

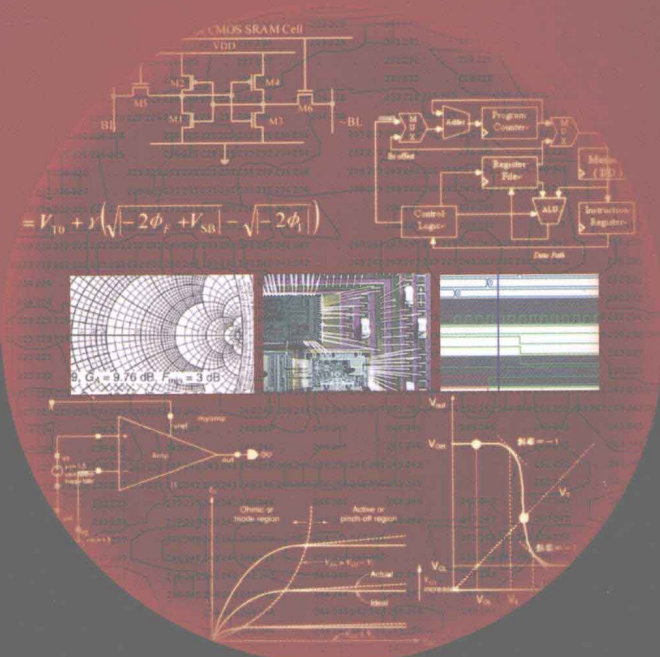
国家集成电路工程领域工程硕士系列教材

国务院学位委员会集成电路工程硕士教育协作组
全国集成电路人才培养基地专家指导委员会

组编

微处理器体系结构

许金纲 王维维 编著



科学出版社
www.sciencep.com

国家集成电路工程领域工程硕士系列教材

国务院学位委员会集成电路工程硕士教育协作组
全国集成电路人才培养基地专家指导委员会

组编

微处理器体系结构

许金纲 王维维 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书是一本系统介绍各种类型微处理器体系结构的教材。作者从与传统的微处理器教材不同的视角,根据自身多年的设计实践与教学经验,全面探讨了包括随机逻辑体系结构、MSPARC 随机逻辑结构、微码体系结构和流水线体系结构等在内的多种微处理器体系结构的特性,以及它们在软硬件设计方面所面临的各种问题,在相应章节给出了各类微处理器的 VHDL 代码以及其行为验证实验,供读者借助电子设计自动化(EDA)工具进行实际仿真模拟实践。本书配有相关习题,方便读者复习每章出现的概念,从而使读者能逐步掌握书中内容并快速地开始设计。

本书适合作为高等院校集成电路设计相关专业工程硕士的教材,并可以作为微处理器硬件与软件设计相关专业高年级本科生和研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

微处理器体系结构/许金纲,王维维编著. —北京:科学出版社,2008

(国家集成电路工程领域工程硕士系列教材)

ISBN 978-7-03-022807-9

I. 微… II. ①许… ②王… III. 数字集成电路—微处理器—系统结构—研究生—教材 IV. TN431.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 124262 号

责任编辑:马长芳 王日臣/ 责任校对:张小霞

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008 年 10 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2008 年 10 月第一次印刷 印张: 12 3/4

