

计算理论导引

[美] 迈克尔·西普塞 (Michael Sipser) 著
麻省理工学院
段磊 唐常杰 等译
四川大学

Introduction to the Theory of Computation
Third Edition

Introduction
to the
Theory of
Computation

3rd edition

Michael Sipser



机械工业出版社
China Machine Press

计 算 机 科 学 丛 书

原书第3版

计算理论导引

[美] 迈克尔·西普塞 (Michael Sipser) 著

麻省理工学院

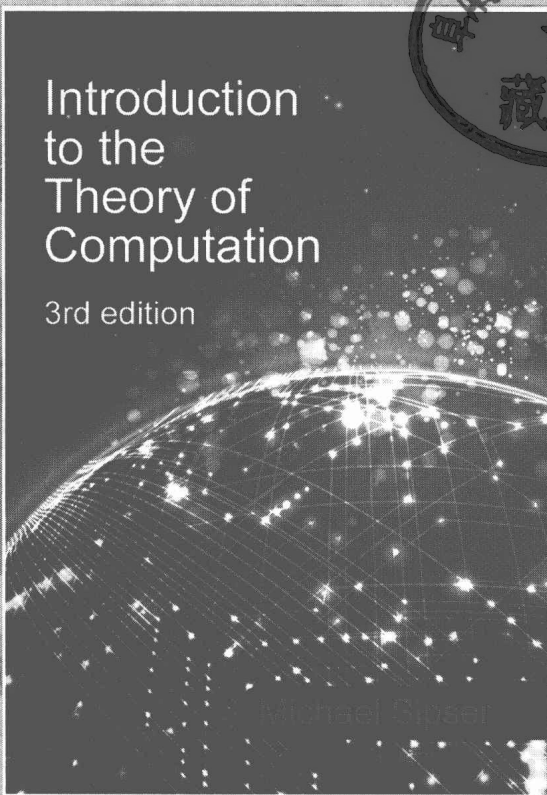
段磊 唐常杰 等译

四川大学

Introduction to the Theory of Computation
Third Edition

Introduction
to the
Theory of
Computation

3rd edition



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

计算理论导引 (原书第 3 版) / (美) 西普塞 (Sipser, M.) 著; 段磊等译. —北京: 机械工业出版社, 2015.6

(计算机科学丛书)

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

ISBN 978-7-111-49971-8

I. 计… II. ①西… ②段… III. 计算技术—理论 IV. TP301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 077899 号

本书版权登记号: 图字: 01-2014-0329

Michael Sipser: Introduction to the Theory of Computation, Third Edition.

Copyright © 2013 by Cengage Learning.

Original edition published by Cengage Learning. All Rights reserved.

China Machine Press is authorized by Cengage 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.

Cengage Learning Asia Pte. Ltd.

151 Lorong Chuan, #02-08 New Tech Park, Singapore 556741

本书原版由圣智学习出版公司出版。版权所有, 盗印必究。

本书中文简体字翻译版由圣智学习出版公司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。

本书封面贴有 Cengage Learning 防伪标签, 无标签者不得销售。

本书是计算理论领域的经典著作, 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, 重点讲解了可计算性和计算复杂性理论中的某些高级内容。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。新版的一大亮点是用一节的篇幅对确定型上下文无关语言进行了直观而不失严谨的介绍。

本书叙述由浅入深、详略得当, 重点突出, 不拘泥于技术细节, 可作为高等院校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。

出版发行: 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: 迟振春

责任校对: 董纪丽

印 刷: 藁城市京瑞印刷有限公司

版 次: 2015 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

开 本: 185mm×260mm 1/16

印 张: 19.5

书 号: ISBN 978-7-111-49971-8

定 价: 69.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

文艺复兴以来，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；也正是这样的优势，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，还揭示了学术的源变，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和发展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到积极的推动作用，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公司较早意识到“出版要为教育服务”。自1998年开始，我们就将工作重点放在了遴选、移译国外优秀教材上。经过多年的不懈努力，我们与Pearson, McGraw-Hill, Elsevier, MIT, John Wiley & Sons, Cengage等世界著名出版公司建立了良好的合作关系，从他们现有的数百种教材中甄选出Andrew S. Tanenbaum, Bjarne Stroustrup, Brian W. Kernighan, Dennis Ritchie, Jim Gray, Alfred V. Aho, John E. Hopcroft, Jeffrey D. Ullman, Abraham Silberschatz, William Stallings, Donald E. Knuth, John L. Hennessy, Larry L. Peterson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、研究及珍藏。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相助，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，有的还专门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。其影印版“经典原版书库”作为姊妹篇也被越来越多实施双语教学的学校所采用。

