

数字电子技术基础

广西南宁化工学校 周静益 主编

51.2

化学工业出版社

内 容 简 介

本书主要根据87年化学工业部电类教材编委会会议上通过的《数字电子技术基础理论》教材大纲试行草案编写而成的。书中系统地介绍了数字电路的基本组成单元,结合某些变例讲明数字电路的基本概念和基本分析方法,把定性分析和简单的定量估算结合起来,便于理解。在内容安排上尽可能做到深入浅出,重点突出、图文并茂、例题翔实、通俗易懂,便于自学。全书内容有数字电路基础知识、门电路、逻辑代数基础、组合逻辑电路、集成电路触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生及整形、数-模和模-数转换、数字电路的综合读图。各章都有小结并附有一定数量和深度的思考题与习题,以巩固和加深所学知识。

本教材适用于化工中专仪表自动化、化工电气自动化专业,也适用于其它中专工科电类专业,并可作为电类爱好者的自学读物。

中等专业学校教材
数 字 电 子 技 术 基 础

广西南宁化工学校 周静远 主编

责任编辑:徐世峰

封面设计:郑小红

化学工业出版社出版

(北京新华街七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本787×1092 1/32印张13字数304千字

1991年6月第1版 1991年6月北京第1次印刷

印 数 1-8,700

ISBN 7-5025-0863-5/G·233

定 价3.30元

前 言

本教材是以广西南宁化工学校仪表自动化专业试用(三届)教材《脉冲数字电路》交流讲义为基础,根据化学工业部电类教材编委会87年4月南宁会议上通过的《数字电子技术基础理论》教学大纲试行草案,并参照86年12月全国中等专业学校电子课程组起草的《电子技术基础》理论教学(多学时)大纲编写而成的。适用于化工中专仪表自动化专业、化工电气自动化专业,也适用于其它中专工科电类专业。通过本课程的学习,为今后进一步学习电动仪表、数字仪表、电力控制及计算机原理等课程提供必要的基础知识。

本教材内容共有九章,包括数字电路基础知识、门电路、逻辑代数基础、组合逻辑电路、集成电路触发器、时序逻辑电路、脉冲波形的产生及整形、数-模及模-数转换器、综合读图练习。

考虑到本课程是一门重要的专业技术基础课,必须侧重于基本原理和电路分析方法,为此目的,本书特别注重物理概念,把定性分析与简单的定量估算结合起来。在内容安排上尽可能做到深入浅出、重点突出、图文并茂、例题翔实,通俗易懂、便于自学。各章都有小结并附有一定数量和深度的思考题与习题,以巩固和加深所学的知识。

本课程参考教学时数为80学时,教材中凡用*号的标注部分为自学内容。

本教材中第一至第七章由广西南宁化工学校周静益执笔,第八、九两章由湖南省化工学校邓允执笔,全书由周静益统稿,由福建机电学校高级讲师郑默贤主审。

本教材得以出版,凝聚了许多同志的辛勤劳动,原试用教材《脉冲数字电路》交流讲义的第七至九章是由西安化校叶虹和王世方两位老师执笔的。化工中专电类教材编审委员会主任瞿昌、副主任徐国和、童乃涛老师对本教材给予了许多具体的指导和帮助。在审稿过程中为了保证审稿会的按期进行,湖南化校贾明森副校长给予了很多的支持和帮助。福建机电学校郑德贤老师、化工中专电类教材编委会的庄泰华、张维菊等老师提出了许多宝贵意见。

