



普通高等教育“十二五”规划教材  
电子电气基础课规划教材

Fundamental Digital Electronic Technique  
(Second Edition)

# 数字电子技术基础 (第二版)

王义军 韩学军 主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

014057203



普通高等教育“十二五”规划教材  
电子电气基础课规划教材

TN79  
182-2

# 数字电子技术基础 (第二版)

主编 王义军 韩学军  
编写 邢晓敏 吴君鹏 李 辉 张光烈  
主审 任先文 任 哲



TN79

182-2



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS



北航

C1742201

01402720310

普通高等教育“十二五”规划教材  
普通高等教育“十二五”规划教材



## 内 容 提 要

本书是普通高等教育“十二五”规划教材。本书共分九章，主要内容包括概述、逻辑代数基础、逻辑门电路、组合逻辑电路、触发器电路、时序逻辑电路、脉冲波形的产生与整形、半导体存储器与可编程逻辑器件、数模转换和模数转换。各章内容的编排力求便于学生自学，以基础知识和掌握逻辑关系为主，集成电路以外特性为主，减少对内部结构的讲解；每章有例题和课后习题。

本书简明扼要，深入浅出，主要作为高等学校电气信息类专业数字电子技术课程的教材，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/王义军，韩学军主编. —2 版. —北京：  
中国电力出版社，2014. 8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-5919-2

I. ①数… II. ①王…②韩… III. ①数字电路-电子技术-高等学校-教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 108666 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 8 月第一版

2014 年 8 月第二版 2014 年 8 月北京第五次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 460 千字

定价 38.00 元

## 敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

为了适应现代电子技术迅速发展的需要,能够较好地面向数字化和专用集成电路的新时代,根据教学基本要求,总结多年的教学实践,编写了这本教材。

本书在《数字电子技术基础》第一版的基础上,重新组织编写,延续第一版强调基本概念、基本理论和基本方法的特点,提出推陈出新、压缩集成电路电气特性的讨论和内部电路工作原理的分析,突出综合能力培养、训练以及集成电路逻辑特性和工作特点的介绍,调整了各章节的内容:第1章增加了EDA技术方面的介绍和利用图形形象讲解补码等不容易理解内容,第2章增加VHDL语言基本内容讲解,将半导体基本知识及集成门电路合为第3章,第4章包括组合逻辑电路的研究方法以及集成组合逻辑电路的应用,第5章讲解触发器内容,第6章将时序逻辑电路的研究方法和集成时序逻辑电路及其应用结合,第8章讲解半导体存储器和可编程逻辑器件;各章增多了例题和习题,第4章、第6章习题中增加VHDL语言内容的练习题。本书的附录部分增加了QUARTUS II软件的使用简介,方便学生在该软件环境下进行VHDL语言的训练。

本书由东北电力大学王义军教授和韩学军教授主编,邢晓敏副教授、吴君鹏老师、李辉老师、张光烈副教授参加编写,王义军编写本书的第1、3、5、6章,韩学军编写第9章,邢晓敏编写第4章,李辉编写第2章和第7章,吴君鹏编写第8章以及各章节中的VHDL语言部分和附录部分,王义军对全书进行统编。

在本书的编写过程中,得到解东光老师以及研究生刘佳滢、李殿文、王喜、赵鹏和周阳的友情帮助。本书由东北电力大学任先文教授和北华大学任哲教授主审,对本书的编写提出了许多宝贵意见。在此一并表示感谢。

限于水平,加之时间仓促,书中疏漏与不妥之处在所难免,敬请读者予以批评指正,以便今后不断改进。

编 者  
2014年2月

# 第一版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

为了适应现代电子技术迅速发展的需要,能够较好地面向 21 世纪,面向数字化和专用集成电路的新时代,在保证基本概念、基本原理和基本方法的前提下,本书压缩了集成电路电气特性的讨论和内部电路工作原理的分析,而突出综合能力的培养训练以及集成电路逻辑特性和工作特点的介绍。

本书打破以往各种版本数字电子技术教材的分章方式,把整书分为数字电路基础篇、组合逻辑电路篇、时序逻辑电路篇和数字系统相关电路篇四篇,在数字电路基础篇中主要介绍逻辑代数基础和数字电路基础,在组合逻辑电路篇中介绍集成门电路、组合电路研究方法和集成组合逻辑电路,在时序逻辑电路篇中介绍了触发器电路、时序逻辑电路研究方法和集成时序逻辑电路,在数字系统相关电路篇中介绍了脉冲波形的产生与整形、模数转换电路、半导体存储器电路和 EDA 及可编程逻辑器件电路,这样编排可以使初学者直观了解数字电路所研究的主要内容以及各主要内容的内在联系。另外,在本书的附录中增加了对电子线路仿真软件 EWB 的介绍,更加方便读者对数字电路相关内容的学习。

