



中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

单片机原理与应用

(电子与信息技术专业)

主编 梁洁婷

68.1-43



高等教育出版社

421

1/16.8.1.2.6.1

1.1.1

中等职业教育国家规划教材
全国中等职业教育教材审定委员会审定

单片机原理与应用

(电子与信息技术专业)

主 编 梁洁婷
责任主审 吴锡龙
审 稿 吕琴康 陈泉林

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,根据教育部2001年颁布的单片机原理与应用教学基本要求编写,同时参考了有关行业的职业技能鉴定规范及中级技术工人等级考核标准。

本书主要内容有,绪论、MCS-51系列单片机的系统结构、MCS-51系列单片机的指令系统与汇编语言程序设计、中断系统定时器/计数器和串行口、单片机系统的接口技术、单片机应用系统设计与开发技术等。各章均安排了习题、实验与实训内容。

本书可作为中等职业学校电子信息类专业教材,也可作为岗位培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

单片机原理与应用/梁洁婷主编. —北京:高等教育出版社,2002.7

ISBN 7-04-010860-7

I. 单… II. 梁… 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(2002)第 038864 号

单片机原理与应用

梁洁婷 主编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号
邮政编码 100009
传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京铭成印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 14.25
字 数 340 000

版 次 2002 年 7 月第 1 版
印 次 2002 年 9 月第 2 次印刷
定 价 17.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

中等职业教育国家规划教材

出版说明

为了贯彻《中共中央国务院关于深化教育改革全面推进素质教育的决定》精神,落实《面向 21 世纪教育振兴行动计划》中提出的职业教育课程改革和教材建设规划,根据教育部关于《中等职业教育国家规划教材申报、立项及管理意见》(教职成[2001]1 号)的精神,我们组织力量对实现中等职业教育培养目标和保证基本教学规格起保障作用的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教材进行了规划和编写,从 2001 年秋季开学起,国家规划教材将陆续提供给各类中等职业学校选用。

国家规划教材是根据教育部最新颁布的德育课程、文化基础课程、专业技术基础课程和 80 个重点建设专业主干课程的教学大纲(课程教学基本要求)编写,并经全国中等职业教育教材审定委员会审定。新教材全面贯彻素质教育思想,从社会发展对高素质劳动者和中初级专门人才需要的实际出发,注重对学生的创新精神和实践能力的培养。新教材在理论体系、组织结构和阐述方法等方面均作了一些新的尝试。新教材实行一纲多本,努力为教材选用提供比较和选择,满足不同学制、不同专业和不同办学条件的教学需要。

希望各地、各部门积极推广和选用国家规划教材,并在使用过程中,注意总结经验,及时提出修改意见和建议,使之不断完善和提高。

教育部职业教育与成人教育司

二〇〇一年十月

前 言

本书根据2001年教育部颁发的“中等职业学校电子与信息技术专业教学指导方案”及“单片机原理与应用教学基本要求”编写。

本书在编写中力求做到结合专业特点,注重应用,降低理论难度。具体表现在以下几点:

(1) 对单片机的基本概念论述透彻,力求使读者在理解最基本的概念的基础上,深入了解单片机的工作原理;

(2) 对单片机的原理部分的论述力求做到深入浅出、通俗易懂,使读者对单片机各功能部件的工作过程有直观的感性认识;

(3) 选用简单而有代表性的实例,使读者轻松自如地掌握单片机的基本应用;

(4) 将动手操作部分附在相应章节之后,并详细列出实验步骤,力求使读者在实践中快速掌握所学的原理。

本书适合于76~86学时的教学,书中打“*”的部分为选学模块。学时分配方案可参考下表。

序号	教 学 内 容	76学时安排				86学时安排			
		合计	讲授	实验与实训	机动	合计	讲授	实验与实训	机动
1	绪论	6	6			6	6		
2	MCS-51系列单片机的系统结构	14	12		2	18	12	4	2
3	指令系统与汇编语言程序设计	18	12	6		20	12	6	2
4	中断系统、定时器/计数器和串行口	8	6	2		8	6	2	
5	单片机系统的扩展与接口	20	14	4	2	20	14	4	2
6	单片机应用系统与开发技术	10	6	4		14	6	4	4
总计		76	56	16	4	86	56	20	10

