

高等职业教育电子信息类贯通制教材

·机电技术专业



单片机控制技术的应用

• 韩全立 主编
• 王建明 主审



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

本书配有电子教学参考资料包

<http://www.phei.com.cn>

TP368.1
114

高等职业教育电子信息类贯通制教材（机电技术专业）

单片机控制技术的应用

限 期 还 书

—— 第 金 工 编

王建明 主审

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书主要介绍了 MCS-51 系列单片机的结构及工作原理、指令系统、中断及定时、串行通信、系统扩展、测控接口、控制系统设计、系统开发与仿真等内容。本书力求紧密结合职业技术教育的特点,注重理论联系实际,书中重点对单片机控制系统的组成、接口、应用等部分做了详细的论述,突出实用性,注重和加强对学生实践能力的培养。为了便于教学或自学,书中列举了大量的应用实例。每章末附有习题,可供读者练习。

本书可作为高等职业教育的机电类及电类相关专业教材,也可作为相关领域工程技术人员的学习参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

单片机控制技术的应用/韩全立主编. —北京:电子工业出版社, 2004.9

高等职业教育电子信息类贯通制教材·机电技术专业

ISBN 7-121-00269-8

I.单… II.韩… III.单片微型计算机, MCS-51 系列—计算机控制—高等学校:技术学校—教材 IV.TP368.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 085662 号

责任编辑:朱怀永

印 刷:涿州京南印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经 销:各地新华书店

开 本:787×1092 1/16 印张:15.5 字数:396.8 千字

印 次:2004 年 9 月第 1 次印刷

印 数:5 000 册 定价:19.60 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

前言



本教材以电子技术领域使用最广泛的 MCS-51 系列单片机为对象, 针对职业教育的特点, 介绍其内部结构, 工作原理, 软、硬件开发等内容, 本教材具有以下特点:

(1) 突出基本性。在阐述单片机的基本概念、基本原理和基本技能方面, 力求做到由浅入深, 体现“必须、够用、适用、会用”原则。

(2) 突出典型性。教材中对问题的阐述及所选实例具有一定的典型性和代表性。

(3) 突出简约性。教材内容较为简单明了, 即用较少的篇幅阐明教学目标所要求的内容。

(4) 突出逻辑性。在教材内容的组织与编排上, 既注意符合知识的逻辑顺序, 又着眼于符合学生的思维发展的规律。

(5) 突出实践性。在教材的选材及应用举例上, 较为注重理论与实际相结合, 务求实用。

本课程参考学时数为 90 学时。各校可根据具体情况进行讲授, 要求通过本课程的学习, 能使学生在单片机应用技术方面具备一定的实用能力。

本书由河南工业职业技术学院韩全立老师任主编, 天津轻工职业技术学院王建明老师任主审。全书共 9 章, 其中第 1, 2 章由天津电子信息职业技术学院郝云编写; 第 3 章由佛山职业技术学院倪明编写; 第 4 章由江苏信息职业技术学院胡蕴海编写; 第 6 章由河南工业职业技术学院张东辉编写; 第 5, 7 章由河南工业职业技术学院韩全立编写; 第 8, 9 章由天津市宁河中专王海东编写。在本教材的编写过程中, 得到了河南工业职业技术学院领导的大力支持, 在此一并表示诚挚的谢意。

为了方便教师教学, 本书配有电子教学参考资料包(教学指南、电子教案及习题答案)免费提供给教师使用。请有此需要的教师登录华信教育资源网(<http://www.hxedu.com.cn>)下载或与电子工业出版社联系。E-mail: ve@phei.com.cn

