STL 源碼剖析

侯捷

碁峰

The Annotated STL Source

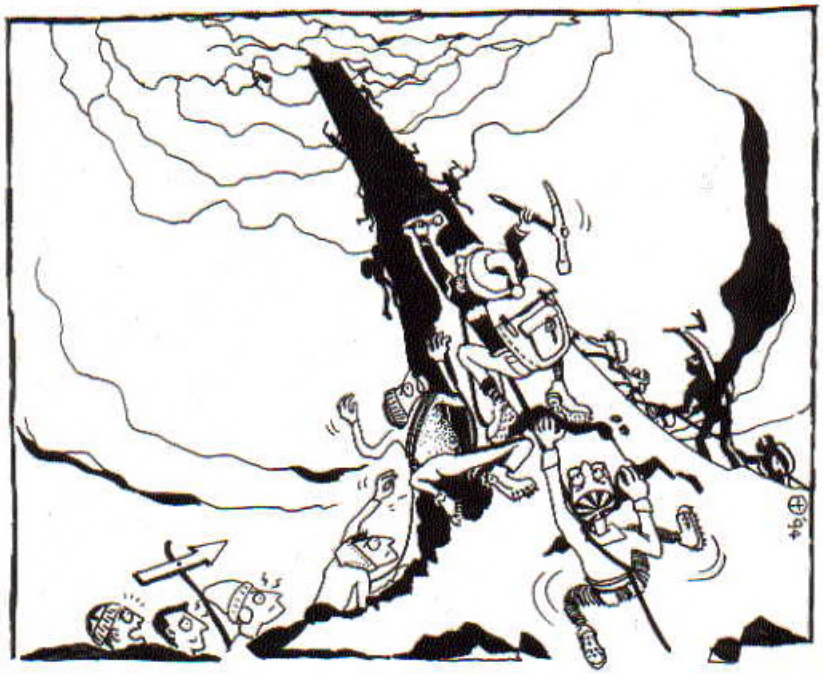
無限延伸你的視野

庖丁解牛 恢恢乎游刃有餘

STL源碼剖析

The Annotated STL Source (using SGI STL)

侯捷



碁峰腦圖書資料股份有限公司

SGI STL 源碼剖析

The Annotated STL Sources

向專家學習
強型檢驗、記憶體管理、演算法、資料結構、
及 STL 各類組件之實作技術

侯 捷 著

源碼之前
了無秘密

獻給每一位對 GP/STL 有所渴望的人

天下大事 必作於細

– 侯 捷 –

庖丁解牛[1]

侯捷自序

這本書的寫作動機，純屬偶然。

2000 年下半，我開始爲計劃中的《泛型思維》一書陸續準備並熱身。爲了對泛型編程技術以及 STL 實作技術有更深的體會，以便在講述整個 STL 的架構與應用時更能虎虎生風，我常常深入到 STL 源碼去刨根究底。2001/02 的某一天，我突然有所感觸：既然花了大把精力看過 STL 源碼，寫了眉批，做了整理，何不把它再加一點功夫，形成一個更完善的面貌後出版？對我個人而言，一份註解詳盡的 STL 源碼，價值不扉；如果我從中獲益，一定也有許多人能夠從中獲益。

這樣的念頭使我極度興奮。剖析大架構本是侯捷的拿手，這個主題又可以和《泛型思維》相呼應。於是我便一頭栽進去了。

我選擇 SGI STL 做爲剖析對象。這份實作版本的可讀性極佳，運用極廣，被選爲 GNU C++ 的標準程式庫，又開放自由運用。愈是細讀 SGI STL 源碼，愈令我震驚抽象思考層次的落實、泛型編程的奧妙、及其效率考量的綿密。不僅最爲人廣泛運用的各種資料結構（data structures）和演算法（algorithms）在 STL 中有良好的實現，連記憶體配置與管理也都重重考慮了最佳效能。一切的一切，除了實現軟體積木的高度復用性，讓各種組件（components）得以靈活搭配運用，更考量了實用上的關鍵議題：效率。

[1] 莊子養生主：「彼節間有間，而刀刃者無厚；以無厚入有間，恢恢乎其於游刃必有餘地矣。」侯捷不讓，以此自況。

這本書不適合 C++ 初學者，不適合 Genericity（泛型技術）初學者，或 STL 初學者。這本書也不適合帶領你學習物件導向（Object Oriented）技術 — 是的，STL 與物件導向沒有太多關連。本書前言清楚說明了書籍的定位和合適的讀者，以及各類基礎讀物。如果你的 Generic Programming/STL 實力足以閱讀本書所呈現的源碼，那麼，恭喜，你踏上了基度山島，這兒有一座大寶庫等著你。源碼之前了無秘密，你將看到 `vector` 的實作、`list` 的實作、`heap` 的實作、`deque` 的實作、`RB-tree` 的實作、`hash-table` 的實作、`set/map` 的實作；你將看到各種演算法（排序、搜尋、排列組合、資料搬移與複製…）的實作；你甚至將看到底層的 memory pool 和高階抽象的 traits 機制的實作。那些資料結構、那些演算法、那些重要觀念、那些編程實務中最重要最根本的珍寶，那些蜇伏已久彷彿已經還給老師的記憶，將重新在你的腦中閃閃發光。

人們常說，不要從輪子重新造起，要站在巨人的肩膀上。面對扮演輪子角色的這些 STL 組件，我們是否有必要深究其設計原理或實作細節呢？答案因人而異。從應用的角度思考，你不需要探索實作細節（然而相當程度地認識底層實作，對實務運用有絕對的幫助）。從技術研究與本質提昇的角度看，深究細節可以讓你徹底掌握一切；不論是爲了重溫資料結構和演算法，或是想要扮演輪子角色，或是想要進一步擴張別人的輪子，都可因此獲得深厚紮實的基礎。

天下大事，必作於細！

但是別忘了，參觀飛機工廠不能讓你學得流體力學，也不能讓你學會開飛機。然而如果你會開飛機又懂流體力學，參觀飛機工廠可以帶給你最大的樂趣和價值。

The Annotated STL Sources

我開玩笑地對朋友說，這本書出版，給大學課程中的「資料結構」和「演算法」兩門授課老師出了個難題。幾乎所有可能的作業題目（複雜度證明題除外），本書都有了詳盡的解答。然而，如果學生能夠從龐大的 SGI STL 源碼中乾淨抽出某一部份，加上自己的包裝，做爲呈堂作業，也足以證明你有資格獲得學分和高分。事實上，追蹤一流作品並於其中吸取養份，遠比自己關起門來寫個三流作品，價值高得多 — 我的確認爲 99.99 % 的程式員所寫的程式，在 SGI STL 面前都是三流水準 ☺。

侯捷 2001/05/30 新竹 ▪ 臺灣

http://www.jjhou.com (繁體)
http://jjhou.csdn.net (簡體)
jjhou@jjhou.com

p.s. 以下三書互有定位，互有關聯，彼此亦相呼應。爲了不重複講述相同的內容，我會在適當時候提醒讀者在哪本書上獲得更多資料：

- 《多型與虛擬》，內容涵括：C++ 語法、語意、物件模型，物件導向精神，小型 framework 實作，OOP 專家經驗，設計樣式（design patterns）導入。
- 《泛型思維》，內容涵括：語言層次（C++ templates 語法、Java generic 語法、C++ 運算子重載），STL 原理介紹與架構分析，STL 現場重建，STL 深度應用，STL 擴充示範，泛型思考。
- 《STL 源碼剖析》，內容涵括：STL 所有組件之實作技術和其背後原理解說。

目 錄

前言

本書定位

C++ 標準程式庫是個偉大的作品。它的出現，相當程度地改變了 C++ 程式的風貌以及學習模式[1]。納入 STL（Standard Template Library）的同時，標準程式庫的所有組件，包括大家早已熟悉的 `string`、`stream` 等等，亦全部以 template 改寫過。整個標準程式庫沒有太多的 OO（Object Oriented），倒是無處不存在 GP（Generic Programming）。

C++ 標準程式庫中隸屬 STL 範圍者，粗估當在 80% 以上。對軟體開發而言，STL 是尖甲利兵，可以節省你許多時間。對編程技術而言，STL 是金櫃石室 — 所有與編程工作最有直接密切關聯的一些最被廣泛運用的資料結構和演算法，STL 都有實作，並符合最佳（或極佳）效率。不僅如此，STL 的設計思維，把我們提昇到另一個思想高點，在那裡，物件的耦合性（coupling）極低，復用性（reusability）極高，各種組件可以獨立設計又可以靈活無罅地結合在一起。是的，STL 不僅僅是程式庫，它其實具備 framework 格局，允許使用者加上自己的組件，與之融合並用，是一個符合開放性封閉（Open-Closed）原則的程式庫。

從應用角度來說，任何一位 C++ 程式員都不應該捨棄現成、設計良好而又效率極佳的標準程式庫，卻「入太廟每事問」地事事物物從輪子造起 — 那對組件技術及軟體工程是一大嘲諷。然而對於一個想要深度鑽研 STL 以便擁有擴充能力的人，

[1] 請參考 *Learning Standard C++ as a New Language*, by Bjarne Stroustrup, C/C++ Users Journal 1999/05。中譯文 http://www.jjhou.com/programmer-4-learning-standard-cpp.htm

相當程度地追蹤 STL 源碼是必要的功課。是的，對於一個想要充實資料結構與演算法等固有知識，並提升泛型編程技法的人，「入太廟每事問」是必要的態度，追蹤 STL 源碼則是提昇功力的極佳路線。

想要良好運用 STL，我建議你看《*The C++ Standard Library*》by Nicolai M. Josuttis；想要嚴謹認識 STL 的整體架構和設計思維，以及 STL 的詳細規格，我建議你看《*Generic Programming and the STL*》by Matthew H. Austern；想要從語法層面開始，學理與應用得兼，宏觀與微觀齊備，我建議你看《泛型思維》by 侯捷；想要深入 STL 實作技法，一窺大家風範，提昇自己的編程功力，我建議你看你手上這本《STL 源碼剖析》— 事實上就在下筆此刻，你也找不到任何一本相同定位的書[2]。

合適的讀者

本書不適合 STL 初學者（當然更不適合 C++ 初學者）。本書不是物件導向（Object Oriented）相關書籍。本書不適合用來學習 STL 的各種應用。

對於那些希望深刻瞭解 STL 實作細節，俾得以提昇對 STL 的擴充能力，或是希望藉由觀察 STL 源碼，學習世界一流程式員身手，並藉此徹底瞭解各種被廣泛運用之資料結構和演算法的人，本書最適合你。

最佳閱讀方式

無論你對 STL 認識了多少，我都建議你第一次閱讀本書時，採循序漸進方式，遵循書中安排的章節先行瀏覽一遍。視個人功力的深淺，你可以或快或慢並依個人興趣或需要，深入其中。初次閱讀最好循序漸進，理由是，舉個例子，所有容器（containers）的定義式一開頭都會出現空間配置器（allocator）的運用，我可以在最初數次提醒你空間配置器於第 2 章介紹過，但我無法遍及全書一再一再提醒你。又例如，源碼之中時而會出現一些全域函式呼叫動作，尤其是定義於 `<stl_construct.h>` 之中用於**物件建構與解構**的基本函式，以及定義於

[2] *The C++ Standard Template Library*, by P.J.Plauger, Alexander Al. Stepanov, Meng Lee, David R. Musser, Prentice Hall 2001/03，與本書定位相近，但在表現方式上大有不同。

<stl_uninitialized.h> 之中用於記憶體管理的基本函式，以及定義於 <stl_algobase.h> 之中的各種基本演算法。如果那些全域函式已經在先前章節介紹過，我很難保證每次都提醒你 — 那是一種顧此失彼、苦不堪言的勞役，並且容易造成閱讀上的累贅。

我所選擇的剖析對象

本書名爲《STL 源碼剖析》，然而 STL 實作品百花齊放，不論就技術面或可讀性，皆有高下之分。選擇一份好的實作版本，就學習而言當然是極爲重要的。我選擇的剖析對象是聲名最著，也是我個人評價最高的一個產品：SGI（Silicon Graphics Computer Systems, Inc.）版本。這份由 STL 之父 Alexander Stepanov、經典書籍《*Generic Programming and the STL*》作者 Matthew H. Austern、STL 耆宿 David Musser 等人投注心力的 STL 實作版本，不論在技術層次、源碼組織、源碼可讀性上，均有卓越的表現。這份產品被納爲 GNU C++ 標準程式庫，任何人皆可從網際網路上下載 GNU C++ 編譯器，從而獲得整份 STL 源碼，並獲得自由運用的權力（詳見 1.8 節）。

我所選用的是 cygnus[3] C++ 2.91.57 for Windows 版本。我並未刻意追求最新版本，一來書籍不可能永遠呈現最新的軟體版本 — 軟體更新永遠比書籍改版快速，二來本書的根本目的在建立讀者對於 STL 巨觀架構和微觀技術的掌握，以及源碼的閱讀能力，這種核心知識的形成與源碼版本的關係不是那麼唇齒相依，三來 SGI STL 實作品自從搭配 GNU C++2.8 以來已經十分穩固，變異極微，而我所選擇的 2.91 版本，表現相當良好；四來這個版本的源碼比後來的版本更容易閱讀，因爲許多內部變數名稱並不採用下劃線（underscore） — 下劃線在變數命名規範上有其價值，但到處都是下劃線則對大量閱讀相當不利。

網絡上有個 STLport（http://www.stlport.org）站點，提供一份以 SGI STL 爲藍本的高度可攜性實作版本。本書附錄 C 列有孟岩先生所寫的文章，是一份 STLport 移植到 Visual C++ 和 C++ Builder 的經驗談。

[3] 關於 cygnus、GNU 源碼開放精神、以及自由軟體基金會（FSF），請見 1.3 節介紹。

各章主題

本書假設你對 STL 已有基本認識和某種程度的運用經驗。因此除了第一章略作介紹之外，立刻深入 STL 技術核心，並以 STL 六大組件（components）爲章節之進行依據。以下是各章名稱，這樣的次序安排大抵可使每一章所剖析的主題能夠於先前章節中獲得充份的基礎。當然，技術之間的關連錯綜複雜，不可能存在單純的線性關係，這樣的安排也只能說是盡最大努力。

第 1 章　STL 概論與實作版本簡介

第 2 章　空間配置器（allocator）

第 3 章　迭代器（iterators）概念與 traits 編程技法

第 4 章　序列式容器（sequence containers）

第 5 章　關聯式容器（associated containers）

第 6 章　演算法（algorithms）

第 7 章　仿函式 or 函式物件（functors, or function objects）

第 8 章　配接器（adapter）

編譯工具

本書主要探索 SGI STL 源碼，並提供少量測試程式。如果測試程式只做標準的 STL 動作，不涉及 SGI STL 實作細節，那麼我會在 VC6、CB4、cygnus 2.91 for Windows 等編譯平台上分別測試它們。

隨著對 SGI STL 源碼的掌握程度增加，我們可以大膽做些練習，將 SGI STL 內部介面打開，或是修改某些 STL 組件，加上少量輸出動作，以觀察組件的運作過程。這種情況下，操練的對象既然是 SGI STL，我也就只使用 GNU C++ 來編譯[4]。

[4] SGI STL 事實上是個高度可攜產品，不限使用於 GNU C++。從它對各種編譯器的環境組態設定（1.8.3 節）便可略知一二。網路上有一個 STLport 組織，不遺餘力地將 SGI STL 移植到各種編譯平台上。請參閱本書附錄 C。

中英文術語的運用風格

我曾經發表過一篇《技術引導乎 文化傳承乎》的文章，闡述我對專業電腦書籍的中英術語運用態度。文章收錄於侯捷網站 http://www.jjhou.com/article99-14.htm。以下簡單敘述我的想法。

爲了學術界和業界的習慣，也爲了與全球科技接軌，並且也因爲我所撰寫的是供專業人士閱讀的書籍而非科普讀物，我決定適量保留專業領域中被朗朗上口的英文術語。朗朗上口與否，見仁見智，我以個人閱歷做爲抉擇依據。

做爲一個並非以英語爲母語的族裔，我們對英文的閱讀困難並不在單字，而在整句整段的文意。做爲一項技術的學習者，我們的困難並不在術語本身（那只是個符號），而在術語背後的技術意義。

熟悉並使用原文術語，至爲重要。原因很簡單，在科技領域裡，你必須與全世界接軌。中文技術書籍的價值不在於「建立本國文化」或「讓它成爲一本道地的中文書」或「完全掃除英漢字典的需要」。中文技術書籍的重要價值，在於引進技術、引導學習、掃平閱讀障礙、增加學習效率。

絕大部份我所採用的英文術語都是名詞。但極少數動詞或形容詞也有必要讓讀者知道原文（我會時而中英並列，並使用斜體英文），原因是：

- C++ 編譯器的錯誤訊息並未中文化，萬一錯誤訊息中出現以下字眼：*unresolved, instantiated, ambiguous, override*，而編寫程式的你卻不熟悉或不懂這些動詞或形容詞的技術意義，就不妙了。
- 有些動作關係到 library functions，而 library functions 的名稱並未中文化☺，例如 *insert, delete, sort*。因此視狀況而定，我可能會選擇使用英文。
- 如果某些術語關係到語言關鍵字，爲了讓讀者有最直接的感受與聯想，我會採用原文，例如 static, private, protected, public, friend, inline, extern。

版面像一張破碎的臉？

大量中英夾雜的結果，無法避免造成版面的「破碎」。但爲了實現合宜的表達方

式，犧牲版面的「全中文化」在所難免。我將儘量以版面手法來達到視覺上的順暢，換言之我將採用不同的字形來代表不同屬性的術語。如果把英文術語視爲一種符號，這些中英夾雜但帶有特殊字形的版面，並不會比市面上琳瑯滿目的許多應用軟體圖解使用手冊來得突兀（而後者不是普遍爲大眾所喜愛嗎☺）。我所採用的版面，都已經過一再試鍊，過去以來獲得許多讀者的贊同。

英文術語採用原則

就我的觀察，人們對於英文詞或中文詞的採用，隱隱有一個習慣：如果中文詞發音簡短（或至少不比英文詞繁長）並且意義良好，那麼就比較有可能被業界用於日常溝通；否則業界多半採用英文詞。

例如，polymorphism 音節過多，所以意義良好的中文詞「多型」就比較有機會被採用。例如，虛擬函式的發音不比 virtual function 繁長，所以使用這個中文詞的人也不少。「多載」或「重載」的發音比 overloaded 短得多，意義又正確，用的人也不少。

但此並非絕對法則，否則就不會有絕大多數工程師說 data member 而不說「資料成員」、說 member function 而不說「成員函式」的情況了。

以下是本書採用原文術語的幾個簡單原則。請注意，並沒有絕對的實踐，有時候要看上下文情況。同時，容我再強調一次，這些都是基於我與業界和學界的接觸經驗而做的選擇。

- 編程基礎術語，採用中文。例如：函式、指標、變數、常數。本書的英文術語絕大部份都與 C++/OOP/GP（Generic Programming）相關。
- 簡單而朗朗上口的詞，視情況可能直接使用英文：input, output, lvalue, rvalue...
- 讀者有必要認識的英文名詞，不譯：template, class, object, exception, scope, namespace。
- 長串、有特定意義、中譯名稱拗口者，不譯：explicit specialization, partial specialization, using declaration, using directive, exception specialization。
- 運算子名稱，不譯：copy assignment 運算子，member access 運算子，arrow 運算子，dot 運算子，address of 運算子，dereference 運算子...

- 業界慣用詞，不譯：constructor, destructor, data member, member function, reference。
- 涉及 C++ 關鍵字者，不譯：public, private, protected, friend, static,
- 意義良好，發音簡短，流傳頗眾的譯詞，用之：多型（polymorphism），虛擬函式（virtual function）、泛型（genericity）…
- 譯後可能失掉原味而無法完全彰顯原味者，中英並列。
- 重要的動詞、形容詞，時而中英並列：模稜兩可（*ambiguous*），決議（*resolve*），改寫（*override*），引數推導（*argument deduced*），具現化（*instantiated*）。
- STL 專用術語：採用中文，如迭代器（iterator）、容器（container）、仿函式（functor）、配接器（adapter）、空間配置器（allocator）。
- 資料結構專用術語：盡量採用英文，如 `vector`, `list`, `deque`, `queue`, `stack`, `set`, `map`, `heap`, `binary search tree`, `RB-tree`, `AVL-tree`, `priority queue`.

援用英文詞，或不厭其煩地中英並列，獲得的一項重要福利是：本書得以英文做爲索引憑藉。

http://www.jjhou.com/terms.txt 列有我個人整理的一份英中繁簡術語對照表。

反白字型格

中文

- 本文：細明 9.5pt
- 標題：粗體
- 視覺加強：粗體 黑

英文

- 一般文字，Times New Roman, 9.5pt，例如：class, object, member function, data member, base class, derived class, private, protected, public, reference, template, namespace, function template, class template, local, global
- 動詞或形容詞，*Times New Roman* 斜體 9.5pt，例如：*resolve, ambiguous, override, instantiated*
- class 名稱，`Lucida Console 8.5pt`，例如：`stack, list, map`
- 程式碼識別符號，`Courier New 8.5pt`，例如：`int, min(SmallInt*, int)`

- 長串術語，Arial 9pt，例如：member initialization list, name return value, using directive, using declaration, pass by value, pass by reference, function try block, exception declaration, exception specification, stack unwinding, function object, class template specialization, class template partial specialization…
- exception types 或 *iterator types* 或 *iostream manipulators*，*Lucida Sans* 9pt，例如： *bad_alloc*, *back_inserter*, *boolalpha*
- 運算子名稱及某些特殊動作，Footlight MT Light 9.5pt，例如：copy assignment 運算子，dereference 運算子，address of 運算子，equality 運算子，function call 運算子，constructor, destructor, default constructor, copy constructor, virtual destructor, memberwise assignment, memberwise initialization
- 程式碼，Courier New 8.5pt，例如：

```
#include <iostream>
using namespace std;
```

要在整本書中維護一貫的字形風格而沒有任何疏漏，很不容易，許多時候不同類型的術語搭配起來，就形成了不知該用哪種字形的困擾。排版者顧此失彼的可能也不是沒有。因此，請注意，名種字形的運用，只是爲了讓您閱讀時有比較好的效果，其本身並不具其他意義。局部的一致性更重於全體的一致性。

原碼形式與下載

SGI STL 雖然是可讀性最高的一份 STL 源碼，但其中並沒有對實作程序乃至於實作技巧有什麼文字註解，只偶而在檔案最前面有一點點總體說明。雖然其符號名稱有不錯的規劃，真要仔細追蹤源碼，仍然曠日費時。因此本書不但在正文之中解說其設計原則或實作技術，也直接在源碼中加上許多註解。這些註解皆以藍色標示。條件式編譯（`#ifdef`）視同源碼處理，函式呼叫動作以紅色表示，巢狀定義亦以紅色表示。classes 名稱、data members 名稱和 member functions 名稱大多以粗體表示。特別需要提醒的地方（包括 template 預設引數、長度很長的巢狀式定義）則加上灰階網底。例如：

```
template <class T, class Alloc = alloc>  // 預設使用 alloc 爲配置器
class vector {
public:
  typedef T           value_type;
```

```
  typedef value_type* iterator;
...
protected:
  // vector 採用簡單的線性連續空間。以兩個迭代器 start 和 end 分別指向頭尾，
  // 並以迭代器 end_of_storage 指向容量尾端。容量可能比(尾-頭)還大，
  // 多餘的空間即備用空間。
  iterator start;
  iterator finish;
  iterator end_of_storage;

  void fill_initialize(size_type n, const T& value) {
    start = allocate_and_fill(n, value);  // 配置空間並設初值
    finish = start + n;                   // 調整水位
    end_of_storage = finish;              // 調整水位
  }
...
};

#ifdef __STL_FUNCTION_TMPL_PARTIAL_ORDER
template <class T, class Alloc>
inline void swap(vector<T, Alloc>& x, vector<T, Alloc>& y) {
  x.swap(y);
}
#endif /* __STL_FUNCTION_TMPL_PARTIAL_ORDER */
```

又如：

```
// 以下配接器用來表示某個 Adaptable Binary Predicate 的邏輯負值
template <class Predicate>
class binary_negate
  : public binary_function<typename Predicate::first_argument_type,
                           typename Predicate::second_argument_type,
                           bool> {
...
};
```

這些作法可能在某些地方有少許例外（或遺漏），唯一不變的原則就是儘量設法讓讀者一眼抓住源碼重點。花花綠綠的顏色乍見之下或許不習慣，多看幾眼你就會喜歡它☺。這些經過註解的 SGI STL 源碼以 Microsoft Word 97 檔案格式，連同 SGI STL 源碼，置於侯捷網站供自由下載[5]。噢，是的，STL 涵蓋面積廣大，源碼浩繁，考慮到書籍的篇幅，本書僅能就具代表性者加以剖析，如果你感興趣的某些細節未涵蓋於書中，可自行上網查閱這些經過整理的源碼檔案。

[5] 下載這些檔案並不會引發版權問題。詳見 1.3 節關於自由軟體基金會（FSF）、源碼開放（open source）精神以及各種授權聲明。

線上服務

侯捷網站（網址見於封底）是我的個人網站。我的所有作品，包括本書，都在此網站上提供服務，包括：

- 勘誤和補充
- 技術討論
- 程式碼下載
- 電子檔下載

附錄 B 對侯捷網站有一些導引介紹。

推薦讀物

詳見附錄 A。這些精選讀物可爲你建立紮實的泛型（Genericity）思維理論基礎與紮實的 STL 實務應用能力。

1

STL 概論與技術簡介

STL，雖然是一套程式庫（library），卻不只是一般印象中的程式庫，而是一個有著劃時代意義，背後擁有先進技術與深厚理論的產品。說它是產品也可以，說它是規格也可以，說是軟體組件技術發展史上的一個大突破點，它也當之無愧。

1.1 STL 概論

長久以來，軟體界一直希望建立一種可重複運用的東西，以及一種得以製造出「可重複運用的東西」的方法，讓工程師 / 程式員的心血不致於隨時間遷移、人事異動、私心欲念、人謀不臧[1]而煙消雲散。從副程式（subroutines）、程序（procedures）、函式（functions）、類別（classes），到函式庫（function libraries）、類別庫（class libraries）、各種組件（components），從結構化設計、模組化設計、物件導向（object oriented）設計，到樣式（patterns）的歸納整理，無一不是軟體工程的漫漫奮鬥史。

爲的就是復用性（reusability）的提昇。

復用性必須建立在某種標準之上 — 不論是語言層次的標準，或資料交換的標準，或通訊協定的標準。但是，許多工作環境下，就連軟體開發最基本的資料結構（data structures）和演算法（algorithms）都還遲遲未能有一套標準。大量程式員被迫從事大量重複的工作，竟是爲了完成前人早已完成而自己手上並未擁有的程式碼。這不僅是人力資源的浪費，也是挫折與錯誤的來源。

[1] 後兩者是科技到達不了的幽暗世界。就算 STL, COM, CORBA, OO, Patterns…也無能爲力☺。

爲了建立資料結構和演算法的一套標準，並且降低其間的耦合（coupling）關係以提昇各自的獨立性、彈性、交互操作性（相互合作性，interoperability），C++ 社群裡誕生了 STL。

STL 的價值在兩方面。低層次而言，STL 帶給我們一套極具實用價值的零組件，以及一個整合的組織。這種價值就像 MFC 或 VCL 之於 Windows 軟體開發過程所帶來的價值一樣，直接而明朗，令大多數人有最立即明顯的感受。除此之外 STL 還帶給我們一個高層次的、以泛型思維（Generic Paradigm）爲基礎的、系統化的、條理分明的「軟體組件分類學（components taxonomy）」。從這個角度來看，STL 是個抽象概念庫（library of abstract concepts），這些「抽象概念」包括最基礎的 *Assignable*（可被賦值）、*Default Constructible*（不需任何引數就可建構）、*Equality Comparable*（可判斷是否等同）、*LessThan Comparable*（可比較大小）、*Regular*（正規）…，高階一點的概念則包括 *Input Iterator*（具輸入功能的迭代器）、*Output Iterator*（具輸出功能的迭代器）、*Forward Iterator*（單向迭代器）、*Bidirectional Iterator*（雙向迭代器）、*Random Access Iterator*（隨機存取迭代器）、*Unary Function*（一元函式）、*Binary Function*（二元函式）、*Predicate*（傳回真假值的一元判斷式）、*Binary Predicate*（傳回真假值的二元判斷式）…，更高階的概念包括 *sequence container*（序列式容器）、*associative container*（關聯式容器）…。

STL 的創新價值便在於具體敘述了上述這些抽象概念，並加以系統化。

換句話說，STL 所實現的，是依據泛型思維架設起來的一個概念結構。這個以抽象概念（abstract concepts）爲主體而非以實際類別（classes）爲主體的結構，形成了一個嚴謹的介面標準。在此介面之下，任何組件有最大的獨立性，並以所謂迭代器（iterator）膠合起來，或以所謂配接器（adapter）互相配接，或以所謂仿函式（functor）動態選擇某種策略（policy 或 strategy）。

目前沒有任何一種程式語言提供任何關鍵字（keyword）可以實質對應上述所謂的抽象概念。但是 C++ classes 允許我們自行定義型別，C++ templates 允許我們將

型別參數化，藉由兩者結合並透過 traits 編程技法，形成了 STL 的絕佳溫床[2]。

關於 STL 的所謂軟體組件分類學，以及所謂的抽象概念庫，請參考 [Austern98] —沒有任何一本書籍在這方面說得比它更好，更完善。

1.1.1 STL 的誕生

STL 係由 Alexander Stepanov 創造於 1979 年前後，這也正是 Bjarne Stroustrup 創造 C++ 的年代。雖然 David R. Musser 於 1971 開始即在計算機幾何領域中發展並倡導某些泛型程式設計觀念，但早期並沒有任何程式語言支援泛型編程。第一個支援泛型概念的語言是 Ada。Alexander 和 Musser 曾於 1987 開發出一套相關的 Ada library。然而 Ada 在美國國防工業以外並未被廣泛接受，C++ 卻如星火燎原般地在程式設計領域中攻城略地。當時的 C++ 尚未導入 template 性質，但 Alexander 卻已經意識到，C++ 允許程式員透過指標以極佳彈性處理記憶體，這一點正是既要求一般化（泛型）又不失效能的一個重要關鍵。

更重要的是，必須研究並實驗出一個「立基於泛型編程之上」的組件庫完整架構。Alexander 在 AT&T 實驗室以及惠普公司的帕羅奧圖（Hewlett-Packard Palo Alto）實驗室，分別實驗了多種架構和演算法公式，先以 C 完成，而後再以 C++ 完成。1992 年 Meng Lee 加入 Alex 的專案，成爲 STL 的另一位主要貢獻者。

貝爾（Bell）實驗室的 Andrew Koenig 於 1993 年知道這個研究計劃後，邀請 Alexander 於是年 11 月的 ANSI/ISO C++ 標準委員會會議上展示其觀念。獲得熱烈迴應。Alexander 於是再接再勵於次年夏天的 Waterloo（滑鐵盧[3]）會議開幕前，完成正式提案，並以壓倒性多數一舉讓這個巨大的計劃成爲 C++ 標準規格的一部份。

1.1.2 STL 與 C++ 標準程式庫

1993/09，Alexander Stepanov 和他一手創建的 STL，與 C++ 標準委員會有了第一

[2] 這麼說有點因果混沌。因爲 STL 的成形過程中也獲得了 C++ 的一些重大修改支援，例如 template partial specialization。

[3] 不是威靈頓公爵擊敗拿破崙的那個地方，是加拿大安大略湖畔的滑鐵盧市。

次接觸。

當時 Alexander 在矽谷（聖荷西）給了 C++ 標準委員會一個演講，講題是：*The Science of C++ Programming*。題目很理論，但很受歡迎。1994/01/06 Alexander 收到 Andy Koenig（C++ 標準委員會成員，當時的 *C++ Standard* 文件審核編輯）來信，言明如果希望 STL 成爲 C++ 標準程式庫的一部份，可於 1994/01/25 前送交一份提案報告到委員會。Alexander 和 Lee 於是拼命趕工完成了那份提案。

然後是 1994/03 的聖地牙哥會議。STL 在會議上獲得了很好的迴響，但也有許多反對意見。主要的反對意見是，C++ 即將完成最終草案，而 STL 卻是如此龐大，似乎有點時不我予。投票結果壓倒性地認爲應該給予這份提案一個機會，並把決定性投票延到下次會議。

下次會議到來之前，STL 做了幾番重大的改善，並獲得諸如 Bjarne Stroustrup、Andy Koenig 等人的強力支持。

然後便是滑鐵盧會議。這個名稱對拿破崙而言，標示的是失敗，對 Alexander 和 Lee，以及他們的辛苦成果而言，標示的卻是巨大的成功。投票結果，80 % 贊成，20 % 反對，於是 STL 進入了 C++ 標準化的正式流程，並終於成爲 1998/09 定案的 C++ 標準規格中的 C++ 標準程式庫的一大脈系。影響所及，原本就有的 C++ 程式庫如 stream, string 等也都以 template 重新寫過。到處都是 templates！ 整個 C++ 標準程式庫呈現「春城無處不飛花」的場面。

Dr Dobb's Journal 曾於 1995/03 刊出一篇名爲 *Alexander Stepanov and STL* 的訪談文章，對於 STL 的發展歷史、Alexander 的思路歷程、STL 納入 C++ 標準程式庫的過程，均有詳細敘述，本處不再贅述。侯捷網站（見附錄 B）上有孟岩先生的譯稿「STL 之父訪談錄」，歡迎觀訪。

1.2 STL 六大組件 功能與運作

STL 提供六大組件，彼此可以組合套用：

1. 容器（containers）：各種資料結構，如 `vector, list, deque, set, map`，

用來存放資料，詳見本書 4, 5 兩章。從實作的角度看，STL 容器是一種 class template。就體積而言，這一部份很像冰山在海面下的比率。

2. 演算法（algorithms）：各種常用演算法如 `sort, search, copy, erase…`，詳見第 6 章。從實作的角度看，STL 演算法是一種 function template。
3. 迭代器（iterators）：扮演容器與演算法之間的膠著劑，是所謂的「泛型指標」，詳見第 3 章。共有五種類型，以及其他衍生變化。從實作的角度看，迭代器是一種將 `operator*, operator->, operator++, operator--` 等指標相關操作予以多載化的 class template。所有 STL 容器都附帶有自己專屬的迭代器 — 是的，只有容器設計者才知道如何巡訪自己的元素。原生指標（native pointer）也是一種迭代器。
4. 仿函式（functors）：行爲類似函式，可做爲演算法的某種策略（policy），詳見第 7 章。從實作的角度看，仿函式是一種重載了 `operator()`的 class 或 class template。一般函式指標可視爲狹義的仿函式。
5. 配接器（adapters）：一種用來修飾容器（containers）或仿函式（functors）或迭代器（iterators）介面的東西，詳見第 8 章。例如 STL 提供的 queue 和 `stack`，雖然看似容器，其實只能算是一種容器配接器，因爲它們的底部完全借重 `deque`，所有動作都由底層的 `deque` 供應。改變 functor 介面者，稱爲 function adapter，改變 container 介面者，稱爲 container adapter，改變 iterator 介面者，稱爲 iterator adapter。配接器的實作技術很難一言以蔽之，必須逐一分析，詳見第 8 章。
6. 配置器（allocators）：負責空間配置與管理，詳見第 2 章。從實作的角度看，配置器是一個實現了動態空間配置、空間管理、空間釋放的 class template。

圖 1-1 顯示 STL 六大組件的交互關係。

由於 STL 已成爲 C++ 標準程式庫的大脈系，因此目前所有的 C++ 編譯器一定支援有一份 STL。在哪裡？就在相應的各個 C++ 表頭檔（headers）。是的，STL 並非以二進位碼（binary code）面貌出現，而是以原始碼面貌供應。按 *C++ Standard* 的規定，所有標準表頭檔都不再有副檔名，但或許是爲了回溯相容，或許是爲了內部組織規劃，某些 STL 版本同時存在具副檔名和無副檔名的兩份檔案，例如 Visual C++ 的 **Dinkumware** 版本同時具備 `<vector.h>` 和 `<vector>`；某些 STL 版本只存在具副檔名的表頭檔，例如 C++Builder 的 **RaugeWave** 版本只有

<vector.h>。某些 STL 版本不僅有一線裝配，還有二線裝配，例如 GNU C++ 的 **SGI** 版本不但有一線的<vector.h> 和<vector>，還有二線的<stl_vector.h>。

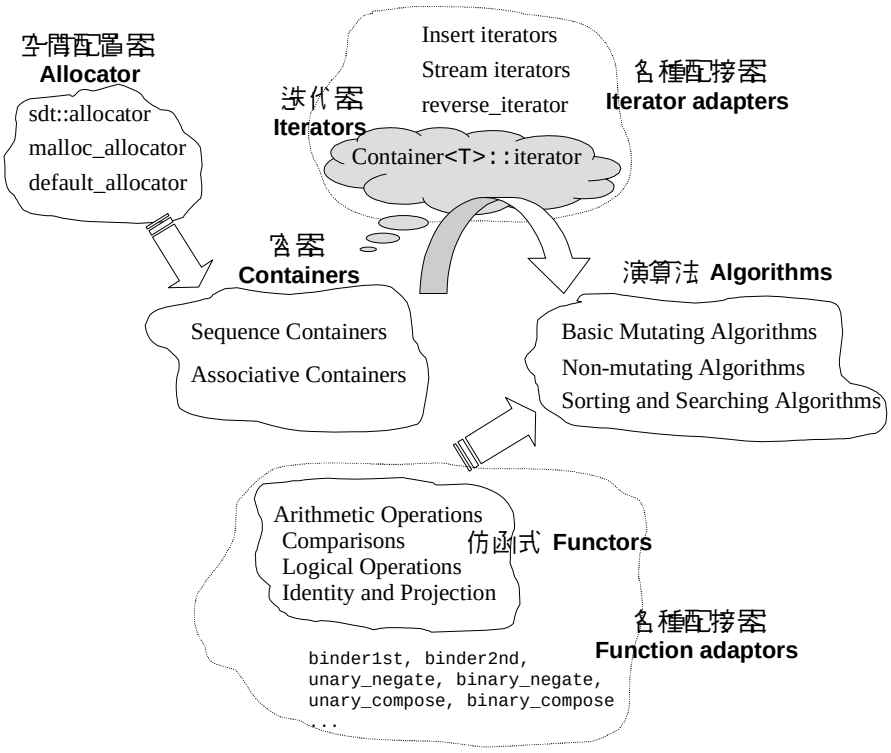


圖 1-1 STL 六大組件的交互關係：Container 透過 Allocator 取得資料儲存空間，Algorithm 透過 Iterator 存取 Container 內容，Functor 可以協助 Algorithm 完成不同的策略變化，Adapter 可以修飾或套接 Functor。

如果只是應用 STL，請各位讀者務必從此養成良好習慣，遵照 C++ 規範，使用無副檔名的表頭檔[4]。如果進入本書層次，探究 STL 源碼，就得清楚所有這些表頭檔的組織分佈。1.8.2 節將介紹 GNU C++ 所附的 SGI STL 各個表頭檔。

[4] 某些編譯器（例如 C++Builder）會在「前處理器」中動手腳，使無副檔名的表頭檔名實際對應到有副檔名的表頭檔。這對使用者而言是透通的。

1.3 GNU 原碼開放精神

全世界所有的 STL 實品，都源於 Alexander Stepanov 和 Meng Lee 完成的原始版本，這份原始版本屬於 Hewlett-Packard Company（惠普公司）擁有。每一個表頭檔都有一份聲明，允許任何人任意運用、拷貝、修改、傳佈、販賣這些碼，無需付費，唯一的條件是必須將該份聲明置於使用者新開發的檔案內。

這種開放源碼的精神，一般統稱爲 **open source**。本書既然使用這些免費開放的源碼，也有義務對這種精神及其相關歷史與組織，做一個簡介。

開放源碼的觀念源自美國人 Richard Stallman[5]（理察▪史托曼）。他認爲私藏源碼是一種違反人性的罪惡行爲。他認爲如果與他人分享源碼，便可以讓其他人從中學習，並回饋給原始創作者。封鎖源碼雖然可以程度不一地保障「智慧所可能衍生的財富」，卻阻礙了使用者從中學習和修正錯誤的機會。Stallman 於 1984 離開麻省理工學院，創立自由軟體基金會（Free Software Foundation[6]，簡稱 **FSF**），寫下著名的 GNU 宣言（GNU Manifesto），開始進行名爲 GNU 的開放改革計劃。

GNU[7] 這個名稱是電腦族的幽默展現，代表 **G**NU is **N**ot **U**nix。當時 Unix 是電腦界的主流作業系統，由 AT&T Bell 實驗室的 Ken Thompson 和 Dennis Ritchie 創造。這原本只是一個學術上的練習產品，AT&T 將它分享給許多研究人員。但是當所有研究與分享使這個產品愈變愈美好時，AT&T 開始思考是否應該更加投資，並對從中獲利抱以預期。於是開始要求大學校園內的相關研究人員簽約，要求他們不得公開或透露 UNIX 源碼，並贊助 Berkeley （柏克萊）大學繼續強化 UNIX，導致後來發展出 **BSD**（Berkeley Software Distribution）版本，以及更後來的 FreeBSD、OpenBSD、NetBSD[8]…。

---

[5] Richard Stallman 的個人網頁見 http://www.stallman.org。

[6] 自由軟體基金會 Free Software Foundation，見 http://www.gnu.org/fsf/fsf.html。

[7] 根據 GNU 的發音，或譯爲「革奴」，意思是從此革去被奴役的命運。音義俱佳。

[8] FreeBSD 見 http://www.freebsd.org，OpenBSD 見 http://www.openbsd.org，NetBSD 見 http://www.netbsd.org。

Stallman 將 AT&T 的這種行爲視爲思想箝制，以及一種偉大傳統的淪喪。在此之前，電腦界的氛圍是大家無限制地共享各人成果（當然是指最根本的源碼）。Stallman 認爲 AT&T 對大學的暫助，只是一種微薄的施捨，擁有高權力的人才能吃到牛排和龍蝦。於是他進行了他的反奴役計劃，並稱之爲 GNU：**G**NU is **N**ot **U**nix。

GNU 計劃中，早期最著名的軟體包括 **Emacs** 和 **GCC**。前者是 Stallman 開發的一個極具彈性的文字編輯器，允許使用者自行增加各種新功能。後者是個 C/C++ 編譯器，對所有 GNU 軟體提供了平台的一致性與可攜性，是 GNU 計劃的重要基石。GNU 計劃晚近的著名軟體則是 1991 年由芬蘭人 Linus Torvalds 開發的 **Linux** 作業系統。這些軟體當然都領受了許多使用者的心力回饋，才能更強固穩健。

GNU 以所謂的 **GPL**（General Public License[9]，廣泛開放授權）來保護（或說控制）其成員：使用者可以自由閱讀與修改 GPL 軟體的源碼，但如果使用者要傳佈借助 GPL 軟體而完成的軟體，他們必須也同意 GPL 規範。這種精神主要是強迫人們分享並回饋他們對 GPL 軟體的改善。得之於人，捨於人。

GPL 對於版權（copyright）觀念帶來巨大的挑戰，甚至被稱爲「反版權」（**copyleft**，又一個屬於電腦族群的幽默）。GPL 帶給使用者強大的道德束縛力量，「黏」性甚強，導致種種不同的反對意見，包括可能造成經濟競爭力薄弱等等。於是其後又衍生出各種不同精義的授權，包括 Library GPL, Lesser GPL, Apache License, Artistic License, BSD License, Mozilla Public License, Netscape Public License。這些授權的共同原則就是「開放源碼」。然而各種授權的擁護群眾所滲雜的本位主義，加上精英份子難以妥協的個性，使「開放源碼」陣營中的各個分支，意見紛歧甚至互相對立。其中最甚者爲 GNU GPL 和 BSD License 的擁護者。

1998 年，自由軟體社群企圖創造出一個新名詞 **open source** 來整合各方。他們組成了一個非財團法人的組織，註冊一個標記，並設立網站。open source 的定義共有 9 條[10]，任何軟體只要符合這 9 條，就可稱呼自己爲 open source 軟體。

[9] GPL 的詳細內容見 http://www.opensource.org/licenses/gpl-license.html。

[10] 見 http://www.opensource.org/docs/definition_plain.html。

本書所採用的 GCC 套件是 **Cygnus** C++2.91 for Windows，又稱爲 **EGCS** 1.1。GCC 和 Cygnus、EGCS 之間的關係常常令人混淆。Cygnus 是一家商業公司，包裝並出售自由軟體基金會所建構的軟體工具，並販售各種服務。他們協助晶片廠商調整 GCC，在 GPL 的精神和規範下將 GCC 原始碼的修正公佈於世；他們提供 GCC 運作資訊，並提昇其運作效率，並因此成爲 GCC 技術領域的最佳諮詢對象。Cygnus 公司之於 GCC，地位就像 Red Hat（紅帽）公司之於 Linux。雖然 Cygnus 持續地技術回饋並經濟贊助 GCC，他們並不控制 GCC。GCC 的最終控制權仍然在 GCC 指導委員會（GCC Steering Committee）身上。

當 GCC 的發展進入第二版時，爲了統一事權，GCC 指導委員會開始考慮整合 1997 成立的 EGCS（**E**xperimental/Enhanced **GNU** **C**ompiler **S**ystem）計劃。這個計劃採用比較開放的開發態度，比標準 GCC 涵蓋更多優化技術和更多 C++ 語言性質。實驗結果非常成功，因此 GCC 2.95 版反過頭接納了 EGCS 碼。從那個時候開始，GCC 決定採用和 EGCS 一樣的開發方式。自 1999 年起，EGCS 正式成爲唯一的 GCC 官方維護機構。

1.4 HP 實作版本

HP 版本是所有 STL 實作版本的濫觴。每一個 HP STL 表頭檔都有如下一份聲明，允許任何人免費使用、拷貝、修改、傳佈、販賣這份軟體及其說明文件，唯一需要遵守的是，必須在所有檔案中加上 HP 的版本聲明和運用權限聲明。這種授權並不屬於 GNU GPL 範疇，但屬於 open source 範疇。

```
/*
 * Copyright (c) 1994
 * Hewlett-Packard Company
 *
 * Permission to use, copy, modify, distribute and sell this software
 * and its documentation for any purpose is hereby granted without fee,
 * provided that the above copyright notice appear in all copies and
 * that both that copyright notice and this permission notice appear
 * in supporting documentation.  Hewlett-Packard Company makes no
 * representations about the suitability of this software for any
 * purpose.  It is provided "as is" without express or implied warranty.
*/
```

1.5 P. J. Plauger 實作版本

P.J. Plauger 版本由 P.J. Plauger 發展，本書後繼章節皆以 **PJ STL** 稱呼此一版本。PJ 版本承繼 HP 版本，所以它的每一個表頭檔都有 HP 的版本聲明，此外還加上 P.J. Plauger 的個人版權聲明：

```
/*
 * Copyright (c) 1995 by P.J. Plauger.  ALL RIGHTS RESERVED.
 * Consult your license regarding permissions and restrictions.
 */
```

這個產品既不屬於 open source 範疇，更不是 GNU GPL。這麼做是合法的，因爲 HP 的版權聲明並非 GPL，並沒有強迫其衍生產品必須開放源碼。

P.J. Plauger 版本被 Visual C++ 採用，所以當然你可以在 Visual C++ 的 "include" 子目錄下（例如 `C:\msdev\VC98\Include`）找到所有 STL 表頭檔，但是不能公開它或修改它或甚至販售它。以我個人的閱讀經驗及測試經驗，我對這個版本的可讀性評價極低，主要因爲其中的符號命名極不講究，例如：

```
// TEMPLATE FUNCTION find
template<class _II, class _Ty> inline
   _II find(_II _F, _II _L, const _Ty& _V)
   {for (; _F != _L; ++_F)
        if (*_F == _V)
             break;
   return (_F); }
```

由於 Visual C++ 對 C++ 語言特性的支援不甚理想[11]，導致 PJ 版本的表現也受影響。

這項產品目前由 Dinkumware [12]公司提供服務。

[11] 我個人對此有一份經驗整理：http://www.jjhou.com/qa-cpp-primer-27.txt

[12] 詳見 http://www.dinkumware.com

1.6 Rouge Wave 實作版本

RougeWave 版本由 Rouge Wave 公司開發，本書後繼章節皆以 **RW STL** 稱呼此一版本。RW 版本承繼 HP 版本，所以它的每一個表頭檔都有 HP 的版本聲明，此外還加上 Rouge Wave 的公司版權聲明：

```
/*************************************************************************
 * (c) Copyright 1994, 1998 Rogue Wave Software, Inc.
 * ALL RIGHTS RESERVED
 *
 * The software and information contained herein are proprietary to, and
 * comprise valuable trade secrets of, Rogue Wave Software, Inc., which
 * intends to preserve as trade secrets such software and information.
 * This software is furnished pursuant to a written license agreement and
 * may be used, copied, transmitted, and stored only in accordance with
 * the terms of such license and with the inclusion of the above copyright
 * notice.  This software and information or any other copies thereof may
 * not be provided or otherwise made available to any other person.
 *
 * Notwithstanding any other lease or license that may pertain to, or
 * accompany the delivery of, this computer software and information, the
 * rights of the Government regarding its use, reproduction and disclosure
 * are as set forth in Section 52.227-19 of the FARS Computer
 * Software-Restricted Rights clause.
 *
 * Use, duplication, or disclosure by the Government is subject to
 * restrictions as set forth in subparagraph (c)(1)(ii) of the Rights in
 * Technical Data and Computer Software clause at DFARS 252.227-7013.
 * Contractor/Manufacturer is Rogue Wave Software, Inc.,
 * P.O. Box 2328, Corvallis, Oregon 97339.
 *
 * This computer software and information is distributed with "restricted
 * rights."  Use, duplication or disclosure is subject to restrictions as
 * set forth in NASA FAR SUP 18-52.227-79 (April 1985) "Commercial
 * Computer Software-Restricted Rights (April 1985)."  If the Clause at
 * 18-52.227-74 "Rights in Data General" is specified in the contract,
 * then the "Alternate III" clause applies.
 *
 *************************************************************************/
```

這份產品既不屬於 open source 範疇，更不是 GNU GPL。這麼做是合法的，因爲 HP 的版權聲明並非 GPL，並沒有強迫其衍生產品必須開放源碼。

Rouge Wave 版本被 C++Builder 採用，所以當然你可以在 C++Builder 的 "include" 子目錄下（例如 `C:\Inprise\CBuilder4\Include`）找到所有 STL 表頭檔，但是

不能公開它或修改它或甚至販售它。就我個人的閱讀經驗及測試經驗，我要說，這個版本的可讀性還不錯，例如：

```
template <class InputIterator, class T>
InputIterator find (InputIterator first,
                    InputIterator last,
                    const T& value)
{
  while (first != last && *first != value)
    ++first;

  return first;
}
```

但是像這個例子（class vector 的內部定義），源碼中夾雜特殊的常數，對閱讀的順暢性是一大考驗：

```
#ifndef _RWSTD_NO_CLASS_PARTIAL_SPEC
    typedef _RW_STD::reverse_iterator<const_iterator>
            const_reverse_iterator;
    typedef _RW_STD::reverse_iterator<iterator>  reverse_iterator;
#else
    typedef _RW_STD::reverse_iterator<const_iterator,
      random_access_iterator_tag, value_type,
      const_reference, const_pointer, difference_type>
      const_reverse_iterator;
    typedef _RW_STD::reverse_iterator<iterator,
      random_access_iterator_tag, value_type,
      reference, pointer, difference_type>
      reverse_iterator;
#endif
```

此外，上述定義方式也不夠清爽（請與稍後的 SGI STL 比較）。

C++Builder 對 C++ 語言特性的支援相當不錯，連帶地給予了 RW 版本正面的影響。

1.7 STLport 實作版本

網絡上有個 STLport 站點，提供一個以 SGI STL 爲藍本的高度可攜性實作版本。本書附錄 C 列有孟岩先生所寫的一篇文章，介紹 STLport 移植到 Visual C++ 和 C++ Builder 的經驗。SGI STL（下節介紹）屬於開放源碼組織的一員，所以 STLport 有權利那麼做。

1.8 SGI STL 實作版本

SGI 版本由 **S**ilicon **G**raphics Computer Systems, **I**nc. 公司發展，承繼 HP 版本。所以它的每一個表頭檔也都有 HP 的版本聲明。此外還加上 SGI 的公司版權聲明。從其聲明可知，它屬於 open source 的一員，但不屬於 GNU GPL（廣泛開放授權）。

```
/*
 * Copyright (c) 1996-1997
 * Silicon Graphics Computer Systems, Inc.
 *
 * Permission to use, copy, modify, distribute and sell this software
 * and its documentation for any purpose is hereby granted without fee,
 * provided that the above copyright notice appear in all copies and
 * that both that copyright notice and this permission notice appear
 * in supporting documentation.  Silicon Graphics makes no
 * representations about the suitability of this software for any
 * purpose.  It is provided "as is" without express or implied warranty.
 */
```

SGI 版本被 GCC 採用。你可以在 GCC 的 "include" 子目錄下（例如 `C:\cygnus\cygwin-b20\include\g++`）找到所有 STL 表頭檔，並獲准自由公開它或修改它或甚至販售它。就我個人的閱讀經驗及測試經驗，我要說，不論是在符號命名或編程風格上，這個版本的可讀性非常高，例如：

```
template <class InputIterator, class T>
InputIterator find(InputIterator first,
                   InputIterator last,
                   const T& value) {
  while (first != last && *first != value) ++first;
  return first;
}
```

下面是對應於先前所列之 RW 版本的源碼實例（class `vector` 的內部定義），也顯得十分乾淨：

```
#ifdef __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION
  typedef reverse_iterator<const_iterator> const_reverse_iterator;
  typedef reverse_iterator<iterator> reverse_iterator;
#else /* __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION */
  typedef reverse_iterator<const_iterator, value_type, const_reference,
                           difference_type>  const_reverse_iterator;
  typedef reverse_iterator<iterator, value_type, reference, difference_type>
          reverse_iterator;
#endif /* __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION */
```

GCC 對 C++ 語言特性的支援相當良好，在 C++ 主流編譯器中表現耀眼，連帶地給予了 SGI STL 正面影響。事實上 SGI STL 爲了高度移植性，已經考量了不同編譯器的不同的編譯能力，詳見 1.9.1 節。

SGI STL 也採用某些 GPL（廣泛性開放授權）檔案，例如 <std\complext.h>, <std\complext.cc>, <std\bastring.h>, <std\bastring.cc>。這些檔案都有如下的聲明：

```
// This file is part of the GNU ANSI C++ Library.  This library is free
// software; you can redistribute it and/or modify it under the
// terms of the GNU General Public License as published by the
// Free Software Foundation; either version 2, or (at your option)
// any later version.

// This library is distributed in the hope that it will be useful,
// but WITHOUT ANY WARRANTY; without even the implied warranty of
// MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.  See the
// GNU General Public License for more details.

// You should have received a copy of the GNU General Public License
// along with this library; see the file COPYING.  If not, write to the Free
// Software Foundation, 59 Temple Place - Suite 330, Boston, MA  02111-1307, USA.

// As a special exception, if you link this library with files
// compiled with a GNU compiler to produce an executable, this does not cause
// the resulting executable to be covered by the GNU General Public License.
// This exception does not however invalidate any other reasons why
// the executable file might be covered by the GNU General Public License.

// Written by Jason Merrill based upon the specification in the 27 May 1994
// C++ working paper, ANSI document X3J16/94-0098.
```

1.8.1 GNU C++ headers 檔案分佈（按字母排序）

我手上的 Cygnus C++ 2.91 for Windows 安裝於磁碟目錄 C:\cygnus。圖 1-2 是這個版本的所有表頭檔，置於 C:\cygnus\cygwin-b20\include\g++，共 128 個檔案，773,042 bytes：

```
algo.h                  algobase.h              algorithm
alloc.h                 builtinbuf.h            bvector.h
cassert                 cctype                  cerrno
cfloat                  ciso646                 climits
```

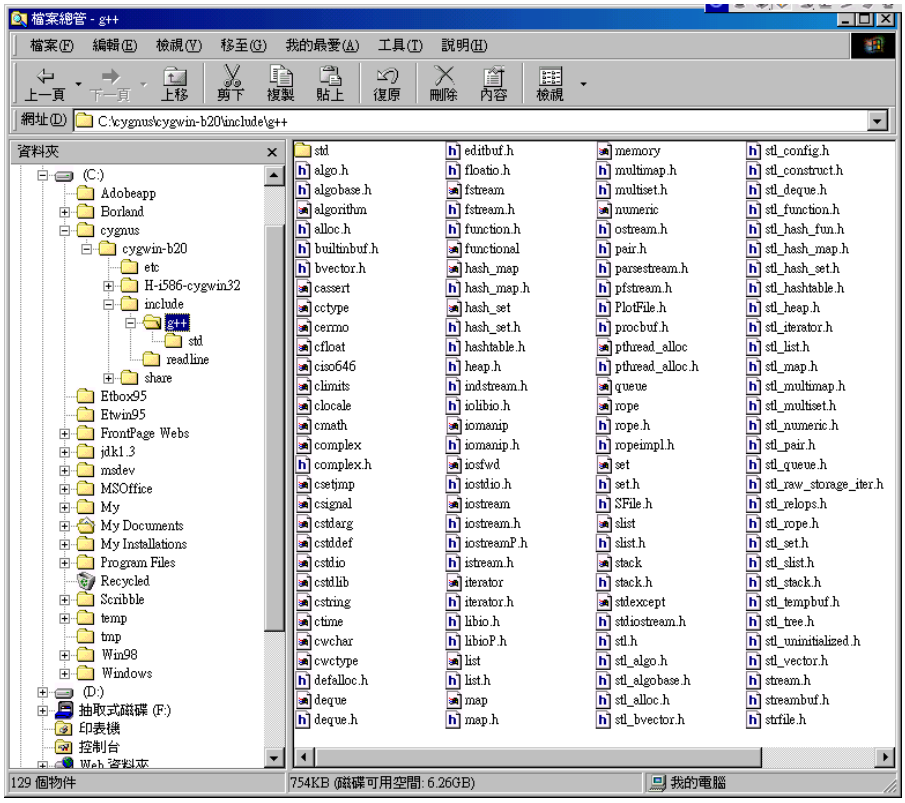
```
clocale              cmath                complex
complex.h            csetjmp              csignal
cstdarg              cstddef              cstdio
cstdlib              cstring              ctime
cwchar               cwctype              defalloc.h
deque                deque.h              editbuf.h
floatio.h            fstream              fstream.h
function.h           functional           hashtable.h
hash_map             hash_map.h           hash_set
hash_set.h           heap.h               indstream.h
iolibio.h            iomanip              iomanip.h
iosfwd               iostdio.h            iostream
iostream.h           iostreamP.h          istream.h
iterator             iterator.h           libio.h
libioP.h             list                 list.h
map                  map.h                memory
multimap.h           multiset.h           numeric
ostream.h            pair.h               parsestream.h
pfstream.h           PlotFile.h           procbuf.h
pthread_alloc        pthread_alloc.h      queue
rope                 rope.h               ropeimpl.h
set                  set.h                SFile.h
slist                slist.h              stack
stack.h              [std]                stdexcept
stdiostream.h        stl.h                stl_algo.h
stl_algobase.h       stl_alloc.h          stl_bvector.h
stl_config.h         stl_construct.h      stl_deque.h
stl_function.h       stl_hashtable.h      stl_hash_fun.h
stl_hash_map.h       stl_hash_set.h       stl_heap.h
stl_iterator.h       stl_list.h           stl_map.h
stl_multimap.h       stl_multiset.h       stl_numeric.h
stl_pair.h           stl_queue.h          stl_raw_storage_iter.h
stl_relops.h         stl_rope.h           stl_set.h
stl_slist.h          stl_stack.h          stl_tempbuf.h
stl_tree.h           stl_uninitialized.h  stl_vector.h
stream.h             streambuf.h          strfile.h
string               strstream            strstream.h
tempbuf.h            tree.h               type_traits.h
utility              vector               vector.h
```

子目錄 **[std]** 內有 8 個檔案，70,669 bytes：

```
bastring.cc          bastring.h           complext.cc
complext.h           dcomplex.h           fcomplex.h
ldcomplex.h          straits.h
```

圖 1-2 Cygnus C++ 2.91 for Windows 的所有表頭檔

下面是以檔案總管觀察 Cygnus C++ 的檔案分佈：



1.8.2 SGI STL 檔案分佈與簡介

上一小節所呈現的眾多表頭檔中，概略可分爲五組：

- C++ 標準規範下的 C 表頭檔(無副檔名)，例如 `cstdio`, `cstdlib`, `cstring`...
- C++ 標準程式庫中不屬於 STL 範疇者，例如 stream, string...相關檔案。
- STL 標準表頭檔(無副檔名)，例如 `vector`, `deque`, `list`, `map`, `algorithm`, `functional` ...
- *C++ Standard* 定案前，HP 所規範的 STL 表頭檔，例如 `vector.h`, `deque.h`, `list.h`, `map.h`, `algo.h`, `function.h` ...

- SGI STL 內部檔案(STL 真正實作於此),例如 `stl_vector.h, stl_deque.h, stl_list.h, stl_map.h, stl_algo.h, stl_function.h ...`

其中前兩組不在本書討論範圍內。後三組表頭檔詳細列表於下。

(1) STL 標準表頭檔(無副檔名)

請注意,各檔案之「本書章節」欄如未列出章節號碼,表示其實際功能由「說明」欄中的 `stl_xxx` 取代,因此實際剖析內容應觀察對應之 `stl_xxx` 檔案所在章節,見稍後之第三列表。

檔名(按字母排序)	bytes	本書章節	說明
algorithm	1,337		ref. <stl_algorithm.h>
deque	1,350		ref. <stl_deque.h>
functional	762		ref. <stl_function.h>
hash_map	1,330		ref. <stl_hash_map.h>
hash_set	1,330		ref. <stl_hash_set.h>
iterator	1,350		ref. <stl_iterator.h>
list	1,351		ref. <stl_list.h>
map	1,329		ref. <stl_map.h>
memory	2,340	3.2	定義 auto_ptr,並含入 <stl_algobase.h>, <stl_alloc.h>, <stl_construct.h>, <stl_tempbuf.h>, <stl_uninitialized.h>, <stl_raw_storage_iter.h>
numeric	1,398		ref. <stl_numeric.h>
pthread_alloc	9,817	N/A	與 Pthread 相關的 node allocator
queue	1,475		ref. <stl_queue.h>
rope	920		ref. <stl_rope.h>
set	1,329		ref. <stl_set.h>
slist	807		ref. <stl_slist.h>
stack	1,378		ref. <stl_stack.h>
utility	1,301		含入 <stl_relops.h>, <stl_pair.h>
vector	1,379		ref. <stl_vector.h>

(2) C++ *Standard* 定案前,HP 規範的 STL 表頭檔(副檔名 .h)

請注意,各檔案之「本書章節」欄如未列出章節號碼,表示其實際功能由「說明」欄中的 `stl_xxx` 取代,因此實際剖析內容應觀察對應之 `stl_xxx` 檔案所在章節,見稍後之第三列表。

檔名（按字母排序）	bytes	本書章節	說明
complex.h	141	N/A	複數，含入 <complex>
stl.h	305		含入 STL 標準表頭檔 <algorithm>, <deque>, <functional>, <iterator>, <list>, <map>, <memory>, <numeric>, <set>, <stack>, <utility>, <vector>
type_traits.h	8,888	3.7	SGI 獨特的 type-traits 技法
algo.h	3,182		ref. <stl_algo.h>
algobase.h	2,086		ref. <stl_algobase.h>
alloc.h	1,216		ref. <stl_alloc.h>
bvector.h	1,467		ref. <stl_bvector.h>
defalloc.h	2,360	2.2.1	標準空間配置器 std::allocator，不建議使用。
deque.h	1,373		ref. <stl_deque.h>
function.h	3,327		ref. <stl_function.h>
hash_map.h	1,494		ref. <stl_hash_map.h>
hash_set.h	1,452		ref. <stl_hash_set.h>
hashtable.h	1,559		ref. <stl_hashtable.h>
heap.h	1,427		ref. <stl_heap.h>
iterator.h	2,792		ref. <stl_iterator.h>
list.h	1,373		ref. <stl_list.h>
map.h	1,345		ref. <stl_map.h>
multimap.h	1,370		ref. <stl_multimap.h>
multiset.h	1,370		ref. <stl_multiset.h>
pair.h	1,518		ref. <stl_pair.h>
pthread_alloc.h	867	N/A	#include <pthread_alloc>
rope.h	909		ref. <stl_rope.h>
ropeimpl.h	43,183	N/A	rope 的功能實作
set.h	1,345		ref. <stl_set.h>
slist.h	830		ref. <stl_slist.h>
stack.h	1,466		ref. <stl_stack.h>
tempbuf.h	1,709		ref. <stl_tempbuf.h>
tree.h	1,423		ref. <stl_tree.h>
vector.h	1,378		ref. <stl_vector.h>

(3) SGI STL 內部私用檔案（SGI STL 真正實作於此）

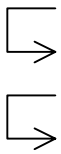
檔名（按字母排序）	bytes	本書章節	說明
stl_algo.h	86,156	6	演算法（數值類除外）
stl_algobase.h	14,105	6.4	基本演算法 swap, min, max, copy, copy_backward, copy_n, fill, fill_n, mismatch, equal, lexicographical_compare
stl_alloc.h	21,333	2	空間配置器 std::alloc。
stl_bvector.h	18,205	N/A	bit_vector（類似標準的 bitset）
stl_config.h	8,057	1.9.1	針對各家編譯器特性定義各種環境常數
stl_construct.h	2,402	2.2.3	建構/解構基本工具

			（construct(), destroy()）
stl_deque.h	41,514	4.4	deque（雙向開口的 queue）
stl_function.h	18,653	7	函式物件（function object） 或稱仿函式（functor）
stl_hash_fun.h	2,752	5.6.7	hash function （雜湊函數，用於 hash-table）
stl_hash_map.h	13,552	5.8	以 hast-table 完成之 map, multimap
stl_hash_set.h	12,990	5.7	以 hast-table 完成之 set, multiset
stl_hashtable.h	26,922	5.6	hast-table（雜湊表）
stl_heap.h	8,212	4.7	heap 演算法：push_heap, pop_heap, make_heap, sort_heap
stl_iterator.h	26,249	3, 8.4, 8.5	迭代器及其相關配接器。並定義迭代器 常用函式 advance(),distance()
stl_list.h	17,678	4.3	list（串列，雙向）
stl_map.h	7,428	5.3	map（映射表）
stl_multimap.h	7,554	5.5	multi-map（多鍵映射表）
stl_multiset.h	6,850	5.4	multi-set（多鍵集合）
stl_numeric.h	6,331	6.3	數值類演算法: accumulate, inner_product, partial_sum, adjacent_difference, power, iota.
stl_pair.h	2,246	5.4	pair（成對組合）
stl_queue.h	4,427	4.6	queue（佇列）, priority_queue（高權先行佇列）
stl_raw_storage_iter.h	2,588	N/A	定義 raw_storage_iterator （一種 OutputIterator）
stl_relops.h	1,772	N/A	定義四個 templatized operators： operator!=, operator>, operator<=, operator>=
stl_rope.h	62,538	N/A	大型（巨量規模）的字串
stl_set.h	6,769	5.2	set（集合）
stl_slist.h	20,524	4.9	single list（單向串列）
stl_stack.h	2,517	4.5	stack（堆疊）
stl_tempbuf.h	3,328	N/A	定義 temporary_buffer class， 應用於 <stl_algo.h>
stl_tree.h	35,451	5.1	Red Black tree（紅黑樹）
stl_uninitialized.h	8,592	2.3	記憶體管理基本工具： uninitialized_copy, uninitialized_fill, uninitialized_fill_n.
stl_vector.h	17,392	4.2	vector（向量）

1.8.3 SGI STL 的編譯器組態設定（configuration）

不同的編譯器對 C++ 語言的支援程度不盡相同。做爲一個希望具備廣泛移植能力的程式庫，SGI STL 準備了一個環境組態檔 <stl_config.h>，其中定義許多常

數，標示某些狀態的成立與否。所有 STL 表頭檔都會直接或間接含入這個組態檔，並以條件式寫法，讓前處理器（pre-processor）根據各個常數決定取捨哪一段程式碼。例如：



```
// in client
#include <vector>

// in <vector>
#include <stl_algobase.h>

// in <stl_algobase.h>
#include <stl_config.h>
...
#ifdef __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION    // 前處理器的條件判斷式
template <class T>
struct __copy_dispatch<T*, T*>
{
  ...
};
#endif /* __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION */
```

<stl_config.h> 檔案起始處有一份常數定義說明，然後即針對各家不同的編譯器以及可能的不同版本，給予常數設定。從這裡我們可以一窺各家編譯器對標準 C++ 的支援程度。當然，隨著版本的演進，這些狀態都有可能改變。其中的狀態 (3),(5),(6),(7),(8),(10),(11)，各於 1.9 節中分別在 VC6, CB4, GCC 三家編譯器上測試過。

以下是 GNU C++ 2.91.57 <stl_config.h> 的完整內容：

G++ 2.91.57，cygnus\cygwin-b20\include\g++**stl_config.h 完整列表**

```
#ifndef __STL_CONFIG_H
# define __STL_CONFIG_H

// 本檔所做的事情：
//  (1)  如果編譯器沒有定義 bool, true, false，就定義它們
//  (2)  如果編譯器的標準程式庫未支援 drand48() 函式，就定義 __STL_NO_DRAND48
//  (3)  如果編譯器無法處理 static members of template classes，就定義
//       __STL_STATIC_TEMPLATE_MEMBER_BUG
//  (4)  如果編譯器未支援關鍵字 typename，就將'typename' 定義爲一個 null macro.
//  (5)  如果編譯器支援 partial specialization of class templates，就定義
//       __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION.
//  (6)  如果編譯器支援 partial ordering of function templates（亦稱爲
//       partial specialization of function templates），就定義
//       __STL_FUNCTION_TMPL_PARTIAL_ORDER
```

```
// (7)  如果編譯器允許我們在呼叫一個 function template 時可以明白指定其
//      template arguments，就定義 __STL_EXPLICIT_FUNCTION_TMPL_ARGS
// (8)  如果編譯器支援 template members of classes，就定義
//      __STL_MEMBER_TEMPLATES.
// (9)  如果編譯器不支援關鍵字 explicit，就定義'explicit' 爲一個 null macro.
// (10) 如果編譯器無法根據前一個 template parameters 設定下一個 template
//      parameters 的預設值，就定義 __STL_LIMITED_DEFAULT_TEMPLATES
// (11) 如果編譯器針對 non-type template parameters 執行 function template
//      的引數推導（argument deduction）時有問題，就定義
//      __STL_NON_TYPE_TMPL_PARAM_BUG.
// (12) 如果編譯器無法支援迭代器的 operator->，就定義
//      __SGI_STL_NO_ARROW_OPERATOR
// (13) 如果編譯器（在你所選擇的模式中）支援 exceptions，就定義
//      __STL_USE_EXCEPTIONS
// (14) 定義 __STL_USE_NAMESPACES 可使我們自動獲得 using std::list; 之類的敘句
// (15) 如果本程式庫由 SGI 編譯器來編譯，而且使用者並未選擇 pthreads
//      或其他 threads，就定義 __STL_SGI_THREADS.
// (16) 如果本程式庫由一個 WIN32 編譯器編譯，並且在多緒模式下，就定義
//      __STL_WIN32THREADS
// (17) 適當地定義與 namespace 相關的 macros 如 __STD, __STL_BEGIN_NAMESPACE。
// (18) 適當地定義 exception 相關的 macros 如 __STL_TRY, __STL_UNWIND。
// (19) 根據 __STL_ASSERTIONS 是否定義，將 __stl_assert 定義爲一個
//      測試動作或一個 null macro。

#ifdef _PTHREADS
#   define __STL_PTHREADS
#endif

# if defined(__sgi) && !defined(__GNUC__)
// 使用 SGI STL 但卻不是使用 GNU C++
#   if !defined(_BOOL)
#     define __STL_NEED_BOOL
#   endif
#   if !defined(_TYPENAME_IS_KEYWORD)
#     define __STL_NEED_TYPENAME
#   endif
#   ifdef _PARTIAL_SPECIALIZATION_OF_CLASS_TEMPLATES
#     define __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION
#   endif
#   ifdef _MEMBER_TEMPLATES
#     define __STL_MEMBER_TEMPLATES
#   endif
#   if !defined(_EXPLICIT_IS_KEYWORD)
#     define __STL_NEED_EXPLICIT
#   endif
#   ifdef __EXCEPTIONS
#     define __STL_USE_EXCEPTIONS
#   endif
#   if (_COMPILER_VERSION >= 721) && defined(_NAMESPACES)
```

```
#    define __STL_USE_NAMESPACES
#  endif
#  if !defined(_NOTHREADS) && !defined(__STL_PTHREADS)
#    define __STL_SGI_THREADS
#  endif
# endif

# ifdef __GNUC__
#  include <_G_config.h>
#  if __GNUC__ < 2 || (__GNUC__ == 2 && __GNUC_MINOR__ < 8)
#    define __STL_STATIC_TEMPLATE_MEMBER_BUG
#    define __STL_NEED_TYPENAME
#    define __STL_NEED_EXPLICIT
#  else // 這裡可看出 GNUC 2.8+ 的能力
#    define __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION
#    define __STL_FUNCTION_TMPL_PARTIAL_ORDER
#    define __STL_EXPLICIT_FUNCTION_TMPL_ARGS
#    define __STL_MEMBER_TEMPLATES
#  endif
   /* glibc pre 2.0 is very buggy. We have to disable thread for it.
      It should be upgraded to glibc 2.0 or later. */
#  if !defined(_NOTHREADS) && __GLIBC__ >= 2 && defined(_G_USING_THUNKS)
#    define __STL_PTHREADS
#  endif
#  ifdef __EXCEPTIONS
#    define __STL_USE_EXCEPTIONS
#  endif
# endif

# if defined(__SUNPRO_CC)
#  define __STL_NEED_BOOL
#  define __STL_NEED_TYPENAME
#  define __STL_NEED_EXPLICIT
#  define __STL_USE_EXCEPTIONS
# endif

# if defined(__COMO__)
#  define __STL_MEMBER_TEMPLATES
#  define __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION
#  define __STL_USE_EXCEPTIONS
#  define __STL_USE_NAMESPACES
# endif

// 侯捷註：VC6 的版本號碼是 1200
# if defined(_MSC_VER)
#  if _MSC_VER > 1000
#    include <yvals.h>     // 此檔在 MSDEV\VC98\INCLUDE
#  else
#    define __STL_NEED_BOOL
```

```
#   endif
#   define __STL_NO_DRAND48
#   define __STL_NEED_TYPENAME
#   if _MSC_VER < 1100
#     define __STL_NEED_EXPLICIT
#   endif
#   define __STL_NON_TYPE_TMPL_PARAM_BUG
#   define __SGI_STL_NO_ARROW_OPERATOR
#   ifdef _CPPUNWIND
#     define __STL_USE_EXCEPTIONS
#   endif
#   ifdef _MT
#     define __STL_WIN32THREADS
#   endif
# endif

// 侯捷註：Inprise Borland C++builder 也定義有此常數。
// C++Builder 的表現豈有如下所示這般差勁？
# if defined(__BORLANDC__)
#   define __STL_NO_DRAND48
#   define __STL_NEED_TYPENAME
#   define __STL_LIMITED_DEFAULT_TEMPLATES
#   define __SGI_STL_NO_ARROW_OPERATOR
#   define __STL_NON_TYPE_TMPL_PARAM_BUG
#   ifdef _CPPUNWIND
#     define __STL_USE_EXCEPTIONS
#   endif
#   ifdef __MT__
#     define __STL_WIN32THREADS
#   endif
# endif

# if defined(__STL_NEED_BOOL)
    typedef int bool;
#   define true 1
#   define false 0
# endif

# ifdef __STL_NEED_TYPENAME
#   define typename    // 侯捷：難道不該 #define typename class 嗎？
# endif

# ifdef __STL_NEED_EXPLICIT
#   define explicit
# endif

# ifdef __STL_EXPLICIT_FUNCTION_TMPL_ARGS
#   define __STL_NULL_TMPL_ARGS <>
# else
```

```
#   define __STL_NULL_TMPL_ARGS
# endif

# ifdef __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION
#   define __STL_TEMPLATE_NULL template<>
# else
#   define __STL_TEMPLATE_NULL
# endif

// __STL_NO_NAMESPACES is a hook so that users can disable namespaces
// without having to edit library headers.
# if defined(__STL_USE_NAMESPACES) && !defined(__STL_NO_NAMESPACES)
#   define __STD std
#   define __STL_BEGIN_NAMESPACE namespace std {
#   define __STL_END_NAMESPACE }
#   define  __STL_USE_NAMESPACE_FOR_RELOPS
#   define __STL_BEGIN_RELOPS_NAMESPACE namespace std {
#   define __STL_END_RELOPS_NAMESPACE }
#   define __STD_RELOPS std
# else
#   define __STD
#   define __STL_BEGIN_NAMESPACE
#   define __STL_END_NAMESPACE
#   undef  __STL_USE_NAMESPACE_FOR_RELOPS
#   define __STL_BEGIN_RELOPS_NAMESPACE
#   define __STL_END_RELOPS_NAMESPACE
#   define __STD_RELOPS
# endif

# ifdef __STL_USE_EXCEPTIONS
#   define __STL_TRY try
#   define __STL_CATCH_ALL catch(...)
#   define __STL_RETHROW throw
#   define __STL_NOTHROW throw()
#   define __STL_UNWIND(action) catch(...) { action; throw; }
# else
#   define __STL_TRY
#   define __STL_CATCH_ALL if (false)
#   define __STL_RETHROW
#   define __STL_NOTHROW
#   define __STL_UNWIND(action)
# endif

#ifdef __STL_ASSERTIONS
# include <stdio.h>
# define __stl_assert(expr) \
   if (!(expr)) { fprintf(stderr, "%s:%d STL assertion failure: %s\n", \
               __FILE__, __LINE__, # expr); abort(); }
   // 侯捷註：以上使用 stringizing operator #，詳見《多型與虛擬》第 4 章。
```

```
#else
# define __stl_assert(expr)
#endif

#endif /* __STL_CONFIG_H */

// Local Variables:
// mode:C++
// End:
```

下面這個小程式，用來測試 GCC 的常數設定：

```
// file: 1config.cpp
// test configurations defined in <stl_config.h>
#include <vector>     // which included <stl_algobase.h>,
                      //   and then <stl_config.h>
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
# if defined(__sgi)
  cout << "__sgi" << endl;           // none!
# endif

# if defined(__GNUC__)
  cout << "__GNUC__" << endl;        // __GNUC__
  cout << __GNUC__ << ' ' << __GNUC_MINOR__ << endl;   // 2 91
  // cout << __GLIBC__ << endl;      // __GLIBC__ undeclared
# endif

// case 2
#ifdef __STL_NO_DRAND48
  cout << "__STL_NO_DRAND48 defined" << endl;
#else
  cout << "__STL_NO_DRAND48 undefined" << endl;
#endif

// case 3
#ifdef __STL_STATIC_TEMPLATE_MEMBER_BUG
  cout << "__STL_STATIC_TEMPLATE_MEMBER_BUG defined" << endl;
#else
  cout << "__STL_STATIC_TEMPLATE_MEMBER_BUG undefined" << endl;
#endif

// case 5
#ifdef __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION
  cout << "__STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION defined" << endl;
#else
```

```
  cout << "__STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION undefined" << endl;
#endif

// case 6
...以下寫法類似。詳見檔案 config.cpp（可自侯捷網站下載）。
}
```

執行結果如下，由此可窺見 GCC 對各種 C++ 特性的支援程度：

```
__GNUC__
2 91
__STL_NO_DRAND48 undefined
__STL_STATIC_TEMPLATE_MEMBER_BUG undefined
__STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION defined
__STL_FUNCTION_TMPL_PARTIAL_ORDER defined
__STL_EXPLICIT_FUNCTION_TMPL_ARGS defined
__STL_MEMBER_TEMPLATES defined
__STL_LIMITED_DEFAULT_TEMPLATES undefined
__STL_NON_TYPE_TMPL_PARAM_BUG undefined
__SGI_STL_NO_ARROW_OPERATOR undefined
__STL_USE_EXCEPTIONS defined
__STL_USE_NAMESPACES undefined
__STL_SGI_THREADS undefined
__STL_WIN32THREADS undefined

__STL_NO_NAMESPACES undefined
__STL_NEED_TYPENAME undefined
__STL_NEED_BOOL undefined
__STL_NEED_EXPLICIT undefined
__STL_ASSERTIONS undefined
```

1.9 可能令你困惑的 C++ 語法

1.8 節所列出的幾個狀態常數，用來區分編譯器對 C++ Standard 的支援程度。這幾個狀態，也正是許多程式員對於 C++ 語法最爲困擾之所在。以下我便一一測試 GCC 在這幾個狀態上的表現。有些測試程式直接取材（並剪裁）自 SGI STL 源碼，因此你可以看到最貼近 SGI STL 真面貌的實例。由於這幾個狀態所關係的，都是 template 引數推導（argument deduction）、偏特化（partial specialization）之類的問題，所以測試程式只需完成 classes 或 functions 的介面，便足以測試狀態是否成立。

本節所涵蓋的內容屬於 C++ 語言層次，不在本書範圍之內。因此本節各範例程式只做測試，不做太多說明。每個程式最前面都會有一個註解，告訴你在《*C++ Primer*》

3/e 哪些章節有相關的語法介紹。

1.9.1 stl_config.h 中的各種組態（configurations）

以下所列組態編號與上一節所列的 <stl_config.h> 檔案起頭的註解編號相同。

組態 3：__STL_STATIC_TEMPLATE_MEMBER_BUG

```
// file: 1config3.cpp
// 測試在 class template 中擁有 static data members.
// test __STL_STATIC_TEMPLATE_MEMBER_BUG, defined in <stl_config.h>
// ref. C++ Primer 3/e, p.839
// vc6[o] cb4[x] gcc[o]
// cb4 does not support static data member initialization.

#include <iostream>
using namespace std;

template <typename T>
class testClass {
public:      // 純粹爲了方便測試，使用 public
  static int _data;
};

// 爲 static data members 進行定義（配置記憶體），並設初值。
int testClass<int>::_data  = 1;
int testClass<char>::_data = 2;

int main()
{
  // 以下，CB4 表現不佳，沒有接受初值設定。
  cout << testClass<int>::_data  << endl;  // GCC, VC6:1  CB4:0
  cout << testClass<char>::_data << endl;  // GCC, VC6:2  CB4:0

  testClass<int>  obji1, obji2;
  testClass<char> objc1, objc2;

  cout << obji1._data << endl;  // GCC, VC6:1  CB4:0
  cout << obji2._data << endl;  // GCC, VC6:1  CB4:0
  cout << objc1._data << endl;  // GCC, VC6:2  CB4:0
  cout << objc2._data << endl;  // GCC, VC6:2  CB4:0

  obji1._data = 3;
  objc2._data = 4;

  cout << obji1._data << endl;  // GCC, VC6:3  CB4:3
  cout << obji2._data << endl;  // GCC, VC6:3  CB4:3
```

```
  cout << objc1._data << endl;  // GCC, VC6:4  CB4:4
  cout << objc2._data << endl;  // GCC, VC6:4  CB4:4
}
```

組態 5：__STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION.

```
// file: 1config5.cpp
// 測試 class template partial specialization — 在 class template 的
//   一般化設計之外，特別針對某些 template 參數做特殊設計。
// test __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION in <stl_config.h>
// ref. C++ Primer 3/e, p.860
// vc6[x] cb4[o] gcc[o]

#include <iostream>
using namespace std;

// 一般化設計
template <class I, class O>
struct testClass
{
  testClass() { cout << "I, O" << endl; }
};

// 特殊化設計
template <class T>
struct testClass<T*, T*>
{
  testClass() { cout << "T*, T*" << endl; }
};

// 特殊化設計
template <class T>
struct testClass<const T*, T*>
{
  testClass() { cout << "const T*, T*" << endl; }
};

int main()
{
  testClass<int, char> obj1;             // I, O
  testClass<int*, int*> obj2;            // T*, T*
  testClass<const int*, int*> obj3;      // const T*, T*
}
```

組態 6：__STL_FUNCTION_TMPL_PARTIAL_ORDER

請注意，雖然 <stl_config.h> 檔案中聲明，這個常數的意義就是 partial

specialization of function templates，但其實兩者並不相同。前者意義如下所示，後者的實際意義請參考 C++ 語法書籍。

```
// file: 1config6.cpp
// test __STL_FUNCTION_TMPL_PARTIAL_ORDER in <stl_config.h>
// vc6[x] cb4[o] gcc[o]

#include <iostream>
using namespace std;

class alloc {
};

template <class T, class Alloc = alloc>
class vector {
public:
  void swap(vector<T, Alloc>&) { cout << "swap()" << endl; }
};

#ifdef __STL_FUNCTION_TMPL_PARTIAL_ORDER  // 只爲說明。非本程式內容。
template <class T, class Alloc>
inline void swap(vector<T, Alloc>& x, vector<T, Alloc>& y) {
  x.swap(y);
}
#endif   // 只爲說明。非本程式內容。

// 以上節錄自 stl_vector.h，灰色部份係源碼中的條件編譯，非本測試程式內容。

int main()
{
  vector<int> x,y;
  swap(x, y);      // swap()
}
```

組態 7：__STL_EXPLICIT_FUNCTION_TMPL_ARGS

整個 SGI STL 內都沒有用到此一常數定義。

狀態 8：__STL_MEMBER_TEMPLATES

```
// file: 1config8.cpp
// 測試 class template 之內可否再有 template (members).
// test __STL_MEMBER_TEMPLATES in <stl_config.h>
// ref. C++ Primer 3/e, p.844
// vc6[o] cb4[o] gcc[o]

#include <iostream>
```

```
using namespace std;

class alloc {
};

template <class T, class Alloc = alloc>
class vector {
public:
  typedef T value_type;
  typedef value_type* iterator;

  template <class I>
  void insert(iterator position, I first, I last) {
    cout << "insert()" << endl;
  }
};

int main()
{
  int ia[5] = {0,1,2,3,4};

  vector<int> x;
  vector<int>::iterator ite;
  x.insert(ite, ia, ia+5);   // insert()
}
```

組態 10：__STL_LIMITED_DEFAULT_TEMPLATES

```
// file: 1config10.cpp
// 測試 template 參數可否根據前一個 template 參數而設定預設值。
// test __STL_LIMITED_DEFAULT_TEMPLATES in <stl_config.h>
// ref. C++ Primer 3/e, p.816
// vc6[o] cb4[o] gcc[o]

#include <iostream>
#include <cstddef>    // for size_t
using namespace std;

class alloc {
};

template <class T, class Alloc = alloc, size_t BufSiz = 0>
class deque {
public:
  deque() { cout << "deque" << endl; }
};

// 根據前一個參數值 T，設定下一個參數 Sequence 的預設值爲 deque<T>
```

```
template <class T, class Sequence = deque<T> >
class stack {
public:
  stack() { cout << "stack" << endl; }
private:
  Sequence c;
};

int main()
{
  stack<int> x;   // deque
                  // stack
}
```

組態 11：__STL_NON_TYPE_TMPL_PARAM_BUG

```
// file: 1config11.cpp
// 測試 class template 可否擁有 non-type template 參數。
// test __STL_NON_TYPE_TMPL_PARAM_BUG in <stl_config.h>
// ref. C++ Primer 3/e, p.825
// vc6[o] cb4[o] gcc[o]

#include <iostream>
#include <cstddef>    // for size_t
using namespace std;

class alloc {
};

inline size_t __deque_buf_size(size_t n, size_t sz)
{
  return n != 0 ? n : (sz < 512 ? size_t(512 / sz) : size_t(1));
}

template <class T, class Ref, class Ptr, size_t BufSiz>
struct __deque_iterator {
  typedef __deque_iterator<T, T&, T*, BufSiz>  iterator;
  typedef __deque_iterator<T, const T&, const T*, BufSiz>
const_iterator;
  static size_t buffer_size() {return __deque_buf_size(BufSiz, sizeof(T)); }
};

template <class T, class Alloc = alloc, size_t BufSiz = 0>
class deque {
public:                         // Iterators
  typedef __deque_iterator<T, T&, T*, BufSiz> iterator;
};

int main()
```

```
{
  cout << deque<int>::iterator::buffer_size() << endl;       // 128
  cout << deque<int,alloc,64>::iterator::buffer_size() << endl; // 64
}
```

以下組態常數雖不在前列編號之內，卻也是 <stl_config.h> 內的定義，並使用於整個 SGI STL 之中。有認識的必要。

組態：__STL_NULL_TMPL_ARGS（bound friend template friend）

<stl_config.h> 定義 __STL_NULL_TMPL_ARGS 如下：

```
# ifdef __STL_EXPLICIT_FUNCTION_TMPL_ARGS
#   define __STL_NULL_TMPL_ARGS <>
# else
#   define __STL_NULL_TMPL_ARGS
# endif
```

這個組態常數常常出現在類似這樣的場合（class template 的 friend 函式宣告）：

```
// in <stl_stack.h>
template <class T, class Sequence = deque<T> >
class stack {
  friend bool operator== __STL_NULL_TMPL_ARGS (const stack&, const stack&);
  friend bool operator< __STL_NULL_TMPL_ARGS (const stack&, const stack&);
...
};
```

展開後就變成了：

```
template <class T, class Sequence = deque<T> >
class stack {
  friend bool operator== <> (const stack&, const stack&);
  friend bool operator< <> (const stack&, const stack&);
...
};
```

這種奇特的語法是爲了實現所謂的 bound friend templates，也就是說 class template 的某個具現體（instantiation）與其 friend function template 的某個具現體有一對一的關係。下面是個測試程式：

```
// file: 1config-null-template-arguments.cpp
// test __STL_NULL_TMPL_ARGS in <stl_config.h>
// ref. C++ Primer 3/e, p.834: bound friend function template
// vc6[x] cb4[x] gcc[o]

#include <iostream>
```

```
#include <cstddef>     // for size_t
using namespace std;

class alloc {
};

template <class T, class Alloc = alloc, size_t BufSiz = 0>
class deque {
public:
  deque() { cout << "deque" << ' '; }
};

// 以下宣告如果不出現，GCC 也可以通過。如果出現，GCC 也可以通過。這一點和
// C++ Primer 3/e p.834 的說法有出入。書上說一定要有這些前置宣告。
/*
template <class T, class Sequence>
class stack;

template <class T, class Sequence>
bool operator==(const stack<T, Sequence>& x,
                const stack<T, Sequence>& y);

template <class T, class Sequence>
bool operator<(const stack<T, Sequence>& x,
               const stack<T, Sequence>& y);
*/

template <class T, class Sequence = deque<T> >
class stack {
  // 寫成這樣是可以的
  friend bool operator== <T> (const stack<T>&, const stack<T>&);
  friend bool operator<  <T> (const stack<T>&, const stack<T>&);
  // 寫成這樣也是可以的
  friend bool operator== <T> (const stack&, const stack&);
  friend bool operator<  <T> (const stack&, const stack&);
  // 寫成這樣也是可以的
  friend bool operator== <> (const stack&, const stack&);
  friend bool operator<  <> (const stack&, const stack&);
  // 寫成這樣就不可以
  // friend bool operator== (const stack&, const stack&);
  // friend bool operator<  (const stack&, const stack&);

public:
  stack() { cout << "stack" << endl; }
private:
  Sequence c;
};

template <class T, class Sequence>
```

```
bool operator==(const stack<T, Sequence>& x,
                const stack<T, Sequence>& y) {
  return cout << "operator==" << '\t';
}

template <class T, class Sequence>
bool operator<(const stack<T, Sequence>& x,
               const stack<T, Sequence>& y) {
  return cout << "operator<" << '\t';
}

int main()
{
  stack<int> x;            // deque stack
  stack<int> y;            // deque stack

  cout << (x == y) << endl;   // operator==   1
  cout << (x < y) << endl;    // operator<    1

  stack<char> y1;          // deque stack
//  cout << (x == y1) << endl;  // error: no match for...
//  cout << (x < y1) << endl;   // error: no match for...
}
```

組態：__STL_TEMPLATE_NULL（class template explicit specialization）

<stl_config.h> 定義了一個 __STL_TEMPLATE_NULL 如下：

```
# ifdef __STL_CLASS_PARTIAL_SPECIALIZATION
#   define __STL_TEMPLATE_NULL template<>
# else
#   define __STL_TEMPLATE_NULL
# endif
```

這個組態常數常常出現在類似這樣的場合：

```
// in <type_traits.h>
template <class type> struct __type_traits {   ... };
__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<char> {  ... };

// in <stl_hash_fun.h>
template <class Key> struct hash { };
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<char> {  ... };
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<unsigned char> {  ... };
```

展開後就變成了：

```
template <class type> struct __type_traits {   ... };
template<> struct __type_traits<char> {  ... };
```

```
template <class Key> struct hash { };
template<> struct hash<char> {  ... };
template<> struct hash<unsigned char> {  ... };
```

這是所謂的 class template explicit specialization。下面這個例子適用於 GCC 和 VC6，允許使用者不指定 `template<>` 就完成 explicit specialization。C++Builder 則是非常嚴格地要求必須完全遵照 C++ 標準規格，也就是必須明白寫出 `template<>`。

```
// file: 1config-template-exp-special.cpp
// 以下測試 class template explicit specialization
// test __STL_TEMPLATE_NULL in <stl_config.h>
// ref. C++ Primer 3/e, p.858
// vc6[o] cb4[x] gcc[o]

#include <iostream>
using namespace std;

// 將 __STL_TEMPLATE_NULL 定義爲 template<>，可以。
// 若定義爲 blank，如下，則只適用於 GCC.
#define __STL_TEMPLATE_NULL   /* blank */

template <class Key> struct hash {
  void operator()() { cout << "hash<T>" << endl; }
};

// explicit specialization
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<char> {
  void operator()() { cout << "hash<char>" << endl; }
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<unsigned char> {
  void operator()() { cout << "hash<unsigned char>" << endl; }
};

int main()
{
  hash<long> t1;
  hash<char> t2;
  hash<unsigned char>t3;

  t1();  // hash<T>
  t2();  // hash<char>
  t3();  // hash<unsigned char>
}
```

1.9.2 暫時物件的型別與運用

所謂暫時物件，就是一種無名物件（unnamed objects）。它的出現如果不在程式員的預期之下（例如任何 pass by value 動作都會引發 copy 動作，於是形成一個暫時物件），往往造成效率上的負擔[13]。但有時候刻意製造一些暫時物件，卻又是使程式乾淨清爽的技巧。刻意製造暫時物件的方法是，在型別名稱之後直接加一對小括號，並可指定初值，例如 `Shape(3,5)` 或 `int(8)`，其意義相當於喚起相應的 constructor 且不指定物件名稱。STL 最常將此技巧應用於仿函式（functor）與演算法的搭配上，例如：

```
// file: 1config-temporary-object.cpp
// 本例測試仿函式用於 for_each() 的情形
// vc6[o] cb4[o] gcc[o]
#include <vector>
#include <algorithm>
#include <iostream>
using namespace std;

template <typename T>
class print
{
public:
  void operator()(const T& elem)   // operator() 多載化。見 1.9.6 節
     {  cout << elem << ' ';  }
};

int main()
{
  int ia[6] = { 0,1,2,3,4,5 };
  vector< int > iv(ia, ia+6);

  // print<int>() 是一個暫時物件，不是一個函式呼叫動作。
  for_each(iv.begin(), iv.end(), print<int>());
}
```

最後一行便是產生「function template 具現體」`print<int>` 的一個暫時物件。這個物件將被傳入 `for_each()` 之中起作用。當 `for_each()` 結束，這個暫時物件也就結束了它的生命。

[13] 請參考《*More Effective C++*》條款 19: Understand the origin of temporary objects.

1.9.3 靜態常數整數成員在 class 內部直接初始化/ in-class static constant integer initialization

如果 class 內含 const static *integral* data member，那麼根據 C++ 標準規格，我們可以在 class 之內直接給予初值。所謂 *integral* 泛指所有整數型別，不單只是指 int。下面是個例子：

```
// file: 1config-inclass-init.cpp
// test in-class initialization of static const integral members
// ref. C++ Primer 3/e, p.643
// vc6[x] cb4[o] gcc[o]

#include <iostream>
using namespace std;

template <typename T>
class testClass {
public:   // expedient
  static const int _datai = 5;
  static const long _datal = 3L;
  static const char _datac = 'c';
};

int main()
{
  cout << testClass<int>::_datai << endl;  // 5
  cout << testClass<int>::_datal << endl;  // 3
  cout << testClass<int>::_datac << endl;  // c
}
```

1.9.4 increment/decrement/dereference 運算子

increment/dereference 運算子在迭代器的實作上佔有非常重要的地位，因爲任何一個迭代器都必須實作出前進（*increment*, operator++）和取值（*dereference*, operator*）功能，前者還分爲前置式（prefix）和後置式（postfix）兩種，有非常規律的寫法[14]。有些迭代器具備雙向移動功能，那麼就必須再提供 decrement 運算子（也分前置式和後置式兩種）。下面是個範例：

[14] 請參考《*More Effective C++*》條款 6：Distinguish between prefix and postfix forms of increment and decrement operators

```
// file: 1config-operator-overloading.cpp
// vc6[x] cb4[o] gcc[o]
// vc6 的 friend 機制搭配 C++ 標準程式庫，有臭蟲。
#include <iostream>
using namespace std;

class INT
{
friend ostream& operator<<(ostream& os, const INT& i);

public:
  INT(int i) : m_i(i) { };

  // prefix : increment and then fetch
  INT& operator++()
  {
    ++(this->m_i);  // 隨著 class 的不同，此行應該有不同的動作。
    return *this;
  }

  // postfix : fetch and then increment
  const INT operator++(int)
  {
    INT temp = *this;
    ++(*this);
    return temp;
  }

  // prefix : decrement and then fetch
  INT& operator--()
  {
    --(this->m_i);  // 隨著 class 的不同，此行應該有不同的動作。
    return *this;
  }

  // postfix : fetch and then decrement
  const INT operator--(int)
  {
    INT temp = *this;
    --(*this);
    return temp;
  }

  // dereference
  int& operator*() const
  {
    return (int&)m_i;
    // 以上轉換動作告訴編譯器，你確實要將 const int 轉爲 non-const lvalue.
    // 如果沒有這樣明白地轉型，有些編譯器會給你警告，有些更嚴格的編譯器會視爲錯誤
```

```
  }

private:
  int m_i;
};

ostream& operator<<(ostream& os, const INT& i)
{
  os << '[' << i.m_i << ']';
  return os;
}

int main()
{
  INT I(5);
  cout << I++;    // [5]
  cout << ++I;    // [7]
  cout << I--;    // [7]
  cout << --I;    // [5]
  cout << *I;     // 5
}
```

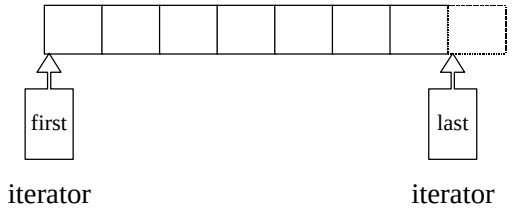
1.9.5 前閉後開區間表示法 [ )

任何一個 STL 演算法，都需要獲得由一對迭代器（泛型指標）所標示的區間，用以表示操作範圍。這一對迭代器所標示的是個所謂的前閉後開區間[15]，以 `[first, last)` 表示。也就是說，整個實際範圍從 `first` 開始，直到 `last-1`。迭代器 `last` 所指的是「最後一個元素的下一位置」。這種 *off by one*（偏移一格，或說 *pass the end*）的標示法，帶來許多方便，例如下面兩個 STL 演算法的迴圈設計，就顯得乾淨俐落：

```
template <class InputIterator, class T>
InputIterator find(InputIterator first, InputIterator last, const T& value) {
  while (first != last && *first != value) ++first;
  return first;
}

template <class InputIterator, class Function>
Function for_each(InputIterator first, InputIterator last, Function f) {
  for ( ; first != last; ++first)
    f(*first);
  return f;
}
```

[15] 這是一種半開（half-open）、後開（open-ended）區間。

前閉後開區間圖示如下（注意，元素之間無需佔用連續記憶體空間）：



1.9.6 function call 運算子 (operator())

很少人注意到，函式呼叫動作（C++ 語法中的左右小括號）也可以被多載化。

許多 STL 演算法都提供兩個版本，一個用於一般狀況（例如排序時以遞增方式排列），一個用於特殊狀況（例如排序時由使用者指定以何種特殊關係進行排列）。像這種情況，需要使用者指定某個條件或某個策略，而條件或策略的背後由一整組動作構成，便需要某種特殊的東西來代表這「一整組動作」。

代表「一整組動作」的，當然是函式。過去 C 語言時代，欲將函式當做參數傳遞，唯有透過函式指標（pointer to function，或稱 function pointer）才能達成，例如：

```
// file: 1qsort.cpp
#include <cstdlib>
#include <iostream>
using namespace std;

int fcmp( const void* elem1, const void* elem2);

void main()
{
  int ia[10] = {32,92,67,58,10,4,25,52,59,54};

  for(int i = 0; i < 10; i++)
    cout << ia[i] << " ";      // 32 92 67 58 10 4 25 52 59 54

  qsort(ia,sizeof(ia)/sizeof(int),sizeof(int), fcmp);

  for(int i = 0; i < 10; i++)
    cout << ia[i] << " ";      // 4 10 25 32 52 54 58 59 67 92
}
```

```
int fcmp( const void* elem1, const void* elem2)
{
const int* i1 = (const int*)elem1;
const int* i2 = (const int*)elem2;

   if( *i1 < *i2)
      return -1;
   else if( *i1 == *i2)
      return 0;
   else if( *i1 > *i2)
      return 1;
}
```

但是函式指標有缺點，最重要的是它無法持有自己的狀態（所謂區域狀態，local states），也無法達到組件技術中的可配接性（adaptability）— 也就是無法再將某些修飾條件加諸於其上而改變其狀態。

爲此，STL 演算法的特殊版本所接受的所謂「條件」或「策略」或「一整組動作」，都以仿函式形式呈現。所謂仿函式（functor）就是使用起來像函式一樣的東西。如果你針對某個 class 進行 `operator()` 多載化，它就成爲一個仿函式。至於要成爲一個可配接的仿函式，還需要一些額外的努力（詳見第 8 章）。

下面是一個將 `operator()` 多載化的例子：

```
// file: 1functor.cpp
#include <iostream>
using namespace std;

// 由於將 operator() 多載化了，因此 plus 成了一個仿函式
template <class T>
struct plus {
   T operator()(const T& x, const T& y) const { return x + y; }
};

// 由於將 operator() 多載化了，因此 minus 成了一個仿函式
template <class T>
struct minus {
   T operator()(const T& x, const T& y) const { return x - y; }
};

int main()
{
  // 以下產生仿函式物件。
  plus<int> plusobj;
```

```
    minus<int> minusobj;

    // 以下使用仿函式，就像使用一般函式一樣。
    cout << plusobj(3,5) << endl;           // 8
    cout << minusobj(3,5) << endl;          // -2

    // 以下直接產生仿函式的暫時物件（第一對小括號），並呼叫之（第二對小括號）。
    cout << plus<int>()(43,50) << endl;     // 93
    cout << minus<int>()(43,50) << endl;    // -7
}
```

上述的 `plus<T>` 和 `minus<T>` 已經非常接近 STL 的實作了，唯一差別在於它缺乏「可配接能力」。關於「可配接能力」，將在第 8 章詳述。

2

空間配置器
allocator

以 STL 的運用角度而言，空間配置器是最不需要介紹的東西，它總是隱藏在一切組件（更具體地說是指容器，container）的背後，默默工作默默付出。但若以 STL 的實作角度而言，第一個需要介紹的就是空間配置器，因爲整個 STL 的操作對象（所有的數值）都存放在容器之內，而容器一定需要配置空間以置放資料。不先掌握空間配置器的原理，難免在觀察其他 STL 組件的實作時處處遇到擋路石。

爲什麼不說 allocator 是記憶體配置器而說它是空間配置器呢？因爲，空間不一定是記憶體，空間也可以是磁碟或其他輔助儲存媒體。是的，你可以寫一個 allocator，直接向硬碟取空間[1]。以下介紹的是 SGI STL 提供的配置器，配置的對象，呃，是的，是記憶體 ☺。

2.1 空間配置器的標準介面

根據 STL 的規範，以下是 allocator 的必要介面[2]：

```
// 以下各種 type 的設計原由，第三章詳述。
allocator::value_type
allocator::pointer
allocator::const_pointer
allocator::reference
allocator::const_reference
allocator::size_type
allocator::difference_type
```

[1] 請參考 *Disk-Based Container Objects*, by Tom Nelson, *C/C++ Users Journal*, 1998/04

[2] 請參考 [Austern98], 10.3 節。

`allocator::rebind`

一個巢狀的（nested）class template。class `rebind<U>` 擁有唯一成員 `other`，那是一個 typedef，代表 `allocator<U>`。

`allocator::allocator()`

default constructor。

`allocator::allocator(const allocator&)`

copy constructor。

`template <class U>allocator::allocator(const allocator<U>&)`

泛化的 copy constructor。

`allocator::~allocator()`

default constructor。

`pointer allocator::address(reference x) const`

傳回某個物件的位址。算式 `a.address(x)` 等同於 `&x`。

`const_pointer allocator::address(const_reference x) const`

傳回某個 `const` 物件的位址。算式 `a.address(x)` 等同於 `&x`。

`pointer allocator::allocate(size_type n, cosnt void* = 0)`

配置空間，足以儲存 `n` 個 `T` 物件。第二引數是個提示。實作上可能會利用它來增進區域性（locality），或完全忽略之。

`void allocator::deallocate(pointer p, size_type n)`

歸還先前配置的空間。

`size_type allocator::max_size() const`

傳回可成功配置的最大量。

`void allocator::construct(pointer p, const T& x)`

等同於 `new(const void*) p) T(x)`。

`void allocator::destroy(pointer p)`

等同於 `p->~T()`。

2.1.1 設計一個陽春的空間配置器，JJ::allocator

根據前述的標準介面，我們可以自行完成一個功能陽春、介面不怎麼齊全的 allocator 如下：

```
// file: 2jjalloc.h
#ifndef _JJALLOC_
#define _JJALLOC_
```

```
#include <new>        // for placement new.
#include <cstddef>    // for ptrdiff_t, size_t
#include <cstdlib>    // for exit()
#include <climits>    // for UINT_MAX
#include <iostream>   // for cerr

namespace JJ
{

template <class T>
inline T* _allocate(ptrdiff_t size, T*) {
   set_new_handler(0);
   T* tmp = (T*)(::operator new((size_t)(size * sizeof(T))));
   if (tmp == 0) {
      cerr << "out of memory" << endl;
      exit(1);
   }
   return tmp;
}

template <class T>
inline void _deallocate(T* buffer) {
   ::operator delete(buffer);
}

template <class T1, class T2>
inline void _construct(T1* p, const T2& value) {
   new(p) T1(value);      // placement new. invoke ctor of T1.
}

template <class T>
inline void _destroy(T* ptr) {
   ptr->~T();
}

template <class T>
class allocator {
public:
   typedef T          value_type;
   typedef T*         pointer;
   typedef const T*   const_pointer;
   typedef T&         reference;
   typedef const T&   const_reference;
   typedef size_t     size_type;
   typedef ptrdiff_t  difference_type;

   // rebind allocator of type U
   template <class U>
```

```
    struct rebind {
        typedef allocator<U> other;
    };

    // hint used for locality. ref.[Austern],p189
    pointer allocate(size_type n, const void* hint=0) {
        return _allocate((difference_type)n, (pointer)0);
    }

    void deallocate(pointer p, size_type n) { _deallocate(p); }

    void construct(pointer p, const T& value) {
        _construct(p, value);
    }

    void destroy(pointer p) { _destroy(p); }

    pointer address(reference x) { return (pointer)&x; }

    const_pointer const_address(const_reference x) {
        return (const_pointer)&x;
    }

    size_type max_size() const {
        return size_type(UINT_MAX/sizeof(T));
    }
};

} // end of namespace JJ

#endif // _JJALLOC_
```

將 JJ::allocator 應用於程式之中，我們發現，它只能有限度地搭配 PJ STL 和 RW STL，例如：

```
// file: 2jjalloc.cpp
// VC6[o], BCB4[o], GCC2.9[x].
#include "jjalloc.h"
#include <vector>
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
  int ia[5] = {0,1,2,3,4};
  unsigned int i;

  vector<int, JJ::allocator<int> > iv(ia, ia+5);
```

```
  for(i=0; i<iv.size(); i++)
    cout << iv[i] << ' ';
  cout << endl;
}
```

「只能有限度搭配 PJ STL」是因爲，PJ STL 未完全遵循 STL 規格，其所供應的許多容器都需要一個非標準的空間配置器介面 `allocator::_Charalloc()`。「只能有限度搭配 RW STL」則是因爲，RW STL 在很多容器身上運用了緩衝區，情況複雜得多，`JJ::allocator` 無法與之相容。至於完全無法應用於 SGI STL 是因爲，SGI STL 在這個項目上根本上就逸脫了 STL 標準規格，使用一個專屬的、擁有次層配置（sub-allocation）能力的、效率優越的特殊配置器，稍後有詳細介紹。

我想我可以提前先做一點說明。事實上 SGI STL 仍然提供了一個標準的配置器介面，只是把它做了一層隱藏。這個標準介面的配置器名爲 `simple_alloc`，稍後便會提到。

2.2 具備次配置力（sub-allocation）的 SGI 空間配置器

SGI STL 的配置器與眾不同，也與標準規範不同，其名稱是 `alloc` 而非 `allocator`，而且不接受任何引數。換句話說如果你要在程式中明白採用 SGI 配置器，不能採用標準寫法：

```
vector<int, std::allocator<int> > iv;  // in VC or CB
```

必須這麼寫：

```
vector<int, std::alloc> iv;            // in GCC
```

SGI STL allocator 未能符合標準規格，這個事實通常不會對我們帶來困擾，因爲通常我們使用預設的空間配置器，很少需要自行指定配置器名稱，而 SGI STL 的每一個容器都已經指定其預設的空間配置器爲 `alloc`。例如下面的 `vector` 宣告：

```
template <class T, class Alloc = alloc>  // 預設使用 alloc 爲配置器
class vector { ... };
```

2.2.1 SGI 標準的空間配置器，std::allocator

雖然 SGI 也定義有一個符合部份標準、名爲 `allocator` 的配置器，但 SGI 自己

從未用過它，也不建議我們使用。主要原因是效率不彰，只把 C++ 的 ::operator new 和 ::operator delete 做一層薄薄的包裝而已。下面是 SGI 的 std::allocator 全貌：

G++ 2.91.57，cygnus\cygwin-b20\include\g++**defalloc.h 完整列表**

```
// 我們不贊成含入此檔。這是原始的 HP default allocator。提供它只是爲了
// 回溯相容。
//
// DO NOT USE THIS FILE  不要使用這個檔案，除非你手上的容器是以舊式作法
// 完成 — 那就需要一個擁有 HP-style interface 的空間配置器。SGI STL 使用
// 不同的 allocator 介面。SGI-style allocators 不帶有任何與物件型別相關
// 的參數；它們只回應 void* 指標（侯捷註：如果是標準介面，就會回應一個
// 「指向物件型別」的指標，T*）。此檔並不含入於其他任何 SGI STL 表頭檔。

#ifndef DEFALLOC_H
#define DEFALLOC_H

#include <new.h>
#include <stddef.h>
#include <stdlib.h>
#include <limits.h>
#include <iostream.h>
#include <algobase.h>

template <class T>
inline T* allocate(ptrdiff_t size, T*) {
    set_new_handler(0);
    T* tmp = (T*)(::operator new((size_t)(size * sizeof(T))));
    if (tmp == 0) {
        cerr << "out of memory" << endl;
        exit(1);
    }
    return tmp;
}

template <class T>
inline void deallocate(T* buffer) {
    ::operator delete(buffer);
}

template <class T>
class allocator {
public:
    // 以下各種 type 的設計原由，第三章詳述。
    typedef T value_type;
    typedef T* pointer;
    typedef const T* const_pointer;
    typedef T& reference;
```

```
    typedef const T& const_reference;
    typedef size_t size_type;
    typedef ptrdiff_t difference_type;

    pointer allocate(size_type n)
       return ::allocate((difference_type)n, (pointer)0);
    }
    void deallocate(pointer p) { ::deallocate(p); }
    pointer address(reference x) { return (pointer)&x; }
    const_pointer const_address(const_reference x)
       return (const_pointer)&x;
    }
    size_type init_page_size()
       return max(size_type(1), size_type(4096/sizeof(T)));
    }
    size_type max_size() const
       return max(size_type(1), size_type(UINT_MAX/sizeof(T)));
    }
};

// 特化版本（specialization）。注意，爲什麼最前面不需加上 template<>？
// 見 1.9.1 節的組態測試。注意，只適用於 GCC。
class allocator<void>
public:
    typedef void* pointer;
};

#endif
```

2.2.2 SGI 特殊的空間配置器，std::alloc

上一節所說的 allocator 只是基層記憶體配置/解放行爲（也就是 ::operator new 和 ::operator delete）的一層薄薄包裝，並沒有考量到任何效率上的強化。SGI 另有法寶供本身內部使用。

一般而言，我們所習慣的 C++ 記憶體配置動作和釋放動作是這樣：

```
class Foo { ... };
Foo* pf = new Foo;     // 配置記憶體，然後建構物件
delete pf;             // 將物件解構，然後釋放記憶體
```

這其中的 new 算式內含兩階段動作[3]：(1) 呼叫 ::operator new 配置記憶體，(2) 呼叫 Foo::Foo() 建構物件內容。delete 算式也內含兩階段動作：(1) 呼叫

[3] 詳見《多型與虛擬》2/e 第 1,3 章。

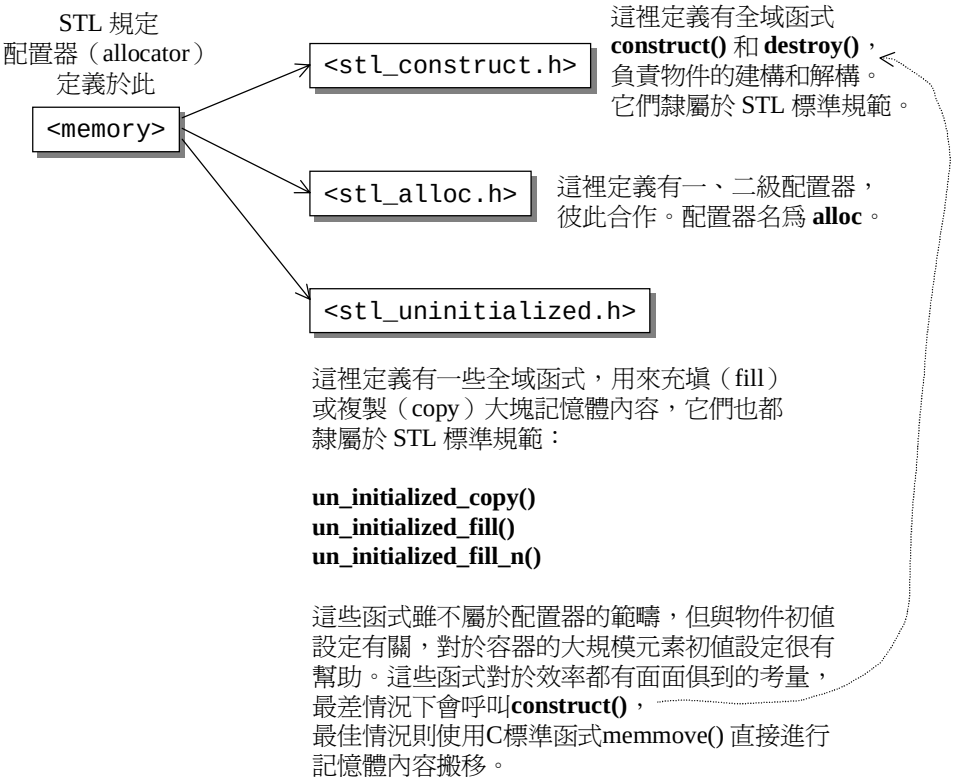
`Foo::~Foo()` 將物件解構，(2) 呼叫 `::operator delete` 釋放記憶體。

爲了精密分工，STL `allocator` 決定將這兩階段動作區分開來。記憶體配置動作由 `alloc:allocate()` 負責，記憶體釋放動作由 `alloc::deallocate()` 負責；物件建構動作由 `::construct()` 負責，物件解構動作由 `::destroy()` 負責。

STL 標準規格告訴我們，配置器定義於 `<memory>` 之中，SGI `<memory>` 內含以下兩個檔案：

```
#include <stl_alloc.h>          // 負責記憶體空間的配置與釋放
#include <stl_construct.h>      // 負責物件內容的建構與解構
```

記憶體空間的配置/釋放與物件內容的建構/解構，分別著落在這兩個檔案身上。其中 `<stl_construct.h>` 定義有兩個基本函式：建構用的 `construct()` 和解構用的 `destroy()`。一頭栽進複雜的記憶體動態配置與釋放之前，讓我們先看清楚這兩個函式如何完成物件的建構和解構。



2.2.3 建構和解構基本工具：construct() 和 destroy()

下面是 <stl_construct.h> 的部份內容（閱讀程式碼的同時，請參考圖 2-1）：

```
#include <new.h>        // 欲使用 placement new，需先含入此檔

template <class T1, class T2>
inline void construct(T1* p, const T2& value) {
  new (p) T1(value);   // placement new; 喚起 T1::T1(value);
}

// 以下是 destroy() 第一版本，接受一個指標。
template <class T>
inline void destroy(T* pointer) {
    pointer->~T();     // 喚起 dtor ~T()
}

// 以下是 destroy() 第二版本，接受兩個迭代器。此函式設法找出元素的數值型別，
// 進而利用 __type_traits<> 求取最適當措施。
template <class ForwardIterator>
inline void destroy(ForwardIterator first, ForwardIterator last) {
  __destroy(first, last, value_type(first));
}

// 判斷元素的數值型別（value type）是否有 trivial destructor
template <class ForwardIterator, class T>
inline void __destroy(ForwardIterator first, ForwardIterator last, T*)
{
  typedef typename __type_traits<T>::has_trivial_destructor trivial_destructor;
  __destroy_aux(first, last, trivial_destructor());
}

// 如果元素的數值型別（value type）有 non-trivial destructor…
template <class ForwardIterator>
inline void
__destroy_aux(ForwardIterator first, ForwardIterator last, __false_type) {
  for ( ; first < last; ++first)
    destroy(&*first);
}

// 如果元素的數值型別（value type）有 trivial destructor…
template <class ForwardIterator>
inline void __destroy_aux(ForwardIterator, ForwardIterator, __true_type) {}

// 以下是 destroy() 第二版本針對迭代器爲 char* 和 wchar_t* 的特化版
inline void destroy(char*, char*) {}
inline void destroy(wchar_t*, wchar_t*) {}
```

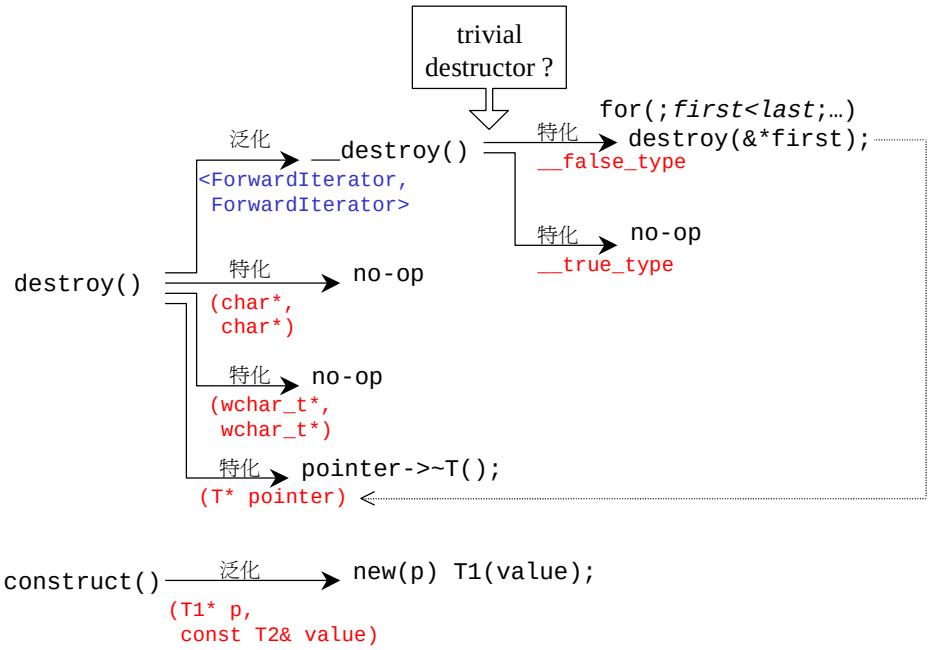


圖 2-1 construct() 和 drestroy() 示意。

這兩個做爲建構、解構之用的函式被設計爲全域函式，符合 STL 的規範[4]。此外 STL 還規定配置器必須擁有名爲 construct() 和 destroy() 的兩個成員函式（見 2.1 節），然而真正在 SGI STL 中大顯身手的那個名爲 std::alloc 的配置器並未遵守此一規則（稍後可見）。

上述 construct() 接受一個指標 p 和一個初值 value，此函式的用途就是將初值設定到指標所指的空間上。C++ 的 placement new 運算子[5] 可用來完成此一任務。

destroy() 有兩個版本，第一版本接受一個指標，準備將該指標所指之物解構掉。

[4] 請參考 [Austern98] 10.4.1 節。

[5] 請參考 [Lippman98] 8.4.5 節。

這很簡單，直接呼叫該物件的解構式即可。第二版本接受 first 和 last 兩個迭代器（所謂迭代器，第三章有詳細介紹），準備將 [first,last) 範圍內的所有物件解構掉。我們不知道這個範圍有多大，萬一很大，而每個物件的解構式都無關痛癢（所謂 *trivial* destructor），那麼一次次呼叫這些無關痛癢的解構式，對效率是一種蘄傷。因此，這裡首先利用 value_type() 獲得迭代器所指物件的型別，再利用 __type_traits<T> 判別該型別的解構式是否無關痛癢。若是（__true_type），什麼也不做就結束；若否（__false_type），這才以迴圈方式巡訪整個範圍，並在迴圈中每經歷一個物件就呼叫第一個版本的 destroy()。

這樣的觀念很好，但 C++ 本身並不直接支援對「指標所指之物」的型別判斷，也不支援對「物件解構式是否爲 *trivial*」的判斷，因此，上述的 value_type() 和 __type_traits<> 該如何實作呢？3.7 節有詳細介紹。

2.2.4 空間的配置與釋放，std::alloc

看完了記憶體配置後的物件建構行爲，和記憶體釋放前的物件解構行爲，現在我們來看看記憶體的配置和釋放。

物件建構前的空間配置，和物件解構後的空間釋放，由 <stl_alloc.h> 負責，SGI 對此的設計哲學如下：

- 向 system heap 要求空間。
- 考慮多緒（multi-threads）狀態。
- 考慮記憶體不足時的應變措施。
- 考慮過多「小型區塊」可能造成的記憶體破碎（fragment）問題。

爲了將問題控制在一定的複雜度內，以下的討論以及所摘錄的源碼，皆排除多緒狀態的處理。

C++ 的記憶體配置基本動作是 ::operator new()，記憶體釋放基本動作是 ::operator delete()。這兩個全域函式相當於 C 的 malloc() 和 free() 函式。是的，正是如此，SGI 正是以 malloc() 和 free() 完成記憶體的配置與釋放。

考量小型區塊所可能造成的記憶體破碎問題，SGI 設計了雙層級配置器，第一級配置器直接使用 malloc() 和 free()，第二級配置器則視情況採用不同的策略：當配置區塊超過 128bytes，視之爲「足夠大」，便呼叫第一級配置器；當配置區塊小於 128bytes，視之爲「過小」，爲了降低額外負擔（overhead，見 2.2.6 節），便採用複雜的 memory pool 整理方式，而不再求助於第一級配置器。整個設計究竟只開放第一級配置器，或是同時開放第二級配置器，取決於 __USE_MALLOC[6] 是否被定義（唔，我們可以輕易測試出來，SGI STL 並未定義 __USE_MALLOC）：

```
# ifdef __USE_MALLOC
...
typedef __malloc_alloc_template<0> malloc_alloc;
typedef malloc_alloc alloc;     // 令 alloc 爲第一級配置器
# else
...
// 令 alloc 爲第二級配置器
typedef __default_alloc_template<__NODE_ALLOCATOR_THREADS, 0> alloc;
#endif /* ! __USE_MALLOC */
```

其中 __malloc_alloc_template 就是第一級配置器，__default_alloc_template 就是第二級配置器。稍後分別有詳細介紹。再次提醒你注意，**alloc** 並不接受任何 template 型別參數。

無論 **alloc** 被定義爲第一級或第二級配置器，SGI 還爲它再包裝一個介面如下，使配置器的介面能夠符合 STL 規格：

```
template<class T, class Alloc>
class simple_alloc {
public:
    static T *allocate(size_t n)
              { return 0 == n? 0 : (T*) Alloc::allocate(n * sizeof (T)); }
    static T *allocate(void)
              { return (T*) Alloc::allocate(sizeof (T)); }
    static void deallocate(T *p, size_t n)
              { if (0 != n) Alloc::deallocate(p, n * sizeof (T)); }
    static void deallocate(T *p)
              { Alloc::deallocate(p, sizeof (T)); }
};
```

其內部四個成員函式其實都是單純的轉呼叫，呼叫傳入之配置器（可能是第一級

[6] __USE_MALLOC 這個名稱取得不甚理想，因爲無論如何，最終總是使用 malloc().

