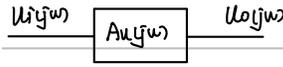
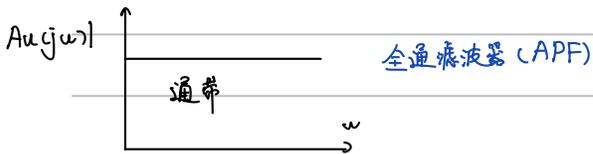
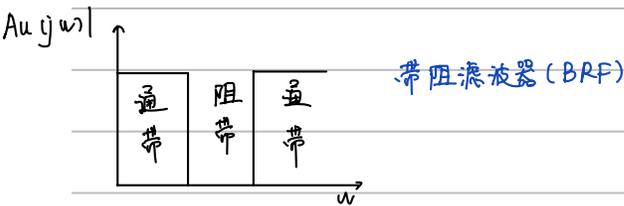
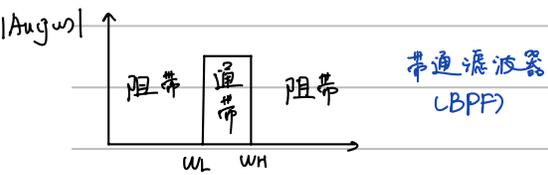
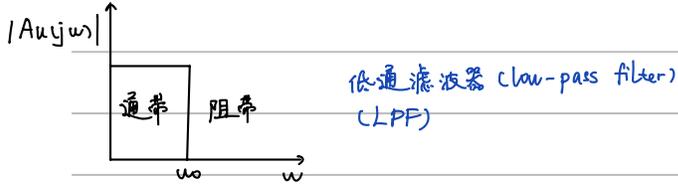


有源RC滤波器

2.1 分类

按频带: 低通、高通、带通、带阻、全通



复频域: $S = s + jw$

$$A(s) = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_m s + b_m}{a_0 s^m + a_1 s^{m-1} + \dots + a_{m-1} s + a_n} \quad (m, n \text{ 均为正整数, 且 } n > m)$$

滤波器阶数: 体现在分母 n 上

电路中, 体现在储能元件的个数上 (电容、电感)

Δ 分母 n 个根 \rightarrow n 个极点

分子 m 个根 \rightarrow m 个零点

Δ 高阶滤波器可由一阶、二阶滤波器实现

Δ 按无源、有源分类

无源滤波器 (Passive Filter) 一般由 R、L、C 构成

$Q < 0.5$
RC — 信号 (低频) LC — 电源 (高频)

有源滤波器 (Active Filter)

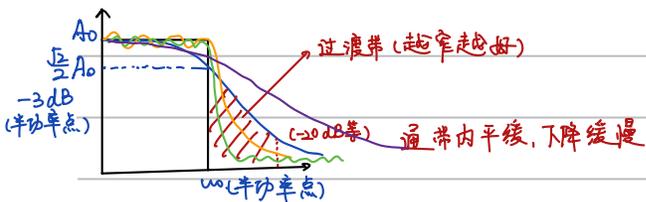
一般由 RC + 运放构成

优点 体积小, 重量轻, 工作频率可低至 10^{-13} Hz

R_0 小, 带载能力强, 级间隔离特性好

Q 大, 可调特性好, 准确度

Δ 理想滤波器及逼近



① Butterworth 型 (巴特沃斯) 通带内平坦, 下降缓慢

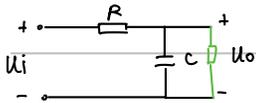
② Chebshel 型 (契比雪夫) 通带内有波纹, 下降陡

③ Elliptic 型 (椭圆函数) 带内带外都有波纹, 下降最陡

④ Bessel 型 (贝塞尔) 下降最缓 线性相位, 相位偏移小

3.2 - 阶有源滤波器

△-阶无源滤波器

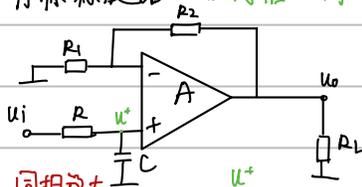


缺点: ① 带载能力差

② $|Au| < 1$ 衰减, 不能放大

△-阶有源滤波器 (引入同相比例放大器)

同相:



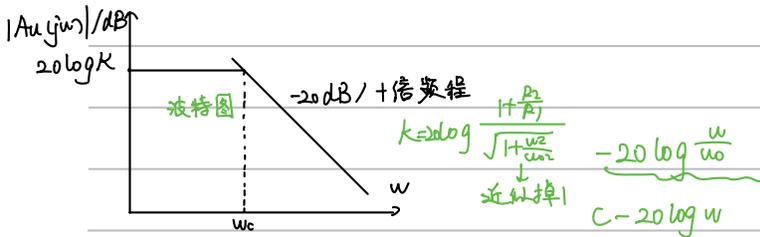
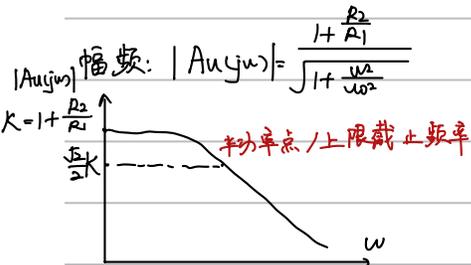
同相放大

$$U_o(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + \frac{1}{j\omega RC}}$$

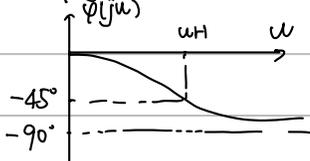
通带增益 $A_0 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

上限频率 $f_H = \frac{1}{2\pi RC}$

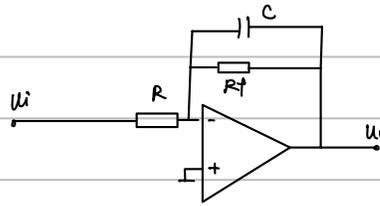
令 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$



相频 $\varphi(j\omega) = -\arctan \frac{\omega}{\omega_0} = -\arctan \omega RC$



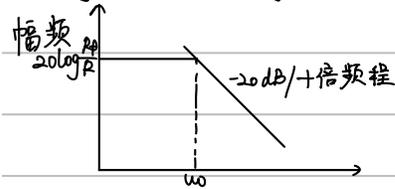
△-阶反相比例滤波器 (反馈引入频变特性)



$$Au(j\omega) = -\frac{R_f + \frac{1}{j\omega C}}{R} = -\frac{R_f}{R} \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega RC}}$$

定义 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$

$$Au(j\omega) = -\frac{R_f}{R} \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} \quad (\text{低通})$$



相移: 与同相呈反向关系

低通 \rightarrow 高通 电容与电阻互换

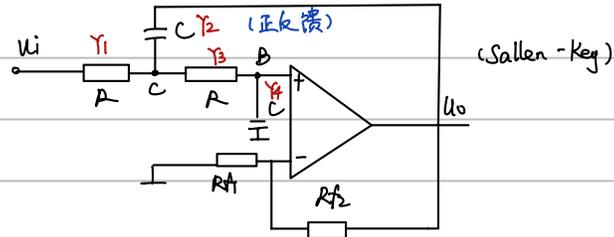
(Multiple Feedback)

3.3 二阶有源滤波器

○ 二阶无源滤波器

- 缺点
- ① 不放大, 只衰减
 - ② Q 低
 - ③ 带载能力差

3.3.1 有限增益二阶有源滤波器



节点 C: $(Y_1 + Y_2 + Y_3)U_C - Y_1 U_i - Y_2 U_o = 0$

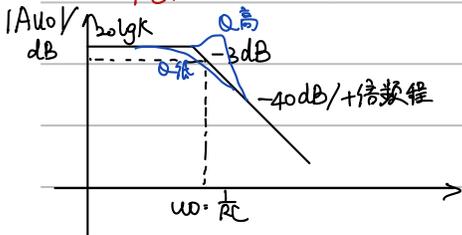
节点 B: $(Y_3 + Y_4)U_B - Y_3 U_C = 0$

放大器: $U_o = (1 + \frac{R_2}{R_1}) \cdot U_B$

取 $Y_1 = Y_3 = \frac{1}{R}$, $Y_2 = Y_4 = j\omega C$

得 $A_{uf}(s) = \frac{U_o}{U_i} = \frac{K \cdot \frac{1}{RC^2}}{s^2 + \frac{2}{RC}s + \frac{1}{RC^2}}$ 二阶低通
(截止频率)

$\omega_0 = \frac{1}{RC}$, $A(0) = K$, $Q = \frac{1}{3-K}$, 其中 $K = 1 + \frac{R_2}{R_1}$



