



模拟电路基础（下）

集成运算放大器的应用

7.2 有源滤波器电路



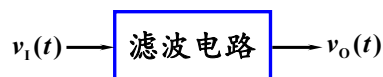
➤ 滤波的基本概念

滤波器：是一种能使有用频率信号通过而同时抑制或衰减无用频率信号电子装置。

有源滤波器：由有源器件构成的滤波器。

滤波电路传递函数定义

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



$s = j\omega$ 时，有 $A(j\omega) = |A(j\omega)| \angle \varphi(\omega)$

其中 $|A(j\omega)|$ —— 模，幅频响应 $\varphi(\omega)$ —— 相位角，相频响应

7.2 有源滤波器电路

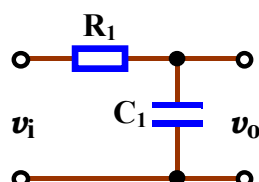
3



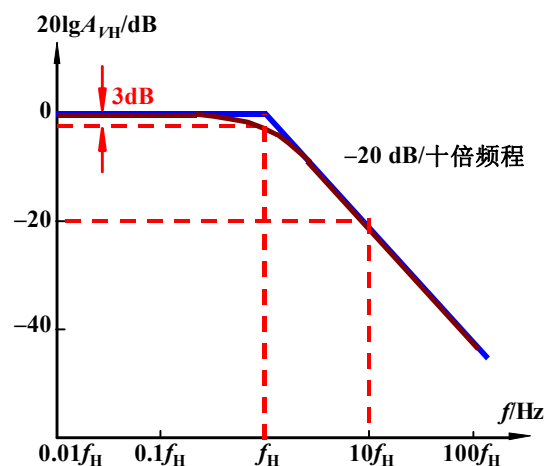
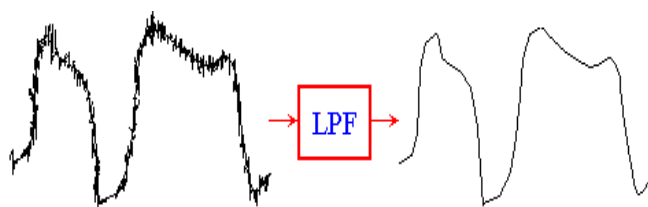
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 滤波的基本概念

举例：RC低通电路



滤波器的用途举例



7.2 有源滤波器电路

4



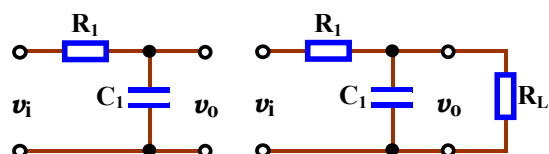
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 滤波的基本概念

分类（按有源无源）

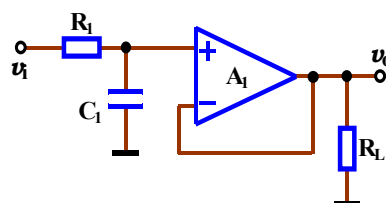
无源滤波器：

采用 R 、 L 、 C 等无源元件组成



有源滤波器：

R 、 L 、 C + 放大器



7.2 有源滤波器电路

5



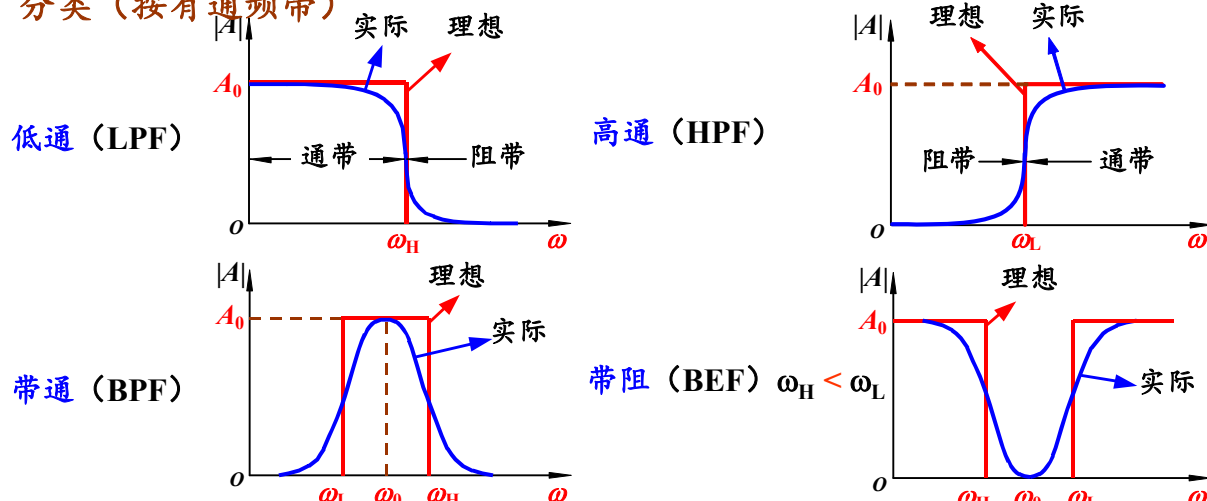
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 滤波的基本概念

