



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

电路电子学基础

SMART

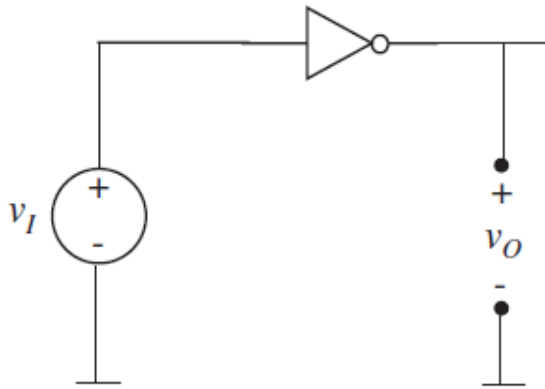
SMART Hybrid Radio Lab.
Since 2003

何松柏 教授

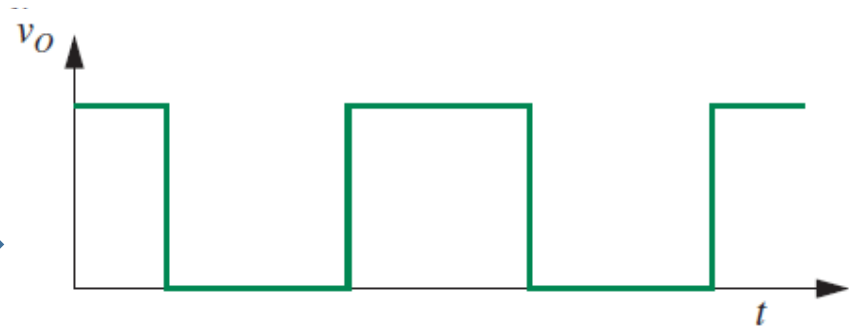
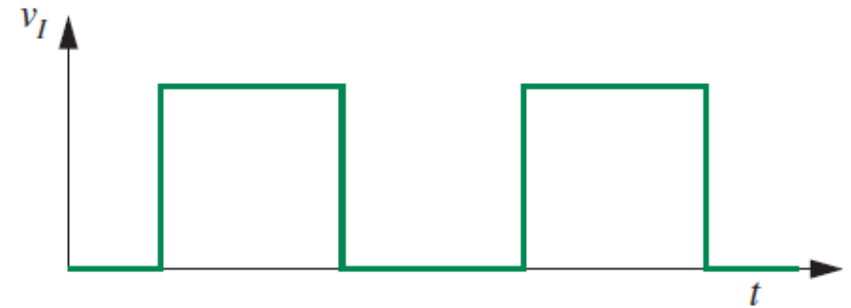
SMART数字射频混合集成电路实验室

4 动态电路及瞬态分析

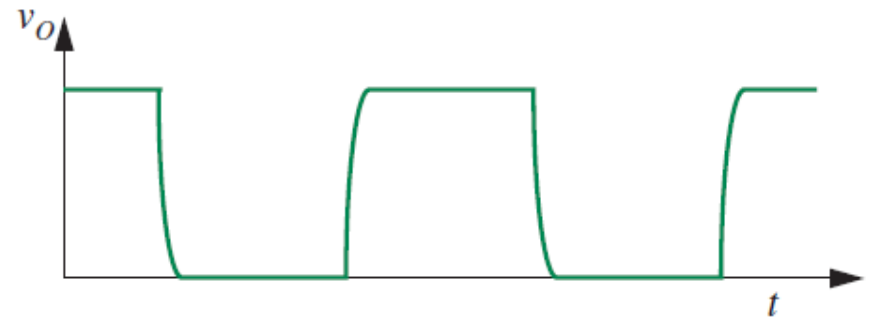
问题引入：



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

4 动态电路及瞬态分析

讨论一阶暂态过程



RC、RL电路



时间常数与响应关系？

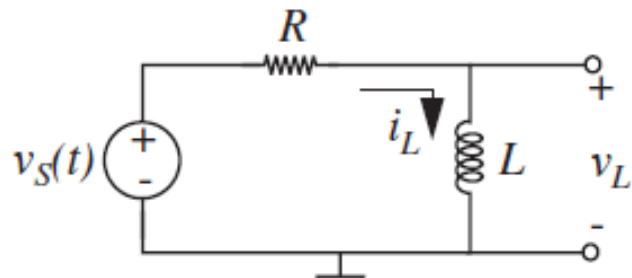
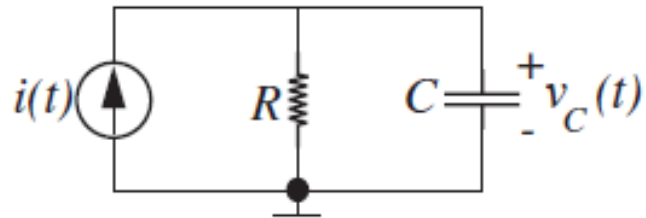
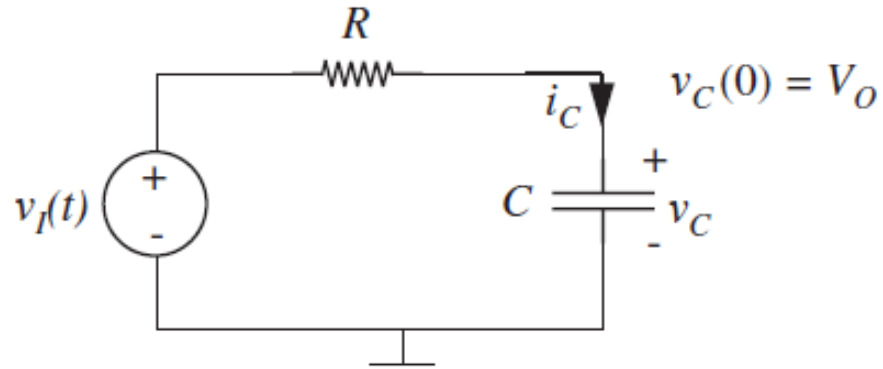
RC、RL电路