由于编者水平有限, 加之时间仓促, 错误和不妥之处在所难免, 敬请广大读者批评指正。

编者
2004 年 2 月





第 1 章 概述	1
1.1 单片机的基础知识	1
1.1.1 单片机概述	1
1.1.2 常用术语	4
1.2 数制与码制	5
1.2.1 数制	5
1.2.2 数制间的转换	6
1.2.3 二进制数的运算	7
1.2.4 计算机中数的表示	8
1.3 常用单片机系列介绍	12
1.3.1 单片机的硬件系统	12
1.3.2 单片机的软件系统	13
1.3.3 常用单片机系列介绍	14
习题 1	15
第 2 章 单片机的基本结构	17
2.1 MCS-51 单片机的性能及结构	17
2.1.1 MCS-51 单片机内部结构	17
2.1.2 MCS-51 单片机的引脚	19
2.2 单片机的存储器结构	24
2.2.1 存储器的地址空间	24
2.2.2 MCS-51 系列单片机程序存储器地址空间	25
2.2.3 MCS-51 系列单片机数据存储器地址空间	26
2.3 AT89 与 P89C5 系列单片机	31
2.3.1 AT89 系列单片机	31
2.3.2 P89C5 系列单片机	32
2.4 单片机的工作方式	33
2.4.1 单片机的时序	33
2.4.2 单片机执行程序的过程	34
2.4.3 单片机的工作方式	35
习题 2	37
第 3 章 指令系统与汇编语言程序设计	38
3.1 指令系统概述	38

3.1.1	程序设计语言	38
3.1.2	指令和指令系统	39
3.1.3	程序的执行过程	39
3.2	汇编语言程序实例	40
3.3	寻址方式	41
3.4	指令系统	43
3.4.1	数据传送类指令	44
3.4.2	算术运算类指令	49
3.4.3	逻辑运算类指令	54
3.4.4	控制转移类指令	56
3.4.5	位操作指令	62
3.4.6	伪指令	65
3.5	汇编语言程序设计	66
3.5.1	汇编语言源程序格式	66
3.5.2	数据处理程序	67
3.5.3	代码转换程序	70
3.5.4	数值运算程序	72
3.5.5	查表及散转程序	75
3.5.6	子程序及其调用	77
习题 3		78
第 4 章	中断系统与定时/计数器	81
4.1	输入/输出控制方式	81
4.2	中断系统	82
4.2.1	中断的概念	82
4.2.2	中断系统	83
4.3	中断处理过程	87
4.3.1	中断响应	87
4.3.2	中断处理	88
4.3.3	中断返回	89
4.3.4	中断请求的撤销	90
4.3.5	中断响应时间	91
4.3.6	中断应用举例	91
4.4	定时/计数器	93
4.4.1	定时/计数器的结构及工作原理	94
4.4.2	定时/计数器的模式寄存器和控制寄存器	95
4.4.3	定时/计数器的工作模式	96
4.5	定时/计数器的应用	99
4.6	外部中断源的扩展	106
习题 4		109

第 5 章 串行接口	110
5.1 串行通信概述	110
5.2 MCS-51 系列单片机的串行接口	115
5.2.1 MCS-51 系列单片机串行口的结构	115
5.2.2 串行口的工作方式	116
5.2.3 波特率的计算	120
5.3 串行口应用举例	122
习题 5	128
第 6 章 系统扩展及接口技术	129
6.1 外部总线扩展	129
6.1.1 外部总线的扩展	129
6.1.2 总线驱动	130
6.2 存储器系统的基本知识	131
6.2.1 只读存储器 (ROM)	131
6.2.2 随机存取存储器 (RAM)	132
6.2.3 存储器的组成	133
6.2.4 片选方式和地址分配	134
6.3 外部存储器的扩展	136
6.3.1 外部存储器的扩展性能	136
6.3.2 外部程序存储器的扩展	137
6.3.3 数据存储器的扩展	140
6.4 并行 I/O 接口的扩展	142
6.4.1 不可编程的简单 I/O 接口	142
6.4.2 8255A 可编程并行 I/O 接口	144
6.5 显示与键盘的扩展	154
6.5.1 LED 显示器与接口	154
6.5.2 键盘及接口	159
习题 6	167
第 7 章 单片机的测控接口	169
7.1 A/D 转换接口的扩展	169
7.1.1 A/D 转换器概述	169
7.1.2 典型 A/D 转换器芯片 ADC0809	171
7.1.3 MCS-51 系列单片机与 ADC0809 接口	172
7.1.4 应用举例	173
7.2 D/A 转换接口的扩展	174
7.2.1 D/A 转换器概述	174
7.2.2 典型 D/A 转换器芯片 DAC0832	174
7.2.3 单缓冲工作方式的接口与应用	176
7.2.4 双缓冲及直通工作方式	177

