



21世纪全国本科院校电气信息类**创新型**应用人才培养规划教材

数字电子技术

主 编 秦长海
张天鹏
翟亚芳

重点讲解基本概念、分析及设计方法
重点介绍集成电路的基本功能和应用
增加了EDA基础知识
Multisim10仿真部分电路
VHDL设计部分数字电路

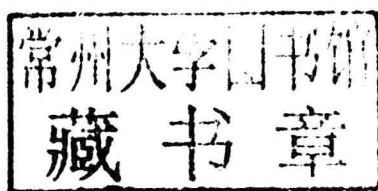


北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

21 世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材

数字电子技术

主 编 秦长海 张天鹏 翟亚芳
副主编 张修太 李红安



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

内 容 简 介

本书从当前的教学实际出发,将理论知识和实践教学相结合,既强调理论基础,又注重实践应用。本书重点介绍数字电子技术的基础知识、基本理论以及数字电路的一般分析方法和设计方法。全书共分10章,内容包括逻辑代数基础、EDA技术的基础知识、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、半导体存储器、数/模和模/数转换器及数字系统设计。

本书可作为高等院校电子信息工程、电气工程、通信工程、电子科学与技术、自动化、机电一体化及其他相关专业的本科生或专科生教材,也可作为自动化、通信、电子技术等行业的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字电子技术/秦长海,张天鹏,翟亚芳主编. —北京:北京大学出版社,2012.10

(21世纪全国本科院校电气信息类创新型应用人才培养规划教材)

ISBN 978-7-301-21304-9

I. ①数… II. ①秦…②张…③翟… 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(2012)第230468号

书 名: 数字电子技术

著作责任者: 秦长海 张天鹏 翟亚芳 主编

策 划 编 辑: 郑 双

责 任 编 辑: 程志强

标 准 书 号: ISBN 978-7-301-21304-9/TM · 0051

出 版 者: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路205号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> <http://www.pup6.cn>

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62750667 出版部 62754962

电 子 邮 箱: pup_6@163.com

印 刷 者: 北京世知印务有限公司

发 行 者: 北京大学出版社

经 销 者: 新华书店

787mm×1092mm 16开本 26印张 606千字

2012年10月第1版 2012年10月第1次印刷

定 价: 49.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024

电子邮箱: fd@pup.pku.edu.cn

前 言

随着社会的进步和科学技术的发展, 数字电子技术的理论和应用得到了飞速的发展, 数字控制系统和数字电子设备已广泛应用到各个领域, 因而电子信息工程、自动化、通信工程、机电一体化及相关专业的技术人员需要掌握数字电子技术的基础知识。“数字电子技术”课程是高校电气类各专业的重要基础课, 它主要介绍数字电路的基本特征、基本原理、基本分析方法和设计方法。

本书的编写将理论和实践相结合, 既强调理论基础, 又突出应用性。每章开篇都列出了本章教学目的与要求和本章知识结构, 书中的例题讲解有助于读者熟练掌握基本知识点, 而每章最后的习题则有助于理解和巩固本章的重点内容。本书的特点是立足打好基础, 重点讲解数字电子技术的基本概念、基本分析方法和设计方法; 对于集成电路, 忽略器件的内部结构, 重点介绍集成电路的基本功能和应用; 增加了 EDA 技术基础知识, 利用 Multisim 10 对部分电路进行仿真, 并用 VHDL 设计部分数字电路。

全书共分为 10 章。第 1 章介绍逻辑代数的基础知识, 主要包括各种数制、常用的编码规则、逻辑代数的基本定理、逻辑函数的表示方法和化简方法等。第 2 章简单介绍 EDA 技术的基础知识, 主要包括 Multisim 10 基础知识、VHDL 语法结构和 Quartus II 使用说明。第 3 章介绍分立门电路、集成门电路和可编程逻辑器件, 然后介绍利用 VHDL 设计门电路的方法, 并进行电路仿真。第 4 章首先介绍组合逻辑电路的基础知识, 然后讲解组合逻辑电路的应用, 最后利用 Multisim 10 对组合逻辑电路进行功能仿真和设计分析, 并介绍组合逻辑电路的 VHDL 设计方法。第 5 章介绍各种触发器的功能和应用, 并利用 Multisim 10 对触发器进行功能仿真, 介绍触发器的 VHDL 设计方法。第 6 章介绍时序逻辑电路的分析方法和设计方法, 介绍常用时序逻辑电路的功能和应用, 并利用 Multisim 10 对部分时序逻辑电路进行功能仿真, 介绍部分时序逻辑电路的 VHDL 设计方法。第 7 章介绍脉冲波形的产生与整形电路, 重点介绍集成电路的应用。第 8 章介绍半导体存储器的特点和应用。第 9 章介绍 ADC 和 DAC 的基础知识及它们的应用, 并利用 Multisim 10 对部分电路进行仿真测试。第 10 章介绍数字系统设计的基本流程, 通过 3 个实例介绍数字系统的不同设计方法。

