

21世纪高等学校电子信息类专业规划教材

# 数字电子技术与逻辑设计

SHUZIDIANZIJISHUYULUOJISHEJI

主 编 蒋汉荣

副主编 张源峰 余明辉 王公望

主 审 刘陆平



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社

<http://press.bjtu.edu.cn>

TN79/169

2008

21 世纪高等学校电子信息类专业规划教材

# 数字电子技术与逻辑设计

主 编 蒋汉荣  
副主编 张源峰 余明辉 王公望  
主 审 刘陆平

清华大学出版社  
北京交通大学出版社  
·北京·

## 内 容 简 介

本书主要内容包括数字电路基础知识、逻辑门电路、组合逻辑电路、集成触发器、时序逻辑电路、脉冲信号的产生与整形电路、半导体存储器和可编程逻辑器件、模数与数模转换电路。着重介绍了逻辑代数基础、组合逻辑电路、时序逻辑电路、模数与数模转换电路。附录中配有技能训练项目,内容丰富实用,理论教学和实践训练紧密结合,融为一体。此外,每章都有小结、适量的思考题和习题。

本书内容简明扼要、通俗易懂、突出重点、概念清晰、深入浅出,可作为高职高专院校计算机、应用电子、通信、电气自动化、机电专业的教材,也可供从事电子技术工作的工程技术人员及其他相关专业的技术人员学习与参考。

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 13501256678 13801310933

## 图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术与逻辑设计/蒋汉荣主编. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社, 2007.12

(21世纪高等学校电子信息类专业规划教材)

ISBN 978-7-81123-210-3

I. 数… II. 蒋… III. ①数字电路-电子技术-高等学校-教材 ②数字电路-逻辑设计-高等学校-教材 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 193980 号

责任编辑:李运文 特邀编辑:齐立心

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京东光印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印张:16 字数:350千字

版 次:2008年1月第1版 2008年1月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-210-3/TN·56

印 数:1~5 000册 定价:25.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

# 前 言

《数字电子技术与逻辑设计》是电子信息类、电气信息类专业的一门重要的技术基础课,历来受到各工科高职院校的重视。为适应电子信息时代的新形势和培养面向 21 世纪电子技术人才的迫切需要,依据教育部《高等工业学校电子技术基础课程教学基本要求》,并融合了作者长期教学中积累的经验和成果编写了此教材。在编写过程中考虑了以下几点:

(1) 本书以培养高素质技能型人才为目标,在内容的选取上,首先立足于打好基础。在确保基本概念、基本原理和基本教学方法的前提下,简化集成电路内部结构和工作原理的讲述,减少小规模集成电路的内容,尽可能多地介绍中大规模集成电路及其应用。以能力培养为主线,以应用为目的,突出思路与方法阐述,力求反映当今数字电子技术的新发展。

(2) 在教材内容编排上精心组合,深入浅出,概念清晰,体系严谨。做到重点突出,层次分明,相互衔接,逻辑性强,以利于教学。在文字上力求简洁流畅,通俗易懂,便于学生自学。

(3) 每章均附有内容提要和本章小结与正文配合,并编写了具有启发意义的思考题和习题,本书后还附有相应的实训项目,体现实践性的教学。这些内容旨在强调重点内容和各知识点之间的联系,以使读者系统地运用所学的理论知识。

本书可作为高职高专院校计算机、应用电子、通信、电气自动化、机电专业教材使用,也可供从事电子技术工作的工程技术人员及其他相关专业人员使用。本课程的参考学时为 60~72 学时。

参加本书编写工作的有刘陆平(第 5 章)、蒋汉荣(第 2、4、6、7、9 章)、张源峰(第 1、3 章、附录 A)、余明辉(第 8 章)。蒋汉荣任主编,负责全书的组织、统稿和定稿。张源峰、余明辉、王公望任副主编,负责对全书内容的修改。

本书由刘陆平老师担任主审,审阅过程中提出了许多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。借此机会也向所有关心、支持和帮助过本书编写、出版、发行工作的同志们致以诚挚的谢意。

