

脉冲电路 与 数字电路

上册 ▶ 脉冲电路



周文彬 秦国荣 赵仕忠 宋玉炎 合编
高等教育出版社

脉冲电路与数字电路

上册 脉冲电路

周文彬 秦国荣 赵仕忠 宋玉炎 合编

高等教育出版社

本书是作者根据教育部审定的综合大学无线电专业教学计划的精神，在长期教学实践的基础上，对讲义作了多次修改补充后编写而成。

《脉冲电路与数字电路》一书，技术性较强。作者根据综合大学无线电类和物理类专业的需要，在学生具有较强的数学、物理知识的基础上，着重于技术基础理论的阐述和电路与系统的基本原理的分析，同时也尽量反映新技术。在脉冲电路部分，以分析电路的瞬态特性为主，着重于分析方法。其内容包括：脉冲过程的数学分析方法；用线性电路、传输线和非线性电路变换波形；张弛振荡；锯齿波发生器；高速和超高速脉冲电路。

全书分上、下两册，本书为上册，可作为综合大学无线电专业的教材或参考书，也可供其他科技工作者参考。

本书责任编辑：郭玉凤

脉冲电路与数字电路

上册 脉冲电路

周文彬 秦国荣 赵仕忠 宋玉炎 合编

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北香河印刷厂印装

*

开本 787×1092 1/16 印张 14.75 字数 330,000

1986年11月第1版 1986年11月第1次印刷

印数 00,001—3,630

书号 15010·0804 定价 2.20元

前 言

教育部于一九八三年在成都召开的综合大学无线电教材编审委员会上,审定了无线电物理专业和无线电电子学专业的教学计划。本书是根据教学计划的精神,在长期教学实践的基础上,对讲义作了多次修改编写而成。可供综合大学无线电类、物理类专业作教材,也可供师范院校和工科无线电类专业作教学参考书。

综合大学无线电类专业电子线路课程的体系与工科不同,一般是在普通物理的电磁学和电路基础之后开模拟电路和数字电路。在电子线路课之后,还开设电路理论(或信号与系统)、数字信号处理、电子线路的计算机辅助设计等后续课。这就是说,电子线路课不仅是技术基础课,也是专业基础理论课。它的目的要求应该是:掌握各类基本电子线路的功能及其应用;掌握电子线路的基本分析方法;为后续更高深的电路课打基础。

本书根据综合大学无线电类和物理类专业的需要,在学生具有较强的数学、物理知识的基础上,着重于技术基础理论的阐述和电路与系统的基本理论的分析,同时也尽量反映新技术。由于脉冲电路和数字电路在工作原理和分析方法上有很大的不同,因此全书分为脉冲电路与数字电路两个独立的部分。在脉冲电路部分,以分析电路的瞬态特性为主,着重于分析方法。由于综合大学无线电类专业和物理类专业的学生,在学脉冲电路和数字电路前没有学过“信号和线性网络分析”一类的技术基础理论课,故在讲电路的同时,还穿插介绍信号的频谱分析,线性系统的频域分析和复频域分析(傅立叶变换和拉普拉斯变换),以及时域分析等内容。此外,还增加了分布参数电路(传输线)和高速脉冲电路以及有关新器件的内容。在数字电路部分,为适应中、大规模集成电路的应用日益广泛的形势,对于不同类型、不同集成度的数字元件组成的数字系统,着重研究逻辑功能的分析和逻辑系统的设计。

本书是在山东大学无线电电子学系二十余年历届自编讲义的基础上编写的。脉冲电路部分第一、二、三、四章由周文彬同志执笔,第五、六、七、八章由秦国荣同志执笔。数字电路部分第一、三、八、九章由赵仕忠同志执笔,第二、四、五、六、七章由宋玉炎同志执笔。在编写过程中,得到山东大学无线电电子学系冯传海教授、陈翌午副教授、栗玉璋副教授和物理系陆大荣副教授的支持和帮助,丁岸东、史菊秋同志为本书制图做了许多具体工作,在此谨表谢意。

