

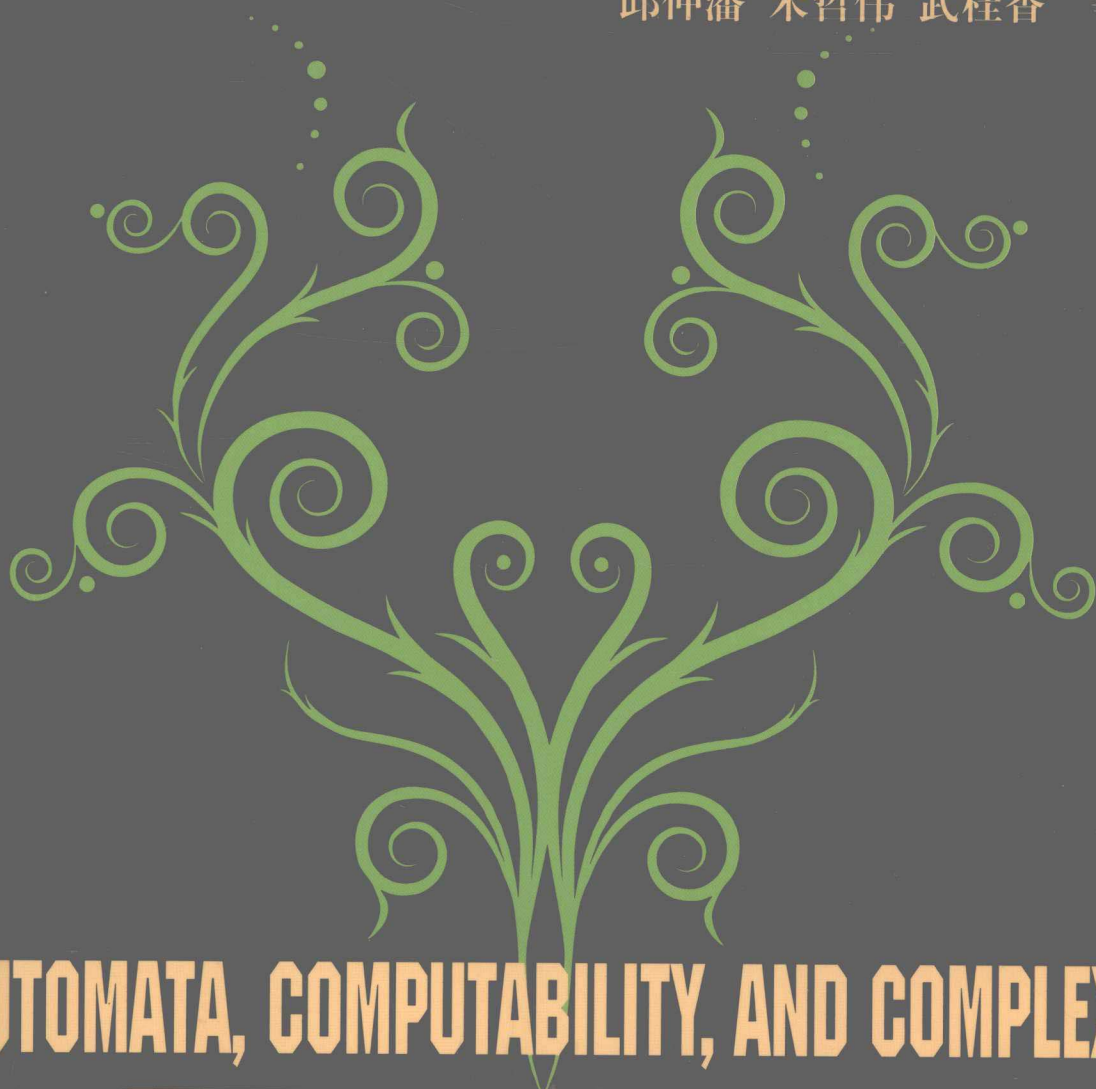
世界著名计算机教材精选

PEARSON

自动机理论与应用

Elaine Rich 著

邱仲潘 米哲伟 武桂香 等译



UTOMATA, COMPUTABILITY, AND COMPLEXITY

THEORY AND APPLICATIONS

清华大学出版社

世界著名计算机教材精选

自动机理论与应用

Elaine Rich 著

邱仲潘 米哲伟 武桂香 等译

清华大学出版社
北京

Simplified Chinese edition copyright ©2011 by PEARSON EDUCATION ASIA LIMITED and TSINGHUA UNIVERSITY PRESS.

