



普通高等教育“十二五”规划教材

数字电子技术基础

赵莹 陈英俊 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十二五”规划教材

数字电子技术基础

主 编 赵 莹 陈英俊
副主编 梁迎春 曲萍萍 吴海涛
参 编 张 炜 危厚琴 郑 娜 徐 宇



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。本书的特点是：

① 编排了大量的应用实例，使理论和实践联系更加紧密。

② 引入了 VHDL 语言基础、EDA 软件 MAX + plus II 和可编程逻辑器件 (PLD) 等的介绍，使读者了解现代数字系统的设计方法。

全书共分 10 章，分别是数字电路基础、逻辑代数基础、集成逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲波形发生器与整形电路、半导体存储器和可编程逻辑器件、数/模和模/数转换器、数字系统设计基础。每节有练习与思考，每章有小结和习题，书后有附录。本书内容丰富实用，有利于培养学生的技术应用能力。

本书可作为高等学校电子信息类、计算机类、自动化类和电气类等专业的“数字电子技术基础”、“数字逻辑电路”等课程的教材，也可供从事电子技术的相关人员参考。

本书配有免费电子课件，欢迎选用本书作教材的老师登录 www.cmpedu.com 注册下载或发邮件到 xufan666@163.com 索取。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字电子技术基础/赵莹, 陈英俊主编. —北京: 机械工业出版社, 2012. 12

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-40841-3

I. ①数… II. ①赵…②陈… 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 (2012) 第 305663 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 徐 凡 责任编辑: 徐 凡 韩 静

版式设计: 霍永明 责任校对: 张 媛

封面设计: 张 静 责任印制: 乔 宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

184mm × 260mm · 18 印张 · 445 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-40841-3

定价: 33.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着科学技术的飞速发展，电子技术在各行各业的应用越来越广泛，已经成为人们生产生活中不可缺少的一项重要技术。20 世纪 80 年代以来，由于数字集成电路和计算机技术突飞猛进的发展，数字电子技术正扮演着越来越重要的角色。为了适应科学技术发展和满足生产实际的需求，数字电子技术已成为高等学校人才培养课程中一门重要的技术基础课，是后续电力电子技术、单片机原理及应用、嵌入式系统设计等专业课必备的基础课。为了适应应用型本科院校培养面向应用的实用型高级人才的目标，为了使数字电子技术课程的教学内容和教学体系不断完善，并能及时反映日新月异的电子新技术、新器件、新应用，编者结合多年的实践教学经验，特编写了本书。

本书教学时数在 60 ~ 80 课时，实验教学在 20 学时左右，各专业可根据专业需求合理安排讲授内容，书中带“*”号的章节为选讲内容。

本书在编写过程中注意了以下几点：

1) 侧重基本概念、基本理论和基本分析方法的论述，内容安排尽可能由浅入深、循序渐进、通俗易懂，从而便于自学。

2) 叙述尽可能做到概念准确、深入浅出，行文流畅。

3) 在理论阐述的基础上，编排了一定数量的应用实例，把课程与工程实际联系起来，以便提高学生的学习兴趣 and 电路识图能力。

4) 内容取舍上兼顾了经典数字电子技术理论与最新现代电子技术的结合，增加了 VHDL 语言基础、EDA 软件 MAX + plus II 和可编程逻辑器件 (PLD) 等的介绍。利用 PLD 和 EDA 技术可以实现多种数字逻辑电路，使读者了解现代数字系统的设计方法。对集成电路器件则侧重讲述了其外部特性，目的在于体现其应用性。

本书由北华大学赵莹和广东肇庆学院陈英俊任主编，北华大学曲萍萍、广东肇庆学院梁迎春和吴海涛任副主编。北华大学郑娜编写第 1、10 章，危厚琴编写第 3 章，赵莹编写第 4 章，张炜编写第 5 章，曲萍萍编写第 6 章，徐宇编写第 7 章，广东肇庆学院陈英俊编写第 2 章、附录，梁迎春编写第 8 章，吴海涛编写第 9 章，全书由赵莹统稿。

本书在编写过程中借鉴了许多参考资料，在此对参考资料的作者一并表示感谢。

限于经验和水平，书中错误与疏漏在所难免，恳请广大读者提出宝贵意见。

编 者

目 录

前言

第 1 章 数字电路基础	1
1.1 数字信号与数字电路	1
1.1.1 数字技术的发展及其应用	1
1.1.2 数字信号和模拟信号	1
1.1.3 数字电路的特点和分类	2
练习与思考	2
1.2 数制和码制	3
1.2.1 数制	3
1.2.2 不同数制间的转换	4
1.2.3 二进制代码	6
练习与思考	8
1.3 二进制的运算方法	8
1.3.1 原码、反码和补码	8
1.3.2 二进制的算术运算	9
练习与思考	9
本章小结	10
习题	10
第 2 章 逻辑代数基础	12
2.1 概述	12
2.2 逻辑代数的基本运算	12
2.2.1 与运算	12
2.2.2 或运算	13
2.2.3 非运算	13
2.2.4 异或运算	14
2.2.5 同或运算	14
2.2.6 复合逻辑运算	14
练习与思考	16
2.3 逻辑代数的基本定律和常用公式	16
练习与思考	16
2.4 逻辑代数的三个基本规则	16
2.4.1 代入规则	16
2.4.2 反演规则	17
2.4.3 对偶规则	17
练习与思考	18
2.5 逻辑函数及其表示方法	18
2.5.1 最小项的定义及其性质	18

