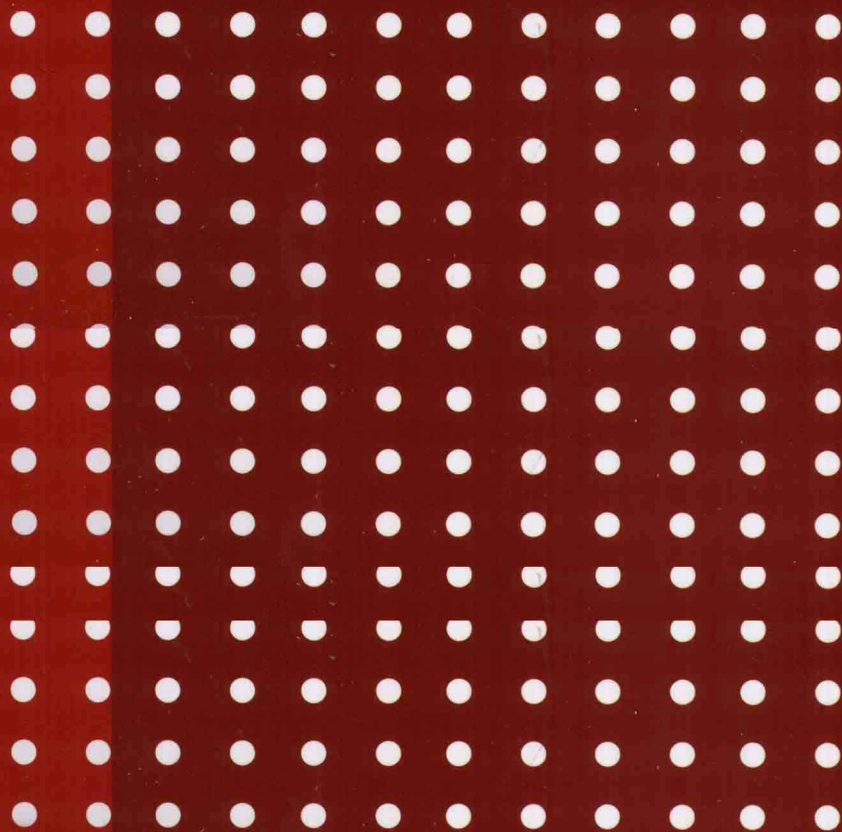


21世纪高等学校电子信息工程规划教材

数字逻辑 电路分析与设计教程

熊小君 主编

熊小君 马然 王旭智 薛雷 编著



清华大学出版社



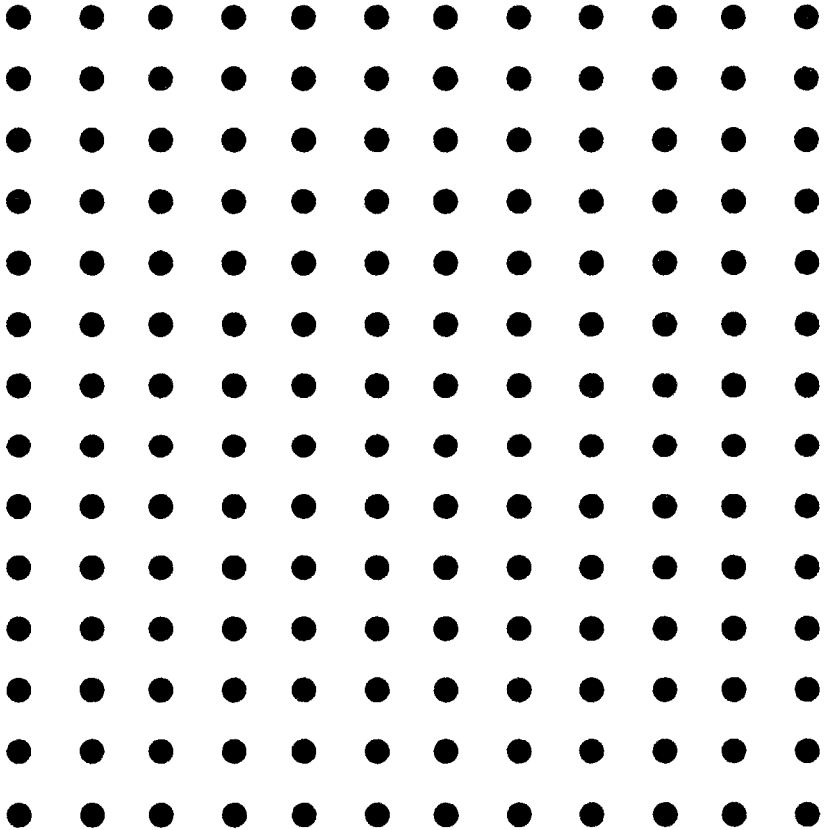


21世纪高等学校电子信息工程规划教材

数字逻辑 电路分析与设计教程

熊小君 主编

熊小君 马然 王旭智 薛雷 编著



清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书以数字逻辑为基础,全面介绍了数字电路的基本理论、分析方法、综合方法和实际应用。本书共分8章,第1章介绍数制之间的转换及常用的编码;第2章介绍逻辑代数及逻辑化简的基本方法;第3章介绍几个常用的组合逻辑模块的应用;第4章和第5章介绍时序电路的分析、设计方法和中规模逻辑模块的应用;第6章介绍数/模和模/数转换电路;第7章介绍可编程逻辑器件的原理及应用;第8章介绍硬件描述语言VHDL,并以大量例题为背景进行了介绍。每章后面附有相应的习题。

本书可作为高等学校通信、电气、电子信息、计算机、自动化等专业的大学本科教材,也可供其他从事电子技术工作的工程技术人员参考。

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 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

数字逻辑电路分析与设计教程/熊小君主编.--北京:清华大学出版社,2012.9

21世纪高等学校电子信息工程规划教材

ISBN 978-7-302-28801-5

I. ①数… II. ①熊… III. ①数字电路—逻辑电路—电路分析—高等学校—教材 ②数字电路—逻辑电路—电路设计—高等学校—教材 IV. ①TN79

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第098709号

责任编辑:闫红梅 李 晔

封面设计:傅瑞学

责任校对:李建庄

责任印制:张雪娇

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010 62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 装 者:北京国马印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:14 字 数:349千字

