

6.52

715.62
Z-101

计算机系统结构教程

张昆藏 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

计算机系统结构教程/张昆藏编著. —北京:国防工业出版社, 2001. 10

ISBN 7-118-02622-0

I. 计... II. 张... III. 电子计算机—系统结构—教材 IV. TP303

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 046686 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京奥隆印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 17¼ 397 千字

2001 年 10 月第 1 版 2001 年 10 月北京第 1 次印刷

印数:1—3500 册 定价:24.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

前 言

自第一台电子计算机问世以来,半个多世纪已经过去了。半导体集成电路技术的迅猛发展和计算机应用广泛深入到社会生活各个领域,推动着计算机工业高速发展。这种高速发展反映在计算机体系结构领域中,有三点变化引人注目:

一是 20 世纪 70、80 年代大中型计算机采用的主要系统结构技术,如高速缓存、虚拟存储管理、流水线、超标量和超流水、转移预测、寄存器别名、超长指令字等等,都已移入到处理器的微体系结构中。先进的 RISC 处理器已实现了动态执行技术、多媒体数据并行处理技术、断定执行和数据预装技术。更先进的 64 位处理器已经问世。

二是 PC/工作站已占据了计算机市场的主导地位。过去只被看成大型主机轻骑兵的个人计算机,不经意间竟成了主角。主要为 PC/工作站提供芯片的 Intel 公司和提供 OS 软件的 Microsoft 公司,分别已成为世界上最大的芯片厂商和软件厂商。难怪美国一家计算机公司总裁惊呼:“计算机工业正在被桌面世界所控制,并且谁控制了桌面世界,谁就占据了给计算机其它领域制定规矩的最佳位置。”

三是我们已步入了网络信息时代。先进的计算机网络技术与先进的 RISC 处理器技术构成了并行计算机发展的坚实基础。随着科学技术进步,对大型计算问题求解和大型数据库管理的需求猛增,这又拉动了并行计算机的发展。其中,尤以 CC-NUMA 多处理器和 workstation 机群系统呈现出强劲的发展势头,一度曾被冷落的 MPP 又呈重新崛起之势。

基于上述的观察,本书在介绍当代计算机系统结构的基本概念、原理及实现技术时,努力突出这三个发展趋势。除第 1 章绪论之外,全书可分成如下三个部分:

第一部分,由第 2、第 3 章构成。主要以 Intel Pentium 系列处理器为实例代表,介绍当代微处理器的先进体系结构,强调指令级并行性的实现技术。

第二部分,由第 4 章构成。以 Pentium PC 为实例代表,介绍总线连接型 SMP 的系统结构,强调当代总线技术、维护 cache 一致性的监听协议以及多处理器环境下的中断处理技术。本章有承上启下的作用,SMP 既是微处理器的具体运用又是并行计算机的基本构件。

第三部分由第 5、6、7、8 章构成。主要以 Enterprise 10000、C_m^{*}、Dash、Origin 2000、NUMA-Q、SP-2、T3E、Option Red、Ivy、TreadMarks、Lind、Orca 等系统为实例代表,介绍多处理器、多计算机、DSM 系统这些并行计算机的先进体系结构,强调进程级并行性的实现技术。第 5 章成为此部分的导论篇,它介绍了互连网络(ICN)和并行编程模型。最后,第 8 章以 DSM 系统为连贯点对多处理器与多计算机进行了比较和汇合。

可见,本教程以并行处理为主线来组织内容。

本书内容新颖、语言流畅、并配有大量图、表,许多章节可以以学生自学为主。根据学校具体情况,本教程可安排在 60~80 学时讲授完毕。书后附有习题,供教师选择布置。

下面再对本教程的两点处理予以说明:

1. 有的计算机系统结构书籍用不少篇幅介绍数据流计算机,但本书未仿效。笔者认

为数据流计算机虽是计算机系统结构发展的方向之一,但目前仍处于研发阶段,成型机很少,离商品化还有相当长的距离。故本书仅在绪论中介绍数据流计算机的基本概念,尔后不再涉及它。对于面向专门问题或专门算法的阵列处理机,本书也是以同样态度来处理。有限的学时内,应以讲述绝大多数人赖以编程的平台和已卓见成效的最新技术进展为主,有的内容不得不予删、减。

2. 并行计算机系统结构、计算机网络和分布式操作系统,三门学科联系紧密并相互渗透。为此,本书以附录的形式提供了第9章:计算机网络和分布式系统简介。这便于读者查阅前面各章中所引用的计算机网络和分布式操作系统的知识,也使计算机系统结构的知识范畴更清晰、更明确。虽然第9章不作为讲授内容,但对于不单独开设“分布式系统”课程的学校,教师若以附录内容为基础开设一些讲座,可使学生进一步明确并行计算机系统与分布式系统的区别与联系。

在努力实现信息技术的跨越式发展方面,计算机学科教材的更新尤为重要。笔者在主译世界著名计算机教材精选之一“计算机组织与结构”第4版(清华大学版,1999)和第5版(电子工业版,2001)的过程中,深有体会。国外这些著名教材几乎3年一更新,总是在追逐当代主流技术并将最新成就融入教材之中。作为一名高校教师,笔者也曾在教材改革上做过一些尝试和努力,其中一本操作系统书籍曾出现销售10万册的好成绩。这说明,广大读者迫切需要的是能将计算机科学理论与当代实际应用紧密结合的新书。

