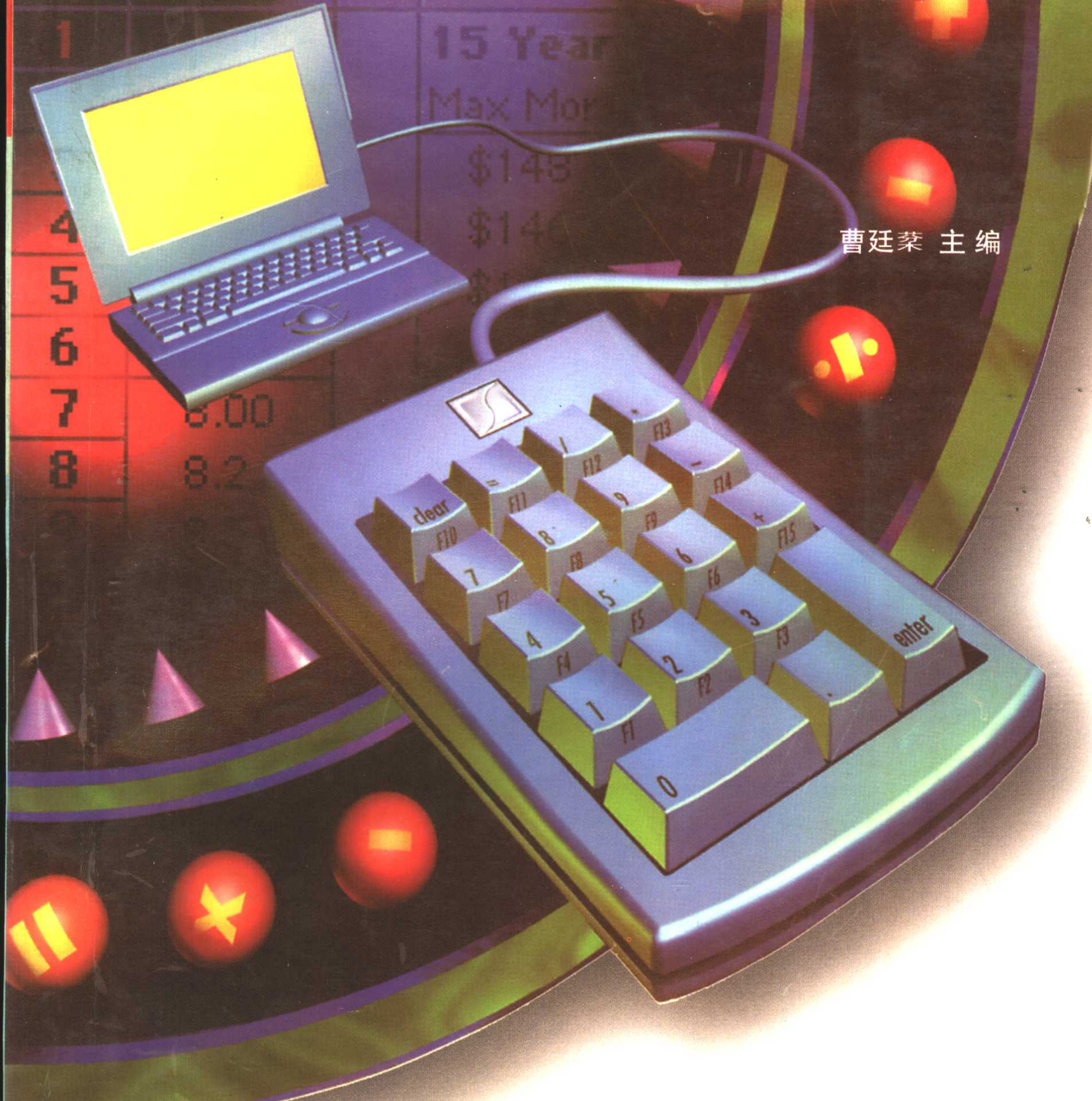

曹廷棻 主编

微机原理与汇编语言

（修订本）

中国商业出版社

计算机应用系列教材

计 算 机 应 用 系 列 教 材

微机原理与汇编语言

（修订本）

曹廷棻　主编

中 国 商 业 出 版 社

图书在版编目（CIP）数据

微机原理与汇编语言/曹廷棻主编．－2版（修订本）．－北京：中国商业出版社，1999.4

ISBN 7－5044－3211－3

Ⅰ．微…　Ⅱ．陈…　Ⅲ．①微机计算机－理论②汇编语言　Ⅳ．TP3

中国版本图书馆 CIP 数据核字（1999）第11012号

责任编辑：刘树林

中国商业出版社出版发行
（100053　北京广安门内报国寺1号）
新华书店总店北京发行所经销
中国石油报社印刷厂印刷

*

787×1092毫米　16开　13印张　324千字
1999年4月第2版　1999年4月第1次印刷
定价：16.50元

*　*　*　*

（如有印装质量问题可更换）

编审说明

根据当前我国电子计算机普及和发展的新形势，为适应大量培训中、初级计算机应用人才的需要，我们组织国内贸易部系统部分中等专业学校中具有丰富理论与实践经验，并多年从事计算机应用专业教学的高级讲师、讲师、工程师编写了这套计算机应用专业系列教材。

这套系列教材的读者对象，以中专、中技、职高为主，同时兼顾了社会培训和等级考核的需要。教材体现了科学性、先进性、理论性与普及性、应用性、操作性相结合的原则，做到了理论联系实际，内容翔实，结构严谨，体系合理，是一套较为实用的计算机应用系列教材。

《微机原理与汇编语言》是计算机应用专业系列教材之一，由陕西教育学院教授曹廷棻任主编。参加本书编写的有：陕西教育学院曹廷棻（第三、四、五、八章），刘非（第六、七章），付敏（第一、二章），最后由湖北省商业高等专科学校邓志华审阅定稿。

本书编写过程中得到了有关学校领导和教师的大力支持，在此一并致谢。由于编写时间仓促，水平有限，缺点疏漏处，请广大读者提出宝贵意见，以便进一步修订完善。

计算机应用系列教材编委会

1996年6月

修订说明

本系列教材出版发行以来，以其科学性、先进性、理论性与普及性、应用性、操作性相结合的特点，深受广大读者喜爱。

但是，由于计算机更新换代的加快，原有教材中有些内容已不适应当前教学需要，为此，我们特请原有主编、参编人员，对本系列教材进行了系统的修订。