本书由湖南铁道职业技术学院梁洁婷主编,宝鸡市新华职业中专孙金科和青岛电子学校谭红江参编。其中第1、3、5章的内容、习题和实验与实训四由孙金科老师编写;第2章内容、习题和实验与实训一、二由谭红江老师编写;第4、6章内容、习题和实验与实训三、五~十由梁洁婷老师编写。全书由梁洁婷统稿。本书经全国中等职业教育教材审定委员会审定,由上

海大学吴锡龙任责任主审，吕琴康、陈泉林审稿，高等教育出版社另聘请了北方交通大学机电学院肖燕彩审稿，在此一并表示感谢。

由于编者的学识和水平有限，书中难免有错误和纰漏，敬请批评指正，编者将不胜感激。

编 者

2001 年 11 月

目 录

第 1 章 绪论	1	4.1 中断系统	95
1.1 单片机概述	1	4.2 定时器/计数器	103
1.2 计算机中的数制与运算	4	4.3 串行口	118
1.3 计算机中的数据编码	8	本章小结	128
本章小结	13	实验与实训五 定时器/计数器的应用	128
思考与练习一	13	实验与实训六 双机通信	131
第 2 章 MCS-51 系列单片机的系统结构	15	思考与练习四	133
2.1 内部结构与引脚功能	15	第 5 章 单片机系统的扩展与接口	136
2.2 并行 I/O 口	18	5.1 概述	136
2.3 片内数据存储器	22	5.2 并行 I/O 口扩展	139
2.4 程序存储器结构及其扩展	27	5.3 显示器接口	155
2.5 片外数据存储器结构及其扩展	33	5.4 键盘接口	164
2.6 MCS-51 时钟电路与时序	36	5.5 A/D 转换接口	169
2.7 单片机系统的复位	39	5.6 D/A 转换接口	173
2.8 CHMOS 芯片的节电方式	40	本章小结	177
本章小结	41	实验与实训七 简单 I/O 口扩展实验	178
实验与实训一 MCS-51 单片机芯片认识	41	实验与实训八 LED 数码显示管显示实验	179
实验与实训二 复位与复位电路	43	实验与实训九 A/D、D/A 转换实验	180
思考与练习二	44	思考与练习五	181
第 3 章 指令系统与汇编语言程序设计	45	第 6 章 单片机应用系统与开发技术	183
3.1 寻址方式	45	6.1 单片机应用系统的组成与研制过程	183
3.2 指令系统	50	6.2 单片机开发系统	188
3.3 汇编语言程序的设计与调试	70	6.3 单片机应用系统的实用接口技术	194
3.4 汇编语言程序设计举例	76	* 6.4 单片机控制系统的应用实例	197
本章小结	88	本章小结	204
实验与实训三 仿真器的使用与调试软件的操作	88	实验与实训十 交通灯控制系统的设计与调试	204
实验与实训四 汇编语言程序设计	90	思考与练习六	206
思考与练习三	93	附录 A MCS-51 单片机指令表	207
第 4 章 中断系统、定时器/计数器和串行口	95	附录 B 常用集成电路引脚图	212
		参考文献	218

第 1 章 绪 论

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。目前计算机硬件技术向巨型化、微型化和单片机三个方向高速发展。

1971 年,世界上第一片微处理器 4004 研制成功后,单片机技术也随之迅速发展起来。1975 年,美国德克萨斯仪器公司第一块单片微型计算机芯片 TMS-1000 问世。之后的 20 多年中,单片机技术作为一个非常有前途的计算机技术,其应用遍及工业控制、智能化仪器仪表、家用电器等领域。目前,单片机正在向稳定可靠、小而廉价的方向发展。

1.1 单片机概述

1.1.1 单片机的组成

微型计算机在原理和结构上属于冯·诺依曼体系结构。即计算机硬件由运算器、控制器、存储器、输入设备和输出设备共五个功能部件组成,如图 1.1 所示。

1. 运算器

运算器即算术逻辑单元 ALU (Arithmetic Logic Unit),其功能是进行算术运算和逻辑运算。在控制器的控制下,运算器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。

