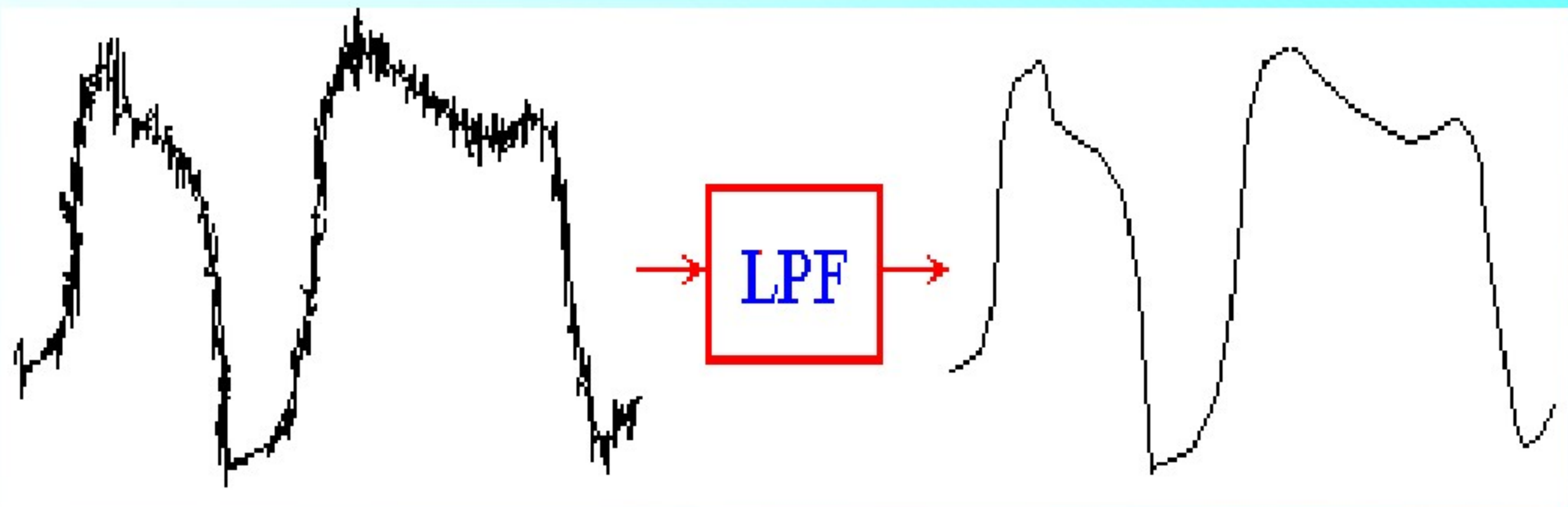


有源滤波电路

滤波器的用途

滤波器是一种能使有用信号通过，滤除信号中无用频率，即抑制无用信号的电子装置。

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。



有源滤波电路的分类

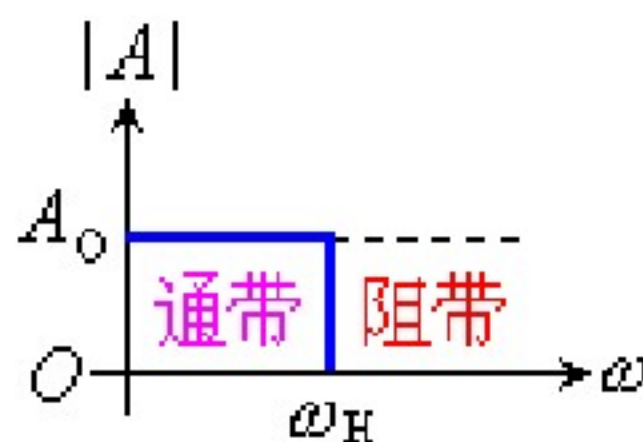
有源滤波器实际上是一种具有特定频率响应的放大器。它是在运算放大器的基础上增加一些 R 、 C 等无源元件而构成的。

低通滤波器 (LPF)

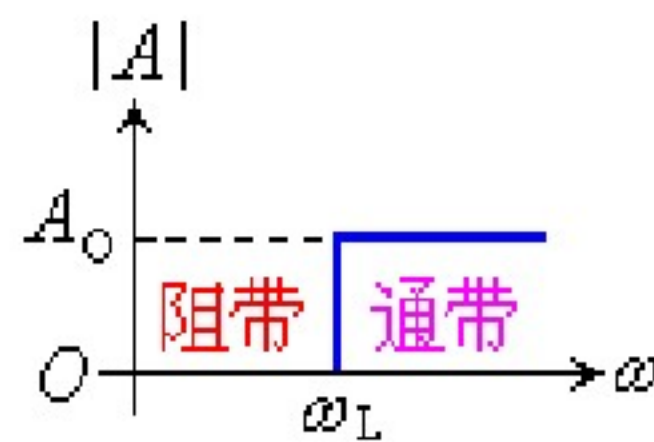
高通滤波器 (HPF)

带通滤波器 (BPF)

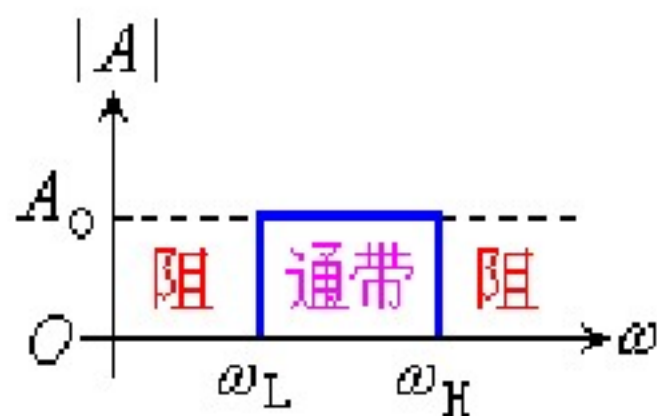
带阻滤波器 (BEF)



