

全国电子类技工学校试用教材

晶体管脉冲与数字电路



天津科学技术出版社

全国电子类技工学校试用教材

晶体管脉冲与数字电路

北 京 市
半导体器件二厂 张顺启 主编

天津科学技术出版社

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。全书共分十二章，前七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；后五章主要介绍集成门电路、逻辑部件（计数器、寄存器和译码器）、数字显示电路的基本工作原理以及不同逻辑电路之间的转换电路。

本书也可以作为电子类工厂工人招工及职业中学、职工业余学校有关专业的参考用书。

本书由谢宁同志主审。

全国电子类技工学校试用教材

晶体管脉冲与数字电路

市 张顺启 主编
半导体器件二
教材编辑：宋淑萍

天津科学技术出版社出版

天津市赤峰道124号

天津新华印刷一厂印刷

新华书店天津发行所发行

开本 787×1092毫米 1/16 印张 19.25 字数 322,000

一九八三年十二月第一版

一九八五年三月第二次印刷

印数：24,881—81,400

书号：15212·121 定价：1.70元

前 言

为了适应技工学校电子类专业的教学需要,不断提高技工学校的培训质量,加速实现我国的四个现代化,国家劳动总局、第四机械工业部委托北京、天津、上海三市和四川、广东两省的劳动局、电子工业主管部门,组织编写了技工学校电子类三个专业(无线电技术、半导体器件、电子计算机)的部分技术基础课和专业课十三种教材。计有:电工基础、电子电路基础、电子测量与仪器、无线电接收设备、电视机原理调试与维修、无线电整机装配工艺基础、半导体器件制造工艺、半导体工艺化学、晶体管原理、制图与钳工知识、半导体集成电路、电子计算机原理、(为适应教学的需要,1982年增编的)晶体管脉冲与数字电路。

这套教材对于二年制(招收高中毕业生)和三年制(招收初中毕业生)的技工学校均适用。这些专业的普通课教材没有另行编写,建议采用国家劳动总局和第一机械工业部委托上海市劳动局、上海市第一机电工业局一九七九年组织编写的全国技工学校机械类通用教材中的普通课教材。我们在组织这套教材的编写时,注意到了这两套教材在内容上的衔接

根据技工学校的培养目标和教学计划的要求,这套教材在强调加强生产实习教学的同时,注意了加强基本理论知识和对新技术、新工艺的吸收。由于技工学校在教学范围内还有许多问题需要探讨,加之这套教材还没有通过教学实践的检验,故先作为试用教材出版发行。

因为时间仓促,编写经验不足,这套教材难免存在一些问题,恳切希望广大读者批评指正,以便作进一步修改。

国家劳动总局培训司

第四机械工业部教育局

一九八一年十二月

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	3
§ 1-3 晶体管的开关特性	18
复习题	34
第二章 双稳态电路	36
§ 2-1 双稳态电路的工作原理	36
§ 2-2 其他电路简介	45
§ 2-3 双稳态电路的调试	47
§ 2-4 应用举例	47
复习题	50
第三章 单稳态电路	52
§ 3-1 集-基耦合单稳态电路	52
§ 3-2 射极耦合单稳态电路	58
§ 3-3 应用举例	60
复习题	63
第四章 自激多谐振荡器	65
§ 4-1 集-基耦合自激多谐振荡器的工作原理	65
§ 4-2 波形分析与电路的改进	66
§ 4-3 设计举例及调试中常见的问题	67
§ 4-4 应用举例	69
复习题	70
第五章 射极耦合触发器(施密特触发器)	71
§ 5-1 电路的工作原理	71
§ 5-2 稳定工作的条件	73
§ 5-3 电路的回差及其控制方法	74
§ 5-4 射极耦合触发器的基本用途	77
复习题	82
第六章 锯齿波发生器	88
§ 6-1 锯齿波电压产生的基本方法	84
§ 6-2 晶体管作恒流源的锯齿波发生器	87
§ 6-3 电容负反馈锯齿波发生器	89
§ 6-4 自举式锯齿波发生器	91

