



普通高等教育“十一五”国家级规划教材 计算机系列教材
教育部-英特尔精品课程



北京市高等教育精品教材立项项目

计算机系统结构

方 娟 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

教育部-英特尔精品课程



北京市高等教育精品教材立项项目

方 娟 编著

计算机系统结构



清华大学出版社

北京

内 容 简 介

计算机系统结构是计算机专业学生的必修课程,旨在使学生了解计算机系统结构的发展及新技术,掌握计算机系统的基本设计分析方法。本教材系统地讲述了计算机系统结构的基本概念、基本原理、基本结构以及计算机系统结构发展的主流技术和最新发展,并介绍了 MIPS 体系结构和多核技术,每章均有小结,使读者对各章的内容能清楚地理解和掌握。

全书共 9 章,分别介绍计算机系统结构的基本概念、指令系统、存储系统、流水线技术、并行处理机和多处理机、输入输出系统、MIPS 体系结构、多核技术、非冯·诺依曼型计算机。

本书章节安排合理,在多年计算机专业本科生教学的基础上,总结经验,将现代大多数计算机采用比较成熟的思想、结构和方法以系统结构的角​​度呈现给学生。

本书既可作为计算机专业本科生的教材,也可作为深入学习高档微型计算机人员的参考书。

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

计算机系统结构/方娟编著. —北京:清华大学出版社,2011.3

(计算机系列教材)

ISBN 978-7-302-24395-3

I. ①计… II. ①方… 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(2010)第 259287 号

责任编辑:张 民 赵晓宁

责任校对:梁 毅

责任印制:何 莘

出版发行:清华大学出版社

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

社 总 机:010-62770175

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

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

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

邮 购:010-62786544

印 刷 者:北京四季青印刷厂

装 订 者:三河市李旗庄少明装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:22.75

字 数:537 千字

版 次:2011 年 3 月第 1 版

印 次:2011 年 3 月第 1 次印刷

印 数:1~4000

定 价:33.00 元

产品编号:032180-01

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

计算机系统结构是由程序设计者所看到的一个计算机系统的属性,即概念性结构和功能性特性。本书系统地讲述了计算机系统结构的基本概念、基本原理、基本思想和基本结构,通过本书的学习,可以使计算机设计者能根据用户的需求和当前技术发展水平等方面设计计算机系统,从而获得较高的性能价格比。本书是作者多年教学经验的总结,我们将最适合计算机专业本科生学习的计算机系统结构知识编写在本书当中,深入地论述了计算机系统结构发展中的主流技术以及未来的发展方向,对 MIPS 系统、多核技术和新型计算机系统也做了介绍。

本书的编写以并行技术发展为主线,从计算机系统结构的基本概念、存储体系、流水技术、超级计算机到多处理机系统均做了详细说明。

全书共 9 章。第 1 章介绍计算机系统结构的基本概念和层次结构以及计算机系统结构的分类,计算机系统结构、组成和实现三者之间的关系和影响、计算机系统的设计要遵循 Amdahl 定律和软硬件取舍的原则等方面。第 2 章介绍对指令系统及与指令系统直接相关的数据表示和寻址技术、数据表示、IEEE 浮点数标准、自定义数据表示、RISC 技术等方面。第 3 章分析并给出了存储系统的层次结构,并介绍了各级存储器的性能指标。还介绍了主存与 cache 之间的三种映像方式:直接映像、全相联映像和组相联映像以及虚拟存储器和存储保护的方法。第 4 章介绍流水线技术,流水线按功能分类可分成单功能流水线和多功能流水线两种,按工作方式分类分为静态流水线和动态流水线,按连接方式可以分为线性流水线与非线性流水线。衡量流水线处理机的性能主要是吞吐率、加速比和效率,流水线的相关包括资源或结构相关、数据相关和控制相关。超级计算机包括一个周期能发射多条指令的计算机,有超标量、超流水、超长指令字计算机三种。第 5 章介绍并行处理机和多处理机,并行处理机包括分布式存储器结构和集中式共享存储器组成的并行处理机结构,各个处理机之间的互连网络连接方式以及多处理机的操作系统。第 6 章介绍输入输出系统的基本概念、基本特点,三种基本输入输出方式:程序查询方式、中断输入输出方式、直接存储器访问方式,通道的基本概念、基本功能、通道处理技术,以及输入输出系统。第 7 章介绍 MIPS 体系结构的发展历程,MIPS 体系结构家族经历了最初的 MIPS I~MIPS V 5 个时代,它们在实现方式上有一些不同。MIPS 32 和 MIPS 64 体系结构定义了兼容的 32 位和 64 位指令,MIPS 指令集是典型的 RISC 指令集。第 8 章介绍多核的基本概念,以及多核技术的发展趋势。片上多核处理器 CMP 根据计算内核的对等与否,可以分为同构多核和异构多核。本章还介绍了多线程的定义以及多线程技