阅读材料：参考书**PP336-350**

主要关注阶跃信号、方波信号的响应（？）

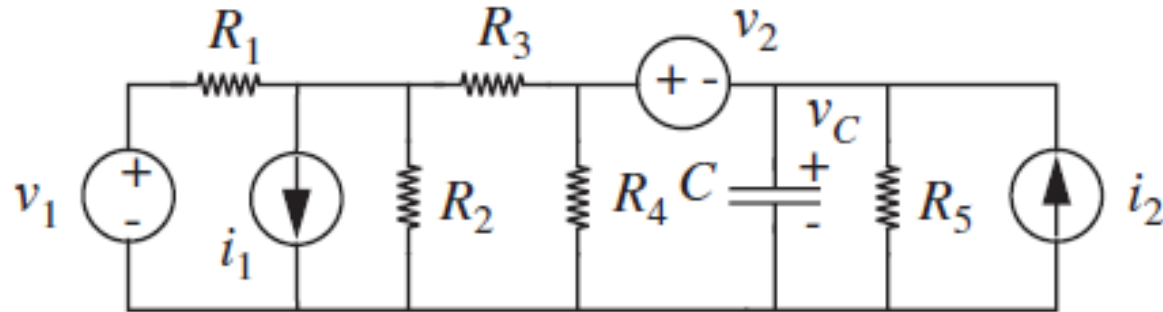
4 动态电路及瞬态分析

RC、RL典型电路



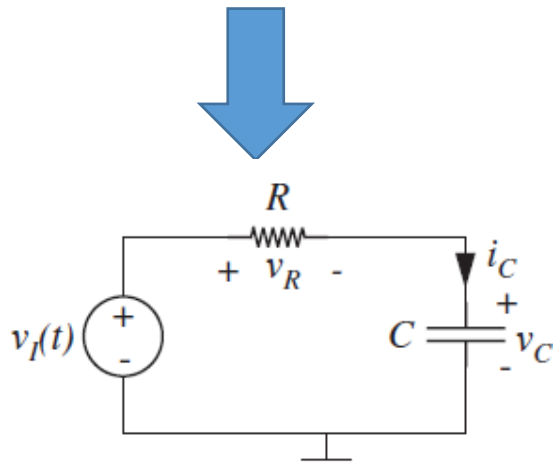
复杂RC电路

讨论：



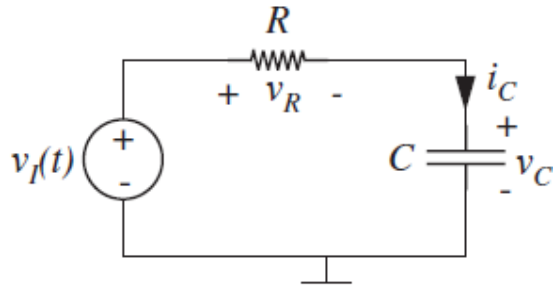
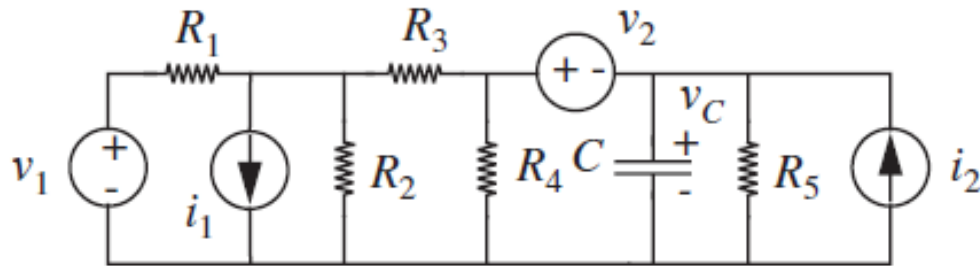
● 为什么这样处理？

