



全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

数字电子技术基础

主编 李震梅

高等教育出版社



210
全国教育科学“十一五”规划课题研究成果

数字电子技术基础

主编 李震梅

参编 刘雪婷 刘万强 白 明 王艳萍

巴奉丽 杨雪岩

视频编辑及网络资源建设 刘新杰 王鹏玮 王梓糠 王在明



高等教育出版社·北京

内容简介

本书依据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新修订的“数字电子技术基础”课程教学基本要求,总结作者省级教学成果和省精品课程建设的经验而编写,主要内容包括:逻辑代数基础、逻辑门电路、组合逻辑电路及应用、触发器、时序逻辑电路、半导体存储器、脉冲电路的产生与整形、数模与模数转换、可编程逻辑器件及电子电路 Quartus II 仿真。本书是新形态教材,扫描二维码就可以观看对应知识点的微视频、PPT 课件、图片等资源。本书概念阐述清楚,通俗易懂,突出应用,便于自学。

本书可作为普通高等学校本科电气、自动化、电子信息、通信和计算机等电类各专业数字电子技术基础课程的教材或教学参考书,也可作为相关工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术基础 / 李震梅主编. -- 北京: 高等教育出版社, 2017. 7

ISBN 978 - 7 - 04 - 047704 - 7

I. ①数… II. ①李… 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(2017)第 112076 号

策划编辑 王耀锋	责任编辑 王耀锋	封面设计 李卫青	版式设计 马敬茹
插图绘制 杜晓丹	责任校对 刘娟娟	责任印制 毛斯璐	

出版发行	高等教育出版社	咨询电话	400 - 810 - 0598
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	网 址	http://www.hep.edu.cn
邮政编码	100120		http://www.hep.com.cn
印 刷	高教社(天津)印务有限公司	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
			http://www.hepmall.com
			http://www.hepmall.cn
开 本	787mm × 1092mm 1/16	版 次	2017 年 7 月第 1 版
印 张	26. 25	印 次	2017 年 7 月第 1 次印刷
字 数	590 千字	定 价	49. 90 元
购书热线	010 - 58581118		

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

物 料 号 47704 - 00

前 言

本书根据当前电子技术发展的趋势和对人才能力培养的要求,针对普通高等院校本科学生的具体情况,依据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会最新修订的“数字电子技术基础”课程教学基本要求,以培养实践和创造能力强的高素质应用型人才为目标,总结省级教学成果和省精品课程建设的经验而编写。本书的特色如下。

1. 本书采用新形态教材,扫描二维码就可以观看对应知识点的微视频、PPT 课件、图片等资源,书中的定义、重点等均用蓝色进行了标注。

2. 本书的编写思路以“学中做,做中学”为核心,大部分章节除了理论讲解外还增加了电路设计与制作、自测题等,构成“理论、仿真、设计、实验、测试”一体化教学过程的基本框架,案例丰富,实用性强。

3. 精选教学内容,深浅适度,主次分明;概念阐述清楚,通俗易懂,突出应用,便于自学。

4. 充分吸收新概念、新理论和新技术,妥善处理传统内容的继承与现代内容的引进,在保留传统的基本内容基础上,突出集成电路的应用,最后增加了可编程逻辑器件及电子电路 Quartus II 仿真章节,仿真围绕教学的基本要求和重点内容进行,并包含了前面章节的设计与制作实例,在讲解前面各章时可以穿插 Quartus II 仿真内容。

5. 参考了国内外近年出版的优秀教材,并总结多年来教学体会,精选了许多具有实用性的例题和习题,每章后附有习题、自测题,其题源丰富,覆盖面宽。

本书可作为普通高等学校本科电气、自动化、电子信息、通信和计算机等电类各专业数字电子技术基础课程的教材或教学参考书,也可作为相关工程技术人员的参考书。

本书参考学时为 60 学时左右,有些章节内容,各校可根据实际情况进行调整。

参加本书编写的教师多年从事电子技术课程体系、课程内容的教学改革与实践,具有丰富的数字电子技术课程的教学经验。山东理工大学李震梅教授组织了本书的编写,制定了详细的编写提纲,并负责全书的统稿。全书共 9 章,第 3、5 章由李震梅编写,第 1、6 章由刘雪婷编写,第 2、8 章由刘万强编写,第 4 章由白明编写,第 9 章由王艳萍编写,第 7 章由巴奉丽编写。杨雪岩参加了第 2、5、10 章的编写。刘新杰、王鹏玮、王梓糠、王在明参加了数字资源建设及视频编辑。

本书由国防科学技术大学丁文霞教授主审,她提出了许多建设性意见和建议;本书的编写还得到了山东理工大学电工电子教研室全体老师的大力支持,编者在这里一并向他们表示感谢。在编写过程中参阅或引用了部分参考资料,对这些作者,我们也表示衷心的感谢。

