

大学本科计算机专业教材系列

计算科学导论

· 赵致琢 著 ·

1

2

3

4

5

6

Q

W

E

R

T

A

S

D

F

G

科学出版社

大学本科计算机专业教材系列

计算科学导论

赵致琢 著

国家教委高等理科面向 21 世纪教学内容
与课程体系改革计划 (13-22) 资助项目

科学出版社

1998

内 容 简 介

本书以计算科学学科的特点、形态、历史渊源、发展变化、典型方法、学科知识结构和分类体系，以及大学本专业各年级课程重点等内容组织结构，阐述如何认识计算科学。

本书可作为大学计算机专业计算机科学导论课程的教材或教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

计算科学导论/赵致琢著.-北京:科学出版社,1998.2
(大学本科计算机专业教材系列)

ISBN 7-03-006392-9

I. 计… II. 赵… III. 计算机科学-高等学校-教材 IV. TP3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 25284 号

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1998 年 2 月第 一 版 开本: 850×1168 1/32

1998 年 8 月第二次印刷 印张: 6 3/4

印数: 3001—6 000 字数: 166 000

定价: 13.00 元

前 言

长期以来，计算科学（专业）教学计划中是否需要开设“计算科学导论”课程，如果开设这门课程，学时数安排多少，重点讲授什么内容等一系列问题在教育界存在不同认识。根据计算科学面向 21 世纪教学内容与课程体系改革课题研究工作的进展和体会，我们认为，还是有必要在计算科学专业教学中于第一学期开设“计算科学导论”这门课程。考虑到目前不少学校新生入学时安排几周军训，课程的学时数以安排 15—20 学时为宜。

在过去的二十几年里，已有不少学校的计算机科学系或计算科学专业开设了计算科学导论课程，并相继编写、编译和陆续出版了若干种《计算机科学导论》的教材，广泛地应用于高等学校的教学中。然而，随着教育界对计算科学教育认识的不断深化，原有教材的不足之处日渐呈现出来，主要表现在以下两个方面：

1. 大多数《计算机科学导论》教材在内容上写成了计算科学本科专业（基础）课程教学内容的—个简洁的压缩版，没有从—年级学生学习中普遍关心的问题出发，就学科特点、学科形态、历史渊源、发展变化、典型方法、学科知识组织结构和分类体系、各—年级课程的重点，以及如何认识计算科学，学好计算科学等问题从科学哲学和高级科普的角度去回答大家的疑问，因而难以起到后续课程导引的作用；

2. 导论的内容与后续课程的衔接缺乏科学的论证，也由于—年级学生尚缺乏学习后续课程必要的基础知识，而该课程以往在学时数的安排上又偏大，从而导致在内容上增加了不少本来应该由其它课程（包括实验课程）承担的教学内容，如计算机操作命令与汉字编码等，—些—些不应该进入教学计划与课程体系中的内容，如某些高级语言和某些数据库系统语言及其—应用等。其中

有一部分是学生进入高年级后如果有必要，能够很自然、很容易地自学掌握的知识。

由此可见，编写一本能够真正起到计算科学导论作用的新教材，已是一项紧迫的任务。这项看似简单的工作之所以一直做得不尽圆满，除了认识上的原因之外，很重要的一条是对作者的要求较高。如果没有对计算科学学科历史渊源、学科特点、学科知识组织结构、学科发展规律和趋势等内容的整体把握，没有长期在第一线从事计算科学研究工作的体会、经验和教训，要写好这本书是不容易的。我们创作的这本教材便是在这样一种背景下面向计算科学专业一年级学生所作的一次探索与尝试，是否合适，还有待实践检验。

