电路理论基础

——电路理论（基础篇）

华中科技大学·电气学院

ccsfm@hust.edu.cn

第8章 一阶电路的暂态分析

8.1 概述

8.2 零输入响应（自然响应）

8.3 直流电源激励下的响应

8.4 正弦电源激励下的响应

8.5 含运算放大器的一阶电路

8.6 线性非时变特性

8.7 冲激响应计算

8.8 拓展与应用

●重点

1. 熟练掌握一阶电路的零输入响应（自然响应）

2.熟练掌握直流电源激励下一阶电路的响应（含阶跃响应的概念，RC电路的方波响应）

零输入响应：换路后电路中没有独立电源，仅由换路前的储能释放产生的响应。

零状态响应：换路前电路中无储能，仅由换路后电路中的独立电源产生的响应。

全响应：由换路后电路中的独立电源、换路前电路的储能共同激励产生的响应。

一阶电路暂态过程的求解方法：

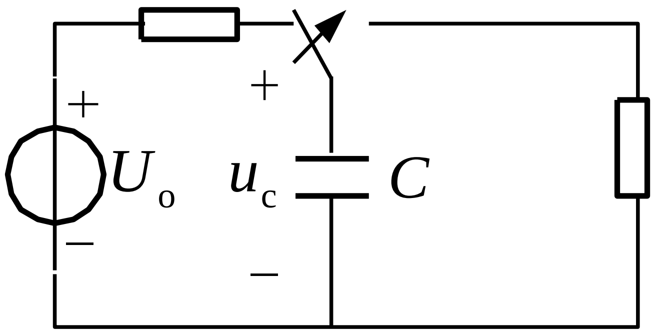
（一）经典法：用数学方法求解微分方程；

（二）三要素法：
- 初始值
- 稳态值
- 时间常数

1. 零输入响应分析

◆ 建立关于 u_C 的微分方程

$$RC\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+u_C=0 \qquad t>0$$



RC电路

◆ 确定初始条件

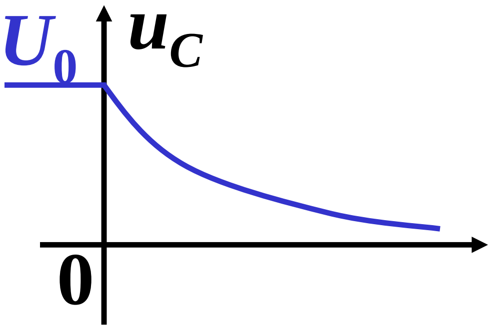
$$u_C(0_-)=U_0$$

$$u_C(0_+)=u_C(0_-)=U_0$$

$$u_C=k\mathrm{e}^{-\frac{1}{RC}t}=U_\mathrm{o}\mathrm{e}^{-\frac{1}{RC}t}$$

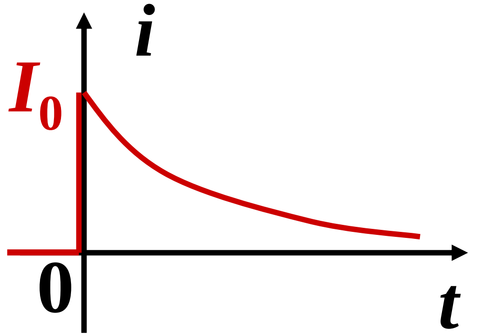
◆ 求解微分方程

$$RCs+1=0 \qquad s=-\frac{1}{RC}$$



◆ 电阻电流

$$i = \frac{u_C}{R} = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = I_0 e^{-\frac{t}{RC}} \qquad t > 0$$



2. 能量转换

设 $u_C(0_+)=U_0$

电容放出能量 $\frac{1}{2}CU_0^2$

电阻消耗能量 $W_R = \int_0^\infty i^2 R dt = \int_0^\infty (\frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}})^2 R dt = \frac{1}{2}CU_0^2$

3. RC电路的时间常数

令 $\tau = RC$， 称τ为一阶电路的时间常数

$$[\tau] = [RC] = [欧][法] = [欧]\left[\frac{库}{伏}\right] = [欧]\left[\frac{安秒}{伏}\right] = [秒]$$

t	0	τ	2τ	3τ	5τ
$u_c = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}$	U_0	$U_0 e^{-1}$	$U_0 e^{-2}$	$U_0 e^{-3}$	$U_0 e^{-5}$
	U_0	$0.368\ U_0$	$0.135\ U_0$	$0.05\ U_0$	$0.007\ U_0$

◆ 工程上认为，经过 5 τ，过渡过程结束。

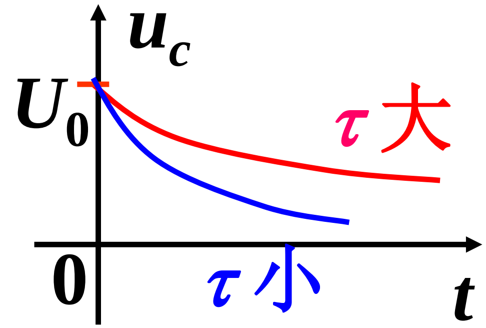
τ: 电容电压衰减到原来电压36.8%所需的时间。

$\tau = RC$

时间常数 τ 的大小反映了电路暂态过程时间的长短

τ 大　过渡过程时间长

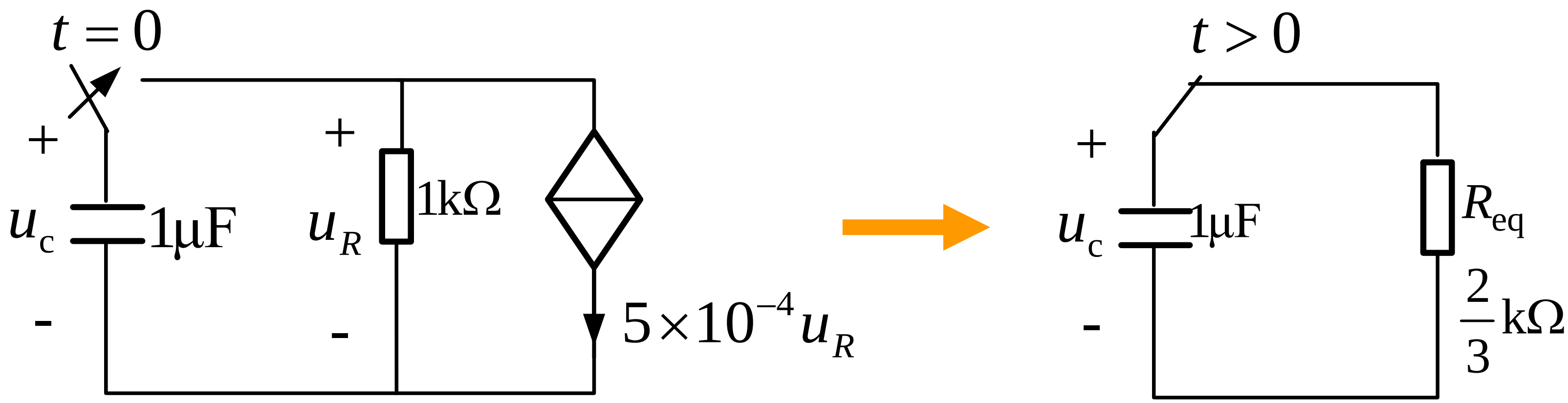
τ 小　过渡过程时间短



电压初值一定：

$$\left.\begin{array}{lll} C\text{ 大（}R\text{不变）} & w=0.5Cu^2 & \text{储能大} \\ R\text{ 大（}C\text{不变）} & i=u/R & \text{放电电流小} \end{array}\right\} \text{放电时间长}$$

例： **假定 $u_c(0\text{-})=10\text{V}$. 求 u_c $t>0$.**

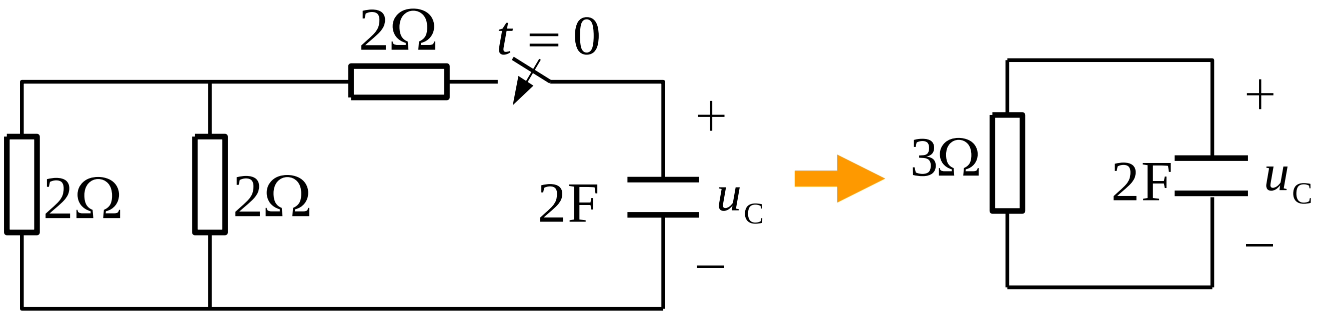


$$u_C(0_+) = u_C(0_-) = 10\text{V}$$

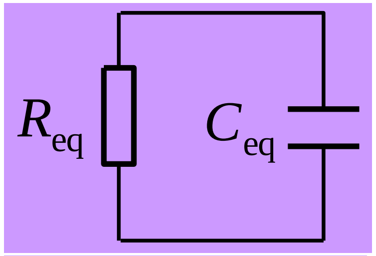
$$\tau = 1 \times \frac{2}{3} \times 10^{-3}\text{s}$$

$$u_C(t) = u_C(0_+)\text{e}^{-\frac{t}{\tau}} = 10\text{e}^{-1500t}\text{V}$$

例：假定 $u_c(0-)=24V$. 求 u_c 和 i_c $t>0$.



$$\tau = 3\times 2 = 6\mathrm{s}$$

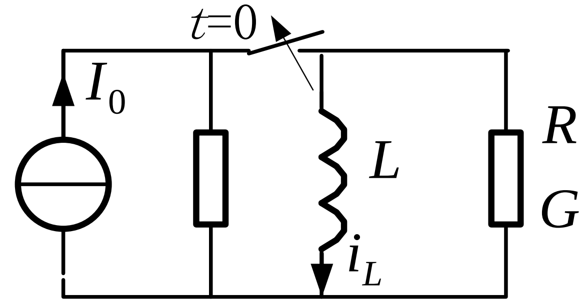


$$\tau = R_{eq}C_{eq}$$

$$u_C(t) = u_C(0_+)\mathrm{e}^{-\frac{t}{\tau}} = 24\mathrm{e}^{-0.17t}\mathrm{V}$$

$$i_C(t) = -8\mathrm{e}^{-0.17t}\mathrm{A}$$

1. 零输入响应分析



◆ 建立关于 i_L 的微分方程

$$L\frac{\mathrm{d}i}{\mathrm{d}t}+Ri=0 \quad t\geq 0$$

◆ 确定初始条件

$$i(0_+)=i(0_-)=I_0$$

◆ 求解微分方程

特征方程 $Ls+R=0$

特征根 $s=-\frac{R}{L}$

$$i(t)=ke^{st}$$

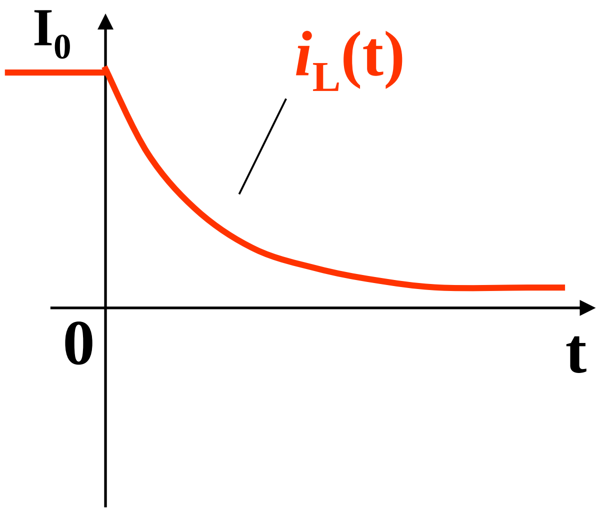
由初始值 $i(0_+)=I_0$ 确定常数 k

$$k=i(0_+)=I_0$$

$$i(t)=I_0e^{st}=I_0e^{-\frac{R}{L}t} \quad t\geq 0$$

$$s=-\frac{R}{L}=-\frac{1}{GL}$$

$$i = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} = I_0 e^{-\frac{t}{GL}} \quad t \geq 0$$



2. 能量转换

设 $i_L(0_+)=I_0$

电感放出能量 $\frac{1}{2}LI_0^2$

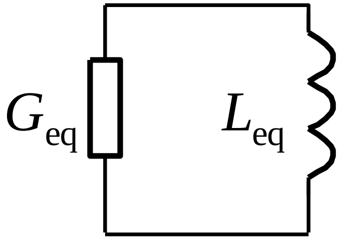
电阻消耗能量 $W_R = \int_0^\infty i^2 R dt = \frac{1}{2}LI_0^2$