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。随着计算机科学与技术专业学科建设的不断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将步入一个新的阶段，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。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，我们的联系方式如下：

华章网站：www.hzbook.com

电子邮件：hzjsj@hzbook.com

联系电话：(010) 88379604

联系地址：北京市西城区百万庄南街1号

邮政编码：100037



华章科技图书出版中心

计算机改变并持续改变着世界，如今，计算技术已把人们带进了云（云计算）、物（物联网）、人（社会计算）、海（海量数据、大数据）的新时代。

在变革的时代里，计算机系统也改变着自己，在进步和进化中遵循了一组潜规则——计算理论，这套理论描述和论证了计算机的能与不能，界定了计算能力的极限。

业内人士常评说某人为某问题设计了一个比较快的算法，好到什么程度？用专业术语描述，线性时间内能完成的比较快，多项式时间能完成的次之，不能在多项式时间内完成的就是不现实的。但是，大数据时代的来临修正了这一观念，对于大数据问题，线性时间也嫌太长，因为需要“等它一千年”，人们呼唤亚线性、亚亚线性的算法。

有些问题，人们已经找到快的算法；有些问题，还没有找到快的算法，也许是等一个聪明程序员的出现。但有一类问题，没有找到好算法不是因为人们不够聪明，而是根本就不存在这样的算法。

计算理论将描述算法的本质，揭示计算机算法的能与不能、快与慢以及足够快的近似技巧。从这个角度来看，计算理论是计算机的灵魂，是应用计算机成功解决实际问题的保障。

这本由麻省理工学院名师 Michael Sipser 编撰的名著是计算理论领域的优秀书籍之一，对于非纯理论专业的人士，也许是深浅程度最合适的。自 1996 年第 1 版问世，该书历经近二十年，获得了学术界的公认和教育界的好评。该书具有如下优点：

第一，内容丰富，编排合理，展现了计算机科学研究广度和深度。该书以理论计算机科学的知识框架为脉络，系统地讲述了自动机与形式语言、可计算性理论和计算复杂性理论等计算理论的重要内容。总体编排上，难度由浅入深、循序渐进，易于学习。

第二，文字清晰，语言生动。作者以引导、举例为叙述手段，对计算理论领域的重要定理、性质等不仅给出证明，而且讲述证明思路，着力让读者在学习理论的同时掌握证明的技巧，彰显了作者在此领域的深厚造诣和娴熟的教学手法。

第三，各章设有练习和问题，并提供了部分习题的解答。通过作答习题，能够锻炼读者的逻辑推导思维，加深读者对关键知识点的理解。

我以切身体会向计算机专业的高年级本科生、硕士生和博士生推荐此书。我在本科阶段第一次接触了该书的第 1 版。差不多 10 年前，在刚开始博士阶段学习时，参与了本书第 2 版的翻译工作。如今，我又引导我的学生学习这本书，并承担了第 3 版的翻译工作。作为多重身份的“过来人”，我有独特的体会。一方面，该书写作规范，研究生可以学习到规范的定义、性质、证明的表述方式，学习该书内容有助于提升计算理论素养，增强学习能力；另一方面，研究生多苦于论文理论深度不够，也不知如何分析问题，认真领会该书讲述的证明思路和解题思路，常会让我们有豁然开朗之感，问题分析能力随之增强，进而提高研究论文的水平。

相较于本书第 2 版，第 3 版的内容更新主要在于增加了关于确定型上下文无关语言的

阐述,这使得本书关于自动机理论和语言处理的介绍更为完整。此外,第3版对每章后的习题进行了增补和重新编排。除了对第3版新增和修正内容进行翻译以外,我们还对第2版译文的错误进行了更正。同时,我们尽可能保持新版译文的文风与第2版译文一致。

