

脉 冲 电 路

(第二版)

何小艇 章守苗 编著

浙江大學出版社

内容简介

《脉冲电路》按照教育部有关本课程的教学基本要求编写而成。全书着重介绍了脉冲电路的基础以及学习分析脉冲电路的基本方法。在内容取舍上注意以集成电路构成的脉冲电路为主,并注意了实用性。

本书可供电子工程、通信工程、电子技术等专业作为本科生教材,也可供有关专业人员参考。

再 版 前 言

脉冲与数字电路课程是电子工程、通信工程、电子技术等专业的重要技术基础课程。本书作者已主编出版了《数字电路》教材。现编写这本《脉冲电路》与《数字电路》配合使用。

脉冲电路被广泛用于家电、仪器仪表、电子系统中,作为中大规模模块电路之间的波形变换、电平转移之用。它也是产生时钟脉冲、锯齿波以及其他非正弦波形的核心电路。脉冲电路花样繁多,变化无穷。如果花大量时间去介绍各种电路原理,将会耗费大量时间而不入其门。本书强调脉冲电路的基础,强调学生学会脉冲电路的基本分析方法,为以后应用打下牢固的基础。

第一版的第三章介绍了由晶体管构成的各种脉冲电路的组成和工作原理,由于微电子技术的发展,这些电路的应用越来越少了,所以在第二版中删除了绝大部分内容,而由集成运算放大器构成的施密特触发器被安排在最后一章的触发器一段内。对于原第四章施密特触发器一段删除了用逻辑门构成施密特触发器的内容,增加了几种具有施密特触发输入功能的集成逻辑电路的介绍。对于密勒积分电路新版直接用运算放大器构成恒流充电的概念说明电路的基本原理,删除第一版中的原理介绍;最后一章中增加了集成脉冲信号产生电路 555, 74LS624, 74LS122 和 CD4541 等电路的工作原理的介绍,这类电路的更多应用请参阅有关器件的使用手册。其他章节的局部内容也作了较多的增删,从而得到了第二版全书的三章内容。

第二版的三章内容为:第一章脉冲电路基础,介绍了分析脉冲电路的基本工具及方法,为本书的基础。第二章脉冲波形变换与形

成电路,应用基本分析方法分析介绍了一些典型的波形变换及波形形成的电路。第三章脉冲波形产生电路,集中介绍了由逻辑门构成的脉冲产生电路及中规模标准脉冲模块电路的工作原理,为实际应用提供了几种典型电路。全书可供14~18学时的课程教学要求使用。本书各章都附有少而精的习题供选用。

编者希望广大读者在使用本书之后能提出宝贵的意见。

章守苗 何小艇

2001年4月于杭州玉泉

目 录

绪 论	1
第一章 脉冲电路基础	4
§ 1-1 线性电路暂态分析	4
一、一阶电路的分析方法	5
二、高阶电路的分析方法	8
§ 1-2 晶体管开关	9
一、晶体二极管稳态开关特性及其等效电路	10
二、晶体三极管稳态开关特性及其等效电路	14
三、MOS 管稳态开关特性及其等效电路	19
§ 1-3 开关电路的计算	22
一、晶体管开关的输入、输出等效电路	23
二、开关电路计算举例	27
习题一	36
第二章 脉冲波形变换与形成电路	42
§ 2-1 限幅器	42
一、二极管限幅器	42
二、三极管限幅器	46
三、限幅器对耦合电路的影响	49
§ 2-2 钳位器	53
一、二极管钳位器	54

二、三极管基极钳位作用	57
§ 2-3 微分电路	58
§ 2-4 锯齿电压波形成电路	60
一、简单锯齿电压波形成电路	61
二、密勒积分电路	63
§ 2-5 限制脉冲电路速度的各种因素及其分析方法	66
一、晶体二极管瞬态开关特性	66
二、晶体三极管瞬态开关特性	69
三、分布电容的影响	74
四、开关方波边沿的影响	75
五、实际情况分析举例	76
六、MOS 管瞬态开关特性	78
习题二	79
第三章 脉冲波形产生电路	82
§ 3-1 集成逻辑门构成的脉冲产生电路	83
一、TTL 集成逻辑门的输入、输出特性	83
二、CMOS 逻辑门的输入、输出特性	88
三、双稳触发电路	88
四、单稳触发电路	95
五、多谐振荡器	101
§ 3-2 中规模标准脉冲模块电路	106
一、单稳触发电路	106
二、时钟产生器	108
三、555 定时器	109
四、可编程定时器	112
习题三	114