2.5.2 逻辑函数的最小项表达式	19
2.5.3 逻辑函数的表示方法及其相互 转换	19
练习与思考	21
2.6 逻辑函数的化简	21
2.6.1 逻辑函数的代数化简法	21
2.6.2 逻辑函数的卡诺图化简法	23
2.6.3 具有无关项的逻辑函数的卡诺 图化简法	26
练习与思考	27
2.7 硬件描述语言 VHDL 基础	27
2.7.1 VHDL 的主要构件	28
2.7.2 VHDL 的数据对象和数据类型	30
2.7.3 VHDL 的操作符	32
2.7.4 VHDL 的基本语句	33
2.8 MAX + plus II 介绍及应用	37
2.8.1 MAX + plus II 的使用方法	37
2.8.2 MAX + plus II 的设计过程	40
2.8.3 MAX + plus II 软件的基本操作 与应用	41
本章小结	54
习题	54
第 3 章 集成逻辑门电路	57
3.1 概述	57
3.2 基本逻辑门	57
3.2.1 二极管的开关特性	58
3.2.2 晶体管的开关特性	58
3.2.3 MOS 管的开关特性	59
3.2.4 分立元件门电路	59
练习与思考	61
3.3 TTL 集成逻辑门电路	62
3.3.1 TTL 与非门电路	62
3.3.2 其他功能 TTL 门电路	67
3.3.3 集电极开路门和三态门电路	68
3.3.4 TTL 集成电路和其他双极型集 成电路	71
3.3.5 TTL 集成逻辑门电路使用注意	

事项	72	练习与思考	107
练习与思考	73	4.6 数据选择器	107
3.4 CMOS 集成逻辑门电路	74	4.6.1 4 选 1 数据选择器	107
3.4.1 CMOS 反相器	74	4.6.2 8 选 1 数据选择器	108
3.4.2 CMOS 逻辑门电路	74	练习与思考	111
3.4.3 CMOS 漏极开路门和三态输出		4.7 数值比较器	111
CMOS 门电路	75	4.7.1 1 位数值比较器	111
3.4.4 CMOS 传输门	75	4.7.2 多位数值比较器	112
3.4.5 CMOS 电路产品系列	76	练习与思考	113
3.4.6 CMOS 集成逻辑门电路使用注		4.8 组合逻辑电路中的竞争冒险	113
意事项	77	4.8.1 什么是竞争冒险	114
练习与思考	77	4.8.2 竞争与冒险的识别	114
3.5 TTL 电路与 CMOS 电路的接口	78	4.8.3 消除竞争冒险的方法	115
3.6 正负逻辑规定及基本逻辑门电路的		练习与思考	116
等效符号	78	4.9 组合电路应用举例	116
3.6.1 正负逻辑规定	78	4.9.1 足球评委会判罚电路	116
3.6.2 基本逻辑门电路的等效符号	79	4.9.2 智力竞赛抢答电路	116
练习与思考	80	4.9.3 水位检测电路	117
3.7 用 VHDL 描述逻辑门电路	80	4.10 用 VHDL 描述组合逻辑电路	118
3.7.1 门电路的 VHDL 描述	80	本章小结	119
3.7.2 三态输出门电路的 VHDL 描述	81	习题	120
本章小结	81	第 5 章 触发器	125
习题	82	5.1 概述	125
第 4 章 组合逻辑电路	86	5.2 基本 RS 触发器	125
4.1 概述	86	5.2.1 由与非门构成的基本 RS 触	
4.2 组合逻辑电路的分析和设计	86	发器	125
4.2.1 组合逻辑电路的分析	86	5.2.2 由或非门构成的基本 RS 触	
4.2.2 组合逻辑电路的设计	87	发器	127
练习与思考	91	5.2.3 基本 RS 触发器的主要特点	128
4.3 加法器	92	5.2.4 集成基本 RS 触发器	128
4.3.1 半加器和全加器	92	练习与思考	128
4.3.2 加法器	93	5.3 同步触发器	129
练习与思考	94	5.3.1 同步 RS 触发器	129
4.4 编码器	94	5.3.2 同步 D 触发器	130
4.4.1 二进制编码器	95	练习与思考	131
4.4.2 二-十进制编码器	95	5.4 边沿触发器	131
4.4.3 优先编码器	96	5.4.1 边沿 JK 触发器	131
练习与思考	99	5.4.2 边沿 D 触发器	134
4.5 译码器和数据分配器	99	练习与思考	136
4.5.1 二进制译码器	99	5.5 触发器的逻辑功能	137
4.5.2 二-十进制译码器	103	5.5.1 D 触发器	137
4.5.3 显示译码器	104	5.5.2 JK 触发器	137
4.5.4 数据分配器	106	5.5.3 T 触发器	137