限于编者的水平,本书中不妥和错误之处在所难免,望读者及同行老师们给予批评指正。E-mail: lzm@sdut.edu.cn。

编者

2017 年 3 月

目 录

第 1 章 逻辑代数基础	1	第 2 章 逻辑门电路	39
1.1 概述	1	2.1 半导体器件的开关特性	39
1.1.1 数字量与模拟量	1	2.1.1 二极管的开关特性	40
1.1.2 数字电路的特点	3	2.1.2 晶体管的开关特性	41
1.2 常用进制及相互转换	3	2.1.3 场效晶体管的开关特性	42
1.2.1 常用进制	3	2.2 基本逻辑门电路	44
1.2.2 常用进制间的转换	4	2.2.1 二极管与门电路	44
1.3 码制	7	2.2.2 二极管或门电路	45
1.3.1 常用 BCD 码	7	2.2.3 晶体管非门电路	46
1.3.2 常用其他代码	8	2.2.4 复合门电路	48
1.4 基本逻辑运算和复合逻辑运算	10	2.3 TTL 集成门电路	49
1.4.1 基本逻辑运算	10	2.3.1 TTL 与非门电路	50
1.4.2 复合逻辑运算	13	2.3.2 其他类型的 TTL 集成门电路	54
1.5 逻辑代数的基本定律及规则	15	2.3.3 集成门电路芯片简介	57
1.5.1 逻辑代数的基本定律	15	2.3.4 TTL 集成电路使用规则	60
1.5.2 逻辑代数的基本规则	17	2.3.5 TTL 集成门电路逻辑功能与参数测试	61
1.6 逻辑函数的表示方法及其转换	18	2.4 MOS 集成门电路	63
1.6.1 逻辑表达式	18	2.4.1 NMOS 门电路	63
1.6.2 逻辑真值表	21	2.4.2 CMOS 反相器	64
1.6.3 卡诺图	21	2.4.3 其他类型的 CMOS 门电路	65
1.6.4 逻辑图	23	2.4.4 CMOS 电路使用注意事项	69
1.6.5 波形图	24	2.4.5 CMOS 电路产品系列和主要参数	69
1.6.6 逻辑函数表示方法间的转换	24	2.4.6 CMOS 集成门电路逻辑功能与参数测试	70
1.7 逻辑函数的化简方法	26	2.5 集成门电路的接口	73
1.7.1 逻辑函数的公式化简法	26	2.5.1 连接原则	73
1.7.2 逻辑函数的卡诺图化简法	28	2.5.2 TTL 电路驱动 CMOS 电路	73
1.7.3 有约束的逻辑函数的化简	31	2.5.3 CMOS 电路驱动 TTL 电路	74
本章小结	34	2.6 门电路应用实例	75
习题	35	2.6.1 两地控制一灯的电路	75
自测题	37		

2.6.2 水位检测电路	76	3.6 数值比较器	134
2.6.3 门控报警器电路	77	3.6.1 数值比较器的定义及功能	134
2.7 楼道灯控制电路分析与制作 ...	77	3.6.2 集成数值比较器	136
本章小结	79	3.6.3 4 位二进制数的判别电路设计 与制作	139
习题	79	3.7 组合逻辑电路中的竞争 冒险	139
自测题	84	3.7.1 产生竞争冒险的原因	139
第 3 章 组合逻辑电路及应用	87	3.7.2 冒险的判断	140
3.1 组合逻辑电路的分析与设计 ...	87	3.7.3 消去竞争冒险的方法	142
3.1.1 组合逻辑电路的分析	87	3.8 病房呼叫电路设计与制作	143
3.1.2 组合逻辑电路的设计	88	本章小结	144
3.1.3 交通信号灯故障报警电路 设计与制作	92	习题	145
3.2 算术运算电路及应用	94	自测题	149
3.2.1 半加器	94	第 4 章 触发器	152
3.2.2 全加器	95	4.1 基本 RS 触发器	152
3.2.3 多位加法器	96	4.1.1 由与非门组成的基本 RS 触发器	152
3.2.4 加减运算电路设计与制作	99	4.1.2 或非门组成的基本 RS 触发器	154
3.3 编码器及其应用电路	100	4.1.3 触发器逻辑功能描述方法	156
3.3.1 二进制编码器	100	4.1.4 用与非门组成基本 RS 触发器 实验	158
3.3.2 二-十进制编码器	102	4.2 同步 RS 触发器和同步 D 触发器	159
3.3.3 优先编码器	103	4.2.1 同步 RS 触发器	159
3.3.4 电话编码控制电路设计与 制作	108	4.2.2 同步 D 触发器	161
3.4 译码器及其应用电路	109	4.2.3 同步触发器实验	163
3.4.1 二进制译码器	110	4.3 主从 JK 触发器	165
3.4.2 二-十进制译码器	117	4.3.1 主从 JK 触发器工作原理	165
3.4.3 显示译码器	118	4.3.2 主从 JK 触发器表示方法	166
3.4.4 燃油锅炉报警电路设计与 制作	123	4.4 边沿 D 触发器和边沿 JK 触发器	168
3.5 数据选择器与数据分配器	124	4.4.1 边沿 D 触发器	168
3.5.1 数据选择器	124	4.4.2 边沿 JK 触发器	170
3.5.2 集成数据选择器	125	4.5 T 触发器以及 T' 触发器	171
3.5.3 用数据选择器实现逻辑 函数	127	4.5.1 翻转功能介绍	171
3.5.4 数据选择器的测试及应用	130	4.5.2 T' 触发器与 T 触发器	172
3.5.5 数据分配器	131		
3.5.6 激光射击游戏获奖电路 设计与制作	132		

