



广东工业大学
Guangdong University of Technology

广东工业大学

通信电路与系统

信息工程学院

李志忠



廣東工業大學
Guangdong University of Technology

广东工业大学

第五章 正弦波振荡器

信息工程学院

李志忠

目录

- 5.1 概述与反馈型LC振荡原理
- 5.2 反馈型LC振荡电路
- 5.3 振荡器的频率稳定原理和高稳定度的LC振荡器
- 5.4 晶体振荡电路


◆ 5.3 振荡器的频率稳定原理


一、频率稳定度的定义

频率稳定度在数量上通常用频率偏差来表示。

频率偏差是指振荡器的实际工作频率和标称频率之间的偏差。它可分为绝对偏差和相对偏差。

设 f 为实际振荡频率， f_c 为指定标称频率，则

1、绝对频率偏差： $\Delta f = |f - f_c|$  绝对频率准确度

2、相对频率偏差： $\frac{\Delta f}{f_c} = \frac{|f - f_c|}{f_c}$  相对频率准确度

3、频率稳定度的定义：

在一定时间间隔内，振荡器相对频率偏差的最大值，用 $\left. \frac{\Delta f_{\max}}{f_c} \right|_{\text{时间间隔}}$ 表示。该数值越小越好，稳定性越高。

4、三种常用的频率稳定度

长期频率稳定度：一般指一天以上甚至数月的时间间隔内的相对频率变化的最大值。这种变化通常是由振荡器中元器件老化而引起的。

短期频率稳定度：一般指一天以内，以小时、分或秒计算的时间间隔的频率相对变化。产生这种频率不稳的因素有温度、电源电压等。

瞬时频率稳定度：一般指秒或毫秒时间间隔内的频率相对变化。引起这类频率不稳定的主要因素是振荡器内部噪声。

◆ 5.3 振荡器的频率稳定原理

二、振荡器频率稳定度的表示式

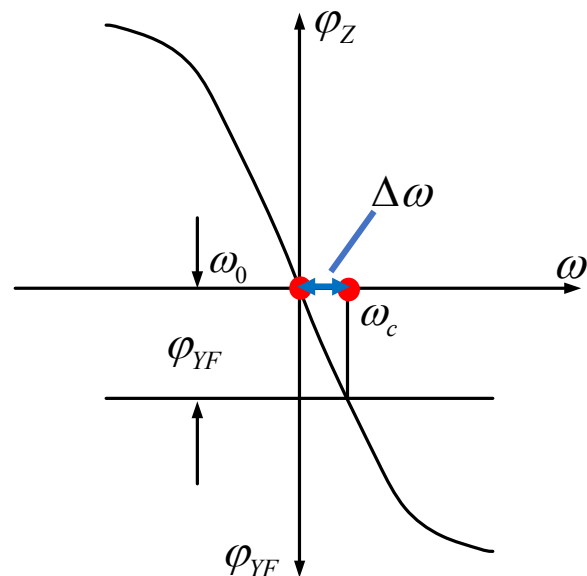
1、振荡频率 ω_c 的表示式

振荡器的振荡频率

$$\omega_c = \omega_0 \left(1 + \frac{1}{2Q} \tan \varphi_{YF} \right)$$

谐振回路的谐振频率

$\Delta \omega_c$



振荡器的相位平衡条件

2、频率稳定度的表示式

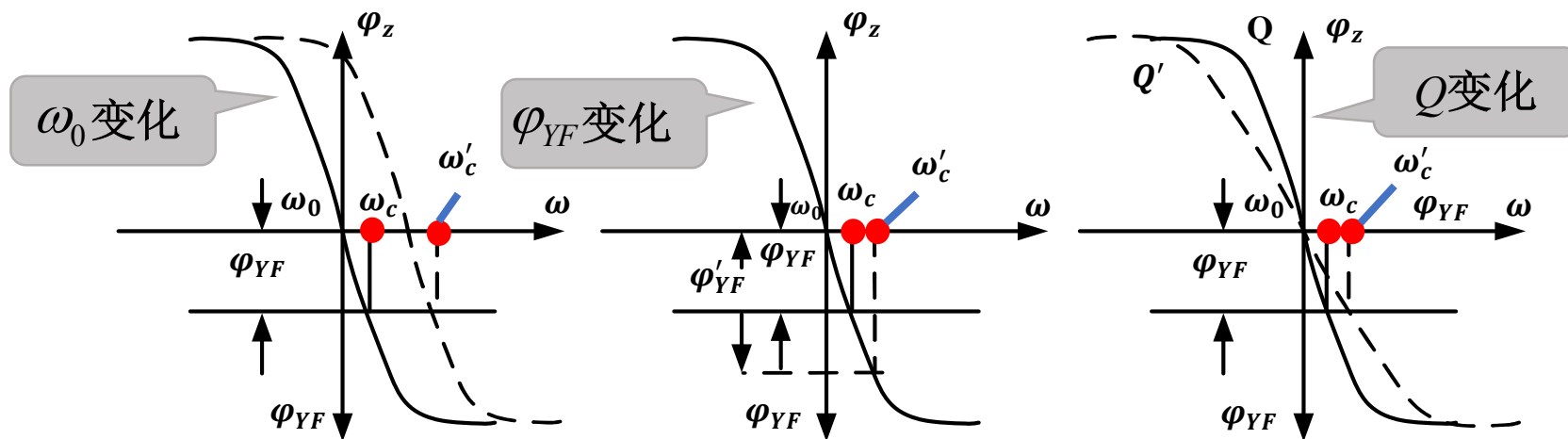
