

第4章 正弦波振荡器

- 4.1 反馈振荡器的原理
- 4.2 LC 振荡器
- 4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度
- 4.4 石英晶体振荡器

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

一、两种改进的电容反馈振荡器

一般电容、电感反馈振荡器的缺陷：

由于极间电容对电容反馈和电感反馈振荡器的回路电抗均有影响，从而对振荡器也会有影响。而极间电容受环境温度、电源电压等因素的影响较大，故电路的频率稳定度不高。

为了提高稳定度，需要对电路做改进以减少晶体管极间电容对回路的影响。

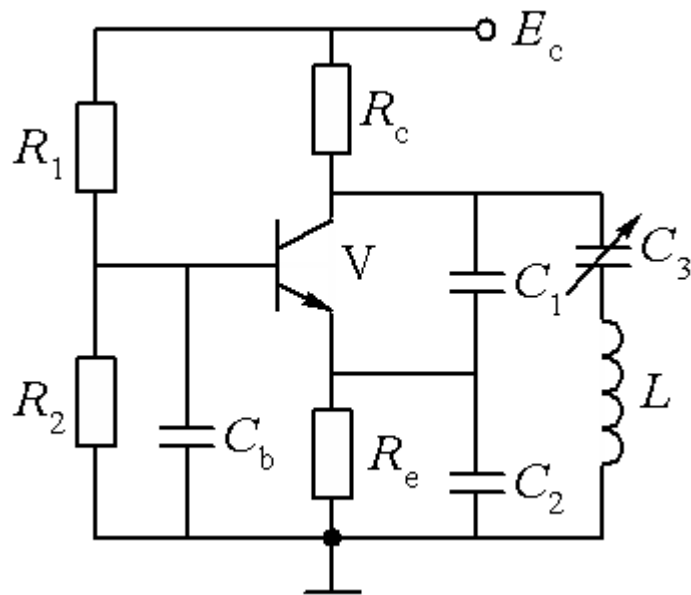
克拉拨振荡器

西勒振荡器

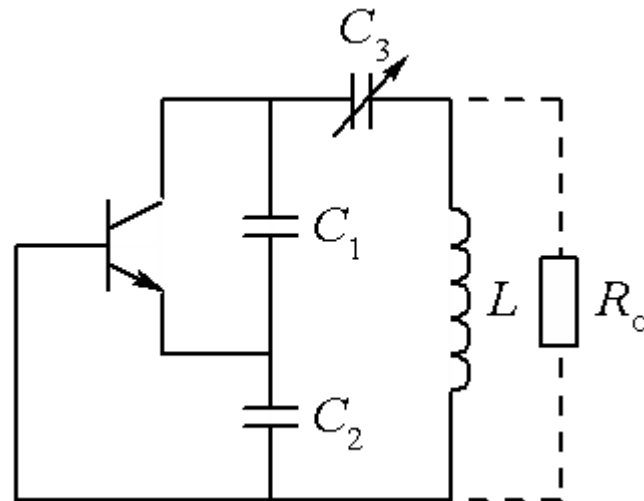
4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

一、两种改进的电容反馈振荡器

① 克拉拨振荡器



实际电路



交流等效电路

R_c 起隔离作用，也可用扼流圈；
 $C_3 \ll C_1, C_2$

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

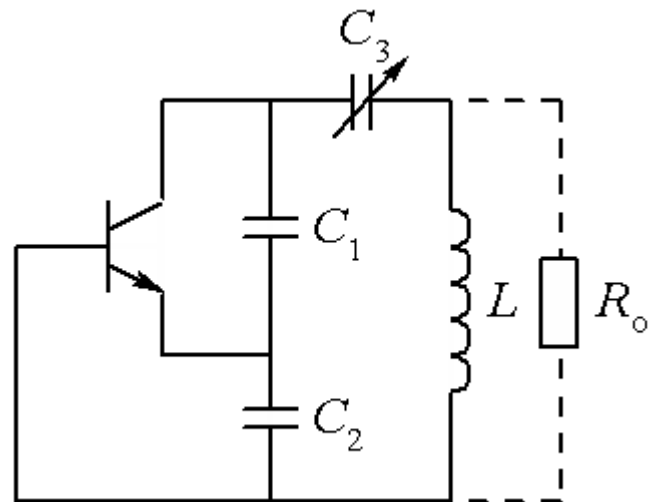
一、两种改进的电容反馈振荡器

① 克拉拨振荡器

回路总电容：

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \quad C_3 \gg C_1 \gg C_2 \quad \frac{1}{C_3}$$

