

世界著名计算机教材精选

数据结构基础

(C语言版) (第2版)

Ellis Horowitz

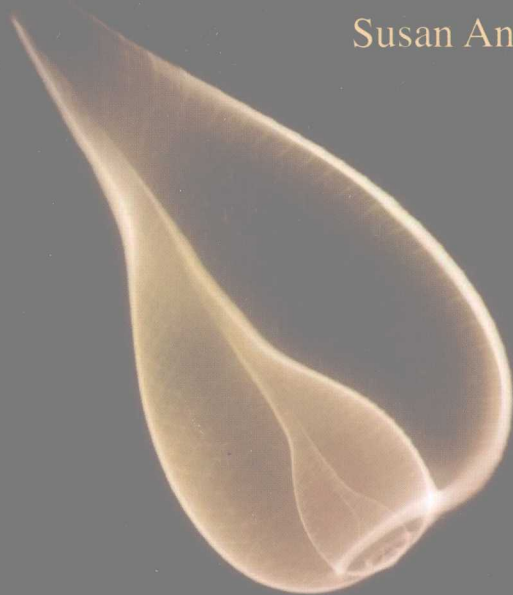
Sartaj Sahni

Susan Anderson-Freed

著

朱仲涛

译



FUNDAMENTALS OF DATA STRUCTURES
IN C

Second Edition



清华大学出版社

世界著名计算机教材精选

Fundamentals of Data Structures in C

Second Edition

数据结构基础

(C 语言版)

(第 2 版)

Ellis Horowitz

Sartaj Sahn

著

Susan Anderson-Freed

朱仲涛

译

清华大学出版社

北 京

Original English language title: Fundamentals of Data Structures in C, Second Edition by Ellis Horowitz, Sartaj Sahni, and Susan Anderson-Freed, Copyright © 2009
All Rights Reserved.

This edition has been authorized by Silicon Press for sale in the People's Republic of China only and not for export therefrom.

本书简体中文版由 Silicon Press 授权给清华大学出版社出版发行。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目 (CIP) 数据

数据结构基础：C 语言版：第 2 版 / (美) 霍罗维兹 (Horowitz, E.), (美) 萨尼 (Sahni, S.), (美) 安德尔森-费里德 (Anderson-Freed, S.) 著；朱仲涛译. —北京：清华大学出版社，2009.3

(世界著名计算机教材精选)

书名原文：Fundamentals of Data Structures in C, 2 E

ISBN 978-7-302-18696-0

I. 数… II. ①霍…②萨…③安…④朱… III. ①数据结构—教材②C 语言—程序设计—教材 IV. TP311.12 TP312

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 155692 号

责任编辑：龙啟铭

责任印制：何 芊

出版发行：清华大学出版社

地 址：北京清华大学学研大厦 A 座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编：100084

社 总 机：010-62770175

邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 刷 者：清华大学印刷厂

装 订 者：三河市新茂装订有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：185×260 印 张：30.75 字 数：759 千字

版 次：2009 年 3 月第 1 版 印 次：2009 年 3 月第 1 次印刷

印 数：1~4000

定 价：49.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题，请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话：(010)62770177 转 3103 产品编号：027384-01

中译本序

《数据结构基础》是一本优秀的数据结构教材，取材全面，难易适中，内容组织合理，详略得当，深入浅出，而且论证逻辑性强，所以广为国内外高校计算机专业选用。此外，这本英文教材对国内许多数据结构教材的编写也有显著影响。

此中译本是《数据结构基础》C 语言版第 2 版的译本，与第 1 版相比，新版篇幅扩张很大，内容全面更新，全书覆盖 ① 线性（序）数据类型、② 树型数据类型、③ 网状数据类型，以及 ④ 排序算法与 ⑤ 查找算法。基本数据结构包括线性表（数组与链表）、栈与队列、树、图等经典内容，特点为运用抽象数据类型（ADT）观点一一呈现。另外，书中包含大量符合 ANSI C 标准的程序，实例丰富，习题众多，并有大量图表。