$$\frac{\Delta \omega_c}{\omega_0} = \frac{\Delta \omega_0}{\omega_0} + \frac{1}{2Q \cos^2 \varphi_{YF}} \Delta \varphi_{YF} - \frac{\tan \varphi_{YF}}{2Q^2} \Delta Q$$

运用知识点：并联谐振回路频率特性 $\phi(\omega) = -\arctan \frac{2Q(\omega - \omega_0)}{\omega_0}$

◆ 5.3 振荡器的频率稳定原理

二、振荡器频率稳定度的表示式

3、 $\Delta\omega_0$ 、 $\Delta\varphi_{YF}$ 、 ΔQ 对振荡频率影响的定性描述



$$\frac{\Delta\omega_c}{\omega_0} = \frac{\Delta\omega_0}{\omega_0} + \frac{1}{2Q \cos^2 \varphi_{YF}} \Delta\varphi_{YF} - \frac{\tan \varphi_{YF}}{2Q^2} \Delta Q$$

总结：谐振频率 ω_0 的变化、相角 φ_{YF} 的变化和有载品质因数 Q 的变化都会引起频率稳定度的变化。

◆ 5.3 振荡器的频率稳定原理

三、引起频率不稳的原因

- 1、温度变化会引起 L 、 C 和晶体管 y 参数变化。
- 2、湿度变化会引起 L 、 Q 变化。
- 3、电源电压变化会引起晶体管参数变化。
- 4、机械振动会引起 L 的变化。

结论：引起振荡器频率不稳定的外部因素是温度、湿度、电源电压波动和机械振动。这些外因变化会引起 $\Delta\omega_0$ 、 $\Delta\varphi_{YF}$ 、 ΔQ 的变化。因此产生频率不稳定。

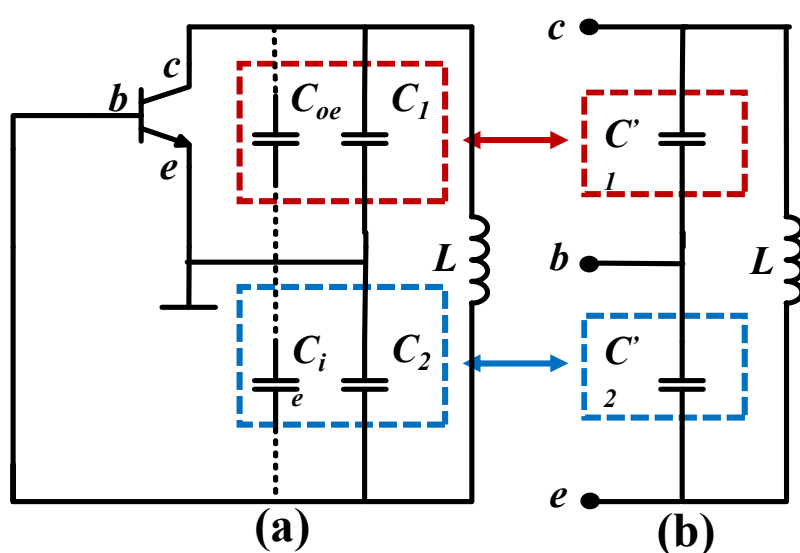
◆ 5.3 振荡器的频率稳定原理

四、提高频率稳定度的措施

1. 提高振荡回路的标准性：选择稳定度高的元件。
2. 减少晶体管的影响：选择 f_T 较高的晶体管。
3. 提高回路的品质因数：据 LC 回路的特性， Q 值越大，相频特性斜率就越大，相位越稳定。
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等变化，负载电阻会降低回路的品质因数。
5. 选用高稳定度的振荡电路：如克拉波振荡电路、西勒振荡电路、石英晶体振荡电路。
6. 远离热源，屏蔽干扰源。

