

21
世纪

高等学校计算机应用型本科规划教材精选



计算机组成原理



李涛 张金 姬秀娟 编著
孙富元 主审



清华大学出版社

21 世纪高等学校计算机应用型本:

计算机组成原理

李 涛 张 金 姬秀娟 编著
孙富元 主审

清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

全书内容分为9章:第1章介绍计算机系统的相关概念;第2章对数据在计算机中的表示、算术和逻辑运算方法以及ALU的概念进行了详细讲述;第3章重点介绍存储子系统设计方法,并详细讲述Cache-主存-辅存三级存储层次的内容;第4章详细讲述CPU的结构及指令执行过程,重点讲述了微程序控制器的原理及其设计方法,并介绍了提高CPU性能的指令流水线技术;第5章讲述了指令的寻址方法及其设计,并对CISC和RISC进行对比分析;第6章讲述总线的基本概念以及信息在总线上的传输方式等;第7章和第8章详细讲述输入输出系统的工作机制,并介绍输入输出设备方面的知识;第9章简要总结处理器技术的发展,并对多核处理器和图形处理器进行阐述。

本书可作为高等学校计算机科学与技术等相关专业开设“计算机组成原理”课程的教材,也可供从事该领域工作的有关人员自学参考。

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

计算机组成原理/李涛,张金,姬秀娟编著. —北京:清华大学出版社,2011.3

(21世纪高等学校计算机应用型本科规划教材精选)

ISBN 978-7-302-24606-0

I. ①计… II. ①李… ②张… ③姬… 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(2011)第012444号

责任编辑:索梅 李玮琪

责任校对:李建庄

责任印制:杨艳

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

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

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62795954, jsjic@tup.tsinghua.edu.cn

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

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:22 字 数:546千字

版 次:2011年3月第1版 印 次:2011年3月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:33.00元

产品编号:032922-01

21 世纪高等学校计算机应用型本科规划教材精选

编写委员会成员

(按姓氏笔画)

王志军

王鹏涛

王慧芳

朱耀庭

孙富元

张洪定

高福成

常守金

序

PREFACE



“教育部、财政部关于实施高等学校本科教学质量与教学改革工程的意见”(教高[2007]1号)指出:“提高高等教育质量,既是高等教育自身发展规律的需要,也是办好让人民满意的高等教育、提高学生就业能力和创业能力的需要”,特别强调“学生的实践能力和创新精神亟待加强”。同时要求将教材建设作为质量工程的重要建设内容之一,加强新教材和立体化教材的建设;鼓励教师编写新教材,为广大教师和学生提供优质教育资源。

“21世纪高等学校计算机应用型本科规划教材精选”就是在实施教育部质量工程的背景下,在清华大学出版社的大力支持下,面向应用型本科的教学需要,旨在建设一套突出应用能力培养的系列化、立体化教材。该系列教材包括各专业计算机公共基础课教材;包括计算机类专业,如计算机应用、软件工程、网络工程、数字媒体、数字影视动画、电子商务、信息管理等专业方向的计算机基础课、专业核心课、专业方向课和实践教学的教材。

应用型本科人才教育重点面向应用、兼顾继续深造,力求将学生培养成为既具有较全面的理论基础和专业基础,同时也熟练掌握专业技能的人才。因此,本系列教材吸纳了多所院校应用型本科的丰富办学实践经验,依托母体校的强大教师资源,根据毕业生的社会需求、职业岗位需求,适当精选理论内容,强化专业基础、技术和技能训练,力求满足师生对教材的需求。

本丛书在遴选和组织教材内容时,围绕专业培养目标,从需求逆推内容,体现分阶段、按梯度进行基本能力→核心能力→职业技能的培养;力求突出实践性,实现教材和课程系列化、立体化的特色。

突出实践性。丛书编写以能力培养为导向,突出专业实践教学内容,为有关专业实习、课程设计、专业实践、毕业实践和毕业设计教学提供具体、翔实的实验设计,提供可操作性强的实验指导,完全适合“从实践到理论再到应用”、“任务驱动”的教学模式。

教材立体化。丛书提供配套的纸质教材、电子教案、习题、实验指导和案例,并且在清华大学出版社网站(<http://www.tup.com.cn>)提供及时更新的数字化教学资源,供师生学习与参考。