印数: 1—3 500 字数: 265 000

定价: 30.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

国家集成电路工程领域工程硕士系列教材

国务院学位委员会集成电路工程硕士教育协作组 组编
全国集成电路人才培养基地专家指导委员会

主 编：严晓浪（浙江大学）

副 主 编：余志平（清华大学，特邀）

审稿人员：（以拼音为序）

陈春章 洪志良

吉利久 罗伟绍

石秉学 时龙兴

唐璞山 吴懿平

肖 钢 于敦山

马长芳（责任编辑 科学出版社）

丛 书 序

随着电子计算机的普及,人类社会已经进入信息化社会。以集成电路为代表的微电子技术是信息科学技术的核心技术。集成电路产业是关系经济建设、社会发展和国家安全的战略性产业。随着半导体技术、计算机技术、多媒体技术、移动通信等技术的不断创新,集成电路技术得到了迅猛发展。自1958年美国的基尔比发明世界上第一块集成电路以来,集成电路已经从初期的小规模集成电路(SSI)发展到今天的系统芯片(SoC),一直按摩尔定律(Moore law)向前演进。集成电路产业包含相对独立的集成电路设计、集成电路加工制造、集成电路封装测试、集成电路材料、集成电路设备业等,而其中的集成电路设计是集成电路产业发展的龙头。

近年来,我国的集成电路产业迅速发展。2000年以来我国的集成电路产值年平均增长率达到30%左右。坚持自主发展,增强技术创新能力和产业核心竞争力,掌握集成电路的核心技术,提高具有自主知识产权产品的比重是我们的历史性任务。

发展集成电路技术的关键是培养具有创新和创业能力的专业人才,因此高质量、较快速度地培养集成电路人才是我们的迫切任务。毫无疑问,大学和大学老师义不容辞地要担负起这一历史责任。2003年以来,教育部先后在全国部分重点高校建设了“国家集成电路人才培养基地”,国务院学位委员会又在2006年批准设立集成电路工程领域培养工程硕士学位课程,意在不仅培养高水平的工学学士、硕士和博士,而且还要培养大量的集成电路工程领域的工程硕士,以满足我国集成电路产业迅速发展的需要。

集成电路技术发展迅速,内容更新快,而我国现有的集成电路工程领域的教科书数量少,而且内容和体系上不能很好地反映学科的发展和工程技术教学的需要,也难以满足集成电路工程领域工程硕士的培养。为此,教育部全国集成电路工程领域工程硕士专业指导委员会和科学出版社,经过广泛而深入的调研,组织编写出版了这套国家集成电路工程领域工程硕士教材。

本系列教材具有以下特色:

1. 内容完整,体系性强。本系列教材包括了集成电路器件、工艺、数字集

成电路设计、模拟集成电路设计、射频集成电路设计以及封装与测试,可以满足集成电路工程领域各个方向的教学。

2. 基础全面,工程性强。教材中不仅对集成电路的基础理论有较详细的论述,而且强调了集成电路的工程性,安排了较大篇幅的内容对具体的集成电路设计技术进行全面的讲解,以使学生在掌握集成电路基础理论的同时,能上机进行具体的设计,加深对理论的理解。

3. 适应教学,自学性强。在教材编写过程中考虑了现有工程硕士的教学时间和教学内容的完整性,对各种教学计划,可以灵活地将教材内容进行裁剪。另外,教材中相对突出了以实验为主的实践环节,以便学生自学。

本系列教材的编写人员,不仅有从事教学第一线的高校教师,而且有从事集成电路设计多年、有丰富实践经验的国际著名集成电路设计公司的资深工程技术人员。在此表示衷心的感谢。

国务院学位委员会集成电路工程硕士教育协作组
全国集成电路人才培养基地专家指导委员会

2008年5月

前 言

“微处理器体系结构”课程的主要内容,是探讨微处理器体系结构的演进、各种体系结构所具有的特性和设计微处理器系统的硬件、软件时两者之间相互影响。

本教材包括以下三个部分:

课本教材:系统而深入地叙述了微处理器体系结构课程的教学内容,从与传统的微处理器教材不同的视角,根据作者在该领域多年的设计实践与教学经验,全面探讨了包括随机逻辑体系结构、MSPARC 随机逻辑结构、微码体系结构和流水线体系结构等在内的多种微处理器体系结构的特性以及在软硬件设计方面所面临的不同问题,而且在相应章节给出了各类微处理器的 VHDL 代码及其行为验证实验,供读者借助计算机设计自动化(EDA)工具进行实际仿真模拟实践。

