中等职业教育国家规划教材配套教学用书

单片机原理及应用技术

（电子电器应用与维修专业、电子技术应用专业）

主编　刘振海

高等教育出版社

中等职业教育国家规划教材配套教学用书

单片机原理及应用技术

（电子电器应用与维修专业、电子技术应用专业）

主编　刘振海

高等教育出版社

内容简介

本书是中等职业教育国家规划教材配套教学用书，根据2001年教育部颁布的中等职业学校重点建设专业教学指导方案，并参照有关行业的职业技能鉴定标准编写。

本书主要内容有：单片机概述及数制基础，MCS-51单片机的结构和原理、指令系统、中断系统与定时器/计数器、输入和输出、存储器及I/O接口扩展，单片机应用系统设计及实验开发系统。书末配有实验指导。

本书可作为中等职业学校电子电器应用与维修专业、电子技术应用专业及相关专业教材或岗位培训用书，也可作为广大单片机用户和电子爱好者的自学用书。

图书在版编目(CIP)数据

单片机原理及应用技术/刘振海主编．—北京：高等教育出版社，2003.8 (2006重印)
ISBN 7-04-012861-6

Ⅰ.单…　Ⅱ.刘…　Ⅲ.单片微型计算机-专业学校-教材　Ⅳ.TP368.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第043454号

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社　址	北京市西城区德外大街4号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100011	网　址	http://www.hep.edu.cn
总　机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
		网上订购	http://www.landraco.com
经　销	蓝色畅想图书发行有限公司		http://www.landraco.com.cn
印　刷	北京市南方印刷厂	畅想教育	http://www.widedu.com
开　本	787×1092　1/16	版　次	2003年8月第1版
印　张	9	印　次	2006年12月第6次印刷
字　数	210000	定　价	11.80元

物料号　12861-00

前　言

随着我国社会主义市场经济体制的初步建立，我国社会经济进入了一个高速发展的时期，经济结构调整在全国范围内深入开展，高科技的发展更是日新月异。面对变化了的客观现实，中等职业教育如何做到与宏观经济结构调整和科学技术发展相匹配，更好地为经济建设服务，已成为中等职业教育亟须解决的问题。2001年，青岛市职教教研室承接了教育部《中等职业教育教材如何贯彻落实全面素质教育为基础，能力为本位的教学指导思想》的课题，并进行了深入的研究。结合本课题的研究成果，同时根据教育部关于中等职业教育课程改革思路和中等职业学校重点建设专业教学指导方案的基本要求，并参照有关行业的职业技能鉴定标准组织编写了本教材。

本教材在编写过程中力图贯彻落实全面素质教育为基础、能力为本位的教学指导思想，为中等职业教育的培养目标服务，体现中等职业教育的特色。本教材有以下主要特点：

1. 充分考虑学生的知识基础，章、节内容安排相互贯通，由浅入深，以学生可以接受的方式，讲授各种基本概念、基本原理及应用。

2. 教材编写以定性介绍为主，减少复杂的理论分析，尽量做到原理分析简单易懂。

3. 书中选择了简单而有代表性的例题及思考题，使学生能够很直观地掌握单片机的工作原理及基本应用。

本书由青岛市职业教育教研室刘振海主编，青岛电子学校陈伟和闫琳琳参编。其中，第1、2、3章内容及习题由闫琳琳编写，第4、5章内容及习题由刘振海编写，第6、7章内容及习题、实验、附录部分由陈伟编写。全书由刘振海统稿。

本书在编写过程中，参考了有关单片机方面的书籍资料，由中国海洋大学计算机系魏志强教授主审，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限和时间仓促，书中难免有错误和纰漏，恳请广大读者批评指正。

编　者

2003年1月

目　录

第一章　单片机概述与数制基础

了解单片机的发展过程，有助于理解单片机的结构；数制及数据编码，是学习计算机知识的基础。

本章介绍：

◇ 单片机的发展简史

◇ 常用数制

◇ 单片机中的数据编码

◇ 存储器的基础知识

第一节　单片机概述

单片机是单片微型计算机的简称，是将中央处理单元 CPU、存储器 RAM 和 ROM、定时/计数器集成在一块芯片上，通过各种总线与外围设备连接的微型计算机，又称为“微控制器”、“嵌入式微控制器”。

