

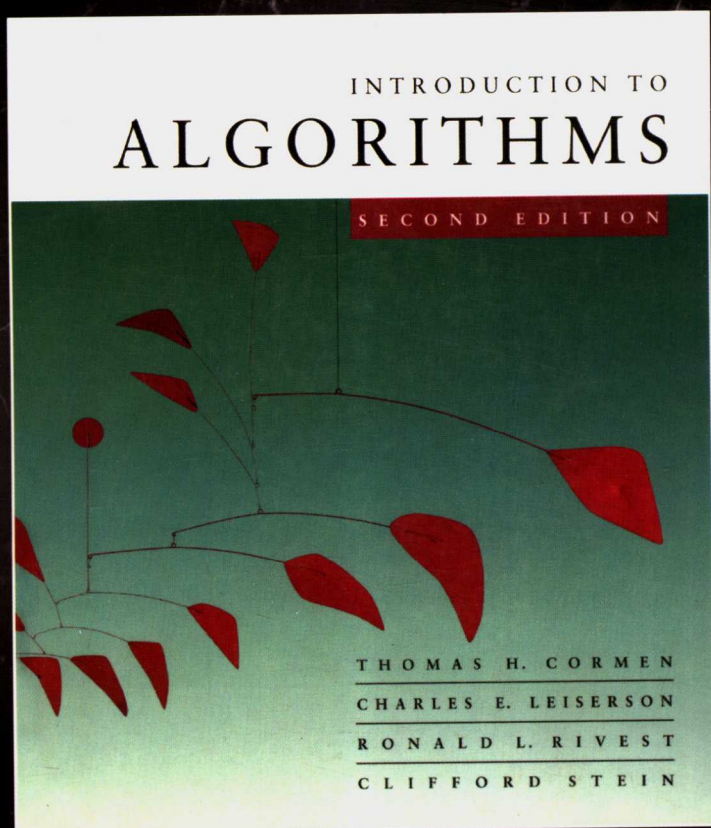


计 算 机 科 学 丛 书

原书第2版

算法导论

(美) Thomas H. Cormen Charles E. Leiserson 著 潘金贵 顾铁成 李成法 叶懋 译
Ronald L. Rivest Clifford Stein



Introduction to Algorithms Second Edition



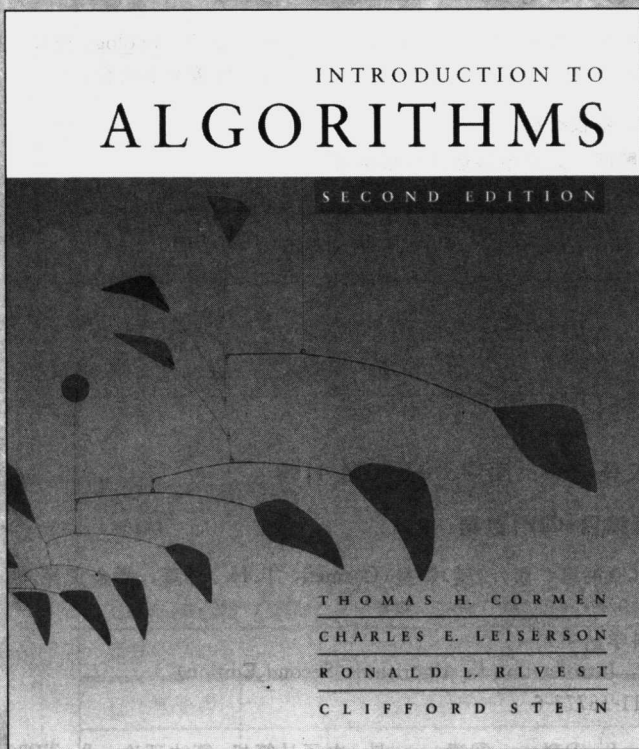
机械工业出版社
China Machine Press

计 算 机 科 学 丛 书

原书第2版

算法导论

(美) Thomas H. Cormen Charles E. Leiserson 著 潘金贵 顾铁成 李成法 叶懋 译
Ronald L. Rivest Clifford Stein



Introduction to Algorithms
Second Edition



机械工业出版社
China Machine Press

本书深入浅出,全面地介绍了计算机算法。对每一个算法的分析既易于理解又十分有趣,并保持了数学严谨性。本书的设计目标全面,适用于多种用途。涵盖的内容有:算法在计算中的作用,概率分析和随机算法的介绍。本书专门讨论了线性规划,介绍了动态规划的两个应用,随机化和线性规划技术的近似算法等,还有有关递归求解、快速排序中用到的划分方法与期望线性时间顺序统计算法,以及对贪心算法元素的讨论。本书还介绍了对强连通子图算法正确性的证明,对哈密顿回路和子集求和问题的 NP 完全性的证明等内容。全书提供了 900 多个练习题和思考题以及叙述较为详细的实例研究。

本书内容丰富,对本科生的数据结构课程和研究生的算法课程都是很实用的教材。本书在读者的职业生涯中,也是一本案头的数学参考书或工程实践手册。

Thomas H. Cormen, Charles E. Leiserson, Ronald L. Rivest, Clifford Stein; Introduction to Algorithms(Second Edition)(ISBN: 0-262-03293-7).

Authorized translation from the English language edition published by The MIT Press.

Copyright © 2001 by The Massachusetts Institute of Technology.

All rights reserved.

Chinese simplified language edition published by China Machine Press.

Copyright © 2006 by China Machine Press.

