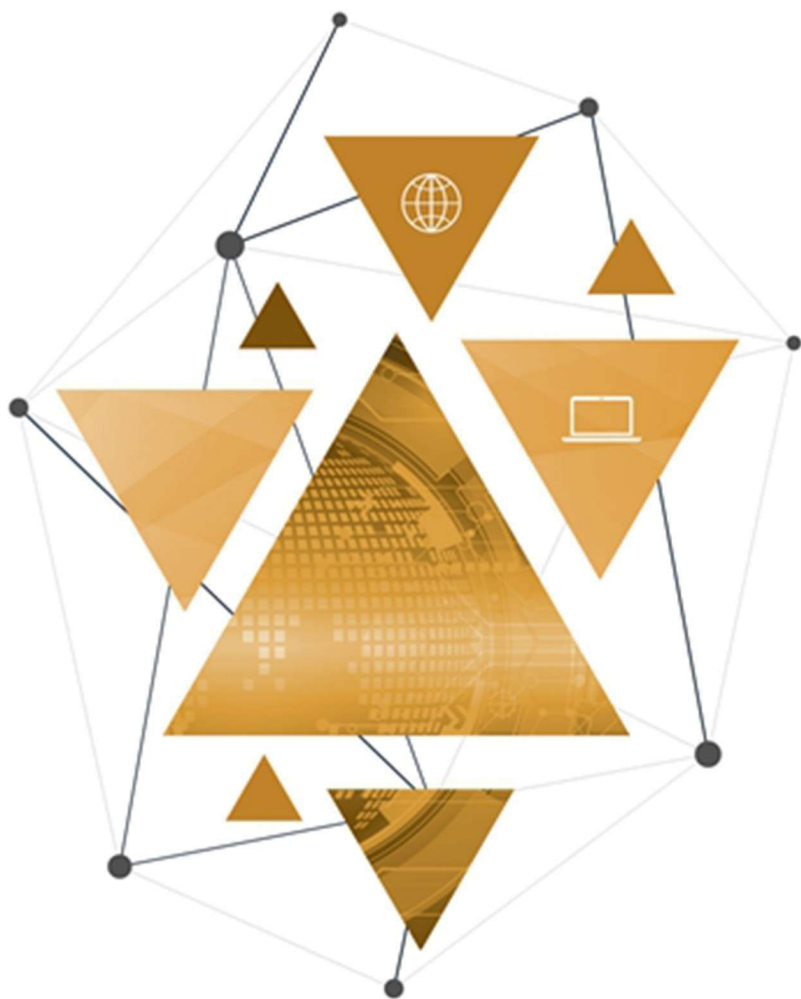


计算机 组成原理

主 编 陈 慧



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

计算机组成原理

主 编 陈 慧

副主编 龙 飞 段智云



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书系统地介绍了计算机的基本组成原理和内部工作机制。全书共分 10 章，主要内容分成两个部分：第 1、2 章介绍了计算机的基础知识；第 3~10 章介绍了计算机的各子系统（包括运算器、存储器、控制器、外部设备和输入/输出子系统等）的基本组成原理、设计方法、相互关系以及各子系统互相连接构成整机系统的技术。

本书可作为普通高等院校计算机科学与技术专业的大学生学习“计算机组成原理”课程的教科书，也可供从事计算机工作的工程技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

计算机组成原理 / 陈慧主编. —北京：北京理工大学出版社，2017.11

ISBN 978-7-5682-4937-9

I. ①计… II. ①陈… III. ①计算机组成原理—高等学校—教材 IV. ①TP301

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2017）第 263734 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775（总编室）

