

21

高等学校信息工程类“十二五”规划教材

数字电子技术

◎ 主编 劳有兰 王翠莲
◎ 参编 覃金飞 张连福
王 玥 潘绍明

SHUZIDIANWUJISHU



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

014037225

TN79-43
165

高等学校信息工程类“十二五”规划教材

数字电子技术

主 编 劳有兰 王翠莲
参 编 覃金飞 张连福 王 玥 潘绍明



TN79-43
165

西安电子科技大学出版社



北航 C1725435

014037522

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

内 容 简 介

在电子技术快速发展的今天,数字电路也经历了由简单门电路的使用到集成门电路的应用,再到现在广泛使用的可编程逻辑芯片的发展历程。

本书内容包括:数制与编码、逻辑代数、组合逻辑电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与变换、可编程逻辑电路、D/A转换器与A/D转换器、VHDL硬件描述语言。

本书可作为高等学校本科电气信息类、计算机类、自动化机电类专业“数字电路”和“电子技术基础”等数字电子基础课程的教材,也可作为有关技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术/劳有兰,王翠莲主编.—西安:西安电子科技大学出版社,2013.9
高等学校信息工程类“十二五”规划教材
ISBN 978-7-5606-3173-8

I. ①数… II. ①劳… ②王… III. ①数字电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 198131 号

策划编辑 邵汉平
责任编辑 许青青 邵汉平
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
网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfb001@163.com
经 销 新华书店
印刷单位 西安文化彩印厂
版 次 2013年9月第1版 2013年9月第1次印刷
开 本 787毫米×1092毫米 1/16 印张 17
字 数 402千字
印 数 1~3000册
定 价 30.00元

ISBN 978-7-5606-3173-8/TN

XDUP 3465001-1

*** 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

近年来,数字电子技术发展十分迅速,出现了新的分析、设计方法和大量新的器件,这对“数字电子基础”课程的教学提出了新的要求。为了保证理论完整的基础上,注重实用性和新颖性,重点介绍数字电子技术的基本原理,侧重介绍集成电路的逻辑功能和应用,目的是使学生在掌握基本电路的分析和设计的基础上,能对集成电路应用自如,为以后的学习、工作奠定坚实的基础。

本书内容由浅入深、重点突出,对基本理论、分析和设计方法均进行了总结并配有相关例题,期望读者通过简单明了的教学内容,掌握数字电子技术的基础知识,以提高学习效率和质量。

本书的主要内容如下:

第1章介绍数制及其转换技术、编码技术。

第2章介绍逻辑函数的基本概念、表示方法、基本的逻辑运算和逻辑函数的化简方法。

第3章介绍集成逻辑门、组合逻辑电路的分析与设计、编码器、译码器、数据选择器、数据分配器、算术运算电路以及竞争与冒险的识别和消除。

第4章介绍时序逻辑电路的基本概念、触发器、时序逻辑电路的分析方法、寄存器、计数器和同步时序逻辑电路的设计方法。

第5章介绍施密特触发器、单稳态触发器、多谐振荡器、555定时器及其应用。

第6章介绍RAM随机读/写存储器、只读存储器、现场可编程逻辑阵列、通用阵列逻辑以及现场可编程门阵列。

第7章介绍数/模和模/数转换原理及应用。

第8章介绍EDA概述、VHDL的程序结构、VHDL的常用语句以及VHDL设计案例。

本书由劳有兰、王翠莲主编,由覃金飞、张连福、王玥和潘绍明参编。其中,第1章和第2章由王翠莲编写,第3章由覃金飞编写,第4章和第8章由劳有兰编写,第5章由王玥编写,第6章由潘绍明编写,第7章由张连福编写。

本书在编写过程中,得到了广西科技大学电气工程学院领导和其他同事的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2013年6月

第 1 章 数制与编码	(1)
1.1 绪论	(1)
1.1.1 模拟电子技术和数字电子技术	(1)
1.1.2 数字电路的发展趋势与分类	(1)
1.1.3 数字电路的特点	(3)
1.2 数制及其转换	(4)
1.2.1 进位计数制	(4)
1.2.2 进位计数制的相互转换	(5)
1.2.3 原码、反码与补码	(7)
1.3 编码	(8)
1.3.1 二进制编码	(8)
1.3.2 二-十进制编码	(8)
1.3.3 字符编码	(10)
本章小结	(11)
思考与练习题	(12)
第 2 章 逻辑代数	(13)
2.1 概述	(13)
2.1.1 逻辑函数的基本概念	(13)
2.1.2 逻辑函数的表示方法	(13)
2.2 基本逻辑运算	(15)
2.2.1 基本与、或、非运算	(15)
2.2.2 复合逻辑运算	(17)
2.3 逻辑代数的基本定律	(19)
2.4 逻辑函数的标准形式	(21)
2.5 逻辑函数的几种表示方法间的相互转换	(22)
2.6 逻辑函数的化简	(25)
2.6.1 逻辑函数最简的概念	(25)
2.6.2 代数化简逻辑函数	(26)
2.6.3 逻辑函数的卡诺图化简法	(29)
本章小结	(35)
思考与练习题	(35)
第 3 章 组合逻辑电路	(40)
3.1 集成逻辑门	(40)
3.1.1 TTL 逻辑门电路	(40)
3.1.2 TTL 集成逻辑门电路	(44)