本书由东北电力大学王义军副教授任主编,周军副教授、张光烈副教授、王冰副教授和刘晓峰高级工程师任参编。王义军老师编写第 1、8、11 章及附录部分,张光烈老师编写第 3、5、7 章,王冰老师编写第 2、4、6 章,周军老师编写第 9、10 章,刘晓峰老师编写本书的 12、13 章,王义军老师对全书进行修改和统编。

在本书的编写过程中,得到东北电力大学任先文教授的亲切关怀和指导。本书由东北电力大学任先文教授和北华大学任哲教授主审,提出了许多宝贵意见,并且也得到东北电力大学韩学军教授、邢晓敏老师、解东光老师的友情帮助。在此一并感谢。

限于水平,加之时间仓促,书中一定存在疏漏和不妥之处,敬请各方面的读者予以批评指正,以便今后不断改进。

编 者  
2007 年 3 月

## 目 录

|                       |     |
|-----------------------|-----|
| 前言                    | 1.2 |
| 第一版前言                 | 2.3 |
| 第1章 概述                | 1   |
| 1.1 电子技术的发展           | 1   |
| 1.2 数字量和模拟量           | 3   |
| 1.3 数字电路              | 4   |
| 1.4 数制和码制             | 6   |
| 本章小结                  | 13  |
| 习题                    | 14  |
| 习题答案                  | 15  |
| 第2章 逻辑代数基础            | 18  |
| 2.1 逻辑代数中的基本运算        | 18  |
| 2.2 逻辑代数的公式、定理和规则     | 21  |
| 2.3 逻辑函数表示方法及相互转换     | 24  |
| 2.4 逻辑函数的化简方法         | 31  |
| 2.5 硬件描述语言 VHDL 基础    | 40  |
| 本章小结                  | 45  |
| 习题                    | 45  |
| 习题答案                  | 49  |
| 第3章 逻辑门电路             | 55  |
| 3.1 半导体基础知识           | 55  |
| 3.2 半导体器件及其开关特性       | 57  |
| 3.3 分立元件门电路           | 69  |
| 3.4 集成门电路             | 76  |
| 3.5 基本逻辑门电路的 VHDL 描述  | 98  |
| 本章小结                  | 101 |
| 习题                    | 101 |
| 习题答案                  | 108 |
| 第4章 组合逻辑电路            | 112 |
| 4.1 概述                | 112 |
| 4.2 分立元件构成组合逻辑电路的研究方法 | 112 |
| 4.3 集成器件构成组合逻辑电路的研究方法 | 118 |
| 4.4 组合逻辑电路的竞争和冒险现象    | 153 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 4.5 组合逻辑电路的 VHDL 描述方法       | 156 |
| 本章小结                        | 159 |
| 习题                          | 160 |
| 习题答案                        | 164 |
| <b>第 5 章 触发器电路</b>          | 167 |
| 5.1 概述                      | 167 |
| 5.2 基本 RS 触发器               | 168 |
| 5.3 同步 RS 触发器               | 169 |
| 5.4 主从触发器                   | 171 |
| 5.5 边沿触发器                   | 174 |
| 5.6 集成触发器                   | 177 |
| 5.7 触发器的 VHDL 描述            | 181 |
| 本章小结                        | 183 |
| 习题                          | 184 |
| 习题答案                        | 185 |
| <b>第 6 章 时序逻辑电路</b>         | 188 |
| 6.1 概述                      | 188 |
| 6.2 计数器                     | 190 |
| 6.3 寄存器                     | 204 |
| 6.4 时序逻辑电路的 VHDL 设计         | 209 |
| 本章小结                        | 211 |
| 习题                          | 211 |
| 习题答案                        | 213 |
| <b>第 7 章 脉冲波形的产生与整形</b>     | 217 |
| 7.1 脉冲信号                    | 217 |
| 7.2 集成 555 定时器              | 218 |
| 7.3 施密特触发器                  | 220 |
| 7.4 多谐振荡器                   | 223 |
| 7.5 单稳态触发器                  | 227 |
| 本章小结                        | 233 |
| 习题                          | 233 |
| 习题答案                        | 236 |
| <b>第 8 章 半导体存储器与可编程逻辑器件</b> | 238 |
| 8.1 随机存取存储器 (RAM)           | 238 |
| 8.2 只读存储器 (ROM)             | 242 |
| 8.3 可编程器件 (PLD)             | 248 |
| 8.4 CPLD/FPGA 的结构和可编程原理     | 251 |
| 本章小结                        | 253 |
| 习题                          | 254 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| 第 9 章 数模转换和模数转换.....          | 257 |
| 9.1 概述 .....                  | 257 |
| 9.2 数模转换器 .....               | 257 |
| 9.3 模数转换器 .....               | 261 |
| 本章小结.....                     | 267 |
| 习题.....                       | 267 |
| 习题答案.....                     | 269 |
| 附录 A 数字电子技术基本英语词汇英汉对照 .....   | 273 |
| 附录 B VHDL-87 关键字 .....        | 281 |
| 附录 C QUARTUS II 软件的使用简介 ..... | 282 |
| 参考文献.....                     | 293 |

