



高等学校计算机专业“十一五”规划教材

计算机组成原理

陈宏 陈智勇 主编
王鑫 参编



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

高等学校计算机专业“十一五”规划教材

计算机组成原理

陈智勇 主 编

陈 宏 王 鑫 参 编

西安电子科技大学出版社

2009

内 容 简 介

本书系统地讲述了计算机最基本的组成和工作原理、分析方法和设计技术,以及有关的先进技术和在计算机组成方面的最新进展。

全书共分8章。第1章计算机系统概论主要讲述计算机的发展历程、计算机系统的层次结构及组成、计算机的工作过程、性能、分类和应用。第2章运算方法和运算器主要讲述数值数据和非数值数据的表示方法、定点数与浮点数的运算方法和运算器以及数据校验码。第3章存储系统主要讲述存储器的基本概念、半导体存储器、多模块交叉存储器、相联存储器、Cache存储器以及虚拟存储器。第4章指令系统主要讲述指令和数据的寻址方式、指令格式的分析与设计以及CISC和RISC的基本概念。第5章中央处理器主要讲述CPU的功能和组成、时序产生器、微程序控制器、硬连线控制器、流水线技术以及提高单机系统指令级并行性的措施。第6章总线结构主要讲述总线的基本概念、总线仲裁和总线通信以及总线标准。第7章输入/输出设备主要讲述典型输入/输出设备的工作原理和常见的性能指标。第8章输入/输出系统主要讲述输入/输出系统的基本概念、I/O接口的功能和基本结构以及I/O设备的数据传送控制方式。每章针对各主要知识点给出了大量的例题和习题,附录A给出了部分习题的参考答案。

本书可作为高等院校普通本科计算机科学与技术、软件工程、网络工程和信息技术等专业的教材,也可作为应用型本科相关专业的教材。

★ 本书配有电子教案,需要者可登录出版社网站,免费下载。

图书在版编目(CIP)数据

计算机组成原理/陈智勇主编. —西安:西安电子科技大学出版社,2009.2

高等学校计算机专业“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5606-2169-2

I. 计… II. 陈… 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(2009)第 005354 号

策 划 云立实

责任编辑 阎 彬 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西华沐印刷科技有限责任公司

版 次 2009年2月第1版 2009年2月第1次印刷

开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印 张 24

字 数 567千字

印 数 1~4000册

定 价 34.00元

ISBN 978-7-5606-2169-2/TP·1107

XDUP 2461001-1

*** 如有印装问题可调换 ***

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

高等学校计算机专业“十一五”规划教材

编审专家委员会

主 任: 马建峰 (西安电子科技大学计算机学院院长, 教授)

副主任: 赵祥模 (长安大学信息工程学院院长, 教授)

余日泰 (杭州电子科技大学计算机学院副院长, 副教授)

委 员: (按姓氏笔画排列)

王忠民 (西安邮电学院计算机系副主任, 教授)

王培东 (哈尔滨理工大学计算机与控制学院院长, 教授)

石美红 (西安工程大学计算机科学与技术系主任, 教授)

纪 震 (深圳大学软件学院院长, 教授)

刘卫光 (中原工学院计算机学院副院长, 教授)

陈 以 (桂林电子科技大学计算机与控制学院副院长, 副教授)

张尤赛 (江苏科技大学电子信息学院副院长, 教授)

邵定宏 (南京工业大学信息科学与工程学院副院长, 教授)

张秀虹 (青岛理工大学计算机工程学院副院长, 教授)

张焕君 (沈阳理工大学信息科学与工程学院副院长, 副教授)

张瑞林 (浙江理工大学信息电子学院副院长, 教授)

李敬兆 (安徽理工大学计算机科学与技术学院院长, 教授)

范 勇 (西南科技大学计算机学院副院长, 副教授)

陈庆奎 (上海理工大学计算机学院副院长, 教授)

周维真 (北京信息科技大学计算机学院副院长, 教授)

徐 苏 (南昌大学计算机系主任, 教授)

姚全珠 (西安理工大学计算机学院副院长, 教授)

徐国伟 (天津工业大学计算机技术与自动化学院副院长, 副教授)

容晓峰 (西安工业大学计算机学院副院长, 副教授)

龚尚福 (西安科技大学计算机系主任, 教授)

策 划: 臧延新 云立实

杨 璠 陈 婷

前 言

“计算机组成原理”是计算机科学与技术一级学科各专业必修的一门专业公共基础课，它以计算机单机系统为研究对象，主要介绍计算机硬件的基本组成、工作原理和逻辑设计。

本书根据高等学校计算机科学与技术专业公共基础课“计算机组成原理”的核心知识体系和研究生入学考试全国统考大纲的要求编写而成，较为全面地介绍了计算机系统中各部件的内部工作原理、组成结构、逻辑设计以及相互连接方式，以便让读者建立计算机系统整机的概念。通过对基础理论和基础知识的讲述，让读者能够运用计算机组成的基本原理和基本方法，对有关计算机硬件系统中的理论和实际问题进行计算、分析和设计。本书内容丰富、取材先进，在阐述计算机的基本组成和工作原理的基础上，力图给出设计方法和实例，以帮助读者更好地理解一些比较抽象的概念。

