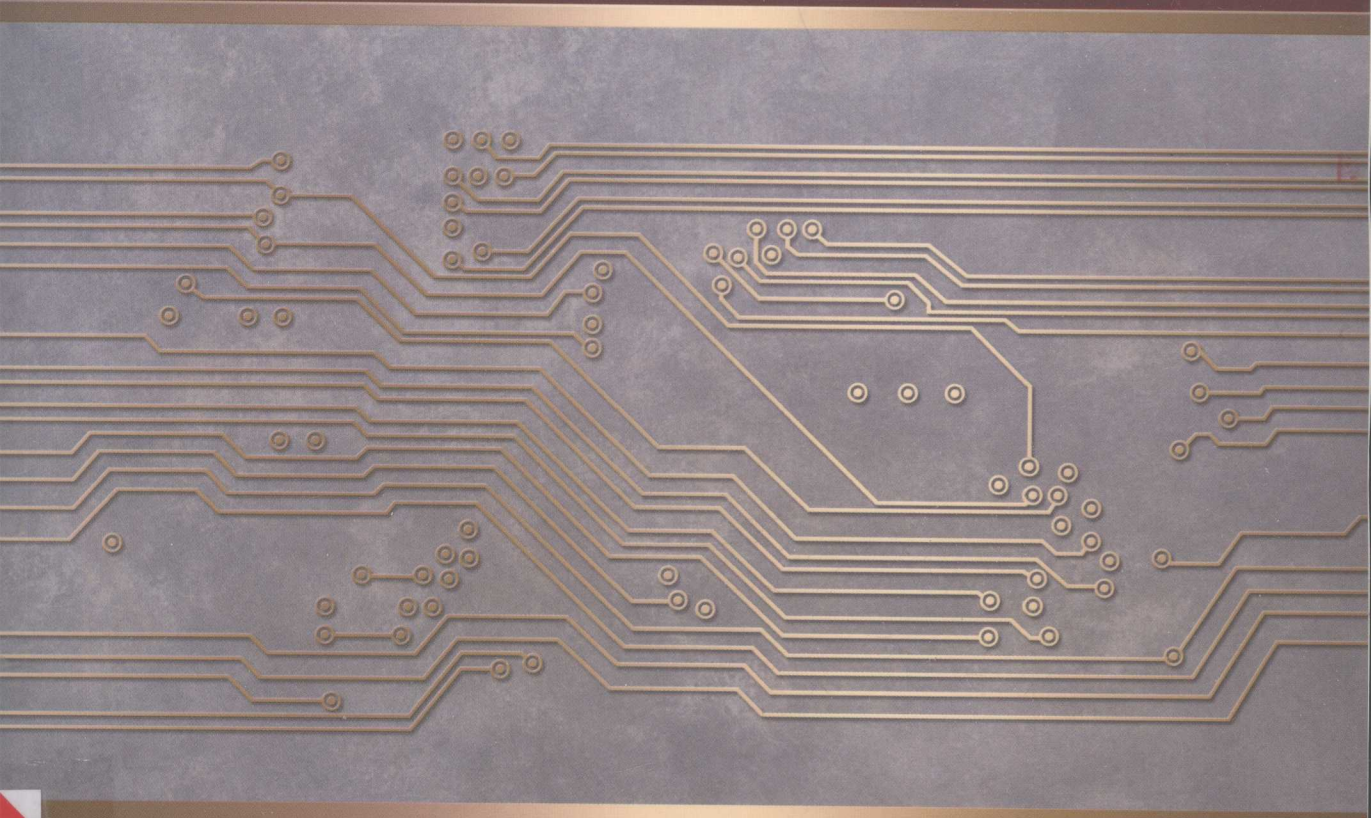


新编电气与电子信息类本科规划教材·电子电气基础课程

新编数字电路与数字逻辑

张虹 主编



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

新编电气与电子信息类本科规划教材·电子电气基础课程

新编数字电路与数字逻辑

张虹 主编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

为适应电子信息时代的新形势和应用型本科院校培养应用型人才的迫切需要,经过教学改革与实践,我们编写了这本《新编数字电路与数字逻辑》教材。

全书共分8章,分别为:数字电路基础知识,门电路,组合逻辑电路,触发器,时序逻辑电路,脉冲波形的产生与整形,数模、模数转换,存储器和可编程逻辑器件。各章均配有经典例题和习题,每章最后都附有相应实训。此外,在教材的最后还编写了综合实训内容。本书语言简洁,知识全面,深入浅出,通俗易懂。在保证理论知识够用的同时,注重理论联系实际,培养学生各方面的能力。

本书在编写过程中注意到电子技术领域的最新变化,将VHDL语言及基本逻辑器件的硬件描述语言引入各个章节中。

本书可作为高等院校计算机、电子、通信、自动化、机电一体化等专业本科和专科的教材,也可作为自学考试和从事电子技术工程人员的自学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

