



9 信号处理与信号产生电路

9.1 滤波电路的基本概念与分类

9.2 一阶有源滤波电路

9.3 高阶有源滤波电路

*9.4 开关电容滤波器

9.5 正弦波振荡电路的振荡条件

9.6 RC 正弦波振荡电路

9.7 LC 正弦波振荡电路

9.8 非正弦信号产生电路

9.1 滤波电路的基本概念与分类

1. 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的电子装置。

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 $A(j\omega) = |A(j\omega)| \cdot e^{j\varphi(\omega)} = |A(j\omega)| \angle \varphi(\omega)$

其中 $|A(j\omega)|$ —— 模，幅频响应

$\varphi(\omega)$ —— 相位角，相频响应

$\tau(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega}$ (s) 群时延响应

9.1 滤波电路的基本概念与分类

2. 分类

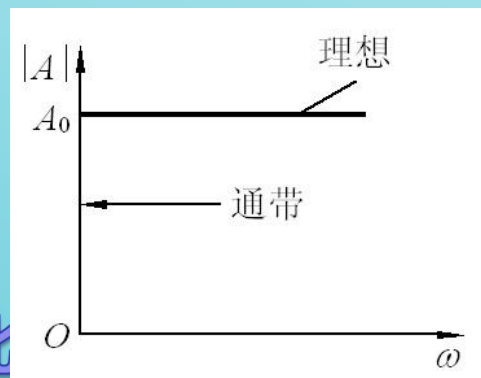
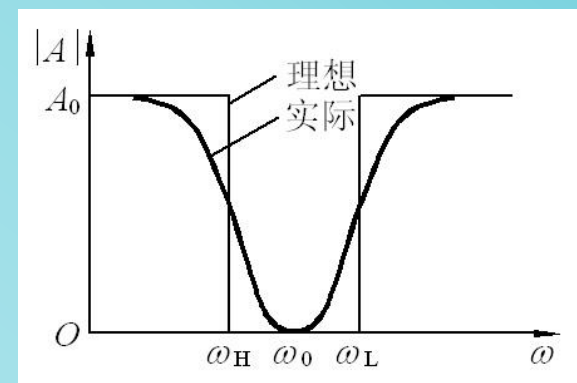
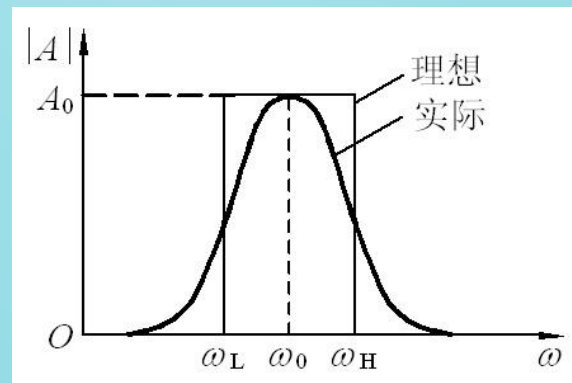
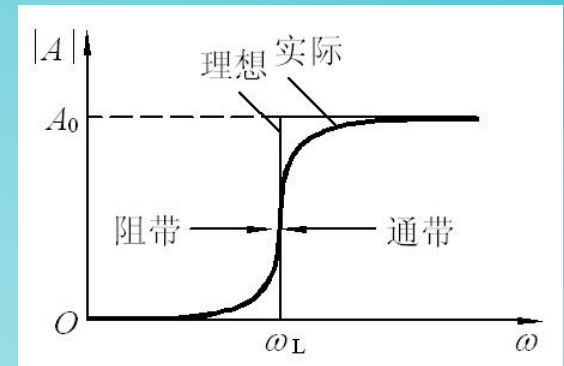
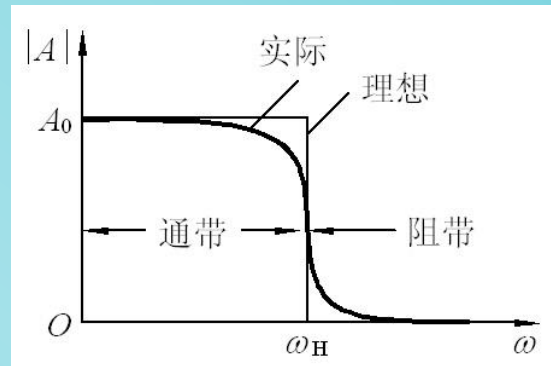
低通 (LPF)

高通 (HPF)

带通 (BPF)

带阻 (BEF)

全通 (APF)



9.2 一阶有源滤波电路

1. 低通滤波电路

传递函数 $A(s) = \frac{A_0}{1 + \frac{s}{\omega_c}}$

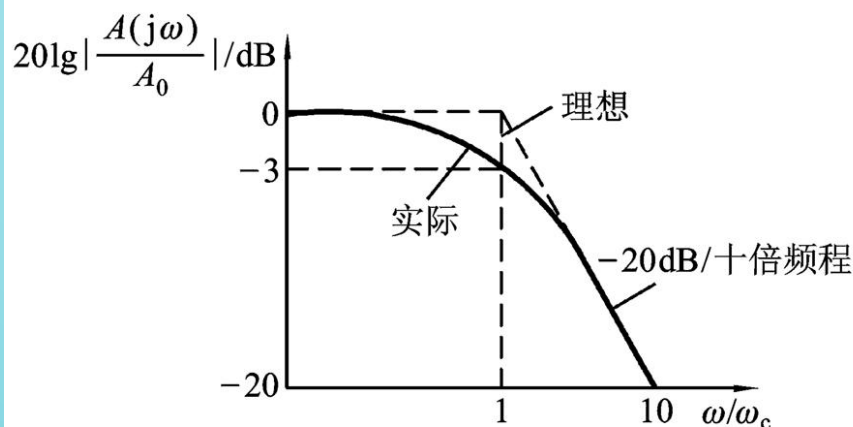
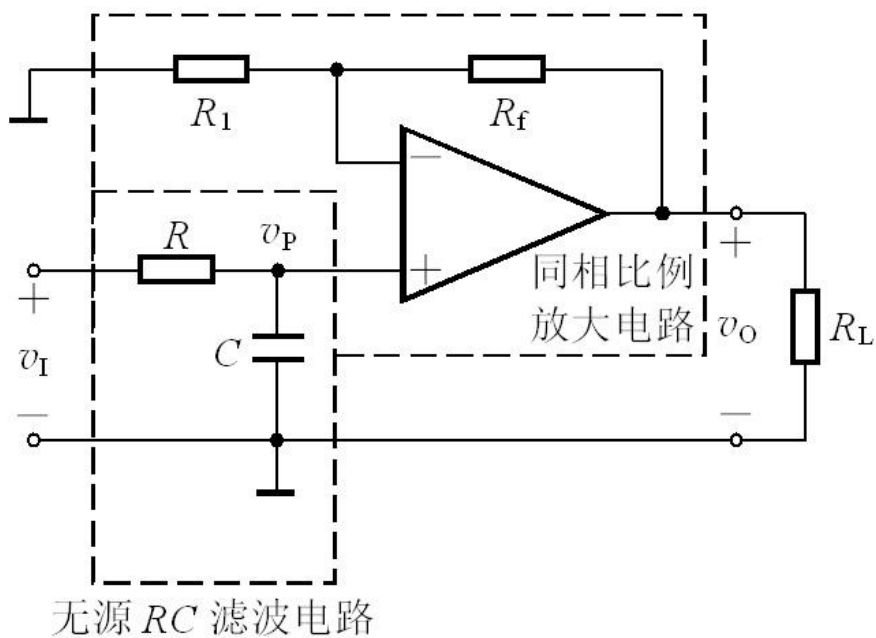
其中

$$A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad \text{同相比例放大系数}$$

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

故，幅频相应为

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

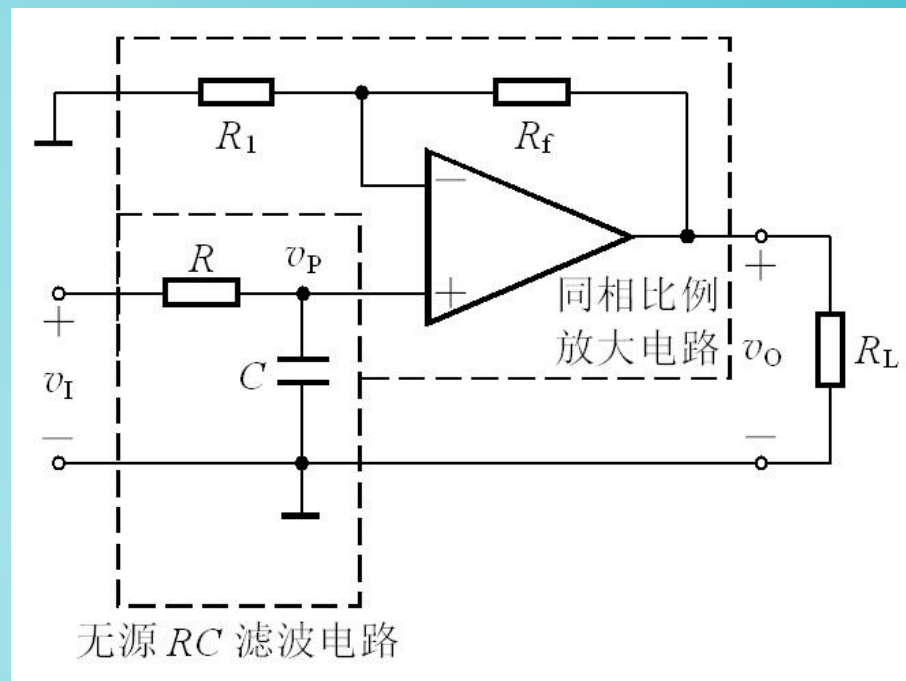


9.2 一阶有源滤波电路

2. 高通滤波电路

低通电路中的 R 和 C 交换位置便构成高通滤波电路

一阶有源滤波电路通带外衰减速率慢（ $-20\text{dB}/$ 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 高阶有源滤波电路

9.3.1 有源低通滤波电路

9.3.2 有源高通滤波电路

9.3.3 有源带通滤波电路

9.3.4 二阶有源带阻滤波电路

9.3.1 有源低通滤波电路

1. 二阶有源低通滤波电路

2. 传递函数

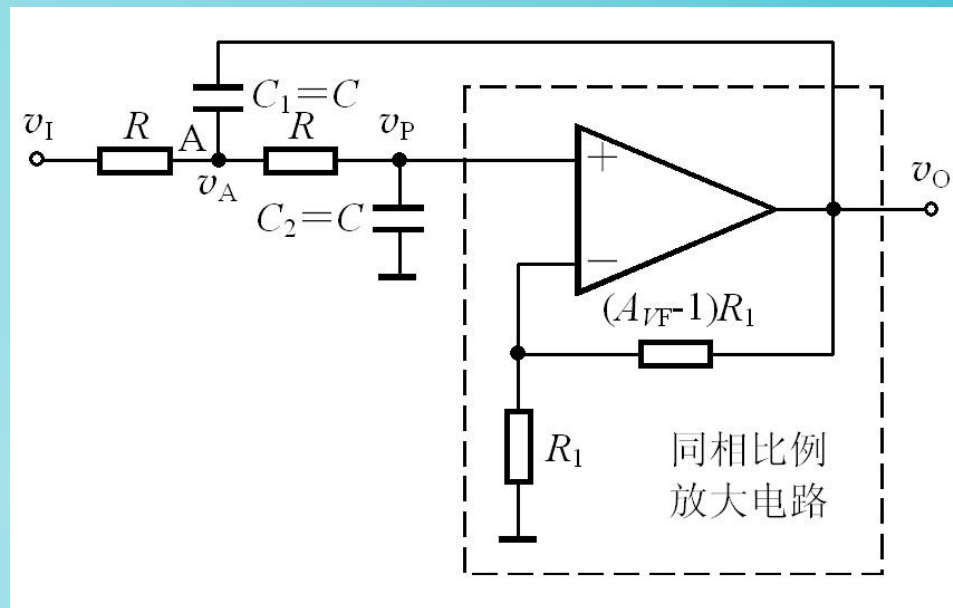
$$A_{VF} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (\text{同相比例})$$

对于滤波电路, 有

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

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

川北医学院生物医学工程 (二阶)



2. 传递函数

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

令 $A_0 = A_{VF}$ 称为**通带增益**

$Q = \frac{1}{3 - A_{VF}}$ 称为**等效品质因数**

$\omega_c = \frac{1}{RC}$ 称为**特征角频率**

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

注意：当 $3 - A_{VF} > 0$ ，即 $A_{VF} < 3$ 时，滤波电路才能稳定工作。

2. 传递函数

用 $s = j\omega$ 代入，可得传递函数的频率响应：
归一化的幅频响应

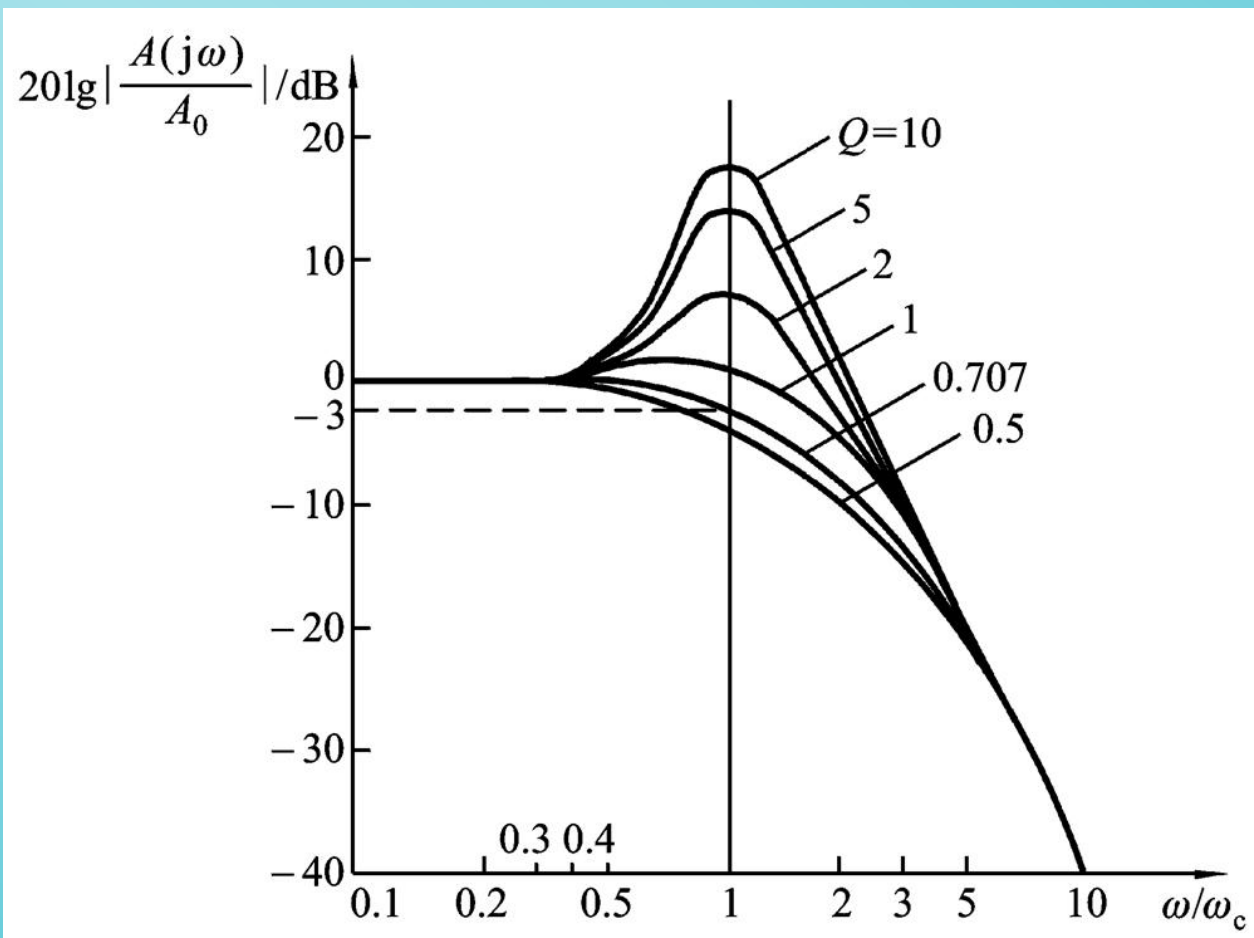
$$20\lg\left|\frac{A(j\omega)}{A_0}\right| = 20\lg\frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_c Q}\right)^2}}$$

