



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校教材

计算机系统结构

(第 2 版)

陆鑫达 翁楚良 编著



高等教育出版社

Higher Education Press

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等学校教材

计算机系统结构

(第2版)

陆鑫达 翁楚良 编著

责任编辑 陆鑫达

文字编辑 翁楚良

封面设计 陆鑫达

版式设计 翁楚良

插图设计 陆鑫达

文字编辑 翁楚良

版式设计 陆鑫达

010-28281118 陆鑫达

800-810-0298 翁楚良

http://www.hep.edu.cn 陆鑫达

http://www.hep.com.cn 翁楚良

http://www.landao.com.cn 陆鑫达

http://www.landao.com.cn 翁楚良

http://www.widedu.com 陆鑫达

2008年7月第1版 陆鑫达

2008年6月第2版 翁楚良

2008年6月第1次印刷 陆鑫达

29.30元 翁楚良

高等教育出版社

内容提要

本书系统地论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。在讲解时将定性和定量分析方法结合起来,并从经济、有效观点来权衡有关技术措施的取舍。

全书共 10 章,主要内容包括计算机系统结构设计基础、计算机的性能及其评估标准、数据类型和数据表示、指令系统设计原理和风格、标量流水技术、向量流水处理、存储体系输入/输出子系统、并行计算技术和新型计算机系统结构。

本书取材先进,内容丰富,篇幅适中,每章有小结并备有一定数量的习题。本书可作为高等学校计算机专业高年级学生的教材,也可作为有关专业的研究生教材以及从事计算机研究和设计人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

计算机系统结构/陆鑫达,翁楚良编著. —2 版. —北京:
高等教育出版社, 2008.6

ISBN 978-7-04-023960-7

I. 计… II. ①陆…②翁… 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 (2008) 第 067948 号

策划编辑	倪文慧	责任编辑	彭立辉	封面设计	于文燕	责任绘图	尹 莉
版式设计	马静如	责任校对	俞声佳	责任印制	韩 刚		

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 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 23.5
字 数 520 000

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>

版 次 1996 年 7 月第 1 版
2008 年 6 月第 2 版
印 次 2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价 29.30 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 23960-00

第2版前言

本书第1版于1996年5月出版以来已历时11年,承蒙广大读者的厚爱,已先后印刷了15次,累计发行数达到8万余册,趁此机会谨向广大读者表示深切的谢意。

自1996年以来,由于挑战性应用问题的急切需求以及超大规模集成电路技术和网络技术的迅速发展,加快了计算机系统结构的演变和发展进程。虽然开发指令级并行性的超标量技术日臻完善,动态猜测执行、EPIC等方法也已被成功应用到商品化产品中,但随之而来的是超标量处理器的设计越来越复杂,以至于进一步开发指令级并行性变得相当困难。

另一方面,为了提高性能,微处理器芯片的时钟频率越来越高,导致功耗急剧增加,组件装配密度下降。显然,单纯依赖提升单处理器时钟频率和一味开发指令级并行性以提高计算机性能的方法已不再经济有效,于是多线程、多核技术应运而生。实践证明,在开发指令级并行性的同时,必须加强对线程级和数据级并行性的开发,只有这样,才能使计算机的性能有更大幅度的提高。这种演变的实质表明并行计算技术已成为当今计算机系统结构发展的主流技术。

计算机网络技术的迅速发展直接导致了机群和网络计算的出现,一般用户已经可以通过网络使用高性能的超级计算机。随着并行计算的日益普及,并行程序设计语言和工具的开发也取得了长足的进步,作为消息传递多机系统的编程语言MPI标准以及PVM已在机群和MPP系统中被广泛使用,被广大用户所认可的OpenMP语言标准在共享存储多机系统中已得到日益广泛的使用。数据并行语言HPF也正逐步趋于成熟和流行。

目前,高性能计算已成为与科学理论和物理实验并驾齐驱的人类从事自然界新发现和新探索的第三个重要手段。近年来,国外不少著名科学家认为“计算科学”(Computational Science)是一门学科,而非技术。“计算科学”是非常有发展前途的一门学科,这一学科随着高性能计算的日益普及,正逐步趋于成熟。编者认为,以学科交叉方式大力发展计算科学,将对增强我国在科技领域的竞争力和提高自主的创新能力起到巨大的促进作用。而计算机系统结构的研究和发展对计算科学的发展将起到至关重要的作用。

