

微型计算机原理及应用系统设计十

# 微型计算机原理及应用 系统设计

金惠娟 梁桂春 孙吉振 编著

J67  
027206

036  
HJ/1

电子工业出版社

## 内 容 简 介

本书由浅入深地阐述了计算机的基本概念和原理,分析了Z-80的指令系统、汇编语言、Z-80的时序、输入输出方式和中断,以及各种接口技术。最后以较大的篇幅介绍了微型机的应用,分别以TP-801单板机、MCS-48系列单片机以及IBM PC个人计算机为例,详细介绍了微型机在控制、管理和教育方面的应用。

本书可作为各类科技人员学习和应用计算机的自学读本,也可作为大专院校计算机原理和应用课程的教材,或各类微机培训班教材。

微型计算机原理及应用系统设计

金惠娟 梁桂春 孙吉振 编著

责任编辑:蒋叙仁

电子工业出版社出版(北京海淀区万寿路)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
江苏金坛县装璜彩色印刷厂印刷

开本: 787×1092毫米1/16 印张: 21 字数: 520千字

1989年7月第一版 1989年7月第一次印刷

印数: 1—10,000册 定价: 7.50元

ISBN7-5053-0541-7/TP·72

## 前 言

近几年来，微型计算机如雨后春笋般地涌现，在各个领域里取得了显著的成效。我们把本书奉献给广大读者，旨在较为系统地介绍微型机的基本工作原理及应用系统的设计方法，以帮助大家尽快学会运用计算机来解决各自工作中的问题，或为大学生走上工作岗位后使用计算机打下良好的基础。

本书共分八章。前七章介绍微型计算机的基本工作原理及工作方式。从着重微机应用的角度出发，书中力图避免涉及计算机内部的具体电子线路及工艺技术，而在功能部件一级上介绍基本结构和工作原理，并在介绍部件的外特性时，展开应用技术的讨论。第八章集中介绍了微机的应用技术，分别介绍了单板机、单片机、个人计算机系统在控制、管理及教育等方面的应用。书中所列举的应用例子，一部分取材于参考资料，一部分则是直接从作者近年来教学、科研成果中提取的。

本书第七章和第八章由梁桂春和孙吉振同志编写，其余内容均由金惠娟同志编写。在编写过程中，得到徐恭德、姜元大、马玉玲、齐广玉等同志的大力支持和热情帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者学识水平有限，书中缺点错误难以尽免，敬请读者批评指正。

编著者

1989年5月

# 目 录

<b>第一章 计算机基础</b> .....	( 1 )
第一节 概 述.....	( 1 )
第二节 计算机中数的表示及运算方法.....	( 8 )
第三节 数字逻辑电路.....	( 33 )
第四节 微型计算机系统的一般概念.....	( 42 )
习题一.....	( 61 )
<b>第二章 Z-80指令系统</b> .....	( 63 )
第一节 概 述.....	( 63 )
第二节 Z-80的寻址方式.....	( 64 )
第三节 Z-80的指令系统.....	( 67 )
习题二.....	( 97 )
<b>第三章 微型计算机的汇编语言程序设计</b> .....	( 100 )
第一节 汇编语言.....	( 100 )
第二节 汇编语言程序设计.....	( 105 )
习题三.....	( 117 )
<b>第四章 Z-80 CPU的时序</b> .....	( 119 )
第一节 概 述.....	( 119 )
第二节 Z-80 CPU的时序.....	( 120 )
习题四.....	( 129 )
<b>第五章 半导体存储器</b> .....	( 131 )
第一节 半导体存储器的分类.....	( 131 )
第二节 读写存储器RAM.....	( 133 )
第三节 只读存储器ROM.....	( 139 )
第四节 存储器连接.....	( 141 )
习题五.....	( 147 )
<b>第六章 输入、输出方式及中断</b> .....	( 148 )
第一节 输入/输出的工作方式.....	( 148 )
第二节 中断的概念.....	( 151 )
第三节 Z-80 CPU的中断系统.....	( 154 )
习题六.....	( 161 )
<b>第七章 微型计算机接口及其应用</b> .....	( 163 )
第一节 概 述.....	( 163 )
第二节 总线锁存器、驱动器.....	( 164 )
第三节 Z-80 CTC.....	( 168 )

第四节	Z-80 PIO.....	( 182 )
第五节	数/模和模/数转换.....	( 197 )
第六节	键盘接口.....	( 221 )
第七节	显示器接口.....	( 229 )
习题七	.....	( 234 )
<b>第八章</b>	<b>微机的应用</b> .....	<b>( 237 )</b>
第一节	概 述.....	( 237 )
第二节	单板机及其应用.....	( 243 )
第三节	单片机及其应用.....	( 263 )
第四节	微机系统在管理中的应用.....	( 272 )
第五节	计算机在教育中的应用.....	( 301 )
<b>附录</b>	<b>HGAL写作语言介绍</b> .....	<b>( 325 )</b>

# 第一章 计算机基础

## 第一节 概 述

电子计算机的发明是二十世纪人类最伟大的科学成就之一。近几年来，随着微型计算机的迅猛发展，使计算机从实验室走入社会，成为新技术革命的一支主力，也是推动社会向现代化迈进的活跃因素。

