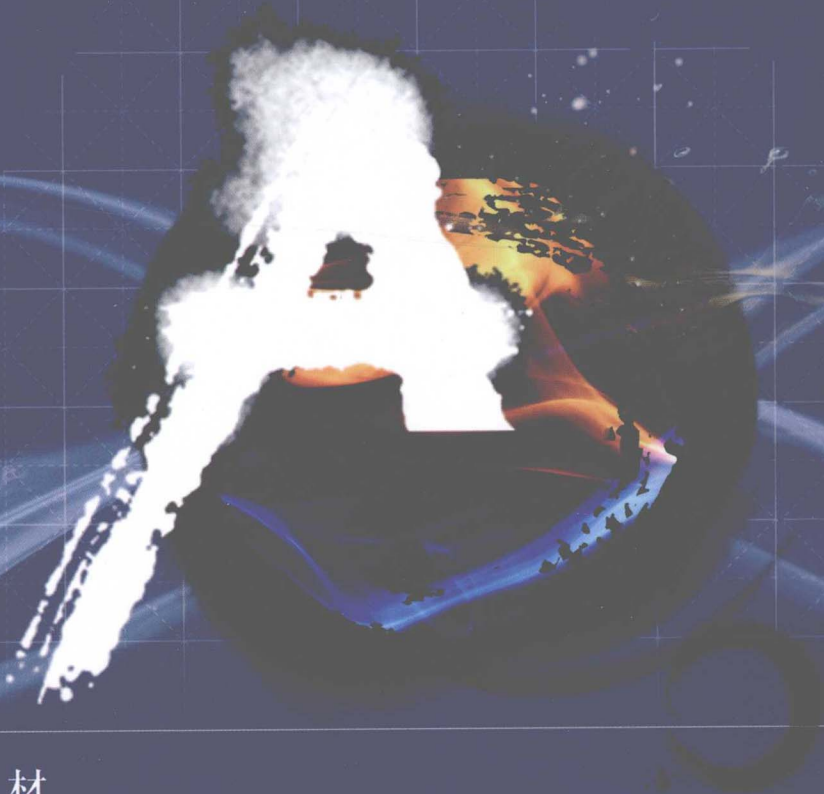




普通高等教育“十一五”国家级规划教材



高等学校规划教材

计算机组成与结构

(第3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

高等学校规划教材

计算机组成与结构

(第3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”国家级规划教材和南京大学优秀教学成果。全书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章介绍计算机硬件技术的发展。本书内容简明精炼, 实例丰富, 原理讲解透彻, 各章配有习题, 并为任课教师免费提供电子课件。

本书可作为高等学校计算机科学与技术、软件工程、网络工程、物联网、信息安全、信息与计算科学等专业本科生教材, 也可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. —3版. —北京: 电子工业出版社, 2013.1

高等学校规划教材

ISBN 978-7-121-19019-3

I. ①计… II. ①徐… III. ①计算机体系结构—高等学校—教材 IV. ①TP303

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第278229号

策划编辑: 童占梅

责任编辑: 童占梅

印 刷: 涿州市京南印刷厂

装 订: 涿州市京南印刷厂

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

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19 字数: 472千字

印 次: 2013年1月第1次印刷

定 价: 35.00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, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

学习是一个人终生成长的过程，它为我们打开认识世界、自然、社会乃至我们自己的窗口，让我们有勇气、责任、知识和能力来改变现状，创造未来。

人生因学习而改变，世界因你而不同。

——编辑心语

前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材和南京大学优秀教学成果，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，是我们这些年来从事本课程教学的教师们的共同愿望。

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。而计算机体系结构 (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 以及 Core 微处理器系列的相应实例，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、睿频加速技术、多级 Cache 及一致性问题，新型存储芯片 EDRAM 和 SDRAM，智能存储器管理，多总线分级结构及典型的 PCI 和 SCSI 总线、USB 及 IEEE 1394 和 PCI-express 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 3~5 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，力求概念准确、深入浅出，并尽量多给出一些具体例子，体现计算思维的思想，以帮助学生学习与理解本书知识点。本教材还为任课教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 章和 6.4, 6.5, 7.4.7, 7.4.8, 7.4.9 节由徐福培执笔；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 章其余部分由王健执笔。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，以及完成本次修订工作。

