

微型计算机原理与应用

MCS-51、MCS-96 系列单片机应用基础

(第二版)

张鄂亮 林 红

肖广润 周惠领

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

微型计算机原理与应用(第二版)/张鄂亮 等
武汉:华中科技大学出版社, 2001年10月
ISBN 7-5609-1325-3

I. 微…

II. ①张… ②林… ③肖… ④周…

III. 单片微型计算机

IV. TP368.1

微型计算机原理与应用

MCS-51、MCS-96 系列单片机应用基础(第二版)

张鄂亮 等

责任编辑:叶翠华 谢燕群

封面设计:秦 茹

责任校对:封春英

责任监印:熊庆玉

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87545012

经 销:新华书店湖北发行所

录 排:华中科技大学惠友科技文印中心

印 刷:武汉市新华印刷有限责任公司

开本:787×1092 1/16

印张:24.25

字数:540 000

版次:2001年10月第2版

印次:2001年10月第5次印刷

印数:11 001—14 000

ISBN 7-5609-1325-3/TP·181

定价:28.50元

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书以微型计算机原理的基础知识为主线，以 MCS-51、MCS-96 系列单片机为对象，系统全面地介绍了微型计算机的硬件、软件及其应用技术。本书内容包括微型计算机基础知识与结构原理、单片机硬件结构与指令系统、汇编语言程序设计、I/O 接口电路及接口技术、单片机应用系统设计等。全书共分八章，每章配有习题。

本书内容由浅入深，循序渐进，适合作为高等院校工科专业学生的教材和工程技术人员的参考书。

再 版 前 言

“微型计算机原理与应用”是理工科高等院校重要的专业技术基础课程之一。由于单片机在工程技术领域各种专业中得到广泛应用，因而“微型计算机原理与应用”课程选用单片机作为典型微型机的教学方式已得到全国高校电气技术专业指导委员会和教育研究会的充分肯定。

单片机具有功能强、可靠性高、使用灵活、体积小、价格低廉等特点，广泛应用于工业自动化、智能仪器仪表、邮电通信、家用电器、航空航天等各个领域。单片机多用于机、电、仪一体化智能型产品中，特别适合于嵌入式计算机应用系统。随着单片机应用技术的日益普及和深入，单片机朝着超小型、低功耗、低成本、多功能、多品种、多型号的方向发展，对我国社会生产力的发展和人民生活水平的提高，正起到积极的推动作用。

MCS-51、MCS-96 系列单片机是我国单片机应用的主流机种。本书着重介绍 MCS-51、MCS-96 系列单片机中的常用机型，对代表单片机发展方向的高档机型 80C196 也作了概括性的介绍。考虑到理工科院校的学生和初步接触微型计算机的工程技术人员学习单片机的需要，本书各部分内容都从微型计算机原理的基础知识入手，遵循由浅入深、循序渐进的认识规律，采用通俗易懂的叙述方法。这对初学者和具有一定微型计算机基础知识的读者，理解和掌握单片机及其应用技术将会有所帮助。

计算机技术正日新月异地飞速发展，本书强调对微型计算机核心基础知识的理解和运用，尽可能归纳微型计算机应用技术中相对稳定、一般规律性的理论，并通过对两种不同系列单片机的应用举例，逐步让读者加深对微型计算机基本原理及应用技术的理解。

本书基础性强、信息量大，在章节编排上既考虑到作为教材的系统性和完整性，也尽可能突出其实用性。书中例题丰富，解释详尽，对于读者理解概念、掌握方法颇有裨益。书中部分例题可抽出直接用于单片机实验教学。本书适合作为高等院校“微型计算机原理与应用”课程的教材，对从事微型计算机应用及相关专业的工程技术人员具有一定参考价值。

本书对第一版作了较大篇幅的修改，使其内容更加新颖，结构更加合理。限于作者水平，书中错漏在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

