

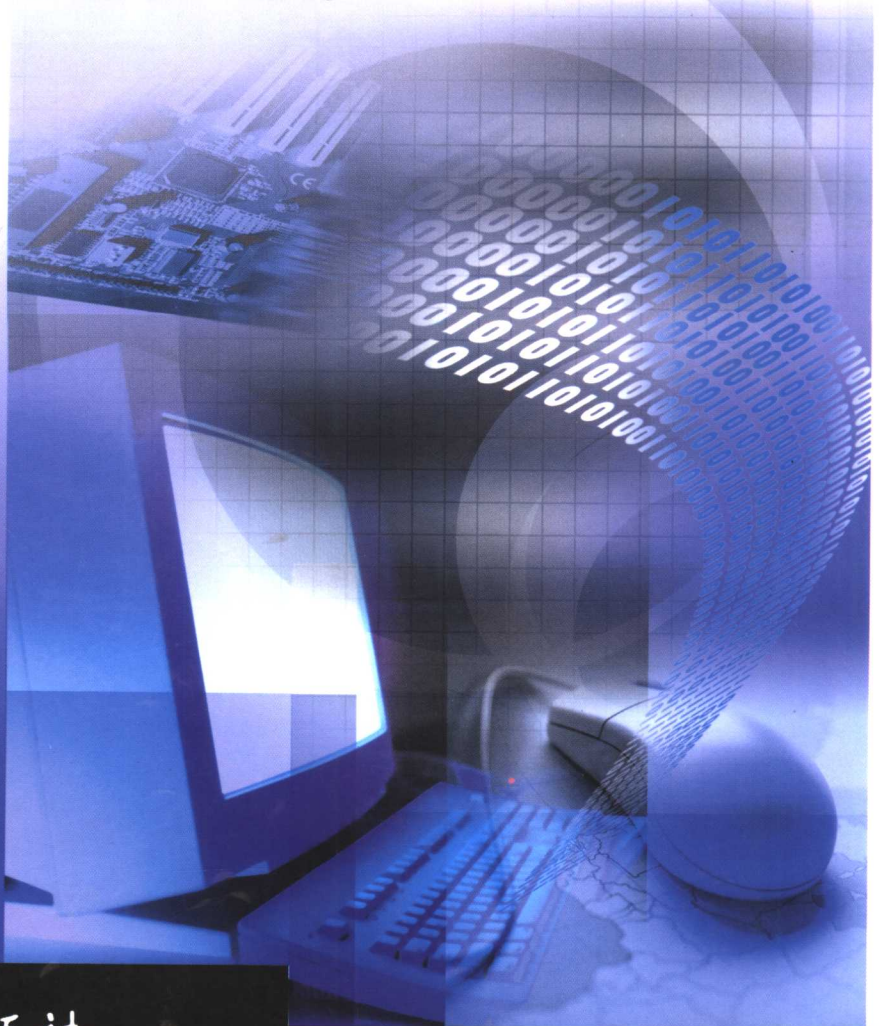


普通高等教育“十一五”国家级规划教材

新世纪高等学校计算机系列规划教材

计算机组成与结构 (第2版)

徐福培 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

新世纪高等学校计算机系列规划教材

计算机组成与结构

(第2版)

徐福培 主编

袁春风 李真 王健 鲍培明 副主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，系统介绍计算机的组成和系统结构的基本概念、工作原理、设计方法和当前的新技术与发展趋势。第1、2章为基础部分，介绍计算机的基本构成、数据的表示方法；第3~9章详细介绍运算器、存储器、控制器、输入和输出等各部件的构成、功能及相关算法；第10章简单介绍计算机硬件技术的发展。本书内容全面，实例丰富，各章配有习题，并为任课教师免费提供电子课件服务。

本书可作为计算机本科或高职高专学生教材，也可以作为计算机技术人员的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

计算机组成与结构/徐福培主编. —2版. —北京: 电子工业出版社, 2006.8

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 7-121-02919-7

I. 计… II. 徐… 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(2006)第082640号

策划编辑: 童占梅

责任编辑: 童占梅

印 刷: 北京市通州大中印刷厂

装 订: 三河市鹏成印业有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 18.75 字数: 476.8千字