§ 6-5 锯齿波电流产生的原理	92
复习题	98
第七章 间歇振荡器	100
§ 7-1 脉冲变压器	100
§ 7-2 触发式间歇振荡器	101
§ 7-3 自激式间歇振荡器	104
§ 7-4 间歇振荡器的同步与分频	106
复习题	108
第八章 集成逻辑门电路	109
§ 8-1 逻辑关系的基本概念	109
§ 8-2 基本逻辑门电路	109
§ 8-3 数字集成电路的分类与集成门电路的逻辑结构	112
§ 8-4 集成门电路	114
复习题	139
第九章 数字集成电路在脉冲电路中的应用	140
§ 9-1 单稳态电路	140
§ 9-2 自激多谐振荡器	145
§ 9-3 石英晶体振荡器	149
复习题	150
第十章 集成电路触发器	151
§ 10-1 基本触发器	151
§ 10-2 电位触发方式的触发器	153
§ 10-3 主-从触发方式的触发器	157
§ 10-4 边沿触发的维持-阻塞触发器	164
§ 10-5 触发器的主要参数及测试方法	167
§ 10-6 三种触发方式的比较	172
复习题	173
第十一章 逻辑部件	175
§ 11-1 计数器	175
§ 11-2 寄存器和移位寄存器	186
§ 11-3 译码器	189
§ 11-4 十进制数码显示器	195
复习题	201
第十二章 转接电路	202
§ 12-1 TTL电路和分立元件电路的转接电路	202
§ 12-2 TTL电路和HTL电路的转接电路	203
§ 12-3 TTL电路和MOS电路的转接电路	204
复习题	206

