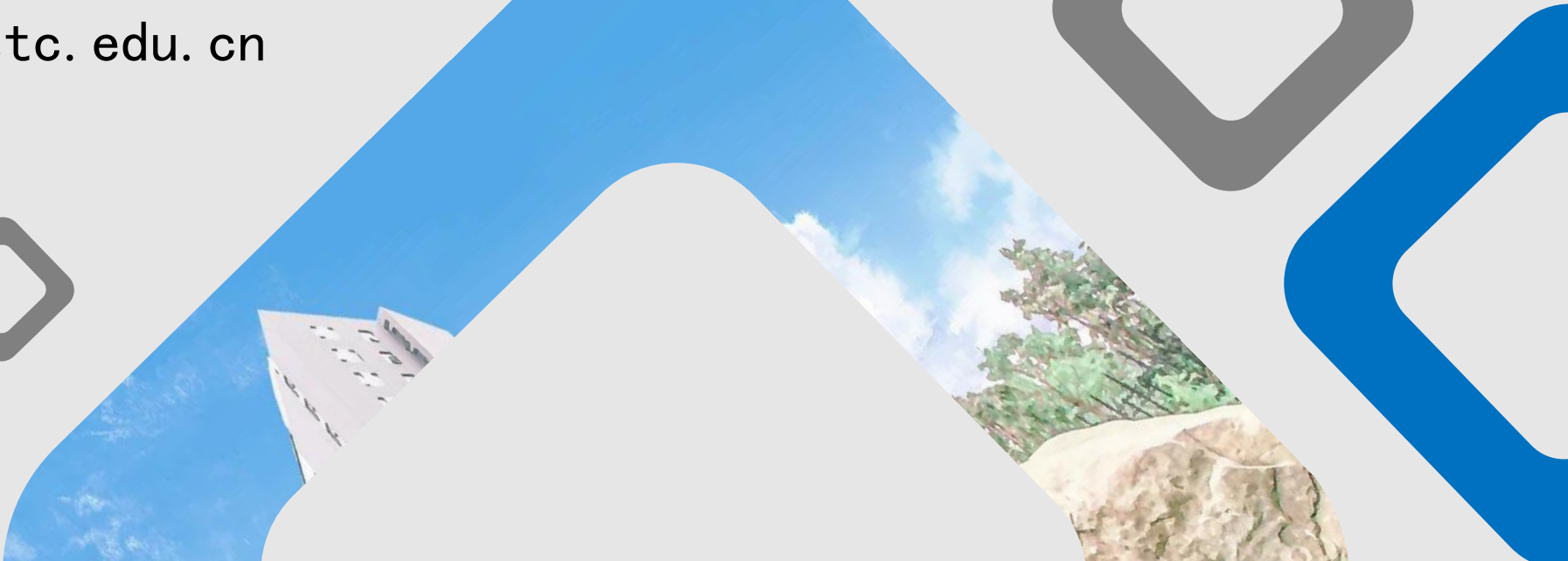




第十章 信号处理 与信号产生电路

梁福田 ftliang@ustc.edu.cn

2025.5.30

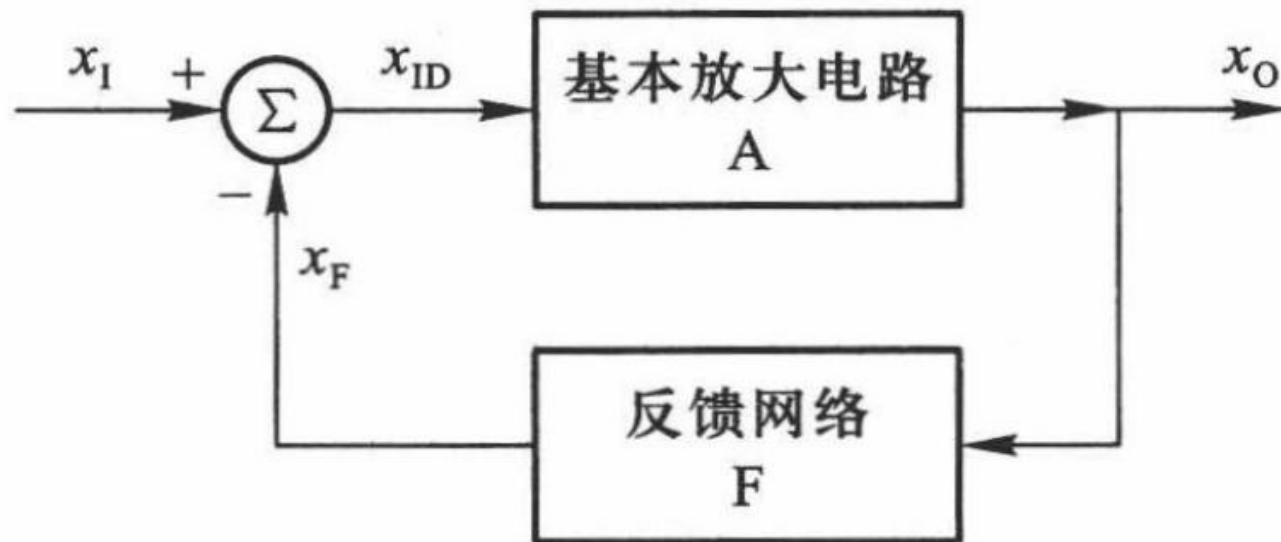
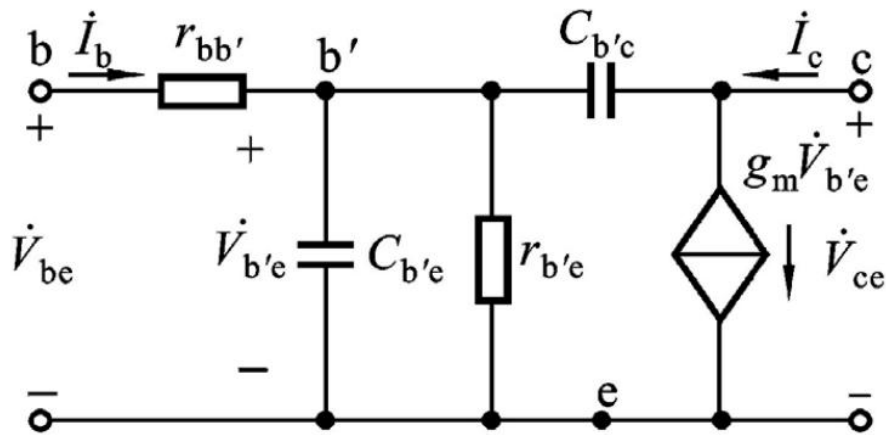




前情提要



- MOSFET、BJT (α , β , $i_e = i_c + i_b$)
 - 小信号模型, 交流通路, 直流通路
- 频率响应, **RC低通/高通电路**
- 运算放大器, 加法器, 比例器
- 集成电路、噪声与干扰
- 反馈放大电路
 - 直流/交流, 正/负, 内/外, 电压/电流, 串联/并联
 - 瞬间极性法
 - 放大电路4种类型, 反馈4种组态
 - 负反馈对放大电路的影响,
 - 反馈深度、环路增益
 - 负反馈稳定条件
 - 自激振荡





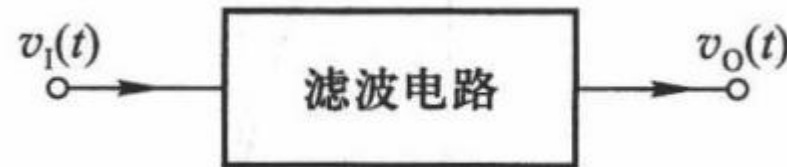
§ 10-1 滤波电路的基本概念与分类



- 滤波器是一种能使有用频率信号通过，同时抑制(或称为衰减)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，随后由集成运放和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。（优势）
- 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。（劣势）



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，则在复领域内有

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

- $A(s)$ 是滤波电路的电压传递函数，一般为复数。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

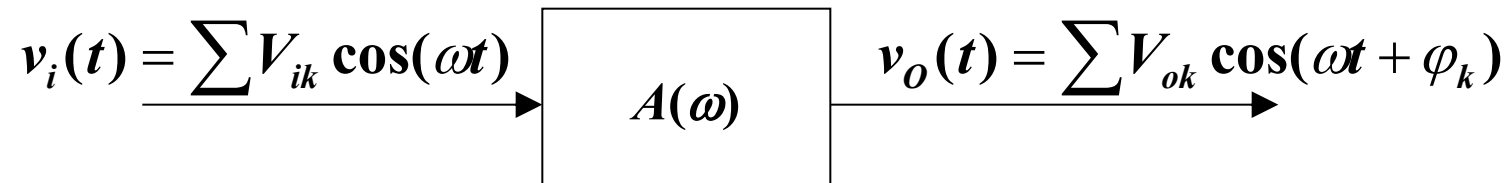
相位角

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

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

- 单位为秒(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，相位和时延响应都需要考虑。
- 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。





