



# 通信电路原理

---

## 第五章 正弦波振荡器

### LC振荡器分析



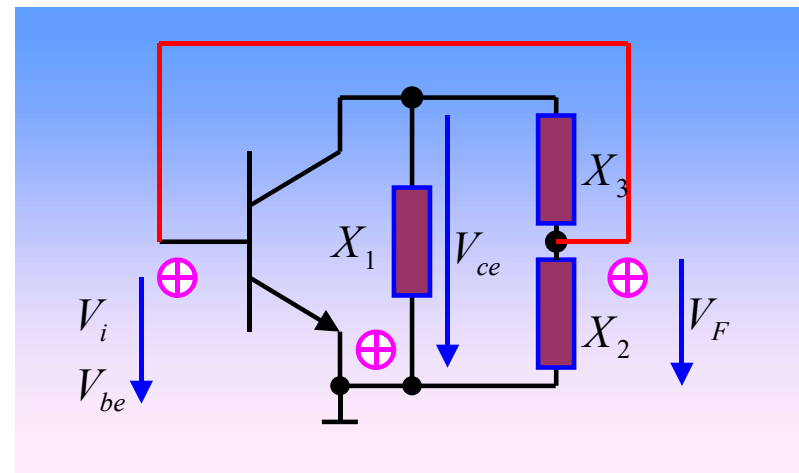
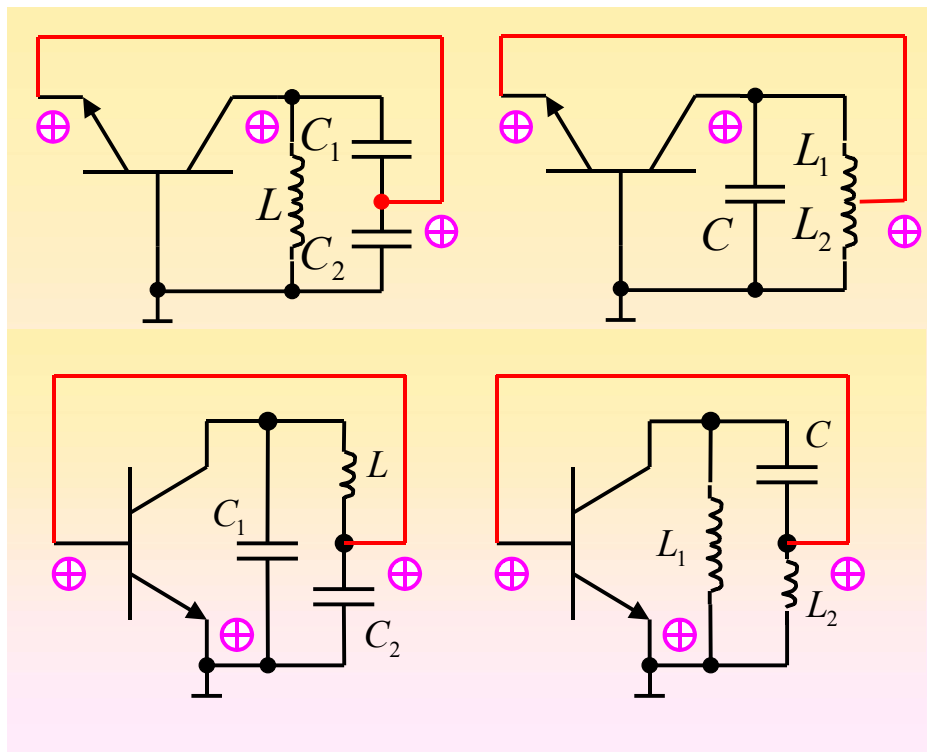
# 正弦波振荡器

---

- **5.1 基本概况**
- **5.2 反馈振荡器的基本工作原理**
- **5.3 LC振荡器的电路分析**
- **5.4 振荡器的频率稳定度**
- **5.5 晶体振荡器**
- **5.6 其他振荡形式**
  - **负阻振荡器**
  - **RC振荡器**
  - **特殊振荡现象**

# 三点式振荡器

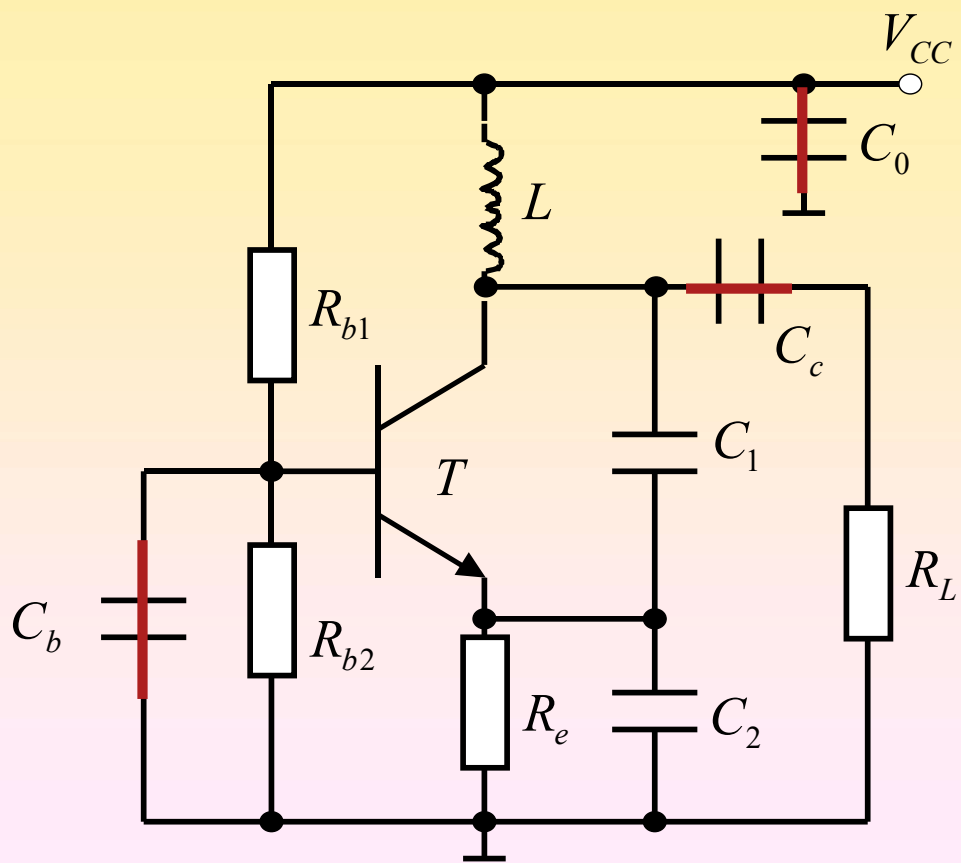
- 三点式振荡器:将换能器件晶体管的三个极置入LC谐振腔的合适位置, 形成正反馈结构



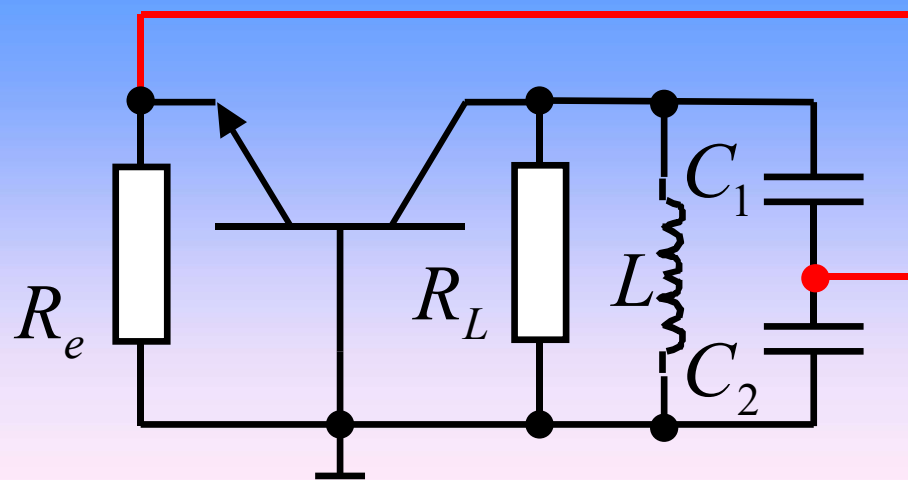
- 电容三点式: 考毕兹振荡器
- 电感三点式: 哈特莱振荡器

- 与发射极相联的两个电抗元件必须是同属性的, 另一个反属性

# 考毕兹振荡器的分析



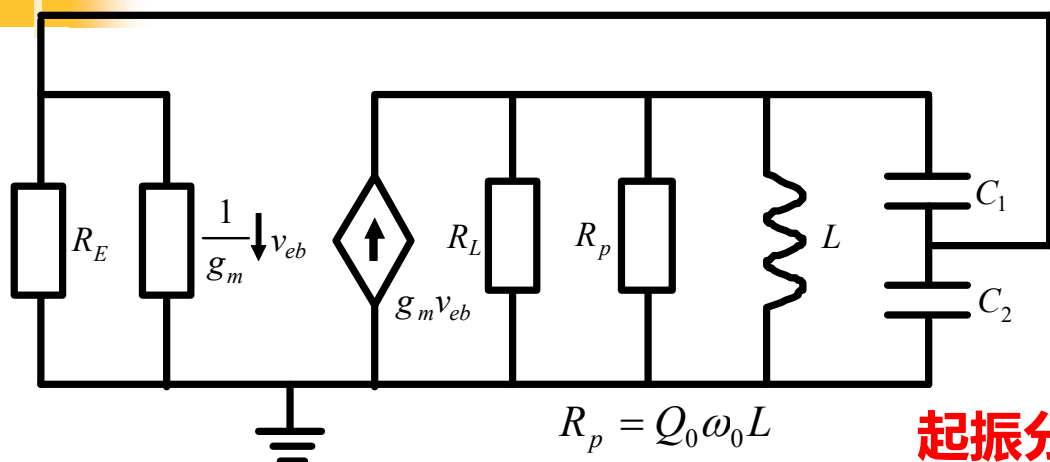
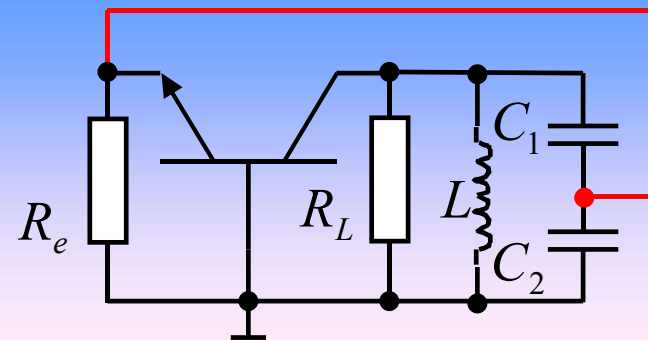
pp271 图5.3.3(a)



