程　序　设　计

大连工学院　高玉昆　主编

国防工业出版社

程 序 设 计

大连工学院

高玉昆　　主编

国防工业出版社

内容简介

本书以DJS-130机为背景，用较通俗的语言，叙述了汇编语言程序设计的基本概念、基本方法和技巧。其内容包括：直接程序、分枝程序、循环程序及其控制方法、子程序的编制、定点机上的浮点运算程序的编制、汇编程序的使用、数据结构与表以及输入/输出程序等。框图法贯串于全书之中。

本书可做为电子计算机硬件专业和软件专业的教科书。也可做为电子类其他专业的教科书或参考书。对从事计算机硬件或软件研制工作的人也有一定参考价值。

程序设计

大连工学院　　高玉昆　主编

*

国防工业出版社　出版

北京市书刊出版业营业许可证出字第074号

新华书店北京发行所发行　　各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

*

787×1092 1/16　印张17　　397千字

1979年12月第一版　1979年12月第一次印刷　印数：00,001—21,500册

统一书号：15034·1931　定价：1.75元

编者的话

本书是根据四机部电子类专业 1978 年 4 月教材会议的精神编写的。做为计算机（硬件）专业与软件（工程）专业的基础课教材，授课时数为八十学时左右。

本书是以 DJS-130 机为背景进行编写的。也兼顾了其它机种，对于 TQ-16 机、DJS-21 机以及 DJS-180 机的指令系统和程序设计也做了简单的介绍（附录）。

本书由高玉昆主编。参加编写工作的有：张清绵(第六章)、裘春航(第七章)、薛源福(第八章)、曹桂琴(附录二)、罗远诠(附录三)和高玉昆(其余部分)。本书是在编者多年来讲授计算机程序设计(手编)课程的基础上，吸收并参考了有关兄弟院校的教材及其它资料编写而成的。

清华大学杨德元、俞盘祥等同志仔细地审阅了全部手稿。天津大学、华中工学院、华南工学院、南京大学和复旦大学的同志也很关心本书的编写工作，并审阅了本书的部分手稿，提出了许多宝贵的意见和建议。在此，对他们一并表示衷心的感谢！

由于编者水平不高，加上时间非常紧迫，书中错误与不当之处在所难免。敬请读者及有关同志提出批评指正，以便再版时改正提高。

编　者

目　录

绪　论

§1　电子计算机的产生和发展概况

人们通常所说的电子计算机可分为两大类。一类是电子数字计算机；另一类是电子模拟计算机。电子数字计算机是利用电子技术对数据（或广义地称为数字化了的信息）进行分析和综合的计算工具；而电子模拟计算机则是利用电的物理量（诸如电流、电压、……）的变化来“模拟”（模仿与比拟）计算或控制对象中的温度、压力、流量等物理量的变化情况，进行运算的另一种工具。在一些情况下，人们也研制了所谓“混合计算机”。它既有数字计算机的特点，也有模拟计算机的特点。就当代计算机的发展来看，电子数字计算机发展最快，应用最广，数量也最多。而模拟机与混合机却不能与数字机相比。因此，人们在一般情况下，就把电子数字计算机称为电子计算机了。

电子计算机是由各种电子元、器件所组成的一种速度快、精度高、能自动进行逻辑控制的现代化计算工具。有了电子计算机，就意味着建立了人的“第二大脑”，它能够迅速而合理地搜集、整理、积累、变换和传输信息，进行运算，并做出合乎逻辑的结论。供使用计算机的人做出判断与决策。电子计算机的制成是电子技术应用的重大成果之一，也是当代科学技术的卓越成就之一。它是由于生产和科学技术的发展而产生的。反过来，它又有力地推动了生产和科学技术特别是尖端科学技术的发展。

在长时期的生产劳动的实践过程中，人们逐渐产生了“数”的概念。有了数之后，就产生了计算问题。由于计算的实践和人们的智慧积累，就陆陆续续创造出各式各样的计算工具来。例如，一直为人们使用着的算盘早在几百年前就已出现。随着工农业和科学技术的不断发展，又产生了对数计算尺、手摇计算机和电动计算机。随着电子技术的飞速发展，利用了电子传递速度快、控制灵活等特点，人们开始了电子计算机的研制工作。世界上第一台电子计算机是美国首先在一九四六年研制成功的。这台电子计算机——“ENIAC”（电子数值积分与自动计算机）是为弹道设计而研制的。它用了一万八千多个电子管，占地面积为一百七十平方米，机身十分庞大，耗电量一百四十千瓦。经过三十多年的努力，人们现在已经研制出的电子计算机，它的运算速度每秒钟可执行几千万或上亿条指令。无论是可靠性方面，还是体积与容量方面，都比初期的计算机有了非常大的进步。

