

电工电子技术

(第3版)

刘蕴陶 主编

高等教育出版社



扫描全能王 创建

目录

第一部分 电路基础

第一章 基尔霍夫定律及电路的分析

方法	1
1-1 电路模型	1
1-2 电流和电压的参考方向	4
1-3 电阻元件	9
1-4 电压源和电流源	12
1-5 基尔霍夫定律	15
1-6 关于电路的实际使用 知识	20
1-7 电阻串联、并联与混联电路 的等效变换	24
1-8 支路电流法	30
1-9 叠加定理	32
1-10 戴维宁定理	35
1-11 电路中各点电位的计算	39

1-12 电容的充电与放电	41
---------------------	----

习题一	48
-----------	----

第二章 正弦交流电路

2-1 正弦交流电量的特征	54
2-2 正弦电量的相量表示法	60
2-3 单一参数的正弦交流 电路	65
2-4 正弦交流电路的分析与 计算	77
2-5 交流电路的应用举例	87
2-6 交流电路中的谐振	90
2-7 非正弦周期电流电路 简介	94
2-8 三相交流电路	96
习题二	106

第二部分 电机与控制

第三章 磁路与变压器

3-1 磁性材料的磁性质	110
3-2 磁路和磁路的欧姆定律	113
3-3 交流铁心线圈电路	115
3-4 变压器的工作原理	118
3-5 变压器的额定值	123
3-6 特殊用途的变压器	126

习题三	128
-----------	-----

第四章 常用电动机

4-1 三相异步电动机的转动 原理	130
4-2 三相异步电动机的构造	135
4-3 三相异步电动机的电磁转矩 与机械特性	137



1-12 电容的充电与放电

电容器是一种常用的电子元件或电工设备,在工程技术中有广泛运用,如用于隔断直流、旁路交流、调谐和提高功率因数等。其中,电容器的充电与放电更是在电子技术中被广泛应用,如电子整流电路中的滤波电路、脉冲数字电路中的微分电路、积分电路和延时电路等都是以电容器的充电与放电为基础进行工作的。