术。第9章介绍几种非冯·诺依曼型计算机,包括基于数据驱动的数据流计算机、基于需求驱动的归约机、基于模式匹配驱动的智能计算机、光计算机和神经网络计算机。

本书内容丰富,涵盖系统结构的新技术,每章均有大量例题和习题,可作为计算机专业本科生和有关专业研究生的教材,也可作为计算机科学工作者的参考书。

本书的先修课程是“数字逻辑”、“计算机组成原理”、“汇编语言”、“数据结构”等课程,也可以在“操作系统”、“编译原理”等课程同时或之后开设,参考学时是64学时,可根据实际情况调整。

本书由北京工业大学方娟老师编著。北京工业大学张载鸿教授对本书提出了很多宝贵的意见和建议,在此表示衷心的感谢。清华大学出版社为本书的出版做了大量工作,在此表示衷心的感谢。

由于计算机技术发展迅速,加上作者水平有限,书中难免有不当之处,敬请广大读者批评指正。

方娟

2010年8月

F O R E W O R D

第 1 章 计算机系统结构的基本概念	/1
1.1 计算机系统结构	/1
1.1.1 计算机系统的层次结构	/3
1.1.2 计算机系统结构概念	/4
1.1.3 计算机系统结构分类	/4
1.1.4 计算机系统结构、组成与实现	/7
1.2 计算机系统设计	/9
1.2.1 计算机系统的设计原理	/9
1.2.2 计算机系统的设计原则	/11
1.2.3 计算机系统的设计思路	/12
1.3 计算机性能评价指标	/12
1.4 计算机系统结构的发展	/15
1.4.1 冯·诺依曼结构	/15
1.4.2 影响计算机系统结构发展的因素	/17
本章小结	/21
习题 1	/22
第 2 章 指令系统	/26
2.1 数据表示	/26
2.1.1 基本数据表示	/26
2.1.2 浮点数据表示	/27
2.1.3 自定义数据表示	/28
2.1.4 向量数据表示	/32
2.2 指令系统设计原则	/33
2.2.1 指令系统的指令编码方法	/34
2.2.2 寻址技术	/34
2.2.3 指令集结构	/36
2.3 指令系统优化	/38
2.3.1 操作码的优化	/38
2.3.2 指令系统的执行和优化	/41
2.4 精简指令系统计算机	/46
2.4.1 CISC 的设计思想与问题	/47

2.4.2 RISC 的设计思想起源 /47
 2.4.3 RISC 结构设计原则 /48
 2.4.4 RISC 结构的基本技术 /49
 2.4.5 RISC 计算机举例 /52
 2.4.6 RISC 计算机的发展 /56
 2.5 DLX 指令集结构 /57
 本章小结 /59
 习题 2 /59