本次修订，仍坚持原来的写作原则，同时根据计算机更新换代后的要求，对原教材中一些不适宜的内容进行了删改，增加了较多的新内容，从而使本系列教材的内容更翔实、结构更严谨、体系更合理。

本书修订过程中，继续得到了有关学校领导和教师的大力支持，在此深表谢意。

由于编写时间仓促、编者水平有限，如有缺点和疏漏之处，敬请广大读者不吝赐教，以便于我们再次修订。

计算机应用系列教材编委会

1999 年 2 月

目　录

绪　论

数字电子计算机的问世与发展，加快了我们赖以生存的这个星球各方面的发展速度，启迪了人们的思维，丰富了人们的想像力，向世人展现了一个新的前景。因而，计算机的问世是本世纪具有划时代意义的重大科技成果，它把人类带进了信息时代。

一、电子计算机的发展历程

从 1946 年成功地制造了第一台数字电子计算机至今才半个世纪，计算机却以惊人的速度更新换代了四次。大约每经过十年左右，机器的运行速度提高 10 倍，可靠性提高 10 倍，成本降低 10 倍。按照使用电子元件的种类，计算机的发展可分为四个阶段。

第一代为电子管时代（1946～1957 年）。这一时期，计算机所采用的逻辑元件为电子管，主存贮器采用延迟线或磁鼓，辅助存贮器开始使用磁带机。软件以机器语言为主，符号语言开始出现并使用。应用以科学计算为主。

用现在的眼光看，第一代计算机是很原始的。体积庞大，内存容量却很小；运算速度慢，可靠性能差，且耗电量大，价格昂贵，维修复杂。例如，1946 年制成的第一台计算机（ENIAC）使用了 1.88 万个电子管，重 30 吨，占地 150 平方米，耗电 150 千瓦，价值 40 万美元。但其内存的存贮容量仅为 17K 位，加法速度为 5 000 次/秒。这样昂贵的庞然大物只能用于军事或科学研究，如航天、原子能工业等少数部门。尽管如此，第一代计算机毕竟是计算机的革命，奠定了计算机发展的技术基础。

第二代为晶体管时代（1958～1964 年）。计算机的逻辑元件和逻辑线路均采用分立的晶体管，主存贮器以磁芯存贮器为主，辅助存贮器开始使用磁盘，采用以中央处理器为中心的集中控制方式，利用通道管理输入、输出设备。软件从机器语言发展到汇编语言、高级科学计算语言，FORTRAN 和商用计算机语言 COBOL、ALGOL 等都已开发，建立了子程序和批处理的管理程序。

