

第9章 信号处理与信号产生电路

一、有源滤波器 **Active Filters**

9.1 滤波电路基本概念与分类

9.2 一阶有源滤波电路

9.3 二阶有源滤波电路

9.4 开关电容滤波*

二、正弦波振荡器 **Sine-wave Oscillators**

9.5 振荡的条件

9.6 RC正弦波振荡电路

9.7 LC正弦波振荡电路*

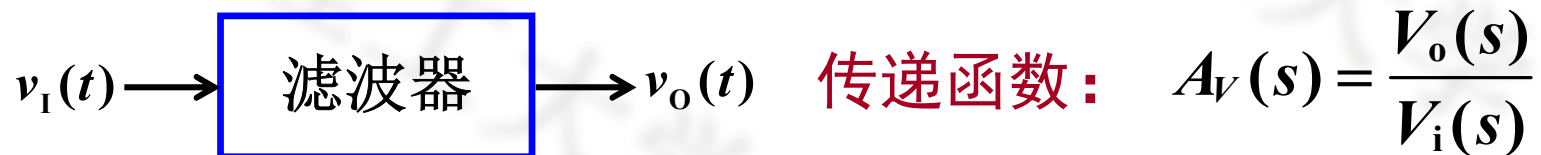
三、非正弦波振荡器 **Nonsinusoidal Oscillator**

9.8 非正弦信号产生电路（比较器、方波、锯齿波）

一、有源滤波器 Active Filters

9.1 滤波电路基本概念与分类

➤ **滤波器作用**：通过有用频率信号，抑制或衰减无用频率信号。

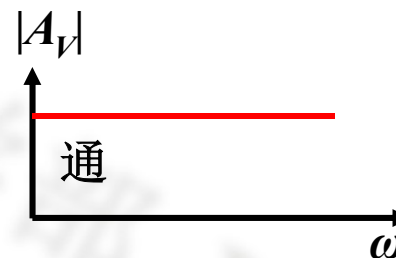


$$A_V(j\omega) = |A_V(j\omega)| \cdot e^{j\phi(\omega)} = |A_V(j\omega)| \angle \phi(\omega)$$

频域分析：幅频特性、相频特性

➤ **分类** 按幅频特性分：

- **全通滤波APF**



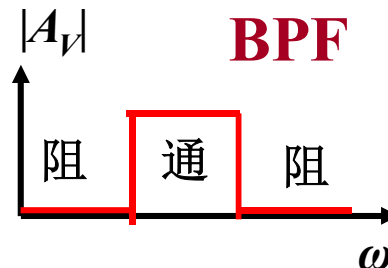
• **低通滤波 LPF**



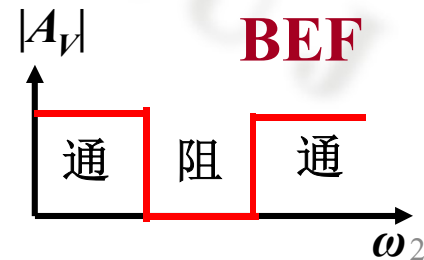
• **高通滤波 HPF**



• **带通滤波 BPF**



• **带阻滤波 BEF**



一、有源滤波器 Active Filters

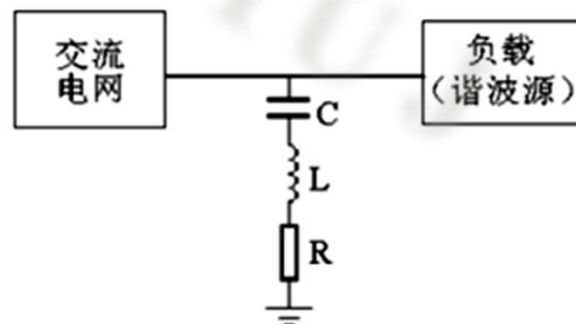
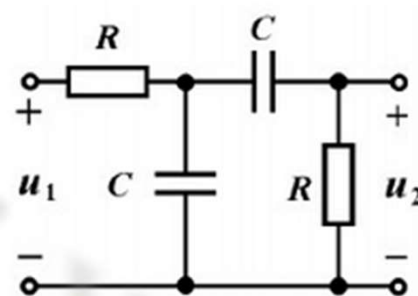
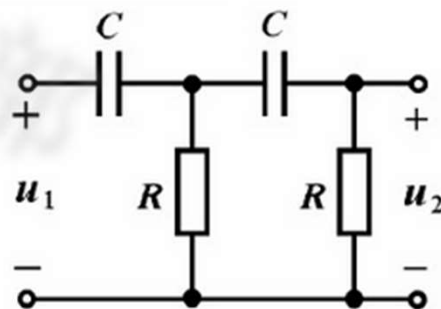
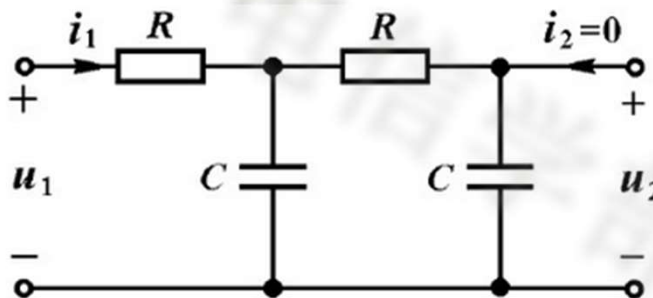
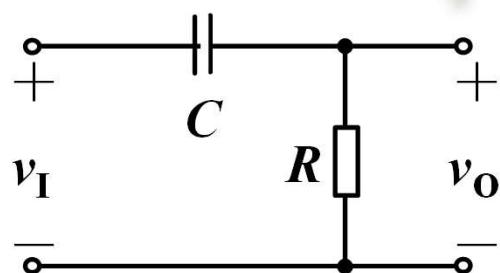
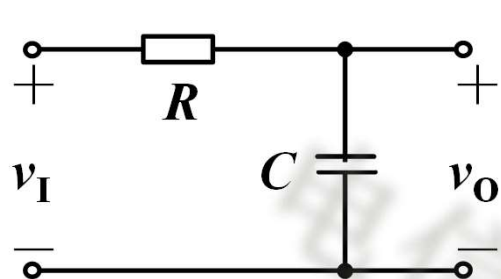
9.1 滤波电路基本概念与分类

➤分类：无源滤波器、有源滤波器

◆无源滤波电路： R 、 L 、 C 组成，

主要优点--结构简单；

主要缺点--性能受负载影响大；



一、有源滤波器 Active Filters

9.1 滤波电路基本概念与分类

➤分类：无源滤波器、有源滤波器

◆有源滤波器：

由集成运放（工作在线性区）和RC网络组成。

➤ 主要优点：

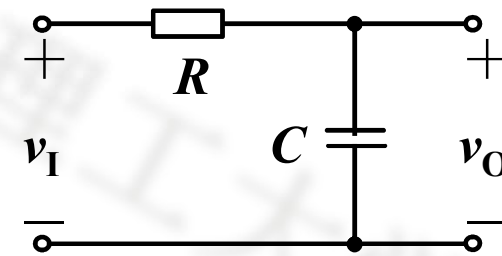
- ✓ 集成运放电路 R_i 高， R_o 低，性能不受系统阻抗影响；
- ✓ 滤波的同时，还可以放大，而且放大倍数容易调节。