5.5.4 T'触发器	138	7.2.2 用 555 定时器组成单稳态触发器电路	189
5.5.5 RS 触发器	138	7.2.3 用 555 定时器组成施密特触发器	191
练习与思考	138	7.2.4 用 555 定时器组成多谐振荡器	192
5.6 触发器逻辑功能的转换	138	练习与思考	194
练习与思考	140	7.3 集成和其他单稳态触发器	194
5.7 触发器的应用举例	140	7.3.1 微分型单稳态触发器	194
5.8 四种基本触发器的 VHDL 描述	142	7.3.2 集成单稳态触发器	196
练习与思考	144	练习与思考	198
本章小结	145	7.4 集成施密特触发器	199
习题	145	练习与思考	200
第 6 章 时序逻辑电路	149	7.5 其他多谐振荡器电路	200
6.1 概述	149	7.5.1 用 CMOS 反相器组成的多谐振荡器	200
6.2 时序逻辑电路的分析	149	7.5.2 石英晶体多谐振荡器	201
6.2.1 同步时序逻辑电路的分析	150	练习与思考	203
6.2.2 异步时序逻辑电路的分析	151	7.6 脉冲产生与整形电路的应用	203
练习与思考	152	本章小结	207
6.3 同步时序逻辑电路的设计	152	习题	207
6.3.1 同步时序逻辑电路的设计步骤	152	第 8 章 半导体存储器和可编程逻辑器件	210
6.3.2 同步时序逻辑电路的设计举例	153	8.1 概述	210
练习与思考	157	8.2 只读存储器	210
6.4 寄存器	157	8.2.1 固定 ROM	210
6.4.1 数码寄存器	157	8.2.2 可编程 ROM	213
6.4.2 移位寄存器	158	8.2.3 可擦除可编程 ROM	214
练习与思考	160	练习与思考	216
6.5 计数器	160	8.3 随机存取存储器	216
6.5.1 二进制计数器	160	8.3.1 静态随机存储器	216
6.5.2 十进制计数器	165	8.3.2 动态随机存储器	217
6.5.3 N 进制计数器	169	8.3.3 存储容量的扩展方法	218
6.5.4 环形计数器和扭环型计数器	175	练习与思考	219
练习与思考	177	8.4 可编程逻辑器件	219
6.6 时序逻辑电路应用举例	178	8.4.1 PLD 基本电路的结构、功能与习惯表示法	219
6.6.1 8 路彩灯控制器	178	8.4.2 可编程逻辑阵列	221
6.6.2 顺序脉冲发生器	179	8.4.3 可编程阵列逻辑	222
6.6.3 数字钟	179	8.4.4 通用阵列逻辑	225
6.7 用 VHDL 描述时序逻辑电路	180	8.4.5 在系统可编程逻辑器件	227
6.7.1 移位寄存器的 VHDL 描述	180	8.4.6 复杂可编程逻辑器件	230
6.7.2 计数器的 VHDL 描述	182	8.4.7 现场可编程门阵列	231
本章小结	182	8.4.8 在系统可编程通用数字开关	232
习题	183		
第 7 章 脉冲波形发生器与整形电路	187		
7.1 概述	187		
7.2 555 定时器及其应用	188		
7.2.1 555 定时器的结构及工作原理	188		

练习与思考	233	* 第 10 章 数字系统设计基础	263
8.5 用存储器实现组合逻辑函数	233	10.1 概述	263
本章小结	237	10.1.1 自下而上设计方法	263
习题	239	10.1.2 自上而下设计方法	264
第 9 章 D/A 和 A/D 转换器	242	10.2 设计举例	265
9.1 概述	242	10.3 数字系统设计参考题目	272
9.2 D/A 转换器	242	10.3.1 800m 赛跑第一名计时电路	272
9.2.1 权电阻网络 D/A 转换器	243	10.3.2 双向流动彩灯控制器的设计	272
9.2.2 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	243	10.3.3 数显脉搏测试电路的设计	272
9.2.3 权电流型 D/A 转换器	245	10.3.4 逻辑电路控制的公共汽车语 音报站器	272
9.2.4 D/A 转换器的主要性能指标	246	10.3.5 家用风扇控制器	273
9.2.5 集成 D/A 转换器及其应用	246	10.3.6 视频信号切换器	273
练习与思考	250	10.3.7 十六路数显报警器	273
9.3 A/D 转换器	250	10.3.8 数字式函数发生器	273
9.3.1 A/D 转换的基本原理	250	附录	275
9.3.2 并行比较型 A/D 转换器	252	附录 A TTL、CMOS 和 ECL 集成电路主 要性能参数	275
9.3.3 逐次比较型 A/D 转换器	253	附录 B 常用逻辑符号对照表	276
9.3.4 双积分型 A/D 转换器	254	附录 C 国产半导体集成电路型号命名 法	278
9.3.5 A/D 转换器的主要性能指标	257	参考文献	280
9.3.6 集成 A/D 转换器及其应用	257		
练习与思考	261		
本章小结	262		
习题	262		

