



技工学校电子类通用教材

晶体管脉冲与数字电路



天津科学技术出版社

责任编辑: 徐 彤

技工学校电子类通用教材
晶体管脉冲与数字电路
技工学校电子类专业教材编审委员会组织编写

*

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道130号

天津新华印刷三厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本787×1092毫米 1/16 印张15.25 字数370 000

1983年12月第1版

1990年4月第2版

1990年4月第6次印刷

印数: 149 201—157 700

ISBN 7-5308-0085-X/G·24 定价: 6.05元

内 容 简 介

本书是根据劳动人事部培训就业局、电子工业部教育局审定颁发的《晶体管脉冲与数字电路教学大纲》组织编写的。全书共分十一章，前六章主要介绍脉冲技术的基础知识及分立元件的双稳态电路、单稳态电路、自激多谐振荡器、射极耦合触发器、锯齿波发生器等基本单元电路的工作原理，后五章主要介绍逻辑代数、集成门电路、逻辑部件（计数器、寄存器和译码器）以及不同逻辑电路之间的转接电路。

本书是技工学校半导体器件专业、整机专业和计算机专业的教材，也可作为电子类工厂工人考工及职业中学、职工业余学校有关专业的参考用书。

本书由张顺启同志主编。

说 明

当前,电子技术迅速发展,国民经济各部门对电子技术的应用日益广泛,对电子类专业技术工人的需求越来越迫切。为了满足技工学校培养电子类专业中级技术工人的需要,不断提高教学质量,加速实现我国的四个现代化,劳动人事部培训就业局、电子工业部教育局在前几年组织编写教材工作的基础上,于1986年成立技工学校电子类专业教材编审委员会,委托北京、天津、上海三市的电子工业部门,组织编写技工学校电子类专业通用教材。这次编写的教材有数学、物理、制图、电子电路基础、电子测量与仪器、收录机原理调试与维修、无线电基础、微型电子计算机原理、操作系统、程序设计基础、微型计算机原理及应用、数字逻辑电路、录像机原理、BASIC语言和PASCAL语言等十五种,由劳动人事出版社出版;另有电工基础、晶体管脉冲与数字电路、电视机原理调试与维修、无线电整机装配工艺基础、晶体管原理等五种,仍由天津科学技术出版社出版。其它课程的教材,以后将陆续组织编写。

上述教材,是本着改革的精神组织编写的。力求做到理论与实际相结合,符合循序渐进的要求,从打好基础入手,突出操作技能训练的特点,并且尽量反映当前生产中采用新设备、新材料、新技术、新工艺的成就。力图使培养出来的学生,能够比较系统地掌握专业技术理论知识,学会一定操作技能,具有培养目标要求的文化素质和职业道德品质,以适合电子工业发展的需要。

这套教材供二年制(招收高中毕业生)和三年制(招收初中毕业生)的技工学校电子类专业专业的学生使用。也适合青工培训和职工自学使用。在使用教材的过程中,希望读者提出批评和改进意见,以便再版时修订。

劳动人事部培训就业局
电子工业部教育局

目 录

第一章 脉冲技术的基础知识.....	(1)
§ 1-1 概述.....	(1)
§ 1-2 RC电路.....	(4)
§ 1-3 晶体管的开关特性.....	(19)
复习题.....	(37)
第二章 双稳态电路.....	(39)
§ 2-1 双稳态电路的工作原理.....	(39)
§ 2-2 其他电路简介.....	(49)
§ 2-3 双稳态电路的调试.....	(50)
§ 2-4 应用举例.....	(52)
复习题.....	(53)
第三章 单稳态电路.....	(55)
§ 3-1 集-基耦合单稳态电路.....	(55)
§ 3-2 射极耦合单稳态电路.....	(62)
§ 3-3 应用举例.....	(64)
复习题.....	(68)
第四章 自激多谐振荡器.....	(70)
§ 4-1 集-基耦合自激多谐振荡器的工作原理.....	(70)
§ 4-2 波形分析与电路的改进.....	(71)
§ 4-3 设计举例及调试中常见的问题.....	(73)
§ 4-4 应用举例.....	(75)
复习题.....	(75)
第五章 射极耦合触发器(施密特触发器).....	(77)
§ 5-1 电路的工作原理.....	(77)
§ 5-2 稳定工作的条件.....	(79)
§ 5-3 电路的回差及其控制方法.....	(81)
§ 5-4 射极耦合触发器的基本用途.....	(81)
§ 5-5 应用举例.....	(87)
复习题.....	(83)
第六章 锯齿波发生器.....	(90)
§ 6-1 锯齿波电压产生的基本方法.....	(91)
§ 6-2 晶体管作恒流源的锯齿波发生器.....	(94)
§ 6-3 电容负反馈锯齿波发生器.....	(96)
§ 6-4 自举式锯齿波发生器.....	(98)
§ 6-5 锯齿波电流产生的原理.....	(100)
复习题.....	(106)
第七章 集成逻辑门电路.....	(107)
§ 7-1 逻辑关系的基本概念.....	(107)
§ 7-2 基本逻辑门电路.....	(107)

