

世纪高等学校规划教材 | 计算机科学与技术

计算机组织与结构

徐 苏 主编

白小明 张 乐 于海雯 副主编



清华大学出版社

21世纪高等学校规划教材 | 计算机

计算机组织与结构

徐 苏 主编
白小明 张 乐 于海雯 副主编

内 容 简 介

本书根据我国教育部教学指导委员会制定的“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 CS 计算机课程最新进展同步,内容涵盖了知识领域 CS-AR 计算机体系结构与组织的核心知识单元和知识点。全书共分 8 章,第 1~7 章全面讲述单处理机系统的硬件组织和结构,包括计算机中的数据表示和运算、汇编级机器组织、存储系统的组织与结构、输入输出系统的组织、CPU 的组织与结构及总线 and 接口等;第 8 章介绍当前并行处理机系统的一些主流技术和体系结构,包括流水线技术、多处理机系统、机群系统和多核处理器等。

本书是作者根据近二十年计算机组成与计算机体系结构课程教学之经验,并在教学和科研过程中不断积累和提炼而写成的。本书条理清晰,概念准确,所组织的内容不仅全面,而且整合了大量的新技术、新知识,为读者展现近些年来计算机技术发展的新成果。

本书适合作为各类高等院校计算机科学与技术专业的教材,也可作为相关专业工程技术人员和计算机爱好者的参考书。

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 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计算机组织与结构/徐苏主编.--北京:清华大学出版社,2015

21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术

ISBN 978-7-302-39559-1

I. ①计… II. ①徐… III. ①计算机体系结构—高等学校—教材 IV. ①TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 046554 号

责任编辑:高买花 薛 阳

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

责任印制:何 芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

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

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:三河市君旺印务有限公司

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:22

字 数:533 千字

版 次:2015 年 5 月第 1 版

印 次:2015 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:39.00 元

产品编号:044373-01

出版说明

随着我国改革开放的进一步深化,高等教育也得到了快速发展,各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的投入力度,通过教育改革合理调整和配置了教育资源,优化了传统学科专业,积极为地方经济建设输送人才,为我国经济社会的快速、健康和可持续发展以及高等教育自身的改革发展做出了巨大贡献。但是,高等教育质量还需要进一步提高以适应经济社会发展的需要,不少高校的专业设置和结构不尽合理,教师队伍整体素质亟待提高,人才培养模式、教学内容和教学方法需要进一步转变,学生的实践能力和创新精神亟待加强。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2007年1月,教育部下发了《关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见》,计划实施“高等学校本科教学质量与教学改革工程”(简称“质量工程”),通过专业结构调整、课程教材建设、实践教学改革、教学团队建设等多项内容,进一步深化高等学校教学改革,提高人才培养的能力和水平,更好地满足经济社会发展对高素质人才的需要。在贯彻和落实教育部“质量工程”的过程中,各地高校发挥师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势,对其特色专业及特色课程(群)加以规划、整理和总结,更新教学内容、改革课程体系,建设了一大批内容新、体系新、方法新、手段新的特色课程。在此基础上,经教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议,清华大学出版社在多个领域精选各高校的特色课程,分别规划出版系列教材,以配合“质量工程”的实施,满足各高校教学质量和教学改革的需要。

为了深入贯彻落实教育部《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》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上。精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展,顺应并符合21世纪教学发展的规律,代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版

社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。推出的特色精品教材包括:

(1) 21 世纪高等学校规划教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 21 世纪高等学校规划教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 21 世纪高等学校规划教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 21 世纪高等学校规划教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 21 世纪高等学校规划教材·信息管理与信息系统。