第 1 章 数字电路基础

本章首先介绍数字技术的发展及其应用、数字信号和模拟信号、数字电路的特点和分类，然后介绍数字系统中常用的数制和码制，并介绍不同数制之间的转换，最后介绍无符号和带符号的二进制算术运算。

1.1 数字信号与数字电路

1.1.1 数字技术的发展及其应用

电子技术是 20 世纪发展最迅速、应用最广泛的技术之一，使工业、农业、科研、教育、金融、医疗、文化娱乐以及人们的日常生活发生了翻天覆地的变化。特别是数字电子技术发展最为迅速，已成为当今电子技术的发展潮流。电子技术的发展是以电子器件的发展为基础的，从 20 世纪初的电子管和 20 世纪 50 年代的晶体管到 20 世纪 60 年代的集成电路以及 20 世纪 70 年代的微处理器，电子技术发生了异常迅速的变化，其发展趋势是向系统集成、大规模、低功耗、高速度、可编程、可测试、多值化等方面发展。

数字技术的典型应用是电子计算机，计算机现在已成为各行各业必不可少的应用工具，它是伴随着电子技术的发展而发展的。由于数字系统具有可靠性高、保密性强、信息易于存储、处理和传输速度快等特点，使得数字技术在很多方面取代了传统的模拟技术，例如数码相机、数字电视等。但是无论数字技术如何发展，终将不能完全取代模拟技术，因为自然界中大多数的物理量是模拟的，数字技术不能直接接受模拟信号进行处理，也无法将处理后的信号直接送到外部物理世界。实际电子系统一般是模拟电路和数字电路的结合，它们之间是相辅相成的，发展数字技术的同时，也要重视模拟技术的发展。

1.1.2 数字信号和模拟信号

电子电路中的信号可分为两类。一类是时间和幅值都是连续的信号，称为模拟信号(analog signal)，如温度、速率、压力、磁场、电场等物理量通过传感器变成的电信号，模拟语音的音频信号和模拟图像的视频信号等。对模拟信号进行传输、处理的电子电路称为模拟电路(analog circuit)，如放大电路、滤波器、信号发生器等。另一类是时间和幅值都是离散的(即不连续的)信号，称为数字信号(digital signal)。对数字信号进行传输、处理的电子电路称为数字电路(digital circuit)，如数字电子钟、数字万用表、数字电子计算机等都是由数字电路组成的。在数字电路中所关注的是输出与输入之间的逻辑关系，而不像模拟电路中要研究输出与输入之间信号的大小、相位变化等。

在数字电路中采用只有 0、1 组成的数字信号，一个 0 或一个 1 通常称为 1bit，有时也将一个 0 或一个 1 的持续时间称为一拍。这里的 0 和 1 主要表示两个对立的逻辑状态，例如，相当于电流的有和无、电压的高和低、开关的连接和断开，等等。

1.1.3 数字电路的特点和分类

1. 数字电路的特点

与模拟电路相比,数字电路具有以下特点。

(1) 稳定性高 由于数字系统只有0和1两种状态,对元件精度要求不高,允许有较大的误差,因此,一般而言,对于一个给定的输入信号,数字电路的输出总是相同的。而模拟电路的输出会随着输入信号、外界温度、电源电压以及器件老化等因素而变化。

(2) 可靠性强 因为传递、记录、加工的信息只有0和1,不是连续变化,所以数字系统抗干扰能力强,可靠性高。

(3) 保密性好 在进行数字量的传递时可进行加密处理,常用于军事、情报等方面。

(4) 经济性 数字电路结构简单,易于设计和制造,便于集成化生产,成本低廉。

(5) 通用性强 数字集成电路产品系列全,通用性强。

(6) 可编程性 现代数字系统设计多采用可编程逻辑器件,用户可根据需要在计算机上完成电路设计和仿真,然后再写入芯片,具有较大的方便性和灵活性。

(7) 高速度、低功耗 集成电路中单管的开关速度可以做到小于 10^{-11} s;在整体器件中,信号从输入到输出的传输时间可小于 2×10^{-9} s;百万门以上的超大规模集成芯片的功耗可低达毫瓦级。

