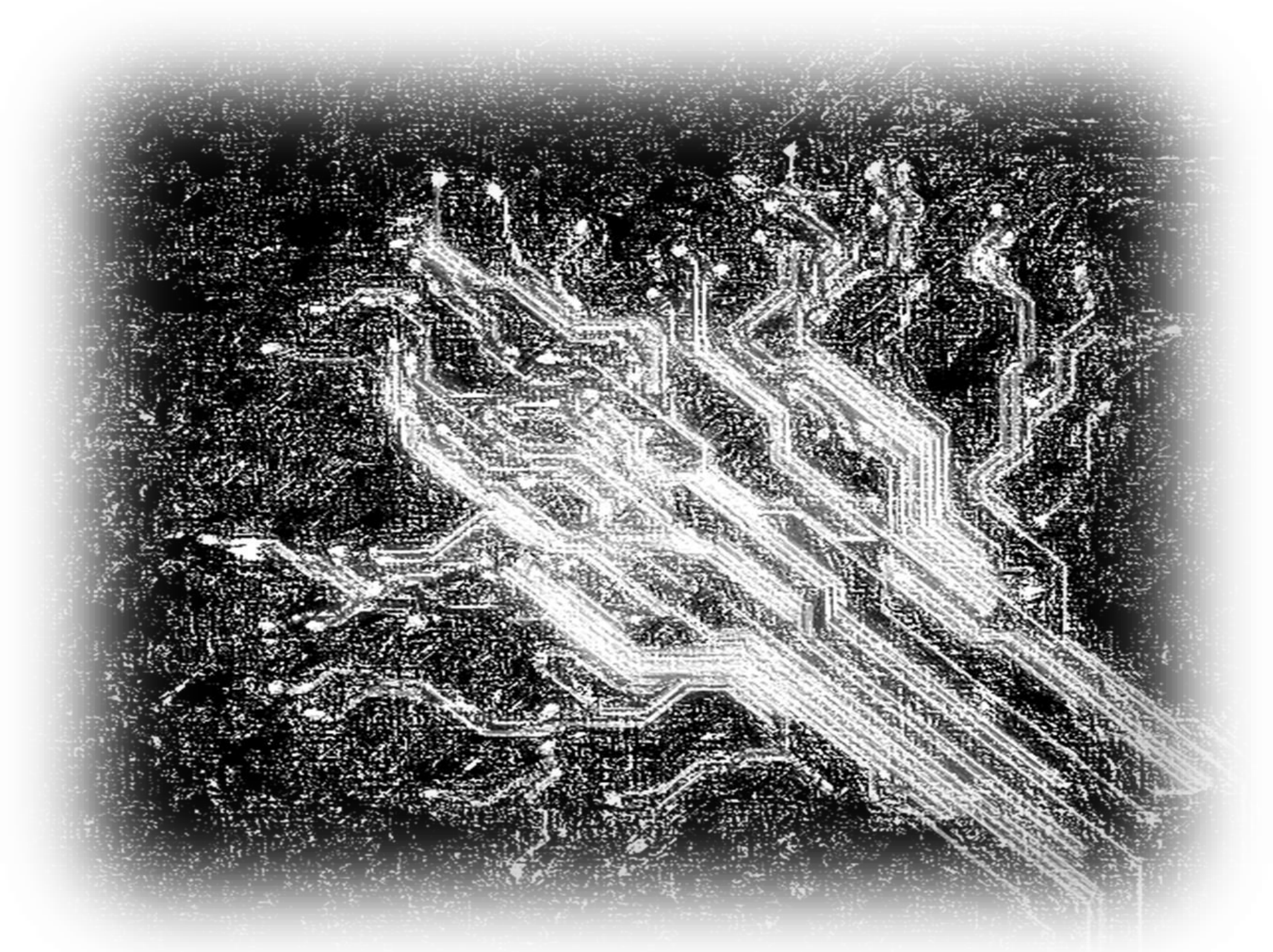


何松柏

电子工程学院

电子电路基础

sbhe@uestc.edu.cn

UESTC

电路稳态分析

讨论

如何得到正弦信号激励下电路的稳态响应？

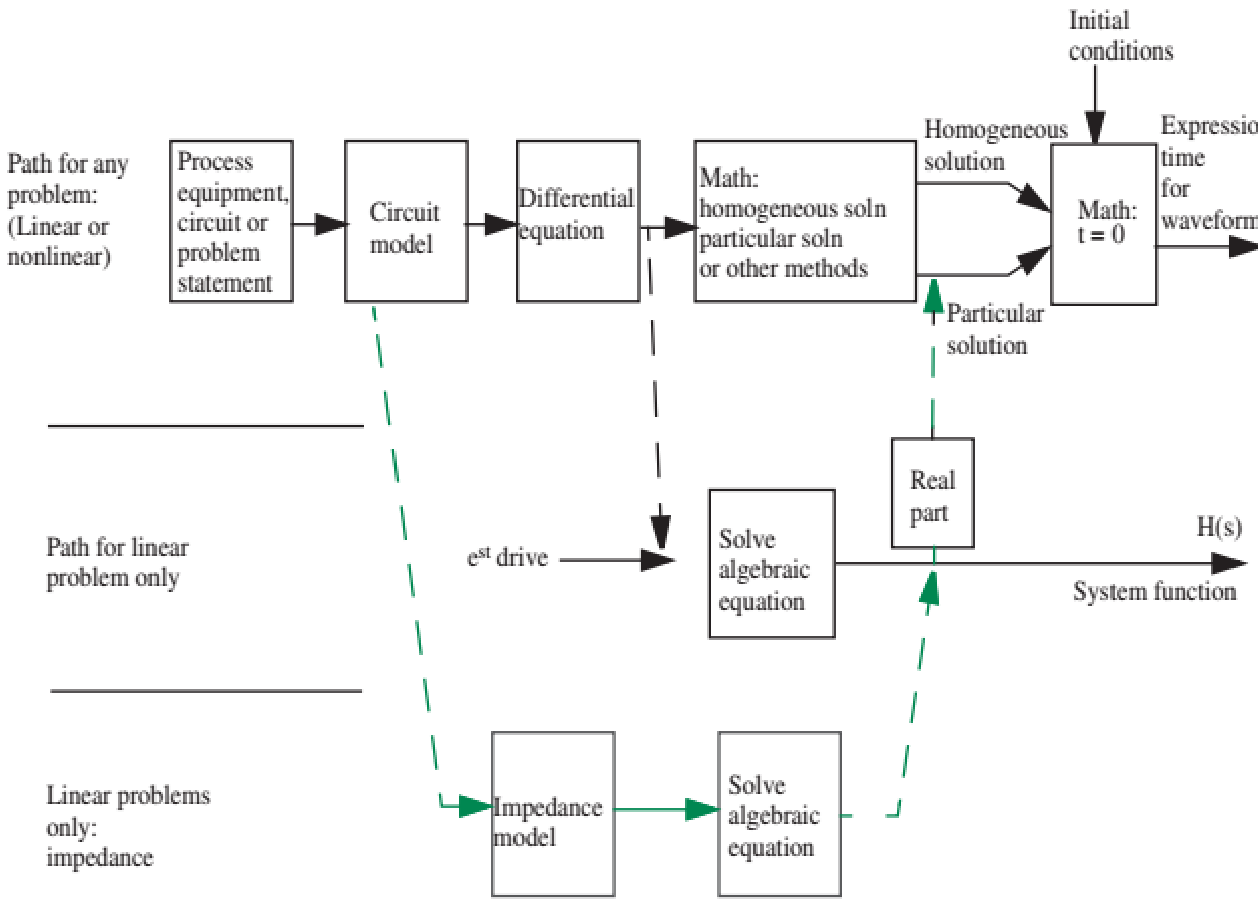
$$t \to \infty$$

正弦稳态？ 两种方法：

（1）时域解求极限（微分方程求解）

（2）频域求解 → 频率响应 （代数方程）

电路稳态分析



微分方程

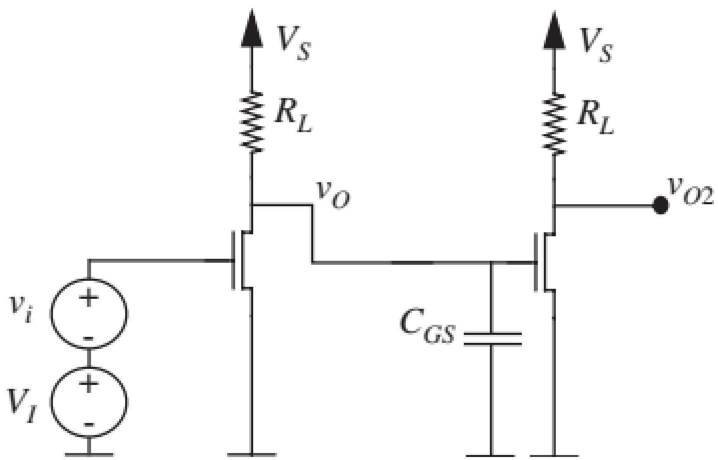
代数方程

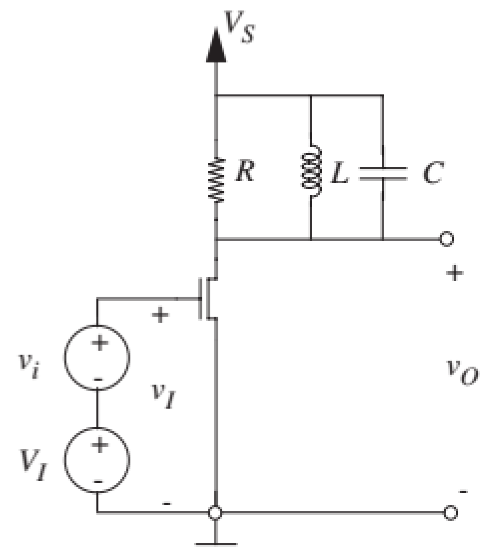
Analog Circuits

sbhe@uestc.edu.cn

电路稳态分析

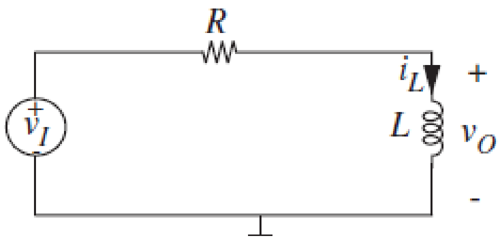
问题引入





关注电容存在对放大器对不同频率信号的响应。可以用10.6.7节时域方法分析。比较本章方法，那个更容易？

正弦输入的RL电路响应（P374-376)