与第一代计算机相比，第二代体积小、重量轻、耗电量少，运算速度提高到每秒几十万次。计算机的应用范围逐渐扩大，除了科学计算之外，也广泛应用于数据处理，并开始用于过程处理，工农业和商业等部门也开始使用计算机。计算机使用不再那么困难，人们对它的神秘感逐渐消除了。

第三代为集成电路时代（1965～1971 年）。集成电路是利用特殊的方法将一个完整的电子电路制做在硅片上，其集成度可做到将几千个晶体管封装在一个仅仅几平方毫米的晶片上。由于采用了半导体集成技术，大大减少了线路间连接的距离，缩短了信息传输上的延迟时间。电路的故障率也大大降低，可靠性显著提高。在软件方面引进了多道程序和并行处理技术。1965 年，易学易用的 BASIC 语言诞生了。

在存贮器容量、运算速度等方面，第三代计算机都比第二代提高了一个数量级，而成本进一步降低。因而，计算机有了更为广泛的应用，出现了新的发展方向，即计算机小型化。

第四代为大规模集成电路时代（1970～　　）。在此时期，建立在大规模和超大规模集成电路基础上的微型机和巨型机同时得到了飞速发展。第四代计算机的主要特点是：

1. 采用半导体存储器为主存贮器，提高了存储的容量和速度。

2. 微处理器的普遍使用。这是计算机发展史上的一个重大事件。20 世纪 70 年代初期，由于大规模集成电路的日趋成熟，使计算机的中央处理器有可能做在一个芯片上，再加上存贮器、接口等其他芯片，就构成了一个微型机。它在性能、价格、体积、使用等多方面都远远超过了前几代的计算机，因而促进了计算机的广泛应用。无论在国防、科技、工农业生产还是教育、医疗卫生，甚至社会科学领域，计算机都被广泛地使用，并发挥着越来越多的重要作用。

短短的 50 年，电子计算机从无到有，不断更新，从神圣的殿堂到寻常百姓家，它的发展让人目不暇接。除了它的性能不断地提高，而且数量也迅速增加。1950 年，全世界只有 10 台计算机。到了 1970 年，猛增到 10 万台，1984 年，又剧增到 4 000 万台。

我国计算机的研究工作起步较晚，但发展速度惊人。1956 年成立了第一个计算机研究单位，到 1978 年就研制出每秒 500 万次的大型计算机。1984 年，国防科技大学成功地研制出运行速度为每秒 1 亿次的“银河”电子计算机，标志着我国计算机技术已取得重大突破。此外，在汉字输入、排版印刷等方面，我国也有了很多领先世界的成就。邓小平同志的“电脑要从娃娃抓起”的指示，反映了我国领导人对计算机事业的重视。十余年来，全国的中、小学中的计算机教育得到了普及。

二、电子计算机的应用领域

随着计算机性能、功能、可靠性的不断提高，价格的降低和体积的不断减小，计算机的应用已渗透到社会的生产和生活的各个领域，使社会的面貌发生了巨大的变化。其主要应用有以下几个方面。

1. 科学计算

电子计算机可以完成大量而复杂的计算。随着计算机的运算速度和稳定运行时间的不断增加，使得过去一些用较简单的计算工具难以解决的问题都迎刃而解。在尖端科学和技术领域中表现尤为显著。例如，高层建筑结构力学分析、光路系统数学分析的科学计算；火箭、人造卫星和宇宙飞船的设计，离开了计算机是难以成功的。从这个角度讲，尖端科学技术是建立在电子计算机的发展基础之上的。科学计算的应用是电子计算机出现的初衷，也是最早的应用。

2. 数据处理

数据处理又称信息加工，这是现代电子计算机应用中最广泛也是最主要的领域，占计算机应用领域的 70%～80%左右。例如，企业管理中的库存管理、报表统计、账目计算；情报检索、人事档案，学校中的学生成绩、试题的管理等。由于各种管理软件日臻完善，大大提高了社会生产、生活各领域的速度和质量。可以说，一个国家的现代化水平越高，使用电子计算机进行数据处理的比例越大。

从 20 世纪 50 年代中期起，电子计算机的应用才从科学扩展到数据处理领域。近几十年来，数据处理的业务种类迅速增加，分布范围不断扩大，应用水平日益提高。例如从 1958 年开始，历时 11 年的美国的阿波罗登月计划，动员了 2 万个企业、120 所大学和实验室的 49 万人参加，如果没有计算机的管理，这个计划是难以完成的。

