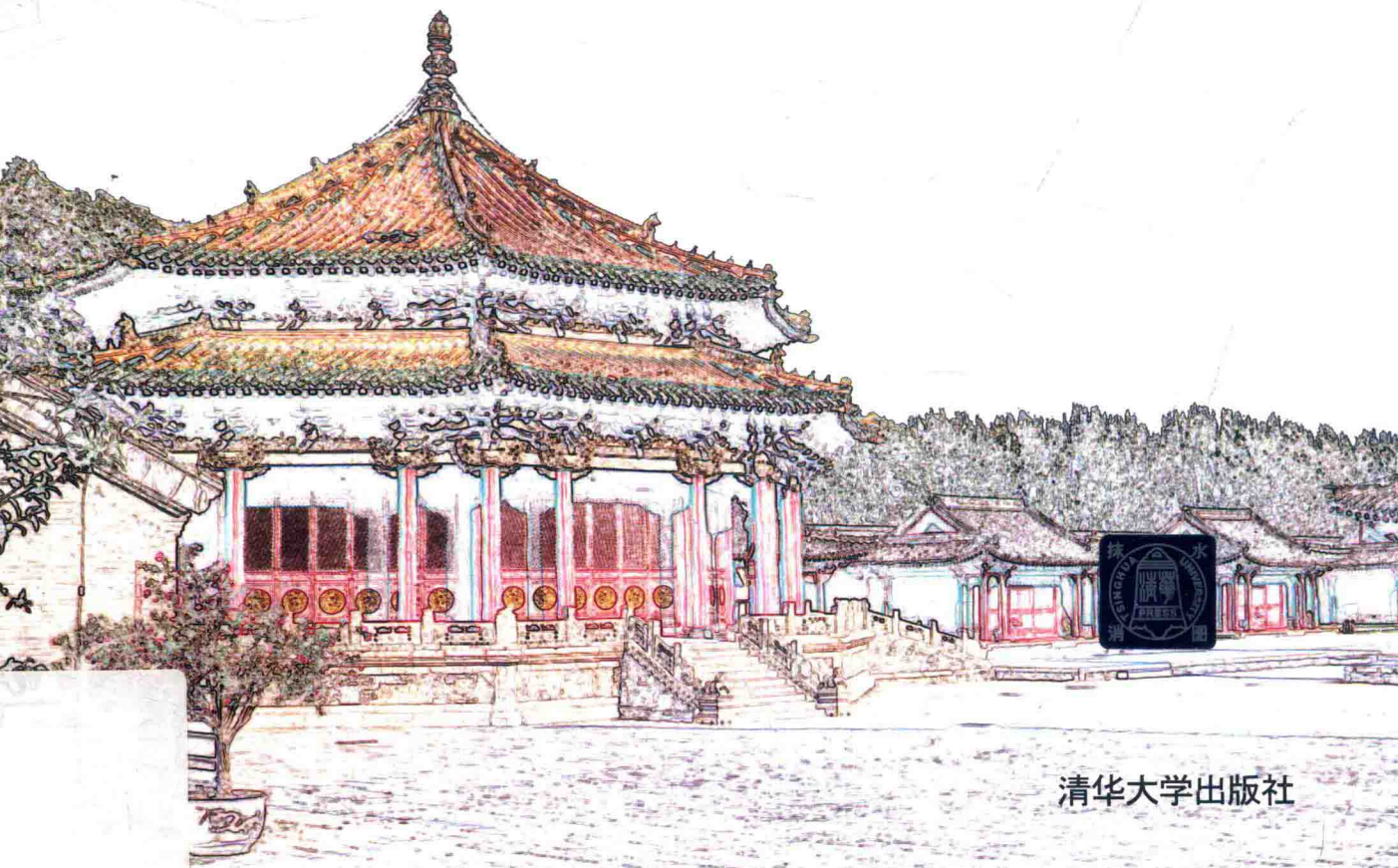


全国普通高校  
电子信息与  
电气学科  
基础规划教材

# 数字电子技术基础

(第2版)

李雪飞 主编



清华大学出版社

全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材

# 数字电子技术基础

(第2版)

李雪飞 主编

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书在第一版内容的基础上,增加了常用半导体器件的工作原理和开关特性,同时对其他章节的内容也进行了修改和完善,增加了大量的习题和参考答案,在每章的结尾增加了小结,使本书的内容更加完善,结构更加合理。