3. RL电路的时间常数

令 $\tau = L/R$，称为一阶RL电路时间常数

$$[\tau]=[\frac{L}{R}]=[\frac{\text{亨}}{\text{欧}}]=[\frac{\text{韦}}{\text{安}\cdot\text{欧}}]=[\frac{\text{伏}\cdot\text{秒}}{\text{安}\cdot\text{欧}}]=[\text{秒}]$$

$$i(0\text{-})\text{一定：}\quad \left.\begin{array}{ll} L\text{大} & \text{起始能量大} \\ R\text{小} & \text{放电过程消耗能量小} \end{array}\right\} \begin{array}{c} \tau\text{大} \\ \text{放电慢} \end{array}$$



$$\tau = G_{eq}L_{eq}$$

$$i_L = I_0 e^{-\frac{t}{GL}} \qquad (t>0)$$

8.2 零输入响应

1. 一阶电路的零输入响应是由储能元件的初值引起的响应，都是由初始值衰减为零的指数衰减函数。

$$y(t)=y(0_+)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

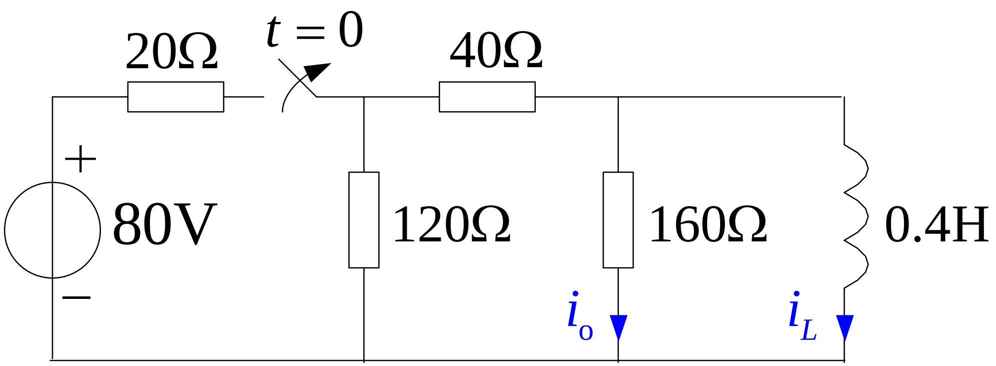
2. 衰减快慢取决于时间常数τ

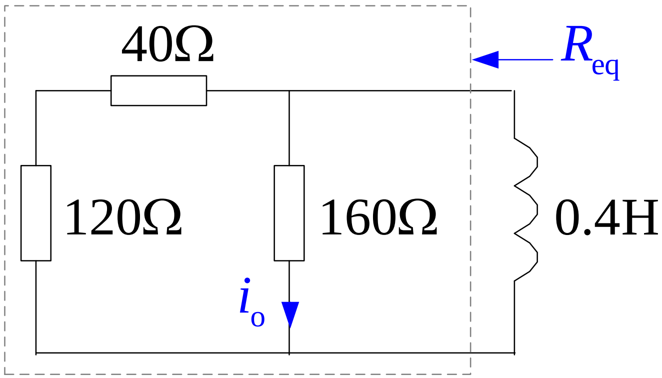
RC电路　$\tau=R_{eq}C$，　RL电路　$\tau=L/R_{eq}$

3. 同一电路中所有响应具有相同的**时间常数**。

4. 一阶电路的零输入响应和**初始值**成正比。

如图，求 i_o （$t>0$）





$$R_{eq}=80\Omega \qquad \tau=\frac{L}{R_{eq}}=\frac{0.4}{80}=5\times10^{-3}\mathrm{s}$$

$$i_L(0_-)=1.2\mathrm{A} \qquad i_L(0_+)=i_L(0_-)=1.2\mathrm{A}$$

$$i_o(0_+)=-\frac{(120+40)}{(120+40)+160}\times i_L(0_+)=-0.6\mathrm{A}$$

$$i_o=i_o(0_+)e^{-\frac{t}{\tau}}=-0.6e^{-200t}\ \mathrm{A}\quad(t>0)$$

第8章 一阶电路的暂态分析

8.1 概述

8.2 零输入响应（自然响应）

8.3 直流电源激励下的响应

8.4 正弦电源激励下的响应

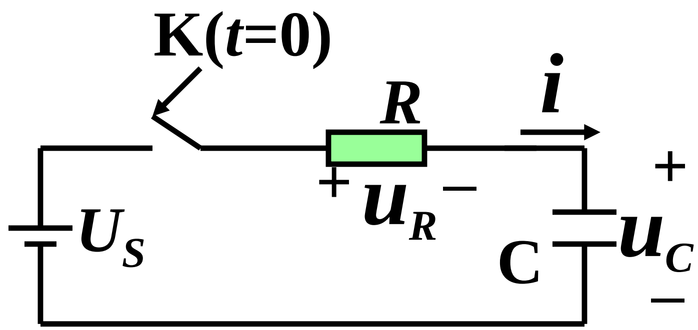
8.5 含运算放大器的一阶电路

8.6 线性非时变特性

8.7 冲激响应计算

8.8 拓展与应用

◆ RC电路的零状态响应（阶跃响应）



列方程：

$$RC\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+u_C=U_S$$

非齐次线性常微分方程

解的形式为：$u_C=u_{Cp}+u_{Ch}$

齐次方程的通解

非齐次方程的特解

8.3 直流电源激励下的响应

u_{Cp} ：特解（强制分量） $u_{Cp}=U_S$

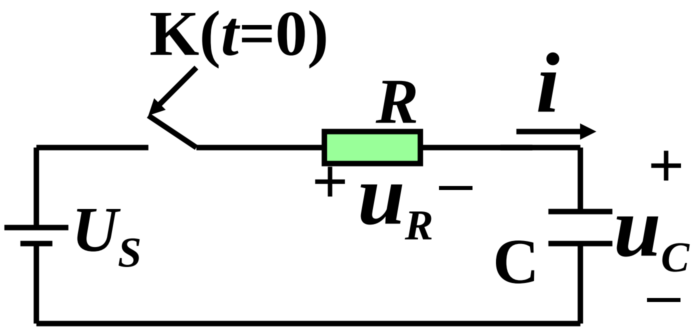
与输入激励的变化规律有关，某些激励时强制分量为电路的稳态解，此时强制分量称为稳态分量

可设为与输入激励相同形式，或用稳态解作为特解

u_{Ch} ：通解（自由分量，暂态分量）

齐次方程 $RC\dfrac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+u_C=0$ 的通解

$u_{Ch}=ke^{-\frac{t}{\tau}}$ 变化规律由电路参数和结构决定



$$u_C = u_{Cp} + u_{Ch}$$

$$u_{Cp} = U_S \qquad u_{Ch} = ke^{-\frac{t}{\tau}}$$

$$\boldsymbol{u_c = U_s + ke^{-\frac{t}{\tau}}}$$

代入初始值 $u_C(0_+)=u_C(0_-)=0$

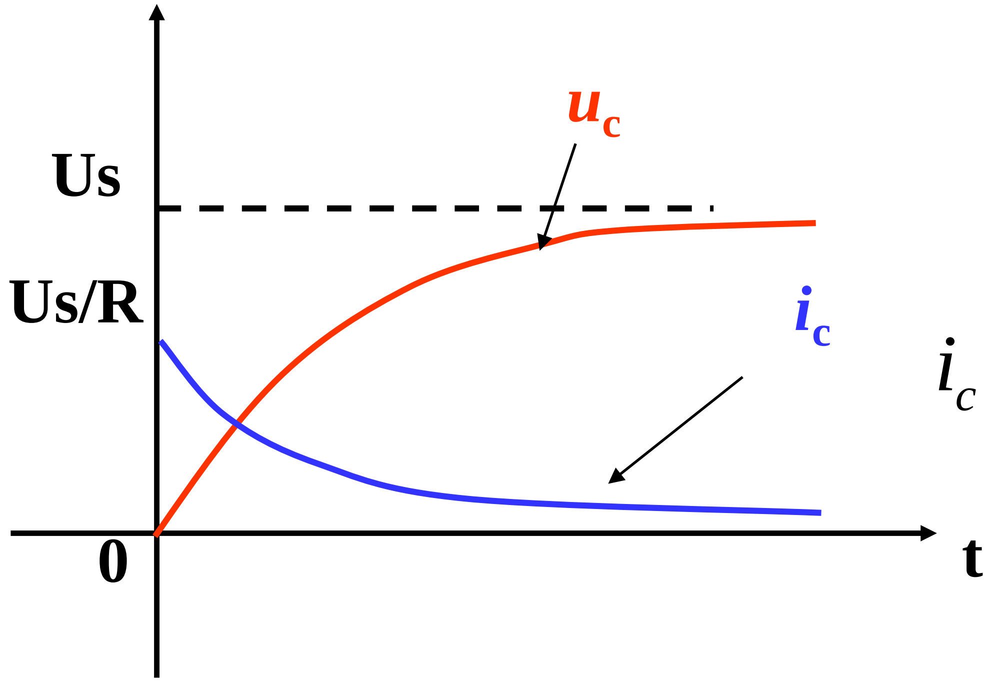
➡ $u_C(0_+)=k+U_S=0$ ➡ $k = -U_S$

➡ $u_c = U_S - U_S e^{-\frac{t}{RC}} = U_S(1-e^{-\frac{t}{RC}}) = U_c(\infty)(1-e^{-\frac{t}{\tau}}) \quad (t \geq 0)$

$$u_c = U_S - U_S e^{-\frac{t}{RC}} = U_S(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) \quad (t \geq 0)$$

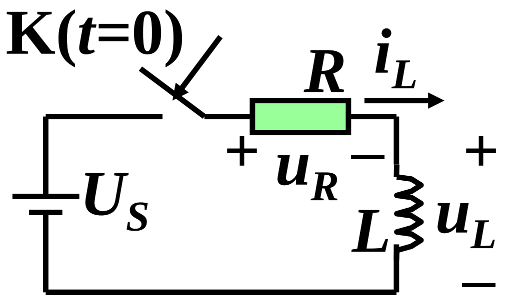
强制分量
(稳态)

自由分量
(暂态)



$$i_c = C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t} = \frac{U_S}{R}e^{-\frac{t}{RC}}$$

RL电路的零状态响应



已知 $i_L(0_-)=0$　求：电感电流$i_L(t)$

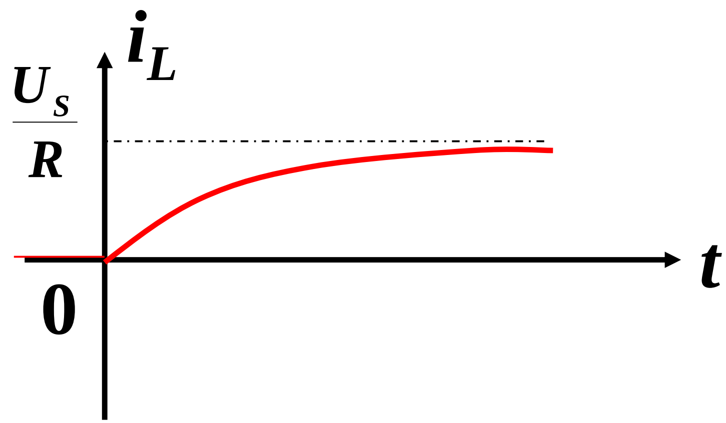
解

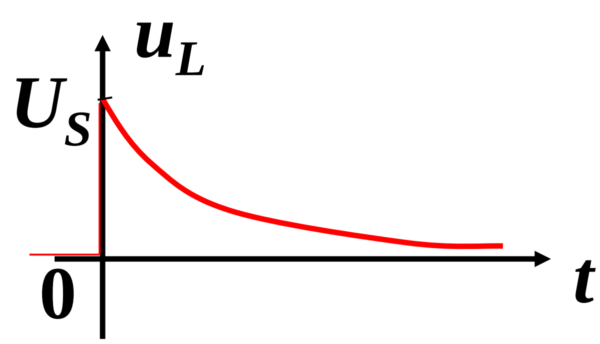
$$L\frac{di_L}{dt}+Ri_L=U_S$$

$$i_L=i_{Lp}+i_{Lh}=\frac{U_S}{R}+ke^{-\frac{t}{\tau}}$$

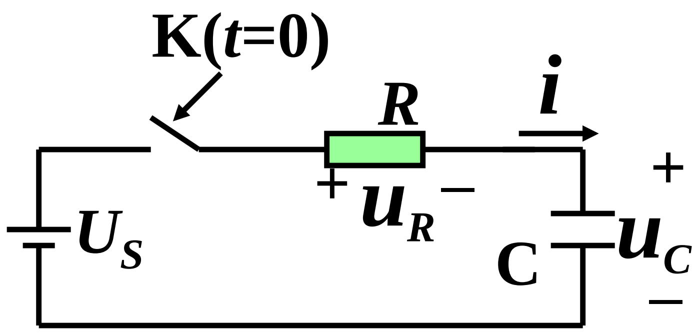
$$i_L=\frac{U_S}{R}(1-e^{-\frac{R}{L}t})$$

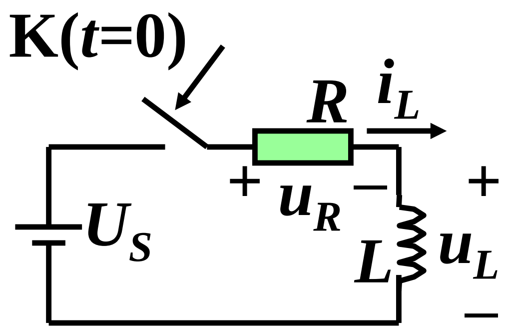
$$u_L=L\frac{di}{dt}=U_Se^{-\frac{R}{L}t}$$





