



工业和信息化高等教育“十二五”规划教材立项项目

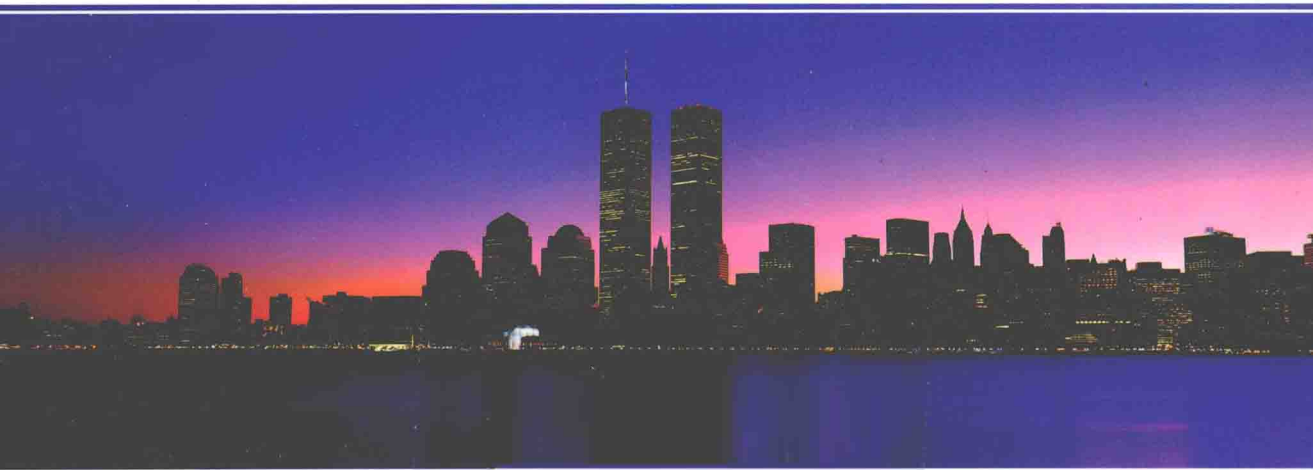
高等职业教育电子技术技能培养规划教材

Gaodeng Zhiye Jiaoyu Dianzi Jishu Jineng Peiyang Guihua Jiaocai

# 数字电子技术 基础

(第2版)

杨碧石 陆冬明 编著



## Fundamentals of Digital Electronic Technology (2nd Edition)

知识扩展：介绍中规模集成电路的芯片功能和实际应用

技能扩展：介绍了故障诊断技术，常见故障的排除方法

视野扩展：介绍了Multisim虚拟电子工作平台使用方法

 人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化高等教育“十二五”规划教材立项项目

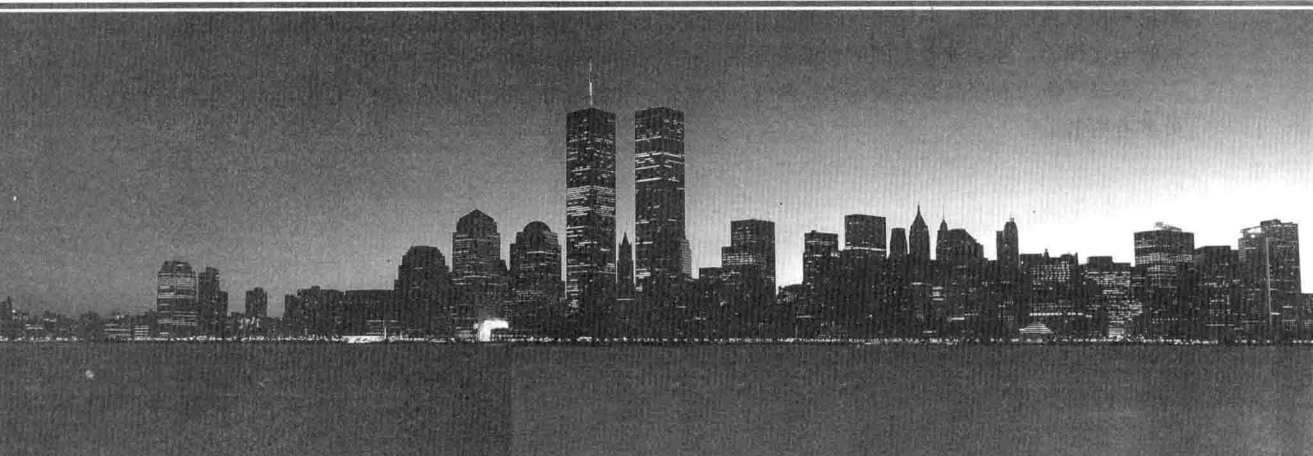
高等职业教育电子技术技能培养规划教材

Gaodeng Zhiye Jiaoyu Dianzi Jishu Jineng Peiyang Guihua Jiaocai

# 数字电子技术 基础

(第2版)

杨碧石 陆冬明 编著



Fundamentals of Digital Electronic  
Technology (2nd Edition)

人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术基础 / 杨碧石, 陆冬明编著. — 2版

— 北京: 人民邮电出版社, 2014. 2

高等职业教育电子技术技能培养规划教材

ISBN 978-7-115-30234-2

I. ①数… II. ①杨… ②陆… III. ①数字电路—电子技术—高等职业教育—教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第309590号

## 内 容 提 要

本书介绍逻辑代数的基本知识及其数字逻辑电路的基本分析和设计方法。全书共分8章。主要内容包括逻辑代数的基本知识, 组合逻辑电路的分析与设计, 时序逻辑电路的分析与设计, 脉冲波形产生电路, 数模和模数转换电路, 半导体存储器和可编程逻辑器件等。章末都配有小结、关键术语、自测题、习题和实验与实训等, 便于读者巩固所学理论知识, 提高分析问题和解决问题的能力。

