

■ 国外优秀信息科学与技术系列教学用书

ALGORITHMICS

The Spirit of Computing (Third Edition)

算法学

第三版

翻译版

——计算精髓

■ [英] David Harel 著
Yishai Feldman

■ 霍红卫 译



高等教育出版社
Higher Education Press

TP311/57

2007

国外优秀信息科学与技术系列教学用书

算 法 学

——计 算 精 髓

(第三版 翻译版)

ALGORITHMICS

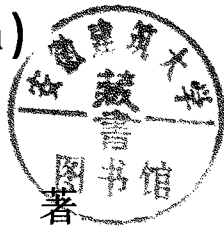
The Spirit of Computing

(Third Edition)

[英]

David Harel

Yishai Feldman



霍红卫 译



高等教育出版社

Higher Education Press

图字: 01 - 2005 - 0274 号

Algorithmics: The Spirit of Computing, Third Edition

David Harel, Yishai Feldman 著, 霍红卫 译

© Addison Wesley Publishers Limited 1987, 1992, Pearson Education Limited 2004.

This translation of *Algorithmics: The Spirit of Computing, Third Edition* is published by arrangement with Pearson Education Limited.

原版 ISBN: 0 - 321 - 11784 - 0

**For sale and distribution in the People's Republic of China exclusively
(except Taiwan, Hong Kong SAR and Macao SAR).**

仅限于中华人民共和国境内(但不包括在中国香港、澳门特别行政区和中国台湾地区)销售发行。

图书在版编目(CIP)数据

算法学: 计算精髓: 第3版/(英)哈雷尔(Harel, D.),
(英)费尔德曼(Feldman, Y.)著; 霍红卫译. —北京:
高等教育出版社, 2007. 6

书名原文: *Algorithmics: The Spirit of Computing*,
Third Edition

ISBN 978 - 7 - 04 - 021681 - 3

I. 算… II. ①哈…②费…③霍 III. 算法分析 -
高等学校 - 教材 IV. TP311

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 064254 号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京民族印刷厂		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787 × 1092 1/16	版 次	2007 年 6 月第 1 版
印 张	31	印 次	2007 年 6 月第 1 次印刷
字 数	700 000	定 价	39.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 21681-00

前言

(为第一版而写)

本书讲述了一个故事。这个故事涉及计算机科学的基本概念、思想、方法和结果。它并非专门论述计算机技术,也不讨论计算机程序设计,尽管深受这两者的影响。

本书旨在填补计算机变革的相关文献中的一些恼人的空白。对优秀著作的结构、工作方式和操作的细节的评价,可在计算机自身中找到。用数量不断增加的各种语言编写的关于计算机程序设计的书籍数不胜数。这些书籍面向不同层次的读者对象,其中有些面向没有任何计算机背景的人员,有些面向大多数计算机专业人员。此外,关于技术之外主题的书籍,如关于计算机变革的社会性问题和法律问题的书籍以及描述计算机在各领域中应用的书籍,也有很多。所有这一切都不足为奇。人们对计算机那么好奇,想知道如何使用它们。人们通常只对某种计算机感兴趣,且常常用于特殊目的。

因而有许多计算机教材。实际上,计算机科学是一门快速成长的学科,越来越多潜在的学生叩开了招生办公室的大门。完善的学科通常会产生优秀的教材,计算机科学也不例外。在过去的若干年里,出现了许多全面、清新的教科书,包括认为是适合于计算机科学学生的某些主题的详细技术解释。然而,尽管某些技术革新会很快过时并且被新的技术所替代,但是计算的科学基础以及计算机科学课程中许多重要的基本概念如果有变化的话,变化也是缓慢的。当然,新技术和新语言要求修订科学重点,并最终反映在科学文献中。然而,基本上,人们几乎一致地认为应该把基本课题的核心内容教给计算机科学的学生。