2001 年 4 月

目 录

第一章 计算机基础知识	(1)
1-1 计算机的发展与组成	(1)
1-1-1 计算机发展概况	(1)
1-1-2 计算机发展趋势	(2)
1-1-3 计算机的组成结构	(2)
1-1-4 计算机的主要技术指标	(3)
1-2 计算机运算基础	(4)
1-2-1 进位计数制	(4)
1-2-2 不同进位计数制之间的转换	(5)
1-2-3 带符号数的表示方法	(8)
1-2-4 数的定点与浮点表示	(11)
1-2-5 运算方法	(12)
1-2-6 二-十进制编码	(15)
1-2-7 字符编码	(17)
习题一	(18)
第二章 微型计算机结构	(20)
2-1 微型计算机功能部件	(20)
2-1-1 CPU 结构	(20)
2-1-2 存储器与读/写操作	(22)
2-1-3 输入/输出接口	(23)
2-2 微型计算机的结构特点	(23)
2-2-1 微型计算机的总线结构	(23)
2-3 微型计算机软件	(25)
2-3-1 计算机语言	(25)
2-4 MCS-51 单片机的硬件结构	(26)
2-4-1 MCS-51 的总体结构	(26)
2-4-2 MCS-51 CPU	(27)
2-4-3 MCS-51 存储器配置	(30)
2-4-4 MCS-51 单片机引脚	(34)
2-4-5 MCS-51 最小系统	(37)
2-5 MCS-96 单片机硬件结构	(37)
2-5-1 基本结构	(37)

2-5-2	MCS-96CPU.....	(38)
2-5-3	总线方式	(41)
2-5-4	MCS-96 存储器配置	(44)
2-5-5	80C196 的性能特点	(51)
2-5-6	MCS-96 引脚的功能	(52)
2-5-7	最小系统连接	(57)
习题二.....		(57)
第三章 指令系统		(60)
3-1	指令的基本格式	(60)
3-2	操作数类型	(63)
3-3	指令寻址方式	(64)
3-4	状态标志位	(70)
3-5	MCS-51 指令系统分析.....	(73)
3-5-1	数据传送指令	(73)
3-5-2	算术运算指令	(79)
3-5-3	逻辑运算指令	(82)
3-5-4	布尔变量操作指令.....	(84)
3-5-5	程序控制指令	(85)
3-6	MCS-96 指令系统分析.....	(91)
3-6-1	数据传送指令	(92)
3-6-2	算术运算指令	(98)
3-6-3	逻辑运算指令	(108)
3-6-4	单操作数指令	(110)
3-6-5	移位指令	(111)
3-6-6	专用控制指令	(113)
3-6-7	程序控制指令	(114)
习题三.....		(120)
第四章 汇编语言程序设计		(123)
4-1	汇编程序约定	(123)
4-2	汇编语言程序设计步骤.....	(125)
4-3	直线程序	(127)
4-4	分支程序	(129)
4-4-1	单重分支程序	(129)
4-4-2	多重分支程序	(131)
4-5	循环程序	(133)
4-5-1	循环程序的构成	(133)
4-5-2	单重循环	(135)

4-5-3 多重循环	(137)
4-6 子程序	(139)
4-6-1 子程序的设计	(139)
4-6-2 子程序类型	(140)
4-6-3 子程序嵌套与递归	(143)
4-7 应用程序设计举例	(144)
4-7-1 多字节加减运算	(144)
4-7-2 多字节乘除运算程序	(146)
4-7-3 代码转换程序	(154)
4-7-4 排序程序	(158)
4-7-5 查找技术	(159)
4-7-6 插入技术	(162)
4-7-7 数字滤波	(163)
4-7-8 软件堆栈	(164)
习题四	(166)
第五章 半导体存储器及其应用	(168)
5-1 半导体存储器结构	(168)
5-1-1 存储器分类	(168)
5-1-2 存储器存储矩阵	(168)
5-1-3 存储器外部信号线	(169)
5-2 随机读/写存储器	(169)
5-2-1 静态 RAM	(169)
5-2-2 动态 RAM	(170)
5-3 只读存储器	(171)
5-4 存储器的连接	(171)
5-4-1 存储芯片的扩充	(172)
5-4-2 存储器芯片与 CPU 或单片机的连接	(174)
5-4-3 存储器与单片机连接实例	(177)
习题五	(189)
第六章 输入/输出及中断系统	(191)
6-1 I/O 接口基本概念	(191)
6-2 I/O 寻址方式及地址译码	(193)
6-3 I/O 控制方式	(194)
6-4 中断技术	(197)
6-4-1 中断的概念	(197)
6-4-2 中断处理过程	(198)
6-4-3 寻找中断源与确定优先级	(199)

