

21世纪高等学校规划教材 | 电子信息



# 电子技术基础 —— 数字电子（第2版）

渠丽岩 主编  
李晓江 副主编



清华大学出版社

高等学校规划教材 | 电子信息

---



# 电子技术基础

## —— 数字电子 (第2版)

渠丽岩 主编  
李晓江 副主编

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书是 21 世纪高等学校电子信息类规划教材。为适应应用型人才培养的需要,以及新的课程体系和教学改革的需要,本书力求知识性、趣味性、实用性相结合。通过本书的学习,学生能在规定学时内掌握具有实用价值的数字电子技术基础知识和技能。

全书共 8 章,主要内容包括逻辑代数基础、逻辑门电路、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/模和模/数转换以及可编程逻辑器件。为适应应用型人才培养的需要,书中穿插了典型例题和习题,并提供了多媒体教学课件。

本书可作为应用型本科计算机科学与技术、通信、电子信息、自动化等相关专业的本科生教材,也可作为成人教育及自学考试教材以及电子工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

### 图书在版编目(CIP)数据

电子技术基础·数字电子/渠丽岩主编.—2 版.—北京:清华大学出版社,2018

(21 世纪高等学校规划教材·电子信息)

ISBN 978-7-302-47949-9

I. ①电… II. ①渠… III. ①数字电路—电子技术—高等学校—教材 IV. ①TN

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 207215 号

责任编辑:刘向威 梅栾芳

封面设计:傅瑞学

责任校对:焦丽丽

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, [c-service@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载:<http://www.tup.com.cn>,010-62795954

印 装 者:北京密云胶印厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:17.5

字 数:417 千字

版 次:2010 年 3 月第 1 版 2018 年 1 月第 2 版

印 次:2018 年 1 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:45.00 元

---

产品编号:070481-01

## 第2版前言

本书在第1版基础上修订而成。2015年11月,教育部、国家发改委、财政部联合印发《关于引导部分地方普通本科高校向应用型转变的指导意见》。指导意见指出:当前我国已经建成了世界上最大规模的高等教育体系,为现代化建设做出了巨大贡献。但随着经济发展进入新常态,人才供给与需求关系深刻变化,面对经济结构深刻调整、产业升级加快步伐、社会文化建设不断推进,特别是创新驱动发展战略的实施,高等教育结构性矛盾更加突出,同质化倾向严重,毕业生就业难和就业质量低的问题仍未有效缓解,生产服务一线紧缺的应用型、复合型、创新型人才培养机制尚未完全建立,人才培养结构和质量尚不适应经济结构调整和产业升级的要求。

为适应应用型人才培养的需要以及新的课程体系和教学改革的需要,本书力求知识性、趣味性、实用性相结合。在第1版的基础上,面向应用技术型高校建设,增加了贴近实际的应用实例。通过本书的学习,学生能在规定学时内掌握具有实用价值的数字电子技术基础知识和技能。为适应应用技术型人才培养的需要,书中穿插了典型例题和习题,并提供了多媒体教学课件。

本书共8章,第1、2章由天津理工大学中环信息学院李晓江编写,第3章由天津理工大学中环信息学院申倩伟编写,第4~6章由天津理工大学中环信息学院渠丽岩编写,第7、8章由南开大学滨海学院李文燕编写,全书由渠丽岩担任主编,并完成全书的修改及统稿,李晓江担任副主编。

在本书的编写过程中得到南开大学滨海学院李维祥教授、北京科技大学天津学院许学东教授的多方支持,在此表示衷心的感谢。同时也向参与第1版编写的所有老师表示感谢。

本书在编写过程中参考了众多读者提出的宝贵意见,也查阅和参考了众多的文献资料,得到许多教益和启发,在此向广大读者和参考文献的作者致以诚挚的谢意。本书在编写过程和出版过程中,还得到清华大学出版社的大力支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

本版虽有所改进提高,但离教学改革的要求距离尚远,殷切希望使用本教材的师生和读者给予批评指正。

编者

2017年7月

# 第1版前言

本书是“21世纪高等学校计算机应用型本科教材精选”的规划教材。本书旨在贯彻实施“质量工程”，适应应用型人才培养的需要，深化教育教学改革，推进应用型本科课程体系和教材体系建设。