(010) 82562903（教材售后服务热线）

(010) 68948351（其他图书服务热线）

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 /

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 16

字 数 / 376 千字

版 次 / 2017 年 11 月第 1 版 2017 年 11 月第 1 次印刷

定 价 / 59.80 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 施胜娟

图书出现印装质量问题，请拨打售后服务热线，本社负责调换

前 言

本书是为高等院校计算机专业的学生以及从事计算机科学与技术工作的工程技术人员编写的，也适合于非计算机专业的学生使用。本书从基本原理讲起，力图贯彻少而精的原则。

本书的第 1、2 章是基础部分，着重阐述构成一台计算机的基本原理，力求与当前广泛使用的计算机技术相结合，概括了计算机的发展情况，介绍了计算机中各类信息的表示方法，通过记录表的形式引导学生发现其中的原理，比如在加减运算时，通过记录表反映出既可以将运算数看作无符号数，也可以看作有符号补码，引导学生发现加减运算电路的本质，启发学生运用课堂上学习的理论知识对现象和结果进行解释，理论和实践相结合，从而加深对计算机工作原理的理解；第 3、4 章是运算方法和运算器，讲解了运算器的组织方法，从物理上讲授计算机基本部件的构成和作用；第 5 章讨论存储系统，讲解了存储器件的工作原理和扩充方法，主要介绍计算机硬件连接形式和内部处理方式；第 6 章讲解指令系统与寻址方式，特别介绍了指令格式和寻址方式如何在汇编程序中应用；第 7、8 章着重讨论了控制系统与中央处理器的设计原理和计算机各部分内部工作过程，控制器是计算机的调度中心，它将计算机中各个部件联系在一起组合成一个整体，根据控制指令的要求指挥协调其余计算机组成部分工作；第 9 章主要讨论了总线系统的结构，总线是一种内部结构，是 CPU、存储器、输入/输出设备传递信息的公用通道，主机的各个部件通过计算机总线连接，从而形成了计算机硬件系统；第 10 章介绍了输入/输出设备的工作原理以及外设与主机间的互联问题，介绍目前常用的外围设备并简要叙述工作原理。考虑到课程性质和教学要求，在硬件设计上并不要求训练学生达到熟练的设计水平，而是通过示范和有限的设计引导学生深入理解硬件结构。本书强调了计算机的基本原理、基本知识和基本技能的训练，通过控制器原理的学习和模型机的例子，可以使读者建立起计算机整机工作的概念，为从事计算机系统的分析、设计、开发与维护等工作打好基础。

综上所述，本书的重点是计算机的基本组成原理及有关的硬件结构，并对计算机的发展与实现提供了必要的也是最基本的知识。本书的第 1、6、10 章由陈慧编写；第 3、4、5、9 章由龙飞编写；第 2、7、8 章由段智云编写。邓世昆教授对全书进行了统稿与审查，对本书的图稿进行了校对。

北京理工大学出版社的编辑们为本书的出版做了大量的工作，在此对他们辛勤的工作和热情的支持表示诚挚的感谢！由于时间仓促及水平有限，书中难免有错误和不妥的地方，恳切欢迎广大同行和读者批评指正。

编 者

第 1 章 计算机系统概论	(1)
1.1 计算机的语言	(1)
1.2 计算机的硬件	(2)
1.3 计算机系统的层次结构	(3)
1.4 计算机的发展简史及应用	(4)
1.4.1 计算机发展简史	(4)
1.4.2 计算机应用	(9)
第 2 章 计算机中的信息表示	(11)
2.1 数制	(11)
2.1.1 概念	(11)
2.1.2 常用数制	(12)
2.1.3 进位制之间的相互转换	(15)
2.2 无符号数和有符号数	(19)
2.2.1 无符号数	(19)
2.2.2 有符号数	(19)
2.2.3 补码的性质	(23)
2.2.4 补码与原码的表示范围	(24)
2.2.5 反码表示法	(25)
2.3 数的定点表示和浮点表示	(25)
2.3.1 定点表示	(25)
2.3.2 浮点表示	(27)
2.4 字符数据表示	(31)
2.4.1 ASCII 码	(31)
2.4.2 汉字编码	(33)
第 3 章 运算方法	(34)
3.1 定点运算	(34)
3.1.1 定点数的移位运算	(34)
3.1.2 定点数的加、减运算	(37)
3.1.3 定点数的乘法运算	(41)



3.1.4 定点数的除法运算	(54)
3.2 浮点运算	(63)
3.2.1 浮点数加减运算	(63)
3.2.2 浮点数乘除运算	(66)
第4章 运算器	(68)
4.1 算术逻辑单元 ALU	(68)
4.2 全加器	(68)
4.2.1 串行加法器和并行加法器	(69)
4.2.2 实例: SN74181 和 SN74182 芯片	(73)
第5章 存储器	(78)
5.1 存储器概述	(78)
5.1.1 存储器特性	(78)
5.1.2 存储层次	(81)
5.2 主存储器	(82)
5.2.1 半导体存储器	(82)
5.2.2 随机访问存储器的存储位	(83)
5.2.3 存储器芯片的内部组成	(85)
5.2.4 存储器芯片的组合	(87)
5.2.5 多字节数据的存储	(89)
5.2.6 纠错	(90)
5.2.7 高级 DRAM 组织	(93)
5.3 高速缓冲存储器	(94)
5.3.1 高速缓冲存储器原理	(94)
5.3.2 Cache 行的映射	(96)
5.3.3 替换策略	(98)
5.3.4 写策略	(99)
5.4 外部存储器	(99)
5.4.1 磁盘	(99)
5.4.2 光盘	(103)
5.4.3 虚拟存储器	(105)
第6章 指令系统	(108)
6.1 机器指令	(108)
6.1.1 机器指令的发展	(108)
6.1.2 指令格式	(109)
6.1.3 指令操作码	(112)
6.1.4 指令字的长度	(114)
6.2 寻址方式	(114)
6.2.1 指令的寻址方式	(115)
6.2.2 操作数的寻址方式	(115)