➤ 主要缺点：成本高；不适合高压、大功率应用。

9.2 一阶有源滤波电路

无源滤波器

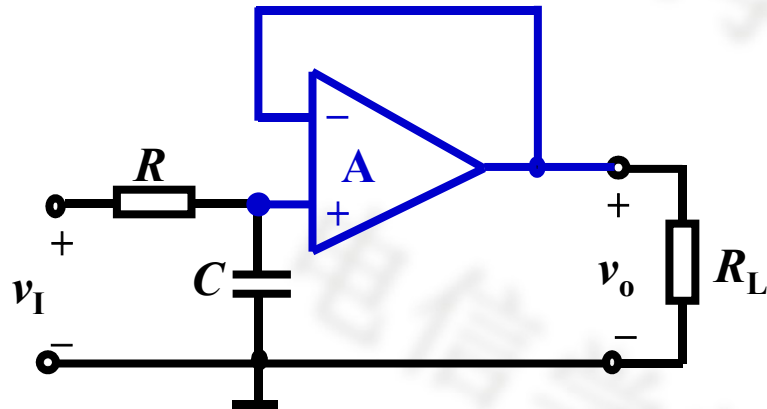
一阶RC低通



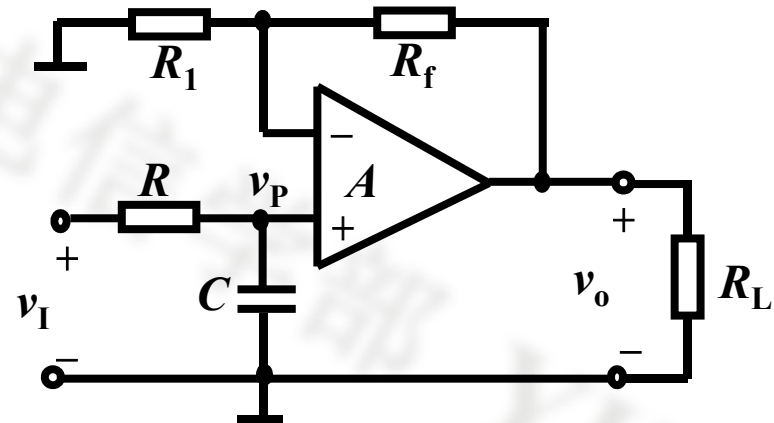
有源滤波器

一阶低通

= 一阶无源RC低通+同相放大器



具有电压跟随器的低通滤波电路



带同相比例放大电路的低通滤波电路

作用：滤波、隔离（阻抗变换）、放大。

9.2 一阶有源滤波电路

(1) 一阶低通滤波器

传递函数

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

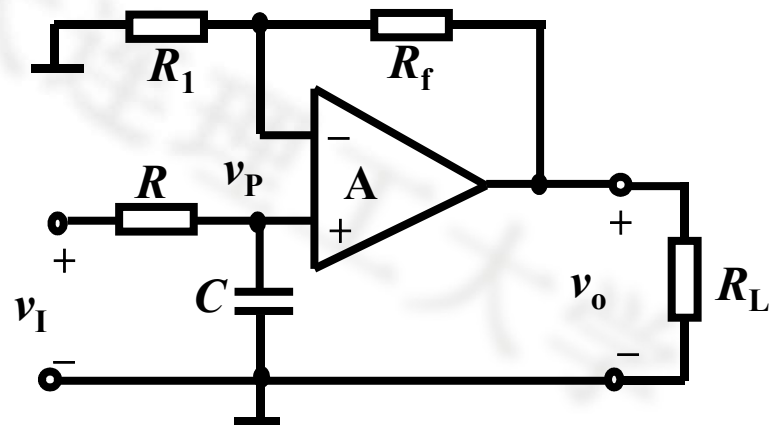
$$A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad \text{通带电压增益}$$

$$\omega_n = \frac{1}{RC} \quad \text{特征角频率}$$

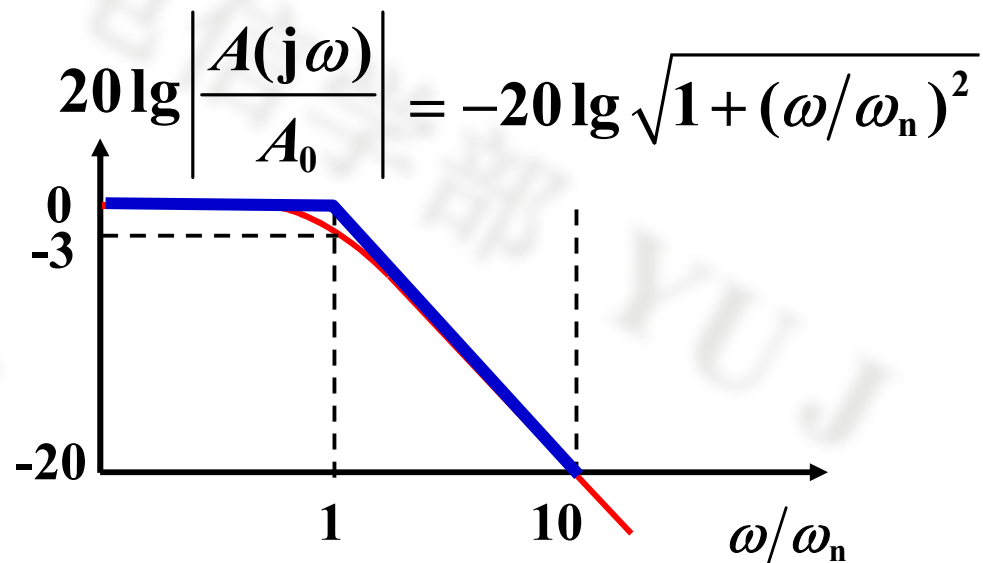
$$A(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j\omega/\omega_n}$$

故，幅频响应为

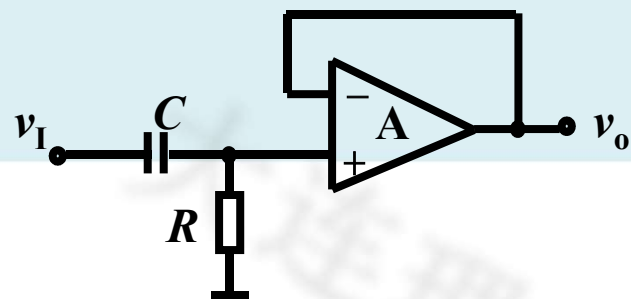
$$|A(j\omega)| = \frac{A_0}{\sqrt{1 + (\omega/\omega_n)^2}}$$