印 次: 2006年8月第1次印刷

印 数: 5000册 定价: 25.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系电话: (010) 68279077; 邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

《新世纪高等学校计算机系列规划教材》组织机构

顾问（以汉语拼音为序）

顾冠群（中国工程院院士，东南大学校长）

李 未（中国科学院院士，北京航空航天大学校长）

陆汝钤（中国科学院院士，中国科学院软件所研究员）

潘云鹤（中国工程院院士，浙江大学校长）

孙钟秀（中国科学院院士，南京大学教授）

王 珉（教授，博导，吉林省人民政府省长）

王 荣（研究员，江苏省苏州市委书记）

杨芙清（中国科学院院士，北京大学教授）

周兴铭（中国科学院院士，国防科技大学教授）

编审委员会

主任 徐宝文

副主任 (以汉语拼音为序)

史忠植 陈道蓄 文宏武

委员

蔡家楣 陈 纯 陈道蓄 程自强 胡学龙

付育熙 何炎祥 怀进鹏 吉根林 金远平

鞠时光 刘方鑫 吕 建 梅 宏 钱培德

秦小麟 瞿裕忠 史忠植 宋方敏 童占梅

王 茜 王怀民 王汝传 王士同 王绍棣

王志坚 文宏武 夏士雄 徐宝文 徐汀荣

徐福培 须文波 张 宏 张 明 张茂坤

张岳新 张在跃 周傲英

总 序

为了认真贯彻《中国教育改革和发展纲要》和教育部“面向 21 世纪教育振兴行动计划”精神，适应现代社会、经济、科技、文化，特别是教育的发展方向，适应培养新世纪计算机人才的需要，根据计算机科学技术学科发展和新世纪高等学校教学内容和课程体系改革的要求，我们编写了这套《新世纪高等学校计算机系列规划教材》。该系列教材已有多本入选普通高等教育“十一五”国家级规划教材，并受到高校师生的欢迎。

教学改革和教学质量是高等学校的头等大事。教学改革的关键在于教材的改革，我们组织编写这套系列教材的指导思想是：立足于新世纪培养创造型开拓型人才的培养目标，立足于高速发展的计算机科学技术，科学地预测本学科前沿发展趋势；注重教材内容的思想性、科学性、先进性、系统性和广泛的适应性，继承与改革现有教材内容和体系；注重加强能力的培养，切实提高学生的综合素质。同时，为了适合我国国情，适应绝大多数高等学校计算机科学与技术专业类的教师知识结构和课程改革的实际情况，一方面，我们尽力拓宽教材内容，充实和加强有关理论，引用新的科技成果；另一方面，我们兼顾各门课程的历史、现状与发展，在具体章节的内容编排上力求循序渐进，顺理成章。在保证学科系统的前提下，充分考虑到学生的接受能力，使教材体系尽量符合学生的认知规律，便于学生接受、理解、掌握和巩固所学知识，促使学生学以致用，理论密切联系实际。

本套教材的组织编写得到了中国计算机学会、江苏省计算机学会的大力支持和帮助，凝聚了参加编审出版工作的许多教师和编辑的心血和汗水，在此一并对他们表示衷心的感谢。

限于我们的水平、能力和经验，本套教材的编审与出版工作一定还存在着很多错漏和其他不妥之处，我们真诚地希望使用这套教材的高校教师、学生和广大读者积极提出宝贵意见，以鞭策我们不断提高教材的编写、修订和出版质量，为我国的计算机科学技术专业教材建设服务。

《新世纪高等学校计算机系列规划教材》编审委员会

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是作者多年教学经验的结晶。

随着计算机技术日新月异的发展，《计算机组成与结构》一书作为计算机学科的基础教材，如何在讲述清楚计算机组成与结构原理的基础上，尽可能地介绍一些计算机硬件与结构方面的新技术，以便让学生在掌握计算机基础理论知识的基础上，了解计算机技术发展的新动向，是我们多年来从事本门课程教学的作者们的共同愿望。