一、单片机的发展

1971 年由 Intel 公司研制推出世界上第一片 4 位单片机芯片 4004。1976 年 9 月在 Intel、Motorola、Zilog 各公司的共同参与下推出了 MCS-48 系列单片机，从此以后单片机的发展非常迅速，先后经历了四个发展阶段：

1. 第一阶段（1976～1978）

低性能单片机阶段。以 Intel 公司的 MCS-48 系列为代表。

2. 第二阶段（1978～1982）

高性能单片机阶段。在此阶段推出了 MCS-51 系列，是单片机的完善阶段，奠定了典型的通用总线型单片机体系结构。

3. 第三阶段（1982～1990）

16 位单片机阶段。同一阶段，8 位单片机得到巩固，并向微处理器方向发展。

4. 第四阶段（1990～）

微控制器全面发展阶段。各公司产品尽量兼容，向高速、大寻址范围、强运算能力的通用型及小型廉价专用型方面发展。

二、单片机的结构特点

1. 片内存储器容量有限。

芯片内集成有存储器，一般程序存储器 ROM 的容量小于 8K 字节，数据存储器 RAM 的容

量小于256字节。

2. 可靠性高。

单片机严格将程序存储器ROM和数据存储器RAM在空间上分开,使用不同编址方式和不同的寻址方式。程序指令、常数、表格固化在ROM中,不易被破坏,许多信号通道在同一芯片内,抗干扰性高于一般CPU。

3. 控制功能强。

指令系统丰富,易于掌握。具有条件转移指令、I/O逻辑操作并开辟了位操作区和特殊功能寄存器SFR区,可以极大地满足工业控制的要求。

4. 易扩展。

芯片内具有计算机正常工作所需的器件,片内有总线、并行及串行输入/输出端,可以方便地构成各种规模的应用系统。

5. 体积小,功耗低。

6. 性能价格比高。

三、单片机的应用

单片机自身的特点决定了应用的广泛性,遍及生产生活的各个领域。主要表现在以下几个方面:

1. 智能产品

单片机与机械产品相结合,使传统的机械产品的结构得到简化,控制实现智能化。如,德国的宝马牌汽车中,就使用了几十个嵌入式单片机芯片;在传真打字机中,使用单片机可取代近千个机械零件。

2. 数控型控制机

用单片机作为控制系统的简易控制机,可以增强功能,降低成本,还可以减轻数控型控制机的负担。

3. 智能仪表

单片机应用于测量控制仪表,能使仪表数字化、智能化,可以方便地解决测量仪器中的误差纠正、线性化等问题。

4. 在智能接口和多机系统中的应用

在计算机系统,特别是在较大型工业测控系统中,用单片机进行接口的控制和管理,可以使系统运行速度提高,减少接口的通信密度,能极大地提高接口的管理水平。

5. 在人类日常生活中的应用

在家用电器、电子玩具中使用单片机,增强了功能;在交通管理方面,使用单片机可以针对具体的车流量、人流量进行控制;应用于电梯、自动扶梯中的单片机控制功能,给人们的生活带来了便利。

四、单片机主要品种及系列

单片机大致可分为通用型和专用型两大类。

通用型单片机指的是,不为某种专门用途而设计,而是把可开发资源全部提供给用户,适应性强,应用范围广。

专用型单片机是针对某一类产品甚至针对某一个产品而设计生产的。

通用型单片机有以下几种。

1. 4 位单片机

主要有美国 TI 公司的 TMS1000 和 NS 公司的 COP400 系列、日本 SHARP 公司的 SM 系列、东芝公司的 TLCA 系列、NEC 公司的 μCOM75××和 μPD75××系列、国内生产的 cop4004 单片机等。

4 位单片机的特点是 CPU 为 4 位，片内的存储器 ROM 有 2KB，最大的有 8KB，RAM 有 128×4B，512×4B 等。有的还带有 A/D 转换器。4 位单片机主要用于家用电器。

