



普通高等院校电子信息类应用型规划教材

# 数字电子技术基础

主 编 白彦霞 张秋菊  
副主编 云彩霞 李丽芬



北京邮电大学出版社  
[www.buptpress.com](http://www.buptpress.com)

普通高等院校电子信息类应用型规划教材

# 数字电子技术基础

主 编 白彦霞 张秋菊  
副主编 云彩霞 李丽芬

北京邮电大学出版社  
·北京·

## 内 容 简 介

本书定位在“应用型本科”层次,内容简明,通俗易懂,由浅入深,突出集成器件的应用,理论联系实际。

全书共分为10章,分别为:数字逻辑概论、逻辑代数基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、锁存器与触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与变换、数/模和模/数转换、半导体存储器以及可编程逻辑器件。此外,配合教学的实验内容穿插在相应的理论教学过程中,每章都配有本章小结和习题。

本书篇幅适中、可读性强,可作为普通高等院校计算机相关专业、电气自动化技术和信息类相关专业应用型本(专)科的教材或参考书,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术基础/白彦霞,张秋菊主编. —北京:北京邮电大学出版社,2009

ISBN 978-7-5635-2035-0

I. 数… II. ①白…②张… III. 数字电路—电子技术—高等学校—教材 IV. TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 119738 号

---

书 名: 数字电子技术基础

主 编: 白彦霞 张秋菊

责任编辑: 张珊珊

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编:100876)

发 行 部: 电话:010-62282185 传真:010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京市梦宇印务有限公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 20.75

字 数: 514 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-5635-2035-0

定 价: 35.00 元

• 如有印装质量问题,请与北京邮电大学出版社发行部联系 •

# 前 言

本书定位在“应用型本科”层次,内容简明,通俗易懂,由浅入深,突出集成器件的应用,理论联系实际。

全书共分为 10 章,分别为:数字逻辑概论、逻辑代数基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、锁存器与触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与变换、数/模和模/数转换、半导体存储器以及可编程逻辑器件。此外,配合教学的实验内容穿插在相应的理论教学过程中,每章都配有本章小结和习题。

在内容组织上以讲清组合逻辑电路和时序逻辑电路的分析方法和设计方法为主线,介绍了各种逻辑器件的功能及应用,贯彻理论联系实际和少而精的原则,加强了对中规模集成电路的应用。对教学目的和要求中要求必须掌握的基本概念、基本原理和基本分析方法,做到讲深、讲透,并注意讲清思路、启发思维,以培养举一反三的能力。本书始终贯彻“讲、学、练”相结合的原则,从能力培养的角度出发,培养学生分析问题和解决问题的能力。

本书第 1 章由周火凤编写,第 2 章由李丽芬编写,第 3 章由刘继超编写,第 4 章和第 6 章由白彦霞编写,第 5 章由云彩霞编写,第 7 章由赵燕编写,第 8 章由张芳芳编写,第 9 章和第 10 章由张秋菊编写。全书由白彦霞整理定稿,莫德举审定。

本书篇幅适中、可读性强,可作为普通高等院校计算机相关专业、电气自动化技术和信息类相关专业应用型本(专)科的教材或参考书,也可供从事电子技术工作的工程技术人员参考。

为方便教学,本书配有免费电子教案,凡选用本书作为授课教材的学校,均可向北京邮电大学出版社索取。

由于编者水平有限,书中难免存在不足之处,恳请各位专家、读者批评指正。

作 者

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第 1 章 数字逻辑概论 .....        | 1  |
| 1.1 数字电路与数字信号 .....       | 2  |
| 1.1.1 数字技术的发展及其应用 .....   | 2  |
| 1.1.2 数字集成电路的分类及特点 .....  | 3  |
| 1.1.3 模拟信号与数字信号 .....     | 6  |
| 1.1.4 数字信号的描述方法 .....     | 7  |
| 1.2 数制 .....              | 11 |
| 1.2.1 十进制 .....           | 11 |
| 1.2.2 二进制 .....           | 12 |
| 1.2.3 十六进制和八进制 .....      | 14 |
| 1.2.4 进制之间的相互转换 .....     | 15 |
| 1.3 二进制数的算术运算 .....       | 18 |
| 1.3.1 无符号二进制数的算术运算 .....  | 19 |
| 1.3.2 带符号二进制数的算术运算 .....  | 20 |
| 1.4 二进制代码 .....           | 22 |
| 1.4.1 自然二进制码 .....        | 22 |
| 1.4.2 二十进制编码 .....        | 22 |
| 1.4.3 格雷码 .....           | 23 |
| 1.4.4 ASCII 码 .....       | 23 |
| 1.5 二值逻辑变量与基本逻辑运算 .....   | 24 |
| 1.6 逻辑函数及其表示方法 .....      | 27 |
| 本章小结 .....                | 29 |
| 习题 .....                  | 30 |
| 第 2 章 逻辑代数基础 .....        | 32 |
| 2.1 逻辑代数 .....            | 32 |
| 2.1.1 逻辑代数的基本定律和恒等式 ..... | 32 |
| 2.1.2 逻辑代数的基本规则 .....     | 35 |
| 2.1.3 逻辑函数的变换及代数化简法 ..... | 36 |