一、电容元件

电容元件是表示电路中储存电荷,建立电场,储存电场能这一电磁现象的理想电路元件。

(一) 电容器

实际使用的电容器品种、规格很多。但是就其基本结构而言,都是由两块金属极板被介质隔开构成,常用的介质有陶瓷、云母、电解质、绝缘纸和空气等。

电容器的基本结构示意图如图 1-12-1(a)、(b)所示是几种常用的电容器外形。

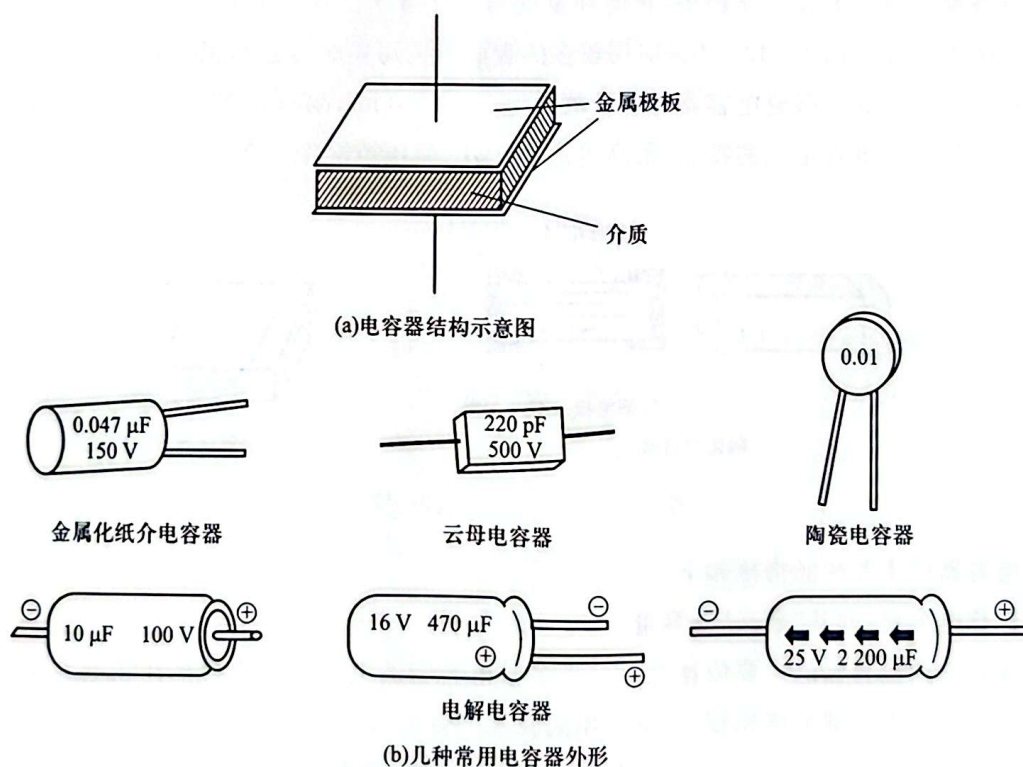


图 1-12-1 电容器

(1) 按照结构的不同,电容器可分为以下几种:

固定电容器:电容量固定,不可调节。



可变电容器和半可变电容器(微调电容器):电容量可在一定范围内连续变化或在一个小范围内变化。

(2) 按照介质材料的不同,电容器可以分为以下几种:

云母电容器:以云母片作为介质。性能稳定、耐压高、漏电流小,但容量小(几十皮法~几万皮法)。

陶瓷电容器:以陶瓷材料作为介质。性能稳定、损耗小、体积小、可工作于高频电路,但耐压低,容量小($1\text{ pF}\sim 1\,000\text{ pF}$)。

纸介电容器:用浸蜡的纸作为介质,一般做成圆柱体状。特点是容量大($100\text{ pF}\sim 10\text{ }\mu\text{F}$)、价格便宜,但稳定性不高、损耗较大。

电解电容器:以铝、钽、铌、钛等金属氧化膜作为介质,突出优点是容量大(可达 $5\,000\text{ }\mu\text{F}$),缺点是容量误差也比较大。在使用中应该注意的是电解电容器的电极有正、负之分,通常它的外壳上标有“+”、“-”记号,如无此标记,则长引线电极为“+”端,短引线电极为“-”端。使用时,“+”端接电路的高电位点,“-”端接电路的低电位点,不可错接。否则,会引起电容器发热,甚至爆燃。

为了适应微电子技术的发展,近年来又出现了新型电容器——表面组装电容器,又称贴片电容器。这种电容器体积小,长度和宽度均为几毫米。其外部无引线,且可直接贴装在印制板的表面。图 1-12-2 是应用较多的表面组装陶瓷电容器和钽电解电容器的外形及结构示意图。其中陶瓷电容器的容量范围为 $1\sim 4\,700\text{ pF}$,耐压范围为 $25\sim 2\,000\text{ V}$ 。钽电解电容器具有电容量大的特点,最高可达 $330\text{ }\mu\text{F}$,耐压范围 $4\sim 50\text{ V}$ 。

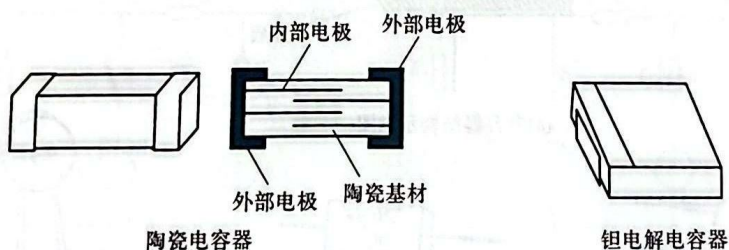


图 1-12-2 表面组装电容器

电容器的主要性能指标如下:

标称电容量:即其“名义”电容量。

这是选用电容器的主要依据之一。大多数电容器的电容量都直接标注在电容器的外壳表面。有些电容器的体积较小,如常用的圆片陶瓷电容器则只标出电容量,如 0.01 、 22 、 $3\,300$ 等,在数字后面并不标出电容量单位。通常规定,当数字小于 1 (零点几)时,单位是 μF ,如 0.01 是表示 $0.01\text{ }\mu\text{F}$ 。当数字是几十、几百、几千时,单位是 pF ,如 22 、 $3\,300$ 是表示 22 pF 、 $3\,300\text{ pF}$ 等。

额定工作电压(又称耐压):是指电容器能够长时间安全、可靠地工作所能够承受的最



高电压,一般均标注在外壳上。当实际使用电压超过额定工作电压时,电容器的介质可能被击穿而烧毁。如果电容器工作在交流电路中,应注意所加交流电压的最大值不能超过额定工作电压。因此,额定工作电压也是选用电容器的重要依据。

(二) 电容元件的伏安特性

若在电容器的两端接上直流电源 E ,就会在两个极板上分别聚集等量正、负电荷 q 。当电源撤除之后,电荷仍然聚集在极板上,此时电容器的端电压是 U 。因此,电容器有储存电荷的功能。与此同时,在两个极板之间建立电场,储存电场能。如果忽略介质中极小的漏电流,把介质看成是理想的绝缘体,电容器就是只具有储存电荷、储存电场能的理想电容元件,简称电容元件(如图 1-12-3 所示)。

电容元件储存的电荷为 q ,其两端电压为 U ,则 q 与 U 之比称为电容元件的电容量,简称电容,用大写字母 C 表示。

$$C = \frac{q}{U} \quad (1-25)$$

电容 C 是常数的电容元件称为线性电容,一般工程上使用的电容器均可认为是线性电容。

国际单位制中,电容 C 的单位是法[拉](F)。当电容元件极板上聚集的电荷是 1 库[仑],极板间的电压是 1 V 时,电容元件的电容 C 就是 1F。由于法拉这一单位太大,工程上多采用微法(μF)和皮法(pF)。1 F 等于 $10^6 \mu\text{F}$ 或 10^{12}pF 。

电容元件储存的电场能量为

$$W_C = \frac{1}{2} C u_C^2 \quad (1-26)$$

电容元件在某一时刻储存的电场能量与其该时刻端电压的平方成正比。

当电容元件外接交流电源时,端电压 u_C 变化,极板上储存的电荷 q 也相应变化,于是电荷在连接导线上移动,形成电流,即电容元件的电流 i_C 。在图 1-12-4 所示参考方向下

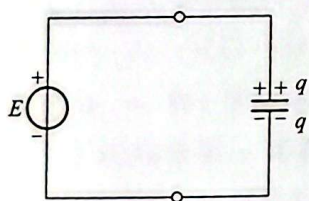


图 1-12-3 电容元件

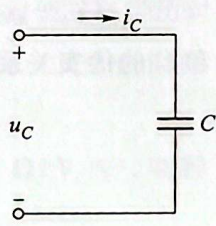
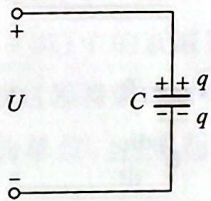


图 1-12-4 电容元件的电压与电流

$$i_C = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu_C)}{dt} = C \frac{du_C}{dt} \quad (1-27)$$

上式就是电容元件的伏安特性表示式,是分析、计算电容电路的重要依据。

该式表明,电容元件的电流 i_C 与其端电压 u_C 对时间的变化率成正比。电压 u_C 变化越



快, 电流 i_C 越大。而在直流电路中, 电压恒定不变, 通过电容的电流为零, 电容开路。

(三) 电容电路的换路定律

电容元件的伏安特性显示, 电容元件的端电压 u_C 不能突变(跃变), 只能连续变化。如若其端电压 u_C 突变, 则 $\frac{du_C}{dt} \rightarrow \infty$, 这就要求电容电路的电流 $i_C \rightarrow \infty$ 。这是不可能的。