在定稿过程中,广西大学喻锡臣教授为本书稿进行了文字加工,广西南宁化工学校谢文明和沈瑞莲老师为绘制插图与整理书稿做了不少工作。

值此出版之际谨向广西南宁化工学校、上海化工学校、湖南化工学校的领导及所有为本书出版作出贡献的同志们表示深切的谢意。

由于笔者水平有限,错误和不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

周静益

1990年4月

目 录

绪论.....	1
第一章 数字电路基础知识.....	2
第一节 数制及其相互转换.....	2
一、二进制计数法.....	2
二、十进制数和二进制数的相互转换.....	2
三、其它进制数的表示法及其相互转换.....	4
第二节 半导体二极管的开关特性及其应用.....	6
一、二极管的开关作用.....	6
二、二极管的开关时间与开关参数.....	6
*三、二极管限幅器.....	8
第三节 半导体三极管的开关特性.....	10
一、三极管的开关作用.....	10
二、三极管的开关时间和开关参数.....	12
第四节 金属-氧化物-半导体 (MOS) 场效应管的开关特性.....	13
一、MOS管的开关作用.....	14
二、MOS管的开关时间.....	15
本章小结.....	15
思考题与习题.....	15
第二章 门电路.....	18
第一节 门电路有关的几个问题.....	18
一、逻辑门电路的基本概念.....	18
二、三种基本的逻辑关系.....	18
三、与逻辑关系有关的几个问题.....	19
第二节 分立元件门电路.....	19
一、二极管与门.....	19
二、二极管或门.....	20
三、非门(反相器)电路.....	22
四、复合门电路.....	25
第三节 三极管-三极管集成逻辑门(TTL).....	27
一、典型的TTL集成与非门电路.....	27
二、TTL与非门电路电压传输特性.....	29
三、TTL与非门的带负载能力.....	31
四、采用多发射极三极管提高TTL与非门工作速度.....	32
五、TTL与非门的主要参数.....	33

六、TTL集成门电路使用中的几个实际问题	41
第四节 TTL的其它类型门电路	37
一、集电极开路与非门(OC门)	38
二、三态门(TSL门)	40
三、异或门	41
*第五节 其它双极型门电路简介	42
一、高阈值逻辑门电路HTL	42
二、集成注入逻辑电路I ² L	43
三、射极耦合逻辑电路ECL	43
第六节 MOS集成逻辑门电路	44
一、NMOS反相器	44
二、NMOS门电路	45
三、CMOS集成门电路	46
四、MOS集成门电路使用中应注意的事项	50
本章小结	51
思考题与习题	52
第三章 逻辑代数基础	57
第一节 概述	57
一、逻辑表达式与真值表	37
二、逻辑函数与逻辑图	57
第二节 逻辑代数基本公式和定理	58
一、基本公式	58
二、与普通代数相似的定理	59
三、逻辑代数的一些特殊定理	59
第三节 几个常用公式	60
第四节 逻辑代数运算的基本规则	61
一、代入规则	61
二、反演规则	61
三、对偶规则	61
第五节 逻辑函数的化简	62
一、公式化简法	62
二、图形化简法	63
本章小结	70
思考题与习题	71
第四章 组合逻辑电路	73
第一节 概述	73
第二节 组合逻辑电路的一般分析方法	73
第三节 组合逻辑电路的基本设计方法	74
一、设计的一般步骤	74

二、双极型上式的行准式	75
第四节 加法器	78
一、半加器	78
二、全加器	79
第五节 编码器	82
一、二进制编码器	82
二、二进制译码器	83
第六节 译码器及显示电路	84
一、数码显示器	84
二、驱动七段数码管的二进制译码器	87
二、中规模BCD七段译码器	89
*第七节 数据分配器与数据选择器	91
一、数据分配器	91
二、数据选择器(MUX)	92
第八节 组合逻辑电路中的竞争冒险	93
一、组合逻辑电路中的竞争冒险	93
二、检查竞争冒险现象及其消除方法	94
本章小结	96
思考题与习题	96
第五章 集成电路触发器	99
第一节 基本触发器	99
一、基本RS触发器	99
二、同步RS触发器	101
第二节 主从触发器	104
一、主从JK触发器	104
二、集成主从JK触发器	106
三、T触发器	107
第三节 维持阻塞D触发器	108
第四节 边沿JK触发器	119
第五节 CMOS主从D触发器	112
第六节 不同类型触发器逻辑功能的转换	113
一、公式法转换	113
二、图形法转换	114
第七节 触发器的脉冲工作特性	115
一、主从JK触发器的脉冲工作特性	115
二、维持阻塞D触发器的脉冲工作特性	116
第八节 集成单元触发器主要参数	117
一、立时参数(静态)	117
二、开关参数	117