现代计算机是一种按程序自动地进行信息处理的通用电子工具。它的处理对象是信息，处理结果也是信息。这种被处理的信息形式，可以是数字、符号，也可以是声音、图形及图象或其它物理量。

在本章中，我们将扼要介绍计算机的分类、发展和应用领域，计算机中的数的表示方法，计算机硬件电路的基本单元——数字逻辑电路，重点介绍微型计算机系统的结构和工作过程，以期对微型计算机的全貌有一个概括的了解。

### 一、电子计算机的分类

一般来说，电子计算机可分两大类：一类是电子模拟计算机，主要由模拟电路组成，对模拟信息进行加工处理；另一类是电子数字计算机，主要由脉冲数字电路组成，对数字量信息进行加工处理。电子模拟计算机由于精度和解题能力有限，故应用较少。平常习惯所称的电子计算机是指目前广泛应用的电子数字计算机，简称电子计算机，甚至更省略地叫计算机。

计算机种类很多，但至今还没有统一的标准对它进行分类，大家公认的有下面几种情况。

按使用分，有通用机和专用机。由于应用广泛，专用机又有数据处理机、科学计算计算机和工业控制计算机等之分。

按其规模及功能分，有巨型机、中型机、小型机及目前正冲击着世界各种工业产品结构的微型计算机。

微型计算机又可分为多种类型：按组成微型机的元件数分，有单片机、双片机、通用多片微型机和位片式微型机以及单板机和多板机；按集成电路制造工艺，分有PMOS、NMOS、HMOS、CMOS、双极型等；按一次并行处理数据的位数（字长）分，有1位、4位、8位、16位和32位机等。

### 二、计算机的发展

今天的计算机，不论是微型机还是巨型机，它们都具有同一个“祖先”，这就是1946年诞生的第一台计算机“埃尼阿克”（ENIAC）。ENIAC用了18000只电子管，机房占地面积140平方米，机器重30吨，功耗100千瓦，价值40万美元。其内存容量17K位，加法速度5000次/秒，乘法速度380次/秒。从现在的眼光看，它的水平不高，又笨又大，但在当时解决了大问题。当时美军用它计算炮弹从发射到进入轨道40个点的位置，只用了3秒钟，而人工计算需7小时，两者相比，效率提高8400倍，显示了计算机的威力。

自第一代计算机问世以来，在40多年的时间内，计算机得到了迅速的发展。如果按所用

电子器件来划分，计算机经历了从电子管、晶体管、小规模集成电路到大规模集成电路四代更新，目前正在向第五代计算机进军。

四十年代中期到五十年代末的计算机都是采用电子管组成的，称为第一代计算机，即电子管时代的计算机。如IBM公司的IBM 650和704。第一代计算机体积笨重、功耗大、运算速度低、可靠性差，并且维护使用困难。但尽管这一代是原始的，它却奠定了计算机发展的技术基础，如数字编码、自动运算方法和程序设计等。

晶体管的发明使计算技术产生了革命性的变化，计算机逐步由电子管过渡到晶体管。1959年到1964年形成了计算机的第二代，即晶体管计算机。像IBM公司的IBM7090和Burroughs公司的B5500都是由晶体管组装起来的。第二代计算机在硬件上引进了通道技术和中断系统；软件上已开始使用高级程序设计语言和操作系统；应用方面以数据处理为主，开始用于过程控制。第二代计算机比第一代计算机速度提高近百倍，体积仅是第一代的几十分之一，结构上向通用型方向发展。特别是由于使用了晶体管，给维护使用带来了极大的方便。

六十年代中期，半导体工艺已经发展到能在一个芯片上制成一个复合的电子器件，这就是所谓的集成电路（IC）。用数字集成电路制成的计算机称为第三代计算机。例如，IBM 60和B6700都属第三代计算机。这一时期的计算机软件有了更进一步的发展，有了标准的程序设计语言，操作系统也更加完善和普及，实时系统和计算机通信网络都有了相应的发展，出现了人机会话式的程序设计语言。

1970年以后，大规模集成电路（LSI）发展很快，并开始成为计算机的主要逻辑部件，从而使计算机进入了第四代，即大规模集成电路时代，并且出现了别具一格的微处理器和微型计算机。这一代计算机体积进一步缩小，可靠性进一步提高，软件和硬件有更多的结合，在应用方面已进入以计算机网络为特征的时代。

### 三、微处理器和微型计算机的发展概况

微处理器属于第四代计算机，它是大规模和超大规模集成电路的产物。自从1971年美国Intel公司首先研制出4位微处理器4004和以它为核心组成的微型机MCS-4以来，迄今不过十多年的历史，但其发展却异常迅速，已经历了四代更新，目前正处在第五代发展阶段。

第一代（1971年~1972年） 1971年的4004和MCS-4是在台式计算器基础上研制而成的。4004由2000个晶体管组成，虽然采用了不少小型计算机的结构思想，但它的功能较弱，灵活性较差，因而基本上属于一种可程序的高级台式计算器。1972年Intel公司又推出了8位微处理器8008和MCS-8，它比4004具有更强的计算能力和灵活性，更适合于控制应用和数据处理。第一代产品的特征是：采用PMOS工艺；集成度较低，约2000~2500晶体管/片；字长4~8位，并行处理；指令周期10 $\mu$ s~20 $\mu$ s；6~24条引脚；系统结构尚未超出台式计算器范围；性能较低；构成微型机最小系统需用50~60个电路片。