Original English language title from Proprietor's edition of the Work.

Original English language title: Automata, Computability, and Complexity: Theory and Applications
by Elaine Rich ©2011

EISBN: 0-13-228806-0

All Rights Reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Addison Wesley.

This edition is authorized for sale only in the People's Republic of China (excluding the Special Administrative Region of Hong Kong and Macao).

本书中文简体翻译版由 Pearson Education (培生教育出版集团) 授权给清华大学出版社在中国境内 (不包括中国香港、澳门特别行政区) 出版发行。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2008-0460 号

本书封面贴有 Pearson Education (培生教育出版集团) 激光防伪标签, 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

自动机理论与应用/ (美) 里奇 (Rich, E.) 著; 邱仲潘, 米哲伟, 武桂香等译. —北京: 清华大学出版社, 2011. 12

(世界著名计算机教材精选)

书名原文: Automata, Computability, and Complexity: Theory and Applications

ISBN 978-7-302-26586-3

I. ①自… II. ①里… ②邱… ③米… ④武… III. ①自动机理论—教材 IV. ①TP301.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 175420 号

责任编辑: 龙啟铭

责任校对: 焦丽丽

责任印制: 何 芊

出版发行: 清华大学出版社

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

社 总 机: 010-62770175

投稿与读者服务: 010-62795954, jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

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

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编: 100084

邮 购: 010-62786544



印 刷 者: 北京市人民文学印刷厂

装 订 者: 三河市兴旺装订有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185×260 印 张: 34.25 字 数: 883 千字

版 次: 2011 年 12 月第 1 版 印 次: 2011 年 12 月第 1 次印刷

印 数: 1~3000

定 价: 69.00 元

产品编号: 023232-01

译者序

自动机理论是对抽象机和它们能解决的问题的研究，密切关联于形式语言理论，因为自动机经常按它们所能识别的形式语言类来分类。自动机理论是从事计算机科学研究的人们必须熟悉的理论。本书作者在学校开设了自动机的课程，受到多届学生的欢迎与好评。作者思路严谨、论述清晰、深入浅出、图文并茂。翻译这本书，不仅让我们领略了自动机世界的精美逻辑，也欣赏了名校名师的风采。相信读者阅读过程中一定会有相似的感受。

本书由邱仲潘、米哲伟、武桂香等主译，孙赫雄、孙桔华、张朋丽、朱敏、宋智军、邹文、邓欣欣、王帅、王润涛、周丹丹等也参与了本书的翻译工作，在此表示感谢。

由于时间仓促、加上译者水平有限，虽然我们认真谨慎，错漏之处仍然在所难免，请广大读者不吝赐教。

祝亲爱的读者们以愉快的心情领略自动机世界的精美逻辑、欣赏名校名师的风采，充满收获。

序

本书有三大目标：

1. 介绍现代计算的基础理论。
2. 告诉学生理论是生动的。尽管许多理论在数字计算早期已为人知（有些更早），但至今仍源源不断地产生许多重要应用。
3. 告诉学生如何在自己的工作中探索这些理论的运用。

本书可作为教科书，核心是第 1 部分到第 5 部分，解决上述第一个目标，包含涉及的理论，超出了一个学期的课程内容，标星号的章节是可选的，后面的材料通常不涉及这些内容。本序中的“课程计划”一节介绍了如何根据一些典型的计算机科学课程选择不同章节。

本书所附的网站为 <http://www.theoryandapplications.org/>，按本书的章节进行组织，可以并行使用。书中概念旁边的电脑图标表示网站上提供了更多材料。

本书通篇大量引用所附网站，还有一些其他应用说明。这些指示和说明放在框中，指向相关网站和章节，如下所示。

这种技术非常有用 (H.1.2)

