



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 计算机系列教材

计算机组成原理

秦磊华 吴非 莫正坤 编著

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 计算机系列教材

秦磊华 吴非 莫正坤 编著

计算机组成原理

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要介绍计算机单机系统的组成原理及内部工作机制,包括计算机各大部件的工作原理、设计方法、逻辑实现及互连构成计算机整机的技术。全书共分9章,内容包括计算机系统概论、计算机中数据信息的表示方法、运算方法与运算器设计、存储系统、指令系统、控制器的工作原理与设计方法、流水线的基本概念、系统总线技术、输入输出设备及其组织结构和工作原理。

本书综合了编者多年的教学经验,并借鉴吸收了国内外经典教材的优点。在内容选取上,既重点论述了经典内容,又尽可能与国际先进教材的内容接轨,并选取一些反映计算机系统新发展的部分知识。内容充实、思路清晰、概念明确、重点突出、通俗易懂,并附有大量的例题、习题和课外实践内容。

本书可作为高等学校计算机及相关专业计算机组成原理课程的教材,也可作为有关专业研究生或计算机工程技术人员的参考书。

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

计算机组成原理/秦磊华,吴非,莫正坤编著. —北京:清华大学出版社,2011.2
(计算机系列教材)

ISBN 978-7-302-24089-1

I. ①计… II. ①秦… ②吴… ③莫… III. ①计算机体系结构—教材 IV. ①TP303

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第228571号

责任编辑:张瑞庆 薛 阳

责任校对:李建庄

责任印制:何 芊

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:北京市季蜂印刷有限公司

装 订 者:三河市金元印装有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:25.75

字 数:640千字

版 次:2011年2月第1版

印 次:2011年2月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:38.00元

产品编号:033561-01

普通高等教育“十一五”国家级规划教材 计算机系列教材 **编委会**

主 任：周立柱

副 主 任：王志英 李晓明

编委委员：(按姓氏笔画为序)

汤志忠 孙吉贵 杨 波

岳丽华 钱德沛 谢长生

蒋宗礼 廖明宏 樊晓桢

责任编辑：马瑛珺

E D I T O R S

“计算机组成原理”(Computer Organization)是计算机类各专业的一门核心专业基础课。主要讨论计算机各大功能部件的基本组成原理及其互连构成整机的技术。本课程在计算机学科系列课程中起承上启下的作用,其先导课程包括“数字逻辑电路”和“汇编语言程序设计”,后续课程为“计算机系统结构”和“微机接口技术”。因此,该课程的教学过程中要注重站在计算机硬件系列课程的角度,引导学生如何利用在前导课中所学的基本知识,设计计算机各大功能部件并构成整机系统,同时要为后续课程的学习奠定坚实的基础。

本书以层次结构的观点来描述计算机各主要功能部件及组成原理;以数据信息和控制信息的表示、处理为主线来组织全书的内容。全书共分9章,第1章为计算机系统概论,简单介绍计算机系统的软、硬件组成、计算机系统的多级层次结构以及计算机的性能指标等内容;第2章为数据信息的表示,主要介绍数值数据和非数值数据的表示方法及信息校验方法;第3章为信息处理,主要介绍定点数和浮点数的四则运算、逻辑运算及运算器的组成和工作原理;第4章讲述存储器系统,主要讨论存储器分级结构的概念、半导体存储器的工作原理、高速缓冲存储器(cache)的工作原理、cache和主存之间的各种映射和替换算法、并行存储器、虚拟存储器的基本概念以及磁表面存储器和廉价磁盘冗余阵列RAID等内容;第5章论述指令系统,首先介绍了计算机指令系统的基本知识,然后讨论了指令系统设计与优化的有关问题,最后较详细地介绍典型RISC处理器的指令实例——MIPS指令系统。第6章讲述中央处理器,主要介绍CPU的功能和基本结构、指令执行流程、数据通路的基本组成与结构、时序控制、微程序控制器和硬布线控制器的基本结构。本章还分别以一个基于总线结构和一个类MIPS的模型机为例,详细讲解数据通路的建立以及硬布线控制器和微程序控制器的设计原理和设计方法;第7章为流水线技术,讲述流水线的基本概念和性能分析,介绍了流水线中的相关问题及解决方法;第8章介绍总线的基本概念、总线的连接方式、总线的仲裁、总线的定时等基本内容,同时还对总线标准的发展和流行的总线标准进行了分析;第9章讲述输入输出系统的一些基本知识,主要包括I/O系统的特性、I/O接口的功能与组织结构、常见的几种输入输出方式,并简要介绍几种常见输入输出设备的工作原理。