2. 8 位单片机

8 位单片机是目前广泛应用的主要机型。8 位低档机如 Intel 公司的 MCS-48 系列等，一般应用很少，主要是高档 8 位机，如 MCS-51 系列、Motorola 公司的 MC 系列、Zilog 公司的 Z8 系列等。在高档 8 位单片机的基础上又出现了超 8 位单片机，如 Intel 公司的 UPI-452，83C152；Zilog 公司的 Super8，Motorola 公司的 MC68HC11 等。这些芯片进一步扩大了片内 ROM 和 RAM 的容量，增加了高级通信、DMA 传送和高速 I/O 的功能。最近一些公司在 MCS-51 的基础上，又研制出了既可与 MCS-51 系列兼容，性能上又优于 51 的系列芯片，如 ATMEL 公司生产的 AT89 系列，它的片内带有 EPROM，最近生产的芯片内还增加了 10 位 A/D 转换器。

下面列出 MCS-51 系列以 8051 为代表的系列型号。

表 1－1　MCS-51 系列单片机型号

型　　号	制造技术	片内程序存储器	片内数据存储器
8051AH	HWOS	ROM(4KB)	128 字节
8031AH	AHWOS	无	128 字节
8751H	HWOS	EPROM(4KB)	128 字节
80C51	CHMOS	ROM(4KB)	128 字节
80C31	CHMOS	无	128 字节
8051	HWOS	ROM(8KB)	256 字节
8031	HWOS	无	256 字节

第二节　计算机中的数制与转换

一、数制

日常生活中，人们经常要跟数字打交道。最常使用的是十进制数。进制是“进位计数制”的简称，即如何按进位的原则进行计数的方法。通俗地讲，将多少个 1 累计在一起然后向高位进一位，就是多少进制。

所谓十进制表示法，就是每累计到 10 个 1 后向高位进一位，用 0～9 这 10 个数字符号来记录累计的次数。

十进制数的表示方法，在其他进制中也是通用的。

在介绍计算机中常用数制之前，先了解几个概念。

1. 基数

数制所使用的数码的个数，叫基数。如十进制的基数为 10，二进制的基数为 2，十六进制的

基数为 16，N 进制的基数为 N。

基数体现了该数制中进位和借位的原则：在某一个数位上累计够一个基数时需要向上一位进 1；反之，从上一位借 1 可以在下一位上当一个基数来使用。

虽然十进制数很常用，但由于构成计算机的部件都是电子器件，很难实现 0～9 这 10 种不同的状态。而二进制对两种状态，如电压的高和低，开关的接通和关断状态实现起来非常容易。因此，在计算机中，往往采用二进制数的表示形式。

常用的还有十六进制数。

按照基数的概念，二进制数的基数为 2，使用的数字符号为 0、1；十六进制的基数为 16，用 0～9、A、B、C、D、E、F 共 16 个数字符号来表示，A～F 相当于十进制中的 10～15。

2．权

进制中，每一位基数的若干次幂称为权，又称位权。

在各种计数的形式中，按照自右向左的顺序，习惯上叫作数字的第 0 位、第 1 位、……。相应的各位的权为 N^0、N^1、…（N 表示基数）。

因此，即便是在数字符号相同的情况下，在不同的位置上其表示的数的大小却不相等。例如，十进制数 555，用到的数字符号都是 5，但第一个数字符号“5”表示 500，第二个数字符号“5”表示 50，第三个数字符号“5”仅表示 5。如果写成每位的权的形式，可以表示为：

$$555 = 5\times 100 + 5\times 10 + 5\times 1 = 5\times 10^2 + 5\times 10^1 + 5\times 10^0$$

