

全国高等院校“十五”计算机规划教材
计算机科学与技术教材系列 (5)

现代计算机 体系结构教程

傅麒麟 徐 勇 编 著



北京希望电子出版社
Beijing Hope Electronic Press
www.bhep.com.cn

全国高等院校“十五”计算机规划教材

计算机科学与技术教材系列(5)

现代计算机体系结构教程

傅麒麟 徐勇 编著



北京希望电子出版社

Beijing Hope Electronic Press

www.bhp.com.cn

内 容 简 介

这是一部关于现代计算机的体系结构的实用教科书。内容新颖全面,讲解深入细致,编写时,特别注重根据不同的教学对象定位不同的培养目标,各章、节的重难点,主次内容都做了恰当合理的安排。

全书由8章构成,其主要内容包括:现代计算机体系结构的发展、流水线与超标量处理机、向量处理机的概念和性能、存储系统的概念和性能、总线的作用和特性、互连网络、SIMD 计算机、多处理机与多计算机系统。全书用了几章的篇幅深入地探讨了各基础部件中采用的新技术及其对提高性能的作用,为构建个人计算机、工作站、服务器等高性能计算机系统打下了理论基础。此外,本书各章均配有丰富的习题供读者练习,巩固所学知识。

作者从事一线的教学数十年,积累了丰富的教学经验,本书在整体结构安排、内容取舍以及整书的编写过程中,都充分考虑了教与学的特点,以及所面对的特定读者的具体需要。在内容上既注重了理论体系的完整性,又兼具系统性和先进性。结构清晰,概念准确,文字叙述简洁明了、可读性强,既便于教师课堂讲授,又便于自学者阅读。通过阅读本书,可对现代计算机体系结构有全面的了解,并为进一步深入学习和研究计算机科学技术奠定基础。

本书可作为普通高校、职业学校计算机科学与技术专业,或非计算机专业的本、专科学生的教材和教学参考书,也可以作为工程技术人员的自学教材或指导书。

系 列 书 名 : 全国高等院校“十五”计算机规划教材
计算机科学与技术教材系列(5)

书 名 : 现代计算机体系结构教程

文本著作者 : 傅麒麟 徐勇 编著

责 任 编 辑 : 蒋湘群

出版、发行者 : 北京希望电子出版社

地 址 : 北京市海淀区知春路63号卫星大厦三层 100080

网址: www.bhp.com.cn

E-mail: lxr@bhp.com.cn

电 话 : 010-62520290,62521724,62528991,62630301,62524940,62521921,82610344

(发行) 010-82675588-202 (门市) 010-82675588-501,82675588-201 (编辑部)

经 销 : 各地新华书店、软件连锁店

排 版 : 希望图书输出中心 董淑红

文本印刷者 : 列电印刷厂印刷

开本 / 规格 : 787毫米×1092毫米 16开本 19印张 431千字

版次 / 印次 : 2002年8月第1版 2002年8月第1次印刷

印 数 : 0001-5000册

本 版 号 : ISBN 7-900101-54-3

定 价 : 23.00元

说明: 凡我社产品如有残缺,可执相关凭证与本社调换。

计算机科学与技术教材系列

编委会成员名单

主任委员：徐洁磐

副主任委员：秦小麟 宋方敏

委员：（按姓氏笔画排序）

王元元 教授 解放军理工大学

宋方敏 教授 南京大学

张桂芸 副教授 天津师范大学

张新荣 教授 天津大学

柏家求 教授 天津大学

秦小麟 教授 南京航空航天大学

徐永森 教授 南京大学

徐洁磐 教授 南京大学

殷新春 副教授 扬州大学

蔡庆生 教授 中国科学技术大学

序

近年来计算机科学与技术的发展突飞猛进,其应用范围之广,对国民经济影响之大前所未有,特别是计算机网络、电子商务、多媒体技术等发展,正在彻底改变人类的工作方式与生活方式,同时也彻底改变了传统产业与传统的工作模式。目前,计算机科学与技术是高新技术的主要标志,是先进生产力的重要支柱,因此,发展计算机事业是摆在我们面前的重要任务。有鉴于此,我们特组织编辑了以大学本科学生为对象的《计算机科学与技术教材》丛书,为我国信息化培养人才作一份贡献。

当前,在我国计算机教学及教材建设中普遍存在着一些弊病与不足,主要有如下几种:

1. 在计算机教材特别是基础性教材中严重存在知识陈旧、落后,跟不上计算机科学与技术发展的步伐。由于计算机技术的飞速发展,内容更新要求极快,一般三五年就需作重大调整而一二年需作必要调整,而现有教材大都不能适应此种变化速度,这种现象在基础性教材中尤为突出。

