

教育部面向21世纪信息管理与信息系统系列教材

计算机组成原理

杨楠 付虹蛟 柴云鹏 / 编著

教育部面向21世纪信息管理与信息系统系列教材



计算机组成原理

杨 楠 付虹蛟 柴云鹏 / 编著

中国人民大学出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

计算机组成原理/杨楠, 付虹蛟, 柴云鹏编著. —北京: 中国人民大学出版社, 2015.7
教育部面向 21 世纪信息管理与信息系统系列教材
ISBN 978-7-300-21192-3

I. ①计… II. ①杨…②付…③柴… III. ①计算机组成原理-高等学校-教材 IV. ①TP301

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 088517 号

教育部面向 21 世纪信息管理与信息系统系列教材

计算机组成原理

杨楠 付虹蛟 柴云鹏 编著

Jisuanji Zucheng Yuanli

出版发行 中国人民大学出版社

社 址 北京中关村大街 31 号

电 话 010-62511242 (总编室)

010-82501766 (邮购部)

010-62515195 (发行公司)

网 址 <http://www.crup.com.cn>

<http://www.ttrnet.com> (人大教研网)

经 销 新华书店

印 刷 北京宏伟双华印刷有限公司

规 格 185 mm×260 mm 16 开本

印 张 19.5 插页 1

字 数 446 000

邮政编码 100080

010-62511770 (质管部)

010-62514148 (门市部)

010-62515275 (盗版举报)

版 次 2015 年 7 月第 1 版

印 次 2015 年 7 月第 1 次印刷

定 价 38.00 元

版权所有 侵权必究

印装差错 负责调换

教育部面向 21 世纪信息管理与信息系统系列教材
编委会

主 编

陈 禹 中国人民大学

编 委 (按姓氏笔画为序)

方美琪 中国人民大学

王明明 中国人民大学

卞孔武 北京信息工程学院

甘仞初 北京理工大学

李 东 北京大学

陈国青 清华大学

张基温 江南大学

苏 俊 中国人民大学

贾 晶 天津财经大学

董小英 北京大学

霍国庆 中国科学院研究生院

内容简介

计算机专业的教学包括算法、程序和系统三个方面。《计算机组成原理》是计算机系统方面重要的基础课程。随着计算架构和计算资源不断多样化，软件与硬件协同设计的深度和广度不断扩展，系统方面的教学对于计算机专业的教学显得越来越重要。良好的上层算法和程序设计必须依赖对底层硬件系统的深入了解，甚至必须和系统进行紧密的结合。

本教材的编写特点是综合考虑了现有教材的一些问题，考虑到计算机技术发展快的特点，根据学生学习一些基本概念的难度，从以下几个方面加强了对教材内容的修改：（1）增加趣味性，在介绍基本概念和原理的同时，增加计算机的文化知识介绍，包括一些历史人物和历史事件的介绍；（2）加强内容的及时性，教材增加了计算机发展的一些新技术，如多核、闪存、移动平台、传感技术等内容；（3）强调实验的重要性，重要的基本概念和原理通过相关的实验加强理解，培养学生对实验的动手能力。

总 序

自 1997 年教育部调整专业目录以来,新组成的“信息管理与信息系统”专业得到了非常迅速的发展。据统计,设置这个专业的高等学校已经接近 500 所。随着信息化建设的进一步深化,社会各界对于信息管理人才的需求越来越多,要求越来越高。特别是电子商务和电子政务的兴起、物流管理的发展以及首席信息官(CIO)的出现,使得这种需求的增长趋势更为引人注目。这表明,“信息管理与信息系统”作为管理科学的一个重要分支,不但没有由于某些泡沫的破灭而销声匿迹,而且还健康地、稳步地、越来越快地向前发展。培养这方面的专业人才已经成为信息时代不可缺少的一个重要方面。