带同相比例放大电路的低通滤波电路

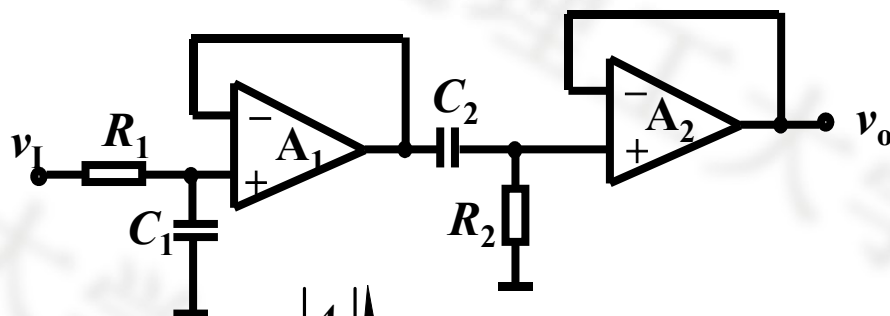


(2) 一阶高通滤波电路



(3) 带通滤波电路

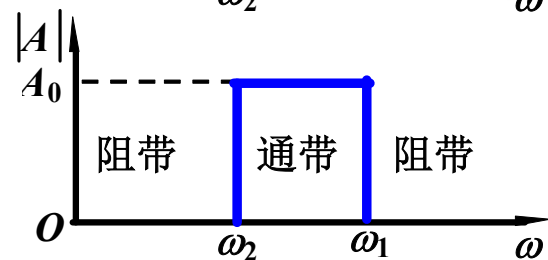
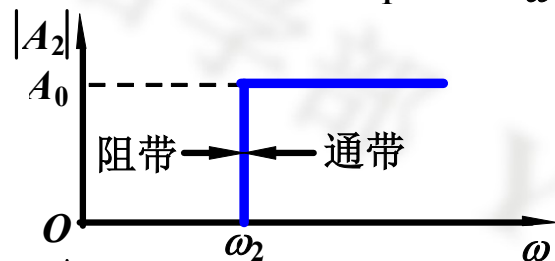
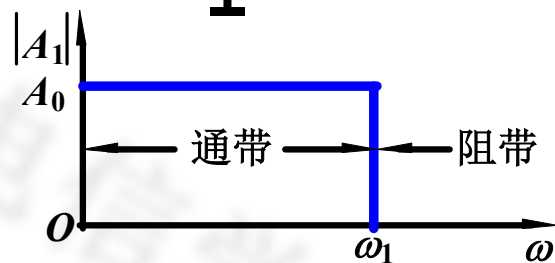
可由低通和高通
串联得到



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

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

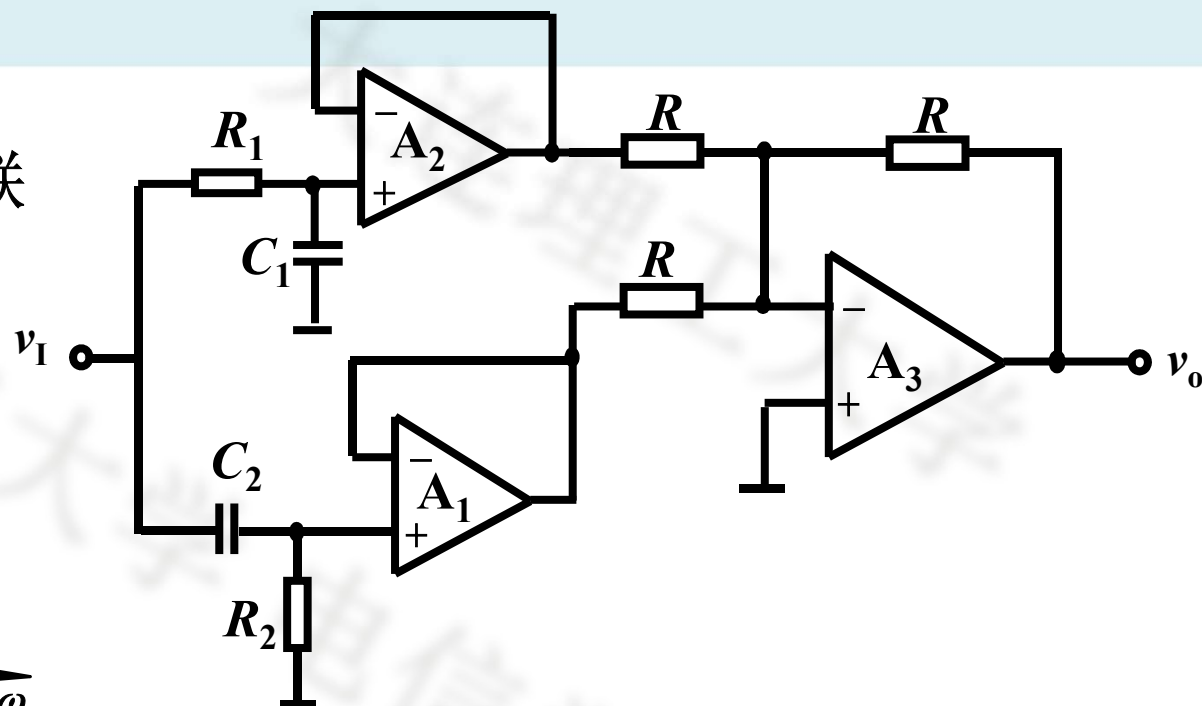
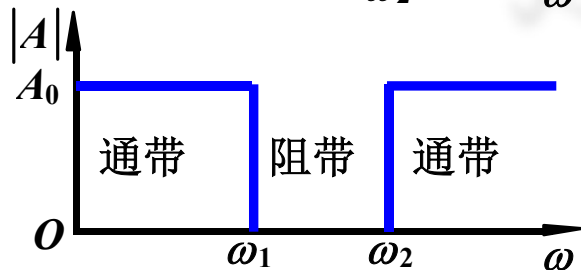
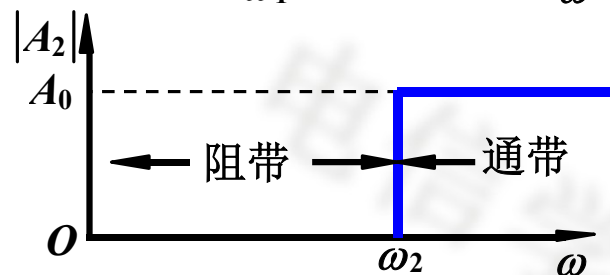
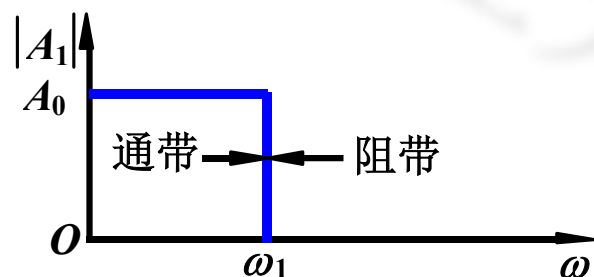
必须满足 $\omega_2 < \omega_1$



