



北京工业学院电视教育小组 编

半导体电路基础

(第三册)

第一分册

科学出版社

半导体电路基础

(第三册 第一分册)

北京工业学院电视教育小组 编

科学出版社

1980

内 容 简 介

本书是为教育部和中央广播事业局共同举办的电视教育讲座编写的电子技术教材。

本书共分四册。第一、二册为半导体低频放大电路，第三、四册为脉冲及数字电路。

第三册分二个分册，内容主要包括二极管和三极管的开关特性，限幅和钳位电路，双稳态和单稳态触发电路，自激多谐振荡器和同步分频电路，间歇振荡器，锯齿波发生器等。

本书可供具有中等文化程度的工人、知识青年阅读，也可供大专院校、中等专业学校有关专业的师生参考。

半 导 体 电 路 基 础

(第三册 第一分册)

北京工业学院电视教育小组 编

*

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行，各地新华书店经售

*

1980年6月第一版 开本：787×1092 1/32

1980年6月第一次印刷 印张：5 1/2

印数：0001—265,800 字数：120,000

统一书号：15031·209

本社书号：1282：15—7

定价：0.46 元

目 录

绪言.....	1
第九章 RC 电路.....	7
第一节 RC 电路的充放电过程.....	7
一、RC 电路的充放电波形.....	8
二、RC 电路充放电的数学表达式.....	9
三、时间常数 τ	11
四、计算举例.....	13
第二节 几种简单的 RC 电路.....	15
一、两种基本形式.....	15
二、RC 耦合电路.....	18
三、RC 微分电路.....	20
四、RC 积分电路.....	24
第三节 RC 分压器.....	26
小结.....	31
思考题.....	32
练习题.....	33
第十章 半导体二极管和三极管的开关特性.....	36
第一节 半导体二极管的静态特性.....	36
第二节 二极管的开关动态特性.....	39
第三节 二极管的开关参数.....	42
第四节 半导体三极管的开关静态特性.....	44
一、开关工作时的三个状态.....	44
二、温度对三个工作状态的影响.....	52
三、半导体三极管开关运用的等效电路.....	53

第五节	半导体三极管的动态特性	54
第六节	开关三极管的参数	65
第七节	加速电容的作用和容性负载的影响	68
一、	加速电容的作用	68
二、	容性负载的影响	71
第八节	倒相器	73
一、	倒相器电路的工作原理	74
二、	输出有箝位电路的倒相器	78
三、	抗饱和式倒相器	79
第九节	脉冲电路中使用的射极跟随器	81
一、	单管射极跟随器	81
二、	互补式射极跟随器	83
小结		84
思考题		85
练习题		85
第十一章	限幅电路和箝位电路	87
第一节	限幅电路的用途和分类	87
第二节	二极管限幅电路	90
一、	理想二极管限幅电路	90
二、	实际二极管限幅电路	95
三、	寄生电容对二极管限幅电路的影响	97
第三节	三极管限幅电路	99
一、	单管限幅电路	99
二、	射极耦合限幅电路	103
第四节	二极管箝位电路	105
一、	从 RC 耦合电路到箝位电路	105
二、	二极管的箝位原理	107
三、	负向箝位电路分析	108
四、	从充放电平衡看影响箝位效果的因素	110
五、	任意电平箝位电路	112

第五节	实际箝位电路和参数的估算	114
第六节	窄脉冲的箝位问题	120
第七节	三极管箝位电路	123
小结		124
思考题		127
练习题		129
第十二章	双稳态触发电路	133
第一节	集基耦合双稳态触发电路	134
一、	电路的构成	134
二、	工作原理	135
三、	稳态条件	138
四、	转换条件	142
第二节	工作速度	145
第三节	触发方式	150
一、	基极触发	150
二、	集电极触发	155
第四节	负载影响	157
第五节	计算举例	160
小结		166
思考题		167
练习题		167