## 第1章 概 述

如今,数字电子技术已广泛应用于计算机、自动化装置、医疗仪器与设备和交通、电信、文娱活动等生产生活领域中,可以说,几乎每人每天都在与数字技术打交道。

本章将介绍有关电子技术的发展、数字量、模拟量、数制和码制等基本概念,是学习后续内容的基础。

### 1.1 电子技术的发展

#### 1.1.1 电子电路发展

当今世界很少有一种技术能像电子技术那样渗透到人类社会生活的一切领域,并且在许多方面改变着我们的生活。无论是当前信息技术的蓬勃发展以及计算机技术的广泛应用,还是工农业生产过程和生产设备的自动监测和控制,都离不开电子技术。我们日常生活中使用的各种电器——电视机、摄像机、DVD 播放机、移动电话、数码照相机、计算器、电子表等,也无一不是利用电子技术生产出来的。

电子技术应用的日益广泛是和电子器件的不断发展紧密相连的。20 世纪初期首先得到推广应用的电子器件是真空电子管。它是在抽成真空的玻璃或金属外壳内安置特制的阳极、阴极、栅极和加热用的灯丝而构成的。真空电子管的发明引发了通信技术的革命,产生了无线电通信和早期的无线电广播和电视。这就是电子技术的“电子管时代”。

由于真空电子管在工作时必须用灯丝将阴极加热到数千摄氏度的高温以后,阴极才能发射出电子,所以这种电子器件不仅体积大、笨重,而且耗电量大,寿命短,可靠性差。因此,各国的科学家开始致力于寻找性能更为优越的电子器件。1947 年美国贝尔实验室的科学家巴丁(Bardeen)、布莱顿(Brattain)和肖克利(Schockley)发明了晶体管(即半导体三极管)。它是一种固体器件,而且不需要用灯丝加热,所以不仅体积小、重量轻、耗电省,而且寿命长,可靠性也大为提高。从 20 世纪 50 年代初开始,晶体管在几乎所有的应用领域中逐渐取代了真空电子管,导致了电子设备的大规模更新换代。同时,也为电子技术更广泛的应用提供了有利条件,用晶体管制造的计算机在各种民用领域得到推广应用。1960 年又诞生了新型的金属—氧化物—半导体场效应三极管(MOSFET),为后来大规模集成电路的研制奠定了基础。我们把这一时期叫做电子技术的“晶体管时代”。

为了满足许多应用领域对电子电路微型化的需要,美国德克萨斯仪器公司(Texas Instruments)的科学家吉尔伯(Kilby)于 1959 年研制成功了半导体集成电路(Integrated Circuit, IC)。由于这种集成电路将为数众多的晶体管、电阻和导线组成的电子电路制作在同一块硅半导体芯片上,所以不仅减小了电子电路的体积,实现了电子电路的微型化,而且还使电路的可靠性大为提高。从 20 世纪 60 年代开始,集成电路大规模投放市场,并再一次引发了电子设备的全面更新换代,开创了电子技术的“集成电路时代”。

随着集成电路制造技术的不断进步,集成电路的集成度(每个芯片包含的三极管数目或

者门电路的数目)不断提高。在不足 10 年的时间里,集成电路制造技术便完成了从小规模集成, [SSI (Small Scale Integration), 每个芯片包含 10 个以内逻辑门电路] 到中规模集成, [MSI (Medium Scale Integration), 每个芯片包含 10~1000 个逻辑门电路], 再到大规模集成, [LSI (Large Scale Integration), 每个芯片包含 1000~10000 个逻辑门电路] 和超大规模集成, [VLSI (very large scale integration), 每个芯片含 10000 个以上逻辑门电路] 的发展过程。自 20 世纪 70 年代以来,集成电路基本上遵循着摩尔定律 (Moore's Law) 在发展进步,即约每一年半,集成电路的综合性能提高一倍,每三年左右集成电路的集成度提高一倍。目前集成电路制造工艺可以加工的最小尺寸已经缩小到了 65nm,能将 1 亿以上的晶体管制作在一片硅片上。现在已经可以把一个复杂的电子系统(例如数字计算机)制作在一个硅片上,形成所谓“片上系统”。

