

计算机及软件技术丛书  
潘金贵 顾铁成 曾 俭 滕远方 等 编译  
蔡瑞英 主审

# 现代 计算机 常用数据结构 和 算法

南京大学出版社



计算机及软件技术丛书

# 现代计算机常用 数据结构和算法

潘金贵 顾铁成 曾 俭 滕远方 等编译

蔡瑞英 主审

南京大学出版社

1994·南京

(苏)新登字第 011 号

## 内 容 简 介

本书对现代计算机的数据结构和算法进行全面而深入的介绍。

本书系统地介绍了常用的数据结构和计算机算法,精心设计和安排了全书内容,适用于各类层次的读者。即使是初学计算机算法的读者,也可以从本书中找到所需的资料。

本书的每一章中给出一个算法、一种设计技术、一个应用领域或一个相关的话题。算法是以通俗的语言说明的,并以“伪代码”的形式来设计,可以很容易地把它转化为计算机程序用于有关的应用。其中用了 260 多幅图来说明算法是如何工作的,并对所有算法都进行仔细、精确的运行时刻分析,算法尽量设计得易于理解,趣味性强。

本书照顾到了通用性与系统性,涵盖了许多方面的内容,包括 800 多个练习和 120 个思考题,因此也可以作为高年级本科生和研究生的(如“数据结构”、“算法分析与设计”等)教材和教学参考书。

本书篇幅较大,覆盖范围广,是一本关于计算机数据结构和算法的工具书,读者可以选择与课程有关的章节进行阅读。本书既可以作为教科书使用,又可以作为工程技术手册或参考书使用。

计算机及软件技术丛书  
**现代计算机常用数据结构和算法**  
潘金贵 顾铁成 曾 俭 滕远方 等 编著  
蔡瑞英 主审  
责任编辑 丁 益

南京大学出版社出版  
(南京大学校内 邮编 210008)  
江苏省新华书店发行 江苏兴印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:44.25 字数:1104 千

1994 年 3 月第 1 版 1994 年 3 月第 1 次印刷

印数:1 0000 册

ISBN 7-305-02424-4/TP·83

定价:29.50 元

## 《计算机及软件技术丛书》编委会

学术顾问    孙钟秀    张福炎    郑国梁

主     编     谢   立

副 主 编     时惠荣    潘金贵    丁   益    赵沁平

编     委     (按姓氏笔画为序)

|       |       |     |     |
|-------|-------|-----|-----|
| 丁   益 | 丁嘉种   | 王永成 | 孙志挥 |
| 时惠荣   | 陈   禹 | 陈道蓄 | 赵沁平 |
| 杨静宇   | 钱士钧   | 钱培德 | 徐宝文 |
| 顾其兵   | 谢   立 | 潘金贵 |     |

## 出版者的话

我国社会主义经济建设的蓬勃发展,极大地推动着社会信息化的进程,也促进了信息产业的发展。现在,计算机的应用已渗透到社会和生活的各个领域。作为社会信息化基础的计算机及软件技术,正为越来越多的人掌握和应用,计算机及软件技术也因此而不断更新、发展。

掌握计算机技术,是现代人特别是跨世纪的中青年人在当今激烈的社会竞争中制胜的基础,也是未来信息化社会对每个人的要求。然而,在我国,计算机基础教育尚欠普及,计算机特别是微型计算机及软件技术的应用和开发也还处在一个较低的层次。许多非专业人员希望能使用计算机,但面对纷繁的专业知识,众多的技术资料,视学习计算机的使用为畏途,专业人员面对软件技术的快速更新,目不暇接。为了让更多的人熟悉计算机技术,利用计算机服务于自己的管理、科研、教学工作,使我国的计算机及软件技术的应用和开发紧随国际潮流,普及和提高我国计算机应用和开发的水平,我们为此组织编写并陆续出版《计算机及软件技术丛书》。

本《丛书》将以应用为基础,兼顾普及与提高。组织科研、教学和应用开发第一线的专家、学者,结合国外计算机及软件技术的最新发展和趋向与国内的应用现状和方向,为初学者提供系统的入门读物,为专业人员介绍适合国情的最新实用技术,既有理论性、学术性强的专著、专论,也有普及性、实用性的教材、手册,以满足多层次读者的需要。

本《丛书》的编写将立足于现实,着眼于未来,力争反映国内外计算机及软件技术的最新动态和发展趋向,引导和帮助读者学习、吸收、掌握计算机的新理论、新技术和新成果。

我们将根据读者需要,不断充实、完善本《丛书》内容,同时诚恳欢迎读者对本《丛书》提出建议、批评,也热忱欢迎向本《丛书》赐稿。

南京大学出版社

《计算机及软件技术丛书》编委会

# 前 言

经过两年多的努力,《现代计算机常用数据结构及算法》一书终于脱稿付梓了。现就我们编译本书的目的、本书的特点、本书的组织及内容安排、本书的用途及使用方法等作一些简要的说明。

## 一、目 的

数据由数据元素组成,数据元素可以是一组“事实”,一批“数”或者一个“符号”集合,等等。作为计算机程序加工处理的对象的数据,并非是一堆无组织的信息元素,它们包含的数据元素之间有着重要的结构关系。数据结构就是对数据元素之间的结构关系的一种描述,算法则是解决数据结构问题的办法。本书中的结果都集中地以算法形式给出。实际上,设计计算机程序,就是要在计算机上实现某种算法。算法是用描述语言描述的程序,而程序则是用计算机所能接受的语言编写的算法。因此,对于从事计算机应用的科技人员来说,不仅要掌握作为程序开发工具的程序设计语言,还要掌握算法。算法是程序设计的基础。为此,我们根据国内外的最新资料编译了本书。