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。

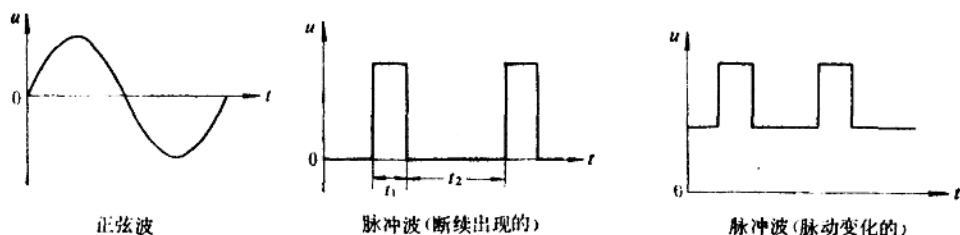


图 1-1

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。

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

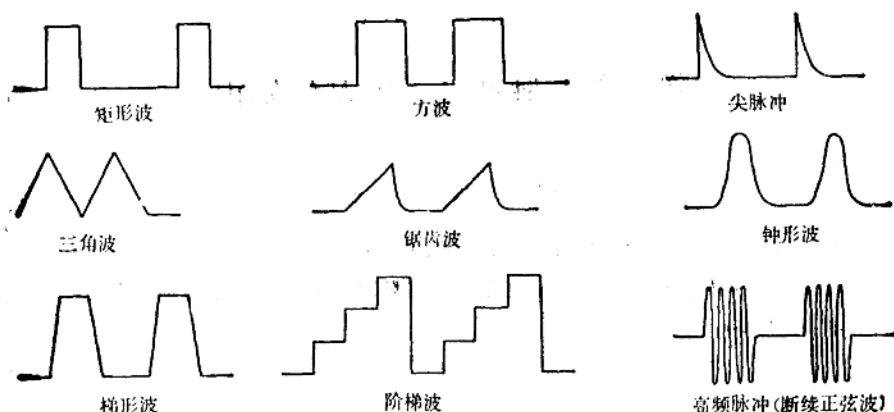


图 1-2

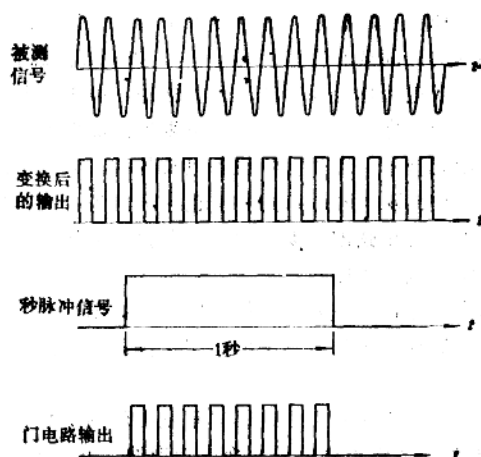
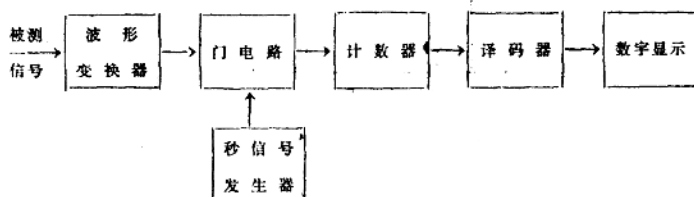


图 1-3 数字频率计方框图及其工作波形

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，

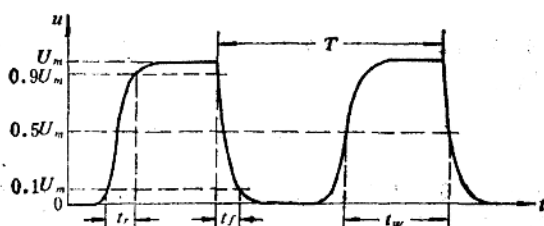


图 1-4 实际的矩形波

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 $U_m = U_H - U_L$ 。

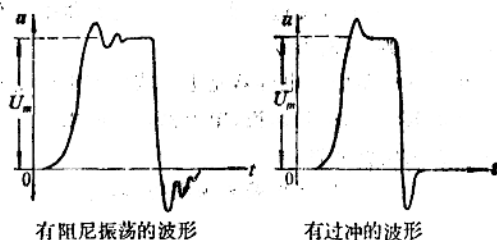


图 1-5 有阻尼振荡或过冲的矩形波

(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 中的 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。在实际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 库仑电荷的电容规定为 1 法拉的容量。实用中的电容比 1 法拉要小得多，因此，常采用的单位为微法和皮法。

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

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

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。

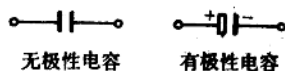


图 1-6 电容器符号

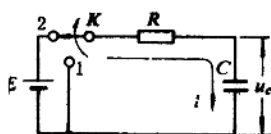


图 1-7 RC 充放电实验电路

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。图 1-8 的曲线即表示该充电过程。

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 $\tau = RC$

经下式推导，其量纲为秒。

$$[R] \cdot [C] = [\text{欧姆}] [\text{法拉}] = \left(\frac{\text{伏特}}{\text{安培}} \right) \left(\frac{\text{库仑}}{\text{伏特}} \right) = \frac{[\text{伏特}]}{[\text{安培}]} \cdot \frac{[\text{安培}] [\text{秒}]}{[\text{伏特}]} = \text{秒}$$

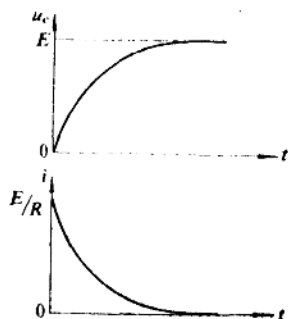


图 1-8 电容器充电曲线

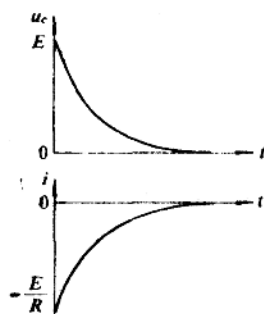


图 1-9 电容器放电曲线

同理，设原来开关处于 2，电容器已充满电荷，即 $u_c = E$ ，当开关由 2 扳向 1 时，电容器所充的电荷通过电阻 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，直至极板间电荷全部放完，即 $u_c = 0$ ， $i = 0$ 时结束。

