

高等学校电子信息专业系列教材

# 数字逻辑电路

刘常澍 主 编

王 炜 副主编

刘常澍 赵雅兴 王 炜 雷淑英 编



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

TN79/173

2008

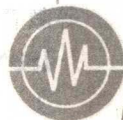
高等学校电子信息专业系列教材

# 数字逻辑电路

刘常澍 主编

王 炜 副主编

刘常澍 赵雅兴 王 炜 雷淑英 编



010-28281118 销售热线  
800-810-0508 商务咨询  
http://www.hep.edu.cn 网 址  
http://www.hep.com.cn 邮 政  
http://www.jbndico.com 邮 箱  
http://www.jbndico.com.cn 邮 政特快  
http://www.widobu.com 电子邮箱



高等教育出版社  
HIGHER EDUCATION PRESS

## 内 容 简 介

本书根据教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会关于“数字电路与逻辑设计”课程的教学基本要求编写。

全书共有9章内容:数字逻辑的基础知识,晶体管开关及门电路,组合逻辑电路,触发器与波形变换、产生电路,时序逻辑电路,存储器与可编程逻辑器件,硬件描述语言(VHDL),可测性设计及边界扫描技术,数模与模数转换。

本课程是电子信息类专业的主要技术基础课。书中内容的基础理论部分深入浅出,注重实践性,备有大量例题和习题。本书采用国家标准图形符号,在出现符号的地方对其所表示的意义进行简要的解释,使读者在学习本书的过程中逐渐学会识读常用的逻辑符号。

本书适合作为高等工科院校电子信息、通信、自动化等专业的技术基础课教材,也可供其他相关专业选用和社会读者阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑电路/刘常澍主编;刘常澍等编.—北京:高等教育出版社,2008.2

ISBN 978-7-04-023224-0

I. 数… II. ①刘…②刘… III. 数字电路:逻辑电路—高等学校—教材 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 003715 号

策划编辑 吴陈滨 责任编辑 王莉莉 封面设计 赵阳 责任绘图 朱静  
版式设计 马静如 责任校对 美国萍 责任印制 韩刚

---

出版发行 高等教育出版社

社 址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100011

总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司

印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×960 1/16

印 张 31

字 数 580 000

购书热线 010-58581118

免费咨询 800-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

<http://www.hep.com.cn>

网上订购 <http://www.landaco.com>

<http://www.landaco.com.cn>

畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008年2月第1版

印 次 2008年2月第1次印刷

定 价 35.20元

---

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23224-00

# 前 言

近年来,电子信息领域的技术发展日益加快,数字集成电路的复杂程度、集成度越来越高,因而对EDA(电子设计自动化)的需求越来越高,对于相关基本技能的提高要求也越来越迫切。

教育部高等学校电子电气基础课程教学指导分委员会对于“数字电路与逻辑设计”课程拟定了教学基本要求,要求中指出,本课程是电子信息类专业的主要技术基础课。其作用与任务是:使学生掌握数字电路的基本分析方法和逻辑设计方法。

本书在多年实际教学的基础上编写而成,考虑到不同院校的课程设置不同,本书没有将可选讲部分标出,在选讲时可根据各校教学要求进行取舍,并建议如下:

1. 第1、2、4章内容分别为数字逻辑的基础知识,晶体管开关及门电路,触发器与波形变换、产生电路,这三章以及第6章存储器与可编程逻辑器件是数字电路的基础内容,教学中选取的内容应以够用为度。

2. 第3章组合逻辑电路与第5章时序逻辑电路两章的内容较多,可在课内讲授基本概念和原理部分,基本内容以外的扩展和例题可以让学生自学。

3. 将硬件描述语言(VHDL)写成独立的第7章,并比较详细地讲述具体内容与列举大量实例,使读者通过本章能够较为全面地学习VHDL。若这部分内容单独设立一门课,则本章可作为参考资料。