6.3 指令类型与功能	(124)
6.3.1 数据传送指令	(125)
6.3.2 算术逻辑运算指令	(125)
6.3.3 移位操作指令	(126)
6.3.4 堆栈操作指令	(126)
6.3.5 字符串处理指令	(127)
6.3.6 程序控制指令	(127)
6.3.7 输入/输出指令	(130)
6.3.8 其他指令	(130)
6.4 RISC 机和 CISC 机指令	(130)
6.4.1 复杂指令系统计算机 CISC	(131)
6.4.2 精简指令系统计算机 RISC	(131)
6.5 指令系统举例	(133)
6.5.1 IBM 大型机指令系统	(133)
6.5.2 Pentium II 的指令系统	(134)
6.6 机器语言、汇编语言和高级语言	(136)
第 7 章 控制器组成原理	(139)
7.1 微操作分析	(139)
7.1.1 取指周期	(139)
7.1.2 间址周期	(141)
7.1.3 中断周期	(141)
7.1.4 执行周期	(142)
7.2 控制器的功能	(144)
7.2.1 控制器的功能需求	(144)
7.2.2 控制器控制信号	(145)
7.2.3 控制信号举例	(146)
7.2.4 多级时序系统	(147)
7.2.5 控制方式	(148)
7.3 控制器的设计	(150)
7.3.1 组合逻辑控制器	(150)
7.3.2 微程序控制器	(155)
第 8 章 中央处理器	(162)
8.1 中央处理器的结构	(162)
8.1.1 中央处理器的功能	(162)
8.1.2 中央处理器结构框图	(163)
8.1.3 中央处理器寄存器	(164)
8.2 指令周期	(165)
8.2.1 间接周期	(165)
8.2.2 数据流	(166)



8.3	指令流水	(167)
8.3.1	指令流水	(168)
8.3.2	流水线性能的影响因素	(170)
8.3.3	流水线的性能	(174)
8.3.4	流水线中的多发技术	(175)
8.3.5	流水线的结构	(178)
8.4	中断处理	(178)
8.4.1	中断和意外	(179)
8.4.2	中断向量表	(179)
8.4.3	中断管理	(180)
第9章	总线	(181)
9.1	总线的概念和作用	(181)
9.1.1	总线的概念	(181)
9.1.2	总线的作用	(182)
9.1.3	总线的分类	(182)
9.1.4	总线的组成及性能指标	(184)
9.2	总线仲裁	(186)
9.2.1	集中仲裁方式	(187)
9.2.2	分布仲裁方式	(190)
9.3	总线操作和定时	(192)
9.3.1	时钟同步定时方式	(192)
9.3.2	异步定时方式	(193)
9.3.3	半同步定时方式	(195)
9.4	总线标准	(196)
第10章	输入/输出系统	(198)
10.1	输入/输出设备概述	(198)
10.2	键盘	(199)
10.2.1	硬件扫描键盘	(200)
10.2.2	软件扫描键盘	(201)
10.3	显示设备	(202)
10.3.1	常见显卡标准	(202)
10.3.2	CRT 显示器	(203)
10.3.3	液晶显示器	(210)
10.4	打印设备	(213)
10.4.1	概述	(213)
10.4.2	点阵打印机	(214)
10.4.3	喷墨打印机	(216)
10.4.4	激光打印机	(217)
10.5	I/O 系统组织	(221)



10.5.1 系统需要解决的主要问题·····	(221)
10.5.2 I/O 系统的组成·····	(222)
10.5.3 主机与外围设备间的连接方式与组织管理·····	(223)
10.5.4 I/O 信息传送的控制方式·····	(224)
10.6 I/O 接口·····	(225)
10.6.1 I/O 接口的基本功能·····	(225)
10.6.2 I/O 接口的分类·····	(228)
10.7 程序控制方式·····	(229)
10.7.1 直接程序控制方式·····	(229)
10.7.2 程序中断传送方式·····	(230)
10.8 直接存储器访问方式·····	(239)
10.8.1 DMA 方式的特点与应用场合·····	(240)
10.8.2 DMA 传送方式·····	(241)
10.8.3 DMA 的硬件组织·····	(242)
10.8.4 DMA 控制器的组成·····	(243)
10.8.5 DMA 控制下的数据传送过程·····	(244)
参考文献·····	(246)

第1章

计算机系统概论

1.1 计算机的语言

科学技术的高度发展，导致计算机的诞生。在现代化社会中，计算机已经深入到人类工作与生活的各个方面。电子计算机按照信息表示形式和处理方式不同，可分为电子模拟计算机和电子数字计算机两大类。计算机语言（Computer Language）指用于人与计算机之间通信的语言。计算机语言是人与计算机之间传递信息的介质。计算机系统的最大特征是将指令通过一种语言传达给机器。为了使电子计算机能进行各种工作，就需要有一套用以编写计算机程序的数字、字符和语法规则，由这些字符和语法规则组成计算机各种指令或各种语句，这些就是计算机能接受的语言。

人类经常用语言来表达思想、交流经验、互通信息。其中汉语、英语、法语等是使用人数最多的语种。人类互相交流信息所用的语言称为自然语言，但是当前的计算机智能化程度不够，还不具备理解自然语言的能力，于是希望找到一种和自然语言接近，并能为计算机接受的语言，这种语言称为计算机的高级语言。从计算机的发展历史来看，最初在计算机中使用的不是高级语言，由于它难学、语法晦涩难以理解且使用困难，因而需要改进，这样才导致了高级语言的诞生。