版 次:2012年9月第1版 印 次:2012年9月第1次印刷

印 数:1~3000

定 价:23.00元

产品编号:037002-01

出版说明

随着我国高等教育规模的扩大和产业结构调整的进一步完善,社会对高层次应用型人才的需求将更加迫切。各地高校紧密结合地方经济建设发展需要,科学运用市场调节机制,合理调整和配置教育资源,在改革和改造传统学科专业的基础上,加强工程型和应用型学科专业建设,积极设置主要面向地方支柱产业、高新技术产业、服务业的工程型和应用型学科专业,积极为地方经济建设输送各类应用型人才。各高校加大了使用信息科学等现代科学技术提升、改造传统学科专业的力度,从而实现传统学科专业向工程型和应用型学科专业的发展与转变。在发挥传统学科专业师资力量强、办学经验丰富、教学资源充裕等优势的同时,不断更新其教学内容、改革课程体系,使工程型和应用型学科专业教育与经济建设相适应。

为了配合高校工程型和应用型学科专业的建设和发展,急需出版一批内容新、体系新、方法新、手段新的高水平电子信息类专业课程教材。目前,工程型和应用型学科专业电子信息类专业课程教材的建设工作仍滞后于教学改革的实践,如现有的电子信息类专业教材中有不少内容陈旧(依然用传统专业电子信息教材代替工程型和应用型学科专业教材),重理论、轻实践,不能满足新的教学计划、课程设置的需要;一些课程的教材可供选择的品种太少;一些基础课的教材虽然品种较多,但低水平重复严重;有些教材内容庞杂,书越编越厚;专业课教材、教学辅助教材及教学参考书短缺,等等,都不利于学生能力的提高和素质的培养。为此,在教育部相关教学指导委员会专家的指导和建议下,清华大学出版社组织出版本系列教材,以满足工程型和应用型电子信息类专业课程教学的需要。本系列教材在规划过程中体现了如下一些基本原则和特点:

(1) 系列教材主要是电子信息学科基础课程教材,面向工程技术应用的培养。本系列教材在内容上坚持基本理论适度,反映基本理论和原理的综合应用,强调工程实践和应用环节。电子信息学科历经了一个多世纪的发展,已经形成了一个完整、科学的理论体系,这些理论是这一领域技术发展的强大源泉,基于理论的技术创新、开发与应用显得更为重要。

(2) 系列教材体现了电子信息学科使用新的分析方法和手段解决工程实际问题。利用计算机强大功能和仿真设计软件,使电子信息领域中大量复杂的理论计算、变换分析等变得快速简单。教材充分体现了利用计算机解决理论分析与解算实际工程电路的途径与方法。