集成度的提高不可能是无限的。在半导体管的尺寸缩小到一定程度以后,再想缩小尺寸不仅加工精度难以达到,生产成本大大提高,而且器件的工作原理也将发生变化而无法正常工作。基于这种推测,从 20 世纪 70 年代起,科学工作者就已经开始潜心研究和寻找比硅片集成度更高、性能更好的新型器件了。

### 1.1.2 EDA 技术的发展

电子设计自动化 (Electronic Design Automation, EDA) 是将计算机技术应用于电子电路设计过程而产生的一门新技术。它广泛地应用于电路结构设计和运行状态的仿真、集成电路版图的设计、印刷电路板的设计以及可编程逻辑器件的编程设计等所有设计环节中。

20 世纪 70 年代以来,大规模集成电路的研制成功有力地推动了计算机技术的发展,也为 EDA 技术的发展创造了有利条件。早期的 EDA 技术很大一部分是用于集成电路的版图设计,因而当时的 EDA 技术还不是所有从事电子技术应用的人员都必须掌握的一门技术。

由于电子电路的复杂程度日益增加,产品更新的周期日益缩短,所以对设计工作的质量、速度和成本的要求也越来越高。因此,必须在所有的设计环节中使用计算机辅助设计 (CAD) 的手段,全面实现设计自动化。经过 30 多年的不懈努力,各国的技术人员先后成功地研制出了专门用于描述电子电路的计算机编程语言——硬件描述语言 (Hardware Description Language, HDL)。目前得到广泛应用的硬件描述语言主要为 VHDL 和 Verilog HDL 两种,它们都已经被 IEEE 认定为标准的硬件描述语言。

许多著名的软件公司也都推出了自己的 EDA 软件产品,而且仍在致力于不断增强和完善这些 EDA 软件的功能。由 Interactive Image Technologies Ltd 推出的 Multisim 不仅具有丰富的元器件库和对电路进行仿真、分析的软件,而且还提供了全套的虚拟电子仪器、仪表。设计者可以方便地从其元器件库中挑选合适的元器件设计所需要的电路,并且能形象地对电路运行状态仿真和测试。利用这些软件可以在计算机上进行电子电路的结构设计、电路参数的选择和优化、电路布局和布线的设计、电路性能的分析 and 测试以及运行状态的模拟等。

进入 20 世纪 90 年代,可编程逻辑器件 (Programmable Logic Device, PLD) 的应用迅速扩展。PLD 生产厂商在开发 PLD 的同时,也与软件公司联手研制了相应的编程软件。为了使用这些器件,必须掌握它们的编程技术。因此,PLD 的广泛应用也促进了 EDA 技术的普及。今天,EDA 技术已经成为所有从事和电子技术有关工作的工程技术人员必须掌握的一门技术。

## 1.2 数字量和模拟量

当我们分析和研究自然界存在的大量的物理量时发现,按照变化规律的不同可以将它们分为两大类。其中一类物理量随时间的变化在数量上是连续的,而且连续变化过程中的每一个数值都有具体的物理意义,如图 1.1 (a) 所示。我们把这一类物理量叫做模拟量,把表示模拟量的信号叫做模拟信号。例如物体的温度,流体的流量、流速,电容器两端的电压等,都是模拟量。

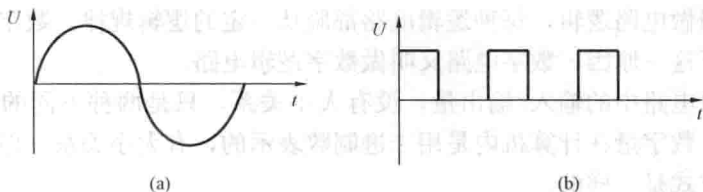


图 1.1 模拟信号和数字信号

(a) 模拟信号; (b) 数字信号

另外一类物理量的变化在时间上和数量上都是不连续的。也就是说,首先它们随时间的变化不是连续发生的,总是发生在一些离散的瞬间;其次,每次变化时数量大小的改变都是某个最小数量单位的整倍数,而小于这个最小数量单位的数值没有任何物理意义。我们把这一类物理量叫做数字量,如图 1.1 (b) 所示。把表示数字量的信号叫做数字信号。例如我们用自动检测仪统计进入教室的人数,得到的结果就是一个数字量。这个数字量的最小数量单位就是 1 (1 个人),小于 1 的数值没有意义。