虽然仅经过三十多年的发展，但电子计算机已经历了几代的变化。

第一代，时间约在一九四六～一九五七年。这第一代计算机的特点是采用电子管，形成电子管计算机体系；采用二进制编码，并发明了变址寄存器。

第二代，时间约在一九五八～一九六四年。这一代计算机的特点是采用了晶体管，使得计算机的可靠性提高了，体积缩小了，速度加快了，容量扩大了。输入输出与其他设备更加完善了。

第三代，时间约在一九六五～一九七二年。这一代计算机的特点是采用了集成电路。这使电子计算机在速度和可靠性方面又提高了一个数量级。出现了分时系统，允许若干个

用户同时使用一台计算机工作。

目前电子计算机正朝着采用大规模集成电路为特征的第四代发展。这一代计算机的存贮量将扩大几百倍，对巨型机来讲，存贮量将扩大几千倍。这时的计算机已不是一台一台地独立工作。为提高效率，已产生多处理机系统和计算机网络。

从电子计算机的类型来看，其发展情况如下。一般计算机向两个方向发展：一是大型机和巨型机；二是小型机、微型机和单片机。

$$\begin{matrix}\text{一般计算机}\\(1950\text{年})\end{matrix}\begin{cases}\text{大型机}\longrightarrow\text{巨型机}\\(1960\text{年})(1965\text{年})\\\text{小型机}\longrightarrow\text{微型机}\longrightarrow\text{单片机}\\(1965\text{年})(1970\text{年})(\text{预计}1980\text{年})\end{cases}$$

以上谈的是电子计算机硬件的发展情况。与硬件相关联的是软件的发展情况。所谓软件就是为了提高计算机的使用效率，扩大计算机的功能所设计的程序和数据的总和。例如象程序库、编译程序、汇编程序和操作系统等都是软件。

随着计算机硬件的发展，软件也经历了几个发展阶段。

第一代，时间约在一九四六～一九五六年。这时，人们要想在电子计算机上算题（在电子计算机产生初期，主要是用来进行大量的科学计算)，必须把问题用所谓机器语言编成计算机能直接接受的程序——即通常所说的手编程序，然后让机器执行。除此之外，再没有什么可以称为软件的东西了。

第二代，时间大约在一九五七～一九六四年。五十年代后期产生了程序语言。这类语言是用尽量接近于自然语言，尽量使用英文字母及大家熟知的数字符号、来编程序的语言。这种语言可以使人们稍加训练就能够编写或应用计算机程序。与它相关的就产生了汇编程序、编译程序等软件。与此同时，计算机硬件方面提供了输入/输出通道和中断设备，因此又产生了管理程序等软件。

应该说程序语言的发展和应用，对计算机本身的发展和应用起着极大的推动作用。有人统计，到一九七六年，大约有85%的计算机是用程序语言来工作的。

第三代，时间约在一九六五～一九七〇年。这时程序语言发展得更加多样化和完善化。这时软件也发展为大致面向三个方面的软件系统：一是面向用户的软件系统——包括语言编译系统和应用程序库及资料库等；二是面向机器维修和管理人员的软件系统——包括有调机程序、诊断维修程序及日常事务管理程序；三是面向计算机本身的软件——操作系统。

自从一九六八年提出软件工程这一术语之后，软件的发展就更加突飞猛进了。由于大型操作系统（包括分时系统、实时控制系统、信息服务、遥控处理和计算机网络等)的出现，多处理机系统和计算机网络的应用，故促进软件在理论和应用两个方面继续向前发展和完善。可以想见，就电子计算机的应用来说，如果没有软件的产生和发展那将是不可想象的。目前对计算机系统来说，研制软件的费用要占70%以上。

随着计算机系统（包括硬件和软件两个方面）的飞速发展、它的应用也愈来愈广泛。简直可以说，人们尚不可能找到那一个领域或部门不能应用计算机。同时，计算机的功能也愈来愈强了。它可以根据市场上的情报自动控制生产过程；它能够积累人类的知识并保

证在几分钟之内提供你所需要的情报；它可以代替医生诊断病人，甚至比一般的医生诊断更准确；它可以代替教师教字；它可以研制新产品；它可以管理交通运输，做一个称职的交通警察；它还可以帮助人管理家务；甚至可以与人对话。未来的计算机可以应用于学习、获取知识和人工智能等领域。

