



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
国家级精品课程教材



21世纪大学本科
计算机专业系列教材

张晨曦 等编著

计算机系统结构实践教程

<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

国家级精品课程教材

21世纪大学本科计算机专业系列教材

计算机系统结构实践教程

张晨曦 刘 依 刘宏伟 编著
孙太一 沈 立 李江峰

· · · · ·

· · · · ·

· · · · ·

· · · · ·

· · · · ·

· · · · ·

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书设计和编写了 11 个实验：指令系统和体系结构、流水线及流水线中的冲突、指令调度和延迟分支、Cache 性能分析、Tomasulo 算法、再定序缓冲(ROB)工作原理、多 Cache 一致性——监听协议、多 Cache 一致性——目录协议。本书覆盖面广，内容丰富，有利于加深对系统结构知识的理解。本书的实验既有基于 MIPS 指令集的，也有基于 SPARC 指令集的。教师可根据具体教学需要选择。本书包含了实验所需相关知识的介绍，可以跟大多数系统结构教材配合使用。本书所附光盘提供了我们专门为系统结构实验开发的一套运行于 Windows 平台的模拟器。这些模拟器界面友好，使用方便、直观，交互性很强。随书光盘还提供了计算机系统结构课程相关的动画和视频课件。本书可作为本科生或研究生的系统结构课程以及计算机组成与结构课程的实验教材，也可作为自学者的辅助教材。

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

计算机系统结构实践教程/张晨曦等编著. —北京：清华大学出版社，2010.5

(21 世纪大学本科计算机专业系列教材)

ISBN 978-7-302-22371-9

I. ①计… II. ①张… 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 053381 号

责任编辑：魏江江 顾 冰

责任校对：梁 毅

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：北京国马印刷厂

经 销：全国新华书店

开 本：185×260 印 张：12 字 数：297 千字

附光盘 1 张

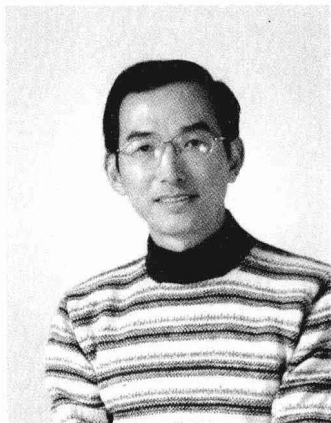
版 次：2010 年 5 月第 1 版 印 次：2010 年 5 月第 1 次印刷

印 数：1~4000

定 价：19.00 元

产品编号：027126-01

第一作者简介



张晨曦,男,1960年9月生,汉族,福建龙岩人。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。

作为课程负责人,张晨曦建设的计算机系统结构课程于2007年被评为上海市精品课程,2008年被评为国家级精品课程。他还先后获得了“教育部—微软精品课程”和“教育部—SUN精品课程”的荣誉。他主讲计算机系统结构课程和从事系统结构的研究二十余年,进行了一系列的教学改革和课程建设,取得了突出的成绩。1992年开发出国内第一套系统结构CAI课件(含30个动画),在清华大学、北京大学等全国十多所高校得到了应用。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”。2009年开发出了国内第一套系统结构实验模拟器。

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二等奖。全国至少有60所大学采用了该教材。至2009年,他共编写出版了5本“十一五”国家级规划教材。撰写专著两部(第二作者),其中专著《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”。发表学术论文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。有18篇被国际著名八大检索工具收录。

张晨曦获部委级科技进步一等奖两项(排名第二),二等奖一项(排名第二);获部委级教学成果二等奖、三等奖各一项。

2007年获宝钢优秀教师奖和上海市育才奖,2008年被评为上海市高校教学名师,2009年被评为上海市模范教师。1991年被国家教委授予“做出突出贡献的中国博士”光荣称号,被评为湖南省科技青年“十佳”之一;1993年被评为“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”。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的他,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

课程网站: www.GotoSchool.net www.Arch365.net

个人摄影网站: www.FotoSky.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。计算机科学与技术的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。

