



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

国家优秀教学团队·国家特色专业教学成果

高等学校工程创新型「十二五」规划计算机教材

计算机组成原理 与汇编语言程序设计

(第3版)

徐洁 俸远祯 主编



Engineering Innovation



電子工業出版社

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
高等学校工程创新型“十二五”规划计算机教材

国家优秀教学团队·国家特色专业教学成果

计算机组成原理 与汇编语言程序设计

(第3版)

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。全书从微体系结构层、指令系统层、汇编语言层三个层次，以及 CPU、存储系统、输入/输出系统及其互连三大系统出发，建立整机的概念，并体现软硬结合的思想。全书分 3 篇（共 7 章），系统介绍基础知识（绪论、计算机中的信息表示），计算机系统分层结构（微体系结构层——CPU 组织、指令系统层、汇编语言层），存储系统和输入/输出系统（存储系统、输入/输出系统）。本教材免费提供电子教案。

本书系统全面，实例丰富，适合于作为高等学校计算机及相关专业教材，也可作为 IT 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

计算机组成原理与汇编语言程序设计/徐洁，俸远祯主编. —3 版. —北京：电子工业出版社，2012.1

高等学校工程创新型“十二五”规划计算机教材

ISBN 978-7-121-14859-0

I. ①计… II. ①徐…②俸… III. ①计算机体系结构—高等学校—教材②汇编语言—程序设计—高等学校—教材 IV. ①TP303②TP313

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 214206 号

策划编辑：童占梅

责任编辑：童占梅

印 刷：北京季峰印刷有限公司

装 订：三河市皇庄路通装订厂

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：787×1 092 1/16 印张：24.5 字数：622 千字

印 次：2012 年 1 月第 1 次印刷

印 数：5 000 册 定价：39.80 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 zltz@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：（010）88258888。

前 言

本书是 2007 年出版的“十一五”国家级规划教材《计算机组成原理与汇编语言程序设计》的第 3 版。本书第一版是电子部“九五”规划教材。本书将传统教学计划中的两门主干课程《计算机组成原理》与《汇编语言程序设计》有机地组织成一门课程，其目的是围绕机器指令级（指令系统层）及与此紧密相关的微操作级（微体系结构层）和汇编语言级（层），更好地体现软硬结合的思想，将计算机内部工作机制与编程求解问题结合起来。书中将输入/输出（I/O）系统作为《计算机组成原理》与《汇编语言程序设计》的结合点，既包含硬件接口设计，又包含 I/O 驱动程序等软件设计，体现了两部分的紧密关联和目前汇编语言程序设计的主要应用场合。本次修编时，对各章内容做了修改和增删，以便更好地与现代计算机技术相吻合，特别是对原书第 8 章输入/输出设备内容进行了精简，并将其合并到第 7 章，但仍在基本结构、主要内容和风格上保持了原书的特点。

本书主要涵盖了 ACM/IEEE-CS 中的“AR 计算机组织与体系结构”这一知识体中的 5 个核心知识单元：

- AR2 数据的机器级表示
- AR3 汇编机器组织
- AR4 存储系统组织和结构
- AR5 接口和通信
- AR6 功能组织

本书还涉及汇编语言层的 PF 程序设计基础知识领域中的一个核心知识单元——PF1 程序设计基本结构。因此，本书适用于“计算机学科教学计划”推荐的 16 门核心课程中的《计算机组成基础》课程。

多年来，我们跟踪分析了国外经典教材与国内优秀教材，这些教材一般可分为两种体系：“分层体系”和“功能部件组成体系”。本书的框架体系采用这两种体系相结合的方案，从三个层次（微体系结构层、指令系统层和汇编语言层）和三大子系统（CPU、存储系统、输入/输出系统及其互连）出发建立整机概念。本书第 2 篇按照微体系结构层、指令系统层和汇编语言层三个层次，讨论计算机系统的组成，从而在 CPU 级建立整机概念。然后，通过第 3 篇存储系统与输入/输出系统的学习，从而在系统级上建立整机概念。

全书由基础知识、计算机系统分层结构、存储系统和输入/输出系统 3 篇共 7 章组成。其编写顺序体现了下述的教学思路：

第 1 篇包括第 1、2 章，介绍计算机系统组成的基本概念和信息表示。

第 1 章仍然强调计算机的两个重要基本概念：信息数字化、存储程序工作方式。在介绍计算机系统的硬件、软件组成之后，引入了现代计算机的一种分层结构模型，它自下而上分为 5 层：微体系结构层、指令系统层、操作系统层、汇编语言层和面向问题的语言层，本书第 2 篇内容就是根据其中的三层来组织的。第 1 章还对计算机的工作过程、特点、性能指标和发展史等做了介绍。

第 2 章讲述数据信息和指令信息的表示，包括带符号数、小数点及字符的表示方法，以及

指令格式、寻址方式和指令类型，并介绍了 Pentium 与 SPARC 的指令格式。

第 2 篇包括第 3、4、5 章，分别从微体系结构层、指令系统层和汇编语言层深入讨论计算机系统的组成和工作机制。

第 3 章微体系结构层，将 CPU 作为整体来讨论，弱化运算方法与运算器。主要以一个教学模型机为例，从寄存器级描述 CPU 的内部逻辑组成，在指令流程和微操作两个层次上分析 CPU 的工作原理。根据当前计算机的发展趋势，更强调组合逻辑控制方式，对微程序控制方式只做一般原理性介绍，并以 UltraSPARC CPU 为典型例子，说明 RISC 的微体系结构及其指令系统。