希望抑制50Hz的干扰信号，应选用哪种类型的滤波电路？

放大音频信号，应选用哪种类型的滤波电路？

分类（按有通频带）



7.2 有源滤波器电路

6



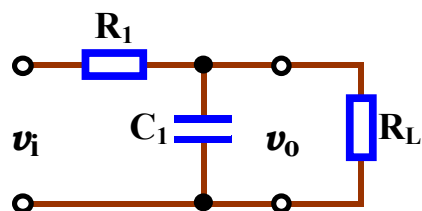
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 一阶有源滤波器

问题：为什么要使用有源滤波器？

无负载时：

$$\frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_H}}$$



缺点：带负载的能力差，例如 $R_1=27k$, $R_L=3k$ ，对于直流而言， v_o 只有 v_i 的十分之一，而当 R_L 断开时， $v_o=v_i$ 。

解决方法：可以减小 R_1 ，提高 C ，或者使用有源电路实现阻抗转换。

7.2 有源滤波器电路

7



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 一阶有源滤波器

- 结构: RC 低通+同相比例

- 传递函数

$$v_o = (1 + \frac{R_f}{R_1})v_p = (1 + \frac{R_f}{R_1}) \frac{1/sC}{R + 1/sC} v_i$$

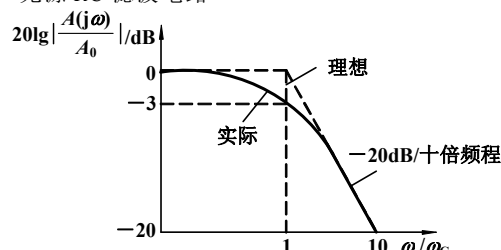
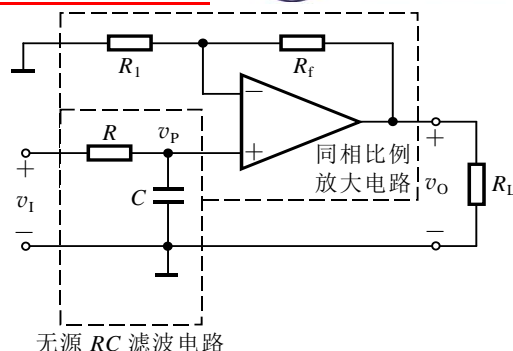
$$A(s) = \frac{v_o}{v_i} = \frac{A_0}{1 + sRC} \quad (A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1})$$

- 频响表达式 $s = j\omega = j2\pi f$

$$A(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j\omega/\omega_H} \quad \text{即: } A(f) = \frac{A_0}{1 + j(f/f_H)}$$

- 确定通带增益 A_0 、通带截止频率 f_H

- 确定过渡带衰减速率



7.2 有源滤波器电路

8

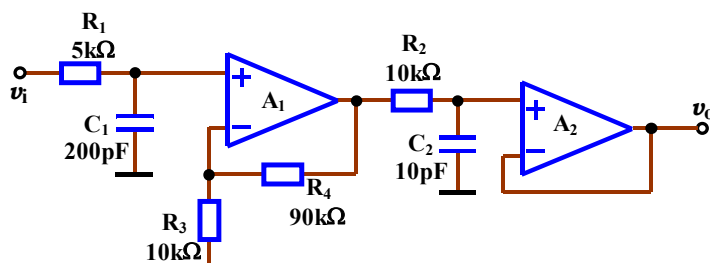


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 一阶有源滤波器

设图中的集成运放均为理想运放。试分析: 1. 集成运放 A_1 和电阻 R_3 、 R_4 构成什么电路? 2. 推导该电路的传递函数3. 作出对数幅频响应曲线(波特图) 4. 该电路的通频带 $BW=?$, 中频增益 $A_{vm}=?$

$$A(f) = \frac{A_0}{(1 + jf/f_{H1})(1 + jf/f_{H2})}$$



$$f_{H1} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = 159 \text{ kHz} \quad f_{H2} = \frac{1}{2\pi R_2 C_2} = 1.59 \text{ MHz}$$

7.2 有源滤波器电路

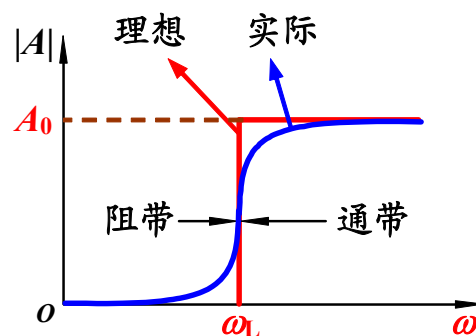
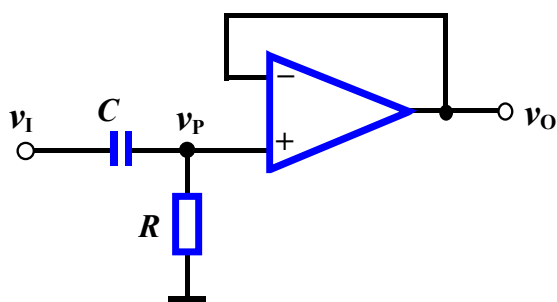
9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 一阶有源滤波器