第二代（1973年~1975年） 1973年末Intel公司推出了8080和MCS-80，速度比8008提高10倍，具有8级中断能力，完全摆脱了台式计算器的范畴，而具有小型计算机的系统结构。典型产品有8080A，Motorola公司的M6800，Rockwell公司的PPS-8，仙童公司的F8，Signetics公司的2650等。第二代产品的特征：采用NMOS为主的工艺；集成度提高到5000

晶体管/片；字长8~12位，并行处理；指令周期2 $\mu$ s；40条引脚；具有小型机结构形式，如变址、多级中断、堆栈技术等；性能有较大的提高；构成微型机最小系统只需15个电路片。

第三代(1976年~1977年) 这是在第二代产品的基础上研制出来的提高型8位机，典型的产品有Intel公司的8085，Zilog公司的Z-80，Motorola公司的6802等。它们的集成度在9000晶体管/片以上，性能有更大提高。在此期间还出现了单片微型计算机及早期的16位微处理器。

第四代(1978年~1980年) 从这一代起，微型机便进入超大规模集成电路(VLSI)时代，出现了高速高性能的16位微处理器，典型产品有Intel公司1978年宣布的8086，Zilog公司1979年宣布的Z8000和Motorola公司1979年年底宣布的MC68000。它们的综合性能超过8位机5~10倍，指标已超过低档的小型机PDP11/34，集成度大大提高了，在每边为1/4英寸的小芯片上集成了29000~68000个晶体管。它们都采用HMOS工艺，时钟频率达5~8MHz，指令周期为0.4 $\mu$ s~0.75 $\mu$ s，引脚数达64条(68000)。这些高性能的16位微处理器的研制成功，标志着微处理器进入了新一代，它们的价格比小型机低1~2个数量级，而性能已达到中高档小型机的水平，它们已向小型机发起了挑战。在此期间还出现了一种带16位内部结构的8位微处理器，它们可以进行16位操作，但外部只有8位数据线，典型产品如Motorola公司在1979年宣布的8位机6809及Intel公司宣布的8088，它们又被称为准16位微处理器。

第五代(1981年之后) 1981年Intel公司研制成功第一台32位微处理器样品iAPX432，集成度达100000晶体管/片，32位乘法时间只需5 $\mu$ s，而8086则要2100 $\mu$ s。该机性能已可与大型机相比，故有“微-大型机”之称。由于半导体存储器存储容量的增加，高级语言将被固化，不久将会出现面向语言的微型计算机。计算机正朝着巨型、微型、网络、智能方向发展。

#### 四、微型计算机的特点

电子计算机是一种运算速度快、计算精度高，同时具有记忆能力和逻辑判别能力的高度自动化的电子设备。如果说望远镜和显微镜的出现补偿了人们眼力的不足，各种工具、机床扩大了人手的功能，交通工具补偿了人腿的功能，那么电子计算机的出现扩大了人们的思维能力。由于微型计算机采用了大规模集成电路(LSI)和超大规模集成电路(VLSI)，除了具备计算机的基本功能外，还具有以下特点。

1. 价格便宜。由于国外制造商不断增多，他们之间开展销售竞争，又由于LSI电路的工艺技术不断提高以及LSI电路的大批量生产，使微机价格不断下降，平均每年降低20%~30%。一片LSI电路的售价只有几美元到几十美元，如8080仅几美元，8086也只有几十美元，不仅企业用得起，家庭也用得起。目前，只需化几十到几百美元就能组装一台微型计算机。

2. 由于微型机采用LSI和VLSI电路，它的体积小，重量轻。芯片尺寸最大不过几百平方毫米，芯片重量只有十几克，一台功能较强的微型计算机完全可以组装在一块印刷电路板上，显然其重量和体积比具有相同功能的小型机要轻巧得多。



3.简单、灵活、可靠。微型机的结构是积木式的，可根据不同需要组成各种规模的系统，且能灵活方便地扩充或缩小。由于微型机采用LSI和VLSI电路，器件集成度不断提高，使印刷板上焊点数和接插件的数目减少，又因MOS电路的功耗小，因而使微型机的可靠性大大提高。

4.容易掌握。微型机采用了大规模集成电路甚至超大规模集成电路，打破了过去小型机元件、单元、系统的界限，将许多功能尽量集中在最少数量的芯片上，这就给微型计算机系统的设计、应用带来很大的方便，缩短了研制周期，有利于普及应用。

5.适应性强。微型机具有很强的适应性，能满足各种应用场合。它可以象一般电子计算机那样，做成通用微型计算机系统，也可以针对某种需要，做成专用微型计算机系统；它可以作为一般电子计算机的CPU，也可以作为它们的专用处理机甚至外设控制器；它可以作为工业控制机，也可作为家庭生活设施的控制器…。

