

计算机

组成原理

学习指导书

■ 李应友 何晓新 编

中央广播电视大学出版社

301

17/1

T1001
L/Y/Y/1

计算机组成原理学习指导书

李应友 何晓新 编

中央广播电视大学出版社

JS320/16

计算机组成原理学习指导书

李应友 何晓新 编

中央广播电视大学出版社出版

新华书店北京发行所发行

西安印刷厂印装

开本787×1092 1/16 印张 7.75 千字190

1988年8月第1版 1991年4月第2次印刷

印数 11801 —15500

定价 2.65 元

ISBN 7-304-00335-0/TP·22

前 言

本书是为中央广播电视大学计算机应用专业教材《计算机组成原理》(以下简称“教材”)编写的学习指导书。

本书根据“教材”及教学录象片,主要讲述了运算器、指令系统、中央处理机、主存贮器、外部设备和输入输出控制等章节中应掌握的基本内容。由于“教材”中有些内容很精练,所以本书做了适当的补充,以便读者自学,此外,在各章后面都附有习题与思考题,以巩固所学知识。

本书第一章~第五章由李应友编写,第六章与第七章由何晓新编写。由于编者水平有限,书中定有不少缺点和错误,恳切希望广大读者批评指正。

编 者

一九八八年八月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 计算机的基本功能部件	(1)
1.2 计算机的基本操作	(2)
1.3 总线结构	(3)
1.4 计算机系统的组成	(5)
第二章 运算器	(8)
2.1 数字和字符的表示方法	(8)
2.2 算术逻辑部件(ALU)	(17)
2.3 定点加减运算	(22)
2.4 乘法运算	(26)
第三章 指令系统	(31)
3.1 指令格式	(31)
3.2 寻址方式	(33)
3.3 指令类型	(37)
3.4 Z-80指令系统	(38)
第四章 中央处理机	(50)
4.1 中央处理机的组成	(50)
4.2 中央处理机的基本操作	(52)
4.3 控制方式与时序	(55)
4.4 组合逻辑控制器	(57)
4.5 微程序控制器	(58)
4.6 Z-80中央处理机	(63)
第五章 主存贮器	(69)
5.1 基本概念	(69)
5.2 半导体随机存贮器(RAM)	(71)
5.3 半导体只读存贮器	(76)
5.4 微处理机与存贮器的连接	(78)
5.5 多模块存贮器与交叉存取	(81)
5.6 高速缓冲存贮器	(82)
第六章 外部设备	(84)
6.1 磁盘系统	(84)
6.2 磁带系统	(87)
6.3 CRT终端	(88)
6.4 打印机	(92)
第七章 输入输出控制	(94)
7.1 主机与外部设备的连接	(94)
7.2 主机与外设之间的数据传送	(96)

7.3 同步	(97)
7.4 中断处理	(101)
7.5 Z-80中断系统	(107)
7.6 直接访问存储器 (DMA)	(110)
7.7 I/O通道	(112)
7.8 I/O接口	(115)

第一章 绪 论

电子数字计算机是一种能够自动地、高速地解决数学问题和逻辑问题的现代化电子设备。(本书所讨论的内容只限于电子数字计算机,以下简称计算机。)为使读者对计算机的结构及其工作过程有一个概括的了解,这一章将介绍计算机的主要组成部分、基本操作、工作原理以及计算机系统的组成。

1.1 计算机的基本功能部件

1.1.1 组成

计算机是一种能自动地进行高速运算的计算工具,它每秒钟能进行成千上万次乃至几百万次以上各种不同的运算。那么它是由几个基本部分组成的呢?为了便于理解,我们用算盘的计算过程来作一比喻。用算盘算题,算盘本身就相当于一个“运算器”;人用头脑和手来控制算盘,这就相当于“控制器”;需要计算的内容和结果,我们往往记在一张纸上,这张纸就相当于“存贮器”。计算机就是由运算器、控制器和存贮器这三个主要部分组成的。

人运用算盘,是用手来拨动算盘珠子;而计算机则是用电子电路作成“电子算盘珠”(触发器)。这种算盘珠子每秒钟可以“拨动”几百万次、几千万次乃至数亿次,这就是计算机能够高速运算的秘密。

计算机中的运算器、控制器和存贮器,是电子计算机的主要组成部分,我们称它为主机(Main frame)。其中运算器和控制器又称为中央处理机CPU(Central Processing Unit)。