本书可作为高职高专院校电子、电气、自动化、计算机等有关专业的教材, 也可作为自学者及科技人员参考用书。

---

◆ 编 著 杨碧石 陆冬明

责任编辑 王 平

责任印制 杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路11号

邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn

网址 <http://www.ptpress.com.cn>

大厂聚鑫印刷有限责任公司印刷

◆ 开本: 787×1092 1/16

印张: 16.5

2014年2月第2版

字数: 421千字

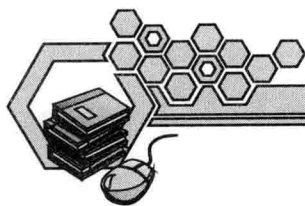
2014年2月河北第1次印刷

---

定价: 36.00元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315



# 前言

当今电子技术飞速发展,企业对员工的要求也越来越高,目前教学不但要讲授知识,而且还要关注如何使学生在学校学习后,能够顺利走入工作岗位。一本合适的教材,除了在内容方面符合规定的教学要求外,更要立足于读者的基础和需求,按照科学的认识规律,引导循序渐进地学习新的知识。

基于上述目的,为适应高职高专技术应用型人才能力的培养的需要,立足于电路的典型性、教学的需要和实际应用。为满足不同教学需要,在第1版的基础上,本教材进行了以下改进。

1. 在各节后增加了思考题,每章后增加了自测题,每章节的内容做了部分调整,减少了原理性的分析讨论,增加了中规模集成电路的芯片功能介绍和实际应用,以提高学生的学习技能和实际应用能力。

2. 逻辑门电路这一章不对内部电路进行分析,改为介绍各种集成门电路的功能、外部特性、使用注意事项及实际应用。

3. 增加了故障诊断部分,这部分主要介绍故障诊断技术,讲述与该章内容相关的一些测试方法、常见故障的排除方法。

4. 每章末尾增加本章小结、关键术语和自测题。

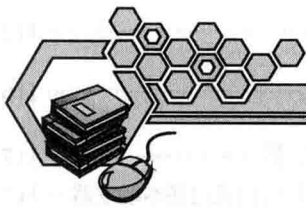
5. 为提高学生应用 Multisim 的能力,增加了附录 Multisim 虚拟电子工作平台的内容,供学生课后学习和选做相关实验内容。使学生掌握用 Multisim 进行电子技术的单元电路参数设计的方法,培养学生应用计算机技术进行电路调试的能力。

本书由杨碧石、陆冬明、戴春风、杨卫东、束慧和陈兵飞共同编著,杨碧石负责全书内容的总体策划、统稿和全书的审定。在本书编著与整理过程中,得到了许多专家及同行的大力支持和帮助,并提出了一些宝贵意见,在此,向他们表示衷心的感谢。

希望第2版教材可以得到专家、同行和学生的认同和指正,意见和建议可用 E-mail 发至:ntybs@126.com 或 ntybs@mail.ntvc.edu.cn。

编者

2012年10月



# 目 录

第 1 章 逻辑代数基础	1
1.1 模拟信号和数字信号	2
1.1.1 模拟信号和数字信号	2
1.1.2 模拟量的数字表示	3
1.1.3 数字电路的特点和分类	4
1.2 数制和码制	5
1.2.1 数制	5
1.2.2 码制	11
1.3 逻辑代数的基本运算	13
1.3.1 与运算(逻辑与)	14
1.3.2 或运算(逻辑或)	15
1.3.3 非运算(逻辑非)	15
1.4 逻辑代数的基本定律及规则	18
1.4.1 基本定律	18
1.4.2 常用公式	19
1.4.3 重要规则	20
1.5 逻辑函数及其表示方法	22
1.5.1 逻辑函数	22
1.5.2 逻辑函数的表示方法	23
1.5.3 逻辑函数的两种标准形式	25
1.6 逻辑函数的化简	28
1.6.1 逻辑函数的最简表达式	28
1.6.2 逻辑函数的公式法化简	29
1.6.3 逻辑函数的卡诺图化简法	30
1.6.4 具有无关项的逻辑函数及其化简	34
1.7 数字系统一般故障的检查和排除	36
1.7.1 直观检查法	36
1.7.2 测量电阻法	36
1.7.3 静态测量	37
1.7.4 动态测量	37
小结	37
关键术语	38
自我测试题	39
习题	40
第 2 章 逻辑门电路	44
2.1 基本逻辑门	44
2.1.1 与门	45
2.1.2 或门	45
2.1.3 与门和或门实际应用	46
2.1.4 非门	47
2.2 复合逻辑门	47
2.2.1 与非门	48
2.2.2 或非门	48
2.2.3 异或门	49
2.2.4 同或门	50
2.2.5 与或非门	51
2.2.6 与非门和或非门实际应用	52
2.3 特殊逻辑门	52
2.3.1 三态逻辑门	52
2.3.2 集电极开路逻辑门	54
2.4 集成逻辑门	55
2.4.1 数字集成电路分类	55
2.4.2 TTL 集成电路逻辑门	56
2.4.3 CMOS 集成电路逻辑门	57
2.4.4 集成电路逻辑门的性能参数	57
2.4.5 TTL 与 CMOS 集成电路的接口	60
2.4.6 集成电路使用常识	61
2.5 故障诊断和排查	62
2.5.1 与门和或门的故障排查技术	62