7.3 开关量接口的扩展	178
7.3.1 开关量输入接口	179
7.3.2 开关量输出接口	181
7.4 电压/频率转换器件	184
7.4.1 V/F 转换原理	185
7.4.2 用 V/F 转换器实现 A/D 转换的方法	186
7.4.3 LM331-V/F 转换器	186
习题 7	189
第 8 章 单片机控制系统设计及应用	190
8.1 单片机控制系统的设计方法	190
8.1.1 系统设计的内容及步骤	190
8.1.2 控制系统设计的内容和步骤	190
8.2 提高系统可靠性的常用方法	191
8.2.1 提高系统可靠性的常用方法	192
8.3 单片机在步进电动机控制中的应用	194
8.3.1 步进电动机的组成及工作原理	195
8.3.2 步进电动机的主要参数	196
8.3.3 步进电动机的单片机控制	196
8.4 单片机在直流调速中的应用	203
8.5 单片机在电子显示屏中的应用	205
习题 8	209
第 9 章 单片机应用系统开发	210
9.1 单片机应用系统的设计过程	210
9.1.1 系统设计的基本要求	210
9.1.2 单片机应用系统的组成	210
9.1.3 应用系统的研制开发过程	211
9.2 单片机的选型	216
9.3 单片机控制系统的仿真调试	219
9.3.1 单片机开发系统	219
9.3.2 硬件调试	221
9.3.3 软件调试	223
9.3.4 综合调试	223
9.4 常用单片机开发系统简介	224
习题 9	226
附录 A MCS-51 指令表	227
附录 B MCS-51 指令编码表	232
附录 C 常用芯片引脚图	234
参考文献	239

第1章 概 述



我们知道，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这四个发展阶段。目前，计算机正在向着巨型化、微型化、网络化和智能化等几个方向发展。

作为微型计算机的重要分支，自 1971 年世界上第一片微处理器芯片 INTER 4004 研制成功以来，单片机技术也随之迅速发展起来。目前，单片机技术作为一个非常有发展前景的计算机技术，其应用已遍及越来越多的领域。本书将以 MCS-51 系列单片机为模型，介绍其结构、原理、系统设计与应用。

1.1 单片机的基础知识

1.1.1 单片机概述

1. 单片机的组成

计算机经过了半个多世纪的发展，其系统结构发生了重大变化。但冯·诺依曼提出的“存储程序”思想，即程序和数据都被存放在内存中的工作方式，仍然被现代微型计算机所采用。因此，现在的微型计算机都可被称为冯·诺依曼型计算机。

冯·诺依曼型计算机的主要特点为：采用二进制代替十进制进行运算和存储程序。人们将计算机要处理的数据和运算方法、步骤，事先按计算机要执行的操作命令和有关原始数据编制成程序（二进制代码），存放在计算机内部的存储器中，计算机在运行时能够自动地、连续地从存储器中取出并执行，不需人工加以干预。根据这种指导思想，得出计算机的硬件系统由运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备共五个部分组成。图 1-1 所示为计算机硬件系统的基本组成框图。

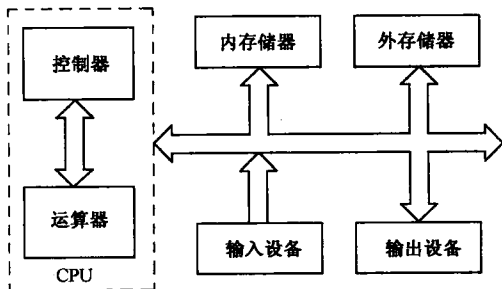


图 1-1 计算机硬件组成框图

(1) 运算器

运算器由算术逻辑单元（ALU）、累加器、数据缓冲寄存器和状态寄存器组成。运算器在控制器的控制下，完成对取自内部存储器或内部寄存器的数据进行算术或逻辑运算，并产



生相应的标志存放到状态寄存器中。

(2) 控制器

控制器控制着单片机完成各种操作。控制器由程序计数器、指令寄存器、指令译码器、时序电路和操作控制电路组成,主要完成取指令、将指令翻译成计算机的各种微操作并执行指令,同时控制计算机各部件有条不紊地工作等。

控制器和运算器合在一起称为中央处理器,即 CPU (Central Processing Unit)。它是计算机的核心部件。

(3) 存储器

存储器为计算机的记忆部件,用于存放计算机的程序和数据,一般可分为只读存储器 (ROM) 和随机存储器 (RAM)。

ROM 中存放的信息具有只能读出而不能写入,并具有掉电不丢失的特点,因此常用来存放固定不变的程序,所以有时直接称之为程序存储器;RAM 中存放的信息可随机“读出”或“写入”,但掉电后信息会丢失,因此常用来存放一些需要临时保存的数据或运算的中间结果,所以有时直接称之为数据存储器。

