

国家“十一五”应用型人才培养规划教材

单片机原理 与接口技术



DANPIANJIYUANLIYUJIEKOUJISHU

黄菊生 编著



 国防工业出版社
National Defense Industry Press

国家“十一五”应用型人才培养规划教材

单片机原理与接口技术

黄菊生 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以目前国内使用最广泛的 MCS-51 系列单片机为对象,针对工程应用型高等院校人才培养的特点和要求,采用循序渐进、由浅入深的原则全面系统地介绍了 MCS-51 系列单片机的硬件结构、工作原理、指令系统、程序设计、中断系统、定时器/计数器、系统扩展、A/D 和 D/A 转换接口、键盘显示接口、串行通信接口、单片机实用技术等内容。

本书在内容的编排上注意了知识的内在联系、前后关系,考虑了基础知识与扩展知识的关系,以适应不同基础的读者。针对没有学过微机原理的读者设置了第 1 章,主要介绍计算机基础知识;针对单片机基础较好的读者编写了第 11 章,专门介绍单片机实用新技术等高级内容;此外,为方便初学者更快更好地学习和掌握单片机知识,选编了万利模拟仿真软件,能模拟仿真指令、程序、外部中断、定时器、串行数据传送等。

本书概念清楚,叙述详细,例题丰富,每章之后均有小结和习题,便于读者自学。本书可作为高等院校“单片机原理与接口技术”课程教学用书,也可作为单片机培训教材及工程技术人员和单片机爱好者的自学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

单片机原理与接口技术/黄菊生编著. —北京:国防工业出版社,2007.9

国家“十一五”应用型人才培养规划教材

ISBN 978-7-118-05321-0

I. 单... II. 黄... III. ①单片微型计算机—基础理论—高等学校—教材②单片微型计算机—接口—高等学校—教材 IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 122786 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

涿中印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 19¼ 字数 446 千字

2007 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

前 言

本书主要以目前国内使用最广泛的 MCS-51 系列单片机为对象,针对工程应用型高等院校人才培养的特点和要求,结合多年的教学科研实践经验和教学改革成果编写而成。本书全面系统地介绍了 MCS-51 系列单片机的工作原理、指令系统、程序设计、中断系统、定时器/计数器、系统扩展、A/D 和 D/A 转换接口、键盘显示接口、串行通信接口、单片机实用技术等内容。

在编写本书过程中,考虑到不同层次的读者的基础和特点,采用循序渐进、由浅入深的原则组织单片机原理与接口技术的基本知识,并对主要内容有所扩展和延伸,以使更多的读者能从使用本书中受益。“好用、实用”是编写本书的目的,因此在内容的编排和选择上,力求具有代表性、典型性;在内容的叙述上尽量多举实例、多用直观的图表,并注重知识的内在逻辑性,做到承前启后、思路清晰;在内容的安排上有所交叉,用指令先行,程序先行来分散难点、突出重点,便于知识点的理解和掌握。

全书各章节可以根据读者的基础或不同的阅读阶段进行取舍。第 1 章中增加了计算机基础知识的介绍,对学过微机原理的读者可以跳过;第 11 章为单片机实用技术,包括 AT89 系列单片机选用、单片机功率接口、I²C 总线与串行扩展、实时时钟、显示驱动、汉字液晶显示等,是单片机基本知识的扩展,可作为学有余力的读者更深入地学习单片机实用新技术的高级内容;此外,为了方便读者更快更好地学习和掌握单片机知识,在第 3 章~第 6 章和第 10 章中举例介绍了单片机的模拟仿真;利用万利仿真软件可以大大提高读者对单片机的学习兴趣和学习效率,为读者提供了另一种非常有效的单片机学习手段和工具。

本书概念清楚,叙述详细,例题丰富,每章之后均有小结和习题,便于读者自学及尽快掌握单片机的基础知识。本书可作为大专院校“单片机原理与接口技术”课程教学用书,也可作为单片机培训教材及工程技术人员和单片机爱好者自学的参考书。

本书由湖南工程学院黄菊生任主编,湖南工程学院周慧、湘潭职业技术学院蒋求生和华北水利水电学院郭术义任副主编。参加编写的还有伍新、刘玉松、刘军安、蒋嵘、吴晨曦、陈小异、谭季秋等。全书由黄菊生统稿,唐唤清教授审阅了全书并提出了许多宝贵的意见和建议。

由于作者水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。作者 E-mail:huang8233@163.com,欢迎交流。