6-4-4 中断系统的扩展	(201)
6-5 MCS-51 中断系统	(202)
6-5-1 中断源	(203)
6-5-2 中断系统的控制	(204)
6-5-3 中断响应和中断返回	(206)
6-5-4 MCS-51 的单步操作	(207)
6-5-5 多中断源系统	(208)
6-5-6 MCS-51 外部中断举例	(209)
6-6 MCS-96 单片机中断系统	(211)
6-6-1 中断系统结构	(211)
6-6-2 中断控制	(213)
6-6-3 中断响应	(215)
6-6-4 中断程序举例	(216)
6-7 80C196 总线出让功能	(218)
6-8 外围事务服务器	(219)
习题六	(223)
第七章 单片机 I/O 接口电路	(225)
7-1 单片机并行 I/O 接口	(225)
7-1-1 MCS-51 片内 PIO	(225)
7-1-2 MCS-96 片内 PIO	(229)
7-2 定时/计数器电路	(233)
7-2-1 MCS-51 定时/计数器	(234)
7-2-2 MCS-96 单片机定时器	(242)
7-2-3 MCS-96 单片机的高速 I/O 部件 HSI、HSO	(245)
7-3 串行 I/O 接口	(252)
7-3-1 MCS-51 串行接口	(253)
7-3-2 MCS-51 串行 I/O 口的应用	(259)
7-3-3 MCS-96 串行接口	(270)
7-3-4 RS-232C 异步通信接口	(277)
7-4 通用 I/O 接口芯片	(280)
7-4-1 可编程并行接口芯片 8255	(280)
7-4-2 可编程多功能接口芯片 8155	(289)
习题七	(295)
第八章 微型计算机接口技术	(297)
8-1 LED 显示器接口	(297)
8-2 键盘和开关接口	(301)
8-2-1 独立式按键键盘	(302)

8-2-2 矩阵式键盘	(304)
8-3 单片机应用系统中键盘、显示接口技术	(308)
8-3-1 8155 扩展 I/O 口的键盘、显示器接口	(308)
8-3-2 串行口扩展的键盘、显示器接口	(310)
8-3-3 可编程键盘、显示接口芯片 8279	(311)
8-4 D/A 转换器接口	(321)
8-4-1 D/A 转换原理	(321)
8-4-2 单片集成 D/A 转换器	(323)
8-4-3 MCS-96 脉宽调制输出 PWM	(327)
8-5 A/D 转换器接口	(328)
8-5-1 双积分式 A/D 转换原理	(328)
8-5-2 逐次逼近式 A/D 转换原理	(329)
8-5-3 MCS-96 A/D 转换部件	(334)
8-6 打印机接口电路	(336)
8-7 微型计算机总线标准	(338)
8-7-1 概述	(338)
8-7-2 S-100 总线标准	(339)
8-7-3 STD 总线标准	(344)
8-7-4 PC 总线标准	(349)
习题八	(354)
附 录	(356)
附录一 MCS-51 特殊功能寄存器一览表	(356)
附录二 MCS-96 特殊功能寄存器一览表	(358)
附录三 MCS-51 指令表(按助记符字母顺序排列)	(364)
附录四 MCS-96 系列指令简表	(374)