|                                  |           |
|----------------------------------|-----------|
| 2.2 逻辑函数的卡诺图化简法 .....            | 40        |
| 2.2.1 最小项的定义及其性质 .....           | 40        |
| 2.2.2 逻辑函数的最小项表达式 .....          | 41        |
| 2.2.3 用卡诺图表示逻辑函数 .....           | 42        |
| 2.2.4 用卡诺图化简逻辑函数 .....           | 44        |
| 本章小结 .....                       | 47        |
| 习题 .....                         | 47        |
| <b>第3章 逻辑门电路</b> .....           | <b>50</b> |
| 3.1 MOS 逻辑门电路 .....              | 50        |
| 3.1.1 概述 .....                   | 50        |
| 3.1.2 MOS 管的开关特性 .....           | 52        |
| 3.1.3 CMOS 反相器和传输门 .....         | 53        |
| 3.1.4 CMOS 与非门、或非门和异或门 .....     | 56        |
| 3.1.5 CMOS 漏极开路门电路和三态输出门电路 ..... | 57        |
| 3.1.6 CMOS 门电路的电气特性和参数 .....     | 62        |
| 3.2 TTL 逻辑门电路 .....              | 67        |
| 3.2.1 三极管的开关特性 .....             | 67        |
| 3.2.2 反相器的基本电路 .....             | 69        |
| 3.2.3 TTL 逻辑门电路 .....            | 72        |
| 3.2.4 集电极开路门和三态门 .....           | 73        |
| 3.3 逻辑描述中的几个问题 .....             | 75        |
| 3.3.1 正负逻辑问题 .....               | 75        |
| 3.3.2 基本逻辑门电路的等效符号及其应用 .....     | 76        |
| 3.4 逻辑门电路使用中的几个实际问题 .....        | 79        |
| 3.4.1 各种门电路之间的接口问题 .....         | 79        |
| 3.4.2 抗干扰措施 .....                | 82        |
| 本章小结 .....                       | 84        |
| 习题 .....                         | 84        |
| <b>第4章 组合逻辑电路</b> .....          | <b>87</b> |
| 4.1 概述 .....                     | 87        |
| 4.2 组合逻辑电路的分析 .....              | 88        |
| 4.3 组合逻辑电路的设计 .....              | 90        |
| 4.4 组合逻辑电路中的竞争冒险 .....           | 94        |
| 4.4.1 产生竞争冒险的原因 .....            | 94        |
| 4.4.2 竞争冒险现象的识别 .....            | 96        |
| 4.4.3 竞争冒险的消去方法 .....            | 97        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 4.5 常用组合逻辑集成电路 .....           | 100        |
| 4.5.1 编码器 .....                | 100        |
| 4.5.2 译码器/数据分配器 .....          | 105        |
| 4.5.3 数据选择器 .....              | 117        |
| 4.5.4 数值比较器 .....              | 124        |
| 4.5.5 算术运算电路 .....             | 128        |
| 本章小结 .....                     | 133        |
| 习题 .....                       | 134        |
| <b>第5章 锁存器与触发器 .....</b>       | <b>141</b> |
| 5.1 概述 .....                   | 141        |
| 5.1.1 锁存器与触发器 .....            | 142        |
| 5.1.2 锁存器和触发器逻辑功能描述方法 .....    | 142        |
| 5.1.3 双稳态存储单元电路 .....          | 143        |
| 5.2 锁存器 .....                  | 143        |
| 5.2.1 基本 RS 锁存器 .....          | 144        |
| 5.2.2 锁存器和触发器逻辑功能描述 .....      | 145        |
| 5.2.3 逻辑门控 RS 锁存器——同步触发器 ..... | 147        |
| 5.2.4 D 锁存器 .....              | 149        |
| 5.3 触发器的电路结构和工作原理 .....        | 151        |
| 5.3.1 主从触发器 .....              | 152        |
| 5.3.2 维持阻塞触发器 .....            | 153        |
| 5.3.3 利用传输延迟的触发器 .....         | 154        |
| 5.4 触发器的逻辑功能 .....             | 155        |
| 5.4.1 D 触发器 .....              | 157        |
| 5.4.2 JK 触发器 .....             | 157        |
| 5.4.3 T 触发器 .....              | 159        |
| 5.4.4 $T'$ 触发器 .....           | 160        |
| 5.4.5 RS 触发器 .....             | 160        |
| 5.4.6 触发器功能转换 .....            | 160        |
| 本章小结 .....                     | 162        |
| 习题 .....                       | 162        |
| <b>第6章 时序逻辑电路 .....</b>        | <b>167</b> |
| 6.1 时序逻辑电路的基本概念 .....          | 167        |
| 6.1.1 时序逻辑电路的特点 .....          | 167        |
| 6.1.2 时序逻辑电路的分类 .....          | 168        |
| 6.1.3 时序逻辑电路的功能描述 .....        | 170        |

