

计算机体系 结构设计

- ◆ 计算机体系结构基本概念
- ◆ 数的表示与计算体系
- ◆ 指令系统设计
- ◆ 中央处理器体系结构设计
- ◆ 存储器体系结构设计
- ◆ I/O系统设计
- ◆ 并行处理与普适计算
- ◆ 生物计算机
- ◆ 光计算机
- ◆ 量子计算机



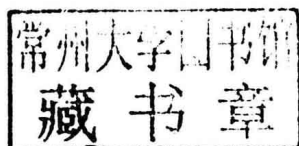
蔡政英 刘势 张上 肖明 编著

清华大学出版社

高等学校计算机应用规划教材

计算机体系结构设计

蔡政英 刘势 张上 肖明 编著



清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书全面透彻地讲解经典计算机以及生物、光、量子等非经典计算机的体系结构设计方法,并融入大量新知识点,技术底蕴深厚。全书共分10章,清晰阐释重要概念,详述计算机体系结构的分析、设计和计算方法,注重培养读者的体系结构思维和创新的能力,帮助读者建立起完整的知识体系。为方便读者自我检测,并扎实掌握所学的知识点,全书共列出200多道精选例题和习题。

本书提供的配套资源包含PPT、例题等学习资源,便于读者学习、参考,读者可在<http://www.tupwk.com.cn/downloadpage>免费下载。任课教师可免费获取教学资源。

本书层次清晰、图文并茂、实例丰富、讲述详细,可作为高等院校计算机相关专业的本科生、研究生教材,可作为计算机资格考试培训机构用书,也可供计算机工程技术人员参考。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

计算机体系结构设计 / 蔡政英 等编著. —北京:清华大学出版社, 2018

(高等学校计算机应用规划教材)

ISBN 978-7-302-49078-4

I. ①计… II. ①蔡… 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(2017)第 296174 号

责任编辑:刘金喜 韩宏志

封面设计:孔祥峰

版式设计:思创景点

责任校对:曹 阳

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084

社 总 机: 010-62770175 邮 购: 010-62786544

投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 三河市金元印装有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 24.25 字 数: 636 千字

版 次: 2018 年 5 月第 1 版 印 次: 2018 年 5 月第 1 次印刷

印 数: 1~2000

定 价: 59.00 元

产品编号: 071993-01

前 言

本书可作为普通高等院校“计算机组成原理”“计算机组织与结构”“计算机系统结构”等相关课程的教材。面向高等院校的计算机、自动化以及电子工程等相关专业的本科生及研究生,并可作为参加研究生入学考试、全国计算机软件资格(水平)考试的备考书籍,也可供科研人员参考。

本书借鉴了国内外经典的相关教材和资料,汲取了它们各自的优点,并具有以下特点。

一是本书知识点全面,内容丰富,不同院校可以根据不同的教学目标适当选取教学内容,不同层次的读者也可以根据自己学习、考试、研究等的不同需要选择本书相关章节进行阅读。

二是本书避免过多地纠结于理论讲述和概念背诵,着重于对读者分析能力和设计能力的培养,全书各章节均穿插了大量图表、例题、习题,全书共计 200 多道例题及习题,均精选于研究生入学考试、全国计算机软件资格(水平)考试等中的典型分析题、设计题,主要参数均与市场主流产品的性能参数相当,尽量让读者学完了觉得“有用”。

三是本书包含大量的较新的知识点和题型,与新技术、实际应用的结合较为紧密,比如固态硬盘、脑波、移动计算、生物计算机、光计算机、量子计算机等,让读者在掌握经典计算机体系结构的基础上,对相关新技术与应用有所了解,引导和培养读者的体系结构思维 and 创新能力。

本书共分 10 章,全面系统地介绍计算机体系结构的相关知识。第 1 章简述计算机的发展和体系结构的演化;第 2 章主要介绍数的表示与计算体系,进而讨论运算器的设计;第 3 章主要讨论指令体系设计,从指令概念到指令体系设计与优化均做了详细介绍;第 4 章主要讨论中央处理器体系结构设计,包括组合逻辑控制器设计与微程序控制器设计,以及多核处理器和国产处理器的相关技术;第 5 章主要讨论存储器体系结构设计;第 6 章主要讨论输入/输出系统设计,以及常见外设与接口技术;第 7 章全面讨论在高速计算要求下的并行处理与普适计算技术;第 8 章、第 9 章、第 10 章分别介绍生物计算机与纳米机器人、光计算机、量子计算机的体系结构设计和发展演变。

本书内容通俗易懂,语言简练,深入浅出,图文并茂,共包含图表 420 多幅。本书按层次和模块化结构组织教学内容,授课教师可以根据需要对内容进行灵活的取舍。

本书主要由蔡政英、刘势、张上、肖明编写,蔡政英主要负责 1、5、10 章,刘势主要负责 2、6、8 章,张上主要负责 4、9 章,肖明主要负责 3、7 章。此外,张余、刘辉、卢晓燕、屈静、吴玥、胡绍齐等也参加了文字录入和绘图工作,在此表示感谢。