(3) 系列教材体现了新技术、新器件的开发应用实践。电子信息产业中仪器、设备、产品都已使用高集成化的模块,且不仅仅由硬件来实现,而是大量使用软件和硬件相结合的方法,使产品性价比很高。如何使学生掌握这些先进的技术、创造性地开发应用新技术是本系列教材的一个重要特点。

(4) 以学生知识、能力、素质协调发展为宗旨,系列教材编写内容充分注意了学生创新能力和实践能力的培养,加强了实验实践环节,各门课程均配有独立的实验课程和课程

设计。

(5) 21 世纪是信息时代,学生获取知识可以是多种媒体形式和多种渠道的,而不再局限于课堂上,因而传授知识不再以教师为中心,以教材为唯一依托,而应该多为学生提供各种学习资料(如网络教材,CAI 课件,学习指导书等)。应创造一种新的学习环境(如讨论,自学,设计制作竞赛等),让学生成为学习主体。该系列教材以计算机、网络和实验室为载体,配有多种辅助学习资料,可提高学生学习兴趣。

繁荣教材出版事业,提高教材质量的关键是教师。建立一支高水平的以老带新的教材编写队伍才能保证教材的编写质量和建设力度,希望有志于教材建设的教师能够加入到我们的编写队伍中来。

21 世纪高等学校电子信息工程规划教材编委会

联系人: 魏江江 weijj@tup.tsinghua.edu.cn

前 言

数字电路分析与设计是高等院校电子信息类专业必修的一门专业技术基础课,主要介绍数字系统的基础知识及应用数字电路来对数字系统进行分析与设计的基本理论与方法。

数字电子技术是当前发展最快的学科之一。随着集成电路工艺的不断发展,数字集成电路已经经历了从传统的小规模集成电路到中大规模、超大规模集成电路的发展过程,特别是可编程逻辑器件的出现,为数字电路设计提供了更完善、更方便的器件。相应地,数字电路的设计过程和设计方法也在不断发展,因此对数字电路分析与设计课程的教学内容、教学方法、教学手段以及教材也提出了新的要求。

本书在编写过程中,以“保证基础,突出重点,面向更新,联系实际”为原则,注重培养学生分析问题、解决问题的能力。在确保基本理论、基本概念、基本方法的教学前提下,力求反映当前数字电子技术的新发展,介绍目前普遍应用的新器件、新技术和新方法。另外,为了方便读者学习,在每章后面附有习题,其中部分习题有一定的深度,以帮助学生在深入掌握课程内容的基础上扩展知识。

通过本书的学习,读者可掌握数字电路的基本原理和分析和设计方法,能对常见的集成电路进行分析、设计和应用;可初步掌握可编程逻辑器件的电路结构特点、工作原理,能用可编程逻辑器件进行电路设计;可掌握硬件描述语言 VHDL 的基本知识并用它来设计数字系统硬件电路。

本书共 8 章,由熊小君老师、马然老师、王旭智老师、朱雯君老师和薛雷老师编写,熊小君老师担任主编。

由于编者水平有限,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2012 年 8 月

目 录

第 1 章 数字电路基础	1
1.1 数字信号与数字电路	1
1.1.1 数字信号	1
1.1.2 数字电路	3
1.2 数值	3
1.2.1 各种进制的表示	3
1.2.2 各种进制之间的转换	4
1.3 二值编码	6
1.3.1 带符号数的表示	6
1.3.2 常用的二进制码	8
1.3.3 n 位十进制数的 BCD 码表示及 8421 BCD 码的加/减法	9
1.4 逻辑关系	10
1.4.1 基本逻辑关系	11
1.4.2 复合逻辑关系	13
1.5 逻辑关系与数字电路	14
习题 1	17
第 2 章 逻辑函数与组合电路基础	18
2.1 逻辑代数	18
2.1.1 逻辑代数的基本公式	18
2.1.2 逻辑代数的基本规则	19
2.1.3 逻辑函数的公式法化简	20
2.2 逻辑函数的标准形式	21
2.2.1 最小项与最小项表达式	21
2.2.2 最大项与最大项表达式	23
2.2.3 最小项与最大项的关系	24
2.3 卡诺图及其化简	24
2.3.1 卡诺图	24
2.3.2 逻辑函数与卡诺图	25
2.3.3 用卡诺图化简逻辑函数	27