|                                |            |
|--------------------------------|------------|
| 6.2 同步时序逻辑电路的分析 .....          | 173        |
| 6.2.1 分析同步时序逻辑电路的一般步骤 .....    | 173        |
| 6.2.2 同步时序逻辑电路分析举例 .....       | 173        |
| 6.3 异步时序逻辑电路的分析 .....          | 178        |
| 6.4 若干典型的时序逻辑电路 .....          | 180        |
| 6.4.1 寄存器和移位寄存器 .....          | 181        |
| 6.4.2 计数器 .....                | 187        |
| 6.5 同步时序逻辑电路的设计 .....          | 203        |
| 6.5.1 设计同步时序逻辑电路的一般步骤 .....    | 204        |
| 6.5.2 同步时序逻辑电路设计举例 .....       | 205        |
| 本章小结 .....                     | 213        |
| 习题 .....                       | 213        |
| <b>第7章 脉冲波形的产生与变换 .....</b>    | <b>221</b> |
| 7.1 概述 .....                   | 221        |
| 7.2 单稳态触发器 .....               | 222        |
| 7.2.1 用门电路组成的单稳态触发器 .....      | 222        |
| 7.2.2 集成单稳态触发器 .....           | 226        |
| 7.2.3 单稳态触发器的应用 .....          | 228        |
| 7.3 施密特触发器 .....               | 230        |
| 7.3.1 用门电路组成的施密特触发器 .....      | 231        |
| 7.3.2 施密特触发器的应用 .....          | 233        |
| 7.4 多谐振荡器 .....                | 235        |
| 7.4.1 用门电路组成的多谐振荡器 .....       | 235        |
| 7.4.2 用施密特触发器构成的多谐振荡器 .....    | 238        |
| 7.4.3 石英晶体振荡器 .....            | 239        |
| 7.5 555 定时器及其应用 .....          | 240        |
| 7.5.1 555 定时器 .....            | 240        |
| 7.5.2 用 555 定时器组成的单稳态触发器 ..... | 242        |
| 7.5.3 用 555 定时器组成的施密特触发器 ..... | 243        |
| 7.5.4 用 555 定时器组成的多谐振荡器 .....  | 244        |
| 本章小结 .....                     | 246        |
| 习题 .....                       | 246        |
| <b>第8章 数/模和模/数转换 .....</b>     | <b>254</b> |
| 8.1 概述 .....                   | 254        |
| 8.2 D/A 转换器 .....              | 255        |
| 8.2.1 D/A 转换的基本原理 .....        | 255        |