全书共 11 章,具体的内容有:逻辑代数基础,常用半导体器件的工作原理和开关特性,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,数/模和模/数转换,存储器和可编程逻辑器件,VHDL 语言基础,VHDL 在数字单元电路设计中的应用。书后附有参考答案。在附录部分还介绍了 EDA 工具软件 MAX+plus II 使用简介。

本书编写简明扼要,内容深入浅出,注重能力的培养。可以作为电子、电气、自动化、计算机、通信工程、机电一体化等相关专业的应用型普通本科生的教材,也可作为高等职业技术学院教材,还可供社会读者阅读。

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

数字电子技术基础/李雪飞主编.—2 版.—北京:清华大学出版社,2016

(全国普通高校电子信息与电气学科基础规划教材)

ISBN 978-7-302-44274-5

I. ①数… II. ①李… 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(2016)第 153128 号

责任编辑:梁颖 薛阳

封面设计:傅瑞学

责任校对:梁毅

责任印制:王静怡

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质量反馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:北京富博印刷有限公司

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:23.5

字 数:569 千字

版 次:2011 年 7 月第 1 版 2016 年 11 月第 2 版

印 次:2016 年 11 月第 1 次印刷

印 数:1~2000

定 价:49.50 元

产品编号:069443-01

# 再版前言

本书是在2011年出版的《数字电子技术基础》(ISBN 978-7-302-24607-7,清华大学出版社)的基础上,根据2005年教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会修订的“数字电子技术基础课程教学基本要求”,并结合多年的教学实践经验,以及众多使用本教材的师生提出的宝贵意见和建议进行修订的。修订后的教材仍然坚持注重理论联系实际,理论以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为重点,难度适中,利于创新的原则。

考虑有些院校的一些专业不开设模拟电子技术基础课程,而是直接开设数字电子技术基础,这次修订增加了半导体二极管、三极管和场效应管基本知识的内容,同时对第一版其他章节的内容也进行了修改和完善,这样使得本教材的内容更加完善、合理,也为使用本教材的读者带来了很大方便。由于本课程属于专业基础课,学生需要做大量的练习,以更好地理解 and 消化所学的内容,因此本次修订增加了大量的习题。同时书后增加了习题的参考答案,方便学生检验自己的学习效果。另外,在每章的结尾都增加了小结,与每章开头的教学提示、教学要求前后呼应。这样教学提示会给读者一个启示作用,教学要求能使读者更好地把握每章的重点内容,小结能帮助读者归纳重要的知识点和结论,使得本书结构设计更加科学合理。

本书由李雪飞主编并统稿。其中第1~6章和附录由李雪飞编写,第7章由王海军编写,第8章由张贺东编写,第9章由崔永刚编写,第10章由戚基艳编写,第11章由王铭杰编写,参考答案由对应每章的作者合作编写。

在本书编写过程中,曾得到许多专家和同行的热情帮助,并参考和借鉴了许多国内外公开出版和发表的文献,在此一并表示感谢!

由于时间仓促,水平有限,书中难免存在不足或疏漏之处,恳请广大读者批评指正,以便再版时修订。

为方便选用本书作为教材的任课教师授课,编者还制作了与本书配套的电子课件。需要者可在清华大学出版社网站([www.tup.com.cn](http://www.tup.com.cn))上下载。

编者

2016年4月

# 前 言

2005年,教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主持修订了“数字电子技术基础课程教学基本要求”,再次强调了本门课程的性质是“电子技术方面入门性质的技术基础课”,其任务在于“使学生获得数字电子技术方面的基本知识、基本理论和基本技能,为深入学习数字电子技术及其在专业中的应用打下基础”。因此,作者编写本书的原则是注重理论联系实际,理论以应用为目的,以必需、够用为度,以讲清概念、强化应用为重点,难度适中,利于创新。

随着电子技术的不断发展,基于EDA技术和可编程逻辑器件进行数字系统的设计与开发得到广泛应用。为此,本书在介绍了经典的数字电子技术理论之后,简单介绍了可编程逻辑器件的结构与工作原理,现代流行的数字系统设计工具——硬件描述语言(VHDL语言)以及用VHDL语言设计常用数字单元电路的方法,并且在附录中简单介绍了EDA工具软件MAX+plus II的使用方法,使得本书内容全面、体系完整。学生在已经掌握了数字电子技术基础知识后,再学习用VHDL语言开发设计数字系统,这样安排体例合理,适合不同层次的学生阅读,而且也方便各个学校根据教学大纲的要求选择教学内容。

本书在每章的开始安排了教学提示和教学要求,给读者一个启示作用,并可更好地把握每章的内容。每章的后面都附有相关习题,方便学生检验对每章内容的掌握程度,具有很强的实用性。

本书由李雪飞主编且负责全书统稿。参加本书编写的还有陈锦生、李方明、张明、张欣、刁芬、于洋、任苹、孙海静、李华玲、于荣义、董燕妮和王丹萍。

在本书编写过程中,曾得到许多专家和同行的热情帮助,并参考和借鉴了许多国内外公开出版和发表的文献,在此一并表示感谢!