绪 论

在学习脉冲电路以前,首先要介绍脉冲信号和脉冲电路的特点。就电信号来讲,脉冲信号是指在短暂时间内作用于电路的电压或电流。常见的脉冲信号波形如图 0-1 所示。脉冲电路就是变换、形成或产生脉冲信号的电路。脉冲电路对脉冲波形有严格的要求,

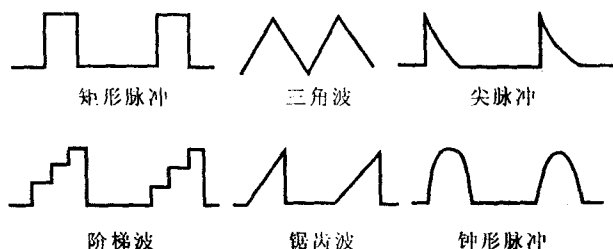


图 0-1 常见的脉冲信号波形

不仅要考虑脉冲的有无,而且要考虑脉冲的幅度、宽度以及整个波形(特别是上升、下降沿)的变化情况。为了对脉冲信号有一个比较具体的概念,现以最常见的矩形脉冲电压波为例,来说明脉冲 waveform 的主要参数,参见图 0-2 所示的波形。

图 0-2 中 V_m 是脉冲电压变化幅值,称为脉冲幅度; t_r 为上升时间,即从 $0.1V_m$ 上升至 $0.9V_m$ 所需时间; t_f 为下降时间,即从 $0.9V_m$ 下降至 $0.1V_m$ 所需时间; t_w 是脉冲宽度,即脉冲前沿的 $0.5V_m$ 到脉冲后沿的 $0.5V_m$ 处的持续时间; T 为脉冲重复周期,即周期性重复脉冲序列中,两相邻脉冲重复出现所对应的间隔时间; 脉冲重复频率为 f , $f = \frac{1}{T}$, 表示每秒脉冲重复出现的次数; t_w/T 是

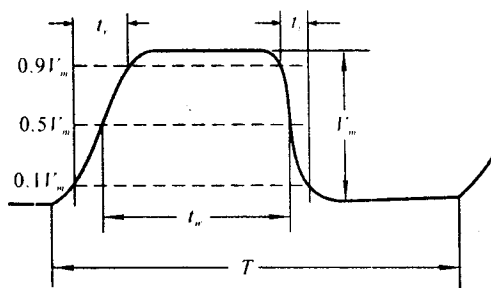


图 0-2 矩形脉冲的特性参数

占空比,即脉冲宽度与脉冲周期的比值。

常用脉冲电路的各个参数范围大致如下: V_m 为 $0.1 \sim 100\text{V}$, t_r 为 $1\mu\text{s} \sim 1\text{ns}$, t_f 为 $1\mu\text{s} \sim 1\text{ns}$, t_w 为 $1\text{ms} \sim 0.1\mu\text{s}$, T 为 $10\text{ms} \sim 1\mu\text{s}$, f 为 $100\text{Hz} \sim 100\text{MHz}$ 。本课程介绍的脉冲电路是小功率中速电路,脉冲幅度较小、速度较慢(边沿较长),各个参数处于下限范围。