本书充分考虑应用型本科培养应用型人才的需要，根据计算机专业对“数字电子技术”课程的基本要求和学习特点，着重培养学生应用理论知识分析和解决实际问题的能力，按照循序渐进原则，突出“从理论到实践再到应用”的应用性教学，教材内容以适量、实用为度，注重理论知识的运用。在编写过程中力求叙述简练，概念清晰，通俗易懂，便于自学。对于数字系统的分析和设计，做到步骤清楚，结果正确，在例题的选择上力求深浅适度、接近实际应用并具有典型性。

全书突出知识性、系统性与趣味性相结合。每章开头的“趣味知识”，介绍了电子技术发展史上的重要历史人物、重大事件以及电子技术前沿科技展望等内容，让学生在学习专业知识的同时，增加社会人文知识，培养人文素养。在每一章最后都有与课程知识相关的故障诊断、数字系统设计等知识，以求尽量缩短学校教育与社会人才需求的距离。

本书共8章，第1、3章由天津理工大学代红丽编写，第2章由天津理工大学中环信息学院高夕庆编写，第4、5章由天津理工大学中环信息学院渠丽岩编写，第6~8章由南开大学任立儒编写，全书由渠丽岩担任主编，完成全书的修改及统稿，本书由天津理工大学中环信息学院孙富元担任主审。

在本书编写过程中得到天津师范大学津沽学院王慧芳教授、南开大学滨海学院朱耀庭教授、天津商业大学宝德学院常守金教授的多方支持，在此表示衷心的感谢。

本书在编写过程中查阅和参考了众多的文献资料，得到许多教益和启发，在此向参考文献的作者致以诚挚的谢意。本书在编写过程和出版过程中，还得到清华大学出版社和天津理工大学中环信息学院的大力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，加之时间仓促，书中难免有错误和不妥之处，殷切希望使用本教材的师生和读者，给予批评指正。

编者

2009年3月

# 目 录

第 1 章 逻辑代数基础 .....	1
1.1 概述 .....	2
1.1.1 模拟信号与数字信号 .....	2
1.1.2 数字波形 .....	2
1.1.3 模拟系统与数字系统 .....	3
1.2 数制 .....	4
1.2.1 十进制系统 .....	5
1.2.2 二进制系统 .....	5
1.2.3 八进制与十六进制系统 .....	6
1.2.4 不同数制间相互转换 .....	6
1.2.5 二进制代码 .....	9
1.3 逻辑运算 .....	11
1.3.1 “与”逻辑运算 .....	12
1.3.2 “或”逻辑运算 .....	12
1.3.3 “非”逻辑运算 .....	13
1.3.4 其他常用逻辑运算 .....	14
1.3.5 逻辑函数的表示方法 .....	15
1.4 逻辑代数 .....	16
1.4.1 逻辑代数基本定律 .....	16
1.4.2 逻辑代数的基本规则 .....	18
1.4.3 逻辑函数表达式及变换 .....	18
1.5 逻辑函数的公式化简法 .....	19
1.5.1 公式化简法中的常用公式 .....	19
1.5.2 公式化简法中的常用方法 .....	20
1.6 逻辑函数的卡诺图化简法 .....	23
1.6.1 最小项的定义及性质 .....	23
1.6.2 逻辑函数的最小项表达式 .....	24
1.6.3 逻辑函数的卡诺图表示 .....	25
1.6.4 逻辑函数的卡诺图化简法 .....	27
1.7 本章小结 .....	31
习题 1 .....	32

<b>第 2 章 集成逻辑门电路</b> .....	35
2.1 晶体管的开关特性 .....	36
2.1.1 二极管的开关特性 .....	36
2.1.2 三极管的开关特性 .....	37
2.2 最基本的门电路 .....	38
2.2.1 与门电路 .....	38
2.2.2 或门电路 .....	39
2.2.3 非门电路 .....	39
2.3 集成 TTL 门电路 .....	40
2.3.1 典型的集成与非门电路 .....	40
2.3.2 集成与非门的主要参数 .....	40
2.3.3 集电极开路与非门 .....	42
2.3.4 三态输出与非门 .....	42
2.4 CMOS 集成门电路 .....	44
2.4.1 CMOS 非门电路 .....	44
2.4.2 CMOS 与非门 .....	44
2.4.3 CMOS 或非门 .....	44
2.4.4 CMOS 输入保护电路 .....	45
2.5 逻辑门电路使用注意事项及应用举例 .....	45
2.5.1 TTL 门电路的使用 .....	45
2.5.2 CMOS 门电路的使用 .....	46
2.5.3 TTL 电路与 CMOS 电路的连接 .....	47
2.5.4 逻辑门电路应用举例 .....	48
2.6 本章小结 .....	49
习题 2 .....	50
<b>第 3 章 组合逻辑电路</b> .....	52
3.1 组合电路的分析和设计 .....	53
3.1.1 组合电路的分析 .....	53
3.1.2 组合电路的设计 .....	55
3.2 编码器 .....	60
3.2.1 编码器的功能和分类 .....	60
3.2.2 集成电路编码器 .....	62
3.3 译码器/数据分配器 .....	66
3.3.1 译码器的结构 .....	66
3.3.2 集成电路译码器 .....	67
3.3.3 数据分配器 .....	76
3.4 数据选择器 .....	77