再从电容储存的电场能量看, 公式(1-26)表明, 如果端电压 u_C 突变, 则电容储存的电场能量 W_C 也要发生突变, 这就要求电源提供的功率为无限大, 这也是不可能的。

电容电路的换路定律就是用数学公式表示电容元件的端电压 u_C 不能突变这一特性的。

所谓换路就是指电路工作条件的改变, 如电路与电源的接通或者断开、电路的改接、电路参数的改变等, 总称为换路。通常都以发生换路的瞬间作为计时起点, 用 $t=0$ 表示。并以 $t=0_-$ 表示换路前的最后一瞬间, 这时的电容电压记为 $u_C(0_-)$ 。以 $t=0_+$ 表示刚刚完成换路后的一瞬间, 这时的电容电压记为 $u_C(0_+)$ 。可以认为, 在时间坐标轴上, $t=0_-$ 和 $t=0_+$ 就是同一点。这样, 电容元件的端电压 u_C 不能突变就可以用数学公式表示

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) \quad (1-28)$$

上式表明, 发生换路后, 电容电压只能在 $u_C(0_-)$ 的基础上, 连续变化。

二、电容经过电阻充电的过程

(一) 充电过程分析

电路如图 1-12-5 所示, 开关 S 原是断开的, 电容 C 的端电压为零, 表示为 $u_C(0_-) = 0$, 称为 u_C 初始电压是零。在 $t=0$ 时, 发生换路——S 闭合, 电容 C 接通直流电源 E, 开始经过电阻 R 的充电过程。

列出换路后 ($t \geq 0$), 电路的 KVL 方程

$$u_R + u_C = E$$

元件 R 和 C 的伏安关系式

$$u_R = iR$$

$$i = C \frac{du_C}{dt}$$

把以上伏安关系式代入电路的 KVL 方程

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = E \quad (t \geq 0) \quad (1-29)$$

由于元件参数 R、C 数值恒定, 所以上式是一个以 u_C 为未知数的常系数一阶线性非齐次微分方程。在解方程的过程中, 要用到 u_C 的初始条件, 并由换路定律 $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$ 确定。

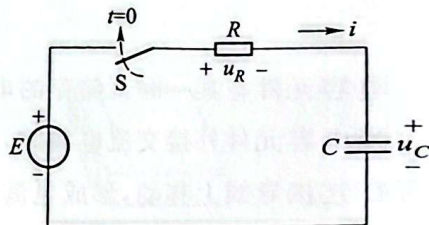


图 1-12-5 电容的充电电路



最后得到 u_C 的完全解

$$u_C = E - Ee^{-\frac{t}{RC}}$$

取 $\tau = RC$, 并称 τ 为时间常数, 则

$$u_C = E(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (t \geq 0) \quad (1-30)$$

$$\text{充电电流} \quad i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (t \geq 0) \quad (1-31)$$

$$\text{电阻的端电压} \quad u_R = iR = Ee^{-\frac{t}{\tau}} \quad (t \geq 0) \quad (1-32)$$

以上分析表明, 在电容充电过程中, u_C 、 i 和 u_R 都随时间按指数规律变化, 用曲线表示如图 1-12-6 所示。即电容电压 u_C 从初始值 $u_C(0) = 0$ 开始, 按指数规律增长到稳态值 E 。这是电容建立电场, 储存电场能的过程。在这一过程中充电电流 i_C 从初始值 $i_C(0_+) = E/R$ 开始, 按指数规律衰减到零。电阻的端电压 u_R 则从初始值 E 按指数规律衰减到零。

