

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

# 计算机 系统结构

郑纬民 汤志忠 编著



清华大学出版社

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



教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

# 计算机系统结构

郑伟民 汤志忠 编著

清华大学出版社

**(京)新登字 158 号**

**内 容 简 介**

本书根据作者多年来从事“计算机系统结构”等课程的教学经验及有关科研成果,深入浅出地全面介绍了计算机系统结构的基本原理。内容包括计算机系统结构的基本概念、指令系统、存储系统、输入输出系统、标量处理机、向量处理机、互连网络、并行处理机和多处理机等。

本书是中央广播电视大学开放教育计算机科学与技术专业专升本教材,也可供其他大专院校及从事计算机科研开发的人员参考。

**版权所有,翻印必究。**

**本书封面贴有清华大学出版社激光防伪标签,无标签者不得销售。**

**图书在版编目(CIP)数据**

计算机系统结构/郑纬民,汤志忠编著. —北京:清华大学出版社,2000

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

ISBN 7-302-04237-3

I. 计… II. ①郑… ②汤… III. 电子计算机-系统结构-高等学校-教材 IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 88441 号

**出版者:** 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

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

**印刷者:** 清华大学印刷厂

**发行者:** 新华书店总店北京发行所

**开 本:** 787×1092 1/16 **印张:** 25.25 **字数:** 578 千字

**版 次:** 2001 年 2 月第 1 版 2001 年 3 月第 2 次印刷

**书 号:** ISBN 7-302-04237-3/TP·2490

**印 数:** 6001~12000

**定 价:** 29.80 元

## 序

我们正处在跨越世纪的门槛上,人类社会在一股股变革性力量的推动下发生着根本性的变化。知识经济时代的到来向我们显示,一个国家最重要的资源已经不再是土地、劳动力或资本,而是其国民的知识和创造力;国与国的竞争虽然常常表现为政治、经济或军事实力的较量,但归根到底已是一场教育和科技的竞争。换言之,国家的综合实力将主要由其国民的教育水平来决定。一时间,世界各国的校长们、跨国企业的巨头们乃至许多的政府首脑们都在纷纷议论 21 世纪的教育,以迎接知识经济的挑战。我们中华民族有着蜿蜒几千年的文明,为在世界民族之林重振雄风,再展辉煌,发出了时代的特强音:实施科教兴国,提高全民素质。从中央领导到广大群众,都对教育提出了更高的要求,寄予了更大的希望,同时也给予了更多的支持。人们在这方面的思想观念和实践探索正在以空前的速度发展着。

中国的高等教育已经走完了一个世纪的路程。已经过去的 20 世纪正是它从无到有、从小到大、由产生到发展的一段百年历史。中国人民在短短的数十年时间里构筑了资本主义国家好几百年才形成的高等教育体系,涌现出一批高水平的学校,培养了一大批高层次优秀人才,取得了辉煌的成就。但是在新时期,教育不适应现代化建设需要的矛盾不断显露,我国劳动者受教育水平普遍较低的现象无法面对新世纪的机遇和挑战,我国高等教育的发展现状也难以满足广大人民群众空前强烈的受教育愿望。一代伟人邓小平早在十年前就一针见血地指出,我们的最大失误是教育,一是放松了对青少年的思想道德教育,二是教育规模发展不够快。现在看来,这两个问题依然是症结所在。一个十二亿人口的泱泱大国,高等学校的毛入学率仅 10% 左右,实在很不相称。我国的高等教育已经面临着大力发展、高速发展、从根本上改变落后状态的紧迫问题。

令人欣慰和鼓舞的是中国有一所全世界最大的大学——中国广播电视大学,上百万的学生遍布在九百六十万平方公里的辽阔土地上。它突破传统教育在空间上的限制,不断减弱时间上的束缚,以覆盖面广、全方位为各类社会成员提供教育服务的优势,成为中国高等教育体系中的一个重要组成部分。二十多年来,它为实现高等教育大众化,为提高我国劳动者的整体素质,为变巨大的人口包袱为巨大的人力资源,以形成浩浩荡荡的高水平建设大军,发挥了不可磨灭的作用。最近,中央电大又有重大改革举措,进一步面向社会开展了“开放教育”等项试点工作,在教育思想、招生对象、培养模式、管理机制方面进行新的探索。尤其引人注目的是中央电大与国内的一些重点高校形成了紧密的合作关系,携手为我国现代远程教育开拓新路。重点高校有学科和教学上的优势,它们的加盟有利于电大提高教学质量、办出特色;而中央电大有很丰富的教育资源,有完整的办学系统,有一支富有经验的教学与管理队伍,特别是有较强的社会服务意识和人才市场意识,这对于需要进一步向社会开放的普通高校而言,又有许多值得学习和借鉴之处。我们完全有理由相信,中央电大和重点高校的结合,不仅可以在现阶段实现优势互补、资源共享,而且有

