

# 脉冲与数字技术导论

蒋之春 编

高等教育出版社

# 脉冲与数字技术导论

龚之春 编

高等教育出版社

(京) 112 号

## 内 容 简 介

本书为“脉冲与数字电路”课程教学参考书。为适应 LSI 及 VLSI 的发展和应, 满足不同层次教学要求, 大大压缩了一般教材中的基础内容, 突出功能部件的外特性, 并适当应用例子加以说明。尤其对 A/D 及 D/A 转换等接口作了较全面的论述。在每章讲述主要功能部件之后, 列表给出商品电路及其主要技术参数, 以利实用。

全书共十一章, 主要内容有: 脉冲与数字信号的概念, 脉冲电路中的半导体器件, 基本逻辑函数及逻辑门, 逻辑门电路, 组合逻辑电路, 触发器和时序逻辑电路, 半导体存储器, 数码的变换与显示, 算术运算电路, 模/数与数/模转换电路, 脉冲波形的产生。本书全部采用国家标准图形符号, 为利于推广和普及, 还做了必要的介绍。书末有适题习题。

本书也可作为高等学校工科电子类、通信类专业的教材使用, 还可供其他专业师生及工程技术人员参考。

责任编辑 姚玉洁

## 图书在版编目(CIP)数据

脉冲与数字技术导论/龚之春编。—北京: 高等教育出版社, 1995

ISBN 7-04-005402-7

I. 脉… II. 龚… III. ①脉冲电路-高等学校-教学参考资料 ②数字电路-高等学校-教学参考资料 IV. ①TN78 ②TN79

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 05898 号

\*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京发行所发行

中国科学院印刷厂印装

\*

开本 850×1168 1/32 印张 16.75 字数 430 000

1995 年 10 月第 1 版 1995 年 10 月第 1 次印刷

印数 0001—1 163

定价 13.90 元

## 前 言

近十余年来,半导体集成电路的日益发展,使广大线路工程师所处理的对象,早就从分立元件脱离,而经过中、小规模集成电路,进入了大规模或超大规模电路的领域。目前各式各样的定制或半定制电路进入市场,就是这种发展趋势的最好说明。许多超大规模电路,其实本身就是一个复杂的系统,因为它们已经可以相对独立地运行。这类器件内部结构复杂,使用时往往需先经编程,或配上适当接口。这样,就使用户把注意力主要放在它的编程与接口上,而无暇顾及内部电子线路的运行机理。后者将由从事微电子技术的专业人员去研究、设计或制造,虽然许多基本原理仍应归属于电子线路的范畴,但电路的外形已面目全非,而所用的工具及知识也远远超出原来电子线路课程大纲所规定的内容。

在这种情况下,作为“电子线路”课程一个重要的分支——“脉冲与数字电路”课程,其教学要求亦应有所调整;相应地在讲授、作业及实验等环节的取材上也希望作出安排。例如,一些原定的基础技术,现在的重要性已大为降低,与实际的联系变弱了,它们仅在教学过程中保留承上启下的作用。所以,在本书编写中,将逻辑代数的讨论及练习、晶体管开关及逻辑门、触发器、存储器等功能组件内部结构的分析,都作了压缩性的调整。一些应用虽广、但操作比较简单的功能性组件,如集成计数器等,则仅简略讲明其工作的基本原理,并举适当应用例子,点到为止。因为学者还可通过实验及课程设计等机会,进一步掌握它们。而有些数字或逻辑系统,操作比较复杂,有时还需进行方案挑选和论证,例如模/数转换等接口电路,本书就作了较为全面的讨论,并介绍较多商品电路作参考,以供比较和选择。

本书对异步逻辑部件、高速脉冲的产生和传输、总线系统和微程序控制以及计算机辅助分析、设计和测试等内容,都未作专门的讨论,其原因有二:一是限于篇幅;二是这些内容都很重要,也许正是学者即将从事的领域,但它们在学过有关的专业技术课或积累一定的工作经验后,是不难理解和掌握的。

