

第九章

信号处理与信号产生电路

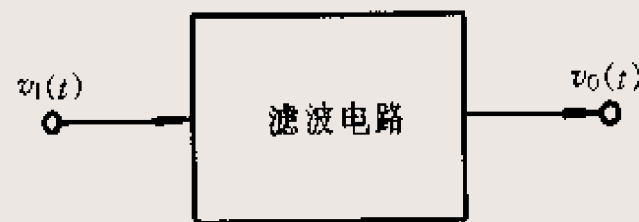
2010年6月11日

§ 9-1 滤波电路的基本概念

- ❖ 滤波器是一种能使有用频率信号通过、抑制或衰减无用频率信号的电子装置。常用来作信号处理、数据传送和抑制干扰等。
- ❖ 滤波电路主要采用无源元件 R 、 L 和 C 组成，随着集成运放的迅速发展，由集成运放和 R 、 C 组成的有源滤波电路成为主流。
- ❖ 集成运放的开环电压增益和输入阻抗均很高，输出阻抗很低，构成有源滤波电路后还具有一定的电压放大和缓冲作用，可不使用电感。
- ❖ 集成运放的带宽有限，有源滤波电路的工作频率难以做得很高。

基本概念及初步定义

- ❖ 滤波电路的一般结构如图所示。 $v_i(t)$ 表示输入信号, $v_o(t)$ 为输出信号。
- ❖ 假设滤波电路是一个线性时不变网络, 则在复频域内有



$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}$$

- ❖ $A(s)$ 是滤波电路的电压传递函数, 为复数。对于实际频率来说, $s=j\omega$, 则有

$$A(j\omega) = |A(j\omega)|e^{j\varphi(\omega)}$$

传递函
数的模

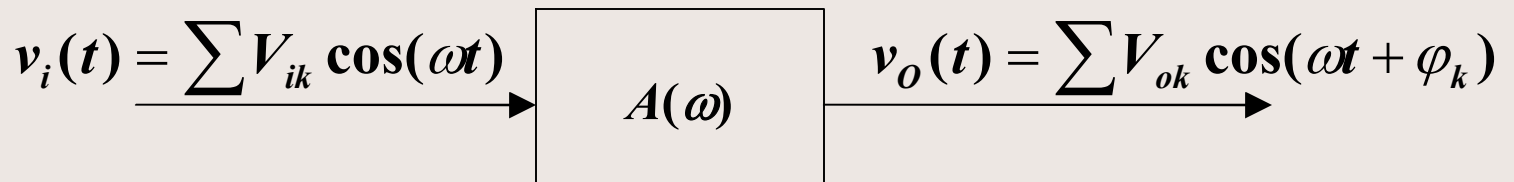
相位角

时延响应

- ❖ 在滤波电路中所关心的另一个量是时延 $\tau(\omega)$ ，它定义为

$$\tau(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} (s)$$

- ❖ 通常用幅频响应来表征一个滤波电路的特性，欲使信号通过滤波器的失真小，相位和时延响应亦需考虑。当相位响应 $\varphi(\omega)$ 作线性变化，即时延响应 $\tau(\omega)$ 为常数时，输出信号才可能避免失真。

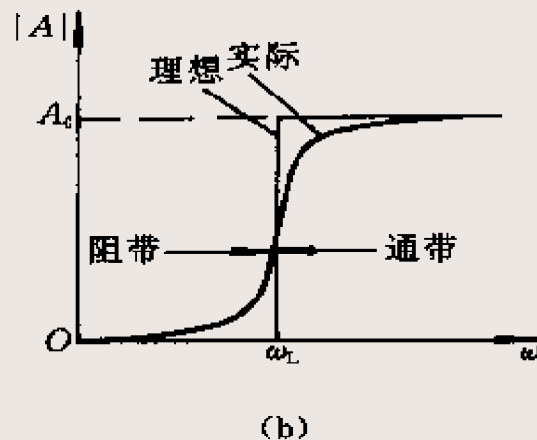
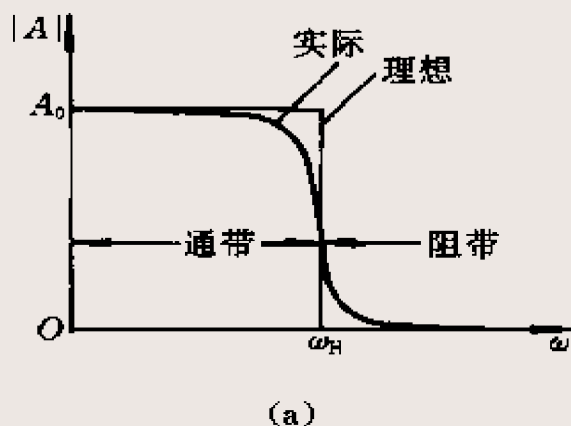