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
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	3
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	4
1.2.6 新一代计算机	6
1.2.7 我国计算机的发展	6
1.3 计算机的组成与结构	7
1.3.1 计算机系统的层次结构	7
1.3.2 计算机硬件	8
1.3.3 计算机软件	9
1.4 计算机的分类与应用	11
1.4.1 计算机的分类	11
1.4.2 计算机应用	12
习题 1	14
第 2 章 数据的表示	15
2.1 数据、信息和媒体	15
2.1.1 数据	15
2.1.2 信息	16
2.1.3 媒体	16
2.2 数字化信息编码	16
2.3 数值数据的编码表示	18
2.3.1 进位计数制及其各进位制数之间的转换	18
2.3.2 定点与浮点表示	22
2.3.3 编码系统	23
2.3.4 无符号数的编码表示	28
2.3.5 浮点数的编码表示	28
2.3.6 十进制数的二进制编码表示	34
2.4 非数值数据的编码表示	36

2.4.1	逻辑数据	36
2.4.2	西文字符	36
2.4.3	汉字字符	38
2.4.4	多媒体信息	40
2.5	二进制信息的计量单位	42
2.6	数据校验码	43
2.6.1	奇偶校验码	44
2.6.2	海明校验码	45
2.6.3	循环冗余校验码	48
习题 2		51
第 3 章	运算器与运算方法	53
3.1	基本组成	53
3.2	算术与逻辑单元	54
3.2.1	半加器与全加器	54
3.2.2	串行进位与并行进位	55
3.2.3	ALU 部件	58
3.3	定点数加、减法运算	62
3.3.1	补码定点数加、减法	62
3.3.2	原码定点数加、减法	65
3.4	定点数乘法运算	66
3.4.1	原码一位乘法	66
3.4.2	原码二位乘法	69
3.4.3	补码一位乘法	70
3.4.4	补码二位乘法	73
3.4.5	阵列乘法器	74
3.5	定点数除法运算	75
3.5.1	原码除法运算	75
3.5.2	补码除法运算	80
3.5.3	阵列除法器	82
3.6	浮点数运算	83
3.6.1	浮点数加、减法运算	83
3.6.2	浮点数乘、除法运算	86
3.7	十进制数的加、减法运算	89
习题 3		92
第 4 章	存储系统	94
4.1	存储器概述	94
4.1.1	存储器的主要性能指标	94

4.1.2	存储器分类	94
4.1.3	存储器结构	95
4.2	半导体读/写存储器	97
4.2.1	基本存储单元	97
4.2.2	半导体 RAM 芯片	99
4.3	半导体只读存储器	108
4.3.1	掩模只读存储器 (Masked ROM)	108
4.3.2	可编程 ROM (PROM)	108
4.3.3	可擦除和可编程的 ROM (EPROM)	109
4.3.4	电擦除电改写只读存储器 (EEPROM)	110
4.4	高速缓冲存储器	110
4.4.1	工作原理	110
4.4.2	映射方式	111
4.4.3	替换算法	113
4.4.4	“Cache—主存”内容的一致性问题	115
4.4.5	Cache 结构举例	115
4.5	虚拟存储器	117
4.5.1	虚拟存储器的功能	117
4.5.2	虚拟存储器的基本管理方法	117
4.6	辅助存储器	121
4.6.1	磁表面存储器	121
4.6.2	光盘存储器	128
习题 4		130

第 5 章 指令系统 132

5.1	指令格式与指令长度	132
5.1.1	指令格式	132
5.1.2	指令长度	133
5.2	寻址方式	133
5.3	指令类型	136
5.4	堆栈和堆栈存取方式	138
5.5	指令系统举例	140
5.5.1	IBM 370 系列机指令格式	140
5.5.2	PDP-11 小型机指令格式	141
5.5.3	Pentium 机指令系统	141
5.5.4	PowerPC 机指令系统	143
5.6	CISC 与 RISC 指令	145
5.7	MMX 技术	146
习题 5		150

第 6 章 中央处理机组织	151
6.1 CPU 的结构与功能	151
6.1.1 CPU 的组成与操作	151
6.1.2 CPU 时序控制方式	154
6.1.3 CPU 控制流程	155
6.1.4 控制器的组成	156
6.1.5 一条完整指令的执行	157
6.1.6 CPU 性能设计	158
6.1.7 典型 CPU 举例——Pentium 和 Power PC 微处理器	162
6.2 组合逻辑控制与 PLA 控制	164
6.2.1 组合逻辑控制	165
6.2.2 PLA 控制	166
6.3 微程序控制	168
6.3.1 Wilkes 微程序控制	168
6.3.2 基本概念	169
6.3.3 微指令的格式与编码	170
6.3.4 微指令地址的生成	172
6.3.5 微程序设计举例	173
6.3.6 微程序应用	176
6.4 微处理器的若干新技术	177
6.5 新技术应用实例——Core (酷睿) 微处理器系列	179
6.5.1 Core 2 微处理器	179
6.5.2 Core i7/i5/i3 系列微处理器	180
习题 6	182
第 7 章 总线及总线互连结构	185
7.1 总线的基本概念	185
7.1.1 总线的特性和分类	185
7.1.2 系统总线的组成	186
7.1.3 总线的数据传输方式	187
7.2 总线设计的要素	188
7.2.1 信号线类型	188
7.2.2 总线裁决	189
7.2.3 定时方式	193
7.2.4 总线事务类型	198
7.2.5 影响总线带宽的因素	199
7.3 总线接口单元	200
7.4 总线标准	200
7.4.1 ISA 总线	201