显然,与计算机相关的每一个人都应该了解这些课题,而不仅是那些已决定花3~4年的时间获得某个专业文凭的学生们。然而,假定我们确实需要发生变革,即使与计算机根本无关,许多课题以及与之相应的特殊思维方式,对于探究者都会是有效的。

主要关注计算机或程序设计的书籍应该满足完全不同的需求。计算机是由位和字节组成的,而程序设计是利用具有严格语法规则和符号的语言来实现的。因此,计算机图书常常患有“位/字节综合症”,而程序设计图书常常患有“分号综合症”。换言之,读者主要受制于某种计算机原理或某种程序设计语言的语法规则(或两者兼而有之)。如果不首先对机器或通信介质(或两者)做详细描述,就不能解释事物。

许多高级教科书确实探讨一些基本问题,但本质上,还是要把重点放在某些课题上,且通常放在不适合一般读者的高级技术课题上。对于面向全日制计算机科学学生的教材,即使专业程序员和系统分析师也可能缺乏通读这些书所需的背景或动力。

令人不解的是,似乎很少有书面材料专门探讨**计算科学**,并同时面向一般的技术读者和计算机专业人员。鉴于类似的文献在其他大多数科学领域,如物理学、生物学、化学和数学(不包括人文和艺术)中十分丰富,因此,这种情况无疑是令人奇怪的。对计算机科学的基本原理进行技术细节的详细解释看来已刻不容缓;这种解释应尽量避免“位/字节综合症”或“分号综合症”及其派生结果的影响,超越技术和语言细节,并对久经世故的外行和计算机专家都有所帮助。我们似乎一直都太忙于变革,以至于无法去考虑这种需要。

本书将尝试朝着这个方向努力。本书的目标是对计算机科学中一些最重要和最基本的课题,给出一种可读的解释,以一种实质上不受特定计算机、语言和某些形式主义细节影响的方式,重点阐述计算机科学的基本原理和本质。

编写本书的想法源自本书第一作者1984年10月至1985年1月在Galei Zahal——以色列国家广播电台中的一个频道——所做的一系列讲座。这个讲座的内容在本书中称为**算法学**,即算法研究。算法是一种抽象的方法,它规定了人、计算机或通过其他手段执行的一个过程。因此,它表示一种非常抽象的概念,具有无数的应用。然而,它的主要兴趣和用途是在由计算机执行过程的那些领域。

本书可用于计算机科学系的一学期初级课程,或用于科学和工程院校的一般计算机科学文化课程;也可用于与计算机有关的各种教育活动——从计算机科学的基本程序设计课程到高年级研究生或本科生的学位课程的补充读物。本书的直接目的不在于培养更好的程序员或系统分析师,而是通过提供一个与人们工作相关的最基本问题的全景图,来帮助人们使用计算机。

预备章节讨论**算法学问题**的基本概念以及解决该问题的**算法**,然后概略地讨论算法的**结构**、**算法操纵的数据**以及所用的**编程语言**。按照计划,本书第二部分转向讨论算法设计的一般方法和范型。接下来的两章分别讨论**算法分析**、处理以及算法的**正确性和效率**(主要指时间效率),前者包括构造算法的技术,后者包括对算法的评价。本书第三部分专门讨论有效可执行算法的**固有局限性**以及实现这些算法的计算机的固有局限性。某些精确定义的问题,包括重要的和实际的问题,被证明是任何合理大小的计算机在任何合理时间内(比如说一个人的有生之年)都是不可解的,而且永远不可解。更糟糕的是,已经证明某些问题,即使有无限的时间,也根本不可能用计算机解决!在本书第四部分^①,我们放宽了要求,例如,通过利用**并发活动**或**抛硬币**的方法,可以解决其中一些难题。这些章节还将讨论反应式系统和分布式系统以及密码学。最后将讨论计算机与**人工智能**之间的关系,重点讨论“软”启发式搜索或直觉、人工智能的本质以及把它与算法学中的“硬”课题联系起来的相关问题。

