

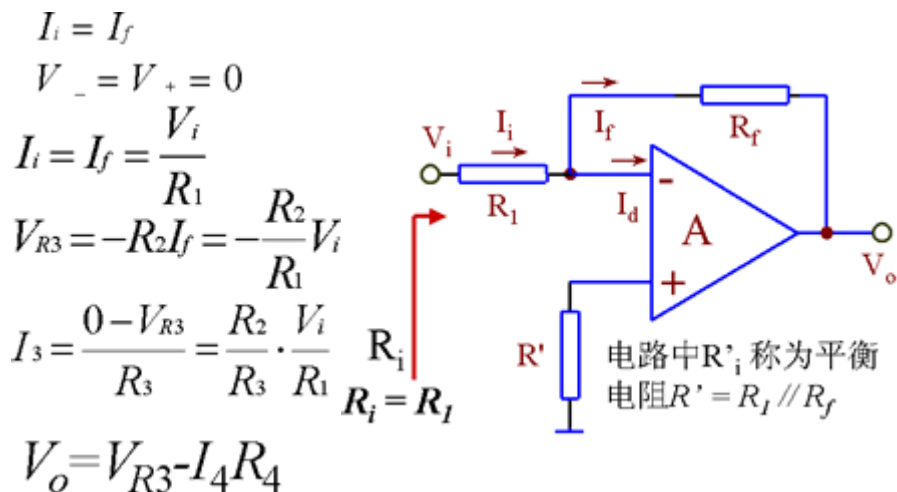
# 运算放大器应用

## § 8.1 比例运算电路

### 8.1.1 反相比例电路

#### 1. 基本电路

电压并联负反馈输入端虚短、虚断



$$I_i = I_f \quad V_- = V_+ = 0$$

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_i$$

特点：

反相端为虚地，所以共模输入可视为 0，对运放共模抑制比要求低

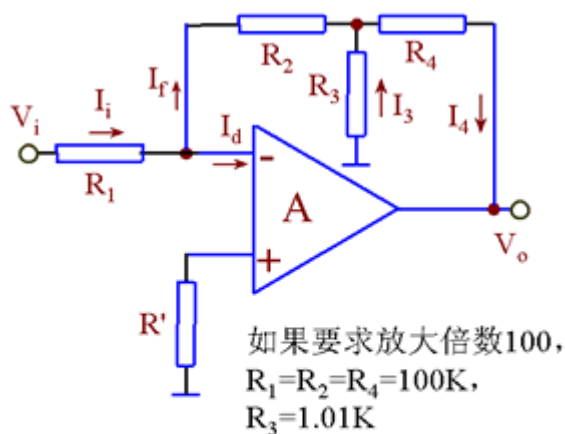
输出电阻小，带负载能力强

要求放大倍数较大时，反馈电阻阻值高，稳定性差。

如果要求放大倍数 100， $R_1=100K$ ， $R_f=10M$

#### 2. T 型反馈网络

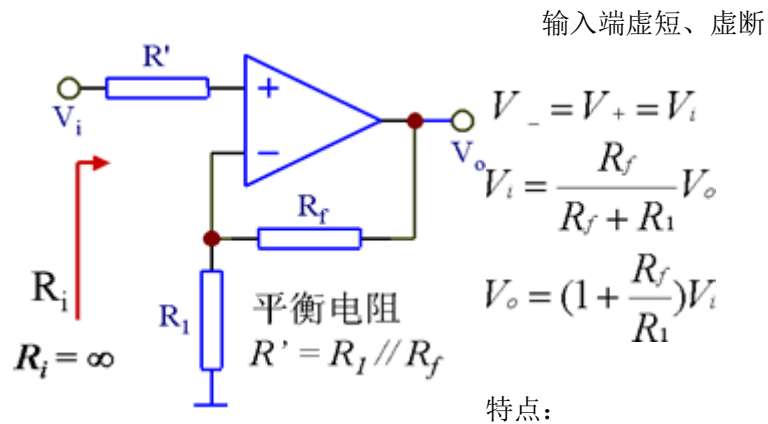
虚短、虚断



$$V_o = -\frac{R_2 + R_4}{R_1} \left( 1 + \frac{R_2 // R_4}{R_3} \right) V_i$$

### 8.1.2 同相比例电路

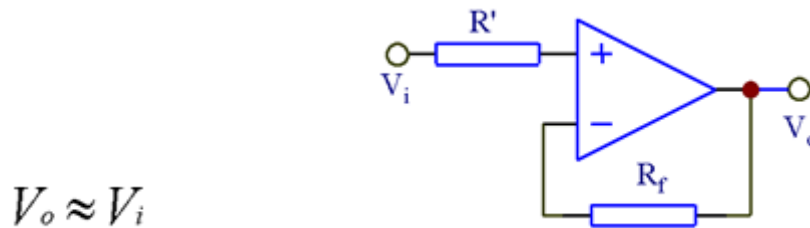
#### 1. 基本电路：电压串联负反馈



输入电阻高，输出电阻小，带负载能力强

$V_- = V_+ = V_i$ ，所以共模输入等于输入信号，对运放的共模抑制比要求高

#### 2. 电压跟随器



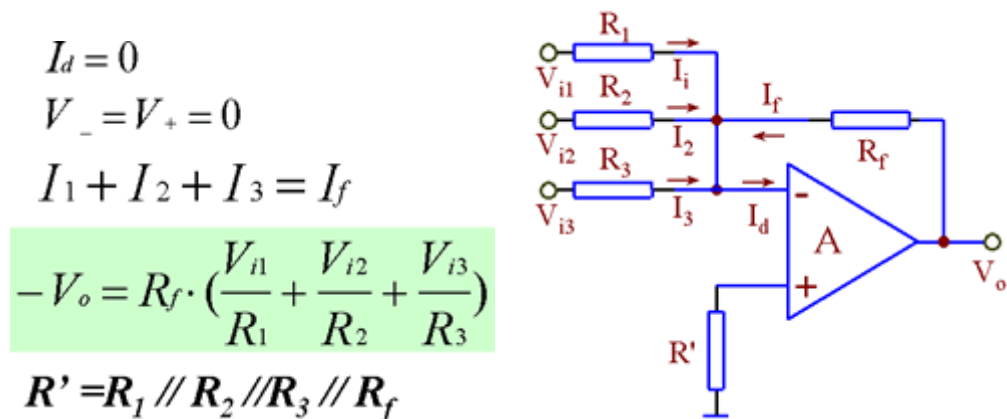
输入电阻大输出电阻小，能真实地将输入信号传给负载而从信号源取流很小

## § 8.2 加减运算电路

### 8.2.1 求和电路

#### 1. 反相求和电路

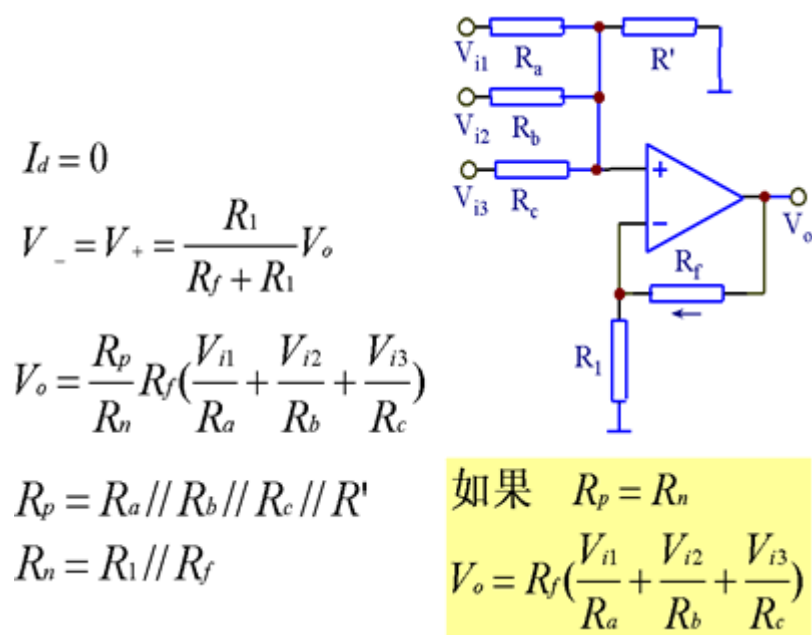
虚短、虚断



特点：调节某一路信号的输入电阻不影响其他路输入与输出的比例关系

## 2. 同相求和电路

虚短、虚断



## 8.2.2 单运放和差电路

$V_{i3}=V_{i4}=0$  时:

$$V_{o1} = -R_f \left( \frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} \right)$$

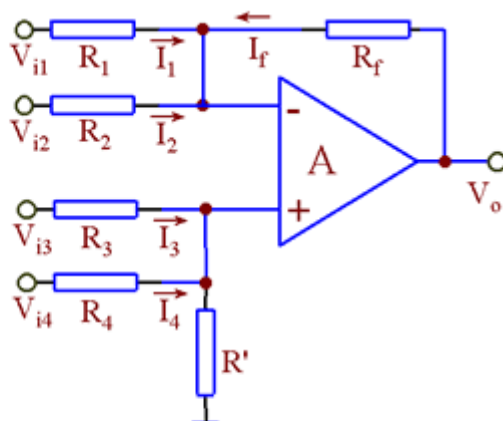
$V_{i1}=V_{i2}=0$  且

$$\left. \begin{aligned} R_p &= R_3 // R_4 // R' \\ R_n &= R_1 // R_2 // R_f \end{aligned} \right\}$$

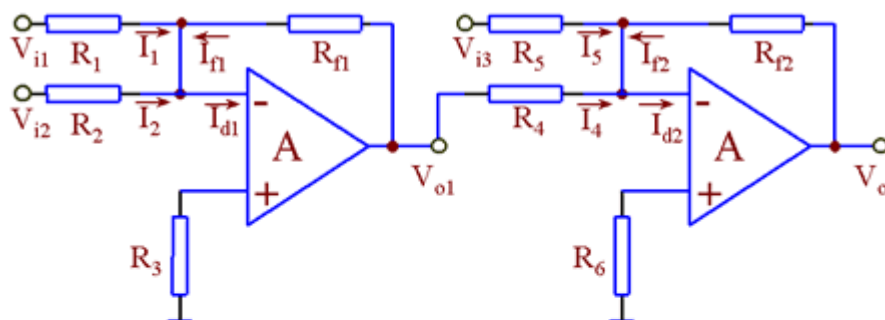
$$R_n = R_p$$

$$V_{o2} = R_f \left( \frac{V_{i3}}{R_3} + \frac{V_{i4}}{R_4} \right)$$

$$V_o = V_{o1} + V_{o2} = R_f \left( \frac{V_{i3}}{R_3} + \frac{V_{i4}}{R_4} - \frac{V_{i1}}{R_1} - \frac{V_{i2}}{R_2} \right)$$



### 8.2.3 双运放和差电路



$$V_{o1} = -R_{f1} \left( \frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} \right)$$

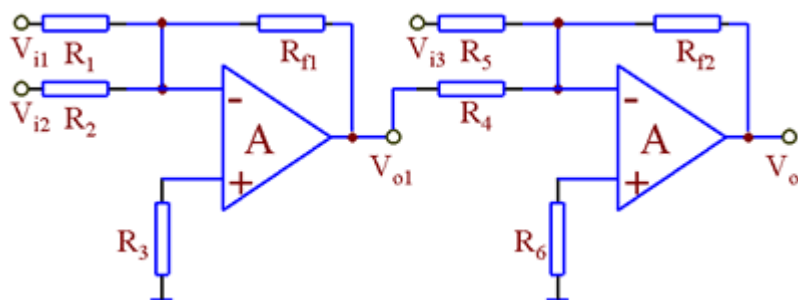
$$V_{o2} = -R_{f2} \left( \frac{V_{o1}}{R_4} + \frac{V_{i3}}{R_5} \right)$$

$$V_o = R_{f2} \left[ \frac{R_{f1}}{R_4} \left( \frac{V_{i1}}{R_1} + \frac{V_{i2}}{R_2} \right) - \frac{V_{i3}}{R_5} \right]$$

例 1: 设计一加减运算电路

设计一加减运算电路, 使  $V_o = 2V_{i1} + 5V_{i2} - 10V_{i3}$

解: 用双运放实现



如果选  $R_{f1}=R_{f2}=100K$ , 且  $R_4=100K$

则:  $R_1=50K$      $R_2=20K$      $R_5=10K$

平衡电阻  $R_3= R_1 // R_2 // R_{f1}=12.5K$      $R_6=R_4 // R_5 // R_{f2}= 8.3K$

例 2:如图电路, 求  $A_{vf}$ ,  $R_i$

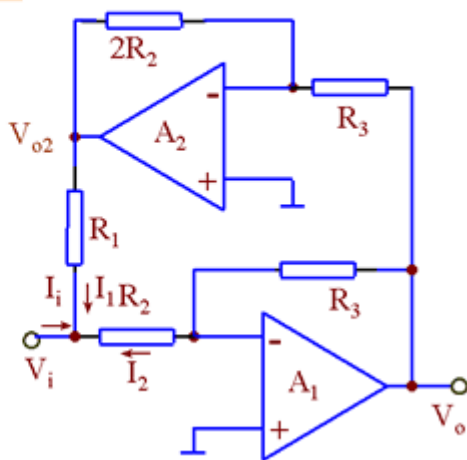
解:

$$V_o = -\frac{R_3}{R_2} V_i \quad A_{vf} = -\frac{R_3}{R_2}$$

$$V_{o2} = -\frac{2R_2}{R_3} V_o = 2V_i$$

$$I_i = I_2 - I_1 = \frac{V_i}{R_2} - \frac{V_i}{R_1} = \frac{R_1 - R_2}{R_2 R_1} V_i$$