为说明问题,本书引用了大量原理、概念、定理、数据、公式、通用代码、试题等属于公有领域的非独创性内容,直接或间接引用了许多专家和学者已经发表的论文、文献或著作,在此向他们表示衷心的感谢,有兴趣的读者可以进一步查阅所附的主要参考文献。未能标出的参考文献,请作者通过出版社与本书编者联系。

本书配套的 PPT 讲稿可从 <http://www.tupwk.com.cn/downpage> 下载。

由于作者水平有限，书中难免有错误和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2018 年 1 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 计算机体系结构的基本概念	1
1.2 计算机的发展简史	2
1.2.1 机械式计算机的发展	2
1.2.2 电子计算机硬件结构的发展	3
1.2.3 微处理器的发展	7
1.2.4 从模拟计算机到数字计算机	8
1.2.5 计算机软件的发展	9
1.3 计算机体系结构的分类	13
1.3.1 冯·诺依曼体系结构	13
1.3.2 哈佛体系结构	14
1.3.3 Flynn 计算机体系结构的 分类	15
1.3.4 冯泽云分类法	16
1.3.5 计算机的语言层次结构	16
1.3.6 计算机的总线组织结构	17
1.3.7 计算机的软件系统	19
1.4 计算机系统的性能指标	19
1.4.1 摩尔定律	19
1.4.2 性能测试程序	19
1.4.3 基本性能指标	20
1.4.4 Amdahl 定律	23
1.5 计算机的应用	24
习题 1	25
第 2 章 数的表示与计算体系	27
2.1 进位计数制与数制转换	27
2.1.1 进位计数制	27
2.1.2 数制间的转换	30
2.2 无符号数与文字的表示	32
2.2.1 无符号数的表示	32
2.2.2 十进制数串的表示	33
2.2.3 西文字符在计算机中的 表示	33

2.2.4 中文字符在计算机中的 表示	34
2.2.5 布尔代数与布尔逻辑	35
2.3 带符号数的表示	38
2.3.1 机器数与真值	38
2.3.2 原码表示	39
2.3.3 补码表示	40
2.3.4 反码表示	41
2.3.5 移码表示	42
2.4 定点数与定点运算	43
2.4.1 定点表示	43
2.4.2 加法与减法运算	43
2.4.3 原码乘法运算	45
2.4.4 原码除法运算	47
2.4.5 补码乘法运算	47
2.4.6 补码除法运算	50
2.4.7 移位运算	50
2.4.8 运算器的基本结构	52
2.5 浮点数与浮点运算	55
2.5.1 浮点表示	55
2.5.2 IEEE754 浮点数标准	57
2.5.3 浮点加减运算	59
2.5.4 浮点乘除运算	61
2.5.5 浮点运算流水线	62
2.6 BCD 码	63
2.6.1 BCD 码的格式	63
2.6.2 BCD 码加减法	64
2.6.3 BCD 码乘除法	65
2.7 数据校验码	65
2.7.1 码距与数据校验码	65
2.7.2 奇偶校验码	66
2.7.3 循环冗余校验码	67
2.7.4 海明校验码	70

2.8 时序逻辑电路	72	3.4.2 指令系统设计的步骤	103
2.8.1 触发器	72	3.4.3 指令的操作码编码	103
2.8.2 寄存器	73	3.4.4 指令的地址码编址	105
2.8.3 计数器	74	3.4.5 Huffman 优化编码方法	106
2.9 组合逻辑电路	74	3.5 CISC 与 RISC 指令系统 设计	107
2.9.1 三态电路	74	3.5.1 复杂指令集计算机 (CISC)	107
2.9.2 比较器	74	3.5.2 精简指令集计算机 (RISC)	108
2.9.3 加法器	75	3.6 80x86/Pentium 指令系统	109
2.9.4 编码器	75	3.6.1 80x86 指令系统主要特征	109
2.9.5 译码器	76	3.6.2 80x86 寻址方式	109
2.9.6 数据选择器	76	3.6.3 8088/8086 CPU 的指令系统 分类	111
2.9.7 总线	76	3.6.4 Pentium 指令系统	116
2.10 阵列逻辑电路	77	3.6.5 80x86/Pentium 常用伪 指令	117
2.10.1 阵列乘法器	77	3.7 ARM 指令系统	118
2.10.2 阵列除法器	79	3.7.1 ARM 指令系统主要特征	118
2.10.3 可编程逻辑阵列(PLA)	79	3.7.2 ARM 寻址方式	119
2.10.4 可编程阵列逻辑(PAL)	80	3.7.3 ARM 指令系统分类	120
习题 2	80	3.7.4 Thumb 指令及应用	121
第 3 章 指令系统设计	82	3.7.5 ARM 汇编语言的伪操作	122
3.1 指令类型与功能	82	3.7.6 ARM 汇编语言的程序 结构	122
3.1.1 数据传送指令	84	3.8 MIPS 指令系统设计	123
3.1.2 算术运算指令	85	3.8.1 MIPS 概述	123
3.1.3 逻辑运算指令	85	3.8.2 MIPS 指令格式	124
3.1.4 算术移位指令	86	习题 3	127
3.1.5 逻辑移位指令	87	第 4 章 中央处理器体系结构设计	129
3.1.6 堆栈操作指令	88	4.1 CPU 的基本结构	129
3.1.7 程序控制指令	88	4.2 CPU 中的主要寄存器	130
3.1.8 输入输出指令	90	4.2.1 用户可见寄存器	130
3.1.9 其他指令	91	4.2.2 控制和状态寄存器	131
3.2 数据类型	91	4.3 控制器的结构	132
3.2.1 数值数据类型	91	4.3.1 指令执行的基本步骤	132
3.2.2 字符类型	92	4.3.2 控制器的组成	133
3.2.3 逻辑数据类型	92		
3.3 寻址方式	92		
3.3.1 指令寻址	93		
3.3.2 操作数寻址	94		
3.4 指令系统设计方法	101		
3.4.1 地址结构划分方法	101		