计算机除主机外,还必须有给主机送程序、数据的输入设备和把计算结果取出来的输出设备,以及沟通外部设备与主机之间传输二进制信息的渠道——总线。

由运算器、控制器、存贮器、输入/输出设备和总线就组成了一台完整的计算机,其组成原理如图1-1。

以上内容规纳如下:

- 运算器(算术逻辑部件) 快速进行各种基本运算,包括算术运算和逻辑运算。
- 存贮器 存贮大量的数据、程序。
- 控制器 计算机的指挥系统。统一指挥整个计算机的工作。
- 输入/输出设备 输入原始数据信息;输出运算结果。

通常我们把组成计算机的这些功能部件称为硬件。

1.1.2 各基本部件的主要功能

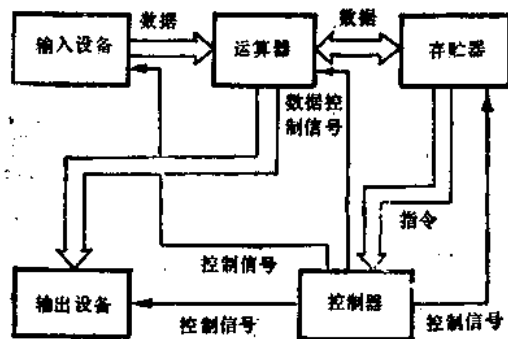


图1-1 计算机结构图

1. 运算器 (算术逻辑部件)

运算器是计算机的主要组成部分之一,它是在控制器的控制下直接完成各种算术运算、逻辑运算及其操作的部件。

在运算过程中,运算器不断地从存储器中取得数据,并且把所求得的结果送回存储器保存起来。

计算机的各种运算可以由相加及移位这两个基本操作来实现。为了进行计算,参加运算的数需要在运算器中暂时存放起来,称为寄存。每次运算所得到的中间结果也要暂时保留,使上次运算结果能直接为下次操作所利用。因此,运算器为了实现其主要功能还必须保证完成数码寄存、数码移位和数码相加等运算任务。它们是由相应的寄存器和加法器等部件来完成的。

2. 存储器

存储器分为两类。一类是主存储器,也称为内存;另一类是辅助存储器,也称为外存储器(如磁带、磁盘、磁鼓以及近代的光盘等),外存储器属于输入/输出设备。

存储器主要功能是存放二进制信息(包括数据、程序和结果),并且根据需要将二进制信息存进去(写入)和取出来(读出)。

为存放二进制信息,在存储器中必须具有存放二进制信息的单元。每个单元就好像旅馆中的一个房间。存储器内的单元,称为存储单元。每一个存储单元有一个编号,正如每个房间均编有房号一样,而存储单元的编号称为地址。二进制信息就存储在这种具有唯一地址的单元里。在进行运算前,根据事先编好的程序存入(写入)存储器。运算过程中存储器一方面不断地向运算器提供所需的数据,另一方面还能保存从运算器送来的计算结果,最终再从存储器中输出结果。

由此可见,存储器中存放的计算程序(一条条指令)决定了计算机的工作过程。计算机从存储器中不断地取出指令送往控制器,然后由控制器分析和解释指令的含义,并据此向运算器或其它部件发出相应的命令,指挥和控制各部件执行指令规定的操作。

3. 控制器

控制器是整个机器的指挥控制中心,其主要的功能是通过向机器的各个部分发出控制信号使整个机器自动地、协调地进行工作。控制器是根据由人事先编好的程序来进行工作的。计算机先做什么,后做什么,如何处理可能遇到的情况,都由程序来决定。人把事先考虑好的意图表达在程序中,而控制器则按程序来指挥机器工作。

4. 输入/输出设备

输入/输出设备的主要功能是:输入设备用来输入计算程序和原始数据,常用的输入设备如键盘;输出设备用来输出计算结果,常用的输出设备如 CRT 显示终端和打印机等。

1.2 计算机的基本操作

当用计算机解题或控制生产时,必须事先有一个明确的计算步骤或操作过程,而且要用一系列指令将它们表达出来。这一系列指令的有序集合,称为程序。程序通过输入设备送到主存储器中保存起来,因此现代计算机的主要特点是采用“内存程序控制”方式或“存储程序方式”。这种方式不仅使计算机实现了自动计算,而且提高了它的通用性(解决不同类型问