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

3. 幅频响应

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

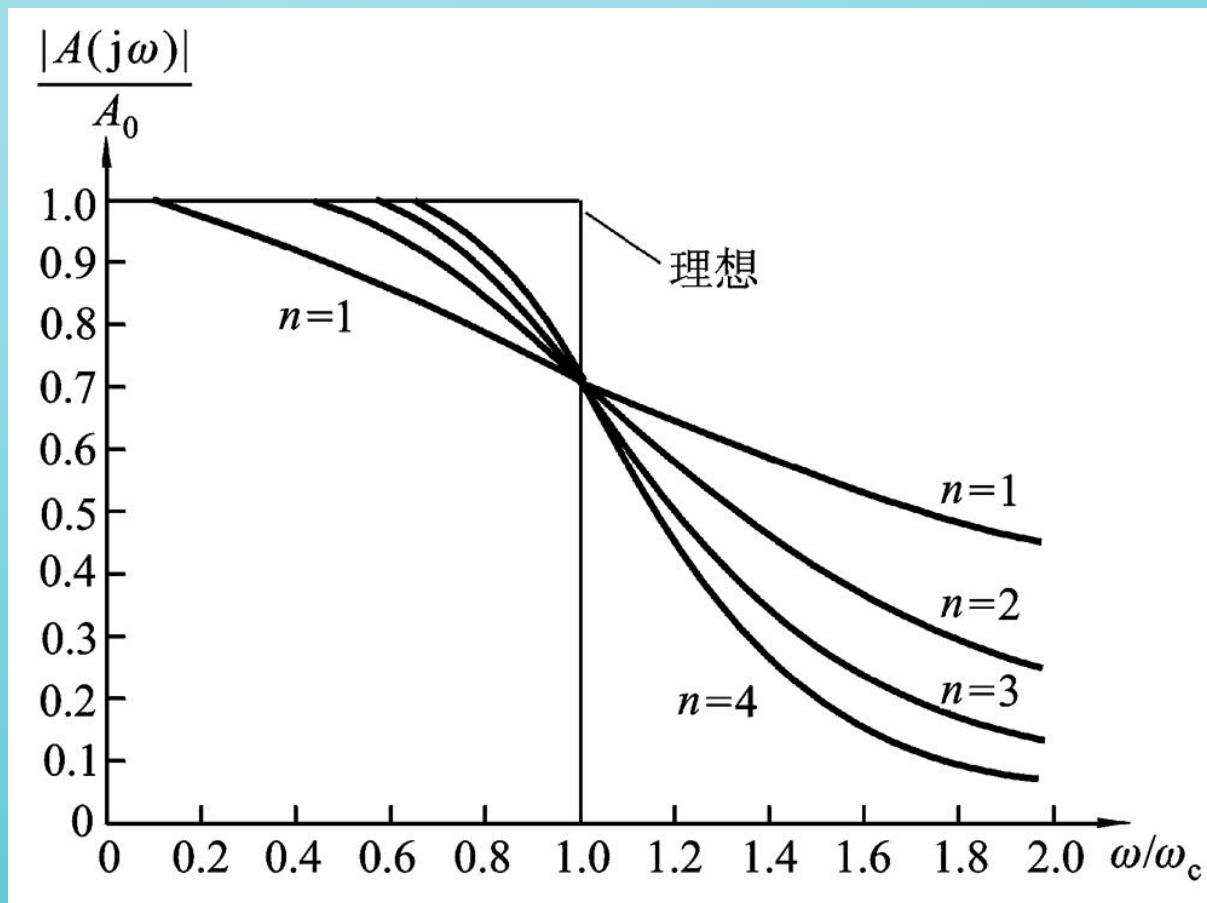
归一化的幅
频响应曲线



4. n 阶巴特沃斯传递函数

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。



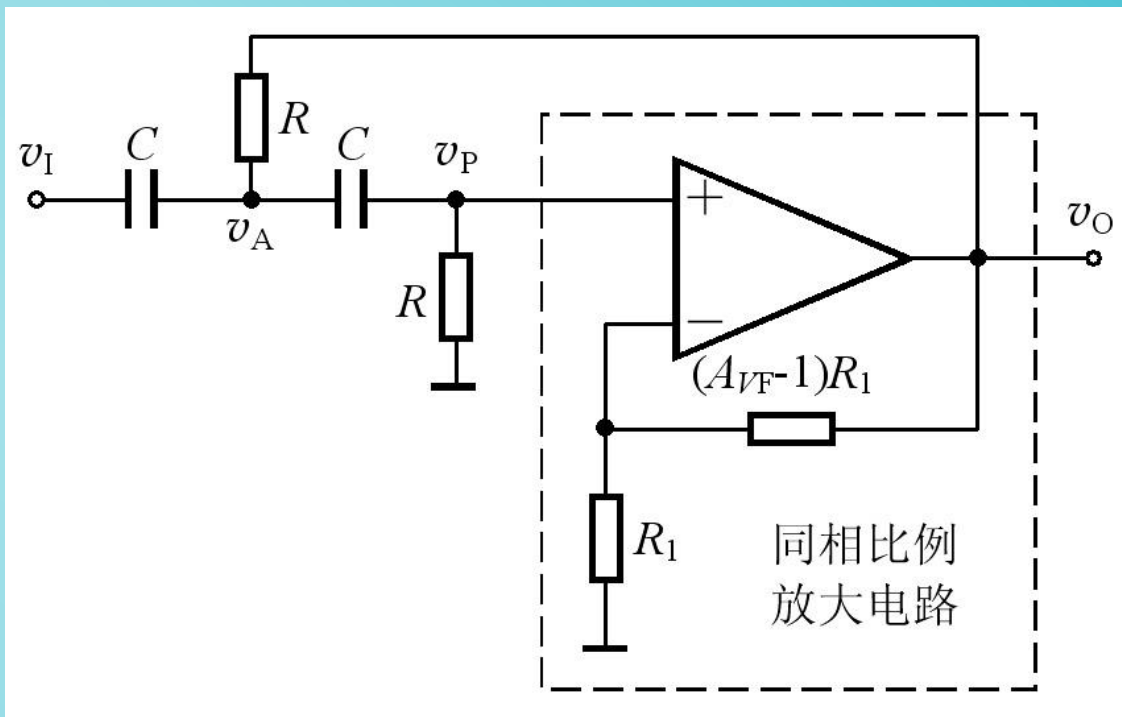
9.3.2 有源高通滤波电路

1. 二阶高通滤波电路

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

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



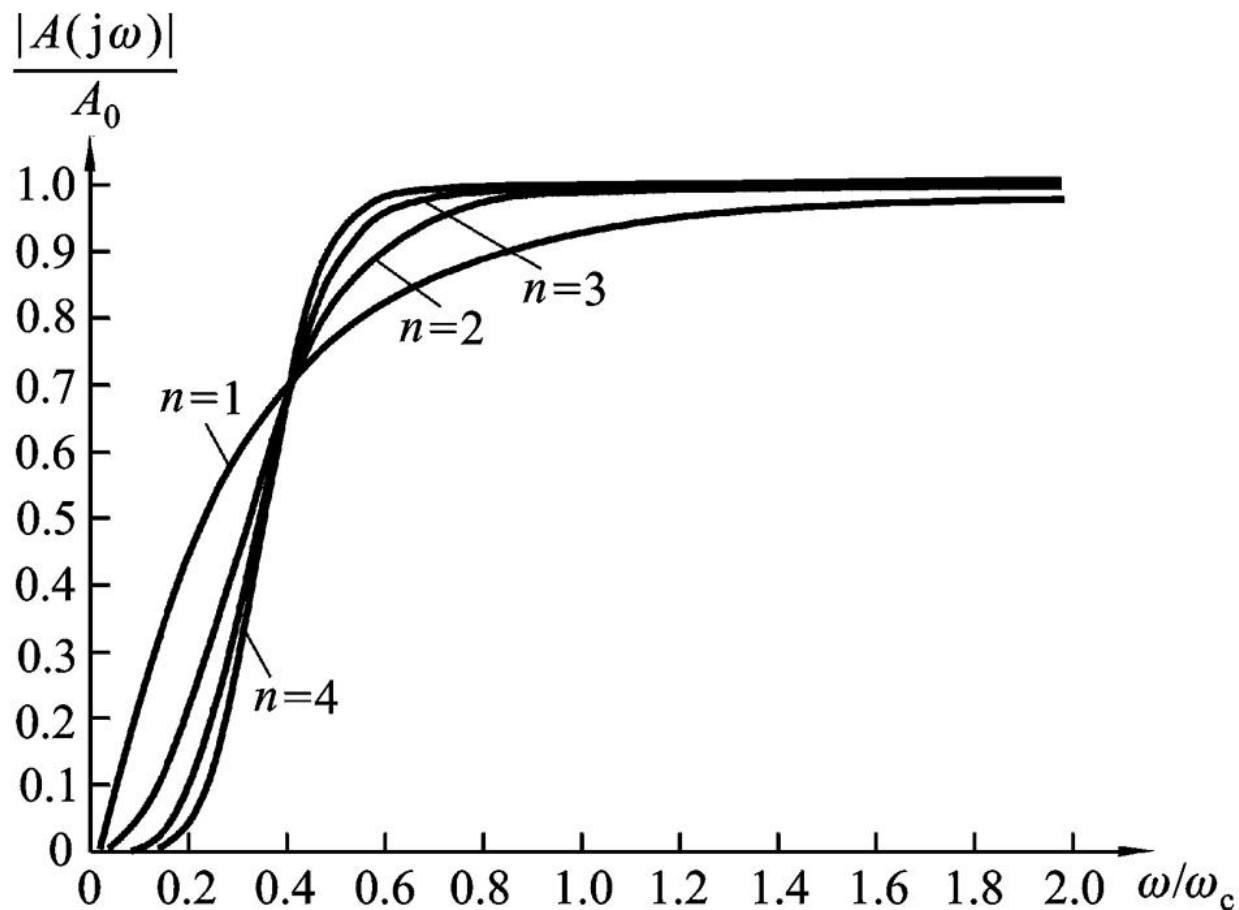
归一化的幅频响应

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

2. 巴特沃斯传递函数及其归一化幅频响应

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

归一化幅频响应



9.3.3 有源带通滤波电路

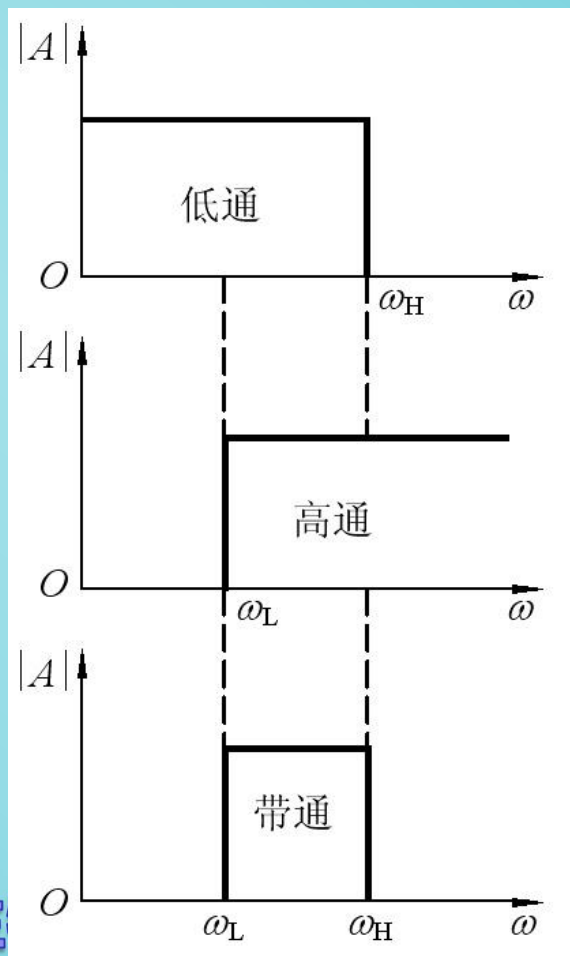
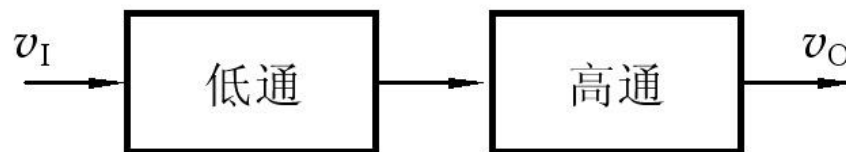
1. 电路组成原理

可由低通和高通串联得到

$$\omega_H = \frac{1}{R_1 C_1} \quad \text{低通截止角频率}$$

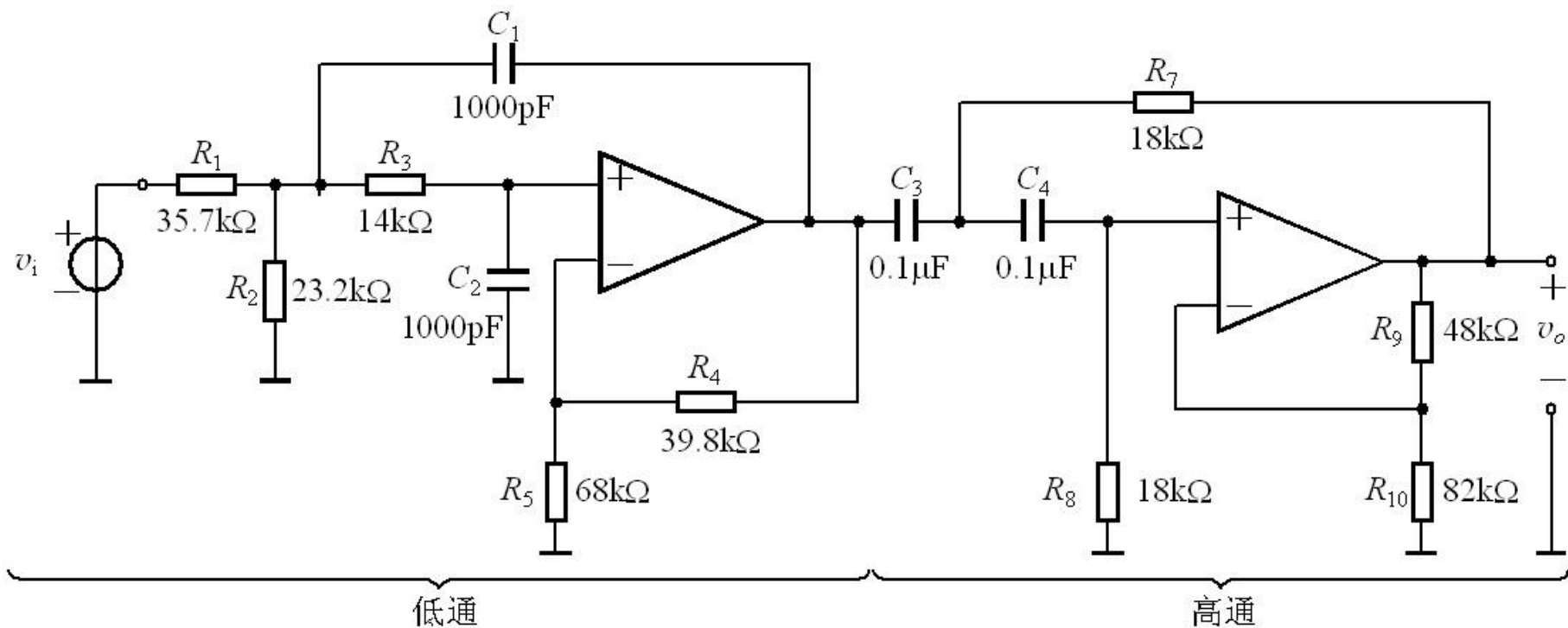
$$\omega_L = \frac{1}{R_2 C_2} \quad \text{高通截止角频率}$$

必须满足 $\omega_L < \omega_H$



9.3.3 有源带通滤波电路

2. 例9.3.2



3. 二阶有源带通滤波电路

传递函数

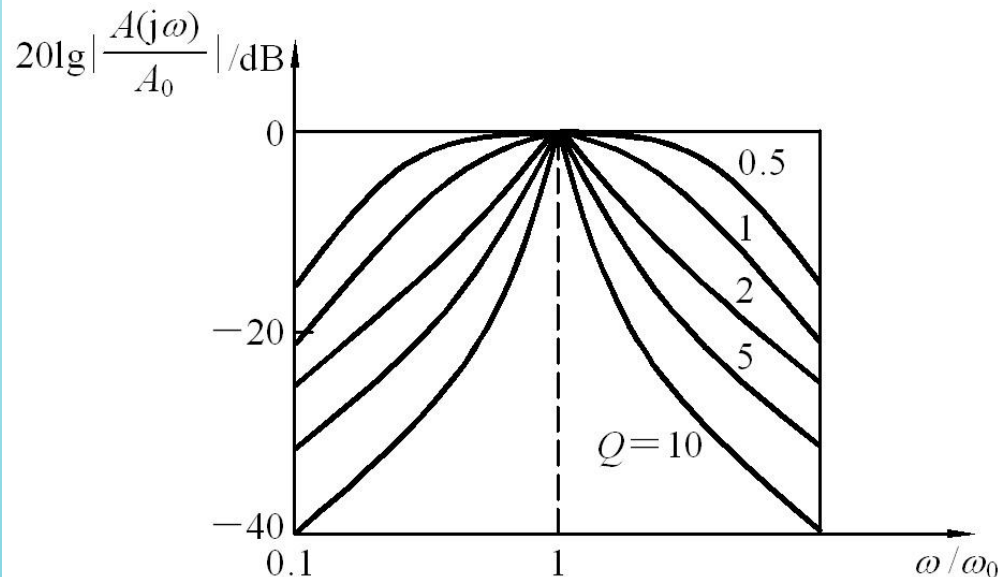
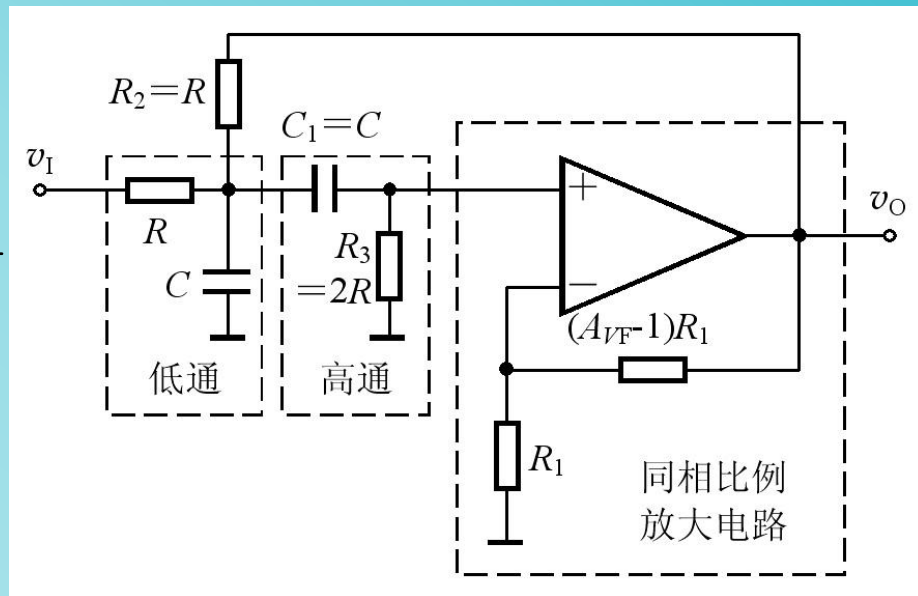
$$A(s) = \frac{A_{VF} sCR}{1 + (3 - A_{VF})sCR + (sCR)^2}$$