§ 7-3 数字集成电路的分类与集成门电路的逻辑结构	(111)
§ 7-4 集成门电路	(113)
复习题	(139)
第八章 逻辑代数	(141)
§ 8-1 逻辑代数基础	(141)
§ 8-2 逻辑函数的实现	(145)
§ 8-3 二进制数	(146)
§ 8-4 逻辑函数的标准表达式	(149)
§ 8-5 逻辑函数的化简	(151)
复习题	(158)
第九章 集成电路触发器	(162)
§ 9-1 基本触发器	(162)
§ 9-2 电位触发方式的触发器	(164)
§ 9-3 主-从触发方式的触发器	(170)
§ 9-4 边沿触发方式的触发器	(174)
§ 9-5 触发器的主要参数及测试方法	(178)
§ 9-6 三种触发方式的比较	(182)
复习题	(184)
第十章 逻辑部件	(186)
§ 10-1 概述	(186)
§ 10-2 编码器	(186)
§ 10-3 译码器	(188)
§ 10-4 BCD-七段译码/驱动器	(190)
§ 10-5 数值比较器	(201)
§ 10-6 数据选择分配器	(205)
§ 10-7 奇偶校验电路	(207)
§ 10-8 基本运算器	(210)
§ 10-9 寄存器和移位寄存器	(213)
§ 10-10 计数器	(217)
§ 10-11 节拍分配器与脉冲分配器	(230)
复习题	(232)
第十一章 转接电路	(233)
§ 11-1 TTL电路和分立元件电路的转接电路	(233)
§ 11-2 TTL电路与HTL电路的转接电路	(234)
§ 11-3 TTL电路和MOS电路的转接电路	(234)
复习题	(237)

第一章 脉冲技术的基础知识

§ 1-1 概 述

在电工课程的学习中,对于正弦波已比较熟悉,其电压或电流是随时间按正弦规律连续变化的。而脉冲波则与正弦波不同,其电压或电流随时间变化有时是断续出现的,有时是脉动的,如图 1-1 所示。

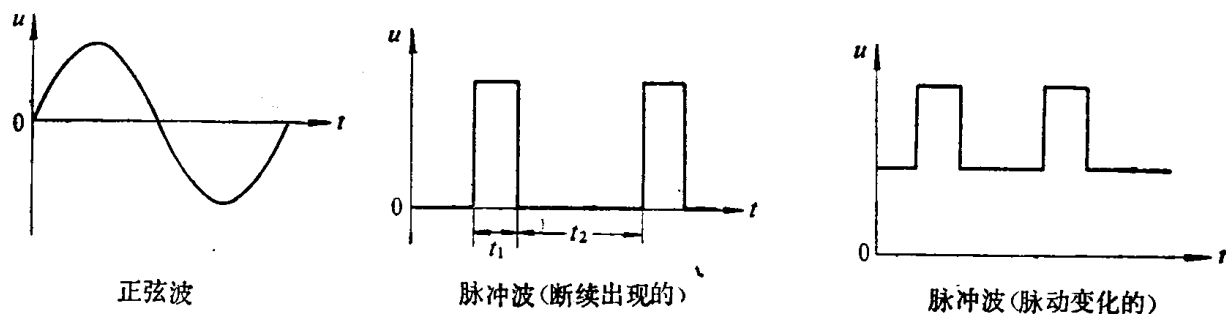


图 1-1

脉冲这个词包含有脉动和突变的意思。脉冲技术中有时使用图 1-1 的脉冲波,其电压或电流出现的时间相对它间歇的时间要小得多,即 $t_1 \ll t_2$ 。如同人的脉搏跳动,一冲一冲地出现。故而将这种变化的电压或电流称为脉冲波,简称脉冲。由于工业、农业、特别是军事技术的发展,脉冲技术的应用愈来愈广泛,从雷达、电视等逐渐发展到数字通信、卫星通信、计算机、各种数字仪表、激光技术、电子医疗设备以及各种工业数字测量设备,自动控制设备等。由于应用的发展,相应出现的脉冲波的种类也愈来愈多。我们把非正弦规律变化的电压或电流统称为脉冲,其波形与正弦波主要不同点是包含有突然变化的成分。