编 者

2007 年 7 月

目 录

第 1 章 单片微型计算机基础知识	1
1.1 单片机的发展及应用	1
1.2 单片机的基础知识	4
本章小结	13
习题 1	14
第 2 章 单片机的硬件结构	15
2.1 单片机的基本组成	15
2.2 单片机的引脚功能	18
2.3 单片机的存储器配置	23
2.4 片内数据存储器	24
2.5 时钟电路与复位电路	30
本章小结	33
习题 2	33
第 3 章 单片机的指令系统	35
3.1 指令及指令格式	35
3.2 寻址方式	37
3.3 指令系统	40
3.4 指令的模拟仿真	54
本章小结	62
习题 3	63
第 4 章 汇编语言程序设计	65
4.1 汇编语言及伪指令	65
4.2 顺序程序设计	72
4.3 分支程序设计	75
4.4 循环程序设计	79
4.5 子程序设计	84
4.6 实用程序设计	89
4.7 程序的模拟仿真	104

本章小结·····	106
习题 4·····	107
第 5 章 单片机的中断系统·····	111
5.1 中断与中断源·····	111
5.2 中断标志与中断控制·····	113
5.3 中断处理过程·····	119
5.4 中断程序设计·····	122
本章小结·····	132
习题 5·····	132
第 6 章 单片机的定时器及其应用·····	135
6.1 定时器的结构及工作原理·····	135
6.2 定时器的控制·····	136
6.3 定时器的工作方式·····	138
6.4 定时器的应用·····	141
本章小结·····	151
习题 6·····	151
第 7 章 单片机的系统扩展·····	153
7.1 系统扩展概述·····	153
7.2 程序存储器的扩展·····	156
7.3 数据存储器的扩展·····	161
7.4 片选与地址译码方法·····	164
7.5 并行 I/O 口的扩展·····	166
本章小结·····	174
习题 7·····	175
第 8 章 数/模与模/数转换接口技术·····	176
8.1 D/A 转换接口技术·····	176
8.2 A/D 转换接口技术·····	182
本章小结·····	190
习题 8·····	191
第 9 章 键盘显示器接口技术·····	192
9.1 键盘接口技术·····	192
9.2 LED 显示器接口技术·····	198
9.3 可编程键盘显示器接口 8279·····	205
本章小结·····	216
习题 9·····	216

第 10 章 串行通信接口技术	218
10.1 串行通信概述	218
10.2 串行通信接口	221
10.3 串行口的工作方式	224
10.4 串行口的应用举例	227
本章小结	243
习题 10	243
第 11 章 单片机实用技术	245
11.1 AT89 系列单片机选用	245
11.2 单片机功率接口电路	251
11.3 串行实时时钟接口芯片 DS1302	258
11.4 串行 LED 显示驱动接口芯片 MAX7219	265
11.5 I ² C 总线串行扩展技术	272
11.6 汉字液晶显示模块 LCM 接口技术	283
附录 1 MCS-51 单片机指令表	289
附录 2 常用芯片引脚图	295
参考文献	301

第 1 章 单片微型计算机基础知识

计算机的发展经历了从电子管、晶体管、集成电路到大规模集成电路四个发展阶段，现在广泛使用的微型计算机是大规模集成电路技术发展的产物。计算机一方面向高速、大容量、高性能的高档机方向发展，另一方面向体积小、价格低、可靠性高的微型化方向发展，单片微型计算机就是计算机微型化的一种，简称为单片机，在很多行业都得到了广泛的应用。

1.1 单片机的发展及应用

1.1.1 什么是单片机

单片机 (Single chip microcomputer, SCM) 直译为单片微型计算机。它将中央处理器 (CPU)、存储器 (RAM、ROM)、输入/输出 (I/O) 接口电路等微型计算机的基本功能部件集成在一块集成电路芯片上，构成一个具有存储、运算、输入/输出功能的微型计算机。

计算机通常按照体积、性能和应用范围等条件分为巨型机、大型机、中型机、小型机和微型机等。微型计算机 (Microcomputer) 简称微机，是计算机的一个重要分支，它具有体积小、质量轻、价格低等优点，得到广泛的应用。其中个人计算机，简称 PC (Personal Computer) 机，是微型计算机中应用最为广泛的一种，也是计算机领域中发展最快的一个分支。微型计算机通常由运算器、控制器、存储器、输入/输出接口电路及输入/输出设备等组成。其中，运算器和控制器一般做在一个集成芯片上，称为中央处理单元 (Central Processing Unit)，简称 CPU。单片机是由微型计算机发展而来，是微型计算机发展的一个分支，虽然形态只是一块芯片，但已具有了微型计算机的组成结构和功能，故将其称之为单片微型计算机。