本书第2版中所增加的内容就是力图反映上述发展的新动向。

概括地讲,第2版对各章中所引用的技术数据做了必要的更新,对各章补充的主要内容如下:

第1章增加了计算机分型的内容,以反映当今计算机系统按年销售量及性能和成本加以分型的趋向。此外,还增加了二进制翻译方法的内容,以反映模拟和仿真的新实现方法。

第2章对章节的安排做了小的调整,内容改动不大,增加了对Top 500和SPEC基准测试程序的2006版本的论述。

第3章主要增加了 Intel Pentium 和 IBM Power PC 数据类型的表示实例。

第4章增加了指令系统对多媒体操作的支持这一小节和指令系统集设计的演变和发展趋向这一节,以反映指令系统对多媒体新应用的支持和指令系统集今后可能的发展趋向。

第5章的内容变动较多,主要增加了以下两方面的内容:一是动态猜测执行方法和 EPIC (显式并行指令计算)方法,其中包括对安腾 2 处理器的论述。二是多线程处理技术这一节。这些内容表明近年来在开发指令级并行性和线程级并行性方面所取得的长足进步。此外,还补充了有关超标量和超流水的加速比公式以及 Tomasulo 算法在 MIPS 机上的实现。

第6章主要增加了并行向量处理技术,以反映这样的—个事实,即向量处理技术并未过时,在解决了可扩展性问题后,向量处理技术已得到了新的发展。本章删除了有关非线性流水线调度的内容。

第7章对小节的编排做了一些调整,增加了网络存储内容,以反映计算机网络技术对存储技术发展的影响。更换了虚拟存储器保护机制中的页式和段式虚拟存储器实例内容。

第8章增加的内容是闪存、通用串行总线标准 USB 和并行 I/O。闪存和 USB 是近年来广为流行的 I/O 部件,并行 I/O 则主要是为了提高计算机系统的吞吐率。

第9章的变化最大,无论是各节内容或是小节的顺序编排都做了很大的改动,基本上是重新撰写。增加了并行计算机系统的分类,多处理机中 Cache 一致性协议、机群、网络计算和网格计算、各种流行的并程序序设计语言以及并行计算机系统的发展趋向等。

第10章主要增加了多核处理器及有关软/硬件支撑技术的内容,以反映新一代处理器的发展趋向;删除了人工智能计算机的内容。

长期以来,计算机系统结构课程缺少必要的实验素材,第2版新增的机群计算和构建各种类型机群的内容,对打造专用和通用的机群及设置相应的程序设计环境做了比较详尽的介绍。编者认为,一般的高校均有能力开设这种网络环境下的计算机系统结构实验。

第2版的修改框架和增加的内容由陆鑫达教授制定,其中第7、8和第10章由翁楚良副教授负责修改,其余各章的修改均由陆鑫达教授执笔。本书中的部分插图由林新华讲师组织绘制,在此仅表谢意。

如同编者在第1版的前言中所述,“新的计算机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。计算机系统结构发展的这一特征,使得编写一本能及时反映当前最新发展水平的计算机系统结构教材变得相当困难。”编者仍相信这是一个不争的事实。

限于篇幅,近年来计算机系统结构发展中出现的新技术、新概念和新术语在本书再版时实难一一论及,希望广大读者能予以谅解。此外,也恳请读者对本书中存在的不妥之处能不吝指正。

在本书第2版出版之际,作者谨向高等教育出版社的策划和编辑人员表示深切的谢意。

陆鑫达

2007年11月于上海

第1版前言

实际应用对计算机系统越来越高的要求(更快的计算能力、更大的存储容量以及更高的输入、输出吞吐能力)、集成电路技术的迅速发展以及计算机软件的发展,加快了计算机系统结构的演变进程。新的计算机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。计算机系统结构发展的这一特征,使得编写一本能及时反映当前最新发展水平的计算机系统结构教材变得相当困难。本书力求能反映这种最新的发展水平,因而在取材上力求先进。考虑到 RISC 技术已成为指令系统设计风格的主流,因此本书将重点叙述 RISC 技术的计算机系统结构。

用定量方法来分析和指导计算机系统结构的设计显然要比传统的定性方法有更大的优越性,本教材将尽力反映定量分析方面的最新方法。

由于计算机系统结构反映了一个计算机系统的软、硬件的交界面,因此计算机系统结构所研究的主要内容,不仅涉及硬件,而且还涉及许多软件技术,特别是有关优化编译技术和操作系统技术。此外,系统结构还与程序设计语言以及算法设计等密切相关。这些在编写本教材时给予了足够的重视。本教材还力求反映当前计算机系统结构的重要进展和今后的发展趋向。

