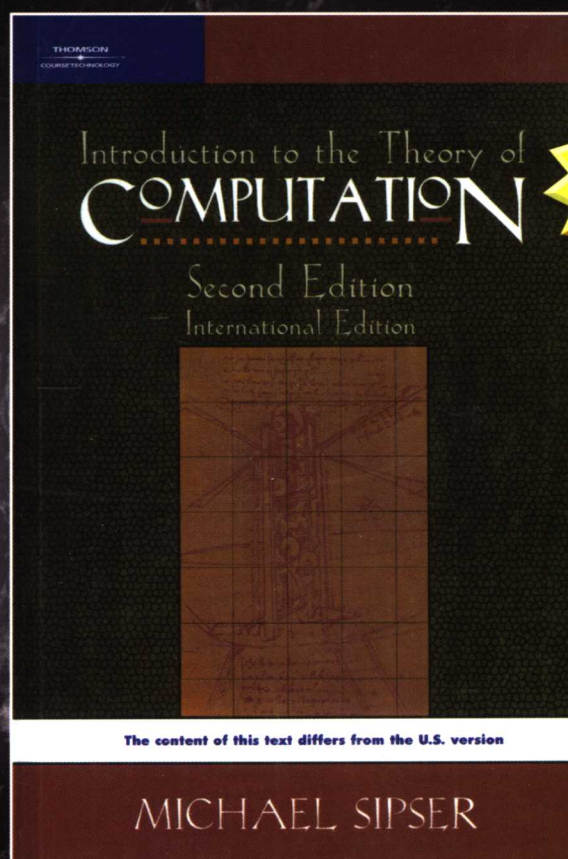


计 算 机 科 学 丛 书

THOMSON

计算理论导引

(美) Michael Sipser 著 唐常杰 陈鹏 向勇 刘齐宏 译
麻省理工学院



第2版

Introduction to
the Theory of Computation
Second Edition



机械工业出版社
China Machine Press

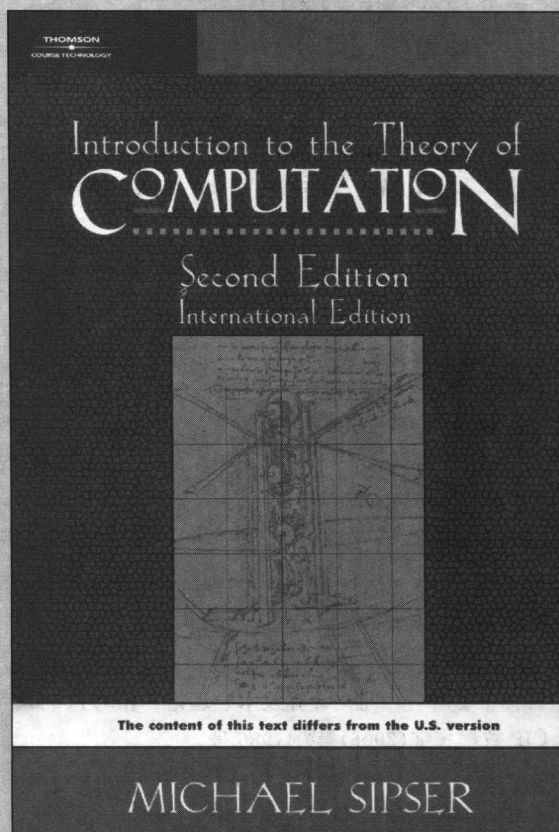


计 算 机 科 学 丛 书

第2版

计算理论导引

(美) Michael Sipser 著 唐常杰 陈鹏 向勇 刘齐宏 译
麻省理工学院



Introduction to the Theory of Computation
Second Edition



机械工业出版社
China Machine Press

本书是计算理论领域的经典著作,被国外多所大学选用为教材。本书以注重思路、深入引导为特色,系统地介绍计算理论的三大主要内容:自动机与语言、可计算性理论和计算复杂性理论。同时,对可计算性和计算复杂性理论中的某些高级内容作了重点讲解。全书通过启发性的问题、精彩的结果和待解决问题来引导读者挑战此领域中的高层次问题。新版的一大亮点是增加了更多习题、教辅资料和部分习题解答,更加有利于教学。

全书叙述由浅入深、详略得当,重点突出,不拘泥于技术细节。可作为计算机专业高年级本科生和研究生的教材,也可作为相关专业教师和研究人员的参考书。

Michael Sipser: Introduction to the Theory of Computation, Second Edition (ISBN 0-619-21764-2).