2.5.2 与非门和或非门的故障 排查技术 .....	64	实验与实训 .....	112
小结 .....	65	<b>第4章 触发器</b> .....	116
关键术语 .....	66	4.1 基本触发器 .....	117
自我测试题 .....	66	4.1.1 用与非门组成的基本触发器 .....	117
习题 .....	68	4.1.2 用或非门组成的基本触发器 .....	119
实验与实训 .....	70	4.1.3 基本RS触发器的特点 及应用 .....	121
<b>第3章 组合逻辑电路</b> .....	73	4.2 同步触发器 .....	122
3.1 组合逻辑电路的特点和分类 .....	74	4.2.1 同步RS触发器 .....	122
3.1.1 组合逻辑电路的特点 .....	74	4.2.2 同步D触发器 .....	124
3.1.2 组合逻辑电路的功能表示 方法 .....	75	4.2.3 同步RS触发器的空翻问题 .....	125
3.1.3 组合逻辑电路的分类 .....	75	4.3 主从触发器 .....	125
3.2 组合逻辑电路的分析和设计 .....	75	4.3.1 主从RS触发器 .....	125
3.2.1 组合逻辑电路的分析 .....	75	4.3.2 主从JK触发器 .....	127
3.2.2 组合逻辑电路的设计 .....	77	4.4 边沿触发器 .....	128
3.3 常用集成组合逻辑电路 .....	79	4.4.1 边沿D触发器 .....	129
3.3.1 加法器 .....	79	4.4.2 边沿JK触发器 .....	130
3.3.2 数值比较器 .....	82	4.4.3 其他类型触发器 .....	131
3.3.3 编码器 .....	85	4.5 故障诊断和排查 .....	134
3.3.4 译码器 .....	90	4.5.1 基本RS触发器的故障排查 技术 .....	134
3.3.5 数据选择器和分配器 .....	98	4.5.2 边沿JK触发器的故障排查 技术 .....	135
3.4 组合逻辑电路中竞争冒险 现象 .....	103	小结 .....	135
3.4.1 竞争冒险现象的产生原因 .....	103	关键术语 .....	136
3.4.2 竞争冒险现象的判断方法 .....	104	自我测试题 .....	136
3.4.3 竞争冒险现象的消除方法 .....	104	习题 .....	137
3.5 故障诊断和排查 .....	105	实验与实训 .....	140
3.5.1 电平恒定 .....	105	<b>第5章 时序逻辑电路</b> .....	142
3.5.2 加法器的故障排查技术 .....	105	5.1 时序逻辑电路的特点和分类 .....	143
3.5.3 比较器的故障排查技术 .....	106	5.1.1 时序逻辑电路的特点 .....	143
3.5.4 编码器的故障排查技术 .....	106	5.1.2 时序逻辑电路功能表示方法 .....	143
3.5.5 译码器的故障排查技术 .....	106	5.1.3 时序逻辑电路分类 .....	144
3.5.6 数据选择器的故障排查技术 .....	106	5.2 时序逻辑电路的分析和设计 .....	145
小结 .....	106	5.2.1 时序逻辑电路的分析 .....	145
关键术语 .....	107	5.2.2 时序逻辑电路的设计 .....	149
自我测试题 .....	108	5.3 计数器 .....	151
习题 .....	109		



5.3.1 计数器的特点和分类	151	6.5.2 集成单稳态触发器	200
5.3.2 二进制计数器	152	6.5.3 单稳态触发器应用举例	200
5.3.3 十进制计数器	157	6.6 故障诊断和排查	201
5.3.4 $N$ 进制计数器	161	6.6.1 定时器的故障分析	201
5.4 寄存器	165	6.6.2 脉冲发生电路的故障分析	202
5.4.1 寄存器的主要特点和分类	165	小结	202
5.4.2 基本寄存器	166	关键术语	202
5.4.3 移位寄存器	167	自我测试题	203
5.4.4 移位寄存器型 $N$ 进制计数器	170	习题	204
5.4.5 顺序脉冲发生器	171	实验与实训	206
5.5 故障诊断和排查	176	<b>第7章 数模和模数转换器</b>	<b>208</b>
5.5.1 集成计数器故障排查技术	176	7.1 数字系统的构成	209
5.5.2 级联的计数器故障排查技术	176	7.2 数模转换器	209
5.5.3 触发器构成的计数器故障排查技术	176	7.2.1 数模转换器的工作原理	209
小结	177	7.2.2 权电阻数模转换器	210
关键术语	178	7.2.3 T型电阻网络数模转换器	211
自我测试题	178	7.2.4 集成数模转换器	212
习题	180	7.2.5 数模转换器的主要参数	214
实验与实训	183	7.3 模数转换器	215
<b>第6章 脉冲发生与整形电路</b>	<b>186</b>	7.3.1 采样保持和量化编码	215
6.1 脉冲信号基本参数	186	7.3.2 双积分型模数转换器	216
6.2 集成定时器	187	7.3.3 逐次渐近型模数转换器	218
6.2.1 CC7555 定时器	187	7.3.4 并联比较型模数转换器	220
6.2.2 脉冲产生整形电路	189	7.3.5 集成模数转换器	221
6.3 多谐振荡器	189	7.3.6 模数转换器的主要参数	223
6.3.1 用555定时器构成的多谐振荡器	189	小结	223
6.3.2 石英晶体多谐振荡器	191	关键术语	224
6.3.3 多谐振荡器应用举例	193	自我测试题	224
6.4 施密特触发器	194	习题	225
6.4.1 用555定时器构成的施密特触发器	194	实验与实训	226
6.4.2 集成施密特触发器	196	<b>第8章 半导体存储器和可编程逻辑器件</b>	<b>228</b>
6.4.3 施密特触发器应用举例	197	8.1 半导体存储器	229
6.5 单稳态触发器	198	8.1.1 基本概念	229
6.5.1 用555定时器构成的单稳态触发器	198	8.1.2 半导体存储器分类	229
		8.2 只读存储器 (ROM)	230