按照国家教育委员会高等学校计算机科学指导委员会的要求,本书是作为高等学校计算机专业的必修课教材。学生最好能在学完“数据结构”、“计算机组成原理”、“操作系统”和“编译原理”课程后,再学习本课程。教学内容可根据学时和读者对象的不同,加以不同组合和取舍,其中并行计算技术、先进的流水技术、增强向量处理性能的方法及新型计算机系统结构等章节,可作为本专业及其他相关专业的研究生课程内容。作者推荐本课程的教育时数为 54~72 学时。

本书共分 10 章,各章的基本内容如下:

第一章主要讲述计算机系统结构的含义、分类、计算机系统设计时应遵循的定量原理以及计算机系统结构的发展。

第二章叙述计算机的性能和成本,讨论衡量计算机性能的重要标准以及评估计算机性能的典型标准测试程序。论述计算机的成本和价格的差异。

第三章主要讨论数据类型和数据表示,重点论述二进制浮点数据的表示以及向量和自定义数据的表示。

第四章叙述计算机指令系统的设计原理和风格,比较 CISC 和 RISC 两种设计风格,并重点介绍 RISC 指令系统的设计实例。

第五章讨论标量流水技术,着重以 RISC 流水线为例叙述流水操作中的 3 种主要障碍,即

目 录

第 1 章 计算机系统结构设计基础	1
1.1 计算机系统结构的含义和分类	1
1.1.1 计算机系统结构含义	2
1.1.2 计算机系统结构分类	5
1.2 计算机系统设计准则	9
1.2.1 计算机系统设计定量原理	9
1.2.2 计算机系统设计者的主要任务	11
1.3 计算机系统结构的发展	12
1.3.1 计算机系统结构的演变	12
1.3.2 软件、应用需求和器件对系统结构发展的影响	16
本章小结	23
习题	23
第 2 章 计算机的性能及其评估标准	25
2.1 引言	25
2.2 计算机性能和性价比	25
2.2.1 衡量计算机性能的主要标准	25
2.2.2 衡量 CPU 性能的公式	26
2.2.3 MIPS 和 MFLOPS	27
2.3 计算机性能的评估标准	28
2.3.1 评估计算机性能的基准测试程序	28
2.3.2 性能评价结果的统计和比较	30
2.4 计算机成本和价格	33
本章小结	34
习题	35
第 3 章 数据类型和数据表示	38
3.1 数据类型	38
3.1.1 基本数据类型	38
3.1.2 结构数据类型	39
3.2 数据表示	40

3.2.1 数据表示、数据类型和数据结构的关系	40
3.2.2 二进制定点、浮点数据表示	40
3.2.3 数据表示实例	43
3.2.4 向量数据表示	43
3.2.5 自定义数据表示	45
本章小结	48
习题	49
第 4 章 指令系统设计原理和风格	50
4.1 引言	50
4.2 指令系统集结构的分类	51
4.2.1 堆栈型、累加器型和通用寄存器型指令集结构	51
4.2.2 通用寄存器型中的进一步分类	53
4.3 操作数访问(寻址)方式	54
4.3.1 按地址访问方式	54
4.3.2 按内容访问方式	60
4.4 指令格式及其优化	62
4.5 两种不同的指令系统设计风格——CISC 和 RISC	66
4.5.1 CISC 设计风格	67
4.5.2 RISC 设计风格	69
4.6 RISC 机指令系统实例和分析	77
4.6.1 美国加州大学伯克利分校的 RISC 机和 SUN SPARC 系统结构	77
4.6.2 美国斯坦福大学的 MIPS 机和 MIPS R3000	80
4.6.3 新一代 RISC 机的主要特征和发展趋向	81
4.7 指令系统对多媒体操作的支持	83
4.7.1 多媒体处理的需求	83