新编数字电路与数字逻辑/张虹主编. —北京:电子工业出版社,2010.1

新编电气与电子信息类本科规划教材. 电子电气基础课程

ISBN 978-7-121-10014-7

I. 新… II. 张… III. ①数字电路—高等学校—教材②数字逻辑—高等学校—教材 IV. TN79 TP302.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第221150号

责任编辑:凌毅

印刷:北京市海淀区四季青印刷厂

装订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开本:787×1092 1/16 印张:17.75 字数:454千字

印次:2010年1月第1次印刷

印数:4000册 定价:26.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zltts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

前 言

为了适应应用型本科院校对实用型专业教材的迫切需求,使学生学到有实用价值的专业知识,为社会培养具有一定理论知识、实践动手能力强的应用型科技人才,作者根据多年的教学实践、产品开发经验,编写了这本适用于应用型本科院校的《新编数字电路与数字逻辑》教材。

本书在保证数字电子技术基本概念、基本分析和设计方法的同时,注重对新知识的引入,尤其是将硬件描述语言(VHDL)引入教材当中。尽管传统的基本单元电路对于理解数字系统基本构成模块的工作原理具有重要的意义,但是必须认识到,电子技术的发展已使数字系统和数字逻辑的工作过程出现了新的描述方法,VHDL就是其中最具代表性的硬件描述语言。如何利用有限的篇幅,将VHDL有效地穿插到各个章节之中,使读者在理解基本逻辑器件的VHDL语言描述时不会出现较大障碍,这是本书在编写过程中思考的主要问题。

我们是这样做的,紧紧围绕基本器件的VHDL描述需求,有针对性地介绍VHDL语言的基本语法,把对VHDL的介绍融入各个基本数字功能器件的介绍之中。在本书的最后,通过两个综合实训对VHDL的用法进行了全面系统的总结。

本书的编写人员有着丰富的工程实践经验,能够从实用角度出发对问题进行论证和阐述,例题、习题的选取也具有这个特点。总之,本书注重以下几方面的问题:①保证基础,加强概念,培养思路;②精选内容,主次分明,详略得当;③面向更新,联系实际,理论与实践并重,知识与技能并重;④问题分析深入浅出,文字叙述通俗易懂,图文并茂,例题精选,便于自学;⑤理论知识以够用为目的,重点加强实际应用。考虑到当前电子技术飞速发展、日新月异的趋势,本书增加了新技术的内容,尤其突出了集成电路芯片引脚及应用方面的介绍。

参加本书编写的有:张虹(第1、5章),张星慧(第3、6章),刘晓亮(第4、7章),张建华(第2章),刘玉民(第8章)。本书由张虹担任主编,并统编全稿。此外,参加本书编写的还有:李耀明、杨洁、王立梅、高寒、陈光军、刘贞德、李厚荣、张元国、杜德、孙俊香。

本书免费提供电子课件,部分习题解答及相关资源可从华信教育资源网 www.hxedu.com.cn 注册后免费下载。

本书参考教学学时数为48~64(不含实验),教师可根据相关专业教学计划的要求,选择相关内容进行教学。

在本书编写过程中,由于时间仓促,加之水平有限,书中错误和不妥之处在所难免,敬请读者予以批评指正,以便今后不断改进。

编 者

2009年12月

目 录

第 1 章 数字电路基础知识	1
1.1 数字电路概述	1
1.1.1 模拟信号和数字信号	1
1.1.2 数字电路的特点	2
1.1.3 数字电路与脉冲电路的异同	2
1.1.4 数字电路的分类	2
1.1.5 数字电路的应用	3
1.2 数制	3
1.2.1 各种数制	4
1.2.2 数制转换	5
1.2.3 二进制正、负数的表示法	8
1.3 码制和常用代码	9
1.3.1 二十进制编码(BCD 码)	9
1.3.2 可靠性编码	10
1.3.3 字符码	12
1.4 逻辑代数	13
1.4.1 逻辑变量与逻辑函数	13
1.4.2 基本逻辑运算	13
1.4.3 复合逻辑运算	15
1.4.4 几个概念	16
1.5 逻辑函数的表示方法及其相互转换	17
1.5.1 真值表	17
1.5.2 逻辑表达式	17
1.5.3 逻辑图	20
1.5.4 波形图	20
1.5.5 卡诺图	21
1.6 逻辑代数的基本公式、定律和规则	22
1.6.1 基本公式	22
1.6.2 基本定律	22
1.6.3 基本规则	23
1.7 逻辑函数的化简	24
1.7.1 “最简”的概念及最简表达式的几种形式	24
1.7.2 逻辑函数的公式化简法	25
1.7.3 逻辑函数的卡诺图化简法	26
1.7.4 具有无关项的逻辑函数的化简	28
1.8 VHDL 语言基础	30
1.8.1 VHDL 语言程序的基本结构	31