题的能力)及工作效率。

在计算机工作过程中,它的解题程序及有关数据(都已变为二进制代码)一般分别存放在存储器不同地方。处理器中的控制部分按照程序给出的顺序一步步地分析每一条指令,并命令计算机各个部件执行这些指令所规定的基本操作。

1.2.1 典型的基本操作

(1) 开始执行程序时,程序计数器(PC)存放着第一条指令的地址,即指示出当前将要执行的指令存放在主存储器的哪一个单元内。

(2) 上述指令地址(PC内容)送到MAR,并向主存储器发出“读指令”控制信号,由主存储器中读出该条指令送到MDR,再送到指令寄存器(IR)中。

(3) 指令寄存器(IR)分析指令的操作性质,并根据操作性质向主存储器、运算部件(ALU)等有关部件发出操作命令。

(4) 在需要由主存储器向ALU提供运算数据时,就需要把操作数地址送到MAR去,并发出一个“取数”控制信号。根据指令的地址部分,在主存储器内所对应的单元地址中取数。

(5) 主存储器中读出的操作数送到MDR后再送到ALU。此时,ALU对该数据进行指令规定的运算。

(6) 若操作结果要保存到主存储器中,就必须把结果送到MDR,把存放此结果的地址送至MAR,同时发出一个“写数”的控制信号。

(7) 此时,PC的内容加1。当一条指令执行完毕,接着就执行一条新指令,不断地循环上述(2)~(7)过程。每重复一次,就执行一条指令,直到程序执行完毕为止。

1.2.2 中断处理

若计算机在执行某程序过程中,发生紧急情况,则计算机就要暂时终止正在执行的程序,去处理紧急情况,等紧急情况处理一结束,再继续运行被终止的程序。这样的处理叫中断处理。

能够引起执行程序中断的原因有两类,一类是外围设备产生的,要求中央处理机给予服务,称为外中断;另一类是在中央处理机内由于某个处理过程发生问题(如程序有错)而产生的,这样的中断称为内中断(自陷)。内中断发生往往不是随机的,重复执行程序时会在程序的同一点出现中断。

中断后必须把处理器的状态保存在主存储器中,如PC内容、寄存器内容以及各种标志信号等。这一处理称为现场保护。一旦中断处理程序结束,即可恢复中断前的现场,从而继续执行被中断的程序。计算机处理中断是很方便的。

1.3 总线结构

本节将讨论计算机的五个基本功能部件是用什么方法连接在一起,从而构成一个完整系统的。这种连接方式统一称为总线(BUS)。

计算机硬件系统的各部件之间是通过一组导线连接起来的。这组导线在各部件之间进行信号传输(在各部件之间传输的信号包括数据与各种控制信号),我们称这一组供信号传输使用的导线为信号传输总线。在总线中某一根导线上传送什么信号,是在计算机硬件系统设

计时, 预先规定好的。计算机各部件通过总线连接成为一个有机的整体, 完成各种预先设置的功能。

总线可传输数据、地址和控制信号。因此, 总线包括数据总线、地址总线和控制总线。

中央处理机(CPU)、主存储器、外部设备这三个计算机必备的部件, 可按不同的总线连接方式进行信号传输。因此, 对于不同型号的计算机系统结构, 总线的连接方式并不一样,

有的是采用单总线结构方式, 有的是采用双总线结构方式。

1.3.1 面向CPU的双总线结构

双总线结构是用两组总线来组织系统的。第一组是在中央处理机和主存储器之间交换信息的通路; 第二组是在中央处理机和输入设备、输出设备、外存储器之间交换信息的通路。

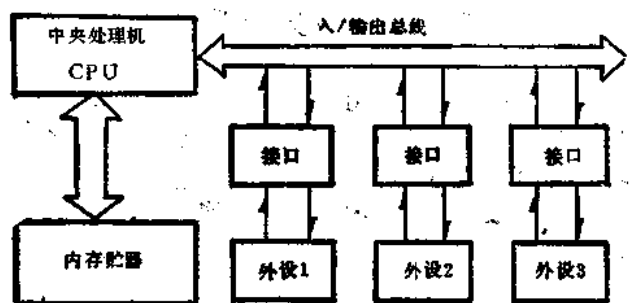


图1-2 面向CPU的双总线结构

信息的通路。由于它们必须经过中央处理机, 因此, 这样的系统组织可以认为是以CPU为中心的总线结构, 或者说是面向CPU的结构。如图1-2所示。这种系统组织为多数低档小型机所采用。