也可能是第二級）的成員函式。這個介面使配置器的配置單位從 bytes 轉爲個別元素的大小（sizeof(T)）。SGI STL 容器全都使用這個 simple_alloc 介面，例如：

```
template <class T, class Alloc = alloc>  // 預設使用 alloc 爲配置器
class vector {
protected:
  // 專屬之空間配置器，每次配置一個元素大小
  typedef simple_alloc<value_type, Alloc> data_allocator;

  void deallocate() {
    if (...)
         data_allocator::deallocate(start, end_of_storage - start);
  }
...
};
```

一、二級配置器的關係，介面包裝，及實際運用方式，可於圖 2-2 略見端倪。

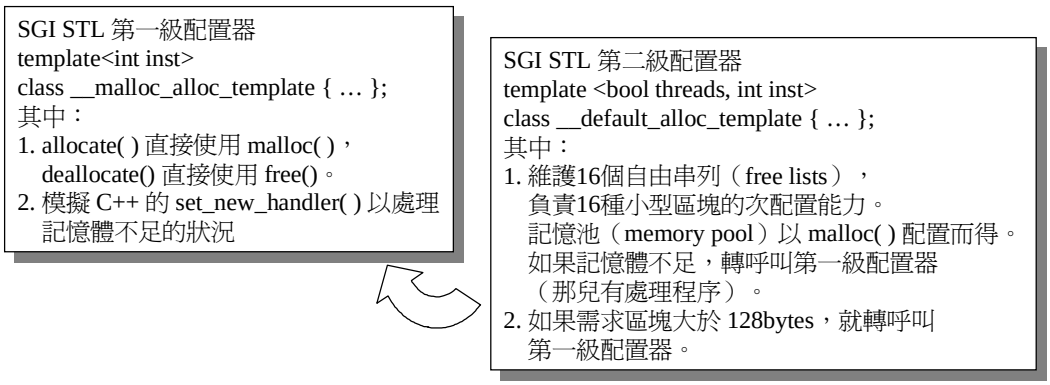


圖 2-2a 第一級配置器與第二級配置器

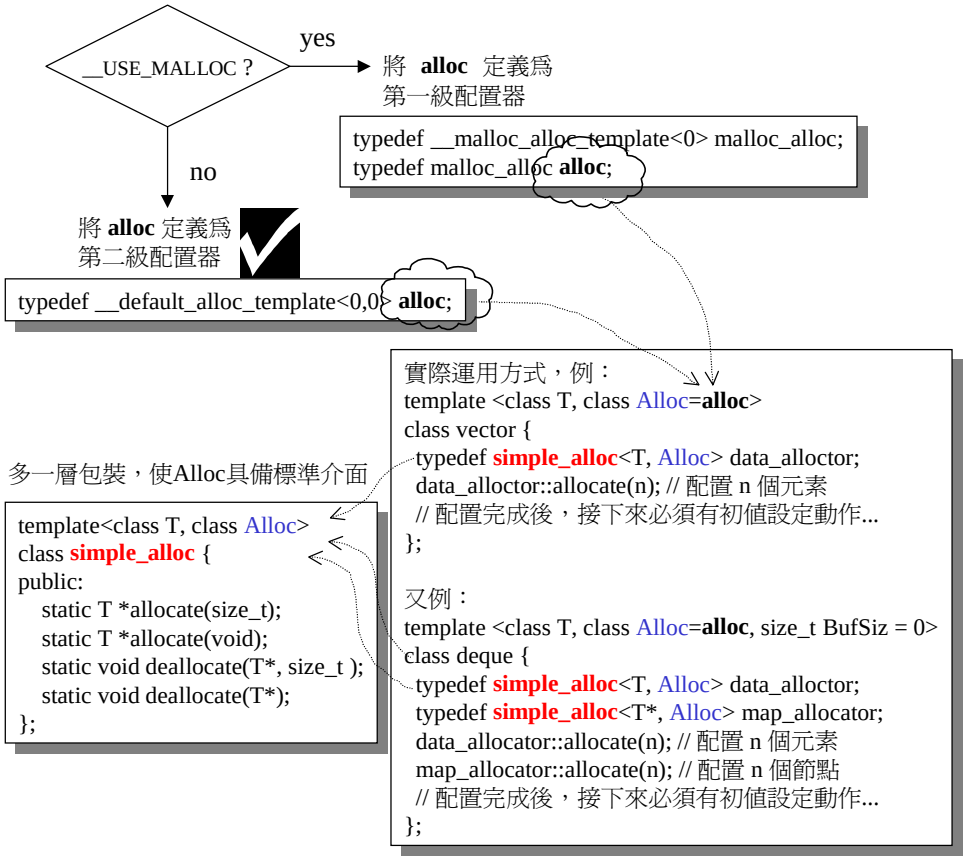


圖 2-2b 第一級配置器與第二級配置器，其包裝介面和運用方式

2.2.5 第一級配置器 __malloc_alloc_template 剖析

首先我們觀察第一級配置器：

```
#if 0
#   include <new>
#   define __THROW_BAD_ALLOC throw bad_alloc
#elif !defined(__THROW_BAD_ALLOC)
#   include <iostream.h>
#   define __THROW_BAD_ALLOC cerr << "out of memory" << endl; exit(1)
#endif

// malloc-based allocator. 通常比稍後介紹的 default alloc 速度慢，
```

```
// 一般而言是 thread-safe，並且對於空間的運用比較高效（efficient）。
// 以下是第一級配置器。
// 注意，無「template 型別參數」。至於「非型別參數」inst，完全沒派上用場。
template <int inst>
class __malloc_alloc_template {

private:
// 以下都是函式指標，所代表的函式將用來處理記憶體不足的情況。
// oom : out of memory.
static void *oom_malloc(size_t);
static void *oom_realloc(void *, size_t);
static void (* __malloc_alloc_oom_handler)();

public:

static void * allocate(size_t n)
{
   void *result = malloc(n);   // 第一級配置器直接使用 malloc()
   // 以下，無法滿足需求時，改用 oom_malloc()
   if (0 == result) result = oom_malloc(n);
   return result;
}

static void deallocate(void *p, size_t /* n */)
{
   free(p); // 第一級配置器直接使用 free()
}

static void * reallocate(void *p, size_t /* old_sz */, size_t new_sz)
{
   void * result = realloc(p, new_sz);   // 第一級配置器直接使用 realloc()
   // 以下，無法滿足需求時，改用 oom_realloc()
   if (0 == result) result = oom_realloc(p, new_sz);
   return result;
}

// 以下模擬 C++ 的 set_new_handler(). 換句話說，你可以透過它，
// 指定你自己的 out-of-memory handler
static void (* set_malloc_handler(void (*f)()))()
{
   void (* old)() = __malloc_alloc_oom_handler;
   __malloc_alloc_oom_handler = f;
   return(old);
}
};

// malloc_alloc out-of-memory handling
// 初值爲 0。有待客端設定。
template <int inst>
```

```
void (* __malloc_alloc_template<inst>::__malloc_alloc_oom_handler)() = 0;

template <int inst>
void * __malloc_alloc_template<inst>::oom_malloc(size_t n)
{
    void (* my_malloc_handler)();
    void *result;

    for (;;) {          // 不斷嘗試釋放、配置、再釋放、再配置…
        my_malloc_handler = __malloc_alloc_oom_handler;
        if (0 == my_malloc_handler) { __THROW_BAD_ALLOC; }
        (*my_malloc_handler)();  // 呼叫處理常式，企圖釋放記憶體。
        result = malloc(n);      // 再次嘗試配置記憶體。
        if (result) return(result);
    }
}

template <int inst>
void * __malloc_alloc_template<inst>::oom_realloc(void *p, size_t n)
{
    void (* my_malloc_handler)();
    void *result;

    for (;;) {          // 不斷嘗試釋放、配置、再釋放、再配置…
        my_malloc_handler = __malloc_alloc_oom_handler;
        if (0 == my_malloc_handler) { __THROW_BAD_ALLOC; }
        (*my_malloc_handler)();  // 呼叫處理常式，企圖釋放記憶體。
        result = realloc(p, n);  // 再次嘗試配置記憶體。
        if (result) return(result);
    }
}

// 注意，以下直接將參數 inst 指定爲 0。
typedef __malloc_alloc_template<0> malloc_alloc;
```

第一級配置器以 `malloc()`, `free()`, `realloc()` 等 C 函式執行實際的記憶體配置、釋放、重配置動作，並實作出類似 C++ new-handler[7] 的機制。是的，它不能直接運用 C++ new-handler 機制，因爲它並非使用 `::operator new` 來配置記憶體。

所謂 C++ new handler 機制是，你可以要求系統在記憶體配置需求無法被滿足時，喚起一個你所指定的函式。換句話說一旦 `::operator new` 無法達成任務，在丟

[7] 詳見《*Effective C++*》2e, 條款 7：*Be prepared for out-of-memory conditions.*

出 *std::bad_alloc* 異常狀態之前，會先呼叫由客端指定的處理常式。此處理常式通常即被稱爲 new-handler。new-handler 解決記憶體不足的作法有特定的模式，請參考《*Effective C++*》2e 條款 7。

注意，SGI 以 `malloc` 而非 `::operator new` 來配置記憶體（我所能夠想像的一個原因是歷史因素，另一個原因是 C++ 並未提供相應於 `realloc()` 的記憶體配置動作），因此 SGI 不能直接使用 C++ 的 `set_new_handler()`，必須模擬一個類似的 `set_malloc_handler()`。

請注意，SGI 第一級配置器的 `allocate()` 和 `realloc()` 都是在呼叫 `malloc()` 和 `realloc()` 不成功後，改呼叫 `oom_malloc()` 和 `oom_realloc()`。後兩者都有內迴圈，不斷呼叫「記憶體不足處理常式」，期望在某次呼叫之後，獲得足夠的記憶體而圓滿達成任務。但如果「記憶體不足處理常式」並未被客端設定，`oom_malloc()` 和 `oom_realloc()` 便老實不客氣地呼叫 `__THROW_BAD_ALLOC`，丟出 *bad_alloc* 異常訊息，或利用 `exit(1)` 硬生生中止程式。

記住，設計「記憶體不足處理常式」是客端的責任，設定「記憶體不足處理常式」也是客端的責任。再一次提醒你，「記憶體不足處理常式」解決問題的作法有著特定的模式，請參考 [Meyers98] 條款 7。

2.2.6 第二級配置器 __default_alloc_template 剖析

第二級配置器多了一些機制，避免太多小額區塊造成記憶體的破碎。小額區塊帶來的其實不僅是記憶體破碎而已，配置時的額外負擔（overhead）也是一大問題[8]。額外負擔永遠無法避免，畢竟系統要靠這多出來的空間來管理記憶體，如圖 2-3。但是區塊愈小，額外負擔所佔的比例就愈大、愈顯得浪費。

[8] 請參考 `[Meyers98]` 條款 10：*write operator delete if you write operator new.*

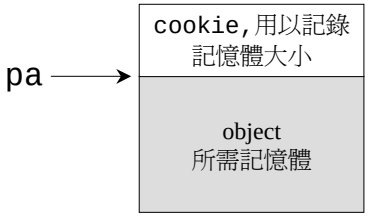


圖 2-3 索求任何一塊記憶體，都得有一些「稅」要繳給系統。

SGI 第二級配置器的作法是，如果區塊夠大，超過 128 bytes，就移交第一級配置器處理。當區塊小於 128 bytes，則以記憶池（memory pool）管理，此法又稱爲次層配置（sub-allocation）：每次配置一大塊記憶體，並維護對應之自由串列（*free-list*）。下次若再有相同大小的記憶體需求，就直接從 *free-lists* 中撥出。如果客端釋還小額區塊，就由配置器回收到 *free-lists* 中 — 是的，別忘了，配置器除了負責配置，也負責回收。爲了方便管理，SGI 第二級配置器會主動將任何小額區塊的記憶體需求量上調至 8 的倍數（例如客端要求 30 bytes，就自動調整爲 32 bytes），並維護 16 個 *free-lists*，各自管理大小分別爲 8, 16, 24, 32, 40, 48, 56, 64, 72, 80, 88, 96, 104, 112, 120, 128 bytes 的小額區塊。*free-lists* 的節點結構如下：

```
union obj {
     union obj * free_list_link;
     char client_data[1];    /* The client sees this. */
};
```

諸君或許會想，爲了維護串列（lists），每個節點需要額外的指標（指向下一個節點），這不又造成另一種額外負擔嗎？你的顧慮是對的，但早已有好的解決辦法。注意，上述 `obj` 所用的是 `union`，由於 `union` 之故，從其第一欄位觀之，`obj` 可被視爲一個指標，指向相同形式的另一個 `obj`。從其第二欄位觀之，`obj` 可被視爲一個指標，指向實際區塊，如圖 2-4。一物二用的結果是，不會爲了維護串列所必須的指標而造成記憶體的另一種浪費（我們正在努力樽節記憶體的開銷呢）。這種技巧在強型（strongly typed）語言如 Java 中行不通，但是在非強型語言如 C++ 中十分普遍[9]。

[9] 請參考 [Lippman98] p840 及 [Noble] p254。

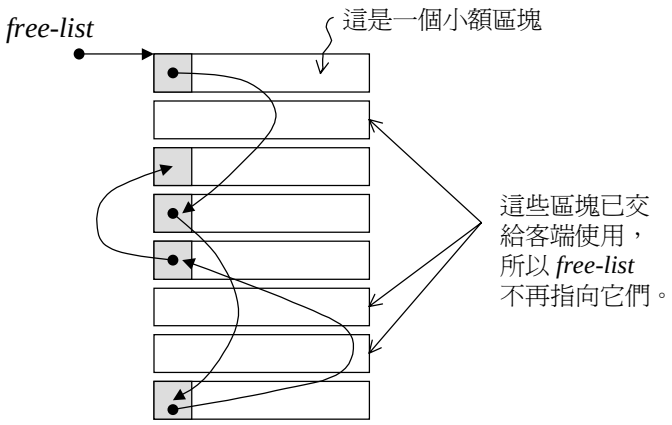


圖 2-4　自由串列（*free-list*）的實作技巧

下面是第二級配置器的部份實作內容：

```
enum {__ALIGN = 8};    // 小型區塊的上調邊界
enum {__MAX_BYTES = 128};  // 小型區塊的上限
enum {__NFREELISTS = __MAX_BYTES/__ALIGN}; // free-lists 個數

// 以下是第二級配置器。
// 注意，無「template 型別參數」，且第二參數完全沒派上用場。
// 第一參數用於多緒環境下。本書不討論多緒環境。
template <bool threads, int inst>
class __default_alloc_template {

private:
  // ROUND_UP() 將 bytes 上調至 8 的倍數。
  static size_t ROUND_UP(size_t bytes) {
       return (((bytes) + __ALIGN-1) & ~(__ALIGN - 1));
  }
private:
  union obj {          // free-lists 的節點構造
       union obj * free_list_link;
       char client_data[1];    /* The client sees this. */
  };
private:
    // 16 個 free-lists
    static obj * volatile free_list[__NFREELISTS];
    // 以下函式根據區塊大小，決定使用第 n 號 free-list。n 從 1 起算。
    static  size_t FREELIST_INDEX(size_t bytes) {
       return (((bytes) + __ALIGN-1)/__ALIGN - 1);
  }
```

```
  // 傳回一個大小爲 n 的物件，並可能加入大小爲 n 的其他區塊到 free list.
  static void *refill(size_t n);
  // 配置一大塊空間，可容納 nobjs 個大小爲 "size" 的區塊。
  // 如果配置 nobjs 個區塊有所不便，nobjs 可能會降低。
  static char *chunk_alloc(size_t size, int &nobjs);

  // Chunk allocation state.
  static char *start_free; // 記憶池起始位置。只在 chunk_alloc()中變化
  static char *end_free;   // 記憶池結束位置。只在 chunk_alloc()中變化
  static size_t heap_size;

public:
  static void * allocate(size_t n) { /* 詳述於後 */ }
  static void deallocate(void *p, size_t n) { /* 詳述於後 */ }
  static void * reallocate(void *p, size_t old_sz, size_t new_sz);
};

// 以下是 static data member 的定義與初值設定
template <bool threads, int inst>
char *__default_alloc_template<threads, inst>::start_free = 0;

template <bool threads, int inst>
char *__default_alloc_template<threads, inst>::end_free = 0;

template <bool threads, int inst>
size_t __default_alloc_template<threads, inst>::heap_size = 0;

template <bool threads, int inst>
__default_alloc_template<threads, inst>::obj * volatile
__default_alloc_template<threads, inst>::free_list[__NFREELISTS] =
{0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, };
```

2.2.7 空間配置函式 allocate()

身爲一個配置器，__default_alloc_template 擁有配置器的標準介面函式 allocate()。此函式首先判斷區塊大小，大於 128 bytes 就呼叫第一級配置器，小於 128 bytes 就檢查對應的 *free list*。如果 *free list* 之內有可用的區塊，就直接拿來用，如果沒有可用區塊，就將區塊大小上調至 8 倍數邊界，然後呼叫 refill()，準備爲 *free list* 重新填充空間。refill() 將於稍後介紹。

```
  // n must be > 0
  static void * allocate(size_t n)
  {
    obj * volatile * my_free_list;
```

```
    obj * result;

    // 大於 128 就呼叫第一級配置器
    if (n > (size_t) __MAX_BYTES)
        return(malloc_alloc::allocate(n));
    }
    // 尋找 16 個 free lists 中適當的一個
    my_free_list = free_list + FREELIST_INDEX(n);
    result = *my_free_list;
    if (result == 0) {
        // 沒找到可用的 free list，準備重新填充 free list
        void *r = refill(ROUND_UP(n));     // 下節詳述
        return r;
    }
    // 調整 free list
    *my_free_list = result -> free_list_link;
    return (result);
  };
```

區塊自 *free list* 撥出的動作，如圖 2-5。

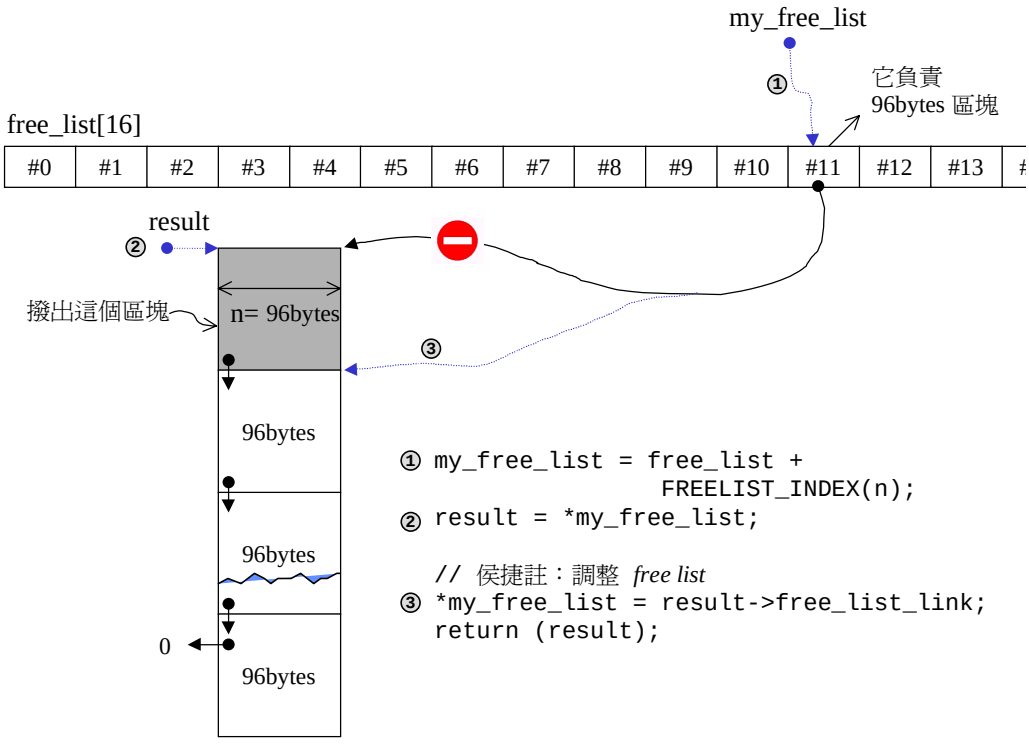


圖 2-5 區塊自 *free list* 撥出。閱讀次序請循圖中編號。

2.2.8 空間釋還函式 deallocate()

身爲一個配置器，__default_alloc_template 擁有配置器標準介面函式 deallocate()。此函式首先判斷區塊大小，大於 128 bytes 就呼叫第一級配置器，小於 128 bytes 就找出對應的 *free list*，將區塊回收。

```
// p 不可以是 0
static void deallocate(void *p, size_t n)
{
  obj *q = (obj *)p;
  obj * volatile * my_free_list;

  // 大於 128 就呼叫第一級配置器
  if (n > (size_t) __MAX_BYTES) {
     malloc_alloc::deallocate(p, n);
     return;
  }
  // 尋找對應的 free list
  my_free_list = free_list + FREELIST_INDEX(n);
  // 調整 free list，回收區塊
  q -> free_list_link = *my_free_list;
  *my_free_list = q;
}
```

區塊回收納入 *free list* 的動作，如圖 2-6。

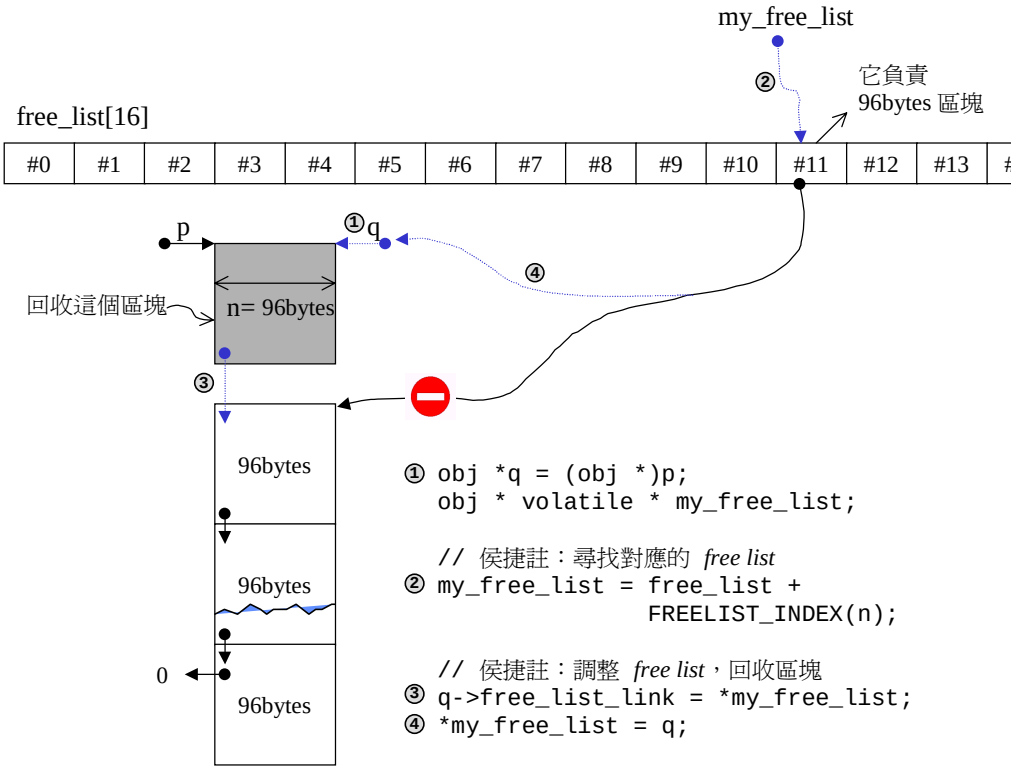


圖 2-6　區塊回收，納入 *free list*。閱讀次序請循圖中編號。

2.2.9 重新充填 *free lists*

回頭討論先前說過的 `allocate()`。當它發現 *free list* 中沒有可用區塊了，就呼叫 `refill()`準備爲 *free list* 重新填充空間。新的空間將取自記憶池（經由 `chunk_alloc()` 完成）。預設取得 20 個新節點（新區塊），但萬一記憶池空間不足，獲得的節點數（區塊數）可能小於 20：

```
// 傳回一個大小爲 n 的物件，並且有時候會爲適當的 free list 增加節點.
// 假設 n 已經適當上調至 8 的倍數。
template <bool threads, int inst>
void* __default_alloc_template<threads, inst>::refill(size_t n)
{
    int nobjs = 20;
    // 呼叫 chunk_alloc()，嘗試取得 nobjs 個區塊做爲 free list 的新節點。
    // 注意參數 nobjs 是 pass by reference。
    char * chunk = chunk_alloc(n, nobjs); // 下節詳述
```

```
    obj * volatile * my_free_list;
    obj * result;
    obj * current_obj, * next_obj;
    int i;

    // 如果只獲得一個區塊，這個區塊就撥給呼叫者用，free list 無新節點。
    if (1 == nobjs) return(chunk);
    // 否則準備調整 free list，納入新節點。
    my_free_list = free_list + FREELIST_INDEX(n);

    // 以下在 chunk 空間內建立 free list
      result = (obj *)chunk;     // 這一塊準備傳回給客端
      // 以下導引 free list 指向新配置的空間（取自記憶池）
      *my_free_list = next_obj = (obj *)(chunk + n);
      // 以下將 free list 的各節點串接起來。
      for (i = 1; ; i++) {  // 從 1 開始，因爲第 0 個將傳回給客端
        current_obj = next_obj;
        next_obj = (obj *)((char *)next_obj + n);
        if (nobjs - 1 == i) {
            current_obj -> free_list_link = 0;
            break;
        } else {
            current_obj -> free_list_link = next_obj;
        }
      }
    return(result);
}
```

2.2.10 記憶池（memory pool）

從記憶池中取空間給 *free list* 使用，是 chunk_alloc() 的工作：

```
// 假設 size 已經適當上調至 8 的倍數。
// 注意參數 nobjs 是 pass by reference。
template <bool threads, int inst>
char*
__default_alloc_template<threads, inst>::
chunk_alloc(size_t size, int& nobjs)
{
    char * result;
    size_t total_bytes = size * nobjs;
    size_t bytes_left = end_free - start_free; // 記憶池剩餘空間

    if (bytes_left >= total_bytes) {
        // 記憶池剩餘空間完全滿足需求量。
        result = start_free;
        start_free += total_bytes;
```

```
        return(result);
    } else if (bytes_left >= size) {
        // 記憶池剩餘空間不能完全滿足需求量，但足夠供應一個（含）以上的區塊。
        nobjs = bytes_left/size;
        total_bytes = size * nobjs;
        result = start_free;
        start_free += total_bytes;
        return(result);
    } else {
        // 記憶池剩餘空間連一個區塊的大小都無法提供。
        size_t bytes_to_get = 2 * total_bytes + ROUND_UP(heap_size >> 4);
        // 以下試著讓記憶池中的殘餘零頭還有利用價值。
        if (bytes_left > 0) {
            // 記憶池內還有一些零頭，先配給適當的 free list。
            // 首先尋找適當的 free list。
            obj * volatile * my_free_list =
                        free_list + FREELIST_INDEX(bytes_left);
            // 調整 free list，將記憶池中的殘餘空間編入。
            ((obj *)start_free) -> free_list_link = *my_free_list;
            *my_free_list = (obj *)start_free;
        }

        // 配置 heap 空間，用來挹注記憶池。
        start_free = (char *)malloc(bytes_to_get);
        if (0 == start_free) {
            // heap 空間不足，malloc() 失敗。
            int i;
            obj * volatile * my_free_list, *p;
            // 試著檢視我們手上擁有的東西。這不會造成傷害。我們不打算嘗試配置
            // 較小的區塊，因爲那在多行程（multi-process）機器上容易導致災難
            // 以下搜尋適當的 free list，
            // 所謂適當是指「尚有未用區塊，且區塊夠大」之 free list。
            for (i = size; i <= __MAX_BYTES; i += __ALIGN) {
                my_free_list = free_list + FREELIST_INDEX(i);
                p = *my_free_list;
                if (0 != p) { // free list 內尚有未用區塊。
                    // 調整 free list 以釋出未用區塊
                    *my_free_list = p -> free_list_link;
                    start_free = (char *)p;
                    end_free = start_free + i;
                    // 遞迴呼叫自己，爲了修正 nobjs。
                    return(chunk_alloc(size, nobjs));
                    // 注意，任何殘餘零頭終將被編入適當的 free-list 中備用。
                }
            }
        end_free = 0; // 如果出現意外（山窮水盡，到處都沒記憶體可用了）
            // 呼叫第一級配置器，看看 out-of-memory 機制能否盡點力
            start_free = (char *)malloc_alloc::allocate(bytes_to_get);
            // 這會導致擲出異常（exception），或記憶體不足的情況獲得改善。
```

```
        }
        heap_size += bytes_to_get;
        end_free = start_free + bytes_to_get;
        // 遞迴呼叫自己，爲了修正 nobjs。
        return(chunk_alloc(size, nobjs));
    }
}
```

上述的 chunk_alloc() 函式以 end_free - start_free 來判斷記憶池的水量。如果水量充足，就直接撥出 20 個區塊傳回給 *free list*。如果水量不足以提供 20 個區塊，但還足夠供應一個以上的區塊，就撥出這不足 20 個區塊的空間出去。這時候其 pass by reference 的 nobjs 參數將被修改爲實際能夠供應的區塊數。如果記憶池連一個區塊空間都無法供應，對客端顯然無法交待，此時便需利用 malloc() 從 heap 中配置記憶體，爲記憶池注入活水源頭以應付需求。新水量的大小爲需求量的兩倍，再加上一個隨著配置次數增加而愈來愈大的附加量。

舉個例子，見圖 2-7，假設程式一開始，客端就呼叫 chunk_alloc(32,20)，於是 malloc() 配置 40 個 32bytes 區塊，其中第 1 個交出，另 19 個交給 free_list[3] 維護，餘 20 個留給記憶池。接下來客端呼叫 chunk_alloc(64,20)，此時 free_list[7] 空空如也，必須向記憶池要求支援。記憶池只夠供應 (32*20)/64=10 個 64bytes 區塊，就把這 10 個區塊傳回，第 1 個交給客端，餘 9 個由 free_list[7] 維護。此時記憶池全空。接下來再呼叫 chunk_alloc(96, 20)，此時 free_list[11] 空空如也，必須向記憶池要求支援，而記憶池此時也是空的，於是以 malloc() 配置 40+n（附加量）個 96bytes 區塊，其中第 1 個交出，另 19 個交給 free_list[11] 維護，餘 20+n（附加量）個區塊留給記憶池……。

萬一山窮水盡，整個 system heap 空間都不夠了（以至無法爲記憶池注入活水源頭），malloc() 行動失敗，chunk_alloc() 就四處尋找有無「尚有未用區塊，且區塊夠大」之 *free lists*。找到的話就挖一塊交出，找不到的話就呼叫第一級配置器。第一級配置器其實也是使用 malloc() 來配置記憶體，但它有 out-of-memory 處理機制（類似 new-handler 機制），或許有機會釋放其他的記憶體拿來此處使用。如果可以，就成功，否則發出 *bad_alloc* 異常。

以上便是整個第二級空間配置器的設計。

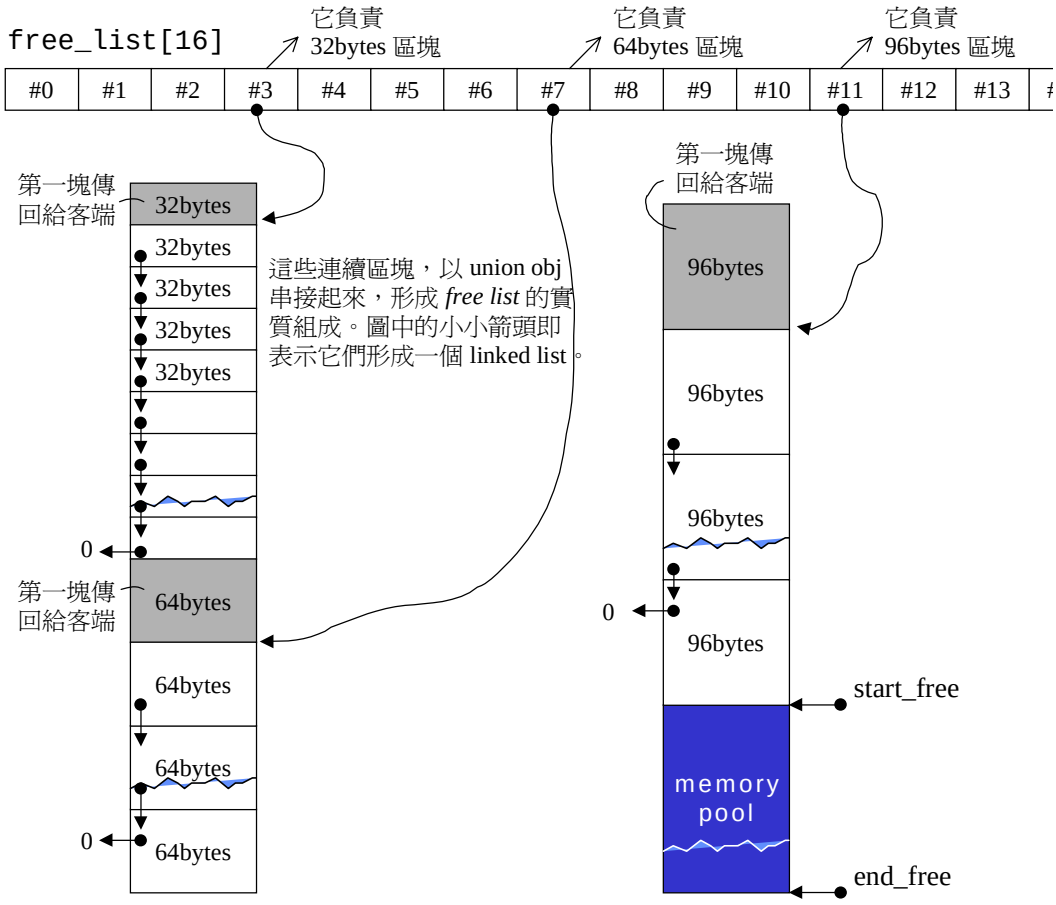


圖 2-7　記憶池（memory pool）實際操練結果

回想一下 2.2.4 節最後提到的那個提供配置器標準介面的 `simple_alloc`：

```
template<class T, class Alloc>
class simple_alloc {
...
};
```

SGI 容器通常以這種方式來使用配置器：

```
template <class T, class Alloc = alloc>  // 預設使用 alloc 爲配置器
class vector {
public:
  typedef T value_type;
...
```

```
protected:
  // 專屬之空間配置器，每次配置一個元素大小
  typedef simple_alloc<value_type, Alloc> data_allocator;
...
};
```

其中第二個 template 參數所接受的預設引數 **alloc**，可以是第一級配置器，也可以是第二級配置器。不過，SGI STL 已經把它設爲第二級配置器，見 2.2.4 節及圖 2-2b。

2.3 記憶體基本處理工具

STL 定義有五個全域函式，作用於未初始化空間上。這樣的功能對於容器的實作很有幫助，我們會在第四章容器實作碼中，看到它們的吃重演出。前兩個函式是 2.2.3 節說過，用於建構的 `construct()` 和用於解構的 `destroy()`，另三個函式是 `uninitialized_copy(),uninitialized_fill(),uninitialized_fill_n()`[10]，分別對應於高階函式 `copy()`、`fill()`、`fill_n()` — 這些都是 STL 演算法，將在第六章介紹。如果你要使用本節的三個低階函式，應該含入 `<memory>`，不過 SGI 把它們實際定義於 `<stl_uninitialized>`。

2.3.1 uninitialized_copy

```
template <class InputIterator, class ForwardIterator>
ForwardIterator
uninitialized_copy(InputIterator first, InputIterator last,
                   ForwardIterator result);
```

`uninitialized_copy()` 使我們能夠將記憶體的配置與物件的建構行爲分離開來。如果做爲輸出目的地的 `[result, result+(last-first))` 範圍內的每一個迭代器都指向未初始化區域，則 `uninitialized_copy()` 會使用 copy constructor，爲身爲輸入來源之 `[first,last)` 範圍內的每一個物件產生一份複製品，放進輸出範圍中。換句話說，針對輸入範圍內的每一個迭代器 `i`，此函式會呼叫 `construct(&*(result+(i-first)),*i)`，產生 `*i` 的複製品，放置於輸

[10] [Austern98] 10.4 節對於這三個低階函式有詳細的介紹。

出範圍的相對位置上。式中的 `construct()` 已於 2.2.3 節討論過。

如果你有需要實作一個容器，`uninitialized_copy()` 這樣的函式會爲你帶來很大的幫助，因爲容器的全範圍建構式（range constructor）通常以兩個步驟完成：

- 配置記憶體區塊，足以包含範圍內的所有元素。
- 使用 `uninitialized_copy()`，在該記憶體區塊上建構元素。

C++ 標準規格書要求 `uninitialized_copy()` 具有 "*commit* or *rollback*" 語意，意思是要不就「建構出所有必要元素」，要不就（當有任何一個 copy constructor 失敗時）「不建構任何東西」。

2.3.2 uninitialized_fill

```
template <class ForwardIterator, class T>
void uninitialized_fill(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                        const T& x);
```

`uninitialized_fill()` 也能夠使我們將記憶體配置與物件的建構行爲分離開來。如果 `[first,last)` 範圍內的每個迭代器都指向未初始化的記憶體，那麼 `uninitialized_fill()` 會在該範圍內產生 `x`（上式第三參數）的複製品。換句話說 `uninitialized_fill()` 會針對操作範圍內的每個迭代器 `i`，呼叫 `construct(&*i, x)`，在 `i` 所指之處產生 `x` 的複製品。式中的 `construct()` 已於 2.2.3 節討論過。

和 `uninitialized_copy()` 一樣，`uninitialized_fill()` 必須具備 "*commit* or *rollback*" 語意，換句話說它要不就產生出所有必要元素，要不就不產生任何元素。如果有任何一個 copy constructor 丟出異常（exception），`uninitialized_fill()` 必須能夠將已產生之所有元素解構掉。

2.3.3 uninitialized_fill_n

```
template <class ForwardIterator, class Size, class T>
ForwardIterator
uninitialized_fill_n(ForwardIterator first, Size n, const T& x);
```

uninitialized_fill_n() 能夠使我們將記憶體配置與物件建構行爲分離開來。它會爲指定範圍內的所有元素設定相同的初值。

如果 [first, first+n) 範圍內的每一個迭代器都指向未初始化的記憶體，那麼 uninitialized_fill_n() 會呼叫 copy constructor，在該範圍內產生 x（上式第三參數）的複製品。也就是說面對 [first,first+n) 範圍內的每個迭代器 i，uninitialized_fill_n() 會呼叫 construct(&*i, x)，在對應位置處產生 x 的複製品。式中的 construct() 已於 2.2.3 節討論過。

uninitialized_fill_n() 也具有 "*commit* or *rollback*" 語意：要不就產生所有必要的元素，否則就不產生任何元素。如果任何一個 copy constructor 丟出異常（exception），uninitialized_fill_n() 必須解構已產生的所有元素。

以下分別介紹這三個函式的實作法。其中所呈現的 iterators（迭代器）、value_type()、__type_traits、__true_type、__false_type、is_POD_type 等實作技術，都將於第三章介紹。

(1) uninitialized_fill_n

首先是 uninitialized_fill_n() 的源碼。本函式接受三個參數：

1. 迭代器 first 指向欲初始化空間的起始處
2. n 表示欲初始化空間的大小
3. x 表示初值

```
template <class ForwardIterator, class Size, class T>
inline ForwardIterator uninitialized_fill_n(ForwardIterator first,
                                            Size n, const T& x) {
  return __uninitialized_fill_n(first, n, x, value_type(first));
  // 以上，利用 value_type() 取出 first 的 value type.
}
```

這個函式的進行邏輯是，首先萃取出迭代器 first 的 *value type*（詳見第三章），然後判斷該型別是否爲 POD 型別：

```
template <class ForwardIterator, class Size, class T, class T1>
inline ForwardIterator __uninitialized_fill_n(ForwardIterator first,
                                              Size n, const T& x, T1*)
```

```
{
  // 以下 __type_traits<> 技法，詳見 3.7 節
  typedef typename __type_traits<T1>::is_POD_type is_POD;
  return __uninitialized_fill_n_aux(first, n, x, is_POD());
}
```

POD 意指 **Plain Old Data**，也就是純量型別（scalar types）或傳統的 C struct 型別。POD 型別必然擁有 *trivial* ctor/dtor/copy/assignment 函式，因此，我們可以對 POD 型別採取最有效率的初值填寫手法，而對 non-POD 型別採取最保險安全的作法：

```
// 如果 copy construction 等同於 assignment, 而且
//  destructor 是 trivial，以下就有效。
// 如果是 POD 型別，執行流程就會轉進到以下函式。這是藉由 function template
// 的引數推導機制而得。
template <class ForwardIterator, class Size, class T>
inline ForwardIterator
__uninitialized_fill_n_aux(ForwardIterator first, Size n,
                           const T& x, __true_type) {
  return fill_n(first, n, x);   // 交由高階函式執行。見 6.4.2 節。
}

// 如果不是 POD 型別，執行流程就會轉進到以下函式。這是藉由 function template
// 的引數推導機制而得。
template <class ForwardIterator, class Size, class T>
ForwardIterator
__uninitialized_fill_n_aux(ForwardIterator first, Size n,
                           const T& x, __false_type) {
  ForwardIterator cur = first;
    // 爲求閱讀順暢，以下將原本該有的異常處理（exception handling）省略。
    for ( ; n > 0; --n, ++cur)
       construct(&*cur, x);     // 見 2.2.3 節
    return cur;
}
```

(2) uninitialized_copy

下面列出 `uninitialized_copy()` 的源碼。本函式接受三個參數：

- 迭代器 `first` 指向輸入端的起始位置
- 迭代器 `last` 指向輸入端的結束位置（前閉後開區間）
- 迭代器 `result` 指向輸出端（欲初始化空間）的起始處

```
template <class InputIterator, class ForwardIterator>
inline ForwardIterator
  uninitialized_copy(InputIterator first, InputIterator last,
```

```
                    ForwardIterator result) {
  return __uninitialized_copy(first, last, result, value_type(result));
  // 以上，利用 value_type() 取出 first 的 value type.
}
```

這個函式的進行邏輯是，首先萃取出迭代器 result 的 *value type*（詳見第三章），然後判斷該型別是否爲 POD 型別：

```
template <class InputIterator, class ForwardIterator, class T>
inline ForwardIterator
__uninitialized_copy(InputIterator first, InputIterator last,
                     ForwardIterator result, T*) {
  typedef typename __type_traits<T>::is_POD_type is_POD;
  return __uninitialized_copy_aux(first, last, result, is_POD());
  // 以上，企圖利用 is_POD() 所獲得的結果，讓編譯器做引數推導。
}
```

POD 意指 Plain Old Data，也就是純量型別（scalar types）或傳統的 C struct 型別。POD 型別必然擁有 *trivial* ctor/dtor/copy/assignment 函式，因此，我們可以對 POD 型別採取最有效率的複製手法，而對 non-POD 型別採取最保險安全的作法：

```
// 如果 copy construction 等同於 assignment, 而且
//  destructor 是 trivial，以下就有效。
// 如果是 POD 型別，執行流程就會轉進到以下函式。這是藉由 function template
// 的引數推導機制而得。
template <class InputIterator, class ForwardIterator>
inline ForwardIterator
__uninitialized_copy_aux(InputIterator first, InputIterator last,
                         ForwardIterator result,
                         __true_type) {
  return copy(first, last, result);  // 呼叫 STL 演算法 copy()
}

//如果是 non-POD 型別，執行流程就會轉進到以下函式。這是藉由 function template
// 的引數推導機制而得。
template <class InputIterator, class ForwardIterator>
ForwardIterator
__uninitialized_copy_aux(InputIterator first, InputIterator last,
                         ForwardIterator result,
                         __false_type) {
  ForwardIterator cur = result;
    // 爲求閱讀順暢，以下將原本該有的異常處理（exception handling）省略。
    for ( ; first != last; ++first, ++cur)
      construct(&*cur, *first);  // 必須一個一個元素地建構，無法批量進行
    return cur;
  }
}
```

針對 char* 和 wchar_t* 兩種型別，可以最具效率的作法 memmove（直接搬移記憶體內容）來執行複製行爲。因此 SGI 得以爲這兩種型別設計一份特化版本。

```
// 以下是針對 const char* 的特化版本
inline char* uninitialized_copy(const char* first, const char* last,
                                char* result) {
  memmove(result, first, last - first);
  return result + (last - first);
}

// 以下是針對 const wchar_t* 的特化版本
inline wchar_t* uninitialized_copy(const wchar_t* first, const wchar_t* last,
                                   wchar_t* result) {
  memmove(result, first, sizeof(wchar_t) * (last - first));
  return result + (last - first);
}
```

(3) uninitialized_fill

下面列出 uninitialized_fill() 的源碼。本函式接受三個參數：

- 迭代器 first 指向輸出端（欲初始化空間）的起始處
- 迭代器 last 指向輸出端（欲初始化空間）的結束處（前閉後開區間）
- x 表示初值

```
template <class ForwardIterator, class T>
inline void uninitialized_fill(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                               const T& x) {
  __uninitialized_fill(first, last, x, value_type(first));
}
```

這個函式的進行邏輯是，首先萃取出迭代器 first 的 *value type*（詳見第三章），然後判斷該型別是否爲 POD 型別：

```
template <class ForwardIterator, class T, class T1>
inline void __uninitialized_fill(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                                 const T& x, T1*) {
  typedef typename __type_traits<T1>::is_POD_type is_POD;
  __uninitialized_fill_aux(first, last, x, is_POD());
}
```

POD 意指 Plain Old Data，也就是純量型別（scalar types）或傳統的 C struct 型別。POD 型別必然擁有 *trivial* ctor/dtor/copy/assignment 函式，因此，我們可以對 POD 型別採取最有效率的初值填寫手法，而對 non-POD 型別採取最保險安全的

作法：

```
// 如果 copy construction 等同於 assignment, 而且
//  destructor 是 trivial，以下就有效。
// 如果是 POD 型別，執行流程就會轉進到以下函式。這是藉由 function template
// 的引數推導機制而得。
template <class ForwardIterator, class T>
inline void
__uninitialized_fill_aux(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                         const T& x, __true_type)
{
  fill(first, last, x);    // 呼叫 STL 演算法 fill()
}

//如果是 non-POD 型別，執行流程就會轉進到以下函式。這是藉由 function template
// 的引數推導機制而得。
template <class ForwardIterator, class T>
void
__uninitialized_fill_aux(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                         const T& x, __false_type)
{
  ForwardIterator cur = first;
    // 爲求閱讀順暢，以下將原本該有的異常處理（exception handling）省略。
    for ( ; cur != last; ++cur)
      construct(&*cur, x);  // 必須一個一個元素地建構，無法批量進行
  }
}
```

圖 2-8 將本節三個函式對效率的特殊考量，以圖形顯示。

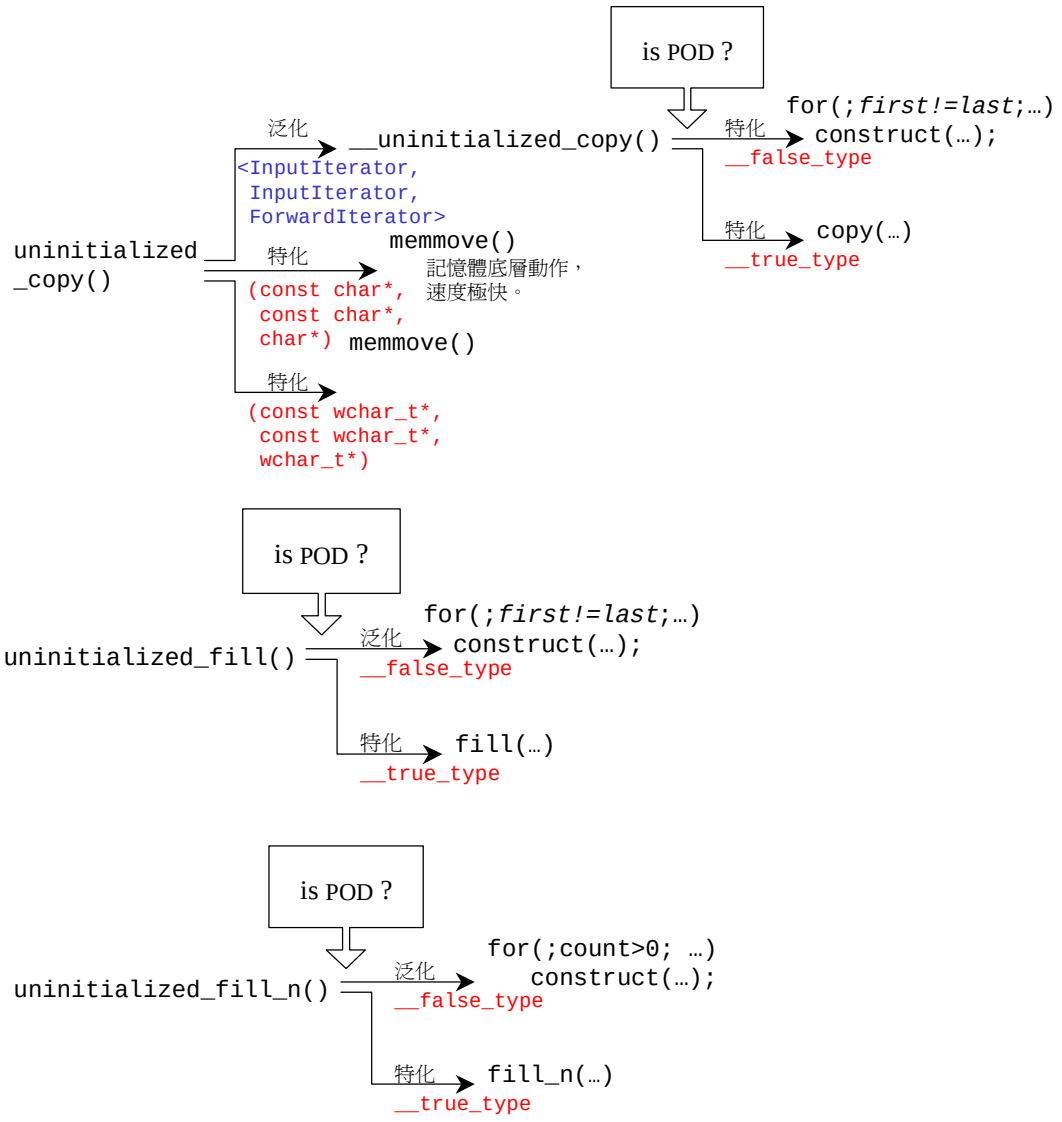


圖 2-8　三個記憶體基本函式的泛型版本與特化版本。

3

迭代器（iterators）概念與 traits 編程技法

迭代器（iterators）是一種抽象的設計概念，現實程式語言中並沒有直接對映於這個概念的實物。《*Design Patterns*》一書提供有 23 個設計樣式（design patterns）的完整描述，其中 ***iterator*** 樣式定義如下：提供一種方法，使得依序巡訪某個聚合物（容器）所含的各個元素，而又無需暴露該聚合物的內部表述方式。

3.1 迭代器設計思維 — STL 關鍵所在

不論是泛型思維或 STL 的實際運用，迭代器（iterators）都扮演重要角色。STL 的中心思想在於，將資料容器（containers）和演算法（algorithms）分開，彼此獨立設計，最後再以一帖膠著劑將它們撮合在一起。容器和演算法的泛型化，從技術角度來看並不困難，C++ 的 class templates 和 function templates 可分別達成目標。如何設計出兩者之間的良好膠著劑，才是大難題。

以下是容器、演算法、迭代器（iterator，扮演黏膠角色）的合作展示。以演算法 `find()` 爲例，它接受兩個迭代器和一個「搜尋標的」：

```
// 摘自 SGI <stl_algo.h>
template <class InputIterator, class T>
InputIterator find(InputIterator first,
                   InputIterator last,
                   const T& value) {
  while (first != last && *first != value)
    ++first;
  return first;
}
```

只要給予不同的迭代器，find() 便能夠對不同的容器做搜尋動作：

```
// file : 3find.cpp
#include <vector>
#include <list>
#include <deque>
#include <algorithm>
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
  const int arraySize = 7;
  int ia[arraySize] = { 0,1,2,3,4,5,6 };

  vector<int> ivect(ia, ia+arraySize);
  list<int> ilist(ia, ia+arraySize);
  deque<int> ideque(ia, ia+arraySize);   // 注意：VC6[x]，未符合標準

  vector<int>::iterator it1 = find(ivect.begin(), ivect.end(), 4);
  if (it1 == ivect.end())
     cout << "4 not found." << endl;
  else
     cout << "4 found. " << *it1 << endl;
  // 執行結果：4 found. 4

  list<int>::iterator it2 = find(ilist.begin(), ilist.end(), 6);
  if (it2 == ilist.end())
     cout << "6 not found." << endl;
  else
     cout << "6 found. " << *it2 << endl;
  // 執行結果：6 found. 6

  deque<int>::iterator it3 = find(ideque.begin(), ideque.end(), 8);
  if (it3 == ideque.end())
     cout << "8 not found." << endl;
  else
     cout << "8 found. " << *it3 << endl;
  // 執行結果：8 not found.
}
```

從這個例子看來，迭代器似乎依附在容器之下。是嗎？有沒有獨立而泛用的迭代器？我們又該如何自行設計特殊的迭代器？

3.2 迭代器（iterator）是一種 smart pointer

迭代器是一種行爲類似指標的物件，而指標的各種行爲中最常見也最重要的便是

內容提領（*dereference*）和成員取用（member access），因此迭代器最重要的編程工作就是對 `operator*` 和 `operator->` 進行多載化（*overloading*）工程。關於這一點，C++ 標準程式庫有一個 `auto_ptr` 可供我們參考。任何一本詳盡的 C++ 語法書籍都應該談到 `auto_ptr`（如果沒有，扔了它☺），這是一個用來包裝原生指標（native pointer）的物件，聲名狼藉的記憶體漏洞（memory leak）問題可藉此獲得解決。`auto_ptr` 用法如下，和原生指標一模一樣：

```
void func()
{
   auto_ptr<string> ps(new string("jjhou"));

   cout << *ps << endl;              // 輸出：jjhou
   cout << ps->size() << endl;       // 輸出：5
   // 離開前不需 delete, auto_ptr 會自動釋放記憶體
}
```

函式第一行的意思是，以算式 `new` 動態配置一個初值爲 `"jjhou"` 的 `string` 物件，並將所得結果（一個原生指標）做爲 `auto_ptr<string>` 物件的初值。注意，`auto_ptr` 角括號內放的是「原生指標所指物件」的型別，而不是原生指標的型別。

`auto_ptr` 的源碼在表頭檔 `<memory>` 中，根據它，我模擬了一份陽春版，可具體說明 `auto_ptr` 的行爲與能力：

```
// file: 3autoptr.cpp
template<class T>
class auto_ptr {
public:
  explicit auto_ptr(T *p = 0): pointee(p) {}
  template<class U>
  auto_ptr(auto_ptr<U>& rhs): pointee(rhs.release()) {}
  ~auto_ptr() { delete pointee; }

  template<class U>
  auto_ptr<T>& operator=(auto_ptr<U>& rhs) {
    if (this != &rhs) reset(rhs.release());
    return *this;
  }
  T& operator*() const { return *pointee; }
  T* operator->() const { return pointee; }
  T* get() const { return pointee; }
  // ...
private:
    T *pointee;
```

```
};
```

其中關鍵字 `explicit` 和 member template 等編程技法，並不是這裡的講述重點，相關語法和語意請參閱 [Lippman98] 或 [Stroustrup97]。

有了模倣對象，現在我們來爲 list（串列）設計一個迭代器[1]。假設 list 及其節點的結構如下：

```
// file: 3mylist.h
template <typename T>
class List
{
  void insert_front(T value);
  void insert_end(T value);
  void display(std::ostream &os = std::cout) const;
  // ...
private:
  ListItem<T>* _end;
  ListItem<T>* _front;
  long _size;
};

template <typename T>
class ListItem
{
public:
  T value() const { return _value; }
  ListItem* next() const { return _next; }
  ...
private:
  T _value;
  ListItem* _next;  // 單向串列（single linked list）
};
```

如何將這個 `List` 套用到先前所說的 `find()` 呢？我們需要爲它設計一個**行爲類似指標**的外衣，也就是一個迭代器。當我們提領（*dereference*）此一迭代器，傳回的應該是個 `ListItem` 物件；當我們累加該迭代器，它應該指向下一個 `ListItem` 物件。爲了讓此迭代器適用於任何型態的節點，而不只限於 `ListItem`，我們可以將它設計爲一個 class template：

[1] [Lippman98] 5.11 節有一個非泛型的 list 實例可以參考。《泛型思維》書中有一份泛型版本的 list 的完整設計與說明。

```
// file : 3mylist-iter.h
#include "3mylist.h"

template <class Item> // Item 可以是單向串列節點或雙向串列節點。
struct ListIter       // 此處這個迭代器特定只爲串列服務，因爲其
{                     // 獨特的 operator++ 之故。
  Item* ptr; // 保持與容器之間的一個聯繫（keep a reference to Container）

  ListIter(Item* p = 0)  // default ctor
    :  ptr(p) { }

  // 不必實作 copy ctor，因爲編譯器提供的預設行爲已足夠。
  // 不必實作 operator=，因爲編譯器提供的預設行爲已足夠。

  Item& operator*()  const { return *ptr; }
  Item* operator->() const { return  ptr; }

  // 以下兩個 operator++ 遵循標準作法，參見 [Meyers96] 條款 6
  // (1) pre-increment operator
  ListIter& operator++()
     { ptr =  ptr->next(); return *this; }

  // (2) post-increment operator
  ListIter  operator++(int)
     { ListIter tmp = *this; ++*this; return tmp; }

  bool operator==(const ListIter& i) const
    { return ptr == i.ptr; }
  bool operator!=(const ListIter& i) const
    { return ptr != i.ptr; }
};
```

現在我們可以這樣子將 List 和 find() 藉由 ListIter 黏合起來：

```
// 3mylist-iter-test.cpp
void main()
{
   List<int> mylist;

   for(int i=0; i<5; ++i) {
      mylist.insert_front(i);
      mylist.insert_end(i+2);
   }
   mylist.display();    // 10 ( 4 3 2 1 0 2 3 4 5 6 )

   ListIter<ListItem<int> > begin(mylist.front());
   ListIter<ListItem<int> > end;  // default 0, null
   ListIter<ListItem<int> > iter; // default 0, null
```

```
    iter = find(begin, end, 3);
    if (iter == end)
        cout << "not found" << endl;
    else
        cout << "found. " << iter->value() << endl;
    // 執行結果：found. 3

    iter = find(begin, end, 7);
    if (iter == end)
        cout << "not found" << endl;
    else
        cout << "found. " << iter->value() << endl;
    // 執行結果：not found
}
```

注意，由於 find() 函式內以 *iter != value 來檢查元素值是否吻合，而本例之中 value 的型別是 int，iter 的型別是 ListItem<int>，兩者之間並無可供使用的 operator!=，所以我必須另外寫一個全域的 operator!= 多載函式，並以 int 和 ListItem<int> 做爲它的兩個參數型別：

```
template <typename T>
bool operator!=(const ListItem<T>& item, T n)
{  return item.value() != n; }
```

從以上實作可以看出，爲了完成一個針對 List 而設計的迭代器，我們無可避免地曝露了太多 List 實作細節：在 main() 之中爲了製作 begin 和 end 兩個迭代器，我們曝露了 ListItem；在 ListIter class 之中爲了達成 operator++ 的目的，我們曝露了 ListItem 的操作函式 next()。如果不是爲了迭代器，ListItem 原本應該完全隱藏起來不曝光的。換句話說，要設計出 ListIter，首先必須對 List 的實作細節有非常豐富的瞭解。既然這無可避免，乾脆就把迭代器的開發工作交給 List 的設計者好了，如此一來所有實作細節反而得以封裝起來不被使用者看到。這正是爲什麼每一種 STL 容器都提供有專屬迭代器的緣故。

3.3 迭代器相應型別（associated types）

上述的 ListIter 提供了一個迭代器雛形。如果將思想拉得更高遠一些，我們便會發現，演算法之中運用迭代器時，很可能會用到其**相應型別**（associated type）。什麼是相應型別？迭代器所指之物的型別便是其一。假設演算法中有必要宣告一個變數，以「迭代器所指物件的型別」爲型別，如何是好？畢竟 C++ 只支援

sizeof()，並未支援 typeof()！即便動用 RTTI 性質中的 typeid()，獲得的也只是型別名稱，不能拿來做變數宣告之用。

解決辦法是有：利用 function template 的引數推導（argument deducation）機制。例如：

```
template <class I, class T>
void func_impl(I iter, T t)
{
  T tmp; // 這裡解決了問題。T 就是迭代器所指之物的型別，本例爲 int

  // ... 這裡做原本 func() 應該做的全部工作
};

template <class I>
inline
void func(I iter)
{
  func_impl(iter, *iter);  // func 的工作全部移往 func_impl
}

int main()
{
  int i;
  func(&i);
}
```

我們以 func()爲對外介面，卻把實際動作全部置於 func_impl() 之中。由於 func_impl() 是一個 function template，一旦被呼叫，編譯器會自動進行 template 引數推導。於是導出型別 T，順利解決了問題。

迭代器相應型別（associated types）不只是「迭代器所指物件的型別」一種而已。根據經驗，最常用的相應型別有五種，然而並非任何情況下任何一種都可利用上述的 template 引數推導機制來取得。我們需要更全面的解法。

3.4 Traits 編程技法 — STL 源碼門鑰

迭代器所指物件的型別，稱爲該迭代器的 *value type*。上述的引數型別推導技巧雖然可用於 *value type*，卻非全面可用：萬一 *value type* 必須用於函式的傳回值，就束手無策了，畢竟函式的「template 引數推導機制」推而導之的只是引數，無

法推導函式的回返值型別。

我們需要其他方法。宣告巢狀型別似乎是個好主意，像這樣：

```
template <class T>
struct MyIter
  typedef T value_type;  // 巢狀型別宣告（nested type）
  T* ptr;
  MyIter(T* p=0) : ptr(p) { }
  T& operator*() const { return *ptr; }
  // ...
};

template <class I>
typename I::value_type  // 這一整行是 func 的回返值型別
func(I ite)
{ return *ite; }

// ...
MyIter<int> ite(new int(8));
cout << func(ite);    // 輸出：8
```

注意，func() 的回返型別必須加上關鍵字 typename，因爲 T 是一個 template 參數，在它被編譯器具現化之前，編譯器對 T 一無所悉，換句話說編譯器此時並不知道 MyIter<T>::value_type 代表的是一個型別或是一個 member function 或是一個 data member。關鍵字 typename 的用意在告訴編譯器說這是一個型別，如此才能順利通過編譯。

看起來不錯。但是有個隱晦的陷阱：並不是所有迭代器都是 class type。原生指標就不是！如果不是 class type，就無法爲它定義巢狀型別。但 STL（以及整個泛型思維）絕對必須接受原生指標做爲一種迭代器，所以上面這樣還不夠。有沒有辦法可以讓上述的一般化概念針對特定情況（例如針對原生指標）做特殊化處理呢？

是的，template partial specialization 可以做到。

Partial Specialization（偏特化）的意義

任何完整的 C++ 語法書籍都應該對 template partial specialization 有所說明（如果沒有，扔了它☺）。大致的意義是：如果 class template 擁有一個以上的 template 參數，我們可以針對其中某個（或數個，但非全部）template 參數進行特化工作。

換句話說我們可以在泛化設計中提供一個特化版本（也就是將泛化版本中的某些 template 參數賦予明確的指定）。

假設有一個 class template 如下：

```
template<typename U, typename V, typename T>
class C { ... };
```

partial specialization 的字面意義容易誤導我們以爲，所謂「偏特化版」一定是對 template 參數 U 或 V 或 T（或某種組合）指定某個引數值。事實不然，**[Austern99]** 對於 partial specialization 的意義說得十分得體：「所謂 partial specialization 的意思是提供另一份 template 定義式，而其本身仍爲 templatized」。《泛型技術》一書對 partial specialization 的定義是：「針對（任何）template 參數更進一步的條件限制，所設計出來的一個特化版本」。由此，面對以下這麼一個 class template：

```
template<typename T>
class C { ... };      // 這個泛化版本允許（接受）T 爲任何型別
```

我們便很容易接受它有一個型式如下的 partial specialization：

```
template<typename T>
class C<T*> { ... };  // 這個特化版本僅適用於「T 爲原生指標」的情況
            // 「T 爲原生指標」便是「T 爲任何型別」的一個更進一步的條件限制
```

有了這項利器，我們便可以解決前述「巢狀型別」未能解決的問題。先前的問題是，原生指標並非 class，因此無法爲它們定義巢狀型別。現在，我們可以針對「迭代器之 template 引數爲指標」者，設計特化版的迭代器。

提高警覺，我們進入關鍵地帶了。下面這個 class template 專門用來「萃取」迭代器的特性，而 *value type* 正是迭代器的特性之一：

```
template <class I>
struct iterator_traits {   // traits 意爲「特性」
  typedef typename I::value_type   value_type;
};
```

這個所謂的 **traits**，其意義是，如果 I 定義有自己的 *value type*，那麼透過這個 **traits** 的作用，萃取出來的 value_type 就是 I::value_type。換句話說如果 I 定義有自己的 *value type*，先前那個 func() 可以改寫成這樣：

```
template <class I>
typename iterator_traits<I>::value_type  // 這一整行是函式回返型別
func(I ite)
{ return *ite; }
```

但這除了多一層間接性，又帶來什麼好處？好處是 **traits** 可以擁有特化版本。現在，我們令 `iterator_traites` 擁有一個 partial specializations 如下：

```
template <class T>
struct iterator_traits<T*> {  // 偏特化版 — 迭代器是個原生指標
  typedef T value_type;
};
```

於是，原生指標 `int*` 雖然不是一種 class type，亦可透過 **traits** 取其 *value type*。這就解決了先前的問題。

但是請注意，針對「指向常數物件的指標（pointer-to-const）」，下面這個式子得到什麼結果：

```
iterator_traits<const int*>::value_type
```

獲得的是 `const int` 而非 `int`。這是我們期望的嗎？我們希望利用這種機制來宣告一個暫時變數，使其型別與迭代器的 *value type* 相同，而現在，宣告一個無法賦值（因 `const` 之故）的暫時變數，沒什麼用！因此，如果迭代器是個 pointer-to-const，我們應該設法令其 *value type* 爲一個 non-const 型別。沒問題，只要另外設計一個特化版本，就能解決這個問題：

```
template <class T>
struct iterator_traits<const T*> { // 偏特化版 — 當迭代器是個 pointer-to-const
  typedef T value_type;            // 萃取出來的型別應該是 T 而非 const T
};
```

現在，不論面對的是迭代器 `MyIter`，或是原生指標 `int*` 或 `const int*`，都可以透過 **traits** 取出正確的（我們所期望的）*value type*。

圖 3-1 說明 **traits** 所扮演的「特性萃取機」角色，萃取各個迭代器的特性。這裡所謂的迭代器特性，指的是迭代器的相應型別（associated types）。當然，若要這個「特性萃取機」**traits** 能夠有效運作，每一個迭代器必須遵循約定，自行以巢狀型別定義（nested typedef）的方式定義出相應型別（associated types）。這種一個約定，誰不遵守這個約定，誰就不能相容於 STL 這個大家庭。

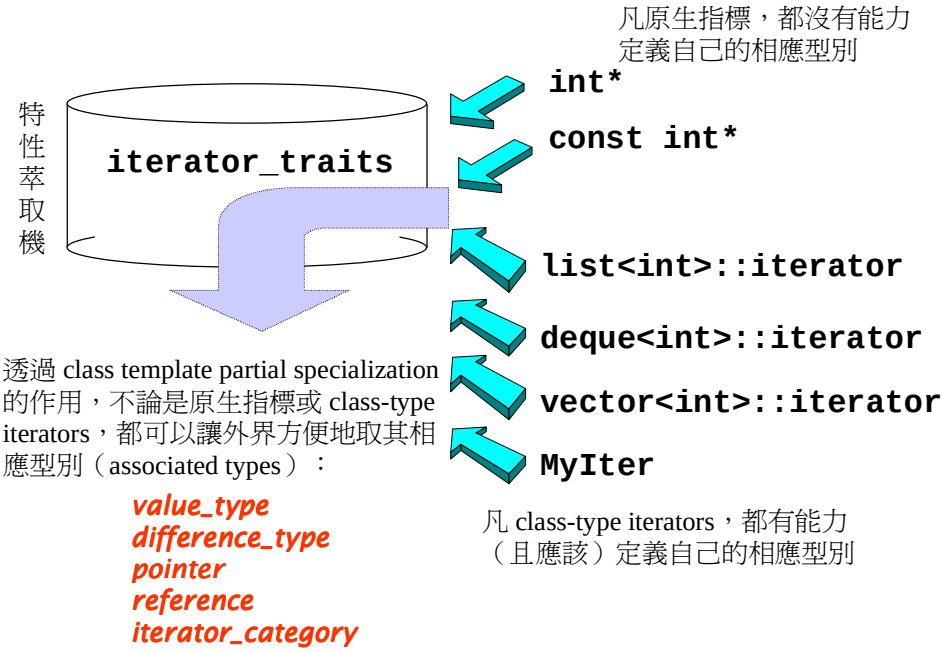


圖 3-1 **traits** 就像一台「特性萃取機」，擰取各個迭代器的特性（相應型別）。

根據經驗，最常用到的迭代器相應型別有五種：*value type*, *difference type*, *pointer*, *reference*, *iterator catagoly*。如果你希望你所開發的容器能與 STL 水乳交融，一定要爲你的容器的迭代器定義這五種相應型別。「特性萃取機」**traits** 會很忠實地將原汁原味擰取出來：

```
template <class I>
struct iterator_traits {
  typedef typename I::iterator_category  iterator_category;
  typedef typename I::value_type         value_type;
  typedef typename I::difference_type    difference_type;
  typedef typename I::pointer            pointer;
  typedef typename I::reference          reference;
};
```

`iterator_traits` 必須針對傳入之型別爲 pointer 及 pointer-to-const 者，設計特化版本，稍後數節爲你展示如何進行。

3.4.1 迭代器相應型別之一：*value type*

所謂 *value type*，是指迭代器所指物件的型別。任何一個打算與 STL 演算法有完美搭配的 class，都應該定義自己的 *value type* 巢狀型別，作法就像上節所述。

3.4.2 迭代器相應型別之二：*difference type*

difference type 用來表示兩個迭代器之間的距離，也因此，它可以用來表示一個容器的最大容量，因爲對於連續空間的容器而言，頭尾之間的距離就是其最大容量。如果一個泛型演算法提供計數功能，例如 STL 的 `count()`，其傳回值就必須使用迭代器的 *difference type*：

```
template <class I, class T>
typename iterator_traits<I>::difference_type // 這一整行是函式回返型別
count(I first, I last, const T& value) {
  typename iterator_traits<I>::difference_type n = 0;
  for ( ; first != last; ++first)
    if (*first == value)
      ++n;
  return n;
}
```

針對相應型別 *difference type*，**traits** 的兩個（針對原生指標而寫的）特化版本如下，以 C++ 內建的 `ptrdiff_t`（定義於 `<cstddef>` 表頭檔）做爲原生指標的 *difference type*：

```
template <class I>
struct iterator_traits {
  ...
  typedef typename I::difference_type  difference_type;
};

// 針對原生指標而設計的「偏特化（partial specialization）」版
template <class T>
struct iterator_traits<T*> {
  ...
  typedef ptrdiff_t   difference_type;
};

// 針對原生的 pointer-to-const 而設計的「偏特化（partial specialization）」版
template <class T>
struct iterator_traits<const T*> {
  ...
```

```
  typedef ptrdiff_t   difference_type;
};
```

現在，任何時候當我們需要任何迭代器 I 的 *difference type* ，可以這麼寫：

```
typename iterator_traits<I>::difference_type
```

3.4.3 迭代器相應型別之三：*reference type*

從「迭代器所指之物的內容是否允許改變」的角度觀之，迭代器分爲兩種：不允許改變「所指物件之內容」者，稱爲 constant iterators，例如 `const int* pic`；允許改變「所指物件之內容」者，稱爲 mutable iterators，例如 `int* pi`。當我們對一個 mutable iterators 做提領動作時，獲得的不應該是個右值（rvalue），應該是個左值（lvalue），因爲右值不允許賦值動作（assignment），左值才允許：

```
int* pi = new int(5);
const int* pci = new int(9);
*pi = 7;   // 對 mutable iterator 做提領動作時，獲得的應該是個左值，允許賦值。
*pci = 1;  // 這個動作不允許，因爲 pci 是個 constant iterator，
           // 提領 pci 所得結果，是個右值，不允許被賦值。
```

在 C++ 中，函式如果要傳回左值，都是以 by reference 的方式進行，所以當 `p` 是個 mutable iterators 時，如果其 *value type* 是 `T`，那麼 `*p` 的型別不應該是 `T`，應該是 `T&`。將此道理擴充，如果 `p` 是一個 constant iterators，其 *value type* 是 `T`，那麼 `*p` 的型別不應該是 `const T`，而應該是 `const T&`。這裡所討論的 `*p` 的型別，即所謂的 *reference type*。實作細節將在下一小節一併展示。

3.4.4 迭代器相應型別之四：*pointer type*

pointers 和 references 在 C++ 中有非常密切的關連。如果「傳回一個左值，令它代表 `p` 所指之物」是可能的，那麼「傳回一個左值，令它代表 `p` 所指之物的位址」也一定可以。也就是說我們能夠傳回一個 pointer，指向迭代器所指之物。

這些相應型別已在先前的 `ListIter` class 中出現過：

```
Item& operator*()  const { return *ptr; }
Item* operator->() const { return  ptr; }
```

`Item&` 便是 `ListIter` 的 *reference type* 而 `Item*` 便是其 *pointer type*。

現在我們把 *reference type* 和 *pointer type* 這兩個相應型別加入 **traits** 內：

```
template <class I>
struct iterator_traits {
  ...
  typedef typename I::pointer         pointer;
  typedef typename I::reference       reference;
};

// 針對原生指標而設計的「偏特化版（partial specialization）」
template <class T>
struct iterator_traits<T*> {
  ...
  typedef T*      pointer;
  typedef T&      reference;
};

// 針對原生的 pointer-to-const 而設計的「偏特化版（partial specialization）」
template <class T>
struct iterator_traits<const T*> {
  ...
  typedef const T*    pointer;
  typedef const T&    reference;
};
```

3.4.5 迭代器相應型別之三：*iterator_category*

最後一個（第五個）迭代器相應型別會引發較大規模的寫碼工程。在那之前，我必須先討論迭代器的分類。

根據移動特性與施行動作，迭代器被分爲五類：

- *Input Iterator*：這種迭代器所指物件，不允許外界改變。唯讀（read only）。
- *Output Iterator*：唯寫（write only）。
- *Forward Iterator*：允許「寫入型」演算法（例如 `replace()`）在此種迭代器所形成的區間上做讀寫動作。
- *Bidirectional Iterator*：可雙向移動。某些演算法需要逆向走訪某個迭代器區間（例如逆向拷貝某範圍內的元素），就可以使用 *Bidirectional Iterator*s。
- *Random Access Iterator*：前四種迭代器都只供應一部份指標算術能力（前三種支援 `operator++`，第四種再加上 `operator--`），第五種則涵蓋所有指標算術能力，包括 `p+n, p-n, p[n], p1-p2, p1<p2`。

這些迭代器的分類與從屬關係，可以圖 3-2 表示。直線與箭頭代表的並非 C++ 的繼承關係，而是所謂 concept（概念）與 refinement（強化）的關係[2]。

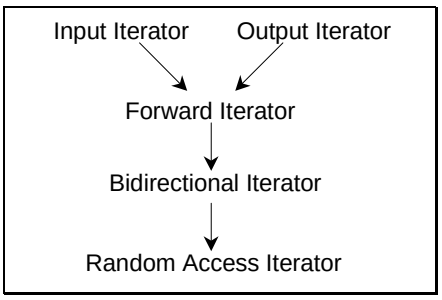


圖 3-2 迭代器的分類與從屬關係

設計演算法時，如果可能，我們儘量針對圖 3-2 中的某種迭代器提供一個明確定義，並針對更強化的某種迭代器提供另一種定義，這樣才能在不同情況下提供最大效率。研究 STL 的過程中，每一分每一秒我們都要念茲在茲，效率是個重要課題。假設有個演算法可接受 *Forward Iterator*，你以 *Random Access Iterator* 餵給它，它當然也會接受，因爲一個 *Random Access Iterator* 必然是一個 *Forward Iterator*（見圖 3-2）。但是可用並不代表最佳！

以 advanced() 爲例

拿 `advance()` 來說（這是許多演算法內部常用的一個函式），此函式有兩個參數，迭代器 `p` 和數值 `n`；函式內部將 `p` 累進 `n` 次（前進 `n` 距離）。下面有三份定義，一份針對 *Input Iterator*，一份針對 *Bidirectional Iterator*，另一份針對 *Random Access Iterator*。倒是沒有針對 *ForwardIterator* 而設計的版本，因爲那和針對 *InputIterator* 而設計的版本完全一致。

```
template <class InputIterator, class Distance>
void advance_II(InputIterator& i, Distance n)
{
  // 單向，逐一前進
  while (n--) ++i;          // 或寫 for ( ; n > 0; --n, ++i );
```

[2] concept（概念）與 refinement（強化），是架構 STL 的重要觀念，詳見 [Austern98]。

```
}

template <class BidirectionalIterator, class Distance>
void advance_BI(BidirectionalIterator& i, Distance n)
{
  // 雙向，逐一前進
  if (n >= 0)
      while (n--) ++i;      // 或寫 for ( ; n > 0; --n, ++i );
  else
      while (n++) --i;      // 或寫 for ( ; n < 0; ++n, --i );
}

template <class RandomAccessIterator, class Distance>
void advance_RAI(RandomAccessIterator& i, Distance n)
{
  // 雙向，跳躍前進
  i += n;
}
```

現在，當程式呼叫 advance()，應該選用（呼叫）哪一份函式定義呢？如果選擇 advance_II()，對 *Random Access Iterator* 而言極度缺乏效率，原本 *O(1)* 的操作竟成爲 *O(N)*。如果選擇 advance_RAI()，則它無法接受 *Input Iterator*。我們需要將三者合一，下面是一種作法：

```
template <class InputIterator, class Distance>
void advance(InputIterator& i, Distance n)
{
  if (is_random_access_iterator(i))       // 此函式有待設計
    advance_RAI(i, n);
  else if (is_bidirectional_iterator(i)) // 此函式有待設計
    advance_BI(i, n);
  else
    advance_II(i, n);
}
```

但是像這樣在執行時期才決定使用哪一個版本，會影響程式效率。最好能夠在編譯期就選擇正確的版本。多載化函式機制可以達成這個目標。

前述三個 advance_xx() 都有兩個函式參數，型別都未定（因爲都是 template 參數）。爲了令其同名，形成多載化函式，我們必須加上一個型別已確定的函式參數，使函式多載化機制得以有效運作起來。

設計考量如下：如果 **traits** 有能力萃取出迭代器的種類，我們便可利用這個「迭代器類型」相應型別做爲 advanced() 的第三參數。這個相應型別一定必須是個

class type，不能只是數值號碼類的東西，因爲編譯器需仰賴它（一個型別）來進行多載化決議程序（overloaded resolution）。下面定義五個 classes，代表五種迭代器類型：

```
// 五個 做爲標記用的型別（tag types）
struct input_iterator_tag { };
struct output_iterator_tag { };
struct forward_iterator_tag : public input_iterator_tag { };
struct bidirectional_iterator_tag : public forward_iterator_tag { };
struct random_access_iterator_tag : public bidirectional_iterator_tag { };
```

這些 classes 只做爲標記用，所以不需要任何成員。至於爲什麼運用繼承機制，稍後再解釋。現在重新設計 __advance()（由於只在內部使用，所以函式名稱加上特定的前置字元），並加上第三參數，使它們形成多載化：

```
template <class InputIterator, class Distance>
inline void __advance(InputIterator& i, Distance n,
                      input_iterator_tag)
{
  // 單向，逐一前進
  while (n--) ++i;
}

// 這是一個單純的轉呼叫函式（trivial forwarding function）。稍後討論如何免除之。
template <class ForwardIterator, class Distance>
inline void __advance(ForwardIterator& i, Distance n,
                      forward_iterator_tag)
{
  // 單純地進行轉呼叫（forwarding）
  advance(i, n, input_iterator_tag());
}

template <class BidiectionalIterator, class Distance>
inline void __advance(BidiectionalIterator& i, Distance n,
                      bidirectional_iterator_tag)
{
  // 雙向，逐一前進
  if (n >= 0)
     while (n--) ++i;
  else
     while (n++) --i;
}

template <class RandomAccessIterator, class Distance>
inline void __advance(RandomAccessIterator& i, Distance n,
                      random_access_iterator_tag)
```

```
{
  // 雙向，跳躍前進
  i += n;
}
```

注意上述語法，每個 __advance() 的最後一個參數都只宣告型別，並未指定參數名稱，因爲它純粹只是用來啓動多載化機制，函式之中根本不使用該參數。如果硬要加上參數名稱也可以，畫蛇添足罷了。

行進至此，還需要一個對外開放的上層控制介面，呼叫上述各個多載化的 __advance()。此一上層介面只需兩個參數，當它準備將工作轉給上述的 __advance() 時，才自行加上第三引數：迭代器類型。因此，這個上層函式必須有能力從它所獲得的迭代器中推導出其類型 — 這份工作自然是交給 **traits** 機制：

```
template <class InputIterator, class Distance>
inline void advance(InputIterator& i, Distance n)
{
  __advance(i, n,
            iterator_traits<InputIterator>::iterator_category());[3]
}
```

注意上述語法，iterator_traits<Iterator>::iterator_category() 將產生一個暫時物件（道理就像 int() 會產生一個 int 暫時物件一樣），其型別應該隸屬前述五個迭代器類型之一。然後，根據這個型別，編譯器才決定呼叫哪一個 __advance() 多載函式。

---

[3] 關於此行，SGI STL <stl_iterator.h> 的源碼是：

```
  __advance(i, n, iterator_category(i));
```

並另定義函式 iterator_category() 如下：

```
template <class I>
inline typename iterator_traits<I>::iterator_category
iterator_category(const I&) {
  typedef typename iterator_traits<I>::iterator_category category;
  return category();
}
```

綜合整理後原式即爲：

```
__advance(i, n,
          iterator_traits<InputIterator>::iterator_category());
```

因此，爲了滿足上述行爲，**traits** 必須再增加一個相應型別：

```
template <class I>
struct iterator_traits {
  ...
  typedef typename I::iterator_category  iterator_category;
};

// 針對原生指標而設計的「偏特化版（partial specialization）」
template <class T>
struct iterator_traits<T*> {
  ...
  // 注意，原生指標是一種 Random Access Iterator
  typedef random_access_iterator_tag  iterator_category;
};

// 針對原生的 pointer-to-const 而設計的「偏特化版（partial specialization）」
template <class T>
struct iterator_traits<const T*>
  ...
  // 注意，原生的 pointer-to-const 是一種 Random Access Iterator
  typedef random_access_iterator_tag  iterator_category;
};
```

任何一個迭代器，其類型永遠應該落在「該迭代器所隸屬之各種類型中，最強化的那個」。例如 `int*` 既是 *Random Access Iterator* 又是 *Bidirectional Iterator*，同時也是 *Forward Iterator*，而且也是 *Input Iterator*，那麼，其類型應該歸屬爲 *random_access_iterator_tag*。

你是否注意到 `advance()` 的 template 參數名稱取得好像不怎麼理想：

```
template <class InputIterator, class Distance>
inline void advance(InputIterator& i, Distance n);
```

按說 `advanced()` 既然可以接受各種類型的迭代器，就不應將其型別參數命名爲 `InputIterator`。這其實是 STL 演算法的一個命名規則：以演算法所能接受之最低階迭代器類型，來爲其迭代器型別參數命名。

淮除「單純轉呼叫函式」

以 class 來定義迭代器的各種分類標籤，不唯可以促成多載化機制的成功運作（使編譯器得以正確執行多載化決議程序，overloaded resolution），另一個好處是，

透過繼承，我們可以不必再寫「單純只做轉呼叫」的函式（例如前述的 advance() *ForwardIterator* 版）。爲什麼能夠如此？考慮下面這個小例子，從其輸出結果可以看出端倪：

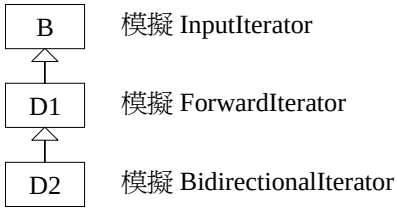


圖 3-3 類別繼承關係

```
// file: 3tag-test.cpp
// 模擬測試 tag types 繼承關係所帶來的影響。
#include <iostream>
using namespace std;

struct B { };                   // B  可比擬爲 InputIterator
struct D1 : public B { };       // D1 可比擬爲 ForwardIterator
struct D2 : public D1 { };      // D2 可比擬爲 BidirectionalIterator

template <class I>
func(I& p, B)
{   cout << "B version" << endl;  }

template <class I>
func(I& p, D2)
{   cout << "D2 version" << endl;  }

int main()
{
  int* p;
  func(p, B());   // 參數與引數完全吻合。輸出: "B version"
  func(p, D1());  // 參數與引數未能完全吻合；因繼承關係而自動轉呼叫。
                  // 輸出:"B version"
  func(p, D2());  // 參數與引數完全吻合。輸出: "D2 version"
}
```

以 distance() 爲例

關於「迭代器類型標籤」的應用，以下再舉一例。distance() 也是常用的一個

迭代器操作函式，用來計算兩個迭代器之間的距離。針對不同的迭代器類型，它可以有不同的計算方式，帶來不同的效率。整個設計模式和前述的 advance() 如出一轍：

```
template <class InputIterator>
inline iterator_traits<InputIterator>::difference_type
__distance(InputIterator first, InputIterator last,
           input_iterator_tag) {
  iterator_traits<InputIterator>::difference_type n = 0;
  // 逐一累計距離
  while (first != last) {
    ++first; ++n;
  }
  return n;
}

template <class RandomAccessIterator>
inline iterator_traits<RandomAccessIterator>::difference_type
__distance(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last,
           random_access_iterator_tag) {
  // 直接計算差距
  return last - first;
}

template <class InputIterator>
inline iterator_traits<InputIterator>::difference_type
distance(InputIterator first, InputIterator last) {
  typedef typename iterator_traits<InputIterator>::iterator_category category;
  return __distance(first, last, category());
}
```

注意，distance() 可接受任何類型的迭代器；其 template 型別參數之所以命名爲 InputIterator，是爲了遵循 STL 演算法的命名規則：以演算法所能接受之最初級類型來爲其迭代器型別參數命名。此外也請注意，由於迭代器類型之間存在著繼承關係，「轉呼叫（*forwarding*）」的行爲模式因此自然存在 — 這一點我已在前一節討論過。換句話說，當客端呼叫 distance() 並使用 *Output Iterator*s 或 *Forward Iterator*s 或 *Bidirectional Iterator*s，統統都會轉呼叫 *Input Iterator* 版的那個 __distance() 函式。

3.5 std::iterator 的保證

爲了符合規範，任何迭代器都應該提供五個巢狀相應型別，以利 **traits** 萃取，否

則便是自外於整個 STL 架構，可能無法與其他 STL 組件順利搭配。然而寫碼難免掛一漏萬，誰也不能保證不會有粗心大意的時候。如果能夠將事情簡化，就好多了。STL 提供了一個 `iterators` class 如下，如果每個新設計的迭代器都繼承自它，就保證符合 STL 所需之規範：

```
template <class Category,
          class T,
          class Distance = ptrdiff_t,
          class Pointer = T*,
          class Reference = T&>
struct iterator {
  typedef Category    iterator_category;
  typedef T           value_type;
  typedef Distance    difference_type;
  typedef Pointer     pointer;
  typedef Reference   reference;
};
```

`iterator` class 不含任何成員，純粹只是型別定義，所以繼承它並不會招致任何額外負擔。由於後三個參數皆有預設值，新的迭代器只需提供前兩個參數即可。先前 3.2 節土法煉鋼的 `ListIter`，如果改用正式規格，應該這麼寫：

```
template <class Item>
struct ListIter :
    public std::iterator<std::forward_iterator_tag, Item>
{ ... }
```

總結

設計適當的相應型別（associated types），是迭代器的責任。設計適當的迭代器，則是容器的責任。唯容器本身，才知道該設計出怎樣的迭代器來走訪自己，並執行迭代器該有的各種行爲（前進、後退、取值、取用成員…）。至於演算法，完全可以獨立於容器和迭代器之外自行發展，只要設計時以迭代器爲對外介面就行。

traits 編程技法，大量運用於 STL 實作品中。它利用「巢狀型別」的寫碼技巧與編譯器的 template 引數推導功能，補強 C++ 未能提供的關於型別認證方面的能力，補強 C++ 不爲強型（strong typed）語言的遺憾。瞭解 **traits** 編程技法，就像獲得「芝麻開門」口訣一樣，從此得以一窺 STL 源碼堂奧。

3.6 iterator 原碼完整重列

由於討論次序的緣故，先前所列的源碼切割散落，有點凌亂。以下重新列出 SGI STL `<stl_iterator.h>` 表頭檔內與本章相關的程式碼。該表頭檔還有其他內容，是關於 iostream iterators、inserter iterators 以及 reverse iterators 的實作，將於第 8 章討論。

```
// 節錄自 SGI STL <stl_iterator.h>
// 五種迭代器類型
struct input_iterator_tag {};
struct output_iterator_tag {};
struct forward_iterator_tag : public input_iterator_tag {};
struct bidirectional_iterator_tag : public forward_iterator_tag {};
struct random_access_iterator_tag : public bidirectional_iterator_tag {};

// 爲避免寫碼時掛一漏萬，自行開發的迭代器最好繼承自下面這個 std::iterator
template <class Category, class T, class Distance = ptrdiff_t,
          class Pointer = T*, class Reference = T&>
struct iterator {
  typedef Category    iterator_category;
  typedef T           value_type;
  typedef Distance    difference_type;
  typedef Pointer     pointer;
  typedef Reference   reference;
};

// 「榨汁機」traits
template <class Iterator>
struct iterator_traits {
  typedef typename Iterator::iterator_category iterator_category;
  typedef typename Iterator::value_type       value_type;
  typedef typename Iterator::difference_type  difference_type;
  typedef typename Iterator::pointer          pointer;
  typedef typename Iterator::reference        reference;
};

// 針對原生指標（native pointer）而設計的 traits 偏特化版。
template <class T>
struct iterator_traits<T*> {
  typedef random_access_iterator_tag     iterator_category;
  typedef T                              value_type;
  typedef ptrdiff_t                      difference_type;
  typedef T*                             pointer;
  typedef T&                             reference;
};
```

```
// 針對原生之 pointer-to-const 而設計的 traits 偏特化版。
template <class T>
struct iterator_traits<const T*> {
  typedef random_access_iterator_tag     iterator_category;
  typedef T                              value_type;
  typedef ptrdiff_t                      difference_type;
  typedef const T*                       pointer;
  typedef const T&                       reference;
};

// 這個函式可以很方便地決定某個迭代器的類型（category）
template <class Iterator>
inline typename iterator_traits<Iterator>::iterator_category
iterator_category(const Iterator&) {
  typedef typename iterator_traits<Iterator>::iterator_category category;
  return category();
}

// 這個函式可以很方便地決定某個迭代器的 distance type
template <class Iterator>
inline typename iterator_traits<Iterator>::difference_type*
distance_type(const Iterator&) {
  return static_cast<typename iterator_traits<Iterator>::difference_type*>(0);
}

// 這個函式可以很方便地決定某個迭代器的 value type
template <class Iterator>
inline typename iterator_traits<Iterator>::value_type*
value_type(const Iterator&) {
  return static_cast<typename iterator_traits<Iterator>::value_type*>(0);
}

// 以下是整組 distance 函式
template <class InputIterator>
inline iterator_traits<InputIterator>::difference_type
__distance(InputIterator first, InputIterator last,
           input_iterator_tag) {
  iterator_traits<InputIterator>::difference_type n = 0;
  while (first != last) {
    ++first; ++n;
  }
  return n;
}

template <class RandomAccessIterator>
inline iterator_traits<RandomAccessIterator>::difference_type
__distance(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last,
           random_access_iterator_tag) {
  return last - first;
```

```
}

template <class InputIterator>
inline iterator_traits<InputIterator>::difference_type
distance(InputIterator first, InputIterator last) {
  typedef typename
      iterator_traits<InputIterator>::iterator_category category;
  return __distance(first, last, category());
}

// 以下是整組 advance 函式
template <class InputIterator, class Distance>
inline void __advance(InputIterator& i, Distance n,
                      input_iterator_tag) {
  while (n--) ++i;
}

template <class BidirectionalIterator, class Distance>
inline void __advance(BidirectionalIterator& i, Distance n,
                      bidirectional_iterator_tag) {
  if (n >= 0)
    while (n--) ++i;
  else
    while (n++) --i;
}

template <class RandomAccessIterator, class Distance>
inline void __advance(RandomAccessIterator& i, Distance n,
                      random_access_iterator_tag) {
  i += n;
}

template <class InputIterator, class Distance>
inline void advance(InputIterator& i, Distance n) {
  __advance(i, n, iterator_category(i));
}
```

3.7 SGI STL 的私房菜：__type_traits

traits 編程技法很棒，適度彌補了 C++ 語言本身的不足。STL 只對迭代器加以規範，制定出 `iterator_traits` 這樣的東西。SGI 把這種技法進一步擴大到迭代器以外的世界，於是有了所謂的 `__type_traits`。雙底線前綴詞意指這是 SGI STL 內部所用的東西，不在 STL 標準規範之內。

`iterator_traits` 負責萃取迭代器的特性，`__type_traits` 則負責萃取型別

（type）的特性。此處我們所關注的型別特性是指：這個型別是否具備 non-trivial defalt ctor？是否具備 non-trivial copy ctor？是否具備 non-trivial assignment operator？是否具備 non-trivial dtor？如果答案是否定的，我們在對這個型別進行建構、解構、拷貝、賦值等動作時，就可以採用最有效率的措施（例如根本不喚起尸位素餐的那些 constructor, destructor），而採用記憶體直接處理動作如 `malloc()`、`memcpy()` 等等，獲得最高效率。這對於大規模而動作頻繁的容器，有著顯著的效率提昇[4]。

定義於 SGI `<type_traits.h>` 中的 `__type_traits`，提供了一種機制，允許針對不同的型別屬性（type attributes），在編譯時期完成函式派送決定（function dispatch）。這對於撰寫 template 很有幫助，例如，當我們準備對一個「元素型別未知」的陣列執行 copy 動作時，如果我們能事先知道其元素型別是否有一個 trivial copy constructor，便能夠幫助我們決定是否可使用快速的 `memcpy()` 或 `memmove()`。

從 `iterator_traits` 得來的經驗，我們希望，程式之中可以這樣運用 `__type_traits<T>`，`T` 代表任意型別：

```
__type_traits<T>::has_trivial_default_constructor
__type_traits<T>::has_trivial_copy_constructor
__type_traits<T>::has_trivial_assignment_operator
__type_traits<T>::has_trivial_destructor
__type_traits<T>::is_POD_type       // POD : Plain Old Data
```

我們希望上述式子回應我們「真」或「假」（以便我們決定採取什麼策略），但其結果不應該只是個 `bool` 值，應該是個有著真/假性質的「物件」，因爲我們希望利用其回應結果來進行引數推導，而編譯器只有面對 class object 形式的引數，才會做引數推導。爲此，上述式子應該傳回這樣的東西：

```
struct __true_type { };
struct __false_type { };
```

這兩個空白 classes 沒有任何成員，不會帶來額外負擔，卻又能夠標示真假，滿足我們所需。

[4] *C++ Type Traits*, by John Maddock and Steve Cleary, DDJ 2000/10 提了一些測試數據。

爲了達成上述五個式子，__type_traits 內必須定義一些 typedefs，其值不是 __true_type 就是 __false_type。下面是 SGI 的作法：

```
template <class type>
struct __type_traits
   typedef __true_type     this_dummy_member_must_be_first;
           /* 不要移除這個成員。它通知「有能力自動將 __type_traits 特化」
           的編譯器說，我們現在所看到的這個 __type_traits template 是特
           殊的。這是爲了確保萬一編譯器也使用一個名爲 __type_traits 而其
           實與此處定義並無任何關聯的 template 時，所有事情都仍將順利運作。
           */

   /* 以下條件應被遵守，因爲編譯器有可能自動爲各型別產生專屬的 __type_traits
      特化版本：
          - 你可以重新排列以下的成員次序
          - 你可以移除以下任何成員
          - 絕對不可以將以下成員重新命名而卻沒有改變編譯器中的對應名稱
          - 新加入的成員會被視爲一般成員，除非你在編譯器中加上適當支援。*/

   typedef __false_type    has_trivial_default_constructor;
   typedef __false_type    has_trivial_copy_constructor;
   typedef __false_type    has_trivial_assignment_operator;
   typedef __false_type    has_trivial_destructor;
   typedef __false_type    is_POD_type;
};
```

爲什麼 SGI 把所有巢狀型別都定義爲 __false _type 呢？是的，SGI 定義出最保守的值，然後（稍後可見）再針對每一個純量型別（scalar types）設計適當的 __type_traits 特化版本，這樣就解決了問題。

上述 __type_traits 可以接受任何型別的引數，五個 typedefs 將經由以下管道獲得實值：

- 一般具現體（general instantiation），內含對所有型別都必定有效的保守值。上述各個 has_trivial_xxx 型別都被定義爲 __false_type，就是對所有型別都必定有效的保守值。
- 經過宣告的特化版本，例如 <type_traits.h> 內對所有 C++ 純量型別（scalar types）提供了對映的特化宣告。稍後展示。
- 某些編譯器（如 Silicon Graphics N32 和 N64 編譯器）會自動爲所有型別提供適當的特化版本。（這真是了不起的技術。不過我對其精確程度存疑）

以下便是 <type_traits.h> 對所有 C++ 純量型別所定義的 __type_traits 特化版本。這些定義對於內建有 __types_traits 支援能力的編譯器（例如 Silicon Graphics N32 和 N64）並無傷害，對於無該等支援能力的編譯器而言，則屬必要。

```
/* 以下針對 C++ 基本型別 char, signed char, unsigned char, short,
unsigned short, int, unsigned int, long, unsigned long, float, double,
long double 提供特化版本。注意，每一個成員的值都是 __true_type，表示這些
型別都可採用最快速方式（例如 memcpy）來進行拷貝（copy）或賦值（assign）動
作。*/

// 注意，SGI STL <stl_config.h> 將以下出現的 __STL_TEMPLATE_NULL
// 定義爲 template<>，見 1.9.1 節，是所謂的
// class template explicit specialization

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<char> {
  typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
  typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
  typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
  typedef __true_type    has_trivial_destructor;
  typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<signed char> {
  typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
  typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
  typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
  typedef __true_type    has_trivial_destructor;
  typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<unsigned char> {
  typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
  typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
  typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
  typedef __true_type    has_trivial_destructor;
  typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<short> {
  typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
  typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
  typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
  typedef __true_type    has_trivial_destructor;
  typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<unsigned short> {
  typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
```

```
    typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
    typedef __true_type    has_trivial_destructor;
    typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<int> {
    typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
    typedef __true_type    has_trivial_destructor;
    typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<unsigned int> {
    typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
    typedef __true_type    has_trivial_destructor;
    typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<long> {
    typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
    typedef __true_type    has_trivial_destructor;
    typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<unsigned long> {
    typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
    typedef __true_type    has_trivial_destructor;
    typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<float> {
    typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
    typedef __true_type    has_trivial_destructor;
    typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<double> {
    typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
```

```
    typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
    typedef __true_type    has_trivial_destructor;
    typedef __true_type    is_POD_type;
};

__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<long double> {
    typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
    typedef __true_type    has_trivial_destructor;
    typedef __true_type    is_POD_type;
};

// 注意，以下針對原生指標設計 __type_traits 偏特化版本。
// 原生指標亦被視爲一種純量型別。
template <class T>
struct __type_traits<T*> {
    typedef __true_type    has_trivial_default_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
    typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
    typedef __true_type    has_trivial_destructor;
    typedef __true_type    is_POD_type;
};
```

__types_traits 在 SGI STL 中的應用很廣。下面我舉幾個實例。第一個例子是出現於本書 2.3.3 節的 uninitialized_fill_n() 全域函式：

```
template <class ForwardIterator, class Size, class T>
inline ForwardIterator uninitialized_fill_n(ForwardIterator first,
                                            Size n, const T& x) {
  return __uninitialized_fill_n(first, n, x, value_type(first));
}
```

此函式以 x 爲藍本，自迭代器 first 開始建構 n 個元素。爲求取最大效率，首先以 value_type()（3.6 節）萃取出迭代器 first 的 *value type*，再利用 __type_traits 判斷該型別是否爲 POD 型別：

```
template <class ForwardIterator, class Size, class T, class T1>
inline ForwardIterator __uninitialized_fill_n(ForwardIterator first,
                                              Size n, const T& x, T1*)
{
  typedef typename __type_traits<T1>::is_POD_type is_POD;
  return __uninitialized_fill_n_aux(first, n, x, is_POD());
}
```

以下就「是否爲 POD 型別」採取最適當的措施：

```
// 如果不是 POD 型別，就會派送（dispatch）到這裡
template <class ForwardIterator, class Size, class T>
ForwardIterator
__uninitialized_fill_n_aux(ForwardIterator first, Size n,
                           const T& x, __false_type) {
  ForwardIterator cur = first;
    // 爲求閱讀順暢簡化，以下將原本有的異常處理（exception handling）去除。
    for ( ; n > 0; --n, ++cur)
       construct(&*cur, x);     // 見 2.2.3 節
    return cur;
}

// 如果是 POD 型別，就會派送（dispatch）到這裡。下兩行是原檔所附註解。
// 如果 copy construction 等同於 assignment，而且有 trivial destructor，
// 以下就有效。
template <class ForwardIterator, class Size, class T>
inline ForwardIterator
__uninitialized_fill_n_aux(ForwardIterator first, Size n,
                           const T& x, __true_type) {
  return fill_n(first, n, x);   // 交由高階函式執行，如下所示。
}

// 以下是定義於 <stl_algobase.h> 中的 fill_n()
template <class OutputIterator, class Size, class T>
OutputIterator fill_n(OutputIterator first, Size n, const T& value) {
  for ( ; n > 0; --n, ++first)
    *first = value;
  return first;
}
```

第二個例子是負責物件解構的 `destroy()` 全域函式。此函式之源碼及解說在 2.2.3 節有完整的說明。

第三個例子是出現於本書第 6 章的 `copy()` 全域函式（泛型演算法之一）。這個函式有非常多的特化（specialization）與強化（refinement）版本，殫精竭慮，全都是爲了效率考慮，希望在適當的情況下採用最「雷霆萬鈞」的手段。最基本的想法是這樣：

```
// 拷貝一個陣列，其元素爲任意型別，視情況採用最有效率的拷貝手段。
template <class T> inline void copy(T* source,T* destination,int n) {
   copy(source,destination,n,
        typename __type_traits<T>::has_trivial_copy_constructor());
}

// 拷貝一個陣列，其元素型別擁有 non-trivial copy constructors。
```

```
template <class T> void copy(T* source,T* destination,int n,
                             __false_type)
{  ... }

// 拷貝一個陣列，其元素型別擁有 trivial copy constructors。
// 可借助 memcpy() 完成工作
template <class T> void copy(T* source,T* destination,int n,
                             __true_type)
{  ... }
```

以上只是針對「函式參數爲原生指標」的情況而做的設計。第 6 章的 copy() 演算法是個泛型版本，情況又複雜許多。詳見 6.4.3 節。

請注意，<type_traits.h> 並未像其他許多 SGI STL 表頭檔有這樣的聲明：

```
/* NOTE: This is an internal header file, included by other STL headers.
 *   You should not attempt to use it directly.
 */
```

因此如果你是 SGI STL 的使用者，你可以在自己的程式中充份運用這個 __type_traits。假設我自行定義了一個 Shape class，__type_traits 會對它產生什麼效應？如果編譯器夠厲害（例如 Silicon Graphics 的 N32 和 N64 編譯器），你會發現，__type_traits 針對 Shape 萃取出來的每一個特性，其結果將取決於我的 Shape 是否有 trivial defalt ctor 或 trivial copy ctor 或 trivial assignment operator 或 trivial dtor 而定。但對大部份缺乏這種特異功能的編譯器而言，__type_traits 針對 Shape 萃取出來的每一個特性都是 __false_type，即使 Shape 是個 POD 型別。這樣的結果當然過於保守，但是別無選擇，除非我針對 Shape，自行設計一個 __type_traits 特化版本，明白地告訴編譯器以下事實（舉例）：

```
template<> struct __type_traits<Shape> {
   typedef __true_type     has_trivial_default_constructor;
   typedef __false_type    has_trivial_copy_constructor;
   typedef __false_type    has_trivial_assignment_operator;
   typedef __false_type    has_trivial_destructor;
   typedef __false_type    is_POD_type;
};
```

究竟一個 class 什麼時候該有自己的 non-trivial default constructor, non-trivial copy constructor, non-trivial assignment operator, non-trivial destructor 呢？一個簡單的判

斷準則是：如果 class 內含指標成員，並且對它進行記憶體動態配置，那麼這個 class 就需要實作出自己的 non-trivial-xxx[5]。

即使你無法全面針對你自己定義的型別，設計`__type_traits` 特化版本，無論如何， 至少，有了這個 `__type_traits` 之後，當我們設計新的泛型演算法時，面對 C++ 純量型別，便有足夠的資訊決定採用最有效的拷貝動作或賦值動作 — 因爲每一個純量型別都有對應的 `__type_traits` 特化版本，其中每一個 typedef 的值都是 `__true_type`。

[5] 請參考 [Meyers98] 條款 11: *Declare a copy constructor and an assignment operator for classes with dynamically allocated memory*， 以及條款 45：*Know what functions C++ silently writes and calls*.

