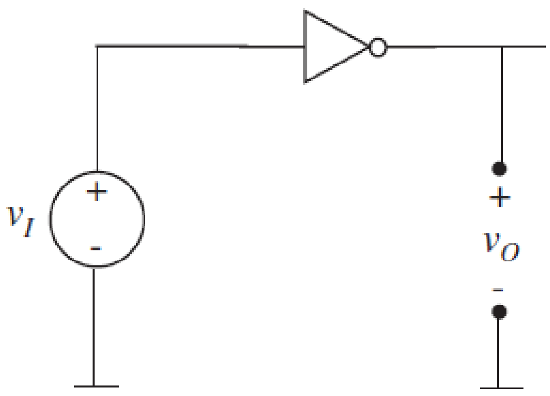
电子科技大学
University of Electronic Science and Technology of China

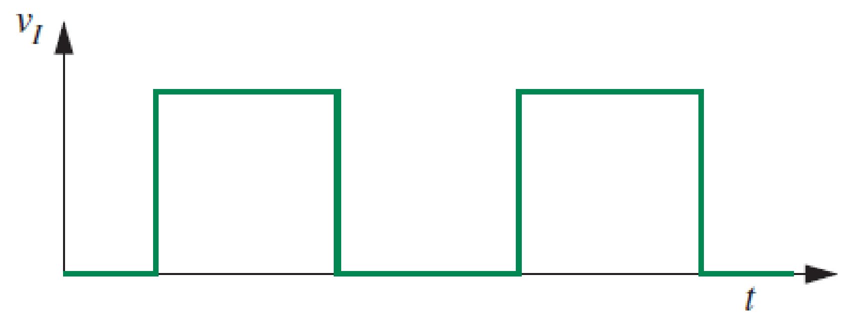
电路电子学基础

SMART
SMART Hybrid Radio Lab.
Since 2003

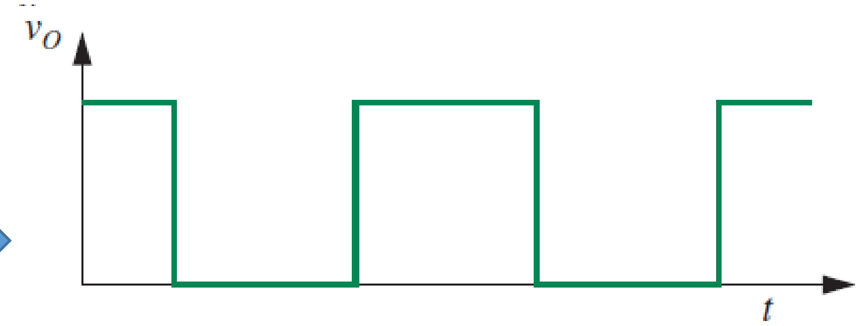
何 松 柏　教授
SMART数字射频混合集成电路实验室

问题引入：

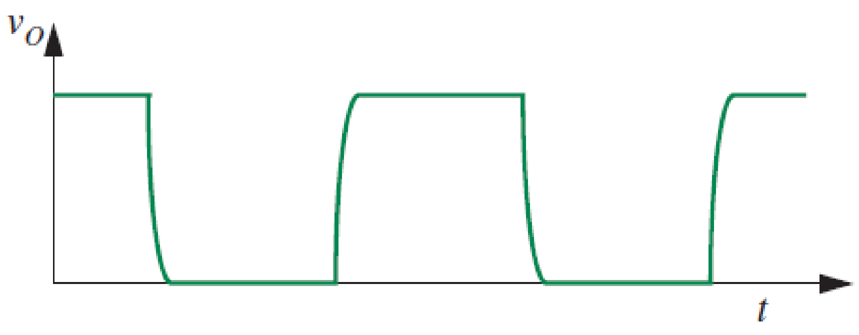




按照前面静态电路（电阻电路）



实际上可能



阅读材料：参考书，PP301-304

讨论一阶暂态过程

RC、RL电路

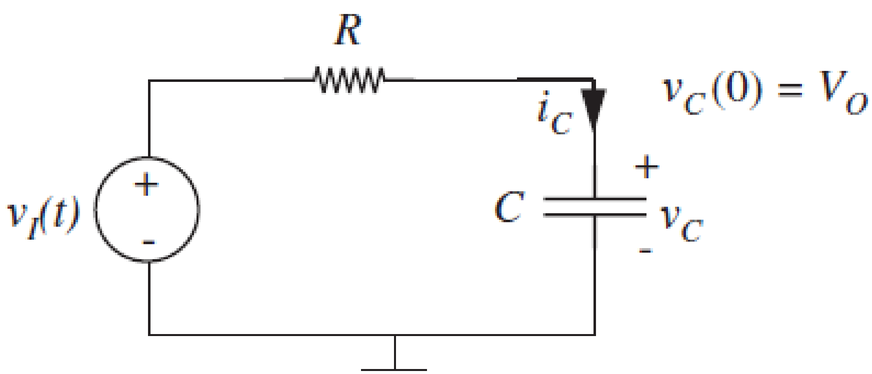
时间常数与响应关系？

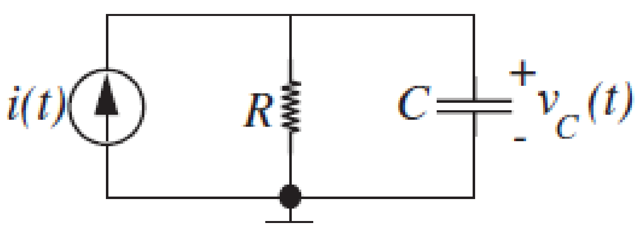
RC、RL电路

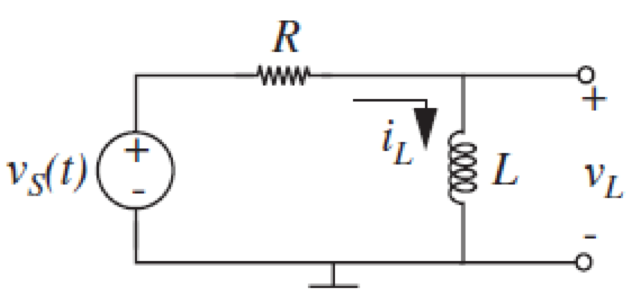
阅读材料：参考书PP336-350