注释

定义常用下列形式：

A something is a *special something* if it possesses property P . (某个东西是个特殊东西，如果其拥有属性 P)

这个形式也适用于属性 P 是充分必要条件时。为了明确起见，这时改用下列形式：

A something is a *special something* iff it possesses property P . (某个东西是个特殊东西，当且仅当其拥有属性 P)

除了少数例外，本书采用下列命名规则：

		例子
集合	字母表前面的大写字母加上 S	A, B, C, D, S
逻辑公式	字母表中间的大写字母	P, Q, R
谓词与关系	字母表中间的大写字母	P, Q, R
逻辑常量	X 的下标和特定名称	X_1 , X_2 , John, Smoky
函数	小写字母或单词	f, g, convert
整数	字母表中间的小写字母	i, j, k, l, m, n
字符串变量	字母表后的小写字母	s, t, u, v, w, x, y

		例子
直接数字符串	写成计算机字体	abc, aabbb
语言值变量	<i>L</i> 开头的大写字母	<i>L</i> , <i>L</i> ₁ , <i>L</i> ₂
特定语言	非斜体字符串	A ⁿ B ⁿ , WW
正则表达式	小写希腊字母	α , β , γ
状态	字母表中间的小写字母	<i>p</i> , <i>q</i> , <i>r</i> , <i>s</i> , <i>t</i>
语法规则的非终止符	大写字母	A, B, C, S, T
文法推理的工作字符串	小写希腊字母	α , β , γ
PDA 堆栈中的字符串	小写希腊字母	α , β , γ
其他变量	字母表后面的小写字母	<i>x</i> , <i>y</i> , <i>z</i>

书中的程序与算法提供不同细节，用下列格式描述：

- 某个编程语言的精确代码和其他字符串一样写出。
- 伪代码描述的算法写成如下：

Until an even-length string is found do:

 Generate the next string in the sequence.

介绍步骤时使用编写，例如：

1. Until an even-length string is found do:
 - 1.1. Generate the next string in the sequence.
2. Reverse the string that was found.

注释放在字符串/*之后，例如代码和文法中的注释。

课程计划

第 1 部分是本书的基础。第 2 章很关键，因为它定义了基础结构：字符串和语言；第 3 章很重要，介绍了本书其他部分的路线图，帮助学生明确学习的方向以及每个理论在整个计算理论中的地位；第 4 章介绍 3 个思想，对本书后面的学习非常重要。可以先跳过第 4 章，后面需要时再回头学习相关章节。

如果跳过选读部分，则第 5 章、第 6 章、第 8 章、第 9 章、第 11~14 章、第 17~21 章和可选第 23 章和/或第 24 章介绍了自动机理论标准课程的内容。第 15 章“上下文无关解析”介绍的内容有助于计算机科学学生的学习，适合放在自动机理论课程中。我的课程中通常都会介绍这个内容，但这个材料常常放在编程语言或编译器课程中介绍，这样就可以在自动机理论课程中省略。作为替代，我在第 5 章介绍选读材料，特别是关于随机有限自动机的部分。我还介绍第 22 章。我发现学生如果能够看到不确定性理论在问题中的运用，就可以对第 21 章的难题（特别是归纳证明的设计）更有兴趣，这个问题比图关机行为问题更复杂。

本书也适用于更广泛的课程，包括经典自动机理论的核心和现代复杂度理论。这些课程可以包括第 2~3 章、第 5 章、第 8 章、第 11 章、第 13 章、第 17~21 章和第 27~30 章，如果时间不够可以省略一些章节。

本书篇幅较小，主要针对核心理论材料的运用。教学过程中为了提高学生的兴趣，可以加进一些应用内容。

教师资源

网站 www.prenhall.com/rich 包含下列教师资源：

- 完整的教学幻灯片
- 书中许多练习的答案
- 其他问题和答案

使用本书的老师欢迎把更多问题发给我，以便和其他教师分享。

致 谢

本书的成书离不开许多人的帮助。我第一次在得克萨斯大学教 CS 341 “自动机理论”课程时，使用了 Bob Wall 与 Russell Williams 的教案。本书的许多材料源于这些教案。我最初是从[Hopcroft and Ullman 1969]学习自动机理论的。在多年自动机理论教学的过程中，我使用过的教材包括[Lewis and Papadimitriou 1988]和[Sipser 2006]。本书写作过程中受到这些材料的很多启发。