(4) 带阻滤波电路

可由低通和高通并联
得到

必须满足 $\omega_2 > \omega_1$

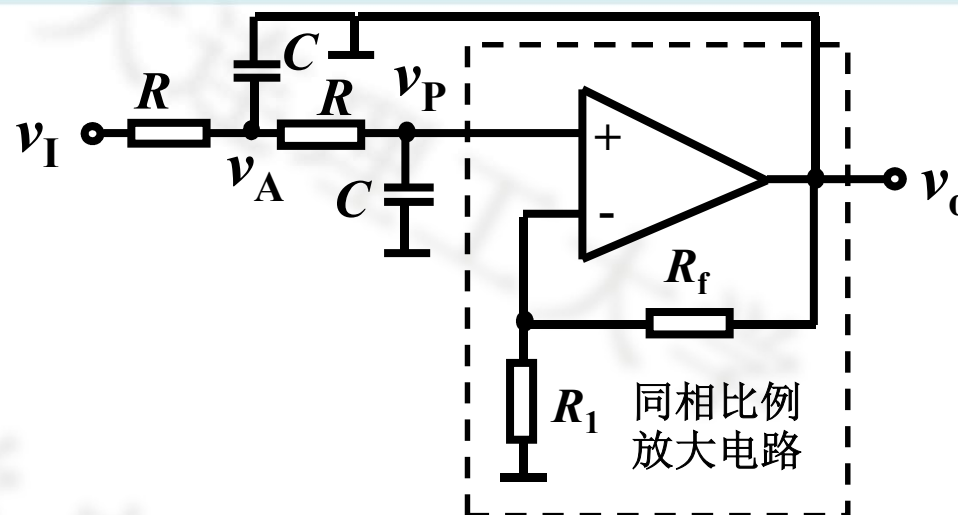


一阶有源滤波电路通带外衰减速率慢（**-20dB/十倍频程**），与理想情况相差较远。一般用在对滤波要求不高的场合。

9.3 二阶有源滤波电路

1. 二阶有源低通滤波电路

(压控电压源LPF)



$$\begin{cases} A_{VF} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \\ V_P(s) = \frac{1}{1 + sRC} \cdot V_A(s) \\ \frac{V_i(s) - V_A(s)}{R} - \frac{V_A(s) - V_o(s)}{1/sC} - \frac{V_A(s) - V_P(s)}{R} = 0 \end{cases}$$

传递函数

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{VF}}{1 + (3 - A_{VF})sCR + (sCR)^2} \quad (\text{二阶})$$

$$A(j\omega) = \frac{A_0}{(j\omega/\omega_n)^2 + j\omega/(\omega_n Q) + 1}$$

通带增益

$$A_0 = A_{VF}$$

等效品质因数

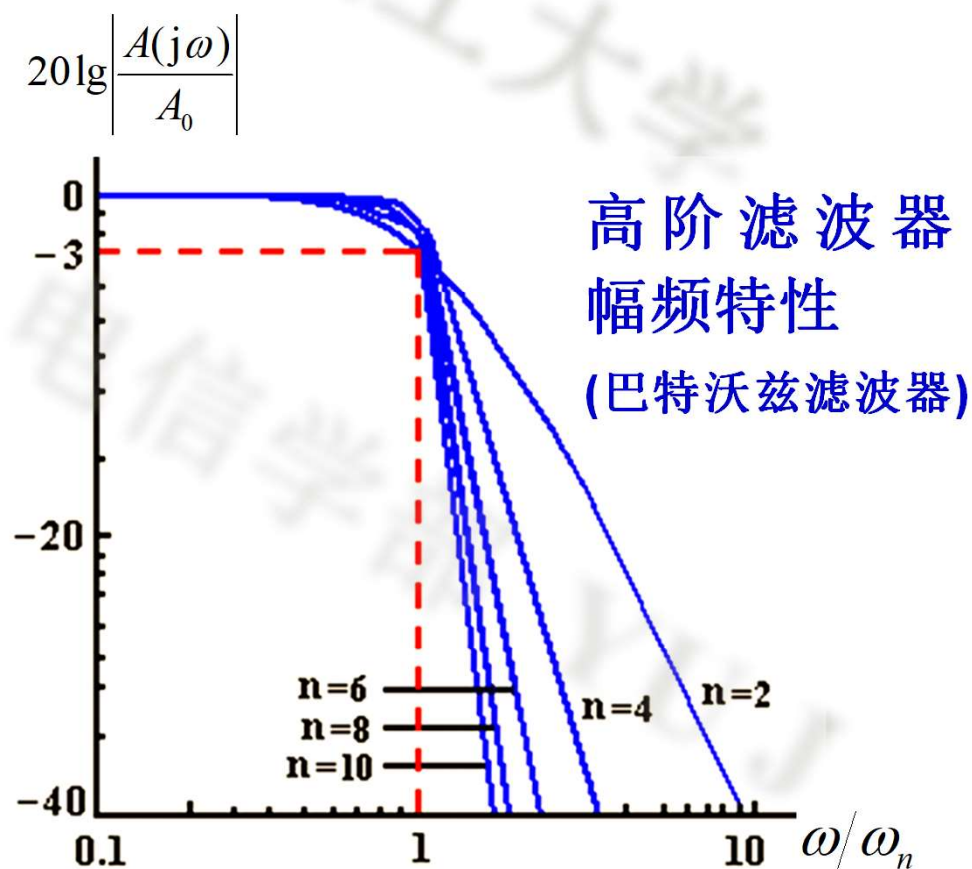
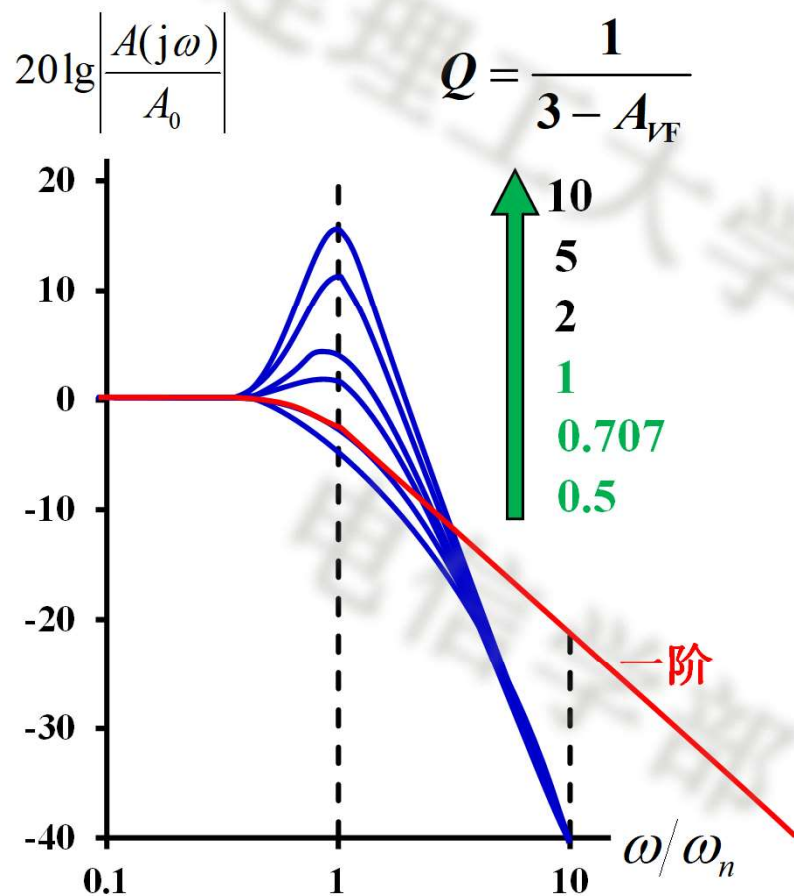
$$Q = \frac{1}{3 - A_{VF}}$$