2. 现有教材很多以国外教材为蓝本,存在着脱离我国具体应用实际的弊病。如何根据我国国情并参考国外先进技术编写教材是当务之急。

3. 现有的教材大都适应面窄,多数仅适应计算机本科专业而尤其仅适应少数重点院校与重要院校。而目前,由于计算机教育发展迅速,各种与计算机相近与相关的专业蓬勃发展,在计算机本科专业中也出现了不同层次的要求,特别是以应用型人才为主的培养要求。因此,迫切需要有一套适应面较广的基础性教材以满足多种层次的要求。

根据以上分析,本丛书编写原则是

1. 适应计算机科学与技术飞跃发展的需要,本教材丛书具有先进性与时代特性,并且每隔一二年作一次小的调整,每隔四五年重新修订出版。

2. 本教材丛书具有适应面广,基础性强的特点,能满足多种层次、多种类型的计算机专业本科学生的需要,特别是满足计算机应用型人才培养的需要。

3. 本教材丛书具有密切结合我国应用实际、反映我国计算机事业发展需求的基本特点,并且能在实际应用中发挥作用。

4. 教材是有别于一般书籍的一种特殊读物,它要求基本概念清楚,基本理论扎实,知识量大与实际应用联系紧密等特点,它还要求教材的内容逻辑性强,可读性好,深入浅出,并附有习题与参考资料等内容,本教材丛书将突出体现这些特点使其适合于教材需要。

5. 本教材丛书选题是根据我国目前实际并参考国际最新动态而制订的。本教材丛书第一批8本都是具有普遍性与基础性的教材,在不久我们将分别推出第二批、第三批教材满足不同的需要。

6. 本教材丛书聘请有深厚理论基础与应用实践经验且长期在教学、科研第一线工作的高校教授编写,特别是有专长的中、青年教授是本丛书教材编写的主要力量。

我们感谢丛书编委会各位委员为本丛书出版所作出的贡献,我们也感谢北京希望电子出版社为丛书的立题、编审所作出的努力,最后我们感谢丛书的各位作者为丛书编写、发

行与发展所作出的创造性的和富有成效的工作。

我们还期待广大读者为丛书提出宝贵意见与建议，我们将通过修订，努力把本丛书办得更好。

计算机科学与技术教材编委会

2002年3月于南京大学

前 言

计算机体系结构一词是来自英文 Computer Architecture 的译名, 有时被译作计算机系统结构。这个词组是由 Amdahl 在 1964 年从 Architecture (建筑学) 一词中借用过来的。尽管对计算机体系结构所包含的内容理解各异, 给出的定义也不尽相同, 但这并不妨碍这门学科的发展。几十年来, 微电子学的发展成果是有目共睹的, 人们常常会津津乐道于某某处理机集成度提高了多少、时钟升到多少、……殊不知, 这里面包含着多少体系结构研究的结晶。因为人们清楚地知道, 如果只在芯片上增加晶体管数量或者使它们运行得快一些, 仅仅是量的变化, 对计算机系统性能的提高而言, 其作用十分有限。而如果按照某种理论, 重新组织这些晶体管, 所得到的效益可能会使计算机性能发生质的飞跃。比如, 超流水线结构的处理机、RISC 结构处理机、新型读写方式的存储器芯片等都是典型的例子。事实上, 体系结构的研究成果不但推进了微电子的发展, 同时也享用了微电子技术的成果。在最新的微电子技术基础上, 使计算机体系结构迈上了一个新台阶, 人们可以用比较低廉的价格获取便于使用的高性能计算机。用相得益彰来形容这两者的关系是再恰当不过的了。

读者在此前已经学习了计算机组成原理、汇编程序设计以及数据结构等课程, 与这些课程相比, 计算机体系结构有些什么特点呢?

在计算机组成原理中, 我们着眼于研究如何用逻辑电路去完成一个模块规定的功能, 即功能模块的内部逻辑实现方法。而汇编程序设计和数据结构则着重研究如何用好计算机提供给程序员的功能。至于计算机应该向程序员呈现什么样的功能、计算机的模块应该如何划分、功能应如何确定等就是计算机体系结构要解决的问题了。换句话说, 体系结构的研究就是要跳到模块以外, 甚至要跳到计算机之外, 考虑系统(模块)向用户提供哪些功能、用什么样的软硬件配置来实现这些功能。这项工作相当于对一个系统作总体设计, 在制订了系统的功能和性能以后, 作出模块的划分规划, 规定各模块的功能, 确定模块间的联系等。

无法想象, 一个不懂得程序设计、不知道逻辑设计为何物的人能够担负起计算机系统设计的任务。同样理由, 如果读者在还没有打牢这些基础以前, 将会无法理解系统结构中的一些概念。可以这样说, 计算机体系结构是那些基础课程的提高和升华。