4.5.3 触发器功能总结	172	习题	256
4.6 集成触发器及应用	173	自测题	262
4.6.1 常见的集成触发器	173	第6章 半导体存储器	266
4.6.2 集成触发器的应用	178	6.1 半导体存储器的特点与 分类	266
4.6.3 “虫子、棒子、老虎、鸡”游戏 简易电路设计与制作	180	6.1.1 半导体存储器的特点	266
本章小结	182	6.1.2 半导体存储器的分类	266
习题	182	6.2 随机存取存储器(RAM)	267
自测题	185	6.2.1 RAM 的基本结构和工作 原理	267
第5章 时序逻辑电路	187	6.2.2 RAM 的存储单元	270
5.1 时序逻辑电路的分析	187	6.2.3 RAM 容量的扩展	273
5.1.1 同步时序逻辑电路的分析	187	6.3 只读存储器(ROM)	275
5.1.2 异步时序逻辑电路的分析	195	6.3.1 ROM 的分类	275
5.2 计数器	197	6.3.2 ROM 的电路结构与工作 原理	276
5.2.1 同步计数器	197	6.4 ROM 应用电路的设计及 实践	283
5.2.2 异步计数器	207	本章小结	284
5.2.3 常用的集成计数器	213	习题	285
5.2.4 用集成计数器构成任意进制 计数器	215	自测题	285
5.2.5 彩灯控制电路设计与制作	226	第7章 脉冲电路的产生与整形	288
5.3 寄存器及应用	227	7.1 矩形脉冲的特性参数	288
5.3.1 数码寄存器	227	7.2 集成 555 定时器	289
5.3.2 移位寄存器	230	7.2.1 555 定时器的电路结构与 工作原理	289
5.3.3 常用的集成寄存器	234	7.2.2 555 定时器的功能	290
5.3.4 寄存器的应用	236	7.3 多谐振荡器	291
5.3.5 寄存器型彩灯控制电路设计 与制作	239	7.3.1 用 555 定时器构成的多谐 振荡器	291
5.4 顺序脉冲产生电路	240	7.3.2 门电路构成多谐振荡器	293
5.4.1 计数型顺序脉冲产生电路	240	7.3.3 石英晶体振荡器	296
5.4.2 移位型脉冲产生电路	241	7.3.4 多谐振荡器的应用	298
5.4.3 8 输出顺序脉冲发生器 设计与制作	243	7.4 施密特触发器	299
5.5 时序逻辑电路的设计	243	7.4.1 555 定时器构成施密特 触发器	299
5.5.1 同步时序逻辑电路的设计	243	7.4.2 集成施密特触发器	301
5.5.2 序列信号发生器设计	252	7.4.3 施密特触发器的应用	302
5.6 用 MSI 设计与制作序列 信号发生器	255		
本章小结	255		