本书中文简体字版由 The Massachusetts Institute of Technology 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书内容。

版权所有,侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号: 图字: 01-2004-4100

图书在版编目(CIP)数据

算法导论(原书第 2 版)/(美)科曼(Cormen, T. H.)等著;潘金贵等译. -北京:机械工业出版社, 2006. 9

(计算机科学丛书)

书名原文: Introduction to Algorithms(Second Edition)

ISBN 7-111-18777-6

I. 算… II. ①科… ②潘… III. 电子计算机-算法理论 IV. TP301.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 026236 号

机械工业出版社(北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:王 玉

北京慧美印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2006 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·48.25 印张

定价:85.00 元

凡购本书,如有倒页、脱页、缺页,由本社发行部调换
本社购书热线:(010)68326294

出版者的话

文艺复兴以降，源远流长的科学精神和逐步形成的学术规范，使西方国家在自然科学的各个领域取得了垄断性的优势；也正是这样的传统，使美国在信息技术发展的六十多年间名家辈出、独领风骚。在商业化的进程中，美国的产业界与教育界越来越紧密地结合，计算机学科中的许多泰山北斗同时身处科研和教学的最前线，由此而产生的经典科学著作，不仅肇划了研究的范畴，还揭橥了学术的源变，既遵循学术规范，又自有学者个性，其价值并不会因年月的流逝而减退。

近年，在全球信息化大潮的推动下，我国的计算机产业发展迅猛，对专业人才的需求日益迫切。这对计算机教育界和出版界都既是机遇，也是挑战；而专业教材的建设在教育战略上显得举足轻重。在我国信息技术发展时间较短、从业人员较少的现状下，美国等发达国家在其计算机科学发展的几十年间积淀的经典教材仍有许多值得借鉴之处。因此，引进一批国外优秀计算机教材将对我国计算机教育事业的发展起积极的推动作用，也是与世界接轨、建设真正的世界一流大学的必由之路。

机械工业出版社华章图文信息有限公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，华章公司就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过几年的不懈努力，我们与Prentice Hall, Addison-Wesley, McGraw-Hill, Morgan Kaufmann等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从它们现有的数百种教材中甄选出Tanenbaum, Stroustrup, Kernighan, Jim Gray等大师名家的一批经典作品，以“计算机科学丛书”为总称出版，供读者学习、研究及度藏。大理石纹理的封面，也正体现了这套丛书的品位和格调。

“计算机科学丛书”的出版工作得到了国内外学者的鼎力襄助，国内的专家不仅提供了中肯的选题指导，还不辞劳苦地担任了翻译和审校的工作；而原书的作者也相当关注其作品在中国的传播，有的还专程为其书的中译本作序。迄今，“计算机科学丛书”已经出版了近百个品种，这些书籍在读者中树立了良好的口碑，并被许多高校采用为正式教材和参考书籍，为进一步推广与发展打下了坚实的基础。

随着学科建设的初步完善和教材改革的逐渐深化，教育界对国外计算机教材的需求和应用都步入一个新的阶段。为此，华章公司将加大引进教材的力度，在“华章教育”的总规划之下出版三个系列的计算机教材：除“计算机科学丛书”之外，对影印版的教材，则单独开辟出“经典原版书库”；同时，引进全美通行的教学辅导书“Schaum's Outlines”系列组成“全美经典学习指导系列”。为了保证这三套丛书的权威性，同时也为了更好地为学校和老师服务，华章公司聘请了中国科学院、北京大学、清华大学、国防科技大学、复旦大学、上海交通大学、南京大学、浙江大学、中国科技大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学、中国人民大学、北京航空航天大学、北京邮电大学、中山大学、解放军理工大学、郑州大学、湖北工学院、中国国家信息安全测评认证中心等国内重点大学和科研机构在计算机的各个领域的著名学者组成“专家指导委员会”，为我们提供选题意见和出版监督。

这三套丛书是响应教育部提出的使用外版教材的号召，为国内高校的计算机及相关专业

的教学度身订造的。其中许多教材均已为M. I. T., Stanford, U.C. Berkeley, C. M. U. 等世界名牌大学所采用。不仅涵盖了程序设计、数据结构、操作系统、计算机体系结构、数据库、编译原理、软件工程、图形学、通信与网络、离散数学等国内大学计算机专业普遍开设的核心课程,而且各具特色——有的出自语言设计者之手、有的历经三十年而不衰、有的已被全世界的几百所高校采用。在这些圆熟通博的名师大作的指引之下,读者必将在计算机科学的宫殿中由登堂而入室。

权威的作者、经典的教材、一流的译者、严格的审校、精细的编辑,这些因素使我们的图书有了质量的保证,但我们的目标是尽善尽美,而反馈的意见正是我们达到这一终极目标的重要帮助。教材的出版只是我们的后续服务的起点。华章公司欢迎老师和读者对我们的工作提出建议或给予指正,我们的联系方法如下:

电子邮件: hzjsj@hzbook.com

联系电话: (010) 68995264

联系地址: 北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码: 100037

专家指导委员会

(按姓氏笔画顺序)

尤晋元
石教英
张立昂
邵维忠
周克定
郑国梁
高传善
裘宗燕

王 珊
吕 建
李伟琴
陆丽娜
周傲英
施伯乐
梅 宏
戴 葵

冯博琴
孙玉芳
李师贤
陆鑫达
孟小峰
钟玉琢
程 旭

史忠植
吴世忠
李建中
陈向群
岳丽华
唐世渭
程时端

史美林
吴时霖
杨冬青
周伯生
范 明
袁崇义
谢希仁

译者序

一、本书的内容

目前，市面上有关计算机算法的书很多，有些叙述严谨但不全面，另外一些则是容量很大但不够严谨。本书将叙述的严谨性以及内容的深度和广度有机地结合了起来。第1版推出后，即在世界范围内受到了广泛的欢迎，被各高等院校用作多种课程的教材和业界的标准参考资料。它深入浅出地介绍了大量的算法及相关的数据结构，以及用于解决一些复杂计算问题的高级策略（如动态规划、贪心算法、平摊分析等），重点在于算法的分析和设计。对于每一个专题，作者都试图提供目前最新的研究成果及样例解答，并通过清晰的图示来说明算法的执行过程。