计算机组成或计算机组织 (Computer Organization) 是指计算机主要由哪些功能部件组成，各部件如何连接。而计算机结构 (Computer Architecture) 是指从程序员的角度观察计算机具有哪些特征，包括指令系统、数据类型与格式、存储器访问技术等。两台计算机可以有不同的组成，但结构是相同的。计算机组成与结构是密不可分的，因此，目前无论是国内还是国外，逐渐把计算机组成原理和系统结构的课程内容有机地结合起来，以消除重复内容。本教材可以作为“计算机组成原理”课程教材，也可作为“计算机系统结构”课程的教材或教学参考书，授课教师可以根据需要进行灵活的取舍。本课程教学参考学时为 50~60 学时。

近年来，尽管计算机得到了飞速的发展，其性能与速度不断提高，但到目前为止，绝大部分计算机的逻辑结构仍然以冯·诺依曼体系结构为主。因此，本教材仍以运算器、存储器、控制器、输入和输出五部件为主线。在介绍各部件基本组成与原理的同时，给出了较流行的 Pentium 和 Power PC 的相应实例，同时结合了当前计算机发展的新技术。例如，多媒体信息的表示、MMX 指令、RISC 与 CISC 之争、指令发射和动态执行、超长指令字 VLIW，显式并行指令计算 EPIC、多核多线程、多级 Cache 及一致性问题，新型存储芯片 EDRAM 和 SDRAM，多总线分级结构及典型的 PCI 和 SCSI 总线、USB 及 IEEE 1394 串行总线，并行处理和集群系统及新一代计算机的发展动态等。通过对这些新技术的简单介绍，可以帮助学生了解计算机科学的最新技术和发展趋势。今后，我们准备 2~3 年更新一次，并增加新的内容，以适应计算机技术不断飞速发展的要求。

本教材在编写过程中，力求达到概念准确、深入浅出，并尽量多给出一些具体例子，以帮助同学们学习与理解。本教材还为任课老师免费提供电子课件，请登录华信教育资源网 <http://www.hxedu.com.cn> 索取。

本教材第 1, 8, 10 章由徐福培执笔；第 2, 7, 9 章由袁春风执笔，第 3 章由鲍培明执笔；第 4, 5 章由李真执笔；第 6 章由王健执笔。全书由南京大学徐福培教授主持编写，并最后统稿、修改和定稿，由蔡士杰教授主审。在第 2 版的修改过程中，还得到了江南计算所的胡向东总工程师和南京大学俞建新高级工程师的大力支持，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，加之作者水平有限，不当或错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2006 年 6 月于南京大学

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 计算机的定义和特性	(1)
1.1.1 什么是计算机	(1)
1.1.2 计算机的特性	(1)
1.2 计算机的发展历程	(2)
1.2.1 电子计算机的诞生	(2)
1.2.2 第一代计算机	(2)
1.2.3 第二代计算机	(3)
1.2.4 第三代计算机	(3)
1.2.5 第四代计算机	(3)
1.2.6 新一代计算机	(5)
1.2.7 我国计算机的发展	(5)
1.3 计算机的组成与结构	(6)
1.3.1 计算机系统的层次结构	(7)
1.3.2 计算机硬件	(7)
1.3.3 计算机软件	(8)
1.4 计算机的分类与应用	(10)
1.4.1 计算机的分类	(10)
1.4.2 计算机应用	(11)
习题 1	(13)
第 2 章 数据的表示	(14)
2.1 数据、信息和媒体	(14)
2.1.1 数据	(14)
2.1.2 信息	(15)
2.1.3 媒体	(15)
2.2 数字化信息编码	(15)
2.3 数值数据的编码表示	(17)
2.3.1 进位计数制及其各进位制数之间的转换	(17)
2.3.2 定点与浮点表示	(21)
2.3.3 编码系统	(22)
2.3.4 无符号数的表示	(27)
2.3.5 浮点数的编码表示	(27)
2.3.6 十进制数的二进制编码表示	(33)
2.4 非数值数据的编码表示	(35)
2.4.1 逻辑数据	(35)