鉴于在同类教材或参考书中,采用 GB4728.12-85《电气图用图形符号 二进制逻辑单元》所制定的逻辑符号,目前还不够普及,所以本书在采用这套国标图形符号的同时,还对符号本身作了必要的解释,并举例应用,目的是加速推广普及,使我国的技术文件早日统一于国标,并与国际标准接轨。

为使讲授的功能部件能与实际型号有较好的对应,本书采用了参考书[22]的编写特色,即在讨论重要功能电路之后,紧接着介绍有关的商品电路及其主要选择指标,以加强联系,有的还包括某些器件图形举例。看起来,这仅是有关器件或电路手册中某几种国外型号的罗列而已,但相信对初学者来说是有很大好处的。

以上所述,就是编写本书时有关章、节内容取材安排等方面的考虑。由于本人孤陋寡闻,水平有限,上述想法难免是井底观天,写出来以便祈求各位专家和广大读者的批评指正,编者将衷心地欢迎和感谢。初稿承清华大学电子工程系刘宝琴副教授细心审阅,提出许多宝贵意见,并指出多处错误,使本书润色不少,获益匪浅。在编写过程中,还得到了国家教育委员会高等学校工科电子线路课程指导小组组长、东南大学电子工程系谢嘉奎教授的鼓励与支持,以及高等教育出版社姚玉洁编审的具体指导与帮助,才使本书顺利成形,编者借此机会向他们一并表示深切的谢意。

杭州电子工业学院 龚之春

1994年盛夏写于杭州翠苑寓所

# 目 录

<b>第 1 章 脉冲与数字信号的概念</b> .....	1
1.1 脉冲波形的概念 .....	1
1.2 脉冲通过线性电路 .....	3
1.3 脉冲波形在电子系统中的应用 .....	8
1.4 数字信号的概念 .....	10
1.5 数字的表示方法 .....	12
1.5.1 正数的自然二进制 (BIN) 表示法 .....	13
1.5.2 八进制 (OCT) 和十六进制 (HEX).....	16
1.5.3 正整数的二进制 (BCD) 表示法 .....	17
1.5.4 有正、负号的二进制整数表示法 .....	19
1.5.5 BCD 数的原码和反码 .....	24
1.6 字符的表示法 .....	24
<b>第 2 章 脉冲电路中的半导体器件</b> .....	27
2.1 半导体二极管的特性曲线和等效电路 .....	27
2.2 二极管在脉冲电路中的应用 .....	31
2.2.1 二极管限幅器 .....	31
2.2.2 二极管钳位器 .....	34
2.2.3 稳压二极管的应用 .....	36
2.3 二极管的开关特性 .....	37
2.4 晶体管特性曲线及其大信号等效电路 .....	39
2.5 晶体管反相器 .....	43
2.6 晶体管的开关特性 .....	45
2.7 场效应晶体管 (FET) .....	48
2.7.1 场效应管的分类 .....	48
2.7.2 结型场效应管的特性和应用 .....	48
2.7.3 金属-氧化物-半导体场效应管的特性和应用 .....	52
2.8 光电半导体器件 .....	55