第 4 章以 80x86 CPU 为背景讨论指令系统层。并将 80x86、Pentium 系列 CPU 的微体系结构做了类比，用归纳和概括的方式介绍该系列 CPU 的寻址方式和指令系统。这一章作为第 3 章与第 5 章的桥梁，由 CPU 模型过渡到实际机器 80x86，并为学习汇编语言奠定了相关基础。

第 5 章汇编语言层，以 80x86、Pentium 系列 CPU 为背景，精练地阐述了汇编语言的基础知识、伪指令与宏指令、汇编语言程序设计基本技术。

第 3 篇包括第 6、7 章，讨论存储系统和输入/输出 (I/O) 系统。

第 6 章首先简介了各种存储器存储信息的基本原理，芯片级主存储器的逻辑设计方法。按三级存储体系：高速缓存 Cache、主存、外存分别介绍其工作原理，并从物理层与虚拟层这两个层次讨论存储系统的组织。特别是，本章在分别介绍主存储器、Cache 和虚拟存储器时，都是以 Pentium 为实例进一步分析相应的工作机制。本章还引入了高级 DRAM、磁盘冗余阵列 RAID、并行存储技术等。

第 7 章介绍输入/输出系统。采用硬软结合的方式，既讨论硬件接口与 I/O 设备的逻辑组成及工作原理，也介绍软件调用方法与相应的 I/O 程序设计。详细阐述了 I/O 接口的主要控制方式：直接程序控制方式、程序中断方式和 DMA 方式。系统介绍了总线分类、标准、时序以及实例。简介了常用 I/O 设备：键盘、鼠标器、打印机和液晶显示器工作原理，并以键盘为例分析其驱动程序的设计。引入了典型外设接口 ATA 接口和 SCSI 接口。

由于篇幅所限，与本书有关的一些辅助资料将以网上电子文档方式提供给读者，**免费下载** (<http://www.hxedu.com.cn>)。网上辅助资料包括：80x86 指令系统一览表，伪操作与操作符表，中断向量地址一览表，DOS 系统功能调用 (INT 21H)，BIOS 功能调用等。

本课程的参考教学时数约为 70~90 学时，全书内容可能比教学时数所允许的份量稍多一些，可供选取或让学生自学，部分实例可随技术发展而更新。本书为教师**免费提供电子教案**，欢迎到华信教育资源网 <http://www.hxedu.com.cn> 注册下载。

本书由徐洁、俸远祯主编并负责全书的统稿。徐洁编写第 1、2 章；鲁珂编写第 3、4、5 章；叶娅兰编写第 6、7 章。重庆大学袁开榜教授担任主审，他认真仔细地审阅了全稿，提出了许多宝贵的修改意见。教材的辅助资料和电子文档由邓亮和于颖制作。本书编辑童占梅老师热情、专业和细致的工作态度保证了教材的编辑质量和水平。教材的编写还得到了北京航空航天大学杨文龙教授、电子科技大学龚天富教授的热情指导和帮助。在编写过程中，我们还得到了电子科技大学计算机学院领导和老师的热情支持。在此，谨向所有给予我们支持和帮助的同志表示衷心的感谢。

书中还会存在错误与不足之处，恳请读者与同行给予批评指正。作者 E-mail 地址：xujie@uestc.edu.cn。

主 编

于成都·电子科技大学计算机学院

目 录

第 1 篇 基础知识	
第 1 章 绪论	2
1.1 计算机的基本概念	2
1.1.1 存储程序工作方式	3
1.1.2 信息的数字化表示	3
1.2 计算机系统的硬、软件组成	5
1.2.1 计算机硬件系统	5
1.2.2 计算机软件系统	9
1.3 层次结构模型	11
1.3.1 从计算机系统组成角度划分层次结构	12
1.3.2 从语言功能角度划分层次结构	14
1.3.3 软、硬件在逻辑上的等价	15
1.4 计算机的工作过程	16
1.4.1 处理问题的步骤	16
1.4.2 指令执行过程	17
1.5 数字计算机的特点与性能指标	18
1.5.1 数字计算机的特点	18
1.5.2 计算机的性能指标	19
1.6 计算机的发展与应用	20
1.6.1 计算机的发展历程	20
1.6.2 提高计算机性能的若干技术	23
1.6.3 计算机应用举例	25
习题 1	27
第 2 章 计算机中的信息表示	28
2.1 数值型数据的表示	28
2.1.1 带符号数的表示	28
2.1.2 定点数与浮点数	33
2.2 字符的表示	38
2.2.1 ASCII 码	39
2.2.2 UNICODE 编码	40
2.2.3 汉字编码简介	41
2.3 指令信息的表示	42
2.3.1 指令格式	42
2.3.2 常用寻址方式	46
2.3.3 指令类型	52
2.3.4 Pentium II 指令格式	55
2.3.5 SPARC 指令格式	57
习题 2	58
第 2 篇 计算机系统分层结构	
第 3 章 微体系结构层——CPU 组织	61
3.1 CPU 的组成和功能	61
3.1.1 CPU 的组成	61
3.1.2 指令执行过程	65
3.1.3 时序控制方式	66
3.1.4 指令流水线	68
3.2 算术逻辑部件 ALU 和运算方法	71
3.2.1 算术逻辑部件 ALU	71
3.2.2 定点数运算方法	75
3.2.3 浮点数运算方法	83
3.2.4 十进制数加减运算	85
3.3 CPU 模型机的组成及其数据通路	86
3.3.1 基本组成	86
3.3.2 数据传送	89
3.4 组合逻辑控制器原理	90
3.4.1 模型机的指令系统	90
3.4.2 模型机的时序系统	94
3.4.3 指令流程	96
3.4.4 微命令的综合与产生	102
3.4.5 小结	103
3.5 微程序控制器原理	103
3.5.1 微程序控制概念	103
3.5.2 微指令编码方式	105
3.5.3 微程序的顺序控制	107
3.5.4 微指令格式	108

