



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家精品课程主讲教材

高等学校计算机科学与技术系列教材

计算机系统结构

张晨曦 王志英 等



高等教育出版社

Higher Education Press

TP303/173D

2008

要點容內

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家精品课程主讲教材

高等学校计算机科学与技术系列教材

计算机系统结构

张晨曦 王志英

张春元 戴 葵 肖晓强 沈 立

010-26281118	总发行所	010-26281109	总发行所
400-810-0288	读者服务部	010-26281109	总发行所
http://www.hep.com.cn	网上订购	010-26281109	总发行所
http://www.jbnc.com.cn	网上订购	010-26281109	总发行所
http://www.jbnc.com.cn	网上订购	010-26281109	总发行所
http://www.widenu.com	网上订购	010-26281109	总发行所

2008年1月第1版
2008年1月第1次印刷

787×1092 1/16
20.25
420 000

高等教育出版社

北京海淀区中关村大街4号
100011
010-26281109
010-26281109
010-26281109

内容提要

本书系统地论述了计算机系统结构的基本概念、基本原理、基本结构和基本方法,并强调采用量化的分析方法,使读者能够更具体、实际地分析和理解计算机系统结构。

全书共分为9章:计算机系统结构的基本概念,计算机指令集结构,流水线技术,指令级并行,存储层次,输入/输出系统,互连网络,多处理机,机群计算机。第1章讲述计算机系统结构的基本概念以及定量分析基础。第2章讲述计算机指令集的设计、RISC技术以及MIPS指令集结构。第3章讲述流水线及其性能分析、流水线中的相关和冲突及其解决方法、向量处理机的结构及其性能评价。第4章讲述指令级并行性开发,包括指令动态调度、指令分支预测、超标量技术、超流水技术以及超长指令字技术等。第5章讲述Cache的基本知识、降低Cache失效率的方法、减少Cache失效开销的方法以及减少命中时间的方法,并对虚拟存储器进行讨论。第6章讲述总线、通道处理机及其流量分析、廉价磁盘冗余阵列(RAID)。第7章讲述互连网络及其特性参数、静态互连网络以及动态互连网络等。第8章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、同步以及同时多线程技术。第9章讲述机群的结构、软件模型以及分类。

本书内容丰富,实例具体,语言简练,通俗易懂,可读性好。本书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。

图书在版编目(CIP)数据

计算机系统结构 / 张晨曦等. —北京: 高等教育出版社, 2008. 6

ISBN 978 - 7 - 04 - 023254 - 7

I. 计… II. 张… III. 计算机体系结构 IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 016877 号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100011
总 机 010 - 58581000
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京未来科学技术研究所
有限责任公司印刷厂

购书热线 010 - 58581118
免费咨询 800 - 810 - 0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787 × 1092 1/16
印 张 20.25
字 数 450 000

版 次 2008 年 6 月第 1 版
印 次 2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价 33.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23254 - 00

高等学校计算机科学与技术系列教材 编审委员会

主任：李 未

副主任：傅育熙 王志英 齐治昌 陈 平 蒋宗礼 马殿富

委员：(按姓氏笔画为序)

王 戟(国防科学技术大学)

周傲英(华东师范大学)

宁 洪(国防科学技术大学)

孟祥旭(山东大学)

刘 强(清华大学)

岳丽华(中国科学技术大学)

孙吉贵(吉林大学)

罗军舟(东南大学)

庄越挺(浙江大学)

姚淑珍(北京航空航天大学)

何炎祥(武汉大学)

胡事民(清华大学)

何钦铭(浙江大学)

骆 斌(南京大学)

张晨曦(同济大学)

徐宝文(东南大学)

李宣东(南京大学)

黄虎杰(哈尔滨工业大学)

李晓明(北京大学)

蒋建伟(上海交通大学)

陈 钟(北京大学)

廖明宏(哈尔滨工业大学)

陈道蓄(南京大学)

熊 璋(北京航空航天大学)

周立柱(清华大学)

樊晓桢(西北工业大学)

序

计算机和通信技术的迅猛发展,不仅形成了融合度最高、潜力最大、增长最快的信息产业,而且成为推动全球经济快速增长和全面变革的关键因素。进入21世纪,我国的信息产业虽然已取得了长足的发展,但与发达国家相比,还有不小的差距。国家信息化的发展和信息产业国际竞争能力的提高,迫切需要高素质、创新型的计算机专业人才。