由于作者水平有限,加之时间比较仓促,书中难免有不妥和疏漏之处,殷切希望使用本教材的师生和读者给予批评指正。

编 者  
2008 年 1 月

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第1章 数字电路基础 .....          | 1  |
| 1.1 数字电路概述 .....          | 1  |
| 1.1.1 数字信号和数字电路 .....     | 1  |
| 1.1.2 数字电路的特点和分类 .....    | 2  |
| 1.1.3 脉冲信号及其参数 .....      | 3  |
| 1.2 数制与码制 .....           | 4  |
| 1.2.1 数制 .....            | 4  |
| 1.2.2 数制转换 .....          | 6  |
| 1.2.3 码制 .....            | 10 |
| 小结 .....                  | 13 |
| 思考题 .....                 | 13 |
| 习题 .....                  | 13 |
| 第2章 逻辑代数基础 .....          | 15 |
| 2.1 概述 .....              | 15 |
| 2.2 逻辑代数中的常用逻辑运算 .....    | 15 |
| 2.2.1 三种基本逻辑运算 .....      | 15 |
| 2.2.2 复合逻辑运算 .....        | 17 |
| 2.3 逻辑函数及其表示方法 .....      | 19 |
| 2.3.1 逻辑函数 .....          | 19 |
| 2.3.2 逻辑函数的表示方法 .....     | 20 |
| 2.3.3 逻辑函数的标准形式 .....     | 22 |
| 2.4 逻辑代数的基本定律和常用公式 .....  | 23 |
| 2.4.1 逻辑代数的基本定律 .....     | 23 |
| 2.4.2 逻辑代数的常用公式 .....     | 24 |
| 2.4.3 逻辑代数的重要规则 .....     | 25 |
| 2.5 逻辑函数的化简 .....         | 26 |
| 2.5.1 逻辑函数的表达式 .....      | 26 |
| 2.5.2 逻辑函数的公式化简法 .....    | 27 |
| 2.5.3 逻辑函数的卡诺图化简法 .....   | 30 |
| 2.5.4 具有约束项的逻辑函数的化简 ..... | 36 |
| 小结 .....                  | 38 |
| 思考题 .....                 | 39 |
| 习题 .....                  | 39 |
| 第3章 集成逻辑门电路 .....         | 41 |
| 3.1 概述 .....              | 41 |
| 3.2 半导体二极管和三极管的开关特性 ..... | 41 |