本书在编写上具有四个特色：第一，基础性强，知识结构合理，教材内容组织符合《高等学校计算机科学与技术专业发展战略研究报告暨专业规范(试行)》和研究生入学考试全国统考大纲的要求；第二，取材先进，在计算机的发展趋势、指令系统的发展、提高单机系统指令级并行性的措施、总线标准等章节中引入了近几年来较新的计算机技术；第三，符合计算学科的认知理论，注重实践能力的培养，教材在内容的设置上依据了人们在计算学科领域的认识规律，即从感性认识(抽象)到理性认识(理论)，再由理性认识(理论)回到实践(设计)；第四，每章针对各主要知识点给出了大量的例题，解题过程详细，思路清晰，有助于对基本理论、基本方法的理解。各章节后的习题附有部分参考答案，有助于读者自学。

本书中有关 CPU 的设计电路已通过 EDA 软件设计验证。在保持 CPU 整体结构不变的前提下，通过扩展指令系统、设计新的指令格式和寻址方式、增加通用寄存器的个数、更新操作控制器的设计等，可设计各类功能强弱不同的 CPU，并通过运行机器语言源程序来验证 CPU 设计的正确性。此部分可作为该课程的综合实践性环节，通过让学生自己做来增强其实践动手能力。

为使用方便，本书所使用的一些常用二进制逻辑元件的图形符号未采用国标，读者可通过附录 C 来进行对照学习。

本书可作为高等院校普通本科计算机科学与技术、软件工程、网络工程和信息化技术等专业的教材，也可作为应用型本科相关专业的教材。课程的参考教学时间为 72 学时，也可根据实际情况选择基础知识部分进行教学。

本书由陈智勇主编。陈智勇编写了第 1、2、4、5 章以及附录；陈宏编写了第 6 和第 8 章；王鑫编写了第 3 和第 7 章。本书由王忠民教授主审，非常感谢他对书稿提出了许多宝贵的修改意见。西安电子科技大学出版社为本书的出版也做了大量的工作，在此表示衷心的感谢。

由于计算机技术的飞速发展，新的理论和技术层出不穷，本书难以反映计算机组成的最新发展变化，加之编者的水平有限，书中难免会存在不妥之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2008 年 10 月

于桂林电子科技大学

目 录

第 1 章 计算机系统概论	1	2.2 非数值数据的表示方法	39
1.1 计算机发展历程	1	2.2.1 字符数据的表示	39
1.1.1 冯·诺依曼型计算机的 特点和功能	1	2.2.2 汉字的表示	40
1.1.2 计算机的发展历史	3	2.3 定点加法、减法运算	41
1.1.3 计算机的发展趋势	5	2.3.1 补码加法、减法	41
1.2 计算机系统的层次结构及计算机组成	6	2.3.2 原码加法、减法	49
1.2.1 计算机系统的层次结构	6	2.3.3 移码加法、减法	52
1.2.2 计算机系统结构和计算机组成	9	2.3.4 十进制加法器	53
1.3 计算机系统的组成	9	2.4 定点乘法运算	54
1.3.1 计算机的硬件系统	10	2.4.1 原码一位乘法	54
1.3.2 计算机的软件系统	13	2.4.2 补码一位乘法	56
1.3.3 计算机硬件与软件的 逻辑等价性	14	2.4.3 阵列乘法器	61
1.4 计算机的工作过程	14	2.5 定点除法运算	70
1.4.1 使用计算机求解的 一个简单例子	15	2.5.1 原码一位除法	70
1.4.2 计算机工作过程	16	2.5.2 补码一位除法	73
1.5 计算机性能	18	2.5.3 阵列除法器	75
1.5.1 计算机性能的衡量尺度	18	2.6 逻辑运算和移位运算	78
1.5.2 反映计算机性能的参数	19	2.6.1 逻辑运算	78
1.5.3 性能因子 CPI	19	2.6.2 移位运算	80
1.5.4 计算机性能常用指标	20	2.7 定点运算器的组成与结构	83
1.6 计算机的分类和应用	21	2.7.1 多功能算术逻辑运算单元	84
1.6.1 计算机的分类	21	2.7.2 定点运算器	89
1.6.2 计算机的应用	24	2.8 浮点运算方法和浮点运算器	92
本章小结	27	2.8.1 浮点加法、减法运算	93
习题 1	28	2.8.2 浮点乘法、除法运算	95
		2.8.3 浮点运算器举例	98
第 2 章 运算方法和运算器	30	2.9 数据校验码	100
2.1 数值数据的表示方法	30	2.9.1 奇偶校验码	101
2.1.1 数据格式	30	2.9.2 海明校验码	101
2.1.2 数的机器码表示	34	2.9.3 循环冗余校验码	104
		本章小结	107
		习题 2	108