$$C \approx C_3$$



交流等效电路

回路总电容主要由 C_3 决定，而极间电容与 C_1 、 C_2 并联。
故极间电容对总电容的影响很小

C_1 、 C_2 是回路的一部分，晶体管部分接入：

$$p = C/C_1 = C_3/C_1$$

C_1 、 C_2 越大， p 越小，耦合越弱 \rightarrow 克拉拨振荡器的频率稳定度越高

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

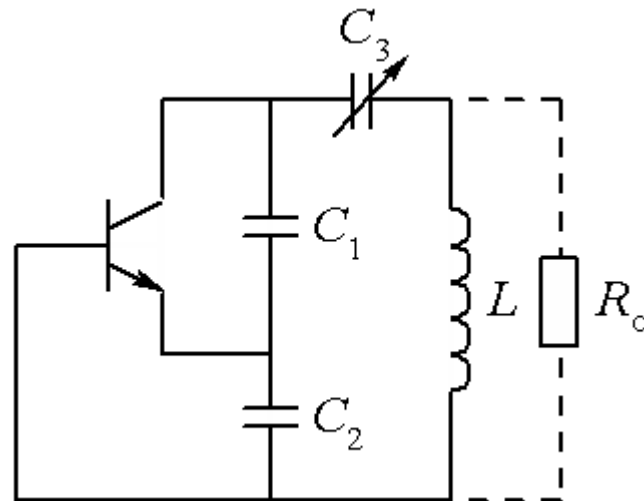
一、两种改进的电容反馈振荡器

① 克拉拨振荡器

$$p = \frac{C}{C_1} \square \frac{C_3}{C_1}$$

电感两端的电阻 R_0 等效到晶体管 C、E 两端的负载电阻 R_L 为：

$$R_L = p^2 R_0 \square \left(\frac{C_3}{C_1}\right)^2 R_0$$



交流等效电路

C_1 过大，负载 R_L 会很小，放大器增益较低，环路增益较小，有可能使振荡器停振。

振荡频率： $\omega_1 \square \sqrt{\frac{1}{LC}} \square \sqrt{\frac{1}{LC_3}}$

反馈系数： $k_F = \frac{C_1}{C_2}$

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

一、两种改进的电容反馈振荡器

① 克拉拨振荡器

讨论：

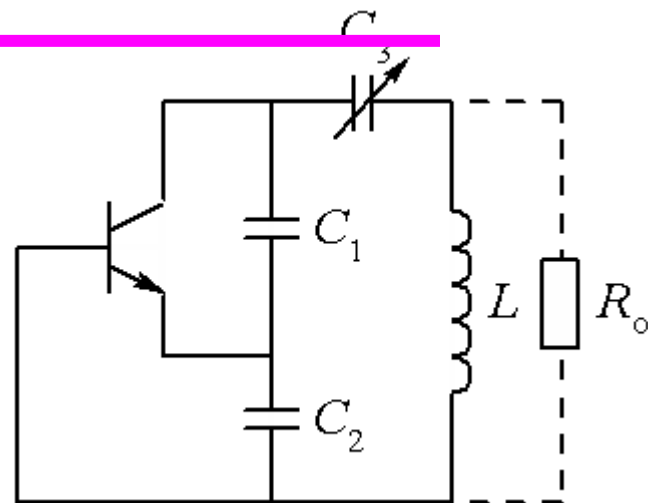
- ① 该电路克服了晶体管极间电容的影响，因而频率稳定度较高。在 $C_1、C_2 \gg C_3$ 的条件下，电路振荡频率基本上与 $C_1、C_2$ 无关，则 $C_3 \downarrow \rightarrow$

- ② 稳定度确定后， K_F 确定， $\nearrow \square p \nearrow$

$\square R_L \nearrow \square$ 振幅 \nearrow 波段范围内输出振幅变化较大

- ③ C_3 较小 $\rightarrow C_3$ 变化范围小 $\rightarrow \omega_1$ 变化小 \rightarrow 用于固定频率或波段较窄的振荡

- ④ 由于电路中串入了比 $C_1、C_2$ 小得多的 C_3 ，故晶体管集电极与振荡回路的耦合比电容三点式弱得多，虽有利于振荡频率的稳定，但对于起振条件却非常不利，在其他条件相同的情况下，该电路起振较困难。