计算机的存储器是一个按地址访问的一维线性空间。每一个地址对应一个存储单元,每个存储单元对应一个 8 位二进制数。由于每个存储单元有固定地址,故选择存储单元的地址要通过地址总线给出,并通过地址译码器惟一的选中。

(4) 输入设备

输入设备用于用户向计算机输入原始的数据和程序,并将其转换为计算机能够识别的二进制代码存入计算机中。常用的输入设备有键盘、鼠标、光电笔、扫描仪等。

(5) 输出设备

输出设备用于将计算机处理的结果转换成人或其他设备能够识别和接收的形式,如字符、文字、图形等。常用的输出设备有打印机、显示器、绘图仪等。

通常,我们把输入设备和输出设备合在一起称为计算机的输入/输出设备或外部设备,简称 I/O 设备或计算机的外设。它们与计算机的 CPU 在连接时需要通过相应的接口电路来完成。

所谓的单片机就是将计算机的 CPU、存储器、I/O 接口电路、定时器/计数器、中断部件等计算机的功能部件集成在一块芯片上,形成单芯片的、具备独特功能的微型计算机。因该芯片具有计算机所必须具备的基本部件,因此,单片机实际上就是一个简单的微型计算机。

2. 单片机的特点

单片机实际上是在半导体集成技术发展 to 一定程度,结合计算机技术的发展而出现的。自 1976 年 Intel 公司推出 MCS-48 系列 8 位单片机后,1980 年 Intel 公司又推出了 MCS-51 系列高档 8 位单片机。目前,尽管单片机已有 16 位和 32 位的芯片,但是作为工业控制的主力军仍然是 8 位单片机。

单片机芯片作为控制系统的核心,除了具有通用微机 CPU 的数值计算功能外,还必须具备灵活、强大的控制功能。由于单片机主要面向工业控制,工作环境比较恶劣,因此,单片机与通用微机相比,具有以下不同的技术特征:

① 抗干扰能力强,工作温度范围宽。由于单片机是在一块芯片上集成了微机系统的多种功能部件,各功能部件间采用总线连接,这样就大大提高了单片机的抗干扰能力。此外,由于其体积小,易于采取屏蔽措施,因此,特别适合于复杂、恶劣的工作环境。目前,单片机适用的环境温度划分为三个等级:民用级 $0^{\circ}\text{C} \sim +70^{\circ}\text{C}$;工业级 $-40^{\circ}\text{C} \sim +85^{\circ}\text{C}$;军用级 $-65^{\circ}\text{C} \sim$



+125℃。相对而言,通用微机一般要求在室温下能够工作,抗干扰能力也较低。

② 高的可靠性。在工业控制中,任何细微的差错都可能造成极其严重的后果,因此,单片机系统一般都具有较高的可靠性。

③ 控制功能强,数值计算能力相对较差。由于单片机主要用于控制领域,因此其具有较强的控制功能。相比之下,通用微机控制能力较弱,但其具有很强的数值计算能力,如果使用通用微机进行工业控制,就必须增加一些专用的接口电路。

④ 指令系统比通用微机的指令系统简单,并具有许多面向控制的指令,如单片机具有较为丰富的位操作指令等。

⑤ 具有很高的性价比。单片机的设计和制作技术使其价格明显降低,而其功能却是全面和完善的。

3. 单片机的应用领域

单片机主要面向控制领域,能够实现系统的在线控制。目前,单片机的应用日益广泛,下面简单介绍其典型的应用领域。

(1) 工业控制领域

单片机广泛应用于工业过程控制与监测、机电一体化系统、工业机器人等领域。例如,在数控机床的简易控制机中,采用单片机可提高控制机的可靠性,增强其功能,降低控制机成本等。

(2) 家用电器领域

目前,各种家用电器普遍采用单片机控制系统,如洗衣机、电冰箱、微波炉、电视机、空调机等。

(3) 办公自动化领域

现在,大多数办公设备都采用了单片机进行控制,如打印机、复印机、绘图仪、电话、传真机、考勤机等。

(4) 商业营销领域

在商业营销系统广泛使用的电子秤、收款机、条形码阅读器、商场保安系统、空气调节系统、冷冻保鲜系统等,都采用了单片机构成的专用系统。

(5) 智能仪器仪表领域

采用单片机控制系统的电气测量仪表,可以使测量系统具有存储、数据处理、联网、语言等智能化功能。集成单片机的压力传感器还可以随钻机送至井下,从而报告井底的压力状况等。