幻灯片教材:是用于课堂教学的教材,全部课程教学用的幻灯片教材共 400 余张(另行出版)。

英文版课本教材(Notes of Microprocessor Architectures):供读者对照阅读,可增强对课程的了解,同时也可增进读者英文阅读的能力。读者可向作者索取。

本教材的幻灯片及英文版课本是首先完成的。本书初译稿工作的参与者包括清华大学的张炜、韩健,他们完成部分英译汉的前期工作;Cadence 设计系统公司的吴洁整理了校样,特此致谢。

浙江大学的严晓浪、清华大学的余志平和 Cadence 设计系统公司的陈春章、居龙,对于本教材的出版给予很多支持和鼓励,作者借此向他们表达由衷的感谢。

许金纲

2008 年于硅谷

目 录

丛书序

前言

第 1 章 引言	1
1.1 电子技术及计算机的发展	1
1.1.1 计算机体系结构的历史回顾	1
1.1.2 微电子学的成长与处理器的发展	2
1.1.3 现代计算机的分类	4
1.2 微处理器体系结构简介	5
1.2.1 随机逻辑体系结构	6
1.2.2 微码体系结构	6
1.2.3 流水线体系结构	6
1.3 习题	7
第 2 章 随机逻辑体系结构	8
2.1 随机逻辑体系结构的特点	8
2.1.1 逻辑门的最小化	8
2.1.2 优化硬件时序以增强性能	8
2.1.3 限制于采用简单的指令集	9
2.2 随机逻辑体系结构的操作	9
2.2.1 取指令操作	10
2.2.2 执行指令操作	10
2.3 使用时序方法以增强随机逻辑体系结构的性能	11
2.3.1 随机逻辑体系结构中的取指时钟周期及执行时钟周期	11
2.3.2 使用不同长度的单个时钟周期	12
2.3.3 使用不同数目的多个时钟周期	12
2.3.4 时序方法的性能分析	17
2.4 MSPARC 的指令集	19
2.4.1 随机逻辑体系结构指令集的设计	19
2.4.2 MSPARC 的指令集	20
2.5 性能分析	26
2.6 习题	27
第 3 章 MSPARC 随机逻辑结构的 VHDL 模拟模型	28
3.1 配置模块	28

3.2	顶层系统模块	28
3.3	CPU 模块	29
3.3.1	控制单元模块	30
3.3.2	寄存器堆及其他模块	31
3.4	ROM 模块	31
3.5	VHDL 模型的仿真	32
3.5.1	VHDL 模型仿真的指令流	32
3.5.2	仿真结果	33
3.6	实验 1: 随机逻辑结构 CPU 的设计和验证	34
3.6.1	简介	34
3.6.2	设定工具环境	34
3.6.3	随机逻辑结构 CPU 的设计信息	35
3.6.4	验证设计	36
3.7	实验 2: 执行指令的仿真操作	38
3.7.1	简介	38
3.7.2	验证实验 1: 设置寄存器指令的仿真操作	38
3.7.3	验证实验 2: ALU 与逻辑指令的仿真操作	38
3.7.4	验证实验 3: 存储器访问指令的仿真操作	39
3.8	习题	39
第 4 章	微码体系结构	40
4.1	微码体系结构的特点	40
4.2	微码机器操作	40
4.2.1	具有单一数据总线、3 个寄存器、与使用直接寻址的微码机器	42
4.2.2	具有 4 个寄存器使用索引寻址的微码机	46
4.3	微码结构与随机逻辑结构的比较	49
4.3.1	指令集的改变导致不同的硬件设计开销	49
4.3.2	两种结构的性能比较	49
4.3.3	现代微码机器的应用	49
4.4	习题	50
第 5 章	流水线体系结构	51
5.1	流水线体系结构的特性	51
5.2	流水线结构的操作	52
5.2.1	四阶段流水线的操作	52
5.2.2	流水线结构与微码结构的比较	52
5.2.3	流水线阶段与超流水线阶段的比较	53
5.2.4	可视化的流水线阶段	54
5.3	MINI-SPARC 流水线结构的 VHDL 模拟模型	54

