



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

微机原理与接口技术

楼顺天 周佳社 编著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书以 Intel 公司生产的 8086/8088 CPU 为核心,详细介绍汇编语言程序设计技术、系统总线形成、存储器设计、常用和专用芯片的接口技术及其应用编程方法。

在汇编语言程序设计中,分别介绍计算机中的数制和码制、补码的运算规则、数据和转移地址的寻址方式、8086/8088 的指令系统,着重介绍汇编语言的编程技术,并结合示例介绍许多实际应用编程技巧,强调汇编语言中指针的使用。在接口技术中,介绍 8086/8088 系统总线的形成、常用芯片与系统总线的接口、专用芯片的接口与工作方式控制、中断技术及其应用,重点介绍存储器的设计和专用芯片的应用设计,结合示例介绍一些实际应用系统的设计方法。

本书可作为高等院校各专业本科生的教材,也可供相关工程技术人员、管理人员和自学者参考。

图书在版编目(CIP)数据

微机原理与接口技术/楼顺天,周佳社编著. —北京:科学出版社,2006
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材·中国科学院电子信息与通信系列规划教材)

ISBN 7-03-017566-2

I. 微… II. ①楼… ②周… III. ①微型计算机-理论-高等学校-教材
②微型计算机-接口-高等学校-教材 IV. TP36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 072704 号

责任编辑:匡 敏 余 江 潘继敏 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:张克忠 / 封面设计:陈 敬

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2006 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2006 年 8 月第一次印刷 印张: 25 1/4

印数: 1—4 000 字数: 494 000

定价: 28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

科学出版社高等教育分社

教学支持说明

科学出版社高等教育分社为了对教师的教学提供支持，特对教师免费提供本教材的电子课件，以方便教师教学。

获取电子课件的教师需要填写如下情况的调查表，以确保本电子课件仅为任课教师获得，并保证只能用于教学，不得复制传播用于商业用途。否则，科学出版社保留诉诸法律的权利。

地址：北京市东黄城根北街16号，100717

科学出版社 高等教育分社 匡敏（收）

联系方式：010-64034548 010-64033787（传真）

kuangmin@mail.sciencep.com

登陆科学出版社网站：www.sciencep.com“教材天地”栏目可下载本表。

请将本证明签字盖章后，传真或者邮寄到本社，我们确认销售记录后立即赠送。

如果您对本书有任何意见和建议，也欢迎您告诉我们。意见一旦被采纳，我们将赠送书目，教师可以免费选书一本。

证 明

兹证明_____大学_____学院/____系第____学
年上/下学期开设的课程，采用科学出版社出版的
_____/_____（书名/作者）作为上课教材。任课
老师为_____共____人，学生____个班共____人。

任课教师需要与本教材配套的电子课件。

电 话：_____

传 真：_____

E-mail：_____

地 址：_____

邮 编：_____

学院/系主任：_____（签字）

（学院/系办公室章）

____年__月__日

《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》

编委会

顾问:保 铮 中国科学院院士 西安电子科技大学
刘永坦 两院院士 哈尔滨工业大学
陈俊亮 两院院士 北京邮电大学

主任:谈振辉 教授 北京交通大学

副主任:任晓敏 教授 北京邮电大学
梁昌洪 教授 西安电子科技大学
冯正和 教授 清华大学
张文军 教授 上海交通大学
林 鹏 编审 科学出版社

委员:(按姓氏汉语拼音排序)

段哲民 教授 西北工业大学
顾学迈 教授 哈尔滨工业大学
洪 伟 教授 东南大学
焦李成 教授 西安电子科技大学
李少谦 教授 电子科技大学
毛军发 教授 上海交通大学
沈连丰 教授 东南大学
唐朝京 教授 国防科学技术大学
王成华 教授 南京航空航天大学
王文博 教授 北京邮电大学
徐安士 教授 北京大学
严国萍 教授 华中科技大学
杨建宇 教授 电子科技大学
姚 彦 教授 清华大学
张宏科 教授 北京交通大学
张晓林 教授 北京航空航天大学