工作在数字信号下的电子电路称为数字电子电路 (简称为数字电路),工作在模拟信号下的电子电路称为模拟电子电路 (简称为模拟电路)。因为在数字电路和模拟电路中所研究的问题和使用的分析方法、设计方法都不相同,所以将电子技术基础的内容分为数字电子技术和模拟电子技术两部分讲授。

电子系统中一般均含有模拟信号和数字信号两种构件,模拟电路是系统中必需的组成部分。但是,由于数字信号更便于传输、运算和存储,处理数字信号的数字电路具有抗干扰能力强,精度高,保密性好,易于集成化等特点,而且现在广泛使用的计算机也是数字式的,

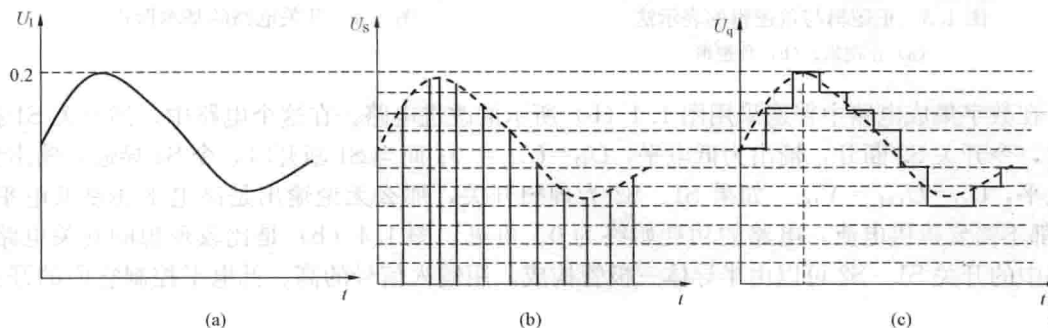


图 1.2 模拟-数字转换过程

(a) 模拟信号; (b) 采样; (c) 量化

所以为了充分发挥计算机在信号处理方面的强大功能,常常把模拟信号也转换为与之成比例的数字信号,送往数字计算机进行处理,然后再根据需要将处理结果的数字信号转换为与之成比例的模拟信号,如图 1.2 所示模拟-数字转换过程所经过的采样、量化过程。

## 1.3 数字电路

### 1.3.1 逻辑电路与数字电路

逻辑电路中电子元器件工作在开关状态,电路的输入、输出信号为离散逻辑信号,电路响应输入的方式叫做电路逻辑,每种逻辑电路都服从一定的逻辑规律。数字电路是以逻辑电路为基础的,由于这一原因,数字电路又叫做数字逻辑电路。

逻辑量是逻辑电路中的输入/输出量,没有大小关系,只是两种不同的状态,可以用一位二进制数表示。数字量在计算机内是用二进制数表示的,有大小关系。但是,逻辑量与数字量的一位表示方式是一样的。

逻辑电路中将电路离散的输入、输出信号用两种相对模糊的电压范围——高电平和低电平——进行分类。以高电平表示 1,低电平表示 0,称为正逻辑;以高电平表示 0,低电平表示 1,称为负逻辑,如图 1.3 所示。由图可见只要能正确无误地区分出高、低电平,则允许高、低电平有一定的变化范围,这就大大降低了对电路参数精度的要求。在本书下面的章节中,除非特别说明,采用的都是正逻辑。

产生高、低电平的基本方法是通过控制半导体开关电路的开关状态实现的。在图 1.4 (a) 中,当开关 S 接通时输出为低电平,  $U_O = U_{OL} = 0$ ; 而当 S 断开时,输出为高电平,  $U_O = U_{OH} = V_{DD}$ 。这种电路的优点是只需一个开关,缺点是功率损耗较大。当 S 接通时,  $V_{DD}$  全部加在电阻 R 上,损耗的功率为  $V_{DD}^2/R$ 。

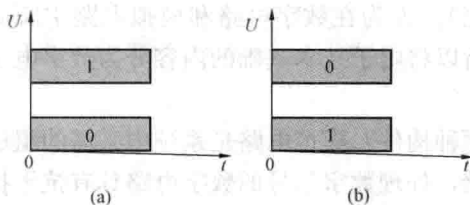


图 1.3 正逻辑与负逻辑的表示法

(a) 正逻辑; (b) 负逻辑

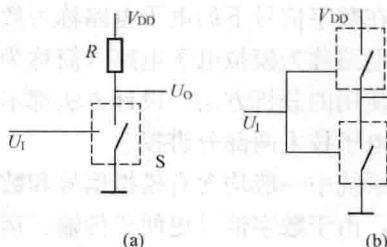


图 1.4 开关电路的基本形式

在数字集成电路中普遍采用图 1.4 (b) 所示的改进电路。在这个电路中,当开关 S1 接通时,令开关 S2 断开,输出为低电平,  $U_O = U_{OL} = 0$ ; 而当 S1 断开时,令 S2 导通,输出为高电平,  $U_O = U_{OH} = V_{DD}$ 。如果 S1、S2 为理想开关,那么无论输出是高电平还是低电平,  $V_{DD}$  都不需要提供电流,电路的功耗始终为 0。可见,图 1.4 (b) 是比较理想的开关电路。电路中的开关 S1、S2 可以由半导体三极管构成,用输入信号的高、低电平控制它们的开关状态。