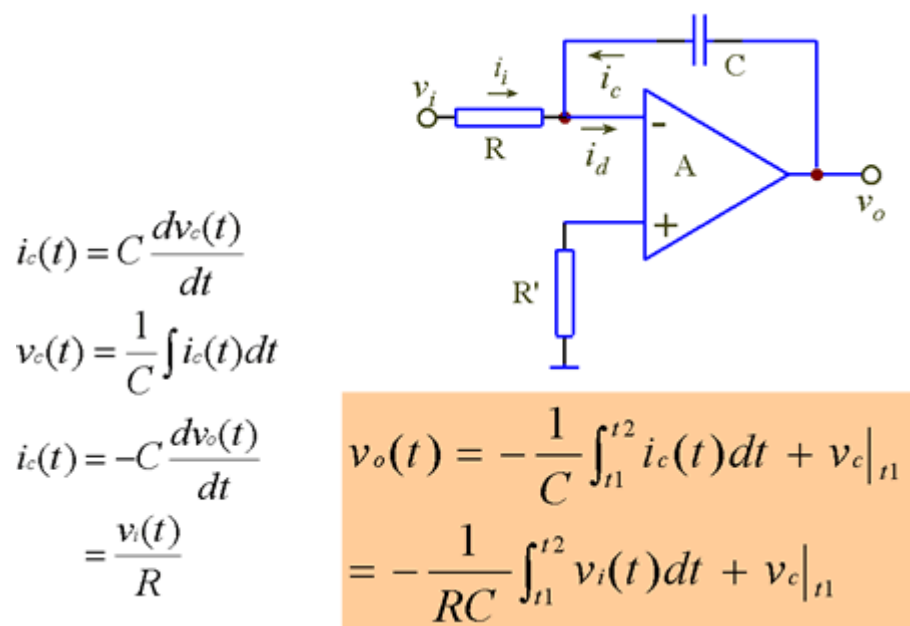
$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{R_1 R_2}{R_1 - R_2}$$



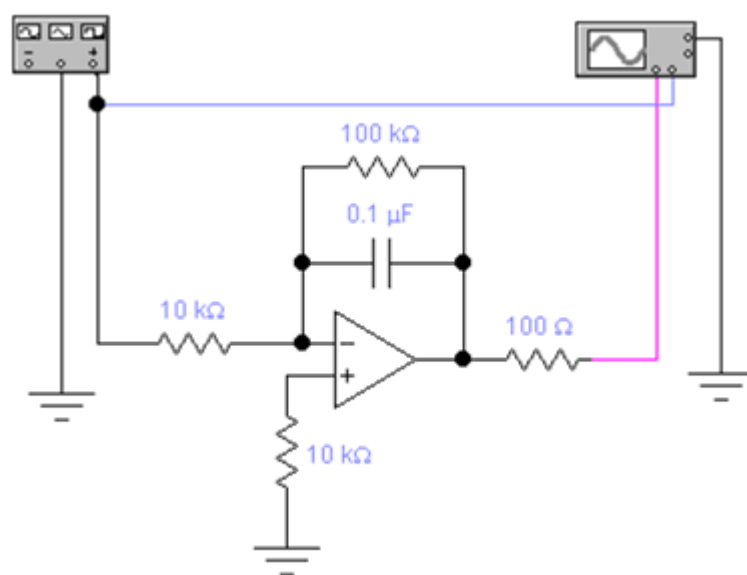
## § 8.3 积分电路和微分电路

### 8.3.1 积分电路

电容两端电压与电流的关系:

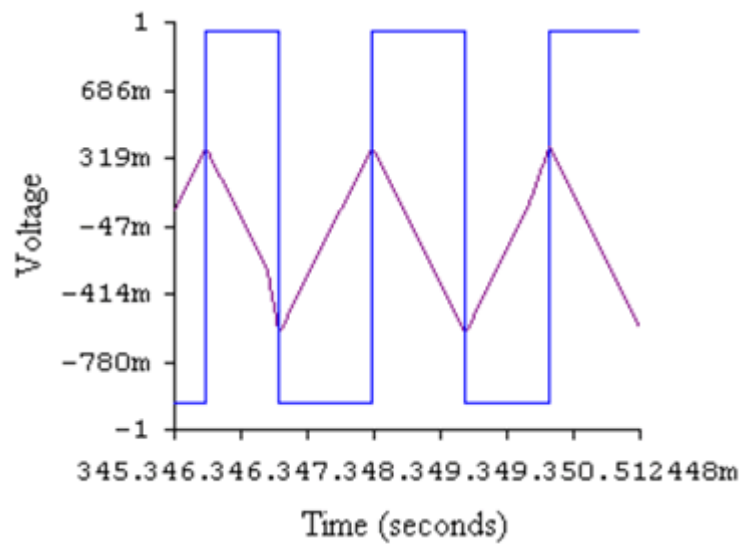


积分实验电路

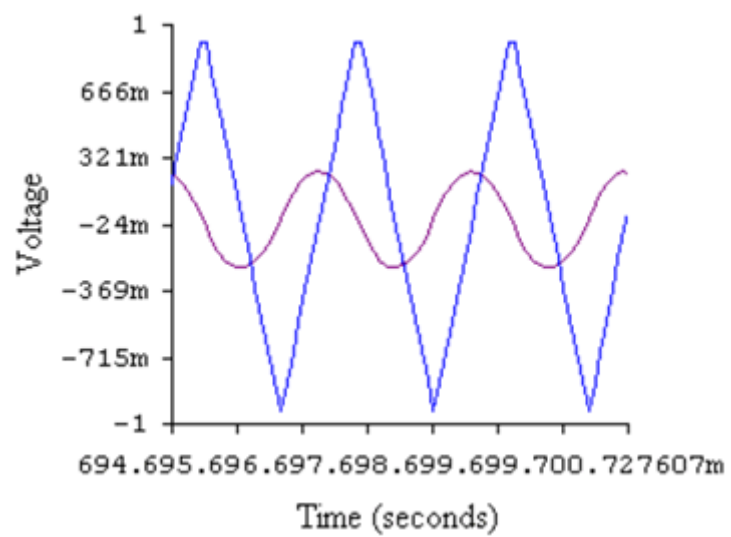


积分电路的用途

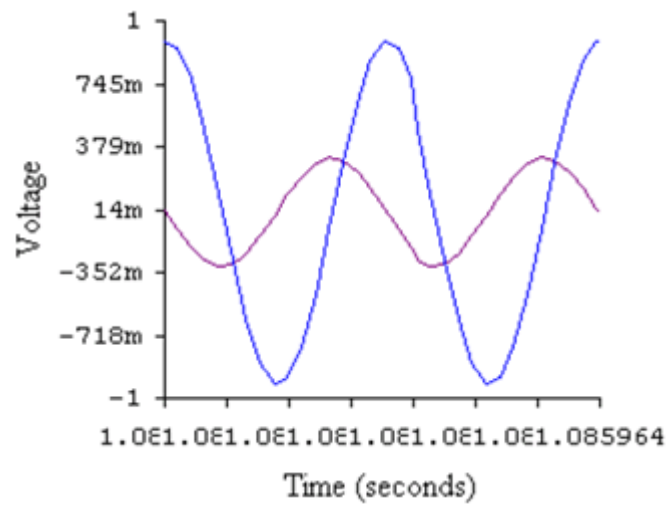
将方波变为三角波 ( $V_i$ : 方波, 频率 500Hz, 幅度 1V)



将三角波变为正弦波 (Vi: 三角波, 频率 500Hz, 幅度 1V)

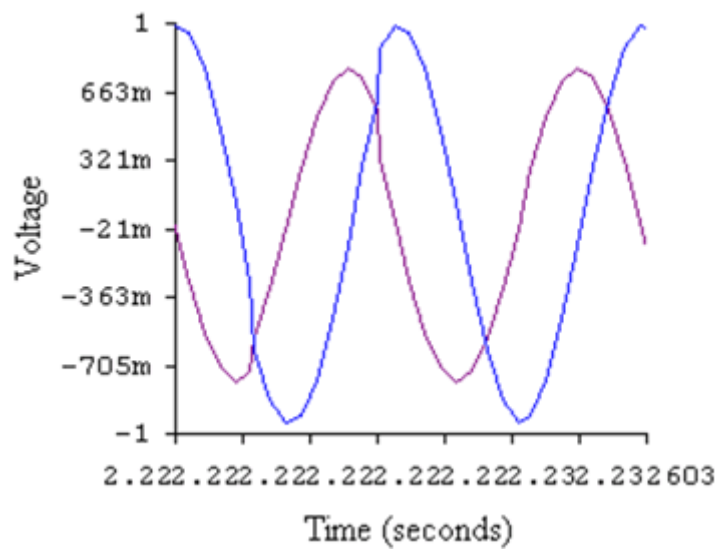


(Vi: 正弦波, 频率 500Hz, 幅度 1V)



思考：输入信号与输出信号间的相位关系？

(Vi: 正弦波，频率 200Hz，幅度 1V)



思考： 输入信号频率对输出信号幅度的影响？

积分电路的其它用途：

去除高频干扰

将方波变为三角波

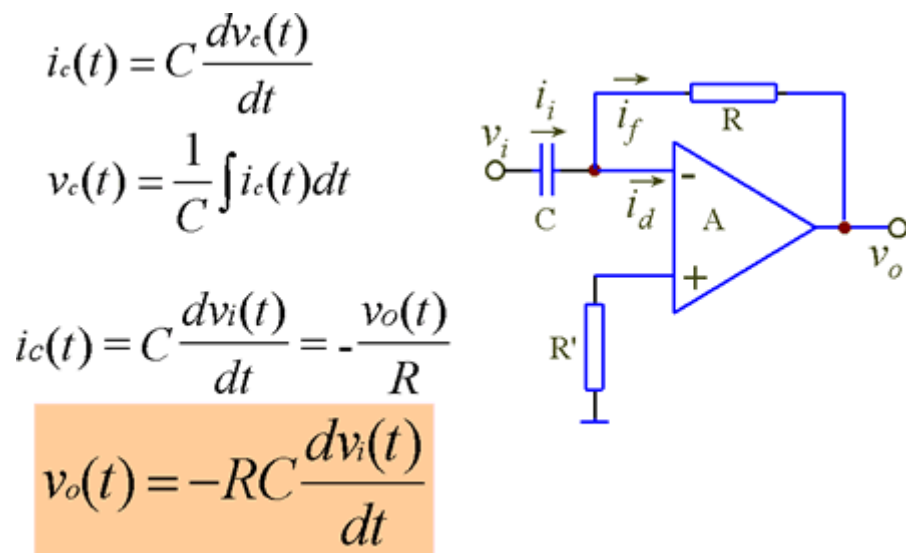
移相

在模数转换中将电压量变为时间量

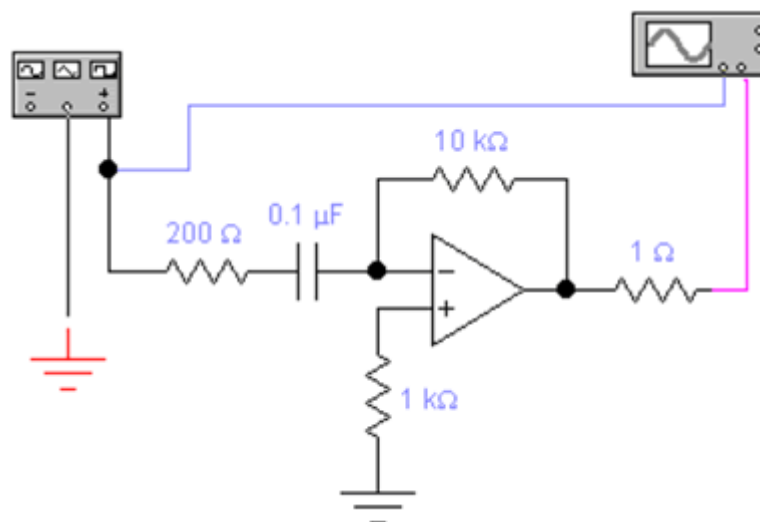


## § 8.3 积分电路和微分电路

### 8.3.2 微分电路

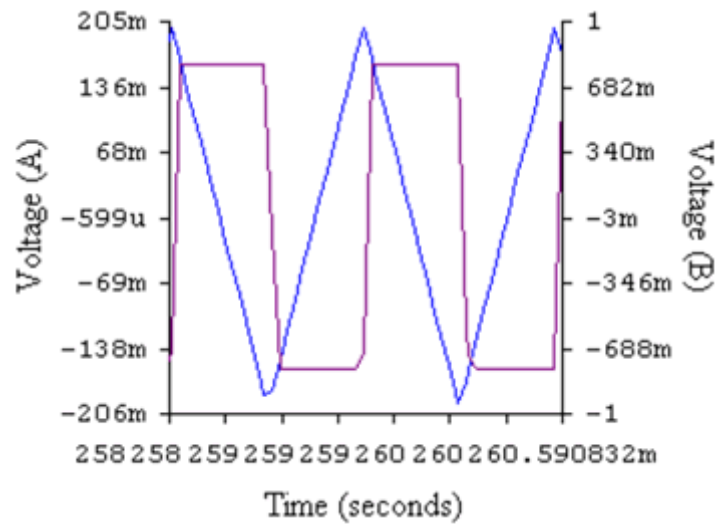


### 微分实验电路



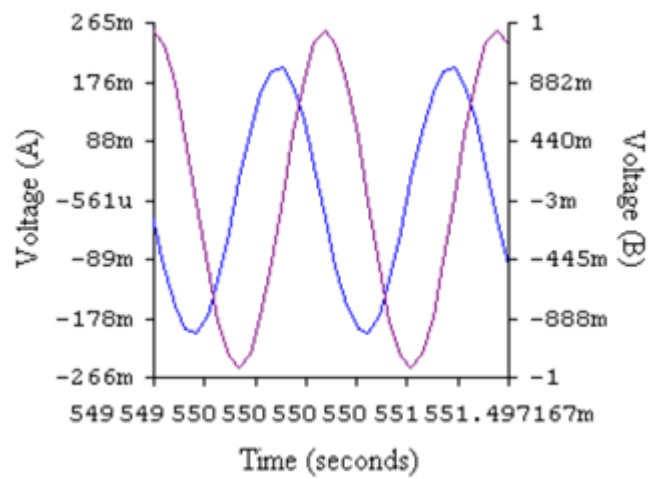
把三角波变为方波

( $V_i$ : 三角波, 频率 1KHz, 幅度 0.2V)



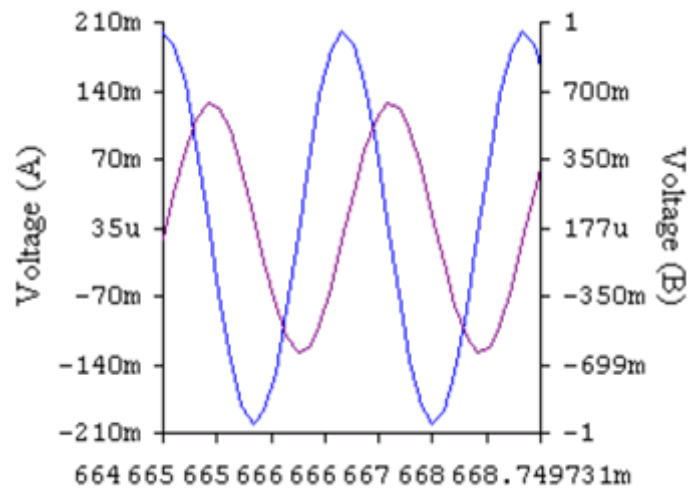
输入正弦波

(Vi: 正弦波, 频率 1KHz, 幅度 0.2V)



思考: 输入信号与输出信号间的相位关系?