秘书:段博原 编辑 科学出版社

丛 书 序

信息技术的高速发展及广泛应用,使信息技术成为当今国际竞争中最重要战略技术。信息技术对经济建设、社会变革乃至国家安全起着关键性的作用,它是经济发展的“倍增器”和社会进步的“催化剂”,是体现综合国力的重要标志。在人类历史上,没有一种技术像信息技术这样引起社会如此广泛、深刻的变革。在 20 世纪末和 21 世纪前半叶,信息技术乃是社会发展最重要的技术驱动力,可以说,21 世纪人类已经步入了信息时代。信息产业在世界范围内正在由先导产业逐步变为主导产业。从微观上看,表现为单位产品的价格构成中,能源和材料的消耗减少而信息技术和信息服务的比重上升;从宏观上看,表现为国民生产总值(GDP)中信息产业所占的比重增加。一个国家信息产业的发展水平将是衡量该国社会经济总体发展和现代化程度的重要标志之一。

目前,信息科学已成为世界各国最优先发展的科学之一。党的十六大提出了“加速发展信息产业,大力推进信息化,以信息化带动工业化”的发展战略,以及“优先发展信息产业,在经济和社会领域广泛应用信息技术”的基本国策,使我国信息产业得到了前所未有的重视,信息产业呈现出飞速发展的势头。信息产业的发展离不开信息化人才,信息化人才建设将是信息产业可持续发展的关键。然而,有关调查表明,我国国家信息化指数为 38.46,而信息化人才资源指数仅为 13.43。据权威机构预测,从 2005 年到 2009 年,中国信息行业将以 18.5% 的年复合增长率高速增长,中国信息市场将迎来又一个“黄金年代”。

为了适应新世纪信息学科尤其是电子信息与通信学科的长足发展,在规模上、素质上更好地满足我国信息产业和信息科学技术的发展需要,更好地实现电子信息与通信学科专业人才的培养目标,推进国内信息产业的发展,中国科学院教材建设专家委员会和科学出版社组织电子信息与通信领域的院士、专家、教学指导委员会成员、国家级教学名师及电子信息与通信学科院校的相关领导等组成编委会,共同组织编写这套《中国科学院电子信息与通信系列规划教材》。

本套教材主要面向全国范围内综合性院校电子信息工程、通信工程、信息工程等相关专业的本科生。本套教材的编委会成员具有国内电子信息与通信方面的较高学术水平,他们负责对本套教材的编写大纲及内容进行审定,可使本套教材的质量得以保证。

本套教材主要有以下几方面的特点:

1. 适应多层次的需要。依据最新专业规范,系列教材主要根据教育部最新公布的电子信息与通信学科相关专业的“学科专业规范”和“基础课程教学基本要求”

进行教材内容的安排与设置。同时,根据各类型高校学生的实际需要,编写不同层次的教材。

2. 结构体系完备。本套教材覆盖本科、研究生教学层次,各门课程的知识之间相互衔接,以便完整掌握学科基本概念、基本理论,了解学科整体发展趋势。

3. 作者水平较高。我们将邀请设有电子、通信国家重点学科的院校,以及国家级、省级教学名师或国家级、省级精品课程负责人编写教材。

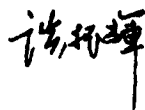
4. 借鉴国外优秀教材。编委会为每门课程推荐一本国外相关的经典原版教材,作为教师编写的参考书。

5. 理论与实际相结合,加强实践教学。教材编写注重案例和实践环节,着力于学生实际动手能力的培养。

6. 教材形式多样。本套教材除主教材外,还配套有辅导书、教师参考书、多媒体课件、习题库及网络课程等。

根据电子信息与通信学科专业发展的战略要求,我们将对本套系列教材不断更新,以保持教材的先进性和适用性。热忱欢迎全国同行以及关注电子信息与通信领域教育及教材建设的广大有识之士对我们的工作提出宝贵意见和建议。

北京交通大学校长



2005年10月

前 言

在大多数高等院校的本科生教学中,计算机课程的设置和教学实施得到了广泛重视,一般都开设了“计算机文化基础”、“C 语言程序设计”、“软件技术基础”、“微机原理与接口技术”(或“微机原理与系统设计”)等课程,本书就是专门为“微机原理与接口技术”(或“微机原理与系统设计”)课程所编写的本科生教材,适合各个专业使用。

