



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



21世纪大学本科
计算机专业系列教材

张晨曦 王志英 编著
沈立 刘依

计算机系统结构教程

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

- 根据教育部“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 *Computing Curricula 2005* 同步

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21世纪大学本科计算机专业系列教材

计算机系统结构教程

张晨曦 王志英 沈立 刘依 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书借鉴了国内外最经典的相关教材,系统地论述了计算机系统结构的基本概念、基本结构、基本方法等,强调从开发并行性的角度,用量化分析(性能评价)的方法来研究和分析计算机系统。

全书共有 13 章。第 1 章介绍基本概念、并行性的发展和定量分析基础。第 2 章介绍计算机指令系统的设计和 MIPS 指令系统。第 3 章介绍流水线技术,包括性能分析、调度、相关和冲突以及流水线的实现。第 4 章介绍向量处理机的结构、特点和性能评价。第 5 章和第 6 章分别讲述如何用硬件和软件的方法来开发指令级并行性,包括记分牌和 Tomasulo 算法、基于硬件的前瞻执行、多指令流出技术、循环展开、VLIW、EPIC 等。第 7 章介绍存储层次,重点讲述 Cache 的基本知识及提高 Cache 性能的各种方法。第 8 章介绍总线、通道处理机和 RAID。第 9 章介绍互连网络的特性参数、静/动态互连网络以及消息传递机制等。第 10 章介绍 SMP、DSM、MPP 等并行计算机系统结构,论述多 Cache 一致性、同步、同时多线程。最后 3 章分别介绍机群计算机、阵列处理机、数据流计算机。

本书内容丰富,实例具体,语言简练,可读性好,通俗易懂,可作为高等院校计算机及相关专业的教学用书,也可供相关科技人员参考。

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

计算机系统结构教程/张晨曦等编著. —北京:清华大学出版社,2009.5

(21 世纪大学本科计算机专业系列教材)

ISBN 978-7-302-19434-7

I. 计… II. 张… III. 计算机体系结构—教材 IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 015846 号

责任编辑:魏江江 林都嘉

责任校对:时翠兰

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:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

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

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260

印 张:25.5

字 数:629 千字

版 次:2009 年 5 月第 1 版

印 次:2009 年 5 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:36.00 元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。
联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:027127-01

读者意见反馈

亲爱的读者：

感谢您一直以来对清华版计算机教材的支持和爱护。为了今后为您提供更优秀的教材，请您抽出宝贵的时间来填写下面的意见反馈表，以便我们更好地对本教材做进一步改进。同时如果您在使用本教材的过程中遇到了什么问题，或者有什么好的建议，也请您来信告诉我们。

地址：北京市海淀区双清路学研大厦 A 座 602 计算机与信息分社营销室 收
邮编：100084 电子邮件：jsjjc@tup.tsinghua.edu.cn
电话：010-62770175-4608/4409 邮购电话：010-62786544

教材名称：计算机系统结构教程

ISBN：978-7-302-19434-7

• 个人资料

姓名：_____ 年龄：_____ 所在院校/专业：_____

文化程度：_____ 通信地址：_____

联系电话：_____ 电子信箱：_____

您使用本书是作为：指定教材 选用教材 辅导教材 自学教材

您对本书封面设计的满意度：

很满意 满意 一般 不满意 改进建议_____

您对本书印刷质量的满意度：

很满意 满意 一般 不满意 改进建议_____

您对本书的总体满意度：

从语言质量角度看 很满意 满意 一般 不满意

从科技含量角度看 很满意 满意 一般 不满意

本书最令您满意的是：

指导明确 内容充实 讲解详尽 实例丰富

您认为本书在哪些地方应进行修改？（可附页）

您希望本书在哪些方面进行改进？（可附页）

电子教案支持

敬爱的教师：

为了配合本课程的教学需要，本教材配有配套的电子教案（素材），有需求的教师可以与我们的联系，我们将向使用本教材进行教学的教师免费赠送电子教案（素材），希望有助于教学活动的开展。相关信息请拨打电话 010-62776969 或发送电子邮件至 jsjjc@tup.tsinghua.edu.cn 咨询，也可以到清华大学出版社主页（<http://www.tup.com.cn> 或 <http://www.tup.tsinghua.edu.cn>）上查询。