5.3.1	Mini-SPARC 的特性	54
5.3.2	配置模块	55
5.3.3	顶层系统模块	55
5.3.4	CPU 模块	55
5.4	实验 3: 流水线结构 CPU 的设计和验证	62
5.4.1	流水线结构 CPU 的设计信息	62
5.4.2	验证设计	63
5.5	实验 4: 执行流水线结构指令的实验	65
5.6	习题	65
第 6 章	流水线结构的冲突	66
6.1	数据冲突	66
6.1.1	数据冲突的两种来源	66
6.1.2	数据冲突的三种形式	67
6.1.3	使用数据旁路以减少写后读冲突	67
6.1.4	将数据旁路加入到 Mini-SPARC 的 VHDL 模型	68
6.1.5	无数据旁路的 Mini-SPARC 模拟	68
6.1.6	使用数据旁路的 Mini-SPARC 模拟	70
6.2	控制冲突	72
6.2.1	控制冲突的来源——分支损失	72
6.2.2	使用分支预测以减少控制冲突	73
6.2.3	当分支目标被正确预测时的操作	74
6.2.4	当分支目标被错误预测时的操作	74
6.2.5	使用延迟分支以减少控制冲突	75
6.2.6	未采用数据和控制冲突改善时的性能分析——微观式的阶段性能和宏观式的统计性能	75
6.2.7	使用数据旁路时的性能增强	76
6.2.8	使用数据旁路、分支预测和延迟分支时的性能增强	77
6.3	结构冲突	77
6.4	使用统一存储器的计算机系统性能增强的分析	78
6.4.1	不使用任何增强措施(无预取队列等)的计算机系统	79
6.4.2	仅使用预取队列增强措施的计算机系统	80
6.4.3	仅使用数据旁路增强措施的计算机系统	80
6.4.4	使用数据旁路、分支预测与延迟分支等增强措施,但无预取队列的计算机系统	81
6.5	习题	82
第 7 章	Cache(高速缓冲存储器)	83
7.1	存储器系统	83
7.1.1	微处理器的速度超过动态随机存取存储器	83

7.1.2 微计算机系统动态随机存取存储器	83
7.1.3 计算机系统存储器层次结构	87
7.2 Cache 结构的分类	89
7.2.1 全相联 Cache	90
7.2.2 直接映射 Cache	91
7.2.3 组相联 Cache	92
7.3 指令 Cache 的结构	92
7.3.1 指令预取队列的使用	93
7.3.2 指令 Cache 的总线介面接口	94
7.4 Cache 的操作	94
7.4.1 直接映射 Cache 的操作	94
7.4.2 两路组相联 Cache 的操作	97
7.4.3 Cache 被分支指令访问时的操作	98
7.4.4 Cache 的两种写入策略	100
7.5 Cache 缺失	101
7.5.1 Cache 缺失的三种类型	101
7.5.2 强制性缺失率、容量缺失率与 Cache 容量之间的关系	101
7.5.3 冲突缺失率与相联度之间的关系	102
7.5.4 Cache 的总缺失率与 Cache 容量之间的关系	102
7.5.5 Cache 的局部性原理	102
7.6 Cache 的性能分析	103
7.6.1 仅使用 L1 级 Cache 系统的性能分析	103
7.6.2 使用 L1 级及 L2 级 Cache 系统的性能分析	106
7.7 习题	108
第 8 章 虚拟存储器	109
8.1 虚拟存储器的特性	109
8.1.1 虚拟存储器与物理存储器之比较	109
8.1.2 虚拟存储器的页面容量	109
8.1.3 虚拟存储器对于缺页的处理	110
8.1.4 虚拟存储器的调页法及按需调页法	110
8.2 通过快表快速查找虚拟存储器所映射的地址	111
8.2.1 快表及 Cache 的寻址结构	112
8.2.2 虚拟索引-物理标记的非全相联 Cache 及 TLB 的总体操作	112
8.3 虚拟存储器的性能分析	115
8.4 习题	116
第 9 章 超标量体系结构	117
9.1 超标量体系结构的特点	117