3.5.5 典型微指令举例——模型机 微指令格式	109
3.6 精简指令集计算机 (RISC)	110
3.6.1 RISC 与 CISC 的概念	110
3.6.2 UltraSPARC CPU 的微体系 结构	112
习题 3	118
第 4 章 指令系统层	120
4.1 80x86 CPU	120
4.1.1 8086/8088 CPU	120
4.1.2 80386/80486 CPU	123
4.1.3 Pentium 系列 CPU	125
4.2 80x86 CPU 的寄存器和主存储器	129
4.2.1 80x86 CPU 的寄存器	129
4.2.2 80x86 的主存储器	133
4.3 80x86 CPU 指令系统	143
4.3.1 80x86 寻址方式	144
4.3.2 80x86 CPU 指令系统	151
习题 4	180
第 5 章 汇编语言层	184
5.1 概述	184
5.2 汇编语言语句格式	186
5.3 80x86 宏汇编语言数据、表达式和 运算符	187
5.3.1 常数	187
5.3.2 变量	188
5.3.3 标号	191
5.3.4 表达式与运算符	193
5.4 80x86 宏汇编语言伪指令	196
5.4.1 符号定义语句	196
5.4.2 处理器选择伪指令	197
5.4.3 段结构伪指令 (SEGMENT/ ENDS)	198
5.4.4 段组伪指令 (GROUP)	202
5.4.5 内存模式和简化段定义伪指令	203
5.4.6 定位和对准伪指令	205
5.4.7 过程定义伪指令 (PROC/ ENDP)	205
5.4.8 包含伪指令 (INCLUDE)	206

5.4.9 标题伪指令 (TITLE)	206
5.5 宏指令	206
5.6 汇编语言程序设计基本技术	213
5.6.1 程序设计步骤	213
5.6.2 顺序程序设计	214
5.6.3 分支程序设计	217
5.6.4 循环程序设计	225
5.6.5 子程序设计	232
5.6.6 系统功能子程序的调用	242
5.6.7 汇编语言程序的开发	243
习题 5	249

第 3 篇 存储系统与输入/输出系统

第 6 章 存储系统	256
6.1 概述	256
6.1.1 存储器的分类	256
6.1.2 主存的主要技术指标	258
6.2 存储原理	259
6.2.1 半导体存储器的存储原理	259
6.2.2 磁表面存储器的存储原理	262
6.2.3 光存储器的存储原理	266
6.3 主存储器的组织	267
6.3.1 主存储器的逻辑设计	267
6.3.2 主存储器与 CPU 的连接	271
6.3.3 Pentium CPU 与存储器组织	273
6.3.4 高级 DRAM	276
6.4 高速缓冲存储器 Cache	280
6.4.1 Cache 的工作原理	280
6.4.2 Cache 的组织	281
6.4.3 Pentium II CPU 的 Cache 组织	285
6.5 外部存储器	287
6.5.1 硬盘存储器	288
6.5.2 光盘存储器	294
6.5.3 磁带存储器	297
6.6 物理存储系统的组织	299
6.6.1 存储系统的层次结构	299
6.6.2 磁盘冗余阵列	301
6.6.3 并行存储技术	303
6.7 虚拟存储系统的组织	304

6.7.1	概述	304	7.4.3	DMA 接口组成	344
6.7.2	虚拟存储器的组织方式	305	7.4.4	DMA 控制器编程及应用	348
6.7.3	Pentium CPU 支持的虚拟 存储器	308	7.5	通道与 IOP	354
6.7.4	存储管理部件 (MMU)	310	7.5.1	通道	354
习题 6		311	7.5.2	IOP 与外围处理机	356
第 7 章	输入/输出系统	313	7.6	总线	358
7.1	概述	313	7.6.1	总线的功能与分类	358
7.1.1	主机与外围设备间的连接方式	313	7.6.2	总线标准及信号组成	361
7.1.2	I/O 接口的功能和分类	315	7.6.3	总线操作时序	364
7.1.3	接口的编址和 I/O 指令	318	7.6.4	典型总线举例	366
7.2	直接程序控制方式	320	7.7	典型外设接口	367
7.2.1	立即程序传送方式	321	7.7.1	ATA 接口	367
7.2.2	程序查询方式	321	7.7.2	SCSI 接口	369
7.3	程序中断方式	323	7.8	I/O 设备与 I/O 程序设计	369
7.3.1	中断的基本概念	323	7.8.1	概述	369
7.3.2	中断的过程	329	7.8.2	键盘	372
7.3.3	中断接口模型	331	7.8.3	鼠标器	376
7.3.4	中断接口举例	336	7.8.4	打印机	377
7.4	DMA 方式	341	7.8.5	液晶显示器	379
7.4.1	DMA 方式的一般概念	342	习题 7		380
7.4.2	DMA 过程	343	附录 A	ASCII 码字符表	382
			参考文献		383