第一章 计算机基础知识

1-1 计算机的发展与组成

本节简要介绍计算机的发展和组成,使读者了解计算机的有关知识。

1-1-1 计算机发展概况

1946 年,世界上第一台数字电子计算机 ENIAC(Electronic Numerical Integrator And Calculator)在美国宾夕法尼亚大学诞生。至今,计算机已经历了由第一代到第四代的迅猛发展阶段。第一代计算机的主要逻辑元件由电子管组成。第二代始于 1958 年,是以半导体晶体管为其逻辑元件的计算机。由于集成电路的出现,1964 年制成了以集成电路为逻辑元件的计算机,称为第三代计算机。1970 年出现超大规模集成电路的计算机,即第四代计算机。现在正在研制和发展的人工智能计算机为第五代计算机。计算机经历四代的演变后,无论从硬件到软件,其技术都日臻完善。随着大规模集成电路技术的突破,20 世纪 70 年代后计算机一方面向功能极强的巨型机发展,另一方面则向体积小、价格低廉的方向发展。微型计算机(简称微型机)是超大规模集成电路孕育的产物,它具有体积小、价格便宜的优点,使得计算机技术能渗透到各行各业,进入千家万户。反过来,微型计算机的广泛应用也大大促进了计算机技术飞速地发展。

单片机是一种集成度更高的微型计算机,它在一块小芯片上集成了一台计算机所应有的功能电路。由于单片机具有高可靠性、高抗干扰能力、高性能价格比的优势,因此被广泛应用于工业实时测量与控制、智能化仪器仪表、计算机外部设备、通信和家用电器等诸多方面。表 1-1-1 列出了单片机的一些应用领域。

表 1-1-1 单片机应用领域

1. 工业测量与控制 电机控制 过程控制 工业机器人 智能传感器	4. 民用 电子玩具、游戏机 电子字典、记事簿 各种智能卡 激光驱动、红外驱动 电子防盗、无线遥控 录像机、照相机、空调等	6. 汽车 点火控制 变速器控制 防滑刹车 排气控制 避雷控制 节能控制 保安控制
2. 智能仪器仪表 智能仪器 光电医疗仪器 色谱仪 数字示波器	5. 导航与控制 导弹控制 鱼雷制导控制 智能武器装置 航天导航系统 电子干扰装置	7. 电信 智能线路运行控制 卫星与地面通信 调制解调器
3. 数据处理 图表终端、图文传真机 彩色与黑白复印机 键盘、打印机、硬盘驱动器等		

自从 1976 年 Intel 公司推出 MCS-48 系列 8 位单片机以来,各种类型的单片机犹如雨后春笋般相继问世。

1980 年 Intel 公司推出的 MCS-51 系列高档 8 位单片机,其功能丰富,使用灵活,“性价比”远高于 MCS-48 系列单片机,深受工程技术人员的欢迎,成为我国 8 位单片机的主流机型。目前 MCS-51 系列单片机的应用技术日趋成熟,适应各种应用场合的新品种不断出现,如高速型、低功耗型、A/D 型、PWN 型、增强型、高级语言型等等。与 MCS-51 单片机配套的芯片、器件和开发装置的种类也很多,使用十分方便。

随着单片机应用的普及和深入,人们对单片机的性能要求越来越高,1983 年 Intel 公司又推出 MCS-96 系列高性能的 16 位单片机。它的处理速度更高,功能更齐全,特别适用于高速实时控制系统。

近年来,Intel 公司又研制成功 80960 系列 32 位单片机,并已投放市场,32 位单片机以其硬件和软件资源的丰富及一整套科学的指令系统,超过以往各类单片机,成为单片机发展史上的重要里程碑。在我国,目前应用最广泛的是 MCS-51 系列单片机,其次是 MCS-96 系列单片机。据有关专家预测,到 2020 年,8 位机还会是单片机应用的主流。