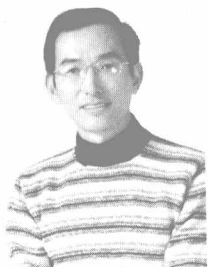
普通高等教育“十一五”国家级规划教材 21世纪大学本科计算机专业系列教材

近期出版书目

- 计算机导论(第2版)
- 程序设计导引及在线实践
- 程序设计基础
- 程序设计基础习题解析与实验指导
- 离散数学(第2版)
- 离散数学习题解答与学习指导(第2版)
- 数据结构与算法
- 形式语言与自动机理论(第2版)
- 形式语言与自动机理论教学参考书(第2版)
- 计算机组成原理(第2版)
- 计算机组成原理教师用书(第2版)
- 计算机组成原理学习指导与习题解析(第2版)
- 计算机组成与体系结构
- 微型计算机系统与接口
- 计算机操作系统
- 计算机操作系统学习指导与习题解答
- 计算机系统结构教程
- 数据库系统原理
- 编译原理
- 软件工程
- 计算机图形学
- 计算机网络(第2版)
- 计算机网络教师用书(第2版)
- 计算机网络实验指导书(第2版)
- 计算机网络习题集与习题解析(第2版)
- 计算机网络软件编程指导书
- 人工智能
- 多媒体技术原理及应用(第2版)
- 算法设计与分析(第2版)
- 算法设计与分析习题解答(第2版)
- C++ 程序设计
- 面向对象程序设计
- 计算机网络工程
- 计算机网络工程实验教程
- 信息安全原理及应用



第一作者简介



张晨曦 男,1960年9月生,汉族,福建龙岩人。他现任同济大学软件学院教授、博士生导师,国家级“中青年有突出贡献专家”,国家杰出青年基金获得者,先后主持了4项国家自然科学基金项目。1988年获博士学位,后一直在国防科技大学计算机学院工作,2005年9月调入同济大学。

张晨曦负责建设的计算机系统结构课程被评为2008年度国家级精品课程。他主讲计算机系统结构课程和从事系统结构的研究20余年,进行了一系列的教学改革和课程建设,取得了突出的成绩。他于1992年开发出了国内第一套系统结构CAI课件(含30个动画),在清华、北大等全国10多所高校应用,并于2003年完成教育部的新世纪网络课程建设工程项目“计算机体系结构网络课程”。

他负责编写出版的《计算机系统结构》(高等教育出版社)是“十五”和“十一五”国家级规划教材,该教材2002年获全国普通高等学校优秀教材2等奖,在全国至少有50所大学采用了该教材。2006年他负责主编的3本教材被列为“十一五”国家级规划教材。他撰写专著两部(第2作者),教材3本(第1作者)。其专著《新一代计算机》由荷兰North-Holland出版社出版,另一部1992年获“国家教委优秀专著特等奖”,1993年获“全国优秀科技图书一等奖”。他发表学术研究论文90多篇,其中在《中国科学》、《计算机学报》等一级刊物上发表8篇,国外发表20多篇,并有18篇被国际八大检索工具收录。

张晨曦获部委级科技进步一等奖两项(排名第2)、二等奖一项(排名第2),获部委级教学成果二、三等奖各一项。

2007年他获宝钢优秀教师奖和上海市育才奖,2008年获上海高校教学名师奖。1991年他被国家教委授予“做出突出贡献的中国博士”光荣称号,还被评为湖南省科技青年“十佳”之一。1993年他被评为“全军优秀教师”,1993年和1995年两次获“霍英东青年教师奖”,1995年获第4届“中国青年科技奖”。张晨曦从事教师工作多年,从15岁起当中学教师,对教学方法和现代教育技术有深入的研究,提出了面向远程教育和CAI的动画解析教学法。

业余爱好:摄影

通信地址:上海市曹安公路4800号同济大学软件学院

邮编:201804

课程网站: www.GotoSchool.net 个人摄影网站: www.FotoSky.com

E-mail: xzhang2000@sohu.com

21世纪大学本科计算机专业系列教材编委会

名誉主任：陈火旺

主任：李晓明

副主任：钱德沛 焦金生

委员：（按姓氏笔画为序）

马殿富 王志英 王晓东 宁 洪 刘 辰

孙茂松 李大友 李仲麟 吴朝晖 何炎祥

宋方敏 张大方 张长海 周兴社 侯文永

袁开榜 钱乐秋 黄国兴 蒋宗礼 曾 明

廖明宏 樊孝忠

秘 书：张瑞庆

21 世纪是知识经济的时代,是人才竞争的时代。随着 21 世纪的到来,人类已步入信息社会,信息产业正成为全球经济的主导产业。计算机科学与技术信息产业中占据了最重要的地位,这就对培养 21 世纪高素质创新型计算机专业人才提出了迫切的要求。