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 8.2.2 权电阻网络型 D/A 转换器 .....    | 256        |
| 8.2.3 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器 ..... | 257        |
| 8.2.4 权电流型 D/A 转换器 .....      | 259        |
| 8.2.5 双极性 D/A 转换器 .....       | 261        |
| 8.2.6 D/A 转换器的技术指标 .....      | 262        |
| 8.2.7 集成 D/A 转换器及其应用 .....    | 264        |
| 8.3 A/D 转换器 .....             | 266        |
| 8.3.1 A/D 转换的基本原理 .....       | 266        |
| 8.3.2 并行比较型 A/D 转换器 .....     | 269        |
| 8.3.3 逐次逼近型 A/D 转换器 .....     | 271        |
| 8.3.4 双积分型 A/D 转换器 .....      | 273        |
| 8.3.5 A/D 转换器的主要技术指标 .....    | 276        |
| 8.3.6 集成 A/D 转换器简介 .....      | 276        |
| 本章小结 .....                    | 277        |
| 习题 .....                      | 278        |
| <b>第 9 章 半导体存储器 .....</b>     | <b>281</b> |
| 9.1 只读存储器 .....               | 282        |
| 9.1.1 ROM 的定义与基本结构 .....      | 282        |
| 9.1.2 二维译码 .....              | 284        |
| 9.1.3 可编程 ROM .....           | 285        |
| 9.1.4 集成电路 ROM .....          | 288        |
| 9.1.5 ROM 的读操作与时序图 .....      | 289        |
| 9.1.6 ROM 的应用举例 .....         | 290        |
| 9.2 随机存取存储器 .....             | 292        |
| 9.2.1 静态随机存取存储器 .....         | 293        |
| 9.2.2 同步静态随机存取存储器 .....       | 294        |
| 9.2.3 动态随机存取存储器 .....         | 295        |
| 9.3 存储器容量的扩展 .....            | 296        |
| 9.3.1 位扩展方式 .....             | 296        |
| 9.3.2 字扩展方式 .....             | 297        |
| 9.3.3 字、位同时扩展 .....           | 298        |
| 本章小结 .....                    | 299        |
| 习题 .....                      | 299        |
| <b>第 10 章 可编程逻辑器件 .....</b>   | <b>301</b> |
| 10.1 可编程逻辑器件的基本特点 .....       | 302        |
| 10.2 可编程逻辑阵列 .....            | 302        |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| 10.3 可编程阵列逻辑 .....              | 303 |
| 10.4 复杂的可编程逻辑器件 .....           | 303 |
| 10.4.1 CPLD 的结构 .....           | 303 |
| 10.4.2 CPLD 编程简介 .....          | 312 |
| 本章小结 .....                      | 313 |
| 习题 .....                        | 314 |
| 附录 1 常用逻辑符号对照表 .....            | 316 |
| 附录 2 CMOS 和 TTL 门电路的技术参数表 ..... | 318 |
| 附录 3 本书常用符号表 .....              | 319 |
| 参考文献 .....                      | 320 |



# 数字逻辑概论

## [主要教学内容]

1. 数字电路与数字信号;
2. 数制;
3. 二进制数的算术运算;
4. 二进制代码;
5. 二值逻辑变量与基本逻辑运算;
6. 逻辑函数及其表示方法。

## [教学目的和要求]

1. 了解模拟信号与数字信号、模拟电路与数字电路的区别与联系;
2. 熟练掌握数字量、数制的概念及不同数制的互化;
3. 熟练掌握二进制数的算术运算;
4. 掌握基本逻辑运算、逻辑函数的概念及逻辑问题的描述;
5. 掌握逻辑函数的常用表示方法:表达式、真值表、逻辑图、波形图,并掌握各种表示方法的相互转换。

随着现代电子技术的发展,人们正处于一个信息时代。每天都要通过电视、广播、通信、互联网等多种媒体获取大量的信息。而现代信息的存储、处理和传输越来越趋于数字化。在人们的日常生活中,常用的计算机、电视机、音响系统、视频记录设备、长途电信等电子设备或电子系统,无一不采用数字电路或数字系统。因此,数字电子技术的应用越来越广泛。

本章首先介绍数字技术的发展及应用、数字集成电路的分类及特点、模拟信号与数字信号以及数字信号的描述方法;然后讨论数制、二进制数的算术运算、二进制码和数字逻辑的基本运算。

## 1.1 数字电路与数字信号

### 1.1.1 数字技术的发展及其应用

20 世纪中期至 21 世纪初,电子技术特别是数字电子技术得到了飞速的发展,使工业、农业、科研、医疗以及人们的日常生活发生了根本性的变革。

电子技术的发展是以电子器件的发展为基础的。20 世纪初直至中叶,主要使用的电子器件是真空管,也称电子管。随着固体微电子学的进步,第一只晶体三极管于 1947 年问世,开创了电子技术的新领域。随后在 60 年代初,模拟和数字集成电路相继上市。到 70 年代末,微处理器的问世使电子器件及其应用出现了崭新的局面。1988 年,集成工艺可在  $1\text{ cm}^2$  的硅片上集成 3 500 万个元件,这说明集成电路进入甚大规模阶段。当前的制造技术已使集成电路芯片内部的布线细微到亚微米和深亚微米量级。随着芯片上元件和布线的缩小,芯片的功耗降低,而速度大为提高。最新生产的微处理器的时钟频率高达  $3\text{ GHz}(10^9\text{ Hz})$ 。