主要关注阶跃信号、方波信号的响应（？）

RC、RL典型电路

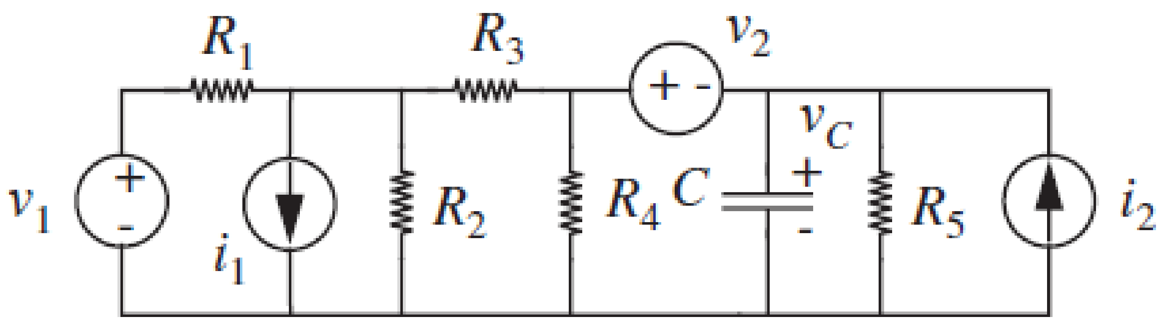


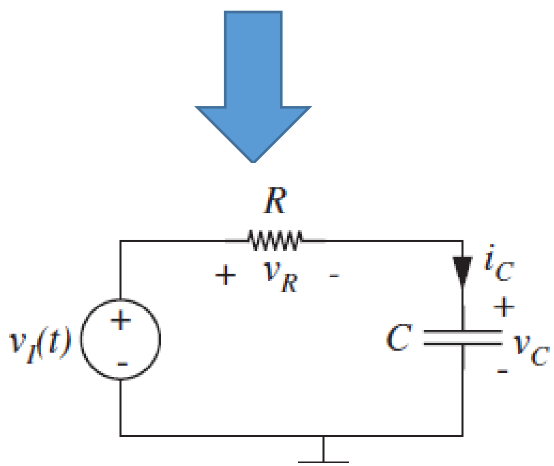




复杂RC电路

讨论：

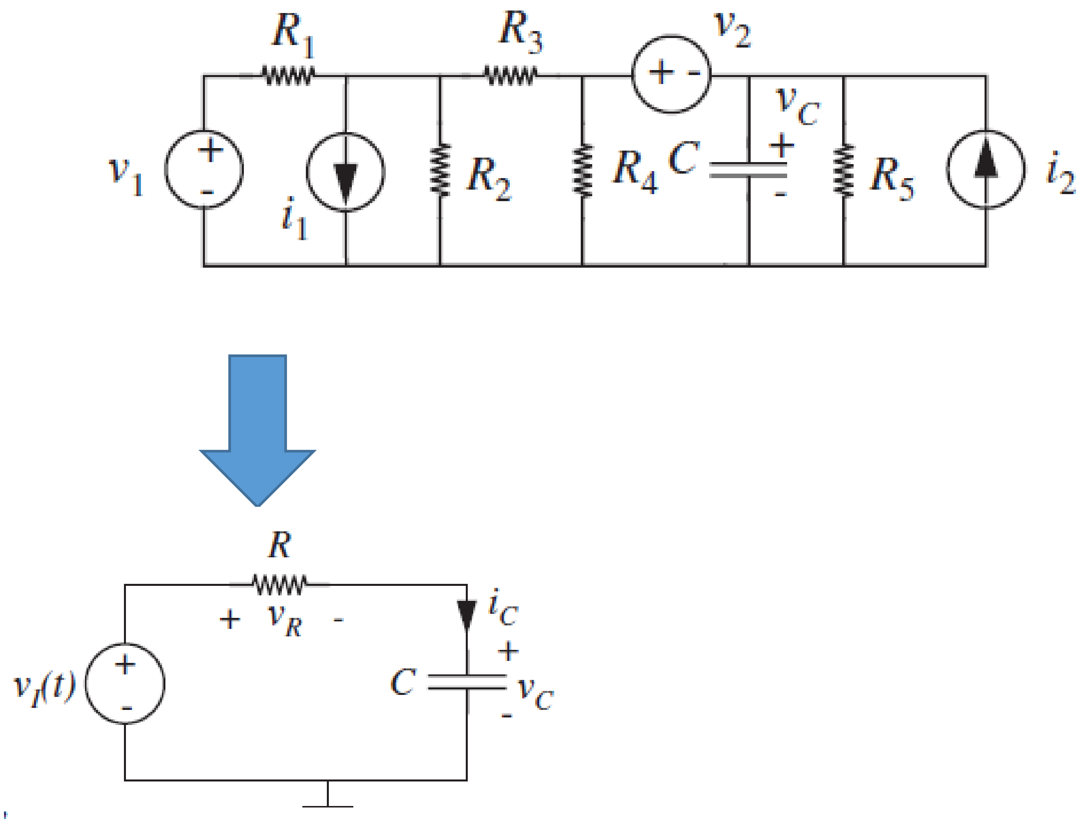




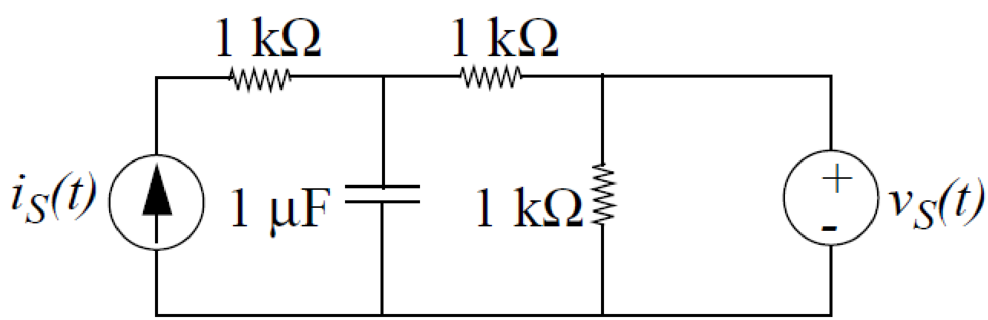
- 为什么这样处理？
- 怎样处理？

复杂RC电路化简

分析过程：



例：求下图电路的时间常数。



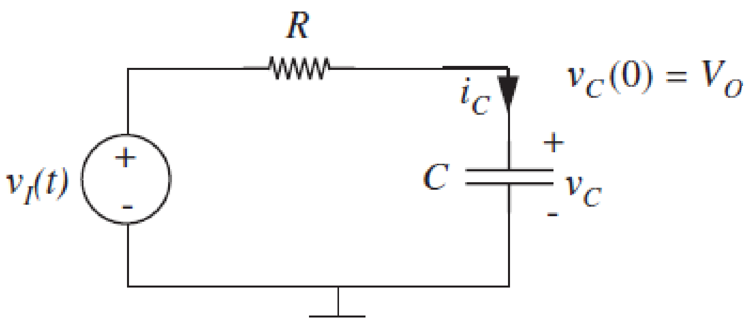
分析

$$R_{TH} = 1000$$

$$\tau = 1000 \cdot C$$

$$\tau = 1ms$$

典型RC电路分析



阶跃输入

列出方程

$$\frac{v_C - v_I}{R} + C\frac{dv_C}{dt} = 0.$$

$$\frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{RC} = \frac{v_I}{RC}.$$

