



普通高等教育 “十一五” 国家级规划教材



21世纪大学本科
计算机专业系列教材

蒋宗礼 编著

形式语言与自动机理论
教学参考书 (第2版)

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

- 根据教育部“高等学校计算机科学与技术专业规范”组织编写
- 与美国 ACM 和 IEEE *Computing Curricula 2005* 同步



清华大学出版社

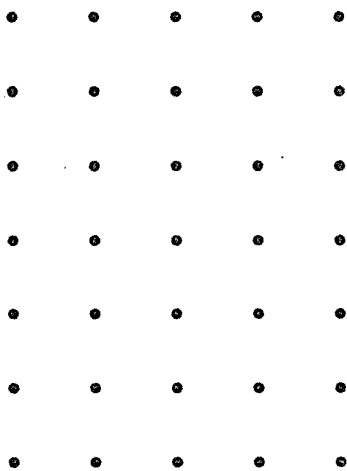


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪大学本科计算机专业系列教材

形式语言与自动机理论 教学参考书 (第2版)

蒋宗礼 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书根据作者对计算机科学与技术专业教育特点的理解和“21世纪大学本科计算机专业系列教材”编写的总体要求,作为《形式语言与自动机理论(第2版)》(主教材)一书的配套教学辅导用书,按照主教材的结构编写而成。本书包括有关内容的讲解、学习要点、问题分析、求解思路和方法、注意事项、典型习题的解析等内容,并且按照小节给出知识点和主要内容解读。为读者学习和掌握主教材中的知识点和问题求解方法,体会问题求解的核心思想提供帮助,对教师和学生来说,阅读这些内容都是很有意义的。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

形式语言与自动机理论教学参考书/蒋宗礼编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2007.7

(21世纪大学本科计算机专业系列教材)

ISBN 978-7-302-14971-2

I. 形… II. 蒋… III. ①形式语言—高等学校—教学参考资料 ②自动机理论—高等学校—教学参考资料 IV. TP301

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第046527号

责任编辑:张瑞庆

责任校对:时翠兰

责任印制:王秀菊

出版发行:清华大学出版社

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

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

印刷者:北京牛山世兴印刷厂

装订者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:16.75

字 数:320千字

版 次:2007年7月第2版

印 次:2007年7月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:25.00元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:025799-01

21世纪大学本科计算机专业系列教材编委会

名誉主任：陈火旺

主任：李晓明

副主任：钱德沛 焦金生

委员：(按姓氏笔画为序)

马殿富	王志英	王晓东	宁洪	刘辰
孙茂松	李大友	李仲麟	吴朝晖	何炎祥
宋方敏	张大方	张长海	周兴社	侯文永
袁开榜	钱乐秋	黄国兴	蒋宗礼	曾明
廖明宏	樊孝忠			

秘书：张瑞庆

本书责任编辑：宋方敏

序 言

PREFACE

21 世纪是知识经济的时代,是人才竞争的时代。随着 21 世纪的到来,人类已步入信息社会,信息产业正成为全球经济的主导产业。计算机科学与技术信息产业中占据了最重要的地位,这就对培养 21 世纪高素质创新型计算机专业人才提出了迫切的要求。

为了培养高素质创新型人才,必须建立高水平的教学计划和课程体系。在 20 多年跟踪分析 ACM 和 IEEE 计算机课程体系的基础上,紧跟计算机科学与技术的发展潮流,及时制定并修正教学计划和课程体系是尤其重要的。计算机科学与技术的发展对高水平人才的要求,需要我们从总体上优化课程结构,精炼教学内容,拓宽专业基础,加强教学实践,特别注重综合素质的培养,形成“基础课程精深,专业课程宽新”的格局。

为了适应计算机科学与技术学科发展和计算机教学计划的需要,要采取多种措施鼓励长期从事计算机教学和科技前沿研究的专家教授积极参与计算机专业教材的编著和更新,在教材中及时反映学科前沿的研究成果与发展趋势,以高水平的科研促进教材建设。同时适当引进国外先进的原版教材。

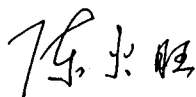
为了提高教学质量,需要不断改革教学方法与手段,倡导因材施教,强调知识的总结、梳理、推演和挖掘,通过加快教案的不断更新,使学生掌握教材中未及时反映的学科发展新动向,进一步拓广视野。教学与科研相结合是培养学生实践能力的有效途径。高水平的科研可以为教学提供最先进的高新技术平台和创造性的工作环境,使学生得以接触最先进的计算机理论、技术和环境。高水平的科研还可以为高水平人才的素质教育提供良好的物质基础。学生在课题研究中不但能了解科学研究的艰辛和科研工作者的奉献精神,而且能熏陶和培养良好的科研作风,锻炼和培养攻关能力和协作精神。

