

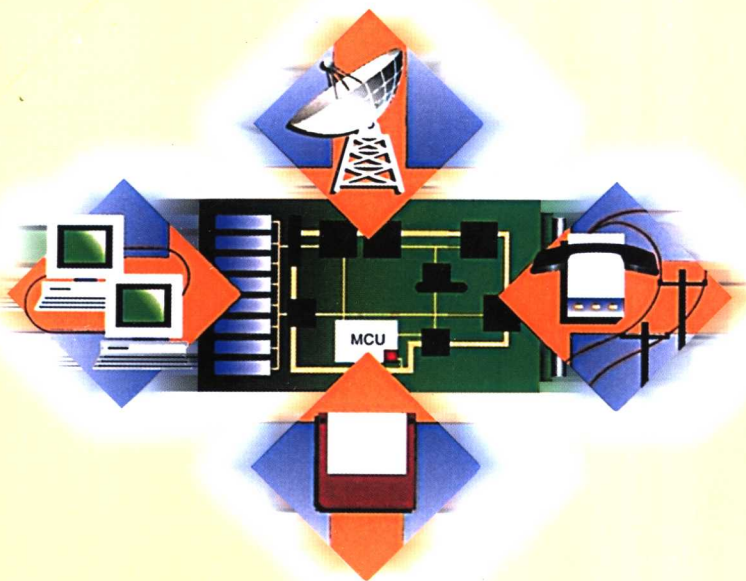


普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
国家级精品课程主干教材与教学设备

# 计算机组成原理

第四版·立体化教材

白中英 主编  
戴志涛 周锋 杨旭东 张杰 编著  
杨士强 主审



 科学出版社  
www.sciencep.com

TP3/68=5

2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
国家级精品课程主干教材与教学设备

---

# 计算机组成原理

(第四版·立体化教材)

白中英 主编

戴志涛 周锋 杨旭东 张杰 编著

杨士强 主审

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书讲授计算机单处理机系统的组成和工作原理。内容分12章：(1)计算机系统概论，(2)运算方法和运算器，(3)存储系统，(4)指令系统，(5)中央处理机，(6)总线系统，(7)外围设备，(8)输入输出系统，(9)操作系统支持，(10)安腾高性能处理机体系结构，(11)教学实验设计，(12)课程综合设计。

本书是作者对“计算机组成原理”课程体系、教学内容、教学方法、教学手段进行综合改革的具体成果。

本书特色：基础性、时代性、系统性、实践性、实用性融为一体，文字教材、多媒体CAI软件、教学课件、习题答案库、自测试题库、教学仪器、实验设计、课程设计综合配套，形成“理论、实验、设计”三个过程相统一的立体化教学体系。全书文字流畅，通俗易懂，有广泛的适应面，是大专院校计算机系的教材，也可作为成人自学考试和全国计算机等级考试NCRE(四级)用书。

本书第三版获2002年教育部全国优秀教材一等奖，2005年国家级教学成果二等奖。第四版是普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

### 图书在版编目(CIP)数据

计算机组成原理/白中英主编. —4版. —北京: 科学出版社, 2008. 1

普通高等教育“十一五”国家级规划教材. 国家级精品课程主干教材与教学设备. 立体化教材

ISBN 978-7-03-020824-8

I. 计… II. 白… III. 计算机体系结构-高等学校-教材 IV. TP303

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第007868号

责任编辑: 陆新民 / 责任校对: 刘小梅

责任印制: 张克忠 / 封面设计: 陈 敬

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>

新蕾印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经售

\*

2007年12月第 四 版 开本: 787×1092 1/16

2007年12月第六十一次印刷 印张: 23 1/4 插页: 1

印数: 858 001~878 000 字数: 553 000

定价: 39.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈环伟〉)

## 第四版前言

“计算机组成原理”是计算机科学与技术系的一门核心专业基础课程。从课程地位来说，它在先导课和后续课之间起着承上启下的作用。

“计算机组成原理”讲授单处理机系统的组成和工作原理，课程教学具有知识面广、内容多、难度大、更新快等特点。另一方面，体现课程特点的教材对于提高教学水平，培养人才质量起着十分重要的作用。作者认为，一本好的“计算机组成原理”教材主要应具备：