绪 言

前面几章我们已经讨论了半导体低频放大电路，以后几章我们要讨论的是半导体脉冲电路与脉冲数字电路。

脉冲技术与脉冲数字技术是近代电子技术的一个重要组成部分。随着电子技术在国民经济、国防和科学技术各个领域的广泛应用，脉冲电路和脉冲数字电路也大量地出现在各种电子设备和自动控制设备中。因此，掌握这部分内容，对四个现代化建设是有着重要意义的。

在讨论具体的电路以前，我们先来介绍有关脉冲的一些基本概念。

一、脉冲波形

让我们来看看图1表示的几种信号波形。图(a)是我们前面几章中经常遇到的，称正弦波。放大电路讲的主要是如何放大这种波形，使它既能放大，又不失真。图(b)~(f)就不叫正弦波了，它们称为脉冲波。脉冲波是这样一种信号：首先它们在某一时间出现，过一段后就消失，以后再次出现；既可以周期性地出现，也可以非周期性地出现。通常，它们是间断地、周期性地出现的，如图(b)~(f)。而正弦波总是有正有负，连续地、周期性地出现的。其次，后面将要讲到，脉冲波可以看成是由具有许多频率、振幅、相位皆不相同的正、余弦波按一定规律组成的，而正弦波是等幅的，且只有单一频率。再次，脉冲波的形状可以有各种各样，如矩形(图a)、锯齿形

(图 d)、三角形(图 e) 等等,而正弦波则只有一种形状。

由于脉冲波和正弦波有这些根本的差别,所以在分析脉

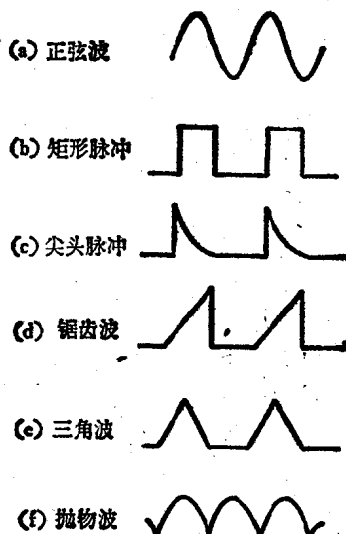


图1 各种波形

冲波时所用的方法就和分析正弦波时有很大的不同,这是我们在学习时必须要注意的。

二、标志脉冲波形的基本参数

和正弦波一样,脉冲波也有一些基本参数,如图2所示。只有知道了这些参数,才能确定脉冲波。

1. 脉冲幅度 U_m (I_m)

脉冲波从 10% 到 90% 的幅度变化值称为脉冲幅度,脉冲电压的幅度以 U_m 表示,单位为伏 (V); 脉冲电流的幅度以 I_m 表示,单位为安 (A), 多数应用下, I_m 为毫安 ($1\text{mA} =$

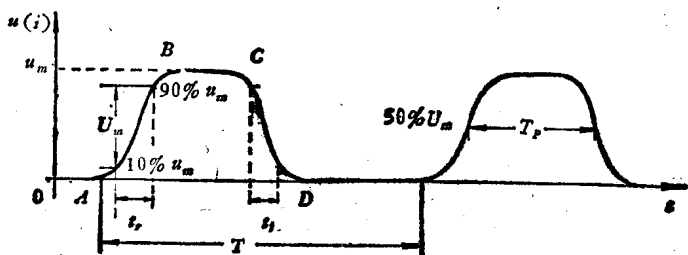


图2 脉冲波形的参数

$10^{-3}\text{A})$.

2. 脉冲上升时间 t_r

脉冲的幅度从 10% 上升到 90% 的时间称为上升时间, 以 t_r 表示, 单位为秒 (sec), 多数应用下, t_r 为微秒 ($1\mu\text{s} = 10^{-6}\text{sec}$).