3. 自动控制

电子计算机用于实时控制或称过程控制，就是生产或科学实验过程的自动化。在各种具体过程中，计算机在收集、检测各种数据资料并经过计算后，可以按照某种标准状态或最佳

状态直接对过程进行调节和控制。这种控制，不仅可以大大提高自动化水平和控制的准确性，提高产品质量及成品合格率，而且能降低成本，减轻劳动强度。近年来计算机在机械、冶金、石油化工、电力、建筑及轻工业各领域都得到广泛的应用，取得了很大的经济效益。

80年代以来，计算机应用的一个重要方面是进入了家庭。它使得人们的生活方式有所改变，生活质量得到提高。计算机为家庭服务可用于信息处理、能源控制、系统处理、安全保卫等。由于多媒体计算机的出现，计算机不仅能做电子游戏，还能播放音乐和活动图像，成为家庭的娱乐中心。

电子计算机最大的特点是它能代替一部分特定的脑力劳动，是一部智能化的设备。随着计算机的不断发展，其应用范围会越来越广泛，并渗透到社会生活的各个领域。

三、电子计算机的发展方向

虽然计算机发展迅速，但它仍是个年轻的学科。目前的发展趋势是全面向第四代过渡，并向超大规模集成电路时代迈进。近期内，主要发展方向，一般认为有以下几个方面。

1. 向大型或巨型机的方向发展

巨型计算机的特点是高速度、大容量，并行处理。主要应用于尖端科学研究、天气预报等领域。加速研究、发展巨型机，既能促进许多科技领域发生变革性的进步，也能推动计算机技术自身的迅速发展。

2. 向微型计算机的方向发展

微型机的主要特点是体积小、价格便宜，使用时不要求严格的环境条件。它为计算机的普及提供了极为有利的条件。

微型机就其功能分高、中、低三档。目前高档微型机已接近或超过小型机的水平，字长可达64位，运算速度已达每秒千万次，主存贮器容量可达几十兆字节。微型机自1971年问世以来，每18个月就会更新换代一次，发展十分迅速。

3. 计算机网络

70年代以来，计算机网络的建立受到普遍重视，从而使计算机的使用方式有了很大的改变。计算机网络提高了计算机系统的效率，用户使用更为方便，更好地发挥了计算机的作用。所谓网络，就是把若干台独立的计算机通过通信线路彼此联接起来，形成能够进行通信的系统。它能进行数据传输，共享整个网络中的硬件、软件资源，均衡网络的负载等。例如，为检索各地图书情报资料而建立的图书情报网络系统，现在已形成一百多个国际联机检索系统。不论用户在哪个国家、哪个地方，只要安装一台终端设备，通过网络系统就可以连接到存贮情报资源的计算机的数据库系统上，输入自己的检索课题后，几分钟之内就可取得所需的资料。

4. 研究智能计算机

用计算机模拟人的智能是自动化发展的最高阶段。计算机使人的体能和脑力得到扩大与延伸。智能模拟的具体内容有：模式识别、数学定理证明、自然语言理解和智能机器人等。智能模拟是在对计算技术和控制论研究的基础上发展起来的。

展望未来，计算机的发展必定还会有很多新的突破。准确的预测是很困难的，但可以预见到，未来的计算机将是半导体技术、光学技术、超导技术、电子仿生技术互相结合的产物。90年代以后，集成电路、超导器件及电子仿生技术与计算机的结合，将使计算机的功能提高到一个新水平，应用领域更宽广，对社会的发展、变革将发挥越来越大的作用。

第一章　　数制与编码

人们之间通常使用数字、字符、声音或图像等形式交换信息，而要用计算机对信息进行处理，必须将其转换成计算机能识别的形式，即由“0”和“1”组成的二进制代码表示。本章介绍数字和字符在计算机中以二进制数表示的方法。

第一节　数　　制

人们通常采用进位计数的方法计数，这就是进位计数制。十进制是大家最熟悉的一种进位计数制，在十进制中，有十个表示数的符号：0、1、2 … 9，称为数码。每计够十个数就要向高位进位，即逢十进一，10 是十进制的基数。一个十进制数 1234.56 所表示的数值为：

$$1\times10^3+2\times10^2+3\times10^1+4\times10^0+5\times10^{-1}+6\times10^{-2}$$

数字 1 在不同的位上，所表示的数值的多少不同。把与每一位数字相乘的 10^n 称为该位数的权。个位的权是 10^0，即 1。十位的权是 10^1，即 10。它们都是基数 10 的整数幂。一个数字的值等于该位数字与它的权的乘积之总和。