1° $Q = 0.58$ Bessel 型

2° $Q = 0.707$ ($\frac{\sqrt{2}}{2}$) Butterworth 型

3° $Q = 0.943$ Chebshew 型

4° $Q \rightarrow \infty$ 电路不稳定 自激

△ 高通: R, C 互换

△ 带通 $Y_1 = \frac{1}{R_1}$, $Y_2 = \frac{1}{R_2}$, $Y_3 = sC$, $Y_4 = \frac{1}{R_4} + sC_4$

3.3.2 无限增益多重反馈二阶有源滤波器 (MFB)

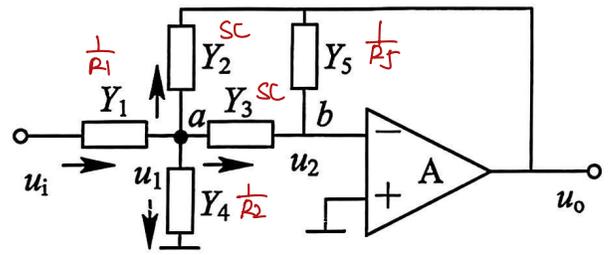


图 3.3.11 多路反馈滤波器原理

传递函数

推导 $U_a(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) - U_b Y_3 - U_o Y_2 - U_i Y_1 = 0$

$U_b(Y_3 + Y_5) - U_a Y_3 - U_o Y_5 = 0$

$U_b = 0$

得 $A_{uf}(s) = -\frac{\frac{1}{R_1 C} \cdot s}{s^2 + \frac{2}{R_5 C} s + \frac{R_1 + R_2}{C^2 R_1 R_2}}$ 二阶带通

$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_1 + R_2}{C^2 R_1 R_2}}$ 取 $R_1 \gg R_2$, $\omega_0 = \frac{1}{C} \sqrt{\frac{1}{R_2 R_1}}$

$A(U\omega_0) = -\frac{R_5}{2R_1}$

$BW = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{2}{R_5 C}$

Q↑, BW↓, 选择性高

改变 R_2 , BW 不变, 中心频率 ω_0 改变

低通串高通 → 带通, 此时带宽较宽

优点: 上、下限频率独立可调, 阶数也可不同

带阻:

① 低通并高通 → 带阻

② 原信号 - 带通 → 带阻

3.1 滤波器的概念

$$H(s) = A \cdot \frac{s^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0} \quad (\text{传递函数})$$

n - 阶数, 分母极点个数

△逼近方法

1. 巴特沃斯滤波器
2. 切比雪夫滤波器
3. 椭圆滤波器
4. 贝塞尔滤波器

△自变量 $j\omega$ —— 复频域
 ω —— 频域

△二阶滤波器

$$H(s) = \frac{s^2 + b_1s + b_0}{s^2 + a_1s + a_0}$$

低通 $H(s) = \frac{H(0)\omega_0^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$ (无零点) 共轭极点

高通 $H(s) = \frac{H(\infty) \cdot s^2}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$

带通 $H(s) = \frac{H(\infty) \cdot \frac{\omega_0}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q}s + \omega_0^2}$

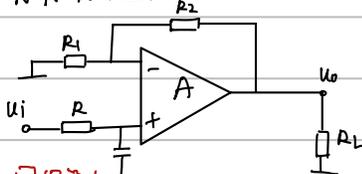
3.2 一阶有源滤波器

△(一阶无源滤波器)

- ① 衰减, 无增益
- ② 带载能力弱

△一阶有源滤波器

同相:



同相放大

$$U_o(j\omega) = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1 + \frac{R_2}{R_1}}{1 + j\omega RC} U_i(j\omega)$$

通带增益 $A_0 = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

上限频率 $f_H = \frac{1}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}$

3.3 二阶有源滤波器

3.3.1 二阶压控电压源型滤波器电路

解得

$$H = \frac{u_o}{u_i} = \frac{A_F Y_1 Y_2}{Y_3(Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4) + Y_5(Y_1 + Y_4 + Y_2(1 - A_F))} \quad (3.3.2)$$

式(3.3.2)是二阶 Sallen-key 滤波电路传递函数的一般表达式。只要适当选取电阻和电容来代替 $Y_1 \sim Y_5$ 中相应的导纳即可构成低通、高通、带通等二阶有源滤波电路。

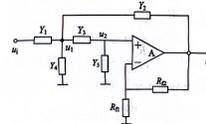


图 3.3.1 Sallen-key 滤波器

Y : 电阻/电容

3.3.2 二阶 MFB 滤波器