第 3 章 存储系统	113	4.2.2 操作码	160
3.1 存储器概述	113	4.2.3 指令字长与机器字长的关系	163
3.1.1 存储器的分类	113	4.2.4 指令格式举例	164
3.1.2 存储器的层次结构	114	4.3 指令和数据的寻址方式	166
3.1.3 主存储器的主要技术指标	115	4.3.1 指令的寻址方式	166
3.2 半导体随机读写存储器	115	4.3.2 操作数的寻址方式	166
3.2.1 SRAM	116	4.3.3 指令格式的分析与设计	173
3.2.2 DRAM	119	4.4 典型指令	176
3.3 半导体只读存储器	123	4.4.1 指令的分类	176
3.3.1 半导体只读存储器的分类	123	4.4.2 RISC 指令系统实例	
3.3.2 EPROM 存储器芯片实例	124	SUN SPARC	178
3.4 半导体存储器的容量扩展	126	4.4.3 Pentium 指令系统	181
3.4.1 位扩展	126	4.5 CISC 和 RISC	188
3.4.2 字扩展	127	4.5.1 CISC	188
3.4.3 字位扩展	127	4.5.2 RISC	188
3.5 高速存储器	130	4.5.3 退耦的 CISC/RISC	191
3.5.1 双端口 RAM	130	4.5.4 后 RISC	192
3.5.2 多模块交叉存储器	132	本章小结	193
3.5.3 相联存储器	134	习题 4	194
3.6 Cache 存储器	136		
3.6.1 Cache 的功能、基本原理与性能参数	136	第 5 章 中央处理器	198
3.6.2 多层次 Cache 存储器	139	5.1 CPU 的功能和组成	198
3.6.3 Cache 的地址映像与变换	140	5.1.1 CPU 的功能	198
3.6.4 Cache 的替换算法	145	5.1.2 CPU 的基本组成	199
3.6.5 Cache 的取算法	145	5.1.3 CPU 中的主要寄存器	200
3.6.6 Cache 的写策略	146	5.1.4 操作控制器和时序产生器	202
3.7 虚拟存储器	147	5.2 指令周期	203
3.7.1 虚拟存储器的基本概念	147	5.2.1 指令周期的基本概念	203
3.7.2 页式虚拟存储器	148	5.2.2 MOV 指令的指令周期	206
3.7.3 段式虚拟存储器	149	5.2.3 LAD 指令的指令周期	207
3.7.4 段页式虚拟存储器	150	5.2.4 ADD 指令的指令周期	209
3.7.5 虚拟存储器的替换算法	151	5.2.5 INC 指令的指令周期	210
本章小结	152	5.2.6 DEC 指令的指令周期	211
习题 3	153	5.2.7 JNZ 指令的指令周期	212
		5.2.8 STO 指令的指令周期	213
		5.2.9 JMP 指令的指令周期	214
		5.2.10 用方框图语言表示指令周期	214
第 4 章 指令系统	156	5.3 时序产生器和控制方式	218
4.1 指令系统的发展与性能要求	156	5.3.1 时序信号的作用和体制	218
4.1.1 指令系统的发展	156	5.3.2 多级时序系统	219
4.1.2 对指令系统性能的要求	157	5.3.3 时序信号产生器	220
4.1.3 计算机语言	158	5.3.4 控制方式	222
4.2 指令格式	158	5.4 微程序控制器	223
4.2.1 地址码	159		

5.4.1 微指令和微程序	223	6.2 总线仲裁和总线通信	281
5.4.2 微程序控制器的 组成和工作原理	227	6.2.1 总线仲裁	281
5.4.3 微程序设计举例	229	6.2.2 总线通信	285
5.5 微程序设计技术	232	6.3 总线举例	290
5.5.1 微命令的编码方法	232	6.3.1 ISA 总线	290
5.5.2 微地址的形成方法	235	6.3.2 PCI 总线	293
5.5.3 微指令格式	236	6.3.3 PCI Express 总线	302
5.5.4 微程序控制器的设计方法	239	6.3.4 通用串行总线 USB	308
5.6 硬连线控制器	240	本章小结	311
5.6.1 硬连线控制器的 组成和工作原理	240	习题 6	312
5.6.2 典型指令的指令周期流程图	241	第 7 章 输入/输出设备	313
5.6.3 硬连线控制器的设计方法	243	7.1 输入设备	313
5.6.4 硬连线控制与微程序控制的比较	243	7.1.1 键盘	313
5.7 流水线技术	244	7.1.2 鼠标	314
5.7.1 并行性的基本概念	244	7.2 输出设备	315
5.7.2 并行处理技术	245	7.2.1 显示器	315
5.7.3 流水线的工作原理、 特点及分类	246	7.2.2 打印机	317
5.7.4 相关问题及解决方法	248	7.3 辅助存储器	320
5.7.5 流水线的性能分析	252	7.3.1 辅助存储器的种类与技术指标	321
5.8 提高单机系统指令级 并行性(ILP)的措施	255	7.3.2 磁盘	322
5.8.1 超标量处理机和 VLIW 体系结构	255	7.3.3 Flash 存储器	326
5.8.2 超流水处理机	257	7.3.4 RAID 盘	327
5.8.3 超标量超流水处理机	258	7.3.5 光盘存储器	328
5.8.4 EPIC 技术	259	本章小结	330
5.9 现代微处理器举例	260	习题 7	331
5.9.1 Pentium 4 处理器	260	第 8 章 输入/输出系统	332
5.9.2 UltraSPARC III Cu 处理器	266	8.1 输入/输出系统概述	332
本章小结	271	8.1.1 I/O 接口的概念及功能	332
习题 5	272	8.1.2 输入/输出设备的编址	333
第 6 章 总线结构	276	8.1.3 I/O 设备的数据传送控制方式	334
6.1 总线的基本概念	276	8.2 程序中断方式	337
6.1.1 总线的特性	276	8.2.1 中断的基本概念	337
6.1.2 总线的标准化	277	8.2.2 中断处理	339
6.1.3 总线的分类	277	8.2.3 多重中断	341
6.1.4 总线的性能	278	8.3 DMA 方式	344
6.1.5 单机系统的总线结构	279	8.3.1 DMA 的基本概念	344
		8.3.2 DMA 的三种工作方式	344
		8.3.3 DMA 控制器的 组成和工作原理	346
		8.4 通道方式	348
		8.4.1 通道的基本概念	348