单片机从功能和形态来说都是为满足控制领域应用要求而诞生的，并且随着单片机技术的发展，大量新型单片机不断涌现。在这些单片机中，不断将满足对象控制要求的外围电路、通道接口单元 (如 A/D、PWM、高速 I/O 口、WDT 等) 集成进去，扩展了各种控制功能，已突破了微型计算机的传统内容。所以更准确地反映单片机本质的名称应是微控制器 (Microcontroller Unit, MCU)，这个名称能更好地反映单片机面向控制的应用特征。微控制器不是微处理器，微处理器 (Microprocessor Unit, MPU) 本身不是计算机，它是将控制器和运算器集成在一个芯片上，是构成微型计算机的核心部件。

单片机作为控制器设计应用系统时，已看不到单片机及其接口电路的外形，它已完全融入到应用系统之中，嵌入到被控对象体系中，变成了一个个智能控制产品，因此，也将单片机称为嵌入式微控制器 (Embedded microcontroller)。这从另一个角度阐述了单

片机的应用特点，与微型计算机完全不同的应用方式。

单片机在硬件、指令系统及 I/O 能力等方面都有独到之处，具有较强而有效的控制功能。但单片机毕竟是一个硬件芯片，在实际应用中，必须外加输入/输出设备、一定的扩展接口电路，才能构成一个实用的单片机应用系统。实际上，单片机应用系统由硬件和软件组成，硬件是基础，软件是灵魂，只有将两者有机地结合起来，才能构成一个功能完整的单片机应用系统。

1.1.2 单片机的发展

单片机的发展经历了 4 位机、8 位低档机、8 位高档机、16 位机、32 位机等从低级向高级的历程。自 1971 年美国 Intel 公司首先研制出 4 位单片机 4004，1972 年研制出 8 位单片机雏形 8008，特别是 1976 年 9 月 Intel 公司推出 MCS-48 系列单片机以来，在短短的二十几年时间，单片机经历了 4 次更新换代，其发展速度大约二三年更新一代，集成度增加一倍，功能翻一番，其发展速度之快，应用范围之广，已达到了惊人的程度。单片机的发展通常可以分为以下几个阶段。

第一阶段（1971~1976 年）：单片机的萌芽阶段。发展了各种 4 位单片机以及 8 位单片机的初级产品。这时生产的单片机，制造工艺比较落后，集成度也较低，并且采用了双片形式，主要用于仪器仪表、民用电器、计算器。

第二阶段（1976~1980 年）：单片机的发展阶段。发展了各种 8 位低档单片机，以 1976 年 Intel 公司首先推出的 MCS-48 系列单片机为代表。其主要技术特征是采用了单片结构，将 CPU 和计算机外围电路集成在一个芯片上，即在一块芯片内集成有 8 位 CPU、多个并行 I/O 接口、一个 8 位定时器/计数器，不带串行通信接口。使单片机与通用 CPU 分道扬镳，构成新型工业微控制器，其功能可满足一般工业控制和仪器仪表等的要求，为单片机的进一步发展开辟了成功之路，成为单片机发展进程中的一个重要阶段。

第三阶段（1980~1983 年）：8 位单片机的成熟阶段。发展了各种高性能的 8 位单片机，以 1980 年 Intel 公司推出的 MCS-51 系列单片机为代表。这类单片机集成了全双工串行通信接口和多个 16 位定时器/计数器，存储器容量进一步扩大，片内资源进一步丰富。这一时期的单片机具有品种齐全、兼容性强、软硬件资源丰富等特点，得到了广泛应用。

第四阶段（1983 年以后）：16 位单片机和 8 位高性能单片机并行发展阶段。以 1983 年 Intel 公司推出的 MCS-96 系列 16 位单片机为代表。与 MCS-51 系列 8 位单片机相比，MCS-96 系列 16 位单片机不但字长增加 1 倍，而且还将一些面向测控要求的外部接口电路集成进去，如多路 10 位 A/D 转换器、高速输入/输出部件、PWM 输出功能等，使这类单片机实时处理能力更强，适用于复杂的高性能要求的应用场合。

目前，单片机市场处于 8 位单片机、16 位单片机、32 位单片机并存的局面。然而，由于应用领域大量需要的仍是 8 位单片机，因此，各大公司纷纷推出高性能、大容量、多功能的新型 8 位单片机，使 8 位单片机的应用范围扩大。直到现在 8 位单片机仍能满足绝大部分应用领域的需要。可以肯定，以 MCS-51 系列为主的 8 位单片机，现在及以后的相当一段时期内仍然将占据单片机应用的主导地位，仍然将是单片机中的主流机型。