9.2 超标量结构操作	118
9.2.1 取指令操作	118
9.2.2 指令的发射操作与执行操作	120
9.3 超标量结构的数据冲突	124
9.3.1 读后写(WAR)和写后写(WAW)数据冲突	124
9.3.2 顺序完成的指令执行过程	124
9.3.3 乱序完成的指令执行过程	126
9.4 使用写缓冲器以减低存储器存入操作的暂停时间	129
9.5 性能分析	130
9.5.1 超标量系统的性能分析	130
9.5.2 具有虚拟存储器的超标量系统的性能分析	132
9.6 习题	133
第 10 章 用软件编译辅助改善硬件性能	134
10.1 通过循环展开以减少分支损失	134
10.1.1 原循环代码的执行	134
10.1.2 循环代码的展开及其执行	135
10.2 通过重新调度代码减少数据冲突	136
10.3 通过软件流水线化减少数据的相关性	137
10.3.1 流水线化指令流的执行过程	138
10.3.2 流水线化中的起始代码和结束代码	139
10.4 具有编译器辅助的超标量系统的性能分析	140
10.5 习题	141
附录 A 重要术语	142
附录 B VHDL 模拟模型代码	146
B.1 MSPARC 随机逻辑结构的 VHDL 模拟模型代码	146
B.1.1 Configuration VHDL Code (..\rtl_rl\cfg_random)	146
B.1.2 Interfaces of VHDL Modules	147
B.1.3 Top Level System VHDL Code (..\rtl_rl\cpu_sys)	148
B.1.4 CPU Block VHDL Code (..\rtl\L1_sys_entity, ..\rtl\L1_sys_arc)	150
B.1.5 Control VHDL Code (..\rtl_rl/control)	153
B.1.6 regfile VHDL Code (..\rtl/regfile)	160
B.1.7 alu VHDL Code (..\rtl/alu)	163
B.1.8 MUX VHDL Code (..\rtl/mux2, ..\rtl/mux4)	167
B.1.9 ROM VHDL Code (..\rtl/rom64x16)	168
B.1.10 DRAM VHDL Code (..\rtl\ram64x8)	171
B.2 MINI-SPARC 流水线结构的 VHDL 模拟模型代码	173
B.2.1 Configuration VHDL Code (..\rtl_pipe/cfg_pcpu)	173

B. 2. 2	Interfaces of VHDL Modules	175
B. 2. 3	CPU Block and Pipeline Stages VHDL Code (pcpu. arc)	175
B. 2. 4	Fetch Process VHDL Code (.../rtl_pipe/fetch_arc)	178
B. 2. 5	Decode Process VHDL Code (.../rtl_pipe/decode_arc).....	179
B. 2. 6	Execute Process VHDL Code (.../rtl_pipe/execute_arc)	183
B. 2. 7	Memory Process VHDL Code (.../rtl_pipe/memory_arc)	185
B. 2. 8	Write Process VHDL Code (.../rtl_pipe/write_arc)	186
B. 3	MINI-SPARC 超标量体系结构的 VHDL 模拟模型代码(.../rtl_ss/sscpu)	187

第 1 章 引 言

1.1 电子技术及计算机的发展

1.1.1 计算机体系结构的历史回顾

人类使用机械式的装置来控制复杂的计算,至少可以追溯到 16 世纪。当时的帕斯卡(Pascal)研发出一种机械式计算器,用于税收工作。这种计算器包含 8 块旋转盘,连接成为一个鼓形的装置,每当低位数旋转盘产生一个进位时,连接装置便会自动带动高一位数的旋转盘,而使其向前转进一格。