2.3.4	对具有无关项的逻辑函数的化简	29
2.4	组合电路的设计基础	30
2.4.1	编码器的设计	31
2.4.2	译码器的设计	33
2.4.3	数据选择器的设计	34
2.4.4	数值比较器的设计	34
2.4.5	2位加法器的设计	35
习题 2	.....	36
第 3 章	组合逻辑电路设计	38
3.1	集成逻辑电路的电气特性	38
3.1.1	集成电路的主要电气指标	39
3.1.2	逻辑电路的输出结构	42
3.1.3	芯片使用中注意的问题	44
3.1.4	正、负逻辑极性	45
3.1.5	常用门电路	46
3.2	常用组合逻辑模块	47
3.2.1	4位并行加法器	47
3.2.2	数值比较器	50
3.2.3	译码器	52
3.2.4	数据选择器	57
3.2.5	总线收发器	61
3.3	应用实例	62
3.4	险象与竞争	70
3.4.1	险象的分类	70
3.4.2	不考虑延迟时的电路输出	71
3.4.3	逻辑险象及其消除	71
3.4.4	功能险象	74
3.4.5	动态险象	75
习题 3	.....	77
第 4 章	时序电路基础	85
4.1	集成触发器	85
4.1.1	基本 RS 触发器	85
4.1.2	钟控 RS 触发器	88
4.1.3	D 触发器	90
4.1.4	JK 触发器	91
4.2	触发器的应用	92
4.2.1	D 触发器的应用	92

4.2.2 JK 触发器的应用	95
4.2.3 异步计数器	95
4.3 同步时序逻辑电路	97
4.3.1 时序逻辑电路的基本概念	97
4.3.2 米里型电路的分析举例	98
4.3.3 莫尔型电路分析举例	101
4.3.4 自启动	102
4.4 集成计数器及其应用	104
4.4.1 集成计数器	105
4.4.2 任意模计数器	107
4.4.3 计数器的扩展	109
4.4.4 集成计数器应用举例	110
4.5 集成移位寄存器及其应用	113
4.5.1 集成移位寄存器	113
4.5.2 移位型计数器	114
4.5.3 移位寄存器在数据转换中的应用	115
习题 4	117
第 5 章 同步时序电路和数字系统设计	129
5.1 同步时序电路的基本设计方法	129
5.1.1 原始状态图和状态表的建立	129
5.1.2 用触发器实现状态分配	133
5.1.3 导出触发器的激励方程和输出方程	134
5.2 用“触发器组合状态法”设计同步时序逻辑电路	135
5.2.1 写出编码状态表	135
5.2.2 化简触发器激励函数的卡诺图	136
5.2.3 画出逻辑图	136
5.3 用“触发器直接状态法”设计同步时序逻辑电路	137
5.3.1 触发器状态的直接分配	138
5.3.2 做出逻辑次态表	138
5.3.3 导出各触发器的激励方程和电路的输出方程	139
5.3.4 画出逻辑图	139
5.4 同步时序电路中的时钟偏移	140
5.4.1 时钟偏移现象	140
5.4.2 时钟偏移的后果	140
5.4.3 防止时钟偏移的方法	141
习题 5	141

第 6 章 集成 ADC 和 DAC 的基本原理与结构	144
6.1 集成数模转换器	144
6.1.1 二进制权电阻网络 DAC	145
6.1.2 二进制 T 形电阻网络 DAC	147
6.2 DAC 的主要技术参数	149
6.2.1 最小输出电压和满量程输出电压	149
6.2.2 分辨率	149
6.2.3 转换误差和产生原因	150
6.2.4 DAC 的建立时间	150
6.3 集成模数转换器	151
6.3.1 ADC 的处理过程	151
6.3.2 并行型 ADC	154
6.3.3 逐次比较逼近型 ADC	155
6.3.4 双积分型 ADC	157
6.4 ADC 的主要技术参数	160
习题 6	161
第 7 章 可编程逻辑器件及其应用基础	166
7.1 PLD 的基本原理	166
7.1.1 PLD 的基本组成	168
7.1.2 PLD 的编程和阵列结构	168
7.1.3 PLD 的逻辑符号	170
7.2 只读存储器	172
7.2.1 ROM 的组成原理	172
7.2.2 ROM 在组合逻辑设计中的应用	173
7.3 可编程逻辑阵列	175
7.3.1 组合逻辑 PLA 电路	175
7.3.2 时序逻辑 PLA 电路	176
习题 7	177
第 8 章 硬件描述语言基础	178
8.1 硬件描述语言概述	178
8.2 VHDL 语言描述数字系统的基本方法	179
8.2.1 VHDL 库和包	180
8.2.2 实体描述语句	181
8.2.3 结构体描述	182
8.3 VHDL 中的赋值、判断和循环语句	186
8.3.1 信号和变量的赋值语句	186