7.4.2	EISA 总线	202
7.4.3	VL 总线 (VESA 总线)	202
7.4.4	PCI 总线和 PCI-X 总线	202
7.4.5	SCSI 总线	209
7.4.6	EIA-232-D 总线	212
7.4.7	USB 通用串行总线	213
7.4.8	IEEE 1394 总线	215
7.4.9	PCI-express 总线	217
7.5	多总线分级结构	219
7.5.1	单总线结构	219
7.5.2	双总线结构	220
7.5.3	三总线结构	220
7.5.4	多总线分级结构举例	222
习题 7		225
第 8 章	输入/输出设备	227
8.1	输入/输出设备的分类与特点	227
8.1.1	分类	227
8.1.2	特点	228
8.2	输入设备	228
8.2.1	键盘	228
8.2.2	鼠标	229
8.3	打印机	230
8.3.1	打印机的种类	230
8.3.2	点阵打印机	231
8.3.3	激光打印机	232
8.4	显示器	234
8.4.1	监视器	234
8.4.2	光栅扫描显示器工作原理	236
8.4.3	IBM PC 图形显示器	237
习题 8		238
第 9 章	输入/输出组织	239
9.1	I/O 接口	239
9.1.1	I/O 接口的功能	239
9.1.2	I/O 接口的结构	241
9.1.3	I/O 接口的分类	241
9.2	I/O 设备的寻址	242
9.2.1	操作系统在 I/O 中的作用	242

9.2.2	I/O 端口的编址	243
9.3	I/O 数据传送控制方式	246
9.3.1	I/O 数据传送控制方式的类型	246
9.3.2	程序直接控制方式	247
9.4	程序中断方式	249
9.4.1	中断的概念	249
9.4.2	中断的分类	250
9.4.3	中断系统的基本职能和结构	252
9.4.4	中断过程	254
9.5	直接存储器存取 (DMA) 方式	260
9.5.1	三种 DMA 方式	261
9.5.2	DMA 接口的结构和功能	262
9.5.3	DMA 操作步骤	264
9.5.4	DMA 与存储器系统	265
9.6	通道和 I/O 处理器方式	266
9.6.1	通道的基本概念	266
9.6.2	通道的种类	267
9.6.3	通道程序	268
9.6.4	I/O 处理机	270
9.7	外部接口	270
9.7.1	串行接口	271
9.7.2	并行接口	274
习题 9		274
第 10 章	计算机硬件技术的发展	277
10.1	并行处理	277
10.1.1	发展历程、分类与应用	277
10.1.2	阵列机	278
10.1.3	多处理机系统	281
10.1.4	分布式系统	284
10.2	新一代计算机	285
10.2.1	生物计算机	286
10.2.2	超导计算机	287
10.2.3	量子计算机	288
10.2.4	纳米计算机	289
10.2.5	光计算机	290
习题 10		291
参考文献		292

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。半个多世纪以来, 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。它把现代电子计算机运算的自动和高速与以前的算盘及各类机械式计算器区分开来。

(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。并且, 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, 这些特性越来越明显。

(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, 甚至千万亿次浮点运算。计算机采用的高速电子器件是高速的基本保证; 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, 使计算机对大信

息量的处理与复杂运算成为可能,从而使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。特别是随着多媒体技术的发展,其处理的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。其应用现已深入到工业、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。社会现已进入“信息时代”,出现了信息爆炸现象。如何从千千万万条信息中,自动找出对用户有用的信息,变成用户自己的知识,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,都是人们不断探索的目标。经过多年不断的努力与探索,智能化研究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