高素质计算机专业人才的培养离不开高质量的计算机教育。我们的专业虽然机会多,处于非常有利的条件,但是我们同样面临着的一件事,就是从规模发展向质量提高的转变。怎么提高质量?专业素质的教育和应用素质的训练非常重要。尤其是我国高等教育进入大众化发展阶段,社会对计算机专业人才呈现出了多样化的需求。而与此同时,计算机学科的发展已极大地突破了原有的学科体系框架,形成了在“计算机科学与技术”之下向多个专业方向发展的新格局。在这种背景下,教育部高等学校计算机科学与技术教学指导委员会编制了《高等学校计算机科学与技术专业发展战略研究报告暨专业规范(试行)》(以下简称“专业规范”)。专业规范按照“培养规格分类”的指导思想,提出了三种类型、四个方向,即科学型(计算机科学方向),工程型(计算机工程方向、软件工程方向),应用型(信息技术方向)的计算机专业发展建议,体现了社会对不同人才类型的需求,对于指导我国计算机教学改革与建设,规范计算机教学工作,促进计算机教学质量的提高都具有重要的意义。

高水平的教材是一流教育质量的重要保证。为了配合专业规范的试行,便于广大高校教师按照新的专业规范组织实施教学,高等教育出版社在大力支持专业规范研究与起草工作的同时,还邀请规范起草小组的有关专家成立“高等学校计算机科学与技术系列教材编审委员会”,组织规划了结合计算机专业规范、面向全国高等学校计算机专业本科生的“高等学校计算机科学与技术系列教材”。令人高兴的是,一批有创新、改革精神,且有丰富教学经验的高等学校教师投身到新体系计算机专业教材的编写中来,他们用自己创造性的思维、辛勤的汗水诠释专业规范的思想,把新的课程体系和教学内容生动地传达给师生,并进行着有意义的教学实践。

“高等学校计算机科学与技术系列教材”以专业规范和 CC2001 - CC2005 有关教程为依据,以强化基础、突出实践、注重创新为原则,体现了学科课程体系和教学内容改革的新成果。此外,这一系列教材还配有丰富的教学辅助资源,并与现代教育技术手段相结合,充分发挥网络平台的作用,使教材更有利于广大教师和学生使用。目前,这一系列教材有不少选题已列入普通高等教

育“十一五”国家级规划教材,希望这些教材的出版能够对新形势下我国高等学校计算机专业课程
改革与建设起到积极的推动作用,使我国高校的计算机专业教学质量再上一个台阶。

乳

书

中国科学院院士

2006—2010 年教育部高等学校计算机科学与技术教学指导委员会主任

二〇〇七年十一月

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。

张晨曦主讲计算机系统结构和从事系统结构的研究20余年,作为国防科技大学“系统结构”课程的负责人,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年开发出了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10多所高校中得以应用。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”,他和王志英教授一起在国防科技大学建设的“计算机体系结构”课程被评为2005年度国家精品课程。他在同济大学负责建设的“计算机系统结构课程”被评为2007年度上海市精品课程。

他负责编写并出版的《计算机体系结构》(高等教育出版社)是普通高等教育“十五”国家级规划教材,2002年获全国普通高等学校优秀教材二等奖。2006年他负责主编的3本教材被列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。撰写专著两部(第二作者)、教材3本(第一作者)。其中专著《新一代计算机》由荷兰North-Holland出版社出版,另一部于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”。发表学术研究论文80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(排名第一);获部委级教学成果二、三等奖各一项。负责研制的新型Internet动画制作/演播系统“网动王”于1999年通过了专家鉴定,达到了国际先进水平,并已在远程教育和CAI中获得了较广泛的应用。

1991年被原国家教委授予“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”。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

前 言

本书可作为高等院校计算机、自动化以及电子工程等相关专业本科生、研究生的教材。在内容的选择上,本书不打算覆盖计算机系统结构的所有方面,也不想成为大而全的参考手册,而是重点讲述现代大多数计算机都采用的比较成熟的思想、结构和方法等。

“计算机系统结构”是计算机科学领域中的一个重要分支。它强调从总体结构、系统分析这一角度来研究计算机系统。通过本书的学习,读者能把在“计算机组成原理”、“数据结构”、“操作系统”、“汇编语言程序设计”等课程中所学的软件与硬件知识有机地结合起来,从而建立有关计算机系统的完整概念。