除十进制外，人们也常使用多种其他进制。如每 7 天为一周——七进制；12 个月为一年——十二进制；60 分为一小时——六十进制等等。

在电子计算机中，直接表示出十进制数是困难的，而表示基数为 2 的二进制数却十分容易。因为许多电子器件都具有两种截然相反的稳定状态，例如，发光二极管的发光与熄灭，晶体管的导通与截止等。这两种稳定状态就可以用来表示二进制中的两个数码“0”和“1”。因此，计算机中使用二进制。

为了区分不同数制的数字，在计算机的书刊或程序中，在容易混淆的地方，一般在数字后面跟一个英文字母以示区别：二进制数用 B（Binary），八进制数用 O（Octal），十进制数用 D（Decimal），而十六进制数则用 H（Hexadecimal）。

一、二进制和十六进制

1. 二进制

二进制的数码有两个：“0”和“1”，其基数是 2，按“逢二进一”进位。若用 a_0、a_1、$a_2\cdots a_{n-1}$分别表示二进制数整数的第一、第二…和第 N 位，用 b_1、b_2、$b_3\cdots b_m$ 分别表示二进制数小数的第一、第二…和第 M 位。

$$a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_2a_1a_0.b_1b_2b_3\cdots b_m$$

表示的就是一个二进制数，其中的 a、b 只能取 1 和 0。第 i 位整数位的权为 2^{i-1}。第一位整数的权为 $2^{1-1}=1$，第二位的权为 $2^{2-1}=2^1=2$，第 N 位的权为 2^{n-1}。第 j 位小数位的权为 2^{-j}。例如，第一位小数位的权为 $2^{-1}=0.5$，第二位的权为 $2^{-2}=0.25$，第 M 位的权为 2^{-m}。以上的权都是以十进制数表示的。二进制不同位的权分别是：

整数位数	6	5	4	3	2	1
权	32	16	8	4	2	1

小数位数	1	2	3	4	5
权	0.5	0.25	0.125	0.0625	0.03125

2. 二进制数与十进制数的转换

(1) 二进制数转换为十进制数

各位数字与该位的权的乘积之和，即为相应的十进制数。例如：

$$1011.011B = (1\times2^3+0\times2^2+1\times2^1+1\times2^0+0\times2^{-1}+1\times2^{-2}+1\times2^{-3})\ D$$
$$= (8+0+2+1+0+0.25+0.125)\ D$$
$$= 11.375D$$

(2) 十进制数转换为二进制数

十进制数转换成二进制数方法有多种，其中较简单的是降幂法和逐次相除/相乘法。

① 降幂法。对一个给定的十进制数，在二进制各位的权中找一个比它小而又最大的权，与该数相减，够减，与该权对应的位为 1，否则，该位为 0。然后降一次幂，将余数按此法依次类推，确定下一位，直到余数为 0 时，前次的余数 1 即为最低位。

例如：　109D

$109-64=45$　$(64=2^6,\quad a_6=1)$

$45-32=13$　$(32=2^5,\quad a_5=1)$

$13-16=-3$　$(16=2^4,\quad a_4=0)$

$13-8=5$　$(8=2^3,\quad a_3=1)$

$5-4=1$　$(4=2^2,\quad a_2=1)$

$1-2=-1$　$(2=2^1,\quad a_1=0)$

$1-1=0$　$(1=2^0,\quad a_0=1)$

于是　109D = 1101101B

② 逐次相除/相乘法。将转换的十进制整数除以 2，其余数为二进制的最低位。此后，前次所得的商不断地除以 2，其余数即为相应位的数字，直到余数为 1 时，就是最高位。对二进制小数则不断地乘 2，其整数即为相应位的二进制数字。取掉整数再乘，直到小数部分为零。

例如：109D

$109\div2=54$	余数为1	$a_0=1$
$54\div2=27$	0	$a_1=0$
$27\div2=13$	1	$a_2=1$
$13\div2=6$	1	$a_3=1$
$6\div2=3$	0	$a_4=0$
$3\div2=1$	1	$a_5=1$
1		$a_6=1$

109D = 1101101B

又如：0.4375B

$0.4315\times2=0.873$　　$b_1=0$

$0.875\times2=1.75$　　$b_2=1$

$0.75 \times 2 = 1.5$　　　　$b_3 = 1$

$0.5 \times 2 = 1.0$　　　　$b_4 = 1$

0.4375D = 0.0111B

3. 十六进制

二进制数只有 0 和 1 两个数字，数的构成比较单调。同一数值用二进制表示数字较长，且与人们熟悉的十进制之间没有直接的对应关系，阅读、书写和记忆都十分不便。采用十六进制可以解决上述问题。

