

可下载教学资料

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



高等学校教材
计算机科学与技术

计算机系统结构

周立 主编
周立 李鹏 编著

清华大学出版社



高等学校教材
计算机科学与技术

计算机系统结构

周立 主编
周立 李鹏 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书系统地讲述了计算机系统结构的基本概念、基本原理,计算机系统的基本构成技术及性能分析方法。介绍了近年来该领域相关技术的重要进展以及最新的发展趋势。

全书共分7章。第1章讲述计算机系统层次结构,计算机系统结构、组成、实现的定义及相互关系,并行处理技术,计算机系统结构的分类,计算机性能。第2章讲述指令格式的优化技术,计算机指令系统的发展方向,RISC的新发展。第3章讲述标量流水线技术,流水线性能分析,流水线的调度技术,超标量流水、VLIW结构及超流水线等指令级并行技术及向量处理机。第4章讲述存储系统及性能,并行主存系统,虚拟存储器和Cache。第5章讲述并行处理技术,SIMD计算机的互连网络。第6章讲述多处理机结构,多处理机的Cache一致性,多处理机的软件及并行机的发展趋势。第7章讲述数据驱动的基本原理,数据流程图和语言,数据流计算机结构。

本书内容丰富,取材先进,概念清晰,易于理解,每章均有一定数量的例题和习题。本书可作为高等院校计算机专业本科生的教材或计算机相关专业的研究生教材,也可作为从事计算机研究的科技人员的参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

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。

本书防伪标签采用特殊防伪技术,用户可通过在图案表面涂抹清水,图案消失,水干后图案复现;或将表面膜揭下,放在白纸上用彩笔涂抹,图案在白纸上再现的方法识别真伪。

图书在版编目(CIP)数据

计算机系统结构/周立主编. —北京:清华大学出版社,2006. 12

(高等学校教材·计算机科学与技术)

ISBN 7-302-13920-2

I. 计… II. 周… III. 计算机体系结构—高等学校—教材 IV. TP303

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第117431号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦

<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

组稿编辑:郑寅堃

文稿编辑:许振伍

印刷者:北京市昌平环球印刷厂

装订者:三河市新茂装订有限公司

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:17.25 字数:428千字

版 次:2006年12月第1版 2006年12月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-13920-2/TP·8367

印 数:1~4000

定 价:23.00元

编审委员会成员

(按地区排序)

清华大学	周立柱	教授
	章 征	教授
	王建民	教授
	刘 强	副教授
	冯建华	副教授
北京大学	杨冬青	教授
	陈 钟	教授
	陈立军	副教授
北京航空航天大学	马殿富	教授
	吴超英	副教授
	姚淑珍	教授
中国人民大学	王 珊	教授
	孟小峰	教授
	陈 红	教授
北京师范大学	周明全	教授
北京交通大学	阮秋琦	教授
北京信息工程学院	孟庆昌	教授
北京科技大学	杨炳儒	教授
石油大学	陈 明	教授
天津大学	艾德才	教授
复旦大学	吴立德	教授
	吴百锋	教授
	杨卫东	副教授
华东理工大学	邵志清	教授
华东师范大学	杨宗源	教授
	应吉康	教授
东华大学	乐嘉锦	教授
上海第二工业大学	蒋川群	教授
浙江大学	吴朝晖	教授
	李善平	教授
南京大学	骆 斌	教授
南京航空航天大学	秦小麟	教授
南京理工大学	张功萱	教授

南京邮电学院	朱秀昌	教授
苏州大学	龚声蓉	教授
江苏大学	宋余庆	教授
武汉大学	何炎祥	教授
华中科技大学	刘乐善	教授
中南财经政法大学	刘腾红	教授
华中师范大学	王林平	副教授
	魏开平	副教授
	叶俊民	副教授
国防科技大学	赵克佳	教授
	肖 侬	副教授
中南大学	陈松乔	教授
	刘卫国	教授
湖南大学	林亚平	教授
	邹北骥	教授
西安交通大学	沈钧毅	教授
	齐 勇	教授
长安大学	巨永峰	教授
西安石油学院	方 明	教授
西安邮电学院	陈莉君	副教授
哈尔滨工业大学	郭茂祖	教授
吉林大学	徐一平	教授
	毕 强	教授
长春工程学院	沙胜贤	教授
山东大学	孟祥旭	教授
	郝兴伟	教授
山东科技大学	郑永果	教授
中山大学	潘小轰	教授
厦门大学	冯少荣	教授
福州大学	林世平	副教授
云南大学	刘惟一	教授
重庆邮电学院	王国胤	教授
西南交通大学	杨 燕	副教授