在数字电路中,人们关心的是输入、输出信号之间的逻辑关系,输入信号通常称为输入逻辑变量,输出信号通常称为输出逻辑变量,输入逻辑变量与输出逻辑变量之间的逻辑关系

通常用逻辑函数来描述。

### 1.3.2 数字电路分类

(1) 从用途上可以分为专用型数字集成电路和通用型数字集成电路两大类。

专用型数字集成电路是为某种特定用途而专门设计、制造的,一般很难用在其他的场合。因为一种新型集成电路的研制费用很高,研制周期比较长,所以通常只有在用量较大的情况下,才采用这种专用型数字集成电路。

通用型数字集成电路产品又分为两种类型。一种是逻辑功能固定的标准化、系列化产品,另一种是可编程逻辑器件。前一种类型的数字集成电路产品中,每一种器件的内部结构和功能在制造时已经固化,不能改变。目前常见的中、小规模数字集成电路产品多半属于这一种。利用这些产品可以组成更为复杂的数字系统。但是当系统复杂以后,电路的体积将很庞大,而且由于器件间的连线很多,降低了电路的可靠性。因此,希望能找到一种既具有像专用型数字集成电路那样体积小、可靠性高、能满足各种专门用途,同时又可以作为电子产品生产的集成电路。于是可编程逻辑器件便应运而生。

PLD的内部包含了大量的基本逻辑单元电路,通过写入编程数据,可以将这些单元连接成所需要的逻辑电路。因此,它的产品是通用型的,而所实现的逻辑功能则由用户根据自己的需要通过编程来设定。20世纪90年代PLD得到了迅速的发展和普及,目前在一片高密度PLD中可以集成数十万个基本逻辑单元,足够连接成一个相当复杂的数字电路。

(2) 按照逻辑功能可分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。

组合逻辑电路简称组合电路,由最基本的逻辑门电路组合而成。其特点是输出值只与当时的输入值有关,即输出只由当时的输入值决定。该电路没有记忆功能,输出状态随着输入状态的变化而变化,类似于电阻性电路。

时序逻辑电路简称时序电路,由最基本的逻辑门电路加上反馈逻辑回路(输出到输入)或器件组合。与组合逻辑电路最本质的区别在于时序逻辑电路具有记忆功能。时序逻辑电路的特点是输出不仅取决于当时的输入值,而且还与电路的历史状态有关。它类似于含储能元件电感或电容的电路。

(3) 按电路有无集成元器件可分为分立元件电路和集成电路两大类。

(4) 按集成电路的集成度进行分类,可分为小规模集成数字电路(SSI)、中规模集成数字电路(MSI)、大规模集成数字电路(LSI)和超大规模集成数字电路(VLSI)。

(5) 按构成电路的半导体器件类型可分为双极型电路和单极型电路。

### 1.3.3 数字电路的特点

1. 同时具有算术运算和逻辑运算功能

数字电路是以二进制逻辑代数作为数学基础,使用二进制数字信号,既能进行算术运算又能方便地进行逻辑运算(与、或、非、判断、比较、处理等)的电路,因此适合运算、比较、存储、传输、控制、决策等应用。

2. 实现简单,系统可靠

以二进制作为基础的数字电路,可靠性较强。电源电压的小波动对其没有影响,温度和工艺偏差对其工作的可靠性影响也比模拟电路小得多。

3. 集成度高,功能实现容易

集成度高,体积小,功耗低是数字电路突出的优点。电路的设计、维修、维护灵活方

便,随着集成电路技术的高速发展,数字电路的集成度越来越高,集成电路的发展也从元件级、器件级、部件级、板卡级上升到系统级。数字电路的设计组成只需采用一些标准的集成电路模块连接而成。对于非标准的特殊数字电路还可以使用可程序逻辑阵列电路,通过编程的方法实现任意的逻辑功能。

### 1.3.4 数字电路的分析方法

数字电路主要研究对象是电路的输出与输入之间的逻辑关系。由于数字电路中的器件主要工作在开关状态,因而采用的分析工具主要是逻辑代数,用功能表、真值表、逻辑表达式、波形图等来表达电路的主要功能。