第九节 触发器应用举例	118
本章小结	119
思考题与习题	120
第六章 时序逻辑电路	124
第一节 概述	124
第二节 寄存器	124
一、数码寄存器	125
二、移位寄存器	125
三、集成移位寄存器	128
第三节 计数器	130
一、二进制异步计数器	130
二、非二进制计数器	134
三、用中规模集成电路构成N进制计数器	141
*第四节 随机存取存储器(RAM)	143
一、存储单元	144
二、存储器	145
第五节 时序逻辑电路的设计举例	146
本章小结	149
思考题与习题	149
第七章 脉冲波形的产生及整形	152
第一节 施密特触发器	152
一、带电压偏移二极管的施密特触发器	152
二、回差电压可调施密特触发器	154
三、施密特触发器的应用	155
第二节 单稳态触发器	156
一、微分型单稳态触发器	156
二、积分型单稳态触发器	158
三、单稳态触发器的应用	159
第三节 多谐振荡器	160
一、环形多谐振荡器	160
二、RC环形多谐振荡器	161
三、石英晶体多谐振荡器	162
第四节 集成定时器	162
一、CMOS集成定时器	163
二、555定时器的典型应用	164
本章小结	168
思考题与习题	168
第八章 数-模和模-数转换	171
第一节 概述	171

第二节 数-模(D/A)转换器	171
一、权电阻D/A转换器	172
二、T形电阻D/A转换器	173
三、集成D/A转换器和主要技术参数	176
第三节 模-数(A/D)转换器	177
一、逐次逼近A/D转换器	177
二、双积分型A/D转换器	180
本章小结	183
思考题与习题	184
第九章 数字电路的综合读图	185
第一节 数字电路读图的一般方法	185
第二节 数字钟电路简介	185
本章小结	191
附录	192
附录 I 常见的二-十进制编码及循环码	192
附录 II 常用逻辑单元图形符号新旧对照表	194
附录 III 部分双极型数字集成电路产品国内外型号对照表	196

绪 论

在近代电子技术领域里，新型的电子电路变化无穷，但根据电路信号的特点，可以将电子电路基本上分成两大类：

一类是数字电路，另一类是模拟电路。在数字电路中工作的是数字信号，信号在时间上和数值上不连续变化，其数值（幅度）大小是表示两个不同状态。如用一个电子电路去记录一条生产线上输出的零件数，当有输出时计入1，没有输出时则为0，这就是数字信号。在模拟电路中工作的信号是模拟信号，其信号在时间上和数值上是连续变化的。例如，用热电偶去测量温度时，由于温度变化是一个连续变量所以转换成电压信号时也是一个连续变化的模拟信号。

数字信号常用二进制两个数码“0”、“1”表示；数字电路中工作的二极管、三极管均处于开关状态，并用“0”、“1”两个数字表示导通和断开两个状态；数字电路中研究的是各个基本单元状态之间的关系，即输入信号与输出信号之间的逻辑关系；数字电路的逻辑分析方法主要用真值表、卡诺图、特性方程及状态方程、状态转换图，主要工具是逻辑代数。

数字电路在许多技术领域中得到广泛的应用，如通讯系统中的信息传递、工业生产中的自动控制、测量系统中的数字测量、计算机系统数值计算等。

数字电路之所以得到如此广泛的应用是由于它具有如下的优越性：

1. 电路简单，易于集成；
2. 功耗低；
3. 抗干扰能力强；
4. 精度高；
5. 速度快。

由于数字信号是靠数字电路产生的脉冲信号来实现的，为了保证数字电路中的脉冲信号有足够的幅度和必要的转换速度，对脉冲信号波形必需有一定要求，这个问题将在本教材第七章中详细讨论。

第一章 数字电路基础知识

本章将阐述计数体制及其相互转换、二极管、三极管和场效应管的开关特性。

第一节 数制及其相互转换

一、二进制计数法

在日常生活中，我们用的计数方法是十进制计数制，就是用十个符号 0、1、2……9 来计数。如果用一位不够，就用二位（10、11、……99）；二位不够，就用三位（100、101、……999）……。这种计数的原则是逢十进一，就是计到九时，如果加 1，就为十，写作 10。