1.3.2 单总线结构

从提高系统结构灵活性出发, 某些小型计算机和大多数微型计算机采用了以单一总线来组织系统的单总线结构, 或者说是面向系统的结构, 如图1-3所示。各设备之间信息交换方式均相同。

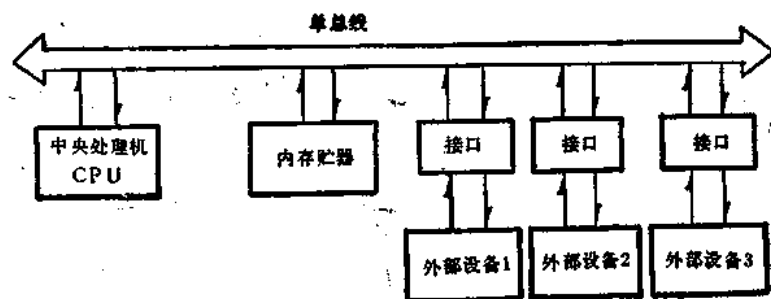


图1-3 单总线结构

单总线结构系统组织与面向CPU的双总线系统组织是不同的。对前者来说, 中央处理机已不再是计算机的中心, 它和系统中的其它设备一样, 只是单总线上一个系统而已。

单总线结构系统组织增强了系统功能, 中央处理机可象访问主存一样, 灵活地访问外部设备, 不再需要功能有限的输入/输出指令。而且总线具有双向性, 既可以接收信息又可以发送信息, 这就使得接口变得简单, 容易实现。另外, 当外部设备与主存交换信息时, 中央处理机可继续完成其它操作, 充分发挥主机的效率。

单总线结构系统组织虽然有很多优点, 但也有它的缺点。由于所有设备都连接在同一总线上, 所以总线的负载很重, 随着中央处理机和外部设备之间信息交换量的增大, 可能使系

统吞吐量呈饱和状态,甚至达到无法胜任的程度。从而使系统性能下降。另外中央处理机与主存储器之间的信息传输往往比通过双总线中的存储总线传输速度慢。

1.3.3 面向存储器的双总线结构

为了进一步提高系统性能,在主存与中央处理机之间开辟了一组高速内存总线,形成了一种新的双总线结构系统组织,如图1-4所示。这种结构的特点是:在存储器上有两个接口:一个通过高速内存总线与中央处理机直接连接起来,专供与中央处理机交换信息。传输速率高,并减轻了单总线的负担。另一个与原来的单总线接通,实现与其它设备之间的信息交换,而不必通过中央处理机。在这种双总线结构中,主存变成计算机的中心,所以称为面向存储器的双总线结构,它并不是对单总线结构系统组织的否定,而是对它很好的补充。这种结构既克服了单总线结构的缺点,防止了吞吐量的饱和,又保持了它的主要优点——系统灵活性。

面向存储器的双总线结构系统组织在性能较高的小型机和超级微型机中应用较为普遍。

总之,由于总线结构系统组织优点很多:提高了系统性能,增加了系统灵活性,便于实现积木化,同时还减少了信息传输线的数量,

所以已被大多数计算机采用。总线结构的缺点是,两种信息代码在总线中不能同时传送。

由于信息在总线上的传输速度较高,很难与总线上所接的其它设备的操作速度相匹配,通常是为该设备设置缓冲寄存器来解决这一矛盾。

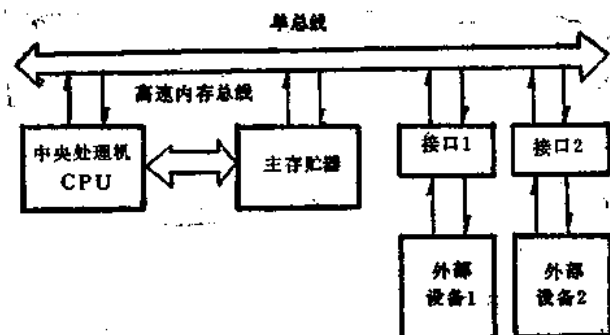


图1-4 面向存储器的双总线结构

1.4 计算机系统的组成

一个完整的计算机系统由硬件和软件两部分组成。硬件提供了处理数据的物质基础,但是若没有软件的支持,它是做什么事情也干不了的。只有和软件相配合,有了运行程序,计算机才能发挥其效能。通过计算机软件的开发,可以更好地发挥计算机效能,使之更适合于使用要求;但是不要认为只要通过软件的开发,就可以无止境地发挥计算机的效能。计算机的最大能力还是由硬件决定的,计算机系统的开发就是力图把计算机的潜力发挥出来。因此,为建立一个良好的、适合用户要求的计算机系统,必须把硬件和软件有机地结合起来,妥善地进行设计。

