



知识回顾

- 稳定工作：幅度（增益）裕度、相位裕度的影响

8.6.1 自激振荡及稳定工作的条件

4. 稳定工作条件

破坏自激振荡条件

$$\begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| < 1 \\ \varphi_a + \varphi_f = (2n+1)180^\circ \end{cases} \quad \text{或} \quad \begin{cases} |\dot{A}\dot{F}| = 1 \\ |\varphi_a + \varphi_f| < 180^\circ \end{cases}$$

写成等式，且幅值用分贝数表示时

$$\begin{cases} G_m = 20 \lg |\dot{A}\dot{F}| \leq -10 \text{ dB} \\ \varphi_a + \varphi_f = (2n+1)180^\circ \end{cases} \quad \begin{cases} 20 \lg |\dot{A}\dot{F}| = 0 \\ |\varphi_a + \varphi_f| + \varphi_m = 180^\circ \end{cases}$$

其中 G_m ——**幅值裕度**，一般要求 $G_m \leq 0\text{dB}$ ，工程上 -10dB （保证可靠稳定，留有余地）
 φ_m ——**相位裕度**，一般要求 $\varphi_m \geq 0^\circ$ ，工程上 45°
当反馈网络为纯电阻网络时， $\varphi_f = 0^\circ$ 。



知识回顾

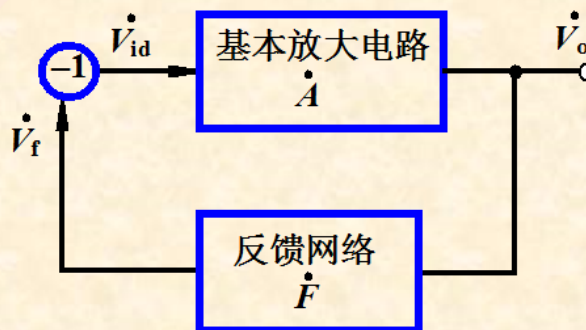
自激振荡：幅度（增益）条件、相位条件（变成正反馈）

8.6.1 自激振荡及稳定工作的条件

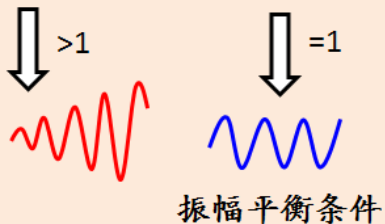
3. 自激振荡条件

自激振荡条件

输入端求和的相位（-1）不包含在内，整体形成正反馈



$$\begin{cases} \varphi_a(\omega_k) + \varphi_f(\omega_k) = (2n+1) \times 180^\circ & \text{相位条件 (附加相移)} \\ |\dot{A}(\omega_k) \cdot \dot{F}(\omega_k)| \geq 1 & \text{幅值条件} \end{cases}$$

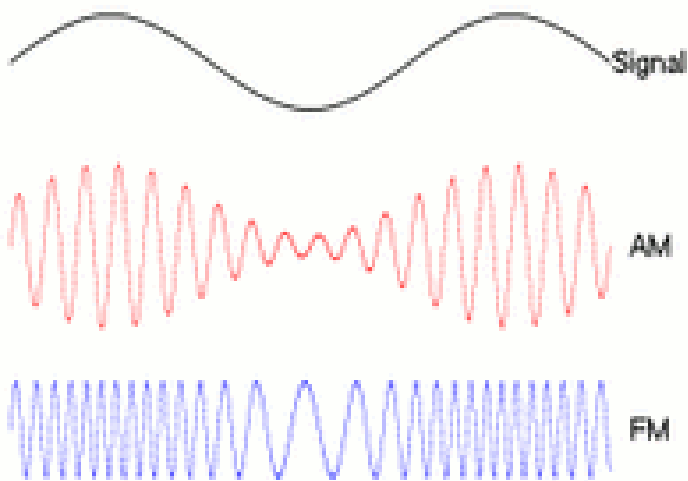


注：负反馈放大电路是否自激振荡实际上与输入信号无关。

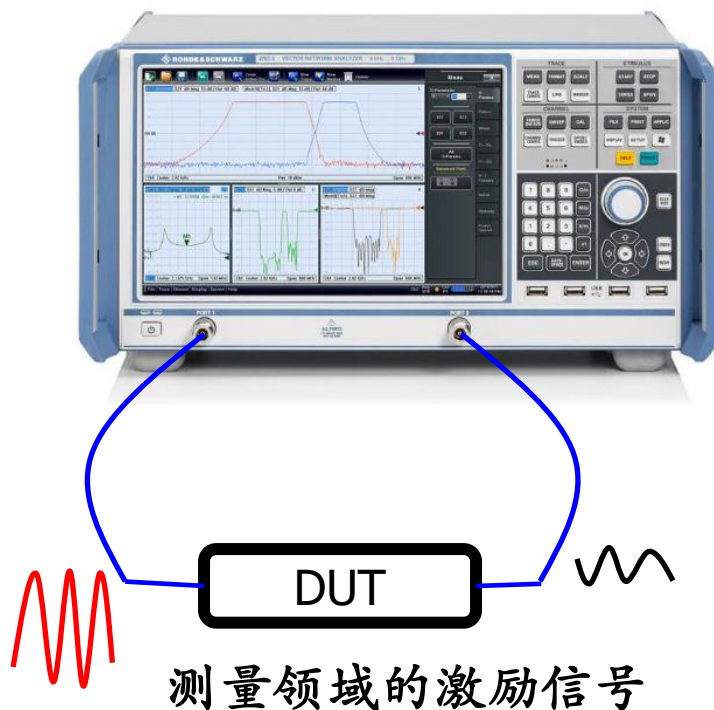


正弦振荡信号的应用

- 自动控制中需要环路稳定，比如开关电源控制、有源滤波器等
- 但是在通信、测量等应用中，需要正弦振荡信号：



无线/电力通信领域的载波信号





正反馈正弦波振荡电路

- ✓ 10.5 正弦波振荡电路的振荡条件
- ✓ 10.6 RC正弦波振荡电路

❖ 教学要求

- 1. 理论上：**针对正反馈放大电路模型，掌握其频域起振的条件及稳幅的要求。
- 2. 电路上：**掌握**RC**桥式振荡电路的电路架构、机理和计算，以及稳幅措施。