4.3.3 时序产生器和控制方式	135	5.2 Cache 存储器	181
4.4 组合逻辑控制器设计	138	5.2.1 Cache 的基本结构	181
4.4.1 组合逻辑控制器的设计		5.2.2 Cache-主存地址映射	183
原理	138	5.2.3 Cache 替换策略	186
4.4.2 方框图语言与指令流程分析/		5.3 随机存储器与只读存储器	188
数据通路分析	139	5.3.1 随机存储器	188
4.4.3 MIPS 的单周期设计方案	143	5.3.2 只读存储器 ROM	192
4.4.4 MIPS 的多周期设计方案	146	5.3.3 并行存储器	194
4.4.5 MIPS 控制器的设计	148	5.4 外部存储器和 RAID	198
4.5 微程序控制器设计	150	5.4.1 磁表面存储器的原理	198
4.5.1 微程序控制器的设计原理	150	5.4.2 磁盘存储器	200
4.5.2 微程序控制器的组成	152	5.4.3 磁带存储器	203
4.5.3 微程序控制器设计步骤	153	5.4.4 光盘存储器	204
4.5.4 微指令的编译方法	154	5.4.5 固态硬盘存储器	206
4.5.5 微程序的顺序控制方式	155	5.4.6 RAID	207
4.5.6 微指令的执行方式	158	5.5 虚拟存储器技术	208
4.5.7 微指令格式的设计方法	159	5.5.1 程序运行的局部性原理	208
4.5.8 微程序设计技术的应用	161	5.5.2 请求分页式存储管理方式	209
4.6 流水线工作原理	163	5.5.3 请求分段存储管理方式	215
4.6.1 指令的执行方式	163	5.5.4 请求段页式虚拟存储器	217
4.6.2 流水线的分类	166	5.5.5 快表与慢表	217
4.6.3 线性流水线的性能	167	5.5.6 存储共享与保护	218
4.6.4 流水线的相关问题	169	5.6 网络存储与容灾备份	219
4.7 典型的处理器设计	170	5.6.1 网络存储技术架构	219
4.7.1 Intel 的 Pentium 处理器结构		5.6.2 备份与容灾	220
与设计	170	习题 5	221
4.7.2 ARM 系列处理器结构		第 6 章 I/O 系统设计	223
与设计	171	6.1 输入输出(I/O)系统概述	223
4.7.3 SUN 的 SPARC 系统	172	6.1.1 I/O 系统需要解决的主要	
4.7.4 多核处理器的结构与与设计	172	问题	223
4.7.5 龙芯系列处理器的结构		6.1.2 I/O 接口的结构与功能	224
与设计	175	6.1.3 I/O 接口的类型	225
习题 4	175	6.1.4 输入输出设备的编址	226
第 5 章 存储器体系结构设计	178	6.2 程序查询方式	227
5.1 存储器概述	178	6.2.1 程序查询流程	227
5.1.1 存储器分类	178	6.2.2 程序查询方式的接口电路	228
5.1.2 存储器的性能指标	180	6.3 中断输入输出方式	229
5.1.3 存储器的层次体系结构	181	6.3.1 中断的作用、产生和响应	229