2. 控制器

控制器一般由指令寄存器、指令译码器、时序电路和控制电路组成。其作用是完成取指令、将指令译码形成各种微操作并执行指令,同时控制计算机的各个部件有条不紊地工作。

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

计算机的记忆部件,用于存放程序和数据。一般分为只读存储器 (ROM) 和随机存储器 (RAM),它们用于不同的场合。

4. 输入设备

用来接受用户输入的原始数据和程序,并将其转换成计算机能够识别的二进制代码输入给 CPU 或存放在内存中。常用的输入设备有键盘、鼠标、扫描仪、光笔、数字化仪等。

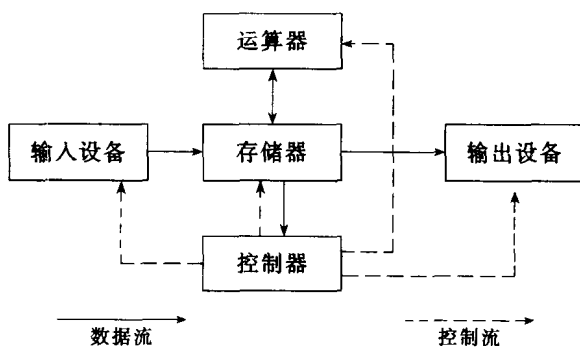


图 1.1 计算机的基本结构

5. 输出设备

用于将计算机处理的结果转换成人或设备能接收和识别的形式,如字符、文字、图形等。常用的输出设备有显示器、打印机、绘图仪等。

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

所谓单片机就是将 CPU、存储器、I/O 接口电路、定时器/计数器等计算机部件集成在一块芯片上,具有独特功能的单片微型计算机。虽然单片机只是一块芯片,但是它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。并且单片机系统还具有高性能、结构简单灵活、工作稳定可靠等特点。

1.1.2 单片机的特点

自 1976 年推出 MCS-48 系列 8 位单片机后,1980 年 Intel 公司又推出 MCS-51 系列高档 8 位单片机。目前,尽管也有 16 位、32 位的单片机芯片,但是主要用于语音、图像处理系统,而且时钟频率也不是很高,一般在数百兆赫以内。

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,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,单片机与通用微机具有以下不同的技术特征:

(1) 抗干扰性强,工作温度范围宽。相对而言,通用微机一般要求在室温下工作,抗干扰能力较低。

(2) 高可靠性。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。相比之下,通用微机具有很强的数值计算能力,但是其控制能力较弱。因此,如果使用通用微机进行工业控制,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。如丰富的位操作指令。

1.1.3 单片机的应用领域

单片机主要面向工业控制,实现在线控制。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. 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。

2. 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。

3. 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。

4. 工业自动化

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。

5. 智能控制

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。另外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。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。从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来控制实现。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。

1.1.4 单片机的常用系列简介

目前全世界生产单片机的厂家不计其数，单片机的型号也五花八门。1971 年 Intel 公司生产出 4 位单片机芯片 4004，1972 年研制成功 8 位芯片 8008。1976 Intel 公司首先推出 MCS-48 系列单片机。之后的 20 多年中，世界各地的半导体公司和计算机公司争相研究和开发单片机系列。其中 Motorola 公司的 6801、6802，Zilog 公司的 Z-80 系列，Rockwell 公司的 6501、6502，Philip 公司的 80C51 系列，Siemens 公司的 C500 系列，ATMEL 公司的 AT-89 系列，还有 NEC 公司、日立公司等，也推出了各具特色的单片机系列。截至目前，大约有 50 多个系列、30 多个品种的单片机产品。

1976 年 Intel 公司推出 MCS-48 系列单片机，在之后的 20 多年中，8 位单片机的发展大致经历了三代。

(1) 以 MCS-48 系列单片机为代表的第一代。MCS-48 系列单片机是一种低档的 8 位机，它将一个 8 位的 CPU、1K×8 位 ROM、64×8 位 RAM、一个 8 位定时器/计数器和一些输入/输出接口电路集成在一个芯片上，以体积小、功能全、价格低等特点得到了广泛的应用，为单片机的进一步发展奠定了基础。

(2) 以 MCS-51 系列的 8051、8052 单片机为代表的第二代。MCS-51 系列单片机是在总结 MCS-48 系列单片机的基础上发展起来的，虽然它仍是 8 位单片机，但是其功能有了很大的增强。8051、8052 系列单片机的主要性能见表 1.1。

表 1.1 8051、8052 系列单片机一览表

片内 ROM 形式			片内 ROM 容量	片内 RAM 容量	寻址范围	I/O 特性			中断源
无	ROM	EPROM				计数器	并行口	串行口	
8031	8051	8751	4 KB	128 B	2×64 KB	2×16	4×8	1	5
8032	8052	8751	8 KB	256 B	2×64 KB	3×16	4×8	1	6