放电时电压和电流的变化规律为：

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

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

图 1-9 为放电过程曲线。

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 1-10、图 1-11 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。

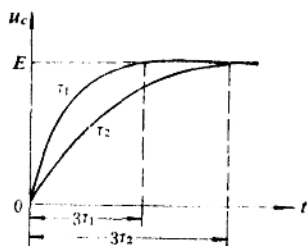


图 1-10 时间常数不同时 ($\tau_2 > \tau_1$) 的充电曲线

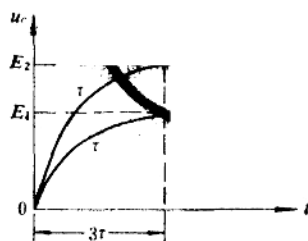


图 1-11 外加电压不同时的充电曲线

从图1-10可见, 时间常数 τ 越大, 电路中的暂态过程就越长。这是由于当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 越大, 则充电电流就越小, 累积相应的电荷量所需时间也就越长; 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, 但对于容量越大的电容器所需累积的电荷量就越多, 所以, 充电过程也就越长。反之, 充电过程就越短。

从图1-11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, 放电过程也是如此。

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1-8、图1-9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1-8中的 u_C 和图1-9中的 i ; 当 $f(0^+) > f(\infty)$ 时, 为按指数衰减的曲线, 如图1-8中的 i 和图1-9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, 在 $\frac{f(t) - f(0^+)}{f(\infty) - f(0^+)}$ 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%。

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.	0.855	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

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1-12。

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。

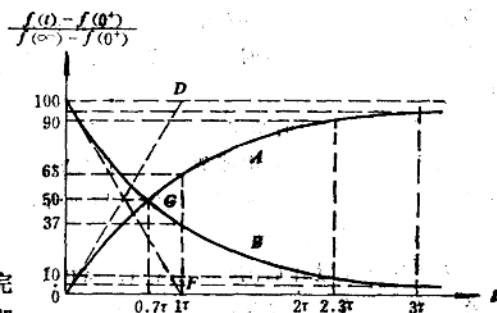


图 1-12 暂态过程通用曲线

由于 $\tau = RC$ 决定了暂态过程的长短, 故称为电路的时间常数 Θ 。如果这一暂态全过程构

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:

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

这里, $f(\infty) - f(0^+)$ 表示暂态全过程之值

$\left. \frac{df(t)}{dt} \right|_{t=0^+}$ 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1-12。

成了脉冲波形的边沿,由图1-12可知, t_r (或 t_f) $\approx 2.3RC$ 。这一点以后经常要用到。

表1-1以及由它作出的图1-12暂态过程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电路可能由多个电阻、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,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 $t = t_0$ 时,为区别开关的两个状态,我们用 t_0^- 表示开关刚要动作前的瞬时,则 $f(t_0^-)$ 表示电路电压或电流在开关动作前的数值。用 t_0^+ 表示开关刚动作后的瞬时,则 $f(t_0^+)$ 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 $t_0 = 0$ 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 $u_c(t_0^+) = u_c(t_0^-)$ 。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 $f(t_0^+)$ 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

应按图1-12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1-12中的G点,称为半衰点。第二,暂态全过程需 3τ 时间。

【例1】图1-13的电路,当 $t = 0$ 的瞬时将开关 K 由“1”置于“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

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

(2) 求 $u_o(\infty)$ 将图1-13中电容器开路,求得

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

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

(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。

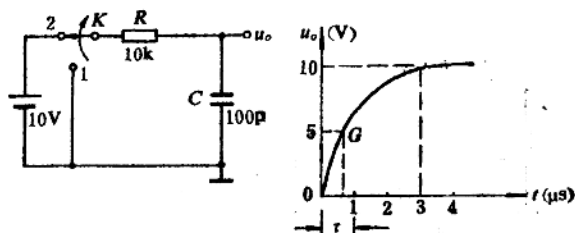


图 1-13 例 1 的电路图及波形图

即可做出所要求的波形，见图 1-13。

【例 2】在图 1-14(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， $u_o(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E = \frac{10}{10 + 10} \times 10 = 5 \text{ V}$