● 怎样处理？

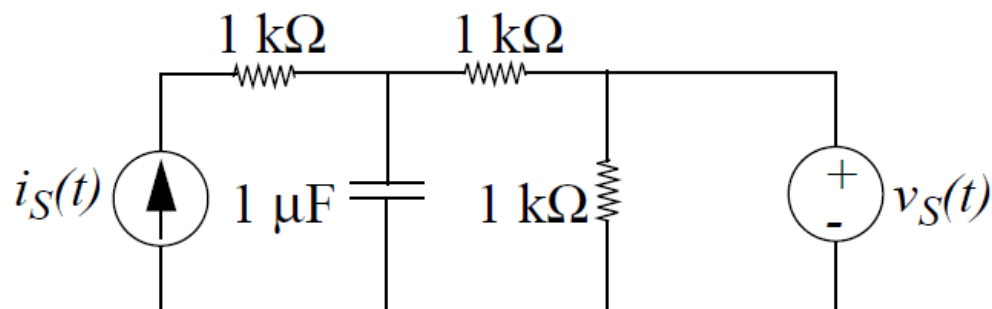


复杂RC电路化简

分析过程：



例：求下图电路的时间常数。



正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

分析

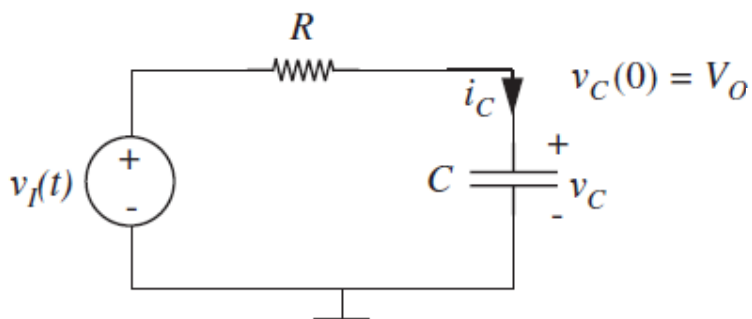
$$R_{TH} = 1000$$

$$\tau = 1000 \cdot C$$

$$\tau = 1ms$$

4 动态电路及瞬态分析

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

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



特征方程

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



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



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

特征方程的根

时间常数

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

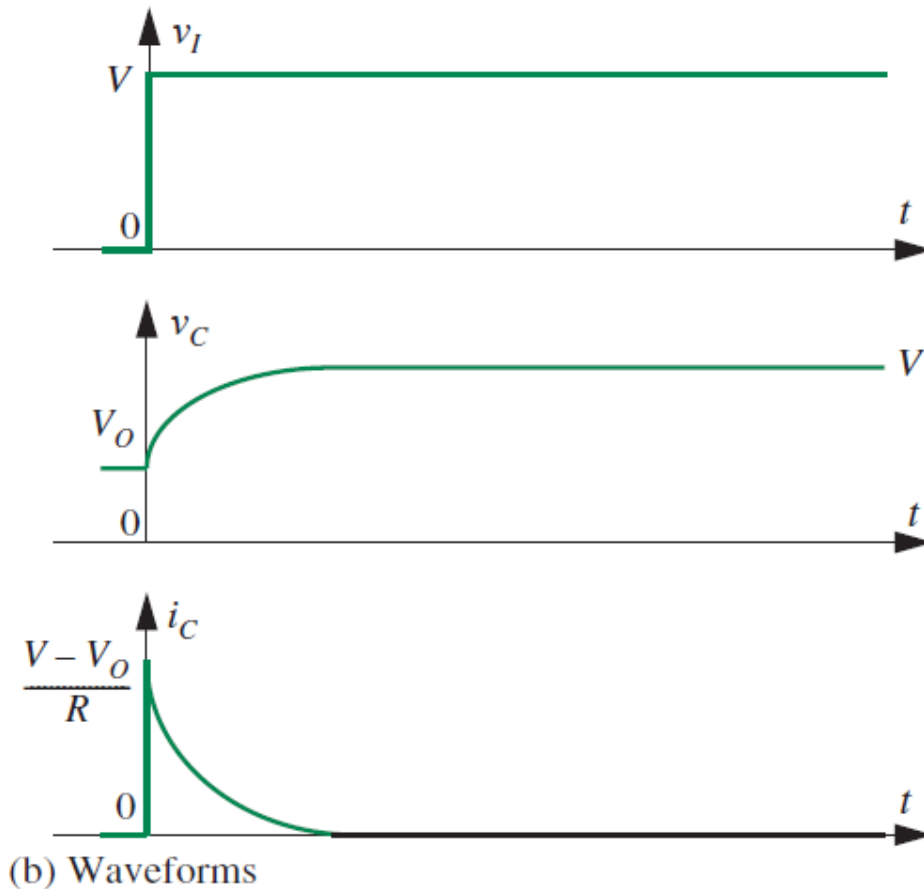
$$v_C = V + (V_0 - V)e^{-t/RC}$$

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

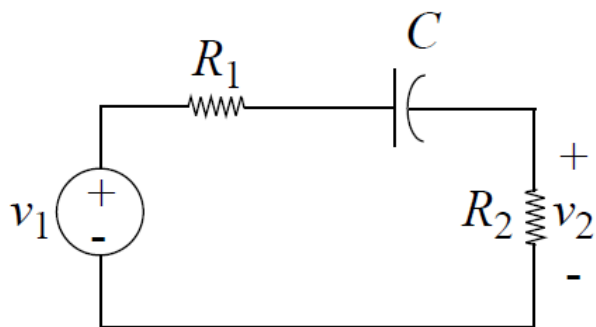
4 动态电路及瞬态分析



- (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？

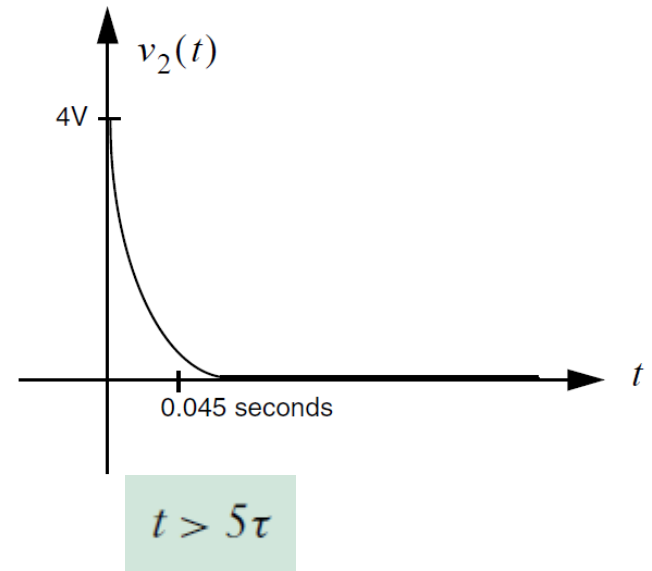
例：电路如图， $R_1 = 1k\Omega$, $R_2 = 2k\Omega$, and $C = 3\mu F$.
初始状态为0，电压为6v的阶跃信号 ($t=0$), 给出
 $t>0, v_2(t)$ 的示意图并标注关键点。



分析

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

$$\tau = 9ms$$



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)

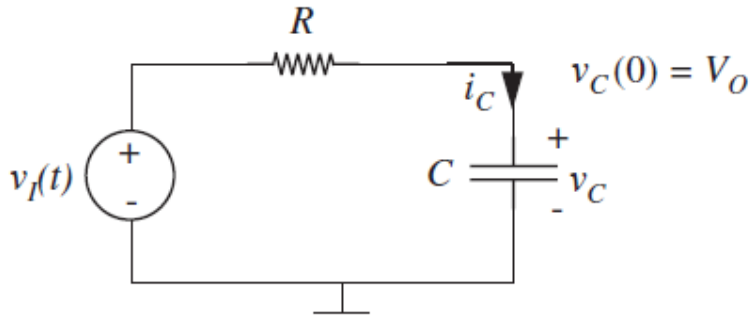
初始条件不为0，输入为0情况下的响应。

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。

4 动态电路及瞬态分析

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

$$v_C = V - V e^{-t/RC}$$

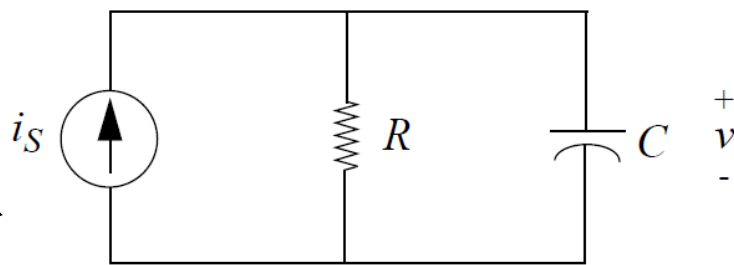
稳态解

$$t \rightarrow \infty$$

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 $t_0 \ll RC$

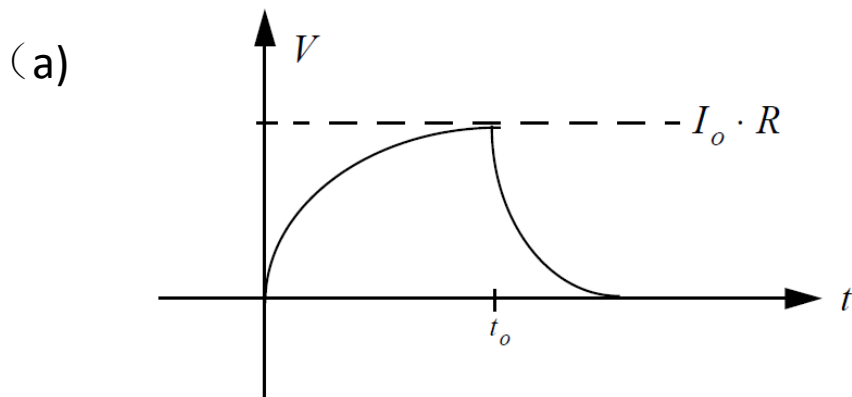
(3) 上问c（窄脉冲），说明 $t > t_0$ 时的响应仅仅取决于脉冲的面积。