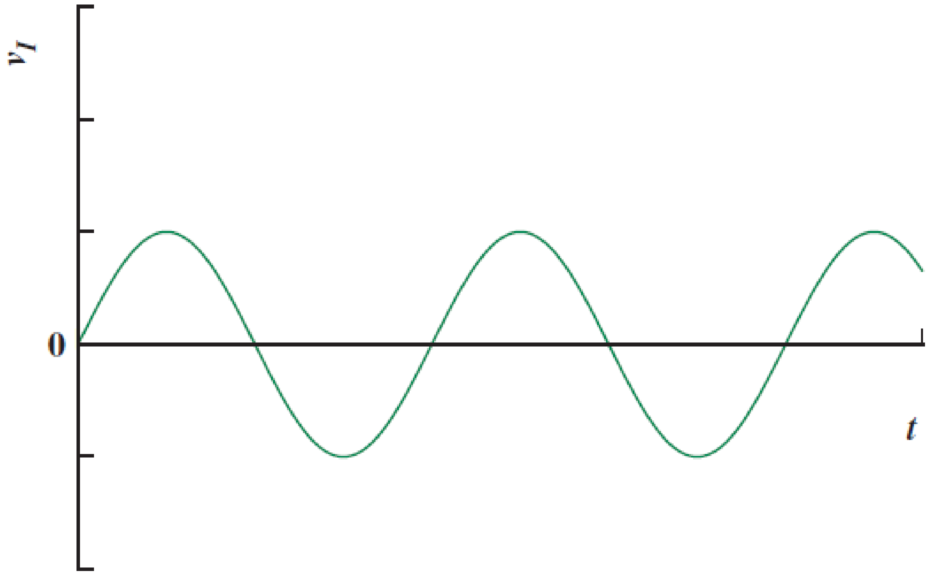


$$v_I = V\sin(\omega t) \qquad\qquad t > 0.$$

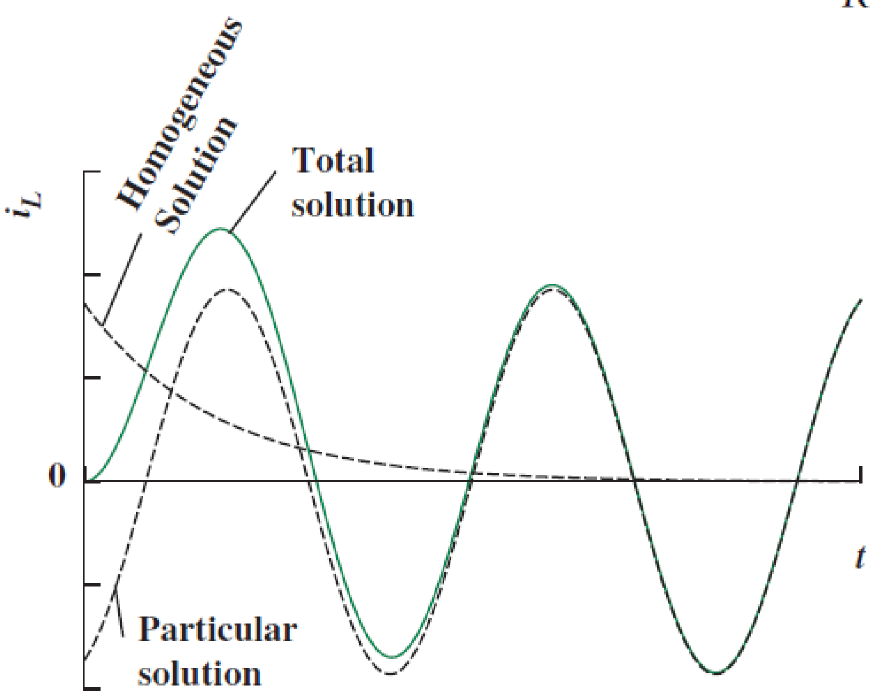
初始态为0

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

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



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



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

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

电路稳态分析—频域方法

电路的稳态特点

●线性电路改变信号幅度和相位

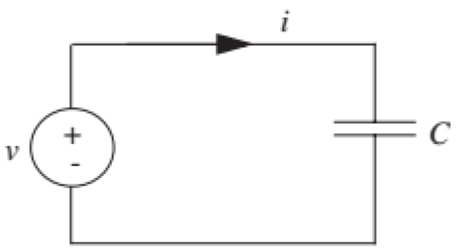
是否有更简便的方法分析？

电路稳态分析——频域方法

- 阻抗和频率响应

- 电路谐振

电路稳态分析



(a)

$$i = C\frac{dv}{dt}.$$

$$v = Ve^{st}$$

$$i = Ie^{st}$$

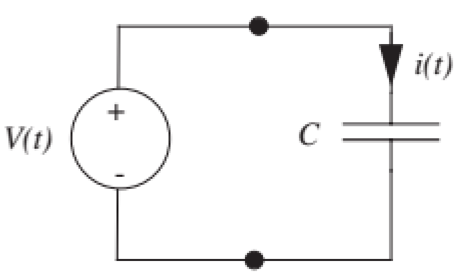
定义算子（运算方式）

$$I = CsV$$

$$V = \frac{1}{Cs}I.$$

电容阻抗关系

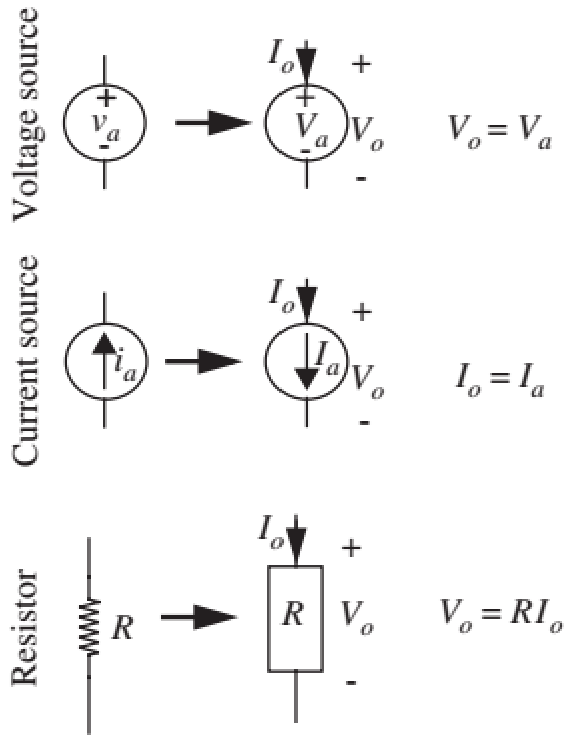
$$s = j\omega$$

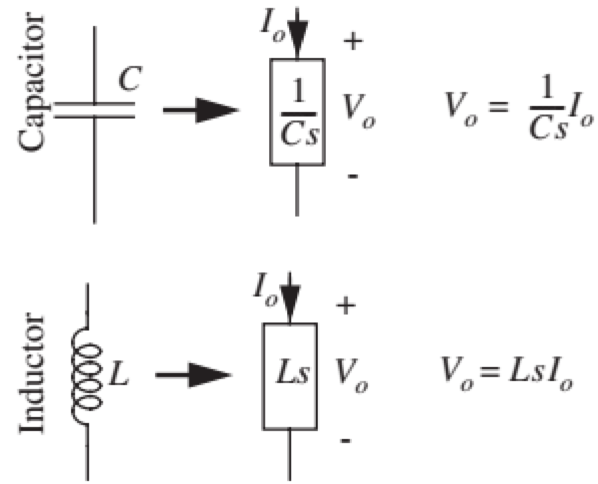


讨论：当输入电压信号为正弦时，这两种计算方法是等效的？

$$v(t) = V\cos(\omega t) \quad \rightarrow \quad i(t) = C\omega V\sin(\omega t)$$

常用元件的阻抗关系

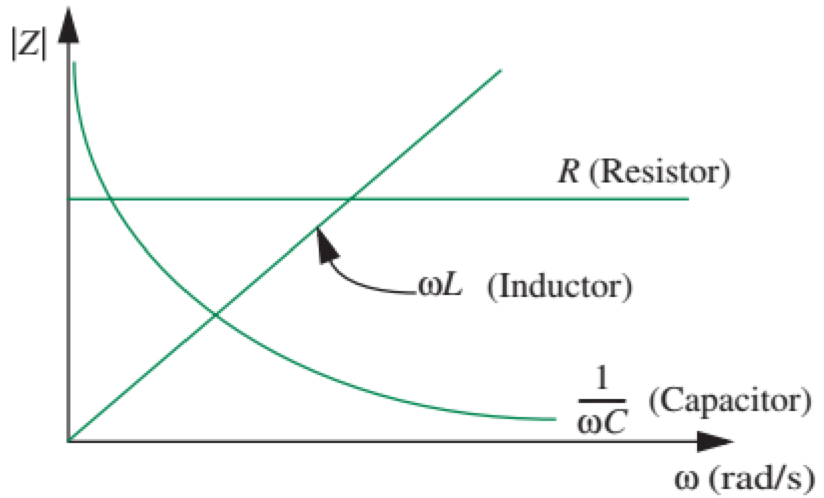




求稳态响应又一种方法？

对比这5个元件，有什么规律？（与频率的关系）

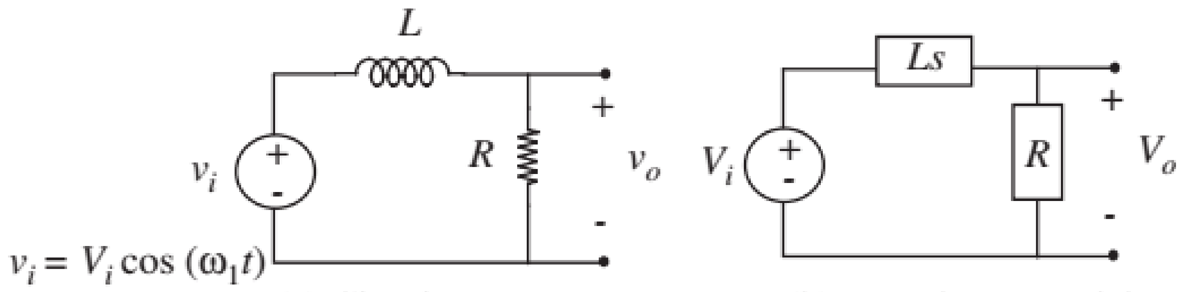
常用元件的阻抗关系



大家查阅资料，实际元件阻抗频率关系是这样吗？（自谐振）

电路稳态分析

例：RL电路



(a) Circuit (b) Impedance model

$$V_o = \frac{R}{R+Ls} V_i$$

$$v_o(t) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega_1^2 L^2}} V_i \cos(\omega_1 t + \Phi)$$

稳态解

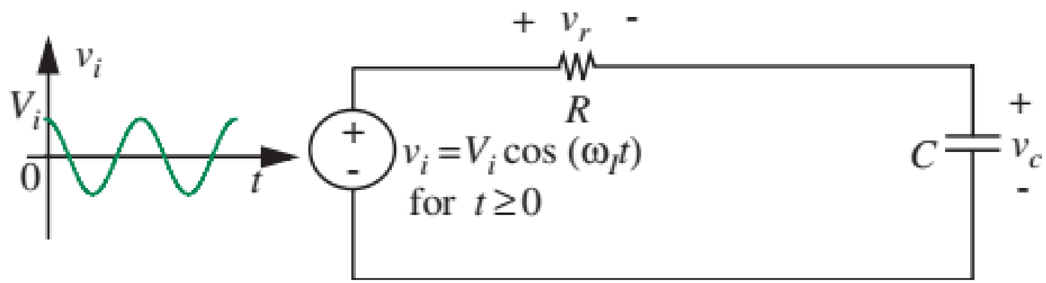
$$V_o = \frac{R}{R+j\omega_1 L} V_i$$

$$\Phi = \tan^{-1} -\omega_1 L/R$$

与第10章正弦激励时域稳态解比较（P375)