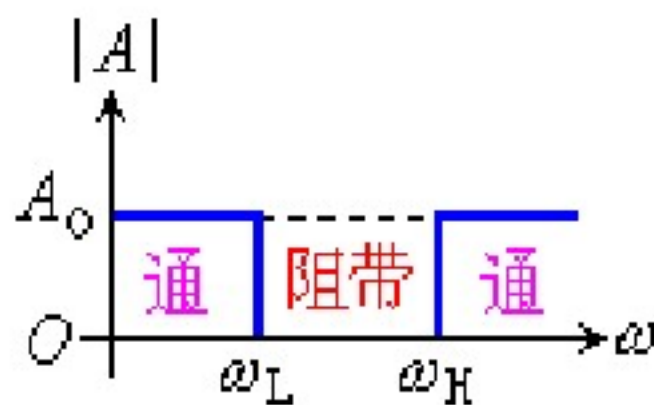
(a) 低通 $BW = \omega_H$



(b) 高通 $BW = \infty$



(c) 带通 $BW = \omega_H - \omega_L$

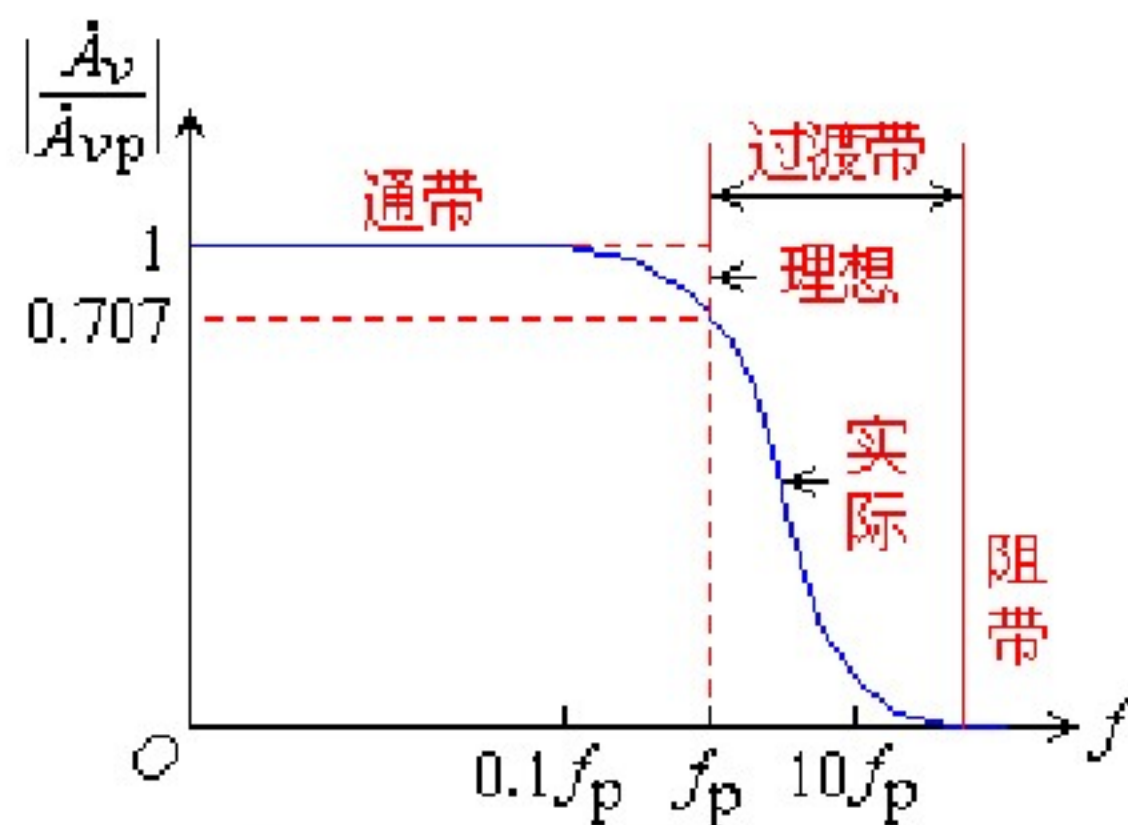


(d) 带阻

低通滤波器的主要技术指标

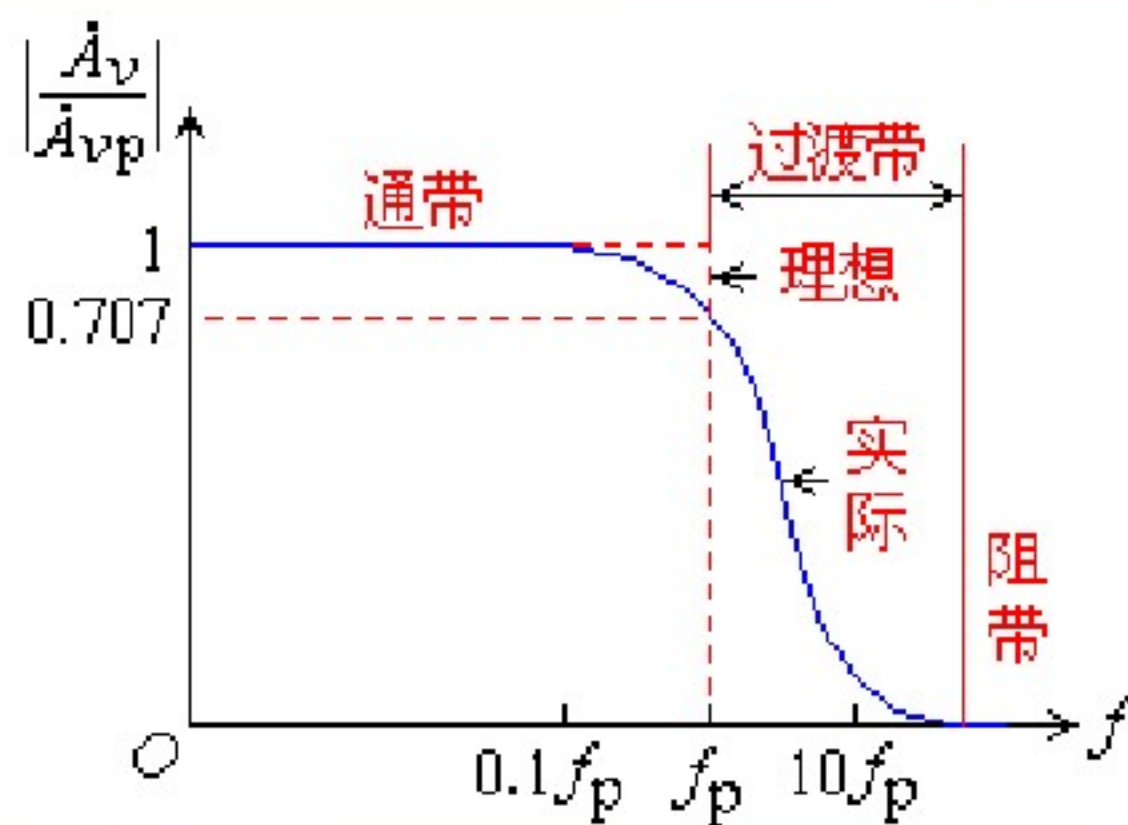
(1) 通带增益 A_{vp}

通带增益是指滤波器在通频倍数，性能良好的LPF通带内是平坦的，阻带内的电压放大倍



(2) 通带截止频率 f_p

其定义与放大电路的上限通带与阻带之间称为过渡带，
明滤波器的选择性越好。



一阶有源滤波器

电路特点是电路简单，阻带衰减太慢，选择性较差。

1. 通带增益

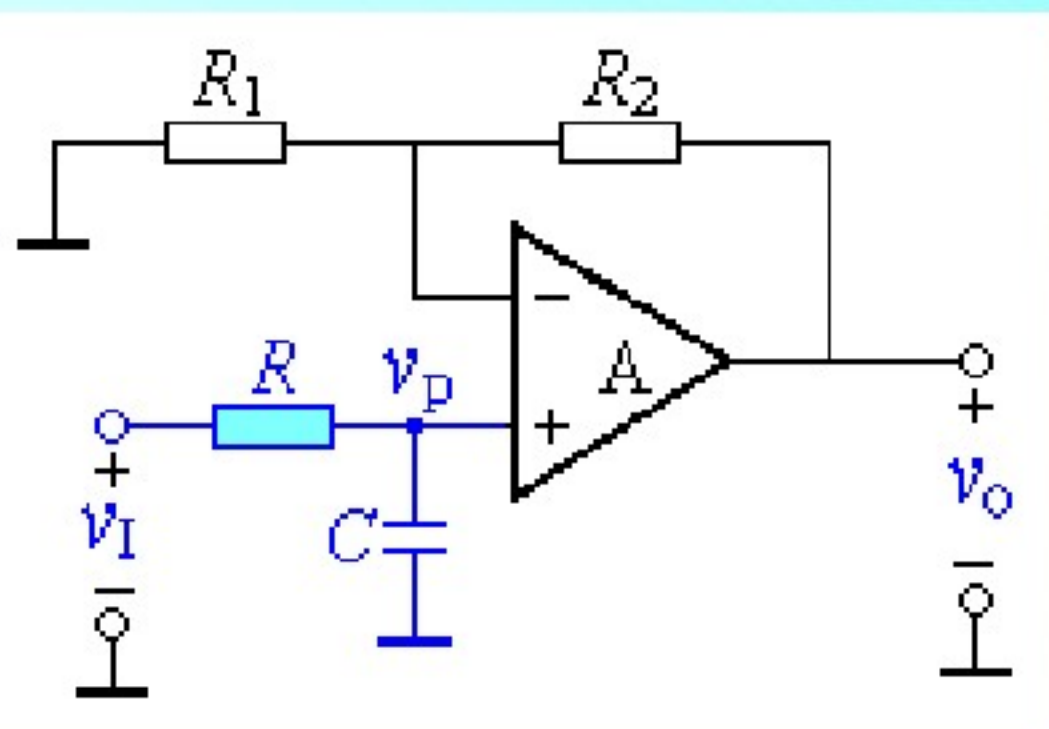
当 $f=0$ 时，电容视为开路，通带内的增益为

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

$$\therefore \dot{V}_P(s) = \frac{1}{1 + SRC} \dot{V}_i(s)$$

2. 传递函数

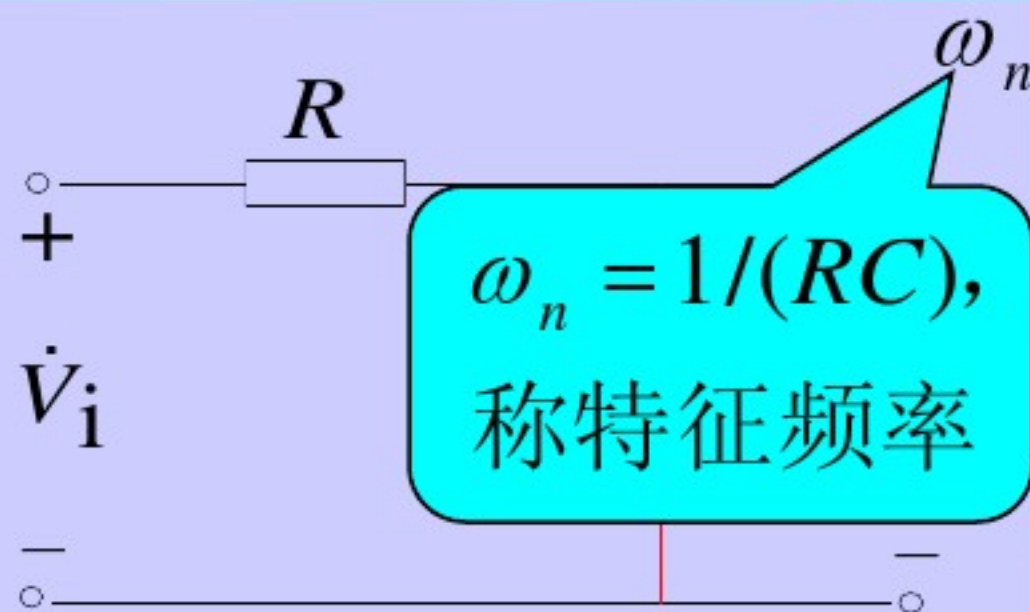
$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = A_{VF} \frac{1}{1 + SRC} = \frac{A_0}{1 + \frac{S}{\omega_n}}$$



RC低通 电压放大倍数 (传递函数) 为

$$A_V = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + SRC}$$

$$\therefore \dot{V}_o = \frac{1}{1 + SRC} \dot{V}_i$$

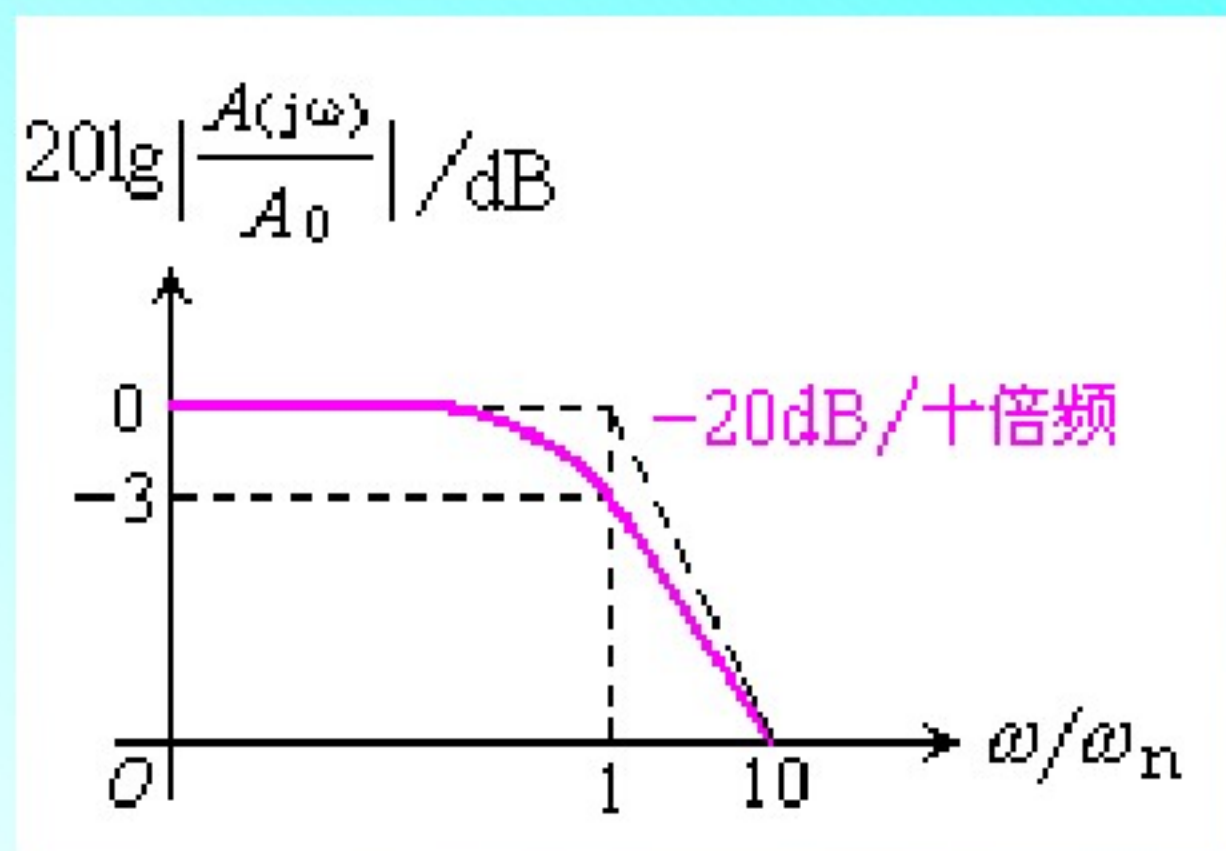
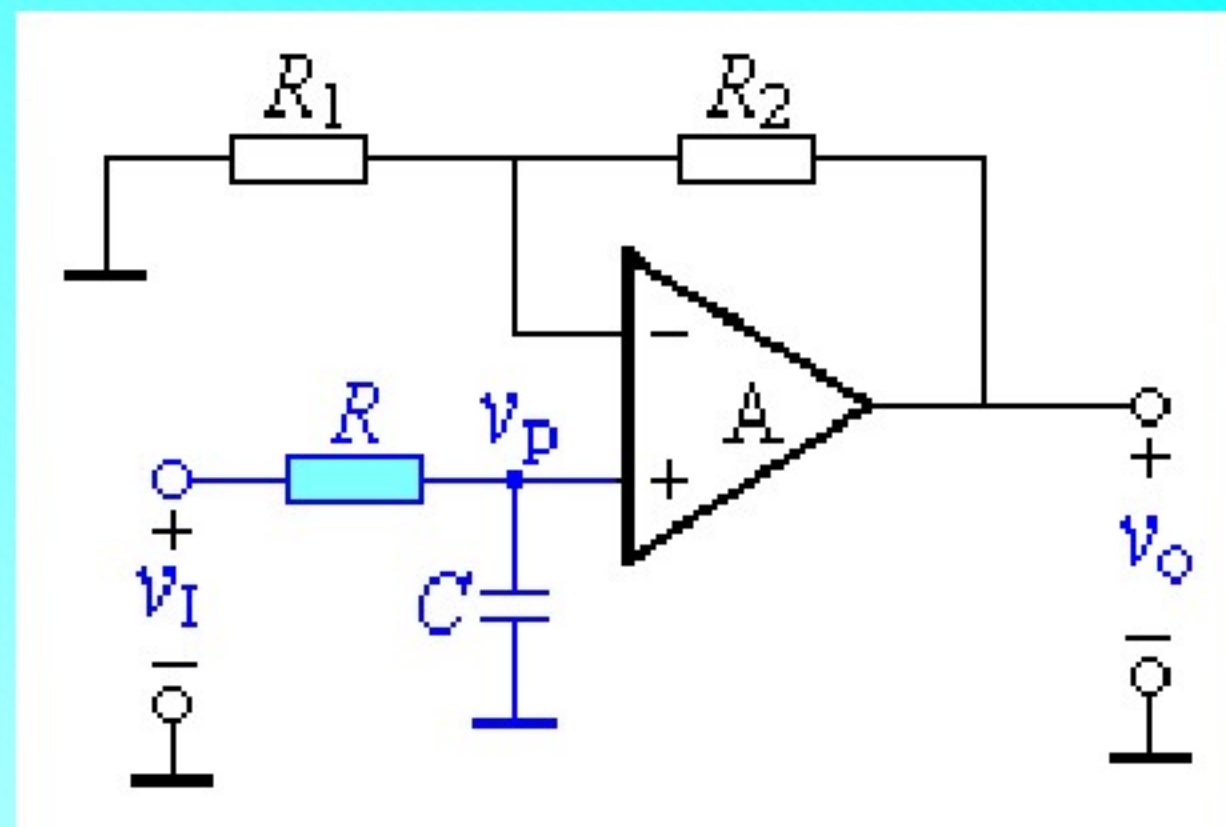


3.幅频响应

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

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

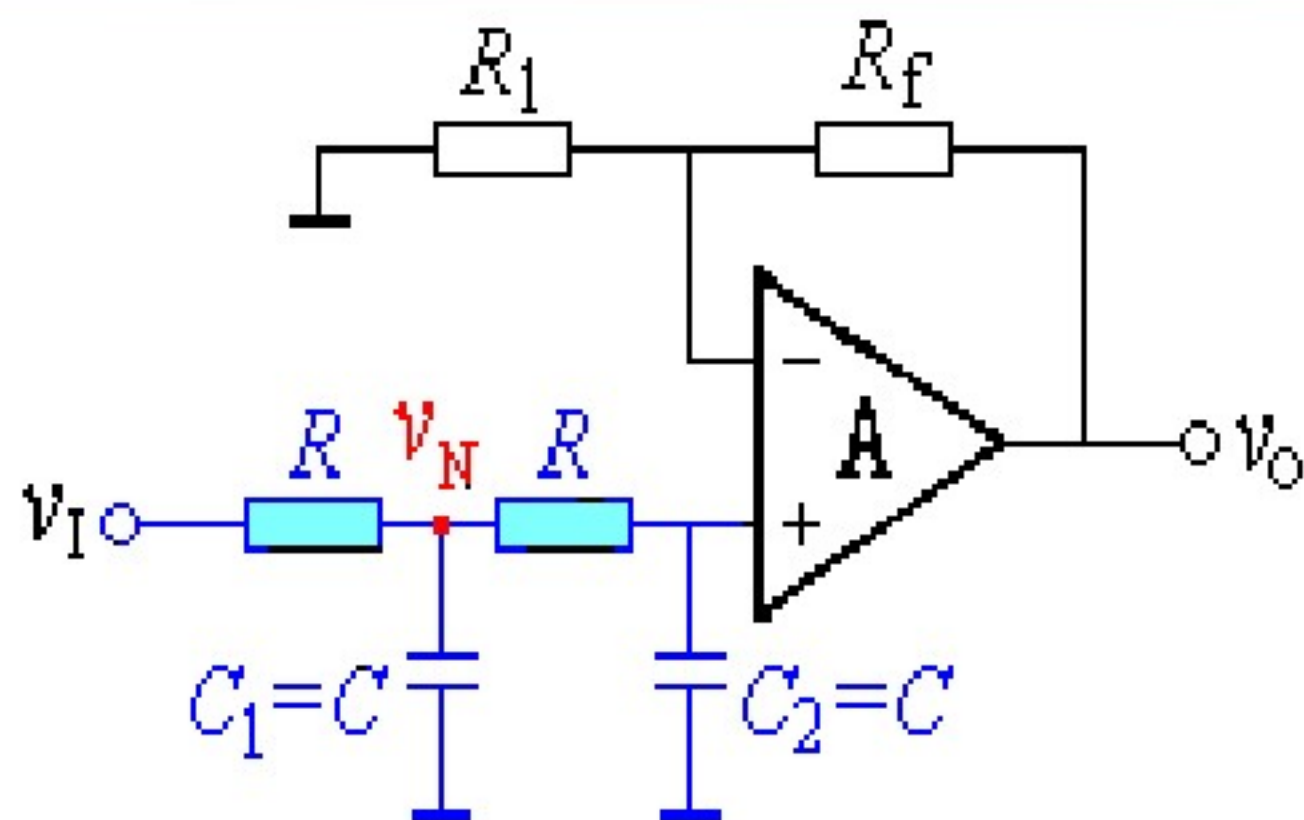
$$|A(j\omega)| = \frac{|V_o(j\omega)|}{|V_i(j\omega)|} = \frac{A_0}{\sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_n})^2}}$$