本书是为按顺序阅读或学习而编写的,而不是仅作为一种参考。本书内容是这样编排的:每一章都基于前面的章节,同时也考虑到了内容的流畅性与易读性。第一部分“预备知识”中的大

^① 见下一节,“第三版新增内容”,因第三版增加了第五部分,划分有些不同。

部分内容对于具有程序设计背景的读者来说应该还是比较熟悉的。因此,这些读者可以快速浏览第1章、第2章以及第3章的部分内容。

某些段落包含技术性较强的内容,读者可以跳过这些内容,而不会严重破坏连贯性。我们有意将这些段落的字体设置成楷体,而且段落前标注有“本节说明”。然而,我们建议,即使跳过这些段落,至少应对其内容有一些简单的了解。

在适当的地方,本书将简要讨论计算机科学家当前感兴趣的研究课题。本书后面附有详细的各章参考书目的注释,并通过“后向”指针把本书中的讨论与相关文献联系起来。

希望本书将会促进积极参与计算机变革的各种小组人员之间的交流,推动小组人员和暂时只是观察者之间的交流。

David Harel

宾夕法尼亚州,匹兹堡

1987年2月

■ 第二版新增内容

本书第一版是按照自始至终顺序阅读而编写的,而且可以用做许多课程的补充读物。只基于本书教授一门课程是可行的,但要求教师准备习题、增加例子,并在某些地方进行更详尽的讨论。第二版包含大量的习题以及大约1/3习题的解答。可用题答作为教材的补充。共有3章没有提供习题。第1章是绪论;第3章的大部分内容实际上只是若干程序设计语言的概括介绍;第12章是对人工智能^①领域某些课题的非技术性解释。从某种意义上说,这3章不是本书主题——算法学的组成部分,因此在基于本书进行教学的课程中,这些内容可留做课外阅读。

除了第11章新增了一节内容,描述交互证明和零知识的一些新课题以外,教材本身绝大部分内容保持不变。读者可能会惊奇为什么本书没有做更广泛的修订,难道自第一版问世以来的5年中,计算机科学家一直是无所事事吗?本书不是以此作为评判这一领域的准则,我认为本书包含的课题具有真正的基本特性,因而毋需做重大改变。本书中所讨论的问题可能是基本的和永恒的问题。也许术语“经典”最合适。

David Harel

宾夕法尼亚州,匹兹堡

1991年5月

① 同样,见下一节,“第三版新增内容”,因为一些章的编号已经改变了。

■ 第三版新增内容

这一版中很多地方做了重大修改。与前两版相比,这一版有几个重要的变化,包括新增加的两章、新增加一些小节和其他内容。

第一个值得注意的变化是,为了这次修订,我需要真正的帮助,幸运的是,有 Yishai Feldman 的加入。他全面参与了修订,但他承担的最重要的部分是彻底修订了关于程序设计语言的内容,并编写了新增加的关于软件工程的一章。

主要变化如下:

本书现在包含 5 个部分,而不是 4 个部分。第一部分(**预备知识**)中的第 3 章已完全重写,现在的标题是“程序设计语言和范型”。所讨论的语言列表也已修订,并组织成范型,因此能够针对我们在计算机上编程时所使用的语言提供更丰富、更新的说明。对某些语言(例如 APL 和 SNOBOL)的讨论已经删除,并且增添了其他一些语言(例如 C、C++ 和 JAVA)的讨论。

对于第二部分(**方法和分析**)和第三部分(**局限性和健壮性**),例如第 4~9 章,无需进行彻底的修改,这也可归因于所选课题的“经典”本质,如在上面“第二版新增内容”中提到的那样。

第四部分(**松弛规则**)的第 10 章前面的标题是“并行和并发”,现在称为“并行、并发及其他模型”。这一章新增加了关于量子计算的内容,包括 Shor 的因子分解算法以及关于分子计算的讨论。可以认为这些课题是并行的其他形式,虽然它们更基本。第四部分的其余两章,是通过把概率算法(第 11 章)与密码学(现为第 12 章)分开而形成的(在以前的版本中,这两章内容是合在一起的),并通过讨论这些领域的新进展扩展了这两章的内容。