本书由段磊、唐常杰主译,王文韬、王怡宁、杨皓、王梦洁也付出了艰辛的努力。如同我们在完成本书第2版翻译工作时所言,本书第3版的翻译工作是在先行者们工作的基础上,再次接过接力棒,把接力赛再推进一程。借此机会,向本书第1版译者(北京大学的张立昂教授、王捍贫教授和黄雄老师)表示衷心的感谢,也向本书第2版译者表示衷心的感谢。同时,华章公司的姚蕾、朱劼编辑在翻译过程中给予了我们大力支持,向她们表示衷心的感谢。特别向阅读本书第2版译文并给予我们翻译指正的读者表示衷心的感谢。

由于水平有限,译文难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

段磊

2015年6月于四川大学

第3版前言

Introduction to the Theory of Computation, 3e

本版新增了关于确定型上下文无关语言的一节。我选择这个主题有以下几个原因。首先，它填补了我之前对自动机理论和语言处理之间的明显空白。以前的版本介绍了有穷自动机以及图灵机在确定型和非确定型上的变形，但却只包含了下推自动机的非确定型变形。因此，增加关于确定型下推自动机的讨论正如同找到完成拼图游戏所缺的那块。

其次，确定型上下文无关文法理论是 $LR(k)$ 文法的基础，同时也是自动机理论在编程语言和编译器设计上重要且非平凡应用的基础。这个应用将一些关键概念，包括确定型和非确定型有穷自动机的等价性、上下文无关文法和下推自动机之间的相互转换，汇聚一起得到一个高效且漂亮的语法分析方法。这里我们实现了理论和实践的相互联系。

最后，虽然该主题作为自动机理论一个真实的应用非常重要，但它在现有理论教科书中却没有得到足够重视。我研究 $LR(k)$ 文法多年但一直没有完整理解它们如何工作，也没有看到它们与确定型上下文无关语言理论的完美契合。我写作这一节旨在为理论学者和实践者提供关于这个领域直观而不失严谨的介绍，并由此对该领域做出贡献。需要注意的是：这一节的部分内容非常具有挑战性，因此基础理论课程的教师可考虑将其作为补充读物。之后的章节不依赖于这部分内容。

在撰写本版的过程中，很多人给了我直接或间接的帮助。我很感激两位审阅者 Christos Kapoutsis 和 Cem Say。他们阅读了这一版新内容的初稿，并提供了很有价值的反馈意见。在 Cengage Learning 的一些人协助了本书的出版工作，特别是 Alyssa Pratt 和 Jennifer Feltri-George。Suzanne Huizenga 编辑了文字，ByteGraphics 的 Laura Segel 绘制了新的图片并修改了以前版本中的图片。

感谢我在 MIT 的助教：Victor Chen, Andy Drucker, Michael Forbes, Elena Grigorescu, Brendan Juba, Christos Kapoutsis, Jon Kelner, Swastik Kopparty, Kevin Matulef, Amanda Redlich, Zack Remscrim, Ben Rossman, Shubhangi Saraf, Oren Weimann。他们都给予了我帮助，包括：讨论新的问题并给出解决方法，提出如何让学生理解课程内容的见解。我非常享受与这群有天赋、有热情的年轻人一起工作。

我很高兴收到了来自世界各地的邮件，非常感谢你们的建议、问题和思路。这里有一个相关人员列表，他们的意见对这个版本产生了影响：

Djihed Afifi, Steve Aldrich, Eirik Bakke, Suzanne Balik, Victor Bandur, Paul Beame, Elazar Birnbaum, Goutam Biswas, Rob Bittner, Marina Blanton, Rodney Bliss, Promita Chakraborty, Lewis Collier, Jonathan Deber, Simon Dexter, Matt Diephouse, Peter Dillinger, Peter Drake, Zhidian Du, Peter Fejer, Margaret Fleck, Atsushi Fujioka, Valerio Genovese, Evangelos Georgiadis, Joshua Grochow, Jerry Grossman, Andreas Guelzow, Hjalmtyr Hafsteinsson, Arthur Hall III, Cihat Imamoglu, Chinawat Isradisaikul, Kayla Jacobs, Flemming Jensen, Barbara Kaiser, Matthew Kane, Christos Kapoutsis, Ali Durlov Khan, Edwin Sze Lun Khoo, Yongwook Kim, Akash Kumar, Elea-