电路稳态分析

例



$$v_i = v_c + RC\frac{dv_c}{dt}.$$

回忆：该微分方程通过求齐次解（自然响应）和特解（强制响应）得到其结果。

电路稳态分析

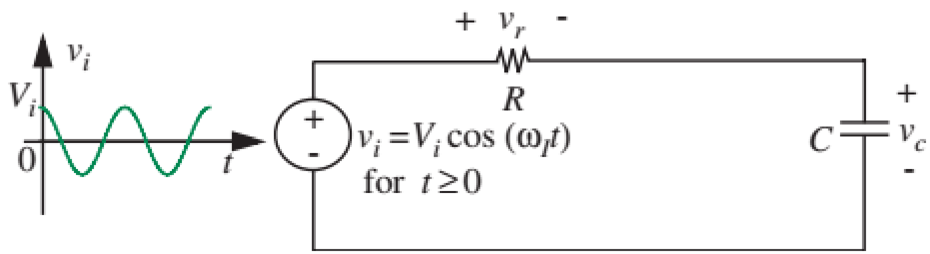
该微分方程的全解

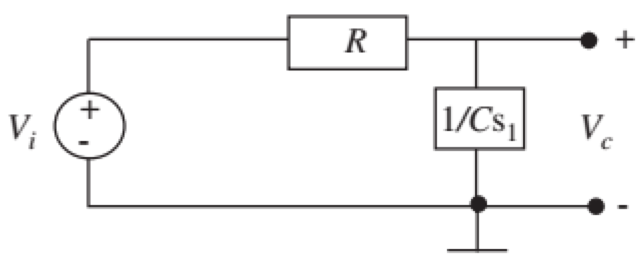
$$v_c = K_1 e^{-t/RC} + \frac{V_i}{\sqrt{1 + (\omega_1 RC)^2}} \cos\left(\omega_1 t + \Phi\right).$$

电路稳态响应：$t \to \infty$ 时，电路响应。

电路稳态响应只与特解（强制响应）有关。

电路稳态分析





求稳态响应

电路稳态分析

利用电路原理求得

$$V_c = \frac{1/Cs_1}{R + 1/Cs_1} V_i.$$

频域

$$v_c = Re\left[V_c e^{j\omega_1 t}\right]$$

$$v_c = |V_c| \cos(\omega_1 t + \angle V_c).$$

与第10章正弦激励时域稳态解比较

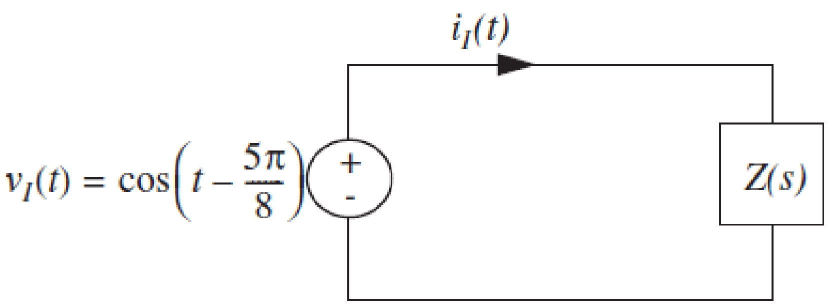
时域

$$v_c = \frac{V_i}{\sqrt{1 + (\omega_1 RC)^2}} \cos\left(\omega_1 t + \Phi\right)$$

主观题 10分 设置

例：电路如图所示

$$i_I(t) \quad \sqrt{2}\sin(t+\pi/8).$$



求 $Z(s = j1)$.

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

电路稳态分析

分析

$$\mathrm{i}_I(t) = \sqrt{2}\sin(\mathrm{t}+\frac{\pi}{8}) = \sqrt{2}\cos(t-\frac{3\pi}{8})$$

$$\mathrm{Z(s=j)}=\frac{V}{I} = \frac{\sqrt{2}}{2}e^{-\frac{\pi}{4}j}$$

电路稳态分析

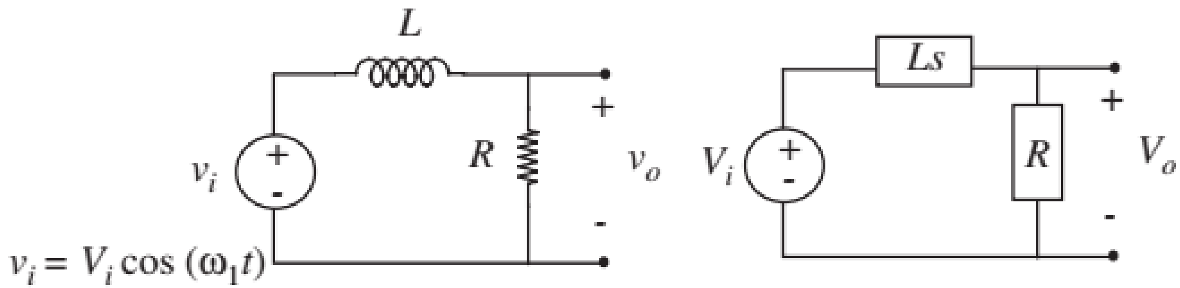
要求：总结出求正弦稳态响应的方法和规律？

查阅资料：思考该求解方法与信号分析课程上方法的关系？

注意变量符号表示：P483

电路稳态分析

例：RL电路



(a) Circuit (b) Impedance model

$$V_o = \frac{R}{R + Ls} V_i$$

$$V_o = \frac{R}{R + j\omega_1 L} V_i$$

$$v_o(t) = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega_1^2 L^2}} V_i \cos(\omega_1 t + \Phi)$$

$$\Phi = \tan^{-1} -\omega_1 L / R$$

稳态解

与第10章正弦激励时域稳态解比较（P375)

sbhe@uestc.edu.cn

电路稳态分析

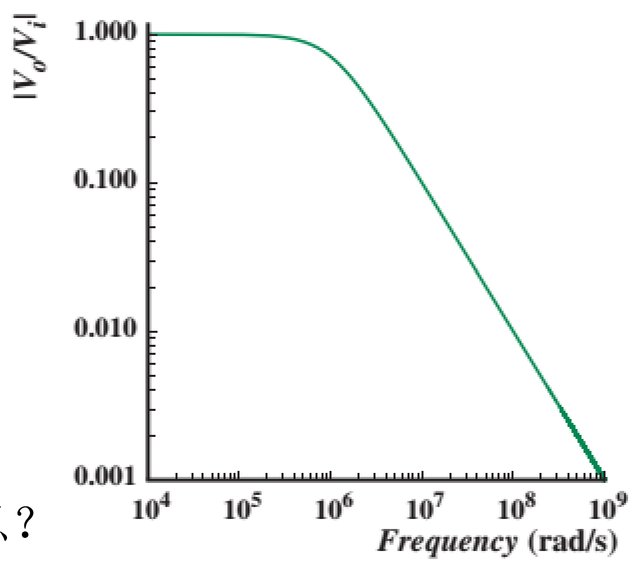
电路参数

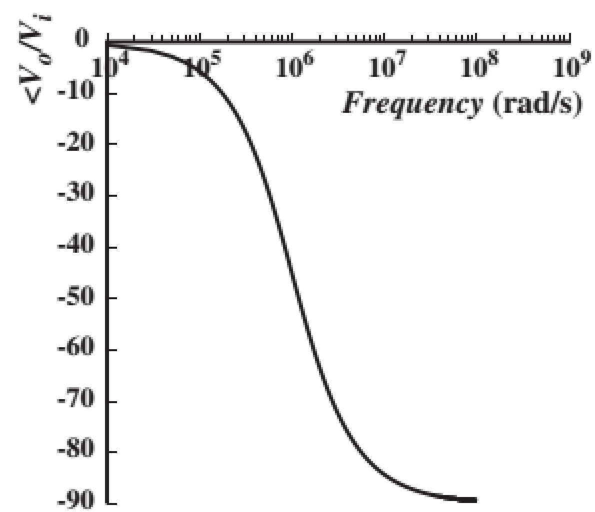
$L = 1\ \text{mH}$

$R = 1\ \text{k}\Omega$

$v_i = V_i \cos(2\pi f t)$, where $V_i = 10$

波特图

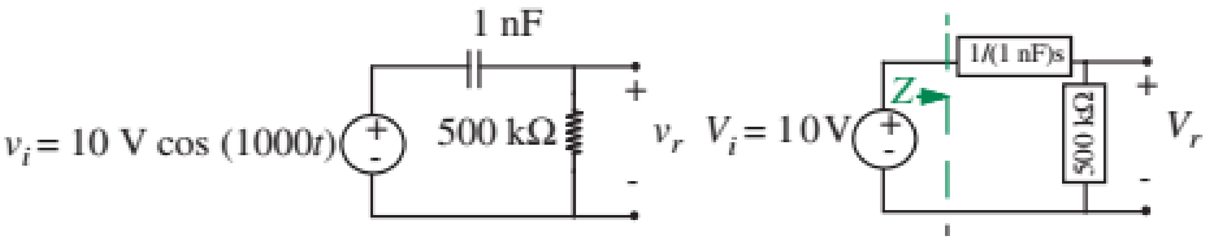




告诉了我们什么信息？

设置

例：电路如图所示



(a) Circuit (b) Impedance model

要求分析该电路在频率较高时如 $10^6 rad/s$ 输出电压？

要求分析该电路在频率较低时如 $1 rad/s$ 输出电压？

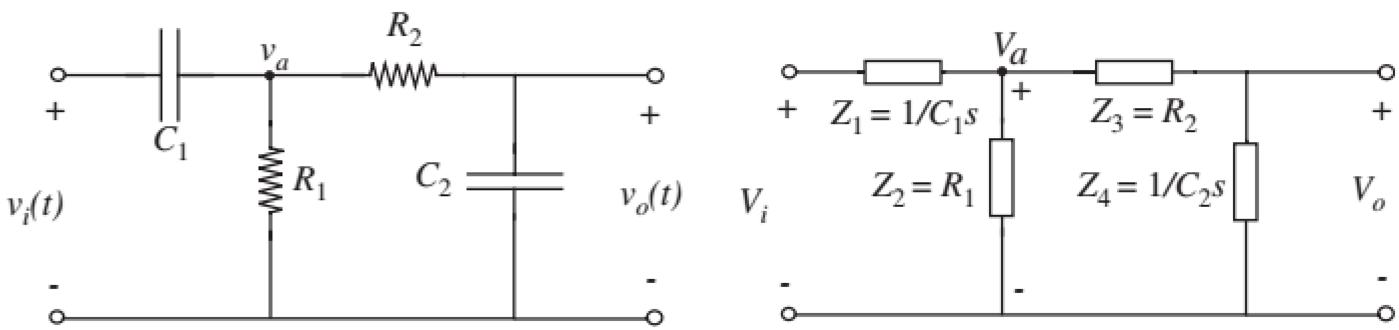
与图13.3 电路响应比较，有什么结论？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