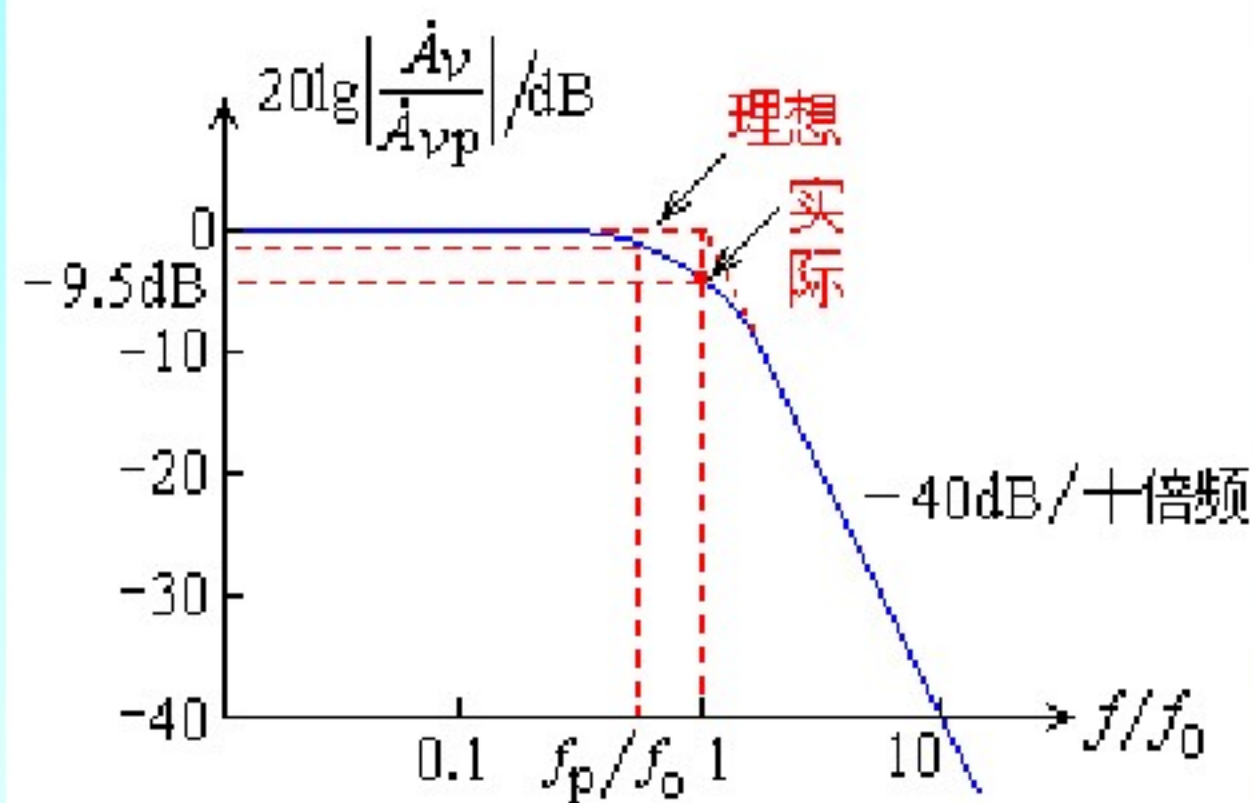
一阶LPF的幅频特性曲线

简单二阶低通有源滤波器

为了使输出电压在高频段以更快的速率下降，以改善滤波效果，再加一节 RC 低通滤波环节，称为二阶有源滤波电路。它比一阶低通滤波器的滤波效果更好。



二阶LPF

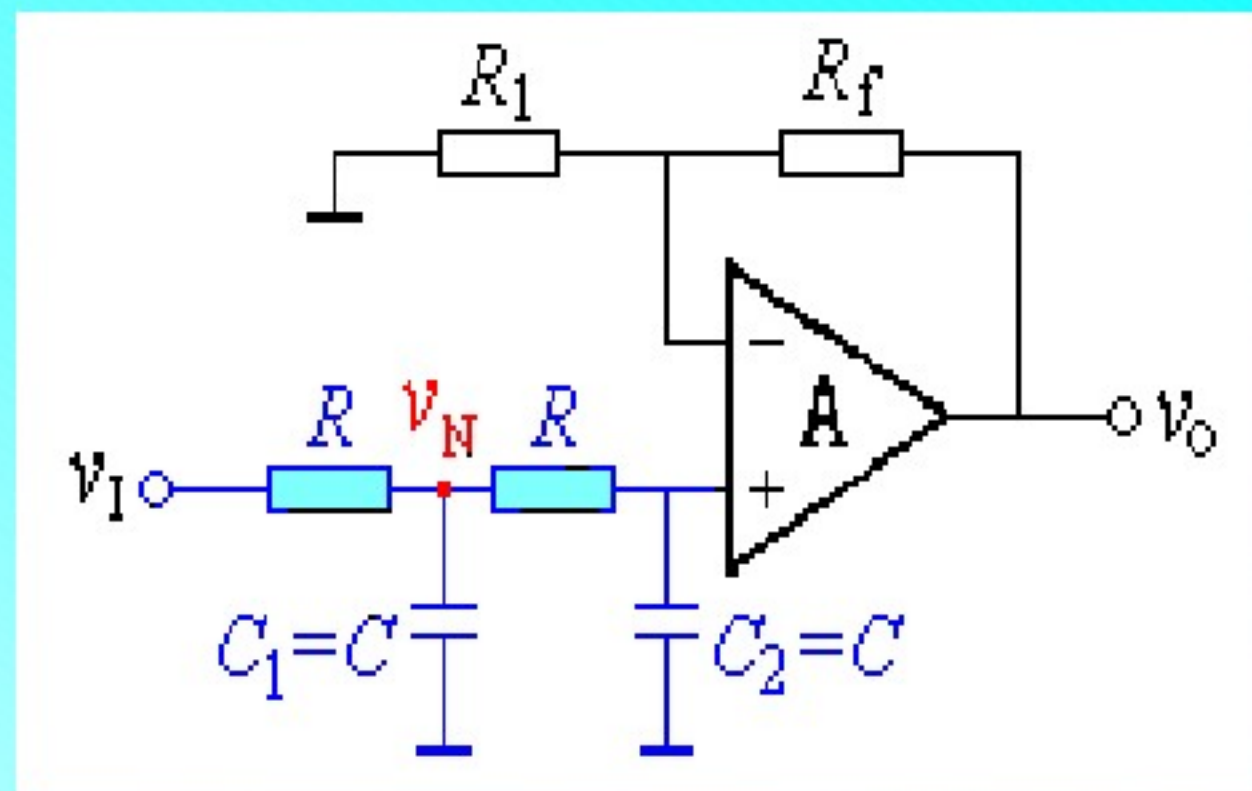


二阶LPF的幅频特性曲线

(1) 通带增益

当 $f = 0$, 或频率很低时, 各电容视为开路, 通带内的增益为

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



(2) 传递函数

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

$$V_{(+)}(s) = V_N(s) \frac{1}{1 + sC_2 R}$$

$$V_N(s) = \frac{\frac{1}{sC_1} // (R + \frac{1}{sC_2})}{R + [\frac{1}{sC_1} // (R + \frac{1}{sC_2})]} V_i(s)$$

通常有 $C_1 = C_2 = C$, 联立求解以上三式, 可得滤波器的传递函数

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

(3) 通带截止频率

将 s 换成 $j\omega$ ，令

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = 1/RC, \text{可得} \Rightarrow$$

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

当 $f = f_p$ 时，上式分母的模

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

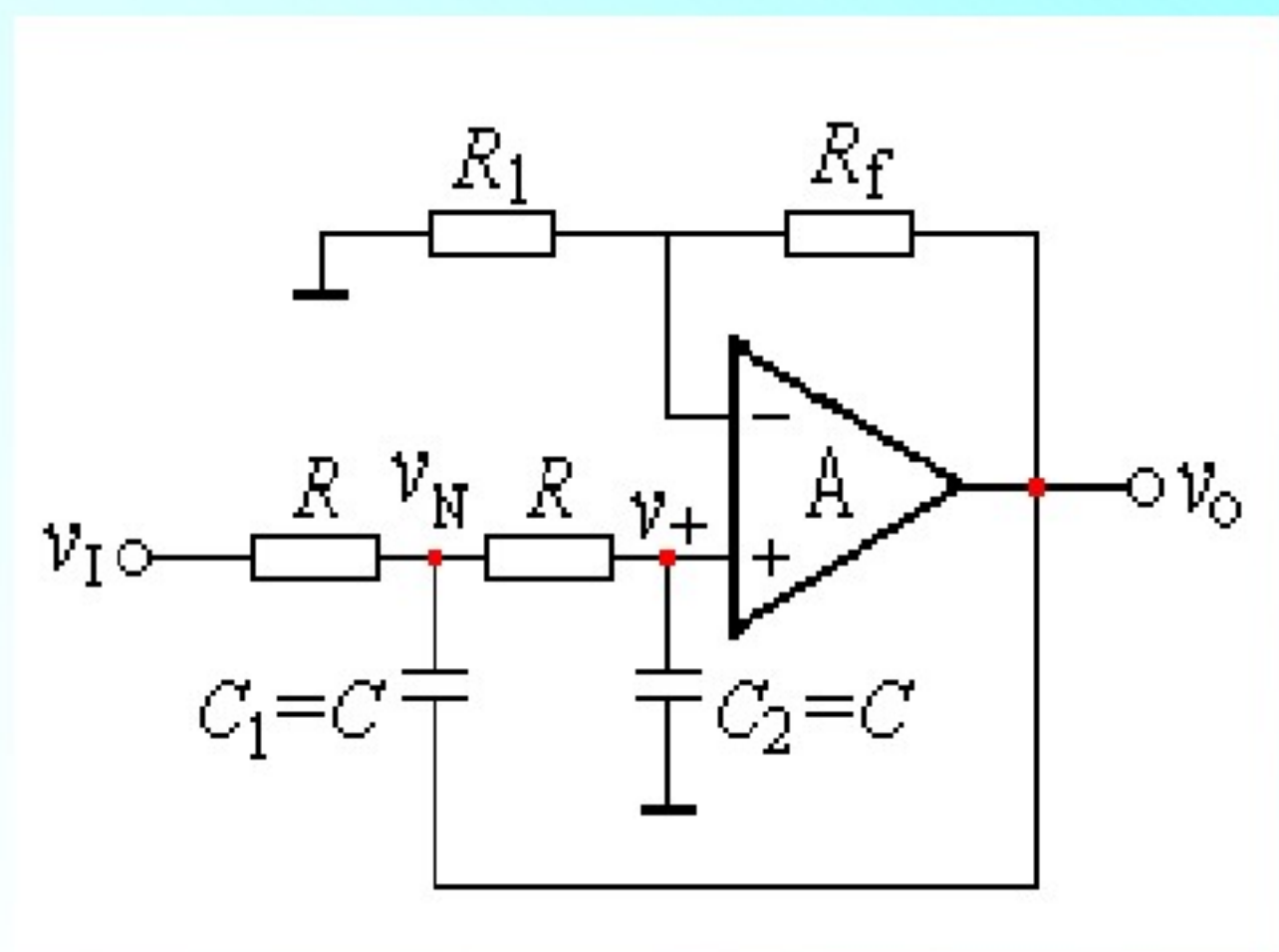
解得截止频率

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

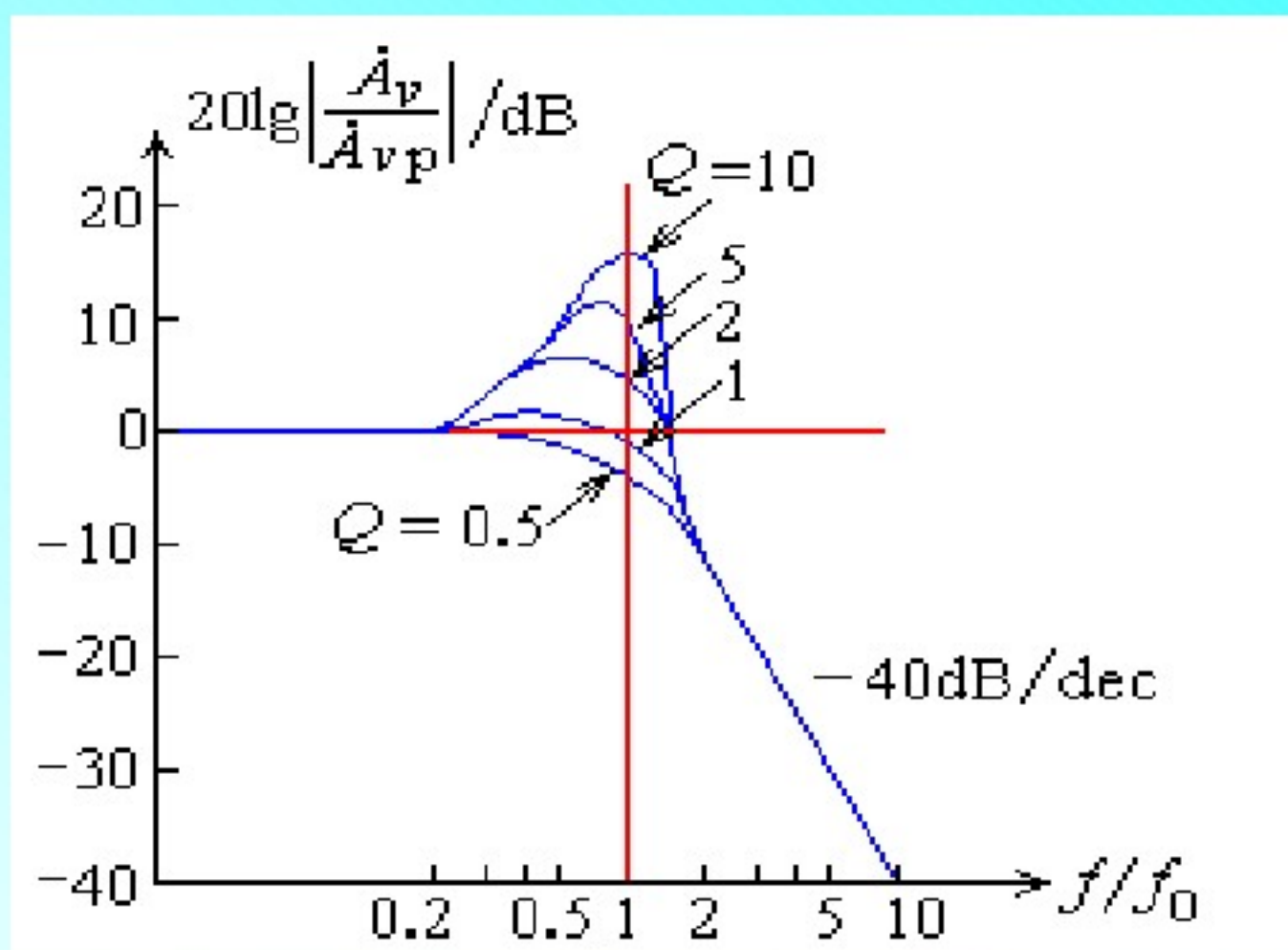
与理想的二阶波特图相比，在超过 f_0 以后，幅频特性以 -40 dB/dec 的速率下降，比一阶的下降快。但在通带截止频率 $f_p \rightarrow f_0$ 之间幅频特性下降的还不够快。