设计一阶高通有源滤波，电路如何改变？



7.2 有源滤波器电路

10

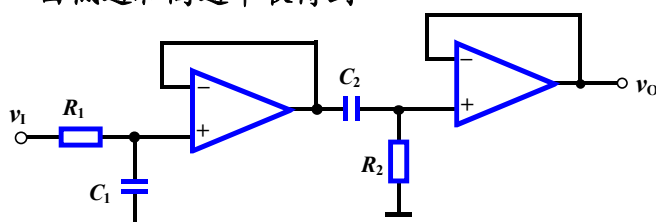


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 一阶有源滤波器

一阶带通有源滤波如何设计？

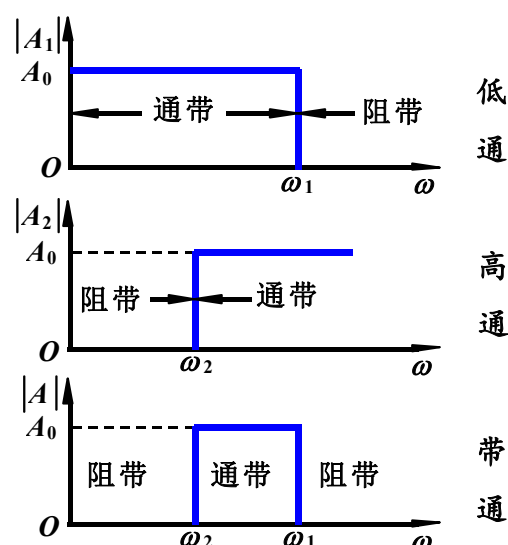
由低通和高通串联得到



低通特征角频率 $\omega_1 = \frac{1}{R_1 C_1}$

高通特征角频率 $\omega_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$

必须满足 $\omega_2 < \omega_1$



7.2 有源滤波器电路

11



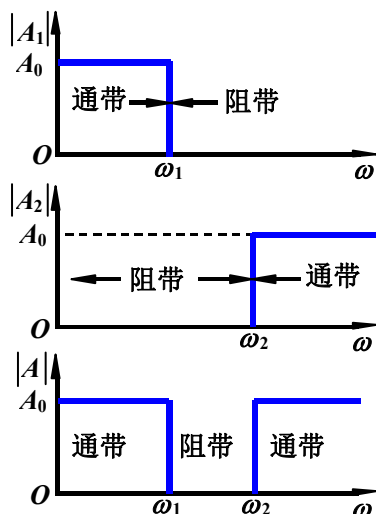
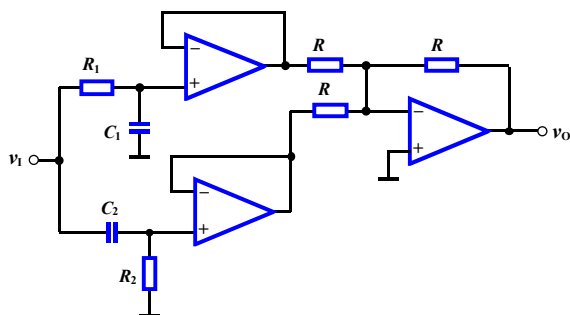
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

一阶有源滤波器

一阶带阻有源滤波如何设计？

可由低通和高通并联得到

必须满足 $\omega_2 > \omega_1$



一阶有源滤波电路通带外衰减速率慢（-20dB/十倍频程），与理想情况相差较远。一般用在对滤波要求不高的场合。

7.2 有源滤波器电路

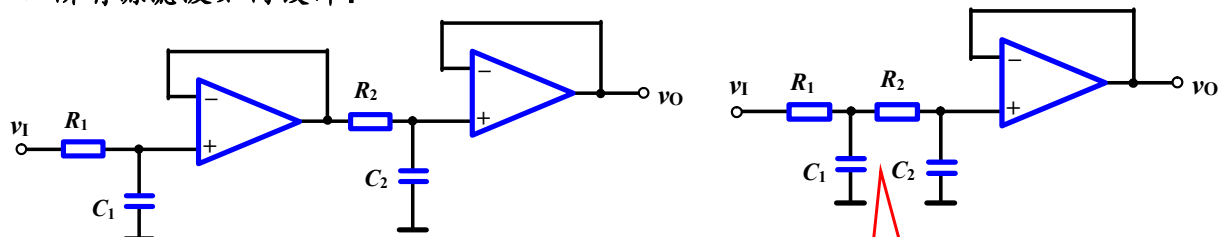
12



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

二阶有源滤波器

二阶有源滤波如何设计？



$$A(s) = \frac{v_o}{v_i} = \frac{1}{(1 + sRC)^2} = \frac{1}{1 + 2sRC + (sRC)^2}$$