从表 1.1 所列的内容可以看出，MCS-51 系列单片机扩大了片内存储容量，程序存储器和片外数据存储器的寻址都增加为 64 KB，增强了并行口，增设了全双工串行口 I/O，增加了定

时器/计数器的个数并扩展了长度,增强了中断系统。另外还增设了布尔处理机,具备了较强的指令寻址和运算功能,共有 111 条指令。

(3) 以 80C51 系列单片机为代表的第三代。它包括 Intel 公司开发的 MCS-51 系列单片机的新一代产品,如 8XC152 子系列、8XC51FX 子系列、8XC51GX 子系列、8XC51SL 子系列等。还包括 Philips、Siemens、AMD、Fujitsu、OKI、ATMEL 等公司以 80C51 为核心推出的大量各具特色、与 MCS-51 兼容的单片机。

80C51 系列单片机保留了 MCS-51 单片机的所有特性,采用 CMOS 技术制造,具有集成度高、速度快、功耗低等特点。另外还增设了一些外部接口功能单元,如 A/D、PWM、PCA(可编程计数器阵列)、WDT(监视定时器)、高速 I/O 口等,并且为系统扩展提供了完善的总线结构。

由于 8 位单片机的高性能价格比,目前 8 位单片机仍然是单片机中的主流机型。继 8 位单片机之后,16 位单片机也有很大的发展,例如 1983 年 Intel 公司推出的 MCS-96 系列单片机。与 MCS-51 相比,MCS-96 字长增加了一倍,而且还具有一个 4 通道或 8 通道的 10 位 A/D 转换器,其指令系统、中断源、定时器等其他性能也有很大的提高。另外,还集成了更加丰富的外设装置,从而使其在高档智能仪表、彩色复印机、录像机等领域得到更加广泛的应用。

1.1.5 单片机的发展方向

随着超大规模集成电路工艺技术的进一步发展,微型计算机有两个显著的发展方向:一是向与大、中型计算机相抗衡的高性能 64 位微机方向发展;另一个是向微机的单片化方向发展。

单片机的发展经历了 4 位机、8 位机、16 位机到 32 位机,由于应用目的和使用范围的不同,单片机的发展呈多样化的趋势。目前,单片机的生产厂家努力开发各种系列的单片机,以适应不同的需求。运行速度快、I/O 接口功能强大、低功耗、大存储容量、体积小、高性能的通用或专用单片机是生产厂家共同追求的目标。

1.2 计算机中的数制与运算

1.2.1 十进制、二进制和十六进制

在日常生活中,十进制是人们最熟悉的计数方式,十进制数由 0~9 十个数字组成。显然,计算机中使用十进制数很不方便,而二进制数由 0 和 1 两个数字组成,使用一个具有两种不同的稳定状态且能互相转换的器件就可以表示 1 位二进制数,所以计算机中采用二进制计数。但是由于二进制数不够直观,位数长,而且不便记忆,所以向计算机中输入数据时,仍然采用十进制数,在计算机内部将其转换为二进制数后,再进行处理。同样,计算机需要将处理结果转换成十进制数后,再进行输出。因此,需要了解计算机中各种数制之间的转换。

1. 十进制

十进制数由 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 十个数字组成,按照“逢十进一”的原则计数。例如 6968 可以写成

$$6968 = 6 \times 10^3 + 9 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 8 \times 10^0$$

上式称为按权展开式。各位数的权值为 10 的幂，即个位的权为 10^0 ，十位的权为 10^1 ，百位的权为 10^2 等。如第四位数字 6 表示 6000，第二位数字 6 表示 60，是因为它们所在位的权不同。

2. 二进制

二进制中只有两个数字符号 0 和 1。采用“逢二进一”的原则，各位的权值为 2 的幂。

n 位二进制正整数可以按权展开写成

$$[a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_2a_1a_0]_2 = a_{n-1} \times 2^{n-1} + a_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + a_2 \times 2^2 + a_1 \times 2^1 + a_0 \times 2^0 = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \times 2^i$$

其中 $a_0, a_1, a_2, \cdots, a_{n-2}, a_{n-1}$ 为二进制数的各位数字，取值为 0 或 1。 $2^0, 2^1, 2^2, \cdots, 2^{n-2}, 2^{n-1}$ 为各数位的权。