|       |                        |     |
|-------|------------------------|-----|
| 3.2.1 | 二极管的开关特性 .....         | 41  |
| 3.2.2 | 三极管的开关特性 .....         | 42  |
| 3.2.3 | MOS管开关特性 .....         | 43  |
| 3.2.4 | 抗饱和和三极管 .....          | 44  |
| 3.3   | 分立元件门电路 .....          | 44  |
| 3.3.1 | 二极管与门电路 .....          | 44  |
| 3.3.2 | 二极管或门电路 .....          | 45  |
| 3.3.3 | 三极管非门电路 .....          | 45  |
| 3.3.4 | 复合门电路 .....            | 46  |
| 3.4   | TTL集成逻辑门电路 .....       | 47  |
| 3.4.1 | 概述 .....               | 47  |
| 3.4.2 | TTL与非门 .....           | 48  |
| 3.4.3 | TTL与非门的主要性能指标 .....    | 49  |
| 3.4.4 | TTL与非门电路的改进 .....      | 54  |
| 3.4.5 | TTL电路的其他类型 .....       | 57  |
| 3.4.6 | TTL集成逻辑门的使用注意事项 .....  | 60  |
| 3.5   | CMOS集成逻辑门电路 .....      | 62  |
| 3.5.1 | CMOS反相器 .....          | 62  |
| 3.5.2 | CMOS与非门 .....          | 63  |
| 3.5.3 | CMOS或非门 .....          | 63  |
| 3.5.4 | CMOS传输门 .....          | 63  |
| 3.5.5 | CMOS集成逻辑门的使用注意事项 ..... | 64  |
| 3.6   | TTL电路与CMOS电路的连接 .....  | 65  |
| 小结    | .....                  | 67  |
| 思考题   | .....                  | 68  |
| 习题    | .....                  | 68  |
| 第4章   | 组合逻辑电路 .....           | 72  |
| 4.1   | 概述 .....               | 72  |
| 4.2   | 组合逻辑电路的分析方法 .....      | 72  |
| 4.3   | 组合逻辑电路的设计 .....        | 74  |
| 4.3.1 | 组合逻辑电路设计的一般步骤 .....    | 74  |
| 4.3.2 | 组合逻辑电路设计举例 .....       | 75  |
| 4.4   | 常用组合逻辑电路 .....         | 77  |
| 4.4.1 | 加法和比较器及其应用 .....       | 77  |
| 4.4.2 | 译码器和编码器及其应用 .....      | 84  |
| 4.4.3 | 数据分配和数据选择器及其应用 .....   | 94  |
| 4.5   | 组合逻辑电路中的竞争冒险现象 .....   | 101 |
| 4.5.1 | 竞争冒险的概述 .....          | 101 |
| 4.5.2 | 竞争冒险的判断方法 .....        | 103 |
| 4.5.3 | 消除竞争冒险的方法 .....        | 105 |
| 小结    | .....                  | 106 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 思考题                      | 106 |
| 习题                       | 107 |
| 第5章 集成触发器                | 110 |
| 5.1 概述                   | 110 |
| 5.2 RS 触发器               | 111 |
| 5.2.1 基本 RS 触发器          | 111 |
| 5.2.2 同步 RS 触发器          | 113 |
| 5.3 同步触发器                | 115 |
| 5.3.1 同步 D 触发器           | 115 |
| 5.3.2 同步 JK 触发器          | 116 |
| 5.3.3 同步触发器的空翻现象         | 117 |
| 5.4 主从触发器                | 117 |
| 5.4.1 主从 RS 触发器          | 118 |
| 5.4.2 主从 JK 触发器          | 119 |
| 5.5 边沿触发器                | 120 |
| 5.5.1 TTL 边沿 JK 触发器      | 120 |
| 5.5.2 维持阻塞 D 触发器         | 122 |
| 5.6 触发器逻辑功能的转换           | 123 |
| 5.6.1 JK 触发器构成其他逻辑功能的触发器 | 123 |
| 5.6.2 D 触发器构成其他逻辑功能的触发器  | 124 |
| 5.7 CMOS 触发器             | 125 |
| 5.7.1 CMOS-D 触发器         | 125 |
| 5.7.2 CMOS-JK 触发器        | 126 |
| 5.8 集成 D 触发器的简介及其应用      | 126 |
| 小结                       | 127 |
| 思考题                      | 128 |
| 习题                       | 129 |
| 第6章 时序逻辑电路               | 131 |
| 6.1 概述                   | 131 |
| 6.1.1 时序逻辑电路的分析          | 132 |
| 6.1.2 时序逻辑电路的设计方法        | 138 |
| 6.2 寄存器和移位寄存器            | 140 |
| 6.2.1 数据寄存器              | 140 |
| 6.2.2 移位寄存器              | 141 |
| 6.3 计数器                  | 145 |
| 6.3.1 异步计数器              | 145 |
| 6.3.2 同步计数器              | 151 |
| 6.3.3 集成计数器              | 156 |
| 6.3.4 $N$ 进制计数器          | 162 |
| 小结                       | 168 |
| 思考题                      | 168 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 习题                            | 169 |
| 第 7 章 脉冲信号的产生与整形              | 172 |
| 7.1 555 定时器的概述                | 172 |
| 7.1.1 555 定时器的电路结构            | 172 |
| 7.1.2 CC555 定时器的工作原理          | 173 |
| 7.2 施密特触发器                    | 174 |
| 7.2.1 用门电路构成的施密特触发器           | 174 |
| 7.2.2 由 555 定时器构成的施密特触发器      | 176 |
| 7.2.3 施密特触发器的应用举例             | 178 |
| 7.3 单稳态触发器                    | 179 |
| 7.3.1 用门电路组成的单稳态触发器           | 179 |
| 7.3.2 由 555 定时器构成的单稳态触发器      | 181 |
| 7.3.3 单稳态触发器的应用举例             | 182 |
| 7.4 多谐振荡器                     | 183 |
| 7.4.1 用门电路构成的多谐振荡器            | 183 |
| 7.4.2 由 555 定时器构成的多谐振荡器       | 185 |
| 7.4.3 多谐振荡器应用举例               | 188 |
| 思考题                           | 189 |
| 小结                            | 189 |
| 习题                            | 189 |
| 第 8 章 存储器与可编程逻辑器件             | 192 |
| 8.1 随机存取存储器                   | 192 |
| 8.1.1 RAM 的结构及存储容量            | 192 |
| 8.1.2 六管静态 MOS 基本存储电路(SMOS)   | 195 |
| 8.1.3 动态 RAM(DRAM)            | 196 |
| 8.2 只读存储器(ROM)                | 196 |
| 8.2.1 ROM 电路原理                | 197 |
| 8.2.2 ROM 在组合电路中的应用           | 199 |
| 8.2.3 用于研究开发或者小批量生产的 ROM      | 200 |
| 8.3 可编程逻辑器件                   | 202 |
| 8.3.1 可编程逻辑阵列 PLA 的功能与应用      | 202 |
| 8.3.2 其他可编程逻辑器件简介             | 205 |
| 8.4 组合逻辑电路设计方法总结              | 205 |
| 思考题                           | 208 |
| 小结                            | 209 |
| 习题                            | 209 |
| 第 9 章 模数与数模转换电路               | 211 |
| 9.1 模数与数模转换的概述                | 211 |
| 9.2 数模转换电路                    | 211 |
| 9.2.1 权电阻网络 D/A 转换电路          | 212 |
| 9.2.2 R-2R 倒 T 形电阻网络 D/A 转换电路 | 214 |