1-1-2 计算机发展趋势

当今计算机主要朝以下几个方向发展。

1) 微型化:超大规模集成电路产品约每两年一换代,这使计算机集成度越来越高,体积越来越小,而信息容量和运算速度以及性价比越来越高。

2) 巨型化:用于军事科学、空间技术和原子能等尖端科技领域的巨型计算机,要求信息容量特大,运算速度特快,功能极强。

3) 智能化:人工智能型计算机可以模拟人的思维和交流方式,具有推理、判断和学习能力,能识别图形、声音、文字等。

4) 系列化:为方便计算机的升级换代,减少用户的硬件、软件投资,计算机制造商采用兼容设计方法,使产品标准化和系列化。

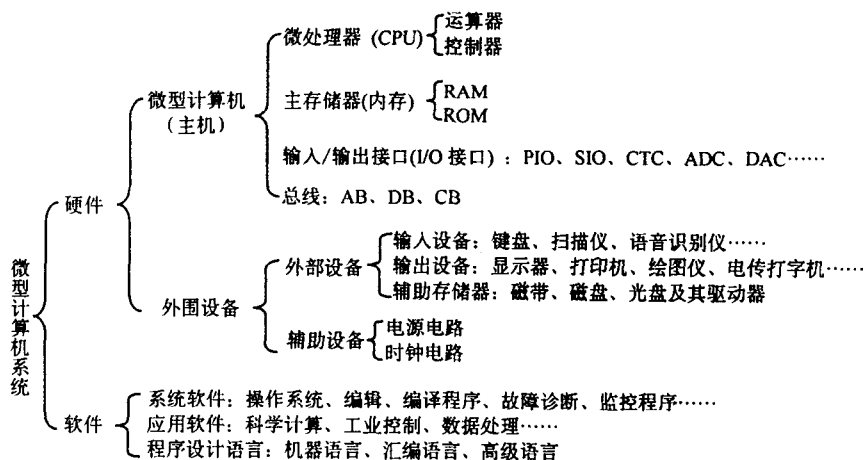
5) 计算机网络:计算机网络技术使世界各地的计算机联网通信,交换各种信息,实现硬件、软件资源共享。

6) 多机系统:多台微机组组成主从式、分散综合式等多微机系统,用于现代大型工业系统中,完成复杂的数据采集和控制任务。系统内部体现了独立控制、集中管理、资源共享、故障分散的原则,使生产、控制和管理科学化、规范化。

1-1-3 计算机的组成结构

一台计算机系统包含硬件系统和软件系统两大部分。计算机硬件系统的核心部分是运算器和控制器,二者合称为中央处理单元 CPU(Central Processing Unit),CPU 常被比喻为计算机的大脑和心脏。利用大规模集成电路技术将运算器、控制器做在一块半导体芯片上,称为微处理器(Microprocessor)。微处理器加上大容量半导体存储器和各种功能的输入/输出(I/O)接口电路,用总线结构连为一个整体,就成为微型计算机(Microcomputer)。微

型计算机主机配以必要的外部设备、电源辅助设备和软件系统，便组成一个微型计算机系统，其组成结构如图 1-1-1 所示。如果将 CPU、存储器和 I/O 接口集成在一块半导体芯片上，这便是单片微型计算机(Single Chip Microcomputer)，简称单片机。



输入/输出设备是计算机与外界联系的桥梁。人们通过输入设备向计算机输入程序和发送各种运行命令，通过输出设备了解计算机的运行状态和计算结果。输入/输出设备是计算机系统的一个重要组成部分。

在计算机上运行的各种程序称为软件，主要有两大类：

(1) 系统软件

由计算机设计者提供，为方便人们使用和管理计算机的软件，都称为系统软件。

(2) 应用软件

以计算机作为工具，利用其硬、软件资源为解决各种实际问题而编制的软件，称为应用软件。

设计程序要使用计算机语言，计算机语言主要有三种类型：机器语言、汇编语言和高级语言。

1-1-4 计算机的主要技术指标

(1) 字长

计算机能并行处理的二进制位数，称为字长。它影响 CPU 的计算速度和精度。通常所说的 8 位机、16 位机、32 位机和 64 位机等，皆是以字长进行分类的。

(2) 主存储量

指计算机主存储器的容量。它影响计算机的数据处理能力和软件配置。

(3) 运算速度

指计算机每秒钟执行的指令条数。通常有以下几种计算运算速度的方法：

1) 每秒钟执行加法指令的条数。

2) 计算机允许的最大主频(时钟频率 f_{osc})。

3) 每条指令执行所需的机器周期或状态周期。

(4) 主存储器的存取周期

指对主存储器进行一次读/写操作所需要的时间。

此外还有最大寻址空间、I/O 接口的功能、可靠性能、抗干扰性能等项指标。

1-2 计算机运算基础

计算机最基本的功能是对数进行运算和处理。计算机中的数字是用二进制数码“0”或“1”表示的。本节讨论计算机中数的表示和运算方法。先列出计算机中常用的进位计数制，并介绍它们之间的转换关系，最后介绍计算机中的二进制编码及其运算方法。

