

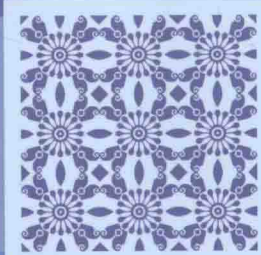
微机原理与接口技术

基于IA-32处理器和32位汇编语言

第5版

钱晓捷 主编

王义琴 范喆 张行进 马耀锋 参编



机械工业出版社
China Machine Press



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

高等院校计算机教材系列

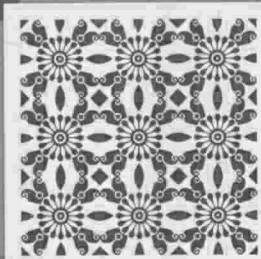
微机原理与接口技术

基于IA-32处理器和32位汇编语言

第5版

钱晓捷 主编

王义琴 范喆 张行进 马耀锋 参编



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

微机原理与接口技术: 基于 IA-32 处理器和 32 位汇编语言 / 钱晓捷主编. —5 版. —北京: 机械工业出版社, 2014.7
(高等院校计算机教材系列)

ISBN 978-7-111-47206-3

I. 微… II. 钱… III. ①微型计算机-理论-高等学校-教材 ②微型计算机-接口技术-高等学校-教材 IV. TP36

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 135044 号

本书以 32 位处理器、32 位汇编语言和 32 位个人微机系统为起点, 从应用角度, 采用循序渐进、深入浅出、突出实践的方法, 展开论述了 IA-32 处理器的发展和微机组成、处理器编程结构、常用指令及其汇编语言程序设计 (32 位 Windows 控制台环境和 16 位 DOS 环境)、存储系统、微机总线、输入输出接口及其应用技术, 还特别介绍了高速缓冲存储器、指令流水线、多媒体指令、超标量、动态执行、多核等先进技术。

本书可以作为高等院校“微机原理及接口技术 (微机原理及应用)”、“汇编语言程序设计”或“计算机组成原理”等课程的教材或参考书, 适合计算机及电子、通信和自控等电类专业的本科学士、专科学生、高职学生及成教学生阅读, 同时也适合作为计算机应用开发人员和希望深入学习微机应用技术的读者的极佳参考书。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 迟振春

责任校对: 殷虹

印刷: 藁城市京瑞印刷有限公司

版次: 2014 年 7 月第 5 版第 1 次印刷

开本: 185mm × 260mm 1/16

印张: 20.75

书号: ISBN 978-7-111-47206-3

定价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

投稿热线: (010) 88379604

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

前 言

本书以 IA-32 处理器和 32 位 PC 为主体介绍 32 位微机原理、32 位汇编语言和接口应用技术。全书共分 9 章。

- 第 1 章“微型计算机系统概述”。本章通过微处理器的发展尤其是 Intel 80x86 系列处理器的发展引出各种基本概念，从冯·诺伊曼计算机结构引出微型计算机硬件组成，以 16 位和 32 位 PC 为例全面理解微机层次结构，通过熟悉 Windows 控制台环境了解微机软件系统。
- 第 2 章“处理器结构”。本章以 8 位 CPU、16 位 8086、32 位 80386 和 Pentium 为例展开讲述处理器功能结构，重点学习 IA-32 处理器通用指令执行环境中的通用整数寄存器、存储器组织和数据寻址方式，并熟悉汇编语言的语句格式、程序框架和开发方法。
- 第 3 章“数据处理”。本章以数据在计算机中的表示介绍数制、数值编码和字符编码，以数据在汇编语言中的表达熟悉常量定义、变量应用以及常用伪指令，以数据在处理器中的处理展开论述 IA-32 处理器数据传送和算术逻辑运算等基本指令，并通过示例程序掌握指令功能和编程应用。
- 第 4 章“汇编语言程序设计”。本章以程序结构为主线，先介绍基本的控制转移指令，然后引出分支程序结构、循环程序结构和子程序结构，同时结合数码转换、字符串处理、键盘输入和显示输出等大量示例程序，掌握汇编语言程序设计方法。最后，介绍汇编语言在编写 32 位 Windows 程序以及与 C++ 混合编程方面的应用。
- 第 5 章“微机总线”。本章展开微机总线结构，介绍总线类型、数据传输、信号时序等总线基本技术，以 16 位 8086 和 32 位 Pentium 为例学习处理器引脚信号和操作时序，以 16 位 ISA、32 位 PCI 和 USB 总线为例学习系统总线和外设总线。
- 第 6 章“存储系统”。本章以存储层次结构中的主存储器、高速缓冲存储器为主体，学习各种半导体存储器的类型、特点、地址译码，介绍 Cache 的工作原理和组成结构。最后，说明 IA-32 处理器支持操作系统进行存储管理的分段和分页机制。
- 第 7 章“输入输出接口”。本章在熟悉 I/O 接口的特点、编址和指令的基础上，结合 I/O 接口电路展开论述微机与外设进行无条件传送、查询传送、中断传送和 DMA 传送的原理，并详细介绍处理器的中断机制和编程方法。本章还引出了使用汇编语言编写 16 位 DOS 应用程序的方法。
- 第 8 章“常用接口技术”。本章综合已学知识，以应用为目的，熟悉定时控制、并行接口、串行通信和模拟系统的基本原理，掌握扬声器控制、打印机连接、键盘输入、数码管显示、异步串行通信和模拟系统的常用接口技术。
- 第 9 章“处理器性能提高技术”。本章以 IA-32 处理器为例介绍高性能处理器运用的各种先进技术，涉及精简指令集计算机思想、指令流水线技术、浮点数据的编码格式及各种并行处理技术。

本书遵循我国“计算机科学与技术本科专业规范”等指导性文件，结合广大师生的反馈和我们的教学实践，删除了陈旧内容，精练了许多知识，实现了以 32 位为主体的教学思想，同时也