第1篇 基础知识

第1篇作为本书其他部分的基础，主要介绍计算机系统组成的基本概念及其信息表示。

第1章首先强调计算机的两个重要基本概念：信息数字化和存储程序工作方式，并将其作为了解计算机组成及工作机制的基本出发点。从功能部件组成角度来看，计算机是由三大子系统：CPU、存储系统、输入/输出系统及其互连结构组成，在本书的第2、3篇将深入讨论这些子系统的内部结构和功能。计算机系统是硬件与软件组成的综合体，从系统层次结构角度看，现代计算机自下而上可分为5层：微体系结构层、指令系统层、操作系统层、汇编语言层和面向问题的语言层，本书第2篇用3章的篇幅分别从微体系结构层、指令系统层、汇编语言层这三个不同的层次讨论计算机系统的逻辑组成和工作机制。本章还对计算机的工作过程、特点、性能指标、发展史、有关提高计算机性能的技术及其主要应用领域等做了简要介绍。

第2章以信息数字化为基本出发点，讨论计算机中数据信息和控制信息（指令）的表示。数据信息的表示涉及数值数据带符号数的表示、小数点的表示（定点数、浮点数）、字符表示方法等。指令信息的表示包括指令格式、寻址方式和指令类型。

第1章 绪 论

通常所讲的计算机，其全称是电子式数字计算机，它是一种能存储程序，能自动连续地对各种数字化信息进行算术、逻辑运算的快速工具。在这一定义中包含两个重要的基本概念：信息数字化和存储程序工作方式。本章一开始就强调它们，作为了解计算机组成及工作机制的基本出发点。

计算机系统是由硬件与软件组成的综合体，人们常采用层次结构观点去描述系统的组成与功能，分层次地分析与设计计算机系统。本章在简要叙述计算机系统的硬件、软件组成之后，将分别从系统内部的有机组成和程序设计语言功能的角度，介绍两种常用的层次结构模型。再通过对解题过程的描述，说明计算机的应用方式与工作过程。在上述知识的基础上，分析计算机的特点，说明其性能指标的含义。最后，简要介绍计算机的发展史，以及有关提高计算机性能的技术及计算机的主要应用领域。

1.1 计算机的基本概念

我们现在广泛使用的计算机，其全称是电子式数字计算机，俗称电脑。初学者提出的第一个问题常常是：计算机是什么？简单地讲，计算机是一种能够存储程序，能够自动连续地执行程序，对各种数字化信息进行算术运算或逻辑运算的快速工具。我们先对这个定义作一些初步的解释。首先，计算机是能够运算的设备，运算可以分为两大类：算术运算和逻辑运算。算术运算的对象是数值型数据，以四则运算为基础，许多复杂的数学问题可通过相应的算法最终分解为若干四则运算。逻辑运算用来解决逻辑型问题，如信息检索、判断分析和决策等。所以我们常将计算机的工作泛称为对信息进行运算处理。那么，计算机中的信息用什么形式来表示呢？简单地讲，是用数字代码来表示各类信息，所以称为数字计算机。计算机又是怎样对这些数字化的信息进行运算处理呢？它采用的是一种存储程序工作方式，即先编写程序，再由计算机将这些程序存储起来，然后通过连续、快速地执行程序实现各种运算处理。为了存储程序与数据，需要存储器；为了进行运算处理，需要运算器；为了输入程序和数据，以及输出运算结果，需要有输入设备和输出设备；控制器则对计算机的工作进行控制管理。

这些要点是由计算机技术的先驱者冯·诺依曼首先提出的，他在1945年提出了数字计算机的若干设计思想，被后人称为冯·诺依曼体制，这是计算机发展史上的一个里程碑。采用冯·诺依曼体制的计算机被称为诺依曼机。几十年来计算机的体系结构发生了许多演变，但冯·诺依曼体制的核心概念仍沿用至今，绝大多数实用的计算机仍属于冯·诺依曼机。我们将冯·诺依曼体制中那些至今仍广泛采用的要点归纳为：

- (1) 采用二进制代码表示数据和指令。
- (2) 采用存储程序工作方式，即事先编制程序，事先存储程序，自动、连续地执行程序。
- (3) 由存储器、运算器、控制器、输入设备、输出设备等5大部件组成计算机硬件系统。

在本节中我们先阐述其中的两点：存储程序工作方式和信息的数字化表示。而硬件组成部分则放在下一节与系统结构一起讨论。

1.1.1 存储程序工作方式

计算机的工作最终体现为执行程序。前面提到，计算机采用存储程序工作方式，这是冯·诺依曼体制中最核心的思想。它有三点含义，体现了用计算机求解问题的过程。

1. 事先编制程序

为了用计算机求解问题，需要事先编制程序。在程序中规定计算机需要做哪些事，按什么步骤去做。程序中还包括需要运算处理的原始数据，或者规定计算机在什么时候从输入设备获得数据。一件事往往要分很多步去完成，要求计算机硬件在一步中执行的操作命令称为一条指令，如加法指令。计算机最终执行的程序，其形态就是指令序列，即若干指令的有序集合，每一步将执行一条指令。换句话说，我们预先编好的程序最终变成：指令序列和有关的原始数据。

2. 事先存储程序

编好的程序经由输入设备送入计算机，存放在存储器中。编写的程序是用字符书写的，通过键盘将字符变成二进制编码，然后输入计算机。二进制编码中的每一位，不是0就是1，可以保存在存储器中。

最早的电子计算机是靠许多开关和拔插连接线来体现程序的，被称为台外程序式，意思是程序不在计算机内部。按照冯·诺依曼体制设计计算机后，才采用了事先存储程序的工作方式，这一点有很重要的意义。