|       |                             |     |
|-------|-----------------------------|-----|
| 9.2.3 | 权电流型 D/A 转换电路 .....         | 215 |
| 9.2.4 | D/A 转换电路的主要参数 .....         | 216 |
| 9.2.5 | 集成 D/A 转换器及应用 .....         | 217 |
| 9.3   | 模数转换电路 .....                | 219 |
| 9.3.1 | 模数转换电路的工作原理 .....           | 219 |
| 9.3.2 | 并联比较型 A/D 转换电路 .....        | 222 |
| 9.3.3 | 逐次逼近型 A/D 转换电路 .....        | 223 |
| 9.3.4 | 双积分型 A/D 转换电路 .....         | 225 |
| 9.3.5 | A/D 转换电路的主要参数 .....         | 227 |
| 小结    | .....                       | 228 |
| 思考题   | .....                       | 228 |
| 习题    | .....                       | 229 |
| 附录 A  | 实训 .....                    | 230 |
| A.1   | 实训一——TTL 与非门逻辑功能和参数测试 ..... | 230 |
| A.2   | 实训二——触发器 .....              | 232 |
| A.3   | 实训三——组合逻辑电路设计 .....         | 234 |
| A.4   | 实训四——计数、译码及显示 .....         | 237 |
| A.5   | 实训五——移位寄存器的功能测试 .....       | 239 |
| A.6   | 实训六——用 555 定时器构成脉冲发生器 ..... | 242 |
| A.7   | 综合实训项目——数字钟电路的设计 .....      | 244 |
| 参考文献  | .....                       | 246 |

# 第 1 章 数字电路基础

## 内容提要

本章主要介绍数字信号、数字电路的分类和特点,并从十进制数的运算规则引入二进制、八进制、十六进制数的运算规则及它们之间的相互转换关系。最后介绍了常用 BCD 码和可靠性代码。

## 1.1 数字电路概述

### 1.1.1 数字信号和数字电路

#### 1. 数字信号

在电子技术中,被传送、加工和处理的信号有两类:一类是模拟信号,另一类是数字信号。

在学习模拟电路时,已经知道模拟信号的物理量(如电压或电流)在时间和数值上均是连续变化的,在正常情况下是不会突然跳变的,如图 1-1(a)所示。

数字信号是在数值和时间上都是离散的、突变的信号,常常被称作“离散”信号,如图 1-1(b)所示。

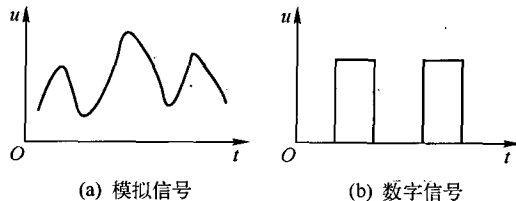


图 1-1 模拟信号与数字信号

数字信号是表示数字量的信号,一般来说数字信号是在两个稳定状态之间作跳跃式变化,它有电位型和脉冲型两种表示形式:用高低不同的电位信号表示数字 1 和 0 是电位型表示法;用有无脉冲表示数字 1 和 0 是脉冲型表示法。

#### 2. 数字电路

在模拟电子技术中,介绍的基本放大器、多级放大器、放大电路中的负反馈、直接耦合放大器、集成运算放大器及正弦波振荡电路等均是模拟信号的产生、放大、处理、运用电路,因此称为“模拟电路”。

数字电子技术则是一门研究数字信号的产生、整形、编码、运算、记忆、计数、存储、分配、测量和传输的科学技术,简单地说是用数字信号去实现运算、控制、测量的科学技术。在数字电子技术中,能实现上述功能的电路称为“数字电路”。

严格地说,数字电路包括了脉冲电路和数字逻辑电路两大部分。其中脉冲电路主要研究脉冲的产生、变换和测量。尽管脉冲波形的形状多样,但它们都有共同点,就是整个波形都由若干个暂态和稳态过程组成。为了获得暂态过程,脉冲电路必须包括两个组成部分:一个是开关电路,用来接通和断开电路,以破坏电路稳态建立暂态;另一个是惰性电路,用以控制暂态过程时间。这里使用的开关电路是半导体晶体二极管、三极管、MOS管及由它们构成的集成电路。常用的惰性电路有RC、RL、RLC和延迟线。

### 1.1.2 数字电路的特点和分类

#### 1. 数字电路的特点

和模拟电路相比,数字电路主要具有如下特点。

- (1) 电路结构简单,易集成化。数字信号只有两个状态0和1,对元件精度要求低。
- (2) 抗干扰能力强,工作可靠性高。数字信号易辨别不易受噪声干扰。
- (3) 数字信息便于长期保存和加密。
- (4) 数字集成电路产品系列全,通用性强,成本低。
- (5) 数字电路不仅能完成数值运算,而且还能进行逻辑判断。