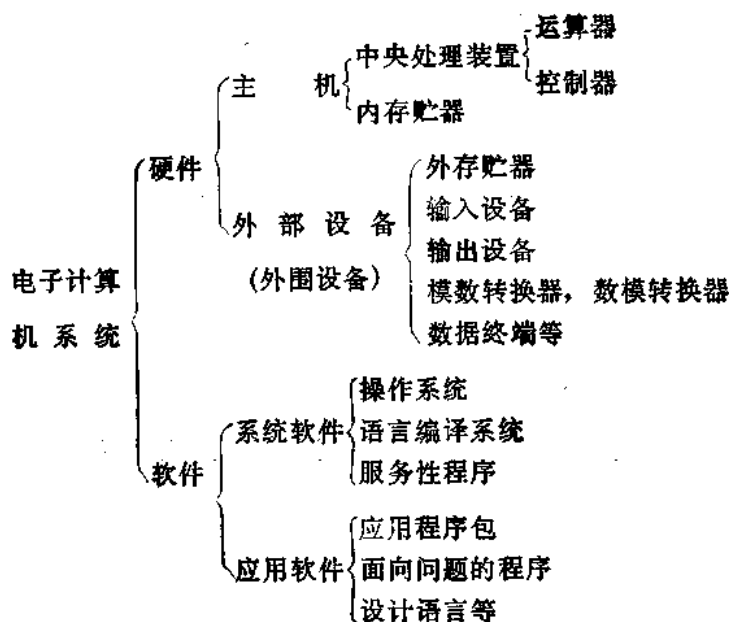
1.4.1 计算机系统的组成

计算机系统的组成情况如下:

硬件部分,是指计算机系统的设备本身,即计算机的运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备五大部分。它是看得见,摸得到的“硬设备”,所以称为计算机的“硬件”。

软件部分,是使用计算机所必备的各种程序的总称。它的任务是充分发挥计算机的功能,提高计算机的使用效率,以便于用户掌握使用。

计算机软件是由一些程序组成的,这些程序通常放在计算机的存储器里,相对于硬设备



来讲，它是软设备，所以称作软件。

程序系统（软件）的功能与质量在很大程度上决定了整个计算机的功能。如果程序系统设计和使用不好，计算机系统效能只能发挥30%；而在最佳情况下可达80%。因此，对计算机程序系统，必须给予足够的重视。

1. 软件包括系统软件和应用软件两大类

- 系统软件 用于计算机的管理、维护、控制和运行以及计算机程序的翻译、装入、编辑和运行的程序。包括有操作系统、语言编译系统和常用服务程序等。

- 应用软件 指的是为解决某类问题（如科学计算、数据处理及实时控制等）所必须的各种程序。应用软件包和解决问题的程序设计语言等都属于应用软件。

2. 有关程序设计语言和操作系统的概念

- 机器语言 计算机能够直接识别的中央处理机的指令代码。用机器语言编制的程序，计算机能够立即执行，但编制程序要花费大量的精力和时间，程序难以看懂。

- 汇编语言 汇编语言亦叫符号语言，每一条指令均由符号来表示。由汇编语言编写的程序较容易理解。由于计算机不能直接识别用汇编语言编写的程序，因此，必须通过汇编语言处理程序，翻译成计算机能够识别的指令代码程序（机器语言），汇编示意如图1-5。

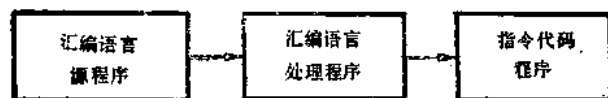


图1-5 汇编语言示意

语言的特点：由于是按计算机的指令系统以逐条指令的形式来编写的，因此运行效率较高。

- 高级语言 这种语言不是面向机器，而是面向用户的。它的语言格式往往是符合某一方面用户的习惯，用高级语言编制的程序也要经过一个编译或解释过程，才能被计算机所识别。例如，BASIC、FORTRAN、PASCAL等语言都属于这类语言，我们给出程序语言层次示意图1-6。