可能成长出一种符合我国国情发展教育的最具潜力的新型教育模式。

现在摆在我们面前的这套中央广播电视大学本科(专科起点)“计算机科学与技术”专业教材,就是中央电大和清华大学合作的产物。在开放教育试点启动之际,在计算机及其网络技术日新月异、其爆炸式发展和神话般应用使人们眼花缭乱、不知所措之时,在我国至少缺乏数十万计算机软件及网络技术人才的当口,这套教材像雪里送炭,像清风送爽,终于在人们的企盼和惊喜中问世了。它确实及时和解渴。教材的编者是清华大学计算机系一批学术水平高、教学经验丰富的教授,他们以知识、能力和素质的全面训练为目标,将教材的先进性、实用性和可读性融为一体。教材纲目清楚,重点突出,深入浅出,便于自学。书中每章有小结,章章有习题,有的还配有实验指导和习题解答,不仅对计算机专业学生适用,其他专业的学生也可以此入门。清华大学的老师们还准备为这套教材制作多媒体导读光盘和网络辅导教材,指明教学基本要求,区分应该熟练掌握和只需一般了解的内容,并进行重点难点分析和讲解。这全套的教材称得上是难得的好书。

对于中国广播电视大学我是颇有感情的,不只是因为它过去的功绩和带给人们未来的曙光,还因为我本人二十年前也曾参与过中央电大《电子技术基础》课程的教学工作。那时我收到许多电大学生热情洋溢的来信,强烈感受到他们对知识与教育的渴求,感受到他们学习的艰辛和坚韧不拔的毅力,同时也感受到了广大学生对我的信任和鼓励。当年的电大学生如今多数已成为我国经济建设和社会发展中的骨干,一些人后来获得了博士学位,有的已成为我国重点大学的教授。中央电大的成功实践已在社会上赢得了很好的声誉,而当前扩大教育规模、构建终身学习体系的社会呼唤又给电大今后的发展提供了新的难得的机遇。近年来,信息网络与多媒体技术突飞猛进,也使电大的远程教育形式跃上了现代化的新台阶。这次中央电大和清华大学合作,共同在计算机专业开放教育改革试点中付出了辛勤的劳动,播下了希望的种子。我期待着中央电大有更多的创新,更大的发展,更加充满活力。我也殷切希望电大的学生们为中华民族的强盛而自强不息,学有所成。

努力吧,中国广播电视大学一定能成为中国教育界一颗璀璨的明珠。

清华大学副校长、教授 胡东成

2000年8月于北京

# 目 录

<b>第一章 计算机系统结构的基本概念</b> .....	1
1.1 计算机系统结构 .....	2
1.1.1 计算机系统层次结构.....	2
1.1.2 计算机系统结构定义.....	4
1.1.3 计算机组成与实现.....	5
1.1.4 计算机系统结构的分类.....	6
1.2 计算机系统设计技术 .....	9
1.2.1 计算机系统设计的定量原理.....	9
1.2.2 计算机系统设计者的主要任务 .....	13
1.2.3 计算机系统设计的主要方法 .....	15
1.3 系统结构的评价标准.....	16
1.3.1 性能 .....	16
1.3.2 成本 .....	19
1.4 计算机系统结构的发展.....	22
1.4.1 冯·诺依曼结构 .....	22
1.4.2 软件对系统结构的影响 .....	24
1.4.3 价格对系统结构的影响 .....	26
1.4.4 应用对系统结构的影响 .....	27
1.4.5 VLSI 对系统结构的影响 .....	28
1.4.6 技术的发展对价格的影响 .....	28
1.4.7 算法和系统结构 .....	30
习题一 .....	32
<b>第二章 指令系统</b> .....	37
2.1 数据表示.....	37
2.1.1 数据表示与数据类型 .....	37
2.1.2 浮点数据表示 .....	39
2.1.3 浮点数尾数基值的选择 .....	44
2.1.4 浮点数格式的设计 .....	48
2.1.5 自定义数据表示 .....	50
2.2 寻址技术.....	56
2.2.1 编址单位 .....	57
2.2.2 零地址空间个数 .....	57