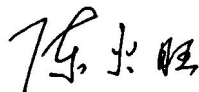
为了适应计算机科学与技术学科发展和计算机教学计划的需要,要采取多种措施鼓励长期从事计算机教学和科技前沿研究的专家教授积极参与计算机专业教材的编著和更新,在教材中及时反映学科前沿的研究成果与发展趋势,以高水平的科研促进教材建设。同时适当引进国外先进的原版教材。

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 and 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

前 言

FOREWORD

计算机系统结构是计算机专业及相关专业的一门重要的专业课程。但是,长期以来,该课程的实验一直是一个令人头疼的问题。系统结构课程内容比较抽象、单调,不少内容要通过实验才能更好地理解。而且,通过实验研究对系统结构进行量化分析,是国际上流行的一种方法。

基于硬件平台来做实验不仅成本高,而且目前没有合适的系统结构实验平台。国外研究和实践经验表明,基于模拟器开设虚拟实验是一种有效的途径,有时其效果甚至比实物实验更好。因此,本教材基于我们自行开发的具有自主知识产权的模拟器,设计和编写了 11 个实验。其中前 6 个实验是分两组平行的,分别基于 MIPS 指令集(本书的第一部分)和 SPARC 指令集(本书的第二部分)。教师可以根据具体的教学需要从中选择一组。后 5 个实验构成第三部分,是必选的。

每个实验都由实验目的、实验平台、实验内容和步骤、模拟器使用手册以及相关知识 5 部分构成。“相关知识”部分系统地论述了与该实验相关的知识,使读者能为实验做好充分的准备。

采用本书,可以开设以下 8 个实验:

- (1) 指令系统和体系结构
- (2) 流水线及流水线中的冲突
- (3) 指令调度和延迟分支
- (4) Cache 性能分析
- (5) Tomasulo 算法
- (6) 再定序缓冲(ROB)工作原理
- (7) 多 Cache 一致性——监听协议
- (8) 多 Cache 一致性——目录协议

本书光盘中提供了所有上述实验所需要的模拟器和样例程序,只要把模拟器复制到硬盘中即可使用。

本书主要由同济大学的张晨曦、刘依,哈尔滨工业大学的刘宏伟,同济大学的孙太一,国防科技大学的沈立以及同济大学的李江峰等编写;张硕、程志强、王伟、江崑等也参加了部分内容的编写。

由于本书的“相关知识”部分系统地论述了与该实验相关的知识,所以本书可以跟大多

数系统结构教材配合使用,而且还可作为自学者的辅助教材。

本书所附光盘还提供了计算机系统结构课程相关的动画和视频课件。

关于新的信息,请关注本网站: www.GotoSchool.net 或 www.Arch365.net。

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。

张晨曦

2009年11月于上海

第一部分 基于 MIPS 体系结构

实验 1 MIPS 指令系统和 MIPS 体系结构	3
1.1 实验目的	3
1.2 实验平台	3
1.3 实验内容和步骤	3
1.4 MIPSsim 使用手册	5
1.4.1 启动模拟器	5
1.4.2 MIPSsim 的窗口	6
1.4.3 MIPSsim 的菜单	12
1.5 相关知识：MIPS 指令系统	15
1.5.1 MIPS 的寄存器	15
1.5.2 MIPS 的数据表示	16
1.5.3 MIPS 的数据寻址方式	16
1.5.4 MIPS 的指令格式	16
1.5.5 MIPS 的部分指令介绍	17
实验 2 流水线及流水线中的冲突	21
2.1 实验目的	21
2.2 实验平台	21
2.3 实验内容和步骤	21
2.4 MIPSsim 使用手册	23
2.5 相关知识：流水线、相关与冲突	23
2.5.1 一条经典的 5 段流水线	23
2.5.2 相关与流水线冲突	24
2.5.3 流水线的实现	29
实验 3 指令调度和延迟分支	34
3.1 实验目的	34

3.2	实验平台	34
3.3	实验内容和步骤	34
3.4	MIPSsim 使用手册	35
3.5	相关知识: 指令调度和延迟分支	35
3.5.1	指令调度	35
3.5.2	延迟分支	36