4

序列式容器
sequence containers

4.1 容器的概觀與分類

容器，置物之所也。

研究資料的特定排列方式，以利搜尋或排序或其他特殊目的，這一專門學科我們稱爲資料結構（Data Structures）。大學資訊相關教育裡頭，與編程最有直接關係的科目，首推資料結構與演算法（Algorithms）。幾乎可以說，任何特定的資料結構都是爲了實現某種特定的演算法。STL 容器即是將運用最廣的一些資料結構實作出來（圖 4-1）。未來，在每五年召開一次的 C++ 標準委員會中，STL 容器的數量還有可能增加。

眾所周知，常用的資料結構不外乎 array（陣列）、list（串列）、tree（樹）、stack（堆疊）、queue（佇列）、hash table（雜湊表）、set（集合）、map（映射表）…等等。根據「資料在容器中的排列」特性，這些資料結構分爲序列式（sequence）和關聯式（associative）兩種。本章探討序列式容器，下一章探討關聯式容器。

容器是大多數人對 STL 的第一印象，這說明了容器的好用與受歡迎。容器也是許多人對 STL 的唯一印象，這說明了還有多少人利器（STL）在手而未能善用。

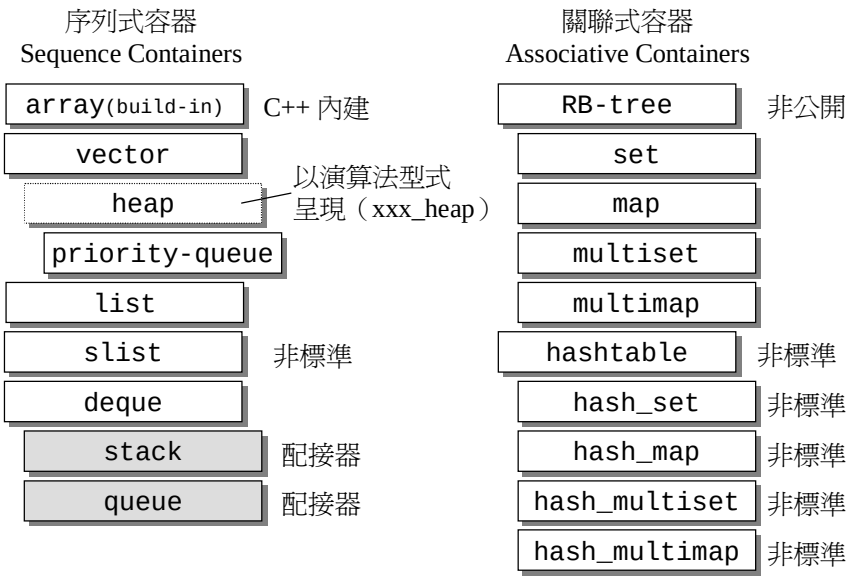


圖 4-1 SGI STL 的各種容器。本圖以內縮方式來表達基層與衍生層的關係。這裡所謂的衍生，並非繼承（inheritance）關係，而是內含（containment）關係。例如 heap 內含一個 vector，priority-queue 內含一個 heap，stack 和 queue 都含一個 deque，set/map/multiset/multimap 都內含一個 RB-tree，hast_*x* 都內含一個 hashtable。

4.1.1 序列式容器（sequential containers）

所謂序列式容器，其中的元素都可序（*ordered*），但未排序（*sorted*）。C++ 語言本身提供了一個序列式容器 `array`，STL 另外再提供 `vector`, `list`, `deque`, `stack`, `queue`, `priority-queue` 等等序列式容器。其中 `stack` 和 `queue` 由於只是將 `deque` 改頭換面而成，技術上被歸類爲一種配接器（adapter），但我仍把它們放在本章討論。

本章將帶你仔細看過各種序列式容器的關鍵實作細節。

4.2 vector

4.2.1 vector 概述

vector 的資料安排以及操作方式，與 array 非常像似。兩者的唯一差別在於空間的運用彈性。array 是靜態空間，一旦配置了就不能改變；要換個大（或小）一點的房子，可以，一切細瑣得由客端自己來：首先配置一塊新空間，然後將元素從舊址一一搬往新址，然後再把原來的空間釋還給系統。vector 是動態空間，隨著元素的加入，它的內部機制會自行擴充空間以容納新元素。因此，vector 的運用對於記憶體的樽節與運用彈性有很大的幫助，我們再也不必因爲害怕空間不足而一開始就要求一個大塊頭 array 了，我們可以安心使用 vector，吃多少用多少。

vector 的實作技術，關鍵在於其對大小的控制以及重新配置時的資料搬移效率。一旦 vector 舊有空間滿載，如果客端每新增一個元素，vector 內部只是擴充一個元素的空間，實爲不智，因爲所謂擴充空間（不論多大），一如稍早所說，是「配置新空間 / 資料搬移 / 釋還舊空間」的大工程，時間成本很高，應該加入某種未雨綢繆的考量。稍後我們便可看到 SGI vector 的空間配置策略。

4.2.2 vector 定義式摘要

以下是 vector 定義式的源碼摘錄。雖然 STL 規定，欲使用 vector 者必須先含入 <vector>，但 SGI STL 將 vector 實作於更底層的 <stl_vector.h>。

```
// alloc 是 SGI STL 的空間配置器，見第二章。
template <class T, class Alloc = alloc>
class vector {
public:
  // vector 的巢狀型別定義
  typedef T           value_type;
  typedef value_type* pointer;
  typedef value_type* iterator;
  typedef value_type& reference;
  typedef size_t      size_type;
  typedef ptrdiff_t   difference_type;

protected:
```

```
  // 以下，simple_alloc 是 SGI STL 的空間配置器，見 2.2.4 節。
  typedef simple_alloc<value_type, Alloc> data_allocator;

  iterator start;           // 表示目前使用空間的頭
  iterator finish;          // 表示目前使用空間的尾
  iterator end_of_storage; // 表示目前可用空間的尾

  void insert_aux(iterator position, const T& x);
  void deallocate() {
    if (start)
      data_allocator::deallocate(start, end_of_storage - start);
  }

  void fill_initialize(size_type n, const T& value) {
    start = allocate_and_fill(n, value);
    finish = start + n;
    end_of_storage = finish;
  }
public:
  iterator begin() { return start; }
  iterator end() { return finish; }
  size_type size() const { return size_type(end() - begin()); }
  size_type capacity() const {
    return size_type(end_of_storage - begin()); }
  bool empty() const { return begin() == end(); }
  reference operator[](size_type n) { return *(begin() + n); }

  vector() : start(0), finish(0), end_of_storage(0) {}
  vector(size_type n, const T& value) { fill_initialize(n, value); }
  vector(int n, const T& value) { fill_initialize(n, value); }
  vector(long n, const T& value) { fill_initialize(n, value); }
  explicit vector(size_type n) { fill_initialize(n, T()); }

  ~vector()
    destroy(start, finish);     // 全域函式，見 2.2.3 節。
    deallocate();               // 這是 vector 的一個 member function
  }
  reference front() { return *begin(); }      // 第一個元素
  reference back() { return *(end() - 1); }   // 最後一個元素
  void push_back(const T& x) {       // 將元素安插至最尾端
    if (finish != end_of_storage) {
      construct(finish, x);     // 全域函式，見 2.2.3 節。
      ++finish;
    }
    else
      insert_aux(end(), x);     // 這是 vector 的一個 member function
  }

  void pop_back() {             // 將最尾端元素取出
```

```
    --finish;
    destroy(finish);            // 全域函式，見 2.2.3 節。
  }

  iterator erase(iterator position) {    // 清除某位置上的元素
    if (position + 1 != end())
      copy(position + 1, finish, position);   // 後續元素往前搬移
    --finish;
    destroy(finish);            // 全域函式，見 2.2.3 節。
    return position;
  }
  void resize(size_type new_size, const T& x) {
    if (new_size < size())
      erase(begin() + new_size, end());
    else
      insert(end(), new_size - size(), x);
  }
  void resize(size_type new_size) { resize(new_size, T()); }
  void clear() { erase(begin(), end()); }

protected:
  // 配置空間並填滿內容
  iterator allocate_and_fill(size_type n, const T& x) {
    iterator result = data_allocator::allocate(n);
      uninitialized_fill_n(result, n, x); // 全域函式，見 2.3 節
      return result;
  }
```

4.2.3 vector 的迭代器

vector 維護的是一個連續線性空間，所以不論其元素型別爲何，原生指標都可以做爲 vector 的迭代器而滿足所有必要條件，因爲 vector 迭代器所需要的操作行爲如operator*,operator->,operator++,operator--,operator+, operator-, operator+=,operator-=，原生指標天生就具備。vector 支援隨機存取，而原生指標正有著這樣的能力。所以，vector 提供的是 *Random Access Iterators*。

```
template <class T, class Alloc = alloc>
class vector {
public:
  typedef T           value_type;
  typedef value_type* iterator;     // vector 的迭代器是原生指標
...
};
```

根據上述定義，如果客端寫出這樣的碼：

```
vector<int>::iterator ivite;
vector<Shape>::iterator svite;
```

ivite 的型別其實就是 int*，svite 的型別其實就是 Shape*。

4.2.4 vector 的資料結構

vector 所採用的資料結構非常簡單：線性連續空間。它以兩個迭代器 start 和 finish 分別指向配置得來的連續空間中目前已被使用的範圍，並以迭代器 end_of_storage 指向整塊連續空間（含備用空間）的尾端：

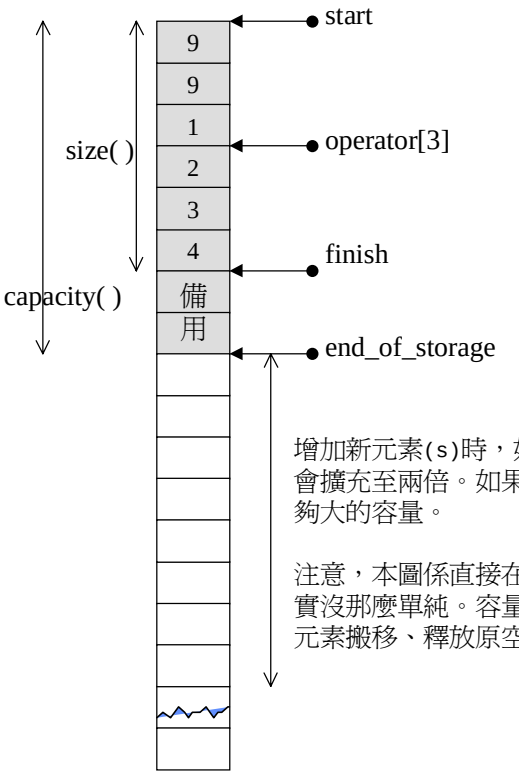
```
template <class T, class Alloc = alloc>
class vector {
...
protected:
  iterator start;          // 表示目前使用空間的頭
  iterator finish;         // 表示目前使用空間的尾
  iterator end_of_storage; // 表示目前可用空間的尾
...
};
```

爲了降低空間配置時的速度成本，vector 實際配置的大小可能比客端需求量更大一些，以備將來可能的擴充。這便是容量（capacity）的觀念。換句話說一個 vector 的容量永遠大於或等於其大小。一旦容量等於大小，便是滿載，下次再有新增元素，整個 vector 就得另覓居所。見圖 4-2。

運用 start, finish, end_of_storage 三個迭代器，便可輕易提供首尾標示、大小、容量、空容器判斷、註標（[ ]）運算子、最前端元素值、最後端元素值…等機能：

```
template <class T, class Alloc = alloc>
class vector {
...
public:
  iterator begin() { return start; }
  iterator end() { return finish; }
  size_type size() const { return size_type(end() - begin()); }
  size_type capacity() const {
     return size_type(end_of_storage - begin()); }
  bool empty() const { return begin() == end(); }
  reference operator[](size_type n) { return *(begin() + n); }

  reference front() { return *begin(); }
```

```
  reference back() { return *(end() - 1); }
...
};
```



經過以下動作：

```
vector<int> iv(2, 9);
iv.push_back(1);
iv.push_back(2);
iv.push_back(3);
iv.push_back(4);
```

vector 記憶體及各成員呈現左圖狀態

增加新元素(s)時，如果超過當時的容量，則容量會擴充至兩倍。如果兩倍容量仍不足，就擴張至足夠大的容量。

注意，本圖係直接在原空間之後畫上新增空間，其實沒那麼單純。容量的擴張必須經歷「重新配置、元素搬移、釋放原空間」等過程，工程浩大。

圖 4-2 vector 示意圖

4.2.5 vector 的建構與記憶體管理：constructor, push_back

千頭萬緒該如何說起？以客端程式碼爲引導，觀察其所得結果並實證源碼，是個良好的學習路徑。下面是個小小的測試程式，我的觀察重點在建構的方式、元素的添加，以及大小、容量的變化：

```
// filename : 4vector-test.cpp
#include <vector>
#include <iostream>
#include <algorithm>
```

```
using namespace std;

int main()
{
  int i;
  vector<int> iv(2,9);
  cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=2
  cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=2

  iv.push_back(1);
  cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=3
  cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=4

  iv.push_back(2);
  cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=4
  cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=4

  iv.push_back(3);
  cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=5
  cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=8

  iv.push_back(4);
  cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=6
  cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=8

  for(i=0; i<iv.size(); ++i)
     cout << iv[i] << ' ';                         // 9 9 1 2 3 4
  cout << endl;

  iv.push_back(5);

  cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=7
  cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=8
  for(i=0; i<iv.size(); ++i)
     cout << iv[i] << ' ';                         // 9 9 1 2 3 4 5
  cout << endl;

  iv.pop_back();
  iv.pop_back();
  cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=5
  cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=8

  iv.pop_back();
  cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=4
  cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=8

  vector<int>::iterator ivite = find(iv.begin(), iv.end(), 1);
  if (ivite) iv.erase(ivite);
```

```
    cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=3
    cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=8
    for(i=0; i<iv.size(); ++i)
       cout << iv[i] << ' ';                         // 9 9 2
    cout << endl;

    ite = find(ivec.begin(), ivec.end(), 2);
    if (ite) ivec.insert(ite,3,7);

    cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=6
    cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=8
    for(int i=0; i<ivec.size(); ++i)
       cout << ivec[i] << ' ';                       // 9 9 7 7 7 2
    cout << endl;

    iv.clear();
    cout << "size=" << iv.size() << endl;            // size=0
    cout << "capacity=" << iv.capacity() << endl;    // capacity=8
  }
```

vector 預設使用 alloc（第二章）做爲空間配置器，並據此另外定義了一個 data_allocator，爲的是更方便以元素大小爲配置單位：

```
template <class T, class Alloc = alloc>
class vector {
protected:
  // simple_alloc<> 見 2.2.4 節
  typedef simple_alloc<value_type, Alloc> data_allocator;
...
};
```

於是，data_allocator::allocate(n) 表示配置 n 個元素空間。

vector 提供許多 constructors，其中一個允許我們指定空間大小及初值：

```
  // 建構式，允許指定 vector 大小 n 和初值 value
  vector(size_type n, const T& value) { fill_initialize(n, value); }

  // 充填並予初始化
  void fill_initialize(size_type n, const T& value) {
    start = allocate_and_fill(n, value);
    finish = start + n;
    end_of_storage = finish;
  }

  // 配置而後充填
  iterator allocate_and_fill(size_type n, const T& x) {
```

```
    iterator result = data_allocator::allocate(n); // 配置 n 個元素空間
    uninitialized_fill_n(result, n, x); // 全域函式，見 2.3 節
    return result;
  }
```

uninitialized_fill_n() 會根據第一參數的型別特性（type traits，3.7 節），決定使用演算法 fill_n() 或反覆呼叫 construct() 來完成任務（見 2.3 節描述）。

當我們以 push_back() 將新元素安插於 vector 尾端，該函式首先檢查是否還有備用空間？如果有就直接在備用空間上建構元素，並調整迭代器 finish，使 vector 變大。如果沒有備用空間了，就擴充空間（重新配置、搬移資料、釋放原空間）：

```
  void push_back(const T& x) {
    if (finish != end_of_storage) {  // 還有備用空間
      construct(finish, x);          // 全域函式，見 2.2.3 節。
      ++finish;                      // 調整水位高度
    }
    else                             // 已無備用空間
      insert_aux(end(), x); // vector member function，見以下列表
  }

template <class T, class Alloc>
void vector<T, Alloc>::insert_aux(iterator position, const T& x) {
  if (finish != end_of_storage) {    // 還有備用空間
    // 在備用空間起始處建構一個元素，並以 vector 最後一個元素值爲其初值。
    construct(finish, *(finish - 1));
    // 調整水位。
    ++finish;
    T x_copy = x;
    copy_backward(position, finish - 2, finish - 1);
    *position = x_copy;
  }
  else {     // 已無備用空間
    const size_type old_size = size();
    const size_type len = old_size != 0 ? 2 * old_size : 1;
    // 以上配置原則：如果原大小爲 0，則配置 1（個元素大小）；
    // 如果原大小不爲 0，則配置原大小的兩倍，
    // 前半段用來放置原資料，後半段準備用來放置新資料。

    iterator new_start = data_allocator::allocate(len); // 實際配置
    iterator new_finish = new_start;
    try {
      // 將原 vector 的內容拷貝到新 vector。
      new_finish = uninitialized_copy(start, position, new_start);
      // 爲新元素設定初值 x
      construct(new_finish, x);
      // 調整水位。
```

```
      ++new_finish;
      // 將原 vector 的備用空間中的內容也忠實拷貝過來（侯捷疑惑：啥用途？）
      new_finish = uninitialized_copy(position, finish, new_finish);
    }
    catch(...) {
      // "commit or rollback" semantics.
      destroy(new_start, new_finish);
      data_allocator::deallocate(new_start, len);
      throw;
    }

    // 解構並釋放原 vector
    destroy(begin(), end());
    deallocate();

    // 調整迭代器，指向新 vector
    start = new_start;
    finish = new_finish;
    end_of_storage = new_start + len;
  }
}
```

注意，所謂動態增加大小，並不是在原空間之後接續新空間（因爲無法保證原空間之後尚有可供配置的空間），而是以原大小的兩倍另外配置一塊較大空間，然後將原內容拷貝過來，然後才開始在原內容之後建構新元素，並釋放原空間。因此，對 vector 的任何操作，一旦引起空間重新配置，指向原 vector 的所有迭代器就都失效了。這是程式員易犯的一個錯誤，務需小心。

4.2.6 vector 的元素操作：pop_back, erase, clear, insert

vector 所提供的元素操作動作很多，無法在有限篇幅中一一講解 — 其實也沒有這種必要。爲搭配先前對空間配置的討論，我挑選數個相關函式做爲解說對象。這些函式也出現在先前的測試程式中。

```
// 將尾端元素拿掉，並調整大小。
void pop_back() {
  --finish;                 // 將尾端標記往前移一格，表示將放棄尾端元素。
  destroy(finish);          // destroy 是全域函式，見第 2 章
}

// 清除 [first,last) 中的所有元素
iterator erase(iterator first, iterator last) {
  iterator i = copy(last, finish, first); // copy 是全域函式，第 6 章
  destroy(i, finish);       // destroy 是全域函式，第 2 章
```

```
    finish = finish - (last - first);
    return first;
  }

  // 清除某個位置上的元素
  iterator erase(iterator position) {
    if (position + 1 != end())
      copy(position + 1, finish, position); // copy 是全域函式，第 6 章
    --finish;
    destroy(finish);   // destroy 是全域函式，2.2.3 節
    return position;
  }

  void clear() { erase(begin(), end()); } // erase() 就定義在上面
```

圖 4-3a 展示 `erase(first, last)` 的動作。

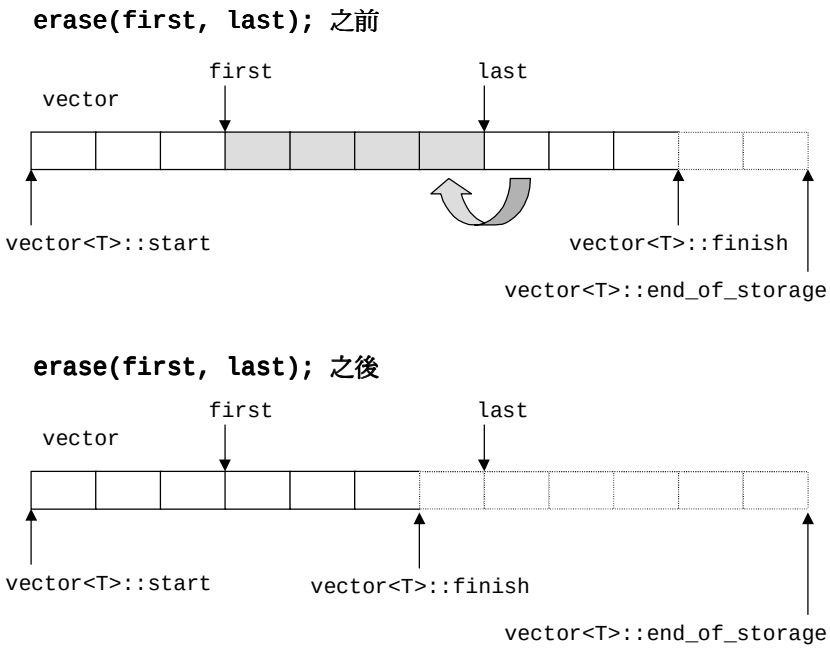


圖 4-3a 局部區間的清除動作：`erase(first,last)`

下面是 `vector::insert()` 實作內容：

```
// 從 position 開始，安插 n 個元素，元素初值爲 x
template <class T, class Alloc>
```

```
void vector<T, Alloc>::insert(iterator position, size_type n, const T& x)
{
  if (n != 0) { // 當 n != 0 才進行以下所有動作
    if (size_type(end_of_storage - finish) >= n)
      // 備用空間大於等於「新增元素個數」
      T x_copy = x;
      // 以下計算安插點之後的現有元素個數
      const size_type elems_after = finish - position;
      iterator old_finish = finish;
      if (elems_after > n)
        // 「安插點之後的現有元素個數」大於「新增元素個數」
        uninitialized_copy(finish - n, finish, finish);
        finish += n;    // 將 vector 尾端標記後移
        copy_backward(position, old_finish - n, old_finish);
        fill(position, position + n, x_copy);  // 從安插點開始填入新值
      }
      else {
        // 「安插點之後的現有元素個數」小於等於「新增元素個數」
        uninitialized_fill_n(finish, n - elems_after, x_copy);
        finish += n - elems_after;
        uninitialized_copy(position, old_finish, finish);
        finish += elems_after;
        fill(position, old_finish, x_copy);
      }
    }
    else {
      // 備用空間小於「新增元素個數」（那就必須配置額外的記憶體）
      // 首先決定新長度：舊長度的兩倍，或舊長度+新增元素個數。
      const size_type old_size = size();
      const size_type len = old_size + max(old_size, n);
      // 以下配置新的 vector 空間
      iterator new_start = data_allocator::allocate(len);
      iterator new_finish = new_start;
      __STL_TRY {
        // 以下首先將舊 vector 的安插點之前的元素複製到新空間。
        new_finish = uninitialized_copy(start, position, new_start);
        // 以下再將新增元素（初值皆爲 n）填入新空間。
        new_finish = uninitialized_fill_n(new_finish, n, x);
        // 以下再將舊 vector 的安插點之後的元素複製到新空間。
        new_finish = uninitialized_copy(position, finish, new_finish);
      }
# ifdef  __STL_USE_EXCEPTIONS
      catch(...) {
        // 如有異常發生，實現 "commit or rollback" semantics.
        destroy(new_start, new_finish);
        data_allocator::deallocate(new_start, len);
        throw;
      }
# endif /* __STL_USE_EXCEPTIONS */
```

```
      // 以下清除並釋放舊的 vector
      destroy(start, finish);
      deallocate();
      // 以下調整水位標記
      start = new_start;
      finish = new_finish;
      end_of_storage = new_start + len;
    }
  }
}
```

注意，安插完成後，新節點將位於標兵迭代器（上例之 position，標示出安插點）所指之節點的前方 — 這是 STL 對於「安插動作」的標準規範。圖 4-3b 展示 insert(position,n,x) 的動作。

```
insert(position,n,x);
```

(1) 備用空間 2 ≥ 新增元素個數 2
例：下圖，n==2

(1-1)安插點之後的現有元素個數 3 > 新增元素個數 2

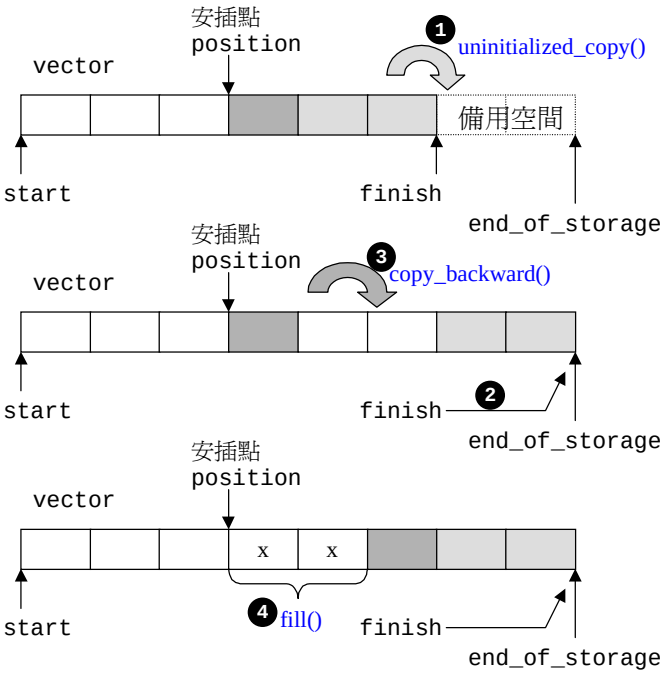


圖 4-3b-1 insert(position,n,x) 狀況 1

(1-2)安插點之後的現有元素個數 2 ≤ 新增元素個數 3

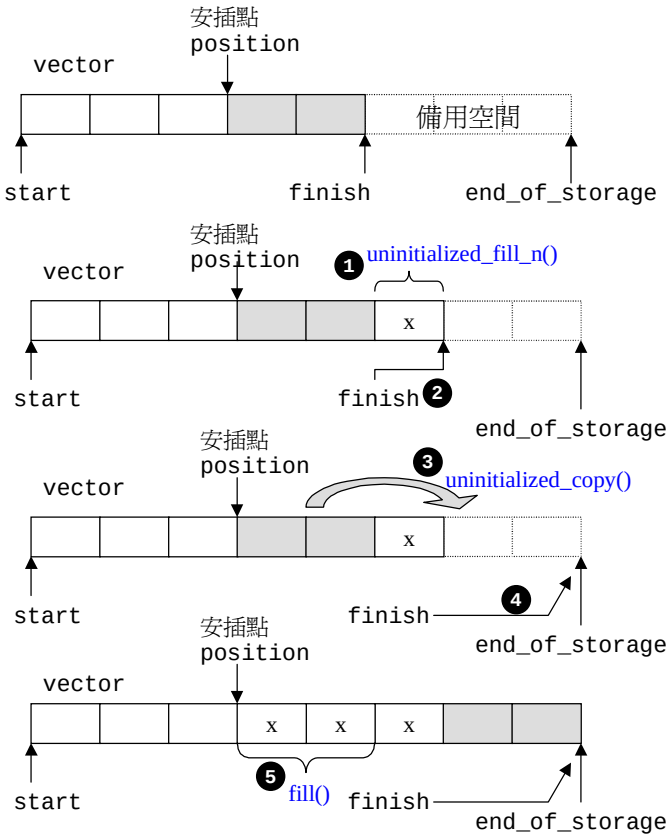


圖 4-3b-2 insert(position,n,x) 狀況 2

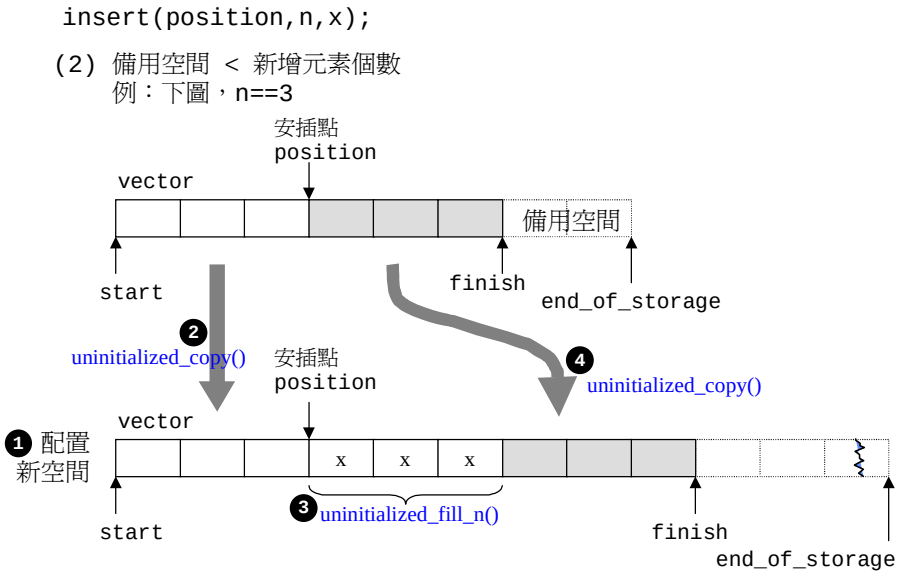


圖 4-3b-3 insert(position,n,x) 狀況 3

4.3 list

4.3.1 list 概述

相較於 vector 的連續線性空間，list 就顯得複雜許多，它的好處是每次安插或刪除一個元素，就配置或釋放一個元素空間。因此，list 對於空間的運用有絕對的精準，一點也不浪費。而且，對於任何位置的元素安插或元素移除，list 永遠是常數時間。

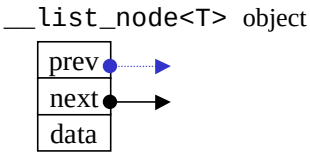
list 和 vector 是兩個最常被使用的容器。什麼時機下最適合使用哪一種容器，必須視元素的多寡、元素的構造複雜度（有無 non-trivial copy constructor, non-trivial copy assignmen operator）、元素存取行爲的特性而定。[Lippman 98] 6.3 節對這兩種容器提出了一份測試報告。

4.3.2 list 的節點（node）

每一個設計過 list 的人都知道，list 本身和 list 的節點是不同的結構，需要分開設計。以下是 STL list 的節點（node）結構：

```
template <class T>
struct __list_node {
  typedef void* void_pointer;
  void_pointer prev;   // 型別爲 void*。其實可設爲 __list_node<T>*
  void_pointer next;
  T data;
};
```

顯然這是一個雙向串列[1]。



4.3.3 list 的迭代器

list 不再能夠像 vector 一樣以原生指標做爲迭代器，因爲其節點不保證在儲存空間中連續存在。list 迭代器必須有能力指向 list 的節點，並有能力做正確的遞增、遞減、取值、成員存取…等動作。所謂「list 迭代器正確的遞增、遞減、取值、成員取用」動作是指，遞增時指向下一個節點，遞減時指向上一個節點，取值時取的是節點的資料值，成員取用時取用的是節點的成員，如圖 4-4。

由於 STL list 是一個雙向串列（double linked-list），迭代器必須具備前移、後移的能力。所以 list 提供的是 *Bidirectional Iterators*。

list 有一個重要性質：安插動作（insert）和接合動作（splice）都不會造成原有的 list 迭代器失效。這在 vector 是不成立的，因爲 vector 的安插動作可能造成記憶體重新配置，導致原有的迭代器全部失效。甚至 list 的元素刪除動作

[1] SGI STL 另有一個單向串列 slist，我將在 4.9 節介紹它。

（erase），也只有「指向被刪除元素」的那個迭代器失效，其他迭代器不受任何影響。

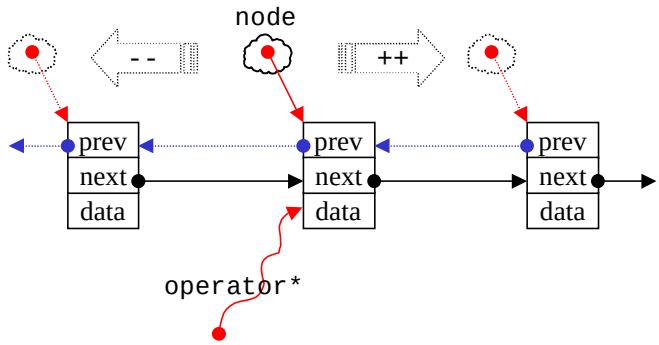


圖 4-4 list 的節點與 list 的迭代器

以下是 list 迭代器的設計：

```
template<class T, class Ref, class Ptr>
struct __list_iterator {
  typedef __list_iterator<T, T&, T*>     iterator;
  typedef __list_iterator<T, Ref, Ptr>   self;

  typedef bidirectional_iterator_tag iterator_category;
  typedef T value_type;
  typedef Ptr pointer;
  typedef Ref reference;
  typedef __list_node<T>* link_type;
  typedef size_t size_type;
  typedef ptrdiff_t difference_type;

  link_type node; // 迭代器內部當然要有一個原生指標，指向 list 的節點

  // constructor
  __list_iterator(link_type x) : node(x) {}
  __list_iterator() {}
  __list_iterator(const iterator& x) : node(x.node) {}

  bool operator==(const self& x) const { return node == x.node; }
  bool operator!=(const self& x) const { return node != x.node; }
  // 以下對迭代器取值（dereference），取的是節點的資料值。
  reference operator*() const { return (*node).data; }

  // 以下是迭代器的成員存取（member access）運算子的標準作法。
```

```
  pointer operator->() const { return &(operator*()); }

  // 對迭代器累加 1，就是前進一個節點
  self& operator++()
    node = (link_type)((*node).next);
    return *this;
  }
  self operator++(int)
    self tmp = *this;
    ++*this;
    return tmp;
  }

  // 對迭代器遞減 1，就是後退一個節點
  self& operator--()
    node = (link_type)((*node).prev);
    return *this;
  }
  self operator--(int)
    self tmp = *this;
    --*this;
    return tmp;
  }
};
```

4.3.4 list 的資料結構

SGI list 不僅是一個雙向串列，而且還是一個環狀雙向串列。所以它只需要一個指標，便可以完整表現整個串列：

```
template <class T, class Alloc = alloc> // 預設使用 alloc 爲配置器
class list {
protected:
  typedef __list_node<T> list_node;
public:
  typedef list_node* link_type;

protected:
  link_type node; // 只要一個指標，便可表示整個環狀雙向串列
...
};
```

如果讓指標 node 指向刻意置於尾端的一個空白節點，node 便能符合 STL 對於「前閉後開」區間的要求，成爲 last 迭代器，如圖 4-5。這麼一來，以下幾個函式便都可以輕易完成：

```
  iterator begin() { return (link_type)((*node).next); }
  iterator end() { return node; }
  bool empty() const { return node->next == node; }
  size_type size() const {
    size_type result = 0;
    distance(begin(), end(), result);  // 全域函式，第 3 章。
    return result;
  }
  // 取頭節點的內容（元素值）。
  reference front() { return *begin(); }
  // 取尾節點的內容（元素值）。
  reference back() { return *(--end()); }
```

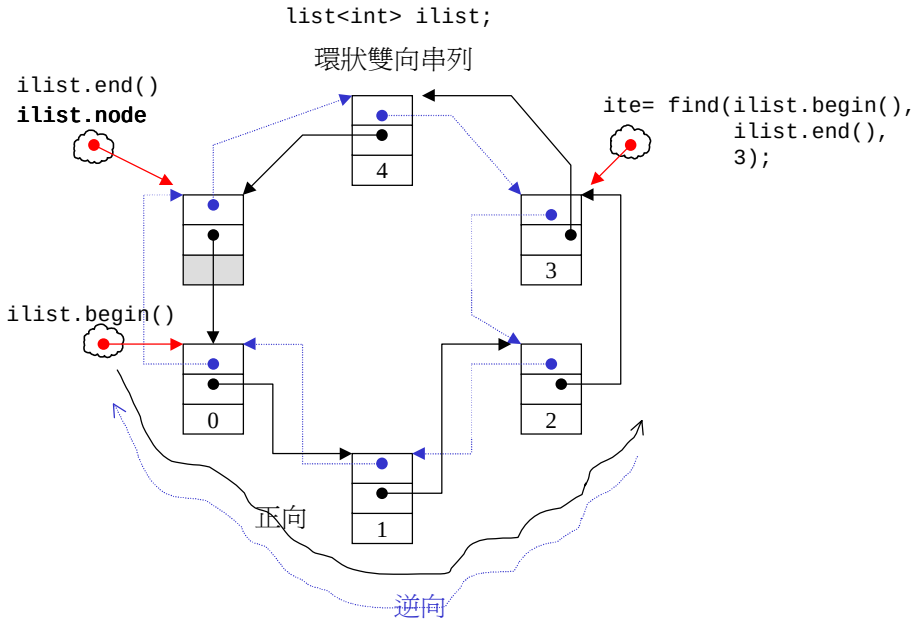


圖 4-5 list 示意圖。是環狀串列只需一個標記，即可完全表示整個串列。只要刻意在環狀串列的尾端加上一個空白節點，便符合 STL 規範之「前閉後開」區間。

4.3.5 list 的建構與記憶體管理：constructor, push_back, insert

千頭萬緒該如何說起？以客端程式碼爲引導，觀察其所得結果並實證源碼，是個

良好的學習路徑。下面是一個測試程式，我的觀察重點在建構的方式以及大小的變化：

```
// filename : 4list-test.cpp
#include <list>
#include <iostream>
#include <algorithm>
using namespace std;

int main()
{
  int i;
  list<int> ilist;
  cout << "size=" << ilist.size() << endl;    // size=0

  ilist.push_back(0);
  ilist.push_back(1);
  ilist.push_back(2);
  ilist.push_back(3);
  ilist.push_back(4);
  cout << "size=" << ilist.size() << endl;    // size=5

  list<int>::iterator ite;
  for(ite = ilist.begin(); ite != ilist.end(); ++ite)
     cout << *ite << ' ';                     // 0 1 2 3 4
  cout << endl;


  ite = find(ilist.begin(), ilist.end(), 3);
  if (ite!=0)
    ilist.insert(ite, 99);

  cout << "size=" << ilist.size() << endl;    // size=6
  cout << *ite << endl;                       // 3

  for(ite = ilist.begin(); ite != ilist.end(); ++ite)
     cout << *ite << ' ';                     // 0 1 2 99 3 4
  cout << endl;

  ite = find(ilist.begin(), ilist.end(), 1);
  if (ite!=0)
    cout << *(ilist.erase(ite)) << endl;      // 2

  for(ite = ilist.begin(); ite != ilist.end(); ++ite)
     cout << *ite << ' ';                     // 0 2 99 3 4
  cout << endl;
}
```

list 預設使用 alloc（2.2.4 節）做爲空間配置器，並據此另外定義了一個 list_node_allocator，爲的是更方便地以節點大小爲配置單位：

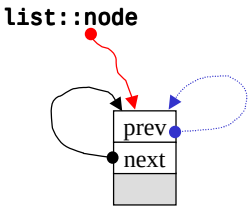
```
template <class T, class Alloc = alloc> // 預設使用 alloc 爲配置器
class list {
protected:
  typedef __list_node<T> list_node;
  // 專屬之空間配置器，每次配置一個節點大小：
  typedef simple_alloc<list_node, Alloc> list_node_allocator;
...
};
```

於是，list_node_allocator(n) 表示配置 n 個節點空間。以下四個函式，分別用來配置、釋放、建構、摧毀一個節點：

```
protected:
  // 配置一個節點並傳回
  link_type get_node() { return list_node_allocator::allocate(); }
  // 釋放一個節點
  void put_node(link_type p) { list_node_allocator::deallocate(p); }

  // 產生（配置並建構）一個節點，帶有元素值
  link_type create_node(const T& x) {
    link_type p = get_node();
    construct(&p->data, x); // 全域函式，建構/解構基本工具。
    return p;
  }
  // 摧毀（解構並釋放）一個節點
  void destroy_node(link_type p) {
    destroy(&p->data);          // 全域函式，建構/解構基本工具。
    put_node(p);
  }
```

list 提供有許多 constructors，其中一個是 default constructor，允許我們不指定任何參數做出一個空的 list 出來：

```
public:
  list() { empty_initialize(); }  // 產生一個空串列。

protected:
  void empty_initialize()
    node = get_node(); // 配置一個節點空間，令 node 指向它。
    node->next = node; // 令 node 頭尾都指向自己，不設元素值。
    node->prev = node;
  }
```



empty list（空串列）

當我們以 push_back() 將新元素安插於 list 尾端，此函式內部呼叫 insert()：

```
void push_back(const T& x) { insert(end(), x); }
```

insert() 是一個多載化函式，有多種型式，其中最簡單的一種如下，符合以上所需。首先配置並建構一個節點，然後在尾端做適當的指標動作，將新節點安插進去：

```
// 函式目的：在迭代器 position 所指位置安插一個節點，內容爲 x。
iterator insert(iterator position, const T& x) {
  link_type tmp = create_node(x); // 產生一個節點（設妥內容爲 x）
  // 調整雙向指標，使 tmp 安插進去。
  tmp->next = position.node;
  tmp->prev = position.node->prev;
  (link_type(position.node->prev))->next = tmp;
  position.node->prev = tmp;
  return tmp;
}
```

於是，先前測試程式連續安插了五個節點（其值爲 0 1 2 3 4）之後，list 的狀態如圖 4-5。如果我們希望在 list 內的某處安插新節點，首先必須確定安插位置，例如我希望在資料值爲 3 的節點處安插一個資料值爲 99 的節點，可以這麼做：

```
ilite = find(il.begin(), il.end(), 3);
if (ilite!=0)
  il.insert(ilite, 99);
```

find() 動作稍後再做說明。安插之後的 list 狀態如圖 4-6。注意，安插完成後，新節點將位於標兵迭代器（標示出安插點）所指之節點的前方 — 這是 STL 對於「安插動作」的標準規範。由於 list 不像 vector 那樣有可能在空間不足時做重新配置、資料搬移的動作，所以安插前的所有迭代器在安插動作之後都仍然有效。

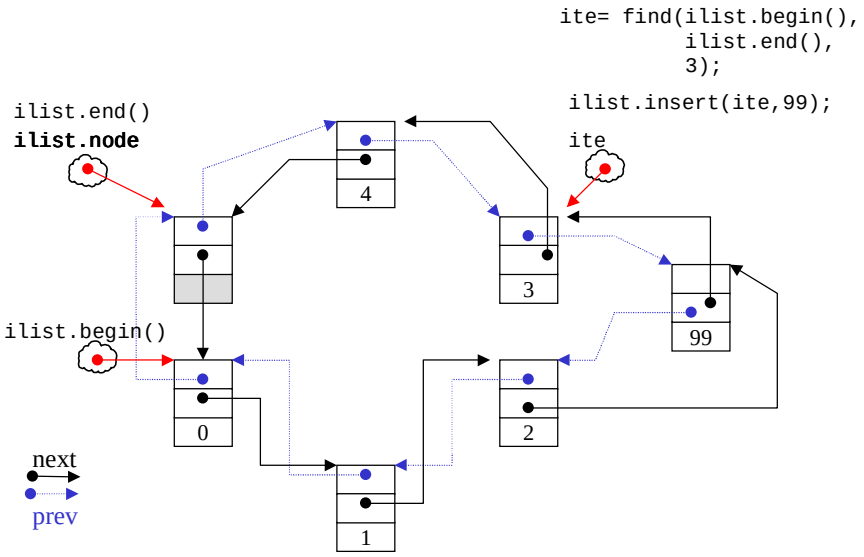


圖 4-6 安插新節點 99 於節點 3 的位置上（所謂安插是指「安插在…之前」）

4.3.6 list 的元素操作：

push_front, push_back, erase, pop_front, pop_back,
clear, remove, unique, splice, merge, reverse, sort

list 所提供的元素操作動作很多，無法在有限的篇幅中一一講解 — 其實也沒有這種必要。爲搭配先前對空間配置的討論，我挑選數個相關函式做爲解說對象。先前示例中出現有尾部安插動作（push_back），現在我們來看看其他的安插動作和移除動作。

```
// 安插一個節點，做爲頭節點
void push_front(const T& x) { insert(begin(), x); }
// 安插一個節點，做爲尾節點（上一小節才介紹過）
void push_back(const T& x) { insert(end(), x); }

// 移除迭代器 position 所指節點
iterator erase(iterator position) {
  link_type next_node = link_type(position.node->next);
  link_type prev_node = link_type(position.node->prev);
  prev_node->next = next_node;
  next_node->prev = prev_node;
  destroy_node(position.node);
  return iterator(next_node);
```

```
  }

  // 移除頭節點
  void pop_front() { erase(begin()); }
  // 移除尾節點
  void pop_back()
    iterator tmp = end();
    erase(--tmp);
  }

// 清除所有節點（整個串列）
template <class T, class Alloc>
void list<T, Alloc>::clear()
{
  link_type cur = (link_type) node->next; // begin()
  while (cur != node) {    // 巡訪每一個節點
    link_type tmp = cur;
    cur = (link_type) cur->next;
    destroy_node(tmp);     // 摧毀（解構並釋放）一個節點
  }
  // 恢復 node 原始狀態
  node->next = node;
  node->prev = node;
}

// 將數值爲 value 之所有元素移除
template <class T, class Alloc>
void list<T, Alloc>::remove(const T& value) {
  iterator first = begin();
  iterator last = end();
  while (first != last) {  // 巡訪每一個節點
    iterator next = first;
    ++next;
    if (*first == value) erase(first);    // 找到就移除
    first = next;
  }
}

// 移除數值相同的連續元素。注意，只有「連續而相同的元素」，才會被移除剩一個。
template <class T, class Alloc>
void list<T, Alloc>::unique() {
  iterator first = begin();
  iterator last = end();
  if (first == last) return;    // 空串列，什麼都不必做。
  iterator next = first;
  while (++next != last) {      // 巡訪每一個節點
    if (*first == *next)        // 如果在此區段中有相同的元素
      erase(next);              // 移除之
    else
```

```
      first = next;                // 調整指標
    next = first;                  // 修正區段範圍
  }
}
```

由於 list 是一個雙向環狀串列，只要我們把邊際條件處理好，那麼，在頭部或尾部安插元素（push_front 和 push_back），動作幾乎是一樣的，在頭部或尾部移除元素（pop_front 和 pop_back），動作也幾乎是一樣的。移除（erase）某個迭代器所指元素，只是做一些指標搬移動作而已，並不複雜。如果圖 4-6 再經以下搜尋並移除的動作，狀況將如圖 4-7。

```
ite = find(ilist.begin(), ilist.end(), 1);
if (ite!=0)
   cout << *(ilist.erase(ite)) << endl;
```

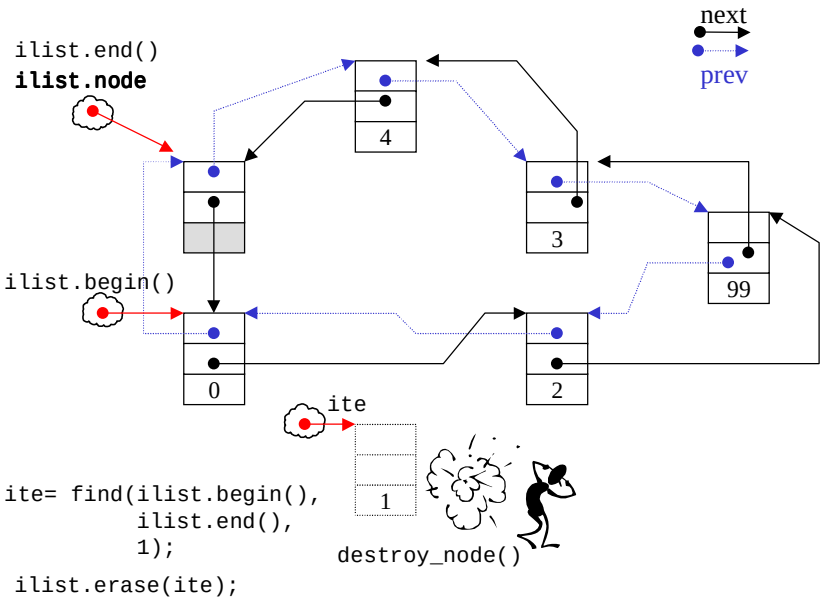


圖 4-7　移除「元素值爲 1」的節點

list 內部提供一個所謂的遷移動作（transfer）：將某連續範圍的元素遷移到某個特定位置之前。技術上很簡單，節點間的指標移動而已。這個動作爲其他的複雜動作如 splice, sort, merge 等奠定良好的基礎。下面是 transfer 的源碼：

```
protected:
  // 將 [first,last) 內的所有元素搬移到 position 之前。
  void transfer(iterator position, iterator first, iterator last) {
    if (position != last) {
      (*(link_type((*last.node).prev))).next = position.node;     // (1)
      (*(link_type((*first.node).prev))).next = last.node;        // (2)
      (*(link_type((*position.node).prev))).next = first.node;    // (3)
      link_type tmp = link_type((*position.node).prev);           // (4)
      (*position.node).prev = (*last.node).prev;                  // (5)
      (*last.node).prev = (*first.node).prev;                     // (6)
      (*first.node).prev = tmp;                                   // (7)
    }
  }
```

以上七個動作，一步一步地顯示於圖 4-8a。

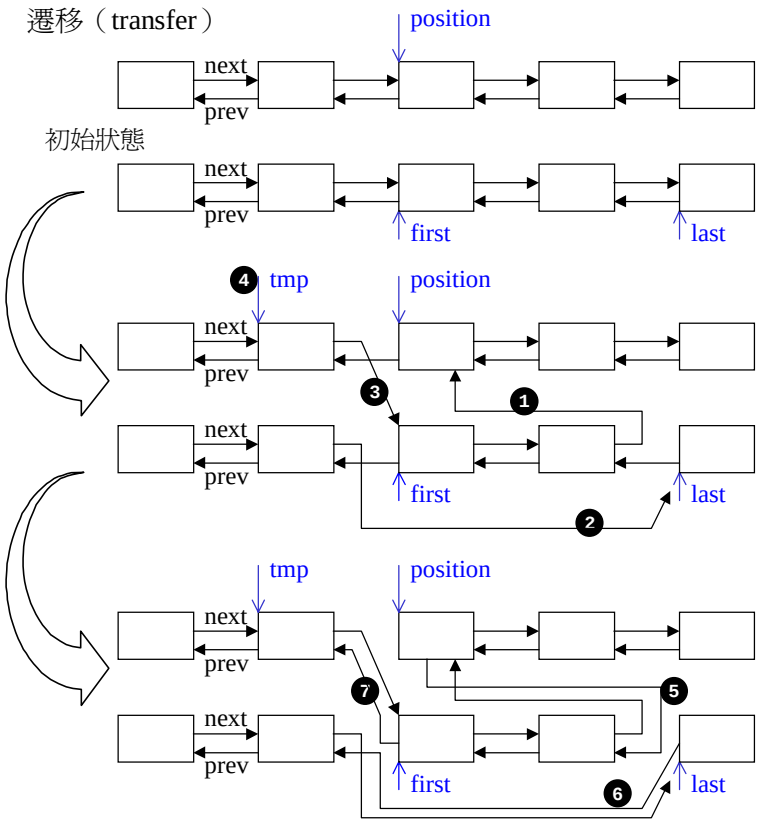


圖 4-8a `list<T>::transfer` 的動作示意

transfer 所接受的 [first,last) 區間，是否可以在同一個 list 之中呢？答案是可以。你只要想像圖 4-8a 所畫的兩條 lists 其實是同一個 list 的兩個區段，就不難得到答案了。

上述的 transfer 並非公開介面。list 公開提供的是所謂的接合動作（splice）：將某連續範圍的元素從一個 list 搬移到另一個（或同一個）list 的某個定點。如果接續先前 4list-test.cpp 程式的最後執行點，繼續執行以下 splice 動作：

```
int iv[5] = { 5,6,7,8,9 };
list<int> ilist2(iv, iv+5);

// 目前，ilist 的內容爲 0 2 99 3 4
ite = find(ilist.begin(), ilist.end(), 99);
ilist.splice(ite,ilist2);              // 0 2 5 6 7 8 9 99 3 4
ilist.reverse();                       // 4 3 99 9 8 7 6 5 2 0
ilist.sort();                          // 0 2 3 4 5 6 7 8 9 99
```

很容易便可看出效果。圖 4-8b 顯示接合動作。技術上很簡單，只是節點間的指標移動而已，這些動作已完全由 transfer() 做掉了。

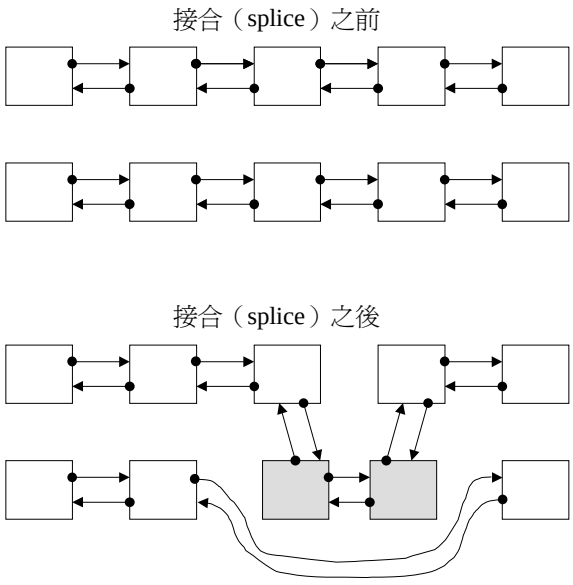


圖 4-8b list 的接合（splice）動作

爲了提供各種介面彈性，list<T>::splice 有許多版本：

```
public:
  // 將 x 接合於 position 所指位置之前。x 必須不同於 *this。
  void splice(iterator position, list& x) {
    if (!x.empty())
      transfer(position, x.begin(), x.end());
  }

  // 將 i 所指元素接合於 position 所指位置之前。position 和 i 可指向同一個 list。
  void splice(iterator position, list&, iterator i) {
    iterator j = i;
    ++j;
    if (position == i || position == j) return;
    transfer(position, i, j);
  }

  // 將 [first,last) 內的所有元素接合於 position 所指位置之前。
  // position 和[first,last)可指向同一個 list，
  // 但 position 不能位於[first,last)之內。
  void splice(iterator position, list&, iterator first, iterator last)  {
    if (first != last)
      transfer(position, first, last);
  }
```

以下是 merge(), reverse(), sort() 的源碼。有了 transfer() 在手，這些動作都不難完成。

```
// merge() 將 x 合併到 *this 身上。兩個 lists 的內容都必須先經過遞增排序。
template <class T, class Alloc>
void list<T, Alloc>::merge(list<T, Alloc>& x) {
  iterator first1 = begin();
  iterator last1 = end();
  iterator first2 = x.begin();
  iterator last2 = x.end();

  // 注意：前提是，兩個 lists 都已經過遞增排序，
  while (first1 != last1 && first2 != last2)
    if (*first2 < *first1) {
      iterator next = first2;
      transfer(first1, first2, ++next);
      first2 = next;
    }
    else
      ++first1;
  if (first2 != last2) transfer(last1, first2, last2);
}
```

```
// reverse() 將 *this 的內容逆向重置
template <class T, class Alloc>
void list<T, Alloc>::reverse() {
  // 以下判斷，如果是空白串列，或僅有一個元素，就不做任何動作。
  // 使用 size() == 0 || size() == 1 來判斷，雖然也可以，但是比較慢。
  if (node->next == node || link_type(node->next)->next == node)
return;
  iterator first = begin();
  ++first;
  while (first != end()) {
    iterator old = first;
    ++first;
    transfer(begin(), old, first);
  }
}

// list 不能使用 STL 演算法 sort()，必須使用自己的 sort() member function，
// 因爲 STL 演算法 sort() 只接受 RamdonAccessIterator.
// 本函式採用 quick sort.
template <class T, class Alloc>
void list<T, Alloc>::sort() {
  // 以下判斷，如果是空白串列，或僅有一個元素，就不做任何動作。
  // 使用 size() == 0 || size() == 1 來判斷，雖然也可以，但是比較慢。
  if (node->next == node || link_type(node->next)->next == node)
      return;

  // 一些新的 lists，做爲中介資料存放區
  list<T, Alloc> carry;
  list<T, Alloc> counter[64];
  int fill = 0;
  while (!empty()) {
    carry.splice(carry.begin(), *this, begin());
    int i = 0;
    while(i < fill && !counter[i].empty()) {
      counter[i].merge(carry);
      carry.swap(counter[i++]);
    }
    carry.swap(counter[i]);
    if (i == fill) ++fill;
  }

  for (int i = 1; i < fill; ++i)
    counter[i].merge(counter[i-1]);
  swap(counter[fill-1]);
}
```

4.4 deque

4.4.1 deque 概述

vector 是單向開口的連續線性空間，deque 則是一種雙向開口的連續線性空間。所謂雙向開口，意思是可以在頭尾兩端分別做元素的安插和刪除動作，如圖 4-9。vector 當然也可以在頭尾兩端做動作（從技術觀點），但是其頭部動作效率奇差，無法被接受。

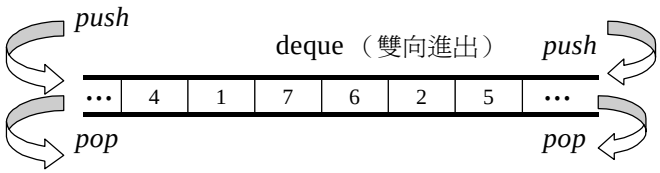


圖 4-9 deque 示意

deque 和 vector 的最大差異，一在於 deque 允許於常數時間內對起頭端進行元素的安插或移除動作，二在於 deque 沒有所謂容量（capacity）觀念，因爲它是動態地以分段連續空間組合而成，隨時可以增加一段新的空間並鏈接起來。換句話說，像 vector 那樣「因舊空間不足而重新配置一塊更大空間，然後複製元素，再釋放舊空間」這樣的事情在 deque 是不會發生的。也因此，deque 沒有必要提供所謂的空間保留（reserve）功能。

雖然 deque 也提供 *Ramdon Access Iterator*，但它的迭代器並不是原生指標，其複雜度和 vector 不可以道里計（稍後看到源碼，你便知道），這當然在在影響了各個運算層面。因此，除非必要，我們應儘可能選擇使用 vector 而非 deque。對 deque 進行的排序動作，爲了最高效率，可將 deque 先完整複製到一個 vector 身上，將 vector 排序後（利用 STL sort 演算法），再複製回 deque。

4.4.2 deque 的中控器

deque 是連續空間（至少邏輯看來如此），連續線性空間總令我們聯想到 array 或 vector。array 無法成長，vector 雖可成長，卻只能向尾端成長，而且其所謂成長原是個假象，事實上是 (1) 另覓更大空間、(2) 將原資料複製過去、(3) 釋放原空間 三部曲。如果不是 vector 每次配置新空間時都有留下一些餘裕，其「成長」假象所帶來的代價將是相當高昂。

deque 係由一段一段的定量連續空間構成。一旦有必要在 deque 的前端或尾端增加新空間，便配置一段定量連續空間，串接在整個 deque 的頭端或尾端。deque 的最大任務，便是在這些分段的定量連續空間上，維護其整體連續的假象，並提供隨機存取的介面。避開了「重新配置、複製、釋放」的輪迴，代價則是複雜的迭代器架構。

受到分段連續線性空間的字面影響，我們可能以爲 deque 的實作複雜度和 vector 相比雖不中亦不遠矣，其實不然。主要因爲，既曰分段連續線性空間，就必須有中央控制，而爲了維護整體連續的假象，資料結構的設計及迭代器前進後退等動作都頗爲繁瑣。deque 的實作碼份量遠比 vector 或 list 都多得多。

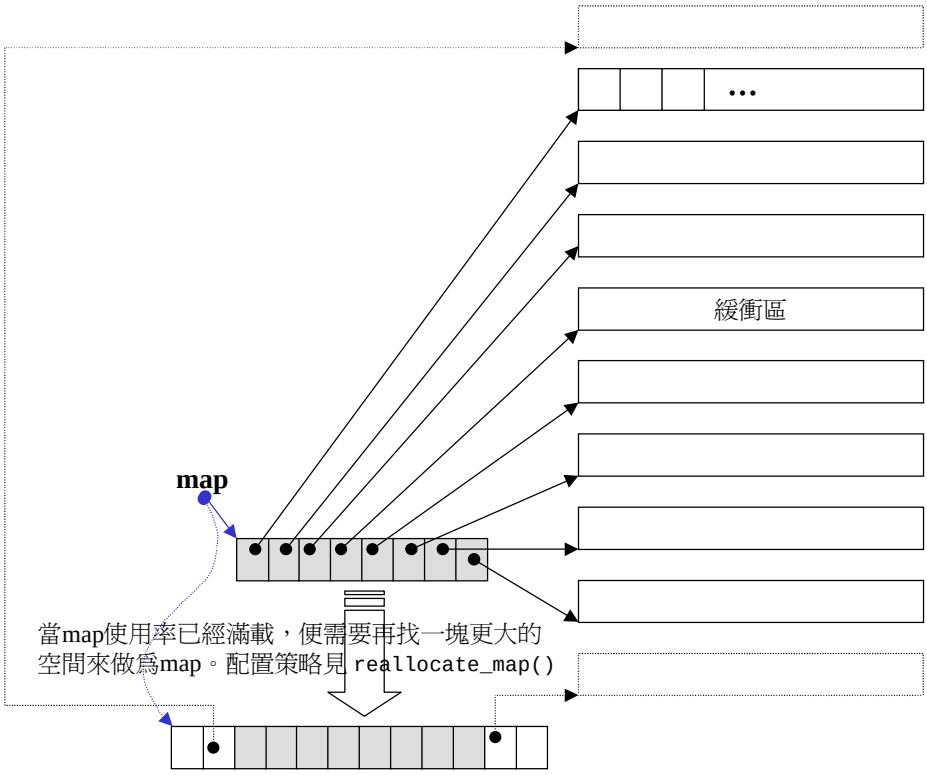
deque 採用一塊所謂的 *map*（注意，不是 STL 的 map 容器）做爲主控。這裡所謂 *map* 是一小塊連續空間，其中每個元素（此處稱爲一個節點，node）都是指標，指向另一段（較大的）連續線性空間，稱爲緩衝區。緩衝區才是 deque 的儲存空間主體。SGI STL 允許我們指定緩衝區大小，預設值 0 表示將使用 512 bytes 緩衝區。

```
template <class T, class Alloc = alloc, size_t BufSiz = 0>
class deque {
public:                         // Basic types
  typedef T value_type;
  typedef value_type* pointer;
  ...
protected:                      // Internal typedefs
  // 元素的指標的指標（pointer of pointer of T）
  typedef pointer* map_pointer;

protected:              // Data members
```

```
  map_pointer map;      // 指向 map，map 是塊連續空間，其內的每個元素
                        // 都是一個指標（稱爲節點），指向一塊緩衝區。
  size_type map_size;   // map 內可容納多少指標。
...
};
```

把令人頭皮發麻的各種型別定義（爲了型別安全，那其實是有必要的）整理一下，我們便可發現，*map* 其實是一個 `T**`，也就是說它是一個指標，所指之物又是一個指標，指向型別爲 `T` 的一塊空間，如圖 4-10。

稍後在 `deque` 的建構過程中，我會詳細解釋 *map* 的配置及維護。



新的 map 於是可以容納更多的節點（亦即代表更多的緩衝區）

圖 4-10 `deque` 的結構設計中，*map* 和 node-buffer（節點-緩衝區）的關係。

4.4.3 deque 的迭代器

deque 是分段連續空間。維護其「整體連續」假象的任務，著落在迭代器的 operator++ 和 operator-- 兩個運算子身上。

讓我們思考一下，deque 迭代器應該具備什麼結構。首先，它必須能夠指出分段連續空間（亦即緩衝區）在哪裡，其次它必須能夠判斷自己是否已經處於其所在緩衝區的邊緣，如果是，一旦前進或後退時就必須跳躍至下一個或上一個緩衝區。爲了能夠正確跳躍，deque 必須隨時掌握管控中心（*map*）。下面這種實作方式符合需求：

```
template <class T, class Ref, class Ptr, size_t BufSiz>
struct __deque_iterator {  // 未繼承 std::iterator
  typedef __deque_iterator<T, T&, T*, BufSiz>      iterator;
  typedef __deque_iterator<T, const T&, const T*, BufSiz> const_iterator;
  static size_t buffer_size() {return __deque_buf_size(BufSiz, sizeof(T)); }

  // 未繼承 std::iterator，所以必須自行撰寫五個必要的迭代器相應型別（第 3 章）
  typedef random_access_iterator_tag iterator_category; // (1)
  typedef T value_type;                    // (2)
  typedef Ptr pointer;                     // (3)
  typedef Ref reference;                   // (4)
  typedef size_t size_type;
  typedef ptrdiff_t difference_type;       // (5)
  typedef T** map_pointer;

  typedef __deque_iterator self;

  // 保持與容器的聯結
  T* cur;    // 此迭代器所指之緩衝區中的現行（current）元素
  T* first;  // 此迭代器所指之緩衝區的頭
  T* last;   // 此迭代器所指之緩衝區的尾（含備用空間）
  map_pointer node;    // 指向管控中心
...
};
```

其中用來決定緩衝區大小的函式 buffer_size()，呼叫 __deque_buf_size()，後者是個全域函式，定義如下：

```
// 如果 n 不爲 0，傳回 n，表示 buffer size 由使用者自定。
// 如果 n 爲 0，表示 buffer size 使用預設值，那麼
//   如果 sz（元素大小，sizeof(value_type)）小於 512，傳回 512/sz，
//   如果 sz 不小於 512，傳回 1。
```

```
inline size_t __deque_buf_size(size_t n, size_t sz)
{
  return n != 0 ? n : (sz < 512 ? size_t(512 / sz) : size_t(1));
}
```

圖 4-11 是 deque 的中控器、緩衝區、迭代器的相互關係。

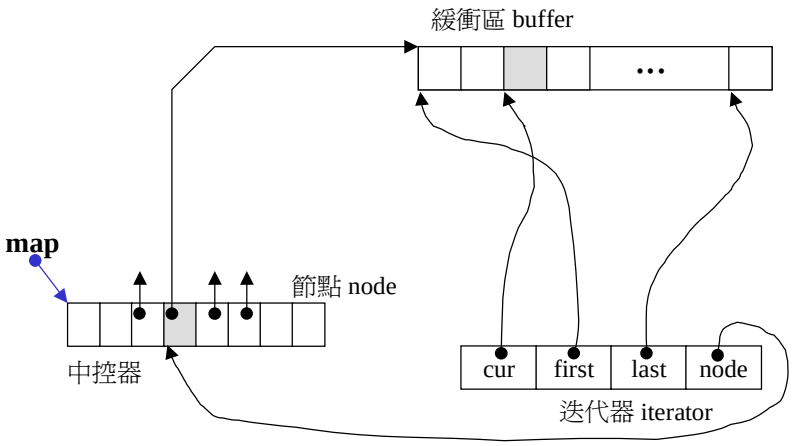


圖 4-11 deque 的中控器、緩衝區、迭代器的相互關係

假設現在我們產生一個 deque<int>，並令其緩衝區大小爲 32，於是每個緩衝區可容納 32/sizeof(int)=4 個元素。經過某些操作之後，deque 擁有 20 個元素，那麼其 begin() 和 end() 所傳回的兩個迭代器應該如圖 4-12。這兩個迭代器事實上一直保持在 deque 內，名爲 start 和 finish，稍後在 deque 資料結構中便可看到）。

20 個元素需要 20/8 = 3 個緩衝區，所以 *map* 之內運用了三個節點。迭代器 start 內的 cur 指標當然指向緩衝區的第一個元素，迭代器 finish 內的 cur 指標當然指向緩衝區的最後元素（的下一位置）。注意，最後一個緩衝區尚有備用空間。稍後如果有新元素要安插於尾端，可直接拿此備用空間來使用。

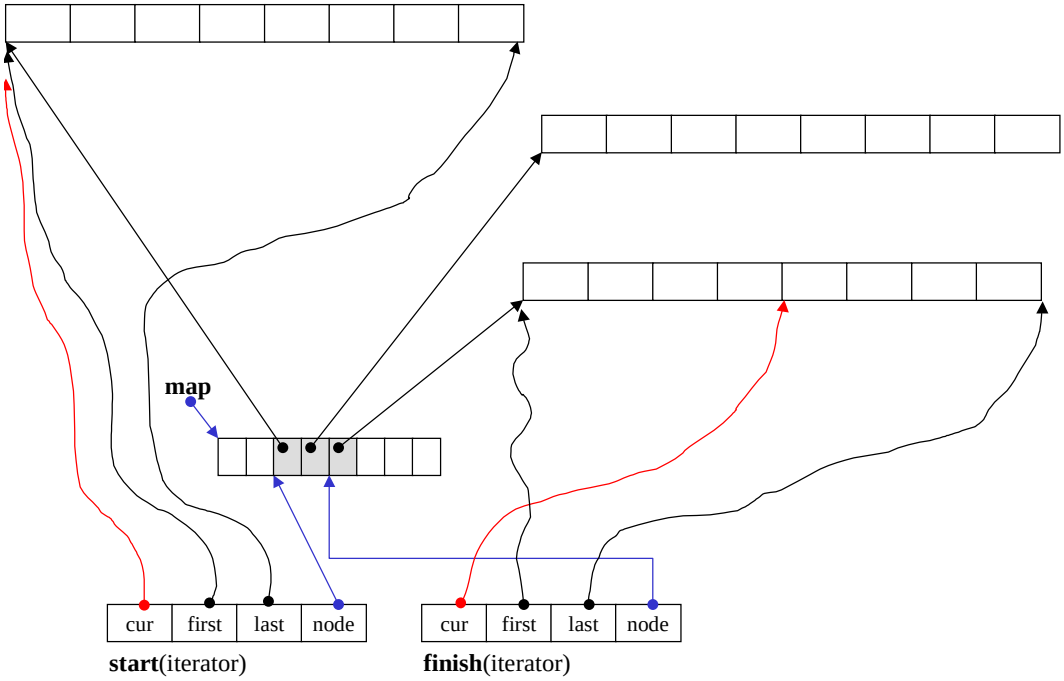


圖 4-12 `deque::begin()` 傳回迭代器 `start`，`deque::end()` 傳回迭代器 `finish`。這兩個迭代器都是 `deque` 的 data members。圖中所示的這個 `deque` 擁有 20 個 `int` 元素，以 3 個緩衝區儲存之。每個緩衝區 32 bytes，可儲存 8 個 `int` 元素。map 大小爲 8（起始值），目前用了 3 個節點。

下面是 `deque` 迭代器的幾個關鍵行爲。由於迭代器內對各種指標運算都做了多載化動作，所以各種指標運算如加、減、前進、後退…都不能直觀視之。其中最重點的關鍵就是：一旦行進時遇到緩衝區邊緣，要特別當心，視前進或後退而定，可能需要呼叫 `set_node()` 跳一個緩衝區：

```
void set_node(map_pointer new_node) {
  node = new_node;
  first = *new_node;
  last = first + difference_type(buffer_size());
}

// 以下各個多載化運算子是 __deque_iterator<> 成功運作的關鍵。

reference operator*() const { return *cur; }
pointer operator->() const { return &(operator*()); }
```

```
difference_type operator-(const self& x) const {
  return difference_type(buffer_size()) * (node - x.node - 1) +
    (cur - first) + (x.last - x.cur);
}

// 參考 More Effective C++, item6: Distinguish between prefix and
// postfix forms of increment and decrement operators.
self& operator++() {
  ++cur;                    // 切換至下一個元素。
  if (cur == last) {        // 如果已達所在緩衝區的尾端，
    set_node(node + 1);     // 就切換至下一節點（亦即緩衝區）
    cur = first;            //   的第一個元素。
  }
  return *this;
}
self operator++(int)  {   // 後置式，標準寫法
  self tmp = *this;
  ++*this;
  return tmp;
}
self& operator--() {
  if (cur == first) {       // 如果已達所在緩衝區的頭端，
    set_node(node - 1);     // 就切換至前一節點（亦即緩衝區）
    cur = last;             //   的最後一個元素。
  }
  --cur;                    // 切換至前一個元素。
  return *this;
}
self operator--(int) {    // 後置式，標準寫法
  self tmp = *this;
  --*this;
  return tmp;
}

// 以下實現隨機存取。迭代器可以直接跳躍 n 個距離。
self& operator+=(difference_type n) {
  difference_type offset = n + (cur - first);
  if (offset >= 0 && offset < difference_type(buffer_size()))
    // 標的位置在同一緩衝區內
    cur += n;
  else {
    // 標的位置不在同一緩衝區內
    difference_type node_offset =
      offset > 0 ? offset / difference_type(buffer_size())
                 : -difference_type((-offset - 1) / buffer_size()) - 1;
    // 切換至正確的節點（亦即緩衝區）
    set_node(node + node_offset);
    // 切換至正確的元素
```

```
      cur = first + (offset - node_offset * difference_type(buffer_size()));
    }
    return *this;
  }

  // 參考 More Effective C++, item22: Consider using op= instead of
  // stand-alone op.
  self operator+(difference_type n) const {
    self tmp = *this;
    return tmp += n; // 喚起 operator+=
  }

  self& operator-=(difference_type n) { return *this += -n; }
  // 以上利用 operator+= 來完成 operator-=

  // 參考 More Effective C++, item22: Consider using op= instead of
  // stand-alone op.
  self operator-(difference_type n) const {
    self tmp = *this;
    return tmp -= n; // 喚起 operator-=
  }

  // 以下實現隨機存取。迭代器可以直接跳躍 n 個距離。
  reference operator[](difference_type n) const { return *(*this + n); }
  // 以上喚起 operator*, operator+

  bool operator==(const self& x) const { return cur == x.cur; }
  bool operator!=(const self& x) const { return !(*this == x); }
  bool operator<(const self& x) const {
    return (node == x.node) ? (cur < x.cur) : (node < x.node);
  }
```

4.4.4 deque 的資料結構

deque 除了維護一個先前說過的指向 *map* 的指標外，也維護 start, finish 兩個迭代器，分別指向第一緩衝區的第一個元素和最後緩衝區的最後一個元素（的下一位置）。此外它當然也必須記住目前的 *map* 大小。因爲一旦 *map* 所提供的節點不足，就必須重新配置更大的一塊 *map*。

```
// 見 __deque_buf_size()。BufSize 預設值爲 0 的唯一理由是爲了閃避某些
// 編譯器在處理常數算式（constant expressions）時的臭蟲。
// 預設使用 alloc 爲配置器。
template <class T, class Alloc = alloc, size_t BufSiz = 0>
class deque {
public:                         // Basic types
  typedef T value_type;
```

```
  typedef value_type* pointer;
  typedef size_t size_type;

public:                         // Iterators
  typedef __deque_iterator<T, T&, T*, BufSiz>  iterator;

protected:                      // Internal typedefs
  // 元素的指標的指標（pointer of pointer of T）
  typedef pointer* map_pointer;

protected:                      // Data members
  iterator start;      // 表現第一個節點。
  iterator finish;     // 表現最後一個節點。

  map_pointer map;     // 指向 map，map 是塊連續空間，
                       // 其每個元素都是個指標，指向一個節點（緩衝區）。
  size_type map_size;  // map 內有多少指標。
...
};
```

有了上述結構，以下數個機能便可輕易完成：

```
public:                         // Basic accessors
  iterator begin() { return start; }
  iterator end() { return finish; }

  reference operator[](size_type n) {
    return start[difference_type(n)]; // 喚起 __deque_iterator<>::operator[]
  }

  reference front() { return *start; } // 喚起 __deque_iterator<>::operator*
  reference back() {
    iterator tmp = finish;
    --tmp;    // 喚起 __deque_iterator<>::operator--
    return *tmp;  // 喚起 __deque_iterator<>::operator*
    // 以上三行何不改爲：return *(finish-1);
    // 因爲 __deque_iterator<> 沒有爲 (finish-1) 定義運算子?!
  }

  // 下行最後有兩個 ';'，雖奇怪但合乎語法。
  size_type size() const { return finish - start;; }
  // 以上喚起 iterator::operator-
  size_type max_size() const { return size_type(-1); }
  bool empty() const { return finish == start; }
```

4.4.5 deque 的建構與記憶體管理 ctor, push_back, push_front

千頭萬緒該如何說起？以客端程式碼爲引導，觀察其所得結果並實證源碼，是個良好的學習路徑。下面是一個測試程式，我的觀察重點在建構的方式以及大小的變化，以及容器最前端的安插功能：

```
// filename : 4deque-test.cpp
#include <deque>
#include <iostream>
#include <algorithm>
using namespace std;

int main()
{
  deque<int,alloc,32> ideq(20,9);         // 注意，alloc 只適用於 G++
  cout << "size=" << ideq.size() << endl;     // size=20
  // 現在，應該已經建構了一個 deque，有 20 個 int 元素，初值皆爲 9。
  // 緩衝區大小爲 32bytes。

  // 爲每一個元素設定新值。
  for(int i=0; i<ideq.size(); ++i)
     ideq[i] = i;

  for(int i=0; i<ideq.size(); ++i)
     cout << ideq[i] << ' ';           // 0 1 2 3 4 5 6...19
  cout << endl;

  // 在最尾端增加 3 個元素，其值爲 0,1,2
  for(int i=0;i<3;i++)
    ideq.push_back(i);

  for(int i=0; i<ideq.size(); ++i)
     cout << ideq[i] << ' ';           // 0 1 2 3 ... 19 0 1 2
  cout << endl;
  cout << "size=" << ideq.size() << endl;     // size=23

  // 在最尾端增加 1 個元素，其值爲 3
  ideq.push_back(3);
  for(int i=0; i<ideq.size(); ++i)
     cout << ideq[i] << ' ';           // 0 1 2 3 ... 19 0 1 2 3
  cout << endl;
  cout << "size=" << ideq.size() << endl;     // size=24

  // 在最前端增加 1 個元素，其值爲 99
  ideq.push_front(99);
  for(int i=0; i<ideq.size(); ++i)
```

```
      cout << ideq[i] << ' ';           // 99 0 1 2 3...19 0 1 2 3
  cout << endl;
  cout << "size=" << ideq.size() << endl;     // size=25

  // 在最前端增加 2 個元素，其值分別爲 98,97
  ideq.push_front(98);
  ideq.push_front(97);
  for(int i=0; i<ideq.size(); ++i)
     cout << ideq[i] << ' ';      // 97 98 99 0 1 2 3...19 0 1 2 3
  cout << endl;
  cout << "size=" << ideq.size() << endl;     // size=27

  // 搜尋數值爲 99 的元素，並列印出來。
  deque<int,alloc,32>::iterator itr;
  itr = find(ideq.begin(), ideq.end(), 99);
  cout << *itr << endl;                       // 99
  cout << *(itr.cur) << endl;                 // 99
}
```

deque 的緩衝區擴充動作相當瑣碎繁雜，以下將以分解動作的方式一步一步圖解說明。程式一開始宣告了一個 deque：

```
deque<int,alloc,32> ideq(20,9);
```

其緩衝區大小爲 32 bytes，並令其保留 20 個元素空間，每個元素初值爲 9。爲了指定 deque 的第三個 template 參數（緩衝區大小），我們必須將前兩個參數都指明出來（這是 C++ 語法規則），因此必須明確指定 alloc（第二章）爲空間配置器。現在，deque 的情況如圖 4-12（該圖並未顯示每個元素的初值爲 9）。

deque 自行定義了兩個專屬的空間配置器：

```
protected:                    // Internal typedefs
  // 專屬之空間配置器，每次配置一個元素大小
  typedef simple_alloc<value_type, Alloc> data_allocator;
  // 專屬之空間配置器，每次配置一個指標大小
  typedef simple_alloc<pointer, Alloc> map_allocator;
```

並提供有一個 constructor 如下：

```
deque(int n, const value_type& value)
  : start(), finish(), map(0), map_size(0)
{
  fill_initialize(n, value);
}
```

其內所呼叫的 fill_initialize() 負責產生並安排好 deque 的結構，並將元素

的初值設定妥當：

```
template <class T, class Alloc, size_t BufSize>
void deque<T, Alloc, BufSize>::fill_initialize(size_type n,
                                               const value_type& value) {
  create_map_and_nodes(n);  // 把 deque 的結構都產生並安排好
  map_pointer cur;
  __STL_TRY {
    // 爲每個節點的緩衝區設定初值
    for (cur = start.node; cur < finish.node; ++cur)
      uninitialized_fill(*cur, *cur + buffer_size(), value);
    // 最後一個節點的設定稍有不同（因爲尾端可能有備用空間，不必設初值）
    uninitialized_fill(finish.first, finish.cur, value);
  }
  catch(...) {
     ...
  }
}
```

其中 create_map_and_nodes() 負責產生並安排好 deque 的結構：

```
template <class T, class Alloc, size_t BufSize>
void deque<T, Alloc, BufSize>::create_map_and_nodes(size_type num_elements)
{
  // 需要節點數=(元素個數/每個緩衝區可容納的元素個數)+1
  // 如果剛好整除，會多配一個節點。
  size_type num_nodes = num_elements / buffer_size() + 1;

  // 一個 map 要管理幾個節點。最少 8 個，最多是 “所需節點數加 2”
  // （前後各預留一個，擴充時可用）。
  map_size = max(initial_map_size(), num_nodes + 2);
  map = map_allocator::allocate(map_size);
  // 以上配置出一個 “具有 map_size 個節點” 的 map。

  // 以下令 nstart 和 nfinish 指向 map 所擁有之全部節點的最中央區段。
  // 保持在最中央，可使頭尾兩端的擴充能量一樣大。每個節點可對應一個緩衝區。
  map_pointer nstart = map + (map_size - num_nodes) / 2;
  map_pointer nfinish = nstart + num_nodes - 1;

  map_pointer cur;
  __STL_TRY {
    // 爲 map 內的每個現用節點配置緩衝區。所有緩衝區加起來就是 deque 的
    // 可用空間（最後一個緩衝區可能留有一些餘裕）。
    for (cur = nstart; cur <= nfinish; ++cur)
      *cur = allocate_node();
  }
  catch(...) {
    // "commit or rollback" 語意：若非全部成功，就一個不留。
    ...
```

```
    }

    // 爲 deque 內的兩個迭代器 start 和 end 設定正確內容。
    start.set_node(nstart);
    finish.set_node(nfinish);
    start.cur = start.first;      // first, cur 都是 public
    finish.cur = finish.first + num_elements % buffer_size();
    // 前面說過，如果剛好整除，會多配一個節點。
    // 此時即令 cur 指向這多配的一個節點（所對映之緩衝區）的起頭處。
}
```

接下來範例程式以註標運算子爲每個元素重新設值，然後在尾端安插三個新元素：

```
for(int i=0; i<ideq.size(); ++i)
    ideq[i] = i;

for(int i=0;i<3;i++)
  ideq.push_back(i);
```

由於此時最後一個緩衝區仍有 4 個備用元素空間，所以不會引起緩衝區的再配置。

此時的 deque 狀態如圖 4-13。

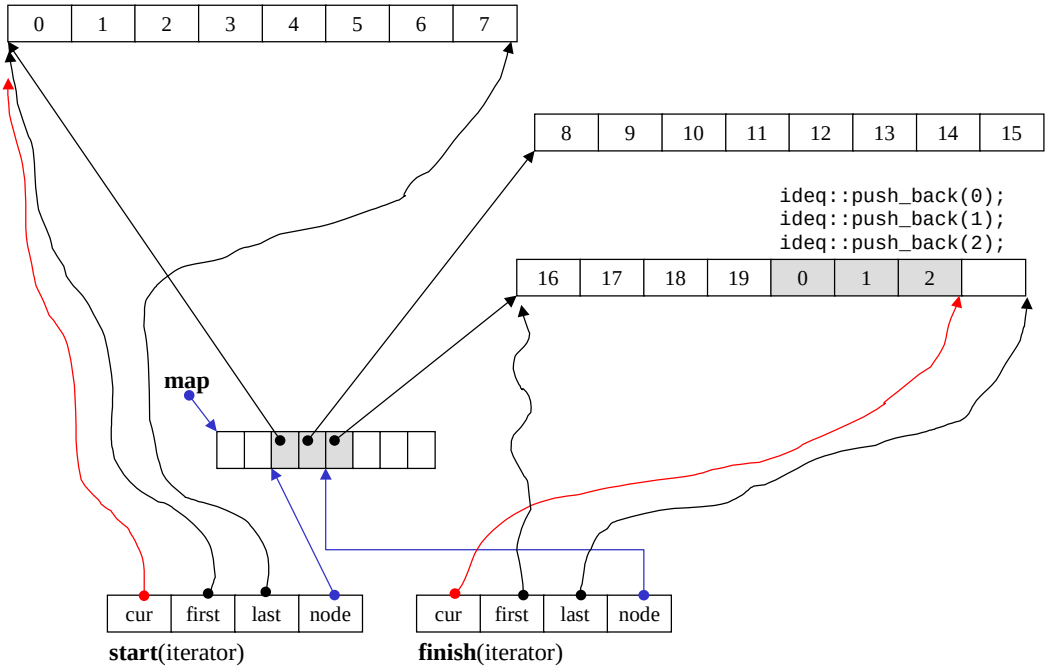


圖 4-13 延續圖 4-12 的狀態，將每個元素重新設值，並在尾端新增 3 個元素。

以下是 push_back() 函式內容：

```
public:                         // push_* and pop_*
  void push_back(const value_type& t) {
    if (finish.cur != finish.last - 1)
      // 最後緩衝區尚有一個以上的備用空間
      construct(finish.cur, t); // 直接在備用空間上建構元素
      ++finish.cur;     // 調整最後緩衝區的使用狀態
    }
    else  // 最後緩衝區已無（或只剩一個）元素備用空間。
      push_back_aux(t);
  }
```

現在，如果再新增加一個新元素於尾端：

```
ideq.push_back(3);
```

由於尾端只剩一個元素備用空間，於是 push_back() 呼叫 push_back_aux()，先配置一整塊新的緩衝區，再設妥新元素內容，然後更改迭代器 finish 的狀態：

```
// 只有當 finish.cur == finish.last – 1 時才會被呼叫。
// 也就是說只有當最後一個緩衝區只剩一個備用元素空間時才會被呼叫。
template <class T, class Alloc, size_t BufSize>
void deque<T, Alloc, BufSize>::push_back_aux(const value_type& t) {
  value_type t_copy = t;
  reserve_map_at_back();        //  若符合某種條件則必須重換一個 map
  *(finish.node + 1) = allocate_node();   // 配置一個新節點（緩衝區）
  __STL_TRY {
    construct(finish.cur, t_copy);        // 針對標的元素設值
    finish.set_node(finish.node + 1);     // 改變 finish，令其指向新節點
    finish.cur = finish.first;            // 設定 finish 的狀態
  }
  __STL_UNWIND(deallocate_node(*(finish.node + 1)));
}
```

現在，deque 的狀態如圖 4-14。

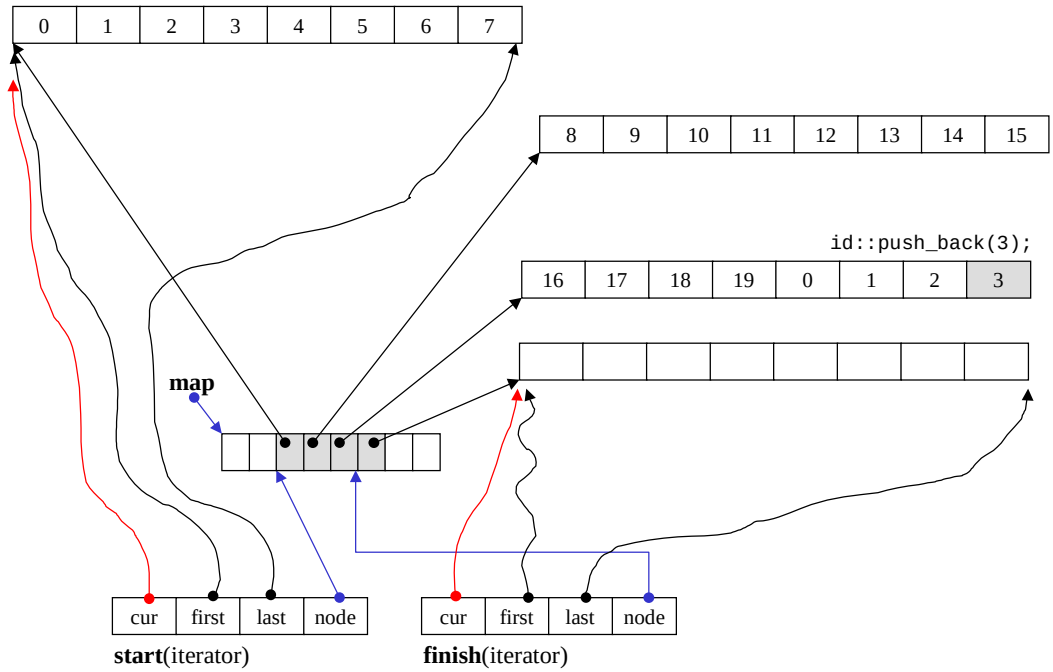


圖 4-14 延續圖 4-13 的狀態，在尾端再加一個元素，於是引發新緩衝區的配置，同時也造成迭代器 finish 的狀態改變。*map* 大小爲 8（初始值），目前用了 4 個節點。

接下來範例程式在 deque 的前端安插一個新元素：

```
ideq.push_front(99);
```

push_front() 函式動作如下：

```
public:                          // push_* and pop_*
  void push_front(const value_type& t) {
    if (start.cur != start.first) {  // 第一緩衝區尚有備用空間
      construct(start.cur - 1, t); // 直接在備用空間上建構元素
      --start.cur;      // 調整第一緩衝區的使用狀態
    }
    else // 第一緩衝區已無備用空間
      push_front_aux(t);
  }
```

由於目前狀態下，第一緩衝區並無備用空間，所以呼叫 push_front_aux()：

```
// 只有當 start.cur == start.first 時才會被呼叫。
// 也就是說只有當第一個緩衝區沒有任何備用元素時才會被呼叫。
template <class T, class Alloc, size_t BufSize>
void deque<T, Alloc, BufSize>::push_front_aux(const value_type& t)
{
  value_type t_copy = t;
  reserve_map_at_front();       //  若符合某種條件則必須重換一個 map
  *(start.node - 1) = allocate_node();    // 配置一個新節點（緩衝區）
  __STL_TRY {
    start.set_node(start.node - 1);       // 改變 start，令其指向新節點
    start.cur = start.last - 1;           // 設定 start 的狀態
    construct(start.cur, t_copy);         // 針對標的元素設值
  }
  catch(...) {
    // "commit or rollback" 語意：若非全部成功，就一個不留。
    start.set_node(start.node + 1);
    start.cur = start.first;
    deallocate_node(*(start.node - 1));
    throw;
  }
}
```

此函式一開始即呼叫 reserve_map_at_front()，後者用來判斷是否需要擴充 *map*，如有需要就付諸行動。稍後我會呈現 reserve_map_at_front() 的函式內容。目前的狀態不需要重新整治 *map*，所以後繼流程便配置了一塊新緩衝區並直接將節點安置於現有的 *map* 上，然後設定新元素，然後改變迭代器 start 的狀態，如圖 4-15。

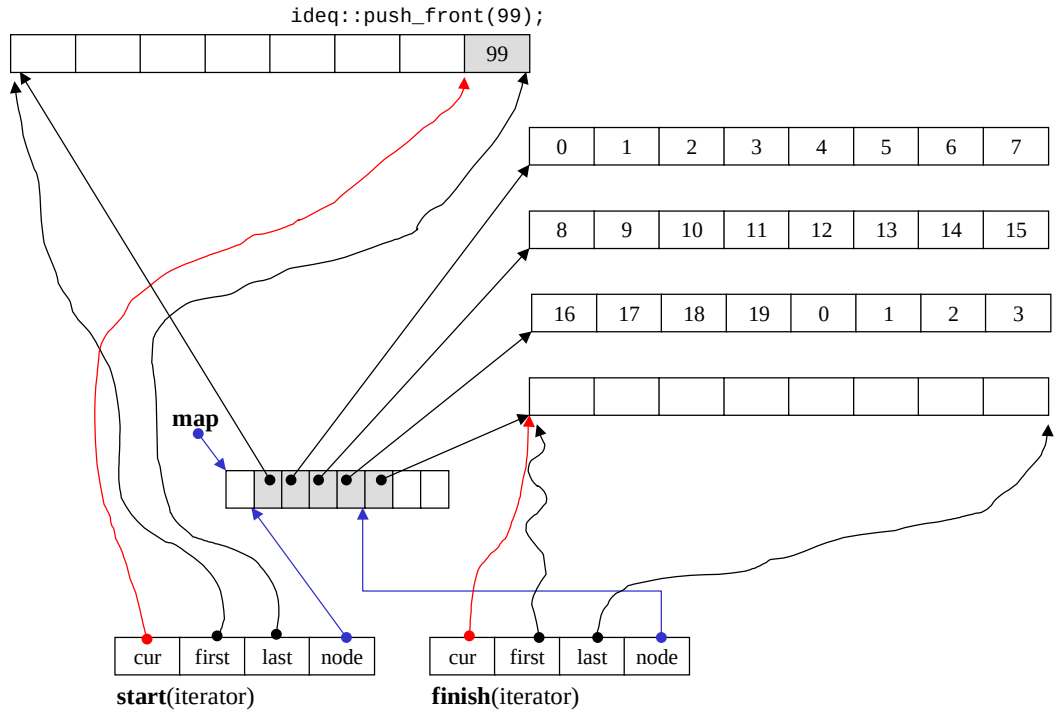


圖 4-15 延續圖 4-14 的狀態，在最前端加上一個元素。引發新緩衝區的配置，同時也造成迭代器 `start` 狀態改變。*map* 大小爲 8（初始值），目前用掉 5 個節點。

接下來範例程式又在 `deque` 的最前端安插兩個新元素：

```
ideq.push_front(98);
ideq.push_front(97);
```

這一次，由於第一緩衝區有備用空間，`push_front()` 可以直接在備用空間上建構新元素，如圖 4-16。

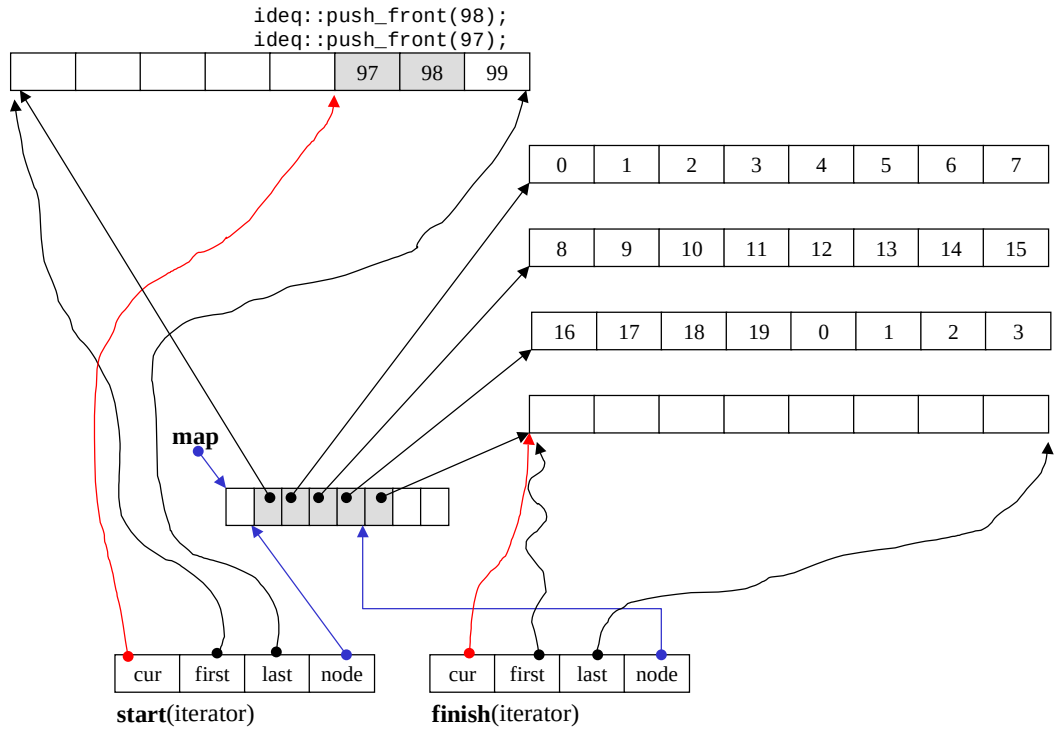


圖 4-16 延續圖 4-15 的狀態，在最前端再加兩個元素。由於第一緩衝區尚有備用空間，因此直接取用備用空間來建構新元素即可。

圖 4-12 至圖 4-16 的連環圖解，已經充份展示了 deque 容器的空間運用策略。讓我們回頭看看一個懸而未解的問題：什麼時候 *map* 需要重新整治？這個問題的判斷由 reserve_map_at_back() 和 reserve_map_at_front() 進行，實際動作則由 reallocate_map() 執行：

```
void reserve_map_at_back (size_type nodes_to_add = 1) {
  if (nodes_to_add + 1 > map_size - (finish.node - map))
    // 如果 map 尾端的節點備用空間不足
    // 符合以上條件則必須重換一個 map（配置更大的，拷貝原來的，釋放原來的）
    reallocate_map(nodes_to_add, false);
}

void reserve_map_at_front (size_type nodes_to_add = 1) {
  if (nodes_to_add > start.node - map)
    // 如果 map 前端的節點備用空間不足
```

```
    // 符合以上條件則必須重換一個 map（配置更大的，拷貝原來的，釋放原來的）
    reallocate_map(nodes_to_add, true);
  }

template <class T, class Alloc, size_t BufSize>
void deque<T, Alloc, BufSize>::reallocate_map(size_type nodes_to_add,
                                              bool add_at_front) {
  size_type old_num_nodes = finish.node - start.node + 1;
  size_type new_num_nodes = old_num_nodes + nodes_to_add;

  map_pointer new_nstart;
  if (map_size > 2 * new_num_nodes) {
    new_nstart = map + (map_size - new_num_nodes) / 2
                 + (add_at_front ? nodes_to_add : 0);
    if (new_nstart < start.node)
      copy(start.node, finish.node + 1, new_nstart);
    else
      copy_backward(start.node, finish.node + 1, new_nstart + old_num_nodes);
  }
  else {
    size_type new_map_size = map_size + max(map_size, nodes_to_add) + 2;
    // 配置一塊空間，準備給新 map 使用。
    map_pointer new_map = map_allocator::allocate(new_map_size);
    new_nstart = new_map + (new_map_size - new_num_nodes) / 2
                     + (add_at_front ? nodes_to_add : 0);
    // 把原 map 內容拷貝過來。
    copy(start.node, finish.node + 1, new_nstart);
    // 釋放原 map
    map_allocator::deallocate(map, map_size);
    // 設定新 map 的起始位址與大小
    map = new_map;
    map_size = new_map_size;
  }

  // 重新設定迭代器 start 和 finish
  start.set_node(new_nstart);
  finish.set_node(new_nstart + old_num_nodes - 1);
}
```

4.4.6 deque 的元素操作

pop_back, pop_front, clear, erase, insert

deque 所提供的元素操作動作很多，無法在有限的篇幅中一一講解 — 其實也沒有這種必要。以下我只挑選幾個 member functions 做爲示範說明。

前述測試程式曾經以泛型演算法 find() 尋找 deque 的某個元素：

```
deque<int,alloc,32>::iterator itr;
itr = find(ideq.begin(), ideq.end(), 99);
```

當 find() 動作完成，迭代器 itr 狀態如圖 4-17 所示。下面這兩個動作輸出相同的結果，印證我們對 deque 迭代器的認識。

```
cout << *itr << endl;                    // 99
cout << *(itr.cur) << endl;              // 99
```

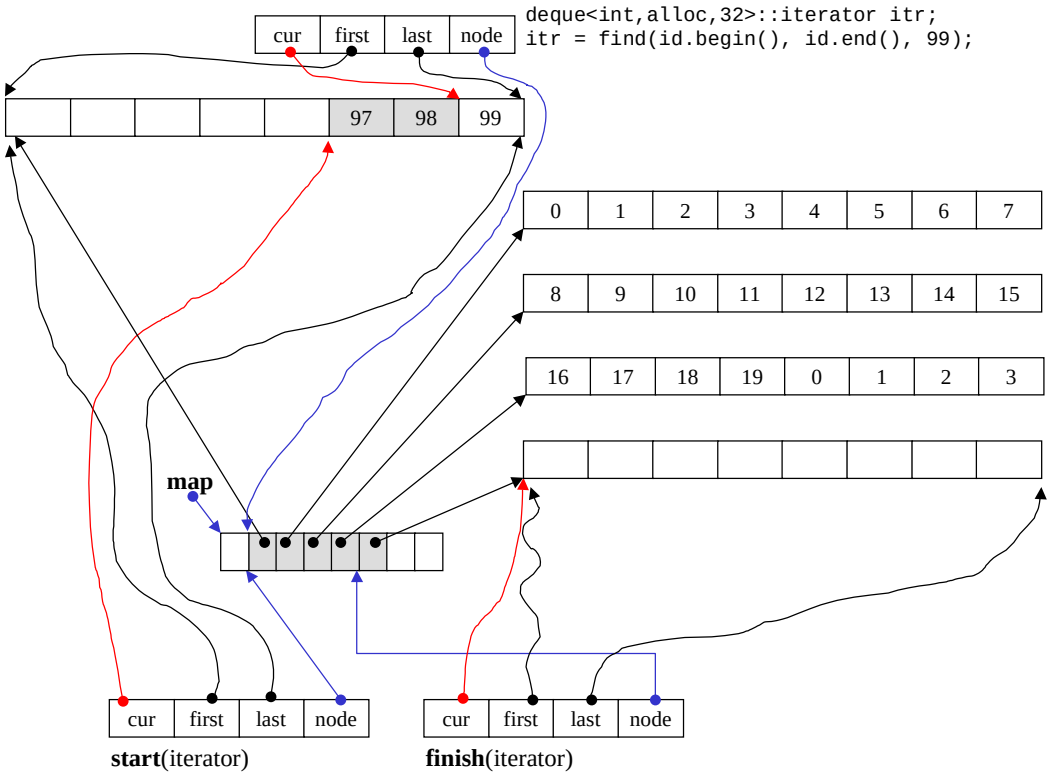


圖 4-17 延續圖 4-16 的狀態，以 find() 尋找數值爲 99 的元素。此函式將傳回一個迭代器，指向第一個符合條件的元素。注意，該迭代器的四個欄位都必須有正確的設定。

前一節已經展示過 push_back() 和 push_front() 的實作內容，現在我舉對應的 pop_back()和 pop_front()爲例。所謂 pop，是將元素拿掉。無論從 deque 的最前端或最尾端取元素，都需考量在某種條件下，將緩衝區釋放掉：

```
  void pop_back() {
    if (finish.cur != finish.first) {
      // 最後緩衝區有一個（或更多）元素
      --finish.cur;          // 調整指標，相當於排除了最後元素
      destroy(finish.cur);  // 將最後元素解構
    }
    else
      // 最後緩衝區沒有任何元素
      pop_back_aux();        // 這裡將進行緩衝區的釋放工作
  }

// 只有當 finish.cur == finish.first 時才會被呼叫。
template <class T, class Alloc, size_t BufSize>
void deque<T, Alloc, BufSize>::pop_back_aux() {
  deallocate_node(finish.first);     // 釋放最後一個緩衝區
  finish.set_node(finish.node - 1); // 調整 finish 的狀態，使指向
  finish.cur = finish.last - 1;      //  上一個緩衝區的最後一個元素
  destroy(finish.cur);               // 將該元素解構。
}


  void pop_front() {
    if (start.cur != start.last - 1) {
      // 第一緩衝區有一個（或更多）元素
      destroy(start.cur);   // 將第一元素解構
      ++start.cur;          // 調整指標，相當於排除了第一元素
    }
    else
      // 第一緩衝區僅有一個元素
      pop_front_aux();       // 這裡將進行緩衝區的釋放工作
  }

// 只有當 start.cur == start.last - 1 時才會被呼叫。
template <class T, class Alloc, size_t BufSize>
void deque<T, Alloc, BufSize>::pop_front_aux() {
  destroy(start.cur);                // 將第一緩衝區的第一個元素解構。
  deallocate_node(start.first);      // 釋放第一緩衝區。
  start.set_node(start.node + 1);    // 調整 start 的狀態，使指向
  start.cur = start.first;           //  下一個緩衝區的第一個元素。
}
```

下面這個例子是 clear()，用來清除整個 deque。請注意，deque 的最初狀態（無任何元素時）保有一個緩衝區，因此 clear() 完成之後回復初始狀態，也一樣要保留一個緩衝區：

```
// 注意，最終需要保留一個緩衝區。這是 deque 的策略，也是 deque 的初始狀態。
template <class T, class Alloc, size_t BufSize>
void deque<T, Alloc, BufSize>::clear() {
  // 以下針對頭尾以外的每一個緩衝區（它們一定都是飽滿的）
  for (map_pointer node = start.node + 1; node < finish.node; ++node) {
    // 將緩衝區內的所有元素解構。注意，呼叫的是 destroy() 第二版本，見 2.2.3 節
    destroy(*node, *node + buffer_size());
    // 釋放緩衝區記憶體
    data_allocator::deallocate(*node, buffer_size());
  }

  if (start.node != finish.node) {   // 至少有頭尾兩個緩衝區
    destroy(start.cur, start.last);  // 將頭緩衝區的目前所有元素解構
    destroy(finish.first, finish.cur); // 將尾緩衝區的目前所有元素解構
    // 以下釋放尾緩衝區。注意，頭緩衝區保留。
    data_allocator::deallocate(finish.first, buffer_size());
  }
  else  // 只有一個緩衝區
    destroy(start.cur, finish.cur);  // 將此唯一緩衝區內的所有元素解構
    // 注意，並不釋放緩衝區空間。這唯一的緩衝區將保留。

  finish = start; // 調整狀態
}
```

下面這個例子是 erase()，用來清除某個元素：

```
// 清除 pos 所指的元素。pos 爲清除點。
iterator erase(iterator pos) {
  iterator next = pos;
  ++next;
  difference_type index = pos - start;  // 清除點之前的元素個數
  if (index < (size() >> 1)) {          // 如果清除點之前的元素比較少，
    copy_backward(start, pos, next);    // 就搬移清除點之前的元素
    pop_front();                // 搬移完畢，最前一個元素贅餘，去除之
  }
  else {                        // 清除點之後的元素比較少，
    copy(next, finish, pos);    // 就搬移清除點之後的元素
    pop_back();                 // 搬移完畢，最後一個元素贅餘，去除之
  }
  return start + index;
}
```

下面這個例子是 erase()，用來清除 [first,last) 區間內的所有元素：

```
template <class T, class Alloc, size_t BufSize>
deque<T, Alloc, BufSize>::iterator
deque<T, Alloc, BufSize>::erase(iterator first, iterator last) {
  if (first == start && last == finish) { // 如果清除區間就是整個 deque
    clear();                              // 直接呼叫 clear() 即可
    return finish;
  }
  else {
    difference_type n = last - first;               // 清除區間的長度
    difference_type elems_before = first - start;   // 清除區間前方的元素個數
    if (elems_before < (size() - n) / 2) {          // 如果前方的元素比較少，
      copy_backward(start, first, last);       // 向後搬移前方元素（覆蓋清除區間）
      iterator new_start = start + n;          // 標記 deque 的新起點
      destroy(start, new_start);               // 搬移完畢，將贅餘的元素解構
      // 以下將贅餘的緩衝區釋放
      for (map_pointer cur = start.node; cur < new_start.node; ++cur)
        data_allocator::deallocate(*cur, buffer_size());
      start = new_start;    // 設定 deque 的新起點
    }
    else {    // 如果清除區間後方的元素比較少
      copy(last, finish, first);           // 向前搬移後方元素（覆蓋清除區間）
      iterator new_finish = finish - n;    // 標記 deque 的新尾點
      destroy(new_finish, finish);         // 搬移完畢，將贅餘的元素解構
      // 以下將贅餘的緩衝區釋放
      for (map_pointer cur = new_finish.node + 1; cur <= finish.node; ++cur)
        data_allocator::deallocate(*cur, buffer_size());
      finish = new_finish;  // 設定 deque 的新尾點
    }
    return start + elems_before;
  }
}
```

本節要說明的最後一個例子是 insert。deque 爲這個功能提供了許多版本，最基礎最重要的是以下版本，允許在某個點（之前）安插一個元素，並設定其值。

```
// 在 position 處安插一個元素，其值爲 x
iterator insert(iterator position, const value_type& x) {
  if (position.cur == start.cur) { // 如果安插點是 deque 最前端
    push_front(x);                 // 交給 push_front 去做
    return start;
  }
  else if (position.cur == finish.cur) { // 如果安插點是 deque 最尾端
    push_back(x);                        // 交給 push_back 去做
    iterator tmp = finish;
    --tmp;
```

```
      return tmp;
    }
    else {
      return insert_aux(position, x);     // 交給 insert_aux 去做
    }
  }

template <class T, class Alloc, size_t BufSize>
typename deque<T, Alloc, BufSize>::iterator
deque<T, Alloc, BufSize>::insert_aux(iterator pos, const value_type& x) {
  difference_type index = pos - start;   // 安插點之前的元素個數
  value_type x_copy = x;
  if (index < size() / 2) {          // 如果安插點之前的元素個數比較少
    push_front(front());             // 在最前端加入與第一元素同值的元素。
    iterator front1 = start;         // 以下標示記號，然後進行元素搬移...
    ++front1;
    iterator front2 = front1;
    ++front2;
    pos = start + index;
    iterator pos1 = pos;
    ++pos1;
    copy(front2, pos1, front1);      // 元素搬移
  }
  else {                           // 安插點之後的元素個數比較少
    push_back(back());               // 在最尾端加入與最後元素同值的元素。
    iterator back1 = finish;         // 以下標示記號，然後進行元素搬移...
    --back1;
    iterator back2 = back1;
    --back2;
    pos = start + index;
    copy_backward(pos, back2, back1);     // 元素搬移
  }
  *pos = x_copy;  // 在安插點上設定新值
  return pos;
}
```

4.5 stack

4.5.1 stack 概述

stack 是一種先進後出（First In Last Out，FILO）的資料結構。它只有一個出口，型式如圖 4-18。stack 允許新增元素、移除元素、取得最頂端元素。但除了最頂端外，沒有任何其他方法可以存取 stack 的其他元素。換言之 stack 不允許有走訪行爲。

將元素推入 stack 的動作稱爲 *push*，將元素推出 stack 的動作稱爲 *pop*。

圖 4-18 stack 的結構

4.5.2 stack 定義式完整列表

以某種既有容器做爲底部結構，將其介面改變，使符合「先進後出」的特性，形成一個 stack，是很容易做到的。deque 是雙向開口的資料結構，若以 deque 爲底部結構並封閉其頭端開口，便輕而易舉地形成了一個 stack。因此，SGI STL 便以 deque 做爲預設情況下的 stack 底部結構，stack 的實作因而非常簡單，源碼十分簡短，本處完整列出。

由於 stack 係以底部容器完成其所有工作，而具有這種「修改某物介面，形成另一種風貌」之性質者，稱爲 adapter（配接器），因此 STL stack 往往不被歸類爲 container（容器），而被歸類爲 container adapter。

```
template <class T, class Sequence = deque<T> >
class stack {
  // 以下的 __STL_NULL_TMPL_ARGS 會開展爲 <>，見 1.9.1 節
  friend bool operator== __STL_NULL_TMPL_ARGS (const stack&, const stack&);
  friend bool operator< __STL_NULL_TMPL_ARGS (const stack&, const stack&);
public:
```

```
  typedef typename Sequence::value_type value_type;
  typedef typename Sequence::size_type size_type;
  typedef typename Sequence::reference reference;
  typedef typename Sequence::const_reference const_reference;
protected:
  Sequence c;     // 底層容器
public:
  // 以下完全利用 Sequence c 的操作，完成 stack 的操作。
  bool empty() const { return c.empty(); }
  size_type size() const { return c.size(); }
  reference top() { return c.back(); }
  const_reference top() const { return c.back(); }
  // deque 是兩頭可進出，stack 是末端進，末端出（所以後進者先出）。
  void push(const value_type& x) { c.push_back(x); }
  void pop() { c.pop_back(); }
};

template <class T, class Sequence>
bool operator==(const stack<T, Sequence>& x, const stack<T, Sequence>& y)
{
  return x.c == y.c;
}

template <class T, class Sequence>
bool operator<(const stack<T, Sequence>& x, const stack<T, Sequence>& y)
{
  return x.c < y.c;
}
```

4.5.3 stack 沒有迭代器

stack 所有元素的進出都必須符合「先進後出」的條件，只有 stack 頂端的元素，才有機會被外界取用。stack 不提供走訪功能，也不提供迭代器。

4.5.4 以 list 做為 stack 的底層容器

除了 deque 之外，list 也是雙向開口的資料結構。上述 stack 源碼中使用的底層容器的函式有 empty, size, back, push_back, pop_back，凡此種種 list 都具備。因此若以 list 爲底部結構並封閉其頭端開口，一樣能夠輕易形成一個 stack。下面是作法示範。

```
// file : 4stack-test.cpp
#include <stack>
#include <list>
#include <iostream>
```

```
#include <algorithm>
using namespace std;

int main()
{
  stack<int,list<int> > istack;
  istack.push(1);
  istack.push(3);
  istack.push(5);
  istack.push(7);

  cout << istack.size() << endl;     // 4
  cout << istack.top() << endl;      // 7

  istack.pop(); cout << istack.top() << endl;   // 5
  istack.pop(); cout << istack.top() << endl;   // 3
  istack.pop(); cout << istack.top() << endl;   // 1
  cout << istack.size() << endl;     // 1
}
```

4.6 queue

4.6.1 queue 概述

queue 是一種先進先出（First In First Out，FIFO）的資料結構。它有兩個出口，型式如圖 4-19。queue 允許新增元素、移除元素、從最底端加入元素、取得最頂端元素。但除了最底端可以加入、最頂端可以取出，沒有任何其他方法可以存取 queue 的其他元素。換言之 queue 不允許有走訪行爲。

將元素推入 queue 的動作稱爲 *push*，將元素推出 queue 的動作稱爲 *pop*。

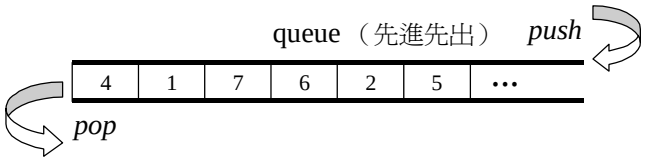


圖 4-19 queue 的結構

4.6.2 queue 定義式完整列表

以某種既有容器爲底部結構，將其介面改變，使符合「先進先出」的特性，形成一個 queue，是很容易做到的。deque 是雙向開口的資料結構，若以 deque 爲底部結構並封閉其底端的出口和前端的入口，便輕而易舉地形成了一個 queue。因此，SGI STL 便以 deque 做爲預設情況下的 queue 底部結構，queue 的實作因而非常簡單，源碼十分簡短，本處完整列出。

由於 queue 係以底部容器完成其所有工作，而具有這種「修改某物介面，形成另一種風貌」之性質者，稱爲 adapter（配接器），因此 STL queue 往往不被歸類爲 container（容器），而被歸類爲 container adapter。

```
template <class T, class Sequence = deque<T> >
class queue {
  // 以下的 __STL_NULL_TMPL_ARGS 會開展爲 <>，見 1.9.1 節
  friend bool operator== __STL_NULL_TMPL_ARGS (const queue& x, const queue& y);
  friend bool operator< __STL_NULL_TMPL_ARGS (const queue& x, const queue& y);
public:
  typedef typename Sequence::value_type value_type;
  typedef typename Sequence::size_type size_type;
  typedef typename Sequence::reference reference;
  typedef typename Sequence::const_reference const_reference;
protected:
  Sequence c;     // 底層容器
public:
  // 以下完全利用 Sequence c 的操作，完成 queue 的操作。
  bool empty() const { return c.empty(); }
  size_type size() const { return c.size(); }
  reference front() { return c.front(); }
  const_reference front() const { return c.front(); }
  reference back() { return c.back(); }
  const_reference back() const { return c.back(); }
  // deque 是兩頭可進出，queue 是末端進，前端出（所以先進者先出）。
  void push(const value_type& x) { c.push_back(x); }
  void pop() { c.pop_front(); }
};

template <class T, class Sequence>
bool operator==(const queue<T, Sequence>& x, const queue<T, Sequence>& y)
{
  return x.c == y.c;
}
```

```
template <class T, class Sequence>
bool operator<(const queue<T, Sequence>& x, const queue<T, Sequence>& y)
{
  return x.c < y.c;
}
```

4.6.3 queue 沒有迭代器

queue 所有元素的進出都必須符合「先進先出」的條件，只有 queue 頂端的元素，才有機會被外界取用。queue 不提供走訪功能，也不提供迭代器。

4.6.4 以 list 做為 queue 的底層容器

除了 deque 之外，list 也是雙向開口的資料結構。上述 queue 源碼中使用的底層容器的函式有 empty, size, back, push_back, pop_back，凡此種種 list 都具備。因此若以 list 爲底部結構並封閉其頭端開口，一樣能夠輕易形成一個 queue。下面是作法示範。

```
// file : 4queue-test.cpp
#include <queue>
#include <list>
#include <iostream>
#include <algorithm>
using namespace std;

int main()
{
  queue<int,list<int> > iqueue;
  iqueue.push(1);
  iqueue.push(3);
  iqueue.push(5);
  iqueue.push(7);

  cout << iqueue.size() << endl;     // 4
  cout << iqueue.front() << endl;    // 1

  iqueue.pop(); cout << iqueue.front() << endl;   // 3
  iqueue.pop(); cout << iqueue.front() << endl;   // 5
  iqueue.pop(); cout << iqueue.front() << endl;   // 7
  cout << iqueue.size() << endl;     // 1
}
```

4.7 heap（隱性表述，implicit representation）

4.7.1 heap 概述

heap 並不歸屬於 STL 容器組件，它是個幕後英雄，扮演 priority queue（4.8 節）的推手。顧名思義，priority queue 允許使用者以任何次序將任何元素推入容器內，但取出時一定是從優先權最高（也就是數值最高）之元素開始取。binary max heap 正是具有這樣的特性，適合做爲 priority queue 的底層機制。

讓我們做點分析。如果使用 4.3 節的 list 做爲 priority queue 的底層機制，元素安插動作可享常數時間。但是要找到 list 中的極值，卻需要對整個 list 進行線性掃描。我們也可以改個作法，讓元素安插前先經過排序這一關，使得 list 的元素值總是由小到大（或由大到小），但這麼一來，收之東隅卻失之桑榆：雖然取得極值以及元素刪除動作達到最高效率，元素的安插卻只有線性表現。

比較麻辣的作法是以 binary search tree（如 5.1 節的 RB-tree）做爲 priority queue 的底層機制。這麼一來元素的安插和極值的取得就有 *O(logN)* 的表現。但殺雞用牛刀，未免小題大作，一來 binary search tree 的輸入需要足夠的隨機性，二來 binary search tree 並不容易實作。priority queue 的複雜度，最好介於 queue 和 binary search tree 之間，才算適得其所。binary heap 便是這種條件下的適當候選人。

所謂 binary heap 就是一種 complete binary tree（完全二元樹）[2]，也就是說，整棵 binary tree 除了最底層的葉節點(s) 之外，是填滿的，而最底層的葉節點(s) 由左至右又不得有空隙。圖 4-20 是一個 complete binary tree。

[2] 關於 tree 的種種，5.1 節會有更多介紹。

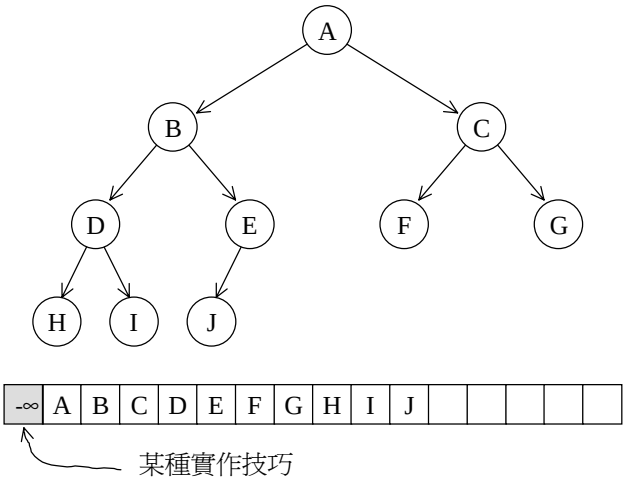


圖 4-20 一個完全二元樹（complete binary tree），及其 array 表述式

complete binary tree 整棵樹內沒有任何節點漏洞，這帶來一個極大好處：我們可以利用 array 來儲存所有節點。假設動用一個小技巧[3]，將 array 的 #0 元素保留（或設爲無限大值或無限小值），那麼當 complete binary tree 中的某個節點位於 array 的 i 處，其左子節點必位於 array 的 2i 處，其右子節點必位於 array 的 2i+1 處，其父節點必位於「i/2」處（此處的「」權且代表高斯符號，取其整數）。通過這麼簡單的位置規則，array 可以輕易實作出 complete binary tree。這種以 array 表述 tree 的方式，我們稱爲隱式表述法（implicit representation）。

這麼一來，我們需要的工具就很簡單了：一個 array 和一組 heap 演算法（用來安插元素、刪除元素、取極值、將某一整組數據排列成一個 heap）。array 的缺點是無法動態改變大小，而 heap 卻需要這項功能，因此以 vector（4.2 節）代替 array 是更好的選擇。

根據元素排列方式，heap 可分爲 max-heap 和 min-heap 兩種，前者每個節點的鍵值（*key*）都大於或等於其子節點鍵值，後者的每個節點鍵值（*key*）都小於或等

[3] SGI STL 提供的 heap 並未使用此一小技巧。計算左右子節點以及父節點的方式，因而略有不同。詳見稍後的源碼及解說。

於其子節點鍵值。因此，max-heap 的最大值在根節點，並總是位於底層 array 或 vector 的起頭處；min-heap 的最小值在根節點，亦總是位於底層 array 或 vector 的起頭處。STL 供應的是 max-heap，因此以下我說 heap 時，指的是 max-heap。

4.7.2 heap 演算法

push_heap 演算法

圖 4-21 是 push_heap 演算法的實際操演情況。爲了滿足 complete binary tree 的條件，新加入的元素一定要放在最下一層做爲葉節點，並填補在由左至右的第一個空格，也就是把新元素安插在底層 vector 的 end() 處。

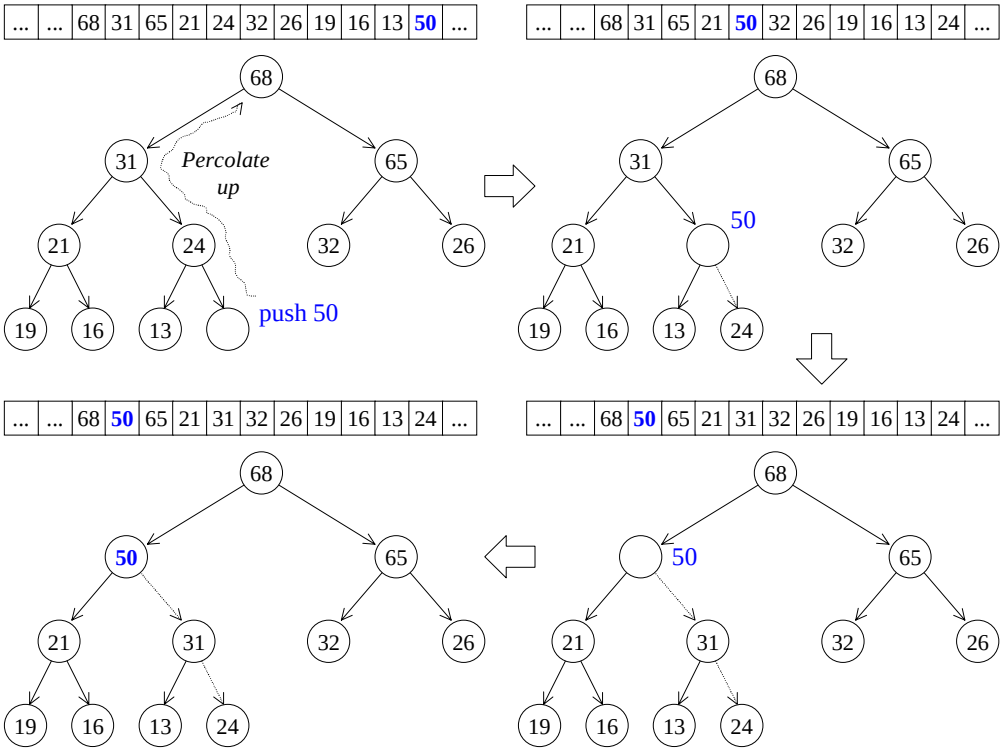


圖 4-21 push_heap 演算法

新元素是否適合於其現有位置呢？爲滿足 max-heap 的條件（每個節點的鍵值都大於或等於其子節點鍵值），我們執行一個所謂的 percolate up（上溯）程序：將新節點拿來與其父節點比較，如果其鍵值（*key*）比父節點大，就父子對換位置。如此一直上溯，直到不需對換或直到根節點爲止。

下面便是 push_heap 演算法的實作細節。此函式接受兩個迭代器，用來表現一個 heap 底部容器（vector）的頭尾，新元素並且已經安插到底部容器的最尾端。如果不符合這兩個條件，push_heap 的執行結果未可預期。

```
template <class RandomAccessIterator>
inline void push_heap(RandomAccessIterator first,
                      RandomAccessIterator last) {
  // 注意，此函式被呼叫時，新元素應已置於底部容器的最尾端。
  __push_heap_aux(first, last, distance_type(first),
                  value_type(first));
}

template <class RandomAccessIterator, class Distance, class T>
inline void __push_heap_aux(RandomAccessIterator first,
                            RandomAccessIterator last, Distance*, T*) {
  __push_heap(first, Distance((last - first) - 1), Distance(0),
              T(*(last - 1)));
  // 以上係根據 implicit representation heap 的結構特性：新值必置於底部
  // 容器的最尾端，此即第一個洞號：(last-first)-1。
}

// 以下這組 push_back()不允許指定「大小比較標準」
template <class RandomAccessIterator, class Distance, class T>
void __push_heap(RandomAccessIterator first, Distance holeIndex,
                 Distance topIndex, T value) {
  Distance parent = (holeIndex - 1) / 2; // 找出父節點
  while (holeIndex > topIndex && *(first + parent) < value) {
    // 當尚未到達頂端，且父節點小於新值（於是不符合 heap 的次序特性）
    // 由於以上使用 operator<，可知 STL heap 是一種 max-heap（大者爲父）。
    *(first + holeIndex) = *(first + parent); // 令洞值爲父值
    holeIndex = parent; // percolate up：調整洞號，向上提昇至父節點。
    parent = (holeIndex - 1) / 2;    // 新洞的父節點
  }   // 持續至頂端，或滿足 heap 的次序特性爲止。
  *(first + holeIndex) = value; // 令洞值爲新值，完成安插動作。
}
```

pop_heap 演算法

圖 4-22 是 pop_heap 演算法的實際操演情況。既然身爲 max-heap，最大值必然在根節點。pop 動作取走根節點（其實是移至底部容器 vector 的最後一個元素）之後，爲了滿足 complete binary tree 的條件，必須將最下一層最右邊的葉節點拿掉，現在我們的任務是爲這個被拿掉的節點找一個適當的位置。

爲滿足 max-heap 的條件（每個節點的鍵值都大於或等於其子節點鍵值），我們執行一個所謂的 percolate down（下放）程序：將根節點（最大值被取走後，形成一個「洞」）填入上述那個失去生存空間的葉節點值，再將它拿來和其兩個子節點比較鍵值（*key*），並與較大子節點對調位置。如此一直下放，直到這個「洞」的鍵值大於左右兩個子節點，或直到下放至葉節點爲止。

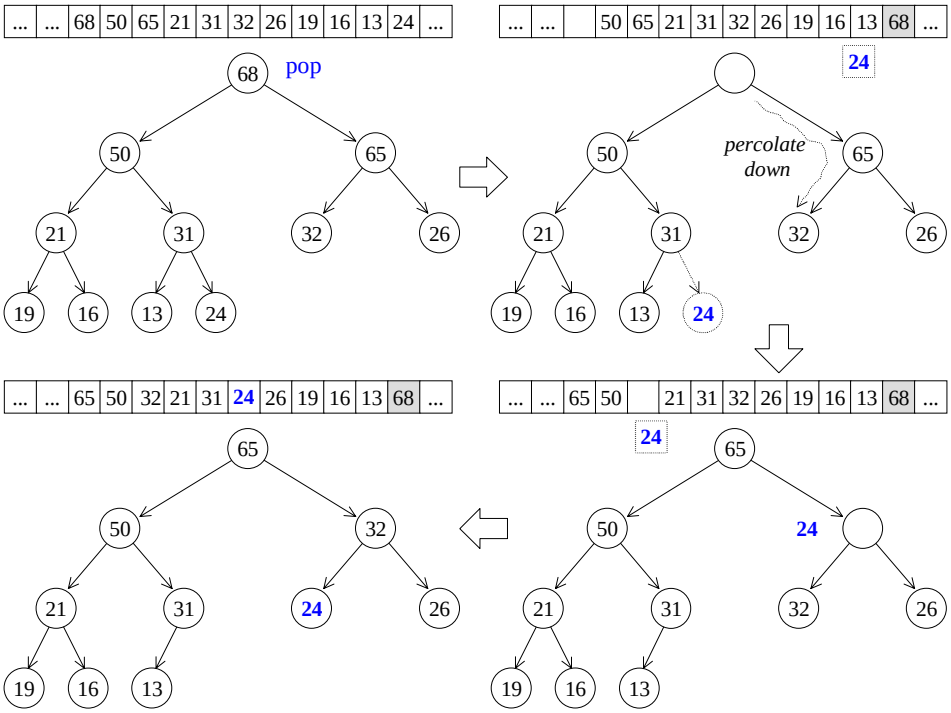


圖 4-22 pop_heap 演算法

下面便是 pop_heap 演算法的實作細節。此函式接受兩個迭代器，用來表現一個 heap 底部容器（vector）的頭尾。如果不符合這個條件，pop_heap 的執行結果未可預期。

```
template <class RandomAccessIterator>
inline void pop_heap(RandomAccessIterator first,
                     RandomAccessIterator last) {
  __pop_heap_aux(first, last, value_type(first));
}

template <class RandomAccessIterator, class T>
inline void __pop_heap_aux(RandomAccessIterator first,
                       RandomAccessIterator last, T*) {
  __pop_heap(first, last-1, last-1, T(*(last-1)),
             distance_type(first));
  // 以上，根據 implicit representation heap 的次序特性，pop 動作的結果
  // 應爲底部容器的第一個元素。因此，首先設定欲調整值爲尾值，然後將首值調至
  // 尾節點（所以以上將迭代器 result 設爲 last-1）。然後重整 [first, last-1)，
  // 使之重新成一個合格的 heap。
}

// 以下這組 __pop_heap() 不允許指定「大小比較標準」
template <class RandomAccessIterator, class T, class Distance>
inline void __pop_heap(RandomAccessIterator first,
                       RandomAccessIterator last,
                       RandomAccessIterator result,
                       T value, Distance*) {
  *result = *first; // 設定尾值爲首值，於是尾值即爲欲求結果，
                    // 可由客端稍後再以底層容器之 pop_back() 取出尾值。
  __adjust_heap(first, Distance(0), Distance(last - first), value);
  // 以上欲重新調整 heap，洞號爲 0（亦即樹根處），欲調整值爲 value（原尾值）。
}

// 以下這個 __adjust_heap() 不允許指定「大小比較標準」
template <class RandomAccessIterator, class Distance, class T>
void __adjust_heap(RandomAccessIterator first, Distance holeIndex,
                   Distance len, T value) {
  Distance topIndex = holeIndex;
  Distance secondChild = 2 * holeIndex + 2;    // 洞節點之右子節點
  while (secondChild < len) {
    // 比較洞節點之左右兩個子值，然後以 secondChild 代表較大子節點。
    if (*(first + secondChild) < *(first + (secondChild - 1)))
      secondChild--;
    // Percolate down：令較大子值爲洞值，再令洞號下移至較大子節點處。
    *(first + holeIndex) = *(first + secondChild);
    holeIndex = secondChild;
    // 找出新洞節點的右子節點
```

```
    secondChild = 2 * (secondChild + 1);
  }
  if (secondChild == len) { // 沒有右子節點，只有左子節點
    // Percolate down：令左子值爲洞值，再令洞號下移至左子節點處。
    *(first + holeIndex) = *(first + (secondChild - 1));
    holeIndex = secondChild - 1;
  }
  // 將欲調整值填入目前的洞號內。注意，此時肯定滿足次序特性。
  // 依侯捷之見，下面直接改爲 *(first + holeIndex) = value; 應該可以。
  __push_heap(first, holeIndex, topIndex, value);
}
```

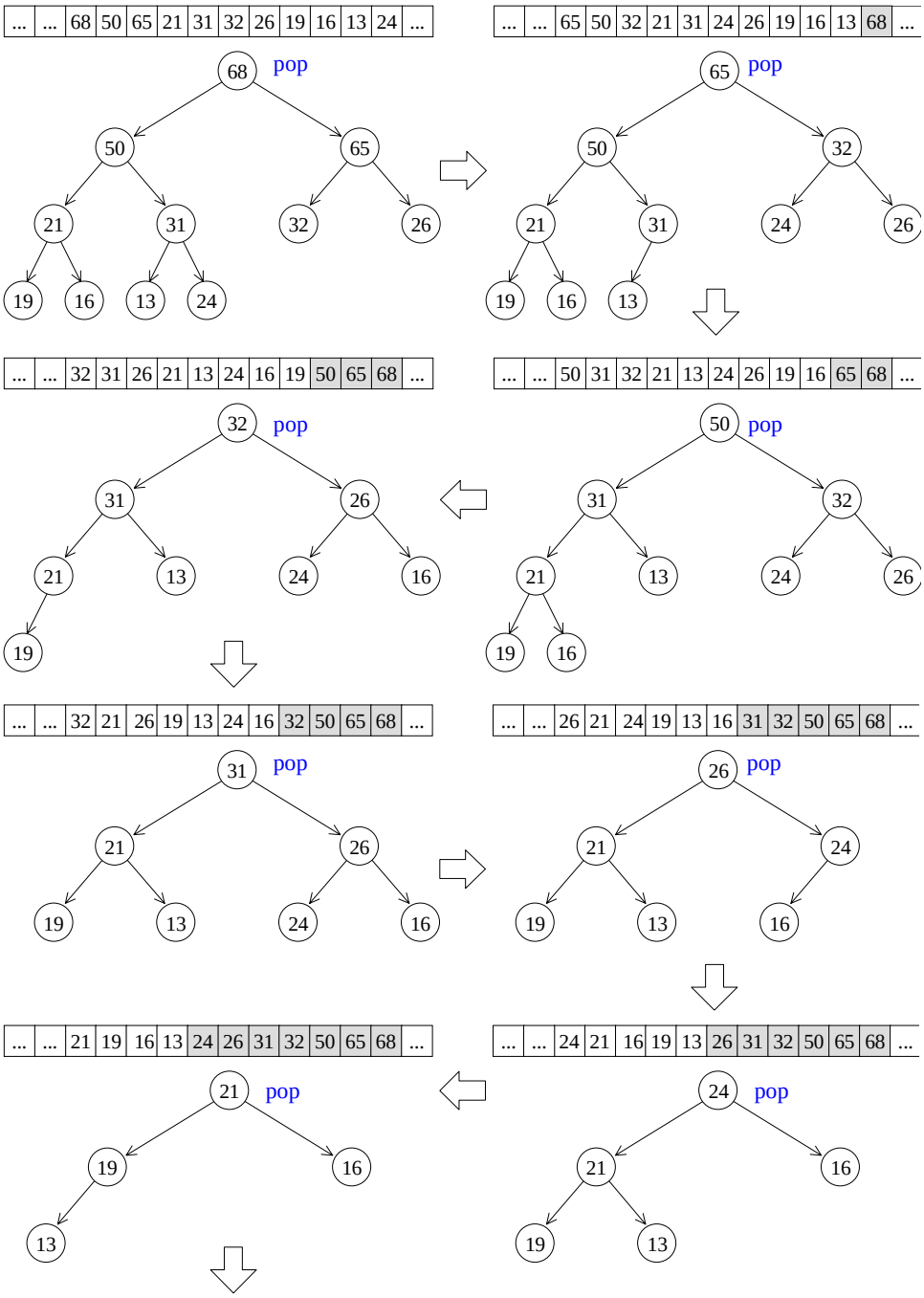
注意，pop_heap 之後，最大元素只是被置放於底部容器的最尾端，尚未被取走。如果要取其值，可使用底部容器（vector）所提供的 back() 操作函式。如果要移除它，可使用底部容器（vector）所提供的 pop_back() 操作函式。

sort_heap 演算法

既然每次 pop_heap 可獲得 heap 之中鍵值最大的元素，如果持續對整個 heap 做 pop_heap 動作，每次將操作範圍從後向前縮減一個元素（因爲 pop_heap 會把鍵值最大的元素放在底部容器的最尾端），當整個程序執行完畢，我們便有了一個遞增序列。圖 4-23 是 sort_heap 的實際操演情況。

下面是 sort_heap 演算法的實作細節。此函式接受兩個迭代器，用來表現一個 heap 底部容器（vector）的頭尾。如果不符合這個條件，sort_heap 的執行結果未可預期。注意，排序過後，原來的 heap 就不再是個合法的 heap 了。

```
// 以下這個 sort_heap() 不允許指定「大小比較標準」
template <class RandomAccessIterator>
void sort_heap(RandomAccessIterator first,
               RandomAccessIterator last) {
  // 以下，每執行一次 pop_heap()，極值（在 STL heap 中爲極大值）即被放在尾端。
  // 扣除尾端再執行一次 pop_heap()，次極值又被放在新尾端。一直下去，最後即得
  // 排序結果。
  while (last - first > 1)
    pop_heap(first, last--); // 每執行 pop_heap() 一次，操作範圍即退縮一格。
}
```


... ... 68 50 65 21 31 32 26 19 16 13 24 ...
pop
... ... 65 50 32 21 31 24 26 19 16 13 68 ...
pop
... ... 32 31 26 21 13 24 16 19 50 65 68 ...
pop
... ... 50 31 32 21 13 24 26 19 16 65 68 ...
pop
... ... 32 21 26 19 13 24 16 32 50 65 68 ...
pop
... ... 26 21 24 19 13 16 31 32 50 65 68 ...
pop
... ... 21 19 16 13 24 26 31 32 50 65 68 ...
pop
... ... 24 21 16 19 13 26 31 32 50 65 68 ...
pop