我国于一九五六年开始研制电子数字计算机。一九五八年就生产了第一台电子计算机。此后我国经历了第一代（电子管）、第二代（晶体管）、第三代（集成电路）的计算机的研制过程，现在正在研制大规模集成电路的第四代计算机，在这一过程中，都取得了不小的进展。在软件方面也投入了相当大的人力与物力进行研制，以便研制出适合我国具体情况的计算机系统来。目前，我们正朝着现代化的宏伟目标前进。在这一过程中，电子计算机也将广泛地应用到各个领域。

§2 电子计算机的组成及各部分的作用

为了说明电子计算机的组成及各部分的作用，这里我们说明一下人在计算一个题目时，是怎样进行的。首先，要有一个计算工具，比如计算尺、算盘或其他简单的工具。其次，要有一些纸和一支笔，以便记录中间结果和最后结果。此外，应该懂一些计算知识。我们把“人、算盘（或计算尺）、纸与笔”称为人工计算系统。在人工计算系统中算一个题目，要靠人去指挥，使得计算能按事先安排好的顺序进行。一切计算（如加、减、乘、除以及其他的运算）都在计算工具算盘上进行。在计算的过程中，对于一些中间数据，如果有必要（比如后边还要用到等）就必须记在纸上。并且，对于算完之后的计算结果，更要记在纸上。

与人工计算系统一样，电子计算机也应该具有几个必要的组成部分。其中，相当于人工计算系统中的“人”，它所起的是指挥作用，计算机的计算都在它的指挥之下进行，这个部件叫控制器。控制器是由许多逻辑电路组成的，它具有类似人的思维的功能。计算机也有一个相当于算盘的计算部件，它称为运算器。电子计算机中的计算，全部都是在运算器中进行的。它可以对数码进行各种算术运算和逻辑运算。此外，计算机也有一些“纸”，这就是内存贮器。内存贮器大多是由磁芯体组成的，也有用半导体器件或其他器件组成的。对许多计算机来讲，由于内存贮器的容量有限，而计算问题对它的需要量又很大，因此，这就使得计算机增设了外存贮器，诸如磁鼓、磁带、磁盘等。除了上述几个部件外，计算机还有输入设备和输出设备。输入设备用来把程序和数据输入到计算机中，以便于计算机的正常计算；输出设备用来把计算机计算的结果输出到计算机外，以便于人们进行分析和检查。如果把计算机用在人造卫星、宇宙飞船等航天飞行或自动控制系统中，那么，其输入、输出设备就是巡回检测装置、遥控装置等，它们直接与被控对

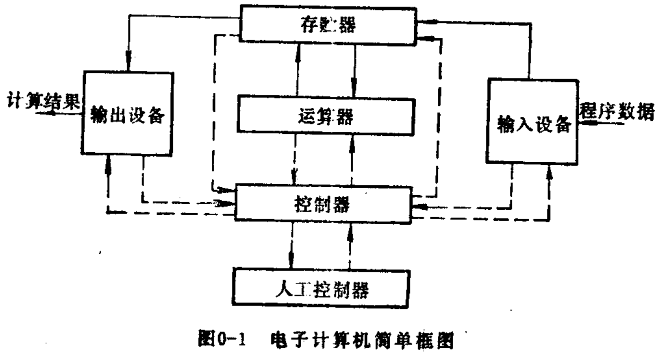

图0-1 电子计算机简单框图

象（如导弹、卫星或机床等）相联。上述计算机的几个组成部件之间的关系可由图0-1表示出来。

图中，实线表示代码传送路线；虚线表示控制路线。

为了适应使用计算机和编程序的需要，我们再把计算机的几个主要部件稍加详述如下。

运算器　它对数或指令进行各种算术运算或逻辑运算。它是由加法器、移位器及寄存器等部件组成。对现代计算机来说，为了提高运算速度，其运算器往往不只有一个寄存器（或累加器）。我们书中将要谈到的 DJS-130 机就有四个寄存器（或累加器）。此外，尚有八个、十六个或更多个寄存器的。

存贮器　这里先讲内存贮器。内存贮器好比一个大旅馆。它有许多“房间”，对于这许多“房间”，我们给它取了一个名字，叫“单元”。这些“房间”总应该有个排列次序，比如给它们编成号码，相当于每个“房间”的门牌号。这“房间”的门牌号，就称为该单元的地址。每个单元能记下多少位二进制数字，称为单元的字长，也叫计算机的字长。字长是随机器的大小和用途的不同而有所区别的。一般用于科学计算的计算机，其字长通常有四十位到四十八位。也有少到三十二位或多到六十四位的。用于自动控制和数据处理的小型计算机，其字长一般为十六位。DJS-130 机字长就是十六位。对于每个单元来讲，可以往里写入（或记入或存入）一组二进制代码或者从其中读出（或取出）一组二进制代码。但是，我们必须着重强调几点。第一，往一个单元中写入或从中读出代码，通常是全部二进制代码一起写入或读出。不能只写入或读出一部分二进制代码而与其余部分代码不相干（当然特殊用处的除外）。第二，某一单元的二进制代码被读出后，该代码仍然保留在原单元中。这就好象照相一样，不管照多少次，原物依然不变。第三，往某单元中写一组代码，用不着去清除该单元中原来的代码，这新的代码就自动取代了原来的代码。第二点与第三点可以用一句话概括起来就是“取之不尽，一冲就掉”。