当初由 5 个分别来自工学、管理学等不同门类的学科,组成“信息管理与信息系统”这个新学科的时候,曾有不少同志对之表示过疑虑:这些背景不同、来源不同的学科能够形成一个有确定内涵、有统一培养目标和学科体系的新学科吗?几年来的事实已经给出了肯定的回答。信息化建设的实践已经表明,信息技术的巨大潜力只有同各行各业的具体业务紧密地、有机地结合在一起,才能充分地发挥出来。它与商业,特别是营销活动的有机结合,派生出了越来越广泛的电子商务;它与政府工作的具体实际相结合,引出了方兴未艾的电子政务,如此等等。现代信息技术这支“利箭”,必须切实瞄准各行各业的业务需求这个“的”,做到“有的放矢”,才能真正发挥作用。现代信息技术造就了“利箭”本身,但是并没有回答如何做到“有的放矢”的问题。正因为如此,近 20 年来,许多学校苦于没有合适的教材,而只是简单地用计算机专业的部分教材,加上管理专业的若干教材,形成了所谓“拼盘式”的教学方案,并没有实现交叉与融合的初衷。出现这种情况的原因,在于我们对信息管理的内涵与实质还没有深入理解。简单地把“矢”和“的”罗列出来,还没有达到“有的放矢”的高度。要做到“有的放矢”,必须认真地研究和认识人们做事的规律。这就是美国著名学者赫伯特·西蒙提倡的“关于人为事物的科学”,也正是我国著名学者许国志先生提倡的“事理学”。具体到教材来说,要求我们针对“有的放矢”的要求,编写具有本专业特色的,真正能够回答如何做到“有的放矢”的教材。这种教材的立足点在于如何在各行各业用好信息技术,而不是信息技术本身,与介绍“矢”本身的教材是有根本区别的。这就是我们组织编写这套教材的出发点。

从 20 多年的实践中,我们深深地体会到信息管理与信息系统这个新专业具有的特点:综合性、实践性、新颖性。从传统的学科分类体系看,这个专业确实有点“不三不四,非驴非马”,然而这正是它的特色与生命力所在。它在实践中的发展非常迅速,以致人们常常困惑于新名词、新概念的层出不穷,然而,这也正是它与社会实践相互促进、相互影响的具体表现。当今时代(包括技术与社会)确实变化太快,理论与研究与学科建设不得不追着实践跑步前进。这也许可以为这 20 多年来一直困扰着这个专业的种种议论和非议,找到一点根源和缘由。

当然,这并不等于为理论研究的不足找借口,也不等于这个专业根本就没有理论,或者不需要理论思维。恰恰相反,实践的源头活水为人类深入认识和掌握“事理学”的规律提供了持续不断的推动力和取之不尽的营养和素材。我们相信,以信息化建设的伟大实践为背景和基础,信息管理与信息系统这个专业一定会继续迅速健康地成长,逐步走向成熟和完善,最终成为人类知识宝库中一个有机的、不可缺少的一部分。

基于上述认识,我们对于“信息管理与信息系统”专业教材的理解,就和一般的专业有所不同。在内容的选择上,我们把视野放得比较宽。作为综合性、交叉性、实践性非常突出的一个学科,开阔学生的眼界是非常重要的。我们的信条是:“不是给学生金条,而是给学生点金的手指;不是给学生将来要用的具体知识,而是为学生终身的主动学习打好基础。”具体地说,对于现代信息技术的各个领域,让学生对将来可能用到的“利箭”有广泛的了解;对于当今社会应用信息技术比较广泛的各个领域,让学生对于目标,即“的”有所了解和准备;对于科学的认识论和方法论,是为学生如何做到“有的放矢”做准备的。因此,我们考虑了从计算机、通信等基本技术到信息安全、数据挖掘等一系列课程。其次,我们考虑了企业的信息管理、电子商务、电子政务以及物流管理等方面的内容。再次,主要是系统科学的内容。简单地说,就是这三个方面构成了我们这个学科的三大支柱。

与此相关,本套教材的另一个特殊的地方就是它的使用方法。我们绝不是认为任何一个学校的“信息管理与信息系统”专业,包括我们自己学校的这一专业,都必须开设这里列出的所有课程。我们认为,各学校必须根据自己的具体情况和环境,有重点、有选择地设计符合自己学校的教学计划。教育是实事求是的、需要因势利导的艺术。教条和僵化与培养创新型人才是水火不相容的。我们希望尽可能地为各位老师,提供充分的选择余地,而不是设置新的条条框框。