8.3 直流电源激励下的响应





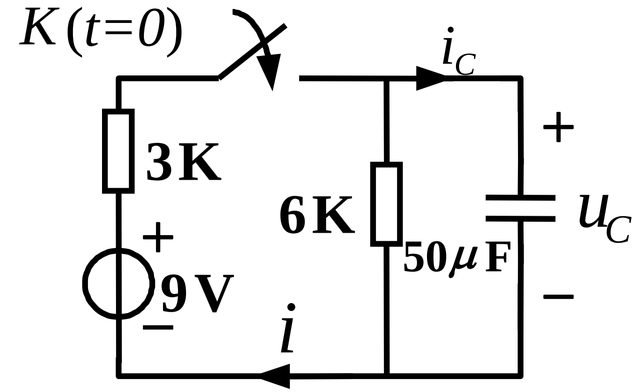
$$u_c = U_S(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$$

$$i_L = \frac{U_S}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t})$$

小结： 由上述讨论得知，一阶电路零状态响应的通用表达式为

$$\boxed{y(t) = y(\infty)(1 - e^{-t/\tau})}$$

已知 $u_C(0)=0$，试求 $u_C(t)$和$i(t)$，$t\geq 0$。



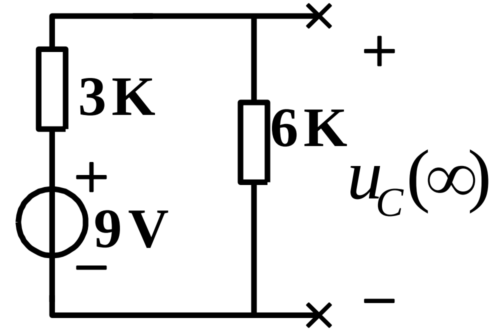
解： $t\geq 0$

$$R=3\text{K}//6\text{K}=2\text{K}$$

$$\therefore \tau=RC$$

$$=2\times10^{3}\times50\times10^{-6}=0.1\text{s}$$

$t=\infty$



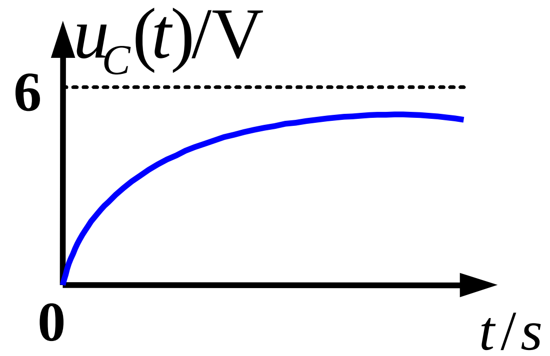
$$u_C(\infty)=6\text{V}$$

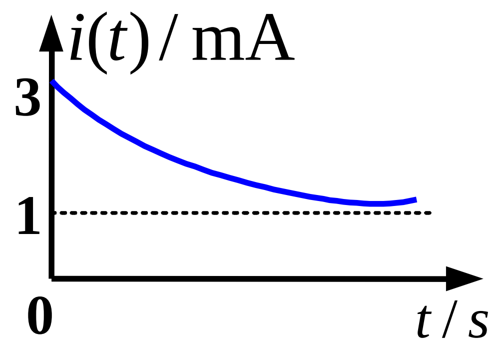
$$u_C(t)=u_C(\infty)\left(1-\text{e}^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$

$$=6\left(1-\text{e}^{-10t}\right)\text{V}\qquad t\geq 0$$

解（续）

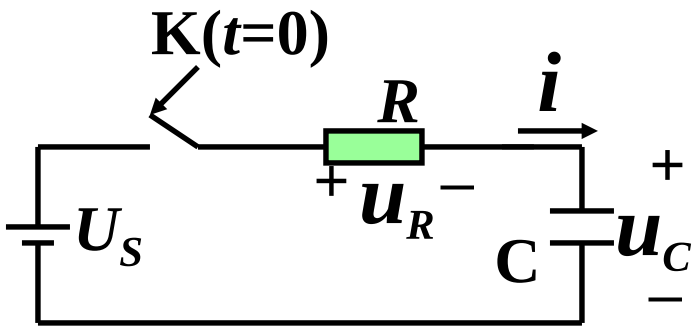
$$i(t)=C\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+\frac{u_C}{6K}=1+2\mathrm{e}^{-10t}\left(\mathrm{mA}\right)\qquad t>0$$





◆一阶电路的全响应及其两种分解方式

1. 全解 = 强制分量(稳态解)+自由分量(暂态解)



$$RC\frac{\mathrm{d}u_C}{\mathrm{d}t}+u_C=U_S$$ 非齐次方程

解为 $u_C(t) = u_{Ch} + u_{Cp}$

$u_C(0_-) = U_0$

稳态解 $u_{Ch} = U_S$ 　　暂态解 $u_{Cp} = ke^{-\frac{t}{\tau}}$

$\tau = RC$

$$u_C = U_S + ke^{-\frac{t}{\tau}}$$

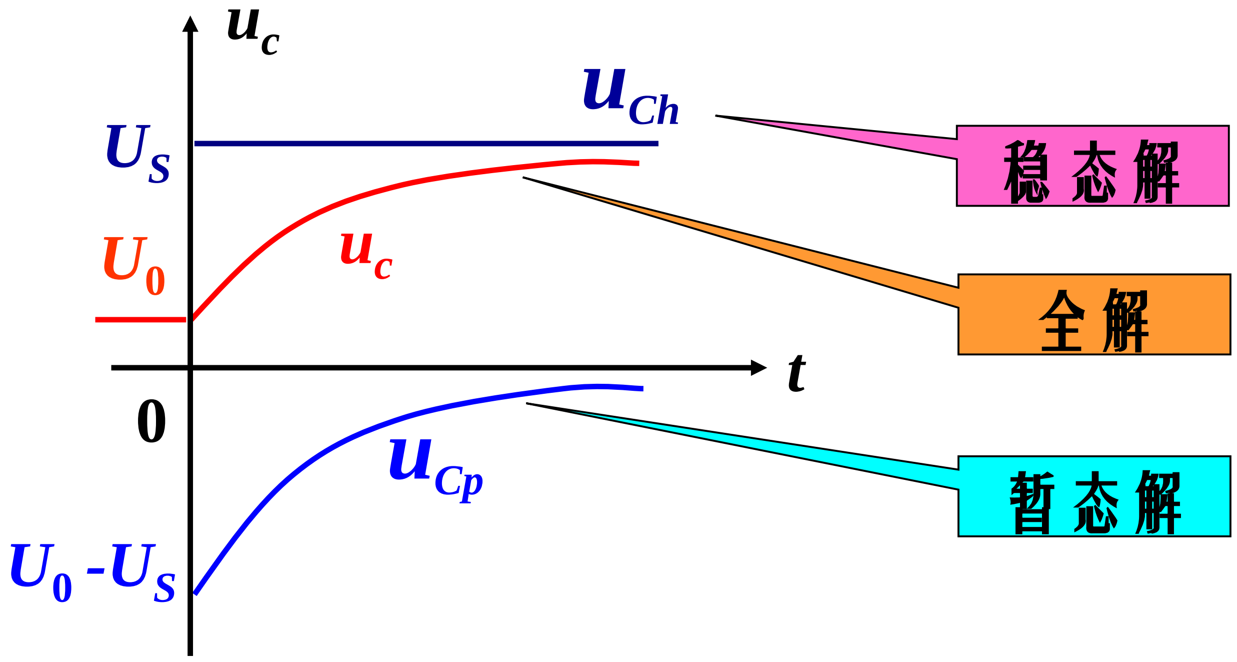
由起始值定k 　$u_C(0_+) = k + U_S = U_0$ 　　$\therefore k = U_0 - U_S$

8.3 直流电源激励下的响应

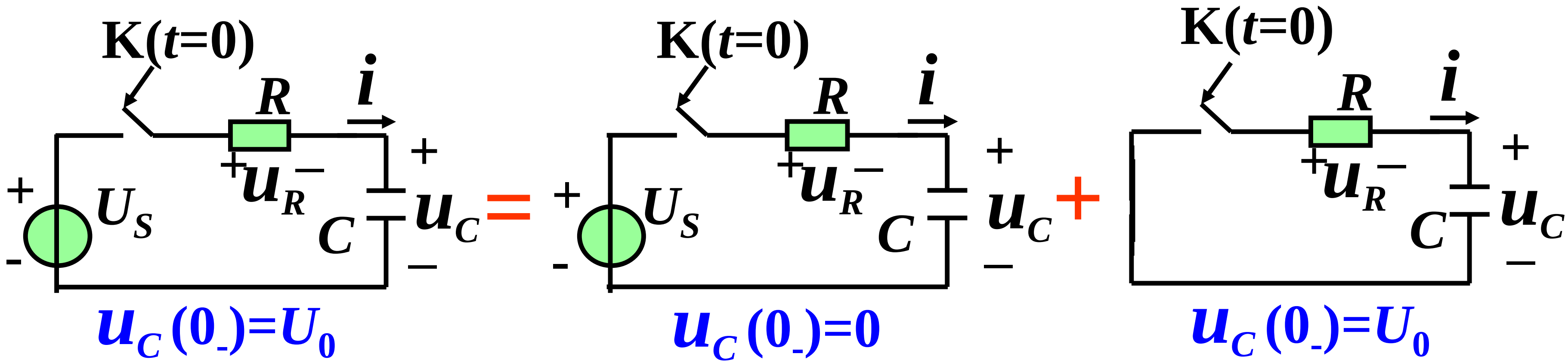
$$u_C = U_S + (U_0 - U_S)e^{-\frac{t}{\tau}} \quad t \geq 0$$

强制分量(稳态解)

自由分量(暂态解)



2. 全响应= 零状态响应 + 零输入响应



$$u_C = U_S(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) + U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (t \geq 0)$$

$$u_C = U_S + (U_0 - U_S)e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad t \geq 0$$

$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]\, e^{-t/RC}$$

8.3 直流电源激励下的响应

$$u_C(t) = u_C(\infty) + [u_C(0_+) - u_C(\infty)]\, e^{-t/RC}$$

◆ 一阶电路全响应微分方程解的通用表达式：

$$\boxed{y(t) = y(\infty) + [y(0_+) - y(\infty)]\, e^{-t/\tau}}$$

◆ 一阶电路零输入响应微分方程解的通用表达式：

$$\boxed{y(t) = y(0_+)\, e^{-t/\tau}}$$

◆ 一阶电路零状态响应微分方程解的通用表达式：

$$\boxed{y(t) = y(\infty)(1 - e^{-t/\tau})}$$

8.3 直流电源激励下的响应

$$y(t)=y(\infty)+[y(0_+)-y(\infty)]e^{-t/\tau}$$

式中 $y(t)$ 代表一阶电路过渡过程中任一电压、电流随时间变化的函数。

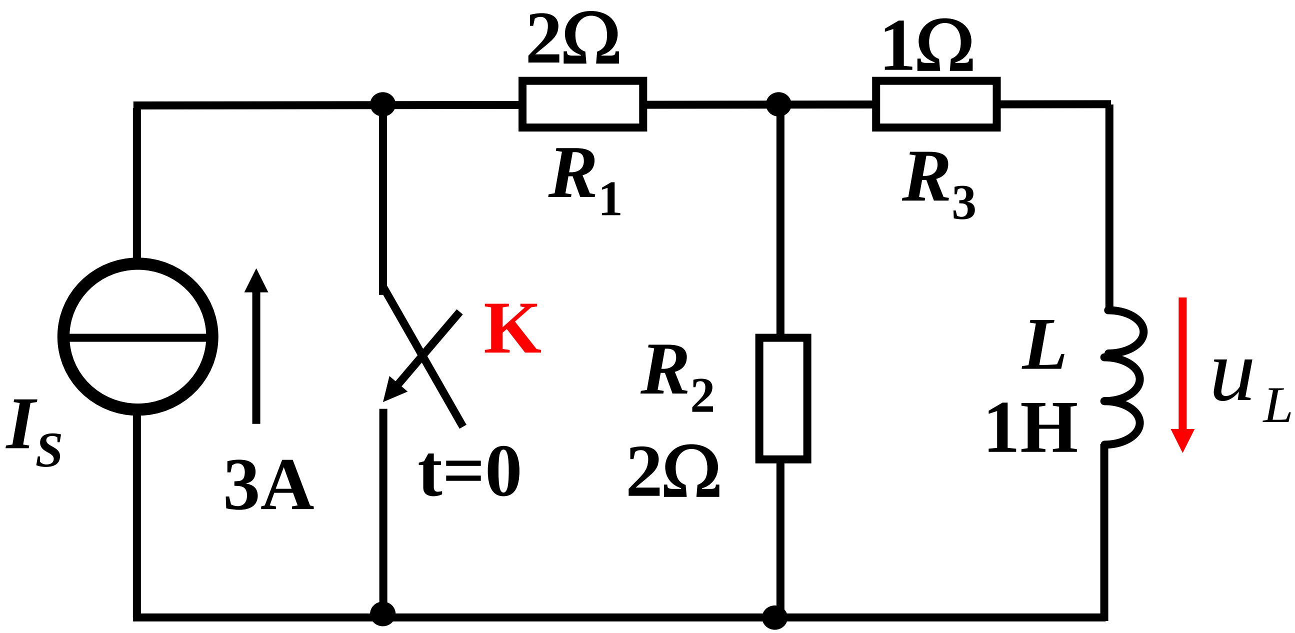
其中三要素为:
- 初始值 ---- $y(0_+)$
- 稳态值 ---- $y(\infty)$
- 时间常数--- τ