- (1) 基础性强，知识结构合理，为学生学习后续课程和建立终生知识体系打下良好基础；
- (2) 系统性强，知识模块彼此交互，使学生能清晰地建立计算机整机概念；
- (3) 时代性强，及时反映前沿方向，以适应计算机科学技术快速发展的需要；
- (4) 实践性强，理论教学与实践教学结合，注重学生的智力开发和能力的培养；
- (5) 应用性强，有较广的适应面，以适应学生在各类计算机上从事开发应用的需要。
- (6) 启发性强，结合计算机科学技术的重大进展，培养学生的创新思维和创新意识。

本书第三版于2002年由科学出版社出版发行，全国有390多所院校用作本科生教材，也有不少省市用作成人教育教材。回首消逝岁月，本书第三版在人才培养中发挥了一定的作用，同行们给予了充分肯定，这是作者感到聊以自慰的。

根据作者们多年从事“计算机组成原理”课程理论教学和实践教学的经验，从传授知识和培养能力的目标出发，并结合本课程教学的特点、难点和要点，这次新版教材编写中又进行了课程体系、教学内容、教学方法和教学手段的改革，使文字教材、多媒体CAI软件、教学课件、习题库、试题库、教学仪器、实验设计、课程设计综合配套，力求形成“理论、实验、设计”三个过程相统一的立体化教学体系。理论教学计划64学时，实践教学学时单独安排。成人教育中采用本教材的院校、非计算机专业教学中采用本教材替代“微机原理”课程的院校，可根据各校情况调整学时或删减教学内容。

杨春武、靳秀国、于艳丽、冯一兵、祁之力、王军德、覃健诚、白缓、刘俊荣、张振华、宗华丽、李娇娇、王晓梅、胡文发、杨秦、刘震、王飞杰、高明、常培、张果桃、赵玉霞、郝静、苏飞、吴璇、杨光辉、杨孟柯等参与了第四版文字教材、CAI软件、教学课件、习题库、试题库、教学仪器、实验设计、课程设计等的编写和研制工作，限于版面，未能在封面上一一署名。

本书由中国科学院清华大学计算机科学与技术系杨士强教授主审。清华大学科教仪器厂李鸿儒教授、深圳艾雷斯科技有限公司张盛容总工、美国Lattice半导体有限公司陈恒先生为本书的出版给予了大力帮助。科学出版社陆新民责编为本书的出版付出了心血。在此，作者一并向他们表示衷心感谢。

白中英

北京邮电大学计算机科学与技术学院

2007年10月

# 目 录

## 第四版前言

<b>第一章 计算机系统概论</b> .....	1
1.1 计算机的分类 .....	1
1.2 计算机的发展简史 .....	2
1.2.1 计算机的五代变化 .....	2
1.2.2 半导体存储器的发展 .....	3
1.2.3 微处理器的发展 .....	3
1.2.4 计算机体系结构的变化 .....	5
1.3 计算机的硬件 .....	5
1.3.1 硬件组成要素 .....	5
1.3.2 运算器 .....	7
1.3.3 存储器 .....	7
1.3.4 控制器 .....	8
1.3.5 适配器与输入输出设备 .....	10
1.4 计算机的软件.....	11
1.4.1 软件的组成与分类 .....	11
1.4.2 软件的发展演变 .....	12
1.5 计算机系统的层次结构.....	13
1.5.1 多级组成的计算机系统 .....	13
1.5.2 软件与硬件的逻辑等价性.....	14
本章小结 .....	15
习题 .....	15
<b>第二章 运算方法和运算器</b> .....	16
2.1 数据与文字 的表示方法.....	16
2.1.1 数据格式 .....	16
2.1.2 数的机器码表示 .....	19
2.1.3 字符与字符串的表示方法.....	23
2.1.4 汉字的表示方法 .....	24
2.1.5 校验码 .....	25
2.2 定点加法、减法运算 .....	26
2.2.1 补码加法 .....	26
2.2.2 补码减法 .....	27
2.2.3 溢出概念与检测方法 .....	28
2.2.4 基本的二进制加法/减法器 .....	30