(Vi: 正弦波, 频率 500Hz, 幅度 1V)



思考：输入信号频率对输出信号幅度的影响？

## § 8.4 对数和指数运算电路

### 8.4.1 对数电路

$$i_D = i_I = \frac{v_I}{R}$$

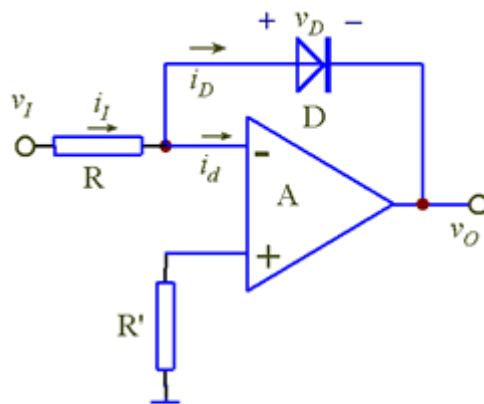
$$v_D = -v_O$$

$$i_D = I_s(e^{\frac{v_D}{V_T}} - 1)$$

$$\approx I_s e^{\frac{v_D}{V_T}} = I_s e^{\frac{-v_O}{V_T}} = \frac{v_I}{R}$$

$v_D \gg V_T$  时

$$v_O \approx -V_T \ln \frac{v_I}{RI_s}$$



对数电路改进

基本对数电路缺点：

运算精度受温度影响大；

小信号时  $\exp(V_D/V_T)$  与 1 差不多大，所以误差很大；

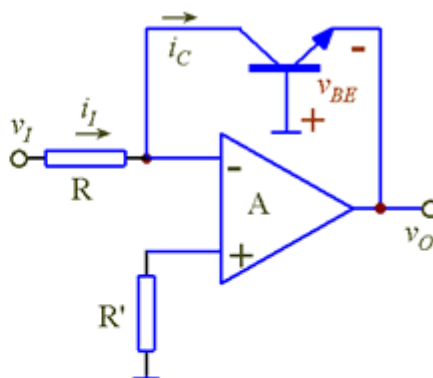
二极管在电流较大时伏安特性与 PN 结伏安特性差别较大，所以运算只在较小的电流范围内误差较小。

改进电路 1：用三极管代替二极管

$$i_C \approx i_E \approx i_I = \frac{v_I}{R}$$

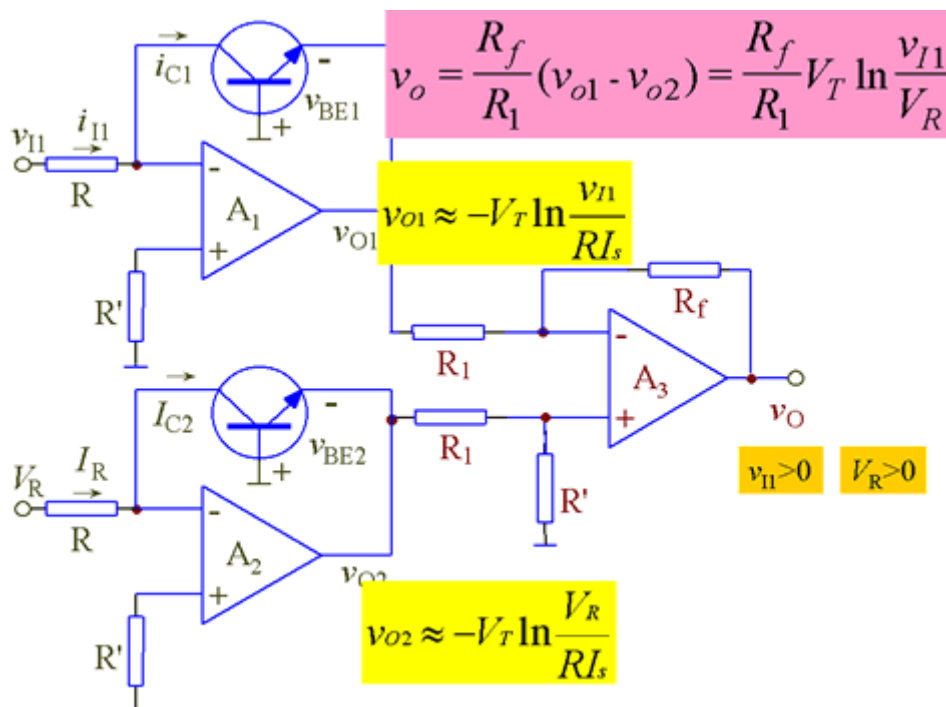
$$i_E = I_s \left( e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} - 1 \right)$$

$$\approx I_s e^{\frac{v_{BE}}{V_T}} \quad (v_{BE} \gg V_T \text{ 时})$$



$$-v_{BE} \approx v_O = -V_T \ln \frac{i_C}{I_s} = -V_T \ln \frac{v_I}{RI_s}$$

电路在理想情况下可完全消除温度的影响



### 改进电路 3：实用对数电路

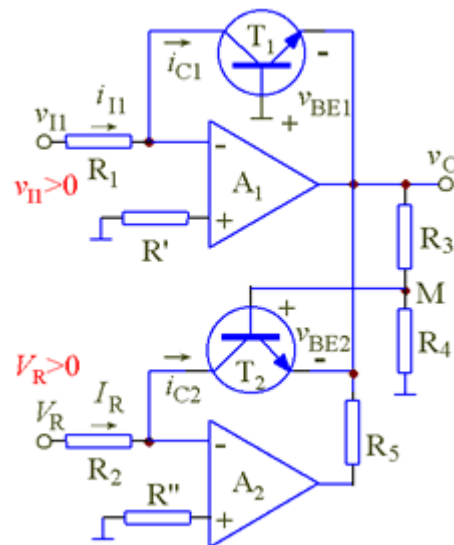
如果忽略  $T_2$  基极电流, 则 M 点电位:

$$v_M = \frac{R_4}{R_3 + R_4} v_O = v_{BE2} - v_{BE1}$$

由于  $i_{C1} = i_{N1}$   $i_{C2} = I_R$

$$\begin{aligned} \text{所以 } v_{BE1} &= V_T \ln \frac{v_I}{R_1 I_S} \\ v_{BE2} &= V_T \ln \frac{V_R}{R_2 I_S} \end{aligned}$$

$$v_o = -\left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right) V_T \ln\left(\frac{R_2}{R_1 V_R} v_i\right)$$



如果取  $R_2 = R_1$  并令  $K = (1 + \frac{R_3}{R_4}) V_T (\lg e)^{-1}$

则  $v_O = -K \lg \frac{v_I}{V_R}$

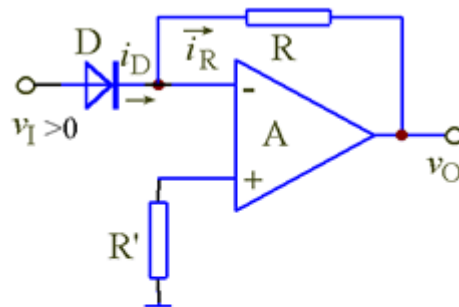
### 8.4.2 指数电路

## 1. 基本指数电路

$$v_O = -RI_s e^{\frac{v_I}{V_T}}$$

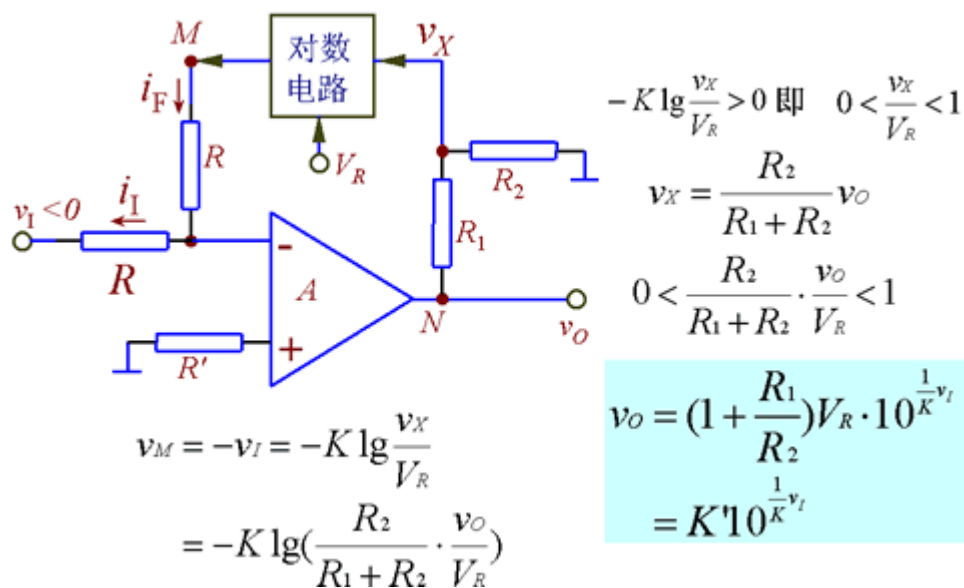
 $v_I \gg V_T$  时

$$i_D \approx I_s e^{\frac{v_I}{V_T}} = i_R = -\frac{v_O}{R}$$



## 2. 反函数型指数电路

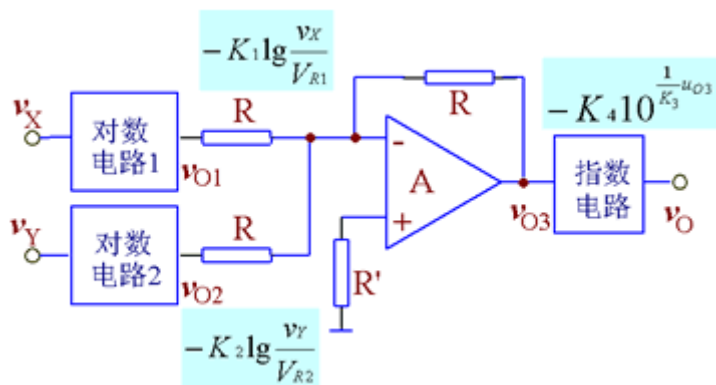
电路必须是负反馈才能正常工作，所以：

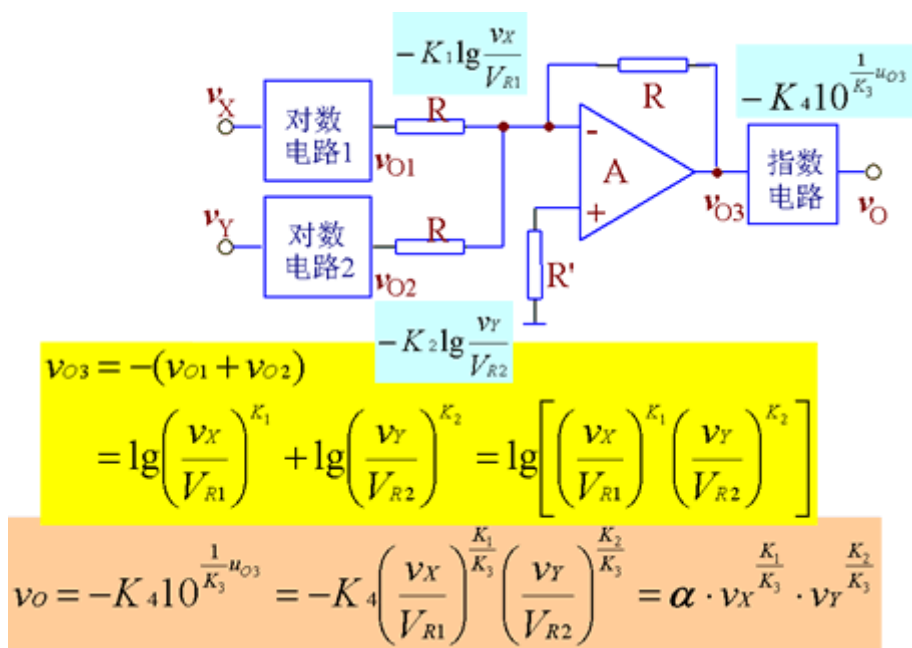


## § 8.5 乘除运算电路

### 8.5.1 基本乘除运算电路

#### 1. 乘法电路

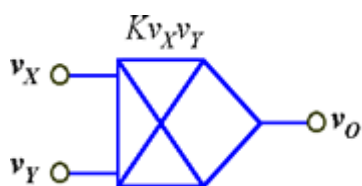




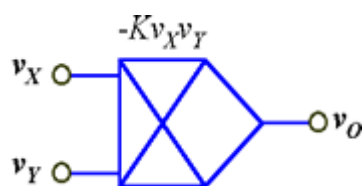
乘法器符号

$$v_O = -K_4 10^{\frac{1}{K_3} v_{O3}} = -K_4 \left(\frac{v_X}{V_{R1}}\right)^{\frac{K_1}{K_3}} \left(\frac{v_Y}{V_{R2}}\right)^{\frac{K_2}{K_3}} = \alpha \cdot v_X^{\frac{K_1}{K_3}} \cdot v_Y^{\frac{K_2}{K_3}}$$