微型机适应性强的原因一方面是他的结构简单灵活，另一方面是它的芯片种类繁多，功能较全，一般均能满足需要。

## 五、微型计算机的应用领域

微型计算机由于具有体积小、重量轻、价格低、功耗小、可靠性高、速度快、功能强，以及通用性和灵活性等特点，故几年来，它的应用范围日益扩大，几乎渗透到各个领域。下面列举一些它的主要应用领域。

- 1.家用电器：如电视机、空调设备、自动洗衣机、录音机、冰箱、数字电子钟等。
- 2.民生用：如汽车、玩具、电子游戏机、缝纫机、照相机、自动售票机等。
- 3.事务、商业：如事务计算（事务处理机、数据收集机和传票处理机等）、复印机、商品库存管理、现金出纳机、销售点终端、金融终端（智能CRT显示）等。
- 4.交通运输：如交通信号控制、运行控制、船用卫星导航、航空自动导航等。
- 5.通信：如有线通信、数据通信和无线电通信等。
- 6.工业：如生产设备（数控、顺控、机器人、焊接机、搬运机械等）、过程控制（如配料系统，炉子温度控制等）、自动仓库控制、数据记录器、计算机辅助设计、生产管理、冶金机械、纺织机械、产品检查、试验装置（如探伤机、各种自动检测器、振动试验机、发动机性能试验系统）等。
- 7.计量、监控设备：如分析仪、测压力装置、气象数据记录仪、通讯设备监控装置等。
- 8.医疗器械：如睡眠监控系统、x射线装置、自动肺功能检查系统和诊断设备等。
- 9.信息处理装置：如开发系统、智能终端和科学计算等。
10. 其它方面：如教育系统、防火监控系统、大楼管理系统等。

不同机种的微型机其应用领域是有所侧重的，如4位机主要应用在台式机、缝纫机、复印机、自动售货机及家用电器等方面；8位机主要用作计算机终端、自动机、控制装置等；16位机主要用于小型计算机、大型计算机的终端；位片机主要用于高速数据传输、高速微型机控制系统等

由上可见，微型机的应用真是“无孔不入”。它不仅是促进计算机进入社会化的重要阶梯和手段，而且是跨入信息社会不可缺少的工具。

## 六、计算机系统的组成

计算机是一种具有“智能”的计算工具，但这种“智能”是科学工作者赋予的。也就是说，计算机只是模拟了人脑的思维过程，本身并不能主动思维，它的一切活动都是由人事先安排的。例如，在科学和工程中提出一些实际问题需要计算机计算时，一般要经历以下几个步骤：

1. 建立数学模型。由于实际问题不一定都是以数学形式给出的，所以人们必须把它用一个数学公式来描述，这个工作称为建立数学模型。

2. 确定计算方法。为了能在计算机上计算，需要选择某种合适的计算方法，并且能保证精度要求。

3. 编排计算步骤。此即按照数学模型和计算方法进行程序设计，使计算步骤具体化。程序中的每一步骤称为一条指令。指令规定了一种基本的操作（如加、减、乘、除等）以及操作时需要的有关数据。计算机只能忠实地按照程序中每条指令的规定，来完成计算任务或其它各种操作。

4. 把编写好的程序通过输入设备输入到计算机中的一个具有“记忆”功能的装置中存储起来。程序中的每条指令通常是按一定顺序一条条存放的，计算机工作时按顺序依次取出，逐条执行。

5. 在计算机中完成计算任务。在计算机中有一个运算部件，它能完成基本的算术逻辑运算。另外，计算机中还有一个担任指挥的机构，它能控制对存储部件逐条取出指令，并控制计算机中的其它各个部件协调地执行指令所规定的操作，从而有条不紊地完成程序所要求的各种计算任务和处理工作。

6. 输出运算结果。

在上述过程中，前四步主要是由人直接处理的，后二步是由计算机处理的。由此可见，作为一个计算机系统，它应该包含两大部分：一部分是具有输入、存储、计算、控制和输出功能的计算机物理实体，称之为计算机硬件。另一部分就是程序。我们看到，计算机进行运算，是通过执行程序来完成的。没有程序，计算机什么事情都干不了。为了运行、管理和维修计算机所编制的各种程序的总和称为软件。所以，一个完整的计算机系统应包括硬件系统和软件系统两部分。我们通常讲到“计算机”一词，都是指含有硬件和软件的计算机系统，这一点也是计算机与其它设备的一个重要区别。

### （一）硬件系统

计算机硬件系统主要由五个部件组成，如图1.1所示。

1. 存储器。存储器具有记忆功能，用来存储数据、指令、程序和运算的中间结果。存储器由许多存储单元组成，每一个存储单元可以存放一个信息代码。为了区分不同的存储单元，把全部存储单元按照一定的顺序编号，这个编号就称为存储单元的地址。当计算机要把一个信息代码存入某单元或从某单元取出时，首先要提供该单元的地址，计算机才能按地址找到该单元，然后进行存入或者取出的操作。

