

自动化专业本科系列教材

Danpianji Yuanli Ji Yingyong(MCS-51)

# 单片机原理及应用(MCS-51)

0101001000100001

蒋廷彪 刘电霆 编著  
高富强 方 华  
黄 冰 主审

重庆大学出版社

# 单片机原理及应用

(MCS—51)

蒋廷彪	刘电霆	编著
高富强	方 华	
黄 冰		

主审

重庆大学出版社

## 内 容 简 介

本书主要介绍单片微型计算机的原理和应用方法。重点介绍了 MCS—51 单片微型计算机的结构、指令系统、程序设计、系统扩展、应用系统配置及接口技术、串口及串行通信以及应用系统的设计。书中对新发展起来的 80C51 系列单片机进行了介绍,附录中介绍了因特网上的单片机资源。在每章末,均附有小结、思考题与习题。

本书可以作为高等院校和高等职业技术教育类本、专科学生的微机原理及应用或单片机原理及应用课程的教材,也可供单片机开发应用的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

单片机原理及应用:MCS—51/蒋廷彪等编著. —重庆:重庆大学出版社,2003. 8

(自动化专业本科系列教材)

ISBN 7-5624-2963-4

I. 单... II. 蒋... III. 单片微型计算机, MCS—51 系列—高等学校—教材 IV. TP368. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 073033 号

## 单片机原理及应用

(MCS—51)

蒋廷彪 刘电霆 编著

高富强 方 华

黄 冰 主审

责任编辑:周 立 版式设计:周 立

责任校对:蓝安梅 责任印制:秦 梅

\*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鹤盛

社址:重庆市沙坪坝正街 174 号重庆大学(A 区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:[fxk@cqup.com.cn](mailto:fxk@cqup.com.cn) (市场营销部)

全国新华书店经销

重庆璧山印务有限公司印刷

\*

开本:787×1092 1/16 印张:17 字数:424 千

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月第 1 次印刷

印数:1—5 000

ISBN 7-5624-2963-4/TP·427 定价:27.50 元(赠 1CD)

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换

版权所有 翻印必究

# 前言

当今计算机正朝着两大分支发展,一个分支是通用计算机系统,另一个分支就是嵌入式计算机系统。通用计算机系统突出发展海量、高速数值计算能力,迅速从 8 位、16 位发展到 32 位、64 位,对其通用操作系统不断进行完善,在数据处理、模拟仿真、人工智能、图像处理、多媒体、网络通信等方面中得到了广泛应用。单片微型计算机,简称单片机,又称微控制器,它因嵌入式应用而得到迅猛发展,各种新颖的单片机层出不穷,令人目不暇接。它可广泛地嵌入到如家用电器、机器人、工业控制单元、仪器仪表、汽车电子系统、金融电子系统、通信系统等产品中。

单片机体积小、成本低、控制功能强。由于开发环境不断得到改善,正在以空前的速度广泛地取代经典电子系统,人们迫切希望学习和掌握单片微机技术。各高等工科院校中,已普遍开设了单片机原理及应用这门课程。在学生毕业设计、课程设计以及各种电子设计大赛中,都用到单片机知识。因此,我们结合多年的教学经验和应用成果,进行了总结,编写了本书。

由于国内单片机发展的主流机种仍然是以 8 位单片机为主,因此,我们编写本书时,仍以 Intel MCS—51 系列单片机为主线进行介绍,同时,在第 11 章中,介绍了几种目前较为流行的常用单片机。介绍时力求深入浅出,通俗易懂,并注重理论联系实际。在章节和内容安排上,参考了同类教材的长处,并结合实际教学、实践经验进行了认真斟酌。为便于读者学习,在每章末均附有小结和练习题。

本书可作为工科院校本科生教材,也可作为高等职业技术教育类学生的教材,以及作为从事单片机开发应用的工程技术人员参考书。作为本科教材时,在微机原理及应用(以讲述 8086/8088CPU 为主线)课程之后,开设单片机原理及应用课程,参考学时为 32~48 学时。本书也可作为微机原理及应用课程和单片机原理及应用课程二合一的教材,这时参考学时为 56~72 学时。教师在讲授时,可结合本专业特点和需要适当

删减部分内容。

全书共 11 章。第 1 章、第 5 章、附录由桂林电子工业学院蒋廷彪编写,第 8 章、第 9 章、第 11 章由重庆大学高富强编写,第 4 章、第 6 章、第 7 章、第 10 章由桂林工学院刘电霆编写,第 2 章、第 3 章由广西工学院方华编写。本书由蒋廷彪任主编,桂林电子工业学院黄冰教授担任主审。黄冰教授对全书进行了认真的审阅,提出了许多宝贵意见,在此表示衷心感谢。桂林电子工业学院田刚领、巫松参与了部分资料整理和审校工作,在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中遗漏和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者  
2003. 5