1-2-1 进位计数制

(一) 十进制

日常生活中，人们熟悉的进位计数制是十进制(Decimal)，为了总结归纳各种进制数的特点，首先总结归纳十进制数的特点。

十进制数的特点：有 0, 1, ..., 9 十个数码，“逢十进一”。一个数的大小决定于数码的大小和数码的位置。数码相同，所在的数位不同，则数的大小也不同。例如，十进制数 1234.5 可写成展开式为：

$$1234.5 = 1 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 4 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1}$$

式中，10 称为基数； 10^{-1} , 10^0 , 10^1 , 10^2 , 10^3 称为各位的“权”。任何一个十进制数 N_D 可表示为：

$$\begin{aligned} N_D &= d_{n-1} \times 10^{n-1} + d_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + d_1 \times 10^1 + d_0 \times 10^0 + d_{-1} \times 10^{-1} + \cdots + d_{-m} \times 10^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} d_i \times 10^i \end{aligned}$$

式中， d_i 为各位上的数码； 10^i 为各位的权；所对应的各位数值为 $d_i \times 10^i$ 。

(二) 二进制

二进制(Binary)为计算机中的数据形式。二进制数的特点：只有 0, 1 两个数码，且“逢二进一”。任意一个二进制数 N_B 写成展开式为：

$$\begin{aligned} N_B &= b_{n-1} \times 2^{n-1} + b_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + b_1 \times 2^1 + b_0 \times 2^0 + b_{-1} \times 2^{-1} + \cdots + b_{-m} \times 2^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} b_i \times 2^i \end{aligned}$$

式中，2 为基数； 2^i 为各位的权； b_i 为各位的数码。例如，一个二进制数 1101.101 可展开为：

$$1101.101 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$$

可以看到二进制具有几个优点：第一，只需用两种电路状态来表示两个数码，因此，

构成二进制数电路的基本单元结构简单；第二，存储和传递可靠。

(三) 十六进制

用二进制表示的数码，书写和阅读很不方便，因此常用十六进制数(Hexadecimal)来表示计算机中各种二进制数码。

十六进制的特点：有 16 个数码 0~9、A~F，“逢十六进一”。一个十六进制数 N_H 可展开表示为：

$$N_H = h_{n-1} \times 16^{n-1} + h_{n-2} \times 16^{n-2} + \cdots + h_1 \times 16^1 + h_0 \times 16^0 + h_{-1} \times 16^{-1} + \cdots + h_{-m} \times 16^{-m}$$
$$= \sum_{i=-m}^{n-1} h_i \times 16^i$$

式中，16 为基数； 16^i 为各位的权； h_i 为各位的数码。例如，一个十六进制数 DFC.8 可展开为：

$$DFC.8 = D \times 16^2 + F \times 16^1 + C \times 16^0 + 8 \times 16^{-1} = 13 \times 16^2 + 15 \times 16^1 + 12 \times 16^0 + 8 \times 16^{-1}$$

任何进位计数制的一般表达式为：

$$N_r = a_{n-1}r^{n-1} + a_{n-2}r^{n-2} + \cdots + a_1r^1 + a_0r^0 + a_{-1}r^{-1} + \cdots + a_{-m}r^{-m}$$
$$= \sum_{i=-m}^{n-1} a_i r^i$$

式中， r 为基数； r^i 为各位的权；各项系数 $a_i = 0 \sim r-1$ 。上式是不同进位制数之间转换的基础。一般来说，当要将一个 r_1 进制的数转换成 r_2 进制表示的数时，先写成展开式，再按 r_2 进制的运算法则进行计算即可完成。

