

邮电高等函授试用教材

脉 冲 电 路

魏 乔 年 编
汪 雍 刘元干 审

人 民 邮 电 出 版 社

内 容 提 要

本书较详细地讨论了脉冲电路的基本知识、分立元件脉冲电路的基本原理和基本的分析方法。本书结合各章特点，章末附有小结和习题，以供师生参考。

本书共分八章，包括：惰性电路和晶体管开关；脉冲电路中常用的几个基本电路；张弛振荡器；锯齿波信号发生器，三极管高速脉冲电路，特殊二极管脉冲电路；晶体管门电路；集成电路组成的脉冲电路。

邮电高等函授试用教材

脉 冲 电 路

魏 乔 年 编

汪 雍 刘元干 审

*

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

北 京 印 刷 一 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行

各 地 新 华 书 店 经 售

*

开本：787×1092 1/32 1982年4月第一版

印张：10 20/32 页数：170 1982年4月北京第一次印刷

字数：243 千字

印数：1—23,500 册

统一书号：15045·总2582-无6182

定价：1.10 元

前 言

本书是根据邮电高等函授“脉冲与数字”电路课程教学大纲的要求编写的。它是邮电函授学院通信各专业公用的一门技术基础课教科书。因此本书也可供各单位从事电子电路的人员作为自学读物，并可供同类院校作为教学参考。

本教材着重于讲清各种典型脉冲电路的基本工作原理和主要技术指标。为了适应函授教学以自学为主的特点，本书内容力求简明扼要、突出重点、深入浅出，着重物理概念，同时也作了必要的定量分析，以使学员掌握脉冲电路的基本理论。

本书在编写过程中，承张毅、赵六骏同志修改。

由于水平不高，编写仓促、书中一定有不少缺点错误，恳切希望读者提出意见，以便修改。

编 者

1981年2月

目 录

绪 论	1
第一章 惰性电路和晶体管开关	5
第一节 简单惰性电路的暂态过程	5
第二节 晶体管开关	31
第二章 脉冲电路中常用的几个基本电路	65
第一节 限幅器	65
第二节 钳位电路	77
第三节 三极管反相器和射极输出器	88
第三章 张弛振荡器	105
第一节 集一基耦合双稳态触发器	105
第二节 集一基耦合单稳态触发器	131
第三节 自激多谐振荡器	145
第四节 射极耦合双稳态触发器	158
第五节 间歇振荡器	174
第四章 锯齿波信号发生器	187
第一节 锯齿波的主要参数和简单的锯齿波电压形成电路	187
第二节 几种提高锯齿波线性的电路	193
第三节 自激式锯齿波电压发生器	210
第四节 锯齿波电流发生器	214
第五章 三极管高速脉冲电路	223
第一节 电压型脉冲电路的工作速度	223
第二节 电流型高速脉冲电路	232
第六章 特殊二极管脉冲电路	255
第一节 隧道二极管高速脉冲电路	255

第二节	单结晶体管脉冲电路	269
第三节	可控硅整流元件	274
第七章	晶体管门电路	279
第一节	逻辑电路	279
第二节	基本门电路	283
第三节	其它门电路	297
第八章	集成电路组成的脉冲电路	305
第一节	模拟集成电路在脉冲电路中的应用	305
第二节	集成逻辑门组成的脉冲单元电路	323

绪 论

与任何其它科学技术一样,脉冲技术的发生与发展,也是由于生产的发展和社会实践的需要所引起的。脉冲技术的应用可追溯到1938年美国人莫尔斯发明的所谓莫尔斯电码,其特点是利用长短不同的断续电流来传送信息。这种电码在现今的电报通信中仍然使用。但脉冲技术的真正发展是在第二次世界大战之际,首先在雷达技术中得到了应用。到目前为止它已广泛地应用于电视、导航、核子物理、自动控制、电子计算机、通信、测试仪表等各种技术领域中。因此,脉冲电路也就成为电子工业各专业的一门通用的专业基础知识了。

究竟什么叫脉冲呢?广义来说,凡非正弦波都可统称为脉冲。图1示出一些常见的脉冲波形,其中(a)是尖脉冲,(b)是矩形脉冲,(c)是方波,(d)是梯形波,(e)是锯齿波。这些脉冲的波形虽然不同,但它们都具有脉动或突变等特点。