#### 2. 数字电路的分类

微电子技术的迅猛发展导致了数字电路的飞速发展。

(1) 按电路组成的结构来分:可分为分立元件电路和集成电路两类。

分立元件电路,是将元件和器件用导线连接起来的电路;而集成电路是将元件、器件和导线均用半导体工艺集成制作在同一块硅片上构成的电路。

(2) 按集成度的大小来分:所谓集成度大小是指在同一块集成芯片上制作的逻辑门电路或元器件数量的多少。

数字电路按集成度分类的情况如表1-1所示,其中SSI、MSI、LSI、VLSI分别是小规模、中规模、大规模和超大规模集成电路英文名称的缩写。

表 1-1 数字集成电路分类

| 集成电路分类           | 集 成 度                                  | 电路规模与范围                                            |
|------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 小规模集成电路<br>SSI   | 1~10 门/片,或<br>10~100 个元件/片             | 逻辑单位电路。<br>它包括:逻辑门电路、集成触发器                         |
| 中规模集成电路<br>MSI   | 10~100 门/片,或<br>100~1 000 个元件/片        | 逻辑部件。<br>它包括:计数器、译码器、编码器、数据选择器、寄存器、算术运算器、比较器、转换电路等 |
| 大规模集成电路<br>LSI   | 100~1 000 门/片,或<br>1 000~100 000 个元件/片 | 数字逻辑系统。<br>它包括:中央控制器、存储器、各种接口电路等                   |
| 超大规模集成电路<br>VLSI | 大于 1 000 门/片,或<br>大于 10 万个元件/片         | 高集成度的数字逻辑系统。<br>例如:各种型号的单片机,即在一块硅片上集成一个完整的微型计算机    |

(3) 按构成电路的半导体器件来分:可分双极型电路和单极型电路两大类。

以双极型晶体管(二极管、三极管)为基本器件的集成电路称为双极型数字集成电路,属于这一类的有TTL、ECL、 $I^2L$ 等。

以 MOS 单极型晶体管为基本器件的集成电路称为单极型集成电路,属于这一类的有 NMOS、PMOS、CMOS 等。

(4) 按电路有无记忆功能来分:可分组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。

组合逻辑电路是一种在任何时刻的输出仅取决于该时刻的电路输入,与电路过去的输入状态无关的逻辑电路。如:编码器、加减法器、比较器、数据选择器等均属于组合逻辑电路,它们不能记忆电路过去的输入情况。

时序逻辑电路是一种在任何时刻的输出不仅取决于该时刻的电路输入,还与电路过去的输入情况有关的逻辑电路。如:触发器、计数器、寄存器等均属于时序逻辑电路,它们能用触发器等存储元件记忆过去的输入情况。

### 1.1.3 脉冲信号及其参数

#### 1. 什么是脉冲信号

瞬间突然变化,作用时间极短的电压或电流称为脉冲信号,它可以是周期性重复的,也可以是非周期性的或单次的。脉冲波形多种多样,现在一般把非正弦波统称为脉冲。常见的脉冲种类包括矩形脉冲、锯齿脉冲、尖脉冲、阶梯波、梯形波、方波、断续正弦波和钟形脉冲等,见图 1-2。从它们的波形就可以看出与典型的模拟信号如正弦交流电压、电流波形有很大的区别,它们是不连续的有突然变化的,也是离散的。

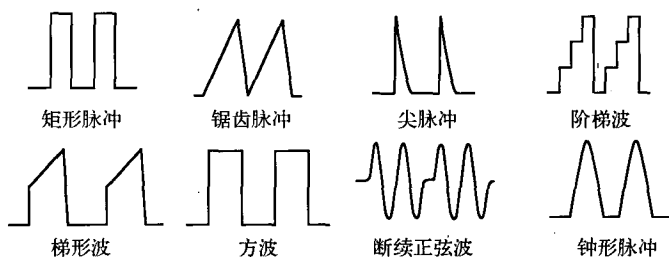


图 1-2 各种脉冲波

#### 2. 脉冲信号的主要参数

正弦交流电压、电流可用幅值、初相位和频率表示它的量值,而脉冲信号用什么参数来表示它的量值呢?在图 1-3 中以一个实际的脉冲波为例加以说明。

一个脉冲主要有下列的参数。

(1)  $U_m$ ——脉冲最大幅度。

它是电压从起始稳态值到峰值之间的变化幅度,单位:伏(V)。

(2)  $t_r$ ——脉冲前沿时间。

在图 1-3 中,对正脉冲而言,前沿即指上升沿。它是指脉冲幅度从  $0.1U_m$  上升到  $0.9U_m$  所对应的时间。因为对一般的脉冲波形很难断定脉冲的起始值和最大值的时刻,而到了  $0.1U_m$  时,幅度的变化比较明显,就容易确定脉冲的起始位置,故作这样的规定,单位:秒。

(3)  $t_f$ ——脉冲后沿时间。

在图 1-3 中,因是正脉冲,后沿即指下降沿。它是指从脉冲幅度  $0.9U_m$  下降到  $0.1U_m$  所需的时间。它反映电压下降时过渡过程的快慢,单位:秒。