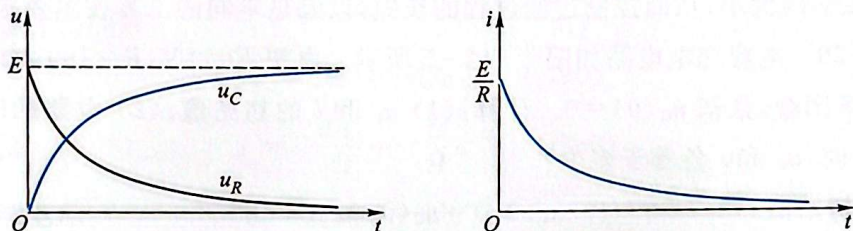


图 1-12-6 电容充电的 u_C 、 u_R 、 i 曲线

通过对电容充电过程的分析, 可以看到, 开关 S 闭合之前, 电容电压为零, 并保持不变, 电路已经处于一种稳定状态。电容充电完毕, u_C 、 i 和 u_R 都保持新的稳态值不变, 电路又达到了另一个稳定状态。一般而言, 包含储能元件(电感、电容)的电路从一个稳定状态转换到另一个稳定状态, 都需要一定的时间, 电路在这段时间内, 完成能量的转移、转换和重新分配。这个时间过程称为电路的过渡过程, 又称暂态。

(二) 时间常数 τ

在电容充电的过渡过程中, u_C 、 u_R 和 i 随时间变化的快慢、过渡过程经历时间的长短, 取决于式(1-30)、式(1-31)、式(1-32)中的衰减因子 $e^{-\frac{t}{\tau}}$, 取决于其中的时间常数 $\tau = RC$ 。 τ 越大, u_C 、 u_R 和 i 变化越慢, 过渡过程持续的时间就越长。

(1) 时间常数 τ 具有时间的单位。当电阻 R 的单位是 $\Omega(V/A)$ 、电容 C 的单位是 $F(A \cdot s/V)$ 时, τ 的单位是 s 。

(2) 把 $t = 0, \tau, 2\tau, 3\tau, \dots$ 值代入式(1-30), 经计算可得表 1-1。

表 1-1 u_C 随时间常数 τ 的变化规律

时间 t	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ
u_C	0	$0.632E$	$0.865E$	$0.950E$	$0.982E$	$0.993E$



当 $t = \tau$ 时, $u_C = 0.632E$ 。表明时间常数 τ 等于电压 u_C 由初始值增加到稳态值的 63.2% 所需要的时间。图 1-12-7 给出了稳态值相同、 τ 值不同的电容充电 u_C 曲线, 从中可以看出 τ 值对于 u_C 变化快慢、过渡过程历时长短的影响。即 τ 越大, u_C 变化越慢, 过渡过程历时越长。

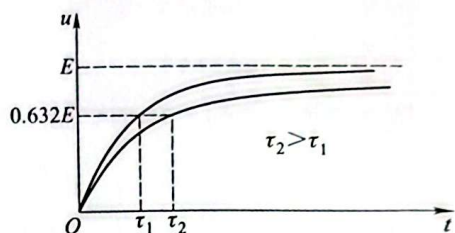


图 1-12-7 时间常数对过渡过程的影响

(3) 从理论上讲, 只有在 $t \rightarrow \infty$ 时, 过渡过程才告结束。但是, 从表 1-1 中可以看到, 当 $t = 3\tau$ 时, u_C 已经达到稳态值的 95%, 当 $t = 5\tau$ 时, u_C 则达到稳态值的 99.3%。因此, 在工程技术中, 一般认为经过 $(3 \sim 5)\tau$ 时间, 过渡过程就结束了。

(4) 时间常数 $\tau = RC$, 只由电路自身的参数决定。在实际应用中, 正是利用改变 R 、 C 的数值来改变 τ 的大小, 从而控制过渡过程的长短, 以满足不同的工程技术要求。

例题 1-20 电容充电电路如图 1-12-5 所示。电源 $E = 9\text{ V}$, $R = 100\text{ k}\Omega$, $C = 50\text{ }\mu\text{F}$, $t = 0$ 时开关 S 闭合, 且知 $u_C(0) = 0$ 。计算: (1) u_C 和 i 的初始值; (2) 电路的时间常数 τ ; (3) $t = 3.5\text{ s}$ 时, u_C 和 i 各等于多少?