本书是原书的第2版，在第1版的基础之上增加了一些新的内容，涉及算法的作用、概率分析和随机化算法、线性规划，以及对第1版中详尽的、几乎涉及到每一小节的修订。这些修订看似细微，实际上非常重要。书中引入了“循环不变式”，并贯穿始终地用来证明算法的正确性。在不改动数学和分析重点的前提下，作者将第1版中的许多数学基础知识从第一部分移到了附录中。

二、本书的特点

本书在进行算法分析的过程中，保持了很好的数学严谨性。书中的分析和设计可以被具有各种水平的读者所理解。相对来说，每一章都可以作为一个相对独立的单元来教授或学习。书中的算法以英语加伪代码的形式给出，只要有一点程序设计经验的人都能读懂，并可以用任何计算机语言（如C/C++和Java等）方便地实现。在书中，作者将算法的讨论集中在一些比较现代的例子中，它们来自分子生物学（如人类基因项目）、商业和工程等领域。每一小节通常以对相关历史素材的讨论结束，讨论了在每一算法领域的原创研究。

本书的特点可以概括为以下几个方面：

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，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”，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易懂的语言进行说明，并采用了大量插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，直接应用。

注重算法设计的效率，对所有的算法进行了仔细、精确的运行时间分析，有利于进一步改进算法。

三、本书的用法

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。

每一章都是独立的，读者只需将注意力集中到最感兴趣的章节阅读。

1. 适合作为教材或教学参考书。

本书兼顾通用性与系统性，覆盖了许多方面的内容。本书不但阐述通俗、严谨，而且提供了大量练习和思考题。针对每一节的内容，都给出了数量和难度不等的练习题。练习题用于考察对基本内容的掌握程度，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。

2. 适合作为工程技术手册和参考书。

对于工程技术人员来说，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. 适合作为工具书。

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。

参加本书翻译的人员有潘金贵、顾铁成、李成法、叶懋、戴世东、李春洪、王亚丽、叶保留、高青、左伟兴、徐健、李桂琼、张剑、吴堃、冯明辉、姚建等同志。由于我们的水平所限，翻译过程中错误在所难免，请广大读者批评指正。

在此，我们还要感谢在翻译工作过程中为我们提供帮助的所有人。

译者

2005年10月

前 言

本书提供了对当代计算机算法研究的一个全面、综合性的介绍。书中给出了多个算法，并对它们进行了较为深入的分析，使得这些算法的设计和 analysis 易于被各个层次的读者所理解。力求在不牺牲分析的深度和数学严密性的前提下，给出深入浅出的说明。

书中每一章都给出了一个算法、一种算法设计技术、一个应用领域或一个相关的主题。算法是用英语和一种“伪代码”来描述的，任何有一点程序设计经验的人都能看得懂。书中给出了 230 多幅图，说明各个算法的工作过程。我们强调将算法的效率作为一种设计标准，对书中的所有算法，都给出了关于其运行时间的详细分析。

本书主要供本科生和研究生的算法或数据结构课程使用。因为书中讨论了算法设计中的工程问题及其数学性质，因此，本书也可以供专业技术人员自学之用。

本书是第 2 版。在这个版本里，我们对全书进行了更新。所做的改动从新增了若干章，到个别语句的改写。

致使用本书的教师

本书的设计目标是全面、适用于多种用途。它可用于若干课程，从本科生的数据结构课程到研究生的算法课程。由于书中给出的内容比较多，只讲一学期一般讲不完，因此，教师们应该将本书看成是一种“缓存区”或“瑞典式自助餐”，从中挑选出能最好地支持自己希望教授的课程的内容。

教师们会发现，要围绕自己所需的各个章节来组织课程是比较容易的。书中的各章都是相对独立的，因此，你不必担心意想不到的或不必要的各章之间的依赖关系。每一章都是以节为单位，内容由易到难。如果将本书用于本科生的课程，可以选用每一章的前面几节内容；在研究生课程中，则可以完整地讲授每一章。

全书包含 920 多个练习题和 140 多个思考题。每一节结束时给出练习题，每一章结束时给出一些思考题。练习一般比较短，用于检查学生对书中内容的基本掌握情况。有一些是简单的自启发性思考题，另一些则要更充实，可以作为家庭作业布置给学生。每一章后的思考题都是些叙述较为详细的实例研究，它们常常会介绍一些新的知识。一般来说，这些思考题都会包含几个小问题，引导学生逐步得到问题的解。

在那些不太适合于本科生、更适合于研究生的章节和练习前面，都加上了星号(*)。带星号的章节也不一定就比不带星号的更难，但可能要求了解更多的数学知识。类似地，带星号的练习可能要求有更好的数学背景或创造力。

致使用本书的学生

希望本教材能为同学们提供关于算法这一领域的有趣介绍。我们力求使书中给出的每一个算法都易于理解和有趣。为了在同学们遇到不熟悉或比较困难的算法时提供帮助，我们逐个步骤地描述每一个算法。此外，为了便于大家理解书中对算法的分析，对于其中所需的数学知识，我们给出了详细的解释。如果对某一主题已经有所了解，会发现根据书中各章的编排顺序，可以跳过一些介绍性的小节，直接阅读更高级的内容。

本书是一本大部头著作，读者所修的课程可能只讲授其中的一部分。我们试图使它能成为一本现在对读者有用的教材，将来在读者的职业生涯中，也能成为一本案头的数学参考书或工程实践手册。

阅读本书需要哪些预备知识呢？

- 读者需要有一些程序设计方面的经验，尤其需要理解递归过程和简单的数据结构，如数组和链表。
- 读者应该能较为熟练地利用数学归纳法进行证明。书中有一些内容要求读者具备初等积分方面的知识。除此之外，本书的第一部分和第八部分将介绍读者需要用到所有数学技巧。

致使用本书的专业技术人员

本书涉及的主题非常广泛，因而是一本很好的算法参考手册。因为每一章都是相对独立的，因而，读者可以重点查阅自己感兴趣的专题。

在我们所讨论的算法中，多数都有着极大的实用价值。因此，我们在书中涉及了算法实现方面的考虑和其他工程方面的问题。对于那些为数不多的、主要具有理论研究价值的算法，通常还给出其实用的替代算法。

如果希望实现这些算法中的任何一个，就会发现，将书中的伪代码翻译成读者熟悉的某种程序设计语言，是一件相当直接的事。伪代码被设计成能够清晰简明地描述每一个算法。因此，我们不考虑出错处理和其他需要对读者所用编程环境有特定假设的软件工程问题。我们力求简单而直接地给出每一个算法，而不会让某种特定程序设计语言的特殊性掩盖算法的本质内容。

致我们的同事

我们在本书中给出了详尽的参考文献。每一章在结束时都给出了“本章注记”，介绍一些历史性的细节和参考文献。但是，各章的注记并没有提供整个算法领域的全部参考文献。有一点可能是让人难以置信的，就是在本书这样一本大部头中，由于篇幅的原因，很多有趣的算法都没能包括进来。

尽管学生们发来了大量的请求，希望我们提供思考题和练习的解答，但我们还是决定不提供思考题和练习的参考答案，以彻底打消学生们试图查阅答案、而不是自己动手得出答案的念头。

第 2 版中所做的修改

在本书的第 1 版和第 2 版之间有哪些变化呢？这些变化可以说不太大，也可以说很大，具体要看读者怎么看待这些变化了。

快速地浏览一遍目录，就会发现，第 1 版中的多数章节在第 2 版中都出现了。在第 2 版中，去掉了两章和一些节的内容，增加了三章新的内容。除了这三章新的内容外，还增加了四个新节。如果单从目录来判断第 2 版中改动的范围的话，得出的结论很可能是改动不大。

但实际上，第 2 版中的改动远不止目录中显示的那样。以下列出了第 2 版中所做的主要改动（没有经过特别的排序）：

- 新增了 Clifford Stein 这位合著者。
- 修正了一些错误。有多少错误呢？可以说有几个吧。
- 增加了新的三章内容：
 - 第 1 章讨论了算法在计算中的作用。
 - 第 5 章介绍了概率分析和随机算法。如第 1 版中一样，这些主题贯穿了整本书。
 - 第 29 章专门讨论了线性规划。
- 在从第 1 版保留下来的各章中，增加了关于以下主题的新节：
 - 完全散列技术(perfect hashing)(第 11.5 节)。
 - 动态规划的两个应用(第 15.1 节和第 15.5 节)。

- 利用随机化和线性规划技术的近似算法(第 35.4 节)。
- 为了使更多的算法可以更早地在书中出现,第 1 版中有关数学背景知识的三章内容从第一部分移到了附录中,即现在的第八部分。
- 新增了 40 多个思考题和超过 185 个练习题。
- 明确地使用循环不变式来证明算法的正确性。第一个循环不变式出现在第 2 章中;整本书中循环不变式共用到了数十次。
- 很多概率分析都进行了重新编写。特别地,我们在十多处用到了“指示器随机变量”(indicator random variable)技术,它简化了概率分析,在随机变量之间互相依赖的情况下,尤其如此。
- 扩展和更新了各章注记和参考文献。参考文献增加了 50% 以上,我们也提及了许多在第 1 版印刷之后,新出现的算法研究成果。

我们还进行了以下的改动:

- 有关递归求解的那一章中,不再包含迭代方法了。在第 4.2 节中,我们将递归树“提升”为一种方法。我们发现,与对递归式进行迭代相比,画出递归树后出错的可能性小了。但是,我们也指出了递归树的最佳用途,即利用它来产生猜测,再利用替代方法对猜测进行验证。
- 快速排序(第 7.1 节)中用到的划分方法与期望线性时间顺序统计算法(expected linear-time order-statistic algorithm,第 9.2 节)有所变化。现在,我们采用了 Lomuto 提出的方法,并将该方法与指示器随机变量一起使用,从而可以使分析更为简单一些。第 1 版中采用的是 Hoare 提出的方法,它现在是作为第 7 章中的一个思考题出现的。
- 在第 11.3.3 节中,修改了对通用散列技术(universal hashing)的讨论,将其纳入到关于完美散列的讨论中。
- 在第 12.4 节中,对随机构造二叉查找树的高度,给出了一个简单得多的分析。
- 对动态规划元素的讨论(第 15.3 节)和对贪心算法元素的讨论(第 16.2 节)大大地扩展了。关于活动选择问题的解释在贪心算法一章中开始出现,有助于读者搞清楚动态规划与贪心算法之间的关系。
- 在第 21.4 节中,我们换掉了对不相交-集合-并(disjoint-set-union)数据结构运行时间的证明,代之以利用潜势方法(potential method)导出一个紧致界的证明。
- 在第 22.5 节中,对强连通子图算法正确性的证明更简单、清晰,也更直接了。
- 对讨论单源最短路径的第 24 章做了重新组织,把对基本性质的证明移到了各自的节中。这种新的结构使我们更早地将注意力放在算法上。
- 第 34.5 节给出了对 NP 完全问题的一个有所扩展的综述,并新增了对哈密顿回路(hamiltonian-cycle)与子集和(subset-sum)问题的 NP 完全性的证明。

对书中的每一节,几乎都做了重新编辑,修正了说明和证明中的错误,使之更简单明了。

网站

本书自第 1 版后的另一项变化就是拥有了自己的网站:<http://mitpress.mit.edu/algorithms/>。读者可以通过该网站报告在书中发现的错误,得到已知错误的清单,或者提出建议;欢迎大家提出意见和建议。我们特别欢迎大家提出一些关于新的练习题和思考题的想法,但请同时提供问题的解答。

我们对不能亲自答复所有的意见和建议表示遗憾。

第 1 版致谢

很多朋友和同行都为本书做出了很大的贡献。在此对你们的帮助和富有建设性的意见表示感谢。

麻省理工学院(MIT)的计算机科学实验室(Laboratory for Computer Science)为我们提供了一个理想的工作环境。在这个实验室里,计算理论小组的同事们特别支持和容忍我们,因为我们不断地请他们对本书的各个章节提出批评和建议。我们特别要感谢 Baruch Awerbuch, Shafi Goldwasser, Leo Guibas, Tom Leighton, Albert Meyer, David Shmoys, 以及 Éva Tardos。感谢 William Ang, Sally Bemus, Ray Hirschfeld 以及 Mark Reinhold, 他们使我们的机器(DEC Microvax, Apple Macintosh 以及 Sun Sparc 工作站)能够始终保持正常运行,并在我们超过了编译时间期限时,帮助我们重新编译TeX。在 Charles Leiserson 暂时离开麻省理工学院的那段时间里, Thinking Machine 公司为他写作本书方面的工作提供了部分支持。

很多同行在其他学校的一些课程中,都使用了本书的初稿作为教材。他们提供了大量有关错误修正和内容修订方面的建议。我们特别希望感谢 Richard Beigel, Andrew Goldberg, Joan Lucas, Mark Overmars, Alan Sherman 以及 Diane Souvaine。

在我们所教授的课程中,很多助教也为书中内容的形成做出了重要的贡献。我们特别要感谢 Alan Baratz, Bonnie Berger, Aditi Dhagat, Burt Kaliski, Arthur Lent, Andrew Moulton, Marios Papaefthymiou, Cindy Phillips, Mark Reinhold, Phil Rogaway, Flavio Rose, Arie Rudich, Alan Sherman, Cliff Stein, Susmita Sur, Gregory Troxel, 以及 Margaret Tuttle。

很多人提供了其他有价值的技术支持。Denise Sergent 花了大量时间在麻省理工学院图书馆里查阅整理参考文献。Maria Sensale 是我们阅览室的资料管理员,始终是那么乐于提供帮助。能使用 Albert Meyer 的私人藏书,帮我们节省了大量准备章节注记的时间。Shlomo Kipnis, Bill Niehaus 以及 David Wilson 校正了旧的练习题,编写了一些新的练习题,并准备了有关练习题解答的注解。Marios Papaefthymiou 和 Gregory Troxel 缩写了本书的索引。在过去的几年里,我们的秘书 Inna Radzihovsky, Denise Sergent, Gayle Sherman, 特别是 Be Blackburn, 都在本书的形成过程中,提供了无尽的支持,在此对他们表示感谢。

本书早期的初稿中,有许多错误都是由学生们发现的。我们特别要感谢 Bobby Blumofe, Bonnie Eisenberg, Raymond Johnson, John Keen, Richard Lethin, Mark Lillibridge, John Pizaris, Steve Ponzio 以及 Margaret Tuttle, 他们仔细地阅读了本书。

同行们对本书的某些章节或某些算法提供了重要的意见和建议,在此深表感谢。我们特别要感谢 Bill Aiello, Alok Aggarwal, Eric Bach, Vašek Chvátal, Richard Cole, Johan Hastad, Alex Ishii, David Johnson, Joe Kilian, Dina Kravets, Bruce Maggs, Jim Orlin, James Park, Thane Plambeck, Hershel Safer, Jeff Shallit, Cliff Stein, Gil Strang, Bob Tarjan, 以及 Paul Wang。有几位同行无私地提供了一些思考题;我们特别要感谢 Andrew Goldberg, Danny Sleator 以及 Umesh Vazirani。

在写作本书的过程中,与麻省理工学院出版社及 McGraw-Hill 的合作始终是非常愉快的。我们特别要感谢麻省理工学院出版社的 Frank Satlow, Terry Ehling, Larry Cohen, 以及 Lorrie Lejeune, 以及 McGraw-Hill 的 David Shapiro, 感谢他们给予的鼓励、支持和耐心。尤其要感谢 Larry Cohen 所做的出色的审阅工作。

第 2 版致谢

当我们请 Julie Sussman, P. P. A 来担当本书第 2 版的技术审阅人时,我们并不知道自己有

多么幸运。Julie 除了编辑技术内容外，还热情地编辑了我们的文字部分。想到 Julie 在我们早期的初稿中发现了多少问题，就让我们觉得汗颜。想一想她在第 1 版中发现了多少错误(不幸的是，是在印刷之后)，在这一版中，她能发现如此多的错误就不足为奇了。此外，Julie 牺牲了她个人的计划来方便我们的安排；在她去维尔京群岛旅行时，甚至还随身带了某些章节的稿子！Julie，对于你所完成的令人惊叹的工作，我们怎么感谢都是不够的。

在完成第 2 版时，本书的作者分别在达特茅斯学院的计算机科学系和麻省理工学院的计算机科学实验室工作。这两个单位都提供了令人兴奋的工作环境，感谢我们的同事们提供的支持。

遍布世界各地的朋友和同行们提供了许多建议和意见，它们引导着我们的写作。非常感谢 Sanjeev Arora, Javed Aslam, Guy Blelloch, Avrim Blum, Scot Drysdale, Hany Farid, Hal Gabow, Andrew Goldberg, David Johnson, Yanlin Liu, Nicolas Schabanel, Alexander Schrijver, Sasha Shen, David Shmoys, Dan Spielman, Gerald Jay Sussman, Bob Tarjan, Mikkel Thorup, 以及 Vijay Vazirani。

很多老师和同行都教给我们许多有关算法的知识。特别要感谢我们的老师 Jon L. Bentley, Bob Floyd, Don Knuth, Harold Kuhn, H. T. Kung, Richard Lipton, Arnold Ross, Larry Snyder, Michael I. Shamos, David Shmoys, Ken Steiglitz, Tom Szymanski, Eva Tardos, Bob Tarjan, 以及 Jeffrey Ullman。

感谢我们在麻省理工学院和达特茅斯所授算法课程的许多助教做出的工作，他们是 Joseph Adler, Craig Barrack, Bobby Blumofe, Roberto De Prisco, Matteo Frigo, Igal Galperin, David Gupta, Raj D. Iyer, Nabil Kahale, Sarfraz Khurshid, Stavros Kolliopoulos, Alain Leblanc, Yuan Ma, Maria Minkoff, Dimitris Mitsouras, Alin Popescu, Harald Prokop, Sudipta Sengupta, Donna Slonim, Joshua A. Tauber, Sivan Toledo, Elisheva Werner-Reiss, Lea Wittie, Qiang Wu, 以及 Michael Zhang。

为我们提供计算机支持的包括麻省理工学院的 William Ang, Scott Blomquist 和 Greg Shomo, 以及达特茅斯的 Wayne Cripps, John Konkle 和 Tim Tregubov。还要感谢麻省理工学院的 Be Blackburn, Don Dailey, Leigh Deacon, Irene Sebeda 和 Cheryl Patton Wu, 以及达特茅斯的 Phyllis Bellmore, Kelly Clark, Delia Mauceli, Sammie Travis, Deb Whiting 和 Beth Young, 感谢他们提供的管理方面的支持。达特茅斯的 Michael Fromberger, Brian Campbell, Amanda Eubanks, Sung Hoon Kim 以及 Neha Narula 也提供了及时的支持。

有许多人报告了他们在第 1 版中发现的错误。我们要感谢以下的人，其中的每一个人都是首先报告在第 1 版中发现的某个错误的：Len Adleman, Selim Akl, Richard Anderson, Juan Andrade-Cetto, Gregory Bachelis, David Barrington, Paul Beame, Richard Beigel, Margrit Betke, Alex Blakemore, Bobby Blumofe, Alexander Brown, Xavier Cazin, Jack Chan, Richard Chang, Chienhua Chen, Ien Cheng, Hoon Choi, Drue Coles, Christian Collberg, George Collins, Eric Conrad, Peter Csaszar, Paul Dietz, Martin Dietzfelbinger, Scot Drysdale, Patricia Ealy, Yaakov Eisenberg, Michael Ernst, Michael Formann, Nedim Fresko, Hal Gabow, Marek Galecki, Igal Galperin, Luisa Gargano, John Gately, Rosario Genario, Mihaly Gereb, Ronald Greenberg, Jerry Grossman, Stephen Guattery, Alexander Hartemik, Anthony Hill, Thomas Hofmeister, Mathew Hostetter, Yih-Chun Hu, Dick Johnsonbaugh, Marcin Jurdzinski, Nabil Kahale, Fumiaki Kamiya, Anand Kanagala, Mark Kantrowitz, Scott Karlin, Dean Kelley, Sanjay Khanna, Haluk Konuk, Dina Kravets, Jon Kroger, Bradley Kuszmaul, Tim Lambert, Hang Lau, Thomas Lengauer, George Madrid, Bruce Maggs, Victor Miller, Joseph Muskat,

Tung Nguyen, Michael Orlov, James Park, Seongbin Park, Ioannis Paschalidis, Boaz Patt-Shamir, Leonid Peshkin, Patricio Poblete, Ira Pohl, Stephen Ponzio, Kjell Post, Todd Poynor, Colin Prepscius, Sholom Rosen, Dale Russell, Hershel Safer, Karen Seidel, Joel Seiferas, Erik Seligman, Stanley Selkow, Jeffrey Shallit, Greg Shannon, Micha Sharir, Sasha Shen, Norman Shulman, Andrew Singer, Daniel Sleator, Bob Sloan, Michael Sofka, Volker Strumpfen, Lon Sunshine, Julie Sussman, Asterio Tanaka, Clark Thomborson, Nils Thommesen, Homer Tilton, Martin Tompa, Andrei Toom, Felzer Torsten, Hirendu Vaishnav, M. Veldhorst, Luca Venuti, Jian Wang, Michael Wellman, Gerry Wiener, Ronald Williams, David Wolfe, Jeff Wong, Richard Woundy, Neal Young, Huaiyuan Yu, Tian Yuxing, Joe Zachary, Steve Zhang, Florian Zschoke, 以及 Uri Zwick。