编 者

1986年5月

目 录

第一章 绪论1	5-3 场效应管的特性及其在脉冲电路中的应用	81
1-1 脉冲电路的应用和发展	5-4 二极管限幅器	88
1-2 脉冲的定义	5-5 三极管限幅器	91
1-3 脉冲波形和参数	5-6 集成运算放大器限幅电路	93
思考题和习题	5-7 钳位器	95
第二章 脉冲过程的数学分析方法6	5-8 晶体管倒相器	99
2-1 经典分析法	5-9 集成运算放大器倒相电路	101
2-2 频域分析法——傅立叶变换法	5-10 集成逻辑门倒相器	104
2-3 复频域分析法——拉普拉斯变换法	本章小结	106
2-4 时域分析法——杜哈密尔积分法	思考题和习题	107
本章小结	第六章 张弛振荡器111	
思考题和习题	6-1 晶体管集-基耦合双稳态触发器	111
第三章 用线性电路变换波形30	6-2 晶体管施密特触发器	118
3-1 微分电路	6-3 用集成运算放大器构成的施密特触发器	122
3-2 积分电路	6-4 集成逻辑门施密特触发器	128
3-3 利用运算放大器提高微分和积分电路的精确度	6-5 晶体管集-基耦合单稳态触发器	130
3-4 脉冲变压器	6-6 集成运算放大器单稳态电路	135
本章小结	6-7 集成逻辑门单稳态电路	137
思考题和习题	6-8 晶体管自激多谐振荡器	141
第四章 用传输线变换波形48	6-9 集成运算放大器构成的自激多谐振荡器	147
4-1 传输线的等效电路	6-10 集成逻辑门自激多谐振荡器	148
4-2 传输线上的行波及其终端反射	6-11 间歇振荡器	153
4-3 传输线方程在非稳定状态下的解	6-12 同步与分频	161
4-4 传输线作为电路元件	本章小结	164
4-5 传输线中脉冲过程的分析	思考题和习题	166
4-6 仿真线	第七章 锯齿波发生器170	
4-7 脉冲形成电路	7-1 锯齿电压发生器的基本原理	170
本章小结	7-2 恒流源锯齿波发生器	174
思考题和习题	7-3 晶体管自举电路	178
第五章 用非线性电路变换波形69	7-4 集成运算放大器自举电路	182
5-1 二极管的开关特性及其大信号分区等效电路	7-5 晶体管密勒积分电路	185
5-2 晶体三极管的开关特性及其大信号分区等效电路	7-6 集成运算放大器密勒积分电路	190

7-7 锯齿电流发生器	192	8-4 隧道二极管(TD)的特性及其应用	211
本章小结	199	8-5 电流开关电路	219
思考题和习题	200	8-6 电流型双稳态触发器	222
第八章 高速和超高速脉冲电路	204	本章小结	226
8-1 元件的寄生参数和等效电路	204	思考题和习题	226
8-2 阶跃二极管(SD)及其电路	206	主要参考书	228
8-3 肖特基势垒二极管(SBD)及其应用	209		

第一章 绪 论

1-1 脉冲电路的应用和发展

随着近代电子技术的发展,在雷达、电视、计算机、通信、控制系统、遥测和科学仪表等设备中,越来越多地应用了方波和锯齿波等脉冲信号。脉冲电路就是专门研究脉冲信号的产生、变换、放大和测量等的一门课程。本书将重点讨论脉冲信号的产生和变换问题。下面简单介绍一些应用脉冲信号的实例,以便使大家对于电子技术中的脉冲工作方式有一个初步的了解。

图 1-1 是在雷达中应用的脉冲信号。它由发射脉冲 1 和从目标反射回来的回波 2 构成,中间相差时间 T_D 。因此,目标的距离 D 可以从 $2D = cT_D$ 求得(c 是电磁波的传播速度)。

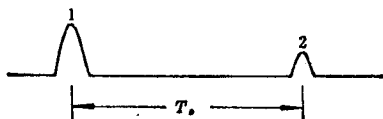


图 1-1 雷达信号



图 1-2 计算机中代表数字的信号

图 1-2 是在电子数字计算机中广泛应用为代表数字 N 的脉冲信号。它是一连串具有一定时间间隔的脉冲,每一个时间间隔代表一位数,如果出现脉冲,该位数是 1,不出现脉冲则是 0。因此, N 是以“二进制”表示的数字。例如,图 1-2 所示脉冲表示的数字是

$$\begin{aligned} N &= 1 \times 2^0 + 0 \times 2^1 + 1 \times 2^2 + 1 \times 2^3 + 0 \times 2^4 + 1 \times 2^5 + 0 \times 2^6 \\ &= 1 + 0 + 4 + 8 + 0 + 32 + 0 = 45 \end{aligned}$$

利用一系列脉冲也能传送信息。可以利用改变脉冲幅度(幅度调制)来传送信号(如图 1-3(a)),也可以利用改变脉冲相对位置(相位调制)来传送信号(如图 1-3(b)),还可以利用改变脉冲宽度(脉宽调制)来传送信号(如图 1-3(c))。在现代通信技术中,广泛采用将一组窄脉冲按信号进行编码的脉冲编码通信。不论采用何种调制方式,由于每个脉冲的持续时间极短,而相邻脉冲的间隔时间较长,因而在同一收发信号系统中,利用时间划分方法更容易实现多路通信。另外,利用调相、调宽和编码,还能大大提高抗干扰度。

电视是利用电信号传送的活动图像。因为图像各处的明暗程度和色彩不同,所以必须把图像分解成很多点(像素),依次逐点转换成电信号传送出去。在接收处,则把收到的电信号转换成不同亮度的光信号,并逐点依次排列成与发送图像一样的图形。由于在发送图像中有很多黑白分明、界限清楚的部分,所以像素各点之间亮度可以有很大的差别,形成的电信号是脉冲状的。此外,为了使发送和接收逐点扫描同步,还要加上脉冲控制信号。图 1-4 所示是一个典型的黑白电视信号。