数字技术应用的典型代表是电子计算机,它是伴随着电子技术的发展而发展的。数字电子技术的发展衍生出计算机的不断发展和完善,计算机技术的影响已遍及人类经济生活的各个领域,掀起了一场“数字革命”。数字技术被广泛地应用于广播、电视、通信、医学诊断、测量、控制、文化娱乐以及家庭生活等方面。由于数字信号具有便于存储、处理和传输的特点,使得许多传统使用模拟技术的领域转而运用数字技术。

#### (1) 照相机

传统的模拟相机是用卤化银感光胶片记录影像,胶片成像过程需要严格的加工工艺和技术,而且胶片不便于保存和传输。数字相机是将影像的光信号转换为数字信号,以像素阵列的形式进行存储。存储的信息包括色彩、光强度和位置等。例如  $640 \times 480$  的像素阵列中,每个像素的红、绿、蓝三元色均是 8 位,则该阵列的数据超过 700 万。如果用 JPEG 图形格式进行压缩处理后,数据量只为原来的 5%,便于进行网络的远距离传输。随着计算机处理照片技术的推广,外置大容量小体积硬盘的普及,激光数字彩色照片冲放设备的广泛应用,数字相机将取代模拟相机。

JPEG(Joint Picture Experts Group)是 ISO(International Standard Organization)和 CCITT(International Telephone and Telegraph Consultative Committee)联合制定的静止图像压缩编码标准,是目前静止图像压缩比最高的文件格式。

#### (2) 视频记录设备

VCD(Video Compact Disk)和 DVD(Digital Video Disk)普及之前,视频信息主要以记录模拟信号的录像带为主,而录像带的携带和保存都不方便。VCD 是利用 MPEG1 压缩方式,以数字信号记录图像和声音,它可以在直径为  $12\text{ cm}$  的光盘上,记录  $74\text{ min}$  的影音信息。DVD 利用 MPEG2 的压缩技术,与 VCD 相比,它的容量更大,画质和音质更好。仅单面单

层、直径 12 cm 的光盘就存储 350 亿位数据,可播放 133 min。双面双层存储的数据可达到单面单层的 4 倍之多。因此,DVD 已成为家庭影院的重要组成部分。

MPEG(Moving Picture Experts Group)是世界数字视频和音频压缩比的标准化组织制定的,用于多媒体运动图像和伴音的数据压缩编码的国际标准。MPEG1 可将移动图像和相关的声音压缩成二进制比特流,压缩比为 200 : 1。与 MPEG1 相比,MPEG2 的视频编码做了多项改进,使压缩比更高,图像质量更好。

### (3) 交通灯控制系统

1920 年,交通灯问世。早期的红黄绿灯是用机电定时器控制的。后来用继电器和开关构成的控制器,根据道路上传感器检测的信号进行控制。现在的交通灯由计算机控制,可以将监测系统检测到的车辆流量信息送到系统计算机,经计算后进行合理的时间分配。如果某路口东西方向堵塞,则将该路口东西方向的绿灯自动延时,并将附近区域东西方向的红灯也自动地延时,堵塞解除后,信号灯恢复正常状态。

随着微电子技术的发展,将会有更多的数字电子产品陆续问世。数字技术的发展、计算机的应用正在改变着人类的生产方式、生活方式及思维方式,它使得工业自动化、农业现代化、办公自动化和通信网络化成为现实。但是,无论数字技术如何发展,终将不能代替模拟技术。自然界中绝大多数物理量都是模拟量,数字技术不能直接接受模拟信号进行处理,也无法将处理后的数字信号直接送到外部物理世界。因此,模拟技术在电子系统中是不可缺少的。由于模拟技术难度远高于数字技术,其发展自然较慢。实际电子系统一般是模拟电路和数字电路的结合,在发展数字技术的同时,也应重视模拟技术的发展。