为了培养高素质创新型人才,必须建立高水平的教学计划和课程体系。在 20 多年跟踪分析 ACM 和 IEEE 计算机课程体系的基础上,紧跟计算机科学与技术的发展潮流,及时制定并修正教学计划和课程体系是尤其重要的。计算机科学与技术的发展对高水平人才的要求,需要我们从总体上优化课程结构,精炼教学内容,拓宽专业基础,加强教学实践,特别注重综合素质的培养,形成“基础课程精深,专业课程宽新”的格局。

为了适应计算机科学与技术学科发展和计算机教学计划的需要,要采取多种措施鼓励长期从事计算机教学和科技前沿研究的专家教授积极参与计算机专业教材的编著和更新,在教材中及时反映学科前沿的研究成果与发展趋势,以高水平的科研促进教材建设。同时适当引进国外先进的原版教材。

为了提高教学质量,需要不断改革教学方法与手段,倡导因材施教,强调知识的总结、梳理、推演和挖掘,通过加快教案的不断更新,使学生掌握教材中未及时反映的学科发展新动向,进一步拓宽视野。教学与科研相结合是培养学生实践能力的有效途径。高水平的科研可以为教学提供最先进的高新技术平台和创造性的工作环境,使学生得以接触最先进的计算机理论、技术和环境。高水平的科研还可以为高水平人才的素质教育提供良好的物质基础。学生在课题研究中不但能了解科学研究的艰辛和科研工作者的奉献精神,而且能熏陶和培养良好的科研作风,锻炼和培养攻关能力和协作精神。

进入 21 世纪,我国高等教育进入了前所未有的大发展时期,时代的进步与发展对高等教育质量提出了更高、更新的要求。2001 年 8 月,教育部颁发了《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》。文件指出,本科教育是高等教育的主体和基础,抓好本科教学是提高整个高等教育质量的重点和关键。随着高等教育的普及和高等学校的扩招,在校大学本科计算机专业学生的人数将大量上升,对适合 21 世纪大学本科计算机科学与技术学科课程体系要求的,并且适合中国学生学习的计算机专业教材的需求量也将急剧增加。为此,中国计算机学会和清华大学出版社共同规划了面向全国高等院校计算机专业本科生的“21 世纪大学本科计算机专业系列教材”。本系列教材借鉴美国 ACM 和 IEEE 最新制定的 *Computing Curricula 2005* (简称 CC2005) 课程体系,反映当代计算机科学与技术学科水平和计算机科学技术的新发展、新技术,并且结合中国计算机教育改革成果和中国国情。

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,在清华大学出版社的大力支持下,跟踪分析 CC2001,并结合中国计算机科学与技术学科的发展现状和计算机教育的改革成果,研究出了《中国计算机科学与技术学科教程 2002》(China Computing Curricula 2002,简称 CCC2002),该项研究成果对中国高等学校计算机科学与技术学科教育的改革和发展具有重要的参考价值和积极的推动作用。

“21 世纪大学本科计算机专业系列教材”正是借鉴美国 ACM 和 IEEE CC2005 课程体系,依据 CCC2002 基本要求组织编写的计算机专业教材。相信通过这套教材的编写和出版,能够在内容和形式上显著地提高我国计算机专业教材的整体水平,继而提高我国大学本科计算机专业的教学质量,培养出符合时代发展要求的具有较强国际竞争力的高素质创新型计算机人才。



中国工程院院士

国防科学技术大学教授

21 世纪大学本科计算机专业系列教材编委会名誉主任

本书适用于重点高等院校的计算机、自动化以及电子工程等相关专业本科生和研究生。在内容的选取上,本书不仅强调采用目前国际上流行的量化分析方法,注意介绍新技术和新方法,而且还注重对经典的结构和思想等的论述和分析。本书借鉴了国内外经典的相关教材,吸取了它们各自的优点,并将其内容有机地结合在了一起。

“计算机系统结构”是计算机领域的一门重要学科。它强调从总体结构、系统分析这一角度来研究计算机系统。通过学习这本书,读者能把在“计算机组成原理”、“数据结构”、“操作系统”等课程中所学的软、硬件知识有机地结合起来,从而建立起计算机系统的完整概念。