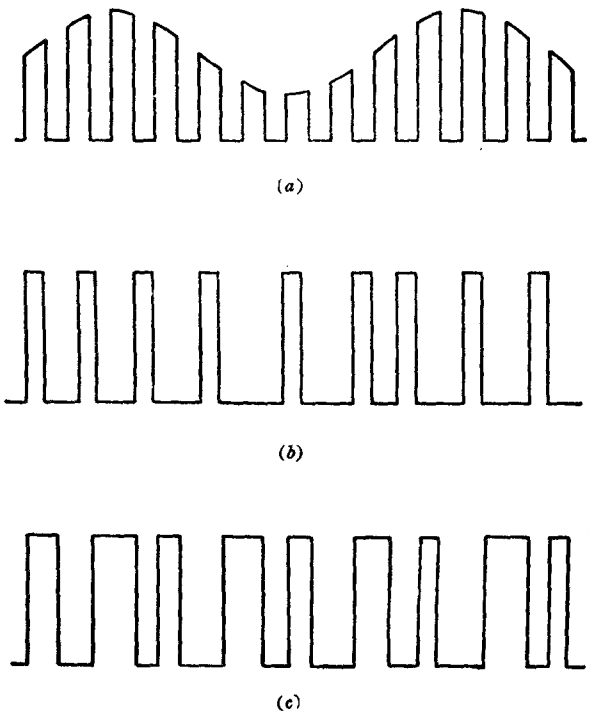


图 1-3 通信机中的脉冲信号

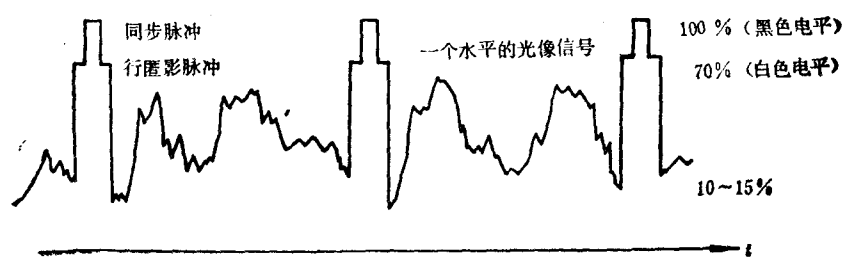


图 1-4 黑白电视信号

原子核的放射线是以不连续的方式(粒子状)放出的，它的探测是通过把放射线转化成电脉冲的方法来实现的。无论在核子物理学基本原理的研究上，还是在原子能工业的控制上，脉冲技术都是很重要的基础技术之一。

脉冲电路的一个重要发展方向是集成化。从六十年代开始，随着半导体工艺的不断改进，各种集成电路的研制和应用取得了很大的进展。集成电路可分为模拟集成电路和数字集成电路两大类。目前，这两种集成电路在脉冲技术中都有广泛的应用。

脉冲电路的另一个重要发展方向是提高电路的工作速度。近年来，随着雷达鉴别能力的提高，计算机计算速度的加快，多路通信路数的增多等，使用的脉冲信号越来越窄，脉冲的宽度已由 μs 、 ns 缩短到 ps 量级。在本教材的第八章里，将专门介绍产生和变换 ns 和 ps 脉冲的高速和超高速脉冲电路。

1-2 脉冲的定义

在给出脉冲定义之前,首先简单地讨论一下电路的稳定状态和过渡过程。

在电磁学和低、高频电路中,遇到的电路问题都是直流或正弦振荡的稳定过程。在这些电路里,电压和电流的变化与作用于电路的外电源的变化服从同一规律,或仅有常数值的差别。所有这类问题,都可以认为是属于很久以前出现,并且永远不停止的电压和电流状态。也就是说,电路的过程是从 $t = -\infty$ 开始,一直延续到 $t = +\infty$ 。事实上,所有直流和交流过程都有开始和終了,而且任何稳定状态的改变,都同时存在建立过程(过渡过程)。以正弦电压作用于图 1-5(a) 所示 RC 串联电路为例,其电路方程为

$$\tau \frac{dv_c}{dt} + v_c = V_m \sin \omega t$$

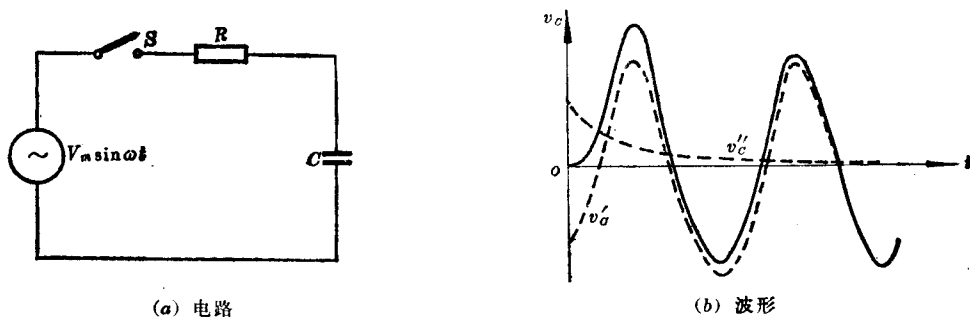


图 1-5 正弦电压作用于 RC 电路

式中 $\tau = RC$ 。解此微分方程,求得 C 的端电压为

$$v_c(t) = \frac{V_m}{\sqrt{1+R^2C^2\omega^2}} \sin(\omega t + \varphi) - \frac{V_m}{\sqrt{1+R^2C^2\omega^2}} e^{-\frac{t}{\tau}} \sin \varphi = v'_c + v''_c$$