这要从 17 世纪说起,那时一些欧洲的数学家就先后设计制造出了纯机械式的数字计算机,包括十进制的加法器、乘/除法运算器,以及借助连续物理量运算求解问题、用物理过程来模拟数字方程求解过程的模拟计算机,但由于这些计算装置的固有不足,它们都没有得到应有的发展。直到 20 世纪 40 年代,随着科学技术的进步,特别是电子技术的迅速发展和第二次世界大战对先进计算工具的迫切要求,才为电子计算机的诞生奠定了社会和技术基础。

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(Mauchly)和他的学生艾克特(Eckert)。ENIAC 有 5 种功能:每秒 5000 次加法运算;每秒 50 次乘法运算;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。

说到电子计算机的诞生,不得不提到一位计算机领域的先驱,20 世纪三四十年代著名的数学家和逻辑学家图灵(A.M.Turing)。他于 1936 年在权威的数学杂志上发表了“可计算数学及其在判断问题中的应用”一文,提出了一种理想的计算器数学模型(图灵机),现已成为计

算机科学中“可计算理论和计算复杂性”的理论基础。他后来还提出了“机器能思考”的构想，因此人们称他为“人工智能之父”。国际计算机协会（ACM）为了纪念他，于1966年专门设立了“图灵奖”，以奖励世界上在计算机领域作出重要贡献的科学家。

可以看到，正是因为有莫齐利、图灵、冯·诺依曼这些计算机先驱者的不懈努力，以及千千万万计算机工作者的长期奋斗，才有了今天计算机科学领域的辉煌成就。

1.2.2 第一代计算机

电子计算机的发展历史表明，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（千次或万次运算每秒），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公司推出的商用机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月推出的IBM 360系统，这是计算机发展史上具有重要历史意义的事件。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。IBM公司一次就推出6种机型，相互兼容，既可用于科学计算，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 33 000 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 年推出的 CDC6600 及随后的 CDC7600 和 CYBER 系列是大型机代表，它们采用多处理机结构。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产生了很大影响，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强大的发展动力，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/片（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》杂志总编采访摩尔先生时他对半导体芯片工业发展前景的预测。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，那么公司将有被淘汰的危险。“逆水行舟，不进则退”，这就迫使公司不断地改进技术，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

芯片型号	年代	集成度 (个晶体管/片)	主频时钟	线宽	数据总线宽 (位)	地址总线宽 (位)
4004	1971	2000	2MHz	2 μ m	4	
8080	1974	8000	4MHz	1.5 μ m	8	20
8086	1978	3 万	5~8MHz	1.5 μ m	16	24
80286	1984	13 万	10MHz	1~1.5 μ m	16	32
80386	1985	27 万	33MHz	1~1.5 μ m	32	32
80486	1989	100 万	35~40MHz	1 μ m	32	32
Pentium	1993	300 万	60~150MHz	0.6 μ m	64	32

续表

芯片型号	年代	集成度 (个晶体管/片)	主频时钟	线宽	数据总线宽 (位)	地址总线宽 (位)
Pentium Pro (P6)	1995	550 万	150~200MHz	0.6 μ m	64	36
P II (P6+MMX)	1997	750 万	300~450MHz	0.35 μ m	64	36
PIII	1999	800 万	600~1000MHz	0.25 μ m	64	36
P4	2000	1000 万	3.4GHz	0.18 μ m	64	36
Itanuim	2004	17 亿	2GHz	0.09 μ m	64	64
Core 2	2006	不详	2.5GHz	45nm	64	64
Core i7/i5/i3	2008	7~11 亿	3.3GHz	45nm~32nm	64	64

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 32nm，正在研制十几 nm 的器件，这极具挑战性，常规制造工艺将失效。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而从另一侧跑出来。目前芯片的“门”已经小于 2nm，足以在“门”关闭时，电子挖出隧道而穿过该门，从而无法阻挡电子。

③ 搀质的使用接近极限。通常，搀质混入硅以改善半导体的导电率，增加局部电荷能力。晶体管虽然可缩小，但仍需保持相同的电荷。为了实现这一目的，这种硅必须有较高的搀质原子浓度。但当它大于某种极限时，搀质原子会凝集成块，使导电性能下降。目前芯片已经非常接近该极限。

④ 传统材料难以适用。目前芯片互连大多采用铝，但铝的导电性能容易导致芯片过早失效。因此，近年来芯片中采用铜布线互连已成为半导体产业的一个攻关热点。

随着超大规模集成电路与微处理器技术的长足进步和现代科学技术对提高计算能力的强烈要求，并行处理技术的研究与应用及众多巨型机的产生也成为这一时期计算机发展的特点。1996 年，Cray 公司推出的 Cray-1 向量巨型机，具有 12 个功能部件，运算速度达每秒 1.6 亿次浮点运算。不少巨型机采用成百上千个高性能处理器组成大规模并行处理系统，其峰值速度已达到每秒万亿至百万亿次。进入 21 世纪，美国、中国等国家已先后研制成功多台每秒超千万亿次的巨型计算机。