另外,需要说明的是有关教学方法。从前面的说明很自然地引出,我们的教学方法必须简明扼要、突出实践。每门课程的时间短一些,开设的课程多一些,少讲一点,多练一点。所谓突出实践,包括两个方面,直接联系社会实践,充分利用实验条件。在有条件的课程和章节,尽可能地为 学生创造直接接触和了解最新的社会实践的机会。同时,大力建设实验室,为学生动手提供现代技术(包括教育技术)支持的平台

和环境。关于这方面，我们正在准备另外一套课程和教材。

总之，这个学科是相当年轻的，相当不成熟的。我们编写这套教材，并不是表明我们已经有了完全成熟的想法，而是为了总结已有的认识，与同行共勉和交流，共同推动这个学科的发展。因此，我们真诚地期待着同行和社会各界的批评意见，因为，只有通过集思广益、互相切磋，才能逐步形成比较成熟的、新的学科体系，这是人类认识发展的规律，也是任何新学科成长的必由之路。

中国人民大学 信息学院

陈禹

2005年5月29日 于北京

前 言

随着信息时代的到来和高新技术的进步,计算机技术已经普遍应用到了社会的各个领域,因此,了解和掌握计算机技术是当代大学生必须具备的基本知识。计算机系统是计算机领域的核心方向,是计算机程序设计的基础,是算法和应用实现的平台。本书将全面介绍计算机的各个组成部件的工作原理和实现技术,有助于读者深入理解上层软件如何在硬件系统上执行的详细过程,进而对软件的效率、安全等问题能有深刻的认识。

尽管目前已经有很多《计算组成原理》的相关教材,但我们在长期的实际教学过程中仍发现一些不尽如人意之处,因此本教材的编写过程中,我们注重对于计算机组成原理的教学引入以下三方面新的特色:

(1) 新颖性:计算机技术的发展非常迅速,教材必须加快更新的频率,不断引入最新的技术。因此我们在处理器一章增加了多核技术的介绍,在存储相关章节中增加了对闪存、NVRAM、PCM 等新兴存储技术的讲解。

(2) 整体性:计算机专业各门课程不是孤立的,而是紧密相关的。因此本教材从内容上整合了数字电路和汇编语言课程中的一些基础知识,一方面让读者能有自上而下的整体视角,可以全面了解程序从汇编语言层次一直到底层逻辑门电路的执行过程,另一方面也有助于为计算机专业不断涌现的新课程提供空间。

(3) 文化性:作为一个充满活力的行业,计算机技术的发展过程中包括很多相关的历史和文化方面的因素,因此本书还添加了很多计算机技术、计算机产业的发展历史中的文化知识和历史事实,让学生了解计算机技术对于整个人类社会起到的重要影响。

此外,为加强对本课程的深入理解,本书的教学过程还配有相关的实验课程,内容涵盖简单的逻辑电路设计到复杂的模型 CPU 设计,采用先进的 EDA 实验系统,基于设计软件 Quartus 和 FGPA 的硬件电路,完成指定题目的设计和下载。本书可作为计算机技术相关专业的大专和本科教学的教师用书和学生参考用书。

本教材共分为 8 章。第一章介绍计算机的发展历史和相关基本概念。第二章介绍数字逻辑基础和计算机的基本逻辑电路。第三章介绍各类信息在计算机中的表示和计

算方法。第四章介绍计算机存储器系统中的主存储器。第五章介绍计算机的汇编语言和指令系统。第六章介绍 CPU 工作原理,包括计算机执行指令的过程和实现方法。第七章介绍辅助存储器,主要包括硬盘存储原理和闪存工作原理。第八章介绍 I/O 系统,包括 I/O 接口及工作原理、总线、外部设备。

本教材第一章、第四章、第五章、第七章由柴云鹏编写,第二章、第三章由付虹蛟编写,第六章、第八章由杨楠编写。

由于作者水平有限,书中难免存在错误之处,欢迎读者批评指正。

目 录

第一章 计算机系统概论	1
1.1 计算机系统的发展	3
1.2 理解计算机系统	22
第一章习题	32
第二章 数字逻辑与计算机基本电路	33
2.1 数字逻辑电路基础	35
2.2 计算机中的组合逻辑电路	55
2.3 计算机中的时序逻辑电路	67
第二章习题	80
第三章 计算机的数据表示和运算	83
3.1 数值型数据的表示	85
3.2 非数值型数据的表示	91
3.3 十进制数和数串的表示	94
3.4 数值型数据的运算	96
3.5 数据校验码	109
第三章习题	115
第四章 汇编语言与指令系统	117
4.1 概述	119
4.2 指令的格式	120
4.3 寻址方式	126
4.4 指令功能/类型	130
4.5 高级语言的翻译和启动执行	140
4.6 汇编语言和指令系统的发展	142
第四章习题	146
第五章 主存储器与存储系统	149
5.1 主存储器的逻辑模型	151