在编排体例等多方面进行了改进。与同类教材相比,本书具有以下特色。

1. 更新教学内容,体现 32 位主体

本书不是将 32 位内容作为 16 位内容的补充,安排在各个章节最后或全书最后,而是直接以 32 位教学内容为起点,硬件上以 IA-32 处理器和 32 位 PC 为主体介绍工作原理,软件上以 32 位指令系统展开讲述 Windows 控制台环境的汇编语言编程。例如,汇编语言的 32 位 Windows 编程、与 Visual C++ 的混合编程,存储系统的 Cache、存储管理,指令集结构的精简指令集计算机思想、浮点指令和多媒体指令,以及系统结构的指令流水线、超标量、动态执行、多线程、多核等技术。

2. 强调工作原理,淡化技术细节

微型计算机技术的突出特点是教学内容虽不深奥但较琐碎,既有共性的工作原理又有具体应用的技术方法。本书在编著过程中,强调基本概念和工作原理,不过多表述实现细节。例如,本教材以 IA-32 处理器为例融合 8 位、16 位和 32 位微机工作原理,而不是仅引出某个处理器的所有技术;选择 32 位基本指令进行重点学习而不是所有指令泛泛而谈;抓住处理器和总线的关键信号,没有详细展开所有引脚功能;重点说明存储器地址译码原理,不分析存储器芯片的连接细节;从应用角度解释系统结构特点,不以设计者观点论述技术实现。

3. 化解汇编难点,突出应用价值

汇编语言编程是本课程的一个难点,因为其指令繁多、规则凌乱,又涉及底层硬件原理。传统的教学顺序是:先数据编码、后指令系统、接着伪指令、最后展开程序设计,即在积累了大量指令和规则后才引出程序,往往又没有输入输出交互,编出的程序不知对错。本教材从第 1 章就引出汇编语言的软件开发环境。第 2 章介绍汇编语言的语句格式、源程序框架和开发方法,并利用简单易用的输入输出子程序编写具有显示结果的程序。第 3 章结合数据编码、常量定义和变量应用,自然地引出常用伪指令;然后通过阅读源程序、掌握常用处理器指令,逐渐编写特定要求的程序片段。第 4 章以程序结构为主线,从简单到复杂逐步编写具有实用价值的应用程序,最后展开讲述 Windows 编程和混合编程。后续章节结合 I/O 接口技术,介绍 I/O 指令和 I/O 程序、中断服务程序以及扬声器控制、键盘扫描码读取、异步串行通信程序,将上机实践贯穿始终,通过汇编语言程序更好地理解硬件工作原理。

4. 面向普通学生,降低入门要求

本书充分考虑到普通院校本、专科学生以及自学人员的实际知识水平,以清晰的逻辑结构由浅入深展开教学内容;尽量使用浅显生动的语言,不惜笔墨详尽讲解重点和难点知识。本书只要求读者具有计算机(文化)基础和高级语言的入门知识,掌握微机操作,不要求读者熟悉数字电路、计算机组成原理等先修内容。例如,本教材介绍了基本逻辑运算、门电路、锁存器、三态缓冲器和译码器等涉及硬件的知识,还补充有 Windows 控制台(及模拟 MS-DOS)环境的操作、MASM 6.15 命令行开发方法等软件方面的内容。再如,本教材详细介绍了开发软件包的构成,精选了大量示例程序,并提供了作者编写的键盘输入和显示输出 I/O 子程序库,读者完全可以依据教材所述自主完成各个程序。另外,课程虽然涉及硬件接口,但本教材设计有在 PC 上实现的实践环节,所以可以不用配置硬件实验平台而开设本课程(当然,如果能够结合硬件实验平台,效果会更加理想)。还有,每章最后都有总结,帮助读者领悟重点知识,并配合大量习题巩固所学。

5. 开办教学网站, 提供辅助资源

本书努力从结构组织、内容编排和上机实践等多方面避免同类教材的不足, 努力做到结构新颖、内容充实、知识先进, 让广大读者有所收获, 掌握一些实实在在的东西。为了更好地服务于广大师生和读者, 编者开辟了“微辅网”(http://www5.zzu.edu.cn/qfw)。该网站面向“微机原理及接口技术”和“汇编语言程序设计”课程, 提供相关教学课件(电子教案)、教学大纲、教材勘误、疑难解答、输入输出子程序库、示例源程序文件等辅助资源, 是本教材的动态延伸, 欢迎大家访问。有关教材的疏漏和不当以及对相关教学问题的探讨, 敬请广大师生和读者通过电子邮件(qianxiaojie@zzu.edu.cn)与编者交流。你们的支持是提高教材质量、催生新版教材的最大动力, 也是对编者的最大鼓励。

与前版教材相比, 本版保持总体结构和主体内容不变, 主要进行了如下修订:

1) 状态标志的详述移到算术运算指令前, 便于结合指令更好地理解标志作用。

2) 关于子程序参数传递增加了两个更易理解的程序示例。

3) 关于主存储器增加了 EEPROM 芯片介绍、NOR 和 NAND Flash 类型的说明等。

4) 关于常用接口技术增加了 8253 脉冲计数示例、反转法识别按键、DAC 芯片输出锯齿波应用等内容。

5) 最后两章改动较大, 内容简化后合并为一章。

6) 全书各章都有根据需要修改或增加的文字、图形和表格, 以便对有关知识点进行更清晰的解释, 尤其是数据处理、主存储器、输入输出接口等章节。

本书前一版由钱晓捷、王义琴、范喆、张行进等编写, 本版由钱晓捷进行修订, 并得到了关国利、张青、姚俊婷等同事的帮助。衷心感谢各位老师, 谢谢你们的支持。

编者

2014 年 4 月

教学建议

针对不同专业不同层次因而教学要求各不相同的本科、专科学生，根据实际教学经验，本教材推荐3个教学方案：

1. 微机原理与汇编语言

这是一个突出重点、精练内容的教学方案，适合自动控制、电子通信、计算机科学与技术等电类专业。这个教学方案可以为后续“单片机原理”、“嵌入式系统”课程打下基础。

这个教学方案综合微机组成原理、汇编语言程序设计、基本输入输出接口和新技术介绍，主要是前8章的核心内容。由于课时有限，教学内容以基本知识为主，对高速缓存、存储管理、通信接口、模拟接口以及并行处理器技术等内容只进行简介。