本书是编者在总结多年从事计算机组成原理及相关计算机硬件系列课程理论及实践教学的基础上,借鉴并吸取国内外经典教材优点编写而成。在内容选取上,既重点论述了经典的内容,又尽可能与国际先进教材的内容接轨,并选取一些反映计算机系统发展的部

分内容。在编写方式上,本书力求去繁求简,用最简单的语言来阐述教材的内容。全书具有内容充实、结构合理、概念清晰、重点突出的优点,符合高等学校计算机科学与技术专业公共核心知识体系与课程中对“计算机组成原理”课程知识点的要求。本书可按层次和模块化结构组织教学,授课教师可以根据教学需要及课时的多少,对内容进行灵活的取舍。教学课时可以安排为 56~72 学时。

本书第 1,3,4,5,6,8,9 等章由秦磊华编写,第 2 章及输入输出设备的部分内容由莫正坤编写,第 7 章由吴非编写。全书由秦磊华主编并修改。在本书的编写过程中,得到了清华大学出版社、华中科技大学计算机学院及华中科技大学教务处的的大力支持与帮助。另外,本书直接或间接地引用了许多国内外专家和学者的文献及著作,在此向他们一并表示衷心的感谢,这些文献和著作已经在参考文献部分一一列出。

由于计算机技术的不断发展,新的思想、概念、技术和实现方法不断涌现,加之作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请同行和广大读者批评指正。

使用该教材的教师可通过电子邮件(abc_119@126.com)索取课程 PPT 和课后习题参考解答。

作 者

2010 年 12 月于华中科技大学

F O R E W O R D

第 1 章 计算机系统概论 /1

- 1.1 计算机的发展与应用 /1
 - 1.1.1 国内外计算机发展概况 /1
 - 1.1.2 摩尔定律 /2
 - 1.1.3 计算机的发展趋势 /3
 - 1.1.4 多核处理器 /4
 - 1.1.5 嵌入式计算机 /4
 - 1.1.6 计算机的应用 /5
- 1.2 计算机系统的组成 /7
 - 1.2.1 计算机硬件系统 /7
 - 1.2.2 计算机软件系统 /11
- 1.3 计算机的性能指标和性能评价 /12
 - 1.3.1 基本性能指标 /13
 - 1.3.2 与执行时间有关的性能指标 /13
 - 1.3.3 CPU 性能公式及其应用 /16
 - 1.3.4 性能测试 /18
 - 1.3.5 计算机系统的可靠性及其评价 /21
- 1.4 计算机系统的层次结构 /22
 - 1.4.1 计算机系统的层次结构及各层简介 /23
 - 1.4.2 各层之间的关系 /24
 - 1.4.3 硬件和软件逻辑功能的等价性 /24
- 本章小结 /25
- 习题 1 /27
- 课外实践 /28

第 2 章 数据信息的表示 /29

- 2.1 数据表示的目的及设计数据格式应考虑的因素 /29
- 2.2 数值数据的表示 /30
 - 2.2.1 数的机器码表示 /30
 - 2.2.2 数的定点表示 /35