对图 0-2 的波形作进一步观察,可以发现这个脉冲波形实际上可能是由若干段 RC 电路暂态过程合成的。RC 充放电电路如

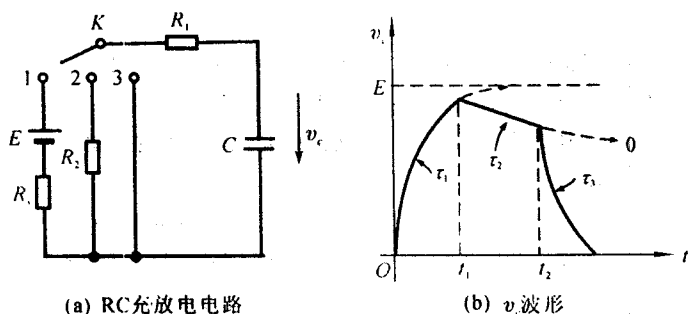


图 0-3

图 0-3(a)所示。假设开关 K 一直处于 3 端, $v_c = 0$ 。在 $t = 0$ 时,开关

扳向 1 端,此时电压源 E 经过电阻 R_1 和 R_1 对 C 充电。充电时间常数 $\tau_1 = (R + R_1)C$, v_c 以指数律上升。在 $t = t_1$ 时,开关 K 又扳向 2 端,此时电容 C 将通过 R_1 和 R_2 放电。放电时间常数 $\tau_2 = (R_1 + R_2)C$, v_c 则以指数律下降。假设 $R_2 \gg R_1$,则 v_c 下降的速度比上升

慢。在 $t = t_2$ 时,开关 K 又扳向 3 端并停在 3 端,此时电容 C 将通过 R_1 放电。放电时间常数变为 $\tau_3 = R_1 C$, v_c 很快下降至零。可以画出 v_c 波形如图 0-3(b)所示。将图 0-2 与图 0-3(b)相比,可以发现它们是很相似的。由此可以得出结论:脉冲电路的基本结构是开关加惰性

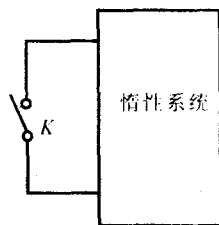


图 0-4 脉冲电路基本结构

系统,如图 0-4 所示。其中开关是电子

开关,电路原理图上等效为图 0-3(a)的开关 K ,惰性系统是带有储能元件(L 或 C)的线性电路,例如图 0-3(a)中的 RC 电路。电子开关控制惰性系统充放电,迫使电路产生暂态过程,从而得到所需要的脉冲波形。因此脉冲电路的基础就是两部分:线性电路的暂态分析;电子开关的计算。不同的脉冲电路就是不同的惰性系统和电子开关的不同组合。

第一章 脉冲电路基础

§ 1-1 线性电路暂态分析

带有储能元件的线性电路的暂态分析是分析、计算脉冲电路的基础。储能元件可以是电容 C 、电感 L 或者两者共存,也可以利用传输线(同轴线、双导线传输线、微带线、仿真线)作为储能元件。一个线性电路可能包含一个储能元件,也可能不止包含一个储能元件,而且控制储能元件充放电的开关信号也有阶跃变化与非阶跃变化之分。根据线性电路的结构以及开关信号的条件,线性电路暂态分析的基本方法不外乎三种:微分方程、拉氏变换和卷积,在《电路分析基础》和《信号与系统》两门课程中都作过详细分析并作过大量习题,这里不再加以重复,而准备根据工程应用的特点,采取由简到繁、逐步深入的方法进行介绍。在分析中着重于基本概念和基本计算。

我们知道实际问题是复杂的,电路中不仅仅有外接的储能元件,而且有各种分布参数,如分布电容和引线电感,而且开关信号也永远不会是阶跃变化的。如果严格按照实际电路结构及开关信号进行计算,其结果将会是相当复杂的而且很难掌握电路的基本工作特点。所以,我们将按照实际情况及电路参数,首先分析计算基本电路的基本性能,然后再根据需要及实际情况加以修正,从而得到接近于实际情况的结果。这种由简到繁逐步深入的方法有助于人们掌握电路的基本原理和性能,学会分析实际问题及解决实际问题的能力。在这一节中将重点复习最常用、最基本的方法——

阶跃开关信号作用下,一阶电路暂态过程的计算方法,即三要素法。同时给出高阶电路及非阶跃开关信号作用下暂态过程计算的原则和特点。

一、一阶电路的分析方法

所谓一阶电路就是电路中只有一个独立的储能元件的电路。常用的一阶电路有RC电路和RL电路。由于控制电路的开关信号有阶跃开关信号和非阶跃开关信号之分,因此一阶电路的分析方法也不同。下面首先介绍三要素法。

1. 三要素法——阶跃开关信号作用下一阶电路的分析方法

以图 1-1(a)所示 RC 电路为例。开关 K 位于 2 端很久,电路已经稳定, $v_c=0$ 。 $t=0$ 时,开关 K 扳向 1 端,相当于在 RC 电路输