2. 数字集成电路(digital integrated circuit)的分类

数字电路可分为分立元件电路和数字集成电路两大类。目前,分立元件电路基本上已被数字集成电路取代,按照集成度的不同,数字集成电路可分为以下几类:

1) 小规模集成电路(SSI),其集成度为1~12门/片,主要是逻辑单元电路,如各种逻辑门电路、集成触发器等。

2) 中规模集成电路(MSI),其集成度为12~99门/片,主要是逻辑功能器件,如译码器、编码器、加法器、寄存器、计数器等。

3) 大规模集成电路(LSI),其集成度为100~9999门/片,主要是数字逻辑系统,如中央处理器、存储器等。

4) 超大规模集成电路(VLSI),其集成度为10000~99999门/片,主要是高集成度的数字逻辑系统,如大型存储器、单片计算机等。

5) 甚大规模集成电路(ULSI),其集成度为大于 10^6 门/片,主要是可编程逻辑器件、多功能专用集成电路等。

练习与思考

1. 什么是数字信号?什么是模拟信号?两者的区别是什么?
2. 与模拟电路相比,数字电路具有哪些特点?
3. 数字电路中的0和1可表示什么意义?
4. 简述数字集成电路的分类。
5. 数字技术能否完全取代模拟技术?为什么?

1.2 数制和码制

1.2.1 数制

数制是计数进制的简称,人们最熟悉的是十进制,数字系统中用的是二进制,另外还有八进制、十六进制等。

1. 十进制

十进制是以10为基数的计数体制。在十进制中,有0、1、2、3、4、5、6、7、8、9共10个基本数码,计数规则为“逢十进一,借一当十”。

如用 K 表示数码,对于一个具有 n 位整数和 m 位小数的十进制数,可用下列按权展开式表示十进制数 N 。

$$\begin{aligned}(N)_{10} &= K_{n-1}10^{n-1} + K_{n-2}10^{n-2} + \cdots + K_010^0 + K_{-1}10^{-1} + \cdots + K_{-m}10^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} K_i 10^i\end{aligned}\quad (1-1)$$

式中, K_i 为第 i 位数码,可取0~9; 10^i 为十进制数第 i 位权值。

如十进制数453.67按权展开式为

$$(453.67)_{10} = 4 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 3 \times 10^0 + 6 \times 10^{-1} + 7 \times 10^{-2}$$

如用 R 表示 R 进制的基数,则式(1-1)可写成下面的通式:

$$(N)_R = \sum_{i=-m}^{n-1} K_i R^i$$

2. 二进制

二进制是以2为基数的计数体制,二进制只有0和1两个数字,进位规则是逢二进一,其按权展开式为

$$(N)_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} K_i 2^i$$

对于二进制数 $(1001.11)_2$,可表示为

$$(1001.11)_2 = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

式中, 2^3 、 2^2 、 2^1 、 2^0 、 2^{-1} 、 2^{-2} 为二进制数各位的权值。

3. 八进制

八进制是以8为基数的计数体制,在八进制中,有0、1、2、3、4、5、6、7共8个数字,进位规则是逢八进一,其按权展开式为

$$(N)_8 = \sum_{i=-m}^{n-1} K_i 8^i$$

对于八进制数 $(257.14)_8$,可表示为

$$(257.14)_8 = 2 \times 8^2 + 5 \times 8^1 + 7 \times 8^0 + 1 \times 8^{-1} + 4 \times 8^{-2}$$

式中, 8^2 、 8^1 、 8^0 、 8^{-1} 、 8^{-2} 为八进制数各位的权值。

4. 十六进制

十六进制是以16为基数的计数体制,在十六进制中,有0、1、2、3、4、5、6、7、8、

9、A、B、C、D、E、F 共 16 个数字，进位规则是逢十六进一，其按权展开式为

$$(N)_{16} = \sum_{i=-m}^{n-1} K_i 16^i$$

对于十六进制数 $(2A7.1E)_{16}$ ，可表示为

$$(2A7.1E)_{16} = 2 \times 16^2 + 10 \times 16^1 + 7 \times 16^0 + 1 \times 16^{-1} + 14 \times 16^{-2}$$

式中， 16^2 、 16^1 、 16^0 、 16^{-1} 、 16^{-2} 为十六进制数各位的权值。

1.2.2 不同数制间的转换

1. 二进制、八进制和十六进制转换为十进制

把二进制、八进制和十六进制按权展开并相加，得到的就是其对应的十进制数。

【例 1-1】 将 $(101.01)_2$ 、 $(245.1)_8$ 、 $(4DE.2A)_{16}$ 转换为十进制数。

解： $(101.01)_2 = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = (5.25)_{10}$

$$(245.1)_8 = 2 \times 8^2 + 4 \times 8^1 + 5 \times 8^0 + 1 \times 8^{-1} = (165.125)_{10}$$

$$(4DE.2A)_{16} = 4 \times 16^2 + 13 \times 16^1 + 14 \times 16^0 + 2 \times 16^{-1} + 10 \times 16^{-2} = (1246.1640625)_{10}$$