二阶压控型低通滤波器

二阶压控型低通有源滤波器中的一个电容器 C_1 原来是接地的，现在改接到输出端。显然 C_1 的改接不影响通带增益。



二阶压控型LPF

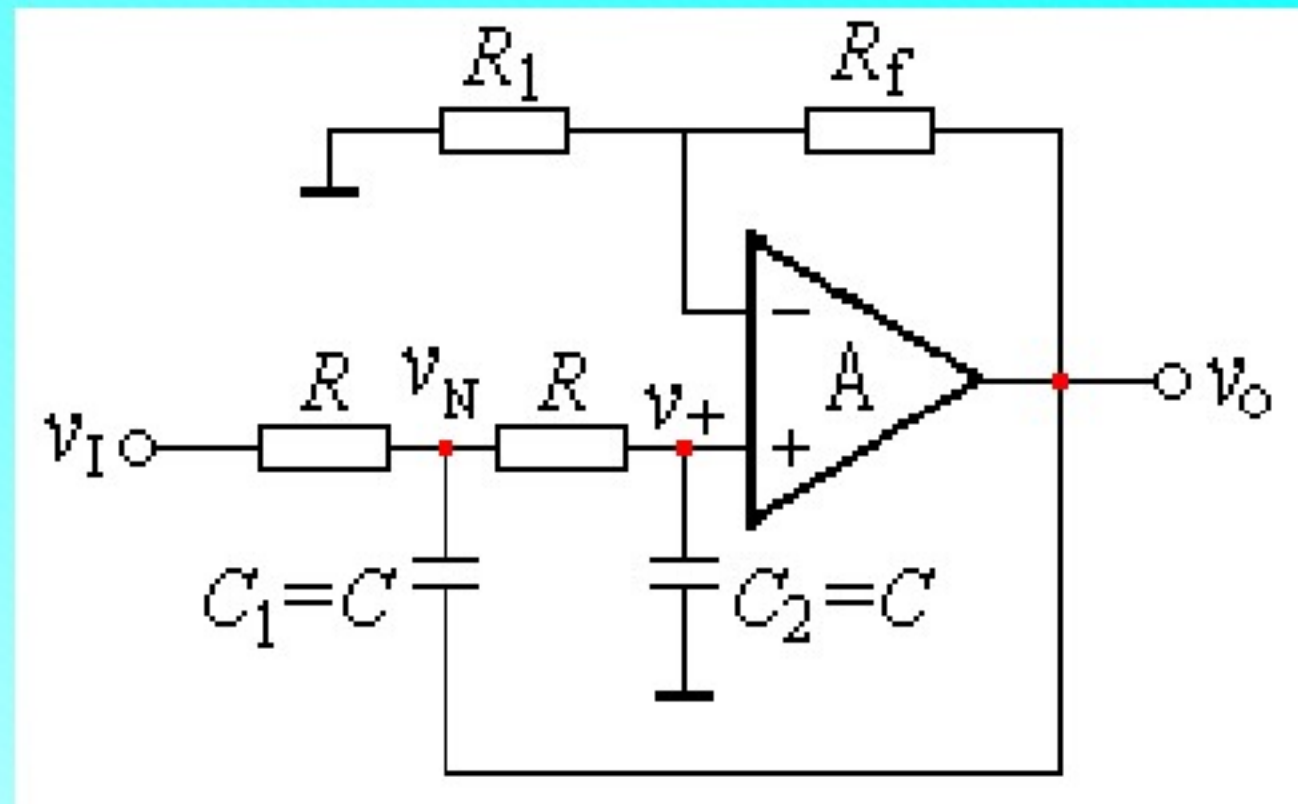


二阶压控型LPF的幅频特性

2. 二阶压控型LPF的传递函数

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

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



*N*节点的电流方程:

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

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。

3.频率响应

由传递函数可以写出频率响应的表达式

$$\dot{A}_v = \frac{A_{vp}}{1 - \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 + j(3 - A_{vp})\frac{f}{f_0}}$$

当 $f = f_0$ 时，上式可以化简为

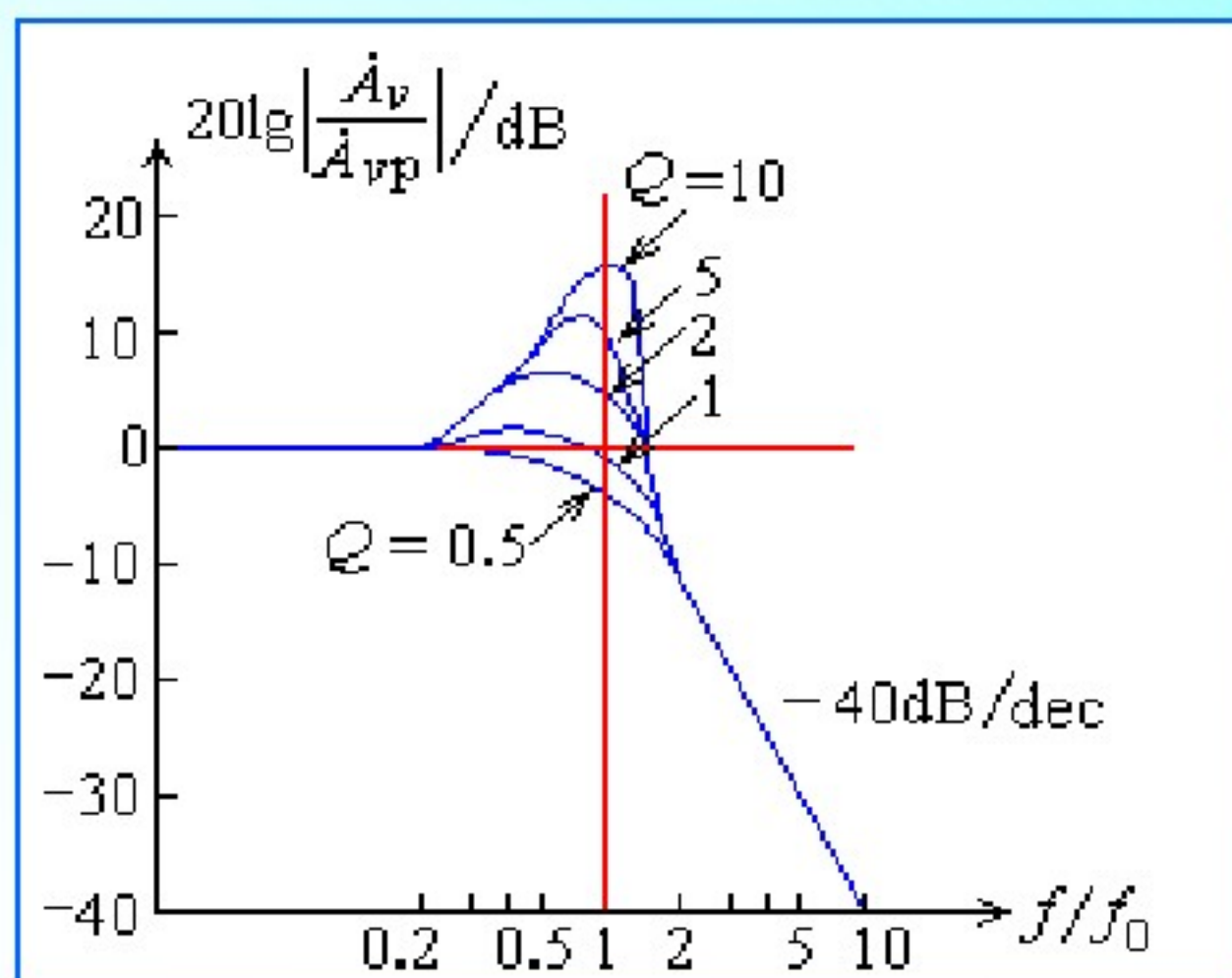
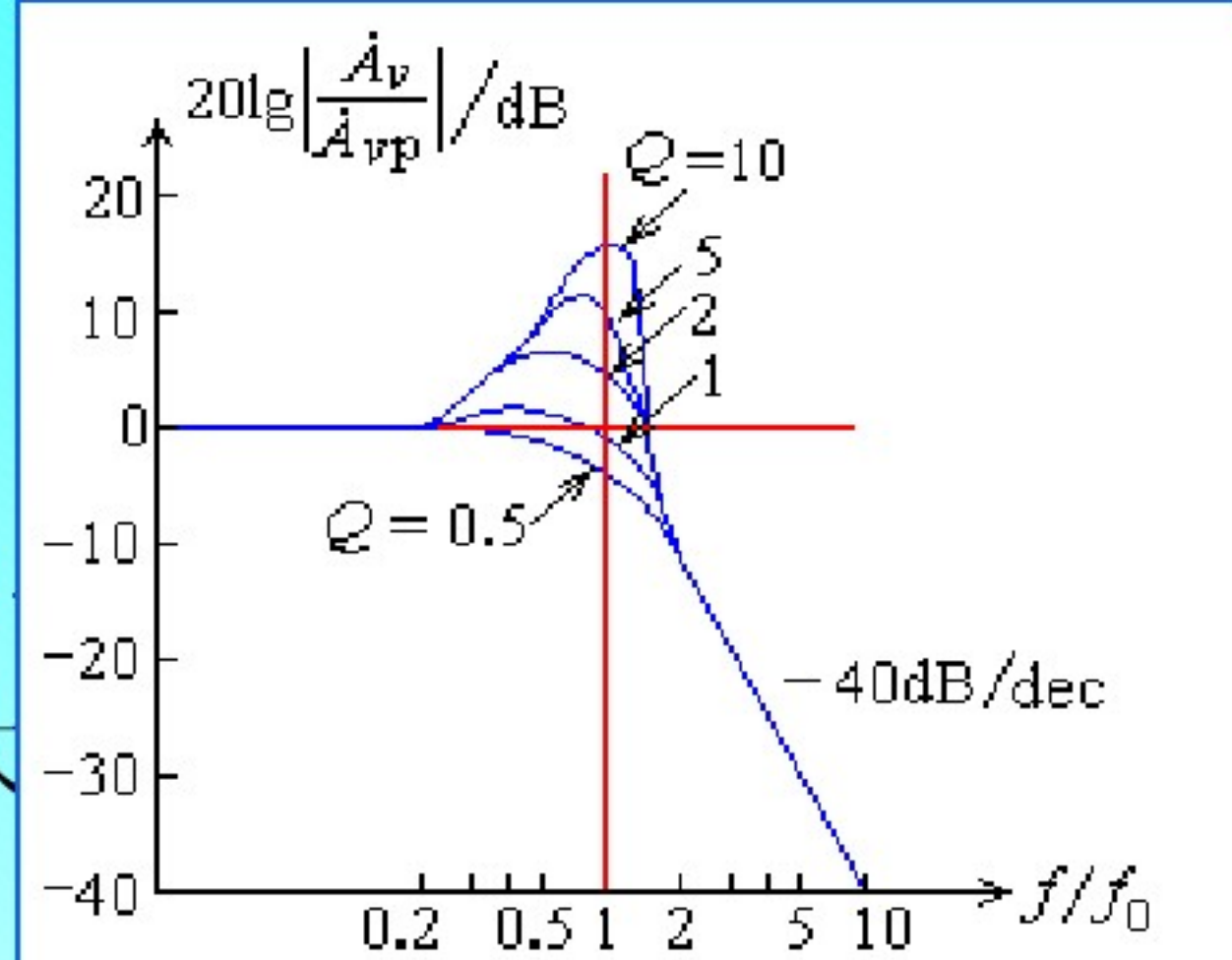
$$\dot{A}_{v(f=f_0)} = \frac{A_{vp}}{j(3 - A_{vp})}$$

定义有源滤波器的品质因数 Q 值为 $f = f_0$ 时的电压放大倍数的模与通带增益之比

$$Q = \frac{1}{3 - A_{vp}} \quad \left| \dot{A}_v \right|_{(f=f_0)} = QA_{vp}$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{vp}} \quad |\dot{A}_v|_{(f = f_0)} = QA_{vp}$$