改革开放以来,特别是党的十五大以来,我国教育事业取得了举世瞩目的辉煌成就,高等教育实现了历史性的跨越,已由精英教育阶段进入国际公认的大众化教育阶段。在质量不断提高的基础上,高等教育规模取得如此快速的发展,创造了世界教育发展史上的奇迹。当前,教育工作既面临着千载难逢的良好机遇,同时也面临着前所未有的严峻挑战。社会不断增长的高等教育需求同教育供给特别是优质教育供给不足的矛盾,是现阶段教育发展面临的基本矛盾。

教育部一直十分重视高等教育质量工作。2001年8月,教育部下发了《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》,提出了十二条加强本科教学工作提高教学质量的措施和意见。2003年6月和2004年2月,教育部分别下发了《关于启动高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作的通知》和《教育部实施精品课程建设提高高校教学质量和人才培养质量》文件,指出“高等学校教学质量和教学改革工程”是教育部正在制定的《2003—2007年教育振兴行动计划》的重要组成部分,精品课程建设是“质量工程”的重要内容之一。教育部计划用五年时间(2003—2007年)建设1500门国家级精品课程,利用现代化的教育信息技术手段将精品课程的相关内容上网并免费开放,以实现优质教学资源共享,提高高等学校教学质量和人才培养质量。

为了深入贯彻落实教育部《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》精神,紧密配合教育部已经启动的“高等学校教学质量与教学改革工程精品课程建设工作”,在有关专家、教授的倡议和有关部门的大力支持下,我们组织并成立了“清华大学出版社教材编审委员会”(以下简称“编委会”),旨在配合教育部制定精品课程教材的出版规划,讨论并实施精品课程教材的编写与出版工作。“编委会”成员皆来自全国各类高等学校教学与科研第一线的骨干教师,其中许多教师为各校相关院、系主管教学的院长或系主任。

按照教育部的要求,“编委会”一致认为,精品课程的建设工作从开始就要坚持高标准、严要求,处于一个比较高的起点上;精品课程教材应该能够反映各高校教学改革与课程建设的需要,要有特色风格、有创新性(新体系、新内容、新手段、新思路,教材的内容体系有较高的科学创新、技术创新和理念创新的含量)、先进性(对原有的学科体系有实质性的改革和发展、顺应并符合新世纪教学发展的规律、代表并引领课程发展的趋势和方向)、示范性(教材所体现的课程体系具有较广泛的辐射性和示范性)和一定的前瞻

性。教材由个人申报或各校推荐(通过所在高校的“编委会”成员推荐),经“编委会”认真评审,最后由清华大学出版社审定出版。

目前,针对计算机类和电子信息类相关专业成立了两个“编委会”,即“清华大学出版社计算机教材编审委员会”和“清华大学出版社电子信息教材编审委员会”。首批推出的特色精品教材包括:

(1) 高等学校教材·计算机应用——高等学校各类专业,特别是非计算机专业的计算机应用类教材。

(2) 高等学校教材·计算机科学与技术——高等学校计算机相关专业的教材。

(3) 高等学校教材·电子信息——高等学校电子信息相关专业的教材。

(4) 高等学校教材·软件工程——高等学校软件工程相关专业的教材。

(5) 高等学校教材·信息管理与信息系统。

(6) 高等学校教材·财经管理与计算机应用。

清华大学出版社经过 20 年的努力,在教材尤其是计算机和电子信息类专业教材出版方面树立了权威品牌,为我国的高等教育事业做出了重要贡献。清华版教材形成了技术准确、内容严谨的独特风格,这种风格将延续并反映在特色精品教材的建设中。

清华大学出版社教材编审委员会
E-mail: dingl@tup.tsinghua.edu.cn

高性能计算机一直是计算机科学技术的主要发展方向之一。近年来,计算机系统结构在许多方面都有重大的进展。例如,超标量、超流水线和超标量超流水线相结合的系统结构在微处理机中已经得到广泛应用;多处理机及其互连网络得到进一步提高和完善,大规模并行处理系统的产品相继面世。计算机系统结构由低级向高级发展的过程,也是并行处理技术不断发展的过程。如今涉及计算机系统结构的有关知识,都离不开并行处理的概念和技术。由于近年来有关计算机系统结构与并行处理的新技术不断涌现,更加系统全面地学习和掌握计算机系统结构的基本原理、组成方式、关键技术和设计方法等方面的知识,具有越来越重要的意义和作用。