## 二、特 点

本书可概括为以下几个方面特点:

1.概念清晰,广度、深度兼顾。

本书收集了现代计算机常用的数据结构和算法,并作了系统而深入的介绍。对涉及的概念和背景知识都作了清晰的阐述和交代,有关的定理给出了完整的证明。

2.“五个一”的描述方法。

本书以相当的深度介绍了许多常用的数据结构和有效的算法。编写上采用了“五个一”的描述方法,即一章介绍一个算法、一种设计技术、一个应用领域和一个相关话题。

3.图文并茂,可读性强。

书中的算法均以通俗的语言进行说明,并采用了260多幅图来说明算法是如何工作的,易于理解。

4.算法的“伪代码”形式简明实用。

书中的算法均以非常简明的“伪代码”形式来设计,可以很容易地把它转化为计算机程序,直接用于有关的应用。

由于注重了算法设计的效率,故对所有算法进行了仔细、精确的运行时刻分析,有利于进一步改进算法。

### 三、内 容

全书内容共分七篇三十七章。各篇及主要章节的安排如下。

第一篇共六章 (1-6), 介绍算法设计和分析使用的数学知识。

算法分析常常需要用到一些数学知识, 其中一些可能很简单, 只要用到高中代数的知识, 但也有一些相对来说是比较复杂的。本书的这一部分内容将对分析算法的各种方法与工具作简要介绍, 以供读者参考查阅。

第二篇共四章 (7-10), 介绍排序和顺序统计学。在这部分中, 介绍了另外两种对任意实数排序的算法, 即堆排序和快速排序。同时对另外两个相关算法即基数排序算法和桶排序作了分析。

第三篇共五章 (11-15), 描述了几种用来实现动态集合的数据结构。例如, 处理简单数据结构如栈、链表、有根树以及杂凑表、二叉查找树、红-黑树和增强红-黑树等的基本方法和操作, 这些数据结构可以用来构造一些高效的算法。

第四篇用三章 (16-18) 的篇幅介绍了设计和分析高效算法的三种重要技术: 动态程序设计、贪心算法和平摊技术, 这部分的技术对有效地解决许多计算问题是至关重要的。

第五篇共四章 (19-22), 进一步讨论支持动态集合上操作的数据结构, 如 B-树, 并给可合并堆的几种实现和用于分离集合的一些数据结构。

第六篇共五章 (23-27), 主要讨论了如何在计算机上描述图以及以此为基础的广度优先搜索和深度优先搜索算法; 如何生成一个图的最小权生成树; 赋权图中顶点间最短路径和网络中最大流的计算问题。网络问题常以多种形式出现, 掌握计算最大流的一种好的算法对于多种多样的相关问题将是非常有益的。

第七篇用了十章 (28-37) 的篇幅对一些算法课题进行了讨论。这些课题是对前面各篇材料的扩展和补充, 介绍了一些新的算法, 如比较网络、组合电路和 PARM 等三种并行计算模型, 矩阵操作的有效算法和一种著名的信号处理技术 (快速傅里叶变换, FFT)。此外, 还讨论了算法应用的特殊领域, 如计算几何和数论, 并对设计有效算法所受的一些限制和克服这些限制的相应技术进行了探讨。

### 四、用 途

1. 适合用于教材或教学参考书。

由于本书兼顾通用性与系统性, 覆盖了许多方面的内容, 因此, 对教师而言, 可选作为高等学校高年级本科生和研究生的多门课程 (如“数据结构”、“算法分析与设计”等) 的教材和教学参考书。本书不但阐述通俗、严谨, 而且还提供了 800 多个练习和 120 多个思考题。针对每一节的内容都给出了数量和难度不等的练习题。练习题用作考察对基本材料掌握程度, 思考题有一定的难度, 需进行精心的研究, 有时还通过思考题介绍一些新的知识。

在适用于研究生的章节和练习前标上了一个星号, 这并不意味着比未标星号章节或练习难, 只是它可能需要用到更多的背景知识和数学知识。

对学生来说, 本书是学习算法的一本很好的参考材料。本书的算法都尽量设计得容易理

解, 并且也比较有趣。在遇到一个不熟悉的算法时, 我们一步一步地说明它; 同时还提供对理解算法的分析所需的数学知识的详细说明。如果读者对某个课题有了一定的了解, 就可以跳过该节的简介部分, 直接去读更高级的部分。

## 2. 作为工程技术手册和参考书。

对于工程技术人员来说, 由于本书的覆盖范围很广, 涉及专题的内容比较全面, 因此它是一本关于计算机数据结构和算法的非常好的参考手册。

## 3. 作为工具书。

由于本书收集的数据结构和算法都是比较常用的、典型的、高效的、成熟的, 短时间内不会过时, 故本书具有很好的收藏价值。

# 五、用 法

本书对内容进行了精心的设计和安排, 尽可能考虑到所有水平的读者。即使是初学计算机算法的人也可以在本书中找到所需的材料, 而不必理会其中的数学证明。

由于每一章都是自解释的, 因此读者只需将注意力集中到最感兴趣的章节即可。

对于选作教材使用的教师和学生来说, 选择使用与课程有关的那些章节阅读。

本书编译工作由潘金贵、牟仁、顾铁成主持和组织, 参加本书编译工作的主要人员有顾铁成、曾俭、蔡瑞英、翁妙凤、滕远方、陈昕、朱训衷、张岗、牟仁、潘金贵、张宁、吴卫华、欣超、胡学联、辛达雅、史欣等二十位同志, 由顾铁成、潘金贵和牟仁同志负责了全书的统校工作。并蒙长期从事计算机算法研究和教学的南京化工学院计算中心蔡瑞英副教授主审, 值此谨表谢意。