2.8.1 光敏电阻 .....	33
2.8.2 光敏二极管和晶体管 .....	56
2.8.3 发光二极管 (LED) .....	60
2.8.4 光耦合器 .....	61
2.8.5 附 液晶显示器 (LCD) .....	61
<b>第 3 章 基本逻辑函数及逻辑门</b> .....	<b>63</b>
3.1 基本逻辑函数 .....	63
3.1.1 三种基本逻辑函数 .....	63
3.1.2 逻辑代数的运算定律及规则 .....	64
3.2 逻辑函数的真值表 .....	67
3.3 逻辑函数的卡诺图 .....	71
3.4 逻辑门及其图形符号 .....	79
3.4.1 二进制逻辑单元符号的组成 .....	79
3.4.2 导出的逻辑门 .....	80
3.5 逻辑电平及正、负逻辑 .....	85
<b>第 4 章 逻辑门电路</b> .....	<b>90</b>
4.1 早期的晶体管逻辑门电路 .....	90
4.2 晶体管-晶体管逻辑门 (TTL) .....	92
4.2.1 TTL 门电路的工作原理 .....	93
4.2.2 TTL 门电路的外部特性及参数 .....	98
4.2.3 TTL 电路的其他输出和输入结构 .....	108
4.2.4 TTL 的或非、与或非及异或门 .....	114
4.3 发射极耦合逻辑门 (ECL) .....	117
4.4 互补 MOS 逻辑门 (CMOS) .....	122
4.5 NMOS 逻辑门 .....	129
4.6 电平转移电路 .....	131
<b>第 5 章 组合逻辑电路</b> .....	<b>139</b>
5.1 图形符号中的关联符号 .....	139
5.2 数据选择器 (MUX) .....	142
5.3 数据分配器 (DMUX) .....	146
5.4 加法器 (ADD) .....	149
5.4.1 半加器 (HA) .....	149

5.4.2 全加器 (FA) .....	150
5.5 数值比较器 (COMP) .....	152
5.6 代码的奇偶发生/检验电路 .....	150
5.7 组合逻辑电路的设计 .....	162
5.7.1 用逻辑门设计组合电路 .....	163
5.7.2 用中规模功能组件设计组合电路 .....	168
5.8 组合逻辑电路中的竞争与冒险 .....	172
<b>第 6 章 触发器和时序逻辑电路</b> .....	<b>177</b>
6.1 集成触发器 (FF) .....	177
6.1.1 RS 触发器 (R-S FF) .....	178
6.1.2 钟控触发器 .....	182
6.1.3 主从触发器 (M-S FF) .....	184
6.1.4 边沿触发器 (E-T FF) .....	189
6.1.5 多功能触发器 .....	194
6.2 数据寄存器和移位寄存器 .....	196
6.2.1 数据寄存器 .....	196
6.2.2 移位寄存器 (SRG) .....	200
6.3 计数器 (CTR) .....	205
6.3.1 行波计数器 .....	206
6.3.2 同步二进制加法计数器 .....	209
6.3.3 二进制加/减计数器 .....	211
6.3.4 8421-BCD 码计数器 .....	216
6.3.5 可预置计数器 .....	218
6.4 异步信号的处理 .....	220
6.4.1 消颤开关 .....	220
6.4.2 异步脉冲的同步化 .....	222
6.4.3 同步单拍电路 .....	223
6.4.4 同步边沿检测电路 .....	225
6.4.5 同步时钟开关 .....	226
6.5 时序电路的系统设计 .....	227
6.5.1 时序电路的组成 .....	227
6.5.2 时序电路的状态图和流程图 .....	228
6.5.3 设计举例 .....	229



6.5.4 存储容量的压缩 .....	232
<b>第7章 半导体存储器</b> .....	<b>237</b>
7.1 概述 .....	237
7.2 随机存取存储器 (RAM) .....	239
7.2.1 静态 RAM (SRAM) .....	239
7.2.2 动态 RAM (DRAM) .....	244
7.3 RAM 的扩展与应用 .....	250
7.3.1 容量的扩展 .....	250
7.3.2 双口 RAM .....	252
7.3.3 RAM 用作移位寄存器 .....	254
7.3.4 先入先出存储器 (FIFO) .....	255
7.4 RAM 的检错与纠错 .....	258
7.5 只读存储器 (ROM) .....	263
7.5.1 可编程 ROM (PROM) .....	263
7.5.2 可擦可编程 ROM (EPROM 和 EEPROM) .....	266
7.6 ROM 的扩展与应用 .....	271
7.6.1 ROM 的扩展 .....	271
7.6.2 用 ROM 实现组合逻辑函数 .....	272
7.6.3 实现数学函数表 .....	274
7.7 可编程逻辑器件 (PLD) .....	277
7.7.1 概述 .....	277
7.7.2 可编程逻辑阵列 (PLA) .....	280
7.7.3 可编程阵列逻辑 (PAL) .....	283
7.7.4 PLD 的计算机辅助编程 (CAP) .....	293
<b>第8章 数码的变换和显示</b> .....	<b>295</b>
8.1 自然二进制码变换成 BCD 码 (B/BCD) .....	295
8.1.1 变换原理 .....	295
8.1.2 组合式 B/BCD 码变换器 .....	299
8.1.3 利用全加器构成 B/BCD 码变换器 .....	300
8.1.4 利用计数器实现 B/BCD 码变换 .....	301
8.2 BCD 码变换成自然二进制码 (BCD/B) .....	302
8.2.1 变换原理 .....	302
8.2.2 组合式 BCD/B 码变换器 .....	305