微机原理与接口技术课程是重要的专业基础课,是学生参加全国、省三级计算机等级考试(PC 技术)的重要课程,也是电路、信号与系统、信号处理、自动控制等硕士学科的考研科目之一。这门课程是“计算机文化基础”,“C 语言程序设计”的继续,又是“数据结构”、“软件技术基础”、“计算机网络”等课程的基础,在计算机教学中占据重要地位。

本书作者均有十几年“微机原理与系统设计”课程的教学经验,多年来一直承担着研究生试卷的命题任务,完成了十多项相关的科研项目,自主开发了“8086 单板型微型计算机实验教学系统”和“基于 EISA/PCI 系统总线的微机原理及接口技术实验教学系统”,并有出版 10 多本教材和专著的写作经验。本书具有下列特点:

(1) 从学生学习、教师讲授的角度出发,内容由浅入深,循序渐进,前后连贯并呼应,使结构系统而完整。

(2) 内容层次分明,既有基础知识的系统介绍,又有拓宽知识的基本介绍,给学生留下广阔的思维空间。

(3) 理论联系实际,在知识介绍的同时,结合实际示例,采用面向应用的启发式教学方法。

(4) 以编程思路为主线,介绍汇编语言的程序设计方法,让学生切实掌握编程知识。

(5) 以实际应用设计为主线,介绍微机系统的接口设计技术。

(6) 将工程设计中常用的实例、常见问题解决方法等作较全面的总结,提高了本书的实用价值。

(7) 写作语言流畅,内容选择合理,结构编排适当。

本书共分 11 章,由楼顺天、周佳社共同编写,楼顺天负责统稿。其中第 1~4 章、第 9~10 章由楼顺天编写,第 5~8 章和第 11 章由周佳社编写。

第 1~4 章构成 8086 汇编语言程序设计技术,重点介绍 8086 的指令系统及其编程方法。第 5~11 章构成了 8086 的系统总线及其接口设计技术,重点介绍 8086/8088 系统的总线形成、存储器设计、常用芯片接口设计、专用芯片

(8259、8253、8255)的接口设计、实际应用接口(D/A、A/D、非编码矩阵键盘、LED数码显示、光电隔离、步进电机等)的设计及其应用编程。

为方便教师授课和学生学习,附录A列出8086/8088的指令系统,附录B给出DOS中断INT 21H的部分功能列表,附录C是本书的例题索引。

感谢西安电子科技大学的有关老师给予本书写作的支持,感谢参与本书绘图和校稿的研究生,更要感谢科学出版社的编辑给予细致的润色加工及发行同志为本书的推广所作的辛苦努力。

由于作者水平和知识面的限制,书中难免会有错误和欠妥之处,敬请读者批评指正,以便及时更正,使本书更有益于广大的读者。

编 者

2006年5月

目 录

丛书序

前言

第 1 章 数制与码制	1
1.1 数制表示及其转换	1
1.2 二进制数的运算规则	4
1.3 有符号数的表示	5
1.4 有符号数的运算及其溢出规则	6
1.5 BCD 编码方法及其运算	7
1.6 ASCII 编码方法	8
1.7 小结	9
习题	9
第 2 章 8086CPU 结构与功能	12
2.1 微处理器的外部结构	12
2.2 微处理器的内部结构	13
2.3 微处理器的功能结构	15
2.4 微处理器的寄存器组织	16
2.5 微处理器的存储器和 I/O 组织	19
2.6 小结	23
习题	23
第 3 章 8086CPU 指令系统	25
3.1 汇编语言指令	25
3.2 8086 指令分类	31
3.3 数据与转移地址的寻址方式	32
3.4 数据传送类指令	38
3.5 算术运算类指令	45
3.6 逻辑运算类指令	56
3.7 移位类指令	58
3.8 标志位操作指令	61
3.9 转移指令	62
3.10 循环控制指令	65
3.11 子程序调用返回指令	67
3.12 中断调用与返回指令	71
3.13 字符串操作指令	73
3.14 输入输出指令	79