2. 微机原理及接口技术

这个教学方案需要先开设“汇编语言程序设计”课程，然后开设“微机原理及接口技术”课程。这是计算机科学与技术专业使用较多，也是一个较为成熟和传统的教学方案。课程内容以本教材第5~8章内容为主，要学习第1、2章内容，可以复习第3、4章内容，同时可以展开介绍比较深入的内容。

计算机专业往往还开设有“计算机组成原理”课程，此时“微机原理及接口技术”课程可以不讲授与其重复部分，或者以复习形式进行巩固。

由于“汇编语言程序设计”课程内容直接影响到“微机原理及接口技术”课程的编程和实践环节，所以两门课程内容一定要衔接好，必要时进行复习。

3. 汇编语言程序设计

“汇编语言程序设计”是计算机科学与技术、软件工程常常单独开设的课程，也可以在电子工程、通信工程、自动控制等专业开设。本教材的“汇编语言”部分适合“汇编语言程序设计”课程的教学要求。课程内容以本教材前4章为主，同时抽取第7~8章中有关汇编语言部分，形成第5章内容。

各个教学方案的课程学时如下表所示。

教学方案	微机原理与汇编语言	微机原理及接口技术	汇编语言程序设计
课程总学时(授课+实验)	68+20	68+12	51(68)+30
第1章 微型计算机系统概述	6	6	4
第2章 处理器结构	8	4	8
第3章 数据处理	12	2	12
第4章 汇编语言程序设计	12	2	20(28)
第5章 微机总线	6	6	7(16)
第6章 存储系统	6	6	
第7章 输入输出接口	8	10	注：第5章输入输出
第8章 常用接口技术	8	26	程序设计，取自本教材
第9章 处理器性能提高技术	2	6	第7、8章内容

目 录

前言	1
教学建议	1
第1章 微型计算机系统概述	1
1.1 微型计算机的发展	1
1.1.1 通用微处理器	1
1.1.2 专用微处理器	2
1.1.3 摩尔定律	3
1.2 Intel 80x86 系列处理器	3
1.2.1 16 位 80x86 处理器	3
1.2.2 IA-32 处理器	4
1.2.3 Intel 64 处理器	8
1.3 微型计算机的系统组成	9
1.3.1 冯·诺伊曼计算机结构	9
1.3.2 微型计算机的硬件系统	11
1.3.3 PC 微机结构	13
1.3.4 计算机系统的层次结构	16
1.3.5 微型计算机的软件系统	20
第1章总结	22
第1章习题	23
第2章 处理器结构	25
2.1 处理器的功能结构	25
2.1.1 处理器的基本结构	25
2.1.2 8086 的功能结构	26
2.1.3 80386 的功能结构	27
2.1.4 Pentium 的功能结构	28
2.2 寄存器	29
2.2.1 通用寄存器	30
2.2.2 标志寄存器	31
2.2.3 专用寄存器	32
2.3 存储器组织	33
2.3.1 存储模型	34
2.3.2 工作方式	34
2.3.3 逻辑地址	35
2.4 汇编语言基础	37
2.4.1 指令代码格式	37
2.4.2 语句格式	39

2.4.3 源程序框架	41
2.4.4 开发过程	44
2.5 数据寻址方式	48
2.5.1 立即数寻址方式	48
2.5.2 寄存器寻址方式	49
2.5.3 存储器寻址方式	49
2.5.4 各种数据寻址方式总结	52
第2章总结	54
第2章习题	54
第3章 数据处理	57
3.1 数据表示	57
3.1.1 数制	57
3.1.2 数值的编码	60
3.1.3 字符的编码	62
3.2 常量表达	64
3.3 变量应用	66
3.3.1 变量定义	66
3.3.2 变量属性	69
3.4 数据传送类指令	72
3.4.1 通用数据传送指令	72
3.4.2 堆栈操作指令	74
3.4.3 其他传送指令	76
3.5 算术运算类指令	78
3.5.1 状态标志	79
3.5.2 加法指令	81
3.5.3 减法指令	82
3.5.4 乘除法等指令	84
3.6 位操作类指令	86
3.6.1 逻辑运算指令	86
3.6.2 移位指令	89
3.7 串操作类指令	92
3.7.1 串传送指令	93
3.7.2 串检测指令	94
3.8 IA-32 指令系统	96
第3章总结	97
第3章习题	98
第4章 汇编语言程序设计	103
4.1 分支程序结构	103

4.1.1 无条件转移指令	103	5.5.4 USB 总线	171
4.1.2 条件转移指令	105	第5章总结	174
4.1.3 单分支程序结构	110	第5章习题	175
4.1.4 双分支程序结构	111	第6章 存储系统	177
4.2 循环程序结构	113	6.1 存储系统的层次结构	177
4.2.1 循环指令	113	6.1.1 技术指标	177
4.2.2 计数控制循环	114	6.1.2 层次结构	177
4.2.3 条件控制循环	115	6.1.3 局部性原理	179
4.3 子程序结构	117	6.2 主存储器	179
4.3.1 子程序指令	117	6.2.1 读写存储器	180
4.3.2 子程序设计	120	6.2.2 只读存储器	184
4.3.3 参数传递	121	6.2.3 存储器地址译码	189
4.3.4 程序模块	129	6.2.4 主存空间分配	194
4.4 Windows 应用程序编程	133	6.3 高速缓冲存储器	197
4.4.1 操作系统函数调用	133	6.3.1 工作原理	197
4.4.2 控制台应用程序	136	6.3.2 地址映射	199
4.4.3 图形窗口应用程序	141	6.3.3 替换算法	203
4.5 与 C++ 语言混合编程	142	6.3.4 写入策略	203
4.5.1 嵌入汇编	142	6.3.5 80486 的 L1 Cache	205
4.5.2 模块连接	143	6.3.6 Pentium 的 L1 Cache	205
第4章总结	145	6.4 存储管理	206
第4章习题	146	6.4.1 段式存储管理	207
第5章 微机总线	150	6.4.2 页式存储管理	209
5.1 总线技术	150	第6章总结	212
5.1.1 总线类型	150	第6章习题	213
5.1.2 总线的数据传输	151	第7章 输入输出接口	215
5.1.3 总线信号和总线时序	154	7.1 I/O 接口概述	215
5.2 8086 的引脚信号	155	7.1.1 I/O 接口的典型结构	215
5.2.1 地址/数据信号	155	7.1.2 I/O 端口的编址	217
5.2.2 读写控制信号	156	7.1.3 输入输出指令	218
5.2.3 其他控制信号	157	7.1.4 16 位 DOS 应用程序	220
5.3 8086 的总线时序	158	7.2 无条件传送和查询传送	223
5.3.1 写总线周期	159	7.2.1 无条件传送	224
5.3.2 读总线周期	160	7.2.2 查询传送	227
5.4 Pentium 处理器的引脚和时序	161	7.3 中断控制系统	229
5.4.1 引脚定义	161	7.3.1 中断传送	229
5.4.2 总线周期	163	7.3.2 IA-32 中断系统	232
5.5 微机系统总线	164	7.3.3 内部中断服务程序	235
5.5.1 PC 总线的发展	164	7.3.4 中断控制器	237
5.5.2 ISA 总线	165	7.3.5 外部中断服务程序	239
5.5.3 PCI 总线	167	7.3.6 驻留中断服务程序	242