2.3	定点乘法运算	31
2.3.1	原码并行乘法	31
2.3.2	直接补码并行乘法	37
2.4	定点除法运算	40
2.4.1	原码除法算法原理	40
2.4.2	并行除法器	41
2.5	定点运算器的组成	44
2.5.1	逻辑运算	44
2.5.2	多功能算术/逻辑运算单元(ALU)	46
2.5.3	内部总线	51
2.5.4	定点运算器的基本结构	51
2.6	浮点运算方法和浮点运算器	53
2.6.1	浮点加法、减法运算	53
2.6.2	浮点乘法、除法运算	56
2.6.3	浮点运算流水线	58
2.6.4	浮点运算器实例	61
	本章小结	63
	习题	63
<b>第三章</b>	<b>内部存储器</b>	<b>65</b>
3.1	存储器概述	65
3.1.1	存储器的分类	65
3.1.2	存储器的分级	66
3.1.3	主存储器的技术指标	66
3.2	SRAM 存储器	67
3.2.1	基本的静态存储元阵列	67
3.2.2	基本的 SRAM 逻辑结构	68
3.2.3	读/写周期波形图	69
3.3	DRAM 存储器	70
3.3.1	DRAM 存储位元的记忆原理	70
3.3.2	DRAM 芯片的逻辑结构	71
3.3.3	读/写周期、刷新周期	72
3.3.4	存储器容量的扩充	73
3.3.5	高级的 DRAM 结构	75
3.3.6	DRAM 主存读/写的正确性校验	79
3.4	只读存储器和闪存存储器	80
3.4.1	只读存储器 ROM	80
3.4.2	FLASH 存储器	83
3.5	并行存储器	86
3.5.1	双端口存储器	86

3.5.2 多模块交叉存储器 .....	89
3.6 cache 存储器 .....	92
3.6.1 cache 基本原理 .....	92
3.6.2 主存与 cache 的地址映射 .....	94
3.6.3 替换策略 .....	98
3.6.4 cache 的写操作策略 .....	99
3.6.5 Pentium 4 的 cache 组织 .....	100
本章小结 .....	101
习题 .....	101
<b>第四章 指令系统</b> .....	<b>103</b>
4.1 指令系统的发展与性能要求 .....	103
4.1.1 指令系统的发展 .....	103
4.1.2 对指令系统性能的要求 .....	104
4.1.3 低级语言与硬件结构的关系 .....	104
4.2 指令格式 .....	105
4.2.1 操作码 .....	105
4.2.2 地址码 .....	106
4.2.3 指令字长度 .....	107
4.2.4 指令助记符 .....	107
4.2.5 指令格式举例 .....	108
4.3 操作数类型 .....	110
4.3.1 一般的数据类型 .....	110
4.3.2 Pentium 数据类型 .....	110
4.3.3 Power PC 数据类型 .....	111
4.4 指令和数据的寻址方式 .....	111
4.4.1 指令的寻址方式 .....	112
4.4.2 操作数基本寻址方式 .....	112
4.4.3 寻址方式举例 .....	116
4.5 典型指令 .....	119
4.5.1 指令的分类 .....	119
4.5.2 基本指令系统的操作 .....	121
4.5.3 精简指令系统 .....	121
本章小结 .....	124
习题 .....	125
<b>第五章 中央处理机</b> .....	<b>127</b>
5.1 CPU 的功能和组成 .....	127
5.1.1 CPU 的功能 .....	127
5.1.2 CPU 的基本组成 .....	127
5.1.3 CPU 中的主要寄存器 .....	128

5.1.4	操作控制器与时序产生器 .....	130
5.2	指令周期 .....	130
5.2.1	指令周期的基本概念 .....	130
5.2.2	MOV 指令的指令周期 .....	132
5.2.3	LAD 指令的指令周期 .....	134
5.2.4	ADD 指令的指令周期 .....	135
5.2.5	STO 指令的指令周期 .....	135
5.2.6	JMP 指令的指令周期 .....	137
5.2.7	用方框图语言表示指令周期 .....	139
5.3	时序产生器和控制方式 .....	141
5.3.1	时序信号的作用和体制 .....	141
5.3.2	时序信号产生器 .....	142
5.3.3	控制方式 .....	144
5.4	微程序控制器 .....	145
5.4.1	微程序控制原理 .....	145
5.4.2	微程序设计技术 .....	151
5.5	硬连线控制器 .....	155
5.6	传统 CPU .....	158
5.6.1	Intel 8088 CPU .....	158
5.6.2	IBM 370 系列 CPU .....	160
5.7	流水 CPU .....	161
5.7.1	并行处理技术 .....	161
5.7.2	流水 CPU 的结构 .....	161
5.7.3	流水线中的主要问题 .....	164
5.7.4	奔腾 CPU .....	166
5.8	RISC CPU .....	171
5.8.1	RISC 机器的特点 .....	171
5.8.2	RISC CPU 实例 .....	172
5.9	多媒体 CPU .....	175
5.9.1	多媒体技术的主要问题 .....	175
5.9.2	MMX 技术 .....	176
5.9.3	动态执行技术 .....	179
	本章小结 .....	180
	习题 .....	181
<b>第六章</b>	<b>总线系统</b> .....	<b>184</b>
6.1	总线的概念和结构形态 .....	184
6.1.1	总线的基本概念 .....	184
6.1.2	总线的连接方式 .....	185
6.1.3	总线的内部结构 .....	187