3. 自动、连续地执行程序

由于程序已经事先存储在存储器中，启动计算机并运行程序后，计算机就可以依照一定顺序从存储器中逐条读取指令，按照指令的要求执行操作，直到运行的程序执行完毕。原则上，程序运行不需操作者通过人工操作去逐条读取指令，所以是自动、连续地执行程序，使得计算机可以高速地运行。当然，有些工作本身要求以人-机对话方式进行，例如我们通过计算机进行查询，计算机通过显示屏幕向用户询问：需查询什么项目？用户通过键盘或鼠标进行选择。这种情况要求计算机分段执行程序，中间允许用户进行人工干预。所以计算机在自动、连续地执行程序的同时，往往允许使用者以外部请求方式进行干预。

上面我们描述了计算机的基本工作方式。冯·诺依曼机的这种工作方式被称为控制流驱动方式。它是按照指令的执行序列依次读取指令，根据指令所含的控制信息调用数据，进行运算处理。在这一过程中，逐步发出的控制信息成为一种控制信息流，简称控制流，它是驱动计算机工作的因素。而依次处理的数据信息则成为一种数据信息流，简称数据流，它是被调用的对象，或者说是被驱动的部分。

1.1.2 信息的数字化表示

前面谈到，计算机中的信息可以分为两大类：控制信息和数据信息。随着程序的逐步执行，依次取出的指令代码序列，以及在此基础上产生的微命令等，就成为控制信息流，它们是控制计算机工作的有关信息。而依据指令要求依次取出的数据，以及运算处理的结果等，成为数据信息流，它们是计算机加工处理的对象。数据可以分为两大类：数值型数据和非数

值型数据。前者有数值大小及正负之分，如四则运算的对象等；后者指字符、文字、图像、声音等一类信息，以及条件、命令、状态等逻辑信息。这就需要解决一个问题：怎样表示上述信息？

现在广泛使用的计算机，它的全称是电子式数字计算机。“电子式”指计算机的主要部件由电子电路构成，计算机内传送与处理的信息是电子信号。那么为什么叫做数字计算机呢？这是因为计算机中的信息（控制流、数据流）都采用数字化表示方法，简单地讲它有两层含义。

（1）在计算机中各种信息用数字代码表示

下面通过一组例子来说明如何用数字代码表示各类信息，这是了解计算机工作原理的又一重要基础，希望大家熟练掌握，能够举一反三。

【例 1-1】 用二进制数字代码表示数值的大小。

用一组数字代码表示一个数值型数据，其中每一位数字只有两种，不是 0 就是 1，逢 2 进位，所以叫做二进制。数的正负符号也用一位数字代码表示，称为符号位。如约定符号位为 0 表示正数，符号位为 1 表示负数。例如 11001 表示 -9。

【例 1-2】 用数字编码表示中、西文字符。

例如 01000001 表示 A，01000010 表示 B，就像发电报时邮局将汉字编为一组数字电报码一样。以字符为基础可以表示范围广泛的各种文字，编写程序时所用的程序设计语言也是用字符组成的。

【例 1-3】 用数字代码表示图像。

与字符相比，图像信息变化多，哪里亮哪里暗，是随时变化的。但是我们可以将一幅图像细分为许多像点（或像素），用这些像点的组合逼近真实图像。如果分得足够细，也就是说点数足够多，则在人的视觉中这幅由许多像点组成的图像几乎是连续的。相应地，用一位数字代码表示一个像点，例如用 1 表示一个亮点，用 0 表示一个暗点。再按照一定的扫描规律，如逐线从左到右地扫描，就可以将这些像点的信息以数字代码形式组织，并存入计算机中，这样就可以用计算机对图像进行了。

下面再举几个例子，说明怎样用数字代码表示逻辑型信息。

【例 1-4】 用数字代码表示机器指令。

程序在计算机中的最终（可执行）形态是指令序列，按照事先约定的指令格式，每条指令用一组数字代码表示。一条指令往往分为几个字段，如操作码字段、地址字段等，我们约定用不同的编码表示不同的指令含义。例如约定操作码的编码含义是：0000 表示传送，0001 表示相加，0010 表示相减等。

【例 1-5】 用数字代码表示设备的状态。

计算机在控制打印机、显示器等设备时，常常需要根据设备的工作状态来决定操作。可以将这些状态抽象化，然后用数字代码表示。例如用 00 表示设备现在空闲，用 01 表示设备忙，用 10 表示设备已完成一次操作，等等。

（2）用数字型电信号表示数字代码

从物理实现层次看，数字代码需要用电信号去体现，这样才能用电子电路部件实现信息的传送和运算处理。电信号分为两类：模拟信号和数字信号。

模拟信号是用信号的某些参量去模拟信息，例如用电信号的幅值去模拟数值的大小，所以称为模拟信号、模拟量。许多物理量，如压力、温度等，需要先通过传感器变为模拟信号，再转换为数字信号，才可以用计算机处理。

数字信号是这样一种信号，它的单个数字信号仅取有限的几种状态，一般只取两种状态，例如高电平或低电平、有脉冲或无脉冲，这两种状态可用数字代码 1 或 0 来表示，这称为二值逻辑。相应地，数字信号也有两种形式：电平信号和脉冲信号。依靠多位数字信号的组合，可以表示多位数字代码。换句话说，一位数字信号表示一位数字代码。