5.2 主存储器介质的发展	155
5.3 存储器模块的组织	163
5.4 存储系统的层次结构	168
5.5 高速缓存 (Cache)	173
第五章习题	178
第六章 CPU 工作原理	179
6.1 CPU 的基本概念	181
6.2 CPU 控制器的时序	184
6.3 CPU 控制器的工作原理	186
6.4 典型指令的执行过程分析	193
6.5 控制信号产生部件的实现技术	199
6.6 硬布线逻辑控制器和微程序控制器的比较	209
6.7 CPU 的流水线技术	210
6.8 CPU 的多核技术	215
第六章习题	220
第七章 外部存储器	223
7.1 磁盘存储器	225
7.2 闪存存储器	240
第七章习题	247
第八章 输入输出系统	249
8.1 I/O 控制器 (接口)	251
8.2 I/O 控制方式	253
8.3 总线	265
8.4 输入输出设备	277
第八章习题	298
参考文献	300

第一章

计算机系统概论

一般来说,计算机学科可以分为人工智能 (artificial intelligence)、编程语言 (programming language)、系统 (systems) 和理论 (theory) 四个大的研究方向。计算机系统是其中最大的方向,包括的内容非常多,比如体系结构、操作系统、分布式系统、并行计算、数据库、存储、网络等很多具体的方向。计算机系统的发展决定了计算机行业及整个人类社会有什么样的计算机可用,因此一直是计算机科学中的核心学科。

计算机系统学科在早期 (从 20 世纪 40 年代开始),主要目的是制造出可用的计算机,越来越快、越来越强的计算机。后来,从 20 世纪 80 年代开始迎来大发展,先是迅速普及的个人电脑,然后 90 年代后期开始普及互联网,最近几年智能手机和移动计算发展也非常迅速,可以说计算机设备和互联网络已经在社会上逐渐普及。计算机系统的大发展,给信息的传递构造了一个非常庞大、便捷的平台。可以说,计算机系统的大发展,极大地推动了其他计算机学科 (例如,人工智能、多媒体) 的发展,也推动了很多相关产业 (从 IT 设备生产、软件公司、互联网公司,甚至到出版、电子商务、互联网金融等) 的进步。

展望未来,以大数据、云计算为代表的计算机系统领域新技术的出现,对整个人类社会都将会产生非常大的影响,可以说,计算机系统已经成为人类社会进步的一大推动力,正如航海技术进步推动大航海和新大陆的发现,蒸汽机推动工业革命和社会生产力的极大提升一样。因此,学习计算机系统知识,可以让大家至少能够了解这个领域的过去、现在和未来的发展趋势,跟上时代的潮流。

1.1 计算机系统的发展

1.1.1 计算机的发展历史

在追溯计算机发展历史的时候，一般都会从 20 世纪 40 年代的第二次世界大战期间开始研发的第一台电子计算机 ENIAC 开始讲起。但实际上，计算机的思想早在几千年前就开始在人类社会中出现和发展，并以一些初级和逐步进化的形态对人类的进步做出了巨大的贡献，而电子计算机只是这种思想的一种高级实现，所以我们可以将眼光放得更长远一些，回溯到古代发明的存储和计算工具。

1. 结绳记事、算盘

结绳记事是文字发明前人们所使用的一种记事方法，如图 1—1 所示，在一条绳子上打结，用以记事。上古时期的中国及秘鲁印第安人皆有此习惯，即使到了近代，一些没有文字的民族，也仍然采用结绳记事来记录信息。