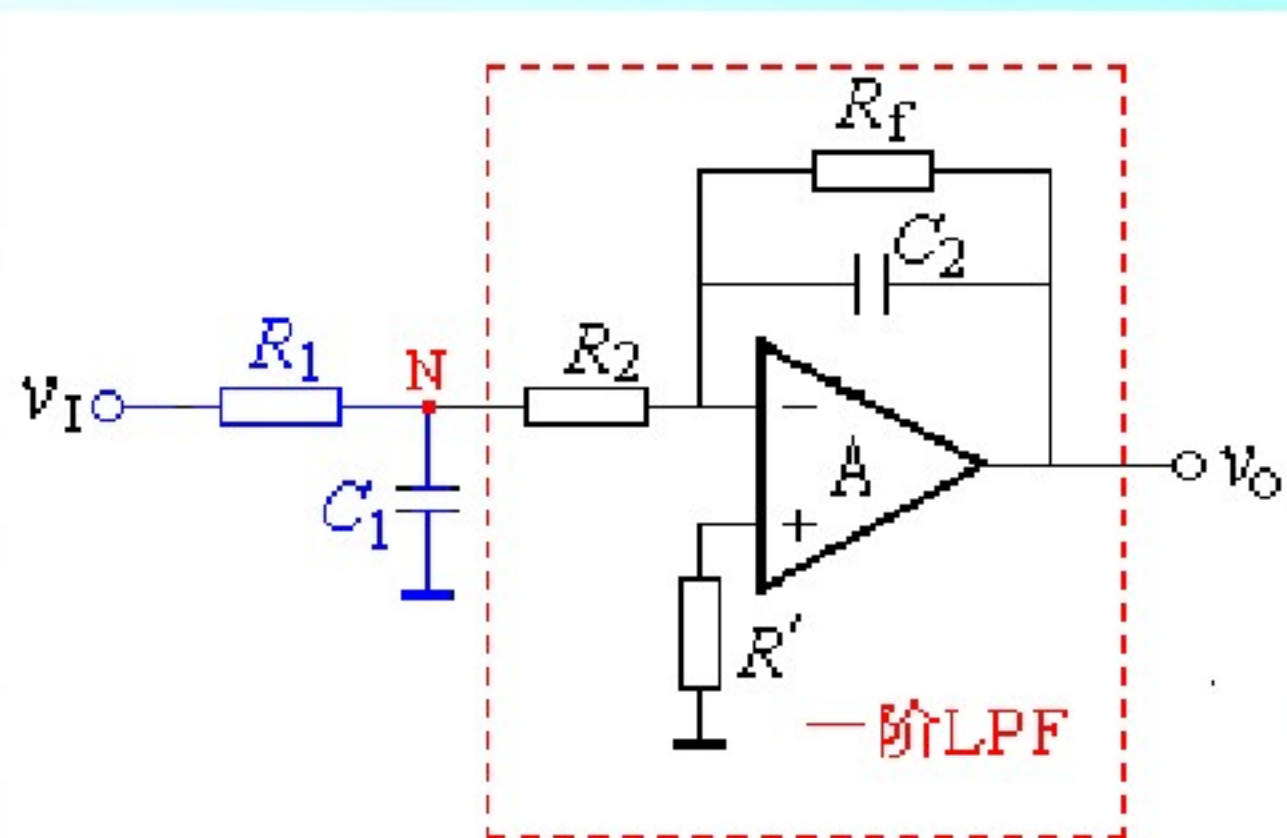
以上两式表明，当 2
 $f = f_0$ 处的电压增益将大
 $f = f_0$ 处将抬高。