6.3.2	中断处理流程	230	6.7.12	交互式输入/输出—— 虚拟现实 VR	264
6.3.3	程序中断设备接口的组成和 工作原理	231	6.7.13	交互式输入/输出——脑波 读取和意念控制	265
6.4	DMA 输入输出方式	233	6.8	外设接口	266
6.4.1	DMA 方式的特点与应用 场合	233	6.8.1	ISA/EISA	266
6.4.2	DMA 控制器组成	234	6.8.2	PCI/PCI-E	266
6.4.3	DMA 的数据传送过程	236	6.8.3	ATA (IDE)/PATA/SATA 接口	267
6.5	I/O 通道和处理机	238	6.8.4	并行 I/O 标准接口 SCSI 和 SAS	267
6.5.1	通道概述	238	6.8.5	光纤通道和 InfiniBand	268
6.5.2	通道的类型	239	6.8.6	PCMCIA	268
6.5.3	通道的组成结构	240	6.8.7	DVI/HDMI	268
6.5.4	通道工作过程	241	6.8.8	串行通信接口和 USB	269
6.5.5	I/O 处理机	242	6.8.9	IEEE 1394/Firewire	270
6.6	总线结构	242	习题 6		271
6.6.1	总线的概念和结构形态	242	第 7 章	并行处理与普适计算	272
6.6.2	总线规范与性能	243	7.1	并行计算机系统结构	272
6.6.3	总线的组成与结构	244	7.1.1	指令级并行和机器并行	272
6.6.4	总线的设计与仲裁	245	7.1.2	并行计算机系统结构	275
6.6.5	总线的定时和数据传送 模式	248	7.2	单处理机系统中的并行 机制	278
6.7	外部设备	249	7.2.1	超线程和同时多线程 SMT	278
6.7.1	输入——键盘	249	7.2.2	单芯片多核处理器 CMP	280
6.7.2	输入——鼠标、跟踪球和 操作杆输入	251	7.2.3	协处理器	280
6.7.3	输入——图像输入设备(数码 相机、摄像机和摄像头)	251	7.2.4	超标量与超流水线	281
6.7.4	输入——语音录入系统	252	7.3	多处理机系统的组织结构	283
6.7.5	输入——光笔、手写板、 绘图板	253	7.3.1	系统拓扑结构	283
6.7.6	输入——条形码与二维码	253	7.3.2	多处理机系统中的存储器 管理	286
6.7.7	输入——OCR 技术和文字 输入系统	255	7.3.3	多处理机系统中的通信	287
6.7.8	输出——显示技术	256	7.3.4	多处理机高速缓冲存储器 一致性	289
6.7.9	输出——打印机、绘图仪	260	7.3.5	多处理机的同步	295
6.7.10	输出——声音输出设备	262	7.3.6	多处理机实例	298
6.7.11	交互式输入/输出—— 触摸屏	263	7.4	多处理机操作系统和算法	302

7.4.1 多处理机操作系统.....	302	8.6 纳米机器人.....	330
7.4.2 并行处理机算法.....	303	8.6.1 纳米机器人概述.....	330
7.5 从计算机到网络.....	304	8.6.2 纳米机器人结构.....	331
7.5.1 计算机网络.....	304	习题 8.....	334
7.5.2 物联网.....	305	第 9 章 光计算机.....	335
7.5.3 无线传感器网络.....	306	9.1 光计算机概述.....	335
7.5.4 网格计算.....	306	9.2 光计算机基本原理.....	336
7.5.5 云计算.....	307	9.2.1 数字光计算.....	336
7.6 普适计算和移动计算.....	308	9.2.2 光学傅里叶变换.....	337
7.6.1 普适计算.....	308	9.2.3 光学计算机实现.....	339
7.6.2 分布式计算.....	309	9.3 激光通信.....	340
7.6.3 移动计算和超移动计算.....	309	9.3.1 激光通信概述.....	340
7.6.4 迅驰技术.....	310	9.3.2 激光通信的基本架构.....	341
7.6.5 智能手机.....	310	9.3.3 光发射机.....	342
7.6.6 笔记本电脑/平板电脑.....	311	9.3.4 光纤.....	343
7.6.7 PDA 智能终端.....	311	9.3.5 光接收机.....	344
7.6.8 车载智能终端.....	312	9.3.6 光放大器.....	345
习题 7.....	312	9.3.7 光纤通信系统的主要性能 指标.....	345
第 8 章 生物计算机.....	314	9.3.8 FDDI 协议.....	347
8.1 生物计算机概述.....	314	9.3.9 光纤传输的波动理论.....	347
8.1.1 生物计算机的特点.....	314	9.4 光量子计算机.....	348
8.1.2 生物计算机种类.....	315	9.4.1 普朗克黑体辐射理论.....	348
8.2 基因调控开关和生物芯片.....	316	9.4.2 爱因斯坦光电效应方程.....	349
8.2.1 转换开关.....	316	9.4.3 康普顿散射.....	350
8.2.2 Riboswitch.....	316	9.4.4 光的波粒二象性.....	351
8.2.3 双稳态开关.....	316	9.4.5 光量子计算机的实现.....	352
8.2.4 生物芯片.....	317	习题 9.....	353
8.3 神经(元)计算机.....	318	第 10 章 量子计算机.....	354
8.3.1 神经(元)计算机的概述.....	318	10.1 量子计算机概述.....	354
8.3.2 神经网络的结构与算法.....	319	10.2 量子态和量子编码非经典 特性.....	355
8.3.3 神经网络的学习方式.....	320	10.2.1 量子态的描述——波函数 和量子态叠加原理.....	355
8.4 DNA 计算机.....	323	10.2.2 量子态时间演化和计算 操作.....	356
8.4.1 DNA 计算机概述.....	323	10.2.3 量子纠缠现象.....	356
8.4.2 DNA 计算机的模型.....	324		
8.4.3 DNA 计算机的体系结构.....	325		
8.5 细胞计算机.....	326		
8.5.1 细胞计算机概述.....	326		
8.5.2 细胞自动机的结构.....	327		