本书由秦长海、张天鹏、翟亚芳担任主编并负责全书统稿, 张修太、李红安担任副主编, 协助主编完成统稿工作。参加本书编写工作的还有张玮玮、李琪、胡万里、段德功、李立、董昭。在本书的编写过程中, 得到了张继军教授、姚玉钦教授、赵艳春高级实验师的大力支持与帮助, 在此表示衷心的感谢。借此机会向所有关心、支持和帮助本书编写、出版、发行工作的同志们表示诚挚的谢意。

由于作者水平有限, 书中难免存在不妥之处, 恳请读者批评指正。

编 者

2012 年 6 月

目 录

第 1 章 逻辑代数基础	1	2.2.2 Multisim 10 操作与使用	49
1.1 数字电路概述	2	2.2.3 Multisim 10 常用仪器介绍	56
1.1.1 数字信号与数字电路	2	2.3 硬件描述语言 VHDL 基础	63
1.1.2 数字电路的发展和分类	3	2.3.1 VHDL 程序的基本结构	63
1.2 数制和码制	4	2.3.2 VHDL 的数据对象和数据类型	67
1.2.1 几种常用的数制	4	2.3.3 VHDL 的操作符	73
1.2.2 不同数制间的相互转换	6	2.3.4 VHDL 的基本语句	74
1.2.3 二进制算术运算	9	2.4 Quartus II 9.0 应用基础	79
1.2.4 几种常用的编码	13	2.4.1 Quartus II 9.0 概述	79
1.3 逻辑代数的基本运算	16	2.4.2 Quartus II 9.0 的用户界面	80
1.3.1 3 种基本逻辑运算	16	2.4.3 Quartus II 9.0 的工程设计	82
1.3.2 复合逻辑运算	18	本章小结	90
1.4 逻辑代数的基本公式与定理	21	习题	90
1.4.1 逻辑代数的基本公式	21	第 3 章 逻辑门电路	91
1.4.2 逻辑代数的常用公式	22	3.1 分立元件门电路	92
1.4.3 逻辑代数的基本定理	23	3.1.1 二极管的开关特性	92
1.5 逻辑函数及其表示方法	24	3.1.2 双极性晶体管的开关特性	94
1.5.1 逻辑函数	24	3.1.3 二极管与门	96
1.5.2 逻辑函数常用的表示方法	25	3.1.4 二极管或门	97
1.5.3 逻辑函数的两种标准形式	29	3.1.5 三极管非门	98
1.5.4 逻辑函数形式的变换	31	3.2 TTL 集成门电路	98
1.6 逻辑函数的化简	34	3.2.1 TTL 与非门	99
1.6.1 逻辑函数化简的意义	34	3.2.2 其他类型的 TTL 门电路	103
1.6.2 代数化简法	34	3.3 CMOS 集成逻辑门电路	107
1.6.3 卡诺图化简法	36	3.3.1 MOS 晶体管的开关特性	108
1.6.4 具有无关项的逻辑函数及其 化简	41	3.3.2 CMOS 反相器	108
本章小结	43	3.3.3 其他类型的 CMOS 门电路	110
习题	44	3.3.4 CMOS 集成逻辑门电路的 主要特点	112
第 2 章 EDA 技术的基础知识	46	3.4 逻辑门电路的接口电路	113
2.1 EDA 技术及其发展	47	3.4.1 TTL 电路与 CMOS 电路的接口	113
2.2 Multisim 10 应用基础	48	3.4.2 逻辑门电路带负载的接口 电路	114
2.2.1 Multisim 10 概述	48		