2.4.2	西文字符	(35)
2.4.3	汉字字符	(37)
2.4.4	多媒体信息	(39)
2.5	二进制信息的计量单位	(41)
2.6	数据校验码	(42)
2.6.1	奇偶校验码	(43)
2.6.2	海明校验码	(43)
2.6.3	循环冗余校验码	(47)
习题 2	.....	(50)
第 3 章	运算器与运算方法	(52)
3.1	基本组成	(52)
3.2	算术与逻辑单元	(53)
3.2.1	半加器与全加器	(53)
3.2.2	串行进位与并行进位	(54)
3.2.3	ALU 部件	(57)
3.3	定点加、减法运算	(61)
3.3.1	补码定点加、减法	(61)
3.3.2	原码定点加、减法	(64)
3.4	定点乘法运算	(64)
3.4.1	原码一位乘法	(65)
3.4.2	原码二位乘法	(68)
3.4.3	补码一位乘法	(69)
3.4.4	补码二位乘法	(72)
3.4.5	阵列乘法器	(73)
3.5	定点除法运算	(74)
3.5.1	原码除法运算	(74)
3.5.2	补码除法运算	(79)
3.5.3	阵列除法器	(81)
3.6	浮点运算	(82)
3.6.1	浮点加、减法运算	(82)
3.6.2	浮点乘、除法运算	(85)
3.7	十进制数的加、减法运算	(88)
习题 3	.....	(91)
第 4 章	存储系统	(93)
4.1	存储器概述	(93)
4.1.1	存储器的主要性能指标	(93)
4.1.2	存储器分类	(93)
4.1.3	存储器结构	(94)
4.2	半导体读写存储器	(96)
4.2.1	基本存储单元	(96)

4.2.2	半导体 RAM 芯片	(98)
4.3	半导体只读存储器	(107)
4.3.1	掩模只读存储器 (Masked ROM)	(107)
4.3.2	可编程 ROM (PROM)	(107)
4.3.3	可擦除和编程的 ROM (EPROM)	(108)
4.3.4	电擦除电改写只读存储器 (EEPROM)	(109)
4.4	高速缓冲存储器	(109)
4.4.1	工作原理	(109)
4.4.2	映射方式	(110)
4.4.3	替换算法	(112)
4.4.4	“Cache—主存”内容的一致性问题	(113)
4.4.5	Cache 结构举例	(114)
4.5	虚拟存储器	(115)
4.5.1	虚拟存储器的功能	(115)
4.5.2	虚拟存储器的基本管理方法	(116)
4.6	辅助存储器	(120)
4.6.1	磁表面存储器	(120)
4.6.2	光盘存储器	(127)
	习题 4	(129)
第 5 章	指令系统	(131)
5.1	指令格式	(131)
5.1.1	指令的格式	(131)
5.1.2	指令长度	(132)
5.2	寻址方式	(132)
5.3	指令类型	(135)
5.4	堆栈和堆栈存取方式	(137)
5.5	指令系统举例	(138)
5.5.1	IBM 370 系列机指令格式	(138)
5.5.2	PDP-11 指令格式	(139)
5.5.3	Pentium 指令系统	(140)
5.5.4	PowerPC 指令系统	(142)
5.6	CISC 与 RISC 指令	(144)
5.7	MMX 技术	(145)
	习题 5	(148)
第 6 章	中央处理机组织	(150)
6.1	CPU 的结构与功能	(150)
6.1.1	CPU 的组成与操作	(150)
6.1.2	CPU 时序控制方式	(153)
6.1.3	CPU 控制流程	(154)
6.1.4	控制器的组成	(155)