3.15	其他指令	80
3.16	宏指令	81
3.17	小结	87
	习题	87
第4章	汇编语言程序设计	92
4.1	汇编语言程序设计基础	92
4.2	源程序的汇编、链接与调试	96
4.3	分支程序设计技术	103
4.4	循环程序设计技术	106
4.5	子程序设计技术	116
4.6	综合程序设计示例	131
4.7	小结	152
	习题	153
第5章	总线及其形成	157
5.1	总线定义及分类	157
5.2	几种常用芯片	161
5.3	8086 的引脚功能及时序	163
5.4	系统总线的形成	173
5.5	8088 与 8086 的差异	181
5.6	小结	181
	习题	182
第6章	存储器设计	184
6.1	存储器分类	184
6.2	存储器主要技术指标	186
6.3	几种常用存储器芯片介绍	187
6.4	扩展存储器设计	197
6.5	多端口存储器设计	214
6.6	小结	218
	习题	218
第7章	常用芯片的接口技术	220
7.1	概述	220
7.2	外设接口的编址方式	222
7.3	输入/输出的基本方式及基本模式	225
7.4	常用芯片的接口技术	229
7.5	小结	235
	习题	235
第8章	中断系统与可编程中断控制器 8259A	236
8.1	中断的基本概念	236
8.2	8086 的中断系统	241

8.3	可编程中断控制器 8259A 及其应用	245
8.4	小结	264
	习题	264
第 9 章	定时/计数器 8253 应用设计	267
9.1	8253 的引脚功能及特点	267
9.2	8253 的原理结构及工作原理	267
9.3	8253 的控制字及工作方式	269
9.4	8253 与系统总线的接口方法	282
9.5	8253 的应用设计	284
9.6	小结	292
	习题	292
第 10 章	并行接口芯片 8255A 应用设计	295
10.1	8255A 的引脚功能及特点	296
10.2	8255A 的原理结构及工作原理	297
10.3	8255A 的控制字及工作方式	298
10.4	8255A 与系统总线的接口方法	304
10.5	8255A 的应用设计	306
10.6	小结	311
	习题	312
第 11 章	实际应用接口的设计与编程	313
11.1	控制系统中的模拟接口	313
11.2	数模转换器芯片(DAC)及其接口技术	314
11.3	模数转换芯片(ADC)及其接口技术	325
11.4	键盘接口	332
11.5	鼠标接口	339
11.6	显示器接口	340
11.7	打印机接口	349
11.8	光电隔离输入/输出接口	356
11.9	电机接口	361
11.10	小结	372
	习题	373
	参考文献	374
附录 A	8086/8088 指令系统	375
附录 B	DOS 中断 INT 21H 功能列表	381
附录 C	例题索引	389

第 1 章 数制与码制

1.1 数制表示及其转换

1.1.1 数制的表示

因为人有 10 根手指，所以自古以来就习惯使用 10 根手指来计数，因此逢十进一的十进制系统很自然就成为人类常用的计数方法。

数制是以表示数值所用的数字位数来命名，例如，十进制用 10 位数字 (0~9) 表示，二进制用 2 位 (数字 0、1) 表示，十六进制用 10 位数字和 6 位符号 (A、B、C、D、E、F) 表示。各种数制中数字或符号的个数称为数制的基数。

任意进制数可以通过多项式形式表示，设数制的基数为 b ，则数 x 可以表示成

$$x = \sum_{i=-m}^n k_i b^i = k_{-m} b^{-m} + \dots + k_{-1} b^{-1} + k_0 + k_1 b + \dots + k_n b^n \quad (1.1)$$

其中 $k_{-m}, \dots, k_n \in [0, 1, \dots, b-1]$ ， m, n 为非负整数。上式表示数 x 可以表示成 b 进制数，整数 $n+1$ 位，小数 m 位。这一式子也称为数值的按权值表示。