交流等效电路

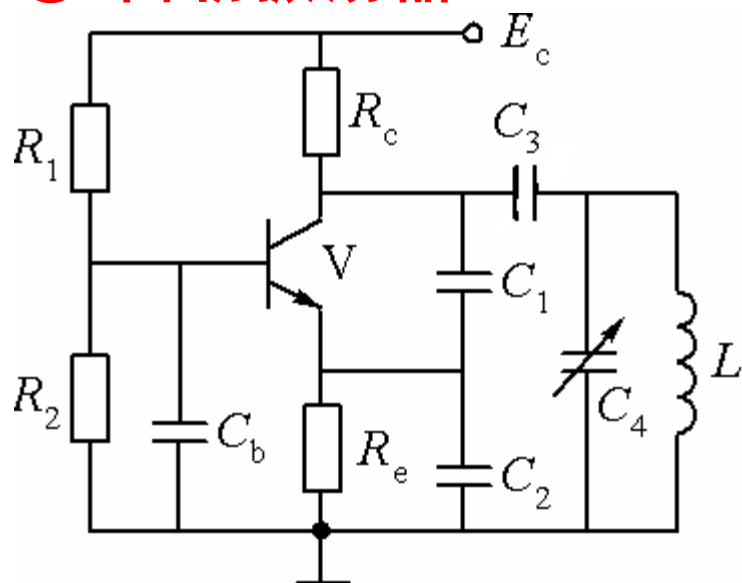
$$p = \frac{C}{C_1} \square \frac{C_3}{C_1}$$

$$R_L = p^2 R_0 \square \left(\frac{C_3}{C_1}\right)^2 R_0$$

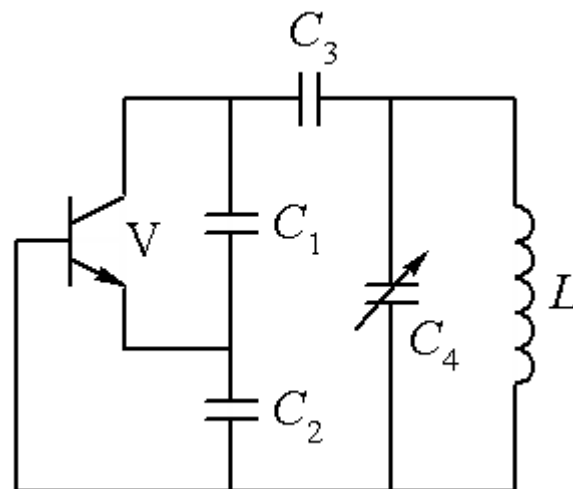
4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

一、两种改进的电容反馈振荡器

① 西勒振荡器



实际电路



交流等效电路

主要特点：与电感 L 并联一可变电容 C_4 ，改变振荡器的工作波段

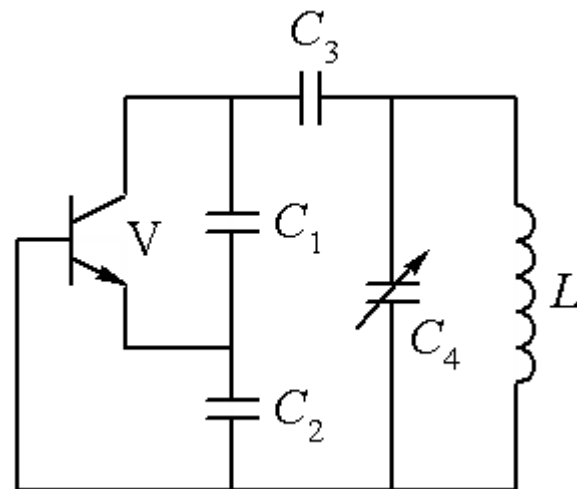
$C_3 \ll C_1$ 、 C_2 ，起微调频率的作用

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

一、两种改进的电容反馈振荡器

① 西勒振荡器

接入系数：
$$p_1 = \frac{\frac{1}{C_1}}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \approx \frac{C_3}{C_1}$$



交流等效电路

回路总电容：
$$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} + C_4 \approx C_3 + C_4$$

振荡器的振荡频率：
$$\omega_1 \approx \sqrt{\frac{1}{LC}} \approx \sqrt{\frac{1}{L(C_3 + C_4)}}$$

改变 $C_4 \rightarrow$ 改变 $\omega_1 \rightarrow$ 西勒振荡器的频率覆盖系数较大

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

二、频率稳定度的意义和表征

1. **频率稳定**——在各种外界条件发生变化的条件下，要求振荡器的实际工作频率与指定频率之间的偏差最小
2. **频率稳定度**——由于外界条件的变化，引起振荡器的实际工作频率偏离标称频率的程度，一般用频率偏差来表示
3. **频率偏差**——实际频率和指定频率之间的偏差