IV 计算机组成原理

课程系列化。实验类课程均由“教程+实验指导+课程设计”三本教材构成一门课程的“课程包”，为教师教学、指导实验，学生完成课程设计提供翔实、具体的指导和技术支持。

希望本丛书的出版能够满足国内对应用型本科学生的教学要求，并在大家的努力下，在使用中逐渐完善和发展，从而不断提高我国应用型本科人才的培养质量。

丛书编委会

2009年6月

前言

FOREWORD

“计算机组成原理”是计算机科学与技术相关专业的重要专业基础课之一,它在先导课和后续课之间起着承上启下的作用。课程教学知识面广、内容比较抽象,一本恰当的教材对培养不同层次的人才具有重要作用。

本书依据全国硕士研究生统一入学考试的计算机组成原理考试大纲,主要讲述计算机单处理机系统的组成结构和工作原理。

本书既注重理论知识讲解,又注重实例分析,既对计算机组成结构中的关键部件进行详细阐述,又对计算机整体的工作原理进行深入剖析,循序渐进、深入浅出地详细介绍计算机系统的设计和开发方法,具有知识全面、讲解细致、指导性强等特点。

本书共分 9 章:第 1 章计算机系统概论介绍了计算机系统的组成、层次结构、性能指标及其应用领域;第 2 章数据表示与运算方法介绍了数值在计算机中表示、逻辑运算、定点运算、浮点运算以及运算器电路等知识;第 3 章存储系统介绍了存储器的概念和分类、主存及存储器子系统设计方法、高速缓冲存储器和虚拟存储器的概念和技术特点等;第 4 章中央处理器介绍了 CPU 的功能和组成、控制器的时序及控制方式、微程序控制器的原理及微程序设计方法、硬布线控制器的结构与简单设计方法,并对加速程序执行的指令流水线技术进行了讲述;第 5 章指令系统介绍了指令的基本概念及其设计方法、指令的寻址方式、CISC 和 RISC 技术的对比分析等;第 6 章总线系统介绍了总线的基本概念与性能指标、总线仲裁与数据信息在总线上的传输方式,最后以较为流行的 PCI、USB 等为例进行了说明;第 7 章 I/O 系统介绍了 I/O 系统的功能和组成,分别介绍了程序查询方式、程序中断方式、DMA 方式、I/O 通道和 I/O 处理机等输入输出方式,并对 IDE、SATA、SCSI 和 FireWire 等接口标准进行了讲解;第 8 章 I/O 设备介绍了外部存储设备、输入设备和输出设备的概念和技术特点;第 9 章处理器新技术在回顾处理器技术发展的基础上,介绍了当今流行的多核处理器和图形处理器的概念和技术特点。

对于从事计算机相关工作的人来说,本书具有很好的参考价值,书中详细介绍了计算机关键部件的结构原理和设计方法,包括运算器、控制器、存储器、输入系统和设备、输出系统和设备、总线等内容,每章的重点知识讲解都配有相应的例题解析,以便于读者更好地理解原理性的知识。

本书可作为大专院校计算机科学与技术等相关专业开设“计算机组成原理”课程的教材,也可供从事计算机相关领域工作的有关人员自学参考。



VI 计算机组成原理

本书的编写和出版得到了教材编写委员会的大力支持,在此表示感谢。全书由李涛、张金、姬秀娟编著,孙富元主审。

由于作者水平有限,加之时间仓促,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

作 者

2011 年 1 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 计算机系统概论	1
1.1 计算机发展史	1
1.1.1 现代计算机的发展	2
1.1.2 微处理器的发展	4
1.2 计算机系统组成	6
1.2.1 计算机硬件系统	6
1.2.2 计算机软件系统	11
1.3 计算机系统结构	13
1.4 计算机系统的性能指标	16
1.5 计算机的应用	18
1.6 本章小结	20
习题 1	20
第 2 章 数据表示与运算方法	21
2.1 数据表示	21
2.1.1 数制及其相互转换	21
2.1.2 有符号数	26
2.1.3 定点数	31
2.1.4 浮点数	32
2.1.5 字符编码	35
2.1.6 汉字编码	35
2.2 逻辑运算	37
2.3 定点运算	39
2.3.1 移位运算	39
2.3.2 加减法运算	41
2.3.3 乘法运算	49
2.3.4 除法运算	58
2.3.5 定点运算器	62
2.4 浮点四则运算	65
2.4.1 浮点加减运算	65
2.4.2 浮点乘法运算	68