归一化的
幅频响应

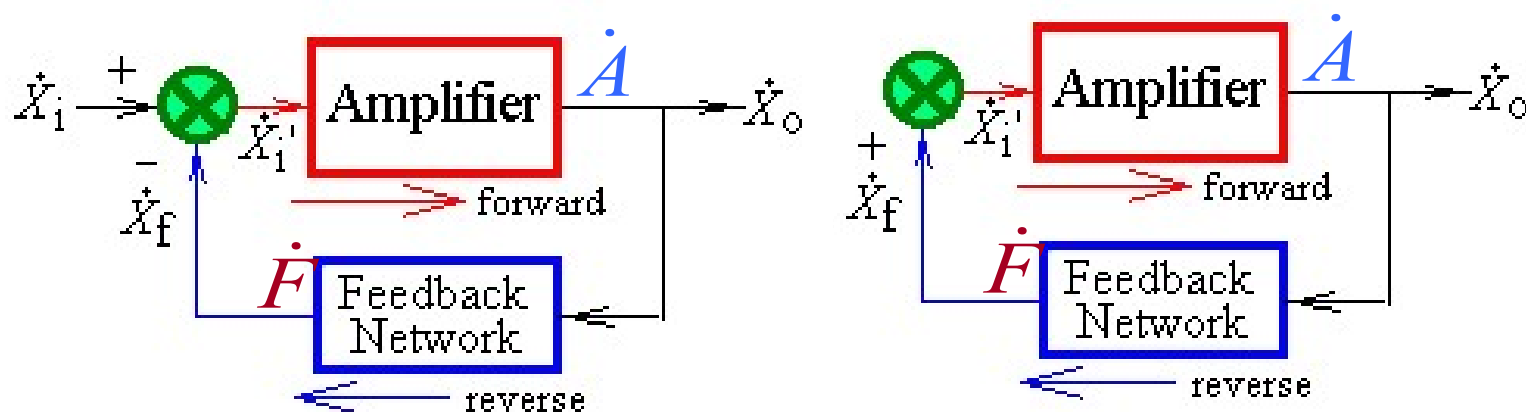
$$20\lg\left|\frac{A(j\omega)}{A_0}\right| = 20\lg\frac{1}{\sqrt{\left[1 - (\omega/\omega_n)^2\right]^2 + \left[\omega/(\omega_n Q)\right]^2}}$$

等效品质因数

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



9.5 振荡的条件



(a) 负反馈电路

(b) 正反馈电路

负反馈电路---自激振荡条件: $\dot{A}\dot{F} = -1$

正反馈电路---稳态振荡条件: $X_f = X_i'$

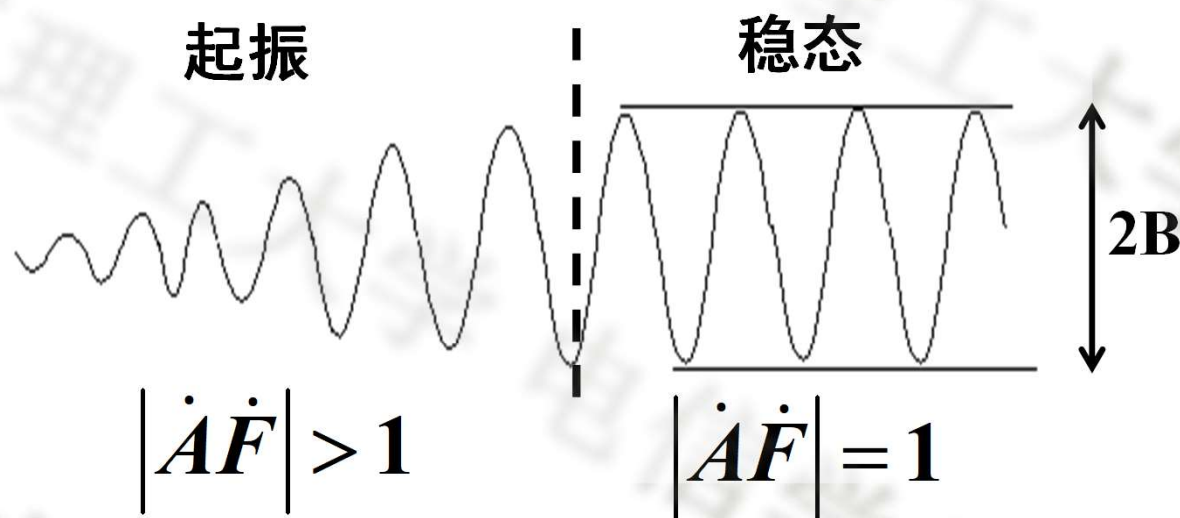
$$\dot{A}\dot{F} = 1 \quad \left\{ \begin{array}{l} |\dot{A}\dot{F}| = 1 \quad \text{---(2) 幅值平衡条件} \\ \varphi_{AF} = \varphi_A + \varphi_F = 2n\pi \quad \text{---(1) 相位平衡条件} \\ n=0,1,2,\dots \quad \text{total phase shift} \end{array} \right.$$

