



普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

数字逻辑电路

张文超 主编

高惠芳 任兵 胡炜薇 樊凌雁 编



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

普通高等教育“十二五”规划教材
电子电气基础课程规划教材

数字逻辑电路

张文超 主编

高惠芳 任兵 胡炜薇 樊凌雁 编

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是根据教育部最新制定的电子技术基础课程教学基本要求,并结合作者多年的理论与实验教学经验和科研应用体会编写的专业技术基础课教材。全书共10章,主要包括:数字和逻辑基础、门电路、组合逻辑电路、触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生和整形、数模转换和模数转换电路、半导体存储器、可编程逻辑器件简介、数字逻辑电路简单应用与知识扩展,以及附录。本书提供配套电子课件和习题解答。

本书可作为高等学校电子信息、通信、计算机科学与技术、电气工程及其自动化、机电工程及相关电类专业的数字电子技术、数字逻辑电路课程的本科生教材,还可供相关领域工程技术人员参考。

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

数字逻辑电路 / 张文超主编. —北京:电子工业出版社,2013.10

电子电气基础课程规划教材

ISBN 978-7-121-20490-6

I. ①数… II. ①张… III. ①数字电路—逻辑电路—高等学校—教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第106911号

策划编辑:王羽佳

责任编辑:王羽佳 文字编辑:王晓庆

印 刷:涿州市京南印刷厂

装 订:涿州市京南印刷厂

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:23.75 字数:685.5千字

印 次:2013年10月第1次印刷

印 数:3000册 定价:48.00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 zits@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

“数字逻辑电路”是一门重要的专业基础技术。从技术发展角度和趋势上看，人类社会已经进入数字时代，各种数码（或数字）产品层出不穷、千姿百态、更新快速、应接不暇。从应用层面看，及其衍生技术已经在工业、农业、航天、航海、运输、教育、娱乐、医疗、通信、家电等各领域得到广泛应用。从学科专业技术链的角度看，它也是 DSP、SoC、EDA、计算机组成与设计、计算机工程、数字通信、嵌入式系统、数控机床、汽车电子、电力电子、工业自动化、自动测控、硬件描述语言、微电子、数字无线通信、无线互联网、物联网、GPRS、软件无线电、能量转换和单片机等技术及其应用的基础。

数字逻辑电路基础知识和技术也是很多高校研究生入学考试以及很多公司招聘技术人员时的必考科目，以此来甄别和筛选应聘人员。所以学好数字逻辑电路基础知识和技术是十分重要的。

本书是根据教育部最新制定的电子技术基础课程教学基本要求，并结合作者多年的理论与实验教学经验以及科研应用体会编写的专业技术基础课教材。

全书共分 10 章，主要内容包括：第 1 章数字和逻辑基础，第 2 章门电路，第 3 章组合逻辑电路，第 4 章触发器，第 5 章时序逻辑电路，第 6 章脉冲波形的产生与整形，第 7 章数模和模数转换电路，第 8 章半导体存储器，第 9 章可编程逻辑器件简介，第 10 章数字逻辑电路简单应用与知识扩展。

本书特色：

- ☆ 提供配套电子课件和习题解答
- ☆ 结合作者多年理论与实验教学经验以及科研应用体会编写而成
- ☆ 弥补传统教学方法中与实际应用实践脱节的不足，为顺利走向实际应用、进入设计者角色搭桥铺路

- ☆ 精选足够适当的应用分析实例

- ☆ 注重基本知识的实际应用方法和知识的扩展

- ☆ 侧重概念、理论和方法的讲述、训练和培养

本书可作为高等学校电子信息、通信、计算机科学与技术、电气工程及其自动化、机电工程及相关电类专业的数字电子技术、数字逻辑电路课程的本科生教材，还可供相关领域工程技术人员参考。

教学中，可以根据教学对象和学时等具体情况对书中的内容进行删减和组合，也可以进行适当扩展。为适应教学模式、教学方法和手段的改革，本书配套电子课件和习题解答等网络教学资源，请登录华信教育资源网（<http://www.hxedu.com.cn>）注册下载。

在本书的编写过程中，高惠芳负责编写了第 1、3 和 6 章；任兵负责编写了第 4、5 章；胡炜薇负责编写了第 7、8 章；樊凌雁负责编写了第 9 章；张文超负责编写了第 2、10 章和附录。张文超负责全书的整理和统稿（注：崔佳冬参与了第 7、8 和 9 章的前期编写工作）。