2.4.3 浮点除法运算	69
2.4.4 浮点运算器	70
2.5 本章小结	70
习题 2	71
第 3 章 存储系统	73
3.1 存储系统概述	73
3.1.1 基本概念	73
3.1.2 评价指标	75
3.1.3 存储器分类	76
3.1.4 存储系统的层次结构	78
3.2 主存储器	80
3.2.1 主存储器的基本结构	80
3.2.2 静态随机存取存储器	81
3.2.3 动态随机存取存储器	83
3.2.4 只读存储器	86
3.2.5 存储器与 CPU 的连接	89
3.2.6 多体交叉存储器	96
3.3 高速缓冲存储器	98
3.3.1 概述	98
3.3.2 Cache 性能评价	100
3.3.3 地址映射	101
3.3.4 替换算法与更新策略	104
3.4 虚拟存储器	105
3.4.1 基本概念	105
3.4.2 页式虚拟存储器	105
3.4.3 段式虚拟存储器	106
3.4.4 段页式虚拟存储器	107
3.4.5 替换算法	108
3.4.6 快表 TLB	109
3.5 数据校验	110
3.5.1 概述	110
3.5.2 奇偶校验码	111
3.5.3 海明码	112
3.5.4 循环冗余校验码	114
3.6 本章小结	116
习题 3	116

第 4 章 中央处理器	119
4.1 CPU 的功能和组成	119
4.1.1 CPU 的功能	119
4.1.2 CPU 的组成	121
4.1.3 CPU 中的主要寄存器	122
4.1.4 控制器的实现方式	124
4.2 时序系统与控制方式	125
4.2.1 指令执行过程	125
4.2.2 指令周期	126
4.2.3 多时序系统	128
4.2.4 指令周期的表示	129
4.2.5 控制方式	130
4.3 微程序控制器	132
4.3.1 基本概念	132
4.3.2 微程序控制器原理	135
4.3.3 微操作命令的分析	143
4.3.4 微程序设计技术	149
4.3.5 微程序设计举例	154
4.4 组合逻辑控制器	158
4.4.1 控制器结构	158
4.4.2 控制器设计方法	158
4.5 流水线技术	163
4.5.1 指令流水线	164
4.5.2 流水线性能	167
4.5.3 流水线中的相关性	169
4.6 本章小结	171
习题 4	172
第 5 章 指令系统	174
5.1 基本概念	174
5.1.1 操作码	174
5.1.2 地址码	175
5.1.3 指令字长	176
5.2 指令的寻址方式	177
5.3 指令格式的设计	182
5.3.1 指令设计的影响因素	182
5.3.2 Pentium 指令格式举例	182
5.3.3 指令格式设计举例	185



5.4 RISC 与 CISC 技术	187
5.4.1 CISC 与 Intel 指令集	187
5.4.2 RISC	190
5.4.3 RISC 和 CISC 的比较	191
5.5 本章小结	192
习题 5	193
第 6 章 总线系统	195
6.1 概述	195
6.1.1 基本概念	195
6.1.2 总线分类	196
6.1.3 总线的性能指标	197
6.2 总线结构	198
6.2.1 单总线结构	199
6.2.2 多总线结构	200
6.3 总线仲裁与通信控制	202
6.3.1 总线仲裁	202
6.3.2 通信控制	205
6.4 PCI(PCI-E)	210
6.4.1 PCI 及其总线信号	210
6.4.2 数据传输过程	213
6.4.3 PCI-E	217
6.5 USB	219
6.5.1 USB 总线概述	219
6.5.2 系统组成	220
6.5.3 USB 传输协议	222
6.6 本章小结	226
习题 6	227
第 7 章 输入输出系统	229
7.1 输入输出系统概述	229
7.1.1 I/O 接口的功能	230
7.1.2 I/O 接口的组成	231
7.1.3 I/O 接口的分类	232
7.1.4 I/O 接口的控制方式	233
7.1.5 I/O 端口及编址方式	234
7.2 程序控制方式	237
7.2.1 无条件传送方式	238
7.2.2 程序查询控制方式	240

7.3 中断传送方式	244
7.3.1 中断的基本概念	244
7.3.2 I/O 中断的处理过程	250
7.3.3 中断控制器 8259A	251
7.3.4 中断方式输入接口电路	254
7.3.5 中断方式输出接口电路	255
7.4 直接存储器存取方式	256
7.4.1 DMA 方式的基本原理	257
7.4.2 DMA 传送方式	260
7.5 I/O 通道(I/O 处理机)	261
7.6 I/O 接口标准	265
7.6.1 IDE 和 SATA 接口	265
7.6.2 SCSI 接口	267
7.6.3 FireWire 接口	270
7.7 本章小结	270
习题 7	270
第 8 章 输入输出设备	273
8.1 概述	273
8.2 辅助存储设备	274
8.2.1 磁存储技术	274
8.2.2 硬磁盘存储器	276
8.2.3 软磁盘存储器	283
8.2.4 磁带存储器	285
8.2.5 光盘存储器	287
8.3 输入设备	291
8.3.1 键盘	292
8.3.2 鼠标	298
8.3.3 扫描仪	299
8.3.4 触摸屏	301
8.3.5 摄像头	302
8.4 输出设备	304
8.4.1 显示器	304
8.4.2 打印机	312
8.4.3 其他输出设备	314
习题 8	315
第 9 章 处理器新技术	318
9.1 处理器技术	318