第 3 章 存储系统 /61

3.1 存储系统基本原理 /61
 3.1.1 存储系统的定义 /61
 3.1.2 存储系统的层次结构 /63
 3.1.3 多体交叉访问存储器 /64
 3.2 高速缓冲存储器 /68
 3.2.1 高速缓冲存储器的基本结构与工作原理 /69
 3.2.2 地址映像与转换 /70
 3.2.3 替换算法及实现 /77
 3.2.4 cache 的预取算法 /81
 3.2.5 cache 的一致性问题 /81
 3.2.6 cache 性能分析 /83
 3.2.7 cache 的实用举例 /85
 3.3 虚拟存储器 /87
 3.3.1 虚拟存储器的工作原理 /88
 3.3.2 虚拟存储器的管理方式 /89
 3.3.3 虚拟存储器的地址映像与变换 /91
 3.3.4 虚拟存储器实例 /94
 3.4 cache 与虚拟存储器的异同 /96
 3.5 主存保护 /97
 3.5.1 存储区域保护 /97
 3.5.2 访问方式保护 /99

- 3.5.3 存储保护实例 /99
- 3.6 存储器检错与纠错技术 /101
 - 3.6.1 奇偶校验 /101
 - 3.6.2 海明校验 /102
 - 3.6.3 循环校验码 /103
- 本章小结 /103
- 习题 3 /104

第 4 章 流水线技术 /110

- 4.1 基本概念 /110
- 4.2 流水线工作方式 /112
 - 4.2.1 流水线处理概念和特点 /112
 - 4.2.2 流水线的分级和分类 /114
 - 4.2.3 流水线举例 /115
- 4.3 流水线性能分析 /120
 - 4.3.1 技术指标 /120
 - 4.3.2 流水线性能指标参数计算 /124
 - 4.3.3 时序和缓冲 /128
 - 4.3.4 相关处理 /128
 - 4.3.5 转移处理 /132
 - 4.3.6 流水中断处理 /134
- 4.4 流水线调度 /135
 - 4.4.1 流水线调度方法 /135
 - 4.4.2 动态硬件预测转移方法 /140
- 4.5 超级计算机 /141
 - 4.5.1 流水处理中指令并行性进一步开发 /141
 - 4.5.2 超级标量计算机 /141
 - 4.5.3 超长指令字计算机 /143
 - 4.5.4 超级流水计算机 /144
 - 4.5.5 超流水超标量计算机 /145

4.6 向量流水处理 /146

 4.6.1 向量处理方式 /146

 4.6.2 向量处理机的结构 /147

 4.6.3 改进向量处理机性能的方法 /149

 4.6.4 向量处理机的性能 /153

4.7 奔腾Ⅱ/Ⅲ/4 处理器流水处理举例 /155

本章小结 /163

习题 4 /163

第 5 章 并行处理机和多处理机 /168

5.1 概述 /168

5.2 并行处理技术与发展 /168

 5.2.1 并行处理技术的开发途径 /169

 5.2.2 并行处理技术发展 /170

5.3 并行处理机结构 /173

5.4 多处理机结构 /178

 5.4.1 紧耦合多处理机系统 /179

 5.4.2 松耦合多处理机系统 /181

5.5 多处理机 cache 一致性 /182

 5.5.1 多处理机 cache 内容不一致的原因 /183

 5.5.2 解决多处理机 cache 不一致的方法 /184

5.6 互连网络 /187

 5.6.1 互连网络的概念 /187

 5.6.2 互连网络的性能参数 /188

 5.6.3 互连网络拓扑结构 /190

 5.6.4 互连函数 /192

 5.6.5 单级互连网 /197

 5.6.6 多级互连网 /199

- 5.6.7 互连网通信模式和消息传递 /203
- 5.7 多处理机的操作系统 /208
 - 5.7.1 多处理机操作系统的特点 /208
 - 5.7.2 多处理机操作系统分类 /209
- 5.8 多处理机系统实例 /211
 - 5.8.1 SMP 共享存储型多处理机 /211
 - 5.8.2 MPP 大规模并行处理机 /212
 - 5.8.3 机群系统 /215
 - 5.8.4 “曙光一号”共享存储并行处理机 /218
- 本章小结 /220
- 习题 5 /221