分析

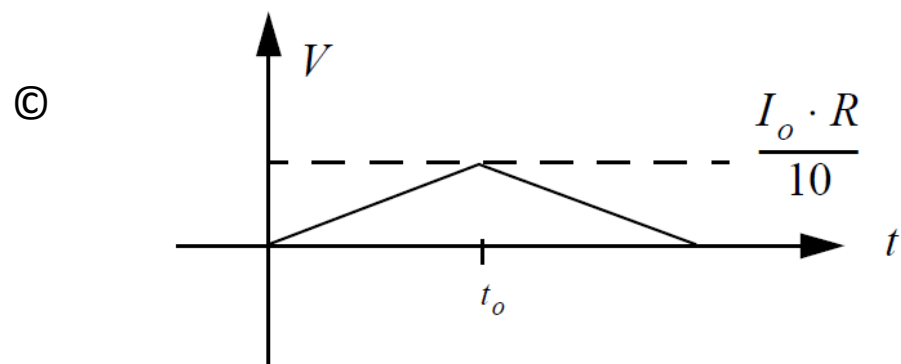
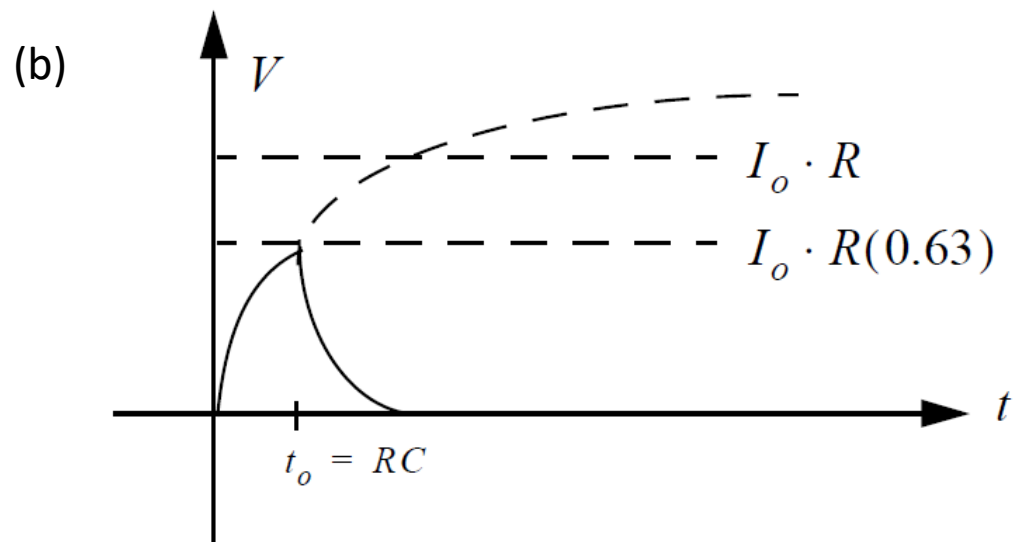
$$0 < t < t_0 : v = I_0 \cdot R (1 - e^{-t/\tau}) ; \tau = RC \quad \text{零状态}$$

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

零输入，初始值是？



分析



分析

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

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

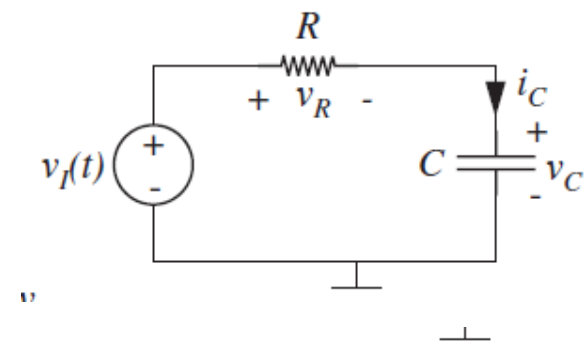
$$\frac{I_0}{C} = \frac{v}{RC} + \frac{dv}{dt}$$

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

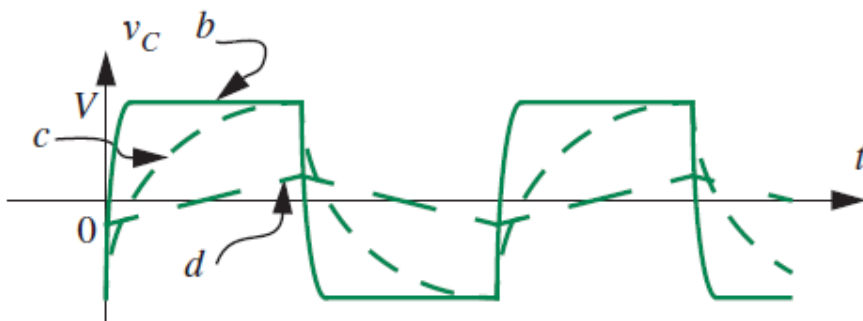
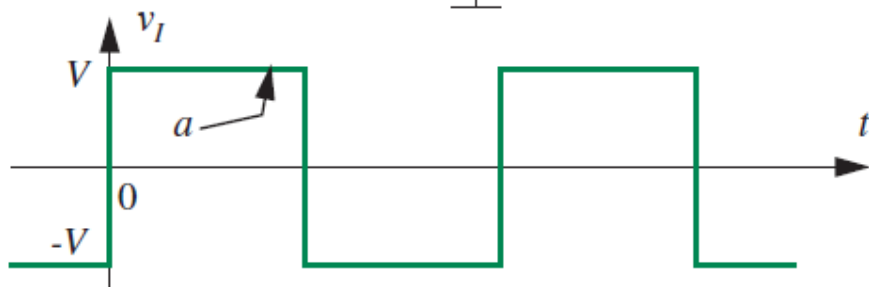
$$\frac{dv}{dt} = \frac{I_0}{C} \Rightarrow v = \int_0^{t_0} I_0/C$$