第四代机时期的一个重要特点是计算机网络的发展与广泛应用。进入 20 世纪 90 年代以来，由于计算机技术与通信技术的高速发展与密切结合，掀起了网络热。大量的计算机连到不同规模的网络中，然后通过 Internet 与世界各地的计算机互连。这样大大扩展和加速了信息的流通，增强了社会的协调与合作能力，使计算机的应用方式也由个人计算方式向分布式和群集式计算发展。因此，有人曾经这样说过：“计算机就是网络，网络就是计算机”。

1.2.6 新一代计算机

目前,业界对什么是第五代计算机的看法并不一致。前面讲到,以元器件的更新换代作为计算机划代的标志,因此不管是大规模(LSI)、超大规模(VLSI)、甚大规模 ULSI (Ultra Large Scale Integration) 还是极大规模 ELSI (Extremely) 集成电路组成的计算机,它们都是由硅组成的半导体器件,且计算机基本结构仍然遵循冯·诺依曼结构体系,人们仍叫它们为第四代计算机。多年来,人们在不断努力与探索,以寻找速度更快、功能更强的全新的元器件,如神经元、生物芯片、分子电子器件、超导计算机、量子计算机等。计算机基本结构也试图突破冯·诺依曼结构体系,使其更具智能化。这方面的研究工作已取得了某些重要成果,相信在不久的将来,真正的新一代计算机一定会出现。

这里,有必要提到日本第五代计算机。20世纪80年代初,日本政府制订了一项10年研究计划——第五代计算机系统研究计划(1982—1992年),计划分三个阶段实施。这一研究计划的制订者和参加者的共识是:未来信息处理的基本发展方向是知识处理,而并行推理将是未来信息处理的核心。因此,该计划从一开始就以研究开发创新的并行推理实现技术为目的,并以逻辑程序设计语言为推理机的核心语言。所谓第五代计算机指的就是这样一类新的并行逻辑推理机。经过之后10年的努力,取得了一些阶段性成果,并于1992年10月宣告该计划结束。该计划的研究方向并不反映当代计算机技术的主要发展方向,更没有直接促进计算机的更新换代,但这一计划对推动人工智能,特别是并行推理技术的发展起了积极作用。

1.2.7 我国计算机的发展

中国古代在计算机理论与计算工具方面曾有过杰出表现,它们包括:① 二进制数的位。易经中的“阴阳八卦”是世界上最早出现的二进制形式。位的表示符号为“爻”(读yáo),阴爻对应0,阳爻对应1,八卦为3个爻的集合。② 十进制计数系统。据殷墟甲骨文和周代青铜器上的铭文记载,十万以内的自然数可由1~9的9个符号和表示十、百、千、万位值的4个符号来表示。较当时巴比伦和埃及的计数制更科学,且我国早就把“零”作为数,并出现了负数运算规则。③ 筹算。利用算筹作为运算工具,春秋战国时期就已广泛使用,对中国古代社会的发展起到了重要作用。④ 珠算。它以算盘作为工具,在元代已广泛使用,明代传至日本、朝鲜等国。

我国对现代电子计算机的研究始于20世纪50年代初。在1956年国家制定《1956—1967年科学技术发展规划》时,将“计算机技术的建立”列为紧急措施之一。一面派人去前苏联考察学习,一面在国内开办学习班,积极培养人才。同时筹建中科院计算技术研究所,开始了计算机的研制工作,并以苏联资料为蓝本,分别于1958年和1959年推出了103小型数字计算机和104大型通用数字计算机,它们属于第一代电子管机。1964年5月和10月分别由中科院计算技术研究所和华东计算技术研究所自行研制成功大型电子管计算机119机和J-501机。1965—1966年间分别推出了晶体管计算机109机、441B机、108机和X-2机,中国进入晶体管机时代。中国集成电路计算机的研究始于1965年,直到1971年和1973年原四机部主持研制100系列机和200系列机,前者与小型机NOVA兼容,后者指标与IBM 360类似,但不兼容,并分别生产了千余台和若干台。由此可以看出,我国一、二、三代机的推出比世界上一、二、三代机晚了整整一代,但这些机型的推出,对我国计算机工业的诞生与发展,特别是计算机人才