(1) 十进制。

常用的十进制数可以直接用 0~9 数字表示，也可以在数字后加 D (decimal) 表示，例如，257 和 369.2D 可以按式 (1.1) 分别表示成

$$257 = 2 \times 10^2 + 5 \times 10 + 7 \times 10^0$$

$$369.2D = 3 \times 10^2 + 6 \times 10 + 9 \times 10^0 + 2 \times 10^{-1}$$

(2) 二进制。

在数字计算机中，经常用二进制数来表示数值，这是因为在数字电路中，只能用高电平和低电平表示不同的事件。二进制数可以用 0~1 数字后加 B (binary) 表示，例如，10101B 可以按权值展开成

$$10101B = 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

这里介绍几个常用的术语：

位 (bit)：二进制位，只有两种状态：0 和 1，它是计算机中存储信息的最小单位。

字节 (byte)：8 个二进制位，可以存储 8 位二进制数，如果是无符号数，

则其范围为 0~255。通常计算机中的存储单元按字节设置，也就是说，8086 微机系统中可以访问的最小存储单元为一个字节，1 byte=8 bit。

字 (word)：16 个二进制位，2 个字节，可以存储 16 位二进制数，如果是无符号数，则其范围为 0~65535。

双字 (double word)：32 个二进制位，2 个字，4 个字节，可以存储 32 位二进制数，如果是无符号数，则其范围为 0~4294967295。

字长：基本数据单元所包含的二进制位数，8086 微处理器中经常采用的字长为 8 和 16。

(3) 十六进制。

为书写表示方便，通常将 4 位二进制数看作为 1 位十六进制数，这时用数字 0~9 和符号 A~F 表示，并在十六进制数后加 H (heximal) 表示。在书写十六进制数时，如果最高位是字符，则在其前面要加上 0，以便与标识符区别开来。这样我们有

$$\begin{array}{lll} 0AH=1010B & 0BH=1011B & 0CH=1100B \\ 0DH=1101B & 0EH=1110B & 0FH=1111B \end{array}$$

十六进制数也可以表示成权值展开形式，如

$$325H = 3 \times 16^2 + 2 \times 16 + 5 \times 16^0$$

$$0B6H = 11 \times 16 + 6 \times 16^0$$

1.1.2 数制的转换

同一个数值可以用各种数制来表示，各种数制表示的数值之间可以进行转换。

1. 十进制数转换成其他进制数

将十进制数 N 分成两部分：整数部分 z 和纯小数部分 f 。设要将十进制数 z, f 转换成 b 进制数，则整数部分 z 采用除 b 取余的方法，即有

$$z_1 = \left[\frac{z}{b} \right] \dots\dots\dots y_1$$

$$z_2 = \left[\frac{z_1}{b} \right] \dots\dots\dots y_2$$

⋮

$$z_n = \left[\frac{z_{n-1}}{b} \right] \dots\dots\dots y_n$$

其中 z_1, \dots, z_n 为商， y_1, \dots, y_n 为余数， $[\cdot]$ 表示取整运算。当 $z_n=0$ 时迭代过程终止，这样得到的 y_1, \dots, y_n 就是 b 进制数的各位数字， y_1 为最低位， y_n 为最高位。

例 1.1 将十进制数 125 转换成二进制数。

解：转换过程为

$$\begin{array}{r}
 2 \overline{) 125} \\
 2 \overline{) 62} \quad \dots\dots\dots 1 \\
 2 \overline{) 31} \quad \dots\dots\dots 0 \\
 2 \overline{) 15} \quad \dots\dots\dots 1 \\
 2 \overline{) 7} \quad \dots\dots\dots 1 \\
 2 \overline{) 3} \quad \dots\dots\dots 1 \\
 2 \overline{) 1} \quad \dots\dots\dots 1 \\
 0 \quad \dots\dots\dots 1
 \end{array}$$

因此， $125=1111101B$ 。

纯小数部分 f 采用乘以 b 取整的方法，即有

$$\begin{aligned}
 r_1 &= [f \times b] & f_1 &= f \times b - r_1 \\
 r_2 &= [f_1 \times b] & f_2 &= f_1 \times b - r_2 \\
 & \vdots \\
 r_m &= [f_{m-1} \times b] & f_m &= f_{m-1} \times b - r_m
 \end{aligned}$$