由于时间仓促,水平有限,书中难免存在不足或疏漏之处,恳请广大读者批评指正,以便再版时修订。

为方便选用本书作为教材的任课教师授课,编者还制作了与本书配套的电子课件。需要者可在清华大学出版社网站([www.tup.com.cn](http://www.tup.com.cn))上下载。

编 者

2011年5月

第 1 章 逻辑代数基础	1
1.1 概述	1
1.1.1 数字电路和模拟电路	1
1.1.2 数字信号与逻辑电平	1
1.1.3 脉冲波形与数字波形	2
1.2 数制和码制	3
1.2.1 数制及数制间的转换	3
1.2.2 码制	7
1.3 逻辑代数中的基本运算	9
1.3.1 逻辑与	9
1.3.2 逻辑或	9
1.3.3 逻辑非	10
1.3.4 复合逻辑	10
1.4 逻辑代数中的公式	12
1.4.1 基本公式	12
1.4.2 若干常用的公式	13
1.5 逻辑代数中的基本定理	14
1.5.1 代入定理	14
1.5.2 反演定理	14
1.5.3 对偶定理	14
1.6 逻辑函数的表示方法	15
1.6.1 逻辑函数	15
1.6.2 逻辑真值表	15
1.6.3 逻辑函数式	16
1.6.4 卡诺图	17
1.6.5 逻辑图	19
1.6.6 各种表示方法间的互相转换	19
1.7 逻辑函数的化简方法	20
1.7.1 逻辑函数的种类及最简形式	20
1.7.2 公式法化简	21
1.7.3 卡诺图法化简	23
1.7.4 具有无关项的逻辑函数及其化简	25
小结	26

习题 .....	27
<b>第2章 常用半导体器件的工作原理和开关特性 .....</b>	<b>31</b>
2.1 半导体的基本知识.....	31
2.1.1 半导体的特性 .....	31
2.1.2 本征半导体 .....	31
2.1.3 杂质半导体 .....	32
2.2 半导体二极管.....	33
2.2.1 PN结及其单向导电性 .....	33
2.2.2 二极管的结构 .....	35
2.2.3 二极管的伏安特性 .....	36
2.2.4 二极管的主要参数 .....	37
2.2.5 二极管的应用 .....	37
2.2.6 二极管的开关特性 .....	39
2.3 半导体三极管.....	40
2.3.1 三极管的结构 .....	40
2.3.2 三极管的电流放大作用 .....	41
2.3.3 三极管的输入和输出特性曲线 .....	44
2.3.4 三极管的主要参数 .....	46
2.3.5 三极管的开关特性 .....	48
2.4 场效应管.....	50
2.4.1 结型场效应管 .....	50
2.4.2 绝缘栅场效应管 .....	55
2.4.3 场效应管的主要参数 .....	59
2.4.4 场效应管的开关特性 .....	60
小结 .....	61
习题 .....	62
<b>第3章 门电路 .....</b>	<b>66</b>
3.1 概述.....	66
3.2 分立元器件门电路.....	66
3.2.1 二极管与门 .....	66
3.2.2 二极管或门 .....	67
3.2.3 三极管非门 .....	68
3.3 TTL门电路 .....	68
3.3.1 TTL非门的电路结构和工作原理 .....	69
3.3.2 TTL非门的外特性 .....	71
3.3.3 其他类型的TTL门电路 .....	74
3.3.4 TTL系列门电路 .....	80

