廣東工業大學
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：$\dfrac{\Delta f}{f_c} = \dfrac{|f - f_c|}{f_c}$　　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 $\left.\dfrac{\Delta f_{\max}}{f_c}\right|_{\text{时间间隔}}$ 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

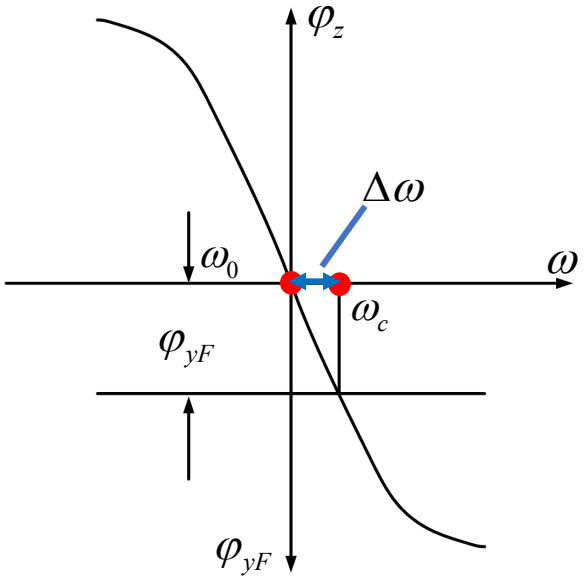
1、振荡频率ω_c 的表示式

振荡器的振荡频率

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

$\Delta\omega_c$

谐振回路的谐振频率



振荡器的相位平衡条件

2、频率稳定度的表示式

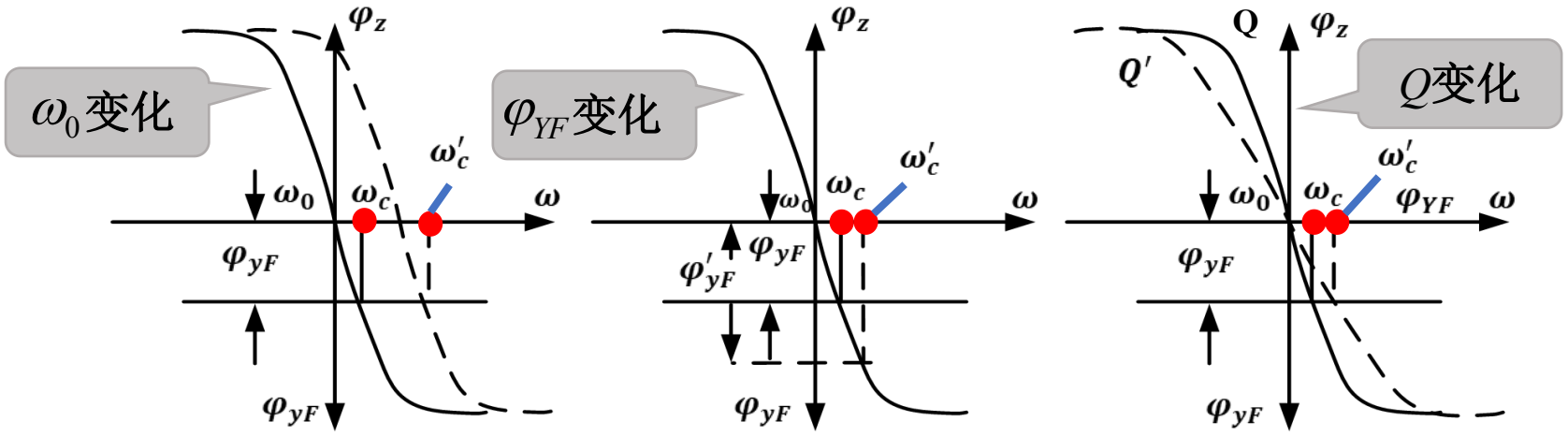
$$\frac{\Delta\omega_c}{\omega_0}=\frac{\Delta\omega_0}{\omega_0}+\frac{1}{2Q\cos^2\varphi_{YF}}\Delta\varphi_{YF}-\frac{\tan\varphi_{YF}}{2Q^2}\Delta Q$$

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

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。

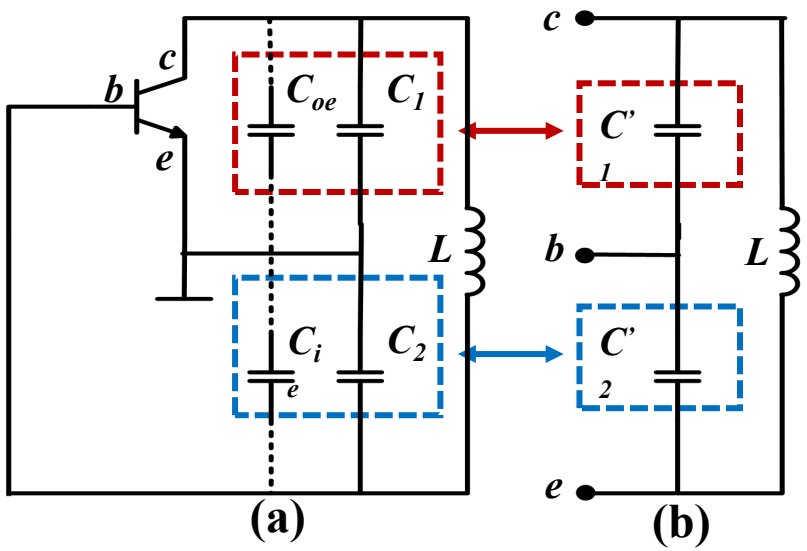
4. 减少电源、负载等的影响：电源电压的波动, 会使晶体管的工作点等变化，负载电阻会降低回路的品质因数。

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



$C_1' = ?$　　$C_2' = ?$

$C_1' = C_1 + C_{oe}$　$C_2' = C_2 + C_{ie}$

$C_{oe}' = ?$　　$C_{ie}' = ?$

当 C_{oe}、C_{ie} 没变化时，回路总电容 $C_\Sigma = \dfrac{C_1' C_2'}{C_1' + C_2'}$ 对应振荡频率为：

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L C_\Sigma}} \qquad F \approx C_1 / C_2$$

并联谐振频率

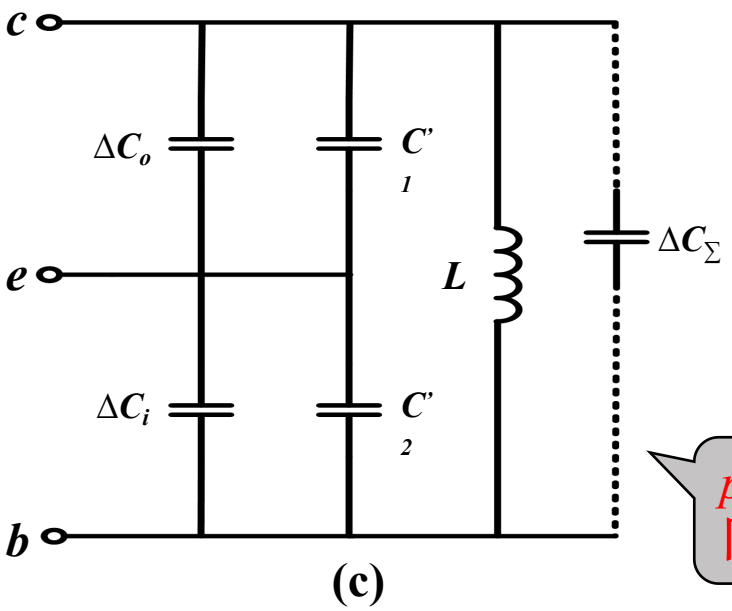
存在问题：

$C \to f \to F$，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：

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

$p_1 = ?$　　$p_2 = ?$

$$p_1 = \frac{C_\Sigma}{C_1'} = \frac{C_2'}{C_1' + C_2'}$$

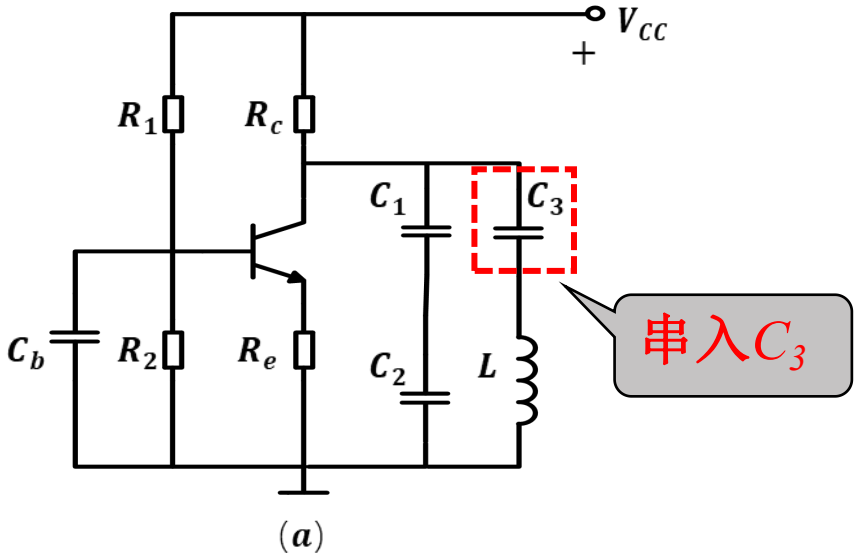
$$p_2 = \frac{C_\Sigma}{C_2'} = \frac{C_1'}{C_1' + C_2'}$$

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



(a)

克拉泼振荡电路

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$C_3 << C_1, C_3 << C_2$

可使回路与晶体管的输入、输出参数隔开来，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

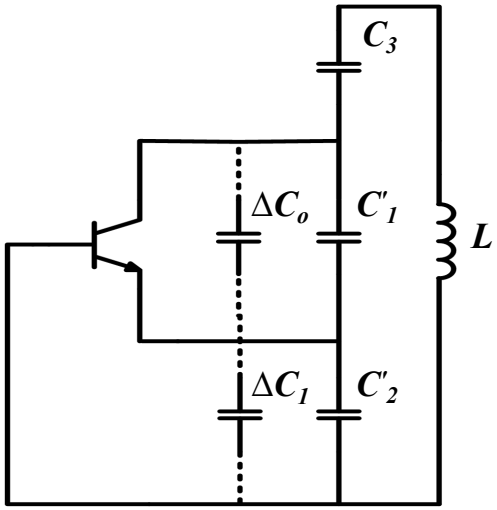
2、相位平衡条件（正反馈）

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 $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}$

因为 $C_\Sigma \approx C_3$ ，所以克拉泼振荡器的振荡频率为：$f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$

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



(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

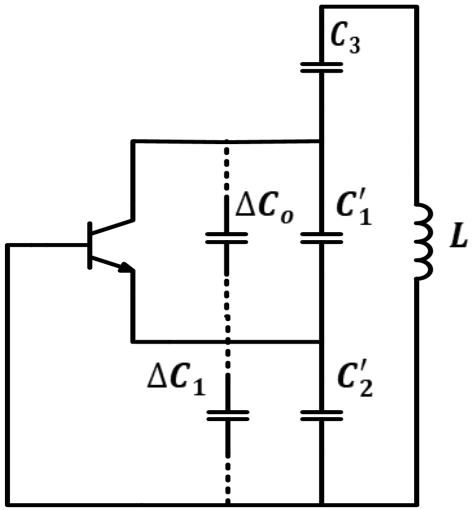
4、稳频原理

外部环境变化时，产生总的电容增量为？

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

其中 $p_1 = \dfrac{C_{\Sigma}}{C_1'} \approx \dfrac{C_3}{C_1'}$ $p_2 = \dfrac{C_{\Sigma}}{C_2'} \approx \dfrac{C_3}{C_2'}$

$C_3 << C_1, C_3 << C_2 \rightarrow p_1$和$p_2$ 都很小



(b)

等效电路

讨论：

①p_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。

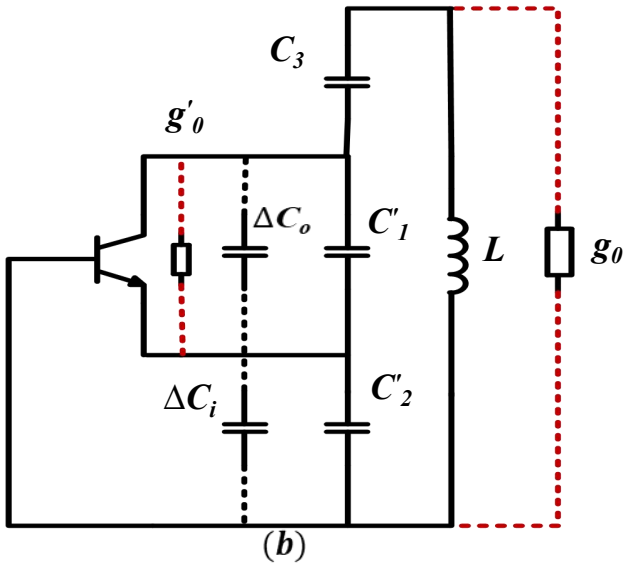
②p_1、p_2的减小受到电路起振条件的限制，频率稳定度不可能很高？

为什么？

5.3 高稳定度的LC振荡器

二、克拉泼（Clapp）振荡电路

分析



$p_1' >> p_1 \Rightarrow g_0' >> g_0$

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

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

$A_0F \downarrow$

振幅稳定条件：$A_0F>1$

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

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

5.3 高稳定度的LC振荡器

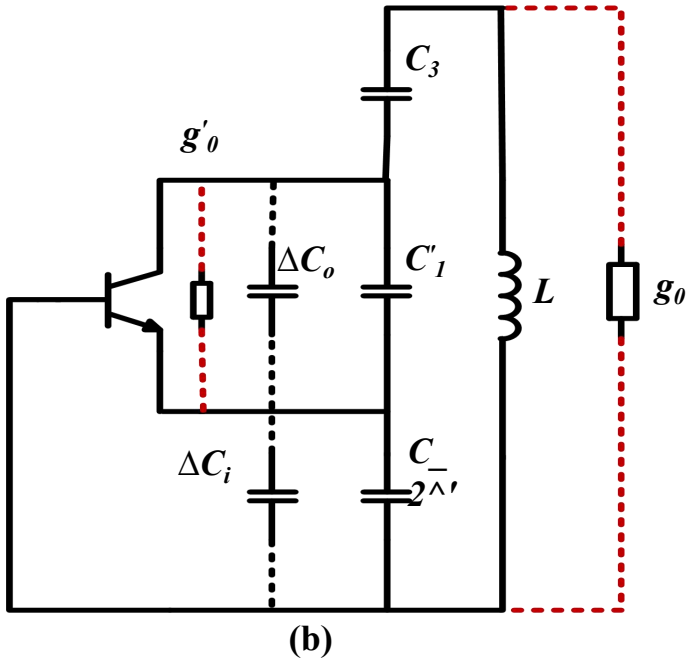
二、克拉泼（Clapp）振荡电路

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

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

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

∴ C_3减小可能导致停振，故振荡器的上限频率受限制



(b)

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 $C_1 >> C_3, C_2 >> C_3$ ，提高频稳定性；
2. 用 C_3 来调频率，改变频率比较方便。

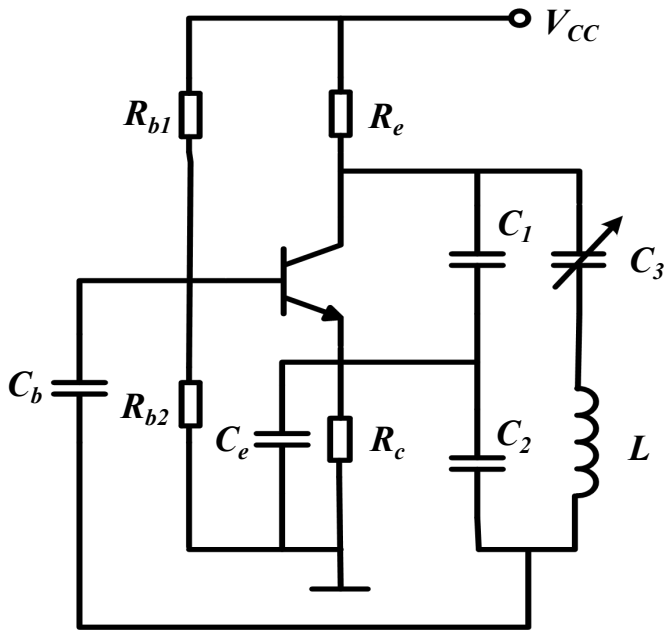
缺点：1. C_1、C_2不能选的太大，若 C_2 C_2过大，则振荡电压幅度太小。
2.当 $C_3 \downarrow \rightarrow f_0 \uparrow$ 时，振荡幅度↓，严重时可能停振，所以振荡频率上限受到限制。

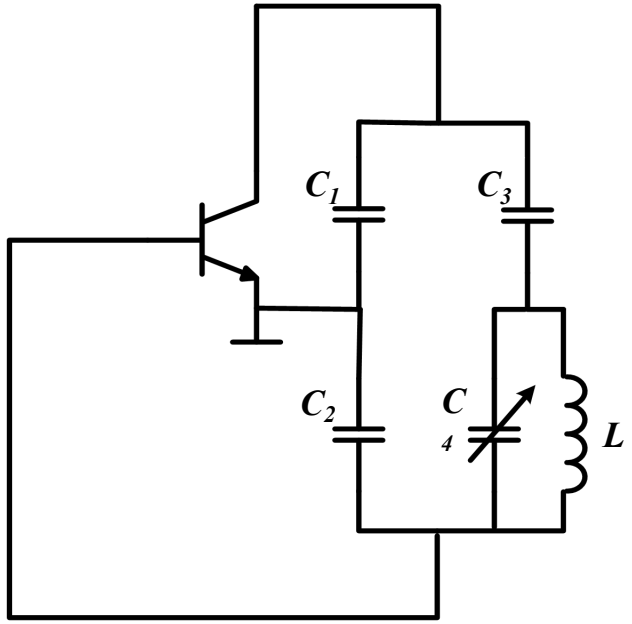
主要用作：固定振荡器

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

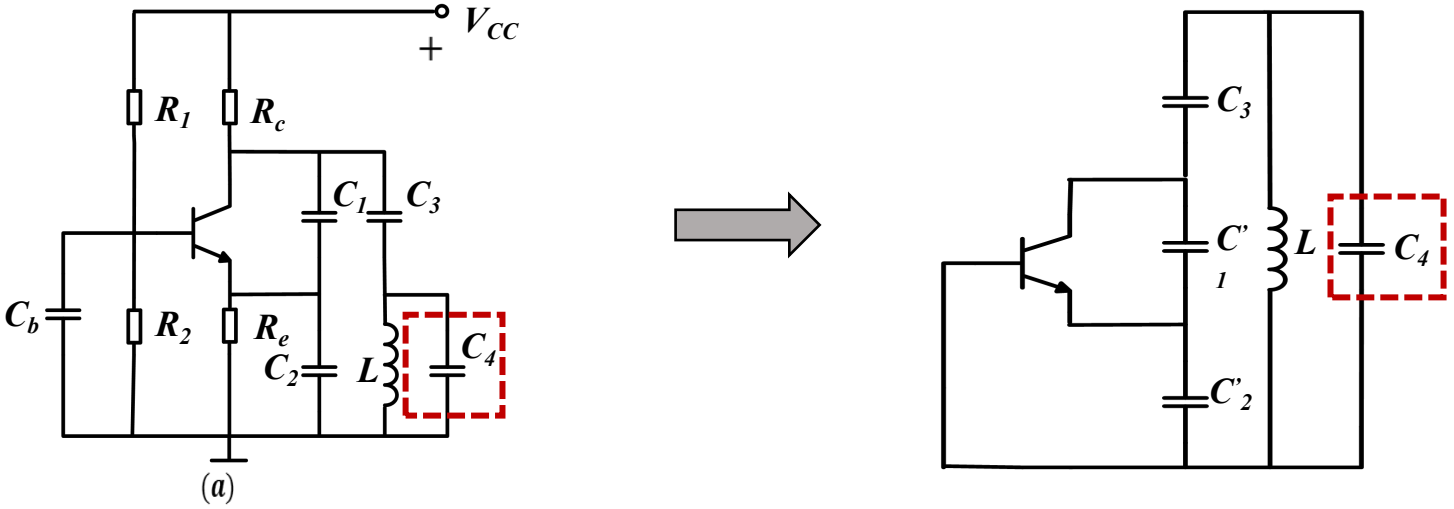




5.3 高稳定度的LC振荡器

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 $C_3 << C_1, C_3 << C_2$ ，C_3与C_4同数量级

回路总电容为：$C_\Sigma = \dfrac{C'_1 C'_2 C_3}{C'_1 C'_2 + C'_2 C_3 + C_3 C'_1} + C_4 \approx C_3 + C_4$

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

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

稳频原理：$\omega_0 = 1\Big/\sqrt{L(C_3+C_4)}$，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

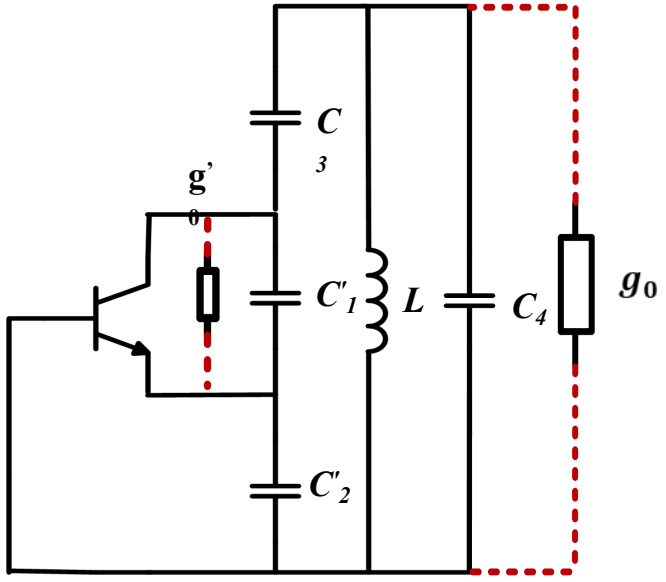
相对克拉泼振荡器的改进之处：

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

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

折合到c、e的电导：$g_0'=P^2g_0$

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

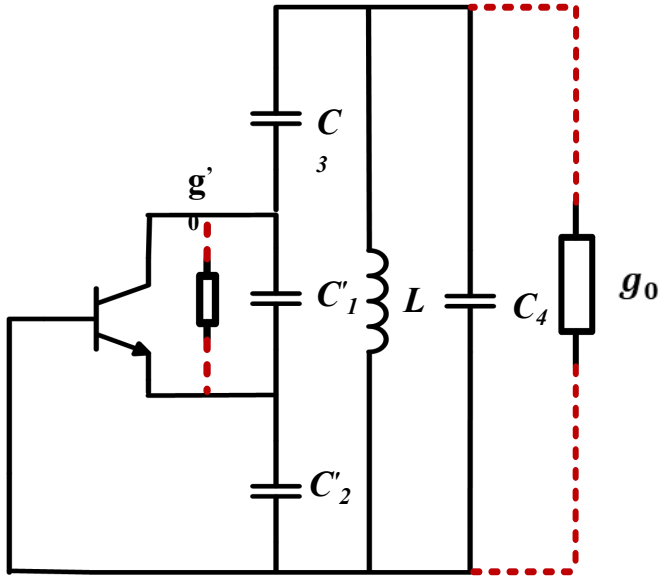


5.3 高稳定度的LC振荡器

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

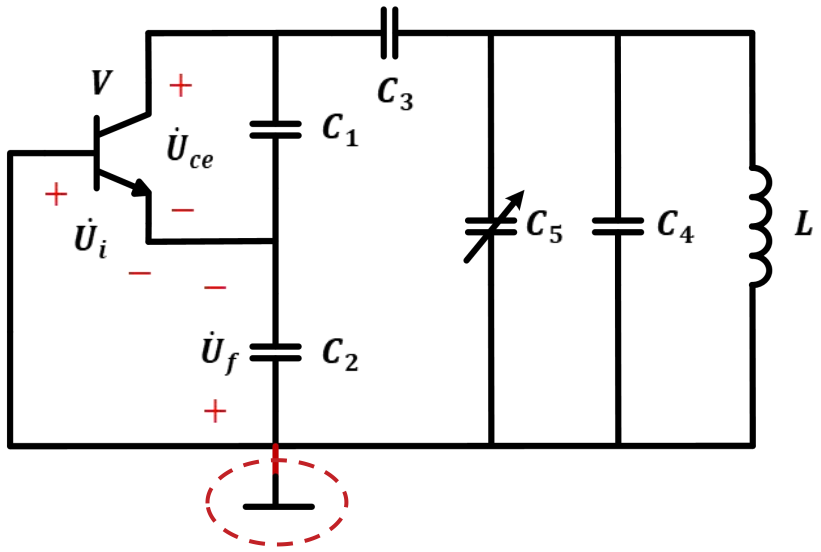
1、这种电路保持了克拉泼电路中晶体管（C_{ie}和C_{oe}）与回路耦合弱（p_1和p_2较小）的特点，频率稳定度高，即受外界影响较小。

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$C_1=600pF, C_3=20pF, C_5=12\sim250pF$，反馈系数$F=0.4$，振荡器的频率范围为$1.2MHz\sim3MHz$，试求：$C_2$、$C_4$、$L$

分析：本题是一个西勒电路。



解：$F=\dfrac{\dot{U}_f}{\dot{U}_{ce}}=\dfrac{1/\omega C_2}{1/\omega C_1}=C_1/C_2$

$$\therefore C_2=\frac{C_1}{F}=\frac{600}{0.4}=1500pF$$

$$\begin{cases} f_{0\min}=1.2\times10^6=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\Sigma\max}}}=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L(20+C_4+C_{5\max})\times10^{-12}}} \\ f_{0\max}=3\times10^6=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\Sigma\min}}}=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L(20+C_4+C_{5\min})\times10^{-12}}} \\ C_{5\max}=120pF, C_{5\min}=20pF \end{cases}$$

$$\Rightarrow C_4=13.3pF, L=62.2uH$$