式中

$$\varphi = -\arctg \tau \omega$$

可以看出, v_c 由稳定电压 v'_c 和按指数减小的瞬变电压 v''_c 叠加而成,如图 1-5(b) 所示。 τ 称为电路的时间常数,它等于 v''_c 衰减到起始值的 e 分之一所需时间。在 $t = 3\tau$ 时,实际值与稳态值相差约 5%;在 $t = 5\tau$ 时,相差不超过 0.7%。严格地讲,过渡过程是持续到无限久的。不过,在有损耗的实际电路中,瞬变分量衰减很快。通常认为,当 $t > (3 \sim 5)\tau$ 时,电路就进入稳定状态。

所谓脉冲,就是在极短时间内发生变化的电压或电流。时间长短是一个相对概念,比较时间长短的标准是电路的过渡过程。因此,脉冲可以定义为:作用时间短到可以与电路的过渡过程相比的电压或电流。

1-3 脉冲波形和参数

图 1-6 给出了几种常见的脉冲波形。这些脉冲称为“视频脉冲”,它们包含了通信和控制用

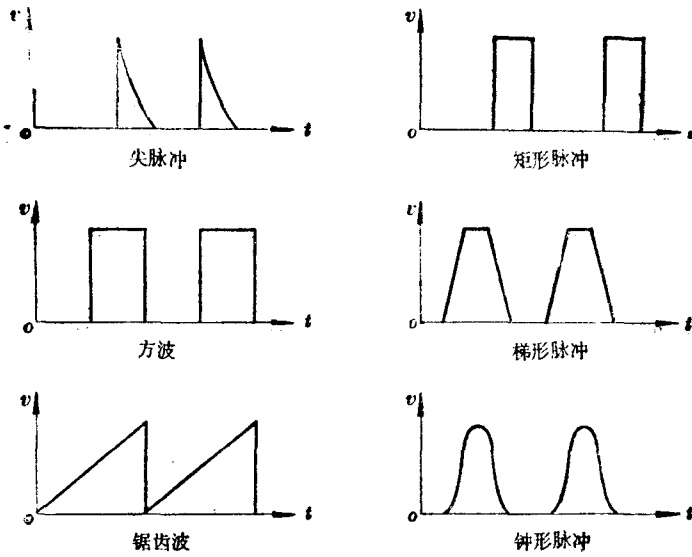
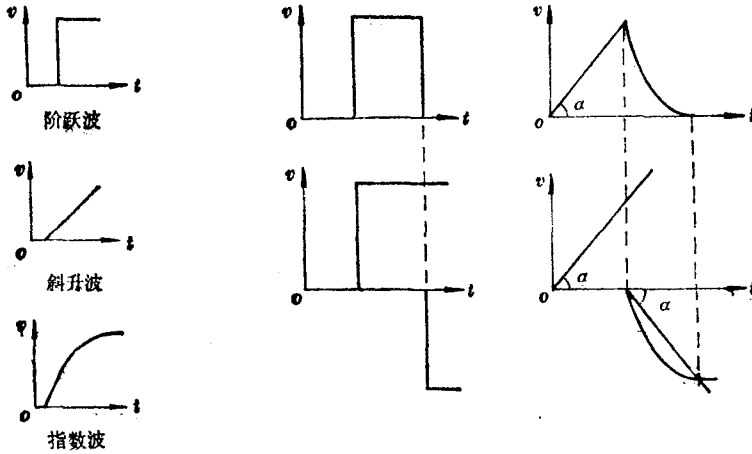


图 1-6 几种常见的脉冲波形

的信息。当然,这些都是理想化了的波形,实际产生的脉冲波形只能是近似理想的。

视频脉冲可由阶跃波、斜升波和指数波叠加而成,如图 1-7 所示。因而,在研究某一网络对脉冲信号的响应特性时,常用这三种波形的电压或电流作为输入信号。



(a) 三种基本信号

(b) 矩形波

(c) 锯齿波

图 1-7 三种基本信号和由其叠加成的脉冲波形

为了用无线电来传送信息,需要产生“射频脉冲”。射频脉冲是用视频脉冲作幅度调制的高频正弦振荡,如图 1-8 所示。

在实际应用中,脉冲的形状具有重要的意义。为了便于定量分析和测量脉冲波形,需要给各种脉冲波形定义一些参数。脉冲波形是千变万化的,其参数也各不相同。下面,我们只讨论矩形