利用求三要素的方法求解过渡过程，称为三要素法。只要是一阶电路，就可以用三要素法。

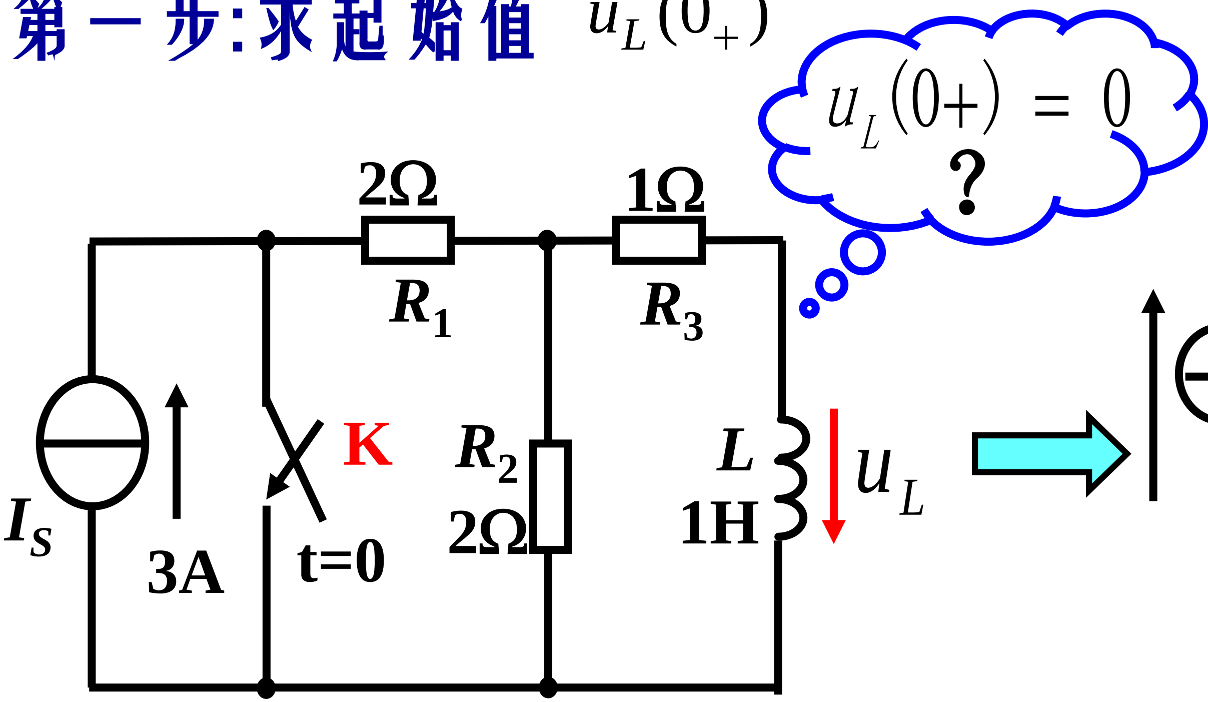
例

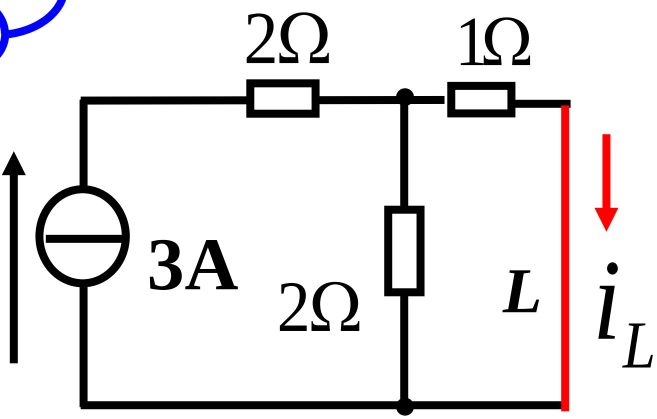
已知：*K* 在t=0时闭合，换路前电路处于稳态。

求：电感电压 $u_L(t)$ $\quad t>0$



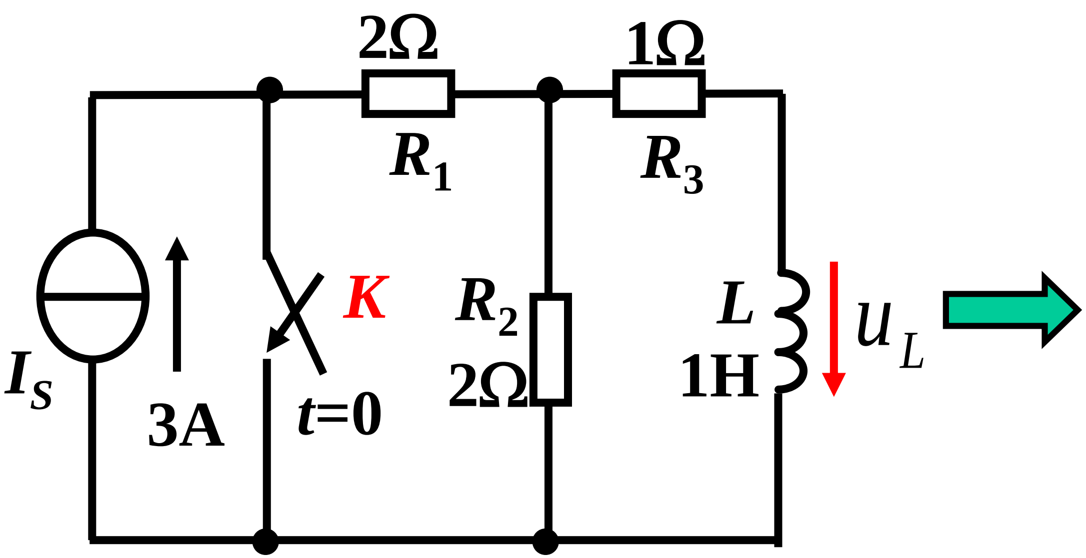
第一步:求起始值 $u_L(0_+)$

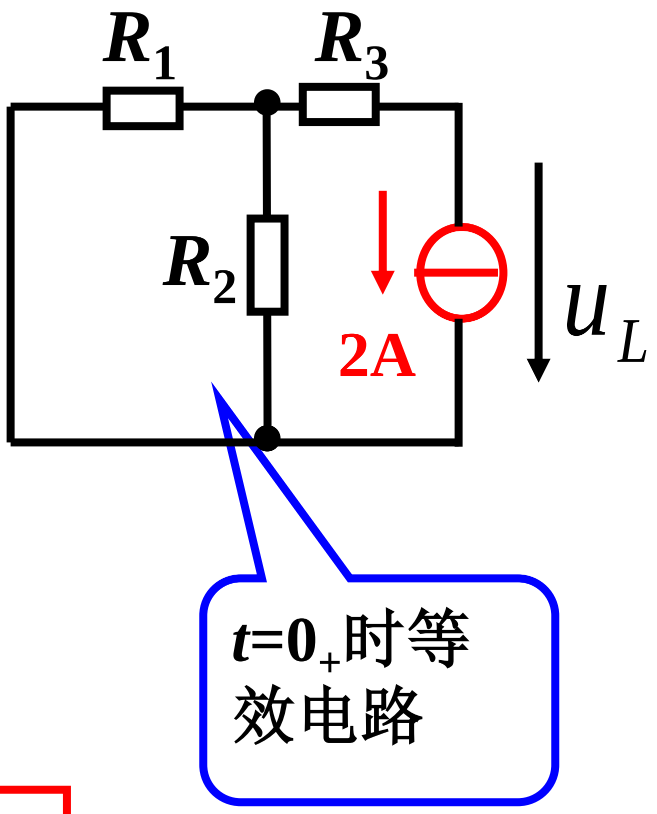




t =0_时等效电路

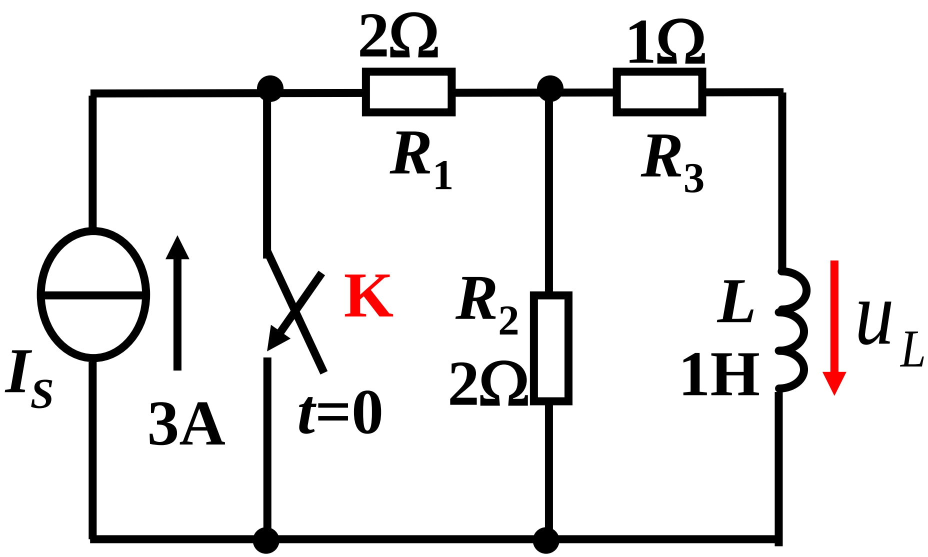
$$
i_L(0+) = i_L(0-) = \frac{2}{1+2} \times 3 = 2\ \mathrm{A}
$$

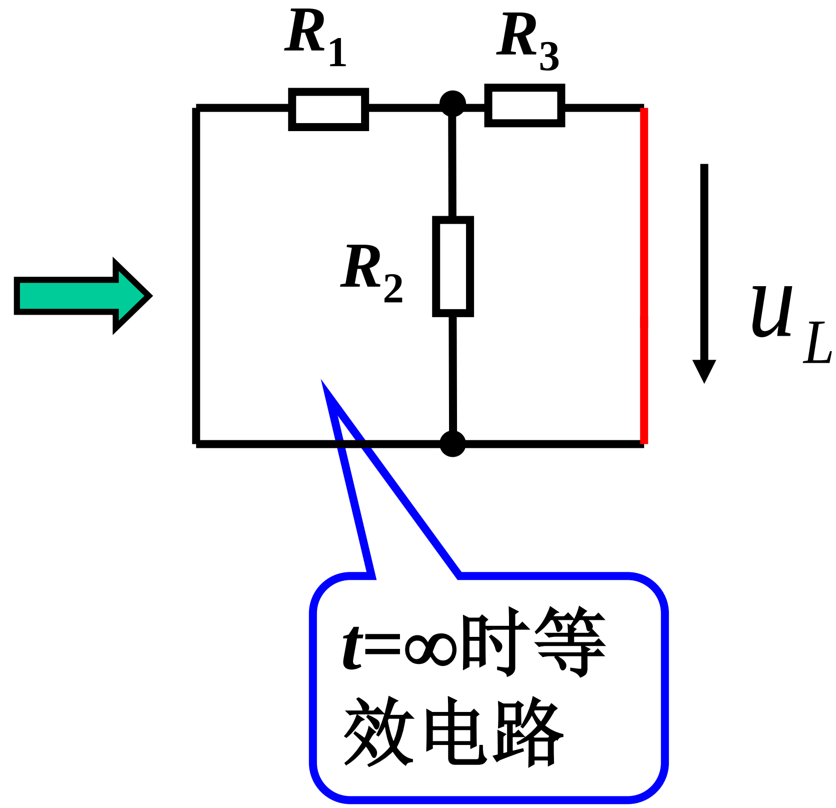




$$u_L(0_+) = -i_L(0_+)[R_1 // R_2 + R_3]$$
$$= -4\ \mathrm{V}$$

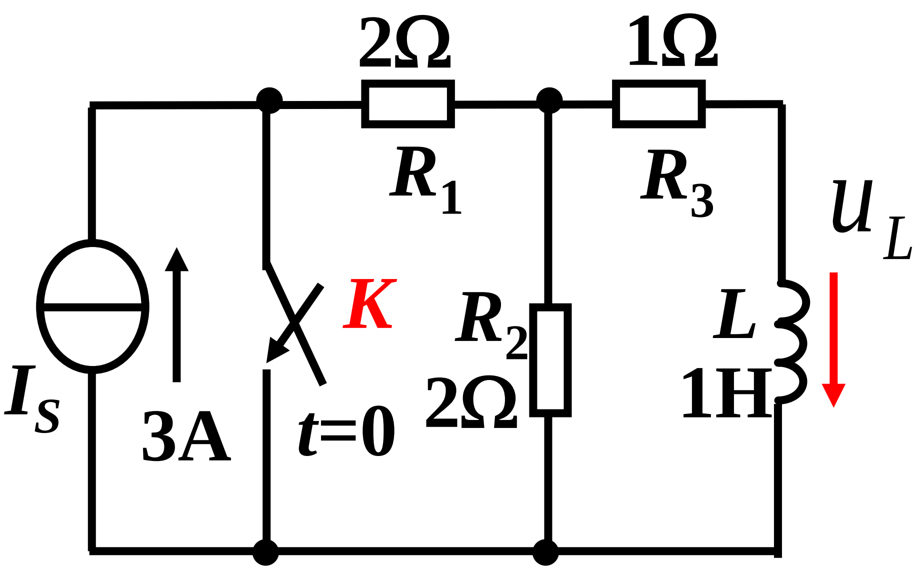
第二步:求稳态值 $u_L(\infty)$

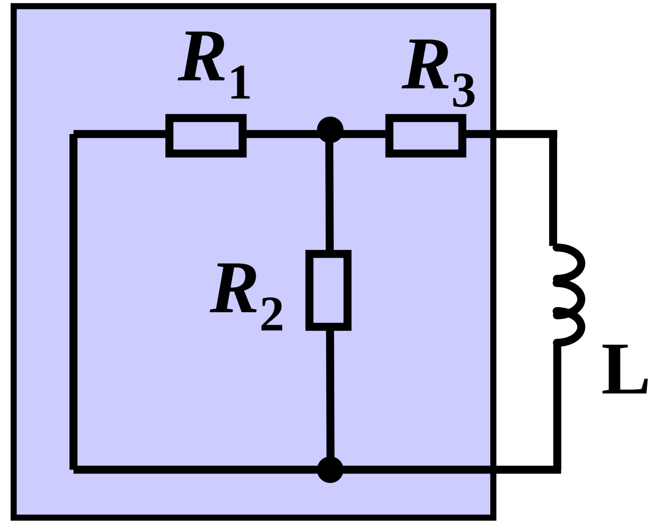




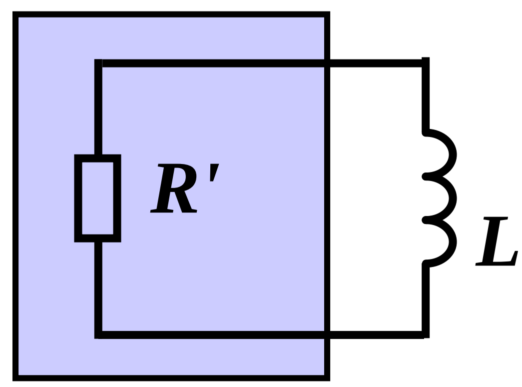
$$u_L(\infty) = 0\ \mathrm{V}$$

第三步:求时间常数 τ





$$R' = R_1 // R_2 + R_3$$



$$\tau = \frac{L}{R'} = \frac{1}{2} = 0.5(\text{s})$$

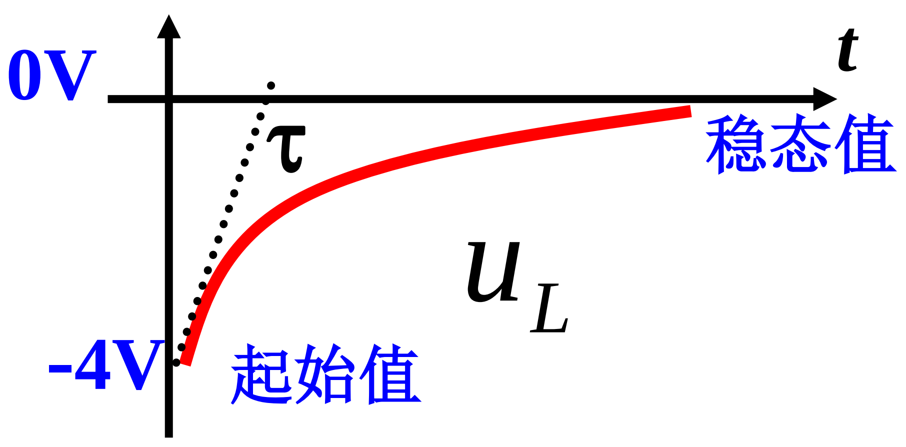
第四步: 将三要素代入通用表达式得过渡过程方程

$$\begin{cases} u_L(0_+) = -4\text{V} \\ \boldsymbol{u_L}(\infty) = 0 \\ \boldsymbol{\tau} = 0.5\text{s} \end{cases}$$

$$\boxed{\begin{aligned} u_L(t) &= u_L(\infty) + [u_L(0_+) - u_L(\infty)]\, e^{-t/\tau} \\ &= 0 + (-4 - 0)\, e^{-2t} \\ &= -4\, e^{-2t}\text{V} \end{aligned}}$$