7.5 单稳态触发器	303	8.3.6 A/D 转换器的主要技术 指标	341
7.5.1 用 555 定时器构成的单稳态 触发器	303	8.4 实践	342
7.5.2 门电路组成的单稳态 触发器	305	8.4.1 锯齿波产生电路	342
7.5.3 集成单稳态触发器	306	8.4.2 数字电压表电路	344
7.5.4 单稳态触发器的应用	308	本章小结	348
7.6 简易数字电子秒表设计与 制作	309	习题	348
7.7 简易数显式脉搏测试仪设计 与制作	311	自测题	350
本章小结	313	第 9 章 可编程逻辑器件及电子 电路 Quartus II 仿真	353
习题	313	9.1 可编程逻辑器件的构成 原理	353
自测题	316	9.2 常用 PLD 器件	355
第 8 章 数模与模数转换	320	9.2.1 可编程只读存储器 PROM	356
8.1 概述	320	9.2.2 可编程逻辑阵列 PLA	358
8.1.1 A/D 转换器和 D/A 转换器的 概念	320	9.2.3 通用逻辑阵列 GAL 阵列	359
8.1.2 A/D 转换器和 D/A 转换器的 实例	320	9.2.4 现场可编程门阵列 (FPGA)	359
8.2 D/A 转换器	321	9.3 VHDL 语言基础	360
8.2.1 D/A 转换器的基本原理和电路 结构	321	9.3.1 VHDL 语言的特点	361
8.2.2 权电阻网络 D/A 转换器	322	9.3.2 VHDL 的主要构件	362
8.2.3 T 形电阻网络 D/A 转换器	324	9.4 Quartus II 入门	376
8.2.4 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	325	9.4.1 Quartus II 简介	376
8.2.5 集成 D/A 转换器	327	9.4.2 Quartus II 9.0 安装	376
8.2.6 D/A 转换器的主要参数	328	9.4.3 Quartus II 工作环境介绍	377
8.3 A/D 转换器	329	9.4.4 Quartus II 的 VHDL 语言设计 输入	377
8.3.1 A/D 转换器的一般步骤和 分类	329	9.4.5 Quartus II 的原理图设计输入	388
8.3.2 并行比较型 A/D 转换器	332	9.5 Quartus II 应用实例	392
8.3.3 逐次比较型 A/D 转换器	334	9.5.1 病房呼叫电路设计	392
8.3.4 双积分型 A/D 转换器	336	9.5.2 彩灯控制电路设计	393
8.3.5 集成 A/D 转换器	339	9.5.3 七段数码管显示译码的 VHDL 语言描述及其仿真	394
		9.5.4 交通灯控制器的设计	399
		9.5.5 8 位十六进制频率计	402
		本章小结	406
		习题	406
		参考文献	408

第1章 逻辑代数基础

随着数字电子技术的快速发展,当今世界已经进入到了神奇的数字化世界。由于具有一系列优点,数字电子技术已经广泛地应用于计算机、自动控制、电子测量仪表、电视、通信、卫星系统、雷达等各个领域。数字电子技术是电气、电子信息类及计算机类各专业的主要技术基础课之一,也是现代电子工程技术人员所必须掌握的专业基础知识。

数字电路是数字电子技术的核心,逻辑代数是分析和设计数字电路的基本工具,利用逻辑代数,可以把实际的逻辑问题抽象为逻辑函数来描述。因此,正确理解并熟练掌握逻辑代数的基础知识是学好数字电子技术的关键。本章首先介绍数字电路的一些基本概念,然后讨论数字电路中常用的数制与码制,最后介绍逻辑代数的基本运算规律、逻辑函数及其化简方法,为学习后面各部分内容奠定必要的数学基础。

1.1 概 述

1.1.1 数字量与模拟量

1. 模拟信号和数字信号

自然界中的物理量,根据其变化规律可以分为两大类:模拟量和数字量。在时间上和数值上具有连续变化的特点的物理量称为模拟量,其在变化过程中的任何一点都具有实际的物理意义,如温度、压力、速度等。在时间上和数值上具有离散的特点的物理量称为数字量,如人数、物件、产品的个数等。在实际应用中,通常用传感器将模拟量转换为与之成比例的电压或电流信号,然后再利用模数和数模转换电路,可以很方便地实现模拟量与数字量之间的相互转换。

电子电路处理的信号分为两类,即模拟信号和数字信号。常常将表示模拟量的电信号叫作模拟信号(Analog Signal),如模拟广播电视传送和处理的音频信号和视频信号等。将表示数字量的电信号叫作数字信号(Digital Signal),如计算机中处理的数据信号,随着计算机的广泛应用,绝大多数电子系统都采用计算机来对信号进行处理。

与电路所处理的信号相对应,电子电路分为模拟电路和数字电路两大类。用以传递和处理模拟信号的电路称为模拟电路(Analog circuit),如各种放大电路是典型的模拟电路,用以传递和加工处理数字信号的电路称为数字电路(Digital circuit),如译码器、编码器、数字钟等数字电路。

2. 数字信号的描述方法

数字信号既可以用0和1组成的二值数字逻辑(Binary Digital Logic)来表示,也可以



视频 1-1
数电课程
概述



视频 1-2
数字量与
模拟量

用高、低电平描述的数字波形来表示。

(1) 二值数字逻辑的描述方法

在数字电路中,数字信号的取值只有两种,即 **0** 和 **1**,它们不表示数值的大小,只表示两种截然相反的逻辑状态,如电位的高与低、门的开与关、真与假、通与断等。这种只有两种对立逻辑状态的逻辑关系称为二值数字逻辑或简称数字逻辑。数字电路不仅能对数字信号进行算术运算,也能进行逻辑运算。