本书的写作是建立在科学研究基础之上的。对内容的取舍，我们着重引用计算科学面向 21 世纪教学内容与课程体系改革课题的一些研究结果来设计各个章节，具体内容系参考国内外一大批科学技术文献后，综合作者多年来从事计算科学研究工作的心得与体会写成。本书可作为计算科学（专业）一年级计算科学导论的试用教材，参考学时数为 15—20 学时。第一章至第三章的内容是课程的重点，建议各系应选派在第一线从事计算科学研究，学有所成的科学家担任本课程的教学并使用投影仪进行教学。我们希望授课教师能在一种轻松的气氛中以类似于讲故事或聊天的形式，将前三章的主要内容介绍给学生。第四章的内容是由其在学科整个教学计划与课程体系中的地位以及受教学计划进度表的时空限制等因素确定的，约占 10—12 个学时。其中，打“*”的小节也可以不学。前三章的内容虽然重要，但却应以学生自学为主，教师辅导为辅，原因是这些内容对学生只是起一个导论的作用，要真正弄明白其内涵，只能在今后的学习中逐步完成。采用课堂讨论的方式初步解决学生在学习前三章的内容时存留的问题也许值得一试。

与本书相呼应的教学课程可以是第一学期的计算机实验。在实验课的教学中，学生应该在实验课教师的指导下具体动手操作

计算机，掌握一些简单的操作技术，提高感性认识。由于近年来入学的学生在熟悉使用计算机方面差别较大，计算机实验课尤其应注意因材施教。各系应积极针对一年级学生编写《计算科学实验》。我们在附录中开列了一些实验单元的参考目录。对一些已经有了程序设计经历的学生，可以考虑安排熟悉各种流行的、重要的计算机软件的使用，特别是网络软件。而对那些从未接触过计算机的学生，则一切应从头开始。要注意的是，教师不必强调学生在计算科学导论课程中对主要内容掌握的熟练程度，也不必强调学生在计算机实验课程中对操作的熟练程度，这些不是一年级学生学习的重点内容。我们建议计算科学导论和计算机实验课程期末考试方式定为考查。

本书的内容重在引导学生怎么从科学哲学的角度去认识和学习计算科学，也包括为学习后续课程准备的布尔代数的基础知识。这些内容对学生学好计算科学，顺利完成学业是有益的。在学习中，学生可能会对前三章的一些内容理解不准确、不深刻、不全面，这是正常的，无须大惊小怪。但是，本书中带有结论性的观点、方法和认识学生应牢记在心。这不仅因为它们是计算科学（教育）界多年来经验的积累，而且，随着同学们学习的不断深入，知识的不断积累，会进一步加深对这些观点、方法的认识，有助于大家学好计算科学，顺利完成学业。教学中，有条件的学校可以配发一些计算科学的课外读物，诸如科学人物评传，与计算科学有关的一些经典的综述性论文、报告文献等。

我国计算科学专业已有几十年的办学历史，在实践中积累了一些经验。从最近十年内的办学情况来看，许多学校，特别是1985年以后建立计算机科学系的学校，由于师资队伍水平、办学经费投入等许多方面的因素，对计算科学的认识存在偏差，主要体现在教师和学生对支撑计算科学发展所需要的基础估计不足，对计算科学专业学习的艰巨性估计不足。这两种估计不足导致专业教学计划对基础课程和专业基础课程的重视程度不够，对计算科学实验课程的重视程度不够，其结果是大多数学校的教师和学生把

这一技术科学当成一般工科专业来对待，基础课程和专业基础课程在全部课程中所占的比重下降，基础课程和专业基础课程的教学深度普遍下降。师生过多地将教学精力投入到简单的上机实践中而倾向于知识扩展的外延发展，忽视了课堂教学和实验教学本来应该走内涵发展的道路这一学科的客观要求，淡化了对基础理论知识的学习，忽视了从理论联系实际的角度出发，在教学中加强对计算机基本实验技术的掌握，从而使人才培养偏向职业技术教育。从根本上说，计算科学这样一种人才培养倾向直接威胁到我国计算科学学科（科学研究和高等教育）的发展和计算机产业参与国际竞争。

计算科学专业的学习是一项十分艰巨的劳动，不少近年来成长起来的青年科学家和工程师有同感。经验告诉我们，学习计算科学甚至比学习基础数学还要困难，因为其不少理论课程在深度上不比数学课程更简单，同时学生又要面对大量实践内容的学习，知识更新周期很短。理论与实践相结合，理论与实践的统一是计算科学的一大特点，它决定了在学习中学生要经常不断地在严密的逻辑思维与形象的实验操作之间转换学习方式，这对大多数人不是一件轻松的事。何况计算科学学科发展极快，在工作中对知识组织结构的补充与更新任务犹如泰山压顶，让人喘不过气来。难怪一些计算科学大师们感叹：“计算科学是年轻人的科学。”这就是说，一旦你选择了计算科学作为你终生为之奋斗的专业领域，就等于你选择了一条布满荆棘的道路，一条充满艰辛的人生之路。一个有志于从事计算科学研究与开发的学生，必须在大学的几年学习中打下坚实的基础，才有可能在将来学科的高速发展中，或在计算机产品的开发和快速更新换代中有所作为。当然，这样形容不一定能让读者信服，还是应该从学科本身的发展和内在规律方面去找出根据，让学生从根本上认清学好基础课程的重要性。