第五步：画过渡过程曲线（由初始值→稳态值）

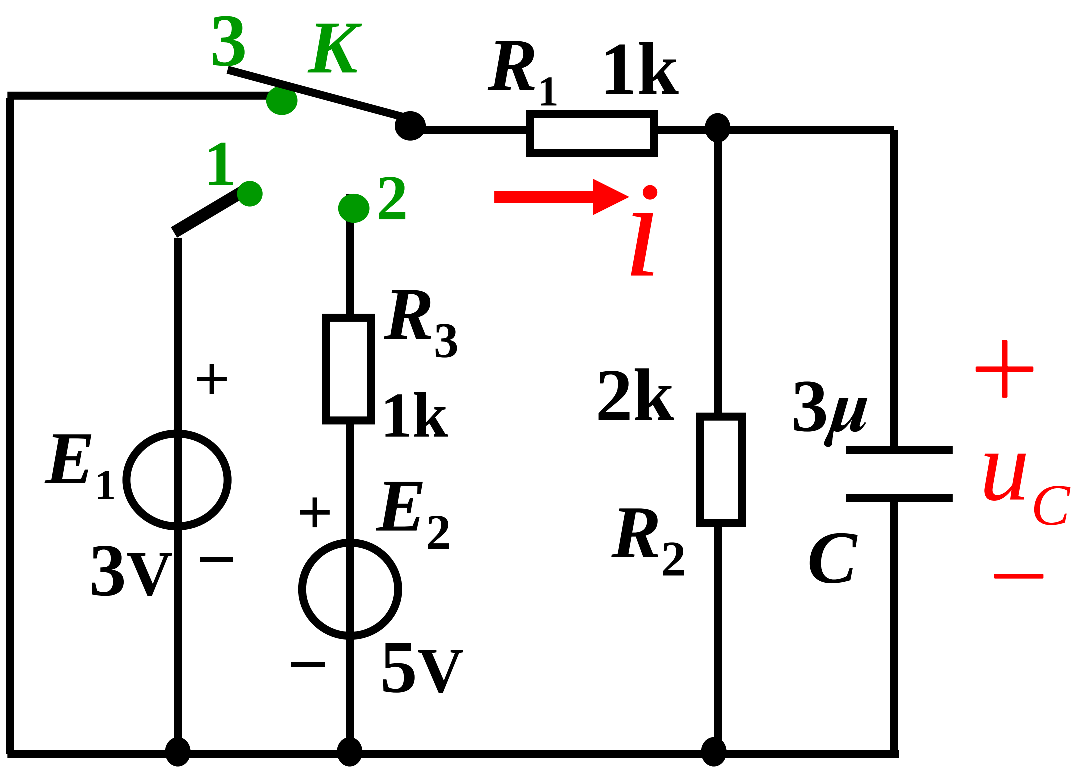
$$u_L(t) = u_L(\infty) + [u_L(0_+) - u_L(\infty)]e^{-t/\tau}$$
$$= 0 + (-4 - 0)e^{-2t}$$
$$= -4e^{-2t}\,\mathrm{V}$$



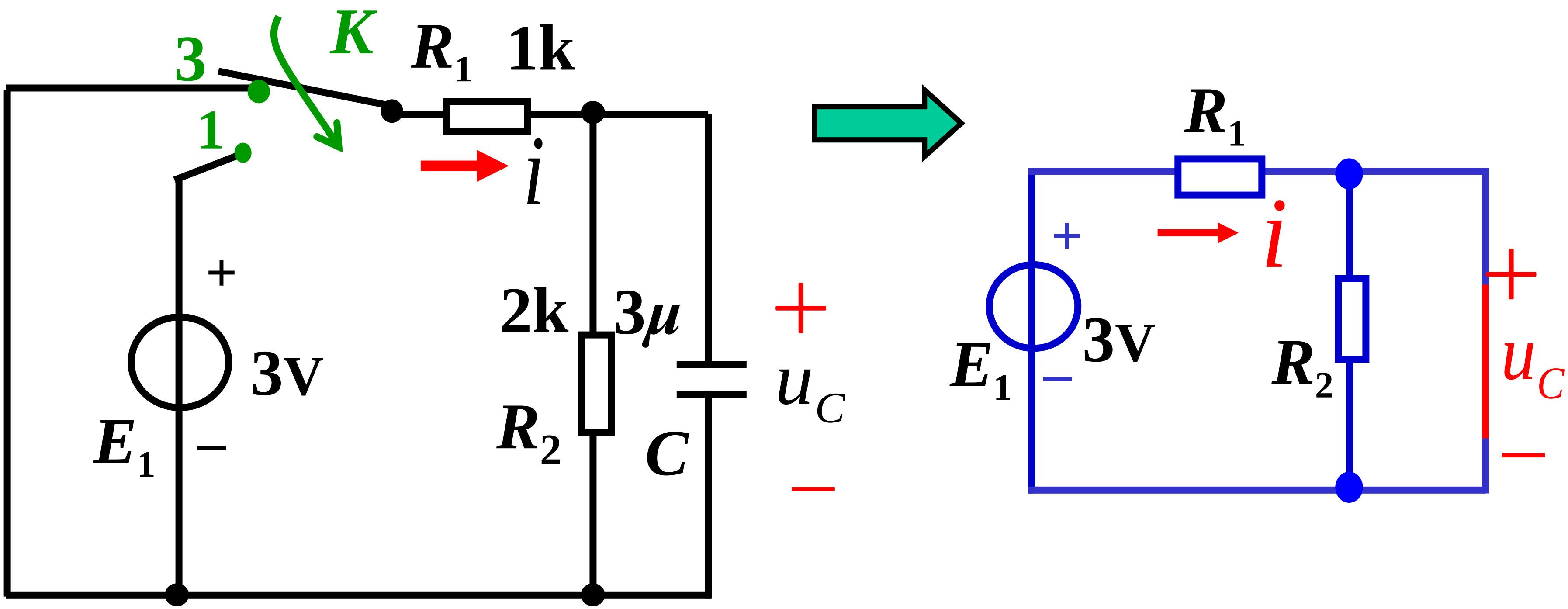
例　已知：开关 K 原在“3”位置，电容未充电。当 $t=0$ 时，K 合向“1”

$t=20$ ms 时，K 再从“1”合向“2”

求：$u_C(t)$ 、$i(t)$



解：第一阶段 （t = 0 ~ 20 ms，K：3→1） 初始值



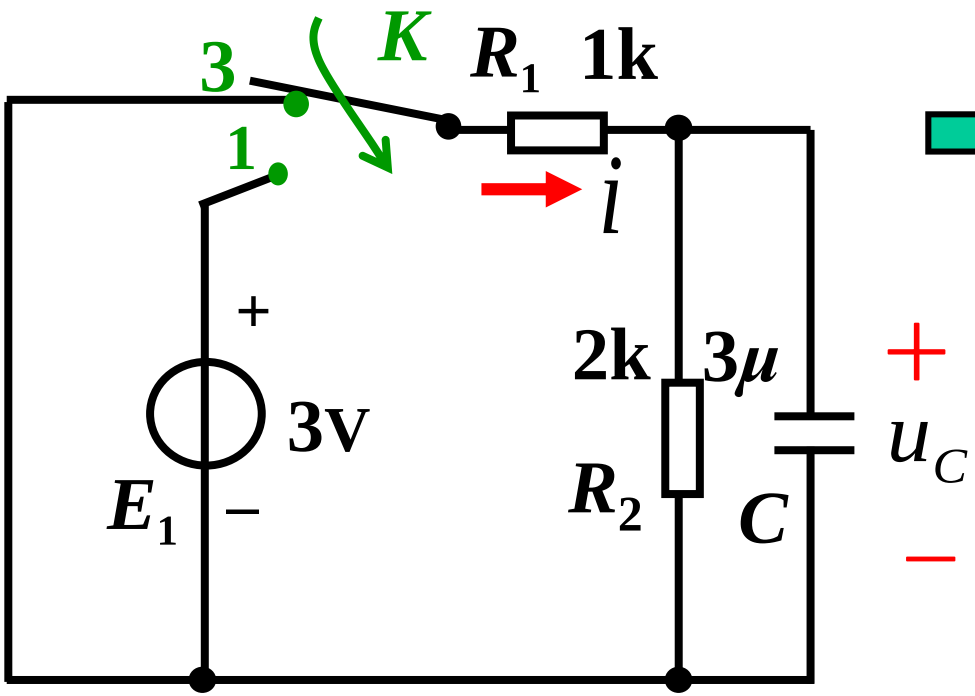
$$\boxed{u_c(0_+) = u_c(0_-) = 0}$$

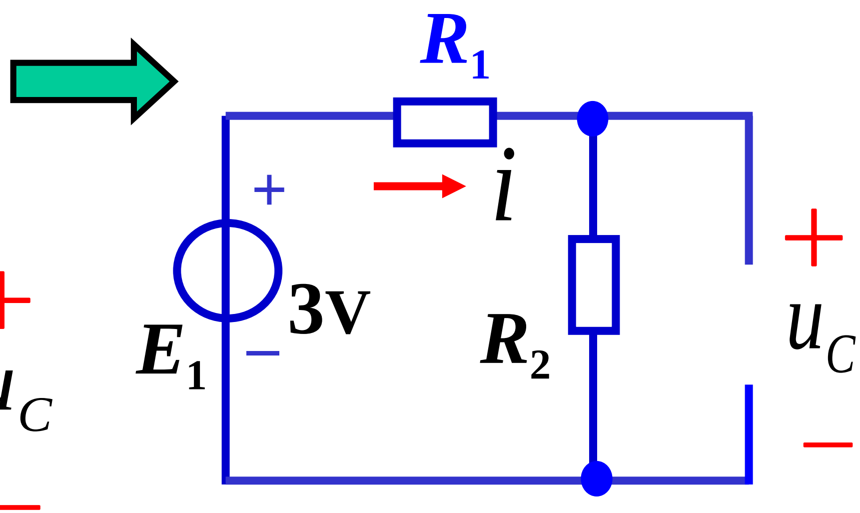
$$\boxed{i(0_+) = \frac{E}{R_1} = 3mA}$$

8.3 直流电源激励下的响应

第一阶段（K：3→1）

稳态值



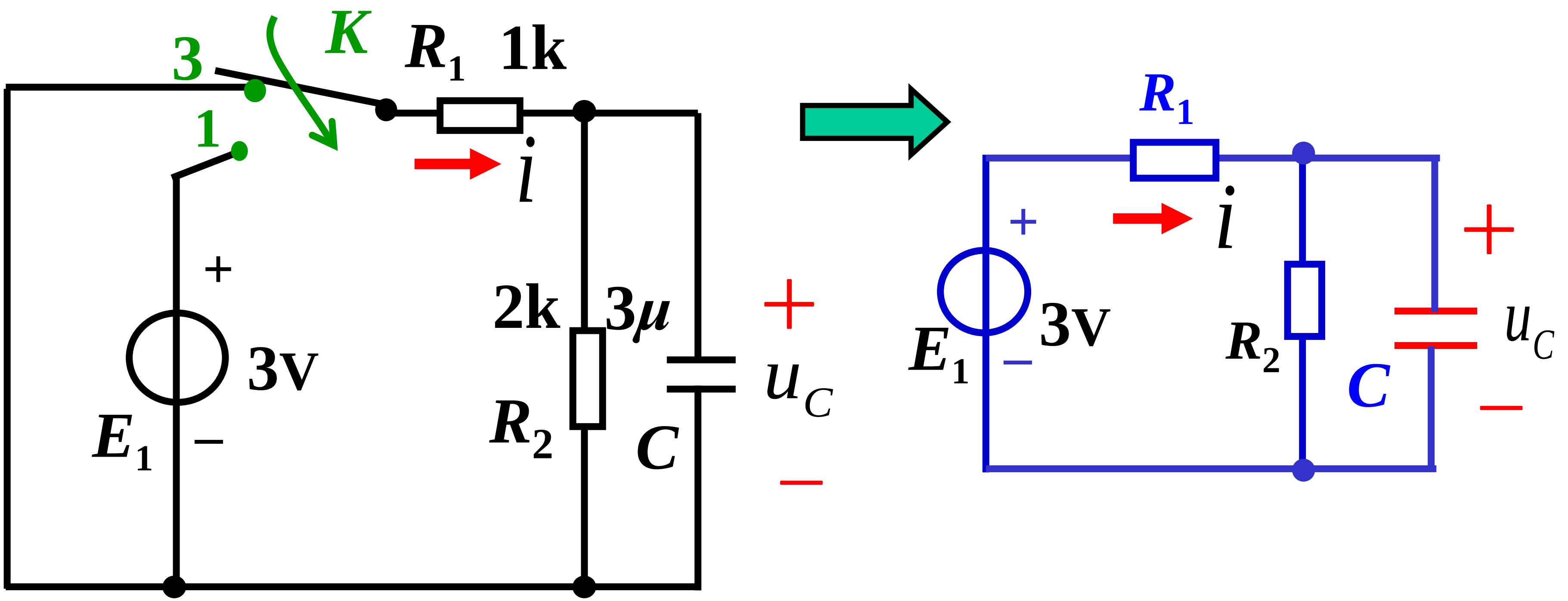


$$i(\infty) = \frac{E_1}{R_1 + R_2} = 1 \ \mathrm{mA}$$

$$u_C(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_1 = 2 \ \mathrm{V}$$

第一阶段（K：3→1）

时间常数



$$R_d = R_1 // R_2 = \frac{2}{3}\,\mathrm{k}\Omega$$

$$\boxed{\tau = R_d C = 2\ \mathrm{ms}}$$

8.3 直流电源激励下的响应

第一阶段（$t = 0 \sim 20$ ms）电压过渡过程方程：

$$\boxed{y(t) = y(\infty) + [y(0_+) - y(\infty)]e^{-t/\tau}}$$

$$\begin{cases} \tau = R_d C = 2(\text{ms}) \\ u_c(0_+) = u_c(0_-) = 0 \\ u_C(\infty) = \dfrac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot E_1 = 2(\text{V}) \end{cases}$$