随着计算机技术的发展,为了分析、仿真与设计数字电路或数字系统,还可以采用硬件描述语言,使用如 VHDL 语言等软件,借助计算机来分析、仿真与设计数字系统。

## 1.4 数制和码制

### 1.4.1 数制

用数字量表示物理量的大小时仅用一位数码往往不够用,常用进位计数的方法组成多位数码使用。我们把多位数码中每一位的构成方法以及从低位到高位进位的规则称为数制。

二进制数是数字电路中应用最广泛的一种数值表示方法。为了更容易的理解有关概念,首先介绍熟悉的十进制数表示方法,进一步介绍二进制数以及由多位二进制数构成的八进制数和十六进制数的计数规律。

#### 一、几种常用进制及其相互转换

##### 1. 十进制

十进制是日常生活和工作中应用最广泛的一种计数进位制。在这种计数进位制中,每一位有 0~9 十个数码,所以计数的基数是 10,低位数和相邻高位数的关系是“逢十进一”,故称为十进制。任意一个十进制数  $D$  均可展开为

$$D = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i 10^i \quad (1.1)$$

式中:  $k_i$  为第  $i$  位的系数,可以是 0~9 中的任何一个数字;  $i$  的取值范围从  $-m$  到  $n-1$ ,其中  $m$  是小数部分的位数,  $n$  是整数部分的位数。

若用  $r$  取代式 (1.1) 中的 10,即可得到任意进制数展开式的普遍形式,表达式为

$$D = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i r^i \quad (1.2)$$

式中:  $i$  的取值与式 (1.1) 的规定相同;  $r$  为计数的基数;  $k_i$  为第  $i$  位的系数;  $r^i$  为第  $i$  位的权。

**【例 1.1】** 将 193.74 展开为按权求和形式。

**解** 按照式 (1.1) 展开得

$$193.74 = 1 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 3 \times 10^0 + 7 \times 10^{-1} + 4 \times 10^{-2}$$

##### 2. 二进制以及二进制到十进制的转换

在数字电路中应用最广泛的是二进制。在二进制数中,每一位仅有 0 和 1 两个可能的取

值,所以计数的基数为2,低位向相邻高位的进位关系是“逢二进一”。

根据式(1.2),任何一个二进制数均可表示为

$$D = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i 2^i \quad (1.3)$$

并可利用式(1.3)计算出它所表示的十进制数值。

分别用下标2和10表示括号里的数是二进制数和十进制数,也可以用字母B来表示二进制数,用字母D来表示十进制数。

**【例 1.2】** 将二进制数  $(1101.11)_2$  转换成为等值的十进制数。

**解** 按照式1.3展开得

$$(1101.11)_2 = 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = (13.75)_{10}$$

### 3. 十六进制以及十六进制到十进制的转换

十六进制是每一位有十六个不同的数码,分别为0~9和用大写字母A、B、C、D、E、F来表示十进制的10、11、12、13、14、15六个数字。因此,任意一个十六进制的数均可展开为

$$D = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i 16^i \quad (1.4)$$

并可利用式(1.4)计算出它所表示的十进制数值。

一般用式下标16表示括号里的数是十六进制数,也可用字母H表示十六进制数。

**【例 1.3】** 将  $(BA.7F)_{16}$  转换成为等值的十进制数。

**解** 按照式(1.4)展开得

$$(BA.7F)_{16} = 11 \times 16^1 + 10 \times 16^0 + 7 \times 16^{-1} + 15 \times 16^{-2} = (186.4960937)_{10}$$

### 4. 八进制以及八进制到十进制的转换

八进制是每一位有八个不同的数码,分别为0~7来表示。因此,任意一个八进制数均可展开为

$$D = \sum_{i=-m}^{n-1} k_i 8^i \quad (1.5)$$

并由式(1.5)计算出它所表示的十进制数值。

一般用下标8表示括号里的数是八进制数,也用字母O表示八进制数。

**【例 1.4】** 将  $(43.25)_8$  转换成为等值的十进制数。

**解** 按照式(1.5)展开得

$$(43.25)_8 = 4 \times 8^1 + 3 \times 8^0 + 2 \times 8^{-1} + 5 \times 8^{-2} = (35.328125)_{10}$$

