

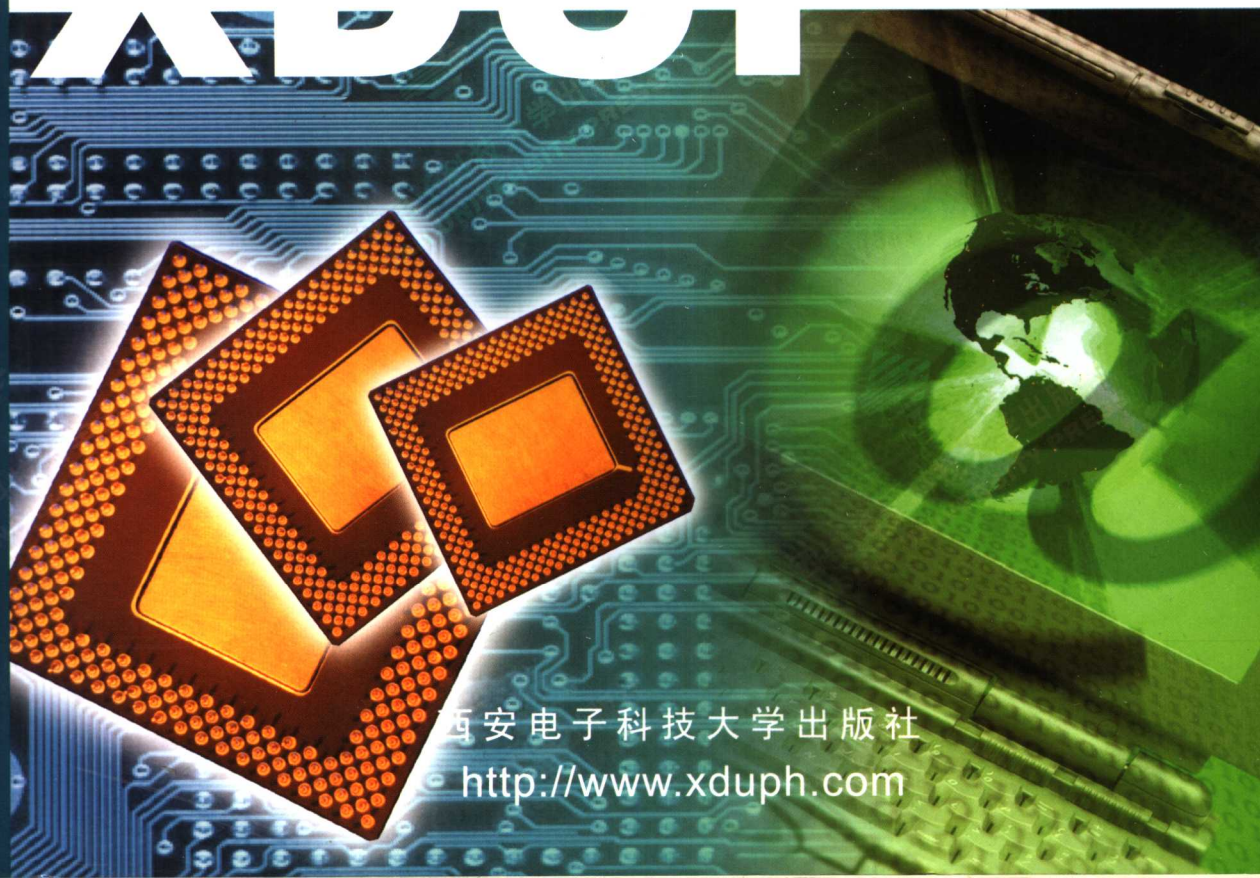
面向 **21** 世纪

高等学校计算机类专业规划教材

单片机原理与应用技术

The Principles and Application Technology of Single Chip Microcomputer

喻宗泉 喻 晗 李建民 编著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

面向 21 世纪高等学校计算机类专业系列教材

单片机原理与应用技术

The Principles and Application Technology
of Single Chip Microcomputer

喻宗泉 喻 晗 李建民 编著

西安电子科技大学出版社

2006

内 容 简 介

本书从应用的角度出发,介绍 MCS-51 系列单片机的运行原理、内部功能结构、外部扩展及实际应用编程。全书分 7 章,分别为单片机原理、单片机汇编语言编程技术、单片机 C 语言编程技术、单片机输入/输出与中断控制技术、单片机片外存储扩展技术、单片机片外接口技术和单片机开发应用技术。

