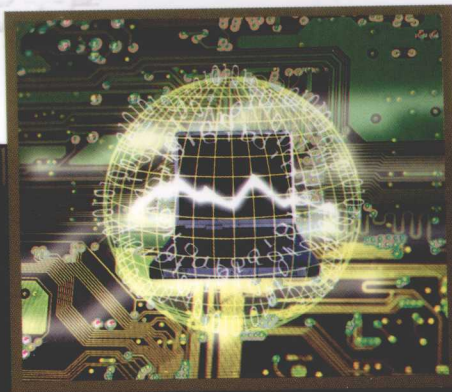


高等院校电气信息类规划教材

# 数字电路与 逻辑设计基础

主 编 张佳薇  
副主编 吕景亮 蔡洪刚 仝志民  
主 审 余成波



中国铁道出版社  
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

高等院校电气信息类规划教材

# 数字电路与逻辑设计基础

主 编 张佳薇  
副主编 吕景亮 蔡洪刚 仝志民  
主 审 余成波

中国铁道出版社

CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

---

## 内 容 简 介

数字电子技术是电气信息类专业的基础课程,本书内容覆盖了数字电子技术的全部基础内容。全书分为11章,分别介绍了数字电路的基础知识、组合逻辑电路、时序逻辑电路、半导体存储器、数/模转换器与模/数转换器、脉冲波形的产生与变换和可编程逻辑器件等内容。本书的最后两章对VHDL语言基础和EWB软件进行了详细的介绍,使读者能够获取数字电路方面的最新知识。

本书适合作为高等院校计算机及电气信息类专业本科生教材,同时也可从事电子工程的工程师和参加各类电子制作竞赛的学生提供有益的参考资料。

### 图书在版编目(CIP)数据

数字电路与逻辑设计基础/张佳薇主编.--北京:  
中国铁道出版社,2010.2  
高等院校电气信息类规划教材  
ISBN 978-7-113-11102-1

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

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第032215号

书 名: 数字电路与逻辑设计基础  
作 者: 张佳薇 主编

策划编辑: 秦绪好 杨 勇  
责任编辑: 秦绪好  
特邀编辑: 刘朝霞  
封面设计: 付 巍  
版式设计: 郑少云

编辑部电话: (010)63560056  
编辑助理: 张爱华  
封面制作: 李 路  
责任印制: 李 佳

出版发行: 中国铁道出版社(北京市宣武区右安门西街8号 邮政编码:100054)  
印 刷: 河北省遵化市胶印厂  
版 次: 2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷  
开 本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 20.5 字数: 498千  
印 数: 3 000册  
书 号: ISBN 978-7-113-11102-1  
定 价: 32.00元

版权所有 侵权必究

本书封面贴有中国铁道出版社激光防伪标签,无标签者不得销售  
凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社计算机图书批销部联系调换。

当今数字技术已成为新技术发展的一个标志,数字技术的普及、微型计算机的迅速发展和应用使数字技术成为计算机应用和自动控制领域中不可缺少的专业基础知识和技术。

本书本着“确保基础、精选内容、加强概念、侧重实践”的基本思想,结合新的课程体系和教学内容改革的要求编写而成。特点如下:

(1)教材的编写以集成电路为主,把数字电路分析和设计的重点移到中规模集成电路中讲解。

(2)注重理论与应用的结合,给出常用集成芯片的逻辑图和引脚分布,强调通过外特性来学习集成电路。

(3)提出通过功能框图分析和设计较大规模数字电路,并引入数字系统概念。

(4)适当引入了新概念、新器件和新技术,介绍了新的数字电路硬件描述语言 VHDL 和 EWB 电子仿真软件。

本书分为 11 章。第 1 章和第 2 章介绍了数字电路的基础知识,内容包括数制和码制、逻辑代数和逻辑函数、门电路,这是研究数字逻辑电路的组成和应用所必备的。第 3 章组合逻辑电路,主要介绍了常用中、小规模组合逻辑电路及其应用。第 4 章和第 5 章主要介绍了触发器和常用中、小规模时序逻辑电路及其应用。第 6 章和第 7 章分别介绍了半导体存储器、数/模转换器与模/数转换器。第 8 章脉冲波形的产生与变换,主要介绍了施密特触发器、单稳态触发器和多谐振荡器的基本原理以及 555 定时器的应用。第 9 章主要介绍了可编程逻辑器件,第 10 章 VHDL 语言基础,主要介绍了 VHDL 程序基础及应用。第 11 章 EWB 软件教程,介绍了电子设计自动化技术。