十六进制有 16 个数码，它们与十进制数的对应关系如下：

十进制	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
十六进制	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F

它的前十个数码与十进制相同。从十进制的 10～15，分别用 A、B、C、D、E 和 F 表示。因此，它与十进制有明显的对应关系。

十六进制与二进制数进行转换也十分方便。四位二进制数最多表示 16 个数，因此，一位十六进制数对应四位二进制数。二进制数转换为十六进制数时，先把二进制数从整数或小数的第一位起每四位分一段，将每段转换成十六进制数，就得到相应的十六进制数。

例如：110111100101.1011B

```
1101  1110  0101 . 1011
  9     E     5  .   B
```

110111100101.1011B = 9E5.B H

十六进制数也容易转换成二进制数，只须把每位十六进制数扩充为四位二进制数即可。

例如：DA2B H

```
  D     A     2     B
1101  1010  0010  1011
```

DA2B H = 1101 1010 0010 1011B

十六进制的基数是 16，其整数各位的权分别是 1、16、256、4096、65536…。用与二进制数转换为十进制数相同的方法，可进行十六进制与十进制之间的转换。

例如：把 1EF8H 转换成十进制数

$$1EF8H = 1 \times 16^3 + 14 \times 16^2 + 15 \times 16^1 + 8 = 7928D$$

十进制数转换为十六进制数也可以用降幂法逐次相除法。

例如：把 14935D 转换为十六进制数。

(1) 降幂法

$$14935 - 3 \times 4096 = 2647$$

$$2647-10\times256=87$$

$$87-5\times16=7$$

$$14935D=3A57H$$

(2) 逐次相除法

$14935\div16=933$	余数 7	$a_0=7$
$933\div16=58$	5	$a_1=5$
$58\div16=3$	10	$a_2=A$
		$a_3=3$

$$14935D=3A57H$$

使用十六进制的另一个优点是它与计算机存储器信息的存储方式有简单的对应关系。存储器存储信息的最小单元是字节，由八位组成，一个字节可用两位十六进制数表示。一个字符用一个字节的二进制数表示，因此，用两个十六进制数可以表示一个字符。

4. 二进制数的运算

(1) 二进制数的运算规则

在二进制的四则运算中，减法和除法可以转换成加法和乘法，因此加法和乘法是基本运算。它们的运算规则是：

加法	乘法
$0+0=0$	$0\times0=0$
$0+1=1$	$0\times1=0$
$1+0=1$	$1\times0=0$
$1+1=1$（产生进位）	$1\times1=1$

(2) 加法运算

二进制数相加是按照加法规则，按位相加，逢二进一进行计算。

例如：$1011+110=10001$

$$\begin{array}{r} 1011 \\ +\quad 110 \\ \hline 10001 \end{array}$$

(3) 乘法运算

乘法运算的方法与十进制相同。先用乘数的第一位乘被乘数的各位，再用第二位、第三位、…与被乘数各位相乘并向左移位求和，即得相乘的结果。

例如：$1011\times101=110111$

$$\begin{array}{r} 1011 \\ \times\quad 101 \\ \hline 1011 \\ 0000 \\ +\quad 1011 \\ \hline 110111 \end{array}$$

二、计算机中数的表示

数是用数字表示的。一个数字应包括数值和符号（正或负号）两部分，数值部分还应有确定的小数点的位置。前面所讨论的只是无符号数，有符号数特别是负数在计算机中如何表

示，是本节讨论的重点问题。

1. 机器数

计算机中数的表示有以下几个特点。

(1) 数的位数是确定的。机器中表示的一位数 0 或 1，称为位 (Bit)，它是计算机所能表示的数的最小单位。计算机一次处理或运算的二进制数称为字 (Word)，它是计算机中表示信息的基本单元。一个字所包含的位数，称为字长。一个八位的二进制数，称为字节 (Byte)。计算机所能表示数的范围受微处理器结构的限制。在八位机中，字长是 8 位，即一个字节；16 位机，字长是两字节；32 位机，字长是四字节。

a_7	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0

符号位　　　　数　　　值　　　部　　　分

(2) 数的符号应能同数本身一起参与运算，即符号的数值化。通常用 “+” 或 “-” 表示数的正或负，例如 +0110、-1010，前面的符号表示其正负，后面的数表示其绝对值。运算时，+、-号仅指示两个数求和是进行加法还是减法运算，而符号本身并不参与加减。在计算机中，所有的信息都必须用二进制数表示，符号也不例外。例如，在 8 位机中，字长是 8 位，规定 a_6—a_0 是数的数值部分，a_7 为符号位。符号位为 0 时，表示正数，符号位为 1 时，表示负数。