有源滤波电路的分类

- ❖ 对于幅频响应，通常把能够通过的信号频率范围定义为通带，而把受阻或衰减的信号频率范围称为阻带，通带和阻带的界限频率叫做截止频率。
- ❖ 理想滤波电路在通带内应具有零衰减的幅频响应和线性的相位响应，而在阻带内应具有无限大的幅度衰减($|A(j\omega)|=0$)。

低通和高通滤波电路

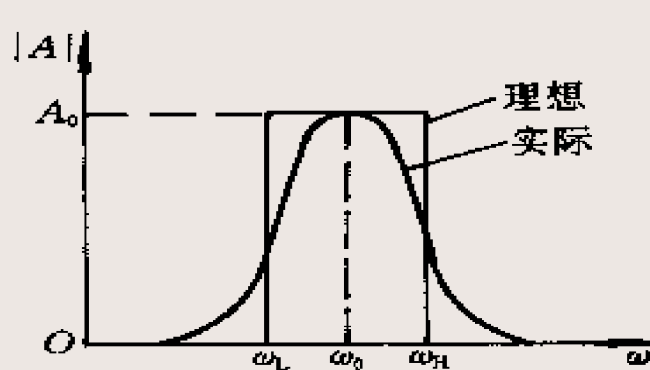
- ❖ 低通滤波电路幅频响应如图a所示，图中 A_0 表示低频增益， $|A|$ 为增益的幅值。它的功能是通过从零到某一截止角频率 ω_H 的低频信号，而对大于 ω_H 的所有频率则完全衰减，其带宽 $BW=\omega_H$ 。
- ❖ 高通滤波电路幅频响应如图b所示。在 $0 < \omega < \omega_L$ 范围内的频率为阻带，高于 ω_L 的频率为通带。它的带宽 $BW=\infty$ ，但实际上由于受有源器件带宽的限制，高通滤波电路的带宽也是有限的。



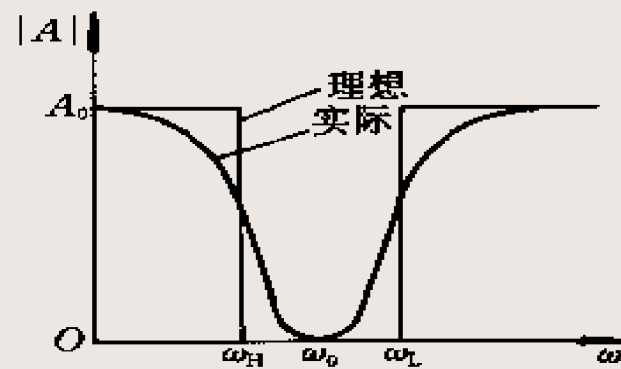
带通滤波和带阻滤波电路

- ❖ 带通滤波电路幅频响应： ω_L 为低边截止角频率， ω_H 为高边截止角频率， ω_0 为中心角频率。它有两个阻带： $0 < \omega < \omega_L$ 和 $\omega > \omega_H$ ，带宽 $BW = \omega_H - \omega_L$ ，如图c所示。
- ❖ 带阻滤波电路幅频响应：它有两个通带： $0 < \omega < \omega_H$ 和 $\omega > \omega_L$ ；一个阻带： $\omega_H < \omega < \omega_L$ 。它的功能是衰减 ω_L 到 ω_H 间的信号。同高通滤波电路相似，由于受有源器件带宽的限制，通带 $\omega > \omega_L$ 是有限的。如图d所示。
- ❖ 带阻滤波电路抑制频带中点所在角频率 ω_0 叫中心角频率。
- ❖ 全通滤波电路没有阻带，它的通带是从零到无穷大，但相移的大小随频率改变。如图e所示。

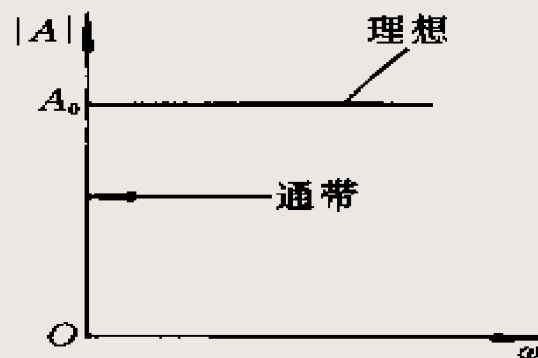
带通滤波和带阻滤波电路



(c)