由于本书篇幅浩大, 内容较深, 其编译工作称得上一项工程, 虽然我们作了认真的校改, 但仍难免有不够确切之处, 敬请广大读者指正和谅解。

编者

1992年3月于南京



# 目 录

## 第一篇 基本知识

|                           |    |                       |    |
|---------------------------|----|-----------------------|----|
| <b>第一章 算法概念</b> .....     | 2  | 阶乘 .....              | 21 |
| 1.1 算法 .....              | 2  | 多重对数函数 .....          | 21 |
| 插入排序 .....                | 3  | 斐波那契数 .....           | 22 |
| 伪代码的使用约定 .....            | 4  | 思考题 .....             | 22 |
| 1.2 算法分析 .....            | 4  | 练习二 .....             | 25 |
| 插入排序算法的分析 .....           | 5  | <b>第三章 求和运算</b> ..... | 26 |
| 最坏情况和平均情况分析 .....         | 6  | 3.1 求和公式和性质 .....     | 26 |
| 增长的量级 .....               | 7  | 线性性质 .....            | 26 |
| 1.3 算法设计 .....            | 7  | 算术级数 .....            | 27 |
| 1.3.1 分治法 .....           | 7  | 几何级数 .....            | 27 |
| 1.3.2 分治算法分析 .....        | 9  | 调和级数 .....            | 27 |
| 合并排序算法的分析 .....           | 9  | 积分级数与微分级数 .....       | 27 |
| 1.4 小结 .....              | 10 | 套迭级数 .....            | 27 |
| 思考题 .....                 | 10 | 积 .....               | 28 |
| 练习一 .....                 | 11 | 3.2 和式的界 .....        | 28 |
| <b>第二章 函数的增长</b> .....    | 13 | 数学归纳法 .....           | 28 |
| 2.1 渐近记号 .....            | 13 | 对项的限界 .....           | 29 |
| $\Theta$ -记号 .....        | 13 | 分解和式 .....            | 30 |
| $O$ -记号 .....             | 15 | 积分近似公式 .....          | 32 |
| $\Omega$ -记号 .....        | 16 | 思考题 .....             | 33 |
| 方程中的渐近记号 .....            | 16 | 练习三 .....             | 33 |
| $O$ -记号 .....             | 17 | <b>第四章 递归式</b> .....  | 35 |
| $\omega$ -记号 .....        | 17 | 4.1 替换方法 .....        | 35 |
| 不同函数间的比较 .....            | 18 | 作一个好的猜测 .....         | 36 |
| 2.2 标准记号体系和通用函数 .....     | 18 | 一些细微问题 .....          | 37 |
| 单调性 .....                 | 19 | 避免陷井 .....            | 37 |
| 底(Floor)和顶(Ceiling) ..... | 19 | 改变变量 .....            | 37 |
| 多项式 .....                 | 19 | 4.2 迭代方法 .....        | 38 |
| 指数式 .....                 | 19 | 递归树 .....             | 39 |
| 对数式 .....                 | 20 | 4.3 主方法 .....         | 40 |

|                               |    |                     |    |
|-------------------------------|----|---------------------|----|
| 主定理 .....                     | 40 | 组合 .....            | 68 |
| 主方法的应用 .....                  | 41 | 二项系数 .....          | 68 |
| * 4.4 主定理的证明 .....            | 42 | 三项界 .....           | 69 |
| 4.4.1 取整数幂时的证明 .....          | 42 | 6.2 概率 .....        | 69 |
| 递归树 .....                     | 43 | 概率公理 .....          | 70 |
| 4.4.2 底函数和顶函数 .....           | 46 | 离散概率分布 .....        | 70 |
| 思考题 .....                     | 48 | 连续一致概率分布 .....      | 71 |
| 练习四 .....                     | 50 | 条件概率和独立性 .....      | 71 |
| <b>第五章 集合、关系、函数、图和树</b> ..... | 52 | 贝叶斯定理 .....         | 72 |
| 5.1 集合 .....                  | 52 | 6.3 离散随机变量 .....    | 73 |
| 5.2 关系 .....                  | 54 | 随机变量的期望值 .....      | 74 |
| 5.3 函数 .....                  | 56 | 方差和标准差 .....        | 75 |
| 5.4 图 .....                   | 57 | 6.4 几何分布与二项分布 ..... | 75 |
| 5.5 树 .....                   | 60 | 几何分布 .....          | 76 |
| 5.5.1 自由树 .....               | 60 | 二项分布 .....          | 77 |
| 5.5.2 有根树和有序树 .....           | 62 | 6.5 二项分布的尾 .....    | 79 |
| 5.5.3 二叉树和位置树 .....           | 63 | 6.6 概率分析 .....      | 83 |
| 思考题 .....                     | 64 | 6.6.1 生日悖论 .....    | 83 |
| 练习五 .....                     | 65 | 另一种分析方法 .....       | 84 |
| <b>第六章 计数和概率</b> .....        | 67 | 6.6.2 球与盒子 .....    | 85 |
| 6.1 计数 .....                  | 67 | 6.6.3 序列 .....      | 85 |
| 和规则与积规则 .....                 | 67 | 思考题 .....           | 87 |
| 串 .....                       | 67 | 练习六 .....           | 88 |
| 排列 .....                      | 68 |                     |    |