本书的基础是由高等教育出版社出版的“十五”国家级规划教材,该教材于2002年获得全国普通高等学校优秀教材二等奖。为了跟踪和反映计算机技术的新发展,我们编写了本书,不仅补充了新内容,而且在很大程度上进一步提高了可读性和系统性,并开发了相应的多媒体课件。本书是国家精品课程“计算机体系结构”及上海市精品课程“计算机系统结构”的指定教材。

本书的主要特点有:

- (1) 可读性好,语言简练,深入浅出,通俗易懂。
- (2) 重点讲述现代大多数计算机都采用的比较成熟的思想、结构和方法等,重点突出,避免面面俱到。
- (3) 借鉴国际上最经典的计算机系统结构教材,强调采用量化的分析方法。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。

全书共包括9章。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章讲述计算机指令集结构设计中的—些问题,包括寻址技术、指令集的功能设计、操作数的类型和大小、指令格式的设计,并且介绍RISC技术以及一个指令集结构的实例——MIPS。第3章为“流水线技术”,讲述流水线的—些基本概念、分类和性能分析,介绍流水线中的—些相关和冲突问题及其解决方法等,并对向量处理机的结构及特点、关键技术以及性能评价进行讨论。第4章为“指令级并行”,讲述利用硬、软件技术开发程序中指令间并行性的技术和方法,包括指令动态调度、指令分支预测、超标量技术、超流水技术以及超长指令字技术等。第5章为“存储层次”,讲述Cache的基本知识、降低Cache失效率的方法、减少Cache失效开销的方法以及减少命中时间的方法,并对虚拟存储器做简要的讨论。第6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、廉价磁盘冗余阵列(RAID)。第7章为“互连网络”,讲述互连函数、互连网络的特性参数、静态互连网络以及动态互连网络等。第8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、同步以及同时多线程技术,并介绍了一个多处理机实例。第9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。

作为教材,读者可以根据自己的需求,选取相应的内容进行学习。有三种建议方案:

(1) 第一方案:

全部9章的内容,根据具体要求,可以安排60~70小时的教学课时。

(2) 第二方案:

第1章 → 第2章 → 第3章 → 第5章 → 第6章 → 第7章 → 第8章

这个方案去掉了难度较大的第4章“指令级并行”和第9章“机群计算机”,安排48~56小时的教学课时为宜。

(3) 第三方案:

第1章 → 第2章 → 第3章 → 第5章 → 第7章 → 第8章

对于仅仅需要建立基本系统结构概念的读者,可以采用本方案。本方案在对第3章、第5章和第7章内容略作删减的情况下,只需约36教学课时。如果读者已经了解指令集的有关概念,还可以跳过第2章。这种情况下,可以安排约32小时的短课程。

本书的大部分内容由同济大学软件学院的张晨曦教授编写,包括第1章、第2章、第5章、第7章的全部内容以及第3章、第4章、第6章的部分内容。国防科技大学计算机学院的王志英教授编写了第8章,张春元教授编写了第4章的部分内容,戴葵副教授编写了第3章的部分内容,沈立副教授编写了第9章,肖晓强副教授编写了第6章的部分内容。

本书附有光盘一张,其内容包括配套的带动画的PPT文稿、动画视频课件、概念总汇、问答题等。其中的200多个精选动画和视频形象、生动地讲解和演示了教学内容,使一些抽象难懂的结构、原理和流程等易于理解和掌握。这些课件由张晨曦教授设计和开发。