Copyright © 2006 by Course Technology, a division of Thomson Learning, Inc.

Original language published by Thomson Learning (a division of Thomson Learning Asia Pte Ltd). All rights reserved.

China Machine Press is authorized by Thomson Learning to publish and distribute exclusively this simplified Chinese edition. This edition is authorized for sale in the People's Republic of China only (excluding Hong Kong, Macao SAR and Taiwan). Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体字翻译版由汤姆森学习出版集团授权机械工业出版社独家出版发行。此版本仅限在中华人民共和国境内(不包括中国香港、澳门特别行政区及中国台湾)销售。未经授权的本书出口将被视为违反版权法的行为。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

981-265-473-9

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:01-2005-4495

图书在版编目(CIP)数据

计算理论导引(第2版)/(美)西普塞(Sipser, M.)著;唐常杰等译. -北京:机械工业出版社, 2006.7

(计算机科学丛书)

书名原文: Introduction to the Theory of Computation, Second Edition, International Edition

ISBN 7-111-19028-9

I. 计… II. ①西… ②唐… III. 计算技术—理论 IV. TP30

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 041986 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:朱起飞

北京诚信伟业印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2006 年 7 月第 2 版第 1 次印刷

184mm×260mm·18 印张

定价:36.00 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中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，不仅擘划了研究的范畴，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: hzsj@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

五年前为计算理论课程选择教材时，海外友人介绍了眼前这本由麻省理工学院的名师 Michael Sipser 编写的名著。五年教学实践表明，此书前三章可供高年级本科生选修，后七章足够研究生钻研，是同类教材中我教得最愉悦、学生学起来最有趣的一本教科书。

计算理论是一门理论修养课，很难断言某章某节能够立竿见影地用于读者的某项科研。我的学生(攻读数据库、数据挖掘和知识工程方向)学习此课一两年后，以过来人身份发出感慨，这门课使他们思路开阔、思维严密、观点提高、点子增多，从而终身受益。在他们的工程性论文中，也不时出现关于可计算性和复杂度方面的亮点，提高了论文的深度和质量。

26 年前初入此门时，读过 J. D. Ullman 和 J. E. Hopcroft 的书以及 S. Eilenberg 的名著《语言、自动机和机器》，在 S. Ginsburg 门下研究数据库理论时，学过他的大师之作《前后文无关语言理论》，教学中也用过 H. R. Lewis 的《计算理论基础》。上述书籍都是好书，但对于非纯理论方向的初学者，还是觉得 Michael Sipser 的这本书更为合适。

本书以注重思路、深入引导为特色。全书勾画了理论计算机科学的知识框架，囊括了形式语言、自动机、可计算性和计算复杂度等重要主题，试图为读者的计算机生涯奠定一个宽广坚实的理论基础。作者强调思想方法，难点均以思路先行；介绍背景如远山淡抹，化繁为简似近水浓描；释难以例，不拘泥于技术细节，铺垫伏笔，常迸发在数章之后。这些亮点表现了作者对问题的深刻理解和娴熟的教学艺术。每一主题的后部都给出精彩结果以作启发，展示待解决问题以设悬念，引导读者向此领域中的高层次问题攀登。全书文笔流畅，读来亲切，开卷读之概念易懂，合书思之脉络不忘。

在同类书被采用的列表中，本书已名列前茅。2005 年 12 月，在 Google 中以作者名和书名搜索到相关项目 8420 项。在 <http://www.amazon.com/gp/product/customer-reviews> 中有许多读者评论此书“best”、“one of the best”，也有人批评此书第 1 版无习题解答。所幸，第 2 版已弥补这一不足。新版修正了若干印刷错误，字句更加流畅，增加了部分内容、部分启发性习题、部分难题解答和教学辅助材料。一些重要内容，如 Myhill-Nerode 定理和 Rice 定理放到了专门的小节。在译文中，新概念首次出现时，大都标注了英文原文，另根据作者在网上发布的勘误表，对原文的个别错误做了校正；翻译过程中发现了少量尚未勘误的错误，翻译团队仔细讨论后，做了校正；按字母顺序列出了中英文对照原书索引术语。