至于外存贮器，它就好比一个无穷大的“旅馆”。它的“房间”及其编号方法与内存贮器不同。例如磁鼓、磁盘和磁带，则还要考虑到鼓号（或盘号，或带号）、区号等等。

输入设备　有光电输入机、卡片输入机、光学字符读出器等。

输出设备　有行式打印机、卡片输出机、纸带穿孔输出机和X-Y绘图仪等。

至于控制台打字机、键盘及光笔显示设备等既是输入设备也是输出设备。

控制器　它是中央处理机的重要组成部分之一。其功能是翻译指令代码，安排操作次序，并发出适当的命令到计算机各部分线路，以便执行机器的指令。其设计方案有两种，一种是常规设计，另一种是微程序设计。在常规设计中，控制器是由大量门电路组成的一套组合网络。它是由指令操作码、机器时钟信号及数据通路的反馈作为输入，而输出的是一系列的有序控制信号。在微程序设计中，利用常规的程序设计思想，把每一条机器指令的执行过程分解成一些基本的微操作，再按一定的次序及设计编成微程序。机器执行一条指令的过程，实际上就是执行相应的微程序的过程。这些微程序被存放在固定的或可变的只读存贮器中。控制器的控制方式有同步和异步两种。同步控制方式，是按一定的节拍发出各种控制命令；异步控制方式是应答方式，即前一次操作执行完毕后发出回答命令，然后再执行后继操作。

由于软件特别是其中的操作系统发展的需要，故通常把运算器与控制器总称为中央处

理机，把内存贮器称为主存，而把外存贮器、输入/输出设备等统称为外部设备。

§3 用电子计算机解决实际问题(科学计算、数据处理和实时控制)的过程

自从电子计算机问世以来，虽然仅经过三十多年的发展，但它应用范围之广，影响力之大是没有哪一门技术能够与之相比拟的。到目前为止，它不仅可以应用于科学设计与计算，而且还应用于企业和政府部门的业务管理，应用于厂矿企业生产自动过程的自动控制；此外，它还可以帮助医生为患者诊断和治疗，帮助人们学习，等等。电子计算机的这些应用，虽然有些早已超出了“计算”的范围，但是在具体运用时，仍离不开“计算”的原则。也就是说，首先，将计算或控制对象的物理过程或工作状态，归结为数学问题的形式（通称数学模型）；其次，将这些数学问题转化为近似计算公式；然后，再将这些计算公式编制成适于具体计算机进行运算的程序。这些程序编好后，就送到（输入到）计算机里。这样一来，计算机便可以自动进行计算。算完后，得出的计算结果或控制信息，由输出设备输送出来，告知人们或传送到相应的机构去执行。简而言之，电子计算机解决实际问题的过程如下：

物理过程——数学模型——近似计算公式——编制程序——计算机自动计算（包括程序和数据的输入——计算——结果输出）——分析结果。

由上所述，在用电子计算机解决实际问题中，电子计算机其所以能够自动进行计算，完全是由于送到机器内的程序的指挥。由此可见，编制程序是应用电子计算机的一个重要环节。

但是，上面所说的程序，如果是用某种具体计算机所能识别的语言（即机器语言）编制的，那么，要将这种程序再用到其他种类的计算机上是行不通的，由于这两种计算机没有共同语言，一个计算机的程序，不能在另一个机器上应用。同时，这种编程序的工作，由于简单的机械性重复，因而工作量很大，从而工作周期也很长；再加上具体的机器语言又不易为没有经过专门训练的人所掌握；而且在编程序的过程中，非常容易产生错误（这种错误是电子计算机在执行程序时所不允许的，哪怕是仅有一点点也不行），产生了错误又不容易查找。这些都严重地影响了电子计算机的使用效率。为了解决这个问题，可采用所谓高级程序设计语言编程序。这种语言，接近于人们的自然语言。用这种语言编程序对使用计算机的人来说是比较方便的。