教材的写法理应贯彻让不同水平的读者都有收获的文学创作原则，此正所谓“深者得其深，浅者得其浅”的作品境界。当然，要做到这一点，不是一件容易的事情，何况书中的内容作这样的

安排仅反映了作者的认识，至多也只是一家之说，难免出现谬误或不足之处，这是需要说明的。作者真诚希望使用本书的教师和学生能够将心得体会告诉我们，欢迎读者批评指正。倘若这本教材能够成为有志于计算科学事业的学生和读者在各个不同的学习时期的一本有用的导引，真正起到一些“导引”的作用，作者将感到由衷的欣慰。

作者在写作时，参考了不少国内外的学术著作和文献资料，但未列出参考文献的目录。这并非作者有悖于科学道德，而是对所有一年级的大学生，我们确实不希望他们将学习的重点放在这门课程之上，更不希望他们在对科学的热情和好奇心的驱使下花费大量的时间去阅读大量的专业参考文献，因为本书的内容不是大学一年级的学习重点，仅仅是一个导论而已。这一点，尤其需要向读者作一个简单的说明和交代。

作者通信地址：

361005 福建省厦门市厦门大学计算机科学系

E-mail: zzzhao@xmu.edu.cn

作 者

1997年7月于厦门大学海滨寓所

致 谢

本书的写作与出版得到许多友人的鼓励与帮助。最初的写作构思曾经与上海交通大学的侯文永教授、中山大学的李师贤教授、哈尔滨工业大学的蒋宗礼教授讨论过，受到不少启发。北京工业大学的刘椿年教授与南京大学的许满武教授作为主审人，对初稿进行了全面、认真的审查，纠正了书稿中的一些不当之处，提出了一些很好的修改意见；特别是石家庄经济学院的刘坤起讲师，他仔细审读了六遍原稿，逐字、逐句、逐条细究，对书稿提出了许多批评意见；吉林大学的姜云飞教授，中山大学的李师贤教授，中国地质大学的孟永良教授，中国科技大学的岳丽华副教授，国防科技大学的朱海滨副教授，厦门大学计算机科学系的蔡经球教授、叶仰明副教授、杨晨晖讲师和达力讲师等在阅读了初稿后，也提出了许多意见。他们的意见，促使我对本书初稿进行了全面修改，从而使书的内容更丰富，读者更易理解，确实令书稿增色不少。作者敬仰他们对中国计算科学教育事业的热诚与敬业精神，衷心感谢他们对本书出版给予我个人的关心和帮助。

本书的写作还得到了国家自然科学基金项目的资助。

《计算科学导论》的出版得到厦门大学教务处林铁民教授、吕子玄副处长的关心和支持，计算机科学系的林炳辉高级工程师、张继红工程师和张秋月、韩美珍等工作人员为书稿的准备提供了支持。厦门大学教材出版基金和厦门大学计算机科学系也为本书的出版提供了经费和设备的支持。在此，作者向有关部门和个人一并表示感谢。