以后若课件有更新或者有新的教学资料,我们将在以下网站上发布消息,敬请关注:www.GotoSchool.net。

另外,任课教师可以发电子邮件索取书中习题的参考答案。邮箱地址为 xzhang2000@sohu.com。

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。

作 者

2007年10月于上海

目 录

第 1 章 计算机系统结构的基本概念	1
1.1 引言	1
1.2 计算机系统结构的概念	2
1.2.1 计算机系统的层次结构	2
1.2.2 计算机系统结构的定义	3
1.2.3 计算机组成和计算机实现	4
1.2.4 计算机系统结构的分类	5
1.3 定量分析技术	6
1.3.1 计算机系统设计的定量原理	6
1.3.2 计算机系统的性能评测	11
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 软件对系统结构的影响	17
1.4.3 器件发展对系统结构的影响	19
1.4.4 应用对系统结构的影响	20
1.4.5 系统结构的生命周期	20
1.5 计算机系统结构中并行性的发展	21
1.5.1 并行性的概念	21
1.5.2 提高并行性的技术途径	22
1.5.3 单机系统中并行性的发展	22
1.5.4 多机系统中并行性的发展	23
习题 1	24
第 2 章 计算机指令集结构	26
2.1 指令集结构的分类	26
2.2 寻址方式	29
2.3 指令集结构的功能设计	32
2.3.1 CISC 指令集结构的功能设计	33
2.3.2 RISC 指令集结构的功能设计	36
2.3.3 控制指令	38
2.4 操作数的类型和大小	39

2.5 指令格式的设计	41
2.6 MIPS 指令集结构	42
2.6.1 MIPS 的寄存器	43
2.6.2 MIPS 的数据表示	43
2.6.3 MIPS 的数据寻址方式	43
2.6.4 MIPS 的指令格式	44
2.6.5 MIPS 的操作	45
2.6.6 MIPS 的控制指令	46
2.6.7 MIPS 的浮点操作	47
习题 2	47
第 3 章 流水线技术	49
3.1 重叠执行和先行控制	49
3.1.1 重叠执行	49
3.1.2 先行控制	53
3.2 流水线的基本概念	55
3.2.1 什么是流水线	55
3.2.2 流水线的分类	57
3.3 流水线的性能指标	60
3.3.1 吞吐率	60
3.3.2 加速比	64
3.3.3 效率	64
3.3.4 流水线性能分析举例	65
3.3.5 流水线设计中的若干问题	67
3.4 流水线的相关与冲突	68
3.4.1 一个经典的 5 段流水线	68
3.4.2 相关	71
3.4.3 流水线冲突	73
3.5 流水线的实现	86
3.5.1 MIPS 的一种简单实现	86
3.5.2 基本的 MIPS 流水线	89
3.6 向量处理机	95

3.6.1 向量处理方式	95	5.2.4 写策略	163
3.6.2 向量处理机的结构	98	5.2.5 Cache 的结构	165
3.6.3 提高向量处理机性能的方法	99	5.2.6 Cache 性能分析	168
3.6.4 向量处理机的性能评价	103	5.2.7 改进 Cache 性能	172
习题 3	108	5.3 降低 Cache 失效率的方法	172
第 4 章 指令级并行	111	5.3.1 增加 Cache 块大小	176
4.1 指令级并行的概念	111	5.3.2 提高相联度	178
4.2 指令的动态调度	114	5.3.3 增加 Cache 的容量	179
4.2.1 动态调度的基本思想	114	5.3.4 Victim Cache	179
4.2.2 Tomasulo 算法	116	5.3.5 伪相联映像 Cache	180
4.3 动态分支预测技术	126	5.3.6 硬件预取	182
4.3.1 采用分支历史表	127	5.3.7 编译器控制的预取	183
4.3.2 采用分支目标缓冲器	128	5.3.8 编译器优化	185
4.3.3 基于硬件的前瞻执行	130	5.4 减少 Cache 失效开销	190
4.4 多指令流出技术	134	5.4.1 让读失效优先于写	190
4.4.1 基于静态调度的多流出技术	136	5.4.2 写缓冲合并	191
4.4.2 基于动态调度的多流出技术	138	5.4.3 请求字处理技术	192
4.4.3 超长指令字技术	140	5.4.4 非阻塞 Cache 技术	192
4.4.4 多流出处理器受到的限制	141	5.4.5 采用两级 Cache	194
4.4.5 超流水线处理机	142	5.5 减少命中时间	197
4.5 循环展开和指令调度	146	5.5.1 容量小、结构简单的 Cache	197
4.5.1 循环展开和指令调度的基本 方法	146	5.5.2 虚拟 Cache	197
4.5.2 静态超标量处理机中的循环 展开	150	5.5.3 Cache 访问流水化	200
习题 4	151	5.5.4 Trace Cache	200
第 5 章 存储层次	154	5.5.5 Cache 优化技术总结	200
5.1 存储器的层次结构	154	5.6 主存	202
5.1.1 从单级存储器到多级存储器	154	5.7 虚拟存储器	208
5.1.2 存储层次的性能参数	155	5.7.1 虚拟存储器的基本原理	208
5.1.3 “Cache-主存”和“主存-辅 存”层次	156	5.7.2 快表	210
5.1.4 存储层次的 4 个问题	158	5.8 进程保护和虚存实例	212
5.2 Cache 基本知识	158	5.8.1 进程保护	212
5.2.1 映像规则	159	5.8.2 页式虚存实例:Alpha AXP 的 存储管理和 21064 的 TLB	213
5.2.2 查找方法	161	5.9 Alpha AXP 21064 存储层次	216
5.2.3 替换算法	162	习题 5	219
		第 6 章 输入/输出系统	222
		6.1 I/O 系统性能与 CPU 性能	222