本教材之所以在计算机体系结构前面冠以“现代”二字, 只是为了反映教材的定位。编者认为, 所谓“现代”应该是“普及性”与“先进性”的结合。

与几十年前不同, 现在计算机已经普及到家庭、个人, 甚至连 5 岁孩童都知道电脑这个词。作为计算机专业人员, 绝大部分人可能一辈子也不会直接使用那些超高速计算机, 当然也更少有机会去设计这种系统。但是, 却可能整天与高档个人计算机、工作站或低端服务器打交道, 甚至按要求设计一些类似的系统。如果没有对这些普及型系统的深刻理解, 就难以充分发挥系统的效能, 也难以解决运行过程中可能出现的问题, 更谈不上设计一个结构合理、性能良好的系统来。编者充分意识到这个观念对大部分专业人员的重要意义, 在选材时给予了足够的重视, 增添了一些组织这类普及型系统的基础和方法。

“现代”的另一个侧面就是内容的先进性。计算机确实发展得太快了, 过不了几年,

看到的计算机可能已经面貌全非了，教学的内容也必须适应这种变化。比如，现在的计算机几乎都是以微处理机为基础组织的，系统的指令系统和寻址方式仅仅是使用的问题，不再需要系统设计者去设计。即使有一小部分人员需要设计指令系统，过去那种用 Huffman 编码方式设计的不等长指令也已经不符合“现代”要求了。

并行结构是当代计算机系统向高性能发展中所采取的最重要技术方向。本书就是围绕着以微处理机为元素，实现各种不同形式、不同程度的并行结构时必须解决的问题展开的。虽然对一些大规模并行系统的叙述还比较简单，但是对于开阔思路，提高对新技术的敏感程度还是十分有益的。

从结构上讲，全书可以分为两大部分，第 1~6 章为基础理论与基本部件，第 7 和 8 章则是运用上述部件组织各种并行系统的方法。根据教学要求的不同，任课教师可以选择各自的重点内容。编者在教学中通常将第 2, 4, 5, 6 章作为第一部分的重点内容，而把分布式共享及机群系统作为第二部分的重点处理。有条件的院校还可以将机群系统作为实验内容。

书中给出了部件、整机的性能分析方法，同时也给出了大量的实例。在处理这两类内容时，应以掌握方法为根本，各具体实例均服务于此目的。

本书的内容曾经在实际教学中多次试用，比较适合在计算机和相关专业的本科和研究生中使用。全部内容可以在 40~50 学时内实施完。

本书第 1, 2, 4, 5, 6, 7, 8 章由傅麒麟教授编写，第 3 章由徐勇副教授编写，最后由傅麒麟统稿。限于编者的水平，书中错误和不当之处敬请读者批评指正。

编者

2002 年 4 月

目 录

第1章 现代计算机体系结构概述.....	1
1.1 现代计算机体系结构的演化.....	1
1.1.1 微处理机的发展.....	2
1.1.2 微型计算机硬件结构的演化.....	3
1.1.3 微型计算机软件的演化.....	4
1.2 计算机性能评价.....	5
1.2.1 CPU 性能.....	6
1.2.2 系统运行速度.....	9
1.2.3 加速比.....	12
1.2.4 性能/价格比.....	14
1.3 计算机系统的层次结构.....	15
1.3.1 层次结构.....	15
1.3.2 冯·诺依曼结构.....	16
1.3.3 现代计算机体系结构的研究对象.....	18
1.3.4 计算机体系结构的分类.....	19
1.3.5 影响现代计算机体系结构的主要因素.....	22
习题1.....	25
第2章 流水线与超标量处理机.....	27
2.1 先行控制技术.....	27
2.1.1 指令的重叠执行.....	27
2.1.2 先行控制原理.....	28
2.1.3 数据相关.....	31
2.1.4 转移及转移预测.....	33
2.2 流水线技术.....	36
2.2.1 流水线工作原理.....	37
2.2.2 线性流水线的性能分析.....	40
2.2.3 流水线中的相关及其处理.....	44
2.2.4 非线性流水线的调度问题.....	47
2.3 超标量与超流水线技术.....	50
2.3.1 超标量处理机的基本结构.....	50
2.3.2 指令的单发射与多发射.....	51
2.3.3 超标量处理机的性能.....	55
2.4 超流水线技术.....	56
2.4.1 超流水线的一般概念.....	56
2.4.2 MIPS R4000 超流水线处理机.....	57
2.4.3 超流水线的性能.....	57
2.4.4 超标量超流水线处理机.....	58