3.4.1	数据选择器的结构 .....	77
3.4.2	集成电路数据选择器 .....	78
3.5	数值比较器 .....	81
3.5.1	数值比较器的结构 .....	81
3.5.2	集成数值比较器 .....	83
3.6	加法器 .....	86
3.6.1	半加器与全加器 .....	86
3.6.2	集成加法器 .....	88
3.7	组合逻辑电路中的竞争-冒险现象 .....	91
3.7.1	竞争-冒险现象的成因 .....	91
3.7.2	消除竞争-冒险的措施 .....	92
3.8	本章小结 .....	93
习题 3	.....	94
<b>第 4 章</b>	<b>触发器 .....</b>	<b>98</b>
4.1	RS 触发器 .....	99
4.1.1	基本 RS 触发器 .....	99
4.1.2	同步 RS 触发器 .....	102
4.1.3	集成 RS 触发器及其应用 .....	104
4.2	边沿触发器 .....	105
4.2.1	边沿 D 触发器 .....	105
4.2.2	边沿 JK 触发器 .....	107
4.2.3	其他类型的触发器(T 触发器和 T' 触发器) .....	109
4.2.4	应用举例 .....	109
4.3	不同类型触发器间的转换 .....	111
4.3.1	JK 触发器转换成 D 触发器 .....	111
4.3.2	D 触发器转换成 T、T' 触发器 .....	111
4.4	本章小结 .....	112
习题 4	.....	112
<b>第 5 章</b>	<b>时序逻辑电路 .....</b>	<b>115</b>
5.1	概述 .....	116
5.1.1	时序逻辑电路的结构和特点 .....	116
5.1.2	时序逻辑电路的分类 .....	117
5.1.3	时序逻辑电路的表示方法 .....	117
5.2	时序逻辑电路的分析 .....	120
5.2.1	分析时序逻辑电路的一般步骤 .....	120
5.2.2	同步时序逻辑电路分析举例 .....	120
5.2.3	异步时序逻辑电路分析举例 .....	123



5.3	时序逻辑电路的设计 .....	125
5.3.1	同步时序逻辑电路设计的一般步骤 .....	125
5.3.2	同步时序逻辑电路设计举例 .....	126
5.4	计数器 .....	132
5.4.1	二进制加法计数器 .....	132
5.4.2	十进制计数器 .....	135
5.4.3	集成计数器 .....	137
5.4.4	计数器应用举例 .....	143
5.5	寄存器 .....	146
5.5.1	数码寄存器 .....	146
5.5.2	移位寄存器 .....	147
5.5.3	集成移位寄存器 .....	148
5.6	本章小结 .....	151
	习题 5 .....	152
<b>第 6 章</b>	<b>脉冲波形的产生和整形 .....</b>	<b>156</b>
6.1	多谐振荡器 .....	157
6.1.1	门电路组成的多谐振荡器 .....	157
6.1.2	石英晶体振荡器 .....	162
6.1.3	多谐振荡器的应用 .....	164
6.2	单稳态触发器 .....	164
6.2.1	门电路组成的微分型单稳态触发器 .....	165
6.2.2	集成单稳态触发器 .....	167
6.2.3	单稳态触发器的应用 .....	170
6.3	施密特触发器及其应用 .....	173
6.3.1	门电路组成的施密特触发器 .....	173
6.3.2	集成施密特触发器 .....	175
6.3.3	施密特触发器的应用 .....	175
6.4	555 定时器及应用 .....	179
6.4.1	555 定时器 .....	179
6.4.2	555 定时器的应用 .....	180
6.5	本章小结 .....	188
	习题 6 .....	188
<b>第 7 章</b>	<b>数/模转换和模/数转换 .....</b>	<b>192</b>
7.1	D/A 转换器 .....	193
7.1.1	权电阻网络 D/A 转换器 .....	193
7.1.2	倒 T 形电阻网络 D/A 转换器 .....	194
7.1.3	权电流型 D/A 转换器 .....	196
7.1.4	D/A 转换器的输出方式 .....	197