电路稳态分析

讨论如图电路



(a) Circuit (b) Impedance model

有哪些方法写出输入输出关系？

该电路幅度响应与频率关系，有什么样特点？

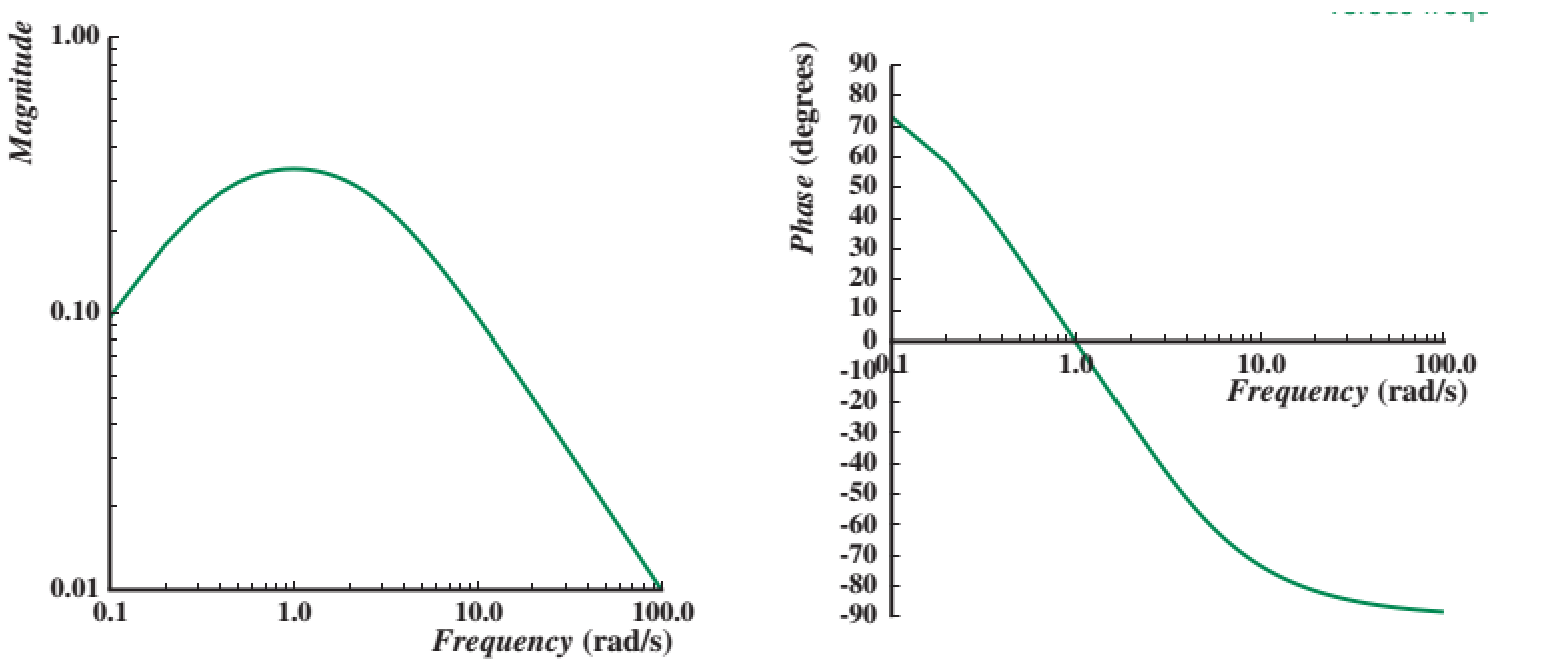
电路稳态分析

$$V_o = \frac{R_1 C_1 s}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) s + 1} V_i$$

传递函数

$$H(s) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{R_1 C_1 s}{R_1 R_2 C_1 C_2 s^2 + (R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2) s + 1}$$

电路稳态分析

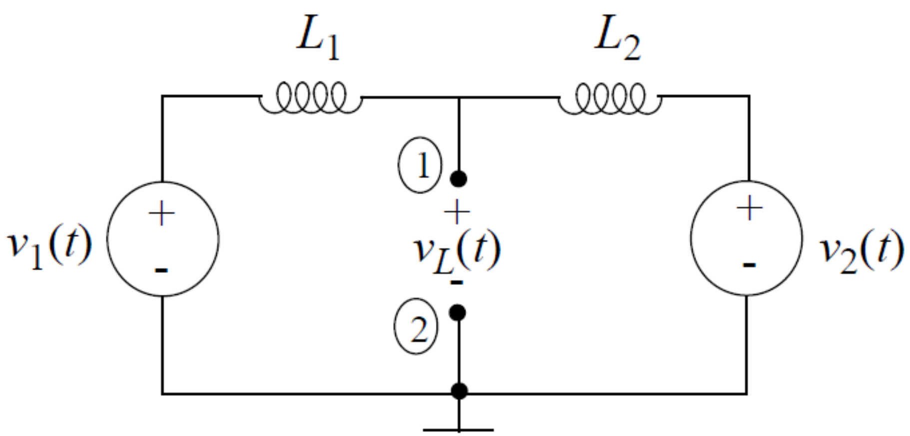


Magnitude
1.00
0.10
0.01
0.1
1.0
10.0
100.0
Frequency (rad/s)
Phase (degrees)
90
80
70
60
50
40
30
20
10
0
-10
-20
-30
-40
-50
-60
-70
-80
-90
0.1
1.0
10.0
100.0
Frequency (rad/s)

波特图

设置

例：电路如图所示。求端口1，2间的戴维南等效。



$$v_1 = V\cos\omega t \quad v_2 = V\cos(\omega t + \Phi)$$

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

电路稳态分析

分析

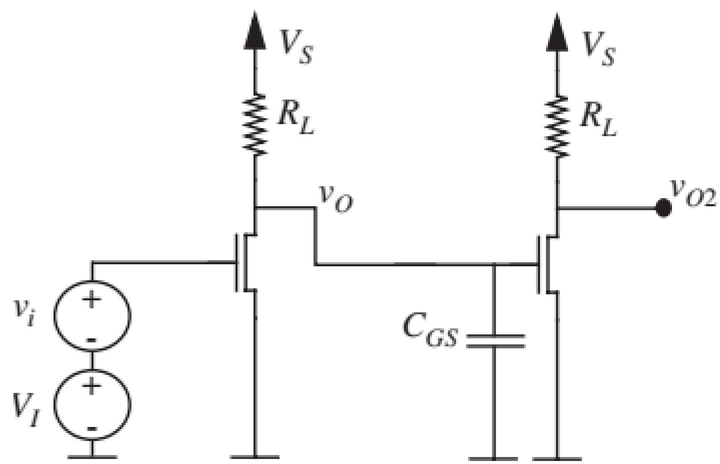
$$R_{TH} = Z_{TH} = \frac{L_1 s - L_2 L s}{L_1 s + L_2 s} = \frac{L_1 L_2 s}{L_1 + L_2} = Z_{TH}$$

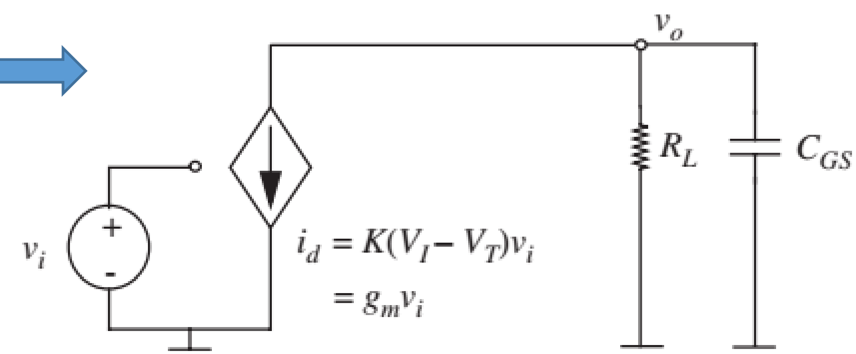
$$V_{oc} = \frac{V_1 L_2 s}{L_1 s + L_2 s} + \frac{V_2 L_1 s}{L_1 s + L_2 s} = \frac{L_2 + L_1 e^{j\phi}}{L_1 + L_2} \cdot V$$

电路稳态分析

带容性负载的小信号放大器分析

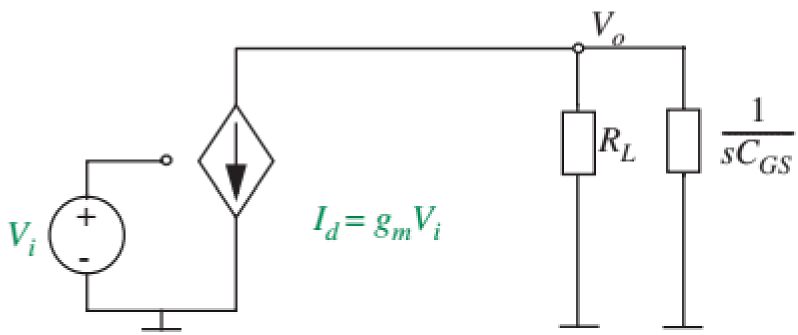
分析电容对第一级放大器影响？



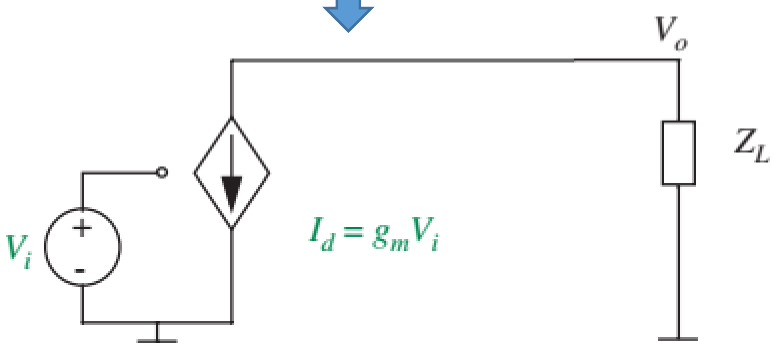


为什么忽略第二级晶体管？

电路稳态分析



$$V_o = -g_m Z_L V_i = -g_m \frac{R_L}{1 + sR_L C_{GS}} V_i.$$



$$Z_L = R_L \parallel \frac{1}{sC_{GS}}$$

$$= \frac{R_L}{1 + sR_L C_{GS}}.$$

电路稳态分析

电路频率响应

$$V_o = -g_m \frac{R_L}{1 + j\omega R_L C_{GS}} V_i.$$

讨论：频率趋于0时，电容的影响？

频率趋于无穷大时，电容影响？

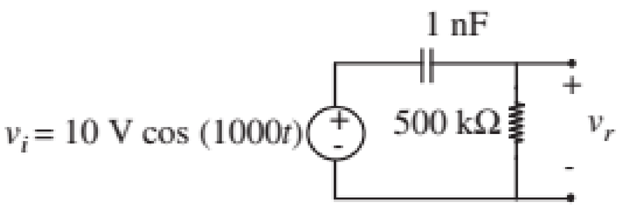
频率响应：幅值和相位与频率的关系

传递函数：系统函数，输出与输入比值。

频率响应：传递函数的幅值和相位与频率的函数关系。

电路稳态分析

一阶RC（RL）电路频率响应近似折线图



传递函数

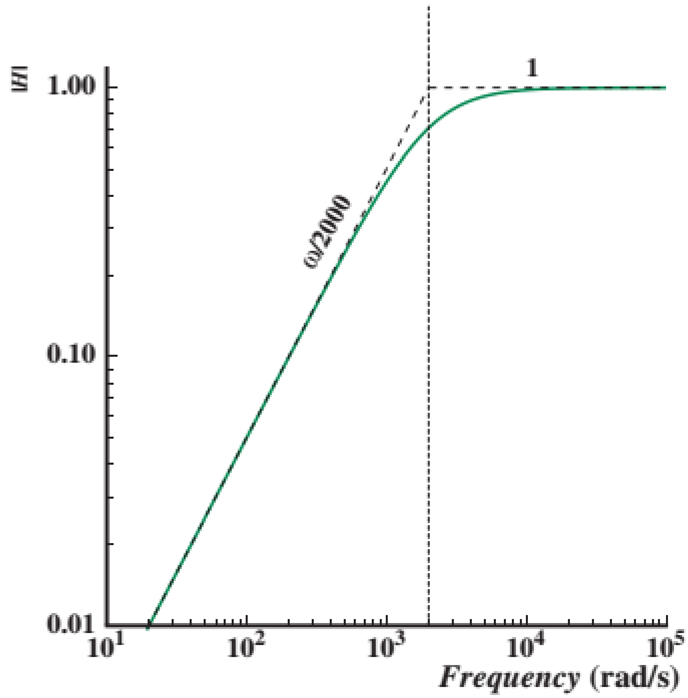
$$\frac{V_r}{V_i} = H(s) = \frac{500 \times 10^3}{500 \times 10^3 + \frac{1}{1\times10^{-9}s}}.$$