本书最鲜明的特点是：用几乎一半篇幅，即第 8~12 章，详细讨论了各种查找表结构及其查找算法，而且内容组织很新颖。这最后 5 章既包括查找法的经典内容，如 Hash 法和 AVL 树等；也包括数据结构研究的新进展，如分摊复杂度分析等；还包括当前数据结构研究的热点，即各种堆结构。这部分内容特别适合数据结构提高课程，也特别适合学过基本数据结构的读者自学提高。以下列出本书有关查找的内容及其编排体系。



本书章节之后的习题与补充习题也各有特色。习题中的一些是正文内容的补充与扩充，

可以培养读者独立思考,举一反三的能力。附加习题中的一些编程大作业,如随机走动、骑士征程、扑克接龙、迷宫求解等,均令人兴趣盎然,读者如果编程求解,既有助于完全彻底地了解基本概念、扎实地掌握教材内容,又能迅速提高编程水平。还有,每章最后的参考文献与选读材料也很全面,可作数据结构研究人员与算法研究人员的入门读物,为开展相关研究奠定基础。

中译本全书由译者排版,排版工具是 $\text{\LaTeX}$ (CJK) 与 $\text{\AMS-TeX}$ 。译本中用到的西文正文字体为 `palatino`, 数学字体为 `mathpazo`; 书体排版采用 `cctbook.cls` 样式类, 该样式类的作者是张林波; 程序代码排版采用 `listings.sty` 样式。中译本全书插图均为矢量图, 全部由译者制作, 工具是 $\text{\Xy-pic}$ 的 `xy.sty`, 作者是 Kristoffer H. Rose 与 Ross Moore, 驱动程序是 `dvips`。中译本全书索引凭借 `makeindex` 工具制作, 人名索引与部分知识点索引由 `sed/awk` 程序协助完成。排版工作环境是 `FreeBSD 7.0`, 编辑器是 `GNU emacs+auctex`。

借此中译本出版机会, 首先感谢清华大学数据结构课程主讲教师殷人昆与邓俊辉, 与他们合作, 无论日常教学工作、教学法研讨, 还是编写教材, 译者均获益太多。还要特别感谢严蔚敏老师对译者教学工作起步阶段的指点。最后, 感谢所有选修、旁听译者数据结构课程的同学和进修教师, 感谢各位课程助教, 衷心感谢他们的支持和鼓励, 他们对此中译本的期待是译者孜孜不倦的全部动力。

译事艰辛、工作繁重, 没有出版社编辑的鼎力支持, 这本中译本是不可能完成的。感谢清华大学出版社龙启铭先生, 身为其中译本责任编辑, 他从译事策划、监督进度, 到审阅全书、精心校对, 甚至版式设计, 事无巨细, 都付出了大量精力。衷心感谢龙启铭先生给予译者的所有帮助。

囿于译者的专业素养与翻译水平, 此中译本一定有不少错陋之处, 恳请读者批评指正。

译者

2008 年 12 月

前 言

本书是《数据结构基础》的 C 语言版。用 C 语言讲授数据结构，原因不止一个。首先，或者说至关重要的原因是，C 语言适用于各种机型，就是说，无论个人计算机（如 PC 机和 Mac 机），或者基于 Unix 的系统，C 语言均为主流开发语言。其次，C 语言本身也在不断进化，时至今日，C 编译器功能愈发强大、C 编程开发环境越来越广泛，我们理应为数据结构的初学者贡献一个 C 语言版本的数据结构教材。还有，在计算机科学的教学中，C 语言的地位也相当重要，举例来说，在程序设计课程里讲授的许多重要概念，诸如虚拟存储、文件系统、自动语法生成、词法分析、网络编程等等，都是由 C 语言实现的。因此，当前通行的教学理念是，尽早介绍 C 语言，这样可以为学生预备足够的时间磨练 C 语言的编程技能，从而可以保证，学生在学习各种重要概念之前，就做好了必要准备。

本书所有 C 语言程序都符合 ANSI C 标准。ANSI C 标准的制订始于 1983 年，目的是增强早期的 C 语言功能，为此 ANSI 标准增加了一些新的语言特征，例如，函数首部引入了类型信息，这样不但令程序更易读，还使程序更加可靠。