常用于数据处理和面向对象的高级语言有 Visual Basic、Visual C++、Java、Delphi、FORTRAN、ALGOL 等。高级语言主要是相对于低级语言而言的，它并不特指某一种具体的语言，而是包括了很多编程语言，这些语言的语法、命令格式都各不相同。高级语言所编制的程序不能直接被计算机识别，必须经过转换才能被执行。高级语言的发展也经历了从早期语言到结构化程序设计语言，从面向过程到非过程化程序语言的过程。

如今通用的编程语言有两种形式，即汇编语言和高级语言，如图 1-1 所示。汇编语言和机器语言的实质是相同的，都是直接对硬件操作，只不过指令采用了英文缩写的标识符，容易识别和记忆。源程序经汇编生成的可执行文件不仅比较小而且执行效率高。高级语言是绝大多数编程者的选择。和汇编语言相比，它不但将许多相关的机器指令合成为单条指令，并

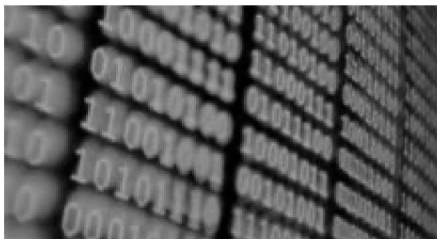


图 1-1 计算机语言

且去掉了与具体操作有关但与完成工作无关的细节,如使用堆栈、寄存器等,这样就大大简化了程序中的指令。同时,由于省略了很多细节,编程者也就不需要具备太多的专业知识。

未来面向对象程序设计以及数据抽象在现代程序设计思想中占有很重要的地位,未来语言的发展将不再是一种单纯的语言标准,将会是一种完全面向对象、更易表达现实世界、更易为人编写的形式,其使用计算机

语言将不再只是专业的编程人员,普通人完全可以用订制真实生活中一项工作流程的简单方式来完成编程。

简单性:提供最基本的方法来完成指定的任务,只需理解一些基本的概念,就可以用它编写出适合于各种情况的应用程序。

面向对象:提供简单的类机制以及动态的接口模型。对象中封装状态变量以及相应的方法,实现了模块化和信息隐藏;提供了一类对象的原型,并且通过继承机制,子类可以使用父类所提供的方法,实现了代码的复用。

安全性:用于网络、分布环境下时有安全机制保证。

平台无关性:与平台无关的特性使程序可以方便地被移植到网络上的不同机器、不同平台。

1.2 计算机的硬件

计算机硬件是指计算机系统中由电子、机械和光电元件等组成的各种物理装置的总称。这些物理装置按系统结构的要求构成一个有机整体,为计算机软件运行提供物质基础。简而言之,计算机硬件的功能是输入并存储程序和数据以及执行程序把数据加工成可以利用的形式。组成计算机的基本部件有中央处理器、存储器和输入/输出设备。

中央处理器又叫 CPU (Central Processing Unit),在早期的计算机中分成运算器和控制器两部分,由于电路集成度的提高,现在已经把它们集成在一块芯片中。

运算器是对信息或数据进行处理和运算的部件,经常进行的是算术运算和逻辑运算,所以在其内部有一个算术及逻辑运算部件 (Arithmetic Logic Unit, ALU)。算术运算是按照算术规则进行的运算,如加、减、乘、除、求负值等。逻辑运算一般是非算术性质的运算,如比较大小、移位、逻辑乘、逻辑加等。在计算机中,一些复杂的运算往往被分解成一系列算术运算和逻辑运算。当 CPU 处理的数据局限于整数时,这个 CPU 有时被称为整数运算部件 IU。为了快速而有效地对实数进行处理,在某些计算机中专门设置了浮点运算部件。

控制器主要用来实现计算机本身运行过程的自动化,即实现程序的自动执行。

存储器用来存放程序和数据,是计算机各种信息的存储和交流中心。计算机中全部信息,包括输入的原始数据、计算机程序、中间运行结果和最终运行结果都保存在存储器中。它根据控制器指定的位置存入和取出信息。有了存储器,计算机才有记忆功能,才能保证正常工作。注意要把存储单元的地址和存储单元里存放的内容(数据或指令)区分开。存储器又有主存储器和辅助存储器之分。当前在计算机上运行的程序和数据是存放在主存储器中的。

输入设备用来输入原始数据和处理这些数据的程序。输入的信息有数字、字母和控制符等，经常用 8 位二进制码来表示一个数字（0~9）、一个字母（A、B、C、…、X、Y、Z）或其他符号，当前通用的是 ASCII 码，它用 7 位二进制码来表示一个字符，最高的一位可用于奇偶校验或作其他用处。一般把 8 位二进制码称为一个字节。

输出设备用来输出计算机的处理结果，可以是数字、字母、表格、图形等。最常用的输入/输出设备是显示终端和打印机，终端设备采用键盘作为输入工具，处理结果显示在屏幕上，而打印机则将结果打印在纸上。此外，为了监视人工输入信息的正确性，在用键盘输入信息时，将刚输入的信息显示在屏幕上，如有错误，可及时纠正。