本书适合作为高等院校计算机和电气信息类专业本科生的教材,同时也可为从事电子工程的工程师和参加各类电子制作竞赛的学生提供有益的参考资料。

本书由东北林业大学、黑龙江大学、黑龙江八一农垦大学三校联合编写。本书由张佳薇担任主编,吕景亮、蔡洪刚、仝志民任副主编。本书的第 1、2、7 章由张佳薇执笔,第 3、4、11 章由吕景亮执笔,第 5、6 章由仝志民执笔,第 9、10 章由蔡洪刚执笔,第 8 章由张佳薇、赵月容共同执笔。重庆理工大学余成波教授担任主审,为提高书稿的质量提出了许多宝贵的建议和修改意见。研究生刘方同学也参与了部分编写资料的整理工作。

编者在编写本教材的过程中,参阅了大量相关教材和专著,在此向各位原编著者致谢。

由于编者水平有限,书中难免存在一些缺点和错误,殷切希望广大读者批评指正。

编者

2010 年 6 月

# 本书中的文字符号及其说明

## 一、电压符号

$v_i (V_i)$	输入电平(相对于电路公共参考点的电压)
$V_{IH}$	输入高电平
$V_{IL}$	输入低电平
$V_O$	输出电平
$V_{OH}$	输出高电平
$V_{OL}$	输出低电平
$V_T$	温度电压当量
$V_{CC}$	电源电压(一般用于双极型半导体器件)
$V_{DD}$	电源电压(一般用于 MOS 器件)
$v_{BE}$	晶体管基极相对于发射极的电压
$v_{CE}$	晶体管集电极相对于发射极的电压
$v_{DS}$	MOS 管漏极相对于源极的电压
$v_{GS}$	MOS 管栅极相对于源极的电压
$V_{NA}$	脉冲噪声电压幅值
$V_{NH}$	输入高电平噪声容限
$V_{NL}$	输入低电平噪声容限
$V_{TH}$	门电路的阈值电压
$V_{T^+}$	施密特触发特性的正向阈值电压
$V_{T^-}$	施密特触发特性的负向阈值电压
$V_{GS(th)N}$	N 沟道 MOS 管的开启电压
$V_{GS(th)P}$	P 沟道 MOS 管的开启电压
$V_{REF}$	参考电压(或基准电压)

## 二、电流符号

$i_B (I_B)$	基极电流瞬时值(直流值)
$i_C (I_C)$	集电极电流瞬时值(直流值)
$i_D (I_D)$	漏极电流瞬时值(直流值)
$i_i$	输入电流
$I_{IH}$	高电平输入电流
$I_{IL}$	低电平输入电流
$i_L (I_L)$	负载电流瞬时值(直流量)
$i_o$	输出电流
$I_{OH}$	高电平输出电流
$I_{OL}$	低电平输出电流
$I_{CC}$	电源( $V_{CC}$ )平均电流
$I_{CCH}$	H 输出为高电平时的电源电流

$I_{CCL}$	输出为低电平时的电源电流
$I_{DD}$	电源( $V_{DD}$ )平均电流

### 三、功率符号

$P_C$	CMOS 电路中负载电容充、放电功耗
$P_D$	CMOS 电路的动态功耗
$P_S$	CMOS 电路的静态功耗
$P_T$	CMOS 电路的瞬时导通功耗
$P_{TOT}$	CMOS 电路的总功耗

### 四、脉冲参数符号

$f$	周期性脉冲的重复频率
$q$	占空比
$t_f$	下降时间
$t_h$	保持时间
$t_r$	上升时间
$t_{re}$	恢复时间
$t_{set}$	建立时间
$t_w$	脉冲宽度
$V_m$	脉冲幅度