本书结构新颖,内容先进,资料翔实。书中提供了大量的实用程序和应用实例,文笔流畅,通俗易懂,每章均配有习题与思考题,便于组织教学或自学。

本书适合于各级各类高等院校作“单片机原理”、“微机原理及应用”等课程的教材和自学读本,也可供专业技术人员阅读参考。

★本书配有电子教案,需要者可与出版社联系,免费提供。

图书在版编目(CIP)数据

单片机原理与应用技术 / 喻宗泉等编著. —西安: 西安电子科技大学出版社, 2006.5

ISBN 7-5606-1661-5

I. 单… II. 喻… III. 单片微型计算机, MCS-51 IV. TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 027076 号

责任编辑 雷鸿俊 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

<http://www.xduph.com>

E-mail: xdupfxb@pub.xaonline.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2006 年 5 月第 1 版 2006 年 5 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 15.5

字 数 364 千字

印 数 1~4000 册

定 价 19.00 元

ISBN 7-5606-1661-5/TP·0403

XDUP 1953001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

前 言

单片微型计算机简称单片机,它具有集成度高、体积小、功能全、性价比高等优点,使得它在微控制领域,例如机器人、智能电器、智能玩具、移动通信设备、工业现场控制等场合一枝独秀。在单片机大显身手的地方,PC机相形见绌。由于单片机在信息的产生、传递和处理过程中有着实际的、必不可少的用途,一些高等院校的许多专业都在“微机原理及应用”等课程中选单片机为主要机型进行讲述。

本书编写有如下特点:

- 以使用广泛的 MCS-51 系列单片机为主,介绍其内部结构、工作原理、指令系统、编程方法及接口技术。
- 采用汇编语言和 C 语言编写单片机应用程序。
- 在内容编排和文字叙述上循序渐进,既方便教学,又利于自学。内容陈述上避免了“必需”、“够用”等模糊概念,清楚地向读者介绍了基本分析方法和设计方法,力求准确无误。

全书分 7 章:第 1 章为单片机原理;第 2 章为单片机汇编语言编程技术;第 3 章为单片机 C 语言编程技术;第 4 章为单片机输入/输出控制技术;第 5 章为单片机片外存储扩展技术;第 6 章为单片机片外接口技术;第 7 章为单片机开发应用技术。

本书在介绍单片机的 C 语言编程技术方面作了一些尝试,着重介绍了 Franklin C51 编译器的使用特征,C51 支持的数据类型、存储类型,MCS-51 单片机的 C51 定义、函数及其功能以及 C51 程序设计;通过实例介绍了定时计数器、中断系统、串行口等的 C51 描述;介绍了顺序、分支、循环设计的语句和方法;最后对 C 语言和汇编语言的混合编程作了小结。

单片机应用编程的实践表明,使用 C 语言编程更为简练,能缩短单片机的开发周期。因为 C51 编译器的使用无需考虑存储器或寄存器的分配,而 C 程序又兼有汇编程序分段结构的特点,对于已经学过 C 语言的读者,更加容易接受。本书也顾及到没有学过 C 语言的读者,从零起点对 C 语言的基本语法作了简单的介绍。学过此部分内容之后,对阅读 C51 程序将不会有多大困难。对于书中介绍的单片机汇编语言和 C 语言,在具体教学过程中可进行取舍,只讲一种语言,另一种语言供学生参考或自学。

本书由喻宗泉主编,第 5、6 章由喻宗泉编写,第 2、3、4 章由喻晗(复旦光华信息科技股份有限公司)编写,第 1、7 章由李建民(江汉大学物理与信息工程学院)编写,全书由喻宗泉统稿。丁霄霞、隋晓妹完成了全部书稿的文字输入及绘图工作,西安电子科技大学出版社的云立实老师和雷鸿俊老师对本书的出版提供了大力支持,对他们的辛勤劳动表示由衷的感谢。

由于编者水平有限,书中难免存在错误和不足之处,恳请读者批评指正。

作者的 E-mail 地址: whyzq379@163.com

编 者

2006 年 2 月

目 录

绪言	1
第 1 章 单片机原理	4
1.1 单片机运算基础及结构基础简介	4
1.1.1 运算基础	5
1.1.2 二进制编码	9
1.1.3 微型计算机的一般结构	11
1.1.4 微机工作原理	16
1.2 MCS-51 单片机的功能结构	18
1.2.1 MCS-51 基本型单片机内部功能结构	18
1.2.2 MCS-51 增强型单片机内部功能结构	19
1.2.3 CPU 结构	22
1.3 MCS-51 单片机存储器	22
1.3.1 片内、外统一编址的程序存储器	23
1.3.2 片内、外单独编址的数据存储器	24
1.3.3 片内 RAM 和特殊功能寄存器 SFR	24
1.4 单片机最小系统	29
1.4.1 单片机引脚功能	29
1.4.2 时钟电路与复位电路	31
1.4.3 操作时序	35
1.4.4 最小系统配置	37
1.5 小结	38
习题与思考题	39
第 2 章 单片机汇编语言编程技术	41
2.1 指令格式	41
2.2 寻址方式	42
2.2.1 立即寻址	42
2.2.2 存储器寻址	42
2.2.3 寄存器寻址	44
2.3 指令系统	45
2.3.1 数据传送指令	46
2.3.2 算术运算指令	52
2.3.3 逻辑运算指令	56
2.3.4 位操作指令	58
2.3.5 控制转移指令	60
2.4 伪指令	67