7.1.5	D/A 转换器的主要技术指标 .....	200
7.1.6	集成 D/A 转换器及其应用 .....	201
7.2	A/D 转换器 .....	203
7.2.1	A/D 转换器的工作过程 .....	203
7.2.2	并行比较型 A/D 转换器 .....	206
7.2.3	逐次比较型 A/D 转换器 .....	208
7.2.4	双积分型 A/D 转换器 .....	211
7.2.5	A/D 转换器的主要技术指标 .....	213
7.2.6	集成 A/D 转换器及应用 .....	214
7.3	本章小结 .....	216
	习题 7 .....	217
<b>第 8 章</b>	<b>可编程逻辑器件 .....</b>	<b>218</b>
8.1	PLD 概述 .....	219
8.1.1	PLD 发展 .....	219
8.1.2	PLD 的编程技术 .....	220
8.1.3	可编程逻辑器件的表示方法 .....	221
8.2	早期可编程只读存储器 .....	222
8.2.1	PROM 结构及工作原理 .....	222
8.2.2	用 PROM 实现组合逻辑电路 .....	223
8.3	较复杂可编程芯片 .....	226
8.3.1	PAL 的基本结构 .....	226
8.3.2	PAL 器件的输出结构 .....	226
8.4	复杂可编程逻辑器件 .....	229
8.4.1	CPLD 器件 .....	229
8.4.2	FPGA 器件 .....	230
8.4.3	CPLD 和 FPGA 的选用 .....	234
8.5	PLD 编程 .....	236
8.5.1	在系统可编程技术 .....	236
8.5.2	PLD 开发软件 .....	237
8.6	Verilog HDL 编程基础 .....	237
8.6.1	Verilog HDL 的概述 .....	237
8.6.2	Verilog HDL 的设计流程 .....	238
8.6.3	Verilog HDL 模块简介 .....	240
8.6.4	Verilog HDL 实例 .....	242
8.7	应用系统设计实例 .....	244
8.8	本章小结 .....	258
	习题 8 .....	258
<b>附录 A</b>	<b>常用术语的汉英对照 .....</b>	<b>260</b>
	<b>参考文献 .....</b>	<b>263</b>

# 第 1 章

## 逻辑代数基础

### 本章要点

- ◇ 了解模拟量与数字量的区别；
- ◇ 掌握二进制、八进制、十六进制数的表示方法，并能完成相互转换；
- ◇ 掌握三种基本逻辑运算；
- ◇ 熟悉逻辑代数的基本定理、公式；
- ◇ 能够使用公式和卡诺图化简逻辑函数。

数字电子技术是一门重要而充满魅力的自然科学。自第二次世界大战以来，自然科学的任何一个分支对现代世界的发展所作出的贡献都比不上电子学。电子学促进了计算机、通信、消费产品、工业自动化、测试和测量以及卫生保健等领域的重大发展。电子工业目前已经超过汽车和石油工业，成为全球最大的单一工业。

一直以来，电子工业的发展趋势之一就是逐渐从模拟电子技术转移到数字电子技术。这种趋势始于 20 世纪 60 年代，到现在几近完成。数字电子技术以其抗干扰能力强、可靠性高、工作速度快、便于集成等优点，成为当前发展最快的学科之一。数字电视技术就是电子技术发展日新月异的典型例子。

### 趣味知识

#### 月球漫步

1969 年 7 月，全球几乎每一个人都在密切关注这一重大历史事件，对于美国宇航员尼尔·阿姆斯特朗来说，人类古老的月球漫步之梦即将成为现实。在地球上，数以百万计的观众和成千上万家报刊和杂志，急切地等待着登月的消息。终于，阿姆斯特朗那简短而又意味深长的消息，传送到 240 000 英里外的美国得克萨斯州休斯敦市，由这里立即被转播到正在焦急等待的世界各地。该消息说：“对于一个人来说，这只是一小步，但对人类来说，这却是一个巨大的飞跃。”很多人通过电视看到了这些话，而对于杂志和报刊来说，整个登月任务（包括阿姆斯特朗的讲话）被转换成一种特殊的代码，在计算机之间来回传输。每一个单词中的每一个字母都被转换成一个代码，该代码使用二进制计数系统的两个符号：0 和 1。用这些由 0 和 1 构成的代码，几乎可以控制一切——从触发航天飞机起飞，到使航天飞机保持正确的角度重新进入地球大气层。