3.1.3	CMOS 集成逻辑门电路	(52)
3.1.4	CMOS 数字集成电路的特点与系列	(58)
3.1.5	TTL 电路和 CMOS 电路的接口	(61)
3.2	组合逻辑电路的分析与设计	(65)
3.2.1	组合逻辑电路概述	(65)
3.2.2	组合逻辑电路的分析	(65)
3.2.3	组合逻辑电路设计	(68)
3.3	组合逻辑模块及其应用	(70)
3.3.1	编码器	(70)
3.3.2	译码器	(73)
3.3.3	数据分配器	(76)
3.3.4	数据选择器	(77)
3.3.5	算术运算电路	(79)
3.3.6	一位数值比较器	(80)
3.4	组合逻辑电路中的竞争冒险	(81)
3.4.1	产生竞争冒险的原因	(81)
3.4.2	竞争冒险的判断	(82)
3.4.3	消去竞争冒险的方法	(83)
	本章小结	(85)
	思考与练习题	(86)
第 4 章	时序逻辑电路	(93)
4.1	时序逻辑电路的基本概念	(93)
4.2	触发器	(94)
4.2.1	基本 RS 触发器	(95)
4.2.2	同步触发器	(99)
4.2.3	主从触发器	(106)
4.2.4	主从 JK 触发器	(108)
4.2.5	边沿触发器	(111)
4.2.6	不同功能触发器间的相互转换	(116)
4.3	时序逻辑电路的分析方法	(119)
4.3.1	同步时序逻辑电路分析举例	(120)
4.3.2	异步时序逻辑电路分析举例	(121)
4.4	寄存器	(123)
4.4.1	数码寄存器	(123)
4.4.2	移位寄存器	(124)
4.4.3	集成寄存器 74LS175、74LS194	(125)
4.5	计数器	(126)
4.5.1	二进制计数器	(127)
4.5.2	非二进制计数器	(130)
4.5.3	集成计数器	(131)

4.6 同步时序逻辑电路的设计方法	(137)
本章小结	(140)
思考与练习题	(141)
第5章 脉冲波形的产生与变换	(150)
5.1 概述	(150)
5.2 施密特触发器	(150)
5.2.1 用门电路构成的施密特触发器	(150)
5.2.2 施密特触发器的典型应用	(152)
5.3 单稳态触发器	(154)
5.3.1 单稳态触发器的基本特点	(154)
5.3.2 用门电路构成的单稳态触发器	(154)
5.4 多谐振荡器	(159)
5.4.1 多谐振荡器的基本特点	(159)
5.4.2 用门电路构成的多谐振荡器	(159)
5.4.3 用施密特触发器构成的多谐振荡器	(160)
5.4.4 用石英晶体构成的多谐振荡器	(161)
5.5 555 定时器及其应用	(162)
5.5.1 555 定时器的内部结构	(162)
5.5.2 555 定时器的工作原理	(163)
5.5.3 用 555 定时器构成的单稳态触发器	(163)
5.5.4 用 555 定时器构成的多谐振荡器	(165)
5.5.5 用 555 定时器构成的施密特触发器	(166)
本章小结	(167)
思考与练习题	(168)
第6章 可编程逻辑电路	(172)
6.1 概述	(172)
6.2 RAM 随机读/写存储器	(172)
6.2.1 RAM 的结构	(172)
6.2.2 RAM 的存储元	(174)
6.2.3 RAM 存储容量的扩充	(175)
6.3 只读存储器	(177)
6.3.1 ROM 的分类	(177)
6.3.2 ROM 的结构与工作原理	(178)
6.3.3 ROM 应用举例	(182)
6.4 现场可编程逻辑阵列(FPLA)	(184)
6.5 通用阵列逻辑(GAL)	(185)
6.5.1 GAL 器件的分类和主要参数	(185)
6.5.2 GAL 器件的基本结构	(186)
6.6 现场可编程门阵列(FPGA)	(192)
本章小结	(196)