在国防工业出版社的热情支持下,本着学习先进技术、推广先进技术的宗旨,笔者编写了本书。但愿它能对广大读者有所帮助。

参与本书资料整理的还有杨厚俊、郭振波、张公敬、刘翠英、李桂芬、宋明玉、李潼、李涛等同志,在此一并表示感谢。

限于笔者的经验与水平,书中难免有错误和不当之处,敬请读者予以批评指正。

张昆藏

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 计算机系统结构基本概念	1
1.1.1 计算机系统结构、组成与实现	1
1.1.2 计算机系统结构的发展	2
1.1.3 计算机系统结构的分类	4
1.2 个人计算机和 workstation	7
1.2.1 何谓个人计算机/workstation	7
1.2.2 Intel x86 处理器系列	8
1.2.3 PC 总线技术	10
1.3 并行计算机	13
1.3.1 并行计算机系统分类	13
1.3.2 并行性、可扩展性和可编程性	18
1.3.3 并行计算机系统性能	20
第 2 章 处理器结构技术	24
2.1 CISC 与 RISC 结构	24
2.1.1 RISC 的提出	24
2.1.2 RISC 的特征	26
2.1.3 RISC 与 CISC 的竞争	29
2.2 指令流水线结构	29
2.2.1 流水线导论	30
2.2.2 指令流水线机制	33
2.2.3 转移处理技术	35
2.2.4 数据冒险及其处理技术	39
2.3 超标量指令流水线结构	43
2.3.1 超标量流水线与超流水线	43
2.3.2 超标量流水线的发射策略	45
2.3.3 实例:88110 处理器的超标量流水线	48
2.4 高速缓存技术	52
2.4.1 cache 导论	52
2.4.2 映射方式	54
2.4.3 替换策略和写策略	59
2.4.4 Look-through 与 Look-aside 结构	62
第 3 章 Pentium 系列处理器结构	64

3.1 Pentium 处理器结构	64
3.1.1 Pentium 的工作模式和寄存器组	64
3.1.2 Pentium 处理器核心结构	71
3.1.3 U,V 指令流水线	76
3.1.4 转移目标缓冲器 BTB	79
3.2 Pentium Pro、Pentium II/III 处理器结构和性能	81
3.2.1 由 Pentium Pro 到 Pentium II/III	81
3.2.2 iCOMP Index 3.0	85
3.3 实现动态执行的 Pentium II/III 核心结构	87
3.3.1 动态执行技术概述	87
3.3.2 Pentium II/III 的双独立总线结构	89
3.3.3 Pentium II 超标量流水线及其核心结构	90
3.4 单指令流多数据流技术	93
3.4.1 MMX 技术	93
3.4.2 MMX 应用举例	98
3.4.3 SSE 技术	100
第 4 章 Pentium PC 系统结构	104
4.1 Pentium PC 主板结构	104
4.1.1 430 芯片组和早期 Pentium PC 的主板结构	104
4.1.2 440 芯片组和当代 Pentium PC 的主板结构	106
4.2 处理器总线	110
4.2.1 Pentium 处理器总线	111
4.2.2 Pentium Pro 处理器总线	114
4.3 PCI 总线	117
4.3.1 PCI 总线结构	117
4.3.2 PCI 总线周期操作	118
4.3.3 PCI 总线仲裁	121
4.4 总线连接型 SMP 的 cache 一致性	121
4.4.1 MESI 协议	122
4.4.2 Pentium L1 cache MESI 协议	125
4.5* 高级可编程中断控制子系统	130
4.5.1 APIC 子系统的组成	131
4.5.2 APIC 子系统的工作过程	133
4.5.3 APIC 子系统的中断类型	136
第 5 章 并行计算机的通信结构	142
5.1 ICN 的组成和类型	142
5.1.1 ICN 的基本部件	142
5.1.2 静态互连网络	144
5.1.3 动态互连网络	146

5.2	ICN 的消息传送	148
5.2.1	消息格式和寻径方式	149
5.2.2	寻径算法	150
5.2.3	流量控制	153
5.3	ICN 的通信时延问题	156
5.3.1	ICN 性能指标	157
5.3.2	时延的减少和隐藏技术	158
5.4	并行编程模型及其通信抽象	160
5.4.1	并行编程模型	160
5.4.2	通信抽象	161
第 6 章	共享存储器的多处理机	164
6.1	UMA 和 NC-NUMA 多处理机	164
6.1.1	Sun Enterprise 10000 多处理机	165
6.1.2	C_m^* 多处理机	166
6.2	维护 cache 一致性的目录协议	167
6.2.1	目录协议的特点	167
6.2.2	Stanford Dash 多处理机	168
6.2.3	目录协议的类型	173
6.3	存储器一致性模型	175
6.3.1	顺序一致性	175
6.3.2	PRAM 一致性和处理器一致性	177
6.3.3	弱一致性和释放一致性	179
6.4	CC-NUMA 多处理机	181
6.4.1	SGI Origin 服务器	182
6.4.2	Origin 服务器的目录协议	185
6.4.3	Sequent NUMA-Q 多处理机	187
6.4.4	NUMA-Q 的目录协议	191
6.4.5	COMA 模型的多处理机	194
第 7 章	消息传递的多计算机	197
7.1	大规模并行处理机 MPP	197
7.1.1	IBM SP-2 系统	198
7.1.2	Cray T3E 系统	201
7.1.3	Intel/Sandia Option Red 系统	202
7.2	机群系统	204
7.2.1	机群系统的目标、分类和配置	205
7.2.2	服务器机群	206
7.2.3	COW 的通信网络	208
7.3	消息传递软件包	210
7.3.1	消息传递方式	211