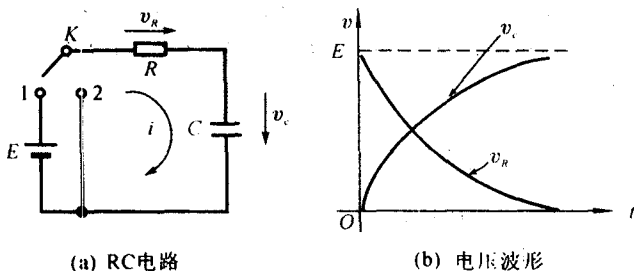


图 1-1

入端加入一个阶跃电压 E ,电压源 E 经电阻 R 对电容 C 充电。根据图 1-1(a)中规定的电压、电流正方向,可列出方程

$$E = iR + v_c$$

$$i = C \frac{dv_c}{dt} \quad (1-1)$$

计算 RC 电路暂态过程的一阶常微分方程为

$$RC \frac{dv_c}{dt} + v_c = E \quad (1-2)$$

解出

$$v_c = E + Ae^{-t/\tau} \quad (\tau = RC) \quad (1-3)$$

将(1-3)式改写成

$$v_c = v_c(\infty) + [v_c(0^+) - v_c(\infty)]e^{-t/\tau} \quad (1-4)$$

待定常数 $v_c(0^+)$ 可利用初值定理来确定。根据开关扳动时电容电压不能突变的原则, 可以得出 $t=0^+$ 时, $v_c(0^+) = v_c(0^-) = 0$ 。根据电路结构可知, $t=\infty$ 时, 电容 C 将被充电到 $v_c = E$, 即 $t=\infty$ 时, $v_c(\infty) = E$ 。将 $v_c(0^+)$ 及 $v_c(\infty)$ 代入(1-4)式, 得

$$v_c = E(1 - e^{-t/\tau}) \quad (1-5)$$

事实上, (1-4)式是阶跃开关信号作用下一阶电路暂态分析的通解。它不仅适用于 RC 电路, 也适用于 RL 电路; 不仅可用来描述电压暂态过程, 也可以描述电流暂态过程。这样, (1-4)式可改写成通用表达式:

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

其中 $x(0^+)$ —— 起始值;

$x(\infty)$ —— 趋向值;

τ —— 时间常数。

今后在计算阶跃开关信号作用下一阶电路的暂态过程时, 可以根据电路情况求出 $x(0^+)$, $x(\infty)$ 以及 τ 这三个要素, 并把它们代入(1-6)式, 即可直接写出电压(电流)变化的表达式。我们把这种方法称为三要素法。

下面简单介绍一下三要素的计算方法。

(1) 时间常数 τ

计算电路时间常数 τ 时, 应将电压源短路(内阻保留)、电流源开路, 利用简单的串并联方法将电路化简成单一电阻电容电路或单一电阻电感电路。此时, 电路的时间常数

$$\tau = RC$$

或

$$\tau = L/R \quad (1-7)$$

(2) 趋向值 $x(\infty)$

趋向值表示电路达到稳定时某点电压(电流)的数值。电路达到稳定,即暂态过程已经结束,此时电容、电感不再充放电。所以,在计算趋向值时应将电路中的电容开路、电感短路(内阻保留),然后计算待求的电压(电流)值。

(3) 起始值 $x(0^+)$

起始值表示的是在开关扳动后瞬间某点电压(电流)的数值。计算起始值时必须利用初值定理:开关扳动时电容电压不能突变;开关扳动时电感电流不能突变。即

$$\left. \begin{aligned} v_c(0^+) &= v_c(0^-) \\ i_L(0^+) &= i_L(0^-) \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

对于开关扳动前的 $v_c(0^-)$ 和 $i_L(0^-)$,它们可能是开关扳动前的稳态值,也可能是前一个暂态过程的终止值,如图 0-3(b)中的 $v_c(t_1^-)$ 或 $v_c(t_2^-)$ 。