在本书的编写过程中，华东理工大学的吴勤勤教授和凌志浩教授提出了许多宝贵意见，电子工业出版社的王羽佳编辑等同志为本书的出版做了大量工作。在此一并表示感谢！

本书的编写参考了大量近年来出版的相关技术资料，吸取了许多专家和同仁的宝贵经验，在此向他们深表谢意。

虽然该教材已经作为校内自编教材使用了两轮，但仍然感到还有不少方面需要改进，很多内容有待进一步充实，且受编写时间所限，错误难免，敬请各位读者不吝指正。

作者

目 录

第 1 章 数字和逻辑基础	1	2.1.2 概述	43
1.1 数字逻辑电路概述	1	2.2 半导体二极管的开关特性	44
1.1.1 模拟信号与数字信号	1	2.3 半导体三极管的开关特性	46
1.1.2 模拟电路与数字电路	1	2.3.1 双极型三极管的结构	47
1.1.3 数字信号参数	2	2.3.2 双极型三极管的输入特性和输出特性	47
1.1.4 数字电路的基本功能及其应用	3	2.3.3 双极型三极管的开关等效电路	48
1.2 数制、数制转换和算术运算简介	5	2.3.4 简单双极型三极管开关电路	49
1.2.1 十进制数	5	2.3.5 双极型三极管的动态开关特性	49
1.2.2 二进制数、八进制数和十六进制数	5	2.4 场效应管(MOS管)的开关特性	50
1.2.3 不同进制数间相互转换	7	2.4.1 MOS管的结构	50
1.2.4 符号数的表示方法	9	2.4.2 MOS管的输入特性和输出特性	51
1.2.5 多位二进制数的运算	11	2.4.3 MOS管的开关等效电路	52
1.3 常用码制	13	2.4.4 MOS管的基本开关电路	52
1.3.1 数字编码	13	2.4.5 MOS管的4种类型	53
1.3.2 可靠性编码	14	2.5 最简单的与、或、非门电路	54
1.3.3 信息交换代码	16	2.5.1 二极管与门	54
1.4 逻辑代数基础	17	2.5.2 二极管或门	55
1.4.1 基本逻辑运算和复合逻辑运算	17	2.5.3 三极管非门	56
1.4.2 基本公式和常用公式	20	2.6 TTL集成门电路	56
1.4.3 基本规则	21	2.6.1 TTL反相器的电路结构和工作原理	56
1.5 逻辑函数的几种常用描述方法及相互间的转换	22	2.6.2 TTL反相器的静态输入特性和输出特性	58
1.5.1 逻辑函数的几种常用描述方法	23	2.6.3 TTL反相器的动态特性	62
1.5.2 不同描述方法之间的转换	24	2.6.4 其他类型的TTL门电路	65
1.5.3 逻辑函数的建立及其描述	26	2.6.5 TTL电路的改进系列简介	72
1.6 逻辑函数的化简	26	2.7 其他类型的双极型数字集成电路简介	72
1.6.1 逻辑函数的最简形式和最简标准	27	2.7.1 ECL电路	72
1.6.2 逻辑函数的公式化简法	27	2.7.2 I ² L电路	73
1.6.3 逻辑函数的两种标准形式	29	2.8 CMOS门电路	75
1.6.4 逻辑函数的卡诺图化简法	31	2.8.1 CMOS反相器的工作原理	75
1.6.5 具有无关项的逻辑函数的化简法	35	2.8.2 CMOS反相器的静态输入特性和输出特性	77
1.6.6 多输出变量的卡诺图化简法	37	2.8.3 CMOS反相器的动态特性	79
习题	38	2.8.4 其他类型的CMOS门电路	82
第 2 章 门电路	41		
2.1 引言与概述	41		
2.1.1 引言	41		

2.8.5 改进的 CMOS 门电路	88	第 5 章 时序逻辑电路	156
2.8.6 CMOS 电路的正确使用	89	5.1 概述	156
2.9 其他类型的 MOS 集成电路	90	5.1.1 时序逻辑电路的组成	156
习题	91	5.1.2 时序逻辑电路的分类	156
第 3 章 组合逻辑电路	96	5.1.3 时序逻辑电路功能的描述方法	156
3.1 概述	96	5.2 时序逻辑电路的分析	157
3.2 组合逻辑电路的分析与设计	97	5.2.1 时序逻辑电路的分析方法	157
3.2.1 组合逻辑电路的分析	97	5.2.2 同步时序逻辑电路的分析举例	157
3.2.2 组合逻辑电路的设计	98	5.2.3 异步时序逻辑电路的分析举例	158
3.3 常用中规模集成组合逻辑电路	101	5.3 寄存器	159
3.3.1 编码器	101	5.3.1 数码寄存器	159
3.3.2 译码器	106	5.3.2 移位寄存器	160
3.3.3 数据选择器	116	5.4 计数器	161
3.3.4 数据分配器	120	5.4.1 二进制计数器	162
3.3.5 数值比较器	121	5.4.2 十进制计数器	163
3.3.6 加法器	125	5.4.3 任意进制计数器	164
3.4 组合逻辑电路的竞争冒险现象	132	5.5 序列信号的产生与检测	165
3.4.1 竞争冒险的概念与原因分析	132	5.5.1 序列信号发生器	165
3.4.2 冒险现象的判别方法	133	5.5.2 序列信号检测器	165
3.4.3 冒险现象的消除方法	134	5.6 顺序脉冲发生器	166
习题	136	5.6.1 计数型顺序脉冲发生器	166
第 4 章 触发器	139	5.6.2 移位型顺序脉冲发生器	167
4.1 概述	139	5.7 1 bit 读/写存储器	168
4.2 基本 RS 触发器	139	5.8 时序逻辑电路的设计	168
4.2.1 用与非门组成的基本 RS 触发器	139	5.8.1 同步时序逻辑电路的设计	169
4.2.2 用或非门组成的基本 RS 触发器	143	5.8.2 异步时序逻辑电路的设计	172
4.3 同步触发器	144	5.9 时序逻辑模块之间的时钟处理技术	179
4.3.1 同步 RS 触发器	144	5.9.1 异步时钟的同步化技术	179
4.3.2 同步 D 触发器	146	5.9.2 同步时钟的串行化技术	179
4.4 边沿触发器	147	5.10 本章小结	179
4.4.1 边沿 D 触发器	147	习题	180
4.4.2 边沿 JK 触发器	148	第 6 章 脉冲波形的产生和整形	183
4.5 触发器的功能分类、功能表示方法及转换	148	6.1 概述	183
4.6 触发器的电气特性	151	6.2 单稳态电路	183
4.6.1 静态特性	151	6.2.1 用门电路或触发器组成的单稳态电路	183
4.6.2 动态特性	151	6.2.2 集成单稳态电路	189
4.7 本章小结	152	6.2.3 单稳态电路的应用	193
习题	152	6.3 施密特触发器	195
		6.3.1 由门电路组成的施密特触发器	195
		6.3.2 集成施密特触发器	197