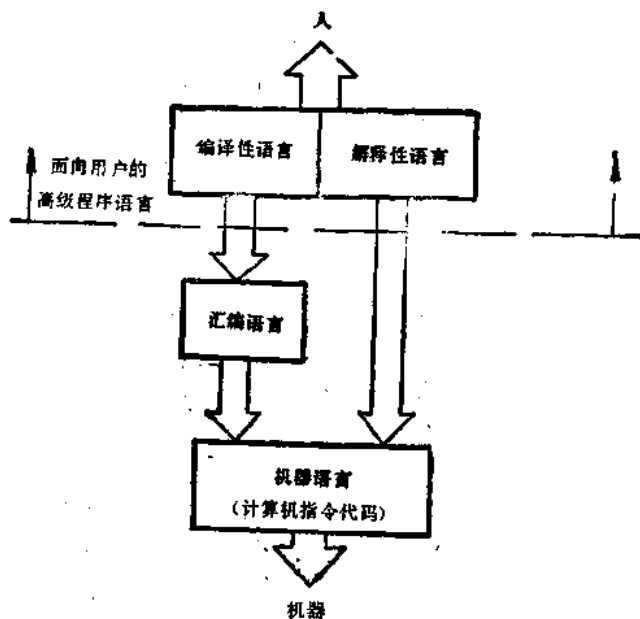


图1-6 程序语言层次示意

• **服务程序** 计算机软件系统专门提供一部分服务性程序，来帮助用户编制程序，它是用户对程序进行编辑、修改与检查错误的工具。

• **操作系统** 操作系统给用户提供一个良好的工作环境，对计算机的运行提供了有效的管理（包括工作管理、信息管理和监控管理）。在操作系统的支持下，用户可以最大限度地利用计算机的能力。可以把操作系统看成是人和计算机系统间进行通讯的一个接口程序。操作系统的内部结构应能有效地对计算机系统的固有资源进行管理，其外部功能应能够方便用户的使用。

1.4.2 计算机系统的功能

- (1) 信息传递与收集 由系统的输入设备完成。
- (2) 信息的存贮 由系统的存贮装置完成。
- (3) 信息的加工与检索 由系统的运算处理装置完成。
- (4) 信息处理的综合管理 由系统的控制装置完成。
- (5) 信息的传递与分配 由系统的输出设备完成。

每个计算机系统，它所包括的硬件和软件的数量是各不相同的。究竟应包括多少，应根据计算机的规模，应用场合及对计算机性能的综合要求来确定。

第二章 运 算 器

在所有数字计算中, 数的加法是一个基本的运算, 这些运算是由机器指令指定的。加减运算以及基本逻辑函数运算, 如与、或、非及异或等, 都是在CPU子系统算术逻辑单元 (ALU) 中进行, 这些函数通常由组合逻辑电路来实现, 通过总线把操作数从两个 CPU 寄存器送到 ALU。通常把结果送到CPU的另一个寄存器中。在硬件控制的 CPU 控制顺序发生器中, 现代集成电路使得有可能在一个基本节拍所分配的的时间内, 完成这些操作。而在微程序控制的 CPU 中, 可以在一条微指令的执行时间内, 完成这些操作。

乘法和除法操作, 要比加或减操作复杂得多。当 CPU 为硬件控制方式时, 常常为这些操作提供可选机器指令; 在用微程序设计技术实现的控制器中, 基本的机器指令系统中可能包含乘法和除法指令。当然, 只要有加、减法指令就可以用软件例行程序提供乘、除法操作。这些例行程序基本上用一系列加法和移位来实现乘法运算, 而用一系列减法和移位来实现除法运算。

从组合电路观点来看, 逻辑运算比算术运算简单, 因为它们包括对操作数的个别位独立地进行布尔运算。另一方面, 在算术运算中, 需要产生进位和借位信号。

为此, 本章的重点是讨论数的表示方法, 算术逻辑部件 (即加法器), 加、减法运算, 乘法运算等概念。

在学习这章时, 认为读者已经具备了布尔代数的理论, 这里不再介绍这方面的概念。

2.1 数字和字符的表示方法

计算机所处理的信息之一是数据。数据包括数字和字符两类。计算机要进行大量的数据运算。那么, 参与计算机运算的数是如何表示的呢? 这一节中, 我们首先从十进制数开始分析, 进而引进各种不同的进位计数制, 说明二进制在计算机中广泛使用的原因, 以及各进位计数制之间的相互联系和转换。同时还提出数的浮点和定点表示, 并讨论它们的一些基本性质, 为以后进一步讨论计算机中数的运算规律打下基础。