2.2.3	寻址方式 .....	59
2.2.4	间接寻址与变址寻址 .....	63
2.3	指令格式的优化设计 .....	66
2.3.1	指令的组成 .....	66
2.3.2	Huffman 编码法 .....	67
2.3.3	扩展编码法 .....	69
2.3.4	缩短地址码长度的方法 .....	71
2.3.5	指令格式设计举例 .....	72
2.4	指令系统的功能设计 .....	74
2.4.1	指令系统的完整性 .....	74
2.4.2	指令系统的性能 .....	78
2.4.3	复杂指令系统 .....	79
2.5	精简指令系统(RISC) .....	80
2.5.1	从 CISC 到 RISC .....	80
2.5.2	RISC 的定义与特点 .....	84
2.5.3	减少指令平均执行周期数(CPI)是 RISC 思想的精华 .....	85
2.5.4	RISC 的关键技术 .....	86
2.5.5	RISC 优化编译技术 .....	92
习题二	.....	93

<b>第三章</b>	<b>存储系统 .....</b>	<b>98</b>
3.1	存储系统原理 .....	98
3.1.1	存储系统的定义 .....	98
3.1.2	存储器的层次结构 .....	102
3.1.3	频带平衡 .....	103
3.1.4	并行访问存储器 .....	104
3.1.5	交叉访问存储器 .....	105
3.2	虚拟存储器 .....	108
3.2.1	虚拟存储器工作原理 .....	108
3.2.2	地址的映象与变换 .....	110
3.2.3	段式虚拟存储器 .....	111
3.2.4	页式虚拟存储器 .....	114
3.2.5	段页式虚拟存储器 .....	115
3.2.6	加快内部地址变换的方法 .....	117
3.2.7	页面替换算法 .....	120
3.2.8	提高主存命中率的方法 .....	124
3.3	高速缓冲存储器(Cache) .....	126
3.3.1	基本工作原理 .....	127

3.3.2	地址映象与变换方法	128
3.3.3	Cache 替换算法及其实现	136
3.3.4	Cache 系统的加速比	142
3.3.5	Cache 的一致性问題	144
3.3.6	Cache 的预取算法	146
3.4	三级存储系统	146
3.4.1	存储系统的组织方式	147
3.4.2	虚拟地址 Cache	148
3.4.3	全 Cache 技术	149
	习题三	150
<b>第四章</b>	<b>输入输出系统</b>	<b>155</b>
4.1	输入输出原理	155
4.1.1	输入输出系统的特点	155
4.1.2	基本输入输出方式	157
4.2	中断系统	162
4.2.1	中断系统的软硬件功能分配	162
4.2.2	中断屏蔽	164
4.3	通道处理机	168
4.3.1	通道的作用和功能	168
4.3.2	通道的工作过程	170
4.3.3	通道种类	171
4.3.4	通道中的数据传送过程	175
4.3.5	通道的流量分析	176
4.4	输入输出处理机	179
4.4.1	输入输出处理机的作用	179
4.4.2	输入输出处理机的种类	181
4.4.3	输入输出处理机的特点	182
	习题四	183
<b>第五章</b>	<b>标量处理机</b>	<b>187</b>
5.1	流水线技术	187
5.1.1	指令的重叠执行	187
5.1.2	流水线的表示方法	189
5.1.3	流水线的特点	190
5.1.4	流水线的性能分析	191
5.1.5	流水线最佳段数的选择	198
5.1.6	非线性流水线的调度技术	198



5.1.7	非线性流水线的优化调度方法	205
5.2	相关性分析技术	207
5.2.1	数据相关	207
5.2.2	控制相关	208
5.2.3	条件分支对流水线的影响	211
5.2.4	静态分支预测技术	212
5.2.5	动态分支预测技术	214
5.2.6	提前形成条件码	217
5.2.7	精确断点与不精确断点	218
5.3	动态调度技术	220
5.3.1	顺序流动与乱序流动	220
5.3.2	乱序流动方式中的数据相关	222
5.3.3	数据重定向	224
5.3.4	Tomasulo 动态指令调度方法	226
5.4	超标量处理机	228
5.4.1	基本结构	228
5.4.2	单发射与多发射	230
5.4.3	多流水线调度	233
5.4.4	资源冲突	237
5.4.5	超标量处理机性能	239
5.5	超流水线处理机	239
5.5.1	指令执行时序	240
5.5.2	典型处理机结构	240
5.5.3	超流水线处理机性能	243
5.6	超标量超流水线处理机	243
5.6.1	指令执行时序	244
5.6.2	典型处理机结构	245
5.6.3	超标量超流水线处理机性能	247
	习题五	249

<b>第六章</b>	<b>向量处理机</b>	<b>253</b>
6.1	向量处理的基本概念	253
6.1.1	什么是向量处理	253
6.1.2	向量处理方式	254
6.2	向量处理机的结构	255
6.2.1	存储器-存储器结构	257
6.2.2	寄存器-寄存器结构	261
6.3	提高向量处理机性能的方法	264