2.2.3	浮点数据表示	/37
2.2.4	十进制数的二进制编码与运算	/41
2.3	非数值数据的表示	/43
2.3.1	字符的表示方法	/43
2.3.2	汉字编码	/44
2.4	数据信息的校验	/46
2.4.1	码距与数据校验	/46
2.4.2	奇偶校验	/47
2.4.3	海明校验	/49
2.4.4	循环冗余校验(CRC)	/53
	本章小结	/57
	习题2	/59
	课外实践	/61
第3章	运算方法与运算器	/62
3.1	定点补码加减法运算	/62
3.1.1	补码加减法运算方法	/62
3.1.2	溢出及检测	/65
3.1.3	补码加减法的逻辑实现	/69
3.2	移码加减运算及实现逻辑	/69
3.3	定点乘法运算	/72
3.3.1	机器数的移位操作	/72
3.3.2	原码一位乘法	/73
3.3.3	补码一位乘法	/76
3.3.4	阵列乘法器	/79
3.4	定点除法运算	/81
3.4.1	原码一位除法	/81
3.4.2	基于不恢复余数的补码一位除法	/84
3.4.3	阵列除法器	/86
3.5	浮点运算	/88
3.5.1	浮点数加减运算	/88
3.5.2	浮点乘法运算	/92

- 3.5.3 浮点除法运算 /93
- 3.6 逻辑运算 /93
- 3.7 运算器 /94
 - 3.7.1 定点运算器 /94
 - 3.7.2 浮点运算器 /96
 - 3.7.3 基本算术逻辑运算单元的设计 /96
- 本章小结 /104
- 习题 3 /108
- 课外实践 /109

第 4 章 存储系统 /110

- 4.1 存储器概述 /110
 - 4.1.1 存储器分类 /110
 - 4.1.2 主存的主要技术指标 /112
 - 4.1.3 主存中数据的存放 /113
 - 4.1.4 主存的基本结构和工作过程 /115
 - 4.1.5 存储系统层次结构 /115
- 4.2 半导体存储器 /116
 - 4.2.1 静态 MOS 存储器(SRAM) /116
 - 4.2.2 动态 MOS 存储器(DRAM) /120
 - 4.2.3 只读存储器 /125
 - 4.2.4 新型存储器 /128
- 4.3 主存的组织及与 CPU 的连接 /131
 - 4.3.1 存储器的扩展 /132
 - 4.3.2 存储器接口 /136
- 4.4 并行主存系统 /138
- 4.5 高速缓冲存储器(cache) /141
 - 4.5.1 程序访问的局部性原理 /141
 - 4.5.2 cache 的工作原理 /142
 - 4.5.3 相联存储器 /145
 - 4.5.4 cache 的地址映射及变换方法 /146
 - 4.5.5 替换算法 /154

4.5.6	cache 的写策略	/159
4.5.7	多 cache 结构	/160
4.6	虚拟存储器	/161
4.6.1	虚拟存储器的工作原理	/161
4.6.2	虚拟存储器的地址映射与变换	/162
4.6.3	页式虚拟存储器	/162
4.6.4	段式虚拟存储器	/167
4.6.5	段页式虚拟存储器	/168
4.7	存储保护	/169
4.8	辅助存储器	/170
4.8.1	磁表面存储器	/170
4.8.2	光盘存储器	/175
4.8.3	冗余磁盘阵列	/178
	本章小结	/183
	习题 4	/189
	课外实践	/192

第 5 章 指令系统 /193

5.1	指令系统概述	/193
5.2	指令格式	/194
5.2.1	操作码	/195
5.2.2	地址码	/195
5.2.3	关于指令长度的有关概念	/197
5.3	指令和操作数的寻址方式	/198
5.3.1	指令的寻址方式	/198
5.3.2	操作数寻址方式	/199
5.3.3	寻址方式举例	/207
5.4	指令系统类型	/208
5.5	指令格式设计及优化	/212
5.5.1	指令格式的设计	/212
5.5.2	指令格式的优化	/214

5.6	CISC 和 RISC 的基本概念	/218
5.6.1	复杂指令系统计算机(CISC)	/218
5.6.2	精简指令系统计算机(RISC)	/219
5.7	指令系统举例	/220
5.7.1	8088/8086 指令系统	/220
5.7.2	Pentium II 指令系统	/222
5.7.3	MIPS 指令系统	/223
	本章小结	/228
	习题 5	/231
	课外实践	/233