10.2.4	量子非克隆定理	357
10.3	量子位与量子逻辑门	357
10.3.1	量子位	357
10.3.2	量子逻辑门	359
10.4	量子算法	363
10.4.1	Shor 算法	363
10.4.2	Grover 算法	365
10.5	量子通信	367
10.6	量子加密	368
10.6.1	量子密钥分配	368
10.6.2	无噪信道下的 BB84 协议	368
10.6.3	有噪信道下的 BB84 协议	369

10.7	量子计算机的物理实现	370
10.7.1	光学量子计算机	370
10.7.2	离子阱量子计算机	371
10.7.3	中性原子量子计算机	371
10.7.4	超导量子计算机	372
10.7.5	腔量子电动力学量子 计算机	372
10.7.6	量子点体系的量子 计算机	373
习题 10		373
主要参考文献		374

第1章 绪 论

内容提要: 本章简要介绍计算机体系结构的基本概念、计算机的发展简史、计算机体系结构的分类、计算机系统的性能指标、计算机的应用。

本章重点: 计算机体系结构的分类、计算机系统的性能指标。

1.1 计算机体系结构的基本概念

计算机体系结构(Computer Architecture): 又称为**计算机系统结构**, 指机器语言程序员看到的传统机器级具有的属性结构, 包括概念性结构和功能性结构两方面。为确保其所设计或生成的程序在机器上能正确运行, 机器语言程序设计者或编译程序生成系统必须遵循这些计算机属性。对通用寄存器型机器来说, 主要属性包括: 数据表示、指令集、寻址规则、寄存器定义、存储系统、输入/输出结构、终端系统、信息保护等。

计算机组织(Computer Organization): 也称为**计算机组成**, 指计算机体系结构的逻辑实现或逻辑结构, 即物理机器级内各部件的功能及各部件的联系, 各事件的控制方式与排序方式, 包括物理机器级内数据流和控制流的组成及逻辑设计等。

计算机实现(Computer Implementation): 指计算机组成的物理实现或物理结构, 即器件技术(占主导作用)和微组装技术, 包括处理机、主存、外设等器件的物理结构与器件集成, 信号传输技术, 模块、插件、底板的划分与连接, 电源、冷却及整机装配技术等。

上述三个术语具有不同的概念和不同的内容, 但又互相紧密联系。具有相同计算机体系结构(如相同指令系统)的计算机根据速度要求不同等可采用不同的组成方式(逻辑结构)。与此类似, 一种计算机组成也可采用不同的计算机实现(物理结构)。

计算机系统(Computer System)包括硬件和软件两大部分, 两者缺一不可。硬件是计算机系统的物质基础, 缺少硬件, 再好的软件也无法运行; 软件是计算机系统的灵魂, 缺少软件, 再好的硬件也毫无用处。硬件和软件密切配合, 计算机才能正常工作和发挥作用。

计算机硬件(Computer Hardware)又称**硬件系统**, 指计算机系统的实体部分, 即计算机系统中电子、机械、光电等元件组成的各种物理器件的总称。计算机硬件的功能是输入并存储程序及数据, 并将数据加工成可被利用的形式。各类物理硬件按系统结构的要求组成一个有机整体, 为计算机软件提供运行的物质基础。中央处理器(Central Processing Unit, CPU)是计算机硬件的运算核心和控制核心, 包括运算器(Arithmetic Unit, AU)、控制器(Control Unit, CU)和寄存器(Register)。运算器的核心是算术逻辑运算单元(Arithmetic Logic Unit, ALU)。

计算机软件(Computer Software)又称**软件系统**, 指计算机系统上的软件部件, 即计算机程序及其文档。程序是为了完成计算任务而组织起来的处理对象和处理规则的描述; 文档是为了说明任务或程序而使用的文本式资料。程序只有装入机器内部才能工作; 文档不一定装入机器内部,

一般用于给人看。计算机软件一般分为系统软件和应用软件两大类。计算机系统如图 1.1 所示。



图 1.1 计算机系统

理论上, 硬件和软件具有逻辑功能等效性, 即计算机系统的某一具体功能既可以由硬件实现, 也可以由软件实现。但两种实现方式具有不同的成本和速度。在设计一个计算机系统时, 应当根据设计要求、当前的技术水平和现实条件, 合理确定哪些功能由硬件实现或由软件实现, 即硬件和软件的功能分配。而硬件与软件的交界面则称为计算机体系结构。

1.2 计算机的发展简史

1.2.1 机械式计算机的发展

经典计算机的发展经历了机械式计算机、机电式计算机、电子计算机几个阶段, 之后又出现了生物计算机、光学计算机、量子计算机等超经典的计算机。

算盘是人类最早的计算工具, 包括起源于中国的(穿)珠算盘、日本的十露盘、俄罗斯算盘、古希腊算板、演算沙盘等。在阿拉伯数字广泛使用之后, 通过机械技术实现数字运算的机械式计算机开始出现。17 世纪时, 一批欧洲数学家开始设计和制造数字计算机以实现数字形式基本运算。1642 年, 法国数学家帕斯卡(Blaise Pascal)采用齿轮传动装置制作了最早的十进制加法器, 也是世界公认的第一台机械式计算机, 如图 1.2 所示。这台加法机利用类似钟表的齿轮传动原理, 通过手工操作来完成加、减运算。