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？



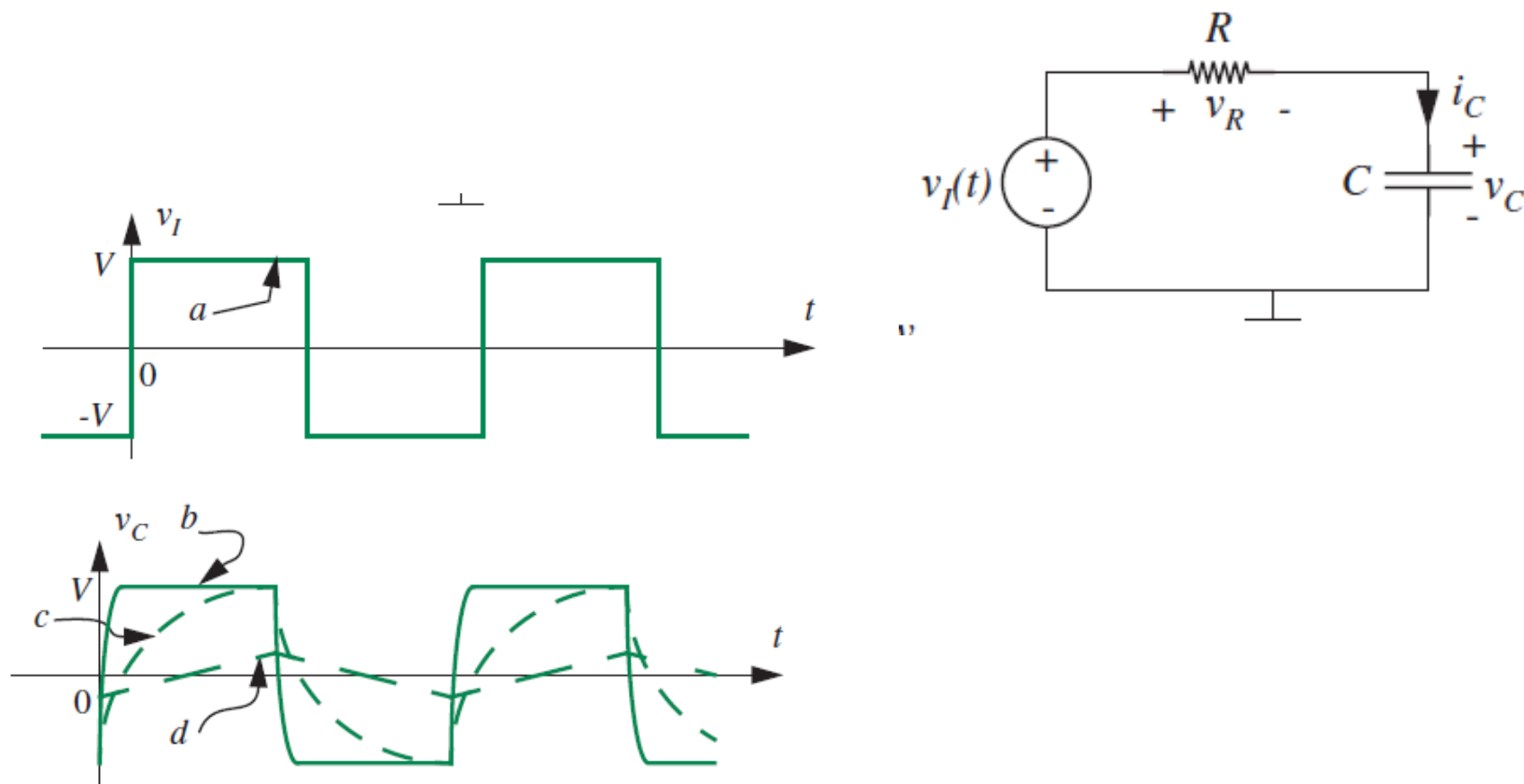
$$v_I = RC \frac{dv_C}{dt} + v_C.$$



b \c\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？

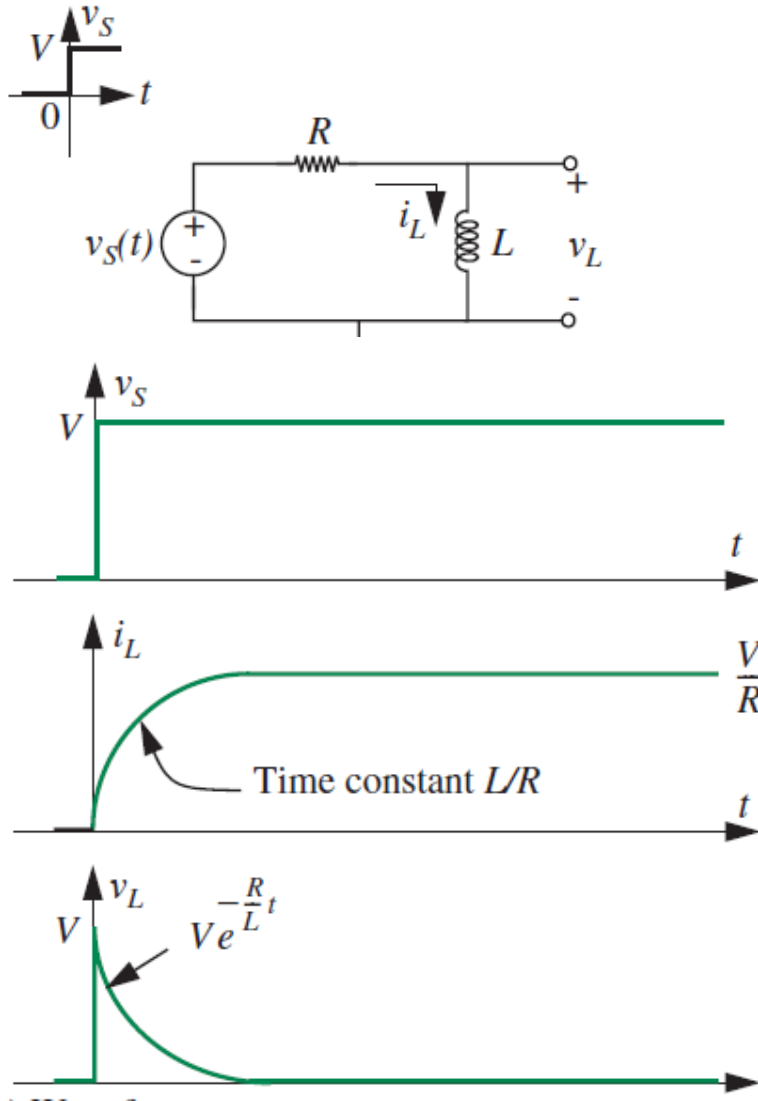


正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

典型RL电路分析

4 动态电路及瞬态分析



- 讨论 (1) 时间常数?
(2) 电感电流连续吗?
(3) 方波输入输出关系?

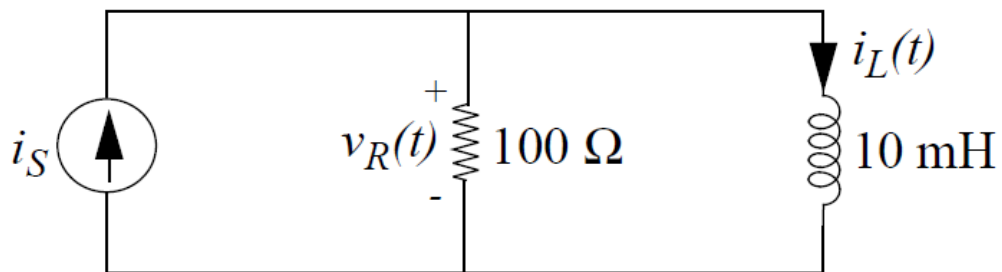
L/R .

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

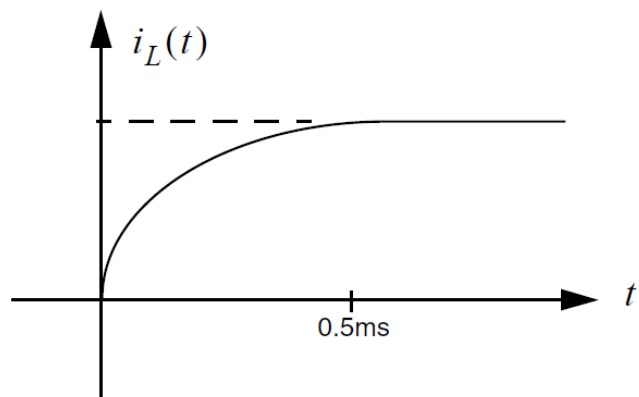
$$i_L = \frac{V}{R} \left(1 - e^{-(R/L)t} \right)$$