任何一种进制数都可以表示为这种按位权展开相加的形式。

关于进制，有如下两个基本特点：

(1) 逢 N 进 1（N 表示进制的基数）；

(2) 可以采用位权表示法：同样的数字符号在不同位置上所代表的值不同，但一个数字在某个固定位置上所代表的值是确定的。按照位权表示的数，称为该数的“位权展开式”。

为了更明确的表示各种数制，一般在数字后面标注一个特定的字母加以区别。

D：表示十进制数，可以缺省。如 25D，或 25；

H：表示十六进制数，如果十六进制数以字母开头，在字母数字前面加“0”以示区别。如 69H，0ABH；

B：表示二进制数。如 1001B。

另外，还可以采用在数字外面加括号，在括号外标注数字符号的方法。如八进制数 12 可以表示为 $(12)_8$。

二、数制之间的相互转换

1．二、十六进制数转换为十进制数

前面提过，任意一个数都可以写作按位权展开相加的形式，如前面提过的十进制数 555。因此，在将二进制、十六进制数转换为十进制数表示形式时，不论是整数还是小数，只需按每位的权展开相加就可以了。

$$1001B = 1\times 2^3 + 0\times 2^2 + 0\times 2^1 + 1\times 2^0 = 9$$

$$1F7H = 1\times 16^2 + 15\times 16^1 + 7\times 16^0 = 503$$

2．十进制数转换为二、十六进制数

将十进制数转换为二进制数或十六进制数时，要分为整数部分和小数部分分别转换，然后再将转换结果加在一起。

(1) 整数部分的转换

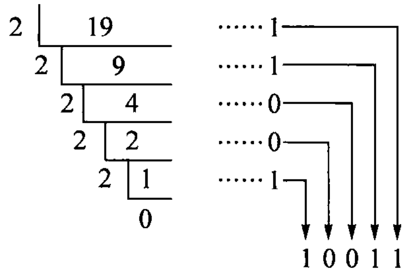
将十进制整数转换为二进制数时，可以用 2 连续除需要转换的十进制数，直到商为 0，再将每次得到的余数逆序排列，得到的即为相应的二进制数。

可以将上面的方法归纳成一个口诀：除 2 取余，直到商为 0，余数逆序排列。

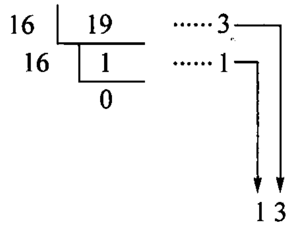
若要转换为十六进制数，只需将口诀中的 2 改为 16 即可：除 16 取余，直到商为 0，余数逆序排列。

例 1：将十进制数 19 分别转换为二进制数和十六进制数。

解：按照转换方法，转换过程如下：



二进制数转换过程



十六进制数转换过程

即：19D＝10011B＝13H

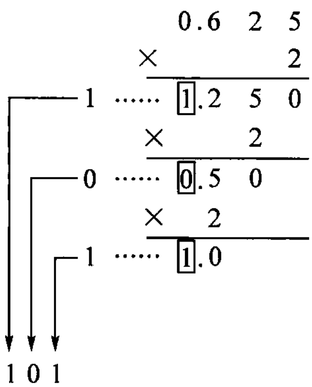
(2) 小数部分的转换

将十进制小数转换成二进制数或十六进制数，采用的是“乘 2(或乘 16)取整”法。

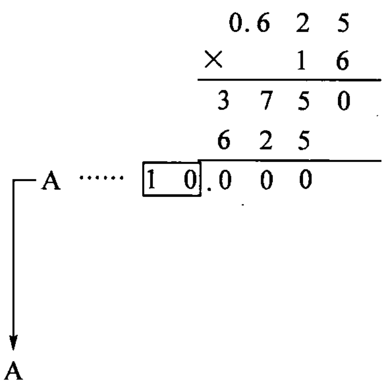
即将需要转换的十进制小数，乘以 2 (或者乘以 16)，将得到的乘积的整数部分取出，然后继续用新的小数部分乘以 2(或者乘以 16)，再取出整数部分……，直到乘积的小数部分为 0(或者使小数的精度达到规定的位数)，最后将每次得到的整数部分按照原来的顺序排列出来，就是相应的二进制数或十六进制数。

例 2：将十进制数 0.625 分别转换为二进制数和十六进制数。

解：



二进制数转换过程



十六进制数转换过程

即:0.625D＝0.101B＝0.AH

例 3:将十进制数 0.3 分别转换为二进制数和十六进制数。

解:结果为:0.3D＝0.01001110B＝0.4CH

此时取结果保留小数点后 8 位。

如果需要也可以保留更多的位数。

例 4:将十进制数 37.875 转换为二进制数和十六进制数。

解:步骤 1:将整数部分进行转换。

步骤 2:将小数部分进行转换。

```
2 | 37   …… 1  ↑
 2 | 18  …… 0
  2 | 9  …… 1
   2 | 4 …… 0
    2 | 2 …… 0
     2 | 1 …… 1
          0
```