8.3.2 IF-ELSE 语句	186
8.3.3 CASE 语句	187
8.3.4 LOOP 语句	187
8.3.5 NEXT、EXIT 语句	188
8.4 进程语句	188
8.5 VHDL 设计组合逻辑电路举例	190
8.6 VHDL 设计时序逻辑电路举例	200
8.6.1 时钟信号的描述	200
8.6.2 触发器的同步和非同步复位的描述	200
习题 8	207
主要参考文献	211

第 1 章 数字电路基础

1995 年,美国麻省理工大学媒体实验室教授、著名未来学家尼葛洛庞帝在其著作《数字化生存》中指出,信息时代是一个数字化的世界。它有 4 根支柱:一是自然界的一切信息都可以通过数字“1”和“0”表示;二是计算机只是用数字“1”和“0”来处理所有数据;三是计算机处理信息方法是通过对“1”和“0”的数字处理来实现的;四是通过跨空间运送“1”和“0”来把信息传送到全世界。

数字化已成为当今电子技术的发展潮流,数字电子技术及其产品已经渗透到人类的生活和工作中,对人类的生产方式、生活方式、思维方式以及学习方式等都产生了巨大的影响。

数字电路是数字电子技术的核心。本章主要介绍数字电路的基本概念、数字逻辑关系及逻辑运算、数字电路中常用的数制和编码等。

1.1 数字信号与数字电路

1.1.1 数字信号

自然界的一切信息都可以直接或间接(通过一定的转换)地用数字“1”和“0”进行表征。例如,可以用“1”表示男性,用“0”表示女性。当需要表示更多状态或信息时,可以用“1”和“0”的组合形式来表示。例如,用 2 位“1”和“0”形成的“00”、“01”、“10”和“11”共 4 种组合形式分别表示东、西、南、北 4 个不同的方位。再如,还可以从由 3 个“1”和“0”构成的 8 种组合形式(000、001、010、011、100、101、110、111)中任意选择 7 种形式分别表示红、橙、黄、绿、青、蓝、紫 7 种基本色彩。

同理,各种各样的信息都可以用多个“1”和“0”的组合形式表示,其中,一个组合形式中所包含的“1”和“0”的个数称为位数。例如,计算机键盘上的字符按键采用了目前国际上最通用的 ASCII 码(American Standard Code for Information Interchange)表示。每一个 ASCII 码由 7 位的“1”和“0”组成;7 位的“1”和“0”的组合形式共有 $2^7=128$ 种组合形式,即可以唯一地标识 128 个字符,这些字符包括十进制数、英文大小写字母、运算符、控制符及特殊符号等。表 1-1 是部分字符对应的 ASCII 码。

图 1-1 是键盘按键信号转换为 ASCII 码的过程。当按下左侧键盘上的按钮 C 时,键盘编码器则同时并行输出 C 对应的 7 位 ASCII 码 100011,再经过并/串转换器,向计算机串行地输出这一代码。如果依次按下的键盘按钮为 APPLE,则最后串行输出的 ASCII 码为是 1000001 1010000 1010000 1001100 1000101。

表 1-1 部分字符的 ASCII 码

字符	ASCII 码	字符	ASCII 码	字符	ASCII 码	字符	ASCII 码
空格	010000	3	0110011	E	1000101	P	1010000
.	0101110	4	0110100	F	1000110	Q	1010001
(	0101000	5	0110101	G	1000111	R	1010010
+	0101011	6	0110110	H	1001000	S	1010011
\$	0100100	7	0110111	I	1001001	T	1010100
*	0101010	8	0111000	J	1001010	U	1010101
)	0101001	9	0111001	K	1001011	V	1010110
,	0101100	A	1000001	L	1001100	W	1010111
0	0110000	B	1000010	M	1001101	X	1011000
1	0110001	C	1000011	N	1001110	Y	1011001
2	0110010	D	1000100	O	1001111	Z	1011010