赵致琢

1997年7月20日

目 录

前 言 致 谢

第一章 计算科学的基本概念和基本知识	(1)
1.1 计算模型与二进制.....	(1)
1.1.1 计算模型与图灵机	(2)
1.1.2 二进制	(6)
1.2 存储程序式计算机的基本结构与工作原理.....	(9)
1.3 数字逻辑与集成电路	(12)
1.4 机器指令与汇编语言	(14)
1.5 算法、过程与程序	(16)
1.6 高级语言与程序设计技术和方法	(25)
1.7 系统软件与应用软件	(28)
1.8 计算机组织与体系结构	(29)
1.9 计算机网络与通信	(30)
第二章 计算科学：它的意义、内容和方法	(34)
2.1 什么是计算科学	(34)
2.2 计算科学发展主线	(39)
2.2.1 计算模型与计算机.....	(41)
2.2.2 计算模型、语言与软件开发方法学.....	(57)
2.2.3 应用数学与计算机应用.....	(69)
2.3 计算科学的分类与分支学科简介	(90)
2.3.1 构造性数学基础（数理逻辑、代数系统、图论、集合论等）.....	(90)
2.3.2 计算的数学理论（计算理论、高等逻辑、形式语言与自动机、形式语义学等）.....	(98)
2.3.3 计算机组成原理、器件与体系结构（计算机原理与设计、体系结构等）	(101)

2.3.4	计算机应用基础(算法基础、程序设计、数据结构、数据库基础、微机原理与接口技术等)	(102)
2.3.5	计算机基本应用技术(数值计算、图形学与图像处理、网络、多媒体、计算可视化与虚拟现实、人工智能等)	(103)
2.3.6	软件基础(高级语言、数据结构、程序设计、编译原理、数据库原理、操作系统原理、软件工程等)	(104)
2.3.7	新一代计算机体系结构与软件开发方法学(并行与分布式计算机系统、智能计算机系统、软件开发方法学等)	(106)
2.4	计算科学与数学和其它相关学科的关系	(107)
2.4.1	为什么说数理逻辑和代数是计算科学的主要基础	(107)
2.4.2	计算科学与其它相关学科的关系	(110)
2.5	计算科学的学科形态与核心概念	(111)
2.6	计算科学的典型方法与典型实例	(115)
2.7	计算科学学科特点、发展规律和趋势	(121)
2.8	计算科学知识组织结构及其演变	(124)
第三章	计算科学教学计划与课程体系	(130)
3.1	计算科学(专业)的培养规格和目标	(130)
3.2	一个计算科学(专业)参考教学计划与课程体系	(135)
3.2.1	计算科学专业本科生A类教学计划与课程设置进度表	(135)
3.2.2	计算科学专业本科生B类教学计划与课程设置进度表	(142)
3.3	如何学好计算科学	(143)
3.3.1	如何实现思维方式的数学化	(143)
3.3.2	计算科学专业各学期重点课程	(156)
3.3.3	实验课程在计算科学教学计划中的作用和地位	(157)
3.4	理解科学与科学素养	(160)
第四章	布尔代数基础	(163)
4.1	集合的基本概念与基本运算	(163)
4.1.1	从属与包含关系	(163)

4.1.2	集合的基本运算和基本关系	(165)
4.2	自对偶的公理系统	(172)
4.2.1	布尔代数公理系统	(172)
4.2.2*	标准形式和公理系统的完备性	(184)
习 题	(191)
附录	计算机科学系一年级 (上) 计算科学实验参考目录	
	(193)
后记	(195)

第一章 计算科学的基本 概念和基本知识

本章主要介绍一些计算科学的基本概念和基本知识，以便帮助读者较为顺利而又自然地学习后面章节的内容。

1.1 计算模型与二进制

数学不等于计算，但数学确实起源于对计算的研究。在数学发展的初期，针对实际问题研究计算方法和技术是当时的一大特点。之后，从古希腊数学家开始，出现了对计算的根本问题，即可计算性的研究。不过，那时的可计算性研究与本世纪不同，其成果只是关于某些问题类的不可计算性。例如，直角三角形的直角边与斜边之长是不可通约的；一元五次以上方程式不存在通解公式等。这是中学时读者就已经知道的两个基本事实。随着许多计算问题得到解决和不可计算问题类的不断积累，由于问题的种类繁多，互不相同，不仅从认识上难以统一已有的成果，而且也使几百年来几代数学家渴望制造出计算机器的梦想因缺乏科学理论而未能成功。无数次的失败使科学家认识到发展计算模型，研究最一般的问题类的可计算性的重要性。

说到计算模型和数学，总免不了要涉及到形式化与形式化方法的概念。我们说，形式是事物的内容存在的外在方式、形状和结构的总和。所谓形式化是将事物的内容与形式相分离，用事物的某种形式来表示事物。形式化方法是在对事物描述形式化的基础上，通过研究事物的形式变化规律来研究事物变化规律的全体方法的总称。下面的例子可以帮助读者理解。