7.3.2 PVM 软件包	212
7.3.3 MPI 软件包	214
第 8 章 应用级共享存储器的多计算机	216
8.1 基于分页的 DSM 系统	216
8.1.1 SVM 的存取控制	216
8.1.2 使用宽松的存储器一致性模型	219
8.1.3 多写者协议	220
8.2 基于对象的 DSM 系统	221
8.2.1 对象和对象空间	221
8.2.2 Linda	222
8.2.3 Orca	225
8.3 DSM 系统与多处理机的比较	228
第 9 章 计算机网络和分布式系统简介	232
9.1 高速局域网	232
9.1.1 快速以太网	232
9.1.2 FDDI	234
9.1.3 HiPPI 和光纤通道	237
9.2 ATM 网络	239
9.2.1 ATM 网络基本技术	239
9.2.2 ATM 网络体系结构	241
9.3 网络应用的编程模式	243
9.3.1 客户 - 服务器模型	244
9.3.2 Socket API	246
9.4 远过程调用 RPC	251
9.4.1 RPC 的基本操作	251
9.4.2 动态绑定	253
9.5 分布式操作系统举例	254
9.5.1 DCE 的基本结构	255
9.5.2 DCE 的线程	257
习题	261
参考文献	267

第 1 章 绪 论

本书以 PC/工作站、并行计算机系统为主体,介绍当代计算机系统结构的原理与技术。鉴于此,本章先介绍计算机系统结构的基本概念,然后介绍 PC 的进展,最后介绍阵列处理机、多处理机(UMA、NUMA、COMA)和多计算机(MPP、COW)的系统结构基本特征及性能指标。

1.1 计算机系统结构基本概念

自第一台电子计算机问世以来,半个世纪已经过去了。随着科学技术的进步,计算机技术应用领域的扩大与深入,尤其是 VLSI 技术新进展、算法与软件研究新成果的实现,使计算机系统性能得到大幅度提高,计算机系统结构也发生了重大变革。那么,什么是计算机系统结构?当今它又朝着什么方向发展?本节对此予以简要介绍。

1.1.1 计算机系统结构、组成与实现

计算机系统结构(computer architecture),也称为计算机体系结构。1964 年,由 Amdahl 等人首先提出,并为计算机系统结构下了定义,即“程序员所看到的系统的一些属性:概念性的结构和功能上的表现,这些属性既不同于数据流和控制的组织,也不同于逻辑设计和物理实现”。按照介绍 IBM360 系统时的计算机技术水平而言,他们所指的程序员是使用机器语言或汇编语言的程序设计人员,而不是高级语言程序员。因此,所看到的计算机属性是硬件子系统的概念结构及功能特性,包括指令系统和实现指令系统的硬件,如寄存器定义和组织、存储器的组成和寻址方式、数据类型及表示、机器工作的状态及切换、中断以及输入输出机制等。

计算机组成(computer organization),也常称为计算机组织。在计算机系统结构确定了分配给硬件子系统的功能及其概念之后,计算机组成的任务是研究硬件子系统各部分的内部结构和相互联系,以实现机器指令级的各种功能和特性。它包括:数据通道宽度的确定,各种功能部件的相互连接及性能参数的匹配,功能部件的并行性确定,控制机构的设计,缓冲器和排队的使用,可靠性技术的采用等。

计算机实现(computer implementation),指的是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、速度和信号,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。

总之,按照上述的划分,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。计算机系统结构是指令系统及其执行模型;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和采用不同的技术,但又有紧密的关系。

但是,有两点需要注意:

一是计算机系统结构、组成和实现之间的界限变得越来越模糊了。尤其是严格区分计算机系统结构和组成已不太可能,也没有太大的实际意义。随着 VLSI 技术的进步,新器件的不断涌现,当今计算机系统结构的设计所面临的问题与 Amdahl 所处的时期大不相同,就是与 10 年前也大不相同。例如,10 年前系统配置几十至几百 KB 的内存就很不错了,某些指令系统的设计中甚至有对存储器操作数直接进行加减的指令,不惜牺牲执行速度来珍惜宝贵、有限的内存资源。现在,存储器芯片的集成度大幅度提高而价格急剧下降,内存容量已不是计算机系统结构设计的主要问题了;如何组织存储器以提高存取速度,如何保证 CPU-内存之间的通道不致成为系统性能的瓶颈,是当代计算机系统结构设计必须考虑的问题。现在,一般已将功能模块设计移入计算机系统结构的考察范畴之内。

二是我们介绍了计算机系统结构、组成和实现三者之间的关系,但不要认为计算机系统结构设计就是硬件设计,两者不能混淆。操作系统、编译程序以及高级语言的发展都对计算机系统结构的设计有重要影响。计算机系统结构设计是在功能这一层次上考虑问题,当然要涉及到硬件,但它不是只包括硬件设计。例如,存储器管理功能可以由硬件和软件共同实现,它们之间的分工取决于当前硬件和软件的可用性、性能和价格。在 VLSI 发展的初期,存储器管理功能一般由软件实现;现在,存储器控制芯片已能实现存储器管理算法并自动维护存储器与高速缓存的一致性。因此,计算机系统结构设计的一个主要任务是研究软件、硬件功能分配和对软件、硬件界面的确定。