6.3.3	施密特触发器的应用	200	8.2.1	掩模只读存储器	247
6.4	自激多谐振荡器	202	8.2.2	一次可编程只读存储器 (PROM)	249
6.4.1	由门电路组成的多谐振荡器	203	8.2.3	高压编程紫外线可擦除的多次 可编程只读存储器	250
6.4.2	环形振荡器	205	8.2.4	电擦除的多次可编程 只读存储器	251
6.4.3	用施密特触发器构成的 多谐振荡器	207	8.2.5	闪速只读存储器	252
6.4.4	石英晶体多谐振荡器	209	8.2.6	ROM 应用举例	253
6.5	555 定时器的原理和应用	210	8.3	随机存取存储器	254
6.5.1	555 定时器原理	210	8.3.1	RAM 的基本结构	254
6.5.2	用 555 定时器构成施密特 触发器	212	8.3.2	静态 RAM	254
6.5.3	用 555 定时器构成 单稳态电路	214	8.3.3	动态 RAM	257
6.5.4	用 555 定时器构成 多谐振荡器	216	8.3.4	双口 RAM	260
习题		218	8.3.5	铁电存储器	263
第 7 章	数模转换和模数转换电路	222	8.4	顺序存取存储器	268
7.1	数模转换和模数转换基本概念	222	8.4.1	顺序存取存储器的基本结构和 工作原理	268
7.1.1	数模转换器的基本工作原理	222	8.4.2	顺序存取存储器中的动态 MOS 移位寄存器	270
7.1.2	模数转换器的基本工作原理	222	8.4.3	电荷耦合器件移位寄存器	270
7.1.3	数模转换的主要技术指标	222	8.4.4	顺序存取存储器的应用介绍	271
7.1.4	模数转换的主要技术指标	223	8.5	存储器容量的扩展	272
7.2	数模转换电路	224	8.5.1	存储器的位扩展	272
7.2.1	权电阻网络数模转换工作原理	224	8.5.2	存储器的字扩展	272
7.2.2	权电流网络数模转换工作原理	225	8.5.3	单片机系统中常用的存储器 扩展技术	273
7.2.3	R-2R 电阻网络数模转换 工作原理	226	8.6	ROM 和 RAM 综合应用举例	274
7.2.4	PWM 型数模转换器工作原理	227	8.6.1	用存储器实现组合逻辑函数	274
7.2.5	集成数模转换器介绍	228	8.6.2	用存储器实现时序逻辑功能	277
7.2.6	数模转换的简单应用	229	8.7	本章小结	278
7.3	模数转换电路	230	习题		278
7.3.1	数据采集系统的一般构成方式	230	第 9 章	可编程逻辑器件简介	281
7.3.2	采样保持器的工作原理	232	9.1	电子器件分类和可编程逻辑器件 概述	281
7.3.3	模拟多路开关的工作原理	233	9.1.1	电子器件分类	281
7.3.4	几种典型模数转换器及 实际器件介绍	234	9.1.2	可编程逻辑器件概述	281
7.4	本章小结	241	9.1.3	本章内容与 EDA 技术的关系	282
习题		241	9.2	可编程逻辑器件	283
第 8 章	半导体存储器	246	9.2.1	PLD 的基本结构、表示方法	283
8.1	半导体存储器概述	246	9.2.2	作为可编程逻辑器件使用的 只读存储器 (PROM)	284
8.2	只读存储器	246			