2.5 几种典型结构的汇编语言程序设计	69
2.5.1 顺序结构程序	69
2.5.2 分支结构程序	70
2.5.3 循环结构程序	72
2.5.4 子程序	74
2.5.5 位操作程序	76
2.6 小结	76
习题与思考题	77
第3章 单片机C语言编程技术	79
3.1 Franklin C51 编译器简介	79
3.1.1 C51 编译器	79
3.1.2 C51 一般格式	80
3.1.3 Franklin C51 编译器支持的数据类型	81
3.2 C51 数据的存储类型	83
3.3 MCS-51 单片机的 C51 定义	84
3.3.1 特殊功能寄存器 SFR 的 C51 定义	84
3.3.2 P0~P3 口及片外扩展硬件 I/O 口的 C51 定义	85
3.3.3 位寻址变量的 C51 定义	85
3.3.4 C51 的运算符定义	86
3.3.5 C51 的指针变量及运算操作定义	88
3.4 C51 函数及功能	88
3.4.1 函数的分类与定义	89
3.4.2 函数的调用	89
3.4.3 函数调用条件	90
3.5 单片机C语言程序设计	91
3.5.1 顺序结构设计	91
3.5.2 分支结构设计	91
3.5.3 循环结构设计	94
3.5.4 C语言和汇编语言混合编程	97
3.6 小结	99
习题与思考题	100
第4章 单片机输入/输出与中断控制技术	102
4.1 片内并行 I/O 端口	102
4.1.1 P0~P3 口结构与功能	102
4.1.2 编程实例	107
4.1.3 键盘和显示器电路设计	110
4.2 片内串行通信接口	113
4.2.1 可编程串行通信接口的结构	114
4.2.2 串行口控制器 SCON 和电源控制器 PCON	115

4.2.3 串行口编程实例	117
4.2.4 单片机与 PC 机的串行通信编程	124
4.3 片内定时计数器	128
4.3.1 定时计数器结构	128
4.3.2 定时计数器的工作寄存器 TMOD 和 TCON	129
4.3.3 定时计数器的工作方式	132
4.3.4 定时计数器程序设计	136
4.4 片内中断系统	138
4.4.1 中断的概念与中断服务程序入口地址	138
4.4.2 中断控制寄存器 TCON、SCON、IE 和 IP	140
4.4.3 中断响应过程	142
4.4.4 中断服务程序	142
4.4.5 C51 中断程序设计	145
4.5 小结	147
习题与思考题	147
第 5 章 单片机片外存储扩展技术	149
5.1 单片机对外提供的三组总线	149
5.2 常用存储器扩展芯片	150
5.2.1 地址锁存器	150
5.2.2 存储器芯片	150
5.2.3 I/O 接口芯片	156
5.3 程序存储器的扩展	156
5.3.1 EPROM 扩展	156
5.3.2 EEPROM 作为程序存储器扩展	157
5.4 数据存储器的扩展	158
5.4.1 SRAM 扩展	158
5.4.2 DRAM 扩展	158
5.4.3 EEPROM 作为片外数据存储器扩展	159
5.5 地址译码电路	160
5.5.1 全译码法	160
5.5.2 部分译码法	161
5.5.3 线性法	162
5.6 I/O 端口扩展	162
5.6.1 串行口外扩展并行口	163
5.6.2 片外扩展 TTL 或 CMOS 芯片	164
5.6.3 片外扩展定时计数器 8253/8254	165
5.6.4 片外扩展并行 I/O 接口芯片 8243	167
5.6.5 片外扩展并行 I/O 接口芯片 8155	169
5.6.6 综合扩展	176

5.7 小结	177
习题与思考题	177
第6章 单片机片外接口技术	179
6.1 I/O 操作指令	179
6.1.1 输入/输出方法	179
6.1.2 I/O 操作时序	180
6.2 可编程键盘显示器接口芯片 8279	181
6.2.1 内部结构	181
6.2.2 连接键盘和数字显示	185
6.3 液晶显示接口	187
6.3.1 液晶显示驱动器	187
6.3.2 接口实例	189
6.4 D/A 转换接口	191
6.4.1 集成 D/A 转换器 AD7520	191
6.4.2 集成 D/A 转换器 DAC0832	193
6.5 A/D 转换技术	198
6.5.1 集成 A/D 转换器 AD574	198
6.5.2 集成 A/D 转换器 ADC0809	202
6.6 小结	204
习题与思考题	205
第7章 单片机开发应用技术	206
7.1 单片机应用系统的抗干扰技术	206
7.1.1 软件抗干扰	206
7.1.2 硬件抗干扰	209
7.1.3 看门狗技术	209
7.2 单片机开发系统	211
7.2.1 单片机开发系统的结构	212
7.2.2 仿真器	213
7.2.3 单片机开发系统的功能	214
7.3 单片机应用系统的总体设计	215
7.4 小结	217
习题与思考题	217
附录 A MCS-51 单片机指令表	218
附录 B C51 库函数	223
附录 C C51 编译控制指令	230
附录 D 单片机常用汉英名词术语对照	234
参考文献	239