6.1.4	总线结构实例	188
6.2	总线接口	190
6.2.1	信息传送方式	190
6.2.2	总线接口的基本概念	191
6.3	总线的仲裁	193
6.3.1	集中式仲裁	193
6.3.2	分布式仲裁	195
6.4	总线的定时和数据传送模式	196
6.4.1	总线的定时	196
6.4.2	总线数据传送模式	198
6.5	HOST 总线和 PCI 总线	199
6.5.1	多总线结构	199
6.5.2	PCI 总线信号	200
6.5.3	总线周期类型	201
6.5.4	总线周期操作	202
6.5.5	总线仲裁	204
6.6	InfiniBand 标准	204
6.6.1	InfiniBand 的体系结构	204
6.6.2	InfiniBand 的通信协议	205
	本章小结	207
	习题	207
<b>第七章</b>	<b>外围设备</b>	<b>209</b>
7.1	外围设备概述	209
7.1.1	外围设备的一般功能	209
7.1.2	外围设备的分类	209
7.2	磁盘存储设备	210
7.2.1	磁记录原理	210
7.2.2	磁盘的组成和分类	213
7.2.3	磁盘驱动器和控制器	214
7.2.4	磁盘上信息的分布	215
7.2.5	磁盘存储器的技术指标	216
7.3	磁盘存储设备的技术发展	218
7.3.1	磁盘 cache	218
7.3.2	磁盘阵列 RAID	218
7.3.3	可移动存储设备	219
7.4	磁带存储设备	220
7.5	光盘和磁光盘存储设备	221
7.5.1	光盘存储设备	221
7.5.2	磁光盘存储设备	223

7.6	显示设备	224
7.6.1	显示设备的分类与有关概念	224
7.6.2	字符/图形显示器	225
7.6.3	图像显示设备	227
7.6.4	VESA 显示标准	228
7.7	输入设备和打印设备	230
7.7.1	输入设备	230
7.7.2	打印设备	232
	本章小结	233
	习题	234
<b>第八章</b>	<b>输入输出系统</b>	<b>236</b>
8.1	外围设备的速度分级与信息交换方式	236
8.1.1	外围设备的速度分级	236
8.1.2	信息交换方式	237
8.2	程序查询方式	239
8.3	程序中断方式	242
8.3.1	中断的基本概念	242
8.3.2	程序中断方式的基本 I/O 接口	244
8.3.3	单级中断	245
8.3.4	多级中断	247
8.3.5	中断控制器	250
8.3.6	Pentium 中断机制	251
8.4	DMA 方式	253
8.4.1	DMA 的基本概念	253
8.4.2	DMA 传送方式	254
8.4.3	基本的 DMA 控制器	256
8.4.4	选择型和多路型 DMA 控制器	258
8.5	通道方式	261
8.5.1	通道的功能	261
8.5.2	通道的类型	262
8.5.3	通道结构的发展	263
8.6	通用 I/O 标准接口	264
8.6.1	并行 I/O 标准接口 SCSI	264
8.6.2	串行 I/O 标准接口 IEEE1394	265
	本章小结	268
	习题	268
<b>第九章</b>	<b>操作系统支持</b>	<b>271</b>
9.1	操作系统概述	271
9.1.1	操作系统的概念	271