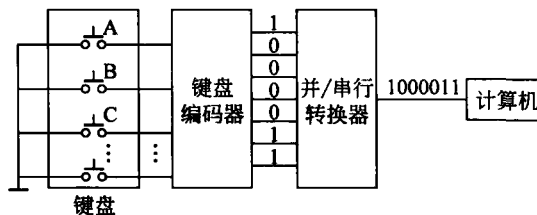


图 1-1 键盘信号转换为 ASCII 码

数字信号只有“1”和“0”两个取值,故又称为二值信号。“1”和“0”两个数字量反映在电信号上,可以表现为在一定时间间隔 T 内电平的高低或是否变化。在图 1-2 中,随时间变化依次出现的数字信号为 11001110100,图 1-2(a)是以高电平表示“1”,低电平表示“0”,这种表示方式称为不归零格式,在数字电路中多采用这一表示方式;图 1-2(b)是以电平变化表示“1”,无变化表示“0”,这种表示方式也称为归零格式,在数字通信中常用的曼彻斯特编码就属于这种格式。

观察图 1-2 中的数字信号,可以看出数字信号具有如下两个显著特点。

(1) 数字信号只有两种电平:高电平和低电平。既可以用高电平表示“1”、低电平表示“0”,称为正逻辑;也可用低电平表示“1”、高电平表示“0”,称为负逻辑。

(2) 信号的变化总是瞬间发生的:信号从低电平突变为高电平的过程称为上升沿,高电平突变为低电平的过程则称为下降沿。理想的数字信号的突变部分是瞬时的,不占用时间,但实际中,电平的变化需要经历一定的时间。如图 1-3 所示, V_m 是数字信号的幅度; t_r 是信号的上升时间,即上升沿,是指信号由 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 所经历的时间; t_f 是信号的下降时间,即下降沿,是指信号由 $0.9V_m$ 下降到 $0.1V_m$ 所经历的时间。

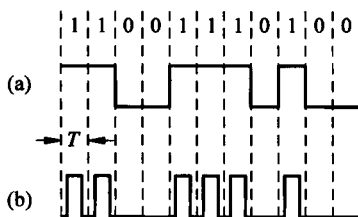


图 1-2 数字信号的两种表示方式

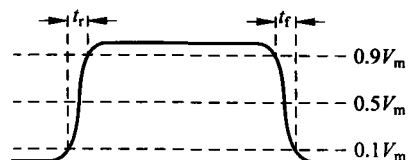


图 1-3 实际的数字信号

1.1.2 数字电路

数字电路是传输、加工和处理数字信号电子电路。它具有以下几个特点。

(1) 数字电路抗干扰性强,可靠性高。

只要数字电路能区分“0”和“1”两种状态(即低电平和高电平),就能可靠地工作,而不需要考虑高、低电平的具体数值。表 1-2 是基于 CMOS 工艺的数字电子器件的电压范围与逻辑电平之间的关系。

表 1-2 电压范围与逻辑电平的关系

电压范围/V	逻辑电平	电压范围/V	逻辑电平
3.5~5	高电平	0~1.5	低电平

(2) 数字电路易于实现。

数字电路利用稳态时的电子器件二极管、三极管工作在开关状态(即导通和截止)来实现数字信号的“0”和“1”。

(3) 数字电路易集成,对器件的特性要求不高。

数字电路是由几种最基本的单元电路组成;在这些基本单元中对元件的精度要求不高。

(4) 数字电路具有存储功能,可以长期保存数字信息。

数字电路主要研究的问题是输出、输入信号状态(“0”和“1”)之间的逻辑关系,即电路的逻辑功能。数字电路中的“1”和“0”具有逻辑意义,例如逻辑“1”和逻辑“0”可以分别表示电路的接通和断开、事件的是和否、逻辑推理的真和假等。因此,数字信号“1”和“0”又被称为逻辑信号,数字电路又被称为逻辑电路。

目前,数字电路在电子计算机、电机、通信设备、自动控制、雷达、家用电器、日常电子产品、汽车电子等许多领域得到了广泛的应用。在数字化的时代中,数字电路产品也无所不在,如 MP3、DVD、数字电视、数码相机、数码摄像机、手机等。