微分方程求解：齐次解和特解

$$v_C(t) = v_{CH}(t) + v_{CP}(t)$$

高等数学相关内容

典型RC电路分析

齐次方程

$$\frac{dv_{CH}}{dt} + \frac{v_{CH}}{RC} = 0.$$

齐次解

$$v_{CH} = Ae^{st}$$

$$v_{CH} = Ae^{-t/RC}$$

特征方程

$$s + \frac{1}{RC} = 0$$

$$s = -\frac{1}{RC}.$$

时间常数

特征方程的根

自然频率

典型RC电路分析

特解方程

$$\frac{dv_{CP}}{dt} + \frac{v_{CP}}{RC} = \frac{V}{RC}.$$

对于输入阶跃函数，特解

$$v_{CP} = V.$$

说明什么问题？

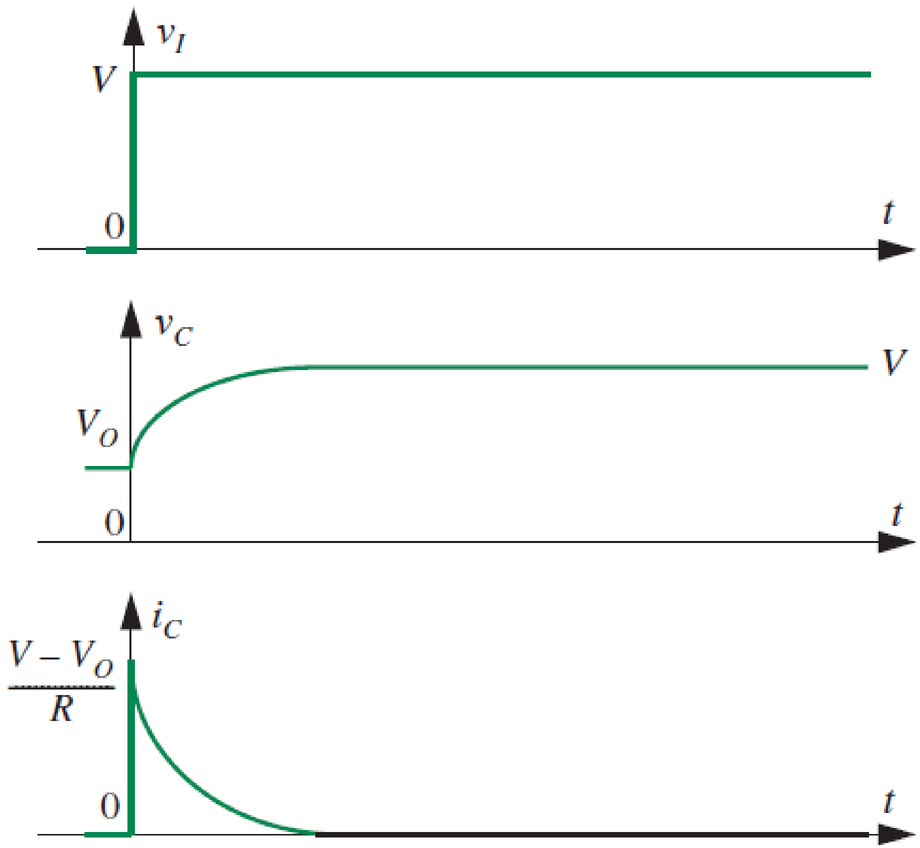
全解

$$v_C = V + (V_O - V)e^{-t/RC}$$

电容初值为？

电阻R上的电压是？ $v_R = (V - V_0)e^{-\frac{t}{RC}} \quad t \geq 0$

典型RC电路分析



(b) Waveforms

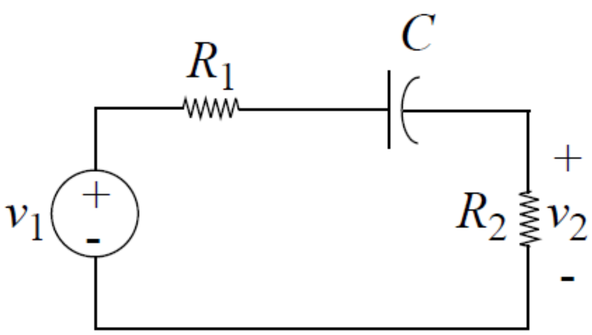
（1）电容电压是否连续？
（2）不同时间常数输出波形？
（3）解释电容电流变化？
（4）左图中阶跃输入电压与电容初始值电压比较？（充电、放电）

讨论：输出波形与时间常数关系？

主观题 10分

设置

例：电路如图，$R_1 = 1k\Omega,\ R_2 = 2k\Omega$, and $C = 3\mu F$.
初始状态为0，电压为6v的阶跃信号（t=0),给出t>0,v2(t)的示意图并标注关键点。



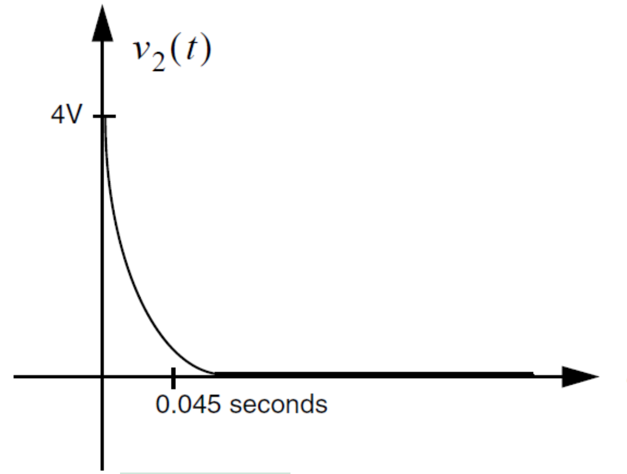
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

分析

$$v_2(t) = 4\, e^{-t/\tau}$$

$$\tau = 9ms$$



$t > 5\tau$

暂态过程近似结束

典型RC电路分析

自学讨论(P343, P360-362):

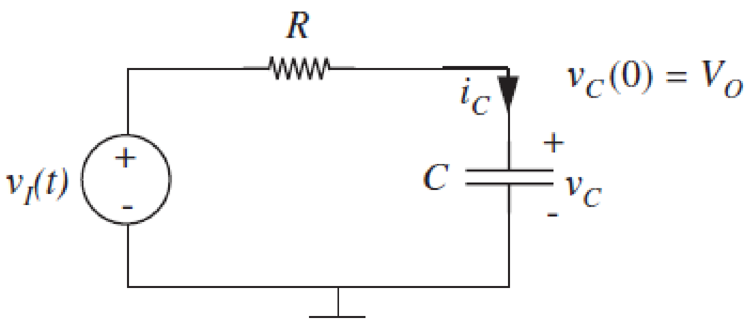
零输入响应（ZIR)

初始条件不为0，输入为0情况下的响应。

零状态响应（ZSR）

初始状态为0，即电容电压和电感电流初始值为0时电路响应。

典型RC电路分析



$$v_C = V + (V_O - V)e^{-t/RC}$$

零输入响应 $v_C = V_O e^{-t/RC}$

零状态响应 $v_C = V - Ve^{-t/RC}.$

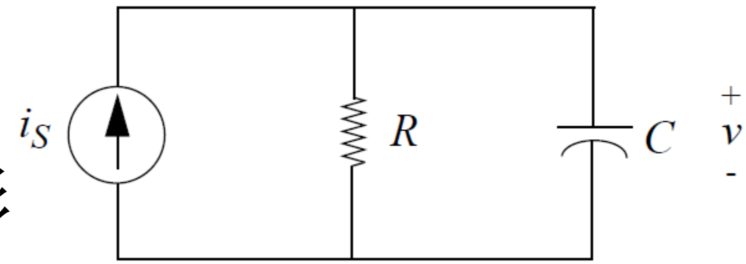
稳态解

t — —∞

例：电路如图所示，电流源幅值为I_0安，持续时间为t_0秒的单个矩形脉冲。

（1）零状态响应

（2）下列情形下零状态响应波形



$a\ t_0 \gg RC$

$b\ t_0 = RC$

$c\ t_0 \ll RC$

(3) 上问c（窄脉冲），说明$t>t_0$时的响应仅仅取决于脉冲的面积。

分析

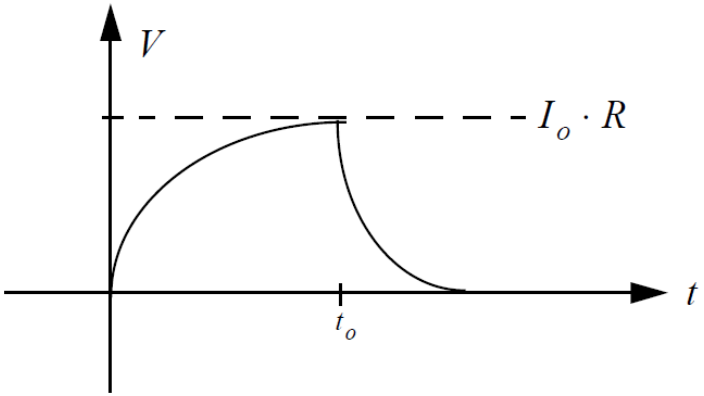
$$0 < t < t_0 : v = I_0 \cdot R \left(1 - e^{-t/\tau}\right) ; \tau = RC$$