1.8.2 VHDL 语言中的数据	32
本章小结	36
习题 1	37
本章实训 集成逻辑门电路的功能检测	40
第 2 章 门电路	44
2.1 半导体器件的开关特性	44
2.1.1 半导体二极管的开关特性	44
2.1.2 半导体三极管的开关特性	45
2.1.3 MOS 管的开关特性	47
2.2 分立元件门电路	48
2.2.1 二极管与门	48
2.2.2 二极管或门	49
2.2.3 三极管非门(反相器)	49
2.3 集成 TTL 门电路	50
2.3.1 集成 TTL 与非门	50
2.3.2 集成 TTL 非门、或非门、集电极开路门和三态门	54
2.3.3 改进型 TTL 门电路——抗饱和 TTL 门电路	59
2.3.4 使用 TTL 门电路的注意事项	60
2.3.5 ECL 门电路	61
2.4 集成 MOS 门电路	62
2.4.1 CMOS 门电路	62
2.4.2 CMOS 集成门电路及其使用规则	64
2.4.3 TTL 与 MOS 门电路之间的接口技术	66
本章小结	67
习题 2	67
本章实训 集成逻辑门参数测试	70
第 3 章 组合逻辑电路	75
3.1 组合逻辑电路的特点及分析设计方法	75
3.1.1 组合电路的特点	75
3.1.2 组合电路的一般分析方法	75
3.1.3 组合电路的一般设计方法	77
3.2 常用组合逻辑电路介绍	80
3.2.1 编码器	80
3.2.2 译码器	85
3.2.3 加法器	90
3.2.4 数值比较器	92
3.2.5 数据选择器	95
3.2.6 数据分配器	98
3.3 组合电路中的竞争冒险	99
3.3.1 竞争冒险的概念及产生原因	99
3.3.2 竞争冒险的消除方法	100
3.4 常用组合逻辑功能器件的 VHDL 语言描述	101

3.4.1	VHDL 语言的主要描述语句	101
3.4.2	常用组合逻辑功能器件的 VHDL 描述	103
	本章小结	106
	习题 3	107
	本章实训 组合逻辑电路的功能检测及设计实训	109
第 4 章	触发器	113
4.1	触发器概述	113
4.1.1	触发器的功能特点	113
4.1.2	触发器的分类及逻辑功能描述方法	113
4.2	基本 RS 触发器	114
4.2.1	电路组成及逻辑符号	114
4.2.2	逻辑功能分析及描述	114
4.2.3	应用举例	116
4.2.4	集成基本触发器	116
4.3	同步触发器	117
4.3.1	同步 RS 触发器	118
4.3.2	同步 D 触发器	120
4.4	主从触发器	123
4.4.1	主从 RS 触发器	123
4.4.2	主从 JK 触发器	124
4.4.3	主从 T 触发器和主从 T' 触发器	127
4.5	边沿触发器	128
4.5.1	维持阻塞 D 触发器	128
4.5.2	边沿 JK 触发器	130
4.6	不同类型时钟触发器间的转换	131
4.6.1	转换原理	131
4.6.2	JK→D、T、T' 和 RS	132
4.6.3	D→JK、T、T' 和 RS	133
4.7	集成触发器应用电路举例	134
4.7.1	分频器电路	134
4.7.2	单脉冲产生电路	135
4.7.3	三相脉冲信号源	135
4.7.4	串行数值比较器	135
4.7.5	时间判别电路	135
4.8	触发器的 VHDL 语言描述	136
4.8.1	时钟信号的 VHDL 描述	136
4.8.2	RS 触发器的 VHDL 描述	137
4.8.3	D 触发器的 VHDL 描述	138
4.8.4	JK 触发器的 VHDL 描述	139
4.8.5	T 触发器的 VHDL 描述	140
	本章小结	141
	习题 4	141

本章实训 1 触发器基本参数和逻辑功能的检测	144
本章实训 2 触发器的应用实训	148
第 5 章 时序逻辑电路	151
5.1 时序逻辑电路概述	151
5.1.1 时序电路的特点	151
5.1.2 时序电路逻辑功能的描述方法	151
5.1.3 时序电路的一般分析方法	152
5.2 计数器	153
5.2.1 计数器的分类	153
5.2.2 同步计数器	153
5.2.3 异步计数器	163
5.2.4 集成计数器构成 N 进制计数器的方法	166
5.2.5 计数器应用电路举例	169
5.3 寄存器	170
5.3.1 数码寄存器	170
5.3.2 移位寄存器	171
5.3.3 寄存器的应用	174
5.4 顺序脉冲发生器	177
5.5 时序逻辑电路的设计	178
5.5.1 设计方法及步骤	178
5.5.2 设计举例	179
5.6 时序逻辑电路的 VHDL 描述	183
5.6.1 计数器的 VHDL 描述	183
5.6.2 寄存器的 VHDL 描述	185
本章小结	189
习题 5	189
本章实训 时序逻辑电路的设计	192
第 6 章 脉冲波形的产生与整形	196
6.1 概述	196
6.2 555 定时器	197
6.2.1 电路结构	197
6.2.2 基本功能	198
6.3 单稳态触发器	198
6.3.1 555 定时器构成的单稳态触发器	199
6.3.2 集成单稳态触发器	199
6.3.3 应用举例	201
6.4 多谐振荡器	202
6.4.1 555 定时器构成的多谐振荡器	202
6.4.2 应用举例	203
6.5 施密特触发器	204
6.5.1 555 定时器构成的施密特触发器	205