9.2 多核处理器	322
9.2.1 多核结构	322
9.2.2 同构多核	324
9.2.3 异构多核	326
9.3 图形处理器	327
9.3.1 G80 架构	328
9.3.2 Fermi 架构	328
9.4 计算机的未来发展趋势	332
9.5 本章小结	334
习题 9	334
参考文献	335

第1章

计算机系统概论

本章要点

自1946年第一台电子计算机问世以来,计算机经历了几个阶段的发展。尽管计算机的速度取得了飞跃性的提高,但其基本的系统结构并没有太大变化。本章主要介绍计算机系统的基础知识,包括计算机的发展、组成、系统层次结构、性能指标及其应用。希望读者通过本章的学习对计算机系统有一个初步的总体概念,以便于展开后续各章内容的学习。

1.1 计算机发展史

现代电子计算机问世之前,计算机的发展主要经历了机械式计算机和机电式计算机两个阶段。人类最早的计算工具可以追溯到公元前5世纪由中国人发明的算筹,算筹迄今为止仍在使用。直到17世纪,历经了几个世纪的发展,计算工具才有了第二次重要的进步。1642年法国数学家帕斯卡(Blaise Pascal)发明了自动进位加法器。1694年,德国数学家莱布尼茨(G. W. Leibniz)对它进行改进后,使之可以进行四则运算。这些早期的计算器都没有突破手动机械式操作的范畴。

直到19世纪初,经过一系列的技术革新,计算机由手动机械式发展成自动机械式。这个时期的计算机突破了手动操作的局限,能够自动完成复杂的运算。1820年法国人托马斯(Thomas)设计制作成功了第一台可用于桌面的成品计算机。在此基础上,许多科学工作者进行了一系列创新改进,1822年英国人巴比奇(Babbage)设计了差分机和分析机,其设计理论非常超前,比如利用卡片输入程序和数据,并且可以自动完成多条运算。由此可以看出差分机和分析机已经蕴涵了现代计算机的一些思想萌芽。

随着电子技术的飞速发展,计算机逐步由机械式向电子时代过渡。1937年英国剑桥大学的图灵(Turing)提出了被后人称为“图灵机”的数学模型。1938年德国工程师朱斯(Zuse)和他的助手们设计完成了第一台可编程二进制形式的计算机Z1。1941年制作完成了第一台可编程的电子计算机Z3。1943年,霍华德·艾肯(Howard Aiken)研制出了世界上第一台自动顺序控制计算机Mark-I。其后,在1945年至1947年,艾肯又成功制造了一台全部使用继电器的计算机Mark-II。

1946年,世界上第一台真正意义的数字电子计算机诞生。它是由美国宾夕法尼亚大学莫克利教授和他的学生为美国陆军军械部阿伯丁弹道研究实验室研制的,用于炮弹弹道轨迹计算的“电子数值积分和计算机”(Electronic Numerical Integrator and Calculator, ENIAC),如图1.1所示。它采用十进制运算,共使用18 000多个电子管,1500个继电器,重达30吨,占地170平方米,运行耗电150kW,但是每秒仅能完成5000次加法运算。这么庞大的机器却仅有20个字节寄存器,时钟频率为100kHz。

ENIAC的诞生,表明了电子计算机时代的到来,标志着人类进入数字化时代。



图1.1 ENIAC电子计算机

1.1.1 现代计算机的发展

从1946年2月世界第一台数字电子计算机ENIAC问世至今60多年以来,计算机技术和科学得到了日新月异的飞速发展,它的性能越来越高,价钱越来越低,功能越来越强,从而使它的应用领域也越来越广。纵观现代计算机的发展史,从它主要使用的元器件来看,大致可划分为以下几个阶段。

1. 第一代电子计算机(1946—1957年)

第一代计算机主要采用电子管作为基本电子元器件,因此又称“电子管计算机”。这一时期的计算机运算数据采用定点表示,主存储器采用汞延迟线、磁鼓等材料。外存储器采用纸带、卡片和磁鼓等。由于电子管自身的技术限制,因此第一代计算机体积大、成本高、耗电高。此外,它只能进行定点计算,存储容量小,可靠性较低,运算速度为每秒几千次至几万次基本运算。