本书是高等院校计算机专业本科生及研究生计算机系统结构课程的通用教材。全书7章可分为两个部分,第一部分为第1~4章,是计算机系统结构的基本概念、基本原理和相关技术与分析方法,包括计算机系统的结构与分类、计算机性能分析方法、指令系统、流水线技术、向量处理技术和存储系统。这部分属于课程必讲的基本核心知识。第二部分是第5~7章,为当代并行计算机系统结构,包括并行处理机、多处理机和数据流计算机的结构与性能分析。可根据教学计划安排选择讲解。

本书在编写方面具有如下主要特色:(1)内容充实。基础知识充分,在阐述基本原理的基础上,给出设计方法和实例分析。叙述深入浅出,易于理解,以帮助读者更好地理解一些比较抽象的概念。(2)取材先进。在指令系统、流水技术、并行处理技术、多处理机及数据流计算机系统结构等章节中,引用了近年计算机系统结构方面比较成熟的研究成果和技术,使读者有机会比较全面、系统地了解当今计算机系统结构的发展前沿。(3)重点突出。每章学习结束后进行小结,对知识要点进行详细的归纳整理,有助于读者对知识结构建立清晰的概念,全面、系统地掌握知识内容。(4)实例丰富。各章节配有较丰富的例题,解题过程详细,思路清晰,有助于读者理解基本原理,掌握基本方法。

本课程应在“数字逻辑设计”、“计算机组成原理”、“程序设计语言”、“数据结构”等课程之后开设;可以在“操作系统”和“数据结构”课程之后,或与它们同时开设。本书可作为高等院校计算机专业本科生的教材或计算机相关专业的研究生教材,也可作为从事计算机研究的科技人员的参考书。本书为教师配有习题参考答案,可发 E-mail(ZhengYK@tup.

tsinghua.edu.cn)联系索取。

本书由周立主编。周立编写了第2、3、4、6、7章,李鹏编写了第1、5章。全书由长安大学赵祥模教授主审,并对书稿提出了许多宝贵意见。在本书编写过程中得到长安大学崔尚森副教授的指导和帮助,在此一并表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在疏漏和不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者
2006年2月

第 1 章 计算机系统结构导论	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.....	1
1.1.2 计算机系统的结构、组成与实现	3
1.1.3 计算机系统的特性.....	7
1.2 计算机系统结构中并行性的发展.....	10
1.2.1 冯·诺依曼型计算机系统结构	10
1.2.2 并行性概念	12
1.2.3 提高并行性的技术途径	13
1.3 计算机系统的分类.....	18
1.4 计算机性能的评价.....	21
1.4.1 计算机系统设计和测评的基本原则	21
1.4.2 CPU 性能公式	23
1.4.3 系统结构的性能评价标准	25
本章小结	27
习题 1	28
第 2 章 指令系统	31
2.1 数据表示.....	31
2.1.1 数据表示的基本概念	31
2.1.2 高级数据表示	32
2.1.3 浮点数尾数的下溢处理	34
2.2 指令系统的优化设计.....	36
2.2.1 寻址方式分析	36
2.2.2 指令格式的优化	38
2.3 计算机指令系统的发展方向.....	44

2.3.1	CISC	45
2.3.2	RISC	47
2.3.3	RISC 的新发展	50
	本章小结	52
	习题 2	52
第 3 章	流水线技术与向量处理技术	55
3.1	流水线的基本原理	55
3.1.1	重叠解释方式	55
3.1.2	先行控制	57
3.1.3	流水技术原理	60
3.1.4	流水线的分类	62
3.2	流水线性能分析	65
3.2.1	吞吐率	65
3.2.2	加速比	69
3.2.3	效率	69
3.3	流水线中的相关及处理	72
3.3.1	局部性相关及处理	72
3.3.2	全局性相关及处理	74
3.3.3	非线性流水线的调度	77
3.3.4	流水器的中断处理	81
3.4	先进的流水线调度技术	81
3.4.1	集中式动态调度方法——记分牌	82
3.4.2	分布式动态调度方法——Tomasulo 算法	83
3.4.3	动态转移目标缓冲技术	86
3.5	指令级并行技术	87
3.5.1	超标量处理机	88
3.5.2	超长指令字处理机	89
3.5.3	超流水线处理机	90
3.5.4	超标量超流水线处理机	91
3.6	向量处理技术	95
3.6.1	向量处理方法	96
3.6.2	向量处理机	98
3.6.3	向量处理的性能	101
	本章小结	103
	习题 3	104