## 1.1.2 数字集成电路的分类及特点

电子电路按功能分为模拟电路和数字电路。根据电路的结构特点及其对输入信号响应规则的不同,数字电路可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路。数字电路中的电子器件,例如二极管、三极管处于开关状态,时而导通,时而截止,构成电子开关。这些电子开关是组成逻辑门电路的基本器件。逻辑门电路又是数字电路的基本单元。如果将这些门电路集成在一片半导体芯片上,就构成数字集成电路。

### 1. 数字集成电路的分类

数字电路的发展历史与模拟电路一样,经历了由电子管、半导体分立器件到集成电路的过程。由于集成电路的发展非常迅速,很快占有主导地位,因此,数字电路的主流形式是数字集成电路。从 20 世纪 60 年代开始,数字集成器件以双极型工艺制成了小规模逻辑器件,随后发展到中规模;70 年代末,微处理器的出现,使数字集成电路的性能发生了质的飞跃;从 80 年代中期开始,专用集成电路(ASIC, Application Specific Integrated Circuit)制作技术已趋成熟,标志着数字集成电路发展到了新的阶段。

ASIC 是将一个复杂的数字系统制作在一块半导体芯片上,构成体积小、重量轻、功耗低、速度高、成本低且具有保密性的系统级芯片。ASIC 芯片的制作可以采用全定制或半定制的方法。全定制适用于生产批量的成熟产品,由半导体生产厂家制造。对于生产批量小

或研究试制阶段的产品,可以采用半定制方法。它是用户通过软件编程,将自己设计的数字系统制作在厂家生产的可编程逻辑器件(PLD,Programmable Logic Device)半成品芯片上,便得到所需的系统级芯片。从集成度来说,数字集成电路可分为小规模(SS1)、中规模(MS1)、大规模(LS1)、超大规模(VLS1)和甚大规模(ULS1)5类。所谓集成度,是指每一芯片所包含的门的个数。表 1-1-1 所示为数字集成电路的分类。

表 1-1-1 数字集成电路的分类

| 分 类  | 门的个数          | 典型集成电路            |
|------|---------------|-------------------|
| 小规模  | 最多 12 个       | 逻辑门、触发器           |
| 中规模  | 12~99         | 计数器、加法器           |
| 大规模  | 100~9 999     | 小型存储器、门阵列         |
| 超大规模 | 10 000~99 999 | 大型存储器、微处理器        |
| 甚大规模 | $10^6$ 以上     | 可编程逻辑器件,多功能专用集成电路 |

数字电路的发展不仅在集成度方面,而且在半导体器件的材料、结构和生产工艺上均有所体现。数字集成器件所用的材料以硅材料为主,在高速电路中,也使用化合物半导体材料,例如砷化镓等。

逻辑门是数字集成电路的主要单元电路,按照结构和工艺分为双极型、MOS 型和双极-MOS 型。晶体管-晶体管逻辑门电路 TTL(Transistor- Transistor Logic)问世较早,其工艺经过不断改进,是至今仍在使用的的基本逻辑器件之一。随着金属-氧化物-半导体(MOS)工艺特别是 CMOS(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor)工艺的发展,使得集成电路具有很高的电路集成度和工作速度,并且功耗很低,因此 TTL 的主导地位已被 CMOS 器件所取代。

## 2. 数字集成电路的特点

与模拟电路相比,数字电路主要有下列优点。

### (1) 稳定性高,结果的再现性好

数字电路的工作可靠,稳定性好。一般而言,对于一个给定的输入信号,数字电路的输出总是相同的。而模拟电路的输出则随着外界温度和电源电压的变化,以及器件的老化等因素而发生变化。

### (2) 易于设计

数字电路又称为数字逻辑电路,它主要是对用 0 和 1 表示的数字信号进行逻辑运算和处理,不需要复杂的数学知识,广泛使用的数学工具是逻辑代数。数字电路只要能够可靠地区分 0 和 1 两种状态就可以正常工作,对电路的精度要求不高。因此,数字电路的分析与设计相对较容易。

### (3) 大批量生产,成本低廉

数字电路结构简单,体积小而成本低廉。

### (4) 可编程性

现代数字系统的设计,大多采用可编程逻辑器件,即厂家生产的一种半成品芯片。用户

根据需要用硬件描述语言(HDL, Hardware Description Language)在计算机上完成电路设计和仿真,并写入芯片,这给用户研制开发产品带来了极大的方便和灵活性。