6.1.5	一条完整指令的执行	(156)
6.1.6	CPU 性能设计	(157)
6.1.7	典型 CPU 举例	(160)
6.2	组合逻辑控制与 PLA 控制	(163)
6.2.1	组合逻辑控制	(164)
6.2.2	PLA 控制	(165)
6.3	微程序控制	(167)
6.3.1	Wilkes 微程序控制	(167)
6.3.2	基本概念	(168)
6.3.3	微指令的格式与编码	(169)
6.3.4	微指令地址的生成	(171)
6.3.5	微程序设计举例	(172)
6.3.6	微程序应用	(175)
6.4	微处理器的若干新技术	(176)
习题 6	.....	(178)
第 7 章	总线及总线互连结构	(181)
7.1	总线的基本概念	(181)
7.1.1	总线的特性和分类	(181)
7.1.2	系统总线的组成	(182)
7.1.3	总线的数据传输方式	(183)
7.2	总线设计的要素	(184)
7.2.1	信号线类型	(184)
7.2.2	总线裁决	(185)
7.2.3	定时方式	(189)
7.2.4	总线事务类型	(194)
7.2.5	总线带宽	(195)
7.3	总线接口单元	(196)
7.4	总线标准	(197)
7.4.1	ISA 总线	(197)
7.4.2	EISA 总线	(198)
7.4.3	VL 总线 (VESA 总线)	(198)
7.4.4	PCI 总线	(199)
7.4.5	SCSI 总线	(205)
7.4.6	EIA-232-D 总线	(208)
7.4.7	USB 通用串行总线	(208)
7.4.8	IEEE 1394 总线	(210)
7.5	多总线分级结构	(212)
7.5.1	单总线结构	(212)
7.5.2	双总线结构	(213)
7.5.3	三总线结构	(213)

7.5.4 多总线分级结构举例	(214)
习题 7	(218)
第 8 章 输入/输出设备	(220)
8.1 输入/输出设备的分类与特点	(220)
8.1.1 分类	(220)
8.1.2 特点	(221)
8.2 输入设备	(221)
8.2.1 键盘	(222)
8.2.2 鼠标器	(222)
8.3 打印机	(223)
8.3.1 打印机的种类	(223)
8.3.2 点阵打印机	(224)
8.3.3 激光打印机	(225)
8.4 显示器	(227)
8.4.1 监视器	(227)
8.4.2 光栅扫描显示器工作原理	(228)
8.4.3 IBM PC 图形显示器	(230)
习题 8	(231)
第 9 章 输入/输出组织	(232)
9.1 I/O 接口	(232)
9.1.1 I/O 接口的功能	(232)
9.1.2 I/O 接口的结构	(234)
9.1.3 I/O 接口的分类	(234)
9.2 I/O 设备的寻址	(235)
9.2.1 操作系统在 I/O 中的作用	(235)
9.2.2 I/O 端口的编址	(236)
9.3 I/O 数据传送控制方式	(239)
9.3.1 I/O 控制方式类型	(239)
9.3.2 程序直接控制方式	(240)
9.4 程序中断方式	(242)
9.4.1 中断的概念	(242)
9.4.2 中断的分类	(243)
9.4.3 中断系统的基本职能和结构	(245)
9.4.4 中断过程	(247)
9.5 直接存储器存取 (DMA) 方式	(254)
9.5.1 3 种 DMA 方式	(255)
9.5.2 DMA 接口的结构和功能	(256)
9.5.3 DMA 操作步骤	(257)
9.5.4 DMA 与存储器系统	(258)
9.6 通道和 I/O 处理器方式	(259)

9.6.1	通道的基本概念	(260)
9.6.2	通道的种类	(261)
9.6.3	通道程序	(262)
9.6.4	输入/输出处理机	(263)
9.7	外部接口	(264)
9.7.1	串行接口	(264)
9.7.2	并行接口	(267)
习题 9	.....	(268)
第 10 章	计算机硬件技术的发展	(271)
10.1	并行处理	(271)
10.1.1	发展历程、分类与应用	(271)
10.1.2	阵列机	(272)
10.1.3	多处理机系统	(275)
10.1.4	分布式系统	(278)
10.2	新一代计算机	(280)
10.2.1	生物计算机	(280)
10.2.2	超导计算机	(281)
10.2.3	量子计算机	(282)
10.2.4	纳米计算机	(283)
10.2.5	光计算机	(284)
习题 10	.....	(285)
参考文献	.....	(286)

第 1 章 概 述



本章学习导读

- (1) 什么是电子计算机?
- (2) 它由哪几部分组成?
- (3) 其特点又是什么?
- (4) 在它的发展历程中经历了哪几代?