3. 脉冲下降时间 t_f

脉冲波的幅度从 90% 下降到 10% 的时间称为下降时间, 以 t_f 表示, 单位为秒 (sec), 多数应用下 t_f 为微秒 (μs).

4. 脉冲宽度 T_p

通常把 50% U_m 处的脉冲持续时间称为脉冲宽度, 以 T_p 表示, 单位为秒 (sec). 对于矩形脉冲, 因其 $t_r, t_f \ll T_p$, 脉冲波的持续时间就相当于脉冲宽度. 常用的脉冲波其宽度约在毫微秒 ($1\text{ns} = 10^{-9}\text{sec}$) 到毫秒 (ms) 之间.

5. 脉冲重复周期 T 或重复频率 F

相邻脉冲周期性出现的时间称为脉冲重复周期, 以 T 表示, 单位为秒 (sec), 多数应用下 T 为微秒 (μs) 或毫秒 (ms). 周

期的倒数称为脉冲重复频率,以 F 表示,单位为赫兹 (Hz)。

6. 占空系数或空度比 Q

脉冲重复周期 T 与脉冲宽度 T_p 之比称为空度比,也叫占空系数,以 Q 表示, $Q = T/T_p$ 。

通常,脉冲波的上述参数要用示波器才能测量出来。有时对于变化十分缓慢的脉冲波,如 T_p 以秒计时,也可用万用表大体估计出脉冲的有无。

三、脉冲的谐波成分

由图 2 可见,一个脉冲波是由 AB , BC , CD 三个部分组成的, AB 称为上升边, BC 称为平顶, CD 称为下降边。对于一个矩形脉冲(习惯上,对于 $T_p = \frac{1}{2}T$ 的矩形脉冲也称

为方波),可以明显地看出, AB 和 CD 部分的变化速率十分快,就是说,在单位时间内,这部分的幅度变化很大; BC 部分的变化速率很慢,就是说,在单位时间内这部分的幅度变化很小。如果我们用频率的观点来看这个问题,就可以理解为一个脉冲波(包括图 1 所示的各种非正弦波)是由许许多多频率、幅度和相位不同的正弦、余弦波按一定的规律组成的。它有一个基波,基波的频率为重复频率,还有其他的波,它们的频率为基波频率的整数倍,称为谐波。换句话说,一个脉冲波可以由不同频率的谐波(各次谐波具有不同的振幅和相位)叠加而成。波形中变化速率较快的部分,如方波的上升、下降边,含有幅度较大的高次谐波,即高频成分占主要地位。波形中变化速率较慢的部分,如方波的平顶部分,含有幅度较大的低次谐波,即低频成分占主要地位。显然,图 2 中, AB 、 CD

变化速率越快,亦即 t_r 、 t_f 越小,高次谐波的频率就越高;反之, t_r 、 t_f 越大,高次谐波的频率就越低。

脉冲波由许许多多频率、幅度和相位不同的正、余弦波叠加而成的这一原理可用高等数学证明。这一概念在我们分析脉冲波形时是很有用处的,以后我们会经常用到它。

四、脉冲电路与脉冲数字电路

产生或变换脉冲波形的电路称为脉冲电路。脉冲波形产生电路可自行产生不同重复频率的脉冲,如自激多谐振荡器、间歇振荡器等。脉冲波形变换电路能将一种脉冲波形变换为另一种波形,如削波电路能将正弦波变为方波,微分电路能将矩形脉冲变为尖头脉冲等。

还有一种矩形脉冲形成电路称为开关电路。图3表示了这种电路的基本原理。开关 K 接通和断开,在负载 R 上就会出现一个矩形脉冲。若将 K 周期地接通和断开, u_R 的波形就如图3(b)所示。这里,开关 K 可以是电子管或半导体管。