脉冲波形种类很多,常见波形见图 1-2。

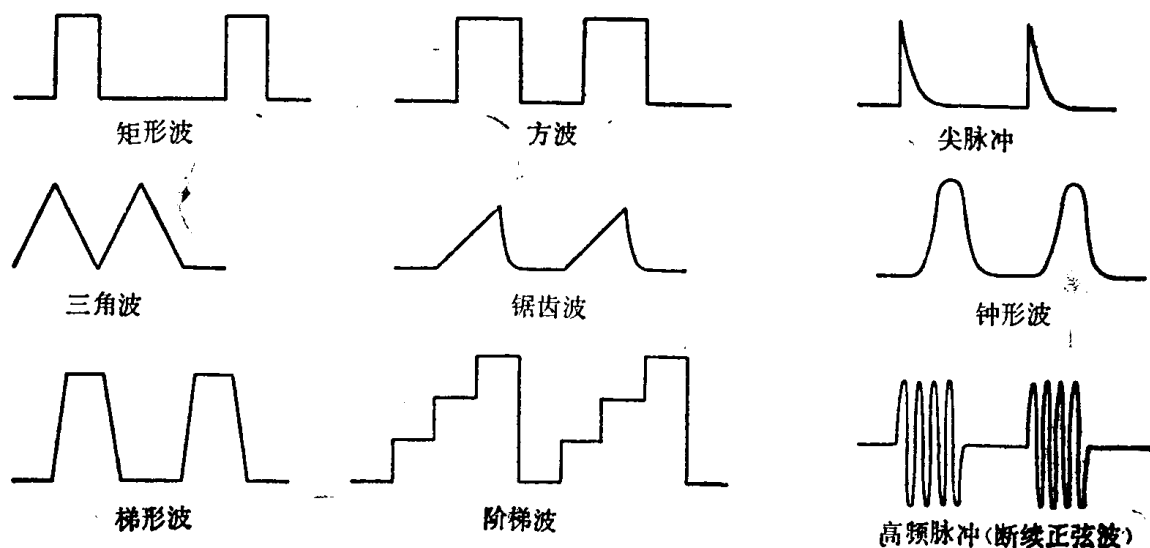


图 1-2

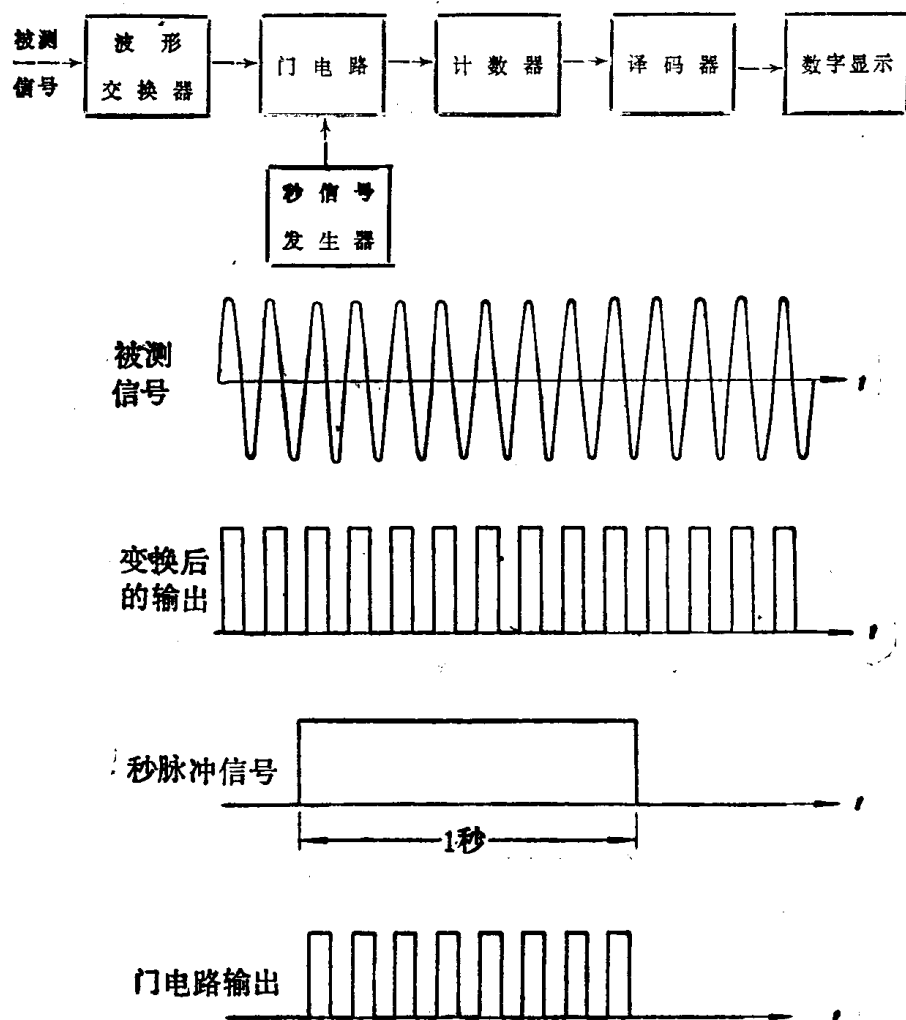


图 1-3 数字频率计方框图及其工作波形

在讨论脉冲技术具体内容之前，先看一个简单的例子：图1-3是一种数字频率计的方框图，数字频率计是用来测量周期性电信号频率的数字化仪器。被测信号可为正弦或非正弦的周期性电信号。

我们知道，周期性信号的频率是指每秒钟信号重复出现的次数，它的单位是赫兹，记为 Hz。由波形图可见，波形变换器将被测信号变换成矩形波，并送入门电路。门电路受秒信号发生器输出的秒信号控制，使门电路只在一秒钟时间内是打开的，于是，通过门电路送入计数器的只是一秒钟内的脉冲个数（一个脉冲表示被测信号重复变化一次），最后通过显示器所显示的数字则表示了被测信号在一秒钟内重复出现的次数，即被测信号的频率。

脉冲电路种类繁多，按功能可分为简单功能电路和复杂功能电路两类。前者包括脉冲信号的产生、变换、控制、放大、记忆等电路；后者包括计数器、寄存器、运算器、译码器、显示器等电路。本课程除重点讲述简单功能电路的基本工作原理外，还将介绍常用复杂功能电路的组成方法。但从上述的应用实例中可以看出，脉冲技术所研究的对象，可以概括为：脉冲信号的产生、变换、控制与测量。

在实践中，经常需要对脉冲波形进行定量分析，以表述和评价脉冲电路的性能。这就需要有一些具体的物理量来表示脉冲信号的特征，这些物理量便称为脉冲的参数。

矩形波是最常用的一种脉冲信号,理想化矩形波如图1-1所示。在分析整体电路原理时,为简化问题,便于分析,常采用理想化的矩形波。但实际电路中的矩形波却不象理想化那样简单,如图1-4所示。下面,我们就以这种实际矩形波为例,介绍脉冲主要参数的含义。

(1) 脉冲幅度 U_m (I_m) 脉冲底部和脉冲顶部的数值之差称为脉冲幅度,用 U_m (I_m) 表示。它是表示脉冲信号强弱的参数,见图1-4。

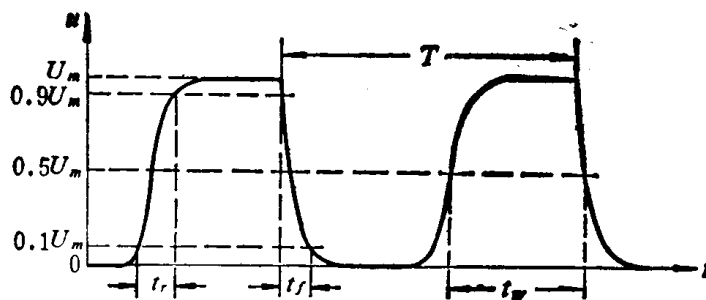


图 1-4 实际的矩形波

对于顶部和底部有过冲或阻尼振荡的脉冲,其幅度应取基本脉冲的幅度,见图1-5。

在逻辑电路中通常把基本脉冲较高的那个电平值(顶部之值)称为高电平,用 U_H 表示。把基本脉冲较低的电平值(底部之值)称为低电平,用 U_L 表示。显然 $U_m = U_H - U_L$ 。