(6) 21 世纪高等学校规划教材·财经管理与应用。

(7) 21 世纪高等学校规划教材·电子商务。

(8) 21 世纪高等学校规划教材·物联网。

清华大学出版社经过三十多年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会

联系人:魏江江

E-mail: weijj@tup.tsinghua.edu.cn

1. 计算机学科的课程体系

一个学科的高等教育必须要有先进的教学理念和完整的课程体系,同时与该学科的发展也是紧密相关的。谈到计算机科学与技术学科的高等教育,就要提到两个国际组织,一是 IEEE,二是 ACM。IEEE 的全称是 Institute of Electrical and Electronics Engineers,即美国电气与电子工程师学会,是美国的一个工程技术和电子专家的组织,主要致力于电气、电子、计算机工程以及和信息技术与科学有关的领域的开发和研究。ACM 的全称是 Association for Computing Machinery,即美国计算机协会,是一个致力于工程技术和应用领域中信息技术科学教育的国际计算机组织。国际上最系统、最有影响的计算机专业的教学计划当属 IEEE-CS(IEEE 属下的计算机学会)与 ACM 各时期发表的指导性计划,它们对计算机学科教育方面的研究既全面又深入。其中,影响较大的有 ACM68 课程体系、ACM78 课程体系、IEEE-CS83 教程和计算机教程 1991(简称 CC1991)等。ACM68 课程体系和 ACM78 课程体系是基于课程定义的。CC1991 是 IEEE-CS 和 ACM 合作推出的,它将更多的科学原理引入计算机学科的教学计划设计中,给出了计算机学科的科学定义,解答了计算机学科教育界多年来存在的疑问和争论,同时它采用了知识领域(Knowledge Area)、知识单元(Knowledge Unit)和知识点(Topic)来描述计算机学科的核心知识体系,引导人们去考虑学科的本质和核心,从而制定出既符合各自培养目标又符合学科发展的课程体系。

1998 年秋,IEEE-CS 和 ACM 又成立了计算机教程 2001(Computing Curricula 2001, CC2001)联合工作组,并于 2001 年发布了计算机教程 2001(即 CC2001)。CC2001 较好地反映了计算机学科自 1991 年的发展及这个时期社会发展给学科教育带来的影响。它除了继承 CC1991 的知识描述体系外,又增加了各级课程的设计方法,并给出了一些推荐课程的描述。

从我国的计算机学科的教育看,1999 年前,我国“计算机专业”主要被分为计算机及应用和计算机软件两个专业。从 1999 年起,按照宽口径培养人才的需要,这两个专业被合并为一个专业,即计算机科学与技术。我国各高校计算机科学与技术专业的教学计划是在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的指导下制定的。CC2001 推出后,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给予了密切的关注,在对 CC2001 进行跟踪研究的基础上,结合我国计算机学科的发展现状和我国计算机教育的具体情况,提出了一个适合我国计算机学科教育的课程体系,即中国计算机科学与技术学科教程 CCC2002。

近些年,随着计算机技术的高速发展和在各行业应用的普及,社会对计算机学科领域人才的需求分工越来越细,计算机学科的高等教育也发生了变化,各高校在计算机学科先后设置了软件工程、网络工程、电子商务、信息安全等不同的专业或方向,以满足社会对不同专业

人才的需求。从 2001 年开始,IEEE-CS 和 ACM 把计算机学科细分为“计算机科学 CS”、“计算机工程 CE”、“信息系统 IS”、“信息工程 IT”以及“软件工程 SE”。2005 年 IEEE-CS 联合 ACM 发布了 CC2005,2008 年发布了 CS2008 版本(临时版本),2012 年 2 月开始颁布 CS2013。CS2013 重新定义计算机科学的知识模块,考量计算机科学教程的要素,提出一个课程体系样本,发展一系列教学内容,尝试着分别从系统和软件开发两个方面,总结基础原理与方法策略,沉淀计算机学科的专业核心知识。其中对于计算机体系结构与组织(AR)知识模块,强化多核并行、虚拟机支持、供电限制,强调 CAD 工具的应用。

我国教育部高等学校计算机科学与技术教学指导委员会在分析研究计算机学科国内外发展和社会需求的基础上,发布了《计算机科学与技术专业发展战略研究报告》,提出了适应我国计算机科学与技术专业高等教育的教学规范。这一教学规范对于我国各高校在计算机科学与技术专业人才培养目标的确定和课程体系的制定等方面都给出了指导性建议。

2. 为什么要学习本课程

对于学习汽车工程专业的学生来讲,无论是搞汽车外形设计,还是研究汽车的发动机,都必须对汽车的组成和工作原理有基本的了解。同样,对于计算机专业的学生来讲,了解和掌握计算机的组成及工作原理也是必需的。