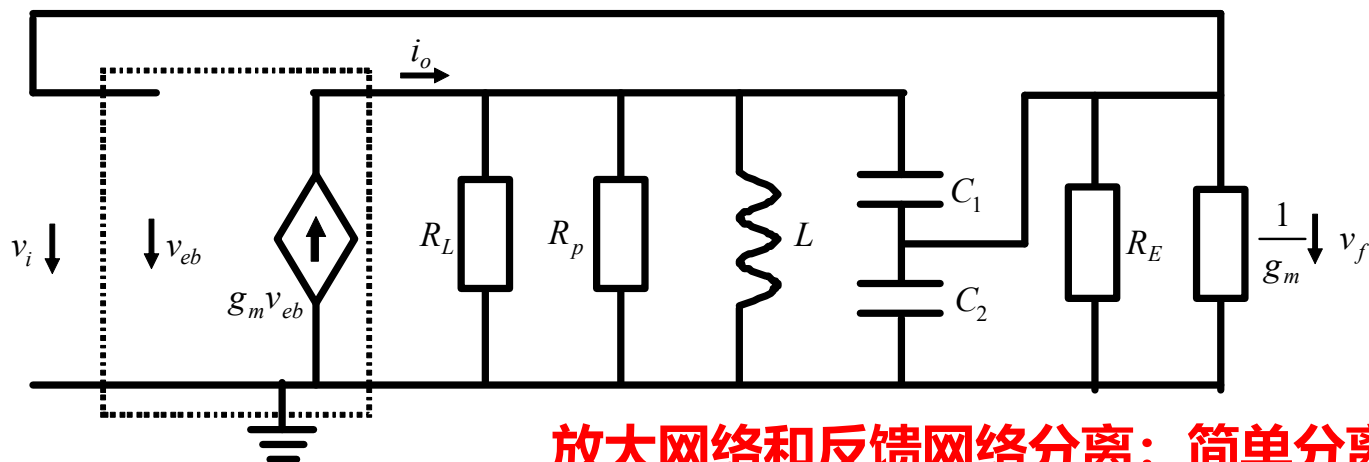
- 这是一个共基组态的考毕兹振荡器
- pp272, 按共射组态分析
- 下面我们按共基组态分析

# 起振分析

## 交流小信号电路模型



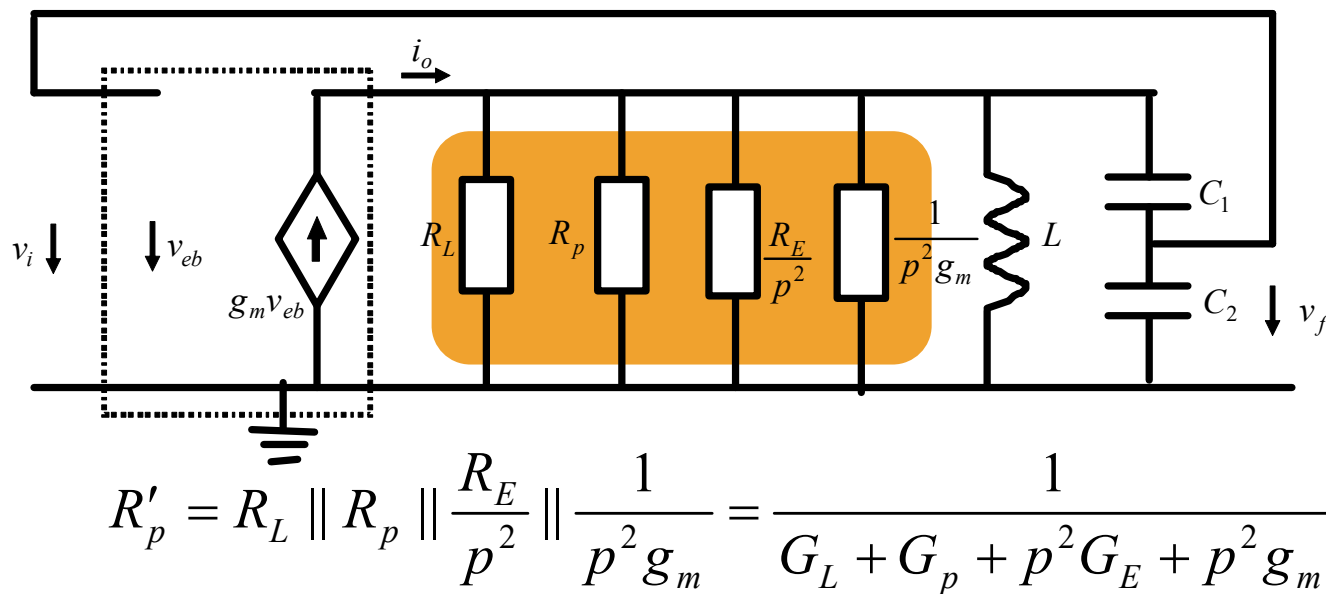
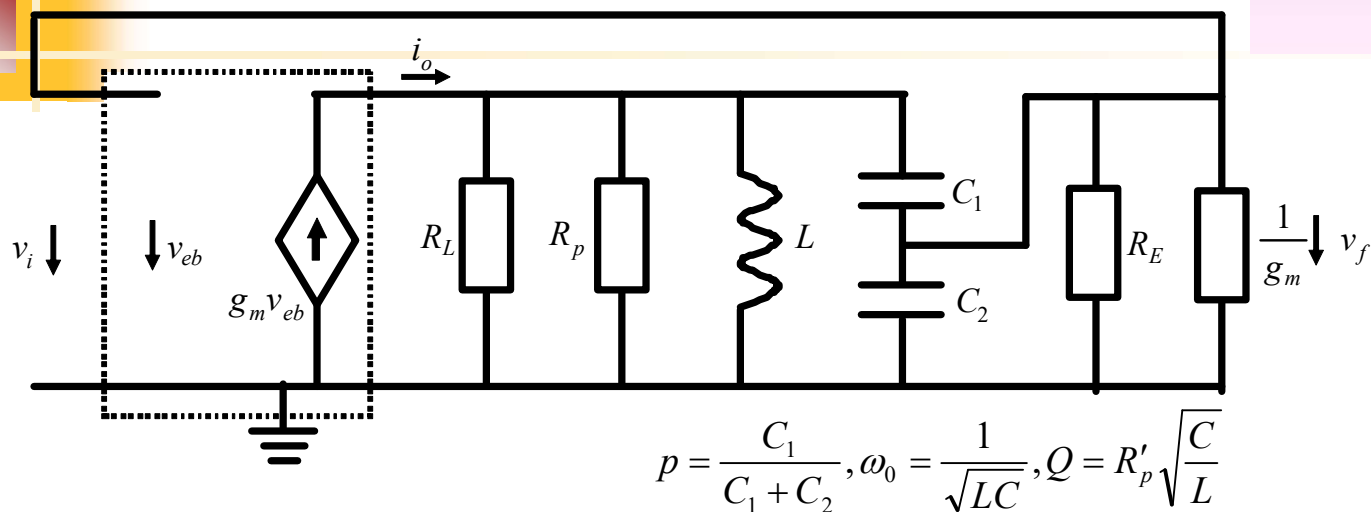
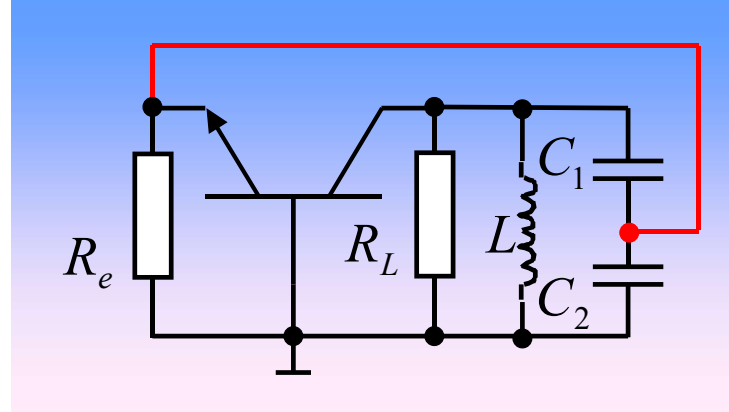
**起振分析：晶体管可采用微分元件模型**  
**平衡分析：晶体管则采用准线性元件模型**



**放大网络和反馈网络分离：简单分离方法**  
**放大网络为理想受控源，剩下的全部视为反馈网络**

# 部分接入简化

Q值足够高



$$A_0 = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_i} = g_m$$

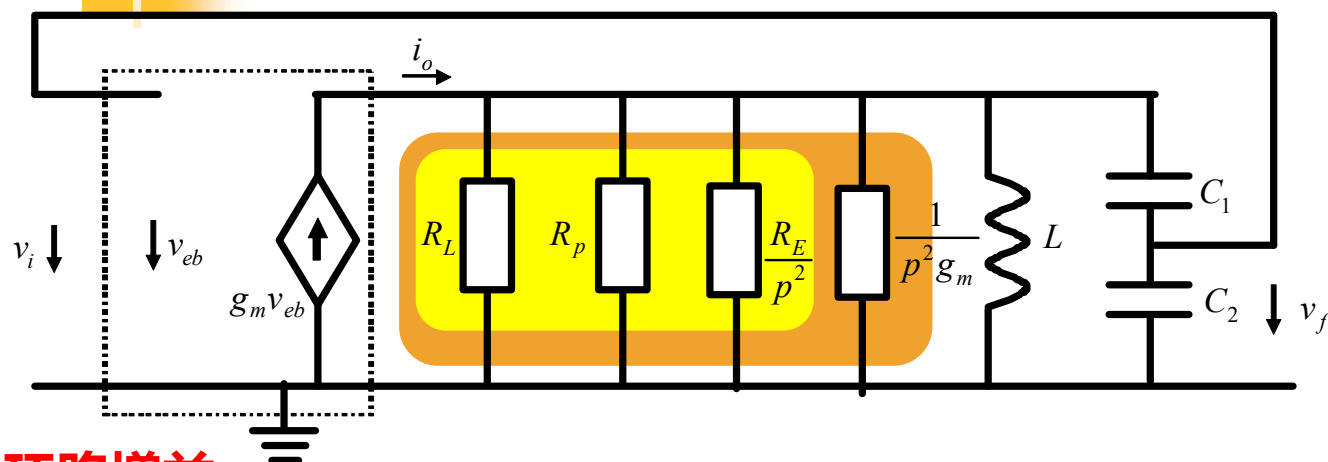
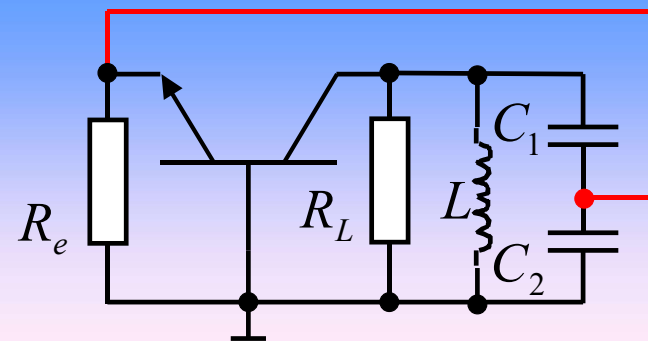
$$F = \frac{\dot{V}_f}{\dot{I}_o} \approx p \frac{\dot{V}'_L}{\dot{I}_o}$$