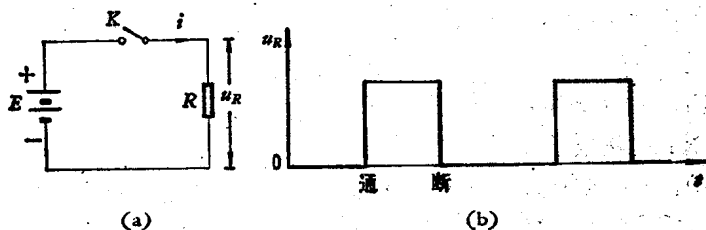


图3 开关电路示意图

如将矩形脉冲的有、无或电平的高、低二种状态分别代表二进制数中的“0”和“1”。就可使不同的脉冲开关电路具有不同的逻辑功能。把具有不同逻辑功能的开关电路按一定的规律连接起来,就可以实现各种逻辑运算。这种电路就称为

脉冲数字电路。换句话说，脉冲数字电路是实现逻辑功能和进行各种数字运算的脉冲电路。

总之，可以认为，脉冲电路是形成各种不同脉冲波形的电路，范围较广。脉冲数字电路是脉冲电路的一种，它着重于实现不同的逻辑功能和完成数字运算。

不论是脉冲电路还是脉冲数字电路，它们都是由管子（这里主要讲半导体管）、电阻、电容或电感元件组成的。但这些元件在脉冲电路中所起的作用与在放大电路中所起的作用是不同的。半导体三极管在脉冲电路中不但起放大作用，更多地是起开关作用。多数情况下，它工作于伏安特性曲线中的饱和和截止二个区域。当它饱和、导通时，相当于开关 K 接通，当它截止时，相当于开关 K 断开。阻容元件在脉冲工作情况下的充放电过程十分重要，许多脉冲波形往往是依靠这些充放电过程而获得的。所以下面我们先介绍的是阻容元件的充放电过程和半导体管作为开关元件的性能，在此基础上再来介绍各种脉冲电路。

脉冲电路还有分立元件电路和集成电路之分。当将半导体管、电阻、电容和电感等元件分别在线路板上焊接时，称分立元件电路；当将这些元件在一小块基片上集成时，称集成电路。由于数字电路类型少，在完成一定数字运算要求时同类型的电路数量又很大，便于集成化，所以数字电路在集成电路中占有主要地位。集成电路的体积小，重量轻，稳定性和可靠性高，寿命长，耗电少，这些优点使它在脉冲电路，尤其是小功率的脉冲电路中获得了广泛的应用。

随着电子技术在国民经济、国防和科学技术各个领域的广泛应用，脉冲电路和脉冲数字电路也大量地出现在各种近代电子设备和自动控制设备中，因此，掌握这部分内容，对我国实现四个现代化是有着重要意义的。

第九章 RC 电 路

电阻 R 和电容器 C 组合在一起的电路称 RC 电路。 RC 电路在脉冲电路中有着十分重要的作用。要了解不同的 RC 电路的工作特性, 首先必须了解 RC 电路的充放电特性。下面我们先来介绍在脉冲作用下, RC 电路的充放电过程, 然后再介绍几种基本的 RC 脉冲电路。

第一节 RC 电路的充放电过程

图 9-1 是一个由电阻 R 和电容器 C 组成的简单的 RC 电路。假设在开关 K 闭合前电容器 C 上的电压为零。当开关 K 接通点“1”时, 电容器 C 被充电, 充电电流从电源 E 的正极流出, 经 C 、 R 回到 E 的负极。当 K 接点“2”时, C 放电, 放电电流从 C 的左极流出, 经 R 回到 C 的右极。如果开关 K 连续不断地反复接通“1”和“2”点, 则 C 时而充电, 时而放电, 这