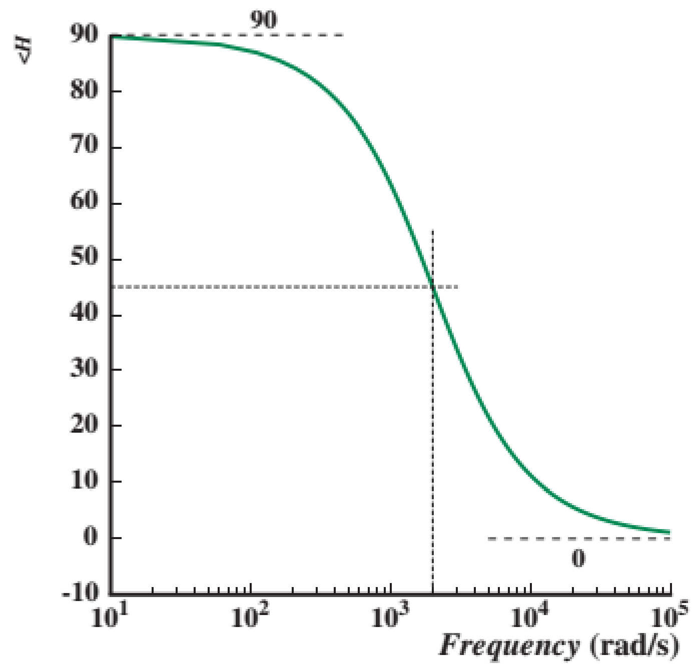
电路稳态分析

一阶RC（RL）电路频率响应近似折线图

$$H(s) = \frac{s}{s+2000}.$$

$$H(j\omega) = \frac{j\omega}{j\omega+2000}.$$





电路稳态分析

一阶RC（RL）电路频率响应近似折线图特点

- 转折频率 $\omega = \dfrac{1}{RC} = 2000 rad / s$

时间常数

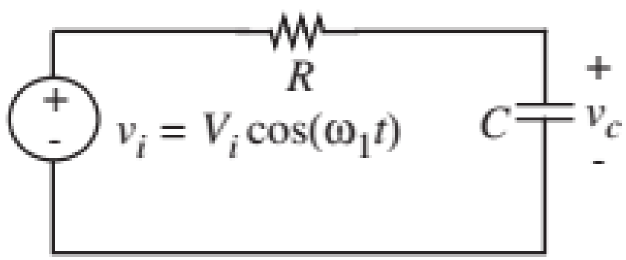
- 低频渐进线 $|H| = \dfrac{\omega}{2000}.$

- 高频渐进线 $|H| = 1.$

- 转折频率处相移45度

电路稳态分析

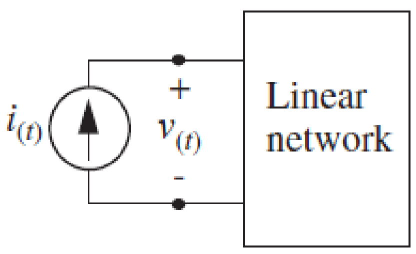
问题：绘出下图电路频率响应近似折线图

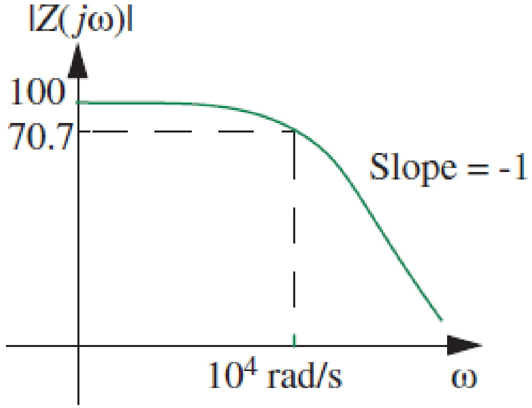


在转折频率处，相移为多少？有什么结论？

sbhe@uestc.edu.cn

例，如图



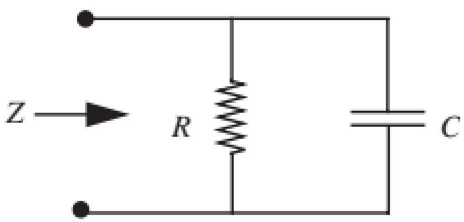


如图：给出两个元件的线性网络，并给出元器件值。

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

电路稳态分析

讨论



$$Z(s)=\frac{R}{RSC+1}$$

$$\omega=\frac{1}{RC}=10^4$$

R=?

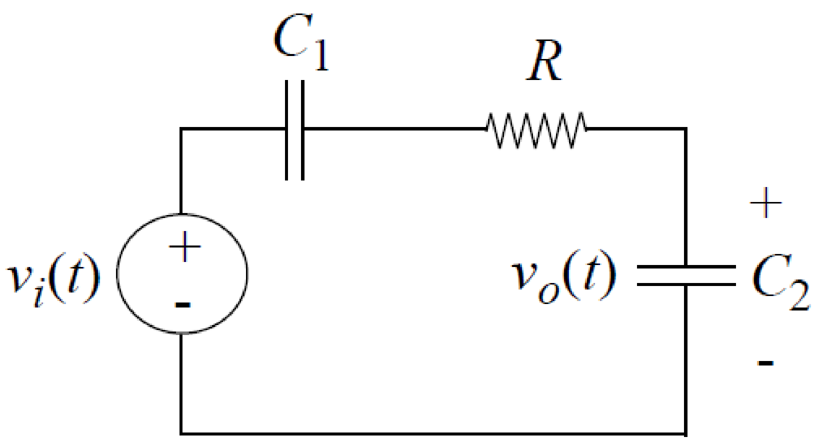
C=?

主观题 10分

设置

例：

$$R = 1kilohm \quad C_1 = 20\mu F \quad C_2 = 20\mu F$$



（1）求传递函数，及幅值和相位

（2）$v_i(t) = \cos 100t + \cos 10000t$ 求稳态输出

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

电路稳态分析

分析

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{C_2 s}}{\frac{1}{C_2 s} + R + \frac{1}{C_1 s}} = \frac{1}{1 + \frac{C_2}{C_1} + RC_2 s} = \frac{1}{2 + \frac{j\omega}{50}}$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2}{100^2}}} \left(\frac{1}{2}\right) e^{j\phi}$$

$$\phi = \tan^{-1}(-\frac{\omega}{100})$$

电路稳态分析

分析 $\omega = 100,$

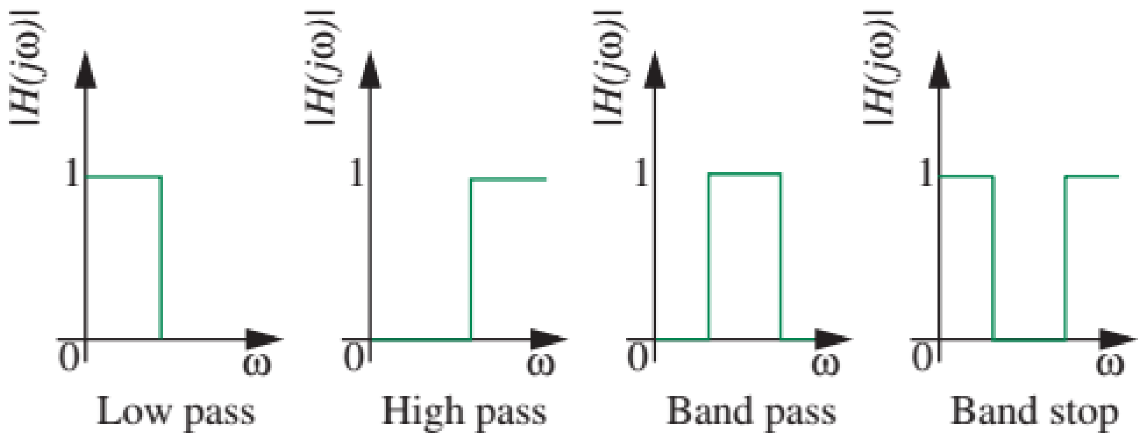
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{2\sqrt{2}}\, e^{-j45^\circ} \quad \rightarrow \quad v_o(t) = \frac{1}{2\sqrt{2}}\cos(100t - 45^\circ)$$

$\omega = 10,000,$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{200.01}\, e^{-j89.4^\circ} \quad \rightarrow \quad v_o(t) = \frac{1}{200.01}\cos(10,000t - 89.4^\circ)$$

$$v_o(t) = \frac{1}{2\sqrt{2}}\cos(100t - 45^\circ) + \frac{1}{200.01}\cos(10,000t - 89.4^\circ)$$