$$= p \cdot \left( R'_p \parallel j\omega L \parallel \frac{1}{j\omega C} \right)$$

$$= p \frac{R'_p}{1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

$$G'_p = G_p + G_L + p^2 G_E + p^2 g_m = G'_L + p^2 g_m$$

# 起振条件



$$A_0 = \frac{\dot{I}_o}{\dot{V}_i} = g_m \quad \text{规范分解}$$

$$F = \frac{\dot{V}_f}{\dot{I}_o} \approx p \frac{R'_p}{1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

环路增益

$$T = A_0 F \approx \frac{p g_m R'_p}{1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

$$\varphi_T(\omega_{osc}) = 0 \Rightarrow \omega_{osc} \approx \omega_0$$

相位条件 (正反馈条件) 决定振荡频率

幅度起振条件  $|T(\omega_{osc})| > 1 \Rightarrow p g_m R'_p > 1 \quad \Rightarrow \quad p g_m > G'_p = G'_L + p^2 g_m$

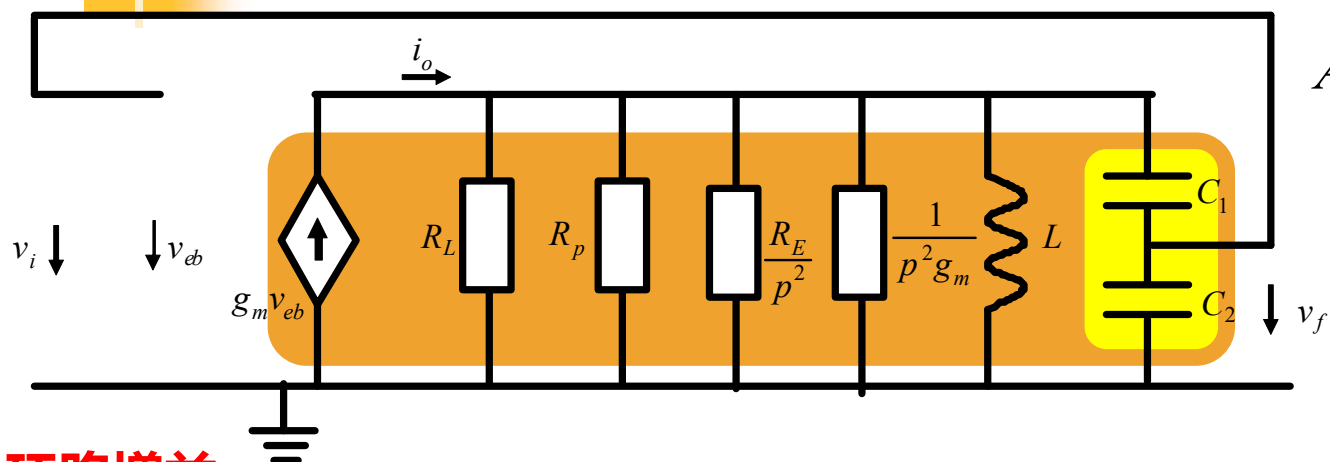
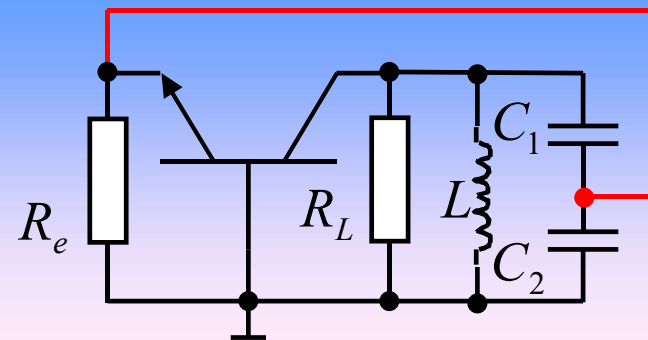
$$\Rightarrow g_m > \frac{G'_L}{p(1-p)}$$

$G'_L$  为电路中所有损耗折合到 bc 端口的总等效电导

讲义中给出了 CE 组态起振条件, 自行确认和 CB 组态等同

$$G'_p = G_p + G_L + p^2 G_E + p^2 g_m = G'_L + p^2 g_m$$

# 放大与反馈



$$A_0 = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = g_m \frac{R'_p}{1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

$$F = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} \approx p$$

教科书中的  
习惯分解

环路增益

$$T = A_0 F \approx \frac{p g_m R'_p}{1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

$$\varphi_T(\omega_{osc}) = 0 \Rightarrow \omega_{osc} \approx \omega_0$$

相位条件（正反馈条件）决定振荡频率

幅度起振条件  $|T(\omega_{osc})| > 1 \Rightarrow p g_m R'_p > 1 \quad \Rightarrow \quad p g_m > G'_p = G'_L + p^2 g_m$

$$\Rightarrow g_m > \frac{G'_L}{p(1-p)}$$





# 合适的接入系数

$$g_m > \frac{1}{p(1-p)} G'_L \geq 4G'_L$$

$$G'_L = G_p + G_L + p^2 G_E \sim G_p + G_L$$

$$p_{opt} = \frac{1}{2}$$

$$C_{1_{opt}} = C_2$$

**不考虑 $R_E$ 影响**

**考虑 $R_E$ 影响：最佳接入系数？自行分析**

振幅起振条件  $g_m > g_L \frac{C_1 + C_2}{C_1} + g_i \left( 1 - \frac{1}{\omega_{\text{OSC}}^2 LC_1} \right) \approx \frac{1}{p} g_L + p g_i \quad \Rightarrow \quad g_m > \frac{G'_L}{p(1-p)}$

# 器件参数对振荡频率的影响

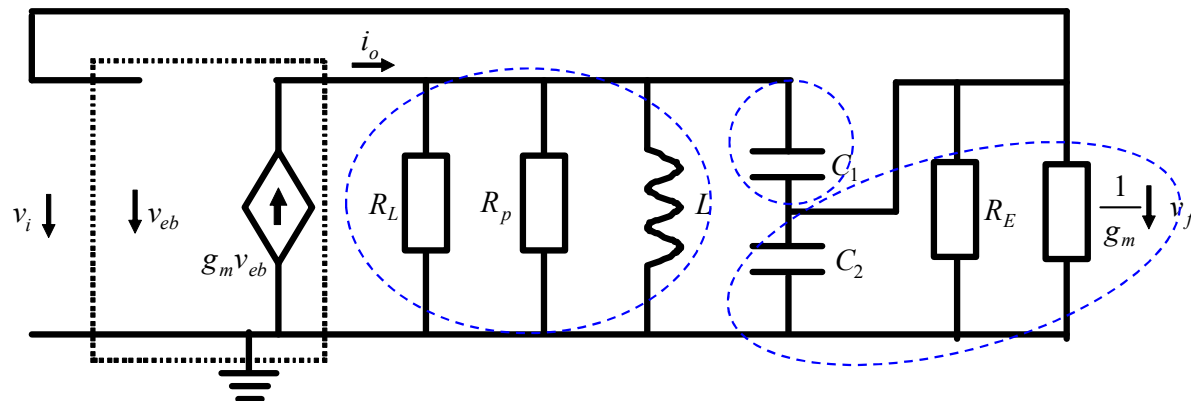
$$Z_1(j\omega) = \frac{1}{j\omega C_1} \quad Z_2(j\omega) = \frac{1}{g_i + j\omega C_2} \quad Z_3(j\omega) = \frac{1}{g_L + 1/j\omega L}$$

$$\dot{V}_F(j\omega) = \frac{g_m \dot{V}_{eb}(j\omega)}{\frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_1 + Z_2}} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

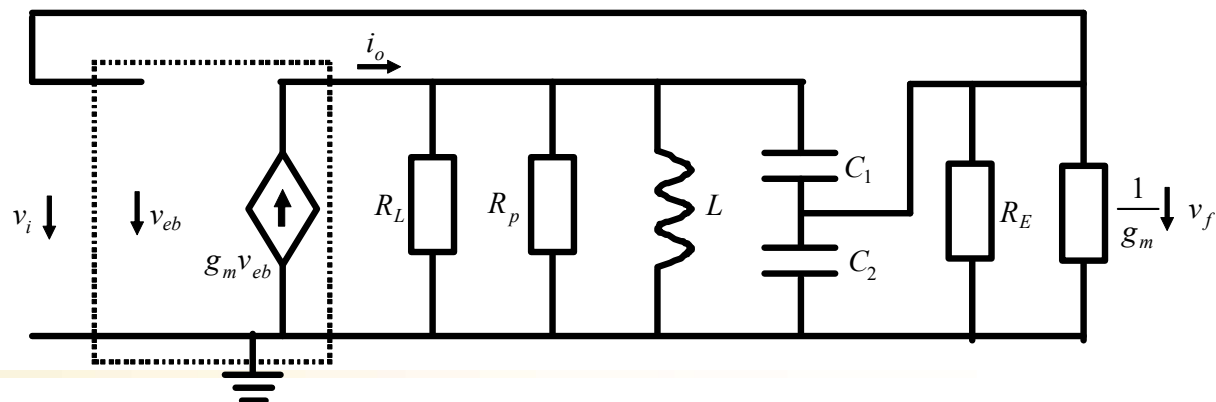
$$T(j\omega) = \frac{\dot{V}_F(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} = \frac{g_m}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_3 Z_2}} = |T(j\omega)| e^{j\varphi_T(j\omega)}$$

$$G_{123} = \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_3 Z_2} = \left( g_L \frac{C_1 + C_2}{C_1} + g_i \left( 1 - \frac{1}{\omega^2 LC_1} \right) \right) + j \left( \omega C_2 - \frac{1}{\omega} \left( \frac{1}{L} + \frac{C_2}{LC_1} + \frac{g_i g_L}{C_1} \right) \right)$$