8.2.1	只读存储器结构和分类	230	总结	242
8.2.2	只读存储器的应用	233	关键术语	243
8.3	随机存取存储器（RAM）	233	自我测试题	243
8.3.1	随机存取存储器结构与分类	234	习题	244
8.3.2	存储器容量的扩展	235	实验与实训	245
8.4	可编程逻辑器件（PLD）	237	附录 Multisim10 简介	248
8.4.1	PLD 器件的分类	237	参考文献	256
8.4.2	PLD 电路的基本结构	238		
8.4.3	可编程组合逻辑器件	239		
8.4.4	PLD 的设计流程	241		





# 第1章

## 逻辑代数基础

### ★ 学习目标:

- 说明模拟量和数字量的区别;
- 如何确定各数制(十进制、二进制、八进制和十六进制)中基数、权值和进位关系;
- 不同数制之间的转换;
- BCD 码的格式和使用;
- 逻辑代数的基本定律与运算规则;
- 逻辑函数常用的表示方法;
- 逻辑函数的化简。

本章主要介绍数制与码制、逻辑代数的基本定律、逻辑函数的表示方法和逻辑函数的化简方法等。

数制是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,其中包括十进制、二进制、八进制和十六进制等,应熟练掌握数制间的相互转换;码制是为了便于记忆和处理,在编制代码时要遵循的规则,应掌握常用的 BCD 码。

与、或、非既是 3 种基本逻辑关系,也是 3 种基本逻辑运算,与非、或非、与或非、异或和同或则是由 3 种基本逻辑运算复合而成的 5 种常用逻辑运算。书中还给出了表示这些运算的逻辑符号,要注意理解和记忆。

逻辑代数的基本定律与常用公式是推演、变换和化简逻辑函数的依据,有些与普通代数相同,有些则完全不一样,例如摩根定理、重叠律、非非律等,要特别注意记住这些特殊的公式。

逻辑函数常用的表示方法有 5 种:真值表、卡诺图、函数式、逻辑图和波形图。它们各有其特点,但本质相通,可以互相转换。尤其由真值表到逻辑图和由逻辑图到真值表的转换,直接涉及数字电路的分析设计与综合问题,更加重要,一定要掌握。



逻辑函数公式化简法和卡诺图化简法，是应该熟练掌握的内容。公式化简法没有什么局限性，但也无一定步骤可以遵循，要想迅速得到函数的最简与或表达式，不仅与对公式、定律的熟悉程度有关，而且还与运算技巧有联系。卡诺图化简法则不同，它简单、直观，有可以遵循的明确步骤，不易出错，初学者也易于掌握。但是，当函数变量多于5个时，卡诺图化简法就失去优势，没有实用价值了。

## 1.1 模拟信号和数字信号

在自然界中有各种物理量，尽管它们的性质各异，但就其变化规律的特点而言，不外乎有两大类。其中一类物理量的变化在时间上和数值上都是连续的，这一类物理量称为模拟量，这种模拟量的信号叫模拟信号，如电视的图像和伴音信号、生产过程中是由传感器检测的某种物理量（如温度、压力）转化成的电信号等，传输、处理模拟信号的电路称为模拟电路。另一类物理量的变化在时间上和数值上都是离散的，这一类物理量称为数字量，这种数字量的信号叫数字信号，如电子表的秒信号、生产中自动记录零件个数的计数信号、由计算机键盘输入计算机的信号等，它们的变化发生在一系列离散的瞬间，数值大小的增减总是最小数量单位的整数倍，传输、处理数字信号的电路称为数字电路。

数字电路是数字计算机和许多控制系统的基础。现代家居中的家用电器、报警系统和供热系统多数是由数字电路进行控制的。在新型汽车中，引入数字电路和微处理器控制可以使汽车具有更高的安全性能、更低的能耗，更易于检修和维护。

数字电路在自控机床、电能监控、仓储管理、医疗仪器和乐器领域也有广泛应用。比如数控（NC）粉碎机可以由工程师事先编程设定物料的粉碎尺寸，精度可达到0.01%；在电能监控方面，随着电能成本的增加，对于大型工业用户和商业用户而言，电能的监测变得十分重要，高效的加热控制设备、通风设备、空调的经济运行可以极大的降低电能消耗、节约成本；在超市中，越来越多地利用通用产品代码（UPC）来核对和汇总商品的销售量，同时也可以自动地进行仓储管理；在医疗仪器方面，大多应用数字电路来设计数字体温计、生命保障系统以及监视器等；在音乐拷贝方面，数字电子技术应用也十分广泛，数字拷贝受静电噪声的影响更小，可以实现音乐的高保真拷贝。

数字电子电路由晶体管电路发展而来，这种电路结构简单，其输出信号随输入信号变化呈现两种电平，高电平和低电平（+5V和0V），可以用“1”和“0”表示。

二进制数仅由“0”和“1”构成，在数字电子技术中应用广泛。其他数制和编码由于可以转化成相应的二进制字符串也被广泛采用。

### 1.1.1 模拟信号和数字信号

电子技术中的工作信号可以分为模拟信号和数字信号两大类。

#### 1. 模拟信号

模拟信号（模拟量）是指时间上和数值上（幅度上）都是连续变化的信号，传输、处理模拟信号的电路称为模拟电路。模拟信号如电视的图像和伴音信号。图1.1所示为某一天的温度变化曲线。