2.5	RISC 处理机.....	60
2.5.1	计算机体系结构设计思想的转变.....	60
2.5.2	RISC 处理机的定义和特点.....	62
2.5.3	实现 RISC 思想的几个关键技术.....	64
2.5.4	几个常见的 RISC 处理机.....	68
2.6	超标量处理机 Pentium II.....	77
2.6.1	Pentium II 的超标量流水线结构.....	77
2.6.2	静态与动态转移预测.....	80
	习题 2.....	81
第 3 章	向量处理机.....	84
3.1	向量处理的基本概念.....	84
3.1.1	向量与向量处理.....	84
3.1.2	向量指令.....	86
3.2	向量处理机的结构.....	89
3.2.1	向量处理机结构概述.....	89
3.2.2	存储器-存储器结构.....	90
3.2.3	寄存器-寄存器结构.....	93
3.3	向量处理机与向量协处理机.....	93
3.3.1	向量处理机.....	94
3.3.2	向量协处理机.....	96
3.4	向量处理机性能分析.....	100
	习题 3.....	105
第 4 章	存储系统.....	107
4.1	存储系统的基本概念.....	107
4.1.1	存储系统的性能指标.....	107
4.1.2	层次式存储系统.....	109
4.1.3	存储器带宽及其对系统性能的影响.....	110
4.2	并行存储器.....	113
4.2.1	并行访问存储器.....	113
4.2.2	交叉访问存储器.....	114
4.2.3	无冲突访问存储器.....	116
4.3	高速缓冲存储器 (Cache).....	119
4.3.1	基本工作原理.....	120
4.3.2	地址映象与地址变换.....	121
4.3.3	Cache 替换算法.....	126
4.3.4	Cache 性能分析.....	128
4.3.5	Pentium 处理机中的双独立总线体系结构.....	131
4.4	虚拟存储器.....	132
4.4.1	基本工作原理.....	133
4.4.2	虚拟存储器的地址映象和地址变换.....	135

4.4.3	目录表与二级分页	141
4.4.4	页面替换算法及其实现	145
4.5	三级存储系统	148
4.5.1	物理地址 Cache 结构	148
4.5.2	虚拟地址 Cache 结构	149
4.5.3	全 Cache 技术	150
习题 4		150
第 5 章	总线	153
5.1	概述	153
5.1.1	总线在计算机中的地位	153
5.1.2	总线的基本特性	155
5.1.3	同步总线与异步总线	158
5.2	总线仲裁	159
5.2.1	总线竞争及其仲裁	159
5.2.2	其他仲裁方式	160
5.3	PCI 总线及其在现代计算机体系结构中地位	166
5.3.1	PCI 总线的主要特性	166
5.3.2	PCI 总线中的仲裁	168
5.3.3	采用 PCI 总线的服务器结构	169
5.4	新一代总线——InfiniBand	171
5.4.1	PCI 总线的局限性	171
5.4.2	InfiniBand 的基本特性	172
5.4.3	InfiniBand 的基本体系结构	173
习题 5		175
第 6 章	互连网络	177
6.1	互连网络的基本概念	177
6.1.1	互连网络在计算机系统中的地位	177
6.1.2	互连网络的主要特性和性能参数	178
6.1.3	互连网络的种类	180
6.1.4	互连函数	188
6.2	多级互连网络	193
6.2.1	几种阻塞互连网络	194
6.2.2	可重排非阻塞网络——Benes 二进制置换网络	200
6.2.3	非阻塞网络——多级 Clos 网络	202
6.3	消息传递机制	202
6.3.1	消息的寻径	203
6.3.2	死锁及其规避	205
6.3.3	单播方式的寻径	208
6.3.4	广播通信方式下的寻径	211
习题 6		212

第7章 SIMD 计算机	214
7.1 概述.....	214
7.1.1 SISD 计算机对大数组的处理	214
7.1.2 SIMD 计算机的基本结构	214
7.1.3 SIMD 计算机与向量计算机	217
7.2 典型 SIMD 计算机介绍.....	219
7.2.1 Illiac IV 阵列计算机.....	219
7.2.2 BSP 计算机.....	223
7.2.3 CM-2 计算机	226
7.2.4 MasPar MP-2 计算机.....	230
7.3 SIMD 在数值计算中的应用	232
7.3.1 SIMD 与连续模型计算	232
7.3.2 SIMD 计算机的几种基本算法	235
习题 7	239
第8章 多处理机与多计算机系统	241
8.1 概述.....	241
8.1.1 SIMD 与 MIMD.....	241
8.1.2 共享存储器多处理机的几种结构形式	242
8.1.3 多处理机系统的特点	243
8.2 多处理机系统中的 Cache 一致性问题	244
8.2.1 产生一致性问题的原因	244
8.2.2 监听协议.....	246
8.2.3 基于目录的协议.....	250
8.3 基于集中共享存储器的多处理机系统	254
8.3.1 适合多处理机系统使用的微处理机	254
8.3.2 SGI Challenge 多处理机系统	257
8.3.3 SUN Enterprise 多处理机系统.....	258
8.4 基于分布式共享存储器的多处理机系统	259
8.4.1 CM-5 计算机	259
8.4.2 SGI Origin2000 系列服务器	263
8.5 机群系统.....	268
8.5.1 机群系统的结构特点.....	268
8.5.2 机群系统中的通信问题.....	272
8.5.3 并行程序设计环境.....	276
8.5.4 机群系统中的负载平衡问题	277
8.6 多处理机系统的性能分析.....	280
8.6.1 性能指标.....	280
8.6.2 几种多处理机系统的性能模型	285
习题 8	289
参考文献	291