这个阶段还没有系统软件,计算机主要使用机器语言。使用机器语言编写程序是一种相当繁琐的工作,既难于记忆也难于操作,缺乏通用性。因此计算机的应用领域主要局限于科学计算。

这个阶段的代表机型有ENIAC、EDVAC和UNIVAC等。

2. 第二代电子计算机(1958—1964年)

第二代计算机主要采用晶体管作为基本电子元器件,也称为“晶体管计算机”。这一时期的计算机引入浮点运算硬件,从而提高了科学计算能力。主存储器采用磁芯,存储容量有所提高。辅助存储器开始使用磁盘、磁带等,且外设种类有所丰富。由于晶体管代替了体积庞大的电子管,所以相对于第一代计算机来说,第二代计算机的体积缩小,成本和功耗降低,而可靠性提高,且它的运算速度提高到每秒几万次至几十万次。

与此同时,软件也取得了极大的发展,出现了高级程序设计语言和操作系统,如COBOL(Common Business-Oriented Language)和FORTRAN(Formula Translator)等语言。计算机的应用领域从原有的科学计算领域扩展到数据处理、自动控制、企业管理、气象

和工程设计等方面。

这个阶段的代表机型有 IBM7094、CDC 7600 等。

3. 第三代电子计算机(1965—1971 年)

第三代计算机主要采用小规模集成电路(Small Scale Integration, SSI)和中规模集成电路(Medium Scale Integration, MSI)作为基本元器件,因此称为“集成电路时代”。集成电路技术的发展,推动计算机进入了第三个时代。这一时期计算机的主存储器开始采用体积更小、可靠性更好的半导体存储器。美国的基尔比和诺伊斯发明了集成电路,引发了电路设计革命。集成电路工艺可以在几平方毫米的单晶硅片上集成由十几个甚至上百个电子元件组成的逻辑电路。因此第三代计算机体积进一步缩小,成本进一步降低,功耗更低,可靠性进一步提高,运算速度提高到每秒几十万次至几百万次。计算机机种逐步多样化,生产系列化,使用系统化,外部设备更加丰富,操作系统更加完善,因此应用领域更广泛。

同时,采用多处理器并行结构的巨型、大型和小型机得到了快速发展。这个阶段的代表机型有 IBM 公司的 IBM360 系列、CDC 公司的 CDC6600 和 DEC 公司的 PDP-8。我国同期也推出了大、中、小型计算机,如 DJS-130 机和 DJS-220 机等。

4. 第四代电子计算机(1972—1977 年)

第四代电子计算机采用大规模集成电路(Large Scale Integration, LSI)和超大规模集成电路(Very Large Scale Integration, VLSI)。随着集成电路的集成度进一步提高,大规模超大规模集成电路广泛应用于计算机。尤其现在的 ULSI(Ultra LSI)甚大规模集成电路的出现,可以在硬币大小的芯片上容纳如此多的元件,使得计算机的体积和价格不断下降,成本更进一步降低,而功能和可靠性不断增强。这个阶段的计算机运算速度从 MIPS(每秒 10^6 条指令)已经提高到 GIPS(每秒 10^9 条指令),甚至 TIPS(每秒 10^{12} 条指令)水平。巨型向量机、阵列机等计算机得到了发展,同时低档的微型计算机开始面世,并迅速走向社会各个领域和家庭。

在软件方面,数据库、网络软件 and 多媒体软件得到迅速发展,应用软件的开发已逐步成为一个庞大的现代产业。计算机网络的发展及应用使计算机非常普及,基本走进了社会生活的各个领域。

5. 第五代电子计算机(1978 年至今)

第五代计算机是一种更接近于人类智慧的人工智能计算机。它采用甚大规模集成电路或者其他新型元器件,除了具有传统的人机交互方式,还应该具有理解人类语言、联想和智能会话等功能。用户不再需要编写程序,而是直接和计算机进行对话。1981 年 10 月在日本东京召开的“第五代电子计算机国际会议”上首先提出了开始研制第五代计算机,并指出第五代计算机系统将是词组逻辑为基础的知识信息处理系统。目前第五代计算机仍处在探索、研制阶段。

20 世纪 50 年代,人工智能作为一门新兴的学科正式诞生。几十年以来,随着计算机技术的发展,人工智能的研究也取得了很大的进展,在机器学习、模式识别、图形显示、理解自