續下頁

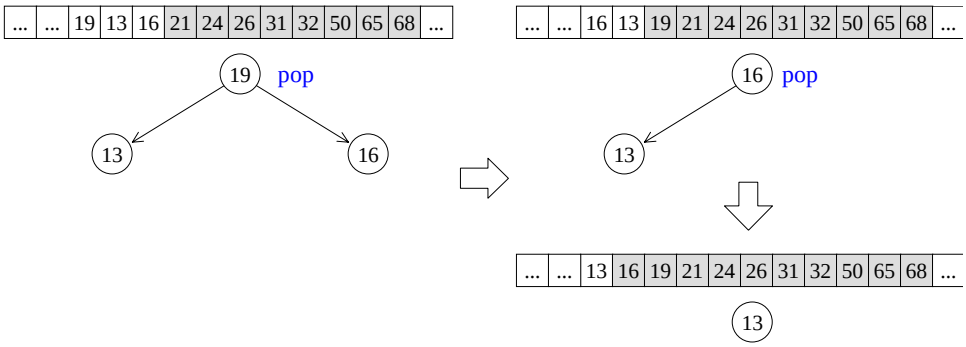


圖 4-23 sort_heap 演算法：不斷對 heap 做 pop 動作，便可達到排序效果

make_heap 演算法

這個演算法用來將一段現有的資料轉化爲一個 heap。其主要依據就是 4.7.1 節提到的 complete binary tree 的隱式表述（implicit representation）。

```
// 將 [first,last) 排列爲一個 heap。
template <class RandomAccessIterator>
inline void make_heap(RandomAccessIterator first,
                      RandomAccessIterator last) {
  __make_heap(first, last, value_type(first), distance_type(first));
}

// 以下這組 make_heap() 不允許指定「大小比較標準」。
template <class RandomAccessIterator, class T, class Distance>
void __make_heap(RandomAccessIterator first,
                 RandomAccessIterator last, T*,
                 Distance*) {
  if (last - first < 2) return; // 如果長度爲 0 或 1，不必重新排列。
  Distance len = last - first;
  // 找出第一個需要重排的子樹頭部，以 parent 標示出。由於任何葉節點都不需執行
  // perlocate down，所以有以下計算。parent 命名不佳，名爲 holeIndex 更好。
  Distance parent = (len - 2)/2;

  while (true) {
    // 重排以 parent 爲首的子樹。len 是爲了讓 __adjust_heap() 判斷操作範圍
    __adjust_heap(first, parent, len, T(*(first + parent)));
    if (parent == 0) return;     // 走完根節點，就結束。
    parent--;                    // （即將重排之子樹的）頭部向前一個節點
  }
}
```

4.7.3 heap 沒有迭代器

heap的所有元素都必須遵循特別的（complete binary tree）排列規則，所以 heap 不提供走訪功能，也不提供迭代器。

4.7.4 heap 測試實例

```
// file: 4heap-test.cpp
#include <vector>
#include <iostream>
#include <algorithm>  // heap algorithms
using namespace std;

int main()
{
  {
  // test heap (底層以 vector 完成)
  int ia[9] = {0,1,2,3,4,8,9,3,5};
  vector<int> ivec(ia, ia+9);

  make_heap(ivec.begin(), ivec.end());
  for(int i=0; i<ivec.size(); ++i)
    cout << ivec[i] << ' ';        // 9 5 8 3 4 0 2 3 1
  cout << endl;

  ivec.push_back(7);
  push_heap(ivec.begin(), ivec.end());
  for(int i=0; i<ivec.size(); ++i)
    cout << ivec[i] << ' ';        // 9 7 8 3 5 0 2 3 1 4
  cout << endl;

  pop_heap(ivec.begin(), ivec.end());
  cout << ivec.back() << endl;     // 9. return but no remove.
  ivec.pop_back();                 // remove last elem and no return

  for(int i=0; i<ivec.size(); ++i)
    cout << ivec[i] << ' ';        // 8 7 4 3 5 0 2 3 1
  cout << endl;

  sort_heap(ivec.begin(), ivec.end());
  for(int i=0; i<ivec.size(); ++i)
    cout << ivec[i] << ' ';        // 0 1 2 3 3 4 5 7 8
  cout << endl;
  }
```

```
  {
  // test heap (底層以 array 完成)
  int ia[9] = {0,1,2,3,4,8,9,3,5};
  make_heap(ia, ia+9);
  // array 無法動態改變大小，因此不可以對滿載的 array 做 push_heap() 動作。
  // 因爲那得先在 array 尾端增加一個元素。

  sort_heap(ia, ia+9);
  for(int i=0; i<9; ++i)
    cout << ia[i] << ' ';          // 0 1 2 3 3 4 5 8 9
  cout << endl;
  // 經過排序之後的 heap，不再是個合法的 heap

  // 重新再做一個 heap
  make_heap(ia, ia+9);
  pop_heap(ia, ia+9);
  cout << ia[8] << endl;   // 9
  }

  {
  // test heap (底層以 array 完成)
  int ia[6] = {4,1,7,6,2,5};
  make_heap(ia, ia+6);
  for(int i=0; i<6; ++i)
    cout << ia[i] << ' ';          // 7 6 5 1 2 4
  cout << endl;
  }
}
```

4.8 priority_queue

4.8.1 priority_queue 概述

顧名思義，priority_queue 是一個擁有權值觀念的 queue，它允許加入新元素、移除舊元素，審視元素值等功能。由於這是一個 queue，所以只允許在底端加入元素，並從頂端取出元素，除此之外別無其他存取元素的途徑。

priority_queue 帶有權值觀念，其內的元素並非依照被推入的次序排列，而是自動依照元素的權值排列（通常權值以實值表示）。權值最高者，排在最前面。

預設情況下 priority_queue 係利用一個 max-heap 完成，後者是一個以 vector 表現的 complete binary tree（4.7 節）。max-heap 可以滿足 priority_queue 所需要的「依權值高低自動遞增排序」的特性。

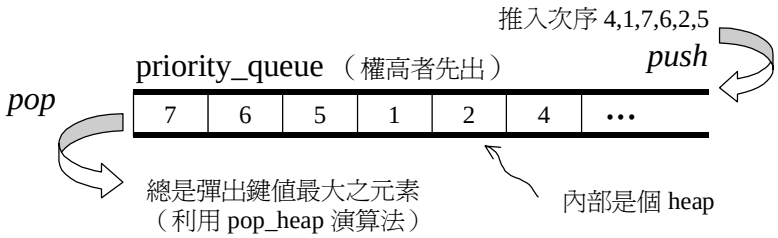


圖 4-24 priority queue

4.8.2 priority_queue 定義式完整列表

由於 priority_queue 完全以底部容器爲根據，再加上 heap 處理規則，所以其實作非常簡單。預設情況下是以 vector 爲底部容器。源碼很簡短，此處完整列出。

queue 以底部容器完成其所有工作。具有這種「修改某物介面，形成另一種風貌」之性質者，稱爲 adapter（配接器），因此 STL priority_queue 往往不被歸類爲 container（容器），而被歸類爲 container adapter。

```
template <class T, class Sequence = vector<T>,
          class Compare = less<typename Sequence::value_type> >
class  priority_queue {
public:
  typedef typename Sequence::value_type value_type;
  typedef typename Sequence::size_type size_type;
  typedef typename Sequence::reference reference;
  typedef typename Sequence::const_reference const_reference;
protected:
  Sequence c;     // 底層容器
  Compare comp;   // 元素大小比較標準
public:
  priority_queue() : c() {}
  explicit priority_queue(const Compare& x) :  c(), comp(x) {}

// 以下用到的 make_heap(), push_heap(), pop_heap()都是泛型演算法
// 注意，任一個建構式都立刻於底層容器內產生一個 implicit representation heap。
  template <class InputIterator>
  priority_queue(InputIterator first, InputIterator last, const Compare& x)
    : c(first, last), comp(x) { make_heap(c.begin(), c.end(), comp); }
  template <class InputIterator>
  priority_queue(InputIterator first, InputIterator last)
    : c(first, last) { make_heap(c.begin(), c.end(), comp); }

  bool empty() const { return c.empty(); }
  size_type size() const { return c.size(); }
  const_reference top() const { return c.front(); }
  void push(const value_type& x) {
    __STL_TRY {
      // push_heap 是泛型演算法，先利用底層容器的 push_back() 將新元素
      // 推入末端，再重排 heap。見 C++ Primer p.1195。
      c.push_back(x);
      push_heap(c.begin(), c.end(), comp); // push_heap 是泛型演算法
    }
    __STL_UNWIND(c.clear());
  }
  void pop() {
    __STL_TRY {
      // pop_heap 是泛型演算法，從 heap 內取出一個元素。它並不是真正將元素
      // 彈出，而是重排 heap，然後再以底層容器的 pop_back() 取得被彈出
      // 的元素。見 C++ Primer p.1195。
      pop_heap(c.begin(), c.end(), comp);
      c.pop_back();
    }
    __STL_UNWIND(c.clear());
  }
};
```

4.8.3 priority_queue 沒有迭代器

priority_queue 的所有元素，進出都有一定的規則，只有 queue 頂端的元素（權值最高者），才有機會被外界取用。priority_queue 不提供走訪功能，也不提供迭代器。

4.8.4 priority_queue 測試實例

```
// file: 4pqueue-test.cpp
#include <queue>
#include <iostream>
#include <algorithm>
using namespace std;

int main()
{
  // test priority queue...
  int ia[9] = {0,1,2,3,4,8,9,3,5};
  priority_queue<int> ipq(ia, ia+9);
  cout << "size=" << ipq.size() << endl;        // size=9

  for(int i=0; i<ipq.size(); ++i)
    cout << ipq.top() << ' ';       // 9 9 9 9 9 9 9 9 9
  cout << endl;

  while(!ipq.empty()) {
    cout << ipq.top() << ' ';       // 9 8 5 4 3 3 2 1 0
    ipq.pop();
  }
  cout << endl;
}
```

4.9 slist

4.9.1 slist 概述

STL list 是個雙向串列（double linked list）。SGI STL 另提供了一個單向串列（single linked list），名爲 slist。這個容器並不在標準規格之內，不過多做一些剖析，多看多學一些實作技巧也不錯，所以我把它納入本書範圍。

slist 和 list 的主要差別在於，前者的迭代器屬於單向的 *Forward Iterator*，後者的迭代器屬於雙向的 *Bidirectional Iterator*。爲此，slist 的功能自然也就受到許多限制。不過，單向串列所耗用的空間更小，某些動作更快，不失爲另一種選擇。

slist 和 list 共同具有的一個相同特色是，它們的安插（insert）、移除（erase）、接合（splice）等動作並不會造成原有的迭代器失效（當然啦，指向被移除元素的那個迭代器，在移除動作發生之後肯定是會失效的）。

注意，根據 STL 的習慣，安插動作會將新元素安插於指定位置之前，而非之後。然而做爲一個單向串列，slist 沒有任何方便的辦法可以回頭定出前一個位置，因此它必須從頭找起。換句話說，除了 slist 起始處附近的區域之外，在其他位置上採用 insert 或 erase 操作函式，都是不智之舉。這便是 slist 相較於 list 之下的大缺點。爲此，slist 特別提供了 insert_after() 和 erase_after() 供彈性運用。

基於同樣的（效率）考量，slist 不提供 push_back()，只提供 push_front()。因此 slist 的元素次序會和元素安插進來的次序相反。

4.9.2 slist 的節點

slist 節點和其迭代器的設計，架構上比 list 複雜許多，運用了繼承關係，因此在型別轉換上有複雜的表現。這種設計方式在第 5 章 RB-tree 將再一次出現。圖 4-25 概述了 slist 節點和其迭代器的設計架構。

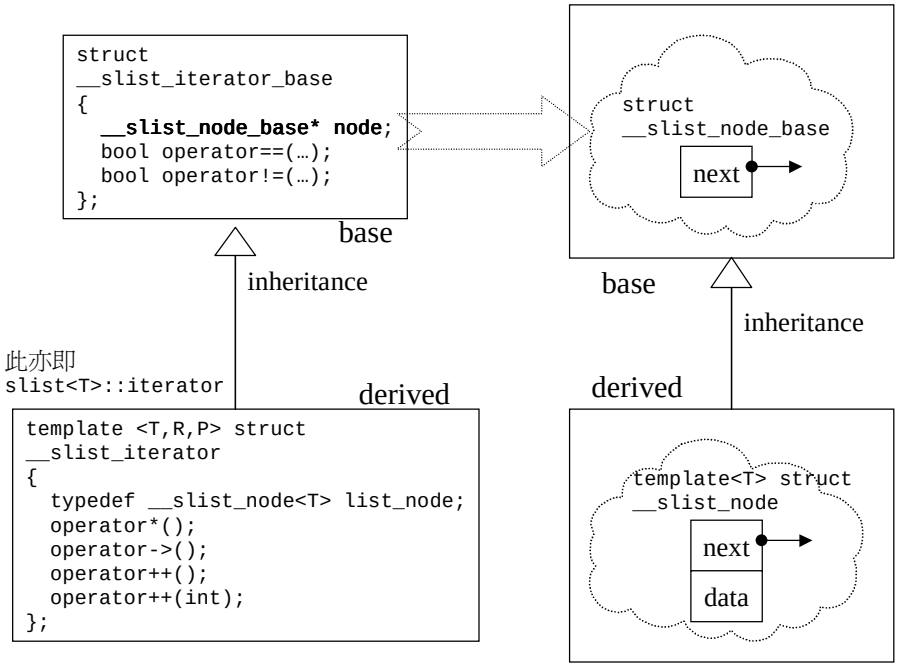


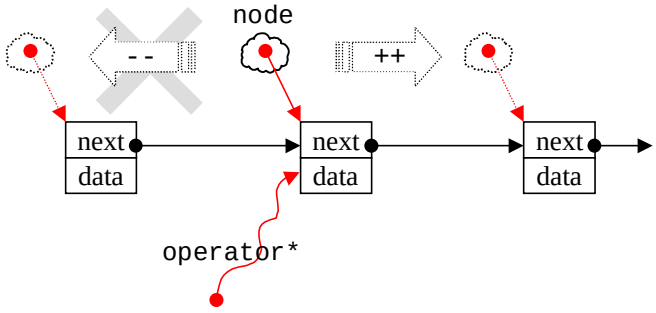
圖 4-25 slist 的節點和迭代器的設計架構

```
// 單向串列的節點基本結構
struct __slist_node_base
{
  __slist_node_base* next;
};

// 單向串列的節點結構
template <class T>
struct __slist_node : public __slist_node_base
{
  T data;
};

// 全域函式：已知某一節點，安插新節點於其後。
inline __slist_node_base* __slist_make_link(
          __slist_node_base* prev_node,
          __slist_node_base* new_node)
{
  // 令 new 節點的下一節點爲 prev 節點的下一節點
  new_node->next = prev_node->next;
  prev_node->next = new_node;    // 令 prev 節點的下一節點指向 new 節點
```

```
  return new_node;
}

// 全域函式：單向串列的大小（元素個數）
inline size_t __slist_size(__slist_node_base* node)
{
  size_t result = 0;
  for ( ; node != 0; node = node->next)
    ++result;      // 一個一個累計
  return result;
}
```

4.9.3 slist 的迭代器

slist 迭代器可以下圖表示：



實際構造如下。請注意它和節點的關係（見圖 4-25）。

```
// 單向串列的迭代器基本結構
struct __slist_iterator_base
{
  typedef size_t size_type;
  typedef ptrdiff_t difference_type;
  typedef forward_iterator_tag iterator_category;  // 注意，單向

  __slist_node_base* node; // 指向節點基本結構

  __slist_iterator_base(__slist_node_base* x) : node(x) {}

  void incr() { node = node->next; } // 前進一個節點

  bool operator==(const __slist_iterator_base& x) const {
    return node == x.node;
  }
  bool operator!=(const __slist_iterator_base& x) const {
```

```
    return node != x.node;
  }
};

// 單向串列的迭代器結構
template <class T, class Ref, class Ptr>
struct __slist_iterator : public __slist_iterator_base
{
  typedef __slist_iterator<T, T&, T*>           iterator;
  typedef __slist_iterator<T, const T&, const T*> const_iterator;
  typedef __slist_iterator<T, Ref, Ptr>         self;

  typedef T value_type;
  typedef Ptr pointer;
  typedef Ref reference;
  typedef __slist_node<T> list_node;

  __slist_iterator(list_node* x) : __slist_iterator_base(x) {}
  // 呼叫 slist<T>::end() 時會造成 __slist_iterator(0)，於是喚起上述函式。
  __slist_iterator() : __slist_iterator_base(0) {}
  __slist_iterator(const iterator& x) : __slist_iterator_base(x.node) {}

  reference operator*() const { return ((list_node*) node)->data; }
  pointer operator->() const { return &(operator*()); }

  self& operator++()
  {
    incr();  // 前進一個節點
    return *this;
  }
  self operator++(int)
  {
    self tmp = *this;
    incr();  // 前進一個節點
    return tmp;
  }

// 沒有實作 operator--，因爲這是一個 forward iterator
};
```

注意，比較兩個 slist 迭代器是否等同時（例如我們常在迴圈中比較某個迭代器是否等同於 slist.end()），由於 __slist_iterator 並未對 operator== 實施多載化，所以會喚起 __slist_iterator_base::operator==。根據其中之定義，我們知道，兩個 slist 迭代器是否等同，視其 __slist_node_base* node 是否等同而定。

4.9.4 slist 的資料結構

下面是 slist 源碼摘要，我把焦點放在「單向串列之形成」的一些關鍵點上。

```
template <class T, class Alloc = alloc>
class slist
{
public:
  typedef T value_type;
  typedef value_type* pointer;
  typedef const value_type* const_pointer;
  typedef value_type& reference;
  typedef const value_type& const_reference;
  typedef size_t size_type;
  typedef ptrdiff_t difference_type;

  typedef __slist_iterator<T, T&, T*>   iterator;
  typedef __slist_iterator<T, const T&, const T*> const_iterator;

private:
  typedef __slist_node<T> list_node;
  typedef __slist_node_base list_node_base;
  typedef __slist_iterator_base iterator_base;
  typedef simple_alloc<list_node, Alloc> list_node_allocator;

  static list_node* create_node(const value_type& x) {
    list_node* node = list_node_allocator::allocate();  // 配置空間
    __STL_TRY {
      construct(&node->data, x);      // 建構元素
      node->next = 0;
    }
    __STL_UNWIND(list_node_allocator::deallocate(node));
    return node;
  }

  static void destroy_node(list_node* node) {
    destroy(&node->data);       // 將元素解構
    list_node_allocator::deallocate(node);    // 釋還空間
  }

private:
  list_node_base head;  // 頭部。注意，它不是指標，是實物。

public:
  slist() { head.next = 0; }
  ~slist() { clear(); }

public:
```

```
  iterator begin() { return iterator((list_node*)head.next); }
  iterator end() { return iterator(0); }
  size_type size() const { return __slist_size(head.next); }
  bool empty() const { return head.next == 0; }

  // 兩個 slist 互換：只要將 head 交換互指即可。
  void swap(slist& L)
  {
    list_node_base* tmp = head.next;
    head.next = L.head.next;
    L.head.next = tmp;
  }

public:
  // 取頭部元素
  reference front() { return ((list_node*) head.next)->data; }

  // 從頭部安插元素（新元素成爲 slist 的第一個元素）
  void push_front(const value_type& x)  {
    __slist_make_link(&head, create_node(x));
  }

  // 注意，沒有 push_back()

  // 從頭部取走元素（刪除之）。修改 head。
  void pop_front() {
    list_node* node = (list_node*) head.next;
    head.next = node->next;
    destroy_node(node);
  }
...
};
```

4.9.5 slist 的元素操作

下面是一個小小練習：

```
// file: 4slist-test.cpp
#include <slist>
#include <iostream>
#include <algorithm>
using namespace std;

int main()
{
  int i;
  slist<int> islist;
  cout << "size=" << islist.size() << endl;    // size=0
```

```
  islist.push_front(9);
  islist.push_front(1);
  islist.push_front(2);
  islist.push_front(3);
  islist.push_front(4);
  cout << "size=" << islist.size() << endl;    // size=5

  slist<int>::iterator ite =islist.begin();
  slist<int>::iterator ite2=islist.end();
  for(; ite != ite2; ++ite)
     cout << *ite << ' ';                  // 4 3 2 1 9
  cout << endl;

  ite = find(islist.begin(), islist.end(), 1);
  if (ite!=0)
    islist.insert(ite, 99);

  cout << "size=" << islist.size() << endl;   // size=6
  cout << *ite << endl;                       // 1

  ite =islist.begin();
  ite2=islist.end();
  for(; ite != ite2; ++ite)
     cout << *ite << ' ';                     // 4 3 2 99 1 9
  cout << endl;

  ite = find(islist.begin(), islist.end(), 3);
  if (ite!=0)
    cout << *(islist.erase(ite)) << endl;     // 2

  ite =islist.begin();
  ite2=islist.end();
  for(; ite != ite2; ++ite)
     cout << *ite << ' ';                     // 4 2 99 1 9
  cout << endl;
}
```

首先依次序把元素 9,1,2,3,4 安插到 slist，實際結構呈現如圖 4-26。

接下來搜尋元素 1，並將新元素 99 安插進去，如圖 4-27。注意，新元素被安插在插入點（元素 1）的前面而不是後面。

接下來搜尋元素 3，並將該元素移除，如圖 4-28。

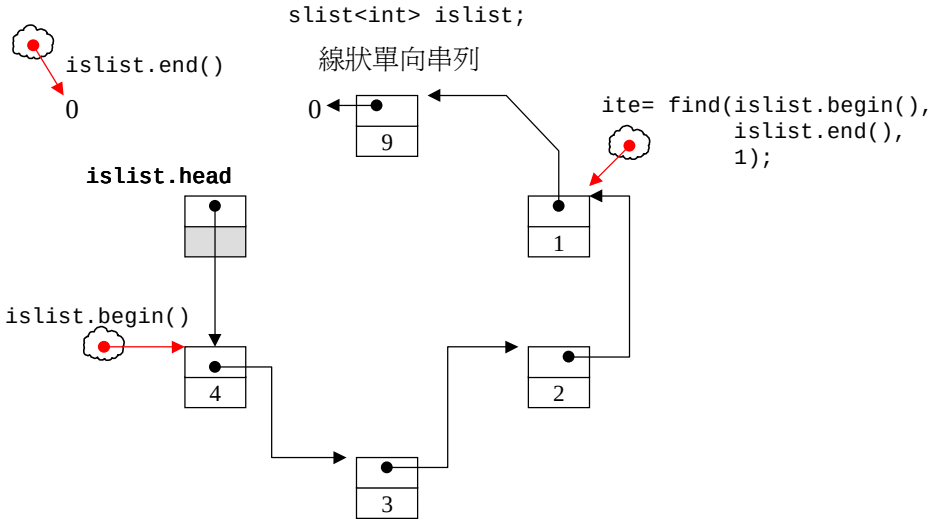


圖 4-26 元素 9,1,2,3,4 依序安插到 slist 之後所形成的結構

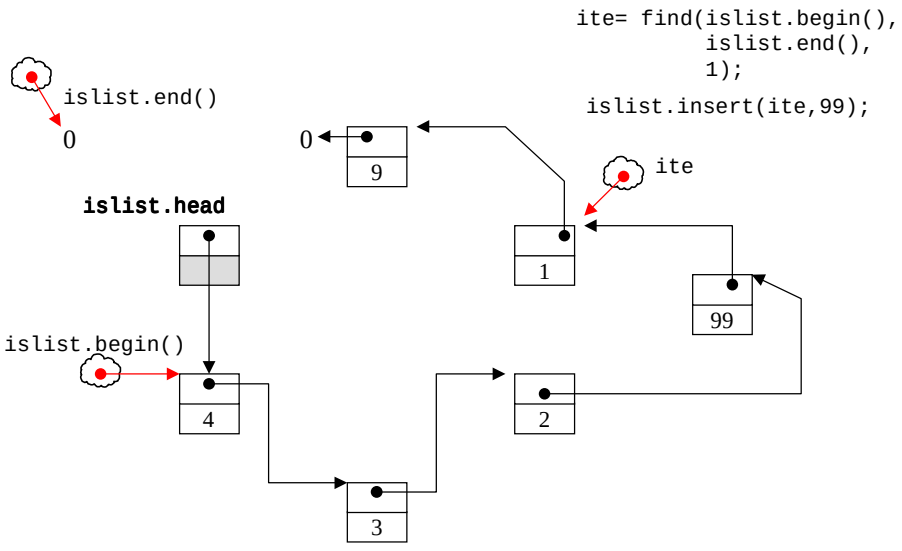


圖 4-27 元素 9,1,2,3,4 依序安插到 slist 之後的實際結構

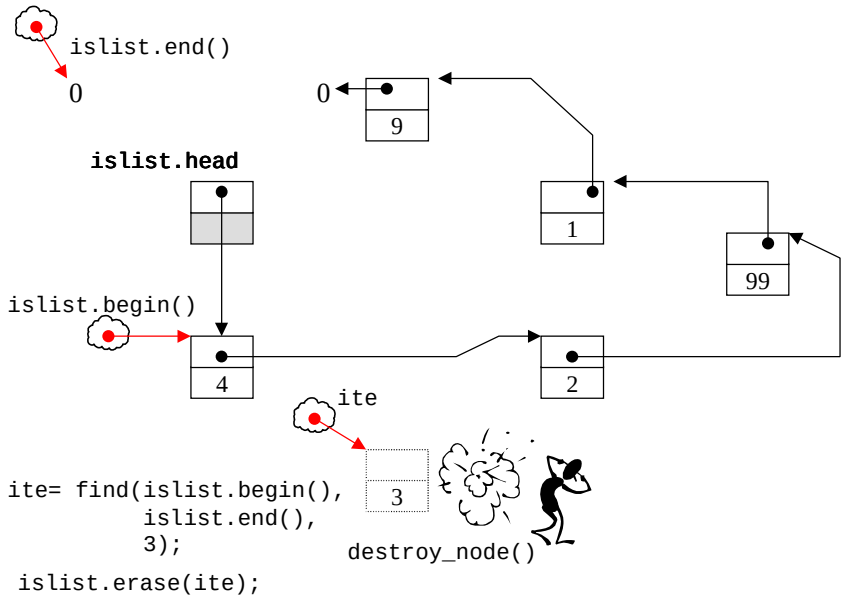


圖 4-28　搜尋元素 3，並將該元素移除

如果你對於圖 4-26、圖 4-27、圖 4-28 中的 end() 的畫法感到奇怪，這裡我要做一些說明。請注意，練習程式中一再以迴圈巡訪整個 slist，並以迭代器是否等於 slist.end() 做爲迴圈結束條件，這其中有一些容易疏忽的地方，我必須特別提醒你。當我們呼叫 end() 企圖做出一個指向尾端（下一位置）的迭代器，STL 源碼是這麼進行的：

```
iterator end() { return iterator(0); }
```

這會因爲源碼中如下的定義：

```
typedef __slist_iterator<T, T&, T*>  iterator;
```

而形成這樣的結果：

```
__slist_iterator<T, T&, T*>(0);     // 產生一個暫時物件，引發 ctor
```

從而因爲源碼中如下的定義：

```
__slist_iterator(list_node* x) : __slist_iterator_base(x) {}
```

而導致基礎類別的建構：

```
__slist_iterator_base(0);
```

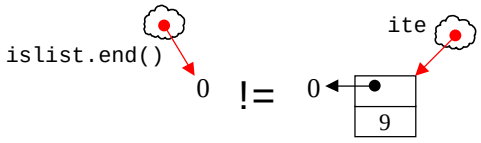
並因爲源碼中這樣的定義：

```
struct __slist_iterator_base
{
  __slist_node_base* node; // 指向節點基本結構
  __slist_iterator_base(__slist_node_base* x) : node(x) {}
  ...
};
```

而導致：

```
node(0);
```

因此我在圖 4-26、圖 4-27、圖 4-28 中皆以下圖左側的方式表現 `end()`，它和下圖右側的迭代器截然不同。



5

关联式容器

associative containers

容器，置物之所也，第 4 章一开始曾对此做了一些描述。所谓 STL 容器，即是将最常被运用的一些数据结构（data structures）实现出来，其涵盖种类有可能在每五年召开一次的 C++ 标准委员会议中不断增订。

根据“数据在容器中的排列”特性，容器可概分为序列式（sequence）和关联式（associative）两种，如图 5-1。第 4 章已经探讨过序列式容器，本章将探讨关联式容器。

标准的 STL 关联式容器分为 set（集合）和 map（映射表）两大类，以及这两大类的衍生体 multiset（多键集合）和 multimap（多键映射表）。这些容器的底层机制均以 RB-tree（红黑树）完成。RB-tree 也是一个独立容器，但并不开放给外界使用。

此外，SGI STL 还提供了一个不在标准规格之列的关联式容器：hash table（散列表）[1]，以及以此 hash table 为底层机制而完成的 hash_set（散列集合）、hash_map（散列映射表）、hash_multiset（散列多键集合）、hash_multimap（散列多键映射表）。

[1] hash table（散列表）及其衍生容器相当重要。它们未被纳入 C++标准的原因是，提案太迟了。下一代 C++ 标准程序库很有可能会纳入它们。

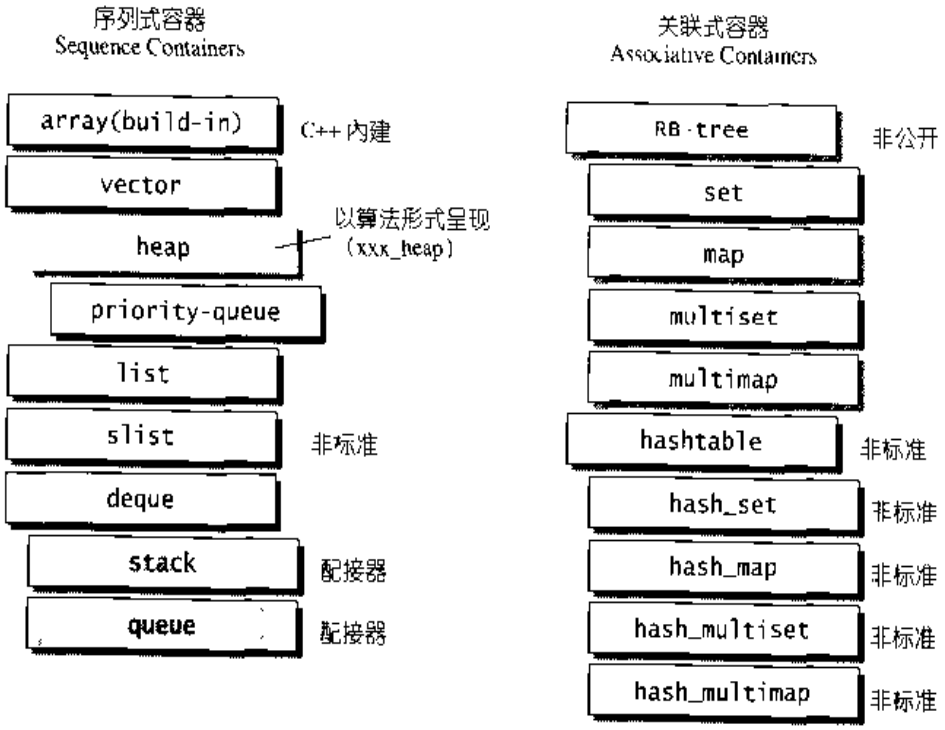


图 **5-1** SGI STL 的各种容器。本图以内缩方式来表达基层与衍生层的关系。这里所谓的衍生，并非继承（inheritance）关系，而是内含（containment）关系。例如 heap 内含一个 vector，priority-queue 内含一个 heap，stack 和 queue 都内含一个 deque，set/map/multiset/multimap 都内含一个 RB-tree，hast_x 都内含一个 hashtable。

关联式容器（associative containers）

所谓关联式容器，观念上类似关联式数据库（实际上则简单许多）：每笔数据（每个元素）都有一个键值（*key*）和一个实值（*value*）[2]。当元素被插入到关联式容器中时，容器内部结构（可能是 RB-tree，也可能是 hash-table）便依照其键值大小，以某种特定规则将这个元素放置于适当位置。关联式容器没有所谓头尾（只有最大元素和最小元素），所以不会有所谓 `push_back()`、`push_front()`、`pop_back()`、`pop_front()`、`begin()`、`end()` 这样的操作行为。

一般而言，关联式容器的内部结构是一个 balanced binary tree（平衡二叉树），以便获得良好的搜寻效率。balanced binary tree 有许多种类型，包括 AVL-tree、

[2] set 的键值就是实值，map 的键值可以和实值分开，并形成一种映射关系，所以 map 被称为映射表，或称为字典（dictionary，取“字典之英文单字为键值索引”之象征）。

RB-tree、AA-tree，其中最被广泛运用于 STL 的是 RB-tree（红黑树）。为了探讨 STL 的关联式容器，我必须先探讨 RB-tree。

进入 RB-tree 主题之前，让我们先对 tree 的来龙去脉有个概念。以下讨论都和最终目标 RB-tree 有密切关联。这些讨论都只是提纲挈领，如果你需要更全面的知识，请阅读数据结构和算法方面的专著。

5.1 树的导览

树（tree），在计算机科学里，是一种十分基础的数据结构。几乎所有操作系统都将文件存放在树状结构里；几乎所有的编译器都需要实现一个表达式树（expression tree）；文件压缩所用的哈夫曼算法（Huffman's Algorithm）需要用到树状结构；数据库所使用的 B-tree 则是一种相当复杂的树状结构。

本章所要介绍的 RB-tree（红黑树）是一种被广泛运用、可提供良好搜寻效率的树状结构。

树由节点（nodes）和边（edges）构成，如图 5-2 所示。整棵树有一个最上端节点，称为根节点（root）。每个节点可以拥有具方向性的边（directed edges），用来和其它节点相连。相连节点之中，在上者称为父节点（parent），在下者称为子节点（child）。无子节点者称为叶节点（leaf）。子节点可以存在多个，如果最多只允许两个子节点，即所谓二叉树（binary tree）。不同的节点如果拥有相同的父节点，则彼此互为兄弟节点（siblings）。根节点至任何节点之间有唯一路径（path），路径所经过的边数，称为路径长度（length）。根节点至任一节点的路径长度，即所谓该节点的深度（depth）。根节点的深度永远是 0。某节点至其最深子节点（叶节点）的路径长度，称为该节点的高度（height）。整棵树的高度，便以根节点的高度来代表。节点 A → B 之间如果存在（唯一）一条路径，那么 A 称为 B 的祖代（ancestor），B 称为 A 的子代（descendant）。任何节点的大小（size）是指其所有子代（包括自己）的节点总数。

图 5-2 对这些术语做了一个总整理。

```
size of E : 3
height of E : 1
depth of E : 2
length of E :2

size of C : 4
height of C : 2
depth of C : 1
length of C : 1

size of A : 12
height of A : 3
depth of A : 0
length of A : 0
```

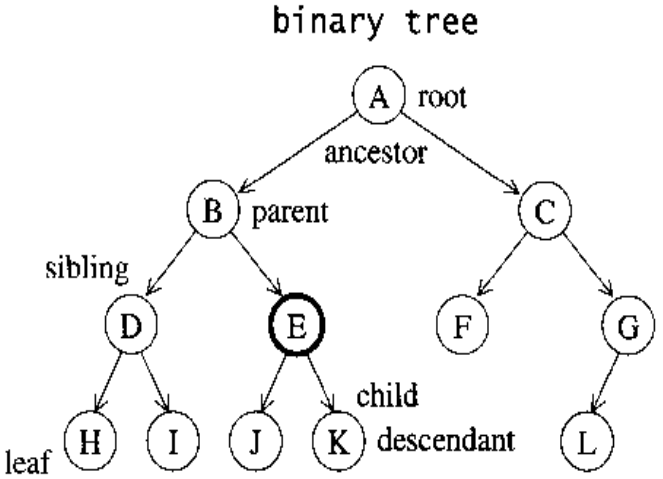


图 **5-2** 树状结构的相关术语整理。图中浅灰色术语是相对于节点 E 而言。

5.1.1 二叉搜索树（binary search tree）

所谓二叉树（binary tree），其意义是：“任何节点最多只允许两个子节点”。这两个子节点称为左子节点和右子节点。如果以递归方式来定义二叉树，我们可以说：“一个二叉树如果不为空，便是由一个根节点和左右两子树构成；左右子树都可能为空”。二叉树的运用极广，先前提到的编译器表达式树（expression tree）和哈夫曼编码树（Huffman coding tree）都是二叉树，如图 5-3 所示。

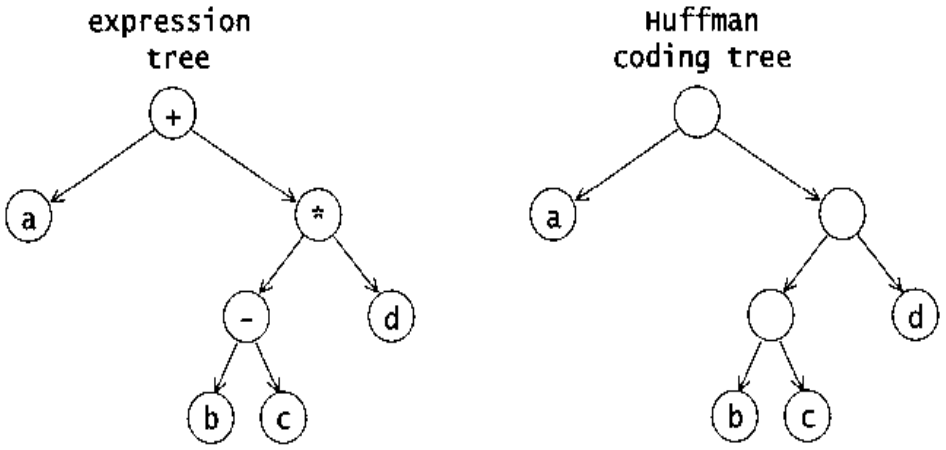


图 **5-3** 二叉树的应用

所谓二叉搜索树（binary search tree），可提供对数时间（logarithmic time）[3]的元素插入和访问。二叉搜索树的节点放置规则是：任何节点的键值一定大于其左子树中的每一个节点的键值，并小于其右子树中的每一个节点的键值[4]。因此，从根节点一直往左走，直至无左路可走，即得最小元素；从根节点一直往右走，直至无右路可走，即得最大元素。图 5-4 所示的就是一棵二叉搜索树。

要在一棵二叉搜索树中找出最大元素或最小元素，是一件极简单的事：就像上述所言，一直往左走或一直往右走即是。比较麻烦的是元素的插入和移除。图 5-5 是二叉搜索树的元素插入操作图解。插入新元素时，可从根节点开始，遇键值较大者就向左，遇键值较小者就向右，一直到尾端，即为插入点。

图 5-6 是二叉搜索树的元素移除操作图解。欲删除旧节点 A，情况可分两种。如果 A 只有一个子节点，我们就直接将 A 的子节点连至 A 的父节点，并将 A 删除。如果 A 有两个子节点，我们就以右子树内的最小节点取代 A。注意，右子树的最小节点极易获得：从右子节点开始（视为右子树的根节点），一直向左走至底即是。

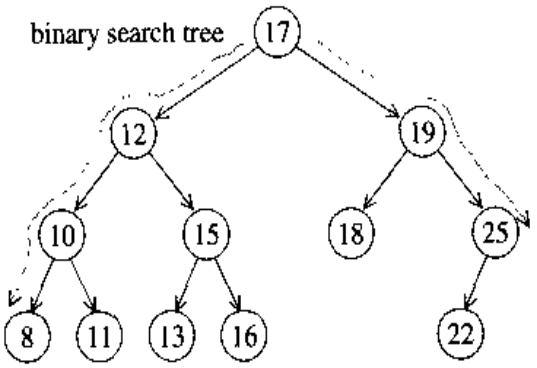


图 **5-4** 这是一棵二叉搜索树。任何节点的键值（*key*）一定大于其左子树中的每一个节点的键值，并小于其右子树中的每一个节点的键值。图中节点内的数值代表键值。

[3] 对数时间（logarithmic time）用来表示复杂度。详见第 6 章。

[4] 注意，键值（key）可能和实值（value）相同，也可能和实值不同。

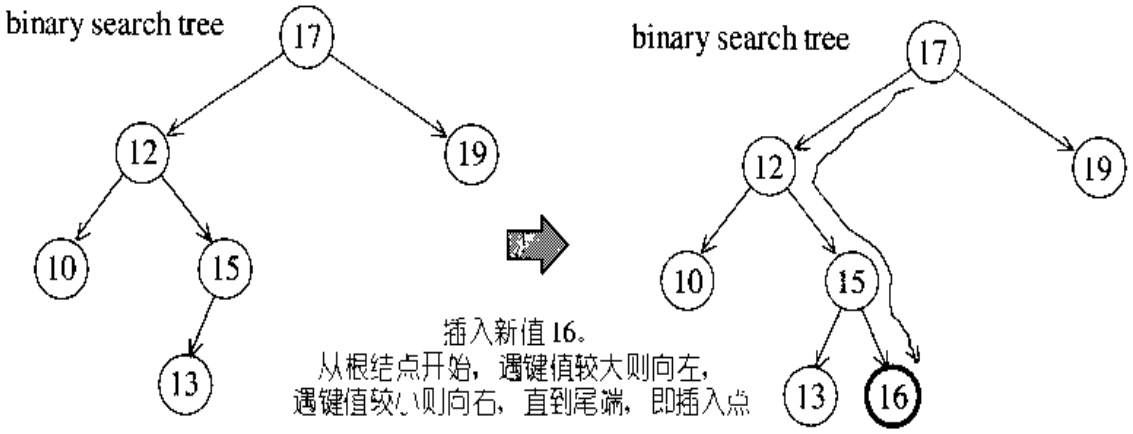


图 **5-5** 二叉搜索树的节点插入操作

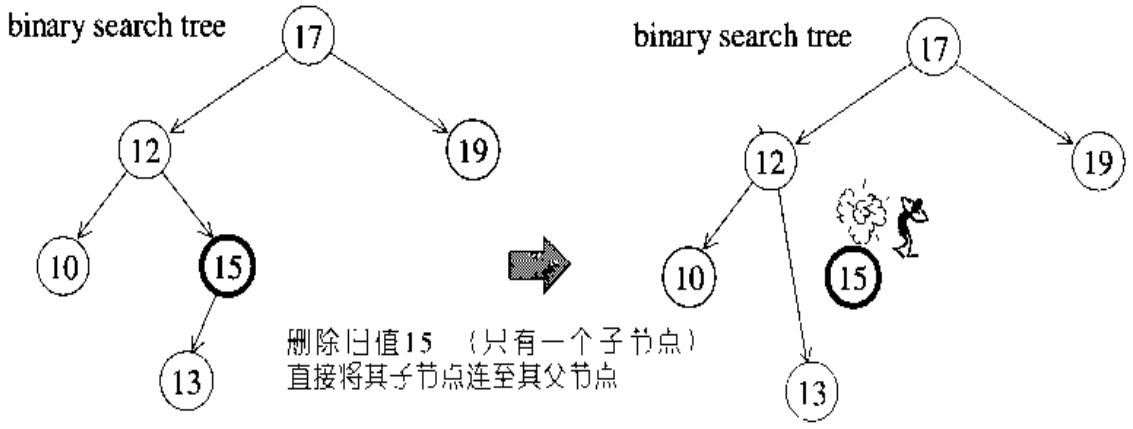


图 **5-6a** 二叉搜索树的节点删除操作之一（目标节点只有一个子节点）

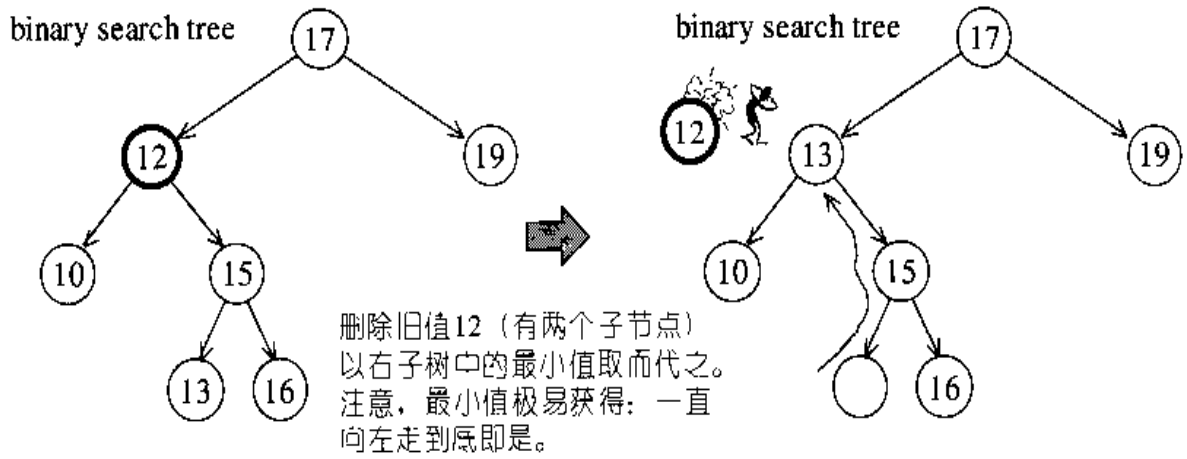


图 **5-6b** 二叉搜索树的节点删除操作之二（目标节点有两个子节点）

5.1.2 平衡二叉搜索树（balanced binary search tree）

也许因为输入值不够随机，也许因为经过某些插入或删除操作，二叉搜索树可能会失去平衡，造成搜寻效率低落的情况，如图 5-7 所示。

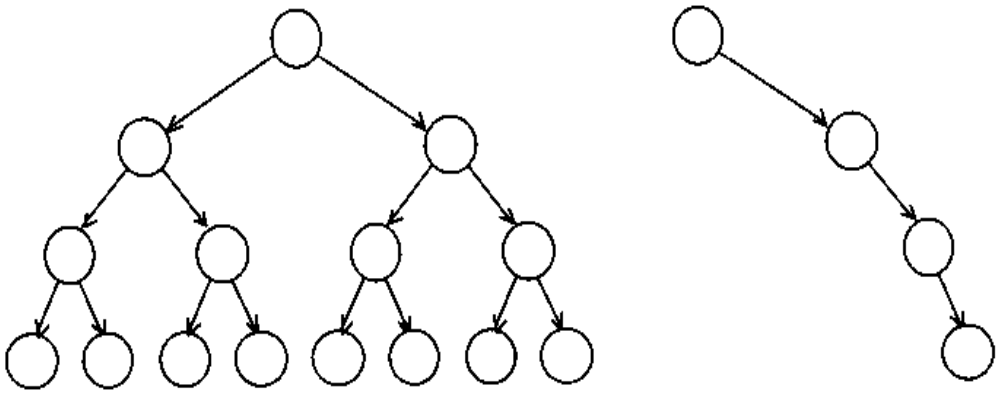


图 **5-7** 树形的极度平衡与极度不平衡

所谓树形平衡与否，并没有一个绝对的测量标准。“平衡”的大致意义是：没有任何一个节点过深（深度过大）。不同的平衡条件，造就出不同的效率表现，以及不同的实现复杂度。有数种特殊结构如 AVL-tree、RB-tree、AA-tree，均可实现出平衡二叉搜索树，它们都比一般的（无法绝对维持平衡的）二叉搜索树复杂，因此，插入节点和删除节点的平均时间也比较长，但是它们可以避免极难应付的最坏（高度不平衡）情况，而且由于它们总是保持某种程度的平衡，所以元素的访问（搜寻）时间平均而言也就比较少。一般而言其搜寻时间可节省 25% 左右。

5.1.3 AVL tree（Adelson-Velskii-Landis tree）

AVL tree 是一个“加上了额外平衡条件”的二叉搜索树。其平衡条件的建立是为了确保整棵树的深度为 O(logN)。直观上的最佳平衡条件是每个节点的左右子树有着相同的高度，但这未免太过严苛，我们很难插入新元素而又保持这样的平衡条件。AVL tree 于是退而求其次，要求任何节点的左右子树高度相差最多 1。这是一个较弱的条件，但仍能够保证“对数深度（logarithmic depth）”平衡状态。

图 5-8 左侧所示的是一个 AVL tree，插入了节点 11 之后（图右），灰色节点违反 ATL tree 的平衡条件。由于只有“插入点至根节点”路径上的各节点可能改变平衡状态，因此，只要调整其中最深的那个节点，便可使整棵树重新获得平衡。

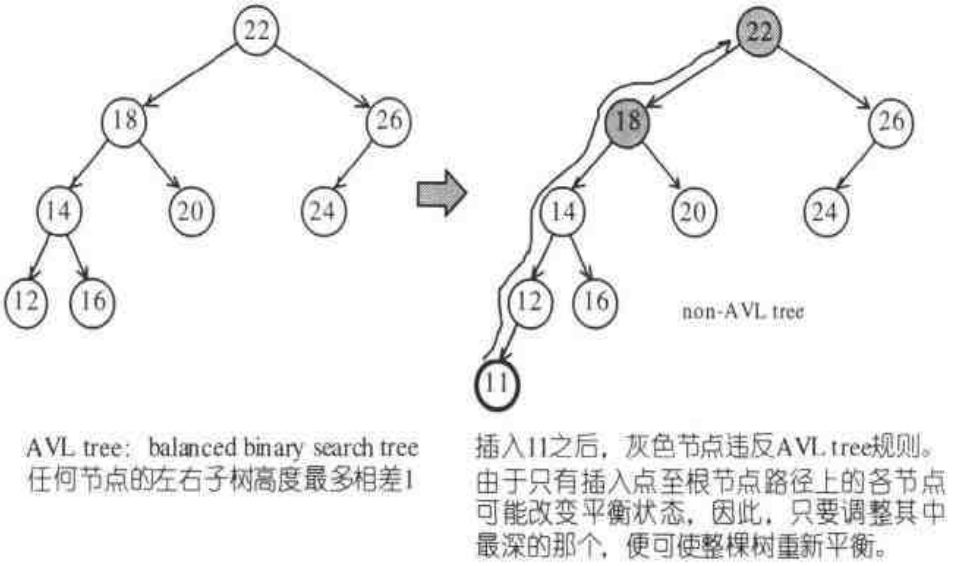


图 **5-8** 图左是 AVL tree。插入节点 11 后，图右灰色节点违反 ATL tree 条件

前面说过，只要调整“插入点至根节点”路径上，平衡状态被破坏之各节点中最深的那一个，便可使整棵树重新获得平衡。假设该最深节点为 X，由于节点最多拥有两个子节点，而所谓“平衡被破坏”意味着 X 的左右两棵子树的高度相差 2，因此我们可以轻易将情况分为四种（图 5-9）：

1. 插入点位于 X 的左子节点的左子树——左左。
2. 插入点位于 X 的左子节点的右子树——左右。
3. 插入点位于 X 的右子节点的左子树——右左。
4. 插入点位于 X 的右子节点的右子树——右右。

情况 1, 4 彼此对称，称为外侧（outside）插入，可以采用单旋转操作（single rotation）调整解决。情况 2, 3 彼此对称，称为内侧（inside）插入，可以采用双旋转操作（double rotation）调整解决。

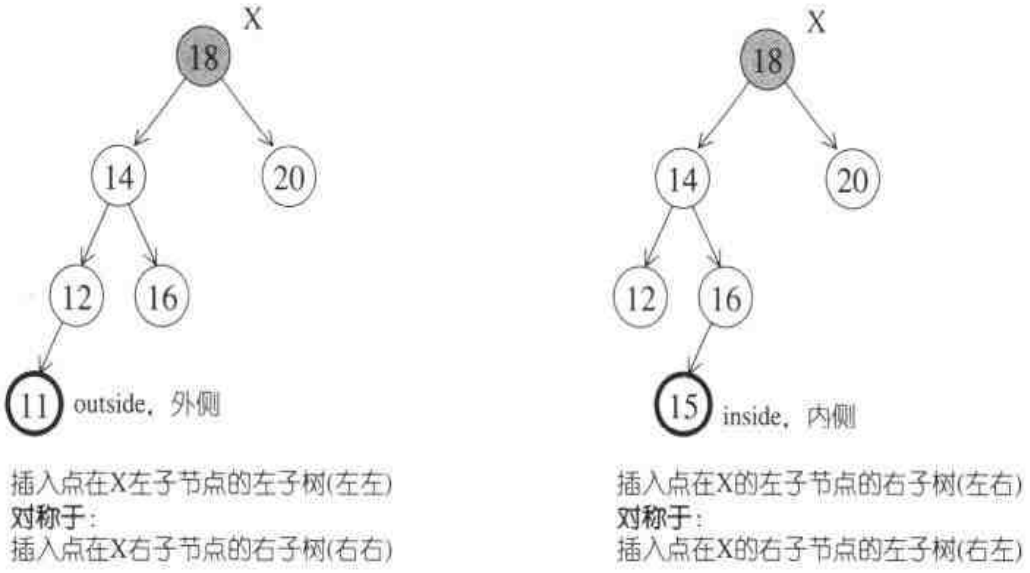


图 **5-9** AVL-tree 的四种 “平衡破坏” 情况

5.1.4 单旋转（Single Rotation）

在外侧插入状态中，k2 “插入前平衡，插入后不平衡” 的唯一情况如图 5-10 左侧所示。A 子树成长了一层，致使它比 C 子树的深度多 2。B 子树不可能和 A 子树位于同一层，否则 k2 在插入前就处于不平衡状态了。B 子树也不可能和 C 子树位于同一层，否则第一个违反平衡条件的将是 k1 而不是 k2。

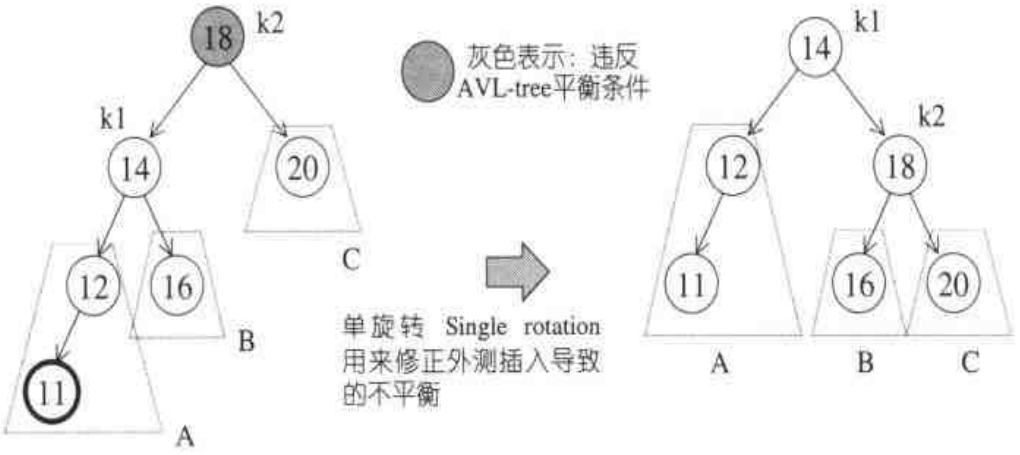


图 **5-10** 延续图 5-8 的状况，以 “单旋转” 修正外侧插入所导致的不平衡

为了调整平衡状态，我们希望将 A 子树提高一层，并将 C 子树下降一层 — 这已经比 AVL-tree 所要求的平衡条件更进一步了。图 5-10 右侧即是调整后的情况。我们可以这么想象，把 k1 向上提起，使 k2 自然下滑，并将 B 子树挂到 k2 的左侧。这么做是因为，二叉搜索树的规则使我们知道，k2 > k1，所以 k2 必须成为新树形中的 k1 的右子节点。二叉搜索树的规则也告诉我们，B 子树的所有节点的键值都在 k1 和 k2 之间，所以新树形中的 B 子树必须落在 k2 的左侧。

以上所有调整操作都只需要将指针稍做搬移，就可迅速达成。完成后的新树形符合 AVL-tree 的平衡条件，不需再做调整。

图 5-10 所显示的是 “左左”外侧插入。至于 “右右”外侧插入，情况如出一辙。

5.1.5 双旋转（Double Rotation）

图 5-11 左侧为内侧插入所造成的不平衡状态。单旋转无法解决这种情况。第一，我们不能再以 k3 为根节点，其次，我们不能将 k3 和 k1 做一次单旋转，因为旋转之后还是不平衡（你不妨自行画图试试）。唯一的可能是以 k2 为新的根节点，这使得（根据二叉搜索树的规则）k1 必须成为 k2 的左子节点，k3 必须成为 k2 的右子节点，而这么一来也就完全决定了四个子树的位置。新的树形满足 AVL-tree 的平衡条件，并且，就像单旋转的情况一样，它恢复了节点插入之前的高度，因此保证不再需要任何调整。

为什么称这种调整为双旋转呢？因为它可以利用两次单旋转完成，见图 5-12。

以上所有调整操作都只需要将指针稍做搬移，就可迅速达成。完成之后的新树形符合 AVL-tree 的平衡条件，不需再做调整。

图 5-11 显示的是 “左右”内侧插入。至于 “右左”内侧插入，情况如出一辙。

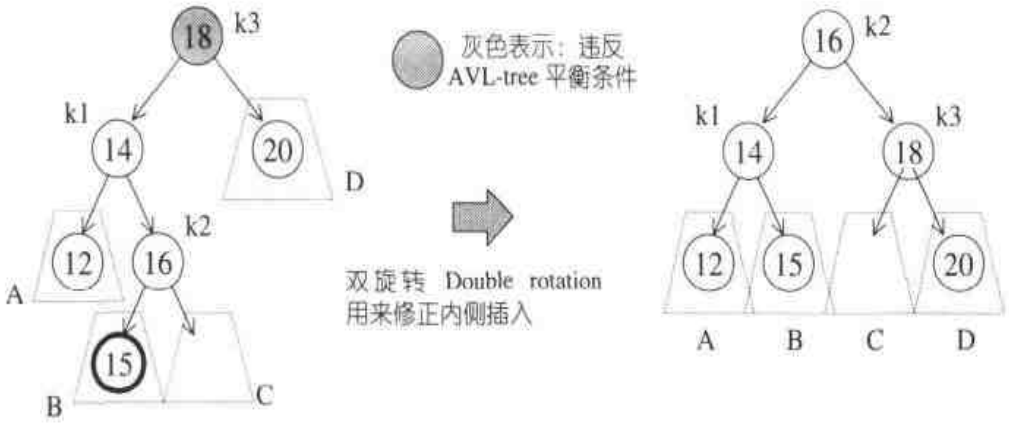


图 **5-11** 延续图 5-8 的状况，以双旋转修正因内侧插入而导致的不平衡。

本图显示的是 “左右”内侧插入。至于 “右左”内侧插入，情况如出一辙。

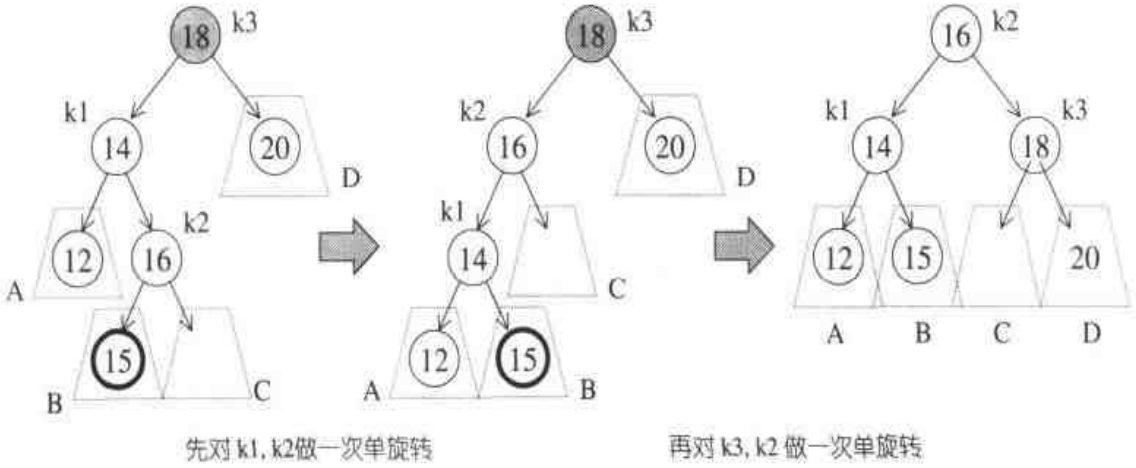


图 **5-12** 双旋转（如图 5-11）可由两次单旋转合并而成。这对编程带来不少方便。

RB-tree 是另一个被广泛使用的平衡二叉搜索树，也是 SGI STL 唯一实现的一种搜寻树，作为关联式容器（associated containers）的底部机制之用。RB-tree 的平衡条件虽然不同于 AVL-tree，但同样运用了单旋转和双旋转修正操作。下一节我将详细介绍 RB-tree。

5.2 RB-tree（红黑树）

AVL-tree 之外，另一个颇具历史并被广泛运用的平衡二叉搜索树是 RB-tree（红黑树）。所谓 RB-tree，不仅是一个二叉搜索树，而且必须满足以下规则：

1. 每个节点不是红色就是黑色（图中深色底纹代表黑色，浅色底纹代表红色，下同）。
2. 根节点为黑色。
3. 如果节点为红，其子节点必须为黑。
4. 任一节点至 NULL（树尾端）的任何路径，所含之黑节点数必须相同。

根据规则 4，新增节点必须为红；根据规则 3，新增节点之父节点必须为黑。当新节点根据二叉搜索树的规则到达其插入点，却未能符合上述条件时，就必须调整颜色并旋转树形。见图 5-13 说明。

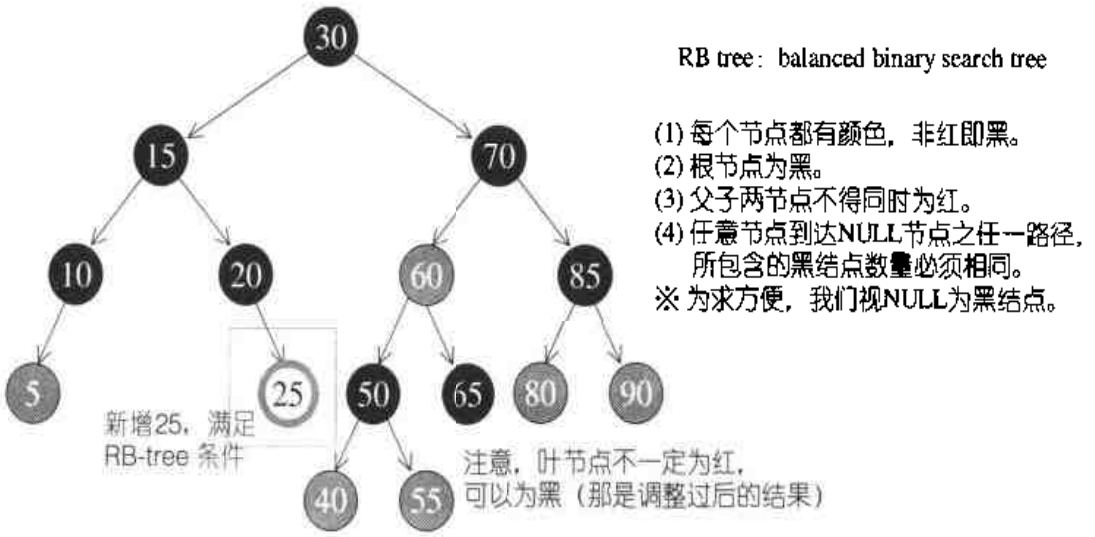


图 **5-13** RB-tree 的条件与实例

5.2.1 插入节点

现在让我们延续图 5-13 的状态，插入一些新节点，看看会产生什么变化。我要举出四种不同的典型。

假设我为图 5-13 的 RB-tree 分别插入 3, 8, 35, 75，根据二叉搜索树的规则，这四个新节点的落脚处应该如图 5-14 所示。啊，是的，它们都破坏了 RB-tree 的规则，因此我们必须调整树形，也就是旋转树形并改变节点颜色。

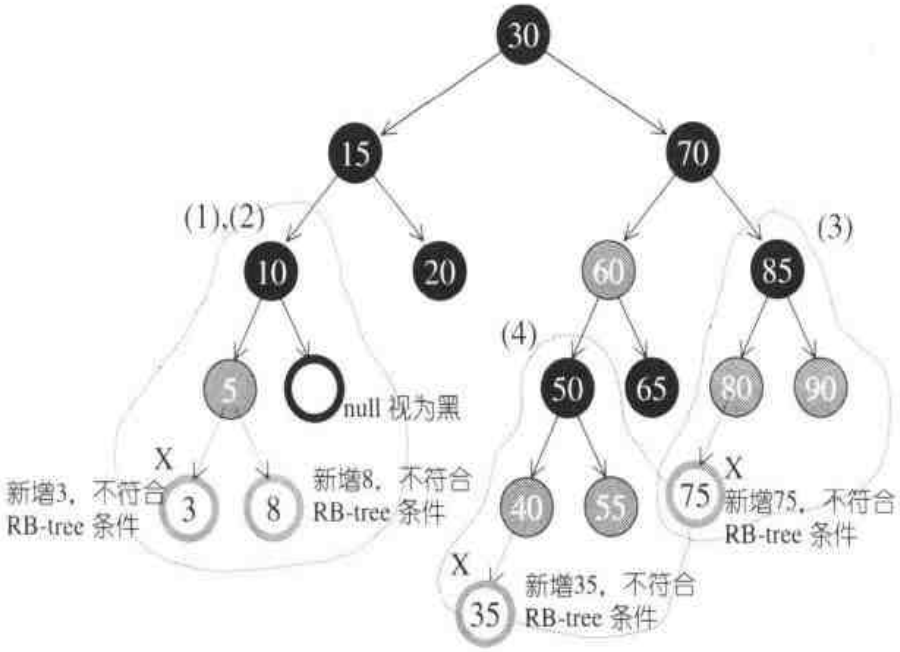


图 **5-14** 为 RB-tree 插入四个新节点：3, 8, 35, 75。新增节点必为红色，暂以空心粗框表示。不论插入 3, 8, 35, 75 之中的哪一个节点，都会破坏 RB-tree 的规则，致使我们必须旋转树形并调整节点的颜色。

为了方便讨论，让我先为某些特殊节点定义一些代名。以下讨论都将沿用这些代名。假设新节点为 X，其父节点为 P，祖父节点为 G，伯父节点（父节点之兄弟节点）为 S，曾祖父节点为 GG。现在，根据二叉搜索树的规则，新节点 X 必为叶节点。根据红黑树规则 4，X 必为红。若 P 亦为红（这就违反了规则 3，必须调整树形），则 G 必为黑（因为原为 RB-tree，必须遵循规则 3）。于是，根据 X 的插入位置及外围节点（S 和 GG）的颜色，有了以下四种考虑。

- 状况 1：S 为黑且 X 为外侧插入。对此情况，我们先对 P,G 做一次单旋转，再更改 P,G 颜色，即可重新满足红黑树的规则 3。见图 5-15a。

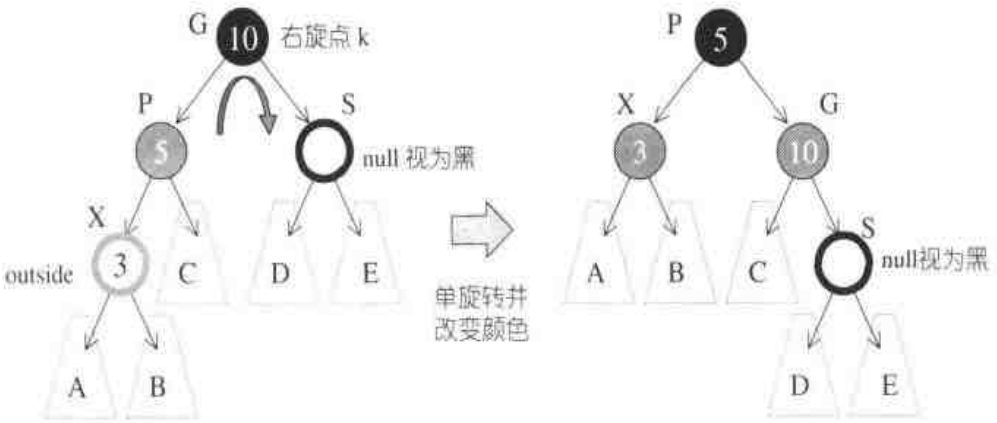


图 **5-15a** S 为黑且 X 为外侧插入。先对 P,G 做一次单旋转，再更改 P,G 颜色，即可重新满足红黑树规则 3。

注意，此时可能产生不平衡状态（高度相差 1 以上）。例如图中的 A 和 B 为 null，D 或 E 不为 null。这倒没关系，因为 RB-tree 的平衡性本来就比 AVL-tree 弱。然而 RB-tree 通常能够导致良好的平衡状态，是的，经验告诉我们，RB-tree 的搜寻平均效率和 AVL-tree 几乎相等。

- 状况 2：S 为黑且 X 为内侧插入。对此情况，我们必须先对 P, X 做一次单旋转并更改 G, X 颜色，再将结果对 G 做一次单旋转，即可再次满足红黑树规则 3。见图 5-15b。

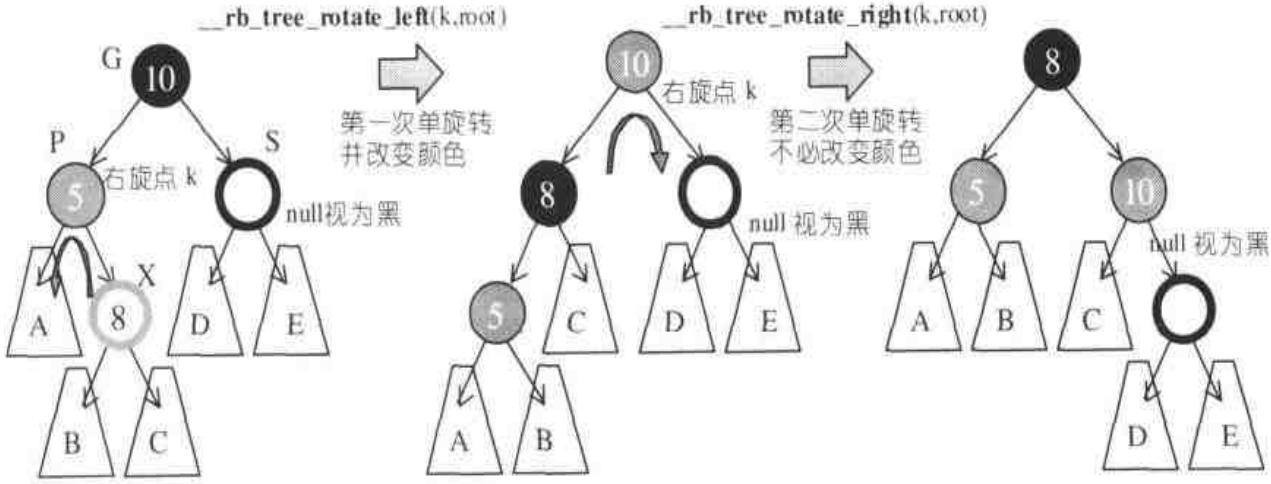


图 **5-15b** 最上方所示为 SGI <stl_tree.h> 所提供的函数，用于左旋或右旋。

- 状况 3：S 为红且 X 为外侧插入。对此情况，先对 P 和 G 做一次单旋转，并改变 X 的颜色。此时如果 GG 为黑，一切搞定，如图 5-15c。但如果 GG 为红，则问题就比较大些，咱…见状况 4。

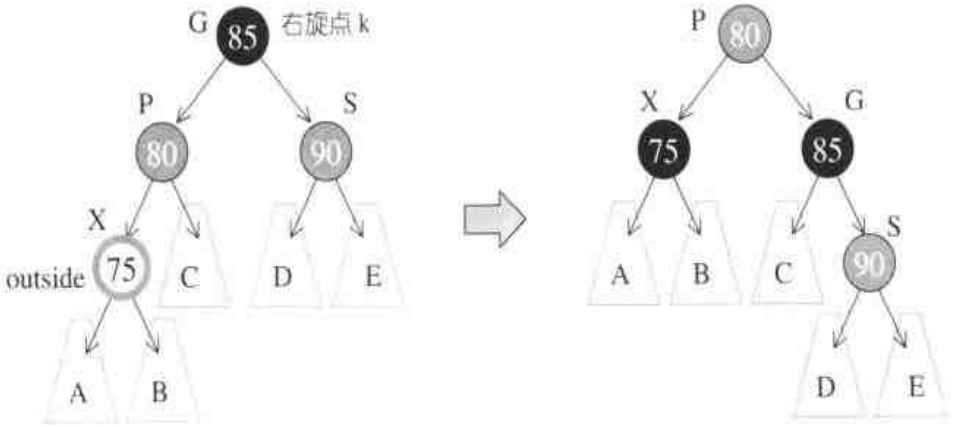


图 **5-15c** RB-tree 元素插入状况 3

- 状况 4：S 为红且 X 为外侧插入。对此情况，先对 P 和 G 做一次单旋转，并改变 X 的颜色。此时如果 GG 亦为红，还得持续往上做，直到不再有父子连续为红的情况。

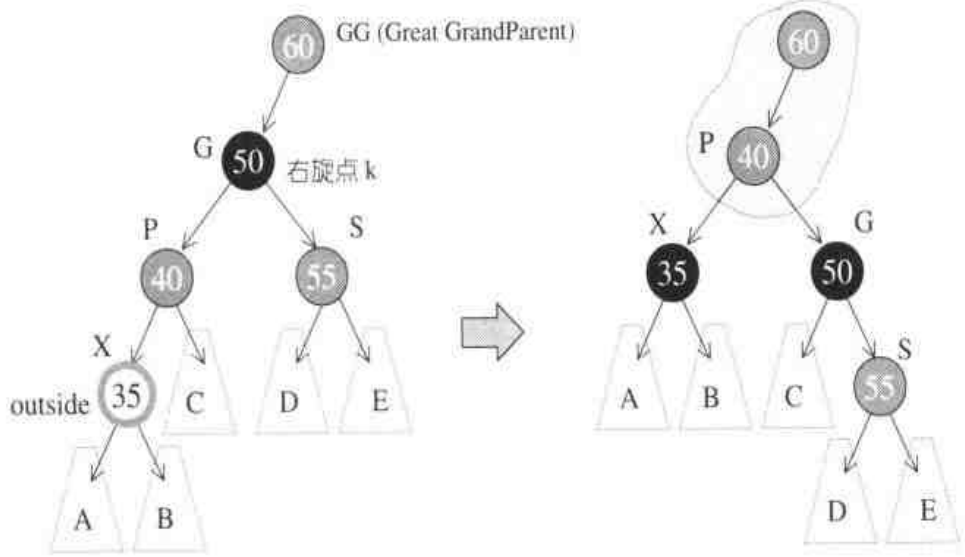


图 **5-15d** RB-tree 元素插入状况 4

5.2.2 一个由上而下的程序

为了避免状况 4 “父子节点皆为红色”的情况持续向 RB-tree 的上层结构发展，形成处理时效上的瓶颈，我们可以施行一个由上而下的程序（top-down procedure）：假设新增节点为 A，那么就延着 A 的路径，只要看到有某节点 X 的两个子节点皆为红色，就把 X 改为红色，并把两个子节点改为黑色，如图 5-15e 所示。

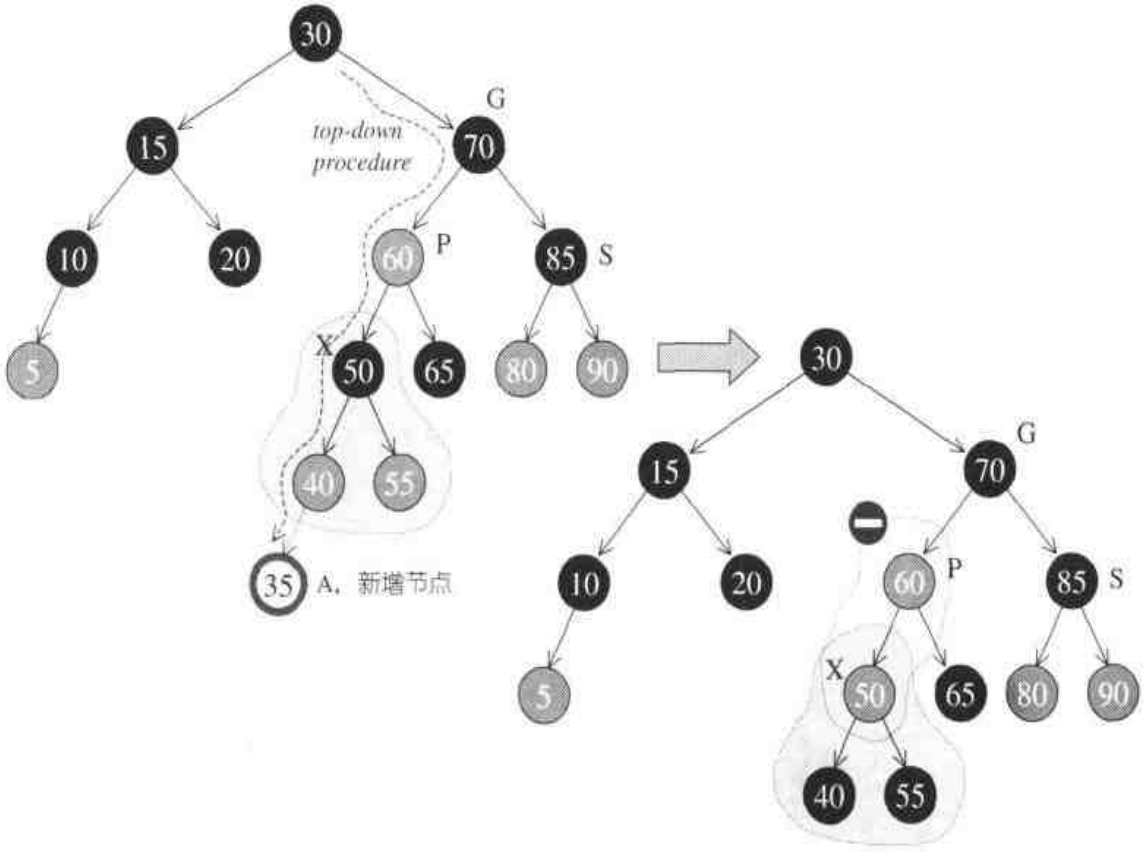


图 **5-15e** 沿着 X 的路径，由上而下修正节点颜色。

但是如果 A 的父节点 P 亦为红色（注意，此时 S 绝不可能为红），就得像状况 1 一样地做一次单旋转并改变颜色，或是像状况 2 一样地做一次双旋转并改变颜色。

在此之后，节点 35 的插入就很单纯了：要么直接插入，要么插入后再一次单旋转即可，如图 5-15f 所示。

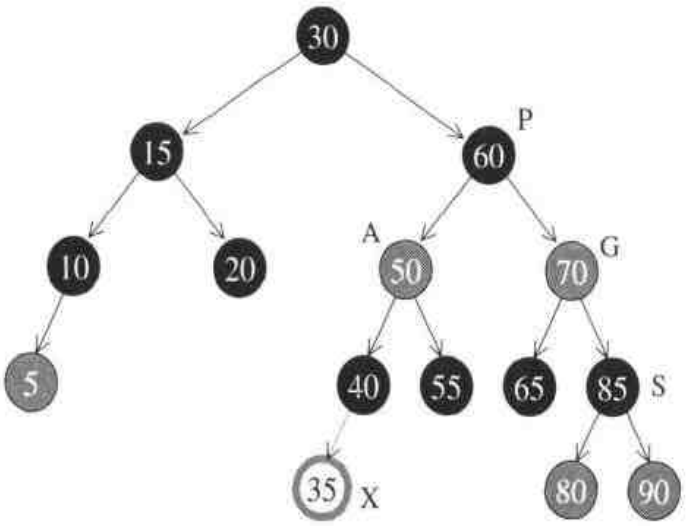


图 **5-15f** 延续图 5-15e 右侧状态，对 G, P 做一次右旋转，并改变颜色。

5.2.3 RB-tree 的节点设计

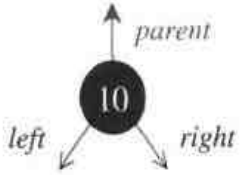
RB-tree 有红黑二色，并且拥有左右子节点，我们很容易就可以勾勒出其结构风貌。下面是 SGI STL 的实现源代码。为了有更大的弹性，节点分为两层，稍后图 5-17 将显示节点双层结构和迭代器双层结构的关系。

从以下的 minimum() 和 maximum() 函数可清楚看出，**RB-tree** 作为一个二叉搜索树，其极值是多么容易找到。由于 **RB-tree** 的各种操作时常需要上溯其父节点，所以特别在数据结构中安排了一个 parent 指针。

```
typedef bool __rb_tree_color_type;
const __rb_tree_color_type __rb_tree_red = false;  // 红色为 0
const __rb_tree_color_type __rb_tree_black = true; // 黑色为 1

struct __rb_tree_node_base
{
  typedef __rb_tree_color_type color_type;
  typedef __rb_tree_node_base* base_ptr;

  color_type color;    // 节点颜色，非红即黑
  base_ptr parent;     // RB 树的许多操作，必须知道父节点
  base_ptr left;       // 指向左节点
  base_ptr right;      // 指向右节点

  static base_ptr minimum(base_ptr x)
  {
```

```
    while (x->left != 0) x = x->left;      // 一直向左走，就会找到最小值，
    return x;                              // 这是二叉搜索树的特性
  }

  static base_ptr maximum(base_ptr x)
  {
    while (x->right != 0) x = x->right;    // 一直向右走，就会找到最大值，
    return x;                              // 这是二叉搜索树的特性
  }
};

template <class Value>
struct __rb_tree_node : public __rb_tree_node_base
{
  typedef __rb_tree_node<Value>* link_type;
  Value value_field;  // 节点值
};
```

下面是RB-tree的节点图标，其中将 __rb_tree_node::value_field填为10：



5.2.4 RB-tree 的迭代器

要成功地将 RB-tree 实现为一个泛型容器，迭代器的设计是一个关键。首先我们要考虑它的类别（category），然后要考虑它的前进（increment）、后退（decrement）、提领（dereference）、成员访问（member access）等操作。

为了更大的弹性，SGI 将 RB-tree 迭代器实现为两层，这种设计理念和 4.9 节的 slist 类似。图 5-16 所示的便是双层节点结构和双层迭代器结构之间的关系，其中主要意义是：__rb_tree_node 继承自 __rb_tree_node_base，__rb_tree_iterator 继承自 __rb_tree_base_iterator。有了这样的认识，我们就可以将迭代器稍做转型，然后解开 RB-tree 的所有奥秘[5]，追踪其一切状态。

[5] 因为不论是 rb-tree 的节点或迭代器，都是以 struct 完成，而 struct 的所有成员都是 public，可被外界自由取用。

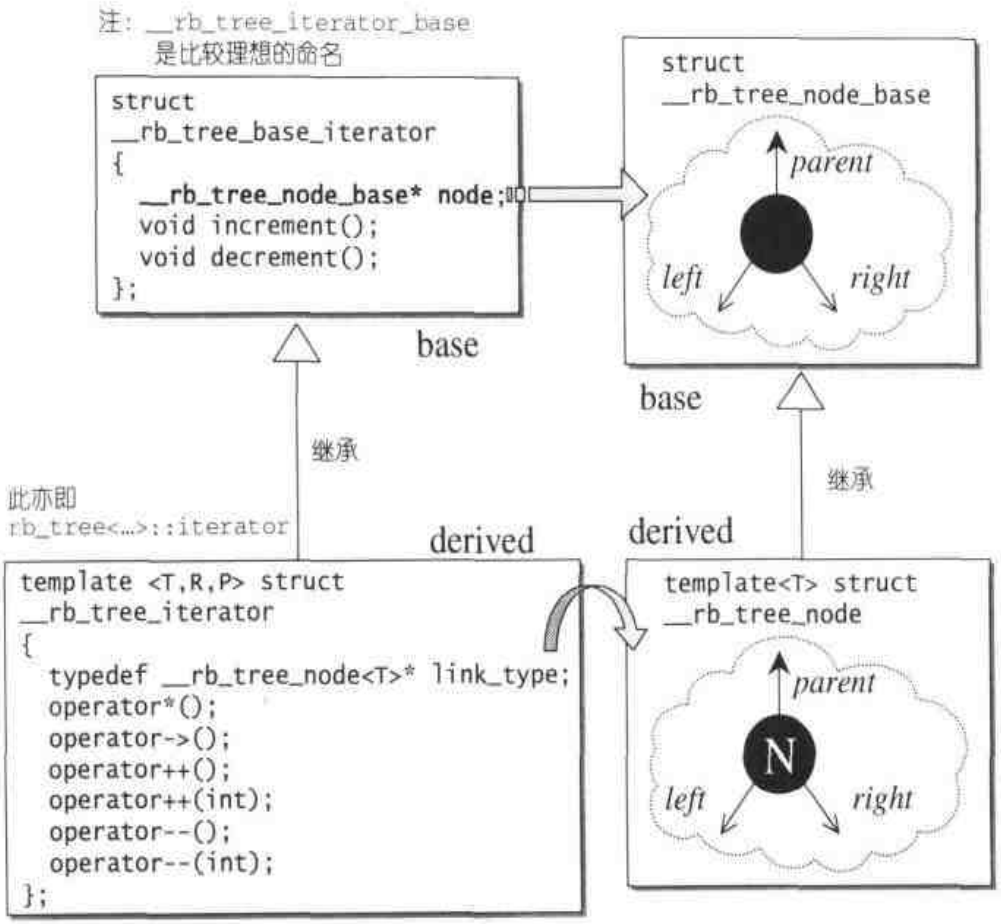


图 5-16 RB-tree 的节点和迭代器之间的关系。

这种双层架构和 4.9 节的 slist 极相似，请参考图 4-25。

RB-tree 迭代器属于双向迭代器，但不具备随机定位能力，其提领操作和成员访问操作与 list 十分近似，较为特殊的是其前进和后退操作。注意，RB-tree 迭代器的前进操作 operator++() 调用了基层迭代器的 increment()，RB-tree 迭代器的后退操作 operator--() 则调用了基层迭代器的 decrement()。前进或后退的举止行为完全依据二叉搜索树的节点排列法则，再加上实现上的某些特殊技巧。我加注于这两个函数内的说明，适足以说明其操作原则。至于实现上的特殊技巧（针对根节点），稍后另有说明。

```
// 基层迭代器
struct __rb_tree_base_iterator
{
  typedef __rb_tree_node_base::base_ptr base_ptr;
  typedef bidirectional_iterator_tag iterator_category;
```

```
typedef ptrdiff_t difference_type;

base_ptr node;  // 它用来与容器之间产生一个连结关系(make a reference)

// 以下其实可实现于 operator++ 内，因为再无他处会调用此函数了
void increment()
{
  if (node->right != 0) {       // 如果有右子节点。状况(1)
    node = node->right;         // 就向右走
    while (node->left != 0)     // 然后一直往左子树走到底
      node = node->left;        // 即是解答
  }
  else {                        // 没有右子节点。状况(2)
    base_ptr y = node->parent; // 找出父节点
    while (node == y->right) { // 如果现行节点本身是个右子节点，
      node = y;                 // 就一直上溯，直到“不为右子节点”止
      y = y->parent;
    }
    if (node->right != y)       // 若此时的右子节点不等于此时的父节点
      node = y;                 // 状况(3) 此时的父节点即为解答
                                // 否则此时的 node 为解答。状况(4)
  }
  // 注意，以上判断“若此时的右子节点不等于此时的父节点”，是为了应付一种
  // 特殊情况：我们欲寻找根节点的下一节点，而恰巧根节点无右子节点
  // 当然，以上特殊做法必须配合 RB-tree 根节点与特殊之 header 之间的
  // 特殊关系
}

// 以下其实可实现于 operator-- 内，因为再无他处会调用此函数了
void decrement()
{
  if (node->color == __rb_tree_red &&   // 如果是红节点，且
      node->parent->parent == node)     // 父节点的父节点等于自己，
    node = node->right;                 // 状况(1) 右子节点即为解答
  // 以上情况发生于 node 为 header 时（亦即 node 为 end() 时）
  // 注意，header 之右子节点即 mostright，指向整棵树的 max 节点
  else if (node->left != 0) {           // 如果有左子节点。状况(2)
    base_ptr y = node->left;            // 令 y 指向左子节点
    while (y->right != 0)               // 当 y 有右子节点时
      y = y->right;                     // 一直往右子节点走到底
    node = y;                           // 最后即为答案
  }
  else {                                // 既非根节点，亦无左子节点
    base_ptr y = node->parent;          // 状况(3) 找出父节点
    while (node == y->left) {           // 当现行节点身为左子节点
      node = y;                         // 一直交替往上走，直到现行节点
      y = y->parent;                    // 不为左子节点
    }
    node = y;                           // 此时之父节点即为答案
```

```
    }
  }
};

// RB-tree 的正规迭代器
template <class Value, class Ref, class Ptr>
struct __rb_tree_iterator : public __rb_tree_base_iterator
{
  typedef Value value_type;
  typedef Ref reference;
  typedef Ptr pointer;
  typedef __rb_tree_iterator<Value, Value&, Value*>    iterator;
  typedef __rb_tree_iterator<Value, const Value&, const Value*> const_iterator;
  typedef __rb_tree_iterator<Value, Ref, Ptr>  self;
  typedef __rb_tree_node<Value>* link_type;

  __rb_tree_iterator() {}
  __rb_tree_iterator(link_type x) { node = x; }
  __rb_tree_iterator(const iterator& it) { node = it.node; }

  reference operator*() const { return link_type(node)->value_field; }
#ifndef __SGI_STL_NO_ARROW_OPERATOR
  pointer operator->() const { return &(operator*()); }
#endif /* __SGI_STL_NO_ARROW_OPERATOR */

  self& operator++() { increment(); return *this; }
  self operator++(int) {
    self tmp = *this;
    increment();
    return tmp;
  }

  self& operator--() { decrement(); return *this; }
  self operator--(int) {
    self tmp = *this;
    decrement();
    return tmp;
  }
};
```

在__rb_tree_iterator_base 的 increment() 和 decrement() 两函数中，较令人费解的是前者的状况 4 和后者的状况 1（见源代码注释标示），它们分别发生于图 5-17 所展示的状态下。

当迭代器指向根节点而后者无右子节点时，若对迭代器进行++操作，会进入 __rb_tree_base_iterator::increment() 的状况 (2),(4)。

当迭代器为 end()时，若对它进行 操作，会进入 __rb_tree_base_iterator::decrement() 的状况 (1)。

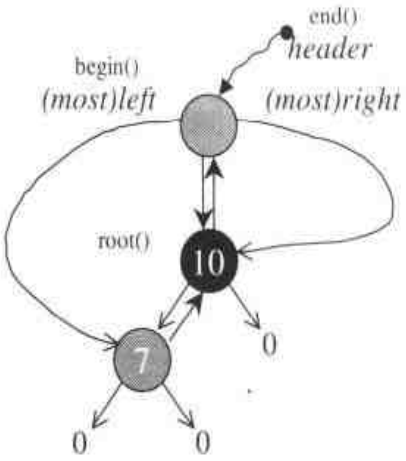


图 **5-17** increment() 和 decrement() 两函数中较令人费解的状况 4 和状况 1，其中的 header 是实现上的特殊技巧，见稍后说明。

5.2.5 RB-tree 的数据结构

下面是 rb-tree 的定义。你可以看到其中定义有专属的空间配置器，每次用来配置一个节点大小，也可以看到各种型别定义，用来维护整棵 RB-tree 的三笔数据（其中有个仿函数，functor，用来表现节点的大小比较方式），以及一些 member functions 的定义或声明。

```
template <class Key, class Value, class KeyOfValue, class Compare,
          class Alloc = alloc>
class rb_tree {
protected:
  typedef void* void_pointer;
  typedef __rb_tree_node_base* base_ptr;
  typedef __rb_tree_node<Value> rb_tree_node;
  typedef simple_alloc<rb_tree_node, Alloc> rb_tree_node_allocator;
  typedef __rb_tree_color_type color_type;
public:
  // 注意，没有定义 iterator（不，定义在后面！）
  typedef Key key_type;
  typedef Value value_type;
  typedef value_type* pointer;
  typedef const value_type* const_pointer;
  typedef value_type& reference;
  typedef const value_type& const_reference;
  typedef rb_tree_node* link_type;
  typedef size_t size_type;
  typedef ptrdiff_t difference_type;
protected:
```

```
  link_type get_node() { return rb_tree_node_allocator::allocate(); }
  void put_node(link_type p) { rb_tree_node_allocator::deallocate(p); }

  link_type create_node(const value_type& x) {
    link_type tmp = get_node();              // 配置空间
    __STL_TRY {
      construct(&tmp->value_field, x);       // 构造内容
    }
    __STL_UNWIND(put_node(tmp));
    return tmp;
  }

  link_type clone_node(link_type x) {        // 复制一个节点（的值和色）
    link_type tmp = create_node(x->value_field);
    tmp->color = x->color;
    tmp->left = 0;
    tmp->right = 0;
    return tmp;
  }

  void destroy_node(link_type p) {
    destroy(&p->value_field);    // 析构内容
    put_node(p);                 // 释放内存
  }

protected:
  // RB-tree 只以三笔数据表现
  size_type node_count; // 追踪记录树的大小（节点数量）
  link_type header;     // 这是实现上的一个技巧
  Compare key_compare; // 节点间的键值大小比较准则。应该会是个 function object

  // 以下三个函数用来方便取得 header 的成员
  link_type& root() const { return (link_type&) header->parent; }
  link_type& leftmost() const { return (link_type&) header->left; }
  link_type& rightmost() const { return (link_type&) header->right; }

  // 以下六个函数用来方便取得节点 x 的成员
  static link_type& left(link_type x)
    { return (link_type&)(x->left); }
  static link_type& right(link_type x)
    { return (link_type&)(x->right); }
  static link_type& parent(link_type x)
    { return (link_type&)(x->parent); }
  static reference value(link_type x)
    { return x->value_field; }
  static const Key& key(link_type x)
    { return KeyOfValue()(value(x)); }
  static color_type& color(link_type x)
    { return (color_type&)(x->color); }
```

```
  // 以下六个函数用来方便取得节点 x 的成员
  static link_type& left(base_ptr x)
    { return (link_type&)(x->left); }
  static link_type& right(base_ptr x)
    { return (link_type&)(x->right); }
  static link_type& parent(base_ptr x)
    { return (link_type&)(x->parent); }
  static reference value(base_ptr x)
    { return ((link_type)x)->value_field; }
  static const Key& key(base_ptr x)
    { return KeyOfValue()(value(link_type(x)));}
  static color_type& color(base_ptr x)
    { return (color_type&)(link_type(x)->color); }

  // 求取极大值和极小值。node class 有实现此功能，交给它们完成即可
  static link_type minimum(link_type x) {
    return (link_type)  __rb_tree_node_base::minimum(x);
  }
  static link_type maximum(link_type x) {
    return (link_type) __rb_tree_node_base::maximum(x);
  }

public:
  typedef __rb_tree_iterator<value_type, reference, pointer> iterator;

private:
  iterator __insert(base_ptr x, base_ptr y, const value_type& v);
  link_type __copy(link_type x, link_type p);
  void __erase(link_type x);
  void init() {
    header = get_node();    // 产生一个节点空间，令 header 指向它
    color(header) = __rb_tree_red; // 令 header 为红色，用来区分 header
                                   // 和 root，在 iterator.operator++ 之中
    root() = 0;
    leftmost() = header;    // 令 header 的左子节点为自己
    rightmost() = header;   // 令 header 的右子节点为自己
  }

public:
                            // allocation/deallocation
  rb_tree(const Compare& comp = Compare())
    : node_count(0), key_compare(comp) { init(); }

  ~rb_tree() {
    clear();
    put_node(header);
  }
  rb_tree<Key, Value, KeyOfValue, Compare, Alloc>&
```

```
  operator=(const rb_tree<Key, Value, KeyOfValue, Compare, Alloc>& x);

public:
                              // accessors:
  Compare key_comp() const { return key_compare; }
  iterator begin() { return leftmost(); }  // RB 树的起头为最左（最小）节点处
  iterator end() { return header; }  // RB 树的终点为 header 所指处
  bool empty() const { return node_count == 0; }
  size_type size() const { return node_count; }
  size_type max_size() const { return size_type(-1); }

public:
                              // insert/erase
  // 将 x 插入到 RB-tree 中（保持节点值独一无二）
  pair<iterator,bool> insert_unique(const value_type& x);
  // 将 x 插入到 RB-tree 中（允许节点值重复）。
  iterator insert_equal(const value_type& x);
...
};
```

5.2.6 RB-tree 的构造与内存管理

下面是 RB-tree 所定义的专属空间配置器 rb_tree_node_allocator，每次可恰恰配置一个节点。它所使用的 simple_alloc<> 定义于第二章：

```
template <class Key, class Value, class KeyOfValue, class Compare,
          class Alloc = alloc>
class rb_tree {
protected:
  typedef __rb_tree_node<Value> rb_tree_node;
  typedef simple_alloc<rb_tree_node, Alloc> rb_tree_node_allocator;
...
};
```

先前所列的程序片段也显示了数个节点相关函数，如 get_node()，put_node()，create_node()，clone_node()，destroy_node()。

RB-tree 的构造方式有两种，一种是以现有的 RB-tree 复制一个新的 RB-tree，另一种是产生一棵空空如也的树，如下所示：

```
rb_tree<int, int, identity<int>, less<int> > itree;
```
[6]

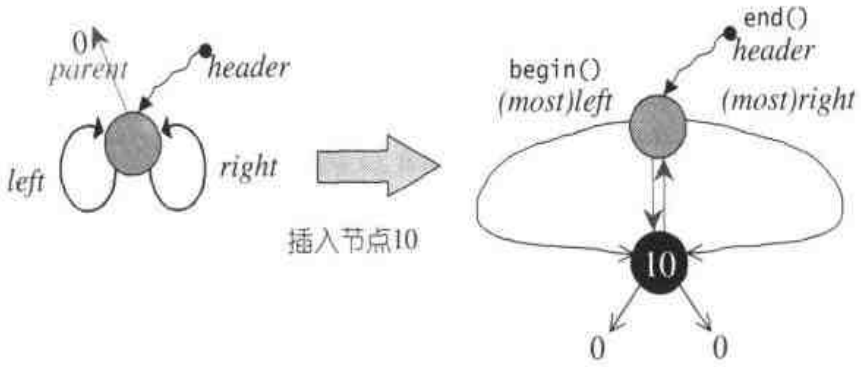
这行程序代码分别指定了节点的键值、实值、大小比较标准… 然后调用 RB-tree 的 default constructor：

```
rb_tree(const Compare& comp = Compare())
  : node_count(0), key_compare(comp) { init(); }
```

其中的 init() 是实现技巧上的一个关键点：

```
private:
  void init() {
    header = get_node();    // 产生一个节点空间，令 header 指向它
    color(header) = __rb_tree_red; // 令 header 为红色，用来区分 header
                                   // 和 root（在 iterator.operator++ 中）
    root() = 0;
    leftmost() = header;    // 令 header 的左子节点为自己
    rightmost() = header;   // 令 header 的右子节点为自己
  }
```

我们知道，树状结构的各种操作，最需注意的就是边界情况的发生，也就是走到根节点时要有特殊的处理。为了简化处理，SGI STL 特别为根节点再设计一个父节点，名为 header，并令其初始状态如图 5-18 所示。



注意，header和 root 互为对方的父节点，这是一种实现技巧

图 **5-18** 图左是 RB-tree 的初始状态，图右为加入第一个节点后的状态。

[6] 注意，RB-tree 并未明列于 STL 标准规格之中，我们能够这么用，是因为我们现在已经相当了解 SGI STL。

接下来，每当插入新节点时，不但要依照 RB-tree 的规则来调整，并且维护 header 的正确性，使其父节点指向根节点，左子节点指向最小节点，右子节点指向最大节点。节点的插入所带来的影响，是下一小节的描述重点。

5.2.7 RB-tree 的元素操作

本节主要只谈元素（节点）的插入和搜寻。RB-tree 提供两种插入操作：insert_unique() 和 insert_equal()，前者表示被插入节点的键值（*key*）在整棵树中必须独一无二（因此，如果树中已存在相同的键值，插入操作就不会真正进行），后者表示被插入节点的键值在整棵树中可以重复，因此，无论如何插入都会成功（除非空间不足导致配置失败）。这两个函数都有数个版本，以下以最简单的版本（单一参数，用以表现将被插入的节点实值（*value*））作为说明对象。注意，虽然只指定实值，但 RB-tree 一开始即要求用户必须明确设定所谓的 KeyOfValue 仿函数，因此，从实值（*value*）中取出键值（*key*）是毫无问题的。

元素插入操作 insert_equal()

```
// 插入新值：节点键值允许重复
// 注意，返回值是一个 RB-tree 迭代器，指向新增节点
template <class Key, class Value, class KeyOfValue, class Compare, class Alloc>
typename rb_tree<Key, Value, KeyOfValue, Compare, Alloc>::iterator
rb_tree<Key, Value, KeyOfValue, Compare, Alloc>::insert_equal(const Value& v)
{
  link_type y = header;
  link_type x = root();     // 从根节点开始
  while (x != 0) {          // 从根节点开始，往下寻找适当的插入点
    y = x;
    x = key_compare(KeyOfValue()(v), key(x)) ? left(x) : right(x);
    // 以上，遇 "大" 则往左，遇 "小于或等于" 则往右
  }
  return __insert(x, y, v);
  // 以上，x 为新值插入点，y 为插入点之父节点，v 为新值
}
```

元素插入操作 insert_unique()

```
// 插入新值：节点键值不允许重复，若重复则插入无效
// 注意，返回值是个pair，第一元素是个 RB-tree 迭代器，指向新增节点，
// 第二元素表示插入成功与否
template <class Key, class Value, class KeyOfValue,
          class Compare, class Alloc>
pair<typename rb_tree<Key, Value, KeyOfValue, Compare, Alloc>::iterator,
     bool>
rb_tree<Key, Value, KeyOfValue, Compare, Alloc>::
    insert_unique(const Value& v)
{
  link_type y = header;
  link_type x = root();     // 从根节点开始
  bool comp = true;
  while (x != 0) {          // 从根节点开始，往下寻找适当的插入点
    y = x;
    comp = key_compare(KeyOfValue()(v), key(x)); // v 键值小于目前节点之键值?
    x = comp ? left(x) : right(x);   // 遇 "大"则往左，遇 "小于或等于"则往右
  }
  // 离开 while 循环之后，y 所指即插入点之父节点（此时的它必为叶节点）

  iterator j = iterator(y);   // 令迭代器 j 指向插入点之父节点 y
  if (comp)  // 如果离开 while 循环时 comp 为真（表示遇 "大"，将插入于左侧）
    if (j == begin())   // 如果插入点之父节点为最左节点
      return pair<iterator,bool>(__insert(x, y, v), true);
      // 以上，x 为插入点，y 为插入点之父节点，v 为新值
    else // 否则（插入点之父节点不为最左节点）
      --j;    // 调整 j，回头准备测试...
  if (key_compare(key(j.node), KeyOfValue()(v)))
    // 小于新值（表示遇 "小"，将插入于右侧）
    return pair<iterator,bool>(__insert(x, y, v), true);
    // 以上，x 为新值插入点，y 为插入点之父节点，v 为新值

  // 进行至此，表示新值一定与树中键值重复，那么就不该插入新值
  return pair<iterator,bool>(j, false);
}
```

真正的插入执行程序 __insert()

```
template <class Key, class Value, class KeyOfValue,
          class Compare, class Alloc>
typename rb_tree<Key, Value, KeyOfValue, Compare, Alloc>::iterator
rb_tree<Key, Value, KeyOfValue, Compare, Alloc>::
    __insert(base_ptr x_, base_ptr y_, const Value& v) {
// 参数 x_ 为新值插入点，参数 y_ 为插入点之父节点，参数 v 为新值
  link_type x = (link_type) x_;
  link_type y = (link_type) y_;
```

```
  link_type z;

  // key_compare 是键值大小比较准则。应该会是个 function object
  if (y == header || x != 0 || key_compare(KeyOfValue()(v), key(y))) {
    z = create_node(v);  // 产生一个新节点
    left(y) = z;         // 这使得当 y 即为 header 时，leftmost() = z
    if (y == header) {
      root() = z;
      rightmost() = z;
    }
    else if (y == leftmost())    // 如果 y 为最左节点
      leftmost() = z;            // 维护 leftmost()，使它永远指向最左节点
  }
  else {
    z = create_node(v);          // 产生一个新节点
    right(y) = z;                // 令新节点成为插入点之父节点 y 的右子节点
    if (y == rightmost())
      rightmost() = z;           // 维护 rightmost()，使它永远指向最右节点
  }
  parent(z) = y;          // 设定新节点的父节点
  left(z) = 0;            // 设定新节点的左子节点
  right(z) = 0;           // 设定新节点的右子节点
                          // 新节点的颜色将在 __rb_tree_rebalance() 设定（并调整）
  __rb_tree_rebalance(z, header->parent);// 参数一为新增节点，参数二为 root
  ++node_count;           // 节点数累加
  return iterator(z);  // 返回一个迭代器，指向新增节点
}
```

调整 RB-tree（旋转及改变颜色）

任何插入操作，于节点插入完毕后，都要做一次调整操作，将树的状态调整到符合RB-tree的要求。__rb_tree_rebalance() 是具备如此能力的一个全局函数：

```
// 全局函数
// 重新令树形平衡（改变颜色及旋转树形）
// 参数一为新增节点，参数二为 root
inline void
__rb_tree_rebalance(__rb_tree_node_base* x, __rb_tree_node_base*& root)
{
  x->color = __rb_tree_red;     // 新节点必为红
  while (x != root && x->parent->color == __rb_tree_red) { // 父节点为红
    if (x->parent == x->parent->parent->left) { // 父节点为祖父节点之左子节点
      __rb_tree_node_base* y = x->parent->parent->right;// 令 y 为伯父节点
      if (y && y->color == __rb_tree_red) {          // 伯父节点存在，且为红
        x->parent->color = __rb_tree_black;          // 更改父节点为黑
        y->color = __rb_tree_black;                  // 更改伯父节点为黑
        x->parent->parent->color = __rb_tree_red;    // 更改祖父节点为红
        x = x->parent->parent;
```

```
    }
    else { // 无伯父节点，或伯父节点为黑
      if (x == x->parent->right) { // 如果新节点为父节点之右子节点
        x = x->parent;
        __rb_tree_rotate_left(x, root); // 第一参数为左旋点
      }
      x->parent->color = __rb_tree_black;     // 改变颜色
      x->parent->parent->color = __rb_tree_red;
      __rb_tree_rotate_right(x->parent->parent, root); // 第二参数为右旋点
    }
  }
  else {   // 父节点为祖父节点之右子节点
    __rb_tree_node_base* y = x->parent->parent->left; // 令y为伯父节点
    if (y && y->color ==   rb_tree_red) {          // 有伯父节点，且为红
      x->parent->color = __rb_tree_black;          // 更改父节点为黑
      y->color = __rb_tree_black;                  // 更改伯父节点为黑
      x->parent->parent->color = __rb_tree_red;    // 更改祖父节点为红
      x = x->parent->parent;   // 准备继续往上层检查
    }
    else { // 无伯父节点，或伯父节点为黑
      if (x == x->parent->left) {   // 如果新节点为父节点之左子节点
        x = x->parent;
        __rb_tree_rotate_right(x, root);      // 第一参数为右旋点
      }
      x->parent->color = __rb_tree_black;     // 改变颜色
      x->parent->parent->color = __rb_tree_red;
      __rb_tree_rotate_left(x->parent->parent, root); // 第二参数为左旋点
    }
  }
 } // while 结束
 root->color = __rb_tree_black;     // 根节点永远为黑
}
```

这个树形调整操作，就是5.2.2节所说的那个“由上而下的程序”。从源代码清楚可见，某些时候只需调整节点颜色，某些时候要做单旋转，某些时候要做双旋转（两次单旋转）；某些时候要左旋，某些时候要右旋。下面是左旋函数和右旋函数：

```
// 全局函数
// 新节点必为红节点。如果插入处之父节点亦为红节点，就违反红黑树规则，此时必须
// 做树形旋转（及颜色改变，在程序它处）
inline void
__rb_tree_rotate_left(__rb_tree_node_base* x,
                      __rb_tree_node_base*& root)
{
  // x 为旋转点
  __rb_tree_node_base* y = x->right; // 令y为旋转点的右子节点
  x->right = y->left;
  if (y->left !=0)
```

```
    y->left->parent = x;          // 别忘了回马枪设定父节点
  y->parent = x->parent;

  // 令 y 完全顶替 x 的地位（必须将 x 对其父节点的关系完全接收过来）
  if (x == root)                          // x 为根节点
    root = y;
  else if (x == x->parent->left)          // x 为其父节点的左子节点
    x->parent->left = y;
  else                                    // x 为其父节点的右子节点
    x->parent->right = y;
  y->left = x;
  x->parent = y;
}

// 全局函数
// 新节点必为红节点。如果插入处之父节点亦为红节点，就违反红黑树规则，此时必须
// 做树形旋转（及颜色改变，在程序其它处）
inline void
__rb_tree_rotate_right(  rb_tree_node_base* x,
                         __rb_tree_node_base*& root)
{
  // x 为旋转点
  __rb_tree_node_base* y = x->left;  // y 为旋转点的左子节点
  x->left = y->right;
  if (y->right != 0)
    y->right->parent = x;   // 别忘了回马枪设定父节点
  y >parent = x->parent;

  // 令 y 完全顶替 x 的地位（必须将 x 对其父节点的关系完全接收过来）
  if (x == root)                          // x 为根节点
    root = y;
  else if (x == x->parent->right)         // x 为其父节点的右子节点
    x->parent->right = y;
  else                                    // x 为其父节点的左子节点
    x->parent->left = y;
  y->right = x;
  x->parent = y;
}
```

下面是客户端程序连续插入数个元素到 RB-tree 中并加以测试的过程：

```
// file: 5rbtree-test.cpp
rb_tree<int, int, identity<int>, less<int> > itree;
  cout << itree.size() << endl;       // 0
```

```
// 以下注释中所标示的函数名称，是我修改 <stl_tree.h>[7]，令三个函数
// 打印出函数名称而后得
itree.insert_unique(10);      // __rb_tree_rebalance
itree.insert_unique(7);       // __rb_tree_rebalance
itree.insert_unique(8);       // __rb_tree_rebalance
                                  //   __rb_tree_rotate_left
                                  //   __rb_tree_rotate_right
itree.insert_unique(15);      // __rb_tree_rebalance
itree.insert_unique(5);       // __rb_tree_rebalance
itree.insert_unique(6);       // __rb_tree_rebalance
                                  //   __rb_tree_rotate_left
                                  //   __rb_tree_rotate_right
itree.insert_unique(11);      // __rb_tree_rebalance
                                  //   __rb_tree_rotate_right
                                  //   __rb_tree_rotate_left
itree.insert_unique(13);      // __rb_tree_rebalance
itree.insert_unique(12);

cout << itree.size() << endl;  // 9
for(; ite1 != ite2; ++ite1)
   cout << *ite1 << ' '; // 5 6 7 8 10 11 12 13 15
cout << endl;

// 测试颜色和 operator++ (亦即  rb_tree_iterator_base::increment)
rb_tree<int, int, identity<int>, less<int> >::iterator
  ite1=itree.begin();
rb_tree<int, int, identity<int>, less<int> >::iterator
  ite2=itree.end();
__rb_tree_base_iterator rbtite;[8]

for(; ite1 != ite2; ++ite1) {
   rbtite = __rb_tree_base_iterator(ite1);
   // 以上，向上转型 up-casting，永远没问题。见《多型与虚拟 2/e》第三章
   cout << *ite1 << '(' << rbtite.node->color << ") ";
}
cout << endl;
// 结果：5(0) 6(1) 7(0) 8(1) 10(1) 11(0) 12(0) 13(1) 15(0)
```

图 5-19 是上述程序操作的完整图标，一步一步展现 RB-tree 的成长与调整。

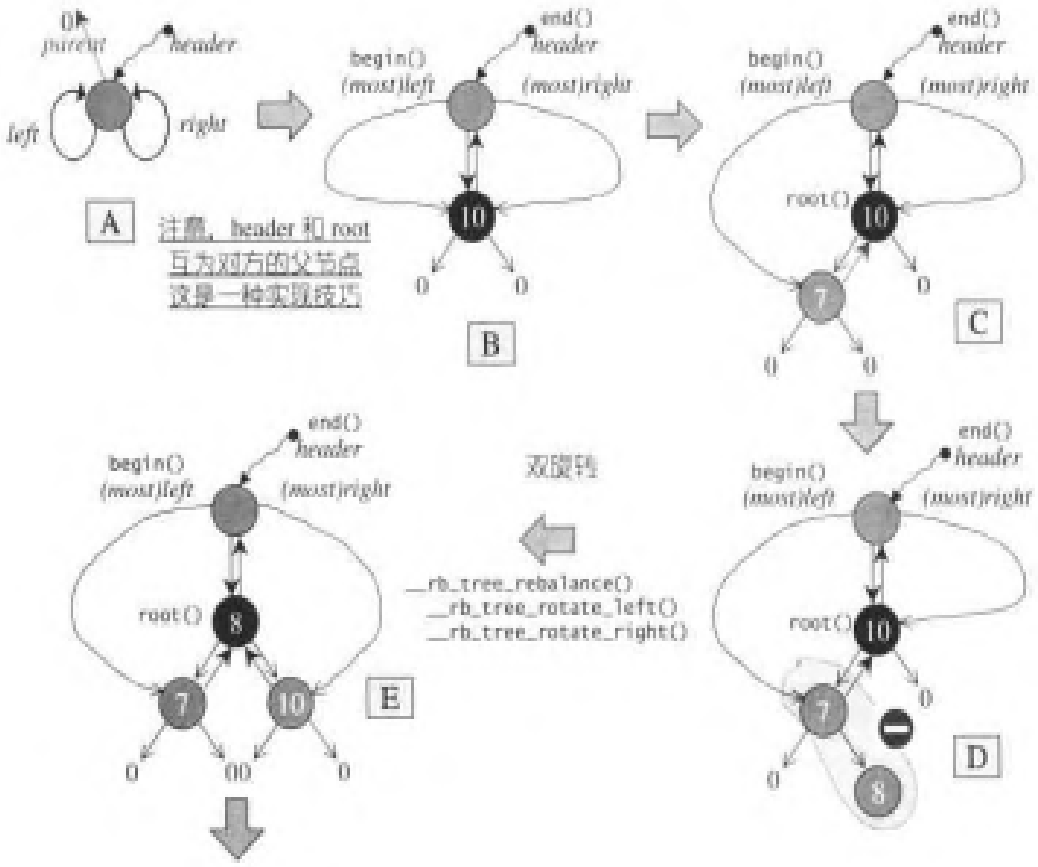
[7] 注意，如果你要像我一样，修改 SGI STL 源代码，请注意备份并谨慎行事。

[8] __rb_tree_base_iterator 是 SGI STL 内部使用的东西。此处为了测试（为了直接取得节点颜色），所以在程序中取用之。当然这是完全合法的，不需修改任何 STL 源代码。

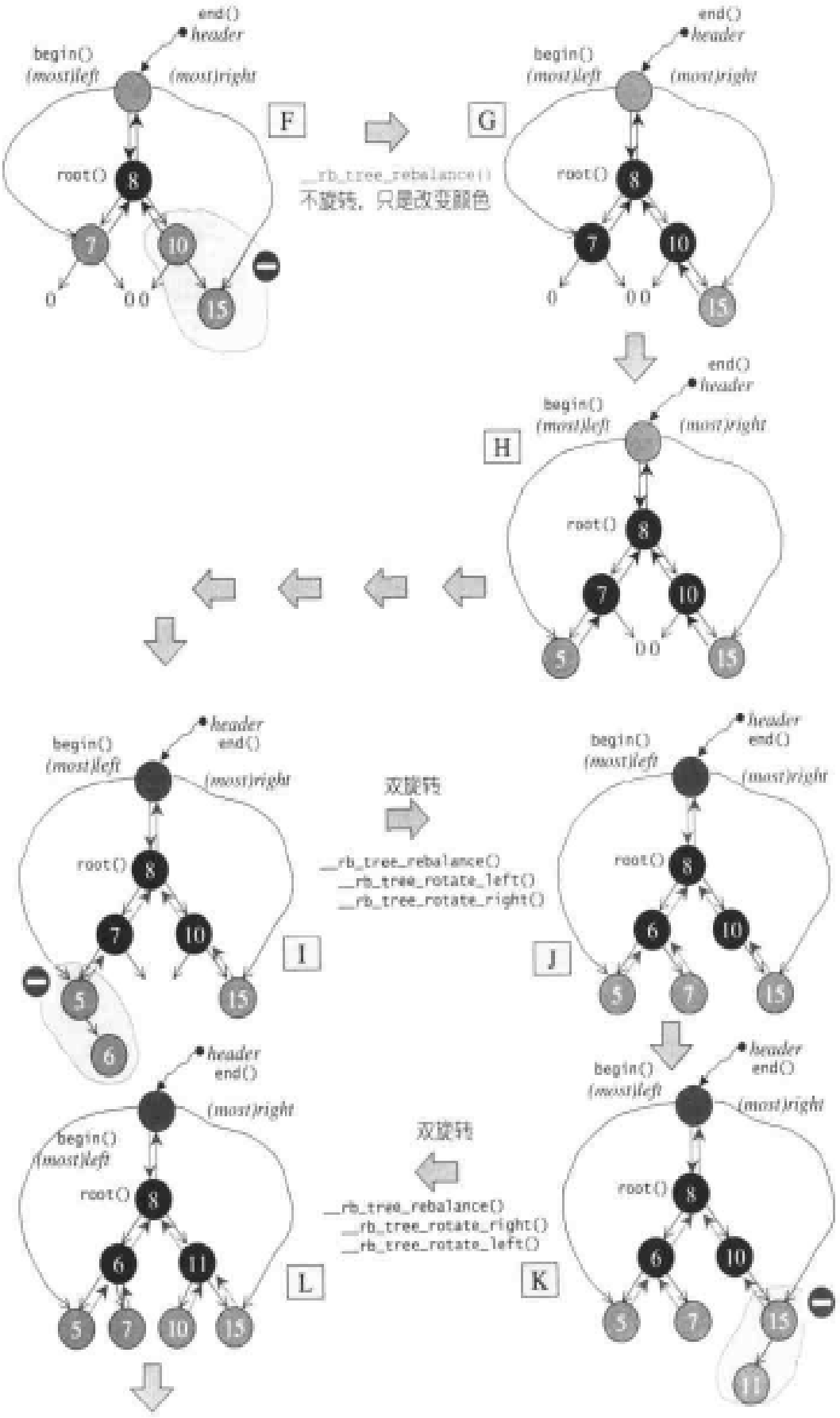
元素的搜寻

RB-tree 是一个二叉搜索树，元素的搜寻正是其拿手项目。以下是 RB-tree 提供的 find 函数：

```
// 寻找 RB 树中是否有键值为 k 的节点
template <class Key, class Value, class KeyOfValue, class Compare, class Alloc>
typename rb_tree<Key, Value, KeyOfValue, Compare, Alloc>::iterator
rb_tree<Key, Value, KeyOfValue, Compare, Alloc>::find(const Key& k) {
  link_type y = header;       // Last node which is not less than k.
  link_type x = root();       // Current node.

  while (x != 0)
    // 以下，key_compare 是节点键值大小比较准则。应该会是个 function object。
    if (!key_compare(key(x), k))
      // 进行到这里，表示 x 键值大于 k。遇到大值就向左走
      y = x, x = left(x);   // 注意语法！
    else
      // 进行到这里，表示 x 键值小于 k。遇到小值就向右走
      x = right(x);

  iterator j = iterator(y);
  return (j == end() || key_compare(k, key(j.node))) ? end() : j;
}
```


0
parent
header
left
right
A
注意，header 和 root
互为对方的父节点
这是一种实现技巧
end()
header
begin()
(most)left
(most)right
10
0
0
B
end()
header
begin()
(most)left
(most)right
root()
10
7
0
0
0
C
end()
header
begin()
(most)left
(most)right
root()
10
7
0
8
D
双旋转
__rb_tree_rebalance()
__rb_tree_rotate_left()
__rb_tree_rotate_right()
end()
header
begin()
(most)left
(most)right
root()
8
7
10
0
00
0
E

续下页


end()
header
begin()
(most)left
(most)right
root()
F
G
__rb_tree_rebalance()
不旋转，只是改变颜色
H
I
双旋转
__rb_tree_rebalance()
__rb_tree_rotate_left()
__rb_tree_rotate_right()
J
K
双旋转
__rb_tree_rebalance()
__rb_tree_rotate_right()
__rb_tree_rotate_left()
L

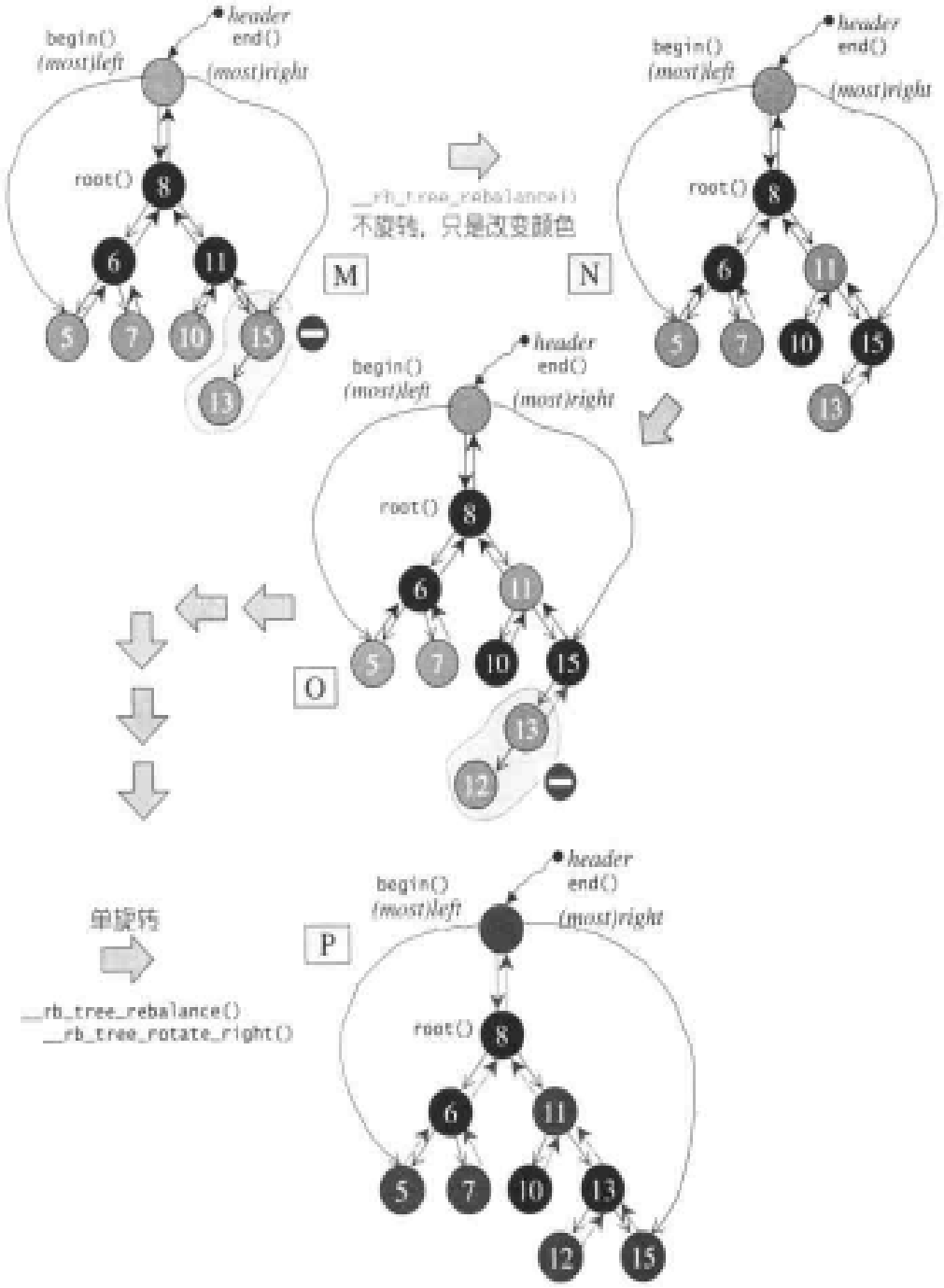


图 **5-19** 依序将 10,7,8,15,5,6,11,13,12 插入至 RB-tree，一步一步的成长与调整。此图根据前述之 5rbtree-test.cpp 实例绘制而成。