例如，在计算机传输数据时，常用多根传输线同时传送，每根线传送一位，这称为并行传送。如果某一根线的电平为高，则该位为 1；若另一根线的电平为低，则该位为 0。各线之间相互分离，可独立传送电平信号。

用数字代码可以表示各种信息。用数字信号表示数字代码，就是信息数字化的含义。计算机是用来处理信息的，它可以处理的信息类型极其广泛。要了解计算机的工作原理，并在今后工作中灵活地进行设计，首先需要深刻理解和熟练掌握信息的数字化表示方法。

采用数字化方法表示信息，具有许多重要的优点：

① 抗干扰能力强，可靠性高。因为每位数字的取值非 1 即 0，相应地，表示数字的电信号也只需两种状态。假定电源为 +5V，用高电平表示 1，用低电平（0V）表示 0，则在 1 与 0 之间有比较大的差别，即使受到一定干扰也能够区分是 0 还是 1。

② 依靠多位数字信号的组合，在表示数值时可以获得很宽的表示范围和很高的精度。在理论上，对信息表示的位数增加并无限制，这取决于使用者愿意付出的硬件代价。

③ 数字化信息容易存储，信息传送也比较容易实现。因为每一位数字非 0 即 1，相应地，在物理实现上也只需取两种可能的极端状态来表示 0 或 1，因而可以有多种方法来体现。如开关连通或断开，晶体管导通或截止，电容上有电荷或无电荷，磁性材料的正向磁饱和或反向磁饱和，磁化状态的变或不变，等等。相应地，可用双稳态触发器去存储信息，或利用电容上存储的电荷来存储信息。

④ 可以表示的信息类型和范围极其广泛，几乎没有限制，这一点在前面已经举例说明。

⑤ 能用逻辑代数等数字逻辑技术进行信息处理，这形成了计算机硬件设计的基础。

计算机的各项具体操作最终是用数字逻辑电路来实现的，可以称为处理功能逻辑化。由于采用二进制数字代码来表示各类信息，所以我们能用种类非常有限的几种逻辑单元（与、或、非门），构造出变化无穷的计算机系统。

1.2 计算机系统的硬、软件组成

计算机系统的组成可分为两大范畴：硬件和软件。计算机硬件是指系统中可触摸到的设备实体，如前面提到的运算器、控制器、存储器、输入设备、输出设备，以及将它们组织为一个计算机系统的总线、接口等。计算机软件是指系统中的各类程序和文件，由于它们在计算机中体现为一些不能直接触摸到的二进制信息，所以称为软件。下面将分别介绍计算机系统的硬件组成和软件组成，帮助大家初步建立整机的概念。

1.2.1 计算机硬件系统

在早期，冯·诺依曼将计算机的硬件组成分为 5 大部件。几十年来，计算机硬件系统已有了许多重大变化。首先，现在采用的大规模及超大规模集成电路，可将运算器和控制器集成在一块芯片上，合称为中央处理器（CPU）。它是负责执行程序，实现运算处理，控制整个

系统的部件。相应地，原来的运算器现在作为 CPU 中的运算部件（又称为算术逻辑部件），它与控制器之间的界限已不像原来那样分明。其次，存储器分为高速缓存、主存储器、外存储器三个层次。其中高速缓存常集成在 CPU 内部，作为 CPU 的一个部分，也可以在 CPU 之外再设置一级高速缓存。通常将 CPU 与主存储器合在一起称为主机，主存储器（简称主存）就是因为位于主机之内而得名，有的书中又称它为内存器（内存）。位于主机之外的磁盘、光盘、磁带等，则作为外存储器（外存）。还有，输入设备的任务是将外部信息输入主机，输出设备则是将主机的运算处理结果或其他信息从主机输出。但从信息传送控制的角度看，它们并无多大区别，不过是传送方向不同而已。有些设备还兼有输入与输出两种功能，所以在描述系统结构时常将它们合称为输入/输出设备，简称 I/O 设备。

在图 1-1 中，用框图的形式描述了一种简单的硬件系统结构。其中将 CPU、主存、I/O 设备等都画为一个框，在框内标注其名称。部件、设备之间的连接线也采用示意方式来表现，暂不画出全部连线，也没有具体标明各条连线的细节。采用这种画法可大大简化细节，以突出其系统结构。

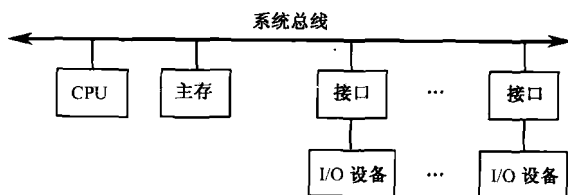


图 1-1 常见的计算机硬件系统结构

下面以图 1-1 为基础，先分别说明各组成部件的功能和相应特性，再介绍以总线为基础构成整机系统的方法。

1. CPU

CPU (Central Processing Unit) 即中央处理器，是硬件系统的核心部件，负责读取并执行指令，也就是执行程序。前面曾经提到，冯·诺依曼体制的要点之一，即采用二进制代码表示数据和指令，那么怎样区分它们呢？在 CPU 中有一个程序计数器 PC (Program Counter)，它存放着当前指令所在存储单元的地址。如果程序是顺序执行，在读取一个或连续几个存储单元的指令代码后，PC 的内容就加 1 或加几，以指出下一条指令的地址；如果程序需要转移，则将转移地址送入 PC。因此，PC 就像一个指针，指引着程序的执行顺序。虽然指令与数据都采用二进制代码表示，在外形上没有区别，但可按照 PC 中的地址信息去读取指令，再按照指令给出的操作数地址去读取数据。下面在讲到主存储器时，将会解释地址的概念。