我的几个朋友、同事和学生提供了例子、答案和意见。特别感谢 Don Baker、Volker Bandke、Jim Barnett、Jon Bentley、Gary Bland、Jaime Carbonell、Alan Cline、Martin Cohn、Dan Connolly、Ann Daniel、Chris Edmonson-Yurkanan、Scott Fahlman、Warren Gish、Mohamed Gouda、Jim Hendler、Oscar Hernandez、David Jefferson、Ben Kuipers、Greg Lavender、Tim Maxwell、Andy Mills、Jay Misra、Luay Nakhleh、Gordon Novak、Gabriela Ochoa、Dewayne Perry、Brian Reid、Bob Rich、Mike Scott、Cathy Stacy、Peter Stone、Lynda Trader 和 David Zuckerman。其中 Luay Nakhleh、Dan Tamir 与 Bob Wall 在他们的课堂上使用了本书的手稿，感谢他们及其学生的反馈。

还要感谢我的所有学生和助教告诉我哪些内容偏难，哪些内容有趣和有用。几年前，Tarang Mittal 与 Mat Crocker 上完我的课程后，决定在下学期建立自动机理论培训课程。他们的课程使许多学生受益匪浅。感谢 Tarang Mittal 与 Mat Crocker 和下列老师：Jason Pennington、Alex Menzies、Tim Maxwell、Chris St. Clair、Luis Guimbarda、Peter Olah、Eamon White、Kevin Kwast、Catherine Chu、Siddharth Natarajan、Daniel Galvan、Elton Pinto 与 Jack Djeu。

我的学生还给我提供了其他帮助。Oscar Hernandez 帮助我做好了本书的幻灯片，Caspar Lam 建立了本书的网站，David Reaves 提供了本书及其网站、幻灯片中的所有图形，包括封面的 Blue Tweed。

我能写这本书，首先要感谢我的父亲引导我学习数学，感谢 Andy van Dam 引导我在布朗大学上本科，Raj Reddy 引导我在 CMU 大学上研究生，对他们的感谢难以言表。

特别感谢我的家人和朋友，特别是我的丈夫 Alan Cline 和父亲 Bob Rich 对本书、校对手稿不厌其烦地讨论，耐心地陪一个写书人一起生活。

目 录

第 1 部分 简 介

第 1 章 为什么学习计算理论	3
1.1 编程工具的历史	3
1.2 理论的应用无处不在	5
第 2 章 语言与字符串	7
2.1 字符串	7
2.1.1 字符串函数	7
2.1.2 字符串的关系	8
2.2 语言	9
2.2.1 定义语言的方法	9
2.2.2 语言的势	11
2.2.3 有多少语言	11
2.2.4 语言函数	12
2.2.5 对语言字符串赋予意义	14
练习	15
第 3 章 语言层次	16
3.1 定义任务：语言识别	16
3.2 编码的力量	16
3.2.1 一切都是字符串	16
3.2.2 把问题变成决策问题	19
3.3 基于机器的语言类层次	20
3.3.1 正则语言	20
3.3.2 上下文无关语言	21
3.3.3 可确定和半确定语言	22
3.3.4 计算层次及其重要性	23
3.4 语言类的可跟踪性层次	24
练习	25
第 4 章 计算	26
4.1 决策过程	26
4.2 确定性与非确定性	29
4.3 语言与程序的函数	33
练习	35