6.2 I/O 系统的可靠性、可用性和可信性	223	8.1 引言	267
6.3 廉价磁盘冗余阵列 RAID	224	8.1.1 并行计算机系统结构的分类 ..	267
6.3.1 RAID 0	227	8.1.2 通信模型和存储器的结构模型	269
6.3.2 RAID 1	227	8.1.3 并行处理面临的挑战	271
6.3.3 RAID 2	228	8.2 对称式共享存储器系统结构	273
6.3.4 RAID 3	229	8.2.1 多处理机 Cache 一致性	274
6.3.5 RAID 4	230	8.2.2 实现一致性的基本方案	275
6.3.6 RAID 5	231	8.2.3 监听协议及其实现	277
6.3.7 RAID 6	231	8.3 分布式共享存储器系统结构	279
6.3.8 RAID 10 与 RAID 01	232	8.3.1 基于目录的 Cache 一致性	279
6.3.9 RAID 的实现与发展	232	8.3.2 目录协议及其实现	282
6.4 总线	233	8.4 同步	283
6.4.1 总线的设计	234	8.4.1 基本硬件原语	284
6.4.2 总线标准和实例	235	8.4.2 用一致性实现锁	285
6.4.3 与 CPU 的连接	237	8.4.3 同步性能问题	288
6.5 通道处理机	238	8.5 同时多线程	290
6.5.1 通道的作用和功能	238	8.5.1 将线程级并行转换为指令级并行	291
6.5.2 通道的工作过程	239	8.5.2 同时多线程处理器的设计	292
6.5.3 通道的种类	242	8.5.3 同时多线程的性能	293
6.5.4 通道中的数据传送过程与流量分析	244	8.6 多处理机实例	295
6.6 I/O 与操作系统	247	习题 8	298
6.6.1 DMA 和虚拟存储器	247	第 9 章 机群计算机	300
6.6.2 I/O 和 Cache 数据一致性	247	9.1 机群的基本概念和结构	300
6.6.3 异步 I/O	250	9.1.1 机群的基本结构	300
习题 6	250	9.1.2 机群的软件模型	301
第 7 章 互连网络	252	9.2 机群的特点	303
7.1 互连网络的基本概念	252	9.3 机群的分类	304
7.1.1 互连网络的功能和特征	252	9.4 典型机群系统简介	305
7.1.2 互连函数	253	9.4.1 Berkeley NOW	305
7.1.3 互连网络的特性参数	256	9.4.2 Beowulf	305
7.2 互连网络的结构	257	9.4.3 LAMP	306
7.2.1 静态互连网络	257	9.4.4 IBM SP2	306
7.2.2 动态互连网络	261	习题 9	308
习题 7	265	主要参考文献	309
第 8 章 多处理机	267		

第1章 计算机系统结构的基本概念

1.1 引言

第一台通用电子计算机诞生于1946年。60多年来,计算机技术取得了飞速的发展,其速度之快,实在是令人赞叹。今天,用不到1万元人民币购买的个人计算机,其性能、主存容量和硬盘容量都已经超过了20年前用100万美元购买的大型机。对于许多应用来说,现在的高性能微处理器的性能已经超过了10年前的超级计算机。这种惊人的发展一方面得益于计算机制造技术的发展,另一方面则是因为计算机系统结构的创新。

在计算机发展的开始25年中,上述两种因素都发挥了重要的作用,从而使计算机的性能以每年约25%的速度提高。从20世纪70年代末到80年代初,大规模集成电路和微处理器的出现使得计算机性能的年增长速度提高到了约35%。这种提高主要归功于以集成电路为代表的制造技术的发展。由于大批量生产的微处理器在价格上有明显的优势,而且其性能也在不断地提高,所以基于微处理器的计算机所占有的市场份额越来越大。