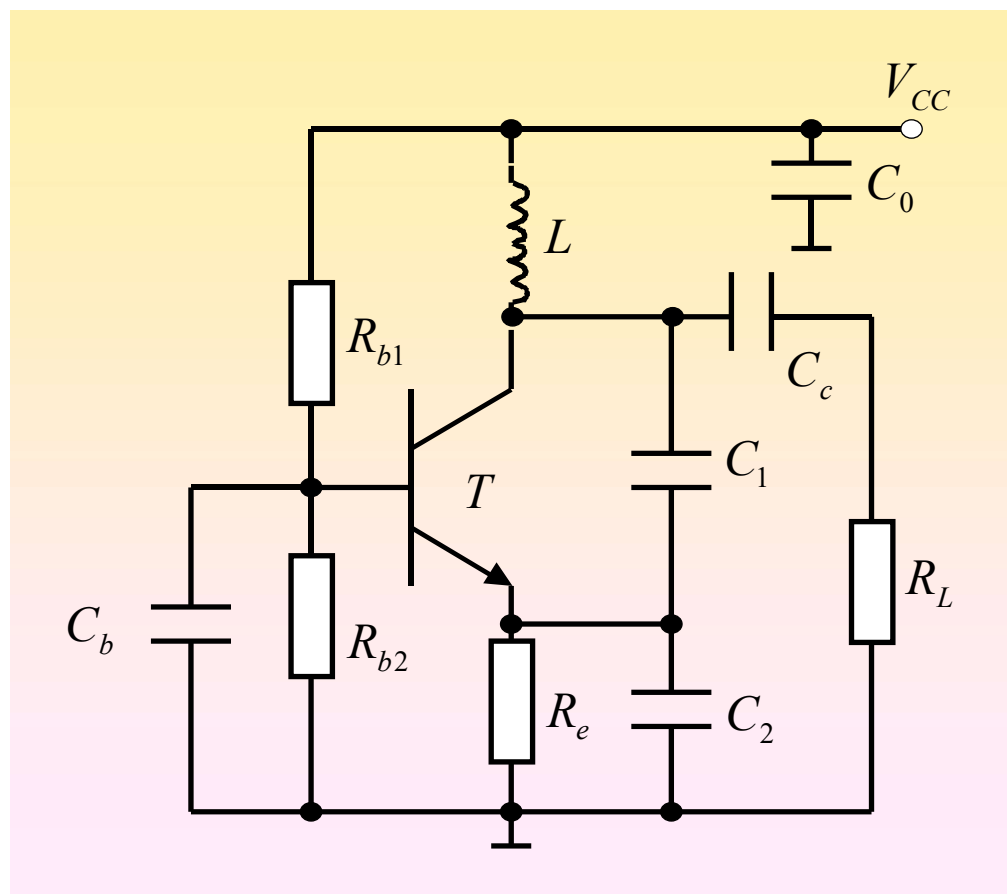
相位条件  $\Rightarrow$  振荡频率  $\omega_{\text{OSC}} = \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{g_i g_L}{C_1 C_2}} = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{g_i g_L}{\omega_0^2 C_1 C_2}} \approx \omega_0 \quad (g_i g_L \ll \omega_0^2 C_1 C_2)$



# 数值例



- 设计一个考毕兹振荡电路。采用的晶体管在共射状态时的参数为  $C_{b'e} \approx 0$ ,  $\beta = 30$ ,  $r_{b'e} = 1.2\text{k}\Omega$ 。已知线圈电感  $L = 0.1\mu\text{H}$ , 空载品质因数  $Q_0 = 100$ 。取  $C_1 = C_2$ , 且回路固有谐振频率  $f_0 = 50\text{MHz}$ 。负载电阻  $R_L$  无穷,  $R_E = 1\text{k}\Omega$ 。
  - 求振荡器振荡频率
  - 为保证顺利起振, 负载最重能接多少?



放大器跨导  $g_m = \frac{\beta}{r_{b'e}} = \frac{30}{1200} = 0.025(S)$  (3.2.3)

回路总电容  $C = \frac{1}{L\omega_0^2} = 101.32 pF$

电容  $C_1 = C_2 = 202.64 pF$

## 题解

共基输入阻抗  $r_e = \frac{1}{g_m} = 40(\Omega)$  (3.2.6下)

振荡频率  $\omega_{osc} = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{g_L g_i}{\omega_0^2 C_1 C_2}} = 1.001\omega_0$

振幅起振条件  $g_m > \frac{G'_L}{p(1-p)} = \frac{g_L + p^2 R_E}{p(1-p)}$

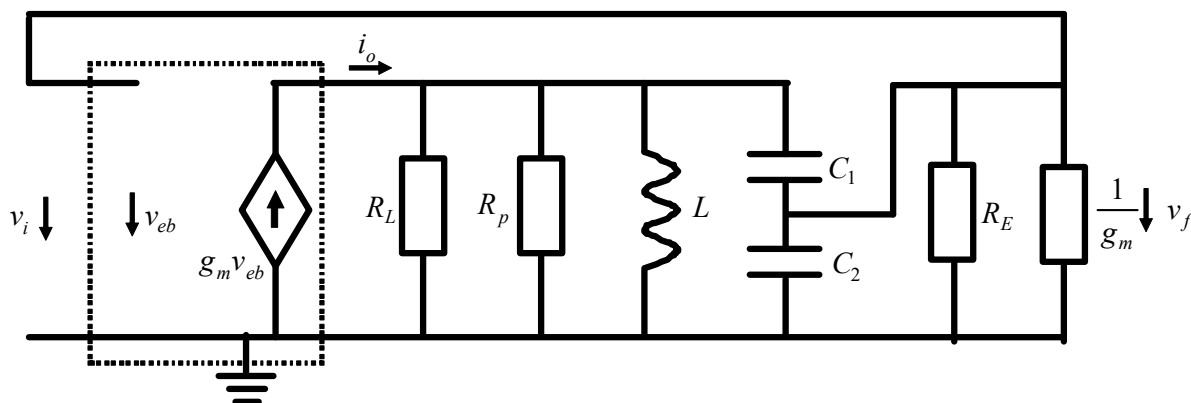
共基输入电导  $g_i = \frac{1}{r_e} + \frac{1}{R_E} = 0.025 + 0.001 = 0.026(S)$

$g_L < p(1-p)g_m - p^2 G_E = 0.006(S)$

LC回路谐振阻抗  $R_p = \omega_0 L Q_0 = 2\pi \times 50 \times 10^6 \times 0.1 \times 10^{-6} \times 100 = 3142(\Omega)$  (2.3.21)

负载电导  $g_L = \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_p} = 3.183 \times 10^{-4}(S)$

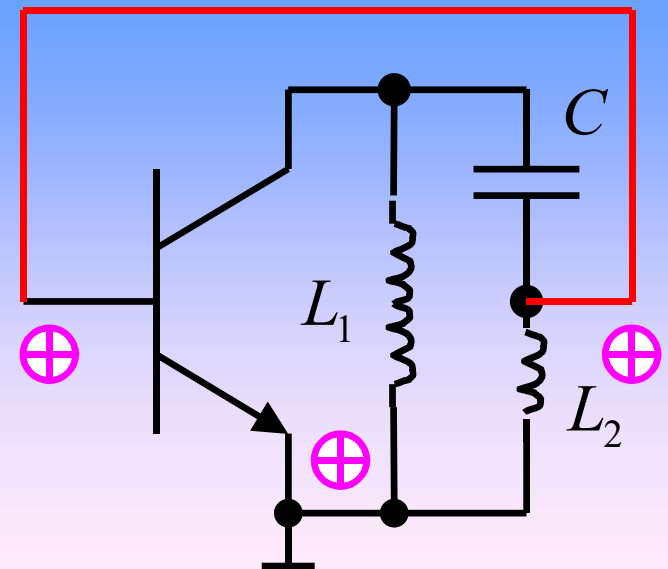
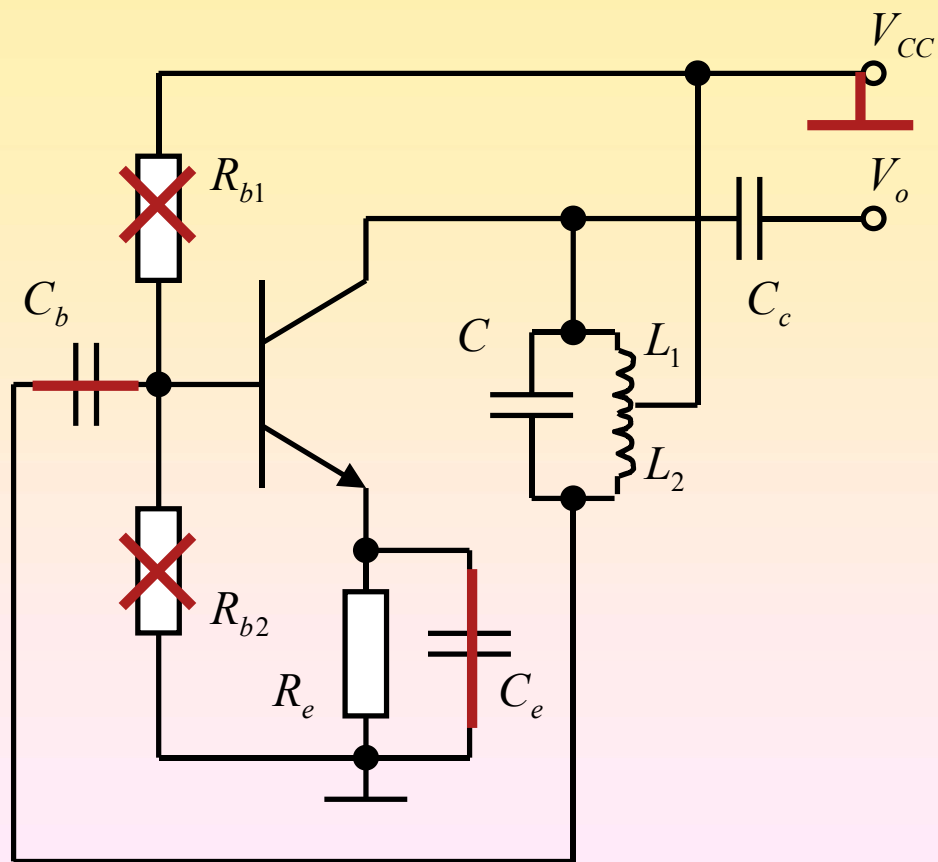
$R_{Lmin} = \frac{1}{g_L - G_p} = \frac{1}{0.006 - 0.00032} = 176\Omega$