1-2-2 不同进位计数制之间的转换

书中使用了多种进制来表示数据，通常用下标或尾符予以区别。用 D、B、H 分别表示十、二、十六进制，十进制数可以不写下标或尾符。例如：

$$1234_D = 10011010010_B = 4D2_H$$

或

$$1234 = 10011010010_B = 4D2_H$$

(一) 二、十六进制数转换成十进制数

按照我们熟悉的十进制运算法则，将二进制数或十六进制数的每位数码乘以权再求和，即可得到相应的十进制数。例如：

$$1011.1010_B = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-3} = 11.625$$

$$DFC.8_H = 13 \times 16^2 + 15 \times 16^1 + 12 \times 16^0 + 8 \times 16^{-1} = 3580.5$$

(二) 二进制与十六进制数之间的转换

因为 $2^4=16$ ，所以 4 位二进制数正好能表示成一位十六进制数。反过来，一位十六进制数能表示成 4 位二进制数。例如：

$$3AF.2_H = \underline{0011} \ \underline{1010} \ \underline{1111} \ \underline{0010} = 1110101111.001_B$$

3 A F 2

$$1111101.11_B = 0111\ 1101.1100 = 7D.C_H$$

7 D C

可见，当二进制数转换为十六进制数时，以小数点为界，整数自右向左每 4 位一组，不足 4 位前面补 0；小数从左向右每 4 位一组，不足 4 位后面补 0。表 1-2-1 为二、十、十六进制数的对照表，熟记之可方便地进行不同数制之间的转换。

表 1-2-1 不同进位记数制对照表

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

从上面的转换可看出：二进制与十六进制之间的转换简捷方便，这正是十六进制的用途所在。后面章节中我们会看到，十六进制经常用来表示机器中的各种二进制数码、指令代码、地址编码等。

(三) 十进制数转换成二、十六进制数

1. 整数转换法

整数转换一般采用“除基取余”法：将十进制数不断除以转换进制的基数，直至商为 0。每除一次取一个余数，依次从低位排向高位。最后由余数排列的数就是转换的结果。

例 1-2-1 将十进制数 39 转换成二进制数。

解 根据“除基取余”法，二进制数的基数为 2，所以用 2 除整数，直至商为 0，依次取余数，从低位排向高位。转换过程如下：

基数	整数	余数	
2	39	1	(b ₀) 低位
2	19	1	(b ₁)
2	9	1	(b ₂)
2	4	0	(b ₃)
2	2	0	(b ₄)
2	1	1	(b ₅) 高位
	0		

转换结果为：39=100111_B

转换原理：设一个十进制整数为 D，转换为二进制整数的表达式为：

$$D = b_{n-1} \times 2^{n-1} + b_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + b_1 \times 2^1 + b_0 \times 2^0$$

上式两边同除以 2, 得:

$$\frac{D}{2} = \text{整数} + \frac{\text{余数}}{2} = b_{n-1} \times 2^{n-2} + b_{n-2} \times 2^{n-3} + \cdots + b_1 \times 2^0 + \frac{b_0}{2}$$

可见, 第一次除 2 取得的余数为转换后二进制整数的最低位系数 b_0 , 如果继续将上式中的整数部分除 2 取余, 可得到二进制整数其余的各位系数 b_1 、 b_2 、 $\cdots$ 、 b_{n-1} 。

例 1-2-2 将十进制数 208 转换成十六进制数。

解 十六进制数的基数为 16, 除基所得余数可为 0~F 中任一数码。转换过程如下:

$$\begin{array}{r|l} 16 & 208 \\ \hline & \text{余 } 0 \\ 16 & 13 \\ \hline & \text{余 } 13 \text{ 即 } D_H \\ & 0 \end{array}$$

转换结果为: $208 = D0_H$

例 1-2-3 将十进制数 123456 转换成二进制数。

解 可先转换成十六进制数, 再直接写出二进制数, 比多次除 2 取余法快。用计算器的数制转换功能键可完成整数转换。

$$123456 = 1E240_H = 11110001001000000_B$$

2. 小数转换法

小数转换可用“乘基取整”法: 用转换进制的基数反复乘以小数部分, 直到小数部分为 0 或达到转换精度要求的位数。每乘一次取一次乘积的整数, 依次从高位排到低位。

例 1-2-4 将十进制小数 0.625 转换成二进制数。

解 用基数 2 乘以十进制小数部分, 每乘一次取一次整数。

0.625	取整	高位
× 2		
1.250	1 (b_{-1})	↓
0.25		
× 2		
0.50	0 (b_{-2})	
× 2		
1.0	1 (b_{-3})	低位