5.3 set

set 的特性是，所有元素都会根据元素的键值自动被排序。set 的元素不像 map 那样可以同时拥有实值（*value*）和键值（*key*），set 元素的键值就是实值，实值就是键值。set 不允许两个元素有相同的键值。

我们可以通过 set的迭代器改变 set 的元素值吗？不行，因为 set 元素值就是其键值，关系到 set 元素的排列规则。如果任意改变 set 元素值，会严重破坏 set 组织。稍后你会在 set 源代码之中看到，`set<T>::iterator` 被定义为底层 RB-tree 的 `const_iterator`，杜绝写入操作。换句话说，set iterators 是一种 constant iterators（相对于 mutable iterators）。

set 拥有与 list 相同的某些性质：当客户端对它进行元素新增操作（insert）或删除操作（erase）时，操作之前的所有迭代器，在操作完成之后都依然有效。当然，被删除的那个元素的迭代器必然是个例外。

STL 特别提供了一组 set/multiset 相关算法，包括交集 `set_intersection`，联集 `set_union`、差集 `set_difference`，对称差集 `set_symmetric_difference`，详见 6.5 节。

由于 RB-tree 是一种平衡二叉搜索树，自动排序的效果很不错，所以标准的 STL set 即以 RB-tree 为底层机制[9]。又由于 set 所开放的各种操作接口，RB-tree 也都提供了，所以几乎所有的 set 操作行为，都只是转调用 RB-tree 的操作行为而已。

下面是 set 的源代码摘录，其中的注释几乎说明了一切，本节不再另做文字解释。

```
template <class Key,
          class Compare = less<Key>,      // 缺省情况下采用递增排序
          class Alloc = alloc>
class set {
public:
  // typedefs:
```

[9] SGI 另提供一种以 hash-table 为底层机制的 set，称为 hash_set，详见 5.8 节。

```
  typedef Key key_type;
  typedef Key value_type;
  // 注意，以下 key_compare 和 value_compare 使用同一个比较函数
  typedef Compare key_compare;
  typedef Compare value_compare;
private:
  // 注意，以下的 identity 定义于 <stl_function.h>，参见第 7 章，其定义为：
  /*
    template <class T>
    struct identity : public unary_function<T, T> {
      const T& operator()(const T& x) const { return x; }
    };
  */
  typedef rb_tree<key_type, value_type,
                  identity<value_type>, key_compare, Alloc> rep_type;
  rep_type t;  // 采用红黑树 (RB-tree) 来表现 set
public:
  typedef typename rep_type::const_pointer pointer;
  typedef typename rep_type::const_pointer const_pointer;
  typedef typename rep_type::const_reference reference;
  typedef typename rep_type::const_reference const_reference;
  typedef typename rep_type::const_iterator iterator;
  // 注意上一行，iterator 定义为 RB-tree 的 const_iterator，这表示 set 的
  // 迭代器无法执行写入操作，这是因为 set 的元素有一定次序安排
  // 不允许用户在任意处进行写入操作
  typedef typename rep_type::const_iterator const_iterator;
  typedef typename rep_type::const_reverse_iterator reverse_iterator;
  typedef typename rep_type::const_reverse_iterator const_reverse_iterator;
  typedef typename rep_type::size_type size_type;
  typedef typename rep_type::difference_type difference_type;

  // allocation/deallocation
  // 注意， set 一定使用 RB-tree 的 insert_unique() 而非 insert_equal()
  // multiset 才使用 RB-tree 的 insert_equal()
  // 因为 set 不允许相同键值存在，multiset 才允许相同键值存在
  set() : t(Compare()) {}
  explicit set(const Compare& comp) : t(comp) {}

  template <class InputIterator>
  set(InputIterator first, InputIterator last)
    : t(Compare()) { t.insert_unique(first, last); }

  template <class InputIterator>
  set(InputIterator first, InputIterator last, const Compare& comp)
    : t(comp) { t.insert_unique(first, last); }

  set(const set<Key, Compare, Alloc>& x) : t(x.t) {}
  set<Key, Compare, Alloc>& operator=(const set<Key, Compare, Alloc>& x) {
    t = x.t;
```

```
  return *this;
}

// 以下所有的 set 操作行为，RB-tree 都已提供，所以 set 只要传递调用即可

// accessors:
key_compare key_comp() const { return t.key_comp(); }
// 以下注意，set 的 value_comp() 事实上为 RB-tree 的 key_comp()
value_compare value_comp() const { return t.key_comp(); }
iterator begin() const { return t.begin(); }
iterator end() const { return t.end(); }
reverse_iterator rbegin() const { return t.rbegin(); }
reverse_iterator rend() const { return t.rend(); }
bool empty() const { return t.empty(); }
size_type size() const { return t.size(); }
size_type max_size() const { return t.max_size(); }
void swap(set<Key, Compare, Alloc>& x) { t.swap(x.t); }

// insert/erase
typedef  pair<iterator, bool> pair_iterator_bool;
pair<iterator,bool> insert(const value_type& x) {
  pair<typename rep_type::iterator, bool> p = t.insert_unique(x);
  return pair<iterator, bool>(p.first, p.second);
}
iterator insert(iterator position, const value_type& x) {
  typedef typename rep_type::iterator rep_iterator;
  return t.insert_unique((rep_iterator&)position, x);
}
template <class InputIterator>
void insert(InputIterator first, InputIterator last) {
  t.insert_unique(first, last);
}
void erase(iterator position) {
  typedef typename rep_type::iterator rep_iterator;
  t.erase((rep_iterator&)position);
}
size_type erase(const key_type& x) {
  return t.erase(x);
}
void erase(iterator first, iterator last) {
  typedef typename rep_type::iterator rep_iterator;
  t.erase((rep_iterator&)first, (rep_iterator&)last);
}
void clear() { t.clear(); }

// set operations:
iterator find(const key_type& x) const { return t.find(x); }
size_type count(const key_type& x) const { return t.count(x); }
iterator lower_bound(const key_type& x) const {
```

```
    return t.lower_bound(x);
  }
  iterator upper_bound(const key_type& x) const {
    return t.upper_bound(x);
  }
  pair<iterator,iterator> equal_range(const key_type& x) const {
    return t.equal_range(x);
  }
  // 以下的__STL_NULL_TMPL_ARGS 被定义为 <>，详见 2.9.1 节
  friend bool operator== __STL_NULL_TMPL_ARGS (const set&, const set&);
  friend bool operator< __STL_NULL_TMPL_ARGS (const set&, const set&);
};

template <class Key, class Compare, class Alloc>
inline bool operator==(const set<Key, Compare, Alloc>& x,
                       const set<Key, Compare, Alloc>& y) {
  return x.t == y.t;
}

template <class Key, class Compare, class Alloc>
inline bool operator<(const set<Key, Compare, Alloc>& x,
                      const set<Key, Compare, Alloc>& y) {
  return x.t < y.t;
}
```

下面是一个小小的 set 测试程序：

```
// file: 5set-test.cpp
#include <set>
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
  int i;
  int ia[5] = { 0,1,2,3,4};
  set<int> iset(ia, ia+5);

  cout << "size=" << iset.size() << endl;          // size=5
  cout << "3 count=" << iset.count(3) << endl;     // 3 count=1
  iset.insert(3);
  cout << "size=" << iset.size() << endl;          // size=5
  cout << "3 count=" << iset.count(3) << endl;     // 3 count=1
  iset.insert(5);
  cout << "size=" << iset.size() << endl;          // size=6
  cout << "3 count=" << iset.count(3) << endl;     // 3 count=1
  iset.erase(1);
  cout << "size=" << iset.size() << endl;          // size=5
```

```
    cout << "3 count=" << iset.count(3) << endl;     // 3 count=1
    cout << "1 count=" << iset.count(1) << endl;     // 1 count=0

    set<int>::iterator ite1=iset.begin();
    set<int>::iterator ite2=iset.end();
    for(; ite1 != ite2; ++ite1)
       cout << *ite1;
    cout << endl;                                    // 0 2 3 4 5


    // 使用 STL 算法 find() 来搜寻元素，可以有效运作，但不是好办法
    ite1 = find(iset.begin(), iset.end(), 3);
    if (ite1 != iset.end())
       cout << "3 found" << endl;                    // 3 found

    ite1 = find(iset.begin(), iset.end(), 1);
    if (ite1 == iset.end())
       cout << "1 not found" << endl;                // 1 not found

    // 面对关联式容器，应该使用其所提供的 find 函数来搜寻元素，会比
    // 使用 STL 算法 find() 更有效率。因为 STL 算法 find() 只是循序搜寻
    ite1 = iset.find(3);
    if (ite1 != iset.end())
       cout << "3 found" << endl;                    // 3 found

    ite1 = iset.find(1);
    if (ite1 == iset.end())
       cout << "1 not found" << endl;                // 1 not found

    // 企图通过迭代器来改变 set 元素，是不被允许的
    *ite1 = 9;   // error, assignment of read-only location
}
```

5.4 map

map 的特性是，所有元素都会根据元素的键值自动被排序。map 的所有元素都是 pair，同时拥有实值（*value*）和键值（*key*）。pair 的第一元素被视为键值，第二元素被视为实值。map 不允许两个元素拥有相同的键值。下面是<stl_pair.h>中的 pair 定义：

```
template <class T1, class T2>
struct pair {
  typedef T1 first_type;
  typedef T2 second_type;

  T1 first;        // 注意，它是 public
  T2 second;       // 注意，它是 public
```

```
  pair() : first(T1()), second(T2()) {}
  pair(const T1& a, const T2& b) : first(a), second(b) {}
};
```

我们可以通过 map 的迭代器改变 map 的元素内容吗？如果想要修正元素的键值，答案是不行，因为 map 元素的键值关系到 map 元素的排列规则。任意改变 map 元素键值将会严重破坏 map 组织。但如果想要修正元素的实值，答案是可以，因为 map 元素的实值并不影响 map 元素的排列规则。因此，map iterators 既不是一种 constant iterators，也不是一种 mutable iterators。

map 拥有和 list 相同的某些性质：当客户端对它进行元素新增操作（insert）或删除操作（erase）时，操作之前的所有迭代器，在操作完成之后都依然有效 当然，被删除的那个元素的迭代器必然是个例外。

由于 RB-tree 是一种平衡二叉搜索树，自动排序的效果很不错，所以标准的 STL map 即以 RB-tree 为底层机制[10]，又由于 map 所开放的各种操作接口，RB-tree 也都提供了，所以几乎所有的 map 操作行为，都只是转调用 RB-tree 的操作行为而已。

图 5-20 说明 map 的架构。下页是 map 源代码摘录，其中注释说明了一切。

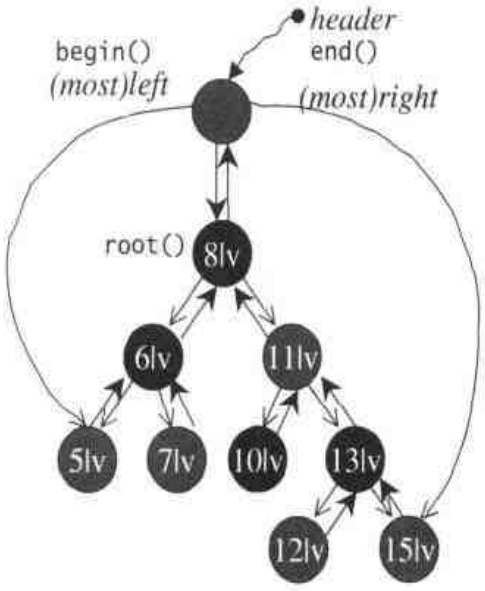


图 5-20 SGI STL map 以红黑树为底层机制，每个节点的内容是一个 pair pair 的第一元素被视为键值（*key*），第二元素被视为实值（*value*）

[10] SGI 另提供一种以 hash table 为底层机制的 map，称为 hash_map，详见 5.9 节。

```
// 注意，以下 Key 为键值（key）型别，T 为实值（value）型别

template <class Key, class T,
          class Compare = less<Key>,     // 缺省采用递增排序
          class Alloc = alloc>
class map {
public:

  // typedefs:
  typedef Key key_type;     // 键值型别
  typedef T data_type;      // 数据（实值）型别
  typedef T mapped_type;    //
  typedef pair<const Key, T> value_type; // 元素型别（键值/实值）
  typedef Compare key_compare;  // 键值比较函数

  // 以下定义一个 functor，其作用就是调用 “元素比较函数”
  class value_compare
    : public binary_function<value_type, value_type, bool> {
  friend class map<Key, T, Compare, Alloc>;
  protected :
    Compare comp;
    value_compare(Compare c) : comp(c) {}
  public:
    bool operator()(const value_type& x, const value_type& y) const {
      return comp(x.first, y.first);
    }
  };

private:
  // 以下定义表述型别（representation type），以 map 元素型别（一个 pair）
  // 的第一型别，作为 RB-tree 节点的键值型别
  typedef rb_tree<key_type, value_type,
                  select1st<value_type>, key_compare, Alloc> rep_type;
  rep_type t;  // 以红黑树（RB-tree）表现 map
public:
  typedef typename rep_type::pointer pointer;
  typedef typename rep_type::const_pointer const_pointer;
  typedef typename rep_type::reference reference;
  typedef typename rep_type::const_reference const_reference;
  typedef typename rep_type::iterator iterator;
  // 注意上一行，map 并不像 set 一样将 iterator 定义为 RB-tree 的
  // const_iterator，因为它允许用户通过其迭代器修改元素的实值（value）
  typedef typename rep_type::const_iterator const_iterator;
  typedef typename rep_type::reverse_iterator reverse_iterator;
  typedef typename rep_type::const_reverse_iterator const_reverse_iterator;
  typedef typename rep_type::size_type size_type;
  typedef typename rep_type::difference_type difference_type;

  // allocation/deallocation
```

```
// 注意， map 一定使用底层 RB-tree 的 insert_unique() 而非 insert_equal()
// multimap 才使用 insert_equal()
// 因为 map 不允许相同键值存在，multimap 才允许相同键值存在

map() : t(Compare()) {}
explicit map(const Compare& comp) : t(comp) {}

template <class InputIterator>
map(InputIterator first, InputIterator last)
  : t(Compare()) { t.insert_unique(first, last); }

template <class InputIterator>
map(InputIterator first, InputIterator last, const Compare& comp)
  : t(comp) { t.insert_unique(first, last); }

map(const map<Key, T, Compare, Alloc>& x) : t(x.t) {}
map<Key, T, Compare, Alloc>& operator=(const map<Key, T, Compare, Alloc>& x)
{
  t = x.t;
  return *this;
}

// accessors:
// 以下所有的 map 操作行为，RB-tree 都已提供，map 只要转调用即可

key_compare key_comp() const { return t.key_comp(); }
value_compare value_comp() const { return value_compare(t.key_comp()); }
iterator begin() { return t.begin(); }
const_iterator begin() const { return t.begin(); }
iterator end() { return t.end(); }
const_iterator end() const { return t.end(); }
reverse_iterator rbegin() { return t.rbegin(); }
const_reverse_iterator rbegin() const { return t.rbegin(); }
reverse_iterator rend() { return t.rend(); }
const_reverse_iterator rend() const { return t.rend(); }
bool empty() const { return t.empty(); }
size_type size() const { return t.size(); }
size_type max_size() const { return t.max_size(); }
// 注意以下 下标 (subscript) 操作符
T& operator[](const key_type& k) {
  return (*((insert(value_type(k, T()))).first)).second;
}
void swap(map<Key, T, Compare, Alloc>& x) { t.swap(x.t); }

// insert/erase

// 注意以下 insert 操作返回的型别
pair<iterator,bool> insert(const value_type& x) {
  return t.insert_unique(x); }
```

```
  iterator insert(iterator position, const value_type& x) {
    return t.insert_unique(position, x);
  }
  template <class InputIterator>
  void insert(InputIterator first, InputIterator last) {
    t.insert_unique(first, last);
  }

  void erase(iterator position) { t.erase(position); }
  size_type erase(const key_type& x) { return t.erase(x); }
  void erase(iterator first, iterator last) { t.erase(first, last); }
  void clear() { t.clear(); }

  // map operations:

  iterator find(const key_type& x) { return t.find(x); }
  const_iterator find(const key_type& x) const { return t.find(x); }
  size_type count(const key_type& x) const { return t.count(x); }
  iterator lower_bound(const key_type& x) {return t.lower_bound(x); }
  const_iterator lower_bound(const key_type& x) const {
    return t.lower_bound(x);
  }
  iterator upper_bound(const key_type& x) {return t.upper_bound(x); }
  const_iterator upper_bound(const key_type& x) const {
    return t.upper_bound(x);
  }

  pair<iterator,iterator> equal_range(const key_type& x) {
    return t.equal_range(x);
  }
  pair<const_iterator,const_iterator> equal_range(const key_type& x) const {
    return t.equal_range(x);
  }
  friend bool operator== __STL_NULL_TMPL_ARGS (const map&, const map&);
  friend bool operator< __STL_NULL_TMPL_ARGS (const map&, const map&);
};

template <class Key, class T, class Compare, class Alloc>
inline bool operator==(const map<Key, T, Compare, Alloc>& x,
                       const map<Key, T, Compare, Alloc>& y) {
  return x.t == y.t;
}

template <class Key, class T, class Compare, class Alloc>
inline bool operator<(const map<Key, T, Compare, Alloc>& x,
                      const map<Key, T, Compare, Alloc>& y) {
  return x.t < y.t;
}
```

下面是一个小小的测试程序：

```
// file: 5map-test.cpp
#include <map>
#include <iostream>
#include <string>
using namespace std;

int main()
{
  map<string, int> simap;        // 以 string 为键值，以 int 为实值
  simap[string("jjhou")]  = 1;   // 第 1 对内容是 ("jjhou", 1)
  simap[string("jerry")]  = 2;   // 第 2 对内容是 ("jerry", 2)
  simap[string("jason")]  = 3;   // 第 3 对内容是 ("jason", 3)
  simap[string("jimmy")]  = 4;   // 第 4 对内容是 ("jimmy", 4)

  pair<string, int> value(string("david"),5);
  simap.insert(value);

  map<string, int>::iterator simap_iter = simap.begin();
  for (; simap_iter != simap.end(); ++simap_iter)
    cout << simap_iter->first << ' '
         << simap_iter->second << endl;
                                    // david 5
                                    // jason 3
                                    // jerry 2
                                    // jimmy 4
                                    // jjhou 1

  int number = simap[string("jjhou")];
  cout << number << endl;           // 1

  map<string, int>::iterator ite1;

  // 面对关联式容器，应该使用其所提供的 find 函数来搜寻元素，会比
  // 使用 STL 算法 find() 更有效率。因为 STL 算法 find() 只是循序搜寻
  ite1 = simap.find(string("mchen"));
  if (ite1 == simap.end())
     cout << "mchen not found" << endl;     // mchen not found

  ite1 = simap.find(string("jerry"));
  if (ite1 != simap.end())
     cout << "jerry found" << endl;         // jerry found

  ite1->second = 9;   // 可以通过 map 迭代器修改 "value"(not key)
  int number2 = simap[string("jerry")];
  cout << number2 << endl;              // 9
}
```

我想针对其中使用的 insert() 函数及 subscript（下标）操作符做一些说明。首先是 insert() 函数：

```
// 注意以下 insert 操作返回的型别
pair<iterator,bool> insert(const value_type& x)
  { return t.insert_unique(x); }
```

此式将工作直接转给底层机制 RB-tree 的 insert_unique() 去执行，原也不必多说。要注意的是其返回值型别是一个 pair，由一个迭代器和一个 bool 值组成，后者表示插入成功与否，成功的话前者即指向被插入的那个元素。

至于 subscript（下标）操作符，用法有两种，可能作为左值运用（内容可被修改），也可能作为右值运用（内容不可被修改），例如：

```
map<string, int> simap;          // 以 string 为键值，以 int 为实值
simap[string("jjnou")] = 1;      // 左值运用
...
int number = simap[string("jjhou")]; // 右值运用
```

左值或右值都适用的关键在于，返回值采用 by reference 传递形式[11]。

无论如何，subscript 操作符的工作，都得先根据键值找出其实值，再做打算。下面是其实际操作：

```
template <class Key, class T,
          class Compare = less<Key>,
          class Alloc = alloc>
class map {
public:
// typedefs:
  typedef Key key_type;     // 键值型别
  typedef pair<const Key, T> value_type; // 元素型别（键值/实值）
  ...
public:
  T& operator[](const key_type& k) {
    return (*((insert(value_type(k, T()))).first)).second;   // (A)
  }
  ...
};
```

上述 (A) 式真是复杂，让我细说分明。首先，根据键值和实值做出一个元素，

11 可参考 [Meyers96] 条款 30: *proxy classes*.

由于实值未知，所以产生一个与实值型别相同的暂时对象[12] 替代：

```
value_type(k, T())
```

再将该元素插入到 map 里面去：

```
insert(value_type(k, T()))
```

插入操作返回一个 pair，其第一元素是个迭代器，指向插入妥当的新元素，或指向插入失败点（键值重复）的旧元素。注意，如果下标操作符作为左值运用（通常表示要填加新元素），我们正好以此 “实值待填”的元素将位置卡好；如果下标操作符作为右值运用（通常表示要根据键值取其实值），此时的插入操作所返回的 pair 的第一元素（是个迭代器）恰指向键值符合的旧元素。

现在我们取插入操作所返回的 pair 的第一元素：

```
(insert(value_type(k, T()))).first
```

这第一元素是个迭代器，指向被插入的元素。现在，提领该迭代器：

```
*((insert(value_type(k, T()))).first)
```

获得一个 map 元素，是一个由键值和实值组成的 pair。取其第二元素，即为实值：

```
(*((insert(value_type(k, T()))).first)).second;
```

注意，这个实值以 by reference 方式传递，所以它作为左值或右值都可以。这便是 (A) 式的最后形式。

---

12 这种语法不常见到，但在 STL 的运用中（尤其是 functor）却很频繁。详见第 7 章。

5.5 multiset

multiset 的特性以及用法和 set 完全相同，唯一的差别在于它允许键值重复，因此它的插入操作采用的是底层机制 RB-tree 的 insert_equal() 而非 insert_unique()。下面是 multiset的源代码提要，只列出了与 set 不同之处：

```
template <class Key, class Compare = less<Key>, class Alloc = alloc>
class multiset {
public:
  // typedefs:
  ... (与 set 相同)

  // allocation/deallocation
  // 注意，multiset 一定使用 insert_equal() 而不使用 insert_unique()
  // set 才使用 insert_unique()

  template <class InputIterator>
  multiset(InputIterator first, InputIterator last)
    : t(Compare()) { t.insert_equal(first, last); }
  template <class InputIterator>
  multiset(InputIterator first, InputIterator last, const Compare& comp)
    : t(comp) { t.insert_equal(first, last); }
  ... (其它与 set 相同)

  // insert/erase
  iterator insert(const value_type& x) {
    return t.insert_equal(x);
  }
  iterator insert(iterator position, const value_type& x) {
    typedef typename rep_type::iterator rep_iterator;
    return t.insert_equal((rep_iterator&)position, x);
  }

  template <class InputIterator>
  void insert(InputIterator first, InputIterator last) {
    t.insert_equal(first, last);
  }
  ... (其它与 set 相同)
```

5.6 multimap

multimap 的特性以及用法与 map 完全相同，唯一的差别在于它允许键值重复，因此它的插入操作采用的是底层机制 RB-tree 的 insert_equal() 而非 insert_unique()。下面是 multimap 的源代码提要，只列出了与 map 不同之处：

```
template <class Key, class T, class Compare = less<Key>, class Alloc = alloc>
class multimap {
public:
// typedefs:
  ... (与 set 相同)

  // allocation/deallocation
  // 注意， multimap 一定使用 insert_equal() 而不使用 insert_unique()
  // map 才使用 insert_unique()

  template <class InputIterator>
  multimap(InputIterator first, InputIterator last)
    : t(Compare()) { t.insert_equal(first, last); }

  template <class InputIterator>
  multimap(InputIterator first, InputIterator last, const Compare& comp)
    : t(comp) { t.insert_equal(first, last); }
  ... (其它与 map 相同)

  // insert/erase

  iterator insert(const value_type& x) { return t.insert_equal(x); }
  iterator insert(iterator position, const value_type& x) {
    return t.insert_equal(position, x);
  }
  template <class InputIterator>
  void insert(InputIterator first, InputIterator last) {
    t.insert_equal(first, last);
  }
  ... (其它与 map 相同)
```

5.7 hashtable

5.1.1 节介绍了所谓的二叉搜索树，5.1.2 节介绍了所谓的平衡二叉搜索树，5.2 节则是十分详细地介绍了一种被广泛运用的平衡二叉搜索树：RB-tree（红黑树）。RB-tree 不仅在树形的平衡上表现不错，在效率表现和实现复杂度上也保持相当的“平衡”☺，所以运用甚广，也因此成为 STL set 和 map 的标准底层机制。

二叉搜索树具有对数平均时间（logarithmic average time）的表现，但这样的表现构造在一个假设上：输入数据有足够的随机性。这一节要介绍一种名为 hash table（散列表）的数据结构，这种结构在插入、删除、搜寻等操作上也具有“常数平均时间”的表现，而且这种表现是以统计为基础，不需仰赖输入元素的随机性。

5.7.1 hashtable 概述

hash table 可提供对任何有名项（named item）的存取操作和删除操作。由于操作对象是有名项，所以 hashtable 也可被视为一种字典结构（dictionary）。这种结构的用意在于提供常数时间之基本操作，就像 stack 或 queue 那样。乍听之下这几乎是不可能的任务，因为约束制条件如此之少，而元素个数增加，搜寻操作必定耗费更多时间。

倒也不尽然。

举个例子，如果所有的元素都是 16-bits 且不带正负号的整数，范围 0~65535，那么简单地运用一个 array 就可以满足上述期望。首先配置一个 array A，拥有 65536 个元素，索引号码 0~65535，初值全部为 0，如图 5-21。每一个元素值代表相应元素的出现次数。如果插入元素 i，我们就执行 A[i]++，如果删除元素 i，我们就执行 A[i]--，如果搜寻元素 i，我们就检查 A[i] 是否为 0。以上的每一个操作都是常数时间。这种解法的额外负担（overhead）是 array 的空间和初始化时间。

hashing 5
hashing 8
hashing 3
hashing 8
hashing 58
hashing 65535
hashing 65534

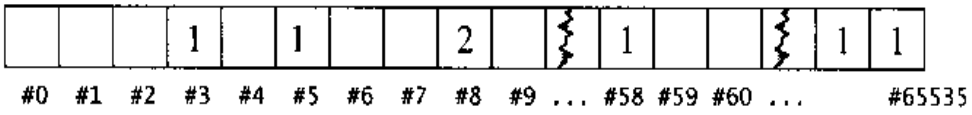


图 **5-21** 如果所有的元素都是 16-bits 且不带正负号的整数，我们可以一个拥有 65536 个元素的 array A，初值全部为 0，每个元素值代表相应元素的出现次数。于是，不论是插入、删除、搜寻，每个操作都在常数时间内完成。

这个解法存在两个现实问题。第一，如果元素是 32-bits 而非 16-bits，我们所准备的 array A 的大小就必须是 2^{32} = 4GB，这就大得不切实际了。第二，如果元素型态是字符串（或其它）而非整数，将无法被拿来作为 array 的索引。

第二个问题（关于索引）不难解决。就像数值 1234 是由阿拉伯数字 1,2,3,4 构成一样，字符串 "jjhou" 是由字符 'j','j','h','o','u' 构成。那么，既然数值 1234 是 $1*10^3+2*10^2+3*10^1+4*10^0$，我们也可以把字符编码，每个字符以一个 7-bits 数值来表示（也就是 ASCII 编码），从而将字符串 "jjhou" 表现为：

$$'j'*128^4 + 'j'*128^3 + 'h'*128^2 + 'o'*128^1 + 'u'*128^0$$

于是先前的 array 实现法就可适用于“元素型别为字符串”的情况了。但这并不实用，因为这会产生出非常巨大的数值。"jjhou" 的索引值将是：

$$106*128^4 + 106*128^3 + 104*128^2 + 111*128^1 + 117*128^0 = 28678174709$$

这太不切实际了。更长的字符串会导致更大的索引值！这就回归到第一个问题：array 的大小。

如何避免使用一个大得荒谬的 array 呢？办法之一就是使用某种映射函数，将大数映射为小数。负责将某一元素映射为一个“大小可接受之索引”，这样的

函数称为 hash function(散列函数)。例如,假设 x 是任意整数,TableSize 是 array 大小,则 x%TableSize 会得到一个整数,范围在 0 ~ TableSize-1 之间,恰可作为表格(也就是 array)的索引。

使用 hash function 会带来一个问题:可能有不同的元素被映射到相同的位置(亦即有相同的索引)。这无法避免,因为元素个数大于 array 容量。这便是所谓的"碰撞(collision)"问题。解决碰撞问题的方法有许多种,包括线性探测(linear probing)、二次探测(quadratic probing)、开链(separate chaining)…等做法。每种方法都很容易,导出的效率各不相同——与 array 的填满程度有很大的关连。

线性探测(linear probing)

首先让我们认识一个名词:负载系数(**loading factor**),意指元素个数除以表格大小。负载系数永远在 0~1 之间——除非采用开链(separate chaining)策略,后述。

当 hash function 计算出某个元素的插入位置,而该位置上的空间已不再可用时,我们应该怎么办?最简单的办法就是循序往下一一寻找(如果到达尾端,就绕到头部继续寻找),直到找到一个可用空间为止。只要表格(亦即 array)足够大,总是能够找到一个安身立命的空间,但是要花多少时间就很难说了。进行元素搜寻操作时,道理也相同,如果 hash function 计算出来的位置上的元素值与我们的搜寻目标不符,就循序往下一一寻找,直到找到吻合者,或直到遇上空格元素。至于元素的删除,必须采用惰性删除(lazy deletion)[13],也就是只标记删除记号,实际删除操作则待表格重新整理(rehashing)时再进行——这是因为 hash table 中的每一个元素不仅表述它自己,也关系到其它元素的排列。

图 5-22 是线性探测的一个实例。

[13] 请参考 [meyers96] item17: *Consider using lazy evaluation.*

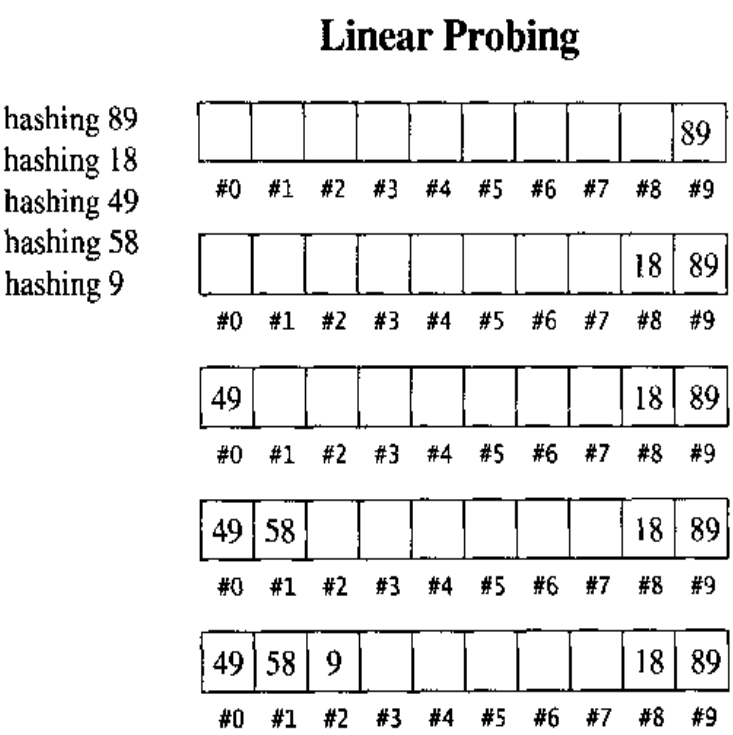


图 **5-22** 线性探测（linear probing）。依序插入 5 个元素，array 的变化。

欲分析线性探测的表现，需要两个假设：(1) 表格足够大；(2) 每个元素都够独立。在此假设之下，最坏的情况是线性巡访整个表格，平均情况则是巡访一半表格，这已经和我们所期望的常数时间天差地远了，而实际情况犹更糟糕。问题出在上述第二个假设太过于天真。

拿实际例子来说，接续图 5-22 的最后状态，除非新元素经过 hash function 的计算之后直接落在位置 #4 ~ #7，否则位置 #4 ~ #7 永远不可能被运用，因为位置 #3 永远是第一考虑。换句话说，新元素不论是 8,9,0,1,2,3 中的哪一个，都会落在位置 #3 上。新元素如果是 4 或 5，或 6，或 7，才会各自落在位置 #4，或 #5，或 #6，或 #7 上。这很清楚地突显了一个问题：平均插入成本的成长幅度，远高于负载系数的成长幅度。这样的现象在 hashing 过程中称为主集团（**primary clustering**）。此时的我们手上有的是一大团已被用过的方格，插入操作极有可能在主集团所形成的泥泞中奋力爬行，不断解决碰撞问题，最后才射门得分，但是却又助长了主集团的泥泞面积。

二次探测（quadratic probing）

二次探测主要用来解决主集团（primary clustering）的问题。其命名由来是因为解决碰撞问题的方程式 `F(i) = i^2` 是个二次方程式。更明确地说，如果 hash function 计算出新元素的位置为 `H`，而该位置实际上已被使用，那么我们就依序尝试 $H+1^2$, $H+2^2$, $H+3^2$, $H+4^2$, …, $H+i^2$，而不是像线性探测那样依序尝试 `H+1`, `H+2`, `H+3`, `H+4`, …, `H+i`。图 5-23 所示的是二次探测的一个实例。

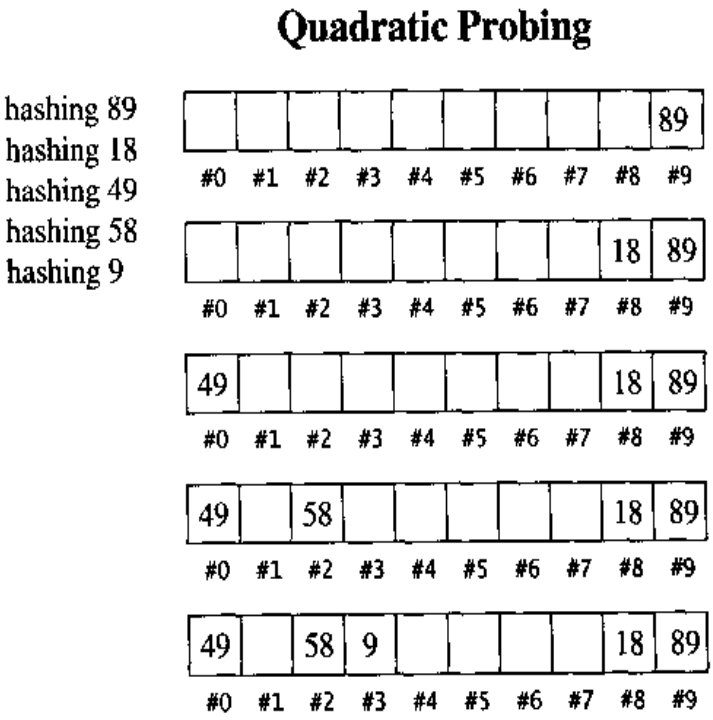


图 **5-23** 二次探测（linear probing）。依序插入 5 个元素，array 的变化。

二次探测带来一些疑问：

- 线性探测法每次探测的都必然是一个不同的位置，二次探测法是否能够保证如此？二次探测法是否能够保证如果表格之中没有 X，那么我们插入 X 一定能够成功？
- 线性探测法的运算过程极其简单，二次探测法则显然复杂得多。这是否会在执行效率上带来太多的负面影响？
- 不论线性探测或二次探测，当负载系数过高时，表格是否能够动态成长？

幸运的是，如果我们假设表格大小为质数（prime），而且永远保持负载系数在 0.5 以下（也就是说超过 0.5 就重新配置并重新整理表格），那么就可以确定每插入一个新元素所需要的探测次数不多于 2。

至于实现复杂度的问题，一般总是这样考虑：赚的比花的多，才值得去做。我们受累增加了探测次数，所获得的利益好歹总得多过二次函数计算所多花的时间，不能吃肥走瘦[14]，得不偿失。线性探测所需要的是一个加法（加 1）、一个测试（看是否需要绕转回头），以及一个偶需为之的减法（用以绕转回头）。二次探测需要的则是一个加法（从 i-1 到 i）、一个乘法（计算 i^2），另一个加法，以及一个 mod 运算。看起来很有得不偿失之嫌。然而这中间却有一些小技巧，可以去除耗时的乘法和除法：

$$H_i = H_2 + i^2 (\mathrm{mod}\ M)$$
$$H_{i-1} = H_2 + (i-1)^2 (\mathrm{mod}\ M)$$

整理可得：

$$H_i - H_{i-1} = i^2 - (i-1)^2 (\mathrm{mod}\ M)$$
$$H_i = H_{i-1} + 2i - 1 (\mathrm{mod}\ M)$$

因此，如果我们能够以前一个 H 值来计算下一个 H 值，就不需要执行二次方所需要的乘法了。虽然还是需要一个乘法，但那是乘以 2，可以位移位（bit shift）快速完成。至于 mod 运算，也可证明并非真有需要（本处略）。

最后一个问题是 array 的成长。欲扩充表格，首先必须找出下一个新的而且够大（大约两倍）的质数，然后必须考虑表格重建（*rehashing*）的成本——是的，不可能只是原封不动地拷贝而已，我们必须检验旧表格中的每一个元素，计算其在新表格中的位置，然后再插入到新表格中。

二次探测可以消除主集团（primary clustering），却可能造成次集团（**secondary clustering**）：两个元素经 hash function 计算出来的位置若相同，则插入时所探测的位置也相同，形成某种浪费。消除次集团的办法当然也有，例如复式散列（**double hashing**）。

---

14 吃肥走瘦是台湾俚语，意指走大老远路去吃一顿，所吃的还不够走路消耗的哩。

虽然目前还没有对二次探测有数学上的分析，不过，以上所有考虑加加减减起来，总体而言，二次探测仍然值得投资。

开链（separate chaining）

另一种与二次探测法分庭抗礼的，是所谓的开链（**separate chaining**）法。这种做法是在每一个表格元素中维护一个 list；hash function 为我们分配某一个 list，然后我们在那个 list 身上执行元素的插入、搜寻、删除等操作。虽然针对 list 而进行的搜寻只能是一种线性操作，但如果 list 够短，速度还是够快。

使用开链手法，表格的负载系数将大于 1。SGI STL 的 hash table 便是采用这种做法，稍后便有详细的实现介绍。

5.7.2 hashtable 的桶子（buckets）与节点（nodes）

图 5-24 是以开链法（separate chaining）完成 hash table 的图形表述。为了解说 SGI STL 源代码，我遵循 SGI 的命名，称 hash table 表格内的元素为桶子（bucket），此名称的大约意义是，表格内的每个单元，涵盖的不只是个节点（元素），甚且可能是一“桶”节点。

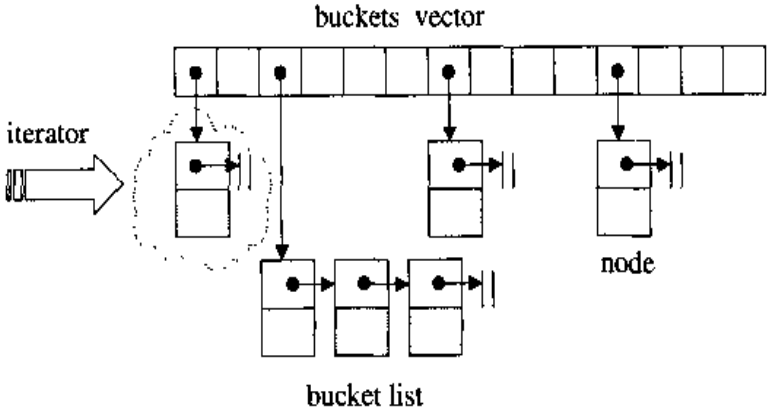
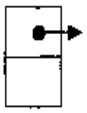


图 **5-24** 以开链（separate chaining）法完成的 hash table。SGI 即采此法。

下面是 hash table 的节点定义：

```
template <class Value>
struct __hashtable_node
{
```

```
  __hashtable_node* next;
  Value val;
};
```



这是一个 __hashtable_node object

注意，bucket 所维护的 linked list，并不采用 STL 的 list 或 slist，而是自行维护上述的 hash table node。至于 buckets 聚合体，则以 vector（4.2 节）完成，以便有动态扩充能力。稍后在 hash table 的定义式中我们可以清楚看到这一点。

5.7.3 hashtable 的迭代器

以下是 hash table 迭代器的定义：

```
template <class Value, class Key, class HashFcn,
          class ExtractKey, class EqualKey, class Alloc>
struct __hashtable_iterator {
  typedef hashtable<Value, Key, HashFcn, ExtractKey, EqualKey, Alloc>
        hashtable;
  typedef __hashtable_iterator<Value, Key, HashFcn,
                               ExtractKey, EqualKey, Alloc>
        iterator;
  typedef __hashtable_const_iterator<Value, Key, HashFcn,
                                     ExtractKey, EqualKey, Alloc>
        const_iterator;
  typedef __hashtable_node<Value> node;

  typedef forward_iterator_tag iterator_category;
  typedef Value value_type;
  typedef ptrdiff_t difference_type;
  typedef size_t size_type;
  typedef Value& reference;
  typedef Value* pointer;

  node* cur;      // 迭代器目前所指之节点
  hashtable* ht;  // 保持对容器的连结关系（因为可能需要从 bucket 跳到 bucket）

  __hashtable_iterator(node* n, hashtable* tab) : cur(n), ht(tab) {}
  __hashtable_iterator() {}
  reference operator*() const { return cur->val; }
  pointer operator->() const { return &(operator*()); }
  iterator& operator++();
  iterator operator++(int);
```

```
  bool operator==(const iterator& it) const { return cur == it.cur; }
  bool operator!=(const iterator& it) const { return cur != it.cur; }
};
```

注意，hasttable 迭代器必须永远维系着与整个 “buckets vector” 的关系，并记录目前所指的节点。其前进操作是首先尝试从目前所指的节点出发，前进一个位置（节点），由于节点被安置于 list 内，所以利用节点的 next 指针即可轻易达成前进操作。如果目前节点正巧是 list 的尾端，就跳至下一个 bucket 身上，那正是指向下一个 list 的头部节点。

```
template <class V, class K, class HF, class ExK, class EqK, class A>
__hashtable_iterator<V, K, HF, ExK, EqK, A>&
__hashtable_iterator<V, K, HF, ExK, EqK, A>::operator++()
{
  const node* old = cur;
  cur = cur->next;     // 如果存在，就是它。否则进入以下 if 流程
  if (!cur) {
    // 根据元素值，定位出下一个 bucket，其起头处就是我们的目的地
    size_type bucket = ht->bkt_num(old->val);
    while (!cur && ++bucket < ht->buckets.size())  // 注意，operator++
      cur = ht->buckets[bucket];
  }
  return *this;
}

template <class V, class K, class HF, class ExK, class EqK, class A>
inline __hashtable_iterator<V, K, HF, ExK, EqK, A>
__hashtable_iterator<V, K, HF, ExK, EqK, A>::operator++(int)
{
  iterator tmp = *this;
  ++*this;   // 调用 operator++()
  return tmp;
}
```

请注意，hashtable 的迭代器没有后退操作（operator--()），hashtable 也没有定义所谓的逆向迭代器（reverse iterator）。

5.7.4 hashtable 的数据结构

下面是 hashtable 的定义摘要，其中可见 buckets 聚合体以 vector 完成，以利动态扩充：

```
template <class Value, class Key, class HashFcn,
          class ExtractKey, class EqualKey, class Alloc = alloc>
class hashtable;

// ...

template <class Value, class Key, class HashFcn,
        class ExtractKey, class EqualKey,
        class Alloc>  // 先前声明时，已给予 Alloc 默认值 alloc
class hashtable {
public:
  typedef HashFcn hasher;       // 为 template 型别参数重新定义一个名称
  typedef EqualKey key_equal;   // 为 template 型别参数重新定义一个名称
  typedef size_t    size_type;

private:
  // 以下三者都是 function objects，<stl_hash_fun.h> 中定义有数个
  // 标准型别（如 int,c-style string 等）的 hasher
  hasher hash;
  key_equal equals;
  ExtractKey get_key;

  typedef __hashtable_node<Value> node;
  typedef simple_alloc<node, Alloc> node_allocator;

  vector<node*,Alloc> buckets;  // 以 vector 完成
  size_type num_elements;

public:
  // bucket 个数即 buckets vector 的大小
  size_type bucket_count() const { return buckets.size(); }
...
};
```

hashtable 的模板参数相当多，包括：

- Value：节点的实值型别。
- Key：节点的键值型别。
- HashFcn：hash function 的函数型别。
- ExtractKey：从节点中取出键值的方法（函数或仿函数）。

- EqualKey：判断键值相同与否的方法（函数或仿函数）。
- Alloc：空间配置器，缺省使用 std::alloc。

如果对 STL 的运用缺乏深厚的功力，不太容易给出正确的参数。稍后我会以一个小小的测试程序告诉大家如何在客户端应用程序中直接使用 hashtable。5.7.7 节的 <stl_hash_fun.h> 定义有数个现成的 hash functions，全都是仿函数（仿函数请见第 7 章）。注意，先前谈及概念时，我们说 hash function 是计算元素位置（如今应该说是 bucket 位置）的函数，SGI 将这项任务赋予 bkt_num()，由它调用 hash function 取得一个可以执行 modulus（取模）运算的值。稍后执行这项“计算元素位置”的任务时，我会再提醒你一次。

虽然开链法（separate chaining）并不要求表格大小必须为质数，但 SGI STL 仍然以质数来设计表格大小，并且先将 28 个质数（逐渐呈现大约两倍的关系）计算好，以备随时访问，同时提供一个函数，用来查询在这 28 个质数之中，“最接近某数并大于某数”的质数：

```
// 注意：假设 long 至少有 32 bits
static const int __stl_num_primes = 28;
static const unsigned long __stl_prime_list[__stl_num_primes] =
{
  53,         97,         193,         389,       769,
  1543,       3079,       6151,        12289,     24593,
  49157,      98317,      196613,      393241,    786433,
  1572869,    3145739,    6291469,     12582917,  25165843,
  50331653,   100663319,  201326611,   402653189, 805306457,
  1610612741, 3221225473ul, 4294967291ul
};

// 以下找出上述 28 个质数之中，最接近并大于 n 的那个质数
inline unsigned long __stl_next_prime(unsigned long n)
{
  const unsigned long* first = __stl_prime_list;
  const unsigned long* last = __stl_prime_list + __stl_num_primes;
  const unsigned long* pos = lower_bound(first, last, n);
  // 以上，lower_bound() 是泛型算法，见第 6 章
  // 使用 lower_bound()，序列需先排序。没问题，上述数组已排序
  return pos == last ? *(last - 1) : *pos;
}

  // 总共可以有多少 buckets。以下是 hast_table 的一个 member function
  size_type max_bucket_count() const
    { return __stl_prime_list[__stl_num_primes - 1]; }
      // 其值将为 4294967291
```

5.7.5 hashtable 的构造与内存管理

上一节 hashtable 定义式中展现了一个专属的节点配置器：

```
typedef simple_alloc<node, Alloc> node_allocator;
```

下面是节点配置函数与节点释放函数：

```
node* new_node(const value_type& obj)
{
  node* n = node_allocator::allocate();
  n->next = 0;
  __STL_TRY {
    construct(&n->val, obj);
    return n;
  }
  __STL_UNWIND(node_allocator::deallocate(n));
}

void delete_node(node* n)
{
  destroy(&n->val);
  node_allocator::deallocate(n);
}
```

当我们初始构造一个拥有 50 个节点的 hash table 如下：

```
// <value, key, hash-func, extract-key, equal-key, allocator>
// 注意：hash table 没有供应 default constructor
hashtable<int, int, hash<int>, identity<int>, equal_to<int>, alloc>
  iht(50, hash<int>(), equal_to<int>());

cout<< iht.size() << endl;              // 0
cout<< iht.bucket_count() << endl;      // 53，STL 提供的第一个质数
```

上述定义调用以下构造函数：

```
hashtable(size_type n,
          const HashFcn&    hf,
          const EqualKey&   eql)
  : hash(hf), equals(eql), get_key(ExtractKey()), num_elements(0)
{
  initialize_buckets(n);
}

void initialize_buckets(size_type n)
{
  const size_type n_buckets = next_size(n);
  // 举例：传入 50，返回 53。以下首先保留 53 个元素空间，然后将其全部填 0
```

```
    buckets.reserve(n_buckets);
    buckets.insert(buckets.end(), n_buckets, (node*) 0);
    num_elements = 0;
  }
```

其中的 next_size() 返回最接近 n 并大于 n 的质数：

```
size_type next_size(size_type n) const { return __stl_next_prime(n); }
```

然后为 buckets vector 保留空间，设定所有 buckets 的初值为 0（null 指针）。

插入操作（insert）与表格重整（resize）

当客户端开始插入元素（节点）时：

```
iht.insert_unique(59);
iht.insert_unique(63);
iht.insert_unique(108);
```

hash table 内将会进行以下操作：

```
// 插入元素，不允许重复
pair<iterator, bool> insert_unique(const value_type& obj)
{
  resize(num_elements + 1);   // 判断是否需要重建表格，如需要就扩充
  return insert_unique_noresize(obj);
}

// 以下函数判断是否需要重建表格，如果不需要，立刻回返。如果需要，就动手…
template <class V, class K, class HF, class Ex, class Eq, class A>
void hashtable<V, K, HF, Ex, Eq, A>::resize(size_type num_elements_hint)
{
  // 以下，“表格重建与否”的判断原则颇为奇特，是拿元素个数（把新增元素计入后）和
  // bucket vector 的大小来比。如果前者大于后者，就重建表格
  // 由此可判知，每个 bucket (list) 的最大容量和 buckets vector 的大小相同
  const size_type old_n = buckets.size();
  if (num_elements_hint > old_n) {   // 确定真的需要重新配置
    const size_type n = next_size(num_elements_hint);   // 找出下一个质数
    if (n > old_n) {
      vector<node*, A> tmp(n, (node*) 0); // 设立新的 buckets
      __STL_TRY {
        // 以下处理每一个旧的 bucket
        for (size_type bucket = 0; bucket < old_n; ++bucket) {
          node* first = buckets[bucket]; // 指向节点所对应之串行的起始节点
          // 以下处理每一个旧 bucket 所含（串行）的每一个节点
          while (first) {    // 串行还没结束时
            // 以下找出节点落在哪一个新 bucket 内
            size_type new_bucket = bkt_num(first->val, n);
            // 以下四个操作颇为微妙
```

```
            // (1) 令旧 bucket 指向其所对应之串行的下一个节点（以便迭代处理）
            buckets[bucket] = first->next;
            // (2)(3) 将当前节点插入到新 bucket 内，成为其对应串行的第一个节点
            first->next = tmp[new_bucket];
            tmp[new_bucket] = first;
            // (4) 回到旧 bucket 所指的待处理串行，准备处理下一个节点
            first = buckets[bucket];
          }
        }
        buckets.swap(tmp);  // vector::swap。新旧两个 buckets 对调
        // 注意，对调两方如果大小不同，大的会变小，小的会变大
        // 离开时释放 local tmp 的内存
      }
    }
  }
}

// 在不需重建表格的情况下插入新节点，键值不允许重复
template <class V, class K, class HF, class Ex, class Eq, class A>
pair<typename hashtable<V, K, HF, Ex, Eq, A>::iterator, bool>
hashtable<V, K, HF, Ex, Eq, A>::insert_unique_noresize(const value_type& obj)
{
  const size_type n = bkt_num(obj); // 决定 obj 应位于 #n bucket
  node* first = buckets[n]; // 令 first 指向 bucket 对应之串行头部

  // 如果 buckets[n] 已被占用，此时 first 将不为 0，于是进入以下循环，
  // 走过 bucket 所对应的整个链表
  for (node* cur = first; cur; cur = cur->next)
    if (equals(get_key(cur->val), get_key(obj)))
      // 如果发现与链表中的某键值相同，就不插入，立刻返回
      return pair<iterator, bool>(iterator(cur, this), false);

  // 离开以上循环（或根本未进入循环）时，first 指向 bucket 所指链表的头部节点
  node* tmp = new_node(obj);     // 产生新节点
  tmp->next = first;
  buckets[n] = tmp;              // 令新节点成为链表的第一个节点
  ++num_elements;                // 节点个数累加 1
  return pair<iterator, bool>(iterator(tmp, this), true);
}
```

前述的 resize() 函数中，如有必要，就得做表格重建工作。操作分解如下，并示于图 5-25 中。

```
// (1) 令旧 bucket 指向其所对应之链表的下一个节点（以便迭代处理）
buckets[bucket] = first->next;
// (2)(3) 将当前节点插入到新 bucket 内，成为其对应链表的第一个节点
first->next = tmp[new_bucket];
tmp[new_bucket] = first;
// (4) 回到旧 bucket 所指的待处理链表，准备处理下一个节点
```

```
first = buckets[bucket];
```

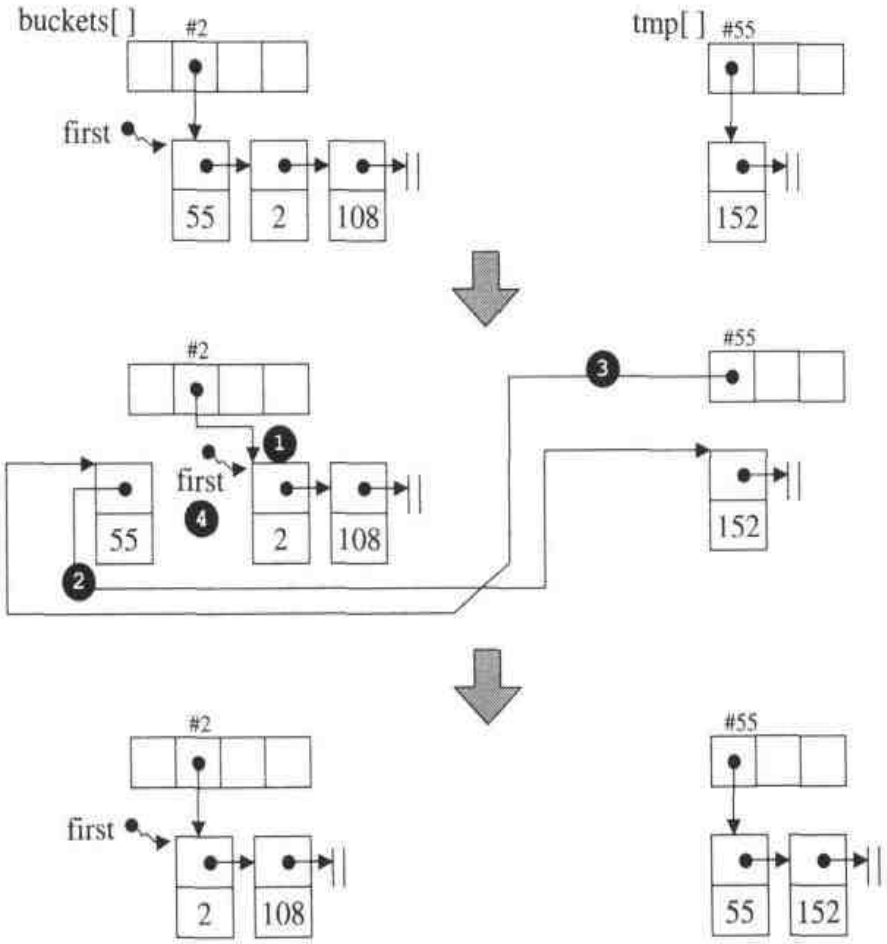


图 5-25 表格重建操作分解。本图所表现的是 hashtable<T>::resize() 内的行为，图左的 buckets[] 是旧有的 buckets，图右的 tmp[] 是新建的 buckets。最后会将新旧两个 buckets 对调，使 buckets[] 有了新风貌而 tmp[] 还诸系统。

如果客户端执行的是另一种节点插入行为（不再是 insert_unique，而是 insert_equal）：

```
iht.insert_equal(59);
iht.insert_equal(59);
```

进行的操作如下：

```
// 插入元素，允许重复
iterator insert_equal(const value_type& obj)
{
  resize(num_elements + 1);    // 判断是否需要重建表格，如需要就扩充
  return insert_equal_noresize(obj);
}
```

```
// 在不需重建表格的情况下插入新节点。键值允许重复
template <class V, class K, class HF, class Ex, class Eq, class A>
typename hashtable<V, K, HF, Ex, Eq, A>::iterator
hashtable<V, K, HF, Ex, Eq, A>::insert_equal_noresize(const value_type& obj)
{
  const size_type n = bkt_num(obj); // 决定obj应位于 #n bucket
  node* first = buckets[n]; // 令 first 指向 bucket 对应之链表头部

  // 如果 buckets[n] 已被占用，此时 first 将不为0，于是进入以下循环，
  // 走过 bucket 所对应的整个链表
  for (node* cur = first; cur; cur = cur->next)
    if (equals(get_key(cur->val), get_key(obj))) {
      // 如果发现与链表中的某键值相同，就马上插入，然后返回
      node* tmp = new_node(obj);      // 产生新节点
      tmp->next = cur->next;          // 将新节点插入于目前位置
      cur->next = tmp;
      ++num_elements;                 // 节点个数累加1
      return iterator(tmp, this);     // 返回一个迭代器，指向新增节点
    }

  // 进行至此，表示没有发现重复的键值
  node* tmp = new_node(obj);      // 产生新节点
  tmp->next = first;              // 将新节点插入于链表头部
  buckets[n] = tmp;
  ++num_elements;                 // 节点个数累加1
  return iterator(tmp, this);     // 返回一个迭代器，指向新增节点
}
```

判知元素的落脚处（bkt_num）

本节程序代码在许多地方都需要知道某个元素值落脚于哪一个 bucket 之内。这本来是 hash function 的责任，SGI 把这个任务包装了一层，先交给 bkt_num() 函数，再由此函数调用 hash function，取得一个可以执行 modulus（取模）运算的数值。为什么要这么做？因为有些元素型别无法直接拿来对 hashtable 的大小进行模运算，例如字符字符串 const char*，这时候我们需要做一些转换。下面是 bkt_num() 函数，5.7.7 列有 SGI 内建的所有 hash functions。

```
// 版本1：接受实值（value）和buckets 个数
size_type bkt_num(const value_type& obj, size_t n) const
{
  return bkt_num_key(get_key(obj), n); // 调用版本4
}

// 版本2：只接受实值（value）
```

```
size_type bkt_num(const value_type& obj) const
{
  return bkt_num_key(get_key(obj));     // 调用版本 3
}

// 版本 3：只接受键值
size_type bkt_num_key(const key_type& key) const
{
  return bkt_num_key(key, buckets.size());  // 调用版本 4
}

// 版本 4：接受键值和 buckets 个数
size_type bkt_num_key(const key_type& key, size_t n) const
{
  return hash(key) % n;  // SGI 的所有内建的 hash() 列于 5.7.7 节
}
```

复制（copy_from）和整体删除（clear）

由于整个 hash table 由 vector 和 linked-list 组合而成，因此，复制和整体删除，都需要特别注意内存的释放问题。下面是 hashtable 提供的两个相关函数：

```
template <class V, class K, class HF, class Ex, class Eq, class A>
void hashtable<V, K, HF, Ex, Eq, A>::clear()
{
  // 针对每一个 bucket.
  for (size_type i = 0; i < buckets.size(); ++i) {
    node* cur = buckets[i];
    // 将 bucket list 中的每一个节点删除掉
    while (cur != 0) {
      node* next = cur->next;
      delete_node(cur);
      cur = next;
    }
    buckets[i] = 0;    // 令 bucket 内容为 null 指针
  }
  num_elements = 0;    // 令总节点个数为 0

  // 注意，buckets vector 并未释放掉空间，仍保有原来大小
}

template <class V, class K, class HF, class Ex, class Eq, class A>
void hashtable<V, K, HF, Ex, Eq, A>::copy_from(const hashtable& ht)
{
  // 先清除己方的 buckets vector. 这操作是调用 vector::clear，造成所有元素为 0
  buckets.clear();
  // 为己方的 buckets vector 保留空间，使与对方相同
  // 如果己方空间大于对方，就不动，如果己方空间小于对方，就会增大
```

```
  buckets.reserve(ht.buckets.size());
  // 从己方的 buckets vector 尾端开始，插入 n 个元素，其值为 null 指针
  // 注意，此时 buckets vector 为空，所以所谓尾端，就是起头处
  buckets.insert(buckets.end(), ht.buckets.size(), (node*) 0);
  __STL_TRY {
    // 针对 buckets vector
    for (size_type i = 0; i < ht.buckets.size(); ++i) {
      // 复制 vector 的每一个元素（是个指针，指向 hashtable 节点）
      if (const node* cur = ht.buckets[i]) {
        node* copy = new_node(cur->val);
        buckets[i] = copy;

        // 针对同一个 bucket list，复制每一个节点
        for (node* next = cur->next; next; cur = next, next = cur->next) {
          copy->next = new_node(next->val);
          copy = copy->next;
        }
      }
    }
    num_elements = ht.num_elements;  // 重新登录节点个数（hashtable 的大小）
  }
  __STL_UNWIND(clear());
}
```

5.7.6 hashtable 运用实例

先前说明 hash table 的实现源代码时，已经零零散散地示范了一些客户端程序。下面是一个完整的实例。

```
// file: 5hashtable-test.cpp
//注意：客户端程序不能直接含入 <stl_hashtable.h>，应该含入有用到 hashtable
// 的容器头文件，例如 <hash_set.h> 或 <hash_map.h>
#include <hash_set>  // for hashtable
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
  // hash-table
  // <value, key, hash-func, extract-key, equal-key, allocator>
  // note: hash-table has no default ctor
  hashtable<int,
            int,
            hash<int>,
            identity<int>,
            equal_to<int>,
            alloc>
```

```
 iht(50,hash<int>(),equal_to<int>()); // 指定保留 50 个buckets

cout<< iht.size() << endl;                  // 0
cout<< iht.bucket_count() << endl;          // 53. 这是 STL 供应的第一个质数
cout<< iht.max_bucket_count() << endl; // 4294967291
                                            // 这是 STL 供应的最后一个质数
iht.insert_unique(59);
iht.insert_unique(63);
iht.insert_unique(108);
iht.insert_unique(2);
iht.insert_unique(53);
iht.insert_unique(55);
cout<< iht.size() << endl;    // 6.  此即 hashtable<T>::num_elements

// 以下声明一个 hashtable 迭代器
hashtable<int,
          int,
          hash<int>,
          identity<int>,
          equal_to<int>,
          alloc>
    ::iterator ite = iht.begin();

// 以迭代器遍历 hashtable，将所有节点的值打印出来
for(int i=0; i< iht.size(); ++i, ++ite)
   cout << *ite << ' ';                  // 53 55 2 108 59 63
cout << endl;

// 遍历所有 buckets，如果其节点个数不为 0，就打印出节点个数
for(int i=0; i< iht.bucket_count(); ++i) {
  int n = iht.elems_in_bucket(i);
  if (n != 0)
     cout << "bucket[" << i << "] has " << n << " elems." << endl;
}
// bucket[0] has 1 elems.
// bucket[2] has 3 elems.
// bucket[6] has 1 elems.
// bucket[10] has 1 elems.

// 为了验证 “bucket(list) 的容量就是 buckets vector 的大小”（这是从
// hashtable<T>::resize() 得知的结果），我刻意将元素加到 54 个，
// 看看是否发生 “表格重建 (re-hashing)”
for(int i=0; i<=47; i++)
    iht.insert_equal(i);
cout<< iht.size() << endl;                  // 54. 元素（节点）个数
cout<< iht.bucket_count() << endl;          // 97. buckets 个数
// 遍历所有 buckets，如果其节点个数不为 0，就打印出节点个数
for(int i=0; i< iht.bucket_count(); ++i) {
  int n = iht.elems_in_bucket(i);
```

```
    if (n != 0)
      cout << "bucket[" << i << "] has " << n << " elems." << endl;
  }
  // 打印结果：bucket[2] 和 bucket[11] 的节点个数为2，
  // 其余的bucket[0]~bucket[47] 的节点个数均为1
  // 此外，bucket[53],[55],[59],[63] 的节点个数均为1

  // 以迭代器遍历hashtable，将所有节点的值打印出来
  ite = iht.begin();
  for(int i=0; i< iht.size(); ++i, ++ite)
    cout << *ite << ' ';   //
  cout << endl;
  // 0 1 2 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 108 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21
  // 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42
  // 43 44 45 46 47 53 55 59 63

  cout << *(iht.find(2)) << endl;  // 2
  cout << iht.count(2) << endl;    // 2
}
```

这个程序详细测试出 hash table 的节点排列状态与表格重整结果。一开始我保留 50 个节点，由于最接近的 STL 质数为 53，所以 buckets vector 保留的是 53 个 buckets，每个 buckets（指针，指向一个 hash table 节点）的初值为 0。接下来，循序加入 6 个元素：53, 55, 2, 108, 59, 63，于是 hash table 变成图 5-26 所示的样子。

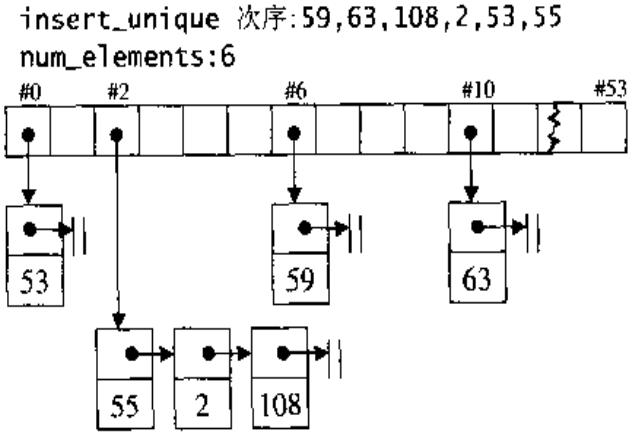


图 **5-26** 插入 6 个元素后，hash table 的状态

接下来，我再插入 48 个元素，使总元素达到 54 个，超过当时的 buckets vector 的大小，符合表格重建条件（这是从 `hashtable<T>::resize()` 函数中得知的），于是 hash table 变成了图 5-27 所示的模样。

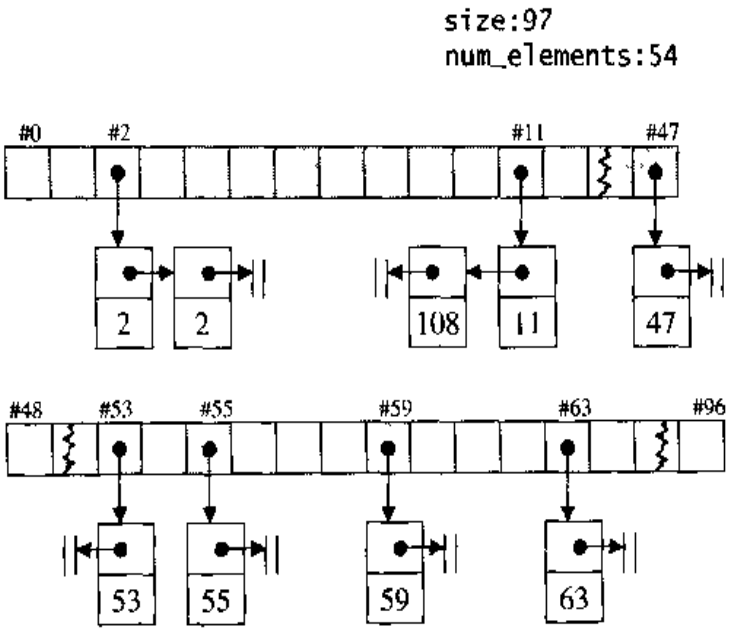


图 **5-27** hash table 重整结果。注意，bucket #2 和 bucket #11 的节点个数都是 2，其余的灰色 buckets，节点个数都是 1。白色 buckets 表示节点个数为 0。灰色和白色只是为了方便表示，因为如果把节点全画出来，画面过挤摆不下。图中的 bucket #47 和 bucket #48 应该连续，也是因为画面的关系，分为两段显示。

程序最后分别使用了 hash table 提供的 find 和 count 函数，搜寻键值为 2 的元素，以及计算键值为 2 的元素个数。请注意，键值相同的元素，一定落在同一个 bucket list 之中。下面是 find 和 count 的源代码：

```
iterator find(const key_type& key)
{
  size_type n = bkt_num_key(key);  // 首先寻找落在哪一个 bucket 内
  node* first;
  // 以下，从 bucket list 的头开始，一一比对每个元素的键值。比对成功就跳出
  for ( first = buckets[n];
        first && !equals(get_key(first->val), key);
        first = first->next)
    {}
  return iterator(first, this);
}

size_type count(const key_type& key) const
{
  const size_type n = bkt_num_key(key); // 首先寻找落在哪一个 bucket 内
  size_type result = 0;
```

```
    // 以下，从 bucket list 的头开始，一一比对每个元素的键值。比对成功就累加 1。
    for (const node* cur = buckets[n]; cur; cur = cur->next)
      if (equals(get_key(cur->val), key))
        ++result;
    return result;
  }
```

5.7.7 hash functions

<stl_hash_fun.h> 定义有数个现成的 hash functions，全都是仿函数（第 7 章）。先前谈及概念时，我们说 hash function 是计算元素位置的函数，SGI 将这项任务赋予了先前提过的 bkt_num()，再由它来调用这里提供的 hash function，取得一个可以对 hashtable 进行模运算的值。针对 char, int, long 等整数型别，这里大部分的 hash functions 什么也没做，只是忠实返回原值。但对于字符字符串（const char*），就设计了一个转换函数如下：

```
// 以下定义于 <stl_hash_fun.h>
template <class Key> struct hash { };

inline size_t __stl_hash_string(const char* s)
{
  unsigned long h = 0;
  for ( ; *s; ++s)
     h = 5*h + *s;

  return size_t(h);
}

// 以下所有的 __STL_TEMPLATE_NULL，在 <stl_config.h> 中皆被定义为
template<>，详见 1.9.1 节

__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<char*>
{
  size_t operator()(const char* s) const { return __stl_hash_string(s); }
};
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<const char*>
{
  size_t operator()(const char* s) const { return __stl_hash_string(s); }
};
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<char> {
  size_t operator()(char x) const { return x; }
};
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<unsigned char> {
  size_t operator()(unsigned char x) const { return x; }
};
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<signed char> {
```

```
  size_t operator()(unsigned char x) const { return x; }
};
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<short> {
  size_t operator()(short x) const { return x; }
};
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<unsigned short> {
  size_t operator()(unsigned short x) const { return x; }
};
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<int> {
  size_t operator()(int x) const { return x; }
};
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<unsigned int> {
  size_t operator()(unsigned int x) const { return x; }
};
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<long> {
  size_t operator()(long x) const { return x; }
};
__STL_TEMPLATE_NULL struct hash<unsigned long> {
  size_t operator()(unsigned long x) const { return x; }
};
```

由此观之，SGI hashtable 无法处理上述所列各项型别以外的元素，例如 string, double, float。欲处理这些型别，用户必须自行为它们定义 hash function。下面是直接以 SGI hashtable 处理 string 所获得的错误现象：

```
#include <hash_set>  // for hashtable and hash_set
#include <iostream>
#include <string>
using namespace std;

int main()
{
  // hash-table
  // <value, key, hash-func, extract-key, equal-key, allocator>
  // note: hashtable has no default ctor
  hashtable<string, string, hash<string>, identity<string>,
            equal_to<string>, alloc>
    iht(50,hash<string>(),equal_to<string>());

  cout<< iht.size() << endl;              // 0
  cout<< iht.bucket_count() << endl;      // 53
  iht.insert_unique(string("jjhou"));     // error

  // hashtable 无法处理的型别，hash_set 当然也无法处理
  hash_set<string> shs;
  hash_set<double> dhs;

  shs.insert(string("jjhou"));  // error
```

```
  dhs.insert(15.0);              // error
}
```

5.8 hash_set

虽然 STL 只规范复杂度与接口，并不规范实现方法，但 STL set 多半以 RB-tree 为底层机制，SGI 则是在 STL 标准规格之外另又提供了一个所谓的 hash_set，以 hashtable 为底层机制。由于 hash_set 所供应的操作接口，hashtable 都提供了，所以几乎所有的 hash_set 操作行为，都只是转调用 hashtable 的操作行为而已。

运用 set，为的是能够快速搜寻元素。这一点，不论其底层是 RB-tree 或是 hashtable，都可以达成任务，但是请注意，RB-tree 有自动排序功能而 hashtable 没有，反应出来的结果就是，set 的元素有自动排序功能而 hash_set 没有。

set 的元素不像 map 那样可以同时拥有实值（*value*）和键值（*key*），set 元素的键值就是实值，实值就是键值。这一点在 hash_set 中也是一样的。

hash_set 的使用方式，与 set 完全相同。

下面是 hash_set 的源代码摘录，其中的注释几乎说明了一切，本节不再另做文字解释。

请注意，5.7.5 节最后谈到，hashtable 有一些无法处理的型别（除非用户为那些型别撰写 hash function）。凡是 hashtable 无法处理者，hash_set 也无法处理。

```
template <class Value,
          class HashFcn = hash<Value>,
          class EqualKey = equal_to<Value>,
          class Alloc = alloc>
class hash_set
{
private:
  // 以下使用的 identity<> 定义于 <stl_function.h> 中
  typedef hashtable<Value, Value, HashFcn, identity<Value>,
                    EqualKey, Alloc> ht;
  ht rep;     // 底层机制以 hash table 完成
```

```
public:
  typedef typename ht::key_type key_type;
  typedef typename ht::value_type value_type;
  typedef typename ht::hasher hasher;
  typedef typename ht::key_equal key_equal;

  typedef typename ht::size_type size_type;
  typedef typename ht::difference_type difference_type;
  typedef typename ht::const_pointer pointer;
  typedef typename ht::const_pointer const_pointer;
  typedef typename ht::const_reference reference;
  typedef typename ht::const_reference const_reference;

  typedef typename ht::const_iterator iterator;
  typedef typename ht::const_iterator const_iterator;

  hasher hash_funct() const { return rep.hash_funct(); }
  key_equal key_eq() const { return rep.key_eq(); }

public:
  // 缺省使用大小为 100 的表格，将被 hash table 调整为最接近且较大之质数
  hash_set() : rep(100, hasher(), key_equal()) {}
  explicit hash_set(size_type n) : rep(n, hasher(), key_equal()) {}
  hash_set(size_type n, const hasher& hf) : rep(n, hf, key_equal()) {}
  hash_set(size_type n, const hasher& hf, const key_equal& eql)
    : rep(n, hf, eql) {}

  // 以下，插入操作全部使用 insert_unique()，不允许键值重复
  template <class InputIterator>
  hash_set(InputIterator f, InputIterator l)
    : rep(100, hasher(), key_equal()) { rep.insert_unique(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_set(InputIterator f, InputIterator l, size_type n)
    : rep(n, hasher(), key_equal()) { rep.insert_unique(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_set(InputIterator f, InputIterator l, size_type n,
           const hasher& hf)
    : rep(n, hf, key_equal()) { rep.insert_unique(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_set(InputIterator f, InputIterator l, size_type n,
           const hasher& hf, const key_equal& eql)
    : rep(n, hf, eql) { rep.insert_unique(f, l); }

public:
  // 所有操作几乎都有 hash table 对应版本，传递调用就行
  size_type size() const { return rep.size(); }
  size_type max_size() const { return rep.max_size(); }
  bool empty() const { return rep.empty(); }
```

```
  void swap(hash_set& hs) { rep.swap(hs.rep); }
  friend bool operator== __STL_NULL_TMPL_ARGS (const hash_set&,
                                               const hash_set&);

  iterator begin() const { return rep.begin(); }
  iterator end() const { return rep.end(); }

public:
  pair<iterator, bool> insert(const value_type& obj)
    {
      pair<typename ht::iterator, bool> p = rep.insert_unique(obj);
      return pair<iterator, bool>(p.first, p.second);
    }
  template <class InputIterator>
  void insert(InputIterator f, InputIterator l) { rep.insert_unique(f,l); }
  pair<iterator, bool> insert_noresize(const value_type& obj)
  {
    pair<typename ht::iterator, bool> p = rep.insert_unique_noresize(obj);
    return pair<iterator, bool>(p.first, p.second);
  }

  iterator find(const key_type& key) const { return rep.find(key); }

  size_type count(const key_type& key) const { return rep.count(key); }

  pair<iterator, iterator> equal_range(const key_type& key) const
    { return rep.equal_range(key); }

  size_type erase(const key_type& key) {return rep.erase(key); }
  void erase(iterator it) { rep.erase(it); }
  void erase(iterator f, iterator l) { rep.erase(f, l); }
  void clear() { rep.clear(); }

public:
  void resize(size_type hint) { rep.resize(hint); }
  size_type bucket_count() const { return rep.bucket_count(); }
  size_type max_bucket_count() const { return rep.max_bucket_count(); }
  size_type elems_in_bucket(size_type n) const
    { return rep.elems_in_bucket(n); }
};

template <class Value, class HashFcn, class EqualKey, class Alloc>
inline bool operator==(const hash_set<Value, HashFcn, EqualKey, Alloc>& hs1,
                       const hash_set<Value, HashFcn, EqualKey, Alloc>& hs2)
{
  return hs1.rep == hs2.rep;
}
```

下面这个例子，取材自 [Austern98] 16.2.5 节。我特别在程序最后新加一段遍历操作，为的是验证 hash_set 内的元素并无任何特定排序，但是这样的安排不尽合理，稍后我有进一步的说明。程序中对于 hash_set 的 EqualKey 必须有特别的设计，不能沿用缺省的 equal_to<T>，因为此例之中的元素是 C 字符串（C style charactors string），而 C 字符串的相等与否，必须一个字符一个字符地比较（可使用 C 标准函数 strcmp()），不能直接以 const char* 做比较。

```
// file: 5hastset-test.cpp
#include <iostream>
#include <hash_set>
#include <cstring>
using namespace std;

struct eqstr
{
  bool operator()(const char* s1, const char* s2) const
  {
    return strcmp(s1, s2) == 0;
  }
};

void lookup(const hash_set<const char*, hash<const char*>, eqstr>& Set,
            const char* word)
{
  hash_set<const char*, hash<const char*>, eqstr>::const_iterator it
    = Set.find(word);
  cout << "  " << word << ": "
       << (it != Set.end() ? "present" : "not present")
       << endl;
}

int main()
{
  hash_set<const char*, hash<const char*>, eqstr> Set;
  Set.insert("kiwi");
  Set.insert("plum");
  Set.insert("apple");
  Set.insert("mango");
  Set.insert("apricot");
  Set.insert("banana");

  lookup(Set, "mango");    //  mango: present
  lookup(Set, "apple");    //  apple: present
  lookup(Set, "durian");   //  durian: not present
```

```
hash_set<const char*, hash<const char*>, eqstr>::iterator ite1
  = Set.begin();
hash_set<const char*, hash<const char*>, eqstr>::iterator ite2
  = Set.end();
for(; ite1 != ite2; ++ite1)
  cout << *ite1 << ' ';   // banana plum mango apple kiwi apricot
}
```

最后执行结果虽然显示 hash_set 内的字符串并没有排序，但这其实不是一个良好的测试，因为即使有排序，也是以元素型别 const char* 为排序对象，而非对 const char* 所代表的字符串进行排序。要测试 hash_set 是否排序，最好是以 int 作为元素型别，如下：

```
hash_set<int> Set;
Set.insert(59);
Set.insert(63);
Set.insert(108);
Set.insert(2);
Set.insert(53);
Set.insert(55);

hash_set<int>::iterator ite1 = Set.begin();
hash_set<int>::iterator ite2 = Set.end();
for(; ite1 != ite2; ++ite1)
  cout << *ite1 << ' ';  // 2 53 55 59 63 108
cout << endl;
```

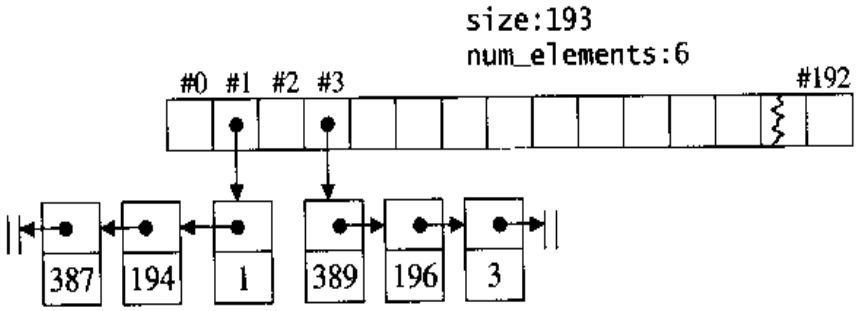
奇怪了，为什么也有排序呢？hash_set 的底层不就是一个 hashtable 吗？先前 5.7.6 节的例子也是以相同的次序将相同的 6 个整数插入到 hashtable 内，获得的结果为什么和这里不同？

这真是一个令人迷惑的问题。答案是，5.7.6 节的 hashtable 大小被指定为 50（根据 SGI 的设计，采用质数 53），而这里所使用的 hash_set 缺省情况下指定 hashtable 的大小为 100（根据 SGI 的设计，采用质数 193），由于 buckets 够多，才造成排序假象。如果以下面这样的次序输入这些数值：

```
hash_set<int> Set;   // 底层 hashtable 缺省大小为 100
Set.insert(3);       // 实际大小为 193
Set.insert(196);
Set.insert(1);
Set.insert(389);
Set.insert(194);
Set.insert(387);
```

```
hash_set<int>::iterator ite1 = Set.begin();
hash_set<int>::iterator ite2 = Set.end();
for(; ite1 != ite2; ++ite1)
   cout << *ite1 << ' ';      // 387 194 1 389 196 3
```

就呈现出未排序的状态了。此时底层的 hashtable 构造如下：



5.9 hash_map

SGI 在 STL 标准规格之外，另提供了一个所谓的 hash_map，以 hashtable 为底层机制。由于 hash_map 所供应的操作接口，hashtable 都提供了，所以几乎所有的 hash_map 操作行为，都只是转调用 hashtable 的操作行为而已。

运用 map，为的是能够根据键值快速搜寻元素。这一点，不论其底层是 RB-tree 或是 hashtable，都可以达成任务。但是请注意，RB-tree 有自动排序功能而 hashtable 没有，反应出来的结果就是，map 的元素有自动排序功能而 hash_map 没有。

map 的特性是，每一个元素都同时拥有一个实值（*value*）和一个键值（*key*）。这一点在 hash_map 中也是一样的。hash_map 的使用方式，和 map 完全相同。

下面是 hash_map 的源代码摘录，其中的注释几乎说明了一切，本节不再另做文字解释。

请注意，5.7.5 节最后谈到，hashtable 有一些无法处理的型别（除非用户为那些型别撰写 hash function）。凡是 hashtable 无法处理者，hash_map 也无法处理。

```
// 以下的 hash<> 是个 function object，定义于 <stl_hash_fun.h> 中
```

```
// 例: hash<int>::operator()(int x) const { return x; }
template <class Key,
          class T,
          class HashFcn = hash<Key>,
          class EqualKey = equal_to<Key>,
          class Alloc = alloc>
class hash_map
{
private:
  // 以下使用的 select1st<> 定义于 <stl_function.h> 中
  typedef hashtable<pair<const Key, T>, Key, HashFcn,
                    select1st<pair<const Key, T> >, EqualKey, Alloc> ht;
  ht rep;     // 底层机制以 hash table 完成

public:
  typedef typename ht::key_type key_type;
  typedef T data_type;
  typedef T mapped_type;
  typedef typename ht::value_type value_type;
  typedef typename ht::hasher hasher;
  typedef typename ht::key_equal key_equal;

  typedef typename ht::size_type size_type;
  typedef typename ht::difference_type difference_type;
  typedef typename ht::pointer pointer;
  typedef typename ht::const_pointer const_pointer;
  typedef typename ht::reference reference;
  typedef typename ht::const_reference const_reference;

  typedef typename ht::iterator iterator;
  typedef typename ht::const_iterator const_iterator;

  hasher hash_funct() const { return rep.hash_funct(); }
  key_equal key_eq() const { return rep.key_eq(); }

public:
  // 缺省使用大小为 100 的表格。将由 hash table 调整为最接近且较大之质数
  hash_map() : rep(100, hasher(), key_equal()) {}
  explicit hash_map(size_type n) : rep(n, hasher(), key_equal()) {}
  hash_map(size_type n, const hasher& hf) : rep(n, hf, key_equal()) {}
  hash_map(size_type n, const hasher& hf, const key_equal& eql)
    : rep(n, hf, eql) {}

  // 以下，插入操作全部使用 insert_unique()，不允许键值重复
  template <class InputIterator>
  hash_map(InputIterator f, InputIterator l)
    : rep(100, hasher(), key_equal()) { rep.insert_unique(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_map(InputIterator f, InputIterator l, size_type n)
```

```
    : rep(n, hasher(), key_equal()) { rep.insert_unique(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_map(InputIterator f, InputIterator l, size_type n,
           const hasher& hf)
    : rep(n, hf, key_equal()) { rep.insert_unique(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_map(InputIterator f, InputIterator l, size_type n,
           const hasher& hf, const key_equal& eql)
    : rep(n, hf, eql) { rep.insert_unique(f, l); }

public:
  // 所有操作几乎都有 hash table 对应版本，传递调用就行
  size_type size() const { return rep.size(); }
  size_type max_size() const { return rep.max_size(); }
  bool empty() const { return rep.empty(); }
  void swap(hash_map& hs) { rep.swap(hs.rep); }
  friend bool
  operator== __STL_NULL_TMPL_ARGS (const hash_map&, const hash_map&);

  iterator begin() { return rep.begin(); }
  iterator end() { return rep.end(); }
  const_iterator begin() const { return rep.begin(); }
  const_iterator end() const { return rep.end(); }

public:
  pair<iterator, bool> insert(const value_type& obj)
    { return rep.insert_unique(obj); }
  template <class InputIterator>
  void insert(InputIterator f, InputIterator l) { rep.insert_unique(f,l); }
  pair<iterator, bool> insert_noresize(const value_type& obj)
    { return rep.insert_unique_noresize(obj); }

  iterator find(const key_type& key) { return rep.find(key); }
  const_iterator find(const key_type& key) const { return rep.find(key); }

  T& operator[](const key_type& key) {
    return rep.find_or_insert(value_type(key, T())).second;
  }

  size_type count(const key_type& key) const { return rep.count(key); }

  pair<iterator, iterator> equal_range(const key_type& key)
    { return rep.equal_range(key); }
  pair<const_iterator, const_iterator> equal_range(const key_type& key) const
    { return rep.equal_range(key); }

  size_type erase(const key_type& key) {return rep.erase(key); }
  void erase(iterator it) { rep.erase(it); }
  void erase(iterator f, iterator l) { rep.erase(f, l); }
```

```
  void clear() { rep.clear(); }

public:
  void resize(size_type hint) { rep.resize(hint); }
  size_type bucket_count() const { return rep.bucket_count(); }
  size_type max_bucket_count() const { return rep.max_bucket_count(); }
  size_type elems_in_bucket(size_type n) const
    { return rep.elems_in_bucket(n); }
};

template <class Key, class T, class HashFcn, class EqualKey, class Alloc>
inline bool operator==(const hash_map<Key, T, HashFcn, EqualKey, Alloc>& hm1,
                       const hash_map<Key, T, HashFcn, EqualKey, Alloc>& hm2)
{
  return hm1.rep == hm2.rep;
}
```

下面这个例子，取材自 [Austern98] 16.2.6 节。我特别在程序最后新加了一段遍历操作，为的是验证 **hash_map** 内的元素并无任何特定排序。程序中对于 **hash_map** 的 EqualKey 必须有特别的设计，不能沿用缺省的 equal_to<T>，因为此例之中的元素是字符串，面字符串的相等与否，必须一个字符一个字符地比较（可使用C标准函数 strcmp()），不能直接以 const char* 做比较。

```
// file : 5hashmap-test.cpp
#include <iostream>
#include <hash_map>
#include <cstring>
using namespace std;

struct eqstr
{
  bool operator()(const char* s1, const char* s2) const {
    return strcmp(s1, s2) == 0;
  }
};

int main()
{
  hash_map<const char*, int, hash<const char*>, eqstr> days;

  days["january"] = 31;
  days["february"] = 28;
  days["march"] = 31;
  days["april"] = 30;
  days["may"] = 31;
  days["june"] = 30;
```

```
  days["july"] = 31;
  days["august"] = 31;
  days["september"] = 30;
  days["october"] = 31;
  days["november"] = 30;
  days["december"] = 31;

  cout << "september -> " << days["september"] << endl;  // 30
  cout << "june      -> " << days["june"] << endl;       // 30
  cout << "february  -> " << days["february"] << endl;   // 28
  cout << "december  -> " << days["december"] << endl;   // 31

  hash_map<const char*, int, hash<const char*>, eqstr>::iterator
    ite1 = days.begin();
  hash_map<const char*, int, hash<const char*>, eqstr>::iterator
    ite2 = days.end();
  for(; ite1 != ite2; ++ite1)
     cout << ite1->first << ' ';
  // september june july may january february december march
  // april november october august
}
```

5.10 hash_multiset

hash_multiset 的特性与 multiset 完全相同，唯一的差别在于它的底层机制是 hashtable。也因此，hash_multiset 的元素并不会被自动排序。

hash_multiset 和 hash_set 实现上的唯一差别在于，前者的元素插入操作采用底层机制 hashtable 的 insert_equal()，后者则是采用 insert_unique()。

下面是 hash_multiset 的源代码摘要，其中的注释几乎说明了一切，本节不再另做文字解释。

请注意，5.7.5 节最后谈到，hashtable 有一些无法处理的型别（除非用户为那些型别撰写 hash function）。凡是 hashtable 无法处理者，hash_multiset 也无法处理。

```
template <class Value,
          class HashFcn = hash<Value>,
          class EqualKey = equal_to<Value>,
          class Alloc = alloc>
class hash_multiset
{
```

```
private:
  typedef hashtable<Value, Value, HashFcn, identity<Value>,
                    EqualKey, Alloc> ht;
  ht rep;

public:
  typedef typename ht::key_type key_type;
  typedef typename ht::value_type value_type;
  typedef typename ht::hasher hasher;
  typedef typename ht::key_equal key_equal;

  typedef typename ht::size_type size_type;
  typedef typename ht::difference_type difference_type;
  typedef typename ht::const_pointer pointer;
  typedef typename ht::const_pointer const_pointer;
  typedef typename ht::const_reference reference;
  typedef typename ht::const_reference const_reference;

  typedef typename ht::const_iterator iterator;
  typedef typename ht::const_iterator const_iterator;

  hasher hash_funct() const { return rep.hash_funct(); }
  key_equal key_eq() const { return rep.key_eq(); }

public:
  // 缺省使用大小为100的表格。将被hash table调整为最接近且较大之质数
  hash_multiset() : rep(100, hasher(), key_equal()) {}
  explicit hash_multiset(size_type n) : rep(n, hasher(), key_equal()) {}
  hash_multiset(size_type n, const hasher& hf) : rep(n, hf, key_equal()) {}
  hash_multiset(size_type n, const hasher& hf, const key_equal& eql)
    : rep(n, hf, eql) {}

// 以下，插入操作全部使用 insert_equal()，允许键值重复
  template <class InputIterator>
  hash_multiset(InputIterator f, InputIterator l)
    : rep(100, hasher(), key_equal()) { rep.insert_equal(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_multiset(InputIterator f, InputIterator l, size_type n)
    : rep(n, hasher(), key_equal()) { rep.insert_equal(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_multiset(InputIterator f, InputIterator l, size_type n,
                const hasher& hf)
    : rep(n, hf, key_equal()) { rep.insert_equal(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_multiset(InputIterator f, InputIterator l, size_type n,
                const hasher& hf, const key_equal& eql)
    : rep(n, hf, eql) { rep.insert_equal(f, l); }

public:
```

```
  // 所有操作几乎都有 hash table 的对应版本，传递调用即可
  size_type size() const { return rep.size(); }
  size_type max_size() const { return rep.max_size(); }
  bool empty() const { return rep.empty(); }
  void swap(hash_multiset& hs) { rep.swap(hs.rep); }
  friend bool operator== __STL_NULL_TMPL_ARGS (const hash_multiset&,
                                               const hash_multiset&);

  iterator begin() const { return rep.begin(); }
  iterator end() const { return rep.end(); }

public:
  iterator insert(const value_type& obj) { return rep.insert_equal(obj); }
  template <class InputIterator>
  void insert(InputIterator f, InputIterator l) { rep.insert_equal(f,l); }
  iterator insert_noresize(const value_type& obj)
    { return rep.insert_equal_noresize(obj); }

  iterator find(const key_type& key) const { return rep.find(key); }

  size_type count(const key_type& key) const { return rep.count(key); }

  pair<iterator, iterator> equal_range(const key_type& key) const
    { return rep.equal_range(key); }

  size_type erase(const key_type& key) {return rep.erase(key); }
  void erase(iterator it) { rep.erase(it); }
  void erase(iterator f, iterator l) { rep.erase(f, l); }
  void clear() { rep.clear(); }

public:
  void resize(size_type hint) { rep.resize(hint); }
  size_type bucket_count() const { return rep.bucket_count(); }
  size_type max_bucket_count() const { return rep.max_bucket_count(); }
  size_type elems_in_bucket(size_type n) const
    { return rep.elems_in_bucket(n); }
};

template <class Val, class HashFcn, class EqualKey, class Alloc>
inline bool operator==(const hash_multiset<Val, HashFcn, EqualKey, Alloc>& hs1,
                       const hash_multiset<Val, HashFcn, EqualKey, Alloc>& hs2)
{
  return hs1.rep == hs2.rep;
}
```

hash_multiset 的使用方式，与 hash_set 完全相同。

5.11 hash_multimap

hash_multimap 的特性与 multimap 完全相同，唯一的差别在于它的底层机制是 hashtable。也因此，hash_multimap 的元素并不会被自动排序。

hash_multimap 和 hash_map 实现上的唯一差别在于，前者的元素插入操作采用底层机制 hashtable 的 insert_equal()，后者则是采用 insert_unique()。

下面是 hash_multimap 的源代码摘要，其中的注释几乎说明了一切，本节不再另做文字解释。

请注意，5.7.5 节最后谈到，hashtable 有一些无法处理的型别（除非用户为那些型别撰写 hash function）。凡是 hashtable 无法处理者，hash_multimap 也无法处理。

```
template <class Key,
          class T,
          class HashFcn = hash<Key>,
          class EqualKey = equal_to<Key>,
          class Alloc = alloc>
class hash_multimap
{
private:
  typedef hashtable<pair<const Key, T>, Key, HashFcn,
                    selectlst<pair<const Key, T> >, EqualKey, Alloc> ht;
  ht rep;

public:
  typedef typename ht::key_type key_type;
  typedef T data_type;
  typedef T mapped_type;
  typedef typename ht::value_type value_type;
  typedef typename ht::hasher hasher;
  typedef typename ht::key_equal key_equal;

  typedef typename ht::size_type size_type;
  typedef typename ht::difference_type difference_type;
  typedef typename ht::pointer pointer;
  typedef typename ht::const_pointer const_pointer;
  typedef typename ht::reference reference;
  typedef typename ht::const_reference const_reference;

  typedef typename ht::iterator iterator;
```

```
  typedef typename ht::const_iterator const_iterator;

  hasher hash_funct() const { return rep.hash_funct(); }
  key_equal key_eq() const { return rep.key_eq(); }

public:
  // 缺省使用大小为 100 的表格，将被 hash table 调整为最接近且较大之质数
  hash_multimap() : rep(100, hasher(), key_equal()) {}
  explicit hash_multimap(size_type n) : rep(n, hasher(), key_equal()) {}
  hash_multimap(size_type n, const hasher& hf) : rep(n, hf, key_equal()) {}
  hash_multimap(size_type n, const hasher& hf, const key_equal& eql)
    : rep(n, hf, eql) {}

// 以下，插入操作全部使用 insert_equal()，允许键值重复
  template <class InputIterator>
  hash_multimap(InputIterator f, InputIterator l)
    : rep(100, hasher(), key_equal()) { rep.insert_equal(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_multimap(InputIterator f, InputIterator l, size_type n)
    : rep(n, hasher(), key_equal()) { rep.insert_equal(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_multimap(InputIterator f, InputIterator l, size_type n,
                const hasher& hf)
    : rep(n, hf, key_equal()) { rep.insert_equal(f, l); }
  template <class InputIterator>
  hash_multimap(InputIterator f, InputIterator l, size_type n,
                const hasher& hf, const key_equal& eql)
    : rep(n, hf, eql) { rep.insert_equal(f, l); }

public:
  // 所有操作几乎都有 hash table 的对应版本，传递调用即可
  size_type size() const { return rep.size(); }
  size_type max_size() const { return rep.max_size(); }
  bool empty() const { return rep.empty(); }
  void swap(hash_multimap& hs) { rep.swap(hs.rep); }
  friend bool
  operator== __STL_NULL_TMPL_ARGS (const hash_multimap&, const hash_multimap&);

  iterator begin() { return rep.begin(); }
  iterator end() { return rep.end(); }
  const_iterator begin() const { return rep.begin(); }
  const_iterator end() const { return rep.end(); }

public:
  iterator insert(const value_type& obj) { return rep.insert_equal(obj); }
  template <class InputIterator>
  void insert(InputIterator f, InputIterator l) { rep.insert_equal(f,l); }
  iterator insert_noresize(const value_type& obj)
    { return rep.insert_equal_noresize(obj); }
```

```
  iterator find(const key_type& key) { return rep.find(key); }
  const_iterator find(const key_type& key) const { return rep.find(key); }

  size_type count(const key_type& key) const { return rep.count(key); }

  pair<iterator, iterator> equal_range(const key_type& key)
    { return rep.equal_range(key); }
  pair<const_iterator, const_iterator> equal_range(const key_type& key) const
    { return rep.equal_range(key); }

  size_type erase(const key_type& key) {return rep.erase(key); }
  void erase(iterator it) { rep.erase(it); }
  void erase(iterator f, iterator l) { rep.erase(f, l); }
  void clear() { rep.clear(); }

public:
  void resize(size_type hint) { rep.resize(hint); }
  size_type bucket_count() const { return rep.bucket_count(); }
  size_type max_bucket_count() const { return rep.max_bucket_count(); }
  size_type elems_in_bucket(size_type n) const
    { return rep.elems_in_bucket(n); }
};

template <class Key, class T, class HF, class EqKey, class Alloc>
inline bool operator==(const hash_multimap<Key, T, HF, EqKey, Alloc>& hm1,
                       const hash_multimap<Key, T, HF, EqKey, Alloc>& hm2)
{
  return hm1.rep == hm2.rep;
}
```

hash_multimap 的使用方式，与 hash_map 完全相同。

6

算法

algorithms

再好的编程技巧，也无法让一个笨拙的算法起死回生。
选择了错误的算法，便注定了失败的命运。

6.1 算法概观

算法，问题之解法也。

以有限的步骤，解决逻辑或数学上的问题，这一专门科目我们称为算法（Algorithms）。大学信息相关教育里面，与编程最有直接关系的科目，首推算法与数据结构（Data Structures，亦即 STL 中的容器，本书 4,5 两章已介绍）。STL 算法即是将最常被运用的算法规范出来，其涵盖区间有可能在每五年一次的 C++ 标准委员会中不断增订。

广义而言，我们所写的每个程序都是一个算法，其中的每个函数也都是一个算法，毕竟它们都用来解决或大或小的逻辑问题或数学问题。唯有用来解决特定问题（例如排序、查找、最短路径、三点共线…），并且获得数学上的效能分析与证明，这样的算法才具有可复用性。本章探讨的便是被收记录于 STL 之中，极具复用价值的 70 余个 STL 算法，包括赫赫有名的排序（sorting）、查找（searching）、排列组合（permutation）算法，以及用于数据移动、复制、删除、比较、组合、运算等等的算法。

特定的算法往往搭配特定的数据结构。例如 binary search tree（二叉查找树）

和 RB-tree（红黑树，5.2 节）便是为了解决查找问题而发展出来的特殊数据结构，hashtable（散列表，5.7 节）拥有快速查找的能力。又例如 max-heap（或 min-heap）可以协助完成所谓的 heap sort（堆排序）。几乎可以说，特定的数据结构是为了实现某种特定的算法。这一类“与特定数据结构相关”的算法，被本书（及 STL）归类于第 5 章“关系型容器”（associated containers）之列。本章所讨论的，是可施行于“无太多特殊条件限制”之空间中的某一段元素区间的算法。

6.1.1 算法分析与复杂度表示 O()

当我们发现（发明）一个可以解决问题的算法时，下一个重要步骤就是决定该算法所耗用的资源，包括空间和时间。这个操作称为算法分析（algorithm analysis）。可以这么说，如果一个算法得耗用数 GB 的内存空间才能获得令人满意的效率，这种算法没有用——至少在目前的计算机架构下没有实用价值。

一般而言，算法的执行时间和其所要处理的数据量有关，两者之间存在某种函数关系，可能是一次（线性，linear）、二次（quadratic）、三次（cubic）或对数（logarithm）关系。当数据量很小时，多项式函数的每一项都可能对结果带来相当程度的影响，但是当数据量够大（这是我们应该关注的情况）时，只有最高次方的项目才具主导地位。

下面是三个复杂度各异的问题：

1. 最小元素问题：求取 array 中的最小元素。
2. 最短距离问题：求取 X-Y 平面上的 N 个点中，距离最近的两个点。
3. 三点共线问题：决定 X-Y 平面上的 N 个点中，是否有任何三点共线。

最小元素问题的解法一定必须两两元素比对，逐一进行。N 个元素需要 N 次比对，所以数据量和执行时间呈线性关系。“最短距离”问题所需计算的元素对（pairs）共有 N(N-1)/2，所以大数据量和执行时间呈二次关系[1]。“三点共线”问题要计算的元素对（pairs）共有 N(N-1)(N-2)/3，所以大数据量和执行时间呈三次关

[1] 有一个聪明的算法可以将它降低为一次关系。

系[2]。

上述三种复杂度，以所谓的 Big-Oh 标记法表示为 O(N), O(N²), O(N³)。这种标记法的定义如下：

> 如果有任何正值常数 c 和 N_0，使得当 $N \geq N_0$ 时，$T(N) \leq cF(N)$，那么我们便可将 T(N) 的复杂度表示为 O(F(N)) [3]。

Big-Oh 并非唯一的复杂度标记法，另外还有诸如 Big-Omega, Big-Theta, Little-Oh 等标记法，各有各的优缺点。一般而言，Big-Oh 标记法最被普遍使用。哦，是的，它并不适合用来标记小数据量下的情况。

以下三个问题出现一种新的复杂度形式：

4. 需要多少 bits 才能表现出 N 个连续整数?
5. 从 X = 1 开始，每次将 X 扩充两倍，需要多少次扩充才能使 X ≥ N?
6. 从 X = N 开始，每次将 X 缩减一半，需要多少次缩减才能使 X ≤ 1?

就问题 4 而言，B 个 bits 可表现出 2^B 个不同的整数，因此欲表现 N 个连续整数，需满足方程式 $2^B \geq N$，亦即 $B \geq \log N$。

问题 5 称为 “持续加倍问题”，必须满足方程式 $2^K \geq N$，此式同问题 4，因此解答相同。问题 6 称为 “持续减半问题”，与问题 5 意义相同，只不过方向相反，因此解答相同。

如果有一个算法，花费固定时间（常数时间，O(1)）将问题的规模降低某个固定比例(通常是 1/2)，基于上述问题 6 的解答，我们便说此算法的复杂度是 O(logN)。注意，问题规模的降低比例如何，并不会带来影响，因为它会反应在对数的底上，而底对于 Big-Oh 标记法是没有影响的（任何算法专论书籍，都应该有其证明）。

---

2 有一个聪明的算法可以将它降低为二次关系。目前学术界还在研究更好的算法。

3 注意，在此定义之下，意味着数据量必须足够大，而且最高次方的常系数和较低次方的项，都不应该出现在 Big-Oh 标记法中。

算法的复杂度，可以作为我们衡量算法效率的标准。

6.1.2 STL 算法总览

图 6-1 将所有的 STL 算法（以及一些非标准的 SGI STL 算法）的名称、用途、文件分布等等，依算法名称的字母顺序列表。表格之中凡是不在 STL 标准规格之列的 SGI 专属算法，都以 * 加以标示。

（以下 “质变”栏意指 *mutating*，意思是 “会改变其操作对象之内容”）

算法名称	算法用途	质变?	所在文件
accumulate	元素累计	否	<stl_numeric.h>
adjacent_difference	相邻元素的差额	是 if in-place	<stl_numeric.h>
adjacent_find	查找相邻而重复（或符合某条件）的元素	否	<stl_algo.h>
binary_search	二分查找	否	<stl_algo.h>
Copy	复制	是 if in-place	<stl_algobase.h>
Copy_backward	逆向复制	是 if in-place	<stl_algobase.h>
Copy_n *	复制 n 个元素	是 if in-place	<stl_algobase.h>
count	计数	否	<stl_algo.h>
count_if	在特定条件下计数	否	<stl_algo.h>
equal	判断两个区间相等与否	否	<stl_algobase.h>
equal_range	试图在有序区间中寻找某值（返回一个上下限区间）	否	<stl_algo.h>
fill	改填元素值	是	<stl_algobase.h>
fill_n	改填元素值，n 次	是	<stl_algobase.h>
find	循序查找	否	<stl_algo.h>
find_if	循序查找符合特定条件者	否	<stl_algo.h>
find_end	查找某个子序列的最后一次出现点	否	<stl_algo.h>
find_first_of	查找某些元素的首次出现点	否	<stl_algo.h>
for_each	对区间内的每一个元素施行某操作	否	<stl_algo.h>

算法名称	算法用途	质变?	所在文件
generate	以特定操作之运算结果填充特定区间内的元素	是	<stl_algo.h>
generate_n	以特定操作之运算结果填充 n 个元素内容	是	<stl_algo.h>
includes	是否涵盖于某序列之中	否	<stl_algo.h>
inner_product	内积	否	<stl_numeric.h>
inplace_merge	合并并就地替换（覆写上去）	是	<stl_algo.h>
Iota *	在某区间填入某指定值的递增序列	是	<stl_numeric.h>
is_heap *	判断某区间是否为一个 heap	否	<stl_algo.h>
is_sorted *	判断某区间是否已排序	否	<stl_algo.h>
iter_swap	元素互换	是	<stl_algobase.h>
lexicographical_compare	以字典顺序进行比较	否	<stl_numeric.h>
lower_bound	“将指定元素插入区间之内而不影响区间之原本排序”的最低位置	否	<stl_algo.h>
max	最大值	否	<stl_algobase.h>
max_element	最大值所在位置	否	<stl_algo.h>
merge	合并两个序列	是 if in-place	<stl_algo.h>
min	最小值	否	<stl_algobase.h>
min_element	最小值所在位置	否	<stl_algo.h>
mismatch	找出不匹配点	否	<stl_algobase.h>
next_permutation	获得下一个排列组合	是	<stl_algo.h>
nth_element	重新安排序列中的第 n 个元素的左右两端	是	<stl_algo.h>
partial_sort	局部排序	是	<stl_algo.h>
partial_sort_copy	局部排序并复制到他处	是 if in-place	<stl_algo.h>
partial_sum	局部求和	是 if in-place	<stl_numeric.h>
partition	分割	是	<stl_algo.h>

算法名称	算法用途	质变?	所在文件
prev_permutation	获得前一个排列组合	是	<stl_algo.h>
power *	幂次方。表达式可指定	否	<stl_numeric.h>
random_shuffle	随机重排元素	是	<stl_algo.h>
random_sample *	随机取样	是 if in-place	<stl_algo.h>
random_sample_n *	随机取样	是 if in-place	<stl_algo.h>
remove	删除某类元素（但不删除）	是	<stl_algo.h>
remove_copy	删除某类元素并将结果复制到另一个容器	是	<stl_algo.h>
remove_if	有条件地删除某类元素	是	<stl_algo.h>
remove_copy_if	有条件地删除某类元素并将结果复制到另一个容器	是	<stl_algo.h>
replace	替换某类元素	是	<stl_algo.h>
replace_copy	替换某类元素，并将结果复制到另一个容器	是	<stl_algo.h>
replace_if	有条件地替换	是	<stl_algo.h>
replace_copy_if	有条件地替换，并将结果复制到另一个容器	是	<stl_algo.h>
reverse	反转元素次序	是	<stl_algo.h>
reverse_copy	反转元素次序并将结果复制到另一个容器	是	<stl_algo.h>
rotate	旋转	是	<stl_algo.h>
rotate_copy	旋转，并将结果复制到另一个容器	是	<stl_algo.h>
search	查找某个子序列	否	<stl_algo.h>
search_n	查找“连续发生 n 次”的子序列	否	<stl_algo.h>
set_difference	差集	是 if in-place	<stl_algo.h>
set_intersection	交集	是 if in-place	<stl_algo.h>
set_symmetric_difference	对称差集	是 if in-place	<stl_algo.h>
set_union	并集	是 if in-place	<stl_algo.h>

算法名称	算法用途	质变?	所在文件
sort	排序	是	<stl_algo.h>
stable_partition	分割并保持元素的相对次序	是	<stl_algo.h>
stable_sort	排序并保持等值元素的相对次序	是	<stl_algo.h>
swap	交换（对调）	是	<stl_algobase.h>
swap_ranges	交换（指定区间）	是	<stl_algo.h>
transform	以两个序列为基础，交互作用产生第三个序列	是	<stl_algo.h>
unique	将重复的元素折叠缩编，使成唯一	是	<stl_algo.h>
unique_copy	将重复的元素折叠缩编，使成唯一，并复制到他处	是 if in-place	<stl_algo.h>
upper_bound	“将指定元素插入区间之内而不影响区间之原本排序”的最高位置	否	<stl_algo.h>
make_heap	制造一个 heap	是	<stl_heap.h>
pop_heap	从 heap 取出一个元素	是	<stl_heap.h>
push_heap	将一个元素推进 heap 内	是	<stl_heap.h>
sort_heap	对 heap 排序	是	<stl_heap.h>

图 **6-1** STL 算法总览

6.1.3 质变算法 mutating algorithms——会改变操作对象之值

所有的 STL 算法都作用在由迭代器 [first,last) 所标示出来的区间上。所谓“质变算法”，是指运算过程中会更改区间内（迭代器所指）的元素内容。诸如拷贝（copy）、互换（swap）、替换（replace）、填写（fill）、删除（remove）、排列组合（permutation）、分割（partition）、随机重排（random shuffling）、排序（sort）等算法，都属此类。如果你将这类算法运用于一个常数区间上，例如：

```
int ia[] = { 22,30,30,17,33,40,17,23,22,12,20 };
vector<int> iv(ia, ia+sizeof(ia)/sizeof(int));

vector<int>::const_iterator cite1 = iv.begin();
```

```
vector<int>::const_iterator cite2 = iv.end();

sort(cite1, cite2);
```

针对上述的 sort 操作，编译器会丢给你一大堆错误信息。

6.1.4 非质变算法 nonmutating algorithms——不改变操作对象之值

所有的 STL 算法都作用在由迭代器 [first,last) 所标示出来的区间上。所谓“非质变算法”，是指运算过程中不会更改区间内（迭代器所指）的元素内容。诸如查找（find）、匹配（search）、计数（count）、巡访（for_each）、比较（equal, mismatch）、寻找极值（max, min）等算法，都属此类。但是如果你在 for_each（巡访每个元素）算法身上应用一个会改变元素内容的仿函数（functor），例如：

```
template <class T>
struct plus2 {
  void operator()(T& x) const
    { x += 2; }
};

  int ia[] = { 22,30,30,17,33,40,17,23,22,12,20 };
  vector<int> iv(ia, ia+sizeof(ia)/sizeof(int));

  for_each(iv.begin(), iv.end(), plus2<int>());
```

那么当然元素会被改变。

6.1.5 STL 算法的一般形式

所有泛型算法的前两个参数都是一对迭代器（iterators），通常称为 first 和 last，用以标示算法的操作区间。STL 习惯采用前闭后开区间（或称左涵盖区间）表示法，写成 [first,last)，表示区间涵盖 first 至 last（不含 last）之间的所有元素。当 first==last 时，上述所表现的便是一个空区间。

这个[first,last)区间的必要条件是，必须能够经由 increment（累加）操作符的反复运用，从 first 到达 last。编译器本身无法强求这一点。如果这个条件不成立，会导致未可预期的结果。

根据行进特性，迭代器可分为5类（见图3-2）。每一个 STL 算法的声明，都

表现出它所需要的最低程度的迭代器类型。例如 find() 需要一个 InputIterator，这是它的最低要求，但它也可以接受更高类型的迭代器，如 ForwardIterator，BidirectionalIterator 或 RandomAccessIterator，因为，由图 3-2 观之，不论 ForwardIterator 或 BidirectionalIterator 或 RandomAccessIterator 也都是一种 InputIterator。但如果你交给 find() 一个 OutputIterator，会导致错误。

将无效的迭代器传给某个算法，虽然是一种错误，却不保证能够在编译时期就被捕捉出来，因为所谓“迭代器类型”并不是真实的型别，它们只是 function template 的一种型别参数（type parameters）。

许多 STL 算法不只支持一个版本。这一类算法的某个版本采用缺省运算行为，另一个版本提供额外参数，接受外界传入一个仿函数（functor），以便采用其他策略。例如 unique() 缺省情况下使用 equality 操作符来比较两个相邻元素，但如果这些元素的型别并未供应 equality 操作符，或如果用户希望定义自己的 equality 操作符，便可以传一个仿函数（functor）给另一版本的 unique()。有些算法干脆将这样的两个版本分为两个不同名称的实体，附从的那个总是以 _if 作为尾词，例如 find_if()。另一个例子是 replace()，使用内建的 equality 操作符进行比对操作，replace_if() 则以接收到的仿函数（functor）进行比对行为。

质变算法（mutating algorithms，6.1.3 节）通常提供两个版本：一个是 in-place（就地进行）版，就地改变其操作对象；另一个是 copy（另地进行）版，将操作对象的内容复制一份副本，然后在副本上进行修改并返回该副本。copy 版总是以 _copy 作为函数名称尾词，例如 replace() 和 replace_copy()。并不是所有质变算法都有 copy 版，例如 sort() 就没有。如果我们希望以这类“无 copy 版本”之质变算法施行于某一段区间元素的副本身上，我们必须自行制作并传递那一份副本。

所有的数值（numeric）算法，包括 adjacent_difference()，accumulate()，inner_product()，partial_sum() 等等，都实现于 SGI <stl_numeric.h> 之中，这是个内部文件，STL 规定用户必须包含的是上层的 <numeric>。其他 STL 算法都实现于 SGI 的 <stl_algo.h> 和<stl_algobase.h> 文件中，也都是内部文

件；欲使用这些算法，必须先包含上层相关头文件 <algorithm>。

6.2 算法的泛化过程

将一个叙述完整的算法转化为程序代码，是任何训练有素的程序员胜任愉快的工作。这些工作有的极其简单（例如循序查找），有的稍微复杂（例如快速排序法），有的十分繁复（例如红黑树之建立与元素存取），但基本上都不应该形成任何难以跨越的障碍。

然而，如何将算法独立于其所处理的数据结构之外，不受数据结构的羁绊，思想层面就不是那么简单了。如何设计一个算法，使它适用于任何（或大多数）数据结构呢？换个说法，我们如何在即将处理的未知的数据结构（也许是 array，也许是 vector，也许是 list，也许是 deque…）上，正确地实现所有操作呢？

关键在于，只要把操作对象的型别加以抽象化，把操作对象的标示法和区间目标的移动行为抽象化，整个算法也就在一个抽象层面上工作了。整个过程称为算法的泛型化（generalized），简称泛化。

让我们看看算法泛化的一个实例。以简单的循序查找为例，假设我们要写一个 find() 函数，在 array 中寻找特定值。面对整数 array，我们的直觉反应是：

```
int* find(int* arrayHead, int arraySize, int value)
{
  for (int i=0; i<arraySize; ++i)
    if (arrayHead[i] == value)
      break;

  return &(arrayHead[i]);
}
```

该函数在某个区间内查找 value。返回的是一个指针，指向它所找到的第一个符合条件的元素；如果没有找到，就返回最后一个元素的下一位置（地址）。

“最后元素的下一位置”称为 end。返回 end 以表示 “查找无结果”似乎是个可笑的做法。为什么不返回 null？因为，一如稍后即将见到的，end 指针可以对其他种类的容器带来泛型效果，这是 null 所无法达到的。是的，从小我们就被

教导，使用array时千万不要超越其区间，但事实上一个指向array元素的指针，不但可以合法地指向array内的任何位置，也可以指向array尾端以外的任何位置。只不过当指针指向array尾端以外的位置时，它只能用来与其他array指针相比较，不能提领（*dereference*）其值。现在，你可以这样使用find()函数：

```
const int arraySize = 7;
int ia[arraySize] = { 0,1,2,3,4,5,6 };
int* end = ia + arraySize;   // 最后元素的下一位置

int* ip = find(ia, sizeof(ia)/sizeof(int), 4);
if (ip == end)               // 两个 array 指针相比较
   cout << "4 not found" << endl;
else
   cout << "4 found. " << *ip << endl;
```

find()的这种做法暴露了容器太多的实现细节（例如arraySize），也因此太过依附特定容器。为了让find()适用于所有类型的容器，其操作应该更抽象化些。让find()接受两个指针作为参数，标示出一个操作区间，就是很好的做法：

```
int* find(int* begin, int* end, int value)
{
  while (begin != end && *begin != value)
    ++begin;

  return begin;
}
```

这个函数在“前闭后开”区间[begin, end)内（不含end；end指向array最后元素的下一位置）查找value，并返回一个指针，指向它所找到的第一个符合条件的元素；如果没有找到，就返回end。现在，你可以这样使用find()函数：

```
const int arraySize = 7;
int ia[arraySize] = { 0,1,2,3,4,5,6 };
int* end = ia + arraySize;

int* ip = find(ia, end, 4);
if (ip == end)
   cout << "4 not found" << endl;
else
   cout << "4 found. " << *ip << endl;
```

find()函数也可以很方便地用来查找array的子区间：

```
int* ip = find(ia+2, ia+5, 3);
if (ip == end)
```

```
    cout << "3 not found" << endl;
  else
    cout << "3 found. " << *ip << endl;
```

由于 find() 函数之内并无任何操作是针对特定的整数 array 而发的，所以我们可将它改成一个 template：

```
template<typename T>  // 关键词 typename 也可改为关键词 class
T* find(T* begin, T* end, const T& value)
{
  // 注意，以下用到了 operator!=, operator*, operator++.
  while (begin != end && *begin != value)
    ++begin;

  // 注意，以下返回操作会引发 copy 行为
  return begin;
}
```

请注意数值的传递由 pass-by-value 改为 pass-by-reference-to-const，因为如今所传递的 value，其型别可为任意；于是对象一大，传递成本便会提升，这是我们不愿见到的。pass-by-reference 可完全避免这些成本[4]。

这样的 find() 很好，几乎适用于任何容器——只要该容器允许指针指入，而指针们又都支持以下四种 find() 函数中出现的操作行为：

- inequality（判断不相等）操作符
- dereferencelm（提领，取值）操作符
- prefix increment（前置式递增）操作符
- copy（复制）行为（以便产生函数的返回值）

C++ 有一个极大的优点便是，几乎所有东西都可以改写为程序员自定义的形式或行为。是的，上述这些操作符或操作行为都可以被重载（*overloaded*），既是如此，何必将 find 限制为只能使用指针呢？何不让支持以上四种行为的、行为很像指针的“某种对象”都可以被 find() 使用呢？如此一来，find() 函数便可以从原生（*native*）指针的思想框框中跳脱出来。如果我们以一个原生指针指向某个 list，则对该指针进行“++”操作并不能使它指向下一个串行节点。但如果我们

[4] 参见《Effective C++》条款 22。

设计一个 class，拥有原生指针的行为，并使其“++”操作指向 list 的下一个节点，那么 find() 就可以施行于 list 容器身上了。

这便是迭代器（iterator，第三章）的观念。迭代器是一种行为类似指针的对象，换句话说，是一种 smart pointers[5]。现在我将 find() 函数内的指针以迭代器取代，重新写过：

```
template<class Iterator, class T>
Iterator find(Iterator begin, Iterator end, const T& value)
{
  while (begin != end && *begin != value)
    ++begin;

  return begin;
}
```

这便是一个完全泛型化的 find() 函数。你可以在任何 C++ 标准库的某个头文件里看到它，长相几乎一模一样。SGI STL 把它放在 <stl_algo.h> 之中。

有了这样的观念与准备，再来看 STL 各式各样的泛型算法，就轻松多了。以下列出（几乎）所有 STL 算法的源代码，并列有用途说明与操作示范，这些说明参考自 [Lippman98], [Austern98], [ISO98]。每一个算法的运用范例，另可参考 [Lippman98] 附录 A，[Austern98] 11,12,13 章。

以下源代码列表中特别运用灰色底纹，标示出每一个算法的接口规格。

[5] 请参考 [Meyers96] 条款 22

6.3 数值算法 <stl_numeric.h>

这一节介绍的算法，统称为数值（numeric）算法。STL 规定，欲使用它们，客户端必须包含表头 <numeric>。SGI 将它们实现于 <stl_numeric.h> 文件中。