到了20世纪80年代初,一种称为RISC(Reduced Instruction Set Computer,精简指令集计算机)结构的出现,使计算机系统结构产生了一次重大变革。这种结构简化了指令系统,从而使得更多的芯片硅面积可用于实现流水和Cache,有效地提高了计算机的性能。从20世纪80年代中期以来,系统结构不断更新和变革,制造技术也不断发展,两者相结合,使计算机的性能增长达到了每年50%以上。这种情况维持了约16年。

这种飞速增长使得基于微处理器的系统在整个计算机设计领域占据了统治地位。工作站和个人计算机已经成为计算机工业的主要产品。小型机被用微处理器构建的服务器所取代,大型机也几乎已经被多处理机取代。这些多处理机是用若干通用的微处理器构建的,甚至高端的超级计算机也是用许多微处理器来构建了。

但是,从2002年以来,计算机性能的年增长率下降到了约20%。其主要原因有3个:①功耗问题(已经很大);②可以进一步有效开发的指令级并行性已经很少;③存储器访问速度的提高缓慢。Intel于2004年宣布放弃其高性能单处理器项目,转向多核(multicore)的研究和开发,这是通过在单个芯片上实现多个处理器来提高系统的性能。IBM、SUN、AMD等公司纷纷采用了这一途径。这标志着系统结构的重大转折,即从单纯依靠指令级并行转向开发线程级并行和数据级并行。

由此可见,计算机系统结构的发展在计算机的发展中占有极其重要的地位。

1.2 计算机系统结构的概念

1.2.1 计算机系统的层次结构

现代计算机是由硬件/固件和软件组成的十分复杂的系统。为了对这个系统进行描述、分析、设计和使用,人们从不同的角度提出了观察计算机的观点和方法。其中常用的一种方法是从计算机语言的角度出发,把计算机系统按功能划分成多级层次结构,每一层以一种语言为特征,如图 1.1 所示。

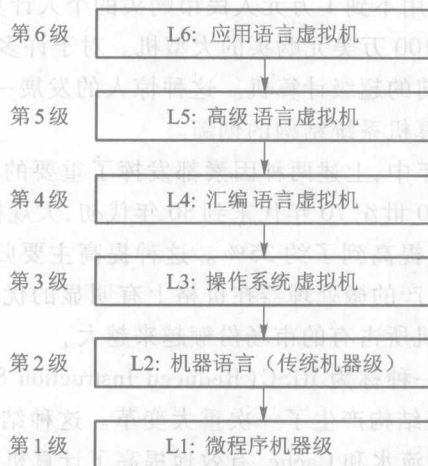


图 1.1 计算机系统的多级层次结构

一台计算机所提供的编程语言一般有多种,构成一系列的层次级别。按照从低级到高级的次序,这些语言是:微程序语言(仅供硬件设计者使用),机器语言,汇编语言,高级语言,应用语言(如 SQL)等。对于使用某一层语言进行编程的程序员来说,他一般不必关心其程序在机器中具体的执行细节,只要程序逻辑和数据正确,他就能得到预期的结果。这样,对使用这层语言的程序员来说,他似乎有了一种新的机器,这层语言就是这种机器的机器语言,该机器能执行用这层语言编写的全部程序。

在图 1.1 中,L1 是微程序机器级。这一级的机器语言是微指令集,其使用者是计算机硬件的设计人员,他们用微指令编写的微程序可直接由硬件/固件来解释实现。

L2 是传统机器级。这一级的机器语言就是传统的机器指令集。程序员用该指令集编写的程序由 L1 级上的微程序进行解释执行。

由微程序解释指令集又称作仿真(emulation)。实际上,在 L1 级上可以有多个能够在它上面运行的解释程序,每一个解释程序定义了一种指令集。因此,可以通过仿真在一台机器上实现多种指令集。

有的计算机中没有采用微程序技术,因此没有微程序机器级(L1)。这时,L2 的指令集是由硬连逻辑直接解释执行的。硬连逻辑的优点是速度快。RISC 处理器经常采用这种实现方法(因为其指令集比较简单)。