计算机是 20 世纪 40 年代人类伟大的创造。60 多年来, 计算机技术、计算机应用和计算机产业在世界范围内蓬勃发展, 规模空前。它的诞生和发展对人类社会作用巨大, 影响深远。什么是计算机? 计算机由哪几部分组成? 它们又是如何工作的? 介绍这些基本原理和结构是本章的目的。

1.1 计算机的定义和特性

1.1.1 什么是计算机

计算机是一种现代化的信息处理工具。更具体地说, 电子计算机是一种能对数字化信息进行自动高速运算的通用处理装置。

(1) 信息。可以是数值、文字、图形、图像、声音、视频等多种不同类型的信息, 其表现手段可以采用数字化形式或模拟量形式, 但目前绝大部分计算机均为数字计算机, 少量为模拟计算机, 因此这里仍称数字化信息。随着计算机技术的不断发展和应用领域的不断扩大, 信息类型可能会越来越多。

(2) 运算。主要包括算术运算和逻辑运算。把现代电子计算机运算的自动与高速与以前的算盘及各类机械式的计算器区分开来。

(3) 处理。除了能计算外, 还能进行搜索、识别、变换, 甚至联想、思考和推理等。且随着计算机软、硬件技术的不断发展, 其处理功能会越来越强。

1.1.2 计算机的特性

计算机的特性可以归纳为高速、通用、准确、智能 4 大特性。随着计算机技术的发展, 特性越来越明显。

(1) 高速。首先指计算机具有很高的运算速度, 从最初计算机每秒几千次加法运算到现在的每秒万亿次、甚至百万亿次的浮点运算。计算机采用的高速电子器件是快速的基本保证; 同时几十年来, 人们为提高计算机的运算速度, 对计算机本身的组织结构也进行了不断的改进, 如 RISC 技术、多级 Cache 技术、超级流水线技术、并行处理技术等, 最近几年又引入了超长指令字 VLIW、显式并行指令计算 EPIC、多核多线程等先进技术。正因为高速, 计算机大信息量的处理与复杂运算就成为可能, 从而使得它在中长期天气预报、航空航天、资源

勘探、核能利用、尖端武器设计与遗传工程等领域得到大量应用，取得了重大的经济与社会效益。

(2) 通用。所谓通用有两层含义：一是它所处理信息的多样化。可以是数值信息，也可以是非数值信息。特别是多媒体技术的发展，非数值信息可以包括文字、图形、图像、声音、视频等，计算机都把它们表示成数字化编码信息，统一处理后，再把它们转变成相应的文字、图形、图像、声音或视频信息后输出，从而得到逼真的效果。二是计算机的应用广泛。现已深入到工业、农业、商业、国防、教育、娱乐等各个行业。科学计算、数值处理、事务管理、工程设计、过程控制、现代教育等，离不开计算机。只要现实世界中某一个问题的算法，然后编制成程序，存入计算机中，计算机就可以高速、准确地解决这一问题。

(3) 准确。首先计算机本身的高速、高精度为计算机的准确性提供了基础，同时用户找到现实世界中相应问题的正确算法，编制成高效、准确的程序，计算机运算就能得到准确的结果。而软件的准确性，可以在编制程序过程中通过反复调试和修改来实现。

(4) 智能化。随着计算机技术特别是人工智能技术的发展，智能化的特点将越来越明显，这也是计算机发展的目标。现已进入“信息时代”，同时也出现了信息爆炸现象。如何从千千万万个信息中，自动找出对你有用的信息，变成你自己的知识，这是人们对计算机智能化的要求。计算机如何模拟人类智慧和智能行为，人机界面如何更自然化、智能化，等等。经过人们不断的努力与探索，智能化已经取得了一些阶段性成果。可以相信，随着新一代计算机的诞生，智能化特性一定会更为突出。