在计算机中，各部件间来往的信号可分为 3 种类型，即地址信号、数据信号和控制信号。通常这些信号是通过总线传送的，如图 1-2 所示。CPU 发出的控制信号，经控制总线送到存储器和输入/输出设备，控制这些部件完成指定的操作。与此同时，CPU（或其他设备）经地址总线向存储器或输入/输出设备发送地址，使得计算机各个部件中的数据能够根据需要相互传送。输入/输出设备和存储器有时也向 CPU 送回一些信号，CPU 可根据这些信号来调节本身发出的控制信号。计算机还允许输入/输出设备直接向存储器提出读写要求，控制数据传送。

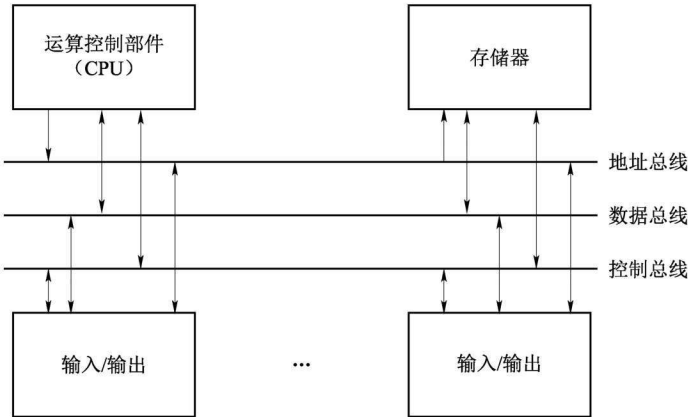


图 1-2 计算机的总线连接框图

1.3 计算机系统的层次结构

计算机解题的一般过程：用户用高级语言编写程序，连同数据一起送入计算机（用户程序一般称为源程序），然后计算机将其翻译成机器语言程序（称为目标程序），在计算机上运行后输出结果，其过程如图 1-3 所示。

早期的计算机只有机器语言，用户必须用二进制码表示的机器语言编写程序，因此工作量大、容易出错，而且对用户的要求较高，要求他们对计算机的硬件和指令系统有正确和深入的理解，并且编程熟练。在 20 世纪 50 年代，出现了符号式的程序设计语言，称为汇编语言。程序员可以用 ADD、SUB、MUL、DIV 符号表示加、减、乘、除的操作码，并用符号来表示指令和数据的地址。汇编语言大部分语句是和机器指令一一对应的。用户用汇编语言编写程序后，依靠计算机将它翻译成机器语言，即二进制码，然后再在计算机上运行。这个翻译过程是由汇编程序实现的。



由于汇编语言与人的传统解题方法相差甚远，因此经过人们的努力又出现了面对题目的高级语言，随同研制出这些语言的翻译程序，因此可以设想在汇编语言级之上又出现了高级语言级，它的实现是先把高级语言程序翻译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，其层次结构如图 1-4 所示。

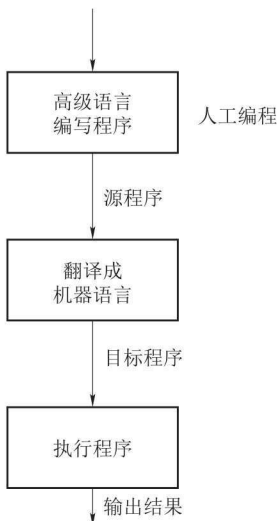


图 1-3 计算机的运行过程

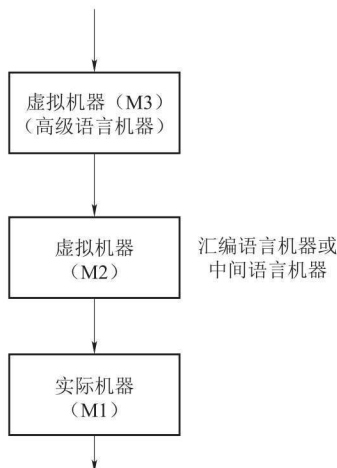


图 1-4 高级语言虚拟机的层次结构

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，那么一旦翻译以后，只要源程序不变，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。如此反复，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。

随着计算机应用的发展，有大量数据需要存储、检索，于是数据库及其管理系统应运而生。

1.4 计算机的发展简史及应用

1.4.1 计算机发展简史

1946 年 2 月 14 日，在美国宾夕法尼亚大学诞生了世界上第一台电子数字计算机——ENIAC。ENIAC 计算机共有 18 000 多个电子管、1 500 个继电器，重达 30 t，占地 170 m²，耗电 140 kW，每秒钟能计算 5 000 次加法。ENIAC 计算机的两个主要缺点是：存储容量太小，只能存 20 个字长为 10 位的十进制数；用线路连接的方法来编排程序，每次解题目都要依靠人工改进连线，准备时间大大超过实际计算时间。

与此同时,冯·诺依曼(Von Neumann)与莫尔小组合作研制 EDVAC 计算机,采用了存储程序方案,其后开发的计算机都采用这种方式,称为冯·诺依曼计算机。一般认为冯·诺依曼计算机具有以下基本特点。