### (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。百万门以上超大规模集成芯片的功耗,可以低达毫瓦级。

由于具有这些优点,数字电路在众多领域取代了模拟电路,而且可以肯定这种趋势将会继续发展下去。

## 3. 数字电路的分析、设计与测试

### (1) 数字电路的分析方法

数字电路处理的是数字信号,电路中的半导体器件工作在开关状态,例如晶体管工作在饱和区或截止区,所以不能采用模拟电路的分析方法,例如小信号模型分析法。数字电路又称为逻辑电路,在电路结构、功能和特点等方面均不同于模拟电路,主要研究的对象是电路的输出与输入之间的逻辑关系,因而,数字电路的分析方法与模拟电路完全不同,所采用的分析工具是逻辑代数,表达电路输出与输入的关系主要用真值表、功能表、逻辑表达式或波形图。

随着计算机技术的发展,借助计算机仿真软件,可以更直观、更快捷、更全面地对电路进行分析。不仅可以对数字电路,而且可以对数模混合电路进行仿真分析。不仅可以进行电路的功能仿真,显示逻辑仿真的波形结果,以检查逻辑错误,而且可以考虑器件及连线的延迟时间,进行时序仿真,检测电路中存在的竞争冒险、时序错误等问题。

### (2) 数字电路的设计方法

数字电路的设计是从给定的逻辑功能要求出发,确定输入、输出变量,选择适当的逻辑器件,设计出符合要求的逻辑电路。设计过程一般有方案的提出、验证和修改3个阶段。设计方式分为传统的设计方式和基于EDA(Electric Design Automation)软件的设计方式。传统的硬件电路设计全过程都是由人工完成的,硬件电路的验证和调试是在电路构成后进行的,电路存在的问题只能在验证后发现。如果存在的问题较大,有可能重新设计电路,因而设计周期长,资源浪费大,不能满足大规模集成电路设计的要求。基于EDA软件的设计方式是借助于计算机来快速准确地完成电路的设计。设计者提出方案后,利用计算机进行逻辑分析、性能分析、时序测试,如果发现错误或方案不理想,可以重复上述过程直至得到满意的电路,然后进行硬件电路的实现。这种方法提高了设计质量,缩短了设计周期,节省了设计费用,提高了产品的竞争力。因此EDA软件已成为设计人员不可缺少的有力工具。

EDA软件的种类较多,大多数软件包含以下主要工具:

① 原理图输入。设计者可以如同在纸上画电路一样,将逻辑电路图输入到计算机,软件自动检查电路的接线、电源及地线的连接、信号的连接等。

② HDL文本输入。硬件描述语言是用文本的形式描述硬件电路的功能、信号连接关系以及时序关系。它虽然没有图形输入那么直观,但功能更强,可以进行大规模、多个芯片的数字系统的设计。常用的HDL有ABEL、VHDL和Verilog HDL等。

③ 测试平台。当逻辑电路的设计输入到计算机后,需要测试其逻辑功能或时序关系的正确性。测试平台用于编写或绘制激励信号。

④ 仿真和综合工具。仿真工具包括对电路的功能仿真和时序仿真。功能仿真用于验证电路的功能和逻辑关系是否正确。时序仿真考虑门及连线的延时,验证系统内部工作过程及输入输出的时序关系是否满足设计要求。综合工具将 HDL 描述的电路的逻辑关系,转换为门和触发器等元件及其相互连接的电路形式。

### (3) 数字电路的测试技术

数字电路在正确设计和安装后必须经过严格的测试方可使用。须备有下列基本仪器设备。

① 数字电压表。这是指把被测电压的数值通过数字技术,变换成数字量,然后用数码管以十进制数字显示被测量电压值的仪表,用来测量电路中各点的电压,并观察其测试结果是否与理论分析一致。

② 电子示波器。这是利用阴极射线管作为显示器所构成的一种电子测试仪器,不但能测量电信号的动态过程,还可以定量测量表征电信号特性的参数,常用来观察电路中各点处信号的波形。一个复杂的数字系统,在主频率信号源的激励下,电信号的逻辑关系可以从波形图中得到验证。

③ 逻辑分析仪。这是一种类似于示波器的专用波形测试设备,它利用时钟从测试设备上采集和显示数字信号。但是逻辑分析仪不像示波器那样有许多电压等级,通常只显示两个电压(逻辑 1 和 0),它可以监测硬件电路工作时的逻辑电平(高或低),便于用户检测,分析电路设计(硬件设计和软件设计)中的错误,而且它可以同时显示 8~32 位的数字波形,十分有利于对整体电路各部分之间的逻辑关系进行分析。