4. 第8章可测性设计及边界扫描技术是综述性内容,可使读者了解近年出现的应用最为普遍的边界扫描技术。

5. 第9章数模与模数转换是模拟、数字的结合电路,可将其安排在诸如智能仪器、测控电路等课程内讲授。

书中采用国家标准图形符号,在出现符号的地方对其所表示的意义进行简要解释,使读者在学习本书的过程中逐渐学会识读常用的逻辑符号。

书中备有大量例题和习题,为读者提供了较多的参考和练习。

本书第2章由雷淑英编写,第7章由赵雅兴编写,第9章由王炜编写,其余章节的编写和统稿工作全部由刘常澍完成。赵雅兴教授在本书的编写过程中给予了指导。

北京联合大学李哲英教授审阅了本书的全部书稿,提出了很多改进的意见,

编者在此表示由衷的感谢。还要感谢李雪花对本书第6章编写所做的工作。

限于编者的水平,本书难免存在缺点或错误,恳请读者批评指正并及时与我们联系。

编者

2007年9月于天津

# 目 录

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| <b>第 1 章 数字逻辑的基础知识</b> .....  | 1  |
| 引言 .....                      | 1  |
| 1.1 数字电路的信号 .....             | 1  |
| 1.1.1 模拟量与数字量 .....           | 1  |
| 1.1.2 数字电路及其信号 .....          | 2  |
| 1.2 数字电路所用的数制 .....           | 2  |
| 1.2.1 二进制数 .....              | 2  |
| 1.2.2 十进制数和二进制数间的互相转换 .....   | 3  |
| 1.2.3 八进制数和十六进制数 .....        | 5  |
| 1.3 数字电路常用的码制与编码 .....        | 6  |
| 1.3.1 原码、反码和补码 .....          | 6  |
| 1.3.2 BCD 码(二-十进制编码) .....    | 10 |
| 1.3.3 格雷(Gray)码 .....         | 11 |
| 1.4 逻辑代数基本知识 .....            | 11 |
| 1.4.1 基本运算 .....              | 11 |
| 1.4.2 复合运算 .....              | 13 |
| 1.4.3 逻辑代数的定律 .....           | 16 |
| 1.4.4 逻辑函数的标准形式 .....         | 17 |
| 1.4.5 逻辑函数的化简 .....           | 24 |
| 本章小结 .....                    | 38 |
| 思考题及习题 .....                  | 39 |
| <b>第 2 章 晶体管开关及门电路</b> .....  | 43 |
| 引言 .....                      | 43 |
| 2.1 晶体管的开关特性及简单门电路 .....      | 44 |
| 2.1.1 二极管的开关特性 .....          | 44 |
| 2.1.2 双极晶体管的开关特性 .....        | 47 |
| 2.1.3 MOS 管的开关特性 .....        | 51 |
| 2.1.4 分立元件构成的门电路 .....        | 56 |
| 2.2 TTL(三极管-三极管逻辑)门电路 .....   | 62 |
| 2.2.1 TTL 与非门的电路结构与工作原理 ..... | 62 |
| 2.2.2 TTL 与非门的特性 .....        | 67 |

|                                  |            |
|----------------------------------|------------|
| 2.2.3 其他类型 TTL 门电路 .....         | 75         |
| 2.2.4 TTL 集成电路的系列产品 .....        | 81         |
| 2.3 其他类型双极型数字集成电路 .....          | 84         |
| 2.3.1 ECL(发射极耦合逻辑)门电路 .....      | 84         |
| 2.3.2 IIL(集成注入逻辑)门电路 .....       | 87         |
| 2.4 CMOS 集成门电路 .....             | 89         |
| 2.4.1 CMOS 反相器的电路结构和工作原理 .....   | 89         |
| 2.4.2 CMOS 反相器的输入特性和输出特性 .....   | 91         |
| 2.4.3 其他 CMOS 集成门电路 .....        | 94         |
| 2.4.4 TTL 电路与 CMOS 电路间的连接 .....  | 99         |
| 2.4.5 低电压 CMOS 电路及逻辑电平转换器 .....  | 101        |
| 2.4.6 CMOS 集成电路系列产品 .....        | 103        |
| 2.4.7 CMOS 集成电路使用注意事项 .....      | 106        |
| 本章小结 .....                       | 108        |
| 思考题及习题 .....                     | 109        |
| <b>第 3 章 组合逻辑电路</b> .....        | <b>116</b> |
| 引言 .....                         | 116        |
| 3.1 组合逻辑电路的一般分析与设计 .....         | 117        |
| 3.1.1 组合逻辑电路的一般分析 .....          | 117        |
| 3.1.2 组合逻辑电路的设计(用门电路) .....      | 119        |
| 3.2 常用组合逻辑电路及其中规模集成器件 .....      | 122        |
| 3.2.1 加法器 .....                  | 123        |
| 3.2.2 编码器 .....                  | 127        |
| 3.2.3 译码器及数据分配器 .....            | 133        |
| 3.2.4 数据选择器 .....                | 140        |
| 3.2.5 图案移位器 .....                | 142        |
| 3.2.6 数码比较器 .....                | 145        |
| 3.2.7 奇偶校验码的产生器/校验器 .....        | 147        |
| 3.3 用中规模集成器件设计组合逻辑电路 .....       | 149        |
| 3.3.1 用数据选择器实现组合逻辑电路 .....       | 149        |
| 3.3.2 用译码器、加法器实现组合逻辑电路 .....     | 154        |
| 3.4 组合逻辑电路的冒险 .....              | 155        |
| 3.4.1 竞争与冒险现象 .....              | 156        |
| 3.4.2 冒险的判断、避免及消除 .....          | 157        |
| 本章小结 .....                       | 159        |
| 思考题及习题 .....                     | 159        |
| <b>第 4 章 触发器与波形变换、产生电路</b> ..... | <b>164</b> |