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

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。



分析

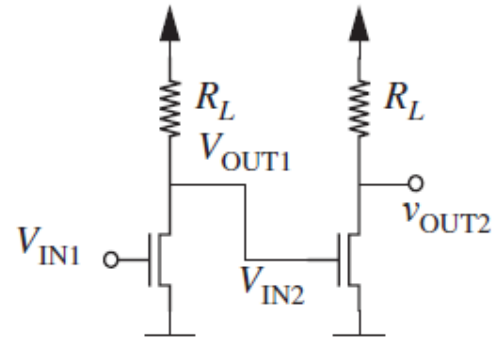
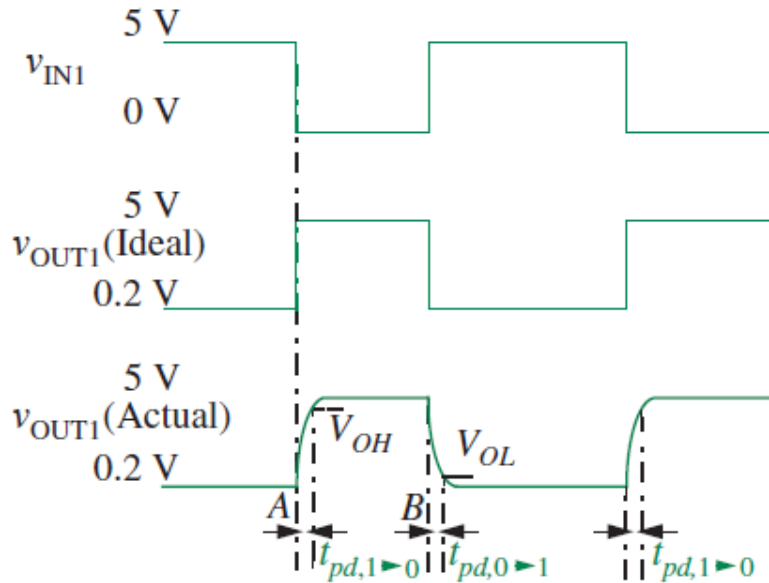
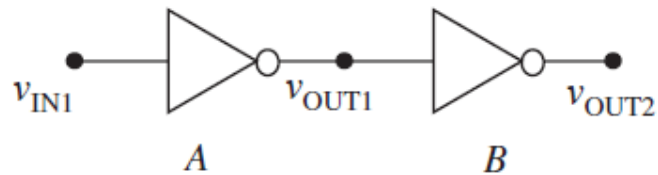


$$i_L(t) = 10 \left(1 - e^{-t/\tau} \right) [mA]$$

$$\tau = L/R = 0.1\text{ms}$$

4 动态电路及瞬态分析

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？

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）

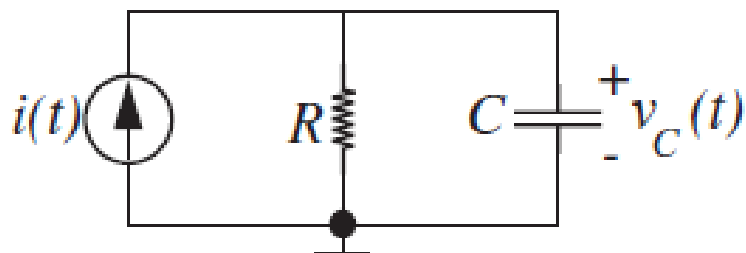
状态和状态变量

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

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



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

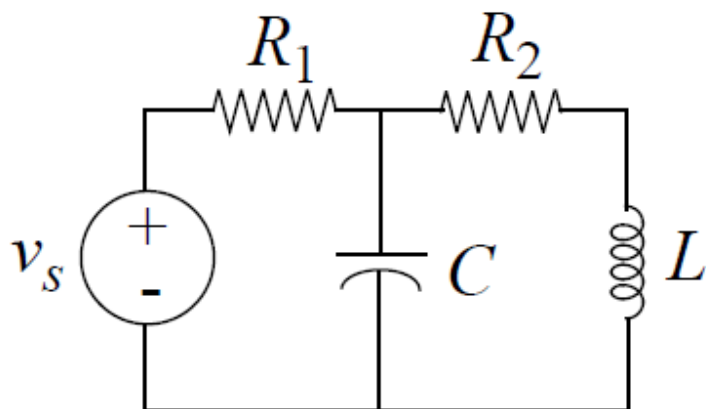
$$\frac{dv_C}{dt} = -\frac{v_C}{RC} + \frac{i(t)}{C}$$

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）

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

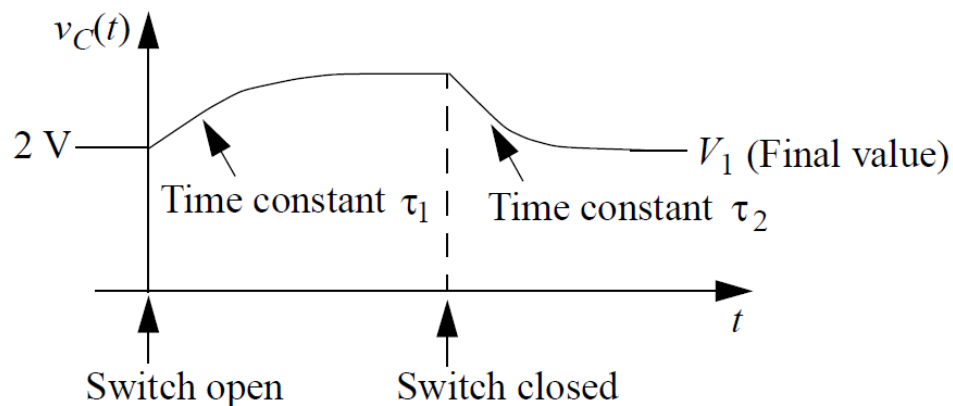
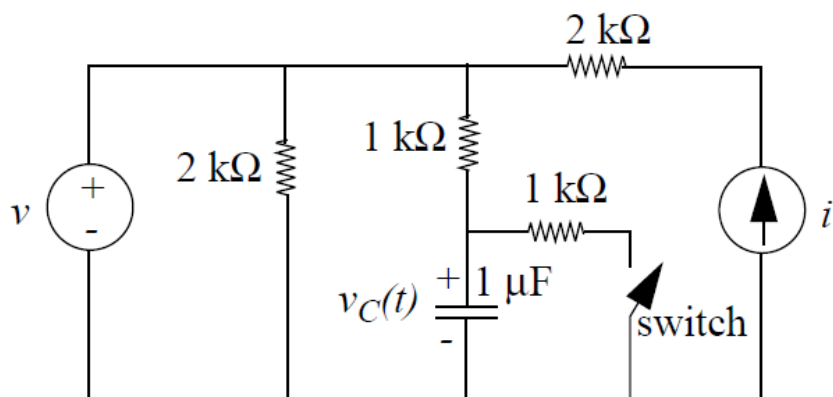
作答