第 6 章 输入输出系统 /223

- 6.1 概述 /223
 - 6.1.1 输入输出设备的分类 /223
 - 6.1.2 输入输出设备的特点 /224
- 6.2 基本工作原理 /225
 - 6.2.1 输入输出系统的结构 /225
 - 6.2.2 输入输出系统的逻辑组成及工作原理 /226
 - 6.2.3 输入输出系统的工作方式 /227
- 6.3 总线 /229
 - 6.3.1 总线工作原理 /230
 - 6.3.2 总线标准与实例 /231
- 6.4 中断 /237
 - 6.4.1 中断基本概念 /237
 - 6.4.2 中断处理过程 /238
 - 6.4.3 中断优先级和嵌套 /239
- 6.5 DMA 方式 /240
 - 6.5.1 DMA 方式的概念 /240
 - 6.5.2 DMA 的工作过程 /241

6.6	通道处理机	/241
6.6.1	通道的功能	/241
6.6.2	通道的逻辑组成与工作过程	/243
6.6.3	输入输出中断	/245
6.6.4	通道的种类及流量分析	/245
6.7	输入输出处理机	/251
6.7.1	输入输出处理机的功能	/251
6.7.2	输入输出处理机系统举例	/252
	本章小结	/253
	习题 6	/253

第 7 章 MIPS 体系结构 /257

7.1	MIPS 的发展历程	/257
7.1.1	RISC 与 CISC	/257
7.1.2	MIPS I 到 MIPS V	/257
7.1.3	MIPS32 和 MIPS64	/259
7.2	MIPS 体系结构	/260
7.2.1	MIPS 的指令格式	/260
7.2.2	MIPS 与 CISC 体系结构的比较	/261
7.2.3	编址和内存访问	/262
7.2.4	MIPS 不支持的特性	/262
7.3	MIPS 的缓存	/263
7.4	MIPS 指令集	/265
7.4.1	MIPS 汇编语言	/265
7.4.2	MIPS 指令集	/266
	本章小结	/285
	习题 7	/286

第 8 章 多核技术 /287

8.1	多核基本概念	/287
8.1.1	多核技术发展趋势	/287

- 8.1.2 多核概念 /287
- 8.1.3 片上多核处理器体系结构 /290
- 8.2 操作系统对多核处理器的支持方法 /295
 - 8.2.1 调度与中断 /295
 - 8.2.2 输入输出系统 /295
 - 8.2.3 存储管理 /296
 - 8.2.4 虚拟化技术 /297
 - 8.2.5 支持多核的操作系统 /299
- 8.3 多线程技术 /300
 - 8.3.1 线程的定义 /300
 - 8.3.2 多线程定义 /301
 - 8.3.3 多线程技术示例 /302
- 8.4 面向 Intel 公司多核处理器的多线程技术 /305
 - 8.4.1 基于硬件的多线程技术 /305
 - 8.4.2 超线程技术 /305
 - 8.4.3 多核体系结构 /306
- 8.5 多核发展趋势 /308
- 本章小结 /309
- 习题 8 /309

- 第 9 章 非冯·诺依曼型计算机 /310**
 - 9.1 数据流计算机 /310
 - 9.1.1 数据流计算机工作原理 /310
 - 9.1.2 数据流程图和数据流语言 /312
 - 9.1.3 数据流计算机的性能分析 /316
 - 9.1.4 数据流计算机结构 /319
 - 9.1.5 数据流机器存在的问题 /323
 - 9.2 归约机 /323
 - 9.2.1 函数式程序设计语言 /324
 - 9.2.2 函数式语言的归约机结构 /324

9.3 人工智能计算机 /327

- 9.3.1 人工智能计算特征 /327
- 9.3.2 人工智能计算机的结构 /328
- 9.3.3 人工智能计算机分类 /329

9.4 光计算机 /330

9.5 神经网络计算机 /331

本章小结 /332

习题9 /333

附录 A DLX 指令集 /334

附录 B WinDLX 教程 /340

参考文献 /346

第 1 章 计算机系统结构的基本概念

1.1 计算机系统结构

世界上第一台电子数字计算机已经问世 60 多年了,在其发展中共经历了 5 次更新换代。无论是运算速度、处理能力,还是存储容量都发生了人们难以预料的巨大变化。仅从 20 世纪 70 年代微型计算机出现至今,其性能已提高数千倍,而价格降低了上万倍。计算机更新换代的速度是人们难以预料的。