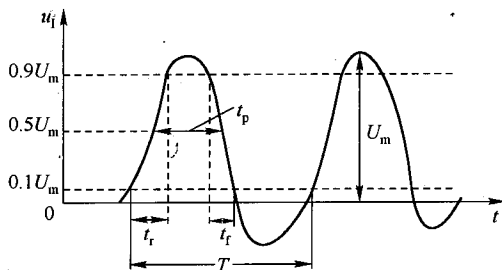


图 1-3 脉冲波形的主要参数

(4)  $t_p$ ——脉冲宽度。

在同一脉冲内两次到达  $0.5U_m$  的时间间隔,单位:秒。

(5)  $T$ ——周期。

在周期性连续脉冲中,相邻两个脉冲波形相位相同点之间的时间间隔,单位:秒。

(6)  $f$ ——频率。

在周期性连续脉冲中,每秒出现脉冲波形的次数,单位:赫兹(Hz)。

显然频率为周期的倒数,即  $f = 1/T$ 。

(7)  $D$ ——占空比。

它是脉冲宽度与脉冲重复周期  $T$  的比值,  $D = t_p/T$ ,它是描绘脉冲疏密的物理量。

## 1.2 数制与码制

### 1.2.1 数制

数制也称进位计数制是人按照进位的方法对数量进行计数的一种统计规律。在日常生活中,常常用到的是十进制,也就是逢十进一的进位计数制。在数字系统中,常常用到的数制是二进制、八进制和十六进制。本节将介绍数制的一些基本概念。

(1) 基数。

基数是指一种数制中所用到的数码个数。一般说基数为  $R$  的数制就是说这种数制称为  $R$  进制,逢  $R$  进一,它包括  $0, 1, \dots, R-1$  等数码。

(2) 位权。

在一个进位计数制表示的数中,处在不同数位上的数码,代表着不同的数值。某一个数位上的数值是由这一位上的数字乘以这个数位的位权值得到的。不同的数位上有不同的位权值。例如,十进制百位的位权值是 100,千位的位权值是 1000,百分位的位权值是 0.01。位权值简称为位权。

下面介绍数的表示。任何一个数都可以将其数值按位权展开。以十进制数 987.65 来举例,即

$$(987.65)_{10} = 9 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 7 \times 10^0 + 6 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2}$$

将这种表示方法推广,一个  $R$  进制的数  $N$ ,设其有  $n$  位整数  $m$  位小数,各位数字为  $K_{n-1}, \dots, K_1, K_0, \dots, K_{-m}$ ,位权为  $R^{n-1}, \dots, R^1, R^0, \dots, R^{-m}$ 。则

$$(N)_R = K_{n-1}R^{n-1} + \cdots + K_0R^0 + K_{-1}R^{-1} + \cdots + K_{-m}R^{-m} \quad (1-1)$$

### 1. 十进制

基数为 10 的数制为十进制,因此,在十进制数中,每位有 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 十个不同的数码,它的进位规律是逢十进一。数码所处的位置不同时,其代表的数值也不同,如

$$(385.64)_{10} = 3 \times 10^2 + 8 \times 10^1 + 5 \times 10^0 + 6 \times 10^{-1} + 4 \times 10^{-2}$$

式中  $10^2$ 、 $10^1$ 、 $10^0$  和  $10^{-1}$ 、 $10^{-2}$  为十进制数百位、十位、个位和十分位、百分位的“权”值。它们都是基数 10 的幂。

如用  $K$  表示数码,对于一个具有  $n$  位整数和  $m$  位小数的十进制数可用下式表示十进制数  $N$ ,则

$$(N)_{10} = K_{n-1}10^{n-1} + \cdots + K_010^0 + K_{-1}10^{-1} + \cdots + K_{-m}10^{-m} \quad (1-2)$$

其中,  $K_i$  为第  $i$  位数码,在十进制数中,  $K$  的取值为 0~9。  $10^i$  为十进制数第  $i$  位的权值。

### 2. 二进制

基数为 2 的数制为二进制,因此,在二进制中,进位规律是逢二进一,表示数值的数字只有 0 和 1。任何一个二进制数  $N$  可以表示为

$$(N)_2 = K_{n-1}2^{n-1} + \cdots + K_02^0 + K_{-1}2^{-1} + \cdots + K_{-m}2^{-m} \quad (1-3)$$

其中,  $K_i$  为 0 或 1, 2 为位权。

在数字系统之所以经常采用二进制,是因为它的运算很简单。下面给出它的运算规律。

#### (1) 二进制的加法规律

$$0+0=0 \quad 1+1=1 \quad 0+1=1+0=1$$

#### (2) 二进制的乘法规律

$$0 \times 0 = 0 \quad 1 \times 1 = 1 \quad 0 \times 1 = 1 \times 0 = 0$$

可见,二进制的运算规律非常简单,而且因为它每位只有 0 和 1 两种表示,所以在数字系统中实现起来很方便。人们经常用 0 来表示低电位或晶体管的截止,用 1 来表示高电位或晶体管的导通等。