(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 1-14(b)，由此可得

$$\begin{aligned} \tau &= (R_1 \parallel R_2) \cdot C = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \cdot C = \frac{10 \times 10}{10 + 10} \times 10^3 \times 100 \times 10^{-12} \\ &= 5 \times 10^{-7} \text{ s} = 5 \times 10^{-7} \times 10^6 \mu\text{s} = 0.5 \mu\text{s} \end{aligned}$$

(4) 绘 u_o 波形 按例 1 中绘 u_o 波形的方法作图，见图 1-14(c)。

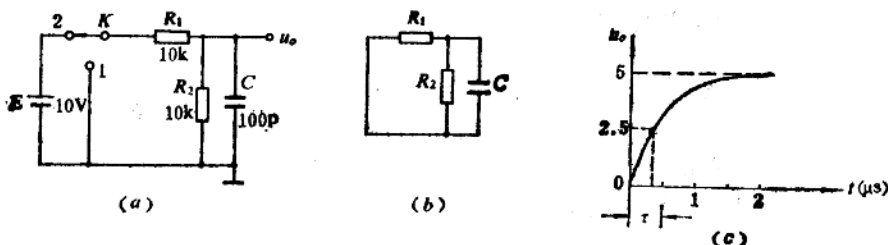


图 1-14 例 2 的电路图及波形图

【例 3】在图 1-15 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： $u_o(0^+) = \frac{R_3}{R_1 + R_3}$

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

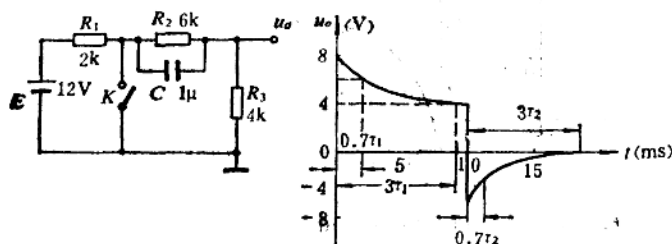


图 1-15 例 3 的电路图及波形图

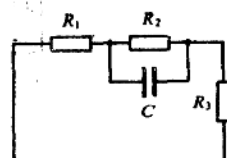


图 1-16 求 τ_1 的等效电路

(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 1-16。

$$\begin{aligned} \text{可见 } \tau_1 &= [(R_1 + R_3) \parallel R_2] \cdot C = \frac{(R_1 + R_3) \times R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot C \\ &= \frac{(2 + 4) \times 6}{2 + 4 + 6} \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6} = 3 \times 10^{-3} = 3 \text{ ms} \end{aligned}$$

(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 $t = t_1 = 10 \text{ ms} > 3\tau_1 (9 \text{ ms})$ 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 1-15 的波形图中 10 ms 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的瞬时, 电容器充上了多少电压。由第一次动作后的暂态分析可知, 在 t_1 时第一个暂态过程已经结束。所以 $u_c(t_1^+) = u_c(t_1^-) = u_c(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} \cdot E = \frac{6}{2 + 6 + 4} \times 12 = 6 \text{ V}$ (根据求趋向值的方法, 电容可视为开路), 此电压的极性标于图 1-15 中电容器电压为左正右负。

当开关重新闭合后, 由图 1-15 电路图可得, $u_o(t_1^+) = -u_c(t_1^-) = -6 \text{ V}$ (因为 u_o 的方向与 u_c 方向相反)。

(2) 求 $u_o(\infty)$ 由于开关第二次动作后 (K 闭合), u_o 只是由电容器电压决定的, 根据充、放电结束的标志, 通过电容器的电流应等于零, 所以 $u_o(\infty) = 0$ 。

(3) 求 τ 由图 1-15 电路知, 将 K 闭合后可以得到求时间常数的等效电路, 见图 1-17。

$$\text{可见 } \tau_2 = (R_2 \parallel R_3) \cdot C = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} \cdot C$$