如果  $K_1 = K_2 = K_3$  则  $v_O = K \cdot v_X \cdot v_Y$

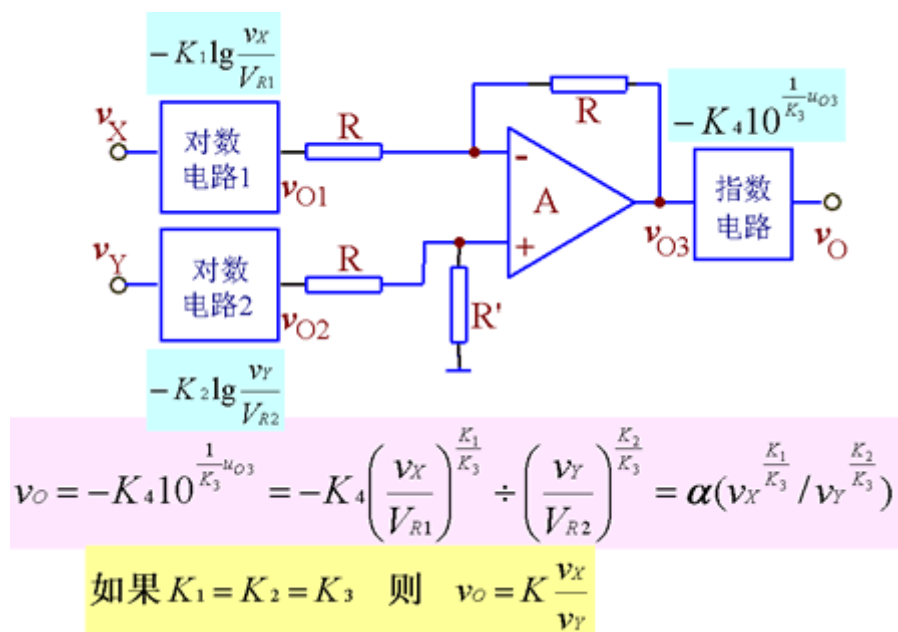


同相乘法器



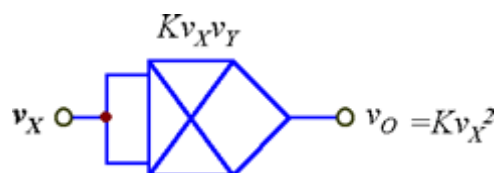
反向乘法器

## 2. 除法电路



### 8.5.2. 乘法器应用

#### 1. 平方运算和正弦波倍频



如果输入信号是正弦波:  $v_I = V_{Im} \sin \omega t$

$$v_O = K (V_{Im} \sin \omega t)^2 = \frac{1}{2} K V_{Im}^2 (1 - \cos 2\omega t)$$

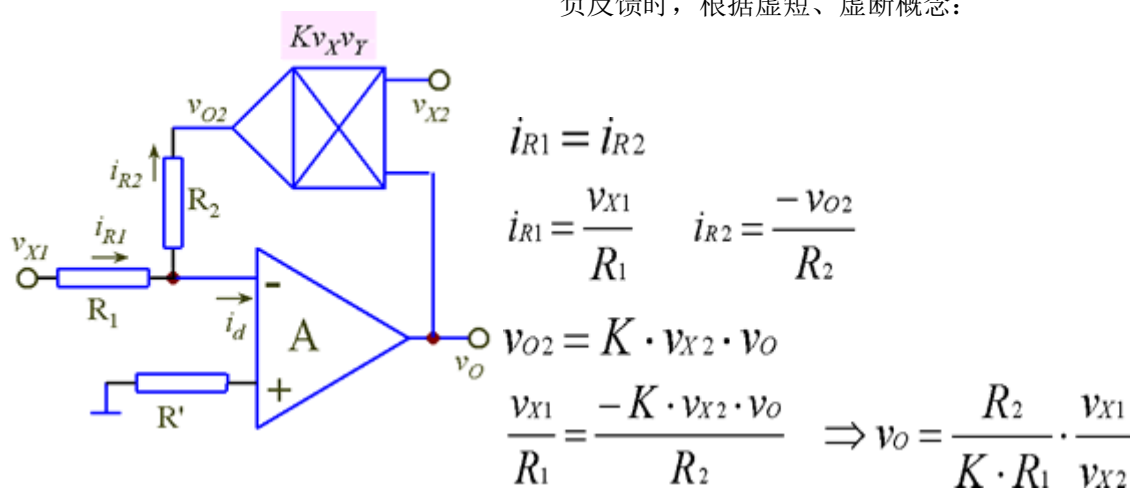
只要在电路输出端加一隔直电容, 便可得到倍频输出信号。

#### 2. 除法运算电路

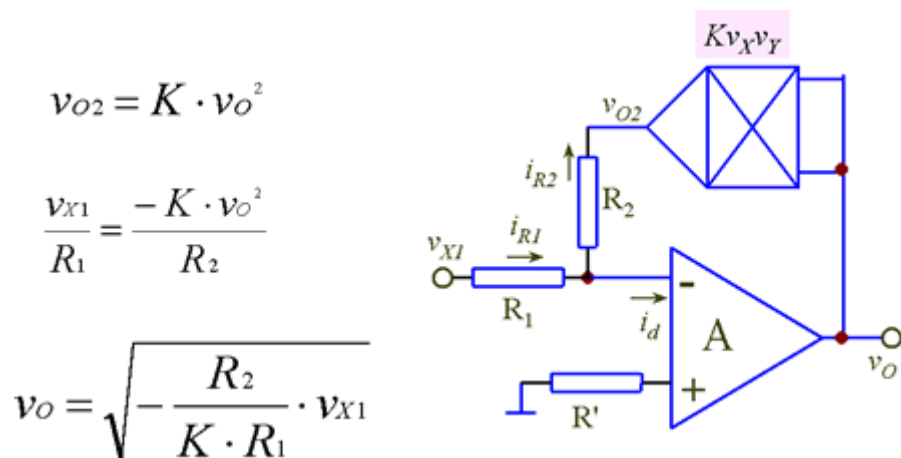
注意: 只有在  $V_{X2} > 0$  时电路才是负反馈



负反馈时，根据虚短、虚断概念：

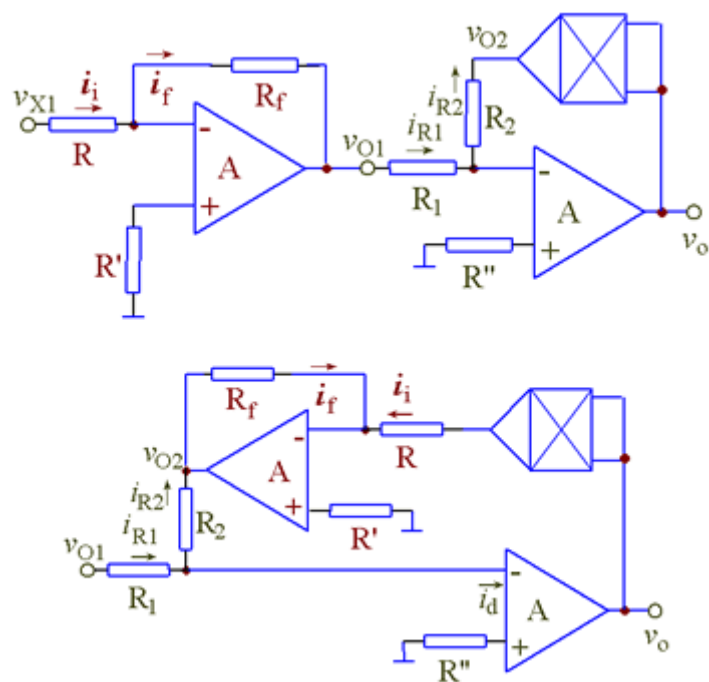


### 3. 开方运算电路

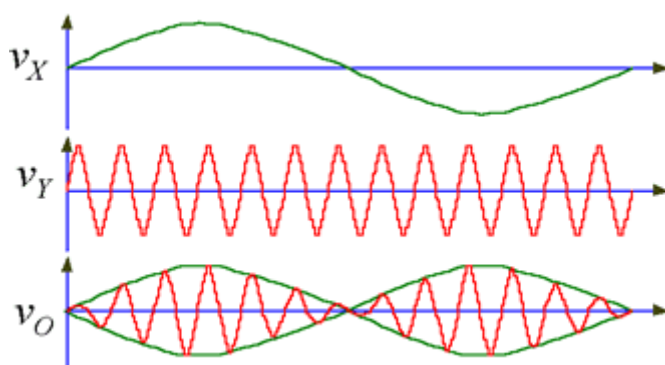


输入电压必须小于 0，否则电路将变为正反馈。

两种可使输入信号大于 0 的方案：

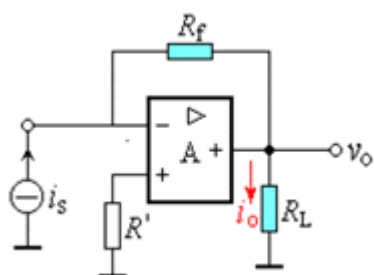


### 3. 调制（调幅）



### 4. 压控增益

乘法器的一个输入端接直流电压（控制信号），另一个接输入信号，则输出信号与输入信号之比（电压增益）成正比。  $V_o = K V_X v_Y$



## 电流-电压变换器

由图可知

$$v_O = -i_s R_f$$

可见输出电压与输入电流成比例。

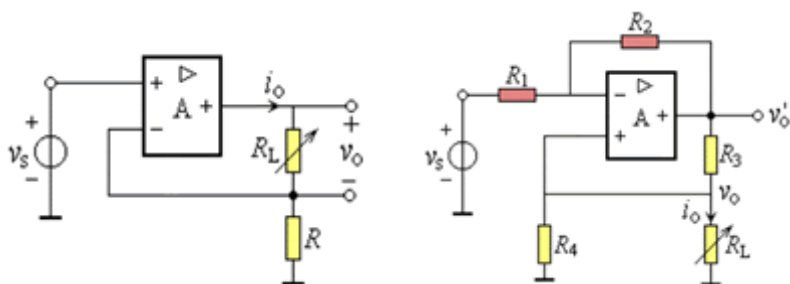
输出端的负载电流：

$$i_O = \frac{v_O}{R_L} = -\frac{i_s R_f}{R_L} = -\frac{R_f}{R_L} i_s$$

电流-电压变换电路

若  $R_f$  固定，则输出电流与输入电流成比例，此时该电路也可视为电流放大电路。

## 电压-电流变换器



负载不接地

负载接地

由负载不接地电路图可知：

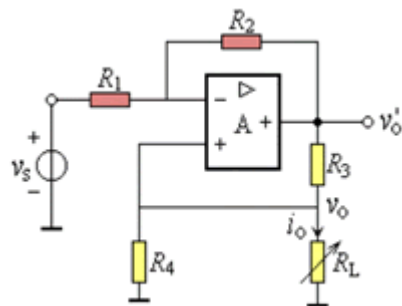
$$v_s = i_O R \quad \text{或} \quad i_O = \frac{1}{R} v_s$$

所以输出电流与输入电压成比例。

对负载接地电路图电路， $R_1$  和  $R_2$  构成电流并联负反馈； $R_3$ 、 $R_4$  和  $R_L$  构成电压串联正反馈。

$$v_- = v_S \frac{R_2}{R_1 + R_2} + v'_O \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$v_+ = v_O = i_O R_L = v'_O \frac{R_4 // R_L}{R_3 + (R_4 // R_L)}$$



$$\text{由 } v_- = v_+ \text{ 得: } i_O = -\frac{R_2}{R_1} \times \frac{v_S}{(R_3 + \frac{R_3}{R_4} R_L - \frac{R_2}{R_1} R_L)}$$

$$i_O = -\frac{R_2}{R_1} \times \frac{v_S}{(R_3 + \frac{R_3}{R_4} R_L - \frac{R_2}{R_1} R_L)}$$

讨论:

1. 当分母为零时,  $i_O \rightarrow \infty$ , 电路自激。

$$i_O = -\frac{1}{R_4} v_S$$

2. 当  $R_2 / R_1 = R_3 / R_4$  时, 则:

说明  $i_O$  与  $v_S$  成正比, 实现了线性变换。

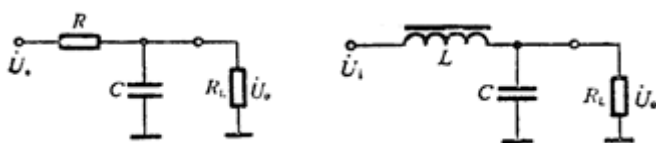
电压-电流和电流-电压变换器广泛应用于放大电路和传感器的连接处, 是很有用的电子电路。

## § 8.6 有源滤波电路

### 8.6.1 滤波电路基础知识

一. 无源滤波电路和有源滤波电路

无源滤波电路：由无源元件（ $R$ ， $C$ ， $L$ ）组成

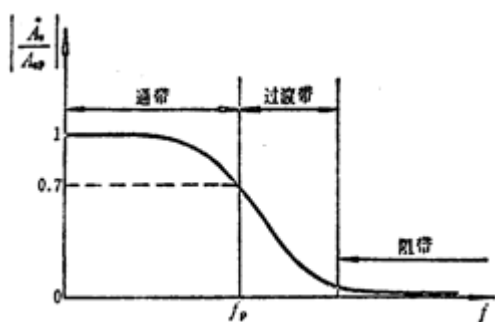


有源滤波电路：用工作在线性区的集成运放和 RC 网络组称，实际上是一种具有特定频率响应的放大器。有源滤波电路的优点，缺点：请看书。

## 二. 滤波电路的分类和主要参数

1. 按所处理的信号可分为模拟的和数字的两种；

2. 按所采用的元器件可分为有源和无源；



没有过渡带

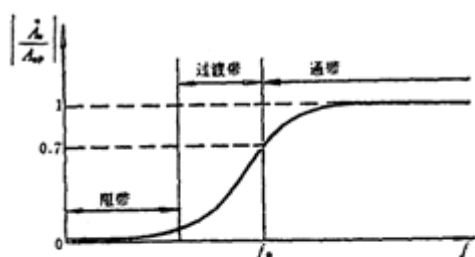
3. 按通过信号的频段可分为以下五种：

a. 低通滤波器（LPF）

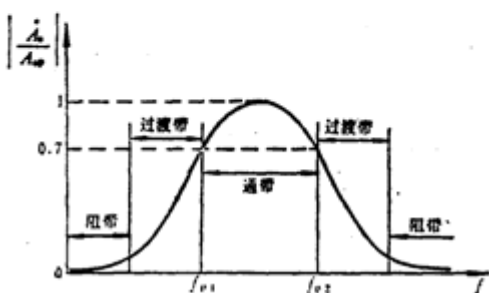
$A_{vp}$ ：通带电压放大倍数

$f_p$ ：通带截至频率

过渡带：越窄表明选频性能越好, 理想滤波器

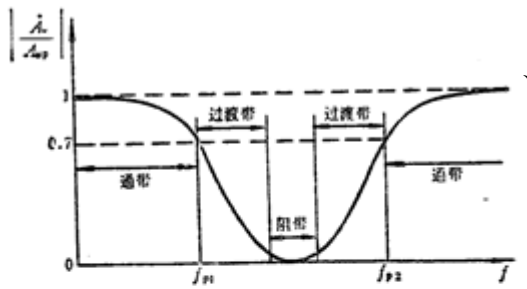


b. 高通滤波器（HPF）

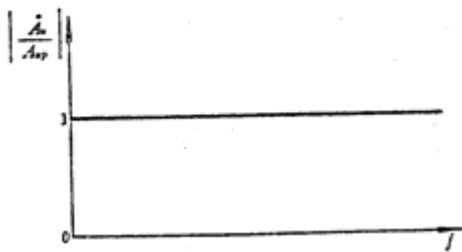


c. 带通滤波器（BPF）

d. 带阻滤波器 ( BEF )