滤波器

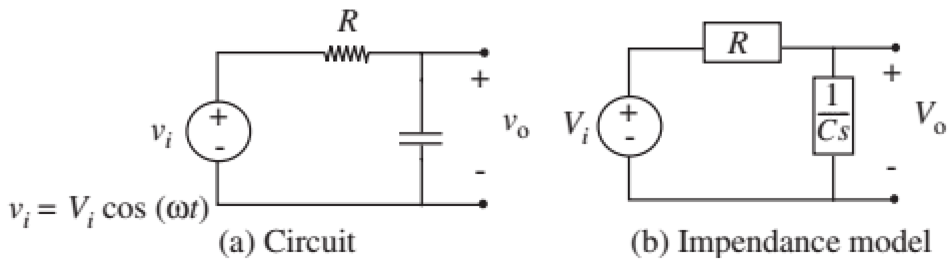


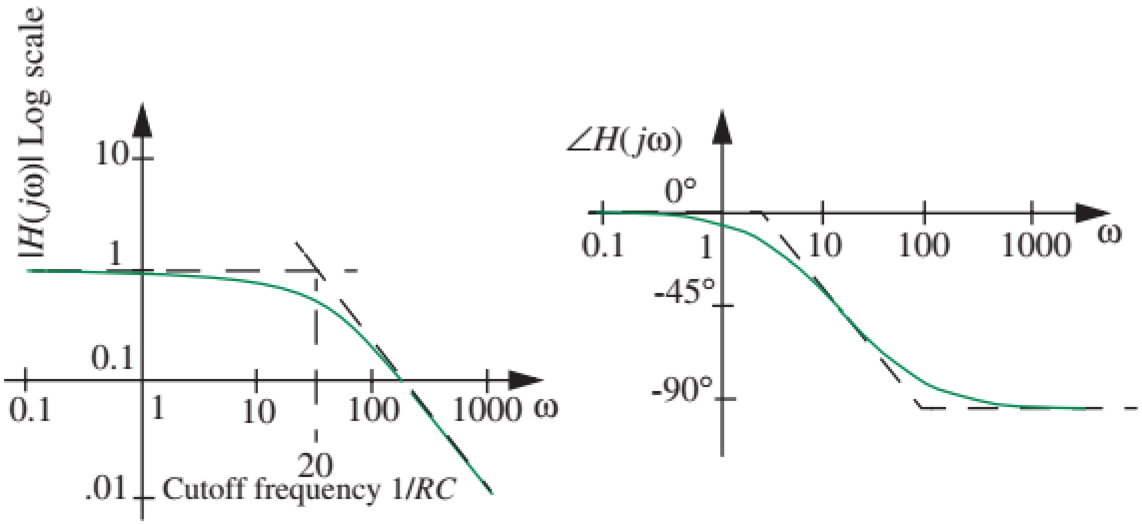
滤波器定义

sbhe@uestc.edu.cn

电路稳态分析

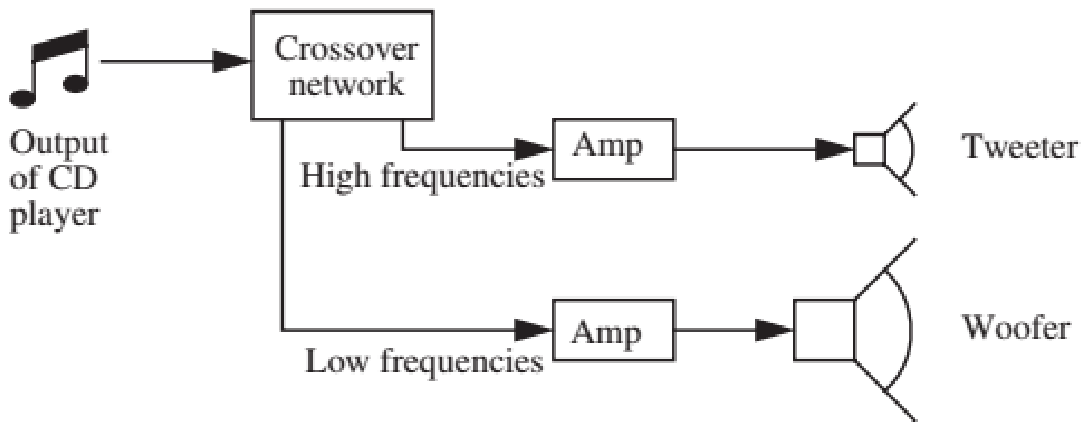
简单滤波器例子





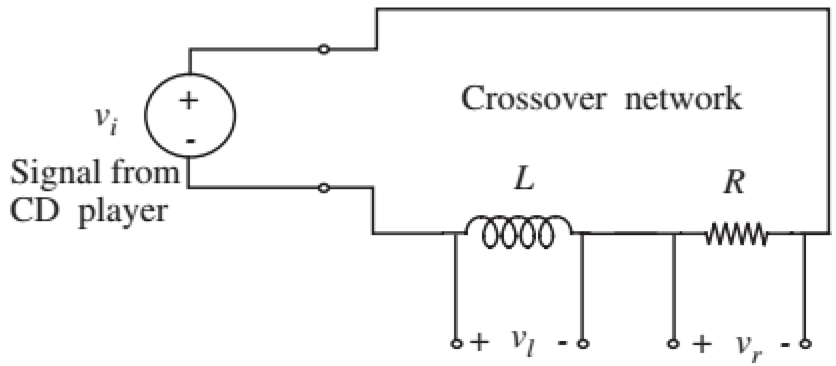
频率选择性与RC关系？

滤波器设计例子


Crossover network
Output of CD player
Amp
Amp
High frequencies
Low frequencies
Tweeter
Woofer

电路稳态分析

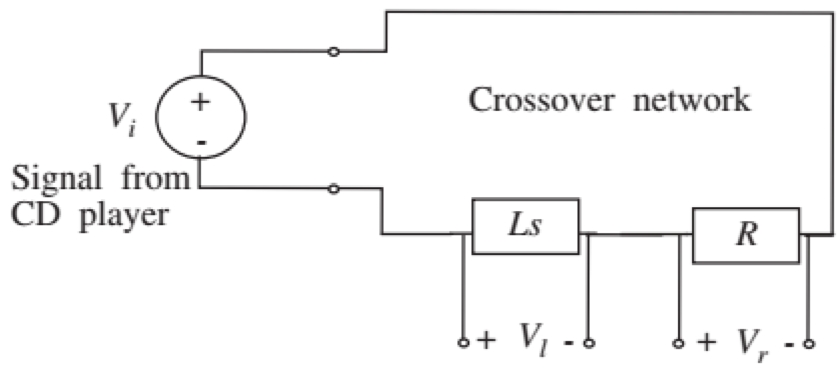
滤波器设计例子



分析该电路特点

电路稳态分析

滤波器设计例子



电路阻抗模型

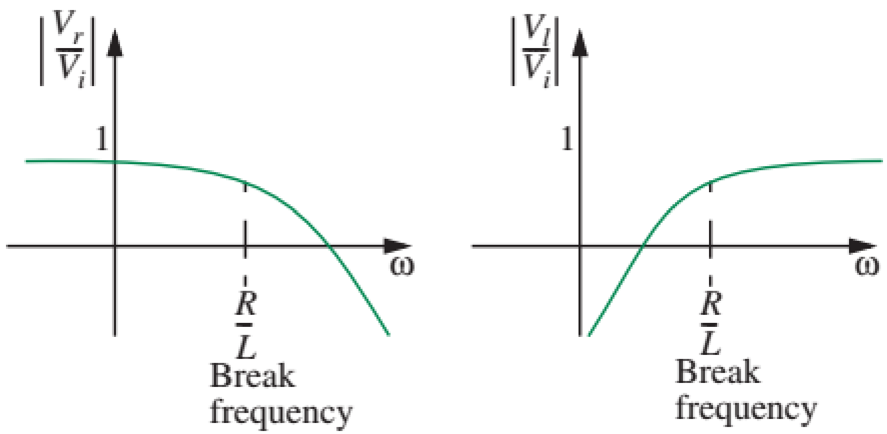
电感输出 $$\frac{V_l}{V_i}=-\frac{Ls}{Ls+R} \Rightarrow \frac{V_l}{V_i}=-\frac{j\omega L}{j\omega L+R}$$

电阻输出 $$\frac{V_r}{V_i}=-\frac{R}{Ls+R}. \Rightarrow \frac{V_r}{V_i}=-\frac{R}{j\omega L+R}.$$

电路稳态分析

滤波器设计例子

频率响应

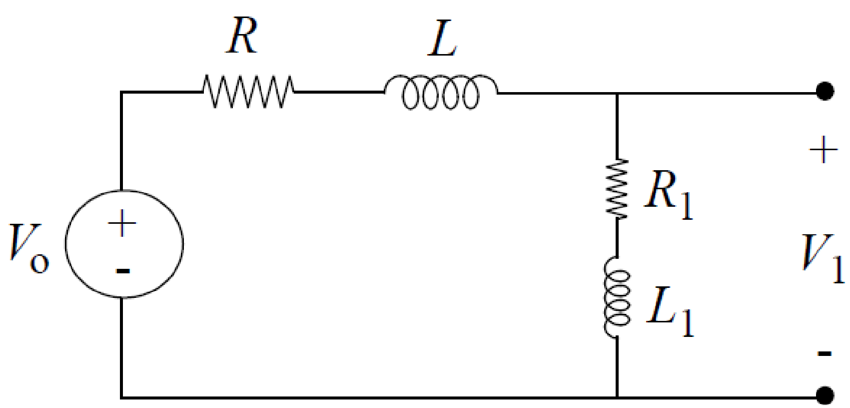


如果选择低音和高音分界频率5KHz，求出电路参数？

主观题 10分

设置

例



$$R_1 = 1k\Omega$$

$$L_1 = 10mH.$$

（1）传递函数

（2）给出R的值使得直流增益为0.1

（3）求L的值，使得高频响应等于直流响应

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答

电路稳态分析

分析

L1

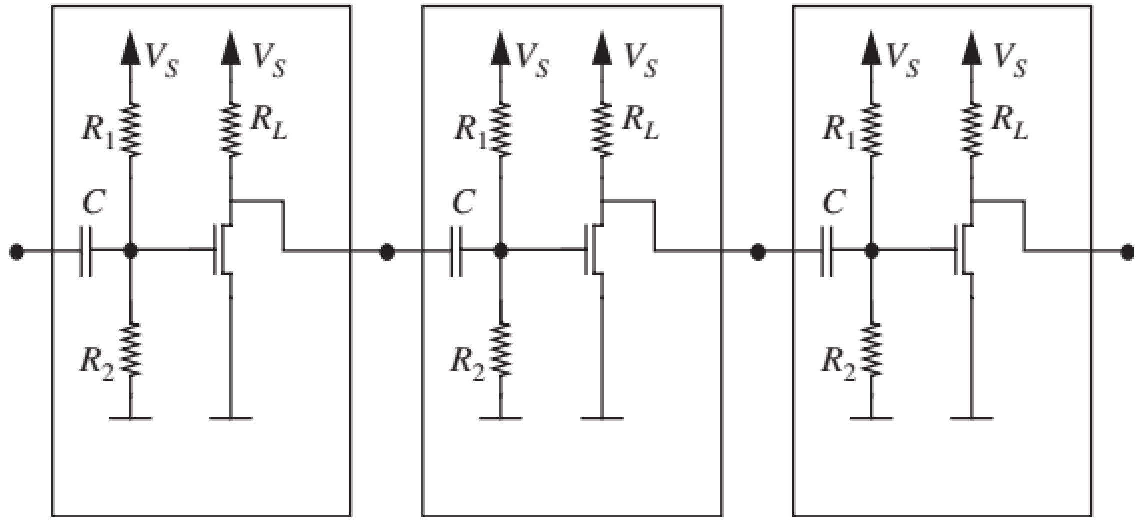
a) $H(j\omega) = \frac{R_1 + j\omega L_s}{(R_1+R)+j\omega(L_1+L)}$