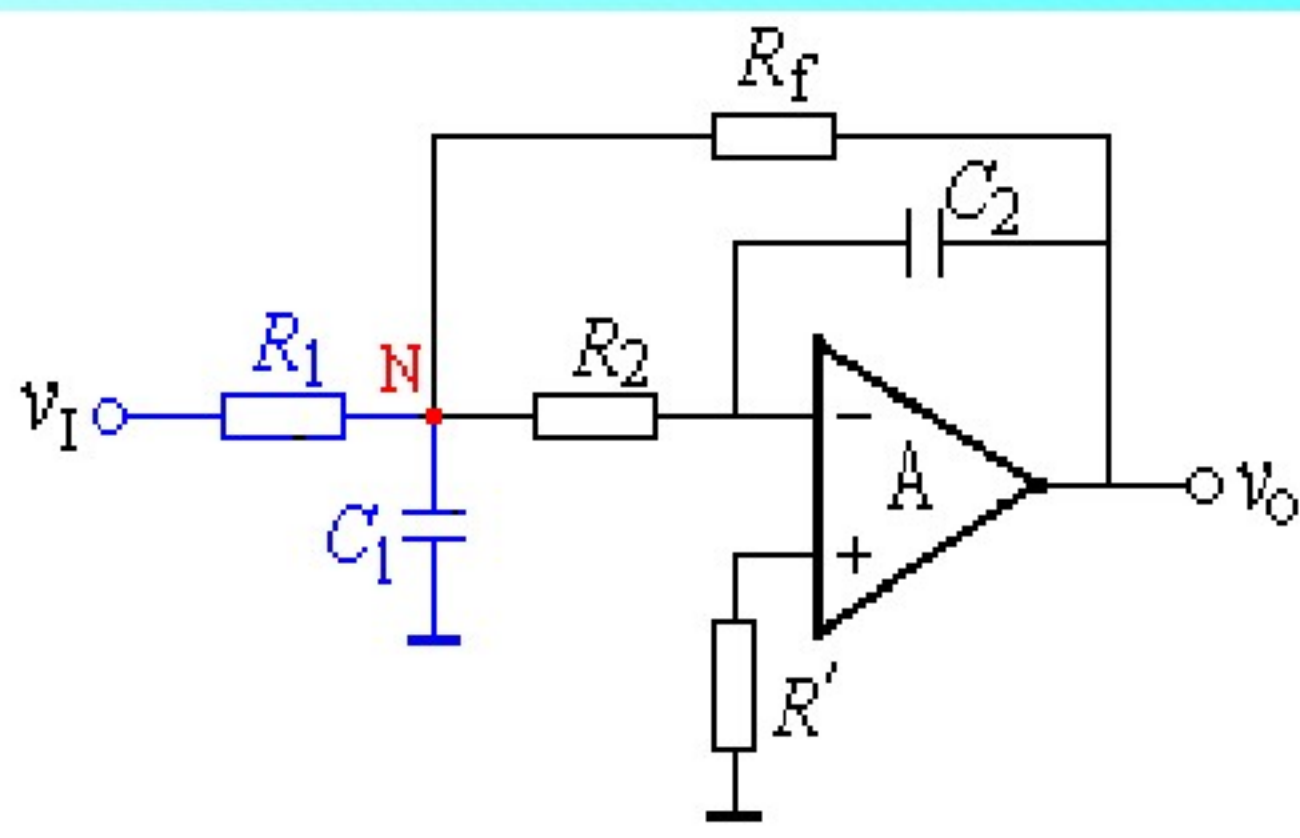
有源滤波器自激。由
 于在高频端给LPF加了
 顶端的放大倍数有所抬

二阶反相型低通有源滤波器

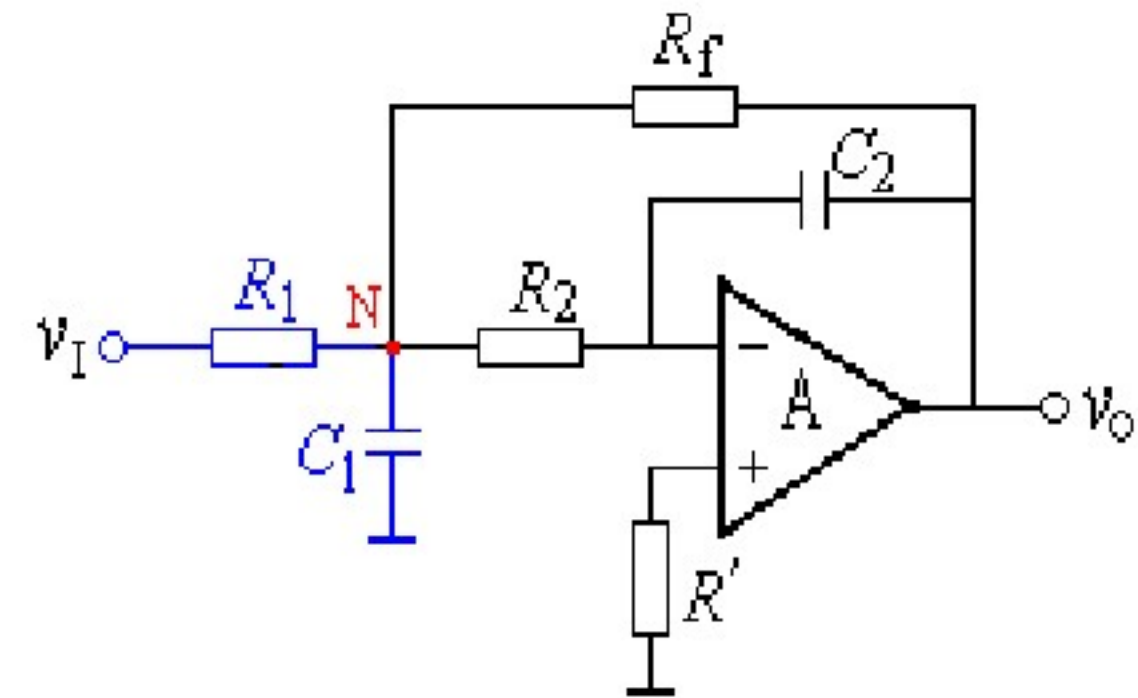
二阶反相型LPF是在反相比比例积分器的输入端再加一节RC低通电路而构成。



反相型二阶LFP



改进型反馈反相二阶LFP



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

N 节点的电流方程

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

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

频率响应为

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

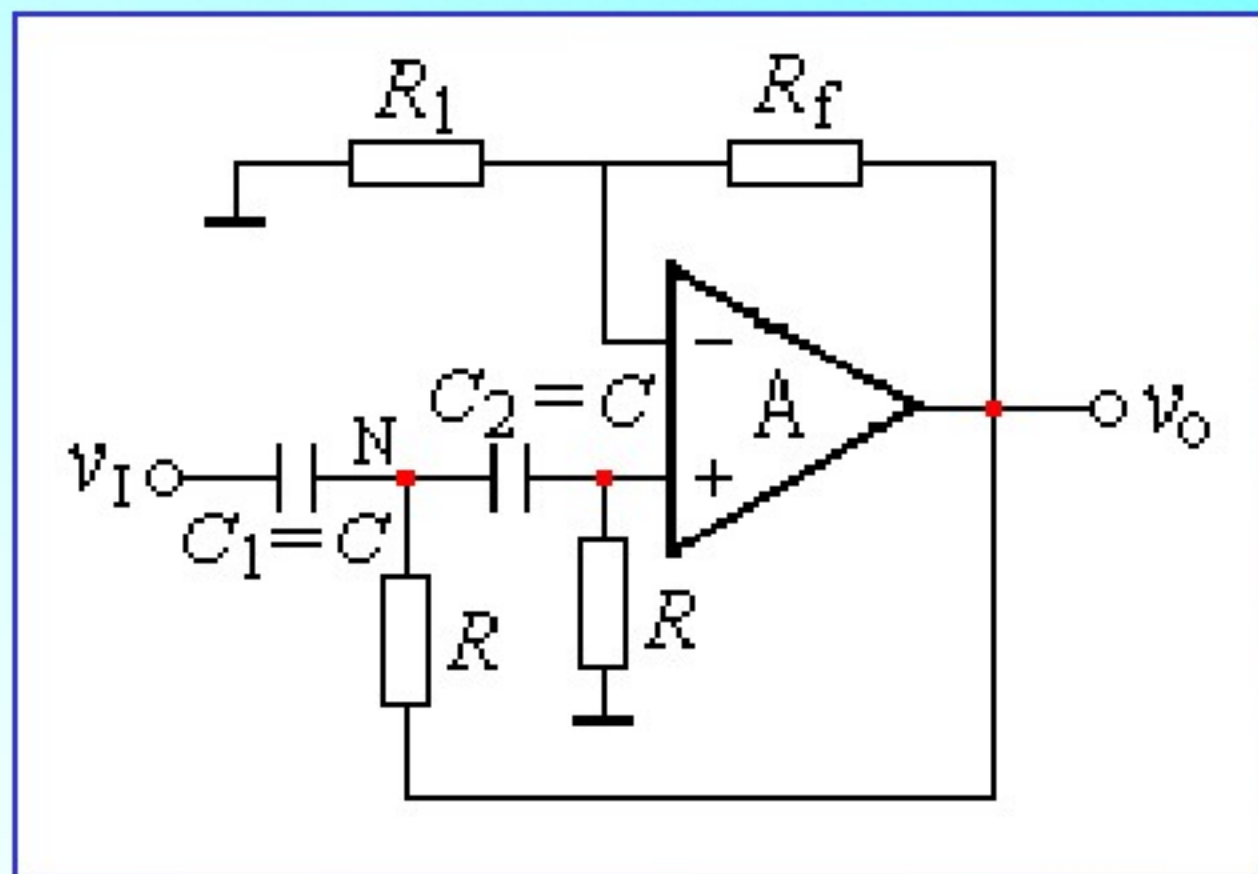
以上各式中

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_2 R_2 R_f}}$$

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

$$Q = (R_1 // R_2 // R_f) \sqrt{\frac{C_1}{R_2 R_f C_2}}$$

有源高通滤波器



二阶压控型HPF

(1) 通带增益

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

(2) 传递函数

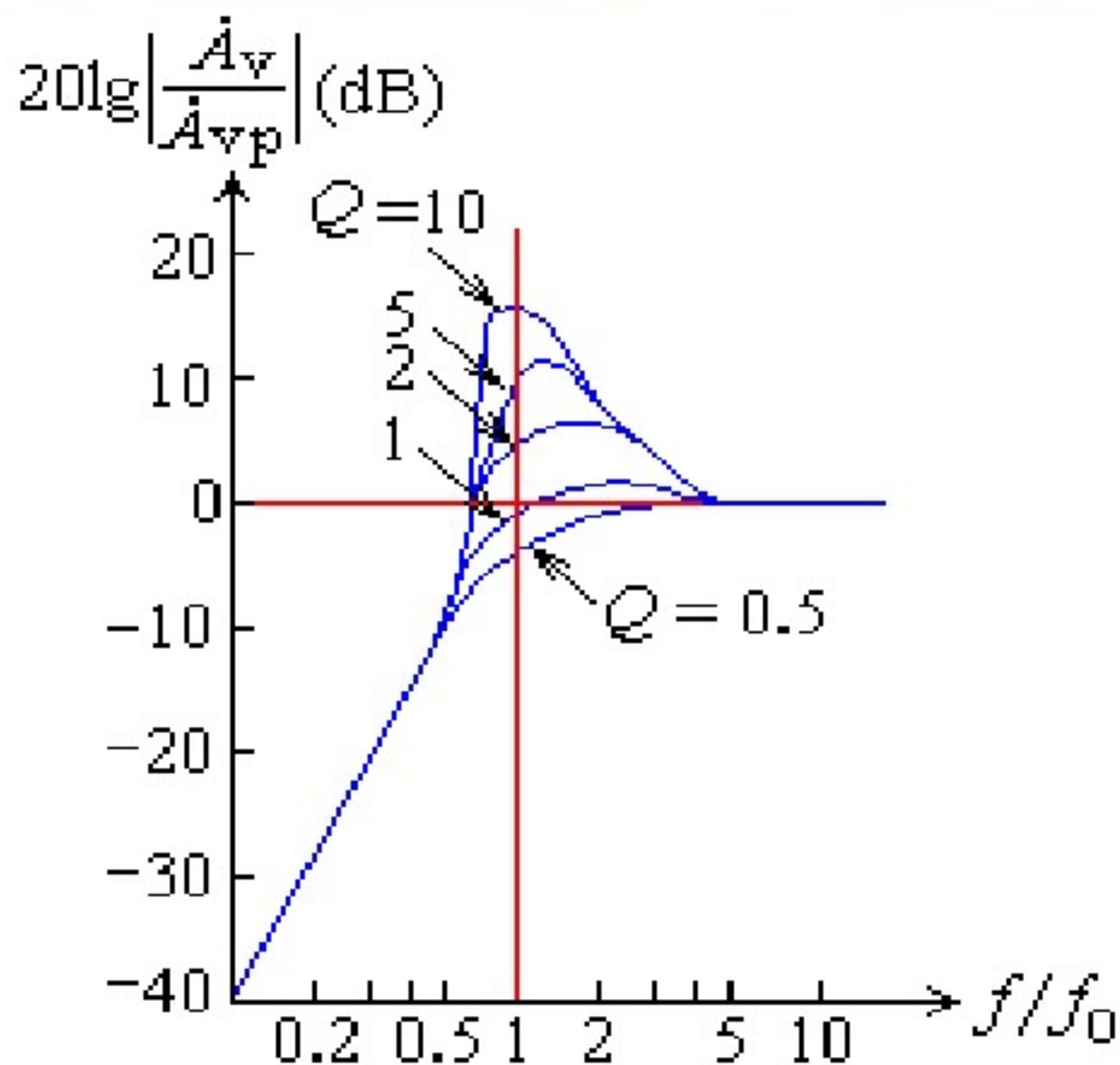
$$A_v(s) = \frac{(sCR)^2 A_{vp}}{1 + (3 - A_{vp})sCR + (sCR)^2}$$

(3) 频率响应

令 $f_0 = \frac{1}{2\pi CR}$, $Q = \frac{1}{3 - A_{vp}}$, 则可得出频响表达式

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

由此绘出的频率响应特性曲线

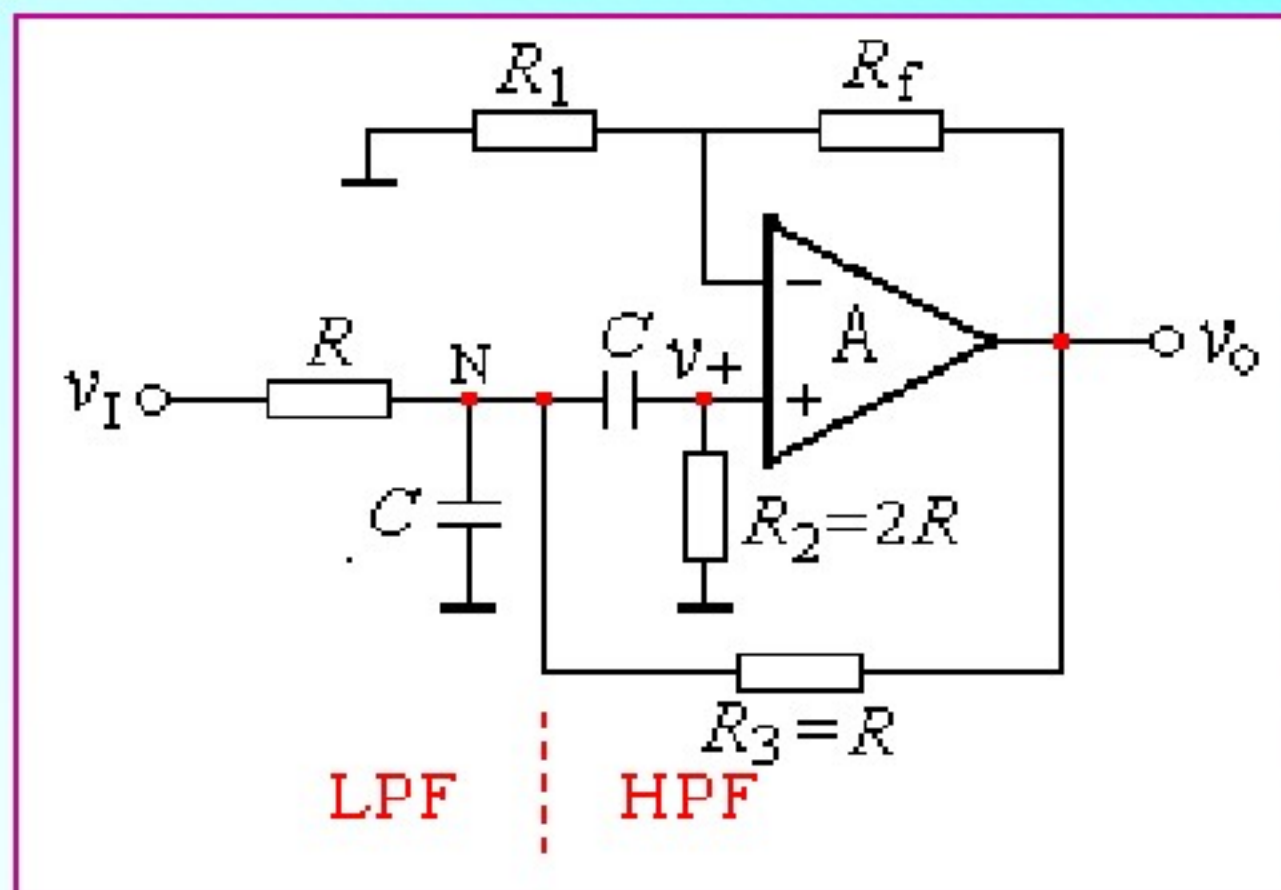


二阶压控型HPF 频率响应

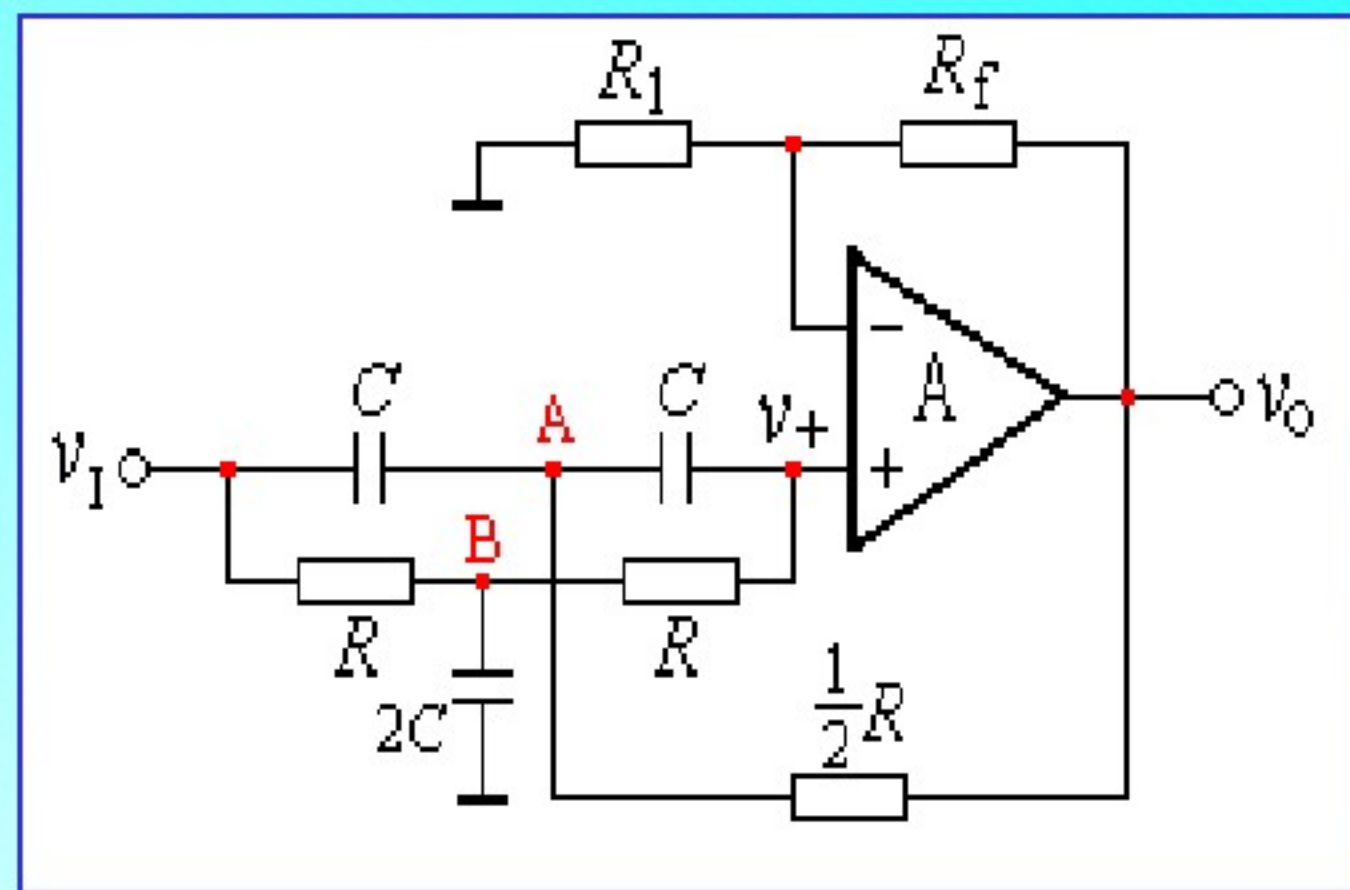
结论：当 $f \ll f_0$ 时，
幅频特性曲线的斜率
为+40dB/dec；

当 $A_{vp} \geq 3$ 时，电
路自激。

有源带通滤波器(BPF) 和带阻滤波器(BEF)