8.2.3 用全加器实现 BCD/B 码变换	306
8.3 二进制与循环码之间的变换	307
8.3.1 二进制转换成循环码 (B/G)	307
8.3.2 循环码转换成二进制 (G/B)	310
8.4 通用 $m$ 线- $n$ 线码变换电路	312
8.4.1 $m$ 线- $n$ 线译码器	312
8.4.2 $m$ 线- $n$ 线编码器	317
8.5 数码的显示	322
8.5.1 二进制的显示	322
8.5.2 准模拟式显示	324
8.5.3 数字的显示——BCD/7SEG 译码器	326
8.5.4 数符的显示	328
8.5.5 多位数字(数据)的显示	332
<b>第 9 章 算术运算电路</b>	<b>336</b>
9.1 加法电路	336
9.1.1 并行进位加法器	336
9.1.2 串行二进制加法器	339
9.1.3 BCD 数的加法	340
9.2 减法电路	341
9.2.1 利用补码相加的二进制减法器	342
9.2.2 BCD 数的减法	344
9.3 乘法电路	346
9.3.1 利用加法器组成的并行乘法器	347
9.3.2 矩阵乘法器	347
9.3.3 用 ROM 构成乘法器	349
9.3.4 BCD 数乘法电路	352
9.4 除法电路	354
9.4.1 恢复部分余数除法	354
9.4.2 不恢复部分余数的除法	356
9.4.3 用乘法来完成除法	356
9.5 算术逻辑单元(ALU)	358
<b>第 10 章 模/数与数/模转换电路</b>	<b>366</b>
10.1 A/D 及 D/A 转换的基本原理	366

10.1.1 A/D 及 D/A 转换的作用 .....	366
10.1.2 A/D 转换的过程及取样定理 .....	368
10.1.3 量化与编码 .....	369
10.1.4 D/A 转换的概念 .....	370
10.2 模拟开关和取样-保持电路 .....	371
10.2.1 模拟开关的结构与性能 .....	371
10.2.2 半导体模拟开关电路 .....	373
10.2.3 带有放大器的模拟开关 .....	379
10.2.4 取样-保持 (S/H) 电路 .....	381
10.3 D/A 转换器 (DAC).....	385
10.3.1 D/A 转换的方法与精度 .....	385
10.3.2 权重网络 DAC.....	389
10.3.3 T 形电阻 DAC.....	392
10.3.4 开关电流源 DAC.....	395
10.3.5 双极性 DAC.....	397
10.3.6 用 DAC 构成函数发生器 .....	399
10.4 A/D 转换器 (ADC).....	404
10.4.1 A/D 转换的方法与精度 .....	404
10.4.2 并行 ADC.....	407
10.4.3 串-并行 ADC .....	409
10.4.4 权重法 ADC (逐次近似法) .....	412
10.4.5 计数法 ADC.....	415
<b>第 11 章 脉冲波形的产生 .....</b>	<b>423</b>
11.1 用门或触发器构成单稳态触发电路 .....	423
11.1.1 微分型单稳态触发电路 .....	423
11.1.2 积分型单稳态触发电路 .....	428
11.1.3 用触发器构成单稳态电路 .....	431
11.2 集成单稳态触发电路 .....	431
11.2.1 概述 .....	431
11.2.2 非重触发单稳态电路 .....	433
11.2.3 可重触发单稳态电路 .....	436
11.2.4 单稳态电路的应用 .....	437
11.3 自激矩形波发生器 .....	440
11.3.1 用门电路构成的自激多谐振荡器 .....	440