现在，单片机正朝着高速度、高性能、多品种方向发展，其发展趋势具体体现在以下几个方面。

1. CPU 功能增强

主要是运算速度和精度的提高。MCS-51 单片机晶振频率为 12MHz, 指令周期为 1 μ s, 而新型单片机的晶振频率可达 40MHz, 指令周期为 1/6 μ s。目前在一些 RISC (精简指令集) 结构的单片机中, 已实现了一个时钟周期执行一条指令, 速度是 MCS-51 单片机的 12 倍。

2. 内部资源增多

单片机内部资源不断增加, 片内 RAM 已达 2KB, 片内 ROM 容量已达 64KB, 集成有串行和并行 I/O 接口、A/D 和 D/A 转换器、WDT (监视定时器)、PWM、高速 I/O 接口等。因此, 采用这种单片机构成控制系统, 外加硬件电路可以减到最少, 从而大大减小了控制系统的体积, 提高了工作可靠性。

3. 引脚的多功能化

随着单片机内部资源和功能的增强, 客观上需要更多的外部引脚, 但是增加外部引脚数量不仅会增加制造困难, 而且会使芯片的集成度减小, 外部电路更加复杂, 这就会出现不可避免的矛盾。为了解决这一矛盾, 单片机中普遍采用一脚多用的设计方案。

4. 低电压和低功耗

单片机大量应用于便携式产品和家电消费类产品, 低电压和低功耗的特性尤其重要。许多单片机已可在 2.2V 电压下运行, 有的已能在 1.2V 或 0.9V 电压下工作。功耗已为 μ A 级, 在一粒纽扣电池下就可长期运行。

5. 大力发展专用型单片机

早期单片机以通用为主, 随着市场的扩大, 单片机设计生产周期缩短, 成本下降, 推动了专用单片机的发展。专用单片机具有低成本, 资源有效利用, 系统外围电路少, 可靠性高的特点, 是未来单片机发展的一个重要方向。

1.1.3 单片机的特点及应用

1. 单片机的特点

单片机结构上的最大特点是把 CPU、存储器、I/O 接口电路等集成在一块超大规模芯片上, 就其组成和功能而言, 一块单片机芯片就是一台计算机。单片机这种特殊的结构形式, 使其具有很多显著的特点。

1) 集成度高、体积小、可靠性高

单片机将各功能部件集成在一块芯片上, 内部采用总线结构, 减少了芯片间的连线, 大量的数据传输在单片机内部进行, 不易受外界的干扰。另外, 用单片机构成的应用系统, 结构简单, 体积小, 极易对系统进行电磁屏蔽等抗干扰措施。所以, 单片机应用系统具有较高的可靠性和抗干扰能力。

2) 控制功能强

单片机采用面向控制的指令系统, 有很丰富的条件分支转移指令, 有很强的位处理功能, 可以直接对 I/O 接口进行输入/输出操作及逻辑运算, 特别适用于实时控制。

3) 性能价格比高

高性能、低价格是单片机最显著的特点之一, 其应用系统具有印制电路板小、接插件少、硬件成本低、安装调试简单方便等特点, 使单片机应用系统的性能价格比大大高于其他控制系统。

4) 使用方便、容易产品化

单片机选择范围宽，可以用通用单片机，也可以用专用单片机。单片机系统扩展方便、硬件设计简单、开发工具完善、开发周期短，容易将单片机应用系统产品化，很快投入实际应用。

2. 单片机的应用

单片机的应用提高了机电产品的技术水平和自动化程度，对各行各业的技术改造和产品更新换代起到了重要的推动作用。其应用领域已从工业控制、仪器仪表、机电一体化设备等迅速发展到家用电器、办公自动化、汽车电子等广大领域。

1) 仪器仪表

在各种仪器仪表中引入单片机，使仪器仪表数字化、智能化、微型化，可以提高仪器仪表的智能化程度和测量精度，可以简化仪器仪表的硬件结构。在仪器仪表中大量使用单片机已是一种趋势，使仪器仪表智能化取得了令人瞩目的进展。

2) 工业控制

单片机广泛应用于各种工业控制系统中，如数控机床、工业机器人、温度控制等。

3) 机电一体化

机电一体化是机械工业的发展方向，机电一体化产品是指集机械技术、通信技术、计算机技术于一体，具有智能化特征的机电产品。单片机作为机电一体化产品中的控制器，能发挥其体积小、控制功能强的优点，使机电产品体积缩小、功能增强，提高机电产品的自动化、智能化程度。

4) 家用电器

家用电器普遍采用单片机取代传统的控制电路，如洗衣机、电冰箱、空调、彩电、微波炉、电子玩具等。家用电器配上了单片机后，功能增强、智能化程度提高、使用更加方便，倍受人们喜爱，同时也身价倍增。