有两个幼儿园的小朋友，他们天天在一起。开学的第一天，下

午放学前，老师给他们每人发了两个梨。俩人舍不得吃，将梨放在一起，数了数一共是四个。第二天，老师给每人发了两个橘子。他们还是舍不得吃，又将橘子放在一起，数了数，也是四个。俩人感到奇怪，梨和橘子明明白白是不一样的，怎么放在一起都是四。于是，他们去问老师，得到回答：你们的问题涉及到数学的加法运算。

在数学家看来，两个梨与两个梨合在一起和两个橘子与两个橘子合在一起形式上是一样的，可以抽象地看成是 $2+2=4$ 。一旦不考虑梨、橘子或其它东西的内在区别，而只考虑其外在的某种形式，譬如数量，那么，每个小朋友分到的梨就是2，分到的橘子也是2，合起来都是4。由此，可以抽象出加法中的一条形式化的运算规则： $2+2=4$ 。

1.1.1 计算模型与图灵机

本世纪30年代是计算模型研究取得突破性进展的时期。由于受到数理逻辑发展中判定问题引起的计算模型研究和构造性数学学派的影响，哥德尔(K. Gödel)、丘奇(A. Church)、图灵(A. M. Turing)、波斯特(E. L. Post)等人在研究中陆续提出了一批计算模型，如递归函数、 λ 演算、图灵机、波斯特系统等，并称这些模型是用算法方法解决问题的极限。即凡是能用算法方法解决的问题，也一定能用这些计算模型解决；反之，这些计算模型解决不了的问题，任何算法也解决不了。进一步的研究发现，这些计算模型之间在能力上是等价的。其中，以图灵机的特点和性质更接近普通人计算的思想方法，又因其好用而被现代计算机的研究、开发者所采纳。

所谓计算模型是刻划计算这一概念的一种抽象的形式系统或数学系统，而算法是对计算过程步骤（或状态）的一种刻划，是计算方法的一种能行实现方式。由于观察计算的角度不同，产生了各种不同的计算模型。例如，递归函数是将可以计算的问题用函数来表示，从考察可以计算的函数应具有怎样的构造入手研究

计算，而图灵机则是从计算的一般化过程来研究计算。

在递归函数的研究中，从少数几个初始函数出发，通过有穷次地使用函数的代入运算、复合运算、以及原始递归等运算，就可以构造出大量复杂的函数。初始函数可以是下面的几个简单的函数：

- (1) $s(x) = x + 1$ (后继函数)；
- (2) $o(x) = 0$ (零函数)；
- (3) $U_j^{(n)}(x_1, x_2, \dots, x_n) = x_j$ (射影函数)。

由于初始函数十分简单，它们显然都是可以计算的（即使用笔和纸经有穷次运算就可以求得函数值）。因此，如果能够保证今后使用的函数的代入运算、复合运算、以及原始递归等运算都是能行可以计算（如使用笔和纸进行计算，或图灵机可计算）的，那么，我们就可以构造出大量可以计算的函数。换言之，我们希望一个函数是否可以计算的判定问题，能够化归为对函数的构造的研究。早期，可计算性理论中关于递归函数理论的研究是先于图灵机建立的，但后来，在图灵机出现之后，关于可计算性理论的研究更多地转向对以图灵机为基础的可计算性研究。至 50 年代，后人比较完整地建立了图灵机与递归函数之间的关系。

下面，我们介绍图灵机的基本概念。

图灵机由一条两端可无限延长的带子，一个读写头和一组控制读写头工作的命令（控制器）所组成，如图 1.1 所示。这条带子上划分了无穷多个可写、可擦的小格（可以想象成计算机的存储器）。读写头可以沿带子方向左右移动并在带上读写（可以将读写头与带子的关系理解成录音机中的磁头和磁带的关系）。每个图灵机有一个状态集 Q ，其中包括一个开始状态和一个结束状态，它还有一个符号集 S ，其中包括一个空白符号，一般只使用 0 和 1 两个符号，0 代表空白符。图灵机工作时，首先从开始状态启动，每次动作都由控制器根据图灵机所处的当前状态和读写头所对准的符号决定下一步的动作（或称操作）。其中，每一步操作包含三件事：第一，把某个符号写到读写头当前对准的那个小格内，取代