4.7.2 多媒体扩展指令集	84	6.4 增强向量处理性能方法	151
4.8 指令系统集设计的演变和发展		6.4.1 多功能部件的并行操作	151
趋向	85	6.4.2 链接技术	152
本章小结	86	6.4.3 条件执行语句和稀疏矩阵的加速	
习题	86	处理方法	153
第5章 标量流水技术	88	6.4.4 向量归约操作的加速方法	155
5.1 控制流及其改变	88	6.5 向量处理性能评估参数和方法	156
5.2 标量流水工作原理	89	6.6 并行向量处理技术	158
5.2.1 重叠操作方式和先行控制	89	6.7 向量化编译技术	160
5.2.2 标量流水工作原理	92	本章小结	161
5.2.3 标量流水分类	94	习题	161
5.2.4 流水线的主要性能及其分析	96	第7章 存储体系	164
5.2.5 流水线性性能分析举例	98	7.1 存储体系构成的基本原理	164
5.3 流水操作中的主要障碍	99	7.1.1 局部性原理	165
5.3.1 资源冲突(结构冲突)	100	7.1.2 层次化原理	165
5.3.2 数据相关冲突	101	7.1.3 存储体系设计原则	166
5.3.3 控制转移冲突	104	7.2 高速缓冲存储器	167
5.3.4 流水线中的中断处理	107	7.2.1 Cache 的基本工作原理和结构	167
5.4 先进的流水技术	108	7.2.2 地址映射与变换	169
5.4.1 先进的流水调度方法——动态		7.2.3 替换策略及更新主存策略	173
调度	108	7.2.4 数据 Cache、指令 Cache 及一体化	
5.4.2 流水中指令级并行性进一步开发	114	Cache	178
5.5 多线程处理技术	134	7.2.5 Cache 性能分析	178
5.5.1 多线程技术	134	7.3 主存储器及带宽拓宽方法	180
5.5.2 多线程处理器的计算模型及现场		7.3.1 提高主存性能方法	180
切换策略	135	7.3.2 多体交叉存储器	181
5.5.3 多线程实现的两种主要方法	136	7.3.3 存储器带宽的拓宽方法	182
本章小结	141	7.4 虚拟存储器的基本概念及实例	182
习题	141	7.4.1 虚拟存储器管理方式	183
第6章 向量流水处理	144	7.4.2 快速地址转换技术	188
6.1 向量流水机的基本系统结构	144	7.4.3 虚拟存储的保护机制	189
6.1.1 向量流水处理的主要特点	144	7.5 网络存储的基本概念	193
6.1.2 向量机的基本系统结构	145	7.5.1 存储区域网的基本原理	193
6.1.3 向量启动时间和启动率	147	7.5.2 存储区域网的构成	194
6.2 向量操作长度控制和向量访问		7.5.3 存储区域网的应用	195
步长	147	本章小结	196
6.3 向量处理方法	149	习题	197

第 8 章 输入/输出子系统	200	9.3 计算机互连网络	242
8.1 引言	200	9.3.1 互连网络的分类及设计准则	242
8.2 I/O 子系统的主要特征	201	9.3.2 静态互连网络	244
8.3 I/O 部件类型	202	9.3.3 基于总线的动态互连网络	249
8.3.1 磁盘	202	9.3.4 基于交换的动态互连网络	252
8.3.2 光盘	206	9.3.5 计算机动态互连网络的带宽 分析	263
8.3.3 闪存	206	9.4 MIMD 多处理机及多计算机 系统	264
8.3.4 图形显示设备	207	9.4.1 MIMD 多机系统主要特征及其 分类	264
8.4 总线	208	9.4.2 多处理机系统中的 Cache 一致性	273
8.4.1 总线分类	208	9.4.3 多处理机间的互连方式	281
8.4.2 总线控制方式	209	9.4.4 并行存储器无冲突访问	290
8.4.3 总线标准	214	9.4.5 多处理机系统中并行性的开发	291
8.5 中断系统	221	9.4.6 多处理机操作系统	309
8.5.1 中断分类和优先等级	221	9.4.7 多处理机调度策略	310
8.5.2 中断处理系统	221	9.5 机群	313
8.6 输入/输出通道	222	9.5.1 机群的组成结构和主要属性	314
8.7 I/O 处理机	225	9.5.2 机群中常用的互连网络	315
8.8 I/O 子系统性能衡量	226	9.5.3 机群实例	320
8.9 I/O 子系统的设计	227	9.6 网络计算	322
8.10 并行 I/O	227	9.6.1 计算机网络基础	323
8.10.1 并行 I/O 基本原理	227	9.6.2 客户/服务器系统	325
8.10.2 并行文件系统实例	229	9.6.3 网络计算	327
本章小结	230	9.7 并行机的发展瞻望	328
习题	230	9.7.1 并行机发展的现状	328
第 9 章 并行计算技术	232	9.7.2 并行机发展的趋势	329
9.1 并行计算技术的发展及系统的 分类	232	本章小结	330
9.1.1 并行性基本概念	232	习题	332
9.1.2 并行性的开发策略	233	第 10 章 新型计算机系统结构	335
9.1.3 并行计算机系统的分类	234	10.1 计算模型分类	335
9.1.4 并行计算机系统的加速比	235	10.2 多核处理器计算机	337
9.2 SIMD 并行计算机 (阵列处理 机)	236	10.2.1 多核处理器的基本工作原理	338
9.2.1 阵列机的基本结构	236	10.2.2 多核处理器的原型系统及产品	339
9.2.2 阵列机的主要特点	238	10.2.3 多核处理器系统的软件技术	341
9.2.3 阵列机的并行算法	238	10.3 数据流计算机	345
9.2.4 典型 SIMD 计算机举例	240		