6.3.1	向量处理机系统结构的设计目标	264
6.3.2	提高向量处理机性能的常用技术	268
6.4	向量处理机实例	275
6.4.1	向量处理机的历史与现状	275
6.4.2	Cray Y-MP, C-90	278
6.4.3	Fujitsu VP2000 和 VPP500	280
6.4.4	向量协处理器	282
6.5	向量处理机的性能评价	285
	习题六	289
<b>第七章</b>	<b>互连网络</b>	<b>291</b>
7.1	互连网络的基本概念	291
7.1.1	互连网络的作用	291
7.1.2	互连函数	292
7.1.3	互连网络的特性和传输的性能参数	297
7.1.4	互连网络的种类	299
7.2	消息传递机制	312
7.2.1	消息寻径方式	312
7.2.2	死锁和虚拟通道	316
7.2.3	流控制策略	319
7.2.4	选播和广播寻径算法	323
	习题七	325
<b>第八章</b>	<b>并行处理机和多处理机</b>	<b>330</b>
8.1	并行处理机结构和实例	330
8.1.1	并行处理计算机模型	330
8.1.2	并行处理机的基本结构	332
8.1.3	并行处理机的特点	334
8.1.4	并行处理机实例	335
8.2	多处理机结构和实例	344
8.2.1	多处理机结构	344
8.2.2	多处理机系统的特点	345
8.2.3	多处理机性能模型	347
8.2.4	多处理机的 Cache 一致性	352
8.2.5	多处理机实例	361
	习题八	386
	<b>参考文献</b>	<b>391</b>

## 第一章 计算机系统结构的基本概念

自第一台电子计算机问世已经半个世纪了,它已经历了五次更新换代。第一代计算机(1945—1954年)将电子管和继电器存储器用绝缘导线互连在一起,由单个CPU构成,CPU用程序计数器和累加器顺序完成定点运算,采用机器语言或汇编语言,用CPU程序控制I/O。代表性系统有由John von Neumann, Arthur Burks和Herman Goldstine于1946年在普林斯顿大学研制成功的IAS计算机、由宾夕法尼亚大学莫尔学院于1950年制成的ENIAC、由IBM于1953年制造的IBM701计算机。

第二代计算机(1955—1964年)采用分立式晶体三极管、二极管和铁氧体的磁芯,用印刷电路将它们互连起来。采用了变址寄存器、浮点运算、多路存储器和I/O处理机。采用有编译程序的高级语言、子程序库、批处理监控程序。代表性系统有1959年制成的Univac LARC、60年代的CDC1604和1962年制成的IBM7030。

第三代计算机(1965—1974年)采用小规模或中规模集成电路和多层印刷电路。微程序控制在这一代开始普及。采用了流水线、高速缓存和先行处理机。软件方面采用多道程序设计和分时操作系统。代表性系统有IBM/360-370系列、CDC6600/7600系列、Texas仪表公司的ASC和Digital Equipment公司的PDP-8系列。

第四代计算机(1974—1991年)采用大规模或超大规模集成电路和半导体存储器,出现了用共享存储器、分布存储器或向量硬件选择的不同结构的并行计算机,开发了用于并行处理的多处理操作系统、专用语言和编译器,同时产生了用于并行处理或分布处理的软件工具和环境。代表性系统有VAX9000、CrayX-MP、IBM/3090VF和BBNTC-2000等。

第五代计算机(1991—现在)采用VLSI工艺更加完善的高密度、高速度处理机和存储器芯片。它的最重要特点是进行大规模并行处理,采用可扩展的和容许时延的系统结构。代表性系统有Fujitsu的VPP500、Cray Research的MPP、Thinking Machines公司的CM-5、Intel超级计算机系统Paragon、SGI的Origin 2000和Sun公司的10000服务器。

前三代中,每一代持续大约十年,第四代的时间跨度约为十五年。现在进入第五代。我们可以看到,换代的标志主要有两个:第一是计算机的器件。器件发生了根本性的变化,经电子管、晶体管发展到集成电路,而集成电路又由小规模、中规模,到大规模和超大规模的阶段。器件的更新,其速度、功能、可靠性的不断提高和成本的不断降低,是计算机发展的物质基础。因此,器件的换代是计算机换代的最突出的标志。第二是系统结构的特点。系统结构不断改进,许多重要概念不断提出并且得到实现。例如变址寄存器概念、通用寄存器概念、浮点数据表示概念、程序中断概念、输入输出通道概念、间接寻址概念、虚拟存储器概念、Cache存储器概念、系列化概念、微程序设计技术等。很明显,如果用大规模集成电路实现早期的计算机系统结构,人们并不会认为它是第四代计算机。因为第四代计算机在系统结构上较之早期的计算机已经有很大的改进和发展。因此,系统结构