7.4 DMA 传送	244	8.4.3 A/D 转换器	292
7.4.1 DMA 传送过程	244	第8章总结	297
7.4.2 DMA 控制器	245	第8章习题	297
第7章总结	246	第9章 处理器性能提高技术	301
第7章习题	247	9.1 精简指令集计算机技术	301
第8章 常用接口技术	250	9.1.1 复杂指令集和精简指令集	301
8.1 定时控制接口	250	9.1.2 RISC 技术的主要特点	302
8.1.1 8253/8254 定时器	250	9.2 指令流水线技术	303
8.1.2 定时器的应用	256	9.2.1 指令流水线思想	303
8.2 并行接口	259	9.2.2 80486 的指令流水线	304
8.2.1 并行接口电路 8255	259	9.3 浮点数据处理单元	305
8.2.2 并行接口的应用	265	9.4 并行处理技术	310
8.2.3 键盘及其接口	267	9.4.1 并行性概念	310
8.2.4 数码管及其接口	275	9.4.2 数据级并行	310
8.3 异步串行通信接口	277	9.4.3 指令级并行	312
8.3.1 异步串行通信格式	278	9.4.4 线程级并行	314
8.3.2 异步串行接口标准	279	第9章总结	317
8.3.3 异步串行通信程序	281	第9章习题	318
8.4 模拟接口	287	附录 输入输出子程序库	319
8.4.1 模拟输入输出系统	287	参考文献	321
8.4.2 D/A 转换器	288		

第1章 微型计算机系统概述

数字电子计算机经历了电子管、晶体管、集成电路为主要部件的时代。随着大规模集成电路的应用,计算机的功能越来越强大,体积却越来越小,微型计算机(简称微型机或微机)应运而生,并得到广泛应用。本章以 Intel 80x86 处理器和个人微机为例,介绍微型计算机系统的发展和组成,为后续章节介绍微型计算机系统的各个组成部分奠定基础。

1.1 微型计算机的发展

在巨型机、大型机、小型机和微型机等各类计算机中,微型机(Microcomputer)是性能适中、价格低廉、体积较小的一类。在科学计算、信息管理、自动控制、人工智能等应用领域中,微型机也是最常见的一类。工作、学习和娱乐中使用的桌面个人微机是我们最熟悉也是最典型的微型机系统;支撑网络的文件服务器、WWW 服务器等各类服务器属于高档微型机系统;生产、生活中运用的各种智能化电子设备从计算机系统的角度看同样也是微型机系统,只不过作为其控制核心的处理器常被封装在电子设备内部,不易被人觉察,因此常称它们为嵌入式计算机系统。桌面系统、服务器和嵌入式计算构成现代计算机的三大主要应用形式,而微型机都是其中的主角。

计算机的运算和控制核心称为处理器(Processor),即中央处理单元(Central Processing Unit, CPU)。微型机中的处理器常采用一块大规模集成电路芯片,称之为微处理器(Microprocessor),它代表着整个微型机系统的性能。通常将采用微处理器为核心构造的计算机称为微型计算机。

处理器的性能用字长、时钟频率、集成度等基本的技术参数来衡量。字长(Word Length)表明处理器每个时间单位可以处理的二进制数据位数,如一次运算、传输的位数。时钟频率表明处理器的处理速度,反映了处理器的基本时间单位。集成度表明处理器的生产工艺水平,通常用芯片上集成的晶体管数量来表达。晶体管只是一个由电子信号控制的电子开关,集成电路在一个芯片上组合了成千上万个晶体管完成特定功能。

1.1.1 通用微处理器

1971年,美国 Intel(英特尔)公司为日本制造商设计可编程计算器时,将采用多个专用芯片的方案修改成一个通用处理器,于是诞生了世界上第一个微处理器 Intel 4004。Intel 4004 微处理器字长为4位,集成了约2300个晶体管,时钟频率为108kHz(赫兹)。以它为核心组成的 MCS-4 计算机也就是世界上第一台微型计算机。随后,Intel 4004 被改进为 Intel 4040。

1972年,Intel 公司研制出8位字长的微处理器芯片 8008,其时钟频率为500kHz,集成了约3500个晶体管。这之后的几年当中,微处理器开始走向成熟,出现了以 Motorola 公司 M6800、Zilog 公司 Z80 和 Intel 公司 8080/8085 为代表的中、高档8位微处理器。Apple 公司的苹果机就是这一时期著名的个人微型机。

1978年开始,各公司相继推出一批16位字长的微处理器,如 Intel 公司的 8086 和 8088、Motorola 公司的 M68000、Zilog 公司的 Z8000 等。例如,Intel 8086 的时钟频率为5MHz,集成度达到2.9万个晶体管。这一时期的著名微机产品是 IBM 公司采用 Intel 公司的微处理器和 Microsoft