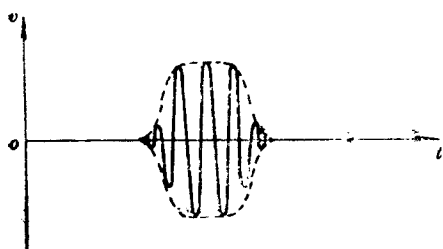


图 1-8 射频脉冲

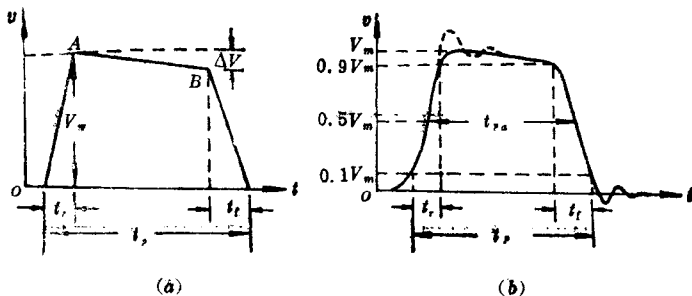


图 1-9 矩形脉冲的主要参数

脉冲的参数。

图 1-9(a) 所示是一个较为理想的矩形脉冲。图中, t_r 为前沿或上升时间, t_f 为后沿或下降时间, AB 为平顶部分, ΔV 为顶部下降, V_m 为最大幅度, t_p 为脉冲宽度。

实际的矩形脉冲如图 1-9(b) 所示, 其前后沿与平顶部分没有明显的分界。习惯上把上升时间和下降时间分别定义为从 $0.1V_m$ 上升到 $0.9V_m$ 和从 $0.9V_m$ 下降到 $0.1V_m$ 所需要的时间(边沿有效宽度)。脉冲宽度则以前后沿 $0.1V_m$ 两点间的时间间隔来计算, 有时也以 $0.5V_m$ 两点间的时间 t_{p0} (脉冲有效宽度) 来衡量脉冲宽度。由于脉冲电路中存在寄生参量, 使得脉冲顶部出现上冲和后沿尾部出现振荡。

脉冲信号属于模拟信号, 对于模拟信号, 我们主要关心其波形质量。脉冲波形的质量可以通过它的参数反映出来, 因而在研究脉冲电路时, 总是把影响脉冲参数的因素和改善措施作为研究的主要内容之一。

思考题和习题

1. 什么是电路的过渡过程? 说明它与稳定过程的区别。
2. 什么叫脉冲? 脉冲电路的研究对象是什么?
3. 矩形脉冲有哪些主要参数? 它们是如何定义的? 为什么要这样来定义?
4. 画出函数 $f(t) = e^{-\frac{t}{\tau}} - 1$ 的图形, 并计算其下降边沿的有效宽度。

第二章 脉冲过程的数学分析方法

脉冲作用于线性电路时,所发生的过程既然是一种不稳定的过程,与此相应的分析方法就不能是分析稳态电路所用的符号法。最常用的数学方法是列解电路的常系数线性微分方程式。假若电路和输入信号都不是很复杂,那末解微分方程可以用经典法,即以方程的通解和特解之和表示其总的解答,但在一般情况下,往往采用拉氏变换法。利用拉氏变换法解微分方程常常是很方便的,它可以把微分和积分运算变成简单的代数运算。另一种解微分方程的方法是傅氏变换法,它与拉氏变换法有着内在的联系。一般说来,对一函数进行傅氏变换时,限制条件比较多,而对同一函数进行拉氏变换时,限制条件较少,因此应用拉氏变换比傅氏变换更为优越,应用范围也广泛得多。但是,傅氏变换除用于求解微分方程外,在脉冲电路中还有其特殊的物理意义,它与信号频谱这一概念有着非常密切的关系。此外,对于复杂波形的脉冲作用于线性系统常用叠加原理求解,如杜哈密尔积分等。本章将介绍以上几种数学方法。

脉冲作用于非线性系统时,因为电路内部包含非线性元件,例如晶体管、场效应管和集成运算放大器等,它们多工作在开关状态,运用于特性曲线的非线性区域,所以电路中发生的过程要用非线性微分方程来描述。非线性特性曲线有许多不同的数学描述方法,例如二极管的特性曲线可以用指数函数等曲线来描述。在应用上,这种方法比较复杂,是不适用的。为了既简化分析方法,又能抓住非线性这个特点,往往将它们的特性曲线分段线性近似,即以分段折线来表示外特性。这样,对组成折线的每一段直线,又可以用线性微分方程来描述。不过,这种方法并不是适用于任何情况的,有时还需要用到图解分析法。

随着电子数字计算机的广泛应用,计算机辅助分析和设计已日益成为电路分析和设计的一种重要方法,许多脉冲电路的分析和计算程序也趋于成熟。有些问题的分析和计算,例如傅氏变换,本来即使采用计算机,也由于计算工作量太大得惊人而难以实现。后来,出现了计算傅氏变换的快速方法,使计算次数和时间大大降低,从而实现了信号的实时分析。近年来,计算机辅助分析和设计在解决非线性问题方面也取得了不少进展。另外,在分析复杂的脉冲电路和系统时,还要用到状态变量法和离散系统分析法。这些方法将在后续课中具体介绍。

2-1 经典分析法

一、电路微分方程的组成和解的形式

我们知道,在电阻、电容和电感元件上,电压和电流的关系是

$$v_R(t) = Ri_R(t)$$
$$v_C(t) = \frac{1}{C} \int_0^t i_C(\xi) d\xi + v_C(0)$$

$$v_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$$

在任一线性电路中，某一支路上的电压或电流都可以根据上述关系式和克希霍夫定律列出电路的微分方程并归化为如下形式

$$a_n \frac{d^n f}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} f}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{df}{dt} + a_0 f = F(t) \quad (2-1)$$