解: (1) 初始值

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 0$$

$$i(0_+) = \frac{E - u_C(0_+)}{R} = \frac{9 - 0}{100 \times 10^3} \text{ A} = 90\text{ }\mu\text{A}$$

(2) 时间常数

$$\tau = RC = 100 \times 10^3 \times 50 \times 10^{-6} \text{ s} = 5\text{ s}$$

(3) $t = 3.5\text{ s}$ 时, 据式 (1-30)、式 (1-31)

$$u_C(3.5\text{ s}) = 9 \times (1 - e^{-\frac{3.5}{5}}) = 9 \times (1 - 0.5) \text{ V} = 4.5\text{ V}$$

$$i(3.5\text{ s}) = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = \frac{9}{100 \times 10^3} e^{-\frac{3.5}{5}} \text{ A} = 45\text{ }\mu\text{A}$$

三、电容经过电阻的放电过程

电路如图 1-12-8(a) 所示, 开关 S 原闭合于位置“1”, 电路已经达到稳定状态, 电容电压 $u_C = U$ 。 $t = 0$ 时, 开关 S 自位置“1”合于“2”, 电容极板上的电荷便通过电阻放电。

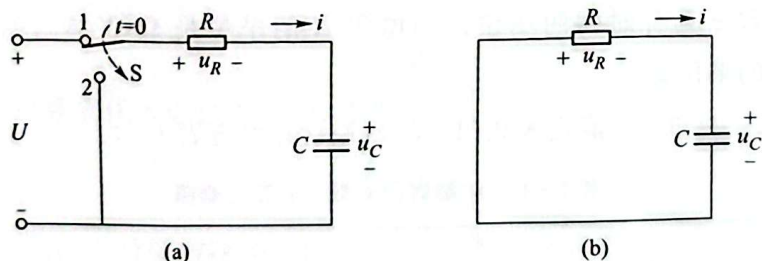


图 1-12-8 电容放电电路



根据换路后的电路[如图 1-12-8(b)所示],列 KVL 方程

$$u_R + u_C = 0$$

电阻、电容的伏安特性

$$u_R = iR$$

$$i = C \frac{du_C}{dt}$$

将以上伏安特性表示式代入 KVL 方程

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$$

上式是以 u_C 为未知数的常系数一阶线性齐次微分方程。

在求解微分方程的过程中,要用到初始条件,并由换路定律得出

$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = U$$

最后可得方程的解

$$u_C = Ue^{-\frac{t}{RC}} = Ue^{-\frac{t}{\tau}} \quad (t \geq 0) \quad (1-33)$$

放电电流

$$i = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (t \geq 0) \quad (1-34)$$