CPU 内有一个或多个算术逻辑部件 ALU (Arithmetic Logic Unit)。通常按照指令的要求将有关数据送入 ALU，进行指定的算术或逻辑运算，然后将运算结果送到主存单元，或暂存在 CPU 内的寄存器中。

CPU 内的主要部分是控制器（又称为控制部件），它的任务是控制整个系统的工作，决定在什么时候，根据什么，发出什么命令，做什么操作。例如它控制着从主存中读取指令，根据指令代码分时地发出一些最基本的控制信号即微命令，控制存储器的读写、ALU 的运算处理、数据的输入/输出等。

按照产生微命令的方式不同，控制器可分为两大类：组合逻辑控制器及微程序控制器。

组合逻辑控制器完全靠若干组合逻辑电路（即硬件）产生微命令序列，将指令代码、状态信息、时序信号等输入到这些组合逻辑电路，电路将分时产生相应的微操作命令。这种控制器又称硬连逻辑控制器，其优点是形成微命令的速度快，常用于精简指令系统计算机（RISC）中。

微程序控制器是将微命令序列以代码形式编制成微程序，存入一个控制存储器中；当 CPU 执行指令时，通过读取并执行对应的一段微程序，产生微命令序列，控制完成指定的操作。微程序控制方式比较规整，硬件代价较小，易于扩充功能，但速度较慢。

在微型计算机系统中，又将 CPU 称为微处理器。在并行计算机系统中，通常包括若干个 CPU，又将 CPU 称为处理器或处理机（Processor）。

2. 主存储器

我们总是希望计算机系统中的存储器容量大，存取速度快，但这往往是有矛盾的，所以常将存储器分为几级。其中主存储器用半导体存储器构成，工作速度较高，也有一定的存储容量。外存储器为主存提供后援，由磁盘、光盘、磁带等构成，其存储容量很大，但速度较主存储器低。以后要介绍的高速缓冲存储器、主存储器和外存储器，组合成一个完整的多级存储系统，使得整个系统既有很大的存储容量，而 CPU 又可以高速地访问存储器。

主存储器用来存放需要执行的程序及需要处理的数据，能由 CPU 直接读出或写入。

主存储器划分为许多单元，通常每个单元存放 8 位二进制数，称为 1 字节。每个单元都有一个唯一的编号，称为存储单元地址，简称地址。向主存储器送出某个地址编码，就能根据地址选中对应的一个单元。这就像一幢学生宿舍楼，分为若干房间，每个房间可住 8 个人，每个房间的房号就相当于存储单元地址。程序的最终（可执行）形态是指令序列，通常它们按照执行顺序依次存放在连续的存储单元中，通过程序计数器 PC 提供的指令地址，就可以逐条地读取指令。一条指令按其长度不同可存放在一个或相邻的几个单元中。有的指令需要处理的数据（又称为操作数）存放在主存的一个或相邻的几个单元中，指令执行时，就提供地址去寻找对应单元，从中读取操作数。通过以上的描述，我们初步了解了主存中的信息存放情况，可见主存储器的一项重要特性是：能按地址（单元编号）存放或读取内容，也就是允许 CPU 直接编址访问，通常以字节为编址单位。对主存储器来说，寻找存储单元（寻址）的依据是地址码，所存取的内容是指令或数据。

3. 外存储器

外存储器用来存放那些需要联机存放，但暂不执行的程序和数据，当需要运行它们时再由外存调入主存。例如在光盘中存放着几个备用的软件，但当前暂时只用得着其中的一个，我们先将它调入主存，其余软件仍存放在光盘上。又如一个信息管理系统所保存的数据很多，可将它们存放在磁盘之中，只将当前需要查询的部分调入主存，以后再调换。这样，主存的容量就不需要很大，可以做到速度比较快。而由磁盘、光盘等构成的外存储器容量很大，可为整个系统提供后援支持，其速度要求可以比主存低一些。

由于外存储器不由 CPU 直接编址访问，也就是不需要按字节地从外存储器读取或写入，因此外存储器中的内容一般都按文件的形式进行组织，一个文件常分解为若干数据块，可以包含许多字节的信息。用户按文件名进行调用，CPU 找到该文件在外存中的存放位置，以数据块为单位进行读写。

从功能上看，外存储器是整个存储系统的一部分，是一种存储器。从信息传送的角度看，它又是一种输入/输出设备。将磁盘中的文件调入主存时，磁盘是输入设备；将主存中的内容以文件的形式写入磁盘时，磁盘是输出设备。

4. 输入/输出设备

计算机系统大多配备了键盘、鼠标、显示器、打印机等常规输入/输出设备，简称 I/O 设备。有的系统还配备了图形及声音输入/输出设备。

输入设备用来将计算机外部的信息输入计算机。外部信息的形式可能有多种，因此输入设备常需进行信息形式的转换，将外部信息变换为计算机所能识别和处理的形式。例如用程序设计语言编写的程序，是以字符为基础，通过按键将它变为机器能够识别和存储的二进制代码。

输出设备将计算机的处理结果以我们能看得懂的形式输出。目前多数计算机采用液晶显示屏，关机后显示信息将会丢失，所以显示器被称为软拷贝设备。打印机可将有关信息打印在纸上，长期保管，所以称为硬拷贝设备。