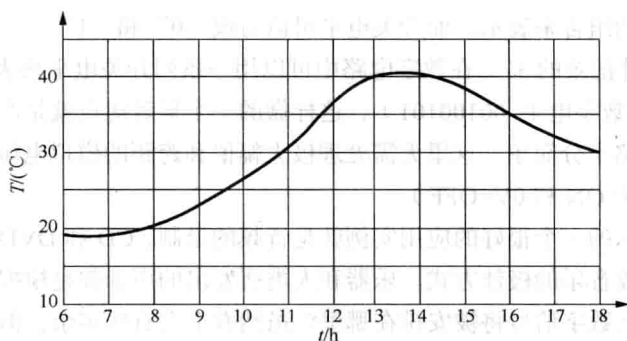


图 1.1 某一天温度变化曲线

## 2. 数字信号

数字信号(数字量)是指时间上和数值上(幅度上)都是断续变化的离散信号(均为离散取值的物理量)。把传输、处理数字信号的电路称为数字电路。数字信号如电子表的秒信号、生产中自动记录零件个数的计数信号、由计算机键盘输入计算机的信号等,它们的变化发生在一系列离散的瞬间,数值大小的增减总是最小数量单位的整数倍。如图 1.1 所示的温度变化曲线,不考虑温度变化的连续性,只考虑时间轴上整点的温度,这实际上是对温度曲线的特定点处进行采样,如图 1.2 所示。但应注意的是,它还不是数字信号,只有将各采样值用数字代码表示后才为数字信号。

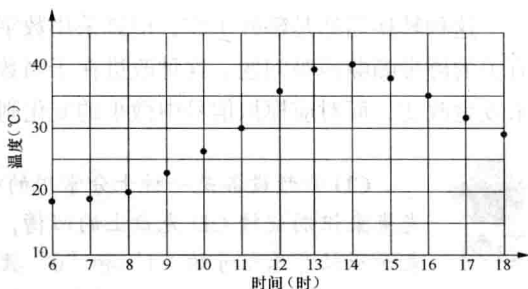


图 1.2 对图 1.1 中模拟量采样(采样间隔为 1 小时)

数字信号可能是二值、三值或多值信号。但目前数字电路中只涉及二值信号,即用 0、1 表示的数字信号,如图 1.3 所示。这里的 0 和 1 没有大小之分,只表示逻辑关系,即逻辑 0 和逻辑 1,因而称为二值数字逻辑或简称数字逻辑。

图 1.3 所示是数字波形的逻辑电平随时间变化的曲线。当电压值在高电平和低电平之间变化时,就产生了数字波形,数字波形由数字脉冲序列组成。

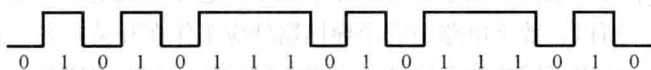


图 1.3 用逻辑 0 和逻辑 1 表示的数字信号波形

### 1.1.2 模拟量的数字表示

在自然界中,绝大多数物理量都是模拟量,模拟信号是连续变化的,以水银温度计为例,当温度上升时,水银以模拟方式膨胀,体现为刻度上的连续平滑变化。棒球运动员挥动球棒也是一种模拟运动,音乐家敲击钢琴键的力度和速度也是模拟量,甚至钢琴弦上发出的颤音也是一个模拟量——正弦振荡。

既然如此,为什么还要用数字量来表示自然界的模拟量呢?这是因为如果想要使用电子设备来表示、传递、处理和存储模拟信息就需要先将信息转化为更便于处理的数字量。数字量的值可



以由一系列开关电平的组合来表示，而开关电平可以写成“0”和“1”。

例如，模拟温度计记录的 $37^{\circ}\text{C}$ 在数字电路中可以用一系列开关电平来表示（后面我们将学到数字 $37^{\circ}\text{C}$ 可以转化为数字电平00100101），这样做的一个显著优点就是产生、处理和存储开关（ON/OFF）电平的电路十分简单。这里无需处理极大幅值和跨距的模拟电压，取而代之的是开关电平（一般情况下 $+5\text{V}=\text{ON}$ 和 $0\text{V}=\text{OFF}$ ）。

模拟量的数字表示的一个很好的应用实例就是音频的录制，CD和DVD的应用十分普及，已经被证明是录制和回放音乐的极佳方式。乐器和人类所发出的声音都是模拟信号，并且人耳接收的也是模拟信号，那么数字信号将被安排在哪里？虽然看上去有些多余，但录制工厂还是将模拟信号转化成数字格式存储在CD或DVD中，用户可以利用CD或DVD播放机将数字电平转化为相应的模拟信号进行播放。

为了使用数字量（“1”和“0”组成的字符串）精确地记录一段复杂的音乐信号，必须对模拟音乐信号进行多次采样，将模拟信号转换为数字信号，这种采样过程贯穿于音乐录制的全过程。音乐回放为上述过程的逆过程，即将数字信号转换为模拟信号，重现原始模拟信号，如果在原始模拟信号中采样点足够多，那么原始音乐的重现精度就很高。

这种转换当然是额外工作，但是采用数字记录方式可以消除静电噪声和与早期音频记录方法有关的磁带嘶嘶声等问题。这种改进在于当数字信号中存在微小变化时，数字信号的开关状态并未发生改变，而对应模拟信号中微小的变化则很容易被人耳所察觉。