现代计算机中仍然广泛使用这种代码，并被称为美国信息交换标准码（American Standard Code for Information Interchange, ASCII）。无论数字电子计算机的规模和应用如何，它们只是一个系统，管理着以 0 和 1 的形式组织的信息流。

## 1.1 概述

模拟电子技术分析和处理的是模拟信号,数字电子技术分析和处理的是数字信号。在学习数字电子技术之前首先了解一下模拟信号与数字信号。

### 1.1.1 模拟信号与数字信号

在自然界中,形形色色的物理量尽管性质各异,但按其变化规律基本可以分为模拟量和数字量两大类。

模拟量是指在一定范围内可以取任意实数值的物理量,其在时间或数值上都是连续的,例如温度、压力、速度等,都属于模拟量。而描述模拟量的信号称为模拟信号,例如热电偶上的电压信号就是模拟信号,随着温度的变化,电压也随之变化。因此模拟信号具有无穷多的数值,其数学表达式也比较复杂,如正弦函数、指数函数等。

另一类物理量,在时间和数值上都是离散的,例如信号灯闪亮的次数、台阶的阶数等,这些物理量的变化发生在离散的瞬间。而描述数字量的信号称为数字信号,这类信号如开关的开与关等,都具有明显的二值特性。因此数字信号通常用逻辑 0 和逻辑 1 描述彼此相关又互相对立的两种离散状态,称为二值逻辑或数字逻辑。数字电路的各种功能就是通过逻辑运算和逻辑判断来实现的,所以数字电路又称为数字逻辑电路。

### 1.1.2 数字波形

数字信号在电路中往往表现为突变的电压或电流,图 1.1 展示了一个理想的周期性数字信号,从图中可以看到,该信号有两个特点:

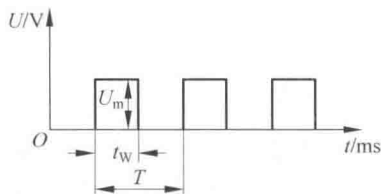


图 1.1 理想的周期性数字信号

(1) 信号只有两个电压值,高电平电压  $U_m$  和低电平电压  $0V$ ,因此可以用逻辑 1 和逻辑 0 分别表示这两个电压。

(2) 信号从高电平变为低电平,或者从低电平变为高电平是个突变的过程,发生在某些离散的时刻,所以这种信号又称为脉冲信号。

以下几个参数可以用来描绘一个理想的周期性数字信号。

$U_m$ ——信号幅度,表示电压波形变化的最大值。

$T$ ——信号的重复周期,信号的重复频率  $f=1/T$ 。

$t_w$ ——脉冲宽度,表示脉冲的作用时间。

$q$ ——占空比,表示脉冲宽度占整个周期的百分比,其定义为

$$q(\%) = \frac{t_w}{T} \times 100\% \quad (1.1)$$

图 1.2 展示了三个周期相同( $T=20ms$ ),但信号幅度、脉冲宽度及占空比各不相同的数字信号。

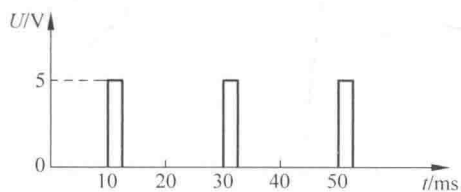
一个实际的数字信号常常是非理想的,如图 1.3 所示。对实际数字信号的描述,除上述几个参数外,还有两个重要参数。

$t_r$ ——上升时间,是指从脉冲幅度的 10% 上升到 90% 所需要的时间。

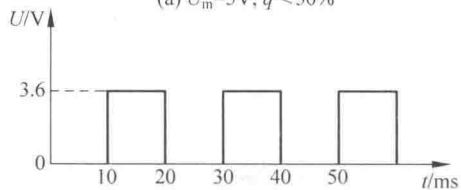
$t_f$ ——下降时间,是指从脉冲幅度的 90% 下降到 10% 所需要的时间。