第 6 章 中央处理器 /234

6.1	中央处理器的功能与组成	/234
6.1.1	中央处理器的功能	/234
6.1.2	中央处理器的组成	/234
6.2	指令周期	/237
6.2.1	指令执行的一般流程	/237
6.2.2	指令周期的基本概念	/237
6.2.3	寄存器级传送语言 RTL	/238
6.3	数据通路的构成及指令操作流程	/239
6.3.1	基于单总线结构的数据通路	/239
6.3.2	基于专用通路结构的数据通路	/244
6.4	时序与控制	/258
6.4.1	中央处理器的时序	/258
6.4.2	控制方式	/260
6.5	微程序控制器	/261
6.5.1	微程序控制的基本概念	/261
6.5.2	微程序控制器组成原理	/263
6.5.3	微指令及其编码方法	/265
6.5.4	微程序设计举例	/267
6.6	硬布线控制器	/271
6.6.1	硬布线控制器的模型	/271

6.6.2	硬布线控制器的设计举例	/271
6.7	中央处理器举例	/277
	本章小结	/280
	习题 6	/284
	课外实践	/286
第 7 章	流水线技术概述	/287
7.1	流水线的概念	/287
7.2	流水线的分类	/288
7.3	流水线的性能分析	/291
7.4	流水线的性能分析举例	/295
7.5	流水线中的相关和冲突问题	/298
7.5.1	经典 5 段 MIPS 指令流水线	/299
7.5.2	流水线的冲突和相关	/301
7.6	指令级高度并行技术	/304
	本章小结	/305
	习题 7	/306
	课外实践	/307
第 8 章	系统总线	/308
8.1	总线基本概念	/308
8.1.1	总线的分类	/308
8.1.2	总线的特性	/309
8.1.3	三态门与总线	/310
8.1.4	总线事务类型	/311
8.1.5	信号线的类型	/311
8.1.6	总线性能指标	/311
8.2	总线的连接方式	/312
8.3	总线的仲裁方法	/316
8.4	总线的定时方式	/319
8.5	总线的信息传送	/323

8.6 总线标准 /325
 8.6.1 总线发展概述 /325
 8.6.2 几种典型的流行总线标准 /326
本章小结 /335
习题8 /338
课外实践 /339

第9章 输入输出系统 /340

9.1 输入输出特性 /340
9.2 I/O接口 /341
 9.2.1 I/O接口的功能 /341
 9.2.2 I/O接口的结构 /342
 9.2.3 接口的分类 /342
 9.2.4 I/O的连接方式 /343
 9.2.5 I/O设备的编址 /344
9.3 输入输出数据传输控制方式概述 /345
9.4 程序查询控制方式 /347
 9.4.1 程序查询控制方式的接口 /347
 9.4.2 设备状态寄存器的格式 /348
 9.4.3 程序查询方式数据输入
 输出流程 /348
9.5 程序中断控制方式 /350
 9.5.1 中断的概念 /350
 9.5.2 中断请求的建立与传送 /353
 9.5.3 中断响应 /355
 9.5.4 中断源识别以及获得中断服务程序
 入口地址的方法 /355
 9.5.5 中断处理流程 /359
9.6 DMA方式 /363
 9.6.1 DMA的基本概念 /363
 9.6.2 DMA传送方式 /364
 9.6.3 DMA操作过程 /365

9.6.4	DMA 控制器的基本组成	/367
9.6.5	选择型和多路型 DMA 控制器	/368
9.7	通道方式	/369
9.7.1	通道概念	/369
9.7.2	通道的类型	/369
9.7.3	CPU 对通道的控制	/371
9.7.4	通道结构的发展	/371
9.8	输入输出设备	/372
9.8.1	输入输出设备分类	/372
9.8.2	输入设备的工作原理	/373
9.8.3	输出设备	/376
	本章小结	/389
	习题 9	/392
	课外实践	/395
	参考文献	/396
	读者可参考的资源网站	/397

第 1 章 计算机系统概论

电子计算机的诞生是当代最卓越的科学技术成就之一,它的发明与应用标志着人类文明进入了一个新的历史阶段。它的迅速发展成为当今新技术革命浪潮中最活跃的因素,也成为衡量世界各国现代化科学技术水平的重要标志。