2.1.1 进位计数制

按进位的方法进行计数称为进位计数制。

1. 十进制数的表示

在日常生活中, 我们最常用的就是十进制, 它由 0 到 9 这十个不同的数码来表示, 数码处于不同的位 (或数位), 代表的意义是不同的。例如, 1626.5 这个数中出现的两个 6, 由于它们所在的位置不同, 表示的数值也就不同。这种表示方法, 通常叫做“位置表示法”。

通过大家熟知的十进制数的表示, 我们要弄清两个概念, 即“权”和“基数”。

• “权” 在十进制数的表示中, 我们把“个、十、百、千…”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。例如, 数 561 中, 5 是百位上的数码, “权”是 100, 则 5×100 表示该位值的大小。

• “基数” 十进制数表示法的特点是“逢十进一”，这个“十”就称为基数。

任意一个十进制数 S （假设是正数）都可以表示为 $S = K_m(10)^m + K_{m-1}(10)^{m-1} + \dots + K_1(10)^1 + K_0(10)^0 + K_{-1}(10)^{-1} + \dots + K_{-n}(10)^{-n} = \sum_{i=-n}^m K_i(10)^i$

其中， K_i 可以是0到9中的任何一个数码，它由 S 决定； m, n 为正整数。括号内的10称为计数制的基数。例 $S = 865.32$ 可表示为

$$865.32 = 8 \times (10)^3 + 6 \times (10)^2 + 5 \times (10)^1 + 3 \times (10)^{-1} + 2 \times (10)^{-2}$$

2. 二进制数的表示

二进制计数制广泛应用于计算机中。

二进制数每个数位只可以取两个不同的数码“0”和“1”，而且是“逢二进一”。下述例子表明二进制数与十进制数的对照。我们先举几个简单例子：

$$(5)_{10} = (101)_2$$

$$(0.125)_{10} = (0.001)_2$$

括号右下角的数字表示进位制的基数，上述例子中十进制的数5以二进制表示时等于101，十进制小数0.125表示为二进制时等于0.001。

任何一个二进制数 S 都可以用一个多项式展开式来表示

$$S = K_m 2^m + K_{m-1} 2^{m-1} + \dots + K_1 2^1 + K_0 2^0 + K_{-1} 2^{-1} + \dots + K_{-n} 2^{-n} = \sum_{i=-n}^m K_i 2^i$$

其中 K_i 只能取0或1，它由 S 决定； m, n 为正整数。例 $S = 1011.01$ 可写成

$$1011.01 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

一般地说，如果用正整数 J 表示进位制基数，则一个 J 进制数 S 都可以表示为

$$S = \sum_{i=-n}^m K_i J^i$$

其中 K_i 可以是0到 $(J-1)$ 中的任意数码， m, n 为正整数。如 $J=10$ ，就是十进制数的表示形式； $J=2$ ，就是二进制数的表示形式； $J=8$ 就是八进制数的表示形式。

二进制的特点

(1) 数的状态简单,容易表示 二进制只有0、1两个状态,很容易获得。因此，二进制的很大一个优点就是它的每一位都可以用任何具有两个不同稳定状态元件来表示。由于计算机中采用二进制，数的存贮和传送，也就可以用简单而可靠的方式进行，如脉冲的有无，电位的高低。

(2) 算术运算简单 二进制的四则运算比较简单。二进制的两个整数的“和”与“积”的规律极为简单，各只有三个。

加法：

$$0+0=0$$

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

$$1+1=10$$

乘法：

$$0 \times 0 = 0$$

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

$$1 \times 1 = 1$$

显然，这样的运算规则比十进制简单得多，因此，在计算机中，实现二进制运算的线路也就大大简化了。下面举几个例子，以便更好地理解它的运算规则。

$$\begin{array}{r} 111 \\ + 011 \\ \hline 1010 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 1101 \\ - 110 \\ \hline 111 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 10111 \\ \times 1010 \\ \hline 00000 \\ 10111 \\ 00000 \\ 10111 \\ \hline 11100110 \end{array}$$

$$\begin{array}{r} 11001 \cdots \cdots \text{商} \\ 111 \overline{) 10110001} \\ \underline{111} \\ 1000 \\ \underline{111} \\ 1001 \\ \underline{111} \\ 10 \cdots \cdots \text{余数} \end{array}$$