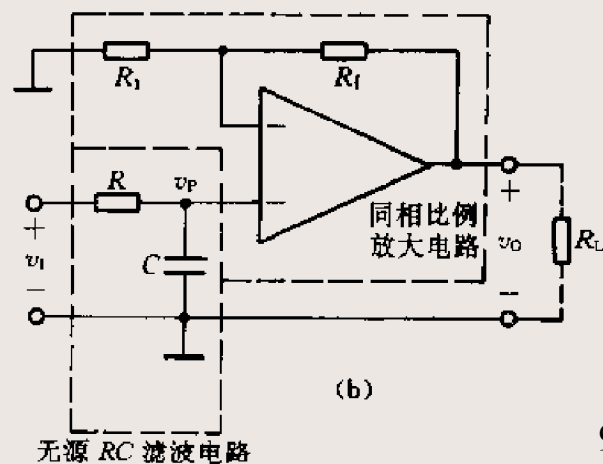
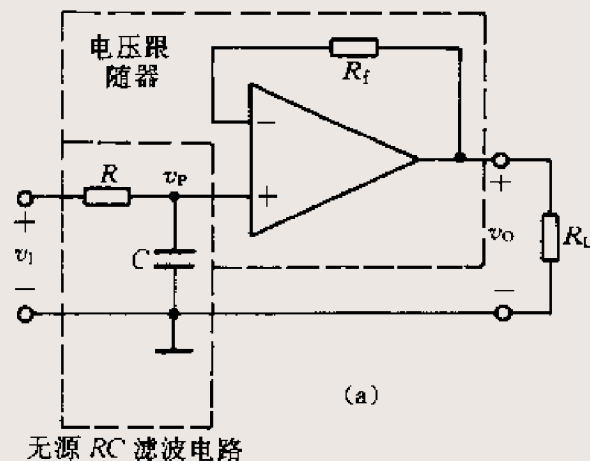
(d)



(e)

一阶有源滤波电路

- ❖ 如果在一级RC低通电路的输出端再加上一个电压跟随器，使之与负载很好地隔离开来，就构成了一个一阶有源低通滤波电路。
- ❖ 由于电压跟随器的输入阻抗很高、输出阻抗很低，因此，其带负载能力很强。
- ❖ 如果希望电路不仅有滤波功能，而且能起放大作用，则只要将电路中的电压跟随器改为同相比例放大电路即可。



一阶有源滤波电路传递函数

- ❖ 由图a知，低通滤波电路的通带电压增益 A_0 是 $\omega=0$ 时输出电压 v_o 与输入电压 v_i 之比，对于图b来说，通带电压增益 A_0 等于同相比例放大电路的电压增益 A_{VF} ，即

$$A_0 = A_{VF} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$V_P(s) = \frac{1}{1 + sRC} V_i(s)$$

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{V_P(s)}{V_i(s)} \cdot \frac{V_o(s)}{V_P(s)} = A_{VF} \frac{1}{1 + \frac{s}{\omega_n}} = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_n}}$$

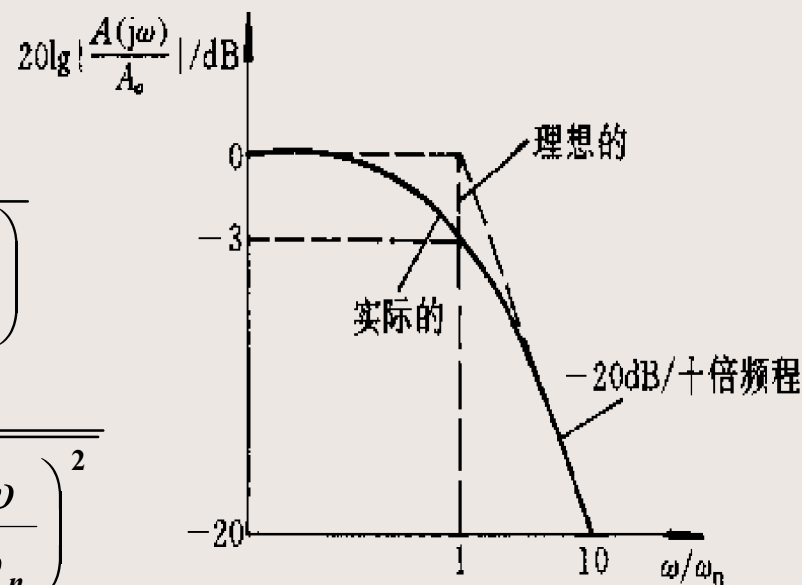
$\omega_n = 1/(RC)$ ，称为特征角频率

一阶有源滤波电路幅频响应

- ❖ 对于频率来说，用 $s=j\omega$ 代入，可得

$$A(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{A_0}{1 + j\left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)}$$