### 五、电阻、电容符号

$C_{GD}$	MOS 管栅极与漏极间电容
$C_{GS}$	MOS 管栅极与源极间电容
$C_h$	保持电容
$C_i$	输入电容
$C_L$	负载电容
$R_i$	输入电阻
$R_L$	负载电阻
$R_o$	输出电阻
$R_{OFF}$	器件截止时内阻
$R_{ON}$	器件导通时内阻
$R_U$	上拉电阻

### 六、器件及参考符号

A	放大器
$A_v$	放大器的电压放大倍数
D	二极管
FF	触发器
G	门
S	开关

T	晶体管
$T_N$	N 沟道 MOS 管
$T_P$	P 沟道 MOS 管
TG	传输门
$t_{pd}$	平均传输延迟时间
$t_{PHL}$	输出由高电平变为低电平时的传输延迟时间
$t_{PLH}$	输出由低电平变为高电平时的传输延迟时间

## 七、其他符号

B	二进制
CLK	时钟
CP	时钟脉冲
D	十进制
EN	允许(使能)
H	十六进制
OE	输出允许(使能)

<b>第 1 章 数字逻辑基础</b> .....	1
1.1 数字技术 .....	1
1.1.1 数字技术的发展概况 .....	1
1.1.2 数字信号与数字电路 .....	2
1.2 数制与码制 .....	2
1.2.1 数制 .....	3
1.2.2 码制 .....	6
1.2.3 算术运算和逻辑运算 .....	7
1.3 逻辑代数及其基本逻辑运算 .....	9
1.3.1 基本逻辑运算 .....	10
1.3.2 其他常用复合逻辑运算 .....	12
1.4 逻辑函数及其表示方法 .....	14
1.4.1 逻辑函数的建立 .....	14
1.4.2 逻辑函数的表示方法及其相互转换 .....	15
1.5 逻辑代数的基本公式和常用公式 .....	16
1.5.1 逻辑代数的基本公式 .....	16
1.5.2 逻辑代数的常用公式 .....	17
1.6 逻辑代数的基本定理 .....	18
1.6.1 代入定理 .....	18
1.6.2 对偶定理 .....	18
1.6.3 反演定理 .....	18
1.7 逻辑函数的变换与公式化简法 .....	19
1.7.1 逻辑函数表达式的变换 .....	19
1.7.2 逻辑函数的公式化简法 .....	19
1.8 逻辑函数的卡诺图 .....	21
1.8.1 逻辑函数的标准形式——最小项 .....	21
1.8.2 逻辑函数的卡诺图表示法 .....	22
1.8.3 逻辑函数的卡诺图化简法 .....	24
1.9 含无关项的逻辑函数及其卡诺图化简 .....	27
小结 .....	28
思考与练习 .....	28
<b>第 2 章 门电路</b> .....	32
2.1 门电路概述 .....	32
2.2 半导体二极管和晶体管的开关特性 .....	33