在数字系统中，因为是用“开”和“关”或“高”和“低”两个状态来计数，所以只能是对应于两个符号，“0”和“1”。用“0”和“1”两个数符来计数时，它的规律就变为逢二进一。当用一位数计数时计到 1 时，如果再加 1，就变为 10（读作“壹零”表示 2）；用二位数计到 11 时，如果再加 1，就变为 100（读作“壹零零”表示 4），依此类推。

二、十进制数和二进制数的相互转换

对于一个十进制数，如 6789₁₀。（注脚 10 表示十进制数），它实际上是

$$6789_{10} = 6(10)^3 + 7(10)^2 + 8(10)^1 + 9(10)^0$$

千位数 百位数 十位数 个位数

即由千位数、百位数、十位数和个位数相加而得。每位都是以十为基数，从右向左幂次从零开始。依次递增。每位再乘上它的相应的系数，就是这一位的数。所以，对于一个 n 位的十进制数 N_{10} 便可写成

$$\begin{aligned} N_{10} &= a_{n-1}(10)^{n-1} + a_{n-2}(10)^{n-2} + \cdots + a_2(10)^2 + a_1(10)^1 + a_0(10)^0 \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} a_i(10)^i \end{aligned} \quad (1-1)$$

其中 a_i 是相应 i 位（即 10^i ）的系数。如果略去加号和 10 的幂次项，便简化为常用的表示形式

$$N_{10} = a_{n-1}a_{n-2}a_{n-3}\cdots a_1a_2a_1a_0 \quad (1-2)$$

对于一个二进制数 N_2 ，也可作类似的表达如下：

$$\begin{aligned} N_2 &= a_{n-1}(2)^{n-1} + a_{n-2}(2)^{n-2} + \cdots + a_3(2)^3 + a_2(2)^2 + a_1(2)^1 + a_0(2)^0 \\ &= \sum_{i=0}^{n-1} a_i(2)^i \end{aligned} \quad (1-3)$$

它与十进制数相比，只是将基数改为 2，系数 a_i 只有两个符号，即“0”或“1”，而这些都是 2^0 、 2^1 ……我们称它为“权”。如果略去加号和 2 的幂次项，只写出各项的系数，便写成

$$N_2 = a_{n-1}a_{n-2}\cdots a_1a_2a_1a_0 \quad (1-4)$$

如 $1(2)^3 + 1(2)^1 + 0(2)^0 + 1(2)^2 + 0(2)^1 + 0(2)^0 = (110100)_2$

根据以上两种计数法的分析,很容易得到它们转化的规律。下面用几个实例来说明转化的方法:

〔例1-1〕 将二进制 $N_2=(110100)_2$ 转化为十进制数。

解:按式(1-3)将 N_2 改写成如下形式得十进制数。

$$N_2=(110100)_2=1(2)^5+1(2)^4+0(2)^3+1(2)^2+0(2)^1+0(2)^0=(52)_{10}$$

〔例1-2〕 将十进制数 $(52)_{10}$ 转化为二进制。

解:1. 观察法

参照式(1-3)观察给定的十进制数中所包含的2的最高次幂(该项系数为1),再将十进制数减去该2的最高次幂之值,如所得差值中还含有2的幂次,则继续将此值减去2的幂次项值,按同样的方法处理直至差值为0。然后按式(1-3)的形式从最高次幂递减至0次幂,各项乘以相应的系数逐项相加,但其中凡经过试算所得的各相应2的幂次项的各项系数为1,而其余各幂次项系数均为0。例如

(1) 观察52中包含2的最高次幂为 $2^5=32$,再求出差值, $52-32=20$;

(2) 观察20中可包含2的最高次幂为 $2^4=16$,再求出差值, $20-16=4$;

(3) 观察4中可包含2的最高次幂为 $2^2=4$,则差值为 $4-4=0$ 。

然后按式(1-3)的形式逐项递减相加有

$$\begin{aligned}(52)_{10} &= 1(2)^5 + 1(2)^4 + 0(2)^3 + 1(2)^2 + 0(2)^1 + 0(2)^0 \\ &= (110100)_2\end{aligned}$$

2. 除2余数法

将十进制数除2得商和余数(对应于二进制数最低位的系数),再将商除2又得余数直至商为0。然后将相应的系数乘以位数(2的幂)相加而得。将 $(52)_{10}$ 转换为二进制数的过程有如表1-1所示。