式中， f 是待求的电压或电流； $F(t)$ 是给定的外加电动势或电流源； $a_n, a_{n-1}, \dots, a_1, a_0$ 为已知的仅与电路参数有关的常系数。微分方程的阶数 n 等于独立的起始条件的数目，而起始条件决定于 $t=0$ 时系统的储能。显然，起始条件的数目，即方程的阶数 n 不能超过电路中惰性元件（电容和电感）的数目。习惯上，把用 n 阶微分方程描述的电路叫做 n 阶电路。

(2-1) 式解的一般形式为

$$f(t) = f_a(t) + (A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t} + \dots + A_n e^{p_n t})$$

其中， $f_a(t)$ 是特解，由外作用 $F(t)$ 决定，它表明 $t \rightarrow \infty$ 时的电路状态，即稳定状态。括号中的各项是通解（自由解），其特性仅由系统本身决定，与外作用的性质无关。对于有损耗的电路，自由解随时间衰减，并且在 $t \rightarrow \infty$ 时等于零。 p_1, p_2, \dots, p_n 是代数方程

$$a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0 = 0$$

的根。系数 A_1, A_2, \dots, A_n 决定于已知的起始条件，即 $t=0$ 时 $f(t), f'(t), \dots, f^{(n-1)}(t)$ 之值，可用待定系数法求得。

二、过渡过程公式

在脉冲电路中，最常遇到的是恒定的电压或电流作用于由一个储能元件和一个耗能元件构成的电路。在这种情况下，微分方程是一阶的

$$a_1 \frac{df}{dt} + a_0 f = F \quad (2-2)$$

其解具有如下形式

$$f(t) = f_a + A e^{-\frac{t}{\tau}}$$

式中， $f_a = f(\infty)$ 是方程的特解，它是一个恒值（因为 F 是恒值）， $A e^{-\frac{t}{\tau}}$ 是通解， $-\frac{1}{\tau} = p_1 = \frac{a_0}{a_1}$ 是代数方程 $a_1 p + a_0 = 0$ 的根， τ 是时间常数。令 $t=0^+$ ，求出积分常数

$$A = f(0^+) - f(\infty)$$

因此

$$f(t) = f(\infty) + [f(0^+) - f(\infty)] e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2-3)$$

上式就是一阶电路的阶跃响应公式，简称过渡过程公式或快速公式。初始值 $f(0^+)$ 、稳态值 $f(\infty)$ 和时间常数 τ 称为过渡过程公式的三要素。对于恒值激励的一阶电路，总可以找出 $f(0^+)$ 、 $f(\infty)$ 和 τ 。因此，可以直接利用式(2-3)写出其电压或电流的表达式，而不必列出电路的微分方程。

三、确定 $f(0^+)$ 、 $f(\infty)$ 和 τ 的方法

1. 确定 $f(0^+)$: 由于实际电源给出的瞬时电压和电流只能是有限值, 即只能给出有限的瞬时功率, 因而在线性非时变电路中, 电容的储能 $(W_C = \frac{1}{2} C v_C^2 = \frac{q_C^2}{2C})$ 和电感的储能 $(W_L = \frac{1}{2} L i_L^2 = \frac{\phi_L^2}{2L})$ 都不可能突变, 所以在确定 $f(0^+)$ 时, 可以认为

$$v_C(0^+) = v_C(0^-)$$

$$i_L(0^+) = i_L(0^-)$$

也就是说, 如果 $v_C(0^-) = 0 \text{ V}$, 则电容 C 可以视为短路; 如果 $v_C(0^-) \neq 0 \text{ V}$, 则电容 C 可用电压源 $v_C(0^-)$ 来代替。如果 $i_L(0^-) = 0$, 则电感 L 可以视为开路; 如果 $i_L(0^-) \neq 0$, 则电感 L 可用电流源 $i_L(0^-)$ 来代替。

2. 确定 $f(\infty)$: 由于电路进入稳定状态后流过电容 C 的电流等于零, 电感 L 的端电压等于零, 所以电容 C 可视为开路, 电感 L 可视为短路。

3. 确定 τ : 由于 τ 只与电路结构及元件参数有关, 与外激励函数无关, 因此在计算 τ 时, 可以把电压源短路(保留其串联内阻), 电流源开路(保留其并联内阻), 然后把电路中的电阻和电容(或者电感)按照串并联规则归纳为一个等效的电阻 R 和一个等效的电容 C (或者电感 L), 则电路的时间常数 $\tau = RC$ (对于 RL 电路, $\tau = \frac{L}{R}$)。