在数字电路中,电路中的半导体器件工作在开关状态,可以很方便地用电路状态来实现二值数字逻辑,如电压的高与低、晶体管的截止与饱和、开关的断开与闭合等。也就是以高、低电平分别表示逻辑 **1** 和 **0** 两种状态。在实际应用中,考虑的是信号之间的逻辑关系,只要能区别出表示逻辑状态的高、低电平即可,可以忽略高、低电平的具体大小。当用高电平表示逻辑 **1**,低电平表示逻辑 **0** 时,默认为正逻辑。反之,则为负逻辑。没有特殊说明,本书均采用正逻辑。

(2) 数字波形的描述方法

数字波形是逻辑电平对时间的图形表示,数字系统通常以一定频率的时钟脉冲为基准,如图 1.1.1 所示。在数字系统中,每秒钟传输的二进制代码的有效位(bit)数称为比特率又称为位率、码率,也是网络带宽数据流量的单位,其单位为比特每秒 bit/s(bps)。它表征了信号传输的速度,比特率越高,传送的数据量越多,表明信号传输速度越快。

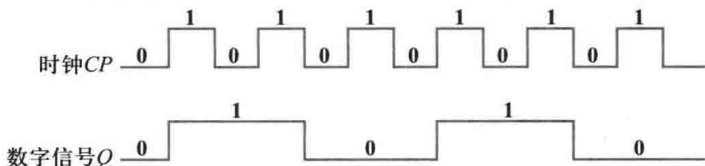


图 1.1.1 数字波形

3. 数字电路的应用

数字电子技术已经渗透到现代社会的各个领域,它正在改变人类的生产方式、生活方式及思维方式,当今世界正在经历一场数字化革命。尤其是计算机技术的不断发展和完善,数字电路的应用越来越普遍,如家庭生活、文化娱乐、广播、电视、通信、医疗、测量、控制以及国防建设等各方面。由于数字信号具有便于存储、处理和传输的特点,数字电路具有抗干扰能力强、可靠性高、通用性广、便于集成、精确性和稳定性好、便于故障诊断和系统维护等优点,使得许多传统使用模拟技术的领域转而运用数字技术。但是,模拟技术在电子系统中是不可缺少的。自然界中绝大多数物理量都是模拟量,目前数字技术不能直接处理模拟信号,也无法将处理后的数字信号直接送到外部物理世界。因此实际电子系统一般是模拟电路和数字电路的结合。

4. 数字电路的发展

电子技术的发展是以电子器件的发展为基础的,数字电路的发展经历了电子管、半导体分立器件、集成电路到超大规模集成电路几个阶段。20 世纪初至中叶,电路中使用的电子器件主要是电子管。随着固体物理学的发展,1947 年世界上第一只晶体管在美国贝尔实验室诞生,开创了电子技术的新领域。在 20 世纪 60 年代初,数字集成电路上市。随

后到 20 世纪 70 年代,由于微处理器的问世,数字电路的发展出现了崭新的局面。20 世纪 80 年代,专用集成电路技术日趋成熟。20 世纪 90 年代,基于单芯片的片上系统设计技术标志着数字集成电路的发展达到了一个新的高峰。当前,数字集成电路的集成度达到几十亿个晶体管的规模,集成片的功耗更低,而速度大为提高,数字集成电路占据了市场的主导地位。

1.1.2 数字电路的特点

当前,数字电路与技术已广泛应用于计算机、数控设备、通信设备、数字仪器仪表以及国民经济的各个领域,数字化已成为当今电子技术发展的潮流。主要原因在于数字电路具有如下特点。



视频 1-3
数字电路
的特点

1. 数字电路易于设计

在数字电路中,主要的分析设计工具是逻辑代数,不需要复杂的数学知识;所使用的电路是开关电路,对元器件的精度和电压或电流的值要求不高;大规模集成电路的发展,能使逻辑部件标准化、通用性强。因此,数字电路的分析和设计相对较容易。