2. 十进制转换为二进制、八进制和十六进制

十进制整数转换为二进制、八进制和十六进制数的方法是“除基取余法”，将十进制整数部分逐次被基数 R 除，每次除完所得余数便是要转换的数码，直到商为 0。第一个余数为最低位，最后一个余数为最高位。十进制小数转换为二进制、八进制和十六进制数采用“乘基取整法”，将小数部分连续乘以基数 R ，乘积的整数部分作为 R 进制的小数部分，第一个整数为最高位，最后一个整数为最低位。

【例 1-2】 将十进制数 $(126.125)_{10}$ 转换为二进制数。

解：(1) 整数部分转换，采用“除基取余法”，基数为 2。

2	126	.....	余数 $0=K_0$	最低位 (LSB)
2	63	.....	$1=K_1$	
2	31	.....	$1=K_2$	
2	15	.....	$1=K_3$	
2	7	.....	$1=K_4$	
2	3	.....	$1=K_5$	
2	1	.....	$1=K_6$	最高位 (MSB)
	0			

所以 $(126)_{10} = (1111110)_2$

(2) 小数部分，转换采用“乘基取整法”。

$0.125 \times 2 = 0.25$ 整数部分 $= 0 = K_{-1}$ 最高位 (MSB)

$0.25 \times 2 = 0.5$ 整数部分 $= 0 = K_{-2}$

$0.5 \times 2 = 1$ 整数部分 $= 1 = K_{-3}$ 最低位 (LSB)

所以 $(126.125)_{10} = (1111110.001)_2$

【例 1-3】 将十进制数 $(28.25)_{10}$ 转换为八进制数。

解：(1) 整数部分转换，采用“除基取余法”，基数为 8。

8	28	.....	余数 $4=K_0$	最低位 (LSB)
8	3	.....	$3=K_1$	最高位 (MSB)
	0			

所以 $(28)_{10} = (34)_8$

(2) 小数部分, 转换采用“乘基取整法”。

$$0.25 \times 8 = 2 \text{ 整数部分} = 2 = K_{-1}$$

所以 $(28.25)_{10} = (34.2)_8$

【例 1-4】 将十进制数 $(246.125)_{10}$ 转换为十六进制数。

解: (1) 整数部分转换, 采用“除基取余法”, 基数为 16。

16	246	.....	余数 $6=K_0$	最低位 (LSB)
16	15	.....	$F=K_1$	最高位 (MSB)
	0			

所以 $(246)_{10} = (F6)_{16}$

(2) 小数部分, 转换采用“乘基取整法”。

$$0.125 \times 16 = 2 \text{ 整数部分} = 2 = K_{-1}$$

所以 $(246.125)_{10} = (F6.2)_{16}$

3. 二进制和八进制、十六进制之间的转换

(1) 二进制和八进制的转换 3 位二进制数共有 8 种状态, 正好与 0~7 这 8 个数相对应。二进制转换为八进制时, 整数部分从低位开始, 每 3 个二进制数为一组, 最后一组不足 3 个时, 加 0 补足 3 个; 小数部分从高位开始, 每 3 个二进制数为一组, 最后一组不足 3 个时, 加 0 补足 3 个, 然后用对应的八进制数代替即可。八进制转换为二进制时, 用对应的二进制数代替八进制数即可。

【例 1-5】 将二进制数 $(11011001.10111)_2$ 转换为八进制数。

解:

011	011	001.	101	110
↓	↓	↓	↓	↓
3	3	1.	5	6

所以 $(11011001.10111)_2 = (331.56)_8$

(2) 二进制和十六进制的转换 4 位二进制数共有 16 种状态, 正好与 0~F 这 16 个数相对应。二进制转换为十六进制时, 整数部分从低位开始, 每 4 个二进制数为一组, 最后一组不足 4 个时, 加 0 补足 4 个; 小数部分从高位开始, 每 4 个二进制数为一组, 最后一组不足 4 个时, 加 0 补足 4 个, 然后用对应的十六进制数代替即可。十六进制转换为二进制时, 用对应的二进制数代替十六进制数即可。

【例 1-6】 将二进制数 $(111011001.10111)_2$ 转换为十六进制数。

解:

0001	1101	1001.	1011	1000
↓	↓	↓	↓	↓
1	D	9.	B	8

所以 $(111011001.10111)_2 = (1D9.B8)_{16}$

1.2.3 二进制代码

数字电路中处理的信息除了数值信息外，还有文字、符号以及一些特定的操作(如表示确认的回车操作)等。为了处理这些信息，必须将这些信息也用二进制数码来表示。这些特定的二进制数码称为这些信息的代码。这些代码的编制过程称为编码(coding)。