反馈信号代替了放大电路的输入信号。

V_o 是振荡器的电压实时输出幅度， B 是最终幅度。启振时 $V_o=0$ ，达到稳定振荡时 $V_o=B$ 。频率 $f=f_o$ 。

振荡建立过程

$$\varphi_{AF} = 2n\pi \quad \text{正反馈}$$



输入信号为0，如何产生输出信号？ 启振

如何设计输出正弦波信号的频率？ 选频

启振后，如何输出幅度稳定的正弦波信号？ 稳幅

V_0 是振荡器的电压实时输出幅度， B 是最终幅度。起振时 $V_0=0$ ，达到稳定振荡时 $V_0=B$ 。频率 $f=f_0$ 。

问题1：如何启振？

放大电路中存在白噪声，即瞬态扰动。

$|AF|>1$ ，且 $\varphi_A + \varphi_B = 2n\pi$ ，即可起振。

上电后， V_0 从 0 增加到 B 的过程需要正反馈放大：启振！

问题2：如何选频？

噪声含有各种频率的分量，其中也包括有 f_0 分量。

把 f_0 分量选出，把其它频率的分量衰减掉。滤波

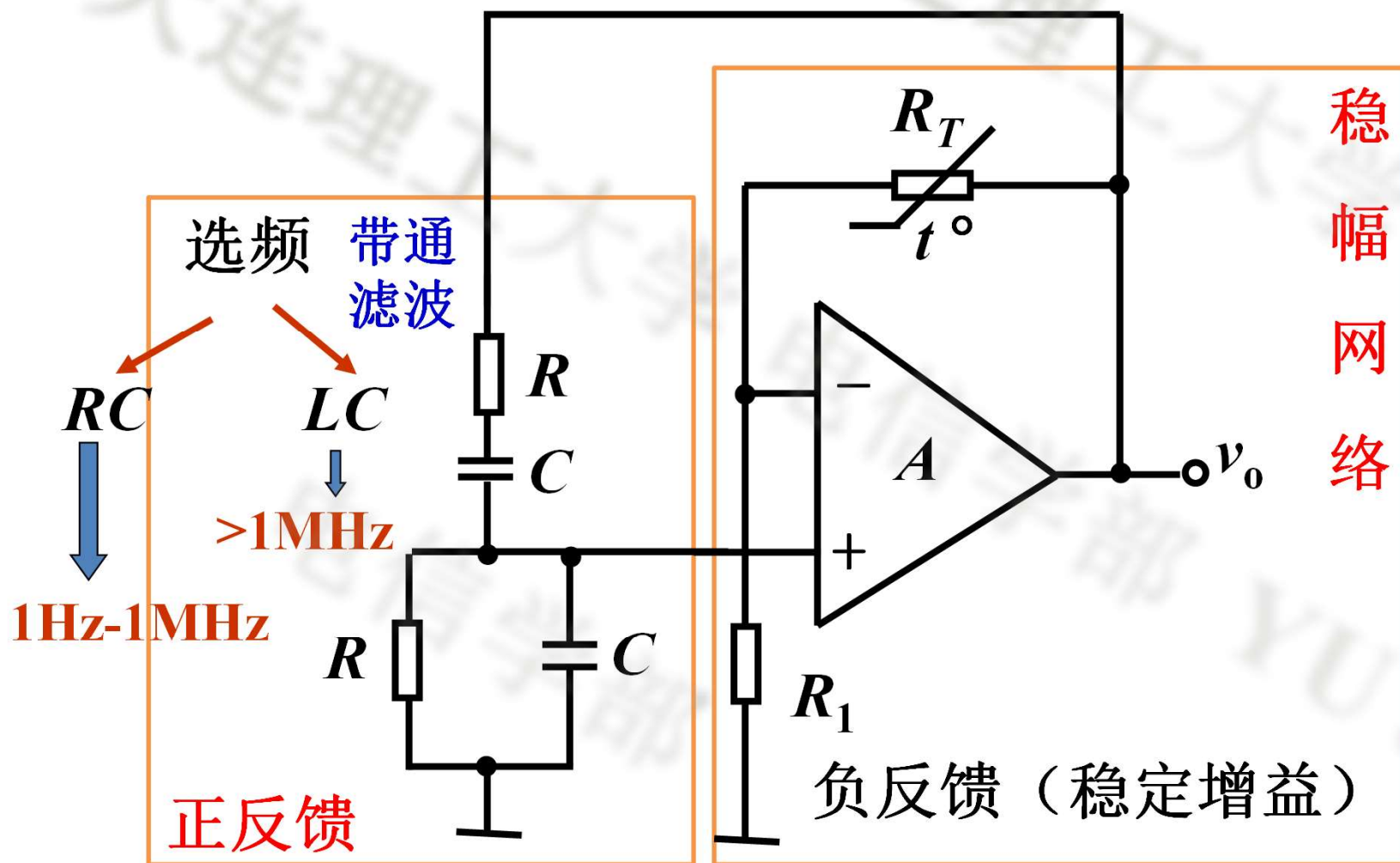
问题3：如何稳幅？

自动调节 $|AF|$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{when } V_0 < B, \quad |\dot{A}\dot{F}| > 1 ; \\ \text{when } V_0 = B, \quad |\dot{A}\dot{F}| = 1 ; \\ \text{when } V_0 > B, \quad |\dot{A}\dot{F}| < 1 ; \end{array} \right.$$

9.6 RC正弦波振荡电路

(1) 电路的构成:



(2). RC串并联网络的频率响应

$$Z_1 = R_1 + (1 / j\omega C_1)$$

$$Z_2 = R_2 // (1 / j\omega C_2) = \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}$$

设计: $R_1 = R_2 = R$; $C_1 = C_2 = C$; 则

$$\dot{F} = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{1}{3 + j(f/f_0 - f_0/f)}$$

$$f_0 = 1/(2\pi RC)$$

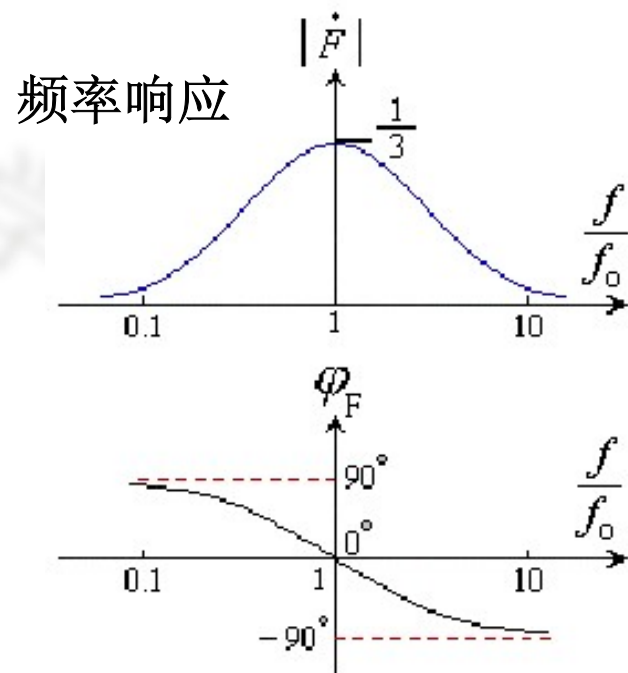
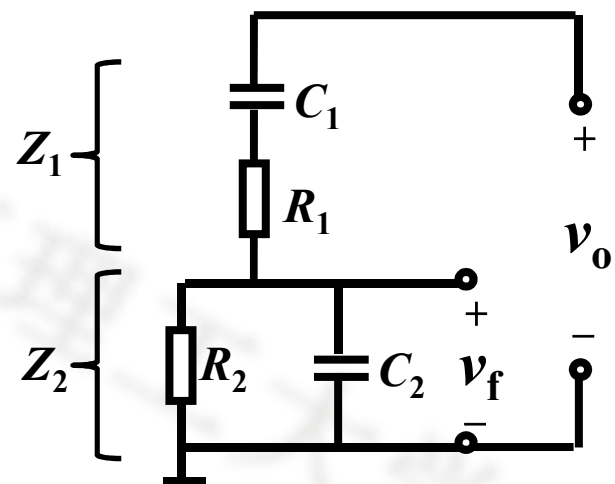
$$\text{幅值: } |\dot{F}| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + (f/f_0 - f_0/f)^2}}$$

$$\text{相位: } \phi_F = -\arctg \frac{f/f_0 - f_0/f}{3}$$

$$\text{当 } f = f_0 \quad |\dot{F}|_{\max} = \frac{1}{3} \quad \phi_F = 0^\circ$$

谐振频率/
振荡频率
(选频)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (\omega_0 = \frac{1}{RC})$$



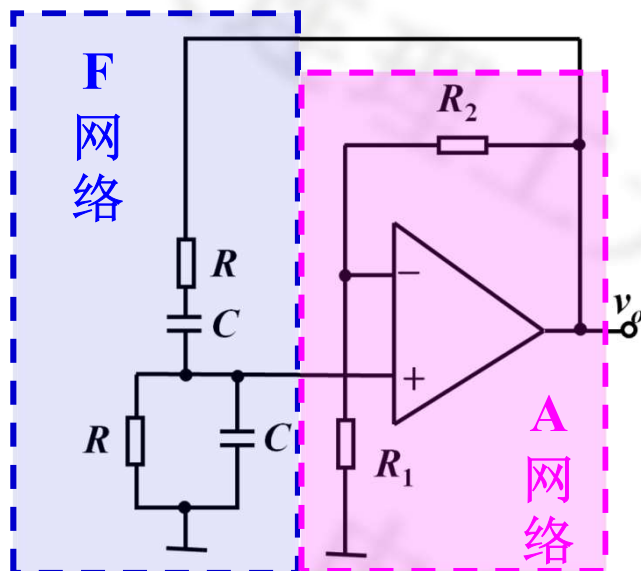
(3). 判断一电路能否振荡 ♥ ♥ ♥

方法:

- (1) 相位条件优先
- (2) 抽取A网络

1. 振荡器组成正确?