3. 十六进制

十六进制中，包括 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A, B, C, D, E, F 十六个基本数字，采用“逢十六进一”的运算法则，各位的权值为 16 的幂。 n 位十六进制正整数的按权展开式为

$$[N]_{16} = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \times 16^i$$

其中 a_i 为十六进制数 N 的第 i 位位数字，取值为 0~9 或 A~F。如：

$$(12DA)_{16} = 1 \times 16^3 + 2 \times 16^2 + 13 \times 16^1 + 10 \times 16^0 = 4826$$

即十六进制的 12DA 在数值上等于十进制数 4826。

在计算机的运算和存储中，采用二进制数。为了表示方便，人们常常使用各种进制，用数字后面跟一个英文字母表示其数制。其中“D”(Decimal)表示该数为十进制，亦可省略，如 97D 和 97 都表示十进制数；“B”(Binary)表示该数为二进制，如 1011B 表示该数为二进制；“H”(Hexadecimal)表示该数为十六进制，如十六进制数“7A”记为“7AH”，同时，以字母开头的十六进制数，在编写程序时必须带有前缀 0，以示区别于一般字符串，如十六进制数“FF”记为“0FFH”。

表 1.2 列出了十进制、二进制、十六进制数的对照关系。

表 1.2 二进制、十进制、十六进制数的对照表

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

1.2.2 各种数制之间的转换

1. 二进制和十六进制转换成十进制

根据二进制数的一般表达式，将其按权展开再相加，即可得到对应的十进制数。

例 1.1 $11000101B = 1 \times 2^7 + 1 \times 2^6 + 0 \times 2^5 + 0 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0$

$$= 128 + 64 + 4 + 1$$

$$= 197D$$

十六进制数转换成十进制数时，将 A ~ F 还原成 10 ~ 15，同样按权展开相加，即得对应的结果。

$$\begin{aligned}\text{例 1.2} \quad 1FBH &= 1 \times 16^2 + 15 \times 16^1 + 11 \times 16^0 \\ &= 256 + 240 + 11 \\ &= 507D\end{aligned}$$

对于含有小数部分的数值，同样采用按权展开相加的方法， m 进制数小数点后第 n 位的权值为 m^{-n} 。

$$\begin{aligned}\text{例 1.3} \quad 1110.101B &= 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= 8 + 4 + 2 + 0.5 + 0.125 \\ &= 14.625D\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{例 1.4} \quad 0FF.8AH &= 15 \times 16^1 + 15 \times 16^0 + 8 \times 16^{-1} + 10 \times 16^{-2} \\ &\approx 240 + 15 + 0.5 + 0.039 \\ &= 255.539D\end{aligned}$$

2. 十进制转换成二进制

十进制正整数转换成二进制整数，采用“除 2 取余”法，即用 2 去除以十进制数，取出余数，再用商去除以 2，重复这个过程，直至商为 0。最后，将所得余数按照从后向前的顺序排列即为转换后的二进制数。

例 1.5 把十进制数 23 转换成二进制数。

解：

		余数		
2	23	1	→	a_0
2	11	1	→	a_1
2	5	1	→	a_2
2	2	0	→	a_3
2	1	1	→	a_4
0				

即 $23D = 10111B$

十进制纯小数转换成二进制数采用“乘 2 取整”法，即：用小数部分乘以 2，取其乘积的整数部分作为二进制小数部分的十分位，再用乘积的小数部分乘以 2，取其乘积的整数部分作为二进制小数部分的百分位，依此类推，直至乘积的小数部分为 0（注意：如果小数部分乘 2 始终不能使其乘积的小数部分为零，一般取小数点后四位数，或根据精度要求确定）。

例 1.6 将 $0.3125D$ 转换成二进制数。

$$\begin{array}{r}
 0.3125 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 0 \leftarrow 0.6250 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 1 \leftarrow 1.2500 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 0 \leftarrow 0.5000 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 1 \leftarrow 1.0000
 \end{array}$$

记数方向 ↓

即 $0.3125D = 0.0101B$

例 1.7 将 $0.66D$ 转换成二进制数。

$$\begin{array}{r}
 0.66 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 1 \leftarrow 1.32 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 0 \leftarrow 0.64 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 1 \leftarrow 1.28 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 0 \leftarrow 0.56
 \end{array}$$

记数方向 ↓

即 $0.66D \approx 0.1010B$

3. 二进制与十六进制的转换

由于 4 位二进制数正好表示 0000 ~ 1111 共 16 个数字，即十六进制的基本数字 0 ~ F。所以，二进制正整数转换成十六进制数时，从最低位开始，4 位二进制为一组，转换成相应的十六进制数字，然后按原来的顺序排列即得十六进制数。