zar Leal, Zsolt Lengvarszky, Cheng-Chung Li, Xiangdong Liang, Vladimir Lifschitz, Ryan Lortie, Jonathan Low, Nancy Lynch, Alexis Maciel, Kevin Matulef, Nelson Max, Hans-Rudolf Metz, Mladen Mikša, Sara Miner More, Rajagopal Nagarajan, Marvin Nakayama, Jonas Nyrup, Gregory Roberts, Ryan Romero, Santhosh Samarthyam, Cem Say, Joel Seiferas, John Sieg, Marc Smith, John Steinberger, Nuri Taşdemir, Tamir Tassa, Mark Testa, Jesse Tjang, John Trammell, Hiroki Ueda, Jeroen Vaelen, Kurt L. Van Etten, Guillermo Vázquez, Phanisekhar Botlaguduru Venkata, Benjamin Bing-Yi Wang, Lutz Warnke, David Warren, Thomas Watson, Joseph Wilson, David Wittenberg, Brian Wongchaowart, Kishan Yerubandi, Dai Yi.

最重要的是，我要感谢我的家人——我的妻子 Ina 以及我们的孩子 Rachel 和 Aaron。时光荏苒，岁月如梭，你们的爱就是一切。

Michael Sipser

马萨诸塞州，剑桥

2012 年 4 月

第 2 版前言

Introduction to the Theory of Computation, 3e

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。通过将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，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 版提供了有益的建议的人，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 Con-
sidine, John J. Crashell, Claude Crepeau, Shaun Cutts, Susheel M. Daswani, Geoff Da-
vis, 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 Go-
palakrishnan, Steven Greenberg, Larry Griffith, Jerry Grossman, Rudolf de Haan, Mi-
chael 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 Leng-
varszky, 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, Dai-
chi Mizuguchi, G. Allen Morris III, Damon Mosk-Aoyama, Xiaolong Mou, Paul Muir,
German Muller, Donald Nelson, Gabriel Nivasch, Mary Obelnicki, Kazuo Ohta, Thom-
as 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 Se-
iferas, 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 Wil-
liams, 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

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考能力、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 Beebe、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、AI 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 $L^A T_E X$ 。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，是我所爱的妻子 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

出版者的话

译者序

第 3 版前言

第 2 版前言

第 1 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	4
0.2.3 函数和关系	4
0.2.4 图	6
0.2.5 字符串和语言	8
0.2.6 布尔逻辑	9
0.2.7 数学名词汇总	10
0.3 定义、定理和证明	11
0.4 证明的类型	13
0.4.1 构造性证明	13
0.4.2 反证法	14
0.4.3 归纳法	15
练习	16
问题	17
习题选解	18

第一部分 自动机与语言

第 1 章 正则语言	20
1.1 有穷自动机	20
1.1.1 有穷自动机的形式化定义	22
1.1.2 有穷自动机举例	23
1.1.3 计算的形式化定义	25
1.1.4 设计有穷自动机	25
1.1.5 正则运算	27

1.2 非确定性	29
1.2.1 非确定型有穷自动机的形式化定义	32
1.2.2 NFA 与 DFA 的等价性	33
1.2.3 在正则运算下的封闭性	36
1.3 正则表达式	38
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	40
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	62
2.1 上下文无关文法概述	62
2.1.1 上下文无关文法的形式化定义	63
2.1.2 上下文无关文法举例	64
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	68
2.2.1 下推自动机的形式化定义	69
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	77
2.4 确定型上下文无关语言	79
2.4.1 DCFL 的性质	82
2.4.2 确定型上下文无关文法	83
2.4.3 DPDA 和 DCFG 的关系	91
2.4.4 语法分析和 LR(k) 文法	94
练习	96
问题	98
习题选解	100