1. 第一代计算机(1945—1954),采用电子管和继电器存储器

20 世纪 50 年代是计算机研制的第一个高潮时期,计算机中的主要元器件都是用电子管制成的,后来人们将用电子管制作的计算机称为第一代计算机。在这一时期,美籍匈牙利科学家冯·诺依曼提出了“程序存储”的概念,其基本思想是把一些常用的基本操作都制成电路,每一个操作用一个数代表,这个数可以指令计算机执行某项操作。程序员根据解题的要求,用这些数编制程序,并把程序和数据一起放在计算机的内存中。计算机运行时,依次从存储器中取出程序里的一条条指令,逐一执行,以完成全部计算的各项操作。“程序存储”使全部计算成为真正的自动过程,它的出现被誉为电子计算机史上的里程碑,而这种类型的计算机被人们称为“冯·诺依曼机”。

第一代计算机的主要特点是:采用电子管作为基础元件;使用汞延迟线作存储设备,后来逐渐过渡到用磁芯存储器;输入、输出设备主要是用穿孔卡片,用户使用很不方便;系统软件还很原始,用户必须掌握用类似于二进制机器语言进行编程的方法。

2. 第二代计算机(1955—1964),采用晶体管

采用了性能优异的晶体管代替电子管为逻辑元件。晶体管的寿命长、速度快、体积小、重量轻、省电,用它来做基础元件,使计算机结构和性能都产生了质的变化。它的计算速度达到了每秒几万到几十万次。

磁记录设备的应用是第二代计算机的又一个特点。主存储器用磁芯,外存储器用磁鼓,主存储器的容量从几千字节提高到 10 万字节。

与此同时,现代计算机体系结构中的许多具有深远意义的特性相继出现,如字节、批处理、浮点数据表示、变址寄存器、中断、输入、输出处理机等。程序系统也发展得非常快,提出了高级语言及其编译程序的思想,出现了 ALGOL、FORTRAN、COBOL 等高级语言,使计算机的总体性能大大提高。

3. 第三代计算机(1965—1974),采用中小规模集成电路

集成电路将众多晶体管、电阻、电容等元件集成在一块薄薄的硅片上,集成电路使计算机的体积、可靠性、速度、功能、成本等方面都有了大幅度的改善。它的体积比晶体管计算机又缩小了100倍以上,运算速度和内存容量比第二代计算机提高了一个数量级,分别达到每秒上千万次和十几万字节,通用性提高,软件支持成倍增加,有力地推动了计算机的普及。

在体系结构上,第三代计算机的最大特点是采用了微程序设计技术,系统软件和应用软件都有很大的发展,随着功能增多,软件规模急剧扩大,使大部分机器系列兼容。在存储技术方面,出现了速度更快、更可靠的半导体存储器,代替磁芯存储器。外存储器用磁盘代替了磁鼓。在应用方式上开始建立计算机网络。

4. 第四代计算机(1975—1990),大规模或超大规模集成电路

根据摩尔定律,微电子技术以惊人的速度(每18个月性能翻番)向前发展,大规模、超大规模集成电路(单芯片上几万至几十万个晶体管)出现,使计算机的发展进入第四代。

并行计算机的出现也是第四代计算机的重要特点,开发了用于并行处理的多处理器操作系统、专用语言和编译器,同时产生了用于并行处理或分布处理的软件工具和环境。第四代计算机在语言和操作系统方面发展更快,形成了软件工程,建立了数据库,出现了大量工具软件。在应用方面,第四代计算机全面建立了计算机网络,实现了计算机之间的相互信息交流。多媒体技术开始发展,计算机集图形、图像、声音、文字处理于一体。