b) $R = 9k\Omega$

c) $L = 90mH$

电路稳态分析

放大器级间解耦



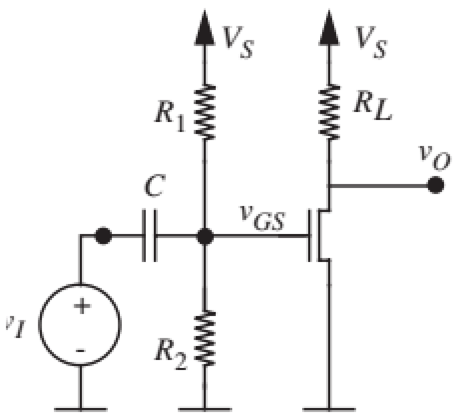
讨论：（1）多级级联放大器？

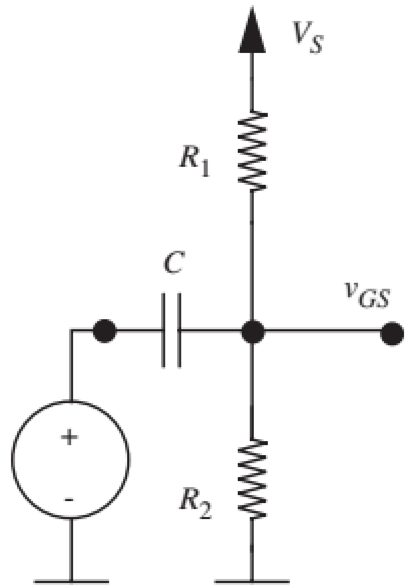
（2）电容作用？（隔直，通交流）

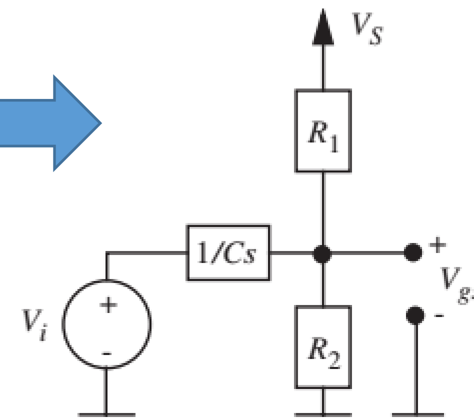
（3）电容对输入信号有什么影响？

电路稳态分析

放大器级间解耦







讨论电容对信号响应的影响

叠加原理（两个源作用）

电路稳态分析

放大器级间解耦

输入信号单独作用

$$V_{gsi} = \frac{R_1 \parallel R_2}{1/Cs + R_1 \parallel R_2} V_i$$

$$= \frac{R_{eq}}{1/Cs + R_{eq}} V_i$$

$$= \frac{R_{eq}Cs}{1 + R_{eq}Cs} V_i$$

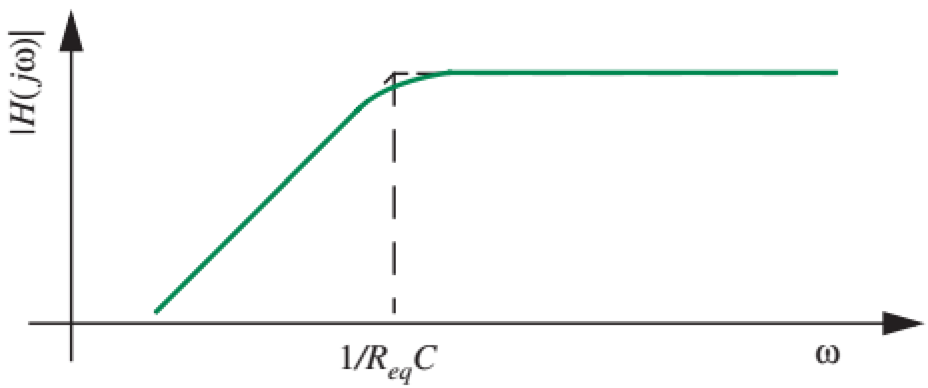
$$R_{eq} = R_1 \parallel R_2.$$

电路稳态分析

放大器级间解耦

输入信号频率响应

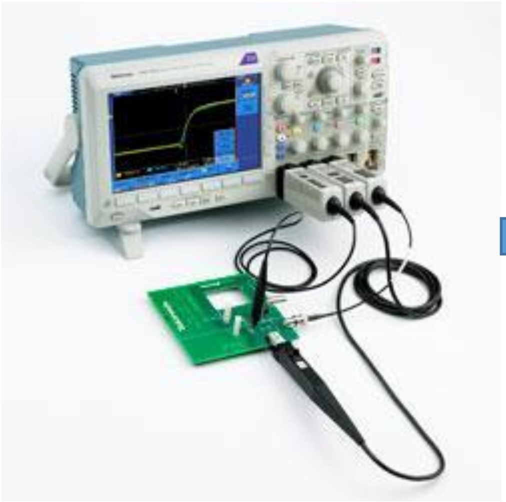
$$H(j\omega) = \frac{V_{gsi}}{V_i} = \frac{R_{eq}Cj\omega}{1 + R_{eq}Cj\omega}.$$

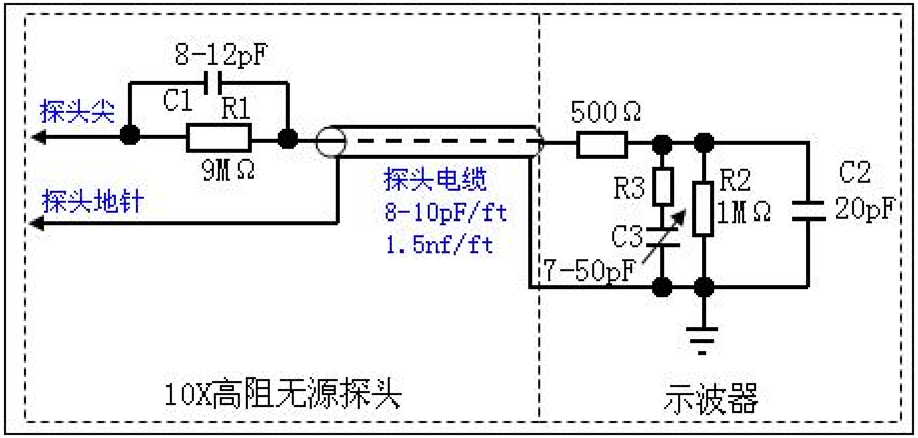


问题：为了有效通过输入信号，如何选取电路参数？工作点的关系？

电路稳态分析

利用分压器例子进行的时域，频域分析比较

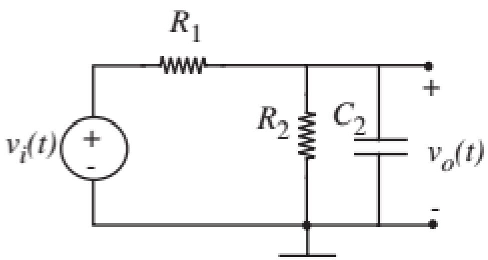


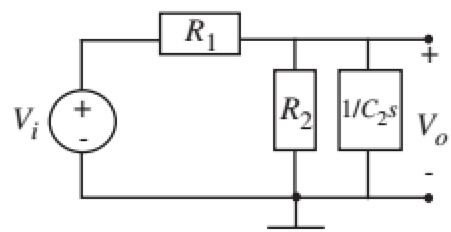


示波器探头一般采用高输入阻抗的分压器取样，高频性能较差（寄生电容的影响）如何补偿？

电路稳态分析

高阻抗分压器



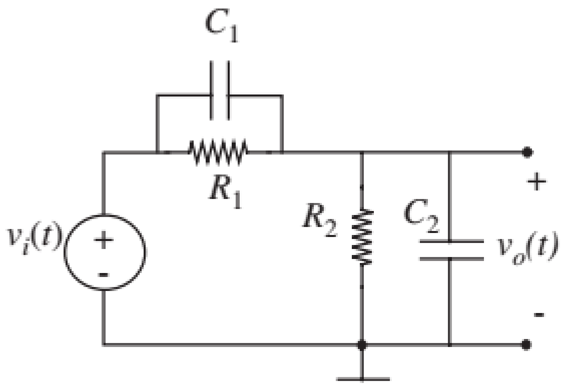


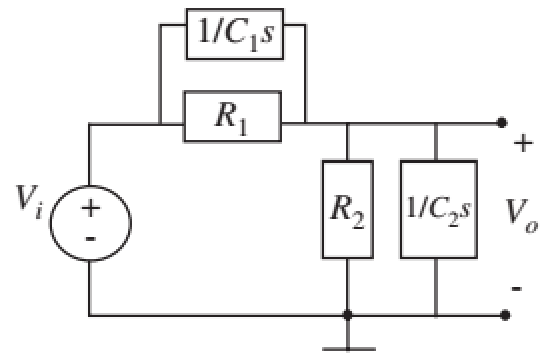
$$V_o = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_1 R_2 C_2 s} V_i.$$

高频时响应 $$V_o \simeq \frac{1}{j\omega R_1 C_2} V_i$$

电路稳态分析

补偿电路





$$V_o = \frac{R_2 \parallel (1/C_2 s)}{R_1 \parallel (1/C_1 s) + R_2 \parallel (1/C_2 s)} V_i,$$