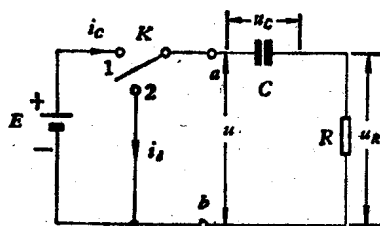


图 9-1 RC 充放电电路

种过程就称为 RC 电路的充放电过程。 RC 电路的充放电过程进行的快慢与 RC 值有关。通常情况下以微秒或毫秒计,

必须用示波器才能观察到。

一、RC 电路的充放电波形

在图 9-1 的电路中, 开关 K 接“1”和接“2”可看作是一个矩形脉冲加到电路的输入端, 如图 9-2 所示。当开关 K 接点“1”时, 相当于脉冲由零陡直上升到 E (时间 $t = t_0$); 当开关 K 接点“2”时, 相当于脉冲由 E 陡直下降到零 (时间 $t = t_2$)。

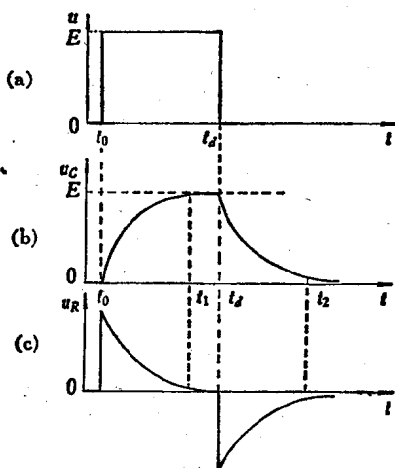


图 9-2 RC 电路的充放电波形

这时如果我们用一个示波器来观察 C 和 R 两端的电压波形, 则在示波器的荧光屏上, 会显示出如图 9-2 (b) (c) 所示的图形。其中, u_C 为电容 C 两端的电压波形, u_R 为电阻 R 两端的电压波形。由图可见, 当 $t = t_0$, 输入脉冲陡直上升时, u_C 并不突然跟着变, 而是由 0 经过 $t_0 - t_1$ 逐渐接近于最大值 E , u_R 也随之逐渐下降到接近于 0。我们称 $t_0 - t_1$ 这段时间

为电容 C 的充电过程。同样，当 $t = t_d$ ，输入脉冲陡直下降时， u_c 也不突然跟着变，而是由 E 经过时间 $t_d - t_2$ 逐渐下降到接近于 0。 u_R 也随之从负最大值逐渐上升到接近于 0。我们称 $t_d - t_2$ 这段时间为电容 C 的放电过程。

下面我们进一步来说明这两段过程。

二、RC 电路充放电的数学表达式

开关接“1”点前，假设电容器 C 上没有电压，即 $u_c(t) = u_c(<t_0) = 0$ 。当 $t = t_0$ 时，开关接“1”，电压突然加入，电路有电流 i_c 流通。但因 ab 两端电压 u 突然上升到 E ，电容要建立电荷又需要时间，因而 C 还来不及充电， $t = t_0$ 时， $u_c(t_0) = 0$ 。电阻两端压降 $u_R = u - u_c = u$ 。说明全部电源电压都加到了电阻之上。在 $t > t_0$ 之后， C 逐渐被充上电， u_c 上升， u_R 下降； $t = t_1$ ， u_c 上升到接近于 E ，到达最大值， u_R 下降到接近于 0。

$t = t_d$ ，开关接“2”点， ab 两端电压 u 突然下降到 0。由于电容要泄放电荷也需要时间，因而 C 还来不及放电， u_c 不变， $t = t_d$ 时， $u_R = u_c$ ，但方向与 $t = t_0$ 时相反。 $t > t_d$ 之后， C 经 R 放电，放电电流在 R 上形成的电压方向与充电电流形成的电压方向相反。随着电容 C 放电， u_c 逐渐下降， u_R 的绝对值也随之下降。最后， $t = t_2$ 时， C 放电基本结束， $u_c = u_R \approx 0$ 。