然而，这种对使用者方便的程序——高级程序设计语言的程序，对具体计算机来说是不方便的。因为每一台具体的计算机，除了认识人们为它所事先设计好的机器语言之外，其他什么都不认识。这样一来，对于高级语言程序，人们必须研究出新的办法。这种办法之一就是用具体的机器语言编制一个程序（这种程序比一般的程序规模要大许多)。通过这个程序对用规定的高级程序设计语言所写的程序进行必要的检查、分析。看它是否符合这种语言的语法规定等等。然后，再把这个符合规定要求的程序翻译成机器语言程序，最后再执行之。

这个进行检查、分析与翻译工作的程序，称为“编译程序”。对于编译程序来说，作为其加工对象的高级程序设计语言程序称为“源程序”。加工后产生的机器语言程序称为“目

标程序”(也有称“目的程序”的)。还有一个办法,就是同样用机器语言编制一个较大的程序。这个程序对于高级语言程序(源程序),根据高级语言文法的规定,对其进行检查,在检查的同时(如果符合文法规定的话),立即翻译成机器语言程序,并立即执行之。这就是所谓“边检查,边执行”的一种程序。在此,源程序仍是高级语言程序。而加工程序则称为“翻译程序”。由于“边检查,边执行”的缘故,因此并不产生一个统一的“目标程序”。

由上所述,用电子计算机解决实际问题,是离不开诸如解释程序、编译程序之类的软件的。特别当电子计算机发展到现阶段就更是如此。因此,对硬件工作者来说,愈来愈需要了解、熟悉甚至掌握翻译程序、编译程序(此外,还有汇编程序、管理程序、诊断程序以及操作系统等)。对软件工作者来说,他们更负有义不容辞的责任,努力去推广、改进和发展现有软件并且尽力研制新的软件。

然而,一切软件的基础,都是汇编语言程序和机器语言程序。而在这两者之间,除一些特殊情况(伪指令、宏指令等)外,只是在记忆符号和机器代码方面有所不同。因此从本质上讲,两者差别是不大的。由于汇编语言更便于记忆。因此,只要掌握了汇编语言,就可打下良好的软件知识的基础。据此,本书的目的就在于:使读者了解并掌握编制汇编语言程序的基本知识、基本方法和技巧。

第一章 预备知识

§1 各种计数制及其间的相互转换

1.1 十进制数

人类在长时期的劳动中，由于生产实践的需要，用十个手指计数，创造了十进制数。十进制数的计算原则是“逢十进一，借一当十”。对于十进制数，每位数字都要用0、1、2、…、9这十个数字当中的一个来表示。例如有一个数5093.25。它表示五个一千加上九个十，再加三个一，再加两个十分之一，最后加五个百分之一。用式子写出来就是

$$5093.25=5\times10^3+0\times10^2+9\times10^1+3\times10^0+2\times10^{-1}+5\times10^{-2}$$

一般说来，一个数N的十进制表示如下：

$$N^{●}=\alpha_n10^n+\alpha_{n-1}\cdot10^{n-1}+\cdots+\alpha_1\cdot10^1+\alpha_0\times10^0+\alpha_{-1}\cdot10^{-1}+\cdots+\alpha_{-m}\cdot10^{-m}\tag{1.1}$$

其中

$$0\leqslant\alpha_i\leqslant9,\quad i=-m、\cdots、-1、0、1、\cdots n。$$

这里m表示数N的小数位数，而n表示整数位数减一。

十进制数是大家经常用到也是最熟悉的。但是，在实践当中除十进制数外还有许多其它进位制的数●。例如七进制、三十进制、十六进制以及六十进制等等。可是计算机到底用什么进制的数合适呢？下面我们就从一般的计数制开始讨论这个问题。

1.2 P进位制

假定P是大于1的整数，则任一数N总可以用下式来表示：

$$N=\alpha_n\cdot p^n+\alpha_{n-1}\cdot p^{n-1}+\cdots+\alpha_1\cdot p^1+\alpha_0\cdot p^0+\alpha_{-1}\cdot p^{-1}+\cdots+\alpha_{-m}\cdot p^{-m}\tag{1.2}$$

或

$$N=\sum_{i=-m}^{n}\alpha_ip^i\tag{1.3}$$

其中

$$0\leqslant\alpha_i\leqslant p-1,\quad i=-m,\ \cdots,\ -1,\ 0,\ 1,\ \cdots,\ n。$$

这里把P称为计数制的基或底。

对于P进位制数的计算原则，与十进位制的计算原则相似，即“逢P进1，借一当P”。

现在我们考虑这样一个问题，即电子计算机使用哪种进位制的数合适。

● 这里假定N为正数。对负数可同样处理，最后加上负号即可。

● 说得确切些应该是数的十进制表示及其它各种进位制的表示。

对于P进制来说，每一位数必须用具有p种不同状态的元件来表示。假如我们讨论的数的范围是固定的，比如是r位（例如在十进制中，我们考虑的数是0到999，则需要三位），这样总共必须有$p \times r$种不同的状态。