第二部分 基于 SPARC 体系结构

实验 4	SPARC 指令系统和 SPARC 体系结构	41
4.1	实验目的	41
4.2	实验平台	41
4.3	实验内容和步骤	41
4.4	SPARCsim 使用手册	44
4.4.1	启动程序	44
4.4.2	SPARCsim 的窗口	44
4.4.3	SPARCsim 的菜单	50
4.5	相关知识: UltraSPARC 指令系统	54
4.5.1	UltraSPARC 的寄存器	54
4.5.2	UltraSPARC 的数据表示	57
4.5.3	UltraSPARC 的数据寻址方式	57
4.5.4	UltraSPARC 的指令格式	58
4.5.5	UltraSPARC 的部分指令介绍	59
实验 5	流水线及流水线中的冲突	63
5.1	实验目的	63
5.2	实验平台	63
5.3	实验内容和步骤	63
5.4	SPARCsim 使用手册	65
5.5	相关知识: 流水线、相关与冲突	65
5.5.1	一条经典的 5 段流水线	65
5.5.2	相关与流水线冲突	66
5.5.3	流水线的实现	71
实验 6	指令调度和延迟分支	76
6.1	实验目的	76
6.2	实验平台	76
6.3	实验内容和步骤	76
6.4	SPARCsim 使用手册	77

6.5 相关知识：指令调度和延迟分支	77
--------------------	----

第三部分 Cache 和指令并行实验

实验 7 Cache 性能分析	83
7.1 实验目的	83
7.2 实验平台	83
7.3 实验内容和步骤	83
7.3.1 Cache 容量对不命中率的影响	83
7.3.2 相联度对不命中率的影响	84
7.3.3 Cache 块大小对不命中率的影响	84
7.3.4 替换算法对不命中率的影响	85
7.4 MyCache 模拟器的使用方法	85
7.5 相关知识：Cache 的基本原理	86
7.5.1 Cache 的映像规则	86
7.5.2 查找方法	88
7.5.3 替换算法	88
7.5.4 写策略	89
7.5.5 改进 Cache 性能	89
7.5.6 3 种类型的命中	89
7.5.7 降低不命中率的方法	90
7.5.8 分离 Cache 和混合 Cache	96
实验 8 Tomasulo 算法	97
8.1 实验目的	97
8.2 实验平台	97
8.3 实验内容和步骤	97
8.4 Tomasulo 算法模拟器的使用方法	98
8.5 相关知识：Tomasulo 算法	100
8.5.1 基本思想	100
8.5.2 具体算法	103
实验 9 再定序缓冲(ROB)工作原理	107
9.1 实验目的	107
9.2 实验平台	107
9.3 实验内容和步骤	107
9.4 ROB 模拟器的使用方法	108
9.5 相关知识：再定序缓冲 ROB	110

实验 10 多 Cache 一致性——监听协议	114
10.1 实验目的	114
10.2 实验平台	114
10.3 实验内容和步骤	114
10.4 监听协议模拟器的使用方法	115
10.5 相关知识：监听协议	116
10.5.1 基本思想	116
10.5.2 监听协议的实现	116
实验 11 多 Cache 一致性——目录协议	121
11.1 实验目的	121
11.2 实验平台	121
11.3 实验内容和步骤	121
11.4 目录协议模拟器的使用方法	122
11.5 相关知识：目录协议	123
11.5.1 目录协议的基本思想	123
11.5.2 目录协议实例	126
附录 A MIPSsim 的指令列表(MIPS64 指令集的一个子集)	129
附录 B MIPSsim 的指令系统(MIPS64 指令集的一个子集)	138
附录 C 模拟器 MIPSsim 的汇编语言	175
参考文献	178

第一部分

基于 MIPS 体系结构

实验 1 MIPS 指令系统和 MIPS 体系结构

1.1 实验目的

- (1) 了解和熟悉指令级模拟器。
- (2) 熟练掌握 MIPSsim 模拟器的操作和使用方法。
- (3) 熟悉 MIPS 指令系统及其特点,加深对 MIPS 指令操作语义的理解。
- (4) 熟悉 MIPS 体系结构。