9.1.2	操作系统的功能	272
9.1.3	操作系统的特性及其需要解决的问题	273
9.1.4	操作系统的硬件环境	275
9.2	调度	277
9.2.1	进程	277
9.2.2	调度的层次	278
9.2.3	处理机调度的实现	279
9.3	存储管理	281
9.3.1	分区式存储管理	281
9.3.2	交换技术和分页技术	281
9.4	虚拟存储器	282
9.4.1	虚拟存储器的基本概念	282
9.4.2	页式虚拟存储器	284
9.4.3	段式虚拟存储器和段页式虚拟存储器	286
9.4.4	虚存的替换算法	289
9.5	存储保护	289
9.5.1	存储区域保护	290
9.5.2	访问方式保护	292
9.6	奔腾系列机的虚存组织	292
9.6.1	存储器模型	293
9.6.2	虚地址模式	293
9.6.3	分页模式下的地址转换	294
	本章小结	295
	习题	296
<b>第十章</b>	<b>安腾高性能处理机体系结构</b>	<b>298</b>
10.1	高性能处理机体系结构的演变	298
10.1.1	IA 体系结构的历史演变	298
10.1.2	英特尔 64 位处理机的两种体系结构	299
10.2	安腾体系结构的基本设计思想	300
10.3	安腾指令系统结构	303
10.3.1	执行单元与指令类型	303
10.3.2	安腾寄存器结构	303
10.3.3	安腾指令格式	304
10.3.4	安腾汇编语言格式	306
10.4	指令级并行机制	307
10.4.1	推断执行技术	307
10.4.2	推测技术	310
10.5	双核安腾处理机的组成	313
10.5.1	双核安腾处理机的基本特性	313

10.5.2 双核安腾处理机的组织结构 .....	314
本章小结 .....	317
习题 .....	318
<b>第十一章 教学实验设计</b> .....	<b>320</b>
11.1 教学实验仪器与测试工具 .....	320
11.1.1 TEC-5 数字逻辑与计算机组成实验系统 .....	320
11.1.2 逻辑测试笔 .....	322
11.2 TEC-5 实验系统的模块结构 .....	323
11.2.1 教学实验设计的基本理念 .....	323
11.2.2 运算器模块 .....	323
11.2.3 操作控制台模块 .....	325
11.2.4 存储器模块 .....	327
11.2.5 控制器模块 .....	327
11.3 运算器组成实验 .....	331
11.4 双端口存储器实验 .....	334
11.5 数据通路实验 .....	336
11.6 微程序控制器实验 .....	338
11.7 CPU 组成与指令周期实验 .....	344
<b>第十二章 课程综合设计</b> .....	<b>347</b>
12.1 使用硬连线控制器的 CPU 设计 .....	347
12.2 多功能 ALU 设计 .....	351
12.3 含有阵列乘法器的 ALU 设计 .....	351
12.4 RAM 故障诊断设计 .....	353
<b>参考文献</b> .....	<b>355</b>
<b>附录 A 《计算机组成原理》(第四版·立体化教材)配套教学设备</b> .....	<b>356</b>
<b>附录 B “计算机组成原理”国家级精品课程建设经验</b> .....	<b>357</b>

# 第一章 计算机系统概论

计算机系统不同于一般的电子设备，它是一个由硬件、软件组成的复杂的自动化设备。本章先说明计算机的分类，然后采用自上而下的方法，简要地介绍硬件、软件的概念和组成，目的在于使读者先有一个粗略的总体概念，以便于展开后续各章内容。

## 1.1 计算机的分类

电子计算机从总体上来说分为两大类。一类是电子模拟计算机。“模拟”就是相似的意思；例如计算尺是用长度来标示数值；时钟是用指针在表盘上转动来表示时间；电表是用角度来反映电量大小，这些都是模拟计算装置。模拟计算机的特点是数值由连续量来表示，运算过程也是连续的。

另一类是电子数字计算机，它是在算盘的基础上发展起来的，是用数目字来表示数量的大小。数字计算机的主要特点是按位运算，并且不连续地跳动计算。表 1.1 列出了电子数字计算机与电子模拟计算机的主要区别。

表 1.1 数字计算机与模拟计算机的主要区别

比较内容	数字计算机	模拟计算机
数据表示方式	数字 0 和 1	电压
计算方式	数字计数	电压组合和测量值
控制方式	程序控制	盘上连线
精度	高	低
数据存储量	大	小
逻辑判断能力	强	无