思考与练习题	(197)
第7章 D/A转换器与A/D转换器	(199)
7.1 概述	(199)
7.2 D/A转换器	(199)
7.2.1 权电阻网络D/A转换器	(199)
7.2.2 倒T型电阻网络D/A转换器	(201)
7.2.3 权电流型D/A转换器	(201)
7.2.4 具有双极性输出的D/A转换器	(202)
7.2.5 D/A转换器的主要技术指标	(203)
7.3 模拟量到数字量的转换(A/D)	(204)
7.3.1 模/数转换的基本概念	(204)
7.3.2 并联比较型A/D转换器	(206)
7.3.3 逐次逼近型A/D转换器	(207)
7.3.4 双积分型A/D转换器	(208)
7.3.5 A/D转换器的主要技术指标	(209)
本章小结	(210)
思考与练习题	(210)
第8章 VHDL硬件描述语言	(213)
8.1 EDA概述	(213)
8.1.1 EDA技术及其特点	(213)
8.1.2 EDA设计方法	(213)
8.1.3 EDA软件设计开发工具	(216)
8.1.4 VHDL硬件描述语言	(217)
8.2 VHDL的程序结构	(218)
8.2.1 实体	(219)
8.2.2 结构体	(219)
8.2.3 库	(220)
8.2.4 程序包	(220)
8.2.5 配置	(221)
8.3 VHDL的常用语句	(222)
8.3.1 VHDL顺序语句	(222)
8.3.2 VHDL并行语句	(228)
8.4 VHDL设计案例	(237)
8.4.1 汽车尾灯控制电路设计	(237)
8.4.2 8位串行数字密码锁设计	(243)
8.4.3 2FSK的数字调制设计	(249)
8.4.4 邮票自动售票机设计	(253)
本章小结	(260)
思考与练习题	(260)
参考文献	(264)

第1章 数制与编码

1.1 绪论

1.1.1 模拟电子技术和数字电子技术

电子技术可分为模拟电子技术和数字电子技术。模拟电子技术是一门研究对仿真信号进行处理的模拟电路的学科。它以半导体二极管、半导体三极管和场效应管为关键电子器件,包括功率放大电路、运算放大电路、反馈放大电路、信号运算与处理电路、信号产生电路、电源稳压电路等内容。数字电子技术主要研究各种逻辑门电路、集成器件的功能及应用、逻辑门电路组合和时序电路的分析和设计等。同样,测量信号可以分为模拟量和数字量。所谓模拟量,是指在时间和数值上都连续变化的物理量。表示模拟量的信号称为模拟信号(Analog Signals)。例如,模拟语言的音频信号(可以通过送话器把声音信号转换成相应的电信号)、模拟温度变化的(如从热电偶上得到的)电压信号等都属于模拟信号。图 1.1 所示的信号就是一个模拟信号。我们把处理模拟信号电子电路称为模拟电路,如各类放大电路、稳压电路等。所谓数字量,是指其变化在时间和数值上都是离散的或者是断续的物理量。表示数字量的信号称为数字信号(Digital Signals),如图 1.2 所示。我们把处理数字信号电子电路称为数字电路,如在本书后面章节中介绍的门电路、编码器、译码器和计数器等。由于数字电子技术的迅速发展,尤其是微型计算机在自动控制和自动检测系统中的广泛应用,用数字信号代替模拟信号的情况也更加普遍。故通常会将模拟信号转化为数字信号,以便于信号的存储、分析和传输等。