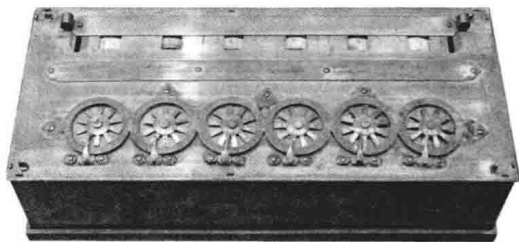


图 1.2 帕斯卡的加法机

1674 年, 德国数学家和哲学家莱布尼茨(Gottfried Wilhelm Leibniz)设计了可手动进行完整四则运算的通用计算机, 并提出了一个重要思想“用机械替代人完成繁杂重复的计算工作”。

1822 年, 英国数学家巴贝奇(Charles Babbage)设计了一台能够代替人来编制数表的差分机。1834 年, 他在差分机的基础上做了较大改进, 设计了既能进行数字运算、又能进行逻辑运算的分析机。其设计思想已具备了现代计算机的概念, 但当时的技术水平是无法实现的。

巴贝奇的思想提出之后的一百多年间, 电子学、电磁学、电工学蓬勃发展。在元器件方面, 相继发明了真空二极管和真空三极管; 在系统技术方面, 接连发明了无线电报、电视、雷达等, 为现代计算机的发展准备了技术基础和物质条件。

同时,数学、物理也发展迅速。至20世纪30年代,物理学的所有领域都进入了定量化阶段,描述物理过程的各种数学方程层出不穷,很多方程已经很难用经典的分析方法解决。数值分析(Numerical Analysis)应运而生,奠定了现代计算机的数值算法基础,通过各种数值积分、数值微分、微分方程数值解法,从而把计算过程归结为基本的数值运算。

另外,现代计算机诞生的根本动力还是社会上对先进计算工具的迫切渴望。20世纪以后,几乎各个领域都遇到了巨量计算困难,严重阻碍了科学的顺利发展。20世纪上半叶两次世界大战的爆发,使得军事领域对高速计算工具的需求更为迫切,促使德、美、英等国几乎同时开始了机电式计算机和电子计算机的研究。

机电式计算机使用机械电子一体化技术实现数字运算,主要器件是机电式继电器,有时也称为继电器计算机。1938年,德国科学家朱斯(Konrad Zuse)研制成功第一台机电式二进制可编程计算机Z-1。1941年,又研制成功机电式全自动计算机Z-3,具备二进制运算、浮点记数、数字存储地址的指令等现代计算机的特征。1940~1947年间,美国也相继制成了机电式计算机MARK-I、MARK-II、Model-1、Model-5等。由于继电器的开关速度比较慢(大约为百分之一秒),大大限制了计算机的运算速度。

1937年,美国哈佛大学教授艾肯(Howard Aiken)在撰写博士论文时因需要求解非线性常微分方程,研究了巴贝奇的工作之后,提出了第一份自动计算机建议书(Proposed Automatic Calculating Machine)。经艾肯和IBM公司的合作与努力,在1944年制成了哈佛MARK-I,IBM将其命名为ASCC(Automatic Sequence Controlled Calculator,自动时序控制计算机),如图1.3所示。

MARK-I是世界上最早的通用型自动机电式计算机之一,是计算机技术史上的一个重大突破。其核心是72个循环寄存器,每个可存放一个正或负的23bit数字,使用了3000多个继电器,加法速度是300ms,乘法速度是6s,除法速度是11.4s。它长15米,高2.4米,有15万个元件,800千米导线,重量达5吨。由穿孔卡片机实现数据和指令的输入,并由电传打字机实现数据输出。1947年,艾肯又研制出机电式计算机MARK-II。1949年,由于电子管技术的重大进步,艾肯研制的MARK-III是采用电子管的计算机。



图1.3 哈佛MARK-I

1.2.2 电子计算机硬件结构的发展

电子计算机的发展过程,经历了从器件制作到整机、从专用机到通用机、从外加式程序到存储程序的演变。一般将电子计算机的发展划分为五个时代。

1. 电子管时代(1946~1959年)

在第一代电子管时代,电子计算机以电子管为基本逻辑单元,由汞延迟线、磁鼓等构成主存储器,用定点表示数据。图1.4和图1.5分别显示电子管和磁鼓存储器。

1938年,美国爱荷华州立大学物理学家阿塔纳索夫(John Vincent Atanasoff)首先制成了电子计算机ABC(Atanasoff-Berry Computer),也是第一台能做加法和减法运算、有再生存储功能并以电子管为元件的数字计算机。