8.4.2 通道的种类	350	习题 6 参考答案	366
本章小结	351	习题 7 参考答案	367
习题 8	352	习题 8 参考答案	367
附录 A 各章部分习题参考答案	353	附录 B 研究生入学考试“计算机组成	
习题 1 参考答案	353	原理”课程全国统考大纲	369
习题 2 参考答案	353	附录 C 国内外常用二进制逻辑元件	
习题 3 参考答案	358	图形符号对照表	372
习题 4 参考答案	360	参考文献	373
习题 5 参考答案	362		

第1章 计算机系统概论

计算机系统是一个由硬件和软件组成的复杂的自动化设备,计算机系统哪些功能由硬件来实现,哪些功能由软件来实现,是计算机系统结构研究的范畴。计算机组成研究的内容是在计算机系统结构确定的情况下,如何进行逻辑设计。本章首先介绍计算机发展历程,然后介绍计算机系统层次结构、计算机系统的组成、计算机的工作过程和计算机性能,最后介绍计算机的分类和应用。

1.1 计算机发展历程

电子数字计算机是一种能够自动、高速、精确地进行信息处理的现代化电子设备。其基本特点是运算速度快、记忆能力强、有逻辑判断能力。电子数字计算机最初只是作为一种计算工具,现已应用于人类生产和生活的各个方面。

1.1.1 冯·诺依曼型计算机的特点和功能

1943年开始研制的电子数字积分器和计算机(Electronic Numerical Integrator And Computer, ENIAC)是美国第一台由程序控制的电子数字计算机,由美国宾夕法尼亚大学莫尔(Moore)学院的莫克利(J. W. Mauchly)和埃克特(J. P. Eckert)共同负责研制。当时正值第二次世界大战,美国的军队非常迫切地需要对他们设计的新型火炮的弹道进行计算,当得知电子计算机可以将弹道表的计算时间从几天缩短到几分钟时,美国陆军部决定资助 ENIAC 计划。事实上,ENIAC 的确可以把计算一个弹道表的时间从 20 小时缩短为 30 秒钟。但不幸的是,直到战争结束,这台机器都未能建成。直到 1945 年年底,ENIAC 计算机才研制完成,并于 1946 年 2 月正式交付使用,它被公认为世界上第一台全电子通用数字计算机。

ENIAC 计算机共使用了 18 000 多个电子管,1500 个继电器,重达 30 吨,占地 170 m²,每秒可进行 5000 次加法运算,有一个存储容量为 1000 比特(可存储大约 20 个字长为 10 位的十进制数)的存储器。但 ENIAC 计算机还不是存储程序的计算机,也就是说,程序并不是存放在存储器中,而是通过人工设置开关和插拔电线以改变接线的方法来编排程序。ENIAC 计算机还没有采用二进制的计算方式,而是采用十进制的计算方式,它通过采用 10 条信号线来表示 0~9 之间的一个数据。

1950 年第一台存储程序计算机 EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer)诞生,它由美籍匈牙利数学家冯·诺依曼(Von Neumann)与莫尔(Moore)小组合作研制。EDVAC 计算机采用了二进制的数表示方法,并设置了能对二进制数进行运

算的算术逻辑运算单元(ALU)。该计算机采用存储程序工作方式,程序存储在主存储器中,可以随时修改。

冯·诺依曼在他发表的《关于电子计算装置逻辑结构初探》报告中提出了存储程序的思想。该思想可以概括如下:计算机要自动完成解题任务,必须将事先设计好的、用以描述计算机解题过程的程序如同数据一样采用二进制形式存储在机器中,计算机在工作时自动高速地从机器中逐条取出指令加以执行。