$R_L > 176\Omega$

**$R_L$ 过重则无法起振**

# 哈特莱振荡器



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

$$L = L_1 + L_2 + 2M$$

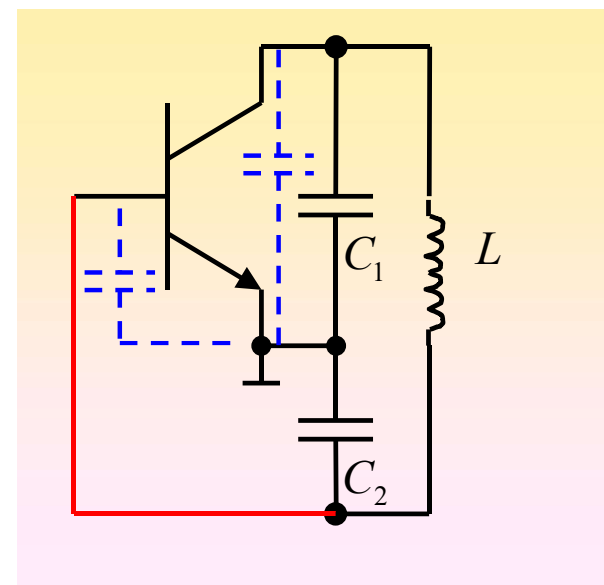
$$g_m > \frac{G'_L}{p(1-p)} = \frac{g_L + p^2 G_E}{p(1-p)}$$

$$F_{CB}(j\omega_0) \approx p = \frac{C_1}{C_1 + C_2}, A_{CB} = g_m R'_{p, CB}$$

$$F_{CE}(j\omega_0) \approx -\frac{C_1}{C_2}, A_{CE} = -g_m R'_{p, CE}$$

# 改进型电容三点式振荡器

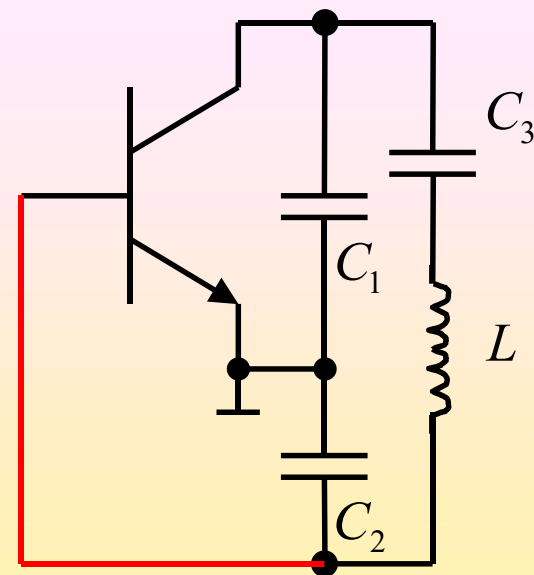
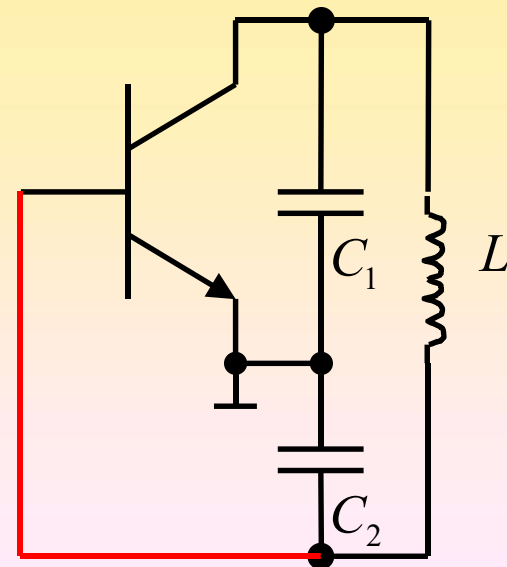
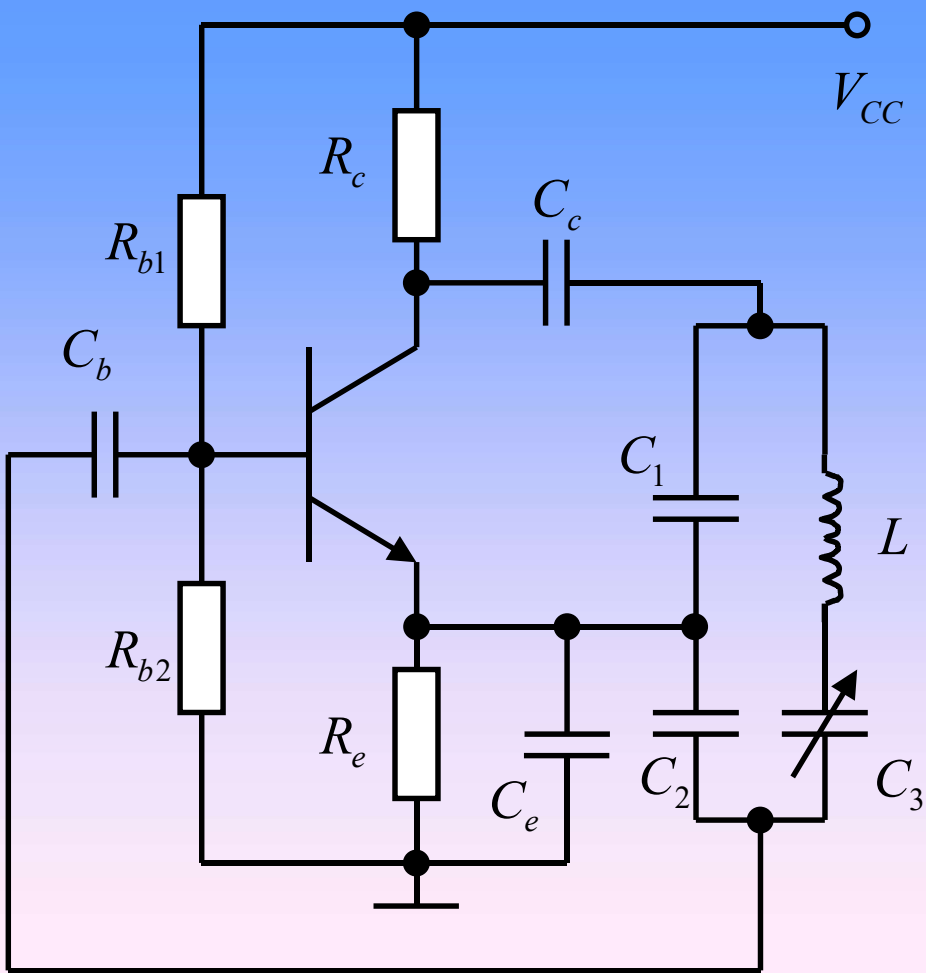
- 电容三点式振荡电路（考毕兹）的振荡波形比电感三点式（哈特莱）的波形更接近于正弦波，应用广泛。
  - 反馈系数F（接入系数p）只有一段范围内较合适。F过小，反馈不足，回路能量的补充不足以弥补回路的损耗，使振荡最终不能建立；F过大，输入电路与回路耦合过紧，增益减小，环路负载过重，振荡也难以发生。
  - 晶体管的输出输入电容影响振荡频率
  - 晶体管的输入电阻和输出电阻影响回路的Q值--影响振荡频率及其稳定性
- 解决办法
  - 将频率决定元件与反馈决定元件分开
  - 使振荡器不受晶体管电容影响



- 把决定反馈系数的主要元件和决定频率的主要元件分开
- 降低晶体管电容的影响

# 克拉泼电路

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$$



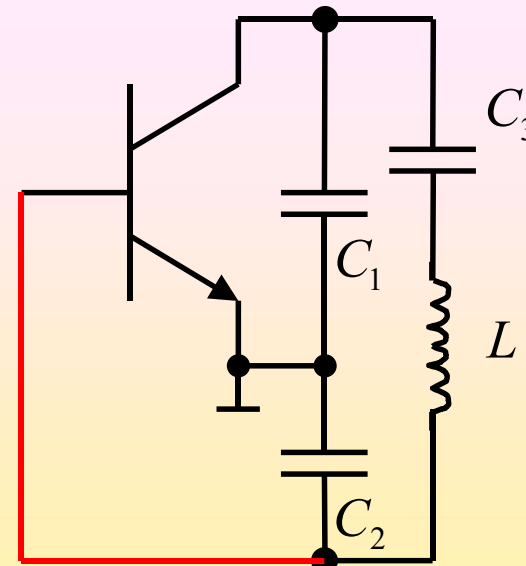
# 克拉泼电路的优缺点

## ■ 优点

- 反馈系数的调整和频率的调整是被分开进行的
- 晶体管电容对振荡频率的影响很小

## ■ 缺点

- 当调节频率时，振荡器振幅随之改变
  - 谐振回路的谐振阻抗等效到CE输出端，和 $C_3$ 有关



$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_1 + C_{ce}} + \frac{1}{C_2 + C_{be}}$$

$$C_3 \ll C_1, C_2 \\ \Rightarrow C \approx C_3$$

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$$

$$R'_P = \left( \frac{C_3 \text{串} C_2}{C_1 + C_3 \text{串} C_2} \right)^2 R_P \approx \left( \frac{C_3}{C_1} \right)^2 R_P$$