|                            |            |
|----------------------------|------------|
| 引言                         | 164        |
| 4.1 脉冲信号                   | 164        |
| 4.1.1 脉冲信号的描述              | 164        |
| 4.1.2 波形的产生与变换             | 165        |
| 4.2 触发器                    | 165        |
| 4.2.1 基本 RS 触发器            | 166        |
| 4.2.2 同步 RS 触发器            | 171        |
| 4.2.3 主从延迟型 JK 触发器         | 175        |
| 4.2.4 边沿型 D 触发器            | 178        |
| 4.2.5 边沿型 JK 触发器           | 183        |
| 4.2.6 触发器的类型               | 185        |
| 4.2.7 各类触发器的开关工作特性及抗干扰能力比较 | 187        |
| 4.3 施密特电路                  | 188        |
| 4.3.1 用门电路组成的施密特电路         | 188        |
| 4.3.2 集成施密特电路              | 189        |
| 4.3.3 施密特电路的应用             | 190        |
| 4.4 单稳态电路                  | 192        |
| 4.4.1 用门电路组成的单稳态电路         | 193        |
| 4.4.2 集成单稳态电路              | 197        |
| 4.4.3 单稳态电路的应用             | 202        |
| 4.5 多谐振荡器                  | 206        |
| 4.5.1 用门电路组成的多谐振荡器         | 206        |
| 4.5.2 用施密特电路构成的多谐振荡器       | 209        |
| 4.5.3 石英晶体多谐振荡器            | 209        |
| 4.6 555 集成定时器              | 211        |
| 4.6.1 555 集成定时器的工作原理       | 211        |
| 4.6.2 555 集成定时器的应用举例       | 213        |
| 本章小结                       | 216        |
| 思考题及习题                     | 218        |
| <b>第 5 章 时序逻辑电路</b>        | <b>230</b> |
| 引言                         | 230        |
| 5.1 时序逻辑电路的基本概念            | 230        |
| 5.2 时序逻辑电路的描述              | 233        |
| 5.3 锁存器、寄存器、移位寄存器          | 236        |
| 5.3.1 锁存器                  | 236        |
| 5.3.2 寄存器                  | 237        |
| 5.3.3 移位寄存器                | 238        |