后来在 19 世纪初,巴贝奇(Babbage)制造出一个称为差分机(difference engine)的计算设备。这个计算设备已具备了现代计算机所常见的许多特性。例如,它会自动阅读输入的数据、存储数据、执行计算,并产生输出的数据,以及使用自动控制的方法进行机器操作等。巴贝奇还制造出一台更为先进的计算机器,称为分析机(analytical engine),这个计算机器具有分支机制,以及使用卡片来编写程序。当时与他共事的爱达·卢富莱斯(Ada Lovelace)——诗人拜伦(Byron)的女儿,写出了目前所知最早的计算机程序。这些程序运行在分析机上,可以解决许多问题。

此后过了一个多世纪,当第二次世界大战爆发时,计算机才又一次取得重大进展。当时德国潜艇严重破坏了英国与同盟国之间的航运,而德国潜艇之间的密码通信,是通过 ENIGMA 密码机来执行的。ENIGMA 所使用的编码程序早就为人所知,但是要使用当时的一般方法来解译 ENIGMA 的密码,却是一个既费时又困难的任务。于是英国数学家阿兰·图灵(Alan Turing)和他的同事们共同研发出一台称为 Colossus 的电子与机械结合的计算机器,成功破译了 ENIGMA 发送的秘密通信。

这台由图灵团队研发出来的,能够成功破译密码的 Colossus,已具备现代电子计算机的许多特性。例如,用纸带输入的信息被存储在电子管内,它的计算过程是在电子管之间进行的,以及它的程序的编写是使用插头板来实现等。

就在图灵致力于研发 Colossus 的同时,美国宾夕法尼亚大学的埃克特(Eckert)和莫齐利(Mauchly),也正在为美国陆军研发用来计算弹道轨迹的计算机。他们的研发成果是美国宾夕法尼亚大学摩尔工程学院的一台电子数字积分计算机(electronic numerical integrator and computer, ENIAC)。ENIAC 一直到第二次世界大战结束之后才正式制造完成,之后被成功地使用了 9 年(1946 ~ 1955)。其主要特性包括:

- (1) 使用了 20 个十进制的 10 位数累加器。
- (2) 依靠人工,通过开关的方式来编写程序。
- (3) 总共使用了 18 000 个电子管,总耗电量 140 kW。

(4) 机器总重 30t, 面积占地 15 000ft² (1ft² = 9.290304 × 10⁻² m²)。

(5) 每秒可以执行 5000 次的加法运算(相当于 0.005 百万条指令/秒(MIPS))。

(6) 它还没有存储程序的概念, 也没有主存。但是这些并没有严重地限制其功能, 因为其主要用途, 是用于某些特定的弹道轨迹计算法。

以下是早期商用计算机发展的简史:

(1) 1952 年冯·诺依曼(von Neumann) 加入了在美国普林斯顿高等研究所的埃克特与莫齐利的团队, 他们共同制造了第一台可存储程序的计算机, 称为 EDVAC。这种可存储程序的计算机的概念, 是他们 3 个人共同研究的成果。从此, “冯·诺依曼结构”就成为可存储式计算机的代名词。EDVAC 具有以下特点:

- 它是第一台实现可存储程序概念的计算机;
- 它的主存中保存着程序与数据;
- 它的算术与逻辑单元(ALU)操作是使用二进制的;
- 它的控制器部分会首先解译存储器中的指令, 然后执行指令;
- 它的控制器部分也控制输入设备与输出设备。

(2) 不久之后, UNIVAC I(universal automatic computer, 通用自动计算机)也被推出:

- 每台 UNIVAC I 的售价为 100 万美元;
- 总共制造了 48 台 UNIVAC I 机器;
- 1950 年美国人口普查局采用 UNIVAC I 进行全国人口普查工作。