### 3. 八进制

基数为 8 的数制为八进制,因此,在八进制中,进位规律是逢八进一,表示数值的数字有 8 个即 0~7。任意一个八进制数  $N$  可以表示为

$$(N)_8 = K_{n-1}8^{n-1} + \cdots + K_08^0 + K_{-1}8^{-1} + \cdots + K_{-m}8^{-m} \quad (1-4)$$

其中,  $K_i$  为 0~7 中的一个数, 8 为位权。

### 4. 十六进制

基数为 16 的数制为十六进制,因此,在十六进制中,进位规律是逢十六进一,十六进制表示数值的数字比较特殊,共有 16 个,包括 0~9 十个数字和六个符号 A、B、C、D、E、F 分别表示 10~15。任意一个十六进制数  $N$  可以表示为

$$(N)_{16} = K_{n-1}16^{n-1} + \cdots + K_016^0 + K_{-1}16^{-1} + \cdots + K_{-m}16^{-m} \quad (1-5)$$

其中,  $K_i$  为 0~9 以及 A、B、C、D、E、F 中的一个数, 16 为位权。

以上各数制对照关系见表 1-2。

表 1-2 十进制、二进制、八进制、十六进制对照表

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

## 1.2.2 数制转换

在实际的数字系统中,普遍采用二进制。但是二进制写起来冗长,不方便记忆。人们通常习惯十进制计数,所以在实际操作中,往往需要先将十进制或其他进制的数值转换为二进制的数值后,再进入数字系统处理。处理后的二进制数值转换为人们熟悉的十进制或其他进制的数值。这就是下面要讲到的不同数值之间的转换问题。

### 1. 任意进制数转换为十进制数

将一个任意进制的数转换为十进制数,方法很简单,利用式(1-1)将任意进制数展开相加的和就是对应的十进制数。下面用几个例题来说明。

【例 1-1】 将二进制数 $(101011.01)_2$ 转换为十进制数。

解: 根据式(1-3),在这里  $n=6, m=2, R=2$ , 有

$$\begin{aligned}(101011.01)_2 &= 1 \times 2^5 + 1 \times 2^3 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-2} = \\ &= 32 + 8 + 2 + 1 + 0.25 = \\ &= (43.25)_{10}\end{aligned}$$

【例 1-2】 将八进制数 $(57)_8$ 转换为十进制数。

解: 根据式(1-4),在这里  $n=2, m=0, R=8$ , 有

$$\begin{aligned}(57)_8 &= 5 \times 8^1 + 7 \times 8^0 = \\ &= 40 + 7 = \\ &= (47)_{10}\end{aligned}$$

【例 1-3】 将十六进制数 $(7E.A)_{16}$ 转换为十进制数。

解: 根据式(1-5),在这里  $n=2, m=1, R=16$ , 要注意在转换时, A~F 要对应写成  $10 \sim 15$ , 则

$$\begin{aligned}(7E.A)_{16} &= 7 \times 16^1 + 15 \times 16^0 + 10 \times 16^{-1} = \\ &= 112 + 15 + 8.75 = \\ &= (135.75)_{10}\end{aligned}$$

### 2. 十进制数转换为其他任意进制数

十进制数转换为其他任意进制数,因为整数部分和小数部分的转换方法不一样,所以要分

别转换后再将其加到一起,下面分别讨论整数部分和小数部分的转换方法。

### 1) 整数部分转换

将十进制整数转换为  $R$  进制数的方法是:将该十进制整数除  $R$  取余,然后逆序排列。具体来说就是,用十进制整数除以  $R$ ,得到一个商和余数,然后用商再除以  $R$ ,得到一个新商和一个新的余数,再将新商除以  $R$ ,……这样不断进行下去,直到所得的商为 0 为止。下面举几个例子来说明。

【例 1-4】将  $(97)_{10}$  转换成二进制数。

解:  $R=2$ ,采取除 2 取余的方法。运算过程为

|   |    |       |         |          |
|---|----|-------|---------|----------|
|   |    |       | 余数      |          |
| 2 | 97 | ..... | $1=K_0$ | 最低位(LSB) |
| 2 | 48 | ..... | $0=K_1$ |          |
| 2 | 24 | ..... | $0=K_2$ |          |
| 2 | 12 | ..... | $0=K_3$ |          |
| 2 | 6  | ..... | $0=K_4$ |          |
| 2 | 3  | ..... | $1=K_5$ |          |
| 2 | 1  | ..... | $1=K_6$ |          |
|   | 0  | ..... |         | 最高位(MSB) |