- (1) 计算机由运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备 5 个部分组成。
- (2) 采用存储程序的方式,程序和数据存放在同一存储器中,指令和数据一样可以送到运算器运算,即由指令组成的程序是可以修改的。
- (3) 数据以二进制表示。
- (4) 指令由操作码和地址码组成。
- (5) 指令在存储器中按执行顺序存放,由指令计算器(即程序计数器 PC)指明要执行的指令所在的单元地址,一般按顺序递增,但可以随运算结果或外界条件而改变。
- (6) 机器以运算器为中心,输入/输出设备与存储器间的数据传送都通过运算器。

70 多年来,随着技术的发展和 new 应用领域的开拓,对冯·诺依曼计算机做了很多革新,使计算机系统结构有了很大的进步,如某些机器程序与数据分开存放在不同的存储器中,程序不允许修改,机器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,但设计原则变化不大,习惯上仍称之为冯·诺依曼计算机。

另一种近年来比较流行的结构——哈佛结构,它是一种存储器结构,将程序指令存储和数据存储分开,也是一种并行体系结构,其主要特点是将程序和数据存储在不同的存储空间中,即程序存储器和数据存储器是两个独立的存储器,每个存储器独立编址、独立访问。与两个存储器相对应的是系统的 4 条总线,即程序的数据总线与地址总线,这种分离的程序总线 and 数据总线可允许在一个机器周期内同时获得指令字(来自程序存储器)和操作数(来自数据存储器),从而提高了执行速度和数据的吞吐率。又由于程序和数据存储在两个分开的物理空间中,因此,取址和执行能完全重叠进行。中央处理器首先到程序指令存储器中读取程序指令内容,解码后得到数据地址,再到相应的数据存储器中读取数据,并进行下一步的操作(通常是执行)。程序指令存储和数据存储分开,可以使指令和数据有不同的数据宽度。哈佛结构的计算机由 CPU、程序存储器和数据存储器组成,程序存储器和数据存储器采用不同的总线,从而提供了较大的存储器带宽,使数据的移动和交换更加方便,尤其提供了较高的数字信号处理性能。

哈佛结构与冯·诺依曼结构处理器相比,处理器有两个明显的特点:使用两个独立的存储器模块,分别存储指令和数据,每个存储模块都不允许指令和数据并存;使用独立的两条总线,分别作为 CPU 与每个存储器之间的专用通信路径,而这两条总线之间毫无关联。计算机使用两个独立的存储器模块,分别存储指令和数据,每个存储模块都不允许指令和数据并存,以便实现并行处理;具有一条独立的地址总线和一条独立的数据总线,利用公用地址总线访问两个存储模块(程序存储模块和数据存储模块),公用数据总线则被用来完成程序存储模块或数据存储模块与 CPU 之间的数据传输;两条总线由程序存储器和数据存储器分时共用。

根据计算机采用的物理器件的发展,可以把计算机的发展历程大概分为 5 个阶段。

第一阶段:电子管计算机。从 1946 年第一台计算机研制成功到 20 世纪 50 年代后期,其主要特点是采用电子管作为基本器件。美国 IBM 公司在 1954 年 12 月推出 IBM 650(小型机),这是第一代计算机中销量最广的,其销售量超过 1 000 台。1958 年 11 月问世的 IBM 709(大型机)是 IBM 公司性能最高的最后一台电子管计算机。



第二阶段：晶体管计算机。从 20 世纪 50 年代中期到 60 年代后期，这个时期计算机的主要构成器件变为晶体管，因此缩小了体积，降低了功耗，提高了速度和可靠性。而且价格不断下降。后来采用磁芯存储器，使运算速度进一步提高。1960 年控制数据公司（CDC）研制高速大型计算机系统 CDC 6600 获得了巨大成功，深受美国和西欧各原子能、航空与宇航、气象研究机构和大学的欢迎，使该公司在研究和生产科学计算高速大型机方面处于领先地位。我国在 1965 年推出了第一代晶体管计算机 DJS-5 机，此后成功研制了 DJS-108 机、DJS-121 机等 5 个机种。

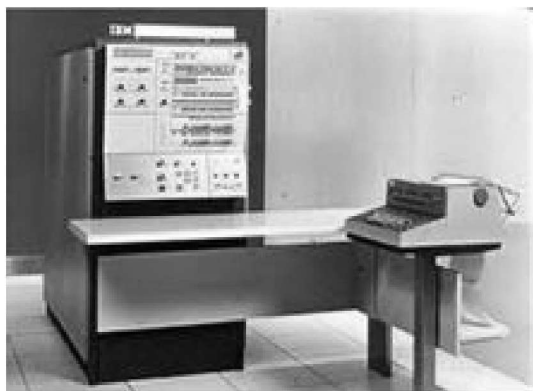


图 1-5 IBM 360

第三阶段：中小规模集成电路计算机。从 20 世纪 60 年代中期到 70 年代前期，这个时期的计算机采用集成电路作为基本器件，因此功耗、体积、价格等进一步下降，而速度和可靠性相应提高，这促使了计算机的应用范围进一步扩大。IBM 360 系列是最早采用集成电路的通用计算机（见图 1-5），也是影响最大的第三代计算机，平均运算速度为每秒几千次到 100 万次，主要特点是通用化、系列化和标准化。我国在此时期也推出了大、中、小型计算机，如 150 机、220 机、182 机等。