6.5.2 应用举例	206
6.6 555 定时器的典型应用	207
6.6.1 555 触摸定时开关	207
6.6.2 直流电机调速控制电路	208
6.6.3 电热温控器	208
6.6.4 简易电子琴电路	209
6.6.5 速率检测电路	209
本章小结	210
习题 6	211
本章实训 1 555 定时器及其应用电路的设计与检测	213
本章实训 2 施密特触发器的应用实训	216
本章实训 3 多谐振荡器和单稳态电路的设计及调试实训	218
第 7 章 数模、模数转换电路	221
7.1 D/A 转换器	221
7.1.1 D/A 转换原理	221
7.1.2 倒 T 型电阻网络 D/A 转换器	221
7.1.3 D/A 转换器的主要技术指标	224
7.1.4 8 位集成 DAC0832	225
7.2 A/D 转换器	227
7.2.1 A/D 转换的一般步骤	227
7.2.2 取样保持电路	228
7.2.3 逐次渐近型 A/D 转换器	229
7.2.4 双积分型 A/D 转换器	231
7.2.5 A/D 转换器的主要技术指标	232
7.2.6 8 位集成 ADC0809	233
本章小结	234
习题 7	235
本章实训 1 D/A、A/D 转换器的测试	236
本章实训 2 D/A 转换器应用实训	239
第 8 章 存储器和可编程逻辑器件	243
8.1 概述	243
8.1.1 存储器	243
8.1.2 可编程逻辑器件	244
8.2 存储器及其应用	244
8.2.1 随机存取存储器 RAM	244
8.2.2 只读存储器 ROM	248
8.3 可编程逻辑器件 PLD	253
8.3.1 PLD 的基本结构	254
8.3.2 PLD 的分类	254
8.3.3 PLD 的应用	255
8.4 存储器的 VHDL 描述	258
8.4.1 只读存储器(ROM)的 VHDL 描述	258

8.4.2 随机存储器(RAM)的 VHDL 描述	259
本章小结	260
习题 8	260
本章实训 存储器 RAM 和 ROM 的测试	262
附录 A 综合实训	266
实训 1 感应式防盗报警电路	266
实训 2 医院住院患者“呼喊”器	267
实训 3 用 VHDL 设计密码锁	268
实训 4 用 VHDL 设计 4 位微处理器的算术逻辑单元(ALU)	271
参考文献	274

第 1 章 数字电路基础知识

本章教学要点:

- 常用数制及其转换;
- 码制及常用代码;
- 逻辑运算及逻辑函数的表示方法;
- 逻辑代数的基本定律和规则;
- 逻辑函数的公式化简法及卡诺图化简法;
- VHDL 语言程序的基本结构及 VHDL 语言中的数据。

1.1 数字电路概述

1.1.1 模拟信号和数字信号

在自然界中有形形色色的物理量,尽管它们的性质各异,但就其变化规律而言,不外乎有两大类:模拟信号和数字信号。

1. 模拟信号

模拟信号是指时间和数值上都是连续变化的信号,它具有无穷多的数值,其数学表达式也较复杂,如正弦函数、指数函数等。图 1-1(a)所示为典型的模拟信号。

人们从自然界感知的许多物理量均属于模拟性质的,如速度、压力、声音、温度等。在工程技术上,为了便于分析,常用传感器将模拟量转换为电流、电压或电阻等电量,以使用电路进行分析和处理。传输、处理模拟信号的电路称为模拟电子线路,简称模拟电路。在模拟电路中主要关心输入、输出信号间的大小、相位、失真等方面的问题。