第二部分 可计算性理论

第 3 章 丘奇-图灵论题	104
3.1 图灵机	104

3.1.1 图灵机的形式化定义	105
3.1.2 图灵机的例子	107
3.2 图灵机的变形	110
3.2.1 多带图灵机	111
3.2.2 非确定型图灵机	112
3.2.3 枚举器	113
3.2.4 与其他模型的等价性	114
3.3 算法的定义	114
3.3.1 希尔伯特问题	115
3.3.2 描述图灵机的术语	116
练习	118
问题	119
习题选解	120
第4章 可判定性	122
4.1 可判定语言	122
4.1.1 与正则语言相关的可判定性 问题	122
4.1.2 与上下文无关语言相关的 可判定性问题	124
4.2 不可判定性	126
4.2.1 对角化方法	127
4.2.2 不可判定语言	130
4.2.3 一个图灵不可识别语言	131
练习	132
问题	133
习题选解	134
第5章 可归约性	136
5.1 语言理论中的不可判定问题	136
5.2 一个简单的不可判定问题	143
5.3 映射可归约性	148
5.3.1 可计算函数	148
5.3.2 映射可归约性的形式化 定义	148
练习	151
问题	151
习题选解	153
第6章 可计算性理论的高级专题	155
6.1 递归定理	155
6.1.1 自引用	155
6.1.2 递归定理的术语	157

6.1.3 应用	158
6.2 逻辑理论的可判定性	159
6.2.1 一个可判定的理论	161
6.2.2 一个不可判定的理论	163
6.3 图灵可归约性	164
6.4 信息的定义	165
6.4.1 极小长度的描述	166
6.4.2 定义的优化	168
6.4.3 不可压缩的串和随机性	168
练习	170
问题	170
习题选解	171

第三部分 复杂性理论

第7章 时间复杂性	174
7.1 度量复杂性	174
7.1.1 大 O 和小 o 记法	174
7.1.2 分析算法	176
7.1.3 模型间的复杂性关系	178
7.2 P 类	180
7.2.1 多项式时间	180
7.2.2 P 中的问题举例	181
7.3 NP 类	184
7.3.1 NP 中的问题举例	187
7.3.2 P 与 NP 问题	188
7.4 NP 完全性	188
7.4.1 多项式时间可归约性	189
7.4.2 NP 完全性的定义	191
7.4.3 库克-列文定理	192
7.5 几个 NP 完全问题	196
7.5.1 顶点覆盖问题	196
7.5.2 哈密顿路径问题	198
7.5.3 子集和问题	201
练习	202
问题	203
习题选解	207
第8章 空间复杂性	208
8.1 萨维奇定理	209

8.2 PSPACE 类	210	10.2.3 只读一次的分支程序	254
8.3 PSPACE 完全性	211	10.3 交错式	257
8.3.1 TQBF 问题	212	10.3.1 交错式时间与交错式空间	257
8.3.2 博弈的必胜策略	214	10.3.2 多项式时间层次	260
8.3.3 广义地理学	215	10.4 交互式证明系统	260
8.4 L 类和 NL 类	219	10.4.1 图的非同构	261
8.5 NL 完全性	220	10.4.2 模型的定义	261
8.6 NL 等于 coNL	222	10.4.3 $IP=PSPACE$	263
练习	224	10.5 并行计算	270
问题	224	10.5.1 一致布尔电路	270
习题选解	226	10.5.2 NC 类	272
第 9 章 难解性	228	10.5.3 P 完全性	273
9.1 层次定理	228	10.6 密码学	273
9.2 相对化	236	10.6.1 密钥	274
9.3 电路复杂性	238	10.6.2 公钥密码系统	275
练习	244	10.6.3 单向函数	275
问题	245	10.6.4 天窗函数	277
习题选解	245	练习	277
第 10 章 复杂性理论高级专题	247	问题	278
10.1 近似算法	247	习题选解	278
10.2 概率算法	248	参考文献	280
10.2.1 BPP 类	249	索引	284
10.2.2 素数性	250		