方面的特点同样是计算机换代的重要标志。

回顾计算机的发展历史,可以看出,计算机系统性能的不断提高主要靠器件的变革和系统结构的改进。恩斯洛(P. H. Enslow)曾经比较了1965—1975年这十年间,器件延迟时间和计算机指令时间的关系。结果表明,这十年间器件延迟时间降低至原来的十分之一,但计算机的指令时间却是原来指令执行时间的百分之一。这种情况在计算机近年来的发展中变得更加明显。如何最合理地利用新器件,最大限度地发挥其潜力,设计并构成综合性指标最佳的计算机系统,单纯依靠器件变革是不能解决的,还要靠计算机系统结构上的改进。

这一章主要介绍什么是计算机系统结构,计算机系统结构和技术有什么关系,计算机系统结构的评价标准是什么,高性能计算机系统的技术是什么。本章的重点是:

- (1) 计算机系统层次结构,系统结构定义,计算机组成定义,计算机实现定义,系统结构、组成与实现的三者关系;
- (2) 透明性,局部性原理,MIPS定义,MFLOPS定义;
- (3) Amdahl定律;
- (4) CPU性能公式。

## 1.1 计算机系统结构

### 1.1.1 计算机系统层次结构

计算机系统由硬件/器件和软件组成,按功能划分成多级层次结构,如图1.1所示。图中每一级各对应一种机器,其作用和组成如图1.2所示。在这里,“机器”只对一定的观察者而存在。它的功能体现在广义语言上,能对该语言提供解释手段,如同一个解释器,然后作用在信息处理和对象上。在某一层次的观察者看来,他只是通过该层次的语言来了解和使用计算机,不必关心内层的那些机器是如何工作和如何实现各自功能的。

图1.1中的第0级机器由硬件实现,第1级机器由微程序(固件)实现,第2级至第6级机器由软件实现。我们称由软件实现的机器为虚拟机器,以区别于由硬件或固件实现的实际机器。

第0级和第1级是具体实现机器指定功能的中央控制部分。它根据各种指令操作所需要的控制时序,配备一套微指令,编写出微程序,控制信息在各寄存器之间的传送,这就是第1级机器。实现这些微指令本身的控制时序只需要很少的逻辑线路,可采用硬联逻辑实现,它就是第0级机器,是机器的硬件内核。

第2级是传统机器语言机器。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编写的程序由第1级的微程序进行解释。

第3级是操作系统机器。这级的机器语言中的多数指令是传统机器的指令,如算术运算、逻辑运算和移位等指令。此外,这一级还提供操作系统级指令,例如打开文件、读/写文件、关闭文件等指令。用这一级语言编写的程序,即那些与第2级指令相同的指令直接由微程序实现。操作系统级指令部分由操作系统进行解释。操作系统是运行在第2级