11.3.2 晶体振荡器 .....	444
11.4 集成定时器 555 .....	448
11.5 计数比较式脉冲产生器 .....	455
11.5.1 计数比较式定时的概念 .....	455
11.5.2 计数比较电路的组成 .....	456
11.5.3 计数式脉冲产生器实例 .....	457
11.5.4 方案的改进 .....	459
11.6 节拍脉冲发生器 .....	460
11.7 序列脉冲的产生 .....	463
<b>习题</b> .....	<b>472</b>
<b>参考书目</b> .....	<b>520</b>

# 第 1 章 脉冲与数字信号的概念

## 1.1 脉冲波形的概念

在现代电子设备中所使用的信号，有连续信号和脉冲信号两类。连续信号又称模拟信号，常见的正弦波等信号就属于这一类，它们在模拟电子线路课程中有专门的讨论。在脉冲与数字电路课程中研究的是脉冲或数字信号，它们都是一些作用时间较短的电压或电流波形，几种常见的脉冲波形如图 1-1 所示。

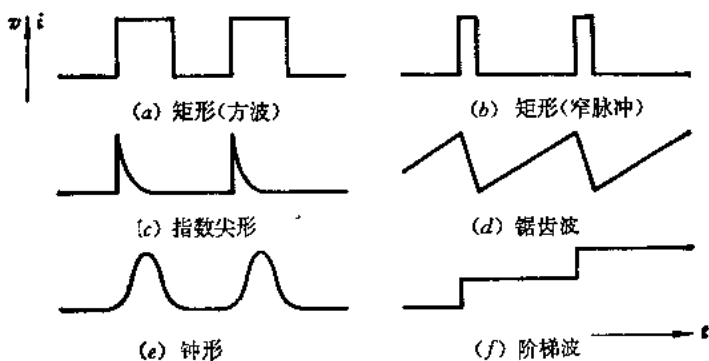


图 1-1 几种常见的脉冲波形

脉冲波形在电路中作用的时间较短，指的是它的作用时间可以与该电路的过渡历程相比较。实际上，许多脉冲信号就是在电路发生过渡历程期间产生的；或者说，脉冲信号的出现，必然伴随着电路的过渡历程。总之，能产生或处理脉冲信号的电路就称为脉冲电路，它通常是由晶体管和某种线性网络组合而成。从外形上看，脉冲电路和处理连续波的模拟电路无多大区别，只是在脉冲

电路中，晶体管等非线性器件大多是工作在大信号(开关)工作状态。所以，对脉冲电路的分析方法，也就与一般模拟电路的分析有所不同。其中，对工作在开关状态的晶体管特性，将用分区折线化特性来代表。因而，器件也就有相应的大信号参数，也叫开关参数，这些在有关手册上可以查到，本书下一章将详细讨论它们。