## 1.1.3 模拟信号与数字信号

### 1. 模拟信号

模拟信号是指时间上或幅值上连续变化的物理量,如广播的声音信号、每天的温度变化等。处理模拟信号的电子电路称为模拟电路。在工程技术上,为了便于处理和分析,通常用传感器将模拟量转换为与之成比例的电压或电流信号,然后再送到电子系统中进一步处理。在分析过程中,通常将电压、电流信号用波形来表示。图 1-1-1(a)所示为由热电偶得到的一个模拟电压信号波形。

### 2. 数字信号

与模拟量相对应的另一类物理量称为数字量。它们是在一系列离散的時刻取值,数值的大小和每次的增减都是量化单位的整数倍,即它们是一系列时间离散、数值也离散的信号。表示数字量的信号称为数字信号。将工作于数字信号下的电子电路称为数字电路。例如用温度计测量某一天内的温度变化,测量时间取在整点时刻读取数据,并且对数据进行量化,即某次的温度计的读数为  $30.35^{\circ}\text{C}$ ,取  $1^{\circ}\text{C}$  作为量化单位,则温度值为  $30^{\circ}\text{C}$ 。这样一天内

的温度记录在时间上和数值上都不是连续的,温度是以  $1^{\circ}\text{C}$  为单位增加或减少。显然,用数字信号也可以表示温度、声音等各种物理量的大小,只是存在着一定的误差,误差取决于量化单位的大小。

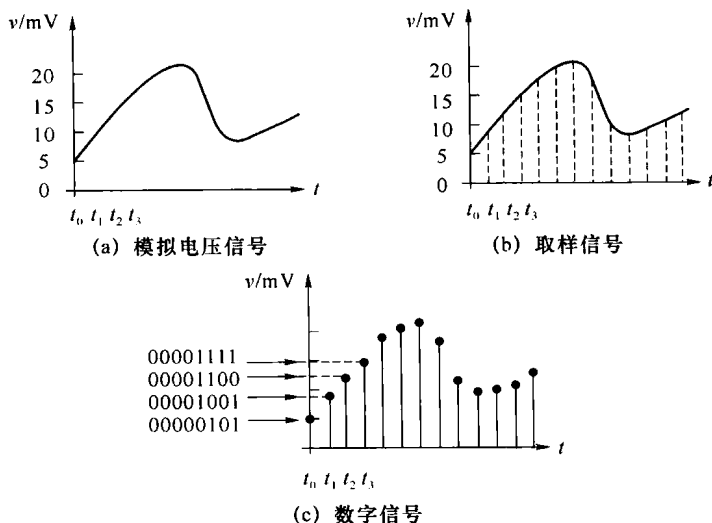


图 1-1-1 模拟量的数字表示

随着计算机的广泛应用,绝大多数电子系统都采用计算机来对信号进行处理。由于计算机无法直接处理模拟信号,所以需要将模拟信号转换为数字信号。

### 3. 模拟量的数字表示

图 1-1-1 所示为转换过程中的各种波形图,图 1-1-1(a)所示为模拟电压信号。首先对模拟信号取样。图 1-1-1(b)所示为模拟信号通过取样电路后,变成时间离散、幅值连续的取样信号, $t_0$ 、 $t_1$ 、 $t_2$ 、 $\dots$ 为取样时间点。这里幅值连续是指各取样点的幅值没有量化,仍然与对应的模拟信号的幅值相同,例如图 1-1-1(a)和图 1-1-1(b)中  $t_1$  处的幅值均为模拟量  $9.15\dots\text{mV}$ 。然后对取样信号进行量化即数字化。选取一个量化单位,将取样信号除以量化单位并取整数结果,得到时间离散、数值也离散的数字量。最后对得到的数字量进行编码,生成用 0 和 1 表示的数字信号,如图 1-1-1(c)所示。图中以  $1\text{ mV}$  作为量化单位,对  $t_1$  处的幅值  $9.15\dots\text{mV}$  进行量化,量化后数值为 9。该值用 8 位二进制数表示为 00001001。如果取样点足够多,量化单位足够小,数字信号可以较真实地反映模拟信号。关于模数和数模转换的详细讨论见第 8 章。

#### 1.1.4 数字信号的描述方法

模拟信号的表示方式可以是数学表达式,也可以是波形图等。数字信号的表示方式可以用二值数字逻辑(Binary Digital Logic),以及由逻辑电平描述的数字波形。