单片机除以上各方面应用之外，还广泛应用于办公自动化领域（如复印机）、汽车电子、通信系统（如手机）、计算机外围设备等，成为计算机发展和应用的一个重要方向。

单片机的应用从根本上改变了传统控制系统的设计思想和设计方法。过去必须由模拟电路、数字电路及继电器控制电路实现的大部分功能，现在已能用单片机并通过软件方法实现了。由于软件技术的飞速发展，各种软件系列产品的大量涌现，可以极大地简化硬件电路。这种以软件取代硬件并能提高系统性能的控制技术，称之为微控制技术。微控制技术标志着一种全新概念的出现，是对传统控制技术的一次革命，随着单片机应用的推广普及，微控制技术必将不断发展、日益完善、更加充实。

1.2 单片机的基础知识

1.2.1 数制及转换

数制是计数的进位制，计数方法。常用的数制有十进制、二进制、十六进制等。日常生活中常用的是十进制计数方式，逢十进一。在计算机中，采用二进制计数方式，逢二进一，二进制是计算机能直接识别的唯一形式。

1. 十进制(Decimal)

一个十进制数，其数值是由数字 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 来表示的，数字所处的位置不同，代表的数的大小也就不同。十进制数从右起的个位、十位、百位、千位等的个、十、百、千在数学上叫做“权”，以 10 为底的幂表示，因此个位、十位、百位、千位的权分别为 10^0 、 10^1 、 10^2 、 10^3 。

在计数中所使用的数字的个数称为基数，十进制数中用到 0~9 共 10 个数字，其基数为 10。不同数制的权是以相应的基数为底的幂来表示的。每一位上的数字与该位权的乘积，就是该位数值的大小。例如：

$$1275=1\times10^3+2\times10^2+7\times10^1+5\times10^0$$

上式称为按权展开式。

2. 二进制(Binary)

如果计算机使用十进制数，每位数的 10 个数字需要电路中的 10 个状态与之对应，这在实际中很难实现。所以，计算机中不用十进制数而用二进制数。二进制中，其数值只由数字 0 和 1 来表示，0 和 1 两个数字很容易用电子元器件来实现，如电压的高与低、电灯的亮与灭、脉冲的有与无均可以用 0 和 1 来代表，且这种简单的状态工作可靠，抗干扰能力强。

二进制按逢二进一的原则计数，使用的数字仅 0、1 两个，其基数为 2。因此，二进制数的权是以 2 为底的幂。同样二进制数可以用按权展开式表示。例如：

$$1011=1\times2^3+0\times2^2+1\times2^1+1\times2^0$$

3. 十六进制(Hexadecimal)

十六进制数用 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F 共 16 个数字来表示，其中 0~9 与十进制相同，A、B、C、D、E、F 分别表示十进制数中的 10、11、12、13、14、15，计数原则是逢十六进一。十六进制数的基数为 16，权是以 16 为底的幂。例如：

$$2A7F=2\times16^3+A\times16^2+7\times16^1+F\times16^0=2\times16^3+10\times16^2+7\times16^1+15\times16^0$$

4. 不同数制之间的转换

一个数值，可以用不同进制的数表示。人们习惯用十进制数，但在计算机中使用二进制数，而编写程序时常用十六进制数。为了区分这三种数制，可以在数的后面用一个英文字母作为标识符。二进制数用 B (Binary) 表示，如 10100011B；十六进制数用 H (Hexadecimal) 表示，如 4BH；十进制数用 D (Decimal) 表示，如 89D 或 89，表示十进制数的 D 可以省略。

1) 二进制数与十进制数之间的转换

二进制数转换为十进制数的基本方法是对二进制数按权展开求和得到。例如：

$$1010B=1\times2^3+0\times2^2+1\times2^1+0\times2^0=10$$

在单片机中，当数据为一个字节时，熟记 8 位二进制数各位的权重值，将为 1 的位的权重值相加就可得到十进制数。例如 01010001B 转换成十进制数，各位的权值对应为：

	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
数据	0	1	0	1	0	0	0	1
权值	128	64	32	16	8	4	2	1

二进制数中为 1 的权值相加：01010001B=64+16+1=81

十进制数转换为二进制数的基本方法是“除 2 取余逆排法”，即将十进制数不断用 2 除，直到商为 0，每次的余数从右到左依次排列，先得到的余数为二进制数的低位，后得到的余数为高位。

实际上，十进制数转换为二进制数可以用一种更为直接的方法，即按位分割法进行转换。以一个十进制数转换为 8 位二进制数为例，将要转换的十进制数与二进制数的各位权重值比较，从高位开始比到低位，若十进制数大于或等于二进制某位，则该位取 1，否则取 0。这样，可以不用繁琐地不断除 2 取余，转换更加直观，还不易出错。例如：将 38 转换为二进制数。按权值比较结果为：