第五部分(**更宏伟的蓝图**)用以前版本中的最后一章“算法学与智能”作为结束,现在它是第 15 章。在这一章之前增添了两章:第 13 章“软件工程”和第 14 章“反应式系统”。第 13 章概括介绍了在大型软件系统的开发中出现的争论和问题。第 14 章重点介绍了在反应式系统的特例中出现的特殊难题,作为复杂行为随时间变化的结果。

除了这些值得注意的变化之外,整个教材以各种方式进行了更新,包括对抽象数据类型、某些 NP-完全问题的非近似性、概率上可检查的证明以及全新的素性测试的 AKS 多项式时间算法的讨论。最后一章也在多处做了修改,例如,增加了关于中文屋论证的讨论。

虽然习题和解答与第二版中的基本相同,但参考书目注释则是取自完全不同的素材。计算机科学这 12 年几乎是一种永恒……注释的格式同前两版一样,即每章开头的概括性段落列出了相关书籍和期刊,接着是随本章内容一起推进的详细注释,并指向它所在的页码。在修订期间,由于新增大量材料,必须准备新的注释,但同时必须煞费苦心地重新考虑和彻底地修订全部已有注释。幸运的是,所有这一切的结果产生了一个有用且最新的工具,把这本解释性的教材与公认的存档科学文献联系起来。

现在这一版已经完成,如果非要列出最重要的发展,在过去的十几年中,“经典”算法学(即不包括软件工程和系统工程)可能包括三个方面:NP-完全问题的非近似性结果、Shor 的因子分

解的量子多项式时间算法和素性测试的 AKS 多项式时间算法。对此,我所能说的是:如果本书下一版的大部分工作花费在类似的质量和重要性的结果上,难道不是很好吗?

David Harel

以色列, Rehovot

2003 年 8 月

致 谢

首先感谢我家乡的韦茨曼科学院为本书的编写提供了理想的支持和激励环境。

最深切的感谢献给 Yishai Feldman(他是我多年前带过的第一个博士研究生),他欣然同意加入准备本书第三版的过程。我感激他为这个项目所付出的时间、精力和才华。没有他,这次修订绝对不可能完成。

本书最初版本的部分内容,是我在 1985 年夏天访问位于加利福尼亚州帕洛阿尔托市的数字设备公司的系统研究中心和 1986—1987 学年访问卡内基·梅隆大学计算机科学系时完成的。对此有机会著书而不受干扰,我想表达我最深切的感谢。后来对康奈尔大学、贝尔实验室、NASA 和朗讯科技公司的访问,使我有时间修订本书第二版和第三版。

特别感谢以色列广播频道 Galei Zahal 的广播大学节目的总编 T. Yuval,是他说服我准备 1983—1984 年的系列讲座,本书最初的版本即源于此。

我还受到韦茨曼科学院的同事 A. Pnueli、A. Shamir 和 S. Ullman 的帮助,共同讨论书中的相关材料。令人惊异的是,一个人的整体方法可以得益于其周围研究人员的才干。

非常感谢 R·Rosner,他与我合作编写了习题及解答,而习题及解答在第二版中首次出现。同时感谢 Eyal Mashiah,感谢他帮助我准备这一版的索引。

感谢阅读过 1987 年原始手稿或其后版本的许多人,他们发现了一些错误,提出了参考书目建议,或提供了有益的、见解深刻的反馈信息。他们是:S. Banerjee、M. Ben - Ari、H. Berliner、S. D. Brookes、A. K. Chandra、N. Dershowitz、R. Fagin、A. Fiat、J. Gal - Ezer、A. Heydon、C. A. R. Hoare、L. Kari、D. E. Knuth、Q. Limmois、W. Pollock、R. Raz、Z. Reisel、E. Roberts、R. Rosner、S. Safra、J. Seiferas、D. Sherman、R. Sherman、B. Simons、D. Sleator、R. Topor、D. Tygar、M. Vardi、P. Wegner 和 L. Zuck。