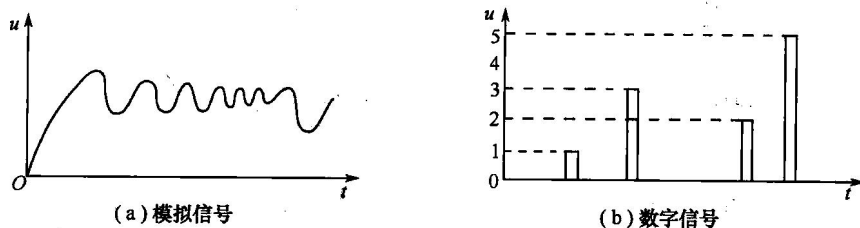


图 1-1 模拟信号与数字信号

2. 数字信号

电子系统中一般均含有模拟和数字两种构件。模拟电路是系统中必需的组成部分。但是,为了便于存储、分析或传输信号,数字电路更具优越性。

数字信号是指时间和数值上都是不连续变化的信号,即数字信号具有离散性,如图 1-1(b)所示。交通信号灯控制电路、智力竞赛抢答电路,以及计算机键盘输入电路中的信号,都是数字信号。对数字信号进行传输、处理的电子线路称为数字电子线路,简称数字电路。在数字电路中主要关心输入、输出之间的逻辑关系。

1.1.2 数字电路的特点

(1) 数字电路中的工作信号是不连续的数字信号,反映在电路上只有高电平和低电平两种状态,因此在分析数字电路时采用二进制数码 0 和 1 来表示电路中的高、低两种电平状态。

(2) 与模拟电路相同,数字电路也是由半导体器件如二极管、三极管、场效应管组成,但不同电路中器件的工作状态不同。数字电路在稳态情况下,半导体器件工作于开、关状态,这种开关状态是利用器件的导通和截止来实现的,器件的导通和截止反映在电路上就是电流的有无、电压的高低,这种有和无、高和低相对立的两种状态,正好可用二进制数码 0 和 1 来表示。因此,数字电路中的信号采用的是二进制表示,二进制数码 0 和 1 在此只代表两种不同的状态,没有数量的大小。例如,用 0 和 1 分别表示一件事的是与非、真与假、一盏灯的亮与灭、一个开关的开通与断开等。

(3) 数字电路对元件的精度要求不高,允许有较大的误差,只要在工作时能够可靠地区分 0 和 1 两种状态就可以了。因此,数字电路便于集成化、系列化生产,具有使用方便、可靠性高、价格低廉等特点。

(4) 与模拟电路不同,数字电路讨论的是输入与输出之间抽象的逻辑关系,使用的主要方法是逻辑分析和逻辑设计,主要工具是逻辑代数,所以数字电路又称逻辑代数。

(5) 数字电路能够对数字信号进行各种逻辑运算和算术运算,因此广泛应用于数控装置、智能仪表及计算机中。

1.1.3 数字电路与脉冲电路的异同

脉冲信号是短促的断续作用的电压或电流信号。图 1-2 所示是常见的脉冲信号波形。除正弦波和它的合成信号外,其他形式的信号都属于脉冲信号。在这个意义上,数字电路也是一种脉冲电路。但一般脉冲电路主要是研究脉冲波形的产生、放大、变换、整形和传输,而数字电路则重点研究电路输入与输出变量之间的逻辑关系,以及如何用各种基本逻辑单元来实现具有逻辑和数值运算的电路。

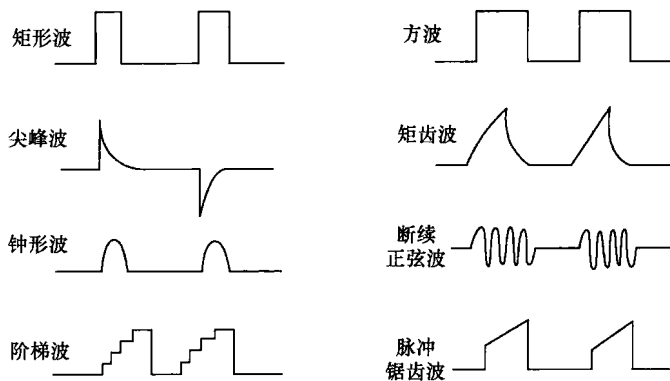


图 1-2 常见的脉冲信号波形示意图

1.1.4 数字电路的分类

数字电路按其组成的结构不同,可分为分立元件电路和集成电路两大类。分立元件电路是最基本的电路,它是由二极管、三极管、电阻、电容等元器件组成的,并且所有元件都裸露在

外,没有封装。随着集成电路的飞速发展,分立元件电路已逐步被取代,集成电路按集成度的大小分为小规模集成电路(SSI,集成度为1门/片~10门/片)、中规模集成电路(MSI,集成度为10门/片~100门/片)、大规模集成电路(LSI,集成度为100门/片~1000门/片)、超大规模集成电路(VLSI,集成度大于1000门/片)。集成电路从应用的角度可分为通用型和专用型两大类,通用型是已被定型的标准化、系列化的产品,适用于不同的数字设备;专用型是指为某种特殊用途专门设计,具有特定的复杂而完整功能的功能块型产品,只适用于专用的数字设备。