|                                       |            |
|---------------------------------------|------------|
| 5.3.4 寄存器的应用 .....                    | 244        |
| 5.4 计数器 .....                         | 246        |
| 5.4.1 同步计数器 .....                     | 247        |
| 5.4.2 异步计数器 .....                     | 258        |
| 5.4.3 $N$ 进制计数器 .....                 | 264        |
| 5.4.4 计数器的应用实例 .....                  | 273        |
| 5.5 时序逻辑电路的设计 .....                   | 277        |
| 5.5.1 原始状态图和原始状态表的建立 .....            | 277        |
| 5.5.2 状态化简 .....                      | 279        |
| 5.5.3 状态分配 .....                      | 281        |
| 5.5.4 状态转移和激励列表 .....                 | 282        |
| 5.5.5 激励方程和输出方程 .....                 | 283        |
| 5.5.6 逻辑图 .....                       | 283        |
| 5.5.7 输出与输入之间的关系 .....                | 292        |
| 5.5.8 自启动与非自启动 .....                  | 293        |
| 5.5.9 异步时序逻辑电路的设计 .....               | 295        |
| 5.5.10 输出方波的奇数分频器 .....               | 297        |
| 5.6 序列信号发生器 .....                     | 299        |
| 5.6.1 移存器型序列信号发生器 .....               | 299        |
| 5.6.2 计数器型序列信号发生器 .....               | 302        |
| 5.6.3 LFSR(线性反馈移存器)型序列信号发生器 .....     | 304        |
| 本章小结 .....                            | 309        |
| 思考题及习题 .....                          | 310        |
| <b>第 6 章 存储器与可编程逻辑器件 .....</b>        | <b>319</b> |
| 引言 .....                              | 319        |
| 6.1 存储器 .....                         | 320        |
| 6.1.1 SAM(顺序存取存储器) .....              | 320        |
| 6.1.2 RAM(随机存取存储器) .....              | 323        |
| 6.1.3 ROM(只读存储器) .....                | 331        |
| 6.2 可编程逻辑器件(PLD) .....                | 336        |
| 6.2.1 可编程器件的逻辑表示法 .....               | 337        |
| 6.2.2 简单可编程逻辑器件(SPLD) .....           | 339        |
| 6.2.3 高密度可编程逻辑器件(HDPLD) .....         | 346        |
| 6.2.4 Altera 公司的开发系统 Quartus II ..... | 352        |
| 本章小结 .....                            | 358        |
| 思考题及习题 .....                          | 359        |
| <b>第 7 章 硬件描述语言(VHDL) .....</b>       | <b>362</b> |

|   |            |
|---|------------|
| 引言 .....                                  | 362        |
| 7.1 VHDL 程序的组成 .....                      | 362        |
| 7.1.1 实体(Entity) .....                    | 363        |
| 7.1.2 构造体(architecture) .....             | 364        |
| 7.1.3 包集合(Package) .....                  | 368        |
| 7.1.4 库(library) .....                    | 370        |
| 7.1.5 配置(configuration) .....             | 371        |
| 7.2 VHDL 的标识符、客体、数据类型和操作符 .....           | 372        |
| 7.2.1 VHDL 的标识符(Identifiers) .....        | 372        |
| 7.2.2 VHDL 的客体(Object) .....              | 372        |
| 7.2.3 VHDL 的数据类型(Data Type) .....         | 374        |
| 7.2.4 子类型(subtypes) .....                 | 377        |
| 7.2.5 属性(Attributes) .....                | 378        |
| 7.2.6 VHDL 的运算操作符 .....                   | 379        |
| 7.3 VHDL 构造体的描述方法 .....                   | 380        |
| 7.3.1 顺序描述语句(Sequential Statement) .....  | 381        |
| 7.3.2 并发描述语句(Concurrent Statements) ..... | 388        |
| 7.3.3 断言语句(Assert Statements) .....       | 399        |
| 7.4 数字电路的 VHDL 设计举例 .....                 | 401        |
| 7.4.1 基本逻辑门的 VHDL 设计源文件 .....             | 401        |
| 7.4.2 组合逻辑电路的 VHDL 设计源文件 .....            | 402        |
| 7.4.3 时序逻辑电路的 VHDL 设计 .....               | 408        |
| 7.4.4 只读存储器(ROM)的 VHDL 设计 .....           | 416        |
| 本章小结 .....                                | 417        |
| 思考题及习题 .....                              | 417        |
| <b>第 8 章 可测性设计及边界扫描技术</b> .....           | <b>420</b> |
| 引言 .....                                  | 420        |
| 8.1 概述 .....                              | 421        |
| 8.2 可测性设计 .....                           | 423        |
| 8.2.1 特定设计 .....                          | 423        |
| 8.2.2 结构设计 .....                          | 425        |
| 8.3 边界扫描测试 BST .....                      | 435        |
| 8.3.1 边界扫描设计基本结构 .....                    | 436        |
| 8.3.2 边界扫描测试的工作方式 .....                   | 439        |
| 8.3.3 边界扫描单元的级联 .....                     | 440        |
| 8.3.4 边界扫描描述语言(BSDL) .....                | 441        |
| 本章小结 .....                                | 442        |