第1章 计算机系统结构设计基础

本章从外特性和内特性两个方面介绍计算机系统结构的含义，叙述计算机系统结构的主要分类方法；讨论进行计算机系统设计应遵循的3个定量原理。最后，概述计算机系统结构进展，并说明软件、应用和器件在计算机系统结构进展中所起的作用。

1.1 计算机系统结构的含义和分类

从电子计算机自1946年问世以来，已经历了60余年，在此期间计算机系统性能得到了大幅度提高，价格却大幅度下降。这一方面是由于计算机所用器件的制造技术不断发展，使其工作速度、功能、集成度和可靠性等指标不断提高和价格不断降低而造成的；另一方面则主要得益于计算机系统结构的不断创新和改进。有人统计在1946年—1985年期间，计算机系统性能的提高主要得益于器件性能的提高和系统结构的改进（各占一半），年均增长率约为25%。而在1986年—2002年期间，微处理器的性能平均每年以52%的速度递增，这主要得益于采用先进的体系结构。2002年以后，由于受功率、可用指令级并行性以及存储器时延的限制，使处理器性能的增长速度降低为每年20%左右。在计算机技术发展的60余年中，总的来讲，器件在技术上的改进是比较稳定的，而系统结构的改进则有较大起伏，特别是近30年来，由于计算机系统的设计对集成电路技术依赖性大为增加，从而使得在此期间内各类不同的计算机系统的性能增加速率有了较大的差异。

传统大型机性能的增长主要依靠器件在工艺上的改进，因为系统结构方面的改进没有新的突破；巨型机的性能增长则得益于器件技术和系统结构两方面的改进；小型机的发展，一方面是由于计算机实现方法有了较大的改进，另一方面是因为采用了许多大型机中行之有效的先进技术。但这三类计算机每年的性能平均增长率均只在18%左右。与之相对照，微处理器的性能增长则比较快，每年的平均增长率约为35%，这是因为微处理器能从集成电路技术的进展中得到最为直接的好处。自20世纪80年代起，微处理器技术实际上已成为新系统结构和老系统结构实现时所选用的主要技术。

进入20世纪80年代后，计算机市场上出现了两个显著的变化，使得新系统结构商品化变得比较容易。一个变化是汇编语言编程的重要性逐步降低，这就放宽了对目标代码兼容性的苛刻要求；另一个变化是与制造厂商无关的、类似UNIX操作系统以及Linux操作系统那样的标准化的建立，使得新系统结构出台的成本和风险性都大幅降低。这种情况导致许多公司追求新

的系统结构发展方向,从而很快地涌现出一些新的计算机类型,如小巨型机 (Minisupercomputer)、高性能微处理机 (High-Performance Microprocessor)、工程工作站 (Engineering Workstation) 以及各种各样的多处理机 (Multiprocessor) 等,因此有人把这段时期比喻为计算机蓬勃发展的“文艺复兴”时期。

自 1985 年开始,一种具有新颖设计风格的系统结构,即采用 RISC 技术的系统结构为计算机工业界所青睐。它将集成电路技术进展、编译技术改进以及新颖系统结构设计思想三者有机地结合起来,侧重于指令级并行性开发和 Cache 的优化使用,从而使得以这种风格设计的计算机系统的性能能以每年 52% 的高增长率加以改进。