## 第二篇 排序和顺序统计学

|                       |     |                      |     |
|-----------------------|-----|----------------------|-----|
| 输入数据的结构 .....         | 92  | 8.1 对快速排序的描述 .....   | 104 |
| 排序算法 .....            | 92  | 对数组进行划分 .....        | 104 |
| 顺序统计学 .....           | 93  | 8.2 快速排序的性能 .....    | 106 |
| <b>第七章 堆排序</b> .....  | 94  | 最坏情况划分 .....         | 106 |
| 7.1 堆 .....           | 94  | 最佳情况划分 .....         | 107 |
| 7.2 保持堆的性质 .....      | 95  | 对称划分 .....           | 107 |
| 7.3 建堆 .....          | 96  | 关于平均情况的直觉考虑 .....    | 108 |
| 7.4 堆排序算法 .....       | 98  | 8.3 快速排序的随机化版本 ..... | 109 |
| 7.5 优先级队列 .....       | 99  | 8.4 快速排序分析 .....     | 110 |
| 思考题 .....             | 101 | 8.4.1 最坏情况分析 .....   | 110 |
| 练习七 .....             | 102 | 8.4.2 平均情况分析 .....   | 111 |
| <b>第八章 快速排序</b> ..... | 104 | 关于划分过程的分析 .....      | 111 |

|                   |     |                      |     |
|-------------------|-----|----------------------|-----|
| 关于平均情况性态的一个递归式    | 111 | 9.4 桶排序              | 121 |
| 解递归式              | 112 | 思考题                  | 123 |
| 上述和式的紧确界          | 113 | 练习九                  | 124 |
| 思考题               | 113 | <b>第十章 中位数和顺序统计学</b> | 126 |
| 练习八               | 115 | 10.1 最大元素和最小元素       | 126 |
| <b>第九章 线性时间排序</b> | 117 | 同时找最小元素和最大元素         | 127 |
| 9.1 排序算法的下界       | 117 | 10.2 以线性期望时间做选择      | 127 |
| 决策树模型             | 117 | 10.3 最坏情况线性时间的选择     | 129 |
| 最坏情况下界            | 118 | 思考题                  | 130 |
| 9.2 计数排序          | 118 | 练习十                  | 131 |
| 9.3 基数排序          | 120 |                      |     |

### 第三篇 数据结构

|                    |     |                   |     |
|--------------------|-----|-------------------|-----|
| 动态集合的元素            | 133 | 通过拉链法来解决碰撞        | 151 |
| 动态集合上的操作           | 133 | 对带拉链杂凑的分析         | 152 |
| 内容综述               | 134 | <b>12.3 杂凑函数</b>  | 153 |
| <b>第十一章 基本数据结构</b> | 135 | 好的杂凑函数的特点         | 153 |
| 11.1 栈和队列          | 135 | 将关键字解释为实数         | 153 |
| 栈                  | 135 | 12.3.1 除法杂凑法      | 154 |
| 队列                 | 136 | 12.3.2 乘法杂凑法      | 154 |
| 11.2 链表            | 137 | 12.3.3 全域杂凑       | 155 |
| 查找链表               | 138 | <b>12.4 开放地址法</b> | 156 |
| 对链表的插入操作           | 138 | 线性探查              | 158 |
| 对链表的删除操作           | 139 | 二次探查              | 158 |
| 哨兵                 | 139 | 双重杂凑              | 158 |
| 11.3 指针和对象的实现      | 140 | 对开放地址杂凑的分析        | 159 |
| 对象的多重数组表示          | 141 | 思考题               | 161 |
| 对象的单数组表示           | 141 | 练习十二              | 163 |
| 分配和释放对象            | 142 | <b>第十三章 二叉查找树</b> | 165 |
| 11.4 有根树的表示        | 143 | 13.1 二叉查找树        | 165 |
| 二叉树                | 143 | 13.2 查询二叉查找树      | 166 |
| 无界分叉的有根树           | 144 | 查找                | 166 |
| 树的其他表示             | 145 | 最大元素和最小元素         | 167 |
| 思考题                | 145 | 前趋和后继             | 168 |
| 练习十一               | 146 | 13.3 插入和删除        | 169 |
| <b>第十二章 杂凑表</b>    | 149 | 插入                | 169 |
| 12.1 直接寻址表         | 149 | 删除                | 170 |
| 12.2 杂凑表           | 150 | * 13.4 随机构造的二叉查找树 | 171 |

|                           |     |                     |     |
|---------------------------|-----|---------------------|-----|
| 思考题 .....                 | 174 | 15.1 动态顺序统计 .....   | 192 |
| 练习十三 .....                | 177 | 检索具有给定秩的元素 .....    | 193 |
| <b>第十四章 红-黑树</b> .....    | 179 | 确定一个元素的秩 .....      | 193 |
| 14.1 红-黑树的性质 .....        | 179 | 对子树规模的维护 .....      | 194 |
| 14.2 旋转 .....             | 180 | 15.2 如何扩张数据结构 ..... | 195 |
| 14.3 插入 .....             | 182 | 对红-黑树的扩张 .....      | 196 |
| 14.4 删除 .....             | 185 | 15.3 区间树 .....      | 197 |
| 思考题 .....                 | 188 | 思考题 .....           | 200 |
| 练习十四 .....                | 190 | 练习十五 .....          | 201 |
| <b>第十五章 数据结构的扩张</b> ..... | 192 |                     |     |