(微软)公司的操作系统开发的16位个人计算机(Personal Computer, PC)。

1985年, Intel公司借助IBM PC的巨大成功, 进一步推出了32位微处理器80386, 其集成度达到27.5万个晶体管, 时钟频率达16MHz。从这时起, 微处理器步入快速发展阶段。就Intel公司来说, 就陆续研制生产了80486、Pentium(奔腾)、Pentium Pro(高能奔腾)、MMX Pentium(多能奔腾)、Pentium II、Pentium III和Pentium 4等微处理器。例如, 2003年Intel公司生产的新一代Pentium 4处理器具有1.25亿个晶体管, 时钟频率达到3.4GHz。兼容IBM PC的32位PC, 还有Apple公司的Macintosh机等, 在这个时期得到飞速发展, 伴随着多媒体技术和互联网络, 成为我们工作和生活不可缺少的一部分。

2000年, Intel公司在微型机的高端产品服务器中使用了64位字长的新一代微处理器Itanium(安腾)。事实上, 其他公司的64位微处理器在20世纪90年代已经出现, 但也是主要应用于服务器产品中, 不能与通用80x86微处理器兼容。2003年4月, AMD公司推出首款兼容32位80x86结构的64位微处理器, 被称为x86-64结构。2004年3月, Intel公司也发布了首款扩展64位能力的32位微处理器, 它采用扩展64位主存技术EM64T(Extended Memory 64 Technology)。64位微处理器主要将整数运算和主存寻址能力扩大到64位, 极大地提高了微型机的处理能力。2005年以后, 采用64位技术的桌面微机逐渐获得用户青睐。与此同时, 生产厂商已经可以在一个半导体芯片上制作两个微处理器核心, 原来面向高端的并行处理器技术开始走向桌面系统, 微型计算机系统也进入了一个全新的多核处理器阶段。

1.1.2 专用微处理器

除了装在PC、笔记本电脑、工作站、服务器上的通用微处理器(常简称为MPU)外, 还有其他应用领域的专用微处理器: 单片机(微控制器)和数字信号处理器。

单片机(Single Chip Microcomputer)是指通常用于控制领域的微处理器芯片, 其内部除CPU外还集成了计算机的其他一些主要部件, 例如, ROM和RAM、定时器、并行接口、串行接口, 有的芯片还集成了A/D、D/A转换电路等。换句话说, 一个芯片几乎就是一个计算机, 只要配上少量的外部电路和设备, 就可以构成具体的应用系统。

单片机是国内习惯的名称, 国际上多称为微控制器(Micro Controller)或嵌入式控制器(Embedded Controller), 简称为MCU。微控制器的初期阶段(1976~1978年)以Intel公司的8位MCS-48系列为代表。1978年以后, 微控制器进入普及阶段, 以8位为主, 最著名的是Intel公司的8位MCS-51系列, 还有Atmel(爱特梅尔)公司的8位AVR系列、Microchip Technology公司的PIC系列。1982年以后, 出现了高性能的16位、32位微控制器, 例如, Intel公司的MCS-96/98系列尤其是基于ARM(Advanced RISC Machine)核心的微处理器。ARM核心采用精简指令集RISC结构, 具有耗电少、成本低、性能高的特点, 因此使用ARM为核心研制的各种微处理器已经广泛应用于32位嵌入式系统, 目前主要采用Cortex-M3微控制器。而面向高性能应用领域的ARM核心则是Cortex-A系列, 主要应用于移动通信领域, 例如智能手机和平板电脑。

数字信号处理器(Digital Signal Processor), 简称DSP芯片, 实际上也是一种微控制器(单片机), 但更专注于数字信号的高速处理, 其内部集成有高速乘法器, 能够进行快速乘法和加法运算。DSP芯片自1979年Intel公司开发2920以后也经历了多代发展, 其中美国德州仪器(Texas Instruments, TI)公司的TMS320各代产品具有代表性, 例如, 1982年的TMS32010、1985年的TMS320C20、1987年的TMS320C30、1991年的TMS320C40, 还有TMS320C2000、TMS320C5000、TMS320C6000系列等。DSP芯片市场主要分布在通信、消费类电子产品和计算机领域。我国推广和应用较多的是TI公司、AD公司和Motorola公司的DSP芯片。

利用微控制器、数字信号处理器或通用微处理器,结合具体应用就可以构成一个控制系统,例如,当前的主要应用形式是嵌入式系统。嵌入式系统融合了计算机软硬件技术、通信技术和半导体微电子技术,把计算机直接嵌入到应用系统之中,构造信息技术(Information Technology, IT)的最终产品。

自从20世纪70年代微处理器产生以来,它就一直沿着通用CPU、微控制器和DSP芯片三个方向发展。这三类微处理器的基本工作原理一样,但各有其特点,技术上它们不断地相互借鉴和交融,应用上却大不相同。本书以通用微处理器Intel 80x86和由其构成的PC为蓝本展开教学,但基本原理也适用于其他微处理器应用系统,可以认为是其他微处理器的一个基础知识。学习微控制器和DSP芯片构成的专用应用系统需要另外的课程和教材。

1.1.3 摩尔定律

从利用算盘实现机械式计算到电子计算机出现,这期间经历了千年历史。但从1946年第一台通用电子数字计算机ENIAC(Electronics Numerical Integrator And Calculator)开始到现在计算机广泛应用的信息时代,却只有短短的几十年时间。大规模集成电路生产技术的不断提高推动了计算机的飞速发展。摩尔定律(Moore's Law)很好地说明了这个现象。

1965年,Intel公司的创始人之一摩尔(G. Moore)预言:集成电路上的晶体管密度每年将翻倍。现在,这个预言通常被表达为:每隔18个月硅片密度(晶体管容量)将翻倍;也常被表达为:每18个月,集成电路的性能将提高一倍,而其价格将降低一半。这个预言就是所谓的摩尔定律。摩尔预计这个规律将持续10年,而事实上这个规律已经持续了近50年,也许将继续维持5年或10年。