◆ 5.4 高稳定度的LC振荡器

一、一般电容三点式振荡电路频率稳定性的分析



$$C'_1 = ? \quad C'_2 = ?$$

$$C'_1 = C_1 + C_{oe} \quad C'_2 = C_2 + C_{ie}$$

$$C'_{oe} = ? \quad C'_{ie} = ?$$

当 C_{oe} 、 C_{ie} 没变化时，回路
总电容 $C_\Sigma = \frac{C'_1 C'_2}{C'_1 + C'_2}$ 对应振荡
频率为：

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC_\Sigma}} \quad F \approx C_1 / C_2$$

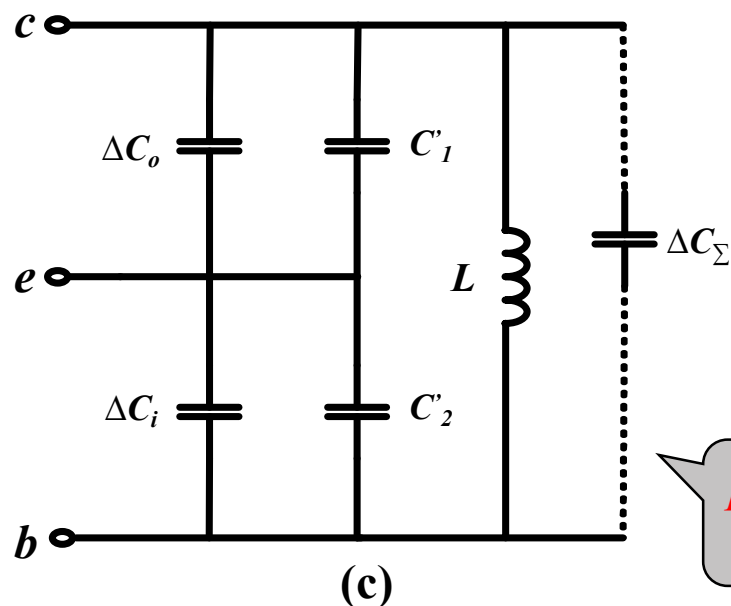
并联谐振频率

存在问题：

$C \rightarrow f \rightarrow F$, 不易用可变电容来调频率
 C_{oe} 、 C_{ie} 影响振荡频率的稳定性

◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

C_{oe} 、 C_{ie} 影响振荡频率的稳定性分析



p_1 和 p_2 能否同时变小?

因 C_{oe} 、 C_{ie} 与晶体管工作状态和外界条件有关。

当 C_{oe} 变化 ΔC_o ， C_{ie} 变化 ΔC_i 时，总电容的增量：

$$\Delta C_{\Sigma} = p_1^2 \Delta C_o + p_2^2 \Delta C_i$$

$$p_1 = ? \quad p_2 = ?$$

$$p_1 = \frac{C_{\Sigma}}{C'_1} = \frac{C'_2}{C'_1 + C'_2}$$

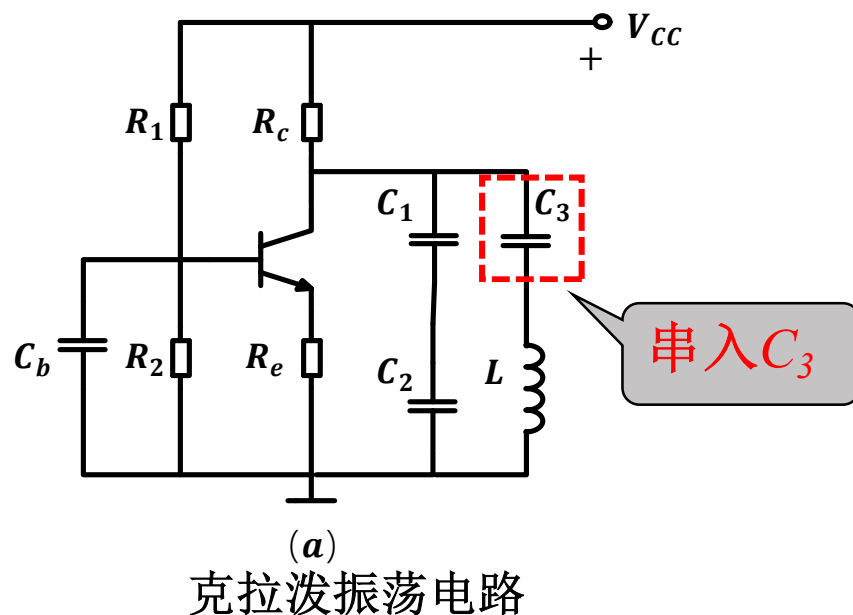
$$p_2 = \frac{C_{\Sigma}}{C'_2} = \frac{C'_1}{C'_1 + C'_2}$$

结论：一般电容三点式振荡电路 p_1 、 p_2 不可能同时减小，故受外界影响后，振荡频率会发生变化，即-频率稳定度不可能做得较高。

◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

二、克拉泼 (Clapp) 振荡电路

属于哪种组态？ 共基型电路



和一般电容式振荡器有何区别？

1、电路特点

①在电感支路串接小电容 C_3
 C_3 一般可调

②满足 $C_3 \ll C_1, C_3 \ll C_2$
可使回路与晶体管的输入、输出参数隔离开，也就是实现晶体管与回路之间的松耦合。
[管子的内部参数对回路的影响非常小]

③回路总电容为：

$$C_{\Sigma} = \frac{C_1' C_2' C_3}{C_1' C_2' + C_2' C_3 + C_1' C_3} = ?$$

$$C_{\Sigma} \approx C_3$$

◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

二、克拉泼（Clapp）振荡电路

2、相位平衡条件（正反馈）

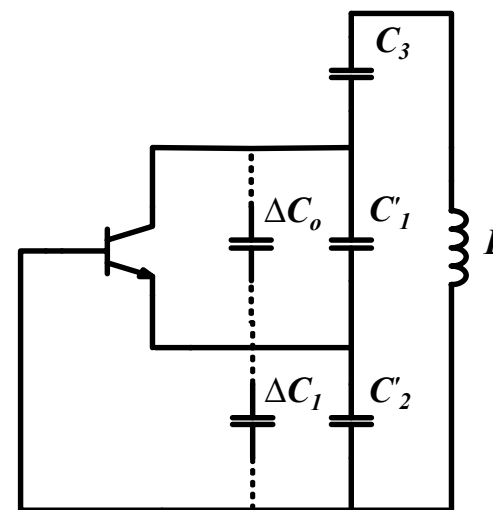
X_{ce} 为容抗, X_{be} 容抗, 同性质。 X_{cb} 可等效为感抗, 与 X_{ce} 、 X_{cb} 反性质。
满足电容三点式振荡器相位平衡条判断准则, 为电容三点式振荡电路。

3、振荡频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}$

因为 $C_\Sigma \approx C_3$, 所以克拉

泼振荡器的振荡频率为: $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$

频率可调:
$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC_3}}, \text{调节 } C_3 \text{ 可改变 } \omega_0 \\ F \approx C_1 / C_2 \therefore C_3 \text{ 改变 } F \text{ 不受影响} \end{cases}$$



(b)

等效电路

◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

二、克拉泼 (Clapp) 振荡电路

4、稳频原理

外部环境变化时, 产生总的电容增量为?

$$\Delta C_{\Sigma} = p_1^2 \Delta C_o + p_2^2 \Delta C_i$$

$$\text{其中 } p_1 = \frac{C_{\Sigma}}{C_1'} \approx \frac{C_3}{C_1'} \quad p_2 = \frac{C_{\Sigma}}{C_2'} \approx \frac{C_3}{C_2'}$$

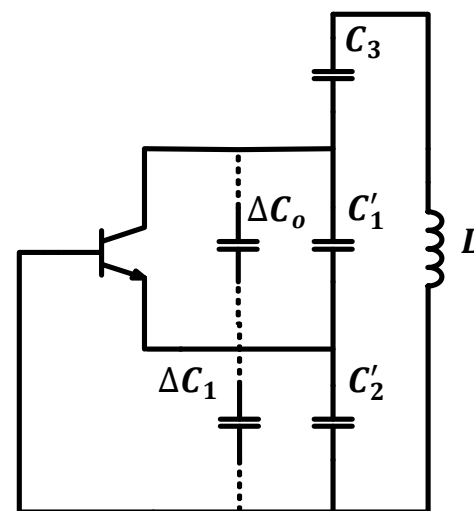
$C_3 \ll C_1, C_3 \ll C_2 \rightarrow p_1 \text{ 和 } p_2 \text{ 都很小}$

讨论:

① p_1 、 p_2 可以同时减小, ΔC_{Σ} 可很小, 故频率稳定度比一般电容三点式要高。

② p_1 、 p_2 的减小受到电路起振条件的限制, 频率稳定度不可能很高?

为什么?



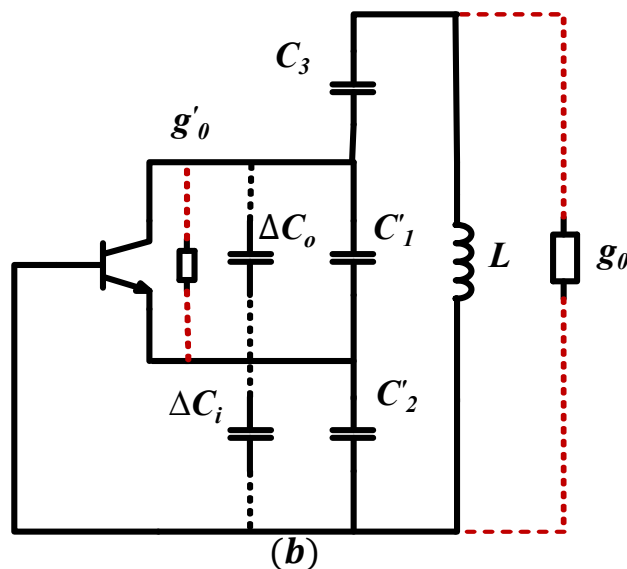
(b)

等效电路

◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

二、克拉泼（Clapp）振荡电路

分析



$$p_1' \gg p_1 \Rightarrow g_0' \gg g_0$$

$$\dot{A}_o = \frac{U_c}{U_i} = \frac{|y_{fe}|}{g_\Sigma} \downarrow$$

$$F = \frac{C_1'}{C_2'} \downarrow$$

$$A_0 F \downarrow$$

振幅稳定条件: $A_0 F > 1$

$$C_2' = C_2 + C_{ie} \text{ 折合到 } c、e \text{ 的电导: } g_0' = p_1^2 g_0 \quad p_1 = \frac{1/\omega C_1' + 1/\omega C_2'}{1/\omega C_1'} = \frac{C_1' + C_2'}{C_2'}$$

$$C_1' = C_1 + C_{oe} \text{ 串接入 } C_3 \text{ 后 } p_1' = \frac{1/\omega C_1' + 1/\omega C_2' + 1/\omega C_3}{1/\omega C_1'} \approx \frac{1/\omega C_3}{1/\omega C_1'} = \frac{C_1'}{C_3}$$

◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

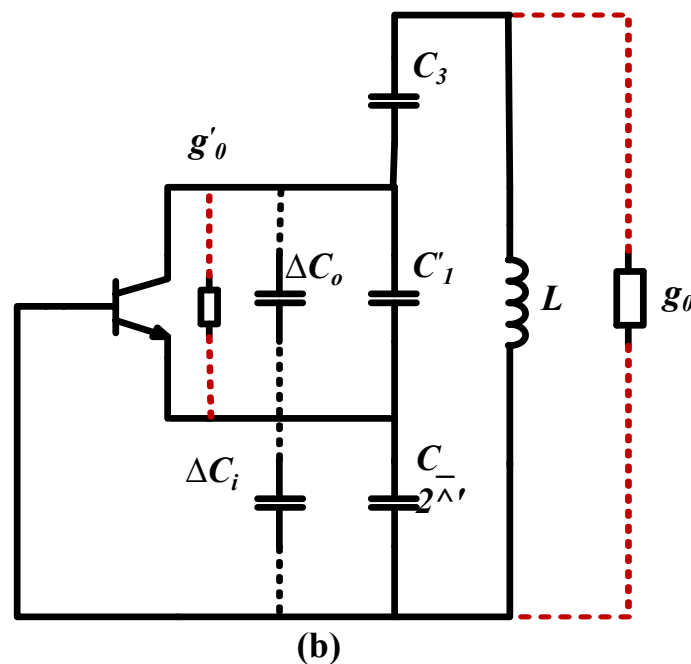
二、克拉泼（Clapp）振荡电路

$$C_2' = C_2 + C_{ie} \text{ 折合到 } c、e \text{ 的电导: } g_0' = p_1^2 g_0 \quad p_1 = \frac{1/\omega C_1' + 1/\omega C_2'}{1/\omega C_1'} = \frac{C_1' + C_2'}{C_2'}$$

$$C_1' = C_1 + C_{oe} \text{ 串接入 } C_3 \text{ 后 } p_1' = \frac{1/\omega C_1' + 1/\omega C_2' + 1/\omega C_3}{1/\omega C_1'} \approx \frac{1/\omega C_3}{1/\omega C_1'} = \frac{C_1'}{C_3}$$

$$\therefore \begin{cases} C_3 \downarrow \xRightarrow{\omega_0 = 1/\sqrt{LC_3}} \omega_0 \uparrow, \\ \text{但 } C_3 \downarrow \Rightarrow g_0' \uparrow \uparrow \Rightarrow R_0' \downarrow \downarrow \Rightarrow U_{ce} \downarrow \downarrow \end{cases}$$

$\therefore C_3$ 减小可能导致停振，故振荡器的上限频率受限制



◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

二、克拉泼（Clapp）振荡电路

优点： 1. 选取 $C_1 \gg C_3, C_2 \gg C_3$ ，提高频稳定性；
2. 用 C_3 来调频率，改变频率比较方便。

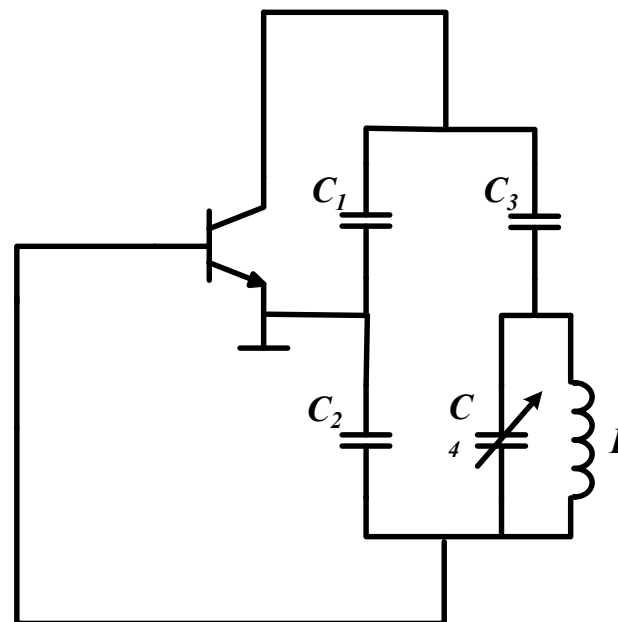
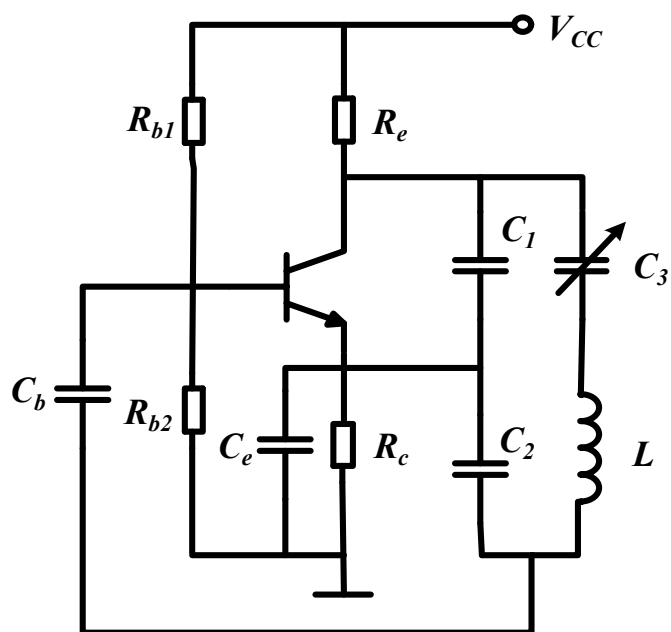
缺点： 1. C_1 、 C_2 不能选的太大，若 C_1 、 C_2 过大，则振荡电压幅度太小。
2. 当 $C_3 \downarrow \rightarrow f_0 \uparrow$ 时，振荡幅度 \downarrow ，严重时可能停振，所以振荡频率上限受到限制。

主要用作：固定振荡器

◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

二、克拉泼（Clapp）振荡电路

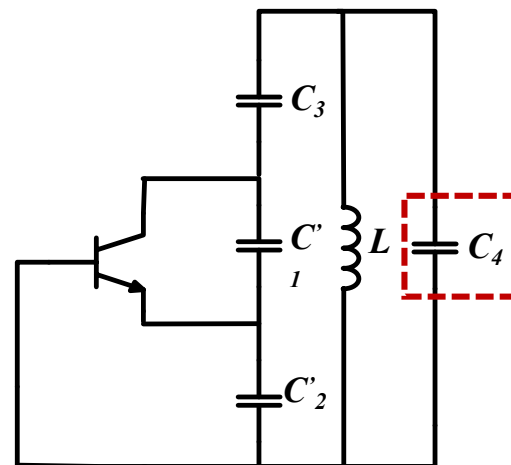
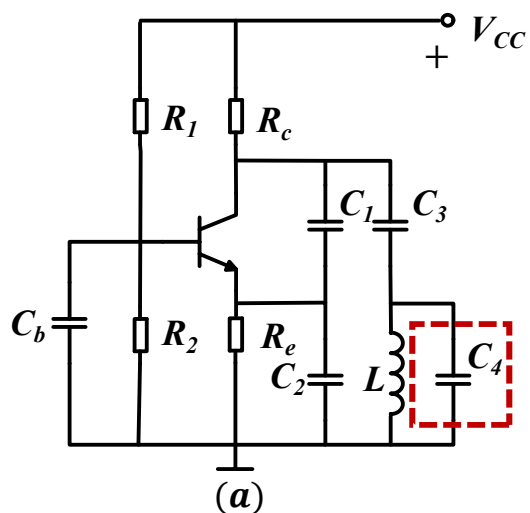
属于哪种组态？ 共基型电路



◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

三、西勒（Siler）振荡电路

优点：频率稳定性好，振荡频率较高，波段范围内幅度比较平稳。



1、电路特点：

西勒电路是在克拉泼电路基础上，在电感 L 两端**并联**一个电容 C_4 。

电路条件仍是 $C_3 \ll C_1, C_3 \ll C_2$ ， C_3 与 C_4 **同数量级**

$$\text{回路总电容为: } C_{\Sigma} = \frac{C_1' C_2' C_3}{C_1' C_2' + C_2' C_3 + C_3 C_1'} + C_4 \approx C_3 + C_4$$

◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

三、西勒（Siler）振荡电路

2、相位平衡条件（正反馈）

X_{ce} 为容抗， X_{be} 为容抗同性质。 X_{cb} 可等效为感抗，与 X_{ce} ， X_{be} 反性质。满足电容三点式振荡器的相位平衡条件判断准则，为电容三点式振荡电路。

3、振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}} \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_3 + C_4)}}$$

频率可调：

$$\begin{cases} \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L(C_3 + C_4)}}, \text{调节 } C_4 \text{ 可改变 } \omega_0 \\ F \approx C_1 / C_2 \therefore C_4 \text{ 改变 } F \text{ 不受影响} \end{cases}$$

稳频原理： $\omega_0 = 1/\sqrt{L(C_3 + C_4)}$ ，与 $C_{ie}C_{oe}$ 无关，故比较稳定

◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

三、西勒（Siler）振荡电路

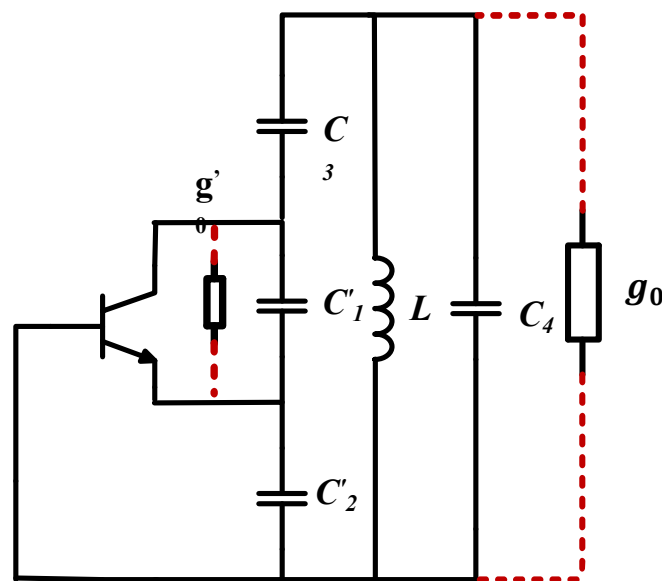
相对克拉泼振荡器的改进之处：

$$\frac{1}{C_{\Sigma}'} = \frac{1}{C_1'} + \frac{1}{C_2'} + \frac{1}{C_3} \approx \frac{1}{C_3},$$

$$\text{接入系数: } P = \frac{\frac{1}{\omega C_{\Sigma}'}}{\frac{1}{\omega C_1'}} = \frac{C_1'}{C_{\Sigma}'} \approx \frac{C_1'}{C_3},$$

折合到 c 、 e 的电导: $g_0' = P^2 g_0$

$$\therefore \begin{cases} C_4 \downarrow \Rightarrow \omega_0 \uparrow, \\ \text{但 } C_4 \downarrow \Rightarrow g_0' \text{ 不变} \Rightarrow U_{ce} \text{ 不变} \end{cases}$$

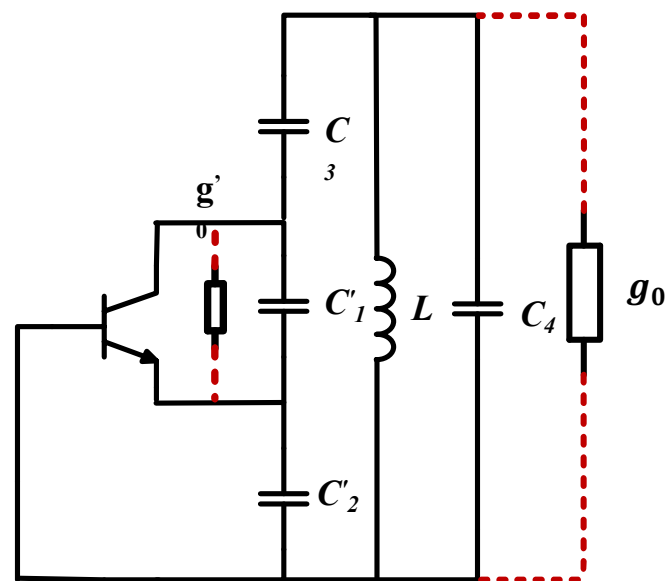


◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

三、西勒（Siler）振荡电路

相对克拉泼振荡器的改进之处：

改进：克拉波电路中是改变 C_3 来调节频率，而 C_3 的改变会影响接入系数 P ，从而可能导致停振。但**西勒电路**中，改变 C_4 来调节频率，而 C_4 的改变不会影响接入系数 P ，故西勒电路的振荡频率可以很高。



总结

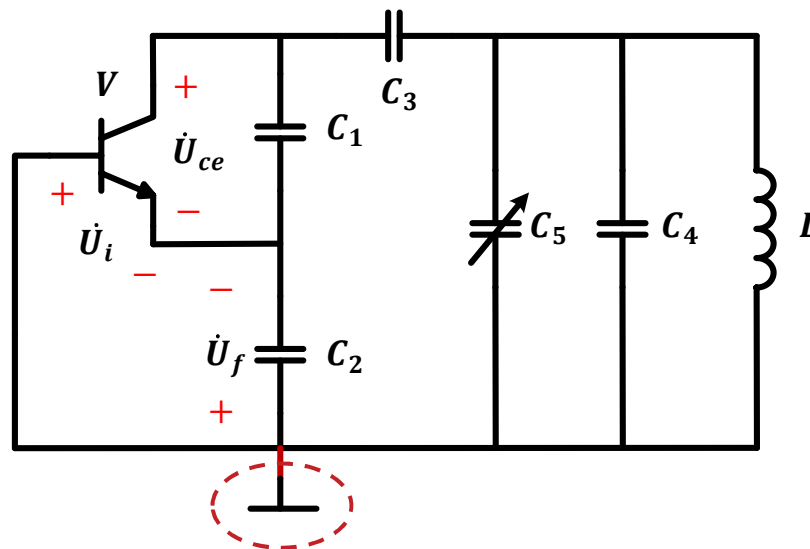
- 1、这种电路保持了克拉泼电路中晶体管（ C_{ie} 和 C_{oe} ）与回路耦合弱（ p_1 和 p_2 较小）的特点，频率稳定度高，即受外界影响较小。
- 2、调频时，输出振荡电压幅度基本平稳，可作为变频振荡器。

◆ 5.3 高稳定度的LC振荡器

例：一振荡器等效电路如图示。已知 $C_1 = 600\text{pF}$, $C_3 = 20\text{pF}$, $C_5 = 12 \sim 250\text{pF}$, 反馈系数 $F = 0.4$ ，振荡器的频率范围为 $1.2\text{MHz} \sim 3\text{MHz}$ ，试求： C_2 、 C_4 、 L

分析：本题是一个西勒电路。

$$\begin{aligned} \text{解：} F &= \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_{ce}} = \frac{1/\omega C_2}{1/\omega C_1} = C_1 / C_2 \\ \therefore C_2 &= \frac{C_1}{F} = \frac{600}{0.4} = 1500\text{pF} \end{aligned}$$



$$\begin{cases} f_{0\min} = 1.2 \times 10^6 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\Sigma\max}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(20 + C_4 + C_{5\max}) \times 10^{-12}}} \\ f_{0\max} = 3 \times 10^6 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\Sigma\min}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(20 + C_4 + C_{5\min}) \times 10^{-12}}} \\ C_{5\max} = 120\text{pF}, C_{5\min} = 20\text{pF} \end{cases}$$

$$\Rightarrow C_4 = 13.3\text{pF}, L = 62.2\mu\text{H}$$