令

$$\begin{cases} A_0 = \frac{A_{VF}}{3 - A_{VF}} \\ \omega_0 = \frac{1}{RC} \\ Q = \frac{1}{3 - A_{VF}} \end{cases}$$

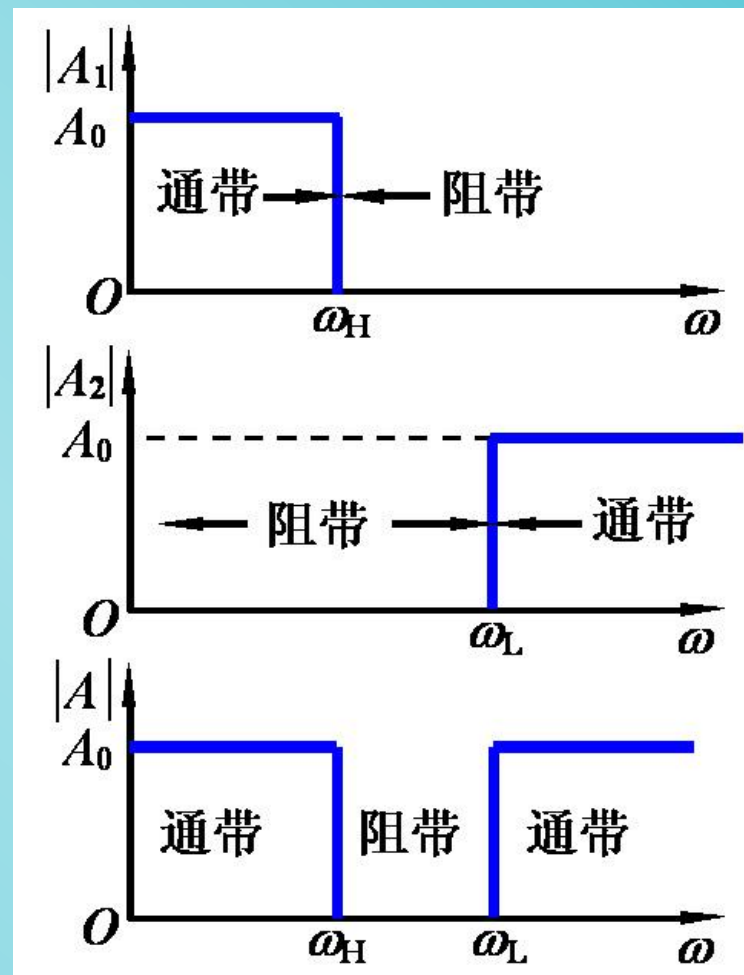
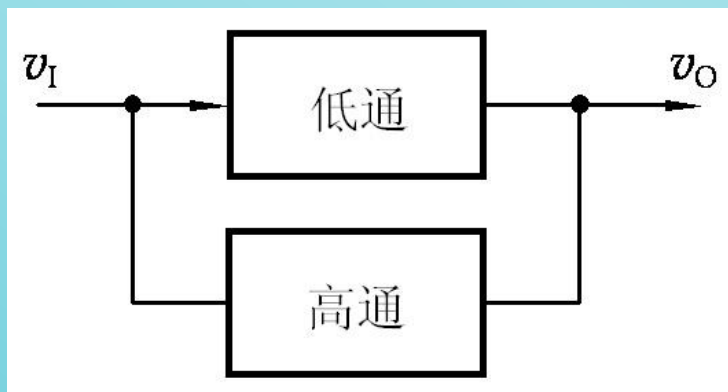
得

$$A(s) = \frac{A_0 \frac{s}{\omega_0}}{1 + \frac{s}{Q\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2}$$



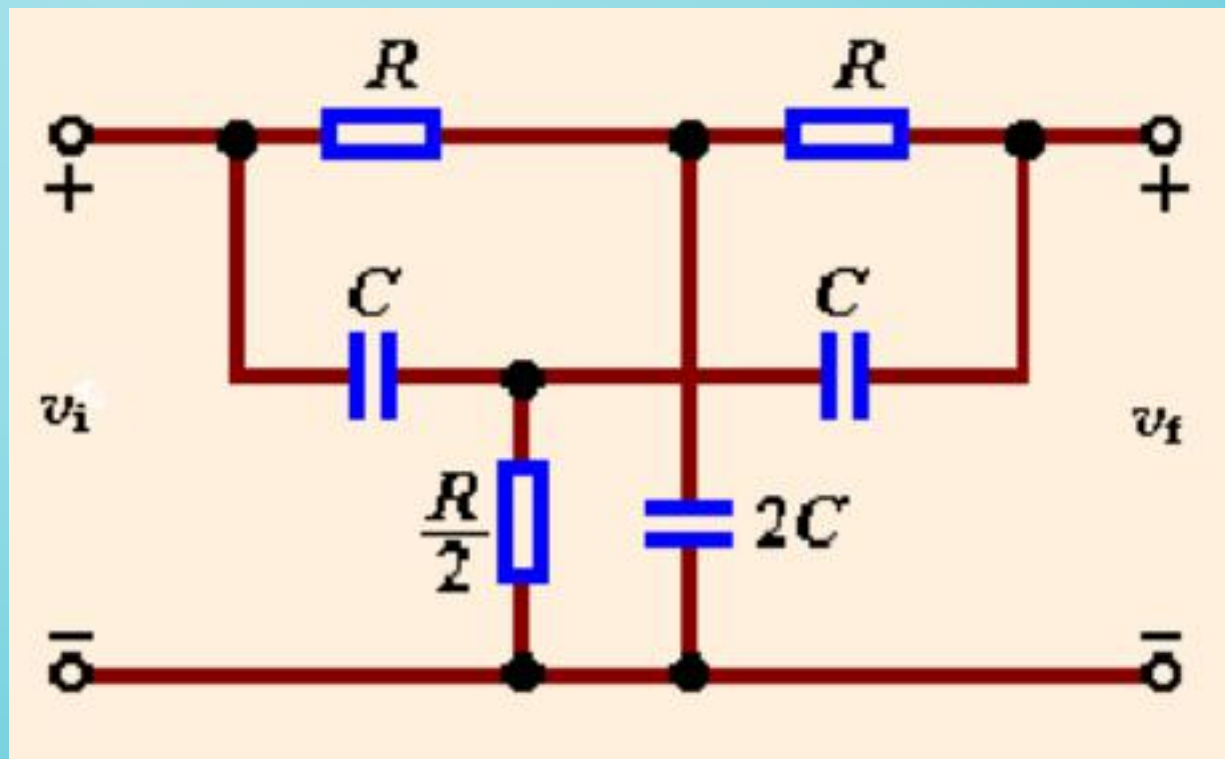
9.3.4 二阶有源带阻滤波电路

可由低通和高通并联得到
必须满足 $\omega_L > \omega_H$



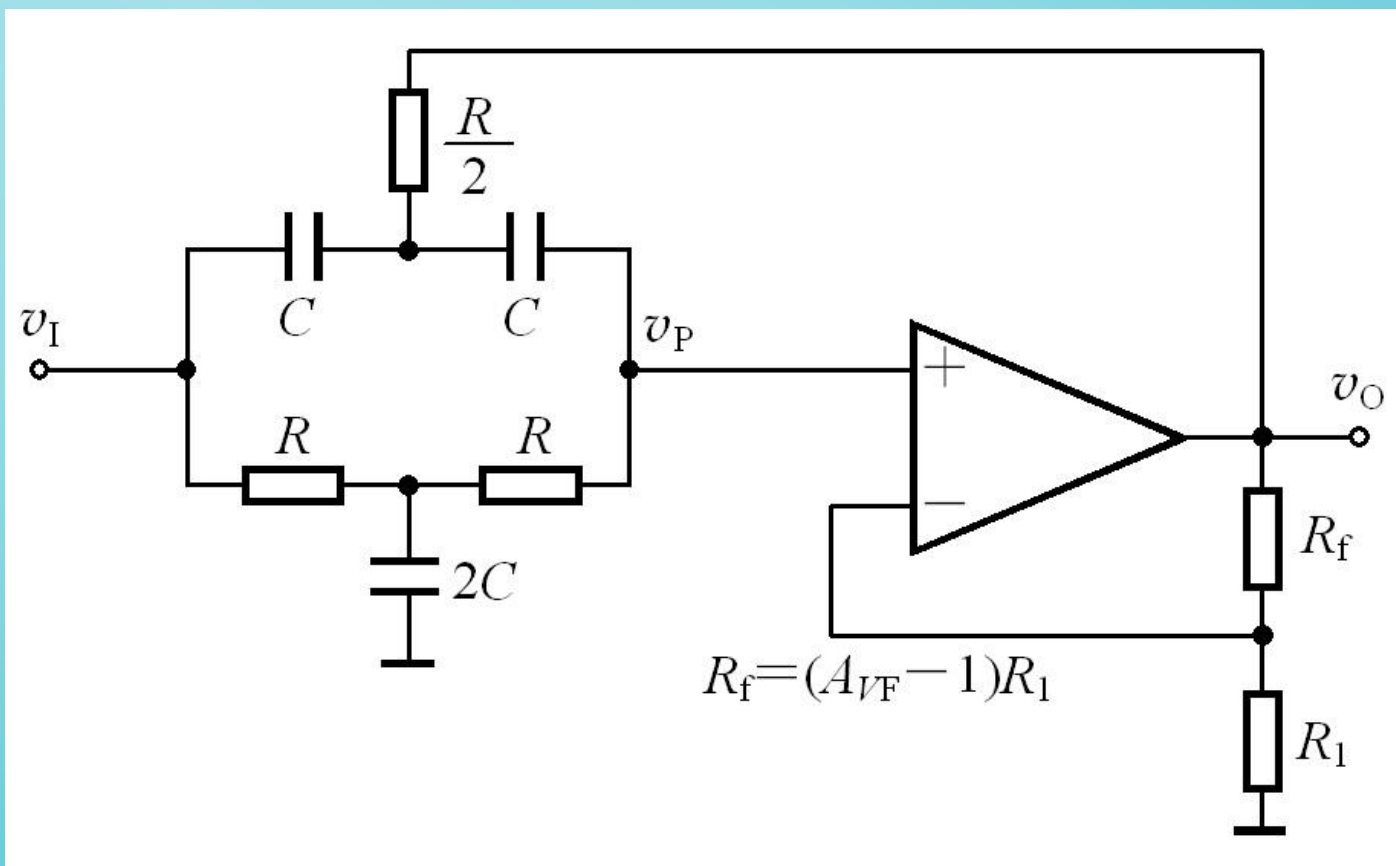
9.3.4 二阶有源带阻滤波电路

双T选频网络



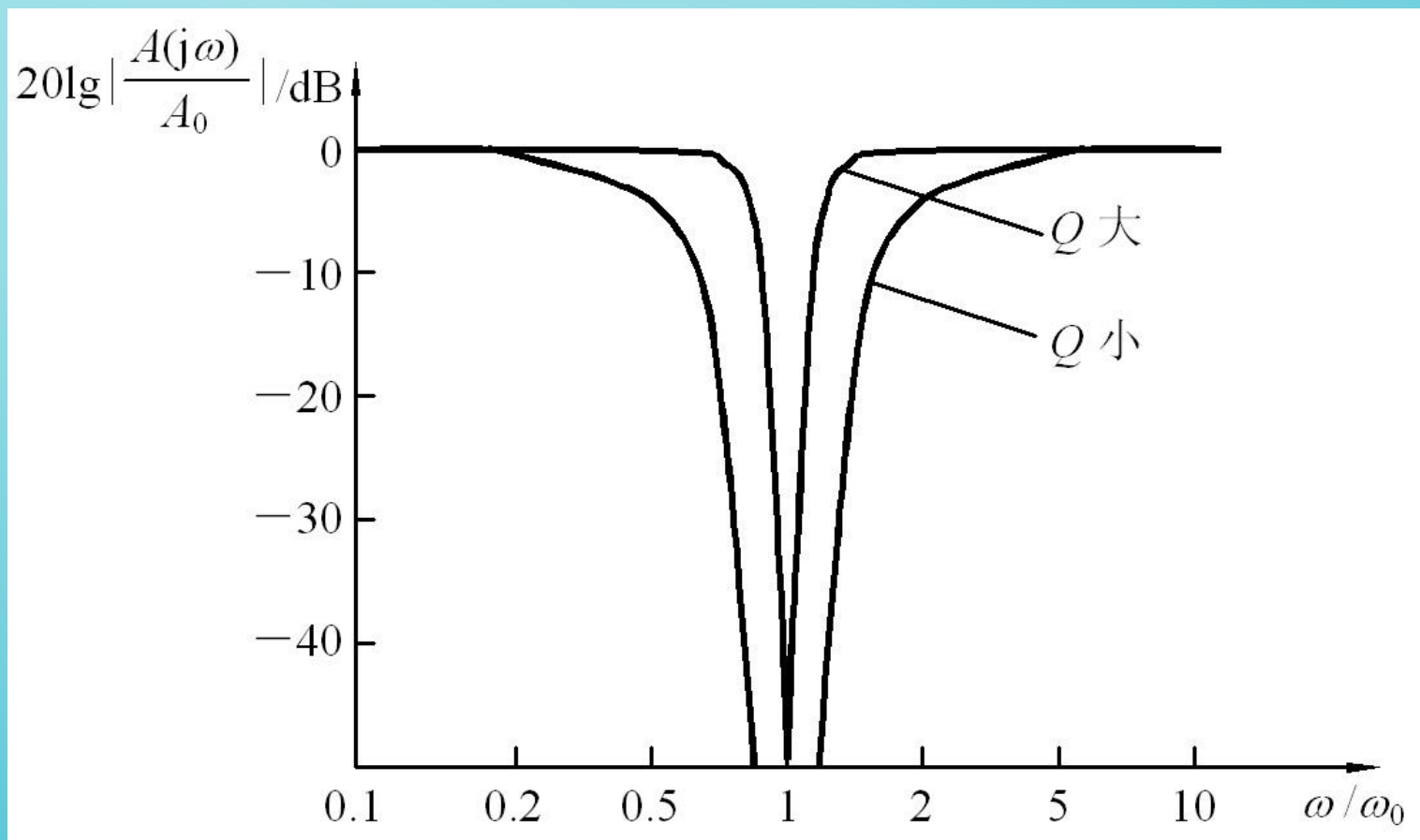
9.3.4 二阶有源带阻滤波电路

双T带阻滤波电路



9.3.4 二阶有源带阻滤波电路

阻滤波电路的幅频特性





*9.4 开关电容滤波器

不作要求

9.5 正弦波振荡电路的振荡条件

1. 振荡条件

正反馈放大电路框图

(注意与负反馈方框图的差别)

$$\dot{X}_a = \dot{X}_i + \dot{X}_f$$

若环路增益 $\dot{A}\dot{F} = 1$ 则 $\dot{X}_a = \dot{X}_f$,

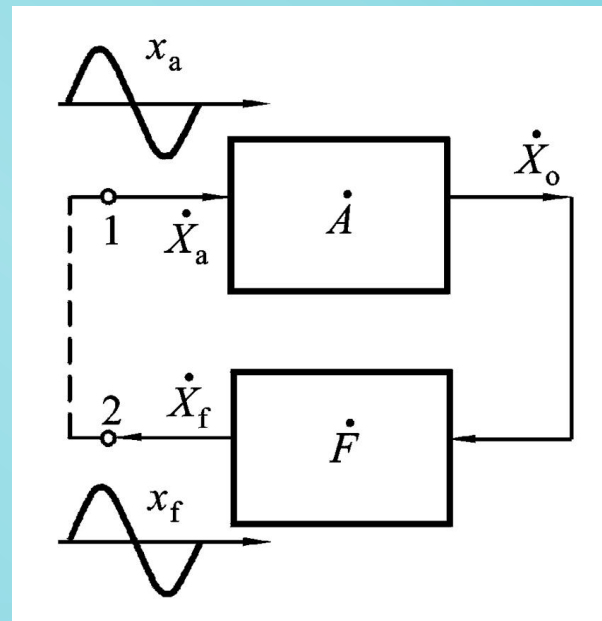
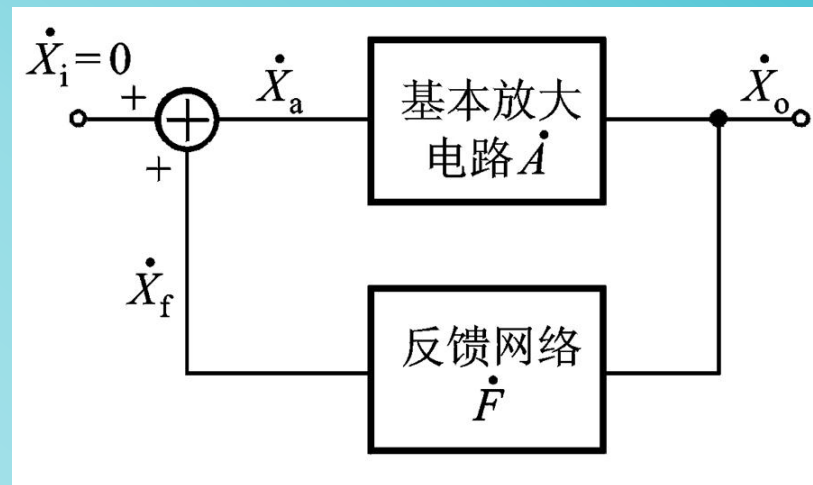
去掉 $\dot{X}_i$, $\dot{X}_o$ 仍有稳定的输出。

$$\text{又 } \dot{A}\dot{F} = |\dot{A}\dot{F}| \angle \varphi_a + \varphi_f = AF \angle \varphi_a + \varphi_f$$