5. 总线

怎样将 CPU、主存、多台 I/O 设备连接成整机系统呢？现在普遍采用总线结构。所谓总线是指一组能为多个部件分时共享的信息传输线。如图 1-1 所示，用一组系统总线连接 CPU、主存及多台 I/O 设备，它们之间可以通过系统总线传送信息，连在总线上的部件都可以使用这组总线。注意，某个时刻只能有一个部件或设备向总线发送数据，如果有两个或两个以上的部件同时向总线发送数据，就会产生冲突，使数据混乱，这就是分时共享的含义。但总线上的数据既可以只向某一部件发送，也可以同时向几个部件发送。

系统总线可分为三组，即地址总线、数据总线和控制总线，例如常见的系统总线有 32 位地址线、32 位数据线、20 多根控制信号线。CPU 如果需要访问主存，就向地址总线送出地址码以选择某个主存单元；通过数据总线送出数据，写入主存；或从主存读出数据，通过数据总线送入 CPU 的寄存器。大部分控制信号是由 CPU 提供的，它们通过控制总线送往主存和 I/O 设备；也有些信号是 I/O 设备提供的，其中有些信号也送往 CPU。

6. 接口

一台计算机系统需连接哪些 I/O 设备，这要根据该系统的应用场合而定，因此通过系统总线连接的设备，其类型与数量都应当可以扩充。某种型号的计算机系统，其系统总线往往是标准的，也就是说，有多少根地址线、数据线，有哪些控制信号线，每个信号的名称及作用等，都是规定好的。但是它所连接的 I/O 设备却是类型各异。怎样使标准的系统总线与各种类型的设备相连接呢？这就需要在系统总线与 I/O 设备之间设置一些逻辑部件，约定它们之间的界面，这种逻辑部件叫做 I/O 接口，在微型计算机中又称为适配卡。在实际工作中，常常需要我们去设计各类接口，大家应当注意学习有关接口的知识和方法。

概括地说，计算机硬件系统是由三大子系统：CPU、存储系统（包括高速缓存、主存和外存）、输入/输出系统（包括输入/输出设备和接口），以及连接它们的总线构成。本书的第 2、3 篇将深入讨论这些子系统的内部结构和功能。在 1.3 节还要针对这种计算机系统分析它的存储程序工作方式，以及指令的执行过程。

1.2.2 计算机软件系统

简单地说，计算机的软件就是程序，它规定计算机如何去完成某个任务，是某种算法的体现。在计算机中还存放着一些以文件形式组织的信息，如对系统的说明，对编程工具与运行环境的说明，为用户提供帮助的提示与其他参考信息等，所以有人将软件的定义描述得更广泛一些，即软件是程序及文件。

在计算机系统中，各种软件的有机组合构成了软件系统。从软件配置与功能的角度看，可将软件分为系统软件和应用软件两大类。下面结合计算机的工作情况，介绍这些软件的主要内容，使读者了解计算机是如何工作的。

1. 系统软件

这是一组为使计算机系统良好运行而编制的基础软件。从软件配置的角度看，系统软件是用户所购置的计算机系统的一部分，它是一种软设备，是提供给用户的系统资源。当我们购买一台计算机系统时，除了购买硬件之外还要购买一些系统软件，有时软件的费用可能会超过硬件费用。从功能的角度看，系统软件是负责计算机系统的调度管理，提供程序的运行环境和开发环境，向用户提供各种服务的一类软件。下面介绍常见的系统软件及其作用。

(1) 操作系统

操作系统是软件系统的核心，例如现在微型计算机中广泛配置的 Windows X。操作系统负责管理和控制计算机系统硬、软件资源及运行的程序，它合理地组织计算机的工作流程，是用户与计算机之间的接口，为用户提供软件的开发环境和运行环境。下面我们对这段话作一些初步的解释，在后续课程中将会深入讨论。

一个完备的操作系统包括：CPU 调度管理、存储器管理、I/O 设备管理、文件管理、作业管理等几大部分。在计算机系统中，大量的信息以文件形式组织并保存，操作系统的文件管理模块提供了信息管理机构。用户程序及其所需的数据，常以作业的形式存放在外存储器中，由操作系统进行调度管理，调入主存储器后方可由 CPU 运行。如果计算机系统具备多道程序运行环境，就需要操作系统对 CPU 的分配和运行实施有效管理，还需要为各道程序分配内存空间，并使它们互不干扰，即提供内存保护。I/O 设备管理模块负责为用户程序分配 I/O 设备，提供良好的人-机界面，其中含有对各种设备的驱动程序，完成有关的 I/O 操作。所以说操作系统控制和管理着计算机的硬、软件资源，合理地组织计算机的工作流程。

在配置了操作系统之后，用户就可以通过操作系统提供的用户界面去使用、操作计算机。例如，曾经广泛使用的单用户操作系统 PC-DOS，为用户提供了两种界面，一种是通过键盘操作执行的 DOS 命令，另一种是供用户程序调用的系统功能调用。所以说操作系统提供了计算机与用户之间的接口。现在的操作系统，如 Windows X 等，为用户提供了更丰富、更方便的人-机图形界面。

在用户程序的开发和执行过程中，可能需要用到许多其他的系统软件程序，即软件资源，它们是作为文件被某个操作系统管理调度的。我们所编制的用户程序也作为文件纳入操作系统的管理之下。所以操作系统为用户提供了软件的开发环境和运行环境。正如人们常常说的，某个应用软件是在 DOS 环境下或是在 Windows 环境下开发、运行的。

(2) 编译程序与解释程序

计算机硬件能够直接识别的是数字代码，所以让计算机硬件执行的基本命令，如传送、