提示

CD音频设备是一种十分常用的模—数转换和数—模转换实例，CD播放器利用激光束来识别旋转CD光盘上的凹槽，这些是由CD刻录机刻录在CD光盘上的，用来表示原始音乐信号的“1”和“0”数字信息。一张CD光盘包括650MB“1”、“0”数字量（1字节=8位）。另一种光介质存储器是DVD，DVD的存储密度较CD大得多，可以容纳17GB数据。

### 1.1.3 数字电路的特点和分类

数字电路的工作信号一般都是数字信号。在电路中，它往往表现为突变的电压或电流，并且只有两个可能的状态。所以，数字电路中的半导体器件应工作在开关状态。利用器件导通和截止两种不同的工作状态，代表不同的数字信息，完成信号的传递和处理任务。

通常用0和1组成的二值量表示数字信号最为简单，故常用的数字信号是用电压的高、低，脉冲的有、无，分别代表两个离散数值1和0。所以数字电路在结构、工作状态、研究内容和分析方法等方面都具有自己的特点。

① 数字电路中半导体器件工作在开关状态，这和二值量或二进制信号的要求是相对应的，分别用1和0两个数码来表示。

② 数字电路的基本单元电路比较简单，对元器件的精度要求不高，便于电路集成化、系列化生产，并具有使用方便、可靠性高、价格低廉等优点。

③ 数字电路能够对数字信号进行各种逻辑运算和算术运算，所以在各种数控装置、智能仪表以及计算机等领域得到广泛应用。

数字电路按组成的结构可分为分立元器件电路和集成电路两大类。其中集成电路按集成度分



为小规模集成电路 (SSI, 集成度为 1~10 门/片)、中规模集成电路 (MSI, 集成度为 10~100 门/片)、大规模集成电路 (LSI, 集成度为 100~1000 门/片) 和超大规模集成电路 (VLSI, 集成度为大于 1000 门/片); 按电路所用器件的不同, 可分为双极型和单极型电路。其中双极型电路有 DTL、TTL、ECL、IIL、HTL 等多种, 单极型电路有 JFET、NMOS、PMOS、CMOS 4 种; 按电路逻辑功能的不同特点, 又可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。



### 思考题

1. 列举 3 个模拟量。
2. 为什么计算机系统处理的量是数字量而不是模拟量?

## 1.2 数制和码制

### 1.2.1 数制

用数字量表示物理量的大小时, 仅用 1 位数码往往不够, 因此经常需要用进位计数的方法组成多位数码使用。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。

在数字电路中经常使用的计数进制除了十进制以外, 还有二进制、八进制和十六进制。

#### 1. 十进制

十进制是我们最为熟悉的进位计数制。它将 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个数字符号, 按照一定的规律排列起来, 表示数值的大小。例如:  $1886 = 1 \times 10^3 + 8 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 6 \times 10^0$ 。

从这个 4 位十进制数, 不难发现十进制数的特点如下。

- (1) 每一位数必然是 10 个数字符号中的一个。所以它计数的基数为 10。
- (2) 同一个数字符号在不同的数位代表的数值不同, 这个 4 位数的位值依次分别为 1000、100、10、1, 位值又称为权值或位权, 它是 10 的幂。
- (3) 低位数和相邻的高位数之间的进位关系是“逢十进一”。

有了基数和位权的概念, 对于任一个十进制数  $N$  按其位权值展开均可表示为

$$(N)_{10} = a_{n-1} \times 10^{n-1} + a_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + a_1 \times 10^1 + a_0 \times 10^0 + a_{-1} \times 10^{-1} + \cdots + a_{-m} \times 10^{-m} = \sum_{i=n-1}^{-m} a_i \times 10^i \quad (1.1)$$

式 (1.1) 中  $a_i$  为 0~9 中任一数码,  $n$  和  $m$  为正整数,  $n$  为整数部分的位数,  $m$  为小数部分的位数。那么, 对于任意进制数, 我们可以写成下式:

$$(N)_R = \sum_{i=n-1}^{-m} r_i \times R^i \quad (1.2)$$

式 (1.2) 中  $r_i$  为任意进制中第  $i$  位的数码, 数码可以是 0~ $R-1$  中任一个,  $n$  和  $m$  为正整数,  $n$  为整数部分的位数,  $m$  为小数部分的位数,  $R$  为进位基数,  $R^i$  为第  $i$  位的权值。

本书中常用的进位计数制是十进制 (Decimal)、二进制 (Binary)、八进制 (Octadic) 和十六进制 (Hexadecimal)。因此, 当基数  $R$  为 10 时, 表示十进制数可用  $(N)_{10}$  表示。同样二进制数、



八进制数、十六进制数可分别用 $(N)_2$ 、 $(N)_8$ 、 $(N)_{16}$ 表示。

## 2. 二进制

二进制数是在数字电路中应用最广的计数体制。这意味着一个二进制位(即比特 bit)的值取决于该位在二进制数中的位置。这种加权计数系统与十进制计数系统类似。八个比特组成的一组数称为一个字节(byte)。二进制数中只有0和1两个数字符号,所以计数的基数为2。各位数的权值是2的幂,低位和相邻高位之间的进位关系是“逢二进一”。因此任意一个二进制数 $(N)_2$ 可以表示为:

$$(N)_2 = b_{n-1} \times 2^{n-1} + b_{n-2} \times 2^{n-2} + \dots + b_1 \times 2^1 + b_0 \times 2^0 + b_{-1} \times 2^{-1} + \dots + b_{-m} \times 2^{-m} = \sum_{i=n-1}^{-m} b_i \times 2^i \quad (1.3)$$