|                                      |            |
|--------------------------------------|------------|
| 思考题及习题 .....                         | 442        |
| <b>第9章 数模与模数转换 .....</b>             | <b>444</b> |
| 引言 .....                             | 444        |
| <b>9.1 D/A 转换器 .....</b>             | <b>444</b> |
| 9.1.1 D/A 转换器的基本工作原理 .....           | 444        |
| 9.1.2 二进制权电阻网络 D/A 转换器 .....         | 445        |
| 9.1.3 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器 .....        | 446        |
| 9.1.4 权电流型 D/A 转换器 .....             | 447        |
| 9.1.5 D/A 转换器的主要性能参数 .....           | 448        |
| 9.1.6 串行输入的 D/A 转换器 .....            | 450        |
| <b>9.2 A/D 转换器 .....</b>             | <b>452</b> |
| 9.2.1 A/D 转换器的基本工作原理 .....           | 452        |
| 9.2.2 并行比较型 A/D 转换器 .....            | 454        |
| 9.2.3 逐次渐近型 A/D 转换器 .....            | 456        |
| 9.2.4 双积分型 A/D 转换器 .....             | 457        |
| 9.2.5 A/D 转换器的主要技术指标 .....           | 460        |
| 9.2.6 串行输出的 A/D 转换器 .....            | 461        |
| <b>9.3 D/A 转换器和 A/D 转换器的应用 .....</b> | <b>462</b> |
| 9.3.1 D/A 转换器应用举例 .....              | 462        |
| 9.3.2 A/D 转换器应用举例 .....              | 463        |
| 本章小结 .....                           | 465        |
| 思考题及习题 .....                         | 466        |
| <b>附录 1 逻辑函数列表化简法 C 语言源程序 .....</b>  | <b>467</b> |
| <b>附录 2 国家标准图形符号简表 .....</b>         | <b>474</b> |
| <b>附录 3 英汉名词对照(以英文字母为序) .....</b>    | <b>477</b> |
| <b>主要参考文献 .....</b>                  | <b>484</b> |

# 第1章 数字逻辑的基础知识

## 引言

21世纪是信息化时代,数字化是进入信息化时代的必要条件。数字化的内涵即将信息用数字0、1编码来表述,对于任意的信息传输、处理、存储均用0、1码的形式进行。

0和1两个数码用电路中的两种对立状态表示,如电压的高低、电流的大小、脉冲的有无等,基于这种原理的电路即是数字电路,它通过对电路中状态的变换,来对其代表的信息进行运算、处理、控制、变换等操作。这种电路表现出许多优点:

① 电路仅稳定工作在不连续的、特征差别大的两个对立状态下,则电路的可靠性和稳定性非常高。

② 从理论上讲,信号在处理的过程中不会产生失真。

③ 信息的传输、运算、处理和保存变得更为方便。

④ 对电路的实时控制准确有效。

⑤ 与计算机及外围电路兼容,便于利用计算机进行运算、处理和控制。

⑥ 数字电路可以很方便地级联和扩展,中、大规模数字集成电路的生产和应用都呈现出广阔的空间。

正是基于上述原因,数字电路在近年来得到长足的进步。使得电子设备的可靠性和准确性得到极大提高。

数字电路越来越广泛地应用于工业、交通、军事、广播电视等几乎所有领域,近些年消费电子的发展方兴未艾,数字电路在此领域大放异彩。

本课程是许多学科的技术基础,也是相关课程的理论基础,如计算机原理、计算机网络、数字通信、数字信号处理、智能仪器及测量、现代自动控制等。

## 1.1 数字电路的信号

### 1.1.1 模拟量与数字量

自然界中存在的物理量,如海拔高度、温度、气压、质量、距离、物种数量等,

各种各样,千变万化,根据各种量的变化特性,可以概括为模拟量和数字量两大类。模拟量是在时间和数值上连续变化的物理量,如海拔、温度、气压等。数字量是在时间和数值上都不连续的或者说是离散的物理量,例如对生产线上产品的件数,物种数量的统计等。