2 振荡的两个条件满足? (起振条件?)



(1) 相位平衡条件:

$$\varphi_A + \varphi_F = 2n\pi, n=0,1,2\dots$$

(2) 幅值平衡条件:

$$|\dot{A}\dot{F}| = 1$$

+起振条件

$$|\dot{A}\dot{F}| \geq 1$$

F

$f = f_0$:

$$\phi_F = 0^\circ$$

A



$$\phi_A = 0^\circ$$

满足

$$\left| \dot{F} \right|_{\max} = \frac{1}{3}$$

$$A_f = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

振荡的建立与稳定:

启振时: $R_2 > 2R_1$

$$A_f = 1 + R_2/R_1 > 3$$

稳幅时: $R_2 = 2R_1$ 则 $A_f = 3$

(4). 稳幅电路

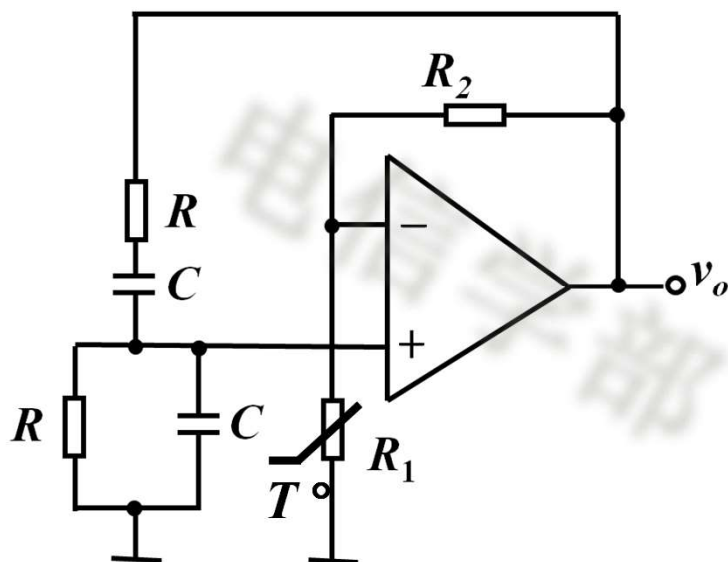
启振时: R_2 略大于 $2R_1$

$$V_o \uparrow \rightarrow A_f = 1 + \frac{R_2}{R_1} \downarrow$$

温敏电阻: $V_o \uparrow \quad I_{R1} = I_{R2} \uparrow \quad \text{温度 } T \uparrow$

$R_1 \uparrow \rightarrow$ 正温度系数

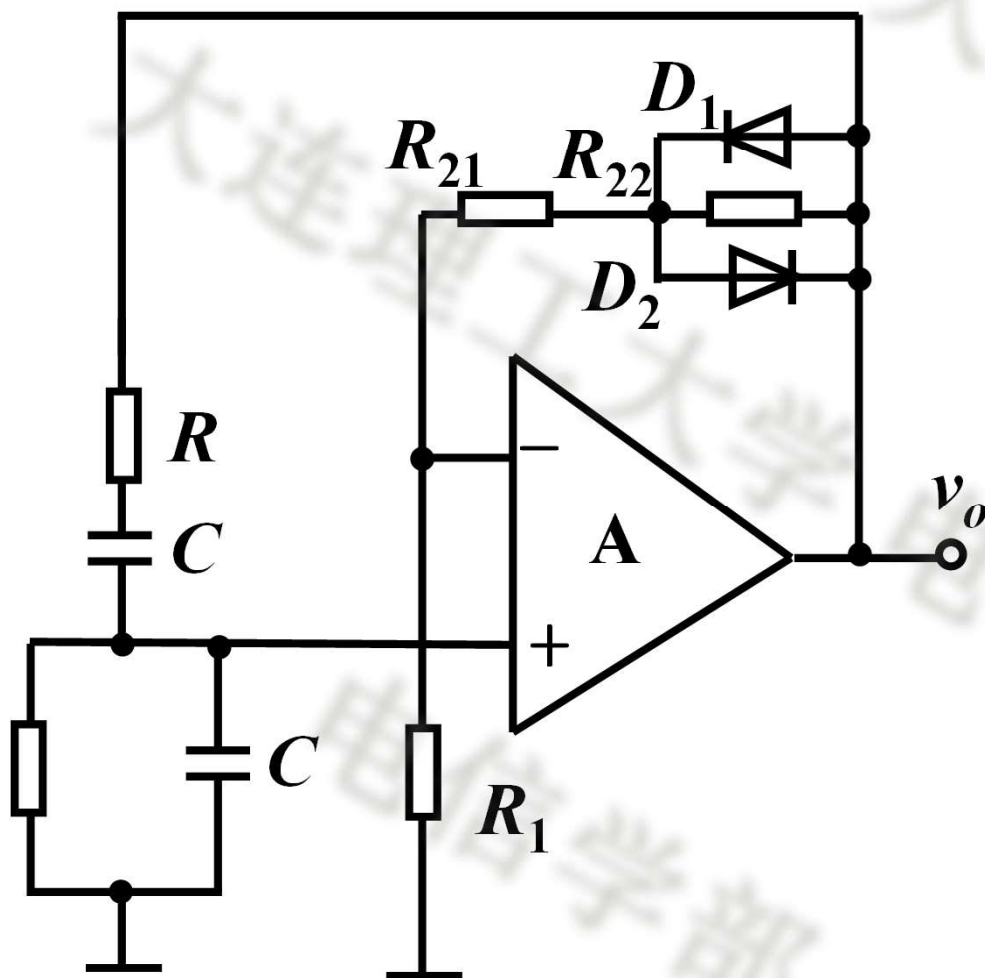
或者 $R_2 \downarrow \rightarrow$ 负温度系数



$$|\dot{A}\dot{F}| > 1 \rightarrow |\dot{A}\dot{F}| = 1$$

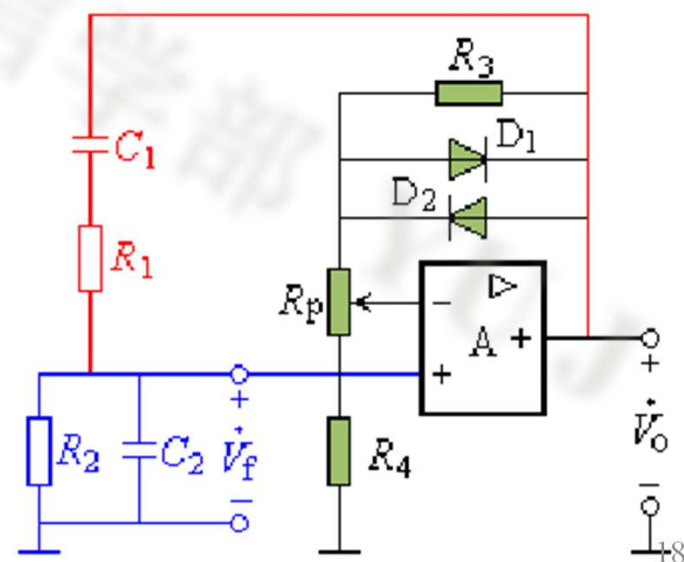


其它稳幅电路 ($R_{21}=2R_1$)