式(1.3)中 $b_i$ 只能取0或者1两个数码, $2^i$ 为第 $i$ 位的权值。例如: $(1101.101)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3}$ 。



二进制数的运算规则为,

加法:  $0+0=0$ 、 $0+1=1+0=1$ 、 $1+1=10$ ; 乘法:  $0 \times 0=0$ 、 $0 \times 1=1 \times 0=0$ 、 $1 \times 1=1$ 。

圆纳

**【例 1.1】** 一个八位(一个字节)二进制整数为 $(N)_2=(10011110)_2$ ,求其对应十进制的数值。

解:将二进制数按权展开,求各位数值之和,可得:

$$(N)_2 = (10011110)_2 = (1 \times 2^7 + 0 \times 2^6 + 0 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0)_{10} = (158)_{10}$$

## 3. 八进制

二进制数虽在计算机中易于实现,然而它最大的缺点是不便读写,与十进制数相比,表示同一个数时二进制用的位数较多。为此,在数字系统中,又常使用八进制数和十六进制数。

计数基数 $R=8$ 时,称为八进制。它有 $0 \sim 7$ 八个数字符号,各位数的权值是8的幂,低位和相邻高位之间的关系是“逢八进一”。因此任意一个八进制数 $(N)_8$ 可以表示为:

$$(N)_8 = q_{n-1} \times 8^{n-1} + q_{n-2} \times 8^{n-2} + \dots + q_1 \times 8^1 + q_0 \times 8^0 + q_{-1} \times 8^{-1} + \dots + q_{-m} \times 8^{-m} = \sum_{i=n-1}^{-m} q_i \times 8^i \quad (1.4)$$

式(1.4)中 $q_i$ 只能取 $0 \sim 7$ 中的某一数码。例如: $(325.7)_8 = 3 \times 8^2 + 2 \times 8^1 + 5 \times 8^0 + 7 \times 8^{-1}$ 。

**【例 1.2】** 求3位八进制 $(N)_8=(236)_8$ 所对应的十进制数的值。

解:按权展开求各位数值之和,可得 $(236)_8 = (2 \times 8^2 + 3 \times 8^1 + 6 \times 8^0)_{10} = (128 + 24 + 6)_{10} = (158)_{10}$ 。

## 4. 十六进制

在十六进制数中,计数基数为16,有16个不同的数字符号:0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F。这里十进制数的 $10 \sim 15$ 分别用A~F六个英文字母表示。低位和相邻高位间的关系是“逢十六进一”。因此,任意一个十六进制数 $(N)_{16}$ 可表示为:

$$(N)_{16} = h_{n-1} \times 16^{n-1} + h_{n-2} \times 16^{n-2} + \dots + h_1 \times 16^1 + h_0 \times 16^0 + h_{-1} \times 16^{-1} + \dots + h_{-m} \times 16^{-m} = \sum_{i=n-1}^{-m} h_i \times 16^i \quad (1.5)$$

式(1.5)中 $h_i$ 只能取 $0 \sim F$ 中的某一个数码。例如: $(3A.9E)_{16} = 3 \times 16^1 + A \times 16^0 + 9 \times 16^{-1} + E \times 16^{-2}$ 。

**【例 1.3】** 求二位十六进制数 $(N)_{16}=(9E)_{16}$ 所对应的十进制数的值。



解: 按权展开, 求各位数值之和, 可得  $(9E)_{16} = (9 \times 16 + 14 \times 16^0)_{10} = (158)_{10}$ 。



八进制和十六进制转换成十进制数时, 可先将其转换成二进制数, 再转换成十进制数较为容易。

同一个十进制数, 当分别由二进制、八进制、十六进制来表示时, 八进制、十六进制要比二进制简单得多, 而二进制转换成八进制和十六进制十分方便, 因此, 书写计算机程序时, 广泛使用八进制和十六进制。

表 1.1 列出了几种常用计数进制对照表。

表 1.1 几种常用计数进制对照表

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



表 1.1 中几种数制各有其优缺点, 应用场合也不相同。十进制数虽然是生活中最常用、最习惯的一种进位制数, 但其 10 个数码在数字电路中难于找到 10 个状态与之对应。而二进制数只有 0、1 两个数码, 可用来表示电路的两种工作状态。所以在数字电路中采用二进制。当二进制中其数位较多而不易读写时, 常采用八进制和十六进制。

## 5. 数制转换

数制之间的转换可归为两类: 十进制数和非十进制之间的转换;  $2^n$  进制数之间的转换。

### (1) 非十进制数转换成十进制数

由二进制、八进制、十六进制数的一般表达式可知, 只要将它们按权展开, 求各位数值之和, 即可得到对应的十进制数。

**【例 1.4】** 将非十进制数  $(1011.011)_2$ 、 $(27.46)_8$ 、 $(C2)_{16}$  转换成十进制数。

解: 按权展开, 求各位数值之和。

$$(1011.011)_2 = (1 \times 2^3 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3})_{10} = (8 + 2 + 1 + 0.25 + 0.125)_{10} = (11.375)_{10}$$

$$(27.46)_8 = (2 \times 8^1 + 7 \times 8^0 + 4 \times 8^{-1} + 6 \times 8^{-2})_{10} = (16 + 7 + 0.5 + 0.09375)_{10} = (23.59375)_{10}$$

$$(C2)_{16} = (12 \times 16^1 + 2 \times 16^0)_{10} = (194)_{10}$$



## (2) 十进制数转换成非十进制数

十进制数转换成非十进制数时,要将其整数部分和小数部分分别转换,结果合并为目的数制形式。

## ① 整数部分的转换。

整数部分的转换采用基数除法。所谓基数除法即用目的数制的基数去除十进制整数,第一次除所得的余数为目的数的最低位,把得到的商再除以该基数,所得余数为目的数的次低位,依次类推,直至商为0时,所得余数为目的数的最高位。此法也叫除基取余法。