模拟量的数字化是对模拟量分离取值的过程。比如气温,一般只按整摄氏度数记录,最小的统计单位是“摄氏度”,而实际气温变化是连续的。所以,记录气温的过程实际是对模拟量数字化的过程。

数字量有一个最小数量单位,数值不同表现为这个最小单位的整数倍不同,而小于这个最小数量单位的数值是没有意义的。比如人口统计中的最小数量单位是1人。

### 1.1.2 数字电路及其信号

表示数字量的信号称为数字信号,工作在数字信号下的电子电路称为数字电路。数字信号只有0和1两个数码,用电路的两个对立的状态表示这两个数码(如电压的高与低、三极管的饱和与截止、开关的通与断等)。由于数字电路中只有0和1两个数字,所以在数字运算时采用二进制数制,与人们习惯的十进制有所不同。相对于模拟电路而言,数字电路具有误差小、抗干扰性强、精度高、容易保存等优点。

## 1.2 数字电路所用的数制

### 1.2.1 二进制数

用数字表示数量即计数,用一组数码采用一定的计数规则表示数量,即是数制。例如,日常生活中通常采用的数制是十进制,基数是10,它有0、1、…、9共10个数字符号,计数的规则是“逢十进一”,即在计数过程中,一旦计数满十,就向高位进一。可以用以10为底的幂级数表达式来表示一个 $n$ 位整数、 $m$ 位小数的十进制数

$$\begin{aligned}(D)_{10} &= k_{n-1} \times 10^{n-1} + k_{n-2} \times 10^{n-2} + \cdots + k_1 \times 10^1 + k_0 \times 10^0 + \\ &\quad k_{-1} \times 10^{-1} + k_{-2} \times 10^{-2} + \cdots + k_{-m} \times 10^{-m} \\ &= \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times 10^i\end{aligned}\quad (1-1)$$

式中, $k_i$ 为第 $i$ 位的系数;10为基数; $10^i$ 为第 $i$ 位的权。处在不同位的数,主要体现在权的大小不同,如十位、百位、千位等;其次是系数不同。任意一个十进制数

可按位展开,即把每一位的位权值与该位的系数相乘,然后对所有位求和。如

$$(1234.056)_{10} = 1 \times 10^3 + 2 \times 10^2 + 3 \times 10^1 + 4 \times 10^0 + \\ 0 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2} + 6 \times 10^{-3}$$

人类文明历史上曾用过不同的计数制,如十二进制、十六进制、六十进制等,按照上述方法,可以写出任意进制( $N$ 进制)数的表达式

$$(D)_N = k_{n-1} \times N^{n-1} + k_{n-2} \times N^{n-2} + \cdots + k_1 \times N^1 + k_0 \times N^0 + \\ k_{-1} \times N^{-1} + k_{-2} \times N^{-2} + \cdots + k_{-m} \times N^{-m} \\ = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times N^i \quad (1-2)$$

一个 $N$ 进制数,基数是 $N$ ,它有 $0, 1, \cdots, N-1$ 共 $N$ 个数字符号,以 $N$ 为基数,计数的规则是“逢 $N$ 进一”,可以用以 $N$ 为底的幂级数表达式来表示一个 $N$ 进制数。

在数字电路和计算机中,都采用二进制计数,即采用“逢二进一”的计数方法。同样,可以用下式表示一个二进制数

$$(D)_2 = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i \times 2^i \quad (1-3)$$

二进制的基数是2,只有0和1两个数字符号,在数字电路和计算机中可以很方便地进行处理运算。但二进制数通常位数很多,而且与一般人们计数习惯和形式不一致,因而需将二进制数转换为十进制数,或反之,以利认识或应用,即进行数制转换。