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 计算机和单片机的发展 .....	1
1.2 计算机中数的表示方法及运算 .....	4
1.3 计算机中常用数制与编码 .....	8
1.4 微型计算机的结构 .....	12
小 结 .....	15
思考题与习题 1 .....	15
第2章 MCS—51 系列单片机的结构及原理 .....	16
2.1 MCS—51 系列单片机的结构与引脚功能 .....	16
2.2 MCS—51 系列单片机的微处理器与 CPU 时序 .....	19
2.3 8051 存储器配置 .....	22
2.4 输入输出端口结构 .....	26
2.5 复位及复位电路 .....	29
小 结 .....	30
思考题与习题 2 .....	30
第3章 MCS—51 指令系统 .....	32
3.1 概述 .....	32
3.2 寻址方式 .....	33
3.3 MCS—51 单片机的指令系统 .....	35
小 结 .....	52
思考题与习题 3 .....	53
第4章 程序设计 .....	55
4.1 编程的步骤、方法和技巧 .....	55
4.2 汇编语言源程序的编辑和汇编 .....	58
4.3 汇编语言程序设计 .....	62
4.4 综合程序应用编程 .....	76
4.5 C51 程序设计简介 .....	77
小 结 .....	81
思考题与习题 4 .....	81

<b>第5章 中断系统及其应用</b> .....	83
5.1 概 述 .....	83
5.2 MCS—51 中断系统及中断控制 .....	85
5.3 中断处理过程 .....	90
5.4 中断应用程序举例 .....	92
小 结 .....	95
思考题与习题 5 .....	96
<b>第6章 定时/计数器及应用</b> .....	97
6.1 MCS—51 定时/计数器概述 .....	97
6.2 定时/计数器的控制 .....	98
6.3 定时/计数器的 4 种工作方式及应用 .....	100
小 结 .....	107
思考题与习题 6 .....	108
<b>第7章 单片机系统扩展</b> .....	109
7.1 MCS—51 系列单片机的外部扩展性能 .....	109
7.2 MCS—51 系列单片机存储器扩展 .....	112
7.3 MCS—51 系列单片机 I/O 口扩展 .....	126
小 结 .....	137
思考题与习题 7 .....	137
<b>第8章 应用系统配置及接口技术</b> .....	139
8.1 单片机与开关及键盘接口技术 .....	139
8.2 单片机与显示器接口技术 .....	149
8.3 A/D 转换器与单片机的接口 .....	152
8.4 D/A 转换器与单片机的接口 .....	163
小 结 .....	168
思考题与习题 8 .....	168
<b>第9章 串口及串行通信技术</b> .....	170
9.1 MCS—51 串行通信接口 .....	170
9.2 MCS—51 单片机之间的通信 .....	177
9.3 PC 机与单片机间的通信 .....	191
小 结 .....	204
思考题与习题 9 .....	204
<b>第10章 单片机应用系统的设计</b> .....	206
10.1 系统设计的原则与步骤 .....	206
10.2 单片机开发系统简介 .....	210
10.3 系统设计举例 .....	213
小 结 .....	228
思考题与习题 10 .....	228

第11章 80C51 系列单片机 .....	229
11.1 PHILIPS 8 × C552 单片机简介 .....	229
11.2 Atmel 89C51 系列单片机 .....	239
小 结 .....	247
思考题与习题 11 .....	248
附录 .....	249
附录 1 MCS—51 系列单片机指令表 .....	249
附录 2 因特网上的单片机资源 .....	255
附录 3 常用逻辑门电路图形符号对照表 .....	261
参考文献 .....	263



# 第 I 章 绪 论

## 1.1 计算机和单片机的发展

### 1.1.1 计算机的发展历史

当今的计算机技术正以惊人的速度向前发展,它已经渗透到工业、农业、国防、科研及日常生活的各个领域,并显示了日益旺盛的生命力。谁掌握计算机技术,谁就占有主动权。计算机技术是发展新技术、改造老技术的强有力的工具。计算机的出现,改变了人类生活的许多方面,特别是近年来的 INTERNET 国际互联网的应用,更说明了这一点。它的作用远远超过了因蒸汽机和电的出现而产生的工业革命。