电阻的端电压

$$u_R = -u_C = -Ue^{-\frac{t}{\tau}} \quad (t \geq 0) \quad (1-35)$$

式中 $\tau = RC$, 是时间常数。

式(1-34)中的负号表示放电电流的实际方向与图示参考方向相反(图示是以充电电流作为参考方向),式(1-35)中的负号亦表明其实际方向与图示参考方向相反。

u_C 、 i 和 u_R 随时间的变化规律如图 1-12-9 中曲线所示,它们都是从各自起始的最大值按照指数规律衰减变化,最后为零。

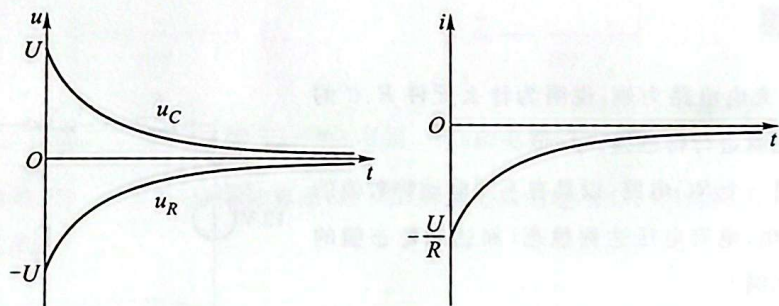


图 1-12-9 电容放电 u_C 、 i 和 u_R 曲线

在电容放电过程中,电容电压 u_C 下降,电容元件中储存的电场能量逐步释放,并全部消耗在电阻上,转换为热能。

时间常数 τ 表征了 u_C 、 i 和 u_R 随时间衰减的快慢、过渡过程经历时间的长短。当 $t = \tau$ 时, $u_C(\tau) = 0.368U$ 。同样可以认为,当 $t = (3 \sim 5)\tau$ 时,即可认为放电过程结束。

例题 1-21 电路如图 1-12-10(a)所示, S 开关闭合, 电路已达稳态。 $t = 0$ 时, S 断



开。求 S 断开后, u_C 和 i 的变化规律。

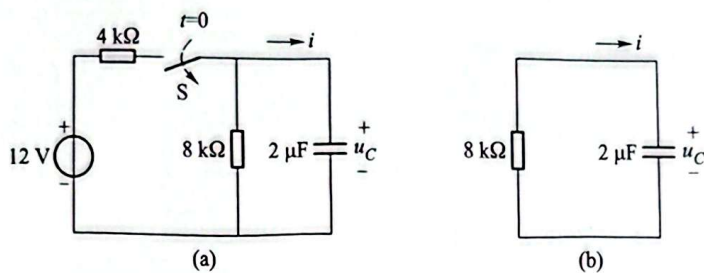


图 1-12-10 例题 1-21 的图

解:(1) 计算电容电压的初始值 $u_C(0_+)$ 。

换路前 S 闭合, 电路已处于稳态, 电容 C 开路。

$$u_C(0_-) = \frac{8}{4+8} \times 12 \text{ V} = 8 \text{ V}$$

根据换路定律 $u_C(0_+) = u_C(0_-) = 8 \text{ V}$

(2) 计算电路的时间常数

换路后 ($t \geq 0$) 的电路如图 1-12-10(b) 所示。

$$\tau = RC = 8 \times 10^3 \times 2 \times 10^{-6} \text{ s} = 16 \text{ ms}$$

(3) 据式(1-33)、式(1-34), 并代入数据

$$u_C = 8e^{-\frac{t}{16 \times 10^{-3}}} \text{ V} = 8e^{-62.5t} \text{ V} \quad (t \geq 0)$$

$$i = -\frac{8}{8} e^{-62.5t} \text{ mA} = -e^{-62.5t} \text{ mA} \quad (t \geq 0)$$

注意: 时间常数 τ 应该是换路后电路的时间常数。

思考练习题

1-28 以 RC 充电电路为例, 说明为什么元件 R、C 的数值越大, 电容充电就进行得越慢。

1-29 对于同一个 RC 电路, 以具有不同电动势数值的直流电源对电容充电, 电容电压达到稳态(如达到稳态值的 95%)的时间是否相同?

1-30 电路如图 1-12-11 所示, 当开关 S 位于“1”时, 电容充电; 当 S 位于“2”时, 电容放电。电容 C 充电与放电的时间常数是否相同?

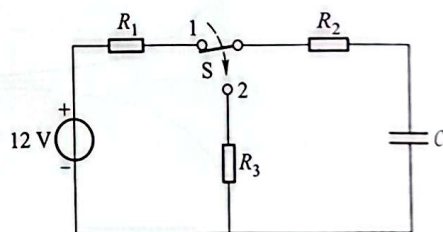


图 1-12-11 思考练习题

1-30 的图

习 题 一

1-1 电路如图 T1-1 所示, 各段电压、电流的参考方向均已表示在图中。已知 $I_1 = 1.5 \text{ A}$, $I_2 = 2.5 \text{ A}$