6.3.1 运用实例

观察这些算法的源代码之前，先示范其用法，是一个比较好的学习方式。以下程序展示本节所介绍的每一个算法的用途。例中使用 ostream_iterator 作为输出工具，第 8 章会深入介绍它，目前请想象它是一个绑定到屏幕的迭代器；只要将任何型别吻合条件的数据丢往这个迭代器，便会显示于屏幕上，而这一迭代器会自动跳到下一个可显示位置。

```
// file: 6numeric.cpp
#include <numeric>
#include <vector>
#include <functional>
#include <iostream>
#include <iterator>    // ostream_iterator
using namespace std;

int main()
{
  int ia[5] = { 1,2,3,4,5 };
  vector<int> iv(ia, ia+5);

  cout << accumulate(iv.begin(), iv.end(), 0) << endl;
  // 15, i.e. 0 + 1 + 2 + 3 + 4 + 5

  cout << accumulate(iv.begin(), iv.end(), 0, minus<int>()) << endl;
  // -15, i.e. 0 - 1 - 2 - 3 - 4 - 5

  cout << inner_product(iv.begin(), iv.end(), iv.begin(), 10) << endl;
  // 65, i.e. 10 + 1*1 + 2*2 + 3*3 + 4*4 + 5*5

  cout << inner_product(iv.begin(), iv.end(), iv.begin(), 10,
                        minus<int>(), plus<int>()) << endl;
  // -20, i.e. 10 - 1+1 - 2+2 - 3+3 - 4+4 - 5+5

  // 以下这个迭代器将绑定到 cout，作为输出用
  ostream_iterator<int> oite(cout, " ");

  partial_sum(iv.begin(), iv.end(), oite);
```

```
  // 1 3 6 10 15 (第n个新元素是前n个旧元素的相加总计)

  partial_sum(iv.begin(), iv.end(), oite, minus<int>());
  // 1 -1 -4 -8 -13 (第n个新元素是前n个旧元素的运算总计)

  adjacent_difference(iv.begin(), iv.end(), oite);
  // 1 1 1 1 1 (#1元素照录, #n新元素等于 #n旧元素 - #n-1旧元素)

  adjacent_difference(iv.begin(), iv.end(), oite, plus<int>());
  // 1 3 5 7 9 (#1元素照录, #n新元素等于 op(#n旧元素, #n-1旧元素))

  cout << power(10,3) << endl;              // 1000, i.e. 10*10*10
  cout << power(10,3, plus<int>()) << endl; // 30, i.e. 10+10+10

  int n=3;
  iota(iv.begin(), iv.end(), n);     // 在指定区间内填入n,n+1,n+2...
  for (int i=0; i<iv.size(); ++i)
    cout << iv[i] << ' ';            // 3 4 5 6 7
}
```

6.3.2 accumulate

```
// 版本 1
template <class InputIterator, class T>
T accumulate(InputIterator first, InputIterator last, T init) {
  for ( ; first != last; ++first)
    init = init + *first;  // 将每个元素值累加到初值 init 身上
  return init;
}

// 版本 2
template <class InputIterator, class T, class BinaryOperation>
T accumulate(InputIterator first, InputIterator last, T init,
             BinaryOperation binary_op) {
  for ( ; first != last; ++first)
    init = binary_op(init, *first);  //  对每一个元素执行二元操作
  return init;
}
```

算法 accumulate 用来计算 init 和 [first,last) 内所有元素的总和。注意，你一定得提供一个初始值 init，这么做的原因之一是当 [first,last) 为空区间时仍能获得一个明确定义的值。如果希望计算 [first,last) 中所有数值的总和，应该将 init 设为 0。

式中的二元操作符不必满足交换律（commutative）和结合律（associative）。

是的，accumulate 的行为顺序有明确的定义：先将 init 初始化，然后针对 [first,last) 区间中的每一个迭代器 i，依序执行 init = init + *i（第一版本）或 init = binary_op(init, *i)（第二版本）。

6.3.3 adjacent_difference

```
// 版本 1
template <class InputIterator, class OutputIterator>
OutputIterator adjacent_difference(InputIterator first, InputIterator last,
                                   OutputIterator result) {
  if (first == last) return result;
  *result = *first;    // 首先记录第一个元素
  return __adjacent_difference(first, last, result, value_type(first));

  // 侯捷认为（并经实证），不需像上行那样传递调用，可改用以下写法（整个函数）：
  // if (first == last) return result;
  // *result = *first;
  // iterator_traits<InputIterator>::value_type value = *first;
  // while (++first != last) {  // 走过整个区间
  //   ...以下同 __adjacent_difference() 的对应内容
  //
  // 这样的观念和做法，适用于本文件所有函数。以后不再赘述
}

template <class InputIterator, class OutputIterator, class T>
OutputIterator __adjacent_difference(InputIterator first, InputIterator last,
                                     OutputIterator result, T*) {
  T value = *first;
  while (++first != last) {      // 走过整个区间
    T tmp = *first;
    *++result = tmp - value;     // 将相邻两元素的差额（后-前），赋值给目的端
    value = tmp;
  }
  return ++result;
}

// 版本 2
template <class InputIterator, class OutputIterator, class BinaryOperation>
OutputIterator adjacent_difference(InputIterator first, InputIterator last,
                                   OutputIterator result,
                                   BinaryOperation binary_op) {
  if (first == last) return result;
  *result = *first;    // 首先记录第一个元素
  return __adjacent_difference(first, last, result, value_type(first),
                               binary_op);
}
```

```
template <class InputIterator, class OutputIterator, class T,
          class BinaryOperation>
OutputIterator __adjacent_difference(InputIterator first, InputIterator last,
                                     OutputIterator result, T*,
                                     BinaryOperation binary_op) {
  T value = *first;
  while (++first != last) {     // 走过整个区间
    T tmp = *first;
    *++result = binary_op(tmp, value); // 将相邻两元素的运算结果，赋值给目的端
    value = tmp;
  }
  return ++result;
}
```

算法 adjacent_difference 用来计算 [first,last)中相邻元素的差额。也就是说，它将 *first 赋值给 *result，并针对 [first+1,last) 内的每个迭代器 i，将 *i - *(i-1) 之值赋值给 *(result+(i-first))。

注意，你可以采用就地（in place）运算方式，也就是令 result 等于 first。是的，在这种情况下它是一个质变算法（mutating algorithm）。

“储存第一元素之值，然后储存后继元素之差值”这种做法很有用，因为这么一来使有足够的信息可以重建输入区间的原始内容。如果加法与减法的定义一如常规定义，那么 adjacent_difference 与 partial_sum（稍后介绍）互为逆运算。这意思是，如果对区间值 1,2,3,4,5 执行 adjacent_difference，获得结果为 1,1,1,1,1，再对此结果执行 partial_sum，便会获得原始区间值 1,2,3,4,5。

第一版本使用 operator- 来计算差额，第二版本采用外界提供的二元仿函数。第一个版本针对 [first+1,last) 中的每个迭代器 i，将 *i - *(i-1) 赋值给 *(result+(i-first))，第二个版本则是将 binary_op(*i, *(i-1)) 的运算结果赋值给 *(result+(i-first))。

6.3.4 inner_product

```
// 版本 1
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class T>
T inner_product(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                InputIterator2 first2, T init) {
```

```
  // 以第一序列之元素个数为据，将两个序列都走一遍
  for ( ; first1 != last1; ++first1, ++first2)
    init = init + (*first1 * *first2); // 执行两个序列的一般内积
  return init;
}

// 版本 2
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class T,
          class BinaryOperation1, class BinaryOperation2>
T inner_product(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                InputIterator2 first2, T init, BinaryOperation1 binary_op1,
                BinaryOperation2 binary_op2) {
  // 以第一序列之元素个数为据，将两个序列都走一遍
  for ( ; first1 != last1; ++first1, ++first2)
    // 以外界提供的仿函数来取代第一版本中的 operator* 和 operator+
    init = binary_op1(init, binary_op2(*first1, *first2));
  return init;
}
```

算法 inner_product 能够计算[first1, last1)和[first2, first2 + (last1 - first1)) 的一般内积（generalized inner product）。注意，你一定得提供初值 init。这么做的原因之一是当 [first,last) 为空时，仍可获得一个明确定义的结果。如果你想计算两个 vectors 的一般内积，应该将 init 设为 0。

第一个版本会将两个区间的内积结果加上 init 。也就是说，先将结果初始化为 init，然后针对 [first1,last1) 的每一个迭代器 i，由头至尾依序执行 result = result + (*i) * *(first2+(i-first1))。

第二版本与第一版本的唯一差异是以外界提供之仿函数来取代 operator+ 和 operator*。也就是说，首先将结果初始化为 init，然后针对 [first1,last1) 的每一个迭代器 i，由头至尾依序执行 result = binary_op1(result, binary_op2(*i, *(first2+(i-first1)))。

式中所用的二元仿函数不必满足交换律（commutative）和结合律（associative）。inner_product 所有运算行为的顺序都有明确设定。

6.3.5 partial_sum

```
// 版本 1
template <class InputIterator, class OutputIterator>
OutputIterator partial_sum(InputIterator first, InputIterator last,
                           OutputIterator result) {
  if (first == last) return result;
  *result = *first;
  return __partial_sum(first, last, result, value_type(first));
}

template <class InputIterator, class OutputIterator, class T>
OutputIterator __partial_sum(InputIterator first, InputIterator last,
                             OutputIterator result, T*) {
  T value = *first;
  while (++first != last) {
    value = value + *first;      // 前n个元素的总和
    *++result = value;           // 指定给目的端
  }
  return ++result;
}

// 版本 2
template <class InputIterator, class OutputIterator, class BinaryOperation>
OutputIterator partial_sum(InputIterator first, InputIterator last,
                           OutputIterator result, BinaryOperation binary_op) {
  if (first == last) return result;
  *result = *first;
  return __partial_sum(first, last, result, value_type(first), binary_op);
}

template <class InputIterator, class OutputIterator, class T,
          class BinaryOperation>
OutputIterator __partial_sum(InputIterator first, InputIterator last,
                             OutputIterator result, T*,
                             BinaryOperation binary_op) {
  T value = *first;
  while (++first != last) {
    value = binary_op(value, *first);     // 前n个元素的总计
    *++result = value;                    // 指定给目的端
  }
  return ++result;
}
```

算法 partial_sum 用来计算局部总和。它会将 *first 赋值给 *result，将 *first 和 *(first+1) 的和赋值给 *(result+1)，依此类推。注意，result

可以等于 first，这使我们得以完成就地（in place）计算。在这种情况下它是一个质变算法（mutating algorithm）。

运算中的总和首先初始为 *first，然后赋值给 *result。对于 [first+1,last) 中每个迭代器 i，从头至尾依序执行 sum = sum + *i（第一版本）或 sum=binary_op(sum,*i)（第二版本），然后再将 sum 赋值给 *(result + (i - first))。此式所用之二元仿函数不必满足交换律（commutative）和结合律（associative）。所有运算行为的顺序都有明确设定。

本算法返回输出区间的最尾端位置：result+(last-first)。

如果加法与减法的定义一如常规定义，那么 partial_sum 与先前介绍过的 adjacent_difference 互为逆运算。这里的意思是，如果对区间值 1,2,3,4,5 执行 partial_sum，获得结果为 1,3,6,10,15，再对此结果执行 adjacent_difference，便会获得原始区间值 1,2,3,4,5。

6.3.6 power

这个算法由 SGI 专属，并不在 STL 标准之列。它用来计算某数的 n 幂次方。这里所谓的 n 幂次是指自己对自己进行某种运算，达 n 次。运算类型可由外界指定；如果指定为乘法，那就是乘幂。

```
// 版本一，乘幂
template <class T, class Integer>
inline T power(T x, Integer n) {
  return power(x, n, multiplies<T>());    // 指定运算型式为乘法
}

// 版本二，幂次方。如果指定为乘法运算，则当 n >= 0 时返回 x^n
// 注意，"MonoidOperation" 必须满足结合律 (associative)，
//  但不需满足交换律 (commutative)
template <class T, class Integer, class MonoidOperation>
T power(T x, Integer n, MonoidOperation op) {
  if (n == 0)
    return identity_element(op);      // 取出 "证同元素" identity element
  else {                              // 所谓 "证同元素"，见 7.3 节
    while ((n & 1) == 0) {
      n >>= 1;
      x = op(x, x);
```

```
    }

    T result = x;
    n >>= 1;
    while (n != 0) {
      x = op(x, x);
      if ((n & 1) != 0)
        result = op(result, x);
      n >>= 1;
    }
    return result;
  }
}
```

6.3.7 itoa

这个算法由 SGI 专属，并不在 STL 标准之列。它用来设定某个区间的内容，使其内的每一个元素从指定的 value 值开始，呈现递增状态。它改变了区间内容，所以是一种质变算法（mutating algorithm）。

```
// 俗称：iota 是什么的缩写？
// 函数意义：在 [first,last) 区间内填入 value, value+1, value+2...
template <class ForwardIterator, class T>
void iota(ForwardIterator first, ForwardIterator last, T value) {
  while (first != last) *first++ = value++;
}
```

6.4 基本算法 <stl_algobase.h>

STL 标准规格中并没有区分基本算法或复杂算法，然而 SGI 却把常用的一些算法定义于 <stl_algobase.h> 之中，其它算法定义于 <stl_algo.h> 中。以下一一列举这些所谓的基本算法。

6.4.1 运用实例

观察这些算法的源代码之前，先示范其用法，是一个比较好的学习方式。以下程序展示本节介绍的每一个算法的用途（但不含 copy，copy_backward 的用法，这两者另有范例程序）。本例使用 for_each 搭配一个自制的仿函数（functor）display 作为输出工具，关于仿函数，第 7 章会深入介绍它，目前请想象它是一个有着函数行径（也就是说，会被 function call 操作符调用起来）的东西。至于 for_each，将在

6.7.1 节介绍，目前请想象它是一个可以将整个指定区间遍历一遍的循环。

```
// file: 6algobase.cpp
#include <algorithm>
#include <vector>
#include <functional>
#include <iostream>
#include <iterator>
#include <string>
using namespace std;

template <class T>
struct display {
  void operator()(const T& x) const
    { cout << x << ' '; }
};

int main()
{
  int ia[9] = { 0,1,2,3,4,5,6,7,8 };
  vector<int> iv1(ia, ia+5);
  vector<int> iv2(ia, ia+9);

  // {0,1,2,3,4} v.s {0,1,2,3,4,5,6,7,8};
  cout << *(mismatch(iv1.begin(), iv1.end(), iv2.begin()).first);  // 5
  cout << *(mismatch(iv1.begin(), iv1.end(), iv2.begin()).second); // 5
  // 以上判断两个区间的第一个不匹配点。返回一个由两个迭代器组成的 pair，
  // 其中第一个迭代器指向第一区间的不匹配点，第二个迭代器指向第二区间的不匹配点
  // 上述写法很危险，应该先判断迭代器是否不等于容器的 end()，然后才可以做输出操作

  // 如果两个序列在 [first,last) 区间内相等，equal() 返回 true
  // 如果第二序列的元素比较多，多出来的元素不予考虑
  cout << equal(iv1.begin(), iv1.end(), iv2.begin());   // 1, true

  cout << equal(iv1.begin(), iv1.end(), &ia[3]);        // 0, false
  // {0,1,2,3,4} 不等于 {3,4,5,6,7}

  cout << equal(iv1.begin(), iv1.end(), &ia[3], less<int>()); // 1
  // {0,1,2,3,4} 小于 {3,4,5,6,7}

  fill(iv1.begin(), iv1.end(), 9);              // 区间区间内全部填 9
  for_each(iv1.begin(), iv1.end(), display<int>());    // 9 9 9 9 9

  fill_n(iv1.begin(), 3, 7);    // 从迭代器所指位置开始，填 3 个 7
  for_each(iv1.begin(), iv1.end(), display<int>());    // 7 7 7 9 9

  vector<int>::iterator ite1 = iv1.begin();     // (指向 7)
  vector<int>::iterator ite2 = ite1;
  advance(ite2, 3);                             // (指向 9)
```

```
    iter_swap(ite1, ite2);                    // 将两个迭代器所指元素对调
    cout << *ite1 << ' ' << *ite2 << endl;                  // 9 7
    for_each(iv1.begin(), iv1.end(), display<int>());       // 9 7 7 7 9

    // 以下取两值之大者
    cout << max(*ite1, *ite2) << endl;              // 9
    // 以下取两值之小者
    cout << min(*ite1, *ite2) << endl;              // 7

    // 千万不要错写成以下那样。那意思是，取两个迭代器（本身）之大者（或小者），
    // 然后再打印其所指之值。注意，迭代器本身的大小，对用户没有意义
    cout << *max(ite1, ite2) << endl;               // 7
    cout << *min(ite1, ite2) << endl;               // 9

    // 此刻状态，iv1: {9 7 7 7 9}, iv2: {0 1 2 3 4 5 6 7 8}
    swap(*iv1.begin(), *iv2.begin());  // 将两数值对调
    for_each(iv1.begin(), iv1.end(), display<int>());       // 0 7 7 7 9
    for_each(iv2.begin(), iv2.end(), display<int>());       // 9 1 2 3 4 5 6 7 8

    // 准备两个字符串数组
    string str1[] = { "Jamie", "JJHou", "Jason" };
    string str2[] = { "Jamie", "JJhou", "Jerry" };

    cout << lexicographical_compare(str1, str1+2, str2, str2+2);
    // 1  (str1 小于 str2)

    cout << lexicographical_compare(str1, str1+2, str2, str2+2,
                greater<string>());
    // 0  (str1 不大于 str2)
}
```

6.4.2 equal, fill, fill_n, iter_swap, lexicographical_compare, max, min, mismatch, swap

这一小节列出定义于 <stl_algobase.h> 头文件中的所有算法，copy(), copy_backward() 除外，因为这两个函数复杂许多，在效率方面有诸多考虑，我把它们安排在另外的小节。

equal

如果两个序列在 [first,last) 区间内相等，equal() 返回 true。如果第二序列的元素比较多，多出来的元素不予考虑。因此，如果我们希望保证两个序列

完全相等，必须先判断其元素个数是否相同：

```
if ( vec1.size() == vec2.size() &&
     equal( vec1.begin(), vec1.end(), vec2.begin() );
```

抑或使用容器所提供的 equality 操作符，例如 vec1==vec2。如果第二序列的元素比第一序列少，这个算法内部进行迭代行为时，会超越序列的尾端，造成不可预测的结果。第一版本缺省采用元素型别所提供的 equality 操作符来进行大小比较，第二版本允许我们指定仿函数 pred 作为比较依据。

```
template <class InputIterator1, class InputIterator2>
inline bool equal(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                  InputIterator2 first2) {
  // 以下，将序列一走过一遍。序列二亦步亦趋
  // 如果序列一的元素个数多过序列二的元素个数，就糟糕了
  for ( ; first1 != last1; ++first1, ++first2)
    if (*first1 != *first2)      // 只要对应元素不相等
      return false;              // 就结束并返回 false
  return true;                   // 至此，全部相等，返回 true
}

template <class InputIterator1, class InputIterator2,
          class BinaryPredicate>
inline bool equal(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                  InputIterator2 first2, BinaryPredicate binary_pred) {
  for ( ; first1 != last1; ++first1, ++first2)
    if (!binary_pred(*first1, *first2))
      return false;
  return true;
}
```

fill

将 [first, last) 内的所有元素改填新值。

```
template <class ForwardIterator, class T>
void fill(ForwardIterator first, ForwardIterator last, const T& value) {
  for ( ; first != last; ++first)    // 迭代走过整个区间
    *first = value;                  // 设定新值
}
```

fill_n

将 [first, last) 内的前 n 个元素改填新值，返回的迭代器指向被填入的最后一个元素的下一位置。

```
template <class OutputIterator, class Size, class T>
OutputIterator fill_n(OutputIterator first, Size n, const T& value) {
  for ( ; n > 0; --n, ++first)        // 经过n个元素
    *first = value;                   // 设定新值
  return first;
}
```

如果 n 超越了容器的现有大小，会造成什么结果？例如：

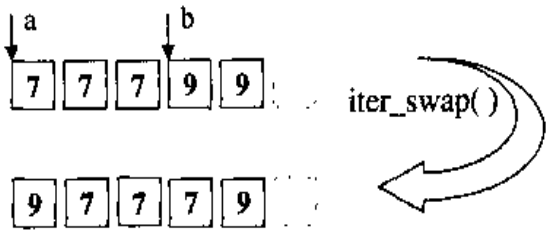
```
int ia[3]={0,1,2};
vector<int> iv(ia, ia+3);

fill_n(iv.begin(), 5, 7);
```

我们很容易就可以从 fill_n() 的源代码知道，由于每次迭代进行的是 assignment 操作，是一种覆写（overwrite）操作，所以一旦操作区间超越了容器大小，就会造成不可预期的结果。解决办法之一是，利用 inserter() 产生一个具有插入（insert）而非覆写（overwrite）能力的迭代器。inserter() 可产生一个用来修饰迭代器的配接器（iterator adapter），见 8.3.1 节。用法如下：

```
int ia[3]={0,1,2};
vector<int> iv(ia, ia+3);                    // 0 1 2
fill_n(inserter(iv, iv.begin()), 5, 7);      // 7 7 7 7 7 0 1 2
```

iter_swap

将两个 ForwardIterators 所指的对象对调。如下图：




```
template <class ForwardIterator1, class ForwardIterator2>
inline void iter_swap(ForwardIterator1 a, ForwardIterator2 b) {
  __iter_swap(a, b, value_type(a)); // 注意第三参数的型别!
}

template <class ForwardIterator1, class ForwardIterator2, class T>
inline void __iter_swap(ForwardIterator1 a, ForwardIterator2 b, T*) {
  T tmp = *a;
  *a = *b;
  *b = tmp;
```

```
}
```

iter_swap() 是“迭代器之 value type”派上用场的一个好例子。是的，该函数必须知道迭代器的 value type，才能够据此声明一个对象，用来暂时存放迭代器所指对象。为此，上述源代码特别设计了一个双层构造，第一层调用第二层，并多出一个额外的参数 value_type(a)。这么一来，第二层就有 value type 可以用了。乍见之下你可能会对这个额外参数在调用端和接受端的型别感到讶异，调用端是 value_type(a)，接受端却是 T*。只要找出 value_type() 的定义瞧瞧，就一点也不奇怪了：

```
// 以下定义于 <stl_iterator.h>
template <class Iterator>
inline typename iterator_traits<Iterator>::value_type*
value_type(const Iterator&) {
  return static_cast<typename iterator_traits<Iterator>::value_type*>(0);
}
```

这种双层构造在 SGI STL 源代码中十分普遍。其实这并非必要，直接这么写就行：

```
template <class ForwardIterator1, class ForwardIterator2>
inline void iter_swap(ForwardIterator1 a, ForwardIterator2 b) {
  typename iterator_traits<ForwardIterator1>::value_type tmp = *a;
  *a = *b;
  *b = tmp;
}
```

lexicographical_compare

以“字典排列方式”对两个序列 [first1,last1)和 [first2,last2)进行比较。比较操作针对两序列中的对应位置上的元素进行，并持续直到 (1) 某一组对应元素彼此不相等；(2) 同时到达 last1 和 last2（当两序列的大小相同）；(3) 到达 last1 或 last2（当两序列的大小不同）。

当这个函数在对应位置上发现第一组不相等的元素时，有下列几种可能：

- 如果第一序列的元素较小，返回 true。否则返回 false。
- 如果到达 last1 而尚未到达 last2，返回 true。
- 如果到达 last2 而尚未到达 last1，返回 false。
- 如果同时到达 last1 和 last2（换句话说所有元素都匹配），返回 false；

也就是说，第一序列以字典排列方式（lexicographically）而言不小于第二序列。

举个例子，给予以下两个序列：

```
string stra1[] = { "Jamie", "JJHou", "Jason" };
string stra2[] = { "Jamie", "JJhou", "Jerry" };
```

这个算法面对第一组元素对，判断其为相等，但面对第二组元素对，判断其为不等。就字符串而言，"JJHou" 小于 "JJhou"，因为 'H' 在字典排列次序上小于 'h'（注意，并非“大写”字母就比较“大”，不信的话看看你的字典。事实上大写字母的 ASCII 码比小写字母的 ASCII 码小）。于是这个算法在第二组“元素对”停了下来，不再比较第三组“元素对”。比较结果是 true。

第二版本允许你指定一个仿函数 comp 作为比较操作之用，取代元素型别所提供的 less-than（小于）操作符。

```
template <class InputIterator1, class InputIterator2>
bool lexicographical_compare(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                             InputIterator2 first2, InputIterator2 last2) {
  // 以下，任何一个序列到达尾端，就结束。否则两序列就相应元素一一进行比对
  for ( ; first1 != last1 && first2 != last2; ++first1, ++first2) {
    if (*first1 < *first2) // 第一序列元素值小于第二序列的相应元素值
      return true;
    if (*first2 < *first1) // 第二序列元素值小于第一序列的相应元素值
      return false;
    // 如果不符合以上两条件，表示两值相等，那就进行下一组相应元素值的比对
  }
  // 进行到这里，如果第一序列到达尾端而第二序列尚有余额，那么第一序列小于第二序列
  return first1 == last1 && first2 != last2;
}

template <class InputIterator1, class InputIterator2, class Compare>
bool lexicographical_compare(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                             InputIterator2 first2, InputIterator2 last2,
                             Compare comp) {
  for ( ; first1 != last1 && first2 != last2; ++first1, ++first2) {
    if (comp(*first1, *first2))
      return true;
    if (comp(*first2, *first1))
      return false;
  }
  return first1 == last1 && first2 != last2;
}
```

为了增进效率，SGI 还设计了一个特化版本，用于原生指针 const unsigned char*：

```
inline bool
lexicographical_compare(const unsigned char* first1,
                        const unsigned char* last1,
                        const unsigned char* first2,
                        const unsigned char* last2)
{
  const size_t len1 = last1 - first1;     // 第一序列长度
  const size_t len2 = last2 - first2;     // 第二序列长度
  // 先比较相同长度的一段。memcmp() 速度极快
  const int result = memcmp(first1, first2, min(len1, len2));
  // 如果不相上下，则长度较长者被视为比较大
  return result != 0 ? result < 0 : len1 < len2;
}
```

其中 memcmp() 是 C 标准函数，正是以 unsigned char 的方式来比较两序列中一一对应的每一个 bytes。除了这个版本，SGI 还提供另一个特化版本，用于原生指针 const char*，形式同上，我就不列出其源代码了。

max

取两个对象中的较大值。有两个版本，版本一使用对象型别 T 所提供的 greater-than 操作符来判断大小，版本二使用仿函数 comp 来判断大小。

```
template <class T>
inline const T& max(const T& a, const T& b) {
  return  a < b ? b : a;
}

template <class T, class Compare>
inline const T& max(const T& a, const T& b, Compare comp) {
  return comp(a, b) ? b : a;    // 由 comp 决定 "大小比较" 标准
}
```

min

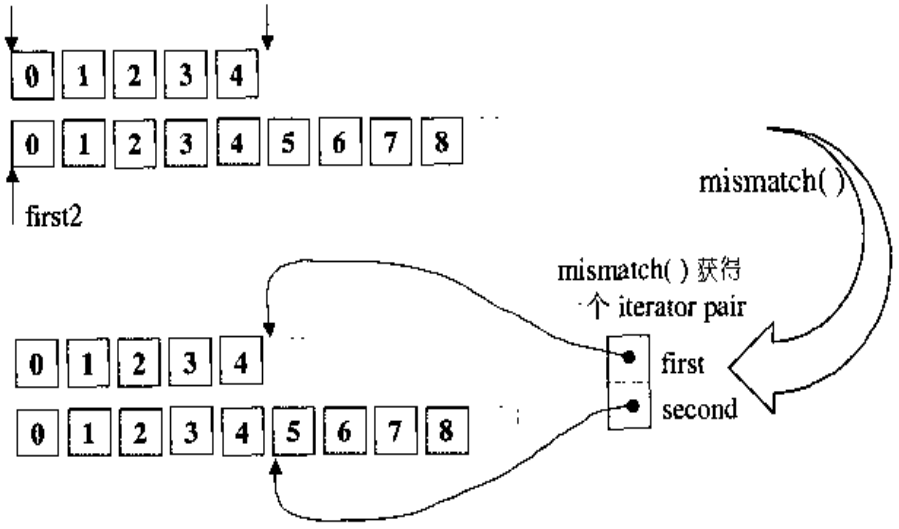
取两个对象中的较小值。有两个版本，版本一使用对象型别 T 所提供的 less-than 操作符来判断大小，版本二使用仿函数 comp 来判断大小。

```
template <class T>
inline const T& min(const T& a, const T& b) {
  return b < a ? b : a;
}
```

```
template <class T, class Compare>
inline const T& min(const T& a, const T& b, Compare comp) {
  return comp(b, a) ? b : a;    // 由 comp 决定 "大小比较" 标准
}
```

mismatch

用来平行比较两个序列，指出两者之间的第一个不匹配点。返回一对迭代器[6]，分别指向两序列中的不匹配点，如下图。如果两序列的所有对应元素都匹配，返回的便是两序列各自的 last 迭代器。缺省情况下是以 equality 操作符来比较元素；但第二版本允许用户指定比较操作。如果第二序列的元素个数比第一序列多，多出来的元素忽略不计。如果第二序列的元素个数比第一序列少，会发生未可预期的行为。




```
template <class InputIterator1, class InputIterator2>
pair<InputIterator1, InputIterator2> mismatch(
                          InputIterator1 first1,
                          InputIterator1 last1,
                          InputIterator2 first2) {
  // 以下，如果序列一走完，就结束
  // 以下，如果序列一和序列二的对应元素相等，就结束
  // 显然，序列一的元素个数必须多过序列二的元素个数，否则结果无可预期
  while (first1 != last1 && *first1 == *first2) {
    ++first1;
    ++first2;
```

[6] 任何一"对"东西，都可以用 pair 来表达。pair 是 *C++ Standard* 规范的一个 class template。

```
  }
  return pair<InputIterator1, InputIterator2>(first1, first2);
}

template <class InputIterator1, class InputIterator2,
          class BinaryPredicate>
pair<InputIterator1, InputIterator2> mismatch(
                            InputIterator1 first1,
                            InputIterator1 last1,
                            InputIterator2 first2,
                            BinaryPredicate binary_pred) {
  while (first1 != last1 && binary_pred(*first1, *first2)) {
    ++first1;
    ++first2;
  }
  return pair<InputIterator1, InputIterator2>(first1, first2);
}
```

swap

该函数用来交换（对调）两个对象的内容。

```
template <class T>
inline void swap(T& a, T& b) {
  T tmp = a;
  a = b;
  b = tmp;
}
```

6.4.3 copy——强化效率无所不用其极

不论是对客端程序或对 STL 内部而言，copy() 都是一个常常被调用的函数。由于 copy 进行的是复制操作，而复制操作不外乎运用 assignment operator 或 copy constructor（copy 算法用的是前者），但是某些元素型别拥有的是 trivial assignment operator，因此，如果能够使用内存直接复制行为（例如 C 标准函数 memmove 或 memcpy），便能够节省大量时间。为此，SGI STL 的 copy 算法用尽各种办法，包括函数重载（function overloading）、型别特性（type traits）、偏特化（partial specialization）等编程技巧，无所不用其极地加强效率。图 6-2 表示整个 copy() 操作的脉络。配合稍后出现的源代码，可收一目了然之效。

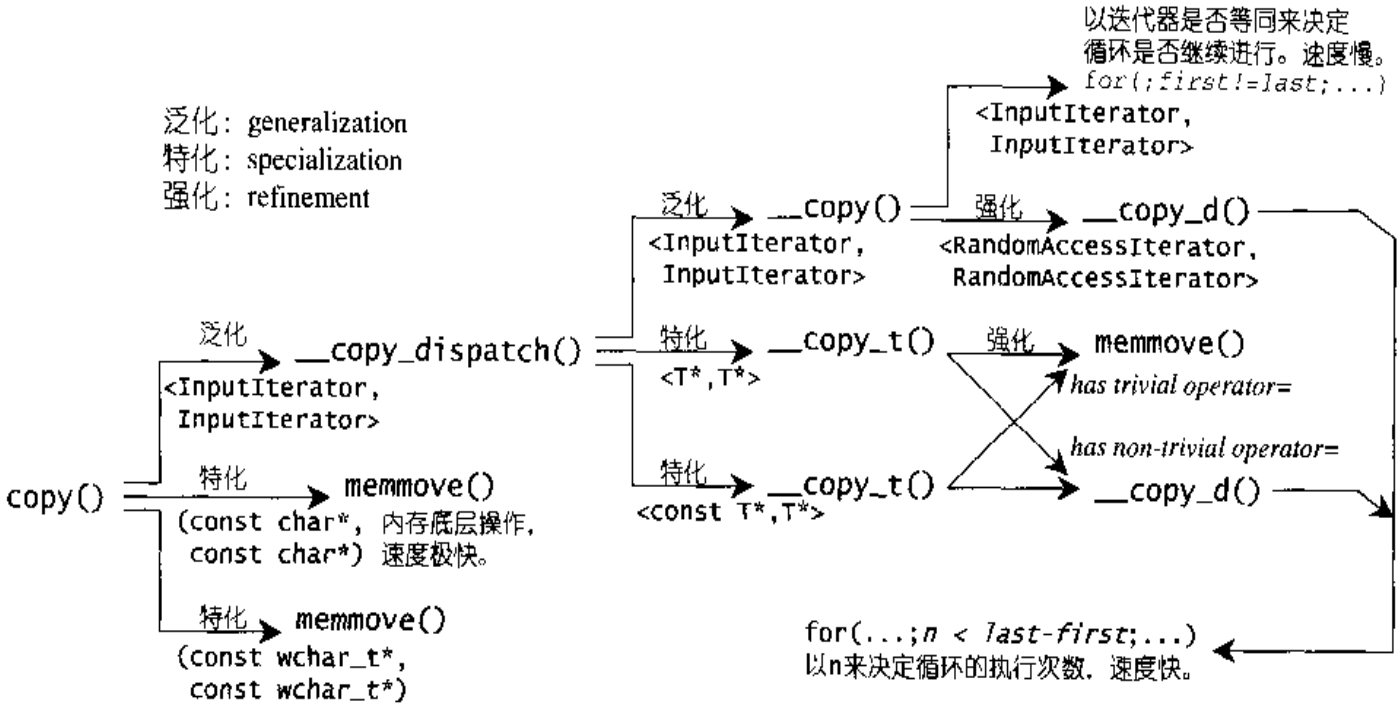


图 **6-2** SGI STL 的 copy 算法的完整脉络

copy 算法可将输入区间 [first,last) 内的元素复制到输出区间 [result, result+(last-first)) 内。也就是说，它会执行赋值操作 *result = *first, *(result+1) = *(first+1)，…依此类推。返回一个迭代器：result+(last-first)。copy 对其 template 参数所要求的条件非常宽松，其输入区间只需由 InputIterators 构成即可，输出区间只需由 OutputIterator 构成即可。这意味着你可以使用 copy 算法，将任何容器的任何一段区间的内容，复制到任何容器的任何一段区间上，如图 6-3 所示。

对于每个从 0 到 last-first（不含）的整数 n，copy 执行赋值操作 *(result+n) = *(first+n)。赋值操作是向前（亦即累加 n）推进的[7]。

[7] 根据 [Austern98] 的说法，如果输入区间和输出区间重叠，赋值顺序需要多加讨论。当 result 位于 [first,last) 之内时，也就是说，如果输出区间的起头与输入区间重叠，我们便不能使用 copy。但如果输出区间的尾端与输入区间重叠，就可以使用 copy。copy_backward 的限制恰恰相反。如果两个区间完全不重叠，当然毫无疑问两个算法都可以用。如果 result 是个 ostream_iterator（8.3.3 节）或其它某种“语意视赋值顺序而定”的迭代器，那么赋值顺序一样会成为一个需要讨论的问题。

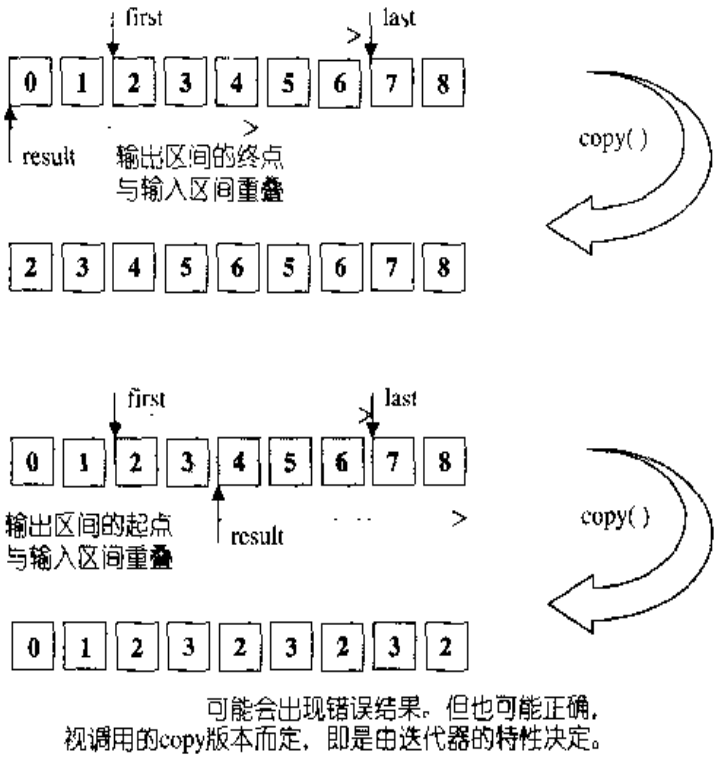


图 **6-3** copy 算法，需特别注意区间重叠的情况

如果输入区间和输出区间完全没有重叠，当然毫无问题，否则便需特别注意。为什么图 6-3 第二种情况（可能）会产生错误？从稍后即将显示的源代码可知，copy 算法是一一进行元素的赋值操作，如果输出区间的起点位于输入区间内，copy 算法便（可能）会在输入区间的（某些）元素尚未被复制之前，就覆盖其值，导致错误结果。在这里我一再使用“可能”这个字眼，是因为，如果 copy 算法根据其所接收的迭代器的特性决定调用 memmove() 来执行任务，就不会造成上述错误，因为 memmove() 会先将整个输入区间的内容复制下来，没有被覆盖的危险。

下面是对图 6-3 的测试。

```
// file : 6copy-overlap.cpp
#include <iostream>
#include <algorithm>
#include <deque>       // deque 拥有 RandomAccessIterator
using namespace std;

template <class T>
struct display {
  void operator()(const T& x)
```

```
    { cout << x << ' '; }
};

int main()
{
  {
  int ia[]={0,1,2,3,4,5,6,7,8};

  // 以下，输出区间的终点与输入区间重叠，没问题
  copy(ia+2, ia+7, ia);
  for_each(ia, ia+9, display<int>());   // 2 3 4 5 6 5 6 7 8
  cout << endl;
  }
  {
  int ia[]={0,1,2,3,4,5,6,7,8};

  // 以下，输出区间的起点与输入区间重叠，可能会有问题
  copy(ia+2, ia+7, ia+4);
  for_each(ia, ia+9, display<int>());   // 0 1 2 3 2 3 4 5 6
  cout << endl;
  // 本例结果正确，因为调用的 copy 算法使用 memmove() 执行实际复制操作
  }
  {
  int ia[]={0,1,2,3,4,5,6,7,8};
  deque<int> id(ia, ia+9);

  deque<int>::iterator first = id.begin();
  deque<int>::iterator last  = id.end();
  ++++first;                    // advance(first, 2);
  cout << *first << endl;       // 2
  ----last;                     // advance(last, -2);
  cout << *last << endl;        // 7

  deque<int>::iterator result = id.begin();
  cout << *result << endl;      // 0

  // 以下，输出区间的终点与输入区间重叠，没问题
  copy(first, last, result);
  for_each(id.begin(), id.end(), display<int>());   // 2 3 4 5 6 5 6 7 8
  cout << endl;
  }
  {
  int ia[]={0,1,2,3,4,5,6,7,8};
  deque<int> id(ia, ia+9);

  deque<int>::iterator first = id.begin();
  deque<int>::iterator last  = id.end();
  ++++first;                    // advance(first, 2);
  cout << *first << endl;       // 2
```

```
    ----last;                       // advance(last, -2);
    cout << *last << endl;          // 7

    deque<int>::iterator result = id.begin();
    advance(result, 4);
    cout << *result << endl;        // 4

    // 以下，输出区间的起点与输入区间重叠，可能会有问题
    copy(first, last, result);
    for_each(id.begin(), id.end(), display<int>());   // 0 1 2 3 2 3 2 3 2
    cout << endl;
    // 本例结果错误，因为调用的 copy 算法不再使用 memmove() 执行实际复制操作
    }
}
```

请注意，如果你以 vector 取代上述的 deque 进行测试，复制结果将是正确的，因为 vector 迭代器其实是个原生指针（native pointer），见 4.2.3 节，导致调用的 copy 算法以 memmove() 执行实际复制操作。

copy 更改的是 [result,result+(last-first)) 中的迭代器所指对象，而非更改迭代器本身。它会为输出区间内的元素赋予新值，而不是产生新的元素。它不能改变输出区间的迭代器个数。换句话说，copy 不能直接用来将元素插入空容器中。

如果你想要将元素插入（而非赋值）序列之内，要么明白使用序列容器的 insert 成员函数，要么使用 copy 算法并搭配 insert_iterator（8.3.1 节）。

现在我们来看看 copy 算法庞大的实现细节。下面是冰山一角，也是唯一的对外接口：

```
// 完全泛化版本
template <class InputIterator, class OutputIterator>
inline OutputIterator copy(InputIterator first, InputIterator last,
                           OutputIterator result)
{
  return __copy_dispatch<InputIterator,OutputIterator>()
             (first, last, result);
}
```

下面两个是多载函数，针对原生指针（可视为一种特殊的迭代器）const char* 和 const wchar_t*，进行内存直接拷贝操作：

```
// 特殊版本(1)。重载形式
inline char* copy(const char* first, const char* last, char* result) {
  memmove(result, first, last - first);
  return result + (last - first);
}

// 特殊版本(2)。重载形式
inline wchar_t* copy(const wchar_t* first, const wchar_t* last,
                     wchar_t* result) {
  memmove(result, first, sizeof(wchar_t) * (last - first));
  return result + (last - first);
}
```

copy() 函数的泛化版本中调用了一个 __copy_dispatch() 函数，此函数有一个完全泛化版本和两个偏特化版本：

```
// 完全泛化版本
template <class InputIterator, class OutputIterator>
struct __copy_dispatch
{
  OutputIterator operator()(InputIterator first, InputIterator last,
                            OutputIterator result) {
    return __copy(first, last, result, iterator_category(first));
  }
};

// 偏特化版本 (1)，两个参数都是 T* 指针形式
template <class T>
struct __copy_dispatch<T*, T*>
{
  T* operator()(T* first, T* last, T* result) {
    typedef typename __type_traits<T>::has_trivial_assignment_operator t;
    return __copy_t(first, last, result, t());
  }
};

// 偏特化版本 (2)，第一个参数为 const T* 指针形式，第二参数为 T* 指针形式
template <class T>
struct __copy_dispatch<const T*, T*>
{
  T* operator()(const T* first, const T* last, T* result) {
    typedef typename __type_traits<T>::has_trivial_assignment_operator t;
    return __copy_t(first, last, result, t());
  }
};
```

这里必须兵分两路来探讨。首先，__copy_dispatch() 的完全泛化版根据迭

代器种类的不同，调用了不同的 __copy()，为的是不同种类的迭代器所使用的循环条件不同，有快慢之别。

```
// InputIterator 版本
template <class InputIterator, class OutputIterator>
inline OutputIterator __copy(InputIterator first, InputIterator last,
                             OutputIterator result, input_iterator_tag)
{
  // 以迭代器等同与否，决定循环是否继续。速度慢
  for ( ; first != last; ++result, ++first)
    *result = *first;       // assignment operator
  return result;
}

// RandomAccessIterator 版本
template <class RandomAccessIterator, class OutputIterator>
inline OutputIterator
__copy(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last,
       OutputIterator result, random_access_iterator_tag)
{
  // 又划分出一个函数，为的是其它地方也可能用到
  return __copy_d(first, last, result, distance_type(first));
}

template <class RandomAccessIterator, class OutputIterator, class Distance>
inline OutputIterator
__copy_d(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last,
         OutputIterator result, Distance*)
{
  // 以 n 决定循环的执行次数。速度快
  for (Distance n = last - first; n > 0; --n, ++result, ++first)
    *result = *first;       // assignment operator
  return result;
}
```

这是 __copy_dispatch() 完全泛化版的故事。现在回到前述兵分两路之处，看看它的两个偏特化版本。这两个偏特化版是在“参数为原生指针形式”的前提下，希望进一步探测“指针所指之物是否具有 *trivial* assignment operator（平凡赋值操作符）”。这一点对效率的影响不小，因为这里的复制操作是由 assignment 操作符负责，如果指针所指对象拥有 *non-trivial* assignment operator，复制操作就一定得通过它来进行。但如果指针所指对象拥有的是 *trivial* assignment operator，复制操作可以不通过它，直接以最快速的内存对拷方式（memmove()）完成。C++ 语言本身无法让你侦测某个对象的型别是否具有 *trivial* assignment operator，但是 SGI

STL 采用所谓的 __type_traits<> 编程技巧来弥补(见 3.7 节)。注意,通过“增加一层间接性”的手法,我们便得以区分两个不同的 __copy_t():

```
// 以下版本适用于 “指针所指之对象具备 trivial assignment operator”
template <class T>
inline T* __copy_t(const T* first, const T* last, T* result,
                   __true_type) {
  memmove(result, first, sizeof(T) * (last - first));
  return result + (last - first);
}

// 以下版本适用于 “指针所指之对象具备 non-trivial assignment operator”
template <class T>
inline T* __copy_t(const T* first, const T* last, T* result,
                   __false_type) {
  // 原生指针毕竟是一种 RandomAccessIterator,所以交给 __copy_d() 完成
  return __copy_d(first, last, result, (ptrdiff_t*) 0);
}
```

以上就是 copy() 的故事。一个无所不用其极地强化执行效率的故事。

现在我再来做个测试,传给 copy() 各种不同形式的迭代器,看看它会调用哪个(或哪些)函数。首先,这得修改 SGI STL 源代码,才能在函数被调用时输出函数名称。修改源代码是件冒险的工作,除非你胆子够大。啊,艺高人胆大,对于已经摸熟 SGI STL 源代码的我们,修改它不是不可能的任务。但务必先做万全准备,将<stl_algobase.h> 备份起来,以便日后回复原状。接下来,在上述每一个 copy 相关函数中输出一个字符串,代表函数名称。下面是测试程序:

```
// file : 6copy-test.cpp
//  读者请注意,该程序在你的平台上不会有相同的执行效果,除非你也修改了你的 STL
#include <iostream>   // for cout
#include <algorithm>  // for copy()
#include <vector>
#include <deque>
#include <list>
#include "6string.h"  // class String, by J.J.Hou
using namespace std;

class C
{
public:
  C() : _data(3) { }
  // there is a trivial assignment operator
```

```
private:
  int _data;
};

int main()
{
  // 测试 1
  const char ccs[5] = {'a','b','c','d','e'};  // 数据来源
  char ccd[5];                                // 数据去处
  copy(ccs, ccs+5, ccd);
  // 调用的版本是 copy(const char*)

  // 测试 2
  const wchar_t cwcs[5] = {'a','b','c','d','e'};   // 数据来源
  wchar_t cwcd[5];                                 // 数据去处
  copy(cwcs, cwcs+5, cwcd);
  // 调用的版本是 copy(const wchar_t*)

  // 测试 3
  int ia[5] = {0,1,2,3,4};
  copy(ia, ia+5, ia);    // 注意，数据来源和数据去处相同、这是允许的
  // 调用的版本是
  // copy()
  //   __copy_dispatch(T*, T*)
  //     __copy_t(__true_type)

  // 测试 4
  // 注：list 迭代器被归类为 InputIterator
  list<int> ilists(ia, ia+5);   // 数据来源
  list<int> ilistd(5);          // 数据去处
  copy(ilists.begin(), ilists.end(), ilistd.begin());
  // 调用的版本是
  // copy()
  //   __copy_dispatch()
  //     __copy(input_iterator)

  // 测试 5
  // 注：vector 迭代器被归类为原生指针 (native pointer)
  vector<int> ivecs(ia, ia+5);       // 数据来源
  // 以上会产生输出信息，原因见稍后正文说明。此处对输出信息暂略不显
  vector<int> ivecd(5);              // 数据去处
  copy(ivecs.begin(), ivecs.end(), ivecd.begin());
  // copy()
  //   __copy_dispatch(T*, T*)
  //     __copy_t(__true_type)
  //
  // 以上是合理的吗？难道不该是这样吗？
  // copy()
  //   __copy_dispatch()
```

```
//     __copy(random_access iterator)
//       __copy_d()
// 见稍后正文探讨

// 测试 6
// class C 具备 trivial operator=
C c[5];
vector<C> Cvs(c, c+5);          // 数据来源
// 以上会产生输出信息，原因见稍后正文说明。此处对输出信息暂略不显
vector<C> Cvd(5);               // 数据去处
copy(Cvs.begin(), Cvs.end(), Cvd.begin());
// copy()
//   __copy_dispatch(T*, T*)    这合理吗？不是 random_access_iterator 吗？
//     __copy_t(__false_type)   这合理吗？不该是 __true_type 吗？
//       __copy_d()

// 测试 7
// 注：deque 迭代器被归类为 random access iterator
deque<C> Cds(c, c+5);           // 数据来源
deque<C> Cdd(5);                // 数据去处
copy(Cds.begin(), Cds.end(), Cdd.begin());
// copy()
//   __copy_dispatch()
//     __copy(random_access_iterator)
//       __copy_d()

// 测试 8
// 注：class String 定义于 "6string.h" 内，拥有 non-trivial operator=
// 其源代码并未列于书中
vector<String> strvs(5);        // 数据来源
vector<String> strvd(5);        // 数据去处
strvs[0] = "jjhou";
strvs[1] = "grace";
strvs[2] = "david";
strvs[3] = "jason";
strvs[4] = "jerry";
copy(strvs.begin(), strvs.end(), strvd.begin());
// copy()
//   __copy_dispatch(T*, T*)      这合理吗？不是 random_access_iterator 吗？
//     __copy_t(__false_type)     合理，String 确实是 __false_type
//       __copy_d()

// 测试 9
// 注：deque 迭代器被归类为 random access iterator
deque<String> strds(5);         // 数据来源
deque<String> strdd(5);         // 数据去处
strds.push_back("jjhou");
strds.push_back("grace");
strds.push_back("david");
```

```
  strds.push_back("jason");
  strds.push_back("jerry");
  copy(strds.begin(), strds.end(), strdd.begin());
  // copy()
  //   __copy_dispatch()
  //     __copy(random_access_iterator)
  //       __copy_d()
}
```

以上的执行结果想必引起你数个疑惑：

- 测试 5 一开始的 constructor 为什么会制造输出信息？
- 测试 6 一开始的 constructor 为什么也会制造输出信息？
- 测试 5, 6, 8 完成 copy() 操作后，为什么不是走 random access iterator 的方向，而是走 T* 的方向？
- 测试 6 的元素型别具备 *trivial* operator=，为何却走 __false_type 的方向？

前两个问题的解答是一样的：它们所调用的 vector ctor 调用了 copy()：

```
// 测试 5
vector<int> ivecs(ia, ia+5);
// 以下是输出信息
// copy()
//   __copy_dispatch(T*, T*)
//     __copy_t(__true_type)
//
// 说明：构造一个 vector 却产生上述三行输出。追踪 vector ctor，我们发现：
// vector<T>::vector(first, last)
// -> vector<T>::range_initialize(first, last, forward_iterator_tag),
//  -> vector<T>::allocate_and_copy(n, first, last)
//   -> ::uninitialized_copy(first, last, result)
//    -> ::__uninitialized_copy(first, last, result, value_type(result))
//     -> ::__uninitialized_copy_aux(first, last, result, is_POD())
//      -> ::copy(first, last, result)
```

第三个问题的解答是：我们以为 vector 的迭代器是 random access iterator，没想到它事实上是个 T*。这虽然令人错愕，但如果你对 4.2.3 节还有点印象，至少不会错愕到跌下马来。4.2.3 节的 vector 定义如下：

```
template <class T, class Alloc = alloc>  // 缺省使用 alloc 为配置器
class vector {
public:
  typedef T value_type;
  typedef value_type* iterator;      // vector 的迭代器是原生指针
  ...
```

```
};
```

是的，vector 迭代器其实是原生指针。这就怪不得 copy() 一旦面对 vector 迭代器，就往 T* 的方向走去了。

最后一个问题是，既然 class C 具备了 *trivial* operator=，为什么它被判断为一个 __false_type 呢？这是因为编译器之中，有能力验证“用户自定义型别”之型别特性者极少（Silicon Graphics N32 或 N64 编译器就可以），<type_traits.h> 内只针对 C++ 的标量型别（scalar types）做了型别特性记录（见 3.7 节）。因此程序中所有的用户自定义型别，都被编译器视为拥有 *non-trivial* ctor/dtor/operator=。如果我们确知某个 class 具备的是 *trivial* ctor/dtor/operator=，例如本例的 class C，我们就得自己动手为它做特性设定，才能保证编译器知道它的身份。

要自己动手为某个型别做特性设定，可借用 <type_traits.h>（见 3.7 节）中的 __type_traits<T>，针对 class C 做一个特化版本如下：

```
// 编译器无力判别 class C 的特性 ("traits")，我们自己来设定。
// 当编译器支持 partial specialization，__STL_TEMPLATE_NULL 被定义为
// template<>，见 <stl_config.h>
__STL_TEMPLATE_NULL struct __type_traits<C> {
   typedef __false_type   has_trivial_default_constructor;
   typedef __true_type    has_trivial_copy_constructor;
   typedef __true_type    has_trivial_assignment_operator;
   typedef __true_type    has_trivial_destructor;
   typedef __false_type   is_POD_type;
   // 以上每一个定义都必须完成。
};
```

加上这样的设定之后，测试 6 的 copy() 操作的输出信息为：

```
// copy()
//   __copy_dispatch(T*, T*)  合理，因为 vector 的迭代器是原生指针
//     __copy_t(__true_type)  编译器现在知道了，class C 是 __true_type
```

6.4.4 copy_backward

```
template <class BidirectionalIterator1, class BidirectionalIterator2>
inline BidirectionalIterator2 copy_backward(BidirectionalIterator1 first,
                                            BidirectionalIterator1 last,
                                            BidirectionalIterator2 result);
```

这个算法的考虑以及实现上的技巧与 copy() 十分类似，源代码我就不列出了。其操作示意于图 6-4，将[first,last) 区间内的每一个元素，以逆行的方向复制到以 result-1 为起点，方向亦为逆行的区间上。换句话说，copy_backward 算法会执行赋值操作 *(result-1) = *(last-1), *(result-2) = *(last-2),…依此类推。返回一个迭代器：result-(last-first)。copy_backward 所接受的迭代器必须是 BidirectionalIterators，才能够“倒行逆施”。你可以使用 copy_backward 算法，将任何容器的任何一段区间的内容，复制到任何容器的任何一段区间上。如果输入区间和输出区间完全没有重叠，当然毫无问题，否则便需特别注意，如图 6-4。

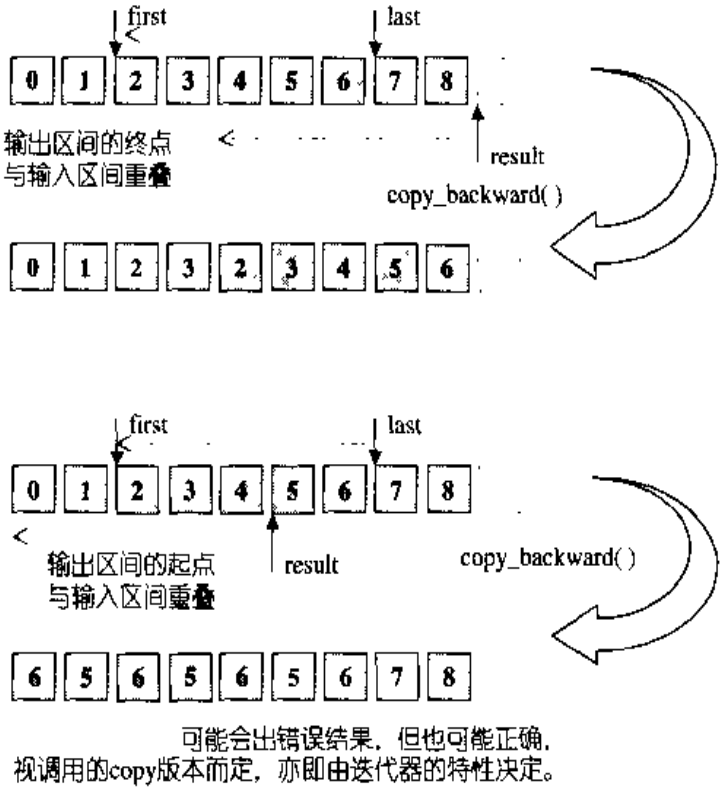


图 **6-4** copy_backward 算法的操作示意图

下面是对图 6-4 的测试。

```
// file : 6copy-backward-overlap.cpp
#include <iostream>
#include <algorithm>
#include <deque>      // deque 拥有 RandomAccessIterator
using namespace std;

template <class T>
struct display {
  void operator()(const T& x)
    { cout << x << ' '; }
};

int main()
{
  {
  int ia[]={0,1,2,3,4,5,6,7,8};

  // 以下，输出区间的终点与输入区间重叠，没问题
  copy_backward(ia+2, ia+7, ia+9);
  for_each(ia, ia+9, display<int>());   // 0 1 2 3 2 3 4 5 6
  cout << endl;
  }
  {
  int ia[]={0,1,2,3,4,5,6,7,8};

  // 以下，输出区间的起点与输入区间重叠，可能会有问题
  copy_backward(ia+2, ia+7, ia+5);
  for_each(ia, ia+9, display<int>());   // 2 3 4 5 6 5 6 7 8
  cout << endl;
  // 本例结果正确，因为调用的 copy 算法使用 memmove() 执行实际复制操作
  }
  {
  int ia[]={0,1,2,3,4,5,6,7,8};
  deque<int> id(ia, ia+9);

  deque<int>::iterator first = id.begin();
  deque<int>::iterator last  = id.end();
  ++++first;                    // advance(first, 2);
  cout << *first << endl;       // 2
  ----last;                     // advance(last, -2);
  cout << *last << endl;        // 7

  deque<int>::iterator result = id.end();

  // 以下，输出区间的终点与输入区间重叠，没问题
  copy_backward(first, last, result);
  for_each(id.begin(), id.end(), display<int>());   // 0 1 2 3 2 3 4 5 6
```

```
    cout << endl;
    }
    {
    int ia[]={0,1,2,3,4,5,6,7,8};
    deque<int> id(ia, ia+9);

    deque<int>::iterator first = id.begin();
    deque<int>::iterator last  = id.end();
    ++++first;                      // advance(first, 2);
    cout << *first << endl;         // 2
    ----last;                       // advance(last, -2);
    cout << *last << endl;          // 7

    deque<int>::iterator result = id.begin();
    advance(result, 5);
    cout << *result << endl;        // 5

    // 以下，输出区间的起点与输入区间重叠，可能会有问题
    copy_backward(first, last, result);
    for_each(id.begin(), id.end(), display<int>());   //  6 5 6 5 6 5 6 7 8
    cout << endl;
    // 本例结果错误，因为调用的 copy 算法不再使用 memmove() 执行实际复制操作
    }
}
```

6.5 set 相关算法

STL 一共提供了四种与 set（集合）相关的算法，分别是并集（union）、交集（intersection）、差集（difference）、对称差集（symmetric difference）。

所谓 set，可细分为数学上的定义和 STL 的定义两种，数学上的 set 允许元素重复而未经排序，例如 {1,1,4,6,3}，STL 的定义（也就是 set 容器，见 5.3 节）则要求元素不得重复，并且经过排序，例如 {1,3,4,6}。本节的四个算法所接受的 set，必须是有序区间（*sorted range*），元素值得重复出现。换句话说，它们可以接受 STL 的 set / multiset 容器作为输入区间。

SGI STL 另外提供有 hash_set / hash_multiset 两种容器，以 hashtable 为底层机制（见 5.8 节、5.10 节），其内的元素并未呈现排序状态，所以虽然名称之中也有 set 字样，却不可以应用于本节的四个算法。

本节四个算法都至少有四个参数，分别表现两个 set 区间。以下所有说明都以

S1 代表第一区间 [first1,last1)，以 S2 代表第二区间 [first2,last2)。每一个 set 算法都提供两个版本（但稍后展示的源代码只列出第一版本），第二版本允许用户指定 “a < b” 的意义，因为这些算法判断两个元素是否相等的依据，完全靠 “小于” 运算。是的，知道何谓 “小于”，就可以推导出何谓 “等于”。

以下程序测试四个 set 相关算法。欲使用它们，必须包含 <algorithm>。

```
// file: 6set-algorithms.cpp
#include <set>          // multiset
#include <iostream>
#include <algorithm>
#include <iterator>   // ostream_iterator
using namespace std;

template <class T>
struct display {
  void operator()(const T& x)
    { cout << x << ' '; }
};

int main()
{
  int ia1[6] = {1, 3, 5, 7, 9, 11};
  int ia2[7] = {1, 1, 2, 3, 5, 8, 13};

  multiset<int> S1(ia1, ia1+6);
  multiset<int> S2(ia2, ia2+7);

  for_each(S1.begin(), S1.end(), display<int>());
  cout << endl;
  for_each(S2.begin(), S2.end(), display<int>());
  cout << endl;

  multiset<int>::iterator first1 = S1.begin();
  multiset<int>::iterator last1  = S1.end();
  multiset<int>::iterator first2 = S2.begin();
  multiset<int>::iterator last2  = S2.end();

  cout << "Union of S1 and S2: ";
  set_union(first1, last1, first2, last2,
            ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;

  first1 = S1.begin();
  first2 = S2.begin();
  cout << "Intersection of S1 and S2: ";
```

```
  set_intersection(first1, last1, first2, last2,
                   ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;

  first1 = S1.begin();
  first2 = S2.begin();
  cout << "Difference of S1 and S2 (S1-S2): ";
  set_difference(first1, last1, first2, last2,
                 ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;

  first1 = S1.begin();
  first2 = S2.begin();
  cout << "Symmetric difference of S1 and S2: ";
  set_symmetric_difference(first1, last1, first2, last2,
                           ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;

  first1 = S2.begin();
  first2 = S1.begin();
  last1 = S2.end();
  last2 = S1.end();
  cout << "Difference of S2 and S1 (S2-S1): ";
  set_difference(first1, last1, first2, last2,
                 ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;
}
```

执行结果如下：

```
1 3 5 7 9 11
1 1 2 3 5 8 13
Union of S1 and S2 (S1-S2): 1 1 2 3 5 7 8 9 11 13
Intersection of S1 and S2: 1 3 5
Difference of S1 and S2: 7 9 11
Symmetric difference of S1 and S2: 1 2 7 8 9 11 13
Difference of S2 and S1 (S2-S1): 1 2 8 13
```

请注意，当集合（set）允许重复元素的存在时，并集、交集、差集、对称差集的定义，都与直观定义有些微的不同。例如上述的并集结果，我们会直观以为是{1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 11, 13}，而上述的对称差集结果，我们会直观以为是{2, 7, 8, 9, 11, 13}，这都是未考虑重复元素的结果。以下各小节对此会有详细说明。

6.5.1 set_union

算法 set_union 可构造 S1、S2 之并集。也就是说，它能构造出集合 S1 ∪ S2，此集合内含 S1 或 S2 内的每一个元素。S1、S2 及其并集都是以排序区间表示。返回值为一个迭代器，指向输出区间的尾端。

由于 S1 和 S2 内的每个元素都不需唯一，因此，如果某个值在 S1 出现 n 次，在 S2 出现 m 次，那么该值在输出区间中会出现 max(m,n) 次，其中 n 个来自 S1，其余来自 S2。在 STL set 容器内，m ≤ 1 且 n ≤ 1。

set_union 是一种稳定（*stable*）操作，意思是输入区间内的每个元素的相对顺序都不会改变。set_union 有两个版本，差别在于如何定义某个元素小于另一个元素。第一版本使用 operator< 进行比较，第二版本采用仿函数 comp 进行比较。

```
// 并集，求存在于[first1,last1) 或存在于 [first2,last2) 的所有元素
// 注意，set 是一种 sorted range。这是以下算法的前提
// 版本一
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class OutputIterator>
OutputIterator set_union(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                         InputIterator2 first2, InputIterator2 last2,
                         OutputIterator result) {
  // 当两个区间都尚未到达尾端时，执行以下操作…
  while (first1 != last1 && first2 != last2) {
    // 在两区间内分别移动迭代器。首先将元素值较小者（假设为A区）记录于目标区，
    // 然后移动A区迭代器使之前进；同时间之另一个区迭代器不动。然后进行新一次
    // 的比大小、记录小值、迭代器移动…直到两区中有一区到达尾端。如果元素相等，
    // 取 S1 者记录于目标区，并同时移动两个迭代器
    if (*first1 < *first2) {
      *result = *first1;
      ++first1;
    }
    else if (*first2 < *first1) {
      *result = *first2;
      ++first2;
    }
    else { // *first2 == *first1
      *result = *first1;
      ++first1;
      ++first2;
    }
    ++result;
```

```
    }

    // 只要两区之中有一区到达尾端，就结束上述的 while 循环
    // 以下将尚未到达尾端的区间的所有剩余元素拷贝到目的端
    // 此刻的 [first1,last1)和[first2,last2)之中有一个是空白区间
    return copy(first2, last2, copy(first1, last1, result));
}
```

set_union 之进行逻辑已经在源代码注释中说明得十分清楚。图 6-5a 所示的是其一步一步的分析图解。

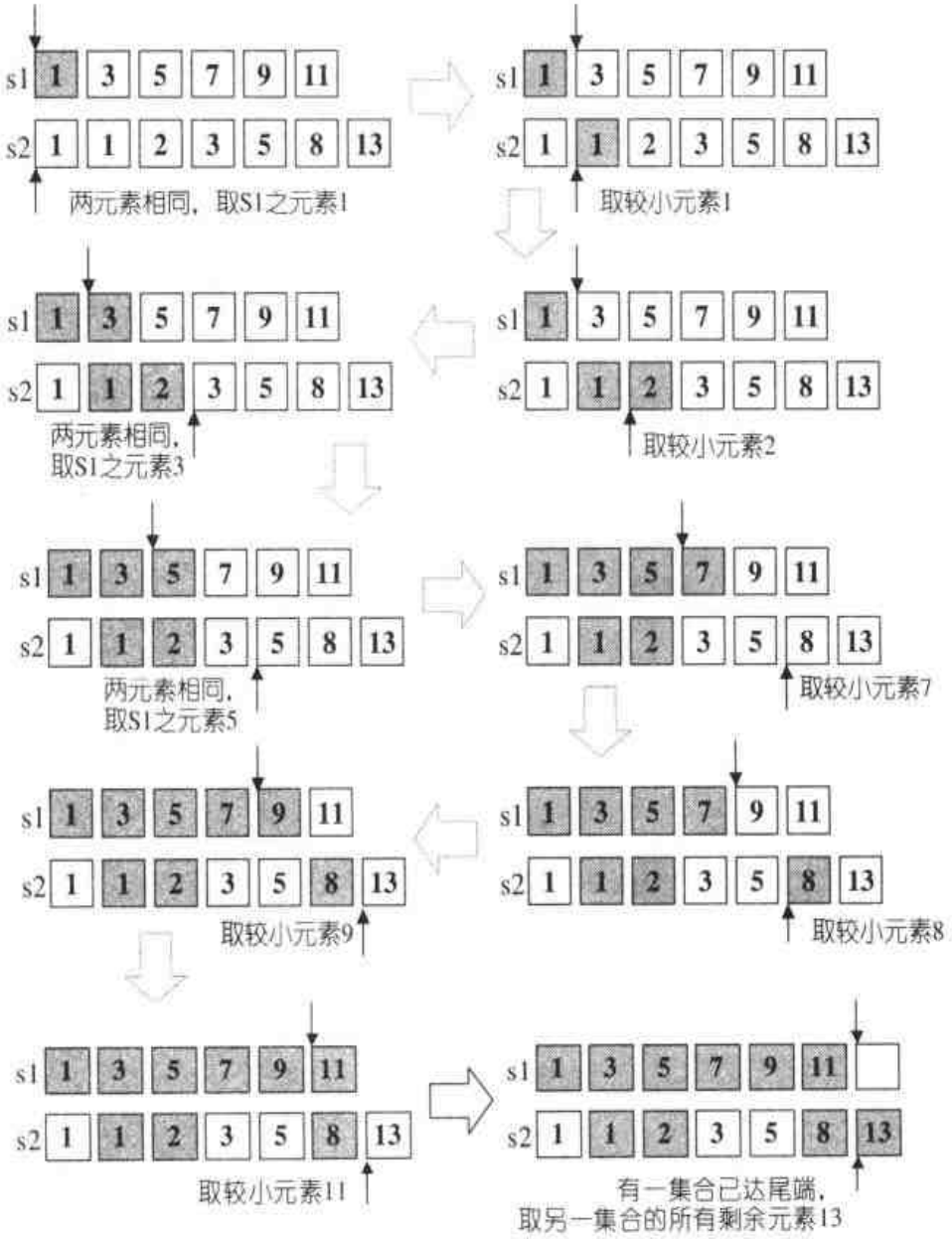


图 6-5a set_union 之步进分析

6.5.2 set_intersection

算法 set_intersection 可构造 S1、S2 之交集。也就是说，它能构造出集合 S1∩ S2，此集合内含同时出现于 S1 和 S2 内的每一个元素。S1、S2 及其交集都是以排序区间表示。返回值为一个迭代器，指向输出区间的尾端。

由于 S1 和 S2 内的每个元素都不需唯一，因此，如果某个值在 S1 出现 n 次，在 S2 出现 m 次，那么该值在输出区间中会出现 min(m,n) 次，并且全部来自 S1。在 STL set 容器内，m ≤ 1 且 n ≤ 1。

set_intersection 是一种稳定（*stable*）操作，意思是输出区间内的每个元素的相对顺序都和 S1 内的相对顺序相同。它有两个版本，差别在于如何定义某个元素小于另一个元素。第一版本使用 operator< 进行比较，第二版本采用仿函数 comp 进行比较。

```
// 交集，求存在于[first1,last1) 且存在于 [first2,last2) 的所有元素
// 注意，set 是一种 sorted range。这是以下算法的前提
// 版本一
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class OutputIterator>
OutputIterator set_intersection(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                                InputIterator2 first2, InputIterator2 last2,
                                OutputIterator result) {
  // 当两个区间都尚未到达尾端时，执行以下操作…
  while (first1 != last1 && first2 != last2)
    // 在两区间内分别移动迭代器，直到遇有元素值相同，暂停，将该值记录于目标区，
    // 再继续移动迭代器… 直到两区之中有一区到达尾端
    if (*first1 < *first2)
      ++first1;
    else if (*first2 < *first1)
      ++first2;
    else {    // *first2 == *first1
      *result = *first1;
      ++first1;
      ++first2;
      ++result;
    }
  return result;
}
```

set_intersection 之进行逻辑已经在源代码注释中说明得十分清楚。图6-5b所示的是其一步一步的分析图解。

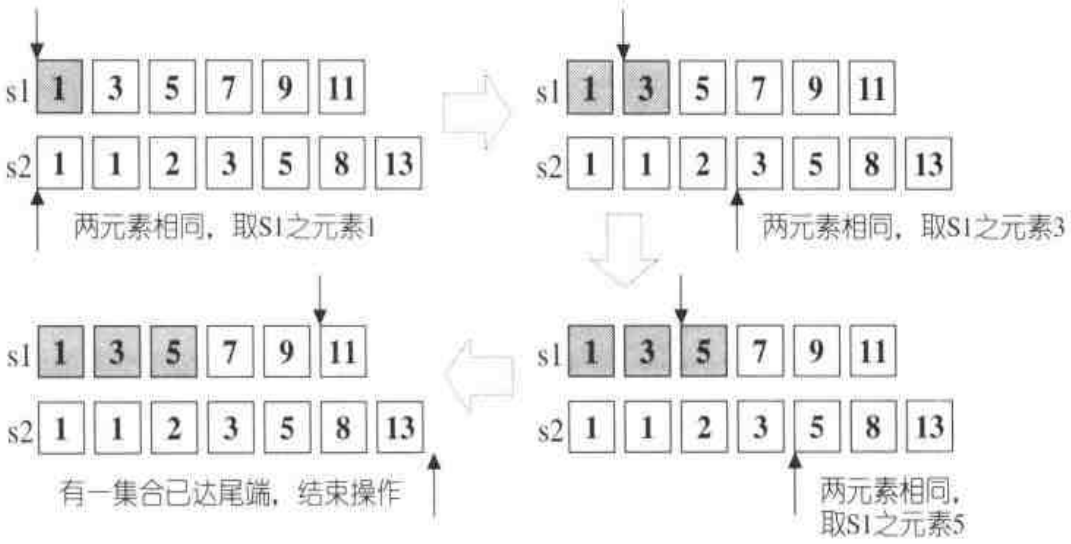


图 **6-5b** set_intersection 之步进分析

6.5.3 set_difference

算法 set_difference 可构造 S1、S2 之差集。也就是说，它能构造出集合 S1 - S2，此集合内含 “出现于 S1 但不出现于 S2” 的每一个元素。S1、S2 及其交集都是以排序区间表示。返回值为一个迭代器，指向输出区间的尾端。

由于 S1 和 S2 内的每个元素都不需唯一，因此如果某个值在 S1 出现 n 次，在 S2 出现 m 次，那么该值在输出区间中会出现 max(n-m,0) 次，并且全部来自 S1。在 STL set 容器内，m ≤ 1 且 n ≤ 1。

set_difference 是一种稳定（*stable*）操作，意思是输出区间内的每个元素的相对顺序都和 S1 内的相对顺序相同。它有两个版本，差别在于如何定义某个元素小于另一个元素。第一版本使用 operator< 进行比较，第二版本采用仿函数 comp 进行比较。

```
// 差集，求存在于[first1,last1) 且不存在于 [first2,last2) 的所有元素
// 注意，set 是一种 sorted range。这是以下算法的前提
// 版本一
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class OutputIterator>
OutputIterator set_difference(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                              InputIterator2 first2, InputIterator2 last2,
                              OutputIterator result) {
  // 当两个区间都尚未到达尾端时，执行以下操作…
  while (first1 != last1 && first2 != last2)
```

```
    // 在两区间内分别移动迭代器。当第一区间的元素等于第二区间的元素（表示此值
    // 同时存在于两区间），就让两区间同时前进；当第一区间的元素大于第二区间的元素，
    // 就让第二区间前进；有了这两种处理，就保证当第一区间的元素小于第二区间的
    // 元素时，第一区间的元素只存在于第一区间中，不存在于第二区间，于是将它
    // 记录于目标区
    if (*first1 < *first2) {
      *result = *first1;
      ++first1;
      ++result;
    }
    else if (*first2 < *first1)
      ++first2;
    else {    // *first2 == *first1
      ++first1;
      ++first2;
    }
  return copy(first1, last1, result);
}
```

set_difference 之进行逻辑已经在源代码注释中说明得十分清楚。图 6-5c 所示的是其一步一步的分析图解。

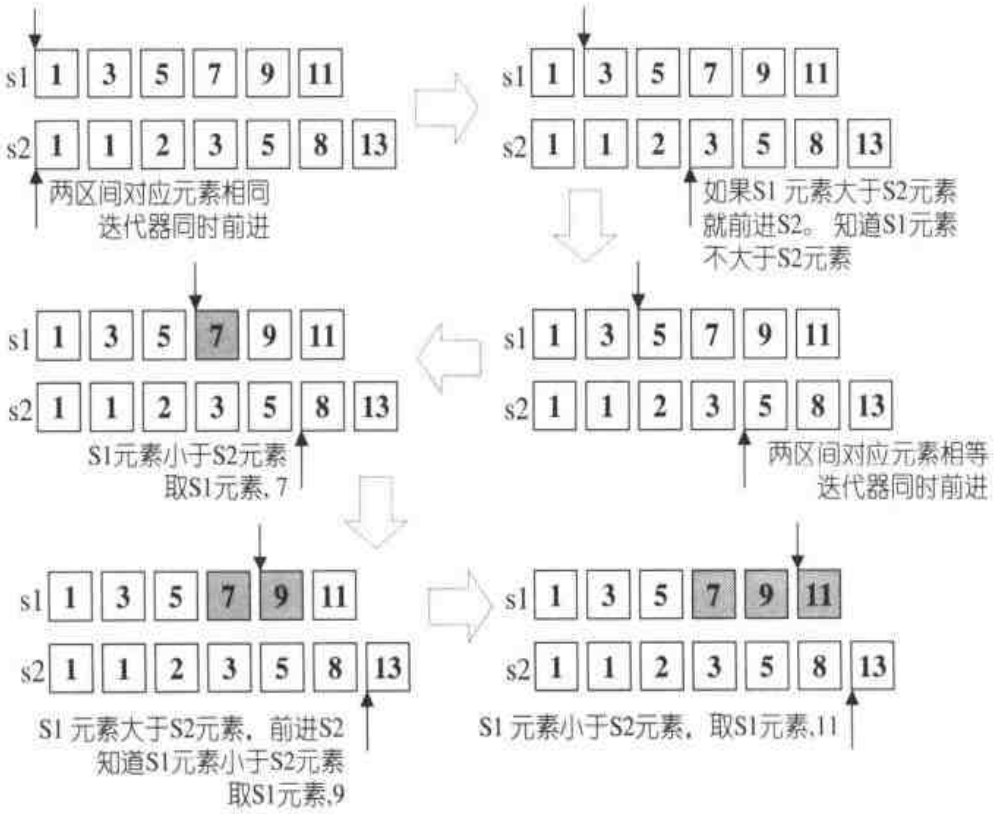


图 **6-5c** set_difference 之步进分析

6.5.4 set_symmetric_difference

算法 set symmetric_difference 可构造 S1、S2 之对称差集。也就是说，它能构造出集合 (S1-S2) ∪(S2-S1)，此集合内含 “出现于 S1 但不出现于 S2” 以及 “出现于 S2 但不出现于 S1” 的每一个元素。S1、S2 及其交集都是以排序区间表示。返回值为一个迭代器，指向输出区间的尾端。

由于 S1 和 S2 内的每个元素都不需唯一，因此如果某个值在 S1 出现 n 次，在 S2 出现 m 次，那么该值在输出区间中会出现 |n-m| 次。如果 n > m，输出区间内的最后 n-m 个元素将由 S1 复制而来，如果 n < m 则输出区间内的最后 m-n 个元素将由 S2 复制而来。在 STL set 容器内，m ≤ 1 且 n ≤ 1。

set_ symmetric_difference 是一种稳定（*stable*）操作，意思是输入区间内的元素相对顺序不会被改变。它有两个版本，差别在于如何定义某个元素小于另一个元素。第一版本使用 operator< 进行比较，第二版本采用仿函数 comp。

```
// 对称差集，求存在于[first1,last1) 且不存在于 [first2,last2) 的所有元素，
// 以及存在于[first2,last2) 且不存在于 [first1,last1) 的所有元素
// 注意，上述定义只有在 “元素值独一无二” 的情况下才成立。如果将 set 一般化，
// 允许出现重复元素，那么 set-symmetric-difference 的定义应该是：
// 如果某值在[first1,last1) 出现 n 次，在 [first2,last2) 出现 m 次，
// 那么它在 result range 中应该出现 abs(n-m) 次
// 注意，set 是一种 sorted range。这是以下算法的前提
// 版本一
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class OutputIterator>
OutputIterator set_symmetric_difference(InputIterator1 first1,
                                        InputIterator1 last1,
                                        InputIterator2 first2,
                                        InputIterator2 last2,
                                        OutputIterator result) {
  // 当两个区间都尚未到达尾端时，执行以下操作…
  while (first1 != last1 && first2 != last2)
    // 在两区间内分别移动迭代器。当两区间内的元素相等，就让两区同时前进；
    // 当两区间内的元素不等，就记录较小值于目标区，并令较小值所在区间前进
    if (*first1 < *first2) {
      *result = *first1;
      ++first1;
      ++result;
    }
    else if (*first2 < *first1) {
      *result = *first2;
      ++first2;
```

```
      ++result;
    }
    else {    // *first2 == *first1
      ++first1;
      ++first2;
    }
  return copy(first2, last2, copy(first1, last1, result));
}
```

set_symmetric_difference 之进行逻辑已经在源代码注释中说明得十分清楚。图 6-5d 所示的是其一步一步的分析图解。

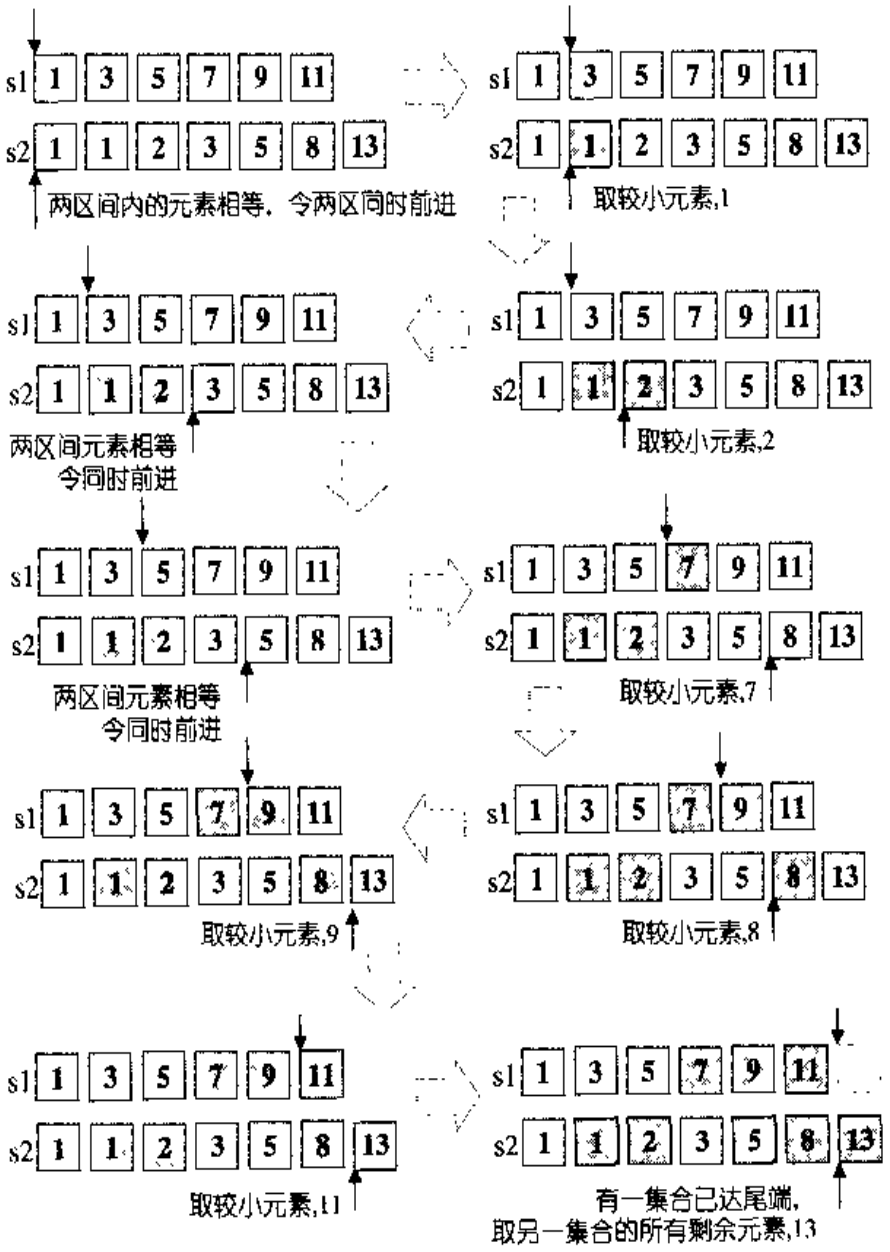


图 **6-5d** set_symmetric_difference 之步进分析

6.6 heap 算法

四个 heap 相关算法已于 4.7.2 节的 <stl_heap.h> 介绍过：make_heap()，pop_heap()，push_heap()，sort_heap()。喔，是的，当然，你猜对了，SGI STL 算法所在的头文件 <stl_algo.h> 内包含了 <stl_heap.h>：

```
#include <stl_heap.h> // make_heap,push_heap,pop_heap,sort_heap
```

6.7 其它算法

定义于 SGI <stl_algo.h> 内的所有算法，除了 set / heap 相关算法已于前两节介绍过，其余都安排在这一节。其中有很单纯的循环遍历，也有很复杂的快速排序。运作逻辑相对单纯者，被我安排在 6.7.1 小节，其它相对比较复杂者，每个算法各安排一个小节。

6.7.1 单纯的数据处理

这一小节所列的算法，都只进行单纯的数据移动、线性查找、计数、循环遍历、逐一对元素施行指定运算等操作。它们的运作逻辑都相对单纯，直观而易懂。我把对它们的说明直接写成源代码注释，必要时另加图片示意。

深入源代码之前，先观察每一个算法的表现，是个比较好的学习方式。以下程序示范本节每一个算法的用法。程序中有时使用 STL 内建的仿函数（functors，如 less，greater，equeal_to）和配接器（adapters，如 bind2nd），有时使用自定义的仿函数（如 display，even_by_two）；仿函数相关技术请参考 1.9.6 节和第 7 章，配接器相关技术请参考第 8 章。

```
// file: 6-7-1.cpp
#include <algorithm>
#include <vector>
#include <functional>
#include <iostream>
using namespace std;

template <class T>
struct display {        // 这是一个仿函数。请参考 1.9.6 节与第 7 章
  void operator()(const T& x) const
    { cout << x << ' '; }
```

```
};

struct even {                    // 这是一个仿函数。请参考 1.9.6 节与第 7 章
  bool operator()(int x) const
    { return x%2 ? false : true; }
};

class even_by_two {    // 这是一个仿函数。请参考 1.9.6 节与第 7 章
public:
  int operator()() const
    { return _x += 2; }
private:
  static int _x;
};

int even_by_two::_x = 0;

int main()
{
  int ia[] = { 0,1,2,3,4,5,6,6,6,7,8 };
  vector<int> iv(ia, ia+sizeof(ia)/sizeof(int));

  // 找出 iv 之中相邻元素值相等的第一个元素
  cout << *adjacent_find(iv.begin(), iv.end())
       << endl;  // 6

  // 找出 iv 之中相邻元素值相等的第一个元素
  cout << *adjacent_find(iv.begin(), iv.end(), equal_to<int>())
       << endl;  // 6

  // 找出 iv 之中元素值为 6 的元素个数
  cout << count(iv.begin(), iv.end(), 6)
       << endl;         // 3

  // 找出 iv 之中小于 7 的元素个数
  cout << count_if(iv.begin(), iv.end(), bind2nd(less<int>(),7))
       << endl;         // 9

  // 找出 iv 之中元素值为 4 的第一个元素的所在位置的值
  cout << *find(iv.begin(), iv.end(), 4)
       << endl;         // 4

  // 找出 iv 之中大于 2 的第一个元素的所在位置的值
  cout << *find_if(iv.begin(), iv.end(), bind2nd(greater<int>(),2))
       << endl;         // 3

  // 找出 iv 之中子序列 iv2 所出现的最后一个位置（再往后 3 个位置的值）
  vector<int> iv2(ia+6, ia+8);       // {6,6}
  cout << *(find_end(iv.begin(), iv.end(), iv2.begin(), iv2.end())+3)
```

```
        << endl;        // 8

    // 找出 iv 之中子序列 iv2 所出现的第一个位置（再往后 3 个位置的值）
    cout << *(find_first_of(iv.begin(), iv.end(), iv2.begin(), iv2.end())+3)
        << endl;        // 7

    // 迭代遍历整个 iv 区间，对每一个元素施行 display 操作（不得改变元素内容）
    for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
    cout << endl;       // iv: 0 1 2 3 4 5 6 6 6 7 8

    // 以下错误：generate 的第三个参数（仿函数）本身不得有任何参数
    // generate(iv.begin(), iv.end(), bind2nd(plus<int>(),3)); // error
    // 以下，迭代遍历整个 iv2 区间，对每个元素施行 even_by_two 操作（得改变元素内容）
    generate(iv2.begin(), iv2.end(), even_by_two());
    for_each(iv2.begin(), iv2.end(), display<int>());
    cout << endl;       // iv2: 2 4

    // 迭代遍历指定区间（起点与长度），对每个元素施行 even_by_two 操作（得改变元素值）
    generate_n(iv.begin(), 3, even_by_two());
    for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
    cout << endl;   // iv: 6 8 10 3 4 5 6 6 6 7 8

    // 删除（但不删除）元素 6。尾端可能有残余数据（可另以容器之 erase 函数去除
之）
    remove(iv.begin(), iv.end(), 6);
    for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
    cout << endl;   // iv: 8 10 3 4 5 7 8 6 6 7 8（灰色表残余数据）

    // 删除（但不删除）元素 6。结果置于另一区间
    vector<int> iv3(12);
    remove_copy(iv.begin(), iv.end(), iv3.begin(), 6);
    for_each(iv3.begin(), iv3.end(), display<int>());
    cout << endl;   // iv3: 8 10 3 4 5 7 8 7 8 0 0 0（灰色表残余数据）

    // 删除（但不删除）小于 6 的元素。尾端可能有残余数据
    remove_if(iv.begin(), iv.end(), bind2nd(less<int>(),6));
    for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
    cout << endl;   // iv: 8 10 7 8 6 6 7 8 6 7 8（灰色表残余数据）

    // 删除（但不删除）小于 7 的元素。结果置于另一区间
    remove_copy_if(iv.begin(), iv.end(), iv3.begin(), bind2nd(less<int>(),7));
    for_each(iv3.begin(), iv3.end(), display<int>());
    cout << endl;   // iv3: 8 10 7 8 7 8 7 8 8 0 0 0（灰色表残余数据）

    // 将所有的元素值 6，改为元素值 3
    replace(iv.begin(), iv.end(), 6, 3);
    for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
    cout << endl;   // iv: 8 10 7 8 3 3 7 8 3 7 8
```

```
// 将所有的元素值 3，改为元素值 5，结果置于另一区间
replace_copy(iv.begin(), iv.end(), iv3.begin(), 3, 5);
for_each(iv3.begin(), iv3.end(), display<int>());
cout << endl;   // iv3: 8 10 7 8 5 5 7 8 5 7 8 0

// 将所有小于 5 的元素值，改为元素值 2
replace_if(iv.begin(), iv.end(), bind2nd(less<int>(),5), 2);
for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
cout << endl;   // iv: 8 10 7 8 2 2 7 8 2 7 8

// 将所有等于 8 的元素值，改为元素值 9，结果置于另一区间
replace_copy_if(iv.begin(), iv.end(), iv3.begin(),
                bind2nd(equal_to<int>(),8), 9);
for_each(iv3.begin(), iv3.end(), display<int>());
cout << endl;   // iv3: 9 10 7 9 2 2 7 9 2 7 9 0

// 逆向重排每一个元素
reverse(iv.begin(), iv.end());
for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
cout << endl;   // iv: 8 7 2 8 7 2 2 8 7 10 8

// 逆向重排每一个元素，结果置于另一区间
reverse_copy(iv.begin(), iv.end(), iv3.begin());
for_each(iv3.begin(), iv3.end(), display<int>());
cout << endl;   // iv3: 8 10 7 8 2 2 7 8 2 7 8 0

// 旋转 (互换元素) [first,middle) 和 [middle,last)
rotate(iv.begin(), iv.begin()+4, iv.end());
for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
cout << endl;   // iv: 7 2 2 8 7 10 8 8 7 2 8

// 旋转 (互换元素) [first,middle) 和 [middle,last)，结果置于另一区间
rotate_copy(iv.begin(), iv.begin()+5, iv.end(), iv3.begin());
for_each(iv3.begin(), iv3.end(), display<int>());
cout << endl;   // iv3: 10 8 8 7 2 8 7 2 2 8 7 0

// 查找某个子序列的第一次出现地点
int ia2[3] = {2,8};
vector<int> iv4(ia2, ia2+2); // iv4: {2,8}
cout << *search(iv.begin(), iv.end(), iv4.begin(), iv4.end())
     << endl;  // 2

// 查找连续出现 2 个 8 的子序列起点
cout << *search_n(iv.begin(), iv.end(), 2, 8) << endl; // 8

// 查找连续出现 3 个小于 8 的子序列起点
cout << *search_n(iv.begin(), iv.end(), 3, 8, less<int>()) << endl;  // 7

// 将两个区间内的元素互换。第二区间的元素个数不应小于第一区间的元素个数
```

```
swap_ranges(iv4.begin(), iv4.end(), iv.begin());
for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
cout << endl;   // iv: 2 8 2 8 7 10 8 8 7 2 8
for_each(iv4.begin(), iv4.end(), display<int>());  // iv4: 7 2
cout << endl;

// 改变区间的值，全部减 2
transform(iv.begin(), iv.end(), iv.begin(), bind2nd(minus<int>(), 2));
for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
cout << endl;   // iv: 0 6 0 6 5 8 6 6 5 0 6

// 改变区间的值，令第二区间的元素值加到第一区间的对应元素身上
// 第二区间的元素个数不应小于第一区间的元素个数
transform(iv.begin(), iv.end(), iv.begin(), iv.begin(), plus<int>());
for_each(iv.begin(), iv.end(), display<int>());
cout << endl;   // iv: 0 12 0 12 10 16 12 12 10 0 12

//******************

vector<int> iv5(ia, ia+sizeof(ia)/sizeof(int));
vector<int> iv6(ia+4, ia+8);
vector<int> iv7(15);
for_each(iv5.begin(), iv5.end(), display<int>());
cout << endl;        // iv5: 0 1 2 3 4 5 6 6 6 7 8
for_each(iv6.begin(), iv6.end(), display<int>());
cout << endl;        // iv6: 4 5 6 6

cout << *max_element(iv5.begin(), iv5.end()) << endl;   // 8
cout << *min_element(iv5.begin(), iv5.end()) << endl;   // 0

// 判断是否 iv6 内的所有元素都出现于 iv5 中
// 注意：两个序列都必须是 sorted ranges
cout << includes(iv5.begin(), iv5.end(), iv6.begin(), iv6.end())
     << endl; // 1 (true)

// 将两个序列合并为一个序列
// 注意：两个序列都必须是 sorted ranges，获得的结果也是 sorted
merge(iv5.begin(), iv5.end(), iv6.begin(), iv6.end(), iv7.begin());
for_each(iv7.begin(), iv7.end(), display<int>());
cout << endl;        // iv7: 0 1 2 3 4 4 5 5 6 6 6 6 6 7 8

// 符合条件的元素放在容器前段，不符合的元素放在后段
// 不保证保留原相对次序
partition(iv7.begin(), iv7.end(), even());
for_each(iv7.begin(), iv7.end(), display<int>());
cout << endl;        // iv7: 0 8 2 6 4 4 6 6 6 6 5 5 3 7 1

// 去除 “连续而重复”的元素
// 注意：获得的结果可能有残余数据
```

```
  unique(iv5.begin(), iv5.end());
  for_each(iv5.begin(), iv5.end(), display<int>());
  cout << endl;          // iv5: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 7 8 (灰色为残余数据)

  // 去除 "连续而重复" 的元素，将结果置于另一处
  // 注意：获得的结果可能有残余数据
  unique_copy(iv5.begin(), iv5.end(), iv7.begin());
  for_each(iv7.begin(), iv7.end(), display<int>());
  cout << endl;          // iv7: 0 1 2 3 4 5 6 7 8 7 8 5 3 7 1 (灰色为残余数据)
}
```

adjacent_find

找出第一组满足条件的相邻元素。这里所谓的条件，在版本一中是指 "两元素相等"，在版本二中允许用户指定一个二元运算，两个操作数分别是相邻的第一元素和第二元素。

```
// 查找相邻的重复元素。版本一
template <class ForwardIterator>
ForwardIterator adjacent_find(ForwardIterator first, ForwardIterator last) {
  if (first == last) return last;
  ForwardIterator next = first;
  while(++next != last) {
    if (*first == *next) return first; // 如果找到相邻的元素值相同，就结束
    first = next;
  }
  return last;
}

// 查找相邻的重复元素。版本二
template <class ForwardIterator, class BinaryPredicate>
ForwardIterator adjacent_find(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                              BinaryPredicate binary_pred) {
  if (first == last) return last;
  ForwardIterator next = first;
  while(++next != last) {
    // 如果找到相邻的元素符合外界指定条件，就结束
    // 以下，两个操作数分别是相邻的第一元素和第二元素
    if (binary_pred(*first, *next)) return first;
    first = next;
  }
  return last;
}
```

count

运用equality操作符，将 [first,last) 区间内的每一个元素拿来和指定值 value 比较，并返回与 value 相等的元素个数。

```
template <class InputIterator, class T>
typename iterator_traits<InputIterator>::difference_type
count(InputIterator first, InputIterator last, const T& value) {
  // 以下声明一个计数器 n
  typename iterator_traits<InputIterator>::difference_type n = 0;
  for ( ; first != last; ++first)    // 整个区间走一遍
    if (*first == value)             // 如果元素值和 value 相等
      ++n;                           // 计数器累加 1
  return n;
}
```

请注意，count() 有一个早期版本，规格如下。它和上述标准版本的主要差异是，计数器由参数提供：

```
// 这是旧版的 count()
template <class InputIterator, class T, class Size>
void count(InputIterator first, InputIterator last,
           const T& value, Size& n) {
  for ( ; first != last; ++first)    // 整个区间走一遍
    if (*first == value)             // 如果元素值和 value 相等
      ++n;                           // 计数器累加 1
}
```

count_if

将指定操作（一个仿函数）pred 实施于 [first,last)区间内的每一个元素身上，并将“造成 pred 之计算结果为 true”的所有元素的个数返回。

```
template <class InputIterator, class Predicate>
typename iterator_traits<InputIterator>::difference_type
count_if(InputIterator first, InputIterator last, Predicate pred) {
  // 以下声明一个计数器 n
  typename iterator_traits<InputIterator>::difference_type n = 0;
  for ( ; first != last; ++first)    // 整个区间走一遍
    if (pred(*first))                // 如果元素带入 pred 的运算结果为 true
      ++n;                           // 计数器累加 1
  return n;
}
```

请注意，count_if() 有一个早期版本，规格如下。它和上述标准版本的主要差异是，计数器由参数提供：

```
// 这是旧版的 count_if()
template <class InputIterator, class Predicate, class Size>
void count_if(InputIterator first, InputIterator last,
              Predicate pred, Size& n) {
  for ( ; first != last; ++first)    // 整个区间走一遍
    if (pred(*first))                // 如果元素带入 pred 的运算结果为 true
      ++n;                           // 计数器累加 1
}
```

find

根据 equality 操作符，循序查找 [first,last) 内的所有元素，找出第一个匹配“等同（equality）条件”者。如果找到，就返回一个 InputIterator 指向该元素，否则返回迭代器 last。

```
template <class InputIterator, class T>
InputIterator find(InputIterator first, InputIterator last,
                   const T& value) {
  while (first != last && *first != value) ++first;
  return first;
}
```

find_if

根据指定的 pred 运算条件（以仿函数表示），循序查找 [first,last) 内的所有元素，找出第一个令 pred 运算结果为 true 者。如果找到就返回一个 InputIterator 指向该元素，否则返回迭代器 last。

```
template <class InputIterator, class Predicate>
InputIterator find_if(InputIterator first, InputIterator last,
                      Predicate pred) {
  while (first != last && !pred(*first)) ++first;
  return first;
}
```

find_end

在序列一 [first1,last1)所涵盖的区间中，查找序列二 [first2,last2) 的最后一次出现点。如果序列一之内不存在“完全匹配序列二”的子序列，便返回迭代器 last1。此算法有两个版本，版本一使用元素型别所提供的 equality 操作符，版本二允许用户指定某个二元运算（以仿函数呈现），作为判断元素相等与否的依据。以下只列出版本一的源代码。

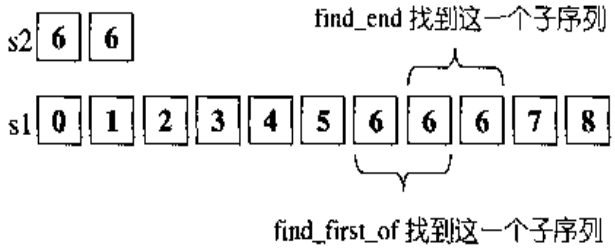


图 **6-6a** find_end 算法和 find_first_of 算法

由于这个算法查找的是“最后一次出现地点”，如果我们有能力逆向查找，题目就变成了“首次出现地点”，那对设计者而言当然比较省力。逆向查找的关键在于迭代器的双向移动能力，因此，SGI 将算法设计为双层架构，一般称呼此种上层函数为 dispatch function（分派函数、派送函数）：

```
// 版本一
template <class ForwardIterator1, class ForwardIterator2>
inline ForwardIterator1
find_end(ForwardIterator1 first1, ForwardIterator1 last1,
         ForwardIterator2 first2, ForwardIterator2 last2)
{
  typedef typename iterator_traits<ForwardIterator1>::iterator_category
          category1;
  typedef typename iterator_traits<ForwardIterator2>::iterator_category
          category2;

  // 以下根据两个区间的类属，调用不同的下层函数
  return __find_end(first1, last1, first2, last2, category1(), category2());
}
```

这是一种常见的技巧，令函数传递调用过程中产生迭代器类型（iterator category）的临时对象[8]，再利用编译器的参数推导机制（argument deduction），自动调用某个对应函数。此例之对应函数有两个候选者：

```
// 以下是 forward iterators 版
template <class ForwardIterator1, class ForwardIterator2>
ForwardIterator1 __find_end(ForwardIterator1 first1, ForwardIterator1 last1,
                            ForwardIterator2 first2, ForwardIterator2 last2,
                            forward_iterator_tag, forward_iterator_tag)
{
```

[8] 型别名称之后直接加上一对小括号，便会产生一个临时对象。

```
  if (first2 == last2)      // 如果查找目标是空的，
    return last1;           // 返回 last1，表示该 “空子序列”的最后出现点
  else {
    ForwardIterator1 result = last1;
    while (1) {
      // 以下利用search()查找某个子序列的首次出现点。找不到的话返回last1
      ForwardIterator1 new_result = search(first1, last1, first2, last2);
      if (new_result == last1)   // 没找到
        return result;
      else {
        result = new_result;     // 调动一下标兵，准备下一个查找行动
        first1 = new_result;
        ++first1;
      }
    }
  }
}

// 以下是bidirectional iterators 版（可以逆向查找）
template <class BidirectionalIterator1, class BidirectionalIterator2>
BidirectionalIterator1
__find_end(BidirectionalIterator1 first1, BidirectionalIterator1 last1,
           BidirectionalIterator2 first2, BidirectionalIterator2 last2,
           bidirectional_iterator_tag, bidirectional_iterator_tag)
{
  // 由于查找的是 “最后出现地点”，因此反向查找比较快。利用reverse_iterator.
  // reverse_iterator 见本书第8章
  typedef reverse_iterator<BidirectionalIterator1> reviter1;
  typedef reverse_iterator<BidirectionalIterator2> reviter2;

  reviter1 rlast1(first1);
  reviter2 rlast2(first2);
  // 查找时，将序列一和序列二统统逆转方向
  reviter1 rresult = search(reviter1(last1), rlast1,
                            reviter2(last2), rlast2);

  if (rresult == rlast1)    // 没找到
    return last1;
  else {                    // 找到了
    BidirectionalIterator1 result = rresult.base(); // 转回正常（非逆向）迭代器
    advance(result, -distance(first2, last2)); // 调整回到子序列的起头处
    return result;
  }
}
```

为什么最后要将逆向迭代器转回正向迭代器，而不直接移动逆向迭代器呢？因为正向迭代器和逆向迭代器之间有奇妙的 “实体关系”和 “逻辑关系”，详见8.3.2节。

find_first_of

本算法以[first2,last2)区间内的某些元素作为查找目标，寻找它们在[first1,last1)区间内的第一次出现地点。举个例子，假设我们希望找出字符序列 synesthesia 的第一个元音，我们可以定义第二序列为 aeiou。此算法会返回一个ForwardIterator，指向元音序列中任一元素首次出现于第一序列的地点，此例将指向字符序列的第一个 e。如果第一序列并未内含第二序列的任何元素，返回的将是last1。本算法第一个版本使用元素型别所提供的 equality 操作符，第二个版本允许用户指定一个二元运算 pred。

```
// 版本一
template <class InputIterator, class ForwardIterator>
InputIterator find_first_of(InputIterator first1, InputIterator last1,
                            ForwardIterator first2, ForwardIterator last2)
{
  for ( ; first1 != last1; ++first1) // 遍访序列一
    // 以下，根据序列二的每个元素
    for (ForwardIterator iter = first2; iter != last2; ++iter)
      if (*first1 == *iter) // 如果序列一的元素等于序列二的元素
        return first1;      // 找到了，结束
  return last1;
}

// 版本二
template <class InputIterator, class ForwardIterator, class BinaryPredicate>
InputIterator find_first_of(InputIterator first1, InputIterator last1,
                            ForwardIterator first2, ForwardIterator last2,
                            BinaryPredicate comp)
{
  for ( ; first1 != last1; ++first1) // 遍访序列一
    // 以下，根据序列二的每个元素
    for (ForwardIterator iter = first2; iter != last2; ++iter)
      if (comp(*first1, *iter)) // 如果序列一和序列二的元素满足 comp 条件
        return first1;          // 找到了，结束
  return last1;
}
```

for_each

将仿函数 f 施行于 [first,last) 区间内的每一个元素身上。f 不可以改变元素内容，因为 first 和 last 都是 InputIterators，不保证接受赋值行为（assignment）。如果想要一一修改元素内容，应该使用算法 transform()。f 可

返回一个值，但该值会被忽略。

```
template <class InputIterator, class Function>
Function for_each(InputIterator first, InputIterator last, Function f) {
  for ( ; first != last; ++first)
    f(*first);     // 调用仿函数 f 的 function call 操作符，返回值被忽略
  return f;
}
```

generate

将仿函数 gen 的运算结果填写在 [first,last) 区间内的所有元素身上。所谓填写，用的是迭代器所指元素之 assignment 操作符。

```
template <class ForwardIterator, class Generator>
void generate(ForwardIterator first, ForwardIterator last, Generator gen) {
  for ( ; first != last; ++first)    // 整个序列区间
    *first = gen();
}
```

generate_n

将仿函数 gen 的运算结果填写在从迭代器 first 开始的 n 个元素身上。所谓填写，用的是迭代器所指元素的 assignment 操作符。

```
template <class OutputIterator, class Size, class Generator>
OutputIterator generate_n(OutputIterator first, Size n, Generator gen) {
  for ( ; n > 0; --n, ++first)  // 只限 n 个元素
    *first = gen();
  return first;
}
```

includes（应用于有序区间）

判断序列二 S2 是否 “涵盖于”序列一 S1。S1 和 S2 都必须是有序集合，其中的元素都可重复（不必唯一）。所谓涵盖，意思是 “S2 的每一个元素都出现于 S1”。由于判断两个元素是否相等，必须以 *less* 或 *greater* 运算为依据（当 S1 元素不小于 S2 元素且 S2 元素不小于 S1 元素，两者即相等；或说当 S1 元素不大于 S2 元素且 S2 元素不大于 S1 元素，两者即相等），因此配合着两个序列 S1 和 S2 的排序方式（递增或递减），includes 算法可供用户选择采用 less 或 greater 进行两元素的大小比较（comparison）。

换句话说，如果S1和S2是递增排序（以operator< 执行比较操作），includes算法应该这么使用：

```
includes(S1.begin(), S1.end(), S2.begin(), S2.end());
```

这和下一行完全相同：

```
includes(S1.begin(), S1.end(), S2.begin(), S2.end(), less<int>());
```

然而如果S1和S2是递减排序（以operator> 执行比较操作），includes 算法应该这么使用：

```
includes(S1.begin(), S1.end(), S2.begin(), S2.end(), greater<int>());
```

注意，S1或S2内的元素都可以重复，这种情况下所谓“S1内含一个S2子集合”的定义是：假设某元素在S2出现n次，在S1出现m次，那么如果m<n，此算法会返回false。

图6-6b展示includes 算法的工作原理。

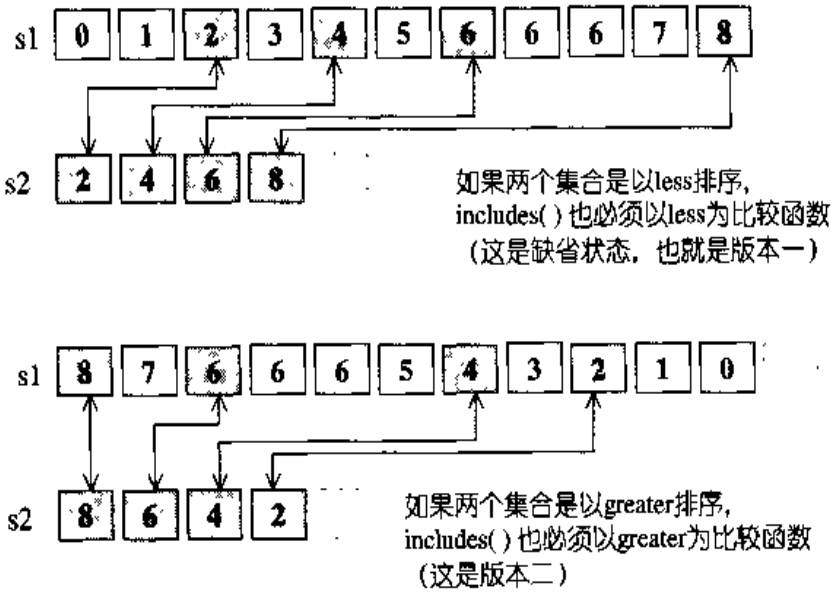


图6-6b includes 算法的工作原理示意图

下面是includes 算法的两个版本的源代码：

```
// 版本一。判断区间二的每个元素值是否都存在于区间一
// 前提：区间一和区间二都是 sorted ranges
template <class InputIterator1, class InputIterator2>
bool includes(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
              InputIterator2 first2, InputIterator2 last2) {
  while (first1 != last1 && first2 != last2) // 两个区间都尚未走完
    if (*first2 < *first1)       // 序列二的元素小于序列一的元素
      return false;              //  "涵盖"的情况必然不成立。结束执行
    else if(*first1 < *first2)   // 序列二的元素大于序列一的元素
      ++first1;                  // 序列一前进 1
    else                         // *first1 == *first2
      ++first1, ++first2;        // 两序列各自前进 1

  return first2 == last2;  // 有一个序列走完了，判断最后一关
}

// 版本二。判断序列一内是否有个子序列，其与序列二的每个对应元素都满足二元运算 comp
// 前提：序列一和序列二都是 sorted ranges
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class Compare>
bool includes(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
              InputIterator2 first2, InputIterator2 last2, Compare comp) {
  while (first1 != last1 && first2 != last2)  // 两个区间都尚未走完
    if (comp(*first2, *first1))       // comp(S2 元素,S1 元素) 为真
      return false;                   // "涵盖"的情况必然不成立。结束执行
    else if(comp(*first1, *first2))   // comp(S1 元素,S2 元素) 为真
      ++first1;                       // S1 前进 1
    else                              // *first1 == *first2
      ++first1, ++first2;             // S1, S2 各自前进 1

  return first2 == last2;             // 有一个序列走完了，判断最后一关
}
```

从版本二可知，如果你传入一个二元运算 comp，却不能使以下的 case3 代表"两元素相等"：

```
if (comp(*first2, *first1))       // cas1
  ...
else if(comp(*first1, *first2))   // case2
  ...
else                              // case3
```

这个 comp 将会造成整个 includes 算法语意错误。但同时我也要提醒你，comp 的型别是 Compare，既不是 BinaryPredicate，也不是 BinaryOperation，所以并非随便一个二元运算就可拿来作为 comp 的参数。从这里我们得到一个教训，是的，虽然从语法上来说 Compare 只是一个 template 参数（从这个观点看，它叫什么名称都一样），但它（乃至于整个 STL 的符号命名）有其深刻涵义。

max_element

这个算法返回一个迭代器，指向序列之中数值最大的元素。其工作原理至为简单，下面是两个版本的源代码：

```
// 版本一
template <class ForwardIterator>
ForwardIterator max_element(ForwardIterator first, ForwardIterator last) {
  if (first == last) return first;
  ForwardIterator result = first;
  while (++first != last)
    if (*result < *first) result = first; // 如果目前元素比较大，就登记起来
  return result;
}

// 版本二
template <class ForwardIterator, class Compare>
ForwardIterator max_element(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                            Compare comp) {
  if (first == last) return first;
  ForwardIterator result = first;
  while (++first != last)
    if (comp(*result, *first)) result = first;
  return result;
}
```

merge （应用于有序区间）

将两个经过排序的集合 S1 和 S2，合并起来置于另一段空间。所得结果也是一个有序（*sorted*）序列。返回一个迭代器，指向最后结果序列的最后一个元素的下一位置。图 6-6c 展示 merge 算法的工作原理。下面是 merge 算法的两个版本的源代码：

```
// 版本一
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class OutputIterator>
OutputIterator merge(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                     InputIterator2 first2, InputIterator2 last2,
                     OutputIterator result) {
  while (first1 != last1 && first2 != last2) { // 两个序列都尚未走完
    if (*first2 < *first1) {     // 序列二的元素比较小
      *result = *first2;         // 登记序列二的元素
      ++first2;                  // 序列二前进 1
    }
    else {                       // 序列二的元素不比较小
      *result = *first1;         // 登记序列一的元素
```

```
      ++first1;                    // 序列一前进 1
    }
    ++result;
  }
  // 最后剩余元素以 copy 复制到目的端。以下两个序列一定至少有一个为空
  return copy(first2, last2, copy(first1, last1, result));
}

// 版本二
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class OutputIterator,
          class Compare>
OutputIterator merge(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
                     InputIterator2 first2, InputIterator2 last2,
                     OutputIterator result, Compare comp) {
  while (first1 != last1 && first2 != last2) { // 两个序列都尚未走完
    if (comp(*first2, *first1)) {    // 比较两序列的元素
      *result = *first2;             // 登记序列二的元素
      ++first2;                      // 序列二前进 1
    }
    else {
      *result = *first1;             // 登记序列一的元素
      ++first1;                      // 序列一前进 1
    }
    ++result;
  }
  // 最后剩余元素以 copy 复制到目的端。以下两个序列一定至少有一个为空
  return copy(first2, last2, copy(first1, last1, result));
}
```

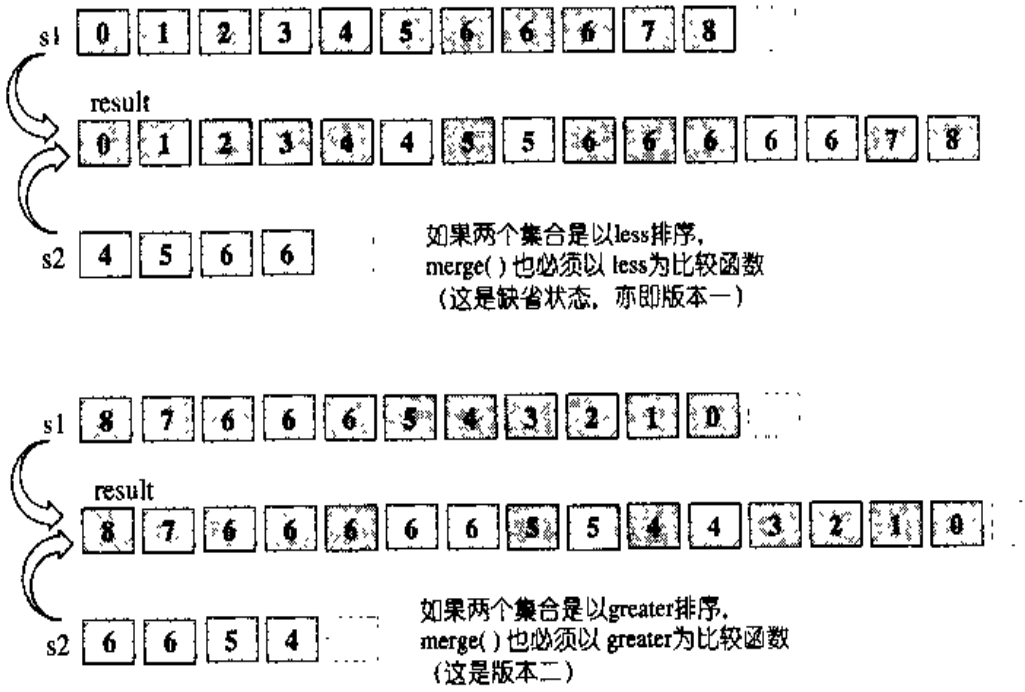


图 **6-6c** merge 算法的工作原理示意

min_element

这个算法返回一个迭代器，指向序列之中数值最小的元素。其工作原理至为简单，下面是两个版本的源代码：

```
// 版本一
template <class ForwardIterator>
ForwardIterator min_element(ForwardIterator first, ForwardIterator last) {
  if (first == last) return first;
  ForwardIterator result = first;
  while (++first != last)
    if (*first < *result) result = first; // 如果目前元素比较小，就登记起来
  return result;
}

// 版本二
template <class ForwardIterator, class Compare>
ForwardIterator min_element(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                            Compare comp) {
  if (first == last) return first;
  ForwardIterator result = first;
  while (++first != last)
    if (comp(*first, *result)) result = first;
  return result;
}
```

partition

partition 会将区间 [first,last) 中的元素重新排列。所有被一元条件运算 pred 判定为 true 的元素，都会被放在区间的前段，被判定为 false 的元素，都会被放在区间的后段。这个算法并不保证保留元素的原始相对位置。如果需要保留原始相对位置，应使用 stable_partition。

下面是 partition 算法的源代码。其工作原理见图 6-6d。

```
// 所有被 pred 判定为 true 的元素，都被放到前段
// 被 pred 判定为 falise 的元素，都被放到后段
// 不保证保留原相对位置。(not stable)
template <class BidirectionalIterator, class Predicate>
BidirectionalIterator partition(BidirectionalIterator first,
                                BidirectionalIterator last,
                                Predicate pred) {
  while (true) {
    while (true)
      if (first == last)          // 头指针等于尾指针
```

```
      return first;                 // 所有操作结束
    else if (pred(*first))          // 头指针所指的元素符合不移动条件
      ++first;                      // 不移动：头指针前进 1
    else                            // 头指针所指元素符合移动条件
      break;                        // 跳出循环
   --last;                          // 尾指针回溯 1
   while (true)
    if (first == last)              // 头指针等于尾指针
      return first;                 // 所有操作结束
    else if (!pred(*last))          // 尾指针所指的元素符合不移动条件
      --last;                       // 不移动：尾指针回溯 1
    else                            // 尾指针所指元素符合移动条件
      break;                        // 跳出循环
   iter_swap(first, last);          // 头尾指针所指元素彼此交换
   ++first;                         // 头指针前进 1，准备下一个外循环迭代
  }
}
```

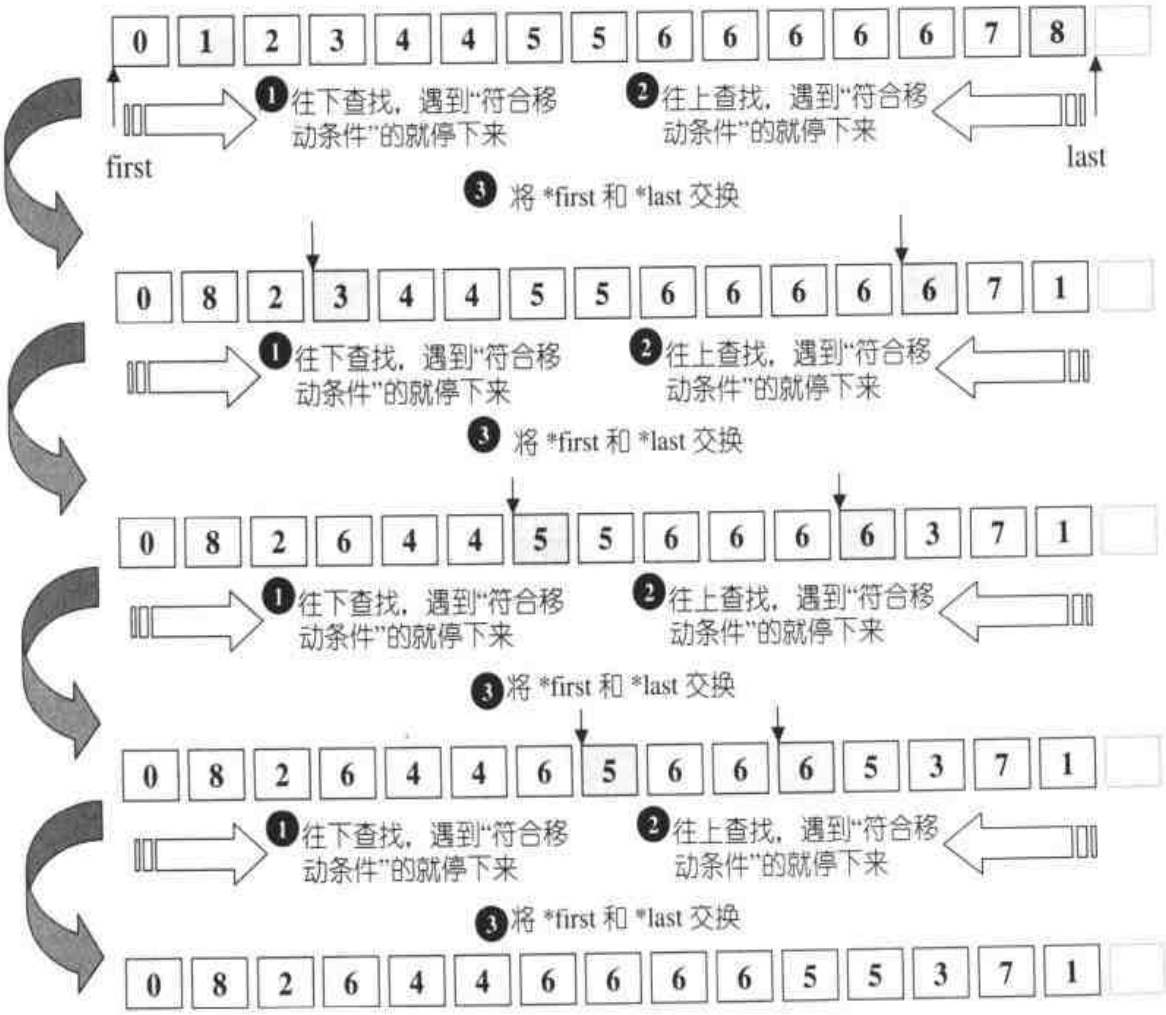


图 **6-6d** partition 算法的工作原理。本例所谓的移动条件（亦即所选用的 pred），是一个 "判断数值是否为偶数" 的仿函数。

remove 移除（但不删除）

移除 [first,last)之中所有与 value 相等的元素。这一算法并不真正从容器中删除那些元素（换句话说容器大小并未改变），而是将每一个不与 value 相等（也就是我们并不打算移除）的元素轮番赋值给 first 之后的空间。返回值 ForwardIterator 标示出重新整理后的最后元素的下一位置。例如序列{0,1,0,2,0,3,0,4}，如果我们执行 remove()，希望移除所有 0 值元素，执行结果将是 {1,2,3,4,0,3,0,4}。每一个与 0 不相等的元素，1,2,3,4，分别被拷贝到第一、二、三、四个位置上。第四个位置以后不动，换句话说是第四个位置之后是这一算法留下的残余数据。返回值 ForwardIterator 指向第五个位置。如果要删除那些残余数据，可将返回的迭代器交给区间所在之容器的 erase() member function。注意，array 不适合使用 remove() 和 remove_if()，因为 array 无法缩小尺寸，导致残余数据永远存在。对 array 而言，较受欢迎的算法是 remove_copy()和 remove_copy_if()。

```
template <class ForwardIterator, class T>
ForwardIterator remove(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                       const T& value) {
  first = find(first, last, value); // 利用循序查找法找出第一个相等元素
  ForwardIterator next = first;     // 以 next 标示出来
  // 以下利用 "remove_copy()允许新旧容器重叠"的性质，进行移除操作
  // 并将结果指定置于原容器中
  return first == last ? first : remove_copy(++next, last, first, value);
}
```