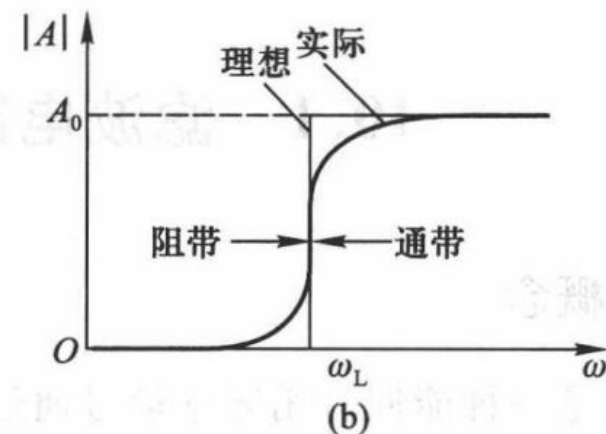
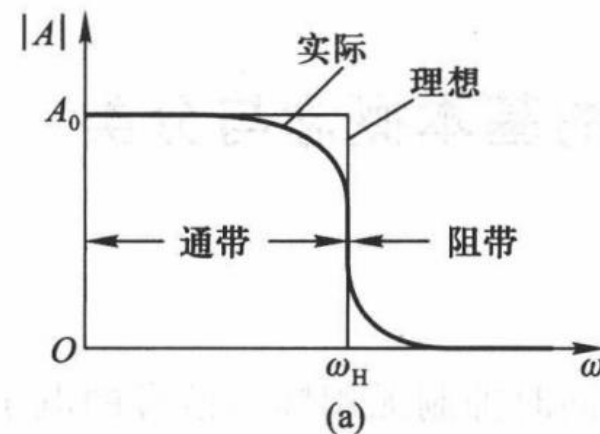
有源滤波电路的分类

- 对于幅频响应，
 - 把能够通过的信号频率范围定义为**通带**，
 - 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，即 ($|A(j\omega)|=0$)



低通和高通滤波电路

- 低通滤波电路幅频响应如图a所示，
 - A_0 表示低频增益， $|A|$ 为增益的幅值。
 - 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。





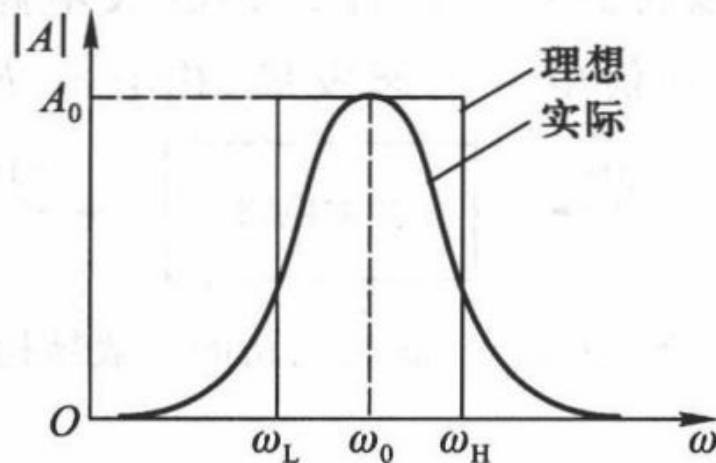
带通滤波和带阻滤波电路

- 带通滤波电路幅频响应:

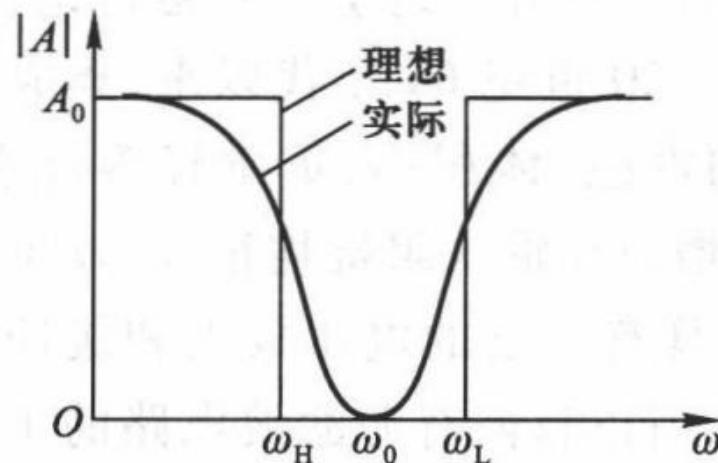
- ω_L 为低边截止角频率, ω_H 为高边截止角频率, ω_0 为中心角频率。
- 有两个阻带: $0 < \omega < \omega_L$ 和 $\omega > \omega_H$, 带宽 $BW = \omega_H - \omega_L$, 如图c所示。

- 带阻滤波电路幅频响应:

- 有两个通带: $0 < \omega < \omega_H$ 和 $\omega > \omega_L$; 一个阻带: $\omega_H < \omega < \omega_L$ 。
- 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。
- 抑制频带中点所在角频率 ω_0 叫中心角频率。



(c)

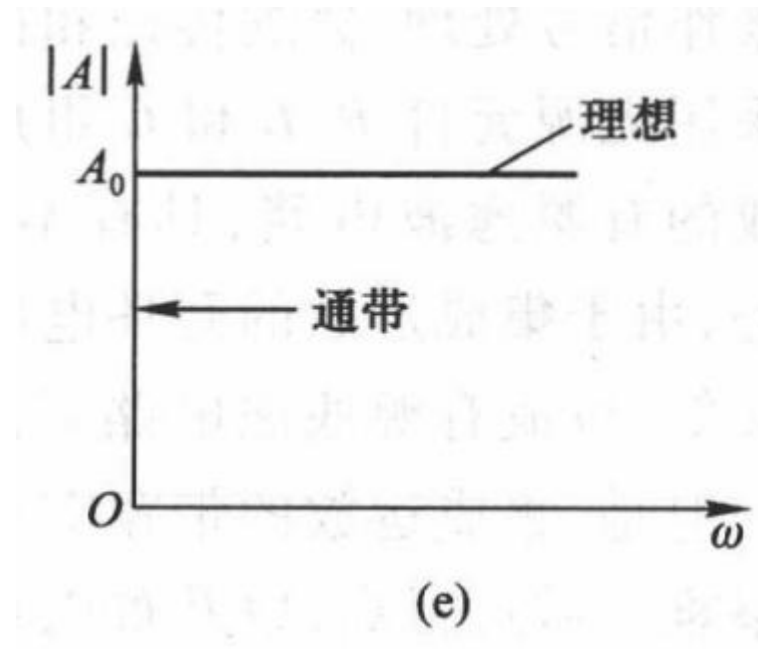


(d)



带通滤波和带阻滤波电路

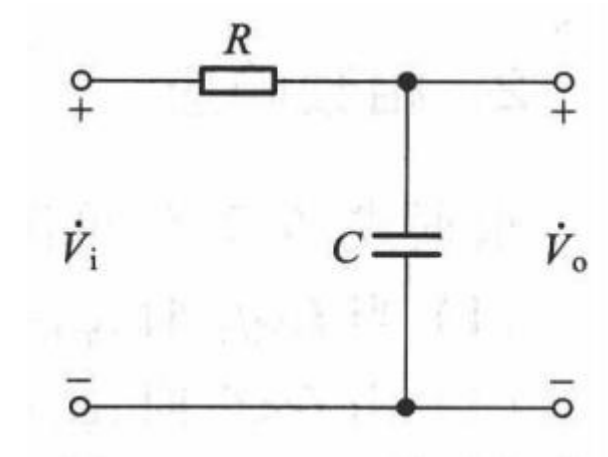
- 全通滤波电路没有阻带，它的通带是从零到无穷大，但相移的大小随频率改变。如图e所示。



频率响应——RC低通电路的频率响应

- 在放大电路的高频区，影响频率响应的主要因素是管子的极间电容和接线电容等，它们在电路中与其他支路是并联的，因此这些电容对高频响应的影响可用RC低通电路来模拟。

$$\begin{aligned}
 A_{VH}(j\omega) &= \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{1/j\omega C_1}{R_1 + 1/j\omega C_1} \\
 &= \frac{1}{1 + j\omega R_1 C_1} \\
 \omega = 2\pi f \quad f_H &= \frac{1}{2\pi R_1 C_1} \\
 A_{VH} &= \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{1}{1 + j(f/f_H)}
 \end{aligned}$$





幅频响应



- 高频区的电压增益的幅值 A_{VH} 和相角 φ_H 分别为

$$A_{VH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \quad \varphi_H = -\arctg(f / f_H)$$

(1) 当 $f \ll f_H$ 时

$$A_{VH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \approx 1 \quad 20 \lg A_{VH} \approx 20 \lg 1 = 0$$

(2) 当 $f \gg f_H$ 时

$$A_{VH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \approx f_H / f \quad 20 \lg A_{VH} \approx 20 \lg f_H / f = -20 \lg f / f_H$$

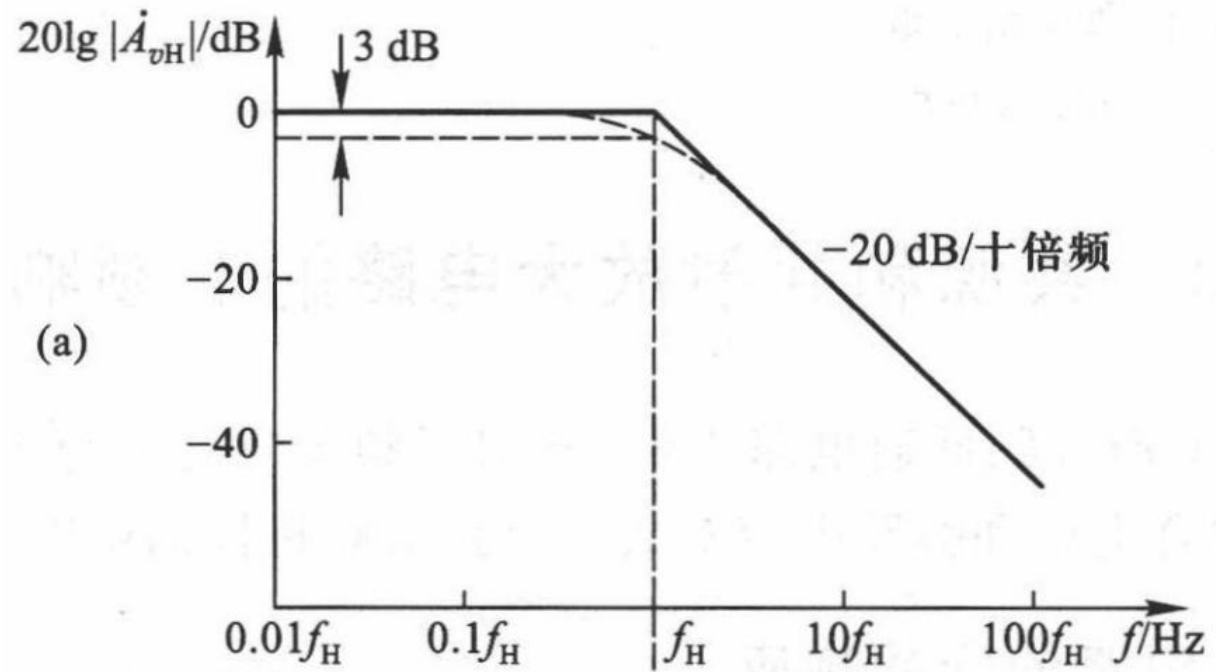
在工程上常用以10为底的对数增益表达，其基本单位为B(贝尔，Bel)，用它的十分之一单位dB(分贝)