3.4	CMOS 门电路 .....	81
3.4.1	CMOS 反相器的电路结构和工作原理 .....	81
3.4.2	其他类型的 CMOS 门电路 .....	82
3.4.3	CMOS 传输门电路的组成和工作原理 .....	82
3.4.4	CMOS 系列门电路的性能比较 .....	83
3.5	集成门电路实用知识简介 .....	85
3.5.1	多余输入端的处理方法 .....	85
3.5.2	TTL 电路与 CMOS 电路的接口 .....	85
3.5.3	门电路带负载时的接口电路 .....	87
	小结 .....	88
	习题 .....	89
<b>第 4 章</b>	<b>组合逻辑电路 .....</b>	<b>96</b>
4.1	概述 .....	96
4.2	组合逻辑电路的分析和设计方法 .....	96
4.2.1	组合逻辑电路的分析方法 .....	96
4.2.2	组合逻辑电路的设计方法 .....	97
4.3	若干常用的组合逻辑电路 .....	99
4.3.1	编码器 .....	99
4.3.2	译码器 .....	104
4.3.3	数据分配器 .....	112
4.3.4	数据选择器 .....	114
4.3.5	加法器 .....	119
4.3.6	数值比较器 .....	122
4.4	组合逻辑电路中的竞争-冒险现象 .....	124
4.4.1	竞争-冒险现象 .....	124
4.4.2	竞争-冒险现象的判别方法 .....	125
4.4.3	消除竞争-冒险现象的方法 .....	126
	小结 .....	127
	习题 .....	128
<b>第 5 章</b>	<b>触发器 .....</b>	<b>132</b>
5.1	概述 .....	132
5.2	触发器的电路结构与动作特点 .....	132
5.2.1	基本 RS 触发器的电路结构与动作特点 .....	132
5.2.2	同步 RS 触发器的电路结构与动作特点 .....	135
5.2.3	主从 RS 触发器的电路结构与动作特点 .....	138
5.2.4	主从 JK 触发器的电路结构与动作特点 .....	140
5.2.5	边沿触发器 .....	143



5.3	触发器的主要参数 .....	149
5.4	不同类型触发器之间的转换 .....	150
5.4.1	JK 触发器转换成其他功能的触发器 .....	151
5.4.2	D 触发器转换成其他功能的触发器 .....	152
	小结 .....	153
	习题 .....	154
<b>第 6 章</b>	<b>时序逻辑电路</b> .....	<b>162</b>
6.1	概述 .....	162
6.1.1	时序逻辑电路的特点 .....	162
6.1.2	时序逻辑电路的组成和功能描述 .....	162
6.1.3	时序逻辑电路的分类 .....	163
6.2	时序逻辑电路的分析方法 .....	163
6.2.1	同步时序逻辑电路的分析方法 .....	163
6.2.2	异步时序逻辑电路的分析方法 .....	167
6.3	计数器 .....	168
6.3.1	同步计数器 .....	168
6.3.2	异步计数器 .....	176
6.3.3	任意进制计数器 .....	180
6.4	寄存器和移位寄存器 .....	185
6.4.1	寄存器 .....	186
6.4.2	移位寄存器 .....	187
6.5	移位寄存器型计数器 .....	192
6.5.1	环形计数器 .....	192
6.5.2	扭环形计数器 .....	192
6.6	顺序脉冲发生器和序列信号发生器 .....	194
6.6.1	顺序脉冲发生器 .....	194
6.6.2	序列信号发生器 .....	194
6.7	时序逻辑电路的设计方法 .....	196
6.7.1	同步时序电路的设计方法 .....	196
6.7.2	异步时序电路的设计方法 .....	200
	小结 .....	203
	习题 .....	204
<b>第 7 章</b>	<b>脉冲波形的产生与整形</b> .....	<b>210</b>
7.1	概述 .....	210
7.2	555 定时器 .....	210
7.2.1	555 定时器的电路结构 .....	211
7.2.2	555 定时器的工作原理 .....	211

7.3	施密特触发器 .....	212
7.3.1	施密特触发器的特点 .....	212
7.3.2	用 555 定时器构成的施密特触发器 .....	212
7.3.3	集成施密特触发器 .....	214
7.3.4	施密特触发器的应用 .....	214
7.4	单稳态触发器 .....	216
7.4.1	单稳态触发器的特点 .....	216
7.4.2	用 555 定时器构成的单稳态触发器 .....	216
7.4.3	集成单稳态触发器 .....	217
7.4.4	单稳态触发器的应用 .....	220
7.5	多谐振荡器 .....	222
7.5.1	多谐振荡器的特点 .....	222
7.5.2	用 555 定时器构成的多谐振荡器 .....	222
7.5.3	石英晶体多谐振荡器 .....	224
7.5.4	压控振荡器 .....	225
	小结 .....	226
	习题 .....	226
<b>第 8 章</b>	<b>数/模和模/数转换 .....</b>	<b>232</b>
8.1	概述 .....	232
8.2	数/模(D/A)转换器 .....	233
8.2.1	D/A 转换器的主要电路形式 .....	233
8.2.2	D/A 转换器的输出方式 .....	236
8.2.3	D/A 转换器的主要技术指标 .....	237
8.2.4	集成 D/A 转换器 .....	238
8.3	模/数(A/D)转换器 .....	241
8.3.1	A/D 转换器的基本工作原理 .....	241
8.3.2	A/D 转换器的主要电路形式 .....	243
8.3.3	A/D 转换器的主要技术指标 .....	250
8.3.4	集成 A/D 转换器 .....	251
	小结 .....	252
	习题 .....	253
<b>第 9 章</b>	<b>存储器和可编程逻辑器件 .....</b>	<b>257</b>
9.1	概述 .....	257
9.1.1	存储器 .....	257
9.1.2	可编程逻辑器件 .....	258
9.2	只读存储器的分类及工作原理 .....	259
9.2.1	只读存储器的分类 .....	259