D. H.

出版说明

20 世纪末,以计算机和通信技术为代表的信息科学和技术对世界经济、科技、军事、教育和文化等产生了深刻影响。信息科学技术的迅速普及和应用,带动了世界范围信息产业的蓬勃发展,为许多国家带来了丰厚的回报。

进入 21 世纪,尤其随着我国加入 WTO,信息产业的国际竞争将更加激烈。我国信息产业虽然在 20 世纪末取得了迅猛发展,但与发达国家相比,甚至与印度、爱尔兰等国家相比,还有很大差距。国家信息化的发展速度和信息产业的国际竞争能力,最终都将取决于信息科学技术人才的质量和数量。引进国外信息科学与技术优秀教材,在有条件的学校推动开展英语授课或双语教学,是教育部为加快培养大批高质量的信息技术人才采取的一项重要举措。

为此,教育部要求由高等教育出版社首先开展信息科学与技术教材的引进试点工作。同时提出了两点要求,一是要高水平,二是要低价格。在高等教育出版社和信息科学技术引进教材专家组的努力下,经过比较短的时间,第一批由教育部高等教育司推荐的 20 多种引进教材已经陆续出版。这套教材出版后受到了广泛的好评,其中有不少是世界信息科学技术领域著名专家、教授的经典之作和反映信息科学技术最新进展的优秀作品,代表了目前世界信息科学技术教育的一流水平,而且价格也是最优惠的,与国内同类自编教材相当。这套教材基本覆盖了计算机科学与技术专业的课程体系,体现了权威性、系统性、先进性和经济性等特点。

在引进教材的同时,我们还应做好消化吸收,注意学习国外先进的教学思想和教学方法,提高自编教材的水平,使我们的教学和教材在内容体系上,在理论与实践的结合上,在培养学生的动手能力上能有较大的突破和创新。

希望这些教学用书的引进出版,对于提高我国高等学校信息科学技术的教学水平,缩小与国际先进水平的差距,加快培养一大批具有国际竞争力的高质量信息技术人才,起到积极的推动作用。同时也欢迎广大教师和专家们对教材引进工作提出宝贵的意见和建议。联系方式:hep.cs@263.net。

高等教育出版社

二〇〇四年十月

译者序

本书系统地论述了计算机科学的基本概念、思想、方法和结果。全书内容具有一定的广度和深度,内容包括算法学中的基本概念、算法的结构、算法所操纵的数据以及描述算法所用的程序设计语言;图灵机、有限自动机、不可判定性、不可计算性、复杂度、NP 完全性;并发模型、并行模型、软件工程、反应式系统、计算机与人工智能之间的关系。

算法学一直是备受关注的研究主题。本书是唯一一本从全新的视角来系统地阐述计算机科学中根本问题的书籍,通过形象的比喻来描述算法和计算理论中的一些富有挑战性的问题。

本书分预备知识(第 1~3 章)、方法和分析(第 4~6 章)、局限性和健壮性(第 7~9 章)、松弛规则(第 10~12 章)和更宏伟蓝图(第 13~15 章)共 5 个部分。本书主要内容及特点如下:

- 从全新的视角系统地阐述计算机科学中具有挑战性的问题。
- 力图用较精炼的数学语言阐述算法和数据结构、图灵机、有限自动机、不可判定性、不可计算性、复杂度、NP 完全性、并行算法、概率算法等概念,同时又不失论述的严谨性。
- 通过形象的比喻来阐述抽象的概念,内容通俗易懂。
- 给出了部分习题的解答,有助于读者深入理解所学知识。