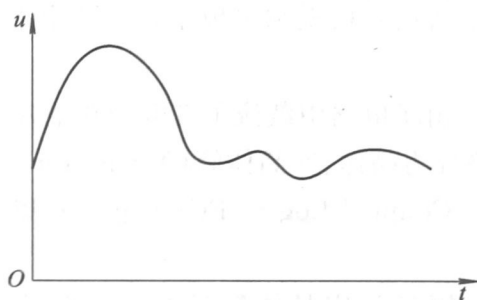


图 1.1 模拟信号

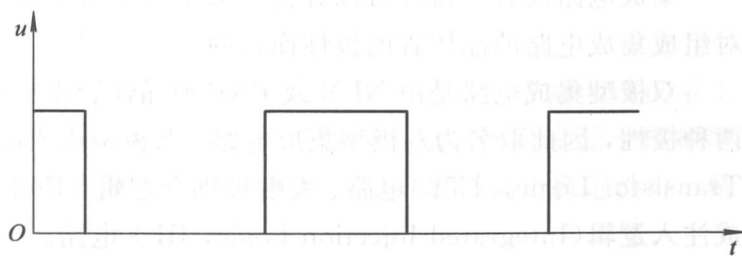


图 1.2 数字信号

1.1.2 数字电路的发展趋势与分类

1. 数字电路的发展

数字电路的发展经历了由电子管、半导体分立器件到集成电路的过程。由于集成电路的发展非常迅速,很快占据主导地位,所以数字电路的主流形式是数字集成电路。从 20 世

纪 60 年代开始, 数字集成器件主要是用晶体管工艺制成的小规模逻辑器件, 随后发展到中规模逻辑器件; 20 世纪 70 年代末, 微处理器的出现使数字集成电路的性能发生了质的飞跃; 从 20 世纪 80 年代中期开始, 超大规模集成电路、专用集成电路制作技术日益成熟。电子计算机是数字电路应用的典型代表, 并随着数字电子技术的发展而发展。数字电路的发展不仅表现在集成度方面, 而且在半导体器件的材料、结构、生产工艺上均有体现。早期的逻辑门电路是 TTL 型逻辑门电路, 后来随着其工艺的不断改进而改进。随着 MOS 工艺特别是 CMOS 工艺的发展, 数字集成电路集成度越来越高, 工作速度越来越快, 功耗则越来越低。

2. 数字集成电路的分类

早期的逻辑门电路采用电阻、电容、二极管、晶体管等分立元件构成。1961 年美国德克萨斯仪器公司率先将数字电路的元器件和连线制作在同一硅片上, 构成一个具有特定功能的完整电子电路, 即集成电路(Integrated Circuit, IC)。与分立元件电路相比, 集成电路由于体积小、重量轻、性能可靠、价格便宜而得到了广泛应用。随着集成电路制造工艺的日益完善, 目前已能将数千万半导体晶体管集成在一片面积只有几十平方毫米的硅片上。数字集成电路种类很多, 下面介绍几种主要分类方式。

1) 按集成度分类

根据集成电路规模的大小, 通常将其分为小规模集成电路(Small Scale Integration Circuit, SSIC)、中规模集成电路(Medium Scale Integration Circuit, MSIC)、大规模集成电路(Large Scale Integration Circuit, LSIC)、超大规模集成电路(Very Large Scale Integration Circuit, VLSIC)。其分类依据是一片集成电路芯片上包含的逻辑门个数或元件个数。小规模集成电路 SSIC 通常集成的逻辑门个数或元件个数为 $10 \sim 100$ 元件/片; 中规模集成电路 MSIC 集成的逻辑门个数或元件个数为 $10^2 \sim 10^3$ 元件/片; 大规模集成电路集成的逻辑门个数或元件个数为 $10^3 \sim 10^4$ 元件/片; 超大规模集成电路集成的逻辑门个数或元件个数已经超过了 10^4 元件/片。本书主要对小规模集成电路(SSIC)进行介绍。

2) 按有源器件分类

集成电路按有源器件可以分为双极型和单极型两类。所谓双极型和单极型, 主要是针对组成集成电路的晶体管的极性而言的。

双极型集成电路是由 NPN 或 PNP 型晶体管组成的。由于电路中载流子有电子和空穴两种极性, 因此取名为双极型集成电路。双极型集成电路分为晶体管-晶体管(Transistor-Transistor Logic, TTL)电路、发射极耦合逻辑(Emitter Coupled Logic, ECL)电路和集成注入逻辑(Integrated Injection Logic, IIL)电路。

单极型集成电路是由 MOS 场效应晶体管组成的。因场效应晶体管只有多数载流子参与导电, 故称场效应晶体管为单极晶体管, 由这种单极晶体管组成的集成电路就称为单极型集成电路。单极型集成电路可以分为 PMOS、NMOS 和 CMOS 电路。PMOS(Positive channel Metal Oxide Semiconductor, P 沟道金属氧化物半导体)是指 N 型衬底、P 沟道, 靠空穴的流动运送电流的 MOS 管电路。NMOS(Negative channel Metal Oxide Semiconductor, N 沟道金属氧化物半导体)是指 P 型衬底、N 沟道, 靠电子的流动运送电流的 MOS 管电路。CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor,

互补金属氧化物半导体)由增强型 PMOS 和增强型 NMOS 组成,这两种电路在 CMOS 中始终处于互补的状态。

目前, TTL 和 CMOS 电路得到了广泛的应用。TTL 是出现较早的一种集成电路,按其消耗的功率(功耗)和工作速度可分为 74(普通或标准)系列、74H(High-speed, 高速)系列、74S(Schottky, 肖特基)系列、74LS(Low-power Schottky, 低功耗肖特基)系列、74AS(Advanced Schottky, 为进一步缩短传输延迟时间而设计的改进型)系列、74ALS(Advanced Low-power Schottky)系列等。它们的工作电压都是 5 V。

不同系列的 TTL 器件中,只要器件型号的后几位数码一样,则它们的逻辑功能、外形尺寸、引脚排列就完全相同。例如, 7420、74H20、74S20、74LS20、74ALS20 都是双四输入与非门,都采用 14 条引脚双列直插式封装,而且输入端、输出端、电源、地线的引脚位置也是相同的。