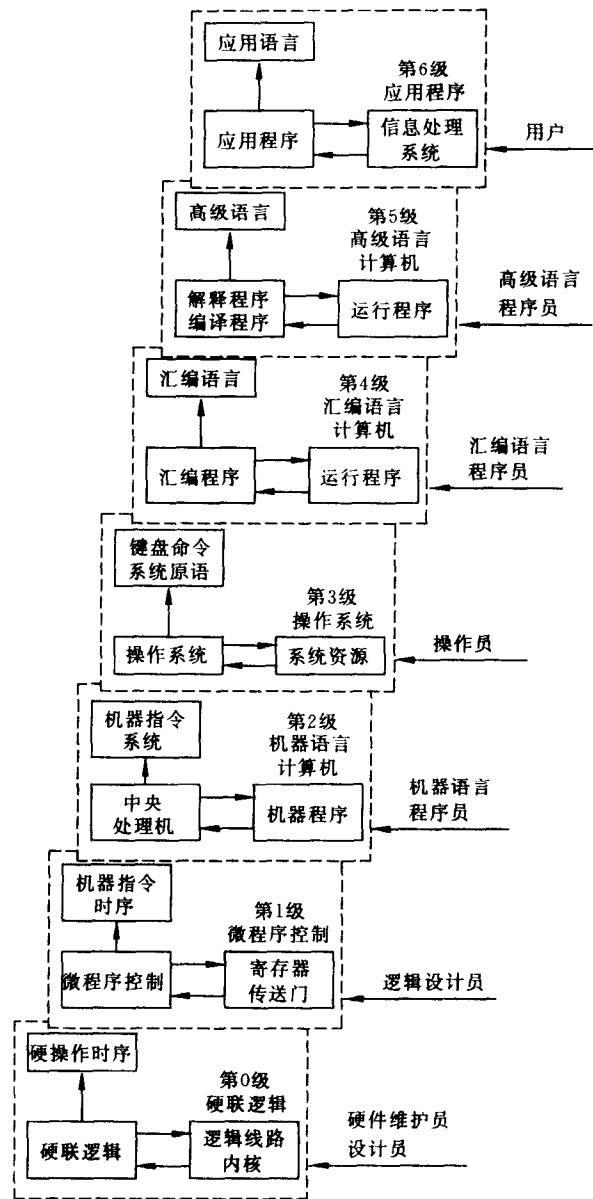


图 1.1 计算机系统层次结构

上的解释程序。

第 4 级是汇编语言机器。这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第 3 级或第 2 级语言,然后再由相应的机器进行解释。完成翻译的程序叫作汇编程序。

第 5 级是高级语言机器。这级的机器语言就是各种高级语言。用这些语言所编写的程序一般是由编译程序翻译到第 4 级或第 3 级上的语言,个别的高级语言也用解释的方

法实现。

第6级是应用语言机器。这级的机器语言是应用语言。这种语言使非计算机专业人员也能直接使用计算机,只需在用户终端用键盘或其他方式发出服务请求就能进入第6级的信息处理系统。

从学科领域来划分,大致可以认为第0至第1级是计算机组织与结构讨论的范围,第3至第5级是系统软件,第6级是应用软件。但是,严格说起来又不尽然,它们之间仍有

交叉。例如,第0级要求一定的数字逻辑基础;第2级涉及汇编语言程序设计的內容;第3级与计算机系统结构密切相关。在特殊的计算机系统中,有些级别可能不存在。

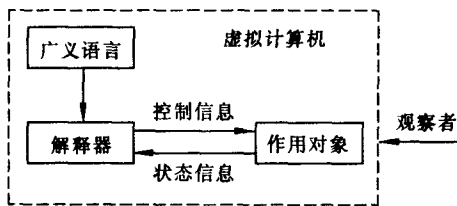


图 1.2 机器的作用和组成

把计算机系统按功能划分成多级层次结构,首先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。其次有利于理解各种语言的实质

及其实现。最后还有利于探索虚拟机器新的实现方法,设计新的计算机系统。

### 1.1.2 计算机系统结构定义

“计算机系统结构”这个名词来源于英文 computer architecture,也有译成“计算机体系结构”的。Architecture 这个字原来用于建筑领域,其意义是“建筑学”、“建筑物的设计或式样”,它是指一个系统的外貌。60年代这个名词被引入计算机领域,“计算机系统结构”一词已经得到普遍应用,它研究的内容不但涉及计算机硬件,也涉及计算机软件,已成为一门学科。但对“计算机系统结构”一词的含义仍有多种说法,并无统一的定义。

计算机系统结构这个词是 Amdahl 等人在 1964 年提出的。他们把系统结构定义为由程序设计者所看到的一个计算机系统的属性,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。按照计算机层次结构,不同程序设计者所看到的计算机有不同的属性。使用高级语言的程序员所看到的计算机属性主要是软件子系统和固件子系统的属性,包括程序语言以及操作系统、数据库管理系统、网络软件等用户界面。Amdahl 等人提出的系统结构定义中的程序设计者是指为机器语言或编译程序设计者所看到的计算机属性,是硬件子系统的概念结构及其功能特性,包括机器内的数据表示,即硬件能直接辨认和处理的那些数据类型;寻址方式,包括最小寻址单元和地址运算等;寄存器定义,包括操作数寄存器、变址寄存器、控制寄存器等的定义、数量和使用方式;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;中断机构,包括中断的类型和中断响应硬件的功能等;机器工作状态的定义和切换,如管态和目态等;输入输出结构,包括输入输出的连结方式,处理机/存储器与输入输出设备间数据传送的方式和格式、传送的数据量以及输入输出操作的结束与出错标志等;信息保护,包括信息保护方式和硬件对信息保护的支持等等。这些即是程序员为了使其所编写的程序能在机器上正确运行,需要了解和遵循的计算机属性。当然不包括基本的数据流、控制流、逻辑设计和物理实现等。

