

面向 **21** 世纪

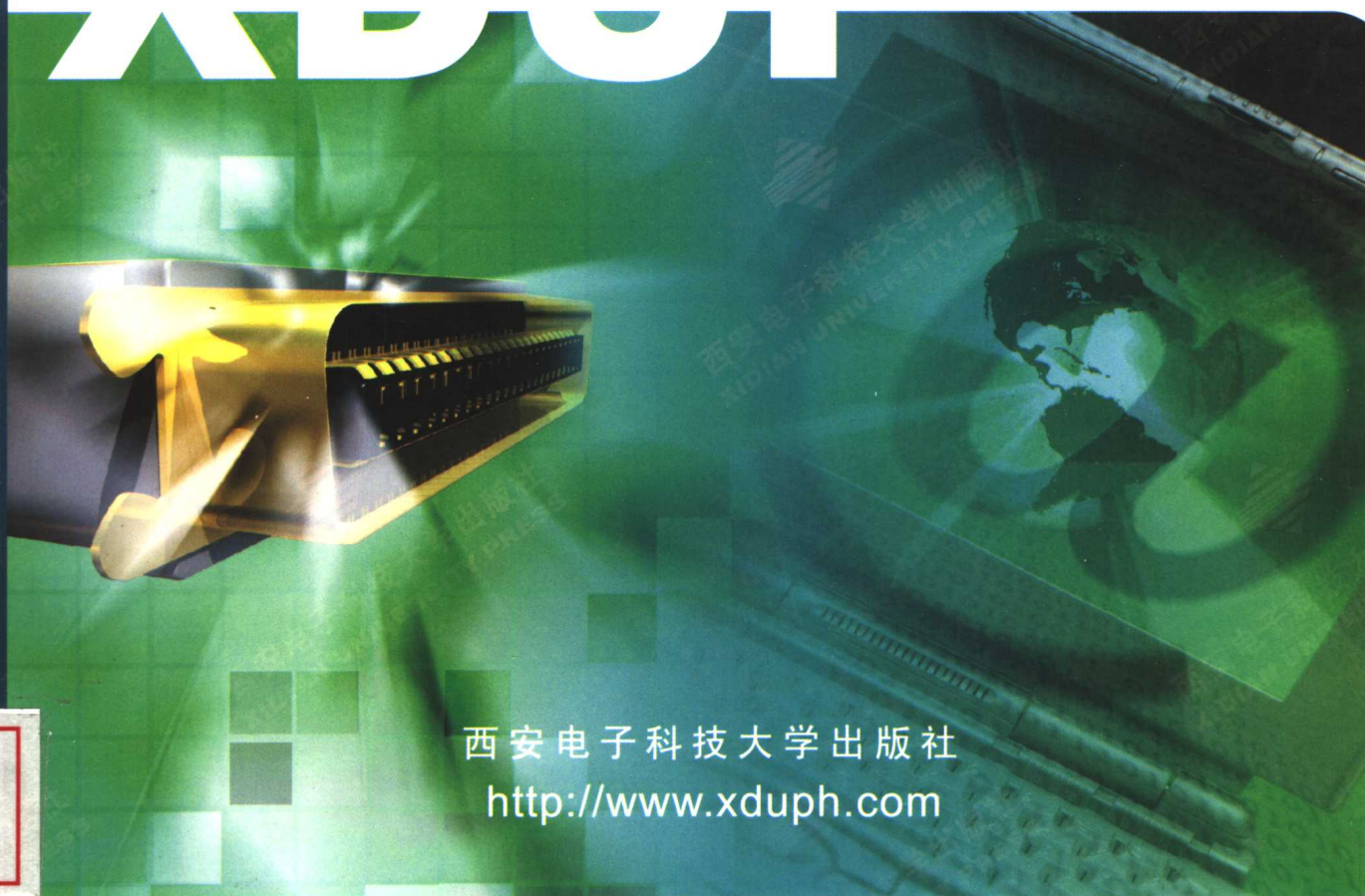
高等学校计算机类专业系列教材

计算机系统结构

Computer System Architecture

陈智勇 主编

李学干 主审



西安电子科技大学出版社

<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校计算机类专业系列教材

计算机系统结构

Computer System Architecture

陈智勇 主编

李学干 主审

西安电子科技大学出版社

内 容 简 介

本书系统地讲述了计算机系统结构的基本概念、设计原理和分析方法,以及有关的先进技术和最新的发展趋向。

全书共分9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,计算机性能,计算机系统结构的分类。第2章讲述指令格式的优化,CISC、RISC、退耦 CISC/RISC、后 RISC 的有关概念及其采用的相关技术。第3章讲述存储体系,页式虚拟存储器和 Cache 存储器。第4章讲述标量流水线技术,超标量超流水技术;VLIW 体系结构以及先进的流水线调度技术。第5章讲述并行处理技术,SIMD 并行处理机及互连网络。第6章讲述向量的流水处理,提高向量处理性能的常用技术。第7章讲述多处理机结构,多处理机 Cache 的一致性,多处理机性能模型以及并行机的最新发展趋势。第8章主要讲述并行算法的基础知识。第9章主要讲述程序流机制,数据流程图和数据流机的基本结构。

本书内容丰富、取材先进,在阐述基本原理的基础上,力图给出设计方法和实例,以帮助读者更好地理解一些比较抽象的概念。每章均有一定数量的例题和习题,书后附有习题的参考答案。本书可作为高等院校计算机专业本科生的教材或有关专业的研究生教材,也可作为科技人员的参考书。

★ 本书配有电子教案,有需要的老师可与出版社联系,免费索取。

图书在版编目(CIP)数据

计算机系统结构=Computer System Architecture/陈智勇主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2004.1
(面向21世纪高等学校计算机类专业系列教材)

ISBN 7-5606-1309-8