所以振荡条件为

$$A(\omega) \cdot F(\omega) = 1 \quad \text{振幅平衡条件}$$

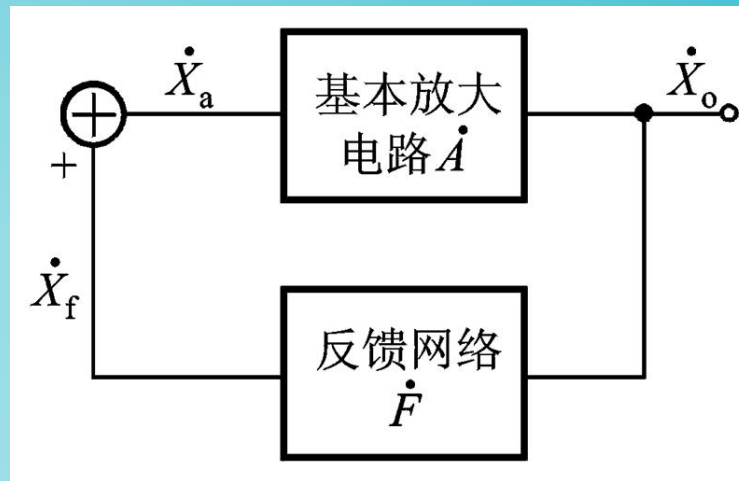
$$\varphi_a(\omega) + \varphi_f(\omega) = 2n\pi \quad \text{相位平衡条件}$$



2. 起振和稳幅

起振条件

$$\begin{cases} A(\omega) \cdot F(\omega) > 1 \\ \varphi_a(\omega) + \varphi_f(\omega) = 2n\pi \end{cases}$$



振荡电路是单口网络，无需输入信号就能起振，起振的信号源来自何处？ 电路器件内部噪声以及电源接通扰动

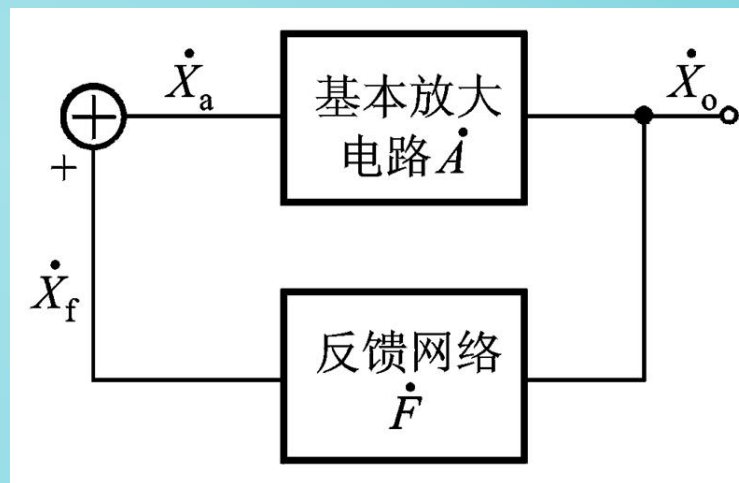
噪声中，满足相位平衡条件的某一频率 ω_0 的噪声信号被放大，成为振荡电路的输出信号。

当输出信号幅值增加到一定程度时，就要限制它继续增加，否则波形将出现失真。

稳幅的作用就是，当输出信号幅值增加到一定程度时，使振幅平衡条件从 $AF > 1$ 回到 $AF = 1$ 。

3. 振荡电路基本组成部分

- ▶ 放大电路（包括负反馈放大电路）
- ▶ 反馈网络（构成正反馈的）
- ▶ 选频网络（选择满足相位平衡条件的一个频率。经常与反馈网络合二为一。）
- ▶ 稳幅环节





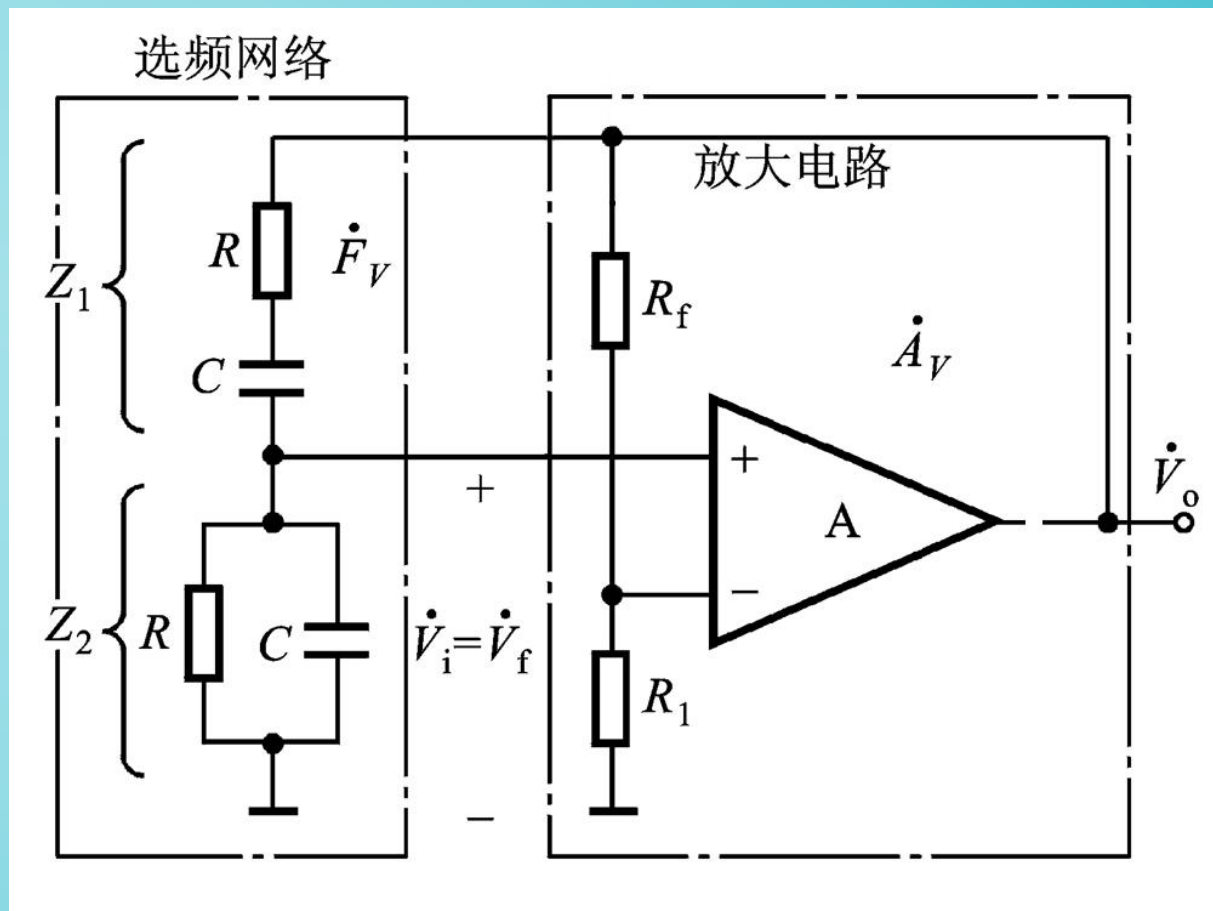
9.6 RC 正弦波振荡电路

1. 电路组成
2. RC 串并联选频网络的选频特性
3. 振荡电路工作原理
4. 稳幅措施

1. 电路组成

RC桥式振荡电路

反馈网络兼做选频网络



2. RC串并联选频网络的选频特性

反馈系数

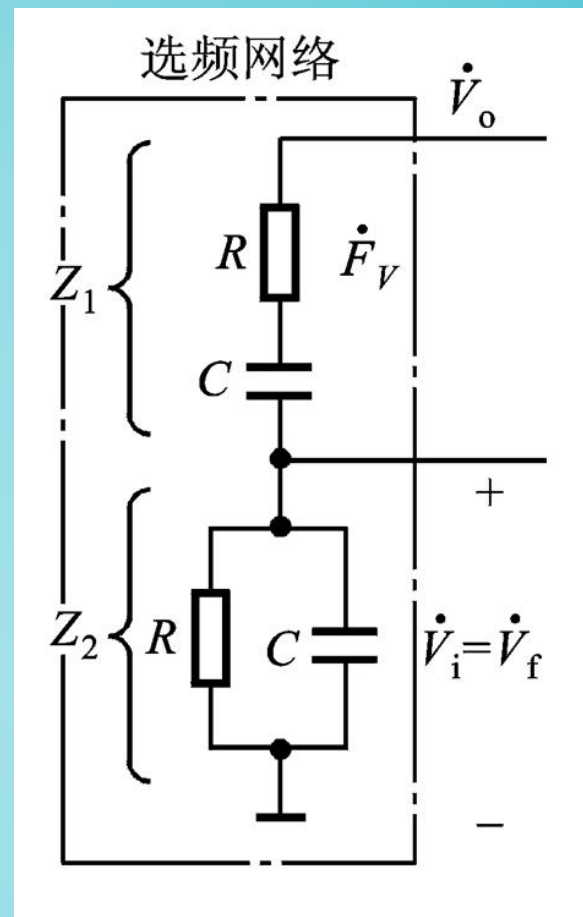
$$F_V(s) = \frac{V_f(s)}{V_o(s)} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{sCR}{1 + 3sCR + (sCR)^2}$$

$$\text{又 } s = j\omega \quad \text{且令 } \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

$$\text{则 } \dot{F}_V = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

$$\text{幅频响应 } F_V = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

$$\text{相频响应 } \varphi_f = -\arctan \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}{3}$$



2. RC串并联选频网络的选频特性

$$F_V = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

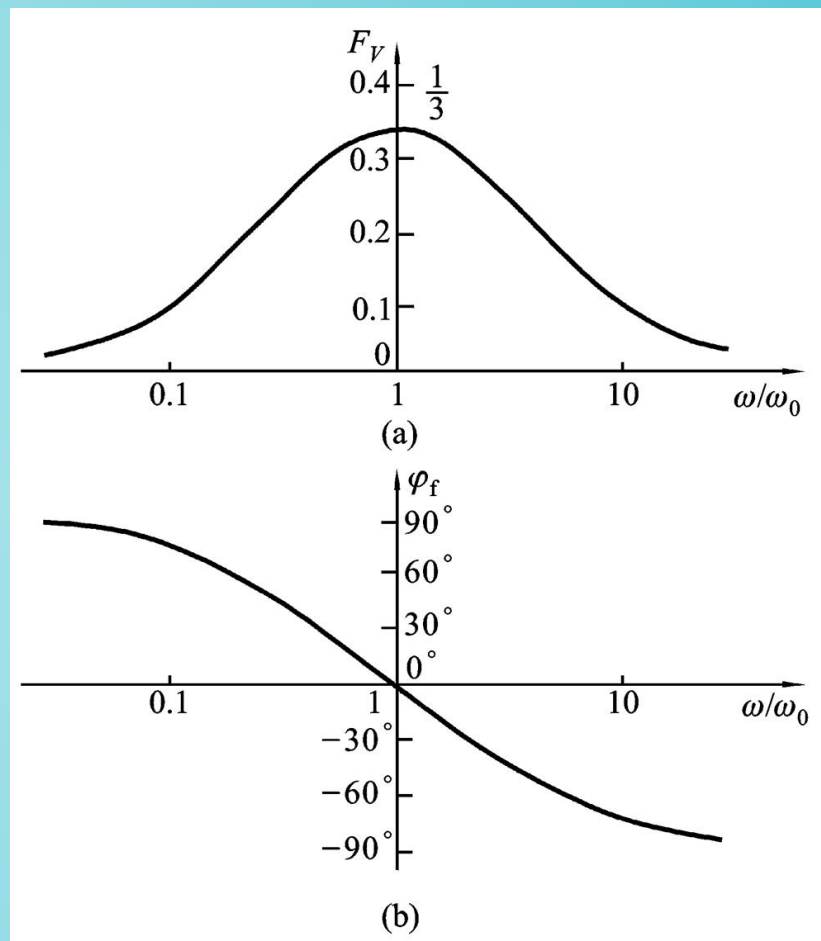
$$\varphi_f = -\arctan \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}{3}$$

当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 或 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

幅频响应有最大值

$$F_{V\max} = \frac{1}{3}$$

相频响应 $\varphi_f = 0$



3. 振荡电路工作原理

当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时, $\varphi_f = 0$

用瞬时极性法判断可知, 电路满足相位平衡条件

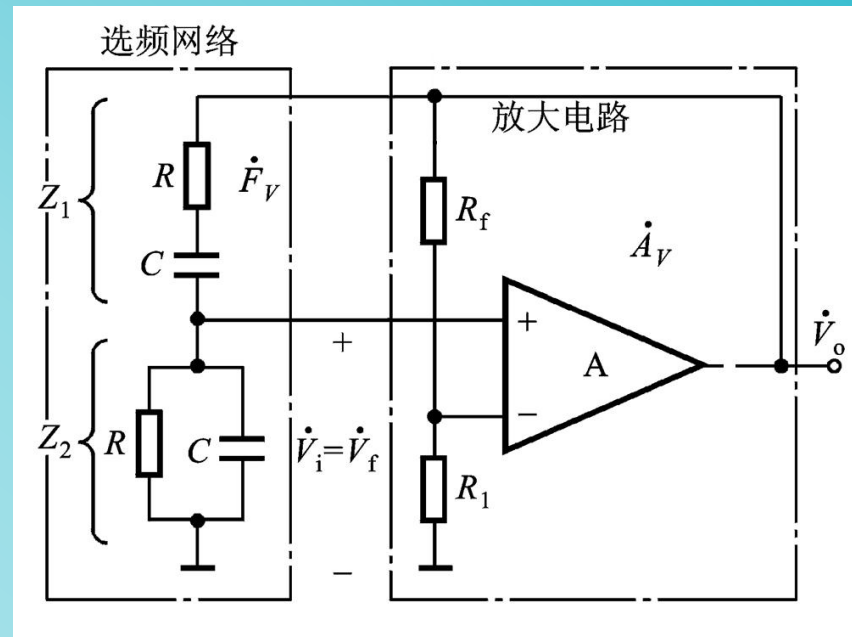
$$\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi$$

此时若放大电路的电压增益为 $A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 3$

则振荡电路满足振幅平衡条件 $A_v F_v = 3 \times \frac{1}{3} = 1$

电路可以输出频率为 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 的正弦波

RC正弦波振荡电路一般用于产生频率低于 1 MHz 的正弦波



4. 稳幅措施

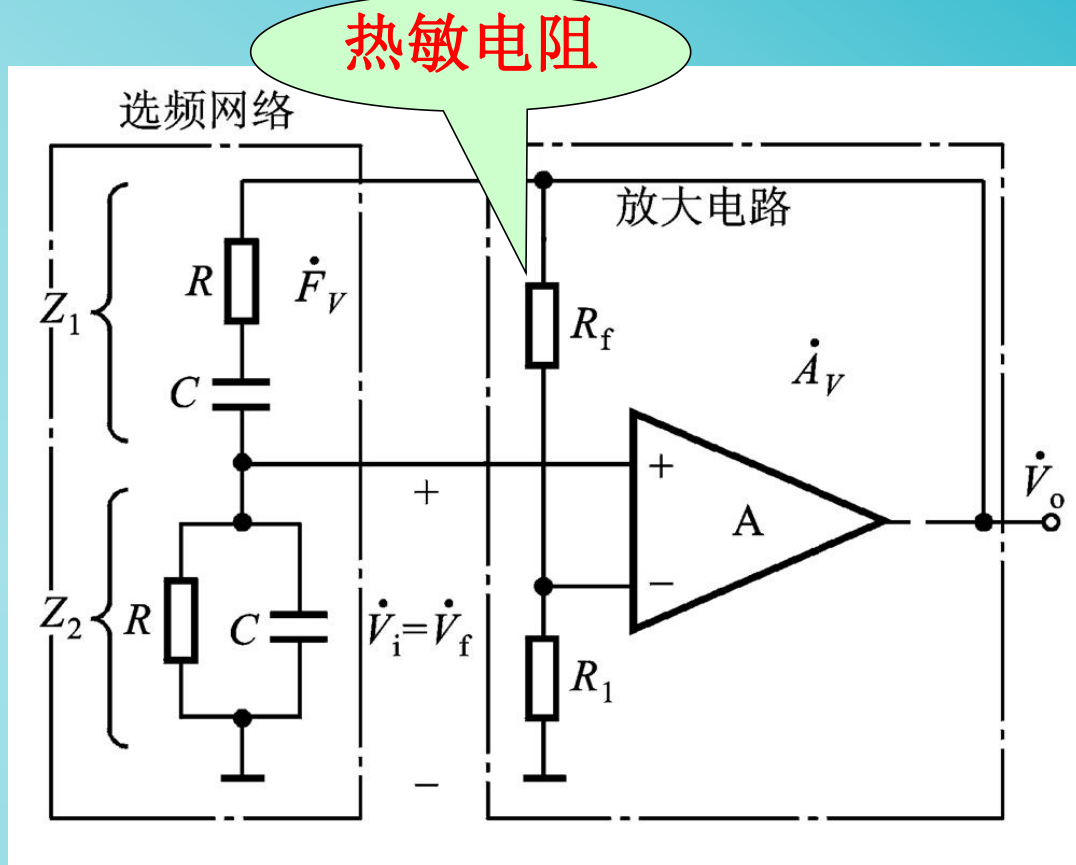
采用非线性元件

► 热敏元件

$$\text{起振时, } A_v = 1 + \frac{R_f}{R_1} > 3$$

$$\text{即 } A_v F_v > 1$$

热敏电阻的作用



$$|\dot{V}_o| \uparrow \longrightarrow |\dot{I}_o| \uparrow \longrightarrow R_f \text{ 功耗} \uparrow \longrightarrow R_f \text{ 温度} \uparrow \longrightarrow R_f \text{ 阻值} \downarrow$$

$$\longrightarrow A_v \downarrow \longrightarrow A_v = 3 \longrightarrow A_v F_v = 1 \text{ 稳幅}$$