L3 级是操作系统虚拟机。所谓虚拟机(virtual machine),是指由软件实现的机器,以区别于由硬件/固件实现的物理机器。这一级的机器语言由两部分构成,一部分就是传统机器级指令,另一部分是操作系统级指令。后者用于实现对操作系统功能的调用,例如打开/关闭文件、读/写文件等。用这一级语言编写的程序是由 L3 和 L2 来共同执行的,其中只有操作系统级指令是由操作系统进行解释执行的。

L4 级是汇编语言虚拟机。这一级的机器语言是汇编语言。用汇编语言编写的程序,首先翻译成 L3 级和 L2 级语言,然后再由相应的机器执行。完成这个翻译的程序称为汇编程序。

L5 级是高级语言虚拟机。这一级的机器语言就是各种高级语言,目前高级语言已有上百种,常用的有 C/C++、Pascal、FORTRAN 等。用高级语言编写的程序一般由编译器翻译到 L4 或 L3 上。个别的高级语言也用解释的方法实现,如绝大多数的 BASIC 语言。

L6 级是应用语言虚拟机。这一级是为使计算机满足某种用途而专门设计的,因此这一级的语言就是各种面向具体应用问题的应用语言。可以设计专门用于人工智能、教育、行政管理、计算机设计等领域的虚拟机。用应用语言编写的程序一般是由应用程序包翻译到 L5 级上。

在上述 6 级中,通常 L1 ~ L3 级用解释(interpretation)的方法实现,而 L4 ~ L6 则是用翻译(translation)的方法实现的。

翻译和解释是语言实现的两种基本技术。其共同点是:都是以执行一串 L 级指令来实现一条 L+1 级指令;其不同点是:翻译技术是先把 L+1 级程序全部转换成 L 级程序后,再去执行新产生的 L 级程序,在执行过程中 L+1 级程序不再被访问;而解释技术则是每当一条 L+1 级指令被译码后,就直接去执行一串等效的 L 级指令,然后再去取下一条 L+1 级的指令,依此重复进行。这两种技术都有着广泛的应用领域。一般来说,解释执行比编译后再执行所花的时间多,但占用的存储空间较少。

1.2.2 计算机系统结构的定义

计算机系统结构(computer architecture)的经典定义是 1964 年 Amdahl 在介绍 IBM 360 系统时提出的:计算机系统结构是程序员所看到的计算机属性,即概念性结构与功能特性。

按照计算机系统的多级层次结构,不同级程序员所看到的计算机具有不同的属性。例如,传统机器级程序员所看到的主要属性是该机器指令集的功能特性,而高级语言虚拟机程序员所看到的主要属性则是该机器所配置的高级语言所具有的功能特性。

显然,不同的计算机系统,从传统机器级或汇编语言程序员的角度来看,具有不同的属性。

但是从高级语言(如C语言)程序员的角度来看,它们几乎没有差别,具有相同的属性。换句话说,这些传统机器级所存在的差别对于高级语言程序员来讲是“看不见”的,也是不需要知道的。在计算机技术中,把这种本来存在的事物或属性,但从某种角度看又好像不存在的特性称为透明性(transparency)。通常,在一个计算机系统中,低层机器的属性对高层机器的程序员往往是透明的。可以看出,在计算机层次结构的各个级上都有它的系统结构。Amdahl提出的系统结构实际上是指传统机器语言级程序员所看到的计算机属性。

在 J. L. Hennessy 和 D. A. Patterson 编写的 *Computer Architecture: A Quantitative Approach* 一书中,把系统结构定义为囊括计算机设计的3个方面:指令集结构,组成和硬件。我们不妨将之理解为广义的系统结构定义。

在 Amdahl 的传统定义中,系统结构所包含的属性是指机器语言程序设计员(或者编译程序代码生成系统)为使其设计(或生成)的程序能在机器上正确运行,所需遵循的计算机属性。对于通用寄存器型机器来说,这些属性主要是指:

- (1) 指令系统(包括机器指令的操作类型和格式、指令间的排序和控制机构等)。
- (2) 数据表示(硬件能直接识别和处理的数据类型)。
- (3) 寻址规则(包括最小寻址单元、寻址方式及其表示)。
- (4) 寄存器定义(包括各种寄存器的定义、数量和使用方式)。
- (5) 中断系统(中断的类型和中断响应硬件的功能等)。
- (6) 机器工作状态的定义和切换(如管态和目态等)。
- (7) 存储系统(主存容量、程序员可用的最大存储容量等)。
- (8) 信息保护(包括信息保护方式和硬件对信息保护的支持)。
- (9) I/O 结构(包括 I/O 连接方式、处理机/存储器与 I/O 设备间数据传送的方式和格式以及 I/O 操作的状态等)。