应该指出的是,这种速度上的改进是在对以往计算机是如何被使用的模拟实验数据进行定量分析的基础上获得的。有的学者将这种设计风格称为定量分析的计算机系统结构设计风格,显然这比传统的定性设计风格要精确得多。开发 RISC 技术的两位先驱者,美国加州大学伯克利分校的 D. Patterson 教授和斯坦福大学的 J. Hennessy 教授是这种定量分析设计方法的主要倡导者。

要了解这种定量的设计系统结构的方法,必须先了解计算机系统结构的含义。下面将从内、外特性两个方面进行讨论。

1.1.1 计算机系统结构含义

1. 计算机系统结构的外特性

计算机系统结构 (Computer Architecture) 这一术语,由 Buchholz 于 1962 年描述 Stretch (IBM-7030) 计算机时首次采用。实际上,建筑学 (Architecture) 一词可以认为是指一个系统的外貌,计算机作为一个包括硬件、软件和固件的系统,也必然有其外观,即外特性。1964 年,IBM360 系列机的主设计师 Amdahl 提出了有关计算机系统结构的定义:程序员所看到的计算机的基本属性,即概念性结构和功能特性。这实际上是计算机系统的外特性,但对这一定义是有争论的。Myers (1982)、Tanenbaum (1984) 以及 Dasgupta (1984) 等都先后给出了不同的定义,主要的争议点是基于这样的事实,即由于计算机系统是包括软/硬件乃至固件资源的较复杂系统,因此处在不同层次的使用者 (各级程序员) 所看到的外特性有可能是完全不一样的。例如,对于使用 FORTRAN 语言的程序员来讲,一台 IBM p690 超级计算机、一台 Sunblade 1000 服务器或是一台奔腾 PC,在他看来都是一样的,因为在这三台机器上运行他所编制的程序得到的结果是一样的。但对于使用汇编语言来编程的程序员来讲,由于必须熟悉这三台机器完全不同的汇编指令,因此认为这三台机器是完全不同的。即使对同一台机器来讲,处在不同级别的程序员,例如应用程序员、高级语言程序员、系统程序员和汇编程序员,他们所看到的计算机外特性也是完全不一样的。通常所讲的计算机系统结构的外特性是指机器语言程序员或编译程序编写者所看到的外特性,即由他们所看到的计算机的基本属性 (概念性结构和功能特性),这是机器语言程序员或编译程序生成系统为使其所编写、设计或生成的程序能在

机器上正确运行所必须遵循的。由机器语言程序员或编译程序编写者所看到的计算机的基本属性是指传统机器级的系统结构，在传统机器级之上的功能被视为软件功能，而在其之下的则属于硬件和固件功能，因此计算机系统的概念性结构和功能属性实际上已成为计算机系统中软/硬件之间的界面。

据上所述，可引出以下几个重要概念：

① 计算机系统按功能可划分成多层次结构，如图 1.1 所示。在传统机器级上的是操作系统级、汇编语言级、高级语言级和应用语言级，在其下面的是微程序机器级以及扩展级电子线路，微程序机器级也可称为计算机的微系统结构。

在传统机器级上的所有机器都称为虚拟机（Virtual Machine, VM），因为它们均是由软件实现的机器，与实际物理机器级有所不同。对应于这些级的机器语言分别是操作系统机器语言、汇编语言、高级语言及应用软件。这种垂直式的层次概念有助于理解各级语言的实质及实现。分层后，处在某一级虚拟机的程序员只需知道这一级的语言及虚拟机，至于这一级语言如何层次地经翻译或解释直到下面的实际机器级，则无须知道。一般来说，越是上层的语言的语义越高级，因此当由下一级语言来实现时，往往要用多条指令或语句来实现。