第 2 部分 有限状态机与正则语言

第 5 章 有限状态机	39
5.1 确定性有限状态机	40
5.2 正则语言	43
5.3 设计确定性有限状态机	44
5.4 非确定性 FSM	46
5.4.1 什么是非确定性 FSM	47
5.4.2 模式与子串匹配的 NDFSM	49
5.4.3 分析非确定 FSM	50
5.4.4 确定 FSM 与非确定 FSM 的等价性	52
5.5 从 FSM 到操作系统	56
5.6 FSM 模拟	56
5.6.1 模拟确定 FSM	56
5.6.2 模拟非确定 FSM	57
5.7 简化 FSM	58
5.7.1 建立一种语言的最简 DFSM	58
5.7.2 简化 DFSM	63
5.8 正则语言的规范形式	66
5.9 有限状态变换器	67
5.10 双向变换器	69
5.11 随机有限自动机: Markov 模型与隐藏 Markov 模型	70
5.11.1 Markov 模型	71
5.11.2 隐马模型	74
5.12 有限自动机、无限字符串: Büchi 自动机	79
练习	83
第 6 章 正则表达式	88
6.1 什么是正则表达式	88
6.2 Kleene 定理	91
6.2.1 建立正则表达式的 FSM	92
6.2.2 从 FSM 建立正则表达式	94
6.2.3 正则表达式与 FSM 的等价性	99
6.2.4 Kleene 定理、正则表达式和有限状态机	99
6.3 应用正则表达式	102
6.4 操纵和简化正则表达式	103
练习	105
第 7 章 正则文法	108
7.1 正则文法的定义	108
7.2 正则文法与正则语言	109

练习	112
第 8 章 正则与非正则语言	113
8.1 有多少正则语言	113
8.2 证明一个语言是正则语言	113
8.3 正则语言的一些闭包属性	115
8.4 证明一个语言不是正则	117
8.4.1 正则语言的泵定理	118
8.4.2 使用闭包属性	122
8.5 利用问题特定知识	123
8.6 正则语言的函数	124
练习	126
第 9 章 正则语言的算法与决策过程	130
9.1 基本决策过程	130
9.1.1 成员关系	130
9.1.2 空性与整体性	131
9.1.3 有限性	133
9.1.4 等价性	134
9.1.5 最简性	134
9.1.6 综合回答特定问题	135
9.2 正则语言算法与决策过程小结	135
练习	136
第 10 章 小结与参考资料	138
参考资料	139
第 3 部分 上下文无关语言与压栈自动机	
第 11 章 上下文无关文法	143
11.1 改写系统与文法简介	143
11.2 上下文无关文法与语言	145
11.3 设计上下文无关文法	149
11.4 简化上下文无关文法	150
11.5 证明文法正确	151
11.6 推导与解析树	154
11.7 歧义性	155
11.7.1 歧义性有什么问题	156
11.7.2 固有歧义性	157
11.7.3 消歧文法	158
11.8 范式	164
11.8.1 文法的范式	164
11.8.2 变成范式	165

11.8.3	变成 Chomsky 范式	166
11.8.4	范式的代价	170
11.9	孤岛文法	170
11.10	随机上下文无关文法	172
	练习	173
第 12 章	压栈自动机	177
12.1	非确定性压栈自动机的定义	177
12.2	确定性与非确定性 PDA	180
12.2.1	确定性 PDA 的定义	180
12.2.2	了解非确定性	181
12.2.3	减少非确定性	183
12.3	上下文无关文法与 PDA 的等价性	184
12.3.1	建立一个文法的 PDA	184
12.3.2	建立一个 PDA 的文法	188
12.3.3	上下文无关文法与 PDA 的等价性	193
12.4	非确定性与停机	193
12.5	PDA 的其他等价定义	195
12.6	不等价于 PDA 的情形	196
	练习	196
第 13 章	上下文无关与非上下文无关语言	197
13.1	上下文无关语言的地位	197
13.2	证明一种语言为上下文无关语言	198
13.3	上下文无关语言的泵定理	198
13.4	上下文无关语言一些重要闭包属性	203
13.4.1	闭包定理	203
13.4.2	泵定理和闭合属性一起使用	205
13.5	确定性上下文无关语言	207
13.6	Ogden 推论	213
13.7	Parikh 定理	215
13.8	上下文无关语言函数	217
	练习	218
第 14 章	上下文无关语言的算法与决策过程	222
14.1	可确定问题	222
14.1.1	成员关系	222
14.1.2	空性与有限性	225
14.1.3	确定性上下文无关语言的相等性	226
14.2	不可确定问题	226
14.3	上下文无关语言算法与决策过程小结	226