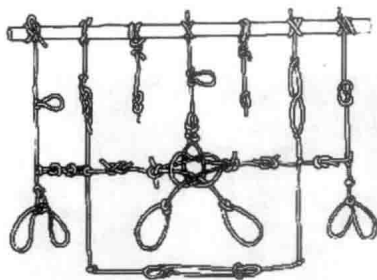


图 1—1 结绳记事

结绳记事可以看作人类在大脑之外存储信息的一种原始方式，从本质上讲，与近年来计算机用来存储和记录的功能是一致的。

在计算方面，人类历史上也出现了一些经典的工具，例如中国古代流传至今的算盘，以及古罗马的算盘，如图 1—2 所示。

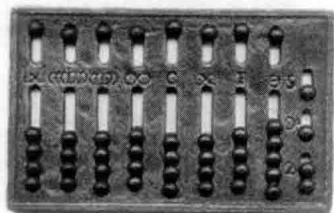
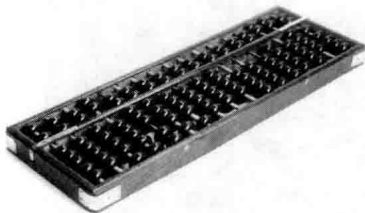


图 1—2 中国和古罗马的算盘

2. 机械式计算机

随着科学技术的发展，商业、航海和天文学等都提出了许多复杂的计算问题，很

多人都关心和参与到新式计算工具的设计当中。到了 17 世纪，计算设备有了相对于算盘这种简单工具的第二次重要进步。1642 年，法国著名数学家和物理学家帕斯卡（Pascal，1623—1662）发明了世界上第一台机械式加法器，称为 Pascalene，它解决了自动进位这一关键问题，如图 1—3 所示。

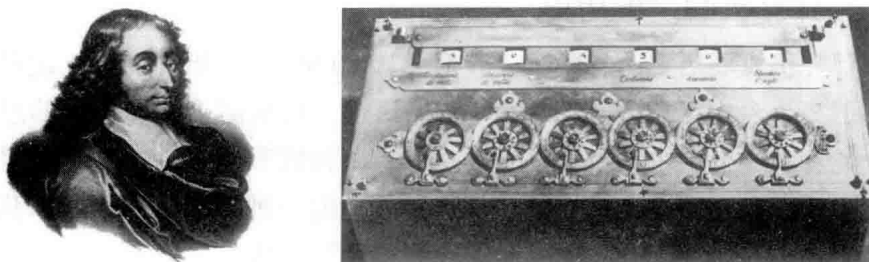


图 1—3 帕斯卡和他发明的机械式加法器

1674 年，德国著名数学家和哲学家莱布尼茨（Leibniz，1646—1716）设计并完成了自动乘法计算机，如图 1—4 所示。莱布尼茨不仅发明了手动的可进行完整四则运算的通用计算机（设计手稿如图 1—5 所示），还提出了“可以用机械替代人进行烦琐重复的计算工作”这一重要思想。