进入 21 世纪,我国高等教育进入了前所未有的大发展时期,时代的进步与发展对高等教育质量提出了更高、更新的要求。2001 年 8 月,教育部颁发了《关于加强高等学校本科教学工作,提高教学质量的若干意见》。文件指出,本科教育是高等教育的主体

和基础,抓好本科教学是提高整个高等教育质量的重点和关键。随着高等教育的普及和高等学校的扩招,在校大学本科计算机专业学生的人数将大量上升,对适合 21 世纪大学本科计算机科学与技术学科课程体系要求的,并且适合中国学生学习的计算机专业教材的需求量也将急剧增加。为此,中国计算机学会和清华大学出版社共同规划了面向全国高等院校计算机专业本科生的“21 世纪大学本科计算机专业系列教材”。本系列教材借鉴美国 ACM 和 IEEE 最新制定的 *Computing Curricula 2005* (简称 CC2005) 课程体系,反映当代计算机科学与技术学科水平和计算机科学技术的新发展、新技术,并且结合中国计算机教育改革成果和中国国情。

中国计算机学会教育专业委员会和全国高等学校计算机教育研究会,在清华大学出版社的大力支持下,跟踪分析 CC2001,并结合中国计算机科学与技术学科的发展现状和计算机教育的改革成果,研究出了《中国计算机科学与技术学科教程 2002》(China Computing Curricula 2002,简称 CCC2002),该项研究成果对中国高等学校计算机科学与技术学科教育的改革和发展具有重要的参考价值和积极的推动作用。

“21 世纪大学本科计算机专业系列教材”正是借鉴美国 ACM 和 IEEE CC2005 课程体系,依据 CCC2002 基本要求组织编写的计算机专业教材。相信通过这套教材的编写和出版,能够在内容和形式上显著地提高我国计算机专业教材的整体水平,继而提高我国大学本科计算机专业的教学质量,培养出符合时代发展要求的具有较强国际竞争力的高素质创新型计算机人才。



中国工程院院士
国防科学技术大学教授

21 世纪大学本科计算机专业系列教材编委会名誉主任

第 2 版前言

FOREWORD

“离散数学”和“形式语言与自动机理论”是计算机科学与技术专业本科两大专业基础理论课程,这两门课程不仅为学生提供本专业的基础知识,更肩负着培养学生计算思维能力的重要任务。在形式语言与自动机理论中,按照类研究问题的描述,并研究这些描述之间的关系、变换等,从而将问题的求解从实例计算推进到类计算和模型计算,这正是计算学科所追求的,也是本学科的工作者解决问题的着眼点和方法,以及所构建的系统的最大特点和优势。随着计算学科本科生和研究生教育的不断发展,这种优势将进一步的凸现。

从 2002 年到 2003 年,作者以近 20 年教学积累和相应的教案为基础,辅以 10 余年对教育教学的思考撰写成了《形式语言与自动机理论》和配套的《形式语言与自动机理论教学参考书》,这套书出版后,受到了广大读者的欢迎,一些相识的和不相识的读者对该书给予了充分的肯定,被选作本科生和研究生教材,成为国内相应课程发行最广的教材。2004 年这套书被评为北京市精品教材,并且荣获 2004 年北京市高等教育教学成果一等奖,2006 年被评为教育部普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

在这次修订中,又融进了近几年来作者在从事相关课程教学以及计算机科学与技术专业优秀教材建设中所获得的经验和体会。例如,进一步强调教材是写给读者的,不是写给自己的。而且强调教材的写作特征,认为在这些读者中,首先是写给学生,要考虑他们是初学者,不同类型的学生有不同的关注点,更需要强调用词和描述的准确性、一致性,语言表达的清晰性和叙述的完整性,杜绝陌生名词的突然出现和使用;其次是教师,面对他们,要考虑对现代教育思想的体现和课程的容量;第三是普通的读者,需要通俗易懂,可以提供一些问题的查阅。考虑到作为理论基础性课程教学所确定的内容的稳定性和相应课程关于人才培养的实际需要,本次修订没有追求对知识点及其讲述顺序的调整,主要是进一步提高其可读性、系统性、严密性,特别对一些不太容易掌握含