I. 计… II. 陈… 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(2003)第 091959 号

策 划 马晓娟

责任编辑 马晓娟

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

http://www.xduph.com

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西省乾兴印刷厂

版 次 2004年1月第1版 2004年1月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 21.125

字 数 493千字

印 数 1~4 000册

定 价 22.00元

ISBN 7-5606-1309-8/TP·0691(课)

XDUP 1580001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

序

第三次全国教育工作会议以来,我国高等教育得到空前规模的发展。经过高校布局和结构的调整,各个学校的新专业均有所增加,招生规模也迅速扩大。为了适应社会对“大专业、宽口径”人才的需求,各学校对专业进行了调整和合并,拓宽专业面,相应的教学计划、大纲也都有了较大的变化。特别是进入 21 世纪以来,信息产业发展迅速,技术更新加快。面对这样的发展形势,原有的计算机、信息工程两个专业的传统教材已很难适应高等教育的需要,作为教学改革的重要组成部分,教材的更新和建设迫在眉睫。为此,西安电子科技大学出版社聘请南京邮电学院、西安邮电学院、重庆邮电学院、吉林大学、杭州电子工业学院、桂林电子工业学院、北京信息工程学院、深圳大学、解放军电子工程学院等 10 余所国内电子信息类专业知名院校长期在教学科研第一线工作的专家教授,组成了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材编审专家委员会,并且面向全国进行系列教材编写招标。该委员会依据教育部有关文件及规定对这两大类的教学计划和课程大纲,对目前本科教育的发展变化和相应系列教材应具有的特色和定位以及如何适应各类院校的教学需求等进行了反复研究、充分讨论,并对投标教材进行了认真评审,筛选并确定了高等学校计算机、信息工程类专业系列教材的作者及审稿人。这套教材预计在 2004 年春季全部出齐。