3.5 可编程逻辑器件	115	5.3 触发器的逻辑功能及其描述方法	203
3.5.1 PLD 电路的表示方法	116	5.3.1 RS 触发器	203
3.5.2 低密度可编程逻辑器件	118	5.3.2 JK 触发器	204
3.5.3 高密度可编程逻辑器件	124	5.3.3 D 触发器	205
3.6 门电路的 VHDL 描述	132	5.3.4 T 与 T' 触发器	205
本章小结	133	5.3.5 触发器逻辑功能的转换	206
习题	134	5.4 触发器的电气特性	207
第 4 章 组合逻辑电路	137	5.4.1 触发器的静态特性	207
4.1 组合逻辑电路的分析	138	5.4.2 触发器的动态特性	207
4.1.1 组合逻辑电路的定义	138	5.5 用 Multisim 10 测试触发器功能	208
4.1.2 组合逻辑电路的分析	139	5.6 触发器的 VHDL 描述及其仿真	212
4.2 组合逻辑电路的设计	141	本章小结	214
4.2.1 组合逻辑电路的设计步骤	141	习题	215
4.2.2 组合逻辑电路的设计举例	142	第 6 章 时序逻辑电路	220
4.3 常用集成组合逻辑器件及应用	143	6.1 时序逻辑电路概述	221
4.3.1 编码器	143	6.1.1 时序逻辑电路的特点	221
4.3.2 译码器	147	6.1.2 时序逻辑电路的分类	222
4.3.3 数据选择器	154	6.1.3 时序逻辑电路的功能描述	222
4.3.4 数据分配器	159	6.2 时序逻辑电路的分析	224
4.3.5 加法器	160	6.2.1 同步时序逻辑电路的分析方法	224
4.3.6 数值比较器	163	6.2.2 异步时序逻辑电路的分析方法	228
4.4 组合逻辑电路中的竞争与冒险	166	6.3 时序逻辑电路的设计	230
4.4.1 产生竞争冒险的原因	166	6.3.1 同步时序逻辑电路的设计方法	231
4.4.2 消除竞争冒险的方法	167	6.3.2 异步时序逻辑电路的设计方法	239
4.5 用 Multisim 10 分析组合逻辑电路	169	6.4 常用集成时序逻辑器件及应用	243
4.6 组合逻辑电路的 VHDL 描述及其仿真	172	6.4.1 寄存器	243
本章小结	176	6.4.2 计数器	248
习题	177	6.4.3 顺序脉冲发生器	265
第 5 章 触发器	179	6.4.4 序列信号发生器	267
5.1 触发器的特点与分类	180	6.5 用 Multisim 10 分析时序逻辑电路	271
5.1.1 触发器的基本特点	180	6.6 时序逻辑电路的 VHDL 描述及其仿真	274
5.1.2 触发器的分类	181	本章小结	277
5.2 触发器的结构与触发方式	181	习题	278
5.2.1 基本 RS 触发器	181		
5.2.2 同步触发器	186		
5.2.3 主从触发器	191		
5.2.4 边沿触发器	196		

第 7 章 脉冲波形的产生与整形	281	本章小结	333
7.1 脉冲信号与脉冲电路	282	习题	333
7.1.1 脉冲信号	282	第 9 章 数/模和模/数转换器	335
7.1.2 脉冲电路	283	9.1 数/模和模/数转换器的概念	336
7.2 施密特触发器	284	9.2 数/模(D/A)转换器	337
7.2.1 门电路构成的施密特触发器	284	9.2.1 D/A 转换器的基本工作原理	337
7.2.2 集成施密特触发器	286	9.2.2 权电阻网络 D/A 转换器	338
7.2.3 施密特触发器的应用	287	9.2.3 倒 T 形电阻网络 D/A 转换器	341
7.3 单稳态触发器	288	9.2.4 权电流 D/A 转换器	342
7.3.1 门电路构成的单稳态触发器	288	9.2.5 D/A 转换器的主要参数	343
7.3.2 集成单稳态触发器	290	9.2.6 集成 D/A 转换器及其应用	346
7.3.3 单稳态触发器的应用	293	9.3 模/数(A/D)转换器	351
7.4 多谐振荡器	294	9.3.1 A/D 转换器的基本工作原理	351
7.4.1 门电路构成的多谐振荡器	294	9.3.2 并联比较型 A/D 转换器	354
7.4.2 石英晶体多谐振荡器	297	9.3.3 反馈比较型 A/D 转换器	356
7.5 555 定时器及其应用	298	9.3.4 双积分型 A/D 转换器	358
7.5.1 555 定时器的组成与功能	298	9.3.5 V-F 变换型 A/D 转换器	361
7.5.2 555 定时器的典型应用	300	9.3.6 A/D 转换器的主要参数	362
7.6 用 Multisim 10 分析 555 定时器	307	9.3.7 集成 A/D 转换器及其应用	362
本章小结	308	9.4 用 Multisim 10 分析 D/A 转换器和	
习题	309	A/D 转换器	364
第 8 章 半导体存储器	312	9.5 用 VHDL 设计 A/D 转换器的控制	
8.1 半导体存储器概述	313	电路	367
8.1.1 半导体存储器的特点	313	本章小结	369
8.1.2 半导体存储器的分类	313	习题	369
8.1.3 半导体存储器的主要参数	314	第 10 章 数字系统设计	371
8.2 只读存储器	314	10.1 数字系统设计概述	372
8.2.1 掩膜只读存储器	315	10.1.1 数字系统的基本结构	372
8.2.2 可编程只读存储器	317	10.1.2 数字系统设计的基本流程	373
8.2.3 可擦除的可编程只读存储器	318	10.2 数字系统设计实例	375
8.2.4 用 ROM 实现组合逻辑函数	323	10.2.1 计数报警器设计	375
8.3 随机存取存储器	325	10.2.2 交通灯控制器设计	378
8.3.1 静态随机存储器	325	10.2.3 函数信号发生器设计	386
8.3.2 动态随机存储器	328	本章小结	395
8.4 存储器的扩展	329	习题	396
8.4.1 位扩展方式	329	附录	397
8.4.2 字扩展方式	330	参考文献	401
8.5 存储器 VHDL 设计举例	331		