。

原本是为功率准备的单位， $10 \lg(P)$ ，此处为电压增益，而电压的平方正比与功率，所以变为 $20 \lg()$

幅频响应

- f_H 对应于两条直线的交点，称为**转折频率**。
- 当 $f=f_H$ 时， $A_{vH}=0.707$ ，即在 f_H 时，电压增益下降到中频值的 0.707 倍，所以 f_H 又是放大电路的上限频率。
- $f_H(\omega_H)$ 是 $A_{vH}(\omega)$ 的极点频率。
- -3dB，功率降低到一半。





相频响应

$$A_{vH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}}$$

$$\varphi_H = -\arctg(f / f_H)$$



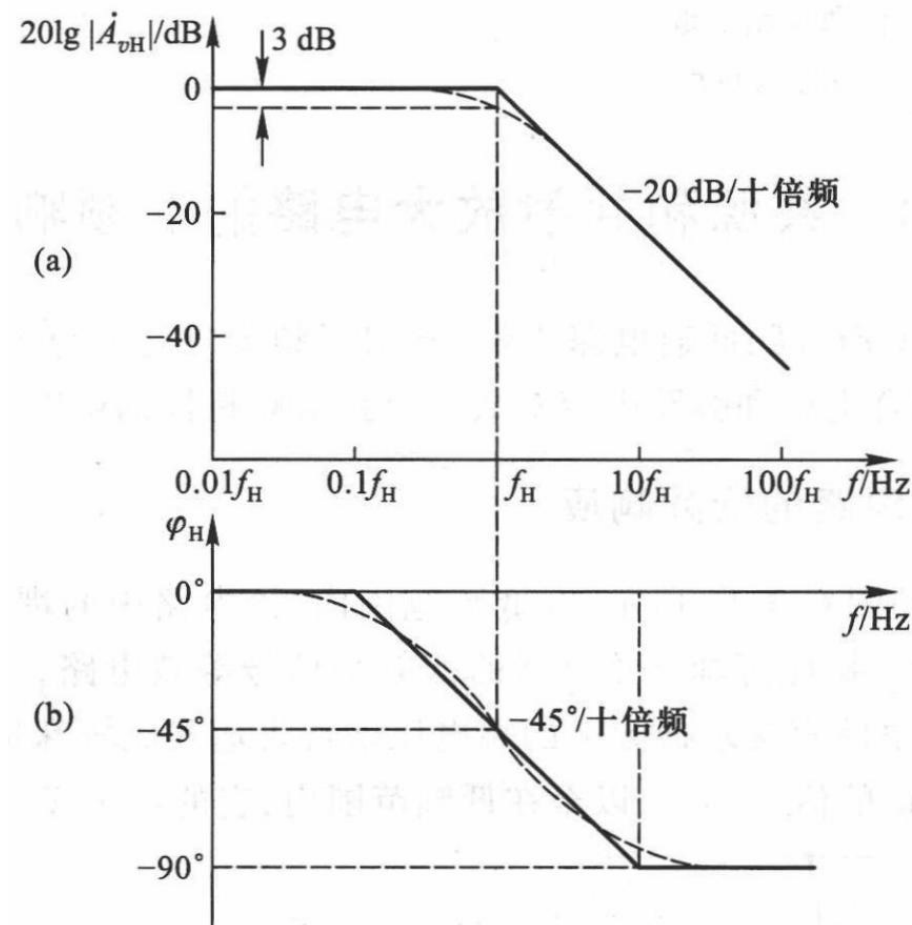
- 可用三条直线来近似描述：

$$f \ll f_H \quad \varphi_H \rightarrow 0^\circ$$

$$f \gg f_H \quad \varphi_H \rightarrow -90^\circ$$

$$f = f_H \quad \varphi_H = -45^\circ$$

- 在 $0.1 f_H$ 和 $10 f_H$ 之间，可用一条斜率为 -45° /十倍频程的直线来表示。



频率响应--RC高通电路的频率响应

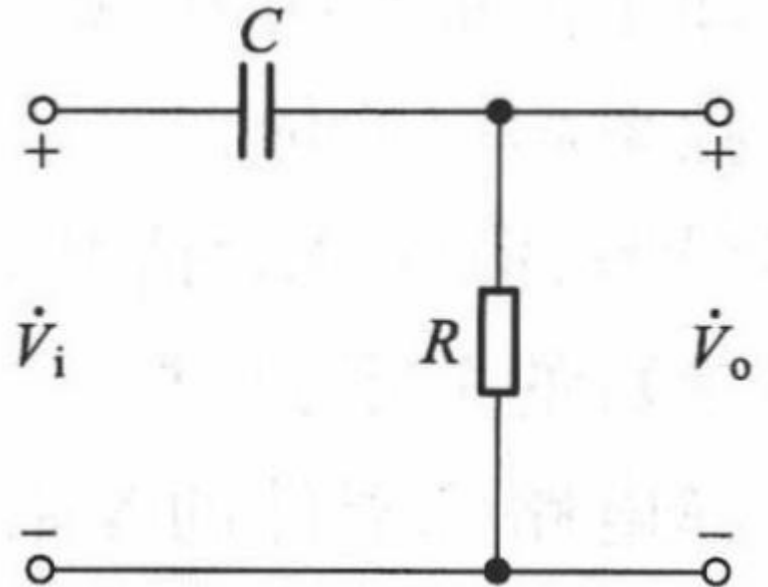
- 在放大电路的低频区内，耦合电容和射极旁路电容对低频响应的影响，可用RC高通电路来模拟。

$$A_{VL}(j\omega) = \frac{V_o(j\omega)}{V_i(j\omega)} = \frac{R_2}{R_2 + 1/j\omega C_2} = \frac{j\omega R_2 C_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$f_L = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$$

$$A_{VL} = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{1}{1 - j(f_L/f)}$$