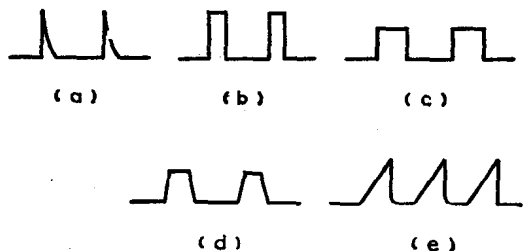


图1 常见的脉冲波形

我们以常用的矩形脉冲为例，来说明脉冲波形的一些特征量。实际的矩形脉冲波形如图 2 所示。

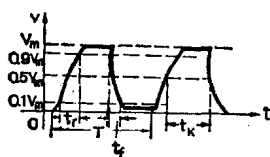


图 2 实际的矩形脉冲波形

1. 脉冲幅度 V_m : 脉冲电压(电流)从一种状态变化到另一种状态的跳变值。

2. 脉冲周期 T : 两个相邻脉冲重复出现所相隔的时间。周期的倒数称为脉冲的重复频率。

3. 上升时间 t_r : 脉冲电压(电流)由 $0.1 V_m$ 上升到 $0.9 V_m$ 所需的时间。 t_r 越短，表示脉冲上升得越快。 t_r 在脉冲技术中是一个重要参数。

4. 下降时间 t_f : 脉冲电压(电流)由 $0.9 V_m$ (或最大值)下降到 $0.1 V_m$ 所需的时间。

5. 脉冲宽度 t_k : 脉冲宽度系指脉冲出现后所持续的时间。由于脉冲上升和下降需要时间，因此一个脉冲波形的顶部和底部的宽度是不一样的。尤其如图 1 (a) 所示的尖脉冲，差别更大。因此一般定义前沿的 $0.5 V_m$ 到后沿的 $0.5 V_m$ 的时间为脉冲宽度。

目前，从课程安排上来看，脉冲电路是脉冲与数字电路这门课程的一个组成部分。但是，这次我们编写教材时，考虑到近年来数字电路已普遍采用集成电路，又因数字电路和脉冲电路无论在分析方法上或在工作原理上都有很大的不同，所以将脉冲电路与数字电路分开来编写。本书是脉冲电路部分。鉴于我国目前生产技术的实际情况，分立元件的脉冲电路在一定时期内还不可能完全被集成电路所取代，特别是一些高速脉冲电路还得用分立元件来构成。因此，本书仍以分立元件的脉冲电路为主，但对用集成电路构成的脉冲电路也作了适当的介绍。

又因完成各种功能的典型脉冲电路已基本定型，所以我们只着重于对这些典型电路的分析。本书共分八章，现将各章主要内容简单介绍一下。

在第一章中我们讨论了惯性电路的暂态过程和晶体管的开关特性。这一章为以后各章作了理论准备。

第二章至第五章讨论了由晶体管作为开关元件所组成的各种基本的脉冲电路。这部分是本书的重点内容。

第六章讨论以特殊二极管作为开关元件所组成的各种基本脉冲电路。

为了学习集成电路所组成的脉冲电路，在第七章中介绍了由分立元件组成的各种基本门电路的工作原理。然后在第八章分别介绍由模拟集成电路和集成逻辑门所组成的脉冲单元电路。

脉冲电路与晶体管放大电路的工作原理、分析方法等有所不同。所以在学习中应注意下面几个问题。

1. 脉冲电路与放大电路都是由三极管、电阻、电容等元件组成的，但它们在电路中所起的作用是不同的。在放大电路中三极管是作为放大元件使用的，要求工作在放大区；而在脉冲电路中它是作为开关元件使用的，要求工作在饱和区或截止区，放大区只是一个过渡区。在放大电路中电容 C 的作用是隔直流通交流，可用容抗的概念来分析。但在脉冲电路中，它的主要作用是控制晶体管的导通或截止，这就必须研究它的充放电过程。

2. 在放大电路中我们主要关心的是放大倍数、频率特性、非线性失真等问题。但在脉冲电路中，我们关心的是开、关工作的可靠性和转换速度。我们认真地研究了可靠工作条件和影响转换的因素，从而找出缩短转换时间的方法。

3. 在放大电路的分析计算中，我们常采用等效电路法和图解法。在脉冲电路中主要的是用波形分析法，即把晶体管当作开关，然后分析电路的工作波形。从分析电路的工作波形中掌握电路的工作原理。

另外，脉冲电路是与工程系统紧密结合着的，我们在绪论一开始所提到的那些运用领域中，没有一个不是建立在脉冲技术的基础上的。因此，掌握实践环节也是学好本课程的关键之一。