9.2.3	可编程逻辑阵列 (PLA) ……	286	10.5.3	异或门作奇偶校验用 ……	327
9.2.4	可编程阵列逻辑 (PAL) ……	287	10.5.4	异或门作符合门用 ……	327
9.2.5	通用可编程逻辑器件 (GAL) ……	291	10.5.5	异或门的边沿检测作用 ……	327
9.3	复杂可编程逻辑器件 (CPLD) 简介 ……	295	10.5.6	异或门完成倍频功能 ……	330
9.3.1	复杂可编程逻辑器件概述 ……	295	10.5.7	异或门构成的移频键控电路 ……	330
9.3.2	现场可编程门阵列 (FPGA) ……	296	10.5.8	异或门构成的交流电过零 检测电路 ……	331
9.3.3	复杂可编程逻辑器件 (CPLD) ……	297	10.5.9	异或门构成的鉴相电路 ……	332
9.3.4	常用 FPGA 和 CPLD 器件及其 厂家介绍 ……	298	10.5.10	异或门在液晶显示驱动控制中的 应用 ……	333
9.4	在系统编程技术和可编程逻辑器件 ……	299	10.6	符合门 (一致门) 及其应用 ……	335
9.4.1	在系统可编程概念和 ISP 技术特点 ……	299	10.6.1	符合门在密码锁中的应用 ……	335
9.4.2	ISP 逻辑器件分类 ……	300	10.6.2	符合门在某些板卡式总线中的 应用 ……	336
9.4.3	在系统编程原理及方式 ……	302	10.6.3	符合门的实现方法 ……	338
9.4.4	isp-PLD 的开发工具 ……	303	10.6.4	符合门的其他应用 ……	339
9.5	EDA 技术 ……	304	10.7	计数器知识的扩展—— 时序状态机 ……	339
9.5.1	硬件描述语言介绍 ……	304	10.8	逻辑器件的输出形式 ……	340
9.5.2	常用 EDA 工具 ……	305	10.9	OC (OD) 门的应用 ……	342
9.6	本章小结 ……	306	10.9.1	不同逻辑电平接口电路 ……	342
习题	……	306	10.9.2	OC 门或 OD 门作驱动器用以及 各种驱动器 ……	342
第 10 章	数字逻辑电路简单应用与		10.9.3	OC 门和 OD 门在总线中 的应用 ……	348
	知识扩展 ……	308	10.10	长线或容性负载的驱动方法及 驱动器件 ……	349
10.0	本章引言 ……	308	10.10.1	OC 门 (或 OD 门) 驱动容性 负载时的不足之处与图腾柱式 的驱动优点 ……	349
10.1	与门 (与非门) 和或门 (或非门) 的应用基础 ……	309	10.10.2	长线驱动和通信线路驱动的 特点、驱动器件与应用举例 ……	351
10.2	与门 (与非门) 和或门 (或非门) 的应用扩展 ……	310	10.10.3	功率器件的基极或门极驱动的 特点、驱动器件与应用举例 ……	353
10.2.1	门控、选通、片选和使能 ……	310	附录 A	逻辑器件及其名称 (功能) 简介 ……	356
10.2.2	逻辑闸门在电子计数器 (频率计) 中的应用 ……	312	附录 B	数字集成电路的命名 ……	366
10.2.3	逻辑闸门在单片机中的应用 ……	313	附录 C	常用中规模集成电路国标符号 ……	368
10.3	1 线-2 线译码器和双缓冲功能 ……	315	参考文献	……	371
10.4	多路开关与程控的概念及多功能器件 举例 ……	316			
10.4.1	多路开关原理及画法演变 ……	316			
10.4.2	多路开关的应用 ……	318			
10.5	异或门的应用 ……	326			
10.5.1	异或门完成算术加法 (本位加) 运算 ……	326			
10.5.2	异或门作极性控制调节作用 ……	326			

第1章 数字和逻辑基础

1.1 数字逻辑电路概述

1.1.1 模拟信号与数字信号

1. 模拟信号

自然界中，人们可以感知的许多物理量，如速度、压力、温度、声音、质量及位置等，都有一个共同的特点：即它们在时间上和数值上是连续变化的信号。这种连续变化的物理量称为模拟量，表示模拟量的信号称为模拟信号。在工程实践中，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，再送到后续的信号处理系统（可能是模拟系统，也可能是数字系统，还可能是模拟与数字的混合系统）中做进一步处理。图 1-1 所示为两种电压的模拟信号的波形，模拟信号也可以是电流或其他物理量的波形。

2. 数字信号

另一类物理量，它们在时间上和数值上都是离散的信号，或者说不连续的，且其数值的大小和每次的变化都是某个值的整数倍，这种物理量称为数字量。表示数字量的信号称为数字信号。例如，普通指针式万用表在指示电压值时，通过表针的摆动和表面的刻度来指示电压值，其值是连续变化的；而数字式万用表则通过数字来指示电压值。例如，某一只数字式万用表只能显示 3 位数字，它显示某电压值为 7.55V，比这个电压值再大一点的显示是 7.56V，但是该表无法显示 7.555V，它只能以每隔 0.01V 来分挡显示，说明它的指示值是不连续的，这种不能连续变化的显示信号就是数字信号。测出的电压值会存在一定误差，该误差取决于数字万用表的位数。

图 1-2 所示的波形是一种幅度取值只有两个值（0 和 1）的数字信号的波形，它是目前最常见的数字信号的波形，称为“二进制信号”。

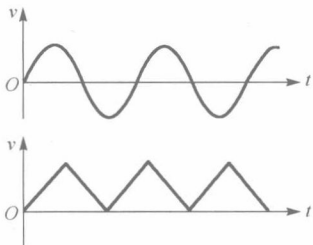


图 1-1 模拟信号波形



图 1-2 一种数字信号波形

1.1.2 模拟电路与数字电路

处理模拟信号电子电路称为模拟电路，而工作于数字信号下的电子电路称为数字电路。所谓数字电路就是用于处理数字信号的电路。数字电路与模拟电路相比有很大的不同，数字电路主要是对数