$$A(j\omega) = \frac{1}{1 + j2\omega/\omega_c - (\omega/\omega_c)^2}$$

传递函数一样吗？

7.2 有源滤波器电路

13



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

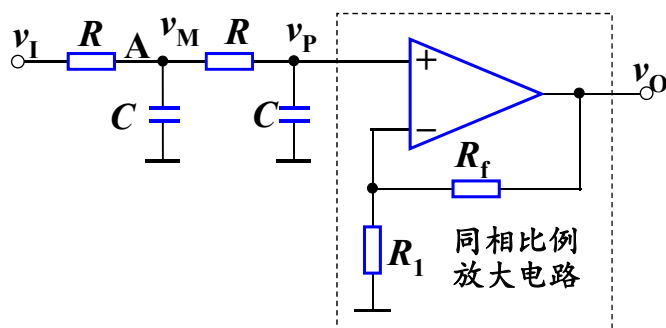
➤ 二阶有源滤波器

$$v_P = v_M \frac{1/sC}{R + 1/sC}$$

$$v_M = v_i \frac{(1/sC) // (R + 1/sC)}{R + (1/sC) // (R + 1/sC)}$$

$$A(s) = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{1}{1 + 3sRC + (sRC)^2}$$

$$A(j\omega) = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{1}{1 + j3\omega/\omega_c - (\omega/\omega_c)^2}$$



$$A(s) = \frac{1}{1 + 2sRC + (sRC)^2}$$

$$A(j\omega) = \frac{1}{1 + j2\omega/\omega_c - (\omega/\omega_c)^2}$$

1次项不一样

7.2 有源滤波器电路

14

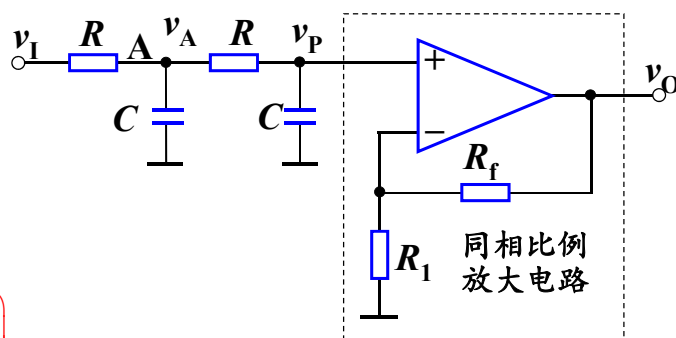


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二阶有源滤波器

$$A(s) = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{1}{1 + 3sRC + (sRC)^2}$$

$$A(j\omega) = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{1}{1 + j3\omega/\omega_c - (\omega/\omega_c)^2}$$



➤ 通带增益

$$A_0 = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right)$$

➤ 等效品质因数

$$Q = \frac{1}{3}$$

➤ 特征(极点)角频率

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



$$A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{1}{Q}(s/\omega_c) + (s/\omega_c)^2}$$

7.2 有源滤波器电路

15



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二阶有源滤波器

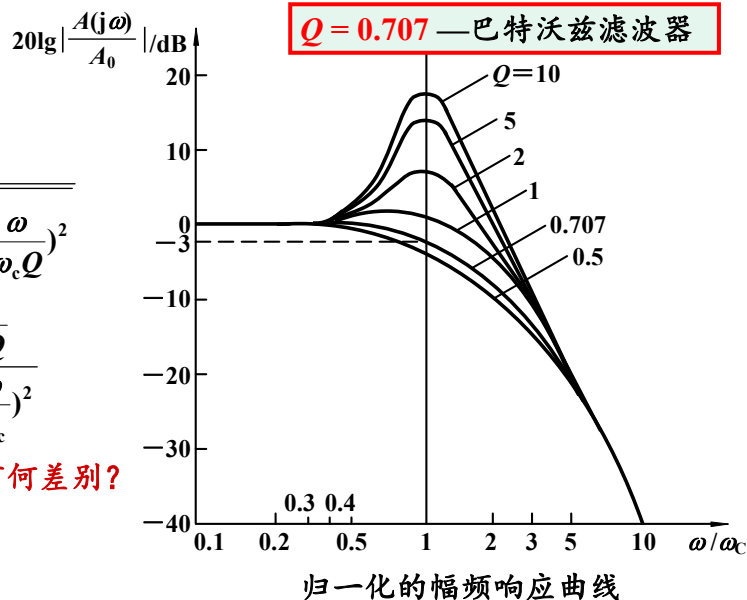
归一化的幅频响应

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

相频响应 $\varphi(\omega) = -\arctg \frac{\frac{\omega}{\omega_c Q}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}$