第 1 章

现代计算机体系结构概述

过去,在讨论计算机发展史时总是用构成计算机的器件来划代的,其实这种观点并不全面,实际上每一代计算机中还包含着它们在体系结构方面的进步。第一代计算机所用的器件是电子管、继电器以及连接导线。在体系结构上采用了单 CPU,且用程序计数器和累加器依次完成定点运算,采用机器语言或汇编语言编制程序,I/O 操作则采用程序控制。第二代计算机所采用的器件是晶体管及磁芯存储器,且将连接导线改为印刷电路。结构上增加了变址寄存器、浮点运算、多路存储器和 I/O 处理机等。软件方面则增加了高级语言、子程序库、批处理监控程序等。使用中、小规模集成电路的计算机被列为第三代计算机,这时已经使用多层印刷电路作为连线。硬件结构上采用了流水线、高速缓冲存储器及虚拟存储器,微程序控制也开始盛行。软件方面则增加了多道程序设计以及分时系统。当时代表性的系统有 IBM/360-370, PDP-8 系列等。第四代计算机以使用 LSI 和 VLSI 器件为特色,在结构上则出现了共享存储器、分布存储器和向量处理硬件等不同选择的并行计算机,与之相适应,开发了多处理操作系统、并行语言及其编译器,还有一些用于并行或分布处理的软件工具和环境。从 20 世纪 90 年代至今,所使用的 VLSI 集成度更高,而且运行的速度更快,可以算作新一代的计算机。但是更大的变化却体现在结构上,这个阶段实现了大规模并行处理,采用可扩展的灵活系统结构,并且逐渐将计算机系统从传统的机柜式结构演变为分散组织形式。

可见,计算机的发展史既是微电子技术(元器件)的进展史,同时也无不体现着体系结构方面深刻的变革轨迹。有许多体系结构概念,如变址寄存器、通用寄存器、程序中断、虚拟存储器、高速缓冲存储器等一直沿用到现在。有些概念,如各种多处理机系统、机群系统等还在不断的发展完善中。可以这样说,现代计算机采用的各种体系结构,是几十年发展的结晶,而且还在不断的前进中。

1.1 现代计算机体系结构的演化

一般认为,“现代电子计算机”是从冯·诺依曼结构的计算机诞生时开始的。但是,我们这里讨论的要更“现代”一些,即从第四代计算机开始,一直延续到今天仍在发展的计算机体系结构,这个时期大体上横跨从 1974 年至今的二十多年时间。

这个时期最显著的特点就是 VLSI 的广泛使用。按照莫尔(Gordon Moore)定律,每隔 18~24 个月,集成在一块芯片上的晶体管数目就增加一倍,计算能力每两年也增长一倍。虽然,这种预测最初是对半导体存储器而言的,但是对于从 1971 年开始出现的微处理机也是适用的。以最初出现的 Intel 4004 处理机与最新的 Pentium 4 处理机相比较,无论是在集成度上,还是计算能力方面,都有了上万倍的提高。现在,几乎所有的高性能计算机都是由各类高档微处理机组成的。人们根据各种微处理机特点,采用适当的结构形式,组合出所需要的系统。这种计算机性能的进展远远超过微处理机发展所遵循的“莫尔”定律,而这就是“体系结构”革新所立下的功劳。实际上,随着工艺水平的提高,现代计算机体系结构中的许多

实现方案都已经直接制作在微处理机芯片中,并且在微处理机设计中充分考虑了多处理机应用的要求。所以,在研究现代计算机体系结构的时候,应先了解一般计算机的结构形态,进而根据微处理机的结构特点,深入的理解这种发展对计算机体系结构的影响。

1.1.1 微处理机的发展

对一些常见的微处理机,如 Intel 80x86 和 Pentium 系列的发展轨迹,包括每一种型号、诞生年代、集成度、特点以及速度等,几乎每个人都耳熟能详,有关的资料也俯拾即是,这里不再罗列。下面仅从微处理机的发展脉络中,探究其在体系结构方面的演化过程。

一般认为,8 位微处理机已经具备现代微处理机的基本雏形。微处理机的结构源于两种不同思路。一种是仿照当时成熟的小型机中央处理机(CPU),例如 MC6800 在其结构中就有不少 Nova 小型机的影子,而 Intel 采用了重新设计的方法。限于当时的工艺水平,8 位机中仅集成了基本的运算器和控制器,用以完成最基本的算术、逻辑运算。在处理机与外部设备的通信控制上,除了仍可使用程序控制外,已经具有强大的中断处理系统。