幅频响应

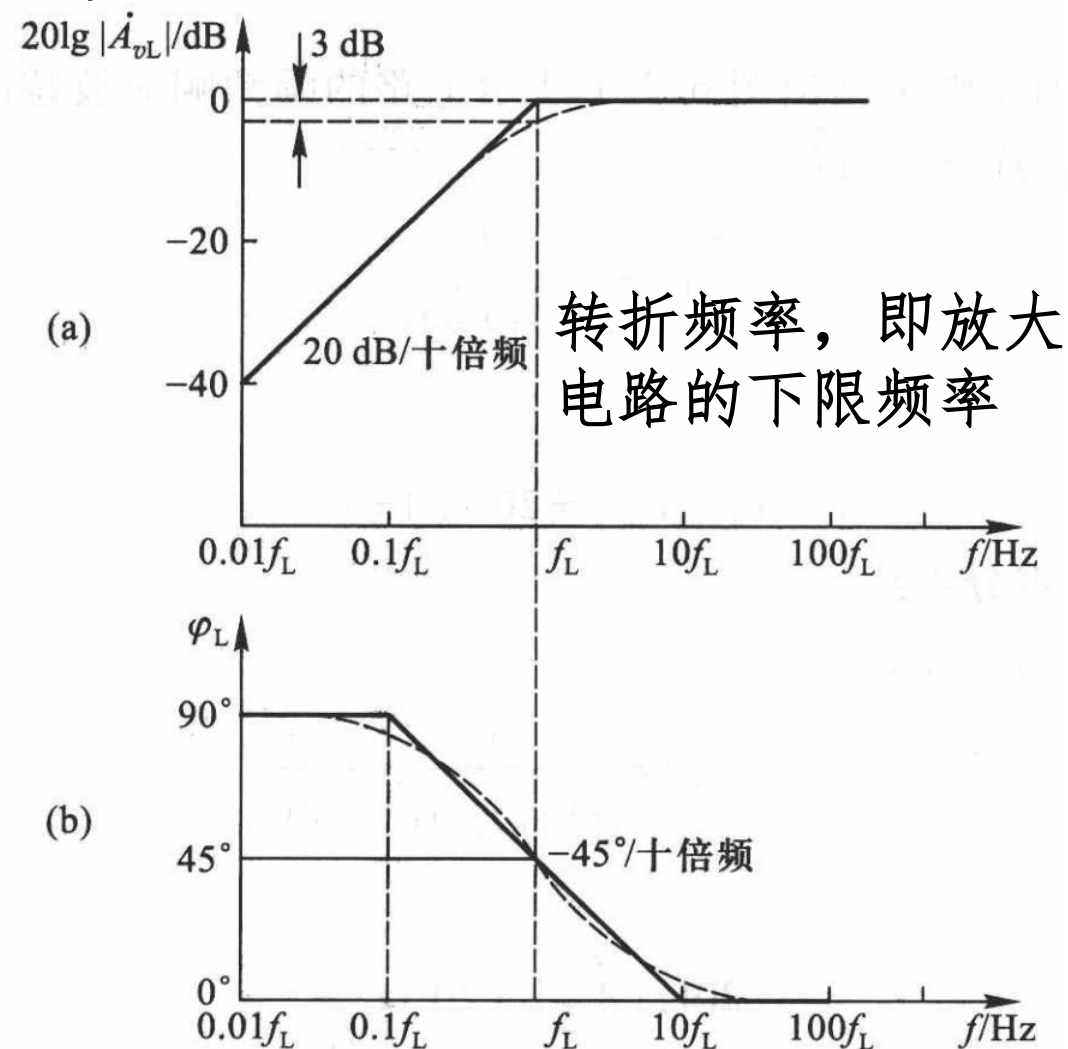


- 低频区的电压增益的幅值 A_{VL} 和相角 φ_L 分别为：

$$A_{VL} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L / f)^2}}$$

$$\varphi_H = \arctg(f_L / f)$$

$$A_{VH} = \frac{1}{\sqrt{1 + (f / f_H)^2}} \quad \varphi_H = -\arctg(f / f_H)$$

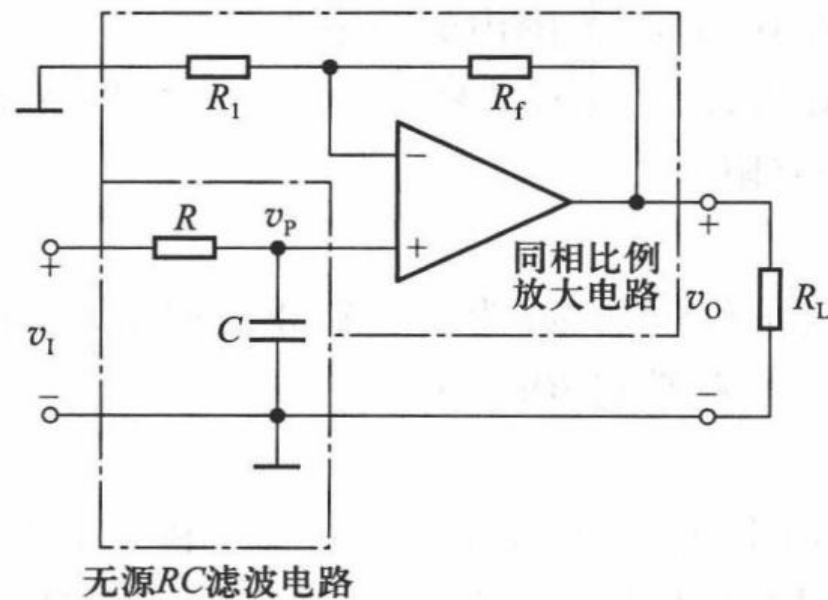
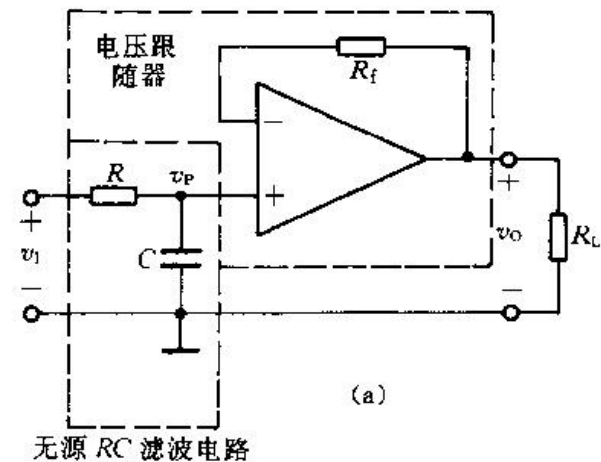




§ 10-2 一阶有源滤波电路



- 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

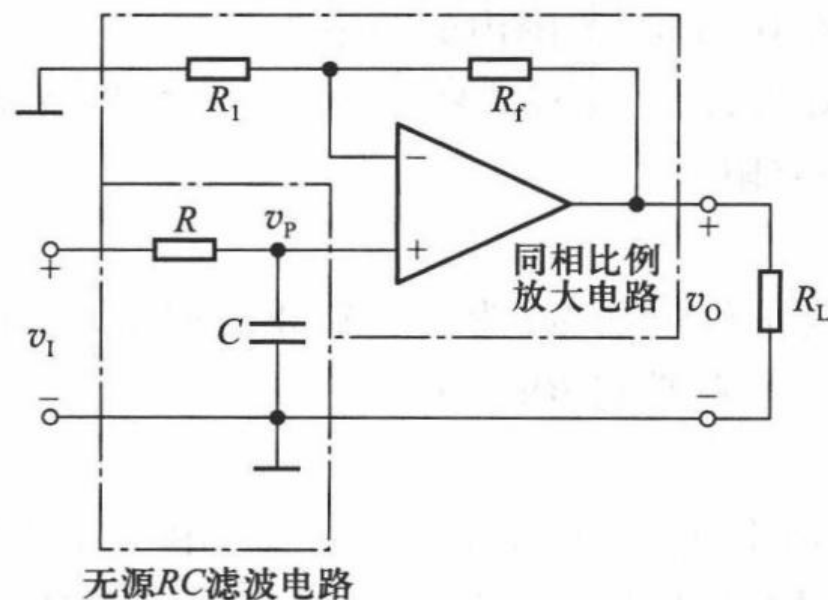
- 低通滤波电路的通带电压增益 A_0 是 $\omega=0$ 时输出电压 v_0 与输入电压 v_i 之比,
- 对于有放大倍数的低通滤波器, 通带电压增益 A_0 等于同相比例放大电路的电压增益 A_{VF} , 即

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

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

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

$\omega_n = 1/(RC)$, 称为**特征角频率**

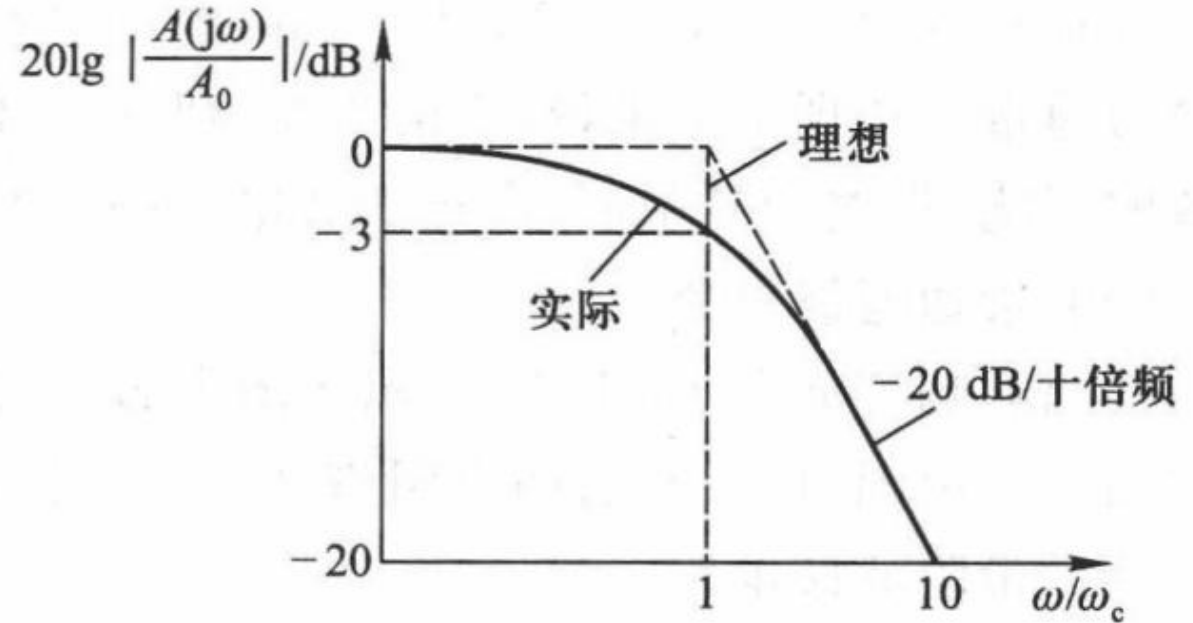


一阶有源滤波电路幅频响应

- 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。



§ 10-3 高阶有源滤波电路



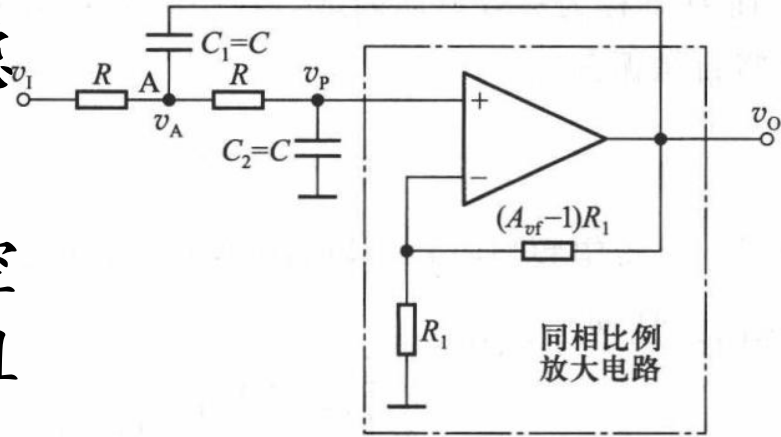
- 理想滤波电路的频响在通带内应具有一定幅值和线性相移，而在阻带内其幅值应为零。
- 实际的滤波电路往往难以达到理想的要求，如要同时在幅频和相频响应两方面都满足要求就更为困难。
- 因此，只有根据不同的实际需要，寻求最佳的近似理想特性。例如，可以主要着眼于幅频响应，而不考虑相频响应等等。