(3) 紧接着, UNIVAC II 生产于 20 世纪 50 年代的后期, 其主要特点是具有更快、更多的存储器。

(4) 1953 年国际商用机器公司(IBM)推出了 IBM 701 产品, 它是 IBM 的第一代可存储程序的计算机, 是一种专用于科学研究的计算机。

(5) IBM 702 是 IBM 于 1953 年与 IBM 701 同时推出的商用产品。它是一种商用计算机, 随后导致一系列 IBM 700 / IBM 7000 产品的出现。

(6) 1957 年 DEC 研发出 PDP 系列产品(PDP-1 微型计算机)。

(7) 1964 年 IBM 投资了 50 亿美元, 研发出 IBM 360 大型计算机的一系列产品。

1.1.2 微电子学的成长与处理器的发展

1947 年美国贝尔(Bell)实验室的威廉·肖克利(William Shockley)等人发明了晶体管。晶体管的特点: 它是由硅元素制造的固态器件, 因其体积小、价钱便宜和更少的热能消耗, 从而完全替代了电子管的使用。

第二代计算机生产时就已经开始使用晶体管元件了, 它们包括:

- (1) 国家收款机公司(NCR) 与美国无线电公司(RCA) 生产的小型晶体管机器。
- (2) IBM 生产的 IBM 7000。
- (3) 1957 年 DEC 公司 推出的 PDP-1。

现代的计算机是由微电子学中的门电路、存储器单元通过互相连接所组成。它们一般都是在被称为硅晶圆片的半导体材料上制造出来的。

英特尔公司的戈登·摩尔(Gordon Moore)在1965年观察到一个满芯片的晶体管的总数,每年将会以成倍的速度增加。这个摩尔定律从那时起就被持续地证明是正确的。目前又有更多的证据显示,一个芯片上的晶体管数量在未来的许多年内,都会根据摩尔定律持续不变地上升,如图1-1所示。