(6) 其他领域

另外,在汽车与航空航天器电子系统中的自动驾驶系统、通信系统、飞行监视器(黑匣子)等,都采用了单片机控制系统。使用单片机的模糊控制仍然是控制领域的前沿。

单片机的应用改变了传统控制系统的设计思想和设计方法。以前需要硬件模拟电路来实现的部分功能,现在可以采用数字电路通过单片机编程控制来实现。由此,诞生了一种新的控制技术,即微控制技术。并且随着单片机技术的普及,微控制技术也必将不断地发展和完善。

4. 单片机的发展和未来

(1) 单片机的发展

单片机的发展可分为三个阶段:

① 第一阶段为单片机的初级阶段。它以 Intel 公司的 MCS-48 系列为代表,采用专门的



结构,在片内集成了8位CPU、并行I/O口、8位定时/计数器、RAM和ROM等,但无串行口,中断处理也较简单。片内RAM和ROM寻址范围均小于4KB。这一阶段具有代表性的单片机还有Motorola的6801系列和Zilog的Z8系列等。

② 第二阶段为单片机的发展阶段。它以Intel公司的MCS-51系列为代表,在技术上完善了外部总线,并确立了单片机的控制功能。它的外部并行总线规范化为16位地址总线,最大可以寻址64KB的程序存储器和数据存储器。其16位地址总线、8位数据总线和相应的控制总线,形成了完整的并行三总线结构。该系列单片机对外提供了具有多机通信功能的串行口。它具有多级中断处理能力。片内具有16位的定时/计数器。有的片内还带有A/D转换接口。此时,单片机的种类繁多,并且在完善硬件的同时,设置了大量位操作指令,大量的条件跳转、无条件跳转指令,片内还设置了特殊功能寄存器,增强了单片机的控制功能,进一步确立了它的控制地位。

③ 第三阶段为单片机的更新阶段。最具有代表性的是Intel公司的MCS-96系列单片机,片内集成16位的CPU,RAM和ROM的容量也进一步增大,并且带有高速输入/输出部件,带有多通道A/D转换器,8级中断处理能力使其具有更强的实时处理功能。近年来,已有32位单片机进入实用阶段。同时,各厂家也纷纷以MCS-51为内核,推出了新型的MCS-51兼容机。总之,单片机的发展已进入更新的阶段。

(2) 单片机的未来

可以预计,在未来很长时间内,8位单片机仍是单片机的主流机型,因为8位机价格便宜,速度与功能也在向16位机挑战。

从单片机发展的趋势来说,主要向着大容量高性能、小容量低价格、外围电路内装化方向发展。

1) 大容量、高性能

单片机片内存储器的容量进一步扩大,存储器种类也从普通的ROM或EPROM向FLASH方向发展,具有在线编程功能。单片机片内,CPU字长增加,总线速度提高,硬件功能扩充,指令执行速度加快。且单片机对外部存储器、I/O口寻址能力增强,更利于系统的扩展和开发。

2) 小容量、低价格

对简单的单片机控制系统,如智能玩具、IC卡、家电等领域中应用的单片机,由于对其控制功能要求不高,而对价格、体积和功耗等方面却要求越小越好,故单片机在开发小容量、低价格产品方面有着广阔的前景。

3) 外围电路内装化

随着单片机的应用和发展,需要尽可能的把众多的外围功能部件集成在芯片内,如A/D和D/A转换器、DMA控制器、PWM发生器、声音发生器、监视定时器、电视机和录像机的锁相电路等,均可集成在单片机内部。

1.1.2 常用术语

(1) 字长

字长是指计算机的运算器能同时处理的二进制数据的位数,它与计算机的功能和用途有很大关系。字长决定了计算机的运算速度,字长越长相应精度越高。通常称8位二进制数为一个字节,以B表示。一般字长是字节的1,2,4,8倍。字长还决定了指令寻址的能力。