1、有源低通滤波电路

- 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：

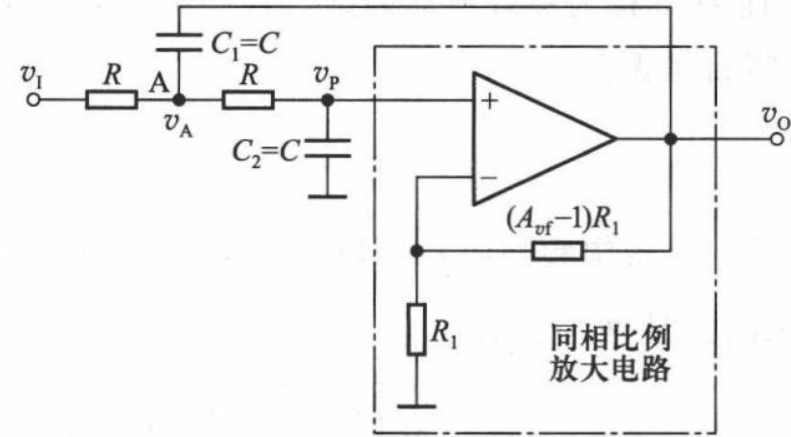
$$V_P(s) = V_N(s) = \frac{R_1}{R_1 + R_f} V_O(s) = \frac{V_O(s)}{A_{VF}} \quad V_P(s) = \frac{V_A(s)}{1 + sRC}$$

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

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

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

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



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。

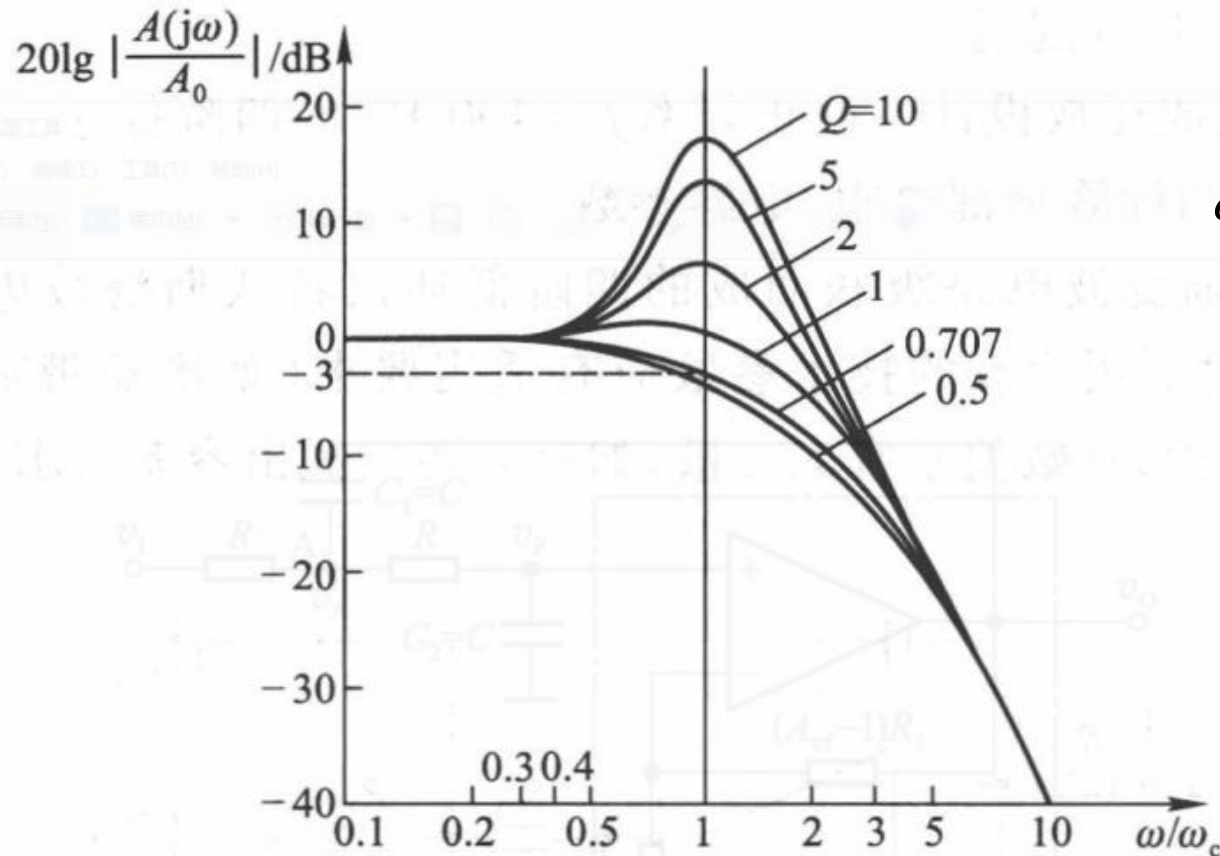
$A_0 = A_{VF} \geq 3$ 时， $A(s)$ 将有极点处于右半 f 平面或虚轴上，电路将自激振荡。

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

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

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





说明

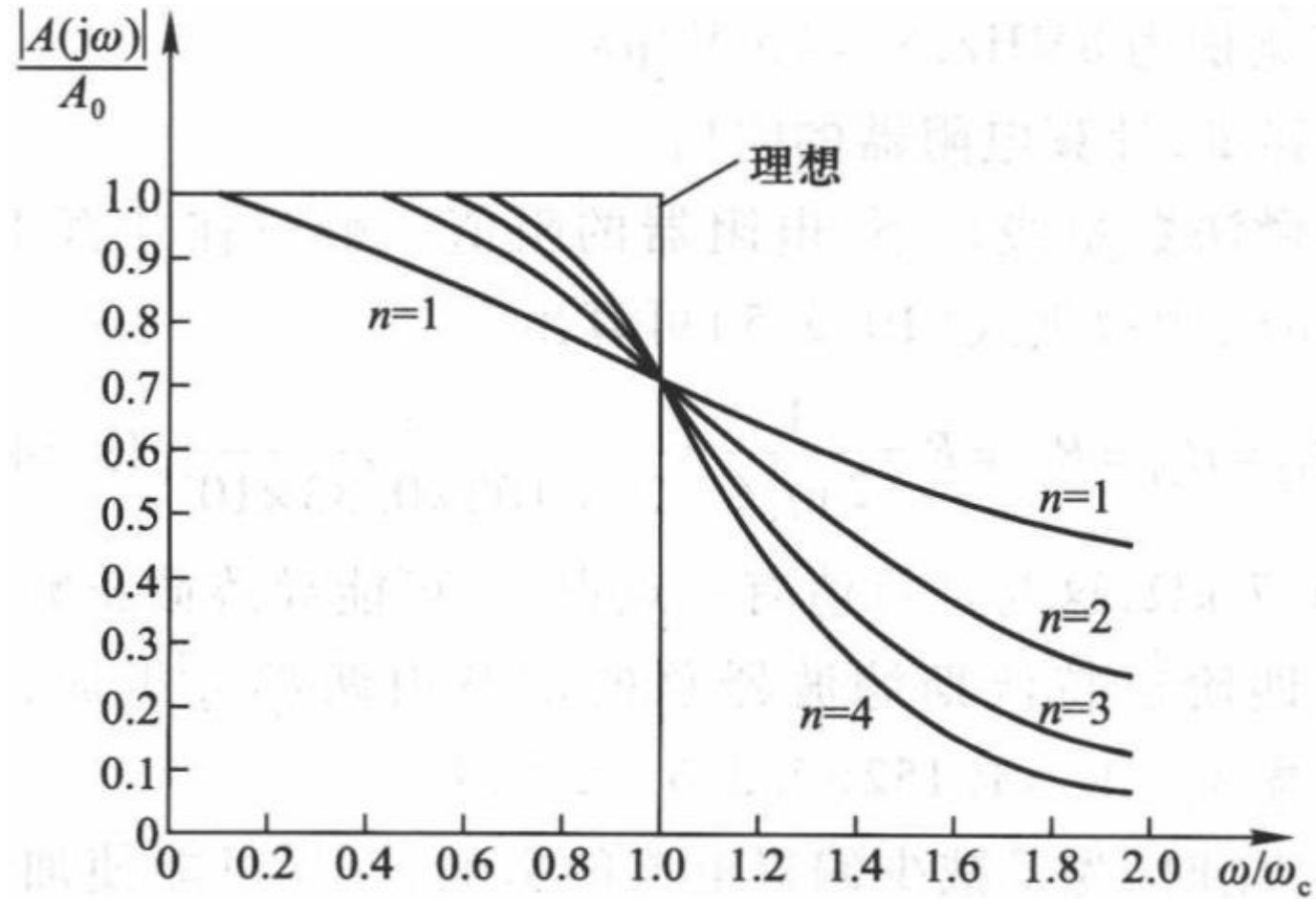
- 当 $Q=0.707$ 时，幅频响应较平坦；
- 当 $Q>0.707$ 时，将出现峰值；
- 当 $Q=0.707$ 和 $\omega/\omega_n=1$ 情况下， $20\lg|A(j\omega)/A_0|=-3\text{dB}$ ；
- 当 $\omega/\omega_n=10$ 时， $20\lg|A(j\omega)/A_0|=-40\text{ dB}$ 。
- 这表明二阶比一阶低通滤波电路的滤波效果好得多。当进一步增加滤波电路阶数，其幅频响应就更接近理想特性。

n阶巴特沃思低通滤波器传递函数

- 二阶有源低通滤波电路选取不同的R、C值可得到不同的频率响应曲线，这种工程上使用的滤波器称为巴特沃思、切比雪夫和贝塞尔滤波器，工程上常用查表式软件计算来确定参数。
- n阶巴特沃思低通滤波器的传递函数为：