目前很多高校计算机专业的学生在不同程度上有着重软轻硬的思想。这主要有两个方面的原因:一方面,近十年来,随着各行业管理信息系统建设的发展,社会对软件工程师(尤其是应用软件工程师)的需求越来越大,从事软件设计、软件编程、软件维护等方面的人员成为了 IT 公司、金融、政府及企事业单位紧缺的人才;另一方面,相对软件课程来讲,硬件课程学起来比较枯燥,没有像语言类软件课程有着学完就能使用的立竿见影的效果。例如,很多高校都开设了“Web 程序设计”课程,学生学完该课程后,就能设计网站或制作网页,学生当然很感兴趣。

实际上,在计算机系统中,计算机硬件和计算机软件是相关联的两个部分,硬件为软件的运行提供了一个平台,要编制高质量的软件程序,对计算机有一个整体的了解是十分重要的。对系统软件程序员来讲,系统软件是和硬件紧密相关的,系统软件程序员必须对机器级硬件十分了解,才有可能编制出适应某一机器硬件的系统软件。对应用软件程序员来讲,对机器硬件的了解有助于他们编制更高效和优化的程序。例如,阵列计算机、并行处理计算机、多处理器以及近两年出现的基于多处理器的计算机系统,对并行计算提供了一个支持的平台。对程序员来讲,对计算机硬件实现的并行处理技术的了解,有助于他们充分利用并行计算环境,编制高效的并行程序。

最重要的,前面已经讲到,计算机学科的教育有一个完整的科学体系,课程的设置也是围绕这一体系来进行的。这一科学体系注重培养学生的科学思维能力、创新实践能力、研究和应用能力以及继续学习的能力。作为学生来讲,应该认真学好每一门课程,掌握计算机学科领域所要求的各方面知识。只有这样,才能对本学科有一个完整的理解,才能成为真正合格的计算机科学与技术专业的学生。

计算机组织与结构是计算机专业一门重要的专业基础课程,也是 CC2001、CC2005、CS2013 以及我国计算机科学与技术专业规范中确定的一门核心课程,它对于学生建立计算机整机概念,了解计算机系统的基本组成、结构和工作原理,从而对本学科其他知识领域和

知识单元的内容有更深刻的理解有着非常重要的意义。

3. 教材内容的组织

本教材在内容的组织上,主要按照我国教育部高等学校计算机科学与技术教学指导委员会制定的“计算机科学与技术专业规范”中的知识领域“CS-AR 计算机体系结构与组织”所要求的内容进行编写。同时,紧跟 IEEE-CS/ACM 颁布的 CS2013,对计算机体系结构和组织(AR)知识模块的内容做了适当调整。各章节涵盖的知识单元主要包括

AR2 数据的机器级表示(核心学时):	第 2 章
AR3 汇编级机器组织(核心学时):	第 3 章
AR4 存储系统组织与结构(核心学时):	第 4 章
AR5 接口和通信(核心学时):	第 5 章、第 6 章
AR6 功能组织(核心学时):	第 7 章
AR7 多处理和体系结构(核心学时):	第 8 章

本书共分 8 章,其中,

第 1 章首先介绍计算机的发展历程;然后介绍按 IEEE 分类法的计算机的分类;最后,作为本书的一个“序”,概括性地介绍了计算机的硬件组成及计算机的层次结构。

第 2 章首先介绍二进制等基本的进位计数制;再介绍在计算机中是如何对我们日常处理的数值数据和非数值数据(主要包括字符、汉字等)进行二进制编码表示的;然后介绍数值数据在计算机中的二进制运算方法和实现;最后介绍对计算机中的数据在传递过程中产生的差错进行检测而使用的数据校验码。

第 3 章首先介绍计算机中汇编级指令的格式、地址结构;然后介绍指令及操作数的寻址方式,以及指令的种类和功能、典型指令系统的组成等;最后对精简指令系统 RISC 进行介绍。

第 4 章首先介绍存储器的组织、分类和分层结构;然后介绍计算机主存储器的组成与工作原理;最后介绍提高存储系统性能的交叉存储技术、高速缓冲存储器及虚拟存储器技术等。