审定并组织出版这套教材的基本指导思想是力求精品、力求创新、好中选优、以质取胜。教材内容要反映 21 世纪信息科学技术的发展,体现专业课内容更新快的要求;编写上要具有一定的弹性和可调性,以适合多数学校使用;体系上要有所创新,突出工程技术型人才培养的特点,面向国民经济对工程技术人才的需求,强调培养学生较系统地掌握本学科专业必需的基础知识和基本理论,有较强的本专业的基本技能、方法和相关知识,培养学生具有从事实际工程的研发能力。在作者的遴选上,强调作者应在教学、科研第一线长期工作,有较高的学术水平和丰富的教材编写经验;教材在体系和篇幅上符合各学校的教学计划要求。

相信这套精心策划、精心编审、精心出版的系列教材会成为精品教材,得到各院校的认可,对于新世纪高等学校教学改革和教材建设起到积极的推动作用。

系列教材编委会

2002 年 8 月

高等学校计算机、信息工程类专业

系列教材编审专家委员会

主任：杨震（南京邮电学院副院长、教授）

副主任：张德民（重庆邮电学院通信与信息工程学院院长、教授）

韩俊刚（西安邮电学院计算机系主任、教授）

李荣才（西安电子科技大学出版社总编辑、教授）

计算机组

组长：韩俊刚（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

王小民（深圳大学信息工程学院计算机系主任、副教授）

王小华（杭州电子工业学院计算机分院副院长、副教授）

孙力娟（南京邮电学院计算机系副主任、副教授）

李秉智（重庆邮电学院计算机学院院长、教授）

孟庆昌（北京信息工程学院教授）

周娅（桂林电子工业学院计算机系副主任、副教授）

张长海（吉林大学计算机科学与技术学院副院长、教授）

信息工程组

组长：张德民（兼）

成员：（按姓氏笔画排列）

方强（西安邮电学院电信系主任、教授）

王晖（深圳大学信息工程学院电子工程系主任、副教授）

胡建萍（杭州电子工业学院电子信息分院副院长、副教授）

徐祎（解放军电子工程学院电子技术教研室主任、副教授）

唐宁（桂林电子工业学院通信与信息工程系副主任、副教授）

章坚武（杭州电子工业学院通信工程分院副院长、教授）

康健（吉林大学通信工程学院副院长、教授）

蒋国平（南京邮电学院电子工程系副主任、副教授）

总策划：梁家新

策划：马乐惠 云立实 马武装 马晓娟

电子教案：马武装

前 言

在实际应用中,对计算机系统高性能的要求以及器件技术的迅速发展和计算机软件技术的发展加快了计算机系统结构的发展进程。新的系统结构技术不断涌现,并且很快被应用到新的计算机产品中去。计算机系统结构的发展如此迅速,使得教材的编写很难反映计算机系统结构当前最新的发展状况。本书内容丰富、取材先进,在阐述基本原理的基础上,力图给出设计方法和实例,以帮助读者更好地理解一些比较抽象的概念。每章均有一定数量的例题和习题,书后附有习题的参考答案。

本书在编写上具有三个特色:第一,取材先进,在流水线计算机设计技术、并行处理技术、向量处理机、多处理机、并行算法等章节都引用了近几年来国内外计算机系统结构方面比较成熟的研究成果和先进技术;第二,例题丰富,解题过程详细,思路清晰,有助于对基本理论、基本方法的理解;第三,各章节后的习题均附有参考答案,有助于读者自学。

本课程应在“数字逻辑”、“计算机原理”、“汇编语言程序设计”、“高级语言程序设计”、“数据结构”等课程之后开设,也可在“操作系统”、“编译原理”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和有关专业的研究生教材。本课程的参考教学时数为60学时,可根据实际情况选择部分内容学习。

本书由陈智勇主编。陈智勇编写了第5、6、7、8章以及附录一和附录二;王鑫编写了第2、3、9章;陈宏编写了第1、4章。本书承蒙西安电子科技大学李学干教授担任主审,李老师对书稿提出了许多宝贵的修改意见,谨深表谢意。西安电子科技大学出版社为本书的出版也做了大量的工作,在此表示衷心的感谢。