绝对偏差：
$$\Delta f = f_1 - f_0$$

相对偏差：
$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f_1 - f_0}{f_0}$$

频率稳定度：通常定义为一定时间间隔内的频率相对变化

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

二、频率稳定度的意义和表征

4. **长期稳定度**——指一天以上以至几个月的时间间隔内的频率相对变化。（元器件的老化引起）

短期稳定度——一天以内，以小时、分钟、或秒计时的时间间隔内的频率相对变化。（温度、电源电压）

瞬时稳定度——一秒或毫秒时间间隔内的频率相对变化。（振荡器内部噪声）

一般说的频率稳定度主要是指**短期稳定度**

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

三、振荡器的稳频原理

(1) 振荡器不稳定的原因

由工作原理可知，振荡器的频率是由振荡器的相位条件决定的，即

$$\varphi_L + (\varphi_f + \varphi_{F\Box}) = 0$$

满足相位平衡条件的 ω 就是振荡器的振荡频率 ω_1 。故能引起 $\varphi_{F\Box}$ φ_f φ_L 变化的因素都会引起 ω_1 的变化。

一般 $\varphi_{F'} + \varphi_f \Box$

主要引起频率变化的是 φ_L

根据第 2 章的讨论可知： $\tan \varphi_L = -\frac{2Q_L(\omega_1 - \omega_0)}{\omega_0}$ $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

引起 φ_L 变化的因素是 Q_L 和

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

三、振荡器的稳频原理

(1) 振荡器不稳定的原因

$$\tan \varphi_L = -\frac{2Q_L(\omega_1 - \omega_0)}{\omega_0}$$

$$\begin{matrix} \square Q_L \\ \square \\ \square \omega_0 \end{matrix} \nearrow \square \varphi_L \nearrow \square \omega_1 \nearrow$$

$$\varphi_L = -(\varphi_f + \varphi_{F\square}) \rightarrow \tan \varphi_L = -\frac{2Q_L(\omega_1 - \omega_0)}{\omega_0} = \tan[-(\varphi_f + \varphi_{F\square})]$$

$$\rightarrow \omega_1 = \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q_L} \tan(\varphi_f + \varphi_{F\square})$$

$$\rightarrow \Delta\omega_1 = \frac{\square\omega_1}{\square\omega_0} \Delta\omega_0 + \frac{\square\omega_1}{\square Q_L} \Delta Q_L + \frac{\square\omega_1}{\square(\varphi_f + \varphi_{F\square})} \Delta(\varphi_f + \varphi_{F\square})$$

$$\text{一般 } Q_L \text{ 值较高, 即 } \omega_1/\omega_0 \approx 1 \quad \frac{\square\omega_1}{\square\omega_0} \approx 1$$

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

三、振荡器的稳频原理

(1) 振荡器不稳定的原因

$$\left. \begin{aligned} \Delta\omega_1 &= \frac{\omega_1}{\omega_0} \Delta\omega_0 + \frac{\omega_1}{Q_L} \Delta Q_L + \frac{\omega_1}{(\varphi_f + \varphi_{F\varphi})} \Delta(\varphi_f + \varphi_{F\varphi}) \\ \omega_1 &= \omega_0 + \frac{\omega_0}{2Q_L} \tan(\varphi_f + \varphi_{F\varphi}) \quad \frac{\omega_1}{\omega_0} \approx 1 \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\Delta\omega_1 \approx \Delta\omega_0 - \frac{\omega_0}{2Q_L^2} \tan(\varphi_f + \varphi_{F\varphi}) \Delta Q_L + \frac{\omega_0}{2Q_L \cos^2(\varphi_f + \varphi_{F\varphi})} \Delta(\varphi_f + \varphi_{F\varphi})$$

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

三、振荡器的稳频原理

(2) 回路谐振频率₀的影响

$$\Delta\omega_1 \approx \Delta\omega_0 - \frac{\omega_0}{2Q_L^2} \tan(\varphi_f + \varphi_{F\Box}) \Delta Q_L + \frac{\omega_0}{2Q_L \cos^2(\varphi_f + \varphi_{F\Box})} \Delta(\varphi_f + \varphi_{F\Box})$$