零状态

$$t > t_0 : v = I_0 \cdot R \left(1 - e^{-t_0/RC}\right) e^{-(t-t_0)/RC}$$

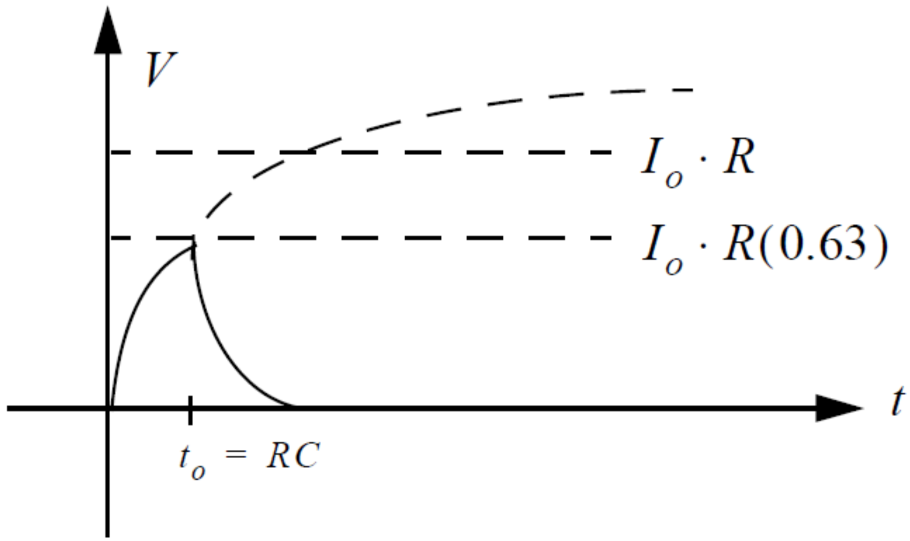
零输入，初始值是？

（a)

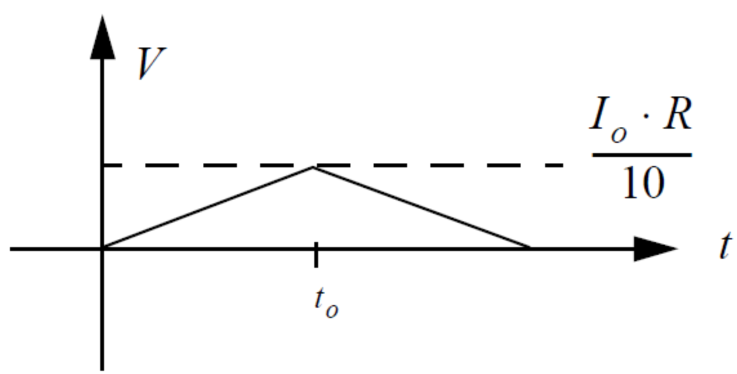


分析

(b)



©



分析

$$i = v/R + C\ \tfrac{dv}{dt}$$

$$I_0 \cdot R = v + RC\ \tfrac{dv}{dt}$$

$$\tfrac{I_0}{C} = \tfrac{v}{RC} + \tfrac{dv}{dt}$$

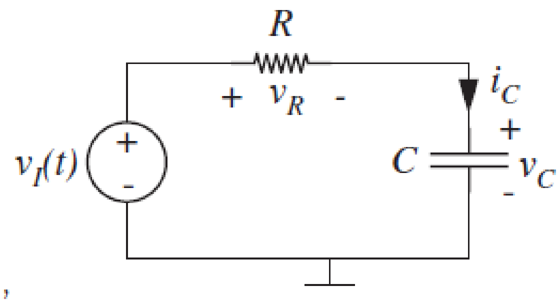
As RC becomes larger ($\gg t_0$), our equation can be approximated as