数字电路按所用元器件的不同,可分为双极型和单极型电路。其中双极型电路又有TTL、DTL、ECL、IIL、HTL等多种,单极型电路有JFET、NMOS、PMOS、CMOS四种。

按数字电路逻辑功能的不同特点,又分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。

1.1.5 数字电路的应用

数字电路较模拟电路具有更多的优点,如有较强的稳定性、可靠性和抗干扰能力,精确度较高,具有算术运算和逻辑运算能力,可进行逻辑推理和逻辑判断,电路结构简单,便于制造和集成等。因此,数字电路的应用领域越来越广泛。

在数字通信系统中,可以用若干个0和1编成各种代码,分别代表不同的含义,用于实现信息的传送。

利用数字电路的逻辑推理和判断功能,可以设计出各式各样的数控装置,用来实现对生产和过程的自动控制。其工作过程是:首先用传感器在现场采集受控对象的数据,求出它们与设定数据的偏差,接着由数字电路进行计算、判断,然后产生相应的控制信号,驱动伺服装置对受控对象进行控制或调整。这样不仅能通过连续监控提高生产的安全性和自动化水平,同时也提高了产品的质量,降低了成本,减轻了劳动强度。

在数字电子技术基础上发展起来的数字电子计算机,是当代科学技术最杰出的成就之一。今天,电子计算机不仅成为近代自动控制系统中不可缺少的一个重要组成部分,而且已经渗透到了国民经济和人民生活的各个领域,成为人们工作、生活、学习不可或缺的重要组成部分,并在许多方面产生了根本性的变革。尤其是计算机网络技术的飞速发展,使人们获取信息、享受网络服务更为便捷。

然而,数字电路的应用也具有它的局限性。前面已提到,在自动控制和测量系统中,被控制和被测量的对象往往是一些连续变化的物理量,即模拟信号,而模拟信号不能直接为数字电路所接收,这就给数字电路的使用带来很大的不便。为了用数字电路处理这些模拟信号,必须用专门的电路将它们转换为数字信号(称为模数转换);而经数字电路分析、处理输出的数字量往往还要通过专门的电路转换成相应的模拟信号(称为数模转换)才能为执行机构所接收。这样一来,不但导致了整个设备的复杂化,而且也使信号的精度受到影响,数字电路本身可以达到的高精度也因此失去了意义。因此,在使用数字电路时,应具体情况具体分析,以便于操作、提高生产效率为目的。

1.2 数 制

数制即计数体制,它是按照一定规则表示数值大小的计数方法。日常生活中最常用的计数体制是十进制,数字电路中常用的是二进制,有时也采用八进制和十六进制。对于任何一个数,可以用不同的进制来表示。

1.2.1 各种数制

1. 十进制 (Decimal)

十进制是最常用的数制。在十进制中,共有 0~9 十个数码,所以它的运算规则是“逢十进一,借一当十”,故为十进制;同一数字符号在不同的数位代表的数值不同。设某十进制数 N_{10} 有 n 位整数, m 位小数,则可表示为

$$N_{10} = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i 10^i \quad (1-1)$$

式中, k_i 为第 i 位的系数,可取 0, 1, 2, ..., 9; 10^i 为第 i 位的权; 10 为进位基数,基数和权是进位制的两个要素,利用基数和权,可以将任何一个数表示成多项式的形式。例如,十进制数 505.6 可表示成

$$(505.6)_{10} = 5 \times 10^2 + 0 \times 10^1 + 5 \times 10^0 + 6 \times 10^{-1}$$

这种表示方法称为多项式表示法或按权展开式。

2. 二进制 (Binary)

在数字电路中,应用最广的是二进制。二进制数中只有 0、1 两个数字符号,所以运算规则是“逢二进一,借一当二”,各位的权为 2^i , k_i 为第 i 位的系数,设某二进制数 N_2 有 n 位整数, m 位小数,则可表示为

$$N_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i 2^i \quad (1-2)$$

利用式(1-2)可以将任何一个二进制数转换为十进制数。

【例 1-1】将二进制数 101.11 转换为十进制数。

【解】 $(101.11)_2 = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = (5.75)_{10}$

计算机内采用的是二进制表示,采用二进制具有以下优点:

①二进制只有 0 和 1 两个代码,因此,在数字系统中,可用电子器件的两种不同状态来表示这两个代码,实现起来非常方便。例如,用晶体管的导通和截止来表示 0 和 1,或用低电平和高电平来表示 0 和 1 等。所以,二进制数的物理实现简单、易行、可靠,并且存储和传送也方便。

②二进制运算规则简单,有利于简化计算机的内部结构,提高运算速度。

二进制数的缺点是书写位数太多,不便记忆,为此数字系统通常用八进制和十六进制。

3. 八进制 (Octal)