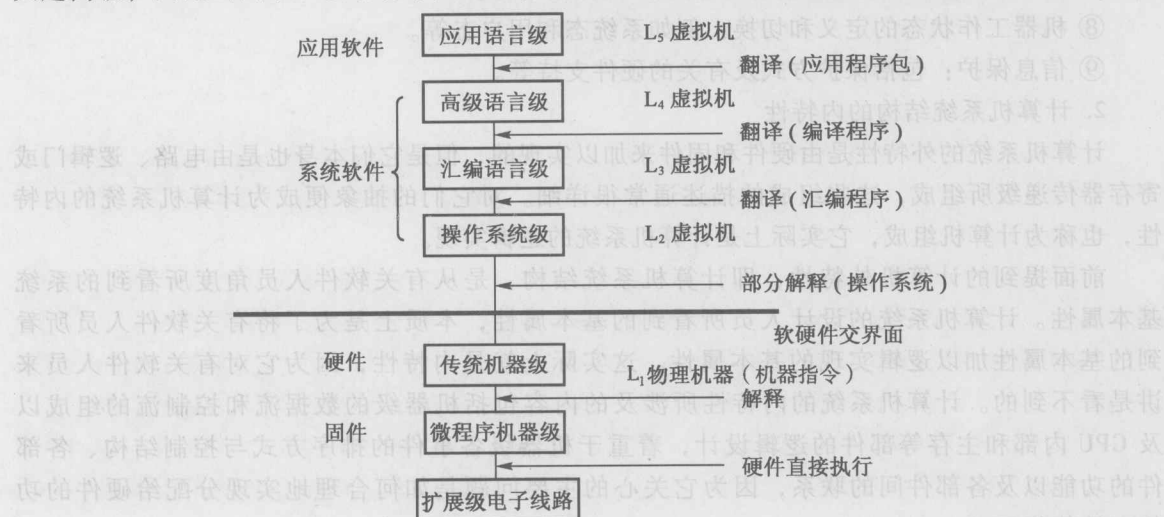


图 1.1 计算机系统的多层次结构

② 虽然软件和硬件两者在实质上是完全不同的，但它们在逻辑上是等价的。即绝大部分硬件功能都可用软件来实现，反之亦然，但两者在实现时将在性能价格比上及实现难易程度上反映出不等价。一般来说，用硬件替代软件所实现的功能往往在性能上占优势，占用存储容量少，但成本相对较高，改变的灵活性较差；使用软件的情况正好相反。

③ 具有相同功能的计算机系统，其软/硬件间的功能分配可在很宽的范围内变化，因此软/硬件的界面是模糊的，没有明确的固定界线，可随各种影响因素在一定范围内动态地变化。主要因素有性能和成本、对存储器容量的需求量、可扩展性和可更改性等。随着 VLSI 技

术的不断发展以及器件的功能越来越强，硬件在功能实现中的比例将趋向增大。

④ 透明性概念。一种本来存在的有差异的事物或属性，从某种角度来看似乎不再存在，称为透明性现象。例如，前面提到的高级语言程序员看不到各种不同类型机器的差异性就是一个明显的例证。从用户使用计算机系统的观点来讲，透明性越多越好，但这种透明性往往是借助软件填补了实际存在的差异而得到的，因此往往需要付出一定的性能代价。

关于计算机系统结构的外特性，比较一致的看法认为应包括以下几个方面：

- ① 指令系统：反映了机器指令的类型和形式以及指令间的排序和控制机构。
- ② 数据表示：反映了能由硬件直接识别和处理的数据类型和指令。
- ③ 操作数的寻址方式：反映了系统能寻址的最小单位（寻址单位）、寻址方式和表示。
- ④ 寄存器的构成定义：反映了通用寄存器和专用寄存器的数量、定义和使用方式。
- ⑤ 中断机构和异常：表示中断的类型、分级和中断响应硬件功能以及异常。
- ⑥ 存储体系和管理：包括主存储器、编址方式、最大可编址空间。
- ⑦ I/O 结构：包括 I/O 设备的连接方式；处理机、存储器与 I/O 设备间的数据传递方式和格式、传递的数据量及传递操作结束表示及出错指示等。
- ⑧ 机器工作状态的定义和切换：例如系统态和用户态等。
- ⑨ 信息保护：包括保护方式及有关的硬件支持等。

2. 计算机系统结构的内特性

计算机系统的外特性是由硬件和固件来加以实现的，但是它们本身也是由电路、逻辑门或寄存器传递级所组成，这些组成的描述通常很详细。对它们的抽象便成为计算机系统的内特性，也称为计算机组成，它实际上是计算机系统的逻辑实现。

前面提到的计算机外特性，即计算机系统结构，是从有关软件人员角度所看到的系统基本属性。计算机系统的设计人员所看到的基本属性，本质上是为了将有关软件人员所看到的基本属性加以逻辑实现的基本属性。这实际上就是内特性，因为它对有关软件人员来讲是看不到的。计算机系统的内特性所涉及的内容包括机器级的数据流和控制流的组成以及 CPU 内部和主存等部件的逻辑设计，着重于机器级各事件的排序方式与控制结构、各部件的功能以及各部件间的联系，因为它关心的主要问题是如何合理地实现分配给硬件的功能和性能指标。