9.2.2	只读存储器的电路结构及工作原理	260
9.2.3	常用的只读存储器	262
9.3	随机存储器	264
9.3.1	RAM的电路结构及工作原理	264
9.3.2	RAM的存储单元	266
9.3.3	常用的随机存储器	267
9.4	存储器的扩展	268
9.4.1	位扩展方式	268
9.4.2	字扩展方式	268
9.5	可编程逻辑器件	269
9.5.1	PLD的电路表示法	269
9.5.2	低密度可编程逻辑器件	270
9.5.3	高密度可编程逻辑器件	273
9.6	可编程逻辑器件的编程	276
9.6.1	并口下载电缆 ByteBlaster 的内部电路与信号定义	277
9.6.2	编程配置方式	277
小结		280
习题		280
<b>第 10 章</b>	<b>VHDL 语言基础</b>	<b>283</b>
10.1	概述	283
10.2	VHDL 设计实体的基本结构	284
10.2.1	库和程序包	284
10.2.2	实体	285
10.2.3	结构体	286
10.3	VHDL 语言规则	287
10.3.1	VHDL 文字规则	287
10.3.2	VHDL 数据类型	289
10.3.3	VHDL 数据对象	291
10.3.4	VHDL 运算符和操作符	292
10.4	VHDL 的顺序语句和并行语句	293
10.4.1	顺序语句	293
10.4.2	并行语句	297
小结		300
习题		301
<b>第 11 章</b>	<b>VHDL 在数字单元电路设计中的应用</b>	<b>304</b>
11.1	组合逻辑电路的设计	304
11.1.1	基本逻辑门电路的设计	304

11.1.2	优先编码器的设计 .....	306
11.1.3	3-8 译码器的设计 .....	307
11.1.4	显示译码器的设计 .....	308
11.1.5	数据选择器的设计 .....	309
11.1.6	加法器的设计 .....	311
11.1.7	数值比较器的设计 .....	313
11.2	时序逻辑电路的设计 .....	313
11.2.1	触发器的设计 .....	314
11.2.2	锁存器的设计 .....	314
11.2.3	寄存器的设计 .....	316
11.2.4	计数器的设计 .....	318
11.3	存储器的设计 .....	320
11.3.1	ROM 的设计 .....	320
11.3.2	RAM 的设计 .....	321
小结	.....	322
习题	.....	322
附录	MAX+plus II 使用简介 .....	324
参考答案	.....	332
参考文献	.....	361

# 第 1 章 逻辑代数基础

**教学提示：**逻辑代数是用于逻辑分析和设计的一种数学工具，主要内容是基本逻辑关系、逻辑代数的公式和定理、逻辑函数的表示方法和逻辑函数的化简。

**教学要求：**要求学生理解数字信号的概念，理解各种逻辑关系，掌握逻辑代数的公式、定理和逻辑函数的表示方法以及各种表示方法之间的转换，熟练掌握逻辑函数的两种化简方法，即公式法和卡诺图法。

## 1.1 概 述

### 1.1.1 数字电路和模拟电路

电子电路中的信号可分为两种类型：一种是模拟信号；另一种是数字信号。

模拟信号是指在时间上和数值上都是连续变化的信号。如温度传感器测量温度时输出的电流或电压信号就属于模拟信号。用来处理或产生模拟信号的电路称为模拟电路(analog circuits)，如放大器、信号发生器、滤波器、直流稳压电路等。由于模拟电路强调工程性，所以通常采用定性分析、近似计算等方法。