2. 数字电路稳定性好,精度高,抗干扰能力强

数字电路采用二进制数字信号,其高低电平都是一个比较宽的范围,在工作中不易出错。另外,数字电路通过提高数字信号的位数就可以提高精度。

3. 数字信号便于存储

随着存储器的存储容量越来越大,文字符号、声音、图像等各种信息被数字化后,可以由存储器长期保存。

4. 数字电路集成度高、易于小型化

随着半导体工艺的发展,数字电路的集成度越来越高,使得数字系统体积小、重量轻、功耗低、便于携带。

1.2 常用进制及相互转换

数制也称进位计数制,是按进位规则进行计数的方法。在日常生活中人们通常使用的数制是十进制,而在数字系统中常使用的数制是二进制、八进制和十六进制。

1.2.1 常用进制

1. 十进制

十进制是人们在日常生活中使用最多的计数体制。它由 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 共 10 个数码组成,故其基数是 10,或称模是 10(mod = 10)。超过 9 的数必须用多位数表示,其中低位和相邻高位的关系是“逢十进一”,故叫十进制。各个数码处于十进制数的不同



视频 1-4
常用进制

位置时,所代表的数值不同,即不同位有不同的位权值,十进制数各位的位权值是基数 10 的幂。例如

$$(867.59)_{10} = 8 \times 10^2 + 6 \times 10^1 + 7 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1} + 9 \times 10^{-2}$$

任意一个 n 位整数和 m 位小数的十进制正数 N 可以表示为

$$(N)_{10} = (N)_D = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times 10^i \quad (1.2.1)$$

式中, k_i 为第 i 位的系数,可以是 0、1、…、9 中的某个值;第 i 位的权值为 10^i ; m, n 都属于正整数。

2. 二进制

二进制数由 0、1 两个数码组成,故其基数是 2,或模是 2(mod=2),进位规则是“逢二进一”,各位的权值是 2 的幂。

与十进制类似,任意一个二进制数可以表示为

$$(N)_2 = (N)_B = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times 2^i \quad (1.2.2)$$

由于二进制计数规则简单,只有 1、0 两个数码,存储、传递方便,而且很容易和电路的两个稳定状态相对应,还可以实现逻辑运算,因此广泛应用于数字系统。

3. 八进制

八进制数也是数字系统中常用的一种进制,它由 0、1、2、3、4、5、6、7 共 8 个数码组成,故其基数是 8,或模是 8(mod=8),进位规则是“逢八进一”,各位的权值是 8 的幂。

任意一个八进制数可以表示为

$$(N)_8 = (N)_O = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times 8^i \quad (1.2.3)$$

4. 十六进制

十六进制也是数字系统中常用的一种进制,它由 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F 共 16 个数码组成,故其基数是 16,或模是 16(mod=16),进位规则是“逢十六进一”,各位的权值是 16 的幂。

任意一个十六进制数可以表示为

$$(N)_{16} = (N)_H = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times 16^i \quad (1.2.4)$$

在计算机系统中,二进制主要用于机器内部的数据处理。当二进制数的位数较多时,容易出错。人们常采用二进制的缩写形式八进制和十六进制用于书写程序。

1.2.2 常用进制间的转换

1. 将 R 进制数转换为十进制数

将 R 进制数转换为十进制数的方法比较简单,由 R 进制数的一般表达式按位权展开相加就可转换成十进制数,概括为“按权展开求和法”,只要将式(1.2.1)中的 10(mod=



10)改换为 $R(\text{mod} = R)$ 即可。

例 1.2.1 将二进制数 $(110110.01)_2$ 转换成十进制数。

$$\begin{aligned}\text{解: } (110110.01)_2 &= 1 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} \\ &= (52.25)_{10}\end{aligned}$$

也可以写为

$$(110110.01)_B = (52.25)_D$$

例 1.2.2 将十六进制数 $(2BE.5)_{16}$ 转换成十进制数。

$$\begin{aligned}\text{解: } (2BE.5)_{16} &= 2 \times 16^2 + 11 \times 16^1 + 14 \times 16^0 + 5 \times 16^{-1} \\ &= 512 + 176 + 14 + 0.3125 \\ &= (702.3125)_{10}\end{aligned}$$

也可以写为

$$(2BE.5)_H = (702.3125)_D$$

由于数字电路中采用二进制数,而我们日常使用的是十进制数。因此,必须掌握二进制数与十进制数之间的转化方法。

2. 将十进制数转换为二进制数

将十进制数转换为二进制数相对较复杂,转换时一般把十进制数的整数部分和净小数部分分别进行转换,然后相加得结果。

整数部分的转换采用“除 2 取余法”,直到商等于零为止,把每次除以 2 得到的余数连起来就是二进制的整数部分,先得到的余数为最低位,概括为“除 2 取余,先得低位”。

净小数部分的转换采用“乘 2 取整法”,直到满足精度要求规定的位数为止。把每次乘以 2 得到的整数部分连起来,即可得到净小数部分,净小数的转换可概括为“乘 2 取整,先得高位”。