第 1 章

逻辑代数基础

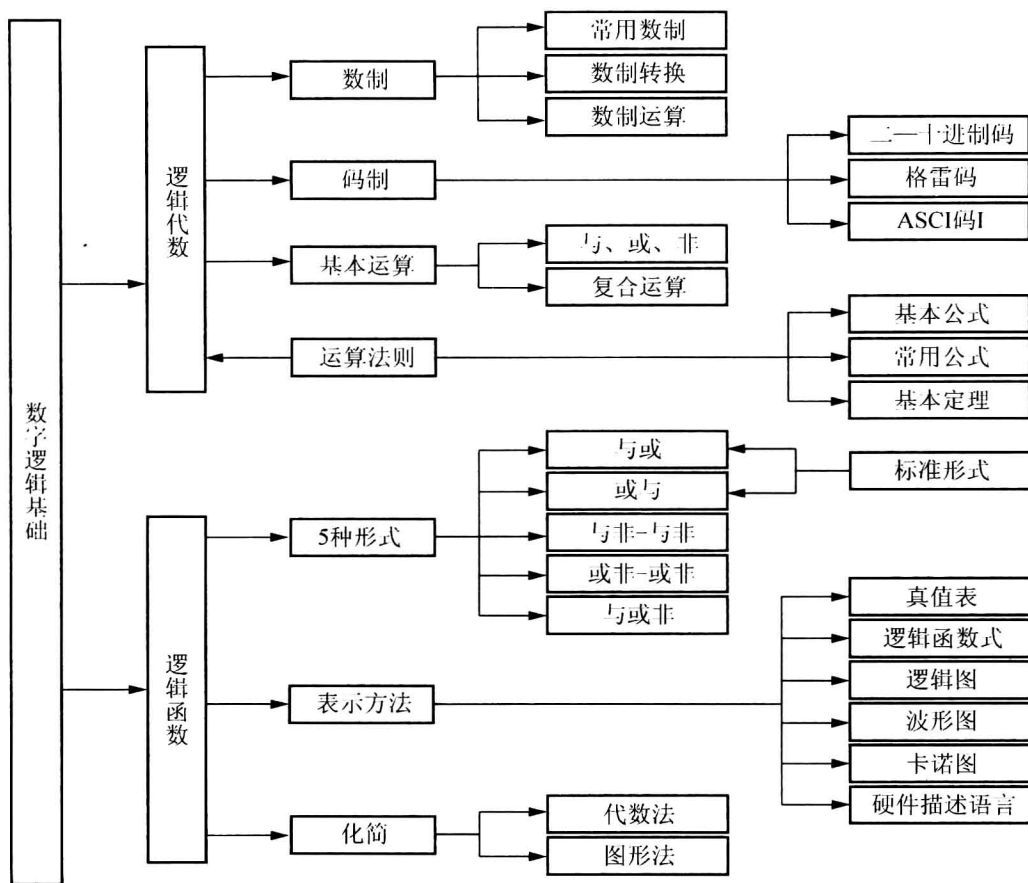


本章教学目的与要求

- (1) 了解数字信号与数字电路的含义。
- (2) 熟练掌握数制的概念及不同数制的互换。
- (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。
- (6) 掌握逻辑代数的基本定律。
- (7) 能熟练使用代数法对逻辑函数进行化简和变换。
- (8) 能够熟练使用卡诺图对逻辑函数进行化简和变换。



本章知识结构



1.1 数字电路概述

1.1.1 数字信号与数字电路

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。而这些信息的存储、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、视频记录设备等电子设备或电子系统，无一不采用数字电路与数字系统。因此，数字电子技术的应用越来越广泛。

1. 数字信号

在电子技术中，按照信号形式的不同，通常将电子电路分为模拟电路和数字电路。模拟电路的工作信号是模拟信号，模拟信号是指随时间连续变化的信号。然而数字信号是一

个离散量,具体地讲数字信号的电压或电流在时间和数值上都是离散的、不连续的。这里举一个例子来说明什么是数字信号。普通指针式万用表在指示电阻值时,通过表针的摆动和表面的刻度来指示电阻值,可数字式万用表则通过数字来指示电阻值。例如,某只数字式万用表只能够显示三位数字,当它显示某电阻值为 $7.55\text{k}\Omega$ 时,比这一阻值再大一点的显示是 $7.56\text{k}\Omega$,但是该表无法显示 $7.555\text{k}\Omega$,它只能以每隔 $0.01\text{k}\Omega$ 来分档显示,这说明它的阻值是不连续的,这种不能连续变化的显示信号称为数字信号。

数字信号的幅值变化只有两种:一是为 0(表示无),二是为 1(表示有)。数字信号的幅值只能在 1 和 0(有或无)两种幅度之间变化,这就是数字信号幅值的不连续性,也是数字信号的一个重要特点。同样,数字信号在时间上也是不连续的。