以存储程序原理为基础的各类计算机,统称为冯·诺依曼计算机。早期经典的冯·诺依曼计算机具有如下基本特点:

- (1) 计算机由运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备五大部件组成。
- (2) 采用存储程序的方式,程序和数据存放在同一存储器中,并且没有对两者加以区分,指令和数据一样可以送到运算器进行运算,即由指令组成的程序是可以修改的。
- (3) 指令和数据均以二进制编码表示,采用二进制运算。
- (4) 指令由操作码和地址码组成,操作码用来表示操作的类型,地址码用来表示操作数和操作结果的地址。操作数类型由操作码决定,操作数本身不能判定其数据类型。
- (5) 指令在存储器中按其执行顺序存放,由指令计数器(又称程序计数器)指明要执行的指令所在的存储单元的地址。一般情况下,每执行完一条指令,指令计数器顺序递增。指令的执行顺序可按运算结果或外界条件而改变,但是解题的步骤仍然是顺序的。
- (6) 机器以运算器为中心,输入/输出设备与存储器之间的数据传送都通过运算器。

经典的冯·诺依曼计算机是以运算器为中心的,如图 1.1 所示。其中,输入设备、输出设备与存储器之间的数据传送都需通过运算器。

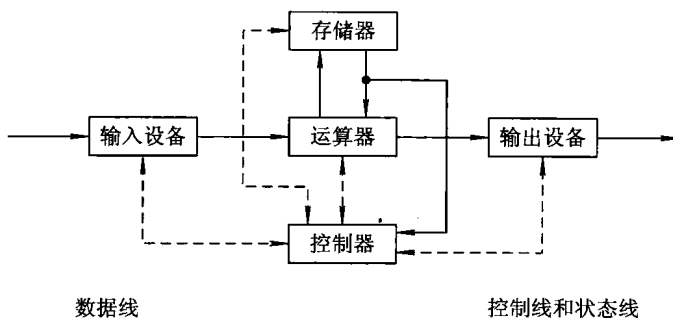


图 1.1 冯·诺依曼型计算机硬件组成图

按照存储程序原理,冯·诺依曼型计算机必须具备五大功能:

- (1) 输入/输出功能。计算机必须有能力把原始数据和解题步骤输入到机器中,同时也可以把计算结果和计算过程中的情况输出给使用者。
- (2) 记忆功能。计算机能够存储(记忆)原始数据和解题步骤,以及解题过程中产生的一些中间结果。
- (3) 计算功能。计算机应能进行一些基本的计算,并能利用这些基本计算组合成使用者所需的一切计算。
- (4) 判断功能。计算机在完成一步操作后,应具备从预先无法确定的几种方案中选择一种操作方案的能力,以保证解题过程的正确性。

(5) 自我控制功能。计算机应能保证程序执行的正确性和各部件之间的协调性。

虽然计算机种类繁多,运算处理能力有强有弱,但作为计算机,它们的基本功能却是相同的。即冯·诺依曼型计算机都应当具有输入/输出、记忆、计算、判断和自我控制这五大功能。

60多年来,随着计算机技术的发展和 new 应用领域的开拓,通用计算机在设计时对冯·诺依曼结构作了很多改进,使计算机系统结构有了很大的发展,例如机器程序与数据分开存放在不同的存储器区域中,程序不允许修改,计算机不再以运算器为中心,而是以存储器为中心等。虽然有以上这些突破,但其本质变化不大,习惯上仍称之为冯·诺依曼型计算机。

冯·诺依曼型计算机的局限性在于它的并行性有限,使工程设计人员一直未能找到构建廉价且与大部分商用软件兼容的快速系统的途径。显然,未受到要与冯·诺依曼体系结构保持兼容性要求约束的工程师们,就可以自由地选择使用许多不同的计算模式。许多不同的研究领域都属于非冯·诺依曼模型的范畴,包括神经网络(利用人脑模型的思想作为计算范式)、基因算法(利用生物学和 DNA 演化的思想开发的算法)、量子计算机(在量子效应和量子力学基础上开发的进行高速数学和逻辑运算、存储及处理量子信息的计算机)、光子计算机(利用光子取代电子进行数据运算、传输和存储的计算机)、纳米计算机(采用纳米技术研发的新型高性能计算机)和大规模并行处理机等。在这些新的体系结构中,并行计算的概念是目前最流行的。

1.1.2 计算机的发展历史

自从电子计算机问世 60 多年来,从使用器件的角度来说,计算机的发展经历了五个阶段,习惯上称为五代。

第一代电子管计算机时代(1946 年~1957 年)。其主要特点是采用电子管作为基本器件,计算机的运算速度为每秒几千次至几万次,其体积庞大,成本很高,可靠性较低。在此期间,计算机主要用于军事和国防尖端技术方面的计算与研究,但它为计算机技术的发展奠定了基础,其研究成果后来扩展到民用,又转为工业产品,形成了计算机工业。