$$\frac{dv}{dt} = \frac{I_0}{C} \quad \Rightarrow \quad v = \int_0^{t_0} I_0/C$$

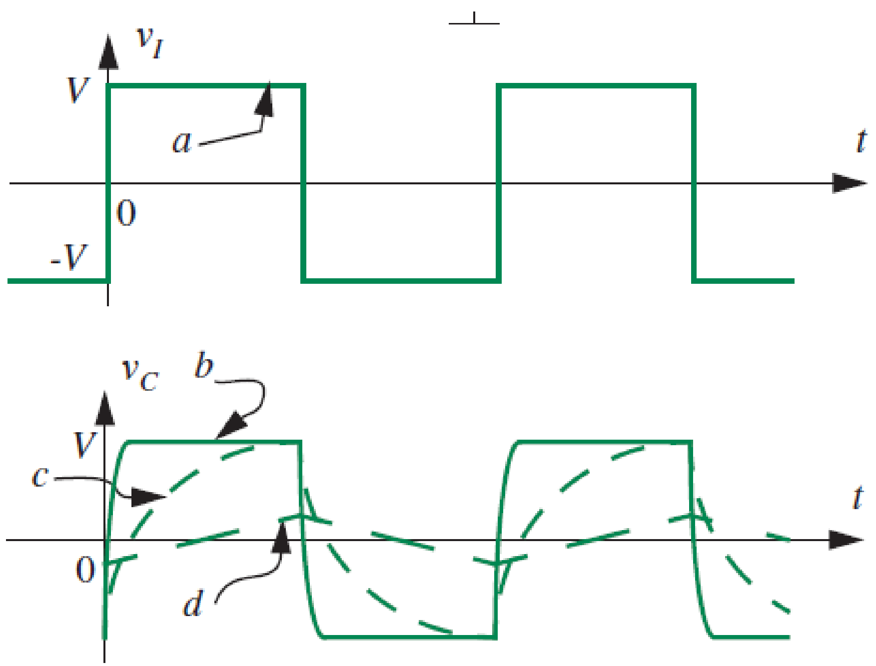
典型RC电路分析

方波输入

重点：方波脉宽与时间常数对输出波形影响？



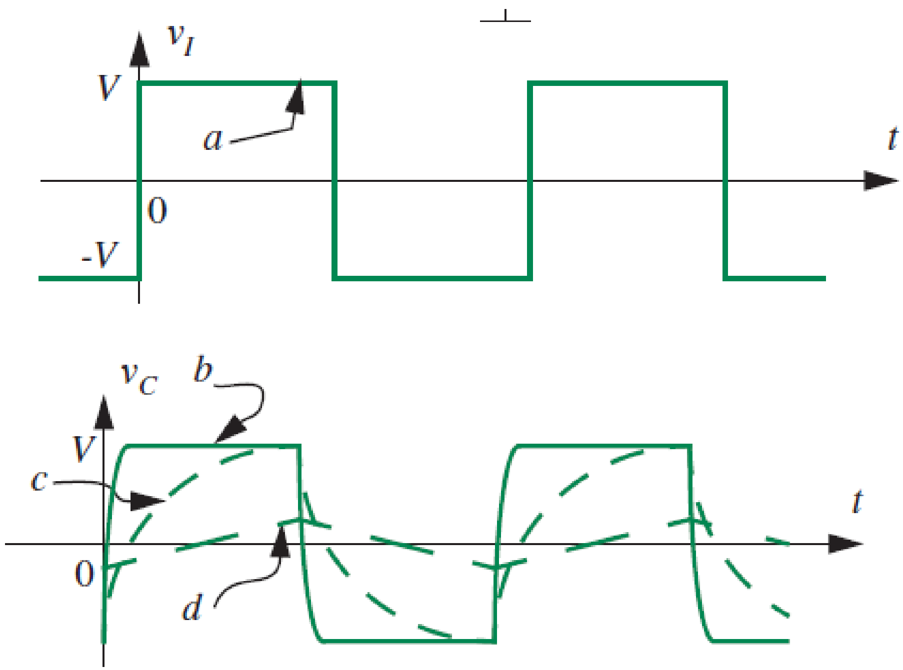
$$v_I = RC\frac{dv_C}{dt} + v_C.$$

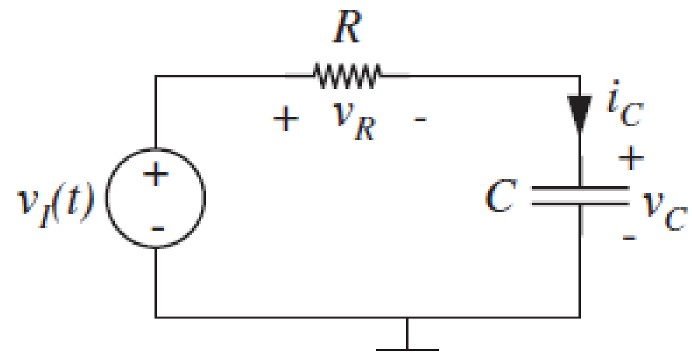


b\c\d波形分别是那种情况？

哪种情况下可实现积分器？

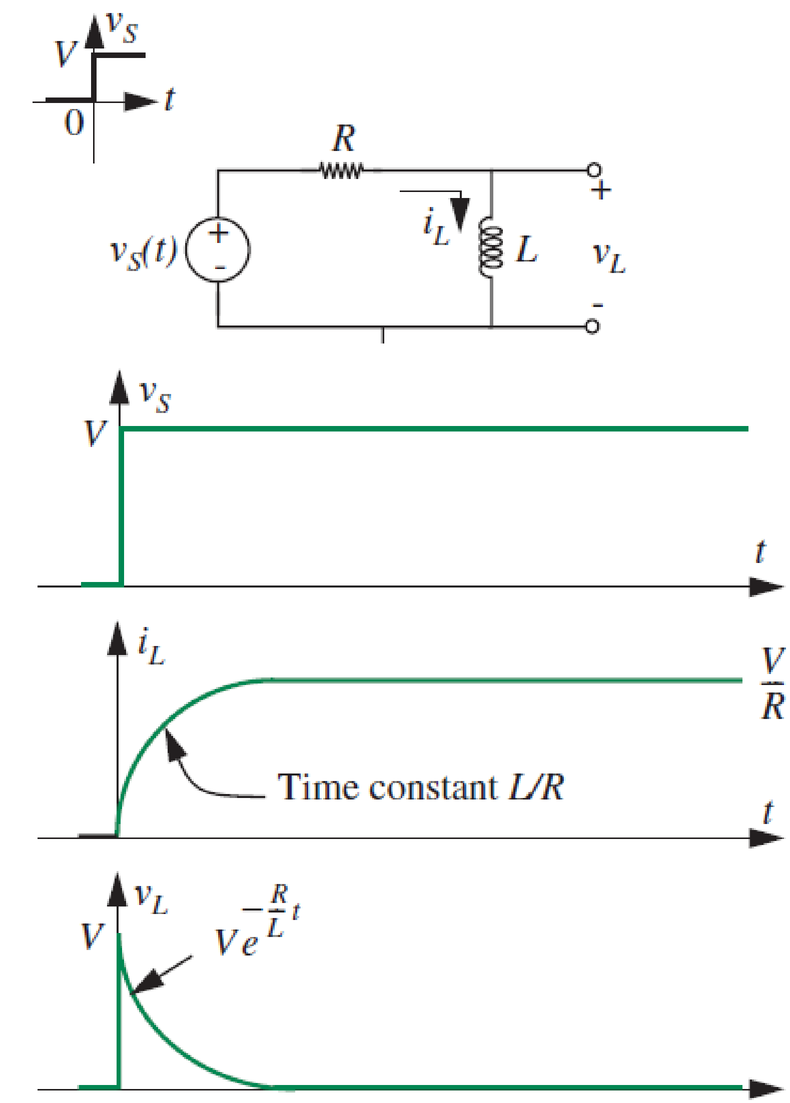
讨论电容电压波形产生的原因?





作答

典型RL电路分析



讨论（1）时间常数？ $L/R.$

（2）电感电流连续吗？

（3）方波输入输出关系？

$$-v_S + i_L R + L\frac{di_L}{dt} = 0.$$

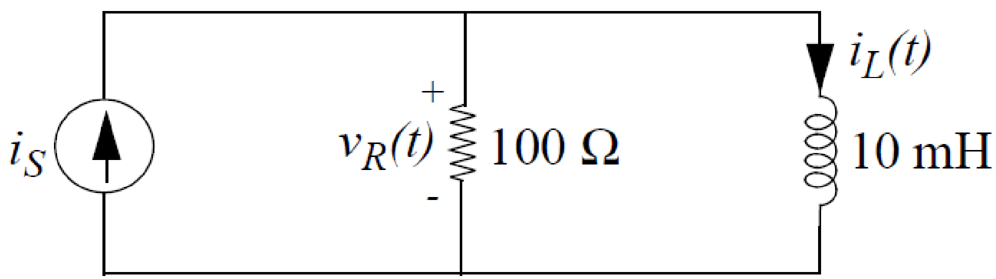
$$i_L = \frac{V}{R}\left(1 - e^{-(R/L)t}\right)$$