### 5. 十进制到二进制转换

(1) 整数转换——除2取余法。

(2) 小数转换——乘2取整法。

**【例 1.5】** 将  $(57)_{10}$  转换为二进制数。

**解** 可表示为

$$\begin{array}{r}
 2 \overline{) 57} \quad \text{余数} \\
 \underline{2 \phantom{0} 28} \quad \dots\dots\dots 1=a_0 \\
 \phantom{2} 2 \phantom{0} 14 \quad \dots\dots\dots 0=a_1 \\
 \phantom{2} 2 \phantom{0} 7 \quad \dots\dots\dots 0=a_2 \\
 \phantom{2} 2 \phantom{0} 3 \quad \dots\dots\dots 1=a_3 \\
 \phantom{2} 2 \phantom{0} 1 \quad \dots\dots\dots 1=a_4 \\
 \phantom{2} \phantom{0} 0 \quad \dots\dots\dots 1=a_5
 \end{array}$$

$$(57)_{10}=(111001)_2$$

**【例 1.6】** 将  $(0.724)_{10}$  转换成二进制小数。

解 可表示为

$$\begin{array}{r}
 0.724 \\
 \times \quad 2 \quad \text{整数} \\
 \hline
 1.448 \dots\dots\dots 1=a_1 \\
 0.448 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 0.896 \dots\dots\dots 0=a_2 \\
 0.896 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 1.792 \dots\dots\dots 1=a_3 \\
 0.792 \\
 \times \quad 2 \\
 \hline
 1.584 \dots\dots\dots 1=a_4
 \end{array}$$

$$(0.724)_{10}=(0.1011)_2$$

可见, 小数部分乘 2 取整的过程, 不一定能使最后乘积为 0, 因此转换值存在误差。通常在二进制小数的精度已达到预定的要求时, 运算便可结束。

将一个带有整数和小数的十进制数转换成二进制数时, 必须将整数部分和小数部分分别按除 2 取余法和乘 2 取整法进行转换, 然后再将两者的转换结果合并起来。

同理, 若将十进制数转换成任意  $R$  进制数  $(N)_R$ , 则整数部分转换采用除  $R$  取余法, 小数部分转换采用乘  $R$  取整法。

#### 6. 二进制到十六进制转换

4 位二进制一共有 16 种组合, 将这十六种组合按照每位的权展开就得到二进制到十六进制的对应表, 如表 1.1 所示。

把 4 位二进制数看作一个整体, 以小数点为出发点向两侧每 4 位二进制数分为一组, 整数部分不足 4 位的高位用 0 补充, 小数部分不足 4 位的低位用 0 补充, 每 4 位二进制数以等值的十六进制数表示, 即可得到相应的十六进制数。

表 1.1

二进制—十六进制对应表

| 二进制  | 十六进制 | 二进制  | 十六进制 |
|------|------|------|------|
| 0000 | 0    | 1000 | 8    |
| 0001 | 1    | 1001 | 9    |
| 0010 | 2    | 1010 | A    |
| 0011 | 3    | 1011 | B    |
| 0100 | 4    | 1100 | C    |
| 0101 | 5    | 1101 | D    |
| 0110 | 6    | 1110 | E    |
| 0111 | 7    | 1111 | F    |

【例 1.7】 将 $(1011110.1011001)_2$ 化为十六进制数。

解  $(0101\ 1110.1011\ 0010)_2 = (5E.B2)_{16}$

式中用下划线表示的 0 是由于数位不足而补充的，显然，不会影响原数的大小。

#### 7. 十六进制到二进制转换

把每 1 位十六进制数对应 4 位二进制数，就可实现十六进制到二进制的转换。

【例 1.8】 将 $(8FA.C6)_{16}$ 化为二进制数

解  $(8FA.C6) = (1000\ 1111\ 1010.1100\ 0110)_2$

### 二、二进制算术运算

算术运算：当两个数码分别表示两个数量大小时，它们可以进行数量间的加、减、乘、除等运算。这种运算称为算术运算。

#### 1. 二进制算术运算的特点

二进制算术运算的特点为逢二进一，借一当二。

二进制的乘法运算可以通过若干次的“被乘数（或 0）左移 1 位”和“被乘数（或 0）与部分积相加”这两种操作完成。

二进制数的除法运算能通过若干次的“除数右移 1 位”和“从被除数或余数中减去除数”这两种操作完成。

【例 1.9】 根据二进制运算规则完成下列四则运算。

(1)  $(1101.01)_2 + (1001.11)_2$ ; (2)  $(1101.01 - 1001.11)_2$ ; (3)  $(1101)_2 \times (110)_2$ ;  
(4)  $(101)_2 / (101)_2$ 。

解 (1) 加法运算

$$\begin{array}{r} 1101.01 \\ + 1001.11 \\ \hline 10111.00 \end{array}$$

(2) 减法运算

$$\begin{array}{r} 1101.01 \\ - 1001.11 \\ \hline 0011.10 \end{array}$$

(3) 乘法运算