第一章 惰性电路和晶体管开关

脉冲技术就是研究各种脉冲波形的产生和变换的技术。产生和变换各种波形的脉冲电路一般都包含两个主要组成部分：一个是开关部分，另一个是惰性电路部分。在晶体管脉冲电路中，通常是利用电容和电感的惰性，来形成电路中的暂态特性。晶体管则通常是用作开关元件，利用开关的通断来改变电路的状态。由此可知，深刻了解惰性电路和晶体管的开关特性，对于掌握脉冲电路是十分重要的。它是学好脉冲电路的基础和关键。为此，本章就惰性电路和晶体管开关作一些必要的研究。

第一节 简单惰性电路的暂态过程

脉冲电路中常用的惰性电路，主要有 $R-C$ 电路， $R-L$ 电路和 $R-L-C$ 电路。利用这些电路的暂态特性，可以形成一定形状的脉冲波形。由于这些电路的暂态特性，在前叙课程中已经讨论过，所以这里只是作重点复习。

一、 $R-C$ 电路

1. $R-C$ 电路的暂态特性

$R-C$ 串联电路如图 1-1(a) 所示。现在我们就来研究它的暂态过程。

当开关 K 接通的瞬间，我们假定电容上的初始电压为零，根据电容的惰性，于是电源电压 E 全部都加在电阻 R 上。以后随着电容的充电，电荷逐步增加， v_C 越来越大， v_R 越来越小。最

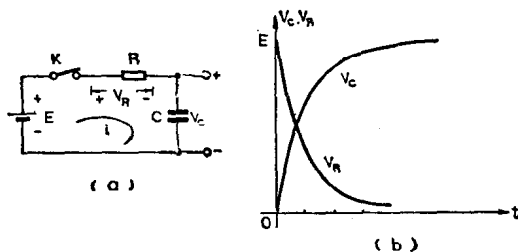


图 1-1 R - C 串联电路及电压变化曲线

后 v_C 增加到等于 E ，而 v_R 则减小到零，充电过程结束。 v_C 和 v_R 的变化规律如图 1-1(b) 所示。下面就对这两个电压的变化规律作定量分析。

当开关 K 闭合后，电路的电压方程为

$$v_R + v_C = E$$

即

$$Ri + v_C = E$$

式中 i 为电路中的充电电流。其表达式为 $i = C \frac{dv_C}{dt}$ ，将它代入上式即得

$$RC \frac{dv_C}{dt} + v_C = E \quad (1-1)$$

根据此式求解 v_C 的暂态特性，常用二种方法：一种是经典法，另一种是拉氏变换法。

(1) 经典法

从高等数学可知，式 (1-1) 是一阶常系数线性非齐次微分方程，它的通解可由一个特解和相应的齐次方程的通解组成。

在电路分析中，常采用电路进入稳态后的 v_C 值作为它的特解，即 $t \rightarrow \infty$ 时的解，用 $v_C(\infty)$ 表示，把它称为最终值。当

$t \rightarrow \infty$ 时, C 充电结束, $\frac{dv_c}{dt} = 0$, 代入上式即可得到它的一个特解为 $v_c(\infty) = E$ 。

一阶常系数线性齐次微分方程的通解一般为指数形式 $A \cdot e^{pt}$ 。由此便可得到上述一阶线性非齐次方程的通解为

$$v_c = E + Ae^{pt} \quad (1-2)$$

下面分别计算常数 p 和 A 。

p 是齐次方程特征方程的根。与式 (1-1) 相对应的齐次方程式为

$$RC \frac{dv_c}{dt} + v_c = 0$$

把它的通解 $v_c = Ae^{pt}$ 代入此式, 即可找出特征方程。求法如下

$$AR \cdot Cpe^{pt} + Ae^{pt} = 0$$

$$(R \cdot C \cdot p + 1)Ae^{pt} = 0$$

因为 $Ae^{pt} \neq 0$, 所以应有

$$R \cdot C \cdot p + 1 = 0$$

这就是上述齐次方程式的特征方程。由此式便可求出特征方程的根

$$p = -\frac{1}{RC} = -\frac{1}{\tau}$$

式中 $\tau = RC$ 称为电路的时间常数。

再根据初始条件确定常数 A 。

我们知道, 电容两端的电压在换路时不能跃变, 用数学式来表达, 即为 $v(0^+) = v(0^-)$ 。式中 $t = 0^+$ 表示开关闭合后的瞬间, $t = 0^-$ 表示开关闭合前的瞬间。从图 1-1(a) 中可知, $v_c(0^-) = 0$ 因而 $v(0^+) = 0$ 。根据式 (1-2), 当 $t = 0^+$ 时, 则有

$$v_c(0^+) = E + Ae^{p \cdot 0} = 0$$

即

$$E + A = 0$$

所以

$$A = -E$$

把 $A = -E$, $p = -\frac{1}{\tau}$ 代入式(1-2)得

$$\begin{aligned} v_c(t) &= E - Ee^{-\frac{t}{\tau}} \\ &= E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \end{aligned} \quad (1-3)$$