- $C_3$ 不能太大,  $C_4$ 调整频率范围太小
- $C_3$ 不能太小, 接入系数小, 振荡幅度小

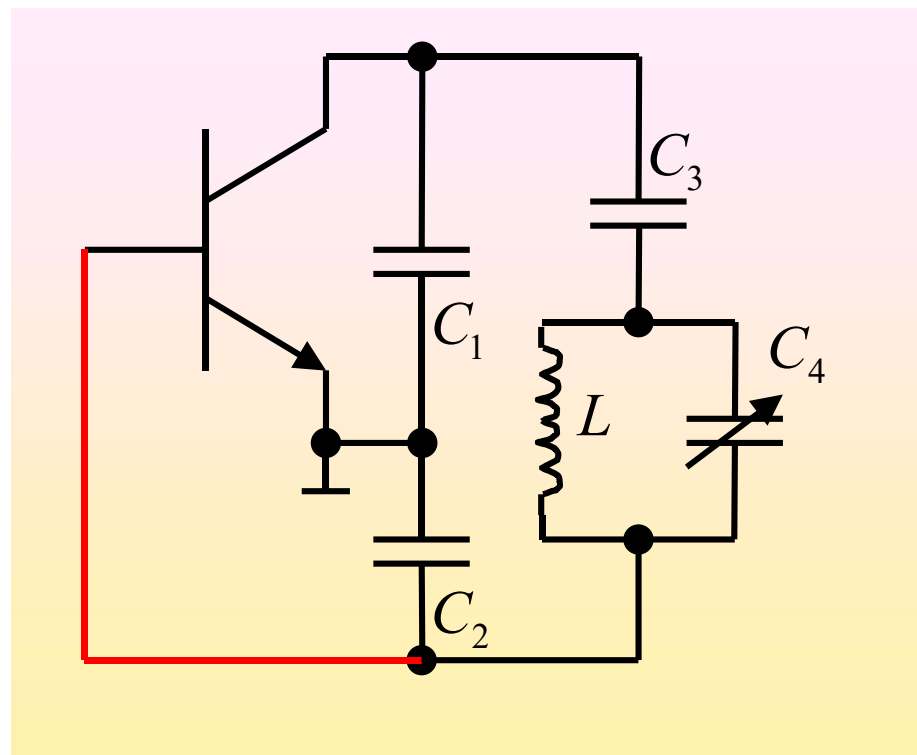
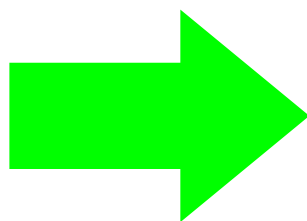
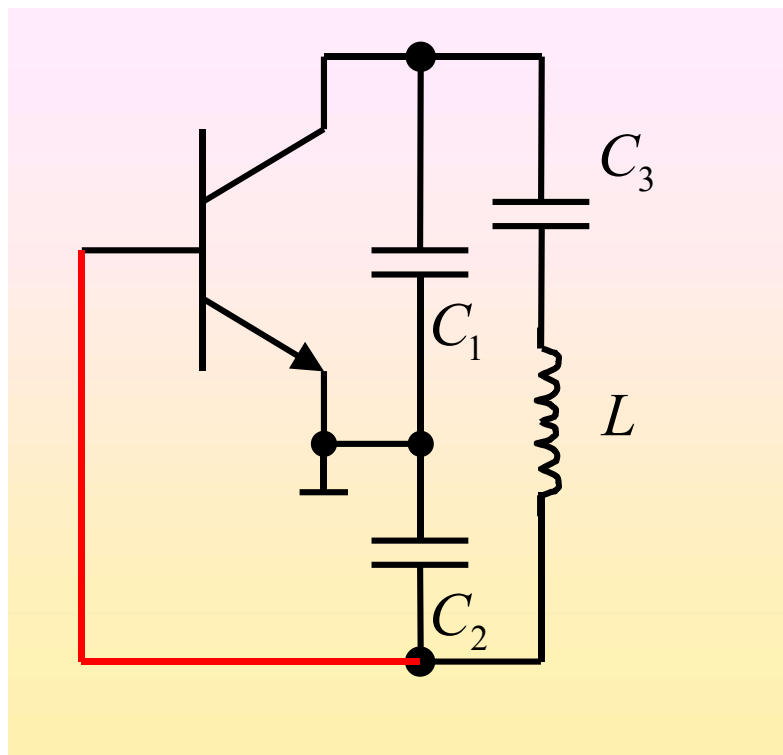
$$C_3 \ll C_1, C_2$$

$$\Rightarrow C \approx C_3 + C_4$$

## 西勒电路

$$f \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_3 + C_4)}}$$

- 调节 $C_4$ , 调节振荡频率, 谐振阻抗变换到输出端几乎不受影响, 输出振幅是稳定的
- 晶体管电容影响很小



# 三点式振荡器

	哈特莱电路	考毕兹电路	克拉泼电路	西勒电路
决定频率元件	$L = L_1 \text{ 串 } L_2$ $C$	$L$ $C = C_1 \text{ 串 } C_2$	$L$ $C \approx C_3$	$L$ $C \approx C_3 \text{ 并 } C_4$
波形	差	好	好	好
共发反馈系数	$L_2/L_1$	$C_1/C_2$	$C_1/C_2$	$C_1/C_2$
反馈系数, 频率可调性	不方便	不方便	方便 幅度改变	方便 幅度稳定
频率稳定度	差	差	好	好
最高振荡频率	十兆	百 ~ 千兆	百 ~ 千兆	百 ~ 千兆

$$C_1 \text{串} C_2 \text{串} C_3 = 1.55 \text{ pF}$$

$$C = C_4 + \text{串} = 4.85 \text{ pF}$$

$$f_{osc} \approx f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 9.57 \text{ MHz}$$

## 例：习题5.11

- 画出图示各振荡器的高频等效电路，说明它们属于哪种类型的振荡器，计算频率值。

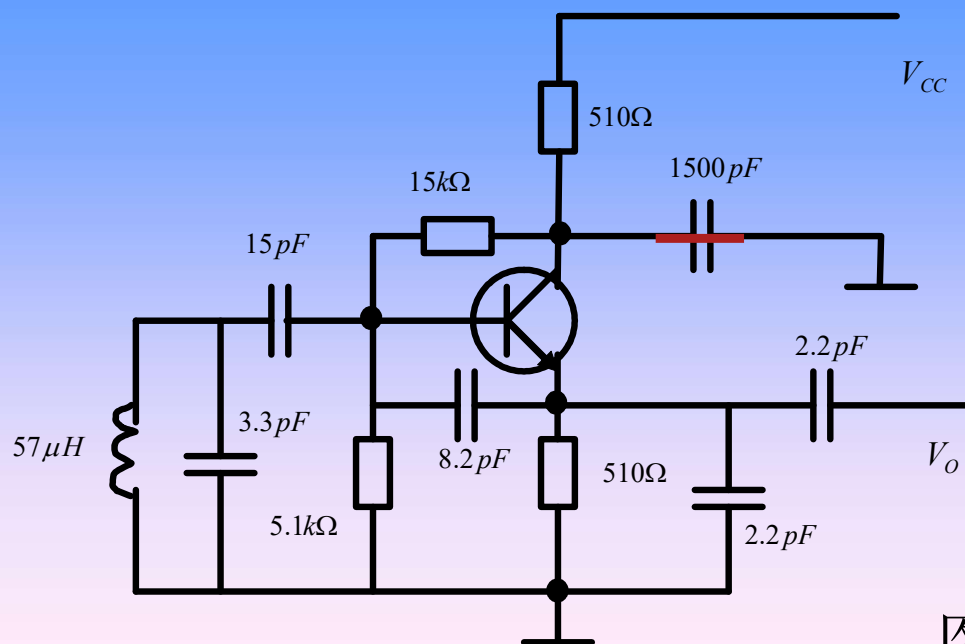
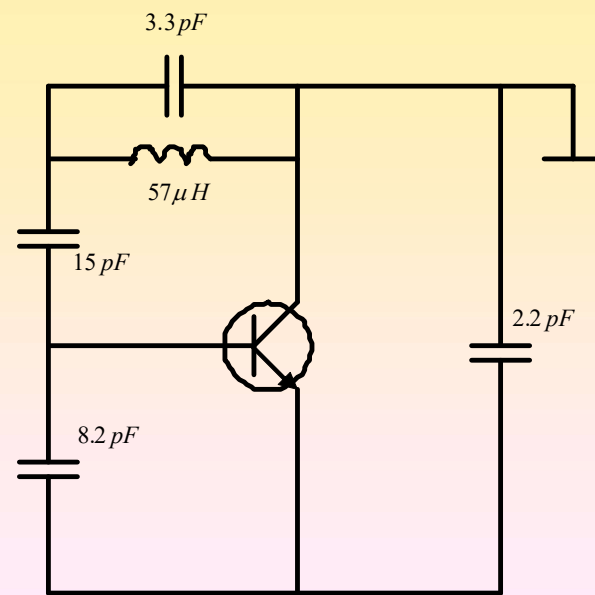


图 (a)



$$C = C_1 \text{串} C_2 \text{串} C_3 = 59.9 \sim 100 pF$$

$$f_{osc} \approx f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 2.25M \sim 2.91MHz$$