总之,计算机系统结构完成各功能模块设计并把这些功能模块互连成一个完整的计算机系统,这些功能模块可以是硬件、软件或者两者的混合。它向编译程序、操作系统设计人员提供硬件子系统的概念结构及其功能特性。计算机系统结构的属性和特征与操作系统的属性和特征,一起构成计算机软件运行的平台。

1.1.2 计算机系统结构的发展

世界第一台通用电子数字计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Computer),于 1946 年在美国宾夕法尼亚大学建成。ENIAC 输入和更换程序特别繁冗。对此,ENIAC 课题组的顾问、著名数学家冯·诺依曼提出将程序的指令与指令所操作的数据一起存于存储器的概念。这个著名的存储式程序(stored-program)概念,成为计算机工作的基本机理。这一概念也被图灵大约同时期提出。后来,冯·诺依曼在普林斯顿主持设计实现这一思想的 IAS 计算机,但迟至 1952 年才予完成。世界上第一台存储式程序计算机是 1949 年在英国剑桥大学建成的 EDSAC (Electronic Delay Storage Automatic Calculator) 计算机,它使用 3000 只电子管,每秒钟能完成 700 次加法运算。1953 年 IBM 公司制造出第一台电子存储式程序的商用计算机。

1. 冯·诺依曼机器

50 年来,计算机系统结构已取得重大进展,但大多数机器的计算机系统结构仍没能摆脱冯·诺依曼机器结构的范畴。冯·诺依曼型机器由运算器、控制器、存储器和输入/输出设备组成,如图 1.1 所示。它的计算机系统结构的基本特点可归纳为以下几点:

第一,采用存储程序方式,程序的指令和数据一起存放到存储器。存储器由线性编址的单元组成,每个单元的位数是固定的。

第二,指令由操作码和地址码组成,操作码指定操作类型,地址码指明操作数地址。操作数的数据类型由操作码确定,操作数本身不具有数据类型标志(如是定点数,还是浮点数等)。

第三,存储器中的指令和数据,从它们本身是区别不了的,它们都是以二进制编码表示的。只不过,指令的地址应由指令计数器给出。换句话说,以指令计数器的值为地址,由存储器读出的内容将被机器看成是指令,被送往控制器去解释和执行。

第四,每执行完一条指令,指令计数器一般自动加“1”,以指示下一顺序指令的地址。虽然执行顺序可以根据运算结果来改变,但解题算法依然是、也只能是顺序型的。

第五,机器以运算器为中心,采用二进制运算,输入输出设备与存储器之间的数据传送都要途经运算器。控制器实施对各部件的集中控制。

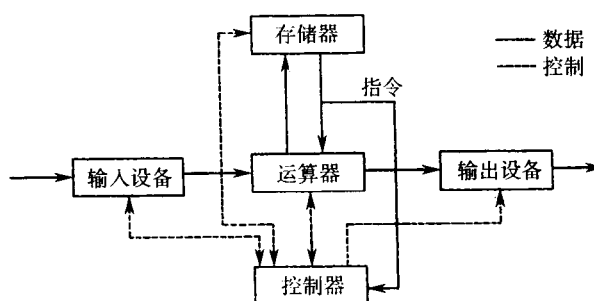


图 1.1 冯·诺依曼机器的结构

总之,冯·诺依曼机器实现了存储式程序这一基本原理;但指令的执行次序受指令计数器(也称为程序计数器)的控制,是一种控制驱动方式的机器。尤其是它的串行执行方式,使得解题算法和编程模型只能是顺序型的;它的更深远影响是使目前绝大多数程序设计语言、编译器、操作系统都是面向顺序式编程模型。

2. 计算机系统结构的发展

50年来,电子计算机已经历了4次更新换代,现在正处于第5代。各代的划分主要依据半导体技术水平,并有明显的硬件和软件技术为标志,如表1.1所示。

表 1.1 计算机的发展

	技术和系统结构	软件和应用
第1代 (1945~1954)	电子管和继电器。单CPU,以程序计数器(PC)和累加器顺序完成定点运算	机器语言或汇编语言。单用户。用CPU程序控制I/O
第2代 (1955~1964)	晶体管和磁芯存储器。用印刷电路互连。变址寄存器,浮点运算;多路存储器,I/O处理机	有编译程序支持的高级语言,子程序库,批处理监控程序
第3代 (1965~1974)	中小规模集成电路(MSI/SSI)。多层印刷电路。微程序设计,流水线,高速缓存,先行处理机	多道程序设计,分时操作系统,多用户应用
第4代 (1975~1990)	大规模集成电路(LSI/VLSI)。半导体存储器。多处理机,多计算机,向量超级计算机	用于并行处理的多处理机操作系统、专用语言和编译器;并行处理或分布计算的软件工具和环境
第5代 (1991~今)	超大规模集成电路(ULSI/GSI)。高密度高速度处理器和存储器芯片,可扩展系统结构,因特网	大规模并行处理,Java语言,分布式操作系统,万维网

当前,计算机系统结构正在沿着两个方向发展:

一是改变冯·诺依曼机器的串行执行模式。如在处理器中加入更多的译码部件、更多的执行部件和更多的寄存器而实现的超标量处理器,以做到同时执行多条指令。又如,以多个处理器共享集中式存储器或分布式存储器的多处理机系统,以及大规模并行处理机(MPP)系统,它们在系统中注入强大的并行处理能力并提出了并行编程模型。尤其是在个人计算机/工作站迅速发展和计算机网络技术成熟和普及的情况下,近年来成为研究热点的机群系统,不仅具有良好的并行性,而且具有良好的可扩展性和可编程性,以及良好的市场前景。

二是改变冯·诺依曼机器的控制驱动方式。自 20 世纪 70 年代以来,提出了数据驱动、需求驱动和模式匹配驱动三种新型驱动方式。数据流计算机是一种数据驱动式系统结构的计算机,只要指令所需的操作数已经齐备,就可立即启动执行,一条指令的运算结果又流向下一条指令,作为下一条指令的操作数来驱动该条指令的启动执行。程序中各条指令的执行顺序仅由指令间的数据依赖关系决定。需求驱动方式是一个操作仅在要用到其输出结果时才开始启动,如果此操作的操作数未到齐,则它去启动能得到各输入数的操作,需求链一直延伸下去,直至遇到常数或外部已输入的数据为止,然后再反方向地去执行运算。归约机就属于需求驱动系统结构的、使用函数式程序设计语言的计算机。在模式匹配驱动方式中,计算的进行是由谓词模式匹配来驱动的,而谓词是代表客体之间关系的一种字符串模式,主要用来求解非数值的符号演算。面向智能的计算机,如 Lisp 机、Prolog 机、神经网络等,属于这种模式匹配驱动式系统结构的计算机。

近 20 年来,前一种发展方向,即控制驱动方式下并行处理系统结构的计算机,已取得重大进展。不论是硬件技术还是软件技术都已相当成熟,并有不少产品走向市场,它们代表当前计算机系统结构发展的主流。而后一种发展方向,除数据流计算机已有一些成型机之外,大多还属于探索、研究阶段,还有大量的工作待完成。

1.1.3 计算机系统结构的分类

曾普遍将计算机系统分为巨、大、中、小、微五类,这是按规模、性能、速度以至价格的一种大致划分。

大、中型计算机,国外常用 mainframe 一词表示,它们大都是通用机,在计算机工业中占很重要地位,很多新的系统结构技术都是首先在大中型计算机上被采用。著名的产品,早期有 IBM360 系列、370 系列,后来有 IBM4300 系列等。

巨型计算机是为气象预报、国防工程、核物理研究等专门设计的具有极高运算速度和很大容量的计算机。其中,著名的有 Cray-1 计算机,它的向量运算速度达 8000 万次/s,并兼顾了一般的标量运算。1983 年研制成功的 CrayX-MP 机向量运算速度达 4 亿次/s。近年来,以微处理器为阵列结构的巨型机(常称为小巨型机)得到了发展,例如古德伊尔公司为美国宇航局研制的巨型计算机系统 MPP,由 16384 个微处理器组成 128×128 方阵。我国自行研制的银河-I、银河-II 型机也属于巨型机范畴。

小型机,因其规模小、结构简单,设计试制周期短,便于及时采用先进技术和工艺,硬、软件成本低等优点,曾在 20 世纪 70 年代被普遍采用。著名的有 DEC 公司的 PDP-11 系列和 VAX-11 系列。近年来曾在我国高校、银行、企事业单位中广泛流行的、用于 Client/Serv-

er 计算的 AS/400 亦属于小型机。

微型机的出现与发展,发起了世界范围的计算机大普及浪潮。1971 年以 Intel 4004 的 4 位微处理器组成的 MCS-4 是世界第一台微型机。近 30 年来,微型机获得惊人的飞跃式发展,从 4 位、8 位、16 位到现在的 32 位机,目前正在向 64 位计算机发展。32 位微型机已采用过去大中型计算机中所采用的技术,故现在的微型机性能已达到 70 年代大中型计算机的水平。

可见,这种按巨、大、中、小、微五类来划分计算机系统只能对同时期的计算机大致分类,规模、价格、尤其是性能和速度的指标随时间变化而变化。而且,这种分类法也不能反映计算机的系统结构特征。

1972 年,Michael.J. Flynn 提出按指令流和数据流的多倍性对计算机系统结构分类。由于当前的计算机系统结构的主流发展方向是控制驱动方式下的并行处理,故这一分类法获得普遍赞同。Flynn 分类法提出如下定义:

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):在系统最受限制的部件上,同时处于同一执行阶段的指令或数据的最大数目。

按指令流和数据流的多倍性,Flynn 将计算机系统结构分成如下 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);

多指令流多数据流(MIMD)。

图 1.2 分别表示了它们的基本结构(不包括 I/O 设备)。下面再对每类予以简要解释。

1. SISD 系统结构

这种结构代表了传统的冯·诺依曼机器,即大多数的单机(单处理器)系统。处理器串行执行指令;或者处理器内采用指令流水线,以时间重叠技术实现了一定程度的指令并行执行;更甚,处理器是超标量处理器,内有几条指令流水线实现了更大程度上的指令并行执行。但它们都是以单一的指令流由存储器取指令,以单一的数据流由存储器取操作数和将结果写回存储器。