由于计算机技术的飞速发展,新的理论和技术层出不穷,教材难以反映系统结构的最新发展变化,再加上编者的水平有限,书中难免会存在不妥,恳请广大读者批评指正。

编者

2003年8月

目 录

第 1 章 基础知识

1.1 计算机系统层次结构	1
1.1.1 按功能划分的多级层次结构	1
1.1.2 按功能划分层次的好处	4
1.2 计算机系统结构	5
1.2.1 计算机系统结构的定义	5
1.2.2 计算机系统结构研究的内容	5
1.3 计算机组成	6
1.3.1 计算机组成的定义	6
1.3.2 计算机组成设计	6
1.4 计算机实现	7
1.4.1 计算机实现的定义	7
1.4.2 器件技术研究的内容	7
1.4.3 系统结构、组成、实现三者的关系和相互影响	8
1.5 计算机性能	9
1.5.1 性能因子 CPI	9
1.5.2 计算机性能常用指标 MIPS 和 MFLOPS	10
1.5.3 计算机系统结构的性能评价标准	16
1.5.4 计算机系统设计的定量原理	18
1.6 计算机系统的分类	20
1.6.1 Flynn 分类法	20
1.6.2 冯氏分类法	22
习题 1	23

第 2 章 指令系统

2.1 指令格式的优化	26
2.1.1 操作码的优化表示	26
2.1.2 指令字格式的优化	30
2.2 CISC	32
2.2.1 CISC 的发展	32
2.2.2 CISC 的特点	33
2.3 RISC	34

2.3.1 RISC 结构采用的基本技术	34
2.3.2 经典 CISC 和纯 RISC 体系结构的比较	37
2.3.3 退耦 CISC/RISC	38
2.4 后 RISC	42
2.4.1 后 RISC 特征	43
2.4.2 几种后 RISC 机器的比较	44
习题 2	45

第 3 章 存储系统设计

3.1 存储系统原理	48
3.1.1 基本概念	48
3.1.2 多级存储层次	48
3.1.3 存储系统的性能参数	49
3.2 交叉访问存储器	51
3.2.1 主存系统的类型	51
3.2.2 高位交叉访问存储器	52
3.2.3 低位交叉访问存储器	53
3.2.4 拓宽存储器带宽的方法	54
3.3 页式虚拟存储器	55
3.3.1 虚拟存储器的工作原理	55
3.3.2 虚拟存储器的地址映像与变换	56
3.3.3 页面替换算法及其实现	59
3.3.4 提高虚拟存储器等效访问速度的措施	65
3.3.5 影响主存命中率的因素	69
3.4 Cache 存储器	71
3.4.1 Cache 存储器的工作原理	71
3.4.2 Cache 存储器的地址映像与变换	72
3.4.3 Cache 替换算法及其实现	79
3.4.4 Cache 的透明性分析	82
3.4.5 Cache 的取算法	84
3.4.6 影响 Cache 存储器性能的因素	85
习题 3	87

第 4 章 流水线计算机设计技术

4.1 重叠解释方式和相关处理	92
4.1.1 重叠解释方式的提出	92
4.1.2 一次重叠工作方式	93
4.1.3 相关处理	94

4.2	流水线的工作原理	99
4.3	流水线的特点	101
4.4	流水线的分类	102
4.4.1	根据向下扩展和向上扩展的思想分类	102
4.4.2	按流水线功能的多少分类	103
4.4.3	按流水线的工作方式分类	104
4.4.4	按流水线的连接方式分类	105
4.5	线性流水线性能分析	106
4.5.1	吞吐率和加速比	106
4.5.2	效率	109
4.6	线性流水线性能分析举例	110
4.7	非线性流水线的基本概念	112
4.8	相关处理和控制机构	115
4.8.1	局部相关的处理	116
4.8.2	全局相关的处理	117
4.8.3	流水机器的中断处理	119
4.9	先进的流水技术——动态调度	120
4.9.1	流水的集中式动态调度——记分板机制	120
4.9.2	流水的分布式动态调度——Tomasulo 方法	121
4.9.3	动态硬件预测转移方法	124
4.10	超标量处理机和 VLIW 体系结构	125
4.10.1	超标量处理机	125
4.10.2	VLIW 体系结构	126
4.11	超流水处理机	128
4.12	超标量超流水处理机	129
	习题 4	133