$$\boxed{u_c(t) = 2 - 2e^{-t/0.002}\ \text{V}}$$

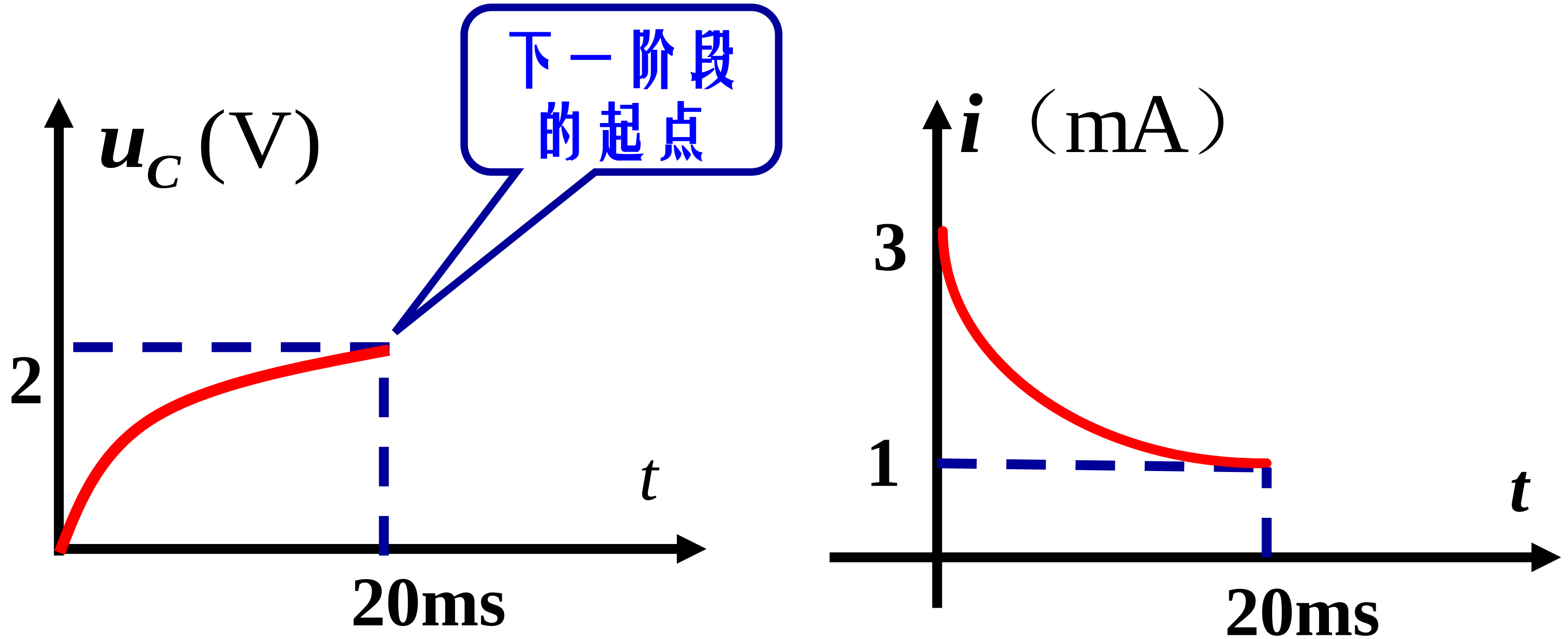
第一阶段（$t = 0 \sim 20$ ms）电压过渡过程方程：

$$\boxed{y(t) = y(\infty) + [y(0_+) - y(\infty)]e^{-t/\tau}}$$

$$\begin{cases} \tau = R_d C = 2\text{ms} \\ i(0_+) = \dfrac{E}{R_1} = 3mA \\ i(\infty) = \dfrac{E_1}{R_1 + R_2} = 1\text{mA} \end{cases}$$

$$\boxed{i(t) = 1 + 2e^{-t/0.002}\text{mA}}$$

第一阶段波形图

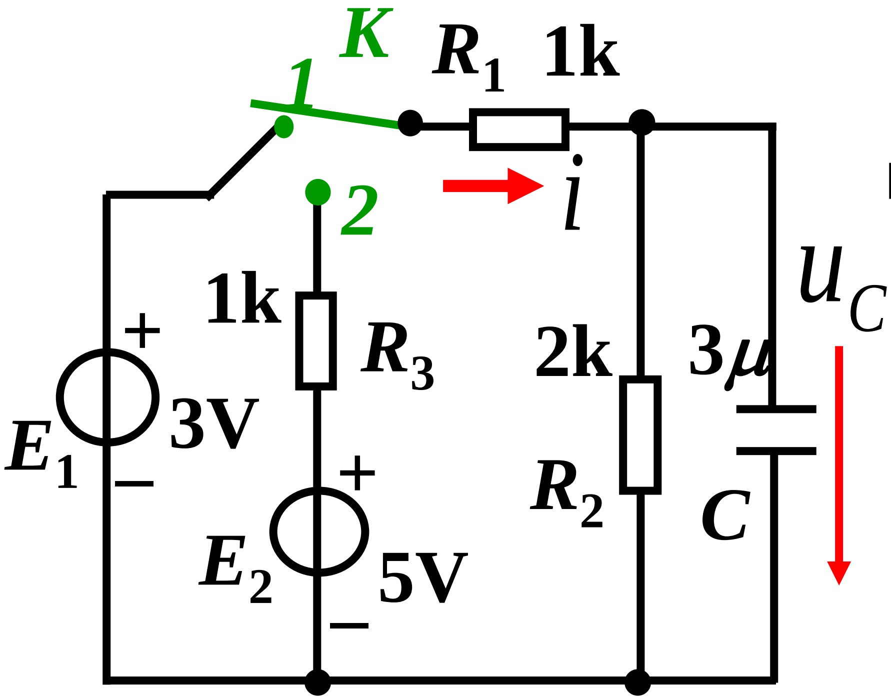


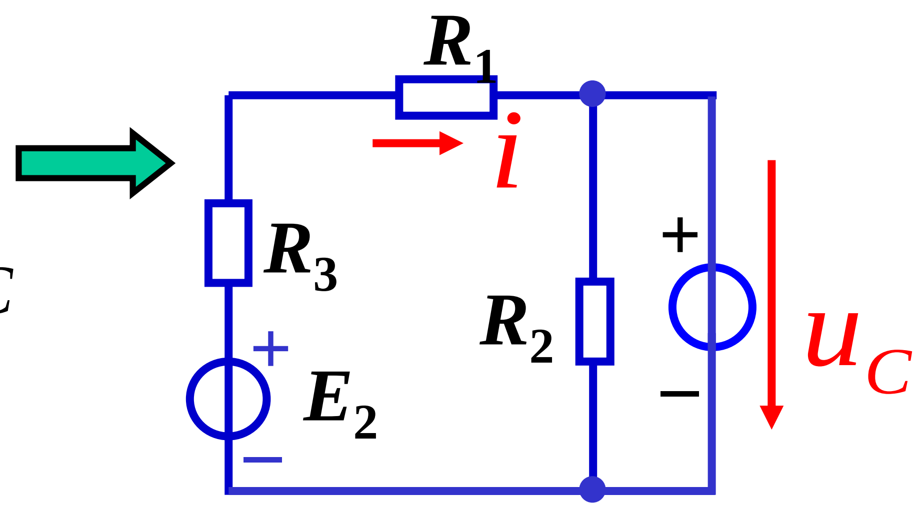
说明： $\tau = 2$ ms, $5\tau = 10$ ms

20 ms > 10 ms , t=20 ms 时，可以认为电路已基本达到稳态。

第二阶段：20ms ~ （K由 1→2）

起始值





t=20ms$_+$ 时等效电路

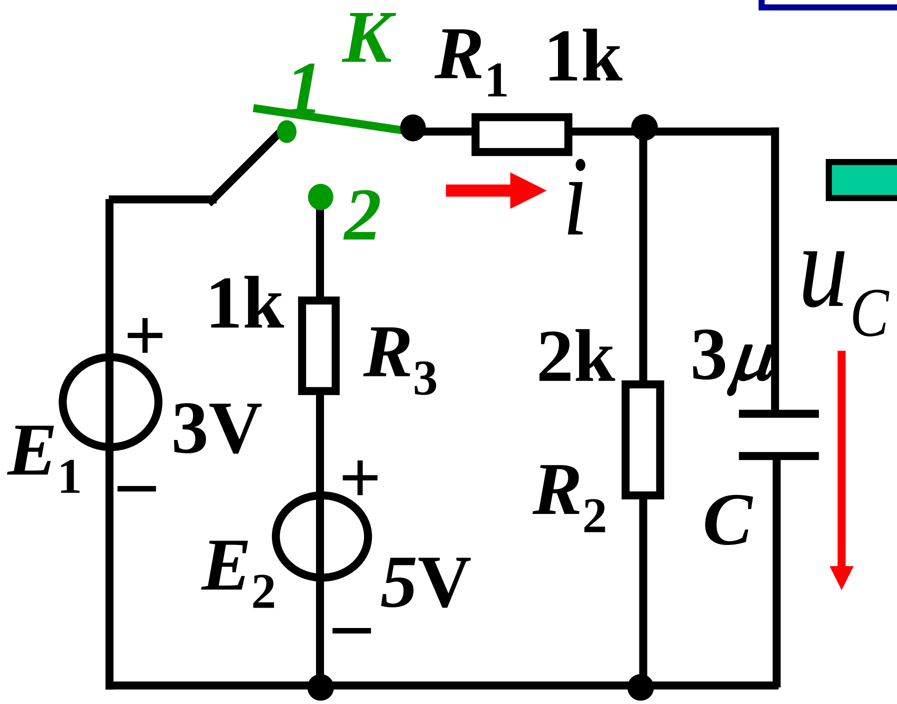
$$u_C(20\text{ms}_+) = u_C(20\text{ms}_-) = 2\text{V}$$

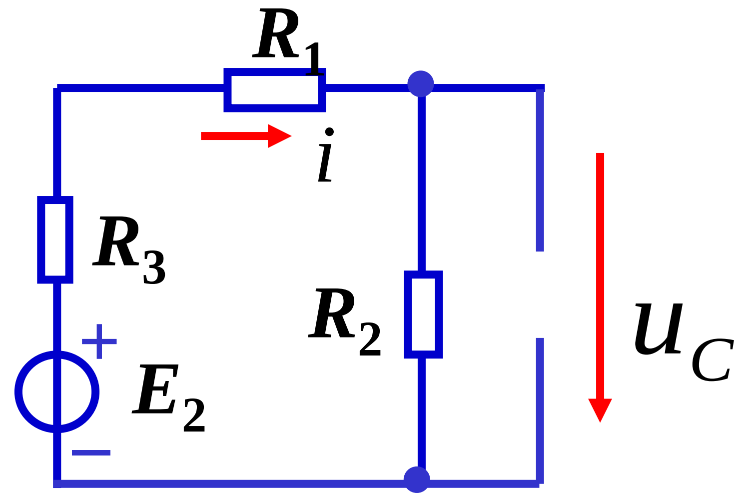
$$i(20\text{ms}_+) = \frac{E_2 - u_c(20\text{ms}_+)}{R_1 + R_3} = 1.5\text{mA}$$

8.3 直流电源激励下的响应

第二阶段：(*K*:1→2)

稳态值





$$u_c(\infty) = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_3} E_2$$

$$= 2.5\,\mathrm{V}$$

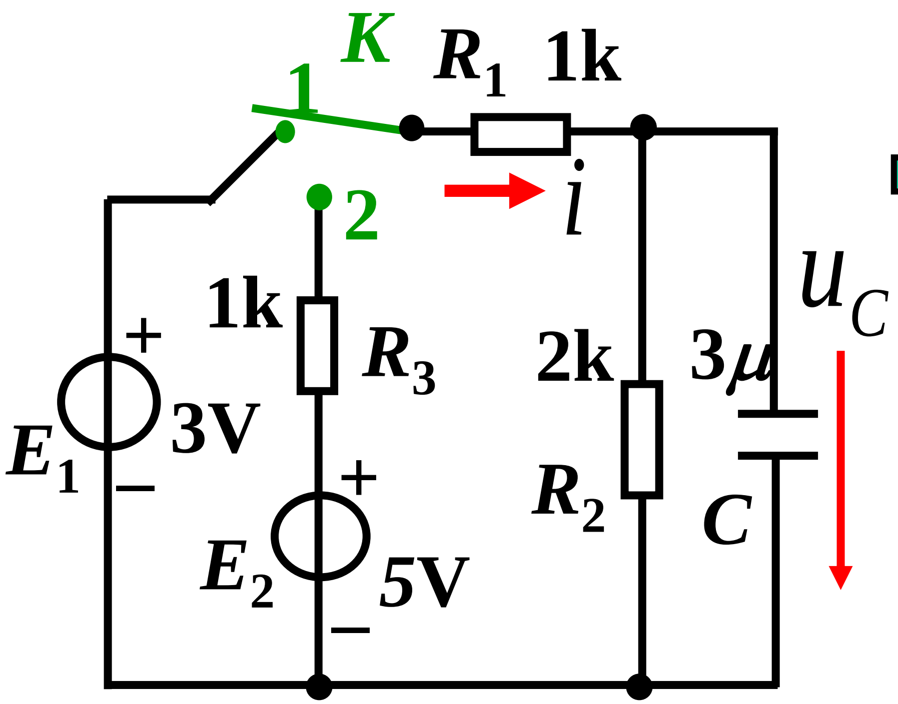
$$i(\infty) = \frac{E_2}{R_1 + R_2 + R_3}$$