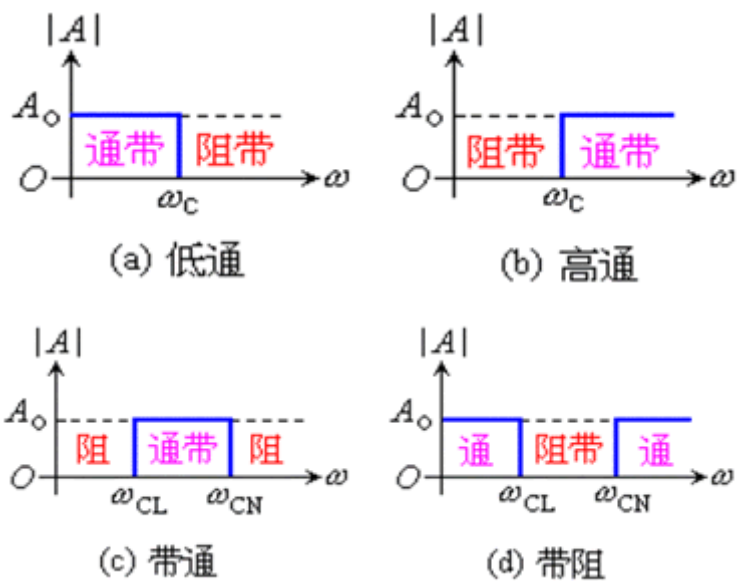


e. 全通滤波器 ( APF )



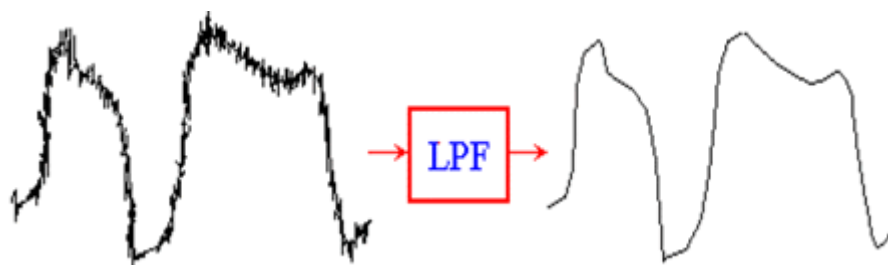
4. 按频率特性在截止频率  $f_p$  附近形状的不同可分为 Butterworth , Chebyshev 和 Bessel 等。

理想有源滤波器的频响：



滤波器的用途

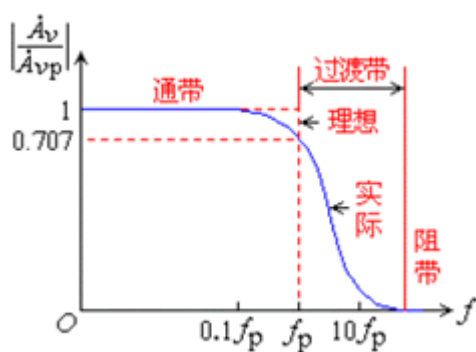
滤波器主要用来滤除信号中无用的频率成分，例如，有一个较低频率的信号，其中包含一些较高频率成分的干扰。滤波过程如图所示。



## § 8.6 有源滤波电路

### 8.6.2 低通滤波电路（LPF）

低通滤波器的主要技术指标



(1) 通带增益  $A_{vp}$

通带增益是指滤波器在通频带内的电压放大倍数，如图所示。性能良好的 LPF 通带内的幅

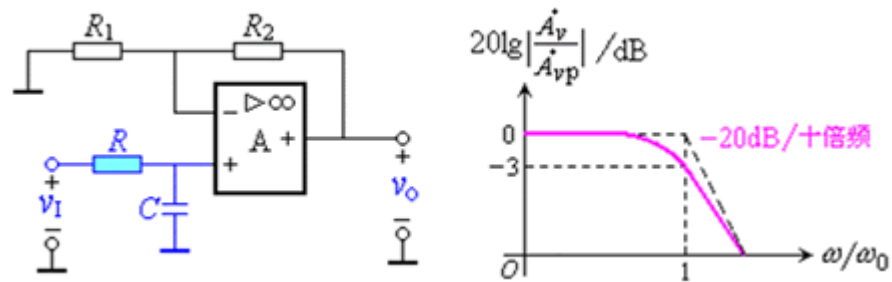
频特性曲线是平坦的，  
阻带内的电压放大倍数  
基本为零。

## (2) 通带截止频率 $f_p$

其定义与放大电路的上限截止频率相同。通带与阻带之间称为过渡带，过渡带越窄，说明滤波器的选择性越好。

### 8.6.2.1 一阶低通滤波电路 (LPF)

#### 一. 电路构成



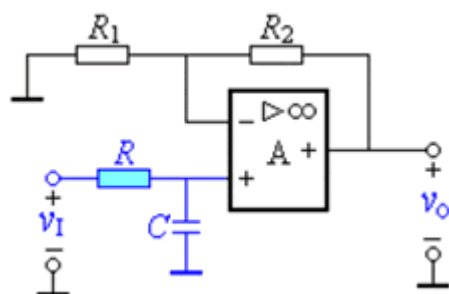
组成：简单 RC 滤波器同相放大器特点： $|\dot{A}_{vp}| > 0$ ，带负载能力强缺点：阻带衰减太慢，选择性较差。

#### 二. 性能分析

有源滤波电路的分析方法：

1. 电路图  $\rightarrow$  电路的传递函数  $A_v(s) \rightarrow$  频率特性  $A_v(j\omega)$
2. 根据定义求出主要参数
3. 画出电路的幅频特性





♥ 通带电压放大倍数

$$A_{vp} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

将s换为 $\omega$

$$\text{令 } \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{RC}$$

$$A_v = \frac{A_{vp}}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$

$$\text{当 } f=f_0 \text{ 时 } |A_v| = \frac{A_{vp}}{\sqrt{2}}$$

$$\text{所以 } f_p = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

♥ 传递函数

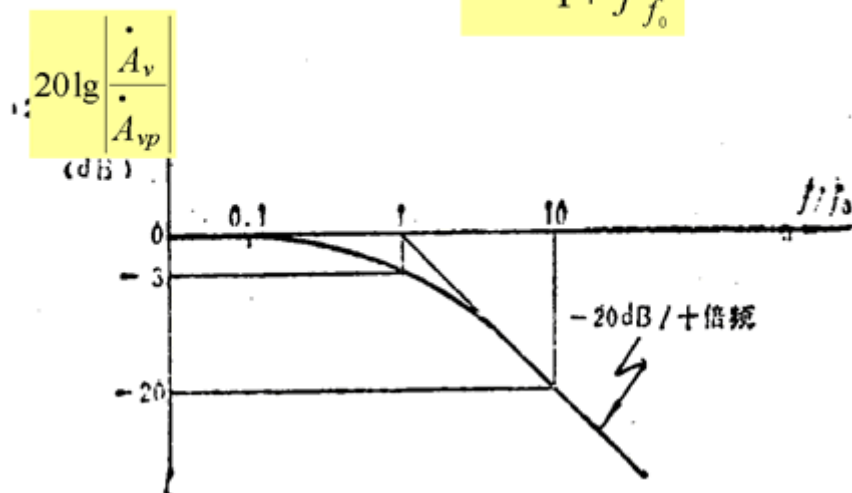
$$V_o(s) = A_{vp} \cdot V_+(s)$$

$$V_+(s) = \frac{1}{1 + sCR} V_i(s)$$

$$A_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{1}{1 + sCR} A_{vp}$$

一阶 LPF 的幅频特性:

$$A_v = \frac{A_{vp}}{1 + j \frac{f}{f_0}}$$



#### 8.6.2.2 简单二阶 LPF

一. 电路构成

将s换为 $\omega$

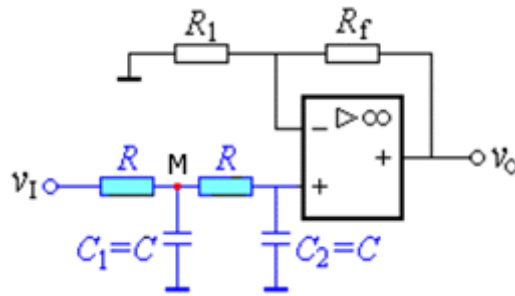
$$\text{令 } \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{RC}$$

$$A_v = \frac{A_{vp}}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j3\frac{f}{f_0}}$$

$$\left| 1 - \left(\frac{f_p}{f_0}\right)^2 + j3\frac{f_p}{f_0} \right| = \sqrt{2}$$

$$f_p = \sqrt{\frac{\sqrt{53}-7}{2}} f_0 \approx 0.37 f_0$$

$$f_p = \frac{0.37}{2\pi RC}$$



组成：二阶 RC 网络同相放大器

通带增益： $A_{vp} = 1 + \frac{R_f}{R}$

二. 主要性能

1. 传递函数：

$$V_o(s) = A_{vp} \cdot V_+(s)$$

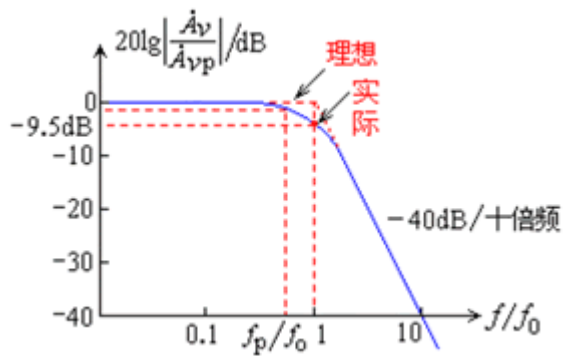
$$V_+(s) = \frac{1}{1 + sCR} V_M(s)$$

$$V_M(s) = \frac{\frac{1}{sC} \parallel (R + \frac{1}{sC})}{R + \frac{1}{sC} \parallel (R + \frac{1}{sC})} V_I(s)$$

$$A_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{vp}}{1 + 3sCR + (sCR)^2}$$

2. 通带截止频率：

3. 幅频特性：



特点：在  $f > f_0$  后幅频特性以  $-40\text{dB/dec}$  的速度下降； 缺点：  $f = f_0$  时，放大倍数的模只有通带放大倍数模的三分之一。

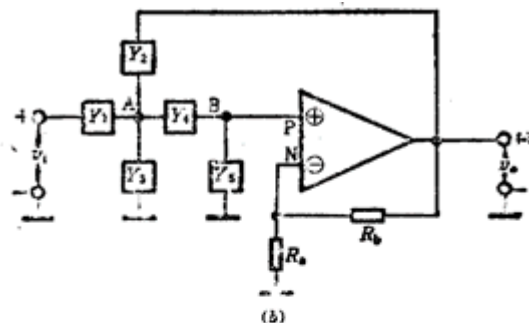
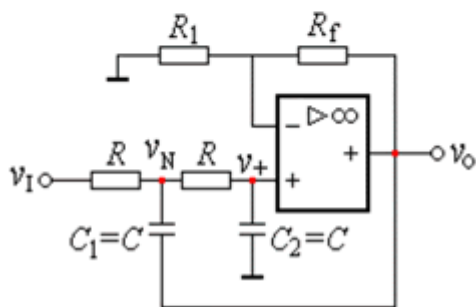


图 8.4.4 二阶压控电压源有源滤波器

### 8.6.2.3 二阶压控电压源 LPF

二阶压控电压源一般形式  
二阶压控电压源 LPF



分析：  $A_{vp}$  同前

$$V_o(s) = A_{vp} V_{(+)}(s)$$

$$V_{(+)}(s) = V_N(s) \frac{1}{1 + sCR}$$

对节点 N，可以列出下列方程：

$$\frac{V_i(s) - V_N(s)}{R} - [V_N(s) - V_o(s)]sC - \frac{V_N(s) - V_{(+)}(s)}{R} = 0$$

联立求解以上三式，可得 LPF 的传递函数：

$$A_v(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{vp}}{1 + (3 - A_{vp})sCR + (sCR)^2}$$

上式表明，该滤波器的通带增益应小于 3，才能保障电路稳定工作。

频率特性：

将s换为 $\omega$

$$\text{令 } \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{RC}$$

$$A_v = \frac{A_{vp}}{1 - (\frac{f}{f_0})^2 + j(3 - A_{vp})\frac{f}{f_0}}$$

$$A_v|_{f=f_0} = \frac{A_{vp}}{j(3 - A_{vp})}$$

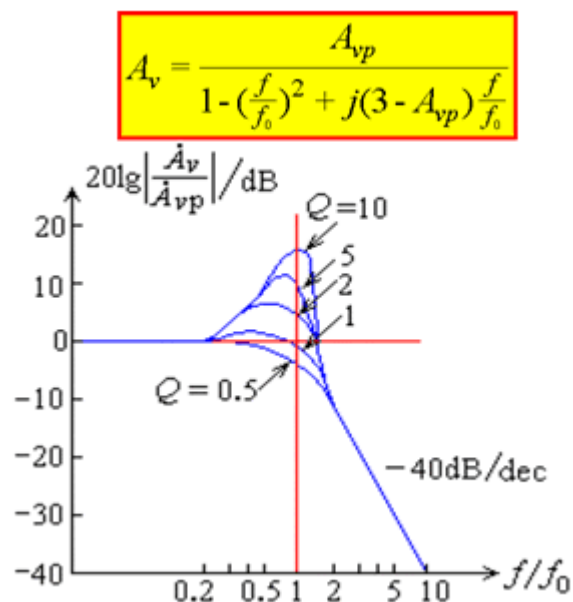
$$\text{令: } Q = \frac{1}{3 - A_{vp}} \text{ 则: } A_v|_{f=f_0} = QA_{vp}$$