第 5 章 并行处理技术

5.1	计算机系统结构中并行性的发展	138
5.1.1	并行性的基本概念	138
5.1.2	实现并行性技术的途径	139
5.1.3	计算机系统结构中并行性的发展	139
5.2	SIMD 并行处理机	141
5.2.1	SIMD 并行处理机的基本结构与特点	141
5.2.2	ILLIAC IV 的处理单元阵列结构	143
5.2.3	阵列处理机的并行算法	144
5.3	SIMD 计算机的互连网络	148
5.3.1	互连网络的设计准则	148

5.3.2	互连函数的表示	149
5.3.3	单级互连网络	149
5.4	网络特性	152
5.4.1	结点度和网络直径	152
5.4.2	聚集带宽和等分带宽	152
5.4.3	数据寻径功能	152
5.5	静态连接网络	153
5.5.1	线性阵列	154
5.5.2	环和带弦环	155
5.5.3	循环移数网络 and 全连接	155
5.5.4	树形和星型	155
5.5.5	胖树型	156
5.5.6	网格型和环网型	156
5.5.7	超立方体	156
5.5.8	带环立方体	157
5.5.9	k 元 n -立方体网络	157
5.6	动态连接网络	160
5.6.1	总线互连方式	161
5.6.2	交叉开关互连方式	162
5.6.3	多级网络互连方式	164
5.6.4	蝶式网络	173
5.6.5	组合网络	174
习题 5		175

第 6 章 向量处理机

6.1	向量处理的基本概念	180
6.1.1	向量流水处理的主要特点	180
6.1.2	向量处理机的基本系统结构	180
6.1.3	向量的处理方式	182
6.2	一般的向量处理机	183
6.2.1	寄存器组	184
6.2.2	多个单功能流水部件	185
6.2.3	运算流水线	186
6.3	提高向量处理性能的常用技术	186
6.3.1	多功能部件的并行操作	187
6.3.2	链接技术	188
6.3.3	条件语句和稀疏矩阵的加速处理方法	190
6.3.4	向量归约操作的加速方法	191

6.4 向量处理的性能评价	192
6.4.1 向量流水处理的时间	192
6.4.2 与向量长度有关的向量流水处理机性能参数	194
6.5 多向量多处理机	196
6.5.1 Cray Y-MP	196
6.5.2 C-90 和机群	197
6.5.3 Fujitsu VP2000	198
6.5.4 VPP500	199
习题 6	200

第 7 章 多 处 理 机

7.1 多处理机结构	204
7.1.1 多处理机的特点	204
7.1.2 多处理机的硬件结构	205
7.2 多处理机的 Cache 一致性	209
7.2.1 Cache 一致性问题的原因	209
7.2.2 监听一致性协议	211
7.2.3 MESI 监听协议	213
7.2.4 基于目录的协议	215
7.3 程序的划分和调度	219
7.3.1 粒度的组合和调度	219
7.3.2 静态多处理机调度	220
7.4 多处理机性能模型	224
7.4.1 基本模型	224
7.4.2 N 台处理机系统的基本模型	226
7.4.3 随机模型	227
7.4.4 通信开销为线性函数的模型	228
7.4.5 一个完全重叠通信的理想模型	229
7.4.6 一个具有多条通信链的模型	231
7.5 并行机的发展趋势	232
7.5.1 并行向量处理机	233
7.5.2 对称多处理机	233
7.5.3 大规模并行处理机	234
7.5.4 分布共享存储器多处理机	234
7.5.5 机群	235
习题 7	237