本章对计算机的发展与应用、计算机的基本组成、计算机系统的层次结构等内容简要介绍,重点分析计算机软硬件系统组成与功能、计算机系统的性能评价指标。使读者能从总体上对计算机的构成及各主要部件的功能有一个初步的了解,并建立整体概念,为后续知识的学习奠定基础。

1.1 计算机的发展与应用

计算机是一种不需要人工直接干预,能够按照事先存储的程序,自动、高速、准确地对各种信息进行处理电子设备。从数据表示来看,计算机可分为数字计算机和模拟计算机。今天的计算机以数字计算机为主,本书的主要研究对象也是数字计算机。

1.1.1 国内外计算机发展概况

1946年2月世界上第一台电子数字计算机“埃尼阿克”(ENIAC)在美国宾夕法尼亚大学诞生,它标志着科学技术的发展进入了新的时代——电子计算机时代。从第一台电子计算机的诞生到现在短短60多年的时间里,按照所采用的微电子器件的发展水平,计算机的发展已经历了4代。

1. 电子管计算机(1946—1958年)

这一时期的计算机以电子管为基本电子器件。存储器采用延迟线,存储容量小,只有几千个存储单元。运算速度每秒约几千次至几万次。输入和输出的设备为穿孔卡片或穿孔带。这一代计算机具有体积大、功耗高、可靠性差等特点。主要应用于科学计算,编程语言为汇编语言。

2. 晶体管计算机(1958—1964年)

第二代计算机的基本电子器件为晶体管。主存采用磁芯,存储容量增至10万存储单元以上;磁鼓被用作辅助存储器。运算速度已达到每秒几万次至几十万次。相对于电子管计算机,其体积和功耗均有所降低。应用领域从科学计算扩展到数据处理,开始使用FORTRAN和Algol等高级语言。

3. 集成电路计算机(1964—1978年)

第三代计算机的基本电子器件普遍采用了集成电路。主存采用半导体存储器,而磁盘代替磁鼓成为辅助存储器;主存和辅存容量显著增加;高速缓存和虚拟存储技术被引入存储系统。运算速度已达每秒几十万次至几百万次。体积和功耗均显著减小,可靠性大大提高。在此期间,出现了向大型和小型化两极发展的趋势,典型的有IBM公司的360(1964年)、Digital Equipment(数字设备)公司的PDP-11(1971年)以及第一台向量计算机CRAY-1(1974年)。与此同时,计算机品种开始出现多样化和系列化;微程序、流水线和并行性等技术也陆续被引入到计算机设计中;软件技术与计算机外围设备发展迅速,应用领域不断扩大。

4. 超大规模集成电路计算机(1978年以后)

第四代计算机的基本电子器件普遍采用了超大规模集成电路。存储容量和速度进一步提高,网络存储开始出现。运算速度从MIPS(每秒 10^6 条指令)级提高到GIPS(每秒 10^9 条指令)级乃至TIPS(每秒 10^{12} 条指令)水平。超大规模集成电路技术的发展,进一步缩小了计算机的体积和功耗,增强了计算机的功能。1980年,采用Intel 8086系列芯片的个人电脑IBM PC(Person Computer)诞生;出现了精减指令系统计算机RISC(典型代表是1985年推出的MIPS机)和复杂指令系统计算机CISC(典型代表是1978年推出的SPARC)两个发展方向。与此同时,多机并行处理与网络化也成为这一时代计算机的重要特征,大规模并行处理系统、分布式系统、计算机网络的研究和实施进展迅速;系统软件的发展不仅实现了计算机运行的自动化,而且正在向工程化和智能化迈进。