## 第四篇 高级设计和分析技术

|                          |     |                           |     |
|--------------------------|-----|---------------------------|-----|
| <b>第十六章 动态程序设计</b> ..... | 204 | 17.2 贪心策略的基本内容 .....      | 226 |
| 16.1 矩阵链乘法 .....         | 204 | 贪心选择性质 .....              | 226 |
| 计算括号化的重数 .....           | 205 | 最优子结构 .....               | 226 |
| 最优括号化的结构 .....           | 206 | 贪心法与动态程序设计 .....          | 226 |
| 一个递归解 .....              | 206 | 17.3 哈夫曼编码 .....          | 228 |
| 计算最优代价 .....             | 207 | 前缀编码 .....                | 228 |
| 构造最优解 .....              | 209 | 构造哈夫曼编码 .....             | 230 |
| 16.2 动态程序设计基础 .....      | 209 | 哈夫曼算法的正确性 .....           | 231 |
| 最优结构 .....               | 209 | * 17.4 贪心法的理论基础 .....     | 232 |
| 重叠子问题 .....              | 210 | 17.4.1 矩阵胚 .....          | 233 |
| 记忆化 .....                | 211 | 17.4.2 关于加权矩阵胚的贪心算法 ..... | 234 |
| 16.3 最长公共子序列 .....       | 213 | 17.5 一个任务调度问题 .....       | 236 |
| 对最长公共子序列进行刻划 .....       | 213 | 思考题 .....                 | 238 |
| 子问题的递归解 .....            | 214 | 练习十七 .....                | 239 |
| 计算 LCS 的长度 .....         | 214 | <b>第十八章 平摊分析</b> .....    | 241 |
| 构造一个 LCS .....           | 215 | 18.1 聚集方法 .....           | 241 |
| 对代码的改进 .....             | 216 | 栈操作 .....                 | 241 |
| 16.4 最优多边形三角剖分 .....     | 216 | 二进制计数器 .....              | 243 |
| 与括号化的对应 .....            | 217 | 18.2 会计方法 .....           | 244 |
| 最优三角剖分的子结构 .....         | 219 | 栈操作 .....                 | 244 |
| 一个递归解 .....              | 219 | 二进制计数器的增值 .....           | 245 |
| 思考题 .....                | 220 | 18.3 势能方法 .....           | 246 |
| 练习十六 .....               | 220 | 栈操作 .....                 | 246 |
| <b>第十七章 贪心算法</b> .....   | 223 | 二进制计数器的增值 .....           | 247 |
| 17.1 活动选择问题 .....        | 223 | 18.4 动态表 .....            | 248 |
| 证明贪心算法的正确性 .....         | 225 |                           |     |

|                     |     |            |     |
|---------------------|-----|------------|-----|
| 18.4.1 表的扩张 .....   | 248 | 思考题 .....  | 254 |
| 18.4.2 表扩张和收缩 ..... | 251 | 练习十八 ..... | 256 |

## 第五篇 高级数据结构

|                          |     |                          |     |
|--------------------------|-----|--------------------------|-----|
| <b>第十九章 B-树</b> .....    | 259 | 21.2 可合并堆操作 .....        | 290 |
| 辅存上的数据结构 .....           | 259 | 创建一个新的斐波那契堆 .....        | 291 |
| 19.1 B-树的定义 .....        | 261 | 插入一个节点 .....             | 291 |
| B-树的高度 .....             | 262 | 寻找最小节点 .....             | 292 |
| 19.2 B-树上的基本操作 .....     | 263 | 合并两个斐波那契堆 .....          | 292 |
| 查找 B-树 .....             | 263 | 抽取最小节点 .....             | 292 |
| 创建一棵空 B-树 .....          | 264 | 21.3 减小一个关键字与            |     |
| B-树中节点的分裂 .....          | 264 | 删除一个节点 .....             | 296 |
| 向 B-树中插入一关键字 .....       | 265 | 减小一个关键字 .....            | 297 |
| 19.3 从 B-树中删除一个关键字       |     | 删除一个节点 .....             | 299 |
| .....                    | 268 | 21.4 最大度数的界 .....        | 299 |
| 思考题 .....                | 270 | 思考题 .....                | 301 |
| 练习十九 .....               | 271 | 练习二十一 .....              | 302 |
| <b>第二十章 二项堆</b> .....    | 273 | <b>第二十二章 用于分离集合的数据结构</b> |     |
| 20.1 二项树与二项堆 .....       | 274 | .....                    | 303 |
| 20.1.1 二项树 .....         | 274 | 22.1 分离集合的操作 .....       | 303 |
| 20.1.2 二项堆 .....         | 275 | 分离集合数据结构的一个应用 .....      | 304 |
| 二项堆的表示 .....             | 276 | 22.2 分离集合的链表表示 .....     | 305 |
| 20.2 二项堆上的操作 .....       | 277 | UNION 的一个简单实现 .....      | 305 |
| 创建一个新的二项堆 .....          | 277 | 一种加权合并启发式 .....          | 306 |
| 寻找最小关键字 .....            | 277 | 22.3 分离集合森林 .....        | 307 |
| 合并两个二项堆 .....            | 278 | 改进运行时间的启发式 .....         | 307 |
| 插入一个节点 .....             | 282 | 分离集合森林的伪代码 .....         | 308 |
| 抽取具有最小关键字的节点 .....       | 283 | 启发式知识对运行时间的影响 .....      | 309 |
| 对一个关键字减值 .....           | 284 | * 22.4 关于带路径压缩的          |     |
| 删除一个关键字 .....            | 284 | 按秩合并的分析 .....            | 309 |
| 思考题 .....                | 285 | Ackerman 函数与其逆函数 .....   | 309 |
| 练习二十 .....               | 287 | 秩的性质 .....               | 311 |
| <b>第二十一章 斐波那契堆</b> ..... | 288 | 时间界的证明 .....             | 312 |
| 21.1 斐波那契堆的结构 .....      | 289 | 思考题 .....                | 315 |
| 势函数 .....                | 290 | 练习二十二 .....              | 317 |
| 最大度数 .....               | 290 |                          |     |