在计算机技术中,一种本来存在的事物或属性,但从某种角度看似乎不存在,称为透

明性现象。通常,在一个计算机系统中,低层机器级的概念性结构和功能特性,对高级语言程序员来说是透明的。由此看出,在层次结构的各个级上都有它的系统结构。

计算机系统结构作为一门学科,主要研究软件、硬件功能分配和对软件、硬件界面的确定,即哪些功能由软件完成,哪些功能由硬件完成。

关于计算机系统结构这一概念,至今有各种各样的理解,很难有一个通用的定义。在下节讨论计算机组成和实现后,我们还要给出另一些定义。

### 1.1.3 计算机组成与实现

计算机组成的任务是在计算机系统结构确定分配给硬件子系统的功能及其概念结构之后,研究各组成部分的内部构造和相互联系,以实现机器指令级的各种功能和特性。这种相互联系包括各功能部件的配置、相互连接和相互作用。各功能部件的性能参数相互匹配,是计算机组成合理的重要标志,因而相应地就有许多计算机组织方法。例如,为了使存储器的容量大、速度快,人们研究出层次存储系统和虚拟存储技术。在层次存储系统中,又有高速缓存、多模块交错工作、多寄存器组和堆栈等技术。为了使输入输出设备与处理机间的信息流量达到平衡,人们研究出通道、外围处理机等方式。为了提高处理机速度,人们研究出先行控制、流水线、多执行部件等方式。在各功能部件的内部结构研究方面,产生了许多组合逻辑、时序逻辑的高效设计方法和结构。例如,在运算器方面,出现了多种自动调度算法和结构等。

由此可见,计算机组成是计算机系统结构的逻辑实现,包括机器内部的数据流和控制流的组成以及逻辑设计等。计算机组成的设计是按所希望达到的性能价格比,最佳、最合理地把各种设备和部件组成计算机,以实现所确定的计算机系统结构。一般计算机组成设计包括数据通路宽度的确定、各种操作对功能部件的共享程度的确定、专用功能部件的确定、功能部件的并行性确定、缓冲器和排队的确定、控制机构的设计、可靠性技术的确定等。对传统机器程序员来说,计算机组成的设计内容一般是透明的。

计算机实现是指计算机组成的物理实现。它包括处理机、主存等部件的物理结构,器件的集成度和速度,信号传输,器件、模块、插件、底板的划分与连接,专用器件的设计,电源、冷却、装配等技术以及有关的制造技术和工艺等。

计算机系统结构、计算机组成和计算机实现是三个不同的概念。系统结构是计算机系统的软、硬件的界面;计算机组成是计算机系统结构的逻辑实现;计算机实现是计算机组成的物理实现。它们各自包含不同的内容,但又有紧密的关系。

我们还应看到系统结构、组成和实现所包含的具体内容是随不同机器而变化的。有些计算机系统是作为系统结构的内容,其他计算机系统可能是作为组成和实现的内容。开始是作为组成和实现提出来的设计思想,到后来就可能被引入系统结构中。例如高速缓冲存储器一般是作为组成提出来的,其中存放的信息全部由硬件自动管理,对程序员来说是透明的。然而,有的机器为了提高其使用效率,设置了高速缓冲存储器的管理指令,使程序员能参与高速缓冲存储器的管理。这样,高速缓冲存储器又成为系统结构的一部分,对程序员来说是不透明的。

Amdahl 等人的计算机系统结构定义的主要内容是指令系统及其执行模型。根据这

个定义,一个系列机中不同档次的机器有相同的系统结构。Amdahl 等人定义系统结构时认为只要指令系统兼容就能保证程序正确运行。由于程序的执行要依赖于程序库、操作系统和其他 Amdahl 等人的系统结构定义中没有涉及的因素,这要求操作系统接口等其他层次的标准化。同时,由于 VLSI 的迅速发展及其成本急剧下降,有些系列机推出有新指令的机器,例如 24 位地址的 IBM 360 和 370 系统发展为 31 位地址的 370xA 系统,16 位地址的 PDP-11 发展为 32 位地址的 VAX 系列。随着新器件的出现,当今计算机设计者面临的问题与 10 年前大不相同,所以我们应当把计算机系统结构定义得更宽一些,除了 Amdahl 等人定义的内容外,还应包括功能模块的设计。也就是说,计算机系统结构、计算机组成、计算机实现之间的界限越来越模糊了。

#### 1.1.4 计算机系统结构的分类

研究计算机系统分类方法有助于人们认识计算机的系统结构和组成的特点,理解系统的工作原理和性能。

通常把计算机系统按其性能与价格的综合指标分为巨型、大型、中型、小型、微型等。但是,随着技术的不断进步,各种型号的计算机性能指标都在不断进步,以至于过去的一台大型计算机的性能甚至于还比不上今天的一台微型计算机,而用过去一台大型计算机的价钱,今天却能够买一台性能指标高许多倍的新式大型计算机。可见按巨、大、中、小、微来划分的绝对性能标准是随时间变化而变化的。