第 5 章首先介绍计算机输入输出系统的组成;然后对计算机输入输出的控制方式进行详细讨论,包括程序控制方式、中断控制方式、DMA 控制方式和通道控制方式等;最后介绍计算机存储设备——磁盘系统以及由磁盘阵列组成的 RAID 技术。

第 6 章首先讲述计算机内部各部件之间的总线互连结构,介绍总线的基本概念、总线的类别和总线的控制方式等;然后列举几种现代计算机中常用的 ISA、PCI 等总线标准;最后介绍几种目前在计算机中常用的 USB、IEEE 1394 和 SCSI 等外部总线接口标准。

第 7 章首先介绍 CPU 的功能与组成;再通过一个模型机的例子说明了 CPU 的指令周期及执行指令的过程;然后讨论了 CPU 控制部件设计的硬布线设计法和微程序设计法两种主要方法;最后以 Intel 公司的 CPU 产品为例,介绍了典型 CPU 的发展。

第 8 章首先介绍计算机系统的并行性概念,对计算机中使用的时间重叠、资源重复和资源共享等提高并行性的技术途径进行概要性的介绍;然后分别介绍现代计算机普遍采用的流水线技术和多处理机技术等并行处理技术;最后对近些年发展起来且应用非常广泛的机群系统、高性能计算和多核处理器进行讨论。

4. 教材的主要特色

结合计算机学科教育重基础、重发展、重创新的要求,本教材在内容组织和编写上有以下特点:

(1) 首先为学生建立整机的概念。在第1章,通过将学生日常所熟悉的实际PC与计算机的基本组成部件进行对比,使学生对计算机整机的组成有一个初步的认识,对组成计算机系统的主要部件的基本功能有一个初步的了解。

(2) 按照从整机到部件自上而下的思想进行课程内容的组织,使学生在每一章节的学习中,都清楚所学章节的内容与整机的关联。同时对计算机组织与结构的各种概念、思想和原理等进行重点讲述。

(3) 围绕各章节的内容,穿插了一些“知识拓展”,介绍一些计算机系统方面的相关知识以及计算机发展的新技术、新知识等。如在第1章穿插了知识拓展——摩尔定律,计算机的性能评测;在第2章穿插了知识拓展——二进制的游戏;在第3章穿插了知识拓展——x86CPU指令系统的扩展指令集;在第4章穿插了知识拓展——新型动态存储器SDRAM、DDR、DDR2和DDR3,芯片的封装技术;在第5章穿插了知识拓展——硬盘接口,网络存储系统;在第6章穿插了知识拓展——前端总线,串行传输还是并行传输;在第7章穿插了知识拓展——GPU和CPU;在第8章穿插了知识拓展——超级计算机“天河”二号;能使学生开拓视野,增长知识。

(4) 为帮助学生更好地学习本课程,专门建设了计算机组织与结构课程教学网站。网站的课程介绍部分介绍了本课程的教学大纲、教学的组织和安排等;课程教学部分提供了按课堂教学单元进行组织的教学内容、重点难点等;教学资源部分为学生提供了本课程的教学课件和参考资料;学习讨论部分提供了一个学生与教师以及学生与学生之间的交流平台等。另外,教学管理部分还进一步为教师提供了一个学生管理、作业管理、考试管理和成绩管理等平台,教师可以通过本课程网站更好地组织本课程的教学。

5. 教材的学时安排

本教材共分8章,第1~7章全面讲述了单处理机系统的硬件组织和结构,包括计算机中的数据表示和运算、汇编级机器组织、存储系统的组织与结构、输入输出系统的组织、CPU的组织与结构及总线和接口等;第8章介绍了现代并行处理机系统的一些主流技术和体系结构,包括流水线技术、多处理机系统、机群系统和多核处理器等。本教材建议总学时为60~80学时,各高校按照计算机专业课程体系中课程设置和讲授内容的不同可以灵活调整。