由于脉冲波形千变万化，很难用几个参数来作精确的描述。为了便于定量分析，可以用图 1-2 所示的矩形脉冲波形为例，规定一些必要的参数。

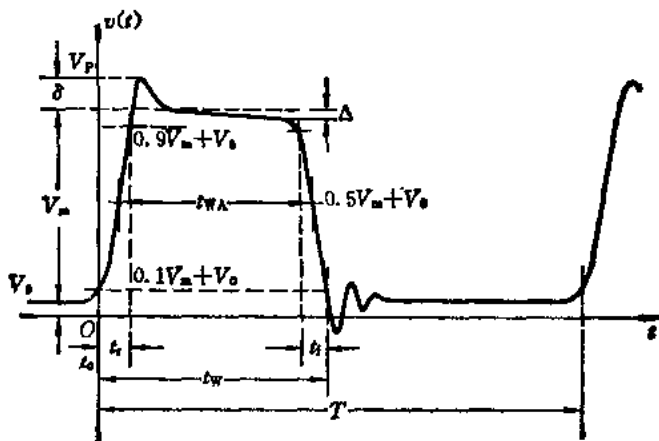


图 1-2 脉冲波形的参数

在图中所示的电压脉冲波形上，可以区分幅度和时间两类参数。属于幅度方面的参数主要有：

$V_0$ ——脉冲的起始电平，也称静态电压，它可正可负，视电路情况而定；

$V_m$ ——脉冲幅度；

$V_p$ ——脉冲峰值，可以有正峰和负(反)峰之分；

$\Delta$ ——平顶下降；

$\delta$ ——超量，也可以有正、反向超量之分。 $\delta$ 和 $\Delta$ 这两个参数，

有时是与幅度  $V_m$  相比,而取百分数标注的。

属于时间方面的参数主要有:

$t_0$ ——脉冲起始时间,通常以  $0.1V_m$  幅度计,在图 1-2 中,取

$$t_0 = 0;$$

$t_r$ ——上升时间,以幅度  $V_m$  的 0.1 至 0.9 计;

$t_f$ ——下降时间,以幅度  $V_m$  的 0.9 至 0.1 计;

$t_w$ ——脉冲底部宽度,通常以  $0.1V_m$  电平计算;

$t_{wA}$ ——脉冲平均宽度,指  $0.5V_m$  电平上的宽度;

$T$ ——周期,其倒数为脉冲的重复频率  $F$ 。

此外,脉冲还有正、负极性之分,电压由起始电平向上变化称为正脉冲,向下变化则称负脉冲。对正脉冲,上升时间  $t_r$  又称前沿时间,下降时间  $t_f$  又称后沿时间;反之,对负脉冲,  $t_r$  为前沿时间,  $t_f$  为后沿时间。

对图 1-1 中列举的锯齿波、阶梯波等其他形状的波形,按需要还可以制定一些专门的参数,这将在涉及它们时再加阐述。

如所周知,脉冲的宽度愈窄,或边沿愈陡,它的频谱就愈宽。本书所讨论的脉冲信号(电压或电流)的时间参数:宽度多数在微秒( $\mu s$ , 即  $10^{-6}s$ )、毫秒( $ms$ , 即  $10^{-3}s$ )或以上量级,而边沿时间可在纳秒( $ns$ ,  $10^{-9}s$ )量级;幅度则在数伏(V)到数十伏之间。参数处在这样范围内的脉冲信号,是目前在实验室或制造场合经常遇见的。

图 1-1 或图 1-2 所示的都是视频脉冲,它们的频谱由低频一直延伸到高频。如果以这种视频脉冲去调制高频振荡(载频),视频脉冲形状将决定高频振荡的包络,这样就得到了一个射频脉冲,后者是无线电通信发射和接收装置中的主要信号形式。在本书中,将仅讨论有关视频脉冲的电路与技术问题。