本书保留了第 1 版以及其它程序设计语言版本的特色，依然包括算法与计算时间复杂度的详细讨论。而且，本书的章节组织与文体风格也尽量与第 1 版保持一致。然而，我们并未墨守陈规，本书也有一些改进之处。举例来说，指针与动态存储分配这两部分内容是 C 语言最常用的概念和技术，现在提前到了第一章；另外，程序中的出错信息现在统一写到 stderr 设备；还有，系统功能调用结束之后，例如，在调用 malloc 之后，现在都要检查返回状态，判断是否成功返回。为了避免程序过于繁琐而不易理解，书中特别定义了若干宏语句，以便程序简短而且易读，例如，宏语句 MALLOC 在调用 malloc 的同时还要判断返回结果是否正确。如果程序正常结束则调用 exit(EXIT_SUCCESS)，如果程序非正常结束则调用 exit(EXIT_FAILURE)。书中有关串的内容现在提前到介绍数组概念的一章。

另外还有一些改动，就不涉及 C 语言了。本书的习题现安排在各章节之后，习题编号前的记号 ♣ 表明该习题有难度，适合用作编程大作业。另外，每章内容或多或少都有调整，基本内容都调整到了前面，而那些较难理解的内容、或者供选讲的内容，现在都移到了最后。

与第一版对比，本书最显著的新特点是引入了抽象数据类型概念。抽象数据类型将数据类型的规范声明（specification）与实现分离。C++ 语言与 Java 语言支持这种声明与实现的分离，但 C 语言却不提供现成的支持。我们设计了一套简单自明的记号，用来描述抽象数据类型。基本思路是：先给出数据类型中数据对象的定义，接着给出数据类型中各函数的名称及其调用参量。我们建议，教师在讲解数据类型的实现细节以及相关算法的效率之前，最好应事先指导学生讨论数据类型的规范声明。

在过去的十年，数据结构研究领域并未停滞，目前，数据结构越来越成熟。各种实用的新型数据结构不断涌现，而且，崭新的复杂性度量方法也相继出现，这本新书力图与这些研究进展保持同步。例如，在第 2 章和第 3 章，我们新增了利用动态数组及其数组加倍技术实现多项式、矩阵、栈和队列的方法；第 6 章增加了求最短路径的 Bellman-Ford 算法；第 9 章专门讨论优先级队列，并新增了对偶堆、对称最小最大堆、区间堆等节目，取代了原先仅讨论最小最大堆与双端堆的编排方式。

原书第一版的第 10 章用来讲查找结构，这本新书把原来的一章篇幅扩张成三章，第 10

章现在用来专讲二叉查找结构，现在的红-黑树不再由 2-3 树和 2-3-4 树导出。此外，这个新版还引入了自顶向下 Splay 树，同时还讨论其性能优于自底向上 Splay 树的原因。第 11 章用来讲多路查找树，B⁺ 树一节是新增内容。第 12 章用来讲 Trie 树，基本思想与第 10 章类似。由于 Trie 树的应用越来越广泛，因此相应篇幅大大增加了。第 12 章也新增了一节，内容包括后缀树以及 Trie 树在互联网包转发技术中的应用。

本书新版本详细讨论了分摊时间复杂度，而且大多数算法都给出了计算时间在最优、最差情形的复杂度分析，有一些算法还包括平均情形的计算复杂度分析。分摊时间复杂度考察给定操作序列连续执行的总效率，由 R. Tarjan 提出，与传统的复杂度度量结果相比，分摊复杂度的度量结果在大多数情形都更加精确。

访问网址 <http://www.cise.ufl.edu/~sahni/fdsc2ed> 可获得本书其它信息。

课程安排

如果本书用作一学期 (semester) 教材，教学安排可分为中速进度和快速进度两类。中速进度教学安排参见图 1，适用于计算机专业低年级学生，最好设置为专业教学规划中的第二门课程或第三门课程。使用本书的大部分教师，包括本书作者，都选用这样的中速进度。以下大纲以 ACM 推荐的教学纲目为依据。