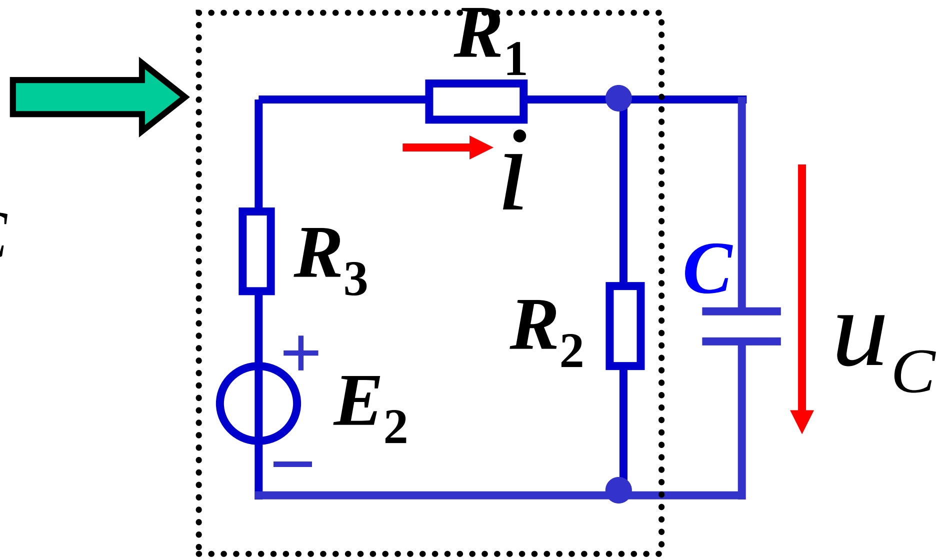
$$= 1.25\,\mathrm{mA}$$

8.3 直流电源激励下的响应

第二阶段：(K:1→2)

时间常数





$$R_d = (R_1 + R_3) // R_2 = 1\,\mathrm{k\Omega}$$

$$\boxed{\tau = R_d C = 3\mathrm{ms}}$$

第二阶段（ 20ms ~）电压过渡过程方程

$$\boxed{y(t)=y(\infty)+[y(0_+)-y(\infty)]e^{-t/\tau}}$$

$$\begin{cases} \tau = R_d C = 3\text{ms} \\ u_C(20\text{ms}_+) = 2\text{V} \\ u_C(\infty) = 2.5\text{V} \end{cases}$$

$$\boxed{u_C(t) = 2.5 - 0.5\, e^{-\frac{t-0.02}{0.003}}\ \text{V}}$$

第二阶段（20ms ~）电流过渡过程方程

$$y(t)=y(\infty)+[y(0_+)-y(\infty)]e^{-t/\tau}$$

$$\begin{cases}\tau = R_d C = 3\text{ms} \\ i(20\text{ms}_+) = 1.5\text{mA} \\ i(\infty) = 1.25\text{mA}\end{cases}$$

$$i(t) = 1.25 + 0.25\,e^{-\frac{t-0.02}{0.003}}\ \text{mA}$$

第一阶段小结：

$$u_c(t) = 2 - 2e^{-t/0.002} \quad \text{V}$$

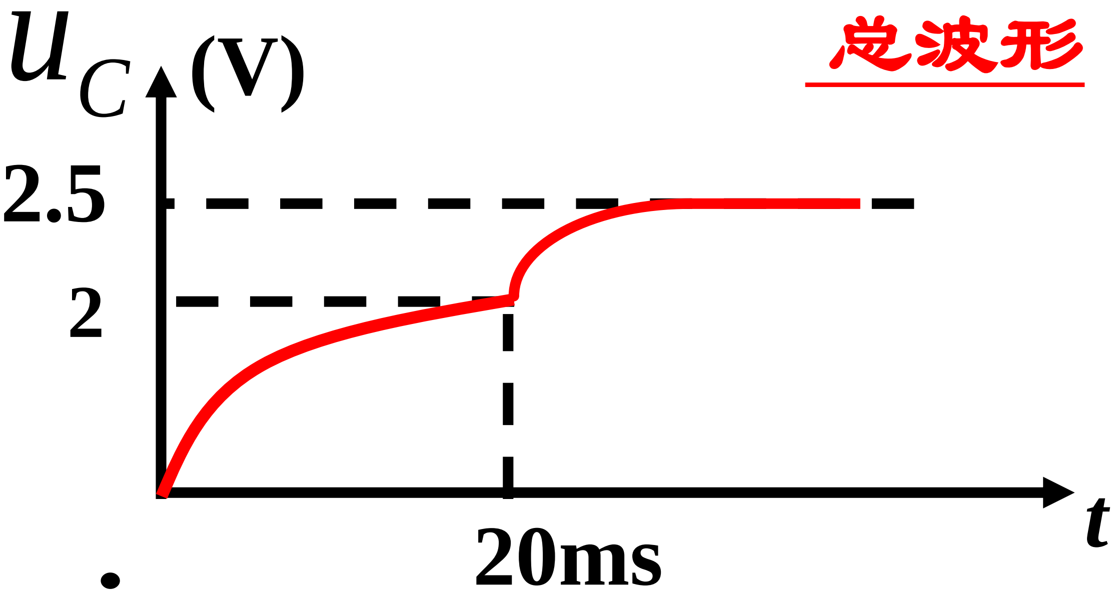
$$i(t) = 1 + 2e^{-t/0.002} \quad \text{mA}$$

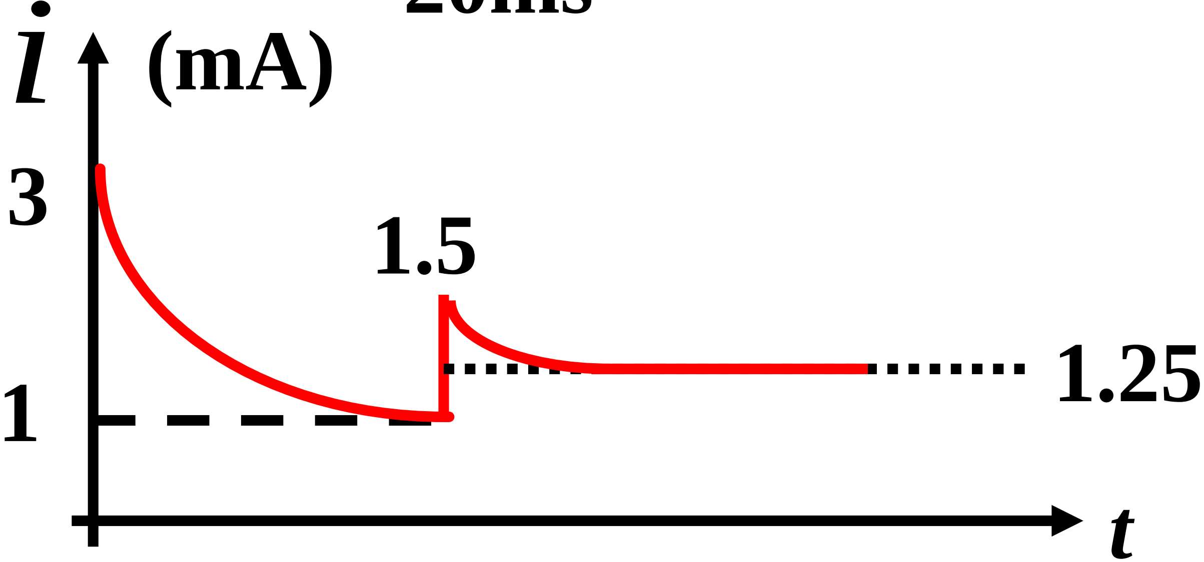
第二阶段小结：

$$u_c(t) = 2.5 - 0.5e^{-\frac{t-0.02}{0.003}} \quad \text{V}$$

$$i(t) = 1.25 + 0.25e^{-\frac{t-0.02}{0.003}} \quad \text{mA}$$

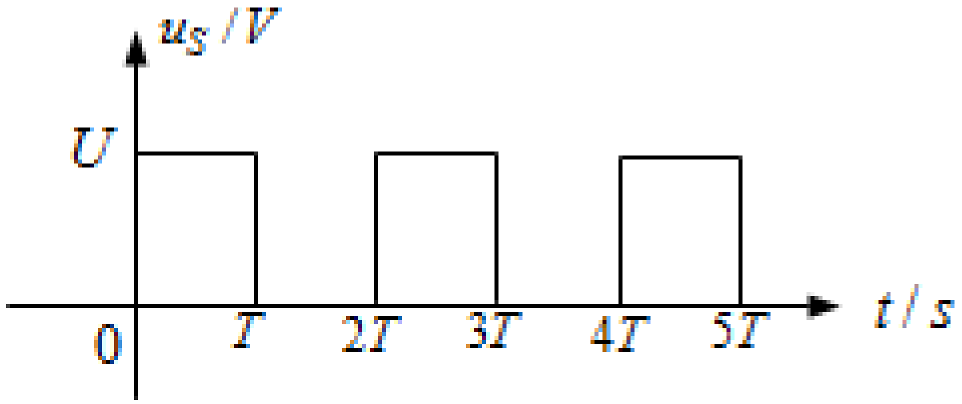
总波形



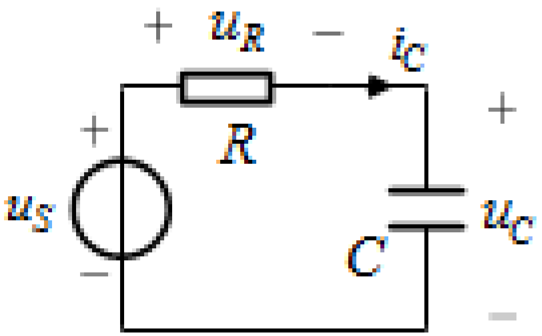


8.3.3 RC电路的方波响应

图（a）所示方波电压源，作用于图（b）所示零状态RC电路，电路处于直流激励响应和零输入响应的交替过程中。下面分析 u_C 和 i_C 的变化规律。



(a)



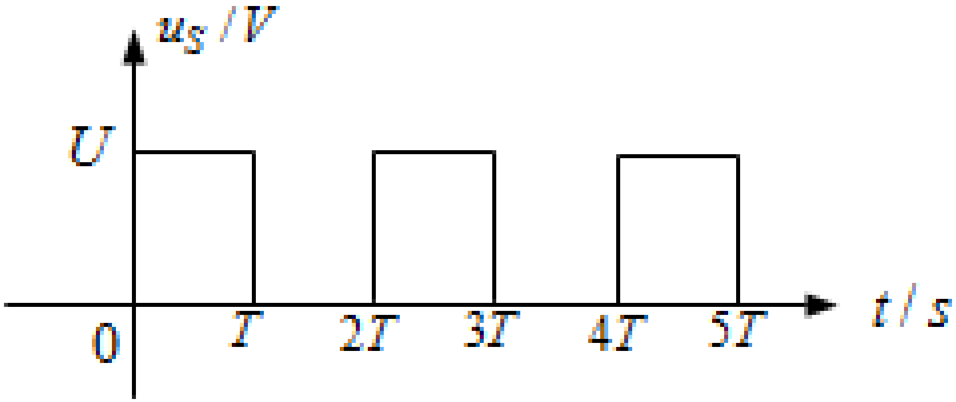
(b)