八进制有 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 八个数码,基数为 8,它的运算规则是“逢八进一,借一当八”。任意一个八进制数 N_8 可表示为

$$N_8 = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i 8^i \quad (1-3)$$

利用式(1-3)可将任意一个八进制数转换为十进制数。

【例 1-2】将八进制数 372.5 转换为十进制数。

【解】 $(372.5)_8 = 3 \times 8^2 + 7 \times 8^1 + 2 \times 8^0 + 5 \times 8^{-1} = (250.625)_{10}$

4. 十六进制 (Hexadecimal)

十六进制数采用 16 个数码,而且“逢十六进一,借一当十六”。这 16 个数码是 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, A(对应于十进制数中的 10), B(11), C(12), D(13), E(14), F(15)。十六进制数的基数是 16。

仿照式(1-1),任一十六进制数 N_{16} 可表示为

$$N_{16} = \sum_{i=m}^{n-1} k_i 16^i \quad (1-4)$$

利用式(1-4)可将任意一个十六进制数转换为十进制数。

【例 1-3】将十六进制数 4E6 转换为十进制数。

【解】 $(4E6)_{16} = 4 \times 16^2 + 14 \times 16^1 + 6 \times 16^0 = (1254)_{10}$

今后,十进制数(Decimal)、二进制数(Binary)、八进制数(Octal)、十六进制数(Hexadecimal)也常采用第一个字母 D、B、O、H 作为其标志,加在数的后面。

例如, $(F58. B2)_{16}$ 可写成 F58. B2H, 还可写成 $(F58. B2)_H$ 。

二进制数与八进制数、十进制数、十六进制数之间的对应关系见表 1-1。

表 1-1 二进制数与八进制数、十进制数、十六进制数之间的对应关系

十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数	十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数
0	0	0	0	9	1001	11	9
1	1	1	1	10	1010	12	A
2	10	2	2	11	1011	13	B
3	11	3	3	12	1100	14	C
4	100	4	4	13	1101	15	D
5	101	5	5	14	1110	16	E
6	110	6	6	15	1111	17	F
7	111	7	7	16	10000	20	10
8	1000	10	8				

1.2.2 数制转换

人们习惯用十进制数,但送入机器时,必须将十进制数转换成数字系统能识别的二进制数。用二进制数表示一个比较大的数时,位数较长不容易读写和记忆,这时常采用八进制数和十六进制数,作为二进制数的缩写。因此,务必要熟练掌握不同数制之间的转换。

1. 十进制数转换成非十进制数

(1) 十进制数转换成二进制数

整数部分:用除 2 取余的方法进行转换,转换结果为“先余为低,后余为高”;

小数部分:用乘 2 取整的方法进行转换,转换结果为“先整为高,后整为低”。

【例 1-4】将 $(21.125)_{10}$ 转换成二进制数。

【解】整数部分

2	21	余数	
2	10	1	↑ 第一个余数为二进制数的最低位
2	5	0	
2	2	1	
2	1	0	
	0	1	

小数部分

$$\begin{array}{l}
 0.125 \times 2 = 0.250 \quad \text{取出整数 } 0 \\
 0.250 \times 2 = 0.500 \quad \text{取出整数 } 0 \\
 0.500 \times 2 = 1.000 \quad \text{取出整数 } 1
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{第一个整数为二进制数的最高位} \\ \\ \text{最后一个整数为二进制数的最低位} \end{array}$$

所以有： $(21.125)_{10} = (10101.001)_2$ 。

(2)十进制数转换成八进制数

十进制数转换为八进制数与十进制数转换为二进制数的方法类似。

整数部分：用除 8 取余的方法进行转换，转换结果为“先余为低，后余为高”；

小数部分：用乘 8 取整的方法进行转换，转换结果为“先整为高，后整为低”。

【例 1-5】将 $(207.5)_{10}$ 转换成八进制数。

【解】整数部分

$$\begin{array}{r}
 8 \overline{)207} \\
 \underline{8 \quad 25} \\
 8 \overline{)3} \\
 \underline{0}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{余数} \\
 7 \uparrow \\
 1 \\
 3
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{第一个余数为八进制数的最低位} \\ \\ \text{最后一个余数为八进制数的最高位} \end{array}$$

小数部分

$$0.5 \times 8 = 4.0 \quad \text{取出整数 } 4, \text{余数为 } 0, \text{转换结束。}$$

综上所述可得： $(207.5)_{10} = (317.4)_8$ 。

(3)十进制数转换成十六进制数

十进制数转换为十六进制数与十进制数转换为二进制数的方法类似。

整数部分：用除 16 取余的方法进行转换，转换结果为“先余为低，后余为高”；

小数部分：用乘 16 取整的方法进行转换，转换结果为“先整为高，后整为低”。

【例 1-6】将 $(1023)_{10}$ 转换成十六进制数。

【解】

$$\begin{array}{r}
 16 \overline{)1023} \\
 \underline{16 \quad 63} \\
 16 \overline{)3} \\
 \underline{0}
 \end{array}
 \begin{array}{l}
 \text{余数} \\
 15 \uparrow \\
 15 \\
 3
 \end{array}
 \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{第一个余数为十六进制数的最低位} \\ \\ \text{最后一个余数为十六进制数的最高位} \end{array}$$