义的地方做了更清楚、更确切的描述,进一步提高了可理解性。

我们必须承认,本课程的基本内容高度抽象,虽然在写作中按照理工科人才培养的实际需要,强调了构造、等价变化等设计形态的内容,但是与其他的课程相比,也难免有一些难度。如何更好地解决这些问题,我们渴望读者能够给出宝贵的建议。另外,书中难免有这样或那样的错误,也恳请读者不吝赐教。联系地址: jiangzl@bjut.edu.cn。

作者

2007年4月

第 1 版前言

FOREWORD

计算机科学与技术学科要求学生具有形式化描述和抽象思维能力,并且能够很好地掌握逻辑思维方法。我们称其为“计算思维”能力,或者叫做“计算机思维”能力。当然,一种能力的培养决不是一、两门孤立的课程可以实现的,尤其是思维能力的培养更是如此。它需要一系列课程,并且通过长期的学习和实践来完成。

形式语言与自动机理论不仅对问题及其求解提供了良好的形式化描述工具,更在通过适当的描述和解析而降低难度之后,成为对本科生和研究生进行“计算思维”能力培养的一门重要技术基础课程。

抽象和形式化是本书所涉及内容的主要特点。在这里,既有严格的理论证明,又具有很强的构造性。包含一些基本模型、模型的建立、性质等。通过对本课程的学习,除了使学生掌握正则语言、下文无关语言的文法、识别模型及其基本性质、图灵机的基本知识以外,主要致力于培养学生的形式化描述和抽象思维能力。同时使学生了解和初步掌握“问题、形式化描述、自动化(计算机化)”的解题思路。这样,我们就扣上了“什么能被有效地自动化”这一计算学科的主题。

当我们用计算机进行问题的求解时,需要实现对“问题”所在系统的状态及其变换的描述,要用适当的数据在计算机中表示该问题,并用适当的算法通过对这些数据的变换来获得问题的求解结果。因此,对问题进行抽象和形式化表示,然后进行处理,是进行计算机问题求解的基本途径。形式语言与自动机理论给出了一类基本问题的基本描述与计算模型——抽象表示。并通过研究这些模型的性质及其变化方法来对这些问题进行研究。它们都是问题的数学模型化的典范,给计算机问题求解提供了一种优美而坚实的基础,而且,它也向人们展示了一种典型的方法和思想。另外,形式语言与自动机理论还是研究算法及其理论的基础。

形式语言与自动机理论对于一个计算机科学与技术工作者来说,是非常重要的。它已经成为国际上计算机科学与技术专业本科生的一门重要课程。ACM 和 IEEE

CC2001 和《中国计算机科学与技术学科教程 2002》(简称为 CCC2002)给出了明确的要求。这里面不仅含有本学科最基本的知识内容,更涉及本学科方法论中所包含的全部 3 个学科形态。它可以被用来引导学生站在更高的高度去看待问题,去粗存真,直击本质,抓住问题及求解的关键点,以“计算机”的方式解决问题。

《形式语言与自动机理论》一书包括了 CC2001 和 CCC2002 规定的全部相关知识单元的内容,并且完全满足 CC2001 建议的高级课程——自动机理论的教学大纲的要求。它不仅是后续课《编译原理》的理论基础,而且还广泛地用于一些新兴的研究领域。与国外现有的教材比较,《形式语言与自动机理论》一书主要突出了 3 个特点:①充分考虑国内教学计划的容量,进行内容的取舍和组织;②在培养读者的计算思维能力上做出进一步的尝试;③主要考虑国内读者的特点,并且按照国内的教学风格的要求讨论问题。本书将按照小节清晰地列举出相关知识点,给出主要内容的解读。通过这些,进一步地讨论讲解学习的要点、问题分析、求解思路和方法、注意事项等内容,为读者学习和掌握原书中的知识点和问题求解方法、体会问题求解的核心思想提供帮助。考虑到初学者在解答习题中将会遇到的主要困难,本书选择了一些典型习题,并且给出解答及分析。

形式语言与自动机理论课程的教学,最大的问题有两个,一是内容非常抽象,这就导致阅读起来比较枯燥,而且它的作用主要是在潜移默化中体现的,难以让学生看出其“用处”,似乎让人感到学习这门课程是在“自讨辛苦”,而且这种“辛苦”没有太大的意义,不如学习 Java 语言等编程更容易,更实用;其二是这些内容具有较大的难度,难以找到体验感性认识的具体实例,这就导致读者难以发现相关知识点的来龙去脉,以达到深入领会之目的。要想解决这两个问题,必须掌握问题求解的思想和方法,并且通过对它们的研究,来领略这门课程在高度抽象和形式化下的优美和乐趣,使这些看似抽象枯燥的内容活起来。实际上,许多内容都可能是读者自己的体会,哪怕这些体会是不完善的,甚至是过于理想化(理性)的,与历史不十分符合的。但是,它们一定是更理性的“思路”和“想法”。实际上,这正是人们在科学研究中所努力追求的。