第8章 并行算法

8.1 并行算法的基础知识	240
8.1.1 并行算法的定义和分类	240
8.1.2 进程中的同构性	241
8.1.3 并行算法的表达	241
8.1.4 并行算法中的同步与通信	242
8.2 同步技术	244
8.2.1 原子性	244
8.2.2 控制同步	245
8.2.3 数据同步	246
8.2.4 高级同步结构	246
8.2.5 低级同步原语	249
8.3 程序并行性的分析	255
8.3.1 数据相关	255
8.3.2 控制相关	257
8.4 并行编程概述	258
8.4.1 并行编程概况	258
8.4.2 并行编程方法	259
8.4.3 并行算法范例	261
8.5 并行编程模型	263
8.5.1 蕴式并行性	263
8.5.2 显式并行模型	264
习题8	269

第9章 数据流计算机系统结构

9.1 程序流机制	272
9.1.1 控制流和数据流	272
9.1.2 数据流驱动的基本原理	272
9.1.3 需求驱动方式	275
9.1.4 归约机模型	275
9.2 计算模型分类	276
9.2.1 控制驱动、共享存储器模型	277
9.2.2 并行控制驱动、共享存储器模型	277
9.2.3 数据驱动模型	277
9.2.4 需求驱动模型	277
9.3 数据流程序图和数据流语言	278
9.3.1 数据流程序图	278

9.3.2 数据流语言	281
9.4 数据流机的基本结构	281
9.4.1 静态数据流机	281
9.4.2 动态数据流机	283
习题 9	286
附录一 各章习题参考答案	287
习题 1 参考答案	287
习题 2 参考答案	288
习题 3 参考答案	291
习题 4 参考答案	296
习题 5 参考答案	299
习题 6 参考答案	304
习题 7 参考答案	307
习题 8 参考答案	310
习题 9 参考答案	314
附录二 专业术语中英文对照表	317
参考文献	324

第 1 章

基 础 知 识

本章首先从多级层次结构的角度定义了计算机系统结构，并分析了计算机系统结构、计算机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。然后，介绍了计算机的性能指标和性能评价标准，讨论了计算机系统设计的定量原理。最后介绍了计算机系统结构的两种分类方法。

1.1 计算机系统层次结构

1.1.1 按功能划分的多级层次结构

现代计算机是通过执行指令来解决问题的，它由软件和硬件两大部分组成。描述一个任务如何实现的指令序列称为程序，所有程序在执行前都必须转换成计算机能识别且能直接执行的机器指令。这些机器指令与机器硬件直接对应，并能被其直接识别和执行，然而使用机器语言编程既不方便，也无法适应解题需要和计算机应用范围的扩大。这个问题可从两方面去解决，前提都是需要设计一个比机器指令更方便使用或编程的指令集合，由它构成新的语言，例如汇编语言。汇编语言是一种符号语言，给程序员编程提供了方便，但尽管每个语句仍基本上与机器指令对应，却并不能被机器直接识别和执行。用汇编语言开发的程序需要某种转换才能在实际机器上执行：一种是翻译(translation)，即在执行汇编语言源程序之前生成一个等价的机器语言指令序列来替换它，生成的程序全部由机器指令组成，计算机执行等效的机器语言源程序，而不是原来的汇编语言源程序，也即把源程序先转换成目标程序，然后再在机器上执行目标程序以获得结果；另一种是解释(interpretation)，即用机器指令写一个程序，将汇编语言源程序作为输入数据，按顺序检查它的每条指令，然后直接执行等效的机器指令序列来解决问题。

汇编语言源程序可以在机器上运行并获得结果，是因为有汇编程序的支持。在汇编语言程序设计者看来，就好像有了一台用汇编语言作为机器语言的机器。这里的机器是指能存储和执行程序的算法和数据结构的集合体。我们把以软件为主实现的机器称为虚拟机器，而把由硬件和固件实现的机器称为实际机器。显然，虚拟机器的实现是构筑在实际机器之上的。图 1.1 给出了虚拟机器与实际机器之间构成的一个简单的层次结构。