存储器的存储作用类似于录音机，它能把记忆的数字信息保存起来，并且在取出信息后原存信息不被破坏，也可以重新记录和保存新的信息，此时原存信息被抹去。

存储器的工作就是在运算之前接收由外界送来的程序和数据；在运算过程中，向控制器和运算器提供指令和数据信息；运算结束后，保存运算结果。

存储器有内存储器（简称内存）和外存储器（简称外存）之分。构成主机的存储器称为内存（又称主存）。内存可以直接与中央处理机交换信息。内存的容量较小（目前微机常用的为32K字或64K字），但存取速度较高。常用的内存有磁芯存储器和半导体存储器，微型机中多采用半导体存储器。位于主机之外的存储器称外存。外存容量大，但存取速度较慢。外存是内存的扩充，它可以帮助内存“记忆”更多的东西。常用的外存有磁带、磁盘、磁鼓等。

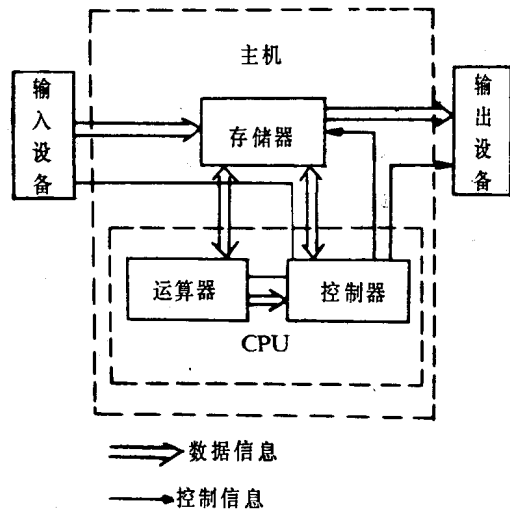


图1.1 计算机硬件系统

2. 运算器。运算器具有运算的功能，是直接进行运算和数据处理的部件。运算器不仅能实现加、减、乘、除等基本算术运算，还可以进行基本逻辑运算，实现逻辑判断和比较，以及数据的传送、移位等操作。运算器的运算能力并不高超，只能作最基本的简单运算，对于无论多么复杂的问题，都是由这些简单运算一步步组合起来实现的。

运算器在运算过程中，不断地从存储器取得数据，而运算的结果送回存储器保存。在得出结果的同时，运算器还能提供结果的特征状态，诸如结果是否为零，是正数还是负数，有没有产生进位…，为下一步操作提供逻辑判断的依据。

3. 控制器。控制器是整个机器的控制中心，使计算机具有自我管理的能力。存储器进行信息存储，运算器进行各种运算，信息的输入和输出都是在控制器的统一指挥下进行的。

控制器的指挥工作是通过程序进行的。程序中安排好了计算机工作的顺序，并对可能遇到的各种情况作了相应处理的安排。控制器按程序规定好的次序从存储器中取出指令，并对指令进行分析和解释，按时间顺序发出各种命令信号，控制各部件完成指令所规定的操作。

控制器在工作过程中，还要接受执行部件的反馈信息，例如运算器送来的运算结果、状态特征等。这些反馈信息为控制器判断下一步如何工作提供了依据。

4. 输入设备。输入设备的作用是把程序和数据信息转换成计算机能识别的电信号，并把它们顺序地存放到存储器中。常用的输入设备有键盘、纸带输入机等。

5. 输出设备。输出设备的功能是把计算机的计算结果或中间结果以容易阅读和使用的形式输送给用户，例如打印在纸上或显示在屏幕上。常用的输出设备有行式打印机、CRT显示器、X-Y绘图仪等。

输入设备和输出设备实现了人-机之间的信息交往，也是计算机不可缺少的组成部分。通常输入/输出设备简称I/O设备。

存储器、运算器和控制器组成计算机的主机，而运算器和控制器合称为中央处理器，简称CPU（Central Processing Unit）。I/O设备和外存储器由于被设置在主机外部，所以称为外部设备。外部设备与主机之间的信息交换工作，也是在控制器的统一指挥下进行的。

## (二) 软件系统

计算机的硬件系统是一个实际的物理装置，其任务是为执行程序建立物质基础。没有装入程序的物理机器称为“硬核”（或称裸机）。硬核是无法实现计算功能的。因此，程序系统是计算机不可缺少的组成部分。

计算机中的各种程序以及用程序编写的各种文件，统称为软件。软件是程序的集合。根据软件功能的不同，可分为系统软件和应用软件两大类。

为了使用和管理计算机，由设计者提供的各种软件统称为系统软件。例如操作系统，各种高级语言处理程序，编译系统和其它服务程序，数据库管理程序等软件，是计算机配置的基本系统软件。这些软件不是用来解决某些具体应用问题的，它利用计算机自身的功能，合理地组织解题流程，管理计算机软硬件各种资源，提供人机之间的接口，从而简化或代替各环节中人所承担的工作。还可以为用户使用计算机提供方便，扩大机器功能，提高工作效率。通常系统软件是作为机器产品与硬件同时提供给用户的。

用户利用计算机及其提供的系统软件，编制出的解决各种实际应用问题的程序，就称为应用软件。对用户来说，一是要有一个能够完成具体要求的机器系统，二是要有一个解决具体问题的应用程序。在有了机器系统之后，主要的问题是如何开发应用程序。目前，应用软