第 4 章 存储系统	109
4.1 存储系统及性能	109
4.1.1 存储系统的层次结构.....	109
4.1.2 存储系统的性能参数.....	111
4.1.3 存储系统的相关问题.....	113
4.2 并行主存系统	113
4.2.1 主存系统的频宽分析.....	113
4.2.2 单体多字存储器.....	115
4.2.3 交叉访问存储器.....	115
4.2.4 提高存储器频宽的方法.....	117
4.3 虚拟存储器	118
4.3.1 虚拟存储器的工作原理.....	118
4.3.2 虚拟存储器的管理方式及地址变换.....	119
4.3.3 替换算法.....	125
4.3.4 虚拟存储器中的相关技术.....	131
4.3.5 虚拟存储器的工作过程.....	135
4.4 高速缓冲存储器	137
4.4.1 Cache 的基本原理	137
4.4.2 地址映像与地址变换.....	139
4.4.3 Cache 的替换算法及实现	144
4.4.4 Cache 的性能分析	146
本章小结.....	151
习题 4	151
第 5 章 并行处理机	155
5.1 并行处理机的结构与特点	155
5.1.1 并行处理机的结构.....	155
5.1.2 并行处理机的特点.....	157
5.1.3 并行处理机的算法.....	158
5.2 并行处理机的互连网络	161
5.2.1 互连网络设计的相关内容.....	162
5.2.2 网络部件.....	162
5.2.3 互连函数.....	163
5.2.4 互连网络特性参数.....	166
5.2.5 静态连接网络.....	168
5.2.6 动态连接网络.....	175

5.3	几种典型的并行处理机	188
5.3.1	ILLIAC-IV 阵列处理机	188
5.3.2	BSP 计算机	190
5.3.3	MasPar MP-1 计算机	194
	本章小结	198
	习题 5	198
第 6 章	多处理机	201
6.1	多处理机的结构与特点	201
6.1.1	多处理机的结构	201
6.1.2	多处理机的特点	205
6.2	多处理机的 Cache 一致性	206
6.2.1	出现 Cache 一致性问题的原因	207
6.2.2	监听一致性协议	209
6.2.3	基于目录的协议	211
6.3	多处理机的软件	215
6.3.1	并行算法	215
6.3.2	程序并行性分析	217
6.3.3	并行程序设计语言	218
6.3.4	多处理机的操作系统	222
6.4	多处理机的性能	225
6.4.1	任务粒度与系统性能	225
6.4.2	多处理机性能模型	226
6.5	MIMD 并行机结构模型	232
6.5.1	并行向量处理机	232
6.5.2	对称多处理机	233
6.5.3	大规模并行处理机	233
6.5.4	分布共享存储器多处理机	234
6.5.5	机群系统	235
	本章小结	236
	习题 6	237
第 7 章	数据流计算机	240
7.1	数据流计算机的基本原理	240
7.1.1	数据流计算机的驱动方式	240
7.1.2	数据流计算机的指令结构	242
7.2	数据流程序图和数据流语言	243
7.2.1	数据流程序图	243
7.2.2	数据流语言	248

7.3 数据流计算机结构	249
7.3.1 静态数据流计算机.....	249
7.3.2 动态数据流计算机.....	251
7.4 数据流计算机的性能评价及发展趋势	255
7.4.1 数据流计算机的优点.....	255
7.4.2 数据流计算机存在的主要问题.....	256
7.4.3 数据流计算机的研究方向.....	257
本章小结.....	258
习题 7	258
参考文献	260

计算机系统结构导论

自第一台电子计算机诞生以来,计算机技术一直处于发展和变革之中。回顾计算机半个多世纪的发展历程,计算机系统性能的提高,主要是依靠电子器件技术和计算机系统结构的不断发展。本章介绍了计算机系统结构的基本概念和计算机的多级层次结构;分析了计算机系统结构、计算器组成与计算机实现的含义、研究的内容以及三者之间的相互关系;讨论了计算机系统并行性发展的技术途径与分类;研究了系统结构的一般性能评价标准。