## 第六篇 图的算法

|                                |     |                               |     |
|--------------------------------|-----|-------------------------------|-----|
| <b>第二十三章 图的基本算法</b> .....      | 319 | 线性程序设计 .....                  | 367 |
| 23.1 图的表示 .....                | 320 | 差分约束系统 .....                  | 368 |
| 23.2 宽度优先搜索 .....              | 322 | 约束图 .....                     | 369 |
| 分析 .....                       | 324 | 差分约束系统问题的求解 .....             | 370 |
| 最短路径 .....                     | 324 | 思考题 .....                     | 371 |
| 宽度优先树 .....                    | 326 | 练习二十五 .....                   | 373 |
| 23.3 深度优先搜索 .....              | 327 | <b>第二十六章 每对结点间的最短路径</b> ..... | 377 |
| 深度优先搜索的性质 .....                | 330 | 26.1 最短路径与矩阵乘法 .....          | 378 |
| 边的分类 .....                     | 331 | 最短路径的结构 .....                 | 379 |
| 23.4 拓扑排序 .....                | 332 | 解决每对结点间的最短路径问题的               |     |
| 23.5 强连通支 .....                | 333 | 一种递归方法 .....                  | 379 |
| 思考题 .....                      | 337 | 自底向上计算最短路径的权 .....            | 379 |
| 练习二十三 .....                    | 339 | 算法运行时间的改进 .....               | 381 |
| <b>第二十四章 最小生成树</b> .....       | 342 | 26.2 Floyd-Warshall 算法 .....  | 382 |
| 24.1 最小生成树的形成 .....            | 343 | 最短路径的结构 .....                 | 382 |
| 24.2 Kruskal 算法和 Prim 算法 ..... | 345 | 解决每对结点间最短路径问题的                |     |
| Kruskal 算法 .....               | 345 | 一种递归方案 .....                  | 383 |
| Prim 算法 .....                  | 347 | 自底向上计算最短路径的权 .....            | 383 |
| 思考题 .....                      | 349 | 建立最短路径 .....                  | 385 |
| 练习二十四 .....                    | 351 | 有向图的传递闭包 .....                | 385 |
| <b>第二十五章 单源最短路径</b> .....      | 352 | 26.3 关于稀疏图的 Johnson 算法        |     |
| 单源最短路径问题的变形 .....              | 352 | .....                         | 387 |
| 负权边 .....                      | 353 | 通过重赋权保持最短路径 .....             | 387 |
| 最短路径的表示方法 .....                | 353 | 通过重赋权产生非负的权 .....             | 388 |
| 本章概述 .....                     | 354 | 计算每对结点间的最短路径 .....            | 389 |
| 25.1 最短路径和松弛技术 .....           | 355 | * 26.4 解决有向图中路径问题             |     |
| 最短路径的理想基础 .....                | 355 | 的一般性框架 .....                  | 390 |
| 松弛技术 .....                     | 356 | 闭半环的定义 .....                  | 390 |
| 松弛的性质 .....                    | 357 | 有向图中路径的计算 .....               | 391 |
| 最短路径树 .....                    | 358 | 闭半环的实例 .....                  | 393 |
| 25.2 Dijkstra 算法 .....         | 360 | 关于有向图标示的一个                    |     |
| 分析 .....                       | 362 | 动态程序设计算法 .....                | 394 |
| 25.3 Bellman-Ford 算法 .....     | 363 | 思考题 .....                     | 395 |
| 25.4 有向无回路图中的                  |     | 练习二十六 .....                   | 396 |
| 单源最短路径 .....                   | 366 | <b>第二十七章 最大流</b> .....        | 399 |
| 25.5 差分约束与最短路径 .....           | 367 | 27.1 流网络 .....                | 399 |

|                              |     |                     |     |
|------------------------------|-----|---------------------|-----|
| 流网络与流 .....                  | 399 | 直觉知识 .....          | 415 |
| 网络流的一个实例 .....               | 401 | 基本的操作 .....         | 416 |
| 多个源和多个汇的网络 .....             | 402 | 一般性算法 .....         | 417 |
| 对流的处理 .....                  | 403 | 先流推进方法的正确性 .....    | 418 |
| 27.2 Ford-Fulkerson 方法 ..... | 404 | 先流推进方法的分析 .....     | 419 |
| 残留网络 .....                   | 404 | * 27.5 向前提升算法 ..... | 421 |
| 增广路径 .....                   | 406 | 容许边和容许网络 .....      | 421 |
| 流网络的割 .....                  | 406 | 相邻表 .....           | 422 |
| 基本的 Ford-Fulkerson 算法 .....  | 408 | 溢出结点的释放 .....       | 423 |
| Ford-Fulkerson 算法的分析 .....   | 409 | 向前提升算法 .....        | 425 |
| 27.3 最大二分匹配 .....            | 412 | 算法分析 .....          | 427 |
| 最大二分匹配问题 .....               | 412 | 思考题 .....           | 428 |
| 寻求最大二分匹配 .....               | 413 | 练习二十七 .....         | 431 |
| 27.4 先流推进算法 .....            | 415 |                     |     |