$$v_L = L\frac{di_L}{dt} = Ve^{-(R/L)t}.$$

主观题 10分

设置

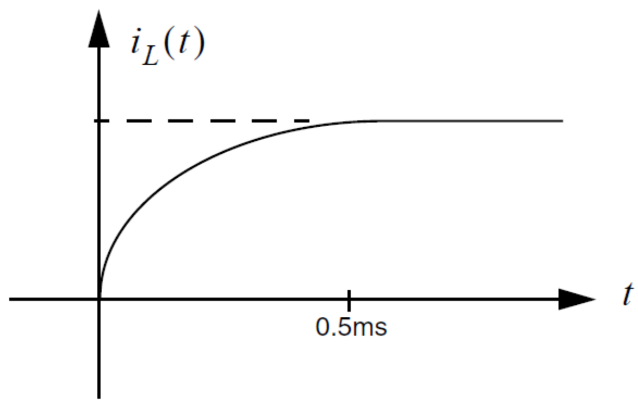
例：电路如图。电流是从t=0开始的大小为10mA的阶跃信号。求零状态响应。



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

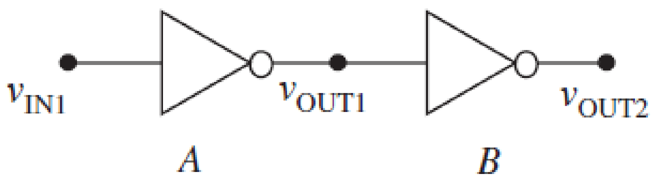
分析

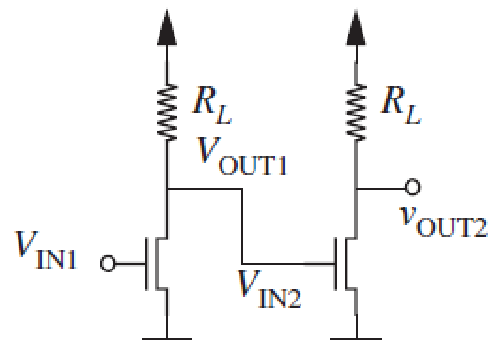


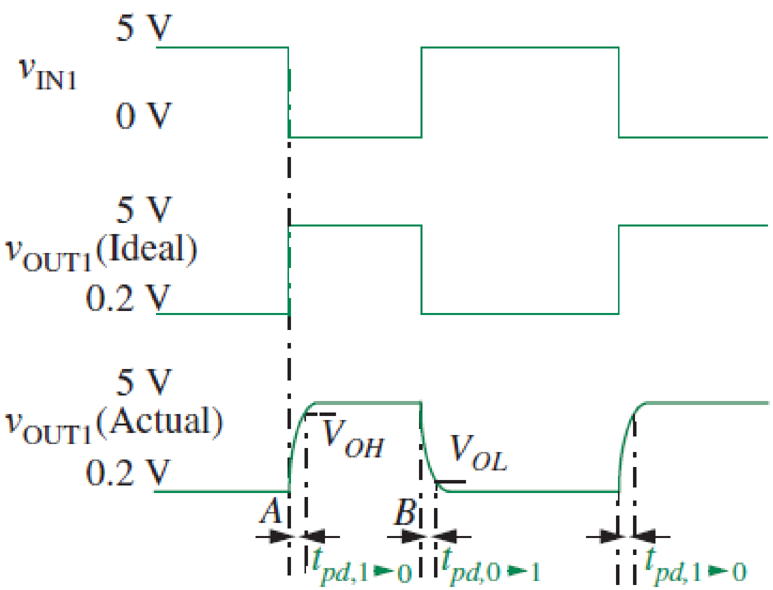
$$i_L(t) = 10\left(1 - e^{-t/\tau}\right)[mA]$$

$$\tau = L/R = 0.1ms$$

动态电路对信号传播影响







讨论：为什么电路对高速传播信号延迟明显？

阅读参考：参考书PP350---358

状态和状态变量

阅读材料：参考资料PP359--363

便于计算机辅助计算求解

迭代法（将微分方程转换为代数方程）

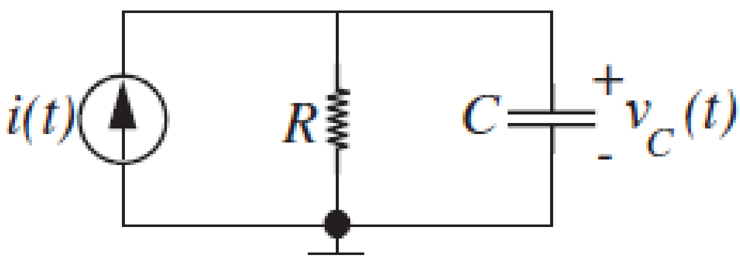
状态和状态变量

$$\frac{d}{dt}(\text{state variable}) = f(\text{state variable, input variable}).$$

电容的状态变量：电荷，电压

电感的状态变量：总磁链，电流

状态和状态变量



$$\frac{dv_C}{dt} + \frac{v_C}{RC} = \frac{i(t)}{C}$$

$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C}{RC} + \frac{i(t)}{C}$$ 状态方程

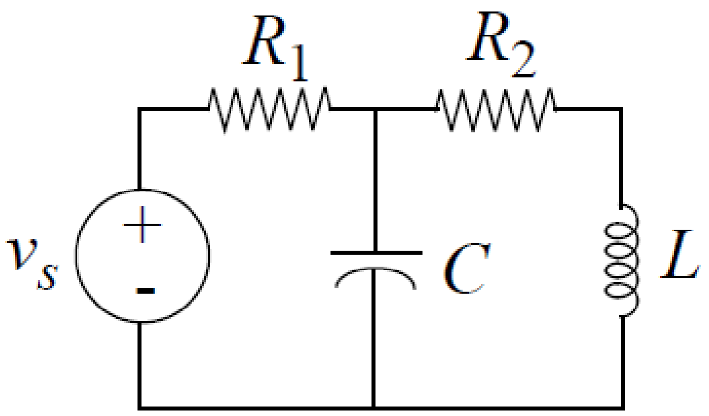
$$v_C(t_0 + \Delta t) = v_C(t_0) - \frac{v_C(t_0)}{RC}\Delta t + \frac{i(t_0)}{C}\Delta t.$$

数值求解（欧拉法、龙格-库塔法等）

主观题 10分

设置

例：如图所示电路，列写状态方程。



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

分析

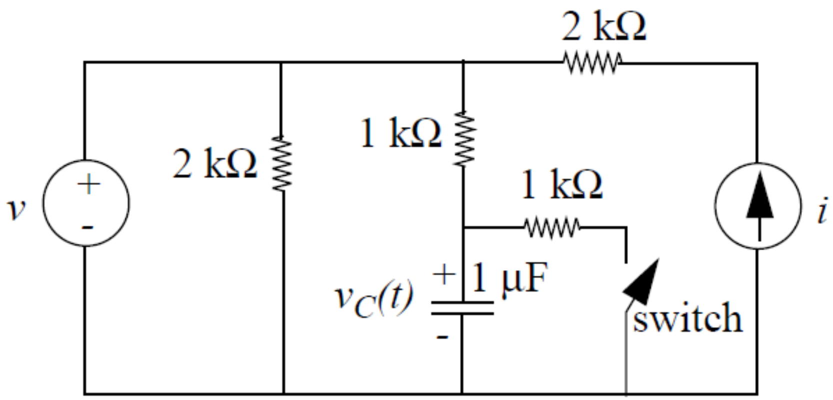
KCL $$\frac{V_S - v_C}{R_1} + \frac{v_L - v_C}{R_2} - C\,\frac{dv_C}{dt} = 0$$