1.2 计算机的发展历程

1.2.1 电子计算机的诞生

世界上第一台电子计算机是 1946 年在美国诞生的 ENIAC，其设计师是美国宾夕法尼亚大学的莫齐利 (Manchly) 和他的学生艾克特 (Eckert)。ENIAC 有 5 种功能：5000 次每秒加法运算；50 次每秒乘法运算；平方和立方计算； \sin 和 \cos 函数数值运算；其他更复杂的计算。当时用它来进行弹道参数计算，60 秒钟射程的弹道计算时间由原来的 20 分钟一下子缩短到仅需 30 秒。因此，ENIAC 的名声不胫而走。当时，它是个庞然大物，耗资 40 万美元，含有 18 000 个真空管，重 30 吨，耗电 150 千瓦，占地面积约 140 平方米。该机正式运行到 1955 年 10 月 2 日，十年间共运行了 80 223 小时。它的算术运算量比有史以来人类大脑所有运算量的总和还要大。

1.2.2 第一代计算机

电子计算机 60 多年的发展历史表明，计算机硬件的发展受电子开关器件的影响极大。为此，人们习惯以元器件的更新来作为计算机技术进步划代的主要标志。从 20 世纪 40 年代起，计算机已经历了四代发展历程。目前人们正在致力于新一代计算机的研究。

第一代计算机为电子管计算机，其逻辑元件采用电子管，存储器件为声延迟线或磁鼓，典型逻辑结构为定点运算。计算机“软件”一词尚未出现，编制程序所用工具为低级语言。电子管计算机体积大，速度慢（千次或万次每秒），存储器容量小。典型机器除上述的 ENIAC 外，还有 EDVAC、EDSAC 等。第一台计算机 ENIAC 没有采用二进制操作和存储程序控制，

未具备现代电子计算机的主要特征。1945年3月，冯·诺依曼领导的小组发表了二进制的程序存储方式的电子数字计算机方案 EDVAC，宣告了现代计算机结构思想的诞生，但该机直到1951年才告完成。而英国剑桥大学的 M.V.Wilkes 在 EDVAC 方案启发下，于1949年制成的 EDSAC 成为世界上第一台存储程序式的现代计算机。此外，尚有1951年的 UMVAC-1 和1956年的 IBM-704 等。

1.2.3 第二代计算机

第二代计算机为晶体管计算机。1947年，美国贝尔实验室发明的半导体三极管为计算机的发展创造了新的物质基础。该实验室于1954年制成了晶体管计算机 TRADIC，而麻省理工学院于1957年完成的 TX-2 对晶体管机的发展起了重要作用。IBM公司于1955年宣布的全晶体管计算机 7070 和 7090，开始了第二代计算机蓬勃发展的新时期。1959年 IBM 推出的商用机 IBM 1401，更以其小巧价廉和面向数据处理而获得广大用户的欢迎，从而也促进了计算机工业的迅速发展。

这一代计算机除了逻辑元件采用晶体管以外，其内存储器由磁芯构成，磁鼓与磁带成为外存储器。计算机典型逻辑结构实现了浮点运算，并提出了变址、中断、I/O 处理等新概念。这时计算机软件也得到了发展，出现了多种高级语言及其编译程序。和第一代电子管计算机相比，第二代晶体管机体积小、速度快、功耗低、可靠性高。

1.2.4 第三代计算机

第三代计算机为集成电路计算机，其逻辑元件与存储器均由集成电路实现。这是微电子与计算机技术相结合的一大突破，从而可以廉价构成运算速度快、容量大、可靠性高、体积小、功耗少的各类计算机。这一代计算机的典型代表是 IBM 公司于1964年4月宣布的 IBM 360 系统，这是计算机发展史上具有重要意义的事件。该系统采用了计算机科学技术中一系列新技术，包括微程序控制、高速缓存、虚拟存储器、流水线技术等。一次就推出6种机型，相互兼容，可作科学计算，又可用于数据处理；软件首先实现了360操作系统，具有资源调度、人机通信和输入/输出控制等功能。IBM 360 系列的诞生，对计算机的普及和大规模工业生产也产生了重大影响。到1966年底，360系列机的产量已达到每月400台，5年内的总产量超过33000台。