	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
权值	128	64	32	16	8	4	2	1
38	0	0	1	0	0	1	1	0

将 38 与二进制各位权值从高位到低位比较， $38 > 32$ ，则该位（D5 位）取 1，余数 $38 - 32 = 6$ ，再与更低位比较，得 D2 位为 1，D1 位为 1。

转换结果：38=00100110B。

十进制数小数部分转换为二进制数小数的基本方法是“乘 2 取整顺排法”，即将十进制小数不断用 2 乘，直到积为 0 或转换位数达到要求为止。每次乘积的整数部分取出从左到右依次排列，先得到的整数为二进制小数的高位先排，后得到的整数为低位后排。

2) 二进制数与十六进制数之间的转换

二进制数的缺点是位数太多，书写起来麻烦，且数值不直观。因此，在写程序时，常将它们写成十六进制数，十六进制数可以看作是二进制数的缩写。

4 位二进制数具有 16 个状态（ $2^4=16$ ），而一位十六进制数也具有 16 个状态，如表 1-1 所列。所以，每 4 位二进制数与 1 位十六进制数对应，这就使二进制数与十六进制数之间的转换简单方便。

表 1-1 二进制、十进制、十六进制数对照表

二进制数 (B)	十进制数	十六进制数 (H)	二进制数 (B)	十进制数	十六进制数 (H)
0000	0	0	1011	11	B
0001	1	1	1100	12	C
0010	2	2	1101	13	D
0011	3	3	1110	14	E
0100	4	4	1111	15	F
0101	5	5	0001 0000	16	10
0110	6	6	0001 0001	17	11
0111	7	7	0001 0010	18	12
1000	8	8	0001 0011	19	13
1001	9	9	0001 0100	20	14
1010	10	A	0001 0101	21	15

十六进制数转换为二进制数，只要将每位十六进制数用相应的 4 位二进制数表示，即可完成转换，这种方法称为“一拉四”。例如：

$$\begin{aligned} 9AH &= 1001\ 1010B \\ 9A.6H &= 1001\ 1010.0110B \end{aligned}$$

二进制数转换为十六进制数的方法为“四合一”，即每 4 位二进制数合并为一位十六进制数。转换时，只要将二进制数的整数部分自右向左，每 4 位为一组，不足 4 位在左边用 0 补足；小数部分自左向右，每 4 位一组，不足 4 位在右边用 0 补足，然后将每组二进制数用 1 位十六进制数表示，即可完成转换。例如：

$$\begin{aligned} 1000101B &= 0100\ 0101B = 45H \\ 100101.101B &= 0010\ 0101.1010B = 25.AH \end{aligned}$$

3) 十进制数与十六进制数之间的转换

十进制数与十六进制数之间的转换可以直接进行，也可先转换为二进制数，然后再把二进制数转换为十六进制数或十进制数。

例如：将十进制数 38 转换为十六进制数。

$$38 = 0010\ 0110B = 26H$$

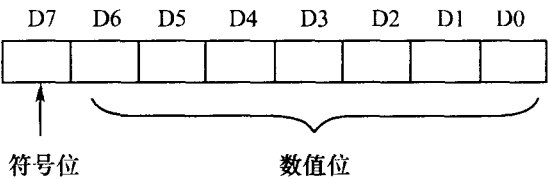
例如：将十六进制数 45H 转换为十进制数。

$$45H = 0100\ 0101B = 69$$

1.2.2 带符号数的表示

计算机中，每个数据都是以固定长度的二进制数位表示和存储的，而不管其实际长度。可以用一个字节 8 位表示一个数或者用两个字节 16 位表示一个数。如 48 表示为一个字节二进制数为 0011 0000B。如果计算机处理的是无符号数，8 位二进制数的 8 个位全部用来表示数值，范围为 0000 0000B~1111 1111B（或写成 00H~FFH），其表示的数值为 0~255。相应的 16 位二进制数（0000H~FFFFH）表示数值范围为 0~65535。

在很多情况下，遇到的数都是有正有负的，这时候的数就是带符号数。在计算机中，不仅所有的数都是用 0 和 1 的组合来表示，符号“+”、“-”也只能用 0 和 1 来表示。为了表示带符号数，通常规定一个数的最高位为符号位，用 0 表示正，1 表示负。例如，一个 8 位二进制数，它的最高位 D7 为符号位，后面的 7 位 D6~D0 为数值位，其格式为：