数字信号是指在时间上和数值上都是离散的信号。如在产品自动装箱控制系统中，一般在包装箱传送带的中间装一个光电传感器，当包装箱到位时，光电传感器就发出一个脉冲，用以对产品进行计数。显然，这个脉冲信号在时间上和数值上都是不连续的，它是一个数字信号。把工作在数字信号下的电子电路叫做数字电路(digital circuits)。数字电路的主要研究对象是电路的输入和输出之间的逻辑关系，所以主要的分析与设计工具是逻辑代数。

### 1.1.2 数字信号与逻辑电平

在数字电路中，一般使用二进制数 0 和 1 进行工作，反映在电路上就是高、低逻辑电平。逻辑电平(logic level)是指一个电压范围，而对于 TTL(三极管-三极管逻辑)电路和 CMOS(场效应管)逻辑电路的高电平( $V_H$ )和低电平( $V_L$ )的电压范围有所不同，具体范围如图 1-1 所示。从图中可以看出，它们都存在中间未定义区域(如 TTL 逻辑电路对电压为 1.5V 未



(a) TTL逻辑电路的高、低电平的电压范围 (b) CMOS逻辑电路的高、低电平的电压范围

图 1-1 高、低电平的电压范围

作出定义),这个未定义区是需要的,它可以明确地定义和可靠地检测高、低电平的状态。如果区分高、低电平的界限离得太近,那么噪声更容易影响运算结果,可能会破坏电路的逻辑功能,或使得电路的逻辑功能含混不清。

在数字电路中,获得高、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来实现的,示意图如图 1-2 所示。当开关 K 断开时,输出电压  $v_O$  为高电平;而当开关 K 闭合时,输出便为低电平。开关 K 是用半导体二极管或三极管组成的。只要能通过输入信号  $v_i$  控制二极管或三极管的截止或导通状态,即可起到开关的作用。

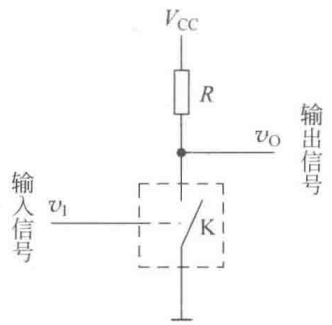


图 1-2 获得高、低电平的基本方法

如果用逻辑 1 表示高电平,用逻辑 0 表示低电平,则称这种赋值方式为正逻辑(positive logic);反之,若用逻辑 1 表示低电平,用逻辑 0 表示高电平,则称这种赋值方式为负逻辑(negative logic)。在本书中均采用正逻辑赋值。

### 1.1.3 脉冲波形与数字波形

数字波形是逻辑电平对时间的图形表示。通常,将只有两个离散值的波形称为脉冲波形,在这一点上脉冲波形与数字波形是一致的,只不过数字波形用逻辑电平表示,而脉冲波形用电压值表示而已。

理想的脉冲波形一般只用 3 个参数便可以描述清楚,这 3 个参数是脉冲幅度  $U_m$ 、脉冲周期  $T$  和脉冲宽度  $t_w$ ,理想脉冲波形如图 1-3 所示。如果将脉冲波形中的电压值用逻辑电平表示就得到了数字波形。与脉冲波形相同,数字波形也有周期性和非周期性之分,图 1-4 表示了这两种数字波形。

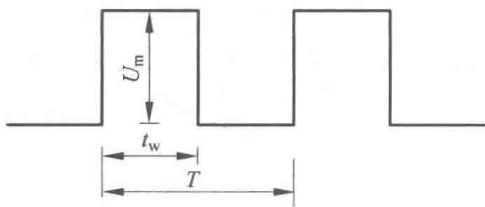


图 1-3 理想的脉冲波形

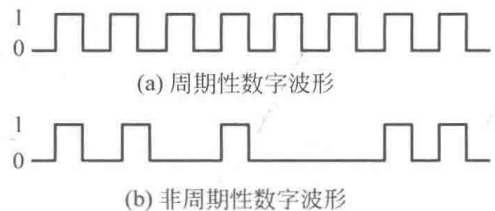


图 1-4 数字波形

前面讨论的脉冲波形是理想波形,而实际的脉冲波形的电压上升与下降都要经历一段时间,也就是说波形存在上升时间  $t_r$  和下降时间  $t_f$ 。实际的脉冲波形如图 1-5 所示。

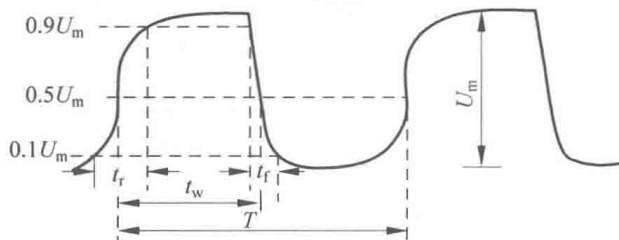


图 1-5 实际的脉冲波形

图 1-5 中所示各参数定义如下:

### 1. 脉冲幅度 $U_m$

脉冲电压的最大变化幅度。

### 2. 上升时间 $t_r$

脉冲上升沿从  $0.1U_m$  上升到  $0.9U_m$  所需的时间。

### 3. 下降时间 $t_f$

脉冲下降沿从  $0.9U_m$  下降到  $0.1U_m$  所需的时间。

### 4. 脉冲宽度 $t_w$

从脉冲上升沿到达  $0.5U_m$  起,到脉冲下降沿到达  $0.5U_m$  为止的一段时间。

### 5. 脉冲周期 $T$

在周期性脉冲信号中,两个相邻脉冲的前沿之间或后沿之间的时间间隔称为脉冲周期,用  $T$  表示。

### 6. 脉冲频率 $f$

在单位时间内(1 秒)脉冲信号重复出现的次数,用  $f$  表示, $f=1/T$ 。

### 7. 占空比 $q$

脉冲的宽度  $t_w$  与脉冲周期  $T$  的比值,即  $q=t_w/T$ 。

一般情况下波形的上升或下降时间都很小,而在数字电路中只需关注逻辑电平的高低,因此在画理想数字波形时忽略了上升和下降时间。本课程中所用的数字波形将采用理想波形。

## 1.2 数制和码制

### 1.2.1 数制及数制间的转换

#### 1. 数制

数制是进位计数制的简称。在日常生活中,人们习惯采用十进制计数,在数字电路中经常使用二进制计数,而在计算机系统中还经常使用十六进制计数。

##### (1) 十进制

十进制(decimal)是用 10 个不同的数  $0, 1, 2, \dots, 9$  来表示数的,任何一个数都可以用上述的 10 个数按照一定的规律排列起来表示,其计数规律是“逢十进一”。

任意一个十进制数  $N$  均可展开为

$$(N)_D = \sum k_i \times 10^i \quad (1-1)$$

其中,下角标 D 表示括号里的数  $N$  为十进制数,有时也用 10 表示。 $k_i$  是第  $i$  位的系数,它可以是 0~9 这 10 个数中的任何一个。10 为基数(base 或 radix), $10^i$  为第  $i$  位的加权(weight)。若整数部分的位数是  $n$ ,小数部分的位数为  $m$ ,则  $i$  包含从  $n-1$  到 0 的所有正整数和从  $-1$  到  $-m$  的所有负整数。

例如,十进制数 47.235 可写为

$$(47.235)_D = 4 \times 10^1 + 7 \times 10^0 + 2 \times 10^{-1} + 3 \times 10^{-2} + 5 \times 10^{-3}$$

## (2) 二进制

二进制(binary)与十进制的区别在于,数码的个数和进位的规律不同,十进制数用 10 个数,并且“逢十进一”;而二进制数则用两个数 0 和 1,并且“逢二进一”。

任意一个二进制数  $N$  可表示为

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

其中,下角标 B 表示括号里的数  $N$  为二进制数,有时也用 2 表示。 $k_i$  是第  $i$  位的系数,它可以是 0、1 这两个数中的任何一个。2 为基数, $2^i$  为第  $i$  位的加权。式中  $i$  的取值与式(1-1)中的规定相同。

例如,二进制数 1011 可写为

$$(1011)_B = 1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0$$

## (3) 十六进制

由于使用二进制数经常是位数很多,不便于书写和记忆,因此在数字计算机中经常采用十六进制(hexadecimal)来表示二进制数。十六进制数采用 16 个不同的数,分别用 0~9、A(10)、B(11)、C(12)、D(13)、E(14)、F(15)表示,而且“逢十六进一”。

任意一个十六进制数可以表示为

$$(N)_H = \sum k_i \times 16^i \quad (1-3)$$

其中,下角标 H 表示括号里的数  $N$  为十六进制数,有时也用 16 表示。 $k_i$  是第  $i$  位的系数。16 为基数, $16^i$  为第  $i$  位的加权。式中  $i$  的取值与式(1-1)中的规定相同。

例如,十六进制数 4F7 可写为

$$(4F7)_H = 4 \times 16^2 + 15 \times 16^1 + 7 \times 16^0$$

由于目前在微型计算机中普遍采用 8 位、16 位和 32 位二进制并行运算,而 8 位、16 位和 32 位的二进制数可以用 2 位、4 位和 8 位的十六进制数表示,因而用十六进制符号书写程序十分方便。