2. SIMD 系统结构

这种系统结构有单一的控制部件,但有多个处理部件。以 CU 由存储器取单一的指令流,一条指令同时作用到各个 PU,指挥各 PU 对来自不同数据流的数据组进行操作。这种系统结构的典型代表是阵列处理机;有的学者认为应将向量处理机划入此类,但也有人持否定态度。值得一提的是,当前的处理器(如 Pentium II/III)多具有多媒体指令功能,这类指令能对打包数据中的多个数据元素同时进行操作。这是一种 SIMD 的变异,也常简称为 SIMD 类的指令。

3. MISD 系统结构

这种系统结构中,有几个处理部件 PU,各配有相应的控制部件 CU。各个 PU 接收不同的指令,对来自同一数据流及其派生数据流(例如中间结果)进行操作。这已被证明是不可能的或不实际的,至少是目前没有这类机器。

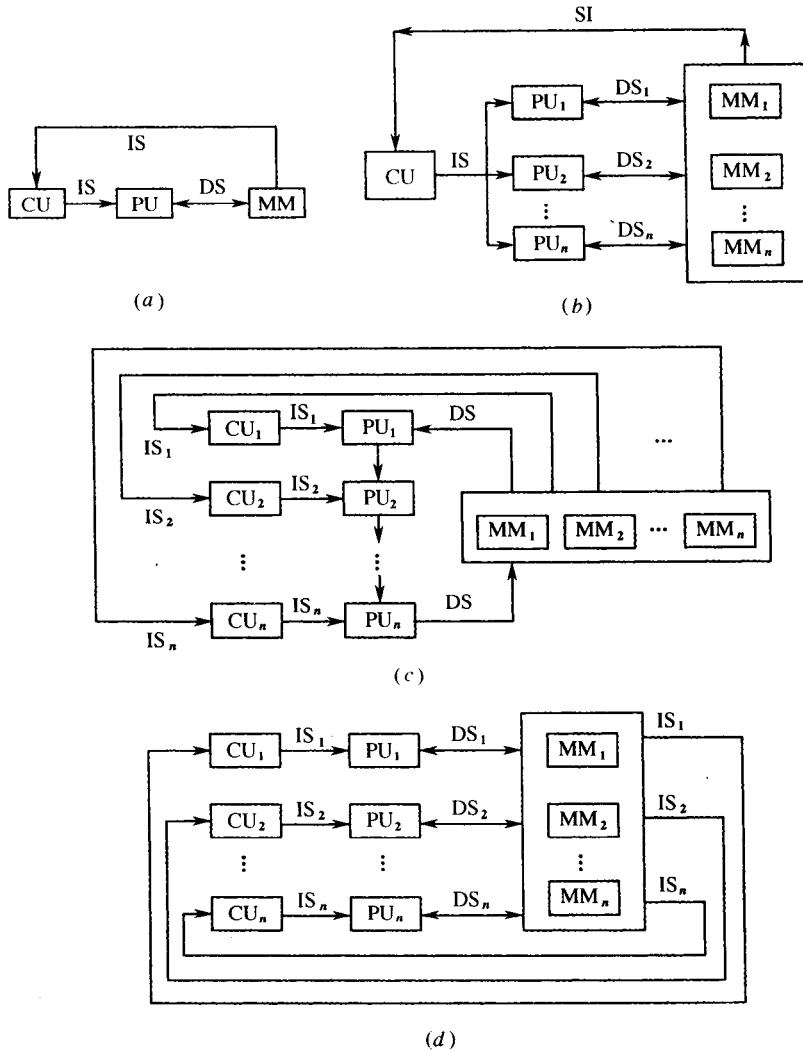


图 1.2 Flynn 分类法各类机器结构

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

(a)SISD; (b)SIMD; (c)MISD; (d)MIMD。

4. MIMD 系统结构

这种系统结构中,也是有几个 PU 并各配有相应的 CU,但各 PU 接收不同的指令对不同的数据流进行操作,这是可行的。把一个 PU 及其相应的 CU 看成是一个处理器(CPU),则这是一个多处理器系统。这类系统的典型代表是多处理机和多计算机。如果提供 n 个指令流和 n 个数据流的各存储器模块来自(集中或分布的)共享存储器,则是多处理机系统。如果各存储器模块各有自己独立的地址空间,那么各处理器为协同操作所需进行的相互通信就只能依据消息传递来进行,而不能依赖共享变量来进行,则是多计算机系统。

总之, Flynn 分类法能反映大多数计算机系统的并行性、工作方式和结构特点,但这仅是对控制驱动方式下的串行处理、并行处理计算机进行分类。对非控制驱动方式的计算

机,如数据流计算机,就不能包括进去。此外,还有其它一些分类法,如美籍华人冯泽云(Tse-yun Feng)于1972年提出的按最大并行度分类法;又如Wolfgang Händler于1977年提出的根据并行度和流水线进行分类。这里就不予介绍了。