二进制数转换过程

```
16 | 37  …… 5  ↑
 16 | 2  …… 2
      0
```

十六进制数转换过程

步骤 1　整数部分的转换

```
         0. 8 7 5
      ×         2
1 ……  [1]. 7 5 0
      ×       2
1 ……  [1]. 5 0
      ×     2
1 ……  [1]. 0
↓
```

二进制数转换过程

```
       0. 8 7 5
   ×        1 6
       5 2 5 0
     8 7 5
E …… [14]. 0 0 0
↓
```

十六进制数转换过程

步骤 2　小数部分的转换

即 37.875D＝100101.111B＝25.EH

前面介绍的十进制数与二进制数和十六进制数之间相互转换的方法,也适用于其他数制与十进制数之间的相互转换。

思考:能否利用前面的方法将十进制数 0～15 分别表示为 4 位二进制数形式和 1 位十六进制数形式?

3. 二进制数、十六进制数之间的转换

表 1－2 给出了十进制数 0～16 的二进制数和十六进制数形式。

分析该表格发现,4 位二进制数有 16 种组合 0000B～1111B,而且十六进制数恰好有 0～F 共 16 个数字符号。因此,任何一个 1 位的十六进制数都可以用一个 4 位的二进制数表示,反之

亦然。这种关系是一一对应的。

表 1－2　二、十六进制对照表

十进制数(D)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
二进制数(B)	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111	10000
十六进制数(H)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0A	0B	0C	0D	0E	0F	10

实际上，这种一一对应的关系正是二进制数与十六进制数之间进行互相转换时所要遵循的原则。可以归纳为：

(1) 二进制数形式转换为十六进制数形式

① 整数部分：自右向左，每 4 位二进制数用 1 位十六进制数代替，若不够 4 位，在前面用 0 补足。

② 小数部分：自左向右，每 4 位二进制数用 1 位十六进制数代替，若不够 4 位，在后面用 0 补足。

称为“4 位合一法”。

(2) 十六进制数形式转换为二进制数形式

① 整数部分：将每一位十六进制数用 4 位二进制数表示，然后按照原来的顺序排列起来。

② 小数部分：与“整数部分”的转换方法相同。

称为“1 位扩四法”。

三、二进制数的运算

1．加法运算

规则：0＋0＝0、0＋1＝1、1＋0＝1、1＋1＝0，进位为 1

例 5：计算 10100111B＋01101111B

解：

$$\begin{array}{rr} & 1\,0\,1\,0\,0\,1\,1\,1 \\ & +\ 0\,1\,1\,0\,1\,1\,1\,1 \\ \hline \text{进位……} & 1\,0\,0\,0\,1\,0\,1\,1\,0 \end{array}$$

即 10100111B＋01101111B＝100010110B

2．减法运算

规则：0－0＝0、1－1＝0、1－0＝1、0－1＝1，且有借位

例 6：计算 10100111B－01101111B

解：

$$\begin{array}{r} 1\,0\,1\,0\,0\,1\,1\,1\,\mathrm{B} \\ -\ 0\,1\,1\,0\,1\,1\,1\,1\,\mathrm{B} \\ \hline 0\,0\,1\,1\,1\,0\,0\,0\,\mathrm{B} \end{array}$$

即 10100111B－01101111B＝00111000B

例 7：计算 1010100B－01001000B

解：

$$\begin{array}{r} 1\,1\,0\,1\,0\,1\,0\,0\,\mathrm{B} \\ -\ 0\,1\,0\,0\,1\,0\,0\,0\,\mathrm{B} \\ \hline 1\,0\,0\,0\,1\,1\,0\,0\,\mathrm{B} \end{array}$$