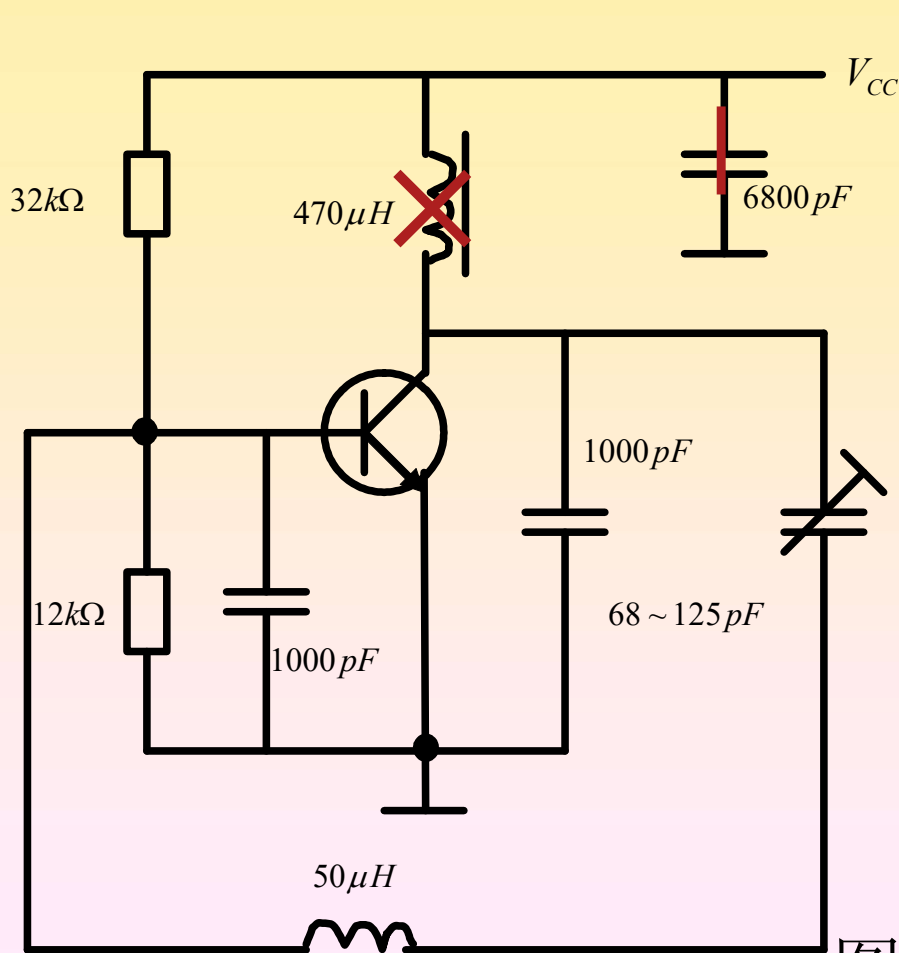
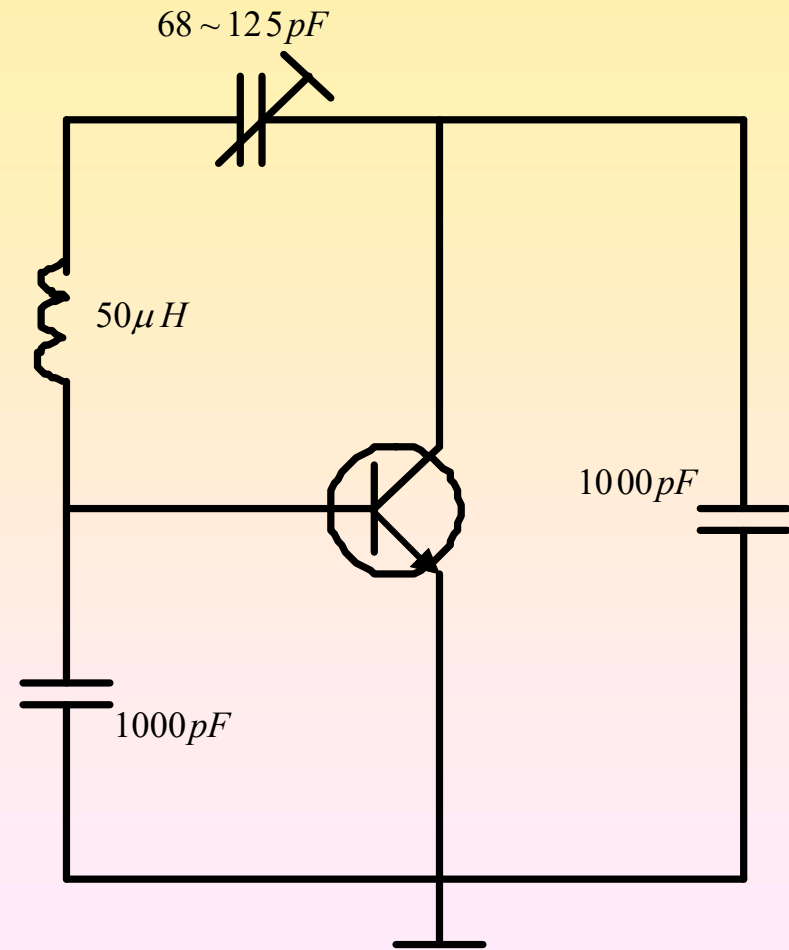


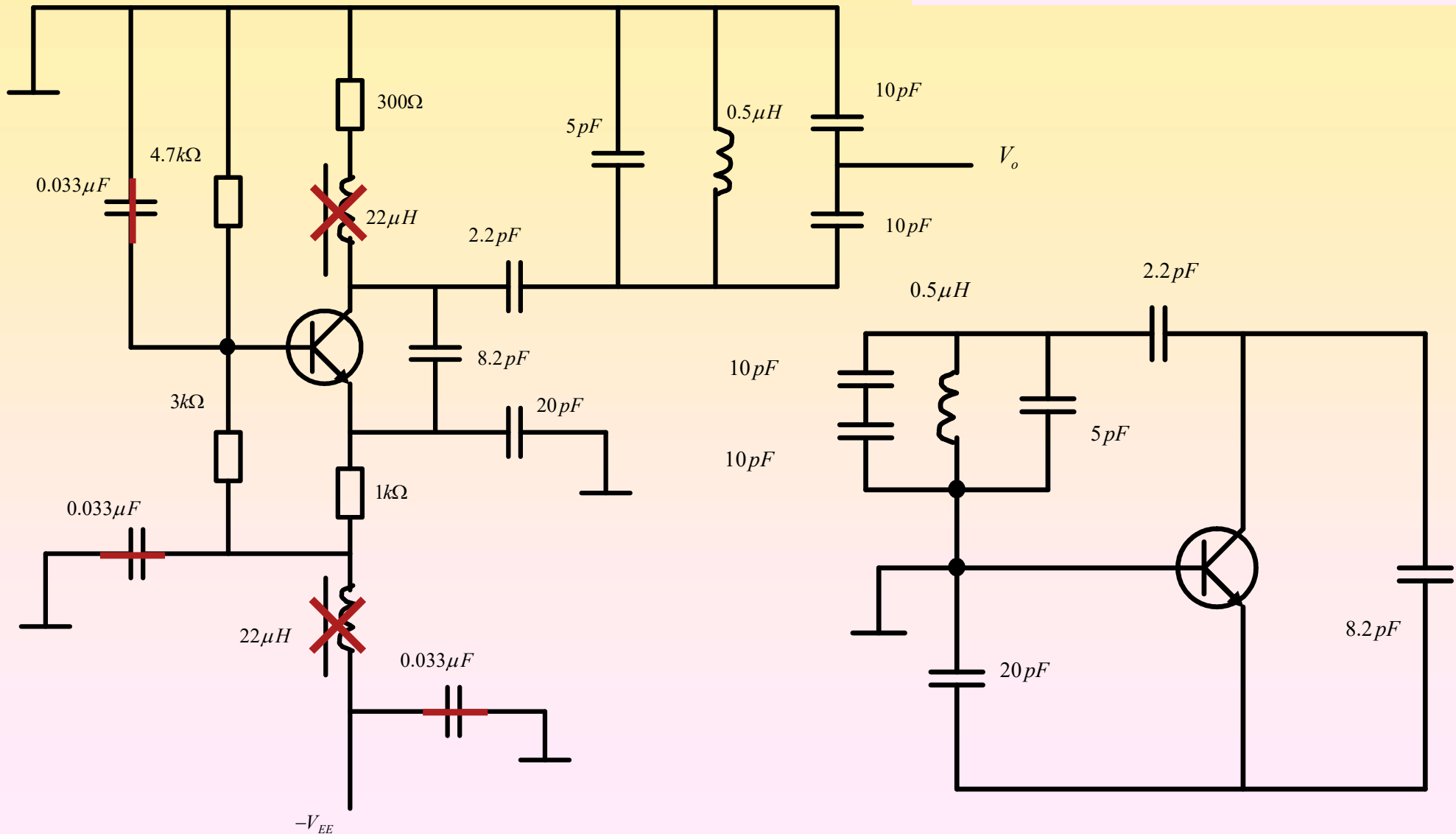
图 (b)



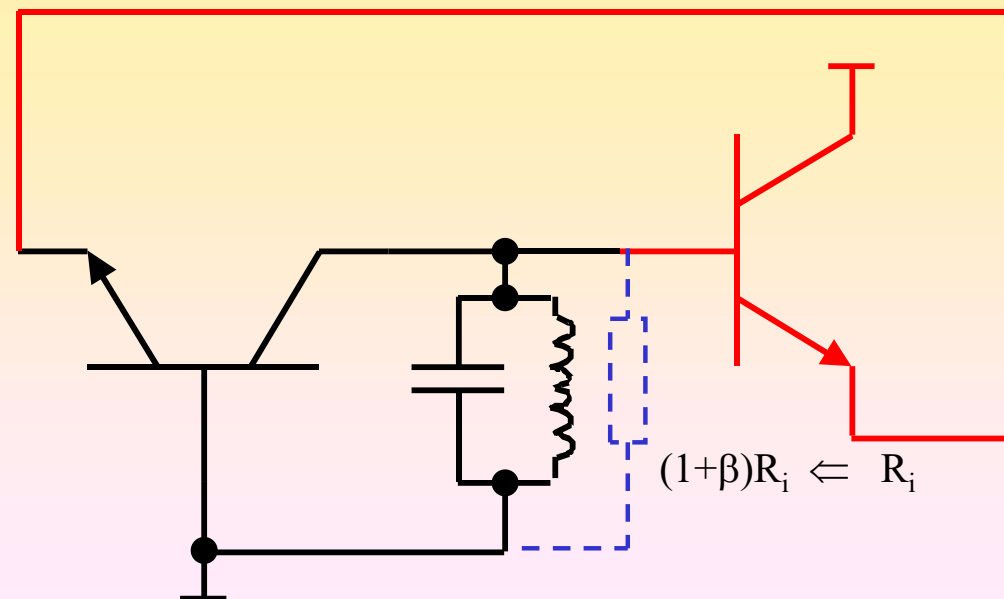
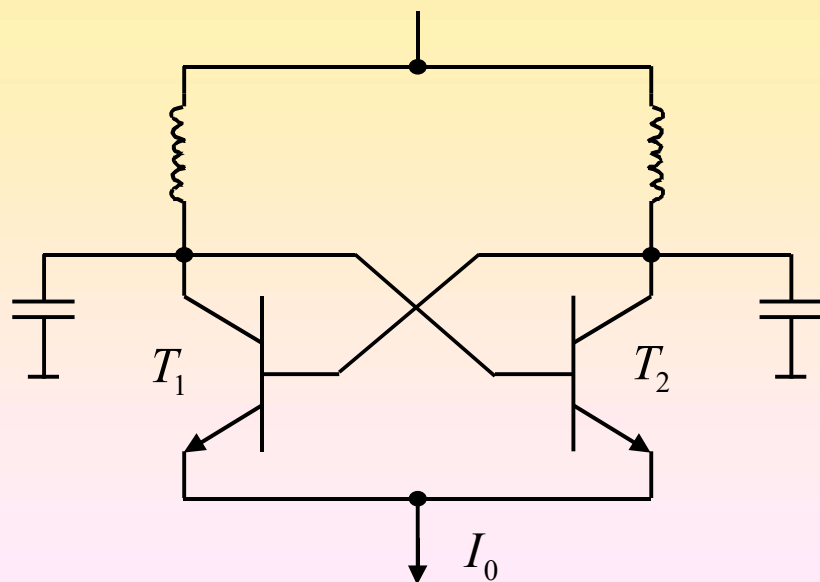
$$C_1 \text{串} C_2 \text{串} C_3 = 1.60 \text{ pF}$$

$$C = C_4 + \text{串} = 11.60 \text{ pF}$$

$$f_{osc} \approx f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 66.10 \text{ MHz}$$