下面利用三要素法计算图 1-1(a)的 v_R 波形:当 $t=0^+$ 时, $v_c(0^+) = v_c(0^-) = 0$, 所以 $i(0^+) = \frac{E}{R}$, $v_R(0^+) = i(0^+)R = E$; 而 $t = \infty$ 时, $v_c(\infty) = E$, 则 $i(\infty) = 0$, $v_R(\infty) = 0$ 。 $\tau = RC$, 可以得出

$$v_R(t) = 0 + (E - 0)e^{-t/\tau} = Ee^{-t/\tau} \quad (1-9)$$

v_c 和 v_R 波形如图 1-1(b)所示。

(1-6)式表明,在阶跃开关信号作用下,一阶电路的暂态过程决定于电路的时间常数。为了对暂态过程和时间常数的关系有比较清晰的概念,下面将举一些数字例子。以图 1-1(a)中 v_c 和 v_R 为例,设开关 K 扳到 1 端瞬间的 v_R 值为 100, v_c 为 0,随后 v_c 和 v_R 与时间的关系如表 1-1 所示。

表 1-1

t	0	0.1τ	0.69τ	τ	2.3τ	3τ	5τ
u_c	0	10	50	63	90	95	99.3
u_R	100	90	50	37	10	5	0.7

根据脉冲宽度 t_w 的定义,脉冲宽度是由 $0.5V_m$ 变化到 $0.5V_m$ 所需时间,则 t_w 等于 0.69τ ,由(1-6)式还可以看出,只有时间等于无穷大时暂态过程才结束。事实上,惯性元件的电压(电容)或电流(电感)达到稳定值的 95% 或 99.3% 时就可以认为暂态过程结束,电路达到稳定状态,因此暂态持续期等于 $(3\sim 5)\tau$ 。

三要素法是在阶跃开关信号作用条件下,分析计算一阶电路暂态过程的最方便的方法,也是分析计算脉冲电路波形的基本方法,应该熟练掌握它。

2. 非阶跃开关信号作用下一阶电路的分析方法

在非阶跃开关信号作用下,一阶电路的解就不再具有(1-6)式的形式,因此三要素法也就不再适用了,应该采用拉氏变换或卷积来计算电路的暂态过程。但实际上,只要开关信号的边沿远小于电路的时间常数,我们就可以把它看作阶跃信号,从而使用三要素法来计算电路的暂态过程。计算出来的结果误差是很小的。这是因为在开关信号变化期间(边沿),惯性元件的充放电很少(时间常数大),因而可以近似忽略不计。这种考虑实际工程运用而采用的近似方法,给分析计算带来极大方便,而且有利于了解事物的主要矛盾,值得采用。

二、高阶电路的分析方法

所谓高阶电路就是电路中含有两个以上独立的储能元件的电路。所谓两个以上独立的储能元件,就是经过简单的串并联方法无法将电路化简成单一电阻电容电路,或单一电阻电感电路,此时的

电路就是高阶电路。图 1-2 给出了四个电路,其中图(a),(b),(d)都是一阶电路,各电路的时间常数分别是

$$\tau_a = (R_1 + R_2) \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} \quad \tau_b = \frac{L_1 L_2}{(L_1 + L_2) R}$$

$$\tau_d = (C_1 + C_2) \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

而图(c)则是二阶电路,其解不具有(1-6)式的形式,因此二阶电路没有统一的时间常数,也不能用三要素法进行计算。分析计算高阶电路的暂态过程应采用拉氏变换或卷积。此外二阶电路还可能是两种不同性质的储能元件共存的电路,如RLC电路。有关RLC电路的暂态分析可参阅《电路分析基础》的有关章节,这里不再重复。