本教材由徐苏担任主编,白小明、张乐、于海雯为副主编,李向军、林振荣等参编并帮助进行课程教学网站的建设。

编 者

2015年2月

目 录

第 1 章 计算机系统概述	1
1.1 计算机的发展历程	1
1.2 计算机的种类	11
1.3 计算机的性能指标	14
1.4 计算机的基本组成	15
1.5 计算机语言	21
1.6 计算机系统的分层组织结构	21
本章小结	23
习题一	24
第 2 章 数据的机器级表示及运算	25
2.1 数制及转换	25
2.1.1 进位记数制	25
2.1.2 数制的转换	27
2.2 数值数据的机器表示	29
2.2.1 数据的机器数表示	30
2.2.2 定点数和浮点数	32
2.3 非数值数据的机器表示	35
2.3.1 二进制编码的十进制数	35
2.3.2 字符编码	36
2.3.3 汉字的表示方法	39
2.4 定点数的运算及实现	41
2.4.1 定点数的加减运算	41
2.4.2 定点数的乘法运算	46
2.4.3 定点数的除法运算	49
2.5 浮点数的运算	51
2.5.1 浮点数的加减运算	52
2.5.2 浮点数的乘除运算	55
2.6 数据校验码	56
2.6.1 奇偶校验码	56
2.6.2 海明校验码	57
2.6.3 循环冗余校验码	60

本章小结	61
习题二	62
第 3 章 汇编级机器组织	66
3.1 汇编级机器指令系统.....	66
3.1.1 指令系统的发展	66
3.1.2 指令系统性能的要求	67
3.1.3 指令操作的种类	69
3.2 指令格式.....	72
3.2.1 指令字长	72
3.2.2 地址码	73
3.2.3 操作码	75
3.3 数据的存储与寻址方式.....	79
3.3.1 数据的存储方式	79
3.3.2 寻址方式	80
3.4 RISC	87
3.4.1 精简指令集计算机的出现	87
3.4.2 精简指令集计算机特点	88
3.5 指令系统举例.....	89
3.5.1 Pentium 微处理器指令系统	89
3.5.2 SPARC 指令系统	93
本章小结	95
习题三	96
第 4 章 存储系统组织与结构.....	100
4.1 存储系统概述	100
4.1.1 存储器的组织.....	100
4.1.2 存储器的分类.....	101
4.1.3 存储器的分层结构.....	103
4.2 半导体存储器	104
4.2.1 半导体存储器的种类.....	104
4.2.2 半导体存储器的组成与工作原理.....	106
4.2.3 主存储器的设计.....	111
4.3 交叉存储技术	117
4.4 高速缓冲存储器	121
4.4.1 cache 实现的基本原理	121
4.4.2 主存与 cache 的地址映射	123
4.4.3 替换算法	128
4.4.4 cache 的写策略	129

4.4.5	cache 性能分析	130
4.4.6	cache 举例: Pentium 4 的 cache 组织	132
4.5	虚拟存储器	133
4.5.1	虚拟存储器实现的基本原理	133
4.5.2	虚拟存储器的分页式管理	135
4.5.3	虚拟存储器的分段式管理	138
4.5.4	虚拟存储器的段页式管理	140
4.5.5	虚拟存储器的替换策略	141
4.5.6	虚拟存储器举例: Pentium 的虚拟存储器组织	143
	本章小结	145
	习题四	145
第 5 章	输入输出系统组织	150
5.1	输入输出系统概述	150
5.1.1	输入输出设备	150
5.1.2	输入输出接口	151
5.1.3	输入输出设备的编址与管理	154
5.2	输入输出控制方式	156
5.2.1	程序控制方式	156
5.2.2	中断控制方式	159
5.2.3	DMA 控制方式	172
5.2.4	通道控制方式	176
5.3	外部存储器的组织	180
5.3.1	磁盘存储器	181
5.3.2	磁带存储器	187
5.3.3	光盘存储器	189
5.4	RAID 技术	194
	本章小结	202
	习题五	202
第 6 章	总线与接口组织	206
6.1	互连结构	206
6.2	总线互连	207
6.2.1	总线的基本概念	207
6.2.2	总线互连结构	209
6.2.3	总线的控制方式	210
6.3	总线标准及举例	214
6.3.1	总线标准	214
6.3.2	ISA 总线	215