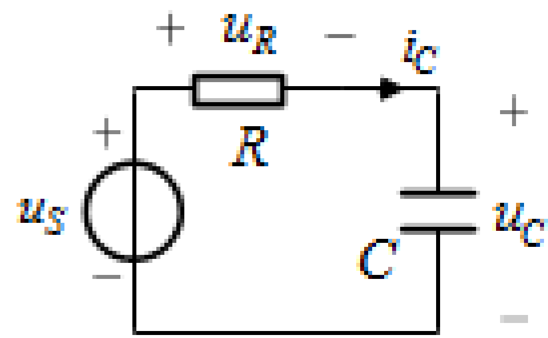
分两种情况： $T > 5\tau$

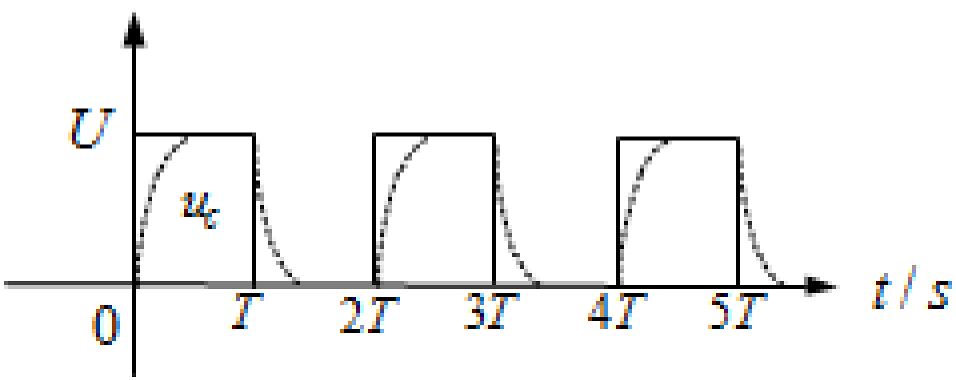
$T < 5\tau$

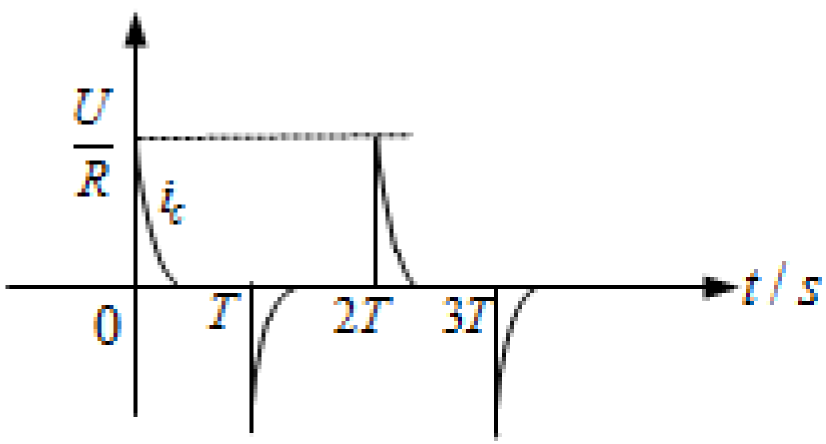
8.3.3 RC电路的方波响应

第一种情况 $T > 5\tau$



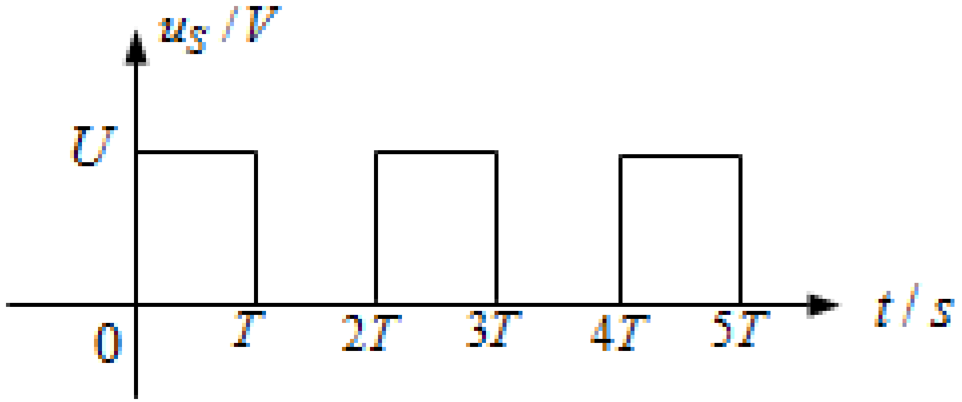


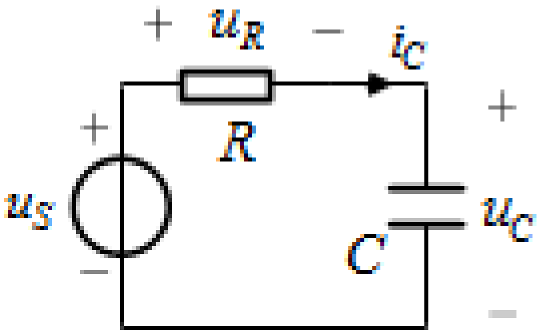




8.3.3 RC电路的方波响应

第一种情况 $T > 5\tau$



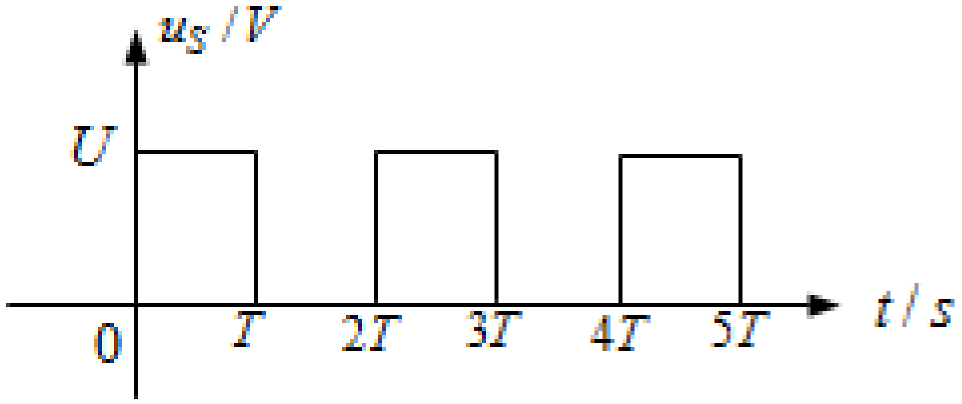


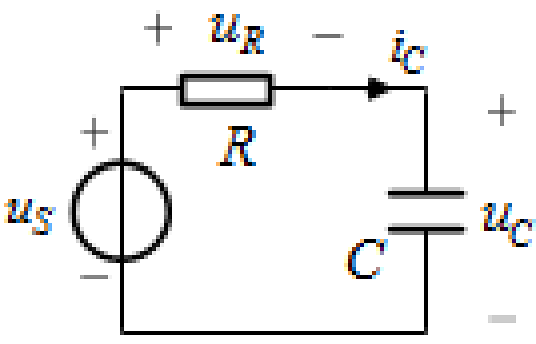
解：（1）当$T > 5\tau$ 时，暂态过程在周期T 内结束。

$0 \le t \le T$，为零状态响应：$u_C(t) = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$；$u_R(t) = Ue^{-\frac{t}{\tau}}$

$T \le t \le 2T$，为零输入响应：$u_C(t) = Ue^{-\frac{t-T}{\tau}}$；$u_R(t) = -Ue^{-\frac{t-T}{\tau}}$

第一种情况 $T > 5\tau$





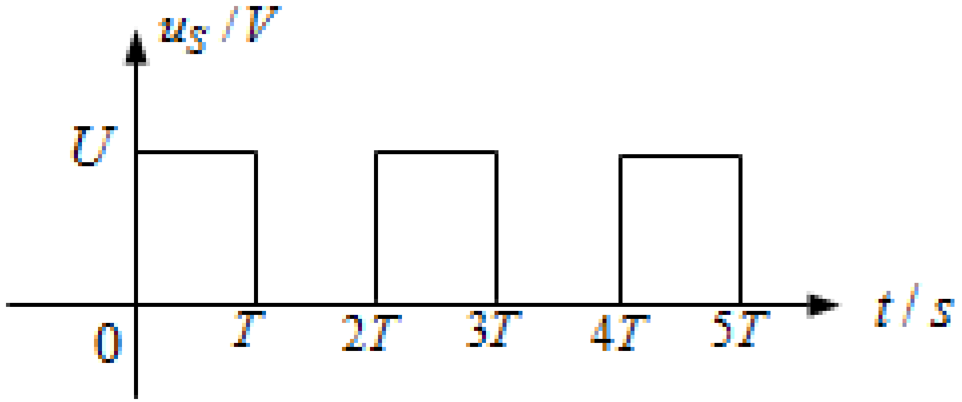
(2) 当$T = 5\tau$ 时，暂态过程在周期T 内刚好结束。

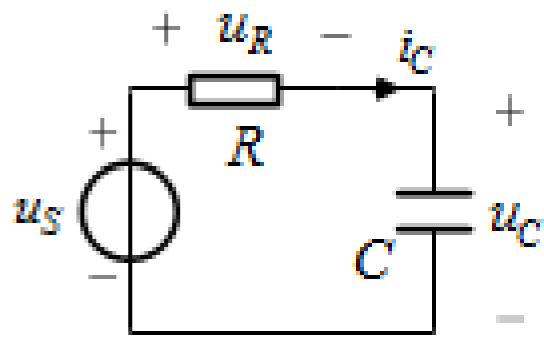
$0 \le t \le T$，为零状态响应：$u_C(t) = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$；$u_R(t) = Ue^{-\frac{t}{\tau}}$

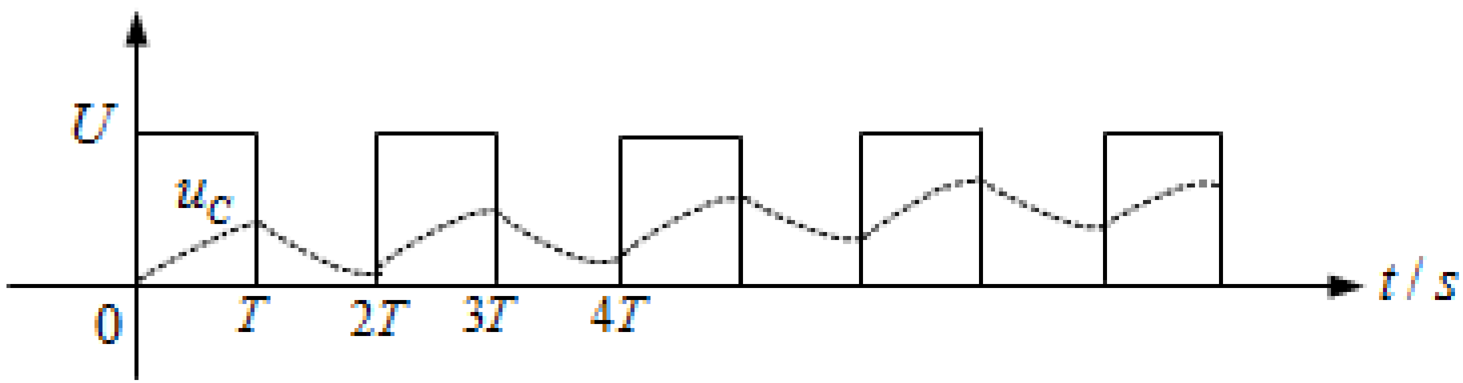
$T \le t \le 2T$，为零输入响应：$u_C(t) = Ue^{-\frac{t-T}{\tau}}$；$u_R(t) = -Ue^{-\frac{t-T}{\tau}}$

8.3.3 RC电路的方波响应

第二种情况 $T < 5\tau$





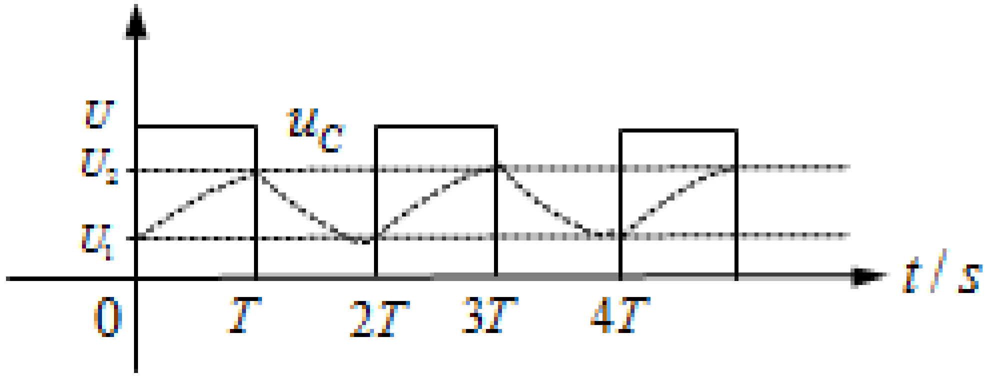


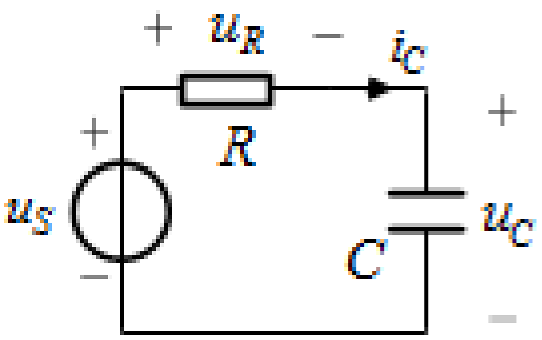
当 T<5τ 时，暂态过程在周期T内不能结束。

经过一段时间内，暂态响应的波形趋于稳定。

8.3.3 RC电路的方波响应

第二种情况 $T < 5\tau$



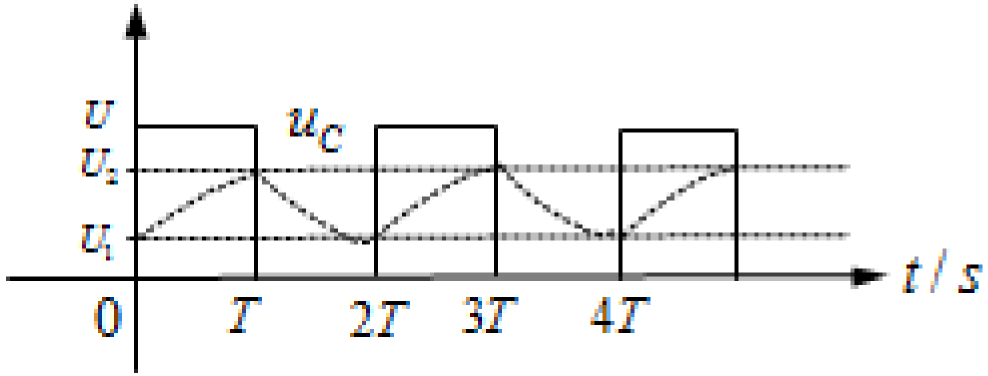


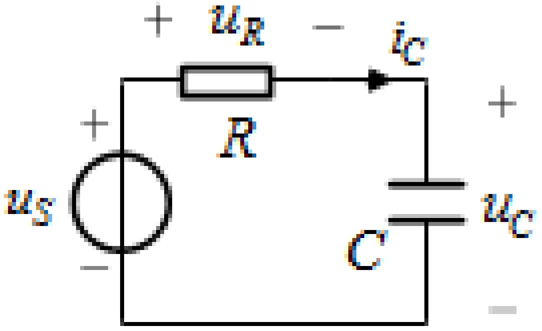
经若干周期后，电容的充放电电压值逐渐趋于相等，暂态响应的波形趋于稳定。

$0 \le t \le T$，为全响应：$u_C(t) = U + (U_1 - U)e^{-\frac{t}{\tau}}$

$T \le t \le 2T$，为零输入响应：$u_C(t) = U_2 e^{-\frac{t-T}{\tau}}$

第二种情况 $T < 5\tau$





$$U_2 = \frac{1 - e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 - e^{-\frac{2T}{\tau}}} U = \frac{U}{1 + e^{-\frac{T}{\tau}}} \qquad U_1 = U_2 e^{-\frac{T}{\tau}} = \frac{U e^{-\frac{T}{\tau}}}{1 + e^{-\frac{T}{\tau}}}$$

小结

利用求三要素的方法求解过渡过程，称为三要素法。只要是一阶电路，就可以用三要素法。

◆ 一阶电路全响应微分方程解的通用表达式：

$$\boxed{y(t) = y(\infty) + [y(0_+) - y(\infty)]\, e^{-t/\tau}}$$

◆ 一阶电路零输入响应微分方程解的通用表达式：

$$\boxed{y(t) = y(0_+)\, e^{-t/\tau}}$$

◆ 一阶电路零状态响应微分方程解的通用表达式：

$$\boxed{y(t) = y(\infty)(1 - e^{-t/\tau})}$$

谢 谢！