## 第七篇 论题选编

|                         |     |                              |     |
|-------------------------|-----|------------------------------|-----|
| <b>第二十八章 排序网络</b> ..... | 436 | 29.3 乘法电路 .....              | 460 |
| 28.1 比较网络 .....         | 436 | 29.3.1 阵列乘法器 .....           | 460 |
| 28.2 0-1 原则 .....       | 438 | 分析 .....                     | 463 |
| 28.3 双调排序网络 .....       | 440 | 29.3.2 华莱士树乘法器 .....         | 463 |
| 半清洁剂 .....              | 440 | 分析 .....                     | 464 |
| 双调排序程序 .....            | 442 | 29.4 时钟电路 .....              | 464 |
| 28.4 合并网络 .....         | 442 | 29.4.1 位串行加法 .....           | 465 |
| 28.5 排序网络 .....         | 444 | 分析 .....                     | 466 |
| 思考题 .....               | 445 | 行波进位加法与位串行加法 .....           | 466 |
| 练习二十八 .....             | 447 | 29.4.2 线性阵列乘法器 .....         | 466 |
| <b>第二十九章 算术电路</b> ..... | 449 | 一种慢速线性阵列实现方法 .....           | 467 |
| 29.1 组合电路 .....         | 449 | 一种快速的线性阵列实现方法 .....          | 469 |
| 组合元件 .....              | 449 | 思考题 .....                    | 469 |
| 组合电路 .....              | 450 | 练习二十九 .....                  | 470 |
| 全加器 .....               | 451 | <b>第三十章 关于并行计算机的算法</b> ..... | 473 |
| 电路深度 .....              | 452 | PRAM 模型 .....                | 473 |
| 电路规模 .....              | 452 | 并发存储器存取方式与                   |     |
| 29.2 加法电路 .....         | 453 | 互斥存储器存取方式 .....              | 474 |
| 29.2.1 行波进位加法 .....     | 453 | 同步与控制 .....                  | 475 |
| 29.2.2 先行进位加法器 .....    | 454 | 本章概述 .....                   | 475 |
| 完成先行进位加法器的构造 .....      | 458 | 30.1 指针转移 .....              | 475 |
| 29.2.3 保留进位加法 .....     | 459 | 30.1.1 表排序 .....             | 476 |

|                              |     |                                |     |
|------------------------------|-----|--------------------------------|-----|
| 正确性 .....                    | 477 | LUP 分解总述 .....                 | 517 |
| 分析 .....                     | 478 | 正向替换与逆向替换 .....                | 518 |
| 30.1.2 列表的并行前缀 .....         | 478 | 关于 LU 分解的计算 .....              | 520 |
| 30.1.3 欧拉回路技术 .....          | 480 | LUP 分解的计算 .....                | 523 |
| 30.2 CRCW算法与EREW算法 .....     | 482 | 31.5 逆矩阵 .....                 | 526 |
| 并发操作发挥作用的有关问题 .....          | 482 | 根据 LUP 分解来计算逆矩阵 .....          | 526 |
| 并发写操作发挥作用的一个问题 .....         | 484 | 矩阵乘法与逆矩阵 .....                 | 526 |
| 用 EREW 算法来模拟 CRCW 算法 .....   | 486 | 把求逆矩阵问题转化为 .....               |     |
| 30.3 Brent 定理与工作效率 .....     | 488 | 矩阵乘法问题 .....                   | 527 |
| * 30.4 高效的并行前缀计算 .....       | 490 | 31.6 对称正定矩阵与 .....             |     |
| 递归的并行前缀计算 .....              | 490 | 最小二乘逼近 .....                   | 529 |
| 选择要消除的对象 .....               | 492 | 最小二乘逼近 .....                   | 530 |
| 分析 .....                     | 493 | 思考题 .....                      | 533 |
| 30.5 确定的打破对称性问题 .....        | 494 | 练习三十一 .....                    | 535 |
| 着色与最大独立集 .....               | 495 | <b>第三十二章 多项式与快速傅里叶变换</b> ..... | 539 |
| 计算 6-着色问题 .....              | 495 | 多项式 .....                      | 539 |
| 根据 6-着色计算出 MIS .....         | 498 | 本章概述 .....                     | 540 |
| 思考题 .....                    | 498 | 32.1 多项式的表示 .....              | 540 |
| 练习三十 .....                   | 501 | 系数表示法 .....                    | 540 |
| <b>第三十一章 矩阵操作</b> .....      | 503 | 点值表示法 .....                    | 541 |
| 31.1 矩阵的性质 .....             | 503 | 关于系数形式表示的多项式 .....             |     |
| 矩阵和向量 .....                  | 503 | 的快速乘法 .....                    | 543 |
| 关于矩阵的操作 .....                | 506 | 32.2 DFT 与 FFT .....           | 544 |
| 逆矩阵, 秩和行列式 .....             | 507 | 单位元素的复根 .....                  | 544 |
| 正定矩阵 .....                   | 508 | DFT .....                      | 546 |
| 31.2 关于矩阵乘法的Strassen算法 ..... | 509 | FFT .....                      | 546 |
| 算法概述 .....                   | 509 | 对单位元素的复根进行插值 .....             | 548 |
| 确定子矩阵的乘积 .....               | 510 | 32.3 有效的 FFT 实现方法 .....        | 549 |
| 讨论 .....                     | 513 | FFT 的一种迭代实现 .....              | 549 |
| * 31.3 代数系统与布尔矩阵乘法 .....     | 513 | 并行 FFT 电路 .....                | 552 |
| 拟环 .....                     | 513 | 思考题 .....                      | 553 |
| 环 .....                      | 514 | 练习三十二 .....                    | 556 |
| 布尔矩阵的乘法 .....                | 515 | <b>第三十三章 有关数论的算法</b> .....     | 558 |
| 域 .....                      | 515 | 输入的规模与算术运算的代价 .....            | 558 |
| 31.4 求解线性方程组 .....           | 516 | 33.1 基本的数论概念 .....             | 559 |
|                              |     | 可除性与约数 .....                   | 559 |
|                              |     | 素数与合数 .....                    | 559 |
|                              |     | 除法定理, 余数和同模 .....              | 559 |