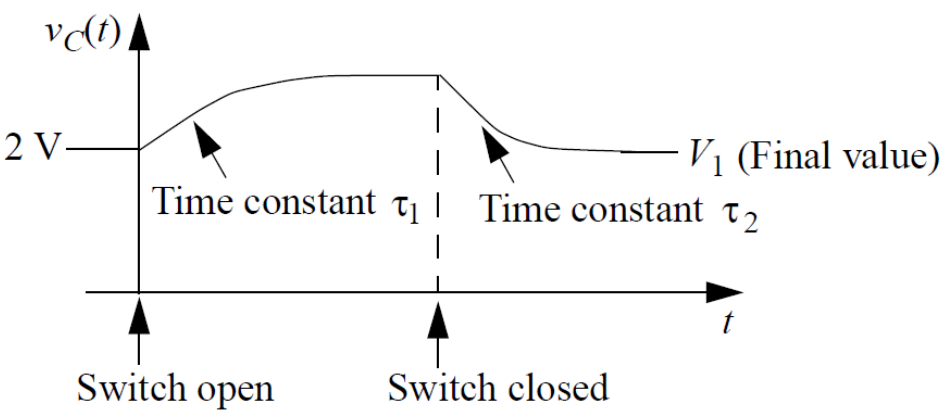
KVL $$v_C - i_L\,R_2 - v_L = 0$$

主观题 10分

设置

求出时间常数，和终值电压V1，t=0之前开关一直闭合。





正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

分析

$\tau_1 = 1ms$

$\tau_2 = 1/2ms$

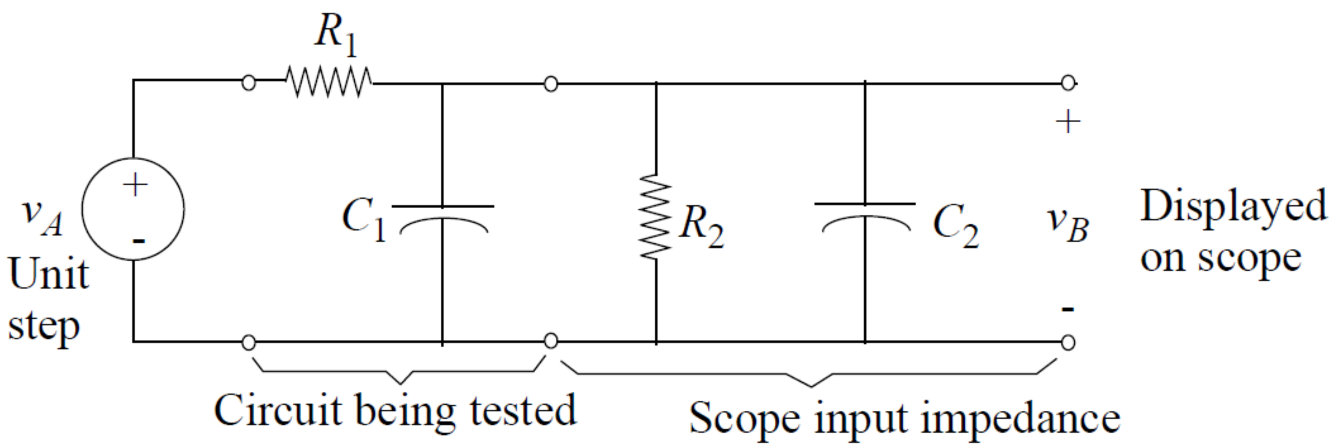
$V_1(final\ value) = 2Volts$

ANS:: $\tau_1 = 1ms$, $\tau_2 = 1/2ms$, $V_1(final\ value) = 2Volts$

主观题 10分

设置

例：探索示波器探头引入的测试误差，及如何补偿？(问题10.23，P397)



（1）如图所示，分析探头不理想造成的电路响应及引入的误差；
（2）如何补偿探头？

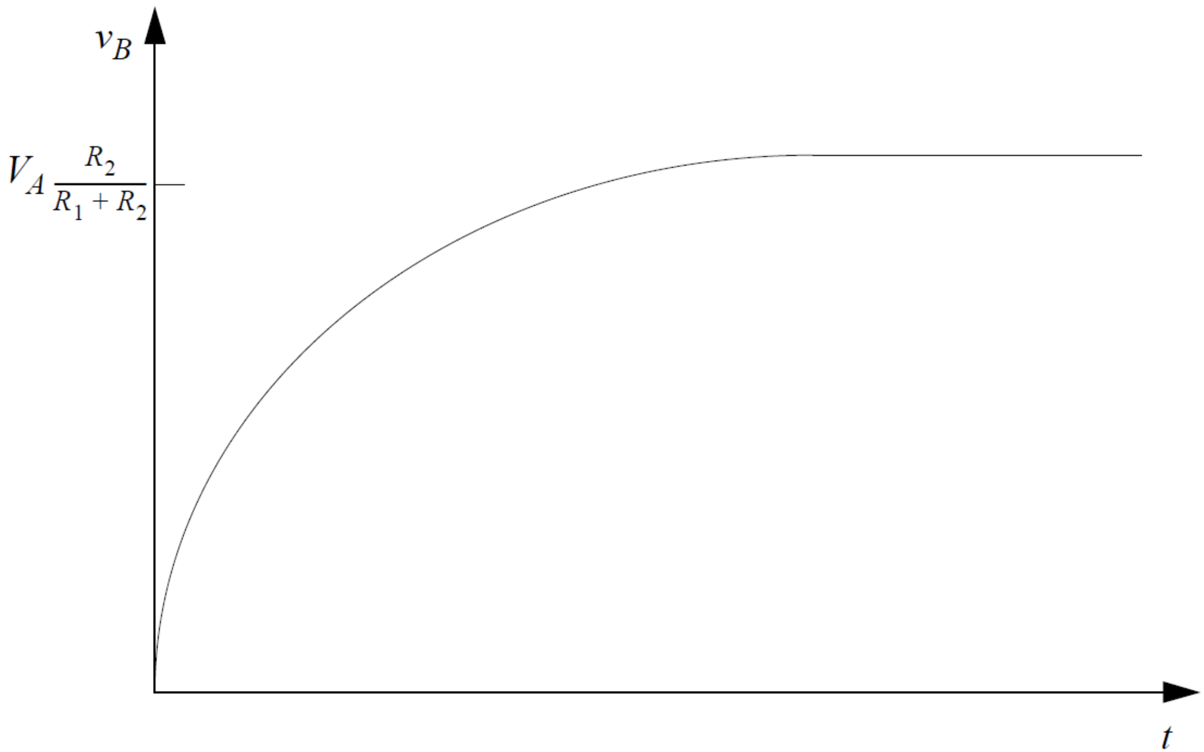
正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

分析

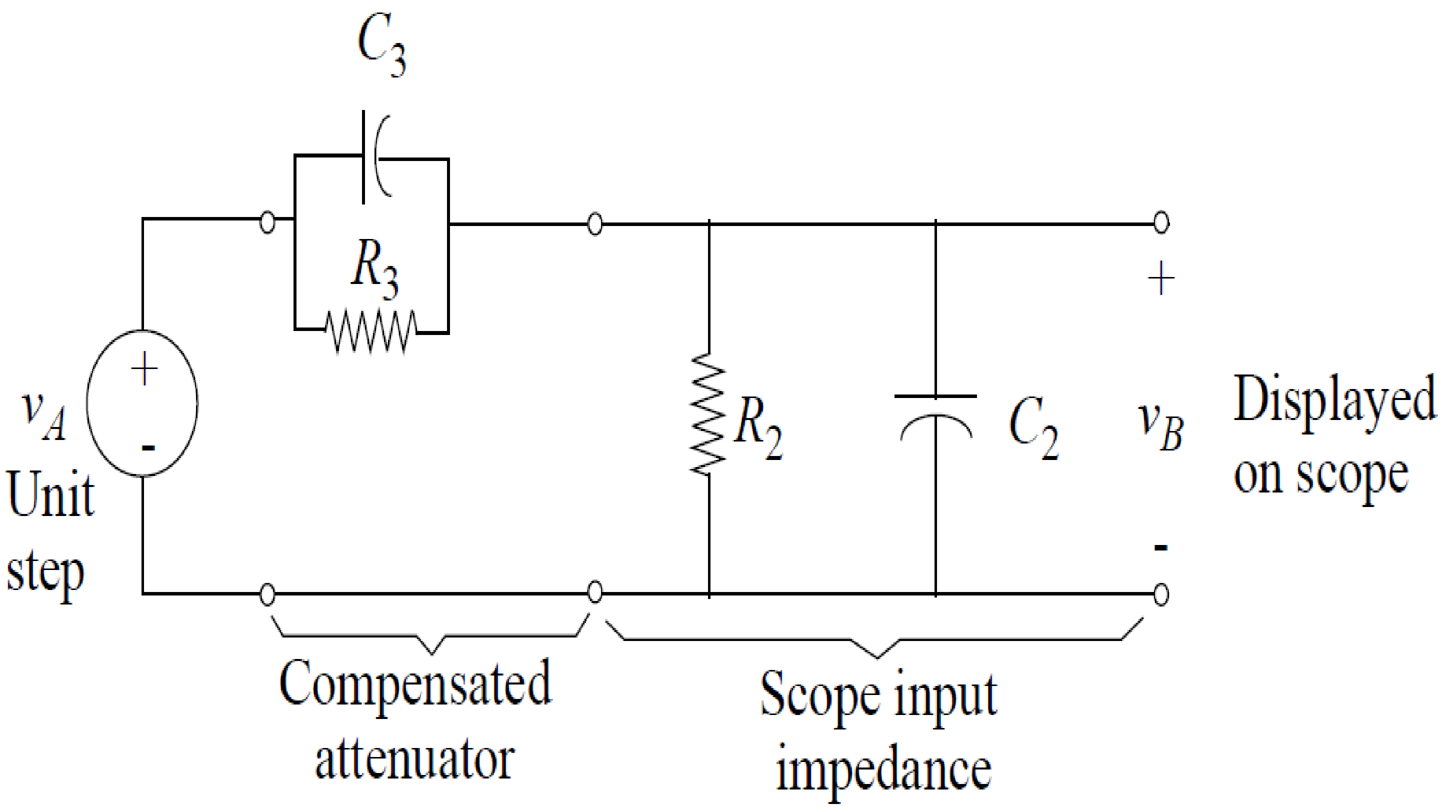
（1） $$\tau = (C_1 + C_2)(R_1 \parallel R_2)$$