由回路电压方程还可求得

$$\begin{aligned} v_R(t) &= E - v_c(t) \\ &= Ee^{-\frac{t}{\tau}} \end{aligned} \quad (1-4)$$

式(1-3)、(1-4)就是图 1-1(a) R - C 串联电路的暂态特性数学表示式。从此式可知,回路中的电压、电流(电流与电阻上的电压的变化规律相同)都是按指数规律变化的。

假若开关 K 闭合前电容 C 上有初始电压 $v_c(0^-)$ 根据换路定理 $v_c(0^+) = v_c(0^-)$, 并把电路的稳态值用 $v_c(\infty)$ 表示。根据式(1-2)求解常数 A , 当 $t = 0^+$ 时, 则有

$$v(0^+) = v_c(\infty) + Ae^{p \cdot 0}$$

得

$$A = v(0^+) - v_c(\infty)$$

这时电容电压, 电阻电压的表示式应写为

$$v_c(t) = v_c(\infty) + [v_c(0^+) - v_c(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-5)$$

$$v_R(t) = [v_c(\infty) - v_c(0^+)]e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1-6)$$

(2) 拉氏变换法

拉氏变换法是求解线性常微分方程中常常采用的一种简便方法。它把求解微分方程的问题, 转化为求解代数方程的问题。下面就用拉氏变换法求解图 1-1(a) 电路的两个电压。

开关 K 闭合后, 电路的电压方程为

$$RC \frac{dv_c}{dt} + v_c(t) = E$$

第一步, 根据拉氏变换的基本原理和公式, 写出方程中各项所对应的变换式, 然后将方程两边进行拉氏正变换。

方程中各项的变换式分别为

$$\begin{aligned} v_c(t) &\longrightarrow V_c(S) \\ \frac{dv_c(t)}{dt} &\longrightarrow S V_c(S) - v_c(0^+) \\ E &\longrightarrow E/S \end{aligned}$$

把各项的变换式代入上述微分方程, 即得

$$\tau S V_c(S) - v_c(0^+) \tau + V_c(S) = \frac{E}{S} \quad \text{其中 } \tau = RC$$

由此解出变换式 $V_c(S)$ 为

$$\begin{aligned} V_c(S) &= \frac{E}{S(1+\tau S)} + \frac{v_c(0^+) \tau}{1+\tau S} \\ &= \frac{E}{S\tau\left(\frac{1}{\tau} + S\right)} + \frac{v_c(0^+)}{\frac{1}{\tau} + S} \end{aligned}$$

第二步, 对 $V_c(S)$ 求拉氏反变换, 查变换表可得

$$v_c(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + v_c(0^+)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

假若开关 K 闭合瞬间 $v_c(0^+) = 0$ 代入上式即得

$$v(t) = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

另外, 式中的 E 即电容 C 充电结束后的电压值, 可用 $v_c(\infty)$ 表示, 所以前式可以写为

$$v_c(t) = v_c(\infty) + [v_c(0^+) - v_c(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$$

显然, 这个解答和前面按照经典法求出的结果是一样的。

从式(1-5)和(1-6)中可看出, 对于简单 $R-C$ 电路, 没有必要每次都去列写微分方程再去求解, 而只要从电路中确定出 $v_c(0^+)$, $v_c(\infty)$, 和 τ 三个要素的数值, 就可以把它们代入式(1-5)和(1-6)直接写出电压(电流)表示式。这种方法称为三要素法。

从式(1-5)可以算出时间 t 为任意值时的电压值。如果要计算电压到达某一规定值的时间, 也可以利用式(1-5)推导出它的计算式。设该电压值和相应的时间分别为 $v_c(T_1)$ 和 T_1 , 把它们代入式(1-5)得

$$v_c(T_1) = v_c(\infty) + [v_c(0^+) - v_c(\infty)]e^{-\frac{T_1}{\tau}}$$

经过整理

$$v_c(\infty) - v_c(T_1) = [v_c(\infty) - v_c(0^+)]e^{-\frac{T_1}{\tau}}$$

$$\frac{v_c(\infty) - v_c(0^+)}{v_c(\infty) - v_c(T_1)} = e^{\frac{T_1}{\tau}}$$

得到

$$T_1 = \tau \ln \frac{v_c(\infty) - v_c(0^+)}{v_c(\infty) - v_c(T_1)} \quad (1-7)$$