我们的问题是：当$p^r = M$固定时，求得p值，使得$f(p) = p \cdot r$取得最小值。$\because p^r = M$ $\therefore r = \dfrac{\ln M}{\ln p}$而

$$f(p) = p \cdot r = p \cdot \frac{\ln M}{\ln p}$$

为了求$f(p)$的最小值，求导数$\dfrac{df}{dp}$，并令其为0则得

$$\frac{df}{dp} = \frac{\ln M}{\ln p} - \frac{\ln M}{\ln^2 p} = \frac{\ln M}{\ln^2 p}(\ln p - 1) = 0$$

由此可得

$$\ln p - 1 = 0 \qquad\qquad p = e \approx 2.72$$

因为p是计数制的基，所以它必须是整数。接近e的整数有2和3（而3更接近些），这就是说电子计算机使用三进制数所用元件是最经济的。但是，三进制用起来又不如二进制那么方便。例如，二进制只用两种不同状态如电灯的亮与灭，电压的高和低，电流的通与断，脉冲的有与无以及磁性的顺向与逆向等等来表示即可。同时，在计算上使用二进制也特别简便。这就决定了电子计算机用二进制数进行运算。

1.3 二进制与八进制

由上述可知，电子计算机便采用了二进制数进行计算。二进制数的计算原则为“逢二进一，借一当二”。每一位数只有0和1两种状态。这样一来，每一个数N都可以用二进制数来表示：

$$N = \alpha_n \cdot 2^n + \alpha_{n-1} \cdot 2^{n-1} + \cdots + \alpha_1 \cdot 2^1 + \alpha_0 \cdot 2^0 + \alpha_{-1} \cdot 2^{-1} + \cdots + \alpha_{-m} \cdot 2^{-m} \tag{1.4}$$

或

$$N = \sum_{i=-m}^{n} \alpha_i \cdot 2^i \tag{1.5}$$

其中　$0 \leqslant \alpha_i \leqslant 1$，$i = -m, \cdots, -1, 0, 1, \cdots, n$。

例如二进制数10 11.01可表示如下：

$$10\ 11.01 = 1.2^3 + 0.2^2 + 1.2^1 + 1\ 2^0 + 0.2^{-1} + 1.2^{-2} = 8 + 2 + 1 + 0\ 25 = 11.25$$

即二进制数10 11.01等于十进制数11.25。又如二进制数111 111.111可表示如下：

$$\begin{aligned} 111\ 111.111 &= 1.2^5 + 1.2^4 + 1.2^3 + 1.2^2 + 1.2^1 + 1.2^0 + 1.2^{-1} + 1.2^{-2} + 1.2^{-3} \\ &= 32 + 16 + 8 + 4 + 2 + 1 + 0.5 + 0\ 25 + 0\ 125 = 63.875 \end{aligned}$$

即二进制数111 111.111等于十进制数63.875。

十进制数字0、1、2、…、9与二进制数的关系，可由表1.1给出。

表1.1 二进制数与十进制数对照表

二进制数	十进制数
0	0
1	1
10	2
11	$3=2+1$
100	$4=2^2$
101	$5=4+1$
110	$6=4+2$
111	$7=4+2+1$
1000	$8=2^3$
1001	$9=8+1$

1.3.1 二进制数的四则运算

前面我们已经说过，二进制数的计算原则是“逢二进一，借一当二”。下面我们举例说明二进制数的四则运算。

加法 它的法则是

$$0+0=0;\quad 0+1=1+0=1;\quad 1+1=10。$$

例如求 $10011.01+100011.11=?$

我们列出算式如下：

$$\begin{array}{r} 10011.01 \\ +)\,100011.11 \\ \hline 110111.00 \end{array}$$

即

$$10011.01+100011.11=110111.00$$

减法 它的法则是

$$0-0=0;\quad 1-0=1;\quad 1-1=0;\quad 10-1=1。$$

例如求 $10110.01-1100.10=?$

我们列出算式如下：

$$\begin{array}{r} 10110.01 \\ -)\,1100.10 \\ \hline 1001.11 \end{array}$$

即

$$10110.01-1100.10=1001.11$$

对于加法和减法运算，关键是把小数点对齐，然后就按它们相应的法则进行运算。

乘法 它的法则是

$$0\times0=0;\quad 1\times0=0\times1=0;\quad 1\times1=1。$$

例如求 $1101.01\times110.11=?$

我们列出算式如下：

$$\begin{array}{r} 1101.01 \\ \times)\,110.11 \\ \hline 110101 \\ 1101010 \\ 000000 \\ 110101 \\ 110101 \\ \hline 1011001.0111 \end{array}$$