表 1-1 十二进制转换计算表

求 商	余数 (对应位系数)	位 数
$52 \div 2 = 26$	0	2^0 (二进制的最低位)
$26 \div 2 = 13$	0	2^1
$13 \div 2 = 6$	1	2^2
$6 \div 2 = 3$	0	2^3
$3 \div 2 = 1$	1	2^4
$1 \div 2 = 0$	1	2^5 (二进制的最高位)

由表1-1可以看出:有

$$(52)_{10} = 1(2)^5 + 1(2)^4 + 0(2)^3 + 1(2)^2 + 0(2)^1 + 0(2)^0 = (110100)_2$$

对于十进制非整数可以采用十进制小数记法表示。例如,数 $(1.8125)_{10}$ 可写成

$$(1.8125)_{10} = 1(10)^0 + 8(10)^{-1} + 1(10)^{-2} + 2(10)^{-3} + 5(10)^{-4}$$

同样,我们也可以用二进制小数记法表示一个二进制非整数,如 $(1.1101)_2 = 1(2)^0 + 1(2)^{-1} + 1(2)^{-2} + 0(2)^{-3} + 1(2)^{-4}$ 。

将十进制数的小数部分转化为二进制数时,只要将十进制小数乘以2,若所得乘积 ≥ 1 ,由所得乘积小数点前的整数数字作为二进制数的系数,则二进制数的系数就是1。再将此

乘积减去1, 把所得的差值再乘以2, 如果这个乘积 <1 , 则二进制数的系数就是0。再继续把这个乘积乘以2, 直至所得乘积减去1的差值为0或接近于0为止, 如此, 从高位到低位, 得到转换结果。

将 $(0.8125)_{10}$ 转换为二进制数的过程如表1-2所示。

表 1-2 十进制数-二进制数的转换

十进制数0.8125	$0.8125 \times 2 = 1.625$	$0.625 \times 2 = 1.25$	$0.25 \times 2 = 0.5$	$0.5 \times 2 = 1.0$
	$1.625 - 1 = 0.625$	$1.25 - 1 = 0.25$	0.5	$1 - 1 = 0$
二 进 数	1 (高位)	1	0	1 (低位)

由表1-2可以看出, 有

$$(0.8125)_{10} = (0.1101)_2$$

必须指出, 即使十进制的小数部分具有有限数位而它与等效的二进制却是无限位的, 亦即最终的差值不一定等于零, 而是只能接近于零。

三、其它进制数的表示法及其相互转换

在数字系统中, 除了用二进制和十进制以外, 常用的还有八进制和十六进制。在八进制中, 用0、1、2……7八个数码来计数, 它的基数为8。十六进制的数码除0、1、2……9的十个数码外再加A、B、C、D、E、F六个数码, 共计十六个数码, 它的基数为十六。

表1-3列出了十进制、八进制、十六进制和二进制在转换时的对照关系。

表 1-3 十进制、八进制、十六进制、二进制对照表

十进制	八进制	十六进制	二进制	十进制	八进制	十六进制	二进制
0	0	0	0	17	21	11	10001
1	1	1	1	18	22	12	10010
2	2	2	10	19	23	13	10011
3	3	3	11	20	24	14	10100
4	4	4	100	21	25	15	10101
5	5	5	101	22	26	16	10110
6	6	6	110	23	27	17	10111
7	7	7	111	24	30	18	11000
8	10	8	1000	25	31	19	11001
9	11	9	1001	26	32	1A	11010
10	12	A	1010	27	33	1B	11011
11	13	B	1011	28	34	1C	11100
12	14	C	1100	29	35	1D	11101
13	15	D	1101	30	36	1E	11110
14	16	E	1110	31	37	1F	11111
15	17	F	1111	32	40	20	10000
16	20	10	10000				