上述充电过程的规律是，开始充电时，因电容 C 上没有电压，充电电流大，电容 C 上电荷的积累速度快，电压上升的也快。以后随着 C 上电压的增加，充电电流逐渐减小，电容 C 上电荷的积累速度逐渐减慢，电压上升也越来越慢。这种变化规律与数学中的指数曲线一致，因为指数曲线在开始时变化

快,以后变化越来越慢。

根据高等数学,可以证明,上述充电电流是可以用指数曲线来表示的。即

$$i_c(t) = i_c(t_0)e^{-t/\tau} \quad (9-1)$$

这里, $i_c(t_0) = E/R$ 为 $t = t_0$ 时的充电电流;

$e = 2.718 \cdots$ 为指数系数;

$\tau = RC$, 称时间常数。当 R 为欧姆, C 为法拉时, τ 的单位为秒。

$$u_R(t) = i_c(t)R = Ee^{-t/\tau} \quad (9-2)$$

$$u_C(t) = E - u_R(t) = E(1 - e^{-t/\tau}) \quad (9-3)$$

式(9-2)和式(9-3)分别是 R 和 C 上的充电电压随时间变化的公式,显然,它与图 9-2 (b) (c) 在 $t = t_0 - t_1$ 时的波形是一致的。

同样,放电电流也可用指数曲线表示,只是符号与式(9-1)相反,即

$$i_d(t) = -\frac{E}{R}e^{-t/\tau} \quad (9-4)$$

$$u_R(t) = i_d(t)R = -Ee^{-t/\tau} \quad (9-5)$$

$$u_C(t) = -u_R(t) = Ee^{-t/\tau} \quad (9-6)$$

式(9-5)和式(9-6)分别是 R 和 C 上的放电电压随时间变化的公式,显然,它与图 9-2 (b) (c) 在 $t = t_2 - t_3$ 时的波形是一致的。

还可以证明,电容 C 的充放电电压变化规律,可用下述通用公式表示:

$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(0) - u_C(\infty)]e^{-t/\tau} \quad (9-7)$$

式中, $u_C(0)$ 为开始充、放电瞬间电容 C 上的电压, $u_C(\infty)$ 为 $t = \infty$ 时 C 上的电压。理论上认为,只有在 $t = \infty$ 时, C 的充

放电过程才结束。

根据指数变化规律,实际上 C 的充放电过程可取近似值。从下表可看出,当 $t = 2.3\tau$ 时, u_R 已降到 $10\% E$, u_C 已充到 $90\% E$; $t = 3\tau$ 时, u_R 下降到 $5\% E$, u_C 充电到 $95\% E$ 。工程上通常都取 $t = (2.3-3)\tau$ 作为电容 C 充放电过程的终止值。

表 9-1 C 充放电过程变化表

t/τ	1	2	2.3	3	4	5	6	7
$e^{-t/\tau}$	0.368	0.135	0.100	0.050	0.018	0.007	0.003	0.001
$1 - e^{-t/\tau}$	0.632	0.865	0.900	0.950	0.982	0.993	0.997	0.999

表9-1列出了随着 t/τ 的加大,指数曲线的变化情况,相应的电压变化曲线示于图 9-3。

三、时间常数 τ

式 (9-1) 中提出了时间常数 τ 。 τ 是标志 RC 电路充放电特性的一个基本参数。从式 (9-1) 和式 (9-5) 可以看出,

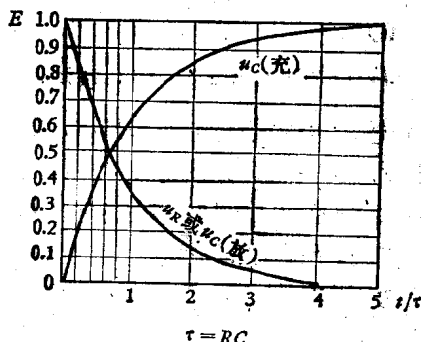


图 9-3 RC 电路充放电曲线