例 2-1、具有内阻 R_s 的电源作用于图 2-1(a) 所示电路, 设电源在 $t=0$ 时刻由零跳变到 E , 求输出电压 $v_R(t)$ 。

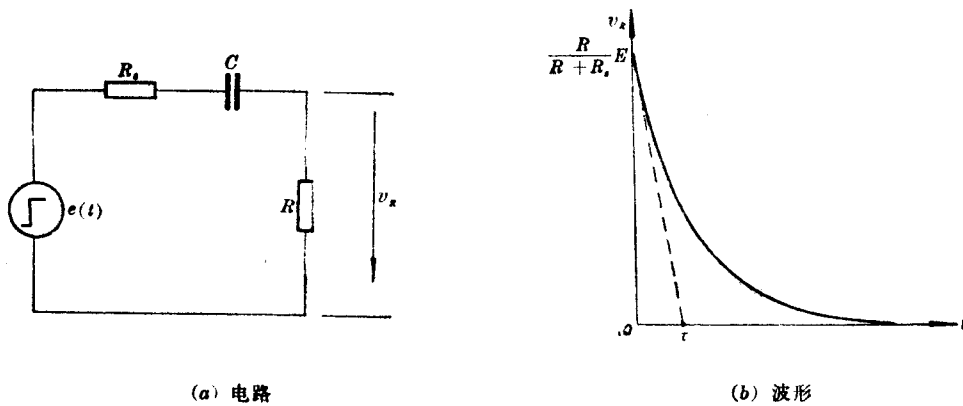


图 2-1

解:

按上述方法可以得到

$$v_R(0^+) = \frac{R}{R + R_s} E$$

$$v_R(\infty) = 0$$

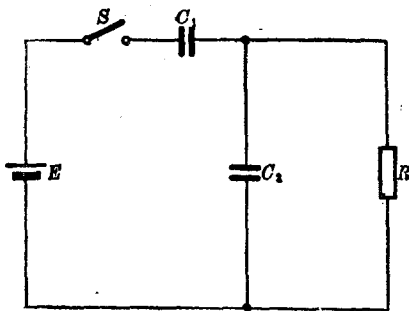
$$\tau = (R + R_s) C$$

代入(2-3)式,得到

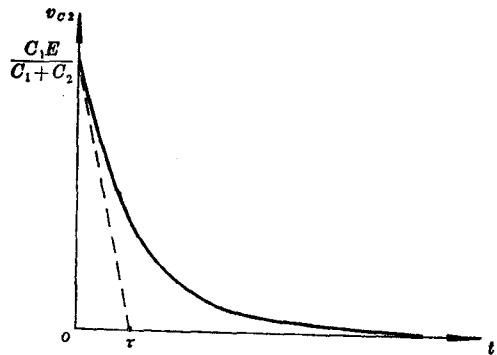
$$v_R(t) = \frac{R}{R+R_s} E e^{-\frac{t}{(R+R_s)C}}$$

在讨论实际电路时,我们常常忽略对过渡过程影响不大的次要因素,例如电源内阻、开关接触电阻等,这样可以使问题变得简单,突出主要元件的作用,其结果可以近似地反映实际情况。

例 2-2、在图 2-2(a) 所示电路中,已知开关 S 接通前电容无储能,求开关接通后 C_2 上的电压。



(a) 电路



(b) 波形

图 2-2

解:

在接通电源的瞬间,由于在电容 C_1 、 C_2 和电源 E 所组成的回路中没有电阻存在,电源提供瞬时无穷大的电流,使 C_1 和 C_2 瞬间充电到 E ,其电压分配服从电容串联分压规则,即

$$v_{C2}(0^+) = \frac{C_1}{C_1+C_2} E$$

显然

$$v_{C2}(\infty) = 0$$

$$\tau = R(C_1+C_2)$$

所以

$$v_{C2}(t) = \frac{C_1}{C_1+C_2} E e^{-\frac{t}{R(C_1+C_2)}}$$

由上述例题可以看出,利用过渡过程公式处理问题是非常方便的。不过应当注意,它的应用范围仅限于包含一个(或者可以合并成一个)惯性元件的 RC 或 RL 电路,同时激励信号必须是恒值。另外还应当注意,在确定初始值时,要对具体问题作具体分析。严格地说,电容上的电压和电感中的电流都不可能突变,但在某些理想情况下是可以突变的,例如在例 2-2 题中,我们看到 v_{C2} 在 $t=0$ 时发生了突变,这是由于我们忽略了电源内阻和开关接触电阻影响的结果。实际上 v_{C2} 在 $t>0$ 的瞬间是逐渐上升的,而不是像图 2-2(b) 所示那样在 $t=0$ 时发生阶跃。但是只要电阻 R 比电源内阻和开关接触电阻之和大得多, v_{C2} 的上升时间相对于其下降时间就小得多,因而可以认为 v_{C2} 在 $t=0$ 时发生了阶跃。

2-2 频域分析法——傅立叶变换法

一、频谱分析

任何形状的周期性脉冲 $f(t) = f(t + nT)$, 如图 2-3 所示, 都可以用傅立叶级数表示

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega_1 t + b_n \sin n\omega_1 t) \quad (2-4)$$

式中 $\omega_1 = 2\pi f_1 = \frac{2\pi}{T}$, $f = \frac{1}{T}$ 为周期性脉冲信号 $f(t)$ 的重复频率。 a_n 和 b_n 都是傅立叶系数, 并且

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega_1 t dt \quad (2-5a)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega_1 t dt \quad (2-5b)$$