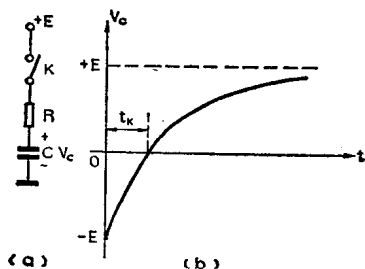


图 1-2 例题 1 电路及波形

式(1-5)、(1-6)、(1-7), 今后经常要用到。

例 1 某一 $R-C$ 电路如图 1-2(a), 开关 K 闭合后, RC 电路接通电源 $+E$ 。假如 K 闭合前电容电压 $v_c(0^-) = -E$, 试画出电容电压 v_c 的波形, 并求出从开关 K 闭合

到电压 $v_c = 0$ 所需要的时间 t_k 。

解: 已知电容电压的初始值 $v_c(0^+) = v_c(0^-) = -E$, 开关

K 闭合后电压的稳态值 $v_c(\infty) = +E$, 电路的时间常数 $\tau = RC$, 代入式(1-5)得

$$v_c(t) = E - 2Ee^{-\frac{t}{\tau}}$$

其波形如图 1-2(b)。

设 K 闭合后, 当 $v_c = 0$ 时的时间为 t_K 根据式(1-7), 可直接求得

$$t_K = \tau \ln \frac{E - (-E)}{E} = \tau \ln 2 = 0.7\tau.$$

例 2 计算图 1-1(a)所示电路的上升时间 t_r

根据 t_r 的定义可知, 电压 v_c 从稳态值的 10% 上升到稳态值的 90% 所需的时间为 t_r 。下面分别计算 v_c 上升到稳态值 10% 及 90% 所用的时间。根据式 (1-7) 可以直接求出 $T_{0.1}$, $T_{0.9}$, 其中 $v_c(\infty) = E$, $v_c(0^+) = 0$

$$T_{0.1} = \tau \ln \frac{v_c(\infty) - v_c(0^+)}{v_c(\infty) - v_c(T_{0.1})}$$

$$T_{0.1} = \tau \ln \frac{E}{E(1-0.1)}$$

$$= \tau \ln \frac{1}{0.9}$$

$$T_{0.9} = \tau \ln \frac{E}{E(1-0.9)}$$

$$= \tau \ln \frac{1}{0.1}$$

所以 t_r 为

$$t_r = T_{0.9} - T_{0.1} = \tau \ln \frac{\frac{1}{0.1}}{\frac{1}{0.9}} = \tau \ln 9 = 2.2\tau$$

2. 暂态持续期和时间常数的关系

根据式(1-3)和(1-4)，可以画出图 1-1(a) 所示电路的暂

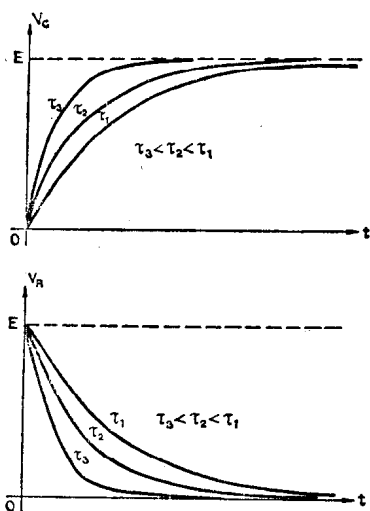


图 1-3 时间常数不同的暂态特性曲线

态特性曲线，如图 1-3 所示。图中分别绘出了三条时间常数不同的暂态特性曲线。可以看出，时间常数越大， $v_R(t)$ 、 $v_C(t)$ 的变化速度越慢，即曲线达到稳态值的时间越长。因此时间常数 τ 值就表征了电路的暂态过程的长短。为了对暂态过程和时间常数的关系有较清晰的概念，我们将 t 与 $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ ，及 $e^{-\frac{t}{\tau}}$ 的关系

列表 1-1。

表 1-1

t	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
$e^{-\frac{t}{\tau}}$	0.368	0.135	0.050	0.018	0.007
$1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$	0.632	0.865	0.950	0.982	0.993

由表可以看出，虽然电路要进入稳态($e^{-\frac{t}{\tau}}=0$ $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}=1$)所需时间将是无穷长，但是，当 $t=3\tau$ 时， $1 - e^{-\frac{t}{\tau}}$ 已上升