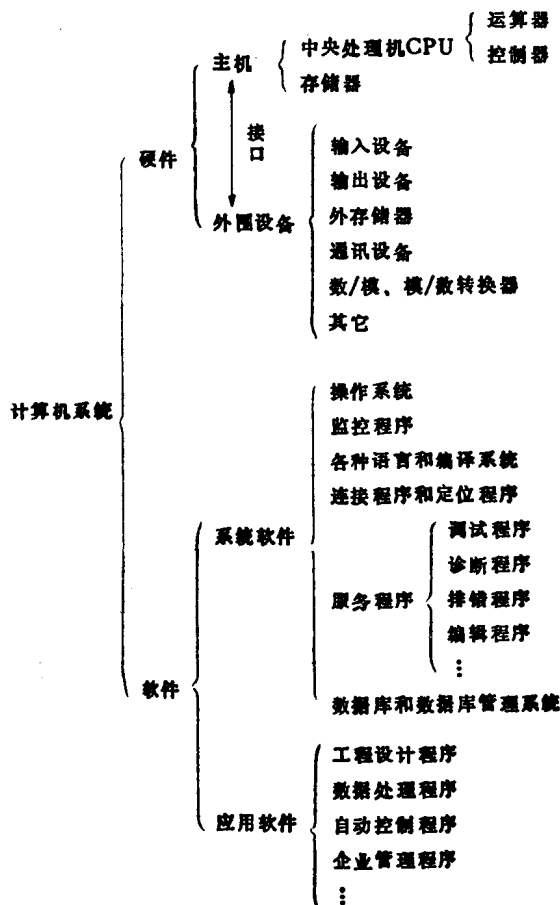


图1.2 计算机系统组成示意图

件已逐步标准化、模块化、商品化。

总之，计算机的硬件建立了计算机应用的物质基础，而各种软件则扩大了计算机的功能和应用范围。硬件和软件的结合才是一个完整的计算机系统，如图1.2所示。硬件与软件的关系如图1.3所示。

对于一个具体的计算机系统，它所包括的硬件和软件数量各不相同，究竟多少，要根据计算机的规模、应用场合及对计算机性能的综合要求来确定。早期计算机硬设备规模大、功能强，后来由于软件技术的发展，有一些硬件功能可由软件实现，这叫“硬件软化”。当大规模集成电路发展了，硬件成本迅速下降，特别是微程序技术的发展，一些软件功能又用硬件实现，即“软件硬化”。因此对计算机系统来说，软件和硬件组成了统一的计算机整体。

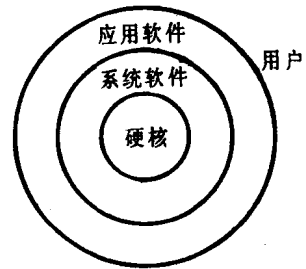


图1.3 软件与硬件的关系

## 第二节 计算机中数的表示及运算方法

计算机中的数是以器件的物理状态来表示的。为了使表示方便可靠，计算机中主要采用了二进制数字系统。也就是说，计算机只认得二进制数。所以，机器处理的所有的数，都要用二进制数来表示，所有的字母、符号也都要用二进制编码来表示。

### 一、数的表示及数制转换

我们日常生活中最常用的数是十进制数，但在计算机中使用的是二进制，为了书写和口读方便，还采用了八进制、十六进制等，下面就介绍各种数制的表示法及相互之间的转换方法。

#### (一) 各种进位计数制及其表示法

进位计数制就是按进位方法进行计数。日常生活中人们已习惯于“逢十进一”的十进制计数，它的特点是：

1. 用十个符号表示数。常用0、1、2、3、4、5、6、7、8、9十个阿拉伯符号，这些符号叫做数码。

2. 每个单独的数码表示0~9中的一个数值。但是在一个数中，每个数码表示的数值不仅取决于数码本身，还取决于它所处的位置。如4046中左起第一个4表示四千，第二个4表示四十，读作四千零四十六，可写成下列多项式的形式：

$$4 \times 10^3 + 0 \times 10^2 + 4 \times 10^1 + 6 \times 10^0$$

上式中的 $10^0$ 、 $10^1$ 、 $10^2$ 、 $10^3$ 分别是个位、十位、百位、千位。这“个、十、百、千、万...”在数学上叫做“权”。每一位上的数码与该位“权”的乘积表示该位数值的大小，如左边的4代表4000，是这一位数码4与这位的“权”(1000)相乘的结果。

3. 十进制有0到9共十个数码，数码的个数称为基数。十进制的基数是10。当计数时每一位计到10往上进一位，也就是“逢十进一”。所以基数就是两相邻数码中高位的权与低位的权之比。

4. 任一十进制数N可表示为：

$$N = \pm [ a_{n-1} \times 10^{n-1} + a_{n-2} \times 10^{n-2} + \dots + a_0 \times 10^0 + a_{-1} \times 10^{-1} ]$$

$$+ \dots a_{-m} \times 10^{-m} ] = \pm \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 10^i \quad (1.1)$$

不难看出式1.1是一个多项式。式中的 $m$ 、 $n$ 是幂指数，均为正整数； $a_i$ 称为系数，可以是0到9十个数码符号中的任一个，由具体的数决定；10是基数。