转换结果为: $0.625 = 0.101_B$

转换过程中可能会出现小数部分永不为 0 的情况, 这可根据精度要求的位数决定转换后的小数位数。

转换原理: 设十进制小数为 D , 转换成二进制小数的表达式为:

$$D = b_{-1} \times 2^{-1} + b_{-2} \times 2^{-2} + \cdots + b_{-m} \times 2^{-m}$$

上式两边同乘以 2 得:

$$D \times 2 = \text{整数} + \text{小数} = b_{-1} + b_{-2} \times 2^{-1} + \cdots + b_{-m} \times 2^{-m+1}$$

可见, 第一次乘 2 取得的整数应为转换后二进制小数的最高位系数 b_{-1} , 如果继续将上式中的小数部分乘 2 取整, 可得到二进制小数其余的各位系数 b_{-2} 、 b_{-3} 、 $\cdots$ 、 b_{-m} 。

例 1-2-5 将十进制小数 0.625 转换成十六进制数。

解 $16 \times 0.625 = 10.0$ 取出整数为 A_H

得 $0.625 = 0.A_H$

例 1-2-6 将十进制数 208.625 转换成二、十六进制数。

解 将整数部分与小数部分分别转换得：

$$208.625 = D0.A_H = 11010000.101_B$$

1-2-3 带符号数的表示方法

(一) 机器数与真值

前面提到的二进制数中没有提到符号问题，这类二进制数称为无符号数。实际中，数字可能会有正有负。在计算机中，数的符号用“0”和“1”两个数码表示。通常，将一个有符号数的最高位用作符号位，以“0”表示“+”号，以“1”表示“-”号。我们把一个数在机器中的表示形式称为机器数，而把机器数所代表的实际数值称为该机器数的真值。例如：一个 8 位机器数与它的真值关系可表示如下：

真值： $x_1 = +1010100_B = +84$ 机器数：01010100

$x_2 = -1010100_B = -84$ 11010100

在微型计算机中，有符号数通常使用 3 种表示方法：原码、反码和补码。

(二) 原码

原码(True Form)表示法约定为：最高位为符号位，“0”表示正数，“1”表示负数，其余位为数值位，数值位与二进制真值的数值位相同。如上例所述，8 位原码可写成如下形式：

真值： $x_1 = +84 = +1010100_B$ 原码： $[x_1]_{\text{原}} = 01010100$

$x_2 = -84 = -1010100_B$ $[x_2]_{\text{原}} = 11010100$

8 位原码所能表示的范围为 $-1111111_B \sim +1111111_B$ ，即 $-127 \sim +127$ 或 $-(2^7-1) \sim +(2^7-1)$ 。
16 位原码表示的范围则为 $-32767 \sim +32767$ ，即 $-(2^{15}-1) \sim +(2^{15}-1)$ 。

原码表示简单直观，可直接看出数值大小，但它有两个缺点。

1) 零的表示不唯一。如 8 位原码有如下两种表示：

$$[+0]_{\text{原}} = 00000000, \quad [-0]_{\text{原}} = 10000000$$

2) 加减运算很复杂。

为了把减法运算转换为加法运算，引入了反码和补码。

(三) 反码

反码(One's Complement)表示法约定为：正数的反码与原码表示相同，负数反码的符号位为“1”，数值位为原码的数值各位取反。

例如： $x = +4$	$[x]_{\text{原}} = 00000100$	$[x]_{\text{反}} = 00000100$
$x = -4$	$[x]_{\text{原}} = 10000100$	$[x]_{\text{反}} = 11111011$
$x = -127$	$[x]_{\text{原}} = 11111111$	$[x]_{\text{反}} = 10000000$
$x = +0$	$[x]_{\text{原}} = 00000000$	$[x]_{\text{反}} = 00000000$
$x = -0$	$[x]_{\text{原}} = 10000000$	$[x]_{\text{反}} = 11111111$