20 世纪 50 年代中期,美国 IBM 公司在计算机行业中崛起,1954 年 12 月推出的 IBM650 小型机是第一代计算机中销售最广的机器,销售量超过了 1000 台。

第二代晶体管计算机时代(1958 年~1964 年)。在这个时期,计算机的主要器件逐步由电子管改为晶体管,运算速度提高到每秒几万次至几十万次。与电子管计算机相比,晶体管计算机缩小了体积,降低了功耗,提高了速度和可靠性。尽管使用了晶体管,这一代的计算机系统的体积还是过于庞大且价格也相当昂贵,通常只有一些大学、政府机关和大型商业机构才买得起。

在这一时期,涌现了大量的计算机制造商。其中,IBM 公司、数字仪器公司(DEC)和 Univac 公司(现在称做 Unisys 公司)等主导了当时的计算机产业。据统计,IBM 公司在这期间成功销售了 7094 台作为科学应用和 1401 台作为商业应用的晶体管计算机。DEC 公司在当时则忙于建造 PDP-1 型的计算机系统。Univac 公司推出了它的 Unisys 1100 系列产品,出现了系列化思想的萌芽。控制数据公司(CDC)在这个时期建造了世界上第一台超级计算机 CDC6600,这台价格为 1000 万美元的超级计算机每秒可以执行 1000 万条指令,采

用 60 位字长，并且拥有在当时令人吃惊的 128 KB 的主存储器。

第三代为集成电路计算机时代(1965 年~1971 年)。在这个时期，计算机采用集成电路作为基本器件，在每个集成电路芯片上可集成几十个至几千个元件，计算机的运算速度提高到每秒几十万次至几百万次。由于采用了集成电路，计算机的体积、功耗和成本等进一步下降，而速度和可靠性则相应提高，这就促成了计算机应用范围的进一步扩大，占领了诸如科学计算、数据处理、实时控制等多个应用领域。

IBM360 系列计算机是第一批采用集成电路制造的商用计算机，也是影响最大的第三代计算机。IBM360 系列机是 IBM 公司提供的第一代可以相互兼容的系列机产品，也就是说这个系列的计算机都使用相同的汇编语言。这样，一些小型机用户可以很方便地升级到较大型的机器，而无需重新编写原来所有的应用软件。除系列化之外，IBM360 还具有通用化和标准化的特点，这在当时来说是一种具有革命性的新思想。

第四代为大规模和超大规模集成电路计算机时代(1972 年~1990 年)。在这个时期，计算机采用大规模和超大规模集成电路(Very Large Scale Integration, VLSI)作为基本器件，在每个集成电路芯片上可集成多达几千个至几十万个元件。由于采用了大规模和超大规模集成电路，计算机的体积进一步缩小，成本进一步降低，可靠性进一步提高，运算速度可达每秒一千万次至几亿次。

在这个时期，还引入了分时共享和多道程序处理的概念，即具有允许多个人同时使用一台计算机的能力。具有分时共享能力的小型计算机系统的出现，例如 PDP-8、PDP-11 的出现，使得计算机逐步进入到一些小型公司和许多大学，应用领域进一步扩大。在这个时期，由大规模集成电路组成的微型计算机和单片机开始出现。集成电路技术的发展同样也促进了功能更加强大的超级计算机的开发，如 Cray Research Corporation 公司于 1976 年推出了价格为 880 万美元、用于向量处理的 Cray-1 超级计算机。Cray-1 在性能上已经远远超过了 CDC6600，它可以在一秒钟内执行超过 1.6 亿条指令，并支持 8 MB 的存储器。

第五代为巨大规模集成电路计算机时代(1991 年至今)。这一代计算机采用巨大规模集成电路(Ultra Large Scale Integration, ULSI)作为基本器件，在每个集成电路芯片上集成的元件超过一百万个，有的甚至达一千万个以上。由于采用了巨大规模集成电路，计算机的体积进一步缩小，成本进一步降低，运算速度可达每秒十亿次至千万亿次。

在这个时期，微型计算机和嵌入式计算机得到了进一步的发展，同时还出现了单芯片多核处理器、可重构单芯片多核处理器等高性能处理器，以及采用这些高性能处理器构成的超级计算机。单个处理器的运算速度已达到每秒几亿次至几百亿次，由高性能微处理器构建的超级计算机的速度可达到每秒一千万亿次浮点运算(1PFLOPS)。例如，2008 年 6 月 18 日，《全球超级计算机 TOP500 强名单》发布，IBM 的走鹃(Roadrunner)超级计算机大幅超越了蓝色基因/L(BlueGene/L)，成为目前世界上运行速度最快的超级计算机，它是全球第一台混合式超级计算机，采用了 Cell 处理器和 x86 架构的 AMD 皓龙处理器，最高性能达 1.026 PFLOPS，正式宣告超级计算机的运算能力进入千万亿次级。由 IBM 和美国能源部(DOE)下属的国家核安全局(NNSA)联合开发的蓝色基因/L 超级计算机的 Linpack 性能(Linpack 为一基准测试程序)达 478.2 TFLOPS。2008 年 6 月 25 日，包含了近 7000 颗低功耗 AMD 四核皓龙处理器的国产曙光 5000A 超级计算机在上海推出，最高性能达