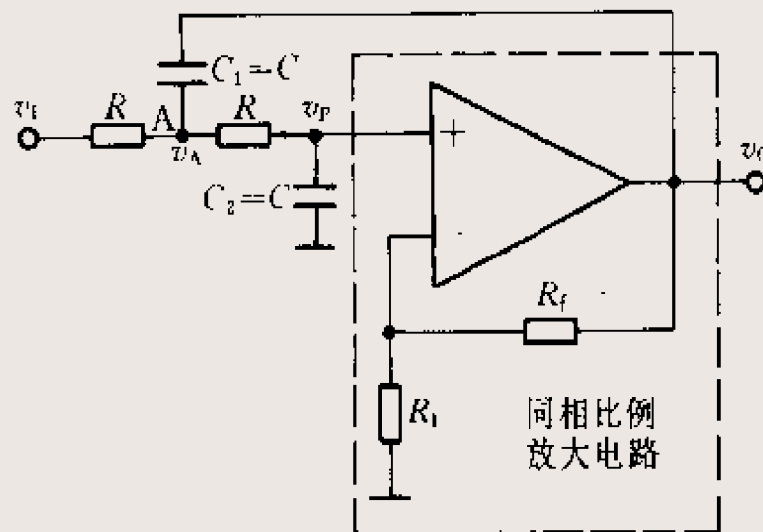
$$|A(j\omega)| = \frac{|V_o(j\omega)|}{|V_i(j\omega)|} = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$



- ❖ 一阶滤波器的衰减率只是20dB/十倍频程。若要求响应曲线以-40或-60dB/十倍频程的斜率变化，需采用二阶、三阶或更高阶次的滤波电路。

二阶有源滤波电路

- ❖ 二阶压控电压源低通滤波电路由两级RC滤波电路和同相比例放大电路组成，同相比例放大电路实际上就是所谓的压控电压源。其特点是，输入阻抗高，输出阻抗低。



- ❖ 同相比例放大电路的电压增益就是低通滤波器的通带电压增益：

$$A_0 = A_{VF} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

二阶有源滤波电路传递函数

考虑到集成运放的同相输入端电压为：

$$V_P(s) = V_N(s) = \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_O(s) = \frac{V_O(s)}{A_{VF}} \quad V_P(s) = \frac{V_A(s)}{1 + sRC}$$

$$\frac{V_i(s) - V_A(s)}{R} - \frac{V_A(s) - V_O(s)}{1/sC} - \frac{V_A(s) - V_P(s)}{R} = 0$$

$$A(s) = \frac{V_O(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{VF}}{1 + (3 - A_{VF})sCR + (sCR)^2}$$

$$\omega_n = \frac{1}{RC} \quad Q = \frac{1}{3 - A_{VF}}$$

$$A(s) = \frac{A_{VF}\omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2} = \frac{A_0\omega_n^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q}s + \omega_n^2}$$

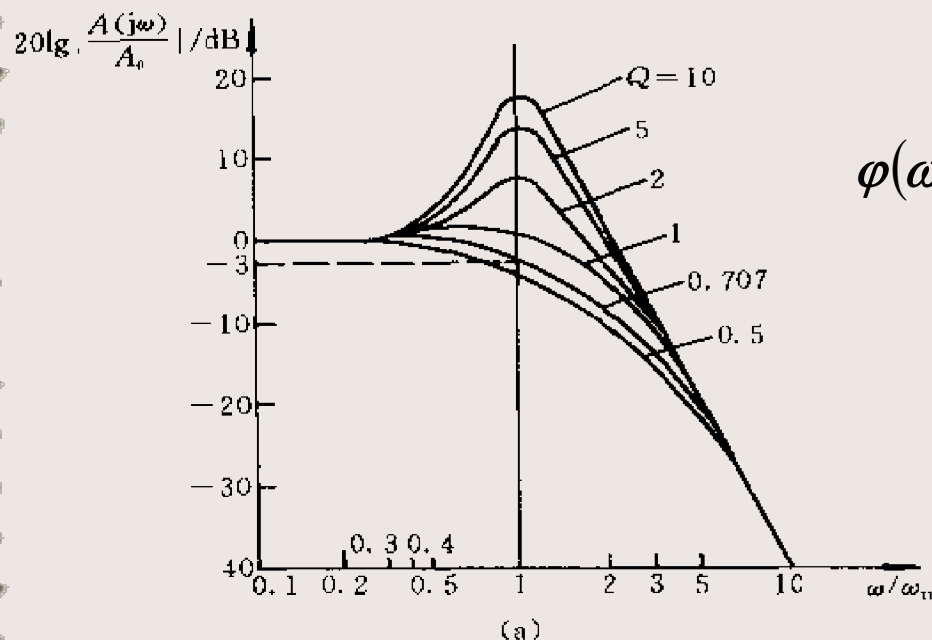
ω_n 为特征角频率， Q 为等效品质因数。

$A_0 = A_{VF} < 3$ ，能稳定工作。
 $A_0 = A_{VF} \geq 3$ 时， $A(s)$ 将有极点处于右半 f 平面或虚轴上，电路将自激振荡。