分析

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

$$\text{KVL} \quad v_C - i_L R_2 - v_L = 0$$

求出时间常数，和终值电压 V_1 ， $t=0$ 之前开关一直闭合。



分析

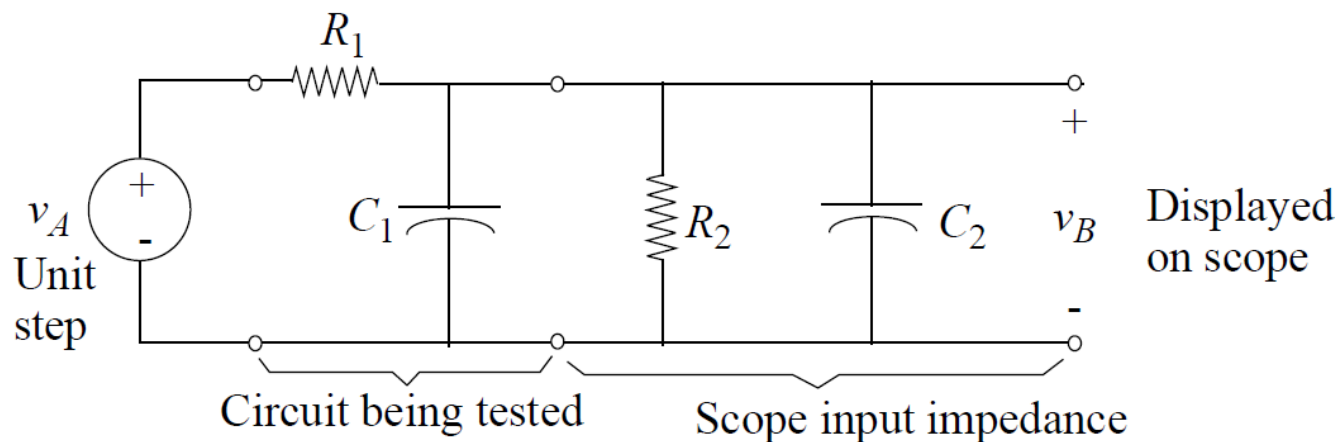
$$\tau_1 = 1ms$$

$$\tau_2 = 1/2ms$$

$$V_1(\text{final value}) = 2Volts$$

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

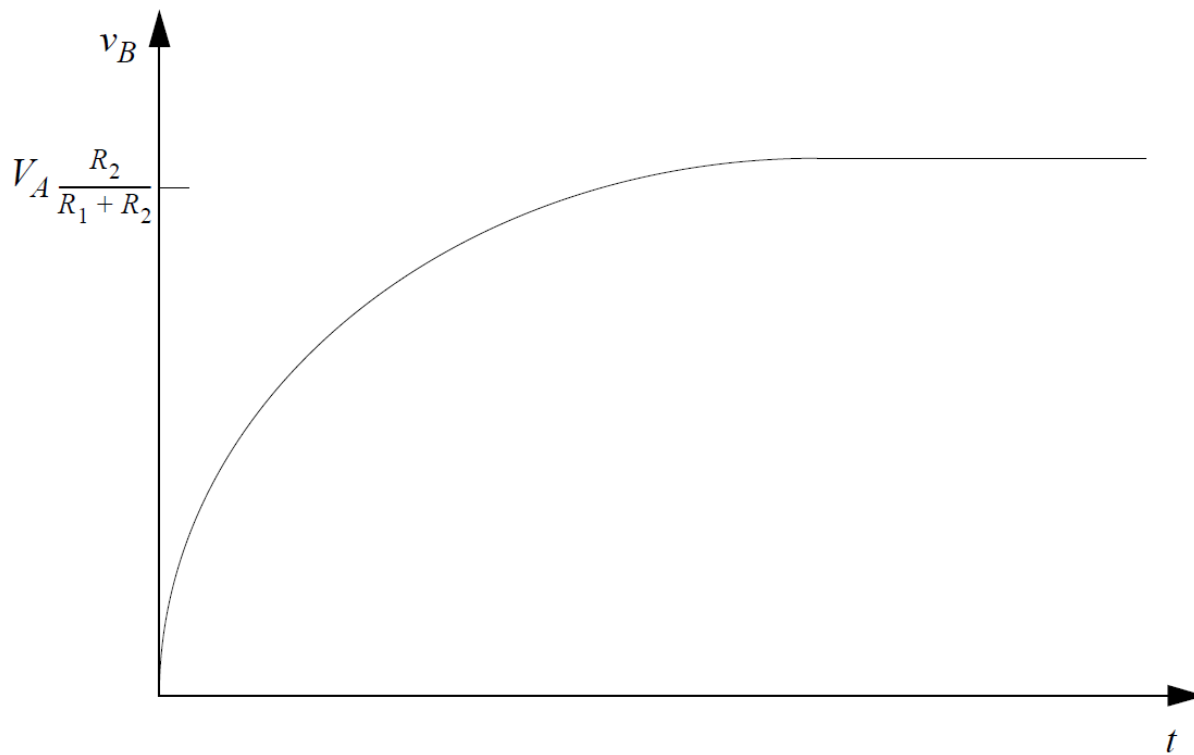
例：探索示波器探头引入的测试误差，及如何补偿？(问题10.23, P397)