2. 数字电路

所谓数字电路就是用于处理数字信号的电路。数字电路与模拟电路相比有很大的不同,数字电路主要是对数字信号进行逻辑运算和数字处理,这些运算和处理有时是相当复杂的,但主要通过软件来进行各种逻辑处理和数字运算的处理。

关于数字电路这里先介绍下列一些特点,以便对这种电路有个初步印象。

(1) 在数字电路中一般采用高、低电平表示两种状态,基本单元电路简单,对电路中各元件的参数精度要求不高,允许有较大的分散性。

(2) 抗干扰能力强、精度高。数字电路传递、加工和处理的是二进制信息,不受外界的干扰,抗干扰能力强。

(3) 易存储。数字信号便于长期储存,使大量信息资源得以保存,使用方便。

(4) 保密性好。在数字电路中可以进行加密处理,使一些信息资源不易被窃取。

(5) 通用性强。可以采用标准的逻辑部件和可编程逻辑器件构建各种各样的数字系统,设计方便,使用灵活。

1.1.2 数字电路的发展和分类

数字电子技术是当今发展最快的学科之一。与模拟电路一样,数字电路经历了由电子管、半导体分立器件到集成电路等几个阶段,但数字集成电路比模拟集成电路的发展更快。从 20 世纪 60 年代开始,数字集成器件用双极型工艺制成了小规模逻辑器件,随后发展到中、大规模集成器件;20 世纪 70 年代末,超大规模集成电路——微处理器的出现,使数字集成电路的性能产生了质的飞跃。

近些年来,可编程逻辑器件(PLD)出现,特别是现场可编程门阵列(FPGA)的飞速进步,为数字电子技术快速发展开创了新局面,它不仅规模大,而且能够将硬件与软件相结合,使器件的功能更加完善,使用也更加灵活。

从集成度来说,数字集成电路可分为小规模、中规模、大规模和超大规模共四类数字集成电路。所谓集成度有两种分类方法,其中一种是指每一块数字芯片所包含的三极管的个数,另一种是指每一块数字芯片所包含的门电路的个数。表 1-1 列出了四类数字集成电路的规模和分类依据。

相应地,数字电路的分析方法和设计过程也在不断地演变和发展进步。由于半导体技



术的迅速发展,微型计算机的广泛应用,使得数字电子技术在现代科学技术领域中占有很重要的地位,在各个领域中得到了广泛的应用。

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 SSI	1~10 门/片, 或者 10~100 个元件/片	逻辑单元电路 包括:逻辑门电路、集成触发器等
中规模集成电路 MSI	10~100 门/片, 或者 100~1000 个元件/片	逻辑部件 包括:计数器、译码器、编码器、数据选择器、寄存器、运算器、比较器等
大规模集成电路 LSI	100~1000 门/片, 或者 0~100000 个元件	数字逻辑系统 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 VLSI	大于 1000 门/片, 或者大于 100000 个元件/片	高集成度的数字逻辑系统 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

【思考题】 什么是数字信号和数字电路?

1.2 数制和码制

1.2.1 几种常用的数制

人们在日常生活中经常会遇到计数问题,并且习惯了用十进制数。而在数字系统中,如在计算机系统中,数字和符号都是用电子元件的不同状态表示的,即以高、低电平表示。因为计算机内部只能识别二进制数,因此数字系统通常采用二进制数,有时也采用十六进制数或八进制数。人们把这种多位数码的构成方式以及从低位到高位进位的规则称为数制。

1. 十进制

人类的祖先在长期的生产劳动实践中学会了用十个指头计数,因而产生了人们最熟悉的十进制数。十进制是日常生活中常用的计数进位制。在十进制中,每个数位规定使用的数码为 0~9 十个数码,所以计数的基础是 10。对于超过 9 的数则必须用多位数表示,其中低位数和相邻高位数之间的关系是“逢十进一”,故称为十进制。

例如:

$$396.652 = 3 \times 10^2 + 9 \times 10^1 + 6 \times 10^0 + 6 \times 10^{-1} + 5 \times 10^{-2} + 2 \times 10^{-3}$$

所以,任意一个正的十进制数的都可以展开成

$$D = \sum k_i 10^i \quad (1-1)$$

式中, k_i 是第 i 位的系数,它可能是 0~9 十个数字中的任何一个; 10^i 称为第 i 位的位权; $k_i 10^i$ 是第 i 位的数值。在十进制中,若整数部分的位数为 n ,小数部分的位数为 m ,那么 i 包含了所有从 $n-1$ 到 0 的正整数和从 -1 到 $-m$ 的负整数。

若以 N 代替式 (1-1) 中的 10, 就可以得到任意进制(N 进制)数展开式的普遍形式

$$D = \sum k_i N^i \quad (1-2)$$

式中, i 的取值与式 (1-1) 中的规定相同。

2. 二进制数

在数字系统中, 为了便于工程实现, 广泛采用二进制计数制。二进制表示的数的每一位只取数码 0 或 1, 因而可以用具有两个不同状态的电子元件来表示, 并且数据的存储和传送也可用简单而可靠的方式进行。二进制计数的基数为 $N=2$ 。低位和相邻高位之间的进位关系是“逢二进一”。