二阶有源滤波电路幅频响应

用 $s=j\omega$ 代入，可得幅频响应和相频响应表达式，分别为：

$$20\lg\left|\frac{A(j\omega)}{A_0}\right| = 20\lg \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_n Q}\right)^2}}$$



$$\varphi(\omega) = -\arg \lg \frac{\frac{\omega}{\omega_n Q}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}$$

说明

- ❖ 当 $Q=0.707$ 时，幅频响应较平坦；
当 $Q>0.707$ 时，将出现峰值；
当 $Q=0.707$ 和 $\omega/\omega_n=1$ 情况下， $20\lg|A(j\omega)/A_0|=3\text{dB}$ ；
当 $\omega/\omega_n=10$ 时， $20\lg|A(j\omega)/A_0|=-40\text{ dB}$ 。
- ❖ 表明二阶比一阶低通滤波电路的滤波效果好得多。
- ❖ 进一步增加滤波电路阶数，其幅频响应就更接近理想特性。

二阶压控电压源高通滤波电路

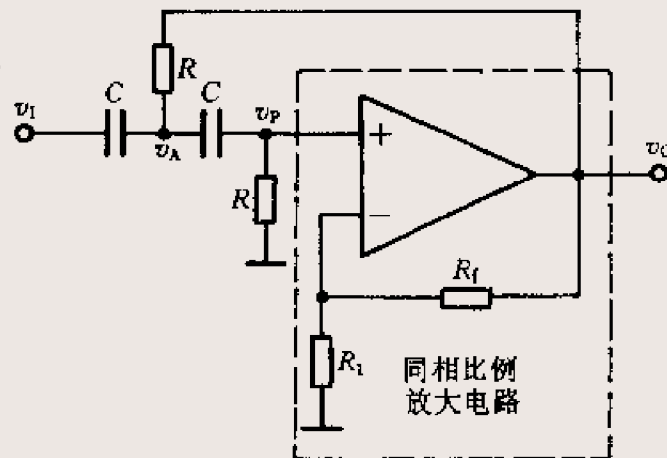
❖ 如果将RC低通电路中的R和C的位置互换，可得到二阶压控电压源高通滤波电路。

❖ 由于二阶高通滤波电路与二阶低通滤波电路在电路结构上存在对偶关系，它们的传递函数和幅频响应也存在对偶关系。

❖ 在理想情况下，高通滤波电路的通带电压增益可认为是 $\omega \rightarrow \infty$ 时的输出电压 v_o 与输入电压 v_i 之比。

❖ 当 $\omega \rightarrow \infty$ ，电容C可视为短路， $v_i = v_p$ ，即通带电压增益 A_0 等于同相比例放大电路的电压增益 A_{VF} ，因此有

$$A_0 = A_{VF} = 1 + R_f/R_1。$$



传递函数

- ❖ 考虑到高通滤波电路在电路结构、传递函数和幅频响应与低通滤波电路的对偶关系，将二阶低通滤波电路的传递函数表达式中的 sRC 用 $1/(sRC)$ 代替，则可得二阶高通滤波电路的传递函数为：

$$A(s) = \frac{A_{VF}}{1 + (3 - A_{VF}) \frac{1}{sRC} + \left(\frac{1}{sRC} \right)^2}$$