第一台数字式电子计算机 ENIAC (Electronic Numerical Integrator And Calculator) 于 1946 年 2 月,在美国宾夕法尼亚大学的莫尔学院,由物理学博士莫克利(J. W. Mauchly)和电气工程师埃克特(J. P. Eckert)领导的小组研制成功。这台计算机字长为 12 位,加法运算速度为 5 000 次/秒,用了 18 800 个电子管、1 500 个继电器,占地面积为 150 m<sup>2</sup>,重量达 3 吨,耗电为 140 kW,其造价为 100 多万美元。在今天看来,是不可想象的。因为,它的功能还远远不如现在的一台 586 计算机,但它却是 20 世纪工业革命的先驱,为日后的发展奠定了基础。到今天为止,计算机的发展已经历了四代。

1946—1957 年,第一代计算机是电子管计算机。当时,计算机的逻辑元件采用的是电子管,主存储器采用磁鼓、磁芯,外存储器开始采用磁带。软件主要用机器语言编写程序,后期发展为采用汇编语言编写程序,这时候的计算机主要用于科学计算。

1957—1965 年,第二代计算机是晶体管计算机。此时,计算机的逻辑元件为晶体管,主存储器仍用磁芯,外存储器已开始使用磁盘。软件有了很大发展,出现了各种高级语言及编译程序,这时的计算机已用于各种事务的数据处理,并开始用于工业控制。

1965—1971 年,第三代计算机是集成电路计算机。此时的计算机逻辑元件已开始采用小规模和中规模的集成电路(SSI 和 MSI),主存储器仍以磁芯为主。软件方面已出现了分时操作系统,会话式的高级语言也有相当的发展。计算机的应用范围也日益扩大,小型计算机已开

始用于企事业管理与工业控制。

从 1971 年以后,出现了第四代计算机,采用大规模、超大规模集成电路为主要部件。所谓大规模集成电路 LSI(Large Scale Integration)是指在单片硅片上可以集成 1 000 个以上晶体管的集成电路。目前一般可集成 10 万个左右,最多可集成 1 亿个。内存储器逻辑元件开始采用半导体存储器,外存储器采用磁盘和光盘。在软件方法上产生了结构化程序设计和面向对象程序设计的思想。另外,网络操作系统、数据库管理系统得到广泛应用。微处理器(Microprocessor)和微型计算机(Microcomputer)也在这一阶段诞生,并获得飞速发展。

从以上可以看出,每一次计算机逻辑元件的改变,硬件结构和软件技术的改进,都会使计算机得到一次质的飞跃发展。与以前相比主要体现为:在速度方面,提高了千万倍;在存储容量方面,提高了千万倍;在体积方面,缩小了千万倍;在软件性能方面,提高了百万倍;而在价格方面,降为万分之几。计算机性能的这种变化,普遍为人们所欢迎。因此,计算机在各行各业以及个人的应用需求也越来越大。

展望未来,随着计算机的日益普及,随着信息高速公路、网络技术、多媒体技术的建立和发展,计算机应用正向人们展示着更加宽广、更加美好的前景。

近年来,计算机的发展趋势主要有两方面:一方面向着高速、智能化的超级巨型机的方向发展;另一方面向着微型机的方向发展。

巨型计算机主要用于大型科学研究和实验以及超高速数学计算。它的研制水平标志着整个国家的科学技术和工业发展的程度,象征着一个国家的实力。

巨型计算机的作用是举世公认的,但在微型计算机(Microcomputer,简称微机)问世之前,计算机还只限于少数科技人员用于数学计算。微型机的诞生揭开了计算机神秘的面纱。微型计算机与巨、大、中、小型机的区别主要是,其中央处理器 CPU(Central Processing Unit)是集成在一个小硅片上,而巨、大、中、小型计算机的 CPU 则是由相当多的电路组成的。

20 多年来,微型计算机不断地更新换代,新产品不断推出。在微机的大家族中,单片微型计算机(以下简称单片机)异军突起,发展极为迅速。从 1976 年开始至今不到 30 年的时间里,单片机的数量、功能不断提升。据统计,20 世纪 90 年代全世界平均每 6 人就有 1 片单片机,美国已达平均每人 69 片。

单片机也被称作“单片微型计算机”、“微控制器”、“嵌入式微控制器”。单片机一词最初来源于“Single Chip Microcomputer”,简称 SCM。在单片机诞生时,SCM 是一个准确的、流行的称谓。“单片机”一词准确地表达了这一概念。随着 SCM 在技术上、体系结构上不断扩展其控制功能,单片机已不能用“单片微型计算机”来准确表达其内涵。国际上逐渐采用微控制器(Micro Controller Unit)来代替,形成了单片机界公认的、最终统一的名词。但在国内,由于习惯,单片机一词还是继续沿用。