其中 r_1, \dots, r_m 为取整结果， f_1, \dots, f_m 为小数部分。当 $f_m=0$ 时迭代过程终止，这样得到的 r_1, \dots, r_m 就是 b 进制数的各位数字， r_1 为最高位， r_m 为最低位。

例 1.2 将十进制数 0.6875 转换成二进制数。

解：转换过程为

$$\begin{array}{r}
 0.6875 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 1.3750 \quad \dots\dots\dots 1 \\
 0.375 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 0.750 \quad \dots\dots\dots 0 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 1.50 \quad \dots\dots\dots 1 \\
 0.5 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 1.0 \quad \dots\dots\dots 1
 \end{array}$$

因此， $0.6875=0.1011B$ 。

2. 其他进制数转换成十进制数

将任意进制数转换成十进制数，可以按照权值表示进行展开，例如

$$\begin{aligned}10110110\text{B} &= 1 \times 2^7 + 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 \\ &= 128 + 32 + 16 + 4 + 2 = 182\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}1011.011\text{B} &= 1 \times 2^3 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= 8 + 2 + 1 + 0.25 + 0.125 = 11.375\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}78.\text{AH} &= 7 \times 16^1 + 8 \times 16^0 + 10 \times 16^{-1} \\ &= 120.625\end{aligned}$$

1.2 二进制数的运算规则

1.2.1 二进制数的算术运算

十进制数的运算规则是我们所熟悉的。计算机中是以二进制数来表示的，为书写方便，经常写成十六进制数。因此这里主要讨论二进制数和十六进制数的算术运算规则。其他进制数的运算规则与十进制数类似，二进制数加法运算采用逢二进一，减法运算采用借一作二；十六进制数加法运算采用逢十六进一，减法运算采用借一作十六，在乘法运算时，也采用类似的规则。例如

$$1011011\text{B} + 10011\text{B} = 1101110\text{B}$$

$$1011\text{B} \times 10011\text{B} = 11010001\text{B}$$

$$65\text{H} + 7\text{AH} = 0\text{DFH}$$

$$65\text{H} \times 7\text{AH} = 3022\text{H}$$

1.2.2 二进制数的逻辑运算

二进制数的逻辑运算是位对位的运算，即本位运算结果不会对其他位产生任何影响，这一点与算术运算是截然不同的。二进制数的逻辑运算有四种：与 (AND)、或 (OR)、异或 (XOR)、非 (NOT)，其规则如表 1.1 所示。

表 1.1 二进制数位的逻辑运算规则

输入 2 个位值	(0, 0)	(0, 1)	(1, 0)	(1, 1)
AND 运算	0	0	0	1
OR 运算	0	1	1	1
XOR 运算	0	1	1	0
NOT 运算	NOT 0=1		NOT 1=0	

例如

10010111B AND 00111000B=00010000B

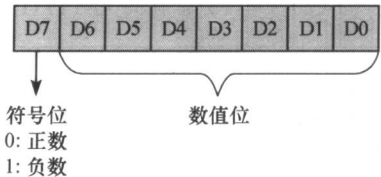
10010111B OR 00111000B=10111111B

10010111B XOR 00111000B=10101111B

利用逻辑运算可以完成特定的操作，AND 运算可以对指定位进行清 0，OR 运算可以对指定位进行置 1，XOR 运算可以对指定位进行取反。例如，对 x 的第 0、3 位清零操作： x AND 11110110B，对 x 的第 1、2 位置 1 操作： x OR 00000110B，对 x 的第 3、7 位取反操作： x XOR 10001000B。

1.3 有符号数的表示

利用二进制数来表示有符号数时，必须有一位用来表示符号位，一般采用最高位表示，如图 1.1 所示。这样表示的数称为机器数，其实际值称为机器数的真值。



1.3.1 原码表示法

除符号位外，剩余 7 位就是真值的绝对值，这种表示方法称为原码表示法。例如， $+1011001B$ 表示成 $01011001B$ ， $-1011001B$ 表示成 $11011001B$ ，这种表示方法的优点是直观，但加减运算时比较麻烦。例如，在对两个数进行加法运算时，应该先对其符号进行判断，如果同号，则进行相加运算，如果异号，则实际上应该进行相减运算。