当 $Q=0.707$  时,  $f_p=f_0$

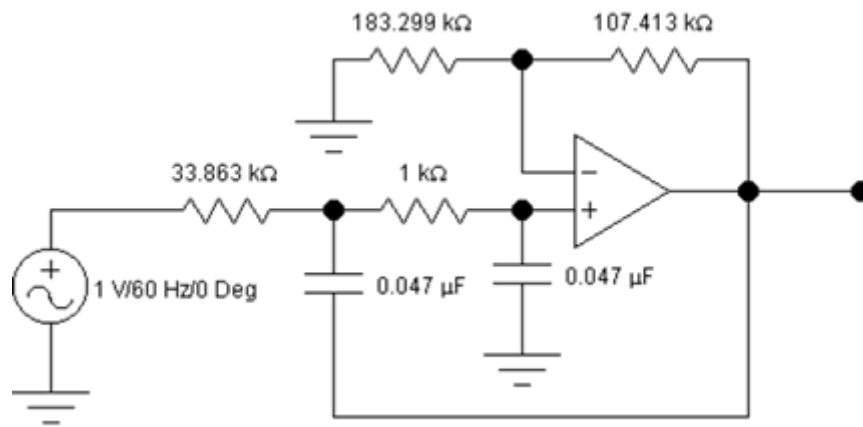
当 $2 < A_{vp} < 3$  时,  $Q > 1$ ,  $A_v|_{f=f_0} > A_{vp}$ , 幅频特性在  $f=f_0$  处将被抬高。

当  $A_{vp} \geq 3$  时,  $Q = \infty$ , 有源滤波器自激。由于将 接到输出端，等于在高频端给 LPF 加了一点正反馈，所以在高频端的放大倍数有所抬高，甚至可能引起自激。

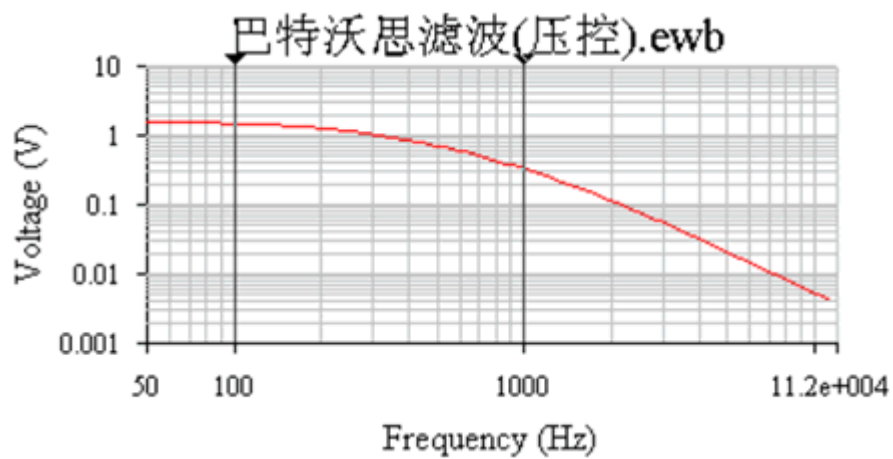
二阶压控电压源 LPF 的幅频特性：



## 巴特沃思（压控）LPF



## 仿真结果

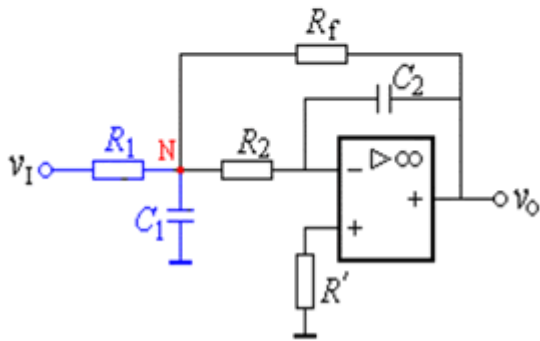


$$Q=0.707 \quad f_p=f_0=100\text{Hz}$$

## § 8.6 有源滤波电路

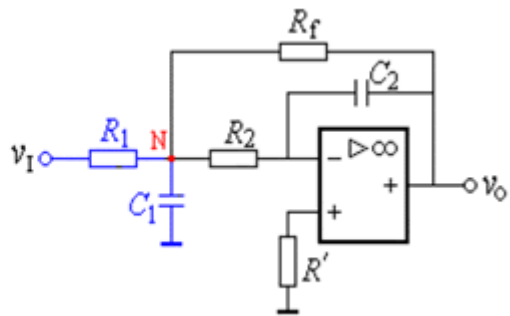
### 8.6.2.4 无限增益多路反馈滤波器

无限增益多路反馈有源滤波器一般形式，要求集成运放的开环增益远大于 60DB



由图可知:

$$V_o(s) = \frac{-1}{sC_2R_2}V_N(s)$$


$$\frac{V_i(s) - V_N(s)}{R_1} - V_N(s)sC_1 - \frac{V_N(s)}{R_2} - \frac{V_N(s) - V_o(s)}{R_f} = 0$$

$$A_v(s) = \frac{-R_f/R_1}{1 + sC_2R_2R_f\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_f}\right) + s^2C_1C_2R_2R_f}$$

$$A_{vp} = -\frac{R_2}{R_1}$$

通带电压放大倍数

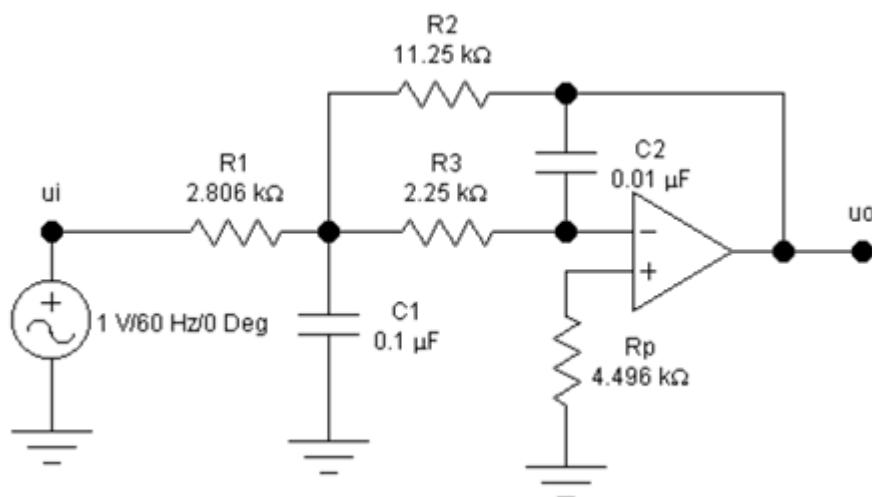
$$A_v = \frac{A_{vp}}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j\frac{1}{Q}\frac{f}{f_0}}$$

$$Q = (R_1 // R_2 // R_f) \sqrt{\frac{C_1}{R_2R_fC_2}}$$

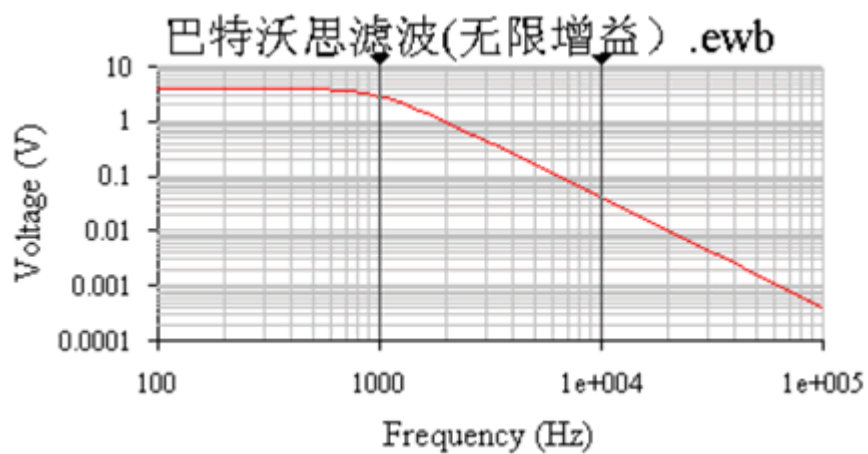
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{C_1C_2R_2R_f}}$$

频率响应为：

巴特沃思（无限增益）LPF



仿真结果

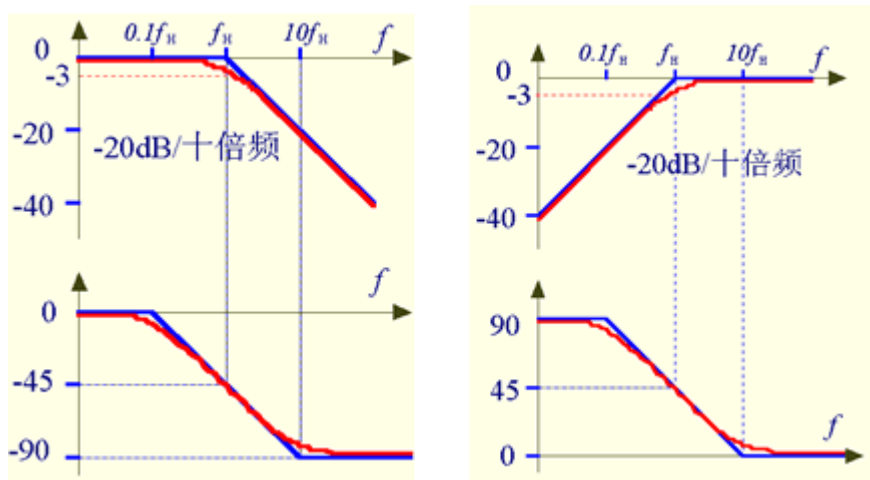


$Q=0.707$   $f_p=f_0=1000\text{Hz}$

### 8.6.3 高通滤波电路 ( HPF )

#### 8.6.3.1 HPF 与 LPF 的对偶关系

##### 1. 幅频特性对偶(相频特性不对偶)



##### 2. 传递函数对偶

低通滤波器传递函数



$$A_v = \frac{1}{1+sRC}$$

$$sRC \Rightarrow \frac{1}{sRC}$$



$$A_v(s) = \frac{A_{vp}}{1 + (3 - A_{vp})sRC + (sRC)^2}$$

$$A_v = \frac{A_{vp}}{1 + (3 - A_{vp})\frac{1}{sRC} + \left(\frac{1}{sRC}\right)^2}$$

$$A_v = \frac{1}{1 + \frac{1}{sRC}} = \frac{sRC}{1 + sRC}$$

高通滤波器传递函数

$$\dot{A}_v = \frac{(sRC)^2}{1 + (3 - A_{vp})sRC + (sRC)^2} A_{vp}$$

$$A_v = \frac{A_{vp}}{1 - \left(\frac{f_0}{f}\right)^2 - j\frac{1}{Q}\frac{f_0}{f}}$$

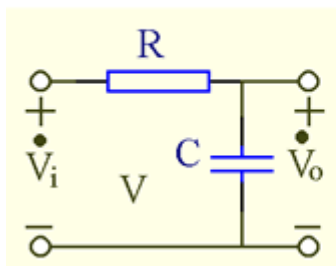
HPF 与 LPF 的对偶关系

3. 电路结构对偶

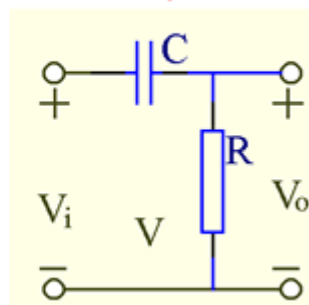
将起滤

波作用的电容换成电阻

将起滤波作用的电阻换成电容

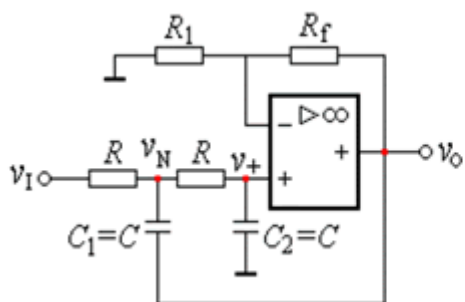


低通滤波电路

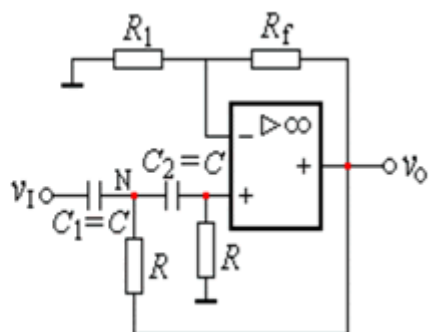


高通滤波电路

### 8.6.3.2 二阶压控电压源 HPF



二阶压控电压源 LPF

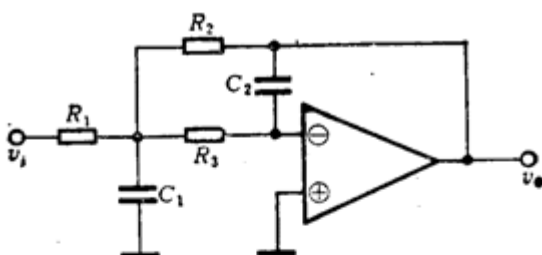


二阶压控电压源 HPF

电路形式相互对偶

二阶压控电压源 HPF

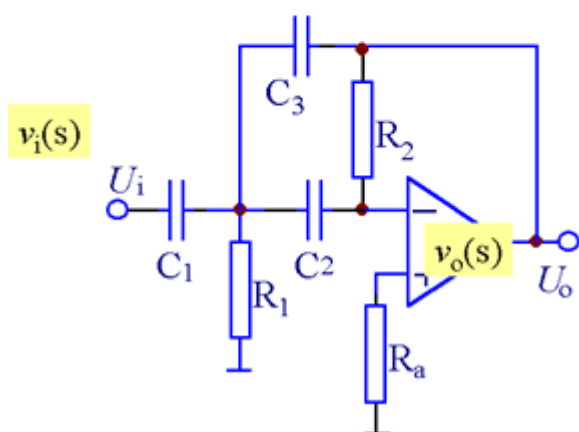
传递函数: 低通:



高通:

将s换为 $\omega$   
 令  $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{RC}$   

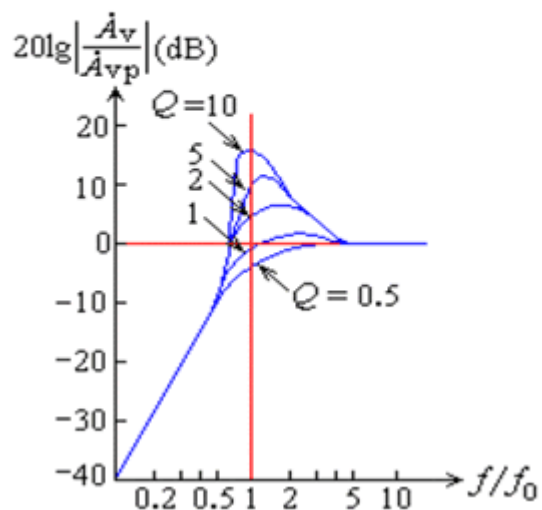
$$Q = \frac{1}{3 - A_{vp}}$$



二阶压控电压源 HPF

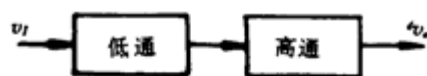
二阶压控电压源 HPF 幅频特性:

$$A_v = \frac{A_{vp}}{1 - (\frac{f_0}{f})^2 - j \frac{1}{Q} \frac{f_0}{f}}$$

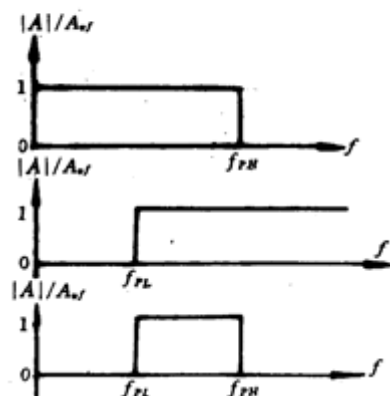


### 8.6.3.3 无限增益多路反馈 HPF

无限增益多路反馈 LPF



无限增益多路反馈 HPF



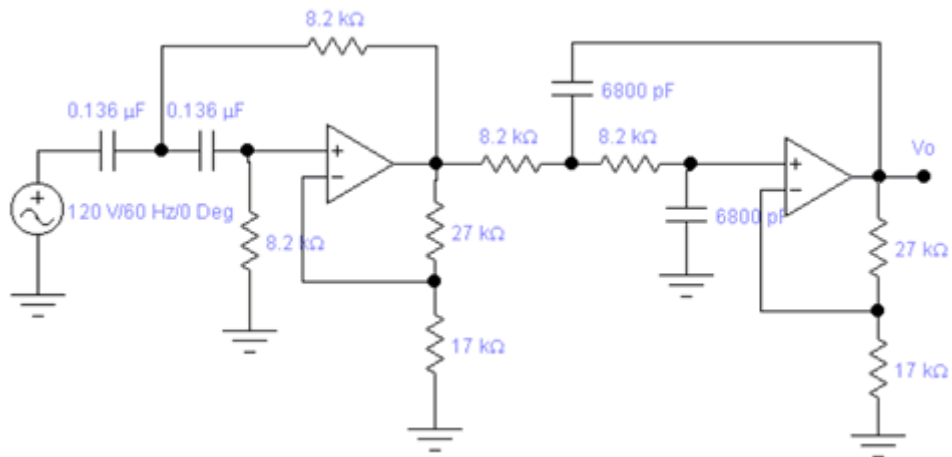
### 8.6.4 带通滤波器 (BPF)

BPF 的一般构成方法:

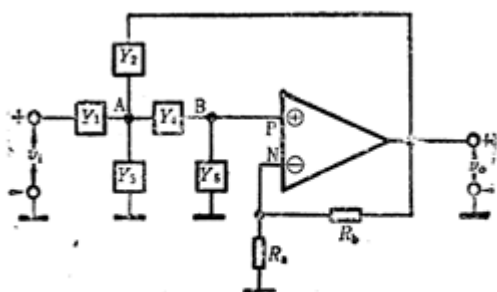
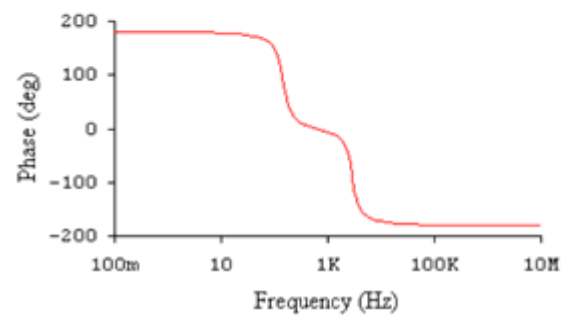
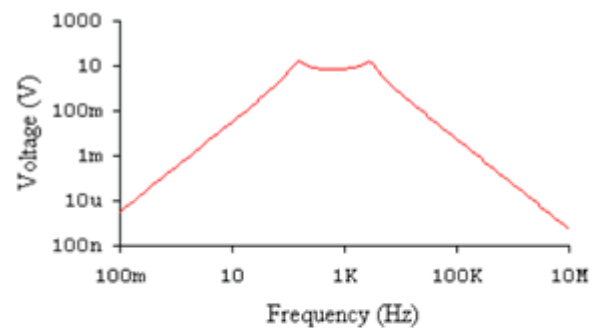
优点: 通带较宽, 通带截至频率容易调整

缺点: 电路元件较多

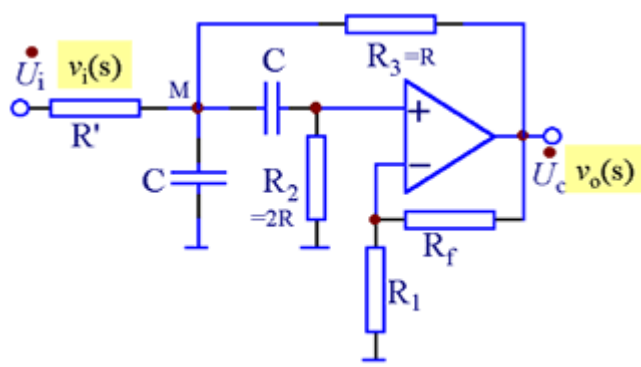
## 一般带通滤波电路



## 仿真结果



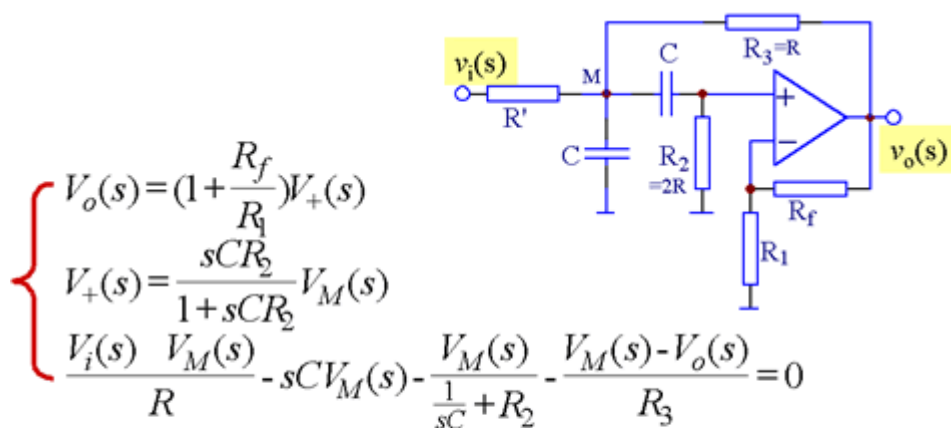
## 二阶压控电压源 BPF



二阶压控电压源一般形式

二阶压控电压源 BPF

传递函数：



$$A_v(s) = \frac{sCR}{1 + (3 - A_{vf})sCR + (sCR)^2} \cdot A_{vf} \quad A_{vf} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$A_v(s) = \frac{sCR}{1 + (3 - A_{vf})sCR + (sCR)^2} \cdot A_{vf} \quad A_{vf} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

s换成  $j\omega$  且令:  $\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{RC}$

$f_0$ 是滤波器的中心频率

$$\begin{cases} A_v = \frac{A_{vp}}{1 + j \frac{1}{3 - A_{vf}} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)} \\ A_{vp} = \frac{A_{vf}}{3 - A_{vf}} \quad \text{通带电压放大倍数} \end{cases}$$

$$\left| \frac{1}{3 - A_{vf}} \left( \frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right) \right| = 1$$

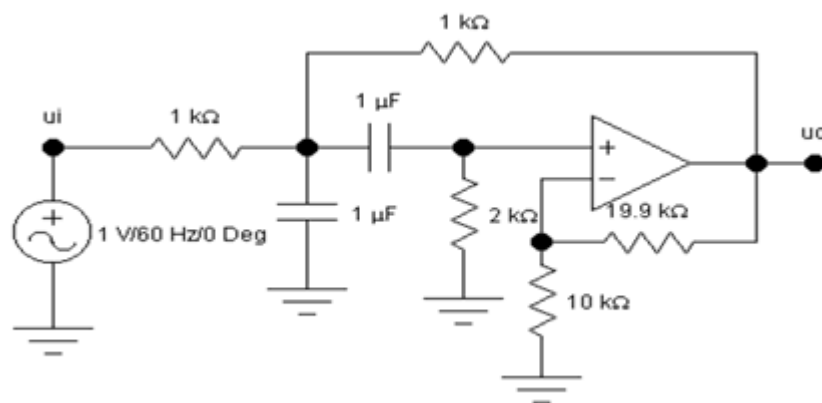
$$\begin{cases} f_{p1} = \frac{f_0}{2} \left( \sqrt{(3 - A_{vf})^2 + 4} - (3 - A_{vf}) \right) \\ f_{p2} = \frac{f_0}{2} \left( \sqrt{(3 - A_{vf})^2 + 4} + (3 - A_{vf}) \right) \end{cases}$$

$$\begin{aligned} BW &= f_{p2} - f_{p1} = (3 - A_{vf})f_0 \\ &= \left( 2 - \frac{R_f}{R_1} \right) f_0 \end{aligned}$$

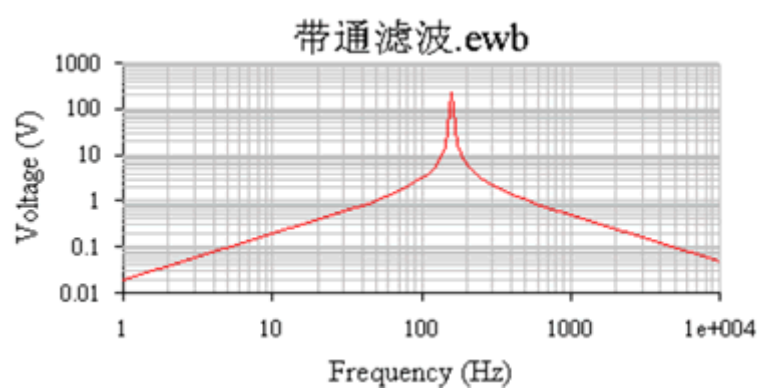
截止频率:

RC 选定后, 改变  $R_1$  和  $R_f$  即可改变频带宽度

二阶压控电压源 BPF 仿真电路



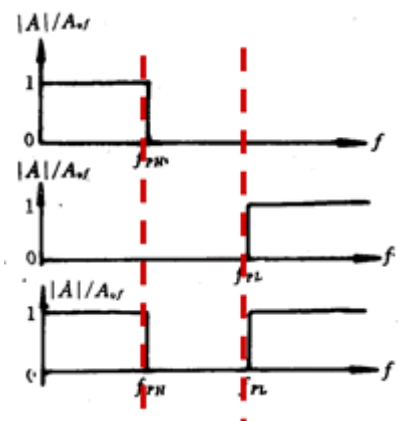
仿真结果



#### 8.6.5 带阻滤波器(BEF)

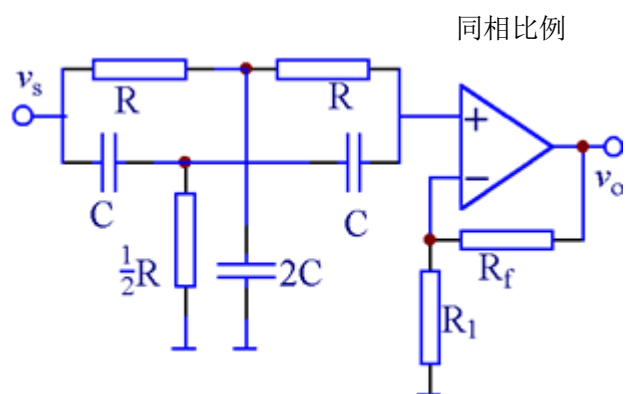


BEF 的一般形式



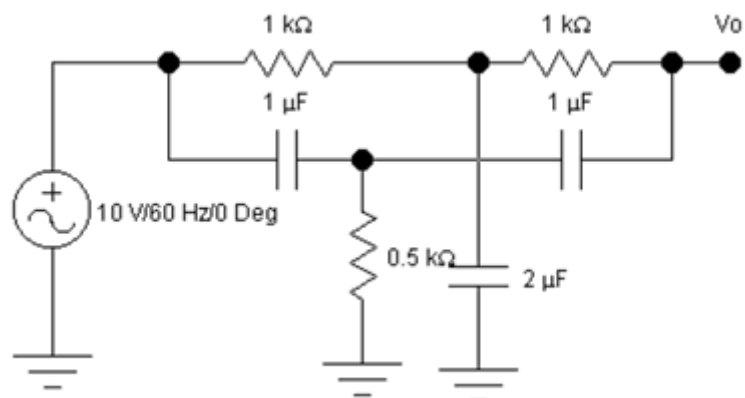
缺点:电路元件较多且 HPF 与 LPF 相并比较困难。

基本 BEF 电路



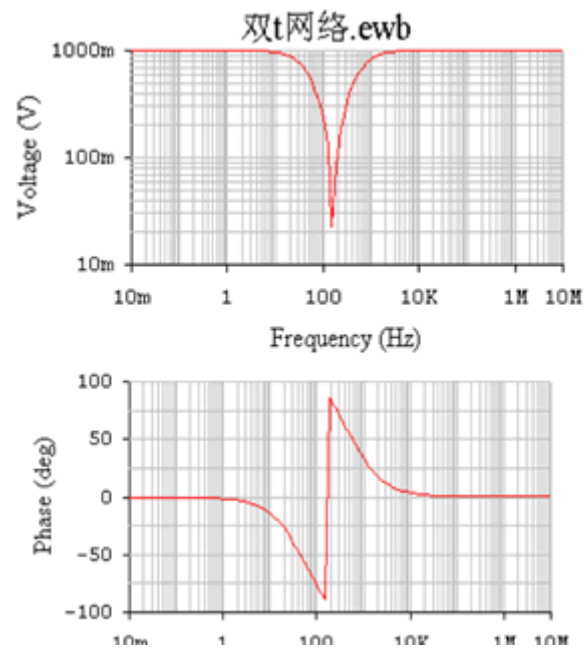
无源带阻(双 T 网络)