从第一代到第四代,计算机的体系结构都是相同的,都是由控制器、存储器、运算器和输入、输出设备组成,称为冯·诺依曼体系结构。

5. 第五代计算机(1991—至今),超大规模集成电路

第五代计算机是一种更接近人的人工智能计算机。在系统设计中考虑了编制知识库管理软件和推理机,机器本身能根据存储的知识进行判断和推理,同时,多媒体技术得到广泛应用,它能理解人的语言、文字和图形,人无须编写程序,靠讲话就能对计算机下达命令,驱使它工作,使人们能用语音、图像、视频等更自然的方式与计算机进行信息交互。

第五代计算机采用VLSI(very large scale integration)工艺更加完善的高密度、高速处理机和存储器芯片,最重要的能进行大规模并行处理,采用可扩展的和容许时延的系统结构。

综上所述,就所用的器件而言,由电子管、晶体管到集成电路,继电器存储、磁介质存储到集成电路,以至现今的大规模和超大规模集成电路;就结构的发展而言,由单个CPU组成的单机系统到流水线机、多处理机到大规模的并行处理机;从技术的发展上看,变址技术、中断技术、微程序技术、缓冲技术、重用技术以及虚拟技术等;就语言和应用方面而言,由汇编到高级语言,从单用户到多用户、到并行处理的语言、编译、操作系统,直到计算机网络、异构系统处理等。这些都标志着计算机的系统结构在不断改进,性能在不断提高。

1.1.1 计算机系统的层次结构

计算机系统由硬件和软件组成,硬件包括中央处理机、存储系统、输入输出设备等,软件包括系统软件和应用软件。按功能特性可以将计算机系统分为多个层次,每个层次的功能主要表现在其语言的功能上,如图 1-1 所示。

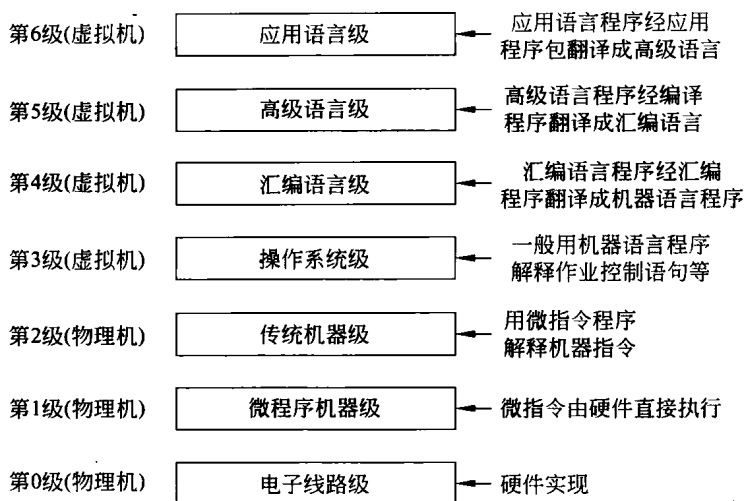


图 1-1 计算机系统的层次结构

图 1-1 中第 0 级是电子线路级,所有的功能都由硬件实现。

第 1 级是微程序级,各种指令由微程序控制执行,微程序控制器由固件实现。这两级是具体实现机器指定功能的中央控制部分。

第 2 级是传统机器语言级,机器语言程序通过解释器形成微程序,由中央处理机运行完成。

以上 3 级的实现是由硬件或固件完成,称为物理机。

第 3 级是操作系统级,其指令部分由操作系统进行解释,一般用机器语言程序解释作业控制语句等。

第 4 级是汇编语言级,经汇编程序翻译成机器语言程序,再由相应的机器进行解释。

第 5 级是高级语言级,由编译程序翻译成汇编语言或是某种中间语言程序。

第 6 级是应用语言级,经应用程序包翻译成高级语言。

以上 3~6 级是虚拟机,其语言的功能均是由软件实现的。

将计算机系统按功能划分成多级层次结构,首先有利于正确理解计算机系统的工作,明确软件、硬件和固件在计算机系统中的地位和作用;其次,有利于理解各种语言的实质及实现;最后,有利于探索虚拟机器新的实现方法,设计新的计算机系统。