4000 系列是早期开发的 CMOS 电路,工作电压为 3~18 V。虽然 CMOS 出现得晚一些,但由于它有效地克服了 TTL 和 ECL 集成电路中存在的单元电路复杂、元件之间需外加电隔离、功耗大等影响集成密度提高的严重缺点,因而在向 LSIC 和 VLSIC 的发展中, CMOS 集成电路已占据了统治地位。

3) 按工作环境分类

按工作环境,数字集成电路可分为以下几类:

(1) 54 系列:工作环境温度为 $-50\sim 125\text{ }^{\circ}\text{C}$,电源电压范围为 4.5~5.5 V。

(2) 74 系列:工作环境温度为 $0\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$,电源电压范围为 4.75~5.75 V。

54 系列电路和 74 系列电路具有完全相同的电路结构和电气性能参数,所不同的是,54 系列比 74 系列的工作温度范围更宽,电源允许的工作范围更大。

4) 按电路逻辑功能分

按逻辑功能,数字集成电路可以分为组合逻辑电路、时序逻辑电路和接口电路。这部分内容将在后面的章节进行详细介绍。

1.1.3 数字电路的特点

与模拟电路相比,数字电路有如下特点。

(1) 稳定性好,精度高。由于只要能够正确区分 0 和 1 两种状态,电路就可以正常工作,因此,数字电路对元器件参数的精度、电源电压的稳定性等要求,都明显低于模拟电路。数字电路可以通过增加数字信号的位数提高精度,具有工作可靠性高、稳定性好、精度高等特点。

(2) 结构简单,便于批量生产。数字电路结构简单,体积小,通用性强,便于集成化、系列化、规模化生产,因此,制造成本低廉。

(3) 可编程性。现代数字系统设计,大多采用可编程逻辑器件(Programmable Logic Device, PLD)。用户可根据实际需要应用硬件描述语言(Hardware Description Language, HDL),在计算机上完成电路的设计(Design)和仿真(Simulation)。这不仅给产品研发带来了极大的方便,也有助于知识产权的保护。

(4) 速度快,功耗低。随着集成电路技术的发展,数字器件的速度越来越快,而功耗越

来越低,集成电路中的单管开关速度已高达 10^{-11} s,超大规模集成电路芯片的功耗已低至毫瓦级。由于具有精度高、抗干扰能力强、稳定性好、易于制造等特点,近年来数字电路得到了长足的发展,各种数字系统和数字设备已渗透到日常生活的各个领域,数字化已成为当今电子技术的发展趋势。

1.2 数制及其转换

1.2.1 进位计数制

1. 十进制计数制

人类的祖先在长期的生产劳动实践中学会了用十个指头计数,因而产生了我们最熟悉的十进制数。任意一个十进制数 $(S)_{10}$ 可以表示为

$$\begin{aligned}(S)_{10} &= k_n 10^{n-1} + k_{n-1} 10^{n-2} + \cdots + k_1 10^0 + k_0 10^{-1} + k_{-1} 10^{-2} + \cdots + k_{-m} 10^{-m-1} \\ &= \sum_{i=n}^{-m} k_i 10^{i-1}\end{aligned}\quad (1.1)$$

其中, k_i 可以是 $0\sim 9$ 十个数码中的任意一个; m 和 n 是正整数,表示权; (S) 的下标与式中的 10 是十进制的基数。通常采用下标法表示 S 的进制数,这里的下标是 10 ,表示 S 是个十进制数,后面介绍的二进制、八进制、十六进制都采用这种表示方法,后面不再赘述。由于这里的基数为 10 ,每个数位计满 10 就向高位进位,即逢十进一,所以称为十进制计数制。

【例 1.1】 将十进制数 2001.9 写成权表示的形式。

解 $(2001.9)_{10} = 2 \times 10^3 + 0 \times 10^2 + 0 \times 10^1 + 1 \times 10^0 + 9 \times 10^{-1}$

2. 二进制计数制

在数字系统中,为了便于工程实现,广泛采用二进制计数。这是因为,二进制表示的数的每一位只取数码 0 或 1 ,因而可以用具有两个不同稳定状态的电子元件来表示,并且数据的存储和传送也可用简单而可靠的方式进行。二进制的基数是 2 ,其计数规律是逢二进一。

任意一个二进制数可以表示成

$$\begin{aligned}(S)_2 &= k_n 2^{n-1} + k_{n-1} 2^{n-2} + \cdots + k_1 2^0 + k_0 2^{-1} + k_{-1} 2^{-2} + \cdots + k_{-m} 2^{-m-1} \\ &= \sum_{i=n}^{-m} k_i 2^{i-1}\end{aligned}\quad (1.2)$$