1.2 个人计算机和 workstation

计算机高速发展反映在计算机系统结构学科领域中,有两点变化非常引人注目。一是20世纪70、80年代大中型计算机所采用的主要系统结构技术,如虚拟存储、高速缓存、流水线、超标量和超流水、向量运算、I/O通道等均已纳入个人计算机/workstation中。而且,一些巨型机已是微处理器阵列构成的高度并行机器。因此,进入20世纪90年代以来,传统的巨、大、中、小、微的计算机分类,只有性能高低、功能多少、规模大小之分,而技术的界线正在消失。二是个人计算机/workstation正在逐渐占据计算机工业的主导地位。从1992年起,个人计算机/workstation已占有计算机市场一半以上的份额。主要为个人计算机/workstation提供芯片和操作系统的Intel公司和Microsoft公司,已分别成为世界上最大的计算机芯片厂商和世界上最大的软件厂商。旺盛的市场需求、雄厚的资本和技术优势,已使个人计算机/workstation率先实现了多媒体等先进技术,今后也会带动计算机系统结构的全面革新与变化。

面对这种新局面,广大的个人计算机/workstation用户需要深入理解他们赖以编程的平台,本书也将以一定的篇幅来介绍它们的系统结构及其先进技术。这里先简要介绍个人计算机/workstation的基本概念。

1.2.1 何谓个人计算机/workstation

20世纪70年代末,在微型机领域中出现个人计算机PC(Personal Computer)和workstation。谁也没料到,PC和workstation的出现不仅剧烈地改变着人类社会生活的各个方面,标志着信息时代的到来;而且剧烈地改变计算机工业的布局。表1.2是美国市场计算机销售额统计资料。只经过15年,PC和workstation在美国的销售额已经从1978年的6%份额激增到1992年的49%份额。这一情况也代表了全世界的销售趋势。

表 1.2 美国市场计算机销售额(百万美元)

机 型	1978 年	1992 年
大型机	550	863.9
中型机	624	1503.5
PC/workstation	78.5	2295.2

个人计算机体积较小、价格较廉,并主要为每次1人使用,用户界面“友好”。最早出现的个人计算机是1977年Apple公司的Apple II型微机。一向以生产大中型通用机为主的IBM公司于1981年推出了IBM PC机,后来又推出了IBM PC/XT机和IBM PC/AT机。这段时期的IBM PC系列机,使用的处理器是Intel公司提供的Intel 8086,8088和80286芯片,使用的操作系统是Microsoft公司提供的MS-DOS和Windows 3.x。IBM PC系列机在整个20世纪80年代得到迅猛发展和普及,这也带动了成立不久的计算机芯片厂商Intel公司和计算机软件厂商Microsoft公司的巨大发展。后来,IBM公司转为生产和销售PS/2(Personal System/2)个人机,使用的操作系统主要是OS/2。其后,Intel公司继续推出80386,80486,Pentium,Pentium MMX,Pentium Pro,Pentium II/III一系列32位微处理器芯

片;AMD, Cyrix, TI(Texas Instrument)等公司也生产出与之兼容的芯片。以这些先进芯片为处理器的个人计算机,从概念上讲都属于 IBM PC/AT 的兼容机,但人们已普遍将其称为 386PC, 486PC 和 Pentium PC。现在,“PC”这个名词已变为专指那些基于 Intel x86 微处理器的计算机和那些与 Apple 公司的 Macintosh 兼容的计算机。

工作站(workstation)这个名词并不太规范,极易与计算机网络系统中的服务器-工作站中的工作站相混淆。这里的工作站是指,具有完整人机交互界面,集高性能的计算和图形于一身,可配置大容量的内存和硬盘, I/O 和网络功能完善,使用多任务多用户操作系统的小型通用个人化的计算机系统。1983 年美国 Apollo 公司推出第一台适合计算机辅助设计(CAD)的工作站,采用的是 Motorola 公司的 68000 系列的 CISC 芯片,并配有分辨率较高、尺寸较大的显示器。Apollo 公司于 1989 年被 HP 公司兼并,目前主要的工作站厂商有 SUN, HP, IBM, DEC, SGI 等五家公司,此外 NEC, Fujitsu, Intergraph 等公司也占有的一些小的市场份额。由于工作站起步较晚,推出不久即是 32 位结构。现在已出现 64 位结构,并普遍采用的是 RISC 处理器芯片,如 SUN 使用的是 SPARC 系列芯片,HP 是 PA-RISC, IBM 是 Power PC, DEC 是 Alpha, SGI 是 MIPS 等芯片。工作站采用的主要是 UNIX 操作系统。由于历史的原因,多家的 UNIX 互不兼容,为此制定开放系统标准,遵循 X/Open 所规定的 API 界面、图形、网络等标准,就能达到互移植性和互操作性。工作在工程领域、商业领域及办公领域中获得广泛应用。高档个人计算机与工作站的距离正在缩小。

PC/工作站的系统结构较为简单,以总线形式将计算机各个模块:CPU 模块、存储器模块、各种 I/O 模块互连在一起,有序地交换信息,从而构成计算机整体。大多数 PC/工作站只使用单一处理器,属于 SISD 系统结构类型。尽管系统中除主 CPU 外可能还有浮点处理器(如 8087, 80287)以及 I/O 处理器(如 8089),但它们属于主从式的多处理器,由主 CPU 统一从内存取指令和操作数,在主 CPU 的控制下从处理器完成所交赋的浮点运算操作或 I/O 处理操作,故仍属于 SISD 系统结构。只有少数的工作站有两个或少数几个处理器,它们共享集中式的存储器,是最简单的对称式多处理机 SMP(Symmetric Multi-Processor),已属于 MIMD 系统结构类型。