1. 二-八进制转换

将二进制数转换成八进制数只要将二进制数从小数点开始分别向左、右按三位一组撇开（不足三位补一位0），即可依次转换为八进制数。

〔例1-3〕 试将二进制数 $(10010101.1011)_2$ 转换成八进制数。

解：将 $(10010101.1011)_2$ 改写成

	高位						低位
二进制数	010	010	101	•	101	100	
八进制数	2	2	5	•	5	4	

转换结果为 $(10010101.1011)_2 = (225.54)_8$ 。

〔例1-4〕 试将八进制数 $(175.714)_8$ 转换成二进制数。

解：将八进制数的每一位转换为相应的二进制数。

八进制数	1	7	5	•	7	1	4
二进制数	001	111	101	•	111	001	100

转换结果为 $(175.714)_8 = (1111101.1110011)_2$ 。

二进制数最高位前面和最低位后面各有两个无意义的零，将它们舍去。

2. 二-十六进制转换

将二进制数转换成十六进制数，只要从小数点开始分别向左、右按四位一组撇开（不足四位用0补上），然后将每一组转换为相应的十六进制数。

〔例1-5〕 试将二进制数 $(110110101.011101)_2$ 转换成十六进制数。

解：二进制数	0001	1011	0101	•	0111	0100
十六进制数	1	B	5	•	7	4

转换结果为 $(110110101.011101)_2 = (1B5.74)_{16}$ 。

〔例1-6〕 试将十六进制数 $(8F.41)_{16}$ 转换成二进制数。

解：十六进制数	8	F	•	4	1
二进制数	1000	1111	•	0100	0001

结果为 $(8F.41)_{16} = (10001111.01000001)_2$ 。

四、二-十进制码（简称BCD码）

BCD码是用一组四位二进制码来表示一位十进制数的编码方法。四位二进制码有十六种组合，只要从中任取十种组合就可以用来代表0~9十个数，因此四位二进制码可以编出很多种BCD码，最常用的是8-4-2-1BCD码如表1-4所示。它是一个有权码，其各位的权是（从最高有效位至最低有效位）8、4、2、1。每一组四位二进制码代表一位十进制数。一个 n 位的十进制数，需要用 n 个四位二进制码来表示。

〔例1-7〕 试将十进制数 $(216)_{10}$ 编成8-4-2-1BCD码。

解：十进制数	2	1	6
BCD码	0010	0001	0110

即 $(216)_{10} = (001000010110)_{8421}$ 。

除了8-4-2-1BCD码外还有其它有权码如，5421码、2421码……等，无权码及余3码等

表 1-4 8-4-2-1BCD码

十进制数	8-4-2-1BCD码	十进制数	8-4-2-1BCD码	十进制数	8-4-2-1BCD码
0	0000	4	0100	7	0111
1	0001	5	0101	8	1000
2	0010	6	0110	9	1001
3	0011				

(见附录 I 及其它参考书)。

第二节 半导体二极管的开关特性及其应用

一、二极管的开关作用

二极管具有单向导电性，当阳极和阴极之间加上正向电压时便导通，正向压降很小（普通硅管约0.7V），二极管相当于一个有压降的闭合开关，其等效电路如图1-1(a)所示。当阳极和阴极之间加上负向电压时，二极管截止其反向电阻很大，对于硅管其值约为数十兆欧，二极管相当于一个断开的开关，其等效电路如图1-1(b)所示。

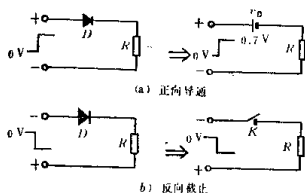


图 1-1 硅二极管等效电路

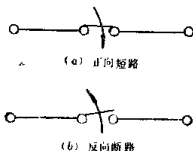


图 1-2 简化的二极管等效电路

在低频电路中，我们常将二极管看成是一个理想开关，即认为它在截止时是断路，导通时是短路，这时的等效电路如图1-2所示。

二极管从正向导通到反向截止，或从反向截止到正向导通这两种不同的工作状态的转换过程中表现出开关特性。

二、二极管的开关时间与开关参数

1. 开关时间

图1-3所示为二极管的内部结构，图中空间电荷区（PN结）具有正、负离子，将此视为结电容。

下面通过分析二极管的开关过程介绍开关时间。图1-4所示为二极管开关过程示意图。

当PN结加上正向电压时，P区空穴克服内电场阻力扩散到N区，一部分与N区内的电子复合，另一部分在该区的一定范围内存储起来；同样，N区内的电子扩散到P区后也形成存储电荷。存储电荷分别积聚在PN结的交界面上，将其视为扩散电容，如图1-3中所