翻译过程采用了团队模式。在初译后，进行了几次工作量更大的轮换修改和校正，全书由唐常杰统校。团队每位成员的工作都涉及了一半以上章节。本书由唐常杰、陈鹏、向勇、刘齐宏主译，刘胤田、朱明放、曾涛、段磊和李川都付出了艰辛的劳动。翻译团队成员在几年前读过由北京大学张立昂教授、王捍贫教授和黄雄老师合作翻译的第 1 版，翻译中不可避免地受到他们准确的词汇、流畅的文风的影响。在此意义上，新版译者不过是接过了先行者的接力棒，再把接力赛推进了一程。借此机会，对三位先行者表示衷心的感谢。

在五年的教学实践中,译者积累了 800 多页的 PPT 双语电子教案,一直放在出版社和个人网页上供自由下载,奉献给我国的读者。(参见机械工业出版社华章分社主页 <http://www.hzbook.com> 或 http://211.83.120.2/~tangchangjie/teach/tang_teching.htm。)

由于水平所限,译文难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

唐常杰

2006 年 1 月于四川大学 竹林村

译者简介

唐常杰



1981年在四川大学数学系获硕士学位, 1983~1986在美国南加利福尼亚大学师从 Seymour Ginsburg, 现为四川大学教授, 博士生导师。目前主要研究方向包括数据库、数据挖掘和基因表达式编程。出版专著四部、教科书五本, 发表研究论文两百余篇, 被 SCI、EI 检索 50 余篇。承担过国家自然科学基金和教育部基金项目共 10 项。曾获四川省科技进步二等奖两项, 光华科技奖励基金二等奖和全国优秀科技图书二等奖。担任多个国际会议的程序委员会委员或主席, 是中国计算机学会数据库专业委员会副主任, 第六届网络时代信息管理(WAIM 2005)大会主席, 四川省学术和技术带头人。主页: <http://cs.scu.edu.cn/~tangchangjie>

陈 鹏

四川大学讲师。曾获 2005 年中国青年实用软件设计大赛铜奖。主要研究方向为数据库与知识工程、图形图像。

向 勇

四川大学计算机软件与理论硕士, 现为成都电子机械高等专科学校计算机工程系讲师。主要研究方向包括数据库与知识工程和基因表达式编程。

刘齐宏

副教授。曾承担 10 余项省、市科技应用项目, 在两项国家自然科学基金项目作主研, 曾获四川省“科学技术进步人文社会科学科研成果奖”三等奖一项。现主要研究方向为数据库、数据挖掘、基因表达式编程、机器学习和专家系统。

第 1 版前言

写给学生

欢迎使用本书!

将要开始学习的是重要而又引人入胜的课题: 计算理论。它包括计算机硬件、软件以及某些应用的基本数学特性。这一课程试图回答什么是不能计算的, 什么是能计算的, 可以算多快, 要用多少存储, 以及采用什么计算模型等。这些问题与工程实践有着紧密的联系, 也具有纯理论的一面。

许多同学主动盼望学习这门课程, 有些同学可能只是为了完成计算机科学或者计算机工程的学位必需的理论课程学分——他们也许认为理论比较神秘、难学且用处不大。

通过学习, 读者会发现理论既不神秘、也不讨厌, 是好理解、甚至是有趣的。理论计算机科学有许多迷人而重要的思想, 同时它也有许多细小的、有时甚至是乏味的细节, 这些细节可能令人感到厌倦。学习任何一门新的课程都是一件艰苦的工作。但是, 如果能把它适当地表述出来, 学习就会变得容易和更愉快些。本书的一个基本目标是让读者接触到计算理论中真正令人激动的方面, 而不陷入单调乏味之中。当然, 对理论感兴趣的唯一途径是努力去学习并掌握它。

理论与实践是密切联系的, 计算理论为实际工作者提供了在计算机工程中使用的理性工具。要为具体的应用设计一个新的程序设计语言吗? 本课程中关于语法的内容迟早是会有用的。要进行字符串搜索和模式匹配吗? 不要忘了有穷自动机和正则表达式。遇到了一个看来需要比你能够提供的计算机时间还要多的问题吗? 想一想你学过的有关 NP 完全性的内容。各种应用领域, 如现代密码协议, 都依赖于在这里将要学习的理论原则。

理论是有意义的, 它向读者展示了计算机新的、简单的、更加优美的一面, 而通常我们把计算机看作一台复杂的机器。最好的计算机设计和应用出自完美的构思。一门理论课程可以提高审美意识, 帮助读者建立更加优秀的系统。