本书第 1~11 章、第 14~15 章、后记、习题选解、参考书目注解由霍红卫翻译,第 12、13 章由王卫东翻译。全书由霍红卫统稿。

由于翻译工作的时间紧迫及译者水平所限,译文难免存在错误及不妥之处,恳请读者批评指正。

霍红卫

西安电子科技大学计算机学院

2006 年 11 月

内 容 提 要

本书主要论述计算机科学的基本概念、思想、方法和结果。全书内容由5个部分组成。“预备知识”部分包括算法学中的基本概念、算法结构、算法所操纵的数据以及描述算法所用的程序设计语言。“方法和分析”部分包括算法设计的方法、算法的正确性和效率、评价算法的方法。“局限性和健壮性”部分包括可执行算法的固有局限性以及实现这些算法的计算机的固有局限性、不可计算性和不可判定性、算法学的通用性及其健壮性。此外,还讨论了并发模型、并行模型以及密码学中的一些根本性的问题,并且介绍了反应式系统和分布式系统以及计算机与人工智能(human intelligence)之间的关系。

这是唯一一本从全新的视角来系统地阐述计算机科学中根本问题的书籍。通过形象的比喻来描述算法和计算理论中的一些富有挑战性的问题。本书力图用最精炼的数学语言阐述算法和数据结构、图灵机、有限自动机、不可判定性、不可计算性、复杂度、NP完全性、并行算法、概率算法等概念,同时又不失论述的严谨性,使一般读者易于理解和掌握。

本书适合作为高等学校计算机专业本科高年级和研究生“算法学”课程的教材,也可作为从事软件开发、系统分析、系统设计等专业人员的参考书。此外,也可供算法和计算理论的爱好者和参加各种编程大赛的选手参考使用。

目 录

前言	I
致谢	I
第一部分 预备知识	1
第 1 章 导引和历史回顾	3
第 2 章 算法和数据	14
第 3 章 程序设计语言和范型	40
第二部分 方法和分析	65
第 4 章 算法学方法	67
第 5 章 算法的正确性	82
第 6 章 算法的效率	106
第三部分 局限性和健壮性	131
第 7 章 无效性和难解性	133
第 8 章 不可计算性和不可判定性	160
第 9 章 算法学的通用性及其健壮性	183
第四部分 松弛规则	213
第 10 章 并行、并发及其他模型	215
第 11 章 概率算法	247
第 12 章 密码学和可靠交互	263
第五部分 更宏伟蓝图	279
第 13 章 软件工程	281
第 14 章 反应式系统	296
第 15 章 算法学与智能	314
后记	333
习题选解	334
参考书目注释	369
英汉对照表	433

第一部分 预备知识

第 1 章 导引和历史回顾

※ 它全部是什么？

计算机是神奇的机器。它们似乎能做任何事情。它们能使飞机和宇宙飞船飞行,能控制发电站和危险的化工厂。如果没有计算机,公司将不能正常运转;越来越多的复杂的医学手术也不能正常进行。计算机可以帮助律师和法官在大量的审判文件中查找以前的审判案例,还能帮助科学家进行和数学有关的复杂海量计算。它们路由并控制横跨大陆板块的网络中数百万的电话呼叫。它们执行具有很高精度的任务——地图识别和排版,图形图像处理 and 集成电路设计。计算机可以帮助我们减轻许多令人厌烦的家务劳动,如详细记录家庭开支,同时还可以提供各种各样的娱乐,如计算机游戏或播放音乐。此外,计算机今天的努力工作,旨在帮助设计明天功能更强大的计算机。

于是,所有和计算机有关的都更加引人关注,数字计算机——甚至最现代和最复杂的计算机——也仅仅被看做大量开关的集合。这些开关或位(bit),正如它们被称呼的那样,不是由用户来“翻转”,而是一些由计算机自身“翻转”的特殊内部开关。每个位可处于两个位置之一,换句话说,就是取 0 或 1 两个值(Value)之一。位的值通常由某些电子特性确定,如某一点是否有正电荷或负电荷。

计算机只能直接执行一小部分极其琐细的操作,如翻转、置 0 或位测试。翻转表示改变位的值,置零表示确保位以 0 结束,而位测试则表示已在 0 位置时执行某种操作,不在 0 位置时执行另一种操作(如图 1.1 所示)。