单片机的应用非常广泛,已成为生产、生活等方面使用最广泛的计算机。对广大理工科高等院校的学生和科技人员来说,学习和掌握单片机原理及应用的知识,一定会有用武之地。

### 1.1.2 单片机的发展历史

单片机作为微型计算机的一个重要分支,应用面很广,发展很快。如果以 8 位单片机的推出作为起点,单片机的发展历史大致经历了以下几个阶段:

1) 第一阶段(1976—1978),以 Intel 公司首先推出的 MCS—48 系列单片微型计算机为代

表。它以体积小、功能全、价格低等特点,赢得了广泛的应用,为单片机的发展奠定了基础,成为单片机发展过程中的一个重要阶段。

2)第二阶段(1978—1982),Intel公司在MCS—48基础上推出了完善的、典型的MCS—51单片机系列。它在以下几个方面完善了单片机体系。

①MCS—51设置了经典的8位单片机的总线结构,包括8位数据总线、16位地址总线、控制总线及具有多机通信功能的串行通信接口。

②CPU外围功能单元的集中管理模式。

③体现工控特性的位地址空间及位操作方式。

④指令系统趋于丰富和完善,增加了许多突出控制功能的指令。

3)第三阶段(1982—1990),在8位单片机的基础上,推出了16位单片机,也是单片机向微控制器发展的阶段。Intel公司推出的MCS—96系列单片机,将一些用于测控系统的模数转换器、程序运行监视器、脉宽调制器等集成到芯片中,体现了单片机的微控制器特征。随着MCS—51系列的广泛应用,许多电气厂商竞相使用80C51的内核技术,将许多测控系统中使用的电路技术、接口技术、多通道A/D转换部件、可靠性技术等应用到单片机中,增强了外围电路功能,强化了智能控制器的特征。

4)第四阶段(1990之后),在此阶段,随着单片机在各个领域全面、深入地发展和应用,出现了高速、大寻址范围、强运算能力的8位/16位/32位通用型单片机,以及小型廉价的专用型单片机。

单片机的种类很多,到目前为止,世界各国厂商已研制出大约50个系列、30多个品种的单片机的产品。其中,有Motorola公司的6801、6802,Zilog公司的Z—8系列,Rockwell公司的6501、6502。此外,各公司也都相继推出了各具特色的单片机新品种。例如:日本日立公司(Hitachi)的H8/300、H8/600,采用高级语言C编制软件,中央处理器工作频率为10MHz,16位寄存器至寄存器加/减运算(速度达200ns)、乘/除运算(速度达1.4 $\mu$ s至2.6 $\mu$ s),寻址空间最多有16MB。

日本NEC公司78K/11系列16位单片机,可在工作温度-40~125 $^{\circ}$ C下工作,已成为汽车电子元件之一,广泛用于汽车制造业。美国Motorola公司的LapKat芯片是HC05单片机的新成员之一,也是较为理想的微型功率控制器。LapKat芯片以8位CPU为核心配以8KB ROM及304B RAM,基本功率控制管理计有8条外围设备扫描线、8条内部工作扫描线、8个8位功率监视及电池侦察A/D,能仿真8042、8048键盘扫描/控制器以及MCI46818实时时钟(RTC),也可与HC05配合或单独使用。

目前单片机的品种尽管很多,但最具典型代表的应属Intel公司的MCS—51系列单片机。MCS—51是在MCS—48的基础上于20世纪80年代初发展起来的,虽然它仍然是8位的单片机,但其功能有很大的增强。另外,它还具有品种全、兼容性强、软硬件资料丰富等特点。因此,MCS—51应用非常广泛,直到现在MCS—51仍不失为单片机中的主流机型。这主要由于在工业控制、智能仪表、家用电器、IC卡等诸多应用领域,8位单片机系列在性能、价格两方面都做到了较好的兼顾。估计在未来十年内,8位单片机仍将是单片机中的主流机型。故本书仍以MCS—51系列单片机为主线来进行讲授。

### 1.1.3 单片机的发展趋势

今后单片机的发展趋势,将是进一步向着多功能、高性能、高速度、低功耗、低价格、存储容量扩大和增强 I/O 功能及结构兼容等方面发展。其发展趋势主要有以下几个方面。

#### (1) 多功能

在单片机中尽可能多地把应用所需的存储器、各种功能的 I/O 口都集成在一块芯片内,使单片机的功能更加强。如把 LED、LCD 或 VFD 显示驱动器也开始集成在 8 位单片机中。