绪 言

单片机是 Single Chip Microcomputer(单片微型计算机)的中文简称。它是一种芯片级计算机,在这个计算机内,将通用计算机的 CPU、ROM、RAM、串行 I/O 接口、并行 I/O 接口、定时器/计数器、中断控制器、系统时钟和系统总线等集成在一块芯片上。单片机的另一名称是 Microcontroller(微控制器)或 Microcontroller Unit(微控制单元,简称 MCU),这一名称突出反映了单片机的主要功能是控制而不是运算。近年来,由于单片机能直接进入各种控制领域,成为系统的一部分,人们又把单片机称为嵌入式微控制器(Embedded Microcontroller),以单片机为控制核心的自动控制系统又称为嵌入式系统(Embedded System)。

1. 通用微机和单片机

通用微机和单片机是当代微型计算机发展的两大分支,它们有各自的应用领域,不能互换。以 IBM-PC 机为代表的通用微机,追求高速运行程序、增大存储容量,采用了高速缓冲存储(Cache)技术、虚拟存储技术、流水线作业技术、乱序执行技术等一系列当代计算机新技术,数据处理的位数也达 64 位,从而广泛应用在科学计算、图像处理、文字处理、数学建模、系统仿真、数据批量处理等领域。以数据检测、实时控制为目的的单片机体积小、功能全,成为智能系统中一个必不可少的环节。单片机在智能家用电器、机器人、智能玩具、智能检测、智能仪器仪表中,以及在制约生产环节的温度、压力、流量测量等方面,均具有得天独厚的优势,其地位不能被通用微机取代。

2. 单片机的应用特点

单片机的应用具有三个明显的特征:

(1) 由于控制对象涉及到机械动作(如机器人)或场效应(如温度的变化、流体的流动),因此片面追求单片机的高速度本身没有什么特别意义。单片机的工作频率一般为 6 MHz、12 MHz、24 MHz、33 MHz 或 40 MHz,远低于通用微机。频率低有利于降低成本,取得较好的效益。

(2) 单片机字长有 4 位、8 位、16 位、32 位之分,数据位数选择以够用为原则,不是越长越好。由于 8 位机用于控制已能满足大多系统的要求,因此 8 位机是单片机的主流机型,今后相当长的时间都不会改变。

(3) 单片机内的存储容量有增大的趋势,这种增大不仅只是增加 RAM、ROM 的容量,而是改用一些新型的存储器。美国 ATMELE 公司开发的 8 位 AT89 系列单片机就是在 MCS-51 内集成了闪速存储器(Flash Memory)。由于芯片内带有闪速可编程、可擦除只读存储器(FPEROM, Flash Programmable and Erasable ROM),使得 89C51 和 89C52 单片机能在掉电后保存已写入的数据。

根据单片机的三个应用特点, 决定了单片机较之通用微机有不同的发展方向:

(1) 工业生产的环境通常比较恶劣, 甚至存在有毒、有害、有腐蚀的气、液体场合, 存在高温、高压、强电、磁辐射等, 这就要求单片机具有极强的抗干扰能力, 不被外界的干扰影响输出。

(2) 在人类不能涉足的场合工作, 要求单片机具备高的可靠性和稳定性, 否则任何差错都不能达到满意的控制效果。

(3) 要求单片机的指令系统简单, 并且 I/O 端口和存储器统一编址。

单片机的发展过程历经三代, 其划分通常以 Intel 公司相继推出的 MCS-48、MCS-51、MCS-96 三大系列单片机为准。

1976 年问世的 MCS-48 系列单片机的内部构造过于简单, 以其典型产品 8048 为例, 内部仅由 8 位 CPU、27 条 I/O 线、1 KB ROM、64 B RAM 和 1 个 8 位定时/计数器组成, 由于没有集成串行接口及中断控制, 它的应用范围日益缩小。

1980 年诞生的 MCS-51 系列单片机, 虽然也是 8 位机, 但由于在内部结构上增加了通用异步接收/发送逻辑部件 UART(Universal Asynchronous Receiver and Transmitter), 增强了定时/计数、中断处理功能, 在指令操作中又设置了大批位操作指令, 与片内位寻址空间一起构成独有的布尔操作系统, 使得单片机成为名副其实的微控制器。它的使用长盛不衰, 成为当今的主流机型。