于是，符号位和数值部分就没有区别。运算过程中，符号位与数值部分一起参与运算，并应得到正确的结果。在计算机中，符号经过数值化处理的数，称为机器数。

(3) 机器中小数点的位置不用特定的符号表示，而采用事先约定的方式确定。

2. 真值　原码、反码和补码

为了能使机器数按照一般的二进制运算规则进行运算，并能得到正确的结果，必须对带符号的机器数按一定的规则进行转换，即进行编码。常用的编码有原码、反码和补码。

下面以 8 位字长的数为例，说明三种编码的编码规则。

(1) 真值

机器数原来的实际值，称为真值。真值一般用十进制或二进制表示，符号仍用 “+”、“-” 号。

例如：　$X_1 = +53D = +0110101B$　和　$X_2 = -53D = -0110101B$

X_1，X_2 就是用真值表示的。

(2) 原码

原码的编码规则：保持其真值的数值部分不变，在其最高位加符号位。正数加 0，负数加 1。

例如：设 $X_1 = +53D = +0110101B$，　　$[X_1]_{原} = 00110101B$

　　　　$X_2 = -53D = -0110101B$，　　$[X_2]_{原} = 10110101B$

数 0 可以有 +0、-0。若令 $X_3 = +0$，$X_4 = -0$，虽然 $X_3 = X_4$，但它们的原码却不相同。

$X_3 = +0000000B$　　$[X_3]_{原} = 00000000B$

$X_4 = -0000000B$　　$[X_4]_{原} = 10000000B$

因此，0 的原码有两个。

原码的编码规则简单，与真值有直接的对应关系。但运算时必须对最高位进行判断，然后取掉最高位才能进行运算，计算机操作起来十分不便。

(3) 反码

反码的编码规则：正数，保持其真值的数值部分不变，在最高位加符号位 0；负数，对其真值的数值部分按位取反，然后在最高位加符号位 1。所谓按位取反是将 1 变 0，而将 0 变 1 的操作。

例如：设 $X_1 = +53D = +0110101B$，$[X_1]_{反} = 00110101B$

$X_2 = -53D = -0110101B$，$[X_2]_{反} = 11001010B$

$X_3 = +0D = +0000000B$，$[X_3]_{反} = 00000000B$

$X_4 = -0D = -0000000B$，$[X_4]_{反} = 11111111B$

可以看出，0 的反码也是两种。

(4) 补码

虽然原码、反码都可以作为机器数在计算机中操作，但大多数计数机采用补码。因为补码的符号位能和数值部分一起直接参加运算，同时能把减法运算转换成补码的加法运算。

先讨论十进制数的补码。假定我们只能进行一位数的加减运算，即运算的结果只保留一位，请看下面几组数求和的结果。

$7 + 26 = 33$ 保留个数结果为3

$7 + 16 = 23$　　3

$7 + 6 = 13$　　3

$7 + (6 - 10) = 3$　　3

虽然加数不同，但结果都相同。在保留个位的加法运算中，加数加 10 或减 10，求和的结果不变。

10 是一位十进制数计数的最大量程，称为模数。以上这几个和数除以模数 10 得到的余数相同，称它们为同余。同一模数的几个数是同余的，对模数而言，同余的数是相等的。用 MOD 10 表示以 10 为模数对一个数作取余运算，则 26 (MOD 10) = 16 (MOD 10) = 6 (MOD 10) = −4 (MOD 10)。6 和 −4 对模数 10 也是同余的。如同两个角之和为 180，此二角互补一样，因为 6 + 4 等于模数 10，于是称 6 是 −4 的补码。一个负数的补码等于模与该负数之和，例如，10 + (−4) = 6。一个正数加上模就等于自己，若定义正数的补码就是自己，任意一个数的补码等于该数与模之和。

如上所述，由于 $7 + 6 = 7 - 4 = 3$，当进行 $7 - 4$ 运算时，就可以用 $7 + 6$ 取替代，对正数 4 的减法就转换成对其补码的加法了。

一个数对不同的模数，它的补码也不同。例如，以 100 为模数时，−4 的补码就是 96 了。

把上面的概念应用到二进制中，就引出了二进制数的补码。n 位二进制数能表示数的个数为 2^n，2^n 就是它的模数。对一个真值为 X 的 n 位二进制数：

若 $X > 0$，$[X]_{补} = [X]_{原}$。若 $X < 0$，则 $[X]_{补} = 2^n + X$。

仍以 8 位二进制数为例，其模为 $2^8D = 100000000B$。若 $X = +0110101B$，其补码 $[X]_{补} = [X]_{原} = 00110101B$。若 $X = -0110101B$，其补码 $[X]_{补} = 100000000 - 0110101 = 11001011B$。