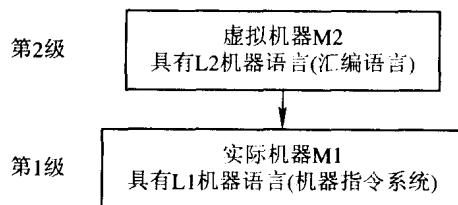


图 1.1 虚拟机器和实际机器层次结构举例

语言与虚拟机之间存在着重要的对应关系，每种机器都有由它能执行的指令组成的机器语言。同时，语言也定义了机器，即机器要能执行这种语言所写的程序。有 n 层不同的语言，就对应 n 层不同的虚拟机。在图 1.2 中，我们给出了典型的现代计算机的多级层次结构。例如，汇编语言(L3)是面向机器的一种符号语言，其语法、语义结构仍然和二进制机器语言的基本相同，但与解题所需的差别较大，于是进一步出现了面向题目和过程的高级语言(L4)；在高级语言的基础上还出现了面向应用的应用语言(L5)，因此我们可以得到多个层次的虚拟机器；而对于实际机器级若采用微程序(L0)控制，它又可分解成传统机器级 M1 和微程序级 M0；虽然目前很多机器上的操作系统(L2)已不再用汇编语言编写，

而是用面向系统软件的高级语言，如 C 语言编写，但从实质上看，操作系统是传统机器的引伸，它要提供传统机器所没有但为汇编语言和高级语言的使用和实现所需的某些基本操作和数据结构，如文件管理、进程管理、中断管理、作业控制、存储管理和输入/输出等等，它们在许多机器上是经机器语言程序解释实现的，因此，操作系统级放在传统机器级之上，汇编语言级之下。

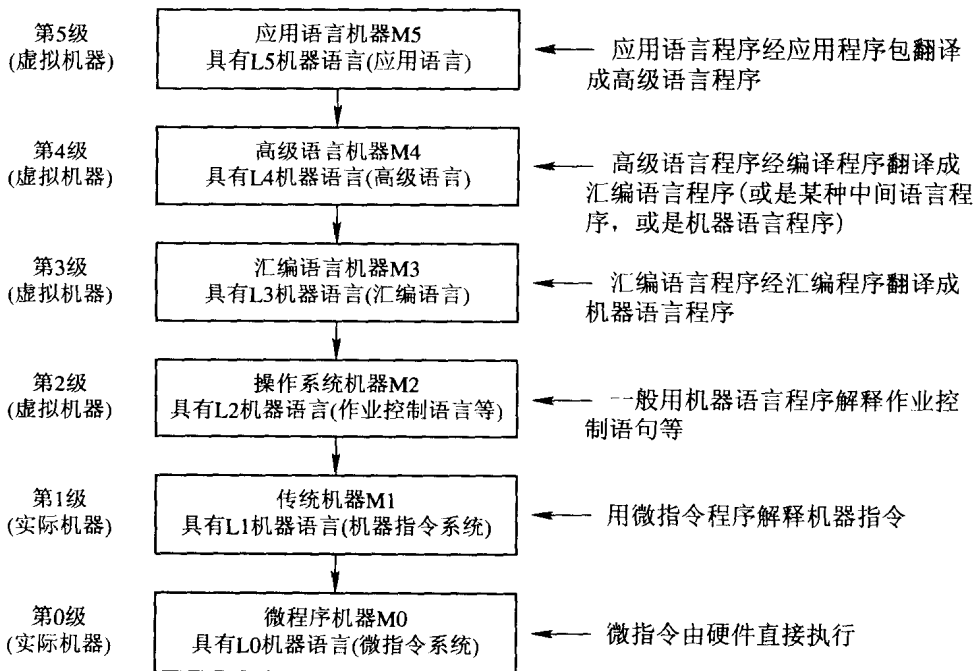


图 1.2 计算机系统的多级层次结构

把计算机系统按功能划分为多个层次结构后，对各机器级的程序员而言，只要熟悉和遵守该级语言的规范准则，所编写的程序就总能在该机器级上运行并得到结果，而不用了解该机器级是如何实现的。各机器级的实现主要靠翻译或解释，或者是这两者的结合。翻译是先用转换程序将高级机器级上的程序整个地变换成低级机器级上可运行的等效程序，然后再在低级机器级上实现的技术。解释则是在低级机器级上用它的串语句或指令来仿真高级机器级上的一条语句或指令的功能，通过对高级程序中的每条语句或指令逐条解释来实现的技术。