本教材的主要特点是:

- (1) 取材先进,体系完整,覆盖面广,深度与广度相结合,适合于重点大学;
- (2) 重点突出,可读性好,语言简练,通俗易懂;
- (3) 参考国际上最经典的系统结构教材,强调采用量化分析方法。这种方法使我们能更具体、实际地分析和设计计算机系统结构。

全书共有 13 章。各章内容如下:

第 1 章讲述计算机系统结构的概念以及系统结构和并行性的发展,并介绍定量分析基础。

第 2 章为“指令系统的设计”,讲述计算机指令系统设计的各个方面,包括指令系统的分类、寻址技术、功能设计、格式设计以及指令系统的发展和改进,并且介绍一种 RISC 计算机——MIPS 的指令系统。

第 3 章为“流水线技术”,讲述流水线的基本概念、分类、性能分析、非线性流水线的调度,介绍流水线中的相关和冲突问题及其解决方法,并以 MIPS 为例讨论流水线的实现。

第 4 章为“向量处理机”,讲述向量处理机的结构和特点、提高向量处理机性能的方法以及向量处理机的性能评价,并介绍了 3 个向量处理机实例。

第 5 章和第 6 章分别讲述如何用硬件和软件的方法来开发指令级并行。第 5 章包括指令级并行的概念、记分牌和 Tomasulo 动态调度算法、基于硬件的前瞻执行以及多指令流出技术等。

第 6 章包括循环展开和基本指令调度、跨越基本块的静态指令调度、VLIW 技术、显式指令并行执行 EPIC 等,并介绍了一个实例——Intel Itanium 处理器。

第 7 章为“存储系统”,讲述 Cache 的基本知识、降低 Cache 不命中率的方法、减少 Cache 不命中开销的方法以及减少命中时间的方法,并对并行主存和虚拟存储器做了简要

的讨论。最后,还介绍了一个存储层次实例——AMD Opteron 的存储器层次结构。

第 8 章为“输入输出系统”,讲述总线及其与 CPU/存储器的连接、通道处理机及其流量分析,并详细论述了廉价磁盘冗余阵列 RAID。

第 9 章为“互连网络”,讲述互连函数、互连网络的特性参数、静态互连网络、动态互连网络以及消息传递机制等。

第 10 章为“多处理机”,讲述对称式共享存储器系统结构、分布式共享存储器系统结构、多 Cache 一致性、同步、同时多线程以及 MPP,并介绍了两个多处理机实例。

第 11 章为“机群计算机”,讲述机群的结构、软件模型以及机群的分类,并介绍了 4 个典型的机群系统。

第 12 章为“阵列处理机”,讲述阵列处理机的操作模型、结构和特点以及并行算法,并介绍了两个阵列处理机实例。

第 13 章为“数据流计算机”,讲述数据流计算机模型、数据流程图和数据流语言、静态数据流计算机结构以及动态数据流计算机结构。

本书的大部分内容由张晨曦教授编写,包括第 1~3 章、第 5 章和第 7~9 章,王志英教授编写了第 10 章,沈立副教授编写了第 6 章和第 11 章,刘依编写了第 12 章和第 13 章。李江峰、张硕、孙太一和程志强编写了第 4 章。

本书直接或间接地引用了许多专家和学者的文献或著作,在此向他们表示衷心的感谢。

本书有配套的教辅材料,包括《计算机系统结构学习辅导与习题解析》(张晨曦主编),《计算机系统结构实验教程》(张晨曦主编),PPT 讲稿,实验模拟程序,动画课件等,前两者的出版时间为 2009 年。关于最新信息,请关注本网站:

www.GotoSchool.net

《实验教程 & 学习辅导 & 习题解析》将于 2009 年下半年出版发行。

由于作者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,敬请读者批评指正,请把相关的信息发送到: xzhang2000@sohu.com。