电子模拟计算机由于精度和解题能力都有限，所以应用范围较小。电子数字计算机则与模拟计算机不同，它是以近似于人类的“思维过程”来进行工作的，所以有人把它叫做**电脑**。它的发明和发展是 20 世纪人类最伟大的科学技术成就之一，也是现代科学技术发展水平的主要标志。习惯上所称的**电子计算机**，一般是指现在广泛应用的电子数字计算机。

数字计算机进一步又可分为专用计算机和通用计算机。专用和通用是根据计算机的效率、速度、价格、运行的经济性和适应性来划分的。专用机是最有效、最经济和最快速的计算机，但是它的适应性很差。通用计算机适应性很大，但是牺牲了效率、速度和经济性。

通用计算机可分超级计算机、大型机、服务器、工作站、微型机和单片机六类，它们的区别在于体积、简易性、功率损耗、性能指标、数据存储容量、指令系统规模和机器价格，见图 1.1。一般来说，超级计算机主要用于科学计算，其运算速度在每秒亿万次以上，数据存储容量很大，结构复杂，价格昂贵。而单片计算机是只用一片集成电路

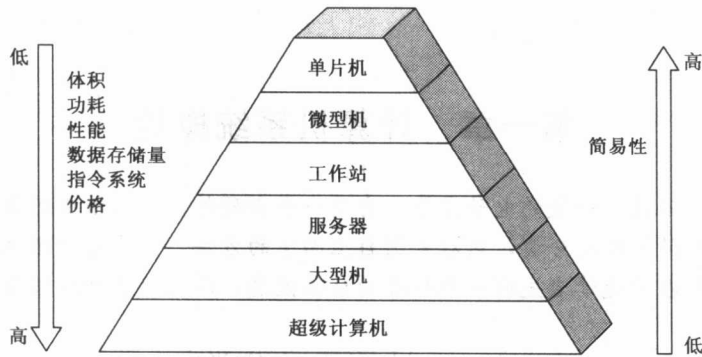


图 1.1 单片机、微型机、工作站、服务器、大型机、超级计算机之间的区别

做成的计算机，体积小，结构简单，性能指标较低，价格便宜。介于超级计算机和单片机之间的是大型机、服务器、工作站和微型机，它们的结构规模和性能指标依次递减。但是随着超大规模集成电路的迅速发展，微型机、工作站等彼此之间的概念也在发生变化，因为今天的工作站可能就是明天的微型机，而今天的微型机可能就是明天的单片机。专用计算机是针对某一任务设计的计算机，一般来说，其结构要比通用机简单。目前已经出现了多种型号的单片专用机及嵌入式单片机，用于测试或控制。

## 1.2 计算机的发展简史

### 1.2.1 计算机的五代变化

世界上第一台电子数字计算机是 1946 年在美国宾夕法尼亚大学制成的。这台机器用了 18000 多个电子管，占用长度超过 30 米的房间，重量达 30 吨，而运算速度只有 5000 次/秒。从今天的眼光来看，这台计算机耗费既大又不完善，但却是科学史上一次划时代的创新，它奠定了电子计算机的基础。自从这台计算机问世 60 多年来，从使用的器件角度来说，计算机的发展大致经历了五代的变化：

第一代为 1946—1957 年，电子管计算机。计算机运算速度为每秒几千次至几万次，体积庞大，成本很高，可靠性较低。在此期间，形成了计算机的基本体系，确定了程序设计的基本方法，**数据处理机**开始得到应用。

第二代为 1958—1964 年，晶体管计算机。运算速度提高到几万次至几十万次，可靠性提高，体积缩小，成本降低。在此期间，**工业控制机**开始得到应用。

第三代为 1965—1971 年，中小规模集成电路计算机。可靠性进一步提高，体积进一步缩小，成本进一步下降，运算速度提高到几十万次至几百万次。在此期间形成机种多样化，生产系列化，使用系统化，**小型计算机**开始出现。

第四代为 1972—1990 年，大规模和超大规模集成电路计算机，可靠性更进一步提高，体积更进一步缩小，成本更进一步降低，速度提高到每秒 1000 万次至 1 亿次。由几片大规模集成电路组成的**微型计算机**开始出现。