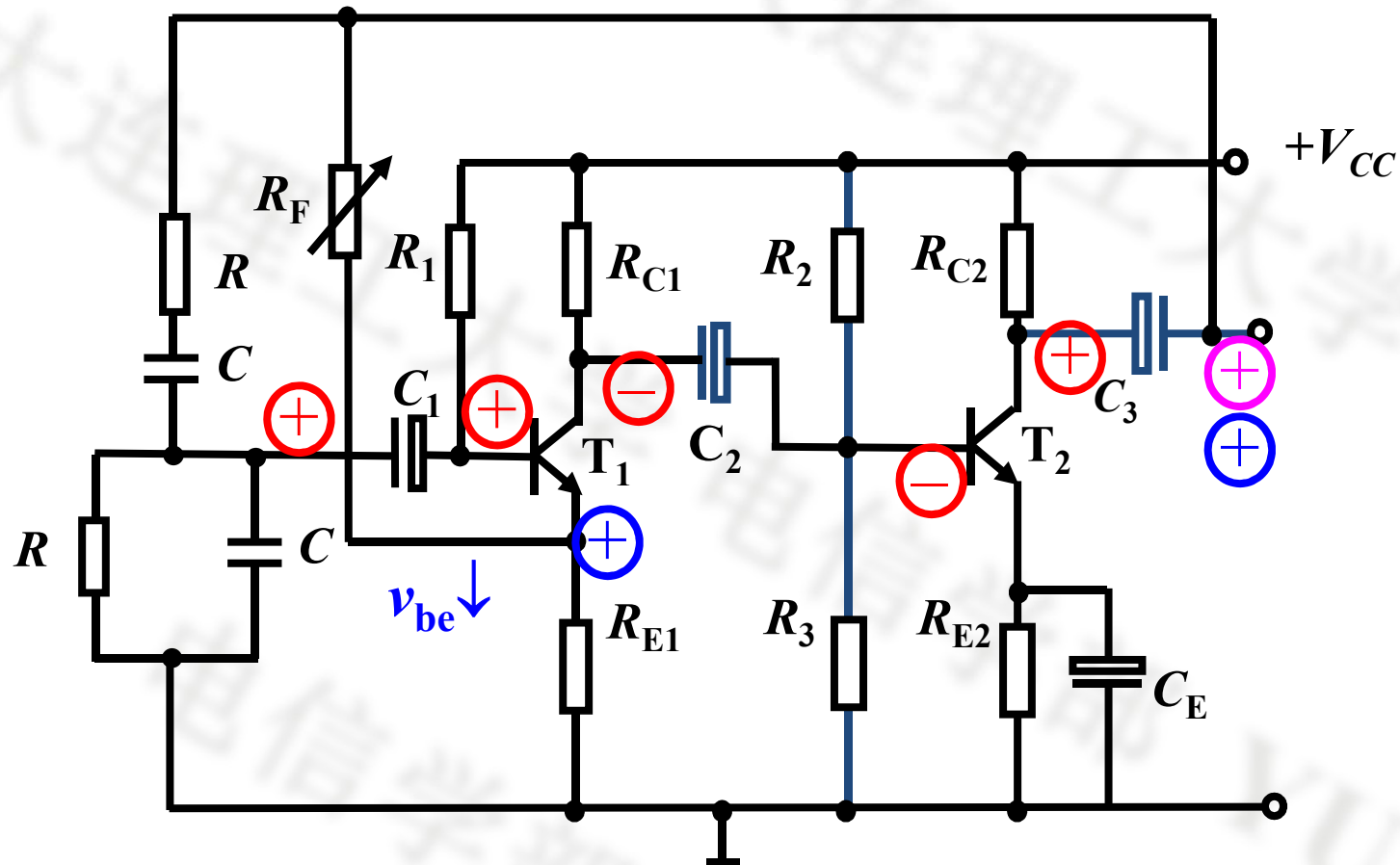


R_{22} 为一小电阻, 使
($R_{21}+R_{22}$)略大于 $2R_1$,
 $|AF|>1$, 以便起振;

随着 v_o 的增加, R_{22} 逐渐
被短接, A 自动下降到
使 $|AF|=1$, 使得输出 v_o
稳定在某值。



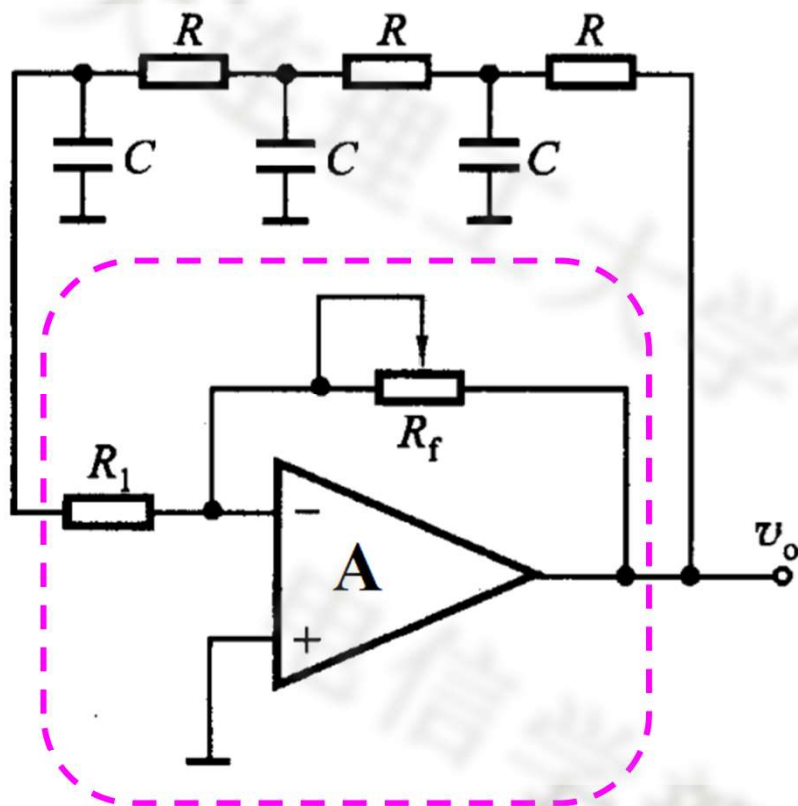
用分立元件组成的 RC 振荡器:



RC 网络正反馈; R_F 、 R_{E1} 组成负反馈;

调整到合适的参数则可产生振荡。

RC移相式振荡电路:



- A_{vf} 的相移180度;
- 每对RC电路的最大相移绝对值小于90度;
- 3对RC电路最大相移小于270度;
- 在特定频率处, 总相移可以达到360度, 形成正反馈;
- 调节 R_f 可同时满足相位和幅度条件, 形成正弦振荡。

9.6 正弦波振荡电路

小结

了解：振荡电路的基本概念；

掌握：RC正弦波振荡电路的
组成、原理、起振条件、稳幅原理及振荡频率的计算。

预习：非正弦波产生电路

作业

P473： 9.6.1, 9.6.2; **P474:** 9.6.5, 9.6.6

注意：幅值稳定： $|\dot{A}\dot{F}|=1$ +起振条件： $|\dot{A}\dot{F}|\geq 1$