周次	内容	阅读材料
1	算法与数据结构引论	第 1 章
2	数组	第 2 章
3	数组 (串)	第一次作业截止日期
4	栈与队列	第 3 章
5	链表 (单向链表和双向链表)	第 4 章
6	链表	第二次作业截止日期
7	树 (基本概念, 二叉树)	第 5 章
8	树 (查找, 堆)	
9	期中考试	
10	图 (基本概念, 存储表示)	第 6 章
11	图 (最短路径, 生成树, 拓扑排序)	第三次作业截止日期
12	内部排序 (插入排序, 快速排序和归并排序)	第 7 章
13	内部排序 (堆排序, 基数排序)	第四次作业截止日期
14	Hash 法	第 8 章
15	高级材料选讲	第 9~12 章
16	高级材料选讲	第 9~12 章

图 1 一学期课程安排 (中速进度)

围绕整个课程的教学环节，教师应布置一些编程作业，时间间隔最好均匀分布。第一次编程作业的主要目的是熟悉编程环境。第二次编程应强调表结构的训练，相关内容是第 4 章，作业可选用该章最后的习题。外部排序的内容可不讲，把时间留给 Hash 法，Hash 法很

重要，数据结构课程之后的许多课程都要用到 Hash 法，因此最好在本课程讲授。讲完 Hash 法，还可以从第 9~12 章中挑选一些内容选讲，做为提高专题。

快速进度的教学安排是为研究生制订的，图 2 是教学大纲，建议最好在研究生的第一学期开设。快速进度也可用作本科生提高课程。编程作业与中速进度教学安排相同，不再赘述。由于课程进度较快，讲授第 9~12 章的时间只有四周，可按需要挑选内容选讲。

周次	内容	阅读材料
1	算法与数据结构引论	第 1 章
2	数组	第 2 章
3	栈与队列	第 3 章 第一次作业截止日期
4	链表	第 4 章
5	树	第 5 章
6	树（续）	第二次作业截止日期
7	期中考试	
8	图	第 6 章
9	图（续）	第三次作业截止日期
10	内部排序	第 7 章
11	外部排序	第 7 章
12	Hash 法	第 8 章
13	优先级队列（选讲）	第 9 章 第四次作业截止日期
14	高效二叉查找树（选讲）	第 10 章
15	多路查找树（选讲）	第 11 章
16	数字树查找结构（选讲）	第 12 章

图 2 一学期课程安排（快速进度）

数据结构的提高课程可采用图 3 的教学安排，选课学生应学过数据结构的基本内容，最好有表、树、图各种数据结构的基础。

有些学校一学年分四个小学期（quarter system），对于这种学期设置，完整的数据结构课程需要占用两个小学期，教学安排可参考图 4 和图 5。选课学生应学过高级程序设计课程，并在这门先修课中学过算法分析与数据结构的基本内容。

借此新书出版机会，我们再一次感谢为本书第 1 版提供过帮助和支持的各位同事。感谢 Illinois Wesleyan University 的 Lisa Brown 教授，感谢 Lisa Brown 教授 Programming III 课程的选课学生，感谢 Colorado School of Mines 的 Dinesh Mehta 博士为本书第一版纠错，感谢 Illinois Wesleyan University 的 Computer Services 机构及其员工 Trey Short 和 Curtis Kelch，感谢他们提供的技术帮助。还要感谢 AT&T 贝尔实验室的 Narain Gehani, Arcadia University 的 Tomasz Müldner，以及 Trinity University 的 Ronald Prather，感谢他们审阅本书初稿。特别要感谢 Friedman 夫妇，Art 与 Barbara，他们从开始就是本书的出版业务负责

周次	内容	阅读材料
1	树的复习与串讲	第 5 章
2	图的复习与串讲	第 6 章
3	外部排序	第 7 章
4	外部排序 (续)	
5	Hash 法 (复习基本 Hash 技术 Bloom 滤波器, 动态 Hash 法)	第 8 章 第一次作业截止日期
6	优先级队列 (左倾树, 对称最小-最大堆, 区间堆)	第 9 章
7	优先级队列 (分摊复杂度, 二项式堆)	第 9 章
8	优先级队列 (Fibonacci 堆, 对偶堆)	第二次作业截止日期
9	高效二叉查找树 (最优 BST 树, AVL 树)	第 10 章
10	期中考试	
11	高效二叉查找树 (红-黑树, Splay 树)	
12	多路查找树 (B-树, B ⁺ 树)	第 11 章
13	数字查找结构 (数字查找树, 二路 Trie 树, Patricia 树)	第二次作业截止日期
14	多路 Trie 树	
15	后缀树	第四次作业截止日期
16	Trie 树与互联网包中继	