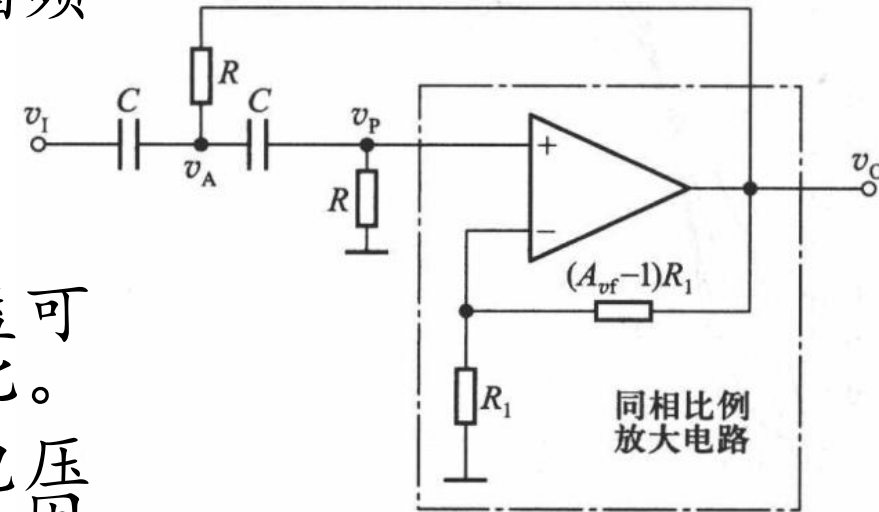
$$A(j\omega) = \frac{A_0}{\sqrt{1 + (\omega / \omega_c)^{2n}}}$$

n阶巴特沃思滤波器归一化幅频响应



2、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的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：

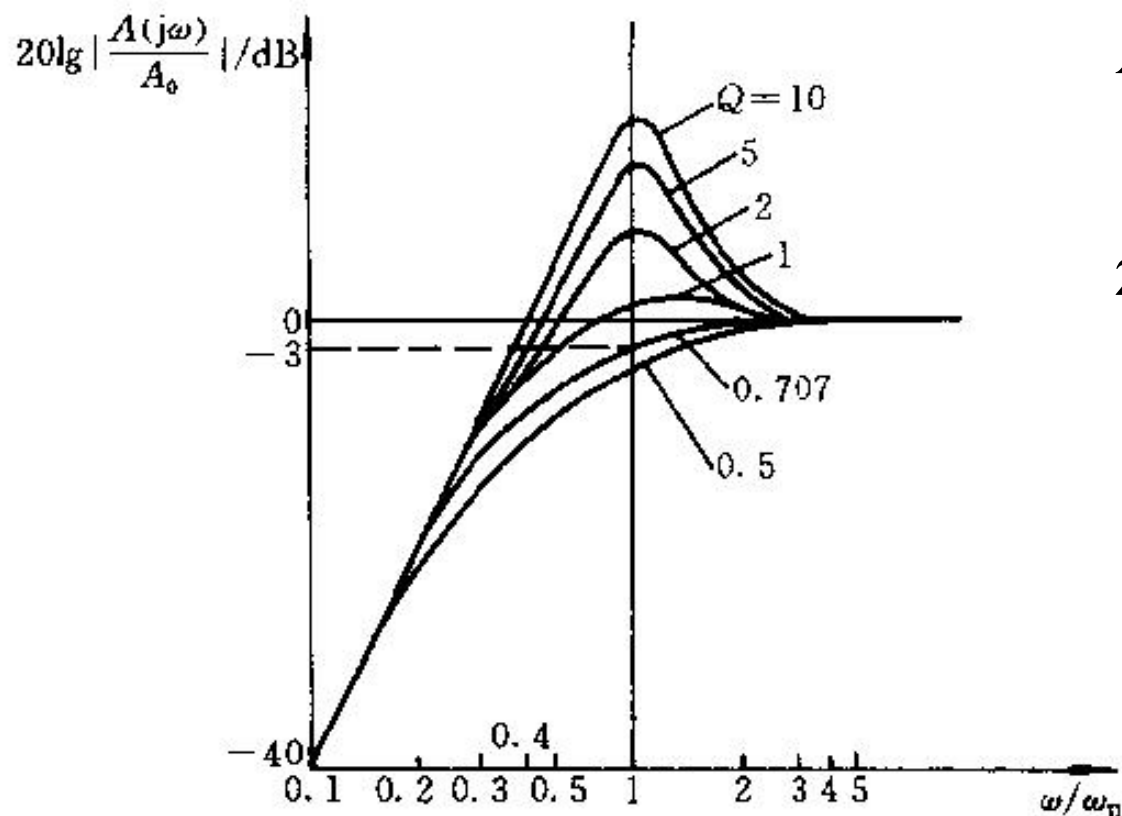
$$A(s) = \frac{A_{VF}}{1 + (3 - A_{VF}) \frac{1}{sRC} + \left(\frac{1}{sRC} \right)^2}$$

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

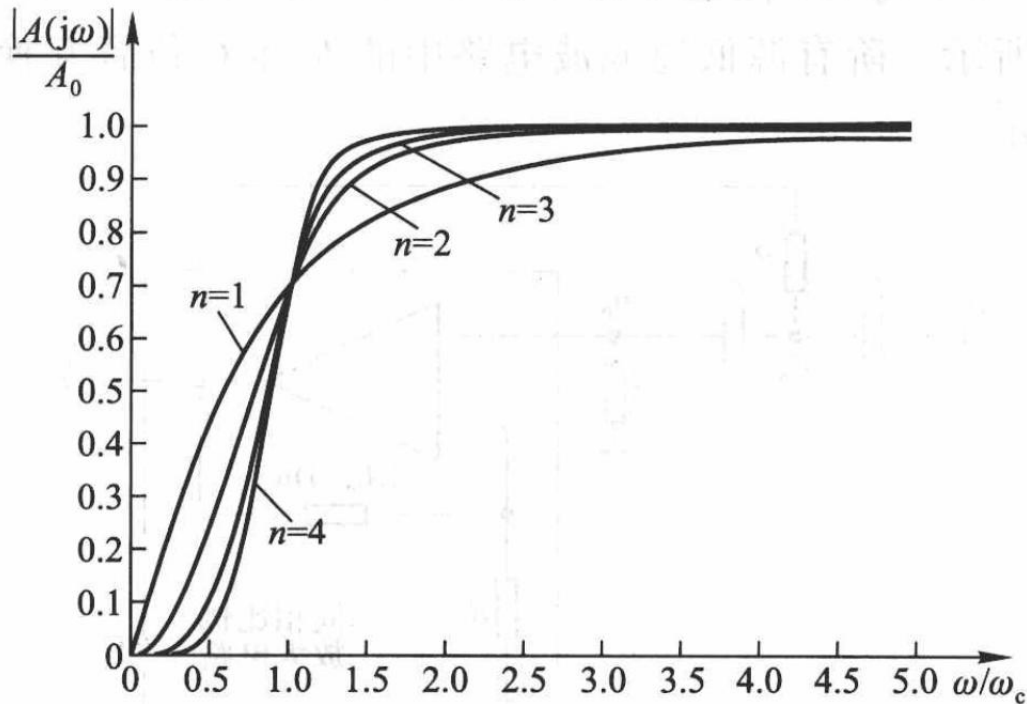


- 二阶高通滤波电路和低通滤波电路的幅频特性具有对偶(镜像)关系。
- 当 $\omega < \omega_n$ 时, 二阶高通滤波电路的 $20 \lg |A(j\omega)/A_0|$ 随 ω 升高而增大, 而当 $\omega > \omega_n$ 时, 二阶低通滤波电路的 $20 \lg |A(j\omega)/A_0|$ 随着 ω 升高而减小。
- 二阶高通滤波电路在 $\omega \ll \omega_n$ 时, 其幅频响应以40dB/十倍频程的斜率上升。
- 只有当 $A_0 = A_{VF} < 3$ 时, 电路才能稳定地工作。

n阶巴特沃思高通滤波器传递函数

- n阶巴特沃思高通滤波器的传递函数为：

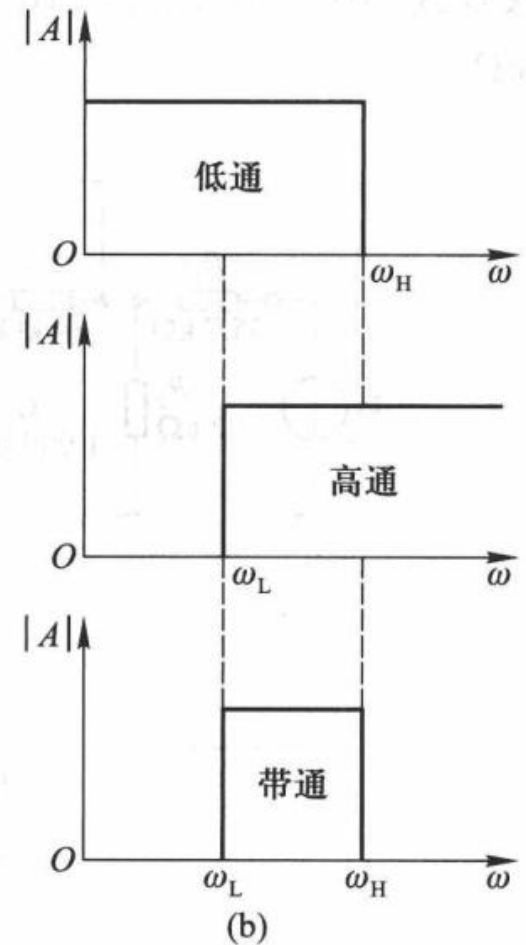
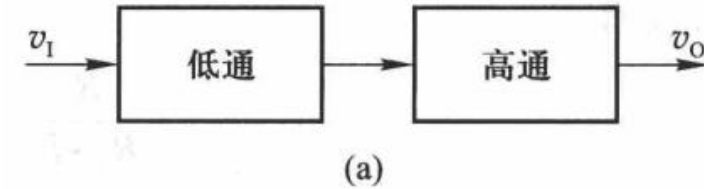
$$A(j\omega) = \frac{A_0}{\sqrt{1 + (\omega_c / \omega)^{2n}}}$$