1.2 实验平台

实验平台采用指令级和流水线操作级模拟器 MIPSsim(随书光盘中提供)。

设计:张晨曦教授,版权所有。

开发:孙太一。

1.3 实验内容和步骤

首先要阅读 MIPSsim 模拟器的使用方法(见 1.4 节),然后了解 MIPSsim 的指令系统和汇编语言(见附录 A、附录 B 和附录 C)。

- (1) 启动 MIPSsim(用鼠标双击 MIPSsim.exe)。
- (2) 选择“配置”→“流水方式”选项,使模拟器工作在非流水方式下。
- (3) 参照 1.4 节的使用说明,熟悉 MIPSsim 模拟器的操作和使用方法。

可以先载入一个样例程序(在本模拟器所在的文件夹下的“样例程序”文件夹中),然后分别以单步执行一条指令、执行多条指令、连续执行、设置断点等方式运行程序,观察程序的执行情况,观察 CPU 中寄存器和存储器的内容的变化。

(4) 选择“文件”→“载入程序”选项,加载样例程序 alltest.asm,然后查看“代码”窗口,查看程序所在的位置(起始地址为 0x00000100)。

(5) 查看“寄存器”窗口 PC 寄存器的值: [PC]=0x_____。

(6) 执行 load 和 store 指令,步骤如下:

- ① 单步执行 1 条指令(F7)。
- ② 下一条指令地址为 0x_____, 是一条 _____ (有,无)符号载入 _____ (字节,半字,字)指令。

③ 单步执行 1 条指令(F5)。

④ 查看 R1 的值, [R1]=0x_____。

⑤ 下一条指令地址为 $0x$ _____, 是一条 _____ (有, 无) 符号载入 _____ (字, 半字, 字) 指令。

⑥ 单步执行 1 条指令。

⑦ 查看 R1 的值, $[R1] = 0x$ _____。

⑧ 下一条指令地址为 $0x$ _____, 是一条 _____ (有, 无) 符号载入 _____ (字, 半字, 字) 指令。

⑨ 单步执行 1 条指令。

⑩ 查看 R1 的值, $[R1] = 0x$ _____。

⑪ 单步执行 1 条指令。

⑫ 下一条指令地址为 $0x$ _____, 是一条保存 _____ (字, 半字, 字) 指令。

⑬ 单步执行 1 条指令(F5)。

⑭ 查看内存 BUFFER 处字的值, 值为 $0x$ _____。

(7) 执行算术运算类指令。步骤如下:

① 双击“寄存器”窗口中的 R1, 将其值修改为 2。

② 双击“寄存器”窗口中的 R2, 将其值修改为 3。

③ 单步执行 1 条指令。

④ 下一条指令地址为 $0x$ _____, 是一条加法指令。

⑤ 单步执行 1 条指令。

⑥ 查看 R3 的值, $[R3] = 0x$ _____。

⑦ 下一条指令地址为 $0x$ _____, 是一条乘法指令。

⑧ 单步执行 1 条指令。

⑨ 查看 LO、HI 的值, $[LO] = 0x$ _____, $[HI] = 0x$ _____。

(8) 执行逻辑运算类指令。步骤如下:

① 双击“寄存器”窗口中的 R1, 将其值修改为 $0xFFFF0000$ 。

② 双击“寄存器”窗口中的 R2, 将其值修改为 $0xFF00FF00$ 。

③ 单步执行 1 条指令。

④ 下一条指令地址为 $0x$ _____, 是一条逻辑与运算指令, 第二个操作数寻址方式是 _____ (寄存器直接寻址, 立即数寻址)。

⑤ 单步执行 1 条指令。

⑥ 查看 R3 的值, $[R3] = 0x$ _____。

⑦ 下一条指令地址为 $0x$ _____, 是一条逻辑或指令, 第二个操作数寻址方式是 _____ (寄存器直接寻址, 立即数寻址)。

⑧ 单步执行 1 条指令。

⑨ 查看 R3 的值, $[R3] = 0x$ _____。

(9) 执行控制转移类指令。步骤如下:

① 双击“寄存器”窗口中的 R1, 将其值修改为 2。

② 双击“寄存器”窗口中的 R2, 将其值修改为 2。

③ 单步执行 1 条指令。

④ 下一条指令地址为 $0x$ _____, 是一条 BEQ 指令, 其测试条件是 _____, 目