4. 稳幅措施

采用非线性元件

► 场效应管 (JFET)

D、 R_4 、 C_3 整流滤波

T 压控电阻

$$A_v = 1 + \frac{R_{p3}}{R_3 + R_{DS}} > 3$$

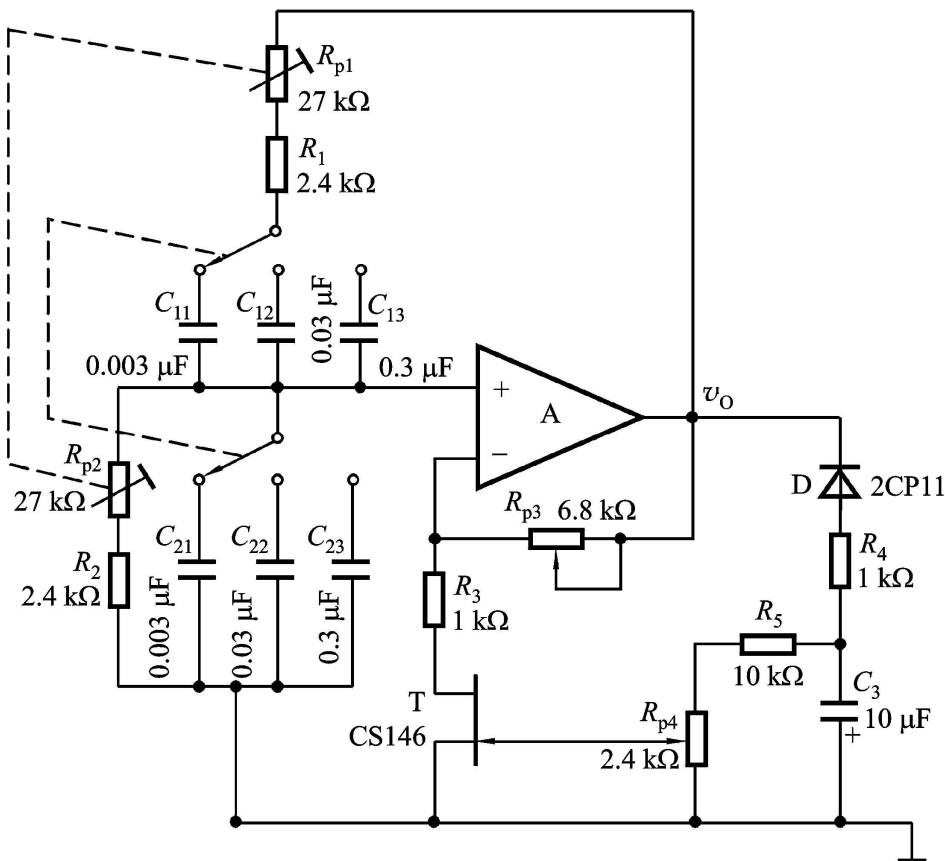
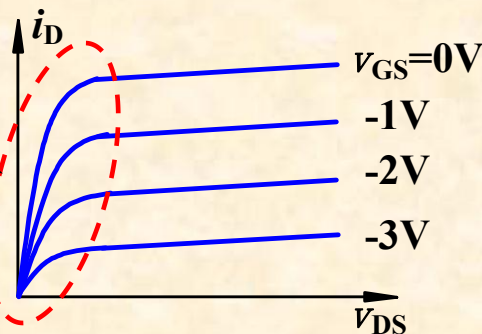
稳幅原理

$$|\dot{V}_o| \uparrow \longrightarrow |V_{GS}(\text{负值})| \uparrow$$

$$A_v \downarrow \longleftarrow R_{DS} \uparrow$$

$$A_v = 3 \longrightarrow A_v F_v = 1 \text{ 稳幅}$$

可变电阻区，
斜率随 v_{GS} 不同而变化



4. 稳幅措施

采用非线性元件

▶ 二极管

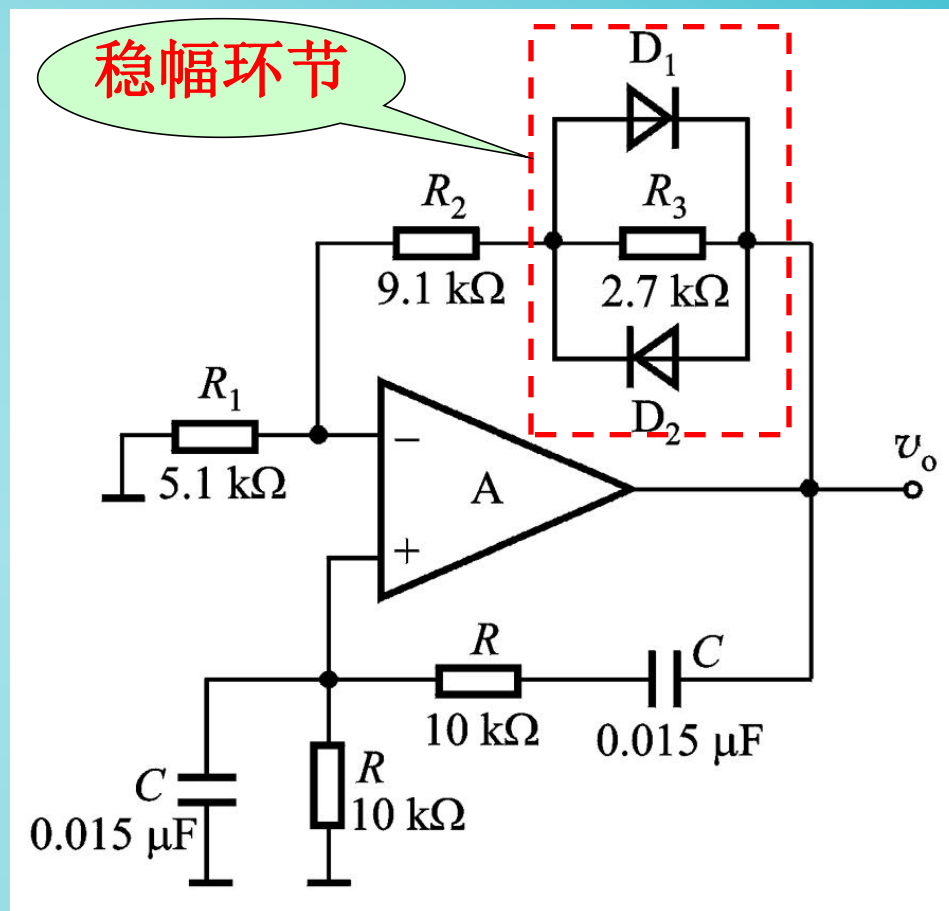
起振时

$$A_V = 1 + \frac{R_2 + R'_3}{R_1} > 3$$

其中 R'_3 是 R_3 、 D_1 和 D_2 并联支路的等效电阻

稳幅原理

$$|\dot{V}_o| \uparrow \longrightarrow R'_3 \downarrow \longrightarrow A_V \downarrow \longrightarrow A_V = 3 \longrightarrow A_V F_V = 1 \text{ 稳幅}$$





9.7 LC 正弦波振荡电路

9.7.1 LC 选频放大电路

9.7.2 变压器反馈式 LC 振荡电路

9.7.3 三点式 LC 振荡电路

9.7.4 石英晶体振荡电路

9.7.1 LC选频放大电路

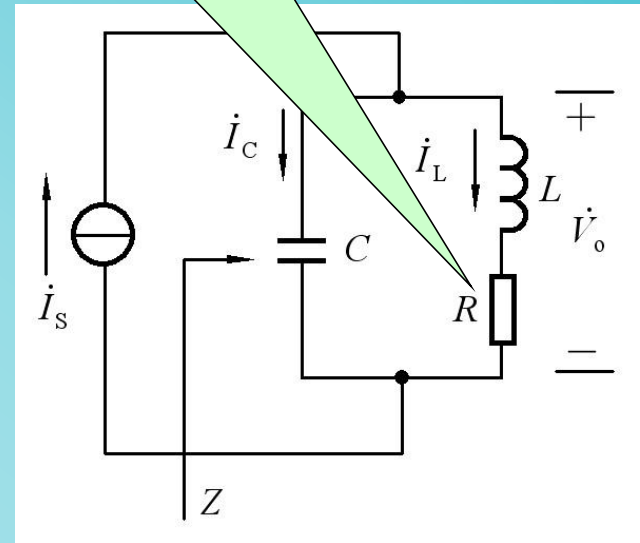
等效损耗电阻

1. 并联谐振回路

$$Z = \frac{\frac{1}{j\omega C}(R + j\omega L)}{\frac{1}{j\omega C} + R + j\omega L}$$

一般有 $R \ll \omega L$ 则

$$Z = \frac{L/C}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$



当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时，电路谐振。 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 为谐振频率

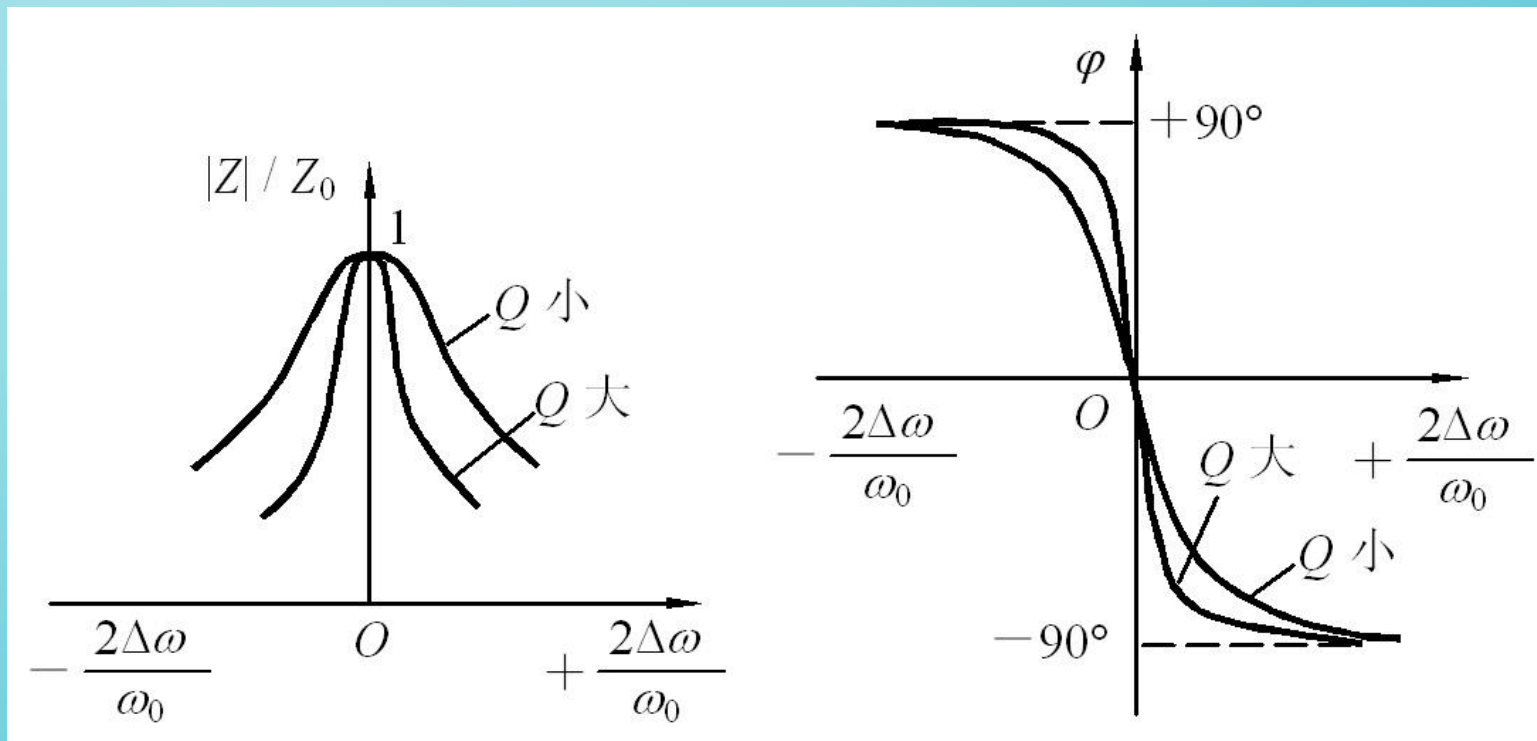
谐振时 阻抗最大，且为纯阻性 $Z_0 = \frac{L}{RC} = Q\omega_0 L = \frac{Q}{\omega_0 C}$