例如：+74=+1001010B=01001010B，符号位为 0 表示正数，后面 7 位表示数值 74。
-74=-1001010B=11001010B，符号位为 1 表示负数，后面 7 位表示数值 74。

同理，一个 16 位二进制数，它的符号位是最高位 D15。最高位作符号位后，一个带符号数的二进制数与一个无符号数的二进制数表示数值的范围是不同的。8 位带符号数表示数值的范围为 -127~+127，16 位带符号数表示数值的范围为 -32767~+32767。

1. 机器数与真值

符号位数字化后,这种连同符号位一起能被计算机识别的数称为机器数,而把机器数所代表的实际数值称为真值。例如,一个8位机器数与真值的关系可表示如下:

+74=+1001010B,正数的真值。

-74=-1001010B,负数的真值。

则对应的机器数为:

+74=0 1001010B,符号位为0表示正数,构成一个字节8位二进制数。

-74=1 1001010B,符号位为1表示负数,构成一个字节8位二进制数。

机器数是数据在计算机中的存储形式,往往不能直观地看出这个数据的数值大小。而真值是在“+”、“-”号后用7位二进制数表示数值,能直接反映数值的正负和大小。

2. 原码、反码、补码

一个带符号数在计算机中可以分别用原码、反码或补码三种方式表示。习惯上,把计算机中存放的数称作机器数,因此原码、反码、补码都是机器数。

1) 原码

正数的符号位用0表示,负数的符号位用1表示,数值位表示数的绝对值,这样就得到数的原码。例如,用8位二进制数表示一个数的原码如下:

X1=+74,则X1的原码为: $[X1]_{\text{原}}=0\ 1001010\text{B}$

X2=-74,则X2的原码为: $[X2]_{\text{原}}=1\ 1001010\text{B}$

原码表示简单直观,可直接看出数值大小,便于与真值进行转换。但是它有两个缺点:一是0的原码有+0和-0两种形式, $[+0]_{\text{原}}=00000000\text{B}$, $[-0]_{\text{原}}=10000000\text{B}$;二是执行减法运算很复杂,做减法时,计算机先要比较两个数的绝对值大小,用大数减小数才能保证结果正确,最后还要判断结果的符号。

2) 反码

正数的反码与原码相同,负数的反码为负数原码的符号位不变,数值位按位取反。例如:

$$[+74]_{\text{反}}=[+74]_{\text{原}}=0\ 1001010\text{B}$$

$$[-74]_{\text{反}}=[1\ 1001010\text{B}]_{\text{反}}=1\ 0110101\text{B}$$

3) 补码

正数的补码与原码相同,负数的补码等于其反码加1。例如:

$$[+74]_{\text{补}}=[+74]_{\text{反}}=[+74]_{\text{原}}=0\ 1001010\text{B}$$

$$[-74]_{\text{补}}=[-74]_{\text{反}}+1=1\ 0110101\text{B}+1=1\ 0110110\text{B}$$

补码表示克服了用原码表示的两个缺点,0的补码是唯一的,只有一种形式00000000B,即 $[+0]_{\text{补}}=[-0]_{\text{补}}=00000000\text{B}$ 。补码的运算方便,可将减法运算变为加法运算,符号位与数值位一起参加运算,使计算机内的运算电路及运算过程大为简化。因此,在计算机中,带符号数一般用补码表示,且运算结果也用补码表示。

3. 补码运算

补码运算必须先将参加运算的数变成补码,运算后结果仍是补码,需再求补得到结果的原码才能看出结果的真值。要注意的是:正数的补码与原码相同,不要转换。

例 1-1 $35-24=11$,分别用加法和减法进行运算。

解：用减法

$$\begin{array}{r} 0010\ 0011 \quad 35 \\ - 0001\ 1000 \quad 24 \\ \hline 0000\ 1011 \quad 11 \end{array}$$

用加法

$$\begin{array}{r} 0010\ 0011 \quad 35 \\ + 1110\ 1000 \quad [-24]_{\text{补}} \\ \hline 1\ 0000\ 1011 \quad 11 \end{array}$$

自然丢失

在字长为 8 位的计算机中，运算结果只保留 8 位，最高位的进位自然丢失。由上例可知，减法运算与补码的加法运算结果相同，因此，补码表示后可将减法运算变为加法运算。

例 1-2 $(-5) + (-7) = -12$ ，用补码表示求出运算结果。

解： $[-5]_{\text{原}} = 1000\ 0101\text{B}$ ， $[-5]_{\text{补}} = [-5]_{\text{反}} + 1 = [1000\ 0101\text{B}]_{\text{反}} + 1 = 1111\ 1011\text{B}$