2.2.1	二极管的开关特性 .....	33
2.2.2	晶体管的开关特性 .....	34
2.3	最简单的与、或、非门电路 .....	37
2.3.1	二极管与门和或门电路 .....	37
2.3.2	晶体管非门电路 .....	39
2.3.3	DTL 与非门电路 .....	39
2.4	TTL 门电路 .....	40
2.4.1	TTL 与非门的电路结构和工作原理 .....	41
2.4.2	TTL 与非门的电压传输特性及抗干扰能力 .....	43
2.4.3	TTL 与非门的带负载能力 .....	45
2.4.4	TTL 与非门举例——7400 .....	47
2.5	其他类型的双极型数字集成电路 .....	48
2.6	TTL 集成逻辑门电路系列简介 .....	52
2.7	CMOS 门电路 .....	54
2.7.1	NMOS 门电路 .....	54
2.7.2	CMOS 非门 .....	55
2.8	其他类型的 CMOS 门电路 .....	56
2.9	CMOS 逻辑门电路的系列及主要参数 .....	62
2.10	TTL 电路与 CMOS 电路的接口 .....	63
小结	.....	65
思考与练习	.....	65
<b>第 3 章</b>	<b>组合逻辑电路</b> .....	<b>72</b>
3.1	组合逻辑电路概述 .....	72
3.2	组合逻辑电路的分析方法和设计方法 .....	73
3.2.1	组合逻辑电路的分析方法 .....	73
3.2.2	组合逻辑电路的设计方法 .....	74
3.3	常用组合逻辑功能器件 .....	76
3.3.1	编码器 .....	76
3.3.2	译码器 .....	80
3.3.3	数据选择器 .....	88
3.3.4	数值比较器 .....	91
3.3.5	加法器 .....	94
3.4	组合逻辑电路中的竞争冒险 .....	98
3.4.1	竞争冒险现象及产生的原因 .....	98
3.4.2	冒险现象的识别 .....	99
3.4.3	竞争冒险现象消除的方法 .....	101
小结	.....	102
思考与练习	.....	102
<b>第 4 章</b>	<b>触发器</b> .....	<b>106</b>
4.1	触发器概述 .....	106

4.1.1	触发器的分类 .....	106
4.1.2	触发器逻辑功能的描述 .....	107
4.2	RS 触发器 .....	107
4.2.1	基本 RS 触发器 .....	107
4.2.2	同步 RS 触发器 .....	109
4.3	TTL 时钟触发器 .....	111
4.3.1	主从 RS 触发器 .....	111
4.3.2	主从 JK 触发器 .....	113
4.4	边沿触发器 .....	115
4.4.1	维持-阻塞结构边沿触发器 .....	116
4.4.2	利用传输延迟时间的边沿触发器 .....	118
4.4.3	CMOS 主从结构的边沿触发器 .....	119
4.5	触发器的主要参数 .....	120
4.5.1	同步 RS 触发器的动态参数 .....	120
4.5.2	主从触发器的动态参数 .....	121
4.5.3	边沿触发器的动态参数 .....	122
4.6	不同类型触发器之间的转换 .....	123
	小结 .....	124
	思考与练习 .....	125
<b>第 5 章</b>	<b>时序逻辑电路 .....</b>	<b>128</b>
5.1	时序逻辑电路及其分类 .....	128
5.1.1	时序逻辑电路概述 .....	128
5.1.2	时序逻辑电路的分类 .....	129
5.2	时序逻辑电路的分析方法 .....	129
5.2.1	时序逻辑电路的状态转换表、状态转换图和时序图 .....	129
5.2.2	同步时序逻辑电路的分析方法 .....	130
5.2.3	异步时序逻辑电路的分析举例 .....	135
5.3	时序逻辑电路的设计方法 .....	136
5.3.1	同步时序逻辑电路的设计方法 .....	136
5.3.2	异步时序逻辑电路的设计方法 .....	140
5.4	常用时序逻辑功能器件 .....	141
5.4.1	寄存器和移位寄存器 .....	141
5.4.2	计数器 .....	144
	小结 .....	156
	思考与练习 .....	156
<b>第 6 章</b>	<b>半导体存储器 .....</b>	<b>160</b>
6.1	存储器概述 .....	160
6.2	只读存储器 .....	160
6.2.1	掩膜只读存储器 .....	161