1978 年出现的 8086 是世界上第一个 16 位微处理机,因为采用了 HMOS 工艺,将处理机的平均门迟延减少到 2ns,使微处理机能在 5, 6 或 8MHz 时钟下工作,从而获得更快的运算速度。同时,8086 在体系结构上也作了一些改进,比如采用了一条简单的流水线,使指令的执行效率得以提高。为了实现硬件的浮点运算,专门设计了一个协处理机 8087,配合主处理机 8086 一起工作。同时还设计了一个 I/O 处理机,用以满足处理机与高速外设的通信要求。80286 是对 8086 的一种改进,使其能在多用户和多任务环境下工作,而最大的特色是采用了更为先进的存储器管理机构,支持更大的物理存储器和虚拟存储器,扩大了存储器寻址范围。这两种 16 位微处理机仍然保持了 8080 的软件向上兼容。

80386 是 Intel 公司在 1985 年推出的全 32 位微处理机,除了进一步扩大了对物理和虚拟存储空间范围外,还可以对它们进行段、页式管理。此外,硬件结构上支持在多任务系统环境下运行,支持四个特权级,能对操作系统与任务之间、或者在任务之间进行了严格的隔离,加强了保护功能。处理机还支持外接高速缓冲存储器(Cache),以提高系统的运行速度,达到每秒运行 400 万条指令(4MIPS)的水平。

1989 年推出的 80486 把原来需要在片外实现的数学协处理机移入了片内,并进行了改进,使之在浮点处理能力上有较大的提高。同时,在片内集成了一个 8KB 的 Cache,进一步将每条指令的执行时间缩短到一个时钟周期。运算速度达到 20MIPS。

在 Intel 公司努力提高处理机的时钟和缩短每条指令执行时间的同时,另一种微处理机设计思路也在 20 世纪 80 年代中完成了从实验室到工业产品的路程,这就是精简指令集计算机(RISC)。这种处理机一改传统的设计思想,对原有的处理机体系结构进行了重大的修正。设计的初始出发点是去除原有系统中的复杂指令,尽量采用程序中用得最多的、简单的、能在一个周期内执行完毕的指令,提高指令的执行效率。于是,极大地简化了处理机上的控制器,并使之实现了寄存器-寄存器型的运算。再以适当的编译软件与硬件改进相配合,使 RISC 处理机的工作速度得到大幅度的提高。从 2~3MIPS 提高到 200~300MIPS 只用了约十年的时间,一改复杂指令计算机在提高运行速度上的艰难历程。早期的 RISC 处理机均为单发射结构,即每个指令周期只发射一条指令,当时最突出的有 Sun 微系统公司的 SPARC 体系结构,以及 MIPS 公司的 MIPS 体系结构。此后就发展成每个周期可以发射

多条指令的多发射结构, IBM 的 POWER 体系结构, 以及这种结构的具体实现 IBM RS/6000 和 Power PC 处理机, 此后出现的 MIPS R4000 和 DEC 公司的 Alpha 21064 也都是很有名的 RISC 微处理机。

RISC 的思想很快为微处理机厂商所接受, Intel 公司推出的 Pentium 及以后的 P II、P III 及 P4 都采用了 RISC 处理机的思想, 但又保持了与 80486 及 80386 等处理机的兼容性。有理由认为, 从此时起 RISC 作为一种技术已经融合到 CISC 中去了。Pentium 处理机在片内建立了两条流水线, 成为整数超标量结构, 使处理机在同一时钟周期内可以发射两条指令。同时还重新设计了浮点运算部件, 芯片中设有一条共有八级的浮点流水线, 每个时钟周期可接受一条浮点指令, 最多时可以接受两条指令(一条必须是交换指令)。片内以哈佛结构形式设置了程序和数据各 8KB 的高速缓冲存储器, 称为一级 Cache。Pentium Pro 处理机, 还将二级 Cache 制作在同一个芯片封装内, 容量达 512KB 或 1MB。后来的 Pentium II/III 则把二级 Cache 制作在一块印刷电路板上, 以芯片工作时钟的一半速率进行读写, 从而降低了芯片的制作难度。Pentium 4 在片内制作了二级 Cache 256KB, 并提供了很宽的数据通道, 极大地减小了数据读写延时。Pentium 处理机还在流水线中采用了动态转移预测技术, 对可能发生的转移也进行指令的预取, 一旦发生转移不会过多地影响流水线的效率。Pentium 处理机在结构上支持多处理机并行工作, 增加了为保持并行工作所需的总线控制和检测信号, 并且还保持 Cache 一致性设置了专门的机构。