即 11010100B－01001000B＝10001100B

在例 7 中，出现了第 3 位向第 4 位的借位。当产生借位时，从高位借来的 1 应当作为 2 来使用，即借 1 当 2。

3．乘法运算

规则：$0\times0=0$、$0\times1=0$、$1\times0=0$、$1\times1=1$

例 8：计算 11001011B×101B

解：

$$
\begin{array}{r}
11001011 \\
\times\qquad\quad 101 \\
\hline
11001011 \\
00000000 \\
11001011 \\
\hline
1111110111
\end{array}
$$

即 11001011B×101B＝1111110111B

四、二进制信息的计量单位

存储器是计算机的主要组成部分，主要用途是存放程序和数据，完成记忆功能。程序和数据在计算机中以二进制代码的形式存在。

按照用途，存储器可以分为程序存储器和数据存储器。这两种存储器的具体结构及使用，在后面章节将做具体介绍，下面介绍几个常用术语。

1．常用单位及术语

(1) 位(bit)

计算机中最基本和最小的数据单位。

由于计算机使用二进制，因此，位就是指一个二进制代码。

(2) 字节(Byte)

一个连续的 8 位二进制数码称为一个字节，简写为 B。1Byte＝8bit。

(3) 字(Word)

两个字节构成一个字，即字通常由 16 位二进制数码组成。

(4) 字长

是计算机一次能够处理的二进制数码的位数。不同类型的计算机有不同的字长，一般与算术运算单元的位数相同，MCS-51 系列单片机的字长为 8 位。

2．存储器主要参数

(1) 存储单元

存储器由大量存储单元组成，每个存储单元由基本存储单元构成。每个基本存储单元存放 1 位二进制代码。

(2) 存储单元地址

将每个存储单元按顺序编号，这种编号称为存储单元的地址。每个存储单元对应着一个惟一的固定的地址。有了地址，可以区别各存储单元，以防混淆。

地址是用若干位二进制数码表示的，二进制的位数取决于计算机内部地址总线的条数。设存储器的容量为 M，计算机内的地址线为 n 条，则 $M\leqslant2^n$。

(3) 存储器容量

一片存储器最多能够存储的单位信息量叫作存储器容量。

对于厂商，多用总的位容量来描述；对于用户，一般用“存储单元数×基本存储单元位数”表示。例如，2114 芯片容量＝1KB×4 位，6264 芯片容量＝8KB×8 位。

计算机中常用的存储器容量单位为 1 024B，又称为 1KB，即 $1K = 1\ 024 = 2^{10}$。此外，还有 1MB、1GB 等单位。它们之间的换算关系为：

1MB＝1 024KB，1GB＝1 024MB。

若单片机有 16 根地址线，则对应的存储器最大容量为：

$2^{16}B = 2^{6} \times 2^{10}B = 64KB = 65\ 536B$

MCS-51 系列单片机的最大存储容量即为 65 536 个存储单元，地址编号为 0～0FFFFH(0～65 535)。

第三节　计算机中的数据编码

前面介绍计算机中的各种数制及其数制间的相互转换时，没有考虑数据的符号，这类数据称为无符号数。实际上，除了无符号数外，还有带符号的数。另外，计算机还要处理字母、字符和数字编码等。对这些问题的处理需要用到数据编码的概念。

编码是把二进制代码按一定的规律编排，使每组代码具有一定的含义。

下面介绍有符号数的编码表示方法。

在 8 位的计算机中，用一个 8 位的二进制数表示各种数据或信息。如果研究对象为无符号数，则 8 位数字符号都用来表示数值，数的大小范围为：00000000B～11111111B，即 0～255D。

由于采用二进制数编码机制，计算机只能识别“0”和“1”这两个数字 。当数有正负之分时，计算机并不能识别“＋” 号和“－”号。此时，需要用“0”和“1” 这两个数字符号来表示数据的符号。通常约定用最高位的“0”表示“＋” 号，用“1”表示“－”号。