6.2.2	可编程只读存储器 .....	162
6.2.3	可擦除可编程只读存储器 .....	162
6.3	随机存取存储器 .....	163
6.3.1	RAM 基本结构 .....	163
6.3.2	静态 RAM .....	164
6.3.3	动态随机存储器 .....	165
6.4	存储器容量的扩展 .....	167
6.4.1	位扩展 .....	167
6.4.2	字扩展 .....	167
	小结 .....	168
	思考与练习 .....	168
<b>第 7 章</b>	<b>数/模转换器与模/数转换器 .....</b>	<b>170</b>
7.1	D/A 转换器 .....	170
7.1.1	倒 T 形电阻网络 D/A 转换器 .....	170
7.1.2	权电流型 D/A 转换器 .....	172
7.1.3	D/A 转换器的主要技术指标 .....	175
7.1.4	集成 D/A 转换器及其应用 .....	176
7.2	A/D 转换器 .....	177
7.2.1	A/D 转换器的一般工作过程 .....	178
7.2.2	并联比较型 A/D 转换器 .....	181
7.2.3	逐次渐近型 A/D 转换器 .....	183
7.2.4	双积分型 A/D 转换器 .....	185
7.2.5	A/D 转换器的主要技术指标 .....	188
7.2.6	集成 A/D 转换器及其应用 .....	188
	小结 .....	193
	思考与练习 .....	193
<b>第 8 章</b>	<b>脉冲波形的产生与变换 .....</b>	<b>196</b>
8.1	施密特触发器 .....	196
8.1.1	由门电路组成的施密特触发器 .....	196
8.1.2	集成施密特触发器 .....	198
8.1.3	施密特触发器的应用 .....	200
8.2	单稳态触发器 .....	201
8.2.1	由集成门电路组成的微分型单稳态触发器 .....	201
8.2.2	集成单稳态触发器 .....	204
8.3	多谐振荡器 .....	208
8.3.1	由门电路组成的多谐振荡器 .....	208
8.3.2	石英晶体多谐振荡器 .....	213
8.4	555 定时器 .....	213
8.4.1	555 定时器概述 .....	213

8.4.2 用 555 定时器组成的施密特触发器 .....	214
8.4.3 用 555 定时器组成的单稳态触发器 .....	215
8.4.4 用 555 定时器组成的多谐振荡器 .....	216
小结 .....	217
思考与练习 .....	218
<b>第 9 章 可编程逻辑器件 .....</b>	<b>222</b>
9.1 可编程逻辑器件的基本结构 .....	222
9.2 现场可编程逻辑阵列 .....	223
9.3 可编程阵列逻辑 .....	226
9.3.1 PAL 的基本电路结构 .....	226
9.3.2 PAL 的输出电路结构和反馈形式 .....	227
9.3.3 PAL 的应用举例 .....	229
9.4 通用阵列逻辑 .....	235
9.4.1 GAL 的电路结构 .....	235
9.4.2 输出逻辑宏单元 .....	237
9.4.3 GAL 的输入特性和输出特性 .....	240
9.5 可擦除的可编程逻辑器件 .....	242
9.5.1 EPLD 的基本结构和特点 .....	242
9.5.2 EPLD 的与-或逻辑阵列 .....	242
9.5.3 EPLD 的输出逻辑宏单元 .....	244
9.6 现场可编程门阵列 .....	246
9.6.1 FPGA 的基本结构 .....	246
9.6.2 FPGA 的 IOB 和 CLB .....	247
9.6.3 FPGA 的互连资源 .....	250
9.6.4 编程数据的装载 .....	252
9.7 PLD 的编程 .....	254
9.8 在系统可编程逻辑器件 .....	255
9.8.1 低密度 ISP-PLD .....	255
9.8.2 高密度 ISP-PLD .....	257
9.8.3 在系统可编程通用数字开关 .....	261
小结 .....	262
思考与练习 .....	263
<b>第 10 章 VHDL 语言基础 .....</b>	<b>266</b>
10.1 VHDL 语言概述 .....	266
10.1.1 硬件描述语言的诞生 .....	267
10.1.2 硬件描述语言的种类 .....	267
10.1.3 VHDL 语言上机操作条件 .....	268
10.2 VHDL 程序的实体 .....	268
10.2.1 实体的组成 .....	270