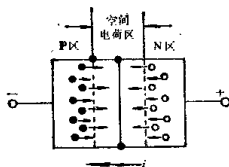


图 1-3 存储电荷形成区

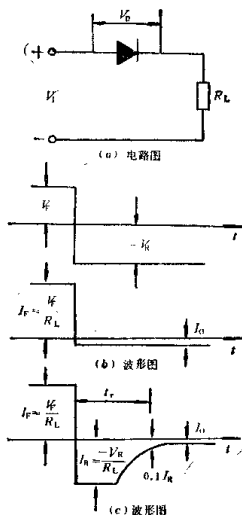


图 1-4 二极管开关过程

示，好似由扩散电流所引起的扩散电容在充电。此时，空间电荷区减弱（PN结变薄），相当于结电容放电，正向电流 $I_F \approx \frac{V_F}{R_L}$ (R_L 为负载电阻)。二极管从反向截止转入正向导通所需的时间称开通时间，这段时间很短。

当外加电压突然由正跳变到负时，如果二极管是理想开关，负载上的电流波形如图 1-4(b) 所示，正向电流 $I_F \approx \frac{V_F}{R_L}$ ，反向电流 $I_R \approx 0$ 。但实际电流波形如图 1-4(c) 所示，这是由于存储电荷在反向电压作用下形成漂移电流，驱散存储电荷好似扩散电容放电。在存储电荷未被驱散之前，PN 结的空间电荷区仍然很窄，PN 结电阻很小，压降很小，所以反向电流 $I_R \approx -\frac{V_R}{R_L}$ 。在一定时间内，反向电流驱散了存储电荷，反向电压使空间电荷区

(PN 结) 由窄变宽，好似结电容充电，管子内电阻加大，反向电流由大变小趋近于 I_0 ，二极管逐渐转入截止状态，这段时间较长。

上述两种转换过程的实质是存储电荷的积累与消散的过程。

图 1-4(c) 中 t_{rr} 为二极管从外加反向电压的瞬间开始到反向电流下降到最大反向电流的十分之一所需的时间，称反向恢复时间。由此可见，影响二极管由导通到截止转换速度的主要因素是反向恢复时间。因此，若要提高开关速度必须减少存储电荷，或减小二极管的结面积（减小结电容）。

2. 开关参数

在整流电路中已介绍过二极管的两个常用参数即最大平均整流电流 I_F 及最大反向工作电压 V_R 。在数字电路中,二极管在开关状态下工作时还有另外两个参数:

(1) 反向恢复时间 t_{rr} t_{rr} 是指二极管在规定的负载,正向电流及最大反向瞬态电流下,所测出的反向恢复时间。在使用时脉冲信号的工作频率应小于 t_{rr} 倒数的十分之一。

(2) 零偏压电容 这个电容是指在二极管两端电压为零时,扩散电容及结电容之和。例如,2CK15的零偏压电容值通常小于5PF。

*三、二极管限幅器

在数字技术中二极管除组成门电路外,常作限幅器和钳位器。

1. 限幅器

限幅器又称“削波电路”。根据限幅的性质不同可分为上限幅、下限幅和双向限幅三种。根据二极管在电路中的连接方式不同又可分为串联限幅与并联限幅两种。

(1) 串联限幅器 图1-5(a)为一串联限幅器。由于二极管 D 与输出端负载串联,所以称串联限幅器。其电路的工作过程如下:假定二极管的开关特性理想(正向电阻很小),输入如图1-5(b)所示电压 v_i 。当输入电压为正半周 $v_i > 0$ 时二极管 D 导通,由于二极管为理想元件,导通后正向压降很小,因此输出电压 v_o 近似等于输入电压 v_i 。而当输入电压 v_i 为负半周 $v_i < 0$ 时二极管截止,输出电压 v_o 近似为零。因此输入波形的负半周被削去,实现了下限幅,输出波形如图1-5(c)所示。

输入输出电压的关系可用下式描述:

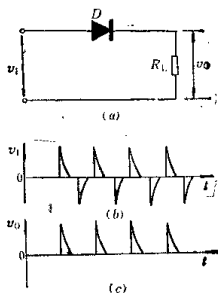


图 1-5 二极管串联下限幅器

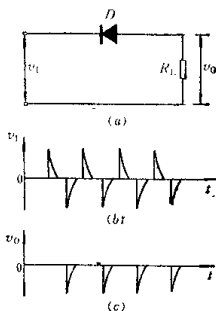


图 1-6 二极管串联上限幅器

$$\begin{aligned} v_i > 0 \text{ 时, } v_o &\approx v_i \\ v_i \leq 0 \text{ 时, } v_o &= 0 \end{aligned} \quad (1-5)$$

如果将图1-5(a)电路中的二极管反接(如图1-6(a)所示),则输出波形如图1-6(c)所示。输入电压 v_i 的正半周被削去,实现了上限幅。

输入输出电压的关系为:

$$\begin{aligned} v_i < 0 \text{ 时, } v_o &\approx v_i \\ v_i \geq 0 \text{ 时, } v_o &= 0 \end{aligned} \quad (1-6)$$

由此可见,在二极管串联限幅器中,不论是下限幅器还是上限幅器,都是利用二极管截止来限幅的。由于是理想二极管,导通时输出电压近似等于输入电压。

(2) 并联限幅器 图1-7(a)为并联限幅器,因为二极管与输出相并联,所以称并联限幅器。

工作过程如下:仍假定二极管为理想开关,当输入电压 $v_i \geq 0$ 时,二极管截止,输出电压 v_o 近似等于输入电压 v_i ,即 $v_o \approx v_i$ 。当输入电压 $v_i < 0$ 时,二极管导通近似于短路,因此输出电压 v_o 等于零,即 $v_o = 0$ 。输出输入电压波形如图1-7(c)所示。

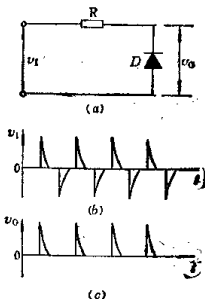


图 1-7 二极管并联下限幅器

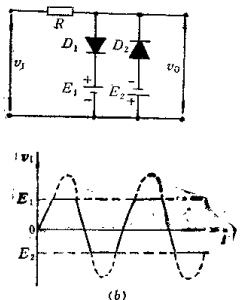


图 1-8 并联双向限幅器

(3) 双向限幅器 将上限幅器和下限幅器联合运用,并用两个直流电源 E_1 和 E_2 控制限幅电平,以削去输出电压中不需要的上下部分,选出我们所需要的中间部分,组成了双向限幅器如图1-8(a)所示。

当输入电压 $v_i > E_1$ 时, D_1 导通,二极管相当于短路,输出电压 v_o 等于限幅电平 E_1 ,此时二极管 D_2 截止,相当于开路。当输入电压 $v_i < -E_2$ 时,二极管 D_2 导通,相当于短路,输出电压 v_o 等于限幅电平 $-E_2$,此时二极管 D_1 截止,相当于开路。当输入电压大于 $-E_2$ 、且小于 $+E_1$ 时,二极管 D_1 、 D_2 均截止,输出电压都等于输入电压 $v_o = v_i$,从而选出了输入电压中间部分 $(-E_2 < v_o < E_1)$,削去了输入电压的上下部分,输出波形如图1-8(b)、(c)所示。

以上分析,我们都将二极管当作理想元件,实际二极管存在正向电阻,截止时存在反向电阻,对限幅器的工作是有影响的。输出波形会出现如图1-9(b)所示的情况。因此,不论是串联限幅器还是并联限幅器,电阻 R 都要选择得使二极管正向电阻 $R_{D\text{正}} \ll R$,二极管反向电阻 $R_{D\text{反}} \gg R$,尽可能减小二极管正、反向电阻的影响。

值得注意的是,实际二极管正向导通时具有压降,如硅管为0.7V、锗管为0.3V,由其组成的限幅器的限幅电平是可以改变的。例如在上限幅电路图1-6的电阻中串接了一个电源(如图1-10所示),当输入信号 $v_i = 0$ 时,二极管导通输出电压 $v_o = 0.7\text{V}$;当输入电压