1.1 计算机系统结构的基本概念

1.1.1 计算机系统的层次结构

计算机系统(computer system)由硬件(hardware)和软件(software)组成。从计算机语言的角度,可以把计算机系统按功能划分成多级层次结构,如图 1.1 所示。

这个层次模型中的每一级都对应一个机器,其组成如图 1.2 所示。这里的“机器”只对一定的观察者存在,它的功能体现在广义语言上,对该语言提供解释手段,然后作用在信息处理或控制对象上,并从对象上获得必要的状态信息。作为某一层次的观察者,只需通过该层次的语言了解和使用计算机,而对其他层次机器是如何工作和实现功能的并不关心。

某级机器具备了上述功能,能将本级机器的语言转换为下级机器能够识别和处理的形式,就完成了本级机器的实现。层次结构中的 M0 级机器为硬联逻辑,M1 级机器由硬联逻辑实现,M2 级机器由微程序(固件)实现,M3 级至 M6 级主要由软件实现。我们将主要由软件实现的机器称为虚拟机器,以区别由硬件或固件实现的实际机器(物理机器)。

M0 级为硬联逻辑,是实现微指令本身的控制逻辑。

M1 级是微程序机器级,这级的机器语言是微指令集。程序员用微指令编写的微程序一般是直接由硬联逻辑解释实现的,M0 级和 M1 级构成机器的硬件内核。

M2 级是传统机器级,这级的机器语言是该机的指令系统。机器语言程序员用这级指令系统的机器指令集编写的程序由 M1 级的微程序进行解释。

计算机系统中也可以没有 M1 机器级。在这些计算机系统中是用硬件直接实现传统机器的指令集,而不必由任何解释程序进行干预。我们目前使用的 RISC 技术就是采用这样的设计思想,处理器的指令集全部用硬件直接实现,以提高指令的执行速度。