对公式1.1推广之，对于任意进位计数制，若基数用 $R$ 表示，则任意数 $N$ 可表示为：

$$N = \pm \sum_{i=-m}^{n-1} a_i R^i \quad (1.2)$$

式中 $m$ 、 $n$ 的意义与式1.1相同， $a_i$ 则为0、1、 $\dots$ 、 $(R-1)$ 中的任一个， $R$ 是基数。

对于二进制，数 $N$ 可表示为：

$$N = \pm \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 2^i \quad (1.3)$$

基数是2，而数码符号只能有两个，即0和1，进位为“逢二进一”。

对于八进制，数 $N$ 可表示为：

$$N = \pm \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 8^i \quad (1.4)$$

基数是8，可用8个数码符号：0、1、2、3、4、5、6、7，“逢八进一”。

对于十六进制数，数 $N$ 可表示为：

$$N = \pm \sum_{i=-m}^{n-1} a_i 16^i \quad (1.5)$$

基数为16，可用16个数码符号：0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F，“逢十六进一”。

上述几种计数制有它们的共同之处：

1. 每种计数制都有一个固定的基数 $R$ ，其每位系数可能取 $R$ 个不同的值。
2. 按“逢 $R$ 进一”方式计数。在混合小数（即带有整数和小数的数）中，小数点向右移一位，则相当于原数乘 $R$ ，向左移一位相当于除以 $R$ 。

## （二）二进制计数制的特点及运算规则

1. 二进制数比起十进制数来，位数需要多得多，写起来长，读起来不方便，这对于习惯于十进制的人们来说，是很不方便的。那么计算机为什么要采用二进制呢？主要原因是：

(1) 二进制只有0、1两个状态，易于实现。例如电位的高、低，脉冲的有、无，指示灯的亮、暗，纸带上有孔、无孔，磁芯磁化方向的正反等等，都可以表示1和0。这种对立的两个状态区别鲜明，容易识别。而十进制有十个状态，要用某种器件表示十种状态显然是难以实现的。

(2) 二进制只有两种状态，可以用逻辑代数这一数学工具对计算机逻辑电路进行分析和

综合。

(3)二进制的四则运算比较简单。

## 2.二进制运算规则。

(1)二进制加法规则为：

$$0 + 0 = 0, 0 + 1 = 1, 1 + 0 = 1, 1 + 1 = 10, 1 + 1 + 1 = 11$$

例如数1011与数1101相加，加法过程如下（括号内为十进制数）：

$$\begin{array}{r} 1011(11) \text{——被加数} \\ 1101(13) \text{——加数} \\ \swarrow \searrow \swarrow \searrow \\ + 11110 \text{——进位} \\ \hline 11000(24) \text{——和} \end{array}$$

可见，两个二进制数相加，每一位应考虑有三个数：相加的两个数以及低位的进位，而相加的结果除得到本位的和之外，还有向高位的进位。

(2)二进制减法规则：

$$0 - 0 = 0, 1 - 1 = 0, 1 - 0 = 1, 0 - 1 = 1 \text{ (有借位)}$$

当0-1不够减时，向高位借一位（相当于借一个2），结果是2-1=1，所以作减法时，每位也要考虑三个数参与运算，即被减数、减数和借位。

例如，数1101减去0110的运算过程如下：

$$\begin{array}{r} 1100 \text{——借位} \\ \swarrow \searrow \\ 1101(13) \text{——被减数} \\ - 0110(6) \text{——减数} \\ \hline 0111(7) \text{——差} \end{array}$$

(3)二进制乘法规则：

$$0 \times 0 = 0, 0 \times 1 = 0, 1 \times 0 = 0, 1 \times 1 = 1$$

与十进制乘法口诀表相比，显得非常简单，只有当两个1相乘时，积才为1，否则积为0。

例如，1011×1101的运算过程如下：

$$\begin{array}{r} 1011(11) \text{——被乘数} \\ \times 1101(13) \text{——乘数} \\ \hline 1011 \text{——第一次部分积} \\ 0000 \\ \hline 01011 \text{——第二次部分积} \\ 1011 \\ \hline 110111 \text{——第三次部分积} \\ 1011 \\ \hline 10001111(143) \text{——乘积} \end{array}$$

(4) 二进制除法规则:

$$0 + 1 = 0, 1 + 1 = 1$$

例如,  $1111 + 101$  的运算如下 (用类似于十进制除法的方式运算):

$$\begin{array}{r} \phantom{101}\overline{)1111} \\ \underline{101} \phantom{000} \\ 101 \phantom{00} \\ \underline{101} \phantom{0} \\ 0 \end{array}$$

关于计算机中乘、除法的运算方法, 在后面的运算方法中再作介绍。

### (三) 各种计数制之间的转换

当两个有理数相等时, 其整数部分和小数部分一定分别相等, 这是不同计数制之间转换的依据。

1. 十进制数与其它进制数之间的转换。先讨论十进制数转换到二进制数, 再推广到其它任意进制数 (基数为  $R$ )。

(1) 十进制整数转换成二进制整数, 采用连续除 2 记录余数的方法。设  $N$  为要转换的十进制整数, 当它已经转换成  $n$  位二进制数时, 可写出下列等式:

$$N = a_{n-1} \times 2^{n-1} + a_{n-2} \times 2^{n-2} + \dots + a_1 \times 2^1 + a_0 \times 2^0$$