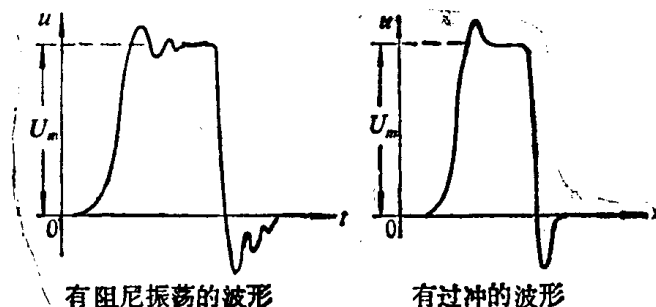


图 1-5 有阻尼振荡或过冲的矩形波

(2) 脉冲周期 T 两个相邻的脉冲重复出现的间隔时间。如图1-4中的 T 。

周期的倒数即为脉冲重复的频率,即 $f = 1/T$ 。

(3) 脉冲上升时间 t_r 通常指脉冲由 $0.1U_m$ (I_m) 上升到 $0.9U_m$ (I_m) 所需的时间,如图1-4的 t_r 。

t_r 愈小,表示脉冲上升得愈快,它在脉冲技术中是一个很重要的参数。

(4) 脉冲下降时间 t_f 通常指脉冲由 $0.9U_m$ (I_m) 下降到 $0.1U_m$ (I_m) 所需的时间,见图1-4中的 t_f 。

(5) 脉冲宽度 t_w 指脉冲出现后所持续的时间。

对于实际矩形波,常取上升或下降至 $0.5U_m$ 处的时间间隔作为脉冲宽度,见图1-4中的 t_w 。

对于三角波和其它底和顶部宽度不一的波形,有时也用脉冲底部的宽度来作为脉宽。在实用中给出的脉冲宽度一般都有具体说明。

§ 1-2 RC 电路

尽管脉冲电路的种类很多,但构成电路的基本元件只是晶体管、电阻、电容和电感等。其中晶体管作为开关,用来打破电路的稳态,而电阻、电容或电感等则是为了控制暂态过程的时间和变化律。掌握这些基本元件的特性和暂态过程的分析方法是学习脉冲电路的基础。

一、电容器充放电规律

两个金属极板中间由介质隔开就构成了电容器,它的符号见图1-6。

电容器是容纳电荷的容器,容纳电荷能力的大小,用电容量表示,记为 C 。用 Q 表示电容器极板所充电量,用 U_c 表示电容器极板间电压,三者有以下关系:

$$C = \frac{Q}{U_c} \quad (1-1)$$

极板间每伏电压能容纳1库仑(C)电荷的电容规定为1法拉的容量。实用中的电容比1法拉(F)要小得多,因此,常采用的单位为微法和皮法。

$$1 \text{ 法拉}(F) = 1 \times 10^6 \text{ 微法} (\mu F)$$

$$1 \text{ 法拉}(F) = 1 \times 10^{12} \text{ 皮法} (pF)$$

一个电容器的电容量大小取决于它本身的结构(极板面积、极板间距和介质),所以对一定结构的电容器,它的电容量 C 为常数。即 Q 与 U_c 的比值是常数。我们将1-1式改写为

$$U_c = \frac{1}{C} \cdot Q \quad (1-2)$$

(1-2)式更直观地表明了,只有电容器中充有一定的电荷时极板间才会有相应的电压。如果 Q 为零则 U_c 也为零。

在实际电路中,电容器充电或放电的电流是有限的,因此,电容器极板上电荷的累积和泄放就需要时间,换句话说,电容器极板间电压的增加或减少都需要经历一定时间,所以我们称电容器为隋性元件。

下面用图1-7所示电路来说明电容器的充放电过程。

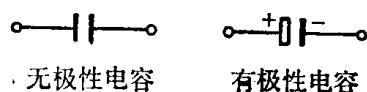


图 1-6 电容器符号

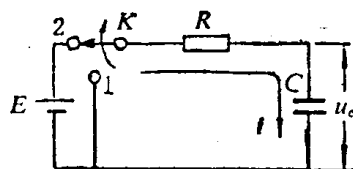


图 1-7 RC充放电实验电路

设原始状态 K 接1, $u_c = 0$, $i = 0$, 电路处在一个稳态(电压和电流都不变)。

假定在 $t = 0$ 时将开关 K 扳向2, 由于电源 E 的接入, 电路的稳态被破坏, 电源 E 将通过 R 对 C 进行充电, 电路开始向新的稳态过渡。下面先讨论一下总的变化趋势。

由图1-7可以得到

$$i = \frac{u_R}{R} = \frac{E - u_C}{R} \quad (1-3)$$

由于原始状态 $u_C = 0$ (极板上无电荷), 当 K 刚接 2 的瞬间, 电容器尚未充上电荷, 故 u_C 仍为零, 由 (1-3) 式可得此时充电电流 $i = \frac{E}{R}$ 为最大。

随着时间的增加, 电容器的电荷逐渐累积, u_C 随之增加, 因而电流 i 将逐渐减小, 而电流的减小又会使电荷累积速度变慢, 即 u_C 的增加速度变慢, 可见, 充电的速度愈来愈慢。当时间足够长, $t \rightarrow \infty$ 时, 方能达到 $u_C = E$ 、 $i = 0$, 充电结束, 电路达到另一个稳态, 见图 1-8。图 1-9 的曲线表示了该充电的过程。