归一化幅频响应

3、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。

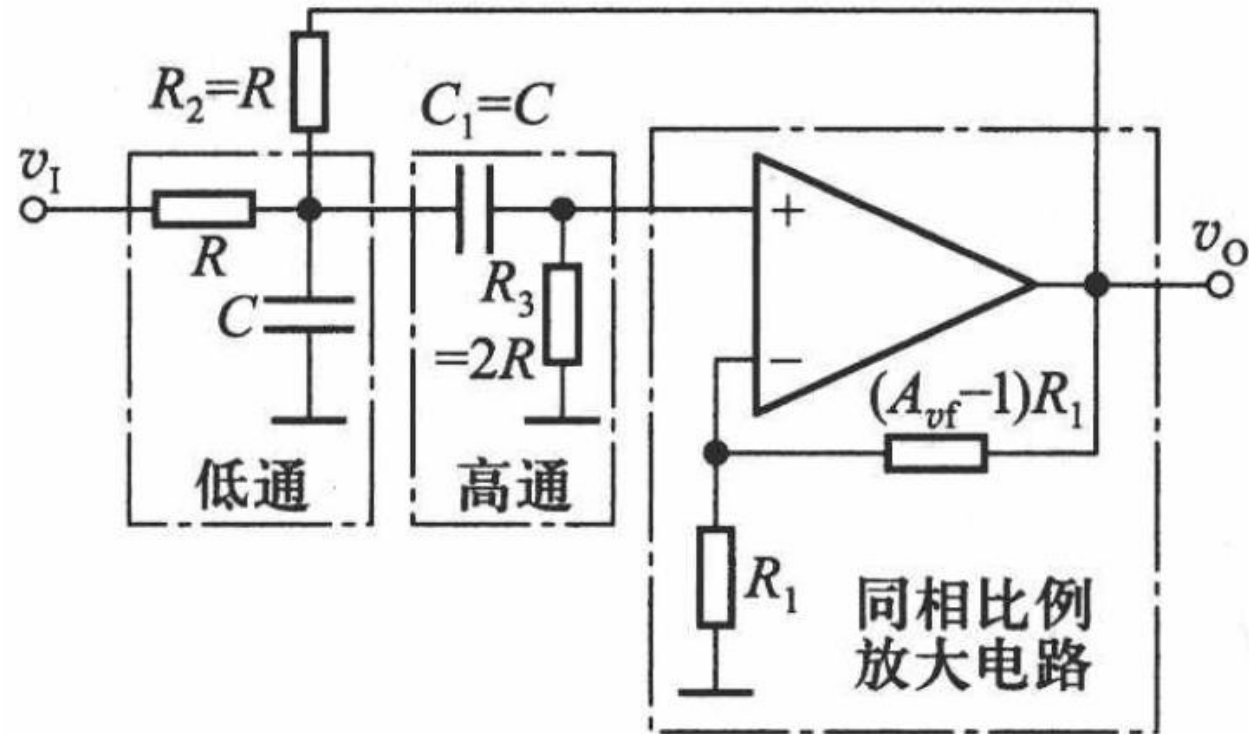




带通滤波电路传递函数

- 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。
- 为了简便，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

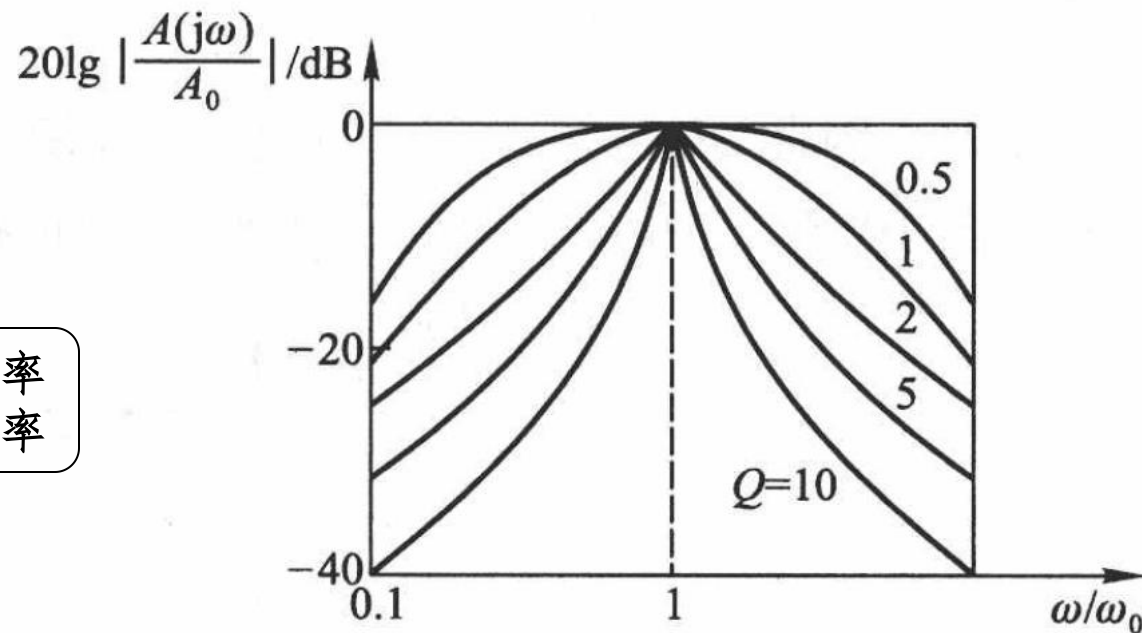
$$A(s) = \frac{A_0 \frac{s}{Q\omega_0}}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$