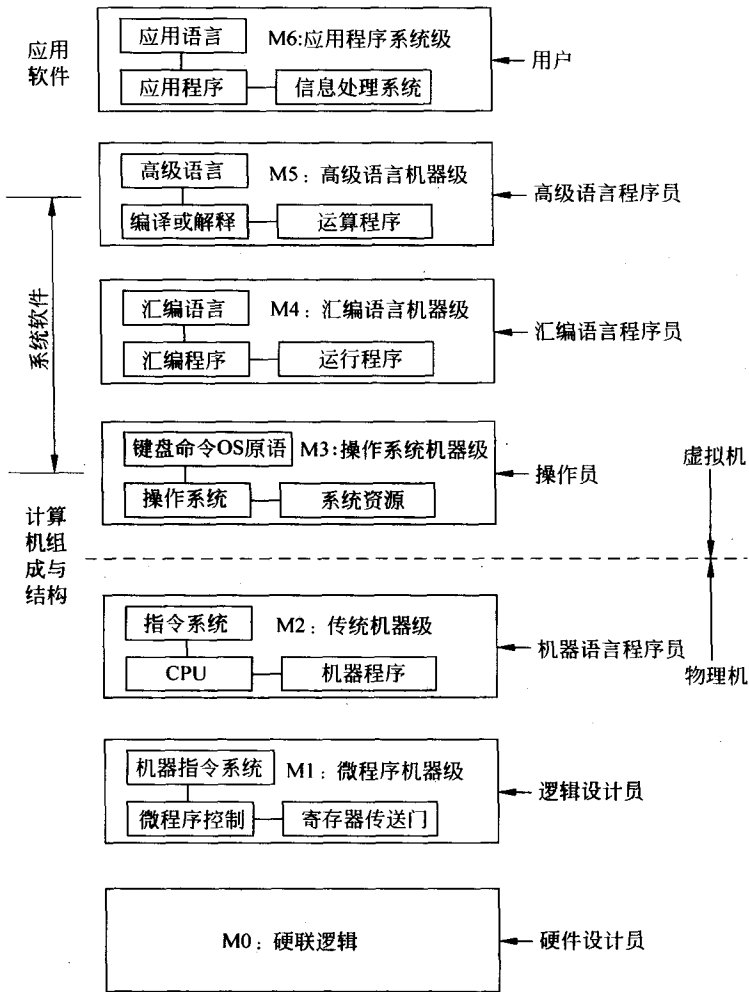


图 1.1 计算机系统层次结构

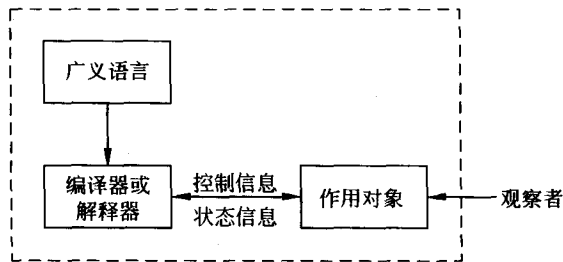


图 1.2 一级机器的组成

M3级是操作系统机器级。从操作系统的基本功能来看，一方面它要直接管理传统机器中的软硬件资源，另一方面它又是传统机器的引申。这级的机器语言中的多数指令是传统机器的指令。此外，这一级还提供操作系统级指令，以实现传统机器所没有的某些基本操作和数据结构，如文件结构与文件管理的基本操作、存储体系管理、多线程管理及设备管理等。

M4级是汇编语言机器级。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被翻译成M3级或M2级语言,然后再由相应的机器进行解释。完成汇编语言程序翻译的程序称为汇编程序。

M5级是高级语言机器级。这一级的机器语言就是各种高级语言。用高级语言编写的程序一般由编译程序翻译成M4级或M3级机器上的语言。个别的高级语言也用解释的方法实现。

M6级是应用程序系统级。这一级的机器语言是应用语言,是为使计算机满足某种用途而专门设计的,因此这一级语言就是各种面向问题的应用语言。用应用语言编写的程序一般是由应用程序包翻译到M5级上。

把计算机系统按功能划分成多级层次结构,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 and 作用;有利于理解各种语言的实质及其实现;有利于探索虚拟机器新的实现方法,设计新的计算机系统。从学科领域来划分,大致可以认为:M0~M2级属于计算机组织与结构范围,M3~M5级属于系统软件范围,M6级是应用软件。但各级之间可能存在某些交叉。

各虚拟机器级的实现主要靠翻译(translation)或解释(interpretation),或者是这两者的结合。翻译和解释是语言实现的两种基本技术。它们都是以执行一串 N 级指令来实现 $N+1$ 级指令,但二者仍存在着差别:翻译技术是先把 $N+1$ 级程序全部变换成 N 级程序后,再去执行新产生的 N 级程序,在执行过程中 $N+1$ 级程序不再被访问;而解释技术是每当一条 $N+1$ 级指令被译码后,就直接去执行一串等效的 N 级指令,然后再去取下一条 $N+1$ 级的指令,依此重复进行。在这个过程中不产生翻译出来的程序,因此解释过程是边变换边执行的过程。在实现新的虚拟机器时,这两种技术都被广泛使用。一般来说,解释执行比翻译花的时间多,但存储空间占用较少。

软件和硬件在逻辑功能上是等效的。从原理上讲,同一逻辑功能既能用软件实现,也可以用硬件或固件实现,只是性能、价格以及实现的难易程度不同而已。一般来说,硬件实现的特点是速度快,但灵活性较差,且增加硬件成本;软件实现的特点是灵活性较好,硬件成本低,但实现速度慢。计算机系统采用何种实现方式,要从效率、速度、价格、资源状况、可靠性等多方面全盘考虑。在满足应用的前提下,软、硬件功能分配的原则主要是看能否充分利用硬件、器件技术的现状和进展,是否有利于各种组成、实现技术的采用以及是否能对各种软件的实现提供较好的硬件支持。由此对软件、硬件及固件的取舍进行综合平衡,使计算机系统达到较高的性能价格比。

从目前软、硬件技术的发展速度及实现成本上看,随着器件技术,特别是半导体集成技术的高速发展,以前由软件实现的功能,会越来越多地由硬件来实现。总体来说,软件硬化是目前计算机系统发展的主要趋势。

1.1.2 计算机系统的结构、组成与实现

1. 计算机系统结构

计算机系统结构(computer architecture)也称为计算机体系结构,从20世纪70年代开始被广泛采用。由于器件技术发展迅速,计算机硬、软件界面在动态变化,至今对计算机系