实际上，二进制数的补码可按如下的简便方法得出：对正数，它的补码就是它的原码；对负数，将原码的符号位保持为 1，其余按位取反后加 1，就是它的补码，即取其绝对值原码的反码加 1，即得补码。

例如：设 $X_1 = +53D = +0110101B$

则　$[X_1]_{补} = 00110101B$

$X_2 = -53 = -0110101B$

$$\begin{array}{rr} [X_2]_{反} = & 11001010B \\ & +\quad\quad 1 \\ \hline [X_2]_{补} = & 11001011B \end{array}$$

设　$X_3 = +0000000B$　$[X_3]$ 补 $= 00000000B$

　　$X_4 = -0000000B$　$[X_4]$ 补 $= 00000000B$

可见，0 的补码只有一种形式。

由取补码的规则可知，补码的补码就是原码。

例如：已知　$[X_2]_{原} = 10110101B$

$[X_2]_{补} = 11001011B$

$$\begin{array}{rr} \{[X_2]_{补}\}_{反} = & 10110100B \\ & +\quad\quad 1 \\ \hline & 10110101B \end{array}$$

$\{[X_2]_{补}\}_{补} = 10110101B = [X_2]_{原}$

由以上的讨论可知，二进制数的原码、反码和补码，对正数三者完全相同，它们的区别主要是反映在负数上。负数三种码的最高位是相同的，都是 1。在变换的过程中符号位不变，区别在它的数值部分。原码保持其真值数值部分不变，反码则对其按位取反，而补码不仅取反，而且要加 1。

3. 机器数的表示范围

在计算机中，机器数的长度一般为 8 位、16 位或 32 位。8 位的机器数，除去一个符号位，数值位只有 7 位，16 位机器数的数值位为 15 位。因此，在 8 位字长时，补码所表示的数值范围为：

最大值	01111111B	7FH	+127D
最小值	10000000B	80H	−128D

16 位字长时：

最大值		7FFFH	+32767D
最小值		8000H	−32768D

三、定点数和浮点数

1. 定点数和浮点数

机器数在运算过程中，按照小数点在数字中的位置是否发生移动，可把机器数分为定点数和浮点数。

先讨论十进制定点数和浮点数的区别。假设有一个能显示 8 位数字的计算器，其最高位显示 +、− 号，有效数字为七位。如图 1.1.1 所示。

−	1 2 3 4 .5 6 7

符号　　　小数点

(a) 定点数

−	1.2 3 4	+03

符号　小数点

尾数　　　阶符　阶码

(b) 浮点数

图 1.1.1　定点数和浮点数的示意图

在运算中，若保留三位小数位，即保持小数点的位置不变，进行定点数的运算。它所表示的数的范围在 $+9999.999 \sim -9999.999$ 之间。

科学记数法是另一种数的表示方法。例如 -1234.567 用科学记数法表示为 -1.234567×10^{3}。其中 1.234567 称为尾数，10 称为阶底，10 的方次 3 称为阶码。对上述计算器，显示格式如图 1.1.1（b）所示，它所能显示的数的范围在 $+1.999\times10^{99} \sim -1.999\times10^{-99}$ 之间。不仅扩大了计数的范围，而且能保持四位有效数字。科学计数法的尾数中的小数点的位置虽然不变，若阶码变化，小数点在数中的实际位置随之改变，这就是浮点数名称的来源。运算过程中阶码固定的数为定点数，阶码变化的数为浮点数。

二进制数也可以用科学记数法表示，与十进制的区别只是它以 2 为底。

例如：

$+1011011=0.1011011\times2^{6}$D

$=0.1011011\times2^{1}$10B

$-0.00101=-0.101\times2^{-2D}=-0.101\times2^{-10B}$。

2. 机器数的浮点表示

机器数表示为浮点数的格式如下：

阶符	阶码	尾符	尾码

它由阶码和尾数两部分组成。阶码在高位，尾数在低位，各自有一位符号位。符号位为 0 表示正，为 1 表示负。尾数的小数点位于 1/2 和 1 之间。

假设尾数为 8 位，阶码为 4 位，其格式为：

0	0	1	1	1 .	1	0	1	1	1	0	1

阶符　阶　码　尾符　小数点位　尾　数

在下面的例子中，浮点数都以原码方式存储。