6.3.3	PCI 总线	216
6.3.4	PCI-X 总线	221
6.3.5	PCI-Express 总线	221
6.3.6	现代微机总线配置	222
6.4	外部总线接口	224
6.4.1	SCSI	224
6.4.2	IEEE 1394 接口	227
6.4.3	USB 接口	230
	本章小结	233
	习题六	234
第 7 章	CPU 组织与结构	236
7.1	CPU 的功能和组成	236
7.1.1	CPU 的功能	236
7.1.2	CPU 的基本组成	237
7.1.3	CPU 的寄存器组织	239
7.2	指令周期	241
7.2.1	几个时间概念	241
7.2.2	典型指令的指令周期	243
7.2.3	指令周期的方框图语言描述	249
7.3	CPU 的时序和控制	250
7.3.1	CPU 的时序系统	250
7.3.2	CPU 的控制方式	252
7.4	控制部件的硬布线实现	254
7.4.1	硬布线控制器的基本原理	255
7.4.2	硬布线控制器设计举例	256
7.4.3	硬布线控制器的缺点及其改进	258
7.5	微程序控制器	259
7.5.1	微程序控制的基本概念	260
7.5.2	微程序控制器的组成	262
7.5.3	微程序设计举例	263
7.5.4	微程序控制的特点	266
7.6	微程序设计技术	267
7.6.1	微命令编码	268
7.6.2	微地址的形成方法	270
7.6.3	微指令的格式及执行方式	273
7.7	典型 CPU 及主要技术	277
7.7.1	Intel CPU	277
7.7.2	Pentium 4 的结构	280

本章小结·····	284
习题七·····	284
第 8 章 并行组织与结构 ·····	290
8.1 计算机系统的并行性 ·····	290
8.1.1 计算机体系结构的概念·····	290
8.1.2 体系结构中的并行性·····	292
8.1.3 提高并行性的技术途径·····	293
8.2 流水线技术 ·····	295
8.2.1 流水线的基本概念·····	295
8.2.2 流水线的分类·····	296
8.2.3 流水线的主要性能参数·····	299
8.2.4 流水线的相关问题·····	302
8.2.5 超流水线技术·····	305
8.3 多处理机系统 ·····	309
8.3.1 多处理机系统分类·····	309
8.3.2 多处理机的 cache 一致性 ·····	311
8.3.3 多处理机操作系统·····	313
8.3.4 多处理机的并行性实现·····	314
8.4 机群系统 ·····	318
8.4.1 机群系统的定义·····	318
8.4.2 机群系统的组成·····	319
8.4.3 机群系统中的关键技术·····	320
8.4.4 机群系统举例·····	321
8.5 多核处理器 ·····	323
8.5.1 多核处理器产生的背景·····	323
8.5.2 多核处理器结构·····	324
8.5.3 多核发展的关键技术·····	326
8.5.4 多核发展趋势·····	330
本章小结·····	332
习题八·····	332
参考文献 ·····	335

第 1 章

计算机系统概述

从 1946 年第一台电子计算机 ENIAC 的诞生到现在,计算机的发展已走过了半个多世纪的历程。在这半个多世纪的时间里,人类在计算机技术领域所取得的成就几乎是其他任何技术领域都无法比拟的。单从衡量计算机性能的重要指标之一——运算速度来看,ENIAC 的运算速度是每秒 5000 次,而现代计算机的运算速度已超过每秒万亿次水平,整整提高了 10^{10} 倍以上。

本章首先介绍计算机的发展历程,其中,器件技术是计算机发展的核心;然后介绍按 IEEE 的分类法的计算机分类和按照计算机的综合性能指标的计算机分类;接着介绍了计算机的主要性能指标;最后,作为本书的一个“序”,概括性地介绍计算机的硬件组成及计算机的层次结构。

1.1 计算机的发展历程

计算机技术的飞速发展离不开其所依赖的硬件技术的发展。在计算机领域,人们普遍把计算机的发展划分为 5 代,而这一划分所依据的正是计算机所使用的基本元器件。可以说,硬件技术是计算机发展的重要物质基础和技术保障。