正弦波振荡电路

✓ 10.5 正弦波振荡电路的振荡条件

1. 正反馈振荡条件
2. 正反馈振荡电路的起振和稳幅
3. 正反馈振荡电路基本组成
4. 正反馈振荡电路的振荡电路分析要点小结

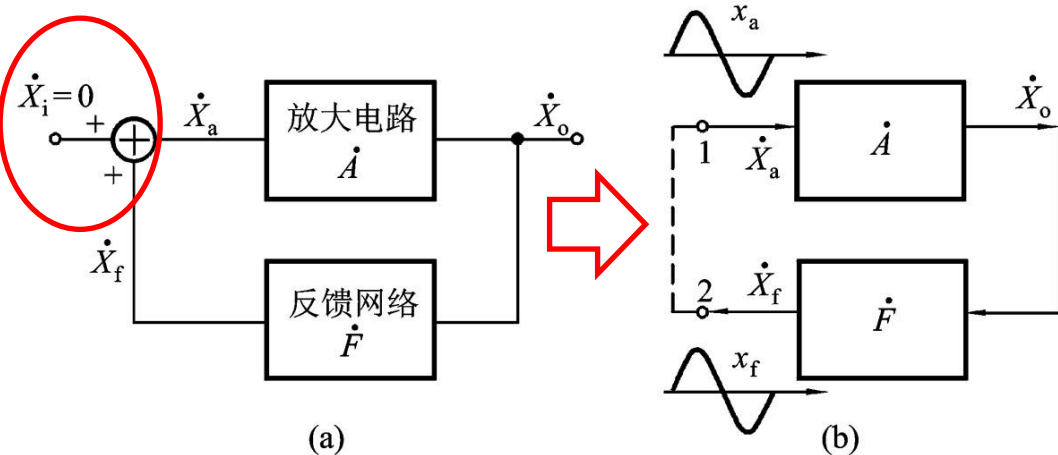
✓ 10.6 RC正弦波振荡电路



10.5 正弦波振荡电路的振荡条件

1. 正反馈振荡条件

- 总结前面：本质上负反馈是由于移相180度形成**正反馈**形成了振荡。
- 为了形成振荡，可以直接构建正反馈电路架构（注意与负反馈方框图的差别）



正反馈电路架构

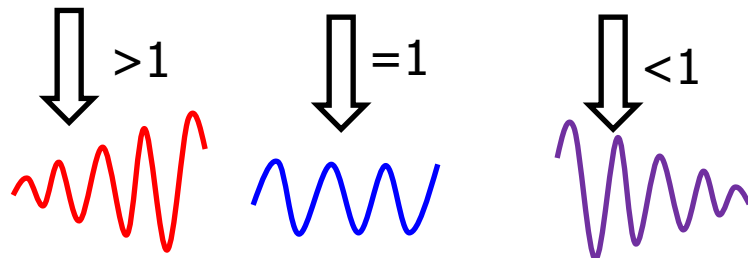
振荡相位条件

$$\varphi_A(\omega_k) + \varphi_F(\omega_k) = 2n \times 180^\circ$$

$n=0,1,2,\dots$

振荡幅值（增益）条件

$$|\dot{A}(\omega_k) \cdot \dot{F}(\omega_k)| \geq 1$$



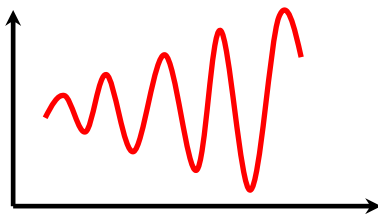
振幅平衡条件



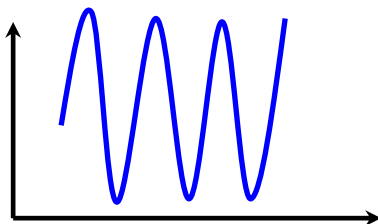
10.5 正弦波振荡电路的振荡条件

2. 正反馈振荡电路的起振和稳幅

- 振荡电路是单口网络，无须输入信号就能起振，但起振的信号源来自何处？ 内部噪声、扰动
- **起振：**在满足振荡的相位条件前提下，还要满足 $|AF|>1$ 才能使信号达到足够的强度维持振荡。



- **稳幅：**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 $|AF|=1$ 。





10.5 正弦波振荡电路的振荡条件

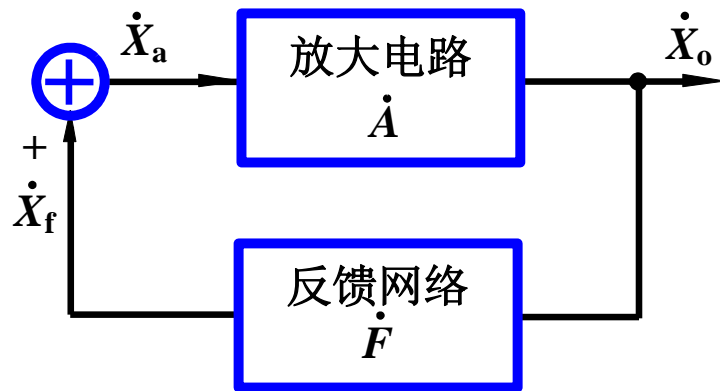
3. 正反馈振荡电路基本组成

▶ 放大电路

▶ (正) 反馈网络

▶ 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。) 常用的选频网络有RC选频、LC选频和石英晶体选频。

▶ 起振和稳幅环节



❖ 按选频网络分类:

RC振荡电路 – 工作频率较低, 一般不超过1MHZ。(低频模拟应用)

LC振荡电路 – 工作频率较高, 几百KHZ-几十GHZ。(高频射频应用)

石英晶体振荡电路 – 工作频率一般在几十kHz以上。(高频率稳定度应用)



10.5 正弦波振荡电路的振荡条件

4. 正反馈振荡电路的振荡电路分析要点小结

- **系统结构上**：是否存在各关键组成部分；
- **放大电路上**：放大电路能否正常工作，即是否有合适的 Q 点，信号是否可能正常传递；
- **相位条件上**：是否存在单一频率 f_0 信号在环路中满足正反馈相位条件 $2n \times 180^\circ$ ；（判断方法—瞬时极性法）
- **幅度条件上**：是否满足振幅条件，即是否可能起振（ $|AF| > 1$ ）和稳定（回到 $|AF| = 1$ ）。



正弦波振荡电路

✓ 10.5 正弦波振荡电路的振荡条件

✓ **10.6 RC正弦波振荡电路**

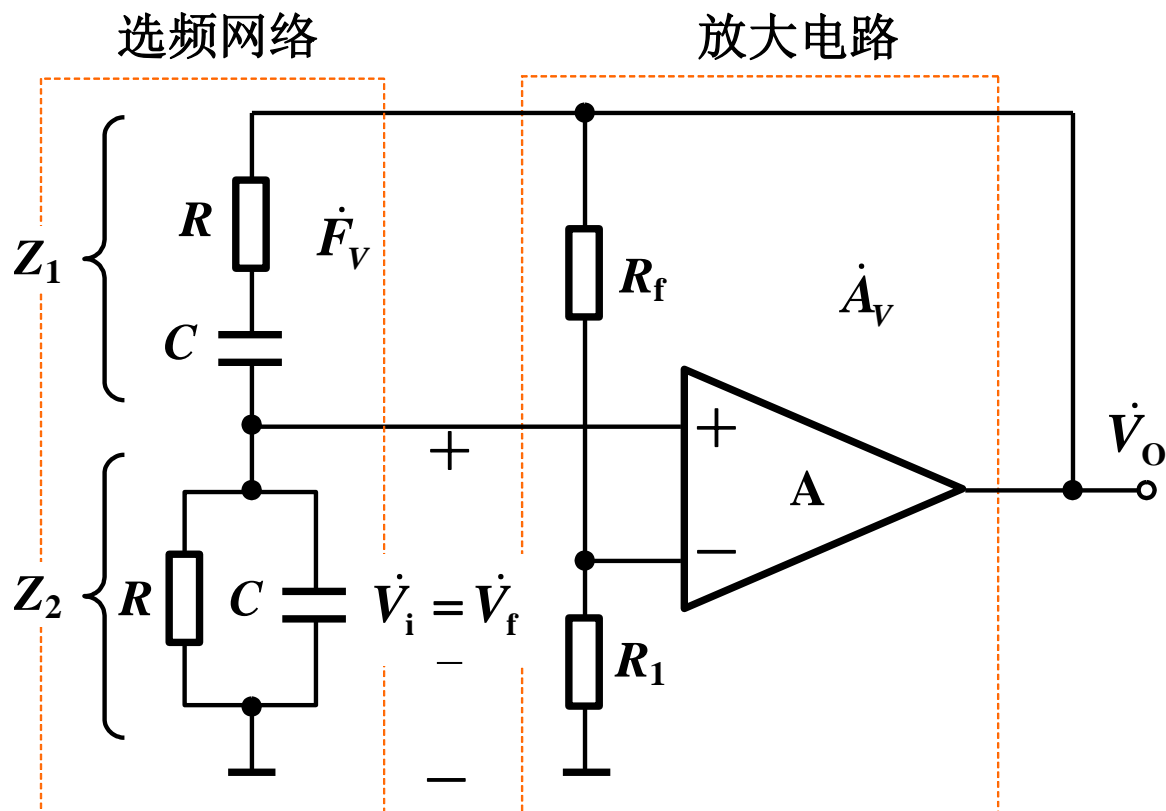
1. 电路组成
2. RC串并联选频网络的选频特性
3. 振荡电路工作原理
4. 稳幅措施
5. 移相式正弦波振荡电路



1. 电路组成

(1) RC桥式振荡电路

反馈网络兼做选频网络，注意参数取值





2. RC串并联选频网络的选频特性

(2) 反馈系数

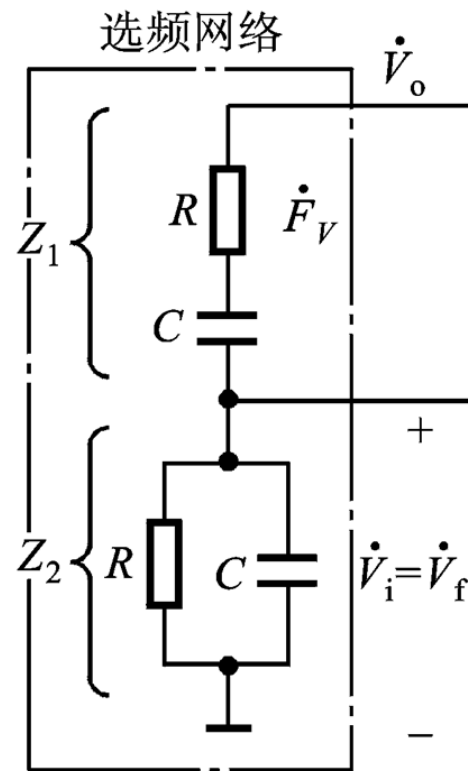
$$F_V(s) = \frac{V_f(s)}{V_o(s)} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{sCR}{1 + 3sCR + (sCR)^2}$$

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

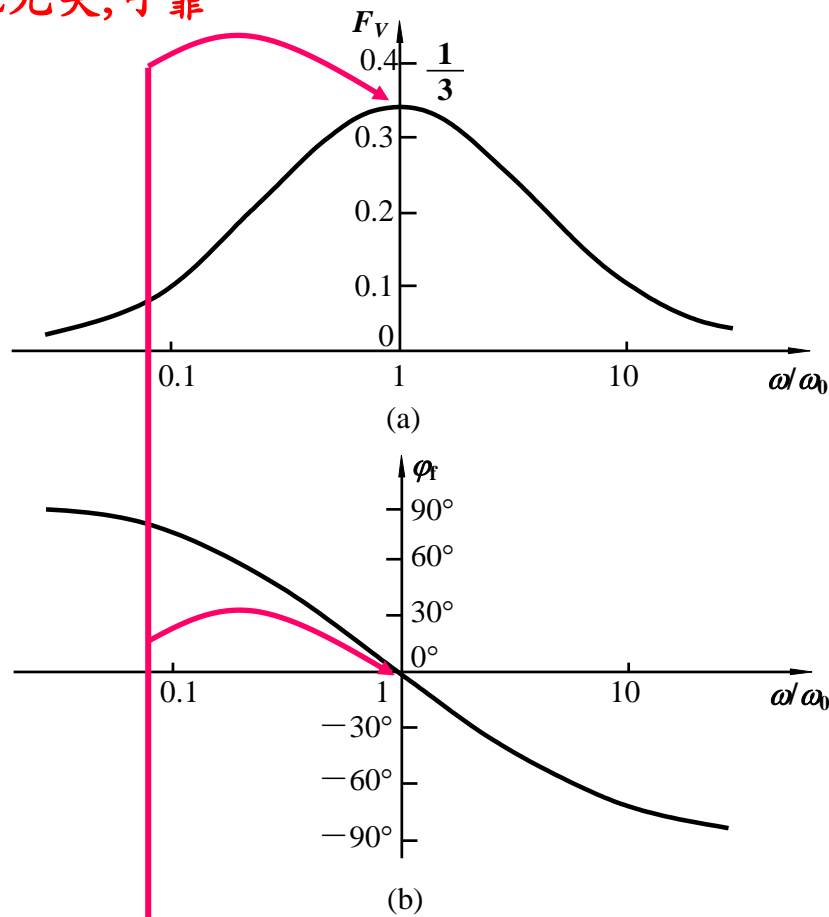
幅频响应有最大值

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

相频响应

$$\varphi_f = 0$$

与RC无关,可靠



- (1) 选频反馈网络工作频率选哪儿好?
- (2) 如果要构成正反馈振荡, 需要一个在幅度和相位上什么样的放大器?



3. 振荡电路工作原理

(1) RC桥式振荡电路原理

当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时:

$$F_{V\max} = \frac{1}{3} \quad \varphi_f = 0$$

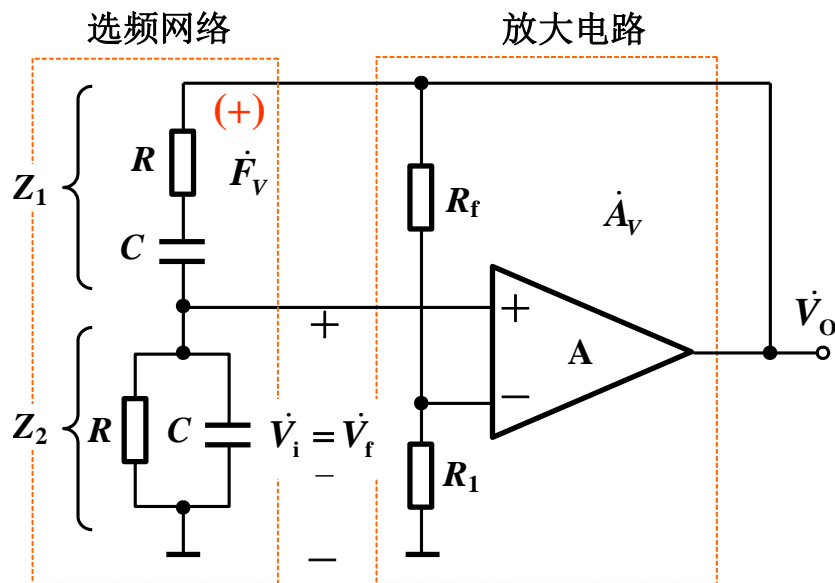
通过引入同相放大器, 电路满足相位平衡条件:

$$\varphi_a + \varphi_f = 2n\pi, n = 0$$

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 几 MHz内 的正弦波

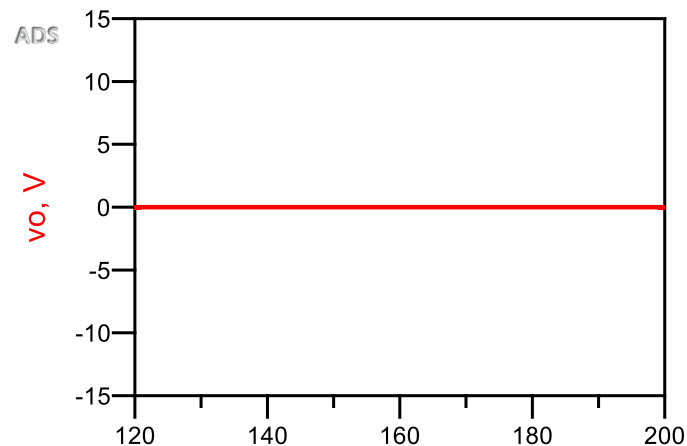
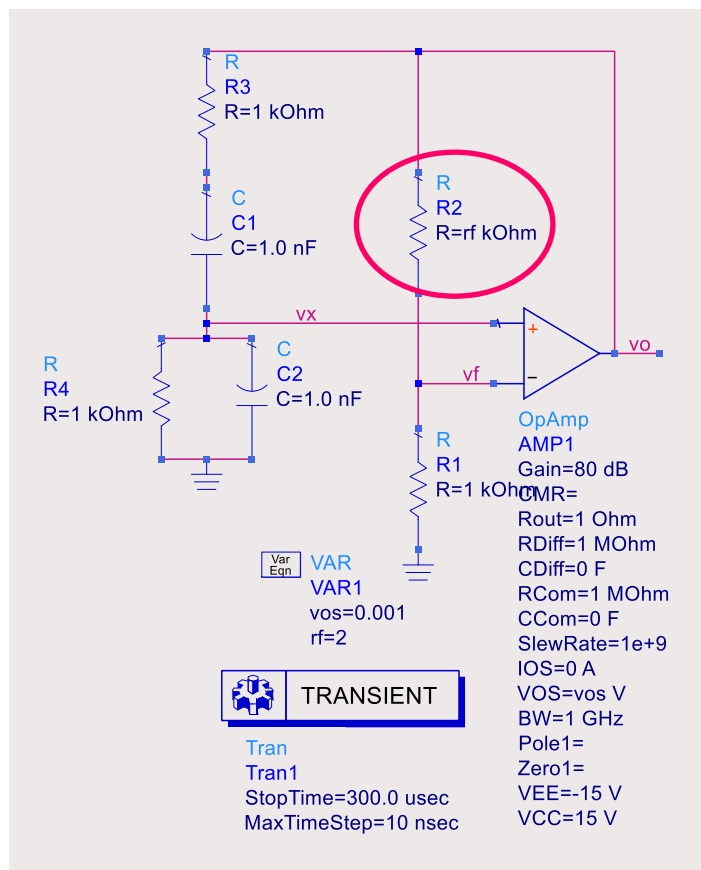


3. 振荡电路工作原理

(2) 仿真验证

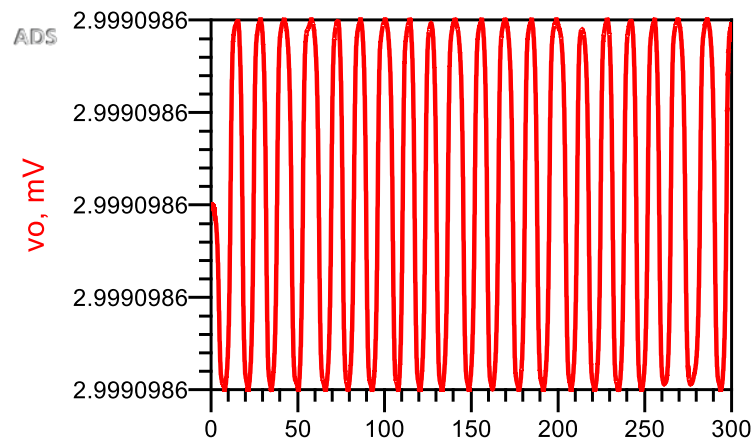
a) $|AF|=1$ 时

$R1=1\text{k}\Omega$, $R2=2\text{k}\Omega$



time, usec

宏观图



time, usec

微观图



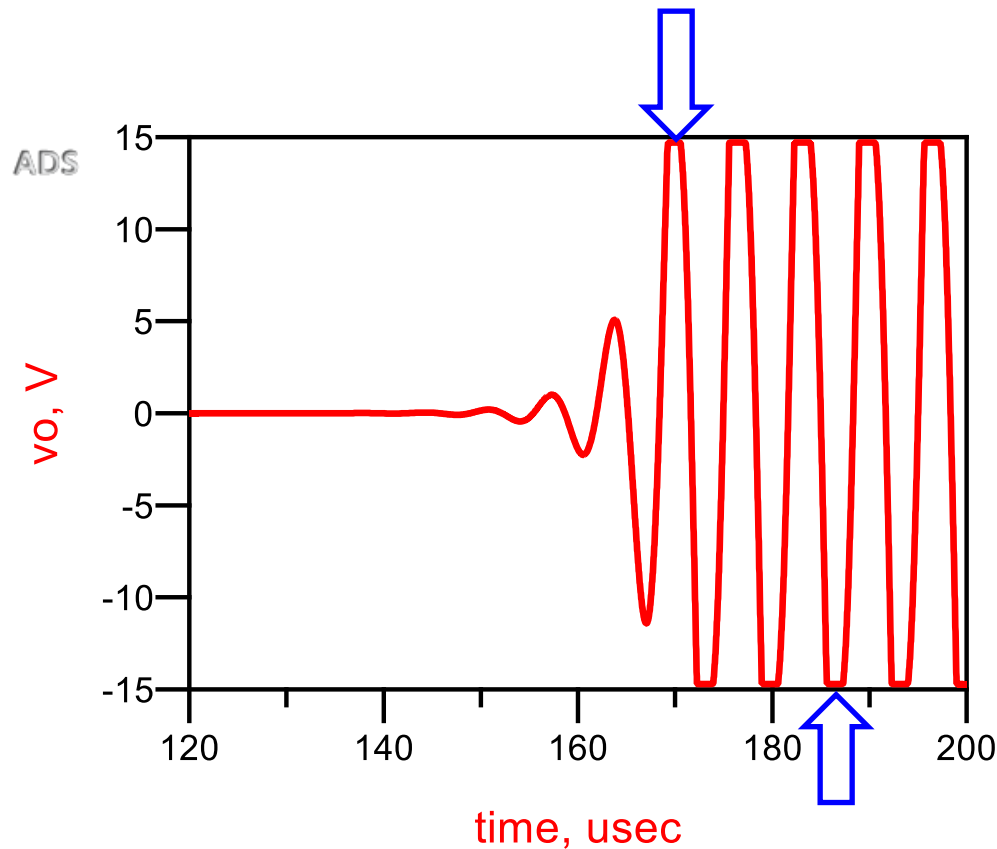
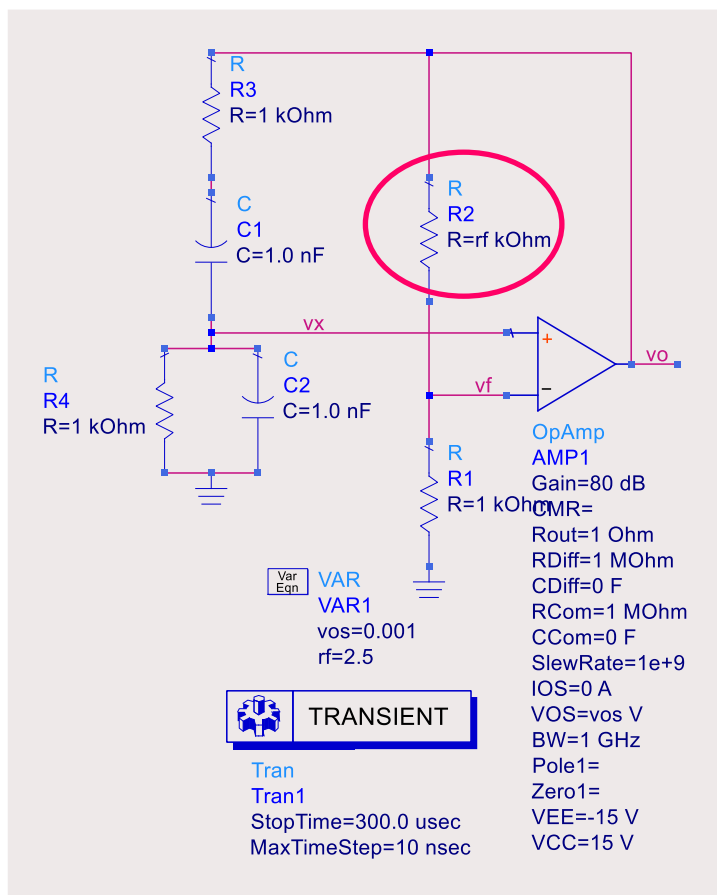
3. 振荡电路工作原理

(2) 仿真验证

b) $|AF| > 1$ 时

$R1=1\text{kohm}$, $R2=2.5\text{kohm}$

幅度不可控，达到放大器输出极限引起失真，
需要稳幅措施！

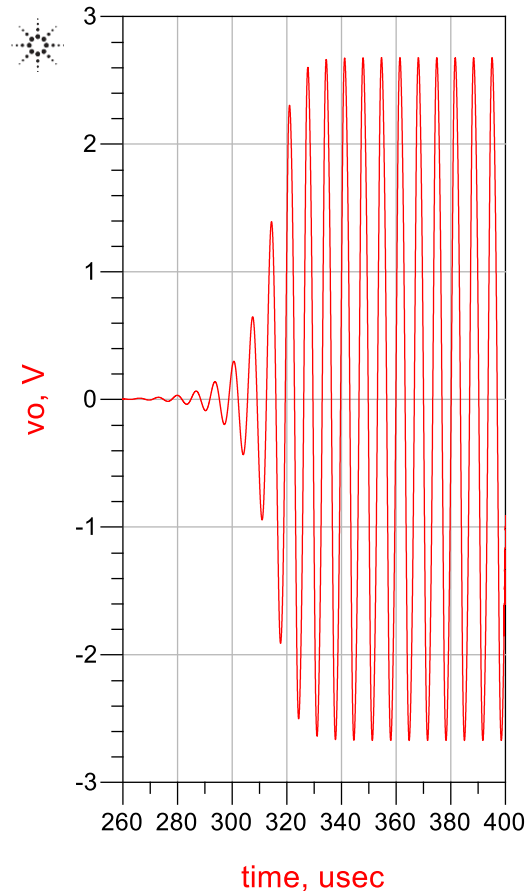
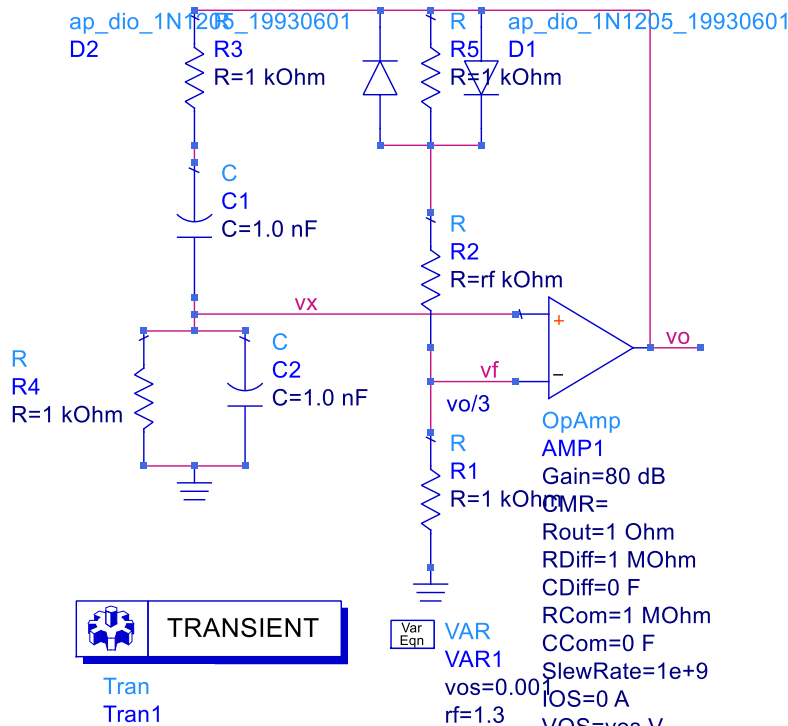




4. 稳幅措施

- 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 $|AF| = 1$ 。

反馈链路加入增益限制机制
(二极管或齐纳二极管)

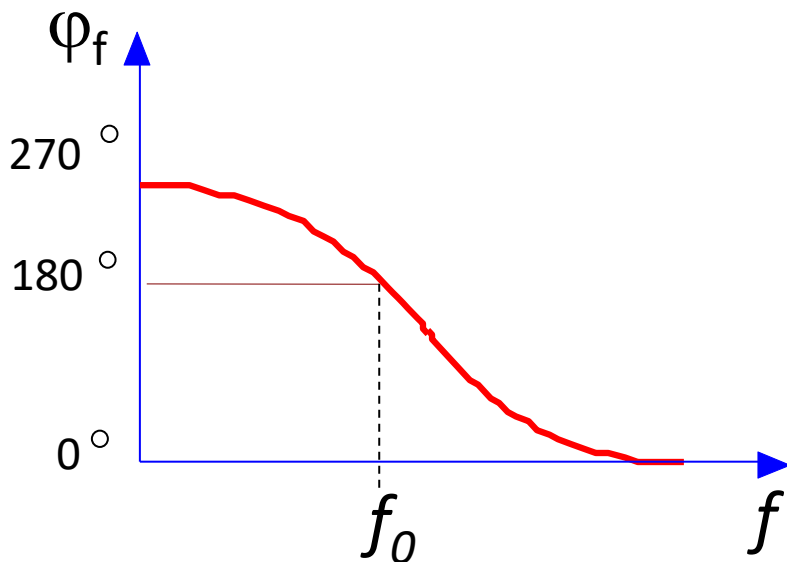
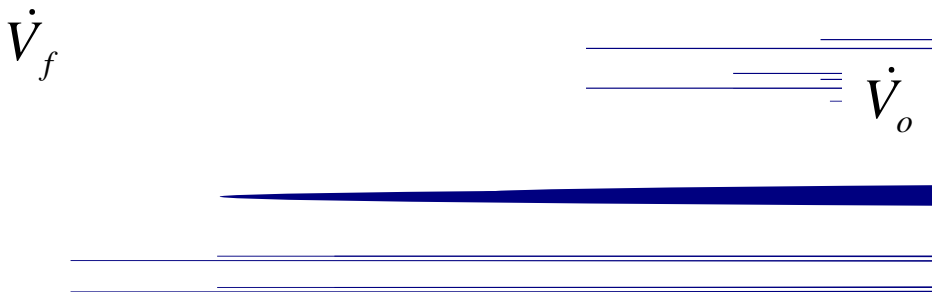


$$v_{omax}/3/R1 \cdot (R1 + R2) = v_{omax} - V_{dio}$$



5. 移相式正弦波振荡电路(定性分析)

a. 超前移相式RC振荡器



移相网络相频特性

$$\because \varphi_a \neq 180^\circ, \quad \varphi_f|_{f=f_0} = 180^\circ$$

\therefore 满足相位平衡条件

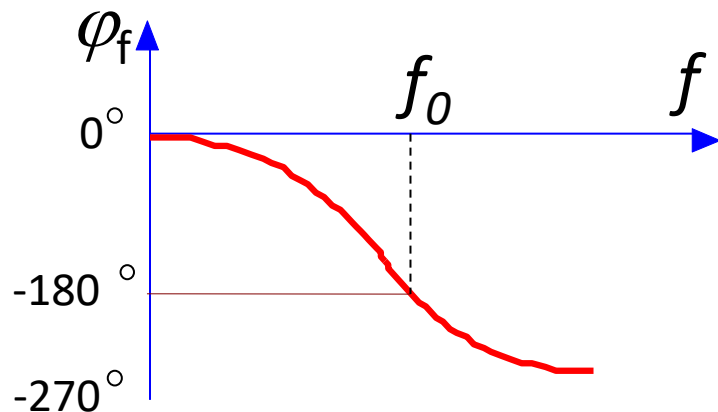
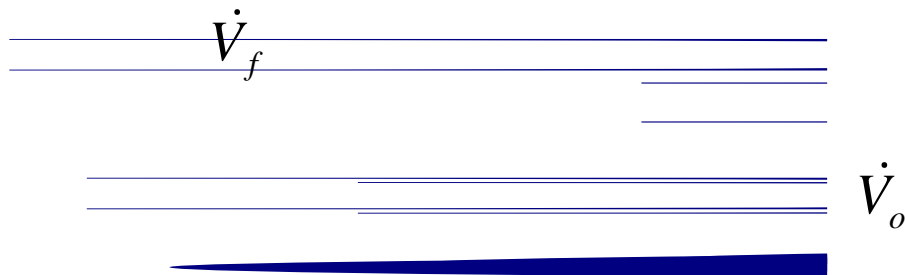
$$\text{由 } \dot{F}_V(j\omega) = \frac{\dot{V}_f(j\omega)}{\dot{V}_o(j\omega)} \text{ 求得:}$$

$$\text{振荡频率为 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}}$$



5. 移相式正弦波振荡电路(定性分析)

b. 滞后移相式RC振荡器



$$\because |\varphi_a| = 180^\circ,$$

$$\varphi_f|_{f=f_0} = -180^\circ$$

满足相位平衡条件

构成移相式RC振荡电路时,一般要求RC移相网络为三阶或三阶以上。



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(自学)



10.7.1 LC选频放大电路

等效损耗电阻

1. 并联谐振回路

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

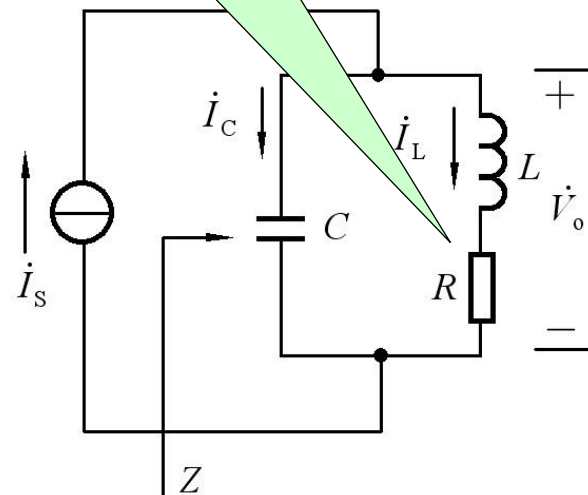
一般有 $R \ll \omega L$ 则 $Z = \frac{L/C}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$

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

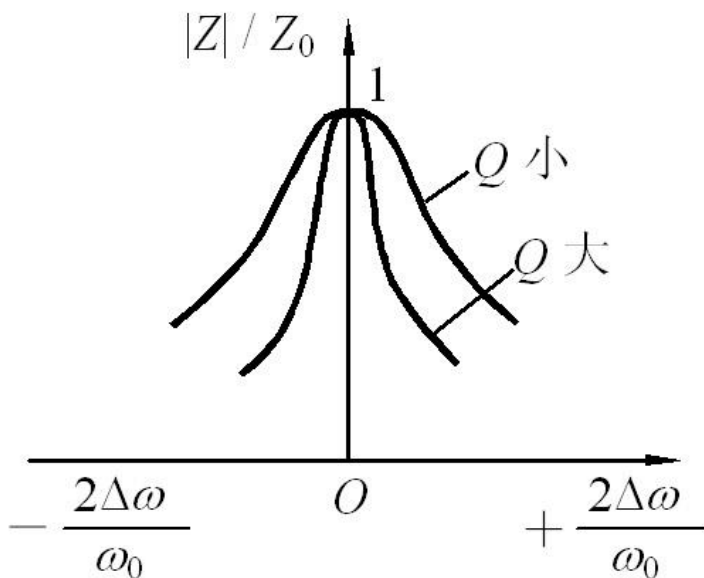
同时有 $|\dot{I}_c| = Q|\dot{I}_s|$ 即 $|\dot{I}_c| \approx |\dot{I}_L| \gg |\dot{I}_s|$



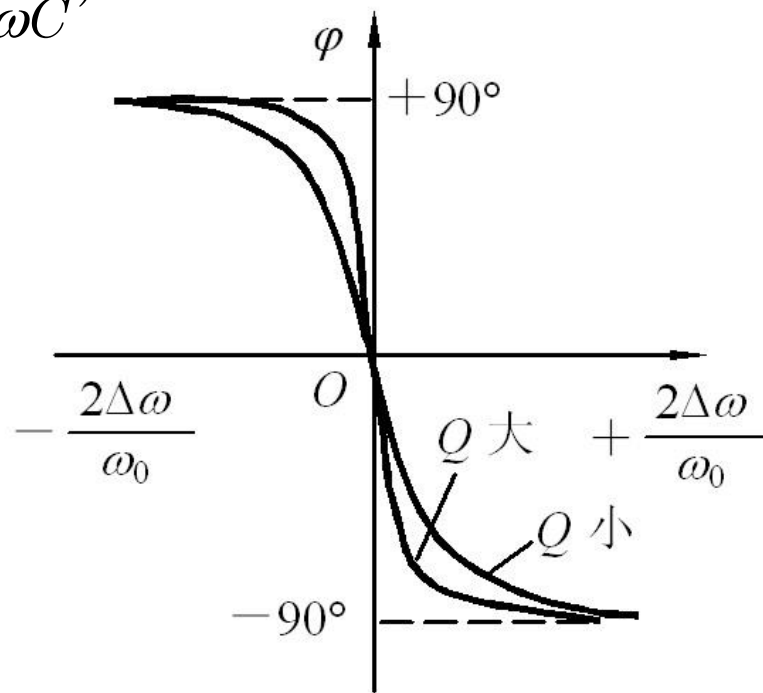


10.7.1 LC选频放大电路

阻抗频率响应 $Z \approx \frac{L/C}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$



(a) 幅频响应

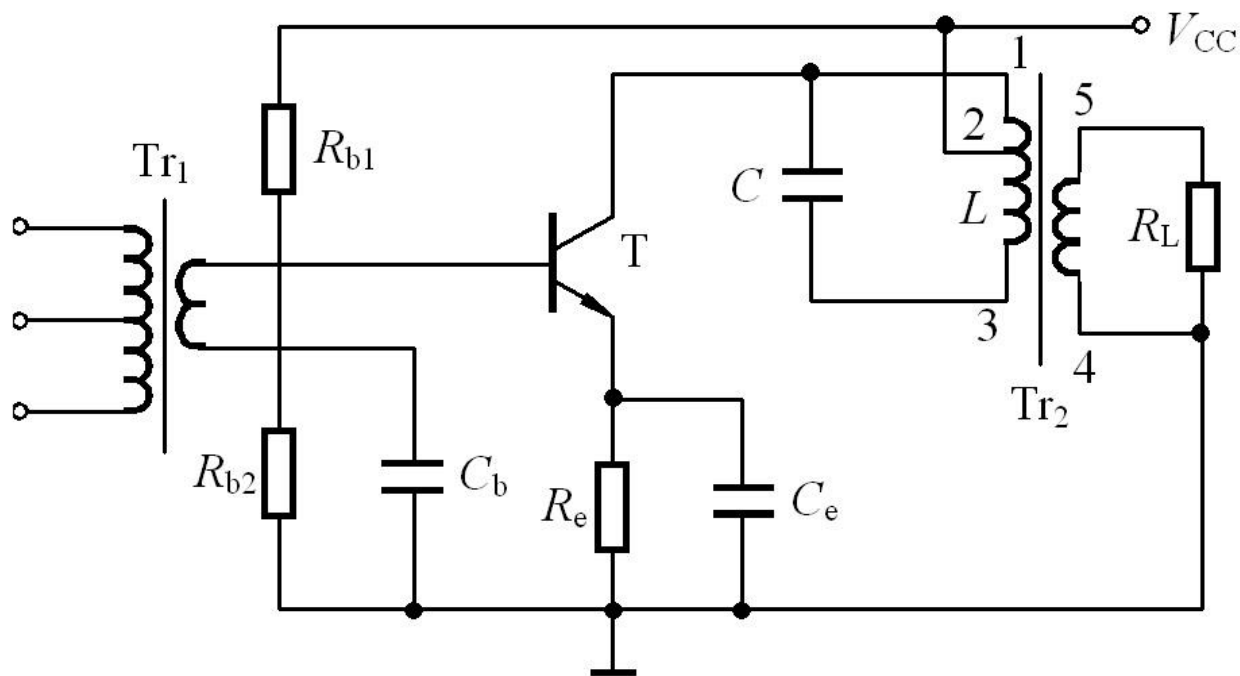


(b) 相频响应



10.7.1 LC选频放大电路

2. 选频放大电路

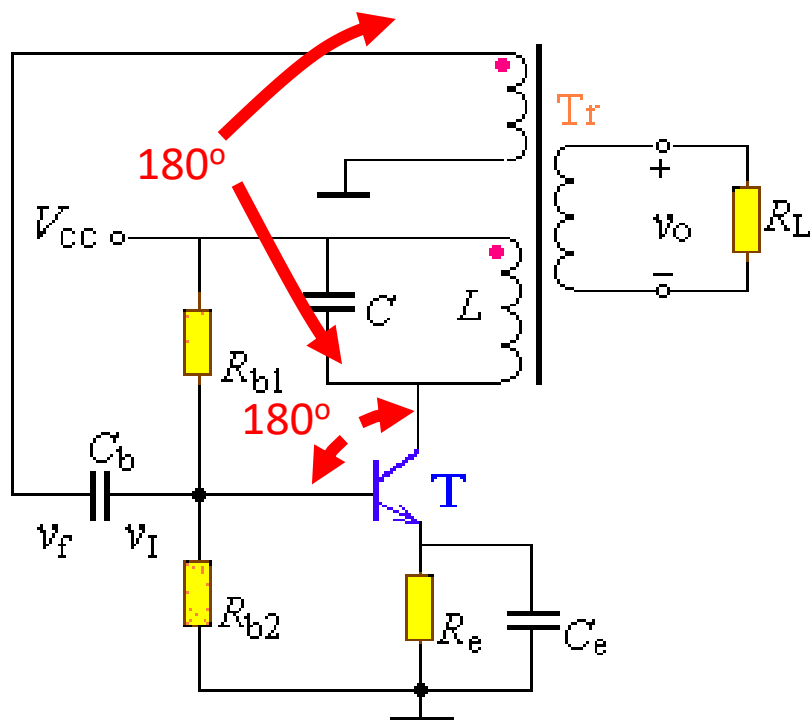


根据LC并联谐振回路的频率特性，当输入信号频率等于谐振频率时电压增益最大。此外，即使集电极电流产生非线性失真，由于具有选频（滤波）特性，输出电压也基本为正弦信号。

（LC选频放大电路是构成LC正弦振荡器、高频放大器等的基础）



10.7.2 变压器反馈式LC振荡电路



(C_b 、 C_e 足够大,可视为交流短路)

◆变压器的相位判断方法:

互为同名端的端点电压同相,而
异名端电压反相。

用瞬时极性法判断可知满足
相位平衡条件。

振荡频率:

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

起振: 通过选用较大 β 的BJT或调整变压器的匝数比, 易于满足

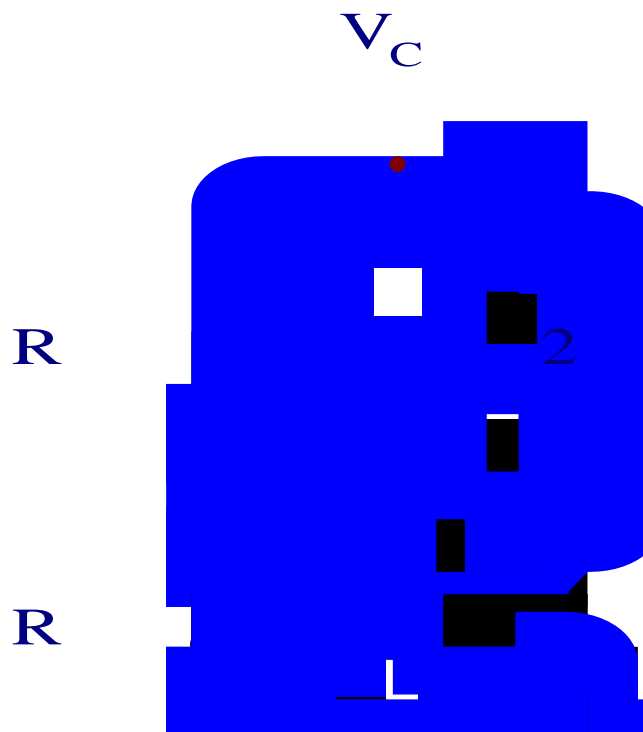
稳幅:

起振后随着输出信号幅度增加, BJT进入非线性区, 集电极电流失真, 输出信号幅度不再增加, 但因LC并联谐振回路具有极好的选频性, 故仍能输出正弦波。

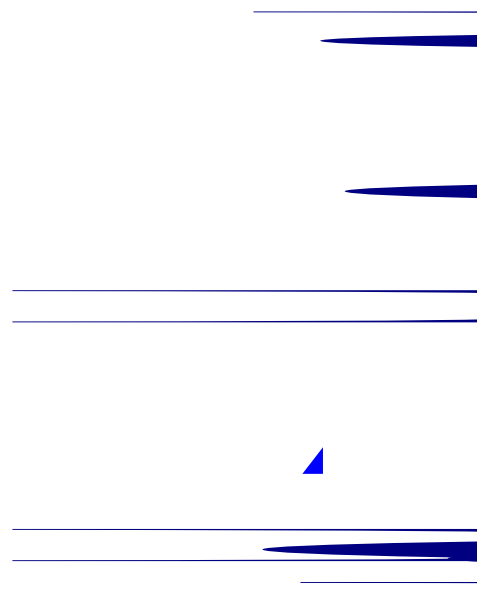
缺点: 损耗较大, 频率稳定性较差。



例：判断下列LC正弦振荡电路是否满足相位平衡条件



不满足

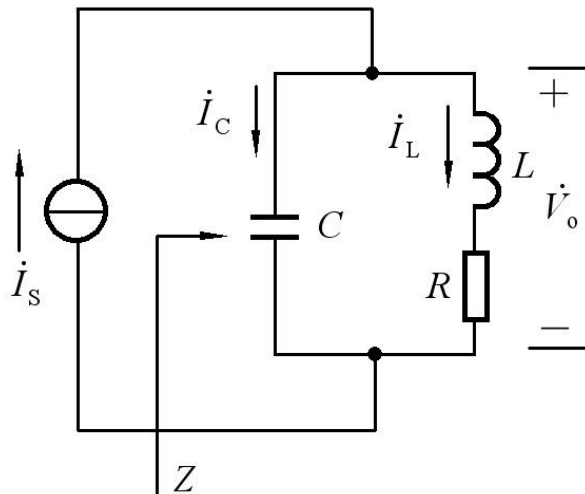


满足



10.7.3 三点式LC振荡电路

谐振时



$$|\dot{I}_c| = Q |\dot{I}_s|$$

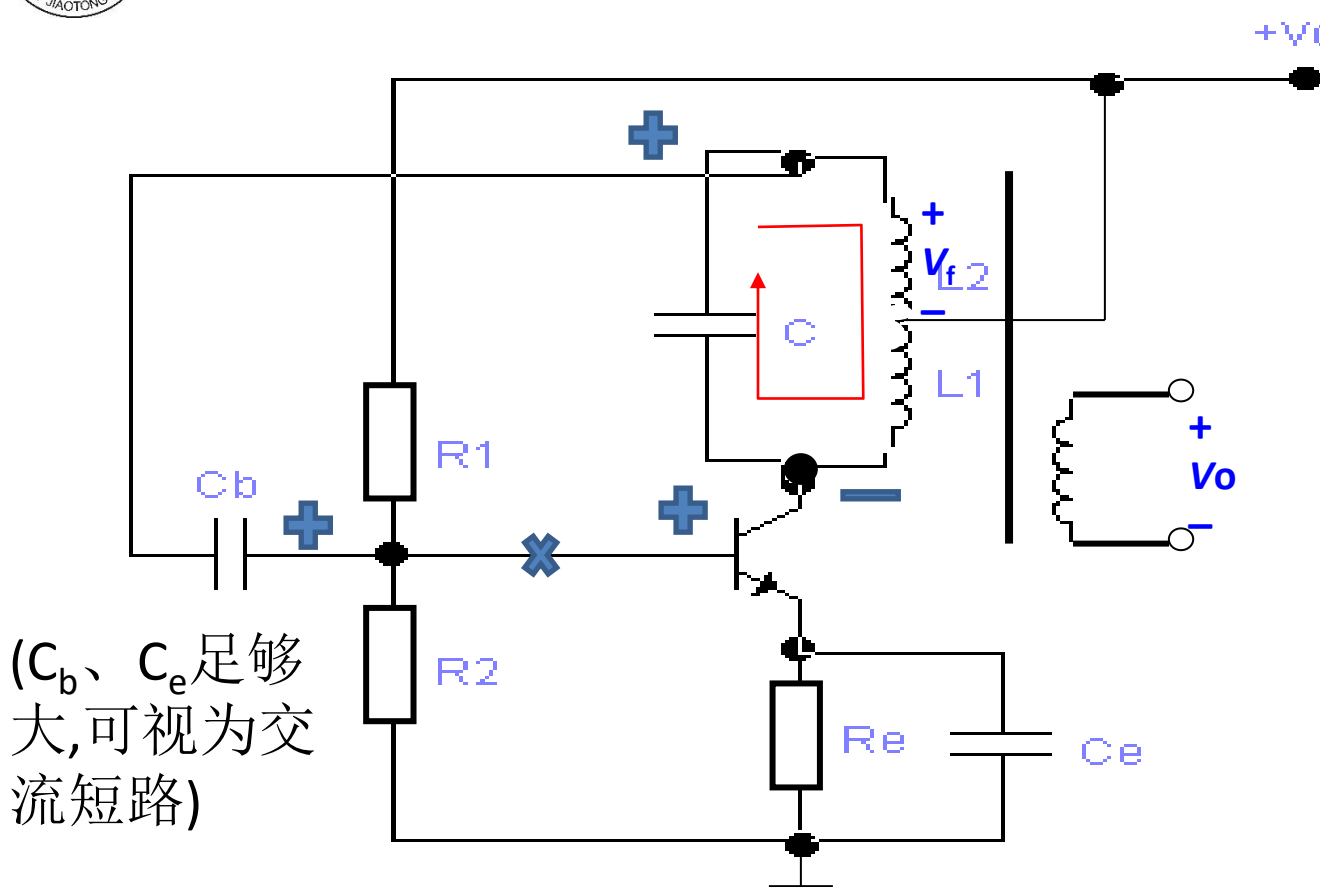
$$Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

即 $|\dot{I}_c| \approx |\dot{I}_L| \gg |\dot{I}_s|$

所以，对于一个谐振网络，分析时可以只考虑网络内部，端口外视为高阻，忽略其电流影响！



◆ 电感三点式



(C_b 、 C_e 足够大,可视为交流短路)

根据前述分析,
L2和L1非公共端
电压相位相反!
用瞬时极性法判
断可知满足相位
平衡条件。

起振: 需要选择合适的 L_2/L_1 值。

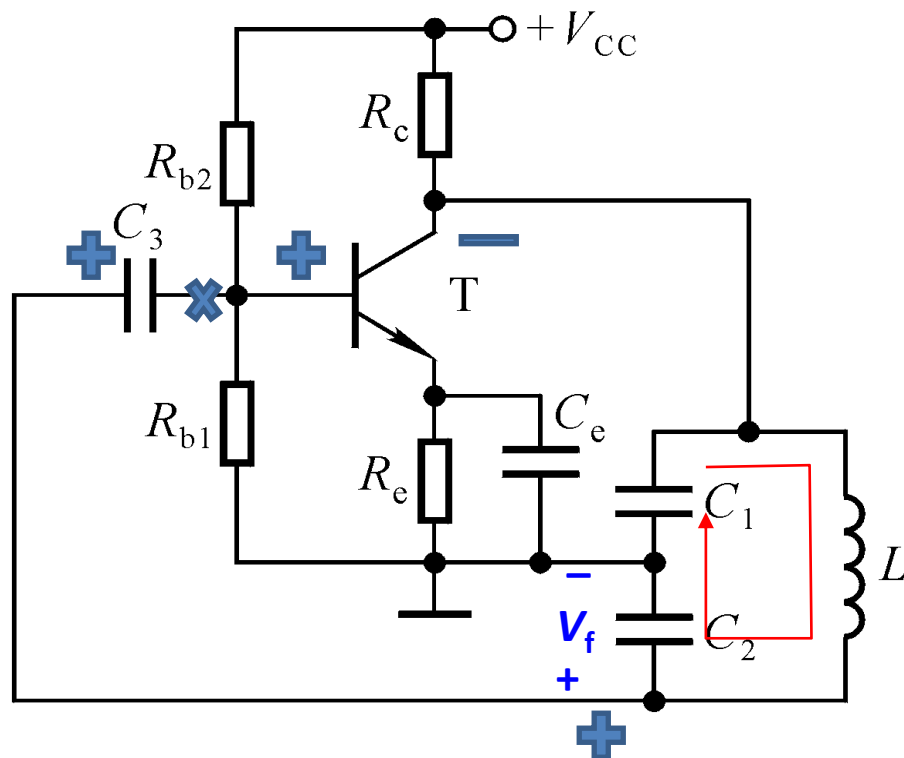
缺点: 由于反馈电压取自电感, 输出波形较差, 含高次谐波。

振荡频率:
$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C}}$$
 其中: $L' = L_1 + L_2 + 2M$

(M是绕组之间的互感)



◆ 电容三点式



(C_3 、 C_e 足够大, 可视为交流短路)