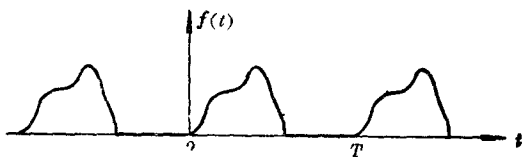


图 2-3 周期性脉冲信号

在 $n=0$ 时, 得到

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (2-5c)$$

由此可见, $\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt$ 是 $f(t)$ 在一个周期内的平均值, 代表信号 $f(t)$ 的直流分量。

(2-4) 式说明, 任何形状的周期性脉冲信号 $f(t)$ 都可以表示为直流分量与无数不同频率的正弦分量和余弦分量之和。也就是说, 任何形状的周期性脉冲信号都是由直流分量和无数不同频率的正弦和余弦分量构成的。在这种信号的谐波结构中, 相应于 $n=1$ 的正弦和余弦分量, 其频率等于信号 $f(t)$ 的重复频率, 通常称这个分量为基波, 并称它的角频率 $\omega_1 = \frac{2\pi}{T}$ 为基频。其他分量的角频率是基频的整数倍, 通常称它们为高次谐波, 如二次谐波 ($n=2$), 三次谐波 ($n=3$) 等等。直流分量、基波和高次谐波的集合, 称为信号 $f(t)$ 的频谱。

(2-4) 式还可以改写成

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t - \varphi_n)$$

式中

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2}$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n}$$

A_n 代表 n 次谐波的振幅, φ_n 代表 n 次谐波的初相位。我们将 $\frac{a_0}{2}, A_1, A_2, \dots, A_n, \dots$ 的集合称为信号 $f(t)$ 的“振幅频谱”, 将 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n, \dots$ 的集合称为 $f(t)$ 的“相位频谱”。求信号 $f(t)$ 的频谱称为频谱分析。

傅氏级数揭示了信号的频谱特性, 使得我们可以对复杂信号进行分解或者实现信号的合成。(2-5) 式指出了由 $f(t)$ 求其频谱的方法, (2-4) 式指出了由 $f(t)$ 的频谱合成原信号的方法——线

性叠加。

现在我们来分析周期性矩形脉冲的频谱。

图 2-4 所示周期性矩形脉冲的重复周期为 T ，脉冲宽度为 t_p ，幅度为 A 。利用(2-5)式可以求出该脉冲信号的频谱中各分量的参数如下

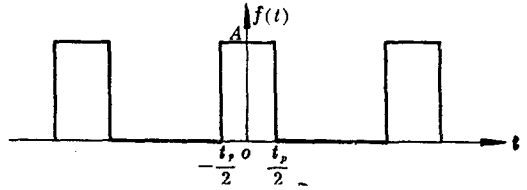


图 2-4 周期性矩形脉冲

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt = \frac{1}{T} \int_{-\frac{t_p}{2}}^{\frac{t_p}{2}} A dt = A \frac{t_p}{T} \quad (2-6a)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{t_p}{2}}^{\frac{t_p}{2}} A \cos n\omega_1 t dt = \frac{2A}{n\pi} \sin n\pi \frac{t_p}{T} \quad (2-6b)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{t_p}{2}}^{\frac{t_p}{2}} A \sin n\omega_1 t dt = 0 \quad (2-6c)$$

$$A_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} = |a_n|$$

$$\varphi_n = \arctg \frac{b_n}{a_n} = \begin{cases} 0 & \text{当 } a_n \text{ 为正} \\ \pi & \text{当 } a_n \text{ 为负} \end{cases}$$

由上式可以看出， a_n 的绝对值就是谐波分量的振幅， a_n 的正负号则表示了该分量的初相位。

因此，周期性矩形脉冲可以表示为

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega_1 t = A \frac{t_p}{T} \quad (\text{直流分量})$$

$$+ \left(\frac{2A}{\pi} \sin \pi \frac{t_p}{T} \right) \cos \omega_1 t \quad (\text{基波})$$

$$+ \left(\frac{A}{\pi} \sin 2\pi \frac{t_p}{T} \right) \cos 2\omega_1 t + \dots \quad (\text{二次谐波})$$

$$+ \left(\frac{2A}{n\pi} \sin n\pi \frac{t_p}{T} \right) \cos n\omega_1 t + \dots \quad (n \text{ 次谐波})$$

也就是说，周期性矩形脉冲可以分解为

$$A \frac{t_p}{T}, \left(\frac{2A}{\pi} \sin \pi \frac{t_p}{T} \right) \cos \omega_1 t, \left(\frac{A}{\pi} \sin 2\pi \frac{t_p}{T} \right) \cos 2\omega_1 t, \dots, \left(\frac{2A}{n\pi} \sin n\pi \frac{t_p}{T} \right) \cos n\omega_1 t, \dots$$

下面我们用波形图说明信号的分解和叠加。为了简单起见，假定图 2-4 所示周期性矩形脉冲的周期 $T = 2t_p$ ，即 $\frac{t_p}{T} = \frac{1}{2}$ 。由(2-5)式可求得

$$a_n = \begin{cases} 0 & \text{当 } n \text{ 为偶数} \\ \frac{2A}{n\pi} & \text{当 } n = 1, 5, 9, \dots, (4m+1), \dots \\ -\frac{2A}{n\pi} & \text{当 } n = 3, 7, 11, \dots, (4m+3), \dots \end{cases}$$