1. 第零代：机械时代

随着科学的发展,商业、航海和天文学都提出了许多复杂的计算问题,很多人都关心计算工具的发展,希望借助计算工具提高计算的效率,于是人们开始研究和设计具有计算能力的“计算机器(Calculating Machine)”。

世界上第一台以齿轮驱动的计算机器应该是由德国人 Wilhelm Schickard 教授于 1623 年设计并建造的计算钟(Calculating Clock),如图 1-1 所示。但它并没有得到人们的关注,因为 Wilhelm Schickard 在发明该机器不久就死于疾病。

1642 年,法国数学家、物理学家帕斯卡(Blaise Pascal)在年仅 19 岁时发明了一台机械加法器 Pascaline(见图 1-2),以帮助其父亲收税时计算使用。由于成本和计算准确度问题,Pascaline 仅售出了 50 台。Pascaline 由一套 8 个可旋转的齿轮系统组成,只能进行加法运算,实现自动进位,并配置一个可显示计算结果的窗口。虽然现在汽车的仪表盘的显示已数字化,但其中里程表中仍然采用了与 Pascaline 相类似的机械工作原理。

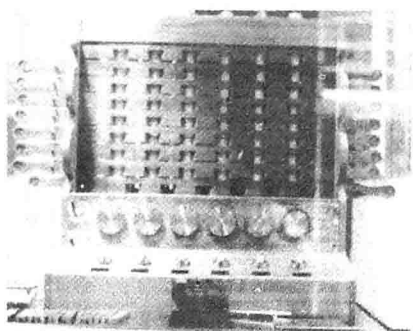


图 1-1 Calculating Clock

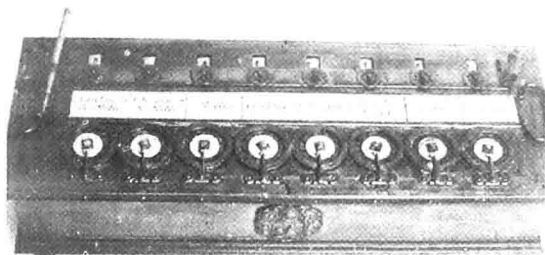


图 1-2 8 齿轮的 Pascaline

1670 年,德国数学家、哲学家莱布尼兹(Gottfried Leibniz)改进了 Pascaline,发明了一个被称为步进式计算器(Stepped Reckoner)的计算器,它具有加、减、乘、除 4 种运算功能。

值得一提的是,虽然在 Stepped Reckoner 上使用的是十进制数,但莱布尼兹是首先提出使用二进制计算的科学家,这为现代计算机奠定了基础。但是,所有的这些计算设备或工具都不能进行编程计算,也没有存储器,计算过程中的每一步都需要人手工参与才能进行。

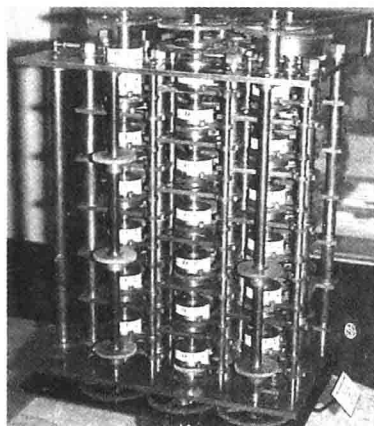


图 1-3 差分机的一小部分机械部件

尽管像 Pascaline 这类计算器一直使用到 20 世纪,但在 19 世纪时就已经开始出现了新型计算工具的设计。这其中,最引人注目的是由英国数学家巴贝奇(Charles Babbage)于 1822 年设计的差分机(Difference Engine)(见图 1-3)。这台机器能够计算数表,如对数表。由于当时数表在航海中的重要性,他得到了英国政府的资助。1833 年,Charles Babbage 又在差分机的基础上设计了一种多用途的机器,称为分析机(A analytical Engine)。

分析机已经具备了执行任意类型的数学运算的能力,同时还包含了现代计算机的许多部件:一个算术处理部件进行计算工作(Babbage 称之为运算逻辑部件——mill),一个存储器(store),以及输入输出设备。可以说分析机已经具有现代计算机的概念,但因当时的技术条件限制而未能制造完成。