一、机器数的概念

将数的符号和数值用“0”、“1”的形式表示，称为机器数。

带有“＋” 号和“－”号的数称为机器数的真值，可以是二进制数或十六进制数的形式。

如＋1010011B 和－1010011B 是机器数的真值，而 01010011B 和 11010011B 即为机器数。

在计算机中，有符号数有原码、反码、补码三种表示形式。

若用 X 表示一个有符号数，则以$(X)_{原}$、$(X)_{反}$、$(X)_{补}$表示该数的原码、反码和补码。

二、原码、反码、补码

1. 原码

原码是最简单的机器数表示形式。

一个数用原码表示时，用“0”表示“＋”号，用“1”表示“－”号，数值部分仍按二进制数形式表示。

例 9：写出下列各数的原码形式：

$$X_1 = +1100B \quad X_2 = -1100B \quad X_3 = 21 \quad X_4 = -21$$

分析：

考虑到 MCS-51 系列单片机是 8 位计算机，机器码一般应表示为 8 位二进制数的形式。题目中给出的数据有 4 位二进制数，也有十进制数，当按题目要求表示为原码形式时，首先应当将题目中的数据表示为 7 位二进制数（给符号留一位），如果数位不足 7 位，应加 0 补齐，然后再写出用 8 位二进制数表示的原码形式。

解： $X_1 = +1100B$，$(X_1)_{原} = 00001100B$

$X_2 = -1100B$，$(X_2)_{原} = 10001100B$

$X_3 = 21$，$X_3 = +0010101B$，$(X_3)_{原} = 00010101B$

$X_4 = -21$，$X_4 = -0010101B$，$(X_4)_{原} = 10010101B$

例 10： 求 0 的原码。

分析：

0 可以表示为 +0 和 −0 两种形式，根据这两种形式写出的真值，结果并不一样。因此，应当分两种情况分别求出 0 的原码。

解： $X = +0$，即 $X = +0000000B$，$(+0)_{原} = 00000000B$

$X = -0$，即 $X = -0000000B$，$(-0)_{原} = 10000000B$

如果将上面的解题过程反过来进行，就可以根据一个数值的原码形式求出这个数的真值。

例如，已知 $(X)_{原} = 00111100B$，则 $X = +0111100B$，即 $X = +59$。

若已知 $(X)_{原} = 10111100B$，则 $X = -0111100B$，即 $X = -59$。

原码的性质：

(1) 8 位带符号数的原码表示范围是 −127～+127。

(2) “0”有两个原码：$(+0)_{原} = 00000000$，$(-0)_{原} = 10000000$。

2．反码

反码是另一种机器数形式。

正数的反码表示与正数的原码相同。负数的反码形式，符号位用“1”表示，数值位根据原码按位取反，即原来为 0 的写作 1，原来为 1 的写作 0。

例 11： $X_1 = +1100B$，则 $(X_1)_{反} = 00001100B$

$X_2 = -1100B$，则 $(X_2)_{反} = 11110011B$

$X_3 = 21$，即 $X_3 = +0010101B$，则 $(X_3)_{反} = 00010101B$

$X_4 = -21$，即 $X_4 = -0010101B$，则 $(X_4)_{反} = 11101010B$

例 12： 求 0 的反码。

解： 写作 $X = +0$ 时，$X = +0000000B$，$(+0)_{反} = 00000000B$

写作 $X = -0$ 时，$X = -0000000B$，$(-0)_{反} = 11111111B$

同理，可以根据数值的反码形式求出其真值，但要分为正数和负数两种情况处理。由反码的符号位可以判断数据为正或为负。若为正数，只需将符号位的“0”用“+”代替，将数值位按位写出。如果数值为负数，除了将最高位的“1”用“−”代替，还需将数值位按位取反后写出。