$$v_B = v_A \frac{R_2}{R_1+R_2}(1 - e^{-t/\tau})$$



分析

（2）一种可能的补偿电路



$$C_2R_2 = C_3R_3$$

分析见P509-512

分析

$$\mathrm{v}_B = Ke^{-t[(\frac{R_2 * R_3}{R_2+R_3}(C_2+C_3)]^{-1}} + \frac{R_2}{R_2+R_3}V_A$$

如何求系数K?

关键在输出电压跃变瞬间，产生非常大的冲击电流，电容电压瞬间发生跳变，利用电荷守恒

$$\mathrm{Q} = C_3V_{C3} = C_2V_B$$

又

$$V_A = V_{C3} + V_B$$

阶跃瞬间后，初值为

$$V_{B0} = \frac{C_3}{C_3+C_2}$$

分析

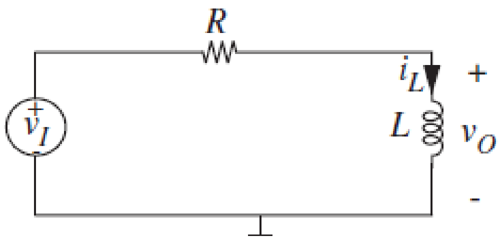
得到

$$K = \left(\frac{C_3}{C_3+C_2} - \frac{R_2}{R_3+R_2}\right)V_A$$

要使全解第1项为0

$$R_2 * C_2 = R_3 * C_3$$

正弦输入的RL电路响应（P374-376)

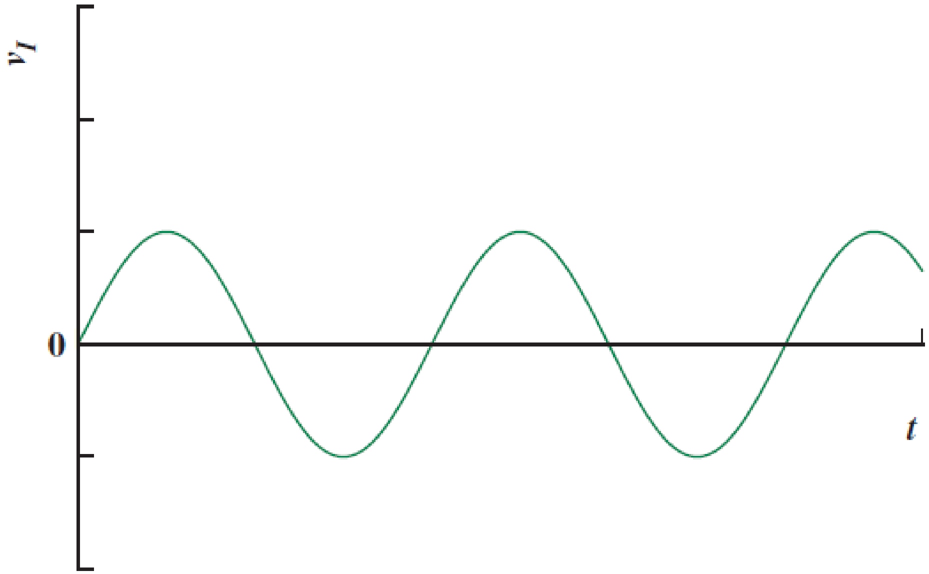


$$v_I = V\sin(\omega t) \qquad t > 0.$$

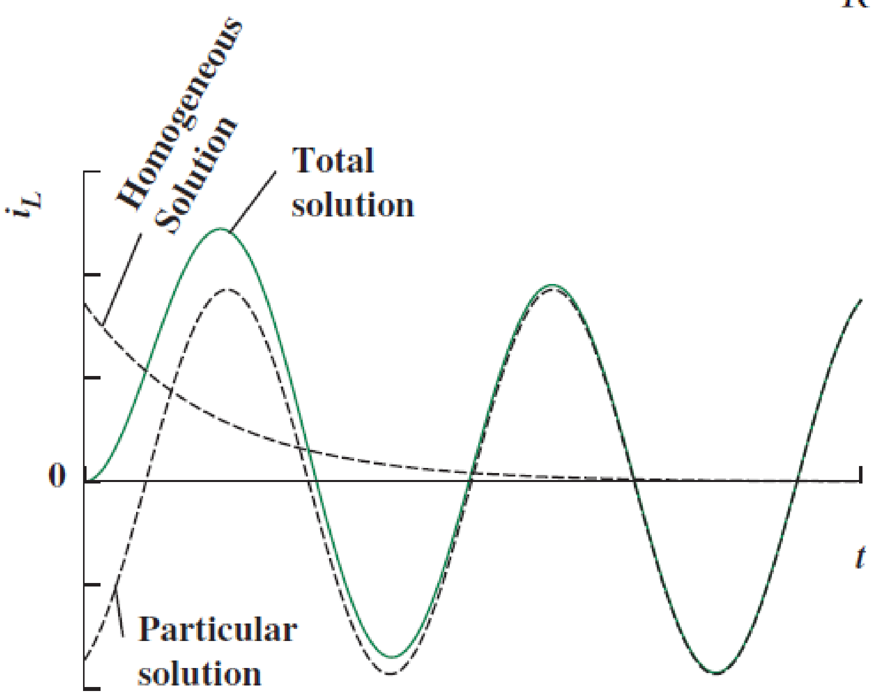
初始态为0

$$v_I = i_L R + L\frac{di_L}{dt}.$$

$$i_L = Ae^{-(R/L)t} + V\frac{R}{R^2+\omega^2L^2}\sin(\omega t) - V\frac{\omega L}{R^2+\omega^2L^2}\cos(\omega t), \quad t \geq 0.$$



$$i_L = Ae^{-(R/L)t} + V\frac{R}{R^2+\omega^2L^2}\sin(\omega t) - V\frac{\omega L}{R^2+\omega^2L^2}\cos(\omega t), \quad t \ge 0.$$



$$\omega \ll \frac{R}{L}, \qquad i_L \simeq \frac{V}{R}\sin(\omega t).$$

$$\omega \gg \frac{R}{L} \qquad i_L \simeq \frac{-V}{\omega L}\cos(\omega t).$$

探究正弦输入的RC电路响应？

本章关键词：

时间常数， 齐次解，特解，零状态，零输入

响应延时（对信号处理有什么影响）

微分方程 ---代数方程

电路基本分析方法

练习：10.4, 10.7, 10.8, 10.14, 10.17

问题：10.10（ 10.11, 10.12），10.24

建议小组讨论解决：10.1, 10.8， 10.23

欢迎大家讨论交流！