1888 年,美国统计学家霍勒瑞斯(Herman Hollerith)为人口统计局建造了第一台机电式穿孔卡系统——制表机,它是将机械统计原理与信息自动比较和分析方法结合起来的统计分析机,使美国统计人口所需的时间从过去的 8 年缩短为 2 年。霍勒瑞斯在 1896 年创办了制表机公司,1911 年他又组建了一家计算制表记录公司,该公司到 1924 年改名为国际商用机器公司,这就是举世闻名的美国 IBM 公司。

1938 年,德国工程师朱斯(Konrad Zuse)成功制造了第一台二进制计算机 Z-1,它是一种纯机械式的计算装置,它的机械存储器能存储 64 位数。此后他继续研制了 Z 系列计算机,其中 Z-3 型计算机是世界上第一台通用程序控制的机电计算机,它使用了 2600 个继电器,采用二进制进行运算,运算一次加法只用 0.3s,如图 1-4 所示。

1944 年,美国麻省理工学院科学家艾肯(Howard Aiken)研制成功了一台通用型机电计算机 MARK- I ,如图 1-5 所示,它使用了 3000 多个继电器,总共由 15 万个元件组成,各种导线总长达到 800km 以上。1947 年,艾肯又研制出运算速度更快的机电计算机 MARK- II 。

至此在计算机技术上存在着两条发展道路,一是各种机械式计算机的发展道路;二是采用继电器作为计算机电路元件的发展道路。后来建立在电子管和晶体管等电子元件基础上的电子计算机正是受益于这两条发展道路的。

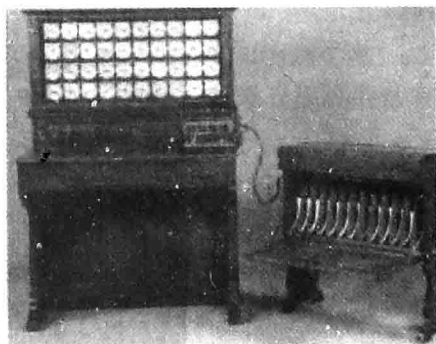


图 1-4 Z-3 型计算机

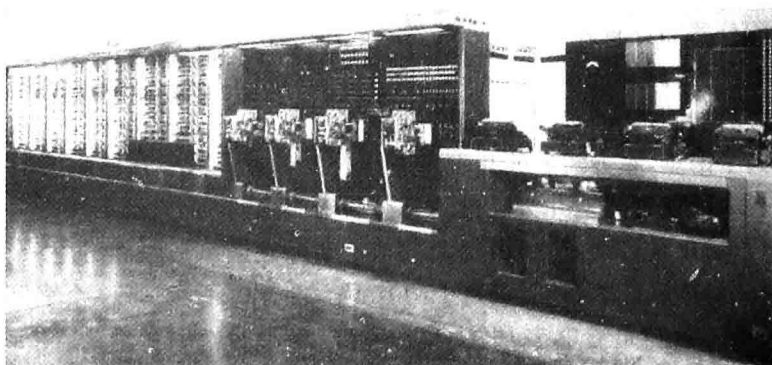


图 1-5 MARK- I 机电计算机

说明: 以上图 1-1~图 1-5 的图片取自 <http://www.computersciencelab.com>。

2. 第一代：电子管计算机

电子计算机区别于机械式计算机最主要的特点是使用了电子元器件作为其存储和控制部件,计算机能够依靠电子元器件自动完成计算。电子计算机发展阶段也正是以其所采用的基本电子元器件及技术作为划分的基础,如表 1-1 所示。

表 1-1 计算机的发展阶段

发展阶段	大致时间	所采用的技术	典型速度
1	1946—1957 年	电子管	几万次
2	1958—1964 年	晶体管	十几到几十万次
3	1965—1971 年	中小规模集成电路	百万次
4	1972—1977 年	大规模集成电路	千万次
	1978—1991 年	超大规模集成电路	亿次
	1991—	巨大规模集成电路	十亿次以上

从表 1-1 中可以看出,第一代计算机采用的主要元器件是电子管(又称真空管),它是以 1946 年诞生的世界上第一台电子计算机 ENIAC 为标志的,如图 1-6 所示。