#### (2) 高性能

进一步改进 CPU 的性能,加快指令运算的速度和提高系统控制的可靠性,采用精简指令系统计算机 RISC (Reduced Instruction Set Computer) 结构和流水线技术,大幅度提高运行速度。现指令速度最高者已达 100 MIPS (Million Instruction Per Seconds, 即兆指令每秒),并加强了位处理功能、中断和定时控制功能,使单片机的性能明显地优于同类型的微处理器。单片机集成度进一步提高,有的单片机的寻址能力已突破 64 KB 的限制,8 位、16 位的单片机有的寻址能力已达到 1 MB 和 16 MB。片内 ROM 的容量可达 64 KB, RAM 的容量可达 2 KB。

#### (3) 低电压、低功耗

允许使用的电压范围越来越宽,一般在 3~6 V 范围内工作,有的已能在 1.2 V 或 0.9 V 电压下工作。绝大多数的单片机都具有省电运行方式。单片机的功耗已从 mA 级降到  $\mu\text{A}$  级,甚至 1  $\mu\text{A}$  以下,在一粒纽扣电池下就可长期工作。低功耗化的效应不仅是功耗低,而且带来了产品的高可靠性、高抗干扰能力以及产品的便携化。

#### (4) 低价格

单片机应用的另一显著特点是量大面广。促使世界各国公司在提高单片机性能的同时,也十分注意降低价格。如 Z-8 系列的 Z8600、80C51 系列的 80C31 每片仅售 1~1.5 美元。提高性能价格比是各公司竞争的主要策略和不懈追求的目标。

## 1.2 计算机中数的表示方法及运算

### 1.2.1 机器数和真值

一个数在计算机中的表示形式称为机器数,而把这个数本身称为真值。

机器数有以下几个特点:

1) 机器数所能表示的数的范围受到计算机字长的限制。在计算机中,作为数据传送、存储和运算基本单位的一组二进制字符称为一个字 (Word), 一个字中的二进制的位数称为字长 (Word Length)。计算机的字长确定以后,机器数所表示的数值范围大小也就确定了。如对于 8 位字长的计算机来说,机器数的范围为  $(0000\ 0000)_2 \sim (1111\ 1111)_2$ , 即对应于十进制数为 0~255。为了扩大机器数表示的范围,有时可以用两个字甚至多个字表示一个数,例如对于 8 位机来说,若用两个字来表示一个正数,其数值范围为 0~65 535。但应注意,这种多字表示方法是在计算机应用中的一种处理方式。从计算机本身来说,则是以单字所表示的数,来确定它本身所能表示数的范围。

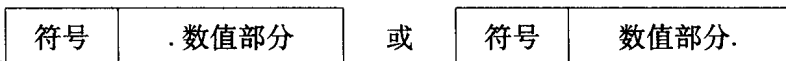
2) 机器数只用来表示正数,这时称为无符号数;当用来既表示正数也可以表示负数时,这时称为带符号数。此时数的符号在机器中就数码化了,即将一个字的最高位定为符号位,其余各位为数值位。最高位为0表示正数,最高位为1表示负数。

例如  $N_1 = (+101\ 1001)_2$  的机器数可表为  $N_1 = (0101\ 1001)_2$ ;  $N_2 = (-110\ 1011)_2$  的机器数可表示为  $N_2 = (1110\ 1011)_2$ 。带符号数也可以用两个字来表示一个数,此时符号位仍定为两个字的最高一位。

3) 机器数可以用来表示带小数点的数。通常有两种表示方法:定点表示法和浮点表示法。对于任意一个二进制数  $N$  总可以表示为纯整数(或纯小数)和一个2的整数次幂的乘积:  $N = 2^p \times S$ 。其中  $S$  称为  $N$  的尾数,  $p$  称为  $N$  的阶码,2称为阶码的底。

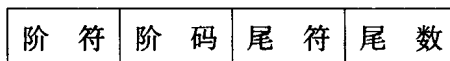
在定点表示法中,小数点在数中的位置是固定不变的,一般固定在数值部分的最高位之前或最低位之后。通常定点表示法中  $p=0$ ,定点数只有符号位和数值部分。

计算机中的定点数格式为:



在浮点表示法中,小数点在数中的位置是浮动的,因而阶码  $p$  是一个可变的数值,它可为正数,也可为负数。同样,尾数  $S$  可为正数,也可为负数。故在浮点表示法中阶码和尾数要分别表示,并且各自都有自己的符号位。

计算机中浮点数格式为:



浮点数表示的数的范围远远超过定点数,但是浮点数的算术运算也要复杂得多。微型计算机中这两种表示法都可以用,但用得较多的是定点表示法。

### 1.2.2 原码、反码和补码

在计算机里,带符号数的机器数有原码、反码和补码3种表示方法。

#### (1) 原码

正数的符号位用“0”表示,负数的符号位用“1”表示,其余各位表示数值,这种表示法称为原码。

$$\text{例如: } X_1 = [+100\ 0001]_2 = +65 \quad [X_1]_{\text{原}} = 0100\ 0001$$

$$X_2 = [-100\ 0001]_2 = -65 \quad [X_2]_{\text{原}} = 1100\ 0001$$

左边表示的数称为真值,即为某数的实际算术值。右边为用原码表示的数,两者的最高位分别用“0”、“1”代替符号位的“+”、“-”。

在原码表示法中,0有两种表示法,即:

$$[+0]_{\text{原}} = 0000\ 0000, [-0]_{\text{原}} = 1000\ 0000$$

原码表示简单易懂,而且与真值的转换方便。但原码表示的数不便于计算机运算,因为在两原码数运算时,首先要判断它们的符号,然后再决定用加法还是用减法。若是采用补码表示法,则可以在两个数的运算中避免减法运算,即将减法运算转换为加法运算。补码可由反码得到。

#### (2) 反码

一个数的反码很容易由原码求得。如果是正数,则其反码与原码相同;如果是负数,则其

反码除符号位为 1 外,其他各数位均按位取反,即 1 转换为 0,0 转换为 1。

$$\begin{aligned} \text{例如: } X_1 &= +100\ 0001 & [X_1]_{\text{反}} &= 0100\ 0001 \\ X_2 &= -100\ 0001 & [X_2]_{\text{反}} &= 1011\ 1110 \end{aligned}$$

如果已知一个数的反码,要求它所表示的真值,若是正数则可直接求得,若是负数则可将符号位除外的数值部分各位取反得到负数的原码,然后再求真值。例如:

$$\begin{aligned} [X_1]_{\text{反}} = 0100\ 0001 & \quad [X_1]_{\text{原}} = 0100\ 0001 & X_1 &= +65 \\ [X_2]_{\text{反}} = 1011\ 1110 & \quad [X_2]_{\text{原}} = 1100\ 0001 & X_2 &= -65 \end{aligned}$$

在反码表示法中,零也有两种表示形式,即:

$$[+0]_{\text{反}} = 0000\ 0000 \quad [-0]_{\text{反}} = 1111\ 1111。$$

### (3) 补码

一个数的补码亦很容易由反码求得。如果是正数,则其补码与反码相同;如果是负数,则其补码为反码加 1,即“求反加 1”。

$$\begin{aligned} \text{例如: } X_1 &= +100\ 0001 & [X_1]_{\text{补}} &= 0100\ 0001 \\ X_2 &= -100\ 0001 & [X_2]_{\text{补}} &= [X_2]_{\text{反}} + 1 = 1011\ 1110 + 1 = 1011\ 1111 \end{aligned}$$

“求反加 1”需要作两步运算,这个过程也可以简化为一步,即符号位不变,只对原码各位中最低一位 1 以左的各位求反,而最低一位 1 和右边各位都不变,即可得到负数的补码。

已知 X 的补码,求 X 的原码时,可以将 X 的补码当作 X 原码形式,再求一次 X 的补码得到,即  $[[X]_{\text{补}}]_{\text{补}} = [X]_{\text{原}}$ 。

例如:已知  $[X]_{\text{补}} = 1011\ 1111$ ,  $[Y]_{\text{补}} = 0001\ 0110$ ,求 X, Y 的真值。

解 ①  $[X]_{\text{原}} = [[X]_{\text{补}}]_{\text{补}} = [1011\ 1111]_{\text{补}} = 1100\ 0000 + 1 = 1100\ 0001$

因为 X 为负数,所以 X 的真值为:  $X = -100\ 0001\text{B} = -65$

②  $[Y]_{\text{原}} = [[Y]_{\text{补}}]_{\text{补}} = [0001\ 0110]_{\text{补}} = 0001\ 0110$

因为 Y 为正数,所以 Y 的真值为:  $Y = 0001\ 0110\text{B} = +22$

在补码表示法中,0 只有一种表示形式,即:

$$[0]_{\text{补}} = 0000\ 0000$$

对于 8 位二进制数来说,用补码所表示的数的范围为  $-128 \sim +127$ 。

### 1.2.3 补码的运算

原码运算虽然比较简单、直观,但在微型计算机中,带符号数一般都以补码的形式在机器中存放和进行运算。这是因为补码的加减运算比原码的简单,它是符号位与数值部分一起参加运算,并且能自动获得结果(包括符号和数值都在内)。就其构成电路而言采用原码进行加、减运算时,计算机的电路将比较复杂;如果采用补码,就可以把减法变成加法运算,省去了减法器,大大简化了硬件电路。