即

$$1101.01\times110.11=1011001.0111$$

除法 它的法则是

$$0\div1=0;\quad 1\div1=1。$$

例如求 $1101.1\div110=?$

我们列出算式如下：

$$
\begin{array}{r}
10.01 \\
110\overline{)1101.1} \\
\underline{110} \\
110 \\
\underline{110} \\
0
\end{array}
$$

即

$$1101.1 \div 110 = 10.01$$

对于乘法和除法的运算，就象我们平常对于十进制数的乘法和除法一样，先当成整数进行乘或除，算完之后再确定小数点的位置。可以看出二进制数的乘除法运算，实际上就是二进制的加减法运算。这正是二进制数乘除法运算的优点之一。

1.3.2 二进制数与八进制数的关系

前面我们已经说过，十进制数及其运算，人们是非常熟悉的。可是它不适合于在计算机上使用。计算机采用二进制数，具有结构简单、节省元件、运算方便等优点。但是，它也有一个很大的缺点，即一个数用二进制表示，书写起来很长因而很不方便。例如十进制数20000写成二进制数就是100111000100000。为了克服这一缺点，我们采用如下的方法，即将三位二进制数写成一个数字。例如 000 写成 0；001 写成 1；010 写成 2；…；111写成 7（参看表1.1）。这就是所谓的八进制。这样一来，上面的数就可以写成下面的形式：

$$100111000100000 = 47040$$

现在我们进一步讨论一下这种表示法的正确性。仔细分析一下，我们看到用三位二进制一共能表示从 0 到 7 共八个数字；而八进制数、每一位数也正好表示从 0 到 7 共八个数字。这就是说三位二进制数与一位八进制数是一一对应的。因此，用一位八进制数代替三位二进制数是完全正确的；反之，用三位二进制数代替一位八进制数也是完全正确的。由此可以把八进制数看成是缩写了的二进制数。把二进制数写成八进制数，正好克服了那种书写起来很长又不易辨认的缺点。

在书写各种计数制的数时，为了避免引起混乱，我们把每个数所在的计数制用一个下标表示。例如

$$20000_{10} = 100111000100000_2 = 47040_8$$

表示十进制的 20000 与二进制的 100111000100000 和八进制的 47040 是彼此相等的。

有了上述二进制数与八进制数的关系，就很容易把二进制数化为八进制数，或者把八进制数化为二进制数。

例一 把二进制数 101000010001.001 化为八进制数。

从小数点开始，向左或向右每三位二进制数为一组进行划分（如果位数不足三位时，可以补 0）。这样就有

$$
\begin{array}{c|c|c|c|c}
101 & 000 & 010 & 001. & 001 \\
\downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
5 & 0 & 2 & 1 & 1
\end{array}
$$

从而得到

$$101000010001.001_2 = 5021.1_8$$

例二 把八进制数 112.2 化成二进制数。

因为

$$1_8=001 \qquad 2_8=010$$

所以有

$$112.2_8=001001010.010_2$$

即 $$112.2_8=1001010.01_2$$

从上述例题中，可以看到二进制数与八进制数互相转换是相当方便和直观的。

有些时候，为了书写方便或划分指令格式的需要，也采用四进制或十六进制。有时还采用混合制。即一个数中一些位用四进制，另一些位用十六进制来表示。甚至有如下的情况，使几种进位制都出现在一个数的表示中。至于四进制或十六进制的数，它们的计算原则自然就是"逢四进一，借一当四"或"逢十六进一，借一当十六"。而它们与二进制数的关系就是用两位二进制数表示一位四进制数或用四位二进制数表示一位十六进制的数。我们可以这样讲，无论是四进制也好，八进制也好，甚至十六进制也好，从本质上来说，他们都是二进制。

我们把二进制数与十六进制数列表 1.2 进行对照。

表1.2 二进制数与十六进制数对照表

二进制	十六进制	二进制	十六进制
0000	0	1000	8
0001	1	1001	9
0010	2	1010	*A*
0011	3	1011	*B*
0100	4	1100	*C*
0101	5	1101	*D*
0110	6	1110	*E*
0111	7	1111	*F*

表中 A、B、C、D、E 和 F 分别表示十进制中的 10、11、12、13、14 和 15 这六个数。也有用 $\bar{0}$、$\bar{1}$、$\bar{2}$、$\bar{3}$、$\bar{4}$ 和 $\bar{5}$ 来表示这六个数的。