双 T 带阻网络

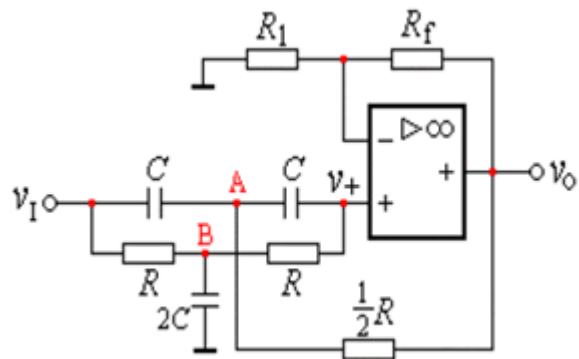




## 双 T 带阻网络



## 二阶压控电压源 BEF 电路



正反馈, 只在  $f_0$  附近起作用

## 传递函数

$$A_v(s) = \frac{1 + (sCR)^2}{1 + 2(2 - A_{vp})sCR + (sCR)^2} \quad A_{up}$$

$$A_{vp} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

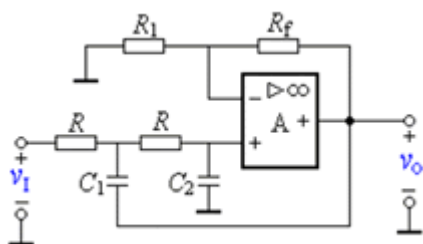
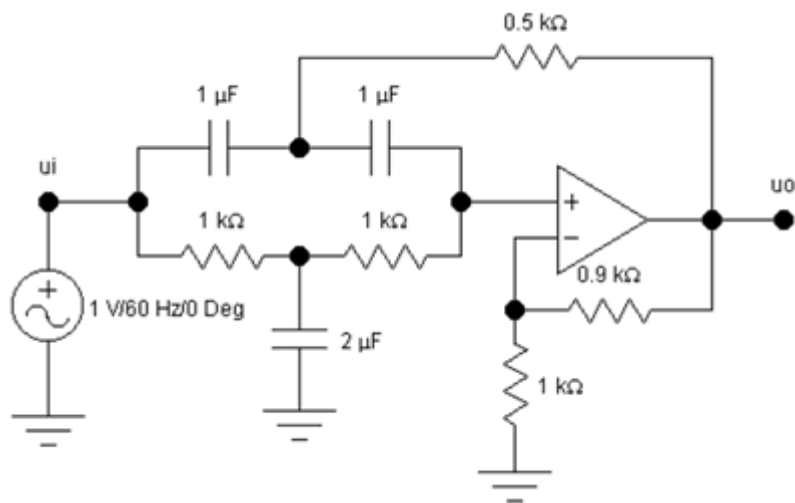
$$f_{p1} = f_0 \left( \sqrt{(2 - A_{vp})^2 + 1} - (2 - A_{vp}) \right)$$

$$f_{p2} = f_0 \left( \sqrt{(2 - A_{vp})^2 + 1} + (2 - A_{vp}) \right)$$

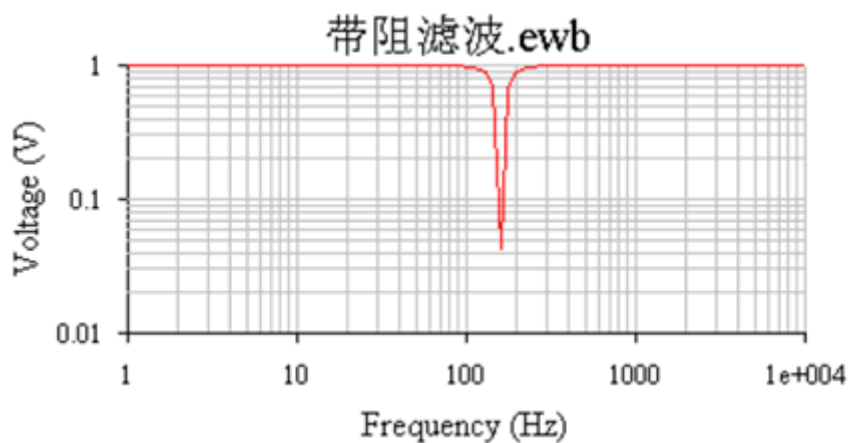
$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$BW = f_{p2} - f_{p1} = 2(2 - A_{vp})f_0$$

二阶压控电压源 BEF 仿真电路



仿真结果



例题 1:

要求二阶压控型 LPF 的  $f_0=400\text{Hz}$  ,  $Q$  值为 0.7, 试求电路中的电阻、电容值。

解: 根据  $f_0$  , 选取  $C$  再求  $R$ 。

1.  $C$  的容量不易超过 。 因大容量的电容器体积大, 价格高, 应尽量避免使用。

取

$$C = 0.1\mu\text{F}, 1\text{k}\Omega < R < 1\text{M}\Omega,$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi R \times 0.1 \times 10^{-6}} = 400\text{Hz}$$

计算出:  $R=3979\Omega$  取  $R=3.9\text{k}\Omega$

2. 根据  $Q$  值求和, 因为时, 根据与、的关系, 集成运放两输入端外接电阻的对称条件

$$Q = \frac{1}{3 - A_{vP}} = 0.7 \quad A_{vP} = 1.57$$

根据 与  $R_1$  、  $R_f$  的关系, 集成运放两输入端外接电阻的对称条件。

$$1 + \frac{R_f}{R_1} = A_{vp} = 1.57 \quad R_1 // R_f = R + R = 2R$$

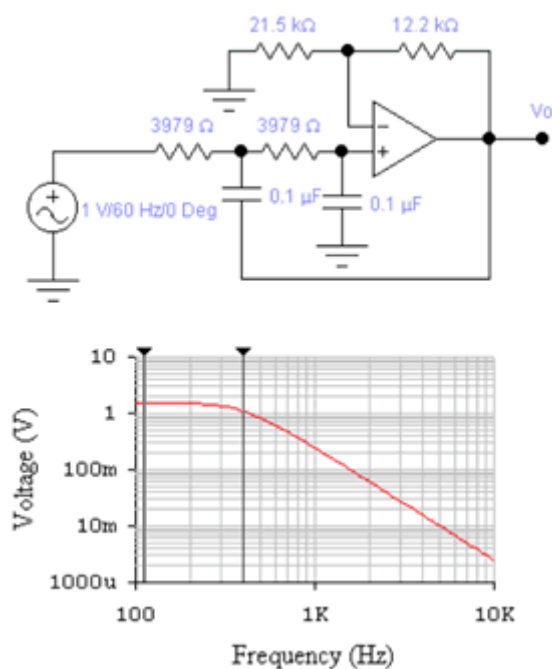
解得：

$$R_1 = 5.51 \times R, \quad R_f = 3.14 \times R, \quad R = 3.9 \text{ k}\Omega$$

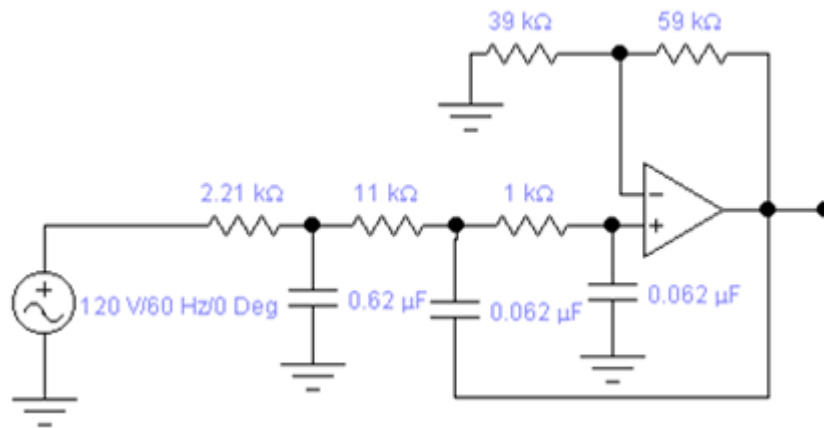
$$R_1 = 5.51 \times R = 5.51 \times 3.9 \text{ k}\Omega = 21.5 \text{ k}\Omega$$

$$R_f = 3.14 \times R = 3.14 \times 3.9 \text{ k}\Omega = 12.2 \text{ k}\Omega$$

例题 1 仿真结果

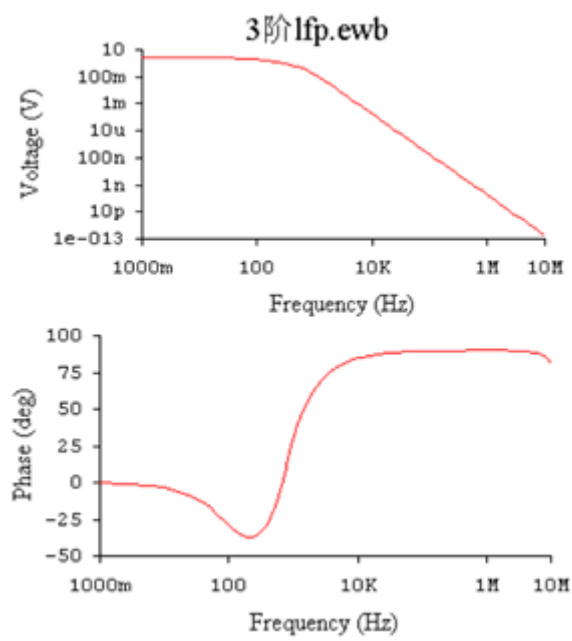


例题与习题 2

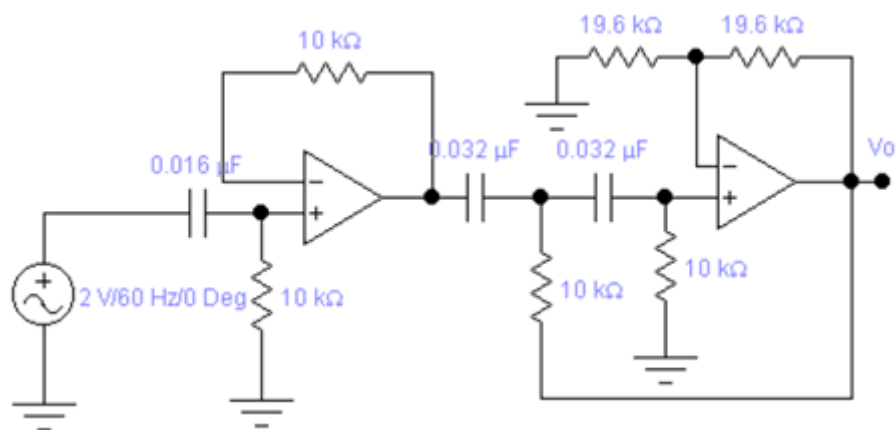


LPF

例题与习题 2 仿真结果

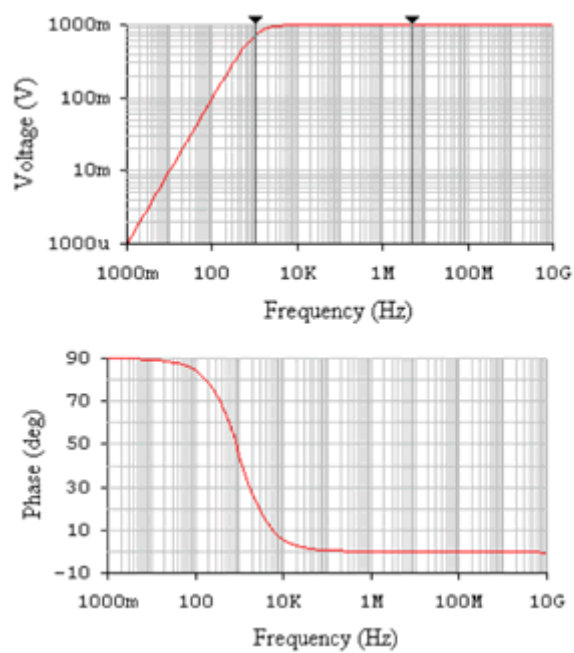


例题与习题 3

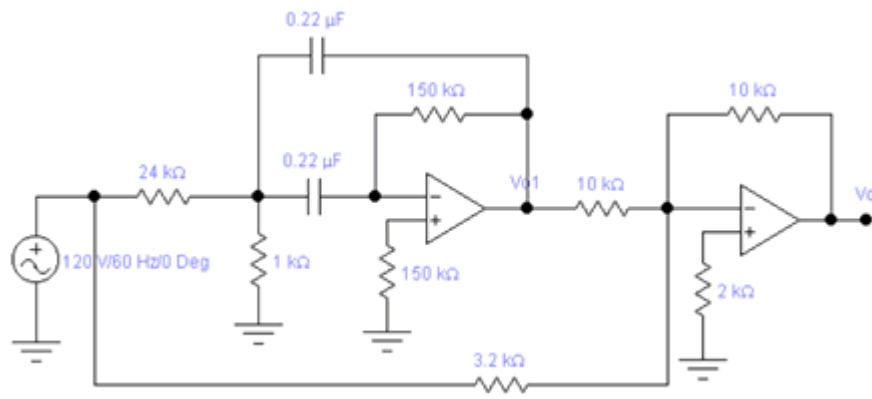


HPF

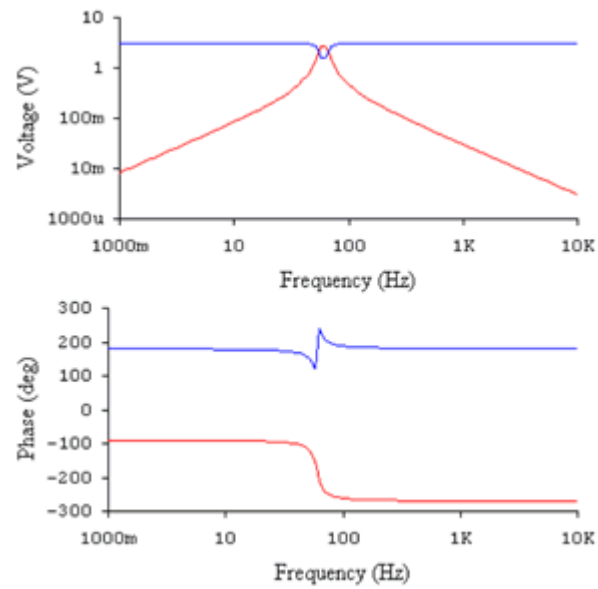
例题与习题 3 仿真结果



例题与习题 4



例题与习题 4 仿真结果



vo1 :红色

vo :蓝色