计算机实现是指计算机组成的物理实现，它主要包括处理机、主存等部件的物理结构；器件的集成度和速度的确定；器件、模块、插件、底板的划分与连接；微组装及整机装配技术；专用器件的设计以及信号传输、电源、冷却方法等。它主要涉及器件技术和微组装技术。

3. 计算机系统的微系统结构——微外特性

它是由微程序编写者所看到的计算机的外部特性——逻辑结构和功能，把它作为一个抽象级，以定义硬件和固件（微代码）之间的界面。因此，微系统结构对之微程序员犹如计算机系统外特性对机器语言程序员一样。图 1.2 所示为计算机系统结构的内、外特性与微系统结构以及与寄存器传递级之间的关系。

微系统结构实际是描述处理器中的资源是以何种方式组成以及采用什么样的设计技术以达到所预期的性能价格比的。微系统结构实质上是对逻辑实现的规范说明，因此它是物理实现的抽象。

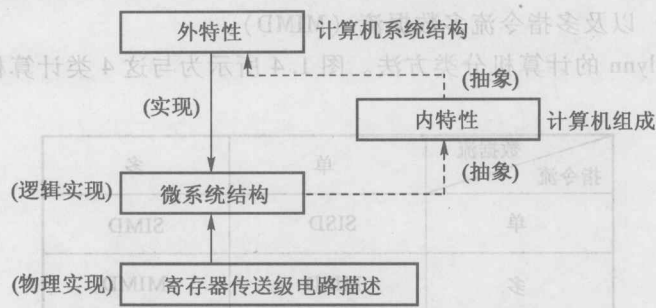


图 1.2 计算机内、外特性与微系统结构及寄存器传送级之间的关系

下面以具体实例来说明计算机系统外特性、内特性以及与物理实现的关系。例如，指令系统的确定属外特性，而指令的解释实现，如取指、译码、取数、运算、存结果等操作及其排序则属内特性。再如，指令可以按顺序方式执行，也可以按重迭或流水方式执行，而完成这些功能的具体电路器件的设计及装配技术等则是计算机实现。又如，对主存储器、主存容量与编址方式的确定属外特性范畴，而主存的带宽应为多少方可达到访问速度要求，譬如采用多模块交叉存储技术增加主存带宽等属于内特性，而选用什么样的存储器芯片来构成和组装成存储器则属计算机实现。

应该注意的是，由于外特性是对内特性的进一步抽象，因此两者之间的映射往往是一对多的关系，即某一外特性可以采用不同内特性方式来映射。而某一内特性与具体物理实现之间也往往存在一对多的关系。因此，计算机组成和它的具体实现可由设计者根据所需要的性价比及实现的难易程度在较大范围内加以选择。

以原 DEC 公司的计算机为例，VAX11/780 和 VAX8600 具有相同的系统结构，但两者具有不同的组成方式。而 VAX11/780 和 VAX11/785 两者不但有相同的系统结构，而且有相同的组成方式，但两者却具有不同的物理实现方式。VAX11/785 采用了改进的集成电路工艺以获取更快的时钟速率并在存储系统中做了一些小的改动。

1.1.2 计算机系统结构分类

研究计算机系统分类有助于了解各类系统的演变和它的基本属性。此外，对分类的研究有助于深化对某些特定系统的了解，以启发对新系统结构的探索。

1. 按“流”分类

计算机系统的分类方法有很多种，但目前最为流行的要数 Flynn 教授在 1966 年提出的按指令流和数据流多倍性概念进行分类的方法。这里的指令流是指机器执行的指令序列，而数据

流是指指令流所调用的数据序列。多倍性是指在机器中最受限制的（即瓶颈最严重的）部件上的处在同一执行阶段的可并行执行的最多指令或数据个数。按指令流和数据流两者的组合可将计算机系统划分成4类：单指令流单数据流（SISD）、单指令流多数据流（SIMD）、多指令流单数据流（MISD）以及多指令流多数据流（MIMD）。

图 1.3 所示为 Flynn 的计算机分类方法。图 1.4 所示为与这 4 类计算机系统相对应的基本框图。

数据流 \ 指令流	单	多
单	SISD	SIMD
多	MISD	MIMD

图 1.3 计算机系统的 Flynn 分类