其中, k_i 只能取 0 或 1 ; m 、 n 为正整数,表示权。

【例 1.2】 将二进制数 1101.101 写成权表示的形式。

解 $(1101.101)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$

3. 八进制计数制和十六进制计数制

采用二进制计数制,对计算机等数字系统来说,运算、存储和传输极为方便,然而,二进制数书写起来很不方便。为此人们经常采用八进制计数制和十六进制计数制来进行书写

或打印。

任意一个八进制数可以表示成

$$(S)_8 = \sum_{i=n}^{-m} k_i 8^{i-1} \quad (1.3)$$

其中, k_i 可取 0, 1, 2, ..., 7 八个数之一; m 和 n 为正整数, 表示权。八进制数的计数规律为逢八进一。

【例 1.3】 将八进制数 $(67.731)_8$ 写成权表示的形式。

解 $(67.731)_8 = 6 \times 8^1 + 7 \times 8^0 + 7 \times 8^{-1} + 3 \times 8^{-2} + 1 \times 8^{-3}$

任意一个十六进制数可以表示成

$$(S)_{16} = \sum_{i=n}^{-m} k_i 16^{i-1} \quad (1.4)$$

其中, k_i 可取 0, 1, 2, ..., 9, A, B, C, D, E, F 等十六进制数码、字母之一; m 和 n 为正整数, 表示权。十六进制数的计数规律是逢十六进一。

【例 1.4】 将十六进制数 $(8AE6)_{16}$ 写成权表示的形式。

解 $(8AE6)_{16} = 8 \times 16^3 + A \times 16^2 + E \times 16^1 + 6 \times 16^0$

1.2.2 进位计数制的相互转换

人们习惯的是十进制数, 计算机采用的是二进制数, 人们书写时又多采用八进制数或十六进制数, 这就产生了各种进位计数制间的相互转换问题。

1. 八进制、十六进制与十进制数的转换

一个十进制整数转换成八进制表示的数时, 可按除 8 取余的方法进行。

【例 1.5】 将十进制数 $(725)_{10}$ 转换为八进制数。

解

8	7 2 5	余数 5
8	9 0	余数 2
8	1 1	余数 3
8	1	余数 1
	0	

转换结果得到 $(725)_{10} = (1325)_8$ 。

类似地, 一个十进制整数转换成十六进制数时, 可按除 16 取余的方法进行。

【例 1.6】 将十进制数 $(725)_{10}$ 转换为十六进制数。

解

16	7 2 5	余数 5
16	4 5	余数 13
16	2	余数 2
	0	

转换结果为 $(725)_{10} = (2D5)_{16}$ 。

一个十进制小数转换成等值的八进制数时, 可按乘 8 取整的方法进行。

【例 1.7】 将十进制数 $(0.7875)_{10}$ 转换为八进制数。

解	0.7875	
×	8	
	6.3000	整数 6
	0.3000	
×	8	
	2.4000	整数 2
	0.4000	
×	8	
	3.2000	整数 3
	⋮	

注意，小数转换不一定能算尽，只能算到一定精度的倍数为止，因此转换中会产生一些误差。不过当位数较多时，这个误差就很小了。因此转换结果为 $(0.7875)_{10} \approx (0.623)_8$ 。

一个十进制小数转换成等值的十六进制小数时，可按乘 16 取整的方法进行，其步骤与转换成八进制小数的过程相类似。

如果一个十进制数既有整数部分又有小数部分，可将整数部分和小数部分分别进行八进制或十六进制数的等值交换，然后合并就可得到结果。

八进制数或十六进制数转换成等值的十进制数时，可按权相加的方法进行。

【例 1.8】 将 $(167)_8$ 、 $(0.42)_8$ 、 $(1C4)_{16}$ 和 $(0.68)_{16}$ 转换成十进制数。

解

$$(167)_8 = 1 \times 8^2 + 6 \times 8^1 + 7 \times 8^0 = 64 + 48 + 7 = (119)_{10}$$

$$(0.42)_8 = 4 \times 8^{-1} + 2 \times 8^{-2} = 0.5 + 0.03125 = (0.53125)_{10}$$

$$(1C4)_{16} = 1 \times 16^2 + 12 \times 16^1 + 4 \times 16^0 = 256 + 192 + 4 = (452)_{10}$$

$$(0.68)_{16} = 6 \times 16^{-1} + 8 \times 16^{-2} = 0.375 + 0.03125 = (0.40625)_{10}$$

2. 八进制、十六进制与二进制数的转换

由于数 $2^3 = 8$ ， $2^4 = 16$ ，所以一位八进制数所能表示的数值恰好相当于三位二进制数能表示的数值，而一位十六进制数与四位二进制数能表示的数值正好相当，因此八进制、十六进制与二进制数之间的转换极为方便。例如：

【例 1.9】 将 $(67.731)_8$ 和 $(3AB4)_{16}$ 转换成二进制数。

解

$$(67.731)_8 = (110111.111011001)_2$$

$$(3AB4)_{16} = (0011101010110100)_2$$

反之，由二进制数转换成八进制数时，只要从小数点开始，分别向左右两边把 3 位二进制数划为一组，最左和最右一组不足 3 位用 0 补充，然后每组用一个八进制数码替代即可。