练习	227
第 15 章 上下文无关解析	228
15.1 辞典分析	229
15.2 自顶向下解析	230
15.2.1 深度优先搜索	231
15.2.2 修改自顶向下解析的文法	233
15.2.3 确定性自顶向下解析与 LL(1)文法	237
15.3 自下而上解析	240
15.3.1 Cocke-Kasami-Younger 算法	240
15.3.2 上下文无关解析与矩阵乘法	243
15.3.3 移位减少解析	243
15.3.4 确定性自下而上 LR 解析	247
15.4 解析自然语言	248
15.4.1 问题	248
15.4.2 Earley 算法	248
练习	254
第 16 章 小结与参考资料	255
参考资料	255
第 4 部分 图灵机与不可确定性	
第 17 章 图灵机	259
17.1 定义、符号与例子	259
17.1.1 什么是图灵机	259
17.1.2 图灵机编程	262
17.1.3 停机	263
17.1.4 形式化图灵机操作	263
17.1.5 图灵机的宏记法	264
17.2 用图灵机计算	267
17.2.1 用图灵机作为语言识别器	267
17.2.2 图灵机计算函数	270
17.3 增加多个磁带和非确定性	272
17.3.1 多带	272
17.3.2 非确定性图灵机	276
17.4 模拟实际计算机	279
17.5 其他图灵机定义	282
17.5.1 单向与双向无限带	282
17.5.2 堆栈与磁带	283
17.6 将图灵机编码成字符串	284
17.6.1 图灵机编码模式	285

17.6.2	枚举图灵机	286
17.6.3	编码的另一个好处	287
17.6.4	编码一个图灵机的多个输入	287
17.7	万能图灵机	288
练习		289
第 18 章	Church-Turing 命题	293
18.1	命题	293
18.2	等价形式例子	295
18.2.1	现代计算机	295
18.2.2	Lambda 演算	295
18.2.3	标注系统	296
18.2.4	Post 生产系统	296
18.2.5	无限制文法	297
18.2.6	Markov 算法	298
18.2.7	Conway 生命游戏	299
18.2.8	一维基本元胞自动机	299
18.2.9	DNA 计算	300
练习		301
第 19 章	停止问题的不可解决性	303
19.1	语言 H 是半确定的但不是确定的	304
19.2	H 不可确定性的一些意义	306
19.3	回到图灵、Church 和决策问题	307
练习		308
第 20 章	可确定与半确定语言	309
20.1	D 概述	309
20.2	SD 概述	309
20.3	D 与 SD 之间的子集关系	310
20.4	D 与 SD 类的补集	311
20.5	枚举语言	312
20.5.1	按未定义顺序枚举	312
20.5.2	辞典顺序枚举	314
20.6	小结	315
练习		316
第 21 章	可确定性与不可确定性证明	318
21.1	归约法	318
21.2	用归约法证明一个语言不是可确定的	320
21.2.1	映射归约性	322
21.2.2	不是映射归约的归约	329