虽然目前在国内的计算机科学与技术学科的本科生的课程教学计划中,设置形式语言与自动机理论课程的学校还不是很普遍,甚至在一些学校的研究生的培养方案中也还未开设此课程,但是,随着我国的计算机科学与技术学科教学的不断发展和条件的逐渐成熟,将会有越来越多的学校开设本课程。

本书共分 12 章。为了便于阅读,从第 1 章到第 10 章完全与原书结构相对应。第 1 章回顾在离散数学中学过的本书将要用到的一些基础知识,为后续的章节做好准备。由于主要是为了复习,所以这里给出的是知识点和应该注意的事项。除最后一节的“形式语言及其相关的基本概念”为新内容外,其他内容都可以由学生自学。第 2 章到第 8

章是教学的重点内容,主要讨论正则语言和上下文无关语言的文法、自动机描述及其性质。第9章对计算进行介绍,包括一般计算模型图灵机的概念、构造方法、修改,与计算相关的不可判定性、P-NP 等问题。第10章介绍上下文有关语言。在这些章节中,以知识点、主要内容解读、典型习题解析的形式,对讨论的内容进行归纳和解析。第11章对本书的内容按类进行全面总结。在第12章中安排了教学设计,从总体上讨论本课程的讲授等问题。

由于作者水平有限,书中的错误和不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

作者

2003年6月

目 录

CONTENTS

第 1 章 绪论	1
1.1 集合的基础知识	2
1.1.1 集合及其表示	2
1.1.2 集合之间的关系	3
1.1.3 集合的运算	4
1.2 关系	6
1.2.1 二元关系	6
1.2.2 递归定义与归纳证明	7
1.2.3 关系的闭包	7
1.3 图	8
1.3.1 无向图	8
1.3.2 有向图	9
1.3.3 树	10
1.4 语言	11
1.4.1 什么是语言	11
1.4.2 形式语言与自动机理论的产生与作用	12
1.4.3 基本概念	14
1.5 小结	17
1.6 典型习题解析	17
第 2 章 文法	24
2.1 启示	25
2.2 形式定义	27

2.3	文法的构造	31
2.4	文法的乔姆斯基体系	35
2.5	空语句	39
2.6	小结	40
2.7	典型习题解析	41
第3章	有穷状态自动机	54
3.1	语言的识别	55
3.2	有穷状态自动机	55
3.3	不确定的有穷状态自动机	61
3.3.1	作为对 DFA 的修改	61
3.3.2	NFA 的形式定义	61
3.3.3	NFA 与 DFA 等价	63
3.4	带空移动的有穷状态自动机	66
3.5	FA 是正则语言的识别器	68
3.5.1	FA 与右线性文法	68
3.5.2	FA 与左线性文法	70
3.6	FA 的一些变形	72
3.6.1	双向有穷状态自动机	72
3.6.2	带输出的 FA	73
3.7	小结	75
3.8	典型习题解析	76
第4章	正则表达式	84
4.1	启示	85
4.2	正则表达式的形式定义	85
4.3	正则表达式与 FA 等价	87
4.3.1	正则表达式到 FA 的等价变换	87
4.3.2	正则语言可以用正则表达式表示	90
4.4	正则语言等价模型的总结	92
4.5	小结	94
4.6	典型习题解析	95

第 5 章 正则语言的性质	99
5.1 正则语言的泵引理	100
5.2 正则语言的封闭性	101
5.3 Myhill-Nerode 定理与 DFA 的极小化	106
5.3.1 Myhill-Nerode 定理	106
5.3.2 DFA 的极小化	111
5.4 关于正则语言的判定算法	113
5.5 小结	114
5.6 典型习题解析	115
第 6 章 上下文无关语言	123
6.1 上下文无关文法	124
6.1.1 上下文无关文法的派生树	125
6.1.2 二义性	128
6.1.3 自顶向下的分析和自底向上的分析	131
6.2 上下文无关文法的化简	131
6.2.1 去无用符号	132
6.2.2 去 ϵ -产生式	136
6.2.3 去单一产生式	139
6.3 乔姆斯基范式	140
6.4 格雷巴赫范式	142
6.5 自嵌套文法	146
6.6 小结	147
6.7 典型习题解析	148
第 7 章 下推自动机	152
7.1 基本定义	153
7.2 PDA 与 CFG 等价	155
7.2.1 PDA 用空栈接受和用终止状态接受等价	155
7.2.2 PDA 与 CFG 等价	157
7.3 小结	159
7.4 典型习题解析	160