理论是实践的指南, 学习理论能够扩展你的思维。计算机技术更新很快, 专门的技术知识虽然今天有用, 但是仅仅在几年内就会变成过时的东西。而能力具有持久的价值, 课程应该注重培养思维能力、清楚准确的表达能力、解决问题的能力以及知道问题什么时候还没有解决的能力, 理论能够训练这些能力。

除了实际的考虑, 几乎每一位使用计算机的人都想了解这个神奇的创造, 它的能力, 以及它的局限性。为了解答某些基本问题, 在过去的 30 年里, 一个全新的数学分支已经确立。这里还有一个重大问题没有解决: 如果给定大的自然数, 例如有 500 位, 能够在合理的时间内把它分解成素数的乘积吗? 即使使用一台超级计算机, 现今还没人知道怎样才能在宇宙毁灭之前做完这件事! 因子分解问题与现代密码系统中的某些密码有关。去寻找一个快速的因子分解方法吧, 也许, 读者会因此而一举成名!

写给教师

本书是计算机学科高年级本科生或研究生的计算理论入门教材。它涉及计算理论的数学论述, 包括叙述和证明定理的基本技能。作者努力使本书适用于那些缺乏定理证明的基本训练的学生, 当然, 有较多这种经验的学生会学习得更轻松。

强调清楚和生动是本书叙述的一个特色，本课程对某些低层次的细节强调了直觉和“大的轮廓”。例如，虽然在第0章介绍了证明的归纳法以及其他的数学预备知识，但在后面部分它并不是重点。关于自动机的各种构造方法的正确性，一般不用归纳证明。只要叙述清楚，这些构造方法已经是令人信服的，不需进一步论证。归纳证明反而可能把学生搞糊涂而不是给人以启迪。归纳法是比较复杂的技术，可能还有些神秘。对十分明显的事情用归纳法作反复的说明可能会化简为繁、违反初衷，使学生认为数学证明是一种形式化手法，而不是教给他们懂得什么是有说服力的证据，什么不是有说服力的证据。

本书第二部分和第三部分没有采用伪码描述算法，而用了自然语言描述。书中没有花很多时间去设计图灵机(或任何其他形式模型)的程序。现在的学生都有程序设计的经历，觉得丘奇-图灵论题是不言自明的。因此我不去用很长的篇幅叙述用一个模型模拟另一个模型来说明它们的等价性。

除增加直观性和压缩某些细节外，本书内容组织符合计算理论中的典型标准。理论工作者将发现，素材的选取、术语以及内容的前后顺序都与其他广泛使用的教材一致。只在少数地方，当我发现标准的术语十分模糊或会引起混淆时，才引进了新的术语。例如，引进名词映射可归约性代替多一可归约性。

习题是学习与数学相关的科学必不可少的环节。书中的习题分成两大类，练习用来复习定义和概念。问题需要多动些脑筋。带星号的问题更难一些。本书努力使练习和问题令人感兴趣，并有挑战性。

反馈给作者

互联网为作者与读者之间的交流提供了新的机会。我收到很多电子邮件，对本书的初版提出了建议、赞许和批评，或者指出错误。请继续来函。只要有时间，我尽量亲自给每一个人回信。与本书有关的电子邮箱是

sipsrbook@math.mit.edu

另外，还有一个 Web 站点，包括一张勘误表。可能还有一些其他材料也要加入这个站点用来帮助教师和学生。请告诉我你希望在这里看到什么。这个站点的地址是

<http://www-math.mit.edu/~sipsr/book.html>

致谢

如果没有众多朋友、同事以及家人的帮助，我将无法完成这本书。

我要感谢帮助我形成科学观和教育风格的各位老师，其中有五位非常突出。尤其是我的论文指导导师 Manuel Blum，他以独有的方式激励学生，充分展现了他的激情和关怀。他是我和许多人的楷模。感谢 Richard Karp 将我领入复杂性理论的大门；John Addison 为我讲授逻辑并布置了那些精彩的家庭作业；Juris Hartmanis 使我了解了计算理论；还有我的父亲，他告诉了我什么是数学、计算机以及教学艺术。

本书源自我在麻省理工学院讲授了 15 年的一门课程的教案和笔记。班上的学生们通过我的讲解做了课程笔记，希望他们原谅我不能将所有人一一列出。我多年的助教 Avrim Blum、Thang Bui、Andrew Chou、Benny Chor、Stavros Cosmadakis、Aditi Dhagat、Wayne Goddard、Parry Husbands、Dina Kravets、Jakov Kućan、Brian O'Neill、Ioana Popescu 以及 Alex Russell 帮助我编辑和充实了这些笔记，并提供了部分家庭作业问题。