## (4) 任意进制

按照上述规律,任意进制数可以表示为

$$(N)_R = \sum k_i \times R^i \quad (1-4)$$

其中,下角标 R 表示括号里的数  $N$  为任意进制数, $k_i$  是第  $i$  位的系数。R 为基数, $R^i$  为第  $i$  位的加权。式中  $i$  的取值与式(1-1)中的规定相同。

例如,八进制数 705 可以写为

$$(705)_8 = 7 \times 8^2 + 0 \times 8^1 + 5 \times 8^0$$

## 2. 数制间的转换

### (1) 将任意进制转换为十进制

将二进制、十六进制和任意进制转换为十进制的方法是按照式(1-2)、式(1-3)和式(1-4)



展开,然后把所有的各项的数值按十进制数相加,就可以得到等值的十进制数了。例如:

$$(101.11)_B = 1 \times 2^2 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2} = (5.75)_D$$

## (2) 十进制转换为二进制

十进制数可分为整数和小数两部分,对整数和小数分别转换,再将结果排列在一起就得到转换结果。

### ① 整数的转换

假定十进制整数为 $(N)_D$ ,等值的二进制数为 $(k_n k_{n-1} \cdots k_0)_B$ ,则依式(1-2)可知

$$\begin{aligned} (N)_D &= k_n 2^n + k_{n-1} 2^{n-1} + \cdots + k_1 2^1 + k_0 2^0 \\ &= 2(k_n 2^{n-1} + k_{n-1} 2^{n-2} + \cdots + k_1) + k_0 \end{aligned} \quad (1-5)$$

式(1-5)表明,若将 $(N)_D$ 除以2,则得到的商为 $k_n 2^{n-1} + k_{n-1} 2^{n-2} + \cdots + k_1$ ,而余数为 $k_0$ 。

同理,可将式(1-5)除以2得到的商写成

$$k_n 2^{n-1} + k_{n-1} 2^{n-2} + \cdots + k_1 = 2(k_n 2^{n-2} + k_{n-1} 2^{n-3} + \cdots + k_2) + k_1 \quad (1-6)$$

由式(1-6)不难看出,若将 $(N)_D$ 除以2所得的商再次除以2,则所得的余数为 $k_1$ 。

以此类推,反复将每次得到的商再除以2,就可求得二进制数的每一位。

例如,将 $(23)_D$ 化为二进制数的方法如下:

$$\begin{array}{r} 2 \overline{)23} \cdots \cdots \cdots \text{余 } 1 \cdots \cdots \cdots k_0 \\ 2 \overline{)11} \cdots \cdots \cdots \text{余 } 1 \cdots \cdots \cdots k_1 \\ 2 \overline{)5} \cdots \cdots \cdots \text{余 } 1 \cdots \cdots \cdots k_2 \\ 2 \overline{)2} \cdots \cdots \cdots \text{余 } 0 \cdots \cdots \cdots k_3 \\ 2 \overline{)1} \cdots \cdots \cdots \text{余 } 1 \cdots \cdots \cdots k_4 \\ 0 \end{array}$$

故 $(23)_D = (10111)_B$ 。

### ② 小数的转换

若 $(N)_D$ 是一个十进制的小数,对应的二进制小数为 $(0.k_{-1} k_{-2} \cdots k_{-m})_B$ ,则根据式(1-2)可知

$$(N)_D = k_{-1} 2^{-1} + k_{-2} 2^{-2} + \cdots + k_{-m} 2^{-m}$$

将上式两边同乘以2得到

$$2(N)_D = k_{-1} + (k_{-2} 2^{-1} + k_{-3} 2^{-2} + \cdots + k_{-m} 2^{-m+1}) \quad (1-7)$$

式(1-7)说明,将小数 $(N)_D$ 乘以2所得乘积的整数部分即为 $k_{-1}$ 。

同理,将乘积的小数部分再乘以2又可得到

$$2(k_{-2} 2^{-1} + k_{-3} 2^{-2} + \cdots + k_{-m} 2^{-m+1}) = k_{-2} + (k_{-3} 2^{-1} + \cdots + k_{-m} 2^{-m+2}) \quad (1-8)$$

该乘积的整数部分即为 $k_{-2}$ 。

以此类推,将每次乘以2后所得到的乘积的小数部分再乘以2,便可求出二进制小数的每一位。

例如,将 $(0.8125)_D$ 化为二进制小数的方法如下: