

10 信号处理与信号产生电路

10.1 滤波电路的基本概念与分类

10.2 一阶有源滤波电路

10.3 高阶有源滤波电路

***10.4 开关电容滤波器**

10.5 正弦波振荡电路的振荡条件

10.6 RC正弦波振荡电路

10.7 LC正弦波振荡电路

10.8 非正弦信号产生电路

10.1 滤波电路的基本概念与分类

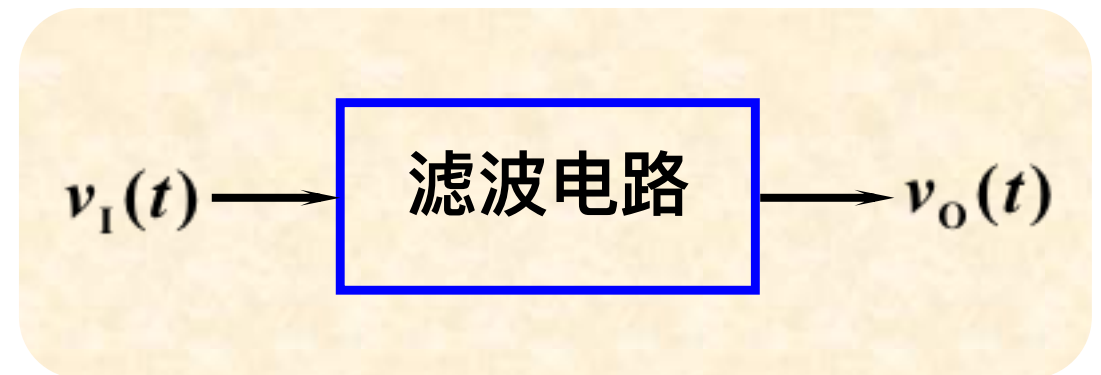
1. 基本概念

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 $A(j\omega) = |A(j\omega)| \angle \varphi(\omega)$

其中 $|A(j\omega)|$ —— 模，幅频响应

$\varphi(\omega)$ —— 相位角，相频响应

$$\tau(\omega) = -\frac{d\varphi(\omega)}{d\omega} \quad (s)$$

群时延响应

10.1 滤波电路的基本概念与分类

2. 分类

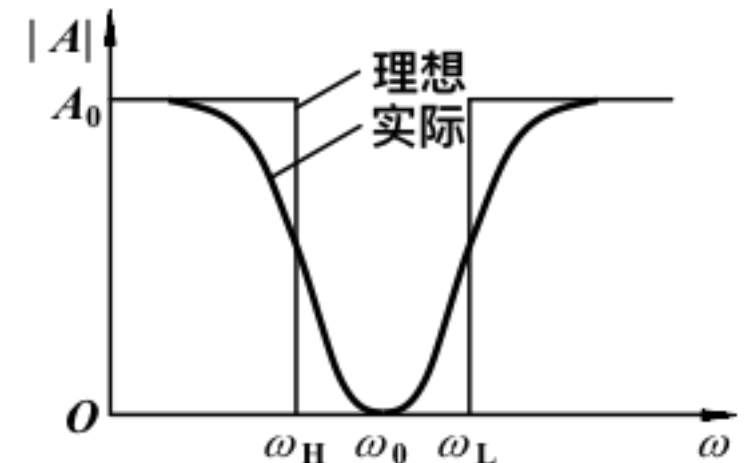
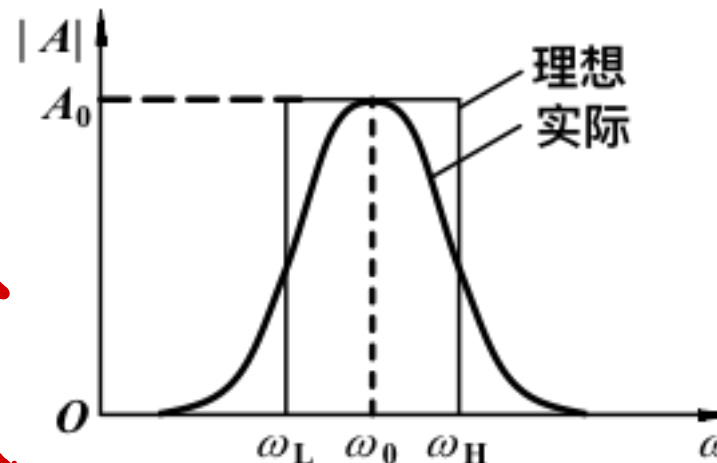
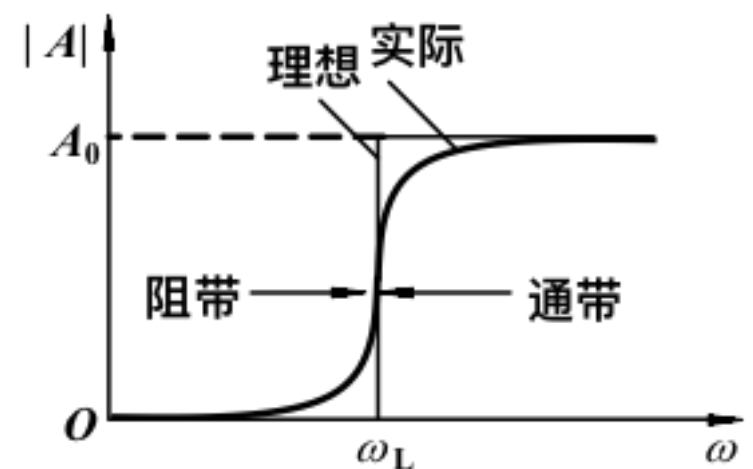
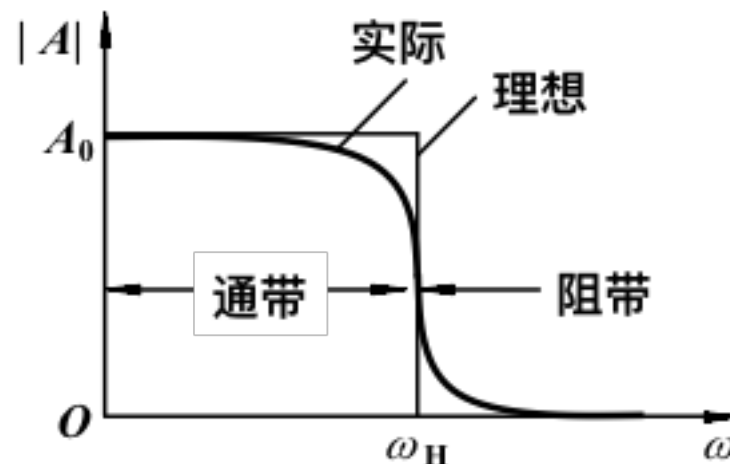
低通 (LPF)

高通 (HPF)

带通 (BPF)

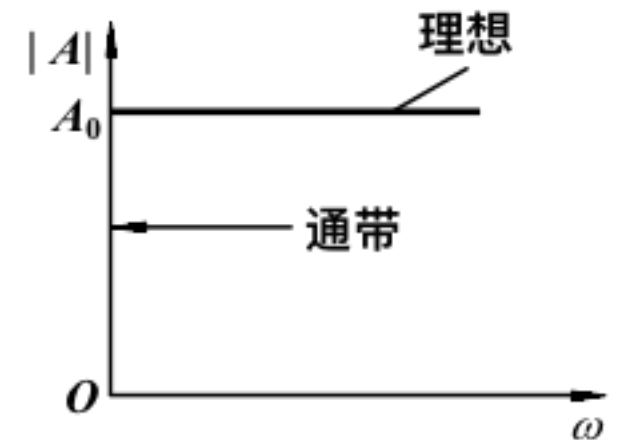
带阻 (BEF)

全通 (APF)



希望抑制^{工频}50Hz的干扰信号，应选用哪种类型的滤波电路？
交流电

放大音频信号，应选用哪种类型的滤波电路？
20~20K



10.2 一阶有源滤波电路

1. 低通滤波电路

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

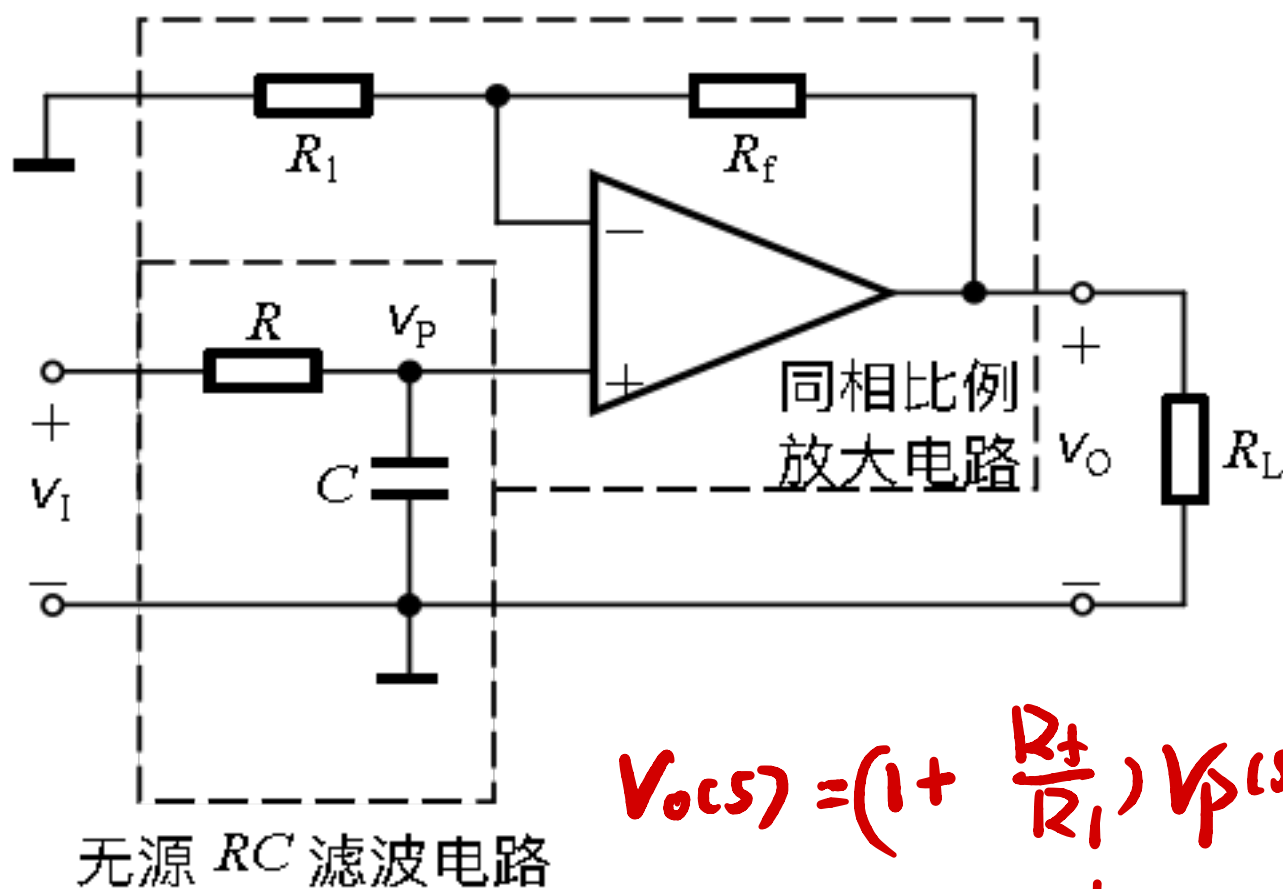
其中

$A_0 = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ 同相比例放大系数

$\omega_c = \frac{1}{RC}$ 特征角频率

故，幅频相应为

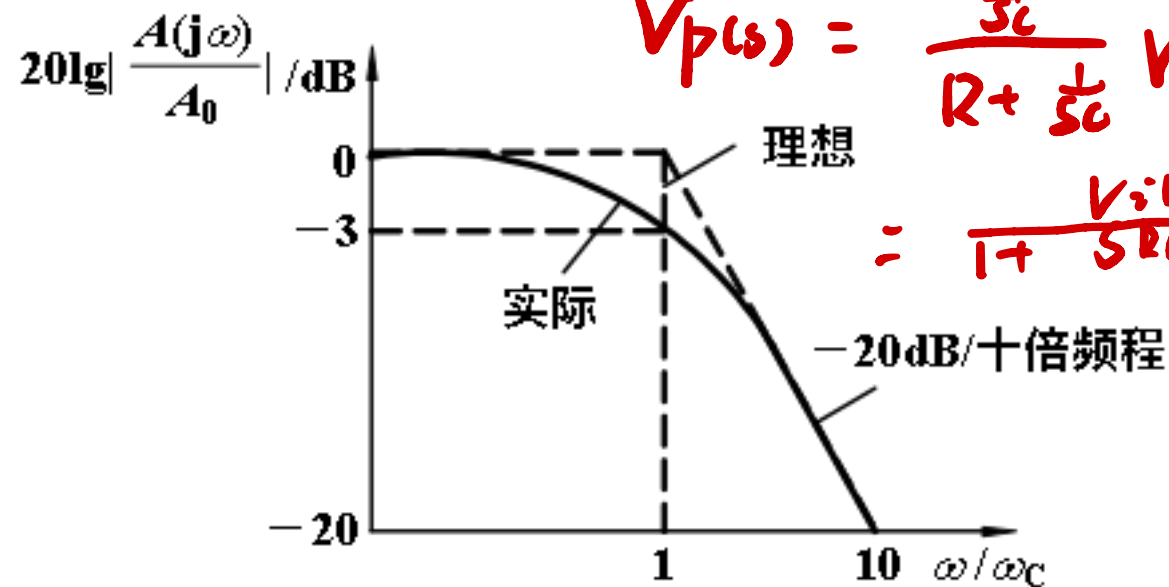
$$|A(j\omega)| = \frac{A_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}}$$



$$V_O(s) = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) V_P(s)$$

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

$$= \frac{V_I(s)}{1 + sRC}$$



10.2 一阶有源滤波电路

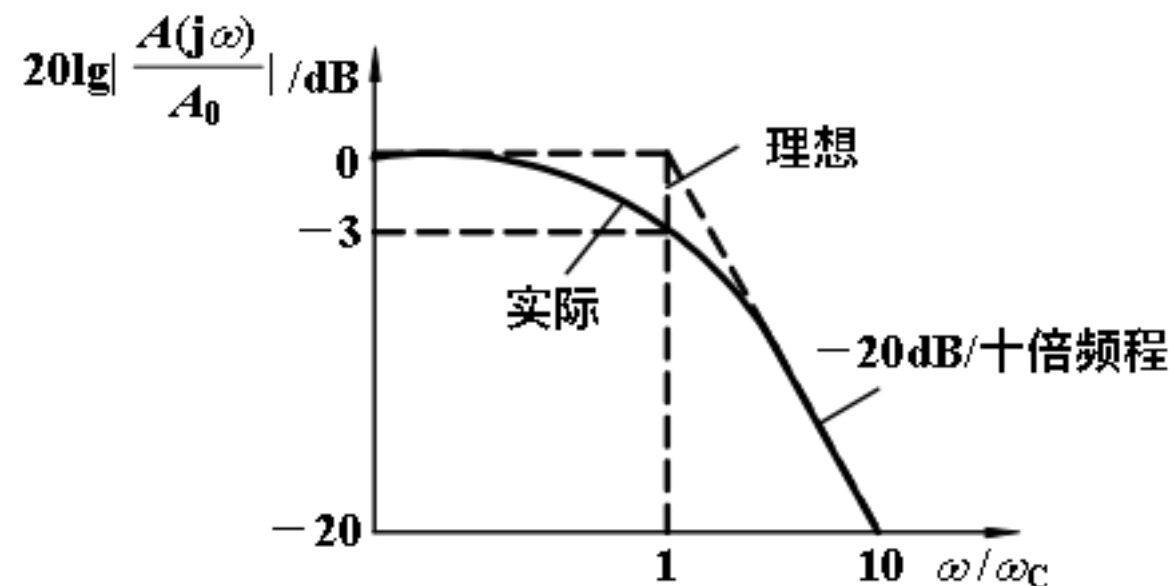
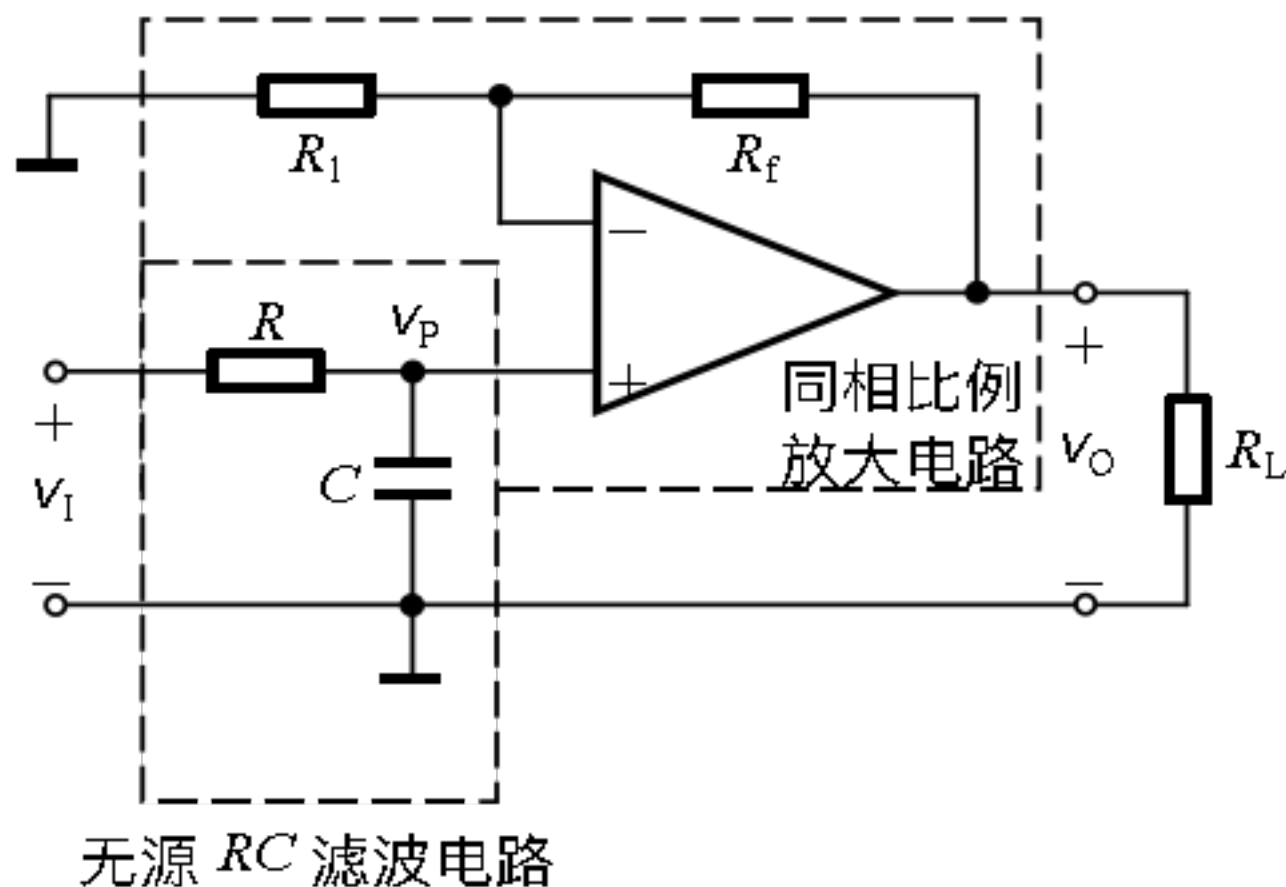
2. 高通滤波电路

电路如何改变？

幅频响应如何变化？

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。

有源滤波电路和无源滤波电路相比有何优缺点？



10.3 高阶有源滤波电路

10.3.1 有源低通滤波电路

10.3.2 有源高通滤波电路

10.3.3 有源带通滤波电路

10.3.4 二阶有源带阻滤波电路

10.3.1 有源低通滤波电路

1. 二阶有源低通滤波电路

2. 传递函数

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

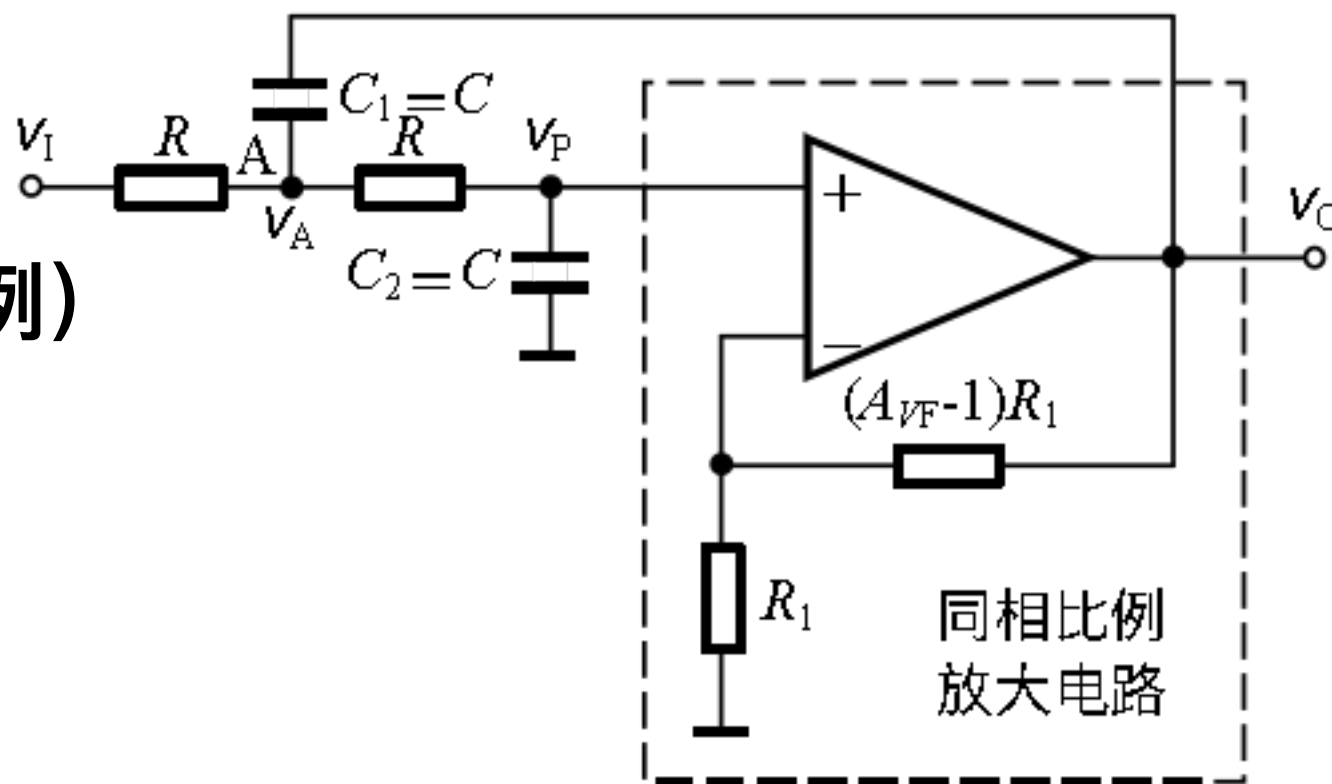
对于滤波电路，有

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

得滤波电路传递函数

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

(二阶)



10.3.1 有源低通滤波电路

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**

$$Q = \frac{1}{3 - A_{VF}} \quad \text{称为**等效品质因数** 不可能是}$$

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

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

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

10.3.1 有源低通滤波电路

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

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

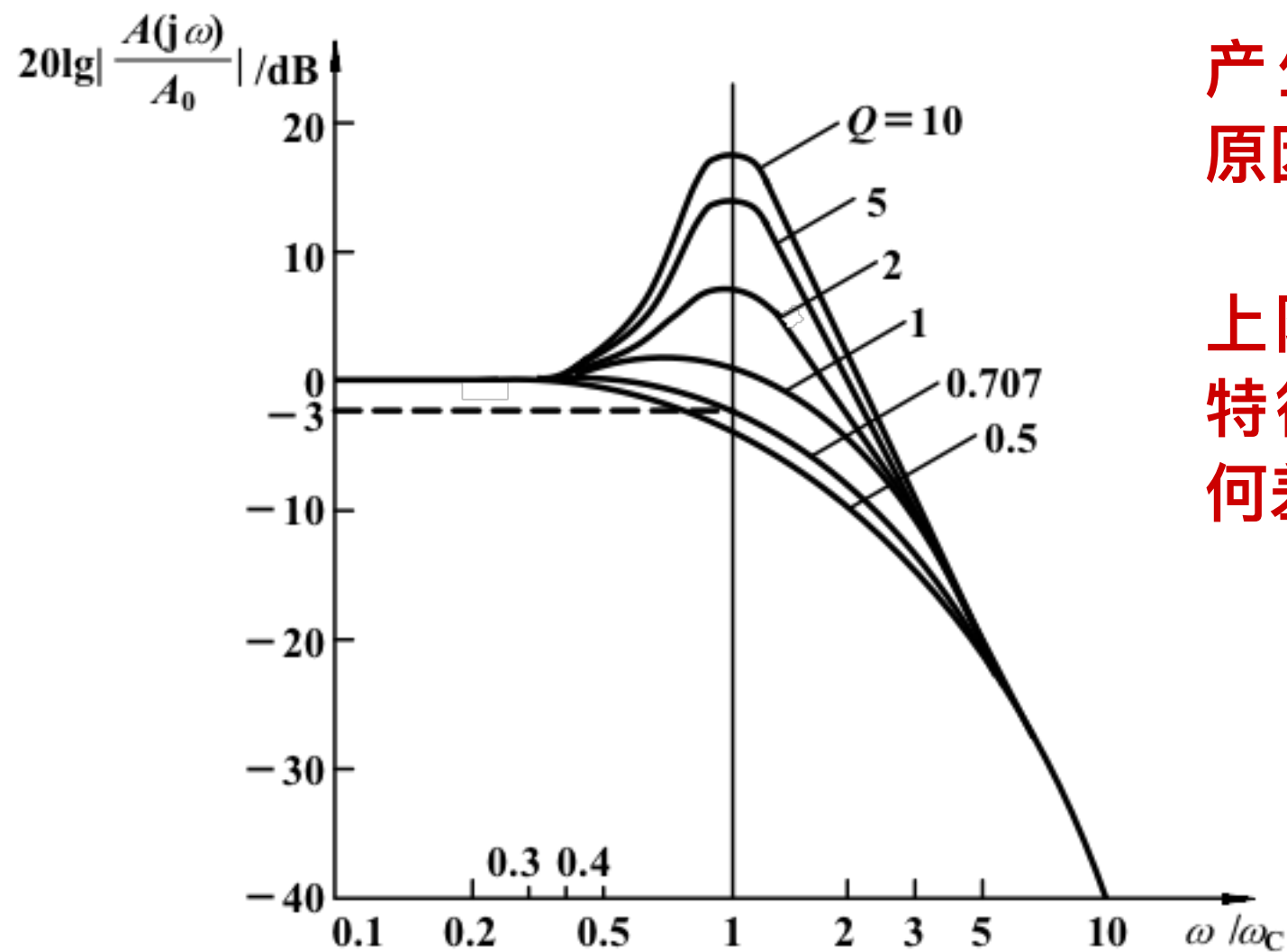
相频响应

$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{\frac{\omega}{\omega_c Q}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2}$$

10.3.1 有源低通滤波电路

3. 幅频响应

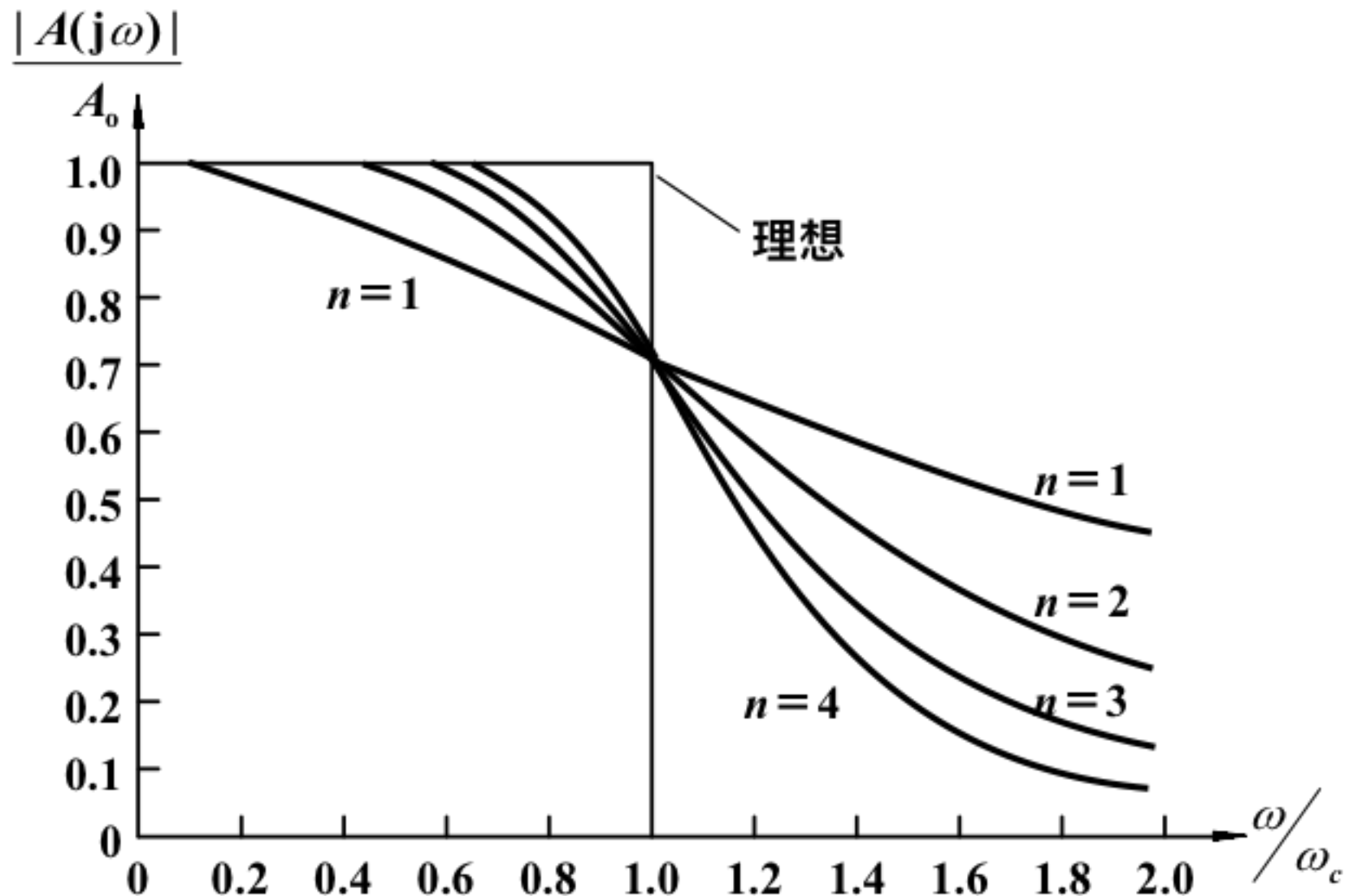
$$20\lg\left|\frac{A(j\omega)}{A_0}\right| = 20\lg \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_c Q}\right)^2}}$$



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。



10.3.2 有源高通滤波电路

1. 二阶高通滤波电路

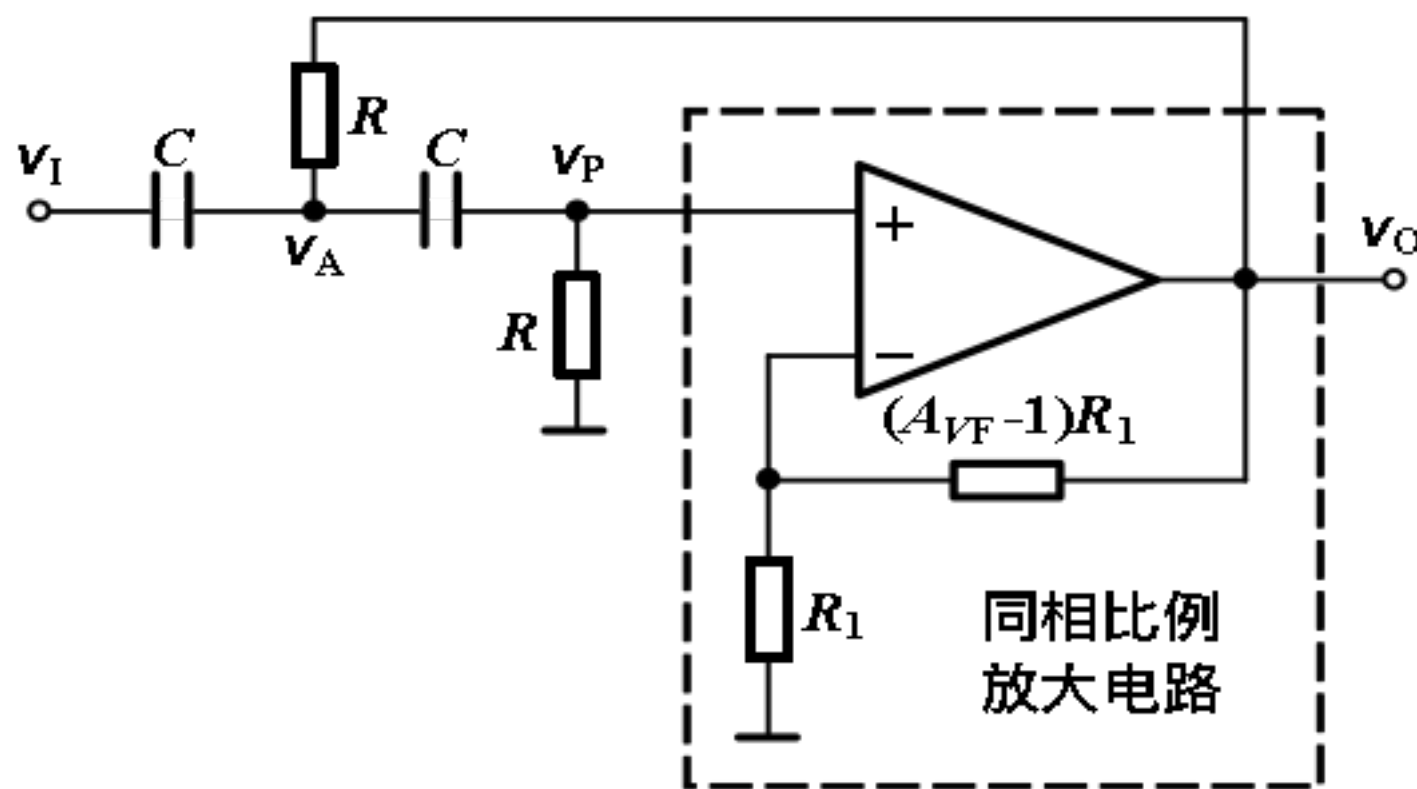
将低通电路中的电容和电阻对换，便成为高通电路。

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

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

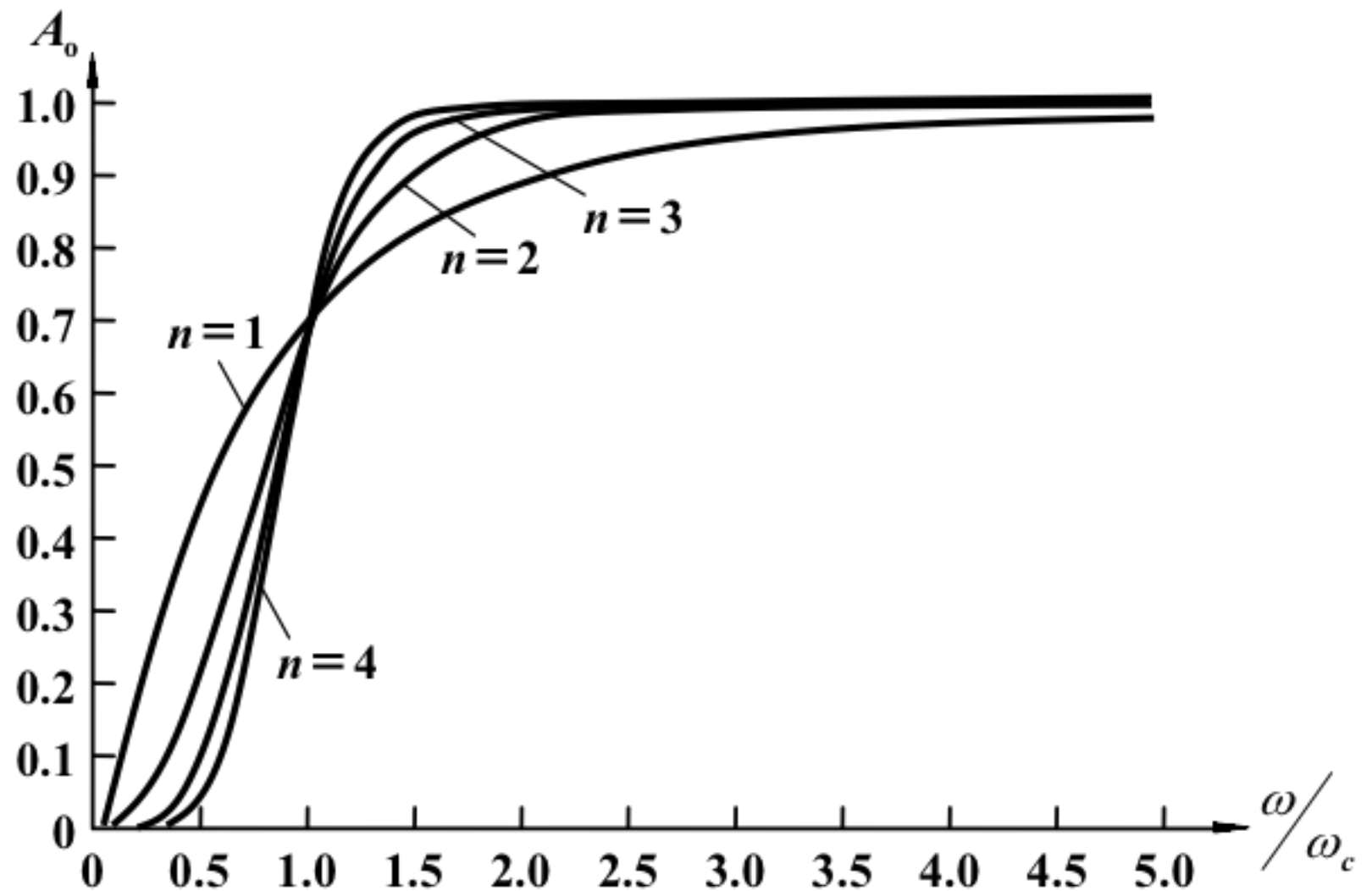


10.3.2 有源高通滤波电路

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 $|A(j\omega)|$



10.3.3 有源带通滤波电路

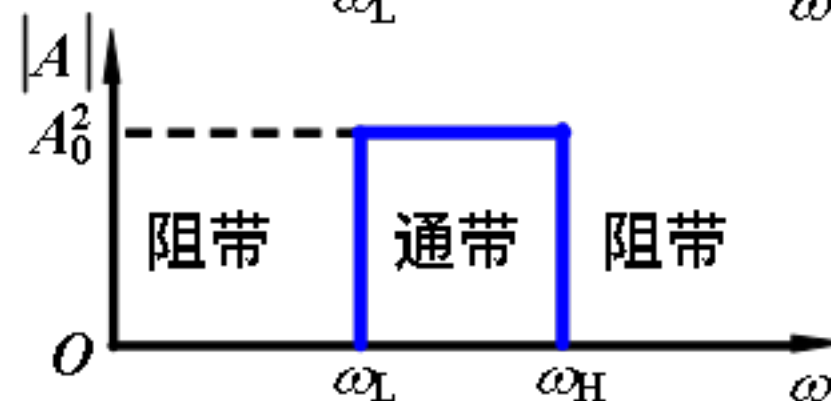
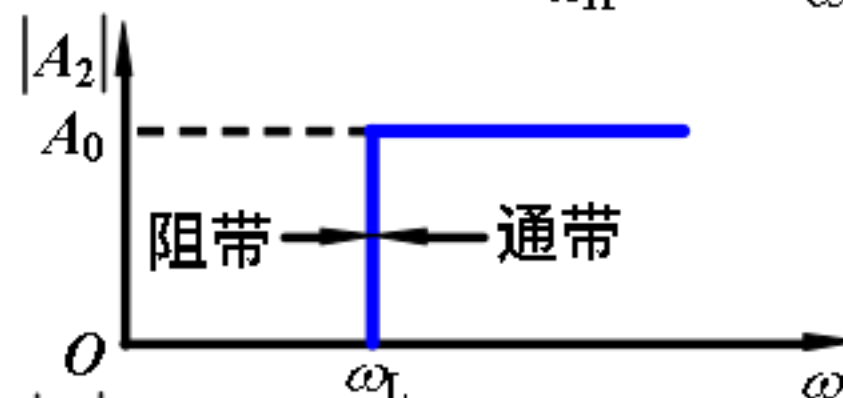
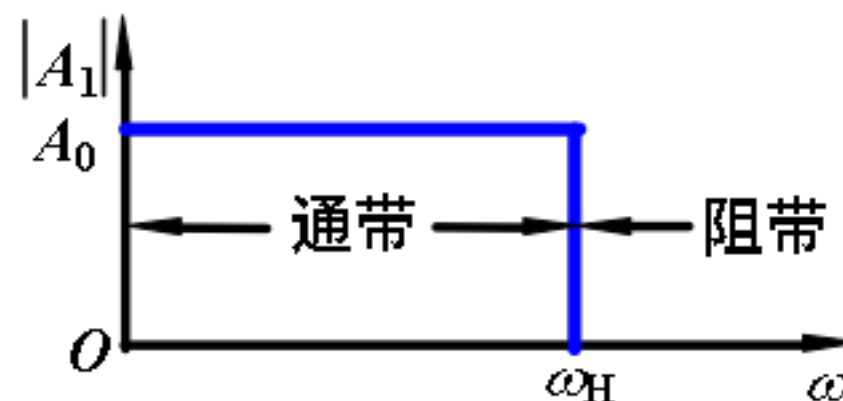
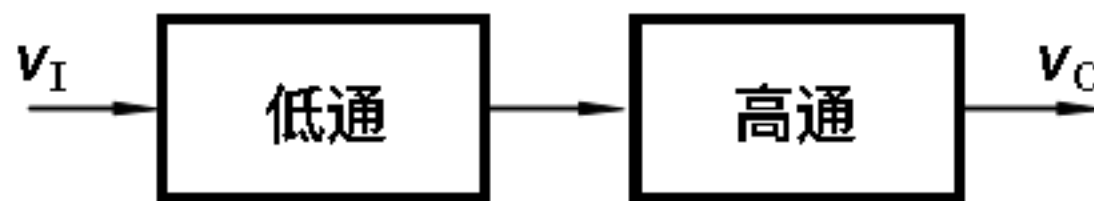
1. 电路组成原理

可由低通和高通串联得到

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

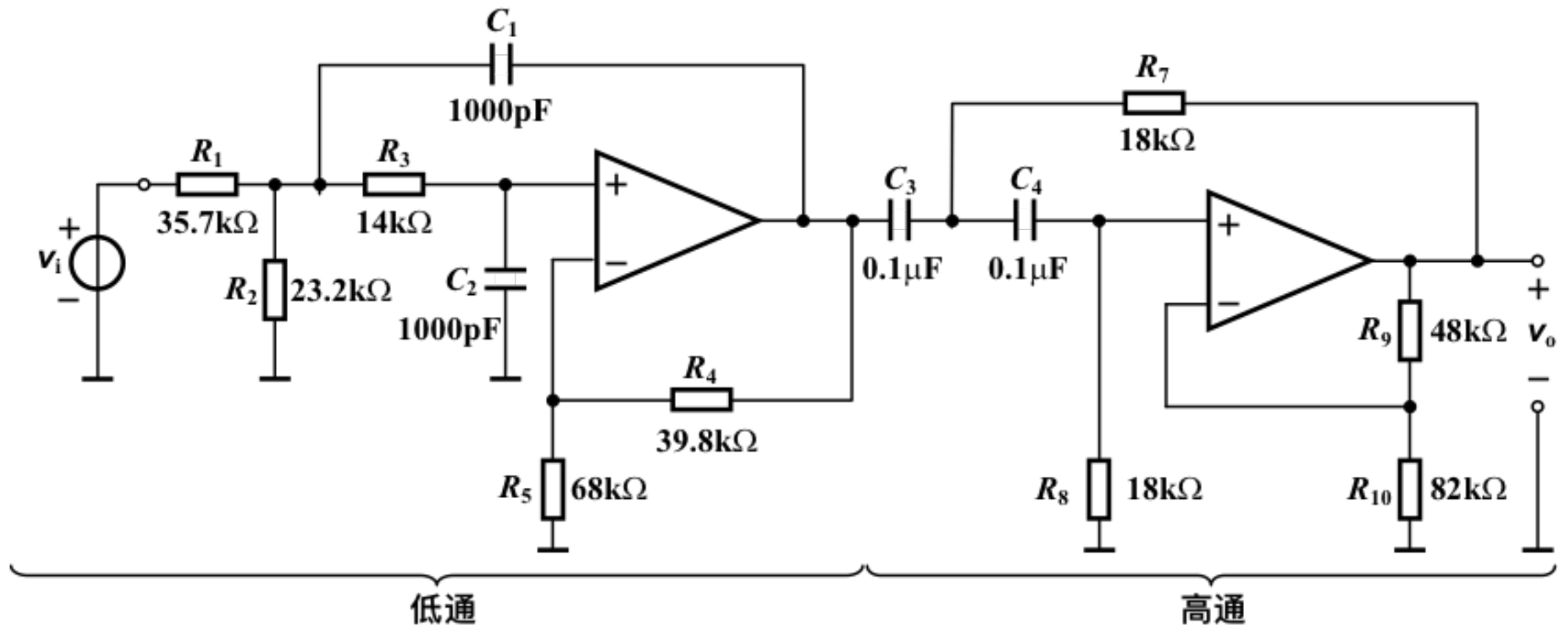
$$\omega_L = \frac{1}{R_2 C_2} \quad \text{高通截止角频率}$$

必须满足 $\omega_L < \omega_H$



10.3.3 有源带通滤波电路

2. 例



10.3.3 有源带通滤波电路

3. 二阶有源带通滤波电路 传递函数

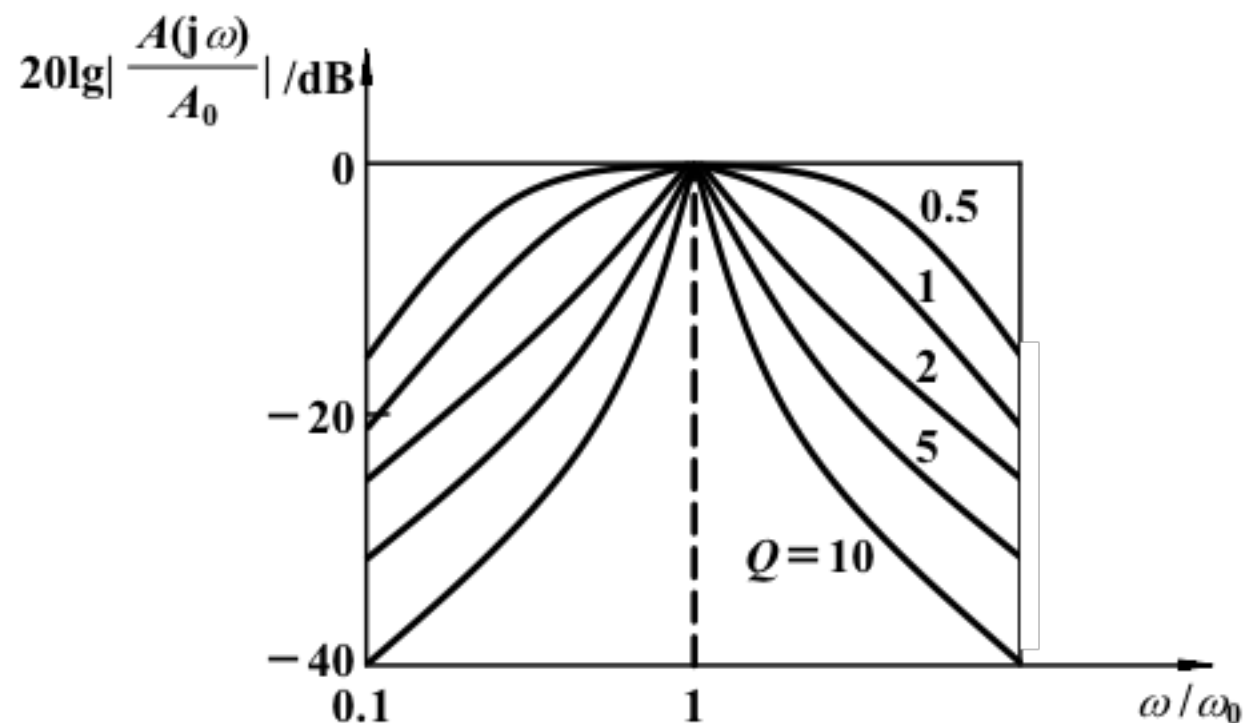
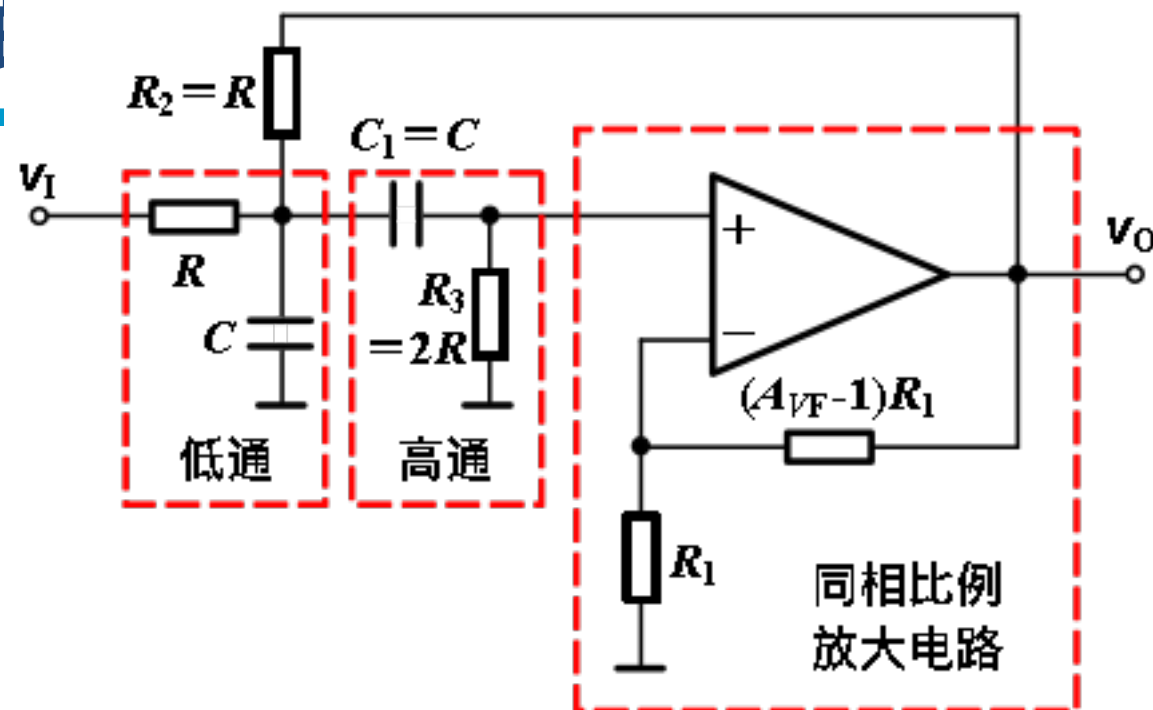
$$A(s) = \frac{A_{VF} sCR}{1 + (3 - A_{VF})sCR + (sCR)^2}$$

令

$$\left\{ \begin{aligned} A_0 &= \frac{A_{VF}}{3 - A_{VF}} \\ \omega_0 &= \frac{1}{RC} \\ Q &= \frac{1}{3 - A_{VF}} \end{aligned} \right.$$

得

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

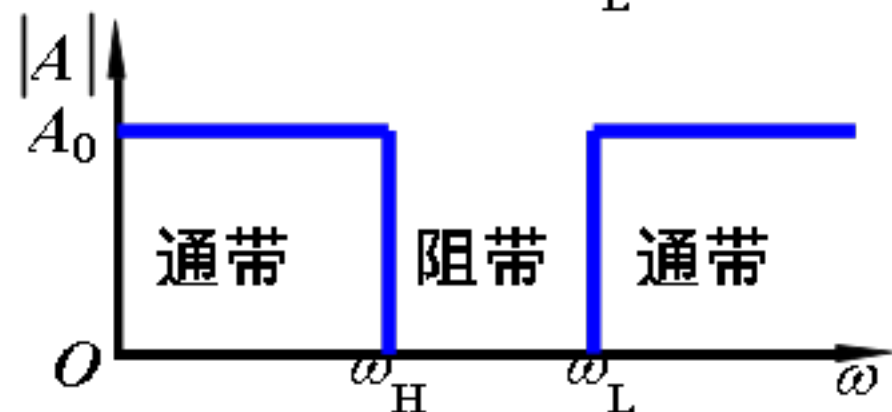
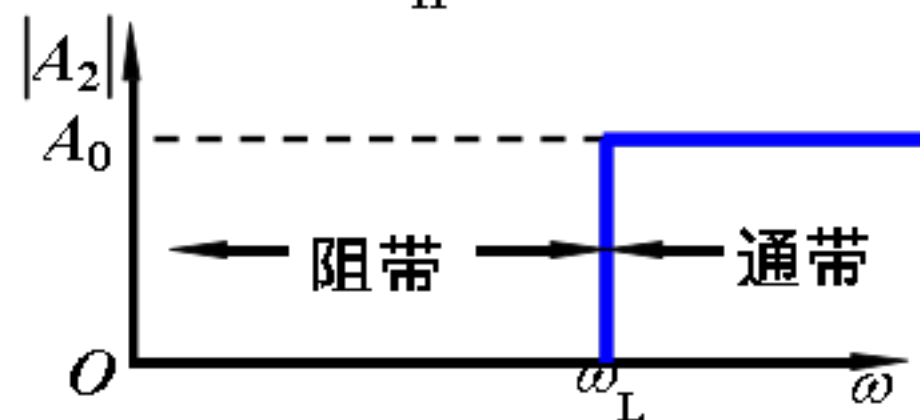
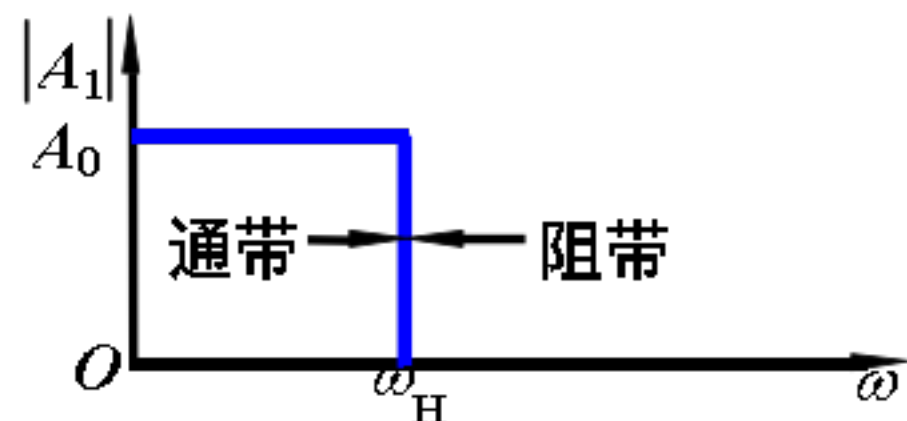
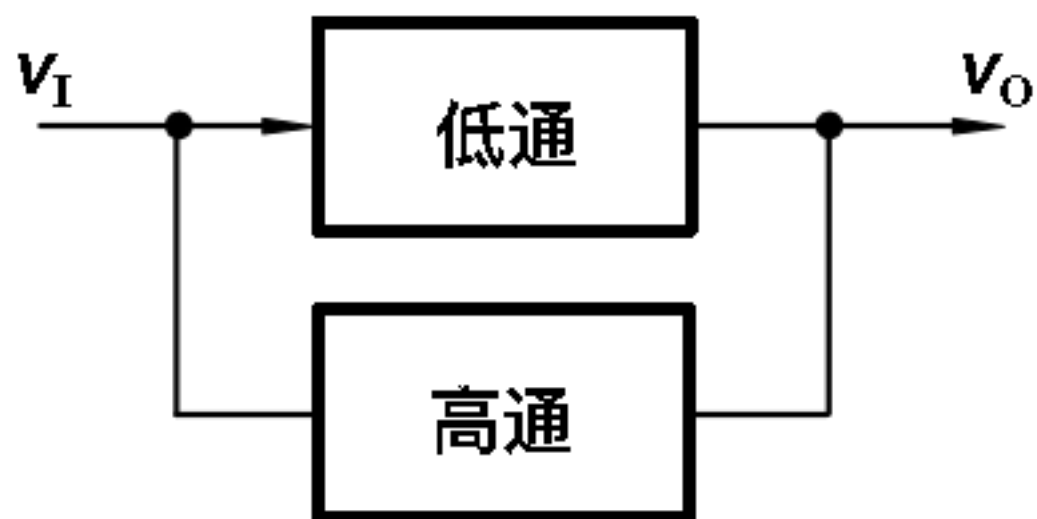


关于选择性

10.3.4 二阶有源带阻滤波电路

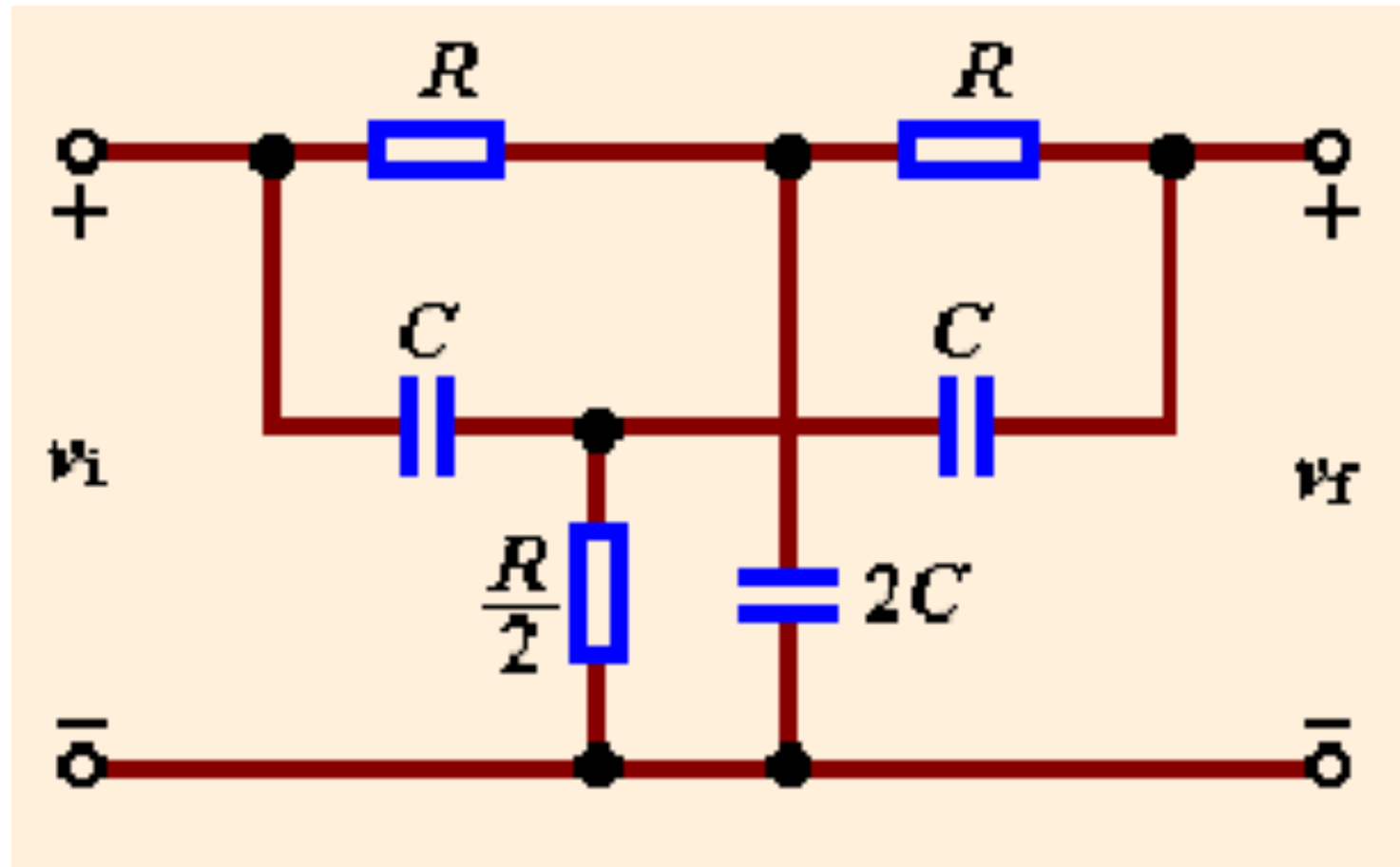
可由低通和高通并联得到

必须满足 $\omega_L > \omega_H$



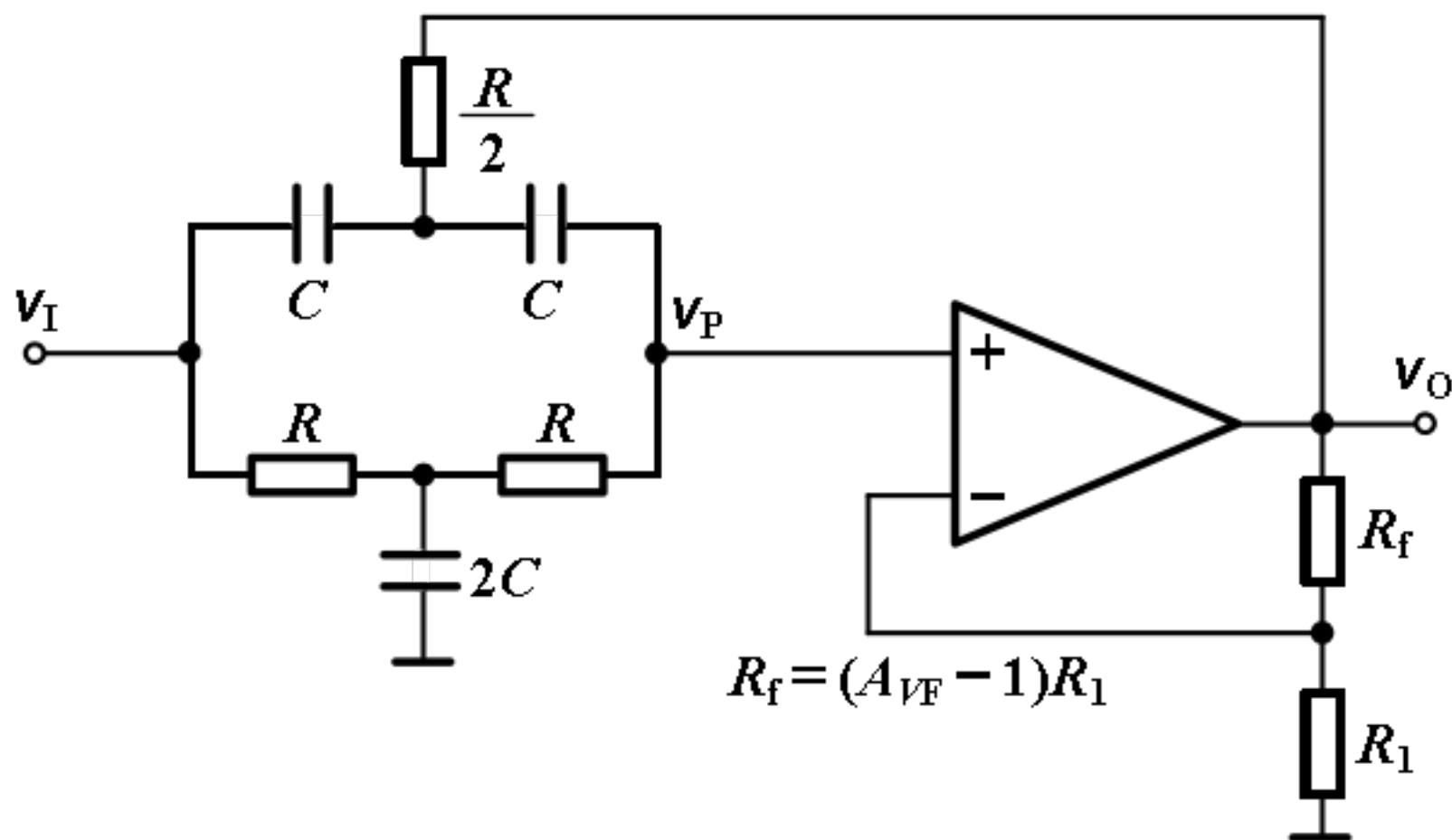
10.3.4 二阶有源带阻滤波电路

双T选频网络



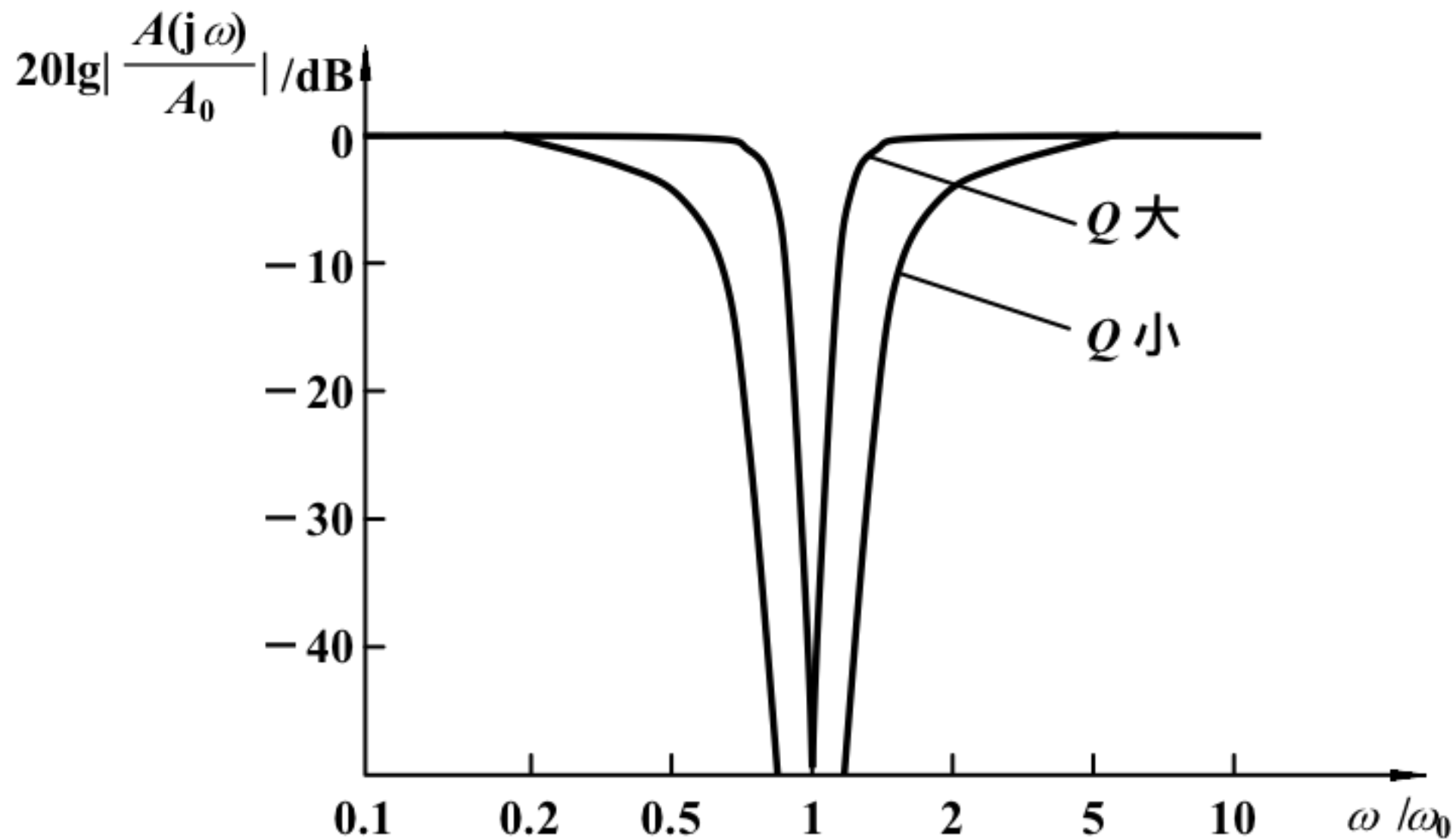
10.3.4 二阶有源带阻滤波电路

双T带阻滤波电路



10.3.4 二阶有源带阻滤波电路

阻滤波电路的幅频特性



10.4 开关电容滤波器 X

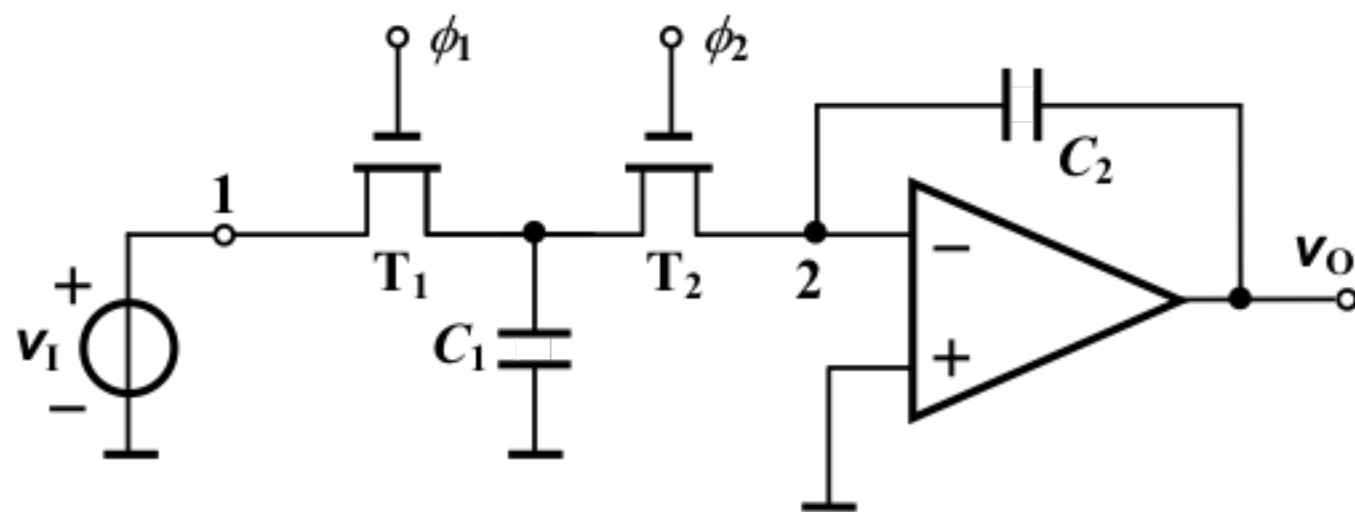
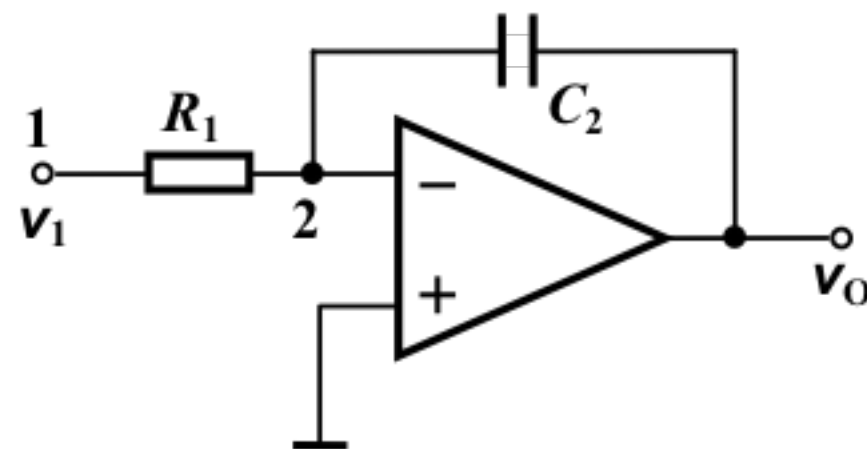
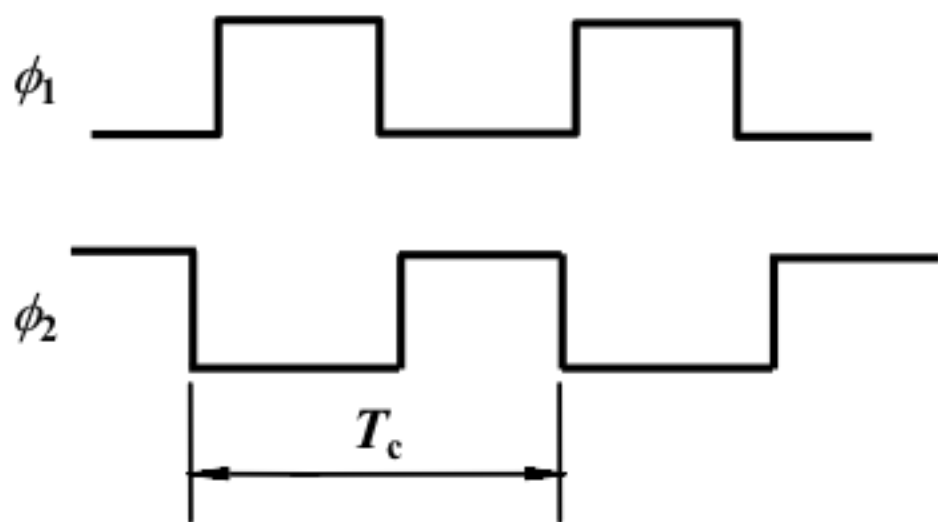
1. 基本原理

积分电路

由电容 C_1 和两个MOS开关管 T_1 、 T_2 等效电阻 R_1 的积分电路

不重叠的两相时钟脉冲

ϕ_1 和 ϕ_2 控制关管的接通与断开



10.4 开关电容滤波

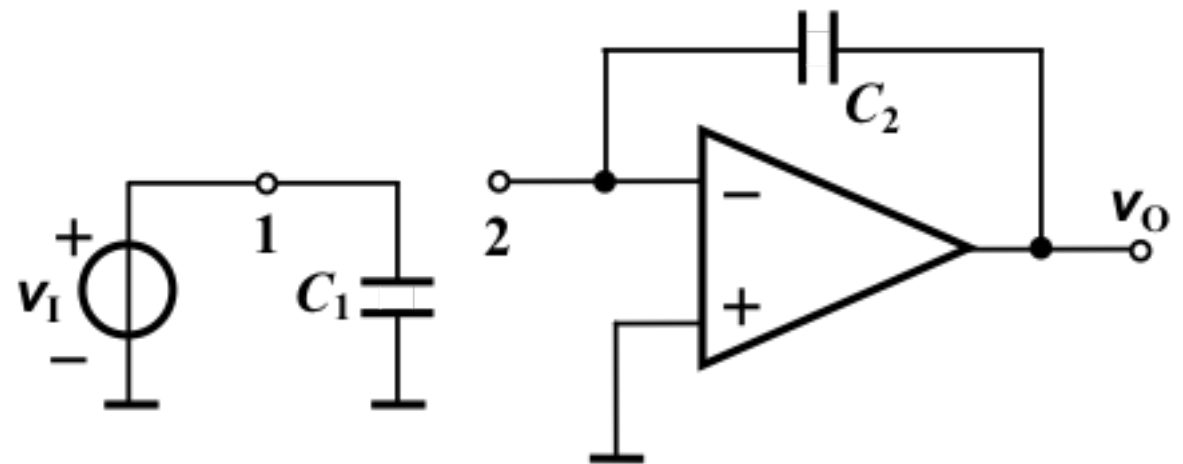
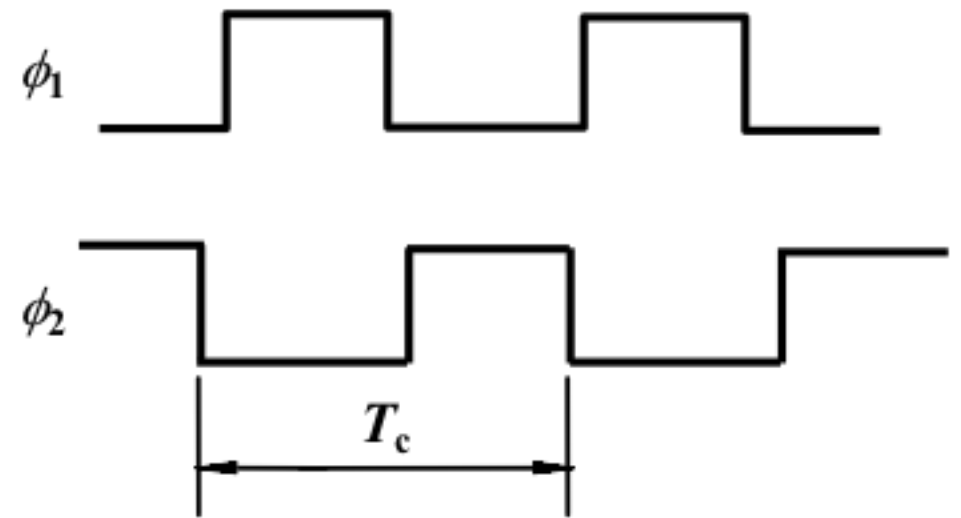
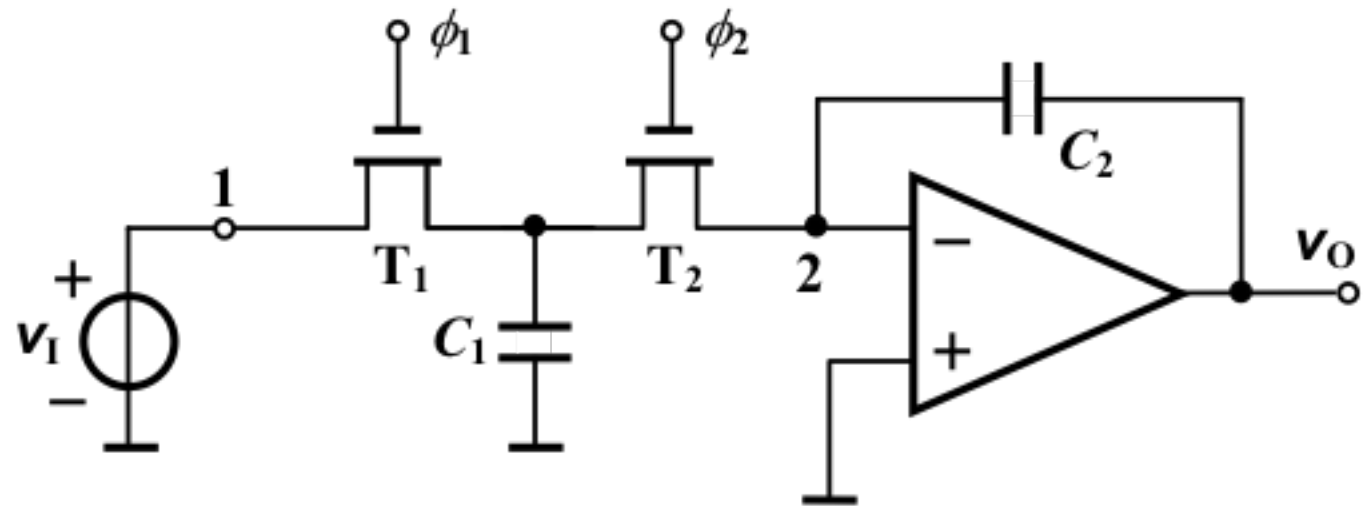
1. 基本原理

ϕ_1 为高电平时, T_1 导通,
 T_2 截止

C_1 被充电, 有 $q_{c1} = C_1 v_I$

ϕ_2 为高电平时, T_1 截止, T_2 导通

C_1 所充电荷向 C_2 转移



10.4 开关电容滤波

1. 基本原理

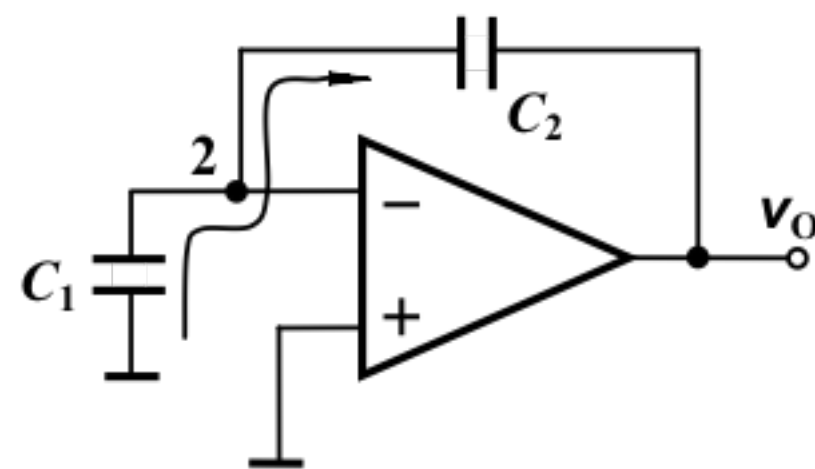
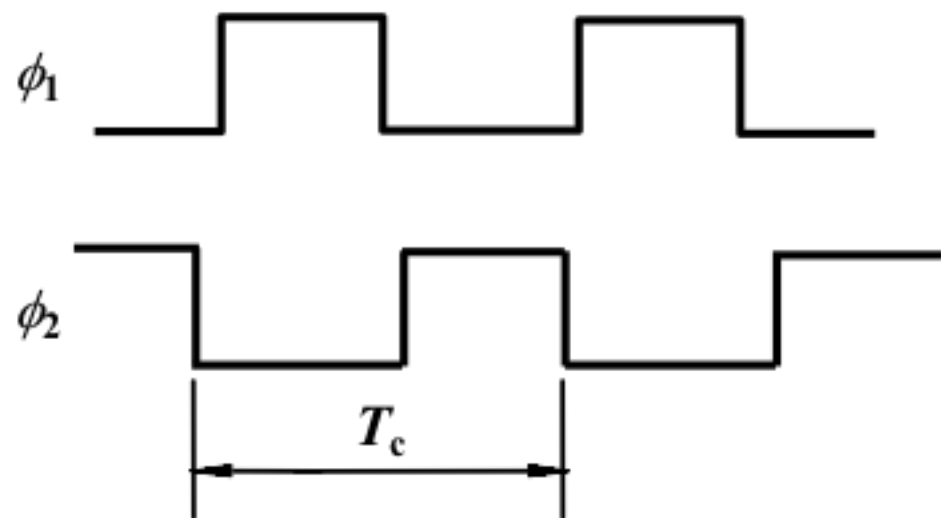
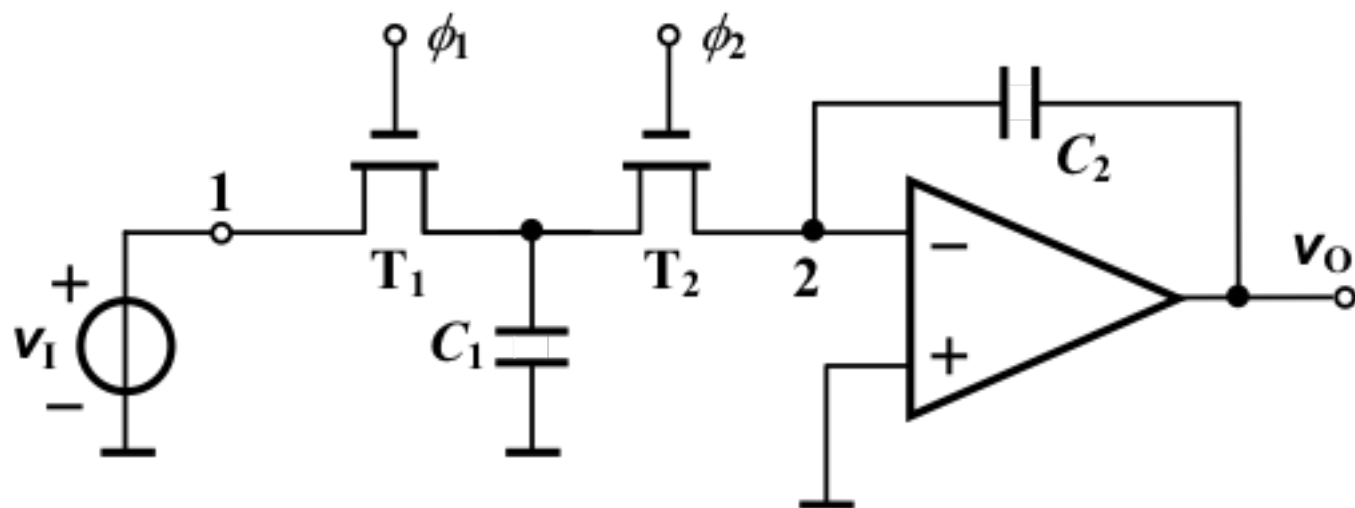
ϕ_1 为高电平时， T_1 导通， T_2 截止

C_1 被充电，有 $q_{c1} = C_1 v_I$

ϕ_2 为高电平时， T_1 截止， T_2 导通

C_1 所充电荷向 C_2 转移

在每一时钟周期 T_c 内，从信号源中提取的电荷 $q_{c1} = C_1 v_I$ 供给了积分电容器 C_2 。因此，在节点1、2之间流过的平均电流为

$$i_{av} = \frac{q_{c1}}{T_c} = \frac{C_1 v_I}{T_c}$$


10.4 开关电容滤波

1. 基本原理

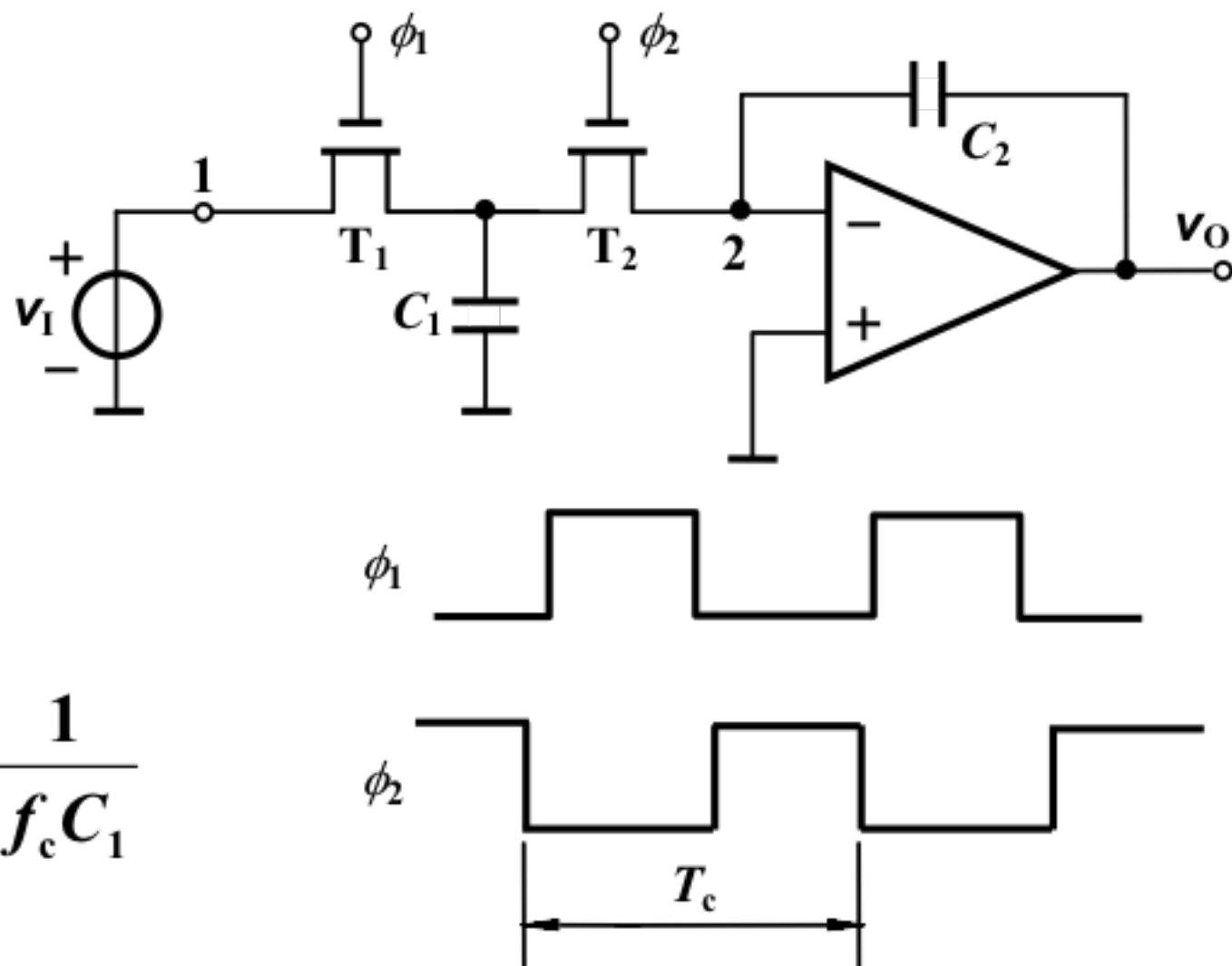
当 T_c 远小于信号周期时，
可在两节点之间定义一个
等效电阻 R_{eq}

$$R_{eq} = \frac{V_I}{i_{av}} = \frac{V_I T_c}{C_1 V_I} = \frac{T_c}{C_1} = \frac{1}{f_c C_1}$$

得等效的积分器时间常数

$$\tau = C_2 R_{eq} = T_c \frac{C_2}{C_1}$$

时间常数与脉冲周期和电容比有关



10.4 开关电容滤波器

2. 开关电路滤波器举例

一阶低通滤波器电路，传递函数为

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = -\frac{R_f}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + sR_fC_f} = \frac{A_0}{1 + s/\omega_{3dB}}$$

其中 $A_0 = -\frac{R_f}{R_1}$ $\omega_{3dB} = \frac{1}{R_fC_f}$

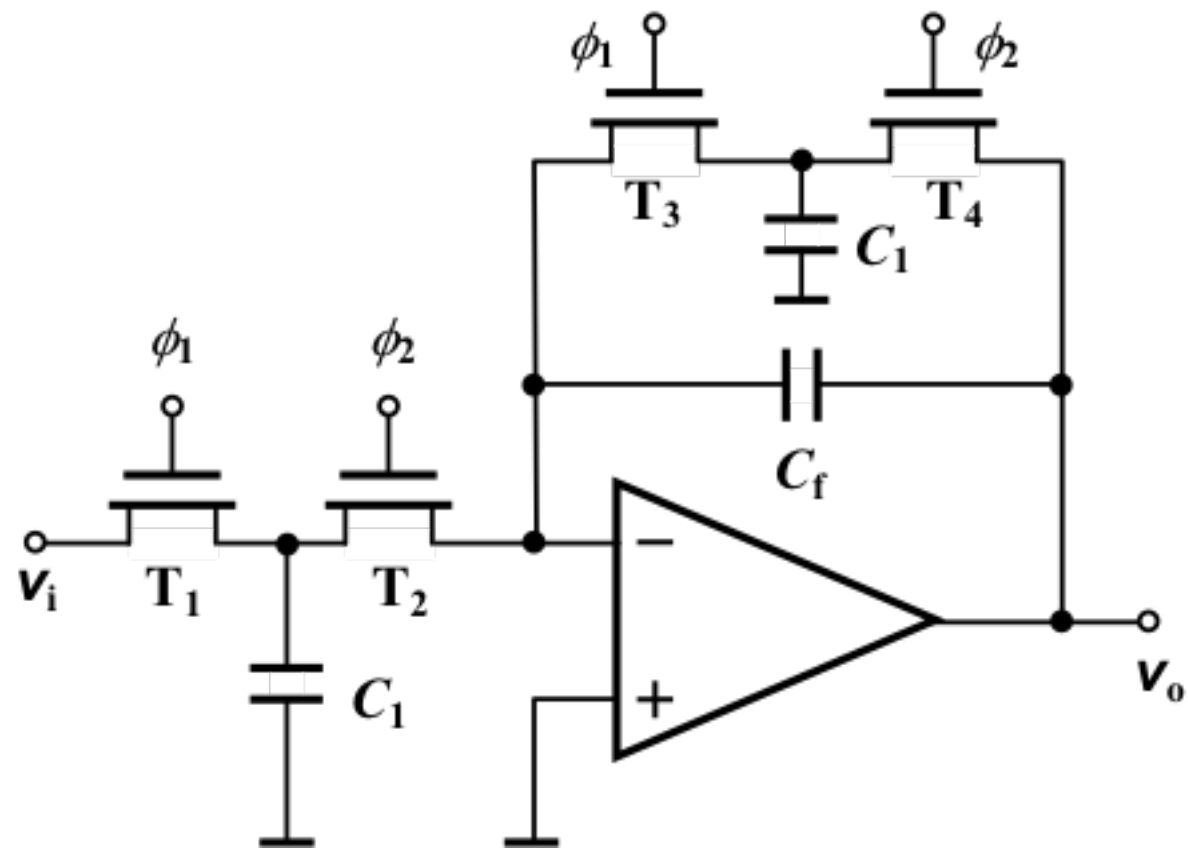
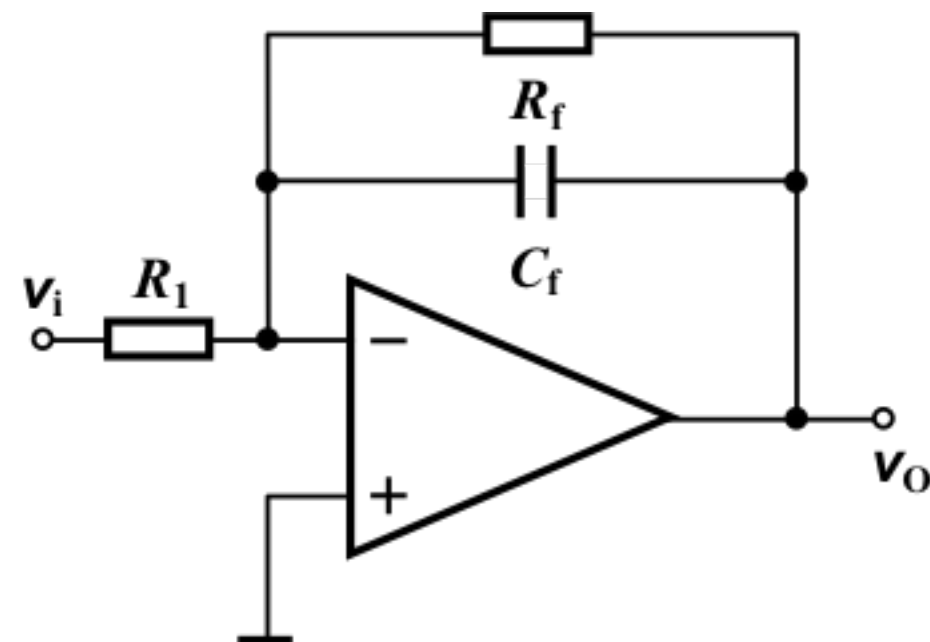
$$f_{3dB} = \frac{1}{2\pi R_fC_f}$$

等效开关电容滤波器电路

有

$$R_1 = R_{1eq} = \frac{1}{f_c C_1}$$

$$R_f = R_{feq} = \frac{1}{f_c C_2}$$

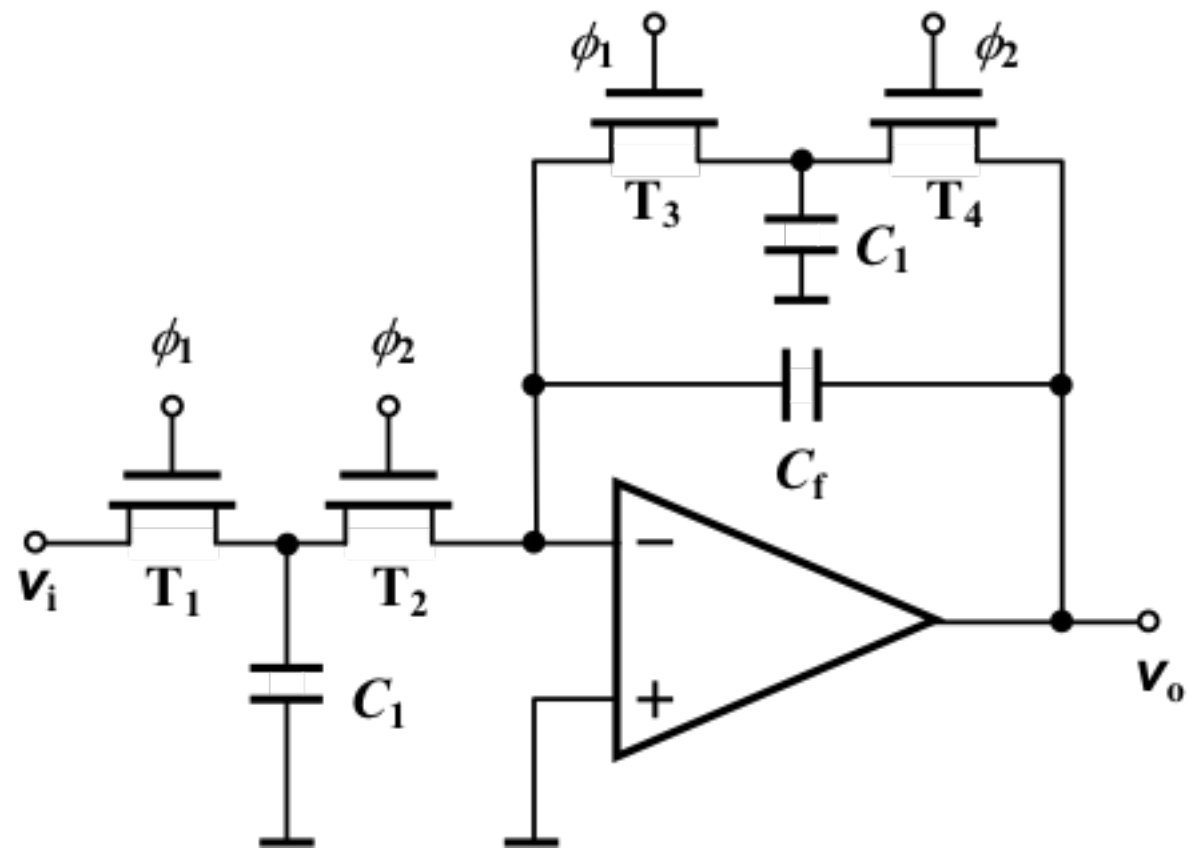
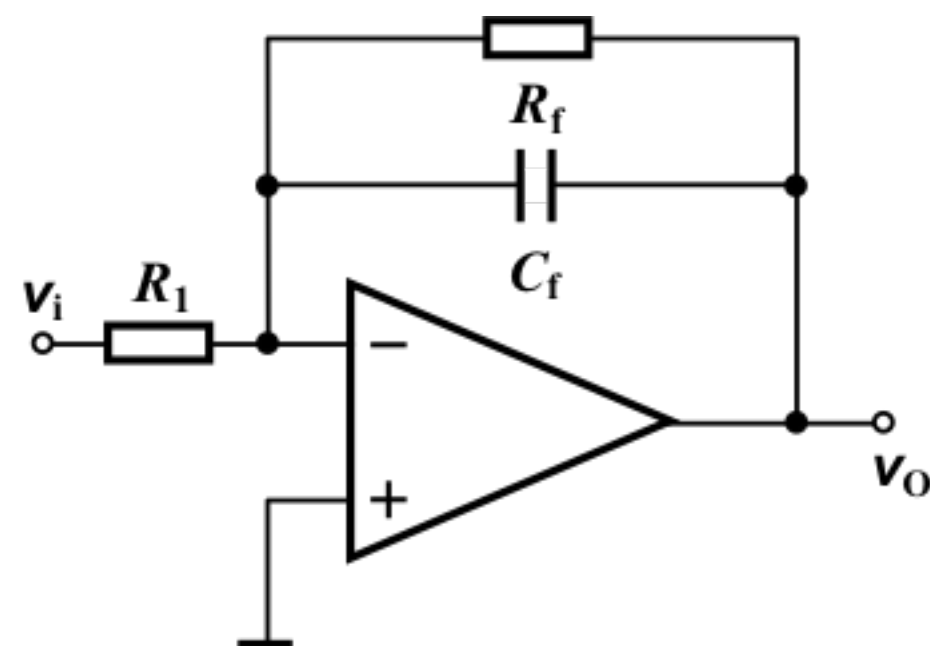


10.4 开关电容滤波器

2. 开关电路滤波器举例

代入传递函数表达式

$$\begin{aligned}\dot{A}(j\omega) &= -\frac{R_f}{R_1} \cdot \frac{1}{1 + j2\pi f R_f C_f} \\ &= -\frac{\frac{1}{f_c C_2}}{\frac{1}{f_c C_1}} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{2\pi f C_f}{f_c C_2}} \\ &= -\frac{C_1}{C_2} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_{3dB}}} \\ &= \frac{A_0}{1 + j(f / f_{3dB})}\end{aligned}$$



10.4 开关电容滤波器

2. 开关电路滤波器举例

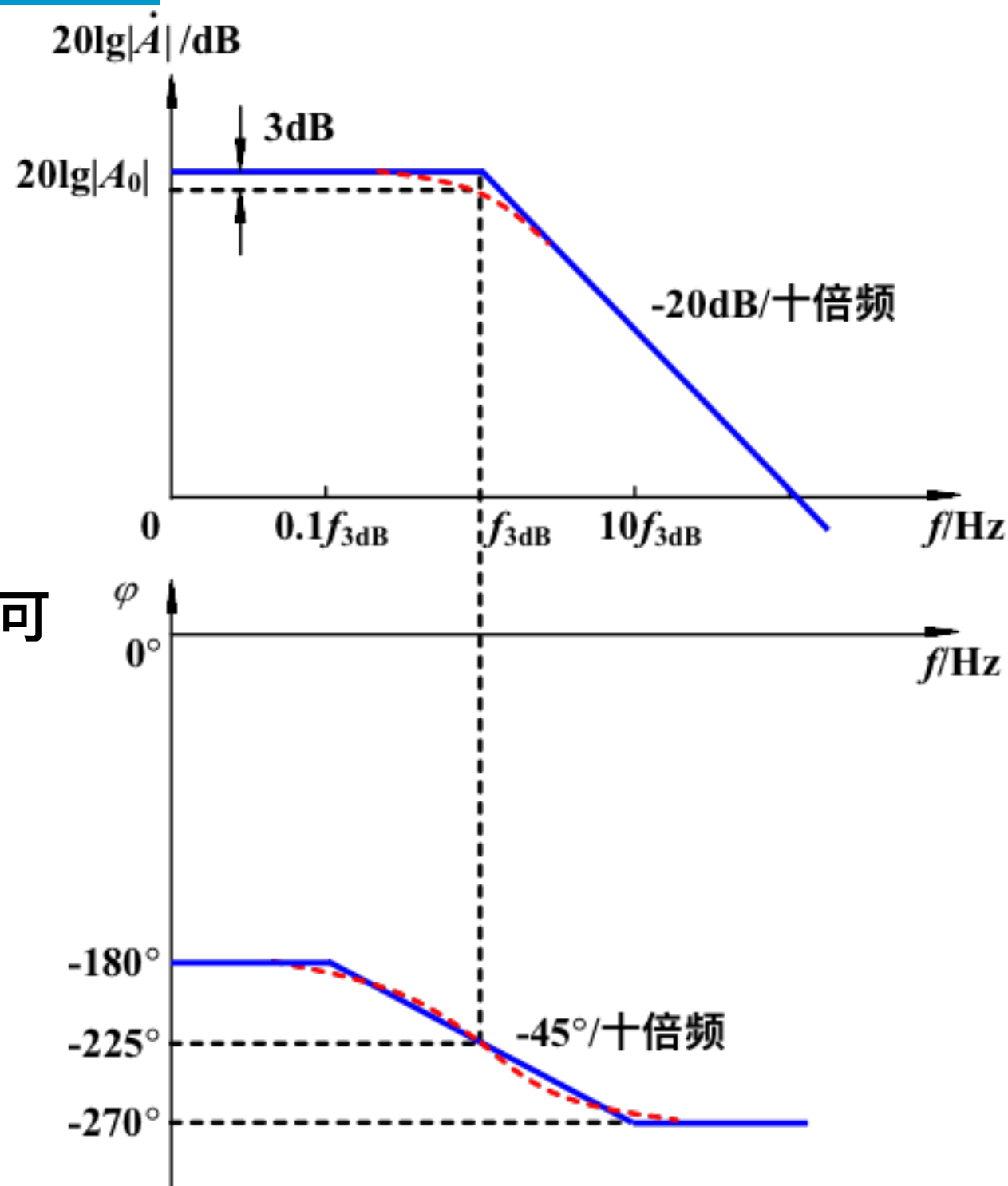
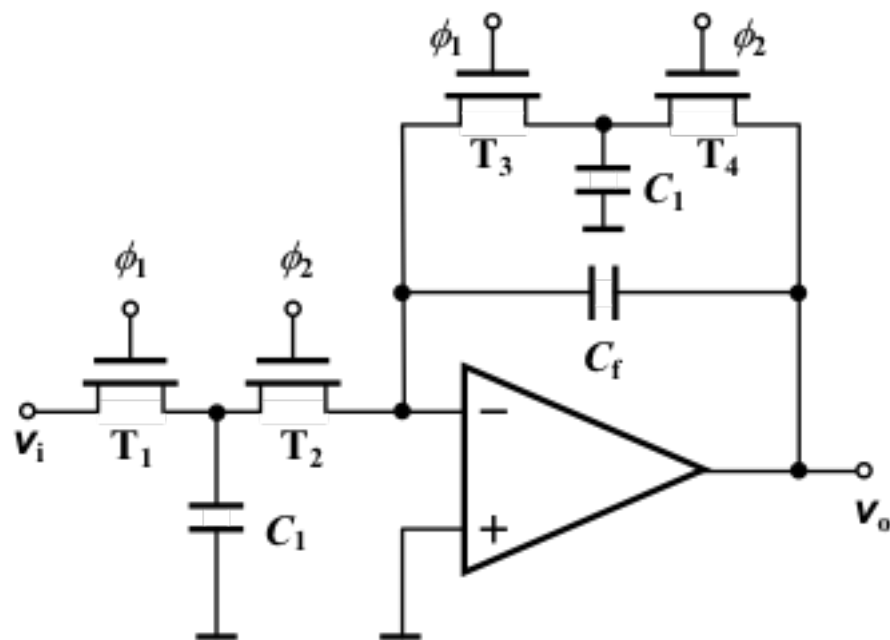
代入传递函数表达式

$$\dot{A} = \frac{A_0}{1 + j(f / f_{3dB})}$$

其中 $A_0 = -\frac{C_1}{C_2}$ $f_{3dB} = \frac{f_c C_2}{2\pi C_f}$

一阶低通滤波器的波特图

通过选择 C_1 、 C_2 和时钟频率 f_c ，便可获得需要的滤波特性



10.4 开关电容滤波器

3. 单片集成开关电容滤波器简介

目前已有通用型开关电容滤波器，可组成低通、高通、带通等类型滤波电路，阶数达8阶，某些型号的产品能对微伏数量级的有用信号进行滤波。

开关电容滤波器的滤波特性决定于电容比和时钟频率，设计简单，可实现高精度和高稳定滤波，同时便于集成。

目前集成开关电容滤波器除工作频率还不够高外（受脉冲频率远大于信号频率的限制），大部分性能指标已达到较高水平。

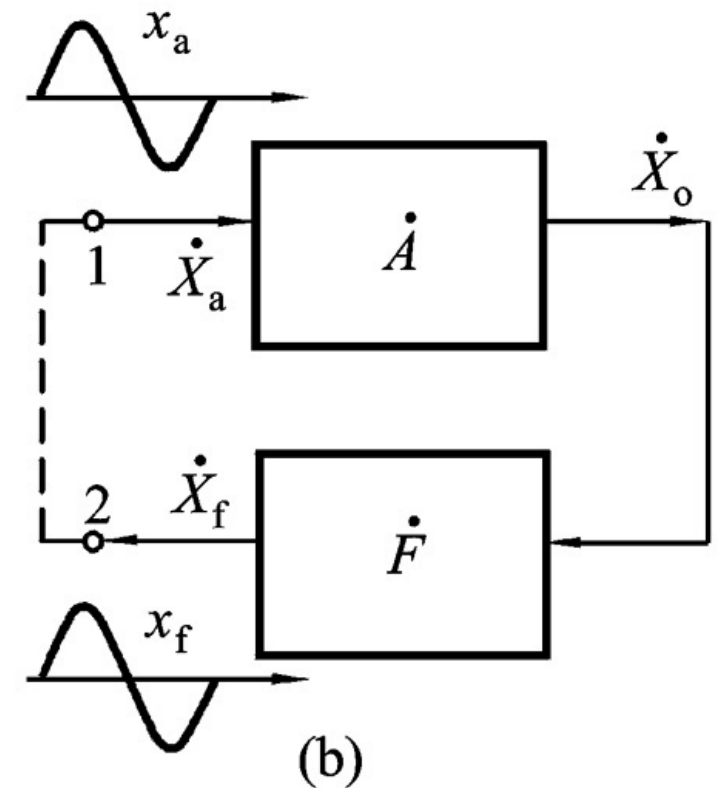
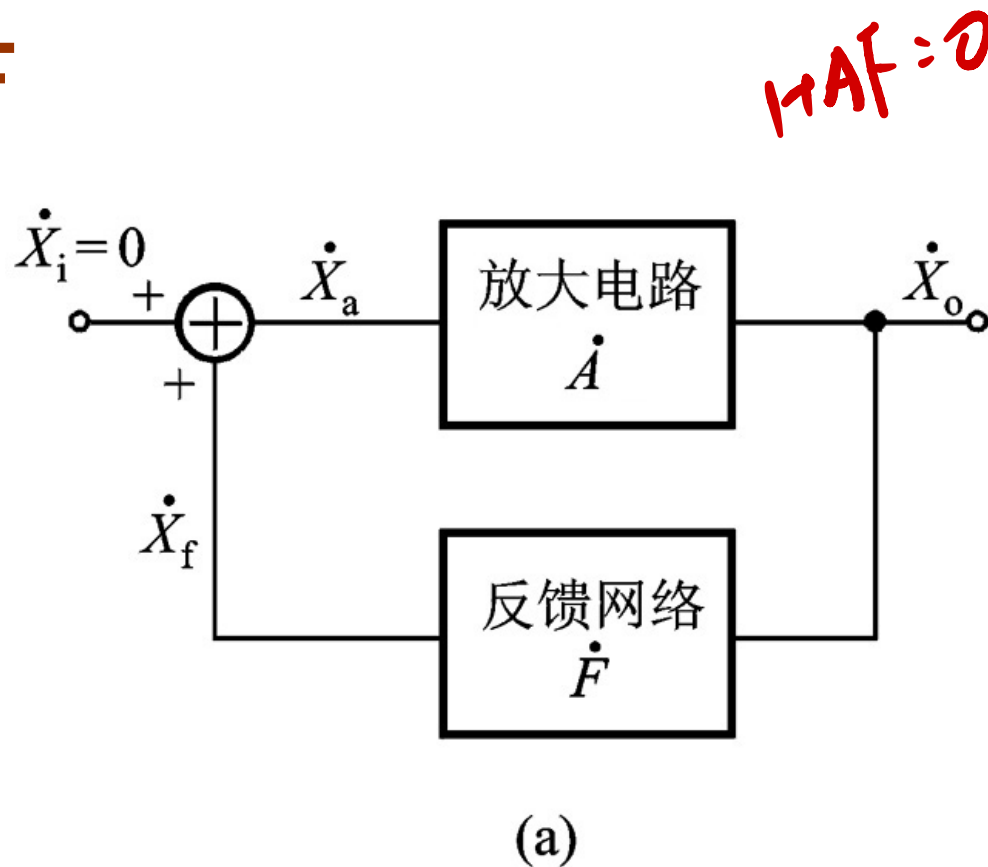
10.5 正弦波振荡电路的振荡条件

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。

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

$A(\omega) \cdot F(\omega) = 1$ 振幅平衡条件

$AF = 1 = \frac{X_f}{X_i}$

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

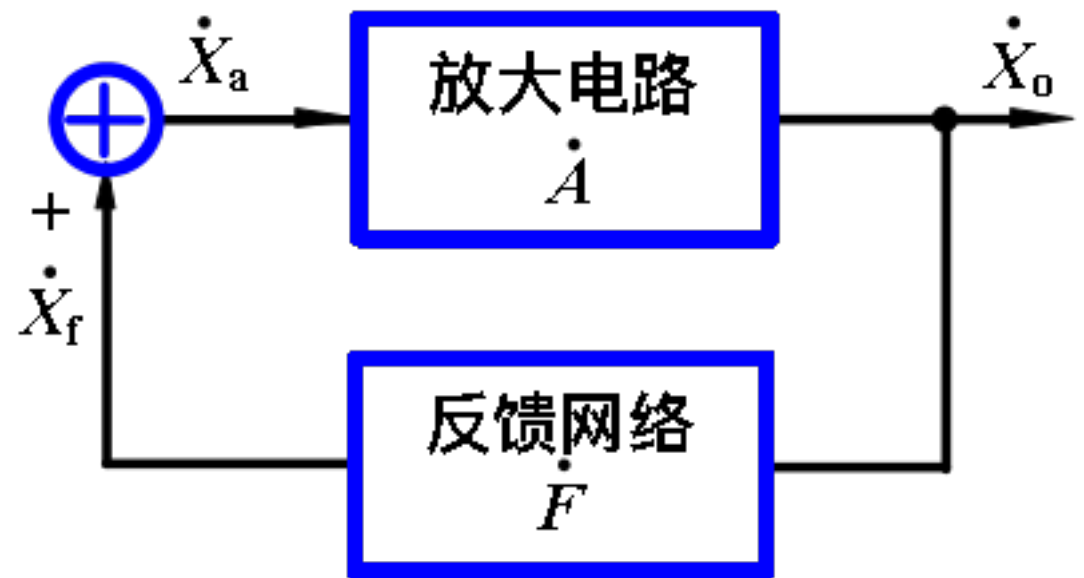
$X_f = X_i$

2. 起振和稳幅

起振条件

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

共模电压



振荡电路是单口网络，无须输入信号就能起振，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。

选频

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 $AF = 1$ 。

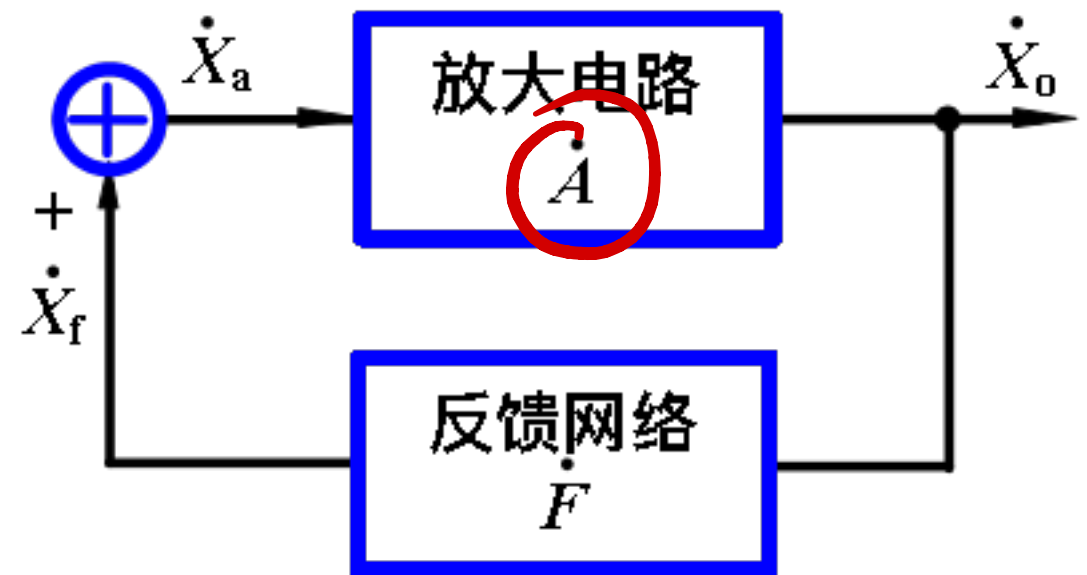
3. 振荡电路基本组成部分

4放大电路（包括负反馈放大电路）

4反馈网络（构成正反馈的）

4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。）

4稳幅环节



10.6 RC正弦波振荡电路

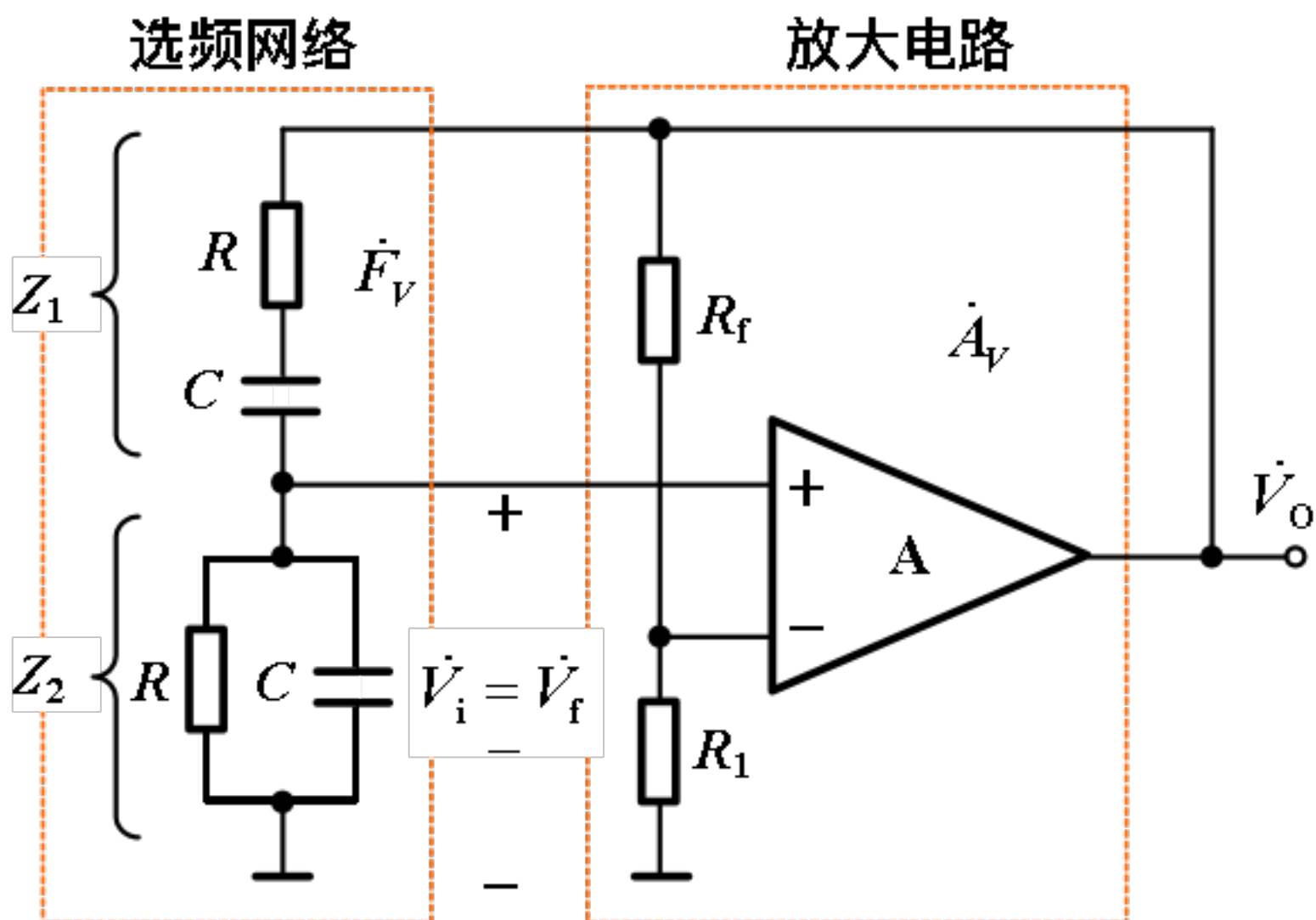
1. 电路组成
2. RC串并联选频网络的选频特性
3. 振荡电路工作原理
4. 稳幅措施
5. 移相式正弦波振荡电路

1. 电路组成

RC 串并 1-4

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

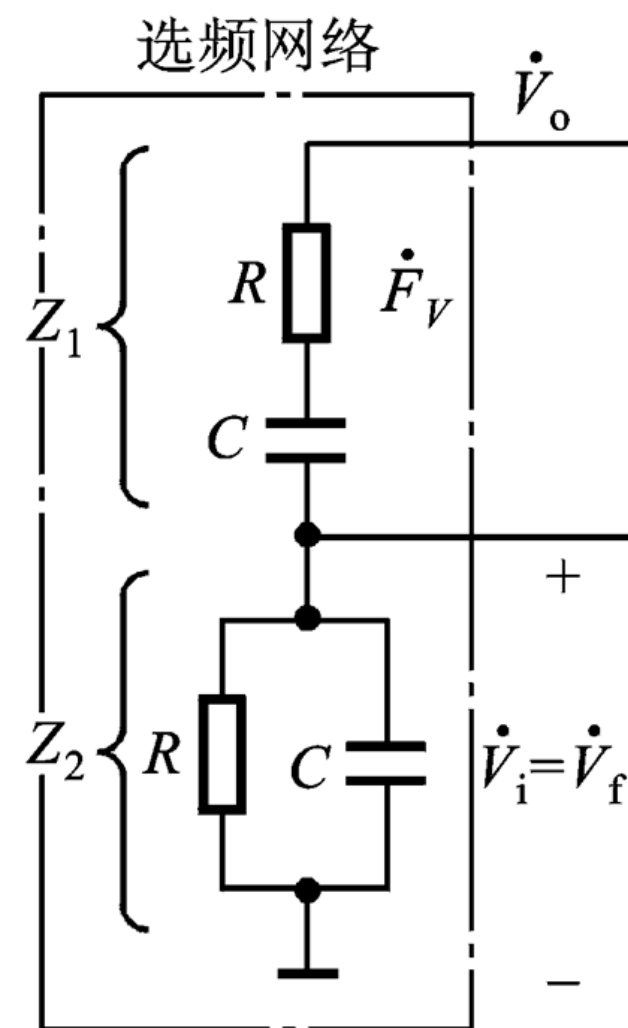
$$F_V(s) = \frac{V_f(s)}{V_o(s)} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{sCR}{1 + 3sCR + (sCR)^2}$$

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

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

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

相频响应 $\varphi_f = -\arctg \frac{(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})}{3}$



2. RC串并联选频网络的选频特性

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

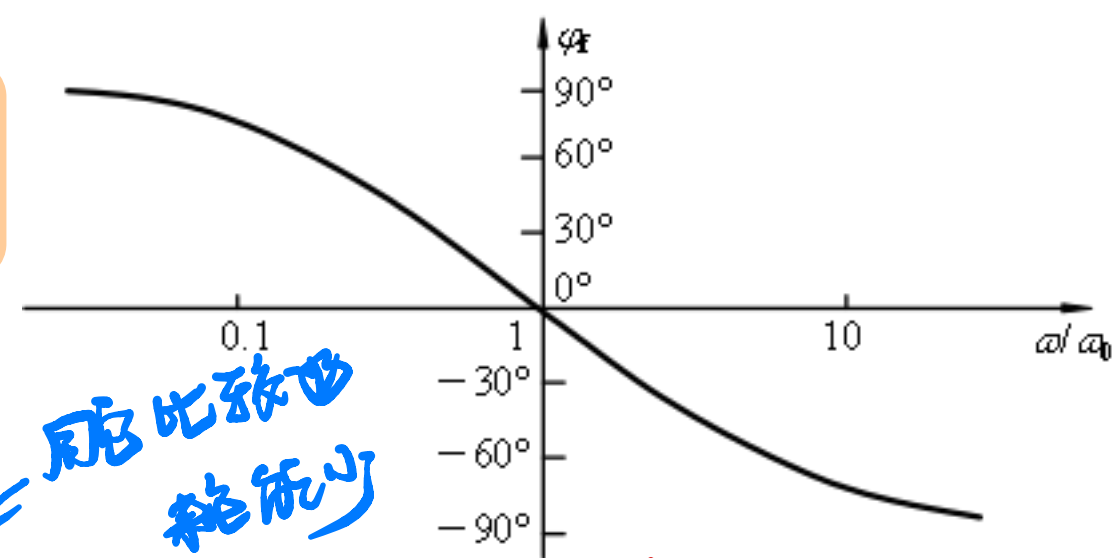
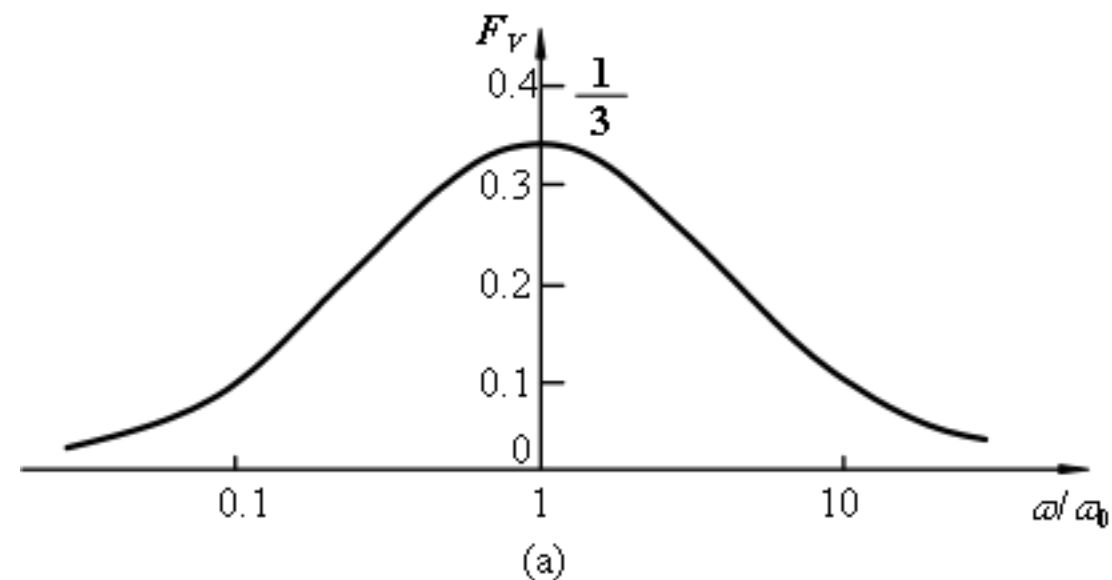
$$\varphi_f = -\operatorname{arctg} \frac{\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}{3}$$

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 $\varphi_f = 0$



$A > 3$
 $1 + \frac{R_2}{R_1} > 3$
 $R_2 > 2R_1$

电阻比张曲 相位少
 $R_2 > 2R_1 \rightarrow$ 正温度系数
 热敏电阻
 负温度系数

3. 振荡电路工作原理

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

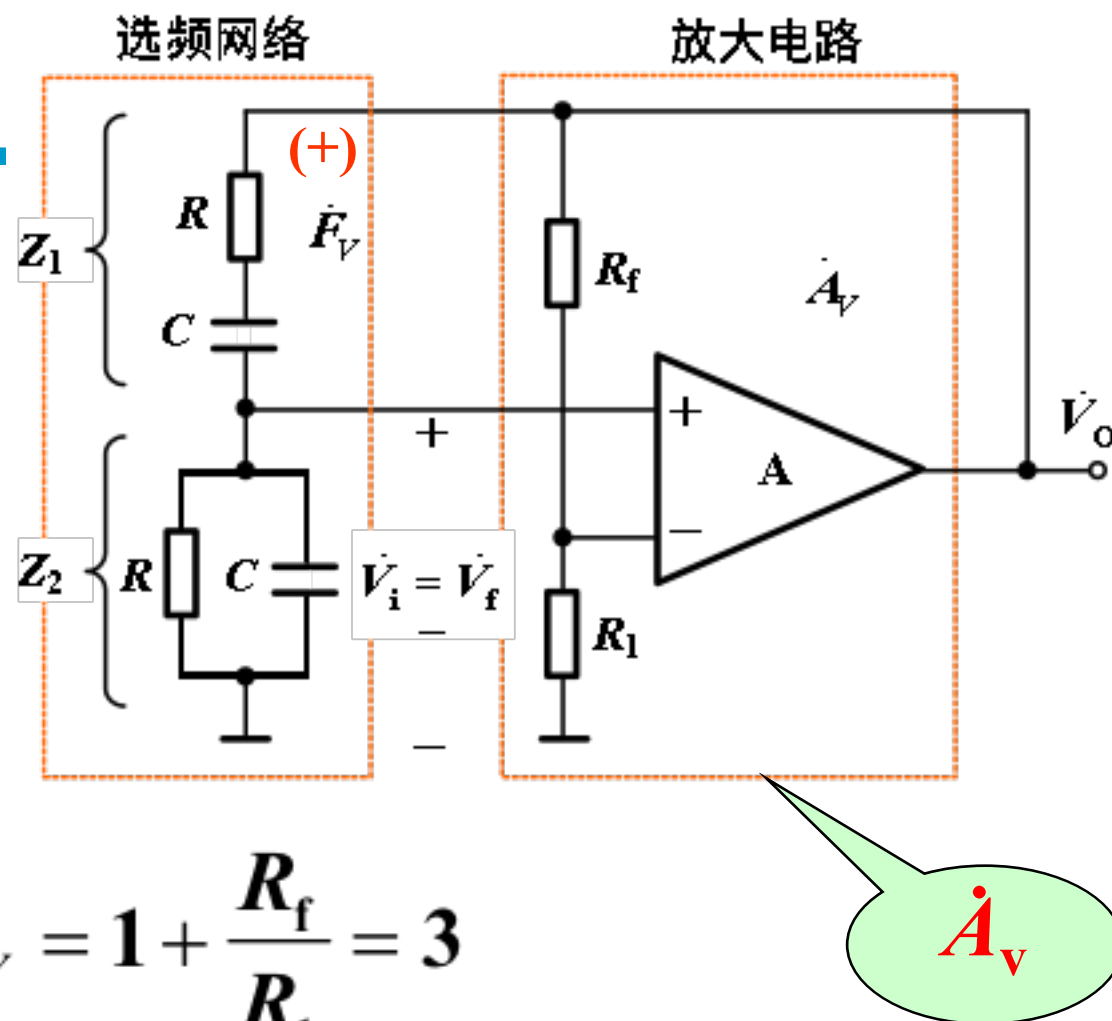
断开环路某一点, 用瞬时极性法判断可知, 电路满足相位平衡条件: $\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi$

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

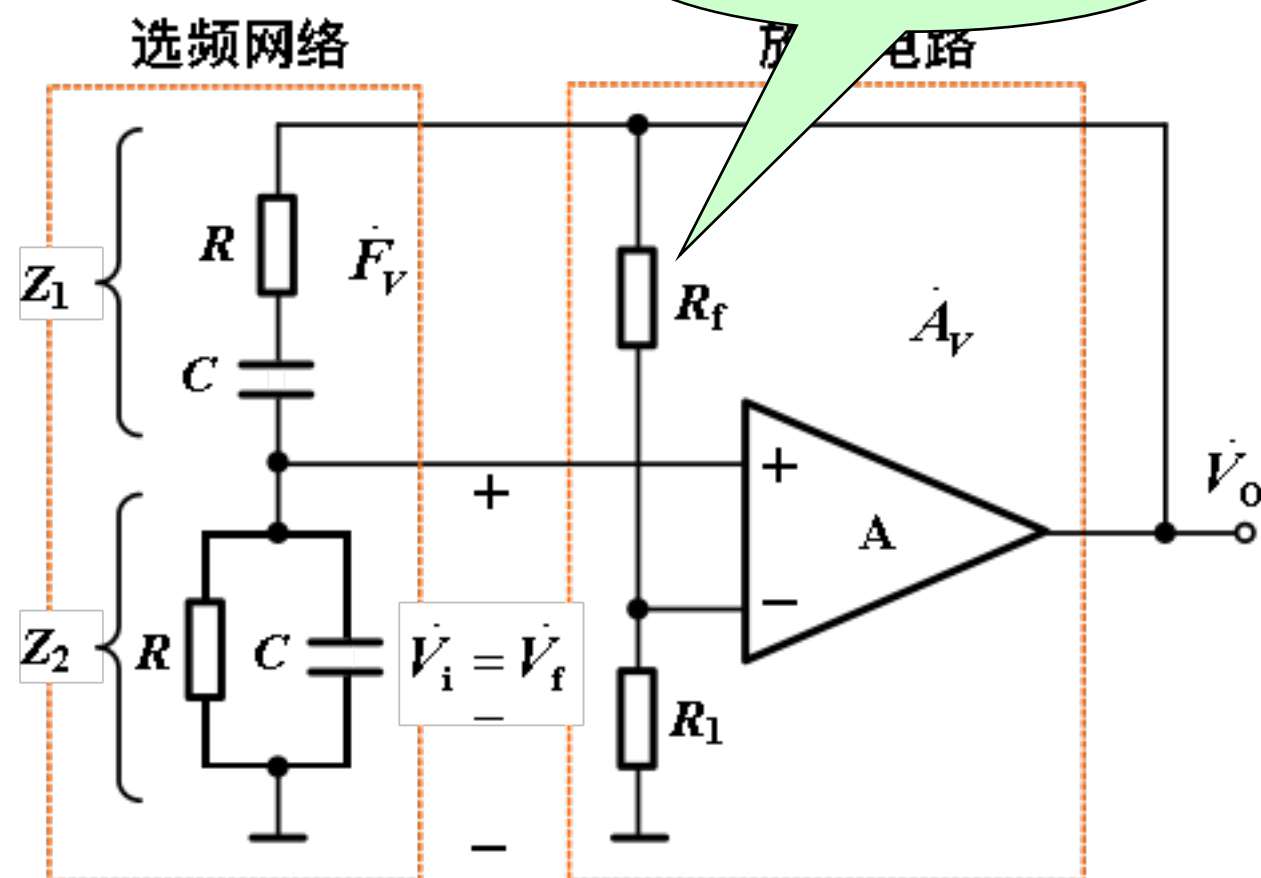
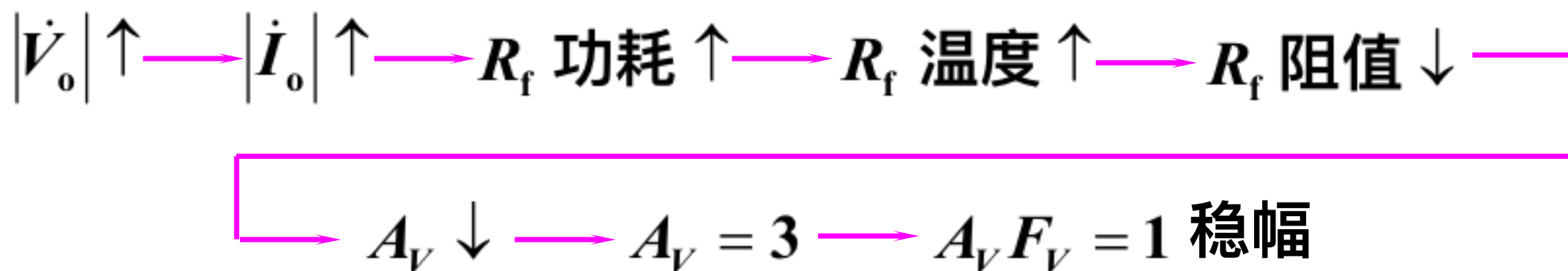
采用非线性元件

4 热敏元件

起振时, $A_V = 1 + \frac{R_f}{R_1} > 3$

即 $A_V F_V > 1$

热敏电阻的作用



4. 稳幅措施

采用非线性元件

4场效应管 (JFET)

D 、 R_4 、 C_3 整流滤波

T 为压控电阻

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

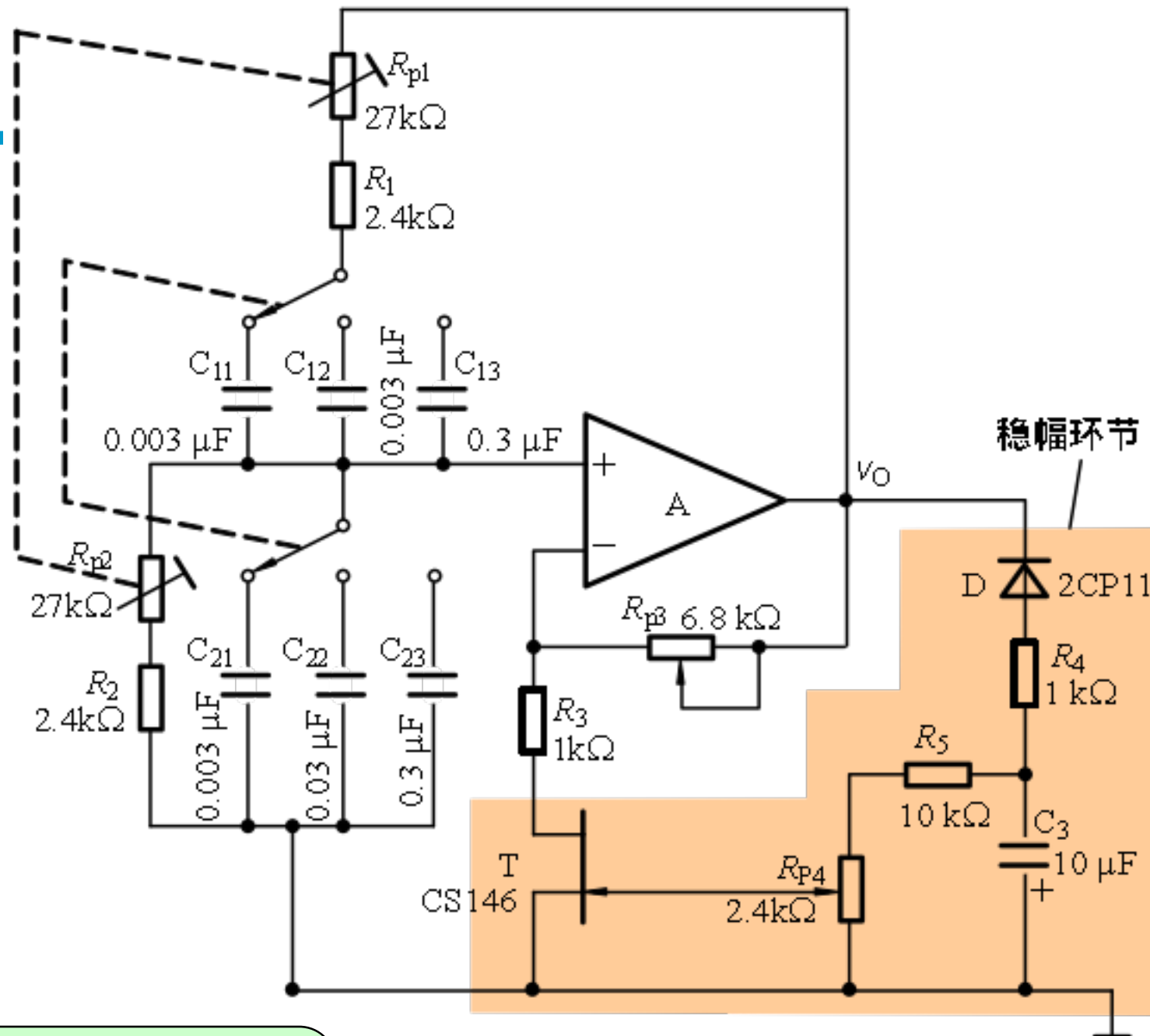
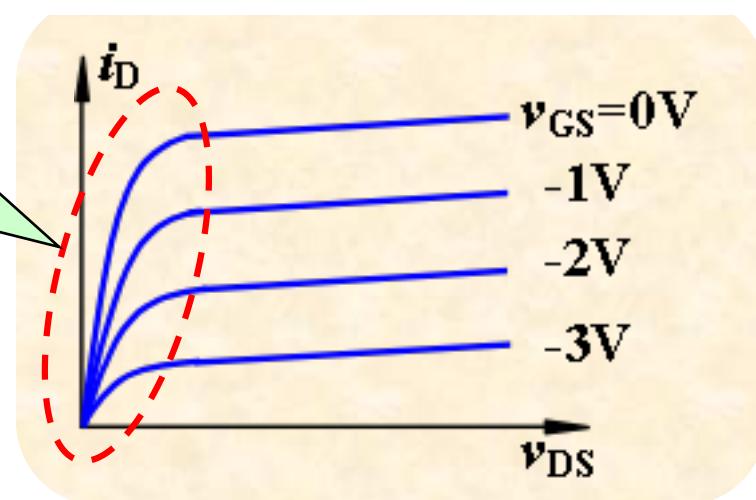
稳幅原理

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

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

$$A_V = 3 \longrightarrow A_V F_V = 1 \text{ 稳幅}$$

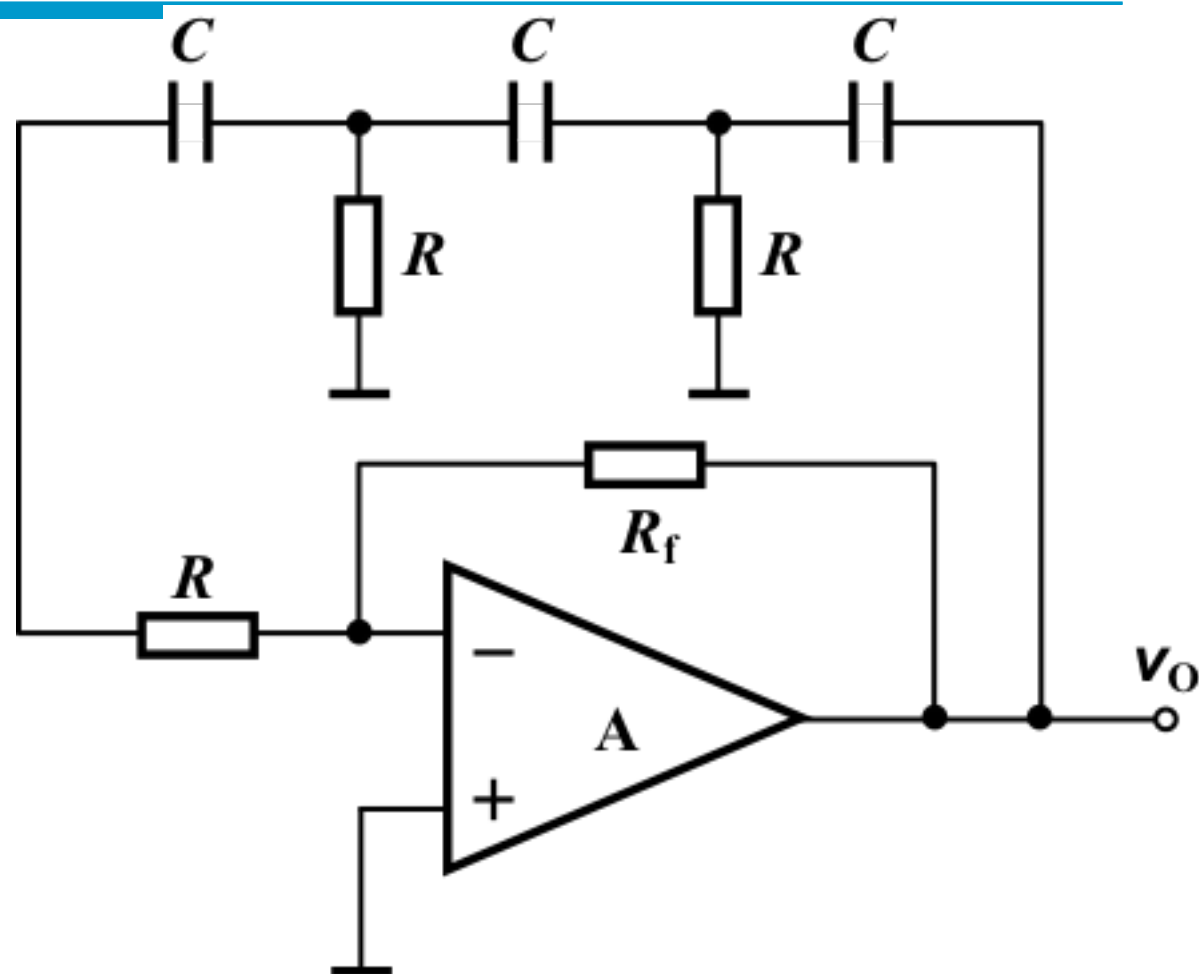
可变电阻区，
斜率随 v_{GS} 不同
而变化



5. 移相式正弦波振荡电路

每节 RC 电路相移小于 90°

当相位移接近 90° 时， R 两端电压接近零，所以，两节 RC 电路组成的反馈网络（兼选频网络）很难既满足相位条件，又满足幅值条件。



采用3节 RC 移相电路，在特定频率 f_0 下移相 180° ，加上放大电路产生的 180° 相移则满足相位平衡条件。

只要适当调节 R_f 的值，使 A_V 适当，便可满足振幅条件，产生正弦振荡。

10.7 LC正弦波振荡电路

10.7.1 LC选频放大电路

10.7.2 变压器反馈式LC振荡电路

10.7.3 三点式LC振荡电路

10.7.4 石英晶体振荡电路

10.7.1 LC选频放大电路

等效损耗电阻

1. 并联谐振回路

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

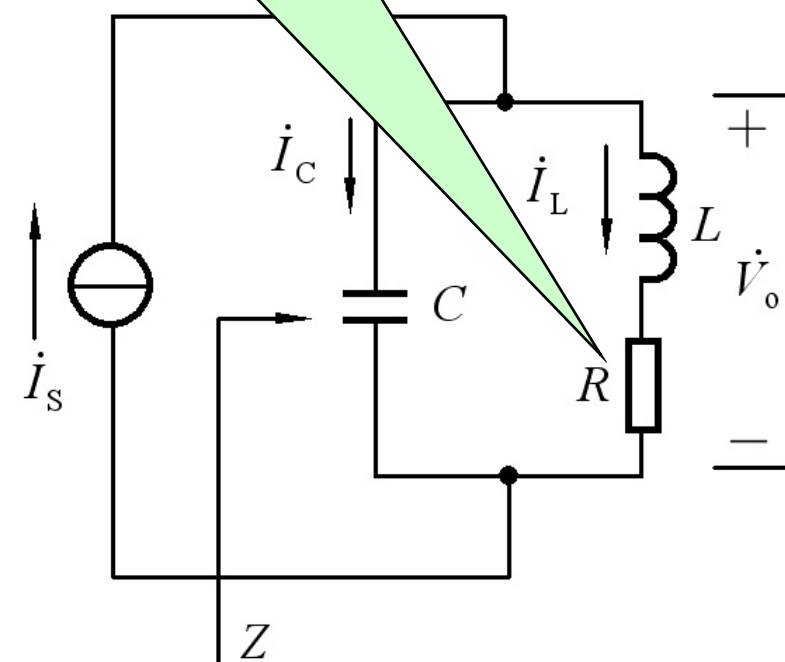
一般有 $R \ll \omega L$ 则 $Z = \frac{L/C}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$

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 $Z_0 = \frac{L}{RC} = Q\omega_0 L = \frac{Q}{\omega_0 C}$

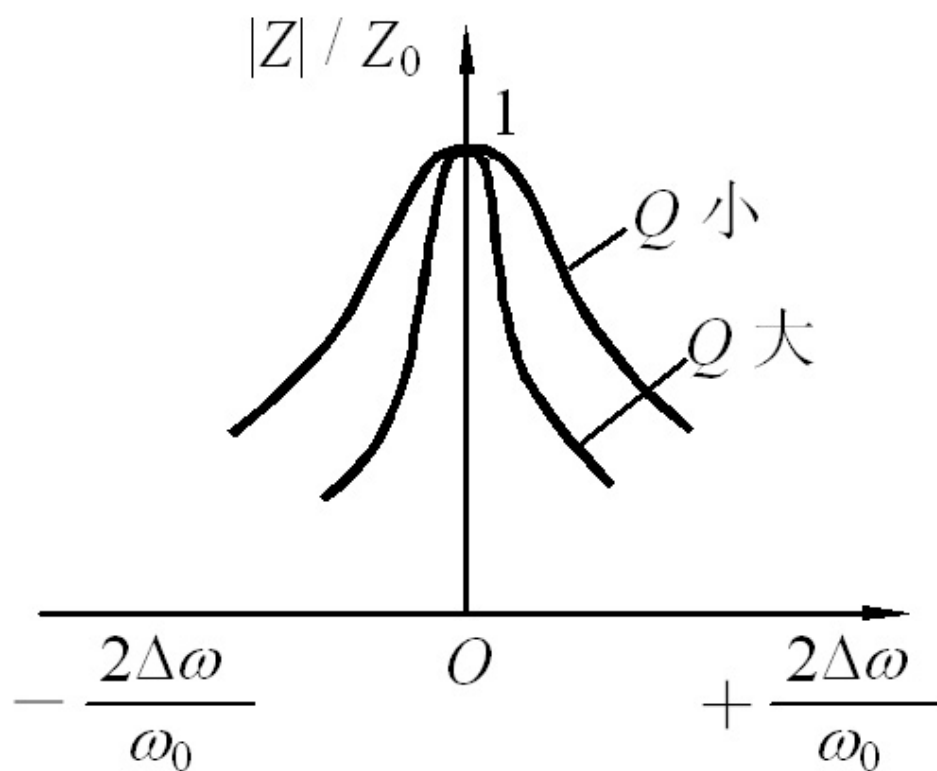
其中 $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ 为品质因数

同时有 $|\dot{I}_c| = Q|\dot{I}_s|$ 即 $|\dot{I}_c| \approx |\dot{I}_L| \gg |\dot{I}_s|$

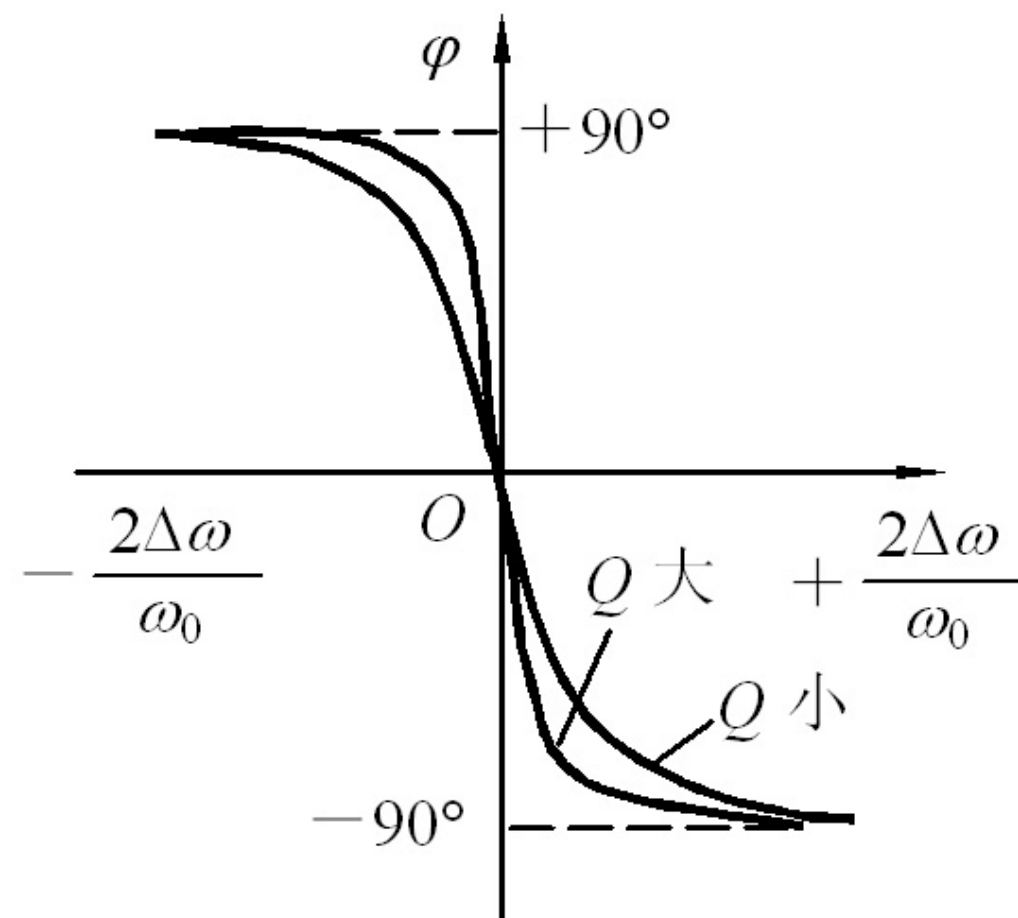


10.7.1 LC选频放大电路

阻抗频率响应



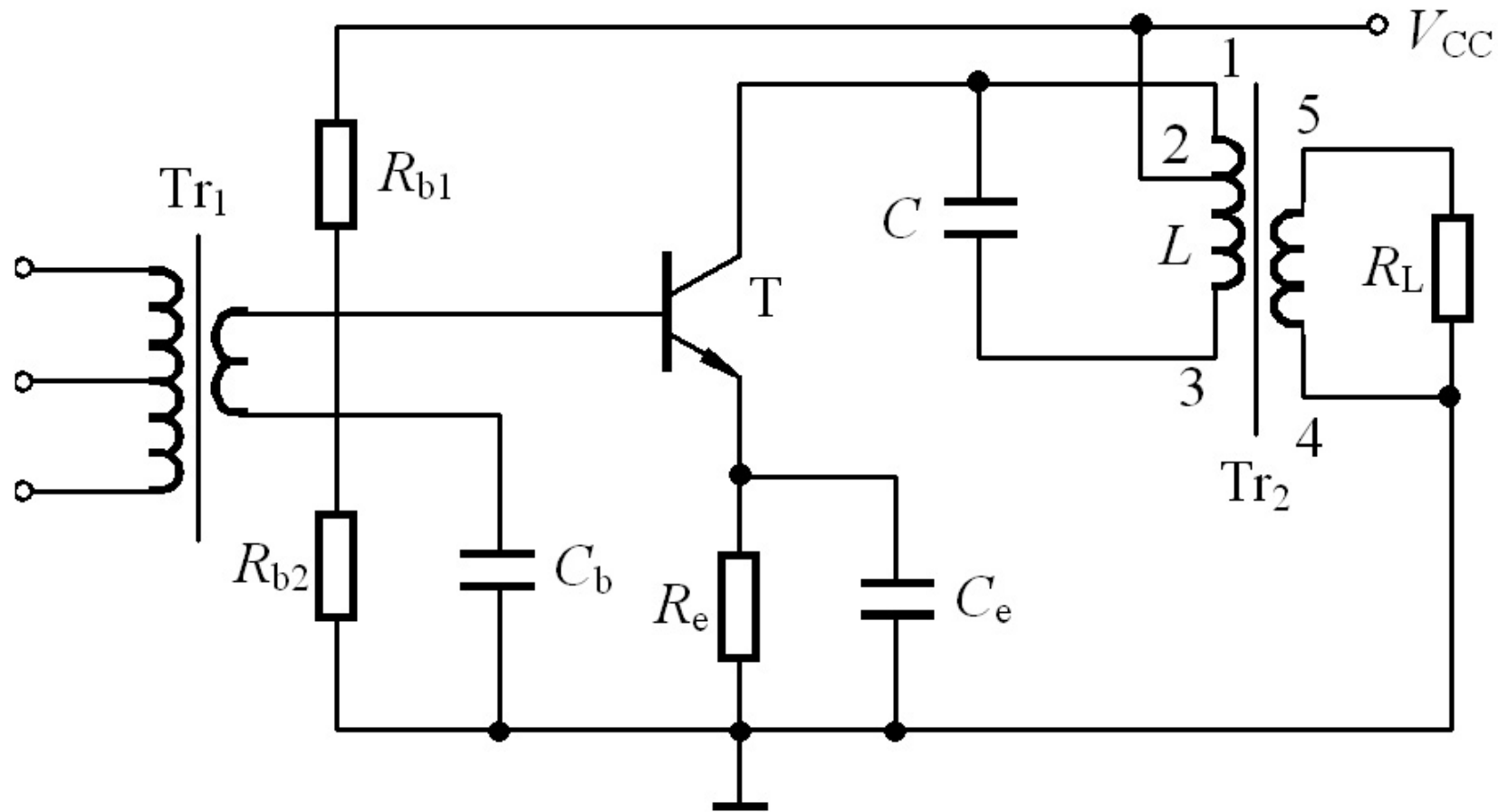
(a) 幅频响应



(b) 相频响应

10.7.1 LC选频放大电路

2. 选频放大电路



10.7.2 变压器反馈式LC振荡电路

(定性分析)

1. 电路结构

2. 相位平衡条件

3. 幅值平衡条件

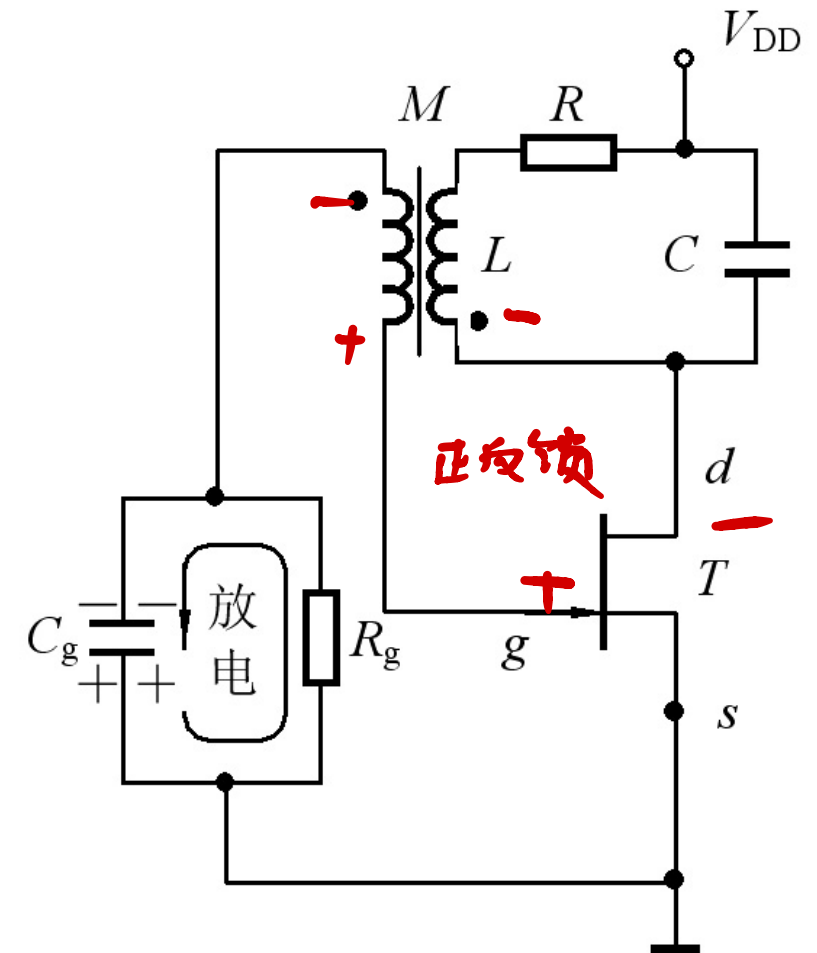
通过选择高增益的场效应管和调整变压器的匝数比，可以满足 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$ 使电路可以起振。

4. 稳幅

BJT进入非线性区，波形出现失真，从而幅值不再增加，达到稳幅目的。

5. 选频

虽然波形出现了失真，但由于LC谐振电路的 Q 值很高，选频特性好，所以仍能选出 ω_0 的正弦波信号。



10.7.3 三点式LC振荡电路

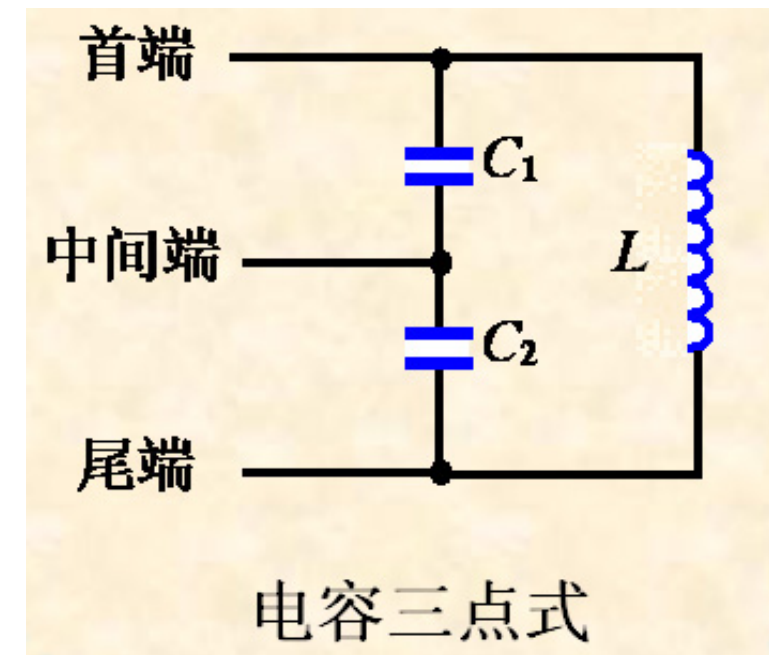
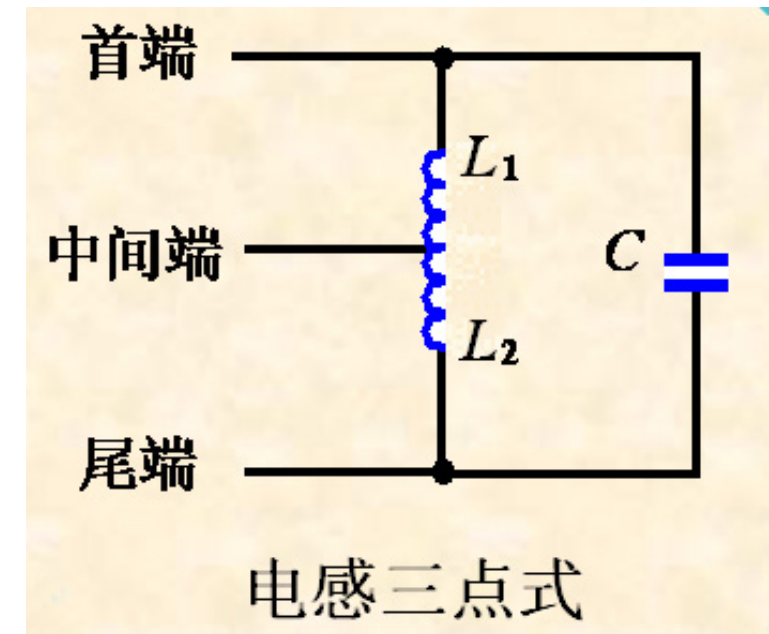
1. 三点式LC并联电路

仍然由LC并联谐振电路构成选频网络

中间端的瞬时电位一定在首、尾端电位之间。

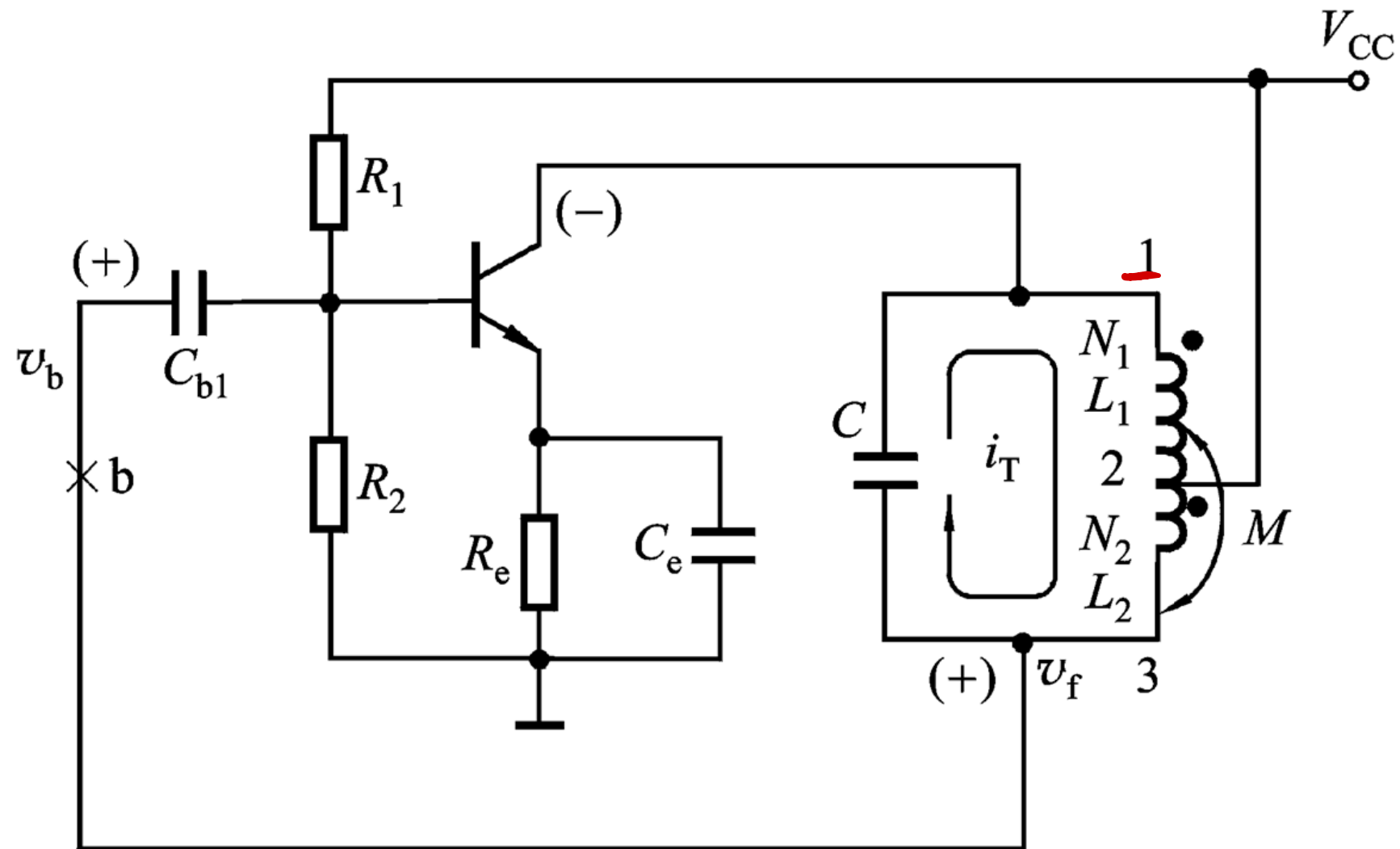
三点的相位关系

- A. 若中间点交流接地，则首端与尾端相位相反。
- B. 若首端或尾端交流接地，则其他两端相位相同。



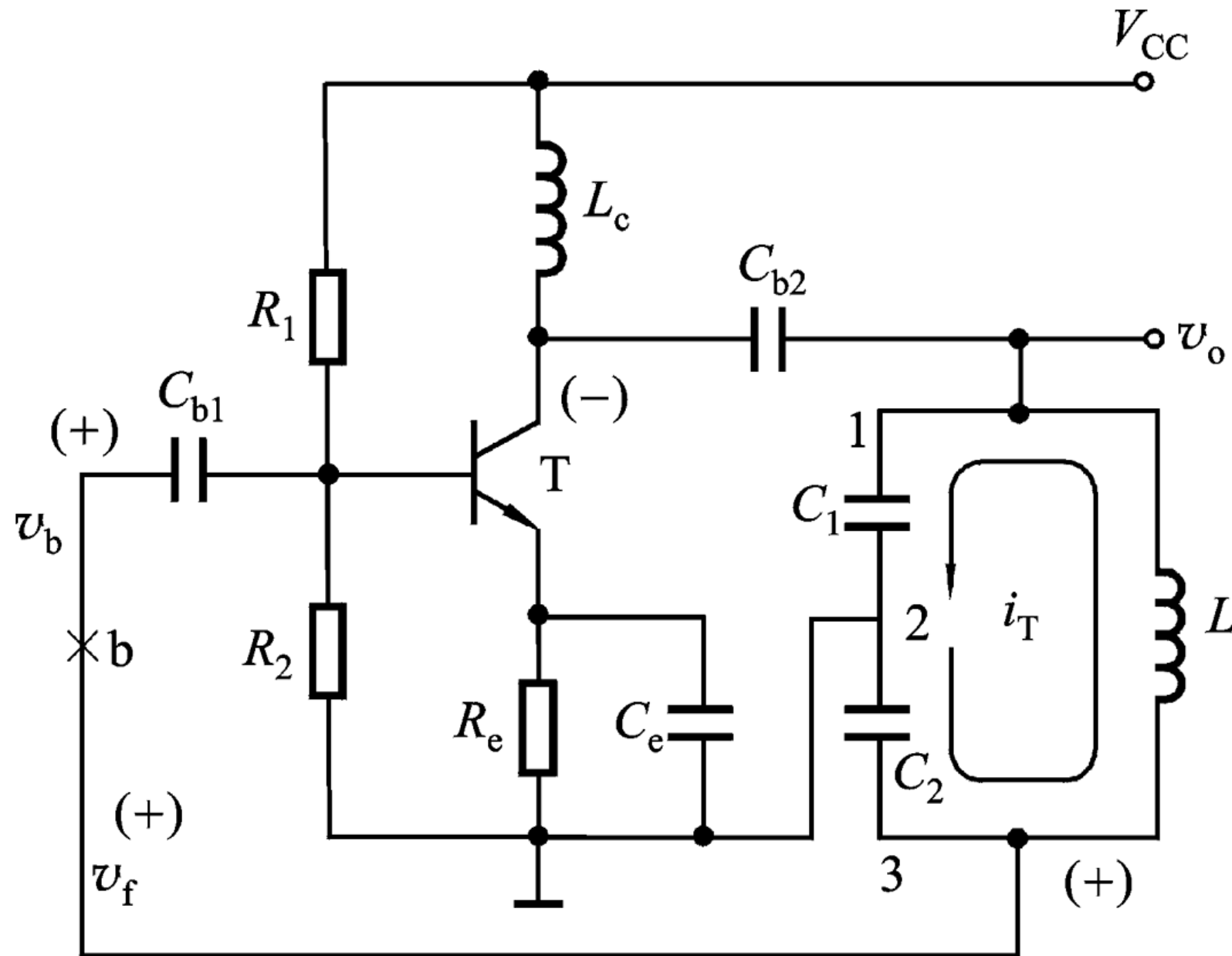
10.7.3 三点式LC振荡电路

2. 电感三点式振荡电路



10.7.3 三点式LC振荡电路

3. 电容三点式振荡电路



10.7.4 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

10.7.4 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

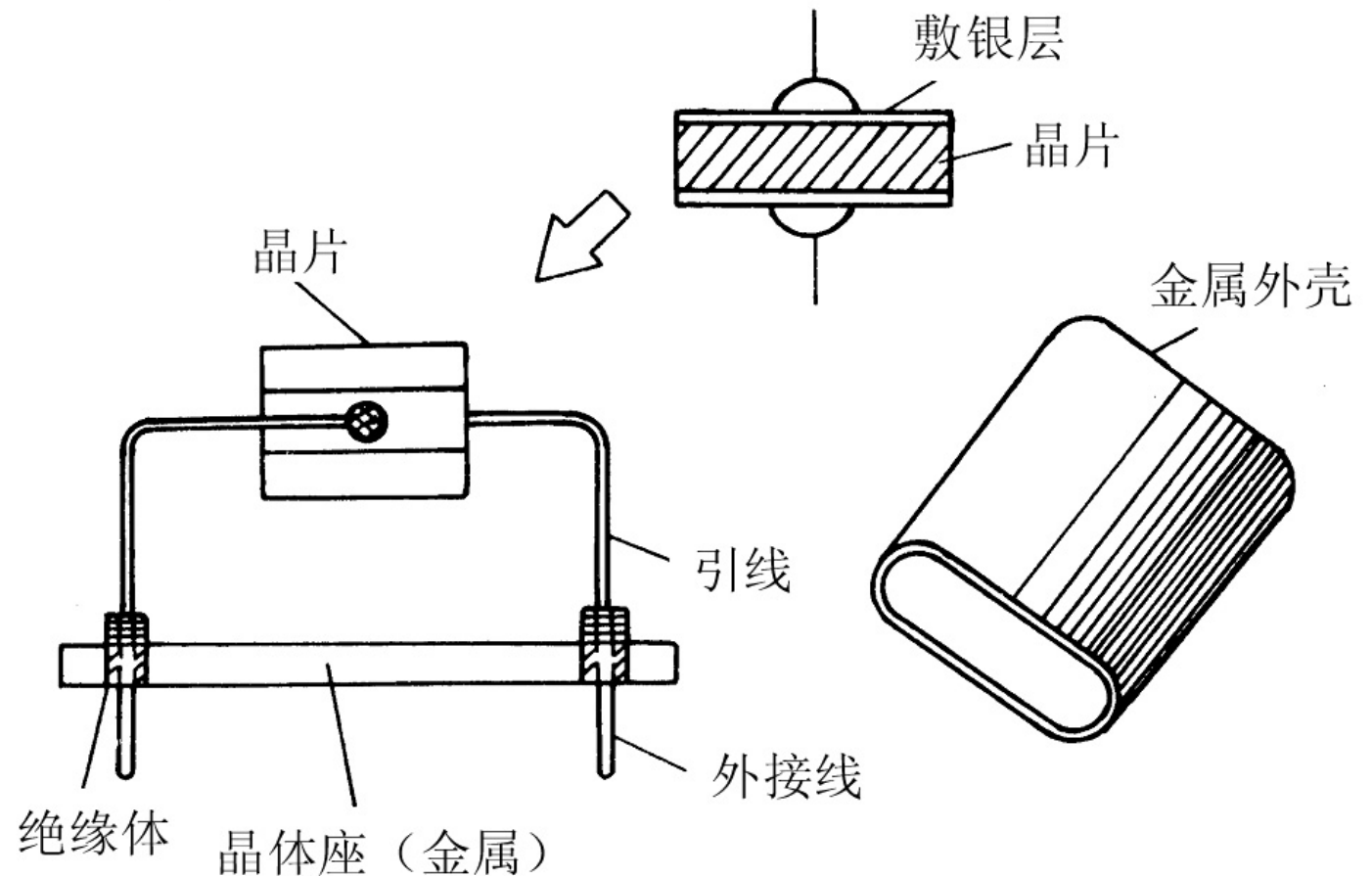
极板间加电场

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**

10.7.4 石英晶体振荡电路

2. 石英晶体的基本特性与等效电路

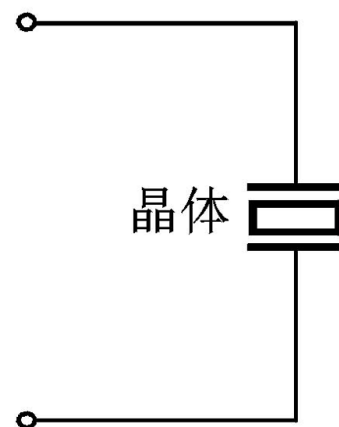
等效电路

特性

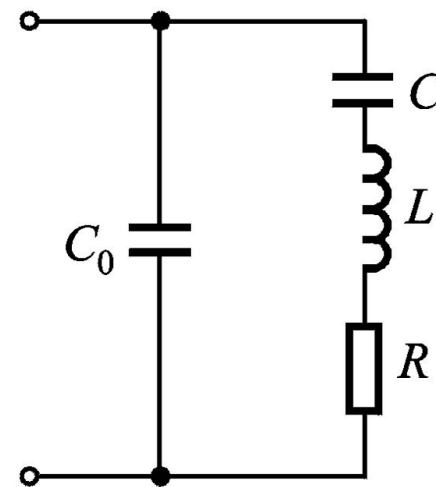
A. 串联谐振

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

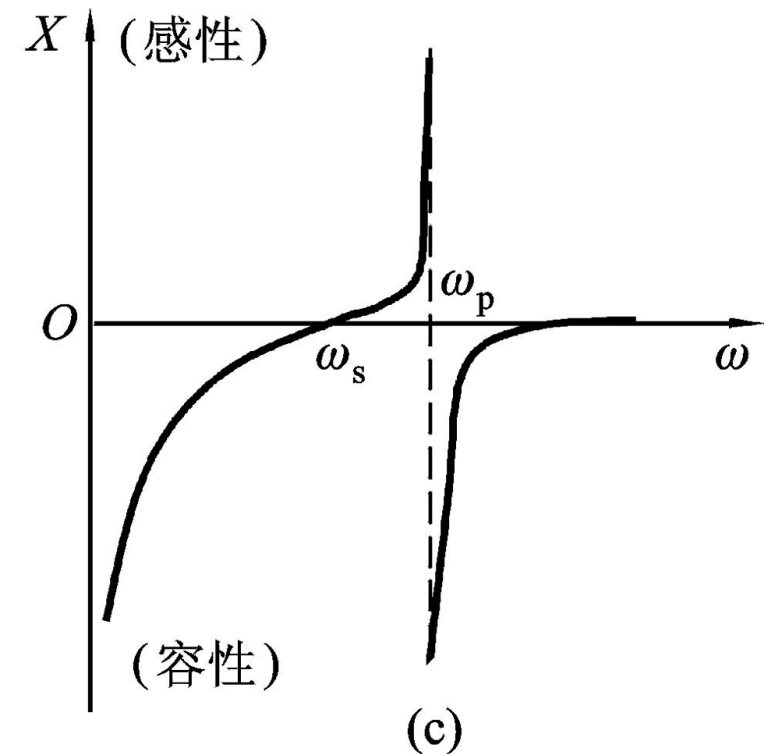
晶体等效阻抗为纯阻性



(a)



(b)



(c)

(a) 代表符号

(b) 电路模型

(c) 电抗-频率响应特性

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

10.7.4 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

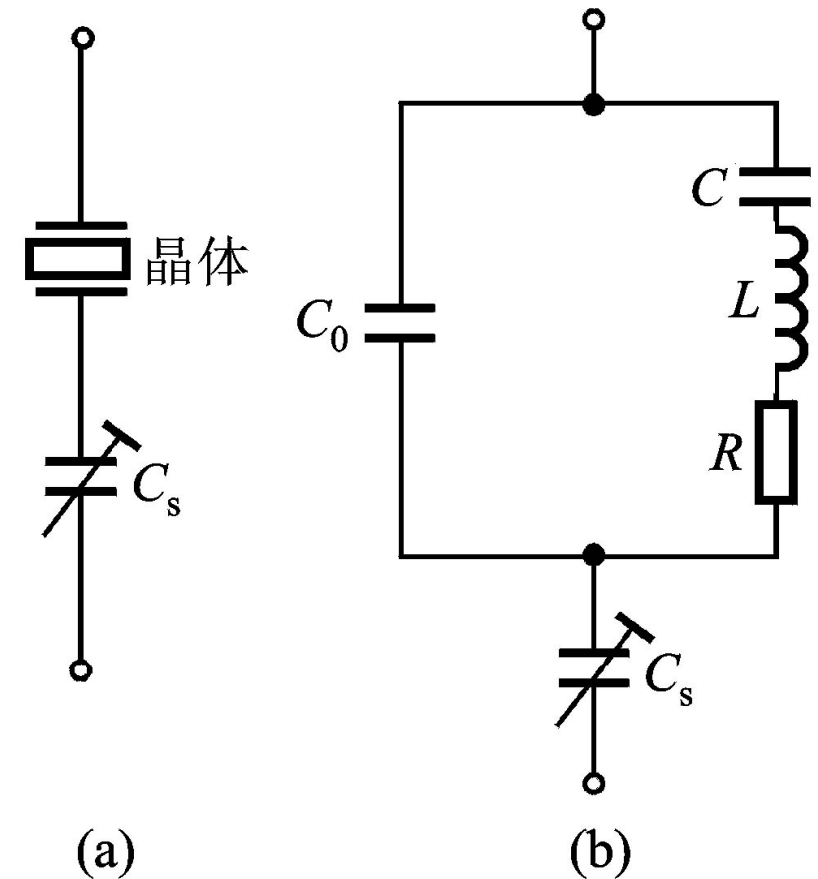
$$f'_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_0 + C_s}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0 + C_s}}$$

由于 $C \ll C_0 + C_s$

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

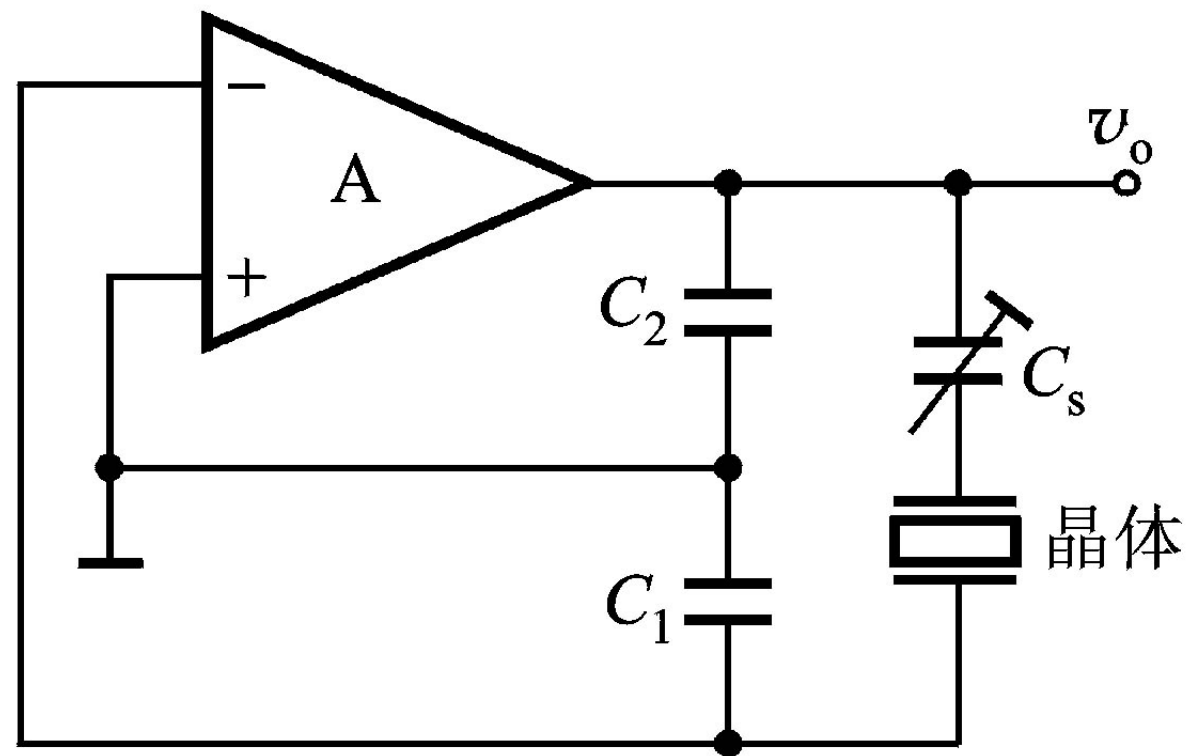
由此看出 $C_s \rightarrow 0$ 时, $f'_s = f_p$; $C_s \rightarrow \infty$ 时, $f'_s = f_s$

调整 C_s 可使 f'_s 在 f_s 和 f_p 之间变化



10.7.4 石英晶体振荡电路

3. 石英晶体振荡电路



10.8 非正弦信号产生电路

10.8.1 电压比较器

10.8.2 方波产生电路

10.8.3 锯齿波产生电路

10.8.1 电压比较器

1. 单门限电压比较器

特点：开环，**虚短**不成立

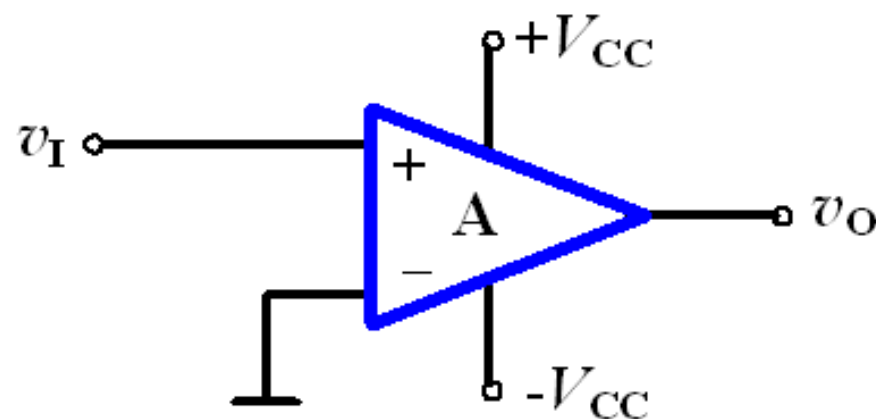
增益 A_0 大于 10^5

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

$$V_O = A(v_P - v_N)$$

$$R_i \rightarrow \infty \Rightarrow i_P = i_N = 0$$

运算放大器工作在非线性状态下



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

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

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

(过零比较器)

10.8.1 电压比较器

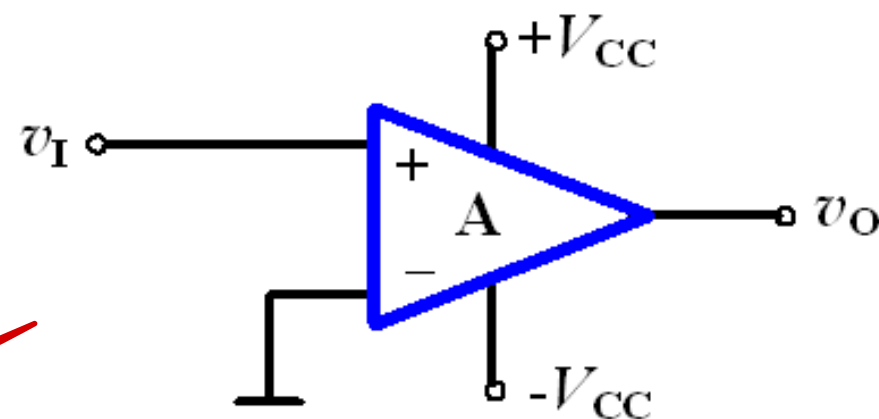
1. 单门限电压比较器

特点：开环，**虚短**不成立

增益 A_0 大于 10^5

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

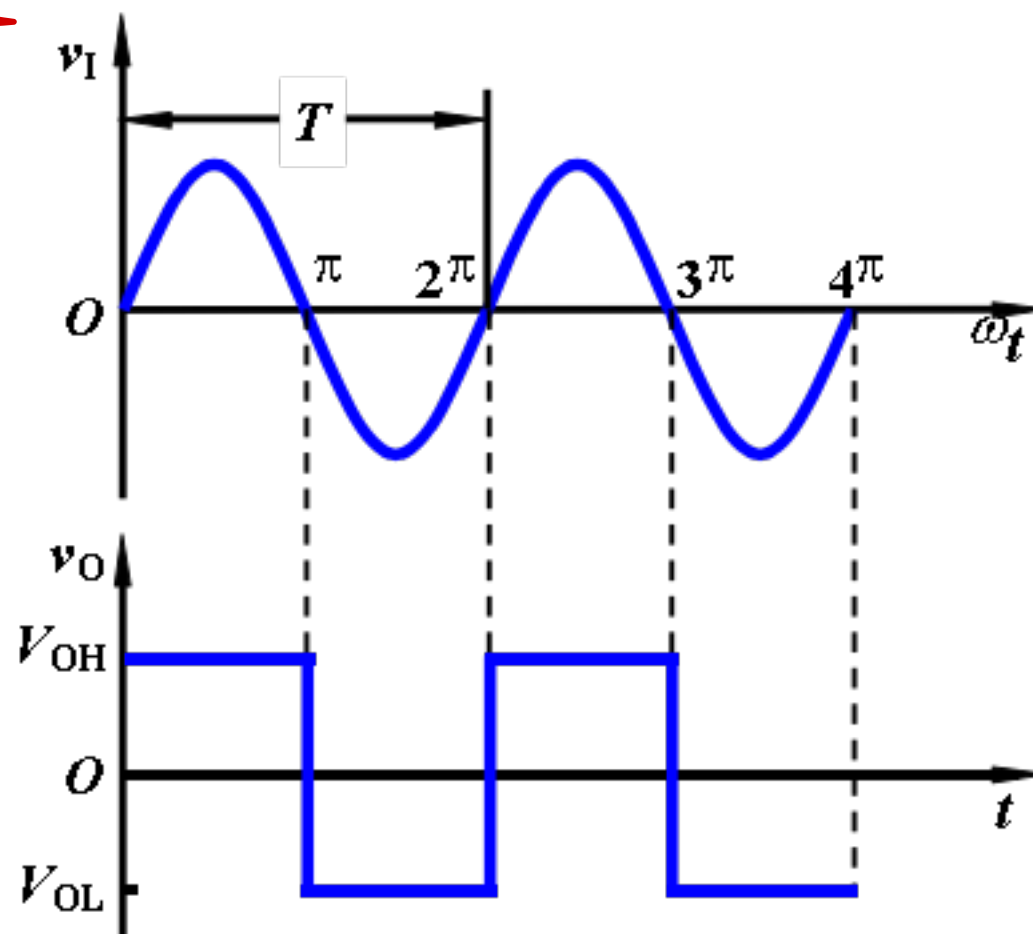
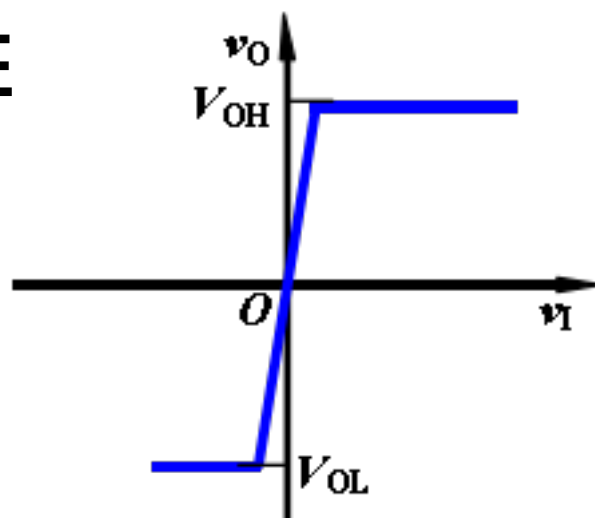
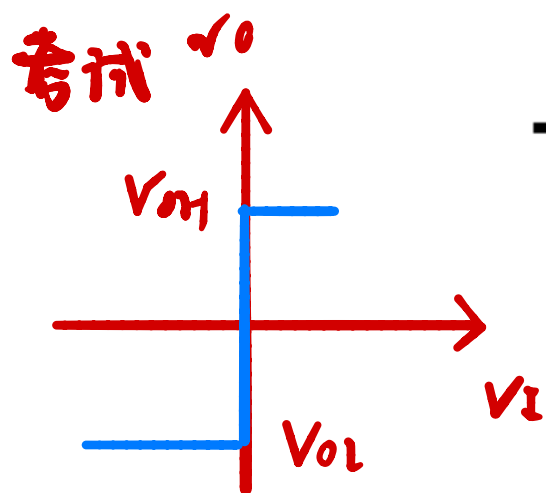
转换



(1) 过零比较器

输入为正负对称的正弦波时，输出为方波。

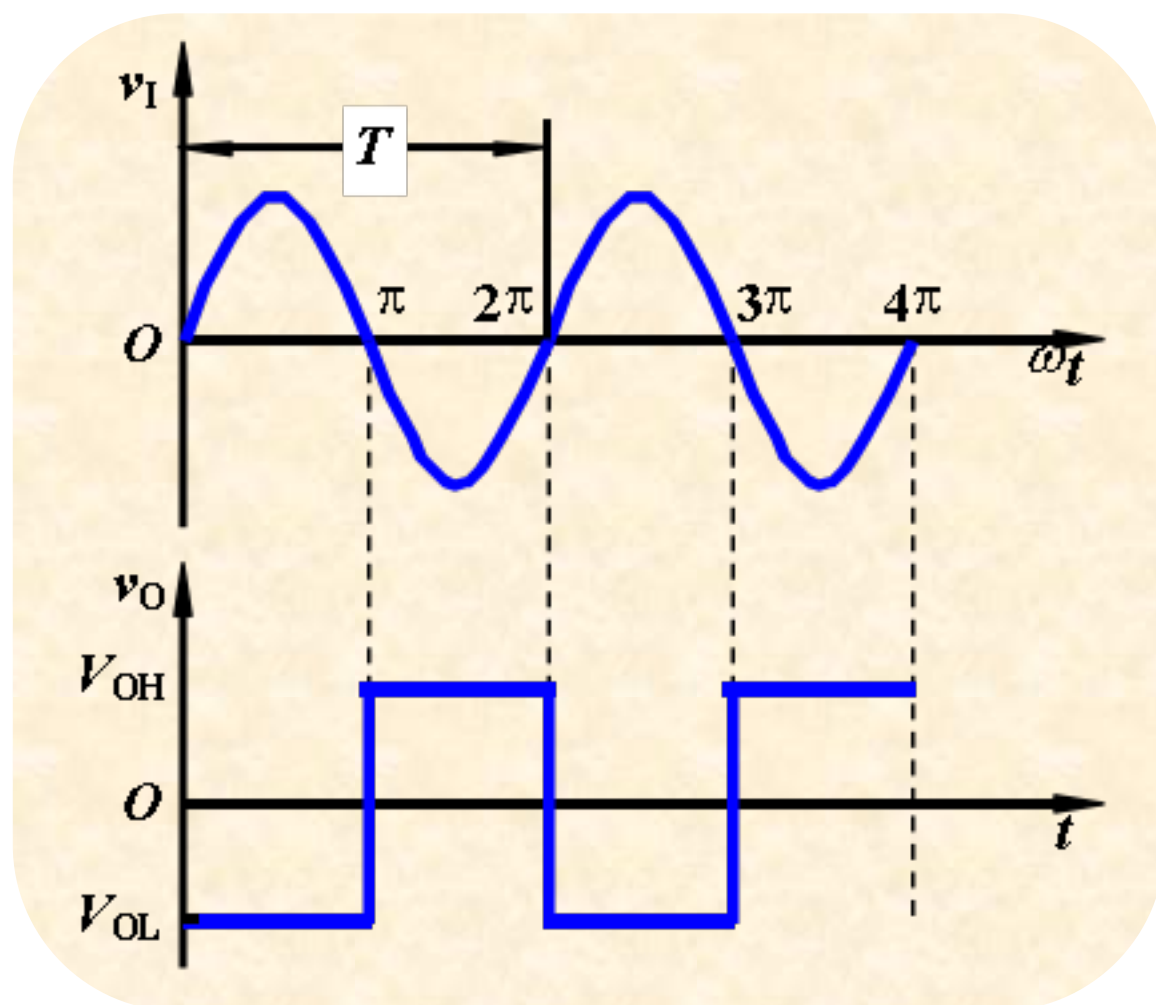
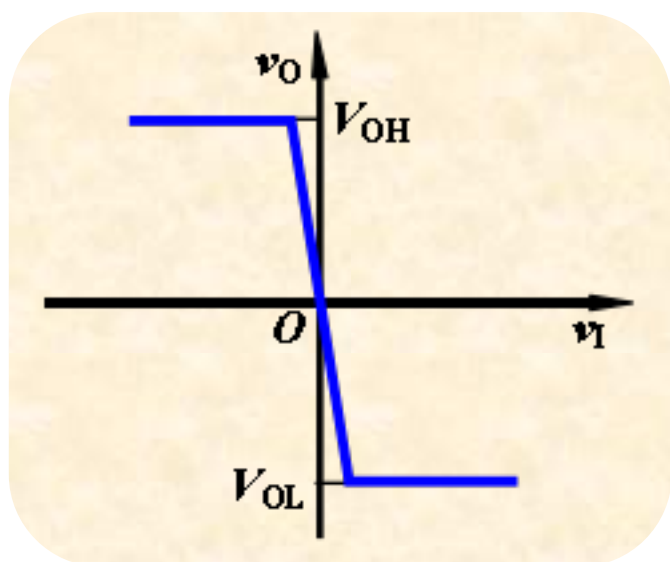
电压传输特性



思考

1. 若过零比较器如左图所示，则它的电压传输特性将是怎样的？

2. 输入为正负对称的正弦波时，输出波形是怎样的？

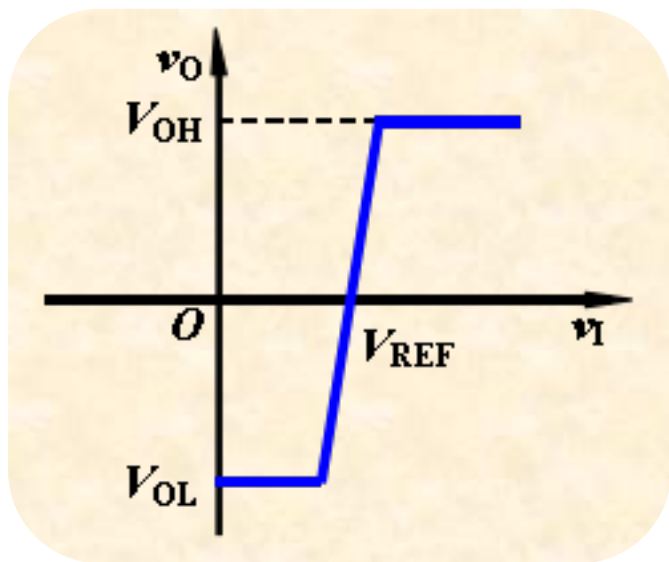


10.8.1 电压比较器

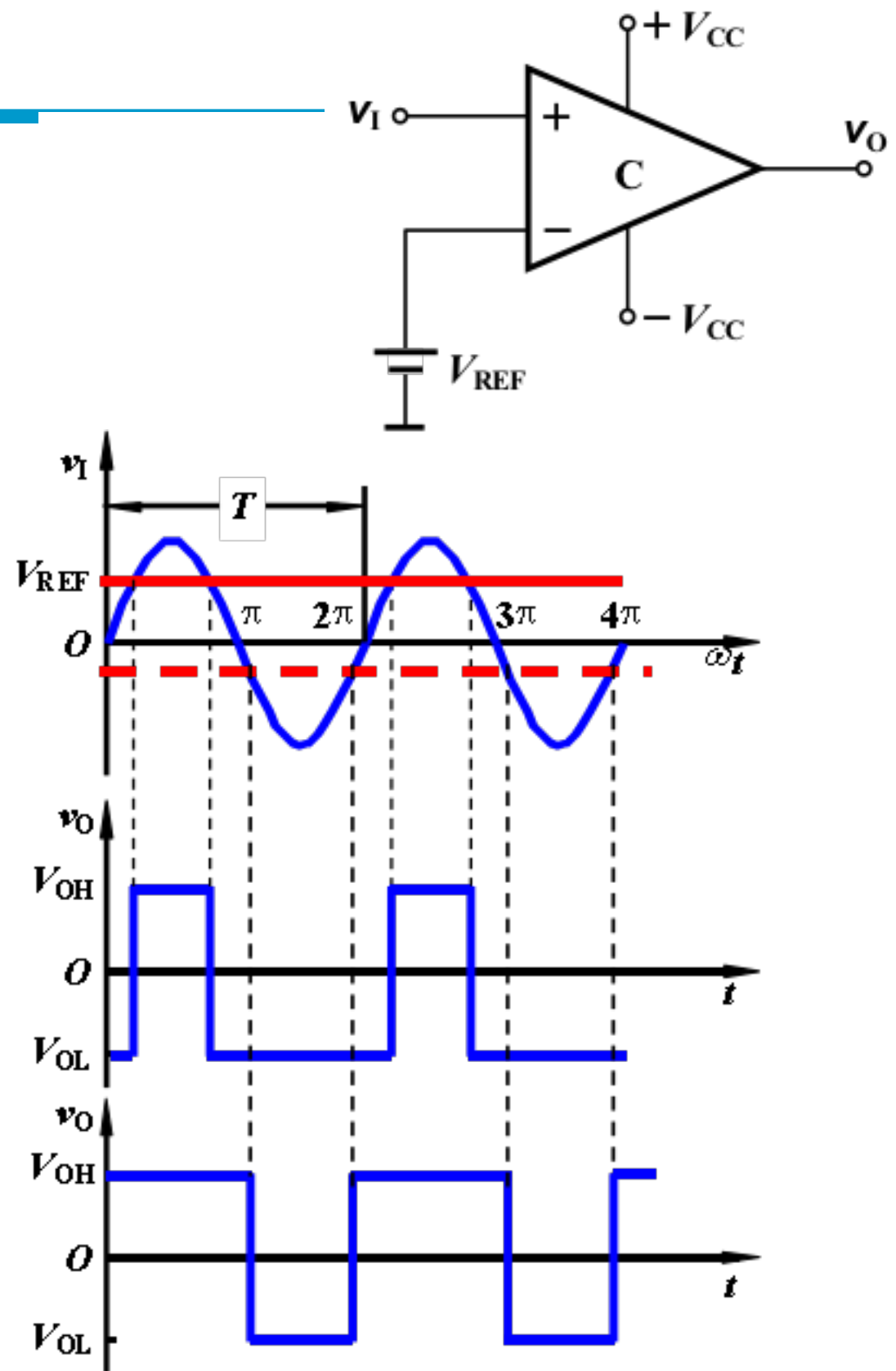
1. 单门限电压比较器

(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

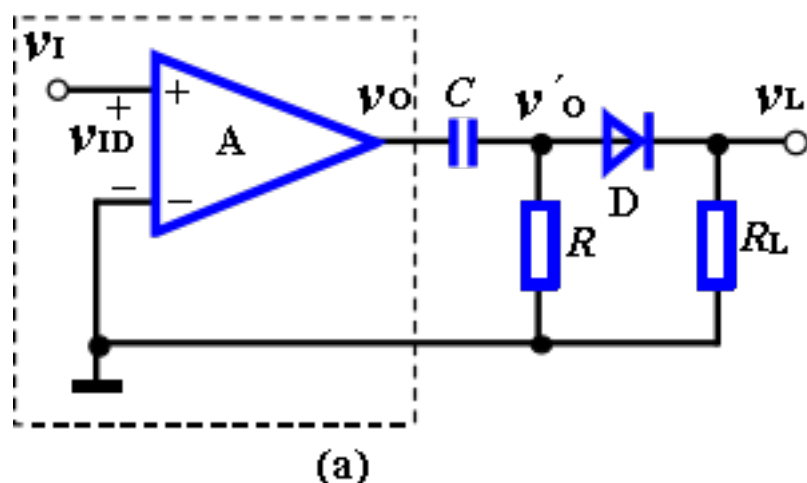


输入为正负对称的正弦波时，输出波形如图所示。

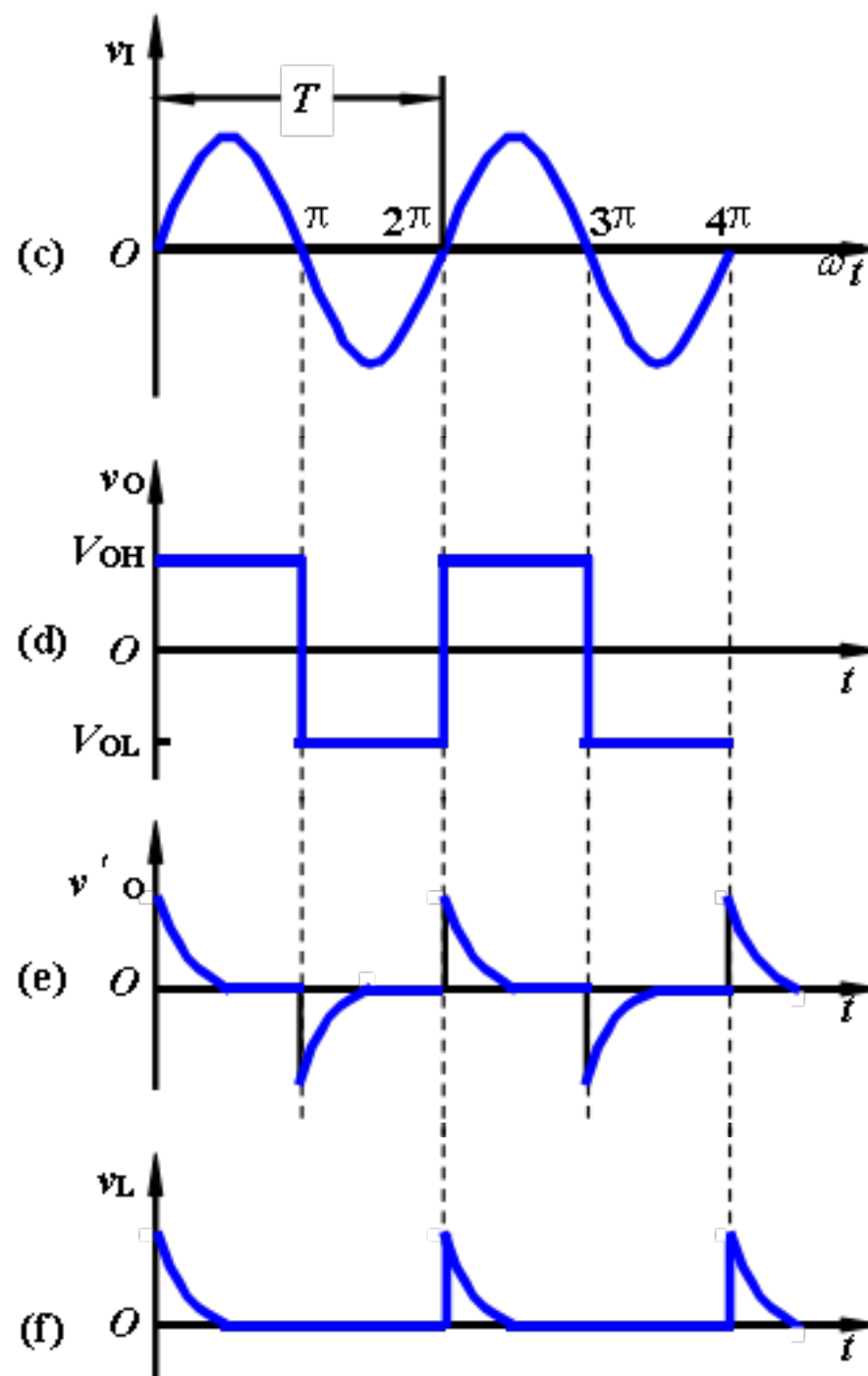


例

电路如图所示，当输入信号如图c所示的正弦波时，定性画出 v_o 、 v'_o 及 v_L 的波形。



- 解：
- (1) A 构成过零比较器
 - (2) RC 为微分电路，
 $RC \ll T$
 - (3) D 削波（限幅、检波）

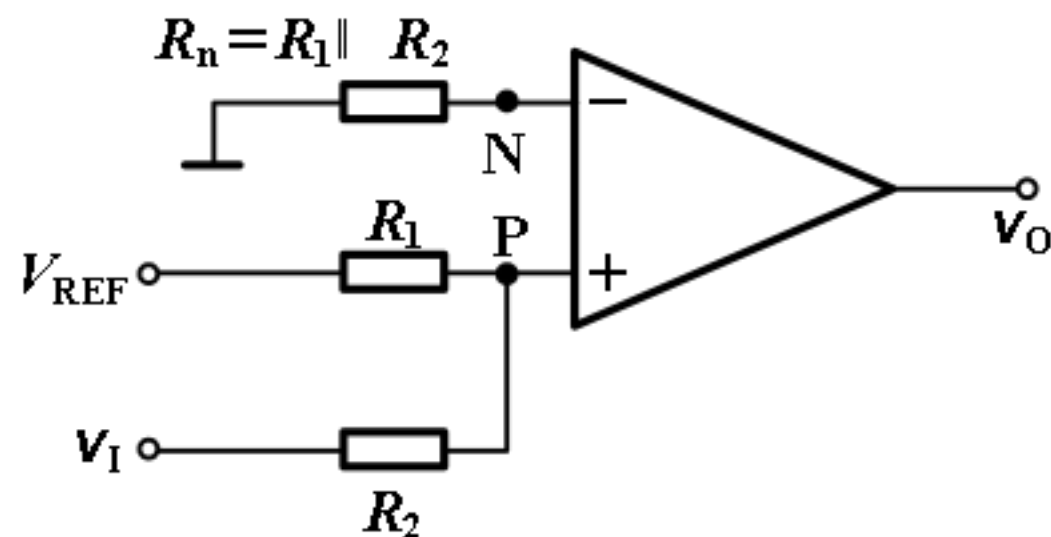


例

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：利用叠加原理可得

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



理想情况下，输出电压发生跳变

时对应的 $V_P = V_N = 0$ ，即

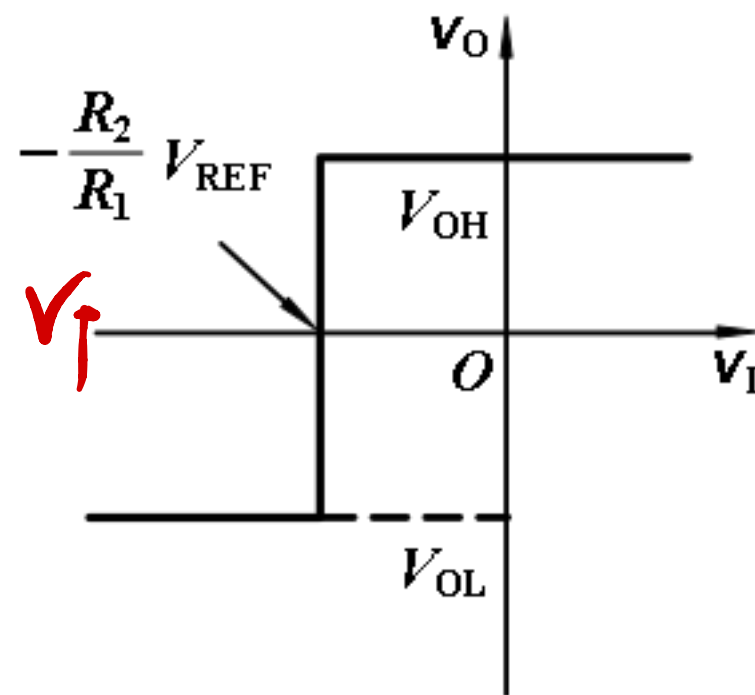
$$R_2 V_{REF} + R_1 V_I = 0$$

门限电压

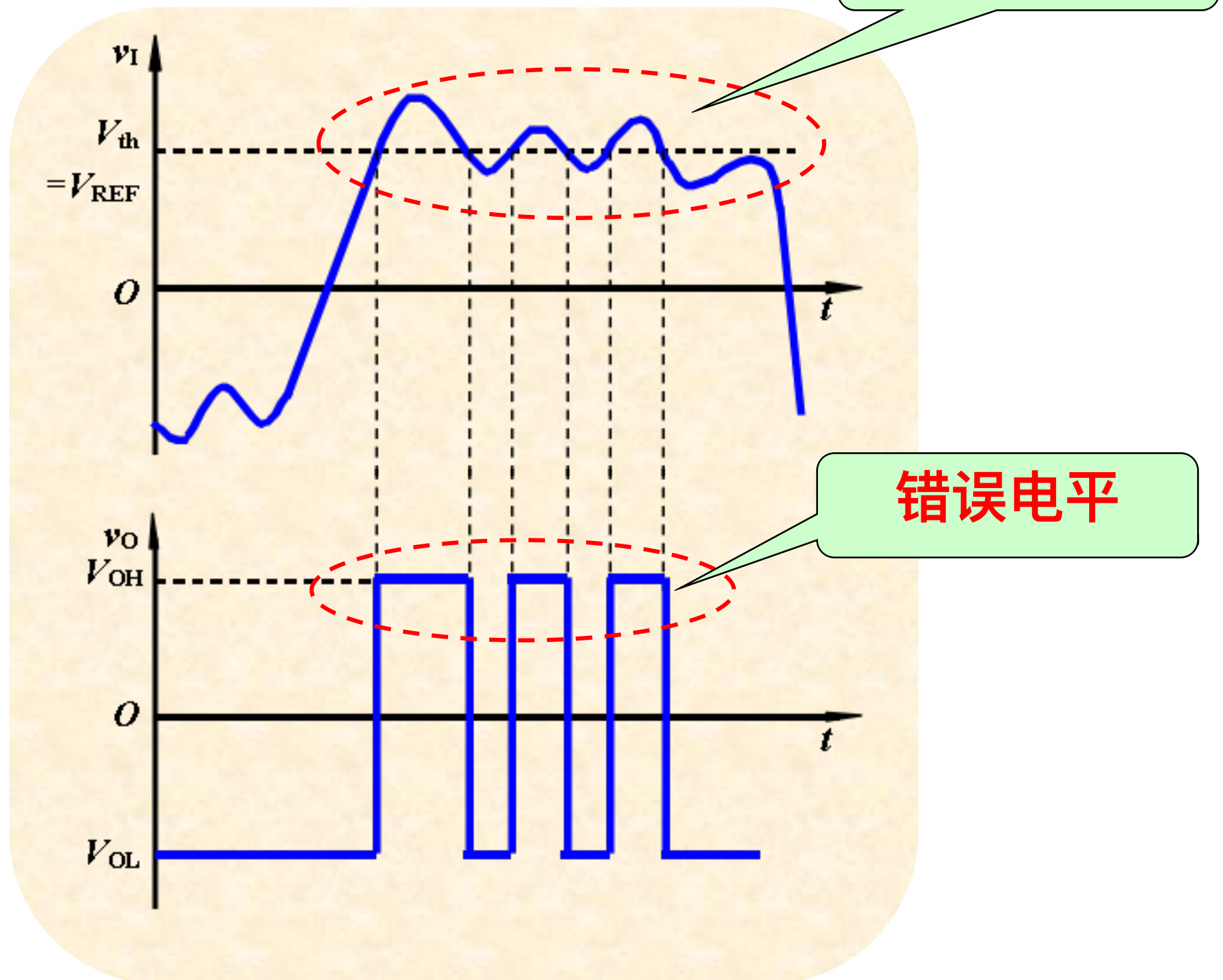
$$V_T = (V_I =) -\frac{R_2}{R_1} V_{REF}$$

令 $V_P = V_N$

把 V_I 换成 V_T



单门限比较器的抗干扰能力



10.8.1 电压比较器

2. 迟滞比较器

(1) 电路组成

(2) 门限电压

$$V_P = \frac{V_O - V_{N27}}{R_1 + R_2} R_2 + V_{REF}$$

$$V_P \text{ 为门限电压, } = \frac{R_1 V_{N27} + V_O R_2}{R_1 + R_2}$$

令 $V_P = V_N$ 把 V_i 换成 V_T

$V_I > V_P$ 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 V_O 的两个电压值, V_P 的两个门限电压

$$\begin{cases} V_{T+} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OH}}{R_1 + R_2} \\ V_{T-} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OL}}{R_1 + R_2} \end{cases}$$

上门限电压

下门限电压



回差电压

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

10.8.1 电压比较器

2. 迟滞比较器

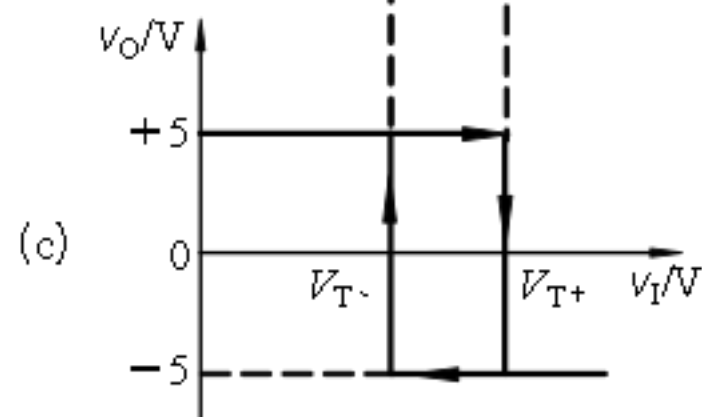
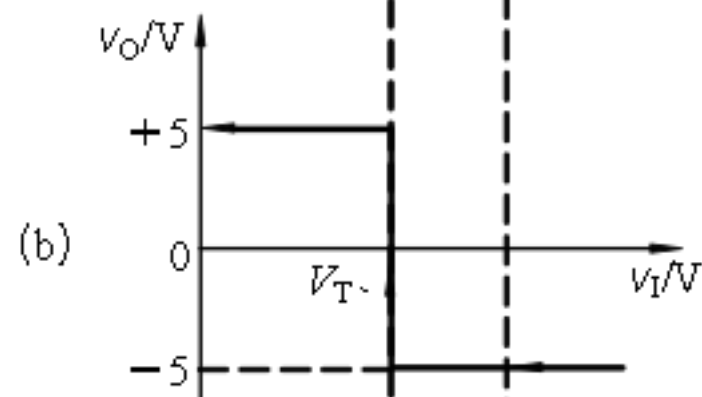
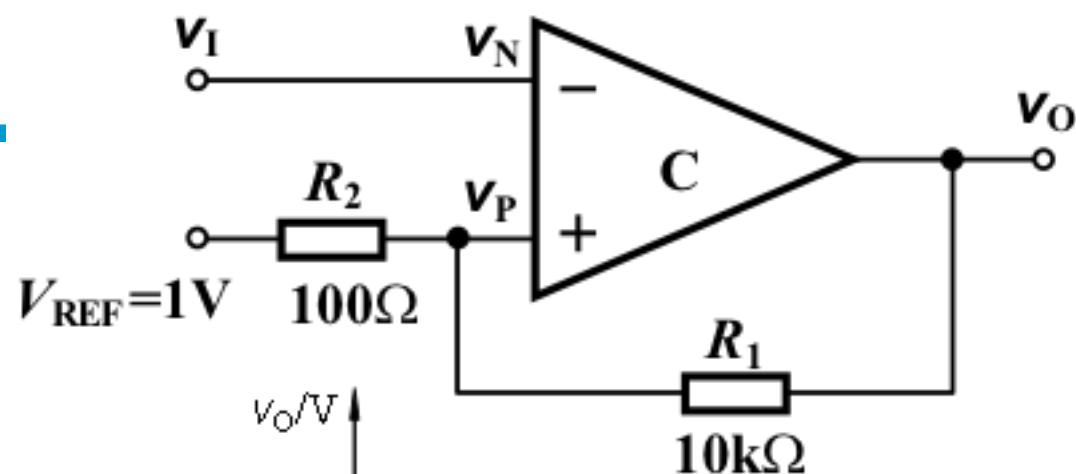
(3) 传输特性

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

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

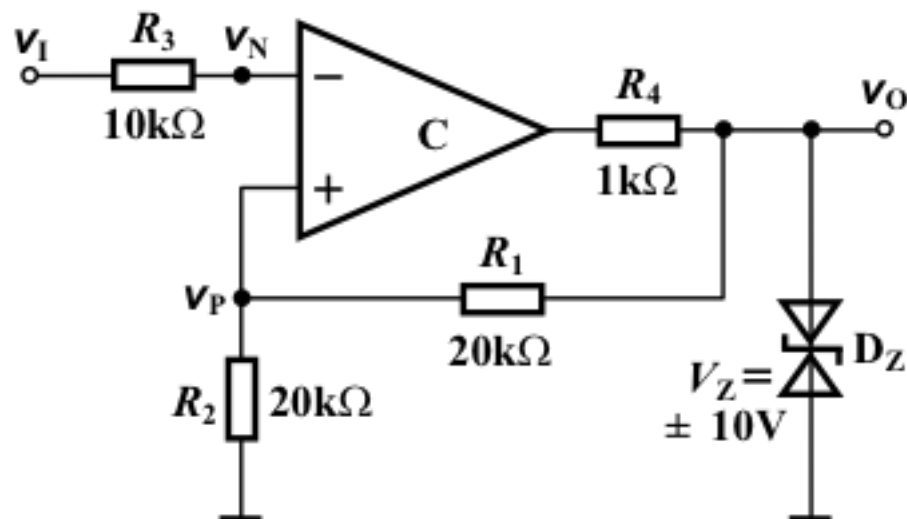
(4) 分析要点

- 门限电压与输出电压有关
- 任何时刻只有一个门限电压有效
- 当输入介于两门限之间时输出不变。只有当输入高于有效的上门限或低于有效的下门限时，输出才翻转。翻转方向取决于输入输出的相位关系。



例

电路如图9.4.6a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。



例题

忽略 0.7V

解：(1) 门限电压

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

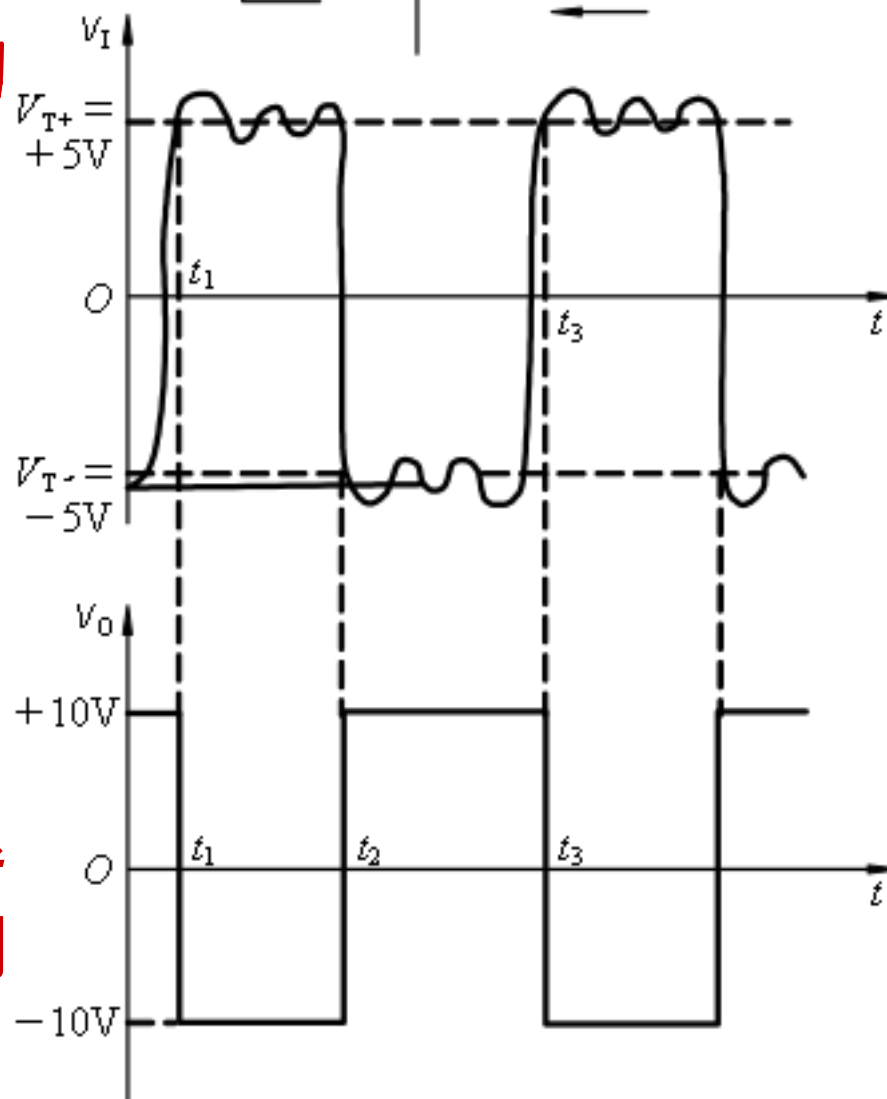
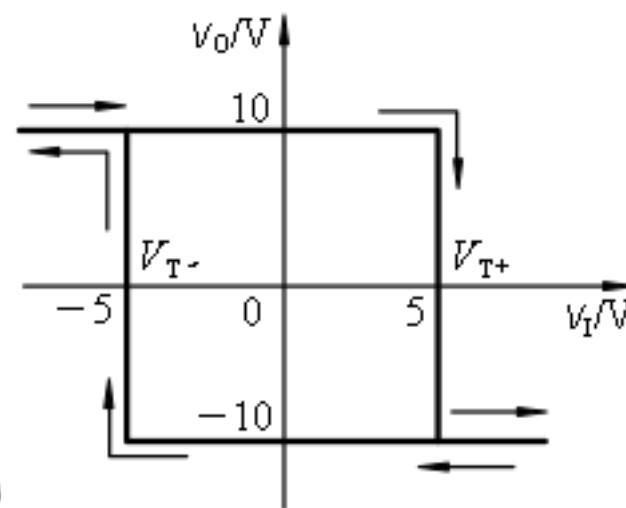
$$V_{T+} = \frac{R_1 V_{REF}}{R_1 + R_2} + \frac{R_2 V_{OH}}{R_1 + R_2} = 5V$$

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

(2) 传输特性

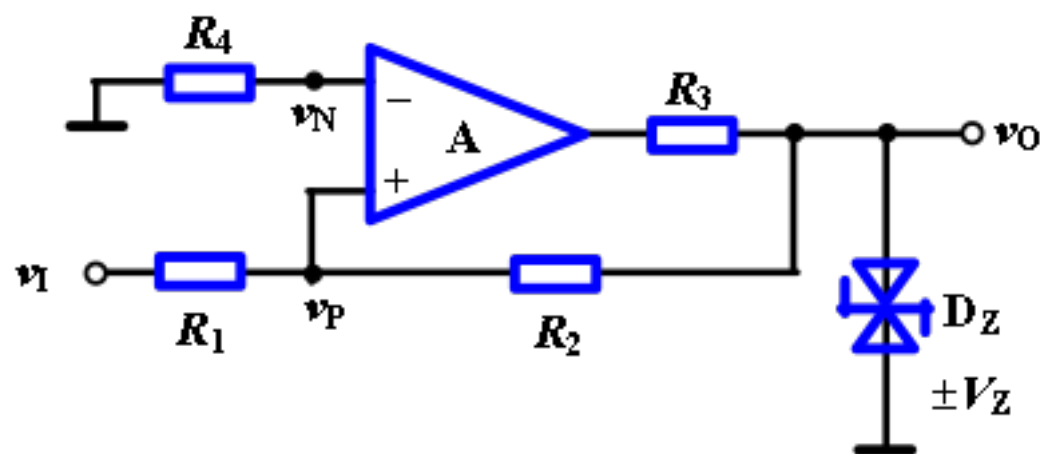
(3) 输出电压波形

与单门限相比，迟滞比较器在电路翻转时有何特点？



例

电路如图示，试求门限电压，画出传输特性。



(2) 传输特性

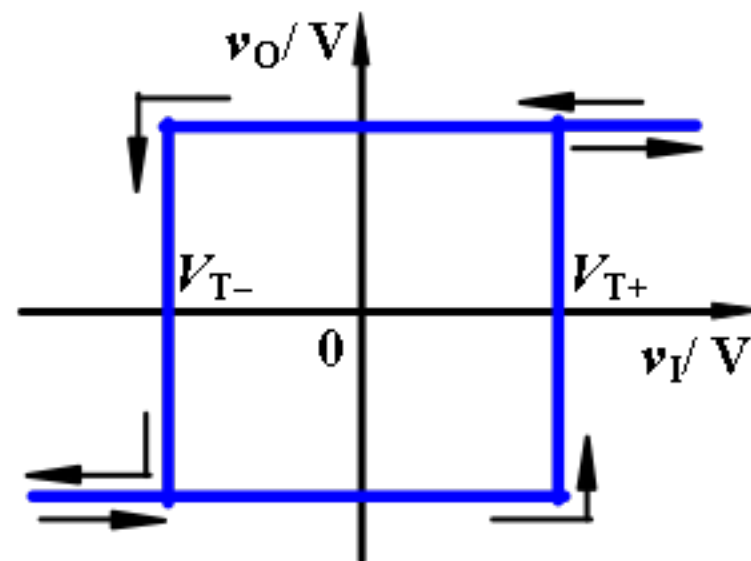
解：(1) 门限电压

$$v_P = \frac{R_2 v_I}{R_1 + R_2} + \frac{R_1 v_O}{R_1 + R_2}$$

翻转时刻， $v_P = v_N = 0$ $v_O = \pm V_Z$

$$v_I = -\frac{R_1}{R_2}(\pm V_Z) \quad V_{T+} = -\frac{R_1}{R_2}(-V_Z) \quad V_{T-} = -\frac{R_1}{R_2} \cdot V_Z$$

为何加负号



10.8.1 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。

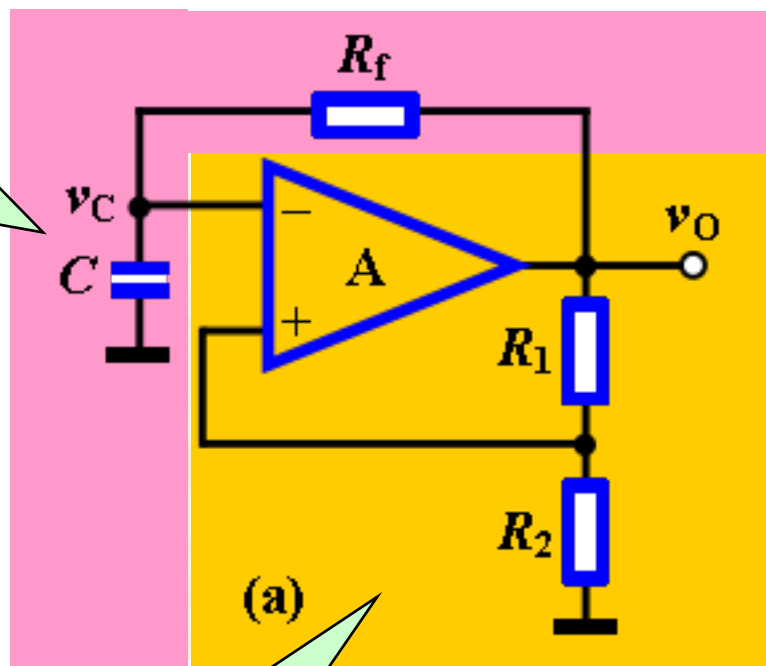
但集成电压比较器中无频率补偿电容，因此转换速率高，改变输出状态的典型响应时间是30~200ns。

相同条件下741集成运算放大器的响应时间为30 μ s左右。

10.8.2 方波产生电路

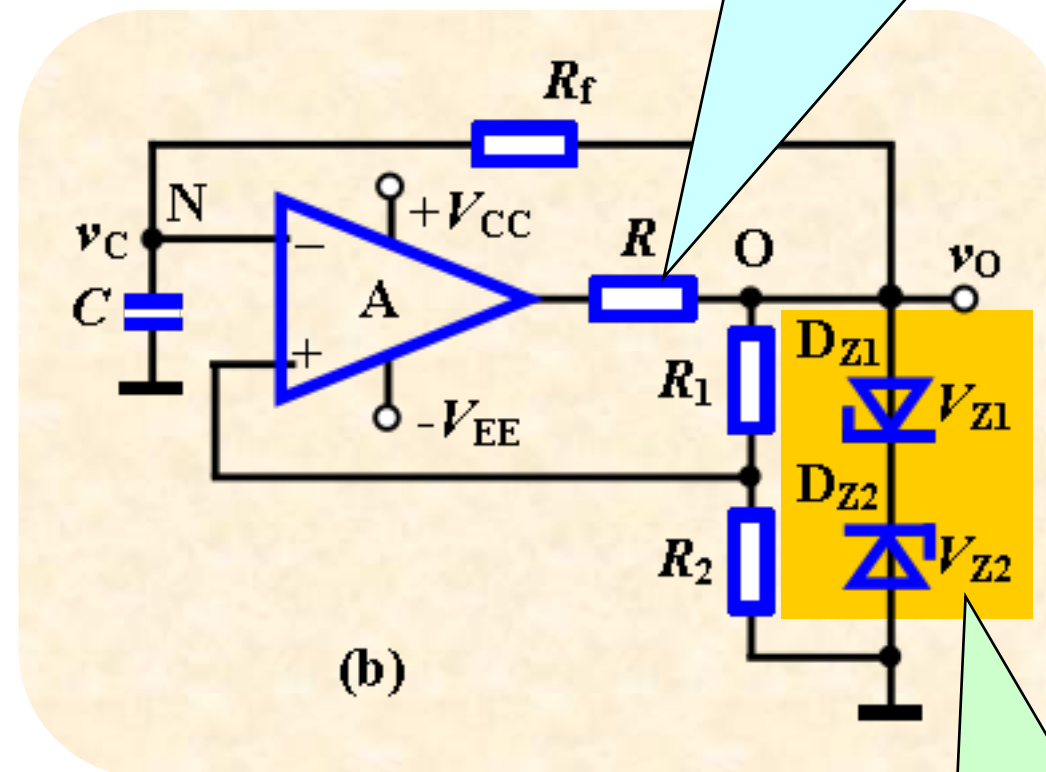
1. 电路组成（多谐振荡电路）

RC充放电支路



迟滞比较器

能否不串入该电阻？



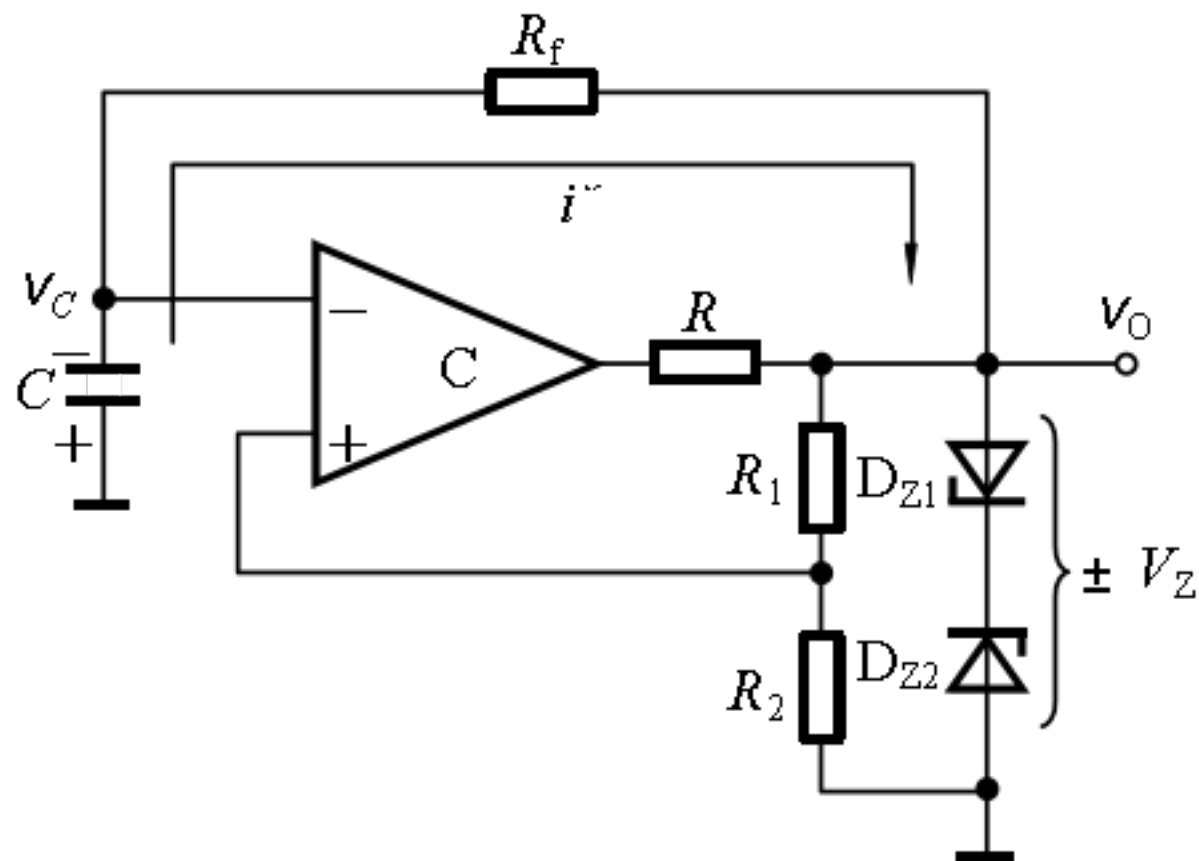
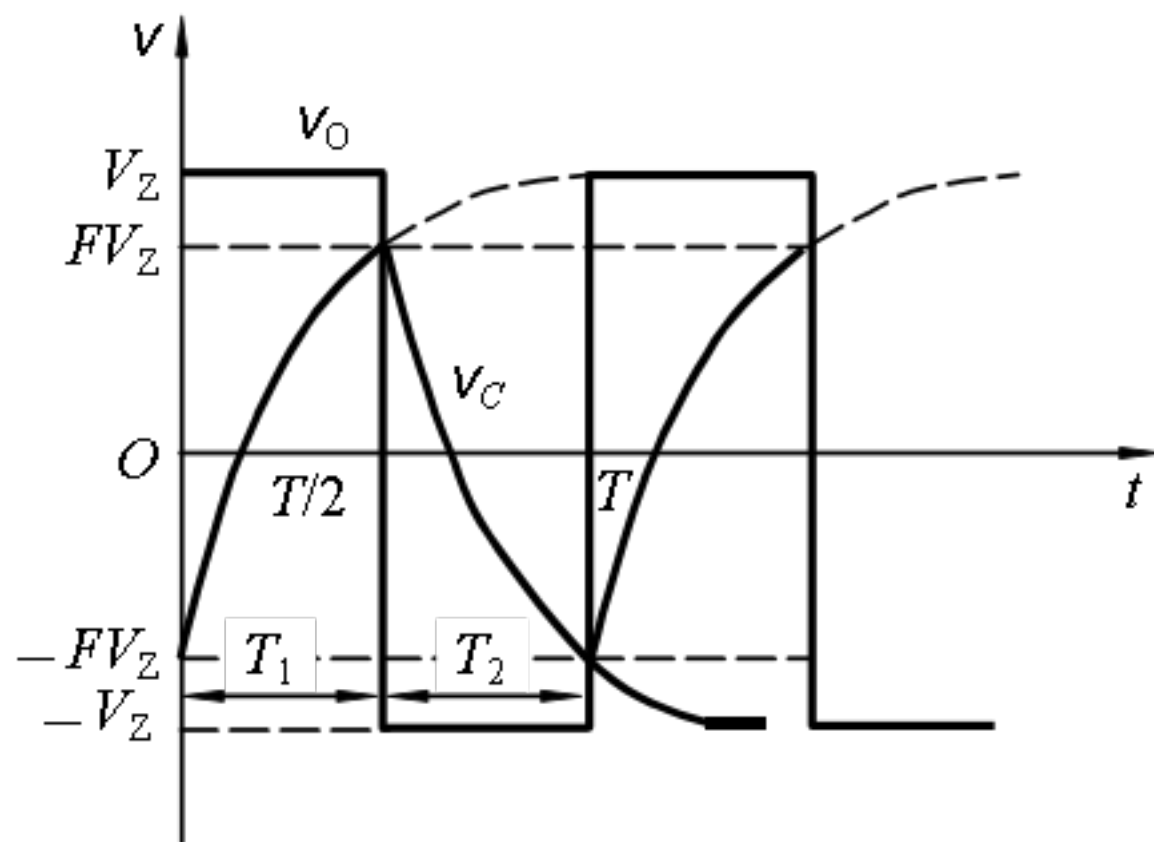
稳压管双向限幅

10.8.2 方波产生电路

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



$$F = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

10.8.2 方波产生电路

3. 振荡周期

利用三要素法公式

$$v_C(t) = [v_C(0+) - v_C(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}} + v_C(\infty)$$

其中 $v_C(\infty) = -V_Z$ $v_C(0+) = FV_Z$

$$\tau = R_f C \quad v_C(T_2) = -FV_Z \quad F = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

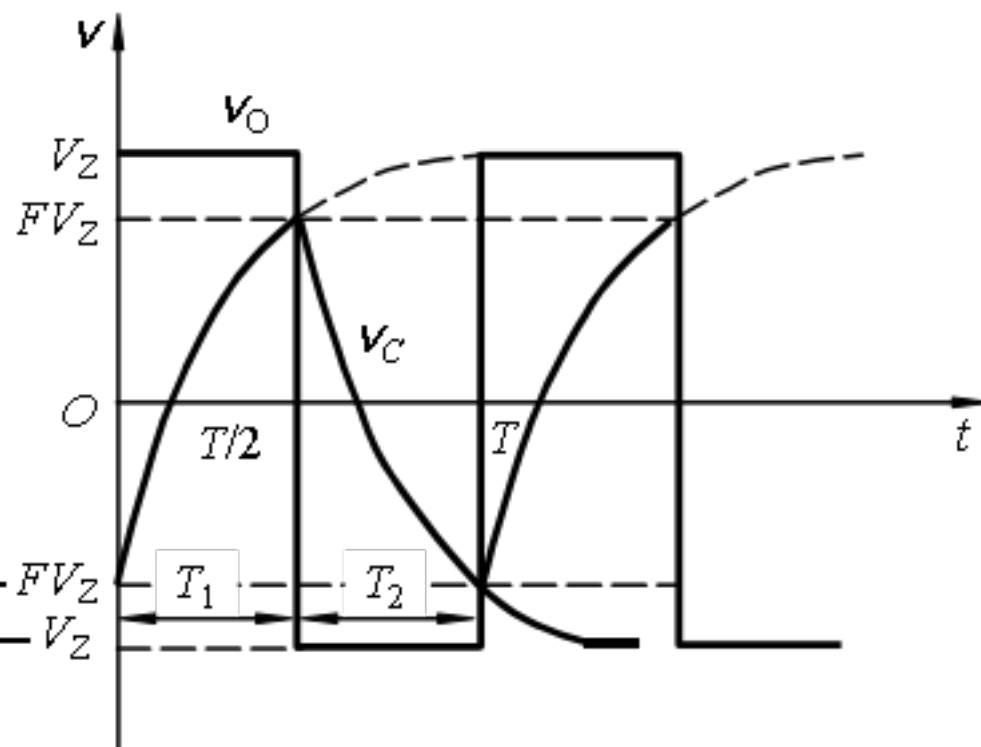
则 $-FV_Z = [FV_Z + V_Z]e^{-\frac{T_2}{R_f C}} - V_Z$

又 $T_1 = T_2$

$$\begin{aligned} \Rightarrow T_2 &= R_f C \ln \frac{1+F}{1-F} \\ &= R_f C \ln \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right) \end{aligned}$$

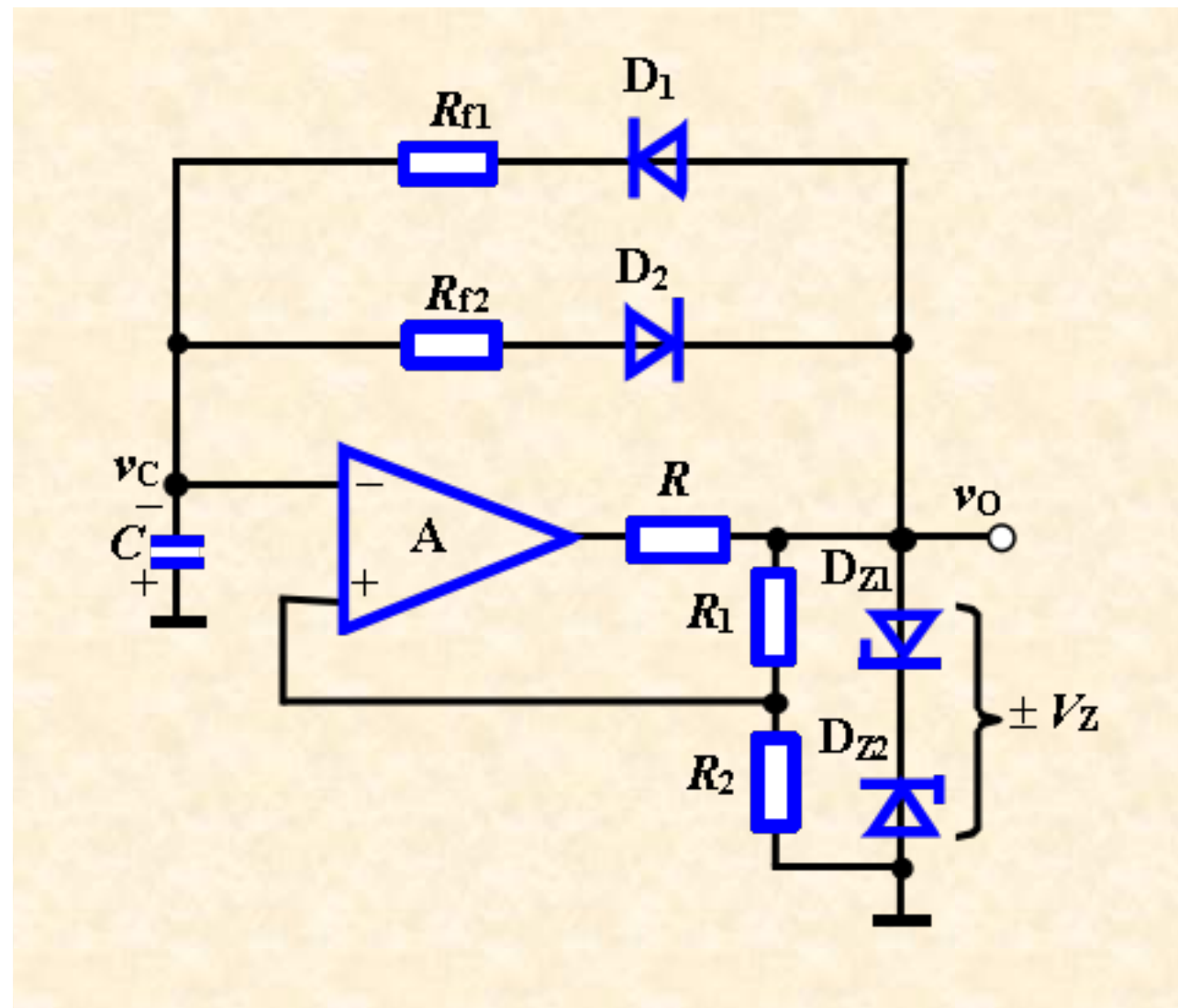
$$\Rightarrow T = 2R_f C \ln \left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)$$

当 $F = 0.462$ 时 $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2R_f C}$



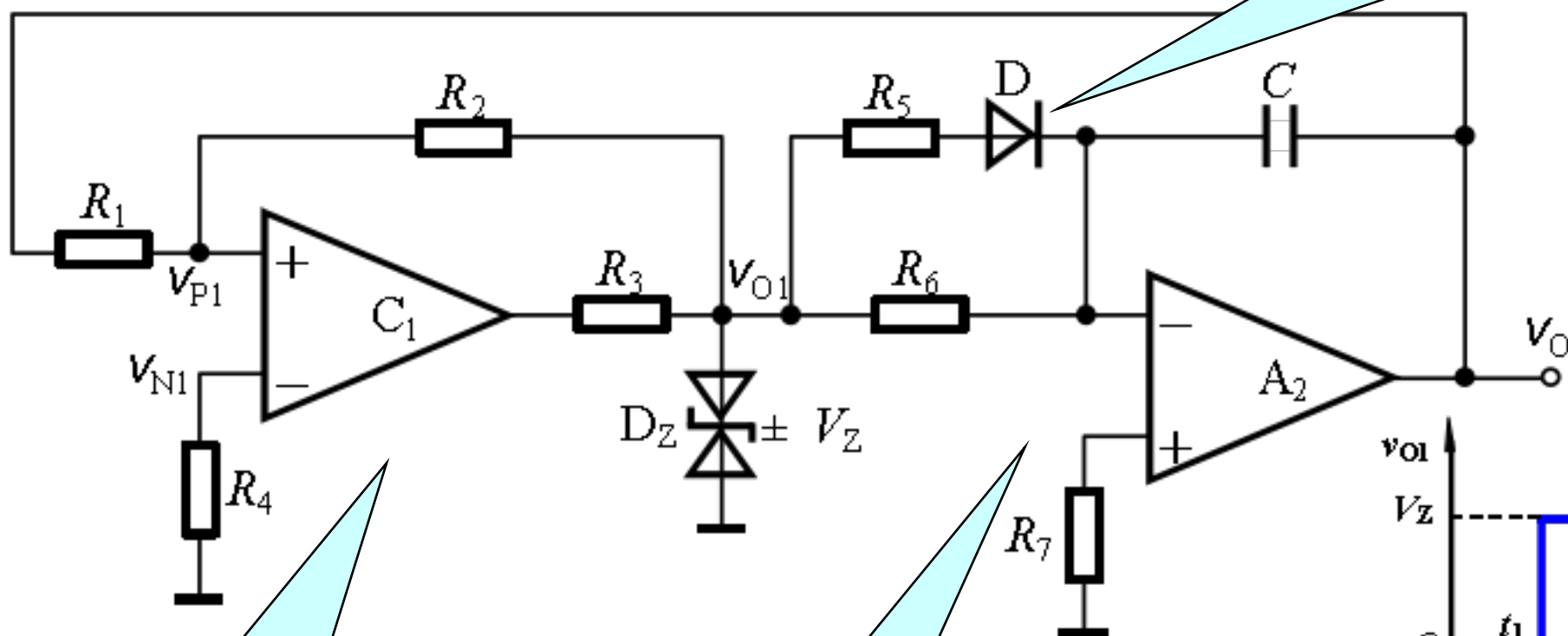
10.8.2 方波产生电路

4. 占空比可变的方波产生电路



10.8.3 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

#该电路可否称为
方波产生电路？