字长越长, 数据总线宽度越宽, 数据传输和运算的速度越快, 当然相应的硬件的性能也要求较高。

(2) 存储容量

存储容量是指存储器能够存储信息的总字节数。通常定义 1024 个字节为 1K 字节(1KB), 存储容量的单位还有 MB, GB 和 TB。

$$1\text{KB}=1024\text{B}=2^{10}\text{B}$$

$$1\text{MB}=1024\text{KB}=2^{20}\text{B}$$

$$1\text{GB}=1024\text{MB}=2^{30}\text{B}$$

$$1\text{TB}=1024\text{GB}=2^{40}\text{B}$$

存储器的存储容量越大地址总线位数也越多, 处理数据的范围就越广, 运算速度越快, 但成本也越高。

(3) 总线

在计算机系统中, 无论是计算机内部各部件之间, 还是计算机与外部设备之间, 数据的传送都是通过总线进行的。总线是信息传送的公共通道。每 1 位二进制数是由总线中的一根线来传送。根据总线传输信息的内容不同, 总线可分为数据总线、地址总线和控制总线。其中数据总线是传送数据信息的, 其位数与计算机字长相同, 具有双向传输功能。地址总线是传送地址信息的, 只有 CPU 的单向输出, 其位数与存储容量有关。例如, 1KB 的存储容量, 需要 10 根地址线。控制总线上传送的是控制信号, 对每一个控制信号而言, 方向是固定的, 但对控制总线来说, 其信息传输是双向的。

(4) 堆栈

堆栈是在 RAM 区中, 按照先进后出的原则设置的专用存储区域。堆栈的起始地址, 叫栈底。最后存入数据对应的地址单元, 叫栈顶。由栈底到栈顶的存储区域称为栈区。栈底是封死的, 只开放栈顶。栈区中数据的存取遵从先进后出的原则。数据的入栈、出栈由堆栈指针 SP 统一管理。数据入栈, SP 的内容先自动加 1, SP 指向新的栈顶, 再堆入一个数据。数据出栈, 每弹出一个数据, SP 的内容自动减 1, 指向新的栈顶。堆栈主要用于 CPU 执行主程序时的现场保护。如主程序调用子程序或执行中断服务程序时, 要将断点数据推入堆栈, 记忆断点的位置, 待子程序或中断服务程序执行完毕, 再将堆栈中保护的断点数据弹出, 即恢复现场, 使 CPU 继续执行主程序。

1.2 数制与码制

1.2.1 数制

我们最熟悉、使用最多的数制是十进制数, 而计算机是用二进制数表示数据、地址或控制命令的。计算机的内部工作是对二进制信息进行运算或处理, 但计算机与人或外设间的信息交换又多用十进制和十六进制数。

1. 十进制数

十进制数是用 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 十个数字来表示的数。计数时, 某一位满十要向上一位进一, 换句话说, 十进制数相邻两位间是十倍的关系。当数码处于不同的位置时, 它所表示的数值是不相同的。例如, 十进制数 985 可以表示成:

$$(985)_D=9\times 10^2+8\times 10^1+5\times 10^0$$



式中,“D”表示十进制数,等式右边的 10^2 , 10^1 , 10^0 表示数码在该位的“权”,不难看出,各数位表示的数值就是该位乘以相应的权,因此任意一个十进制数都可以按权展开。

$$(N)_D = k_{n-1} \times 10^{n-1} + k_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + k_1 \times 10^1 + k_0 \times 10^0 + k_{-1} \times 10^{-1} + \cdots + k_{-m} \times 10^{-m}$$

十进制数是我们日常生活中习惯的数制,此外还有二进制、八进制、十六进制、六十进制等。

2. 二进制数

二进制数是以 2 为基数的计数体制,它用 0 和 1 两个数码表示,采用“逢二进一”的计数规律。任意一个二进制数 $(N)_B$ 都可以按权展开:

$$(N)_B = k_{n-1} \times 2^{n-1} + k_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + k_1 \times 2^1 + k_0 \times 2^0 + k_{-1} \times 2^{-1} + \cdots + k_{-m} \times 2^{-m}$$

式中,下标“B”表示二进制数, K_i 表示第 i 位的系数,只有 0 和 1 两种数值, 2^i 为第 i 位的权。例,

$$(1011)_B = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

3. 八进制数

八进制数是以 8 为基数的计数体制,它用 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 这八个数码表示,采用“逢八进一”的计数规律。任意一个八进制数 $(N)_O$ 可以按权展开:

$$(N)_O = K_{n-1} \times 8^{n-1} + \cdots + K_0 \times 8^0 (\text{整数})$$

式中,下标“O”表示八进制数, K_i 表示第 i 位的系数。例,

$$(625)_O = 6 \times 8^2 + 2 \times 8^1 + 5 \times 8^0$$

此外,三位二进制数可用 1 位八进制数表示,即 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110, 111 可用 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 来表示。