1. 二-十进制编码(BCD 码)

在数字电路中，十进制数除了可转换成为二进制数参加运算外，还可以直接用十进制数进行输入和运算。其方法是将十进制的 10 个数码分别用 4 位二进制代码表示，这种编码称为二-十进制编码(binary coded decimal coding)，简称 BCD 码。BCD 码有很多种形式，常用的有 8421 码、2421 码、5421 码、余 3 码和余 3 循环码等，见表 1-1。

表 1-1 常用 BCD 码

十进制数	8421 码	2421 码	5421 码	余 3 码	余 3 循环码
0	0000	0000	0000	0011	0010
1	0001	0001	0001	0100	0110
2	0010	0010	0010	0101	0111
3	0011	0011	0011	0110	0101
4	0100	0100	0100	0111	0100
5	0101	1011	1000	1000	1100
6	0110	1100	1001	1001	1101
7	0111	1101	1010	1010	1111
8	1000	1110	1011	1011	1110
9	1001	1111	1100	1100	1010
权	8421	2421	5421	无权码	无权码

在 8421 码中，10 个十进制数码与二进制数一一对应，即用二进制数的 0000 ~ 1001 来分别表示十进制数的 0 ~ 9。8421 码是一种有权码，各位的权从左到右分别为 8、4、2、1，所以根据代码的组成就可知道代码所代表的十进制数的值。设 8421 码的各位分别为 a_3 、 a_2 、 a_1 、 a_0 ，则它所代表的十进制数的值为

$$N = 8a_3 + 4a_2 + 2a_1 + 1a_0$$

对于 8421 码与十进制数之间的转换，只要直接按位转换即可。例如：

$$(753)_{10} = (0111\ 0101\ 0011)_{8421BCD}$$

4 位二进制数共有 16 种组合，即 0000 ~ 1111。8421BCD 码只利用了这 16 种组合中的前 10 种组合 0000 ~ 1001，其余 6 种组合 1010 ~ 1111 是无效的。从 16 种组合中选取 10 种不同的组合方式，可以得到其他二-十进制码，如 2421 码、5421 码等，2421 码、5421 码也是有码码。余 3 码是由 8421BCD 码加 3(0011)得到的，这是一种无权码。

【例 1-7】 将十进制数 $(683)_{10}$ 分别转换成 8421BCD 码、2421BCD 码、5421BCD 码、余 3 码和余 3 循环码。

解： $(683)_{10} = (011010000011)_{8421BCD\text{码}}$

$(683)_{10} = (110011100011)_{2421BCD\text{码}}$

$(683)_{10} = (100110110011)_{5421BCD码}$
 $(683)_{10} = (100110110110)_{余3码}$
 $(683)_{10} = (110111100101)_{余3循环码}$

2. 可靠性代码

代码在形成和传输过程中有可能产生错误，为了使代码形成时不易出差错，或在出现差错时容易发现并能及时校正，需要采用可靠性代码。常用的可靠性代码有格雷码、奇偶校验码等。

(1) 格雷码 格雷码也是一种常见的无权码，其编码方式见表 1-2。格雷码的特点是：从一个代码变为相邻的另一个代码时只有一位发生变化，这种特点称为逻辑上相邻。这是考虑到信息在传输过程中可能出错，为了减少错误而研究的一种编码形式。格雷码的缺点是与十进制之间不存在规律性的对应关系，不够直观。

表 1-2 格雷码

二进制码	格雷码	二进制码	格雷码
0000	0000	1000	1100
0001	0001	1001	1101
0010	0011	1010	1111
0011	0010	1011	1110
0100	0110	1100	1010
0101	0111	1101	1011
0110	0101	1110	1001
0111	0100	1111	1000

(2) 奇偶校验码 为了发现和校正错误，提高设备的抗干扰能力，常采用奇偶校验码。奇偶校验码由两部分组成，一部分是需要传送的信息本身，另一部分是位数为 1 位的奇偶检验位，其数值(0 或 1)应使整个代码中 1 的个数为奇数或偶数。1 的个数为奇数的称为奇校验，1 的个数为偶数的称为偶校验。表 1-3 为 8421BCD 码的奇偶校验码。如果奇校验码在传输过程中本来应该输出 0，表示传输的数据应该有奇数个 1，但输出却是 1，说明传输的数据有偶数个 1，出现了错误，需要及时校正。

表 1-3 8421BCD 码的奇偶校验码

十进制数	8421BCD 码奇校验码		8421BCD 码偶校验码	
	信息码	校验位	信息码	校验位
0	0000	1	0000	0
1	0001	0	0001	1
2	0010	0	0010	1
3	0011	1	0011	0
4	0100	0	0100	1
5	0101	1	0101	0
6	0110	1	0110	0
7	0111	0	0111	1
8	1000	0	1000	1
9	1001	1	1001	0