上限角频率 ω_H 和特征角频率 ω_c 有何差别？

当 $Q = \frac{1}{3}$ $\omega_H \approx 0.37\omega_c$



7.2 有源滤波器电路

16



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二阶有源滤波器

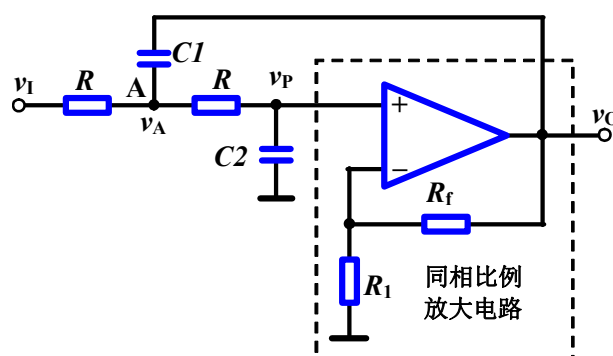
压控电压源电路 (VCVS)

$f \rightarrow 0$ 时, C_1 断路, 正反馈断开,
放大倍数为通带放大倍数;

$f \rightarrow \infty$, C_2 短路, 正反馈不起作用,
放大倍数小 $\rightarrow 0$;

对于不同频率的信号正反馈的强弱不同。

因而有可能在 $f = f_0$ 时放大倍数等于或大于通带放大倍数。



7.2 有源滤波器电路

17



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二阶有源滤波器

压控电压源电路 (VCVS)

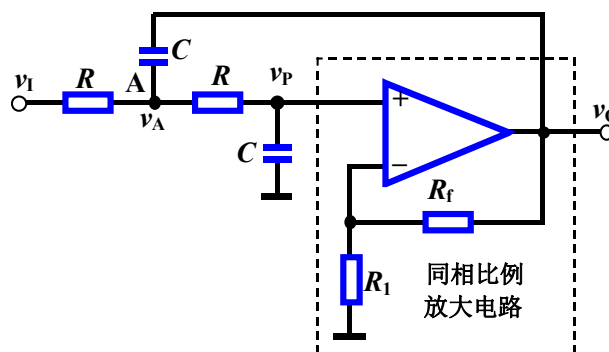
$$A_{VF} = 1 + R_f / R_1$$

对于滤波电路, 有

$$\begin{cases} A_{VF} = \frac{V_o(s)}{V_p(s)} \\ V_p(s) = \frac{1/sC}{R + 1/sC} \cdot V_A(s) \\ \frac{V_i(s) - V_A(s)}{R} - \frac{V_A(s) - V_o(s)}{1/sC} - \frac{V_A(s) - V_p(s)}{R} = 0 \end{cases}$$

要求: $3 - A_{VF} > 0$

得滤波电路传递函数 $A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{VF}}{1 + (3 - A_{VF})sCR + (sCR)^2}$ (二阶)



7.2 有源滤波器电路

18



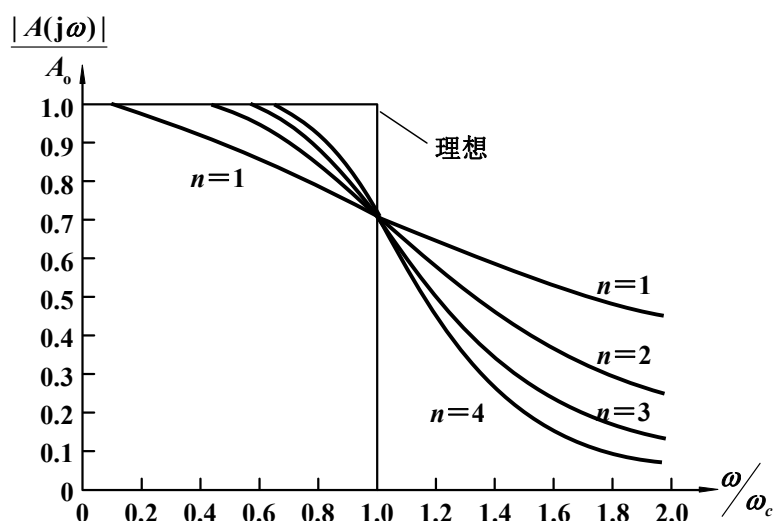
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二阶有源滤波器

N阶巴特沃斯传递函数为

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

式中 n 为阶滤波电路阶数,
 ω_c 为3dB截止角频率, A_0 为
通带电压增益。



7.2 有源滤波器电路

19



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二阶有源滤波器

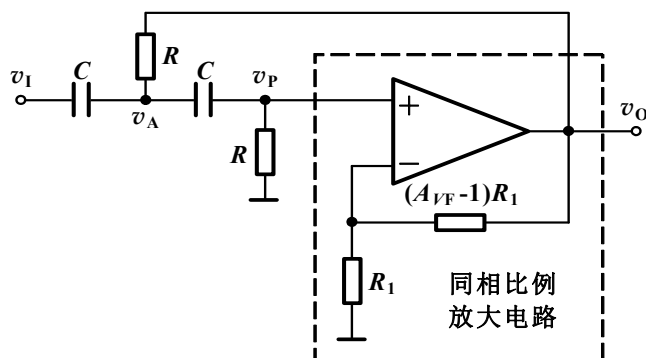
将低通电路中的电容和电阻对换，便成为高通电路。

传递函数

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

归一化的幅频响应

$$20 \lg \left| \frac{A(j\omega)}{A_{VF}} \right| = 20 \lg \frac{1}{\sqrt{\left[\left(\frac{\omega_c}{\omega} \right)^2 - 1 \right]^2 + \left(\frac{\omega_c}{\omega Q} \right)^2}} \quad Q = \frac{1}{3 - A_{VF}}$$