字信号进行逻辑运算和数字处理, 这些运算和处理有时是相当复杂的, 这一点决定了对数字电路的识图不同于模拟电路的识图。

关于数字电路这里先介绍下列一些特点, 以便对这种电路有初步印象。

(1) 数字电路中只处理二进制中的“0”和“1”两种信号, “0”表示信号无, “1”表示信号有。从电路硬件这一角度上讲, 电子电路中的元器件特别是三极管只工作在有信号和无信号两种状态, 也就是数字电路中的三极管多半工作在开关状态, 不像模拟电路中的三极管工作在放大状态。

(2) 数字电路中, 三极管的饱和状态与截止状态分别对应于数字信号中的“0”和“1”, 可用三极管截止时输出的高电平表示数字信号的“1”状态, 而用三极管饱和导通时输出的低电平表示数字信号中的“0”状态。三极管的这一工作状态与模拟电路是完全不同的, 在进行数字电路识图时电路分析方法就不能与模拟电路中三极管放大状态的分析方法相同。

(3) 由于数字信号只有“0”和“1”两种, 那么对数字电路的工作要求就是能够可靠地区别信号为“0”和信号为“1”两种状态, 因此对数字电路的精度要求不高, 这适合于对数字电路进行集成化, 加上对数字信号的处理和运算都是相当复杂的过程, 所以数字电路中都是采用集成电路, 且许多是大规模集成电路, 这一点又使数字电路工作的分析增加了一份神秘的色彩。

(4) 数字电路是实现逻辑功能和进行各种数字运算的电路。数字信号在时间上和数值上是不连续的, 所以它在电路中只能表现为信号的有、无(或信号的高电平、低电平)两种状态。数字电路中用二进制数“0”和“1”来代表低电平和高电平两种状态, 数字信号便可用“0”和“1”组成的代码序列来表示。因此, 学习数字电路首先要了解有关二进制数知识, 否则对数字电路的分析将寸步难行。

因此, 概括起来, 对于模拟电路和数字电路, 其主要区别如下。

(1) 工作任务不同

模拟电路研究的是输出信号与输入信号之间的大小、相位、失真等方面的关系; 数字电路主要研究的是输出与输入间的逻辑关系(因果关系)。

(2) 三极管的工作状态不同

模拟电路中的三极管工作在线性放大区, 是一个放大元件; 数字电路中的三极管工作在饱和或截止状态, 起开关作用。所以, 模拟电路和数字电路的基本单元电路、分析、设计的方法及研究的范围均不同。

1.1.3 数字信号参数

模拟信号的表示方式可以是数学表达式, 也可以是波形图等。数字信号的表示方式可以是二值数字逻辑, 以及由逻辑电平描述的数字波形。

1. 理想数字信号的主要参数

数字信号是一种二值信号, 用两个电平(高电平和低电平)分别来表示两个逻辑值(逻辑1和逻辑0), 如图1-3所示。

一个理想的周期性数字信号如图1-4所示, 可以用下列参数来描述。

V_m : 信号幅度, 即高电平的值。

T : 信号的重复周期, 表示两个相邻脉冲之间的时间间隔; 有时也使用频率 $f = 1/T$ 表示单位时间内脉冲重复的次数。

t_w : 脉冲宽度, 即波形高电平维持的时间。

q (或 β): 占空比, 其定义为脉冲宽度 t_w 与信号周期 T 的比值, 即

$$q(\%) = \frac{t_w}{T} \times 100\% \quad (1-1)$$



图 1-3 理想数字信号的波形

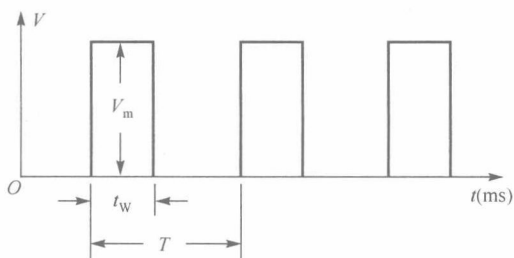


图 1-4 理想的周期性数字信号

2. 实际数字信号波形及参数

在实际的数字系统中，数字信号并没有那么理想。当它从低电平跳变到高电平，或从高电平跳变到低电平时，边沿没有那么陡峭，而要经历一个过渡过程，分别用上升时间 t_r 和下降时间 t_f 描述，如图 1-5 所示。

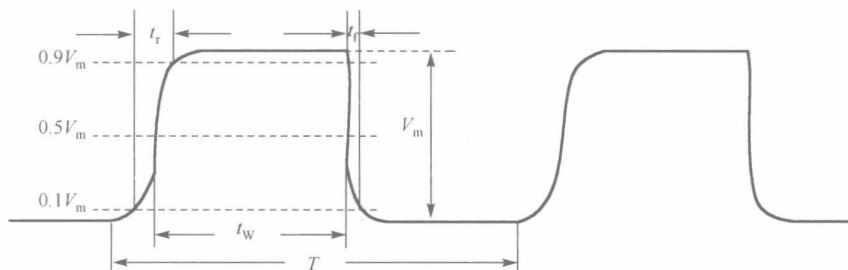


图 1-5 实际数字信号波形

该信号除了具有上述几个参数外，还定义了如下参数。

t_r ：在脉冲的上升沿，从脉冲幅值的 10% 上升到 90% 所经历的时间（典型值 ns）；

t_f ：在脉冲的下降沿，从脉冲幅值的 90% 下降到 10% 所经历的时间（典型值 ns）。

t_w ：脉冲幅值从脉冲波形的上升沿上升到 $0.5V_m$ 开始，到下降沿下降至 $0.5V_m$ 为止的时间间隔。

1.1.4 数字电路的基本功能及其应用

数字电路的基本功能是对输入的数字信号进行算术运算和逻辑运算，即它具有一定的“逻辑思维”能力。数字电路是计算机、自动控制系统、各种智能仪表、现代通信系统等的基本电路，是学习这些专业知识的基础。