根据式 (1-2) 可知, 任何二进制数均可展开为

$$D = \sum k_i 2^i \quad (1-3)$$

式中, k_i 的取值只有 0 和 1 两种可能。

例如:

$$\begin{aligned} (10101.011)_2 &= 1 \times 2^4 + 0 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= (21.375)_{10} \end{aligned}$$

上式中分别使用下脚注 2 和 10, 表示括号里的数是二进制数和十进制数。有时也用 B(Binary)和 D(Decimal)代替 2 和 10 这两个脚注。

3. 八进制

采用二进制计数制, 对计算机等数字系统来说, 运算、存储和传输极为方便, 然而二进制数书写起来很不方便。为此人们经常采用八进制和十六进制计数制来进行书写或打印。八进制数的每一位有 0~7 八个不同的数码, 计数的基数为 8。低位和相邻高位之间的进位关系是“逢八进一”。任意一个八进制数可以按十进制数展开为

$$D = \sum k_i 8^i \quad (1-4)$$

式中, k_i 可以是 0~7 这 8 个整数当中的任何一个。

例如:

$$(674.34)_8 = 6 \times 8^2 + 7 \times 8^1 + 4 \times 8^0 + 3 \times 8^{-1} + 4 \times 8^{-2} = (444.4375)_{10}$$

有时也用 O(Octal)代替下脚注 8, 表示八进制数。 $2^3=8$, 因而 3 位二进制数可用一位八进制数表示。

4. 十六进制

在十六进制中, 每个数位上规定使用的数码符号为 0~9、A、B、C、D、E 及 F。因此, 任意一个十六进制数均可展开为

$$D = \sum k_i 16^i \quad (1-5)$$

式中, k_i 可以是 0~F 中的任何一个。

例如:

$$\begin{aligned} (9B3.3C)_{16} &= 9 \times 16^2 + B \times 16^1 + 3 \times 16^0 + 3 \times 16^{-1} + C \times 16^{-2} \\ &= 9 \times 16^2 + 11 \times 16^1 + 3 \times 16^0 + 3 \times 16^{-1} + 12 \times 16^{-2} \\ &= (2483.234375)_{10} \end{aligned}$$



式中,下脚注 16 表示括号里的数是十六进制数,有时也用 H(Hexadecimal)代替这个脚注。因为 $2^4=16$, 所以 4 位二进制数可用 1 位十六进制数表示。

在计算机应用系统中,二进制主要用于计算机内部的数据处理,八进制和十六进制主要用于书写程序,十进制主要用于运算最终结果的输出。

1.2.2 不同数制间的相互转换

1. 二进制、八进制、十六进制数转换成十进制数

可分别用式(1-3)、式(1-4)、式(1-5)将任意一个二进制数、八进制数和十六进制数按位权展开,转换成十进制数。

【例 1-1】将二进制数 1110.001 转换成十进制数。

$$\begin{aligned}\text{解: } (1110.001)_2 &= 1 \times 2^3 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 0 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= (14.125)_{10}\end{aligned}$$

【例 1-2】将八进制数 774.23 转换成十进制数。

$$\text{解: } (774.23)_8 = 7 \times 8^2 + 7 \times 8^1 + 4 \times 8^0 + 2 \times 8^{-1} + 3 \times 8^{-2} = (508.296\cdots)_{10}$$

【例 1-3】将十六进制数 6DB 转换成十进制数。

$$\text{解: } (6DB)_{16} = 6 \times 16^2 + 13 \times 16^1 + 11 \times 16^0 = (1755)_{10}$$

2. 十进制数转换成二进制数

将十进制数转换成二进制数时,整数部分和小数部分应分别进行转换。整数部分可采用连续除 2 取余数法,小数部分可采用连续乘 2 取整数法。下面以十进制数 43.8125 转换成二进制数为例来说明。

(1) 整数部分的转换。将十进制数整数部分除以 2,将得到一个商数和一个余数;再将商数除以 2,又得到一个商数和一个余数……继续这个过程,直到商数等于零为止。每次得到的余数(必定是 0 或 1)就是对应二进制数的整数部分各位数字。

这里需要注意的是:第一次得到的余数为二进制数的最低位,最后一次得到的余数为二进制数的最高位。

将十进制数 43 转换成二进制数的具体过程如下所示:

$$\begin{array}{rcll} 2 & \overline{) 43} & 1 & \text{余数为1, 即 } b_0=1 \\ 2 & \overline{) 21} & 1 & \text{余数为1, 即 } b_1=1 \\ 2 & \overline{) 10} & 0 & \text{余数为0, 即 } b_2=0 \\ 2 & \overline{) 5} & 1 & \text{余数为1, 即 } b_3=1 \\ 2 & \overline{) 2} & 0 & \text{余数为0, 即 } b_4=1 \\ 2 & \overline{) 1} & 1 & \text{余数为1, 即 } b_5=1; \text{ 商为0, 结束} \\ & & 0 & \end{array}$$