得到： $(1023)_{10} = (3FF)_{16}$ 。

值得注意的是，从二进制数、八进制数、十六进制数转换为十进制数，或十进制数转换为二进制整数，都能做到完全准确。但把十进制小数转换为其他进制小数时，除少数可以完全准确外，大多数存在误差，这时就要根据精度的要求进行“四舍五入”。

【例 1-7】将 $(0.706)_{10}$ 转换成二进制数，要求其误差不大于 0.1%。

【解】要使精度达到 0.1%，必须使 LSB(最低有效位)的值小于等于 0.1%。由于 $2^{-10} =$

$$\frac{1}{1024} < \frac{1}{1000} = 0.1\%, \text{所以小数点后取 } 10 \text{ 位即可满足精度要求。}$$

$$\begin{array}{l}
 0.706 \times 2 = 1.412 \quad 1 \quad a_{-1} \\
 0.412 \times 2 = 0.824 \quad 0 \quad a_{-2} \\
 0.824 \times 2 = 1.648 \quad 1 \quad a_{-3} \\
 0.648 \times 2 = 1.296 \quad 1 \quad a_{-4} \\
 0.296 \times 2 = 0.592 \quad 0 \quad a_{-5}
 \end{array}$$

$$0.592 \times 2 = 1.184 \quad 1 \quad a_{-6}$$

$$0.184 \times 2 = 0.368 \quad 0 \quad a_{-7}$$

$$0.368 \times 2 = 0.736 \quad 0 \quad a_{-8}$$

$$0.736 \times 2 = 1.472 \quad 1 \quad a_{-9}$$

由于最后的小数小于 0.5, 根据“四舍五入”的原则, $a_{-10} = 0$, 所以有

$$(0.706)_{10} = (0.101101001)_2$$

2. 二进制数与八进制数之间的转换

由于 1 位八进制数有 0~7 八个数码, 3 位二进制数正好有 000~111 八种组合, 它们之间有以下简单的对应关系:

八进制数 0 1 2 3 4 5 6 7

二进制数 000 001 010 011 100 101 110 111

利用这种对应关系, 可以很方便地在八进制数与二进制数之间进行转换。

将二进制数转换为八进制数的方法是: 以小数点为界, 将二进制数的整数部分从低位开始, 小数部分从高位开始, 每 3 位分成一组, 头尾不足 3 位的补 0, 然后将每组 3 位二进制数转换为 1 位八进制数。

【例 1-8】 将 $(10111010011.01011)_2$ 转换成八进制。

【解】

<u>010</u>	<u>111</u>	<u>010</u>	<u>011</u>	.	<u>010</u>	<u>110</u>
2	7	2	3	.	2	4

所以, $(10101010011.01011)_2 = (2723.24)_8$ 。

将八进制数转换为二进制数, 只要将每 1 位八进制数用 3 位二进制数表示即可。

【例 1-9】 将 $(3\ 274.65)_8$ 转换成二进制数。

【解】

<u>3</u>	<u>2</u>	<u>7</u>	<u>4</u>	.	<u>6</u>	<u>5</u>
011	010	111	100	.	110	101

所以, $(3\ 274.65)_8 = (011010111100.110101)_2$ 。

3. 二进制数与十六进制数之间的转换

由于 1 位十六进制数有 16 个代码, 而 4 位二进制数正好有 0000~1111 十六种组合, 它们之间也存在简单的对应关系。利用这种对应关系, 可以很方便地在十六进制数与二进制数之间进行转换。转换方法与二、八进制数的转换类似, 只是将二进制数中 3 位一组改为 4 位一组。

【例 1-10】 将二进制数 $(11010111010.011101)_2$ 转换成十六进制数。

【解】

<u>0110</u>	<u>1011</u>	<u>1010</u>	.	<u>0111</u>	<u>0100</u>
6	B	A	.	7	4

所以, $(11010111010.011101)_2 = (6BA.74)_{16}$ 。

【例 1-11】 将十六进制数 $(94E.B0C)_{16}$ 转换成二进制数。

【解】

<u>9</u>	<u>4</u>	<u>E</u>	.	<u>B</u>	<u>0</u>	<u>C</u>
1001	0100	1110	.	1011	0000	1100

所以, $(94E.B0C)_{16} = (100101001110.101100001100)_2$ 。

4. 其他进制数转换成十进制数

将其他进制数转换成十进制数时, 只要将该数写成按权展开式, 然后将各项相加求出最终结果即可, 此处不再赘述。