大约三年前，Tom Leighton 建议我写一本关于计算理论的教科书。我也曾多次有过这个念头，但正是 Tom 的建议才使我付诸行动。我非常感激和珍视他对于本书写作和其他许多事情的

慷慨建议。

我还想感谢 Eric Bach、Peter Beebee、Cris Calude、Marek Chrobak、Anna Chefter、Guang-Ien Cheng、Elias Dahlhaus、Michael Fischer、Steve Fisk、Lance Fortnow、Henry J. Friedman、Jack Fu、Seymour Ginsburg、Oded Goldreich、Brian Grossman、David Harel、Micha Hofri、Dung T. Huynh、Neil Jones、H. Chad Lane、Kevin Lin、Michael Loui、Silvio Micali、Tadao Murata、Christos Papadimitriou、Vaughan Pratt、Daniel Rosenband、Brian Scassellati、Ashish Sharma、Nir Shavit、Alexander Shen、Ilya Shlyakhter、Matt Stallmann、Perry Susskind、Y. C. Tay、Joseph Traub、Osamu Watanabe、Peter Widmayer、David Williamson、Derick Wood 以及 Charles Yang 所提供的意见和建议，以及他们在本书写作过程中提供的帮助。

下述各位为本书的改进提供了意见：Isam M. Abdelhameed、Eric Allender、Shay Artzi、Michelle Atherton、Rolfe Blodgett、Al Briggs、Brian E. Brooks、Jonathan Buss、Jin Yi Cai、Steve Chapel、David Chow、Michael Ehrlich、Yaakov Eisenberg、Farzan Fallah、Shaun Flisakowski、Hjalmtyr Hafsteinsson、C. R. Hale、Maurice Herlihy、Vegard Holmedahl、Sandy Irani、Kevin Jiang、Rhys Price Jones、James M. Jowdy、David M. Martin Jr.、Manrique Mata-Montero、Ryota Matsuura、Thomas Minka、Farooq Mohammed、Tadao Murata、Jason Murray、Hideo Nagahashi、Kazuo Ohta、Constantine Papageorgiou、Joseph Raj、Rick Regan、Rhonda A. Reumann、Michael Rintzler、Arnold L. Rosenberg、Larry Roske、Max Rozenoer、Walter L. Ruzzo、Sanatan Sahgal、Leonard Schulman、Steve Seiden、Joel Seiferas、Ambuj Singh、David J. Stucki、Jayram S. Thathachar、H. Venkateswaran、Tom Whaley、Christopher Van Wyk、Kyle Young 以及 Kyoung Hwan Yun。

Robert Sloan 在他执教的一个班上使用了本书手稿的早期版本，并通过使用经验向我提供了宝贵的意见和想法。Mark Herschberg、Kazuo Ohta 和 Latanya Sweeney 通读了手稿的各部分并提供了广泛的改进建议。Shafi Goldwasser 为我提供了第 10 章的素材。

我得到了 William Baxter 专业的技术支持，他编写了实现内部设计的宏语言包 L^AT_EX。麻省理工学院数学系的 Larry Nolan 保证了所有事务的正常进行。

同 PWS 出版社的人们一起工作创作最终作品是一件很愉快的事。我在此感谢 Michael Sugarman、David Dietz、Elise Kaiser、Monique Calello、Susan Garland 和 Tanja Brull，因为我和他们的接触最为频繁，但我知道还有许多人也为此付出了努力。感谢 Jerry Moore 的审稿、Diane Levy 的封面设计以及 Catherine Hawkes 的版式设计。

感谢美国国家科学基金项目 CCR-9503322 给予的支持。

我的父亲 Kenneth Sipser 和姐姐 Laura Sipser 将书中的图表转换成了电子格式。我的另一位姐姐 Karen Fisch 为我们解决了许多使用电脑的紧急问题，我的母亲 Justine Sipser 用她那慈母的建议帮助我。感谢他们在疯狂的截止时间、糟糕的软件等困难环境下的付出。

最后，是其所爱的妻子 Ina 和我的女儿 Rachel，感谢她们对所有这一切的理解和容忍。

Michael Sipser
马萨诸塞州，剑桥
1996 年 10 月

第 2 版前言

大量读者来的电子邮件反映，第 1 版没有习题解答是一个缺陷。这一版弥补了这一缺陷。每一章现在都增加了“习题选解”小节，给出了该章的练习和问题中有代表性题目的答案。给出了答案的问题就不能再作为有趣的有挑战性的家庭作业，为弥补这一损失，又添加了若干新问题。教师可以和 www.course.com 上所指定的相应地区的销售代表联系，索取一份教师手册，其中包含了附加的答案。

第 2 版的国际版是针对国外读者的。尽管涵盖了同样的主题，它和标准第 2 版还是有所不同，并且不是用来替代标准第 2 版的。

许多读者更喜欢学习更多的“标准”主题，比如 Myhill-Nerode 定理和 Rice 定理。通过这些主题展示在给出答案的问题中，我部分地采纳了这些读者的意见。没有将 Myhill-Nerode 定理放到书本主体中是因为我认为，这门课程的目标是初步介绍而非深入研究有穷自动机。有穷自动机在这里的角色是使学生通过研究计算的简单形式模型，从而为了解复杂模型奠定基础，同时为后续的主题提供方便的例子。当然，一些人希望有更全面的内容，同时另一些人觉得应该略去所有对有穷自动机的引用(或者至少是依赖)。尽管 Rice 定理对于不可判定性的证明是一个有用的“工具”，第 2 版还是没有将它放到书本主体中，因为一些学生可能只是机械地使用它而没有真正理解其作用。换用归约来证明不可判定性，可以为学习复杂性理论中出现的归约做更好的准备。

我很感谢我的助教 Ilya Baran、Sergi Elizalde、Rui Fan、Jonathan Feldman、Venkatesan Guruswami、Prahladh Harsha、Christos Kapoutsis、Julia Khodor、Adam Klivans、Kevin Matulef、Ioana Popescu、April Rasala、Sofya Raskhodnikova 和 Iuliu Vasilescu，他们帮助我草拟了若干新问题及其答案。Ching Law、Edmond Kayi Lee 和 Zulfikar Ramzan 也为给出答案付出了努力。感谢 Victor Shoup 提出了一个简洁的方法，用于修整在第 1 版中出现在概率原始算法分析中的缺陷。

感谢 Course Technology 出版社的编辑们的努力，尤其是 Alyssa Pratt 和 Aimee Poirier。多谢 Gerald Eisman、Weizhen Mao、Rupak Majumdar、Chris Umans 和 Christopher Wilson 所做的审校。感谢 Jerry Moore 在编辑上的出色工作，还有 ByteGraphics 的 Laura Segel (lauras@bytegraphics.com) 精彩而又精确的图表再现。

我所收到的电子邮件数量超乎预料。收到来自这么多地方的这么多人的来信绝对是一种快乐。我会尽量回复并向我未曾回复者表示歉意。我在此列出对本书第 2 版做出了有益的建议的人，同时对所有给我来信的人表示感谢。

Luca Aceto, Arash Afkanpour, Rostom Aghanian, Eric Allender, Karun Bakshi, Brad Ballinger, Ray Bartkus, Louis Barton, Arnold Beckmann, Mihir Bellare, Kevin Trent Bergeson, Matthew Berman, Rajesh Bhatt, Somenath Biswas, Lenore Blum, Mauro A. Bonatti, Paul Bondin, Nicholas Bone, Ian Bratt, Gene Browder, Doug Burke, Sam Buss, Vladimir Bychkovsky, Bruce Carneal, Soma Chaudhuri, Rong-Jaye Chen, Samir Chopra, Benny Chor, John Clausen, Allison Coates, Anne Condon, Jeffrey Considine, John J. Crashell, Claude Crepeau, Shaun Cutts, Susheel M. Daswani, Geoff Davis, Scott Dexter, Peter Drake, Jeff

Edmonds, Yaakov Eisenberg, Kurtcebe Eroglu, Georg Essl, Alexander T. Fader, Farzan Fallah, Faith Fich, Joseph E. Fitzgerald, Perry Fizzano, David Ford, Jeannie Fromer, Kevin Fu, Atsushi Fujioka, Michel Galley, K. Ganesan, Simson Garfinkel, Travis Gebhardt, Peymann Gohari, Ganesh Gopalakrishnan, Steven Greenberg, Larry Griffith, Jerry Grossman, Rudolf de Haan, Michael Halper, Nick Harvey, Mack Hendricks, Laurie Hiyakumoto, Steve Hockema, Michael Hoehle, Shahadat Hossain, Dave Isecke, Ghaith Issa, Raj D. Iyer, Christian Jacobi, Thomas Janzen, Mike D. Jones, Max Kanovitch, Aaron Kaufman, Roger Khazan, Sarfraz Khurshid, Kevin Killourhy, Seungjoo Kim, Victor Kuncak, Kanata Kuroda, Suk Y. Lee, Edward D. Legenski, Li-Wei Lehman, Kong Lei, Zsolt Lengvarszky, Jeffrey Levetin, Baekjun Lim, Karen Livescu, Thomas Lasko, Stephen Louie, TzerHung Low, Wolfgang Maass, Arash Madani, Michael Manapat, Wojciech Marchewka, David M. Martin Jr., Anders Martinson, Lyle McGeoch, Alberto Medina, Kurt Mehlhorn, Nihar Mehta, Albert R. Meyer, Thomas Minka, Mariya Minkova, Daichi Mizuguchi, G. Allen Morris III, Damon Mosk-Aoyama, Xiaolong Mou, Paul Muir, German Muller, Donald Nelson, Gabriel Nivasch, Mary Obelnicki, Kazuo Ohta, Thomas M. Oleson, Jr., Curtis Oliver, Owen Ozier, Rene Peralta, Alexander Perlis, Holger Petersen, Detlef Plump, Robert Prince, David Pritchard, Bina Reed, Nicholas Riley, Ronald Rivest, Robert Robinson, Christi Rockwell, Phil Rogaway, Max Rozenoer, John Rupf, Teodor Rus, Larry Ruzzo, Brian Sanders, Cem Say, Kim Schioett, Joel Seiferas, Joao Carlos Setubal, Geoff Lee Seyon, Mark Skandera, Bob Sloan, Geoff Smith, Marc L. Smith, Stephen Smith, Alex C. Snoeren, Guy St-Denis, Larry Stockmeyer, Radu Stoleru, David Stucki, Hisham M. Sueyllam, Kenneth Tam, Elizabeth Thompson, Michel Toulouse, Eric Tria, Chittaranjan Tripathy, Dan Trubow, Hiroki Ueda, Giora Unger, Kurt L. Van Etten, Jesir Vargas, Bienvenido Velez-Rivera, Kobus Vos, Alex Vrenios, Sven Waibel, Marc Waldman, Tom Whaley, Anthony Widjaja, Sean Williams, Joseph N. Wilson, Chris Van Wyk, Guangming Xing, Vee Voon Yee, Cheng Yongxi, Neal Young, Timothy Yuen, Kyle Yung, Jinghua Zhang, Lilla Zollei.

当我夜以继日地坐在我的电脑屏幕前时，尤其要感谢我的家人 Ina、Rachel 和 Aaron 的耐心、理解和爱。

Michael Sipser
马萨诸塞州，剑桥
2004 年 12 月

目 录

出版者的话	
专家指导委员会	
译者序	
译者简介	
第1版前言	
第2版前言	

第0章 绪论	1
0.1 自动机、可计算性与复杂性	1
0.1.1 计算复杂性理论	1
0.1.2 可计算性理论	2
0.1.3 自动机理论	2
0.2 数学概念和术语	2
0.2.1 集合	2
0.2.2 序列和多元组	3
0.2.3 函数和关系	4
0.2.4 图	6
0.2.5 字符串和语言	7
0.2.6 布尔逻辑	8
0.2.7 数学名词汇总	9
0.3 定义、定理和证明	10
0.4 证明的类型	12
0.4.1 构造性证明	12
0.4.2 反证法	13
0.4.3 归纳法	13
练习	15
问题	16
习题选解	17

第一部分 自动机与语言

第1章 正则语言	19
1.1 有穷自动机	19
1.1.1 有穷自动机的形式化定义	21
1.1.2 有穷自动机举例	22
1.1.3 计算的形式化定义	24
1.1.4 设计有穷自动机	24

1.1.5 正则运算	26
1.2 非确定性	28
1.2.1 非确定型有穷自动机的形式化定义	31
1.2.2 NFA与DFA的等价性	32
1.2.3 在正则运算下的封闭性	35
1.3 正则表达式	37
1.3.1 正则表达式的形式化定义	38
1.3.2 与有穷自动机的等价性	39
1.4 非正则语言	46
练习	50
问题	54
习题选解	58
第2章 上下文无关文法	63
2.1 上下文无关文法概述	63
2.1.1 上下文无关文法的形式化定义	64
2.1.2 上下文无关文法举例	65
2.1.3 设计上下文无关文法	65
2.1.4 歧义性	66
2.1.5 乔姆斯基范式	67
2.2 下推自动机	69
2.2.1 下推自动机的形式化定义	70
2.2.2 下推自动机举例	70
2.2.3 与上下文无关文法的等价性	72
2.3 非上下文无关语言	76
练习	79
问题	81
习题选解	83

第二部分 可计算性理论

第3章 丘奇-图灵论题	87
3.1 图灵机	87
3.1.1 图灵机的形式化定义	88
3.1.2 图灵机的例子	89
3.2 图灵机的变形	93

3.2.1 多带图灵机	93
3.2.2 非确定型图灵机	94
3.2.3 枚举器	95
3.2.4 与其他模型的等价性	96
3.3 算法的定义	97
3.3.1 希尔伯特问题	97
3.3.2 描述图灵机的术语	98
练习	100
问题	101
习题选解	102
第4章 可判定性	104
4.1 可判定语言	104
4.1.1 与正则语言相关的可判定性 问题	104
4.1.2 与上下文无关语言相关的可判定 性问题	106
4.2 停机问题	108
4.2.1 对角化方法	109
4.2.2 停机问题是不可判定的	111
4.2.3 一个图灵不可识别语言	113
练习	114
问题	115
习题选解	116
第5章 可归约性	118
5.1 语言理论中的不可判定问题	118
5.2 一个简单的不可判定问题	124
5.3 映射可归约性	129
5.3.1 可计算函数	129
5.3.2 映射可归约性的形式定义	129
练习	132
问题	132
习题选解	134
第6章 可计算性理论的高级专题	136
6.1 递归定理	136
6.1.1 自引用	136
6.1.2 递归定理的术语	138
6.1.3 应用	139
6.2 逻辑理论的可判定性	140
6.2.1 一个可判定的理论	141
6.2.2 一个不可判定的理论	143
6.3 图灵可归约性	145

6.4 信息的定义	146
6.4.1 极小长度的描述	146
6.4.2 定义的优化	148
6.4.3 不可压缩的串和随机性	148
练习	150
问题	150
习题选解	151

第三部分 复杂性理论

第7章 时间复杂性	153
7.1 度量复杂性	153
7.1.1 大O和小o记法	153
7.1.2 分析算法	155
7.1.3 模型间的复杂性关系	157
7.2 P类	158
7.2.1 多项式时间	158
7.2.2 P中的问题举例	159
7.3 NP类	163
7.3.1 NP中的问题举例	165
7.3.2 P与NP问题	166
7.4 NP完全性	166
7.4.1 多项式时间可归约性	167
7.4.2 NP完全性的定义	169
7.4.3 库克-列文定理	169
7.5 几个NP完全问题	173
7.5.1 顶点覆盖问题	174
7.5.2 哈密顿路径问题	175
7.5.3 子集和问题	178
练习	180
问题	181
习题选解	185
第8章 空间复杂性	187
8.1 萨维奇定理	188
8.2 PSPACE类	189
8.3 PSPACE完全性	190
8.3.1 TQBF问题	190
8.3.2 博弈的必胜策略	193
8.3.3 广义地理学	194
8.4 L类和NL类	197
8.5 NL完全性	198
8.6 NL等于coNL	200

练习	202	10.4 交互式证明系统	236
问题	202	10.4.1 图的非同构	236
习题选解	204	10.4.2 模型的定义	237
第9章 难解性	206	10.4.3 $IP=PSPACE$	238
9.1 层次定理	206	10.5 并行计算	244
9.2 相对化	213	10.5.1 一致布尔电路	245
9.3 电路复杂性	215	10.5.2 NC 类	246
练习	220	10.5.3 P 完全性	247
问题	221	10.6 密码学	247
习题选解	222	10.6.1 密钥	248
第10章 复杂性理论高级专题	223	10.6.2 公钥密码系统	249
10.1 近似算法	223	10.6.3 单向函数	249
10.2 概率算法	224	10.6.4 天窗函数	250
10.2.1 BPP 类	224	练习	251
10.2.2 素数性	226	问题	251
10.2.3 只读一次的分支程序	229	习题选解	252
10.3 交错式	232	参考文献	254
10.3.1 交错式时间与交错式空间	233	索引	259
10.3.2 多项式时间层次	235		