第五代为 1991 年开始的巨大规模集成电路计算机，运算速度提高到每秒 10 亿次。由一片巨大规模集成电路实现的**单片计算机**开始出现。

总之，从1946年计算机诞生以来，大约每隔五年运算速度提高10倍，可靠性提高10倍，成本降低10倍，体积缩小10倍。而20世纪70年代以来，计算机的生产数量每年以25%的速度递增。

值得一提的是，计算机从第三代起，与集成电路技术的发展密切相关。LSI的采用，一块集成电路芯片上可以放置1000个元件，VLSI达到每个芯片1万个元件，现在的ULSI芯片超过了100万个元件。1965年摩尔观察到芯片上的晶体管数量每年翻一番，1970年这种态势减慢成每18个月翻一番，这就是人们所称的摩尔定律。直到目前，这个增长速率仍在持续下去。

### 1.2.2 半导体存储器的发展

20世纪50~60年代，所有计算机存储器都是由微小的铁磁体环(磁芯)做成，每个磁芯直径约1mm。这些小磁芯处在计算机内用三条细导线穿过网格板上。每个磁芯的一种磁化方向代表一个1，另一个磁化方向则代表一个0。磁芯存储器速度相当快，读存储器中的一位只需1个微秒。但是磁芯存储器价格昂贵，体积大，而且读出是破坏性的，因此必须有读出后立即重写数据的电路。更重要的在于工艺复杂，甚至手工制作。

1970年，仙童半导体公司生产出了第一个较大容量半导体存储器。一个相当于单个磁芯大小的芯片，包含了256位的存储器。这种芯片是非破坏性的，而且读写速度比磁芯快得多，读出一位只要70纳秒，但是其价格比磁芯要贵。

1974年每位半导体存储器的价格低于磁芯。这以后，存储器的价格持续快速下跌，但存储密度却不断增加。这导致了新的机器比它之前的机器更小、更快、存储容量更大，价格更便宜。存储器技术的发展，与处理器技术的发展一起，在不到10年里改变了计算机的生命力。虽然庞大昂贵的计算机仍然存在，但计算机已经走向了个人电脑时代。

从1970年起，半导体存储器经历了11代：单个芯片1KB、4KB、16KB、64KB、256KB、1MB、4MB、16MB、64MB、256MB和现在的1GB。其中 $1K=2^{10}$ ， $1M=2^{20}$ ， $1G=2^{30}$ 。每一代比前一代存储密度提高4倍，而每位价格和存取时间都在下降。

### 1.2.3 微处理器的发展

同存储器芯片一样，处理器芯片的单元密度也在不断增加。随着时间的推移，每块芯片上的单元个数越来越多，因此构建一个计算机处理器所需的芯片越来越少。表1.2列出了Intel公司微处理器的演化。

1971年Intel公司开发出Intel 4004。这是第一个将CPU的所有元件都放入同一块芯片内的产品，于是，微处理器诞生了。

4004能完成两个4位数相加，通过重复相加能完成乘法。按今天的标准，4004虽然过于简单，但是它却成为微处理器的能力和功能不断发展的奠基者。

微处理器演变中的另一个主要进步是1972年出现的Intel 8008，这是第一个8位微处理器，它比4004复杂一倍。

表 1.2 Intel 微处理器的演化

**(a) 20 世纪 70 年代的处理器**

型 号	4004	8008	8080	8086	8088
发布时间	1971	1972	1974	1978	1979
时钟速率	108kHz	108kHz	2MHz	5MHz, 8MHz, 10MHz	5MHz, 8MHz
总线宽度	4 位	8 位	8 位	16 位	8 位
晶体管数	2300	3500	6000	29000	29000
特征尺寸(微米)	10		6	3	3
可寻址存储器	640B	16KB	64KB	1MB	1MB
虚拟存储器	--	--	--	--	--

**(b) 20 世纪 80 年代的处理器**

型 号	80286	386TM DX	386TM SX	486TM DX
发布时间	1982	1985	1988	1989
时钟速率	6~12.5MHz	16~33MHz	16~33MHz	25~50MHz
总线宽度	16 位	32 位	16 位	32 位
晶体管数	134 000	275 000	275 000	1 200 000
特征尺寸(微米)	1.5	1	1	0.8~1
可寻址存储器	16MB	4GB	16MB	4GB
虚拟存储器	1GB	64TB	64TB	64TB