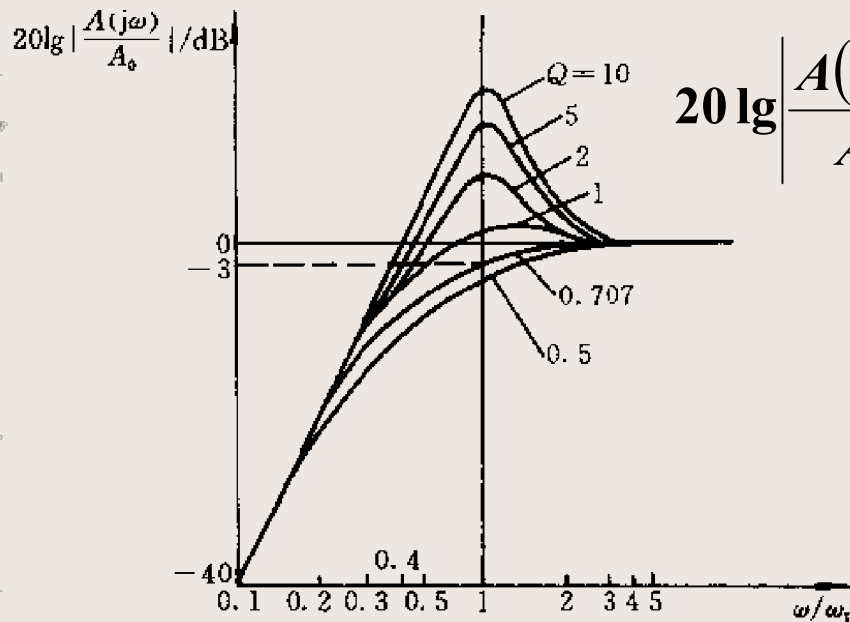
令 $\omega_n = \frac{1}{RC} \quad Q = \frac{1}{3 - A_{VF}}$

$$A(s) = \frac{A_{VF} s^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q} s + \omega_n^2} = \frac{A_0 s^2}{s^2 + \frac{\omega_n}{Q} s + \omega_n^2}$$

幅频响应

用 $s=j\omega$ 代入，可得二阶高通滤波电路幅频响应特征方程为：

$$A(j\omega) = \frac{A_0 \omega^2}{\omega_n^2 - \omega^2 + j \frac{\omega_n \omega}{Q}}$$



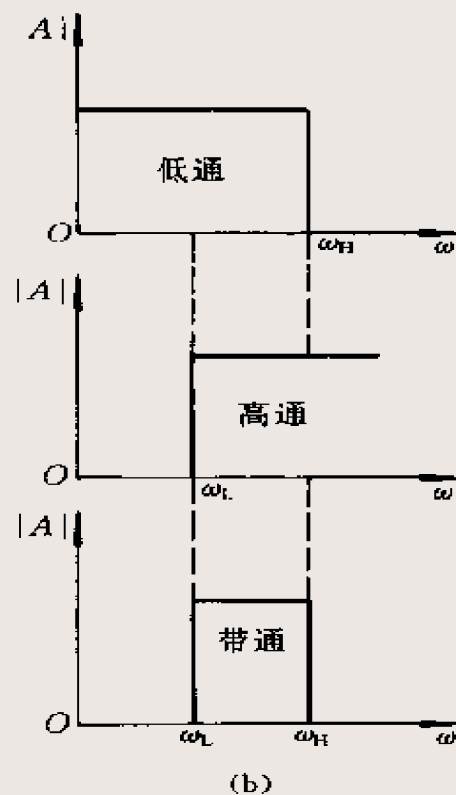
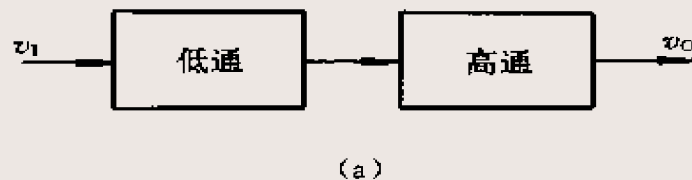
$$20 \lg \left| \frac{A(j\omega)}{A_0} \right| = 20 \lg \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{\omega_n}{\omega} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left(\frac{\omega_n}{\omega Q} \right)^2}}$$

说明

- ❖ 二阶高通滤波电路和低通滤波电路的幅频特性具有对偶(镜像)关系。
- ❖ 当 $\omega < \omega_n$ 时，二阶高通滤波电路的 $20\lg|A(j\omega)/A_0|$ 随 ω 升高而增大，而当 $\omega > \omega_n$ 时，二阶低通滤波电路的 $20\lg|A(j\omega)/A_0|$ 随着 ω 升高而减小。
- ❖ 二阶高通滤波电路在 $\omega \ll \omega_n$ 时，其幅频响应以40dB/十倍频程的斜率上升。
- ❖ 只有当 $A_0 = A_{VF} < 3$ 时，电路才能稳定地工作。