二阶压控型BPF



二阶压控型BEF

带通滤波器是由低通 RC 环节和高通 RC 环节组合而成的。要将高通的下限截止频率设置的小于低通的上限截止频率。反之则为带阻滤波器。

要想获得好的滤波特性，一般需要较高的阶数。滤波器的设计计算十分麻烦，需要时可借助于工程计算曲线和有关计算机辅助设计软件。

例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 $1\mu\text{F}$ 。

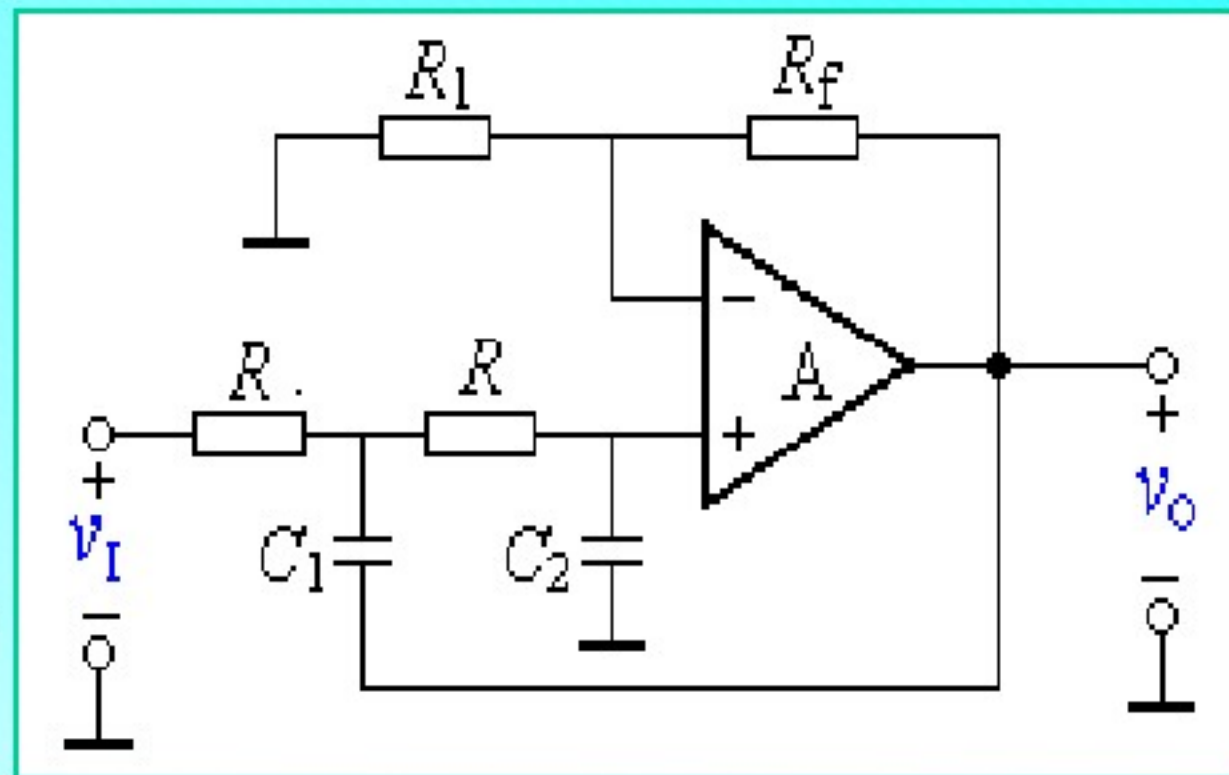
因大容量的电容器体积大, 价格高, 应尽量避免使用。

取

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

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

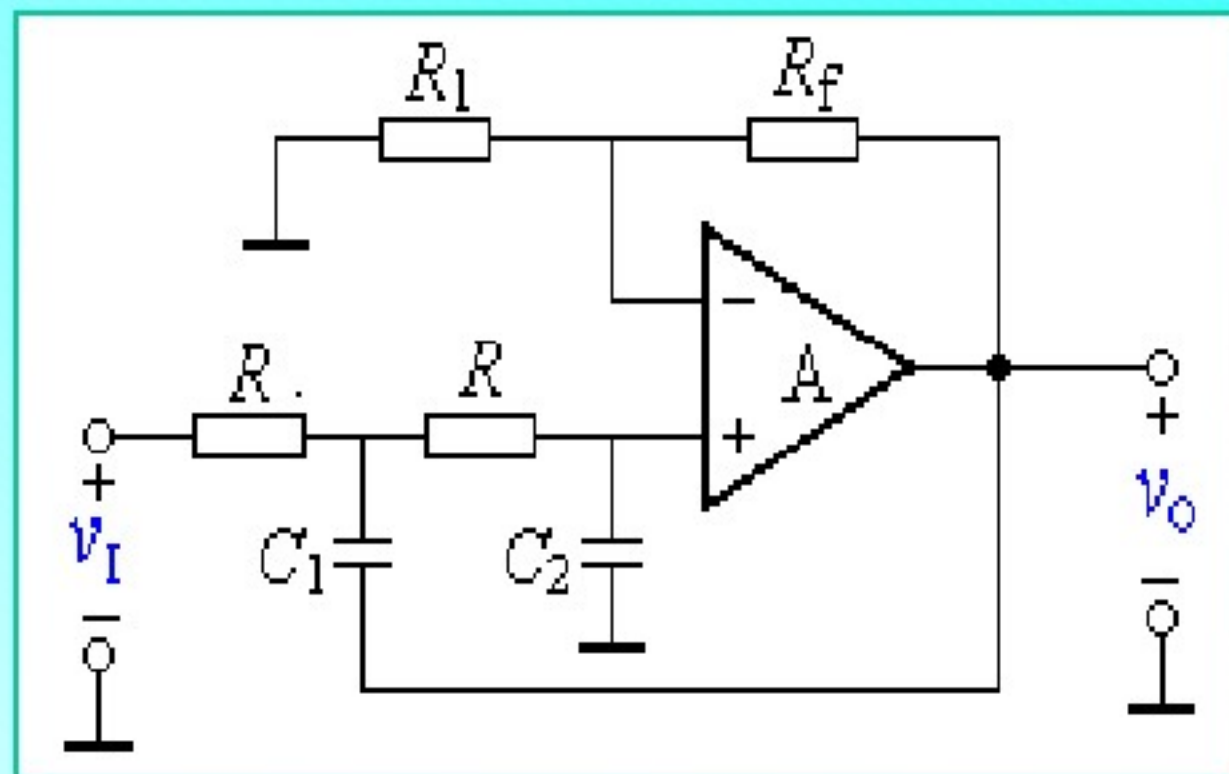
计算出 $R = 3979\Omega$, 取 $R = 3.9\text{k}\Omega$



2. 根据 Q 值求 R_1 和 R_f ，因为 $f = f_0$ 时 $Q = \frac{1}{3 - A_{vP}} = 0.7$ ， $A_{vP} = 1.57$ ，根据 A_{vP} 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

$$1 + \frac{R_f}{R_1} = A_{vP} = 1.57$$

$$R_1 // R_f = R + R = 2R$$



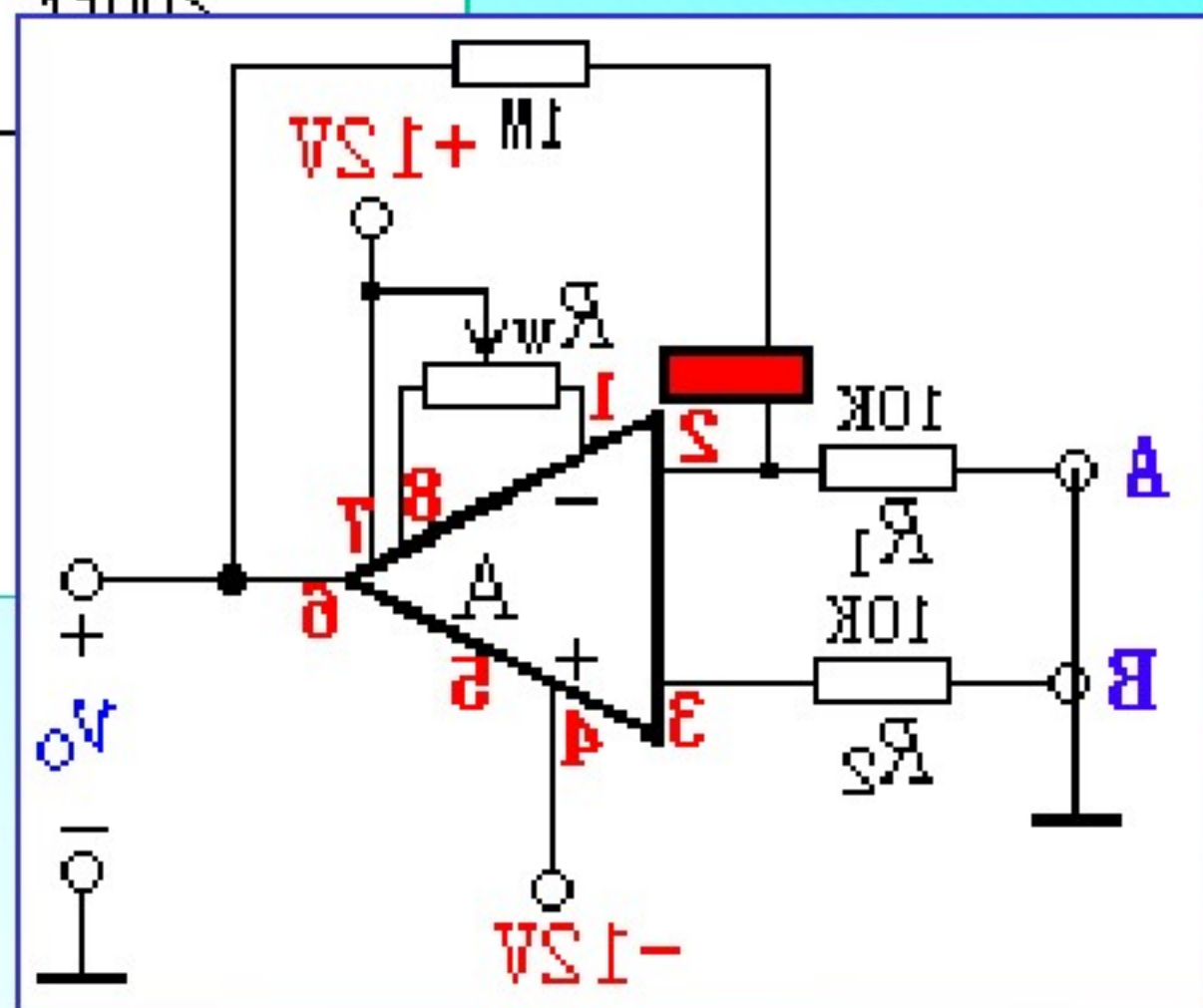
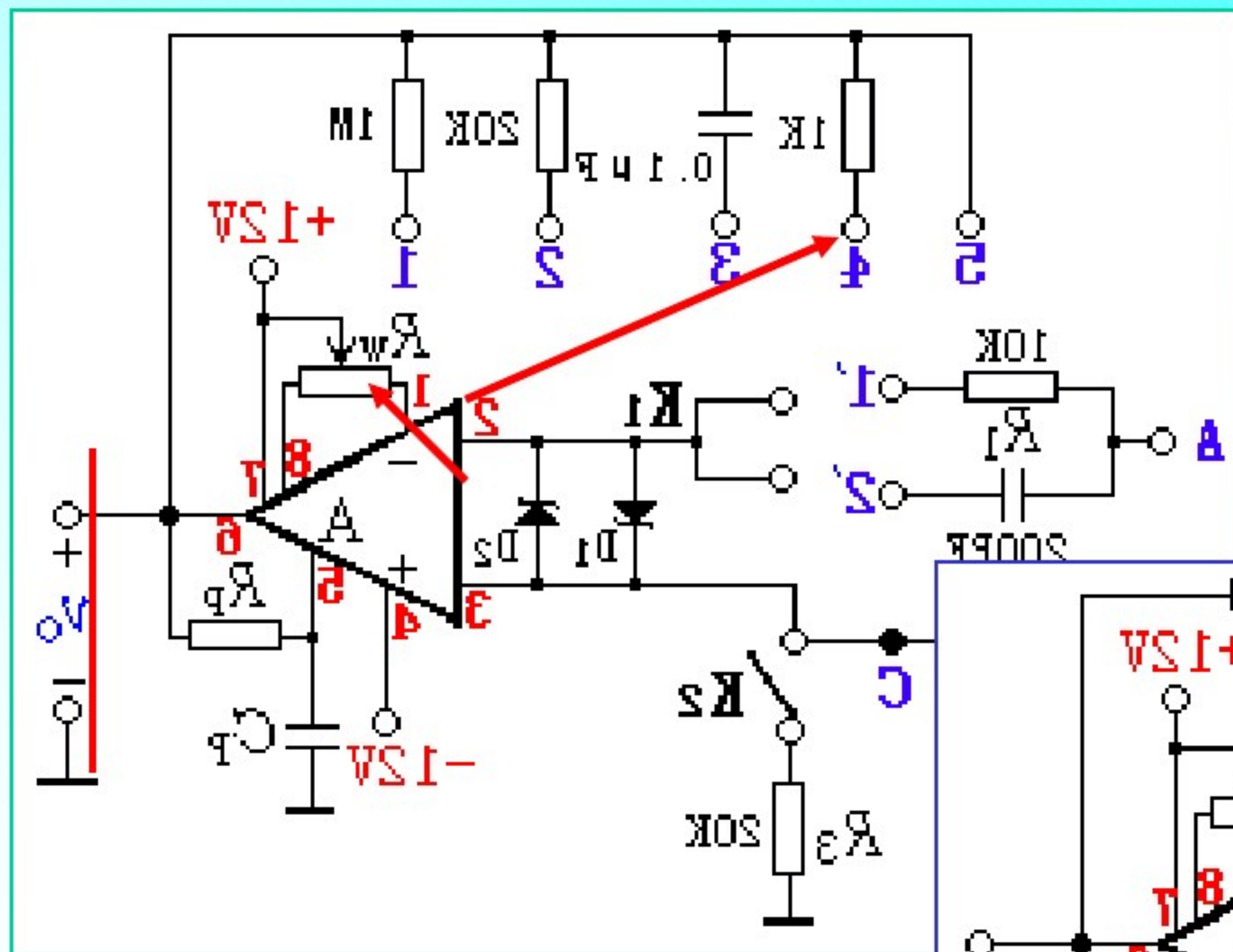
解得：