$[-7]_{\text{原}} = 1000\ 0111\text{B}$ ， $[-7]_{\text{补}} = [-7]_{\text{反}} + 1 = [1000\ 0111\text{B}]_{\text{反}} + 1 = 1111\ 1001\text{B}$

$$\begin{array}{r} 1111\ 1011 \quad [-5]_{\text{补}} \\ + 1111\ 1001 \quad [-7]_{\text{补}} \\ \hline 1\ 1111\ 0100 \quad \text{补码} \end{array}$$

自然丢失

运算结果的 8 位二进制数中，最高位是 1，说明结果为负数的补码，只要对该补码再进行求补码，就得到该数的原码（补码的补码是原码），进而得到真值。结果的原码及真值：

$$[1111\ 0100\text{B}]_{\text{补}} = [1111\ 0100\text{B}]_{\text{反}} + 1 = 1000\ 1011\text{B} + 1 = 1000\ 1100\text{B} = -12$$

显然，计算机中用补码表示及运算，不需要单独考虑处理符号位的问题，符号位与数值位一样参加运算，运算简单方便，结果正确。补码表示的缺点是不直观，要转换成原码才能看出结果的真值（数值大小）。

补码加减运算的步骤如下：

- (1) 求出参加运算的两个数的补码。
- (2) 用补码相加进行加法运算，用减数变补相加完成减法运算。
- (3) 运算时符号位应当作为数的一部分参与运算，符号位有进位则丢弃。
- (4) 运算结果也为补码。若结果的符号位为 0，表示结果是正数，它就是结果的原码形式；若结果符号位为 1，表示结果为负数的补码，经求补才能得到原码。

日常生活中有不少补码的应用，现以钟表对时为例来说明补码的含义。假如现在的标准时间是 7 点整，而钟表的指针指向 9 点整，这时钟表对时有两种方法：

- (1) 倒拨 2 小时，从 9 倒拨到 7， $9-2=7$ ，使指针指向 7。
- (2) 顺拨 10 小时，从 9 顺拨到 7， $9+10=12$ （自然丢失） $+7=7$ ，也能使指针指向 7。

在顺拨过程中，时钟到达 12 点时又从 0 点重新开始，相当于丢失了一个数 12（自然丢弃），这个自然丢失的数叫做模（mod）。所以，在模为 12 的系统中， $(9-2)$ 与 $(9+10)$

是等价的。

所谓模是一个系统的量程，即此系统所能表示的最大数。对模为 12 的时钟来说，时钟上只能表示 0~11 共 12 个时刻，一旦到 12 则 12 被丢失，又变为 0。时钟系统 2 与 10 互为补数（补码），减 2 的运算可用加 10 的运算代替。此外，3 与 9、4 与 8、6 与 6 等也在模为 12 的系统中互为补数。对一个 8 位的二进制数，它能表示 00000000B 到 11111111B 共 256 个数，故模为 $2^8=256$ 。8 位的二进制负数的补码可用下式求得：

$$[X]_{\text{补}}=256-|X|$$

因此，一个负数的补码，可用模减去该数的绝对值求得。

必须指出，8 位二进制数原码、反码、补码所表示数的范围是不同的。原码所表示的范围为 -127~+127，有 +0 和 -0；补码所表示的范围为 -128~+127，0 只有一种形式。8 位二进制数原码、反码、补码所表示的真值如表 1-2 所列。

表 1-2 8 位二进制数的真值表

二进制数	无符号数	原 码	反 码	补 码
0000 0000	0	+0	+0	+0
0000 0001	1	+1	+1	+1
0000 0010	2	+2	+2	+2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
0111 1101	125	+125	+125	+125
0111 1110	126	+126	+126	+126
0111 1111	127	+127	+127	+127
1000 0000	128	-0	-127	-128
1000 0001	129	-1	-126	-127
1000 0010	130	-2	-125	-126
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1111 1101	253	-125	-2	-3
1111 1110	254	-126	-1	-2
1111 1111	255	-127	-0	-1

1.2.3 计算机中的编码

计算机只能识别 0 和 1 两种符号表示的二进制形式的信息，而计算机要处理的信息却有多种形式，例如数字符号、标点符号、运算符号、英文字符等。所有这些需计算机处理的符号只有按特定的规则进行二进制编码后，才能在计算机中表示和识别。如键盘敲击的是字母、数字等符号，但输入计算机内部的却是二进制编码。

计算机中根据信息对象不同，编码的方式（即码制）也不同，常用的有 BCD 码和 ASCII 码等。

1. BCD 码(Binary Coded Decimal)

人们习惯使用十进制数，计算机的输入和输出通常也采用十进制数，而计算机中只