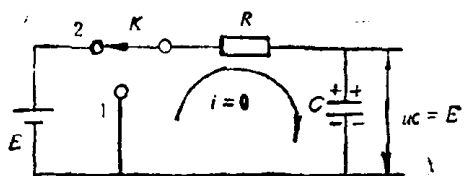


图 1-8 充电结束后电路的稳态

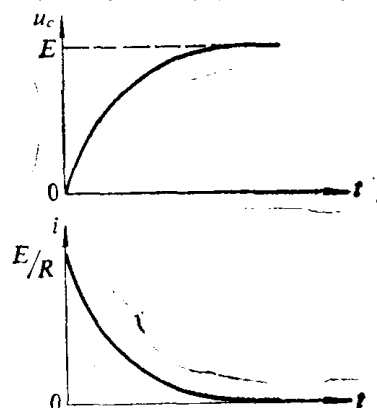


图 1-9 电容器充电曲线

经数学证明, 充电时电压和电流变化规律为:

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

$$i = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

其中 $\tau = RC$ 为电路的时间常数。经下式推寻, 其量纲为秒。

$$\begin{aligned} [R] \cdot [C] &= [\text{欧姆}] \cdot [\text{法拉}] = \left[\frac{\text{伏特}}{\text{安培}} \right] \cdot \left[\frac{\text{库仑}}{\text{伏特}} \right] \\ &= \frac{[\text{伏特}] \cdot [\text{安培}] \cdot [\text{秒}]}{[\text{安培}] \cdot [\text{伏特}]} = \text{秒} \end{aligned}$$

同理, 设原来开关处于 2, 电容器已充满电荷, 即 $u_C = E$, 如图 1-8 所示。当开关由 2 扳向 1 时, 见图 1-10。电容器原有的电荷通过电阻 R 泄放也需要一个过程, 即 u_C 的下降也需要一定时间, 这就是电容器的放电过程。放电时由初始值 $u_C = E$ 、 $i = -\frac{E}{R}$ (因放电电流与充电电流反方向) 开始, 直至极板电荷全部放完, 即 $u_C = 0$ 、 $i = 0$ 时结束。

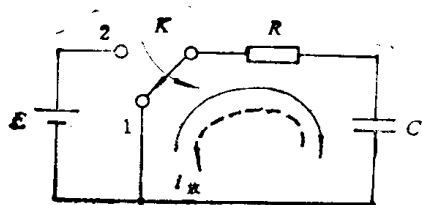


图 1-10 电容器放电电路

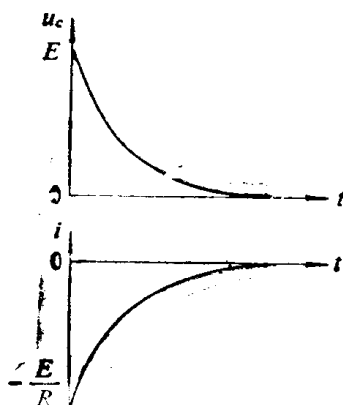


图 1-11 电容器放电曲线

放电时电压和电流的变化规律为:

$$u_c = E \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$i = \left(-\frac{E}{R}\right) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}$$

图1-11为电容器放电的曲线。

总之, 在RC电路中, 由开关动作打破电路的原始状态(作用于电路的电压产生突然变化), 电容器将出现充电或放电过程, 使电路从原始状态向新的稳态过渡, 我们把这个过程称为电路的过渡过程或暂态过程。由以上分析可知, 在暂态过程中, 电压和电流均按指数规律变化。

图1-12、图1-13分别绘出了图1-7电路在不同时间常数和不同外加电压情况下的充电曲线。

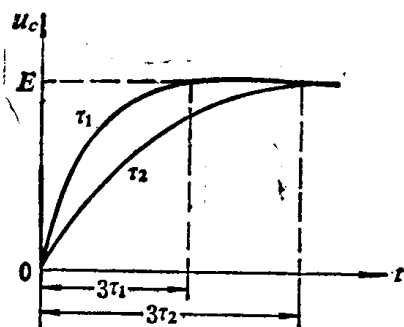


图 1-12 时间常数不同时 ($\tau_2 > \tau_1$) 的充电曲线

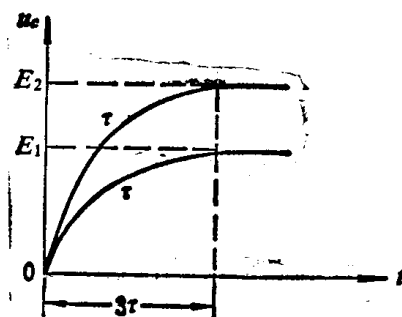


图 1-13 外加电压不同时的充电曲线

从图1-12可见, 时间常数 τ 愈大, 电路中的暂态过程就愈长。这是由于外加电压一定的情况下, 充电结束时电容器所建立的电压是一定的。对于一定容量的电容器来说, 所需累积的电荷量也是一定的。若电阻 R 愈大, 则充电电流就愈小, 累积相应的电荷量所需时间也就愈长; 若 R 一定, 而 C 不同, 在充电结束时, 电容器所建立的电压虽然相同, 但对于容量愈大的电容器所需累积的电荷量就愈多, 所以, 充电过程也就愈长。反之, 充电过程就愈短。

从图1-13可见, 对于同一时间常数的电路, 若外加电压不同时, 其暂态过程所需的时间是相同的。因为外加电压增大时, 虽然充电电流增大了, 但由于充电结束时, 电容器所需建

立的电压相应增大,所需积累的电荷量也相应增多,这两个因素互相抵消的结果,使电路中暂态过程的时间相同。

以上分析了RC电路中的充电过程,放电过程也如此。

总之,RC电路暂态过程所需时间,仅取决于电路的时间常数,而与外加电压的大小无关。

二、简单RC电路的分析方法

对脉冲电路,若能够绘出脉冲波形,对于分析电路原理是十分重要的。而暂态过程曲线又是脉冲波形中很重要的组成部分,因此,掌握一种绘制暂态过程曲线的简便方法,是很必要的。