编 者

2009 年 4 月于上海

第 1 章 计算机系统结构的基础知识	1
1.1 计算机系统结构的基本概念	1
1.1.1 计算机系统的层次结构	2
1.1.2 计算机系统结构的定义	3
1.1.3 计算机组成和计算机实现	3
1.1.4 计算机系统结构的分类	4
1.2 计算机系统的设计	7
1.2.1 计算机系统设计的定量原理	7
1.2.2 计算机系统设计者的主要任务	10
1.2.3 计算机系统设计的主要方法	12
1.3 计算机系统的性能评测	13
1.4 计算机系统结构的发展	17
1.4.1 冯·诺依曼结构及其改进	17
1.4.2 软件对系统结构的影响	19
1.4.3 器件发展对系统结构的影响	22
1.4.4 应用对系统结构的影响	23
1.5 计算机系统结构中并行性的发展	23
1.5.1 并行性的概念	23
1.5.2 提高并行性的技术途径	25
1.5.3 单机系统中并行性的发展	25
1.5.4 多机系统中并行性的发展	26
1.5.5 并行机的发展变化	27
习题 1	28
第 2 章 指令系统的设计	30
2.1 指令系统结构的分类	30
2.2 寻址方式	33
2.3 指令系统的设计和优化	35
2.3.1 指令系统设计的基本原则	35

2.3.2	控制指令	36
2.3.3	指令操作码的优化	37
2.3.4	指令字格式的优化	40
2.4	指令系统的发展和改进	42
2.4.1	沿 CISC 方向发展和改进指令系统	42
2.4.2	沿 RISC 方向发展和改进指令系统	44
2.5	操作数的类型和大小	45
2.6	MIPS 指令系统结构	47
2.6.1	MIPS 的寄存器	47
2.6.2	MIPS 的数据表示	47
2.6.3	MIPS 的数据寻址方式	47
2.6.4	MIPS 的指令格式	48
2.6.5	MIPS 的操作	49
2.6.6	MIPS 的控制指令	50
2.6.7	MIPS 的浮点操作	51
习题 2	51
第 3 章	流水线技术	53
3.1	流水线的基本概念	53
3.1.1	什么是流水线	53
3.1.2	流水线的分类	55
3.2	流水线的性能指标	58
3.2.1	流水线的吞吐率	58
3.2.2	流水线的加速比	60
3.2.3	流水线的效率	61
3.2.4	流水线性能分析举例	62
3.2.5	流水线设计中的若干问题	64
3.3	非线性流水线的调度	64
3.3.1	单功能非线性流水线的最优调度	65
3.3.2	多功能非线性流水线的调度	67
3.4	流水线的相关与冲突	70
3.4.1	一条经典的 5 段流水线	70
3.4.2	相关与流水线冲突	72
3.5	流水线的实现	83
3.5.1	MIPS 的一种简单实现	83
3.5.2	基本的 MIPS 流水线	86
习题 3	90

第 4 章 向量处理机	93
4.1 向量的处理方式	93
4.2 向量处理机的结构	95
4.2.1 “存储器-存储器”结构	95
4.2.2 “寄存器-寄存器”结构	95
4.3 提高向量处理机性能的常用技术	97
4.3.1 设置多个功能部件	98
4.3.2 链接技术	98
4.3.3 分段开采技术	101
4.3.4 采用多处理机系统	102
4.4 向量处理机的性能评价	102
4.4.1 向量指令的处理时间 T_{vp}	102
4.4.2 最大性能 R_{∞} 和半性能向量长度 $n_{1/2}$	105
4.4.3 向量长度临界值 n_v	106
4.5 向量处理机实例	106
4.5.1 具有代表性的向量处理机	106
4.5.2 Cray Y-MP 和 C-90	107
4.5.3 NECSX-X44	108
习题 4	109
第 5 章 指令级并行及其开发——硬件方法	111
5.1 指令级并行的概念	111
5.2 相关与指令级并行	112
5.3 指令的动态调度	113
5.3.1 动态调度的基本思想	113
5.3.2 记分牌动态调度方法	115
5.3.3 Tomasulo 算法	122
5.4 动态分支预测技术	133
5.4.1 采用分支历史表 BHT	134
5.4.2 采用分支目标缓冲器 BTB	135
5.4.3 基于硬件的前瞻执行	137
5.5 多指令流出技术	141
5.5.1 基于静态调度的多流出技术	143
5.5.2 基于动态调度的多流出技术	144
5.5.3 超长指令字技术	147
5.5.4 多流出处理器受到的限制	148
5.5.5 超流水线处理机	149
习题 5	152