## 1.2.2 十进制数和二进制数间的互相转换

### 1. 十进制数 - 二进制数转换

十进制数转换到二进制数的过程分两步,对整数部分和小数部分分别进行转换,然后再合成得到结果。

整数部分的转换:一个十进制的整数( $D$ )<sub>10</sub>总可以用二进制数展开,即

$$(D)_{10} = k_n 2^n + k_{n-1} 2^{n-1} + \cdots + k_1 2^1 + k_0 2^0$$

二进制数写为( $k_n k_{n-1} \cdots k_0$ )<sub>2</sub>。若将( $D$ )<sub>10</sub>除以2,则得到的商为

$$k_n 2^{n-1} + k_{n-1} 2^{n-2} + \cdots + k_1$$

而余数即 $k_0$ ;然后,再将商数除以2,则所得余数即 $k_1$ ;……,将每次得到的商依次除以2,取它们的余数 $k_0 \cdots k_n$ ,就可求出二进制数的每一位了。所以,十进制数整数部分转换为二进制数的过程是采用逐次除以基数2、再取余数的方法。

**例 1-1** 将十进制数( $27$ )<sub>10</sub>转换成二进制数。

解:

$$\begin{array}{r}
 2 \overline{) 27} \quad \text{商} \quad \text{余数} \\
 \underline{2} \quad 13 \quad \leftarrow \dots\dots 1 = k_0 \text{ 最低位} \\
 \underline{2} \quad 6 \quad \dots\dots 1 = k_1 \\
 \underline{2} \quad 3 \quad \dots\dots 0 = k_2 \\
 \underline{2} \quad 1 \quad \dots\dots 1 = k_3 \\
 0 \quad \dots\dots 1 = k_4 \text{ 最高位}
 \end{array}$$

故  $(27)_{10} = (11011)_2$ 。

小数部分的转换与整数部分的转换不同,是通过乘以基数 2 实现的。

若  $(D)_{10}$  是一个十进制数的小数,对应的二进制小数为  $(0.k_{-1}k_{-2}\dots k_{-m})_2$ , 应有

$$(D)_{10} = k_{-1}2^{-1} + k_{-2}2^{-2} + \dots + k_{-m}2^{-m}$$

如果将两边同乘以 2 得到

$$2(D)_{10} = k_{-1} + (k_{-2}2^{-1} + k_{-3}2^{-2} + \dots + k_{-m}2^{-m+1})$$

说明将小数  $(D)_{10}$  乘以 2 后,等式右边所得乘积的整数部分即  $k_{-1}$ ,其余为小数部分。

取出  $k_{-1}$ ,将小数部分再乘以 2 又可以得到

$$k_{-2} + (k_{-3}2^{-1} + \dots + k_{-m}2^{-m+2})$$

同样取出  $k_{-2}$ ,将小数部分再乘以 2,……当乘到取出  $k_{-m}$ 后,就依次得到  $k_{-1}k_{-2}\dots k_{-m}$ 。所以,十进制数(小数部分)转换为二进制数的过程是采用逐次乘以基数 2、再取整数的方法。

**例 1-2** 将十进制小数  $(0.625)_{10}$  转换成二进制小数。

解:

$$\begin{array}{r}
 0.625 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 \text{取 } 1 \dots\dots \quad 1.250 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 \text{取 } 0 \dots\dots \quad 0.500 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 \text{取 } 1 \dots\dots \quad 1.000
 \end{array}$$

故  $(0.625)_{10} = (0.101)_2$ 。

不是所有的十进制小数连乘 2 后小数部分都能达到 0,有的会出现无限循环,有的可能二进制小数的位数很多,在这种情况下,转换达到一定精度的位数时舍去后面的小数即可。转换精度的确定,一般以十进制所要求的精度进行换算:二进制每 4 位小数相当于十进制 1 位小数的精度( $1/16 \approx 1/10$ ),二进制每 7

位小数相当于十进制 2 位小数的精度( $1/128 \approx 1/100$ ),二进制每 10 位小数相当于十进制 3 位小数的精度( $1/1024 \approx 1/1000$ )等,依此类推。

**例 1-3** 将  $(0.4)_{10}$  转换成二进制小数。

解:

$$\begin{array}{r}
 0.4 \\
 \times 2 \\
 \hline
 \text{取 } 0 \cdots \cdots \quad 0.8 \\
 \times 2 \\
 \hline
 \text{取 } 1 \cdots \cdots \quad 1.6 \\
 \times 2 \\
 \hline
 \text{取 } 1 \cdots \cdots \quad 1.2 \\
 \times 2 \\
 \hline
 \text{取 } 0 \cdots \cdots \quad 0.4 \\
 \vdots \qquad \qquad \vdots
 \end{array}$$