【例 1.10】 将二进制数 $(11111101.01001111)_2$ 转换成八进制数。

解

$$(11111101.01001111)_2 = (375.236)_8$$

二进制数转换成十六进制数与此类似，只不过是四位二进制数码分为一组。

【例 1.11】 将二进制数 $(01111101.01001111)_2$ 转换成十六进制数。

解

$$(01111101.01001111)_2 = (7D.4F)_{16}$$

用八进制或十六进制书写要比用二进制书写简短，而且八进制或十六进制表示的数据信息很容易转换成二进制表示。这就是普遍使用八进制或十六进制的原因，当十进制数转换成二进制数时，也可采用八进制数或十六进制数作为中间过渡。

1.2.3 原码、反码与补码

在对数字进行算术运算时，必然涉及数的正负问题。在数字系统中，数的正负符号是用二进制数 0 和 1 表示的，一般将数的最高位作为数的正负符号位，用“0”表示正数，用“1”表示负数。通常将用“+”、“-”表示的正、负二进制数称为数的真值，而把符号位和数值一起编码表示的二进制数称为机器数或机器码。常用的机器码有原码、反码、补码三种。

1. 原码

用原码表示带符号的二进制数时，符号位为 0 表示正数，符号位为 1 表示负数。数值位保持不变。

例如， $X_1 = +1101$ ， $X_2 = -1101$ ， $X_3 = 0000$ ，则 $[X_1]_{\text{原}} = 01101$ ， $[X_2]_{\text{原}} = 11101$ 。

整数 0 的原码有两种形式： $[X_3]_{\text{原}} = 00000$ 或 $[X_3]_{\text{原}} = 10000$ 。

2. 反码

与原码相同，用 0 表示正数，用 1 表示负数，但其数值位与符号位相关，正数反码的数值位与原码数值位相同，而负数反码的数值位是原码的数值位按位取反。

例如， $X_1 = +1101$ ， $X_2 = -1101$ ，则 $[X_1]_{\text{反}} = 01101$ ， $[X_2]_{\text{反}} = 10010$ 。

同样地，整数 0 的反码也有两种形式： $00\cdots 0$ 和 $11\cdots 1$ 。

采用反码进行加减运算时，无论进行两数相加还是两数相减，均可通过加法实现。加减运算规则如下：

$$[X_1 + X_2]_{\text{反}} = [X_1]_{\text{反}} + [X_2]_{\text{反}}$$

$$[X_1 - X_2]_{\text{反}} = [X_1]_{\text{反}} + [-X_2]_{\text{反}}$$

运算时，符号位和数值位一样参加运算，当符号位有进位产生时，应将进位加到运算结果的最低位，才能得到正确的结果。

例如， $X_1 = +1110$ ， $X_2 = +1101$ ，求 $X_1 - X_2$ 和 $X_2 - X_1$ 均可通过反码相加实现，即

$$[X_1 - X_2]_{\text{反}} = [X_1]_{\text{反}} + [-X_2]_{\text{反}} = 01110 + 10010 = 00000$$

$$[X_2 - X_1]_{\text{反}} = [X_2]_{\text{反}} + [-X_1]_{\text{反}} = 01101 + 10001 = 11110$$

3. 补码

用补码表示带符号的二进制数时，符号位与原码、反码相同，数值位与符号位相关，正数补码的数值与原码、反码相同，而负数补码的数值是原码的数值位按位取反，并在最低位加 1。

整数 0 的补码只有一种形式，即 $00\cdots 0$ 。

采用补码进行加减运算时，可以将加减运算均通过加法实现，运算规则如下：

$$[X_1 + X_2]_{\text{补}} = [X_1]_{\text{补}} + [X_2]_{\text{补}}$$

$$[X_1 - X_2]_{\text{补}} = [X_1]_{\text{补}} + [-X_2]_{\text{补}}$$

运算时，若符号位有进位产生，则应将该进位丢掉后才能得到正确结果。

例如， $X_1 = +1110$ ， $X_2 = +1101$ ，求 $X_1 - X_2$ 和 $X_2 - X_1$ 可通过补码相加实现：

$$[X_1 - X_2]_{\text{补}} = [X_1]_{\text{补}} + [-X_2]_{\text{补}} = 01110 + 10011 = 00001$$

$$[X_2 - X_1]_{\text{补}} = [X_2]_{\text{补}} + [-X_1]_{\text{补}} = 01101 + 10010 = 11111$$