我们的许多同行提供了经过深入思考的评审意见, 填写了一份很长的调查表。我们要感谢评审人 Nancy Amato, Jim Aspnes, Kevin Compton, William Evans, Peter Gacs, Michael Goldwasser, Andrzej Proskurowski, Vijaya Ramachandran 以及 John Reif。我们还要感谢以下人员, 感谢他们将调查问卷寄了回来: James Abello, Josh Benaloh, Bryan Beresford-Smith, Kenneth Blaha, Hans Bodlaender, Richard Borie, Ted Brown, Domenico Cantone, M. Chen, Robert Cimikowski, William Clocksin, Paul Cull, Rick Decker, Matthew Dickerson, Robert Douglas, Margaret Fleck, Michael Goodrich, Susanne Hambruch, Dean Hendrix, Richard Johnsonbaugh, Kyriakos Kalorkoti, Srinivas Kankanahalli, Hikyoo Koh, Steven Lindell, Errol Lloyd, Andy Lopez, Dian Rae Lopez, George Luckner, David Maier, Charles Martel, Xiannong Meng, David Mount, Alberto Policriti, Andrzej Proskurowski, Kirk Pruhs, Yves Robert, Guna Seetharaman, Stanley Selkow, Robert Sloan, Charles Steele, Gerard Tel, Murali Varanasi, Bernd Walter, 以及 Alden Wright。我们希望能够将你们所有的建议付诸实现。唯一的问题是如果我们真采纳了所有建议的话, 第 2 版的篇幅就会达到大约 3000 页之巨!

第 2 版是用 $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ 编排出来的。Michael Downes 将 \LaTeX 宏从古典(classic) \LaTeX 转换成了 $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$, 并将文本文件转换成使用这些新的宏。David Jones 还提供了 $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$ 支持。第 2 版中的插图是由本书作者利用 MacDraw-Pro 制作而成的。如在第 1 版中一样, 索引是用 Windex 编译生成的, 这是一个由作者用 C 语言编写的程序。参考文献是用 \BIBTeX 生成的。Ayorkor Mills-Tettey 和 Rob Leathern 帮助将插图转换成了 MacDraw Pro 格式, Ayorkor 还对我们的参考文献进行了检查。

就像在编写本书的第 1 版时一样, 与麻省理工学院出版社和 McGraw-Hill 的合作是件令人愉快的事。我们的编辑, 麻省理工学院出版社的 Bob Prior 和 McGraw-Hill 的 Betsy Jones 容忍了我们的各种怪毛病, 并用胡萝卜加大棒的方式来不断督促我们向前走。

最后, 非常感谢我们各自的妻子 Nicole Cormen, Gail Rivest 和 Rebecca Ivry, 还有我们的孩子: Ricky, William 和 Debby Leiserson; Alex 和 Christopher Rivest; Molly, Noah 和 Benjamin Stein, 还有我们的父母, Renee 和 Perry Cormen, Jean 和 Mark Leiserson, Shirley 和 Lloyd Rivest, 以及 Irene 和 Ira Stein, 感谢他们在我们写作本书过程中给予的爱和支持。正是由于有了来自家庭的耐心和鼓励, 本书的写作出版工作才得以完成。谨将此书献给他们。

THOMAS H. CORMEN 汉诺威, 新罕布什尔州
 CHARLES E. LEISERSON 剑桥, 马萨诸塞州
 RONALD L. RIVEST 剑桥, 马萨诸塞州
 CLIFFORD STEIN 汉诺威, 新罕布什尔州

目 录

出版者的话
专家指导委员会
译者序
前言

第一部分 基础知识

引言	1
第 1 章 算法在计算中的作用	3
1.1 算法	3
1.2 作为一种技术的算法	6
第 2 章 算法入门	9
2.1 插入排序	9
2.2 算法分析	12
2.3 算法设计	16
2.3.1 分治法	16
2.3.2 分治法分析	20
第 3 章 函数的增长	26
3.1 渐近记号	26
3.2 标准记号和常用函数	31
第 4 章 递归式	38
4.1 代换法	38
4.2 递归树方法	40
4.3 主方法	43
*4.4 主定理的证明	45
4.4.1 取正合幂时的证明	45
4.4.2 上取整函数和下取整函数	48
第 5 章 概率分析和随机算法	54
5.1 雇用问题	54
5.2 指示器随机变量	56
5.3 随机算法	58
*5.4 概率分析和指示器随机变量的进一步 使用	62
5.4.1 生日悖论	62
5.4.2 球与盒子	64
5.4.3 序列	64

5.4.4 在线雇用问题 66

第二部分 排序和顺序统计学

引言	71
第 6 章 堆排序	73
6.1 堆	73
6.2 保持堆的性质	74
6.3 建堆	76
6.4 堆排序算法	78
6.5 优先级队列	80
第 7 章 快速排序	85
7.1 快速排序的描述	85
7.2 快速排序的性能	88
7.3 快速排序的随机化版本	90
7.4 快速排序分析	91
7.4.1 最坏情况分析	91
7.4.2 期望的运行时间	92
第 8 章 线性时间排序	97
8.1 排序算法时间的下界	97
8.2 计数排序	98
8.3 基数排序	100
8.4 桶排序	102
第 9 章 中位数和顺序统计学	108
9.1 最小值和最大值	108
9.2 以期望线性时间做选择	109
9.3 最坏情况线性时间的选择	112

第三部分 数据结构

引言	117
第 10 章 基本数据结构	119
10.1 栈和队列	119
10.2 链表	121
10.3 指针和对象的实现	124
10.4 有根树的表示	127
第 11 章 散列表	132