例 1.8 将二进制数 10101111011B 转换成十六进制数。

$$\begin{array}{ccc}
 \underline{0101} & \underline{0111} & \underline{1011} \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 5 & 7 & 11
 \end{array}$$

即 $10101111011B = 57BH$

相反，十六进制正整数转换成二进制数时，将每位十六进制数转换成 4 位二进制数，若不足 4 位时，在前面加 0 补足 4 位，再按原来的顺序排列即可。

例 1.9 将 57AH 转换成二进制数。

$$\begin{array}{ccc}
 \underline{5} & \underline{7} & \underline{A} \\
 \hline
 0101 & 0111 & 1010
 \end{array}$$

即 $57AH = 10101111010B$

将二进制纯小数转换成十六进制数时，从高位开始分组，4 位为一组，不足 4 位，则低位补

零，最后按原顺序写成十六进制数(小数点位置不变)。

例 1.10 将 0.1010011B 转换成十六进制数。

$$\begin{array}{c} 0. \quad 1010 \quad 0110 \\ \downarrow \quad \downarrow \quad \downarrow \end{array}$$

0. A 6

即 0.1010011B = 0.A6H

1.2.3 二进制的算术运算

1. 二进制数的加法

二进制数的加法运算规则为：① $0+0=0$ ，② $0+1=1$ ，③ $1+0=1$ ，④ $1+1=0$ 且进位为 1。

例 1.11

$$\begin{array}{r} 10100111\text{B} \\ + 01101110\text{B} \\ \hline 100010101\text{B} \end{array}$$

2. 二进制数的减法

二进制的减法运算规则为：① $0-0=0$ ，② $1-1=0$ ，③ $1-0=1$ ，④ $0-1=1$ ，且有借位。

例 1.12

$$\begin{array}{r} 10100111\text{B} \\ - 01101110\text{B} \\ \hline 00111001\text{B} \end{array}$$

3. 二进制数的乘法

二进制数的乘法运算规则为：① $0 \times 0 = 0$ ，② $0 \times 1 = 0$ ，③ $1 \times 0 = 0$ ，④ $1 \times 1 = 1$ 。

例 1.13

$$\begin{array}{r} 11001011\text{B} \\ \times \quad 101\text{B} \\ \hline 11001011 \\ 00000000 \\ 11001011 \\ \hline 111110111\text{B} \end{array}$$

1.3 计算机中的数据编码

1.3.1 带符号数的编码表示

在计算机中，常常需要表示正数和负数，如何表示数据的符号位？如何表示带符号数？下

面将着重讨论带符号数的表示方法。

1. 机器数的概念

我们可以用最高位表示符号位，例如：“1”表示负号，“0”表示正号。64H 可以表示为 01100100B；-64H 可以表示为 11100100B。

如上所述，为了表示带符号的数，可以把数的最高位作为符号位处理，其余各位表示数值本身。这种把符号数码化了的数称为机器数，而把原来符号未进行数码化的数称为机器数的真值。

如：+1001110 和 -1001110 是真值，01001110 和 11001110 是机器数。

为了在运算过程中使符号位与数值位一起参加运算，在计算机中机器数常采用三种表示方法：原码、反码和补码。

2. 原码

原码表示是一种简单的机器数表示。一个数用原码表示时，符号位用 0 表示正数，用 1 表示负数，其数值按一般二进制表示。

例 1.14 用 8 位二进制原码表示下列各数。

若 $X = +1100$ ，则 $(X)_{\text{原}} = 00001100$

若 $X = -1100$ ，则 $(X)_{\text{原}} = 10001100$

已知原码求真值的方法：符号位用“+”代表“0”，用“-”代表“1”，其余数值位不变。

例 1.15 若 $(X)_{\text{原}} = 00011101$ ，则 $X = +11101$

若 $(X)_{\text{原}} = 10101110$ ，则 $X = -101110$

以下用原码表示 8 位带符号数，并规定其最高位为符号位，其余 7 位为数值位。

例 1.16 $X = +1100001$ $(X)_{\text{原}} = 01100001$

$X = -1100001$ $(X)_{\text{原}} = 11100001$

$X = +1111111$ $(X)_{\text{原}} = 01111111$

$X = -1111111$ $(X)_{\text{原}} = 11111111$

$X = +0$ $(X)_{\text{原}} = 00000000$

$X = -0$ $(X)_{\text{原}} = 10000000$

由上例可知，① 8 位带符号数的原码，其表示范围为：-127 ~ +127。② “0”有两个原码，即 $(+0)_{\text{原}} = 00000000$ ， $(-0)_{\text{原}} = 10000000$ 。