例 1.2.3 将十进制数 $(77.35)_{10}$ 转换成二进制数(取 6 位有效数)。

解:转换分成整数和净小数两部分来进行。

对于整数部分,采用除 2 取余法,直到商等于零为止。

2	┌ 77	余数1	
2	┌ 38	余数0	最低位(LSB)
2	┌ 19	余数1	
2	┌ 9	余数1	
2	┌ 4	余数0	
2	┌ 2	余数0	
2	┌ 1	余数1	最高位(MSB)
	0		

即

$$(77)_{10} = (1001101)_2$$

净小数部分 $(0.35)_{10}$ 的转换采用乘2取整法,直到满足规定的位数为止。

$0.35 \times 2 = 0.7$

整数 = 0

$= k_{-1}$

$0.7 \times 2 = 1.4$

整数 = 1

$= k_{-2}$

$0.4 \times 2 = 0.8$

整数 = 0

$= k_{-3}$

$0.8 \times 2 = 1.6$

整数 = 1

$= k_{-4}$

$0.6 \times 2 = 1.2$

整数 = 1

$= k_{-5}$

$0.2 \times 2 = 0.4$

整数 = 0

$= k_{-6}$

MSB

↓

LSB

即

$(0.35)_{10} = (0.010110)_2$

将整数部分 $(77)_{10}$ 和净小数部分 $(0.35)_{10}$ 的转换结果按 k_6 (高位)到 k_{-6} (低位)的次序排列,就得到总的转换结果,即

$(77.35)_{10} = (1001101.010110)_2$

3. 二进制数、八进制数和十六进制数间的转换

常用进制间部分数据对应关系如表 1.2.1 所示。

表 1.2.1 常用进制间部分数据对应关系

十进制	二进制	八进制	十六进制	十进制	二进制	八进制	十六进制
0	0000	0	0	8	1000	10	8
1	0001	1	1	9	1001	11	9
2	0010	2	2	10	1010	12	A
3	0011	3	3	11	1011	13	B
4	0100	4	4	12	1100	14	C
5	0101	5	5	13	1101	15	D
6	0110	6	6	14	1110	16	E
7	0111	7	7	15	1111	17	F

由表 1.2.1 可以看出,3 位二进制数对应 1 位 8 进制数,而 4 位二进制数对应 1 位十六进制数。

例 1.2.4 完成下列各题

- (1) $(10101.11)_2 = (\quad)_8$
- (2) $(1101101.001)_2 = (\quad)_{16}$
- (3) $(35.24)_8 = (\quad)_2$
- (4) $(4.A8)_{16} = (\quad)_2$

解:

(1) $(10101.11)_2 = (010101.110)_2 = (25.6)_8$

(二进制数转换成八进制数时,以小数点为界,整数部分由右向左每 3 位分为 1 组,小数部分由左向右每 3 位分为 1 组,两端若不够 3 位则用 0 补齐。)

(2) $(1101101.001)_2 = (01101101.0010)_2 = (6D.2)_{16}$



视频 1-6
常用进制
间的转换
(二): 二
十快速转
换、二八转
换、二十六
转换

也可以写为

$$(1101101.001)_B = (6D.2)_H$$

(二进制数转换成十六进制数时,以小数点为界,整数部分由右向左每 4 位分为 1 组,小数部分由左向右每 4 位分为 1 组,两端若不够 4 位则用 0 补齐。)

(3) $(35.24)_8 = (011101.010100)_2 = (11101.0101)_2$

(1 位八进制数换成 3 位二进制数,去掉两端无效的 0)

(4) $(4.A8)_{16} = (0100.10101000)_2 = (100.10101)_2$

(1 位十六进制数换成 4 位二进制数,去掉两端无效的 0)

1.3 码制

数码不仅可以表示数量的大小,还可以用来表示文字、符号、事物等特定的信息。当数码用来表示特定的信息时称为代码。码制是指编制代码的规则。由于数字系统是以二值数字逻辑为基础的,因此在数字系统中,常将有特定意义的信息(如数值、文字、符号、控制命令等)用一串二进制代码来表示。所谓编码就是用一定规则的二进制数表示某种信息的过程。

显然,1 位二进制代码可以表示 2 个信息, n 位二进制代码可有 2^n 种不同的组合,即可代表 2^n 种不同的信息。用 n 位二进制代码来表示 N 个信息时,应满足

$$2^n \geq N \tag{1.3.1}$$

由编码定义可知,由于信息的代码是人为规定的,因此,对同一信息,可采用多种编码方案。下面介绍几种在数字系统中最常用的编码。

1.3.1 常用 BCD 码

用 4 位二进制数码表示十进制数的 0、1、2、...、9 这十个数字的代码称为二 - 十进制代码,简称 BCD(Binary Coded Decimal)码。

几种常见的 BCD 代码如表 1.3.1 所示。

表 1.3.1 几种常见的 BCD 代码

十进制数	8421 码	5421 码	2421 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	1000	1011	1000	1100
6	0110	1001	1100	1001	1101