以上属性是计算机系统中由硬件或固件完成的功能,程序员在了解这些属性后才能编制可在传统机器级上正确运行的程序。因此,计算机系统结构概念的实质是确定计算机系统中软、硬件的界面,界面之上是软件实现的功能,界面之下是硬件和固件实现的功能。

1.2.3 计算机组成和计算机实现

计算机系统结构指的是计算机系统的软、硬件的界面,即机器语言程序员所看到的传统机器级所具有的属性。

计算机组成(computer organization)指的是计算机系统结构的逻辑实现,包含物理机器级中的数据流和控制流的组成以及逻辑设计等。它着眼于物理机器级内各事件的排序方式与控制方式、各部件的功能以及各部件之间的联系。

计算机实现(computer implementation)指的是计算机组成的物理实现,包括处理机、主存等部件的物理结构,器件的集成度和速度,模块、插件、底板的划分与连接,信号传输,电源、冷却及整机装配技术等。它着眼于器件技术和微组装技术,其中器件技术在实现技术中起主导作用。

下面举例说明上述 3 个概念的区别。

(1) 确定指令集中是否有乘法指令属于计算机系统结构的内容,但乘法指令是用专门的乘法器实现,还是利用加法器经多步操作来实现,属于计算机组成的内容。而乘法器、加法器的物理实现,如器件的选定及所用的微组装技术等,属于计算机实现的内容。

(2) 主存容量与编址方式(按位、按字节或按字访问等)的确定属于计算机系统结构的内容。为了达到给定的性能价格比,主存速度应多快、逻辑结构是否采用多体交叉等属于计算机组成的内容。而主存系统的物理实现,如器件的选定、逻辑电路的设计、微组装技术的使用等均属于计算机实现的内容。

可以看出,具有相同系统结构的计算机因为速度、价格等方面要求的不同,可以采用不同的计算机组成。而同一种计算机组成可以采用多种不同的计算机实现。系列机的出现充分反映了这一点。系列机(family machine)是指由同一厂家生产的具有相同系统结构、但具有不同组成和实现的一系列不同型号的机器。例如 IBM 公司的 IBM 370 系列、Intel 公司的 x86 系列等。1.4.2 节将对系列机做进一步的介绍。

1.2.4 计算机系统结构的分类

常见的计算机系统结构分类法有两种:Flynn 分类法和冯氏分类法。

冯氏分类法是用系统的最大并行度对计算机进行分类。它是由冯泽云于 1972 年提出的。最大并行度定义为:计算机系统在单位时间内能够处理的最大的二进制位数。可以用平面直角坐标系中的一个点代表一个计算机系统,其横坐标表示字宽(n 位),纵坐标表示一次能同时处理的字数(m 字)。 $m \times n$ 就表示了其最大并行度。

Flynn 分类法是按照指令流和数据流的多倍性进行分类,它由 M. J. Flynn 于 1966 年提出。Flynn 分类法中定义:

指令流(instruction stream): 机器执行的指令序列。

数据流(data stream): 由指令流调用的数据序列。

多倍性(multiplicity): 在系统受限的部件上,同时处于同一执行阶段的指令或数据的最大数目。

Flynn 分类法把计算机系统的结构分为以下 4 类:

(1) 单指令流单数据流(Single Instruction stream Single Data stream, SISD)。

(2) 单指令流多数据流(Single Instruction stream Multiple Data stream, SIMD)。

(3) 多指令流单数据流(Multiple Instruction stream Single Data stream, MISD)。

(4) 多指令流多数据流(Multiple Instruction stream Multiple Data stream, MIMD)。

这 4 类计算机的基本结构如图 1.2 所示。其中,IS(Instruction Stream)表示指令流,DS(Data Stream)表示数据流,CS(Control Stream)表示控制流,CU(Control Unit)表示控制部件,PU(Processing Unit)表示处理部件,MM 和 SM 表示存储器。

SISD 是传统的顺序处理计算机。SIMD 以阵列处理机为代表。在 SIMD 计算机中,在同一控