1.4 十进制数与二进制数之间的转换

前面已经说过，人们习惯于使用十进制数进行计算。而电子计算机却是用二进制数进行计算的。这样，人与计算机之间，在使用计数制上就产生了一个矛盾。怎样解决这个矛盾呢？办法是将十进制数用特殊的形式（参看 1.6 节）表示输入到计算机内，然后用专门的程序把这些数转换成二进制的数（简称十换二）。计算机就用这些二进制数进行计算。计算结果当然仍是二进制数。再用专门程序将这些二进制数转换成十进制数（简称二换十），最后输出到机外。

诚然，初始数据的十换二与计算最终结果的二换十，是由计算机用专门的程序来完成的。但为了熟练地使用计算机，尤其是在计算机上解决实际问题时，能够迅速地发现并处理所出现的问题，熟悉并掌握各种计数制及其间的相互转换仍然是十分必要的。

我们已经讨论了好几种计数制。有十进制、二进制、四进制、八进制、十六进制以及其它进制如七进制和六十进制等等。在这些计数制之间，十进制与二进制之间的转换是主要的。但是如前所述，二进制与八进制的转换是非常方便而直观的。所以只要我们能够抓住十进制与八进制之间互相转换这个主要矛盾并解决它，那么其它计数制之间的转换的矛盾就迎刃而解了。

下面分别讨论十进制数与八进制数之间的相互转换。

1.4.1 十进制数转换成八进制数

先讨论整数的情形。假定已知十进制正整数 x_{10}（对于负整数也同样处理，只是在最后加上负号就行了），求八进制整数 x_8。

为此我们设

$$x_8=\alpha_n\cdot 8^n+\alpha_{n-1}\cdot 8^{n-1}+\cdots+\alpha_1\cdot 8^1+\alpha_0\cdot 8^0 \tag{1.6}$$

因为 $x_{10}=x_8$ 所以有

$$x_{10}=\alpha_n\cdot 8^n+\alpha_{n-1}\cdot 8^{n-1}+\cdots+\alpha_1\cdot 8^1+\alpha_0\cdot 8^0 \tag{1.7}$$

目的是由（1.7）式求出这些 α_i（$i=0,1,\cdots,n$）。从对（1.7）式右边分析可见：除最后一项 α_0 之外均为 8 的倍数。这就告诉我们，如果把 x_{10} 除以 8，那么得到一个商和一个余数，这个余数正好是我们所要求的 α_0。再把第一个商数除以 8 时，又得到第二个商和第二个余数，这第二个余数就是我们所求的 α_1。如此等等，直到最后一个商为 0 时，对应的余数就是 α_n。也就是八进制数的最高位。

将上述过程写成公式如下：

$$\left.\begin{aligned}
x_{10}&=8\times q_1+\alpha_0\\
q_1&=8\times q_2+\alpha_1\\
q_2&=8\times q_3+\alpha_2\\
&\cdots\\
q_{n-1}&=8\times q_n+\alpha_{n-1}\\
q_n&=8\times q_{n+1}+\alpha_n
\end{aligned}\right\} \tag{1.8}$$

此时 $q_{n+1}=0$。所得八进制数为

$$\alpha_n\alpha_{n-1}\cdots\alpha_i\cdots\alpha_2\alpha_1\alpha_0$$

从上式可见，我们所求的 α_i 从 α_0 开始依次都是用 8 做除数除得的余数。由此我们把这个方法称为“除八取余”法。

例三 将十进制数 279 化为八进制数。由（1.8）式可得

$$\begin{array}{r|l}
8 & \underline{279}\ |\ 7 \text{ —— } \alpha_0\\
8 & \underline{34}\ |\ 2 \text{ —— } \alpha_1\\
8 & \underline{4}\ |\ 4 \text{ —— } \alpha_2\\
 & 0
\end{array}$$

这里除得的余数依次是 7、2 和 4。它们分别是 α_0、α_1 和 α_2。则所求八进制数为427。也就是说

$$279_{10}=427_8$$

在此，我们提醒读者，对于各种计数制中的数，在读的时候不能一律都用读十进制数的习惯读法。比如十进制的 279 可以读做二百七十九。然而八进制的 427 就不可以读做四百二十七，只能按每位数字的名字读做四二七即可。这是初学者应该注意的，否则容易引起混乱。

现在讨论小数的情形。我们仍然假定已知正的十进制小数 x_{10}，求八进制小数 x_8。

设

$$x_8=\alpha_{-1}\cdot 8^{-1}+\alpha_{-2}\cdot 8^{-2}+\cdots+\alpha_{-m}\cdot 8^{-m} \tag{1.9}$$

因为 $x_{10}=x_8$ 所以有