视频 1-7
常用 BCD
码

续表

十进制数	8421 码	5421 码	2421 码	余 3 码	余 3 循环码
7	0111	1010	1101	1010	1111
8	1000	1011	1110	1011	1110
9	1001	1100	1111	1100	1010
位权	8421	5421	2421	无权	无权

8421 码是 BCD 码中最常用的一种。它每一位的权是固定不变的,分别为 $8(即 2^3)$ 、 $4(即 2^2)$ 、 $2(即 2^1)$ 、 $1(即 2^0)$ 。此码与二进制数转换为十进制数的权值一样。由于 4 位二进制数码有 16 种组合,而 0、1、2、 $\cdots$ 、9 这十个数字只需要 10 种组合,则其余 6 种组合称为无效码。

8421BCD 码和十进制数之间的转换,可直接按位(或按组)转换。

例 1.3.1 将 $(426)_{10}$ 转换成 8421BCD 码。

解:将 426 中各位数 4、2、6 分别转换成 8421BCD 码,按高位到低位的次序由左到右排列,就是 8421BCD 码。即

$$(426)_{10} = (0100\ 0010\ 0110)_{8421BCD}$$

5421BCD 码和 2421BCD 码也是有固定位权的 BCD 码。5421BCD 码每一位的权分别为 5、4、2、1,而 2421BCD 码每一位的权分别 2、4、2、1。5421BCD 码和 2421BCD 码与十进制数之间的转换与 8421BCD 码相似,可直接按位(或按组)转换。

余 3 码的编码规则和上述的有权码不同,它是无权码,但它是有规律的。与 8421BCD 码相比,对应同样的十进制数字,它比 8421BCD 码多出 3(即 0011),因此称为余 3 码。

余 3 循环码是一种无权码,它比一般循环码从 0000 开始计数的状态多出 3(即 0011)。它的主要特点是相邻的两个代码之间只有一位状态不同。

8421BCD 码、5421BCD 码和 2421BCD 码都是有固定位权的 BCD 码,也叫恒权码,常用的 BCD 码还有其他的恒权 BCD 码和无权 BCD 码。

1.3.2 常用其他代码

1. 循环码

循环码也叫反射码、格雷码(GrayCode),是一种无权码。循环码的主要优点是相邻的两个代码之间只有一位状态不同,而且首尾两个码也具有相邻性。4 位循环码的编码表如表 1.3.2 所示。

表 1.3.2 4 位循环码

十进制数	循环码	十进制数	循环码
0	0000	3	0010
1	0001	4	0110
2	0011	5	0111

续表

十进制数	循环码	十进制数	循环码
6	0101	11	1110
7	0100	12	1010
8	1100	13	1011
9	1101	14	1001
10	1111	15	1000

由表 1.3.2 可见,循环码中各位的 0、1 从上到下的排列顺序都是按固定的周期循环的。按一定的逻辑运算规则可将自然二进制码转换成格雷码。循环码与二进制数码的关系如下

$$G_i = B_{i+1} \oplus B_i$$

由于格雷码从一个代码过渡到相邻代码时,只有一位数码发生变化。因此格雷码与其他编码相比出错的可能性更小,所以在数字系统中获得广泛应用。

2. ANSCII(ASCII)码

ANSCHII 码(American National Code for Information Interchange)是美国国家信息交换标准代码的简称,它的编码表如表 1.3.3 所示。ANSCHII 码是计算机与通信设备交换信息的字符编码,后来被国际标准化组织(简称 ISO)采用。ANSCHII 码是一组 8 位二进制代码,其中低 7 位表示信息,对应 128 个字符,最高位用作奇偶校验位。奇偶校验位的数值是 1 还是 0,要根据校验的类型来决定,从而将任何一个 8 位代码均配成奇数个 1(或是偶数个 1),以便电路进行自校验。

表 1.3.3 ANSCHII 编码

b₆b₅b₄ 字符 b₃b₂b₁b₀	000	001	010	011	100	101	110	111
0000	NUL (空,无效)	DLE (数据键换码)	SP 空格	0	@	P	\	p
0001	SOH (标题开始)	DC1 (设备控制 1)	!	1	A	Q	a	q
0010	STX (正文开始)	DC2 (设备控制 2)	"	2	B	R	b	r
0011	ETX (本文结束)	DC3 (设备控制 3)	#	3	C	S	c	s
0100	EOT (传输结束)	DC4 (设备控制 4)	\$	4	D	T	d	t
0101	ENQ (询问)	NAK (否定)	%	5	E	U	e	u
0110	ACK (承认)	SYN (空转同步)	&	6	F	V	f	v