第 6 章 指令级并行的开发——软件方法	153
6.1 基本指令调度及循环展开	153
6.1.1 指令调度的基本方法	153
6.1.2 循环展开	155
6.2 跨越基本块的静态指令调度	157
6.2.1 全局指令调度	157
6.2.2 踪迹调度	159
6.2.3 超块调度	162
6.3 静态多指令流出: VLIW 技术	163
6.4 显式并行指令计算 EPIC	165
6.4.1 非绑定分支	166
6.4.2 谓词执行	166
6.4.3 前瞻执行	169
6.5 开发更多的指令级并行	172
6.5.1 挖掘更多的循环级并行	172
6.5.2 软流水	178
6.6 实例: IA-64 体系结构	180
6.6.1 IA-64 的指令格式	181
6.6.2 IA-64 的谓词执行机制	184
6.6.3 IA-64 的前瞻执行机制	185
习题 6	186
第 7 章 存储系统	188
7.1 存储系统的基本知识	188
7.1.1 存储系统的层次结构	188
7.1.2 存储系统的性能参数	189
7.1.3 三级存储系统	190
7.1.4 存储层次的四个问题	192
7.2 Cache 基本知识	192
7.2.1 基本结构和原理	192
7.2.2 映像规则	193
7.2.3 查找方法	195
7.2.4 Cache 的工作过程	197
7.2.5 替换算法	198
7.2.6 写策略	202
7.2.7 Cache 性能分析	203
7.2.8 改进 Cache 性能	205
7.3 降低 Cache 不命中率	205

7.3.1	三种类型的不命中	206
7.3.2	增加 Cache 块大小	208
7.3.3	增加 Cache 的容量	209
7.3.4	提高相联度	209
7.3.5	伪相联 Cache	209
7.3.6	硬件预取	210
7.3.7	编译器控制的预取	210
7.3.8	编译优化	211
7.3.9	“牺牲”Cache	213
7.4	减少 Cache 不命中开销	214
7.4.1	采用两级 Cache	214
7.4.2	让读不命中优先于写	217
7.4.3	写缓冲合并	217
7.4.4	请求字处理技术	218
7.4.5	非阻塞 Cache 技术	218
7.5	减少命中时间	219
7.5.1	容量小、结构简单的 Cache	219
7.5.2	虚拟 Cache	219
7.5.3	Cache 访问流水化	222
7.5.4	踪迹 Cache	222
7.5.5	Cache 优化技术总结	222
7.6	并行主存系统	223
7.6.1	单体多字存储器	224
7.6.2	多体交叉存储器	224
7.6.3	避免存储体冲突	229
7.7	虚拟存储器	230
7.7.1	基本概念	230
7.7.2	快速地址转换技术	231
7.7.3	页式虚拟存储器实例: 64 位 Opteron 的存储管理	232
7.8	实例: AMD Opteron 的存储器层次结构	234
	习题 7	238
第 8 章	输入输出系统	241
8.1	I/O 系统的性能	241
8.2	I/O 系统的可靠性、可用性和可信性	242
8.3	廉价磁盘冗余阵列 RAID	243
8.3.1	RAID0	245
8.3.2	RAID1	245
8.3.3	RAID2	246

8.3.4	RAID3	246
8.3.5	RAID4	247
8.3.6	RAID5	248
8.3.7	RAID6	249
8.3.8	RAID10 与 RAID01	249
8.3.9	RAID 的实现与发展	249
8.4	总线	250
8.4.1	总线的设计	250
8.4.2	总线标准和实例	252
8.4.3	与 CPU 的连接	253
8.5	通道处理机	254
8.5.1	通道的作用和功能	254
8.5.2	通道的工作过程	255
8.5.3	通道种类	257
8.5.4	通道流量分析	259
8.6	I/O 与操作系统	261
8.6.1	DMA 和虚拟存储器	261
8.6.2	I/O 和 Cache 数据一致性	261
	习题 8	263
第 9 章	互连网络	266
9.1	互连函数	266
9.1.1	互连函数的表示方法	266
9.1.2	几种基本的互连函数	267
9.2	互连网络的结构参数与性能指标	272
9.2.1	互连网络的结构参数	272
9.2.2	互连网络的性能指标	273
9.3	静态互连网络	273
9.4	动态互连网络	279
9.4.1	总线网络	279
9.4.2	交叉开关网络	280
9.4.3	多级互连网络	281
9.4.4	动态互连网络的比较	284
9.5	消息传递机制	285
9.5.1	消息寻径方案	285
9.5.2	死锁与虚拟通道	288
9.5.3	流控制策略	289
9.5.4	选播和广播寻径算法	292
	习题 9	294