图 1-6 所示为一个典型的早期的电子系统的组成框图。框图中各部分电路功能如下。

(1) 传感器

传感器是一种检测装置，能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用信号的器件或装置，通常由敏感元件和转换元件组成，它是实现自动检测和自动控制的首要环节。该内容有专门的课程讲述。

(2) 信号处理电路

信号处理电路完成根据实际需要对传感器送来的信号进行隔离、放大、滤波、运算、转换等处理。这部分电路一般为模拟电路，在模拟电子技术中论述。

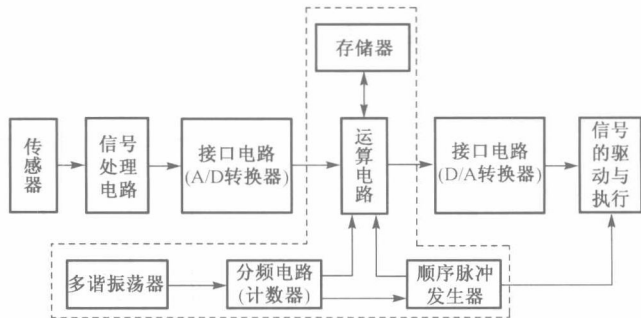


图 1-6 典型的电子系统的组成框图

(3) 接口电路——A/D 转换器和 D/A 转换器

由于一般信号处理电路输出的是模拟信号，而数字运算电路只能处理数字信号，所以需通过 A/D 转换器把模拟信号转换成数字信号，运算电路对信号进行处理之后，再通过 D/A 转换器把数字信号转换成模拟信号。接口电路（即 A/D 转换器和 D/A 转换器）将在第 7 章进行介绍。

(4) 运算电路

运算电路可完成信息的算术运算和逻辑运算，这部分内容在第 1 章后续部分和第 3 章中介绍。

(5) 存储器

数字系统需要处理的数据量越来越大，速度也越来越快。有关存储器的知识及技术指标等在第 8 章中介绍。

访问存储器中指定地址的内容，需要对地址进行译码，即通过地址译码器寻址到相应的存储单元。译码器的内容将在第 3 章中介绍，对存储器中的内容如果需要显示，在该章也介绍了七段译码器及数码显示等内容。

(6) 信号的驱动与执行

系统输出的控制信号一般功率有限，需通过功率放大后，驱动执行机构完成控制功能。功率放大电路的内容一般在模拟电路中介绍。

(7) 波形的产生与整形电路——多谐振荡器

很多数字电路器件工作时都需要时钟信号，该信号可通过多谐振荡器获得，这部分的内容将在第 6 章中详细介绍。

(8) 计数器（分频器）

不同数字电路器件需要的时钟频率可能有所不同，此时可通过分频电路——计数器获得不同频率的时钟信号。分频器的设计与分析将在第 5 章中介绍。

(9) 顺序脉冲发生器

系统各部分的电路需要按照事先规定的时间顺序依次工作，顺序脉冲发生器便可完成此项工作，这部分的内容将在第 5 章中介绍。

随着数字电子技术及计算机的迅猛发展，图 1-6 中虚线框内的运算电路、波形产生与整形电路、分频电路及顺序脉冲发生器等可采用计算机来完成，这种计算机可选用通用计算机，也可选用单片机、数字信号处理器（Digital Signal Processor，简称 DSP）及基于某总线的专用 CPU 等。图 1-7 所示为单片机的温度检测和控制电路实例。

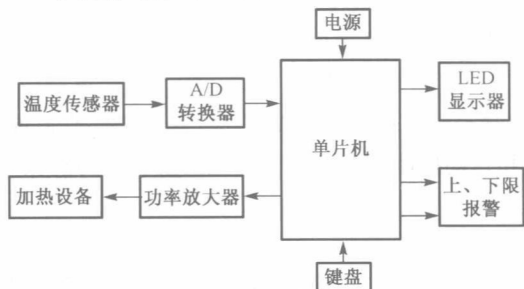


图 1-7 温度检测和控制电路实例

1.2 数制、数制转换和算术运算简介

数制是数的表示方法,用数字表示数量大小时,经常要采用多位数码。我们把多位数码中每一位的构成方法以及从低位到高位进位的规则称为数制。

人们在日常生活和工作中习惯于使用十进制数,而在数字系统中,如计算机中,通常使用二进制数,有时也使用八进制数或十六进制数。

1.2.1 十进制数

在十进制数中,每一位有0~9共10个数码,所以计数的基数是10。超过9的数必须用多位数表示,其中,低位和相邻高位之间的关系是“逢十进一”,故称为十进制。所以,十进制就是以10为基数的计数体制。