如果把 MCS-48、MCS-51 机型分别算作单片机发展进程中的第一代和第二代, 那么 1984 年由 Intel 公司推出的 MCS-96 系列就成为单片机的第三代。这一代计算机的特点是字长 16 位、运算速度快, 但这一代计算机应用范围不广, 并没有形成气候。之所以 16 位 MCS-96 系列机(代表机型 8098)取代不了 MCS-51 系列机, 正是因为微控制领域多数场合下字长用不着 16 位, 而且 MCS-96 系列机价格又普遍偏高。

目前在市场上较为流行的单片机品种除 Intel 公司的 MCS-51、MCS-96 系列外, 还有:

Motorola 公司: 68HC5、68HC11 系列;

Zilog 公司: Z86EXXXPSC 系列;

Texas 公司: MSP430FXX 系列;

Micro Chip 公司: PIC16C 系列。

这些产品中, MCS-51 系列所占市场份额最大。世界上许多知名生产厂家, 如美国 Intel、AMD、ATMEL、Winbond、Temic 等公司, 以及其它国家的 Simens、Philips、NEC、LG 等, 都生产 MCS-51 系列单片机。生产该系列单片机的这些公司中, 又以 Intel 公司的产品时间最长、品种最多、应用最快。该系列机的品种已达数百个, 为此, MCS-51 不仅成为市场上的佼佼者, 也成为高校教学的首选。

3. 单片机的应用领域

作为一种芯片级的计算机, 单片机具有集成度高、体积小、功耗低、性价比高、可靠性高、控制功能强、供电电压低等一系列优点, 在微控制领域一枝独秀。单片机的应用领域大体有如下几个方面:

(1) 智能控制。单片机适用于各种控制系统, 如温度、压力、流量智能控制系统, 能够实现可编程顺序控制、程序控制、实时控制、连续控制、离散控制、自适应控制、模糊控

制等多种控制方案。控制对象涉及到工业、农业、社会生活各个部门，如数控机床、加热炉、化工生产装置等。

(2) 智能仪表。在各种仪器仪表中引入单片机，让单片机成为仪表的一部分，是单片机最为重要的用途之一，由此也产生了智能传感器、智能医疗器械、智能测量仪表、数字示波器等等。

(3) 办公自动化设备。在当代微机的键盘中装入一片单片机，能适时处理即时键入的字符，完成初步转换。具备如此智能处理功能的还有众多的办公自动化设备，如打印机、传真机、复印机、磁盘机、终端设备等等。

(4) 实时控制。在过程控制、过程监测、运动机械、遥控遥测、机器人等各种实时过程控制系统中，单片机能够使系统保持最佳工作状态、提高效率。例如汽车控制，从点火、换挡、防滑、倒车直至排气、最佳油气比等，都能使用单片机操纵。又如航天领域的导航、制导、自动寻找目标、目标辨识等，也能使用单片机进行控制。

(5) 日常生活。单片机可应用于智能建筑、洗衣机、电冰箱、微波炉、电视机、游戏机等当中。有了单片机，人们的生活将更加舒适方便。

(6) 商务用品。单片机可应用于商业领域的自动售货机、电子秤、电子收款机、自动收款机等当中。

第1章 单片机原理

MCS-51 单片机的品种很多, 使用不同的标准有不同的分类方法。

按照单片机内部结构的复杂程度划分, 可以分为基本型和增强型两大类。基本型是 Intel 公司最早推出的 MCS-51 系列单片机, 它们奠定了单片机的结构基础; 增强型是在基本型单片机的基础上为满足不同的使用目的, 增加了一些硬件电路或一些软件程序构成的。

按照单片机制造工艺的不同, 可以分为 HMOS 型和 CHMOS 型。基本型单片机既有 HMOS 型, 也有 CHMOS 型; 增强型单片机仅限于使用 CHMOS 工艺。

按照单片机型号划分, 有 Intel 公司的 51 子系列和 52 子系列、AT 公司的 AT89 系列以及 Philips 公司的 P87 和 P89 系列等。以 51 子系列(含 8031、8051、8751、89C51)和 52 子系列(含 8032、8052、8752、89C52)为例, 不同子系列之间除存储器结构有差别外, 还有其它一些功能电路配置不同。一般而言, 51 子系统属于基本型, 52 子系统属于增强型。在同一子系列几种不同型号的产品之间, 仅限于存储器的配置不同, 如 8031 内部无 ROM, 8051 内部有 4 KB 掩膜 ROM, 8751 内部有 4 KB EPROM。

Intel 公司的 MCS-51 单片机, 不论哪种类型, 在本书中都统一用 8XX5X 来表示。

1.1 单片机运算基础及结构基础简介

单片机中的数以器件的物理状态表示, 由于具有两个状态的物理器件容易制造, 有 10 个状态的物理器件难于制成, 因此在单片机中广泛使用二进制数。二进制数的 N 次方所对应的十进制数如表 1-1 所示。