21.3	是不是图灵机的所有问题都不可确定	330
21.4	Rice 定理	331
21.5	实际程序的不可确定问题	334
21.6	证明一个语言不是半确定	336
21.6.1	非归约法	336
21.6.2	归约法	337
21.6.3	L 是否在 D 、 SD/D 或 $\neg SD$	341
21.7	包括图灵机描述的 D 、 SD/D 和 $\neg SD$ 语言小结	341
	练习	342
第 22 章	不明显提图灵机问题的语言的可确定性	345
22.1	Diophantine 方程与 Hilbert 第十问题	345
22.2	Post 对应性问题	346
22.3	铺砖问题	348
22.4	逻辑理论	350
22.4.1	布尔理论	351
22.4.2	一阶逻辑理论	351
22.5	上下文无关语言的不可确定问题	353
22.5.1	通过计算历史归约	354
22.5.2	使用 CFG_{ALL} 的不可确定性	356
22.5.3	从 PCP 归约	357
	练习	359
第 23 章	无限制文法	361
23.1	定义和例子	361
23.2	非限制文法与图灵机的等价性	365
23.3	文法计算函数	366
23.4	无限制文法的不可确定问题	368
23.5	半 Thue 系统的单词问题	369
	练习	370
第 24 章	Chomsky 层次及其他	371
24.1	上下文有关语言	371
24.1.1	线性有界自动机确定	372
24.1.2	上下文有关文法	373
24.1.3	线性有界自动机与上下文有关文法的等价性	374
24.1.4	上下文有关语言在语言层次中的位置	374
24.1.5	上下文有关语言的闭包属性	376
24.1.6	上下文有关语言的决策过程	378
24.2	Chomsky 层次	380
24.3	属性、特性与合一文法	381

24.4 Lindenmayer 系统	383
练习	389
第 25 章 可计算函数	391
25.1 什么是可计算函数	391
25.1.1 总体与部分函数	391
25.1.2 部分可计算与可计算函数	392
25.1.3 不是部分可计算的函数	394
25.1.4 忙海狸函数	395
25.1.5 语言与函数	397
25.2 递归函数理论	398
25.2.1 基本递归函数	398
25.2.2 Ackermann 函数	400
25.2.3 可递归(可计算)函数	401
25.3 递归定理及其使用	403
练习	408
第 26 章 小结与参考资料	410
参考资料	411
第 5 部分 复 杂 度	
第 27 章 复杂度分析简介	415
27.1 旅行销售员问题	415
27.2 复杂度 0	416
27.3 问题特性化	417
27.3.1 选择编码方式	417
27.3.2 把优化问题变成语言	419
27.4 测量时间与空间复杂度	419
27.4.1 选择计算模型	419
27.4.2 定义测量时间与空间要求的函数	420
27.5 函数增长速率	422
27.6 渐近优势	423
27.7 算法空白	427
27.8 例子	427
27.8.1 多项式加速	427
27.8.2 将指数级算法变成多项式算法	433
27.8.3 时间空间取舍	434
练习	435
第 28 章 时间复杂度类	439
28.1 语言类 P	439
28.1.1 P 在补集下闭合	439

28.1.2	属于 P 的语言	440
28.1.3	正则下上下文无关语言	441
28.1.4	连通图	441
28.1.5	欧拉路径与线路	442
28.1.6	最小生成树	444
28.1.7	质数性测试	446
28.2	语言类 NP	447
28.2.1	定义 NP 类	447
28.2.2	NP 语言	449
28.2.3	TSP	451
28.2.4	集团探测	451
28.2.5	布尔可满足性	452
28.3	$P=NP?$	453
28.4	用归约法进行复杂度证明	454
28.5	NP 完备性与 Cook-Levin 定理	456
28.5.1	NP 完备与 NP 难语言	457
28.5.2	Cook-Levin 定理和 SAT 的 NP 完备性	458
28.6	其他 NP 完备问题	462
28.6.1	NP 完备问题采样	462
28.6.2	证明一个语言为 NP 完备	463
28.6.3	3-SAT	464
28.6.4	独立集合	465
28.6.5	VERTEX-COVER (顶点覆盖)	465
28.6.6	哈密尔顿线路与旅行销售员问题	467
28.7	P 与 NP 完备的关系	473
28.7.1	P 与 NP 完备间的空白	473
28.7.2	两个类似的线路问题	474
28.7.3	两个类似的 SAT 问题	474
28.7.4	两个类似的路径问题	474
28.7.5	两个相似的覆盖问题	475
28.7.6	三个类似的地图作色问题	476
28.7.7	两个类似的线性编程问题	477
28.7.8	Diophantine 方程问题的层次	478
28.8	Co-NP 语言类	478
28.9	时间层次定理、EXPTIME 及其他	479
28.9.1	时间层次定理	480
28.9.2	EXPTIME	483
28.9.3	比 EXPTIME 更难的问题	484
28.10	FP 与 FNP 问题类	484