数码处于不同位置时,它所代表的数值是不同的,例如,十进制数1234.56可以表示为

$$1234.56 = 1 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 4 \times 10^0 + 5 \times 10^{-1} + 6 \times 10^{-2}$$

其中, 10^3 、 10^2 、 10^1 、 10^0 分别为千位、百位、十位、个位数码的权,也就是相应位的1所代表的实际数值; 10^{-1} 、 10^{-2} 是小数点以右各位数码的权值,是基数10的负幂。

根据以上分析,任意十进制数可表示为

$$(N)_D = \sum_{i=-m}^n d_i \times 10^i \quad (1-2)$$

式中, d_i 是第 i 位的系数,它可以是0~9这10个数码中的任何一个数字; n 、 m 分别表示整数及小数部分的位数。

如果将式(1-2)中的10用基数 R 来代替,就可以得到任意进制数的表达式

$$(N)_R = \sum_{i=-m}^n d_i \times R^i \quad (1-3)$$

式中, d_i 是第 i 位的系数,根据基数 R 的不同,它的取值为 R (0~ $R-1$) 个不同的数码。

构成数字电路的基本思路是把电路的状态与数码对应起来,十进制数的10个数码要求电路有10个完全不同的状态,这使得电路很复杂,因此用数字电路来存储或处理十进制数是不方便的。在数字电路中不直接处理十进制数,而常常采用二进制数、八进制数和十六进制数。

1.2.2 二进制数、八进制数和十六进制数

1. 二进制数

在二进制数中,每一位仅有0和1两个数码,所以计数基数为2。二进制数的进位规则是“逢二进一”,即 $1+1=10$ (读为“壹零”)。注意:这里的“10”与十进制数的“10”是完全不同的,它并不代表数“拾”。左边的1表示 2^1 位数,右边的0表示 2^0 位数,即 $10 = 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0$ 。因此,二进制数就是以2为基数的计数体制。

根据式(1-3),任何一个二进制数均可表示为

$$(N)_B = \sum_{i=-m}^n d_i \times 2^i \quad (1-4)$$

式中, d_i 是第 i 位的系数, 它可以是 0、1 两个数码中的任何一个数字, n 、 m 分别表示整数及小数部分的位数。式 (1-4) 也可以作为二进制数转换为十进制数的转换公式, 例如

$$\begin{aligned}(1010.101)_B &= 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= (10.625)_D\end{aligned}$$

式中, 分别用下标 B (Binary) 和 D (Decimal) 表示括号中的数是二进制数和十进制数, 有的书上也用 2 和 10 表示。

采用二进制数的主要优点是容易用器件实现。由于二进制的每一位只有 0、1 两种取值, 因此可以用具有两个稳定状态的元件来表示一位二进制数。例如, 用三极管的饱和与截止、继电器接点的闭合与断开、灯泡的亮与不亮等分别表示二进制数的 0 和 1。

采用二进制数的主要缺点是当数值较大时位数较多, 使用起来不方便, 也不习惯, 因此在数字计算机的资料中常采用八进制数和十六进制数。

2. 八进制数

在八进制数中, 每一位有 0~7 共 8 个数码, 计数的基数为 8。八进制数的进位规则是“逢八进一”。任意一个八进制数可以表示为

$$(N)_O = \sum_{i=-m}^n d_i \times 8^i \quad (1-5)$$

式中, d_i 是第 i 位的系数, 它可以是 0~7 这 8 个数码中的任何一个数字。下标 O (Octal) 用来表示八进制数, 也可用 8 做下标。

式 (1-5) 也可以作为八进制数转换为十进制数的转换公式, 例如

$$\begin{aligned}(123.4)_O &= 1 \times 8^2 + 2 \times 8^1 + 3 \times 8^0 + 4 \times 8^{-1} \\ &= (83.5)_D\end{aligned}$$

3. 十六进制数

在十六进制数中, 每一位有 16 个不同的数码, 分别为 0~9、A、B、C、D、E、F, 计数的基数为 16。十六进制数的进位规则为“逢十六进一”。任意一个十六进制数可以表示为

$$(N)_H = \sum_{i=-m}^n d_i \times 16^i \quad (1-6)$$

式中, d_i 是第 i 位的系数, 它可以是 0~9、A、B、C、D、E、F 这 16 个数码中的任何一个。下标 H (Hexadecimal) 用来表示十六进制数, 也可用 16 做下标。

式 (1-6) 也可以作为十六进制数转换为十进制数的转换公式, 例如

$$\begin{aligned}(2A5.6B)_H &= 2 \times 16^2 + A \times 16^1 + 5 \times 16^0 + 6 \times 16^{-1} + B \times 16^{-2} \\ &= (752.41796875)_D\end{aligned}$$

为便于对照, 将十进制、二进制、八进制及十六进制数之间的关系列于表 1-1 中。

表 1-1 几种数制之间的关系对照表

十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数
0	00000	0	0
1	00001	1	1
2	00010	2	2

续表

十进制数	二进制数	八进制数	十六进制数
3	00011	3	3
4	00100	4	4
5	00101	5	5
6	00110	6	6
7	00111	7	7
8	01000	10	8
9	01001	11	9
10	01010	12	A
11	01011	13	B
12	01100	14	C
13	01101	15	D
14	01110	16	E
15	01111	17	F
16	10000	20	10
17	10001	21	11
18	10010	22	12
19	10011	23	13
20	10100	24	14