|                               |     |                                  |     |
|-------------------------------|-----|----------------------------------|-----|
| 公约数与最大公约数 .....               | 560 | 34.4 Knuth-Morris-Pratt 算法 ..... | 605 |
| 互质数 .....                     | 561 | 关于模式的前缀函数 .....                  | 605 |
| 唯一的因子分解 .....                 | 561 | 运行时间分析 .....                     | 607 |
| 33.2 最大公约数 .....              | 562 | 前缀函数计算过程的正确性 .....               | 608 |
| 欧几里德算法 .....                  | 563 | KMP 算法的正确性 .....                 | 609 |
| EUCLID 算法的运行时间 .....          | 563 | 34.5 Boyer-Moore 算法 .....        | 610 |
| 欧几里德算法的推广形式 .....             | 564 | 坏字符启发性方法 .....                   | 611 |
| 33.3 模运算 .....                | 565 | 好后缀启发性方法 .....                   | 613 |
| 有限群 .....                     | 565 | 思考题 .....                        | 614 |
| 根据模加法与模乘法所定义的群 .....          | 566 | 练习三十四 .....                      | 616 |
| 子群 .....                      | 568 | <b>第三十五章 计算几何学</b> .....         | 618 |
| 由一个元素生成的子群 .....              | 569 | 35.1 线段的性质 .....                 | 618 |
| 33.4 求解模线性方程 .....            | 570 | 叉积 .....                         | 619 |
| 33.5 中国余数定理 .....             | 572 | 确定连续线段是向左转还是向右转 .....            | 620 |
| 33.6 元素的幂 .....               | 574 | 确定两条线段是否相交 .....                 | 620 |
| 运用反复平方法求数的幂 .....             | 576 | 叉积的其他应用 .....                    | 621 |
| 33.7 RSA 公开密钥加密系统 .....       | 577 | 35.2 确定任意一对线段是否相交 .....          | 621 |
| 公开密钥加密系统 .....                | 577 | 排序线段 .....                       | 622 |
| RSA 加密系统 .....                | 579 | 扫除线的移动 .....                     | 622 |
| 33.8 素数的测试 .....              | 581 | 求线段交点的伪代码 .....                  | 623 |
| 素数的密度 .....                   | 581 | 正确性 .....                        | 624 |
| 伪素数测试过程 .....                 | 582 | 运行时间 .....                       | 625 |
| Miller-Rabin 随机性素数测试方法 .....  | 583 | 35.3 寻找凸包 .....                  | 625 |
| Miller-Rabin 素数测试过程的出错率 ..... | 585 | Graham 扫描法 .....                 | 626 |
| * 33.9 整数的因子分解 .....          | 587 | Jarvis 步进法 .....                 | 631 |
| POLLARD 的 rho 启发性方法 .....     | 587 | 35.4 寻找最近点对 .....                | 632 |
| 思考题 .....                     | 590 | 分治算法 .....                       | 632 |
| 练习三十三 .....                   | 592 | 正确性 .....                        | 633 |
| <b>第三十四章 串匹配</b> .....        | 595 | 算法实现与运行时间 .....                  | 634 |
| 记号与术语 .....                   | 595 | 思考题 .....                        | 635 |
| 34.1 朴素的串匹配算法 .....           | 596 | 练习三十五 .....                      | 636 |
| 34.2 Rabin-Karp 算法 .....      | 597 | <b>第三十六章 NP-完全性</b> .....        | 639 |
| 34.3 利用有限自动机进行串匹配 .....       | 600 | 36.1 多项式时间 .....                 | 640 |
| 有限自动机 .....                   | 601 | 抽象问题 .....                       | 640 |
| 串匹配自动机 .....                  | 601 | 编码 .....                         | 641 |
| 计算变迁函数 .....                  | 604 | 形式语言体系 .....                     | 642 |
|                               |     | 36.2 多项式时间的验证 .....              | 644 |