从图1-9、图1-11可以看出,电容器充电或放电时,其电压或电流均按指数曲线变化。我们只要知道指数曲线的开始值和结束值,由开始值用一条指数曲线逐渐向结束值趋近,即可大致描绘出它的规律。为了以后叙述和计算上的方便,我们把暂态过程开始点电压或电流之值称为电路的起始值。设开关动作时 $t=0$,则起始值记为 $u(0^+)$ 或 $i(0^+)$,也可以抽象出来用数学符号 $f(0^+)$ 来表示。将暂态过程所趋向的数值称为趋向值,记为 $u(\infty)$ 或 $i(\infty)$,也可以抽象出来,用数学符号 $f(\infty)$ 表示。

暂态过程曲线有两种情况:当 $f(0^+) < f(\infty)$ 时为按指数上升的曲线,如图1-9中的 u_c 和图1-11中的 i ;当 $f(0^+) > f(\infty)$ 时为按指数衰减的曲线,如图1-9中的 i 和图1-11中的 u_c 。

在实践中,还经常会遇到对暂态过程进行定量分析的问题,下面介绍一种用于定量分析的表格。

经数学分析,简单RC电路中暂态过程的通用解析式为:

$$f(t) = f(0^+) + [f(\infty) - f(0^+)] \cdot (1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

整理可得:

$$\frac{f(t) - f(0^+)}{f(\infty) - f(0^+)} = (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (1-4)$$

将不同 $\frac{t}{\tau}$ 所对应的 $\frac{f(t) - f(0^+)}{f(\infty) - f(0^+)}$ 之值列于表1-1。

(1-4)式中, $f(t)$ 表示由起始值算起,经 t 时间所达到的瞬时值, $f(t) - f(0^+)$ 表示经 t 时间暂态过程已完成的数值,于是 $[f(t) - f(0^+)]/[f(\infty) - f(0^+)]$ 即表示经 t 时间完成暂态

全过程的百分数(表中以小数形式表示)。例如 $\frac{t}{\tau} = 0.23$,在 $\frac{t}{\tau}$ 竖格中找到0.2, $\frac{t}{\tau}$ 横格

中找到3,由0.2和3的两行交叉点查出对应的 $[f(t) - f(0^+)]/[f(\infty) - f(0^+)]$ 之值为0.206,于是我们就可以说,当 $t = 0.23\tau$ 时,暂态过程已经完成了20.6%。

为描绘暂态过程曲线的方便,由表1-1中 $\frac{t}{\tau}$ 和 $[f(t) - f(0^+)]/[f(\infty) - f(0^+)]$ 一一对应的关系,作出了暂态过程的通用曲线,见图1-14。

表1-1 简单RC电路暂态过程通用表

$\frac{t}{\tau}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0.0	0	0.010	0.020	0.030	0.039	0.049	0.059	0.068	0.077	0.086
0.1	0.095	0.104	0.113	0.122	0.131	0.139	0.148	0.156	0.165	0.173
0.2	0.181	0.189	0.197	0.206	0.213	0.221	0.229	0.237	0.244	0.252
0.3	0.259	0.267	0.274	0.281	0.288	0.295	0.302	0.309	0.316	0.323
0.4	0.330	0.336	0.343	0.350	0.356	0.362	0.369	0.375	0.381	0.387
0.5	0.394	0.400	0.406	0.411	0.417	0.423	0.429	0.435	0.440	0.446
0.6	0.451	0.457	0.462	0.467	0.473	0.478	0.483	0.488	0.493	0.498
0.7	0.503	0.508	0.513	0.518	0.523	0.528	0.532	0.537	0.542	0.546
0.8	0.551	0.555	0.560	0.564	0.568	0.573	0.577	0.581	0.585	0.589
0.9	0.593	0.598	0.601	0.605	0.609	0.613	0.617	0.621	0.625	0.628
1.	0.632	0.667	0.699	0.728	0.753	0.777	0.798	0.817	0.835	0.850
2.	0.865	0.878	0.889	0.900	0.909	0.918	0.926	0.933	0.939	0.945
3.	0.950	0.955	0.959	0.963	0.967	0.970	0.973	0.975	0.978	0.980

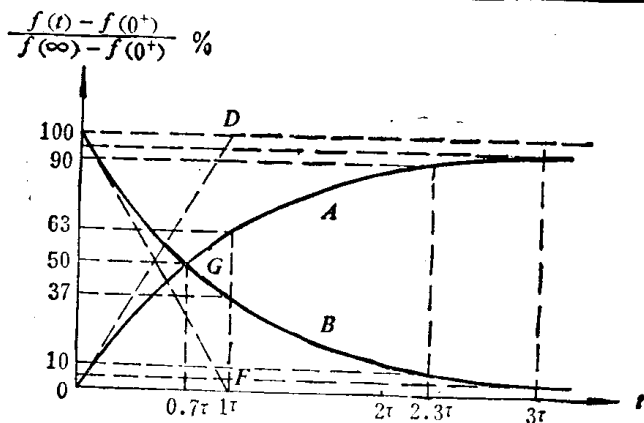


图 1-14 暂态过程通用曲线

A为按指数上升的曲线 $[f(0^+) < f(\infty)]$ ，B为按指数衰减的曲线 $[f(0^+) > f(\infty)]$ 。

由曲线可知：当 $t = 0.7\tau$ 时，暂态完成了50%；当 $t = \tau$ 时，暂态完成了63%；当 $t = 3\tau$ 时，暂态完成了95%。

从理论上讲，暂态全过程需 $t = \infty$ 才能完成，但实际上常规定暂态完成了95%时，即需 3τ 时间就可近似认为暂态基本结束。

由于 $\tau = RC$ 决定了暂态过程的长短，故称为电路的时间常数①。如果这一暂态全过程构成了脉冲波形的边沿，由图1-14可知， t_r （或 t_f ）= $2.3RC$ 。这一点以后经常要用到。