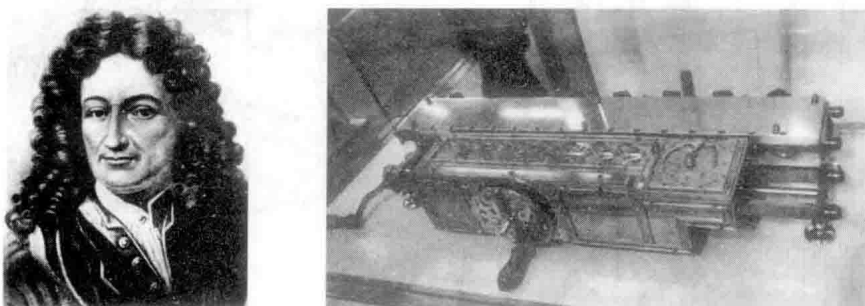


图 1—4 莱布尼茨和他发明的自动乘法计算机

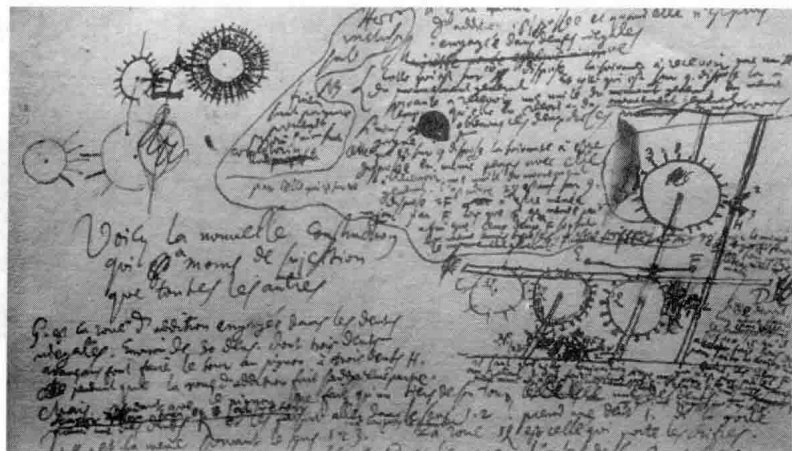


图 1—5 莱布尼茨设计四则运算计算机的手稿

莱布尼茨发明的乘法计算机约有 1 米长，内部安装了一系列齿轮机构，其基本原理继承于帕斯卡。不过，莱布尼茨为计算机增添了一种名叫“步进轮”的装置。步进轮是一个有 9 个齿的长圆柱体，9 个齿依次分布于圆柱表面；旁边另有个小齿轮可以沿着轴向移动，以便逐次与步进轮啮合。每当小齿轮转动一圈，步进轮可根据它与小齿轮啮合的齿数，分别转动 $1/10$ 圈、 $2/10$ 圈、…，直到 $9/10$ 圈，这样一来，它能够连续重复地做加法运算。

18 世纪末，法国数学界调集大批数学家，组成了人工计算的流水线，经过长期的努力，终于完成了 17 卷《数学用表》的编制工作。但是，手工计算出的数据出现了大量错误。这件事情强烈刺激了英国剑桥大学的科学家巴贝奇 (C. Babbage)，他从 20 岁开始着手计算机的研制工作。他的第一个目标是差分机，所谓“差分”，就是把函数表的复杂算式转化为差分运算，用简单的加法代替平方运算，快速编制不同函数的数学用表。

经过 10 年的努力，到 1822 年，巴贝奇终于完成了第一台差分机，它有 3 个寄存器，每个寄存器有 6 个部分，每个部分有一个字轮。它可以编制平方表和一些其他的表格，还能计算多项式的加法，运算的精确度达 6 位小数，如图 1—6 所示。

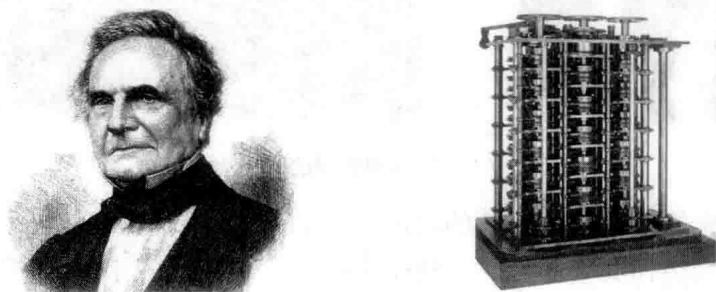


图 1—6 巴贝奇和他发明的差分机

巴贝奇的差分机主要用于计算导航表，但他发现差分机还只是专门用途的机器，于是开始设计包含现代计算机基本组成部分的分析机 (analytical engine)。1834 年，巴贝奇完成了分析机的设计方案，它在差分机的基础上做了较大的改进，不仅可以进行算术运算，还可以完成逻辑运算。分析机的设计已具有现代计算机的概念。

可是，限于当时的机械制作工艺水平，所研制的部件精度不够；再加上在研制过程中，巴贝奇不断地修改设计方案，引起工程人员的不满，以致纷纷离开研制小组，因此，工作进展缓慢。10 年过去了，巴贝奇只完成了“分析机”的一部分，可政府资助的 1.7 万英镑经费早已用完，巴贝奇自己还花费了 1.3 万英镑。巴贝奇希望政府予以进一步的资助，可政府认为这是在造一部“吃英镑”的机器，因此不予资助。巴贝奇毫无办法，只好中断研制工作。半成品的分析机连同它的全部图纸，被送至伦敦的皇家学院博物馆保存。1991 年，为纪念巴贝奇诞辰 200 周年，伦敦科学博物馆制作了