表 1-1 二进制数 N 次幂

位权	对应十进制数	位权	对应十进制数	位权	对应十进制数	位权	对应十进制数
2^{-4}	0.0625	2^2	4	2^8	256	2^{14}	16 384
2^{-3}	0.125	2^3	8	2^9	512	2^{15}	32 768
2^{-2}	0.25	2^4	16	2^{10}	1024	2^{16}	65 536
2^{-1}	0.5	2^5	32	2^{11}	2048	2^{20}	1 048 576
2^0	1	2^6	64	2^{12}	4096	2^{30}	1 073 741 824
2^1	2	2^7	128	2^{13}	8192	2^{40}	1 099 511 627 776

阅读和记忆二进制数极易出错, 考虑到 4 位二进制数就是 1 位十六进制数, 因此在单片机中几乎全用十六进制数书写二进制数。而在大型机中还经常用八进制数书写二进制数。相应各种进制数之间的关系如表 1-2 所示。

表 1-2 二进制数、八进制数、十进制数和十六进制数

二进制数	0000	0001	0010	0011	0100	0101	0110	0111	1000	1001	1010	1011	1100	1101	1110	1111
八进制数	0	1	2	3	4	5	6	7	10	11	12	13	14	15	16	17
十进制数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
十六进制数	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F

单片机中区别不同数制的方法是在数的后面加一个字母：二进制数用 B(Binary)；八进制数用 Q(Octal)，手写时 O、0 易混淆，故用 Q；十进制数用 D(Decimal)或省略 D；十六进制数用 H(Hexadecimal)。也可以直接将数制写在数的右下角。

单片机中为了简化表示，常用 K 表示 2^{10} ，用 M 表示 2^{20} ，用 G 表示 2^{30} ，用 T 表示 2^{40} 。即

$$1\text{ K}=2^{10}=1024$$

$$1\text{ M}=2^{20}=1\text{ K K}=1\text{ 048 576}$$

$$1\text{ G}=2^{30}=1\text{ K M}=1\text{ 073 741 824}$$

$$1\text{ T}=2^{40}=1\text{ M M}=1\text{ 099 511 627 776}$$

1.1.1 运算基础

1. 数制转换

将各种进制数转换成十进制数的方法是按权展开然后相加：

$$101.1\text{H}=1\times 16^2+0\times 16^1+1\times 16^0+1\times 16^{-1}=257.0625\text{D}$$

$$101.1\text{B}=1\times 2^2+0\times 2^1+1\times 2^0+1\times 2^{-1}=5.5\text{D}$$

将十进制整数转换成其它进制数，使用除进率取余法，即用进率不停地去除需转换的十进制数，直至商为 0，把每次相除所得余数倒序排放，就是所需转换的数。例如，将 298D 转换成十六进制数：

第一次除法： $298\div 16=18$ 余 10 (最低位)，10 的十六进制数是 AH；

第二次除法： $18\div 16=1$ 余 2 (次低位)；

第三次除法： $1\div 16=0$ 余 1。

所以 $298\text{D}=12\text{AH}$

把二进制数转换成十六(八)进制数，只需从最低位向左每 4(3)位为一组，每组用 1 位十六(八)进制数表示，最高位不足 4(3)位的补足 4(3)位，凑成一组，如：

$$1\ 0110\ 1011\ 0111\text{B}\rightarrow 0001\ 0110\ 1011\ 0111\text{B}$$

$$\begin{array}{cccc} \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 1 & 6 & \text{B} & 7 & \text{H} \end{array}$$

所以 $1\ 0110\ 1011\ 0111\text{B}=16\text{B7 H}$

十六(八)进制数转换为二进制数，只需每位用相应的二进制数代替：

$$\begin{array}{ccc} 372\text{Q}\rightarrow & 3 & 7 & 2 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \\ 011 & 111 & 010 & =1111\ 1010\text{B} \end{array}$$

2. 有符号二进制数的符号表示方法

无符号数在单片机中表示成二进制数时, 所有的二进制位都是数值位。

有符号数要想在单片机中表示出来, 必须将符号数码化, 通常用“0”表示正号, 用“1”表示负号。例如, 使用 8 位二进制数表示 +100 1001B, 就表示成