图 3 学期课程安排 (数据结构提高课程)

周次	内容	阅读材料
1	算法与数组复习	第 1、2 章
2	栈与队列	第 3 章
3	链表 (栈、队列、多项式)	第 4 章
4	链表	
5	树 (遍历、集合的表示)	第 5 章 第一次作业截止日期
6	树 (堆, 查找) 期中考试	
7	图 (遍历, 连通分量)	第 6 章
8	图 (最小生成树)	第 6 章
9	图 (最短路径)	第 6 章
10	图 (活动网络)	第二次作业截止日期

图 4 第一个小学期

周次	内容	阅读材料
1	内部排序（插入排序，快速排序 排序的界， $O(1)$ 空间归并，归并排序）	第 7 章
2	排序（堆排序，基数排序，链表排序，表排序）	
3	外部排序	第 7 章
4	Hash 法 期中考试	第 8 章
6	优先级队列（左倾树，对称最小-最大堆，区间堆）	第 9 章
7	优先级队列（分摊复杂度，二项式堆，Fibonacci 堆）	第 9 章
8	高效二叉查找树（AVL 树或红-黑树，Splay 树）	
9	多路查找树（B-树， B^+ 树）	第 11 章
		第二次作业截止日期
10	数字查找结构（Trie 树，后缀树）	第 12 章

图 5 第二个小学期

人，此书从初期雏形到最后出版，是经他们之手促成的。

Ellis Horowitz
Sartaj Sahni
Susan Anderson-Freed

目 录

第 1 章 基本概念	1
§1.1 概观：系统生命周期	1
§1.2 指针和动态存储分配	3
§1.2.1 指针	3
§1.2.2 动态存储分配	4
§1.2.3 指针隐患	6
§1.3 算法形式规范	6
§1.3.1 综论	6
§1.3.2 递归算法	11
§1.4 数据抽象	14
§1.5 性能分析	17
§1.5.1 空间复杂度	18
§1.5.2 时间复杂度	20
§1.5.3 渐近记号 (O, Ω, Θ)	27
§1.5.4 实际复杂度	33
§1.6 性能度量	35
§1.6.1 定时	35
§1.6.2 生成测试数据	39
§1.7 参考文献和选读材料	40
第 2 章 数组和结构	41
§2.1 数组	41
§2.1.1 数组的抽象数据类型	41
§2.1.2 C 语言的数组	41
§2.2 数组的动态存储分配	44
§2.2.1 一维数组	44
§2.2.2 二维数组	44
§2.3 结构体和联合体	47
§2.3.1 结构体	47
§2.3.2 联合体	49
§2.3.3 结构的内部实现	50
§2.3.4 自引用结构	50
§2.4 多项式	51
§2.4.1 多项式的抽象数据类型	51
§2.4.2 多项式的表示	52
§2.4.3 多项式加法	55

§2.5 稀疏矩阵	58
§2.5.1 稀疏矩阵的抽象数据类型	58
§2.5.2 稀疏矩阵的表示	58
§2.5.3 矩阵转置	59
§2.5.4 矩阵相乘	63
§2.6 多维数组的表示	67
§2.7 字符串	68
§2.7.1 字符串的抽象数据类型	68
§2.7.2 C 语言的字符串	68
§2.7.3 模式匹配	71
§2.8 参考文献和选读材料	77
§2.9 补充习题	78
第 3 章 栈与队列	83
§3.1 栈	83
§3.2 动态栈	87
§3.3 队列	88
§3.4 动态循环队列	92
§3.5 迷宫问题	95
§3.6 表达式求值	98
§3.6.1 表达式	98
§3.6.2 后缀表达式求值	100
§3.6.3 中缀表达式转换成后缀表达式	103
§3.7 多重栈与多重队列	108
§3.8 补充习题	111
第 4 章 链表	113
§4.1 单向链表	113
§4.2 用 C 语言表示单向链表	115
§4.3 链式栈与链式队列	121
§4.4 多项式	124
§4.4.1 多项式表示	124
§4.4.2 多项式加法	125
§4.4.3 销毁多项式	128
§4.4.4 循环链表与多项式	129
§4.4.5 小结	130
§4.5 其它链表操作	133
§4.5.1 单向链表操作	133
§4.5.2 循环链表操作	134
§4.6 等价类	135