10.2.2	类型说明(可选)	271
10.2.3	端口说明	271
10.2.4	实体说明部分	273
10.3	VHDL 的程序结构	273
10.4	VHDL 的语言元素	277
10.4.1	VHDL 的基本语句	282
10.4.2	属性的描述与定义	287
10.4.3	VHDL 的子程序	290
小结		291
<b>第 11 章</b>	<b>EWB 软件教程</b>	<b>292</b>
11.1	EWB 软件简介	292
11.2	EWB 的主窗口	293
11.2.1	工具栏	294
11.2.2	元器件库和仪器库	295
11.2.3	电路描述窗口	297
11.2.4	电路运行控制开关	297
11.3	EWB 的基本操作	297
11.3.1	调整元器件位置	298
11.3.2	连线操作	298
11.4	虚拟仪器的使用	300
11.4.1	数字万用表	300
11.4.2	函数信号发生器	301
11.4.3	示波器	301
11.4.4	频率特性(扫描仪)	303
11.4.5	字信号发生器	304
11.4.6	逻辑分析仪	306
11.4.7	逻辑转换器	306
小结		310
参考文献		311

# 第 1 章 数字逻辑基础

在电子技术领域,数字信号具有便于存储、分析、传输以及抗干扰能力强等特点,所以常常将模拟信号进行编码,转化为数字信号。本章首先简要介绍数字电路中常用的数制和码制,然后介绍了逻辑函数及其表示方法、逻辑代数的基本公式、常用公式和重要定理,最后介绍了逻辑函数的化简方法。本章是本书内容的基础,特别地,逻辑代数是本书分析和设计数字逻辑电路的主要数学工具。

需要掌握的主要知识点如下:

- (1) 数字电路中常用的数制与码制。
- (2) 逻辑代数的基本公式、常用公式。
- (3) 逻辑代数的基本定理。
- (4) 逻辑函数的各种表示方法及相互转换。
- (5) 逻辑函数的化简方法。
- (6) 约束项、任意项、无关项的概念以及无关项在化简逻辑函数中的应用。

## 1.1 数字技术

### 1.1.1 数字技术的发展概况

电子技术的发展诞生了数字电路,而数字电路的进步又产生了计算机技术,现代计算机技术的发展促进了科学技术和生产的飞跃。现在,计算机广泛地应用于科学计算、数据处理、生产过程控制、军事科技、现代医疗技术和家用电器等领域。计算机已经成为数字系统中最常见的、最有代表性的一种设备,是现代生活中不可缺少的工具。

数字电路系统是用数字来“处理”信息以实现计算和执行操作的电子网络。数字电路系统所用的数字来自于一种特定的数制系统,该数制系统只有两个可能的值:0 或 1。这就是目前数字电路系统采用的二进制数制系统。每 1 位二进制数(0 或 1)称为 1 比特(bit),简称为二进制数字。由于 1 位二进制数只有两个状态,而实际工作中可能出现的状态数很多,因此无法只用 1 位二进制数来完成所有的计算和操作,实际上是将若干位二进制数组合起来,例如,将 4 位二进制数划为 1 组,则这组二进制数将可以表示 16 种状态。现代的数字电路系统(如个人计算机)已有 8 位、16

位、32 位以至 64 位系统,位数越多,表示该系统处理的信息量越大。

数字系统是相当复杂的,它必须能完成如下任务:

- 将各种物理信息转换成数字系统可以理解的二进制“语言”。
- 仅用硬件电路来完成所要求的计算和操作。
- 将处理的结果以可以理解的物理形式返回给现实世界。

### 1.1.2 数字信号与数字电路

综观自然界中形形色色的物理量,不难发现,尽管这些物理量性质各异,但就其变化规律的特点而言,可以分为两大类。

一类物理量的变化在时间上或数量上是连续的,把这一类物理量称为模拟量。用来表示模拟量的信号称为模拟信号,而处理模拟信号的电子电路称为模拟电路。例如,当使用热电偶测量温度时,其输出的电压信号便是一个连续变化的模拟信号,在测量过程中,任意时刻的电压取值都表示相应的温度。

另一类物理量的变化在数量上和时间上都是离散的。也就是说,其变化在时间上是不连续的,总是发生在一系列的离散瞬间。并且,总是以某一个最小数量大小的整数倍的数值关系来增减变化。把这一类物理量称为数字量,用来表示数字量的信号称为数字信号,而处理数字信号电子电路称为数字电路。通常,数字系统的信号只有两个离散量(0 和 1),称为二进制信号。例如,开关的断开与闭合、晶体管的截止与导通、电路中的低电平与高电平等均为二进制信号。很明显,二进制信号容易被电路识别和处理,处理二进制信号的数字系统往往具有极高的可靠性和稳定性。