0 100 1001 B
符号位 数值位

或写成十六进制数 49H。而 -100 1001B 就表示成

1 100 1001 B
符号位 数值位

或写成十六进制数 C9H。

无论有符号二进制数是用 8 位、16 位、32 位, 还是用 64 位表示, 都只用一位表示符号位, 就是最高位, 而其余位全部都是数值位。

已经把符号数码化了的二进制数被称为机器数, 相应二进制数或十进制数的值被称为机器数的真值。机器数有原码、反码和补码三种表示方法。

1) 原码

最高位为符号位, 其余位为数值位的二进制数码叫做机器数的原码。

例如 $X = +76 = +100\ 1100B$, 则

$$[X]_{\text{原}} = 0\ 100\ 1100B = 4CH$$

这里用 8 位二进制数表示, 最高位为符号位, 其余 7 位为数值位。如果用 16 位二进制数表示, 则

$$[X]_{\text{原}} = 0000\ 0000\ 0100\ 1100B = 004CH$$

又假设 $Y = -76 = -100\ 1100B$, 则

$$[Y]_{\text{原}} = 1\ 100\ 1100B = CCH$$

如果用 16 位二进制数表示, 则

$$[Y]_{\text{原}} = 1000\ 0000\ 0100\ 1100B = 804CH$$

在书写机器数的时候, 必须首先指明二进制数用多少位, 一般不加申明时常用 8 位。

从原码的表示中可以看出: 如果一个十六进制数的首位大于等于 8, 那它必然是一个负数的原码。例如 CCH、83H 等就是负数的原码, 因为它们化成二进制数后最高位是 1。

2) 反码

正数的反码与正数的原码相同; 负数的反码等于负数的原码除符号位外逐位求反。

例如 $X = +76 = +100\ 1100B$, 则

$$[X]_{\text{反}} = [X]_{\text{原}} = 4CH$$

又如 $Y = -76 = -100\ 1100B$, 则因 $[Y]_{\text{原}} = 1\ 100\ 1100B = CCH$, 所以

$$[Y]_{\text{反}} = 1\ 011\ 0011B = B3H$$

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:

$$[+76]_{\text{补}} = [+76]_{\text{反}} = [+76]_{\text{原}} = 4CH$$

$$[-76]_{\text{补}} = [-76]_{\text{反}} + 1 = 1011\ 0100 = B4H$$

【例 1-1】 已知 $[X]_{\text{补}} = A7H$, 求 X 。

解: 因 X 的符号位为 1, 故 $X < 0$,

$$[X]_{\text{反}} = [X]_{\text{补}} - 1 = A6H = 1010\ 0110B$$

所以

$$[X]_{\text{原}} = 1\ 101\ 1001B \rightarrow X = -101\ 1001B = -89$$

虽然原码与真值转换简单, 但两数相减时, 需要减法器硬件电路的支持。而单片机为了简化硬件结构, CPU 内只设计了一个加法器, 为此引进了补码的概念。反码正是为了计算补码而设立的一种表示法。

3. 二进制数及补码运算

1) 二进制数数学运算

加法运算规则是逢二进一。例如:

$$\begin{array}{r} 101B \\ + 11B \\ \hline 1000B \end{array}$$

减法运算规则是向高位借 1 到本位的大小等于十进制数的 2。例如:

$$\begin{array}{r} 101B \\ - 11B \\ \hline 10B \end{array}$$

乘法运算规则是只有当两个 1 相乘时, 部分积才为 1, 否则为 0。例如:

$$\begin{array}{r} 101B \\ \times 11B \\ \hline 101 \\ + 101 \\ \hline 1111B \end{array}$$

除法运算规则是够减商为 1, 不够减商为 0 且把被除数下一位移至除数。例如:

$$\begin{array}{r} 1B \\ 11B \overline{) 101B} \\ \underline{11B} \\ 10B \end{array}$$

2) 二进制数逻辑运算

“与”运算规则为只有两个 1 相“与”时, 结果才为 1, 否则为 0。例如:

$$101B \wedge 011B = 001B$$

“或”运算规则为只要“或”的双方有一个为 1 时, 结果就为 1。例如:

$$101B \vee 011B = 111B$$

“非”运算规则为“非 0 即 1, 非 1 即 0”。例如:

$$A = 1010B, \text{ 则 } \overline{A} = 0101B$$

“异或”运算规则为两个相同逻辑变量“异或”, 结果为 0; 不同逻辑变量“异或”, 结果为 1。例如:

$$101B \oplus 001B = 100B$$

3) 补码运算

补码运算规律是有符号数的符号位和数值位具有相同的进位规则，这就意味着如果参加运算的二进制数是补码形式，那么在进位时，有符号数完全同于无符号数，而运算的结果也是补码。

【例 1-2】 设 $[X]_{补}=36H$ ， $[Y]_{补}=20H$ ，求 $[X]_{补}+[Y]_{补}$ 。

解： $[X]_{补}+[Y]_{补}=36H+20H=56H$ ，相加结果是 56H 的补码。

【例 1-3】 设 $[X]_{补}=63H$ ， $[Y]_{补}=F4H$ ，求 $[X]_{补}+[Y]_{补}$ 。

解： $[X]_{补}+[Y]_{补}=63H+F4H$ ，列竖式如下：

$$\begin{array}{r} 0110\ 0011B \\ +\ 1111\ 0100B \\ \hline 1\ 0101\ 0111B \end{array} = \boxed{1}57H=57H$$