## ② 小数部分的转换。

小数部分的转换是采用基数乘法进行的。所谓基数乘法即用该小数乘目的数制的基数,第一次乘得结果的整数部分为目的数的最高位(当然是小数部分的最高位),其小数部分再乘基数,所得结果的整数部分作为目的数的第二位,依次类推,直至小数部分为0或达到要求精度为止。此法也叫乘基取整法。

【例 1.5】把 $(26)_{10}$ 分别转换成二进制数、八进制数、十六进制数。

解:

$2 \overline{) 26}$	0 低位	$8 \overline{) 26}$	2	$16 \overline{) 26}$	10
$2 \overline{) 13}$	1	$8 \overline{) 3}$	3	$16 \overline{) 1}$	1
$2 \overline{) 6}$	0		0		0
$2 \overline{) 3}$	1	↑			
$2 \overline{) 1}$	1 高位				
	0				

$$(26)_{10} = (11010)_2,$$

$$(26)_{10} = (32)_8,$$

$$(26)_{10} = (1A)_{16}$$

注意:在列写二进制数结果时,不要将高位(MSB)和低位(LSB)写反了。

【例 1.6】把 $(0.875)_{10}$ 转换成二进制数。

解:	$0.875 \times 2 = 1.750$	1
	$0.75 \times 2 = 1.500$	1
	$0.500 \times 2 = 1.000$	1

所以,  $(0.875)_{10} = (0.111)_2$

【例 1.7】把 $(0.423)_{10}$ 换成二进制数(保留4位小数)。

解:	$0.423 \times 2 = 0.846$	0
	$0.846 \times 2 = 1.692$	1
	$0.692 \times 2 = 1.384$	1
	$0.384 \times 2 = 0.768$	0
	$0.768 \times 2 = 1.536$	1



一般保留4位小数,则第5位小数采取“零舍一入”的原则,所以 $(0.432)_{10} = (0.0111)_2$ 。从[例 1.7]可知,十进制小数有时不能用二进制小数精确地表示出来,这时只能根据精度要求,求到一定的位数,近似地表示。

(3)  $2^n$ 进制数之间的转换

## ① 二进制数与八进制数之间的转换。

八进制的基数 $8=2^3$ ,所以3位二进制数构成1位八进制数。若要将二进制数转换成八进制数时,





只要将二进制整数部分自右往左每3位分一组，最后不足3位时左边用0补足；小数部分则自左往右每3位分为一组，最后不足3位时在右面用0补足。再把每3位二进制数对应的八进制数码写出即可。

**【例 1.8】** 试将二进制数 $(1010011100.101110111)_2$ 转换成八进制数。

解：

001	010	011	100	.	101	110	111
1	2	3	4	.	5	6	7

$(1010011100.101110111)_2 = (1234.567)_8$

如果将八进制数转换成二进制数时，只要写出每位数码所对应的二进制数，依次排好即可。

**【例 1.9】** 试将八进制数 $(463.57)_8$ 转换成二进制数。

解：

4	6	3	.	5	7
100	110	011	.	101	111

$(463.57)_8 = (100110011.101111)_2$

② 二进制数与十六进制数之间的转换。

由于十六进制的基数  $16=2^4$ ，所以4位二进制数对应1位十六进制数。按照上述转换步骤，只要将二进制数按4位分组，即可实现它们之间的转换。

**【例 1.10】** 试将二进制数 $(10110100111100.100101111)_2$ 转换成十六进制数。

解：

0010	1101	0011	1100	.	1001	0111	1000
2	D	3	C	.	9	7	8

$(10110100111100.100101111)_2 = (2D3C.978)_{16}$

**【例 1.11】** 试将十六进制数 $(3AF6.5B)_{16}$ 转换成二进制数。

解：

3	A	F	6	.	5	B
0011	1010	1111	0110	.	0101	1011

$(3AF6.5B)_{16} = (0011101011110110.01011011)_2$

如果要进行八进制和十六进制数之间的转换，均可通过二进制作为转换媒介。

## 6. 数制的应用

因为数字系统主要处理的对象为“1”和“0”，所以我们用了相当多的时间来讨论不同的数制，数据的表示和使用方式决定了采用数制的类型。下面将讨论基于这些数字表示形式的转换和解释方面的应用实例。

**【例 1.12】** 如某制药厂利用计算机来监视4个药罐的温度和压力，如图1.4所示。一旦温度或压力超出警戒线，罐内传感器向相应输出位输出“1”并将该信息传给计算机，若一切正常，所有输出位皆为“0”。

(1) 如果计算机读取的二进制字符串为00101000，该系统存在什么问题？

解：将二进制字符串填入图1.5的图表可知，药罐B和C的压力超高。

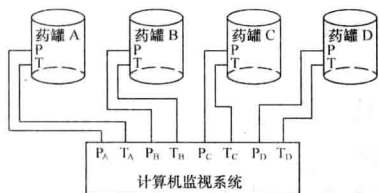


图 1.4 制药厂温度和压力的监视电路连接图

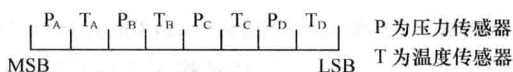


图 1.5 计算机监视系统读取的二进制排布图