这一时期还有另外一个重要特点：大型/巨型机与小型机同时发展。1964年的 CDC6600 及随后的 CDC7600 和 CYBER 系列是大型机代表，它们采用多处理结构。巨型机有 CDC STAR-100 和 64 个单元并行操作的 ILLIAC IV 阵列机等。小型计算机的发展，对计算机的推广使用也产生了很大的影响，DEC 公司的 PDP 系列是典型代表。

1.2.5 第四代计算机

20世纪70年代初，微电子学飞速发展创造的大规模集成电路和微处理器给计算机工业注入了新鲜血液，大规模（LSI）和超大规模（VLSI）集成电路成为计算机的主要器件。其集成度已从20世纪70年代初的几千个晶体管/片（如 Intel 4004 为2000个晶体管）到20世纪末的千万个晶体管（PIII已有近1000万个晶体管），主频速度也已超过1吉赫兹（1GHz）。这里，以最大的微处理器制造商 Intel 产品为例（见表1.1），可以看出，半导体集成电路的集成度越来越高，其速度也越来越快，其发展遵循一个定律——摩尔定律：“由于硅技术的

不断改进，每 18 个月，集成度将翻一番，速度将提高一倍，而其价格将降低一半”。戈登·摩尔（Golden Moore）是 Intel 公司的创始人之一，摩尔定律是 1965 年美国《电子》杂志的总编在采访摩尔先生时他对半导体芯片工业发展前景的预测。40 多年来的实践证明，摩尔定律的预测非常准确，摩尔定律对计算机工业的发展具有如下重要意义：

① 由于定律预测半导体产品和技术每经过一年半时间将会加倍，因此如果发展速度慢于这个定律的指标，那么你将会有被淘汰的危险。“逆水行舟，不进则退”，这就迫使你不断地改进技术，提高质量。

② 芯片价格的持续下降，一方面迫使公司必须采取正确的价格策略，以提高产品的竞争力，另一方面也为计算机的普及创造了有利条件。

③ 定律不仅适用于“硬件”，同时也驱动着软件产业和市场的发展。由于硬件性能的不断改进和提高，软件也必须适应硬件的发展而进行不断的修改与创新，否则也将面临被淘汰的危险。微软公司总裁比尔·盖茨经常以下面一句话来鞭策下属：“微软离破产永远只有一年半时间！”

表 1.1 Intel CPU 芯片性能比较

芯片名	年代	集成度 (晶体管)	主频时钟 (MHz)	线宽 (μm)	数据总线宽 (位)	地址总线宽 (位)
4004	1971	2000	2	2	4	
8080	1974	8000	4	1.5	8	20
8086	1978	3 万	5~8	1.5	16	24
80286	1984	13 万	10	1~1.5	16	32
80386	1985	27 万	33	1~1.5	32	32
80486	1989	100 万	35~40	1	32	
Pentium	1993	300 万	60~150	0.6	64	32
Pentium Pro (P6)	1995	550 万	150~200	0.6	64	36
P II (P6+MMX)	1997	750 万	300~450	0.35	64	36
PIII	1999	800 万	600~1000	0.25	64	36
P4	2000	1000 万	3.4GHz	0.18	64	36
Itanium	2004	17 亿	2GHz	0.09	64	64

已过而立之年的摩尔定律还能风光多久？什么时候该定律将寿终正寝？这早已引起了业界不少人士的关注。摩尔先生本人也在 1995 年国际光学工程协会的一次会议上回顾了半导体芯片的发展历史后承认，如果坚持他的定律所预测的道路，将会面临着越来越多的困难和技术障碍，其中最突出的问题是制造芯片的成本将会大幅增加。专家们认为，摩尔定律面临着四大劫难：

① 传统工艺难以适应。目前芯片特征尺寸已发展到 $0.09\mu\text{m}$ ，正在研制 $0.065\mu\text{m}$ 的器件，到 2010 年将缩小到 $0.045\mu\text{m}$ ，这具有挑战性，常规制造工艺将失灵。一些大公司正在另辟蹊径寻找新工艺，但技术复杂，成本昂贵。

② “门”越来越窄。科学家们早已发现电子能够挖出小小的隧道，从而通过该隧道绕过障碍物从另一侧跑出来。目前芯片的“门”已经小于 2nm ，足以在“门”关闭时电子挖出