11.1 直接寻址表	132	17.3 势能方法	249
11.2 散列表	133	17.4 动态表	251
11.3 散列函数	137	17.4.1 表扩张	251
11.3.1 除法散列法	138	17.4.2 表扩张和收缩	253
11.3.2 乘法散列法	138		
*11.3.3 全域散列	139		
11.4 开放寻址法	142		
*11.5 完全散列	146		
第12章 二叉查找树	151		
12.1 二叉查找树	151		
12.2 查询二叉查找树	153		
12.3 插入和删除	155		
*12.4 随机构造的二叉查找树	158		
第13章 红黑树	163		
13.1 红黑树的性质	163		
13.2 旋转	165		
13.3 插入	167		
13.4 删除	172		
第14章 数据结构的扩张	181		
14.1 动态顺序统计	181		
14.2 如何扩张数据结构	184		
14.3 区间树	186		
第四部分 高级设计和分析技术			
导论	191		
第15章 动态规划	192		
15.1 装配线调度	192		
15.2 矩阵链乘法	197		
15.3 动态规划基础	202		
15.4 最长公共子序列	208		
15.5 最优二叉查找树	212		
第16章 贪心算法	222		
16.1 活动选择问题	222		
16.2 贪心策略的基本内容	228		
16.3 赫夫曼编码	231		
*16.4 贪心法的理论基础	236		
*16.5 一个任务调度问题	239		
第17章 平摊分析	244		
17.1 聚集分析	244		
17.2 记账方法	247		
17.3 势能方法	249		
17.4 动态表	251		
17.4.1 表扩张	251		
17.4.2 表扩张和收缩	253		
第五部分 高级数据结构			
概述	261		
第18章 B树	263		
18.1 B树的定义	265		
18.2 对B树的基本操作	267		
18.3 从B树中删除关键字	272		
第19章 二项堆	277		
19.1 二项树与二项堆	278		
19.1.1 二项树	278		
19.1.2 二项堆	279		
19.2 对二项堆的操作	281		
第20章 斐波那契堆	291		
20.1 斐波那契堆的结构	291		
20.2 可合并堆的操作	293		
20.3 减小一个关键字与删除一个结点	299		
20.4 最大度数的界	302		
第21章 用于不相交集的数据结构	305		
21.1 不相交集上的操作	305		
21.2 不相交集的链表表示	307		
21.3 不相交集森林	310		
*21.4 带路径压缩的按秩合并的分析	312		
第六部分 图算法			
引言	321		
第22章 图的基本算法	322		
22.1 图的表示	322		
22.2 广度优先搜索	324		
22.3 深度优先搜索	330		
22.4 拓扑排序	336		
22.5 强连通分支	338		
第23章 最小生成树	344		
23.1 最小生成树的形成	345		
23.2 Kruskal算法和Prim算法	348		
第24章 单源最短路径	357		

24.1	Bellman-Ford 算法	362	第 31 章	有关数论的算法	522
24.2	有向无回路图中的单源最短路径	364	31.1	初等数论概念	522
24.3	Dijkstra 算法	366	31.2	最大公约数	526
24.4	差分约束与最短路径	370	31.3	模运算	529
24.5	最短路径性质的证明	373	31.4	求解模线性方程	533
第 25 章	每对顶点间的最短路径	381	31.5	中国余数定理	535
25.1	最短路径与矩阵乘法	382	31.6	元素的幂	538
25.2	Floyd-Warshall 算法	386	31.7	RSA 公钥加密系统	540
25.3	稀疏图上的 Johnson 算法	391	*31.8	素数的测试	544
第 26 章	最大流	396	*31.9	整数的因子分解	550
26.1	流网络	396	第 32 章	字符串匹配	557
26.2	Ford-Fulkerson 方法	400	32.1	朴素的字符串匹配算法	558
26.3	最大二分匹配	408	32.2	Rabin-Karp 算法	560
*26.4	压人与重标记算法	411	32.3	利用有限自动机进行字符串匹配	563
*26.5	重标记与前移算法	419	*32.4	Knuth-Morris-Pratt 算法	568
第七部分 算法研究问题选编			第 33 章	计算几何学	575
引言		431	33.1	线段的性质	575
第 27 章	排序网络	433	33.2	确定任意一对线段是否相交	580
27.1	比较网络	433	33.3	寻找凸包	584
27.2	0-1 原理	436	33.4	寻找最近点对	591
27.3	双调排序网络	438	第 34 章	NP 完全性	597
27.4	合并网络	440	34.1	多项式时间	600
27.5	排序网络	442	34.2	多项式时间的验证	605
第 28 章	矩阵运算	446	34.3	NP 完全性与可归约性	608
28.1	矩阵的性质	446	34.4	NP 完全性的证明	615
28.2	矩阵乘法的 Strassen 算法	451	34.5	NP 完全问题	620
28.3	求解线性方程组	455	34.5.1	团问题	620
28.4	矩阵求逆	464	34.5.2	顶点覆盖问题	622
28.5	对称正定矩阵与最小二乘逼近	467	34.5.3	哈密顿回路问题	623
第 29 章	线性规划	473	34.5.4	旅行商问题	626
29.1	标准型和松弛型	477	34.5.5	子集和问题	627
29.2	将问题表达为线性规划	482	第 35 章	近似算法	633
29.3	单纯形算法	485	35.1	顶点覆盖问题	634
29.4	对偶性	495	35.2	旅行商问题	636
29.5	初始基本可行解	498	35.2.1	满足三角不等式的旅行商问题	636
第 30 章	多项式与快速傅里叶变换	506	35.2.2	一般旅行商问题	638
30.1	多项式的表示	507	35.3	集合覆盖问题	640
30.2	DFT 与 FFT	511	35.4	随机化和线性规划	643
30.3	有效的 FFT 实现	516	35.5	子集和问题	646