信号的离散有的是自然形成的,有的则是将连续过程加以量化后而得到的。例如,科学工作者在科学研究工作中常常要观察连续的过程,但由于过程持续时间太长,要做到连续观察和记录是非常困难的。例如,天气形势的记录是不可能连续记录下来的,否则信息量太大,系统很难处理,于是,气象台按一定时间间隔将数据记录下来,列成表格,这样就将连续的信息离散化了,表格中的每一个数字都成为离散量。

数字电路与模拟电路相比主要有如下优点:

- ① 由于数字电路是以二值数字逻辑为基础的,只有 0 和 1 两个基本数字,易于用电路来实现,例如,可用二极管、晶体管的导通与截止这两个对立的状态来表示数字信号的逻辑 0 和逻辑 1。
- ② 由数字电路组成的数字系统工作可靠,精度较高,抗干扰能力强。它可以通过整形很方便地去除叠加于传输信号上的噪声与干扰,还可利用差错控制技术对传输信号进行查错和纠错。
- ③ 数字电路不仅能完成数值运算,而且能进行逻辑判断和运算,这在控制系统中是不可缺少的。
- ④ 数字信息便于长期保存,例如,可将数字信息存入磁盘、光盘等长期保存。
- ⑤ 数字集成电路产品系列多,通用性强,成本低。

由于数字电路具有一系列优点,在电子设备或电子系统中得到了越来越广泛的应用,计算机、计算器、电视机、音响系统、视频记录设备、光碟、长途电信及卫星系统等,无一不采用数字电路。

## 1.2 数制与码制

数制是进位计数制度的简称。把多位数码中每一位的构成方法以及从低位向相邻高位的进位规则称为数制。日常生活中有许多不同的数制,例如,最早采用、也是使用最广泛的是十进制,

逢十进一；而钟表计时采用六十进制，如 60 秒(s)为 1 分(min)，60 分(min)为 1 小时(h)；12 个月为 1 年，则采用的是十二进制；也有采用二进制的，如 2 只筷子为 1 双等。中国古代的八卦也是采用二进制信息来表示的。

数字系统处理的是离散元素，而这些离散元素通常以二进制数的形式出现。为此，本节将介绍数制和码制的概念、表示方法、性质及其相互转换，以便为进一步学习以后各章打下基础。

## 1.2.1 数制

自古以来，常采用十进制数来计数，它的基数为 10，每位数可用下列 10 个数码之一来表示，即 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9。

### 1. 十进制 (Decimal)

十进制数的计数规律是逢十进一。也就是说，每位数累计不能超过 10，计满 10 就应向高位进 1。

当出现一个十进制数，如 512.32 时，就会立刻联想到：这个数的最左边第一位为百位(5 代表 500)，第二位为十位(1 代表 10)，第三位为个位(2 代表 2)，小数点后的第一位为十分位(3 代表 3/10)，第二位为百分位(2 代表 2/100)。这里百、十、个、十分之一和百分之一都是 10 的  $n$  次幂，它取决于系数所在的位置，称之为权。十进制数 512.32 从左到右各位的权分别是  $10^2, 10^1, 10^0, 10^{-1}, 10^{-2}$ 。因此，512.32 按权展开的形式为

$$512.32 = 5 \times 10^2 + 1 \times 10^1 + 2 \times 10^0 + 3 \times 10^{-1} + 2 \times 10^{-2}$$

等式左边的表示方法称为位置计数法，等式右边则是其按权展开式。

一般来说，对于任意一个十进制数  $s$ ，可用位置计数法表示为

$$(s)_{10} = (a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m})_{10} \quad (1-1)$$

也可用按权展开式表示为

$$\begin{aligned} (s)_{10} &= a_{n-1} \times 10^{n-1} + a_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + a_1 \times 10^1 + a_0 \times 10^0 + \\ &\quad a_{-1} \times 10^{-1} + a_{-2} \times 10^{-2} + \cdots + a_{-m} \times 10^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 10^i \end{aligned} \quad (1-2)$$