然后将余数逆序排列,所谓逆序排列就是最先得到的余数是二进制数的最低位,最后得到的是二进制数的最高位,得:1100001,即为所求。所以转换结果为

$$(97)_{10} = (1100001)_2$$

【例 1-5】将十进制整数  $(65)_{10}$  转换为八进制数。

解:因为  $R=8$ ,所以采用除 8 取余,逆序排列的方法。运算过程为

|   |    |       |         |
|---|----|-------|---------|
| 8 | 65 | ..... | $1=K_0$ |
| 8 | 8  | ..... | $0=K_1$ |
| 8 | 1  | ..... | $1=K_2$ |
|   | 0  |       |         |

然后将余数逆序排列,得 101,所以转换结果为

$$(65)_{10} = (101)_8$$

【例 1-6】将十进制数  $(275)_{10}$  转换为十六进制数。

解:因为  $R=16$ ,所以采用除 16 取余,逆序排列的方法。运算过程为

|    |     |       |         |
|----|-----|-------|---------|
| 16 | 275 | ..... | $3=K_0$ |
| 16 | 17  | ..... | $1=K_1$ |
| 16 | 1   | ..... | $1=K_2$ |
|    | 0   |       |         |

然后将余数逆序排列,得 113,所以转换结果是

$$(275)_{10} = (113)_{16}$$

由上面例题可见,采用除  $R$  取余,逆序排列的方法可以将十进制数转换为  $R$  进制数。

### 2) 小数部分转换

将十进制小数转换为  $R$  进制数的方法是:将十进制小数乘  $R$  取整,顺序排列。具体来说

就是将十进制的小数乘以  $R$ , 将其乘积的整数部分取出, 剩下的小数部分继续乘以  $R$ , 得到一个新的乘积, 再取出整数部分, 将剩下的小数部分乘以 2, ……如此下去直到乘积的小数部分为 0, 或者达到了要求的精确位数。下面举例说明。

【例 1-7】将十进制数  $(0.375)_{10}$  转换为二进制数。

解:  $R=2$ , 所以乘 2 取整, 顺序排列。运算过程为

|                         | 整数           |          |
|-------------------------|--------------|----------|
| $0.375 \times 2 = 0.75$ | $0 = K_{-1}$ | 最高位(MSB) |
| $0.75 \times 2 = 1.50$  | $1 = K_{-2}$ |          |
| $0.50 \times 2 = 1.00$  | $1 = K_{-2}$ | 最低位(LSB) |

然后将取到的整数顺序排列, 得 0.011, 所以转换结果为

$$(0.375)_{10} = (0.011)_2$$

而且在本题中, 由于最后的小数部分刚好为 0, 所以没有误差。

【例 1-8】将十进制数  $(0.69)_{10}$  转换为二进制数。

解:

|                        | 整数           |          |
|------------------------|--------------|----------|
| $0.69 \times 2 = 1.38$ | $1 = K_{-1}$ | 最高位(MSB) |
| $0.38 \times 2 = 0.76$ | $0 = K_{-2}$ |          |
| $0.76 \times 2 = 1.56$ | $1 = K_{-3}$ |          |
| $0.56 \times 2 = 1.12$ | $1 = K_{-4}$ | 最低位(LSB) |

将取得的整数顺序排列, 得 0.1011, 所以转换结果为

$$(0.69)_{10} = (0.1011)_2$$

在本题中, 由于结果取到小数点后第四位, 所以误差  $\epsilon < 2^{-4}$ 。

【例 1-9】将十进制数  $(0.23)_{10}$  转换为八进制数。

解:

|                        | 整数           |          |
|------------------------|--------------|----------|
| $0.23 \times 8 = 1.84$ | $1 = K_{-1}$ | 最高位(MSB) |
| $0.84 \times 8 = 6.72$ | $6 = K_{-2}$ |          |
| $0.72 \times 8 = 5.76$ | $5 = K_{-3}$ | 最低位(LSB) |

将取得的整数顺序排列, 得: 0.165, 所以转换结果为

$$(0.23)_{10} = (0.165)_8$$

在本题中由于结果取到小数点后第三位, 所以误差  $\epsilon < 8^{-3}$ 。

【例 1-10】将十进制数  $(0.87)_{10}$  转换为十六进制数。

解:

|                          | 整数            |          |
|--------------------------|---------------|----------|
| $0.87 \times 16 = 13.92$ | $13 = K_{-1}$ | 最高位(MSB) |
| $0.92 \times 16 = 14.72$ | $14 = K_{-2}$ |          |
| $0.72 \times 16 = 11.52$ | $11 = K_{-3}$ |          |
| $0.52 \times 16 = 8.32$  | $8 = K_{-4}$  | 最低位(LSB) |

将取得的整数顺序排列, 得 0.DEB8, 所以转换的结果为