有人将 PC/工作站的系统结构实现技术归纳为:处理器技术 + 总线技术,虽然过于简单但也说明了问题的实质。下面简要介绍 Intel x86 处理器和 PC 总线技术。

1.2.2 Intel x86 处理器系列

表 1.3 列出 8086, 80286, 80386, 80486, Pentium, Pentium MMX(多能奔腾)等微处理器芯片的主要性能参数。表下方的注释对一些需注意点做了说明。除此之外,还需要说明两点:第一,80486SX 严格地讲不应算作一代产品,它只是 80486(DX)芯片产品中那些片内浮点处理器制作不合格的芯片(出厂前 FPU 被短路),作为不含浮点处理器的 80486 芯片来销售;第二,1993 年 3 月推出的 Pentium 芯片使用的是 5V 工作电压,采用的是 0.8 μ m 半导体工艺技术,产品内部代号为 P5。1994 年 3 月推出的 Pentium 芯片产品代号为 P54C,采用 0.6 μ m 半导体工艺技术,微处理器工作电压为 3.3V,功耗也由 15W 降至 4W。但是 P5 销售之后,美国 Luychburg 学院的一位教师发现 P5 芯片有 bug(确切地说是浮点的双精度除法有缺欠),尽管只有 27000 年一次的出错概率,Intel 公司还是对已售出的 200 万只芯片应用户要求予以换货。故市场上已不大见 P5 芯片了。

表 1.3 Intel x86 处理器系列性能

推出时间	CUP 类型	浮点处理器 (FPU)	指令集规模	工作时钟 /MHz	数据线宽度	地址线宽度	物理地址空间大小	内部级 1cache	工作模式	集成晶体管数目	引脚数
1978.6	8086	8087	133 条	6.8	16 位	20 位	1MB	无	实模式	290 000	40
1979.6	8088	8087	同上	4.77	8 位	同上	同上	同上	同上	同上	同上
1982.2	80286	80287	143 条	8,12,20	16 位	24 位	16MB	无	+ 保护模式	130 000	68
1985.10	80386(DX)	80387	154 条	12,25,33	32 位	32 位	4GB	无	+ V86 模式	275 000	132
1988.6	80386SX	80387	同上	同上	16 位	24 位	16MB	无	同上	同上	100
1989.6	80486(DX)	内含	160 条	25,33	32 位	32 位	4GB	8KB	+ 系统管理模式 (SMM)	1.2×10^6	168
1991.4	80486 SX	80487 SX	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上	1.18×10^6	同上
1992.3	80486 DX2	内含	同上	50.66	同上	同上	同上	同上	同上	1.2×10^6	同上
1994.6	80486 DX4	内含	同上	75,100	同上	同上	同上	同上	同上	同上	同上
1993.3	Pentium(P5)	内含	165 条	60,66	64 位	32 位	4GB	16KB	同上	3.1×10^6	273
1994.3	Pentium (P54C)	内含	同上	75,90 100,120 133,150 166,200	同上	同上	同上	同上	同上	同上	296
1996.10	Pentium MMX (P55C)	内含	222 条	166,200 233	64 位	32 位	4GB	32KB	同上,并具有多媒体扩展功能	4.5×10^6	296

注:(1)8088 是 8086 数据总线为 8 位的产品。(2)80386 SX 是 80386(DX)外部总线与 80286 兼容的产品。(3)80486 SX 是 80486(DX)片内不含 FPU 的产品。(4)80486 DX2、DX4 是指 CPU 内部时钟频率是片外时钟频率的 2 倍频和 3 倍频。

由表 1.3 可看出 Intel x86 处理器有如下特点:

(1)从 1978 年 6 月到 1996 年 11 月,18 年来 Intel 公司接连不断地推出 10 余种微处理器芯片(其中,1995 年还推出 Pentium Pro 芯片)。正如 Intel 公司总裁兼首席执行官 Cvaig Bawett 所言,Intel 公司遵循 More 定律,大约每 18 个月就会推出一种新的微处理器,间隔期内对现有芯片的性能加以改进。由 8086 片内集成有 29 000 个晶体管到 Pentium MMX 片内集成有 4 500 000 个晶体管,这种集成度的大幅度提高导致微处理器的功能越来越强,速度越来越快。

(2)8086(包括 8088)和 80286 是 16 位的微处理器。80386,80486,Pentium 是 32 位的微处理器。这主要由处理器内部的寄存器位长来确定,尽管 Pentium 芯片的数据引脚线已是 64 位,但仍属于 32 位微处理器。Intel 的 P6 产品,Pentium Pro 和 Pentium II/III 也是 32 位微处理器,即将推出的 P7 产品据说是 64 位微处理器。

(3)至 80386 已具备了三种主要工作模式,即实地址模式、受保护的虚拟地址模式和虚拟 8086 模式。80386,80486,Pentium 不仅能运行 16 位代码程序也能运行 32 位代码程序。这是能采用 Windows NT 或 Windows 95 操作系统的最基本硬件条件。

(4)性能的增强还体现在:浮点运算器(FPU)由片外的分立协处理器变为集成到处理器芯片内;由处理器芯片内无 cache(高速缓存器)到片内有 8KB 的级 1 cache,到片内有代码和数据 cache 各为 8KB 的共 16KB 级 1 cache,到 Pentium MMX 处理器芯片内级 1 cache 已有 32KB(16KB 代码 + 16KB 数据)了。