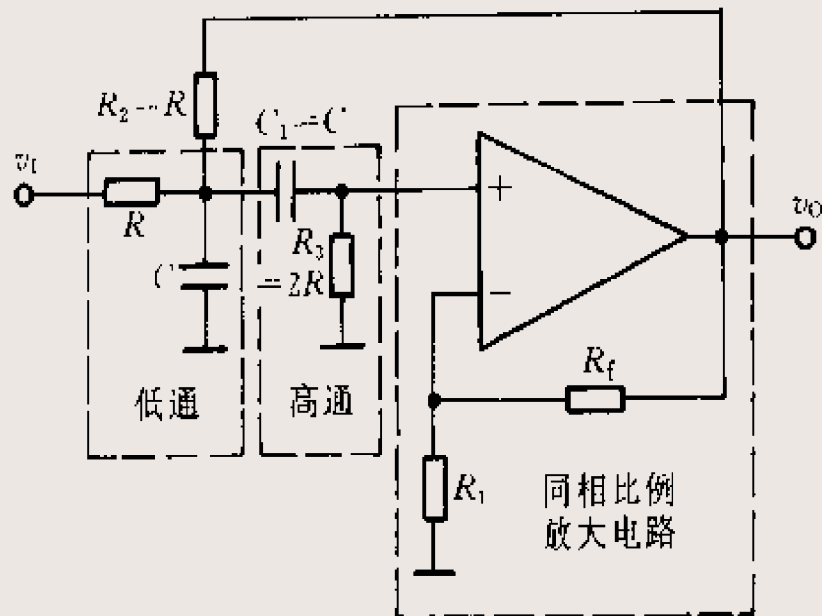
二阶压控电压源带通滤波电路

- ❖ 构成带通滤波电路的条件是低通滤波电路的截止角频率 ω_H 大于高通滤波电路的截止角频率 ω_L ，两者覆盖的通带就提供了一个带通响应。



带通滤波电路传递函数

- ❖ 二阶压控电压源带通滤波电路如图， R 、 C 组成低通网络， C_1 、 R_3 组成高通网络，两者串联组成了带通滤波电路。
- ❖ 设 $R_2=R$ ， $R_3=2R$ ，则由KCL列出方程，可导出带通滤波电路的传递函数为：



$$A(s) = \frac{A_{VF} CR}{1 + (3 - A_{VF})sCR + (sCR)^2}$$

带通滤波电路频率响应

令

$$A_0 = \frac{A_{VF}}{3 - A_{VF}}$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{VF}}$$

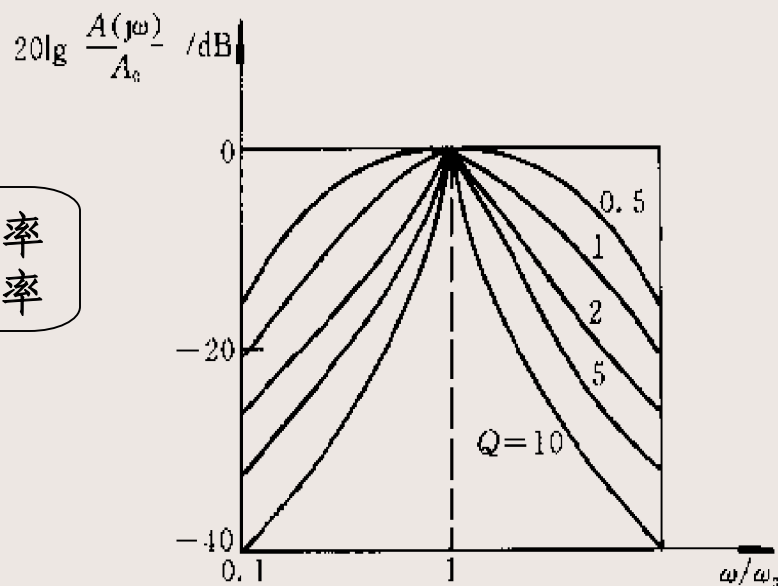
$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

特征角频率
中心角频率

$$A(s) = \frac{A_0 \frac{s}{Q \omega_0}}{1 + \frac{s}{Q \omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