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

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

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

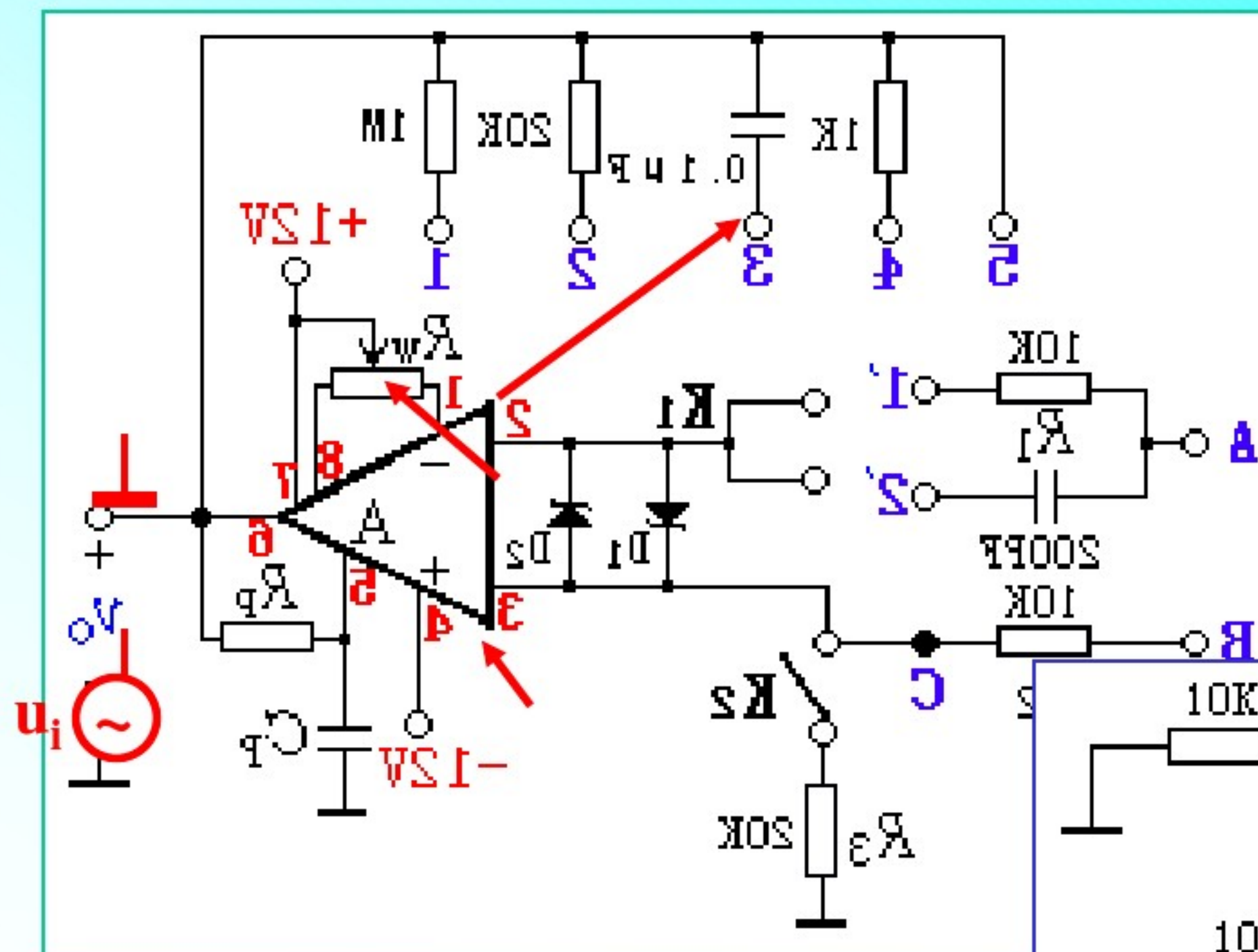
实验八 运算放大器在信号方面的应用



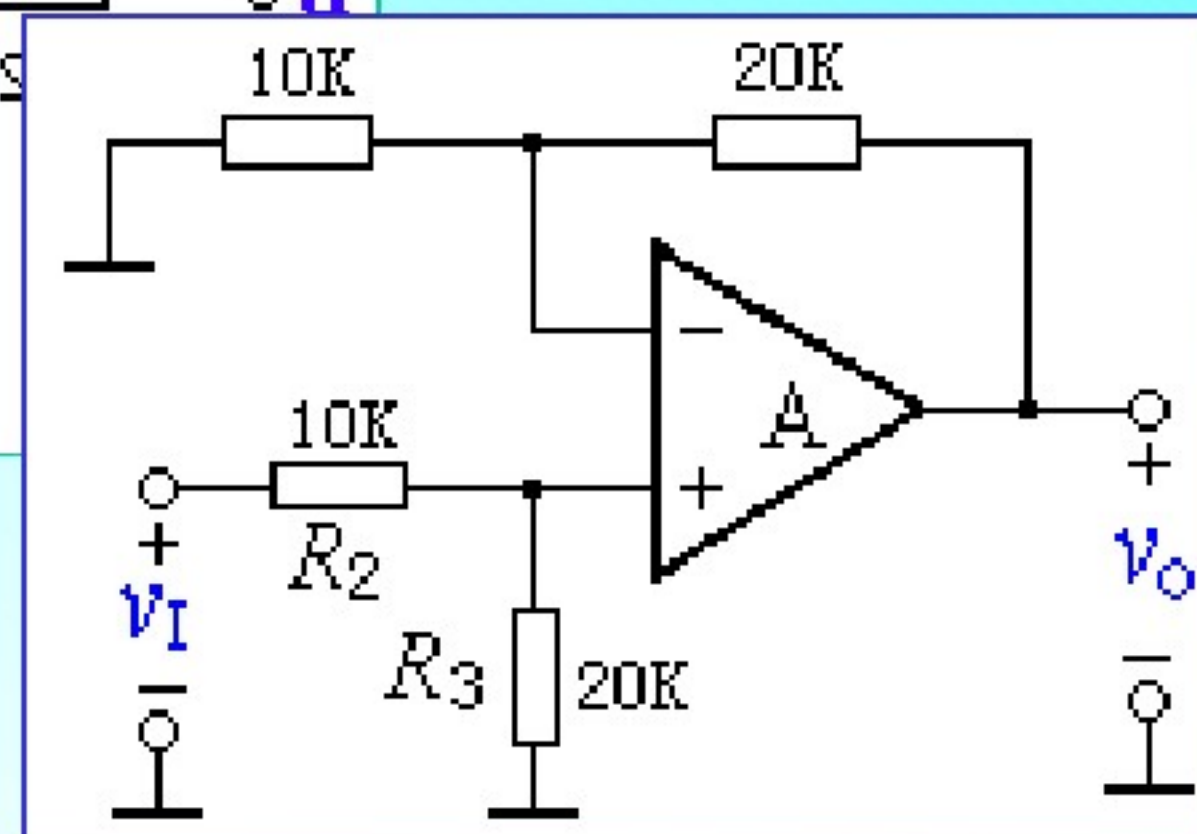
调零电路

调整 R_w 使输出为零。

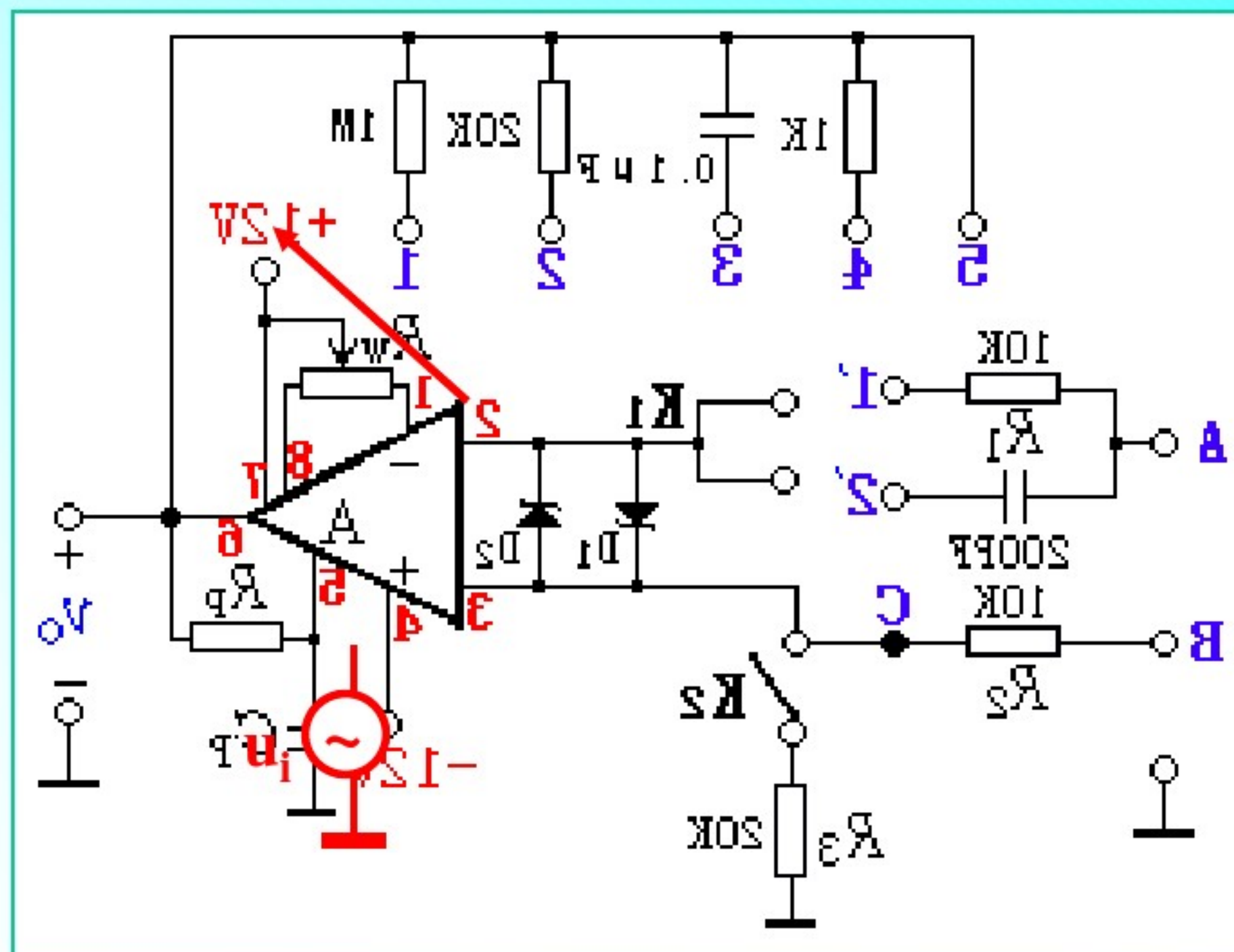
2.同相比例放大器



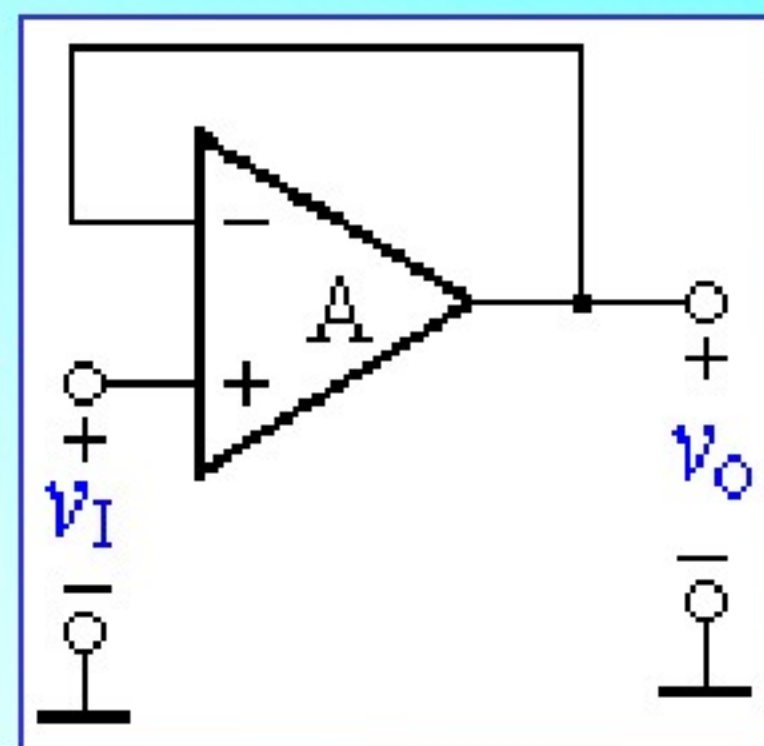
测量 $u_0=?$ ，计算 $A_{uf} = u_0/u_i$ 。



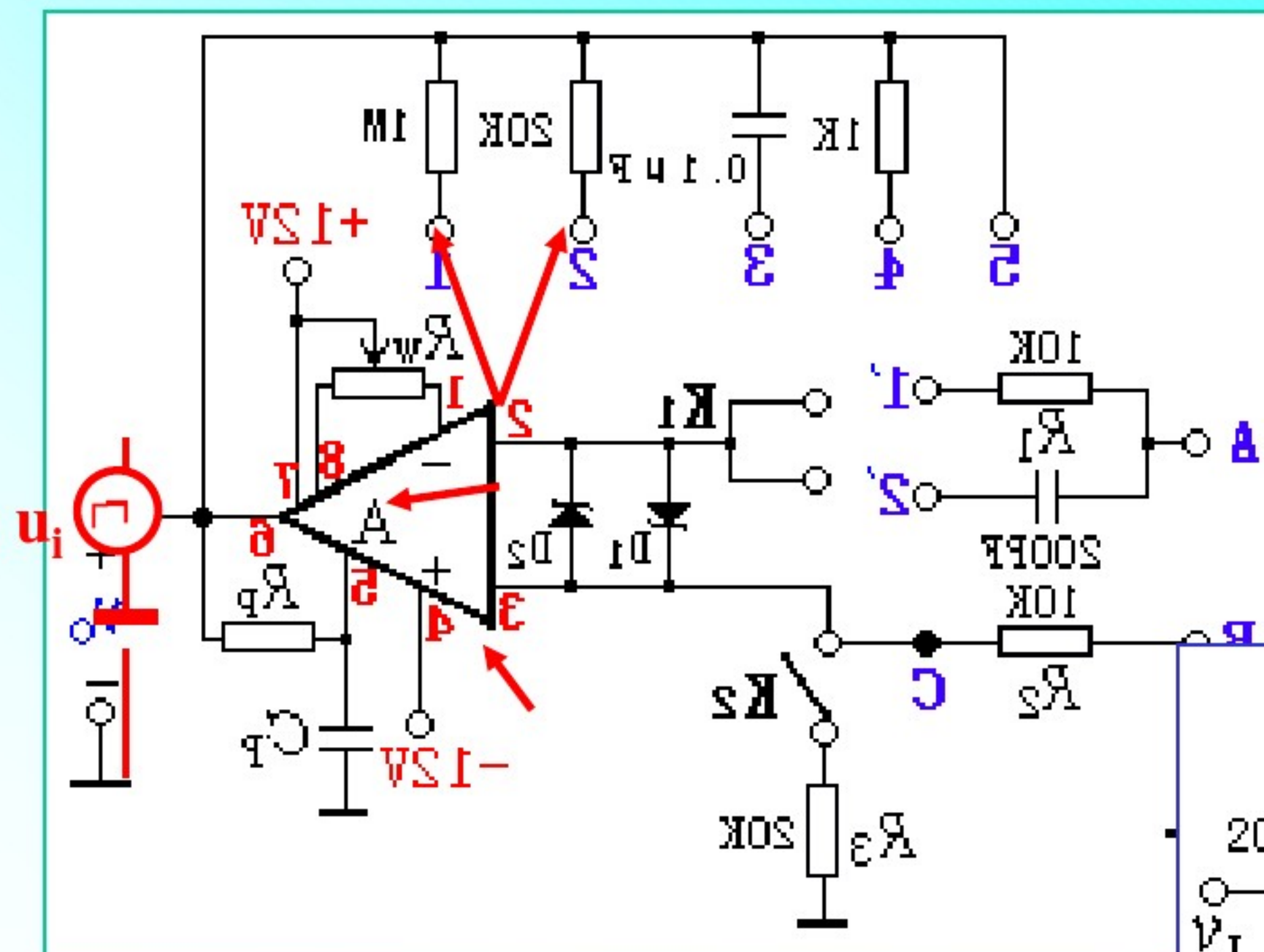
3.跟随器



测量 $u_0 = ?$ ，计算 $A_{uf} = u_0/u_i$ 。



4.微分电路



观察 u_o 的输出波形。