§4.7 稀疏矩阵	139
§4.7.1 稀疏矩阵表示	139
§4.7.2 输入稀疏矩阵	142
§4.7.3 输出稀疏矩阵	144
§4.7.4 销毁稀疏矩阵	144
§4.8 双向链表	146
第5章 树	149
§5.1 引论	149
§5.1.1 术语	149
§5.1.2 树的表示	151
§5.2 二叉树	154
§5.2.1 二叉树的抽象数据类型	154
§5.2.2 二叉树的性质	155
§5.2.3 二叉树的表示	157
§5.3 遍历二叉树	159
§5.3.1 中序遍历	160
§5.3.2 先序遍历	161
§5.3.3 后序遍历	161
§5.3.4 非递归(循环)中序遍历	162
§5.3.5 层序遍历	163
§5.3.6 不设栈遍历二叉树	163
§5.4 其它二叉树操作	164
§5.4.1 复制二叉树	164
§5.4.2 判断两个二叉树全等	164
§5.4.3 可满足性问题	165
§5.5 线索二叉树	168
§5.5.1 线索	168
§5.5.2 中序遍历线索二叉树	169
§5.5.3 线索二叉树插入结点	170
§5.6 堆	172
§5.6.1 优先级队列	172
§5.6.2 大根堆定义	174
§5.6.3 大根堆插入操作	174
§5.6.4 大根堆删除操作	176
§5.7 二叉查找树	178
§5.7.1 定义	178
§5.7.2 二叉查找树的查找	179
§5.7.3 二叉查找树的插入	180

§5.7.4	二叉查找树的删除	181
§5.7.5	二叉查找树的合并与分裂	182
§5.7.6	二叉查找树的高度	183
§5.8	选拔树	185
§5.8.1	引子	185
§5.8.2	优胜树	186
§5.8.3	淘汰树	187
§5.9	森林	188
§5.9.1	森林转换为二叉树	189
§5.9.2	遍历森林	189
§5.10	不相交集集合的表示	190
§5.10.1	引子	190
§5.10.2	合并与查找操作	191
§5.10.3	划分等价类	197
§5.11	二叉树的计数	199
§5.11.1	不同态二叉树	199
§5.11.2	栈置换	200
§5.11.3	矩阵乘法	201
§5.11.4	不同二叉树的数目	203
§5.12	参考文献和选读材料	204
第 6 章	图	205
§6.1	图的抽象数据类型	205
§6.1.1	引子	205
§6.1.2	图的定义和术语	206
§6.1.3	图的表示	210
§6.2	图的基本操作	216
§6.2.1	深度优先搜索	216
§6.2.2	广度优先搜索	217
§6.2.3	连通分量	218
§6.2.4	生成树	219
§6.2.5	重连通分量	220
§6.3	最小代价生成树	225
§6.3.1	Kruskal 算法	225
§6.3.2	Prim 算法	228
§6.3.3	Sollin 算法	229
§6.4	最短路径和迁移闭包	230
§6.4.1	单源点至所有其它节点: 边权值非负	231
§6.4.2	单源点至所有其它节点: 边权值正负无限制	233