230 TFLOPS, Linpack 性能高达 160 TFLOPS。这个速度将有望让中国高性能计算机再次跻身世界前十。这台超百万亿次的计算机是目前中国运算能力最强的超级计算机,它不仅向世界再次展示了中国在高性能计算领域的强大实力,也为中国众多重大科研项目铺平了道路,为中国信息产业的长远发展打下了坚实的基础。曙光公司将与龙芯公司合作,计划于 2010 年推出我国第六代千万亿次超级计算机。

总之,从 1946 年计算机诞生以来,在保持芯片价格不变的前提下,微处理器芯片上的晶体管数每隔 18~24 个月便翻一番。在保持微处理器速度不变的前提下,微处理器芯片价格每 18~24 个月将降低约 48%,这就是著名的摩尔定律(Moore's Law)。在 1965 年,当时为 Intel 公司奠基人的摩尔曾预测他的这个假定能够维持 10 年左右的时间。然而,芯片制造技术的进步已经让摩尔定律维持了超过 40 年。因为迹线和器件的尺寸取决于蚀刻光束的波长,而我们生成和聚焦短波长激光和 X 射线的能力有限。此外,芯片迹线的宽度将很快接近构成迹线的材料的分子宽度,迹线不可能小于一个分子宽度。因此,当采用当前的微处理器设计和制造技术达到极限时,摩尔定律所预测的集成电路的这种发展趋势不可能再延续下去,除非计算机采用全新的技术,如光子技术、量子技术、纳米技术等。

1.1.3 计算机的发展趋势

未来的计算机将以巨大规模集成电路为基础,向巨型化、微型化、网络化、智能化和多媒体化的方向发展。

1. 巨型化

巨型化计算机是指具有高速度、大容量、高吞吐量的计算机。巨型机又称超级计算机,它采用并行处理技术来改进计算机结构,使计算机系统可同时执行多条指令或同时对多个数据进行处理,进一步提高计算机的运行速度。超级计算机通常由成百上千甚至更多的处理器(机)组成,能完成普通计算机或服务器不能计算的大型复杂任务。从超级计算机获得的数据分析和模拟结果,能推动各个领域尖端项目的研究与开发。目前,一般超级计算机的运算速度可达每秒百万亿次浮点运算。世界上最受欢迎的动画片、很多耗巨资拍摄的电影中使用的特技效果等都是在超级计算机上完成的。日本、美国和中国已成为世界上拥有每秒百万亿次浮点运算超级计算机的国家,这些国家和其他国家正在进一步研发更高速的超级计算机。超级计算机的研发涉及的内容很广,主要包括高速微处理器、高速互连网络、并行操作系统、并行编译、并行算法、并行编程等,超级计算机已在科技界内引起了开发与创新的狂潮。

由于硅芯片技术越来越接近其物理极限,因此超级计算机发展的另一个趋势是采用全新的元件和技术,使计算机的体系结构与技术都产生一次量与质的飞跃。新型的量子计算机、光子计算机、分子计算机和纳米计算机,将会在 21 世纪走进我们的生活,遍布各个领域。

2. 微型化

微型化计算机是指采用巨大规模集成电路组成的体积小、价格低、功能强的计算机。这种计算机主要包括嵌入式计算机和微型计算机。嵌入式计算机已进入仪器、仪表、家用电器等小型仪器设备中,同时也作为工业控制过程的“心脏”,使仪器设备实现“智能化”。随

着微电子技术的进一步发展,笔记本型、掌上型、嵌入式等计算机必将以更优的性能价格比受到人们的欢迎。

3. 网络化

计算机与互联网络组成高速信息通道,互联网络扩展了计算机的概念。全世界几乎所有的国家都直接或间接地与 Internet 相连,使之成为一个全球范围的计算机互联网络。人们已充分领略到网络的魅力,可以通过 Internet 与世界各地的其他用户自由地进行通信,可以共享计算机硬件资源、软件资源和信息资源。

目前,通信业界正在酝酿着空前的从互联网到光网络的革命。为了克服 Internet 本身的缺陷,满足商业用户对电子商务的需求,光速经济应运而生。该阶段的网络具备以下特性:达到 99.999% 的高可靠性,绝对的网络安全性,接近零的网络时延,无限的网络带宽和网络交换容量,普遍的、灵活的宽带接入。光网络是互联网络的高级阶段,是光电子技术发展的必然趋势,是电子商务的必要条件。光网络的出现将开拓全新的信息产业领域,使网络设施发生根本改变。由于计算机间的通信不受时间、空间和带宽的限制,网络的发展将从根本上改变人们的工作和生活方式。

4. 智能化

智能化是指计算机模拟人类的智能活动,诸如感知、判断、理解、学习、问题求解和图像识别等。智能化的发展将使各种知识库及人工智能技术得到进一步普及,人们将用自然语言和机器对话。计算机将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。