第四阶段：大规模集成电路计算机。从 20 世纪 70 年代中期到 90 年代，随着半导体存储器问世，迅速取代了磁芯存储器，并不断向大容量、高速度方向发展，此后，存储器芯片集成度大体上每 3 年翻两番（1971 年每片 1 K 位，到 1984 年达到每片 256 K 位，1992 年 16 M 位动态随机存储器芯片上市），这是著名的摩尔定律。从 1971 年内含 2 300 个晶体管的 Intel 4004 芯片问世，到 1999 年包含了 750 万个晶体管的 Pentium II 处理器，都证实了摩尔定律的正确性。后来微处理器的工作速度在一定成本下大体上每 18 个月翻一番。

低端微型机发展的另一个方面就是单片机，它广泛应用于工业控制、智能仪器仪表。早期的单片机都是 8 位或 4 位的。其中最成功的是 Intel 8031，因为简单可靠而性能不错获得了广泛好评。此后在 8031 基础上研发出 MCS-51 系列单片机系统。基于这一系列的单片机系统直到现在还在广泛使用。随着工业控制领域要求的提高，开始出现了 16 位单片机，但因为性价比不理想，并未得到很广泛的应用。20 世纪 90 年代后随着消费电子产品的大发展，单片机技术得到了飞速提高。随着 Intel i960 系列特别是后来的 ARM 系列的广泛应用，32 位单片机迅速取代 16 位单片机的高端地位，并且进入主流市场。而传统的 8 位单片机的性能也得到了快速提升，处理能力比起 20 世纪 80 年代提高了数百倍。目前，高端的 32 位单片机主频已经超过 300 MHz，性能直追 20 世纪 90 年代中期的专用处理器，比如现在 ARM 公司的 ARM7、ARM9、ARM10 单片机，Atmel 公司推出的 AVR32 单片机，而普通的型号出厂价格跌落至 1 美元，最高端的型号也只有 10 美元。当代单片机系统已经不再只是裸机环境下开发和使用，大量专用的嵌入式操作系统被广泛应用在全系列的单片机上。而在作为掌上计算机和手机核心处理的高端单片机甚至可以直接使用专用的 Windows 和 Linux 操作系统。单片机比专用处理器更适合应用于嵌入式系统，因此它得到了广泛的应用。事实上，单片机是世界

上数量最多的计算机。现代人类生活中所用的几乎每件电子和机械产品中都会集成有单片机。手机、电话、计算器、家用电器、电子玩具、掌上计算机以及鼠标等计算机配件中都配有 1~2 部单片机。而个人计算机中也会有为数不少的单片机在工作。汽车上一般配备 40 多部单片机, 复杂的工业控制系统上甚至可能有数百台单片机在同时工作, 单片机的数量不仅远远超过 PC 机和其他计算机的总和, 甚至比人类的数量还要多, 单片机又称为单片微控制器, 它不是完成某个逻辑功能的芯片, 而是把一个计算机系统集成到一块芯片上, 相当于一个微型的计算机, 和计算机相比, 单片机只缺少了 I/O 设备。概括地讲, 一块芯片就成了一台计算机。它的体积小、质量轻、价格便宜, 为学习、应用和开发提供了便利条件。同时, 学习使用单片机是了解计算机原理与结构的最佳选择。单片机诞生于 20 世纪 70 年代末, 经历了 SCM、MCU、SoC 三大阶段。单片机作为微型计算机的一个重要分支, 应用面很广、发展很快。自单片机诞生至今, 已发展出上百种系列的近千个机种。目前, 单片机正朝着高性能和多品种且进一步向着 CMOS 化、低功耗、小体积、大容量、高性能、低价格和外围电路内装化等方向发展。

第五阶段: 超级规模集成电路计算机。自 20 世纪 90 年代末到现在, 从集成度来看, 计算机使用的半导体存储器芯片集成度已经接近极限, 出现了极大甚至超大规模集成电路。这一阶段出现了采用大规模并行计算和高性能机群计算机技术的超级计算机, 如 IBM 公司的“深蓝”计算机就是一台 RS/6000 SP2 超级并行计算机, 它具有 256 块处理器芯片。