4. 十六进制数

十六进制数是以 16 为基数的计数体制,它用 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F 这 16 个数码表示,采用“逢十六进一”的计数规律。一个十六进制数可以按权展开,例,

$$(4A8F)_H = 4 \times 16^3 + 10 \times 16^2 + 8 \times 16^1 + 15 \times 16^0$$

式中,下标“H”表示十六进制数。

此外,4 位二进制数可表示 1 位十六进制数,即 0000, 0001, 0010, 0011, 0100, 0110, 0111, 1000, 1001, 1010, 1011, 1100, 1101, 1110, 1111 对应表示 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F。

1.2.2 数制间的转换

1. 二、八、十六进制数转换为十进制数

将一个二进制、八进制或十六进制数转换成十进制数,只要将此数按权展开,按十进制数规律相加,结果就是要转换的十进制数。例如,

$$(1110)_B = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 = (14)_D$$

$$(113)_O = 1 \times 8^2 + 1 \times 8^1 + 3 \times 8^0 = (75)_D$$

$$(5D4)_H = 5 \times 16^2 + 13 \times 16^1 + 4 \times 16^0 = (1492)_D$$

2. 十进制数转换为二、八或十六进制数

将十进制数向其他进制数转换,采用“除进制取余”的方法,直到商为“0”。然后,从余



数的末位起顺次收集余数，即余数的末位是第一位，余数的首位是最后一位，即得转换后的数。

例， $(35)_D = (100011)_B$

2 35	余数 1	低位
2 17	1	↑
2 8	0	
2 4	0	
2 2	0	
2 1	1	高位
0		

$(139)_D = (213)_O$

8 139	余数 3	低位
8 17	1	↑
8 2	2	
0		高位

$(139)_D = (8B)_H$

16 139	余数 11	→ B	低位
16 8	8		↑
0			高位

上述为整数部分的转换方法，小数部分应采用“乘进制取整”的方法。例，

$(0.375)_D = (0.011)_B$ 取整

小数部分： $0.375 \times 2 = 0.75$ 0

$0.75 \times 2 = 1.5$ (减 1) 1

$0.5 \times 2 = 1.0$ 1

3. 二进制、八进制、十六进制数的相互转换

前面讲过，3 位二进制数对应 1 位八进制数，4 位二进制数对应 1 位十六进制数，所以，二、八、十六进制间的转换只要选对位数（3 位或 4 位为一组），就能相互转换。例如，

$(625)_O = (110 \ 010 \ 101)_B$

$(1 \ 1010 \ 0111)_B = (1A7)_H$

1.2.3 二进制数的运算

1. 二进制加法

二进制加法的运算规则为：0+0=0、0+1=1、1+1=0（有进位 1）。二进制数的加法与十进制加法相同，方法是：数位对齐，按加法规则逐位相加。

例， $(1101)_B + (1101)_B = (11010)_B$

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

单片机在做加法运算时，若两个 8 位二进制数相加，向更高字节有进位时，将置位进位标志位 CY；如低 4 位向高 4 位进位时，置位半进位标志位 AC。



2. 二进制减法

二进制减法的运算规则为： $0-0=0$ ， $1-0=1$ ， $1-1=0$ ， $0-1=1$ （有借位）。二进制减法与十进制减法相同，数位对齐，按减法规则逐位相减，不够减借位。

例如， $(11011)_B - (1101)_B = (1110)_B$

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

再如， $(1000100) - (10100101) = (11001111)$

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

此例中被减数小于减数，产生借位。在单片机中是要置位进位标志位 CY 的。

3. 二进制乘法

二进制乘法的运算规则为： $0 \times 0 = 0$ ， $0 \times 1 = 0$ ， $1 \times 0 = 0$ ， $1 \times 1 = 1$ 。此外，二进制乘法与十进制乘法相同。例，