(3) 采用二进制可以节省设备 用二进制表示0~9之间的数, 只要用四位二进制数, 每位有两个设备状态, 四位总共要有八个设备状态, 能表示数的范围可达0~15, 可以看出, 用二进制比较省设备。

(4) 采用二进制可以应用逻辑代数这一数学工具, 对计算机逻辑线路进行分析和综合。

3. 八进制数的表示法

八进制的基数 $J=8$, 每位可以取0~7这八个数码中的一个, 而且是“逢八进一”。因为 $2^3=8$, 所以一位八进制的数相当于三位二进制的数。这样, 八进制与二进制之间的转换非常方便, 从八进制转换为二进制时, 只要把每位八进制数用三位二进制数表示即可; 从二进制数转换成八进制数只要将每三位二进制数用一个八进制数表示。

例1 将八进制数7.721转换成二进制数。

$$\begin{array}{cccc} 7 & 7 & 2 & 1 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 111 & 111 & 010 & 001 \end{array}$$

所以, $(7.721)_8 = (111.111010001)_2$ 。

例2 将二进制数11111101.01001111转换成八进制数。

$$\begin{array}{cccccc} 011 & 111 & 101 & 010 & 011 & 110 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 3 & 7 & 5 & 2 & 3 & 6 \end{array}$$

所以, $(11111101.01001111)_2 = (375.236)_8$ 。

由于八进制比二进制书写简短, 而且转换成二进制也很方便, 因此, 八进制表示法也是常用的。

4. 十六进制数的表示

计算机还常采用十六进制数的表示法, 这种表示法基数 $J=16$, “逢十六进一”。用四个二进制数即可表示一位十六进制数, 每一位可用0~9以及A、B、C、D、E、F这十六个数码中的一个来表示。

例

$$\begin{array}{cccc} 10 & 1100 & 0100 & 0101 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 2 & C & 4 & 5 \end{array}$$

所以, $(10110001000101)_2 = (2C45)_{16}$ 。

2.1.2 不同计数制之间的转换

1. 十进制数与二进制数之间的转换

如两个有理数相等, 则两个数的整数部分和分数部分一定分别相等。不同计数制之间的转换便是根据以上原理进行的。

(1) 十进制整数转换成二进制整数

采用除 2 取余法。如将 $(215)_{10}$ 转换成二进制数可表示为

$$(215)_{10} = K_8 \times 2^8 + \dots + K_2 \times 2^2 + K_1 \times 2^1 + K_0 \times 2^0$$

只要求出 $K_8, K_7, \dots, K_2, K_1, K_0$, 就可得到 $(215)_{10}$ 的二进制形式, 而它们只可能是 0 或 1。下面用除 2 取余法来求出这些 K 值。

2 215	余数 = 1 = K_0
2 107	余数 = 1 = K_1
2 53	余数 = 1 = K_2
2 26	余数 = 0 = K_3
2 13	余数 = 1 = K_4
2 6	余数 = 0 = K_5
2 3	余数 = 1 = K_6
2 1	余数 = 1 = K_7
0	

因此, $(215)_{10} = (K_7 K_6 \dots K_2 K_1 K_0)_2 = (11010111)_2$

(2) 十进制小数转换成二进制小数

采用乘 2 取整法, 如将 $(0.6531)_{10}$ 转换成二进制小数, 可以表示为

$$(0.6531)_{10} = K_{-1} \times 2^{-1} + K_{-2} \times 2^{-2} + \dots + K_{-n} \times 2^{-n}$$

下面我们用乘 2 取整法来求出所有 K 值。

0.6531	
× 2	
1.3062	……整数部分 = 1 = K_{-1}
0.3062	
× 2	
0.6124	……整数部分 = 0 = K_{-2}
× 2	
1.2248	……整数部分 = 1 = K_{-3}
0.2248	
× 2	
0.4496	……整数部分 = 0 = K_{-4}
× 2	
0.8992	……整数部分 = 0 = K_{-5}
× 2	
1.7984	……整数部分 = 1 = K_{-6}

如精度要求只取 6 位小数, 则

$$(0.6531)_{10} = (0.K_{-1}K_{-2}\dots K_{-6})_2 \approx (0.101001)_2$$

(3) 十进制混合小数转换成二进制

混合小数由整数和纯小数复合而成, 将整数部分和纯小数部分按上述方法分别进行转