例 13： 已知 $(X)_{反} = 01101001B$，求 X 的真值。

解： 由 $(X)_{反}$ 的符号位为 0 可知，X 为正数，$X = +1101001B$

例 14：已知 $X_{反}=11101001B$，求 X 的真值。

解：由$(X)_{反}$的符号位为 1 可知，X 为负数，$X=-0010110B$

反码的性质：

(1) 8 位带符号数的反码表示范围是 $-127\sim+127$。

(2) "0"的反码表示有两种形式：$(+0)_{反}=00000000B$，$(-0)_{反}=11111111B$。

3. 补码

补码也是机器数形式。

正数的补码表示与正数的原码相同；负数的补码由其反码末位加 1 得到。

例 15：设 X=3，求 X 的补码。

解：X=3 即 $X=+0000011B$ 则$(X)_{补}=00000011B$

例 16：设 $X=-3$，求 X 的补码。

解：$X=-0000011B$，$(X)_{原}=10000011B$，即$(X)_{补}=11111101B$

例 17：求 0 的补码。

解：$X=+0$ 时，$X=+0000000B$，$(+0)_{补}=00000000B$

$X=-0$ 时，$X=-0000000B$，$(-0)_{补}=100000000B$

溢出

根据数值的补码形式求真值时，如果数值本身为正数，只需将符号位的"0"用"+"号代替，数值位保持不变写出即可；而根据负数的补码求其真值时，需对此补码再进行一次求补操作。

例 18：设已知$(X_1)_{补}=01001011B$，$(X_2)_{补}=10101101B$，求 X_1 和 X_2 的真值。

解：由$(X_1)_{补}=01001011B$，可知 X_1 为正数，$X_1=+1001011B$

由$(X_2)_{补}=10101101B$，可知 X_2 为负数，$(X_2)_{原}=11010011B$，$X=-1010011B$

补码的性质：

(1) 0 的补码形式是惟一的，即 00000000B。

(2) 8 位带符号数的补码表示范围是 $-128\sim+127$。

0 的原码、反码都有两种形式，而 0 的补码只有一种形式；8 位带符号数的原码、反码的表示范围是相同的，但与补码的范围不同，如表 1－3 所示。

表 1－3　8 位有符号数的编码表示范围

二进制数	原　码	反　码	补　码
0000 0000	+0	+0	±0
0000 0001	+1	+1	+1
0000 0010	+2	+2	+2
⋮	⋮	⋮	⋮
0111 1101	+125	+125	+125
0111 1110	+126	+126	+126
0111 1111	+127	+127	+127
1000 0000	−0	−127	−128

续表

二进制数	原　码	反　码	补　码
1000 0001	-1	-126	-127
1000 0010	-2	-125	-126
⋮	⋮	⋮	⋮
1111 1101	-125	-2	-3
1111 1110	-126	-1	-2
1111 1111	-127	-0	-1

在计算机的数据编码中引入反码和补码的形式，是为了将二进制数的减法运算转变为加法运算，这样可以省去减法器，从而可以大大简化计算机硬件电路。当采用反码或补码并按一定的运算规则运算时，并不影响运算结果的正确性。

例 19：计算 35－17

解：$35-17=35+(-17)_{补}=18=12H$

用二进制运算如下：

$$\begin{array}{r} 0\,0\,1\,0\,0\,0\,1\,1 \\ +\ 1\,1\,1\,0\,1\,1\,1\,1 \\ \hline 0\,0\,0\,1\,0\,0\,1\,0 \end{array}$$

例 20：计算 －9－7

解：$-9-7=(-9)_{补}+(-7)_{补}=(-16)_{补}=F0H$

用二进制运算如下：

$$\begin{array}{r} 1\,1\,1\,1\,0\,1\,1\,1 \\ +\ 1\,1\,1\,1\,1\,0\,0\,1 \\ \hline 1\,1\,1\,1\,1\,0\,0\,0\,0 \end{array}$$

由例题可以看出，加法和减法都可以由加法运算得出，而且以补码形式参与运算时，结果仍为补码，并且符号位可以一起参与运算。因此，在计算机中普遍采用补码表示有符号数。

三、BCD 码

BCD 码是 Binary Coded Decimal 的简称，表示二进制编码的十进制数，即将每 1 位十进制数用 4 位二进制数表示。设数据为 X，则其 BCD 码可用符号$(X)_{BCD}$表示。例如，十进制数 57 的 BCD 码为$(01010111)_{BCD}$。

使用 BCD 码既适应了人们使用十进制数的习惯，又考虑了计算机采用二进制这一特点。在数据的输入输出时，常采用 BCD 码。

用 4 位二进制数可以表示 16 种状态，但十进制数只有 0～9 十个数字符号，因此将 1010～1111 六种状态舍去，用余下的十种状态一一对应表示 0～9，如表 1－4 所示。