- (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？

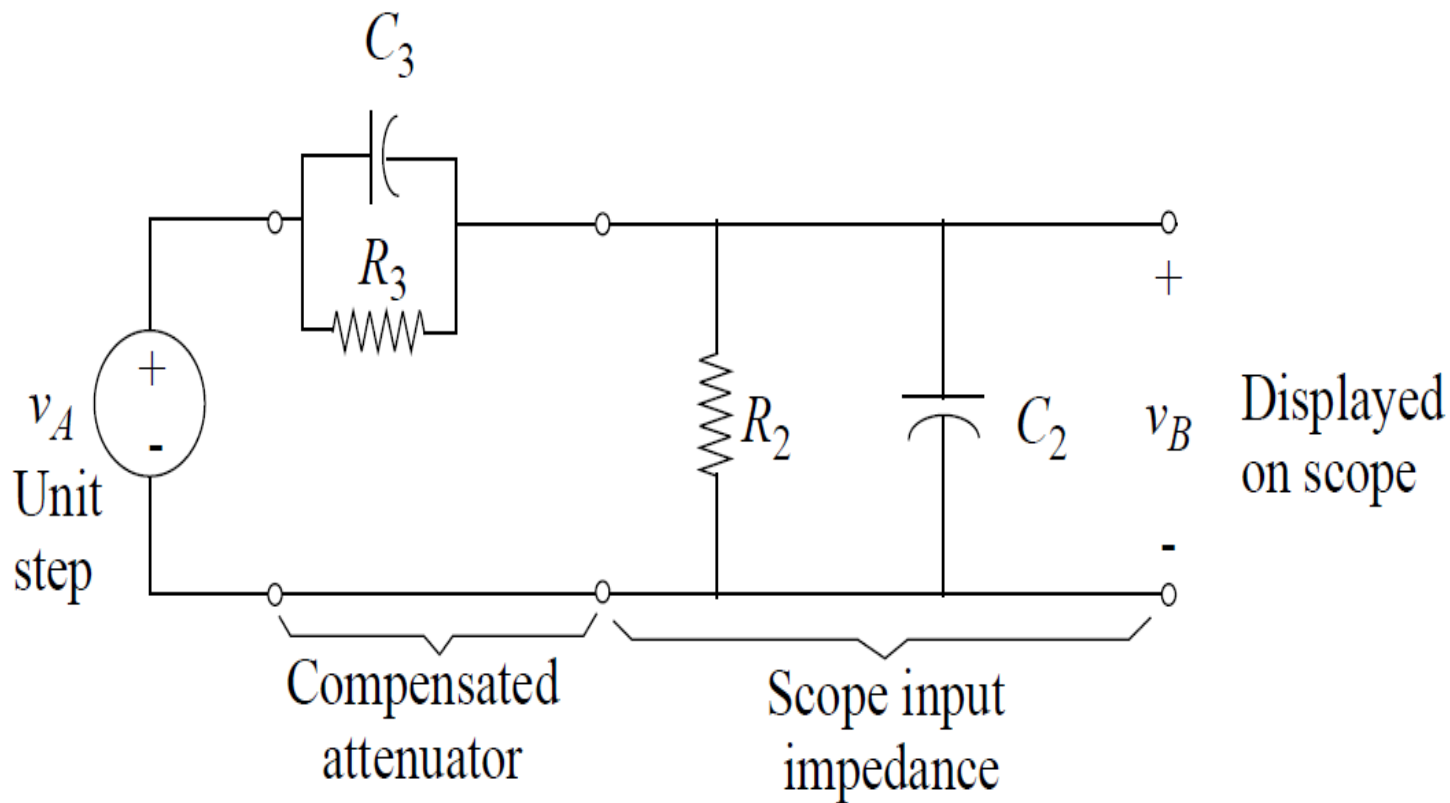
分析

$$(1) \quad \tau = (C_1 + C_2)(R_1 \parallel R_2)$$
$$v_B = v_A \frac{R_2}{R_1 + R_2} (1 - e^{-t/\tau})$$



分析

(2) 一种可能的补偿电路



$$C_2 R_2 = C_3 R_3$$

分析见P509-512

分析

$$v_B = K e^{-t[(\frac{R_2 * R_3}{R_2 + R_3})(C_2 + C_3)]} + \frac{R_2}{R_2 + R_3} V_A$$

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

$$Q = C_3 V_{C3} = C_2 V_B$$

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

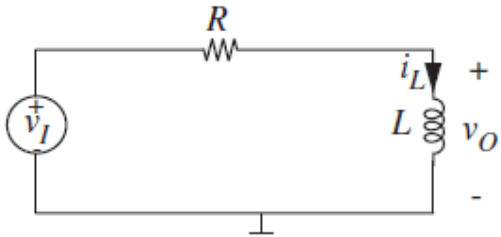
得到

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

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)

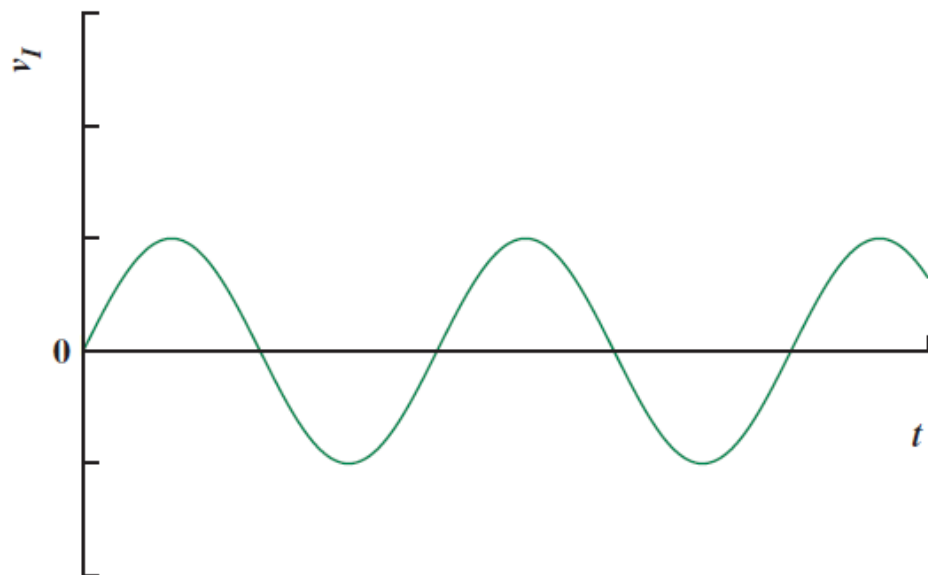


$$v_I = V \sin(\omega t) \quad t > 0.$$

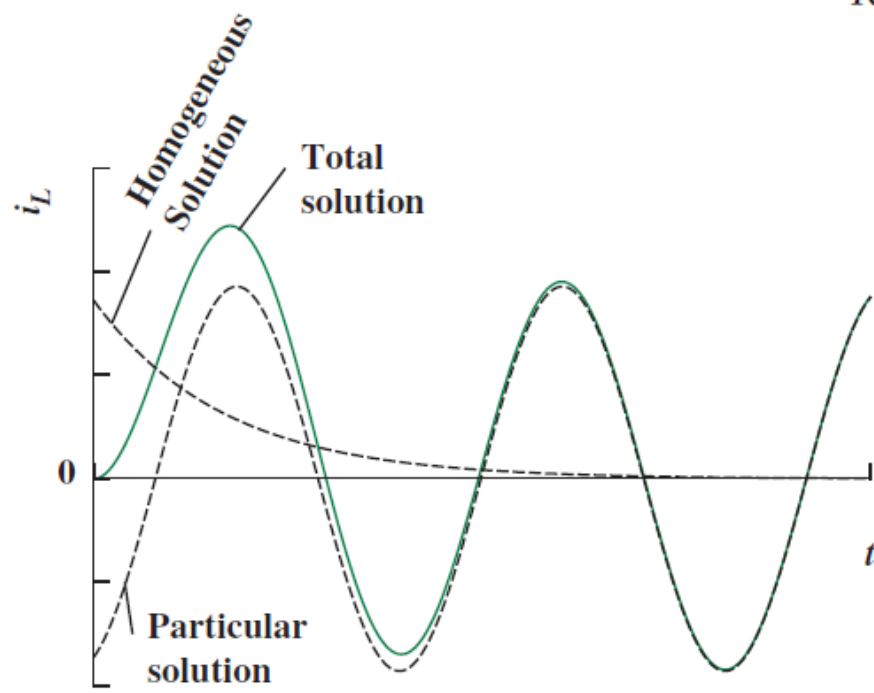
初始态为0

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

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



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



$$\omega \ll \frac{R}{L},$$

$$i_L \simeq \frac{V}{R} \sin(\omega t).$$

$$\omega \gg \frac{R}{L}$$

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

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

4 动态电路及瞬态分析

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！