1.2 数值

在现实生活中,人们习惯用十进制进行计数和运算;而在数字电路系统中,通常采用二进制、八进制和十六进制。

1.2.1 各种进制的表示

对于任何一个具有 n 位整数、 m 位小数的 R 进制数 N ,可以用式(1-1)表示为

$$\begin{aligned}
 (N)_R &= (r_{n-1}r_{n-2}\cdots r_1r_0.r_{-1}r_{-2}\cdots r_{-m})_R \\
 &= r_{n-1} \times R^{n-1} + r_{n-2} \times R^{n-2} + \cdots + r_1 \times R^1 + r_0 \times R^0 + r_{-1} \times R^{-1} \\
 &\quad + r_{-2} \times R^{-2} + \cdots + r_{-m} \times R^{-m} \\
 &= \sum_{i=-m}^{n-1} r_i \times R^i
 \end{aligned} \tag{1-1}$$

其中, $(N)_R$ 表示数 N 是 R 进制数; R 是大于 1 的任意正整数, 称为该数制的基; R^i 为 R 进制数第 i 位的权。

十进制的基是 10, 含有 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9 共 10 个数制符号和小数点, 并且以“逢十进一”表示数的大小。例如, $(3456.789)_{10}$ 是一个 4 位整数、3 位小数的十进制数, 按权展开为

$(3456.012)_{10} = 3 \times 10^3 + 4 \times 10^2 + 5 \times 10^1 + 6 \times 10^0 + 0 \times 10^{-1} + 1 \times 10^{-2} + 2 \times 10^{-3}$
其中千位数 3 处于第 3 位, 表示的数值为 3×10^3 ; 十分位数 0 处于第 -1 位, 表示的数值为 0×10^{-1} ; 其他各位的含义如图 1-4 所示。

位号	3	2	1	0		-1	-2	-3
十进制数	3	4	5	6	.	0	1	2
位权	10^3	10^2	10^1	10^0		10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}

图 1-4 十进制数的权值

同理, 二进制的基是 2, 含有 0、1 两个数制符号和小数点, 并且“逢二进一”计数; 八进制的基是 8, 含有 0、1、2、3、4、5、6、7 共 8 个数制符号和小数点, 并且“逢八进一”计数; 十六进制的基是 16, 含有 0、1、2、3、4、5、6、7、8、9、A、B、C、D、E、F 共 16 个数制符号和小数点, 并且“逢十六进一”计数。表 1-3 是各种数制的对照表。

表 1-3 各种数制的对照表

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	0	0	0	10	1010	12	A
1	1	1	1	11	1011	13	B
2	10	2	2	12	1100	14	C
3	11	3	3	13	1101	15	D
4	100	4	4	14	1110	16	E
5	101	5	5	15	1111	17	F
6	110	6	6	16	10000	20	10
7	111	7	7	17	10001	21	11
8	1000	10	8	18	10010	22	12
9	1001	11	9	19	10011	23	13

1.2.2 各种进制之间的转换

在现实生活中, 最常使用的进制是十进制数, 但在数字电路设计中, 常常需要使用二、八、十六进制数, 有必要进行进制之间的等值转换。

1. 其他进制数转换成十进制数

当将其他进制数转换成十进制数时, 只要根据公式(1-1)“按权展开相加”, 即可得到等值的十进制数。

例 1-1 将二进制数 $(11010.111)_2$ 转换成十进制数。

解：根据公式(1-1)，得

$$\begin{aligned}(11010.111)_2 &= 1 \times 2^4 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 0 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} + 1 \times 2^{-3} \\ &= 16 + 8 + 0 + 2 + 0 + 0.5 + 0.25 + 0.125 \\ &= (26.875)_{10}\end{aligned}$$

例 1-2 将八进制数 $(74.32)_8$ 转换成十进制数。

$$\begin{aligned}\text{解：}(74.32)_8 &= 7 \times 8^1 + 4 \times 8^0 + 3 \times 8^{-1} + 2 \times 8^{-2} \\ &= 56 + 4 + 0.375 + 0.03125 \\ &= (60.40625)_{10}\end{aligned}$$

例 1-3 将十六进制数 $(13AB6)_{16}$ 转换成十进制数。

$$\begin{aligned}\text{解：}(13AB.6)_{16} &= 1 \times 16^3 + 3 \times 16^2 + 10 \times 16^1 + 11 \times 16^0 + 6 \times 16^{-1} \\ &= 4096 + 768 + 160 + 11 + 0.375 \\ &= (5063.375)_{10}\end{aligned}$$