此外,非理想数字信号的脉冲宽度  $t_w$  定义为脉冲幅值 50% 处,上升沿和下降沿两个时间点之间的时间间隔。

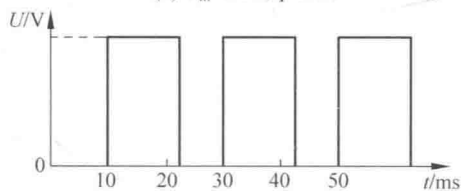
显然,上升时间  $t_r$  与下降时间  $t_f$  的值越小,越接近于理想波形。其典型值一般为几个纳秒(ns)。



(a)  $U_m=5V; q<50\%$



(b)  $U_m=3.6V; q=50\%$



(c)  $U_m=10V; q>50\%$

图 1.2 周期相同的三个数字信号

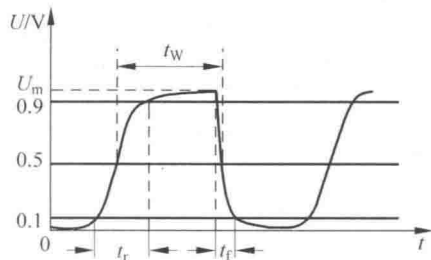


图 1.3 实际的脉冲信号

**例 1.1** 设某周期性数字信号波形的高电平持续时间为 3ms,低电平持续时间为 10ms,求其占空比  $q$ 。

**解:** 由题中已知条件可知数字波形的脉冲宽度  $t_w = 3\text{ms}$ ,周期  $T = 3\text{ms} + 10\text{ms} = 13\text{ms}$ ,则

$$q(\%) = \frac{t_w}{T} \times 100\% = \frac{3}{13} \times 100\% = 23.1\%$$

### 1.1.3 模拟系统与数字系统

电子系统是指由相互作用的基本电路和器件组成的能完成特定功能的电路整体。电子系统通常分为两大类:模拟系统和数字系统。

模拟系统(Analog System)是对模拟信息进行采集、存储、加工、传输、运算和处理的电子系统。模拟系统主要处理模拟信号,研究信号在处理过程中的波形变化以及器件和电路对信号波形的影响,即讨论信号的连续变化性,如放大电路、滤波器、正弦波振荡器、功率放

大器、电源等都属于模拟系统。

数字系统(Digital System)是用来对数字信息进行采集、存储、加工、传输、运算和处理的电子系统。数字系统主要处理数字信号,如计数器、寄存器、译码器等都属于数字系统。一个完整的数字系统通常由输入电路、输出电路、数据处理器、控制器和时钟电路五个部分组成。

与模拟系统相比,数字系统具有如下特点:

(1) 可靠性、稳定性和精度较高。

数字电子系统工作可靠、稳定性好。一般而言,对于一个给定的输入信号,数字电子系统的输出总是相同的,而模拟电子系统的输出则会随着外界温度、电源电压以及元器件老化等因素的变化而变化。而且对于数字电子系统,只要采样频率足够高、所使用的数字位数足够多,就能达到很高的精度,而用模拟方法实现时,由于系统各部分误差的累积影响,要达到与数字方法同样的精度和质量,设备往往复杂而昂贵。

(2) 可通过编程改变芯片的逻辑功能。

现代数字电子系统的设计,大多采用可编程逻辑器件,即厂家生产的是一种半成品芯片,用户可以根据需要在计算机上完成电路设计和仿真,并写入芯片,这给用户研发产品带来了极大的方便和灵活性。

(3) 容易采用计算机辅助设计。

数字电子系统设计与模拟电子系统相比,偏重于逻辑设计而不是参数选择,因此便于使用计算机辅助设计。目前许多高质量的数字系统开发工具纷纷面世,使得科技人员可以在自己的实验室内设计制作专用集成电路(ASIC),并可以通过各类仿真工具校验设计的结果,这大大缩短了设计的进程,节约了设计的成本,提高了设计质量。

(4) 电路结构简单,便于集成化。

数字电子系统结构简单,体积小,通用性强,容易制造,便于集成化生产,因而成本低廉。

(5) 高速度,低功耗。

随着集成电路工艺的发展,数字器件的工作速度越来越高,而功耗越来越低。集成电路中单管的开关速度可以做到小于 $10^{-11}$ s。整体器件中,信号从输入到输出的传输时间小于 $2 \times 10^{-9}$ s。百万门以上的超大规模集成芯片的功耗,可以低达毫瓦级。

由于具有上述一系列优点,数字电路在电子设备或电子系统中得到了越来越广的应用,计算机、电视机、视频记录设备、通信及卫星系统等,无一不采用了数字电路。

### 思考题

1. 举例说明你身边哪些信号是模拟信号? 哪些信号是数字信号?
2. 举例说明你身边哪些电子设备属于模拟系统? 哪些属于数字系统?