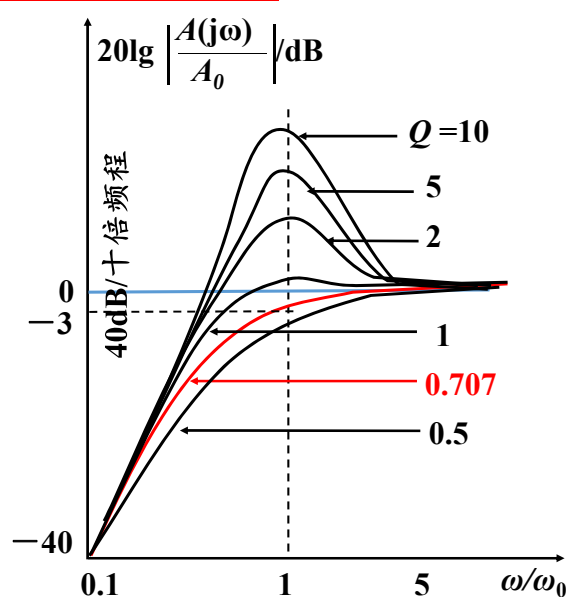
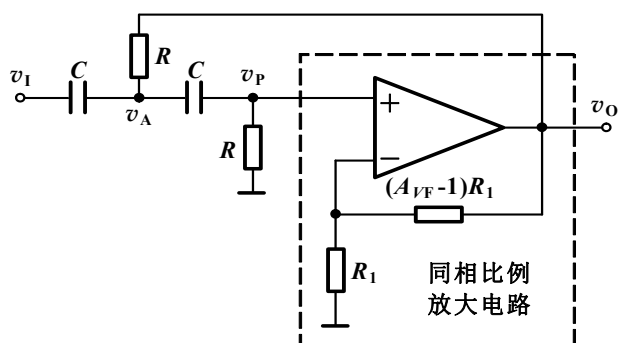
7.2 有源滤波器电路

20



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二阶有源滤波器



7.2 有源滤波器电路

21



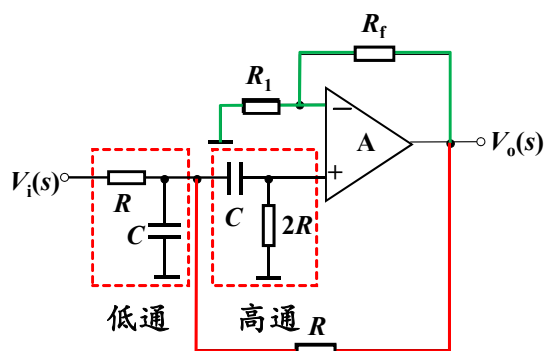
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二阶有源滤波器

二阶带通滤波器传递函数

$$A(s) = \frac{A_{VF} s \omega_c}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q} s + \omega_c^2} \quad Q = \frac{1}{3 - A_{VF}}$$

$$= \frac{Q A_{VF}}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_c} - \frac{\omega_c}{\omega} \right)} \quad \omega_c = \frac{1}{RC}$$



令 $A_0 = A(j\omega)|_{\omega=\omega_c} = Q A_{VF}$ 则 $A(j\omega) = \frac{A_0}{1 + jQ \left(\frac{\omega_c}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_c} \right)}$

7.2 有源滤波器电路

22



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二阶有源滤波器

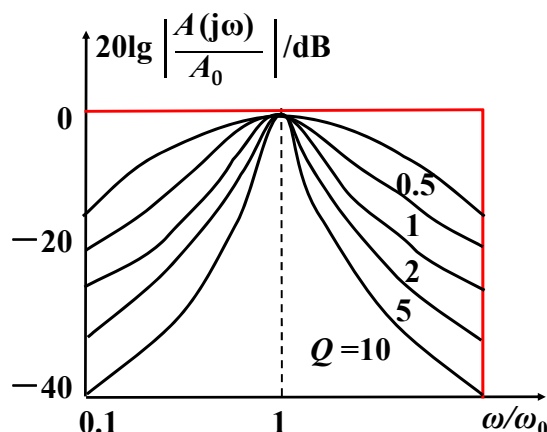
二阶带通滤波器传递函数

$$A_0 = A(j\omega)|_{\omega=\omega_c} = Q A_{VF} \quad Q = \frac{1}{3 - A_{VF}}$$

$$A(j\omega) = \frac{A_0}{1 + jQ \left(\frac{\omega_c}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_c} \right)}$$