图 1.4 电子管

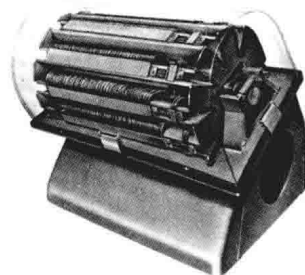


图 1.5 磁鼓存储器

二次大战期间,英国数学家、逻辑学家图灵(Alan Mathison Turing, 见图 1.6)研制出一台译码计算机“图灵甜点”(Turing Bombe)。1944 年 2 月,巨人(Colossus Computer)计算机(如图 1.7 所示)正式启用,也是世界上最早的电子数字计算机,依靠该计算机英国在二战期间破解了大量德军通信密码。图灵也被誉为计算机科学之父、人工智能之父。



图 1.6 图灵

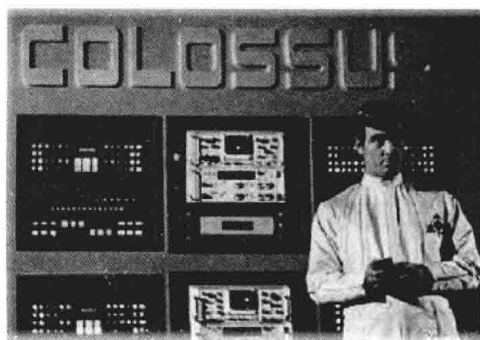


图 1.7 “巨人”计算机

1946 年 2 月 14 日,美国宾夕法尼亚大学莫尔学院研制的大型电子数值积分计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator)通过验收,这就是公认的世界上第一台电子计算机,如图 1.8 所示。该计算机完全采用电子线路实现算术、逻辑运算和信息存储,包含 18 000 多只电子管、1500 多个继电器、10 000 多只电容器、70 000 只电阻,运算速度比继电器计算机快 1000 倍。它占地 160 多平方米,重达 30 吨,功率 150 千瓦,有 5 种功能(每秒 5000 次加法运算,每秒 385 次乘法运算,平方和立方计算, $\sin$ 和 $\cos$ 函数数值运算,及其他更复杂的计算)。ENIAC 最初专门用于火炮弹道计算,后经多次改进而能用于各种科学计算,包括弹道计算、天气预报、原子能、热能点火、风洞试验设计等。但是,ENIAC 采用十进制计算和外加式程序,存储容量也太小,未完全具备现代计算机的主要特征。

新的重大突破是由美国普林斯顿大学教授冯·诺伊曼(John von Neumann, 见图 1.9)的研究小组完成的。冯·诺依曼是 20 世纪最重要的科学家之一,在现代计算机、博弈论、核生化武器等多个领域内均有杰出建树的科学全才之一,1931 年成为美国普林斯顿大学的第一批终身教授时还不满 30 岁,被后人誉为计算机之父和博弈论之父。1945 年 3 月,该小组研制了一个全新的存储程序式通用电子计算机方案,即电子离散变量自动计算机(Electronic Discrete Variable Automatic Computer, EDVAC),首次使用二进制而不是十进制。

本阶段的代表性机器有:冯·诺依曼的 IAS(1946 年)、UNIVAC 公司的 UNIVAC-1(1951 年)、IBM 公司的 IBM701(1953 年)和 IBM704(1956 年)。中国的有 103 机、104 机、119 机等。

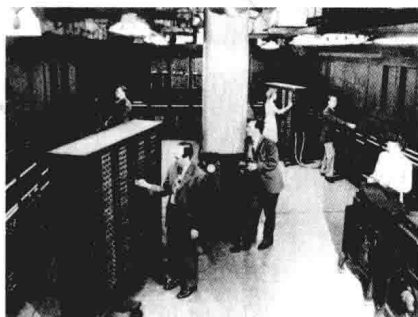


图 1.8 ENIAC



图 1.9 冯·诺依曼

2. 晶体管时代(1959 ~ 1964 年)

在第二代晶体管时代,电子计算机主要以晶体管作为基本逻辑单元,由磁芯构成主存储器,引入浮点运算硬件提高科学计算能力。图 1.10 和图 1.11 显示了晶体管和磁芯存储器。

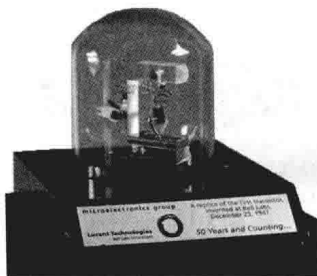


图 1.10 晶体管

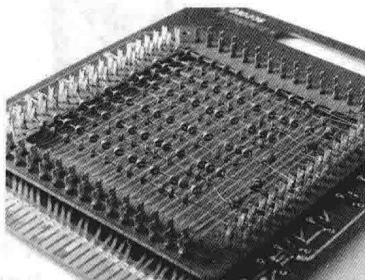


图 1.11 磁芯存储器

相比电子管计算机,晶体管计算机体积小、功耗低、速度快和可靠性高。代表性的机器有:IBM 公司的 IBM7090(1959 年)、IBM7094(1962 年)。中国的第一台晶体管计算机是 1965 年的 DJS-5 机,后继机有 DJS-121 机、DJS-108 机等。