式中， $a_i$  为 0~9 这 10 个数码中的任意一个； $n$  为整数部分的位数； $m$  为小数部分的位数。通常，对十进制数的表示，可以在数字的右下角标注 10 或 D(Decimal)。

### 2. 二进制 (Binary)

数字系统中最常使用的进位制是二进制。在二进制数中，每一位只有 0 和 1 两个码，所以计数的基数为 2。二进制数的计数规则是每位计满 2 就向高位进 1，即逢二进一。例如，(1001) 就是一个二进制数，不同数位的数码表示的值不同，各位的权值是以 2 为底的连续整数幂，从右向左递增。

对于任意一个二进制数  $s$ ，用位置计数法表示为

$$(s)_2 = (a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m})_2 \quad (1-3)$$

用按权展开式表示为

$$\begin{aligned} (s)_2 &= a_{n-1} \times 2^{n-1} + a_{n-2} \times 2^{n-2} + \cdots + a_1 \times 2^1 + a_0 \times 2^0 + \\ &\quad a_{-1} \times 2^{-1} + a_{-2} \times 2^{-2} + \cdots + a_{-m} \times 2^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times 2^i \end{aligned} \quad (1-4)$$

式中， $a_i$  为数码 0 或 1； $n$  为整数部分的位数； $m$  为小数部分的位数。



通常,对二进制数的表示,可以在数字右下角标注 2 或 B(Binary)。

### 3. 十六进制 (Hexadecimal) 与八进制 (Octal)

由于二进制数简单、容易实现,所以它是数字系统中、特别是计算机中广泛采用的一种数制。但如用二进制表示一个十进制数时,需用 4 位二进制数才能表示 1 位十进制数,所用的位数比用十进制数表示的位数多,读写很不方便,因此在实际工作中通常采用八进制或十六进制。

八进制数的基数是 8,采用的数码是 0~7。计数规则是逢八进一,相邻高位的权值是低位权值的 8 倍。例如,数 $(47.6)_8$ 就表示一个八进制数。由于八进制的数码和十进制前 8 个数码相同,所以为了便于区分,通常在数字的右下角标注 8 或 O(Octal)。

十六进制数的基数为 16,分别用 0~9,A(10),B(11),C(12),D(13),E(14),F(15)表示。十六进制的计数规则是逢十六进一,相邻高位的权值是低位权值的 16 倍。例如,数 $(54AFSB)_{16}$ 就是一个十六进制数。通常,在数字的右下角标注 16 或 H(Hexadecimal)。

与二进制数一样,任意一个八进制数和十六进制数均可用位置计数法的形式和按权展开式的形式表示。

一般来说,对于任意的数  $s$ ,都能表示成以  $r$  为基数的  $r$  进制数,数  $s$  的表示方法也有两种形式,即位置计数法和按权展开式。

位置计数法表示为

$$(s)_r = (a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_0a_{-1}a_{-2}\cdots a_{-m})_r \quad (1-5)$$

用按权展开式表示为

$$\begin{aligned} (s)_r &= a_{n-1} \times r^{n-1} + a_{n-2} \times r^{n-2} + \cdots + a_1 \times r^1 + a_0 \times r^0 + a_{-1} \times r^{-1} + \\ &\quad a_{-2} \times r^{-2} + \cdots + a_{-m} \times r^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} a_i \times r^i \end{aligned} \quad (1-6)$$

式中:  $a_i$  为数码 0~ $(r-1)$  数码中的一个;  $r$  为该进位制的基数;  $n$  为整数部分的位数;  $m$  为小数部分的位数。

$r$  进制数的计数规则是“逢  $r$  进一”。

不同数制的各种数码如表 1-1 所示,该表列出了当  $r$  为 10、2、8、16 时,各种进位计数制中开始的 16 个自然数。

表 1-1 不同进位计数制的各种数码

十进制数( $r=10$ )	二进制数( $r=2$ )	八进制数( $r=8$ )	十六进制数( $r=16$ )
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