图 1.1 有符号数的表示

另外，对于特殊值 0 有两种表示： $+0$ 表示成 $00000000B$ ， -0 表示成 $10000000B$ ，但实际上， $00000000B$ 和 $10000000B$ 表示同一个值 0。

1.3.2 补码表示法

计算机中有符号二进制数采用补码表示， x 的补码表示 $[x]_{\text{补}}$ 定义为

$$[x]_{\text{补}} = \begin{cases} x, & \text{当 } 0 \leq x \leq 2^{n-1} \text{ 时,} \\ x + 2^n, & \text{当 } -2^{n-1} \leq x < 0 \text{ 时,} \end{cases} \quad (\text{mod } 2^n)$$

求一个数 x 的补码，可以表示成 $[x]_{\text{补}}$ ，这种过程称为求补运算。从定义可以看出，当 x 为正数时，其原码与补码一致，只有当 x 为负数时，才有求补码的问题。

当 $n=8$ 时，有符号二进制数的表示范围为 $-128 \sim 127$ ，当 $n=16$ 时，有符号二进制数的表示范围为 $-32768 \sim 32767$ 。例如， $+12$ 的原码和补码表示均为 $00001100B$ ，而 -12 的补码表示为 $[-12]_{\text{补}} = -12 + 2^8 = 244 = 11110100B$ ，实际上，它就是原码 $10001100B$ 按位取反（符号位除外）再加 1 的结果。

因此负数的补码为原码取反加1（符号位除外），即当 x 为负数时，有

$$[x]_{\text{补}} = \overline{[x]_{\text{原}}} + 1 \quad (\text{除符号位})$$

如果对已经表示成补码的数 $[x]_{\text{补}}$ 再求补码，则可以得到其原码表示，即

$$[[x]_{\text{补}}]_{\text{补}} = [x]_{\text{原}}$$

实际上，对负数 x 求补码时，只需要先求出 $(-x)$ 的原码，然后按位取反再加1，即

$$[x]_{\text{补}} = \overline{[-x]_{\text{原}}} + 1 \quad (\text{含符号位})$$

这为求负数补码运算提供了简捷的运算方法。

例 1.3 求 -15 的补码表示。

解：分两步进行。

(1) $[15]_{\text{补}} = 00001111\text{B}$ 。

(2) $[-15]_{\text{补}} = \overline{00001111}\text{B} + 1 = 11110001\text{B}$ 。

1.4 有符号数的运算及其溢出规则

1.4.1 补码运算规则

有符号二进制数以补码形式表示以后，可以直接进行加减法运算，并满足下列规则：

(1) 加法 $[x+y]_{\text{补}} = [x]_{\text{补}} + [y]_{\text{补}} \pmod{2^n}$

该式表明：当带符号数的两个数采用补码形式表示时，进行加法运算可以把符号位和数值位一起进行运算（若符号位有进位，则丢掉），其结果为两数之和的补码形式。例如

$$(+57) + (+45) = 00111001\text{B} + 00101101\text{B} = 01100110\text{B} \quad (+102)$$

$$(+57) + (-45) = 00111001\text{B} + 11010011\text{B} = [1]00001100\text{B} \quad (\text{进位舍弃}, +12)$$

$$(-57) + (-45) = 11000111\text{B} + 11010011\text{B} = [1]10011010\text{B} \quad (\text{进位舍弃}, -102)$$

(2) 减法 $[x-y]_{\text{补}} = [x]_{\text{补}} - [y]_{\text{补}} \pmod{2^n}$

$$\begin{aligned} (+57) - (+45) &= 00111001\text{B} - 00101101\text{B} \\ &= 00001100\text{B} \quad (+12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (+57) - (-45) &= 00111001\text{B} - 11010011\text{B} \\ &= [1]01100110\text{B} \quad (\text{借位舍弃}, +102) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (-57) - (-45) &= 11000111\text{B} - 11010011\text{B} \\ &= [1]11110100\text{B} \quad (\text{借位舍弃}, -12) \end{aligned}$$

(3) 用加法完成相减运算 $[x-y]_{\text{补}} = [x]_{\text{补}} + [-y]_{\text{补}} \pmod{2^n}$