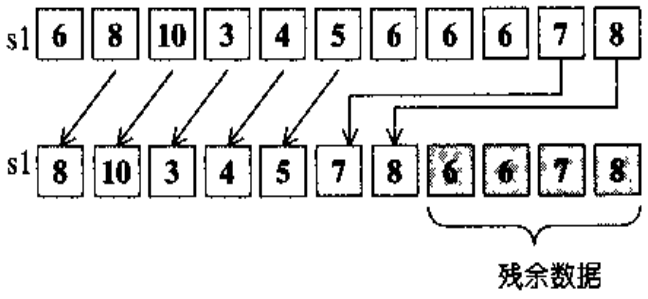


图 **6-6e** 移除（remove）所有数值为 6 的元素。如果运算结果置于另一个区间（而非如本图在同一个 s1 区间上）即是 remove_copy 算法。

稍后图 6-6f 对 remove 算法的程序操作另有良好的说明——尽管该图是针对更一般化的 pred 条件，而非本处的 "相等（equality）条件"。

remove_copy

移除 [first,last)区间内所有与 value 相等的元素。它并不真正从容器中删除那些元素（换句话说，原容器没有任何改变），而是将结果复制到一个以 result 标示起始位置的容器身上。新容器可以和原容器重叠，但如果对新容器实际给值时，超越了旧容器的大小，会产生无法预期的结果。返回值 OutputIterator 指出被复制的最后元素的下一位置。

```
template <class InputIterator, class OutputIterator, class T>
OutputIterator remove_copy(InputIterator first, InputIterator last,
                           OutputIterator result, const T& value) {
  for ( ; first != last; ++first)
    if (*first != value) {       // 如果不相等
      *result = *first;          //   就赋值给新容器
      ++result;                  //   新容器前进一个位置
    }
  return result;
}
```

remove_if

移除 [first,last)区间内所有被仿函数 pred 核定为 true 的元素。它并不真正从容器中删除那些元素（换句话说，容器大小并未改变，请参考 remove()）。每一个不符合 pred 条件的元素都会被轮番赋值给 first 之后的空间。返回值 ForwardIterator 标示出重新整理后的最后元素的下一位置。此算法会留有一些残余数据，如果要删除那些残余数据，可将返回的迭代器交给区间所在之容器的 erase() member function。注意，array 不适合使用 remove() 和 remove_if()，因为 array 无法缩小尺寸，导致残余数据永远存在。对 array 而言，较受欢迎的算法是 remove_copy()和 remove_copy_if()。

```
template <class ForwardIterator, class Predicate>
ForwardIterator remove_if(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                          Predicate pred) {
  first = find_if(first, last, pred); // 利用循序查找法找出第一个匹配者
  ForwardIterator next = first;       // 以 next 标记出来
  // 以下利用 "remove_copy_if()允许新旧容器重叠"的性质，做删除操作
  // 并将结果放到原容器中
  return first == last ? first : remove_copy_if(++next, last, first, pred);
}
```

图 6-6f 对以上程序操作有良好的说明。

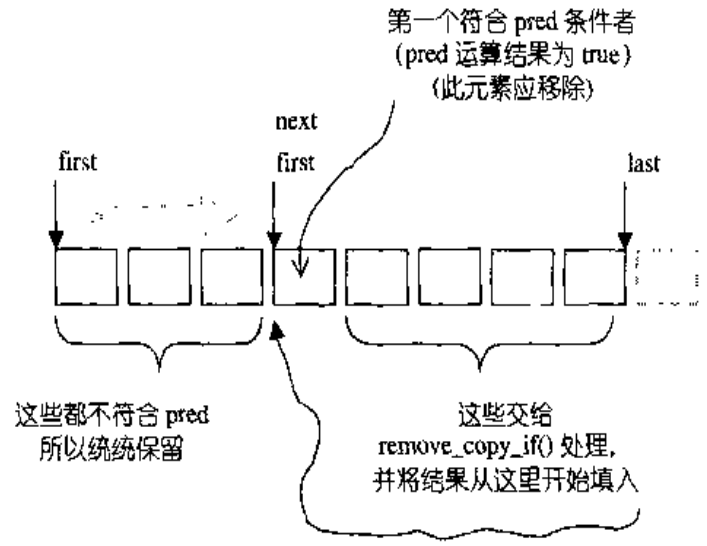


图 **6-6f** remove_if 操作示意

remove_copy_if

移除 [first,last) 区间内所有被仿函数 pred 评估为 true 的元素。它并不真正从容器中删除那些元素（换句话说原容器没有任何改变），而是将结果复制到一个以 result 标示起始位置的容器身上。新容器可以和原容器重叠，但如果针对新容器实际给值时，超越了旧容器的大小，会产生无法预期的结果。返回值 OutputIterator 指出被复制的最后元素的下一位置。

```
template <class InputIterator, class OutputIterator, class Predicate>
OutputIterator remove_copy_if(InputIterator first, InputIterator last,
                              OutputIterator result, Predicate pred) {
  for ( ; first != last; ++first)
    if (!pred(*first)) {    // 如果pred核定为false,
      *result = *first;     //   就赋值给新容器（保留，不删除）
      ++result;             //   新容器前进一个位置
    }
  return result;
}
```

replace

将 [first, last) 区间内的所有 old_value 都以 new_value 取代。

```
template <class ForwardIterator, class T>
void replace(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
             const T& old_value,
             const T& new_value) {
  // 将区间内的所有 old_value 都以 new_value 取代
  for ( ; first != last; ++first)
    if (*first == old_value) *first = new_value;
}
```

replace_copy

行为与 replace() 类似，唯一不同的是新序列会被复制到 result 所指的容器中。返回值 OutputIterator 指向被复制的最后一个元素的下一位置。原序列没有任何改变。

```
template <class InputIterator, class OutputIterator, class T>
OutputIterator replace_copy(InputIterator first, InputIterator last,
                            OutputIterator result, const T& old_value,
                            const T& new_value) {
  for ( ; first != last; ++first, ++result)
    // 如果旧序列上的元素等于 old_value，就放 new_value 到新序列中
    // 否则就将元素拷贝一份放进新序列中
    *result = *first == old_value ? new_value : *first;
  return result;
}
```

replace_if

将[first, last) 区间内所有 “被 pred 评估为 true” 的元素，都以 new_value 取而代之。

```
template <class ForwardIterator, class Predicate, class T>
void replace_if(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                Predicate pred,
                const T& new_value) {
  for ( ; first != last; ++first)
    if (pred(*first)) *first = new_value;
}
```

replace_copy_if

行为与 replace_if() 类似，但是新序列会被复制到 result 所指的区间内。返回值 OutputIterator 指向被复制的最后一个元素的下一位置。原序列无任何改变。

```
template <class Iterator, class OutputIterator, class Predicate, class T>
OutputIterator replace_copy_if(Iterator first, Iterator last,
                               OutputIterator result, Predicate pred,
                               const T& new_value) {
  for ( ; first != last; ++first, ++result)
    // 如果旧序列上的元素被 pred 评估为 true，就放 new_value 到新序列中，
    // 否则就将元素拷贝一份放进新序列中
    *result = pred(*first) ? new_value : *first;
  return result;
}
```

reverse

将序列[first,last) 的元素在原容器中颠倒重排。例如序列 {0,1,1,3,5} 颠倒重排后为 {5,3,1,1,0}。迭代器的双向或随机定位能力，影响了这个算法的效率，所以设计为双层架构（呵呵，老把戏了）：

```
// 分派函数 (dispatch function)
template <class BidirectionalIterator>
inline void reverse(BidirectionalIterator first, BidirectionalIterator last) {
  __reverse(first, last, iterator_category(first));
}

// reverse 的 bidirectional iterator 版
template <class BidirectionalIterator>
void __reverse(BidirectionalIterator first, BidirectionalIterator last,
               bidirectional_iterator_tag) {
  while (true)
    if (first == last || first == --last)
      return;
    else
      iter_swap(first++, last);
}

// reverse 的 random access iterator 版
template <class RandomAccessIterator>
void __reverse(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last,
               random_access_iterator_tag) {
  // 以下，头尾两两互换，然后头部累进一个位置，尾部累退一个位置。两者交错时即停止
  // 注意，只有 random iterators 才能做以下的 first < last 判断
  while (first < last) iter_swap(first++, --last);
}
```

reverse_copy

行为类似 reverse()，但产生出来的新序列会被置于以 result 指出的容器中。返回值 OutputIterator 指向新产生的最后元素的下一位置。原序列没有任何改变。

```
template <class BidirectionalIterator, class OutputIterator>
OutputIterator reverse_copy(BidirectionalIterator first,
                            BidirectionalIterator last,
                            OutputIterator result) {
  while (first != last) {  // 整个序列走一遍
    --last;                // 尾端前移一个位置
    *result = *last;       // 将尾端所指元素复制到 result 所指位置
    ++result;              // result 前进一个位置
  }
  return result;
}
```

rotate

将[first,middle)内的元素和 [middle,last)内的元素互换。middle 所指的元素会成为容器的第一个元素。如果有个数字序列 {1,2,3,4,5,6,7}，对元素 3 做旋转操作，会形成{3,4,5,6,7,1,2}。看起来这和 swap_ranges() 功能颇为近似，但 swap_ranges() 只能交换两个长度相同的区间，rotate() 可以交换两个长度不同的区间，如图 6-6g 所示。

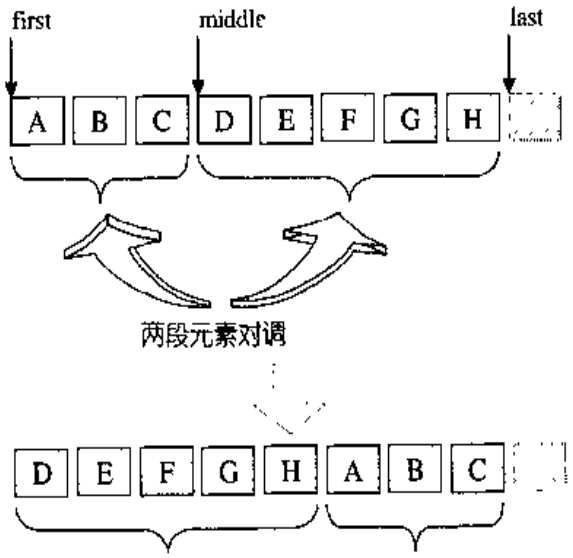


图 **6-6g** rotate 操作示意

迭代器的移动能力，影响了这个算法的效率，所以设计为双层架构（呵呵，老把戏）：

```
// 分派函数 (dispatch function)
template <class ForwardIterator>
inline void rotate(ForwardIterator first, ForwardIterator middle,
                   ForwardIterator last) {
  if (first == middle || middle == last) return;
  __rotate(first, middle, last, distance_type(first),
           iterator_category(first));
}
```

下面是根据不同的迭代器类型而完成的三个旋转操作：

```
// rotate 的 forward iterator 版，操作示意如图6-6b
template <class ForwardIterator, class Distance>
void __rotate(ForwardIterator first, ForwardIterator middle,
              ForwardIterator last, Distance*, forward_iterator_tag) {
  for (ForwardIterator i = middle; ;) {
    iter_swap(first, i);    // 前段、后段的元素一一交换
    ++first;                // 双双前进1
    ++i;
    // 以下判断是前段[first, middle)先结束还是后段[middle,last)先结束
    if (first == middle) {      // 前段结束了
      if (i == last) return;    // 如果后段同时也结束，整个就结束了
      middle = i;               // 否则调整，对新的前、后段再作交换
    }
    else if (i == last)     // 后段先结束
      i = middle;           // 调整，准备对新的前、后段再作交换
  }
}

// rotate 的 bidirectional iterator 版，操作示意如图6-6i。
template <class BidirectionalIterator, class Distance>
void __rotate(BidirectionalIterator first, BidirectionalIterator middle,
              BidirectionalIterator last, Distance*,
              bidirectional_iterator_tag) {
  reverse(first, middle);
  reverse(middle, last);
  reverse(first, last);
}

// rotate 的 random access iterator 版
template <class RandomAccessIterator, class Distance>
void __rotate(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator middle,
              RandomAccessIterator last, Distance*,
              random_access_iterator_tag) {
  // 以下迭代器的相减操作，只适用于 random access iterators
  // 取全长和前段长度的最大公因子
```

```
  Distance n = __gcd(last - first, middle - first);
  while (n--)
    __rotate_cycle(first, last, first + n, middle - first,
                   value_type(first));
}

// 最大公因子，利用辗转相除法
// __gcd() 应用于 __rotate() 的 random access iterator 版
template <class EuclideanRingElement>
EuclideanRingElement __gcd(EuclideanRingElement m, EuclideanRingElement n)
{
  while (n != 0) {
    EuclideanRingElement t = m % n;
    m = n;
    n = t;
  }
  return m;
}

template <class RandomAccessIterator, class Distance, class T>
void __rotate_cycle(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last,
                    RandomAccessIterator initial, Distance shift, T*) {
  T value = *initial;
  RandomAccessIterator ptr1 = initial;
  RandomAccessIterator ptr2 = ptr1 + shift;
  while (ptr2 != initial) {
    *ptr1 = *ptr2;
    ptr1 = ptr2;
    if (last - ptr2 > shift)
      ptr2 += shift;
    else
      ptr2 = first + (shift - (last - ptr2));
  }
  *ptr1 = value;
}
```

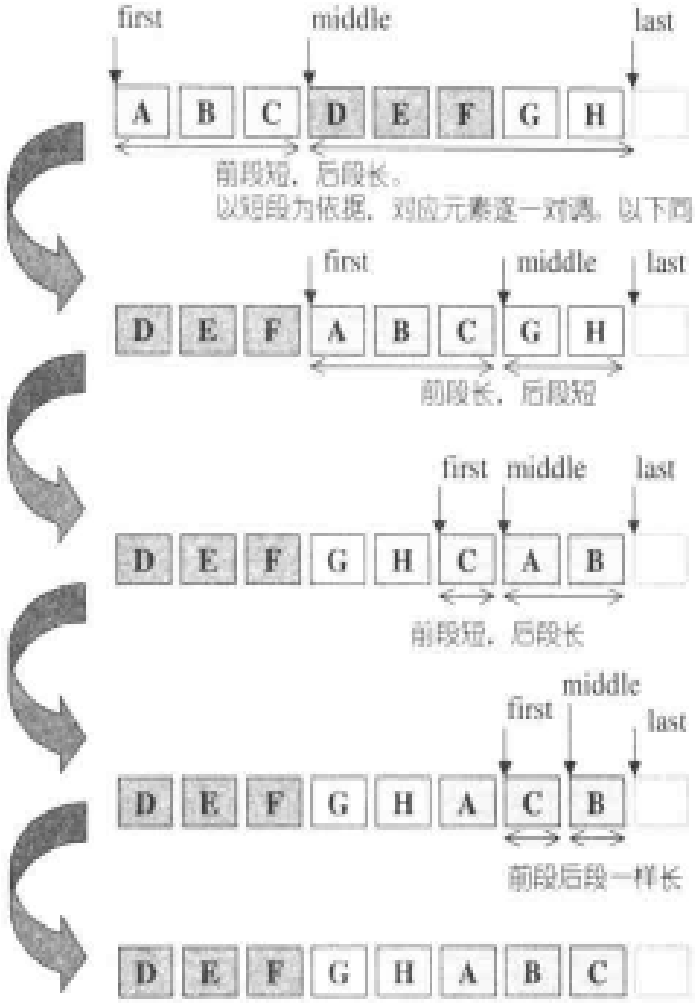


图 **6-6h** `rotate` forward iterator 版操作示意

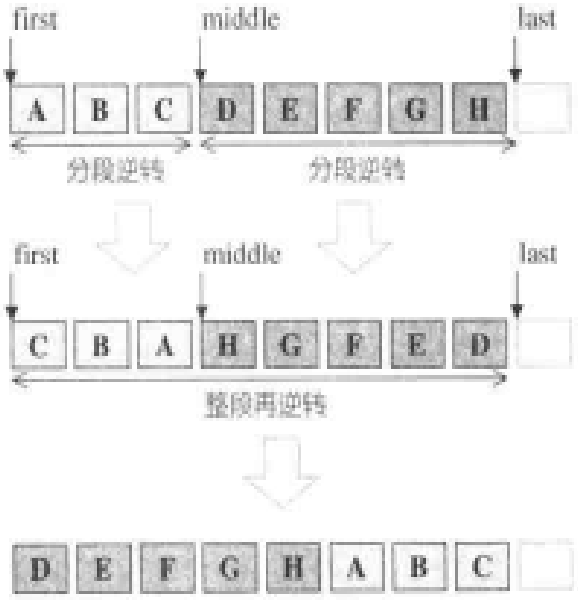


图 **6-6i** `rotate` bidirectional iterator 版操作示意

rotate_copy

行为类似 rotate()，但产生出来的新序列会被置于 result 所指出的容器中。返回值 OutputIterator 指向新产生的最后元素的下一位置。原序列没有任何改变。

由于它不需要就地（in-place）在原容器中调整内容，实现上也就简单得多。旋转操作其实只是两段元素彼此交换，所以只要先把后段复制到新容器的前端，再把前段接续复制到新容器，即可。

```
template <class ForwardIterator, class OutputIterator>
OutputIterator rotate_copy(ForwardIterator first, ForwardIterator middle,
                           ForwardIterator last, OutputIterator result) {
  return copy(first, middle, copy(middle, last, result));
}
```

search

在序列一 [first1,last1)所涵盖的区间中，查找序列二 [first2,last2) 的首次出现点。如果序列一内不存在与序列二完全匹配的子序列，便返回迭代器 last1。版本一使用元素型别所提供的 equality 操作符，版本二允许用户指定某个二元运算（以仿函数呈现），作为判断相等与否的依据。以下只列出版本一的源代码。

```
// 查找子序列首次出现地点
// 版本一
template <class ForwardIterator1, class ForwardIterator2>
inline ForwardIterator1 search(ForwardIterator1 first1,
                               ForwardIterator1 last1,
                               ForwardIterator2 first2,
                               ForwardIterator2 last2)
{
  return __search(first1, last1, first2, last2, distance_type(first1),
                  distance_type(first2));
}

template <class ForwardIterator1, class ForwardIterator2, class Distance1,
          class Distance2>
ForwardIterator1 __search(ForwardIterator1 first1, ForwardIterator1 last1,
                          ForwardIterator2 first2, ForwardIterator2 last2,
                          Distance1*, Distance2*) {
  Distance1 d1 = 0;
  distance(first1, last1, d1);
  Distance2 d2 = 0;
  distance(first2, last2, d2);
```

```
  if (d1 < d2) return last1;  // 如果第二序列大于第一序列，不可能成为其子序列

  ForwardIterator1 current1 = first1;
  ForwardIterator2 current2 = first2;

  while (current2 != last2)      // 遍历整个第二序列
    if (*current1 == *current2) {    // 如果这个元素相同
      ++current1;                    // 调整，以便比对下一个元素
      ++current2;
    }
    else {                         // 如果这个元素不等
      if (d1 == d2)                //   如果两序列一样长
        return last1;              //   表示不可能成功了
      else {                       // 两序列不一样长（至此肯定是序列一大于序列二）
        current1 = ++first1;       //   调整第一序列的标兵，
        current2 = first2;         //   准备在新起点上再找一次
        --d1;           // 已经排除了序列一的一个元素，所以序列一的长度要减 1
      }
    }
  return first1;
}
```

search_n

在序列 [first,last) 所涵盖的区间中，查找“连续 count 个符合条件之元素”所形成的子序列，并返回一个迭代器指向该子序列起始处。如果找不到这样的子序列，就返回迭代器 last。上述所谓的“某条件”，在 search_n 版本一指的是相等条件“equality”，在 search_n 版本二指的是用户指定的某个二元运算（以仿函数呈现）。

例如，面对序列 {10, 8, 8, 7, 2, 8, 7, 2, 2, 8, 7, 0}，查找“连续两个 8”所形成的子序列起点，可以这么写：

```
iter1 = search_n(iv.begin(), iv.end(), 2, 8);
```

查找“连续三个小于 8 的元素”所形成的子序列起点，可以这么写：

```
iter2 = search_n(iv.begin(), iv.end(), 3, 8, less<int>());
```

图 6-6j 展示其执行结果。

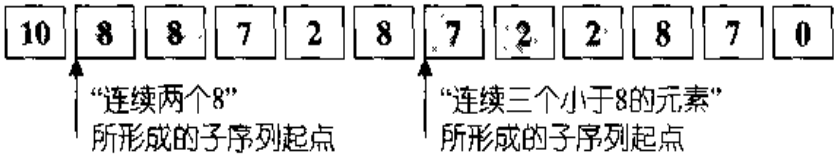


图 6-6j search_n 能够找出 "符合某条件之连续 n 个元素" 的起始点

下面是 search_n 的源代码，其工作原理如图 6-6k 所示。

```
// 版本一
// 查找 "元素 value 连续出现 count 次" 所形成的那个子序列，返回其发生位置
template <class ForwardIterator, class Integer, class T>
ForwardIterator search_n(ForwardIterator first,
                         ForwardIterator last,
                         Integer count, const T& value) {
  if (count <= 0)
    return first;
  else {
    first = find(first, last, value); // 首先找出 value 第一次出现点
    while (first != last) {           // 继续查找余下元素
      Integer n = count - 1;          // value 还应出现 n 次
      ForwardIterator i = first;      // 从上次出现点接下去查找
      ++i;
      while (i != last && n != 0 && *i == value) { // 下个元素是 value，good.
        ++i;
        --n;                          // 既然找到了，"value 应再出现次数" 便可减 1
      }                               // 回到内循环内继续查找
      if (n == 0)                 // n==0 表示确实找到了 "元素值出现 n 次" 的子序列。功德圆满
        return first;
      else                        // 功德尚未圆满…
        first = find(i, last, value); // 找 value 的下一个出现点，并准备回到外循环
    }
    return last;
  }
}

// 版本二
// 查找 "连续 count 个元素皆满足指定条件" 所形成的那个子序列的起点，返回其发生位置
template <class ForwardIterator, class Integer, class T,
          class BinaryPredicate>
ForwardIterator search_n(ForwardIterator first,
                         ForwardIterator last,
                         Integer count, const T& value,
                         BinaryPredicate binary_pred) {
  if (count <= 0)
    return first;
  else {
```

```
    while (first != last) {
      if (binary_pred(*first, value)) break; // 首先找出第一个符合条件的元素
      ++first;                                // 找到就离开
    }
    while (first != last) {                   // 继续查找余下元素
      Integer n = count - 1;                  // 还应有 n 个连续元素符合条件
      ForwardIterator i = first;              // 从上次出现点接下去查找
      ++i;
      // 以下循环确定接下来 count-1 个元素是否都符合条件
      while (i != last && n != 0 && binary_pred(*i, value)) {
        ++i;
        --n;  // 既然这个元素符合条件，“应符合条件的元素个数”便可减 1
      }
      if (n == 0) // n==0 表示确实找到了 count 个符合条件的元素。功德圆满
        return first;
      else {      // 功德尚未圆满…
        while (i != last) {
          if (binary_pred(*i, value)) break;   // 查找下一个符合条件的元素
          ++i;
        }
        first = i;                             // 准备回到外循环
      }
    }
    return last;
  }
}
```

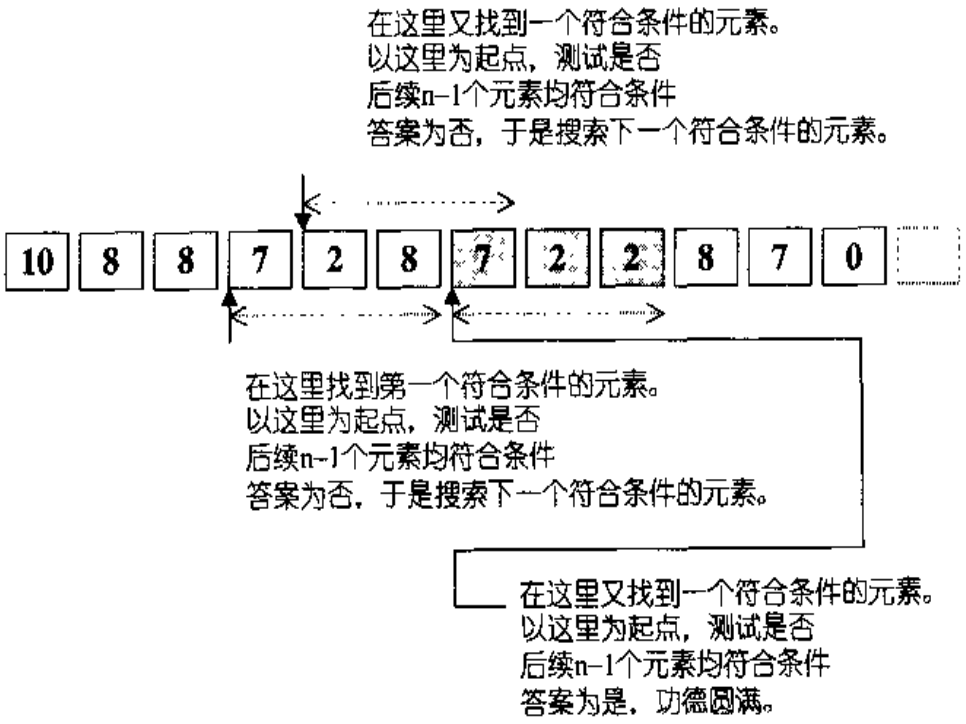


图 **6-6k** search_n 的工作原理。

题目：查找 “连续 n 个小于 8 的元素”所形成的子序列起点。本例 n==3。

swap_ranges

将 [first1,last1) 区间内的元素与 "从 first2 开始、个数相同" 的元素互相交换。这两个序列可位于同一容器中，也可位于不同的容器中。如果第二序列的长度小于第一序列，或是两序列在同一容器中且彼此重叠，执行结果未可预期。此算法返回一个迭代器，指向第二序列中的最后一个被交换元素的下一位置。

```
// 将两段等长区间内的元素互换
template <class ForwardIterator1, class ForwardIterator2>
ForwardIterator2 swap_ranges(ForwardIterator1 first1,
                             ForwardIterator1 last1,
                             ForwardIterator2 first2) {
  for ( ; first1 != last1; ++first1, ++first2)
    iter_swap(first1, first2);
  return first2;
}
```

transform

tranform() 的第一版本以仿函数 op 作用于 [first,last) 中的每一个元素身上，并以其结果产生出一个新序列。第二版本以仿函数 binary_op 作用于一双元素身上（其中一个元素来自 [first1,last)，另一个元素来自 "从 first2 开始的序列"），并以其结果产生出一个新序列。如果第二序列的元素少于第一序列，执行结果未可预期。

transform() 的两个版本都把执行结果放进迭代器 result 所标示的容器中。result 也可以指向源端容器，那么 transform() 的运算结果就会取代该容器内的元素。返回值 OutputIterator 将指向结果序列的最后元素的下一位置。

```
// 版本一
template <class InputIterator, class OutputIterator, class UnaryOperation>
OutputIterator transform(InputIterator first, InputIterator last,
                         OutputIterator result, UnaryOperation op) {
  for ( ; first != last; ++first, ++result)
    *result = op(*first);
  return result;
}

// 版本二
template <class InputIterator1, class InputIterator2, class OutputIterator,
          class BinaryOperation>
OutputIterator transform(InputIterator1 first1, InputIterator1 last1,
```

```
                          InputIterator2 first2, OutputIterator result,
                          BinaryOperation binary_op) {
  for ( ; first1 != last1; ++first1, ++first2, ++result)
    *result = binary_op(*first1, *first2);
  return result;
}
```

unique

算法 unique 能够移除（*remove*）重复的元素。每当在 [first,last] 内遇有重复元素群，它便移除该元素群中第一个以后的所有元素。注意，unique 只移除相邻的重复元素，如果你想要移除所有（包括不相邻的）重复元素，必须先将序列排序，使所有重复元素都相邻。

unique 会返回一个迭代器指向新区间的尾端，新区间之内不含相邻的重复元素。这个算法是稳定的（*stable*），亦即所有保留下来的元素，其原始相对次序不变。

事实上 unique 并不会改变 [first,last) 的元素个数，有一些残余数据会留下来，如图 6-6L 所示。情况类似 remove 算法，请参考先前对 remove 的讨论。

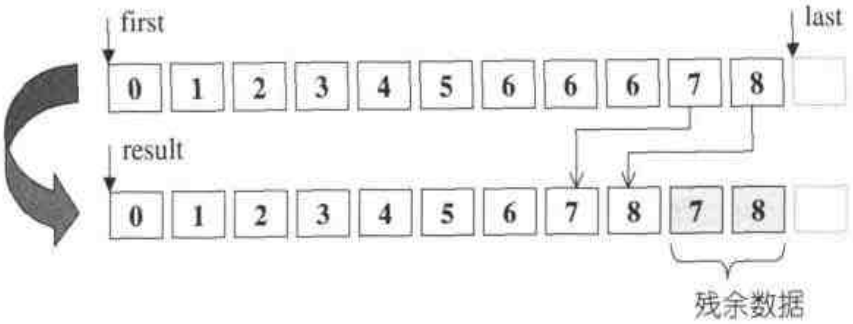


图 **6-6L** unique 算法可能产生一些残余数据。可以 erase 函数去除。
注意，如果上图的 result 即为 first，便表示 unique 算法，
如果上图的 result 不等于 first，便表示 unique_copy 算法。

unique 有两个版本，因为所谓“相邻元素是否重复”可有不同的定义。第一版本使用简单的相等（equality）测试，第二版本使用一个 Binary Predicate binary_pred 做为测试准则。以下只列出第一版本的源代码，其中所有操作其实是借助 unique_copy 完成。

```
// 版本一
template <class ForwardIterator>
ForwardIterator unique(ForwardIterator first, ForwardIterator last) {
  first = adjacent_find(first, last);          // 首先找到相邻重复元素的起点
  return unique_copy(first, last, first);      // 利用 unique_copy 完成
}
```

unique_copy

算法 unique_copy 可从 [first,last) 中将元素复制到以 result 开头的区间上：如果面对相邻重复元素群，只会复制其中第一个元素。返回的迭代器指向以 result 开头的区间的尾端。

与其它名为 *_copy 的算法一样，unique_copy 乃是 unique 的一个复制式版本，所以它的特性与 unique 完全相同（请参考图 6-6L），只不过是将结果输出到另一个区间而已。

unique_copy 有两个版本，因为所谓 “相邻元素是否重复”可有不同的定义。第一版本使用简单的相等（equality）测试，第二版本使用一个 Binary Predicate binary_pred 作为测试准则。以下只列出第一版本的源代码。

```
// 版本一
template <class InputIterator, class OutputIterator>
inline OutputIterator unique_copy(InputIterator first,
                                  InputIterator last,
                                  OutputIterator result) {
  if (first == last) return result;
  // 以下，根据 result 的 iterator category，做不同的处理
  return __unique_copy(first, last, result, iterator_category(result));
}

// 版本一辅助函数，forward_iterator_tag 版
template <class InputIterator, class ForwardIterator>
ForwardIterator __unique_copy(InputIterator first,
                              InputIterator last,
                              ForwardIterator result,
                              forward_iterator_tag) {
  *result = *first;              // 记录第一个元素
  while (++first != last)        // 遍历整个区间
  // 以下，元素不同，就记录，否则（元素相同），就跳过
    if (*result != *first) *++result = *first;
  return ++result;
}
```

```
// 版本一辅助函数，output_iterator_tag 版
template <class InputIterator, class OutputIterator>
inline OutputIterator __unique_copy(InputIterator first,
                                    InputIterator last,
                                    OutputIterator result,
                                    output_iterator_tag) {
  // 以下，output iterator 有一些功能限制，所以必须先知道其 value type.
  return __unique_copy(first, last, result, value_type(first));
}

// 由于 output iterator 为 write only，无法像 forward iterator 那般可以读取
// 所以不能有类似 *result != *first 这样的判断操作，所以才需要设计这一版本
// 例如ostream_iterator 就是一个 output iterator.
template <class InputIterator, class OutputIterator, class T>
OutputIterator __unique_copy(InputIterator first, InputIterator last,
                             OutputIterator result, T*) {
  // T 为 output iterator 的 value type
  T value = *first;
  *result = value;
  while (++first != last)
    if (value != *first) {
      value = *first;
      *++result = value;
    }
  return ++result;
}
```

* *

接下来各小节（6.7.2~6.7.12）所介绍的算法，工作原理比较复杂。下面是各个算法的运用实例：

```
// file: 6-7-n.cpp
// gcc291[x] cb4[o] vc6[o]
// gcc291 不接受 random_shuffle()，见 6.7.7 节详述
#include <algorithm>
#include <vector>
#include <functional>
#include <iostream>
using namespace std;

struct even {                    // 这是一个仿函数，请参考 1.9.6 节与第 7 章
  bool operator()(int x) const
    { return x%2 ? false : true; }
};
```

```
int main()
{
  int ia[] = { 12,17,20,22,23,30,33,40 };
  vector<int> iv(ia, ia+sizeof(ia)/sizeof(int));

  cout << *lower_bound(iv.begin(), iv.end(), 21) << endl;  // 22
  cout << *upper_bound(iv.begin(), iv.end(), 21) << endl;  // 22
  cout << *lower_bound(iv.begin(), iv.end(), 22) << endl;  // 22
  cout << *upper_bound(iv.begin(), iv.end(), 22) << endl;  // 23

  // 面对有序区间 (sorted range)，可以二分查找法寻找某个元素
  cout << binary_search(iv.begin(), iv.end(), 33) << endl;  // 1 (true)
  cout << binary_search(iv.begin(), iv.end(), 34) << endl;  // 0 (false)

  // 下一个排列组合
  next_permutation(iv.begin(), iv.end());
  copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;
  // 12 17 20 22 23 30 40 33

  // 上一个排列组合
  prev_permutation(iv.begin(), iv.end());
  copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;
  // 12 17 20 22 23 30 33 40

  // 随机重排
  random_shuffle(iv.begin(), iv.end());
  copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;
  // 33 12 30 20 17 23 22 40

  // 将 iv.begin()+4 - iv.begin() 个元素排序，放进
  // [iv.begin(), iv.begin()+4) 区间内。剩余元素不保证维持原相对次序
  partial_sort(iv.begin(), iv.begin()+4, iv.end());
  copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;
  // 12 17 20 22 33 30 23 40

  // 排序 (缺省为递增排序)
  sort(iv.begin(), iv.end());
  copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;
  // 12 17 20 22 23 30 33 40

  // 排序 (指定为递减排序)
  sort(iv.begin(), iv.end(), greater<int>());
  copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
  cout << endl;
```

```
// 40 33 30 23 22 20 17 12

// 在 iv 尾端附加新元素，使成为40 33 30 23 22 20 17 12 22 30 17
iv.push_back(22);
iv.push_back(30);
iv.push_back(17);

// 排序，并保持 "原相对位置"
stable_sort(iv.begin(), iv.end());
copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
cout << endl;
// 12 17 17 20 22 22 23 30 30 33 40

// 面对一个有序区间，找出其中的一个子区间，其内每个元素都与某特定元素值相同；
// 返回该子区间的头尾迭代器
// 如果没有这样的子区间，返回的头尾迭代器均指向该特定元素可插入
// （并仍保持排序）的地点
pair<vector<int>::iterator, vector<int>::iterator> pairIte;
pairIte = equal_range(iv.begin(), iv.end(), 22);
cout << *(pairIte.first) << endl;     // 22  (lower_bound)
cout << *(pairIte.second) << endl;    // 23  (upper_bound)

pairIte = equal_range(iv.begin(), iv.end(), 25);
cout << *(pairIte.first) << endl;     // 30 (lower_bound)
cout << *(pairIte.second) << endl;    // 30 (upper_bound)

random_shuffle(iv.begin(), iv.end());
copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
cout << endl;  // 22 30 30 17 33 40 17 23 22 12 20

// 将小于 *(iv.begin()+5)（本例为 40）的元素置于该元素之左
// 其余置于该元素之右。不保证维持原有的相对位置
nth_element(iv.begin(), iv.begin()+5, iv.end());
copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
cout << endl;  // 20 12 22 17 17 22 23 30 30 33 40

// 将大于 *(iv.begin()+5)（本例为 22）的元素置于该元素之左
// 其余置于该元素之右。不保证维持原有的相对位置
nth_element(iv.begin(), iv.begin()+5, iv.end(), greater<int>());
copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
cout << endl;  // 40 33 30 30 23 22 17 17 22 12 20

// 以 "是否符合 even()条件" 为依据，将符合者置于左段，不符合者置于右段
//保证维持原有的相对位置。如不需要 "维持原有的相对位置"，可改用 partition()
stable_partition(iv.begin(), iv.end(), even());
copy(iv.begin(), iv.end(), ostream_iterator<int>(cout, " "));
cout << endl;  // 40 30 30 22 22 12 20 33 23 17 17
}
```

6.7.2 lower_bound（应用于有序区间）

这是二分查找（binary search）的一种版本，试图在已排序的[first,last)中寻找元素 value。如果[first,last)具有与 value 相等的元素(s)，便返回一个迭代器，指向其中第一个元素。如果没有这样的元素存在，便返回“假设这样的元素存在时应该出现的位置”。也就是说，它会返回一个迭代器，指向第一个“不小于 value”的元素。如果 value 大于[first,last)内的任何一个元素，则返回 last。以稍许不同的观点来看 lower_bound，其返回值是“在不破坏排序状态的原则下，可插入 value 的第一个位置”。见图 6-7。

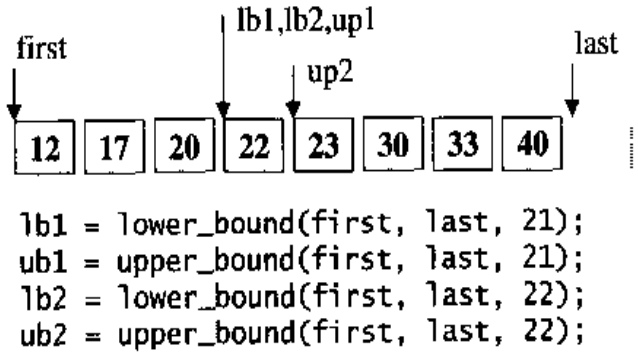


图 6-7 lower_bound 和 upper_bound

这个算法有两个版本，版本一采用 operator< 进行比较，版本二采用仿函数 comp。更正式地说，版本一返回[first,last)中最远的迭代器 i，使得[first,i)中的每个迭代器 j 都满足 *j < value。版本二返回[first,last)中最远的迭代器 i，使[first,i)中的每个迭代器 j 都满足“comp(*j, value)为真”。

```
// 版本一
template <class ForwardIterator, class T>
inline ForwardIterator lower_bound(ForwardIterator first,
                                   ForwardIterator last,
                                   const T& value) {
  return __lower_bound(first, last, value, distance_type(first),
                       iterator_category(first));
}

// 版本二
template <class ForwardIterator, class T, class Compare>
inline ForwardIterator lower_bound(ForwardIterator first,
```

```
                                ForwardIterator last,
                                const T& value, Compare comp) {
  return __lower_bound(first, last, value, comp, distance_type(first),
                       iterator_category(first));
}
```

下面是版本一的两个辅助函数。版本二的辅助函数极为类似，就不列出了。

```
// 版本一的 forward_iterator 版本
template <class ForwardIterator, class T, class Distance>
ForwardIterator __lower_bound(ForwardIterator first,
                              ForwardIterator last,
                              const T& value,
                              Distance*,
                              forward_iterator_tag) {
  Distance len = 0;
  distance(first, last, len);   // 求取整个区间的长度 len
  Distance half;
  ForwardIterator middle;

  while (len > 0) {
    half = len >> 1;            // 除以 2
    middle = first;             // 这两行令 middle 指向中间位置
    advance(middle, half);
    if (*middle < value) {      // 如果中间位置的元素值 < 标的值
      first = middle;           // 这两行令 first 指向 middle 的下一位置
      ++first;
      len = len - half - 1;     // 修正 len，回头测试循环的结束条件
    }
    else
      len = half;               // 修正 len，回头测试循环的结束条件
  }
  return first;
}

// 版本一的 random_access_iterator 版本
template <class RandomAccessIterator, class T, class Distance>
RandomAccessIterator __lower_bound(RandomAccessIterator first,
                                   RandomAccessIterator last,
                                   const T& value,
                                   Distance*,
                                   random_access_iterator_tag) {
  Distance len = last - first;  // 求取整个区间的长度 len
  Distance half;
  RandomAccessIterator middle;

  while (len > 0) {
    half = len >> 1;            // 除以 2
    middle = first + half;      // 令 middle 指向中间位置（r-a-i 才能如此）
```

```
    if (*middle < value) {        // 如果中间位置的元素值 < 目标值
      first = middle + 1;         // 令 first 指向 middle 的下一位置
      len = len - half - 1;       // 修正 len，回头测试循环的结束条件
    }
    else
      len = half;                 // 修正 len，回头测试循环的结束条件
  }
  return first;
}
```

6.7.3 upper_bound（应用于有序区间）

算法 upper_bound 是二分查找（binary search）法的一个版本。它试图在已排序的[first,last) 中寻找 value。更明确地说，它会返回 “在不破坏顺序的情况下，可插入 value 的最后一个合适位置”。见图 6-7。

由于 STL 规范 “区间圈定”时的起头和结尾并不对称（是的，[first,last) 包含 first 但不包含 last），所以 upper_bound 与 lower_bound 的返回值意义大有不同。如果你查找某值，而它的确出现在区间之内，则 lower_bound 返回的是一个指向该元素的迭代器。然而 upper_bound 不这么做。因为 upper_bound 所返回的是在不破坏排序状态的情况下，value 可被插入的 “最后一个”合适位置。如果 value 存在，那么它返回的迭代器将指向 value 的下一位置，而非指向 value 本身。

upper_bound 有两个版本，版本一采用 operator< 进行比较，版本二采用仿函数 comp。更正式地说，版本一返回 [first,last) 区间内最远的迭代器 i，使 [first,i) 内的每个迭代器 j 都满足 “value < *j 不为真”。版本二返回 [first,last) 区间内最远的迭代器 i，使 [first,i) 中的每个迭代器 j 都满足 “comp(value, *j) 不为真”。

```
// 版本一
template <class ForwardIterator, class T>
inline ForwardIterator upper_bound(ForwardIterator first,
                                   ForwardIterator last,
                                   const T& value) {
  return __upper_bound(first, last, value, distance_type(first),
                       iterator_category(first));
}
```

```
// 版本二
template <class ForwardIterator, class T, class Compare>
inline ForwardIterator upper_bound(ForwardIterator first,
                                   ForwardIterator last,
                                   const T& value, Compare comp) {
  return __upper_bound(first, last, value, comp, distance_type(first),
                       iterator_category(first));
}
```

下面是版本一的两个辅助函数。版本二的辅助函数极为类似，我就不列出了。

```
// 版本一的 forward_iterator 版本
template <class ForwardIterator, class T, class Distance>
ForwardIterator __upper_bound(ForwardIterator first,
                              ForwardIterator last,
                              const T& value, Distance*,
                              forward_iterator_tag) {
  Distance len = 0;
  distance(first, last, len);   // 求取整个区间的长度 len
  Distance half;
  ForwardIterator middle;

  while (len > 0) {
    half = len >> 1;            // 除以 2
    middle = first;             // 这两行令 middle 指向中间位置
    advance(middle, half);
    if (value < *middle)        // 如果中间位置的元素值 > 标的值
      len = half;               // 修正 len，回头测试循环的结束条件
    else {
      first = middle;           // 这两行令 first 指向 middle 的下一位置
      ++first;
      len = len - half - 1;     // 修正 len，回头测试循环的结束条件
    }
  }
  return first;
}

// 版本一的 random_access_iterator 版本
template <class RandomAccessIterator, class T, class Distance>
RandomAccessIterator __upper_bound(RandomAccessIterator first,
                                   RandomAccessIterator last,
                                   const T& value, Distance*,
                                   random_access_iterator_tag) {
  Distance len = last - first;  // 求取整个区间的长度 len
  Distance half;
  RandomAccessIterator middle;

  while (len > 0) {
    half = len >> 1;            // 除以 2
```

```
    middle = first + half;          // 令 middle 指向中间位置
    if (value < *middle)            // 如果中间位置的元素值 > 目标值
      len = half;                   // 修正 len，回头测试循环的结束条件
    else {
      first = middle + 1;           // 令 first 指向 middle 的下一位置
      len = len - half - 1;         // 修正 len，回头测试循环的结束条件
    }
  }
  return first;
}
```

6.7.4 binary_search （应用于有序区间）

算法 binary_search 是一种二分查找法，试图在已排序的[first,last) 中寻找元素 value。如果 [first,last) 内有等同于 value 的元素，便返回 true，否则返回 false。

返回单纯的 bool 或许不能满足你，前面所介绍的 lower_bound 和 upper_bound能够提供额外的信息。事实上binary_search便是利用lower_bound先找出“假设 value 存在的话，应该出现的位置”，然后再对比该位置上的值是否为我们所要查找的目标，并返回对比结果。

binary_search 的第一版本采用 operator< 进行比较，第二版本采用仿函数 comp 进行比较。

正式地说，当且仅当 (*if and only if*) [first,last) 中存在一个迭代器 i 使得 “*i < value 和 value < *i 皆不为真”，则第一版本返回 true。当且仅当在 [first,last) 中存在一个迭代器 i 使得 “comp(*i,value) 和 comp(value,*i) 皆不为真”，则第二版本返回 true。

```
// 版本一
template <class ForwardIterator, class T>
bool binary_search(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                   const T& value) {
  ForwardIterator i = lower_bound(first, last, value);
  return i != last && !(value < *i);
}

// 版本二
```

```
template <class ForwardIterator, class T, class Compare>
bool binary_search(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
                   const T& value, Compare comp) {
  ForwardIterator i = lower_bound(first, last, value, comp);
  return i != last && !comp(value, *i);
}
```

6.7.5 next_permutation

STL 提供了两个用来计算排列组合关系的算法，分别是 next_permucation 和 prev_permutation。首先我们必须了解什么是“下一个”排列组合，什么是“前一个”排列组合。考虑三个字符所组成的序列 {a,b,c}。这个序列有六个可能的排列组合：abc, acb, bac, bca, cab, cba。这些排列组合根据 less-than 操作符做字典顺序（*lexicographical*）的排序。也就是说，abc 名列第一，因为每一个元素都小于其后的元素。acb 是次一个排列组合，因为它是固定了 a（序列内最小元素）之后所做的新组合。同样道理，那些固定 b（序列内次小元素）而做的排列组合，在次序上将先于那些固定 c 而做的排列组合。以 bac 和 bca 为例，bac 在 bca 之前，因为序列 ac 小于序列 ca。面对 bca，我们可以说其前一个排列组合是 bac，而其后一个排列组合是 cab。序列 abc 没有 “前一个”排列组合，cba 没有 “后一个”排列组合。

next_permutation() 会取得 [first,last) 所标示之序列的下一个排列组合。如果没有下一个排列组合，便返回 false；否则返回 true。

这个算法有两个版本。版本一使用元素型别所提供的 less-than 操作符来决定下一个排列组合，版本二则是以仿函数 comp 来决定。

稍后即将出现的实现，简述如下，符号表示如图 6-8 所示。首先，从最尾端开始往前寻找两个相邻元素，令第一元素为 *i，第二元素为 *ii，且满足 *i<*ii。找到这样一组相邻元素后，再从最尾端开始往前检验，找出第一个大于 *i 的元素，令为 *j，将 i,j 元素对调，再将 ii 之后的所有元素颠倒排列。此即所求之 “下一个”排列组合。

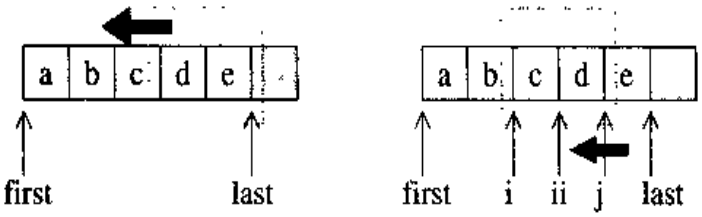


图 **6-8** next_permutation 算法的实现细节符号表示

举个实例，假设我手上有序列 {0,1,2,3,4}，图 6-9 便是套用上述演算法则，一步一步获得的 “下一个” 排列组合。图中只框出那符合 “第一元素为 *i，第二元素为 *ii，且满足 *i < *ii” 的相邻两元素，至于寻找适当的 j、对调、逆转等操作并未显示出。

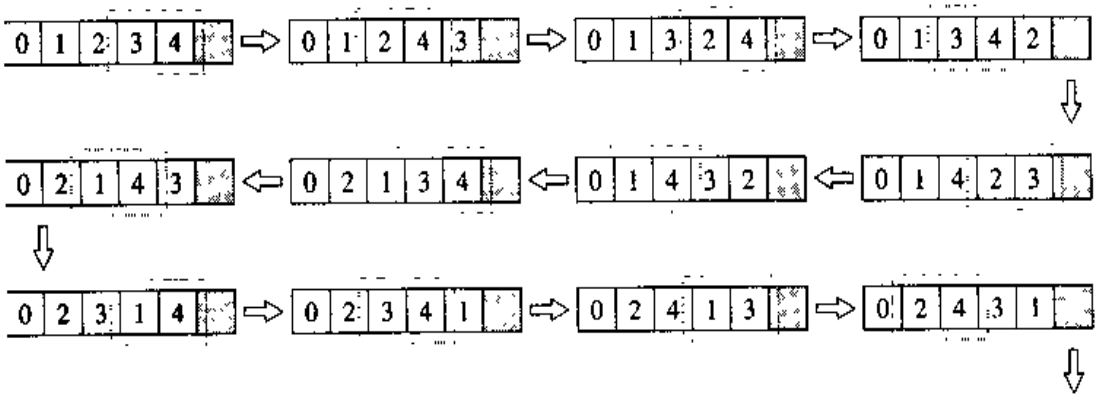


图 **6-9** next_permutation 算法 实例演练

以下便是版本一的实现细节。版本二相当类似，我就不列出来了。

```
// 版本一
template <class BidirectionalIterator>
bool next_permutation(BidirectionalIterator first,
                      BidirectionalIterator last) {
  if (first == last) return false;   // 空区间
  BidirectionalIterator i = first;
  ++i;
  if (i == last) return false;       // 只有一个元素
  i = last;  // i 指向尾端
  --i;

  for(;;) {
    BidirectionalIterator ii = i;
    --i;
```

```
    // 以上，锁定一组（两个）相邻元素
    if (*i < *ii) {     // 如果前一个元素小于后一个元素
      BidirectionalIterator j = last;      // 令 j 指向尾端
      while (!(*i < *--j));          // 由尾端往前找，直到遇上比 *i 大的元素
      iter_swap(i, j);               // 交换 i, j
      reverse(ii, last);             // 将 ii 之后的元素全部逆向重排
      return true;
    }
    if (i == first) {                // 进行至最前面了
      reverse(first, last);          // 全部逆向重排
      return false;
    }
  }
}
```

6.7.6 prev_permutation

所谓“前一个”排列组合，其意义已在上一节阐述。实际做法简述如下，其中所用的符号如图 6-8 所示。首先，从最尾端开始往前寻找两个相邻元素，令第一元素为 *i，第二元素为 *ii，且满足 *i > *ii。找到这样一组相邻元素后，再从最尾端开始往前检验，找出第一个小于 *i 的元素，令为 *j，将 i, j 元素对调，再将 ii 之后的所有元素颠倒排列。此即所求之“前一个”排列组合。

举个实例，假设我手上有序列 {4,3,2,1,0}，图 6-10 便是套用上述演算法则，一步一步获得的“前一个”排列组合。图中只框出那符合“第一元素为 *i，第二元素为 *ii，且满足 *i > *ii”的相邻两元素，至于寻找适当的 j、对调、逆转等操作并未显示出。

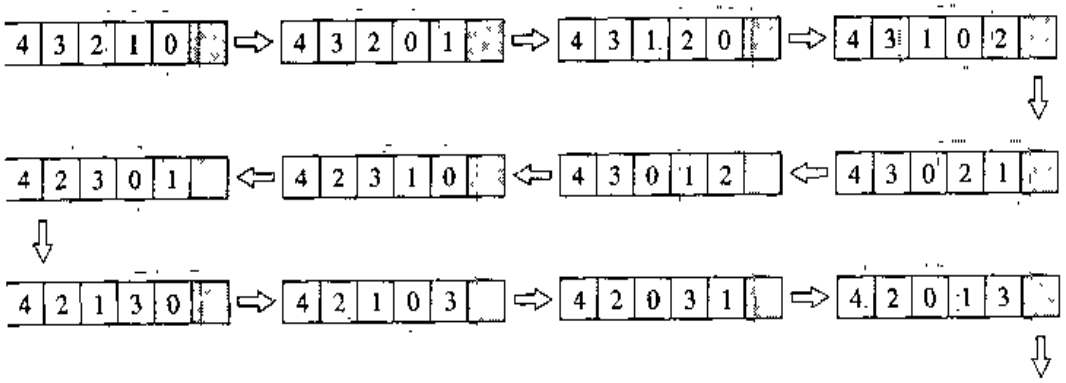


图 6-10 prev_permutation 算法 实例演练

以下便是版本一的实现细节，版本二非常类似，我就不列出来了。

```
// 版本一
template <class BidirectionalIterator>
bool prev_permutation(BidirectionalIterator first,
                      BidirectionalIterator last) {
  if (first == last) return false;  // 空区间
  BidirectionalIterator i = first;
  ++i;
  if (i == last) return false;      // 只有一个元素
  i = last;  // i 指向尾端
  --i;

  for(;;) {
    BidirectionalIterator ii = i;
    --i;
    // 以上，锁定一组（两个）相邻元素
    if (*ii < *i) {    // 如果前一个元素大于后一个元素
      BidirectionalIterator j = last;     // 令 j 指向尾端
      while (!(*--j < *i));       // 由尾端往前找，直到遇上比 *i 小的元素
      iter_swap(i, j);            // 交换 i, j
      reverse(ii, last);          // 将 ii 之后的元素全部逆向重排
      return true;
    }
    if (i == first) {             // 进行至最前面了
      reverse(first, last);       // 全部逆向重排
      return false;
    }
  }
}
```

6.7.7 random_shuffle

这个算法将[first,last)的元素次序随机重排。也就是说，在 N! 种可能的元素排列顺序中随机选出一种，此处 N 为 last-first。

N 个元素的序列，其排列方式有 N! 种，random_shuffle会产生一个均匀分布，因此任何一个排列被选中的机率为 1/N!。这很重要，因为有不少算法在其第一阶段过程中必须获得序列的随机重排，但如果其结果未能形成“在 N! 个可能排列上均匀分布（uniform distribution）”，便很容易造成算法的错误。

这个算法详述于《*The Art of Computer Programming*》by Donald Knuth, 3.4.2 节。

random_shuffle有两个版本，差别在于随机数的取得。版本一使用内部随机数产生器，版本二使用一个会产生随机随机数的仿函数。特别请你注意，该仿函数的传递方式是 by reference 而非一般的 by value，这是因为随机随机数产生器有一个重要特质：它拥有局部状态（local state），每次被调用时都会有所改变，并因此保障产生出来的随机数能够随机。

下面是SGI 版的实现细节：

```
// SGI 版本一
template <class RandomAccessIterator>
inline void random_shuffle(RandomAccessIterator first,
                           RandomAccessIterator last) {
  __random_shuffle(first, last, distance_type(first));
}

template <class RandomAccessIterator, class Distance>
void __random_shuffle(RandomAccessIterator first,
                      RandomAccessIterator last,
                      Distance*) {
  if (first == last) return;
  for (RandomAccessIterator i = first + 1; i != last; ++i)
#ifdef __STL_NO_DRAND48
    iter_swap(i, first + Distance(rand() % ((i - first) + 1)));
#else
    iter_swap(i, first + Distance(lrand48() % ((i - first) + 1)));
#endif
// 注意，在我的GCC2.91.57 中，__STL_NO_DRAND48 是未定义的，因此上述实现代码
// 会采用lrand48() 那个版本。但编译时却又说 lrand48() undeclared
}

// SGI 版本二
template <class RandomAccessIterator, class RandomNumberGenerator>
void random_shuffle(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last,
                    RandomNumberGenerator& rand) { // 注意，by reference
  if (first == last) return;
  for (RandomAccessIterator i = first + 1; i != last; ++i)
    iter_swap(i, first + rand((i - first) + 1));
}
```

奇怪的是，我手上的 GCC2.91-for-win 并未定义 __STL_NO_DRAND48（见1.8.3节的组态测试），因此对random_shuffle 的调用会流向上述的lrand48() 版本，然而联结时却又说 lrand48() 未曾声明。例如，以下程序可通过C++Builder4和 VC6，却无法通过GCC2.91-for-win：

```
int main()
{
  vector< int > vec;
  for (int ix = 0; ix < 10; ix++)
       vec.push_back( ix );

  random_shuffle( vec.begin(), vec.end() );
  copy(vec.begin(), vec.end(), ostream_iterator<int>(cout," " ));
  // 6 8 9 2 1 4 3 7 0 5

  return 0;
}
```

为此，我特别把 RaugeWave STL 对 random_shuffle() 的实现细节列出于下：

```
// RW 版本一，in <algorithm.h>
template <class RandomAccessIterator>
inline void random_shuffle (RandomAccessIterator first,
                            RandomAccessIterator last)
{
  __random_shuffle(first, last, __distance_type(first));
}

// RW 版本一，in <algorithm.cc>
template <class RandomAccessIterator, class Distance>
void __random_shuffle (RandomAccessIterator first,
                       RandomAccessIterator last,
                       Distance*)
{
  if (!(first == last))
    for (RandomAccessIterator i = first + 1; i != last; ++i)
      iter_swap(i, first + Distance(__RWSTD::__long_random((i-first)+1)));
      // 上述 __RWSTD::__long_random 是内部的随机数产生器
}

// RW 版本二，in <algorithm.cc>
template <class RandomAccessIterator, class RandomNumberGenerator>
void random_shuffle (RandomAccessIterator first,
                     RandomAccessIterator last,
                     RandomNumberGenerator& rand)
{
  if (!(first == last))
    for (RandomAccessIterator i = first + 1; i != last; ++i)
      iter_swap(i, first + rand((i - first) + 1));
}
```

6.7.8 partial_sort / partial_sort_copy

本算法接受一个 middle 迭代器（位于序列 [first,last) 之内），然后重新安排 [first,last)，使序列中的 middle-first 个最小元素以递增顺序排序，置于[first,middle) 内。其余 last-middle 个元素安置于 [middle,last) 中，不保证有任何特定顺序。

使用 sort 算法，同样能够保证较小的 N 个元素以递增顺序置于 [first,first+N) 之内。选择 partial_sort 而非 sort 的唯一理由是效率。是的，如果只是挑出前 N 个最小元素来排序，当然比对整个序列排序快上许多。

partial_sort 有两个版本，其差别在于如何定义某个元素小于另一元素。第一版本使用 less-than 操作符，第二版本使用仿函数 comp。算法内部采用 heap sort（4.7.2 节）来完成任务，简述于下。

partial_sort 的任务是找出 middle-first 个最小元素，因此，首先界定出区间 [first, middle)，并利用 4.7.2 节的 make_heap() 将它组织成一个 max-heap，然后就可以将[middle,last)中的每一个元素拿来与 max-heap 的最大值比较（max-heap 的最大值就在第一个元素身上，轻松可以获得）；如果小于该最大值，就互换位置并重新保持 max-heap 的状态。如此一来，当我们走遍整个 [middle,last)时，较大的元素都已经被抽离出[first,middle)，这时候再以 sort_heap() 将[first, middle) 做一次排序，即功德圆满。见图 6-11 的步骤详解。

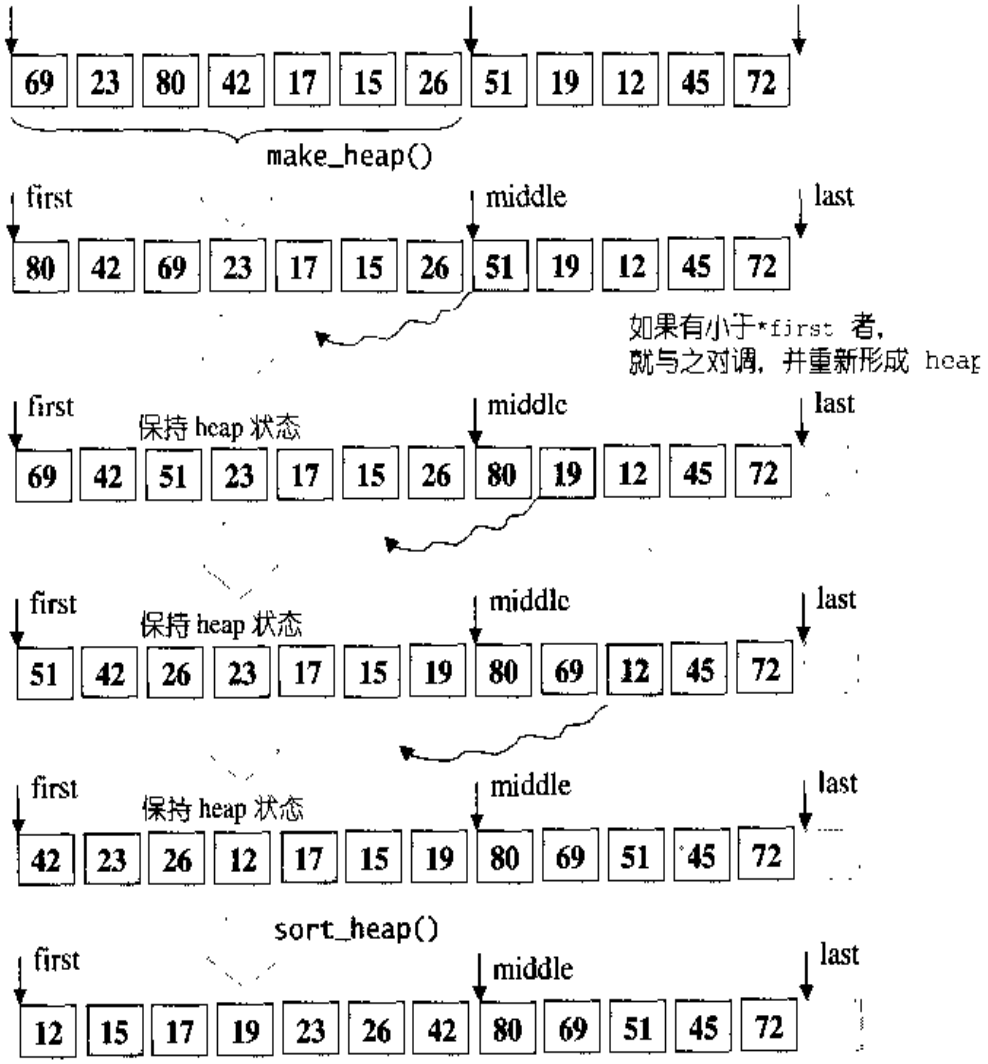


图 6-11 partial_sort 步骤详解

下面是 partial_sort 的实现细节。考虑到篇幅，我只列出第一个版本。请注意，partial_sort 只接受 RandomAccessIterator。

```
// 版本
template <class RandomAccessIterator>
inline void partial_sort(RandomAccessIterator first,
                         RandomAccessIterator middle,
                         RandomAccessIterator last) {
  __partial_sort(first, middle, last, value_type(first));
}

template <class RandomAccessIterator, class T>
void __partial_sort(RandomAccessIterator first,
                    RandomAccessIterator middle,
                    RandomAccessIterator last, T*) {
```

```
  make_heap(first, middle);
  // 注意，以下的 i < last 判断操作，只适用于 random iterator
  for (RandomAccessIterator i = middle; i < last; ++i)
    if (*i < *first)
      __pop_heap(first, middle, i, T(*i), distance_type(first));
  sort_heap(first, middle);
}
```

partial_sort 有一个姊妹，就是 partial_sort _copy:

```
// 版本一
template <class InputIterator, class RandomAccessIterator>
inline RandomAccessIterator
partial_sort_copy(InputIterator first,
                  InputIterator last,
                  RandomAccessIterator result_first,
                  RandomAccessIterator result_last);

// 版本二
template <class InputIterator, class RandomAccessIterator,
          class Compare>
inline RandomAccessIterator
partial_sort_copy(InputIterator first,
                  InputIterator last,
                  RandomAccessIterator result_first,
                  RandomAccessIterator result_last,
                  Compare comp);
```

partial_sort 和 partial_sort_copy 两者行为逻辑完全相同，只不过后者将(last-first) 个最小元素（或最大元素，视 comp 而定）排序后的所得结果置于 [result_first, result_last)。下面是运用实例：

```
int ia[12] = {69,23,80,42,17,15,26,51,19,12,35,8 };
vector<int> vec( ia, ia+12 );
ostream_iterator<int> oite( cout," " );

partial_sort( vec.begin(), vec.begin()+7, vec.end() );
copy( vec.begin(), vec.end(), oite ); cout << endl;
// 8 12 15 17 19 23 26 80 69 51 42 35

vector<int> res(7);
partial_sort_copy( vec.begin(), vec.begin()+7, res.begin(),
                   res.end(), greater<int>() );
copy( res.begin(), res.end(), oite ); cout << endl;
// 26 23 19 17 15 12 8
```

6.7.9 sort

STL 所提供的各式各样算法中，sort() 是最复杂最庞大的一个。这个算法接受两个 RandomAccessIterators（随机存取迭代器），然后将区间内的所有元素以渐增方式由小到大重新排列。第二个版本则允许用户指定一个仿函数（functor），作为排序标准[9]。STL 的所有关系型容器（associative containers）都拥有自动排序功能（底层结构采用 RB-tree，见第 5 章），所以不需要用到这个 sort 算法。至于序列式容器（sequence containers）中的 stack、queue 和 priority-queue 都有特别的出入口，不允许用户对元素排序。剩下 vector、deque 和 list，前两者的迭代器属于 RandomAccessIterators，适合使用 sort 算法，list 的迭代器则属于 BidirectioinalIterators，不在 STL 标准之列的 slist，其迭代器更属于 ForwardIterators，都不适合使用 sort 算法。如果要对 list 或 slist 排序，应该使用它们自己提供的 member functions sort()。稍后我们便可看到为什么泛型算法 sort() 一定要求 RandomAccessIterators。

排序有多么重要

人类生活在一个有序的世界中。没有排序，很多事情无法进行。排过序的数据，特别容易查找。电话簿总是以人名为键值来排序，对人名而言，电话簿是有序的，对电话号码而言，电话簿是无序的。在电话簿里找一个人（从而得到他的电话号码）很容易，但你能想象在电话簿里头不通过人名直接查找某个特定的电话号码吗？

这类情况大量发生在日常生活中，字典需要排序，书籍索引需要排序，磁盘目录需要排序，名片需要排序，图书馆藏需要排序，户籍数据需要排序。任何数据只要你想快速查找，就需要排序。

犹有进者，排序可能使其它工作更快更轻松。如果你要确定（或找出）一堆数据里头有没有重复的元素，先排序一遍再找，会比闷着头两两对比快得多。换句话说，许多算法可能因为数据先行排序过而大幅改善效率。排序的成本，成为影响执行时间的关键因素。

[9] 稍后呈现的实现代码，都只列出第一版本，也就是以 operator< 作为排序比较标准。

STL 的 sort 算法，数据量大时采用 Quick Sort，分段递归排序。一旦分段后的数据量小于某个门槛，为避免 Quick Sort 的递归调用带来过大的额外负荷（overhead），就改用 Insertion Sort。如果递归层次过深，还会改用 Heap Sort（已于 4.7.2 节介绍）。以下分别介绍 Quick Sort 和 Insertion Sort，然后再整合起来介绍 STL sort 算法。

Insertion Sort

Insertion Sort 以双层循环的形式进行。外循环遍历整个序列，每次迭代决定出一个子区间；内循环遍历子区间，将子区间内的每一个“逆转对（inversion）”倒转过来。所谓“逆转对”是指任何两个迭代器 i,j，i < j 而 *i > *j。一旦不存在“逆转对”，序列即排序完毕。这个算法的复杂度为 O(N²)，说起来并不理想，但是当数据量很少时，却有不错的效果，原因是实现上有一些技巧（稍后源代码可见），而且不像其它较为复杂的排序算法有着诸如递归调用等操作带来的额外负荷。图 6-12 是 Insertion Sort 的详细步骤示意。

SGI STL 的 Insertion Sort 有两个版本，版本一使用以渐增方式排序，也就是说，以 operator< 为两元素的比较函数，版本二允许用户指定一个仿函数（functor），作为两元素的比较函数。以下只列出版本一的源代码。由于 STL 规格并不开放 Insertion Sort，所以 SGI 将以下函数的名称都加上双下划线，表示内部使用。

```
// 版本一
template <class RandomAccessIterator>
void __insertion_sort(RandomAccessIterator first,
                      RandomAccessIterator last) {
  if (first == last) return;
  for (RandomAccessIterator i = first + 1; i != last; ++i)  // 外循环
    __linear_insert(first, i, value_type(first));
    // 以上，[first,i) 形成一个子区间
}
```

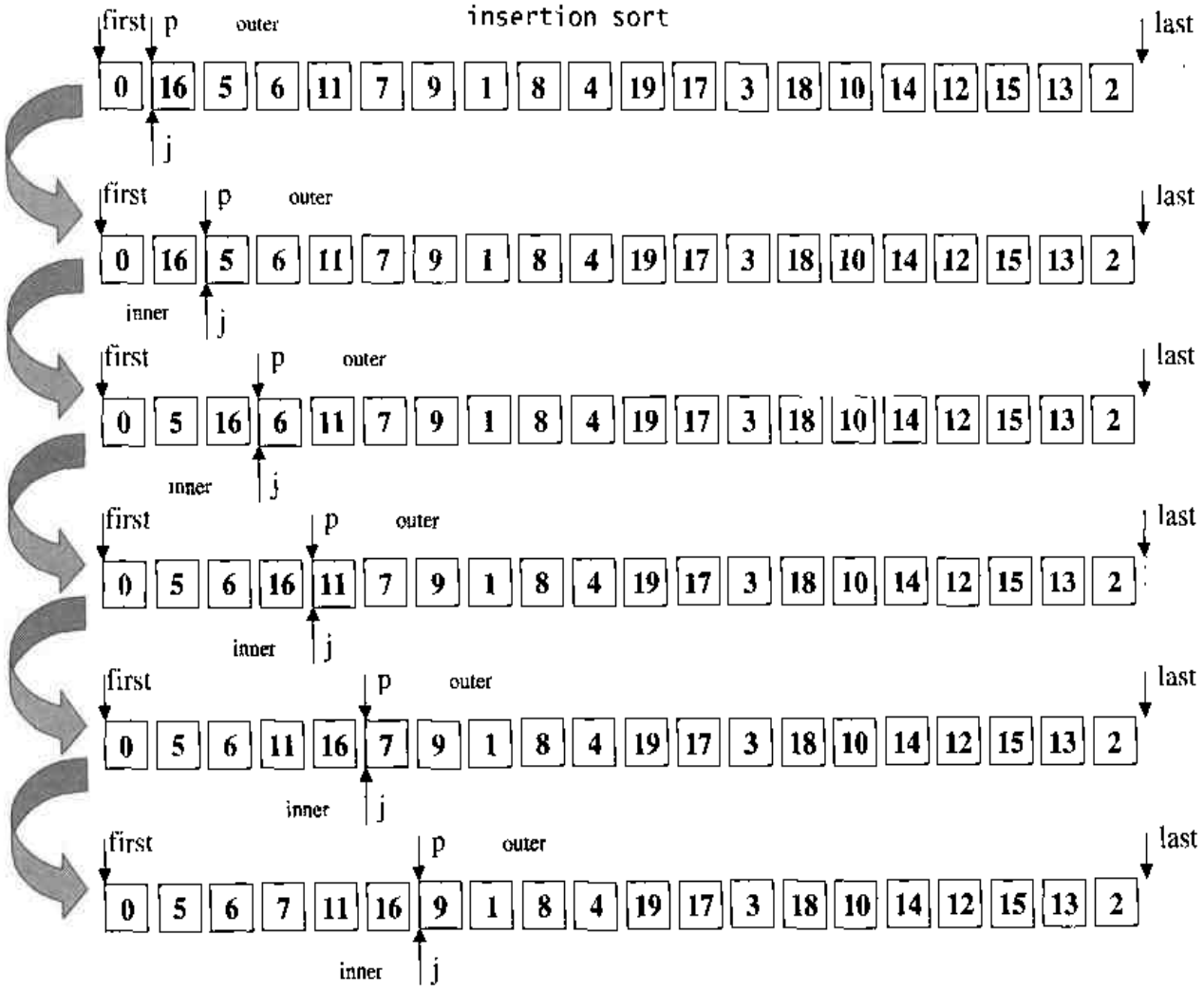


图 **6-12** Insertion Sort 操作分解

```
// 版本一辅助函数
template <class RandomAccessIterator, class T>
inline void __linear_insert(RandomAccessIterator first,
                            RandomAccessIterator last, T*) {
  T value = *last;          // 记录尾元素
  if (value < *first) {     // 尾比头还小（注意，头端必为最小元素）
    // 那么就别一个个比较了，一次做完爽快些…
    copy_backward(first, last, last + 1); // 将整个区间向右递移一个位置
    *first = value;         // 令头元素等于原先的尾元素值
  }
  else  // 尾不小于头
    __unguarded_linear_insert(last, value);
}

// 版本二辅助函数
template <class RandomAccessIterator, class T>
```

```
void __unguarded_linear_insert(RandomAccessIterator last, T value) {
  RandomAccessIterator next = last;
  --next;
  // insertion sort 的内循环
  // 注意，一旦不再出现逆转对（inversion），循环就可以结束了
  while (value < *next) {   // 逆转对（inversion）存在
    *last = *next;          // 调整
    last = next;            // 调整迭代器
    --next;                 // 左移一个位置
  }
  *last = value;            // value 的正确落脚处
}
```

上述函数之所以命名为 unguarded_x 是因为，一般的 Insertion Sort 在内循环原本需要做两次判断，判断是否相邻两元素是“逆转对”，同时也判断循环的行进是否超过边界。但由于上述所示的源代码会导致最小值必然在内循环子区间的最边缘，所以两个判断可合为一个判断，所以称为 unguarded_。省下一个判断操作，乍见之下无足轻重，但是在大数据量的情况下，影响还是可观的，毕竟这是一个非常根本的算法核心，在大数据量的情况，执行次数非常惊人。

稍后即将出场的几个函数，也有以 unguarded_ 为前缀命名者，同样是因为在特定条件下，边界条件的检验可以省略（或说已融入特定条件之内）。

Quick Sort

如果我们拿 Insertion Sort 来处理大量数据，其 $O(N^2)$ 的复杂度就令人摇头了。大数据量的情况下有许多更好的排序算法可供选择。正如其名称所昭示，Quick Sort 是目前已知最快的排序法，平均复杂度为 O(N log N)，最坏情况下将达 $O(N^2)$。不过 IntroSort（极类似 median-of-three QuickSort 的一种排序算法）可将最坏情况推进到 O(N log N)。早期的 STL sort 算法都采用 Quick Sort，SGI STL 已改用 IntroSort。

Quick Sort 算法可以叙述如下。假设 S 代表将被处理的序列：

1. 如果 S 的元素个数为 0 或 1，结束。
2. 取 S 中的任何一个元素，当作枢轴（*pivot*）v。
3. 将 S 分割为 L, R 两段，使 L 内的每一个元素都小于或等于 v，R 内的每一个元素都大于或等于 v。
4. 对 L, R 递归执行 Quick Sort。

Quick Sort 的精神在于将大区间分割为小区间，分段排序。每一个小区间排序完成后，串接起来的大区间也就完成了排序。最坏的情况发生在分割（*partitioning*）时产生出一个空的子区间——那完全没有达到分割的预期效果。图 6-13 说明了 Quick Sort 的分段排序。

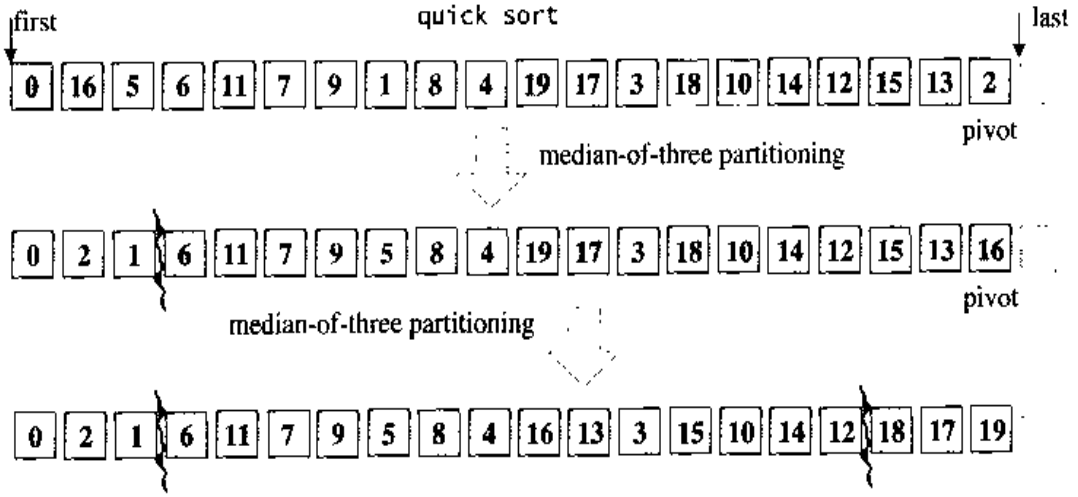


图 **6-13** Quick Sort 采行分段排序。分段的原则通常采用 median-of-three（首、尾、中央的中间值）。因此，图中第一列以 2 为枢轴，分割出第二列所示的左右两段。第二列的右段再以 16 为枢轴，分割出第三列的两段。依此类推。

Median-of-Three（三点中值）

注意，任何一个元素都可以被选来当作枢轴（pivot），但是其合适与否却会影响 Quick Sort 的效率。为了避免“元素当初输入时不够随机”所带来的恶化效应，最理想最稳当的方式就是取整个序列的头、尾、中央三个位置的元素，以其中值（median）作为枢轴。这种做法称为 median-of-three partitioning，或称为 mediun-of-three-QuickSort。为了能够快速取出中央位置的元素，显然迭代器必须能够随机定位，亦即必须是个 RandomAccessIterators。

以下是 SGI STL 提供的三点中值决定函数：

```
// 返回 a,b,c 之居中者
template <class T>
inline const T& __median(const T& a, const T& b, const T& c) {
  if (a < b)
    if (b < c)          // a < b < c
```

```
    return b;
  else if (a < c)    // a < b, b >= c, a < c
    return c;
  else
    return a;
 else if (a < c)     // c > a >= b
  return a;
 else if (b < c)     // a >= b, a >= c, b < c
  return c;
 else
  return b;
}
```

Partitioining（分割）

分割方法不只一种，以下叙述既简单又有良好成效的做法。令头端迭代器 first 向尾部移动，尾端迭代器 last 向头部移动。当 *first 大于或等于枢轴时就停下来，当 *last 小于或等于枢轴时也停下来，然后检验两个迭代器是否交错。如果 first 仍然在左而 last 仍然在右，就将两者元素互换，然后各自调整一个位置（向中央逼近），再继续进行相同的行为。如果发现两个迭代器交错了（亦即 !(first < last)），表示整个序列已经调整完毕，以此时的 first 为轴，将序列分为左右两半，左半部所有元素值都小于或等于枢轴，右半部所有元素值都大于或等于枢轴。

下面是 SGI STL 提供的分割函数，其返回值是为分割后的右段第一个位置：

```
// 版本一
template <class RandomAccessIterator, class T>
RandomAccessIterator __unguarded_partition(
                                    RandomAccessIterator first,
                                    RandomAccessIterator last,
                                    T pivot) {
 while (true) {
  while (*first < pivot) ++first;  // first 找到 >= pivot 的元素就停下来
  --last;                          // 调整
  while (pivot < *last) --last;    // last 找到 <= pivot 的元素就停下来
  // 注意，以下 first < last 判断操作，只适用于 random iterator
  if (!(first < last)) return first;    // 交错，结束循环
  iter_swap(first, last);               // 大小值交换
  ++first;                              // 调整
 }
}
```

图 6-14 是两个分割实例的完整过程，请参照以上源代码操作。

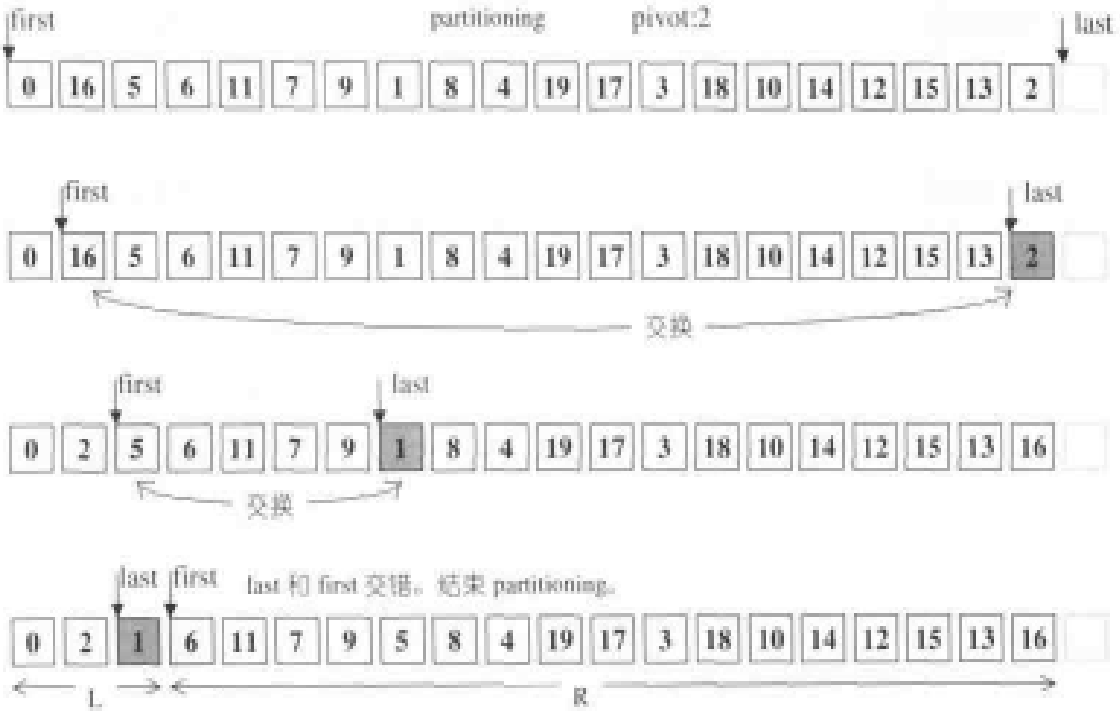


图 **6-14a** 分割（partitioning）实例一。请参照上页源代码

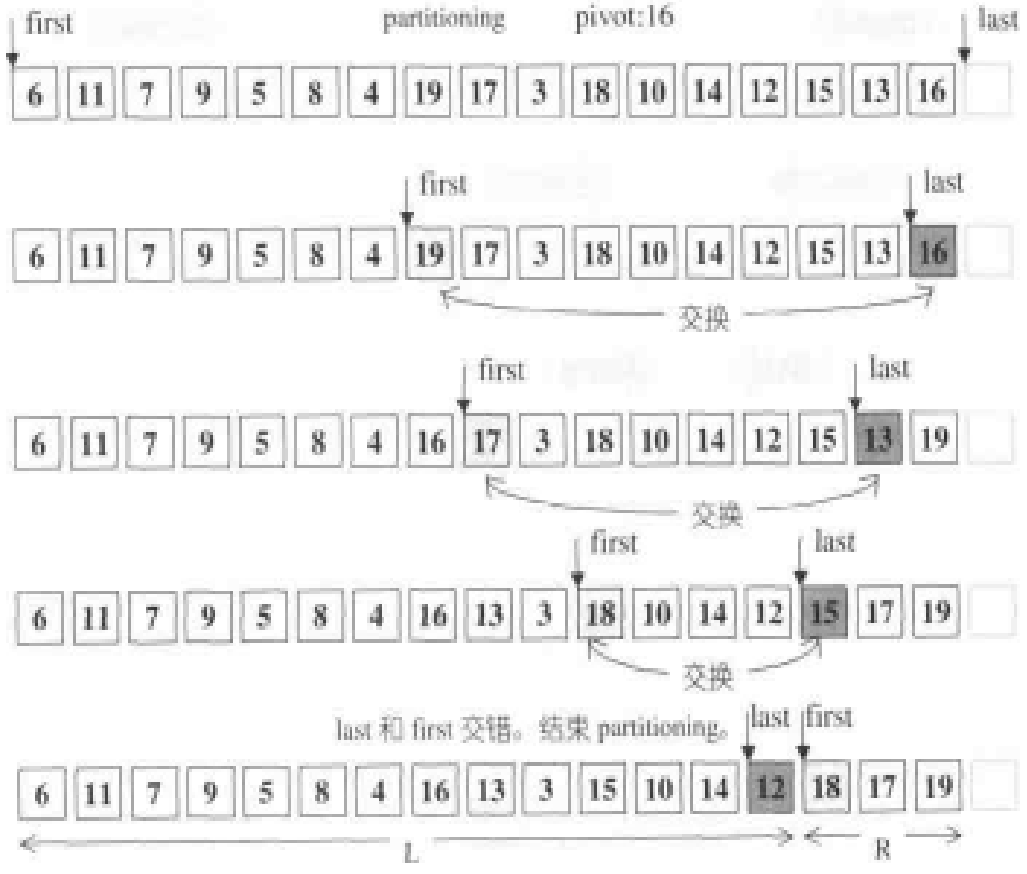


图 **6-14b** 分割（partitioning）实例二。请参照上页源代码

threshold（阈值）

面对一个只有十来个元素的小型序列，使用像 Quick Sort 这样复杂而（可能）需要大量运算的排序法、是否划算？不，不划算，在小数据量的情况下，甚至简单如 Insertion Sort 者也可能快过 Quick Sort——因为 Quick Sort 会为了极小的子序列而产生许多的函数递归调用。

鉴于这种情况，适度评估序列的大小，然后决定采用 Quick Sort 或 Insertion Sort，是值得采纳的一种优化措施。然而究竟多小的序列才应该断然改用 Insertion Sort 呢？唔，并无定论，5~20 都可能导致差不多的结果，实际的最佳值因设备而异。

final insertion sort

优化措施永不嫌多，只要我们不是贸然行事（Donald Knuth 说过一件名言：贸然实施优化，是所有恶果的根源，premature optimization is the root of all evil）。如果我们令某个大小以下的序列滞留在“几近排序但尚未完成”的状态，最后再以一次 Insertion Sort 将所有这些“几近排序但尚未竟全功”的子序列做一次完整的排序，其效率一般认为会比“将所有子序列彻底排序”更好。这是因为 Insertion Sort 在面对“几近排序”的序列时，有很好的表现。

introsort

不当的枢轴选择，导致不当的分割，导致 Quick Sort 恶化为 $O(N^2)$。David R. Musser（此君于 STL 领域大大有名）于 1996 年提出一种混合式排序算法：Introspective Sorting（内省式排序）[10]，简称 IntroSort，其行为在大部分情况下几乎与 median-of-3 Quick Sort 完全相同（当然也就一样快）。但是当分割行为（partitioning）有恶化为二次行为的倾向时，能够自我侦测，转而改用 Heap Sort，使效率维持在 Heap Sort 的 $O(N \log N)$，又比一开始就使用 Heap Sort 来得好。稍后便可看到 SGI STL 源代码中对 IntroSort 的实现。

---

[10] 请参考 http://www.cs.rpi.edu/~musser/gp/index_1.html，这里有 introsort 的简介，并可下载全篇论文。

SGI STL sort

真是千呼万唤始出来 ☺。下面是 SGI STL sort() 源代码：

```
// 版本一
// 千万注意：sort()只适用于 RandomAccessIterator
template <class RandomAccessIterator>
inline void sort(RandomAccessIterator first,
                 RandomAccessIterator last) {
  if (first != last) {
    __introsort_loop(first, last, value_type(first), __lg(last-first)*2);
    __final_insertion_sort(first, last);
  }
}
```

其中的 __lg() 用来控制分割恶化的情况：

```
// 找出 2^k <= n 的最大值 k。例：n=7，得 k=2，n=20，得 k=4，n=8，得 k=3
template <class Size>
inline Size __lg(Size n) {
  Size k;
  for (k = 0; n > 1; n >>= 1) ++k;
  return k;
}
```

当元素个数为 40 时，__introsoft_loop() 的最后一个参数将是 5*2，意思是最多允许分割 10 层。IntroSort 算法如下：

```
// 版本一
// 注意，本函数内的许多迭代器运算操作，都只适用于 RandomAccess Iterators
template <class RandomAccessIterator, class T, class Size>
void __introsort_loop(RandomAccessIterator first,
                      RandomAccessIterator last, T*,
                      Size depth_limit) {
  // 以下，__stl_threshold 是个全局常数，稍早定义为 const int 16
  while (last - first > __stl_threshold) {     // > 16
    if (depth_limit == 0) {                    // 至此，分割恶化
      partial_sort(first, last, last);         // 改用 heapsort
      return;
    }
    --depth_limit;
    // 以下是 median-of-3 partition，选择一个够好的枢轴并决定分割点
    // 分割点将落在迭代器 cut 身上
    RandomAccessIterator cut = __unguarded_partition
      (first, last, T(__median(*first,
                               *(first + (last - first)/2),
                               *(last - 1))));
    // 对右半段递归进行 sort.
    __introsort_loop(cut, last, value_type(first), depth_limit);
```

```
      last = cut;
      // 现在回到while 循环，准备对左半段递归进行 sort
      // 这种写法可读性较差，效率并没有比较好
      // RW STL 采用一般教科书写法（直观地对左半段和右半段递归），较易阅读
    }
  }
```

函数一开始就判断序列大小，__stl_threshold 是个全局整型常数，定义如下：

```
const int __stl_threshold = 16;
```

通过元素个数检验之后，再检查分割层次。如果分割层次超过指定值（我已在前一段文字中对此做了说明），就改用 partial_sort()。如果你不健忘，当还记得先前介绍过的 partial_sort() 是以 Heap Sort 完成的。

都通过了这些检验之后，便进入与 Quick Sort 完全相同的程序：以 median-of-3 方法确定枢轴位置，然后调用 __unguarded_partition() 找出分割点（其源代码已于先前显示过），然后针对左右段落递归进行 IntroSort。

当 __introsort_loop() 结束，[first, last) 内有多个“元素个数少于16”的子序列，每个子序列都有相当程度的排序，但尚未完全排序（因为元素个数一旦小于 __stl_threshold，就被中止进一步的排序操作了）。回到母函数 sort()，再进入 __final_insertion_sort()：

```
// 版本一
template <class RandomAccessIterator>
void __final_insertion_sort(RandomAccessIterator first,
                            RandomAccessIterator last) {
  if (last - first > __stl_threshold) {  // > 16
    __insertion_sort(first, first + __stl_threshold);
    __unguarded_insertion_sort(first + __stl_threshold, last);
  }
  else
    __insertion_sort(first, last);
}
```

此函数首先判断元素个数是否大于 16。如果答案为否，就调用 __insertion_sort() 加以处理。如果答案为是，就将 [first,last) 分割为长度 16 的一段子序列，和另一段剩余子序列，再针对两个子序列分别调用 __insertion_sort() 和 __unguarded_insertion_sort()。前者源代码已于先前展示过，后者源代码如下：

```
// 版本一
template <class RandomAccessIterator>
inline void __unguarded_insertion_sort(RandomAccessIterator first,
                                       RandomAccessIterator last) {
  __unguarded_insertion_sort_aux(first, last, value_type(first));
}

// 版本一
template <class RandomAccessIterator, class T>
void __unguarded_insertion_sort_aux(RandomAccessIterator first,
                                    RandomAccessIterator last,
                                    T*) {
  for (RandomAccessIterator i = first; i != last; ++i)
    __unguarded_linear_insert(i, T(*i)); // 见先前展示
}
```

瞧，这就是 SGI STL sort 算法的精彩故事。为了做个比较，我再列出 RW STL sort() 的部分（主要是上层）源代码。RW 版本用的是纯粹是 Quick Sort，不是 IntroSort。

```
template <class RandomAccessIterator>
inline void sort (RandomAccessIterator first,
                  RandomAccessIterator last)
{
  if (!(first == last))
  {
    __quick_sort_loop(first, last);
    __final_insertion_sort(first, last); // 其内操作与 SGI STL 完全相同
  }
}

template <class RandomAccessIterator>
inline void __quick_sort_loop (RandomAccessIterator first,
                               RandomAccessIterator last)
{
  __quick_sort_loop_aux(first, last, _RWSTD_VALUE_TYPE(first));
}

template <class RandomAccessIterator, class T>
void __quick_sort_loop_aux (RandomAccessIterator first,
                            RandomAccessIterator last,
                            T*)
{
  while (last - first > __stl_threshold)
  {
    // median-of-3 partitioning
```

```
      RandomAccessIterator cut = __unguarded_partition
      (first, last, T(__median(*first, *(first + (last - first)/2),
                               *(last - 1))));
      if (cut - first >= last - cut)
      {
        __quick_sort_loop(cut, last);      // 对右段递归处理
        last = cut;
      }
      else
      {
        __quick_sort_loop(first, cut);     // 对左段递归处理
        first = cut;
      }
    }
  }
```

6.7.10 equal_range （应用于有序区间）

算法 equal_range 是二分查找法的一个版本，试图在已排序的 [first,last)中寻找 value。它返回一对迭代器 i 和 j，其中 i 是在不破坏次序的前提下，value 可插入的第一个位置（亦即 lower_bound），j 则是在不破坏次序的前提下，value 可插入的最后一个位置（亦即 upper_bound）。因此，[i,j) 内的每个元素都等同于 value，而且 [i,j) 是 [first,last) 之中符合此一性质的最大子区间。

如果以稍许不同的角度来思考 equal_range，我们可把它想成是 [first,last) 内 “与 value 等同”之所有元素所形成的区间 A。由于 [first,last) 有序（*sorted*），所以我们知道 “与 value 等同”之所有元素一定都相邻，于是，算法 lower_bound 返回区间 A 的第一个迭代器，算法 upper_bound返回区间A的最后元素的下一位置，算法 equal_range则是以 pair 的形式将两者都返回。

即使 [first,last) 并未含有 “与 value 等同”之任何元素，以上叙述仍然合理。这种情况下 “与 value 等同”之所有元素所形成的，其实是个空区间。在不破坏次序的前提下，只有一个位置可以插入 value，而 equal_range 所返回的 pair，其第一和第二元素（都是迭代器）皆指向该位置。

本算法有两个版本，第一版本采用 operator< 进行比较，第二版本采用仿函数 comp 进行比较。稍后只列出版本一的源代码。图 6-15 展示 equal_range 的意义。

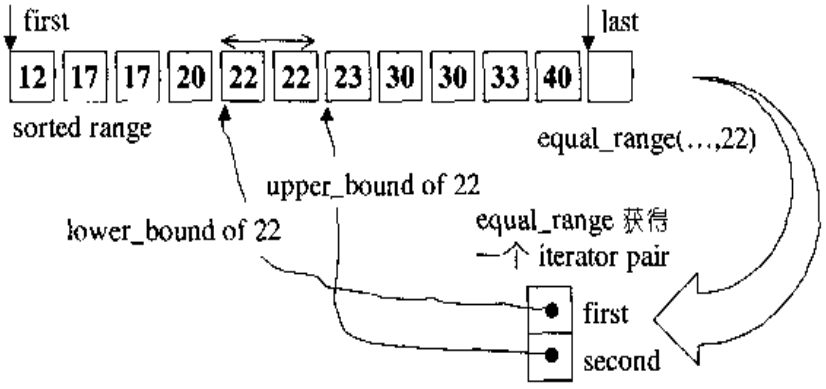


图 6-15 equal_range 的执行结果示意

```
// 版本一
template <class ForwardIterator, class T>
inline pair<ForwardIterator, ForwardIterator>
equal_range(ForwardIterator first, ForwardIterator last,
            const T& value) {
  // 根据迭代器的种类型 (category)，采用不同的策略
  return __equal_range(first, last, value, distance_type(first),
                       iterator_category(first));
}

// 版本一的 random_access_iterator 版本
template <class RandomAccessIterator, class T, class Distance>
pair<RandomAccessIterator, RandomAccessIterator>
__equal_range(RandomAccessIterator first, RandomAccessIterator last,
              const T& value, Distance*, random_access_iterator_tag) {
  Distance len = last - first;
  Distance half;
  RandomAccessIterator middle, left, right;

  while (len > 0) {          // 整个区间尚未遍历完毕
    half = len >> 1;         // 找出中央位置
    middle = first + half;   // 设定中央迭代器
    if (*middle < value) {   // 如果中央元素 < 指定值
      first = middle + 1;    // 将运作区间缩小（移至后半段），以提高效率
      len = len - half - 1;
    }
    else if (value < *middle)    // 如果中央元素 > 指定值
      len = half;                // 将运作区间缩小（移至前半段）以提高效率
    else {          // 如果中央元素 == 指定值
      // 在前半段找 lower_bound
      left = lower_bound(first, middle, value);
      // 在后半段找 lower_bound
      right = upper_bound(++middle, first + len, value);
      return pair<RandomAccessIterator, RandomAccessIterator>(left,right);
```

```
    }
  }
  // 整个区间内都没有匹配的值，那么应该返回一对迭代器，指向第一个大于 value 的元素
  return pair<RandomAccessIterator, RandomAccessIterator>(first, first);
}

// 版本一的 forward_iterator 版本
template <class ForwardIterator, class T, class Distance>
pair<ForwardIterator, ForwardIterator>
__equal_range(ForwardIterator first, ForwardIterator last, const T& value,
              Distance*, forward_iterator_tag) {
  Distance len = 0;
  distance(first, last, len);
  Distance half;
  ForwardIterator middle, left, right;

  while (len > 0) {
    half = len >> 1;
    middle = first;          // 此行及下一行，相当于 RandomAccessIterator 的
    advance(middle, half);   //   middle = first + half;
    if (*middle < value) {
      first = middle;        // 此行及下一行，相当于 RandomAccessIterator 的
      ++first;               //   first = middle + 1;
      len = len - half - 1;
    }
    else if (value < *middle)
      len = half;
    else {
      left = lower_bound(first, middle, value);
      // 以下这行相当于 RandomAccessIterator 的 first += len;
      advance(first, len);
      right = upper_bound(++middle, first, value);
      return pair<ForwardIterator, ForwardIterator>(left, right);
    }
  }
  return pair<ForwardIterator, ForwardIterator>(first, first);
}
```

6.7.11 inplace_merge（应用于有序区间）

如果两个连接在一起的序列 [first,middle) 和 [middle,last) 都已排序，那么 inplace_merge 可将它们结合成单一一个序列，并仍保有序性（*sorted*）。如果原先两个序列是递增排序，执行结果也会是递增排序，如果原先两个序列是递减排序，执行结果也会是递减排序。

和 merge 一样，inplace_merge 也是一种稳定（*stable*）操作。每个作为数据来源的子序列中的元素相对次序都不会变动；如果两个子序列有等同的元素，第一序列的元素会被排在第二序列元素之前。

inplace_merge 有两个版本，其差别在于如何定义某元素小于另一个元素。第一版本使用 operator< 进行比较，第二版本使用仿函数（functor）comp 进行比较。以下列出版本一的源代码：

```
template <class BidirectionalIterator>
inline void inplace_merge(BidirectionalIterator first,
                          BidirectionalIterator middle,
                          BidirectionalIterator last) {
  // 只要有任何一个序列为空，就什么都不必做
  if (first == middle || middle == last) return;
  __inplace_merge_aux(first, middle, last, value_type(first),
                      distance_type(first));
}

// 辅助函数
template <class BidirectionalIterator, class T, class Distance>
inline void __inplace_merge_aux(BidirectionalIterator first,
                                BidirectionalIterator middle,
                                BidirectionalIterator last,
                                T*, Distance*) {
  Distance len1 = 0;
  distance(first, middle, len1);     // len1 表示序列一的长度
  Distance len2 = 0;
  distance(middle, last, len2);      // len2 表示序列二的长度

  // 注意，本算法会使用额外的内存空间（暂时缓冲区）
  temporary_buffer<BidirectionalIterator, T> buf(first, last);
  if (buf.begin() == 0)    // 内存配置失败
    __merge_without_buffer(first, middle, last, len1, len2);
  else       // 在有暂时缓冲区的情况下进行
    __merge_adaptive(first, middle, last, len1, len2,
```

```
                    buf.begin(), Distance(buf.size()));
}
```

这个算法如果有额外的内存（缓冲区）辅助，效率会好许多。但是在没有缓冲区或缓冲区不足的情况下，也可以运作。为了篇幅，也为了简化讨论，以下我只关注有缓冲区的情况。

```
// 辅助函数。有缓冲区的情况下
template <class BidirectionalIterator, class Distance, class Pointer>
void __merge_adaptive(BidirectionalIterator first,
                      BidirectionalIterator middle,
                      BidirectionalIterator last,
                      Distance len1, Distance len2,
                      Pointer buffer, Distance buffer_size) {
  if (len1 <= len2 && len1 <= buffer_size) {
    // case1：缓冲区足够安置序列一
    Pointer end_buffer = copy(first, middle, buffer);
    merge(buffer, end_buffer, middle, last, first);
  }
  else if (len2 <= buffer_size) {
    // case 2：缓冲区足够安置序列二
    Pointer end_buffer = copy(middle, last, buffer);
    __merge_backward(first, middle, buffer, end_buffer, last);
  }
  else { // case3： 缓冲区空间不足安置任何一个序列
    BidirectionalIterator first_cut = first;
    BidirectionalIterator second_cut = middle;
    Distance len11 = 0;
    Distance len22 = 0;
    if (len1 > len2) {      // 序列一比较长
      len11 = len1 / 2;
      advance(first_cut, len11);
      second_cut = lower_bound(middle, last, *first_cut);
      distance(middle, second_cut, len22);
    }
    else {                  // 序列二比较长
      len22 = len2 / 2;     // 计算序列二的一半长度
      advance(second_cut, len22);
      first_cut = upper_bound(first, middle, *second_cut);
      distance(first, first_cut, len11);
    }
    BidirectionalIterator new_middle =
      __rotate_adaptive(first_cut, middle, second_cut, len1 - len11,
                        len22, buffer, buffer_size);
    // 针对左段，递归调用
    __merge_adaptive(first, first_cut, new_middle, len11, len22, buffer,
                     buffer_size);
    // 针对右段，递归调用
```

```
        __merge_adaptive(new_middle, second_cut, last, len1 - len11,
                         len2 - len22, buffer, buffer_size);
    }
  }
```

上述辅助函数首先判断缓冲区是否足以容纳 inplace_merge 所接受的两个序列中的任何一个。如果空间充裕（源代码中标示 case1 和 case2 之处），工作逻辑很简单：把两个序列中的某一个 copy 到缓冲区中，再使用 merge 完成其余工作。是的，merge 足堪胜任，它的功能就是将两个有序但分离（sorted and separated）的区间合并，形成一个有序区间，因此，我们只需将 merge 的结果置放处（迭代器 result）指定为 inplace_merge 所接受之序列起始点（迭代器 first）即可。

图 6-16 是一份实例及说明。

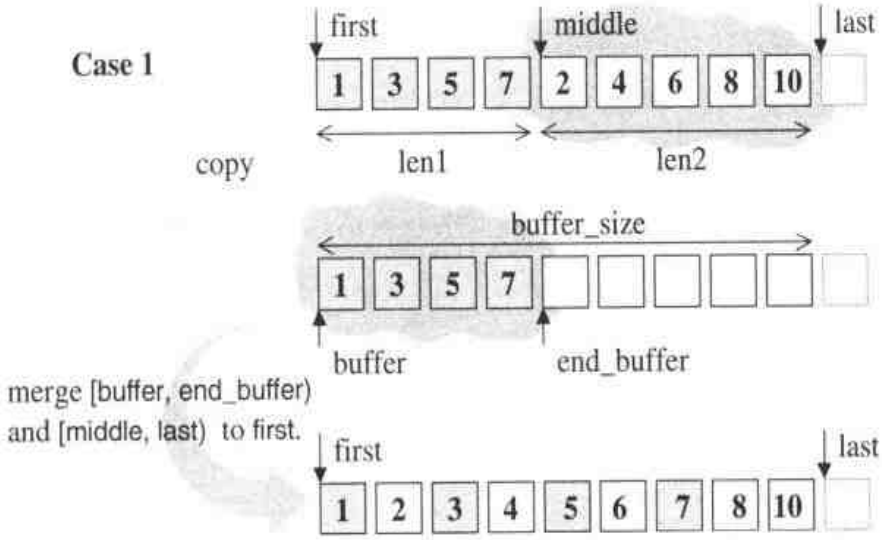


图 6-16a 当缓冲区足够容纳 [first,middle)，就将 [first,middle) 复制到缓冲区，再以 merge 将缓冲区和第二序列[middle,last)合并。

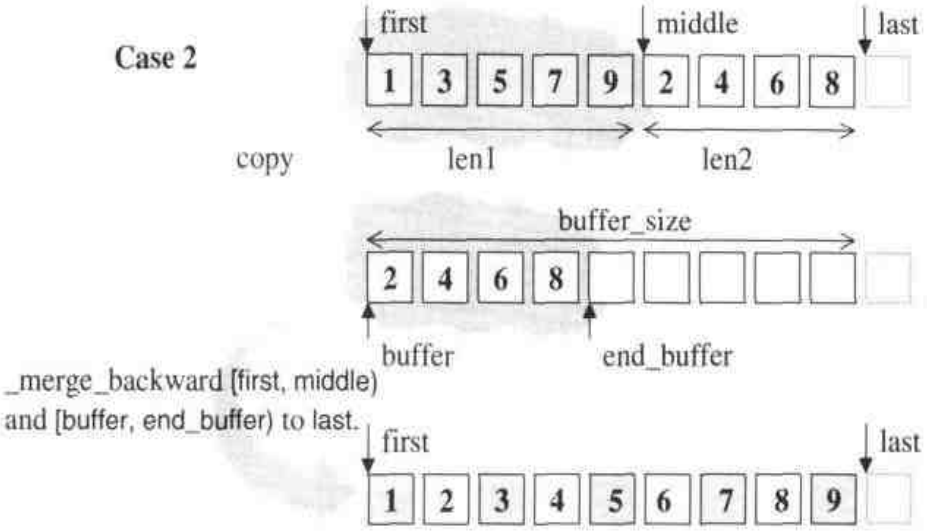
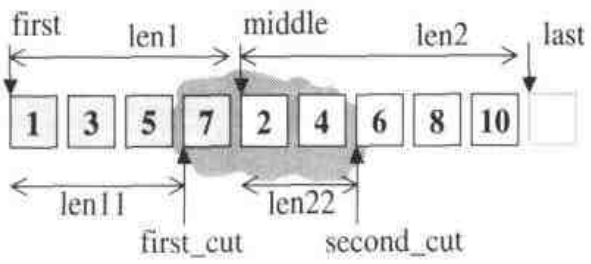


图 6-16b 当缓冲区足够容纳 [middle,last)，就将 [middle,last) 复制到缓冲区，再以 _merge_backward 将第一序列[first,middle)和缓冲区和合并。

但是当缓冲区不足以容纳任何一个序列时（源代码中标示 case3 之处），情况就棘手多了。面对这种情况，我们的处理原则是，以递归分割（*recursive partitioning*）的方式，让处理长度减半，看看能否容纳于缓冲区中（如果能，才好办事儿）。例如，沿用图 6-16 的输入状态，并假设缓冲区大小为 3，小于序列一的长度 4 和序列二的长度 5，于是，拿较长的序列二开刀，计算出 first_cut 和 second_cut 如下：

```
BidirectionalIterator first_cut = first;
BidirectionalIterator second_cut = middle;
Distance len11 = 0;
Distance len22 = 0;

  len22 = len2 / 2;      // 计算序列二的一半长度
  advance(second_cut, len22);
  first_cut = upper_bound(first, middle, *second_cut);
  distance(first, first_cut, len11);
```



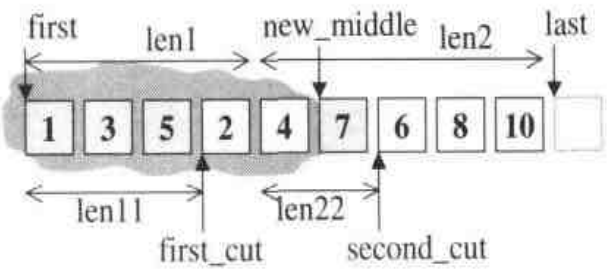
然后，针对上图的淡蓝色阴影部分{7, 2, 4} 执行以下旋转操作：

```
BidirectionalIterator new_middle =
  __rotate_adaptive(first_cut, middle, second_cut, len1 - len11,
                    len22, buffer, buffer_size);
```

这个 __rotate_adaptive 函数的功效和 STL 算法 rotate 并没有什么不同，只是它针对缓冲区的存在，做了优化、万一缓冲区不足，最终还是交给 STL 算法 rotate 去执行。

```
template <class BidirectionalIterator1, class BidirectionalIterator2,
          class Distance>
BidirectionalIterator1 __rotate_adaptive(BidirectionalIterator1 first,
                                         BidirectionalIterator1 middle,
                                         BidirectionalIterator1 last,
                                         Distance len1, Distance len2,
                                         BidirectionalIterator2 buffer,
                                         Distance buffer_size) {
  BidirectionalIterator2 buffer_end;
  if (len1 > len2 && len2 <= buffer_size) {
    // 缓冲区足够安置序列二（较短）
    buffer_end = copy(middle, last, buffer);
    copy_backward(first, middle, last);
    return copy(buffer, buffer_end, first);
  } else if (len1 <= buffer_size) {
    // 缓冲区足够安置序列一
    buffer_end = copy(first, middle, buffer);
    copy(middle, last, first);
    return copy_backward(buffer, buffer_end, last);
  } else {
    // 缓冲区仍然不足，改用 rotate 算法（不需缓冲区）
    rotate(first, middle, last);
    advance(first, len2);
    return first;
  }
}
```

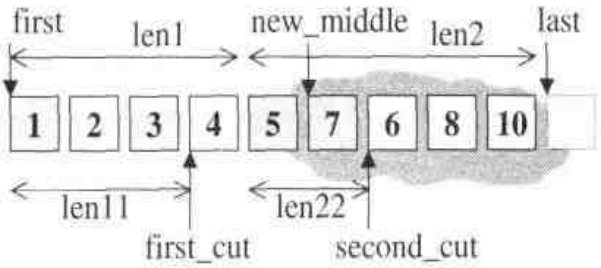
经过这样的处理，原序列现在变成了：



现在可以分段处理了，首先针对左段 [first, first_cut, new_middle)，也就是上图的淡蓝色阴影部分 {1,3,5,2,4}，做递归调用：

```
// 针对左段，递归调用
__merge_adaptive(first, first_cut, new_middle,
                 len11, len22,
                 buffer, buffer_size);
```

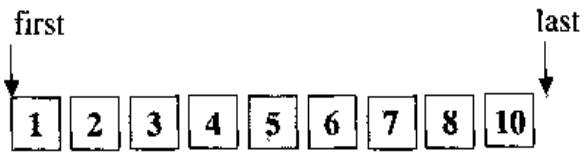
由于本例的缓冲区（大小3）此时已显足够，所以轻松获得这样的结果：



再针对右段 [new_middle,second_cut,last)，也就是上图的淡蓝色阴影部分 {7,6,8,10}，做递归调用：

```
// 针对右段，递归调用
__merge_adaptive(new_middle, second_cut, last,
                 len1 - len11, len2 - len22,
                 buffer, buffer_size);
```

由于本例的缓冲区（大小3）此时已显足够，所以轻松获得这样的结果：



通过这样的实例步进程序，相信你对于 inplace_merge 的操作已有了一个相当程度的概念。

6.7.12 nth_element

这个算法会重新排列 [first,last)，使迭代器 nth 所指的元素，与“整个 [first,last) 完整排序后，同一位置的元素”同值。此外并保证 [nth,last) 内没有任何一个元素小于（更精确地说是不大于） [first,nth) 内的元素，但对于 [first,nth) 和 [nth,last) 两个子区间内的元素次序则无任何保证——这一点也是它与 partial_sort 很大的不同处。以此观之，nth_element 比较近似 partition 而非 sort 或 partial_sort。

例如，假设有序列 {22, 30, 30, 17, 33, 40, 17, 23, 22, 12, 20}，以下操作：

```
nth_element(iv.begin(), iv.begin()+5, iv.end());
```

便是将小于 *(iv.begin()+5)（本例为 40）的元素置于该元素之左，其余置于该元素之右，并且不保证维持原有的相对位置。获得的结果为 { 20, 12, 22, 17, 17, 22, 23, 30, 30, 33, 40}。执行完毕后的 5th 个位置上的元素值 22，与整个序列完整排序后 { 12, 17, 17, 20, 22, 22, 23, 30, 30, 33, 40} 的 5th 个位置上的元素值相同。

如果以上述结果 { 20, 12, 22, 17, 17, 22, 23, 30, 30, 33, 40} 为根据，再执行以下操作：

```
nth_element(iv.begin(), iv.begin()+5, iv.end(), greater<int>());
```

那便是将大于 *(iv.begin()+5)（本例为 22）的元素置于该元素之左，其余置于该元素之右，并且不保证维持原有的相对位置。获得的结果为 {40, 33, 30, 30, 23, 22, 17, 17, 22, 12, 20}。

由于 nth_element 比 partial_sort 的保证更少（是的，它不保证两个子序列内的任何次序），所以它当然应该比 partial_sort 较快。

nth_element 有两个版本，其差异在于如何定义某个元素小于另一个元素。第一版本使用 operator< 进行比较，第二个版本使用仿函数 comp 进行比较。注意，这个算法只接受 RandomAccessIterator。

nth_element 的做法是，不断地以 median-of-3 partitioning（以首、尾、中央

三点中值为枢轴之分割法，见 6.7.9 节）将整个序列分割为更小的左（L）、右（R）子序列。如果 nth 迭代器落于左子序列，就再对左子序列进行分割，否则就再对右子序列进行分割。依此类推，直到分割后的子序列长度不大于 3（够小了），便对最后这个待分割的子序列做 Insertion Sort，大功告成。

图 6-17 是 nth_element 的操作实例拆解。以下是其源代码，我只列出版本一。

```
// 版本一
template <class RandomAccessIterator>
inline void nth_element(RandomAccessIterator first,
                        RandomAccessIterator nth,
                        RandomAccessIterator last) {
  __nth_element(first, nth, last, value_type(first));
}

// 版本一辅助函数
template <class RandomAccessIterator, class T>
void __nth_element(RandomAccessIterator first,
                   RandomAccessIterator nth,
                   RandomAccessIterator last, T*) {
  while (last - first > 3) {    // 长度超过 3
    // 采用 median-of-3 partitioning。参数：(first, last, pivot)
    // 返回一个迭代器，指向分割后的右段第一个元素
    RandomAccessIterator cut = __unguarded_partition
      (first, last, T(__median(*first,
                               *(first + (last - first)/2),
                               *(last - 1))));
    if (cut <= nth)     // 如果右段起点 <= 指定位置（nth 落于右段）
      first = cut;      // 再对右段实施分割（partitioning）
    else                // 否则（nth 落于左段）
      last = cut;       // 对左段实施分割（partitioning）
  }
  __insertion_sort(first, last);
}
```

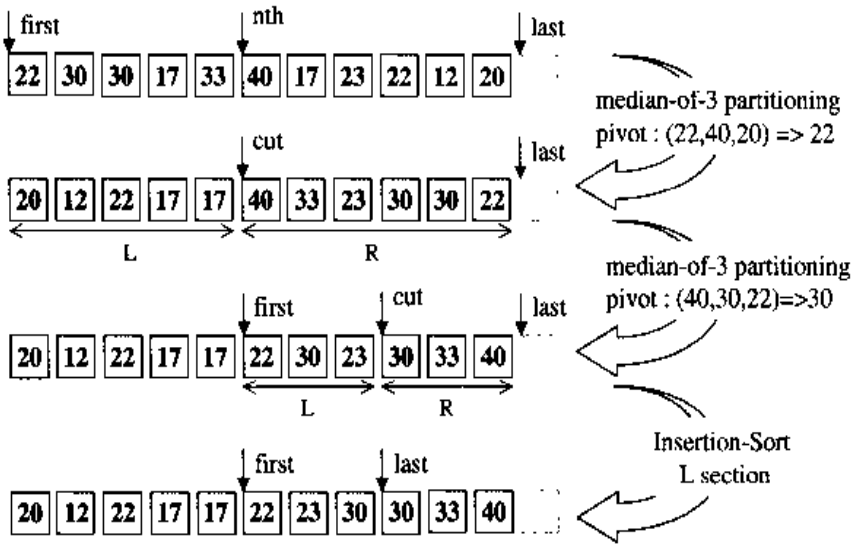


图 **6-17** nth_element 操作实例拆解

6.7.13 merge sort

虽然 SGI STL 所采用的排序法是 IntroSort（一种比 Quick Sort 考虑更周详的算法，见 6.7.9 节），不过，另一个很有名的排序算法 Merge Sort，很轻易就可以利用 STL 算法 inplace_merge（6.7.11 节）实现出来。

Merge Sort 的概念是这样的：既然我们知道，将两个有序（*sorted*）区间归并成一个有序区间，效果不错，那么我们可以利用“分而治之”（devide and conquer）”的概念，以各个击破的方式来对一个区间进行排序。首先，将区间对半分割，左右两段各自排序，再利用 inplace_merge 重新组合为一个完整的有序序列。对半分割的操作可以递归进行，直到每一小段的长度为 0 或 1（那么该小段也就自动完成了排序）。下面是一份实现代码：

```
template <class BidirectionalIter>
void mergesort(BidirectionalIter first, BidirectionalIter last) {
  typename iterator_traits<BidirectionalIter>::difference_type n
    = distance(first, last);
  if (n == 0 || n == 1)
    return;
  else {
    BidirectionalIter mid = first + n / 2;
    mergesort(first, mid);
```

```
    mergesort(mid, last);
    inplace_merge(first, mid, last);
  }
}
```

Merge Sort 的复杂度为 O(N logN)。虽然这和 Quick Sort 是一样的，但因为 Merge Sort 需借用额外的内存，而且在内存之间移动（复制）数据也会耗费不少时间，所以 Merge Sort 的效率比不上 Quick Sort。实现简单、概念简单，是 Merge Sort 的两大优点。

7

仿函数 functors

另名 函数对象 function objects

历经前数章的 memory pool、iterator-traits、type_traits、deque、RB-tree、hash table、QuickSort、IntroSort…的复杂洗礼与无情轰炸，你的脑袋快吃不消了吧。这一章是轻松小菜，让我们在此稍事停顿，休生养息。

7.1 仿函数（functors）概观

这一章所探索的东西，在 STL 历史上有两个不同的名称。仿函数（functors）是早期的命名，C++ 标准规格定案后所采用的新名称是函数对象（function objects）。

就实现意义而言，“函数对象”比较贴切：一种具有函数特质的对象。不过，就其行为而言，以及就中文用词的清晰漂亮与独特性而言，“仿函数”一词比较突出。因此，本书绝大部分时候采用“仿函数”一词。这种东西在调用者可以像函数一样地被调用（调用），在被调用者则以对象所定义的 function call operator 扮演函数的实质角色。

仿函数的作用主要在哪里？从第 6 章可以看出，STL 所提供的各种算法，往往有两个版本。其中一个版本表现出最常用（或最直观）的某种运算，第二个版本则表现出最泛化的演算流程，允许用户“以 template 参数来指定所要采行的策略”。拿 `accumulate()` 来说，其一般行为（第一版本）是将指定范围内的所有元素相加，第二版本则允许你指定某种“操作”，取代第一版本中的“相加”行为。再举 `sort()` 为例，其第一版本是以 `operator<` 为排序时的元素位置调整依据，第二版本则允许用户指定任何“操作”，务求排序后的两两相邻元素都能令该操作结果为 `true`。嗯，是的，要将某种“操作”当做算法的参数，唯一办法就是先将该“操作”（可

能拥有数条以上的指令）设计为一个函数，再将函数指针当做算法的一个参数；或是将该“操作”设计为一个所谓的仿函数（就语言层面而言是个 class），再以该仿函数产生一个对象，并以此对象作为算法的一个参数。

根据以上陈述，既然函数指针可以达到“将整组操作当做算法的参数”，那又何必有所谓的仿函数呢？原因在于函数指针毕竟不能满足 STL 对抽象性的要求，也不能满足软件积木的要求——函数指针无法和 STL 其它组件（如配接器 adapter，第8章）搭配，产生更灵活的变化。

就实现观点而言，仿函数其实上就是一个“行为类似函数”的对象。为了能够“行为类似函数”，其类别定义中必须自定义（或说改写、重载）function call 运算子（operator()，语法和语意请参考 1.9.6 节）。拥有这样的运算子后，我们就可以在仿函数的对象后而加上一对小括号，以此调用仿函数所定义的 operator()，像这样：

```
#include <functional>
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
  greater<int> ig;
  cout  << boolalpha << ig(4, 6);   // (A) false[1]
  cout  << greater<int>()(6, 4);    // (B) true
}
```

其中第一种用法比较为大家所熟悉，greater<int>ig 的意思是产生一个名为 ig 的对象，ig(4,6) 则是调用其 operator()，并给予两个参数 4,6。第二种用法中的 greater<int>() 意思是产生一个临时（无名的）对象，之后的(4,6)才是指定两个参数 4,6。临时对象的产生方式与生命周期，请参见 1.9.2 节。

上述第二种语法在一般情况下不常见，但是对仿函数而言，却是主流用法。

[1] 程序中的 boolalpha 是一种所谓的 iostream manipulators（操控器），用来控制输出入设备的状态。boolalpha 意思是从此以后对 bool 值的输出，都改为以字符串 "true" 或 "false" 表现。我手上的 GCC 2.91 并不支持 boolalpha。

图 7-1 所示的是 STL 仿函数与 STL 算法之间的关系。

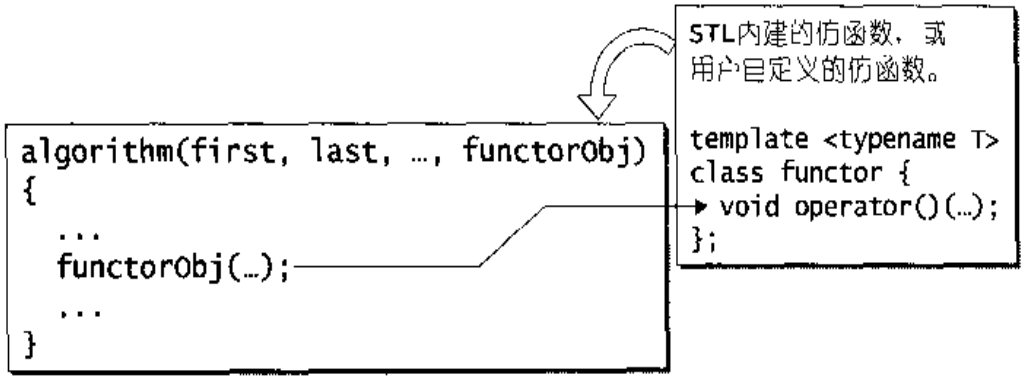


图 **7-1** STL 仿函数与 STL 算法之间的关系

STL 仿函数的分类，若以操作数（operand）的个数划分，可分为一元和二元仿函数，若以功能划分，可分为算术运算（Arithmetic）、关系运算（Rational）、逻辑运算（Logical）三大类。任何应用程序欲使用 STL 内建的仿函数，都必须含入 `<functional>` 头文件，SGI 则将它们实际定义于 `<stl_function.h>` 文件中。以下分别描述。