计算机系统还可以根据其面向应用领域的不同性质而进行分类。一般说来,计算机都是作为通用系统进行设计的,但是,在用户编写应用程序时,却都带有专用性质。为了解决这个矛盾,采取的办法有:灵活地改变系统配置,包括内存容量、外围设备品种和数量等;允许适应特殊环境的要求采取不同的物理安装;增加处理不同数据结构的能力,如浮点、字符串、快速傅里叶变换等;提供多种可用的语言和操作系统,以适应批处理、分时、实时、事务处理等不同需要。所以按用途分类可以分为科学计算、事务处理、实时控制、家用等计算机。

按处理机个数和种类分,计算机系统又可分为单处理机、多处理机、并行处理机、关联处理机、超标量处理机、超流水线处理机、SMP(对称多处理机)、MPP(大规模并行处理机)和机群系统等。

下面再介绍三种常用的分类方法。

##### 1. Flynn 分类法

1966 年 M. J. Flynn 提出了如下定义:

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,包括输入数据和中间结果。

多倍性(multiplicity)——在系统最受限制的元件上同时处于同一执行阶段的指令或数据的最大可能个数。

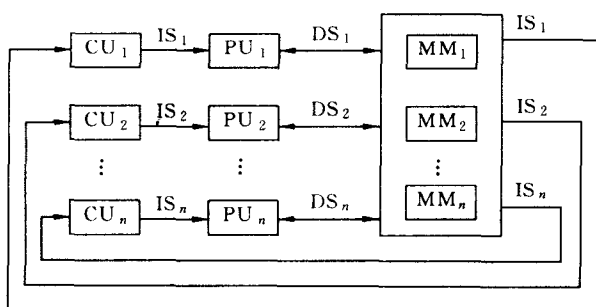
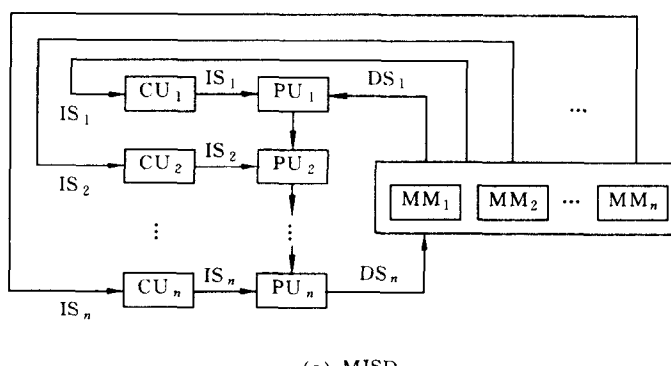
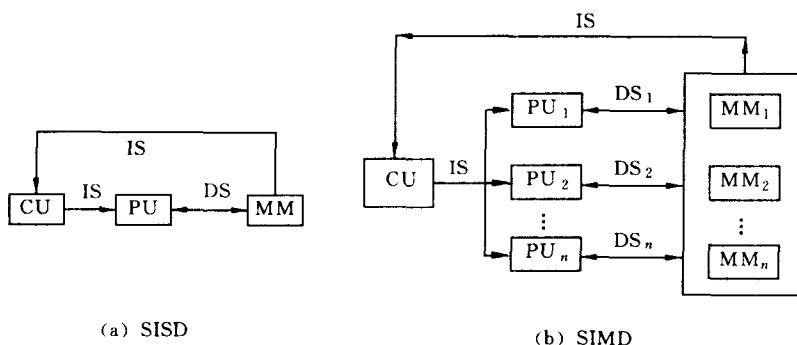
同时,他按照指令流和数据流的不同组织方式,把计算机系统的结构分为以下四类:

(1) 单指令流单数据流 SISD(Single Instruction stream single Datastream);



- (2) 单指令流多数据流 SIMD(Single Instruction stream Multiple Datastream);
- (3) 多指令流单数据流 MISD(Multiple Instruction stream Single Datastream);
- (4) 多指令流多数据流 MIMD(Multiple Instruction stream Multiple Datastream)。

对应于这四类计算机的基本结构框图如图 1.3 所示。SISD 是传统的顺序处理计算机。SIMD 以阵列处理机或并行处理机为代表。MISD 在实际上代表何种计算机,存在着不同的看法,有的文献把流水线结构机器看作是 MISD 结构。多处理机属于 MIMD 结构。



CU: 控制部件 PU: 处理部件 MM: 存储器模块 IS: 指令流 DS: 数据流

图 1.3 Flynn 分类法各类机器结构