§6.4.3 所有节点两两之间的最短路径	237
§6.4.4 迁移闭包	238
§6.5 活动网络	242
§6.5.1 活动节点(AOV)网络	242
§6.5.2 活动边(AOE)网络	247
§6.6 参考文献和选读材料	253
§6.7 补充习题	254
第7章 排 序	256
§7.1 动机	256
§7.2 插入排序	259
§7.3 快速排序	261
§7.4 排序最快有多快	264
§7.5 归并排序	265
§7.5.1 归并	265
§7.5.2 非递归归并排序	266
§7.5.3 递归归并排序	267
§7.6 堆排序	270
§7.7 多关键字排序	273
§7.8 链表排序和索引表排序	277
§7.9 内部排序小结	284
§7.10 外部排序	289
§7.10.1 引子	289
§7.10.2 k 路归并	291
§7.10.3 缓存与并行操作	292
§7.10.4 生成多路数据	298
§7.10.5 最优多路归并	300
§7.11 参考文献和选读材料	303
第8章 Hash 法	304
§8.1 引言	304
§8.2 静态 Hash 法	304
§8.2.1 Hash 表	304
§8.2.2 Hash 函数	305
§8.2.3 溢出处理	307
§8.2.4 处理溢出方法的理论估计	312
§8.3 动态 Hash 法	315
§8.3.1 动态 Hash 法的动机	315
§8.3.2 设目录的动态 Hash 法	316
§8.3.3 不设目录的动态 Hash 法	318

§8.4	Bloom 滤波器	320
§8.4.1	差异文件及其应用	320
§8.4.2	设计 Bloom 滤波器	321
§8.5	参考文献和选读材料	323
第 9 章	优先级队列	324
§9.1	单端优先级队列与双端优先级队列	324
§9.2	左倾树	325
§9.2.1	高度左倾树	325
§9.2.2	权值左倾树	330
§9.3	二项式堆	332
§9.3.1	代价分摊	332
§9.3.2	二项式堆的定义	333
§9.3.3	二项式堆的插入	333
§9.3.4	融合两个二项式堆	334
§9.3.5	删除最小元	334
§9.3.6	分析	336
§9.4	Fibonacci 堆	338
§9.4.1	定义	338
§9.4.2	F-堆的删除	338
§9.4.3	减小关键字	339
§9.4.4	上行切除	339
§9.4.5	分析	340
§9.4.6	F-堆与最短路径问题	342
§9.5	配偶堆	344
§9.5.1	定义	344
§9.5.2	融合与插入	344
§9.5.3	减小关键字值	345
§9.5.4	删除最小元	346
§9.5.5	删除任意元	348
§9.5.6	实现细节	349
§9.5.7	复杂度分析	349
§9.6	对称最小-最大堆	350
§9.6.1	定义与性质	350
§9.6.2	SMMH 的表示	351
§9.6.3	SMMH 的插入	351
§9.6.4	SMMH 的删除	353
§9.7	区间堆	358
§9.7.1	定义和性质	358

§9.7.2 区间堆的插入	359
§9.7.3 删除最小元	360
§9.7.4 区间堆的初始化	361
§9.7.5 区间堆操作的复杂度	361
§9.7.6 区间外查找	361
§9.8 参考文献和选读材料	363
第 10 章 高效二叉查找树	366
§10.1 最优二叉查找树	366
§10.2 AVL 树	373
§10.3 红-黑树	384
§10.3.1 定义	384
§10.3.2 红-黑树的表示	386
§10.3.3 红-黑树的查找	386
§10.3.4 红-黑树的插入	386
§10.3.5 红-黑树的删除	389
§10.3.6 红-黑树的合并	389
§10.3.7 红-黑树的分裂	391
§10.4 Splay 树	393
§10.4.1 自底向上 Splay 树	394
§10.4.2 自顶向下 Splay 树	398
§10.5 参考文献和选读材料	403
第 11 章 多路查找树	405
§11.1 m -路查找树	405
§11.1.1 定义和性质	405
§11.1.2 m -路查找树的查找	406
§11.2 B -树	407
§11.2.1 定义和性质	407
§11.2.2 B -树中数据元素的个数	408
§11.2.3 B -树的插入	409
§11.2.4 B -树的删除	412
§11.3 B^+ -树	419
§11.3.1 定义	419
§11.3.2 B^+ -树的查找	420
§11.3.3 B^+ -树的插入	420
§11.3.4 B^+ -树的删除	422
§11.4 参考文献和选读材料	426