2. 十进制数转换成其他进制数

当将十进制数转换成其他进制数时，十进制数的整数部分采用基数除法、小数部分采用基数乘法。

如果十进制数既有整数部分又有小数部分，只要把它们分别进行转换，然后将结果合并即可。其中，整数部分取余数、由低位到高位；小数部分取积的整数部分，由高位到低位。

例 1-4 将十进制数 $(58.625)_{10}$ 转换成二进制数。

$$\begin{aligned}\text{解：}(58.625)_{10} &= (58)_{10} + (0.625)_{10} \\ &= (111010)_2 + (0.101)_2 = (111010.101)_2\end{aligned}$$

2 | 58	余数		积的整数部分	
2 | 29	0	↓ 低位	× 2	
2 | 14	1		— 0.250	↑ 高位
2 | 7	0		× 2	
2 | 3	1		— 0.500	0
2 | 1	1		× 2	
0	1	↓ 高位	— 0.000	↑ 低位

当十进制小数不能精确转换为非十进制小数时，往往需要有一定的精度要求。

例 1-5 将十进制数 $(54.39)_{10}$ 转换成十六进制数(保留小数点后4位)。

$$\begin{aligned}\text{解：}(54.39)_{10} &= (54)_{10} + (0.39)_{10} \\ &= (36)_{16} + (0.63D7)_{16} = (36.63D7)_{16}\end{aligned}$$

16 | 54	余数		积的整数部分	
16 | 3	6	↓ 低位	× 16	
0	3	↓ 高位	— 0.24	↑ 高位
			× 16	
			— 0.84	3
			× 16	
			— 0.44	D
			× 16	
			— 0.04	7
				↑ 低位

3. 非十进制数之间的转换

非十进制数之间的转换可以利用十进制作为桥梁,即先将非十进制数转换成十进制,然后再将十进制数转换为所需的非十进制数。

对于二、八、十六进制数而言,它们都是 2^n 进制数,可以直接、方便地利用二进制数进行数制间的转换:因为由表 1-3 可以看到,3 位二进制数相当于 1 位八进制数,4 位二进制数相当于 1 位十六进制数。

例 1-6 将十六进制数 $(BE.29)_{16}$ 转换成八进制数。

解:

$$\begin{aligned}
 & (\text{B} \quad \text{E} \quad . \quad 2 \quad 9)_{16} \\
 & \quad \downarrow \quad \downarrow \quad \quad \downarrow \quad \downarrow \\
 & = (1011 \quad 1110 \quad . \quad 0010 \quad 1001)_2 \\
 & = (\underset{\downarrow}{0}10 \quad 111 \quad 110 \quad . \quad 001 \quad 010 \quad \underset{\downarrow}{0}10)_2 \quad \begin{array}{l} \text{从小数点起, 向前或向后每3位} \\ \text{组合, 不足数位向前或向后补0} \end{array} \\
 & = (\underset{\downarrow}{2} \quad \underset{\downarrow}{7} \quad \underset{\downarrow}{6} \quad . \quad \underset{\downarrow}{1} \quad \underset{\downarrow}{2} \quad \underset{\downarrow}{2})_8
 \end{aligned}$$

1.3 二值编码

如前所述,可以利用 0、1 的不同组合形式表示数和文字信息,这种表示形式就称为二值编码。从编码的角度看,二进制数制实质上就是用 0、1 表示数值大小的一种编码方法,常称为自然二进制码。

1.3.1 带符号数的表示

1. 原码、反码和补码表示法

任何一个带符号的十进制数都是由符号和数值两部分组成,例如 +23、-87 等。对于符号部分,用“0”表示正号“+”,用“1”表示负号“-”;对于数值部分,转换成自然二进制数。这种表示方法称为“原码”。

带符号数还有反码和补码两种表示方法。在反码中,正数的反码就是其原码;负数的反码是原码中的符号位不变、数值部分按位取反得到。在补码中,正数的补码也是其原码;负数的补码是原码中的符号位不变、数值部分按位取反再加“1”得到。

例 1-7 已知 $X=(+75)_{10}$, $Y=(-75)_{10}$, 分别求 X 和 Y 的原码、反码和补码(设字长为 8 位)。

解: 由 $(75)_{10}=(1001011)_2$, 得

因为 X 是正数,所以 $[X]_{\text{原}}=[X]_{\text{反}}=[X]_{\text{补}}=01001011$ 。

因为 Y 是负数,所以 $[Y]_{\text{原}}=11001011$, $[Y]_{\text{反}}=10110100$, $[Y]_{\text{补}}=10110101$ 。

2. n 位带符号数的表示数值范围

n 位带符号数的原码、反码和补码可以表示的数值范围是