5. 多媒体化

多媒体化是指计算机具有全数字式、全动态、全屏幕的播放、编辑和创作多媒体信息的功能,具备控制和传输多媒体电子邮件、电视会议等多种功能。

1.2 计算机系统的层次结构及计算机组成

1.2.1 计算机系统的层次结构

现代计算机的解题过程通常是先由用户用高级语言编写程序(称做源程序),然后将它和数据一起送入计算机内,再由计算机将其翻译成机器能识别的机器语言程序(称做目标程序),机器自动运行该机器语言程序,并将结果输出。计算机的解题过程如图 1.2 所示。

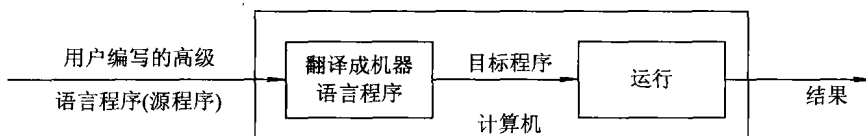


图 1.2 计算机的解题过程

机器语言程序由计算机能够直接识别和执行的机器指令组成。这些机器指令与机器硬件直接对应,并能被其直接识别和执行,然而使用机器语言编程既不方便,也无法适应解

题需要和计算机应用范围的扩大。于是在 20 世纪 50 年代出现了一个比机器指令更方便使用或编程的指令集合,由它构成新的语言,即汇编语言。汇编语言是一种符号语言,给程序员编程提供了方便。尽管汇编语言的每个语句基本上仍与机器指令对应,却并不能被机器直接识别和执行。用汇编语言开发的程序经过翻译,转换成机器能识别的机器语言后才能在实际机器上执行,这个翻译过程是由汇编程序来实现的。

汇编语言源程序可以在机器上运行并获得结果,是因为有汇编程序的支持。在汇编语言程序设计者看来,有了汇编程序的支持就好像有了一台用汇编语言作为机器语言的机器。这里的机器是指能存储和执行程序的算法和数据结构的集合体。我们把以软件为主实现的机器,称为虚拟机器,而把由硬件和固件实现的机器称为实际机器。固件是将程序固化在 ROM 中的一种部件,它是一种具有软件特性的硬件,既具有硬件的快速性,又具有软件的灵活性。显然,虚拟机器的实现是构筑在实际机器之上的。图 1.3 给出了虚拟机器与实际机器之间构成的一个简单的层次结构。

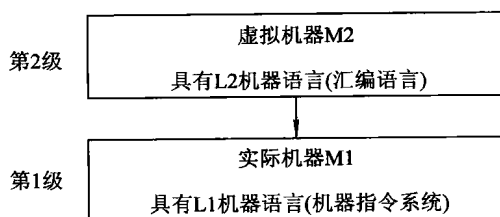


图 1.3 虚拟机器和实际机器层次结构举例

语言与虚拟机器之间存在着重要的对应关系,每种机器都有由它能执行的指令组成的机器语言。同时,语言也定义了机器,即机器要能执行这种语言所编写的程序。有 n 层不同的语言,就对应应有 n 层不同的虚拟机。图 1.4 给出了典型的现代计算机的多级层次结构。汇编语言(L3)是面向机器的一种符号语言,其语法、语义结构仍然和二进制机器语言基本相同,但与解题所需的差别较大,于是进一步出现了面向题目和过程的高级语言(L4)。随之研究出来的是这些语言的翻译程序。由高级语言编写的高级语言源程序,经过翻译转换成汇编语言程序或中间语言程序,然后再翻译成机器语言程序,再在实际机器上运行。

高级语言的翻译程序有编译程序和解释程序两种。编译程序是将编写的源程序中全部语句翻译成机器语言程序后,再执行机器语言程序。假如一个题目需要重复计算几遍,那么一旦翻译之后,只要源程序不变,就不需要再次进行翻译。但源程序若有任何修改,都要重新经过编译。解释程序则是在将源程序的一条语句翻译成机器语言以后立即执行它(而且不再保存刚执行完的机器语言程序),然后再翻译执行下一条语句。如此重复,直到程序结束。它的特点是翻译一次只能执行一次,当第二次重复执行该语句时,又要重新翻译,因而效率较低。ALGOL、FORTRAN、C 和 Pascal 等语言是用编译程序进行翻译的,而 BASIC 语言则有解释和编译两种。

随着计算机应用的发展,有大量数据需要存储、检索,于是数据库及管理系统应运而生。为了提高应用软件的开发效率,缩短软件开发周期,在 20 世纪 80 年代出现了面向应用的应用语言(L5)。到了 20 世纪 90 年代,大量基于数据库管理系统的应用语言商品化软件已在计算机应用领域中获得了广泛应用,它以数据库管理系统所提供的功能为核心,进一步构造了开发高层应用软件系统的开发环境,例如,菜单生成、报表生成和多窗口表格