不同的计算机在内存容量(按照可用位数)、基本操作类型、执行这些操作的运行速度、实现这些位及其内部组织的物理介质方面都可能不同,显然,计算机的外部环境也可以有所不同。最后一项表明在功能方面均相似的两台计算机,对于观察者而言可能非常不同:一台计算机就好像是带有键盘的电视机,而另一台可能被藏在一台自动织机的刻度盘和按钮的下面。然而,与位及其内部排列方式相比,外部的的外观就显得次要了。正因为这些位,才能够“感知”这些来自外界的键盘上的按钮、控制杆和按键、电子通信线路甚至麦克风和照相机的外部刺激。由这些位“决定”对这些外部刺激如何反应,并经由显示器、屏幕、打印机、扩音器、发声仪器、控制杆和转动曲柄,导引其他刺激以做出相应的响应。

计算机如何完成这个过程?它是如何把普通的对位的平凡操作转换成我们看到的由计算机

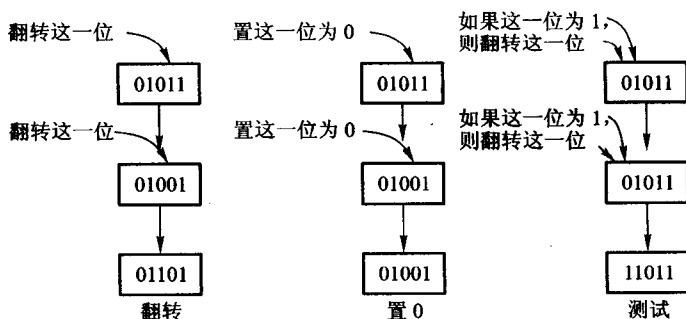


图 1.1 位操作

实现的难以置信的应用呢？该问题的答案也就是本书的核心概念：指示和导致它发生的过程（process）和算法（algorithm）。

1. 美食学

设想一个厨房中有许多配料、一系列的烘烤器具、一个烤箱和一个面包师。烘焙美味的葡萄干蛋糕是一个过程，面包师借助烤箱和配料实现这个过程，最重要的是按照食谱进行。配料就是这一过程的输入（input），蛋糕是这一过程的输出（output），食谱是算法（algorithm）。换句话说，算法指定了组成过程的活动。一般将与所讨论过程集合相关的食谱或算法称为软件（software），而器具和烤箱所代表的事物一般称为硬件（hardware）。在该例中，可以认为面包师是硬件的一部分（如图 1.2 所示）。

在位操作的情况下，面包师、烤箱和器具集具有非常有限的直接能力。烤蛋糕的“硬件”可以灌注、混合、涂抹、滴水、照射烤箱、打开烤箱门、测量时间或测量数量，但不直接烘烤蛋糕。正是由食谱——那些魔法般的指示，把厨房硬件的有限能力变成蛋糕——而不是由烤箱或面包师实现的，这正是本书的主题。

如上所述，这里称食谱为算法，而人类的研究领域、知识以及涉及算法的专家意见在本书中都称为算法学（algorithmics）。这里尽可能做出精确的类比描绘：食谱在某种意义上是一种抽象实体，它就是算法；食谱的形式化书写版本，如食谱中可看到的那种，类似于计算机程序（program）。对于算法自身而言，软件实际上更多是指程序——它是用计算机可识别的某种语言书写的算法的精确表示，而不是指算法自身。然而，直到第 3 章讨论程序设计语言，这种区别才具有实质性。

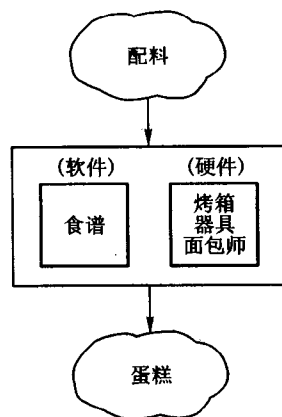


图 1.2 烤蛋糕