由 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 有: $\Delta\omega_0 = \frac{\partial\omega_0}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial\omega_0}{\partial C} \Delta C$

$$\Delta\omega_0 = -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{C}} L^{-3/2} \Delta L - \frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{L}} C^{-3/2} \Delta C = -\frac{1}{2} \frac{1}{\sqrt{LC}} \left(\frac{1}{L} \Delta L + \frac{1}{C} \Delta C \right)$$

$$\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C}$$

L、C 的稳定度将影响 ω_1 的稳定度

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

三、振荡器的稳频原理

(3) $\varphi_{F'} + \varphi_f$ Q_L 和 对频率的影响

$$\Delta\omega_1 \approx \Delta\omega_0 - \frac{\omega_0}{2Q_L^2} \tan(\varphi_f + \varphi_{F'}) \Delta Q_L + \frac{\omega_0}{2Q_L \cos^2(\varphi_f + \varphi_{F'})} \Delta(\varphi_f + \varphi_{F'})$$

由上式可以看出，频率稳定度取决于 $(\varphi_f + \varphi_{F'})$ 和 ΔQ_L

另外， $\varphi_f + \varphi_{F'}$ 的绝对值越小，频率稳定度越高。

Q_L 越大，频率稳定度越高

$$|\varphi_{F'} + \varphi_f| \ll \Delta\omega_1$$

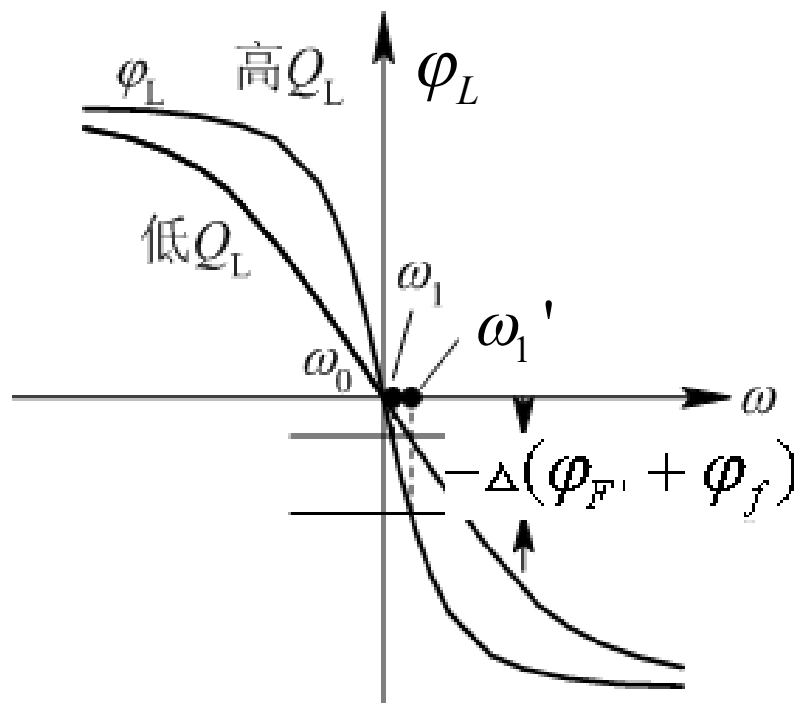
$$Q_L \gg \Delta\omega_1$$

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

三、振荡器的稳频原理

(3) $\varphi_{F'} + \varphi_f$ 和 Q_L 对频率的影响

$$\Delta\omega_1 \approx \Delta\omega_0 - \frac{\omega_0}{2Q_L^2} \tan(\varphi_f + \varphi_{F'}) \Delta Q_L + \frac{\omega_0}{2Q_L \cos^2(\varphi_f + \varphi_{F'})} \Delta(\varphi_f + \varphi_{F'})$$



4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

四、提高频率稳定度的措施

① 提高振荡回路的标准性

振荡回路的标准性是指回路元件和电容的标准性。温度是影响的主要因素。

加恒温槽，采用温度系数较小的电感电容

② 减少晶体管的影响

在前面分析时已提到，极间电容将影响频率稳定度，在设计电路时应尽可能减少晶体管和回路之间的耦合。

另外，应选择 f_T 较高的晶体管， f_T 越高，高频性能越好，可以保证在工作频率范围内均有较高的跨导，电路易于起振；而且 f_T 越高，晶体管内部相移越小。一般，选择 $f_T > (3 \sim 10)f_{\max}$ ， f_{\max} 是振荡器最高工作频率

4.3 改进的 LC 振荡器及频率稳定度

四、提高频率稳定度的措施

③ 提高回路的品质因数

Q_L ☐ ☐ 相位越稳定 频率越稳定

④ 减少电源、负载等的影响

电源电压的波动，会使晶体管的工作点、电流发生变化，从而改变晶体管的参数，降低频率稳定度——振荡器电源应采取稳压措施

负载电阻并联在回路的两端，这会降低回路的品质因数，从而使振荡器的频率稳定度下降。——应减小负载对回路的耦合，可以在负载与回路之间加射极跟随器。