伴随着摩尔定律,我们看到原来封闭在机房的庞大计算机系统已经走入普通家庭,成为日常使用的桌面微机、平板电脑和智能手机。事实上,以微处理器为基础的计算机在整个计算机设计领域占据了统治地位。工作站和PC成为计算机工业的主要产品,使用微处理器的服务器取代了传统的小型机,大型机则几乎都由流行的微处理器组成的多处理器系统取代,甚至高端的巨型机也采用微处理器。更不用说无处不在的嵌入式计算机正改变着我们应用计算机的方式。也正因为如此,为了方便论述,在不会引起歧义的情况下,本书将使用术语“处理器”表示“微处理器”。

但是,摩尔定律不会永远持续,电子器件的物理极限在悄然逼近。20世纪80年代中期以前,微处理器的性能提高主要是工艺技术驱动。此后,微处理器的性能提高更多地得益于计算机系统结构的革新。从通用寄存器结构、精简指令集计算机RISC、高速缓冲存储器Cache、虚拟存储器管理,到指令级并行、线程级并行、单芯片多核心等并行技术,先进的系统结构已经成为提高微处理器性能的主要推动力。本书将以Intel 80x86系列微处理器为例,向读者介绍这些激动人心的技术。

1.2 Intel 80x86 系列处理器

美国Intel公司是目前世界上最有影响的处理器生产厂家,也是世界上第一个处理器芯片的生产厂家,其生产的80x86系列处理器一直是个人微机的主流处理器,该系列处理器的发展就是微型计算机发展的一个缩影。

1.2.1 16位80x86处理器

1971年,Intel公司生产的4位处理器芯片4004宣告了微型计算机时代的到来。1972年,

Intel 公司开发了 8 位处理器 8008 芯片；1974 年，生产了 Intel 8080；1977 年，Intel 公司将 8080 及其支持电路集成在一块集成电路芯片上，形成了性能更高的 8 位处理器 8085。从 1978 年开始，Intel 公司在其 8 位处理器基础上，陆续推出了 16 位结构的 8086、8088 和 80286（也可以表示成 Intel 286，本书采用 80286 这种形式）等处理器，它们在 IBM PC 系列机中获得广泛应用，被称为 16 位 80x86 处理器。

1. 8086

1978 年，Intel 公司推出 16 位 8086 处理器，这是该公司生产的第一个 16 位芯片。8086 的数据总线为 16 位，地址总线为 20 位，主存容量为 1MB，时钟频率为 5MHz。8086 支持的所有指令，即指令系统 (Instruction Set) 成为整个 Intel 80x86 系列处理器的 16 位基本指令集。

为了方便与当时的 8 位外部设备连接，1979 年，Intel 公司推出准 16 位处理器 8088。8088 只是将外部数据总线设计为 8 位，内部仍保持 16 位结构，指令系统等都与 8086 相同。随后的 80186 和 80188 则分别是以 8086 和 8088 为核心并配以支持电路构成的芯片，但它们在 8086 指令系统的基础上增加了若干条实用指令，涉及堆栈、输入输出、移位、乘法、支持高级语言等操作。

处理器芯片的对外引脚 (Pin) 用于与其他电路进行连接，以构成微型计算机。处理器引脚也常称为处理器总线 (Bus)，主要由三组信号总线组成：数据总线 (Data Bus, DB)、地址总线 (Address Bus, AB) 和控制总线 (Control Bus, CB)。

数据总线是处理器与存储器或外设交换信息的通道，其个数 (条数) 就是一次能够传送数据的数据的二进制位数，通常等于处理器字长。

地址总线用于指定存储器或外设的具体单元，其个数反映处理器能够访问的主存储器容量或外设范围。由于每个信号只能为高或低电平两种状态，对应 1 或 0 两种编码，所以对于 20 位地址信号线的 8086 来说，最多能够组合 2^{20} 个状态 (编码)。每个编码就是一个地址，每个地址指示一个存储单元或 I/O 端口，其中包含一个字节 (Byte) 数据。这样，8086 的主存容量为 $2^{20} \text{B} = 1024 \times 1024 \text{B} = 1024 \text{KB} = 1 \text{MB}$ ，这里 $1 \text{KB} = 2^{10} \text{B} = 1024 \text{B}$ 。

控制总线用于控制处理器数据传送等操作，例如，存储器读信号 (MEMR) 有效说明处理器正在从存储器中读取信息，还有存储器写 (MEMW)、外设读 (IOR)、外设写 (IOW) 等信号。

2. 80286

1982 年，Intel 公司推出仍为 16 位结构的 80286 处理器，但地址总线扩展为 24 位，即主存储器具有 16MB 容量。80286 设计了与 8086 工作方式一样的实方式 (Real Mode)，还新增了保护方式 (Protected Mode)。在实方式下，80286 相当于一个快速 8086。在保护方式下，80286 提供了存储管理、保护机制和多任务管理的硬件支持。这些传统上由操作系统实现的功能在处理器硬件支持下，使微机系统的性能得到极大提高。

1.2.2 IA-32 处理器

IBM PC 系列机的广泛应用推动了处理器芯片的生产。Intel 公司在推出 32 位结构的 80386 处理器后，确定 80386 芯片的指令集结构 (Instruction Set Architecture, ISA) 为以后开发的 80x86 系列处理器的标准，称为 Intel 32 位结构 (Intel Architecture-32, IA-32)。现在，Intel 公司的 80386、80486 以及 Pentium 各代处理器统称为 IA-32 处理器或 32 位 80x86 处理器。

1. 80386

1985 年，Intel 80x86 微处理器进入第三代 80386。80386 处理器采用 32 位结构，数据总线为 32 位，地址总线也是 32 位，可寻址 4GB ($1 \text{GB} = 2^{30} \text{B} = 1024 \text{MB}$) 主存，时钟频率有 16、25 和

33MHz。IA-32 指令系统在兼容原 16 位 80286 指令系统的基础上,全面升级为 32 位,还新增了有关位操作、条件设置等指令。

80386 除保持与 80286 兼容外,又提供了虚拟 8086 工作方式(Virtual 8086 Mode)。虚拟 8086 方式是在保护方式下的一种特殊状态,类似于 8086 工作方式但又接受保护方式的管理,能够模拟多个 8086 处理器。32 位 PC 的 Windows 操作系统采用保护方式,其 MS-DOS 命令行(环境)就是虚拟 8086 方式,而早期采用的 DOS 操作系统是以实方式为基础建立的。