根据前述分析,
 C_2 和 C_1 非公共端
电压相位相反!
用瞬时极性法判断可知满足相位平衡条件。

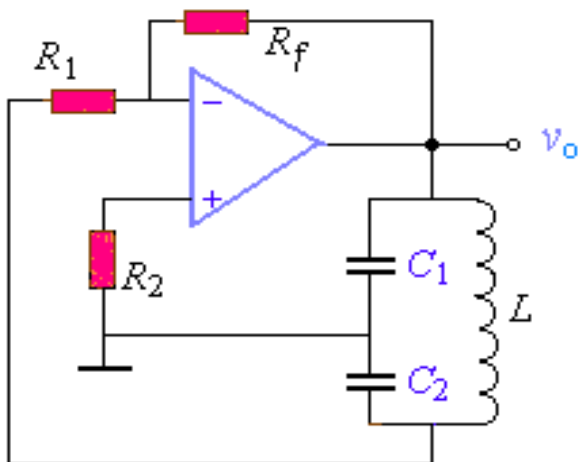
起振: 需要选择合适的 C_2/C_1 值。

特点: 由于反馈电压取自电容, 输出波形好, 但频率调节不便。

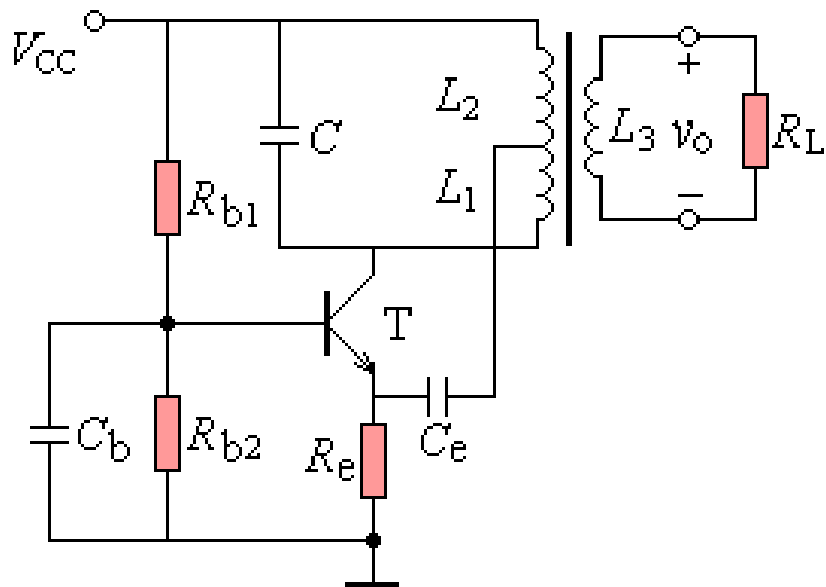
振荡频率:
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}} \quad \text{其中: } C' = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}$$



例：判断下列LC正弦振荡电路是否满足相位平衡条件



满足



满足



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

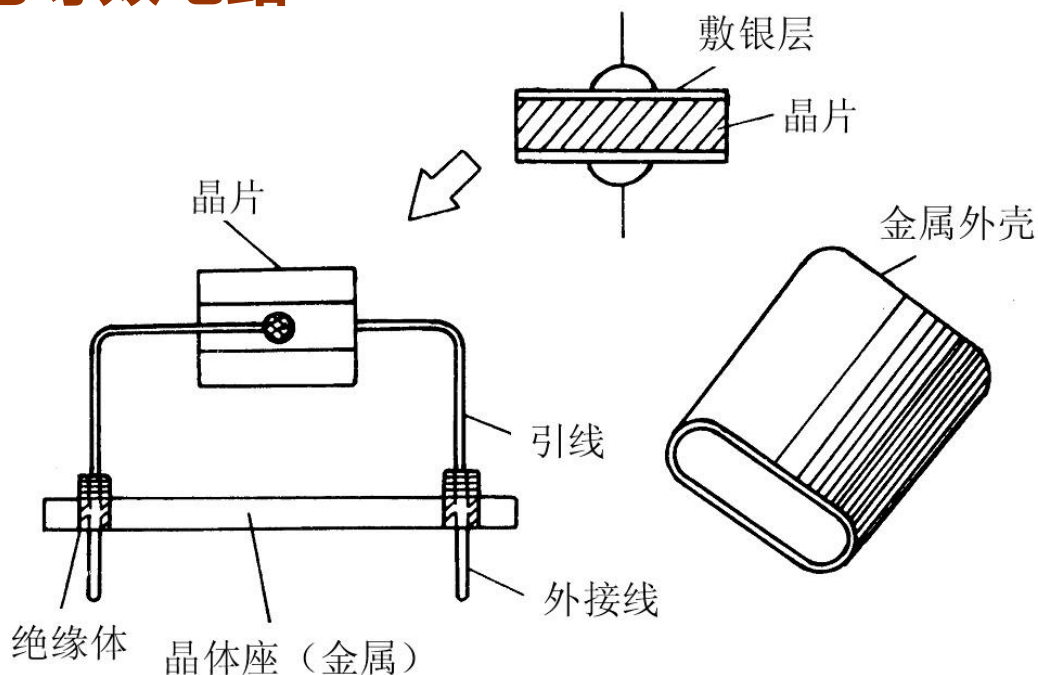
极板间加电场

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 \longrightarrow 机械振动 \longrightarrow 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

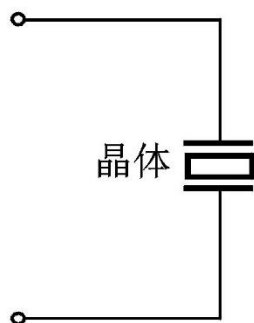
2. 石英晶体的基本特性与等效电路

等效电路

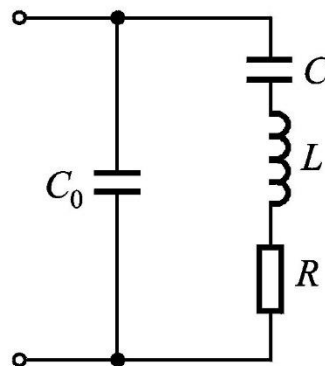
特性

A. 串联谐振

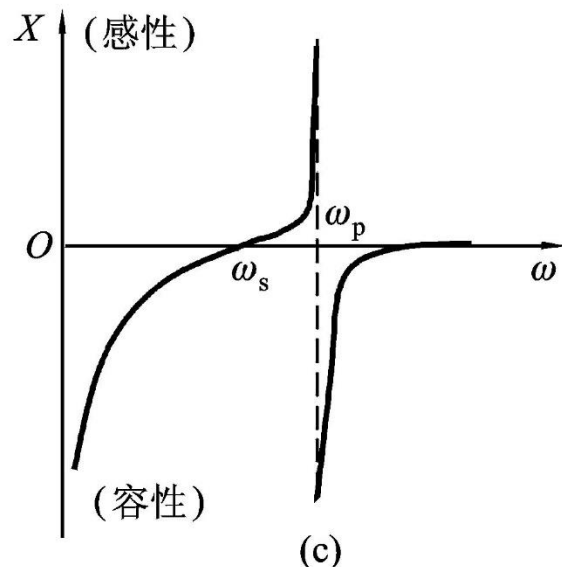
$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



(a)



(b)



(c)

晶体等效阻抗
为纯阻性 (**短路**)

(a) 代表符号

(b) 电路模型

(c) 电抗-频率响应特性

B. 并联谐振 $f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_0}}$ 晶体等效为**开路**

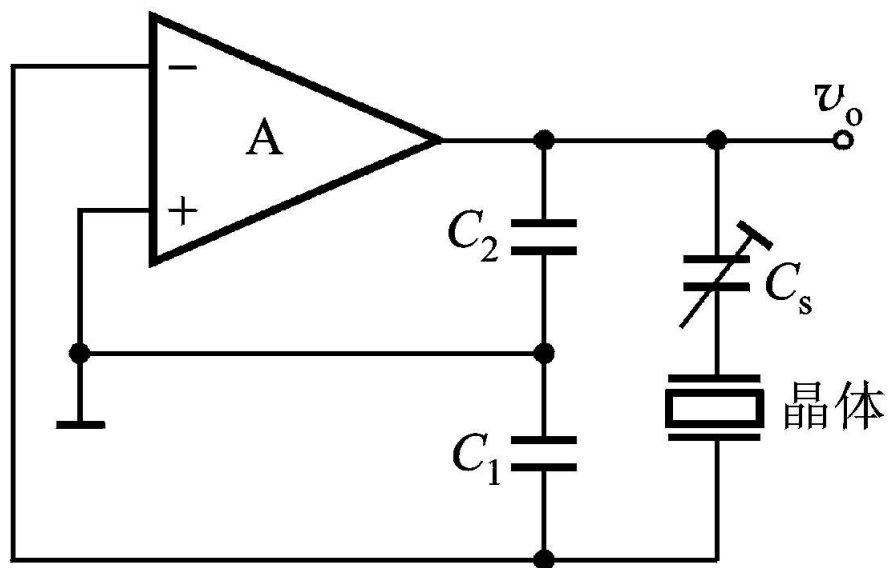
通常 $C \ll C_0$ 所以 f_s 与 f_p 很接近



10.7.4 石英晶体振荡电路

3. 石英晶体振荡电路

一种加入调节电容的并联式石英晶体振荡器



由于 C_s 的作用，石英晶体工作在 f_s 与 f_p 之间，相当于一个电感，与 C_1 、 C_2 组成电容三点式振荡器。从谐振回路来看，由于 C_2 、 C_1 往往取值比 C_s 大很多，振荡频率取决于石英晶体与 C_s 的谐振频率。



10.7.4 石英晶体振荡电路

3. 石英晶体振荡电路

一种串联型石英晶体振荡器（利用串联谐振频率时晶体可视为短路）