模值为0.707所包含的频率范围定义为带宽

$$BW = \frac{\omega_c}{Q} = \left(2 - \frac{R_f}{R_1} \right) \omega_c$$



7.2 有源滤波器电路

23



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

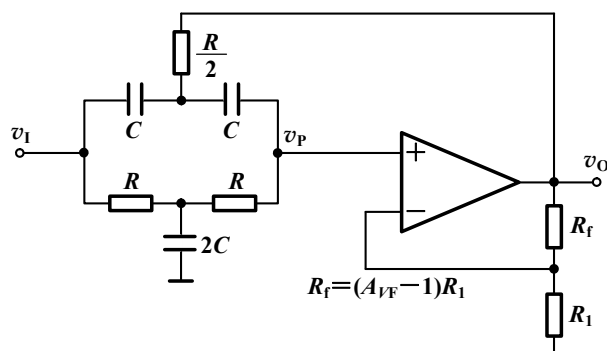
➤ 二阶有源滤波器

二阶带阻滤波器传递函数

$$A(s) = \frac{A_{VF} \left[1 + \left(\frac{s}{\omega_c} \right)^2 \right]}{1 + 2(2 - A_{VF}) \frac{s}{\omega_c} + \left(\frac{s}{\omega_c} \right)^2}$$

$$A_{VF} = 1 + R_f / R_1$$

$$Q = \frac{1}{2(2 - A_{VF})} \quad \omega_c = \frac{1}{RC}$$



$$BW = \frac{\omega_c}{Q} = 2 \left(1 - \frac{R_f}{R_1} \right) \omega_c$$

7.2 有源滤波器电路

24

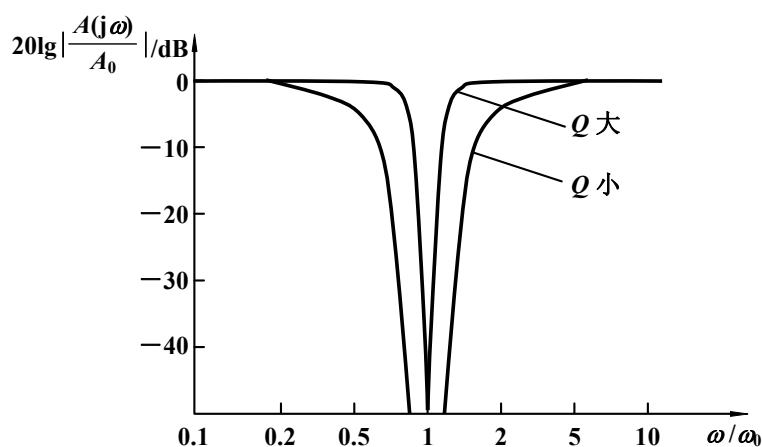


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 二阶有源滤波器

二阶带阻滤波器传递函数

$$BW = \frac{\omega_c}{Q} = 2 \left(1 - \frac{R_f}{R_1} \right) \omega_c$$



7.3 电压比较器

25

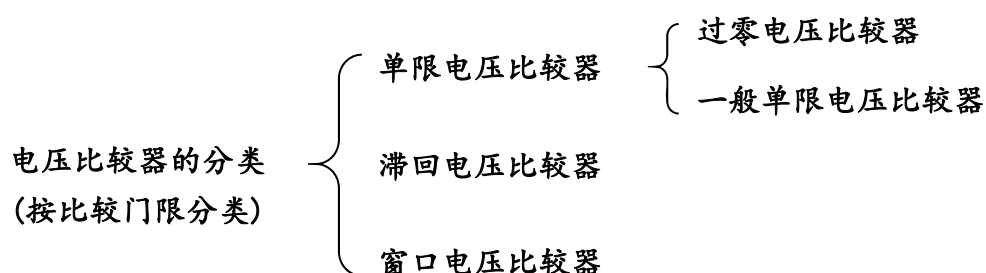


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电压比较器概述

电压比较器：

将输入电压与一个参考电压进行比较，并将比较的结果输出，输出只有高(“1”)和低(“0”)两种状态。



7.3 电压比较器

26



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电压比较器概述

电压比较器的主要指标：

- (1) 阈值电平：比较器输出发生跳变时的输入电压或者门限电压 V_{th} 。
- (2) 输出电平：输出电压的高电平 或 低电平 的值。
- (3) 最小鉴别电压：能确定输出电平两个状态的最小输入电压，高逻辑电平的最小值和低逻辑电平的最大值之差与开环增益之比值。
- (4) 响应时间：所加的两个输入信号的差值电压非常接近于零电平开始到输出达到规定的阈值电平所需的时间。

7.3 电压比较器

27



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 单限电压比较器

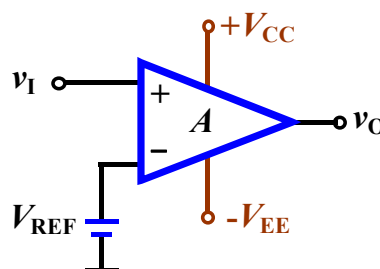
单限电压比较器只有一个阈值电压 V_{th} ，在输入电压 v_I 逐渐增大或逐渐减小的过程中，当通过 V_{th} 时，输出电压 v_O 发生跃变。