为了适应便携机的要求,Intel 公司在 1990 年生产的低功耗节能型芯片中,增加了一种新的工作状态:系统管理方式(System Management Mode, SMM)。它是指当处理器进入这种工作状态后,处理器会根据当时不同的使用环境,自动减速运行,甚至停止运行。这时处理器还可以控制其他部件停止工作,从而使微机的整体耗电降到最少。

2. 80486

1989 年,Intel 公司推出 80486 处理器。它的内部集成了 120 万个晶体管,最初的时钟频率为 25MHz,但很快发展到 33MHz 和 50MHz。从结构上来说,80486 = 80386 + 80387 + 8KB Cache,即 80486 把 80386 处理器与 80387 数学协处理器和 8KB 高速缓冲存储器(Cache)集成在一个芯片上,使处理器的性能大大提高。

传统上,中央处理单元 CPU 主要是整数处理器。为了协助处理器处理浮点数据(实数),Intel 公司设计了数学协处理器,后被称为浮点处理单元(Floating-point Processing Unit, FPU)。配合 8086 和 8088 整数处理器的数学协处理器是 8087,配合 80286 的是 80287,配合 80386 的是 80387。而从 80486 开始,FPU 已经被集成到处理器中。这样,IA-32 处理器能够直接支持浮点数据的操作指令。

高速缓冲存储器是处理器与主存之间速度很快但容量较小的存储器,可以有效地提高整个存储器系统的存取速度。80486 不仅在芯片内部集成有 8KB 第一级高速缓存(L1 Cache),而且支持外部第二级高速缓存(L2 Cache)。

Intel 80x86 系列处理器是传统的复杂指令集计算机(Complex Instruction Set Computer, CISC),它采用大量的、复杂的但功能强大的指令来提高性能。复杂指令一方面提高了处理器性能,另一方面却为进一步提高性能带来了麻烦。所以,人们又转而设计主要由简单指令组成的处理器,以期在新的技术条件下生产更高性能的处理器,这就是精简指令集计算机(Reduced Instruction Set Computer, RISC)。80486 及以后的 IA-32 处理器吸取 RISC 技术特长并将其融入 CISC 中,同时采用流水线方式的指令重叠执行方法,使 80486 可以在一个时钟周期执行完一条简单指令。指令流水线技术是将指令的执行划分成多个步骤,在多个部件中独立地进行,这样使得多条指令可以在不同的执行阶段同时进行,就像工厂中的产品流水线一样。

80486 DX4 综合了此前所使用的所有技术,是 80486 处理器中最快的一种芯片。它采用时钟倍频(Clock Doubling)思想,将外部时钟频率 25MHz 或 33MHz 提高 3 倍作为内部工作时钟频率,形成 75MHz 或 100MHz 两款产品。以前的微机系统中,处理器的内部时钟频率和外部时钟频率是一样的,也是处理器与外围部件的数据传输频率。处理器的时钟频率提高了,系统的运行速度当然也就提高了。但是,当外部数据传输频率太高时,会给外围部件、主板等设计带来困难。为了既能尽量提高处理器的时钟频率以增强性能,又能迁就较慢速的外围部件,使高频率的处理器照样能够使用,Intel 公司使用了这种时钟倍频技术。

3. Pentium

Pentium 芯片即俗称的 80586 处理器,因为数字很难进行商标版权保护的缘故而特意取名。其实,Pentium 是源于希腊文“pente”(数字 5),再加上后缀-ium(化学元素周期表中命名元素常

用的后缀)变化而来的。同时, Intel 公司为其取了一个响亮的中文名称“奔腾”, 并进行了商标注册。

Intel 公司于 1993 年制造成功 Pentium。其内部时钟频率有 120、133、166 和 200MHz 等多款, 外部频率主要是 60MHz 和 66MHz。Pentium 虽然仍属于 32 位结构, 但其与主存连接的外部数据总线却是 64 位的, 这样大大提高了存取主存的速度。

Pentium 引入了超标量 (Superscalar) 技术, 内部具有可以并行工作的两条整数处理流水线, 可以达到每个时钟周期执行两条指令。Pentium 还将 L1 Cache 分成两个彼此独立的 8KB 代码和 8KB 数据高速缓冲存储器, 即双路高速缓冲结构, 这种结构可以减少争用 Cache 的情况。另外, Pentium 对浮点处理单元作了重大改进, 包含了专用的加法、乘法和除法单元。Pentium 还对常用的简单指令直接用硬件逻辑实现, 对指令的微代码进行了重新设计。这些都提高了 Pentium 的整体性能。

4. Pentium Pro

Pentium Pro 于 1995 年正式推出, 原来被称为 P6, 中文名称为“高能奔腾”。Pentium Pro 由两个芯片组成: 一是含 8KB 代码和 8KB 数据 L1 Cache 的 CPU, 它由 550 万个晶体管构成; 二是 CPU 上还封装了 256KB 或 512KB 的 L2 Cache, 它由 1550 万或 3100 万个晶体管构成。Pentium Pro 扩展了超标量技术, 具有 12 级指令流水线, 能同时执行 3 条指令。

Pentium Pro 在处理器结构上的最大革新是采用了动态执行技术。动态执行是 3 种技术结合的总称: 分支预测、数据流分析和推测执行。分支预测技术预测程序的正确转移方向; 数据流分析技术分析哪些指令依赖于其他指令的结果或数据, 以便创建最优的指令执行序列; 而推测执行技术利用分支预测和数据流分析, 推测着执行指令。指令的实际执行顺序是动态的、乱序的, 并不一定是指令的原始静态顺序, 执行的临时结果暂存于处理器的缓冲区中, 但最终的输出执行顺序仍然是指令的正确顺序。动态技术可以使处理器尽量繁忙, 避免可能引起的流水线停顿。