一般而言,两个数的补码运算可按以下步骤进行:

- ①把参与运算的两数连同其前面的正负号,变成补码;
- ②对补码做加法,得到两数运算结果的补码,若最高位上有进位则舍弃不要;
- ③若要求运算结果的真值,则按补码数求真值的办法进行。

例 1.1 用补码运算求  $23 - 11$ 。

解  $[23]_{\text{补}} = 0001\ 0111$ ,  $[-11]_{\text{补}} = 1111\ 0101$ ,用二进制运算如下:

$$\begin{array}{r}
 00010111 \\
 +)11110101 \\
 \hline
 \boxed{1}00001100
 \end{array}$$

因为在8位机中,最高位 $D_7$ 的进位已超出计算机字长的范围,所以是自然丢失的。由上面运算可知:

$$[23]_{\text{补}} + [-11]_{\text{补}} = 0000\ 1100$$

由此可见,在不考虑最高位产生进位的情况下,作减法运算与补码相加的结果完全相同。

例 1.2 用补码运算求  $(-5) + (-6)$

解  $[-5]_{\text{补}} = 1111\ 1011, [-6]_{\text{补}} = 1111\ 1010$

用二进制运算如下:

$$\begin{array}{r}
 11111011 \\
 +)11111010 \\
 \hline
 \boxed{1}11110101
 \end{array}$$

$$[-5]_{\text{补}} + [-6]_{\text{补}} = 1111\ 1011 + 1111\ 1010 = 1\ 111\ 10101$$

对补码运算的结果仍为补码。本例所求和数符号位为1,即和为负数的补码。

例 1.3 用补码运算求  $64 - 10$ ,并对运算结果求真值。

解  $64 - 10 = 64 + (-10)$

①对两数求补码:

$$[64]_{\text{补}} = 0100\ 0000 \quad [-10]_{\text{补}} = 1111\ 0110$$

②做加法:

$$0100\ 0000 + 1111\ 0110 = 0011\ 0110$$

③求真值。由于是正数,可直接求:

$$(0011\ 0110)_2 = 54$$

例 1.4 用补码运算求  $64 - 65$ ,并对运算结果求真值。

解  $64 - 65 = 64 + (-65)$

①对两数求补码

$$[64]_{\text{补}} = 0100\ 0000 \quad [-65]_{\text{补}} = 1011\ 1111$$

②做加法:

$$0100\ 0000 + 1011\ 1111 = 1111\ 1111$$

③求真值。由于是负数,把结果再求一次补码,得原码,再求真值。

$$[1111\ 1111]_{\text{补}} = [1000\ 0001]_{\text{原}} = -1$$

若参加运算的两个补码数相加的结果,超过了机器所允许表示的范围,得出了错误的结果,这种情况称为溢出。如两正数相加符号位为1,变为负数;两负数相加符号位为0,变为正数。

例 1.5 用补码运算求  $64 + 65$ 。

解 ①对两数求补码

$$[64]_{\text{补}} = 0100\ 0000 \quad [65]_{\text{补}} = 0100\ 0001$$

②做加法

$$0100\ 0000 + 0100\ 0001 = 1000\ 0001$$

此时两个正数相加,其结果的符号位为 1,表明出现了溢出。也就是说,在字长 8 位的情况下,64 + 65 不可能通过单字表示的补码运算得出正确的结果。为了得到正确结果,可采用双字表示(16 位)的补码来运算:

$$[64]_{\text{补}} = 0000\ 0000\ 0100\ 0000$$

$$[65]_{\text{补}} = 0000\ 0000\ 0100\ 0001$$

$$[64 + 65]_{\text{补}} = 0000\ 0000\ 1000\ 0001, \text{真值为 } 129$$

此时,和的 16 位补码数的最高位仍为 0,因此没有出现溢出,结果是正确的。

由以上例子可见,当数用补码表示时,无论是加法还是减法都可采用加法运算,而且是连同符号位一起进行的,只要不溢出,就能得到正确结果。

### 1.3 计算机中常用数制与编码

计算机中常用数制有十进制、二进制、十六进制等。在人机界面中,计算机的输入/输出常用十进制,以适应人们的习惯。而在计算机内部,数据均采用的是二进制或十六进制的存放和运算。计算机中常用编码有 BCD 码、ASCII 码等,下面分别予以介绍。

#### 1.3.1 数制及数制间的转换

##### (1) 进位计数制

进位计数制有以下两个特点:

①有一个固定的基数  $r$ , 数的每一位只能取  $r$  个不同的数字,即所使用的数码为  $0, 1, 2, \dots, r-1$ 。

②逢  $r$  进位,它的第  $i$  个数位对应于一个固定的值  $r^i$ ,  $r^i$  称为该位的“权”。小数点左面各位的权是基数  $r$  的正次幂,依次为  $0, 1, 2, \dots, m$  次幂,小数点右面各位的权是基数  $r$  的负次幂,依次为  $-1, -2, \dots, -n$  次幂。

从以上可以看出,数制所使用的数码的个数称为基数,数制每位所具有的值称为权。

##### 1) 十进制

十进制的基数为 10,它所使用的数码为  $0 \sim 9$ ,共 10 个数字。十进制各位的权是以 10 为底的幂,即每个数所处的位置不同,它的值是不同的,每一位数是其右边相邻那位数的 10 倍。

例如,数 435.32 就是下列多项式的缩写:

$$435.32D = 4 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 5 \times 10^0 + 3 \times 10^{-1} + 2 \times 10^{-2}$$

由此可见,在十进制中每个(位)数字的值都是以该(位)数字乘以基数的幂次来表示。通常将基数的幂次称为权。例如,上述各位的权分别为个、十、百,即以 10 为底的 0 次幂、1 次幂、2 次幂,通常简称为 0 权位、1 权位、2 权位等。上式中的后缀 D(Decimal)表示该数为十进制数,通常对十进制数可不加后缀。

##### 2) 二进制

二进制的基数为 2,它所使用的数码为  $0, 1$ ,共 2 个。二进制各位的权是以 2 为底的幂,即  $\dots, 2^2, 2^1, 2^0, 2^{-1}, 2^{-2}, \dots$ 。

例如,二进制数 1011.101 相当于十进制的数是:



$$1011.101\text{B} = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$$

二进制数只有两个数码,即0和1,在电子计算机中容易实现。例如,可以用高电平表示1,低电平表示0;也可用晶体管截止时的输出表示1,导通时的输出表示0等等。采用二进制,只要能表示出两个状态,就可以做到。

二进制数的运算规则类似于十进制,加法为逢二进一,减法为借一为二。利用加法和减法就可以进行乘法、除法以及其他数值运算。上式中的后缀B(Binary)表示该数为二进制数。

由于二进制位数太长,不易记忆和书写,因此人们又提出了十六进制的表示方法。一位16进制数可以表示四位二进制数,因此,书写起来比较方便。

### 3) 十六进制

十六进制的基数为16,它所使用的数码共有16个:0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F,其中A~F相当于十进制数的10~15。十六进制的权是以16为底的幂,即 $\dots, 16^2, 16^1, 16^0, 16^{-1}, 16^{-2}, \dots$ 。

例如,十六进制数A3E.8F相当于十进制的数是:

$$\text{A3E.8FH} = 10 \times 16^2 + 3 \times 16^1 + 14 \times 16^0 + 8 \times 16^{-1} + 15 \times 16^{-2}$$

上式中的后缀H(Hexadecimal)表示该数为十六进制数。十六进制数如是字母打头,则在使用汇编指令时前面需加一个0。

由于十六进制数易于书写和记忆,且与二进制之间的转换十分方便,因而人们在书写计算机的机器码时多用十六进制。

## (2) 数制的转换

### 1) 二进制数、十六进制数转换成十进制数

根据定义,只需将二、十六进制数按权展开后相加即可。

例如:

$$1011\text{B} = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 = 11$$

$$\text{A4H} = 10 \times 16^1 + 4 \times 16^0 = 164$$

### 2) 十进制数转换成二进制数、十六进制数

一个十进制整数转换成二进制数(或十六进制数)时,通常采用“除二取余”(或除十六取余)法,即用“2”(或16)连续除十进制数至商为0,逆序排列余数即可得到。十进制小数部分转换成二进制数(或十六进制数)时,通常采用“乘2取整”(或乘十六取整)的方法得到。即:将小数部分十进制数一次又一次地纯小数部分乘2(或16),把每次得到的整数按顺序排列,就得到用二进制数(或十六进制数)表示的小数。

例 1.6 将62.6875转换成二进制数。

解 ①十进制整数62转换为二进制数,采用“除二取余”法。

2   62	……余数 = 0	低位 ↑ 高位
2   31	……余数 = 1	
2   15	……余数 = 1	
2   7	……余数 = 1	
2   3	……余数 = 1	
1	……余数 = 1	

按余数的逆序排列,即得结果:62D = 111110B