结果为: $(43)_{10} = (b_5 b_4 b_3 b_2 b_1 b_0)_2 = (101011)_2$ 。

(2) 十进制小数转换成二进制小数采用“乘2取整法”。用2乘十进制小数,将得到一个整数部分和一个小数部分;再用2乘小数部分,又得到一个整数部分和一个小数部分……继续这个过程,直到余下的小数部分为0或到满足精度要求为止。最后将每次得到的整数部分(必定是0或1)自上而下排列即得到所对应的二进制小数。

将十进制小数 0.8125 转换成二进制小数的过程如下:

0.8125	
<u> ? 2 </u>	
1.6250	整数部分为1, 即 $a_{-1}=1$
0.6250	余下的小数部分
<u> ? 2 </u>	
1.2500	整数部分为1, 即 $a_{-2}=1$
0.2500	余下的小数部分
<u> ? 2 </u>	
0.5000	整数部分为0, 即 $a_{-3}=0$
0.5000	余下的小数部分
<u> ? 2 </u>	
1.0000	整数部分为1, 即 $a_{-4}=1$
0.0000	余下的小数部分为0, 结束

结果为: $(0.8125)_{10} = (0.a_{-1}a_{-2}a_{-3}a_{-4})_2 = (0.1101)_2$ 。

综合(1)、(2)的结果得到: $(43.8125)_{10} = (101011.1101)_2$ 。

3. 十进制转换成八进制

例如, 将十进制数 862.140625 转换成八进制数的过程如下。

(1) 十进制整数转换成八进制整数采用“除8取余法”。方法与十进制整数转换成二进制整数相同。

8	<u>862</u>	6	余数为6, 即 $b_0=6$
8	<u>107</u>	3	余数为3, 即 $b_1=3$
8	<u>13</u>	5	余数为5, 即 $b_2=5$
8	<u>1</u>	1	余数为1, 即 $b_3=1$; 商为0, 结束
	0		

最后结果为: $(862)_{10} = (b_3b_2b_1b_0)_8 = (1536)_8$ 。

(2) 十进制小数转换成八进制小数采用“乘8取整法”。方法与十进制小数转换成二进制小数相同。

将十进制小数 0.140625 转换成八进制小数的过程如下:

$$\begin{array}{r}
 0.140625 \\
 \times 8 \\
 \hline
 1.125000 \quad \text{整数部分为1, 即 } a_{-1}=1 \\
 0.125000 \quad \text{余下的小数部分} \\
 \times 8 \\
 \hline
 1.000000 \quad \text{整数部分为1, 即 } a_{-2}=1 \\
 0.000000 \quad \text{余下的小数部分为0, 结束}
 \end{array}$$

最后结果为: $(0.140625)_{10} = (0.a_{-1}a_{-2})_8 = (0.11)_8$ 。

综合(1)、(2)的结果得到 $(862.140625)_D = (1536.11)_O$ 。

4. 十进制转换成十六进制

例如, 十进制数 106.25 转换成十六进制数的过程如下。

先转换整数部分:

$$\begin{array}{r}
 16 \overline{) 106} \quad 10 \quad \text{余数为10, 即 } b_0=A \\
 \underline{96} \\
 16 \overline{) 6} \quad 6 \quad \text{余数为6, 即 } b_1=6; \text{ 商为0, 结束} \\
 \underline{0}
 \end{array}$$

因此 $(106)_D = (6A)_H$ 。

再转换小数部分:

$$\begin{array}{r}
 0.25 \\
 \times 16 \\
 \hline
 4.00 \quad \text{整数部分为4, 即 } a_{-1}=4 \\
 0.00 \quad \text{余下的小数部分为0, 结束}
 \end{array}$$

最后结果为: $(106.25)_D = (6A.4)_H$ 。

5. 二进制与八进制或者十六进制之间的转换

使用二进制表示一个数所使用的位数要比十进制表示时所使用的位数长得多, 书写极不方便, 不好读也不容易记忆。在计算机系统中, 为了口读与书写方便, 有时也经常采用八进制或十六进制表示, 因为八进制或十六进制与二进制之间有着直接而方便的换算关系。

二进制与八进制、十六进制之间的转换都很方便。由于 8 和 16 都是 2 的整数次幂, 即 $8=2^3$ 、 $16=2^4$ 。因此, 3 位二进制数相当于一位八进制数, 4 位二进制数相当于一位十六进制数。