把等号两边都除以 2, 得到商和余数:

$$\frac{N}{2} = \underbrace{(a_{n-1} \times 2^{n-2} + a_{n-2} \times 2^{n-3} + \dots + a_1 \times 2^0)}_{\text{商 } Q_1} + \text{余数 } (a_0)$$

上式中括弧内是商  $Q_1$ , 余数正是我们要求的二进制数的最低位  $a_0$ , 然后把商  $Q_1$  除以 2, 得到:

$$\frac{Q_1}{2} = \underbrace{(a_{n-1} \times 2^{n-3} + a_{n-2} \times 2^{n-4} + \dots + a_2 \times 2^0)}_{\text{商 } Q_2} + \text{余数 } (a_1)$$

这次得到的余数是二进制数的次低位  $a_1$ 。按此步骤, 一直进行到  $Q_n = 0$  为止。

**例 1.1** 把十进制的 59 转换成二进制数。

**解:** 为了清楚起见, 把计算步骤列成下述图形表示:

$$\begin{array}{cccccccc} & & & & & & \text{商} & \\ & & & & & & & \\ Q_5 & Q_4 & Q_3 & Q_2 & Q_1 & N & & \\ 0 & \leftarrow 1 & \leftarrow 3 & \leftarrow 7 & \leftarrow 14 & \leftarrow 29 & \leftarrow 59 & \\ & + 2 \downarrow & + 2 \downarrow & + 2 \downarrow & + 2 \downarrow & + 2 \downarrow & + 2 \downarrow & \text{余数} \\ & & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ & & (a_5) & (a_4) & (a_3) & (a_2) & (a_1) & (a_0) \end{array}$$

把各余数排成  $a_5 a_4 a_3 a_2 a_1 a_0 = 111011$  即为 59 的二进制数。

综上所述, 十进制整数转换成二进制整数的过程可归纳如下: 将已知的十进制数反复的



除以2：若余数为1，则相应位为1；余数为0，相应位为0，从最低位向最高位逐次进行，一直到出现商等于0为止。此时所得的 $a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0$ 即为所求的二进制数。

推广之，若要将十进制整数转换成任意进制整数（基数为R），只要将十进制整数反复的除以基数R，从最低位向最高位逐次得到余数 $a_{n-1}\cdots a_0$ ，即为所求R进制数。

例如，将十进制数145转换成八进制数：

$$\begin{array}{cccc}
 & \text{商} & & \\
 & Q_3 & Q_2 & Q_1 & N \\
 0 & \leftarrow 2 & \leftarrow 18 & \leftarrow 145 \\
 & + 8 & + 8 & + 8 \\
 & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 & 2 & 2 & 1
 \end{array}$$

$\therefore a_2a_1a_0 = 221$ 即为145的八进制数。

(2)十进制小数转换成二进制小数，采用连续乘2而记录其乘积中整数的方法。设N是个十进制小数，它相应的二进制数共有m位，则

$$N = a_{-1} \times 2^{-1} + a_{-2} \times 2^{-2} + \cdots + a_{-m} \times 2^{-m}$$

把等号两边都乘以2，得到整数部分 $a_{-1}$ 和小数部分 $F_1$ ，即

$$\begin{aligned}
 2N &= a_{-1} + (a_{-2} \times 2^{-1} + \cdots + a_{-m} \times 2^{-m+2}) \\
 &= a_{-1} + F_1
 \end{aligned}$$

$a_{-1}$ 正是所要求的二进制的最高位，然后再把 $F_1$ 乘以2，得到：

$$\begin{aligned}
 2F_1 &= a_{-2} + (a_{-3} \times 2^{-1} + \cdots + a_{-m} \times 2^{-m+2}) \\
 &= a_{-2} + F_2
 \end{aligned}$$

$a_{-2}$ 正是所要求的二进制的次高位。依次类推，就逐次得到 $a_{-1}a_{-2}a_{-3}\cdots a_{-m}$ 的值，这就是所求的二进制数。

例1.2 把十进制小数0.625转换成二进制小数。

解：

$$\begin{array}{ccccccc}
 & & \text{小数部分} & & & & \\
 0.625 & \xrightarrow{\times 2} & 0.25 & \xrightarrow{\times 2} & 0.5 & \xrightarrow{\times 2} & 0 \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow & & \\
 \text{整数 } 1 & & 0 & & 1 & & 
 \end{array}$$

所以0.625的二进制小数为.101。

这种方法简称为“乘2取整”法。

计算步骤可简化成下列图形：

$$\begin{array}{ccc}
 & \times 2 & \\
 N & \longrightarrow & \text{小数部分} \\
 \downarrow & & \\
 \text{整数} & & 
 \end{array}$$

综上所述，十进制纯小数转换成二进制小数，可将其反复乘2，每乘一次2后，若乘积的整数部分为1，则相应位的系数为1；若积的整数部分为0，则相应位系数也为0。从最高位向最低位逐次进行，最后一次乘积的整数部分即为 $a_{-m}$ ，从而得到二进制小数 $0.a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m}$ 。

值得注意的是，在十进制小数转换成二进制小数时，整个计算过程可能无限制地进行下去（即积的小数部分始终不为0），此时可根据需要取若干位作为近似值，必要时对舍去部