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、可靠性等多方面因素全盘考虑，对软件、硬件及固件的取舍进行综合平衡。

软件和硬件在逻辑功能上是等效的，同一逻辑功能既可以用软件也可以用硬件或固件实现。从原理上讲，软件实现的功能完全可以用硬件或固件完成；同样，硬件实现的逻辑功能也可以由软件的模拟来完成，只是性能、价格以及实现的难易程度不同而已。例如，在计算机中实现十进制乘法这一功能，既可以用硬件来实现，也可以用软件来完成。用硬件实现，需设计十进制乘法机器指令，其特点是完成这一功能的速度快，但需要更多的器件。而用软件来实现这个功能，则要采用加法、移位等指令通过编程来实现，其特点是实

现的速度慢，但不需增加器件。

软、硬件的功能分配比例可以在很宽的范围内变化，这种变化是动态的，如图 1.3 所示，软、硬功能分配的比例随不同时期以及同一时期的不同机器的变化而变化。由于软、硬件是紧密相关的，软、硬界面常常是模糊不清的，因此在计算机系统的功能实现上，有时候很难分清哪些功能是由硬件完成的，哪些功能是由软件完成的。在满足应用的前提下，软、硬功能分配比例的确定，主要是看能否充分利用硬件、器件技术的现状和进展，使计算机系统达到较高的性能价格比。对于计算机系统的用户，还要考虑他所直接面对的应用语言所对应的机器级的发展状况。

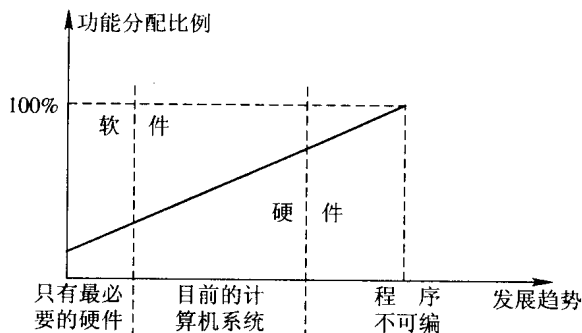


图 1.3 软、硬功能分配

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

1.1.2 按功能划分层次的好处

从概念和功能上把一个复杂的计算机系统看成是由多个机器级构成的层次结构，可以有如下的好处。首先，有利于理解软件、硬件和固件在系统中的地位和作用。从系统层次的划分中可以看出，微程序机器级(M0)、传统机器级(M1)、操作系统机器级(M2)不是为应用程序员解题设计的，而是为运行支持更高层次机器级程序所必须的解释程序和翻译程序而设计的，以便能设计和实现新的虚拟机器级；在这之上的机器级(M3~M5级)则主要是为应用程序设计人员解决各类实际应用问题而设计的。其次，有利于理解各种语言的实质和实现途径。计算机各层次的语言总是通过低一级的语言翻译或解释来实现的，这就说明相邻机器级之间的语义差别不能太大。再次，有利于推动计算机系统结构的发展。例如，可以重新分配软、硬件的比例，为虚拟机器的各个层次提供更多更好的硬件支持，改变硬件及器件快速发展而软件却日益复杂、开销过大的状况。可以用硬件和固件来实现高级语言和操作系统而形成高级语言机器和操作系统机器。再如，用真正的机器来取代各级虚拟机，摆脱各级功能都在同一台实际机器上实现的情况，发展多处理机系统、分布处理系统、计算机网络等系统结构。最后，有利于理解计算机系统结构的定义。把计算机按功能划分成多个不同的层次结构，从各个层次的功能划分和实现去了解计算机系统，有助于更深入地了解系统结构的定义。