▶ 特点：开环， $A_{VO} \approx \infty (> 10^5)$

运放工作在非线性状态下

▶ 工作原理： $v_O = A_{VO}(v_I - V_{REF})$

$$\begin{cases} v_I > V_{REF} \Rightarrow v_O > 0 \Rightarrow v_O \rightarrow +\infty \Rightarrow v_O = V_{OH} \approx +V_{CC} \\ v_I < V_{REF} \Rightarrow v_O < 0 \Rightarrow v_O \rightarrow -\infty \Rightarrow v_O = V_{OL} \approx -V_{EE} \end{cases}$$



7.3 电压比较器

28



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

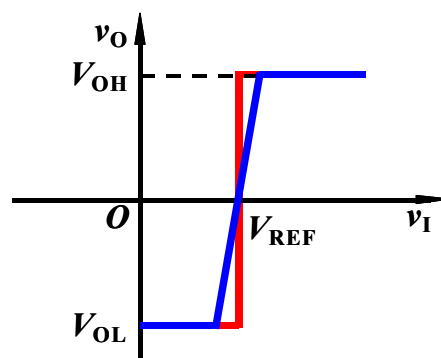
➤ 单限电压比较器

单限电压比较器只有一个阈值电压 V_{th} ，在输入电压 v_I 逐渐增大或逐渐减小的过程中，当通过 V_{th} 时，输出电压 v_O 发生跃变。

▶ 传输特性：直观

逻辑 '1' (高电平) $\Rightarrow v_P > v_N$

逻辑 '0' (低电平) $\Rightarrow v_P < v_N$



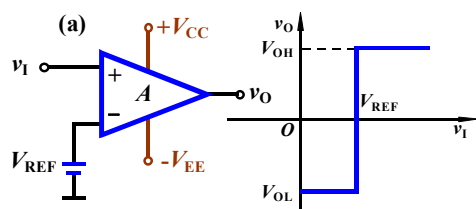
7.3 电压比较器

29

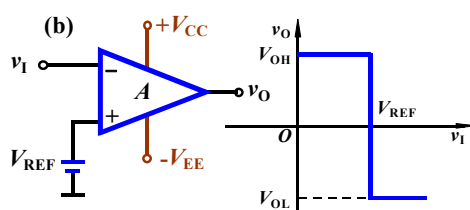


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

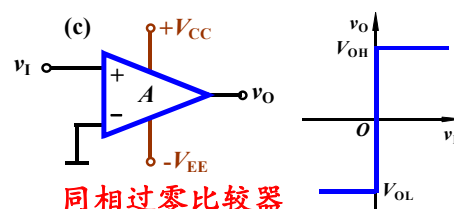
➤ 单限电压比较器



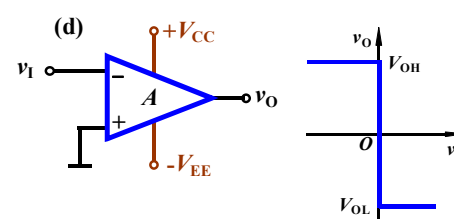
同相比较



反相比较



同相过零比较器



反相过零比较器

7.3 电压比较器

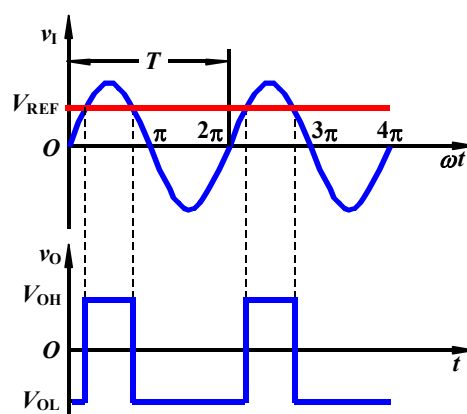
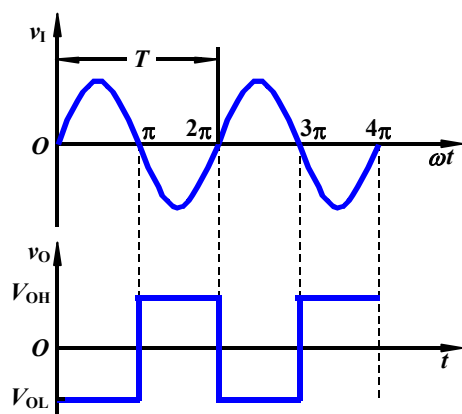
30



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 单限电压比较器

下列输入输出波形是何种电路？



7.3 电压比较器

31



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 单限电压比较器

设运放是理想的，且 $V_{REF} = -1V$, $V_Z = 5V$ ，试求门限电压 V_{th} ，画出传输特性

解：利用虚短、虚断

为什么可以利用两虚？

$$\begin{cases} v_N = v_P = 0 \\ v_N = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot v_I + \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot V_{REF} \end{cases}$$

可得： $V_{th} = v_I = -V_{REF} = 1V$

由稳压管电路，得： $V_O = \pm V_Z = \pm 5V$ 。

$v_I \rightarrow$ 反相端 \Rightarrow 反相电压比较器