(1) 八进制数转换成二进制数的规律是: 每位八进制数用相应的 3 位二进制数代替。

例如, 八进制数 $(732.35)_8$ 转换成二进制数为:

$$\begin{array}{cccccc}
 7 & 3 & 2 & . & 3 & 5 \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 111 & 011 & 010 & . & 011 & 101
 \end{array}$$

即 $(732.35)_8 = (111011010.011101)_2$ 。

(2) 二进制数转换成八进制数的规律是：从小数点开始，向前以每 3 位一组构成一位八进制数；向后以每 3 位一组构成一位八进制数，当左端的最后一组不够 3 位时，有时可在前面添 0 补足 3 位。当右端的最后一组不够 3 位时，应在后面添 0 补足 3 位。

例如，二进制数 $(1100101111.11)_2$ 转换成八进制数为：

$$\begin{array}{ccccccc} 001 & 100 & 101 & 111 & . & 110 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & & \downarrow \\ 1 & 4 & 5 & 7 & . & 6 \end{array}$$

即 $(1100101111.11)_2 = (1457.6)_8$ 。

(3) 十六进制数转换成二进制数的规律是：每位十六进制数用相应的 4 位二进制数代替。

例如，十六进制数 $(ABD.C)_{16}$ 转换成二进制数为：

$$\begin{array}{ccccc} A & B & D & . & C \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 1010 & 1011 & 1101 & . & 1100 \end{array}$$

即 $(ABD.C)_{16} = (101010111101.11)_2$ 。

(4) 二进制数转换成十六进制数的规律是：从小数点开始，向前以每 4 位一组构成一位十六进制数；向后以每 4 位一组构成一位十六进制数，当左端的最后一组不够 4 位时，可在前面添 0 补足 4 位。当右端的最后一组不够 4 位时，应在后面添 0 补足 4 位。

例如，二进制数 $(1101001100.01)_2$ 转换成十六进制数为：

$$\begin{array}{ccccccc} 0011 & 0101 & 1100 & . & 0100 \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ 3 & 5 & C & . & 4 \end{array}$$

即 $(1101001101.01)_2 = (35C.4)_{16}$ 。

1.2.3 二进制算术运算

在数字电路中，一位二进制数码的 0 和 1 不仅可以表示数量的大小，而且可以表示两种不同的数字逻辑状态。当两个二进制数码表示数量的大小时，它们之间可以进行数制运算，这种运算称为算术运算。本节将介绍无符号二进制数和有符号二进制数的算术运算。

1. 无符号二进制数的算术运算

无符号二进制数的计算可以采用原码进行，也可以用补码进行。无符号二进制数的加、减、乘、除 4 种运算的运算规则与十进制数类似，两者唯一的区别在于进位或借位规则不同。

二进制加法运算法则：

$$0+0=0 \quad 0+1=1 \quad 1+0=1 \quad 1+1=10(\text{逢二进一})$$

二进制减法运算法则：

$$0-0=0 \quad 10-1=1 \quad 1-0=1 \quad 1-1=0$$

二进制乘法运算法则:

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

二进制除法运算法则:

$$0 \div 0 = 0 \quad 0 \div 1 = 0 \quad 1 \div 0 (\text{无意义}) \quad 1 \div 1 = 1$$

二进制的加减运算可借助于十进制数的加减运算竖式, 即在进行两数相加时, 首先写出被加数和加数, 然后按照由低位到高位顺序, 根据二进制加法运算法则把两个数逐位相加即可。

【例 1-4】 试进行二进制加减乘除运算。

(1) 求 $1001+1110=?$

解:

$$\begin{array}{r} 1001 \\ + 1110 \\ \hline 10111 \end{array}$$

所以 $1001+1110=10111$,

(3) 求 $10011 \times 1101=?$

解:

$$\begin{array}{r} 10011 \\ \times 1101 \\ \hline 10011 \\ 00000 \\ 10011 \\ 10011 \\ \hline 11110111 \end{array}$$

(2) 求 $11011-11000=?$

解:

$$\begin{array}{r} 11011 \\ - 11000 \\ \hline 00011 \end{array}$$

$11011-11000=11$ 。

(4) 求 $1010 \div 111=?$

解:

$$\begin{array}{r} 1011 \\ 111 \overline{) 1010} \\ \underline{111} \\ 1100 \\ \underline{111} \\ 1010 \\ \underline{111} \\ 11 \dots \text{余数} \end{array}$$

所以 $10011 \times 1101 = 11110111$, $1010 \div 111 = 1.011$ 余 0.011 。

二进制的移位运算与十进制的移位运算比较如下。

在十进制中每左移 1 位相当于乘以 10, 左移 n 位相当于乘以 10^n 。

例如: $8000 = 8 \times 10^3$ (左移 3 位)。

二进制中每左移 1 位相当于乘以 2, 左移 n 位相当于乘以 2^n 。

例如: $(10)_2 \times 2 = (100)_2$ (左移 1 位)。

所以二进制乘法运算可以转换为左移位和加法运算, 除法运算可以转换为右移位和减法运算。