1.1.2 微型计算机硬件结构的演化

与过去大型计算机发展的方式不同, 由于在微处理机中已经逐渐地实现了许多先进的体系结构概念, 所以在构建计算机硬件体系时着重考虑的是: 处理机如何与存储器连接; 如何与各种外部设备连接; 如何与其他处理机连接等。对于一台以微处理机为基础的计算机, 最能体现其硬件结构特征的是机器中所采用的总线结构。

表征当代微型计算机特点的总线应从 IBM 公司推出 PC 机时开始。在开始推出 PC/XT, 以及以后推出 PC/AT 时, 使用的是 ISA (工业标准体系结构) 总线, 所不同的只是前者为 8 位版本, 后者则改成 16 位版本。这个时期的微型计算机大多采用这种单总线结构, 即微处理机、存储器、各种 I/O 接口部件都挂接在同一条总线上。这是由于当时的微处理机所用的主频不太高, 主存储器的存取周期可以与之相当, 同时接口部件所用器件的工作速度也足以跟上处理机的速度, 所以各部件基本上可以无等待地互相传输数据。至于较慢速的外部设备, 由于有中断机构的处理, 只要接口部件能对总线的运行进行有效地屏蔽和缓冲, 就可以正常工作。由于总线也支持 DMA 工作方式, 高速外设与存储器间的快速数据传输也得以保证。ISA 总线上以硬接线方式安排系统的外部中断资源, 使系统可接外部设备数量受到很大限制。虽然在这个期间也出现过一些其他形式的总线, 如根据不同性质的信号设置多条总线的“多总线”就是一例, 但这些都没有改变主流形式所代表的结构特点。

32 位总线是伴随着 386 微处理机推出的, IBM 公司最先推出了微通道总线 (MCA), 并且成为一个专利产品, 限制其他厂商的使用。Compaq 公司设计了 EISA 总线, 并组织了 EISA 协会, 该总线考虑了与过去的板级产品的兼容, 为大多数厂商所接受, 成为后来实际流行的 32 位总线标准。

随着更高工作频率的 486 和 Pentium 处理机出现, EISA 那只有 8.33MHz 的总线速率根

本无法满足系统运行的要求,限制了系统性能的提高。于是,一些组织与公司开始制订高速总线标准,以满足处理机与高速运行部件之间的传输需要,如外部高速缓冲存储器、高速硬盘等。由于这种总线只能使 CPU 直接访问部分部件,所以被称为局部总线。与此同时,仍然保留了 EISA 这种慢速总线,以保持向下的兼容性。当然在两种总线之间需要一个总线转换装置。虽然 VESA 局部总线早在 1992 年就出现了,但是由于其局限性的原因,最为流行的局部总线还是由 Intel 提出的 PCI 总线,同时还引入了加速图形端口 (AGP) 总线作为 PCI 的补充。局部总线的推广使用,使微型计算机体系结构跟上了处理机的发展步伐,从而在硬件结构上为充分发挥高速处理机的效能提供了保证。于是,在系统中形成了从处理机到外设的三层总线结构,即系统总线、局部总线和 EISA 总线。USB 总线是微型机体系结构方面的另一个重大进步,这是由计算机和电信产业的几个领导者提出的外设连接标准,适合于与大多数高速和慢速外设连接。最重要的是由此彻底解决了 I/O、中断和 DMA 资源的匮乏,并且实现了设备的即插即用和热插拔。

微处理机性能的不断提升,大大扩展了其在高端计算机中的应用。用微处理机组成高性能计算机,最根本的问题在于将多个(甚至几百、几千个)处理机及其他计算机资源互连起来。总线形式是互连中最简便的方法,各种系统资源按某种安排挂接在总线上,共同争用同一条总线进行通信。为了尽可能地提高系统的工作效能,每一个处理机一般都配置有专用的高速缓冲存储器,有的还可能配有专用的存储器,只有当需要使用公共存储器或其他资源时,才使用公用总线。事实上许多微处理机的体系结构中已经考虑到多机应用的需要,专门为解决共用总线设计了相应的部件。比如,在 Pentium 系列处理机中,Pentium Pro 处理机专门设计了一条 APIC 总线,由相应的部件控制,允许最多组织四个处理机的簇,簇中的处理机共享同一条系统总线。如果需要还可以将两个簇通过簇桥相连,组成更大的系统。这种简单扩展的结构已经在网络服务器中得到应用。