7.2 可配接（Adaptable）的关键

在 STL 六大组件中，仿函数可说是体积最小、观念最简单、实现最容易的一个。但是小兵也能立大功——它扮演一种“策略”[2]角色，可以让 STL 算法有更灵活的演出。而更加灵活的关键，在于 STL 仿函数的可配接性（adaptability）。

是的，STL 仿函数应该有能力被函数配接器（function adapter，第 8 章）修饰，彼此像积木一样地串接。为了拥有配接能力，每一个仿函数必须定义自己的相应型别（associative types），就像迭代器如果要融入整个 STL 大家庭，也必须依照规定定义自己的 5 个相应型别一样。这些相应型别是为了让配接器能够取出，获得

[2] 所谓策略，是指算法可因为不同的仿函式的介入而有不同的变异行为——虽然算法本质是不变的。这个用词可能会和 *Modern C++ Design* 一书 [Alexandrescu01] 所谓的 policy 混淆，请注意。该书所谓 policy，是令 template 参数成为 class template 的基类（base class）。这同样也是为了让客户端拥有最大最灵活的运用弹性。

仿函数的某些信息。相应型别都只是一些 typedef，所有必要操作在编译期就全部完成了，对程序的执行效率没有任何影响，不带来任何额外负担。

仿函数的相应型别主要用来表现函数参数型别和传回值型别。为了方便起见，<stl_function.h> 定义了两个 classes，分别代表一元仿函数和二元仿函数（STL 不支持三元仿函数），其中没有任何 data members 或 member functions，唯有一些型别定义。任何仿函数，只要依个人需求选择继承其中一个 class，便自动拥有了那些相应型别，也就自动拥有了配接能力。

7.2.1 unary_function

unary_function用来呈现一元函数的参数型别和回返值型别。其定义非常简单：

```
// STL规定，每一个 Adaptable Unary Function 都应该继承此类别
template <class Arg, class Result>
struct unary_function {
    typedef Arg argument_type;
    typedef Result result_type;
};
```

一旦某个仿函数继承了 unary_function，其用户便可以这样取得该仿函数的参数型别（见下例灰色部分），并以相同手法取得其回返值型别（下例未显示）：

```
// 以下仿函数继承了 unary_function.
template <class T>
struct negate : public unary_function<T, T> {
    T operator()(const T& x) const { return -x; }
};

// 以下配接器（adapter）用来表示某个仿函数的逻辑负值（logical negation）
template <class Predicate>
class unary_negate
  ...
public:
  bool operator()(const typename Predicate::argument_type& x) const {
    ...
  }
};
```

这一类例子在第 8 章的仿函数配接器（functor adapter）中时时可见。

7.2.2 binary_function

binary_function 用来呈现二元函数的第一参数型别、第二参数型别，以及回返值型别。其定义非常简单：

```
// STL规定，每一个 Adaptable Binary Function 都应该继承此类别
template <class Arg1, class Arg2, class Result>
struct binary_function {
    typedef Arg1 first_argument_type;
    typedef Arg2 second_argument_type;
    typedef Result result_type;
};
```

一旦某个仿函数继承了 binary_function，其用户便可以这样取得该仿函数的各种相应型别（见下例灰色部分）：

```
// 以下仿函数继承了 binary_function.
template <class T>
struct plus : public binary_function<T, T, T> {
    T operator()(const T& x, const T& y) const { return x + y; }
};

// 以下配接器（adapter）用来将某个二元仿函数转化为一元仿函数
template <class Operation>
class binder1st
  ...
protected:
  Operation op;
  typename Operation::first_argument_type value;
public:
  typename Operation::result_type
  operator()(const typename Operation::second_argument_type& x) const {
    ...
  }
};
```

这一类例子在第 8 章的仿函数配接器（functor adapter）中时时可见。

7.3 算术类（Arithmetic）仿函数

STL 内建的“算术类仿函数”，支持加法、减法、乘法、除法、模数（余数，modulus）和否定（negation）运算。除了“否定”运算为一元运算，其它都是二元运算。

- 加法：plus<T>
- 减法：minus<T>
- 乘法：multiplies<T>
- 除法：divides<T>
- 模取（modulus）：modulus<T>
- 否定（negation）：negate<T>

```
// 以下6个为算术类（Arithmetic）仿函数
template <class T>
struct plus : public binary_function<T, T, T> {
   T operator()(const T& x, const T& y) const { return x + y; }
};

template <class T>
struct minus : public binary_function<T, T, T> {
   T operator()(const T& x, const T& y) const { return x - y; }
};

template <class T>
struct multiplies : public binary_function<T, T, T> {
   T operator()(const T& x, const T& y) const { return x * y; }
};

template <class T>
struct divides : public binary_function<T, T, T> {
   T operator()(const T& x, const T& y) const { return x / y; }
};

template <class T>
struct modulus : public binary_function<T, T, T> {
   T operator()(const T& x, const T& y) const { return x % y; }
};

template <class T>
struct negate : public unary_function<T, T> {
   T operator()(const T& x) const { return -x; }
};
```

这些仿函数所产生的对象，用法和一般函数完全相同。当然，我们也可以产生一个无名的临时对象来履行函数功能。下面是个实例，显示两种用法：

```
// file: 7functor-arithmetic.cpp
#include <iostream>
#include <functional>
using namespace std;

int main()
{
  // 以下产生一些仿函数实体（对象）
  plus<int> plusobj;
  minus<int> minusobj;
  multiplies<int> multipliesobj;
  divides<int> dividesobj;
  modulus<int> modulusobj;
  negate<int> negateobj;

  // 以下运用上述对象，履行函数功能
  cout << plusobj(3,5) << endl;          // 8
  cout << minusobj(3,5) << endl;         // -2
  cout << multipliesobj(3,5) << endl;    // 15
  cout << dividesobj(3,5) << endl;       // 0
  cout << modulusobj(3,5) << endl;       // 3
  cout << negateobj(3) << endl;          // -3

  // 以下直接以仿函数的临时对象履行函数功能
  // 语法分析：functor<T>() 是一个临时对象，后面再接一对小括号
  //  意指调用 function call operator
  cout << plus<int>()(3,5) << endl;          // 8
  cout << minus<int>()(3,5) << endl;         // -2
  cout << multiplies<int>()(3,5) << endl;    // 15
  cout << divides<int>()(3,5) << endl;       // 0
  cout << modulus<int>()(3,5) << endl;       // 3
  cout << negate<int>()(3) << endl;          // -3
}
```

稍早我已提过，不会有人在这么单纯的情况下运用这些功能极其简单的仿函数。仿函数的主要用途是为了搭配 STL 算法。例如，以下式子表示要以 1 为基本元素，对 vector iv 中的每一个元素进行乘法（multiplies）运算：

```
accumulate(iv.begin(), iv.end(), 1, multiplies<int>());
```

证同元素（identity element）

所谓“运算 op 的证同元素（identity element）”，意思是数值 A 若与该元素做 op 运算，会得到 A 自己。加法的证同元素为 0，因为任何元素加上 0 仍为自己。乘法的证同元素为 1，因为任何元素乘以 1 仍为自己。

请注意，这些函数并非 STL 标准规格中的一员，但许多 STL 实现都有它们。

```
template <class T>
inline
T identity_element(plus<T>)
{ return T(0); }
// SGI STL 并未实际运用这个函数

template <class T>
inline
T identity_element(multiplies<T>)
{ return T(1); }
// 乘法的证同元素应用于 <stl_numerics.h> 的 power(). 见 6.3.6 节
```

7.4 关系运算类（Relational）仿函数

STL 内建的“关系运算类仿函数”支持了等于、不等于、大于、大于等于、小于、小于等于六种运算。每一个都是二元运算。

- 等于（equality）：equal_to<T>
- 不等于（inequality）：not_equal_to<T>
- 大于（greater than）：greater<T>
- 大于或等于（greater than or equal）：greater_equal<T>
- 小于（less than）：less<T>
- 小于或等于（less than or equal）：less_equal<T>

```
// 以下 6 个为关系运算类 (Relational) 仿函数
template <class T>
struct equal_to : public binary_function<T, T, bool> {
   bool operator()(const T& x, const T& y) const { return x == y; }
};

template <class T>
struct not_equal_to : public binary_function<T, T, bool> {
   bool operator()(const T& x, const T& y) const { return x != y; }
```

```
};

template <class T>
struct greater : public binary_function<T, T, bool> {
   bool operator()(const T& x, const T& y) const { return x > y; }
};

template <class T>
struct less : public binary_function<T, T, bool> {
   bool operator()(const T& x, const T& y) const { return x < y; }
};

template <class T>
struct greater_equal : public binary_function<T, T, bool> {
   bool operator()(const T& x, const T& y) const { return x >= y; }
};

template <class T>
struct less_equal : public binary_function<T, T, bool> {
   bool operator()(const T& x, const T& y) const { return x <= y; }
};
```

这些仿函数所产生的对象，用法和一般函数完全相同。当然，我们也可以产生一个无名的临时对象来履行函数功能。下面是一个实例，显示两种用法：

```
// file: 7functor-rational.cpp
#include <iostream>
#include <functional>
using namespace std;

int main()
{
  // 以下产生一些仿函数实体（对象）
  equal_to<int> equal_to_obj;
  not_equal_to<int> not_equal_to_obj;
  greater<int> greater_obj;
  greater_equal<int> greater_equal_obj;
  less<int> less_obj;
  less_equal<int> less_equal_obj;

  // 以下运用上述对象，履行函数功能
  cout << equal_to_obj(3,5) << endl;          // 0
  cout << not_equal_to_obj(3,5) << endl;      // 1
  cout << greater_obj(3,5) << endl;           // 0
  cout << greater_equal_obj(3,5) << endl;     // 0
  cout << less_obj(3,5) << endl;              // 1
  cout << less_equal_obj(3,5) << endl;        // 1

  // 以下直接以仿函数的临时对象履行函数功能
```

```
  // 语法分析：functor<T>() 是一个临时对象，后面再接一对小括号
  //  意指调用 function call operator
  cout << equal_to<int>()(3,5) << endl;        // 0
  cout << not_equal_to<int>()(3,5) << endl;    // 1
  cout << greater<int>()(3,5) << endl;         // 0
  cout << greater_equal<int>()(3,5) << endl;   // 0
  cout << less<int>()(3,5) << endl;            // 1
  cout << less_equal<int>()(3,5) << endl;      // 1
}
```

一般而言不会有人在这么单纯的情况下运用这些功能极其简单的仿函数。仿函数的主要用途是为了搭配 STL 算法。例如以下式子表示要以递增次序对 vector iv 进行排序：

```
sort(iv.begin(), iv.end(), greater<int>());
```

7.5 逻辑运算类（Logical）仿函数

STL 内建的“逻辑运算类仿函数”支持了逻辑运算中的 And、Or、Not 三种运算，其中 And 和 Or 为二元运算，Not 为一元运算。

- 逻辑运算 And：logical_and<T>
- 逻辑运算 Or：logical_or<T>
- 逻辑运算 Not：logical_not<T>

```
// 以下3个为逻辑运算类（Logical）仿函数
template <class T>
struct logical_and : public binary_function<T, T, bool> {
   bool operator()(const T& x, const T& y) const { return x && y; }
};

template <class T>
struct logical_or : public binary_function<T, T, bool> {
   bool operator()(const T& x, const T& y) const { return x || y; }
};

template <class T>
struct logical_not : public unary_function<T, bool> {
   bool operator()(const T& x) const { return !x; }
};
```

这些仿函数所产生的对象，用法和一般函数完全相同。当然，我们也可以产生

一个无名的临时对象来履行函数功能。下面是一个实例，显示两种用法：

```
// file: 7functor-logical.cpp
#include <iostream>
#include <functional>
using namespace std;

int main()
{
  // 以下产生一些仿函数实体（对象）
  logical_and<int> and_obj;
  logical_or<int> or_obj;
  logical_not<int> not_obj;

  // 以下运用上述对象，履行函数功能
  cout << and_obj(true,true) << endl;              // 1
  cout << or_obj(true,false) << endl;              // 1
  cout << not_obj(true) << endl;                   // 0

  // 以下直接以仿函数的临时对象履行函数功能
  // 语法分析：functor<T>() 是一个临时对象，后面再接一对小括号
  //  意指调用 function call operator
  cout << logical_and<int>()(true,true) << endl;   // 1
  cout << logical_or<int>()(true,false) << endl;   // 1
  cout << logical_not<int>()(true) << endl;        // 0
}
```

一般而言，不会有人在这么单纯的情况下运用这些功能极其简单的仿函数。仿函数的主要用途是为了搭配 STL 算法。

7.6 证同（identity）、选择（select）、投射（project）

这一节介绍的仿函数，都只是将其参数原封不动地传回。其中某些仿函数对传回的参数有刻意的选择，或是刻意的忽略。之所以不在 STL 或其它泛型程序设计过程中直接使用原本极其简单的 identity, project, select 等操作，而要再划分一层出来，全是为了间接性——间接性是抽象化的重要工具。

C++ 标准规格并未涵盖本节所列的任何一个仿函数，不过它们常常存在于各个实现品中作为内部运用。以下列出 SGI STL 的版本。

```
// 证同函数（identity function）。任何数值通过此函数后，不会有任何改变
// 此式运用于 <stl_set.h>，用来指定 RB-tree 所需的 KeyOfValue op
// 那是因为 set 元素的键值即实值，所以采用 identity
template <class T>
```

```
struct identity : public unary_function<T, T> {
  const T& operator()(const T& x) const { return x; }
};

// 选择函数（selection function）：接受一个pair，传回其第一元素
// 此式运用于 <stl_map.h>，用来指定 RB-tree 所需的 KeyOfValue op
// 由于 map 系以 pair 元素的第一元素为其键值，所以采用 select1st
template <class Pair>
struct select1st : public unary_function<Pair, typename Pair::first_type>
{
  const typename Pair::first_type& operator()(const Pair& x) const
  {
    return x.first;
  }
};

// 选择函数：接受一个pair，传回其第二元素
// SGI STL 并未运用此式
template <class Pair>
struct select2nd : public unary_function<Pair, typename Pair::second_type>
{
  const typename Pair::second_type& operator()(const Pair& x) const
  {
    return x.second;
  }
};

// 投射函数：传回第一参数，忽略第二参数
// SGI STL 并未运用此式
template <class Arg1, class Arg2>
struct project1st : public binary_function<Arg1, Arg2, Arg1> {
  Arg1 operator()(const Arg1& x, const Arg2&) const { return x; }
};

// 投射函数：传回第二参数，忽略第一参数
// SGI STL 并未运用此式
template <class Arg1, class Arg2>
struct project2nd : public binary_function<Arg1, Arg2, Arg2> {
  Arg2 operator()(const Arg1&, const Arg2& y) const { return y; }
};
```

8

配接器

adapters

配接器（adapters）在 STL 组件的灵活组合运用功能上，扮演着轴承、转换器的角色。Adapter 这个概念，事实上是一种设计模式（design pattern）。《Design Patterns》一书提到 23 个最普及的设计模式，其中对 adapter 样式的定义如下：将一个 class 的接口转换为另一个 class 的接口，使原本因接口不兼容而不能合作的 classes，可以一起运作。

8.1 配接器之概观与分类

STL 所提供的各种配接器中，改变仿函数（functors）接口者，我们称为 function adapter，改变容器（containers）接口者，我们称为 container adapter，改变迭代器（iterators）接口者，我们称为 iterator adapter。

8.1.1 应用于容器，container adapters

STL 提供的两个容器 queue 和 stack，其实都只不过是一种配接器。它们修饰 deque 的接口而成就出另一种容器风貌。这两个 container adapters 已于第 4 章介绍过。

8.1.2 应用于迭代器，iterator adapters

STL 提供了许多应用于迭代器身上的配接器，包括 insert iterators，reverse iterators，iostream iterators。C++ *Standard* 规定它们的接口可以藉由 `<iterator>` 获得，SGI STL 则将它们实际定义于 `<stl_iterator.h>`。

Insert Iterators

所谓 insert iterators，可以将一般迭代器的赋值（*assign*）操作转变为插入（*insert*）操作。这样的迭代器包括专司尾端插入操作的 back_insert_iterator，专司头端插入操作的 front_insert_iterator，以及可从任意位置执行插入操作的 insert_iterator。由于这三个 iterator adapters 的使用接口不是十分直观，给一般用户带来困扰，因此，STL 更提供三个相应函数：back_inserter()、front_inserter()、inserter()，如图 8-1 所示，提升使用时的便利性。

辅助函数（helper function）	实际产生的对象
`Back_inserter (Container& x);`	`back_insert_iterator<Container>(x);`
`front_inserter (Container& x);`	`front_insert_iterator<Container>(x);`
`Inserter(Container& x, Iterator i);`	`insert_iterator<Container> (x, Container::iterator(i));`

图 **8-1** 三个辅助函数，使三种 iterator adapters 更易使用。详见稍后的源代码说明

Reverse Iterators

所谓 reverse iterators，可以将一般迭代器的行进方向逆转，使原本应该前进的 operator++ 变成了后退操作，使原本应该后退的 operator-- 变成了前进操作。这种错乱的行为不是为了掩人耳目或为了欺敌效果，而是因为这种倒转筋脉的性质运用在“从尾端开始进行”的算法上，有很大的方便性。稍后我有一些范例展示。

IOStream Iterators

所谓 iostream iterators，可以将迭代器绑定到某个 iostream 对象身上。绑定到 istream 对象（例如 std::cin）身上的，称为 istream_iterator，拥有输入功能；绑定到 ostream 对象（例如 std::cout）身上的，称为 ostream_iterator，拥有输出功能。这种迭代器运用于屏幕输出，非常方便。以

它为蓝图，稍加修改，便可适用于任何输出或输入装置上。例如，你可以在透彻了解 iostream Iterators 的技术后，完成一个绑定到 Internet Explorer cache 身上的迭代器[1]，或是完成一个系结到磁盘目录上的一个迭代器[2]。

请注意，不像稍后即将出场的仿函数配接器（functor adapters）总以仿函数作为参数，予人以“拿某个配接器来修饰某个仿函数”的直观感受，这里所介绍的迭代器配接器（iterator adapters）很少以迭代器为直接参数[3]。所谓对迭代器的修饰，只是一种观念上的改变（赋值操作变成插入操作啦、前进变成后退啦、绑定到特殊装置上啦…）。你可以千变万化地写出适合自己所用的任何迭代器。就这一点而言，为了将 STL 灵活运用于你的日常生活之中，iterator adapters 的技术是非常重要的。

下面是一个实例，集上述三种 iterator adapters 之运用大成：

```
// file : 8iterator-adapter.cpp
#include <iterator>   // for iterator adapters
#include <deque>
#include <algorithm>  // for copy()
#include <iostream>
using namespace std;

int main()
{
  // 将 outite 绑定到 cout。每次对 outite 指派一个元素，就后接一个 " "。
  ostream_iterator<int> outite(cout, " ");

  int ia[] = {0,1,2,3,4,5};
  deque<int> id(ia, ia+6);
```

1 参见 *C++ and STL : Take Advantage of STL Algorithms by Implementing a Custom Iterator*, by Samir Bajaj , MSDN Magazine, 2001/04。这篇文章示范如何写出一个迭代器，协助 STL 算法遍历 Internet Explorer cache（IE 自己的一个快取装置）。这是一个自定义的迭代器，也可以说是一个配接器，因为它让原本互不认识的 STL 算法和 IE cache 得以一起运作。

2 参见《泛型思维》，其中示范一个迭代器，可绑定到磁盘目录上，遍历所得可套用于任何 STL 算法（或其它 STL 组件）。

3 通常它们以容器为直接参数，而每一个容器都有自己专属的迭代器，因此这里所谈的配接器事实上是以容器的迭代器为间接参数。当然啦，C++ 语法并无所谓间接参数。稍后看实现代码，即可拨云见日。

```
    // 将所有元素拷贝到 outite（那么也就是拷贝到 cout）
    copy(id.begin(), id.end(), outite);    // 输出 0 1 2 3 4 5
    cout << endl;

    // 将 ia[] 的部分元素拷贝到 id 内，使用 front_insert_iterator。
    // 注意，front_insert_iterqtor 会将 assign 操作改为 push_front 操作
    // vector 不支持 push_front()，这就是本例不以 vector 为示范对象的原因。
    copy(ia+1, ia+2, front_inserter(id));
    copy(id.begin(), id.end(), outite);    // 1 0 1 2 3 4 5
    cout << endl;

    // 将 ia[] 的部分元素拷贝到 id 内，使用 back_insert_iterator。
    copy(ia+3, ia+4, back_inserter(id));
    copy(id.begin(), id.end(), outite);    // 1 0 1 2 3 4 5 3
    cout << endl;

    // 搜寻元素 5 所在位置
    deque<int>::iterator ite = find(id.begin(), id.end(), 5);
    // 将 ia[] 的部分元素拷贝到 id 内。使用 insert_iterator
    copy(ia+0, ia+3, inserter(id, ite));
    copy(id.begin(), id.end(), outite);    // 1 0 1 2 3 4 0 1 2 5 3
    cout << endl;

    // 将所有元素逆向拷贝到 outite
    // rbegin() 和 rend() 与 reverse_iterator 有关，见稍后源代码说明
    copy(id.rbegin(), id.rend(), outite);  // 3 5 2 1 0 4 3 2 1 0 1
    cout << endl;

    // 以下，将 inite 绑定到 cin。将元素拷贝到 inite，直到 eos 出现
    istream_iterator<int> inite(cin), eos;  // eos : end-of-stream
    copy(inite, eos, inserter(id, id.begin()));
    // 由于很难在键盘上直接输入 end-of-stream (end-of-file) 符号
    // （而且不同系统的 eof 符号也不尽相同），因此，为了让上一行顺利执行，
    // 请单独取出此段落为一个独立程序，并准备一个文件，例如 int.dat，内置
    // 32 26 99（自由格式），并在 console 之下利用 piping 方式执行该程序，如下：
    // c:\>type int.dat | thisprog
    // 意思是将 type int.dat 的结果作为 thisprog 的输入

    copy(id.begin(), id.end(), outite);    // 32 26 99 1 0 1 2 3 4 0 1 2 5 3
}
```

8.1.3 应用于仿函数，functor adapters

functor adapters（亦称为function adapters）是所有配接器中数量最庞大的一个族群，其配接灵活度也是前二者所不能及，可以配接、配接、再配接。这些配接操作包括系结（*bind*）、否定（*negate*），组合（*compose*）、以及对一般函数或成

员函数的修饰（使其成为一个仿函数）。*C++ Standard* 规定这些配接器的接口可由 <functional> 获得，SGI STL 则将它们实际定义于 <stl_function.h>。

function adapters 的价值在于，通过它们之间的绑定、组合、修饰能力，几乎可以无限制地创造出各种可能的表达式（expression），搭配 STL 算法一起演出。例如，我们可能希望找出某个序列中所有不小于 12 的元素个数。虽然，“不小于”就是“大于或等于”，我们因此可以选择 STL 内建的仿函数 greater_equal，但如果希望完全遵循题目语意（在某些更复杂的情况下，这可能是必要的），坚持找出“不小于”12 的元素个数，可以这么做：

```
not1(bind2nd(less<int>(), 12))
```

这个式子将 less<int>() 的第二参数系结（绑定）为 12，再加上否定操作，便形成了“不小于 12”的语意，整个凑和成为一个表达式（expression），可与任何“可接受表达式为参数”之算法搭配——是的，几乎每个 STL 算法都有这样的版本。

再举一个例子，假设我们希望对序列中的每一个元素都做某个特殊运算，这个运算的数学表达式为：

```
f(g(elem))
```

其中 f 和 g 都是数学函数，那么可以这么写：

```
compose1(f(x), g(y));
```

例如我们希望将容器内的每一个元素 v 进行 (v+2)*3 的操作，我们可以令 f(x)= x*3，g(y)= y+2，并写下这样的式子：

```
compose1(bind2nd(multiplies<int>(),3), bind2nd(plus<int>(),2))
// 第一个参数被拿来当做 f()，第二个参数被拿来当做 g().
```

这一长串形成一个表达式，可以拿来和任何接受表达式的算法搭配。不过，务请注意，这个算式会改变参数的值，所以不能和 non-mutating 算法搭配。例如不能和 for_each 搭配，但可以和 transform 搭配，将结果输往另一地点。下面是个实例：

```
// file : 8compose.cpp
// gcc2.91[o] bcb4[x] vc6[x]    注：compose1() 是 GCC 独家产品
#include <algorithm>
#include <functional>
```

```
#include <vector>
#include <iostream>
#include <iterator>
using namespace std;

int main()
{
  // 将 outite 绑定到 cout，每次对 outite 指派一个元素，就后接一个 " "。
  ostream_iterator<int> outite(cout, " ");

  int ia[6] = { 2, 21, 12, 7, 19, 23 };
  vector<int> iv(ia, ia+6);

  // 欲于每个元素 v 身上执行 (v+2)*3.
  // 注意，for_each() 是 nonmutating algorithm. 元素内容不能更改
  // 所以，执行之后 iv 内容不变。
  for_each(iv.begin(), iv.end(), compose1(
                                 bind2nd(multiplies<int>(),3),
                                 bind2nd(plus<int>(),2) ));
  copy(iv.begin(), iv.end(), outite);
  cout << endl;       // 2 21 12 7 19 23

  // 如果像这样，输往另一地点（cout），是可以的
  transform(iv.begin(), iv.end(), outite, compose1(
                                 bind2nd(multiplies<int>(),3),
                                 bind2nd(plus<int>(),2) ));
  cout << endl;       // 12 69 42 27 63 75
}
```

由于仿函数就是“将 function call 操作符重载”的一种 class，而任何算法接受一个仿函数时，总是在其演算过程中调用该仿函数的 operator()，这使得不具备仿函数之形、却有真函数之实的“一般函数”和“成员函数（member functions）”感到为难。如果这些既存的心血不能纳入复用的体系中，完美的规划就崩落了一角。为此，STL 又提供了为数众多的配接器，使“一般函数”和“成员函数”得以无缝隙地与其它配接器或算法结合起来。当然，STL 所提供的这些配接器不可能在变化纷歧的各种应用场合完全满足你的所有需求，例如它没有能够提供我们写出“大于 5 且小于 10”或是“大于 8 或小于 6”这样的算式。不过，对 STL 源代码有了一番彻底研究后，要打造专用的配接器，不是难事。

请注意，所有期望获得配接能力的组件，本身都必须是可配接的（*adaptable*）。换句话说，一元仿函数必须继承自 unary_function（7.1.1 节），二元仿函数必须

继承自 binary_function（7.1.2 节），成员函数必须以 mem_fun 处理过，一般函数必须以 ptr_fun 处理过。一个未经 ptr_fun 处理过的一般函数，虽然也可以函数指针（pointer to function）的形式传给 STL 算法使用[4]，却无法拥有任何配接能力。

图 8-2 是 STL function adapters 一览表。实际运用时通常我们采用图左的辅助函数而不自行产生图右的对象，因为辅助函数的接口比较直观，比较好用；有些辅助函数还形成重载（例如图下方的 mem_fun() 和 mem_fun_ref()），更增加了使用上的便利。

以下各挑选一个配接器类型做示范：

```
// file : 8functor-adapter.cpp
#include <algorithm>
#include <functional>
#include <vector>
#include <iostream>
using namespace std;

// 这里有个既存函数（稍后希望于 STL 体系中被复用）
void print(int i)
{
  cout << i << ' ';
}

class Int
{
public:
  explicit Int(int i) : m_i(i) { }

  // 这里有个既存的成员函数（稍后希望于 STL 体系中被复用）
  void print1() const { cout << '[' << m_i << ']'; }
private:
  int m_i;
};

int main()
{
  // 将 outite 绑定到 cout。每次对 outite 指派一个元素，就后接一个 " "。
  ostream_iterator<int> outite(cout, " ");
```

[4] STL 算法接获一个表达式 Op 后，会以 Op(...)的形式使用之。如果这个表达式是一个函数指针，Op(...) 仍能成立。这就是算法可以接受函数指针的原因。

```
int ia[6] = { 2, 21, 12, 7, 19, 23 };
vector<int> iv(ia, ia+6);

// 找出不小于 12 的元素个数
cout << count_if(iv.begin(), iv.end(),
                 not1(bind2nd(less<int>(), 12)));  // 4
cout << endl;

// 令每个元素 v 执行 (v+2)*3 然后输往 outite
transform(iv.begin(), iv.end(), outite, compose1(
                                  bind2nd(multiplies<int>(),3),
                                  bind2nd(plus<int>(),2) ));
cout << endl;   // 12 69 42 27 63 75

// 以下将所有元素拷贝到 outite. 有数种办法
copy(iv.begin(), iv.end(), outite);              // 2 21 12 7 19 23
cout << endl;
// (1) 以下，以函数指针搭配 STL 算法
for_each(iv.begin(), iv.end(), print);           // 2 21 12 7 19 23
cout << endl;

// (2) 以下，以修饰过的一般函数搭配 STL 算法
for_each(iv.begin(), iv.end(), ptr_fun(print)); // 2 21 12 7 19 23
cout << endl;

Int t1(3), t2(7), t3(20), t4(14), t5(68);
vector<Int> Iv;
Iv.push_back(t1);
Iv.push_back(t2);
Iv.push_back(t3);
Iv.push_back(t4);
Iv.push_back(t5);
// (3) 以下，以修饰过的成员函数搭配 STL 算法
for_each(Iv.begin(), Iv.end(), mem_fun_ref(&Int::print1));
// [3][7][20][14][68]
}
```

请注意，上述例子中，打印函数不能设计成这样：

```
class Int {
public:
void print2(int i)  { cout << '[' << i << ']';  }
...
};
for_each(Iv.begin(), Iv.end(), mem_fun1_ref(&Int::print2));
```

因为这不符合 for_each() 的接口需求（看看 for_each 源代码你就明白了）

辅助函数（helper function）	实际效果	实际产生的对象
bind1st(const Op& op, const T& x);	op(x, param);	binder1st<Op> (op, arg1_type(x))
bind2nd(const Op& op, const T& x);	op(param, x);	binder2nd<Op> (op, arg2_type(x))
not1(const Pred& pred);	!pred(param);	unary_negate<Pred> (pred)
not2(const Pred& pred);	!pred (param1,param2);	binary_negate<Pred> (pred)
compose1(const Op1& op1, const Op2& op2);	op1(op2(param));	unary_compose<Op1,Op2> (op1, op2)
compose2(const Op1& op1, const Op2& op2, const Op3& op3);	op1(op2(param) op3(param));	binary_compose<Op1,Op2,Op3> (op1, op2, op3)
ptr_fun (Result(*fp)(Arg));	fp(param);	pointer_to_unary_function <Arg, Result>(fp)
ptr_fun (Result(*fp)(Arg1,Arg2));	fp(param1 param2);	pointer_to_binary_function <Arg1, Arg2, Result>(fp)
mem_fun(S (T::*f)());	(param->*f)();	mem_fun_t<S,T>(f)
mem_fun(S (T::*f)() const);	(param->*f)();	const_mem_fun_t<S,T>(f)
mem_fun_ref(S (T::*f)());	(param.*f)();	mem_fun_ref_t<S,T>(f)
mem_fun_ref (S (T::*f)() const);	(param.*f)();	const_mem_fun_ref_t<S,T>(f)
mem_fun1(S (T::*f)(A));	(param->*f)(x);	mem_fun1_t<S,T,A>(f)
mem_fun1(S (T::*f)(A)const);	(param->*f)(x);	const_mem_fun1_t<S,T,A>(f)
mem_fun1_ref(S (T::*f)(A));	(param.*f)(x);	mem_fun1_ref_t<S,T,A>(f)
mem_fun1_ref (S (T::*f)(A)const);	(param.*f)(x);	const_mem_fun1_ref_t<S,T,A> (f)

- compose1 和 compose2 不在 C++ *Standard* 规范之中。
- 最后四个辅助函数在 C++ *Standard* 中已去除名称中的'1'。与其前四个辅助函数形成重载。

图 **8-2** 各种 function adapters 及其辅助函数，以及实际效果。

此图等于是相关源代码的接口整理。搭配源代码阅读，更得益处。

8.2 container adapters

8.2.1 stack

stack的底层由 deque 构成。从以下接口可清楚看出 stack 与 deque 的关系：

```
template <class T, class Sequence = deque<T> >
class stack {
protected:
  Sequence c;      // 底层容器
  ...
};
```

C++ Standard 规定客户端必须能够从 <stack> 中获得 stack 的接口，SGI STL 则把所有的实现细节定义于的 <stl_stack.h> 内，请参考 4.5 节。class stack 封住了所有的 deque 对外接口，只开放符合 stack 原则的几个函数，所以我们说 stack 是一个配接器，一个作用于容器之上的配接器。

8.2.2 queue

queue的底层由 deque 构成。从以下接口可清楚看出 queue 与 deque 的关系：

```
template <class T, class Sequence = deque<T> >
class queue {
protected:
  Sequence c;      // 底层容器
  ...
};
```

C++ Standard 规定客户端必须能够从 <queue> 中获得 queue 的接口，SGI STL 则把所有的实现细节定义于 <stl_queue.h> 内，请参考 4.6 节。class queue 封住了所有的 deque 对外接口，只开放符合 queue 原则的几个函数，所以我们说 queue 是一个配接器，一个作用于容器之上的配接器。

8.3 iterator adapters

本章稍早已说过 iterator adapters 的意义和用法，以下研究其实现细节。

8.3.1 insert iterators

下面是三种 insert iterators 的完整实现列表。其中的主要观念是，每一个 insert iterators 内部都维护有一个容器（必须由用户指定）；容器当然有自己的迭代器，于是，当客户端对 insert iterators 做赋值(*assign*)操作时，就在 insert iterators 中被转为对该容器的迭代器做插入(*insert*)操作，也就是说，在 insert iterators 的 operator= 操作符中调用底层容器的 push_front() 或 push_back() 或 insert() 操作函数。至于其它的迭代器惯常行为如 operator++, operator++(int), operator* 都被关闭功能，更没有提供 operator--(int) 或 operator-- 或 operator-> 等功能（因此被类型被定义为 output_iterator_tag），换句话说，insert iterators 的前进、后退、取值、成员取用等操作都是没有意义的，甚至是不允许的。

观察源代码的同时，请参考先前的图 8-1。

```
// 这是一个迭代器配接器 (iterator adapter)，用来将某个迭代器的赋值 (assign)
// 操作修改为插入 (insert) 操作——从容器的尾端插入进去 (所以称为 back_insert)
template <class Container>
class back_insert_iterator {
protected:
  Container* container;          // 底层容器
public:
  typedef output_iterator_tag   iterator_category;      // 注意类型
  typedef void                  value_type;
  typedef void                  difference_type;
  typedef void                  pointer;
  typedef void                  reference;

  // 下面这个 ctor 使 back_insert_iterator 与容器绑定起来
  explicit back_insert_iterator(Container& x) : container(&x) {}
  back_insert_iterator<Container>&
  operator=(const typename Container::value_type& value) {
    container->push_back(value);      // 这里是关键，转而调用 push_back()
    return *this;
  }
```

```
  // 以下三个操作符对 back_insert_iterator 不起作用（关闭功能）
  // 三个操作符返回的都是 back_insert_iterator 自己
  back_insert_iterator<Container>& operator*() { return *this; }
  back_insert_iterator<Container>& operator++() { return *this; }
  back_insert_iterator<Container>& operator++(int) { return *this; }
};

// 这是一个辅助函数，帮助我们方便使用 back_insert_iterator
template <class Container>
inline back_insert_iterator<Container> back_inserter(Container& x) {
  return back_insert_iterator<Container>(x);
}

//----------------------------------------------------------------
// 这是一个迭代器配接器（iterator adapter），用来将某个迭代器的赋值（assign）
// 操作修改为插入（insert）操作——从容器的头端插入进去（所以称为 front_insert）
// 注意，该迭代器不适用于 vector，因为 vector 没有提供 push_front 函数
template <class Container>
class front_insert_iterator {
protected:
  Container* container;          // 底层容器
public:
  typedef output_iterator_tag   iterator_category;      // 注意类型
  typedef void                  value_type;
  typedef void                  difference_type;
  typedef void                  pointer;
  typedef void                  reference;

  explicit front_insert_iterator(Container& x) : container(&x) {}
  front_insert_iterator<Container>&
  operator=(const typename Container::value_type& value) {
    container->push_front(value);     // 这里是关键，转而调用 push_front()
    return *this;
  }
  // 以下三个操作符对 front_insert_iterator 不起作用（关闭功能）
  // 三个操作符返回的都是 front_insert_iterator 自己。
  front_insert_iterator<Container>& operator*() { return *this; }
  front_insert_iterator<Container>& operator++() { return *this; }
  front_insert_iterator<Container>& operator++(int) { return *this; }
};

// 这是一个辅助函数，帮助我们方便使用 front_insert_iterator
template <class Container>
inline front_insert_iterator<Container> front_inserter(Container& x) {
  return front_insert_iterator<Container>(x);
}

//----------------------------------------------------------------
// 这是一个迭代器配接器（iterator adapter），用来将某个迭代器的赋值（assign）
```

```
// 操作修改为插入（insert）操作，在指定的位置上进行，并将迭代器右移一个位置
// ——如此便可很方便地连续执行 “表面上是赋值（覆写）而实际上是插入”的操作
template <class Container>
class insert_iterator {
protected:
  Container* container;                    // 底层容器
  typename Container::iterator iter;
public:
  typedef output_iterator_tag   iterator_category;      // 注意类型
  typedef void                  value_type;
  typedef void                  difference_type;
  typedef void                  pointer;
  typedef void                  reference;

  insert_iterator(Container& x, typename Container::iterator i)
    : container(&x), iter(i) {}
  insert_iterator<Container>&
  operator=(const typename Container::value_type& value) {
    iter = container->insert(iter, value);     // 这里是关键，转调用 insert()
    ++iter;  // 注意这个，使 insert iterator 永远随其目标贴身移动
    return *this;
  }
  // 以下三个操作符对 insert_iterator 不起作用（关闭功能）
  // 三个操作符返回的都是 insert_iterator 自己
  insert_iterator<Container>& operator*() { return *this; }
  insert_iterator<Container>& operator++() { return *this; }
  insert_iterator<Container>& operator++(int) { return *this; }
};

// 这是一个辅助函数，帮助我们方便使用 insert_iterator
template <class Container, class Iterator>
inline insert_iterator<Container> inserter(Container& x, Iterator i) {
  typedef typename Container::iterator iter;
  return insert_iterator<Container>(x, iter(i));
}
```

8.3.2 reverse iterators

所谓 reverse iterator，就是将迭代器的移动行为倒转。如果 STL 算法接受的不是一般正常的迭代器，而是这种逆向迭代器，它就会以从尾到头的方向来处理序列中的元素。例如：

```
// 将所有元素逆向拷贝到 ite 所指位置上
// rbegin() 和 rend() 与 reverse_iterator 有关
copy(id.rbegin(), id.rend(), ite);
```

看似单纯，实现时却大有文章。

首先我们看看 rbegin() 和 rend()。任何 STL 容器都提供有这两个操作，我在第4,5两章介绍各种容器时，鲜有列出这两个成员函数，现在举个例子瞧瞧：

```
template <class T, class Alloc = alloc>  // 预设使用 alloc 为配置器
class vector {
public:
  typedef T value_type;
  typedef value_type* iterator;
  typedef reverse_iterator<iterator> reverse_iterator;
  reverse_iterator rbegin() { return reverse_iterator(end()); }
  reverse_iterator rend() { return reverse_iterator(begin()); }
...
};
```

再举个例子瞧瞧：

```
template <class T, class Alloc = alloc> // 预设使用 alloc 为配置器
class list {
public:
  typedef __list_iterator<T, T&, T*>  iterator;
  typedef reverse_iterator<iterator> reverse_iterator;
  reverse_iterator rbegin() { return reverse_iterator(end()); }
  reverse_iterator rend() { return reverse_iterator(begin()); }
...
};
```

再举个例子瞧瞧：

```
template <class T, class Alloc = alloc, size_t BufSiz = 0>
class deque {
public:
  typedef __deque_iterator<T, T&, T*, BufSiz> iterator;
  typedef reverse_iterator<iterator> reverse_iterator;
  iterator begin() { return start; }
  iterator end() { return finish; }
  reverse_iterator rbegin() { return reverse_iterator(finish); }
  reverse_iterator rend() { return reverse_iterator(start); }
// 上述两式相当于：
//reverse_iterator rbegin() { return reverse_iterator(end()); }
//reverse_iterator rend() { return reverse_iterator(begin()); }
...
};
```

没有任何例外！只要双向序列容器提供了 begin(), end()，它的 rbegin(), rend() 就是上面那样的型式。单向序列容器如 slist 不可使用 reserve iterators。有些容器如 stack、queue、priority_queue 并不提供 begin(), end()，当然也就没有 rbegin(), rend()。

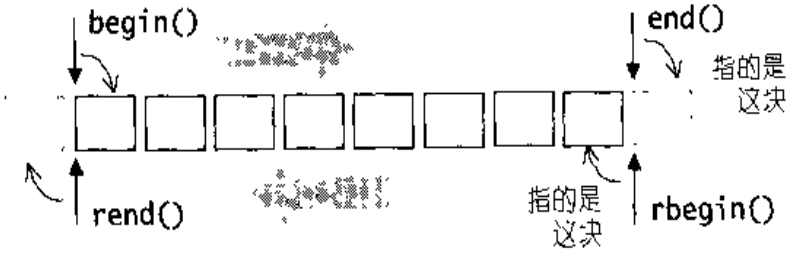
现在让我们延续 8.1.2 节的实例，假设有一个 deque<int> id，当前的内容是：

```
32 26 99 1 0 1 2 3 4 0 1 2 5 3
```

执行以下操作：

```
cout << *(id.begin()) << endl;      // 32
cout << *(id.rbegin()) << endl;     // 3
cout << *(id.end()) << endl;        // 0  dangerous!
cout << *(id.rend()) << endl;       // 0  dangerous!

deque<int>::iterator ite = find(id.begin(), id.end(), 99);
reverse_iterator< deque<int>::iterator > rite(ite);
cout << *ite << endl;     // 99
cout << *rite << endl;    // 26
```

为什么“正向迭代器”和“与其相应的逆向迭代器”取出不同的元素呢？这并不是一个潜伏的错误，而是一个刻意为之的特征，主要是为了配合迭代器区间的“前闭后开”习惯（1.9.5 节）。从图 8-3 的 rbegin() 和 end() 关系可以看出，当迭代器被逆转方向时，虽然其实体位置（真正的地址）不变，但其逻辑位置（迭代器所代表的元素）改变了（必须如此改变）：




```
#typedef ...    reverse_iterator
rbegin()=reverse_iterator(end());
```

图 **8-3** 当迭代器被逆转，虽然实体位置不变，但逻辑位置必须如此改变

唯有这样，才能保持正向迭代器的一切惯常行为。换句话说，唯有这样，当我们将一个正向迭代器区间转换为一个逆向迭代器区间后，不必再有任何额外处理，就可以让接受这个逆向迭代器区间的算法，以相反的元素次序来处理区间中的每一个元素。例如（以下出现于 8.1.2 节实例之中）：

```
copy(id.begin(), id.end(), outite);       // 1 0 1 2 3 4 0 1 2 5 3
copy(id.rbegin(), id.rend(), outite);     // 3 5 2 1 0 4 3 2 1 0 1
```

注意，上述的 id.rbegin() 是个暂时对象，相当于：

```
reverse_iterator<deque<int>::iterator>(id.end()); // 指向本例的最后元素
deque<int>::reverse_iterator(id.end());           // 指向本例的最后元素
```

其中的 deque<int>::reverse_iterator 是一种型别定义，稍早已展现过。

有了这些认知，现在我们来看看 reverse_iterator 的源代码：

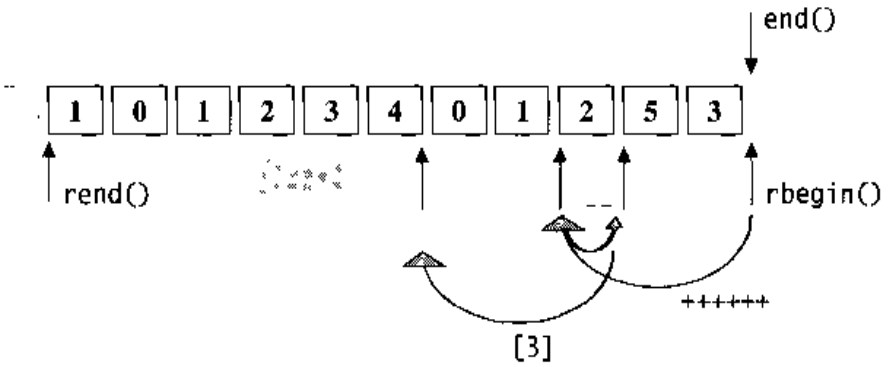
```
// 这是一个迭代器配接器（iterator adapter），用来将某个迭代器逆反前进方向，
// 使前进为后退，后退为前进
template <class Iterator>
class reverse_iterator
{
protected:
  Iterator current;    // 记录对应之正向迭代器
public:
  // 逆向迭代器的5种相应型别（associated types）都和其对应的正向迭代器相同
  typedef typename iterator_traits<Iterator>::iterator_category
          iterator_category;
  typedef typename iterator_traits<Iterator>::value_type
          value_type;
  typedef typename iterator_traits<Iterator>::difference_type
          difference_type;
  typedef typename iterator_traits<Iterator>::pointer
          pointer;
  typedef typename iterator_traits<Iterator>::reference
          reference;

  typedef Iterator iterator_type;              // 代表正向迭代器
  typedef reverse_iterator<Iterator> self;     // 代表逆向迭代器

public:
  reverse_iterator() {}
  // 下面这个 ctor 将 reverse_iterator 与某个迭代器 x 系结起来
  explicit reverse_iterator(iterator_type x) : current(x) {}
  reverse_iterator(const self& x) : current(x.current) {}

  iterator_type base() const { return current; } // 取出对应的正向迭代器
  reference operator*() const {
    Iterator tmp = current;
    return *--tmp;
    // 以上为关键所在。对逆向迭代器取值，就是将 “对应之正向迭代器”后退一格而后取值
  }
  pointer operator->() const { return &(operator*()); } // 意义同上

  // 前进（++）变成后退（--）
  self& operator++() {
```

```
    --current;
    return *this;
  }
  self operator++(int) {
    self tmp = *this;
    --current;
    return tmp;
  }
  // 后退 (--) 变成前进 (++)
  self& operator--() {
    ++current;
    return *this;
  }
  self operator--(int) {
    self tmp = *this;
    ++current;
    return tmp;
  }
  // 前进与后退方向完全逆转
  self operator+(difference_type n) const {
    return self(current - n);
  }
  self& operator+=(difference_type n) {
    current -= n;
    return *this;
  }
  self operator-(difference_type n) const {
    return self(current + n);
  }
  self& operator-=(difference_type n) {
    current += n;
    return *this;
  }
  // 注意，下面第一个* 和唯一一个 + 都会调用本类的 opearator* 和 opreator+,
  // 第二个 * 则不会。(判断法则：完全看处理的型别是什么而定)
  reference operator[](difference_type n) const { return *(*this + n); }
};
```

下面是另一些测试：

```
// 容器目前状态：1 0 1 2 3 4 0 1 2 5 3
deque<int>::reverse_iterator rite2(id.end());
cout << *(rite2);          // 3
cout << *(++++++rite2);    // 1 (前进 3 个位置后取值)
cout << *(--rite2);        // 2 (后退 1 个位置后取值)
cout << *(rite2.base()); // 5 (恢复正向迭代器后，取值)
cout << rite2[3];          // 4 (前进 3 个位置后取值)
```

下面以图形显示上述几个操作对逆向迭代器所造成的移动：



图片说明：rbegin() 连续三次累进（注：++++++ 合乎 C++ 语法）后，退后一格，然后再以注标表示法 [3] 前进三格。由于是逆向迭代器，所以方向与一般的正向迭代器恰恰相反。

8.3.3 stream iterators

所谓 stream iterators，可以将迭代器绑定到一个 stream（数据流）对象身上。绑定到 istream 对象（例如 std::cin）者，称为 **istream_iterator**，拥有输入能力；绑定到 ostream 对象（例如 std::cout）者，称为 **ostream_iterator**，拥有输出能力。两者的用法在 8.1.2 节的例子中都有示范。

乍听之下真神奇。所谓绑定一个 istream object，其实就是在 istream iterator 内部维护一个 istream member，客户端对于这个迭代器所做的 operator++ 操作，会被导引调用迭代器内部所含的那个 istream member 的输入操作（operator>>）。这个迭代器是个 Input Iterator，不具备 operator--。下面的源代码和注释说明了一切。

```
// 这是一个 input iterator，能够为 "来自某一 basic_istream" 的对象执行
// 格式化输入操作。注意，此版本为旧有之 HP 规格，未符合标准接口：
// istream_iterator<T, charT, traits, Distance>
// 然而一般使用 input iterators 时都只使用第一个 template 参数，此时以下仍适用
// 注：SGI STL 3.3 已实现出符合标准接口的 istream_iterator，做法与本版大同小异
// 本版可读性较高
template <class T, class Distance = ptrdiff_t>
class istream_iterator {
  friend bool
  operator== __STL_NULL_TMPL_ARGS (const istream_iterator<T, Distance>& x,
                                   const istream_iterator<T, Distance>& y);
  // 以上语法很奇特，请参考《C++ Primer》3e，p834，bound friend function template
  // 在 <stl_config.h> 中，__STL_NULL_TMPL_ARGS 被定义为 <>
```

```
protected:
  istream* stream;
  T value;
  bool end_marker;
  void read() {
    end_marker = (*stream) ? true : false;
    if (end_marker) *stream >> value;          // 关键
    // 以上，输入之后，stream 的状态可能改变，所以下面再判断一次以决定 end_marker
    // 当读到 eof 或读到型别不符的资料，stream 即处于 false 状态
    end_marker = (*stream) ? true : false;
  }
public:
  typedef input_iterator_tag    iterator_category;
  typedef T                     value_type;
  typedef Distance              difference_type;
  typedef const T*              pointer;
  typedef const T&              reference;
  // 以上，因身为 input iterator，所以采用 const 比较保险

  istream_iterator() : stream(&cin), end_marker(false) {}
  istream_iterator(istream& s) : stream(&s) { read(); }
  // 以上两行的用法：
  //  istream_iterator<int> eos;          造成 end_marker 为 false。
  //  istream_iterator<int> initer(cin);  引发 read()。程序至此会等待输入
  // 因此，下面这两行客户端程序：
  //  istream_iterator<int> initer(cin);      (A)
  //  cout << "please input..." << endl;      (B)
  // 会停留在 (A) 等待一个输入，然后才执行 (B) 出现提示信息。这是不合理的现象
  // 规避之道：永远在最必要的时候，才定义一个 istream_iterator。

  reference operator*() const { return value; }
  pointer operator->() const { return &(operator*()); }

  // 迭代器前进一个位置，就代表要读取一笔资料
  istream_iterator<T, Distance>& operator++() {
    read();
    return *this;
  }
  istream_iterator<T, Distance> operator++(int)  {
    istream_iterator<T, Distance> tmp = *this;
    read();
    return tmp;
  }
};
```

请注意，源代码清楚告诉我们，只要客户端定义一个 istream iterator 并绑定到某个 istream object，程序便立刻停在 istream_iterator<T>::read() 函数，等待输入。这不是我们所预期的行为，因此，请在绝对必要的时刻才定义你所需要

的 istream iterator —— 这其实是 C++ 程序员在任何时候都应该遵循的守则，但是很多人忽略了。

图 8-4 所示的是 copy() 和 istream_iterator 共同合作的例子。

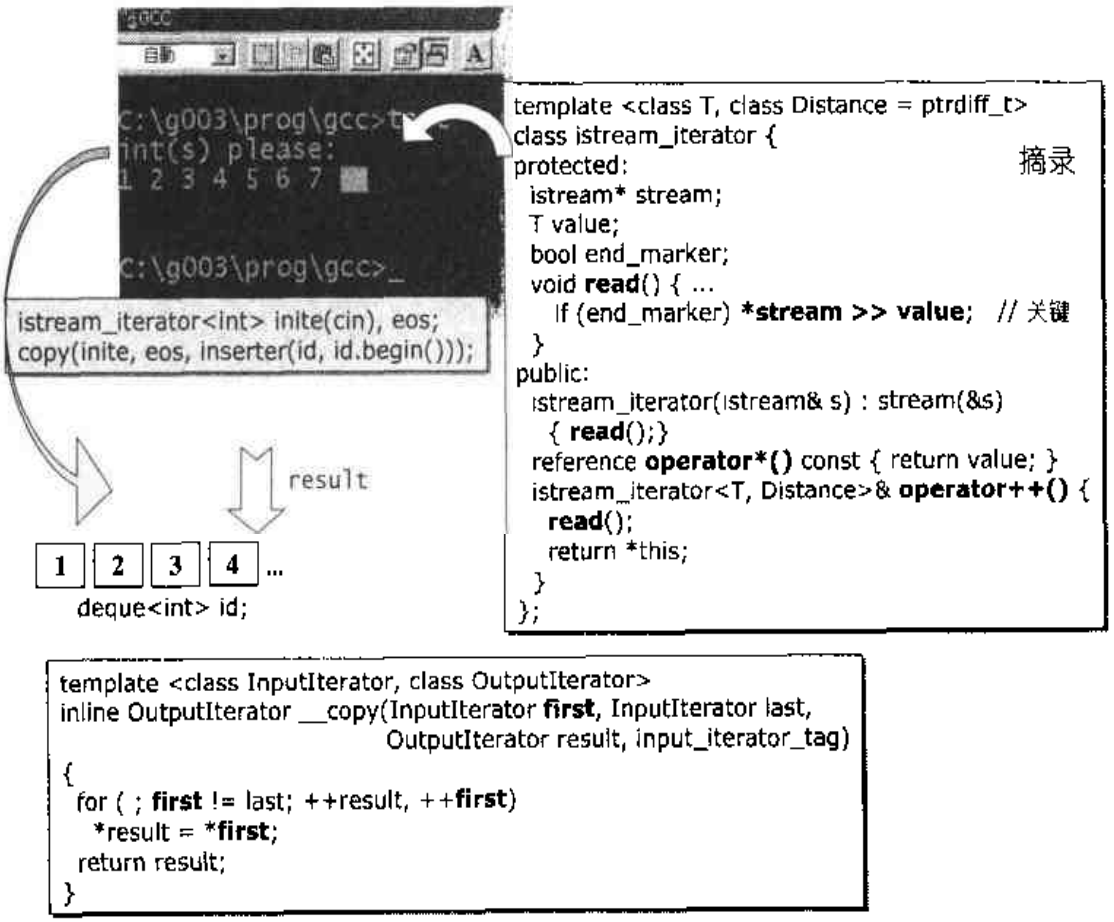


图 8-4 copy() 和 istream_iterator 合作。屏幕画面下方的浅蓝色方块是客户端程序代码，程序流程将停在其中第一行，等待用户从 cin 输入（因为右侧的 istream_iterator 源代码告诉我们，一产生 istream_iterator 对象，便会调用 read()，执行 *stream >> value，而 *stream 在本例就是 cin）。用户输入数值后，copy 算法（源代码见最下方块内容）将该数值插入到容器之内，然后执行 istream_iterator 的 operator++ 操作 —— 这又再次引发 istream_iterator::read()，准备读入下一笔资料…

图 8-4 浅色底纹部分为客户端程序代码。另两块分别为 istream_iterator 和 copy() 的源代码。copy() 算法已于 6.4.2 节有过详细的介绍，它有能力判断各种迭代器类型，采用最佳处理方式（见图 6-2），由于 istream_iterator 是个 InputIterator，所以 copy() 最后会进入 8-4 图下方所摘录的那段代码内。我们发现，当客户端初次定义了一个 istream_iterator<T> 对象并绑定到标准输入设备 cin 时，便调用了 istream_iterator<T>::read() 读取 cin 的一笔 T 值。此值被置于 data member value 之中。然后，进入循环，做这样的事情：

```
*result = *first;      // first 是一个 istream_iterator object.
```

根据 istream_iterator 的定义，对 first 取值，就是返回 data member value，也就是刚才从 cin 获得的值。此值于是被指派给 *result。当 copy() 中的 for 循环进入下一次迭代时，会引发 ++first，而根据 istream_iterator 的定义，对 first 累加，就是再从 cin 中读一个值（放入 data member value 中），然后又是 *result = *first；如此持续下去，直到 first==last 为止。last 代表的是一个 end-of-stream 标记，在各个系统上可能都不相同。

以上便是 istream iterator 的讨论。至于 ostream iterator，所谓绑定一个 ostream object，就是在其内部维护一个 ostream member，客户端对于这个迭代器所做的 operator= 操作，会被导引调用对应的（迭代器内部所含的）那个 ostream member 的输出操作（operator<<）。这个迭代器是个 OutputIterator。下面的源代码和注释说明了一切。

```
// 这是一个 output iterator，能够将对象格式化输出到某个 basic_ostream 上
// 注意，此版本为旧有之 HP 规格，未符合标准接口：
// ostream_iterator<T, charT, traits>
// 然而一般使用 onput iterators 时都只使用第一个 template 参数，此时以下仍适用
// 注：SGI STL 3.3 已实现出符合标准接口的 ostream_iterator。做法与本版大同小异
// 本版可读性较高
template <class T>
class ostream_iterator {
protected:
  ostream* stream;
  const char* string;        // 每次输出后的间隔符号
                             // 变量名称为 string 可以吗？可以！
public:
  typedef output_iterator_tag   iterator_category;
  typedef void                  value_type;
```

```
  typedef void                    difference_type;
  typedef void                    pointer;
  typedef void                    reference;

  ostream_iterator(ostream& s) : stream(&s), string(0) {}
  ostream_iterator(ostream& s, const char* c) : stream(&s), string(c) {}
  // 以上 ctors 的用法:
  //  ostream_iterator<int> outiter(cout, " "); 输出至 cout, 每次间隔一空格

  // 对迭代器做赋值 (assign) 操作, 就代表要输出一笔资料
  ostream_iterator<T>& operator=(const T& value) {
    *stream << value;                  // 关键: 输出数值
    if (string) *stream << string;     // 如果输出状态无误, 输出间隔符号
    return *this;
  }
  // 注意以下三个操作
  ostream_iterator<T>& operator*() { return *this; }
  ostream_iterator<T>& operator++() { return *this; }
  ostream_iterator<T>& operator++(int) { return *this; }
};
```

图 8-5 是 copy() 和 ostream_iterator 共同合作的例子。此图浅色底纹部分为客户端程序代码。另两块分别为 ostream_iterator 和 copy() 的源代码。本例令 ostream_iterator 绑定到标准输出设备 cout 身上。copy() 算法已于 6.4.2 节有过详细的介绍，它有能力判断各种迭代器类型，采用最佳处理方式（见图 6-2）。由于 deque<int>::iterator 是个 RandomAccessIterator，所以 copy() 最后会进入 8-5 图中段所摘录的程序代码。我们发现，每次迭代都做这样的事情：

```
*result = *first;      // result 是一个 ostream_iterator object.
```

根据 ostream_iterator 的定义，对 result 取值，返回的是自己。对 result 执行赋值（*assign*）操作，则是将 operator= 右手边的东西输出到 cout 去。当 copy() 算法进入 for 循环的下一次迭代时，会引发 ++result，而根据 ostream_iterator 的定义，对 result 累加，返回的是自己。如此持续下去，直到资料来源结束（first == last）为止。

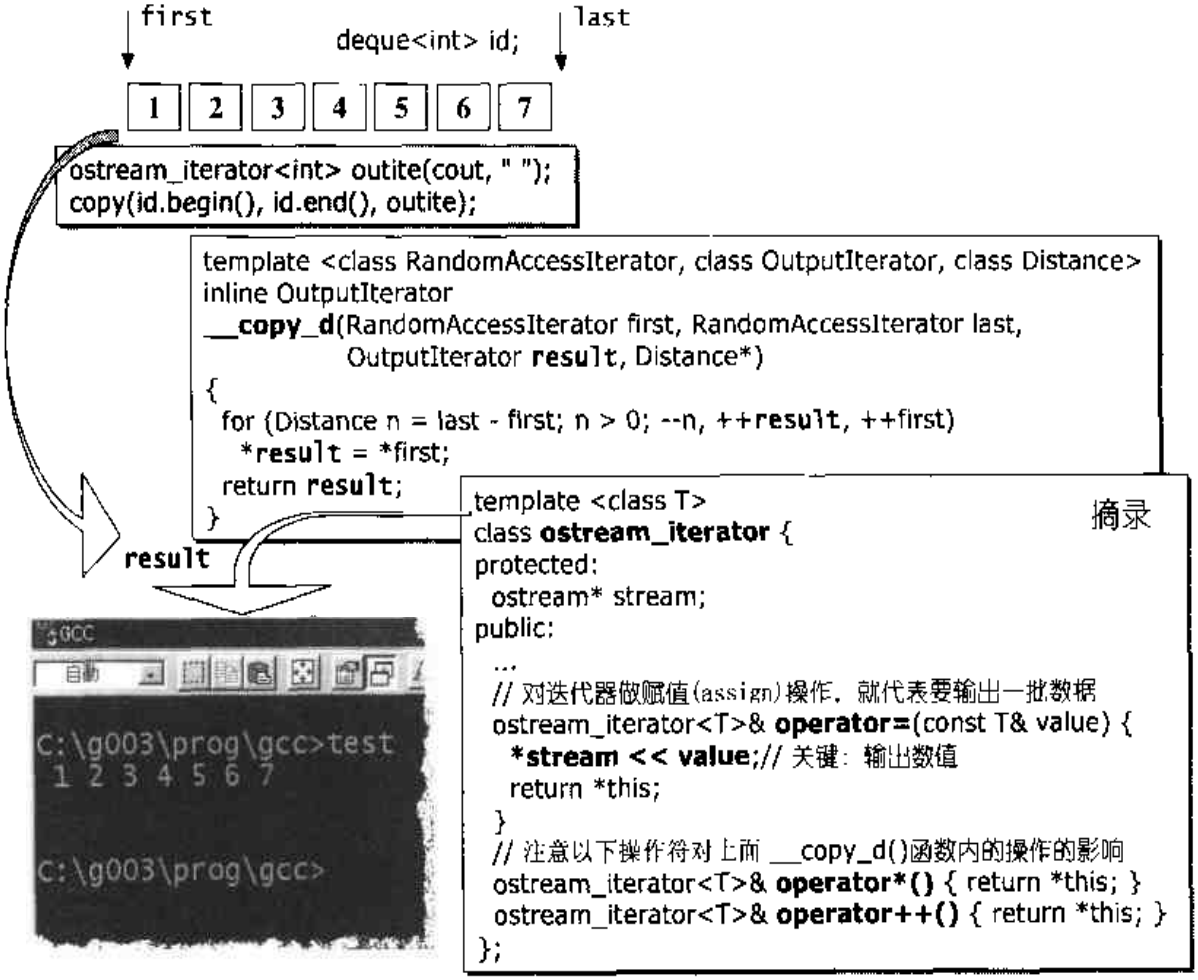


图 **8-5** copy() 和 ostream_iterator 合作，见内文说明。

这两个迭代器，istream_iterator 和 ostream_iterator，非常重要。不，我不是说它们在应用上非常重要，而是说这两个迭代器的源代码向我们展示了如何为自己量身定制一个迭代器，系结（绑定）于你所属意的装置上。正如我在本章一开始的概观说明中提过，以这两个迭代器的技术为蓝图，稍加修改，便有非常大的应用空间，可以完成一个绑定到 Internet Explorer cache 身上的迭代器，也可以完成一个系结到磁盘目录上的一个迭代器，也可以… 啊，泛型世界无限宽广。

8.4 function adapters

8.1.3 节已经对 function adapters 做了介绍，并举了一个颇为丰富的运用实例。从这里开始，我们就直接探索 SGI STL function adapters 的实现细节吧。

一般而言，对于 C++ template 语法有了某种程度的了解之后，我们很能够理解或想象，容器是以 class templates 完成，算法以 function templates 完成，仿函数是一种将 `operator()` 重载的 class template，迭代器则是一种将 `operator++` 和 `operator*` 等指针习惯常行为重载的 class template。然而配接器呢？应用于容器身上和迭代器身上的配接器，已于本章稍早介绍过，都是一种 class template。可应用于仿函数身上的配接器呢？如何能够 “事先”对一个函数完成参数的绑定、执行结果的否定、甚至多方函数的组合？请注意我用 “事先”一词。我的意思是，最后修饰结果（视为一个表达式，expression）将被传给 STL 算法使用，STL 算法才是真正使用这表达式的主格。而我们都知道，只有在真正使用（调用）某个函数（或仿函数）时，才有可能对参数和执行结果做任何干涉。

这是怎么回事？

关键在于，就像本章先前所揭示，container adapters 内藏了一个 container member 一样，或是像 reverse iterator (adapters) 内藏了一个 iterator member 一样，或是像 stream iterator (adapters) 内藏了一个 pointer to stream 一样，或是像 insert iterator (adapters) 内藏了一个 pointer to container（并因而得以取其 iterator）一样，每一个 function adapters 也内藏了一个 member object，其型别等同于它所要配接的对象（那个对象当然是一个“可配接的仿函数”，adaptable functor），图 8-6 是一份整理。当 function adapter 有了完全属于自己的一份修饰对象（的副本）在手，它就成了该修饰对象（的副本）的主人，也就有资格调用该修饰对象（一个仿函数），并在参数和返回值上面动手脚了。

图 8-7 鸟瞰了 `count_if()` 搭配 `bind2nd(less<int>(), 12))` 的例子，其中清楚显示 `count_if()` 的控制权是怎么落到我们的手上。控制权一旦在我们手上，我们当然可以予取予求了。

辅助函数（helper function）	实际产生的配接器对象形式	内藏成员的型式
bind1st(cost Op& op, const T& x);	binder1st<Op> (op, arg1_type(x))	Op（二元仿函数）
bind2nd(cost Op& op, const T& x);	binder2nd<Op> (op, arg2_type(x))	Op（二元仿函数）
not1(cost Pred& pred);	unary_negate<Pred> (pred)	Pred 返回布尔值的仿函数
not2(cost Pred& pred);	binary_negate<Pred> (pred)	Pred 返回布尔值的仿函数
compose1(const Op1& op1, ♠ const Op2& op2);	unary_compose<Op1,Op2> (op1, op2)	Op1, Op2
compose2(const Op1& op1, const Op2& op2, ♠ const Op3& op3);	binary_compose <Op1,Op2,Op3> (op1, op2, op3)	Op1, Op2, Op3
ptr_fun (Result(*fp)(Arg));	pointer_to_unary_function <Arg, Result>(f)	Result(*fp)(Arg)
ptr_fun (Result(*fp)(Arg1,Arg2));	pointer_to_binary_function <Arg1, Arg2, Result>(f)	Result(*fp) (Arg1,Arg2)
mem_fun(S (T::*f)());	mem_fun_t<S,T>(f)	S (T::*f)()
mem_fun(S (T::*f)() const);	const_mem_fun_t<S,T>(f)	S (T::*f)() const
mem_fun_ref(S (T::*f)());	mem_fun_ref_t<S,T>(f)	S (T::*f)()
mem_fun_ref (S (T::*f)() const);	const_mem_fun_ref_t<S,T> (f)	S (T::*f)() const
mem_fun1(S (T::*f)(A));	mem_fun1_t<S,T,A>(f)	S (T::*f)(A)
mem_fun1(S (T::*f)(A)const);	const_mem_fun1_t<S,T,A>(f)	S (T::*f)(A)const
mem_fun1_ref(S (T::*f)(A));	mem_fun1_ref_t<S,T,A>(f)	S (T::*f)(A)
mem_fun1_ref (S (T::*f)(A)const);	const_mem_fun1_ref_t <S,T,A>(f)	S (T::*f)(A)const

♠ compose1 和 compose2 不在 C++ *Standard* 规范之内。
♠ 最后四个辅助函数在 C++ *Standard* 内已去除名称中的'1'。

图 **8-6** 不同的 function adapters 内藏不同的成员。

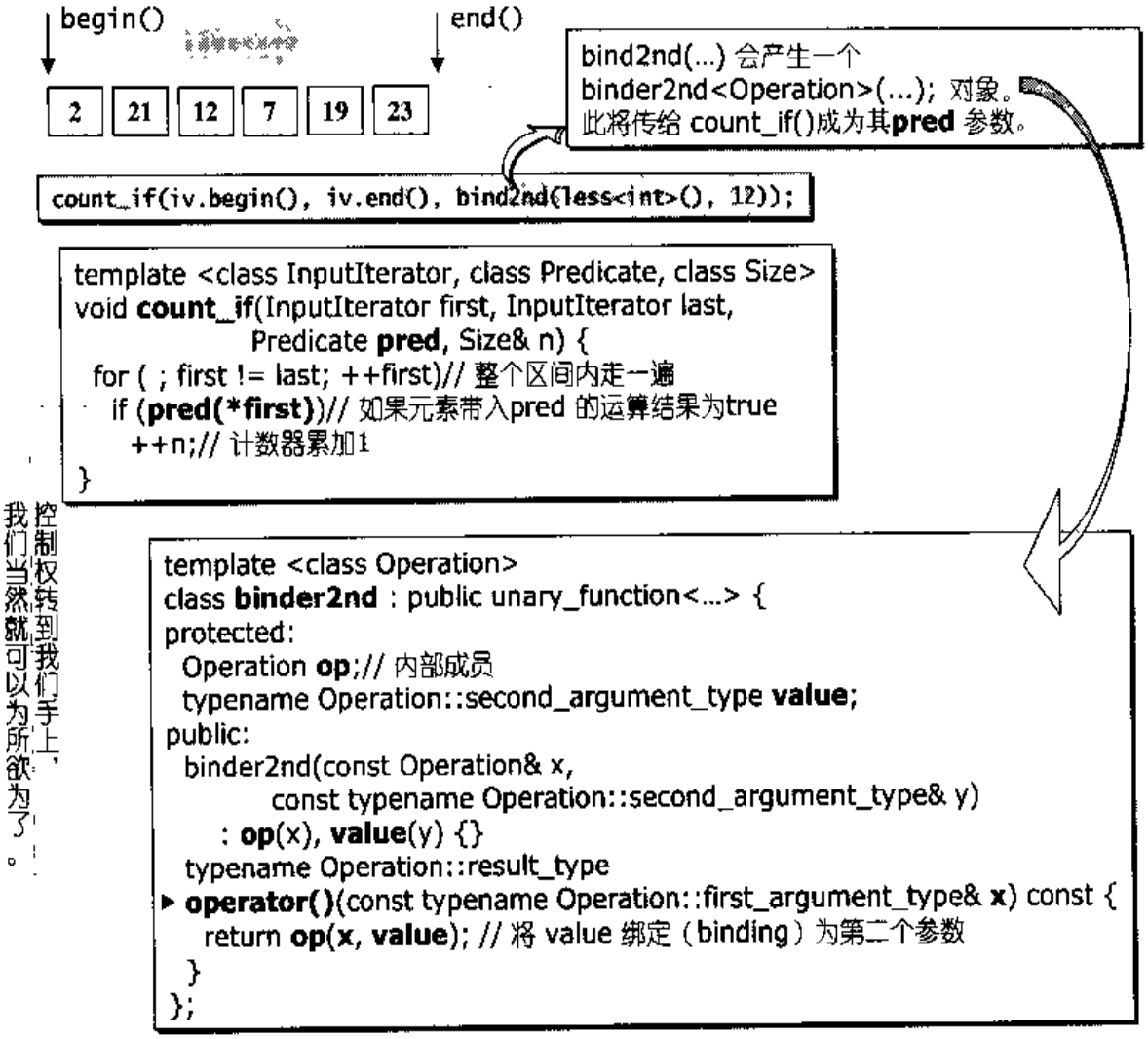


图 **8-7** 鸟瞰 `count_if()` 和 `bind2nd(less<int>(), 12))` 的搭配实例。此图等于是相关源代码的接口整理，搭配 `bind2nd()` 以及 class `binder2nd` 源代码阅读，更得益处。图中浅色底纹方块为客户端调用 `count_if()` 实况；循着箭头行进，便能理解的整个合作机制。

8.4.1 对返回值进行逻辑否定：not1, not2

以下直接列出源代码。源代码中的注释配合先前的概念解说，应该足以让你彻底认识这些仿函数配接器。源代码中常出现的 `pred` 一词，是 predicate 的缩写，意指会返回真假值（`bool`）的表达式。

```
// 以下配接器用来表示某个 Adaptable Predicate 的逻辑负值 (logical negation)
template <class Predicate>
class unary_negate
  : public unary_function<typename Predicate::argument_type, bool> {
protected:
  Predicate pred;      // 内部成员
public:
  explicit unary_negate(const Predicate& x) : pred(x) {}
  bool operator()(const typename Predicate::argument_type& x) const {
    return !pred(x);   // 将 pred 的运算结果加上否定 (negate) 运算
  }
};

// 辅助函数，使我们得以方便使用 unary_negate<Pred>
template <class Predicate>
inline unary_negate<Predicate> not1(const Predicate& pred) {
  return unary_negate<Predicate>(pred);
}

//-------------------- -------------- ------- --- ---- ---- -----
// 以下配接器用来表示某个 Adaptable Binary Predicate 的逻辑负值
template <class Predicate>
class binary_negate
  : public binary_function<typename Predicate::first_argument_type,
                           typename Predicate::second_argument_type,
                           bool> {
protected:
  Predicate pred;      // 内部成员
public:
  explicit binary_negate(const Predicate& x) : pred(x) {}
  bool operator()(const typename Predicate::first_argument_type& x,
                  const typename Predicate::second_argument_type& y) const {
    return !pred(x, y); // 将 pred 的运算结果加上否定 (negate) 运算
  }
};

// 辅助函数，使我们得以方便使用 bineary_negate<Pred>
template <class Predicate>
inline binary_negate<Predicate> not2(const Predicate& pred) {
  return binary_negate<Predicate>(pred);
}
```

8.4.2 对参数进行绑定：bind1st, bind2nd

以下直接列出源代码。源代码中的注释配合先前的概念解说，应该足以让你彻底认识这些仿函数配接器。

```
// 以下配接器用来将某个 Adaptable Binary function 转换为 Unary Function
template <class Operation>
class binder1st
  : public unary_function<typename Operation::second_argument_type,
                          typename Operation::result_type> {
protected:
  Operation op;   // 内部成员
  typename Operation::first_argument_type value;   // 内部成员

public:
  // constructor
  binder1st(const Operation& x,
            const typename Operation::first_argument_type& y)
     : op(x), value(y) {}  // 将表达式和第一参数记录于内部成员

  typename Operation::result_type
  operator()(const typename Operation::second_argument_type& x) const {
    return op(value, x);    // 实际调用表达式，并将 value 绑定为第一参数
  }
};

// 辅助函数，让我们得以方便使用 binder1st<Op>
template <class Operation, class T>
inline binder1st<Operation> bind1st(const Operation& op, const T& x)
{
  typedef typename Operation::first_argument_type arg1_type;
  return binder1st<Operation>(op, arg1_type(x));
        // 以上，注意，先把 x 转型为 op 的第一参数型别
}

//-----------------------------------------------------------------
// 以下配接器用来将某个 Adaptable Binary function 转换为 Unary Function
template <class Operation>
class binder2nd
  : public unary_function<typename Operation::first_argument_type,
                          typename Operation::result_type> {
protected:
  Operation op;   // 内部成员
  typename Operation::second_argument_type value;  // 内部成员
public:
  // constructor
  binder2nd(const Operation& x,
            const typename Operation::second_argument_type& y)
     : op(x), value(y) {}  // 将表达式和第一参数记录于内部成员

  typename Operation::result_type
  operator()(const typename Operation::first_argument_type& x) const {
    return op(x, value);    // 实际调用表达式，并将 value 绑定为第二参数
  }
```

```
};

// 辅助函数，让我们得以方便使用 binder2nd<Op>
template <class Operation, class T>
inline binder2nd<Operation> bind2nd(const Operation& op, const T& x)
{
  typedef typename Operation::second_argument_type arg2_type;
  return binder2nd<Operation>(op, arg2_type(x));
        // 以上，注意，先把 x 转型为 op 的第二参数型别
}
```

8.4.3 用于函数合成：compose1, compose2

以下直接列出源代码。源代码中的注释配合先前的概念解说，应该足以让你彻底认识这些仿函数配接器。请注意，本节的两个配接器并未纳入 STL 标准，是 SGI STL 的私产品，但是颇有钻研价值，我们可以从中学习如何开发适合自己的、更复杂的配接器。

```
// 已知两个 Adaptable Unary Functions f(),g()，以下配接器用来产生一个 h()，
// 使 h(x) = f(g(x))
template <class Operation1, class Operation2>
class unary_compose
  : public unary_function<typename Operation2::argument_type,
                          typename Operation1::result_type> {
protected:
  Operation1 op1;      // 内部成员
  Operation2 op2;      // 内部成员
public:
  // constructor
  unary_compose(const Operation1& x, const Operation2& y)
    : op1(x), op2(y) {} // 将两个表达式记录于内部成员

  typename Operation1::result_type
  operator()(const typename Operation2::argument_type& x) const {
    return op1(op2(x));     // 函数合成
  }
};

// 辅助函数，让我们得以方便运用 unary_compose<Op1,Op2>
template <class Operation1, class Operation2>
inline unary_compose<Operation1, Operation2>
compose1(const Operation1& op1, const Operation2& op2) {
  return unary_compose<Operation1, Operation2>(op1, op2);
}

//-- ---------- ----------------------------------------------
```

```
// 已知一个 Adaptable Binary Function f 和
// 两个 Adaptable Unary Functions g1,g2,
// 以下配接器用来产生一个 h, 使 h(x) = f(g1(x),g2(x))
template <class Operation1, class Operation2, class Operation3>
class binary_compose
  : public unary_function<typename Operation2::argument_type,
                          typename Operation1::result_type> {
protected:
  Operation1 op1;      // 内部成员
  Operation2 op2;      // 内部成员
  Operation3 op3;      // 内部成员
public:
  // constructor, 将三个表达式记录于内部成员
  binary_compose(const Operation1& x, const Operation2& y,
                 const Operation3& z) : op1(x), op2(y), op3(z) { }

  typename Operation1::result_type
  operator()(const typename Operation2::argument_type& x) const {
    return op1(op2(x), op3(x));      // 函数合成
  }
};

// 辅助函数，让我们得以方便运用 binary_compose<Op1,Op2,Op3>
template <class Operation1, class Operation2, class Operation3>
inline binary_compose<Operation1, Operation2, Operation3>
compose2(const Operation1& op1, const Operation2& op2,
         const Operation3& op3) {
  return binary_compose<Operation1, Operation2, Operation3>
           (op1, op2, op3);
}
```

8.4.4 用于函数指针：ptr_fun

这种配接器使我们能够将一般函数当做仿函数使用。一般函数当做仿函数传给 STL 算法，就语言层面本来就是可以的，就好像原生指针可被当做迭代器传给 STL 算法样。但如果你不使用这里所说的两个配接器先做一番包装，你所使用的那个一般函数将无配接能力，也就无法和前数小节介绍过的其它配接器接轨。

如果你不熟悉函数指针的语法，请参考《多态与虚拟》2/e，第 1 章。

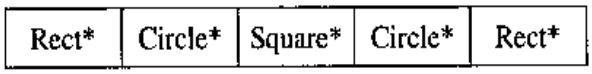
以下直接列出源代码。源代码中的注释配合前数小节的概念解说，应该足以让你彻底认识这些仿函数配接器。

```
// 以下配接器其实就是把一个一元函数指针包起来：
// 当仿函数被使用时，就调用该函数指针
template <class Arg, class Result>
class pointer_to_unary_function : public unary_function<Arg, Result>
{
protected:
  Result (*ptr)(Arg); // 内部成员，一个函数指针
public:
  pointer_to_unary_function() {}
  // 以下 constructor 将函数指针记录于内部成员之中
  explicit pointer_to_unary_function(Result (*x)(Arg)) : ptr(x) {}

  // 以下，通过函数指针执行函数
  Result operator()(Arg x) const { return ptr(x); }
};

// 辅助函数，让我们得以方便运用 pointer_to_unary_function
template <class Arg, class Result>
inline pointer_to_unary_function<Arg, Result> // 灰色部分是返回值型别
ptr_fun(Result (*x)(Arg)) {
  return pointer_to_unary_function<Arg, Result>(x);
}

//-----------------------------------------------------------------
// 以下配接器其实就是把一个二元函数指针包起来：
// 当仿函数被使用时，就调用该函数指针
template <class Arg1, class Arg2, class Result>
class pointer_to_binary_function
    : public binary_function<Arg1, Arg2, Result> {
protected:
    Result (*ptr)(Arg1, Arg2);  // 内部成员，一个函数指针
public:
    pointer_to_binary_function() {}
    // 以下 constructor 将函数指针记录于内部成员之中
    explicit pointer_to_binary_function(Result (*x)(Arg1, Arg2))
      : ptr(x) {}

    // 以下，通过函数指针执行函数
    Result operator()(Arg1 x, Arg2 y) const { return ptr(x, y); }
};

// 辅助函数，让我们得以方便使用 pointer_to_binary_function
template <class Arg1, class Arg2, class Result>
inline pointer_to_binary_function<Arg1, Arg2, Result> // 返回值型别
ptr_fun(Result (*x)(Arg1, Arg2)) {
  return pointer_to_binary_function<Arg1, Arg2, Result>(x);
}
```

8.4.5 用于成员函数指针：mem_fun, mem_fun_ref

这种配接器使我们能够将成员函数（member functions）当做仿函数来使用，于是成员函数可以搭配各种泛型算法。当容器的元素型式是 X& 或 X*，而我们又以虚拟（virtual）成员函数作为仿函数，便可以藉由泛型算法完成所谓的多态调用（polymorphic function call）。这是泛型（genericity）与多态（polymorphism）之间的一个重要接轨。下面是一个实例，图 8-8 是例中的类阶层体系（classes hierarchy）和实际产生出来的容器状态：

```
vector<Shape*> V;
```




```
for_each(v.begin(),
         V.end(),
         mem_fun(&Shape::display));
```

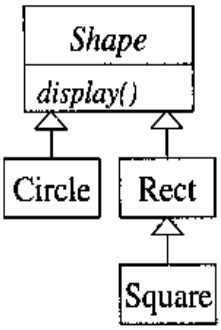


图 **8-8** 图右是类阶层体系（classes hierarchy），图左是实例所产生的容器状态。

```
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>
#include <functional>
using namespace std;

class Shape
{  public: virtual void display()=0; };

class Rect : public Shape
{  public: virtual void display() { cout << "Rect "; }  };

class Circle : public Shape
{  public: virtual void display() { cout << "Circle "; }  };

class Square : public Rect
{  public: virtual void display() { cout << "Square "; }  };

int main()
{
  vector<Shape*> V;
```

```
  V.push_back(new Rect);
  V.push_back(new Circle);
  V.push_back(new Square);
  V.push_back(new Circle);
  V.push_back(new Rect);

  // polymorphically
  for(int i=0; i< V.size(); ++i)
     (V[i])->display();
  cout << endl;   // Rect Circle Square Circle Rect

  // polymorphically
  for_each(V.begin(), V.end(), mem_fun(&Shape::display));
  cout << endl;   // Rect Circle Square Circle Rect
}
```

请注意，就语法而言，你不能写：

```
for_each(V.begin(), V.end(), &Shape::display);
```

也不能写：

```
for_each(V.begin(), V.end(), Shape::display);
```

一定要以配接器 mem_fun 修饰 member function，才能被算法 for_each 接受。

另一个必须注意的是，虽然多态（polymorphism）可以对 pointer 或 reference 起作用，但很可惜的是，STL 容器只支持 “实值语意”（value semantic），不支持 “引用语意”（reference semantics）[5]，因此下面这样无法通过编译：

```
vector<Shape&> V;
```

以下是各个 adapters for member function 的源代码[6]。源代码中的注释配合前数小节的概念解说，应该足以让你彻底认识这些仿函数配接器。

[5] 请参考《*The C++ Standard Library*》by Nicolai M. Josuttis, 5.10.2 节和 6.8 节。

[6] 本处源码所使用的 pointer to member function（成员函数指针）语法，例如 `S (T::*pf)(A) const`，对一般人而言比较奇特而罕见。请参见《多态与虚拟》2/e，第 1 章。

```
// Adapter function objects: pointers to member functions.

// 这个族群一共有 8 = 2^3 个 function objects。
//  (1)  "无任何参数" vs "有一个参数"
//  (2)  "通过 pointer 调用" vs "通过 reference 调用"
//  (3)  "const 成员函数" vs "non-const 成员函数"

// 所有的复杂都只存在于 function objects 内部。你可以忽略它们，直接使用
//  更上层的辅助函数 mem_fun 和 mem_fun_ref，它们会产生适当的配接器

//  "无任何参数"、"通过 pointer 调用"、"non-const 成员函数"
template <class S, class T>
class mem_fun_t : public unary_function<T*, S> {
public:
  explicit mem_fun_t(S (T::*pf)()) : f(pf) {} // 记录下来
  S operator()(T* p) const { return (p->*f)(); }   // 转调用
private:
  S (T::*f)();    // 内部成员，pointer to member function
};

//  "无任何参数"、"通过 pointer 调用"、"const 成员函数"
template <class S, class T>
class const_mem_fun_t : public unary_function<const T*, S> {
public:
  explicit const_mem_fun_t(S (T::*pf)() const) : f(pf) {}
  S operator()(const T* p) const { return (p->*f)(); }
private:
  S (T::*f)() const;  // 内部成员，pointer to const member function
};

//  "无任何参数"、"通过 reference 调用"、"non-const 成员函数"
template <class S, class T>
class mem_fun_ref_t : public unary_function<T, S> {
public:
  explicit mem_fun_ref_t(S (T::*pf)()) : f(pf) {}  // 记录下来
  S operator()(T& r) const { return (r.*f)(); }    // 转调用
private:
  S (T::*f)();    // 内部成员，pointer to member function
};

//  "无任何参数"、"通过 reference 调用"、"const 成员函数"
template <class S, class T>
class const_mem_fun_ref_t : public unary_function<T, S> {
public:
  explicit const_mem_fun_ref_t(S (T::*pf)() const) : f(pf) {}
  S operator()(const T& r) const { return (r.*f)(); }
private:
  S (T::*f)() const;  // 内部成员，pointer to const member function
};
```

```
// "有一个参数"、"通过 pointer 调用"、"non-const 成员函数"
template <class S, class T, class A>
class mem_fun1_t : public binary_function<T*, A, S> {
public:
  explicit mem_fun1_t(S (T::*pf)(A)) : f(pf) {}          // 记录下来
  S operator()(T* p, A x) const { return (p->*f)(x); } // 转调用
private:
  S (T::*f)(A);   // 内部成员，pointer to member function
};

// "有一个参数"、"通过 pointer 调用"、"const 成员函数"
template <class S, class T, class A>
class const_mem_fun1_t : public binary_function<const T*, A, S> {
public:
  explicit const_mem_fun1_t(S (T::*pf)(A) const) : f(pf) {}
  S operator()(const T* p, A x) const { return (p->*f)(x); }
private:
  S (T::*f)(A) const; // 内部成员，pointer to const member function
};

// "有一个参数"、"通过 reference 调用"、"non-const 成员函数"
template <class S, class T, class A>
class mem_fun1_ref_t : public binary_function<T, A, S> {
public:
  explicit mem_fun1_ref_t(S (T::*pf)(A)) : f(pf) {}      // 记录下来
  S operator()(T& r, A x) const { return (r.*f)(x); }   // 转调用
private:
  S (T::*f)(A);   // 内部成员，pointer to member function
};

// "有一个参数"、"通过 reference 调用"、"const 成员函数"
template <class S, class T, class A>
class const_mem_fun1_ref_t : public binary_function<T, A, S> {
public:
  explicit const_mem_fun1_ref_t(S (T::*pf)(A) const) : f(pf) {}
  S operator()(const T& r, A x) const { return (r.*f)(x); }
private:
  S (T::*f)(A) const; // 内部成员，pointer to const member function
};

//-----------------------------------------------------------------
// mem_fun adapter 的辅助函数：mem_fun, mem_fun_ref

template <class S, class T>
inline mem_fun_t<S,T> mem_fun(S (T::*f)()) {
  return mem_fun_t<S,T>(f);
}
```

```
template <class S, class T>
inline const_mem_fun_t<S,T> mem_fun(S (T::*f)() const) {
  return const_mem_fun_t<S,T>(f);
}

template <class S, class T>
inline mem_fun_ref_t<S,T> mem_fun_ref(S (T::*f)()) {
  return mem_fun_ref_t<S,T>(f);
}

template <class S, class T>
inline const_mem_fun_ref_t<S,T> mem_fun_ref(S (T::*f)() const) {
  return const_mem_fun_ref_t<S,T>(f);
}

// 注意：以下四个函数，其实可以采用和先前（以上）四个函数相同的名称（函数重载）。
// 事实上 C++ Standard 也的确这么做。我手上的 G++ 2.91.57 并未遵循标准，不过只要
// 把 mem_fun1() 改为 mem_fun()，把 mem_fun1_ref() 改为 mem_fun_ref()，
// 即可符合 C++ Standard。SGI STL 3.3 就是这么做。
template <class S, class T, class A>
inline mem_fun1_t<S,T,A> mem_fun1(S (T::*f)(A)) {
  return mem_fun1_t<S,T,A>(f);
}

template <class S, class T, class A>
inline const_mem_fun1_t<S,T,A> mem_fun1(S (T::*f)(A) const) {
  return const_mem_fun1_t<S,T,A>(f);
}

template <class S, class T, class A>
inline mem_fun1_ref_t<S,T,A> mem_fun1_ref(S (T::*f)(A)) {
  return mem_fun1_ref_t<S,T,A>(f);
}

template <class S, class T, class A>
inline const_mem_fun1_ref_t<S,T,A> mem_fun1_ref(S (T::*f)(A) const) {
  return const_mem_fun1_ref_t<S,T,A>(f);
}
```

A

參考書籍與推薦讀物
Bibliography

Genericity/STL 領域裡頭，已經產生了一些經典作品。

我曾經書寫一篇文章，介紹 Genericity/STL 經典好書，分別刊載於台北《*Run!PC* 》雜誌和北京《程序員》雜誌。該文討論 Genericity/STL 的數個學習層次，文中所列書籍不但是我的推薦，也是本書《STL 源碼剖析》寫作的部分參考。以下摘錄該文中關於書籍的介紹。全文見 http://www.jjhou.com/programmer-2-stl.htm。

侯捷觀點之《Genericity/STL 大系》— 泛型技術的三個學習階段

自從被全球軟體界廣泛運用以來，C++ 有了許多演化與變革。然而就像人們總是把目光放在豔麗的牡丹而忽略了花旁的綠葉，做爲一個廣爲人知的物件導向程式語言（Object Oriented Programming Language），C++ 所支援的另一種思維 — 泛型編程 — 被嚴重忽略了。說什麼紅花綠葉，好似主觀上劃分了主從，其實物件導向思維和泛型思維兩者之間無分主從。兩者相輔相成，肯定對程式開發有更大的突破。

面對新技術，我們的最大障礙在於心中的怯弱和遲疑。To be or not to be, that is the question! 不要和哈姆雷特一樣猶豫不決，當你面對一項有用的技術，必須果敢。

王國維說大事業大學問者的人生有三個境界。依我看，泛型技術的學習也有三個境界，第一個境界是運用 **STL**。對程式員而言，諸多抽象描述，不如實象的程式

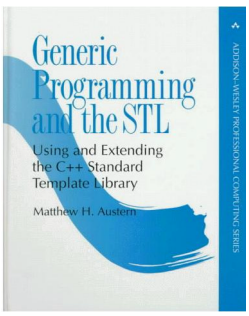
碼直指人心。**第二個境界是理解泛型技術的內涵與 STL 的學理**。不但要理解 STL 的概念分類學（concepts taxonomy）和抽象概念庫（library of abstract concepts），最好再對數個 STL 組件（不必太多，但最好涵蓋各類型）做一番深刻追蹤。STL 源碼都在手上（就是相應的那些 header files 嘛），好好做幾個個案研究，便能夠對泛型技術以及 STL 的學理有深刻的掌握。

第三個境界是擴充 STL。當 STL 不能滿足我們的需求，我們必須有能力動手寫一個可融入 STL 體系中的軟體組件。要到達這個境界之前，得先徹底瞭解 STL，也就是先通過第二境界的痛苦折磨。

也許還應該加上所謂**第零境界：C++ template 機制**。這是學習泛型技術及 STL 的第一道門檻，包括諸如 class templates, function templates, member templates, specialization, partial specialization。更往基礎看去，由於 STL 大量運用了 operator overloading（運算子多載化），所以這個技法也必須熟捻。

以下，我便爲各位介紹多本相關書籍，涵蓋不同的切入角度，也涵蓋上述各個學習層次。另有一些則爲本書之參考依據。爲求方便，以下皆以學術界慣用法標示書籍代名，並按英文字母排序。凡有中文版者，我會特別加註。

[Austern98]: *Generic Programming and the STL - Using and Extending the C++ Standard Template Library*, by Matthew H. Austern, Addison Wesley 1998. 548 pages
繁體中文版：《泛型程式設計與 STL》，侯捷/黃俊堯合譯，碁峰 2000, 548 頁。



這是一本艱深的書。沒有三兩三，別想過梁山，你必須對 C++ template 技法、STL 的運用、泛型設計的基本精神都有相當基礎了，才得一窺此書堂奧。

此書第一篇對 STL 的設計哲學有很好的導入，第二篇是詳盡的 STL concepts 完整規格，第三篇則是詳盡的 STL components 完整規格，並附運用範例：

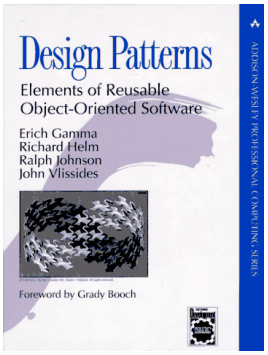
```
PartI : Introduction to Generic Programming
1. A Tour of the STL
2. Algorithms and Ranges
3. More about Iterators
4. Function Objects
5. Containers
PartII : Reference Manual: STL Concepts
6. Basic Concepts
7. Iterators
8. Function Objects
9. Containers
PartIII : Reference Manual : Algorithms and Classes
10. Basic Components
11. Nonmutating Algorithms
12. Basic Mutating Algorithms
13. Sorting and Searching
14. Iterator Classes
15. Function Object Classes
16. Container Classes
Appendix A. Portability and Standardization
Bibliography
Index
```

此書通篇強調 STL 的泛型理論基礎，以及 STL 的實作規格。你會看到諸如 concept, model, refinement, range, iterator 等字詞的意義，也會看到諸如 *Assignable, Default Constructible, Equality Comparable, Strict Weakly Comparable* 等觀念的嚴謹定義。雖然一本既富學術性又帶長遠參考價值的工具書，給人嚴肅又艱澀的表象，但此書第二章及第三章解釋 iterator 和 iterator traits 時的表現，卻不由令人擊節讚賞大嘆精彩。一旦你有能力徹底解放 traits 編程技術，你才有能力觀看 STL 源碼（STL 幾乎無所不在地運用 traits 技術）並進一步撰寫符合規格的 STL 相容組件。就像其他任何 framework 一樣，STL 以開放源碼的方式呈現市場，這種白盒子方式使我們在更深入剖析技術時（可能是爲了透徹，可能是爲了擴充），有一個終極依恃。因此，觀看 STL 源碼的能力，我認爲對技術的養成與掌握，極爲重要。

總的來說，此書在 STL 規格及 STL 學理概念的資料及說明方面，目前無出其右者。不論在 (1) 泛型觀念之深入淺出、(2) STL 架構組織之井然剖析、(3) STL 參考文件之詳實整理 三方面，此書均有卓越表現。可以這麼說，在泛型技術和 STL 的學

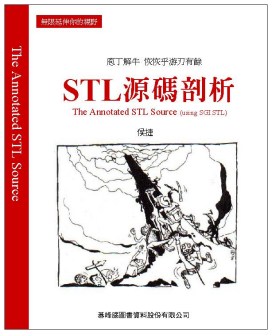
習道路上，此書並非萬能（至少它不適合初學者），但如果你希望徹底掌握泛型技術與 STL，沒有此書萬萬不能。

[Gamma95]:*Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software*, by Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, and John Vlissides, Addison-Wesley, 1995. 395 pages
繁體中文版：
《物件導向設計模式—可再利用物件導向軟體之要素》葉秉哲譯，培生 2001, 458 頁



此書與泛型或 STL 並沒有直接關係。但是 STL 的兩大類型組件：*Iterator* 和 *Adapter*，被收錄於此書 23 個設計樣式（design patterns）中。此書所談的其他設計樣式在 STL 之中也有發揮。兩相比照，尤其是看過 STL 的源碼之後，對於這些設計樣式會有更深的體會，迴映過來對 STL 本身架構也會有更深一層的體會。

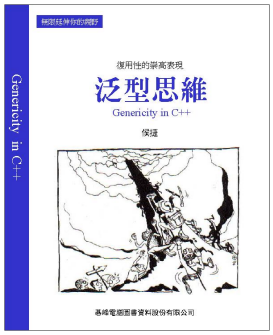
[Hou02a]:《STL 源碼剖析 — 向專家取經，學習 STL 實作技術、強型檢驗、記憶體管理、演算法、資料結構之高階編程技法》，侯捷著，碁峰 2002，??? 頁。



這便是你手上這本書。揭示 SGI STL 實作版本的關鍵源碼，涵蓋 STL 六大組件之

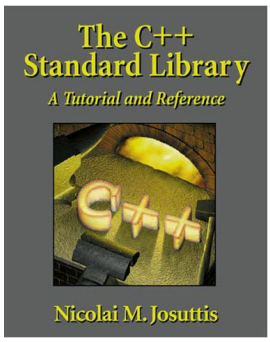
實作技術和原理解說。是學習泛型編程、資料結構、演算法、記憶體管理…等高階編程技術的終極性讀物，畢竟…唔…源碼之前了無秘密。

[Hou02b]:《泛型思維 — Genericity in C++》，侯捷著（計劃中）



下筆此刻，此書尚在撰寫當中，內容涵蓋語言層次（C++ templates 語法、Java generic 語法、C++ 運算子重載），STL 原理介紹與架構分析，STL 現場重建，STL 深度應用，STL 擴充示範，泛型思考。並附一個微型、高度可移植的 STLLite，讓讀者得以最精簡的方式和時間一窺 STL 全貌，一探泛型之宏觀與微觀。

[Josuttis99]: *The C++ Standard Library - A Tutorial and Reference*, by Nicolai M. Josuttis, Addison Wesley 1999. 799 pages
繁體中文版：
《C++ 標準程式庫 — 學習教本與參考工具》，侯捷/孟岩譯，碁峰 2002, 800 頁。



一旦你開始學習 STL，乃至實際運用 STL，這本書可以爲你節省大量的翻查、參考、錯誤嘗試的時間。此書各章如下：

```
1. About the Book
2. Introduction to C++ and the Standard Library
3. General Concepts
4. Utilities
5. The Standard Template Library
6. STL Containers
7. STL Iterators
8. STL Function Objects
9. STL Algorithms
10 Special Containers
11 Strings
12 Numerics
13 Input/Output Using Stream Classes
14 Internationalization
15 Allocators
Internet Resources
Bibliography
Index
```

此書涵蓋面廣，不僅止於 STL，而且是整個 C++ 標準程式庫，詳細介紹每個組件的規格及運用方式，並佐以範例。作者的整理功夫做得非常紮實，並大量運用圖表做爲解說工具。此書的另一個特色是涵蓋了 STL 相關各種異常（exceptions），這很少見。

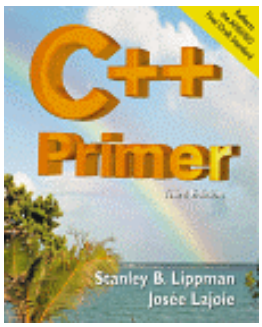
此書不僅介紹 STL 組件的運用，也導入關鍵性 STL 源碼。這些源碼都經過作者的節錄整理，砍去枝節，留下主幹，容易入目。這是我特別激賞的一部份。繁中取簡，百萬軍中取敵首級，不是容易的任務，首先得對龐大的源碼有清晰的認識，再有堅定而正確的詮釋主軸，知道什麼要砍，什麼要留，什麼要註解。

閱讀此書，不但得以進入我所謂的第一學習境界，甚且由於關鍵源碼的提供，得以進入第二境界。此書也適度介紹某些 STL 擴充技術。例如 6.8 節介紹如何以 smart pointer 使 STL 容器具有 "reference semantics" （STL 容器原本只支援 "value semantics"），7.5.2 節介紹一個訂製型 iterator，10.1.4 節介紹一個訂製型 stack，10.2.4 節介紹一個訂製型 queue，15.4 節介紹一個訂製型 allocator。雖然篇幅都不長，只列出基本技法，但對於想要擴充 STL 的程式員而言，有個起始終究是一種實質上的莫大幫助。就這點而言，此書又進入了我所謂的第三學習境界。

正如其副標所示，本書兼具學習用途及參考價值。在國際書市及國際 STL 相關研討會上，此書都是首選。盛名之下無虛士，誠不欺也。

The Annotated STL Sources

[Lippman98] : *C++ Primer*, 3rd Edition, by Stanley Lippman and Josée Lajoie, Addison Wesley Longman, 1998. 1237 pages.
繁體中文版：《C++ Primer 中文版》，侯捷譯，碁峰 1999, 1237 頁。



這是一本 C++ 百科經典，向以內容廣泛說明詳盡著稱。其中與 template 及 STL 直接相關的章節有：

```
chap6: Abstract Container Types
chap10: Function Templates
chap12: The Generic Algorithms
chap16: Class Templates
appendix: The Generic Algorithms Alphabetically
```

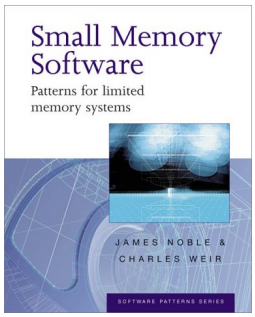
與 STL 實作技術間接相關的章節有：

```
chap15: Overloaded Operators and User Defined Conversions
```

書中有大量範例，尤其附錄列出所有 STL 泛型演算法的規格、說明、實例，是極佳的學習資料。不過書上有少數例子，由於作者疏忽，未能完全遵循 C++ 標準，仍沿用舊式寫法，修改方式可見 www.jjhou.com/errata-cpp-primer-appendix.htm。

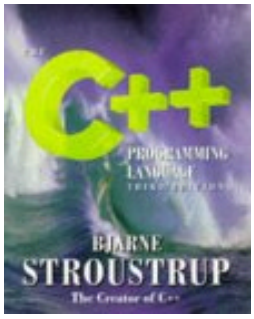
這本 C++ 百科全書並非以介紹泛型技術的角度出發，而是因爲 C++ 涵蓋了 template 和 STL，所以才介紹它。因此在相關組織上，稍嫌凌亂。不過我想，沒有人會因此對它求全責備。

[Noble01]: *Small Memory Software – Patterns for systems with limited memory*, by James Noble & Charles Weir, Addison Wesley, 2001. 333 pages.
繁體中文版：《記憶體受限系統 之設計樣式》，侯捷/王飛譯，碁峰 2002，333 頁。



此書和泛型技術、STL 沒有任何關連。然而由於 SGI STL allocator（空間配置器）在記憶體配置方面運用了 memory pool 手法，如果能夠參考此書所整理的一些記憶體管理經典手法，頗有助益，並收觸類旁通之效。

[Struostrup97]: *The C++ Programming Language*, 3rd Editoin, by Bjarne Stroustrup, Addison Wesley Longman, 1997. 910 pages
繁體中文版：《C++ 程式語言經典本》，葉秉哲譯，儒林 1999, 總頁數未錄。



這是一本 C++ 百科經典，向以學術權威（以及口感艱澀☺）著稱。本書內容直接與 template 及 STL 相關的章節有：

```
chap3: A Tour of the Standard Library
chap13: Templates
chap16: Library Organization and Containers
chap17: Standard Containers
chap18: Algorithms and Function Objects
chap19: Iterators and Allocators
```

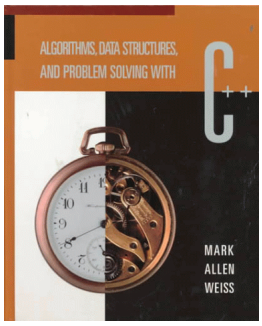
與 STL 實作技術間接相關的章節有：

`chap11: Operator Overloading`

其中第 19 章對 Iterators Traits 技術的介紹，在 C++ 語法書中難得一見，不過蜻蜓點水不易引發閱讀興趣。關於 Traits 技術，[Austern98] 表現極佳。

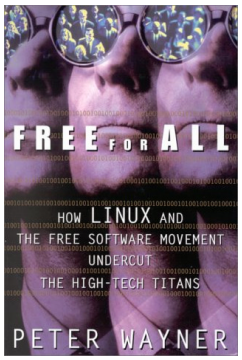
這本 C++ 百科全書並非以介紹泛型技術的角度出發，而是因爲 C++ 涵蓋了 template 和 STL，所以才介紹它。因此在相關組織上，稍嫌凌亂。不過我想，沒有人會因此對它求全責備。

[Weiss95]: *Algorithms, Data Structures, and Problem Solving With C++*, by Mark Allen Weiss, Addison Wesley, 1995, 820 pages



此書和泛型技術、STL 沒有任何關連。但是在你認識 STL 容器和 STL 演算法之前，一定需要某些資料結構（如 red black tree, hash table, heap, set…）和演算法（如 quick sort, heap sort, merge sort, binary search…）以及 Big-Oh 複雜度標記法的學理基礎。本書在學理敘述方面表現不俗，用字用例淺顯易懂，頗獲好評。

[Wayner00]: *Free For All – How Linux and the Free Software Movement Undercut the High-Tech Titans*, by Peter Wayner, HarperBusiness, 2000. 340 pages
繁體中文版：《開放原始碼—Linux 與自由軟體運動對抗軟體巨人的故事》，蔡憶懷譯，商周 2000，393 頁。

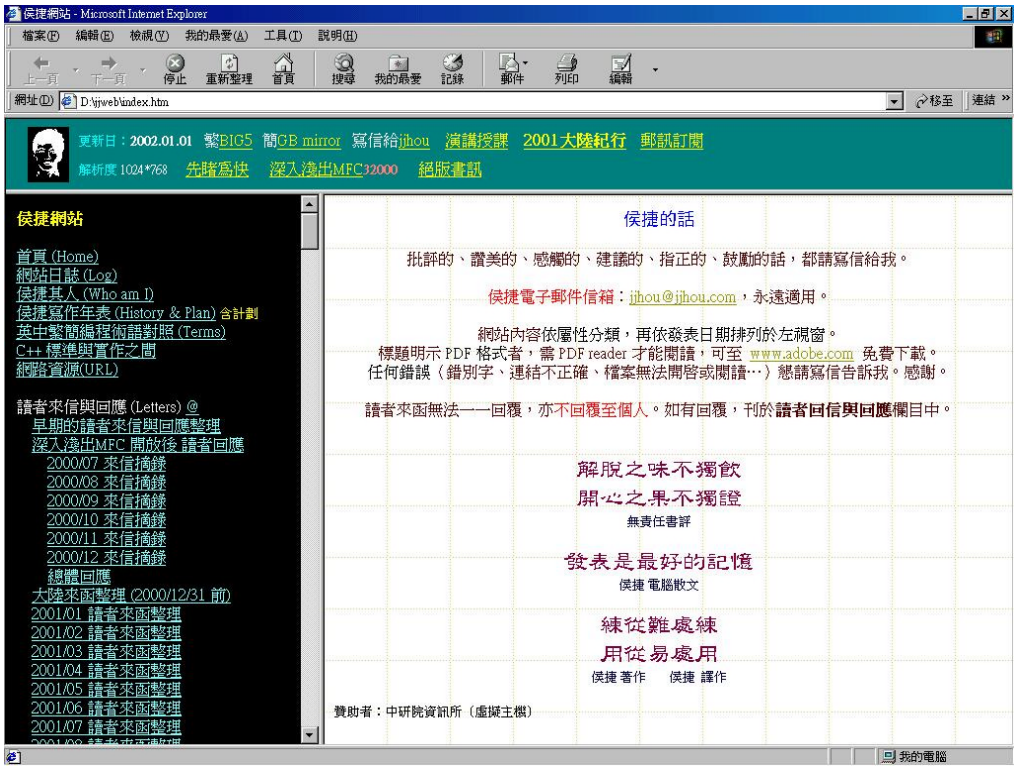


《STL 源碼剖析》一書採用 SGI STL 實作版本爲解說對象，而 SGI 版本屬於源碼開放架構下的一員，因此《STL 源碼剖析》第一章對於 **open source**（源碼開放精神）、**GNU**（由 Richard Stallman 創先領導的開放改革計劃）、**FSF**（Free Software Foundation，自由軟體基金會）、**GPL**（General Public License，廣泛開放授權）等等有概要性的說明，皆以此書爲參考依據。

B

侯捷網站
本書支援站點簡介

侯捷網站是我的個人站點，收錄寫作教育生涯的所有足跡。我的所有作品的勘誤、討論、源碼下載、電子書下載等服務都在這個站點上進行。永久網址是 http://www.jjhou.com（中文繁體），中文簡體鏡像站點爲 http://jjhou.csdn.com。下面是進入侯捷網站後的畫面，其中上視窗是變動主題，提供最新動態。左視窗是目錄，右視窗是主畫面：



左視窗之主目錄，內容包括：

首頁
網站日誌
侯捷其人
侯捷寫作年表 (History) 含計劃
英中繁簡編程術語對照 (Terms)
C++ 標準與實作之間
網路資源(URL)

讀者來信與回應
課程
電子書開放
程式源碼下載
答客問 (Q/A)
作品勘誤(errata)
無責任書評 1 1993.01~1994.04
無責任書評 2 1994.07~1995.12
無責任書評 3 1996.08~1997.11
侯捷散文 1998
侯捷散文 1999
侯捷散文 2000
侯捷散文 2001
侯捷散文 2002
STL 系列文章 (PDF)
《程序員》雜誌文章
侯捷著作
侯捷譯作
作序推薦

本書《STL 源碼剖析》出版後之相關服務，皆可於以上各相關欄位中獲得。

C

STLPort 的移植經驗

by 孟 岩 [1]

STL 是一個標準，各商家根據這個標準開發了各自的 STL 版本。而在這形形色色的 STL 版本中，SGI STL 無疑是最引人矚目的一個。這當然是因爲這個 STL 產品系出名門，其設計和編寫者名單中，Alexander Stepanov 和 Matt Austern 赫然在內，有兩位大師坐鎮，其代碼水平自然有了最高保證。SGI STL 不但在效率上一直名列前茅，而且完全依照 ISO C++ 之規範設計，使用者儘可放心。此外，SGI STL 做到了 thread-safe，還體貼地爲用戶增設數種組件，如 hash, hash_map, hash_multimap, slist 和 rope 容器等等。因此無論在學習或實用上，SGI STL 應是首選。

無奈，SGI STL 本質上是爲了配合 SGI 公司自身的 UNIX 變體 IRIX 而量身定做，其他平台上的 C++ 編譯器想使用 SGI STL，都需要一番週折。著名的 GNU C++ 雖然也使用 SGI STL，但在發行前已經過調試整合。一般用戶，特別是 Windows 平台上的 BCB/VC 用戶要想使自己的 C++ 編譯器與 SGI STL 共同工作，可不是一件容易的事情。俄國人 Boris Fomitchev 注意到這個問題之後，建立了一個免費提供服務的專案，稱爲 STLport，旨在將 SGI STL 的基本代碼移植到各主流編譯環境中，使各種編譯器的用戶都能夠享受到 SGI STL 帶來的先進機能。STLport 發展過程中曾接受 Matt Austern 的指導，發展到今天，已經比較成熟。最新的 STLport 4.0，可以從 www.stlport.org 免費下載，zip 檔案體積約 1.2M，可支持各主流 C++ 編譯環境的移植。BCB 及 VC 當然算是主流編譯環境，所以當然也得到了 STLport 的關照。但據筆者實踐經驗看來，配置過程中還有一些障礙需要跨越，本文詳細

[1] 感謝孟岩先生同意將他的寶貴經驗與本書讀者分享。原文以大陸術語寫就，爲遷就臺灣讀者方便，特以臺灣術語略做修改。

指導讀者如何在 Borland C++Builder 5.5 及 Visual C++ 6.0 環境中配置 STLport。

首先請從 www.stlport.org 下載 STLport 4.0 的 ZIP 檔案，檔名 stlport-4.0.zip。然後利用 WinZip 等工具展開。生成 stlport-4.0 目錄，該目錄中有（而且僅有）一個子目錄，名稱亦爲 stlport-4.0，不妨將整目錄拷貝到你的合適位置，然後改一個合適的名字，例如配合 BCB 者可名爲 STL4BC…等等。

下面分成 BCB 和 VC 兩種情形來描述具體過程。

Borland C++Builder 5

Borland C++Builder5 所攜帶的 C++ 編譯器是 5.5 版本，在當前主流的 Windows 平台編譯器中，對 ISO *C++ Standard* 的支持是最完善的。以它來配合 SGI STL 相當方便，也是筆者推薦之選。手上無此開發工具的讀者，可以到 www.borland.com 免費下載 Borland C++ 5.5 編譯器的一個精簡版，該精簡版體積爲 8.54M，名爲 freecommandlinetools1.exe，乃一自我解壓縮安裝檔案，在 Windows 中執行它便可安裝到你選定的目錄中。展開後體積 50M。

以下假設你使用的 Windows 安裝於 C:\Windows 目錄。如果你有 BCB5，假設安裝於 C:\Program Files\Borland\CBuilder5；如果你沒有 BCB5，而是使用上述的精簡版 BCC，則假設安裝於 C:\BCC55 目錄。STLport 原包置於 C:\STL4BC，其中應有以下內容:

```
<目錄> doc
<目錄> lib
<目錄> src
<目錄> stlport
<目錄> test
檔案 ChangLog
檔案 Install
檔案 Readme
檔案 Todo
```

請確保 C:\Program Files\Borland\CBuilder5\Bin 或 C:\BCC55\Bin 已登記於你的 Path 環境變數中。

筆者推薦你在安裝之前讀一讀 Install 檔案，其中講到如何避免使用 SGI 提供的

iostream。如果你不願意使用 SGI iostream，STLport 會在原本編譯器自帶的 iostream 外加一個 wrapper，使之能與 SGI STL 共同合作。不過 SGI 提供的 iostream 標準化程度好，和本家的 STL 代碼配合起來速度也快些，所以筆者想不出什麼理由不使用它，在這裡假定大家也都樂於使用 SGI iostream。有不同看法者儘可按照 Install 檔案的說法調整。

下面是逐一步驟（本任務均在 DOS 命令狀態下完成，請先打開一個 DOS 視窗）：

1. 移至 C:\Program Files\Borland\CBuilder5\bin，使用任何文字編輯器修改以下兩個檔案。

檔案一 bcc32.cfg 改爲：

```
-I"C:\STL4BC\stlport";\
"C:\Program Files\Borland\CBuilder5\Include";\
"C:\Program Files\Borland\CBuilder5\Include\vcl"
-L"C:\STL4BC\LIB";\
"C:\Program Files\Borland\CBuilder5\Lib";\
"C:\Program Files\Borland\CBuilder5\Lib\obj";\
"C:\Program Files\Borland\CBuilder5\Lib\release"
```

以上爲了方便閱讀，以 "\" 符號將很長的一行折行。本文以下皆如此。

檔案二 ilink32.cfg 改爲：

```
-L"C:\STL4BC\LIB";\
"C:\Program Files\Borland\CBuilder5\Lib";\
"C:\Program Files\Borland\CBuilder5\Lib\obj";\
"C:\Program Files\Borland\CBuilder5\Lib\release"
```

C:\BCC55\BIN 目錄中並不存在這兩個檔案，請你自己用文字編輯器手工做出這兩個檔案來，內容與上述有所不同，如下。

檔案一 bcc32.cfg 內容：

```
-I"C:\STL4BC\stlport";"C:\BCC55\Include";
-L"C:\STL4BC\LIB";"C:\BCC55\Lib";
```

檔案二 ilink32.cfg 內容：

```
-L"C:\STL4BC\LIB";"C:\BCC55\Lib";
```

2. 進入 C:\STL4BC\SRC 目錄。

3. 執行命令 `copy bcb5.mak Makefile`

4. 執行命令 `make clean all`

這個命令會執行很長時間，尤其在老舊機器上，可能運行 30 分鐘以上。螢幕

不斷顯示工作情況，有時你會看到好像在反覆做同樣幾件事，請保持耐心，這其實是在以不同編譯開關建立不同性質的標的程式庫。

5. 經過一段漫長的編譯之後，終於結束了。現在再執行命令 `make install`。這次需要的時間不長。
6. 來到 C:\STL4BC\LIB 目錄，執行：
   ```
   copy *.dll c:\windows\system;
   ```
7. 大功告成。下面一步進行檢驗。rope 是 SGI STL 提供的一個特有容器，專門用來對付超大規模的字串。string 是細弦，而 rope 是粗繩，可以想見 rope 的威力。下面這個程式有點暴殄天物，不過倒也還足以做個小試驗：

```
//issgistl.cpp
#include <iostream>
#include <rope>

using namespace std;

int main()
{
    // crope 就是容納 char-type string 的 rope 容器
    crope bigstr1("It took me about one hour ");
    crope bigstr2("to plug the STLport into Borland C++!");
    crope story = bigstr1 + bigstr2;
    cout << story << endl;
    return 0;
}
//~issgistl.cpp
```

現在，針對上述程式進行編譯：`bcc32 issgistl.cpp`。咦，怪哉，linker 報告說找不到 stlport_bcc_static.lib，到 C:\STL4BC\LIB 看個究竟，確實沒有這個檔案，倒是有一個 stlport_bcb55_static.lib。筆者發現這是 STLport 的一個小問題，需要將程式庫檔案名稱做一點改動：

```
copy stlport_bcb55_static.lib stlport_bcc_static.lib
```

這個做法頗爲穩妥，原本的 stlport_bcb55_static.lib 也保留了下來。以其他選項進行編譯時，如果遇到類似問題，只要照葫蘆畫瓢改變檔案名稱就沒問題了。

現在再次編譯，應該沒問題了。可能有一些警告訊息，沒關係。只要能運行，就表示 rope 容器起作用了，也就是說你的 SGI STL 開始工作了。

Microsoft Visual C++ 6.0:

Microsoft Visual C++ 6.0 是當今 Windows 下 C++ 編譯器主流中的主流，但是對於 ISO C++ 的支持不盡如人意。其所配送的 STL 性能也比較差。不過既然是主流，STLport 自然不敢怠慢，下面介紹 VC 中的 STLport 安裝方法。

以下假設你使用的 Windows 系統安裝於 C:\Windows 目錄，VC 安裝於 C:\Program Files\Microsoft Visual Studio\VC98；而 STLport 原包置於 C:\STL4VC，其中應有以下內容:

```
<目錄> doc
<目錄> lib
<目錄> src
<目錄> stlport
<目錄> test
檔案 ChangLog
檔案 Install
檔案 Readme
檔案 Todo
```

請確保 C:\Program Files\Microsoft Visual Studio\VC98\bin 已設定在你的 Path 環境變數中。

下面是逐一步驟（本任務均在 DOS 命令狀態下完成，請先打開一個 DOS 視窗）：

1. 移至 C:\Program Files\Microsoft Visual Studio\VC98 中，使用任何文字編輯器修改檔案 vcvars32.bat。將其中原本的兩行：

   ```
   set
   INCLUDE=%MSVCDir%\ATL\INCLUDE;%MSVCDir%\INCLUDE;%MSVCDir%\MFC\I
   NCLUDE;%INCLUDE%
   set LIB=%MSVCDir%\LIB;%MSVCDir%\MFC\LIB;%LIB%
   ```

   改成:

   ```
   set
   INCLUDE=C:\STL4VC\stlport;%MSVCDir%\ATL\INCLUDE;%MSVCDir%\INCLUDE;\
   %MSVCDir%\MFC\INCLUDE;%INCLUDE%
   set LIB=C:\STL4VC\lib;%MSVCDir%\LIB;%MSVCDir%\MFC\LIB;%LIB%
   ```

   以上爲了方便閱讀，以 "\" 符號將很長的一行折行。

   修改完畢後存檔，然後執行之。一切順利的話應該給出一行結果:

   ```
   Setting environment for using Microsoft Visual C++ tools.
   ```

如果你預設的 DOS 環境空間不足，這個 BAT 檔執行過程中可能導致環境空間不足，此時應該在 DOS 視窗的「內容」對話框中找到「記憶體」附頁，將「起始環境」（下拉式選單）改一個較大的值，例如 1280 或 2048。然後再開一個 DOS 視窗，重新執行 vcvars32.bat。

2. 進入 C:\STL4VC\SRC 目錄。
3. 執行命令 `copy vc6.mak Makefile`
4. 執行命令 `make clean all`

   如果說 BCB 編譯 STLport 的時間很長，那麼 VC 編譯 STLport 的過程就更加漫長了。螢幕反反覆覆地顯示似乎相同的內容，請務必保持耐心，這其實是在以不同編譯開關建立不同性質的標的程式庫。
5. 經過一段漫長的編譯之後，終於結束了。現在你執行命令 `make install`。這次需要的時間不那麼長，但也要有點耐心。
6. 大功告成。下一步應該檢驗是不是真的用上了 SGI STL。和前述的 BCB 過程差不多，找一個運用了 SGI STL 特性的程式，例如運用了 rope, slist, hash_set, hash_map 等容器的程式來編譯。注意，編譯時務必使用以下格式：

   ```
   cl /GX /MT program.cpp
   ```

   這是因爲 SGI STL 大量使用了 try…throw…catch，而 VC 預設情況下並不支持此一語法特性。/GX 要求 VC++ 編譯器打開對異常處理的語法支持。/MT 則是要求 VC linker 將本程式的 obj 檔和 libcmt.lib 連結在一起 — 因爲 SGI STL 是 thread-safe，必須以 multi-thread 的形式運行。

如果想要在圖形介面中使用 SGI STL，可在 VC 整合環境內調整 Project | Setting(Alt+F7)，設置編譯選項，請注意一定要選用 /MT 和/GX，並引入選項 `/Ic:\stl4vc\stlport` 及 `/libpath:c:\stl4vc\lib`。

整個過程在筆者的老式 Pentium 150 機器上耗時超過 3 小時，雖然你的機器想必快得多，但也必然會花去出乎你意料的時間。全部完成後，C:\STL4VC 這個目錄的體積由原本區區 4.4M 膨脹到可怕的 333M，當然這其中有 300M 是編譯過程產生的.obj 檔，如果你確信自己的 STLport 工作正常的話，可以刪掉它們，空出硬碟空間。不過這麼一來若再進行一次安裝程序，就只好再等很長時間。

另外，據筆者勘察，STLport 4.0 所使用的 SGI STL 並非最新問世的 SGI STL3.3 版

本，不知道把 SGI STL3.3 的代碼導入 STLport 會有何效果，有興趣的讀者不妨一試。

大致情形就是這樣，現在，套用 STLport 自帶檔案的結束語：享受這一切吧（Have fun!）

孟岩
2001-3-11

索引

請注意，本書並未探討所有的 STL 源碼（那需要數千頁篇幅），所以
請不要將此一索引視爲完整的 STL 組件索引

A

B

C

D

E

F

G

H

I

K

L

M

R

S

T

U

V

W

X

Y