随着超规模集成电路的迅速发展, 计算机进入大发展时期, 各种类型的计算机都得到了迅速发展, 下面对各类计算机的情况做一个简单介绍。

1. 大型机

大型机是反映各个时期先进计算机技术的大型通用计算机, 其中以 IBM 公司的大型机系列影响最大。从 20 世纪 60—80 年代, 信息处理主要是以主机系统加终端为代表(即大型机)的集中式数据处理, IBM 公司开发出 360 系统, 70 年代和 80 年代的 IBM 370 系统曾占据大型机的霸主地位。IBM 公司为开发 360 系统的软件耗费了巨大的财力和人力, 据估计, IBM 用户在应用程序和培训等方面耗费了 2 千亿美元, 是硬件投资的 3~5 倍。如此丰富的软件不能抛弃, 这也成为计算机发展的主要制约因素。因此, IBM 370 系统是在保持与 360 系统兼容的前提下进行了改进和提高, 其主流产品有 IBM 303X 系列与 IBM 4300 系列, 后者是该系列中的低档产品。

20 世纪 90 年代后期, 随着企业规模的扩大和信息技术的发展, 很多采用客户机/服务器的分散式运算模式的用户发现, 这种系统的管理极为复杂, 运算营运成本高, 安全可靠难以保证。于是大型机获得重新崛起的机会, 企业需要一个开放的、安全的大型服务器作为计算机平台, 因为只有大型机才具有高可靠性、安全性、高吞吐能力、高可扩展性、防病毒以及防黑客的能力。

IBM 公司当前生产的大型机在其服务器产品线中被称为 Z 系列。该系列服务器的主机通常为一个大机柜, 通过原生和虚拟方式可运行多种操作系统, 其中最典型的操作系统是 IBM 大型机的专用文字界面操作系统 Z/OS。为了使得一台大型机能够同时为多个客户提供服务, IBM 公司在软件上采用了分时复用和虚拟化的设计思想, 使得多个客户在同时使用同一台大型机时, 就好像将其分割成了多个小型化的虚拟主机, 这其实就是效用计算的雏形。



2. 巨型机

现代科学技术的发展,需要有很高的运算速度、很大的存储容量的计算机,一般的大型机已不能满足要求。巨型计算机实际上是一个巨大的计算机系统,主要用来承担重大的科学研究、国防尖端技术和国民经济领域的大型计算课题及数据处理任务,如大范围天气预报、整理卫星照片、原子核物的探索、研究洲际导弹和宇宙飞船等,制定国民经济的发展计划,项目繁多,时间性强,要综合考虑各种各样的因素,依靠巨型计算机能较顺利地完成任务。1983年研制成功的Cray X-MP机向量运算速度达每秒4亿次。“天河一号”为我国首台千万亿次超级计算机,已从2010年9月开始进行系统调试与测试,并分步提交用户使用。它以每秒1206万亿次的峰值速度,和每秒563.1万亿次的实测性能,使这台名为“天河一号”的计算机位居同日公布的中国超级计算机前100强之首,也使中国成为继美国之后世界上第二个能够自主研制千万亿次超级计算机的国家。在德国法兰克福召开的“2015国际超级计算大会”上,我国国防科技大学研制的“天河二号”超级计算机系统,再次位居第45届世界超级计算机500强排行榜榜首,这是“天河二号”问世以来连续第5次夺冠。随着各国在超级计算机领域竞争的升级,尤其是我国相关产业国产化以及智能制造、“互联网+”等国家战略的推进,也势必给相关公司带来机会。

3. 小型机

小型机规模小、结构简单,所以设计测试周期短,便于及时采用先进工艺,生产量大,硬件成本低;同时由于软件比大型机简单,所以软件成本也低。1971年贝尔实验室发布多任务多用户操作系统UNIX,随后被一些商业公司采用,成为后来服务器的主流操作系统。在国外,小型机是一个已经过时的名词,20世纪60年代由DEC(数字设备公司)公司首先开发,并于90年代消失。

4. 微型机

微型机的出现与发展掀起了计算机大普及的浪潮,世界上第一台微型机是利用4位微处理器的Intel 4004组成的MCS-4,它于1971年问世。Intel 8086是最早开发成功的16位微处理器,它生产于1978年。1981年32位微处理器Intel 80386问世,与原来的产品相比较,除了提高了主频速度外,还将原属于片外的有关电路集成到片内。自1981年美国IBM公司推出第一代微型计算机IBM-PC以来,微型机以其执行结果精确、处理速度快捷、性价比高、轻便小巧等特点迅速进入社会各个领域,且技术不断更新、产品快速换代,从单纯的计算工具发展成为能够处理数字、符号、文字、语言、图形、图像、音频、视频等多种信息的强大多媒体工具。如今的微型机产品无论从运算速度、多媒体功能、软硬件支持还是易用性等智能化应用方面都比早期产品有了很大飞跃。微型机的发展过程中出现了平板机、笔记本等,其中嵌入式计算机是一种以应用为中心、以微处理器为基础,软硬件可裁剪的,适应应用系统对功能、可靠性、成本、体积、功耗等综合性严格要求的专用计算机系统。它一般由嵌入式微处理器、外围硬件设备、嵌入式操作系统以及用户的应用程序等4个部分组成。它是计算机市场中增长最快的领域,也是种类繁多、形态多样的计算机系统。嵌入式系统几乎包括了生活中的所有电气设备,如电视机顶盒、手机、数字电视、多媒体播放器、汽车、数字相