显然，采用补码进行加减运算最方便。

1.3 编 码

数字系统中的信息有两类：一类是数码信息，另一类是代码信息。数码信息多为数字，其表示方法为前述的原码、反码及补码等。字符等数字之外的信息也需要用一定位数的二进制数码表示，这个特定的二进制码称为代码。注意，“代码”和“数码”的含义不尽相同，代码是不同信息的代号，不一定有数的含义。一般地，一个码字是由若干信息位组成的，每位有 0 和 1 两种代码。 n 位代码可以组合成 2^n 个不同的码字，即它们可以代表 2^n 种不同信息。

给 2^n 种信息中的每个信息指定一个具体的码字去代表它，这一指定过程称为编码。由于指定的方法不是唯一的，故对一组信息存在着多种编码方案。

数字系统中常用的编码有两类，一类是二进制编码，另一类是二-十进制编码。

1.3.1 二进制编码

在二进制编码中，自然二进制码是最简单的一种。它的结构形式与二进制数完全相同。表 1.1 列出了 4 位自然二进制码，其中每位代码都有固定权值，这种代码称为有权码，各信息位的权值为 2^i (i 是码元位序， $i=0, 1, \dots, n-1$)。

表 1.1 两种 4 位二进制编码

十进制数	自然二进制码	循环二进制码	十进制数	自然二进制码	循环二进制码
0	0000	0000	8	1000	1100
1	0001	0001	9	1001	1101
2	0010	0011	10	1010	1111
3	0011	0010	11	1011	1110
4	0100	0110	12	1100	1010
5	0101	0111	13	1101	1011
6	0110	0101	14	1110	1001
7	0111	0100	15	1111	1000

另一种二进制编码是循环二进制码，简称循环码，其特性是任何相邻的两个码字中，仅有一位代码不同，其他位代码则相同，因此循环码又称为单位距离码。例如，表 1.1 中，7 和 8 是相邻的两个代码，7 的代码是 0100，8 的代码是 1100，仅有最高位代码不同。循环码的编码方法不是唯一的，四位循环码就有许多种，表 1.1 所示的是最基本的一种。循环码是无权码，每一位都没有固定的权值。

1.3.2 二-十进制编码

数字电路处理的是二进制数码，而人机界面中进行输入和输出的是十进制数。为使数字系统能够传递、处理十进制数，就必须把十进制数的各个数码用二进制代码的形式表示

出来。这便是用二进制代码对十进制数进行的编码,简称 BCD 码。BCD 码具有二进制码的形式(四位二进制码),又有十进制数的特点(每四位二进制码是一位十进制数)。

十进制数共有 10 个数码,需要用 4 位二进制代码来表示。4 位二进制码可以有 16 种组合,而表示十进制数只需要 10 种组合,因此用 4 位二进制码来表示十进制数有多种选取方式。表 1.2 列出了几种常用的 BCD 码与其相应的十进制数。BCD 码也分为有权码和无权码两大类。

在采用有权码的一些方案中,用得最普遍的是 8421 码,即四个二进制,其他的编码方法还有 2421 码、5211 码等。其具体编码值分配如表 1.2 所示。

表 1.2 常用 BCD 码

十进制数	8421 码	2421 码	5211 码	余 3 码	格雷码
0	0000	0000	0000	0011	0000
1	0001	0001	0001	0100	0001
2	0010	0010	0011	0101	0011
3	0011	0011	0101	0110	0010
4	0100	0100	0111	0111	0110
5	0101	1011	1000	1000	1110
6	0110	1100	1010	1001	1010
7	0111	1101	1100	1010	1000
8	1000	1110	1110	1011	1100
9	1001	1111	1111	1100	0100

把一个十进制数变成它的 8421 码时,十进制数的每一位都单独进行变换。例如 1592 变为相应的 8421 码表示,结果为 0001 0101 1001 0010;相反的转换过程也类似,例如 0110 1000 0100 0000 变为十进制数,结果应为 6840。

8421 码的主要缺点是实现加法运算的规则比较复杂,当两数相加后大于 9 时还需要对运算结果进行修正。

另外,两种有权 BCD 码 2421 码和 5211 码的共同特点是:它们的 0 和 9、1 和 8、2 和 7、3 和 6、4 和 5 互为反码,任何两个这样的编码值相加等于 9 时,结果的四个二进制位一定为 1111,这对求取 10 的补码是很方便的。

在采用无权码的一些方案中,用得比较多的是余 3 码和格雷码。

余 3 码是在 8421 码的基础上,把每个代码都加 0011 码而形成的。它的主要优点是执行十进制数相加时,能正确地产生进位信号,而且还给减法运算带来了方便。

格雷码的编码规则是使任何两个相邻的代码只有一个二进制位的状态不同,其余三个二进制位必须有相同的状态。这种编码方法的好处是:从某一编码变到下一个相邻的编码时,只有一位的状态发生变化,有利于得到更好的译码波形。格雷码是一种循环码。