原来的那个符号（注意，这里隐含了可擦、不写的功能）；第二，读写头向左或向右移动一格，或者不移动；第三，根据控制器的命令用某个状态（可以是原状态）取代当前的状态，使图灵机进入一个新状态。

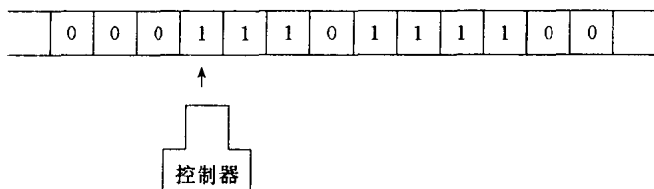


图 1.1

控制器的命令可表示为：

（状态，符号）→（写符号，移动，状态）；

一旦图灵机的运行中进入了一个状态，而且这个状态是一个结束状态，那么，图灵机就停机，计算任务宣告完成，此时带上的内容就是计算的输出结果。

由上面的非形式定义我们已经知道，图灵机是一种数学自动机器，控制器的命令相当于程序指令。对图灵机的工作过程从不同的角度考察，可以给予不同的解释。

第一，把图灵机看作识别器，即判断带子上最初的内容能否被图灵机所接受。假定图灵机从左向右扫描完带子上的内容后停机则为接受，否则为不接受。

例 1 一台图灵机可以设计成识别下面的序列：

1000110, 10011101, 010101011。

第二，把图灵机看作生成器，对给定的输入集合，考察输出集合，并研究输入输出集合性质之间的关系，这就研究了图灵机的生成能力。

例 2 设一台图灵机的输入集合为 $I_n = \{1^n 0^n \mid n \in N\}$ ，可设计一台图灵机，对给定的输入集合 I_n ，得到输出集合 $Out = \{0^n 1^n \mid n \in N\}$ 。其中， N 是全体自然数的集合。

第三，把图灵机看作计算器，相当于一个函数。图灵机的输入是函数的自变量的值，图灵机的输出是函数的值。

例 3 图灵机可以计算下列函数：

(1) $s(x) = x + 1$;

(2) $o(x) = 0$;

(3)
$$\begin{cases} A(0, y) = y + 1, \\ A(x + 1, 0) = A(x, 1), \\ A(x + 1, y + 1) = A(x, A(x + 1, y)). \end{cases}$$

第一和第二个函数读者不难从图灵机的定义出发感悟到它们是图灵机可以计算的函数，而第三个函数就比较复杂，一时难于判断。顺便提一下，第三个函数叫做阿克曼函数，它是阿克曼 (W. Ackermann) 在研究原始递归函数和递归函数的关系时给出的。这个函数在计算理论中具有重要价值。事实上，图灵机还可以计算形式上比第三个函数更复杂的函数。当然，这超出了本书的内容，它们属于可计算性理论或递归函数论课程所研究的范畴。

沿着这样一种思路，图灵机被证明具有很强的计算能力，它与 30 年代发展的递归函数论（一种能行可计算性理论）中一类最一般的可计算函数（部分递归函数或部分可计算函数）在计算表达能力上是等价的。然而，图灵机简洁的构造和运行原理隐含了存储程序的原始思想，深刻地揭示了现代通用电子数字计算机最核心的内容。尽管在递归函数论的研究中，通用机定理在揭示存储程序式思想方面也与图灵机有着异曲同工之妙，但没有图灵机来得明显和易于为一般人所理解。原因是图灵机可以动态地描述计算的整个过程，而递归函数只可能从结构上给出一种静态表示。

本世纪 40 年代，在图灵机提出后不到 10 年，世界上第一台存储程序式通用电子数字计算机就诞生了。随着 70 年代英国政府对第二次世界大战时期一些档案的解密，从科学史的研究和另一位对现代电子数字计算机研制作出突出贡献的科学家冯·诺依曼 (Von Neumann) 本人的谈话记录都证实了图灵对存储程序式计算机设计思想的杰出贡献。