5. Pentium II

前面所述的各代 IA-32 处理器都新增了若干实用指令, 但非常有限。为了顺应微机向多媒体和通信方向发展, Intel 公司及时在其处理器中加入了多媒体扩展 (MultiMedia eXtension, MMX) 技术。MMX 技术于 1996 年正式公布, 它在 IA-32 指令系统中新增了 57 条整数运算多媒体指令, 可以用这些指令对图像、音频、视频和通信方面的程序进行优化, 使微机对多媒体的处理能力较原来有了大幅度提升。MMX 指令应用于 Pentium 处理器就是 Pentium MMX (多能奔腾)。MMX 指令应用于 Pentium Pro 处理器就是 Pentium II, 它于 1997 年推出。

在以往的结构中, L1 Cache 最快, 在处理器内部与处理器同频工作; L2 Cache 次之, 在主板上与主板同频 (即处理器外部频率) 工作。处理器与 L2 Cache 间的通道和处理器与系统其他部件间的通道共用一条 64 位总线, 这就造成主板总线上数据传输混乱、拥挤; 而且由于主板的总线工作频率远低于处理器内部主频 (多倍关系), 使得数据传输速度较慢。Pentium II 采用双重独立总线 (Dual Independent Bus) 结构, 处理器与 L2 Cache 间单独使用一条 64 位的背侧总线, 且其工作频率独自与处理器的主频保持 1/2 的关系。这样, 便提高了 L2 Cache 的速度。Pentium II 内部 L1 Cache 增大为 32KB + 32KB, L2 Cache 为 512KB。对于 233/266/300/333MHz 内频的 Pentium II, 其外频是 66MHz; 后来内频为 350/400/450MHz 的 Pentium II 采用 100MHz 外部频率。

6. Pentium III

1999 年, 针对因特网和三维多媒体程序的应用要求, Intel 公司在 Pentium II 的基础上又新增了 70 条 SSE (Streaming SIMD Extensions) 指令 (原称为 MMX-2 指令), 开发了 Pentium III。SSE 指令侧重于浮点单精度多媒体运算, 极大地提高了浮点 3D 数据的处理能力。SSE 指令类似于 AMD 公

司发布的 3D Now! 指令。由于这些多媒体指令具有显著的单指令多数据 (Single Instruction Multiple Data, SIMD) 处理能力, 即一条指令可以同时进行多组数据的操作, 所以现在统称为 SIMD 指令。

后来, Intel 公司又推出了代号“Coppermine(铜矿)”的改进型 Pentium III。它将半速于 CPU 的 L2 Cache 改成集成在 CPU 芯片中的全速 L2 Cache, 集成了约 1000 万个晶体管, 内频达到 1GHz, 而外频是 133MHz。

7. Pentium 4

Pentium Pro、Pentium II 和 Pentium III 都基于 P6 微结构。2000 年 11 月, Intel 公司推出 Pentium 4。它采用全新的称为 NetBurst 的微结构, 超级流水线达 20 级。最初的 Pentium 4 新增了 76 条 SSE2 指令集, 侧重于增强浮点双精度多媒体运算能力。2003 年, 新一代 Pentium 4 处理器又新增了 13 条 SSE3 指令, 用于补充完善 SIMD 指令集。该处理器具有 1.25 亿个晶体管、3.4GHz 时钟频率, L2 Cache 更是达到了前所未有的 1MB 容量。

处理器性能的提高依赖于新工艺和先进体系结构。半导体工艺水平决定了芯片的集成度和可以达到的时钟频率, 而体系结构则决定了在相同集成度和时钟频率下处理器的执行效率, 所以说体系结构对处理器至关重要。处理器的内部结构通常称为微体系结构或微结构 (Microarchitecture)。

Pentium 4 一方面沿袭指令级并行 (Instruction-Level Parallel, ILP) 方法, 通过进一步发掘指令之间可以同时执行的能力来提高性能, 如其 NetBurst 微结构; 另一方面通过开发线程级并行 (Thread-Level Parallel, TLP) 方法从更高层次发掘程序中的并行性来提高性能, 如其超线程 (Hyper Threading, HT) 技术。进程 (Process) 是一段可以独立运行的程序, 当一个进程被多个处理器以共享代码和地址空间的形式执行时称为线程 (Thread)。在现在服务器应用程序、在线处理、Web 服务甚至桌面应用程序中都包含可以并行执行的多个线程。3.06GHz 的 Pentium 4 开始支持 HT 技术, 它使一个物理处理器对操作系统来说看似有两个逻辑处理器, 这就允许两个程序线程, 不管有关还是无关都可以同时执行。

8. Celeron 和 Xeon

为了满足不断发展的应用和市场需求, Intel 公司从 Pentium II 开始将同一代处理器产品进一步细分。面向低端 (低价位 PC), Intel 公司推出 Celeron (赛扬) 处理器; 面向高端 (服务器), Intel 公司推出 Xeon (至强) 处理器。

Celeron 处理器采用减少高速缓存容量、改用低成本封装或降低时钟频率等方法来降低芯片成本, 是同代处理器的简化版本, 当然性能也有所降低。1998 年, Intel 公司推出首款 Celeron 处理器。它从 Pentium II 衍生而来, 核心为 7500 万个晶体管, 采用 0.25 μm 制造工艺, 内含 32KB L1 Cache, 外部频率仍为 66MHz。开始推出的 266 和 300MHz 的 Celeron 处理器不含 L2 Cache, 也就没有 Pentium II 的最大技术优势——双重独立总线结构, 其性能略高于 233MHz 的 MMX Pentium。后来推出的 300A、333、366 和 533MHz 的 Celeron 内置了 128KB L2 Cache, 性能有了很大提高。2000 年 5 月, 生产了基于 Pentium III 的 Celeron II 处理器。它采用 0.18 μm 制造工艺, 内频有 533 和 566MHz, 但外频仍然保持为 66MHz。2001 年, Celeron II 将外频提升为 100MHz。基于 Pentium 4 等后续产品, 同样也有低端 Celeron 处理器。

Xeon 处理器主要用于网络服务器或图形工作站, 通过增加 Cache 容量、提高工作频率、支持多处理器、率先采用革新新技术等方法提高性能, 但价格也相应较高。另外, 针对便携式 PC (笔记本电脑) 要求功耗低、发热量小等特点, Intel 公司推出了 Pentium M (Mobile) 系列处理器; 还有 Centrino (迅驰) 系列处理器产品, 可以支持无线通信。