## 1.2 数制

“数制”指的是进位计数制,即用进位的方式来计数。同一个数可以采用不同的数制来计量。通常人们生活中习惯于采用十进制计数,而在数字电路中常常采用二进制计数,常用的还有八进制、十六进制等。各种进制存在共同的规律,相互联系,并能相互转换。这些数制所用的数字符号叫做数码;某种数制所用数码的个数称为基数。

## 1.2.1 十进制系统

十进制(Decimal)是人们最常用的数制。它具有如下特点:

(1) 数码。十进制数由 0, 1, 2, ..., 9 十个数码组成, 基数为 10, 逢 10 进 1。它们从低位到高位依次排列, 低位在右, 高位在左。

(2) 位权。 $10^i$ , 其中 10 代表基数,  $i$  代表十进制数的第  $i$  位。十进制数的计数规律是“逢 10 进 1”, 因此, 一个十进制数, 小数点左边第一位记作  $10^0$ , 第二位记作  $10^1$ , 第三位记作  $10^2$ , 依此类推; 而小数点右边第一位记作  $10^{-1}$ , 第二位记作  $10^{-2}$ , 依此类推。通常把  $10^i$  称为对应数位的权, 或称为位权, 即基数的幂。这样, 各数位表示的数值就是该位数码与权的乘积, 称为加权系数。

例如: 十进制数 151.68 可以写成:

$$(151.68)_{10} = 1 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 1 \times 10^0 + 6 \times 10^{-1} + 8 \times 10^{-2}$$

式中下标 10 表示该数字是十进制数, 也可以用下标 D 表示。从中可以看出, 每个数码处在不同位置代表的数值不同, 即使同样的数码在不同的位置, 代表的数值也不相同。

根据上述特点, 任何一个十进制数均可以展开为

$$(N)_{10} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} k_i 10^i \quad (1.2)$$

该式称为按位权展开式。式中  $k_i$  是第  $i$  位的系数, 它可以是 0~9 中的任何一个。若整数部分的位数是  $n$ , 小数部分的位数是  $m$ , 则  $i$  包含  $n-1 \sim 0$  的所有正整数和  $-1 \sim -m$  的所有负整数。

十进制数虽然是人们常用的计数体制, 但从计数电路的角度来看, 要构成电路, 必须要把电路的状态和计数符号对应起来, 而因为十进制数有 10 个数码, 电路就必须有 10 个能严格区别的状态与之对应, 所以采用十进制计数会在技术上带来很多困难, 因此在计数电路中一般不直接采用十进制数。

## 1.2.2 二进制系统

数字系统中最常使用的进制是二进制(Binary), 和十进制类似, 二进制具有如下特点:

(1) 数码。二进制数由 0、1 两个数码组成, 基数为 2, 逢 2 进 1。它们从低位到高位依次排列, 低位在右, 高位在左。

(2) 位权。 $2^i$ , 其中 2 代表基数,  $i$  代表二进制的第  $i$  位。二进制的计数规律是“逢 2 进 1”, 因此, 左边第一位记作  $2^0$ , 第二位记作  $2^1$ , 第三位记作  $2^2$ , 依此类推; 而小数点右边第一位记作  $2^{-1}$ , 第二位记作  $2^{-2}$ , 依此类推。通常把  $2^i$  称为对应数位的权, 或称为位权, 即基数的幂。这样, 各数位表示的数值就是该位数码与权的乘积, 称为加权系数。

例如: 二进制数 101.11 可以写成

$$(101.11)_2 = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}$$

式中下标 2 表示该数字是二进制数, 也可以用下标 B 表示。从中可以看出, 每个数码处在不同位置代表的数值不同, 即使同样的数码, 在不同的位置代表的数值也不相同, 所以任何一个二进制数均可以展开为

$$(N)_2 = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} k_i 2^i \quad (1.3)$$

目前数字电路普遍采用二进制系统,因为二进制有以下优点:

(1) 只有两个数码 0 和 1,很容易用电路元件的状态来表示。因此电路所用元件个数少,存储和传送数据可靠,装置简单稳定。

(2) 二进制的基本运算规则与十进制运算规则类似,但要简单得多。因为二进制数只有 0 和 1 两个符号,所以做加法、乘法等运算操作起来很简便。

与十进制相比,二进制数的缺点是:同样表示一个数,二进制数比十进制数位多,如 2 位十进制数 87 变为二进制数为 1010111,需要 7 位;另外,人们对二进制数不熟悉,使用起来不习惯。

因此,在进行数字系统运算时,通常先将十进制数转换成二进制数,运算结束后,再将二进制数转换为十进制数。

### 1.2.3 八进制与十六进制系统

由于用二进制表示一个数所用位数要比十进制多,不便于书写和记忆,所以在实际应用中还常采用八进制(Octal)和十六进制。

与二进制和十进制表示方法类似,八进制数有八个数码:0,1,2,3,4,5,6,7,“逢 8 进 1”,所以八进制数可展开为

$$(N)_8 = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} k_i 8^i \quad (1.4)$$

例如:八进制数 37.41 可以写成

$$(37.41)_8 = 3 \times 8^1 + 7 \times 8^0 + 4 \times 8^{-1} + 1 \times 8^{-2}$$

式中下标 8 表示该数字是八进制数,也可以用下标 O 表示。

十六进制数(Hexadecimal)有 16 个数码:0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,A,B,C,D,E,F。其中 A~F 分别对应十进制数的 10~15,“逢 16 进 1”,展开式为

$$(N)_{16} = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} k_i 16^i \quad (1.5)$$

例如:十六进制数 2A.7F 可写成

$$(2A.7F)_{16} = 2 \times 16^1 + 10 \times 16^0 + 7 \times 16^{-1} + 15 \times 16^{-2}$$

式中下标 16 表示该数字是十六进制数,也可以用下标 H 表示。

综上所述,任意进制数均可以写成如下展开式形式

$$D = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} k_i N^i \quad (1.6)$$

其中: $k_i$  为第  $i$  位的系数, $N^i$  为第  $i$  位的权。

### 1.2.4 不同数制间相互转换

既然同一个数可以用十进制、二进制、八进制、十六进制等不同形式来表示,那么不同数制之间必然存在一定的相互转换关系。下面一一介绍。



## 1. 十进制数和二进制数相互转换

## (1) 二进制数转换为十进制数

将二进制数转换为十进制数,就是根据式(1.3)把二进制数按位权展开后求和,其结果就是相应的十进制数。

**例 1.2** 将二进制数 $(01010110)_2$ 和 $(1010.01)_2$ 转换为十进制数。

**解:** 根据式(1.3)可得

$$\begin{aligned}(01010110)_2 &= 0 \times 2^7 + 1 \times 2^6 + 0 \times 2^5 + 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 \\ &= (86)_{10}\end{aligned}$$

$$(1010.01)_2 = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = (5.75)_{10}$$

## (2) 十进制数转换为二进制数

十进制数转换为二进制数包括两部分:整数转换和小数转换。整数转换一般采用连除法,“除2取余”,即把十进制数的整数部分连续除以2,到商为0为止,再把每次得到的余数由低到高排列,即先得到的余数是低位,后得到的余数是高位。而小数部分转换采用连乘法,“乘2取整”,即把十进制的小数部分连续乘以2,到小数部分为0或达到规定的精度为止,再把每次得到的整数由高到低排列,即先得到的是高位,后得到的是低位。

**例 1.3** 将十进制数 $(26)_{10}$ 转换为二进制数。

**解:** 根据上述原理,可按如下步骤将 $(26)_{10}$ 转换为二进制数:

2	26	余数	
2	13	……余0	↑ 低位
2	6	……余1	
2	3	……余0	
2	1	……余1	
	0	……余1	
			↓ 高位

由上可得 $(26)_{10} = (11010)_2$ 。

**例 1.4** 将十进制数 $(0.8125)_{10}$ 转换为二进制数。

**解:** 根据上述原理,可按如下步骤将 $(0.8125)_{10}$ 转换为二进制数:

	0.8125	取整	
×	2		↑ 高位
	1.6250	……取整数1	
	0.6250		
×	2		
	1.2500	……取整数1	
	0.2500		
×	2		↓ 低位
	0.5000	……取整数0	
×	2		
	1.0000	……取整数1	

由上可得 $(0.8125)_{10} = (0.1101)_2$ 。