令 $s=j\omega$

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

带宽？

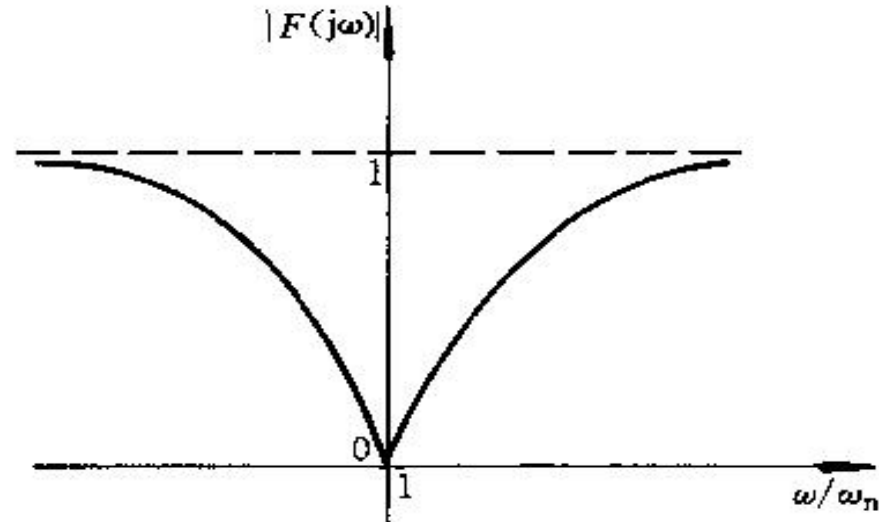
当 $\omega=\omega_0$ 时，电路具有最大电压增益。





4、双T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，即双T带阻滤波电路。





双T带阻滤波电路

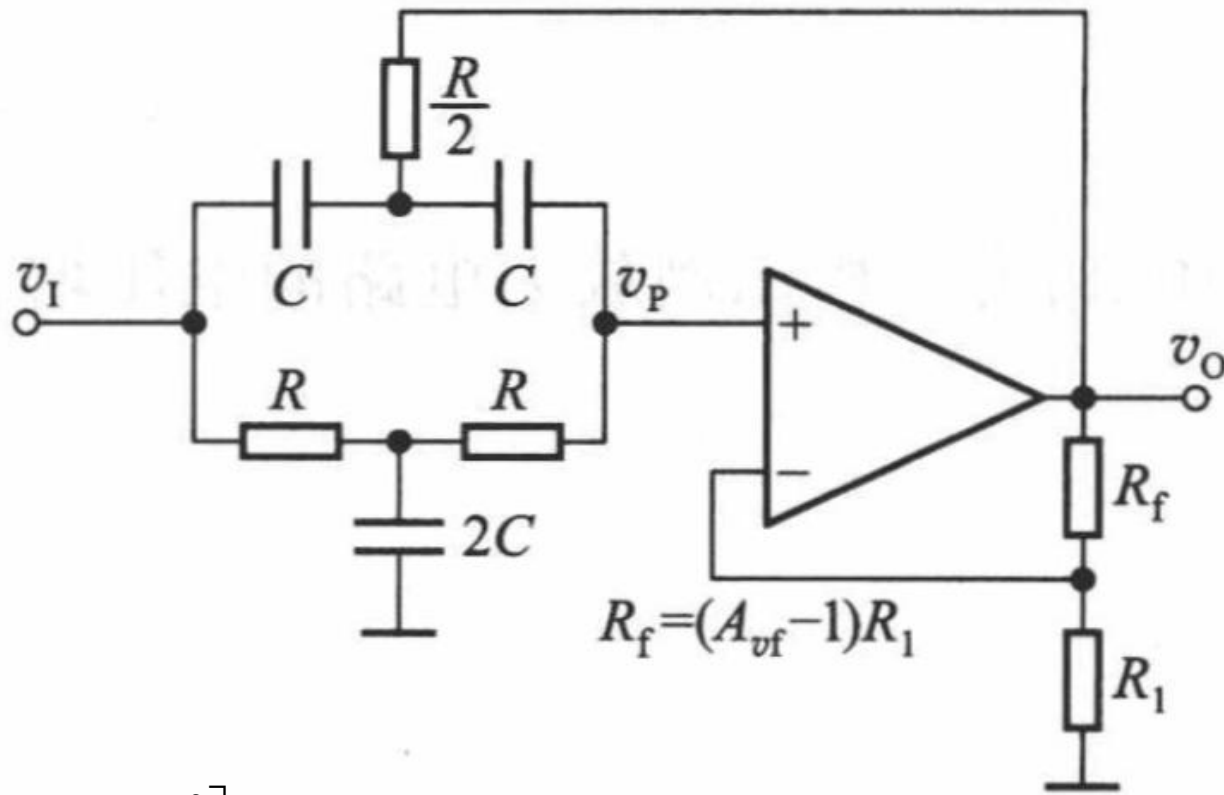


$$A_0 = 1 + \frac{R_F}{R_1} \quad \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

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

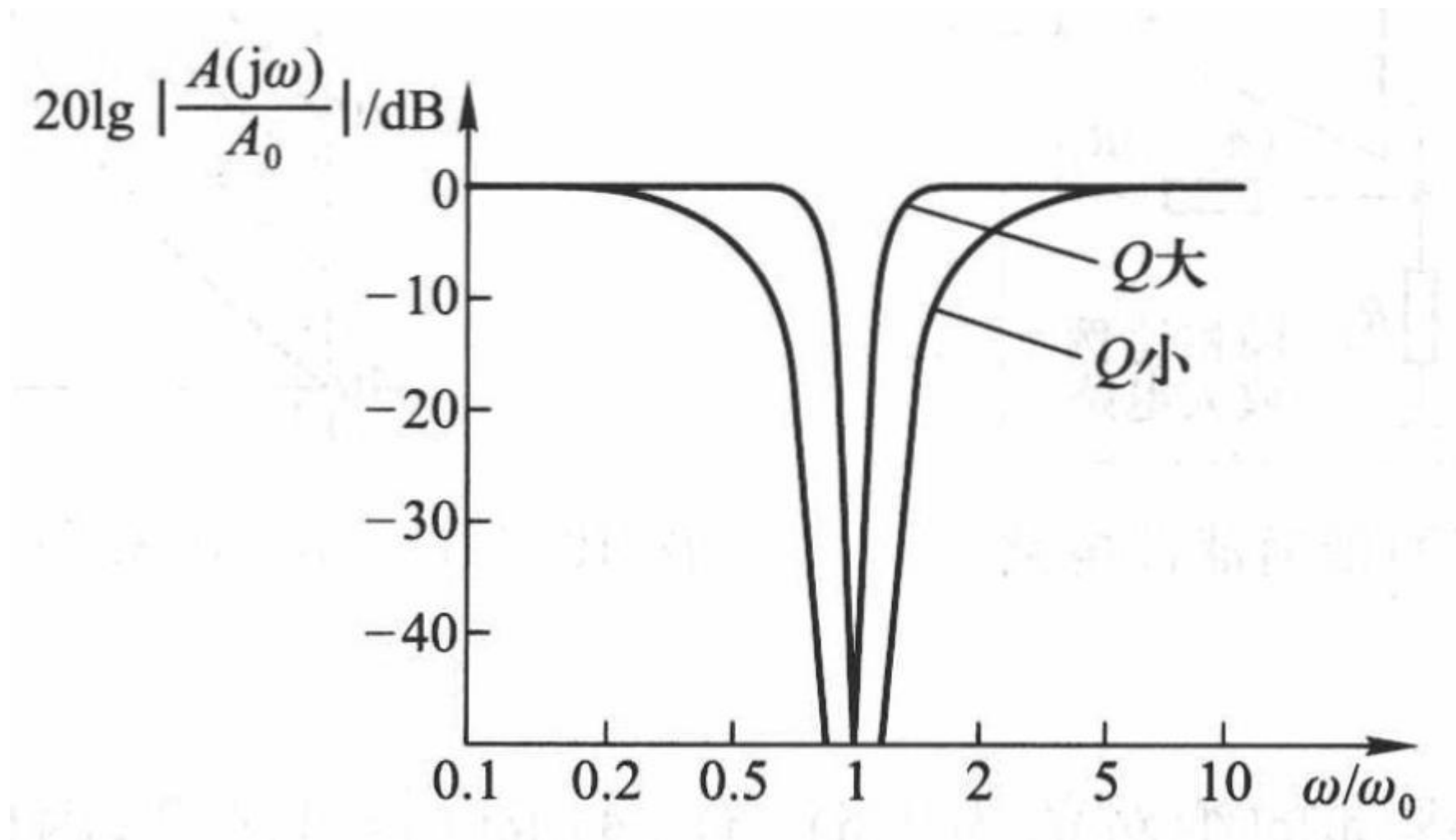
$$A(s) = \frac{A_0 \left[1 + \left(\frac{s}{\omega_0} \right)^2 \right]}{1 + 2(2 - A_0) \frac{s}{\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0} \right)^2}$$

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



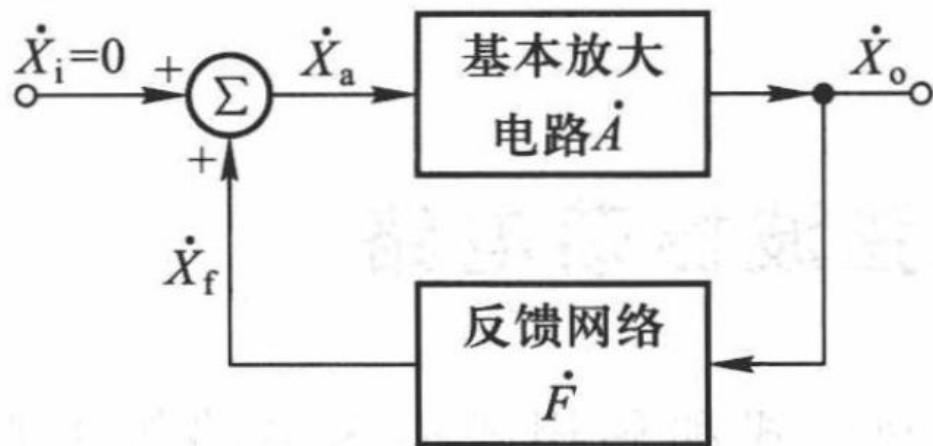


双T带阻滤波电路

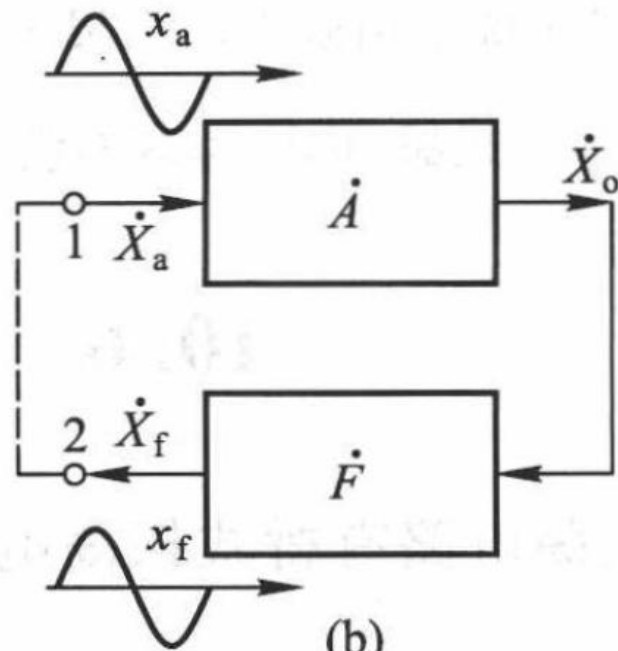




§ 10-4 正弦波振荡电路的振荡条件



(a)



(b)

$$\frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_a} = \frac{\dot{X}_o}{\dot{X}_a} \frac{\dot{X}_f}{\dot{X}_o} = 1 \Rightarrow \dot{A}\dot{F} = 1$$

$$\dot{A} = A\angle\varphi_A, \dot{F} = F\angle\varphi_F$$

$$\therefore \left| \dot{A}\dot{F} \right| = AF = 1, \angle\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi$$



振荡频率



- 振荡电路的振荡频率 f_0 是由相位平衡条件决定的。
 - 一个正弦波振荡电路只在一个频率下满足相位平衡条件，即 f_0 。
- 环路必须中包含一个具有选频特性的网络，简称选频网络。它可以设置在放大电路中，也可设置在反馈网络中，它可以用R、C元件组成，也可用L、C元件组成。
- 用R、C元件组成选频网络的振荡电路称为RC振荡电路，一般用来产生1Hz~1MHz范围内的低频信号；
- 用L、C元件组成选频网络的振荡电路称为LC振荡电路，一般用来产生1MHz以上的高频信号。

RC正弦振荡电路

- LC正弦振荡电路
- 石英晶体振荡电路等等