3. 中、小规模集成电路时代(1964 ~ 1975 年)

在第三个发展时代,半导体技术的高速发展催生了集成电路和以集成电路器件为主要逻辑单元的电子计算机,进入了中、小规模集成电路(MSI、SSI)时代。主存储器也由半导体存储器构成(如图 1.12 所示),出现了小型机,以及采用多处理器并行结构的大型机、巨型机。

代表性的计算机有:1964 年 IBM 公司的 IBM360 系列(图 1.13)、CDC 公司的 CDC6600(1964 年)、美国数字设备公司(Digital Equipment Corporation, DEC)的 PDP-8(1964 年)。中国的有 150 机(1973 年)、DJS-130 机(1974 年, 100 系列机)、220 机(1973 ~ 1981 年, 200 系列机)和 182 机(1976 年, 180 系列机)。

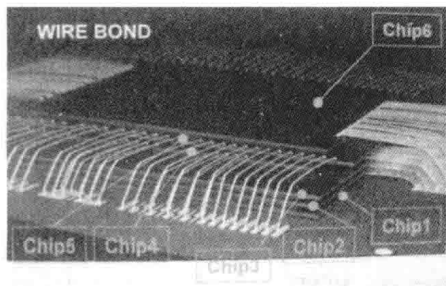


图 1.12 半导体存储器显微照片

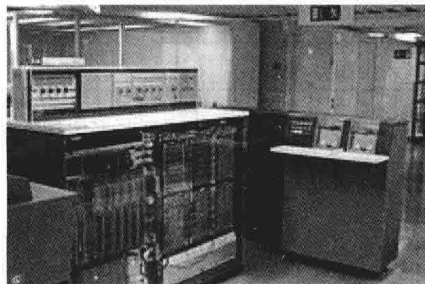


图 1.13 IBM S/360-20

4. 大规模集成电路时代(1975 ~ 1990 年)

在第四个时代, 集成电路的集成度不断提高, 进入了大规模集成电路(LSI)时代。半导体存储器已完全取代了磁芯存储器, RISC 指令集出现。在该阶段, 并行系统、多机系统、分布式系统、巨型向量机、阵列机等体系结构得到了发展, 如美国的 Gray-1、中国的 HY-1 等, 也出现了低档的微处理器。

1973 年, Intel 8080 微处理器的研制成功标志着 8 位微机的诞生, 如 Apple II、Z80 等。1978 年, 采用 Intel 8086 微处理器构成的 16 位微机 IBM-PC/XT(如图 1.14 所示)面世, 标志着台式个人计算机(Personal Computer, PC)开始走进办公室和家庭。诞生于 1977 年的苹果 II(如图 1.15 所示)是世界最早为个人用户量产的 PC 设备, 同样也是最畅销的一款产品。

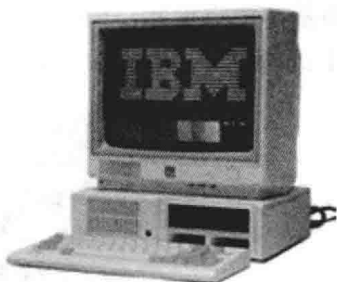


图 1.14 IBM PC



图 1.15 苹果 II

低端微机发展的另一方面是以单片机(Microcontrollers)为核心的工业控制、智能仪器仪表。计算机网络也由实验室走向了商业市场, 推动并形成了信息技术(Information Technology, IT)产业。

5. 超大规模集成电路时代(1990 年至今)

第五个时代, 出现了纳米科技和超大规模集成电路(VLSI), 大规模并行计算和高性能机群开始涌现, 如 IBM 公司的“深蓝”RS/6000 SP2 是一台有 256 块处理芯片的超级并行计算机。中国的有 HY-III(1997 年, 128 个 CPU 大规模并行处理)、HY-IV(机群技术)巨型机, 而在 1999 年, “神威-I”超级并行处理计算机的成功研制使中国成为继美、日之后第三个具备高性能计算机研制能力的国家。

同一时期的微处理器技术也在高速发展, 32 位、64 位的处理器芯片相继出现, 如 Pentium IV、Itanium II 等。中国也推出了“龙芯”系列微处理器芯片。除了用作微机的主要处理部件外, 微处理器芯片也可用作大规模巨型机的处理阵列。表 1.1 列出了电子计算机发展的五个时代。

表 1.1 电子计算机发展的五个时代

时代	年份	硬件	软件	应用
一	1946 ~ 1959	电子管	机器语言 汇编语言	科学计算
二	1959 ~ 1964	晶体管	高级语言	数据处理
三	1964 ~ 1975	小规模集成电路(Small-Scale Integration, SSI) 中规模集成电路(Medium-Scale Integration, MSI)	操作系统	工业控制
四	1975 ~ 1990	大规模集成电路(Large-Scale Integration, LSI)	数据库 网络	商业领域
五	1990 年至今	超大规模集成电路(Very-Large-Scale Integration, VLSI) 特大规模集成电路(Ultra-Large-Scale Integration, ULSI)	人工智能	各个领域