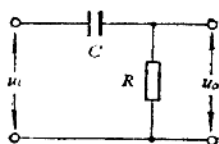
$$= \frac{6 \times 4}{6 + 4} \times 10^3 \times 1 \times 10^{-6} = 2.4 \times 10^{-3} \text{ s} = 2.4 \text{ ms}$$

(4) 绘制 t_1 以后的波形 从 t_1 算起, 经 $t = 0.7\tau_2 = 1.48 \text{ ms}$, 放电完成一半, 经 $t = 3\tau_2 = 7.2 \text{ ms}$, 放电就基本结束。其输出波形见图1-15波形图10ms以后的部分。

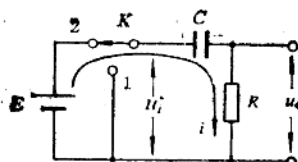
三、几种简单RC电路

实用中的脉冲电路, 由于功能的不同, 往往要求脉冲信号的波形也不同。这就需要将脉冲信号进行各种变换, 以适应电路的需要。下面分析几种常用简单RC脉冲变换电路的工作原理。

1. 微分电路



(a)



(b)

图 1-18 微分电路

图1-18(a)的电路中, 如果输入电压 u_i 为图1-19(a)

矩形波时, 其输入电压的形成相当于图1-18(b)电路中的开关 K 的两次动作。当 $t = t_1$ 时, 开关 K 由“1”突然置于“2”, 输入电压将产生从零到 E 的跳变, 称为正跳变电压。当 $t = t_2$ 时, 开关由“2”又重新置于“1”, 输入电压将产生从 E 到零的跳变, 称为负跳变。所产生矩形波脉冲的宽度为 $t_W = t_2 - t_1$ 。见图1-19(a)。

在图1-18(a)的电路中, 如果 $\tau \ll t_W$, 其输出电压将与输入电压的微分成正比, 故称为 $\ominus$ 微分电路。

下面我们就用RC电路的分析方法, 分析它的输出波形。为了方便, 先结合图1-18(b)进行分析, 以后分析就直接用图1-18(a)了。

先分析开关第一次动作(正阶跃电压输入)的情况。在开关动作前的 t_1^- 瞬时, (K 接“1”)电容器无电荷, 故电容器电压 $u_C(t_1^-) = 0$, 由开关定理可知, 开关刚动作后(K 接“2”)的 t_1^+ 时, 电容器电压仍为零, 即 $u_C(t_1^+) = u_C(t_1^-) = 0$ 。此时电容器可视为短路, 由电路图可知, 输出电压的起始值应等于开关动作后的输入电压之值, 即 $u_o(t_1^+) = u_i(t_1^+) = E$ 。此后电容器 C 将被充电, 充电的电压极性见图1-18(b), 由于充电完毕的标志是通过电容器

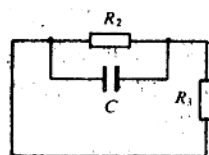


图 1-17 求 τ_2 的等效电路

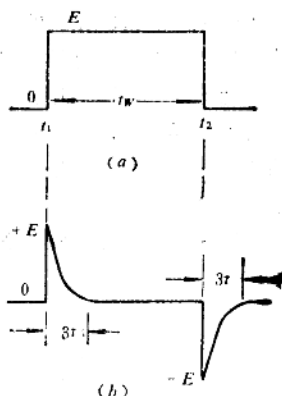


图 1-19 单个矩形脉冲输入时微分电路的波形

$\ominus$ [图1-18(b)电路, 由回路电压定律可得

$$u_i = u_C + u_R = u_C \quad (\because \tau \ll t_W, \text{在 } t_W \text{ 时间内大部分输入电压降在电容器上})。$$

又由电路可得

$$u_o = u_R = iR = R \cdot C \frac{du_C}{dt} = R \cdot C \frac{du_i}{dt} \quad (i = C \frac{du_C}{dt}) \text{ 可见, 输出电压与输入电压的微分成正比, 故而得名微分电路。}]$$