练习与思考

1. 十进制数如何转换成为二进制数、八进制数和十六进制数？
2. 二进制数、八进制数和十六进制数如何转换成为十进制数？
3. 二进制数、八进制数和十六进制数之间如何转换？
4. 什么是二进制代码？什么是编码？常用的二进制码都有哪些？
5. 什么是有权码？什么是无权码？
6. 什么是可靠性代码？格雷码的特点是什么？
7. 什么是奇偶校验码？奇偶校验码有什么优点？
8. 8421 码和 8421BCD 码有何区别？

1.3 二进制的运算方法

1.3.1 原码、反码和补码

在一般情况下，数的正、负是在数的最高位前面加上“+”或“-”来表示，如 +78、-32 等。而在计算机中，数的正和负是用数码表示的，通常采用的方法是在二进制数最高位的前面加一个符号位来表示，符号位后面的数码表示数。正数的符号位用“0”表示，负数的符号位用“1”表示，如

$$(+14)_{10} = (\boxed{0}1110)_2 \quad (-14)_{10} = (\boxed{1}1110)_2$$

方框中的数为符号位。

在数字系统中，常将负数用补码表示，其目的是为了将减法运算变为加法运算。带符号的二进制数有原码、反码和补码三种表示方法。

1. 原码表示

原码由二进制数的原数值部分和符号位组成。表示如下：

$$(N)_{\text{原}} = \begin{cases} [0] \text{ 原数值} & (\text{原数值为正数}) \\ [1] \text{ 原数值} & (\text{原数值为负数}) \end{cases}$$

如二进制数 +1010111 的原码为 01010111；-1010111 的原码为 11010111。

2. 反码表示

二进制数反码是这样规定的：对于正数，反码和原码相同；对于负数，反码为符号位加上原数值按位取反。表示如下：

$$(N)_{\text{反}} = \begin{cases} [0] \text{ 原数值} & (\text{原数值为正数}) \\ [1] \text{ 原数值取反} & (\text{原数值为负数}) \end{cases}$$

如二进制数 +10011101 的反码为 010011101，-10011101 的反码为 101100010。

3. 补码表示

二进制数补码是这样规定的：对于正数，补码和原码、反码相同；对于负数，补码为符号位加上原数值按位取反后再在最低位加 1，即为反码加 1。表示如下：

$$(N)_{\text{补}} = \begin{cases} [0] \text{ 原数值} & (\text{原数值为正数}) \\ [1] \text{ 原数值取反加 1} & (\text{原数值为负数}) \end{cases}$$

如二进制数 $+110101$ 的补码为 0110101 ； -110101 的补码为 1001011 。

1.3.2 二进制的算术运算

当二进制数表示数量的大小时，可以进行算术运算。二进制算术运算和十进制算术运算规则基本相同，区别是二进制数是逢二进一，而十进制数是逢十进一。

【例 1-8】 分别计算 1011 和 0101 的加、减、乘、除运算。

解：

加法运算 $\begin{array}{r} 1011 \\ + 0101 \\ \hline 10000 \end{array}$	减法运算 $\begin{array}{r} 1011 \\ - 0101 \\ \hline 0110 \end{array}$
乘法运算 $\begin{array}{r} 1011 \\ \times 0101 \\ \hline 1011 \\ 0000 \\ 1011 \\ 0000 \\ \hline 110111 \end{array}$	除法运算 $\begin{array}{r} 10.001 \dots \\ 0101 \overline{) 1011} \\ \underline{101} \\ 0000 \\ \underline{0101} \\ 011 \end{array}$

在数字电路中，为了简化运算电路，两数相减的运算可以用它们的补码相加来完成。

【例 1-9】 计算 $(1000)_2 - (0100)_2$

解：根据二进制的减法运算规则可得

$$\begin{array}{r} 1000 \\ - 0100 \\ \hline 0100 \end{array}$$

在采用补码运算时，首先要求出 $(+1000)_2$ 和 $(-0100)_2$ 的补码。

$$\begin{array}{l} (+1000)_{\text{补码}} = \boxed{0}1000 \\ \downarrow \\ \text{符号位} \\ (-0100)_{\text{补码}} = \boxed{1}1100 \\ \downarrow \\ \text{符号位} \end{array}$$

然后把两个补码相加并舍去进位。

$$\begin{array}{r} 0 \ 1000 \\ + 1 \ 1100 \\ \hline \text{舍去} \leftarrow 1 \ \boxed{0} \ 0100 \\ \downarrow \\ \text{符号位} \end{array}$$

两种计算方法计算相同，这样就把减法运算转化成了加法运算。

练习与思考

1. 如何求二进制数的反码和补码？
2. 为什么二进制的减法运算可以用其补码相加的方法实现？
3. 试分别计算 1110 和 0010 的加、减、乘、除运算。