电路稳态分析

电路分析

$$V_o = \frac{R_2(R_1C_1s+1)}{R_1(R_2C_2s+1)+R_2(R_1C_1s+1)}V_i.$$

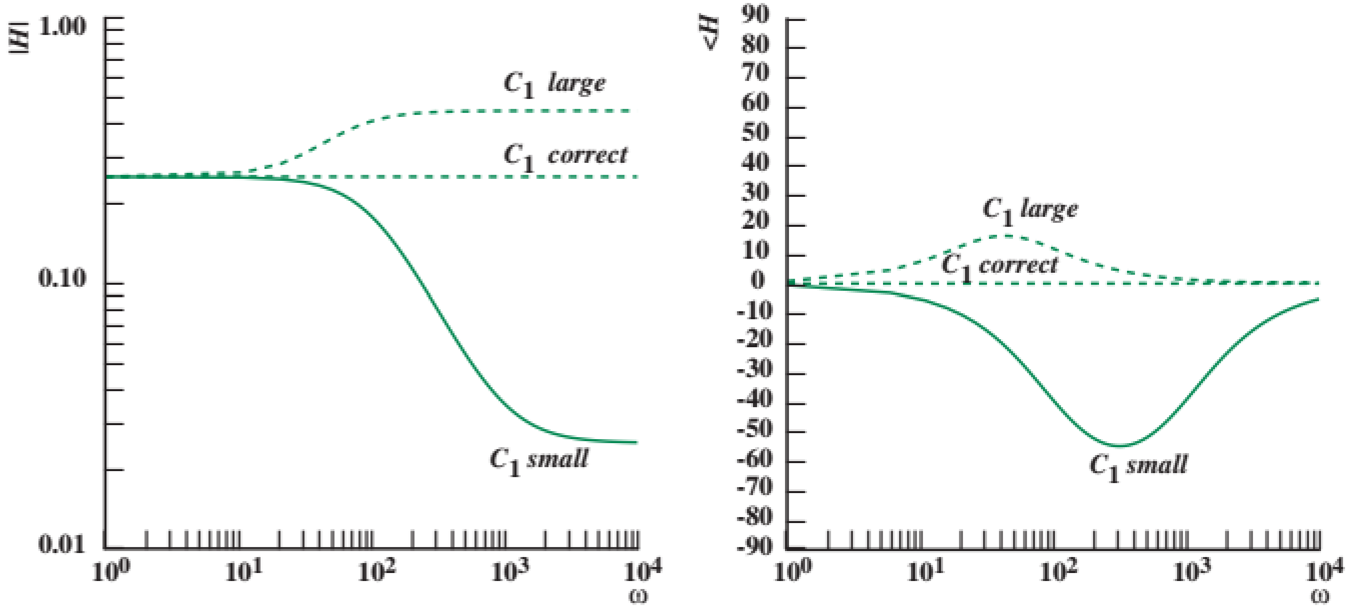
如果 $R_1C_1 = R_2C_2,$

$$\Downarrow$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1+R_2}V_i$$

电路稳态分析

电路补偿效果



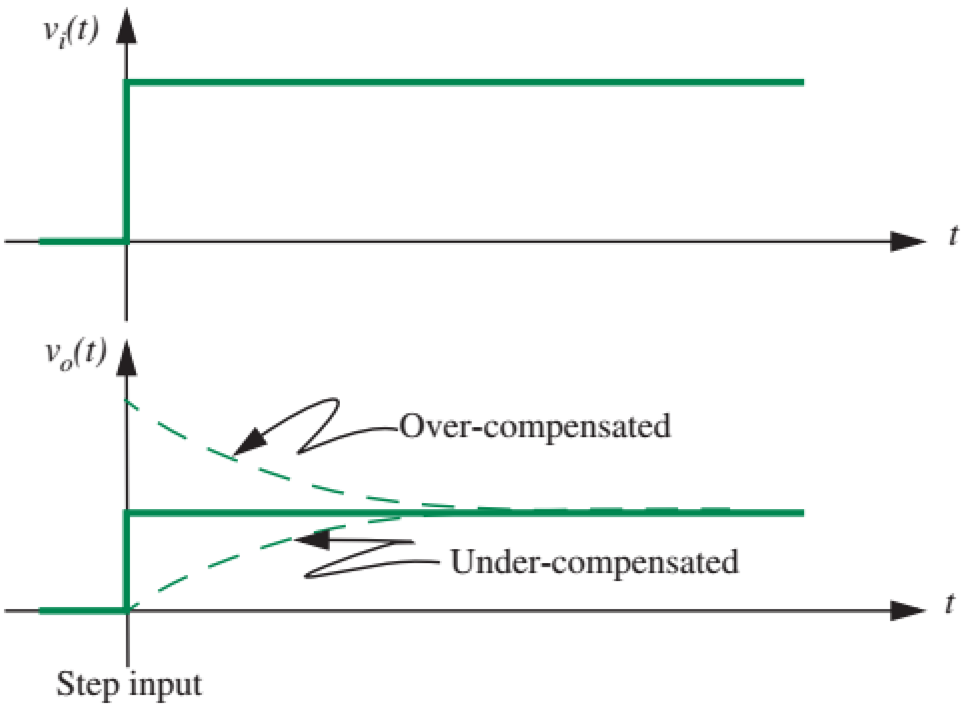
在不同情况下，输入阶跃信号，输出时域波形？

~~方波信号，输出时域波形？~~

电路稳态分析

电路补偿效果（时域）

输入阶跃信号

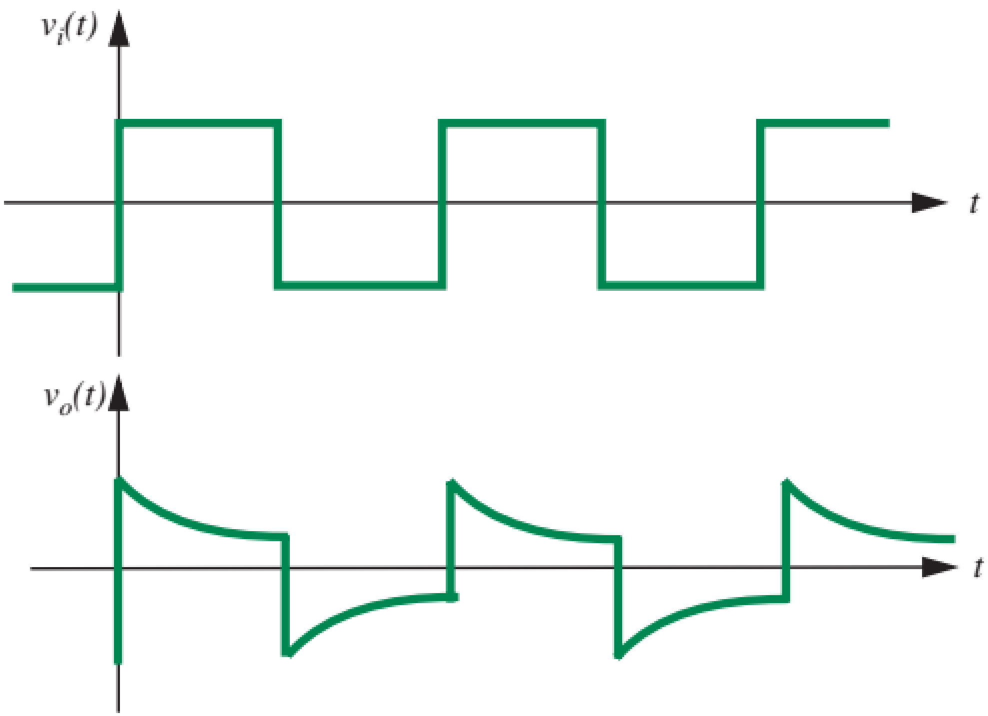


正确补偿后，类似电阻电路，无暂态响应

电路稳态分析

电路补偿效果

输入方波信号



Square-wave input, over-compensated case

怎样从
频域分
析解释？

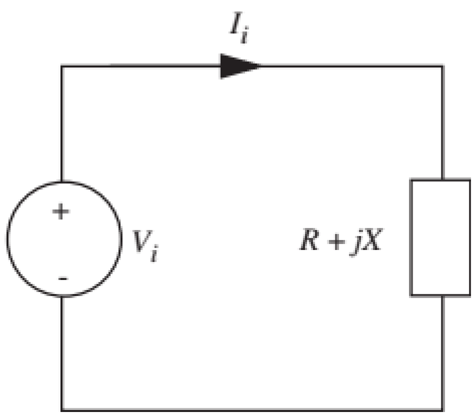
电路稳态分析

讨论

怎样在实验中，调整补偿电容的大小？

电路稳态分析

阻抗中的功率和能量



$$v_i(t) = |V_i|\cos(\omega t + \phi).$$

复幅值表示

$$V_i = |V_i|e^{j\phi}$$

$$I_i = \frac{V_i}{Z} = \frac{|V_i|e^{j\phi}}{R + jX}$$

$$= \frac{|V_i|e^{j(\phi-\theta)}}{\sqrt{R^2 + X^2}}$$

$$= |I_i|e^{j(\phi-\theta)}.$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{X}{R}.$$

电路稳态分析

瞬时功率

$$p(t) = vi = \frac{|Vi|^2}{\sqrt{R^2+X^2}}[\cos(\omega t+\phi)][\cos(\omega t+\phi-\theta)]$$

$$= \frac{1}{2}\frac{|V_i|^2}{\sqrt{R^2+X^2}}[\cos(2\omega t+2\phi-\theta)+\cos\theta].$$

平均功率

$$\overline{p} = \frac{1}{2}\frac{|V_i|^2}{\sqrt{R^2+X^2}}\cos\theta.$$

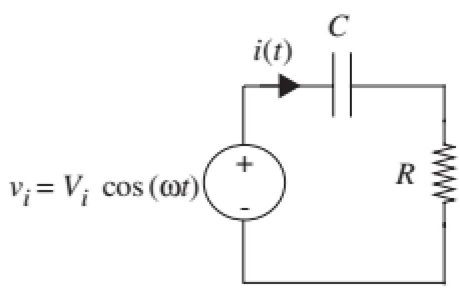
$$\boxed{\overline{p} = \frac{1}{2}|V_i \parallel I_i|\cos\theta}$$

sbhe@uestc.edu.cn

电路稳态分析

讨论

纯电抗是否消耗功率？能量是如何转换的？



该电路在转折频率（时间常数）处电路消耗功率是？

电路稳态分析

本章关键词：

微分方程转换为代数方程， 复数阻抗

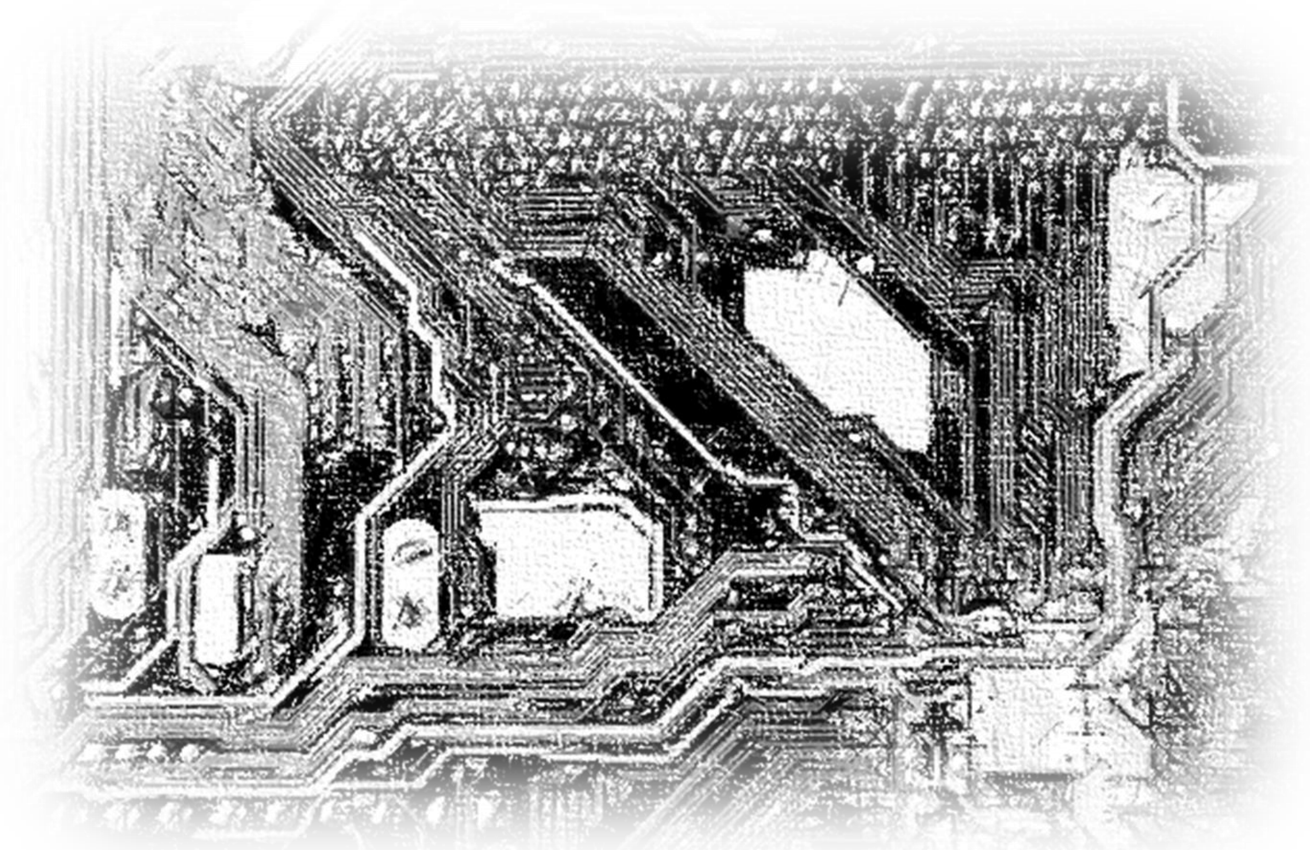
稳态解（强制响应），频率选择，频率响应（幅度和相位）

波特图，传递函数

- 练习13.6，13.9 ，13.11，13.16（P519)

- 问题13.1, 13.3，13.6（P523)

建议小组讨论解决：问题13.5，13.2



何松柏

电子工程学院

谢谢！