其中 $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 为品质因数

同时有 $|i_c| = Q|i_s|$ 即 $|i_c| \approx |i_L| \gg |i_s|$

9.7.1 LC选频放大电路

阻抗频率响应

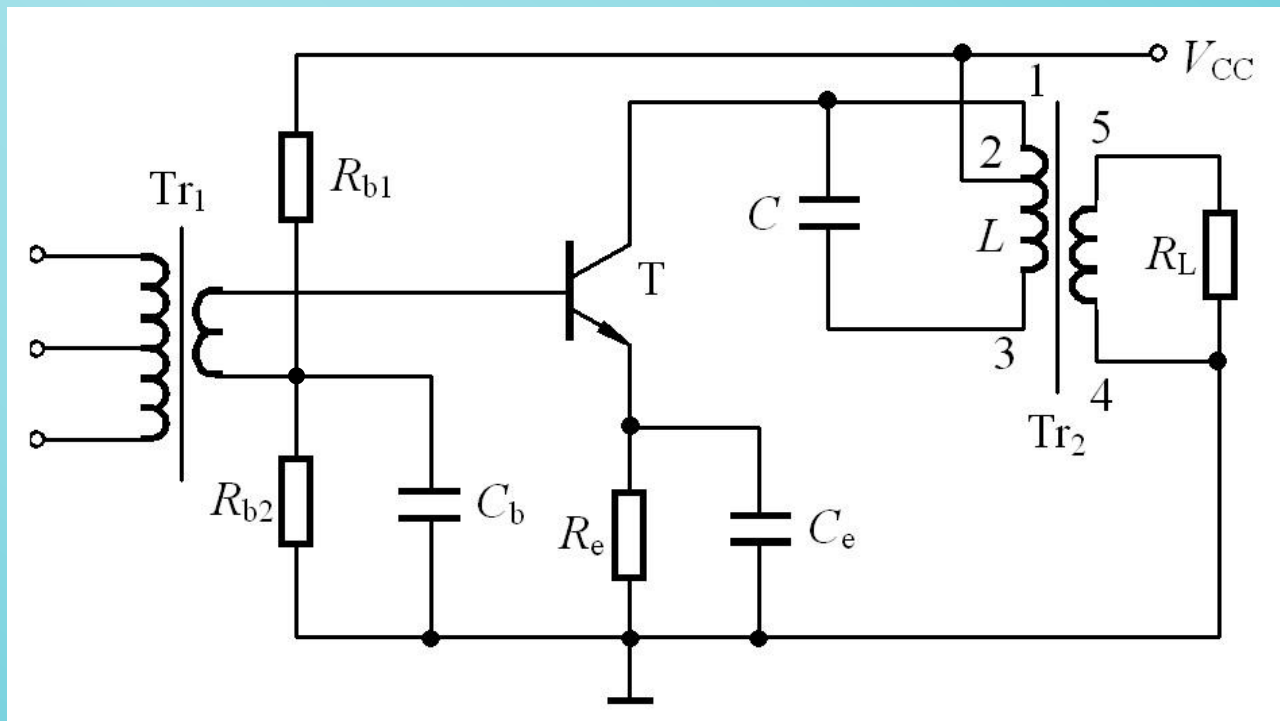


(a) 幅频响应

(b) 相频响应

9.7.1 LC 选频放大电路

2. 选频放大电路



9.7.4 石英晶体振荡电路

1. 频率稳定问题

频率稳定度一般由 $\frac{\Delta f}{f_0}$ 来衡量

Δf ——频率偏移量。

f_0 ——振荡频率。

Q 值越高，选频特性越好，频率越稳定。

LC 振荡电路 Q ——数百

石英晶体振荡电路 Q ——10 000 ~ 500 000

9.7.4 石英晶体振荡电路

2. 石英晶体的基本特性与等效电路

结构

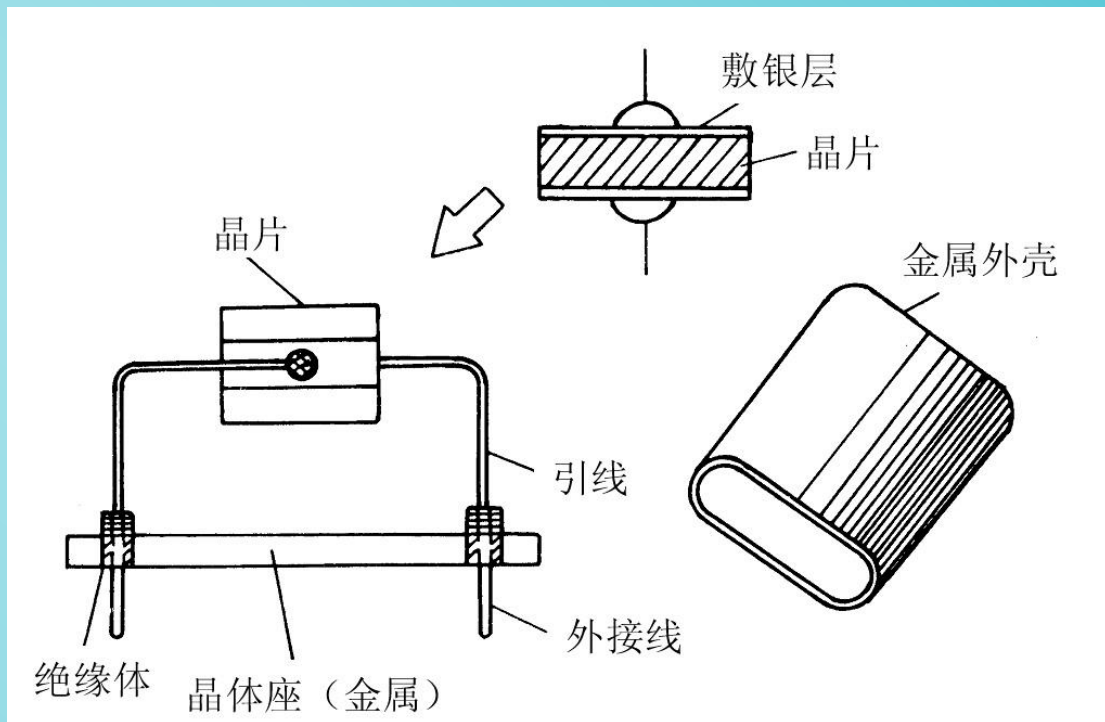
极板间加电场

晶体机械变形

极板间加机械力

晶体产生电场

压电效应



交变电压 $\rightarrow$ 机械振动 $\rightarrow$ 交变电压

机械振动的固有频率与晶片尺寸有关，稳定性高

当交变电压频率 = 固有频率时，振幅最大

压电谐振

9.7.4 石英晶体振荡电路

2. 石英晶体的基本特性与等效电路

等效电路

特性

A. 串联谐振

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

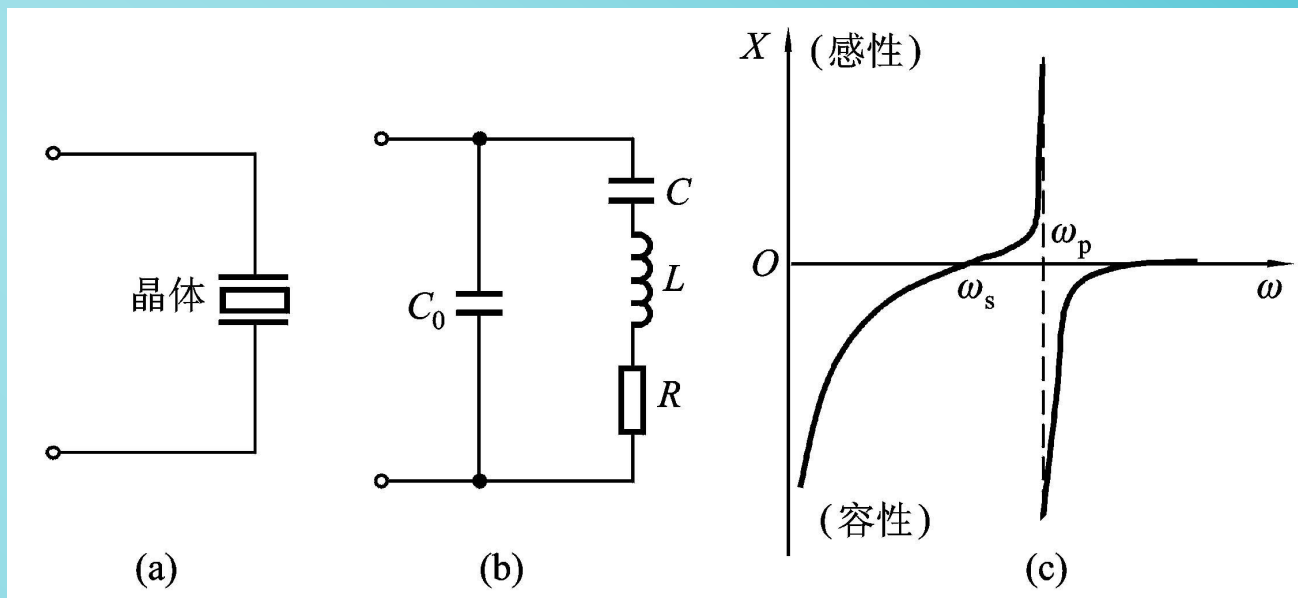
晶体等效阻抗为纯阻性

B. 并联谐振

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$$

通常 $C \ll C_0$ 所以 f_s 与 f_p 很接近

川北医学院生物医学工程



9.7.4 石英晶体振荡电路

2. 石英晶体的基本特性与等效电路

实际使用时外接一小电容 C_s

则新的谐振频率为

$$f'_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_0 + C_s}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0 + C_s}}$$

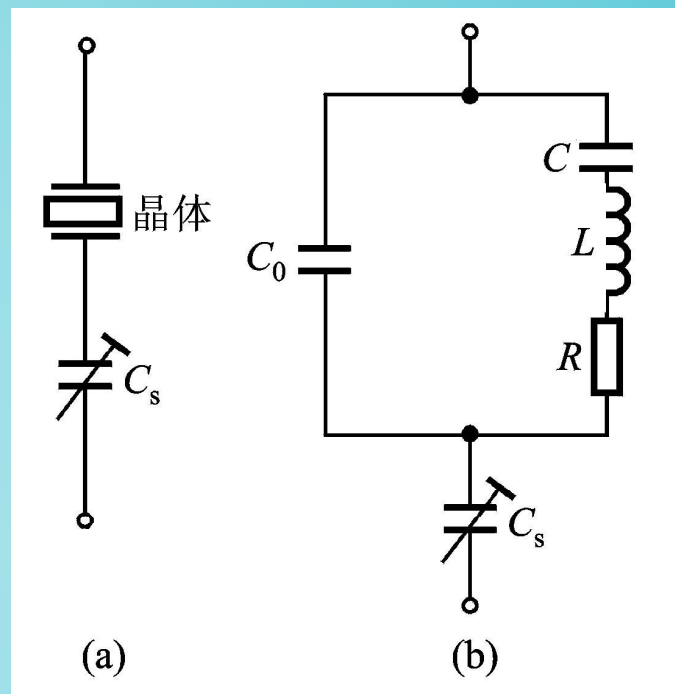
由于 $C \ll C_0 + C_s$

$$f'_s = f_s \left[1 + \frac{C}{2(C_0 + C_s)} \right]$$

由此看出 $C_s \rightarrow 0$ 时, $f'_s = f_p$; $C_s \rightarrow \infty$ 时, $f'_s = f_s$

调整 C_s 可使 f'_s 在 f_s 和 f_p 之间变化

川北医学院生物医学工程





9.8 非正弦信号产生电路

9.8.1 电压比较器

单门限电压比较器

迟滞比较器

集成电压比较器

9.8.2 方波产生电路

9.8.3 锯齿波产生电路

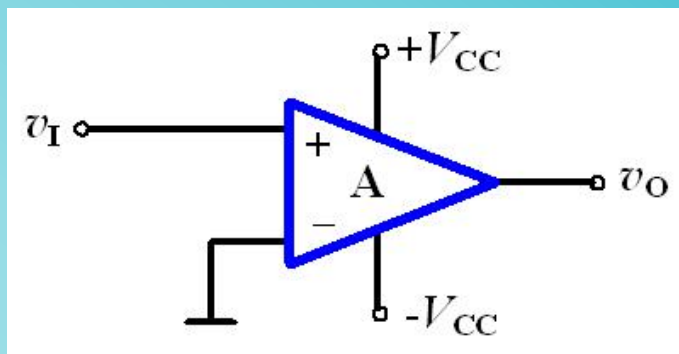
9.8.1 电压比较器

1. 单门限电压比较器

特点：开环，**虚短**不成立

增益 A_0 大于 10^5

$$-V_{CC} \leq v_O \leq +V_{CC}$$



运算放大器工作在非线性状态下

(1) 过零比较器 (假设 $|-V_{CC}| = |+V_{CC}| = V_M$)

$|v_I| \geq \frac{V_M}{A_0}$ 时, $|v_O| = |A_0 v_I| > V_M$, 由于 $|v_O|$ 不可能超过 V_M ,

所以 $|v_{Omax}| = V_M$ (忽略了放大器输出级的饱和压降)

当 $|+V_{CC}| = |-V_{CC}| = V_M = 15V$, $A_0 = 10^5$ 时, $\frac{V_M}{A_0} = \frac{15}{10^5} V = 0.15mV \approx 0$

可以认为 $\begin{cases} v_I > 0 \text{ 时, } v_{Omax} = +V_{CC} \\ v_I < 0 \text{ 时, } v_{Omax} = -V_{CC} \end{cases}$

(过零比较器)

9.8.1 电压比较器

1. 单门限电压比较器

特点：开环，**虚短**不成立

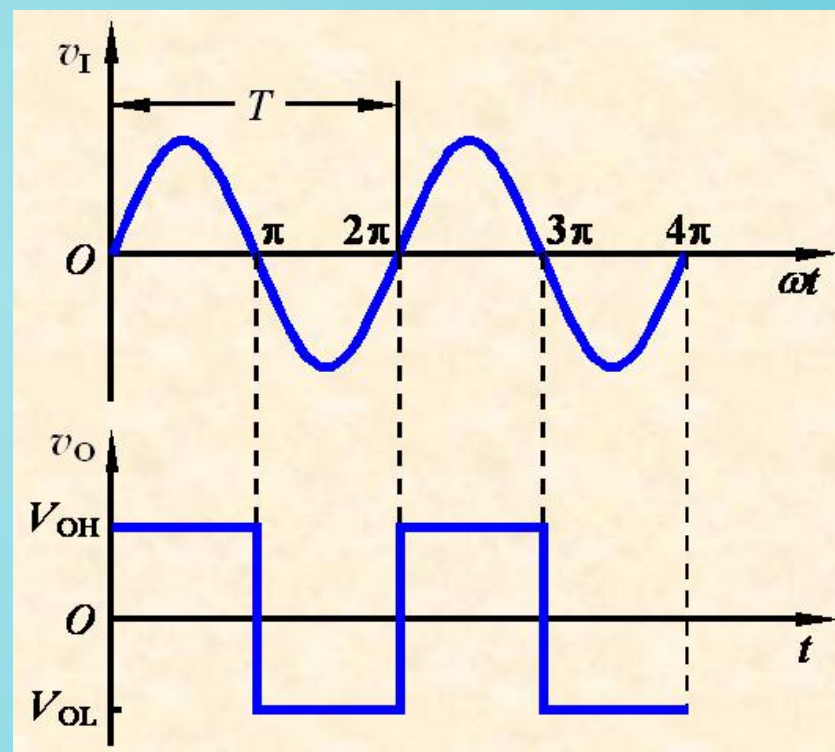
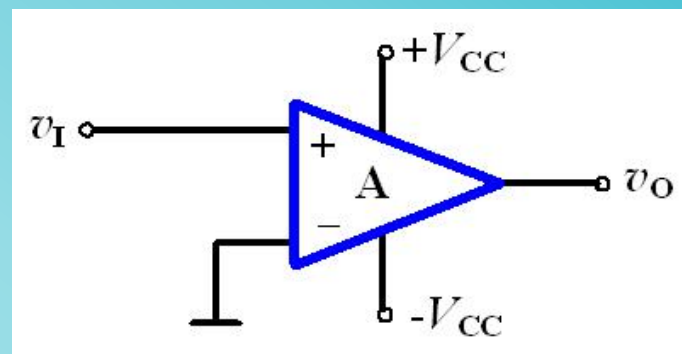
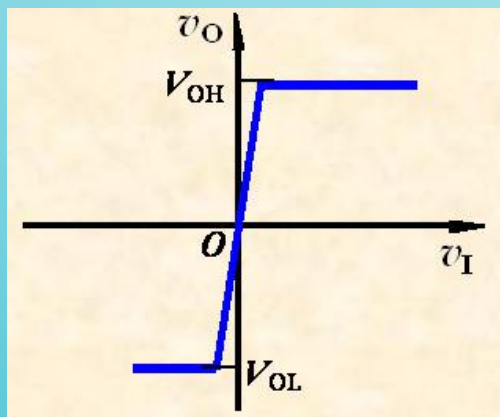
增益 A_0 大于 10^5

$$-V_{CC} \leq v_O \leq +V_{CC}$$

(1) 过零比较器

输入为正负对称的正弦波时，输出为方波。

电压传输特性



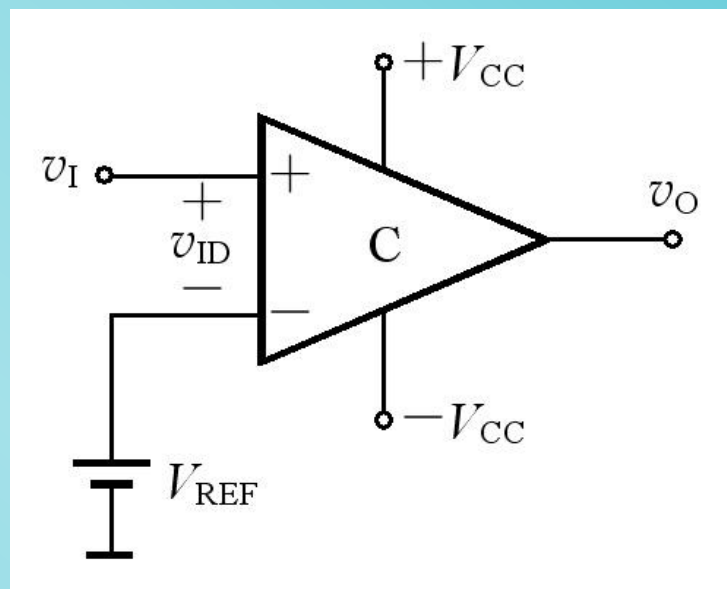
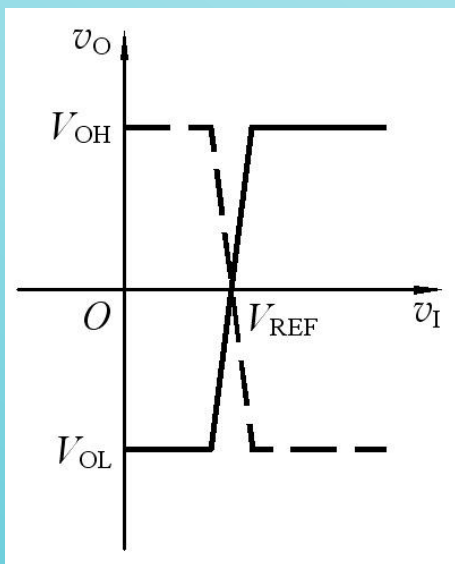
9.8.1 电压比较器

1. 单门限电压比较器

(2) 门限电压不为零的比较器

(门限电压为 V_{REF})

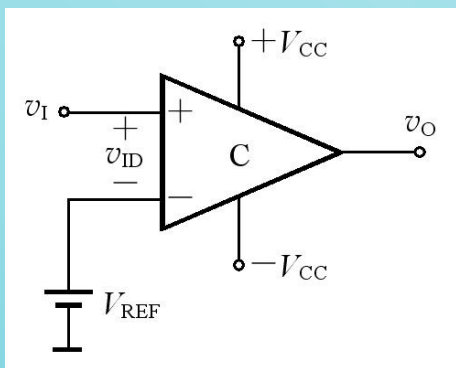
电压传输特性



9.8.1 电压比较器

1. 单门限电压比较器

(2) 门限电压不为零的比较器 (门限电压为 V_{REF})

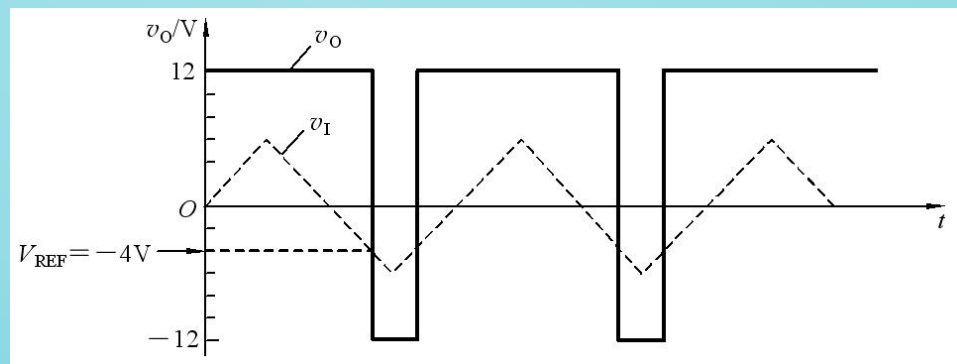
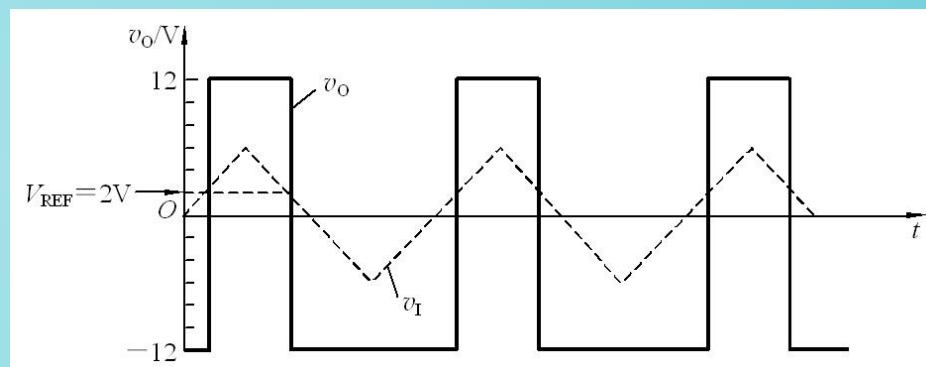
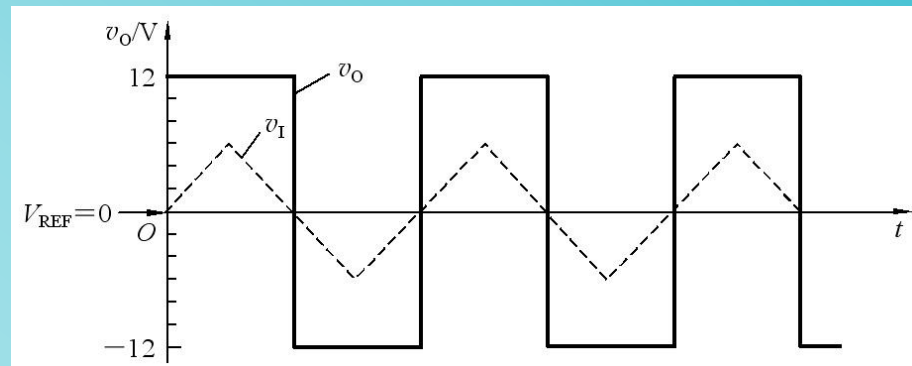


v_I 为峰值 6V 的三角波，设 $\pm V_{CC} = \pm 12V$ ，运放为理想器件。

(a) $V_{REF} = 0$ 时

(b) $V_{REF} = 2V$ 时

(c) $V_{REF} = -4V$ 时

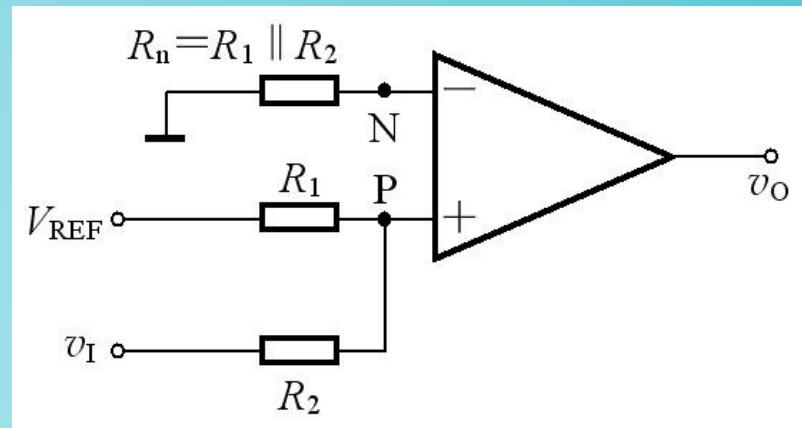


例

图示为另一种形式的单门限电压比较器，试求出其门限电压(阈值电压) V_T ，画出其电压传输特性。设运放输出的高、低电平分别为 V_{OH} 和 V_{OL} 。

解： 利用叠加定理可得

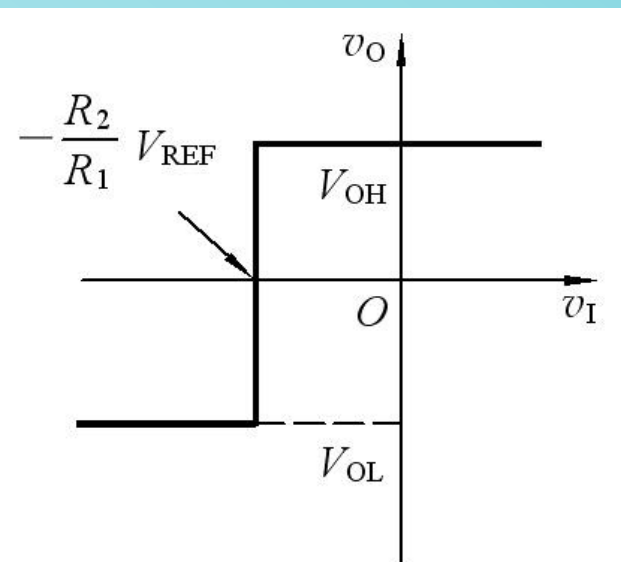
$$V_P = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{REF} + \frac{R_1}{R_1 + R_2} V_I$$



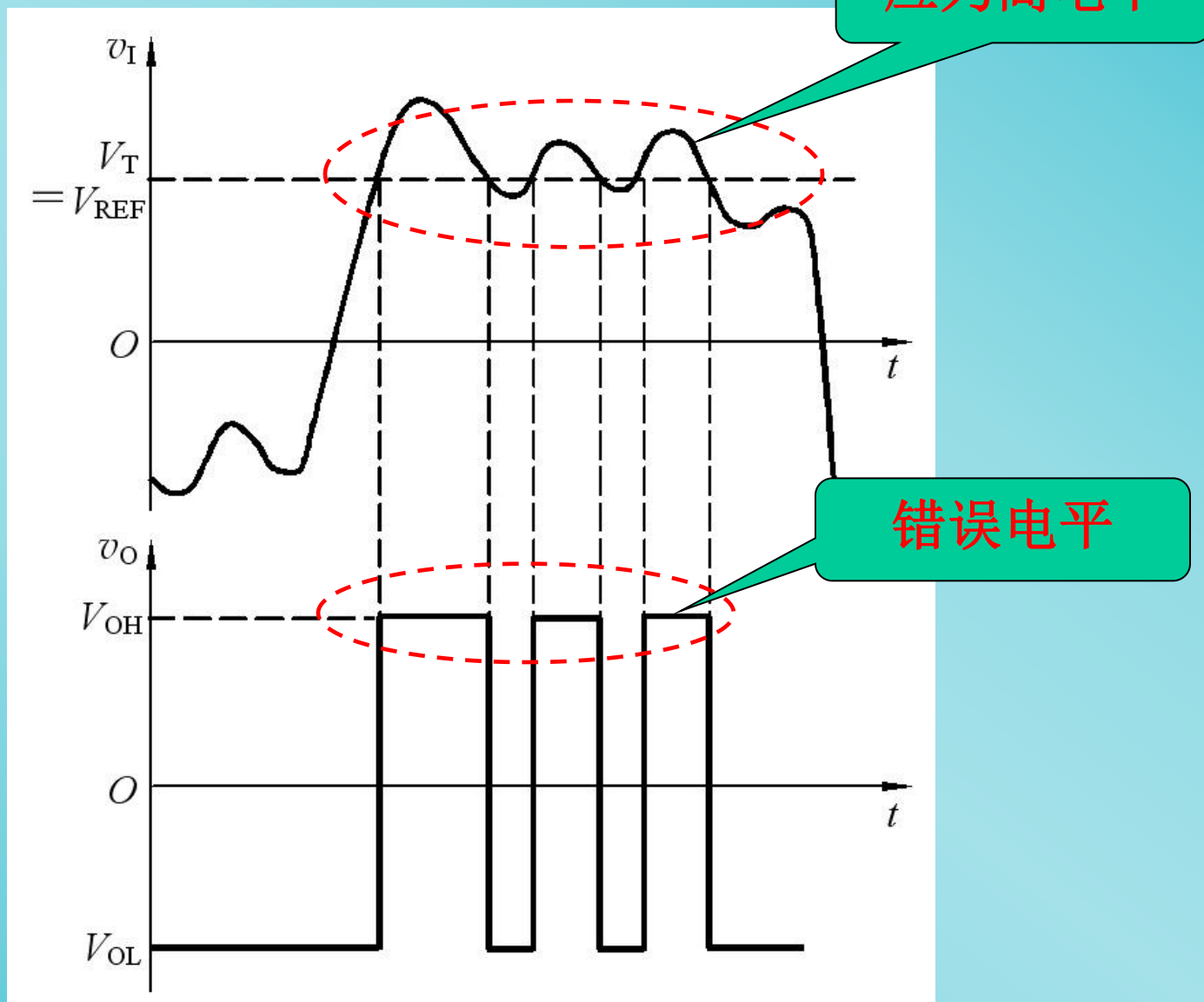
理想情况下，输出电压发生跳变时对应的 $v_P = v_N = 0$ ，即

$$R_2 V_{REF} + R_1 V_I = 0$$

门限电压 $V_T = (V_I =) -\frac{R_2}{R_1} V_{REF}$



单门限比较器的抗干扰能力

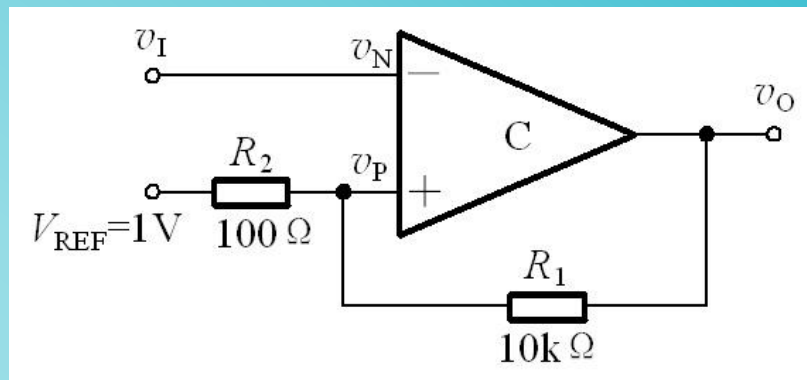


9.8.1 电压比较器

2. 迟滞比较器

(1) 电路组成

(2) 门限电压 v_P 为门限电压,



$v_I > v_P$ 时, $v_O = V_{OL}$ (低电平) $v_I < v_P$ 时, $v_O = V_{OH}$ (高电平)

而 v_P 与 v_O 有关, 对应于 v_O 的两个电压值得得 v_P 的两个门限电压

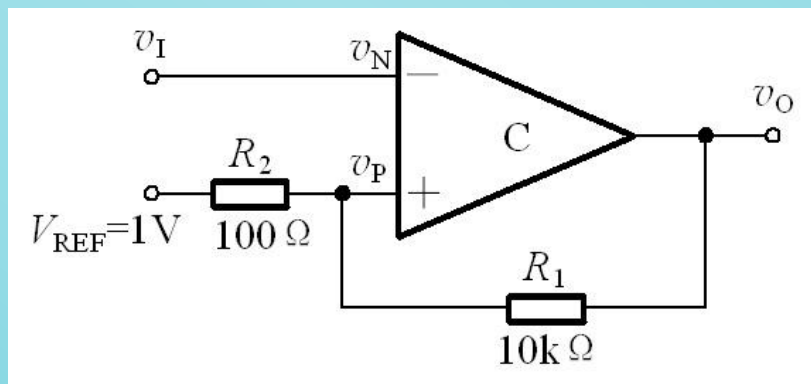
$$\begin{cases} V_{T+} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OH}}{R_1 + R_2} & \text{上门限电压} \\ V_{T-} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OL}}{R_1 + R_2} & \text{下门限电压} \end{cases}$$

回差电压

$$\Delta V_T = V_{T+} - V_{T-} = \frac{R_2 (V_{OH} - V_{OL})}{R_1 + R_2}$$

9.8.1 电压比较器

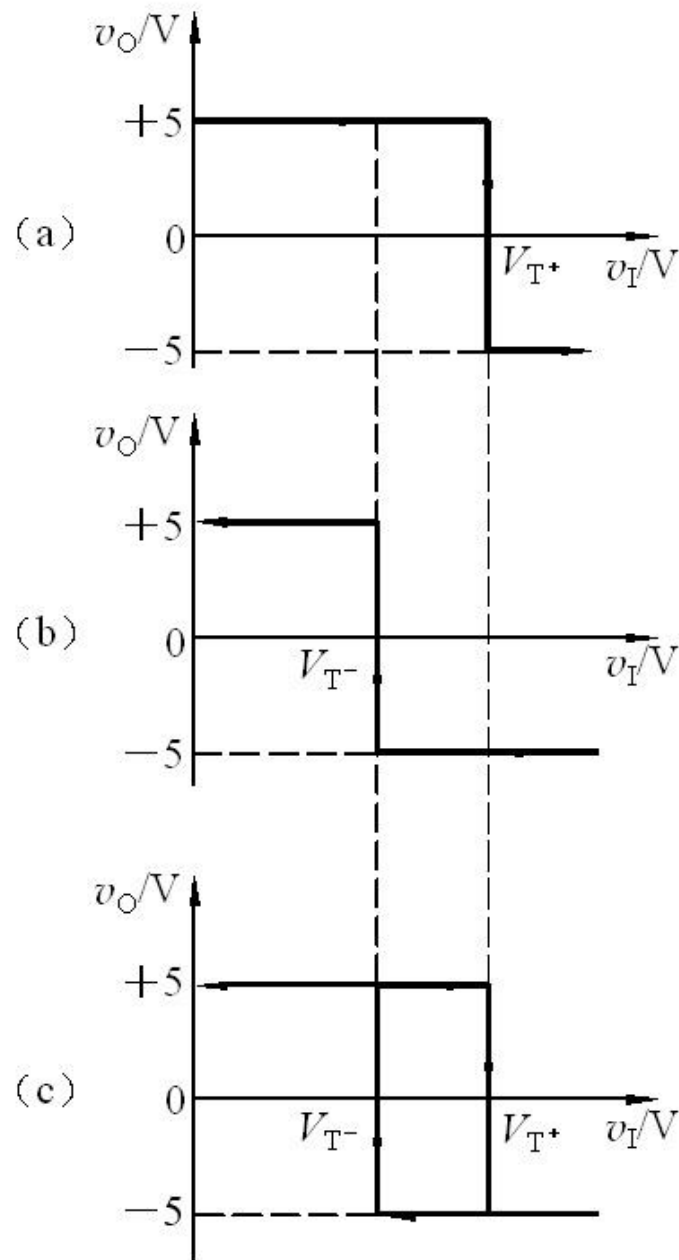
2. 迟滞比较器



(3) 传输特性

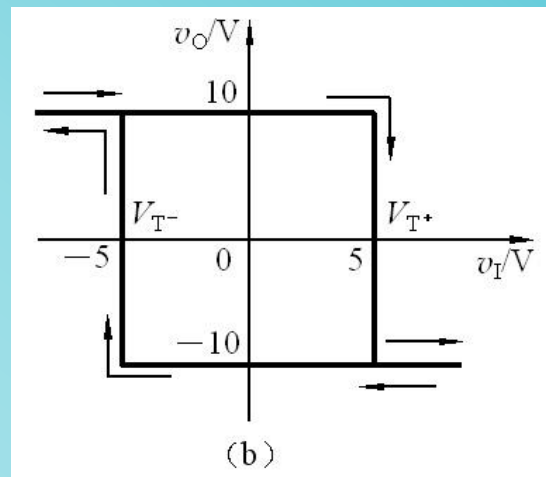
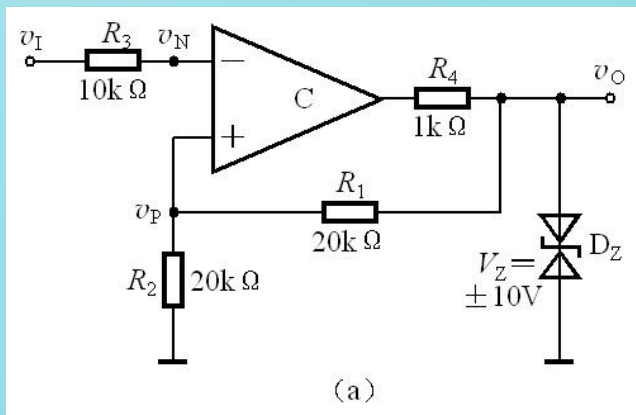
$$V_{T+} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OH}}{R_1 + R_2}$$

$$V_{T-} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OL}}{R_1 + R_2}$$



例

电路如图所示，试求门限电压，画出传输特性和图c所示输入信号下的输出电压波形。



解： (1) 门限电压

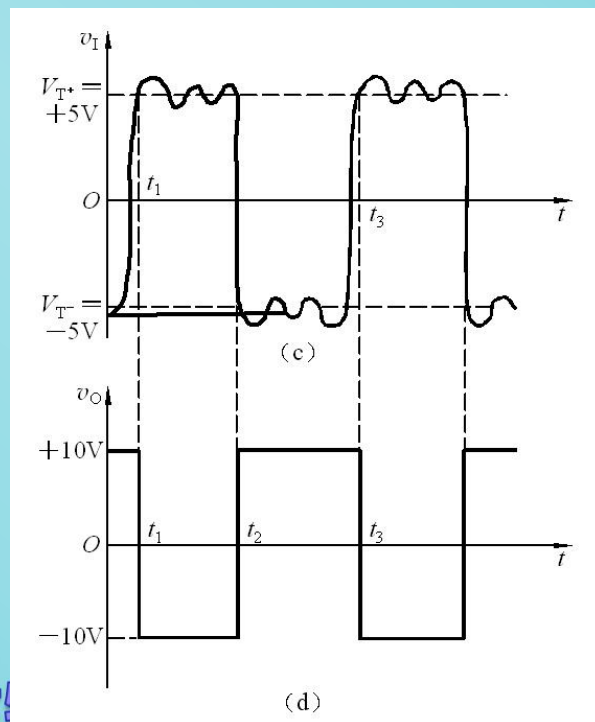
$$V_{REF} = 0 \quad V_O = \pm 10V$$

$$V_{T+} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OH}}{R_1 + R_2} = 5V$$

$$V_{T-} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OL}}{R_1 + R_2} = -5V$$

(2) 传输特性

(3) 输出电压波形



通过上述几种电压比较器的分析，可得出如下结论：

(1) 用于电压比较器的运放，通常工作在开环或正反馈状态和非线性区，其输出电压只有高电平 V_{OH} 和低电平 V_{OL} 两种情况。

(2) 一般用电压传输特性来描述输出电压与输入电压的函数关系。

(3) 电压传输特性的关键要素

输出电压的高电平 V_{OH} 和低电平 V_{OL}

门限电压

输出电压的跳变方向

➤ 令 $v_P = v_N$ 所求出的 v_I 就是门限电压

➤ v_I 等于门限电压时输出电压发生跳变

➤ 跳变方向取决于同相输入方式还是反相输入方式

★ 9.8.1 电压比较器

3. 集成电压比较器

集成电压比较器与集成运算放大器比较：

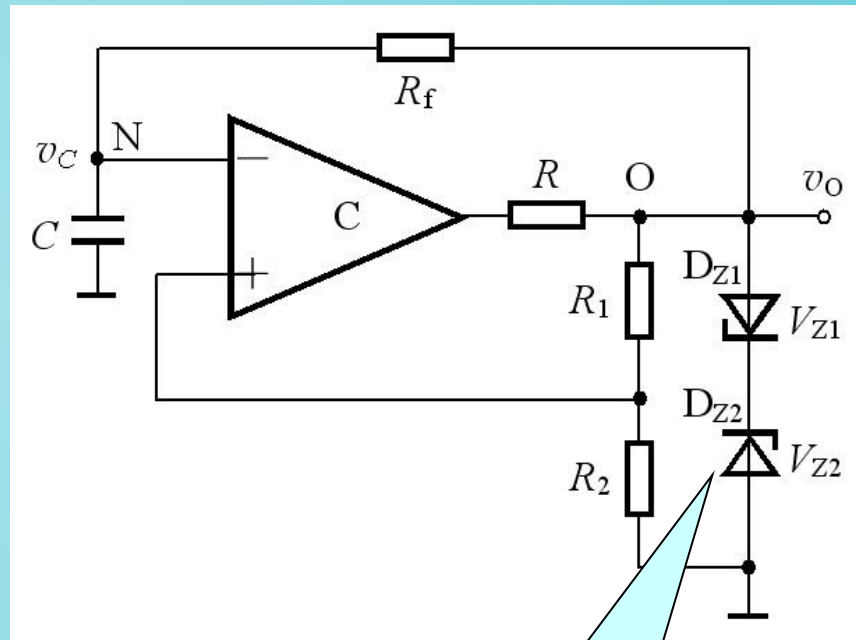
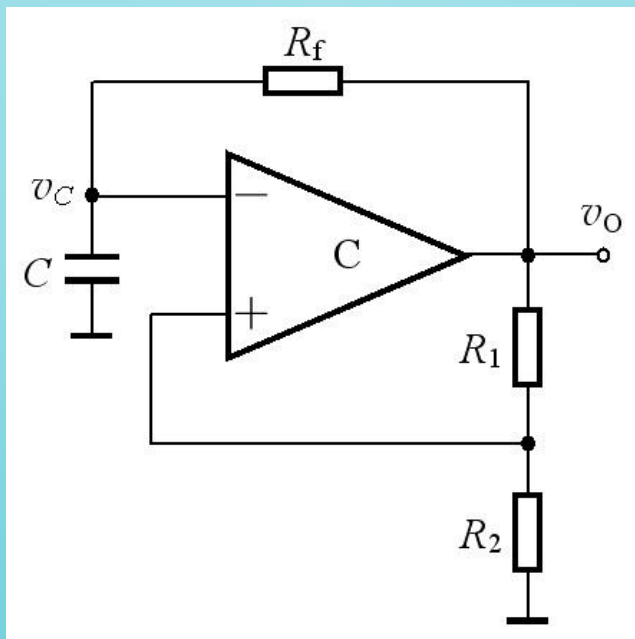
开环增益低、失调电压大、共模抑制比小，灵敏度往往不如用集成运放构成的比较器高。

但集成电压比较器中无频率补偿电容，因此转换速率高，改变输出状态的典型响应时间是 $30\sim 200\text{ ns}$ 。

相同条件下741集成运算放大器的响应时间为 $30\text{ }\mu\text{s}$ 左右。

9.8.2 方波产生电路

1. 电路组成（多谐振荡电路）

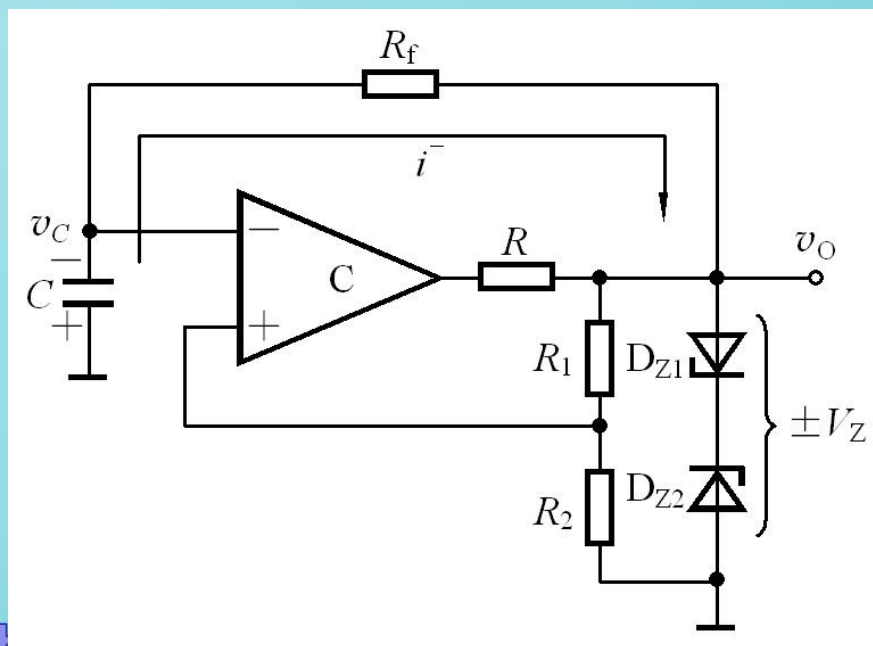
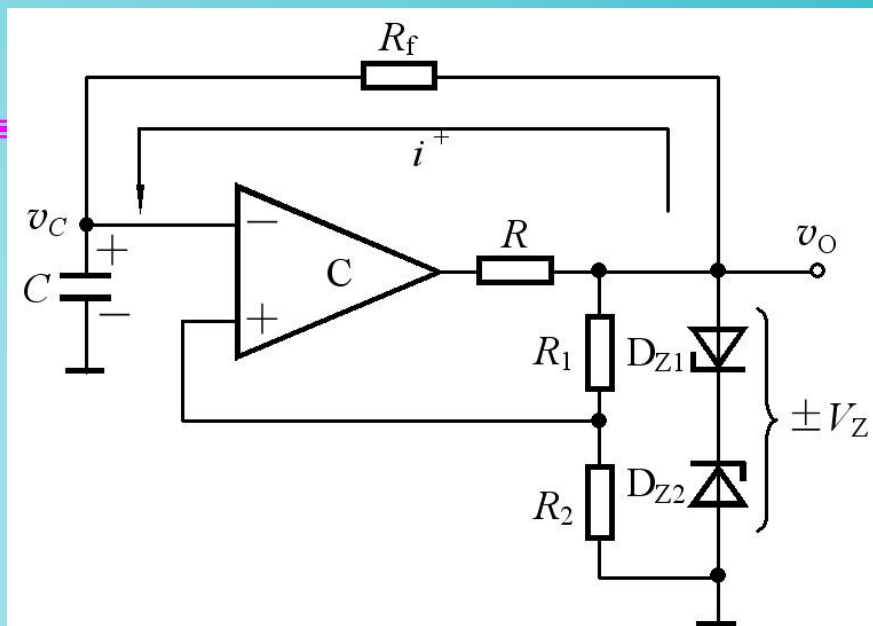
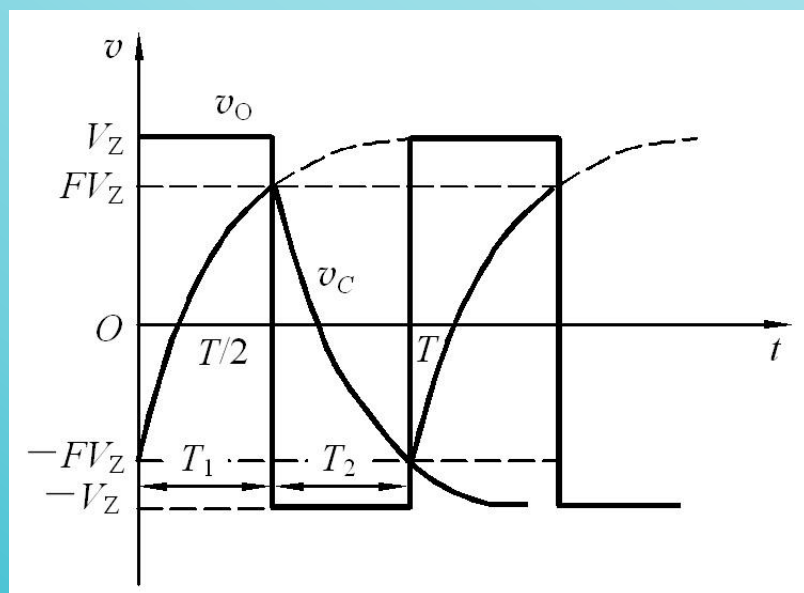


稳压管双向限幅

2. 工作原理

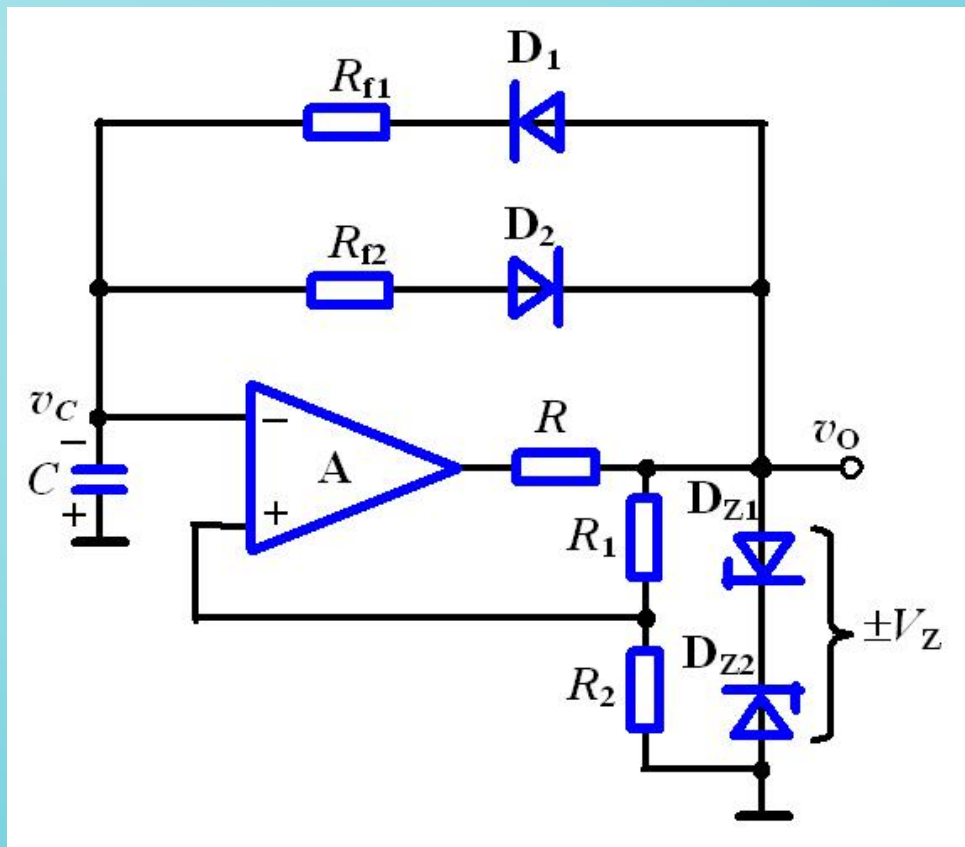
由于迟滞比较器中正反馈的作用，电源接通后瞬间，输出便进入饱和状态。

假设为正向饱和状态



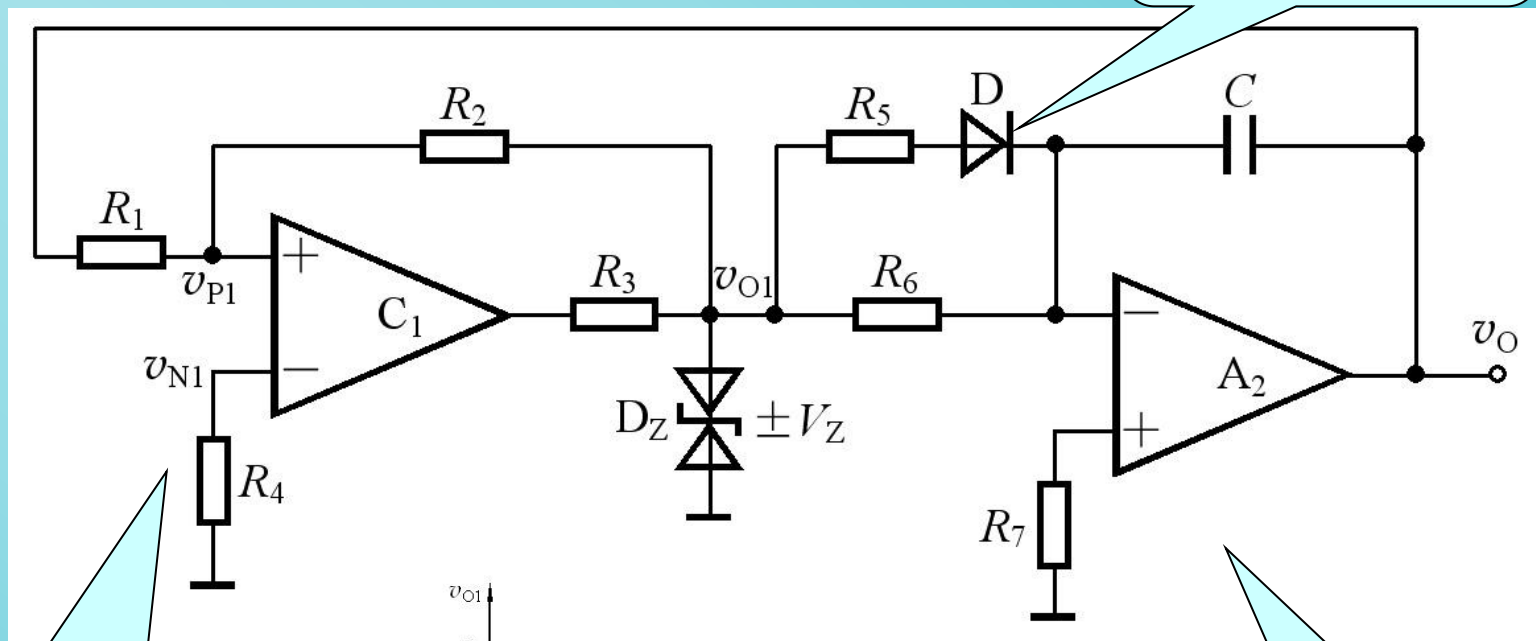
9.8.2 方波产生电路

3. 占空比可变的方波产生电路

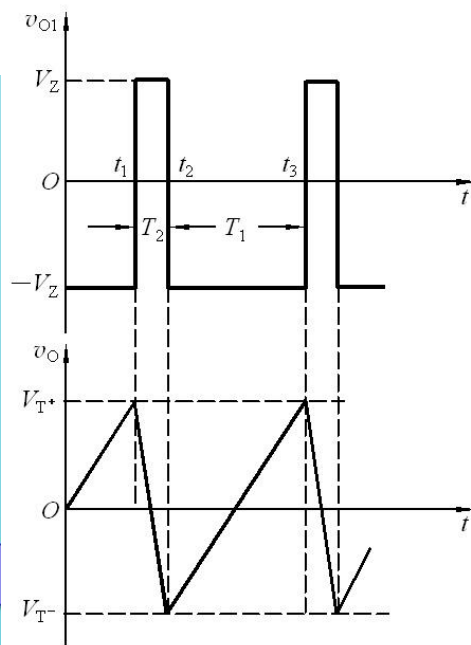


9.8.3 锯齿波产生电路

充放电时间
常数不同



同相输入迟
滞比较器



积分电路

end