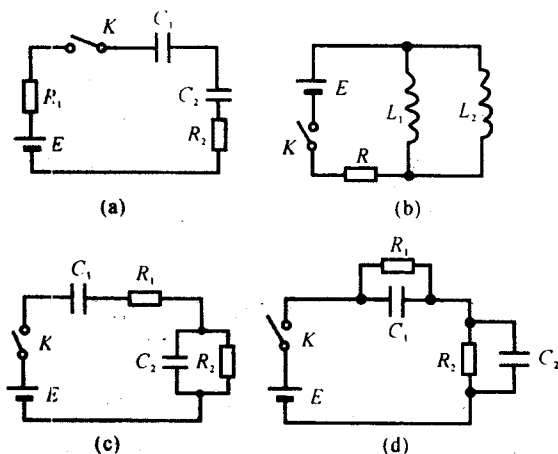


图 1-2 各种 RC 电路

§ 1-2 晶体管开关

我们已经知道脉冲电路的基本结构是开关加惯性系统。这个开关不可能是普通的机械开关,它们大多是晶体管开关,它们是晶

体二极管开关、晶体三极管开关、MOS管开关以及逻辑门开关。在这一节中将集中介绍晶体管开关,有关逻辑门开关将在第三章中介绍。晶体管开关的作用是把电路接通或断开。接通时开关呈现很小的电阻,最好接近于短路;断开时则要求开关呈现很大的电阻,最好是开路。对于晶体二极管或晶体三极管开关而言,它们应工作在两个极端状态:饱和导电状态(以获得尽量小的导通电阻)和截止状态(以获得最大的电阻)。对于MOS管开关而言,则应工作在非饱和导电状态及截止状态。因此,工作于开关状态的晶体管都是大信号运用,它与小信号放大状态不同,所以适用于小信号放大状态的交流等效电路也不能用了。为此,首先需要介绍晶体管的开关特性以及开关运用条件下的晶体管等效电路。由于脉冲电路总是有两种工作状态,即相对稳定状态(开关扳动后又经很长时间,电路中电压电流已经稳定的状态)和瞬变状态(开关突然扳动后的状态),所以晶体管开关也对应工作于两种工作状态,即相对稳定状态和瞬变状态。在不同的工作状态下晶体管的开关特性也不同。本章首先介绍晶体管开关的稳态开关特性。晶体管开关的瞬态开关特性将在第二章中介绍。

一、晶体二极管稳态开关特性及其等效电路

1. 晶体二极管稳态开关特性

为了研究晶体二极管的稳态开关特性,首先要了解它的静态伏安特性。图1-3示出了结型硅二极管的典型伏安特性曲线。由曲线可看出:

①正向偏置($v_D > 0$)时,存在死区和导电区。

当正向电压小于 e_d ($0 < v_D < e_d$) 时,二极管电流极小,约在几纳安到几十微安之间,这时可近似认为二极管处于截止状态。因此,通常把这个区域称为死区。只有当正向电压大于 e_d 以后,二极管电流才随着端电压的增加而显著加大,进入导电区。 e_d 称为二极

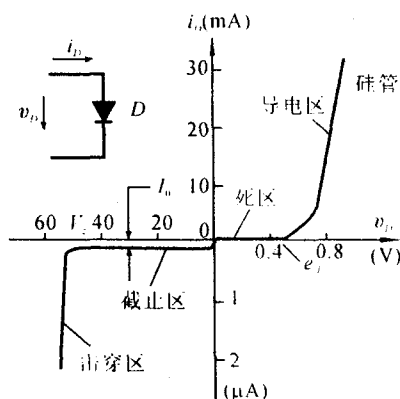


图 1-3 硅二极管伏安特性曲线

管的起始电压,对于硅二极管, $e_d=0.5\sim 0.6\text{V}$,对于锗二极管, e_d 约为 0.2V 。当硅二极管的正向电压大于 0.7V 以后,特性曲线接近于直线,二极管良好导通。

②反向偏置($v_D<0$)时,存在截止区和击穿区。

当反向电压的绝对值小于击穿电压 V_z 的绝对值(即 $V_z<v_D<0$)时,二极管电流极小,这个小电流称为反向饱和电流 I_0 。这时二极管工作于截止区。

当反向电压达到 V_z 时,产生很大的反向电流,二极管被反向击穿,这时二极管工作于击穿区。除了稳压管外,一般作开关用的二极管均应使 $v_D>V_z$,防止被击穿。

由以上分析可以得到二极管的开关工作条件:

当 $v_D<e_d$ 时,二极管截止;若 $v_D<0$ (反偏),则可靠截止。

当 $v_D>e_d$ 时,二极管导通;若 $v_D\geq 0.7\text{V}$ (硅管)或 $v_D\geq 0.3\text{V}$ (锗管),则良好导通。

2. 晶体二极管开关等效电路

由于晶体二极管用作开关时,总是处于大信号运用状态,因此,可将其伏安特性曲线作折线化近似,如图 1-4 所示。导电区的