以下循环,故  $(0.4)_{10} = 0.0110\cdots$ ,取所需要的位数即可。

## 2. 二进制数 - 十进制数转换

将一个二进制数转换成十进制数的过程很简单,只需将二进制数按位权展开相加即可。

**例 1-4** 将二进制数  $(1101001.011)_2$  转换成十进制数。

解:

$$\begin{aligned}
 (11010.011)_2 &= 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\
 &= 1 \times 16 + 1 \times 8 + 0 \times 4 + 1 \times 2 + 0 \times 1 + 0 \times 0.5 + 1 \times 0.25 + 1 \times 0.125 \\
 &= (26.375)_{10}
 \end{aligned}$$

### 1.2.3 八进制数和十六进制数

用二进制数表示一个数的位数会很多,书写和识别都很不方便,因而将二进制数用八进制或十六进制数表示被广泛应用。

八进制数有 0、1、…、7 共 8 个数字符号,根据数制规律可知,3 位二进制数可表示成 1 位八进制数,因而转换时只需将二进制数的每 3 位对应转换成 1 位八进制数。带小数的二进制数转换为十进制数时,整数与小数应分别进行转换。即以小数点为基准,向左、向右每 3 位为一组(首尾不足 3 位的以 0 补足 3 位),每组对应转换成 1 位八进制数。

反过来,1 位八进制数则对应 3 位二进制数。

**例 1-5** 将  $(10110.01011)_2$  转换成八进制数。

解:



$$\begin{array}{cccc} (010\ 110.\ 010\ 110)_2 \\ \downarrow\ \downarrow\ \downarrow\ \downarrow \\ (2\ 6.\ 2\ 6)_8 \end{array}$$

所以  $(10110.\ 01011)_2 = (26.\ 26)_8$ 。

十六进制数由 0、1、…、9 和 A、B、C、D、E、F 共 16 个数字组成，其中 A、…、F 分别等值于十进制数中的 10、…、15。4 位二进制数可表示为 1 位十六进制数，转换方法可参照八进制数的转换方法进行，但需将二进制数的每 4 位对应转换成 1 位十六进制数。

**例 1-6** 将二进制数  $(1011010.\ 01111)_2$  转换成十六进制数。

解： $(1011010.\ 01111)_2 = (5A.\ 78)_{16}$ 。

欲将八进制数和十六进制数转换成十进制数，只需像二进制数转换时那样，按位权展开求和即可。

**例 1-7** 将十六进制数  $(5A.\ 78)_{16}$  转换成十进制数。

解： $(5A.\ 78)_{16} = 5 \times 16^1 + 10 \times 16^0 + 7 \times 16^{-1} + 8 \times 16^{-2} = (90.\ 46875)_{10}$ 。

十进制数直接转换成八进制和十六进制数比较繁琐，有时计算容易出错。可以将十进制数先转换成二进制数，然后再转换为八进制或十六进制数。

**例 1-8** 将  $(43.\ 3125)_{10}$  转换成八进制和十六进制数。

解： $(43.\ 3125)_{10} = (101011.\ 0101)_2 = (53.\ 24)_8 = (2B.\ 5)_{16}$ 。

## 1.3 数字电路常用的码制与编码

计算机可以存储和处理很多不同的信息，而实际上机器只能识别二进制码，因而要用数码来表示各种各样的信息。

用数码来表示信息的方法很多，建立这种对应关系的过程称为编码，编码所依据的不同的编码规则就称为码制。所以，数码不仅可以表示数值的大小，而且还能表示不同的事物。表示事物的这些数码只是事物的代号，而没有数值的含义。例如，不同的电话号码，只是区别不同的电话终端，并不表示数值大小。代替不同事物的数码称为代码。当然，数值也可以用数码来表示，但可以有不同的表示规则，甚至同一个数可以有不同的代码表示形式，因为依据的码制不同。

### 1.3.1 原码、反码和补码

书写一个带符号数时，可以在数的前面加上一个符号，如 +3、-0.5 等。而在计算机中的正、负号是用数码来表示的。通常带符号数的最高位为符号位：该位为 0 表示是正数；为 1 则表示是负数。符号位后面的数码表示数值。在计算