令 $s = j\omega$

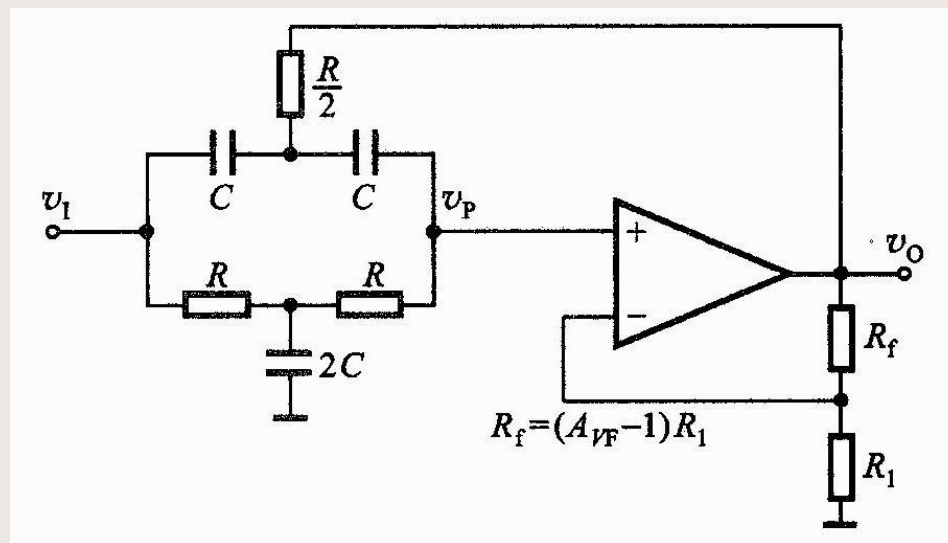
$$A(j\omega) = \frac{A_0 \frac{1}{Q} \frac{j\omega}{\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j \frac{\omega}{Q \omega_0}} = \frac{A_0}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$



当 $\omega = \omega_0$ 时，电路具有最大电压增益。

带阻滤波电路

- ❖ 与带通滤波电路相反，带阻滤波电路是用来抑制或衰减某一频段的信号，而让该频段以外的信号通过。这种滤波电路叫陷波电路，经常用于电子系统抗干扰。
- ❖ 如果从输入信号中减去带通滤波电路处理过的信号，就可得到带阻信号，这是实现带阻滤波的思路之一。
- ❖ 另一种方案：双T带阻滤波电路。



双T带阻滤波电路

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{VF} [1 + (\frac{s}{\omega_0})^2]}{1 + 2(2 - A_{VF}) \frac{s}{\omega_0} + (\frac{s}{\omega_0})^2}$$

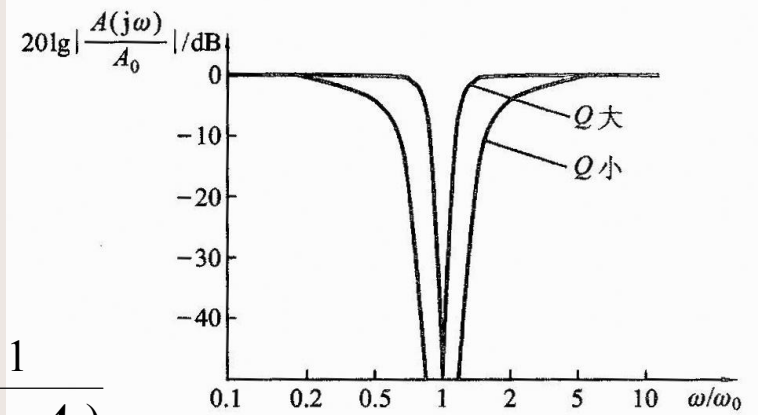
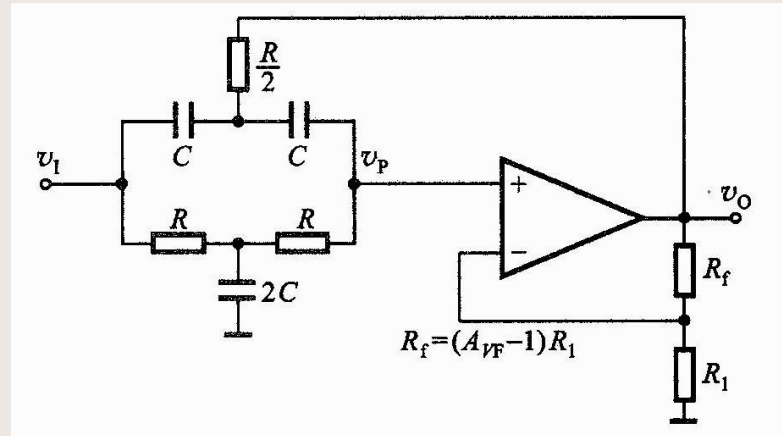
$$A(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{A_{VF} [1 + (\frac{j\omega}{\omega_0})^2]}{1 + 2(2 - A_{VF}) \frac{j\omega}{\omega_0} + (\frac{j\omega}{\omega_0})^2}$$

$$= \frac{A_0 [1 + (\frac{j\omega}{\omega_0})^2]}{1 + \frac{1}{Q} \frac{j\omega}{\omega_0} + (\frac{j\omega}{\omega_0})^2}$$

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$

$$A_{VF} = A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$Q = \frac{1}{2(2 - A_0)}$$



注意！！！！

复习 模电部分讲过的内容

考试时间：6月27日上午9:45-11:20

地点：待定