由于总线受到带宽的限制,在组织更大的系统时,通常要用交叉结点、共享存储器或互连网络方式进行连接。实际上这些互连方式早在第四代计算机时已经开始出现,如 1972 年由宝来 (Burroughs) 公司和依利诺斯 (Illinois) 大学推出的 illiac IV 阵列处理机,由 64 个处理单元排列成 8×8 的矩阵,形成一个闭合螺线阵列。此后推出的 BSP 采用 16 个处理机的并行结构,并用共享存储器进行通信。巨型机制造商 Cray 公司也于稍晚推出了多处理机结构的巨型机,向量计算机 Cray Y-MP 816 就是其中一例,内有 8 个处理机,处理机之间通过共享存储器方式进行通信。此后改进的 C-90 中用了 16 个处理机,也用共享存储器方式通信,但同时又可以由多个 C-90 机群组成更大规模的计算机系统。日本富士通公司于 1993 年推出的 Fujitsu VPP500 也是个多处理机的向量计算机,处理部件可以从 7 个扩展到 222 个,机内采用了 224×224 交叉开关,实现了完全无阻塞的连接。最近中科院计算所推出的曙光 3000 高级服务器,运行速度在 3000 亿次以上,全机最多可以由 70 个节点,280 个处理机组成,通过高速网络组成一个机群系统。直到现在,这种采用多处理机或处理机群方式组成巨型计算机或服务器的趋势仍在继续,而且可以肯定地说,这是所有巨型计算机必然采用的基本结构方式。

1.1.3 微型计算机软件的演化

按照微型计算机体系结构讨论的范畴,引起我们关注的微型计算机软件包括机器级的

指令系统、操作系统以及有关的编译程序等。

指令系统总是与硬件结构紧密相连的,这里仍以 Intel 的 80x86 为例说明指令系统的演化的过程。8086 处理机是为单用户单任务设计的,所以其指令系统只是原 8 位机的扩展,除了由于采用了段结构而增加的寻址方式外,并没有什么质的变化。这个系列的后续处理机,包括 Pentium 4 在内,对指令系统作了重大的改进。特别设置了一些特权指令,将处理机的全部操作权力分为管态和目态。于是处理机可以很好地支持多道作业,用户程序不会影响系统的管理状态,并且通过选择字和描述符对每个程序的运行范围进行管理。同时采用分页方法实现存储器管理,支持系统的虚拟存储器。从 Pentium 处理机起还增加了检查 CPU ID 的功能,且为了在多处理机情况下解决对总线争用的竞争,增设了 APIC (高级可编程中断控制器),也增添了一些相应的指令。机器指令是处理机与人交互的界面,为了使处理机改进了的体系结构能为操作系统所用,设置相应的指令是必由之路。结合前一节对处理机体系结构的叙述,可以明显地看出,现代微处理机已经具备了过去大型计算机中央处理机的大部分功能。

使用计算机的人们在关心操作系统时,往往注重其与人的交互界面,于是有了 DOS, Windows 和 Linux 等的差别。但是作为体系结构研究者关心的是其最底层的内容,即直接控制硬件动作的部分,在微型计算机中就是 BIOS (基本输入输出系统)。与最初的 PC 机相比,现代微型计算机的 BIOS 除了仍担当对各种 I/O 操作的基本控制外,还可以赋予升级的微代码标记。所谓的升级包括两种情况,一种是 CPU 升级,一种是多处理机的升级。前者是指同一型号的 CPU,在不断修正其硬件错误中推出的不同版本,在 BIOS 中专门设置了 2KB 空间存入该版本的微代码。后者则是当系统采用多处理机时,需要存入多个处理机的版本信息,即系统要对每一个处理机的版本有一个升级映射,在初始化时必须验证系统所有的处理机的存在情况。

并行语言及其编译是多处理机系统中最重要软件问题。与单处理机系统中用的程序和编译不同,在多处理机中应尽可能地使系统并行地执行任务,并且保证各进程之间的同步。为解决这个问题,主要采取了三种途径。一是专门设计一些语言,使它们具有并行程序设计的特点,如 Occam 和 Ada 语言,其中包括了并行任务、通信同步等语法描述。这些语言的编译专用性强,几乎都是针对特定机器开发的,费用较高。另一个方法是采用预编译处理,对传统的语言经过预先编译,使之扩展成为可并行的语言,这些传统语言可以是 C, C++ 等。最近兴起的一种并行设计动向是在不修改语言也不设置预编译的情况下,通过提供并行程序开发所需的函数库或类库,在编译生成代码时,将它们链接在一起。这样用户在原来程序的基础上,只要在需要的地方加入并行函数即可,例如 PVM 系统就是一个典型的例子。

在采用机群系统形式组成的多处理机系统中,除了有一般多机系统同样的软件问题外,还有自己独有的问题需要解决。由于机群系统是以高速局域网络作为各计算机间互连的基础,为了实现紧耦合,必须使各机之间的通信开销尽可能小。为此在要求尽量采用高速网络的同时,也应尽可能采用简化的网络协议。

1.2 计算机性能评价

性能/价格比是人们在设计、升级或选购某个计算机系统时首先要考虑的问题,性能高