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

4. 二进制除法

二进制除法是乘法的逆运算，与十进制除法类似，我们在这里就不再叙述了。

1.2.4 计算机中数的表示

计算机能表示和识别的是按特定的规则用二进制编码的众多信息。如，运算符号，各种命令、文字、数字、图形等。下面介绍计算机中数的表示法。

1. 带符号数

前面我们提到的二进制数，没有涉及数的正负问题，此类数常称为无符号数。工业控制中如开关的状态，就可用无符号数表示。但算术运算自然会有正有负，这类数称为带符号数。在计算机中，可以把符号位数值化，即正、负符号也用 1 位二进制数来表示，这就是“机器数”，通常符号位在该数的最高位，用“0”表示正，用“1”表示负。例如，+74 用有符号数表示就是 01001010，-74 用有符号数表示就是 11001010。

2. 定点数和浮点数

(1) 定点数

在计算机中，小数点的位置固定不变的数称为定点数。若约定小数点固定于机器数的最低位的右边，则机器数表示的是整数；若约定小数点固定于机器数数值的左边，符号位的右边，则机器数表示的为纯小数。

机器数所表示的数值范围由机器的字长决定，字长越长，所表示的数的范围就越大。一台 n 位字长的计算机，它所表示的机器数的范围是 $1 \leq X \leq 2^{n-1}$ （无符号定点整数）。因此，凡



是比1小的数, 机器认定为零, 若数值大于 2^{n-1} , 则产生“溢出”, 机器数不能表示。同理, 若表示不带符号的定点纯小数, 机器数的范围是 $2^{-n} \leq X \leq 1-2^{-n}$ 。一个字节所能表示的带符号定点整数的范围是 $-128 \leq X \leq +127$ 。

(2) 浮点数

浮点数是指在数的表示中, 小数点的位置是浮动的。任一个二进制数 N 可以表示为: $N = 2^E \times M$, 其中 M 为 N 的尾数, 表示 N 的有效数位, E 称为 N 的阶码, 它指明小数点的位数。例, $N = 110.011 = 2^{+10} \times 1.10011 = 2^{+11} \times 0.110011$ 。因此, 一个浮点数通常表示成如下形式:

Ms	E	M
1 位	m 位	n 位

其中, Ms 为尾数的符号位, 安排在最高一位, E 为阶码, 紧跟符号位之后, 占 m 位, M 为尾数, 占 n 位。例, $N = 2^{+101} \times 0.1011101$, 其浮点数表示为:

0	101	1011101
---	-----	---------

因此, N 相当于十进制数的 23.25。浮点数表示数的范围比定点数大得多, 使用方便, 运算速度快。目前, 一般大中型计算机及高档微机、小型机均采用浮点表示法, 或两种方法均有。

3. 原码、反码和补码

(1) 原码

在符号位中用“0”表示正, 用“1”表示负的二进制数称为原码, 通常用 $[x]_{\text{原}}$ 表示。设计算机字长是 8 位, 则

$$\begin{aligned} [+57]_{\text{原}} &= 00111001 & [+127]_{\text{原}} &= 01111111 & [+0]_{\text{原}} &= 00000000 \\ [-57]_{\text{原}} &= 10111001 & [-127]_{\text{原}} &= 11111111 & [-0]_{\text{原}} &= 10000000 \end{aligned}$$

原码的表示简单, 但做加减法运算时显得不很方便。因为先要判断符号位, 还要比大小, 因此我们引入反码和补码的概念。

(2) 反码

反码的定义描述如下:

正数, 反码=原码;

负数, 反码=原码的符号位不变, 数值位按位取反, 即数值位的 1 变 0, 0 变 1。

$$\begin{aligned} \text{例如, } [+13]_{\text{反}} &= [+13]_{\text{原}} = 00001101 & [+0]_{\text{反}} &= [+0]_{\text{原}} = 00000000 \\ [-13]_{\text{反}} &= 11110010 & [-0]_{\text{反}} &= 11111111 \end{aligned}$$

(3) 补码

补码的定义描述如下:

正数, 补码=原码;

负数, 补码=反码加 1。

$$\begin{aligned} \text{例如, } [13]_{\text{补}} &= [+13]_{\text{原}} = 00001101 & [0]_{\text{补}} &= 00000000 \\ [-13]_{\text{补}} &= [-13]_{\text{反}} + 1 = 11110011 & [-0]_{\text{补}} &= 00000000 \end{aligned}$$

在计算机中, 得到一个数的反码很容易, 因而得到一个数的补码也较容易。采用补码运算, 计算机的控制线路简单, 因而, 目前多数计算机采用补码存储和补码运算, 其结果也是