## 1.2 脉冲通过线性电路

现在先以最简单的  $RC$  高通网络为例,考察矩形脉冲通过它

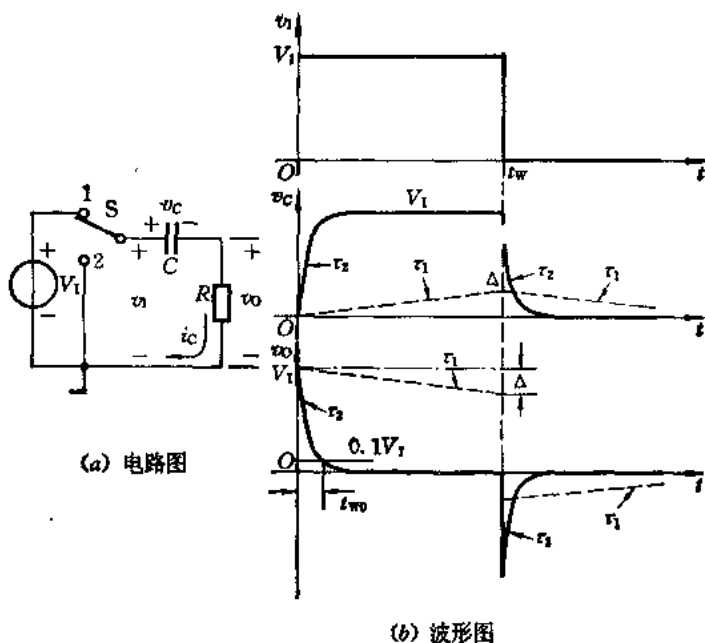


图 1-3 脉冲通过 RC 电路

时,产生何种响应。如图 1-3 所示,矩形脉冲  $v_1$  的获得,是通过开关 S 与直流电源  $V_1$  (1 端)及地(2 端)轮流接通来实现的。

假设,图中电容 C 的初始电压  $v_c(0) = 0$ , 当  $t = 0$  时,开关 S 突然与电压源  $V_1$  接通,相当于 RC 电路的输入电压为

$$v_1(t) = \begin{cases} V_1 \cdot 1(t) & t \geq 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

由电路基础课的分析可知,此时将发生阶跃电压  $V_1$  通过电阻 R 给电容 C 的充电过渡历程,其充电电流为

$$i_c(t) = \frac{V_1}{R} e^{-t/\tau} \quad (1-2)$$

式中  $\tau = RC$ ——RC 电路时间常数。



所以,输出电压为

$$v_o(t) = V_1 e^{-t/\tau} \quad (1-3)$$

而电容电压则为

$$v_c(t) = V_1(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-4)$$

由波形图可见,一开始充电时,电容  $C$  可看作短路,输出电压  $v_o(0) = V_1$ 。指数规律的充电过程,经  $(3 \sim 5)\tau$  时间后趋于结束,这时  $v_c$  达最大值  $V_1$ , 而  $v_o$  则趋于零。

若在  $t = t_w$  时,开关  $S$  突然改接到地,这时将发生电容  $C$  的反向放电过程,放电电流也将是指数规律的,即

$$i_c = -\frac{V_1}{R} e^{-(t-t_w)/\tau} \quad t \geq t_w \quad (1-5)$$

同时输出电压变为

$$v_o(t) = -V_1 e^{-(t-t_w)/\tau} \quad t \geq t_w \quad (1-6)$$

同样,放电过程经  $(3 \sim 5)\tau$  后也趋于结束,最终使  $v_c$  及  $v_o$  都回到零。

进一步分析可知,当  $\tau = \tau_1 \gg t_w$  时,电路的响应将如图 1-3 中的虚线所示。这时,  $C$  的充电过程在  $t_w$  以前来不及结束,仅使  $v_c$  从零上升至  $\Delta$ , 而  $v_o$  则成为具有相应平顶下降  $\Delta$  的矩形波。 $\tau$  愈大于  $t_w$ ,  $v_o$  就愈接近于输入波形  $V_1$ , 这就是  $RC$  电路作耦合电路的情况。

反之,在  $\tau = \tau_2 \ll t_w$  时,如图中实线波形所示,电容的充、放电都很快,使输出  $v_o$  成为正、负极性相间的指数尖脉冲,这就是  $RC$  电路作微分电路的情况。

总之,开关  $S$  周期性地在电压源  $V_1$  及地两点间来回转接,相当于  $RC$  电路输入了幅度为  $V_1$ 、宽度为  $t_w$  的周期性方波。它通过  $RC$  微分电路后,能获得正、负相间的指数窄脉冲,其宽度  $t_{w0}$ , 若也以  $0.1V_m = 0.1V_1$  电平计,则可算得为

$$t_{w0} = \tau_2 \ln \frac{v_o(0)}{v_o(t_{w0})} = CR \ln \frac{V_1}{0.1V_1} = 2.3CR \quad (1-7)$$