我国电子计算机的研究从1953年开始,到1958年研制出第一台103型通用数字电子计算机,它属于第一代电子管计算机。60多年来,我国已相继研制出多代新的计算机。从1982年开始,我国的计算机事业进入了新的发展时期,研制出每秒1亿次的巨型机——银河I型机、中型机、32位超级小型系列机,微型计算机、超级微型计算机、服务器都实现了批量生产。现在已形成了自己的计算机工业体系,并具备相当规模的计算机硬件、软件和外部设备的生产能力。1995年5月,由中科院计算技术研究所研制的“曙光1000”大规模并行处理机诞生。该机的峰值速度可达每秒25亿次单精度浮点运算,或每秒20亿次双精度浮点运算,内存容量为1000MB,节点机间总通信容量为每秒4800MB。该机的研制成功,标志着我国已掌握了大规模并行处理尖端技术,进入该高技术领域的世界先进行列。为加快我国经济信息化的进程,国家组织实施了一系列重大信息工程并已取得丰硕成果。目前,电子商务、电子政务的实施正方兴未艾。计算机网络的应用已从机关、企业、学校普及到寻常百姓家,我国网民的数量已跃居世界前列。计算机应用已渗透到我国的各行各业和千家万户。

1.1.2 摩尔定律

1965年,英特尔公司创始人之一戈登·摩尔(Gordon Moore)在一篇论文里对集成电

路上可容纳的晶体管数目、性能和价格等发展趋势进行了预测,其主要内容可概括为:集成电路上可容纳的晶体管数量每18个月翻一番,性能将提高一倍,而其价格将降低一半。这就是著名的摩尔定律的核心思想。

作为迄今为止半导体发展史上意义最深远的定律,摩尔定律已被集成电路近40多年的发展历史准确无误地验证着。1971年Intel 4004 CPU芯片上集成了2300个晶体管,至2001年Intel Pentium 4芯片上已集成了4200万个晶体管,增长了180多倍。

虽然摩尔后来对1965年发表论文中晶体管数量的增长率进行了重新审定和修正,而且近年来部分部件的发展已经开始偏离摩尔定律的预测,但这些都不能否定摩尔定律的深远影响和巨大贡献。这里需要特别指出的是,摩尔定律并非数学、物理定律,而是对发展趋势的一种分析预测,因此无论是它的文字表述还是定量计算,都应当容许一定的宽裕度。

目前,微处理器的制造工艺已从微米级发展到纳米级,戈登·摩尔的预言仍然正确。虽然摩尔定律从物理角度来说终归要结束,然而摩尔定律的影响是非常深远的,它表现在:

- (1) 单个芯片集成度提高后,其成本变化不大,因此总体成本明显下降。
- (2) 高集成度的芯片中,电路间的距离更近,其连线更短,工作速度可以更高。
- (3) 增加了芯片内部的连线,从而减少了外部连线,可靠性得以提高。
- (4) 计算机变得更小,减少了电能的消耗,适应性更好。

1.1.3 计算机的发展趋势

随着超大规模集成电路、新型高速器件不断涌现,计算机产品的生命周期大大缩短,计算机工业已成为当今世界发展最快的工业之一。20世纪90年代,微型计算机已迈入64位的新时代;RISC出现并逐步成熟;随机存取存储器、光盘、磁盘阵列和高速缓冲存储(cache)、网络存储等信息存储技术以及计算机网络技术正以惊人的速度发展;大规模并行处理系统(MPP)的处理速度已达到TFLOPS级(每秒 10^{12} 条浮点指令);超立方体计算机、神经网络计算机等高性能计算机正在加紧研究、试制之中。随着电子器件速度极限的逼近,人们又开始了光计算机、生物计算机和量子计算机的研究,这些计算机的诞生将会使计算机的发展进入一个全新时代。

在软件方面,20世纪40年代是手工编程时代,50年代是高级语言时代,60年代是操作系统时代,70年代是软件工程和数据库时代,80年代是软件开发环境时代。而今,具有良好图形用户界面的32位操作系统和各种网络操作系统得到广泛使用,版本不断更新。计算机辅助工程(CAS)、面向对象的技术以及形形色色的诊断、测试、调试和开发工具如雨后春笋,窗口软件、集成操作环境已相当成熟。软件在计算机系统中所占的比重越来越大,专门生产软件的公司越来越多,软件产业已形成相对独立的专门产业。只需要人们给出设计思想和解题步骤,由计算机自动编程的时代已为期不远。

计算机外部设备的发展速度也异常迅速,垂直磁记录技术、磁盘阵列技术、激光存储技术、激光印字机、高分辨率显示器、平面显示技术的研究和开发不断取得新成果。