1.2.3 不同进制数间相互转换

1. 二、八和十六进制数转换成十进制数

任意进制数（包括二进制数、八进制数和十六进制数）转换为十进制数的方法是，根据式（1-3）按权展开，然后将各项按十进制数相加，即得对应的十进制数，如前面 1.2.2 节所述。

2. 十进制数转换成二、八和十六进制数

十进制数转换为二进制数时，要分成整数与小数两部分分别转换，然后将转换结果合成一个二进制数。

(1) 整数转换

对于整数部分，假定十进制数为 $(N)_D$ ，等值的二进制数为 $(d_{n-1}\cdots d_2d_1d_0)_B$ ，则有

$$\begin{aligned}(N)_D &= d_{n-1}2^{n-1} + \cdots + d_22^2 + d_12^1 + d_02^0 \\ &= 2(d_{n-1}2^{n-2} + \cdots + d_22^1 + d_12^0) + d_0\end{aligned}\quad (1-7)$$

若将式（1-7）中 $(N)_D$ 除以 2，则商为 $d_{n-1}2^{n-2} + \cdots + d_22^1 + d_12^0$ ，余数为 d_0 ，因此把十进制数 $(N)_D$ 除以 2 后，余数即为对应二进制数的最低位 d_0 ，若将商记为 $(N)'_D$ ，则

$$\begin{aligned}(N)'_D &= d_{n-1}2^{n-2} + \cdots + d_22^1 + d_12^0 \\ &= 2(d_{n-1}2^{n-3} + \cdots + d_22^0) + d_1\end{aligned}\quad (1-8)$$

若再将式（1-8）中 $(N)'_D$ 除以 2，则余数为 d_1 ，它对应二进制数的次低位 d_1 。以此类推，每次以前次的商除以 2，即可求得二进制数的一位数字，连续除以 2 直到商为 0 为止，这时的余数为二进制数的最高位 d_{n-1} 。从而由所有的余数求出二进制数。

【例 1-1】 将十进制数 $(185)_D$ 转换为二进制数。

根据上述原理，可将 $(185)_D$ 按如下的步骤转换为二进制数。

		余数	
2	185	1	…… d_0
2	92	0	…… d_1
2	46	0	…… d_2
2	23	1	…… d_3
2	11	1	…… d_4
2	5	1	…… d_5
2	2	0	…… d_6
2	1	1	…… d_7
	0		

故 $(185)_D=(10111001)_B$ 。

当十进制数较大时，不必逐次除以 2，而是将十进制数和与其相当的 2 的乘幂项对比，使转换过程得到简化。

【例 1-2】 将 $(135)_D$ 转换为二进制数。

解：由于 $2^7=128$ ，而 $135-128=7=2^2+2^1+2^0$ ，所以对应二进制数 $d_7=1$ ， $d_2=1$ ， $d_1=1$ ， $d_0=1$ ，其余各系数为 0，故得

$$(135)_D=(10000111)_B$$

值得指出，由于多数计算机或数字系统中只处理 4、8、16、32 或 64 位等的二进制数据，因此，转换得到的数据的位数需是规格化的位数，如转换结果为 10101，在纸上写为 10101 即可，但在计算机中就要高位补“0”，如果是 8 位计算机就要将它配成 8 位，则相应的高幂项应填以 0，其值不变，即

$$10101 = 00010101$$

(2) 小数转换

设十进制小数为 $(N)_D$ ，等值的二进制小数为 $(0.d_{-1}d_{-2}d_{-3}\cdots d_{-m})_2$ ，则有

$$(N)_D = d_{-1}2^{-1} + d_{-2}2^{-2} + d_{-3}2^{-3} + \cdots + d_{-m}2^{-m} \quad (1-9)$$

将式 (1-9) 两边分别乘以 2，得

$$2(N)_D = d_{-1} + d_{-2}2^{-1} + d_{-3}2^{-2} + \cdots + d_{-m}2^{-(m-1)} \quad (1-10)$$

由此可见，将十进制小数乘以 2，所得乘积的整数部分为 d_{-1} ，小数部分为 $d_{-2}2^{-1} + d_{-3}2^{-2} + \cdots + d_{-m}2^{-(m-1)}$ 。

同理，将乘积的小数部分再乘以 2，又可得到

$$2(d_{-2}2^{-1} + d_{-3}2^{-2} + \cdots + d_{-m}2^{-(m-1)}) = d_{-2} + d_{-3}2^{-1} + \cdots + d_{-m}2^{-(m-2)} \quad (1-11)$$

也即乘积的整数部分就是 d_{-2} 。

以此类推，将每次乘以 2 后所得乘积的小数部分再乘以 2，得到的整数即为对应位的二进制数，直到小数部分是 0 为止（或满足要求的精度为止），从而完成十进制小数转换成二进制小数。

【例 1-3】 将 $(0.206)_D$ 转换为二进制数，要求其误差不大于 2^{-10} 。

解：按上面介绍的方法计算，可得 d_{-1} 、 d_{-2} 、 \cdots 、 d_{-9} 如下

	整数
$0.206 \times 2 = 0.412$	$0 \cdots \cdots d_{-1}$
$0.412 \times 2 = 0.824$	$0 \cdots \cdots d_{-2}$