原码表示直观易懂，但是原码加减法运算比较复杂。同号数相加，则数值相加，符号不变（注意溢出）；异号数相加，实际上是相减运算。因此，计算机进行加减运算时机器数并没有采用原码表示法。

3. 反码

正数的反码与原码相同，负数的反码，符号位为 1，数值位按位取反，即 0 变 1，1 变 0。

例 1.17 若 $(X)_{\text{原}} = 01101001$ ，则 $(X)_{\text{反}} = 01101001$

若 $(X)_{\text{原}} = 10111010$ ，则 $(X)_{\text{反}} = 11000101$

例 1.18 若 $X = +1000110$ ，则 $(X)_{\text{反}} = 01000110$

若 $X = -1000110$, 则 $(X)_{\text{反}} = 10111001$ 。

由上例可知, 已知真值, 求反码: 对于正数, 符号位用“0”代替“+”, 数值位不变; 对于负数, 符号位用“1”代替“-”, 数值位按位取反。

用反码表示一个8位带符号数时规定: 最高位为符号位, 其余7位表示有效数字。

同样可知, 8位带符号数的反码表示范围为 $-127 \sim +127$, “0”有两个反码。即: $(+0)_{\text{反}} = 00000000$, $(-0)_{\text{反}} = 11111111$ 。

4. 补码

正数的补码与原码相同; 负数的补码符号位为1, 数值位按位取反, 且末位加1。

(1) 已知真值 X 求补码 $(X)_{\text{补}}$ 的方法: 对于正数, 符号位用“0”代“+”, 数值位不变; 对于负数, 符号位用“1”代“-”, 数值位按位取反, 末位加1。

例 1.19 若 $X = +1010$, 则 $(X)_{\text{补}} = 00001010$

若 $X = -1010$, 则 $(X)_{\text{补}} = 11110110$

例 1.20 用补码表示八位带符号数, 并规定最高位为符号位。

$X = +0001100$ $(X)_{\text{补}} = 00001100$

$X = -0001100$ $(X)_{\text{补}} = 11110100$

$X = +1111111$ $(X)_{\text{补}} = 01111111$

$X = -1111111$ $(X)_{\text{补}} = 10000001$

$X = +1$ $(X)_{\text{补}} = 00000001$

$X = -1$ $(X)_{\text{补}} = 11111111$

$X = +0$ $(X)_{\text{补}} = 00000000$

$X = -0$ $(X)_{\text{补}} = 00000000$

$X = -10000000$ $(X)_{\text{补}} = 2^8 + (-10000000) = 10000000$

显然, “0”的补码是惟一的, 即 $(+0)_{\text{补}} = (-0)_{\text{补}} = 00000000$; 8位带符号数补码的表示范围为 $-128 \sim +127$ 。

(2) 已知补码 $(X)_{\text{补}}$ 求真值 X 的方法: 符号位用“+”代“0”, 数值位不变。

符号位用“-”代“1”, 数值位按位取反, 末位加1。

例 1.21 $(X)_{\text{补}} = 00001010$, 则 $X = +1010$

$(X)_{\text{补}} = 11110110$, 则 $X = -110$

(3) 已知 $(X)_{\text{补}}$ 求 $(-X)_{\text{补}}$, 则不论 X 的正负, 将 $(X)_{\text{补}}$ 连同符号位一起按位求反, 末位加1。

例 1.22 若 $(X)_{\text{补}} = 01101010$, 则 $(-X)_{\text{补}} = 10010110$

若 $(X)_{\text{补}} = 11001001$, 则 $(-X)_{\text{补}} = 00110111$

(4) 补码的加减运算。负数用补码表示可以使减法转化为加法, 从而使加减运算转换为单纯的符号数相加的运算。补码进行运算时, 符号位与数值位一起参加运算。

补码加法的公式是:

$$(X)_{\text{补}} + (Y)_{\text{补}} = (X + Y)_{\text{补}}$$

例 1.23 已知 $(X)_{\text{补}} = 00111010$, $(Y)_{\text{补}} = 10011101$, 求 $(X + Y)_{\text{补}}$ 。