最高进位位 1 将自然丢失。相加前， $[X]_{补}=63H$ 是 $X=+99$ 的补码， $[Y]_{补}=F4H$ 是 -12 的补码；相加后，结果 57H 是 87 的补码。

补码运算有两个特征：一个是能把减法转换成加法，另一个是存在溢出问题。

【例 1-4】 利用补码完成 $64-11$ 。直接相减结果为 53，化成十六进制数是 35H。

解：

$$\begin{aligned} 64-11 &= 64+[-11] \\ &= [64]_{补}+[-11]_{补} \\ &= 40H+F5H \\ &= \boxed{1}35H \end{aligned}$$

在最高位进位自然丢失后，结果为 35H，恰是十进制数 53 的补码，与直接相减结果相同。

【例 1-5】 溢出问题举例。

设 $[X]_{补}=40H$ ， $[Y]_{补}=41H$ ，此时， $X=+64$ ， $Y=+65$ ，直接相加后结果为 $+129$ 。

但如果用补码相加，有 $[X]_{补}+[Y]_{补}=81H=1000\ 0001B$ ，最高位为 1 表明和是负数，81H 是 -127 的补码。两个正数相加，结果成了负数，说明补码相加出了问题。

出问题的原因在于 8 位二进制数补码所能表示数的范围是 $-128\sim+127$ ，如果相加的和超出了这个范围，结果必然出错，这种情况称为溢出。本例就是溢出的例子， $40H$ 与 $41H$ 的和 $+129>+127$ 。

8 位、16 位二进制数表示无符号数和有符号数的范围如表 1-3 所示。

表 1-3 8 位和 16 位二进制数表示无符号数和有符号数的范围

		8 位二进制数表示数的范围	16 位二进制数表示数的范围
无符号数		00H~FFH (0~255)	0000H~FFFFH (0~65 535)
有符号数	原码	FFH~7FH ($-127\sim+127$)	FFFFH~7FFFH ($-32\ 767\sim+32\ 767$)
	反码	80H~7FH ($-127\sim+127$)	8000H~7FFFH ($-32\ 767\sim+32\ 767$)
	补码	80H~7FH ($-128\sim+127$)	8000H~7FFFH ($-32\ 768\sim+32\ 767$)

判断补码运算是否产生溢出，有一个比较简单的方法。假设参加相加的两个数及结果都用补码，且将结果的进位位丢失，则有：

两个正数相加得负数，有正溢出；

两个负数相加得正数，有负溢出；

有三种情况下无溢出：① 两个正数相加得正数；② 两个负数相加得负数；③ 一个正数与一个负数相加。

溢出的判断方法如表 1-4 所示。

表 1-4 溢出判断法

一个加数(8 位补码)	另一个加数(8 位补码)	8 位结果(8 位补码)(最高进位丢失)	有无溢出
00H~79H	00H~79H	00H~79H	无
		80H~FFH	正溢出
00H~79H	80H~FFH	00H~FFH	无
80H~FFH	80H~FFH	00H~79H	负溢出
		80H~FFH	无

两个无符号数相加时无溢出问题，只存在进位问题。两个 8 位二进制数相加，结果为 9 位，其中相加的和为 8 位，进位位为 1 位(或为 0，或为 1)。

【例 1-6】 无符号数 9AH+81H，结果为 1 1BH，进位位 1 不能丢失。

1.1.2 二进制编码

为了让单片机不仅能完成数学运算，而且还能进行非数值处理，需要把运算符号、阿拉伯数字、英文字母等都使用二进制数表示，由此产生了二进制编码。二进制编码的方法很多，这里只介绍常用的两种。

1. BCD 码

BCD 码(Binary Coded Decimal)的全称是用二进制编码的十进制数。用 4 位二进制数表示 1 位十进制数，由于 4 位二进制数可以区分 16 种不同的状态，因此表示方法很多，其中用得最多的是 8421BCD 码，如表 1-5 所示。要注意 BCD 码的 4 位不能省略，例如 5 的 BCD 码是 0101BCD，而不是 101BCD。

表 1-5 8421 BCD 码

二进制数	BCD 码	十进制数	二进制数	BCD 码	十进制数
0000	0000	0	0101	0101	5
0001	0001	1	0110	0110	6
0010	0010	2	0111	0111	7
0011	0011	3	1000	1000	8
0100	0100	4	1001	1001	9

使用 4 位二进制数表示 1 位十进制数的 BCD 码称为压缩 BCD 码。例如十进制数 265 用压缩 BCD 码表示为

0010 0110 0101 BCD

使用 8 位二进制数表示 1 位十进制数的 BCD 码称为非压缩 BCD 码，其中的高 4 位为 0000。十进制数 265 用非压缩 BCD 码表示为