第 8 章	上下文无关语言的性质	167
8.1	上下文无关语言的泵引理	168
8.2	上下文无关语言的封闭性	171
8.3	上下文无关语言的判定算法	175
8.3.1	L 空否的判定	175
8.3.2	L 是否有穷的判定	176
8.3.3	x 是否为 L 的句子的判定	177
8.4	小结	179
8.5	典型习题解析	179
第 9 章	图灵机	182
9.1	基本概念	183
9.1.1	基本图灵机	184
9.1.2	图灵机作为非负整函数的计算模型	188
9.1.3	图灵机的构造	189
9.2	图灵机的变形	192
9.2.1	双向无穷带图灵机	193
9.2.2	多带图灵机	196
9.2.3	不确定的图灵机	198
9.2.4	多维图灵机	199
9.2.5	其他图灵机	200
9.3	通用图灵机	203
9.4	几个相关的概念	204
9.4.1	可计算性	204
9.4.2	P 与 NP 相关问题	205
9.5	小结	206
9.6	典型习题解析	206
第 10 章	上下文有关语言	220
10.1	图灵机与短语结构文法的等价性	220
10.2	线性有界自动机及其与上下文有关文法的等价性	223
10.3	小结	225

10.4	典型习题解析	225
第 11 章	内容归纳	229
11.1	文法与语言	229
11.2	正则语言	229
11.3	上下文无关语言	230
11.4	图灵机	231
11.5	上下文有关语言	232
第 12 章	教学设计	233
12.1	概述	233
12.2	课程内容体系	234
12.2.1	课程的基本描述	234
12.2.2	教学定位	235
12.2.3	知识点与学时分配	236
12.3	讲授提示	238
12.3.1	重点与难点	238
12.3.2	讲授中应注意的方法等问题	242
12.4	习题与实验	243
12.4.1	指导思想	243
12.4.2	关于大作业和实验	243
12.5	考试与成绩记载	244
12.5.1	成绩评定	244
12.5.2	考题设计	244
参考文献		246

第 1 章

绪 论

计算机科学与技术学科系统地研究信息描述及其变换算法,包括它们的理论、分析、效率、实现和应用。学科的根本问题是:什么能且如何被(有效地)自动计算。经过多年的发展,计算机科学与技术学科已经发展成为计算学科(computing discipline)。该学科既研究计算领域中的一些普遍规律,描述计算的基本概念与模型,又研究包括计算机硬件、软件(系统软件和应用软件)在内的计算系统设计与实现的工程技术。理论和实践在该学科占有重要地位,其中的理论扮演着重要基础的角色。这可以从计算学科(计算机科学与技术学科)方法论中找到依据。另外,深入分析不难发现,即使像形式语言与自动机理论这样的内容,也同时具有抽象、理论、设计 3 个形态的内容。对不同类型学生的教学,可以通过强调不同形态的内容来达到教学目的。

众所周知,建立物理符号系统并对其实施变换是计算机科学与技术学科进行问题的描述和求解的重要手段。“可行性”所要求的“形式化”及其“离散变换特征”使得数学成为重要工具。尤其是离散数学和计算模型无论从方法还是从工具等方面,更表现出它在计算学科中的直接应用。

虽然形式语言与自动机理论的论述只是用到集合、关系、图等基本概念,但是却不需要对这些基本概念进行过多的解释。因此,从知识的联系的角度来看,集合论和图论不一定要作为本课程的先修课。但是,从理解和掌握本课程的内容来讲,应该是在学习过集合论和图论,具有一定的知识基础和思维能力基础后,再开始本书内容的学习才是比较有利的。考虑到集合论和图论通常都被划入离散数学,所以,在本科生的教学计划中,形式语言与自动机理论被作为离散数学的后续课程。而如果是在研究生阶段学习形式语言与自动机理论,通常也假定学生具有离散数学的基本知识。为了平稳地过渡,本章首先简要回顾在离散数学中学过的部分基本概念和方法,包括:集合及其表示、集合之间的关系、集合的运算、无穷集合、二元关系及其性质、等价关系与等价类、关系的