① τ 的物理意义：简单RC电路中的暂态过程均符合如下通用解析式（证明从略）：

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

将上式微分一次得：
$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{f(\infty) - f(0^+)}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

当 $t = 0^+$ 时，即对起始点而言，则有：

表 1-1 以及由它作出的图 1-14 暂态过程的通用曲线只适用于简单 RC 电路。由一个电阻和一个电容组成的电路，是最简单的 RC 电路。实际上 RC 电路可能多个电阻、电容组成，但多数电路都可以用串、并联的方法，归纳成为一个电阻和一个电容的形式^①。这种电路，亦称为简单 RC 电路。对于不能归纳成为一个电阻和一个电容的电路，称为复杂 RC 电路。下面就介绍简单 RC 电路的分析方法。

综上所述，确定 RC 电路中暂态过程的起始值、趋向值和时间常数是分析 RC 电路的关键，所以将这三项称为电路的三要素。

下面将三要素的确定方法以及绘制暂态波形的方法归纳如下：

1. 起始值的确定

电路暂态过程是在开关打破电路稳态后才出现的，设开关动作发生在 $t = t_s$ 时，为区别开关的两个状态，我们用 t_s^- 表示开关刚要动作前的瞬时，则 $f(t_s^-)$ 表示电路电压或电流在开关动作前的数值。用 t_s^+ 表示开关刚动作后的瞬时，则 $f(t_s^+)$ 表示电压或电流在开关刚动作后的数值，这就是暂态过程的起始值。若开关动作发生在 $t_s = 0$ 时，则起始值用 $f(0^+)$ 表示。

由电容器充放电过程可知，电容器两端电压的变化是需要时间的（电荷累积。泄放均要时间），即电容器电压具有不能突变的特点，由此可得开关刚动作后那一瞬间，电容器电压将保留开关刚要动作前的数值，这一规律称为开关定理，它的数学表达式为 $u_c(t_s^+) = u_c(t_s^-)$ 。根据这个定理求起始值时，电容器两端的电压便成了已知数。起始值 $f(t_s^+)$ 便可由电路求出。

2. 趋向值 $f(\infty)$ 的确定

趋向值是电容器充电或放电结束后电压或电流所趋向的数值。充、放电完毕的标志是通过电容器的电流为零。所以当欲确定趋向值时，可将电容器开路再去计算。

3. 时间常数 τ 的确定

先画出开关动作后的 RC 电路图，将恒压源短路（保留串联内阻），然后用串、并联方法将电路归纳成为一个电阻 R 和一个电容 C 的形式，则 $\tau = R \cdot C$

4. 绘制暂态波形的方法

应按照图 1-14 暂态过程通用曲线的规律作图。掌握图中的两个特点，第一，当 $t = 0.7\tau$ 时，暂态完成一半，见图 1-14 中的 G 点，称为半衰点。第二，暂态全过程需 3τ 时间。

【例 1】图 1-15 的电路，当 $t = 0$ 时的瞬时将开关由“1”扳向“2”。绘制输出电压 u_o 的波形。

解：

(1) 求 $u_o(0^+)$ ，由已知条件可得 $u_c(0^-) = 0$ ，由开关定理得 $u_c(0^+) = u_c(0^-) = 0$ ，由于 u_o 是取自于电容器两端，所以

$$\left. \frac{df(t)}{dt} \right|_{t=0^+} = \frac{f(\infty) - f(0^+)}{\tau} \quad \text{于是} \quad \tau = \frac{f(\infty) - f(0^+)}{\left. \frac{df(t)}{dt} \right|_{t=0^+}}$$

这里： $f(\infty) - f(0^+)$ 表示暂态全过程之值

$$\left. \frac{df(t)}{dt} \right|_{t=0^+} \quad \text{表示暂态中起始点的速度（充电或放电）}$$

由此可见，电路的时间常数是以起始点速度进行充电或放电时，完成全过程所需的时间。这在几何图形上，相当于从起始点作一条切线与趋向值交点 D 或 F 所对应的时间，见图 1-14。

$$u_o(0^+) = u_c(0^+) = 0$$

(2) 求 $u_o(\infty)$ 将图1-15中电容器开路, 求得

$$u_o(\infty) = E = 10V$$

(3) 求 τ $\tau = R \cdot C = 10 \cdot 10^3 \times 100 \times 10^{-12} = 10^{-6}s = 1\mu s$

(4) 绘 u_o 波形 先在横坐标标出 $1\mu s$ 、 $2\mu s$ 、 $3\mu s$ 点, 并按比例标出 $0.7\mu s$ 点, 由该点向上找出半衰点 G , 再由 $u_o(0^+)$ 开始, 通过半衰点 G 作指数曲线, 约在 $3\tau(3\mu s)$ 时, 接近于趋向值。即可做出所要求的波形, 见图1-15。

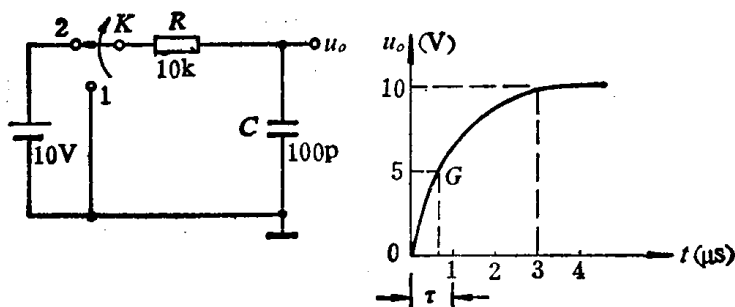


图 1-15 例 1 的电路图及波形图

【例 2】在图1-16(a)电路中, 当 $t = 0$ 瞬时将开关 K 由 “1” 扳向 “2”, 求输出电压 u_o 的波形。

解:

(1) 求 $u_o(0^+)$ 由开关定理, $u_o(0^+) = u_c(0^+) = u_c(0^-) = 0$

(2) 求 $u_o(\infty)$ 将电容 C 开路后, $u_o(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times 10 = \frac{10}{10 + 10} \times 10 = 5V$

(3) 求 τ 由求 τ 的规则, 将开关 K 置于 “2”, 并将恒压源短路, 作出求时间常数的等效电路, 见图1-16(b)。由此可得

$$\tau = (R_1 // R_2) \cdot C = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot C = \frac{10 \times 10}{10 + 10} \times 10^3 \times 100 \times 10^{-12}$$

$$= 5 \times 10^{-7}s = 5 \times 10^{-7} \times 10^6 \mu s = 0.5 \mu s$$

(4) 绘 u_o 波形 按例 1 中绘 u_o 波形的方法作图, 见图1-16(c)。

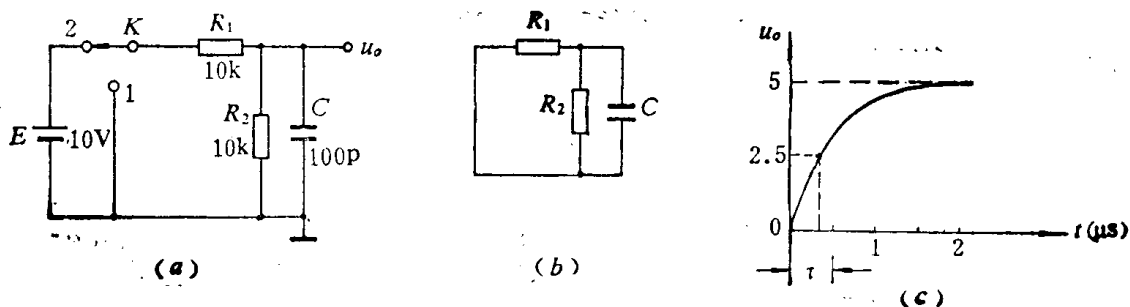


图 1-16 例 2 的电路图及波形图

【例3】在图1-17所示电路中，当 $t=0$ 时， K 由闭合突然断开，又当 $t_1=10\text{ms}$ 时重新闭合。求 u_o 波形。

解：开关动作两次，电路会出现两个暂态过程。必须分两次来求。

当 $t=0$ 时，第一次动作（开关由闭合到断开）：

（1）求 $u_o(0^+)$ 首先要注意这时的 u_o 并不是电容器的电压，而是电阻 R_3 上的电压。电容器电压的起始值仍由开关定理来确定， $u_c(0^+) = u_c(0^-) = 0$ ，由于电容器两端电压为零，可以视为短路，所以输出电压的起始值应为 R_3 通过 R_1 分得的电源电压，即： $u_o(0^+) = \frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot E$

$$\cdot E = \frac{4}{2+4} \times 12 = 8 \text{ V}$$

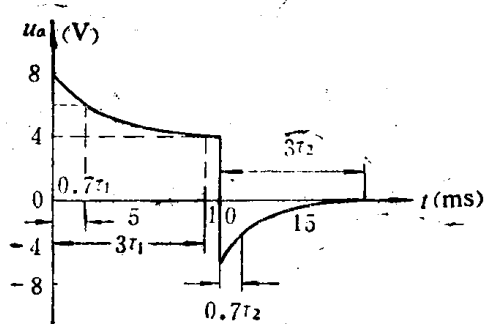
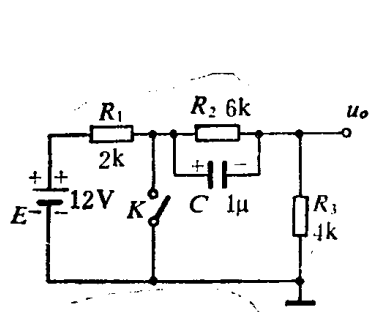


图 1-17 例3的电路图及波形图

图 1-18 求 τ_1 的等效电路

（2）求 $u_o(\infty)$ 将电容器开路（充电完毕电容器中无电流通过），则 $u_o(\infty)$ 应是 R_3 通过 R_1 、 R_2 分得的电源电压，即

$$u_o(\infty) = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot E = \frac{4}{2 + 6 + 4} \times 12 = 4 \text{ V}$$

（3）求 τ_1 由求时间常数规则，第一次开关动作后， K 是断开的，将 E 短路作出求 τ_1 的等效电路图，见图1-18。

可见

$$\tau_1 = [(R_1 + R_2) \parallel R_3] \cdot C = \frac{(R_1 + R_2) \times R_3}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot C$$

$$= \frac{(2 + 4) \times 6}{2 + 4 + 6} \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6} = 3 \times 10^{-3} = 3 \text{ ms}$$

（4）绘制 $t=0-t_1$ 的波形 由于开关作两次动作，首先必须判别一下，第二次动作开始的时刻（ t_1 ），第一个暂态过程是不是全过程。如果不是全过程，只能取其已经完成部分的曲线。这一点我们以后会具体讲述。这里当 $t=t_1=10\text{ms} > 3\tau_1$ （9ms）时，前一个暂态已结束，故 $u_o(t_1) = u_o(\infty) = 4\text{V}$ ，因此可以根据前面作图规则作出 t_1 以前波形，见图1-17的波形图中10ms之前的部分。

当 $t=t_1$ 时，开关第二次动作（开关由断开到闭合）

（1）求 $u_o(t_1^+)$ 为求出第二次动作后输出电压的起始值，首先要确定开关动作后的电容器电压的起始值。由开关定理知， $u_c(t_1^+) = u_c(t_1^-)$ ，这就是说必须求出在第二次动作以前