**(c) 20 世纪 90 年代的处理器**

型 号	486TM SX	Pentium	Pentium Pro	Pentium II
发布时间	1991	1993	1995	1997
时钟速率	16~33MHz	60~166MHz	150~220MHz	200~300MHz
总线宽度	32 位	32 位	64 位	64 位
晶体管数	1.185 百万	3.1 百万	5.5 百万	7.5 百万
特征尺寸(微米)	1	0.8	0.6	0.35
可寻址存储器	4MB	4GB	64GB	64GB
虚拟存储器	64TB	64TB	64TB	64TB

**(d) 最近的处理器**

型 号	Pentium III	Pentium 4	Itanium	Itanium 2
发布时间	1999	2000	2001	2002
时钟速率	450~600MHz	1.3~1.8GHz	733~800MHz	0.9~1GHz
总线宽度	64 位	64 位	64 位	64 位
晶体管数	9.6 百万	42 百万	25 百万	220 百万
特征尺寸(微米)	0.25	0.18	0.18	0.18
可寻址存储器	64GB	64GB	64GB	64GB
虚拟存储器	64TB	64TB	64TB	64TB



1974年出现了 Intel 8080。这是第一个通用微处理器，而 4004 和 8008 是为特殊用途而设计的。8080 是为通用微机而设计的中央处理器。它与 8008 一样，都是 8 位微处理器，但 8080 更快，有更丰富的指令集和更强的寻址能力。

大约在同时，16 位微机被开发出来。但是直到 20 世纪 70 年代末才出现强大的通用 16 位微处理器，8086 便是其中之一。这一发展趋势中的另一阶段是在 1981 年，贝尔实验室和 HP 公司开发出了 32 位单片微处理器。Intel 于 1985 年推出了 32 位微处理器 Intel 80386。

#### 1.2.4 计算机体系结构的变化

正是由于生产、科研、应用的飞速发展，促使计算机的系统结构不断完善，形成了当代计算机的体系结构形式。60 多年来计算机体系结构的发展过程，是在冯·诺依曼型结构的基础上，围绕如何提高速度、提高字长、扩大存储容量、降低成本、提高系统可靠性和方便用户使用为目的，不断采用新的器件和研制新的软件的过程。就体系结构本身来说，主要是指令系统、微程序设计、流水线结构、多级存储器体系结构、输入/输出体系结构、并行体系结构、分布式体系结构、多媒体体系结构、操作系统和数据库管理系统的形成和发展。

随着社会需求的不断增长和微电子技术的不断发展，计算机的体系结构仍在继续发展，其发展趋势是：

(1) 由于计算机网络和分布式计算机系统能为信息处理提供廉价的服务，因此计算机系统的进一步发展，“三网合一”，将进入以通信为中心的体系结构。

(2) 计算机智能化将进一步发展，各种知识库及人工智能技术将进一步普及，人们将用自然语言和机器对话。计算机从数值计算为主过渡到知识推理为主，从而使计算机进入知识处理阶段。

(3) 随着大规模集成电路的发展，不仅用多处理机技术来实现并行计算机的功能，而且会出现计算机的动态结构，即所谓模块化计算机体系结构。

(4) 多媒体技术将有重大突破和发展，并在微处理器、计算机网络与通信等方面引起一次重大变革。

### 1.3 计算机的硬件

#### 1.3.1 硬件组成要素

要了解数字计算机的主要组成和工作原理，可从打算盘说起。假设给一个算盘、一张带有横格的纸和一支笔，要求我们计算  $y=ax+b-c$  这样一个题目。为了和下面讲到的内容做比较，我们不妨按以下方法把使用算盘进行解题的过程步骤事先用笔详细地记录在带横格的纸上。

首先，将横格纸编上序号，每一行占一个序号，如 1, 2, 3, ...,  $n$ ，如表 1.3 所示。其次，把计算式中给定的四个数  $a$ ,  $b$ ,  $c$  和  $x$  分别写到横格纸的第 9, 10, 11, 12 行上，每一行只写一个数。接着详细列出给定题目的解题步骤，而解题步骤也需要记在横格纸上，每一步也只写一行。第一步写到横格纸的第 1 行，第二步写到第 2 行，……