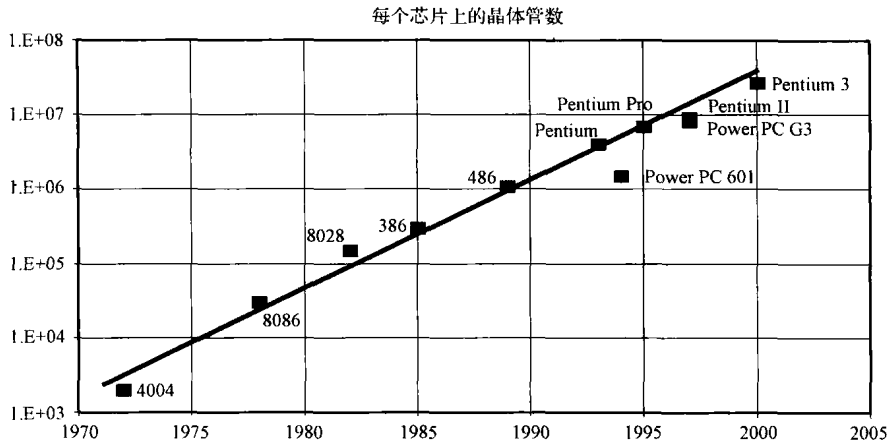


图 1-1 芯片的晶体管根据摩尔定律上升

微处理器的速度(或者性能),按照 SPEC 基准程序的测量,到目前为止已经得到很大提升,如图1-2所示。

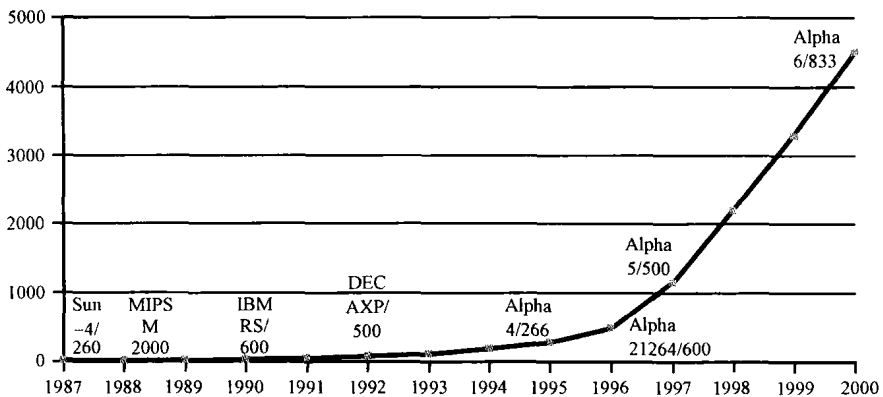


图 1-2 微处理器性能的增长速率

自从20世纪80年代中期以来,微处理器性能的增长速率远高于1980年之前的速率。在其后的16年中,微处理器的性能大约增加了1600倍。在1980年以前,性能的增长很大程度上是由生产制造技术的进步造成的,但是自从1980年以后,性能的增长则应归功于结构上和组织上的许多新想法。

表1-1显示出微电子技术的进步,带来各代计算机的相应演进。

表 1-1 计算机的演进

类型	桌面计算机服务器	每个芯片上的设备
电子管	1946~1957	—
晶体管	1958~1964	—
小规模集成电路	1965	可达 100
中规模集成电路	1971	100~3000
大规模集成电路	1971~1977	3000~ 10^5
超大规模集成电路	1978 至今	$10^5 \sim 10^8$
甚大规模集成电路	—	10^8 以上

与此同时,虽然存储器芯片的容量与价格之比在过去的 20 年中也同样地有所进步,如图 1-3 所示,但就运行速度而言,CPU 早已经大幅度地超前提升了,而存储器与磁盘的进步却相对较小,因而导致计算机在结构、操作系统及程序编写等方面相应地发生了极大的改变。

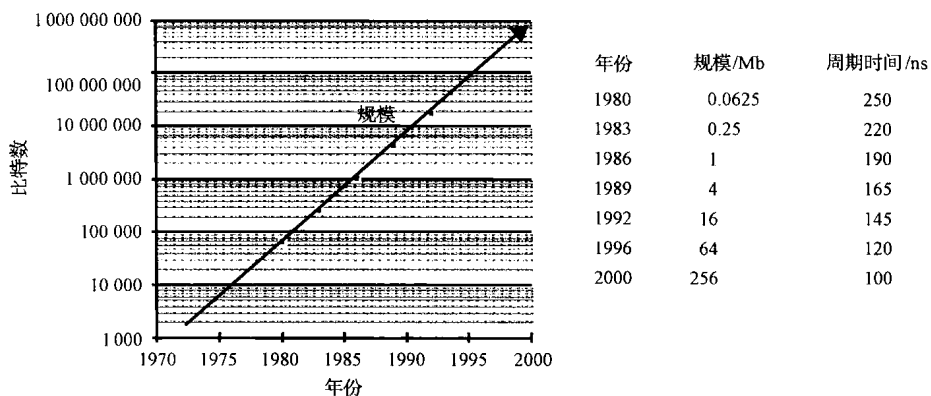


图 1-3 存储器芯片的容量与价格比

表 1-2 是逻辑电路、动态存储器及磁盘发展速度的回顾。

表 1-2 逻辑电路、动态存储器和磁盘的发展速度

	容量	速度(延迟)
逻辑电路	3 年内提高 2 倍	3 年内提高 2 倍
动态存储器	3 年内提高 4 倍	10 年内提高 2 倍
磁盘	3 年内提高 4 倍	10 年内提高 2 倍

1.1.3 现代计算机的分类

早期的计算机只有大型的主机系统,而现代所有的计算机系统可以划分为以下三类:桌面计算机、服务器、嵌入式计算机。

(1) 桌面计算机包括:低端的个人计算机(PC)、高端的工作站。