# 用射极跟随器作阻抗变换电路



- 交叉耦合正反馈LC振荡器，分析时多用负阻分析，又称负阻LC振荡器

正反馈！

高Q值！



# LC振荡器小结

- LC振荡器是以LC谐振回路作为选频回路的振荡器
  - 晶体管作为换能元件的晶体管振荡器：既要保证从输出端引回到输入端是**正反馈**，又要求输入端电路对输出端LC回路的影响尽量地小（**高Q值**），于是采用了不同的接入方式，从而LC振荡器可以分为互感耦合、三点式和负阻几种类型
- 三点式振荡器是将LC选频回路的三个电抗元件分别接在晶体管的e,b,c三个极之间
  - 与发射极e相联的两个电抗元件必须是同性质的，而另一个必须是反性质的：首要满足正反馈条件
- LC振荡器的振荡频率近似为LC回路的中心频率
- LC振荡器起振分析和小信号放大器分析完全相同



## 5.4 振荡器的频率稳定度

- 通常用频率准确度和频率稳定度来衡量振荡器的频率性能
  - 频率稳定性是振荡器保持频率不变的能力，这在通信系统中是很重要的
    - 本地振荡器被称为是通信系统的‘心脏’
- 频率稳定度是指振荡器的实际振荡频率偏离其标称值变化的程度
  - 这种变化是由于振荡器的电源电压不恒定，环境条件（温度，湿度...）变化，器件内部噪声、机械振动、电磁干扰，和器件老化等因素引起的
    - LC振荡器，其频率稳定度不够高，主要原因在于品质因数Q值相对较低





# 频率准确度

- 频率准确度又称频率精度，它表示实际振荡频率 $f$ 偏离标称频率 $f_0$ 的程度

- 绝对频率准确度

$$\Delta f = |f - f_0|$$

- 相对频率准确度

$$\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{|f - f_0|}{f_0}$$

# 频率稳定度

- 在一定观测时间内，由于各种因素变化，所引起的振荡频率对于标称频率变化的程度

$$\sigma(\tau) = \frac{\Delta f_{\max}}{f_0}$$

- 频率的变化是随机的，是和环境相关的
  - 不同的观测时间，测量结果不同
    - 用上式表示频率稳定度不合理
  - 更合理的关于频率稳定度的表示可以采用均方误差

$$\sigma(\tau) = \lim_{n \rightarrow \infty} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \left( \frac{\Delta f_{\max}}{f_0} \right)_i - \overline{\left( \frac{\Delta f_{\max}}{f_0} \right)} \right]^2}$$

■如果在频域内研究，这就是所谓的相位噪声（第八章）。相位噪声是通信系统中对振荡器质量衡定的主要指标

## 长稳和短稳

- **长期频率稳定度**
  - 观察时间为一天以上
    - 高精度的频率基准、时间基准（天文观测台、国家计时台，等）均采用长期频率稳定度来计量频率源的频率稳定性
- **短期频率稳定度**
  - 观察时间为一天以内，以小时计量
    - 大多数电子设备和仪器均采用短期频率稳定度来衡量频率源的频率稳定性
- **瞬时频率稳定度**
  - 衡量秒或毫秒时间内频率的随机变化
    - 主要由设备内部噪声或各种突发性干扰引起
    - 是高速通信设备、雷达设备以及以相位信息为传输对象的电子设备的重要指标



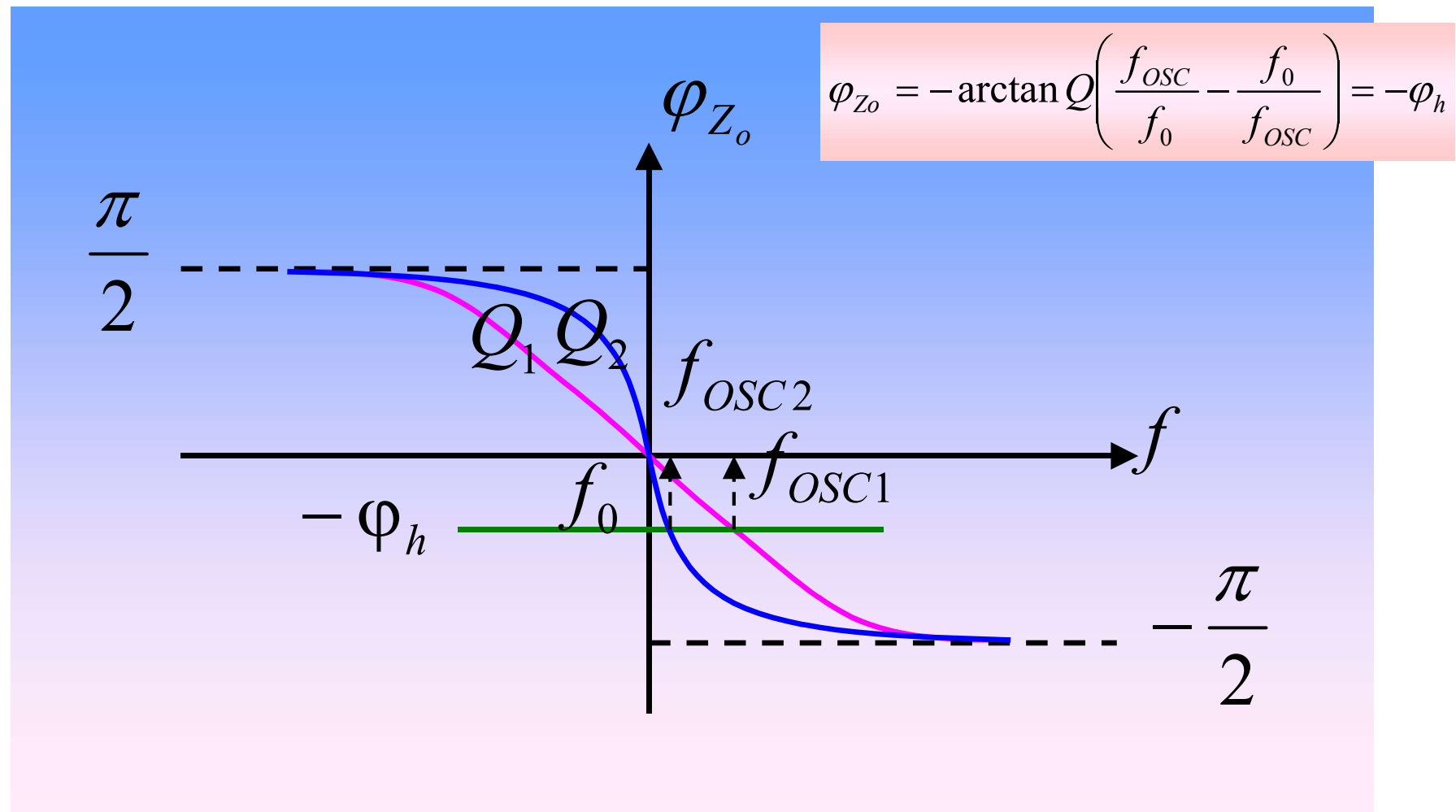
# 频率稳定度的例子

<b>RC振荡器</b>	<b><math>10^{-3}</math></b>
<b>LC振荡器</b>	<b><math>10^{-3} - 10^{-4}</math></b>
<b>普通信号发生器</b>	<b><math>10^{-3} - 10^{-4}</math></b>
<b>中波广播台</b>	<b><math>2 \times 10^{-5}</math></b>
<b>短波通信机</b>	<b><math>10^{-4} - 10^{-5}</math></b>
<b>电视发射台</b>	<b><math>5 \times 10^{-7}</math></b>
<b>标准信号发生器</b>	<b><math>10^{-7} - 10^{-9}</math></b>
<b>时间标准</b>	<b><math>10^{-11} - 10^{-13}</math></b>

## ■ 以互感耦合LC振荡器为例分析

$$f_{osc} = f_0 \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\tan \varphi_h}{2Q} \right)^2} + \frac{\tan \varphi_h}{2Q} \right]$$

# 导致频率不稳定的原因



$$f_{osc} = f_0 \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\tan \varphi_h}{2Q} \right)^2} + \frac{\tan \varphi_h}{2Q} \right]$$

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

$$Q = R_p \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$\varphi_h = \varphi_{g_m} + \varphi_F$$

# 影响频率稳定度三方面因素

- 影响谐振回路中心频率的因素
  - 各种环境因素对回路电感L和电容C的影响
    - 温度、湿度、大气压力、振动等因素
  - 晶体管或其它器件的输入、输出阻抗的变化
    - 寄生电容、负载电抗、元件失效、直流电源电压不稳
- 影响回路Q值的因素
  - 器件输入输出阻抗中有功部分的等效电阻，负载电阻、和谐振回路损耗电阻（高频损耗）等
- 影响相位的因素
  - 非理想反馈变压器、晶体管的寄生效应、环路内各种噪声源引起的相差抖动等

$$f_{osc} = f_0 \left[ \sqrt{1 + \left( \frac{\tan \varphi_h}{2Q} \right)^2} + \frac{\tan \varphi_h}{2Q} \right]$$

# 主要稳频措施

- 可能还有许多原因，通过上述三个途径对振荡频率的稳定性起着不良影响
  - 对于某一振荡器，可从上述三个途经分析引起该振荡器频率不稳定的主要因素是什么，针对性地对其中的主要因素采取防范和改善，以有效地提高频率稳定性
  - 一般性的稳频措施
    - 提高谐振回路的标准性
    - 消弱不稳定因素对谐振特性的影响

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

$$\frac{\Delta f_0}{f_0} = -\frac{1}{2} \left( \frac{\Delta L}{L} + \frac{\Delta C}{C} \right)$$

# 提高谐振回路的标准性

- 回路的标准性是指在外界因素如温度、湿度、大气压力等变化时，谐振回路保持其谐振频率固定不变的能力
  - 标准性越高，回路自然谐振频率随环境条件变化的可能性就越小
  - 对LC振荡器，提高回路标准性的主要措施是选用高稳定性、低温度系数、低吸水性电容器与电感器
- 引起电抗元件电感量和电容量变化最明显的环境因素是温度的变化，对温度变化进行补偿和隔离是提高谐振回路标准性最有效的手段之一
  - 温度补偿法：用具有负温度系数的瓷介电容器，接入由普通的具有正温度系数的电感和电容组成的谐振回路
  - 温度隔离法：将电抗元件置于特制的恒温槽内，槽内温度基本上不随外界环境温度变化
- 利用固体谐振系统代替LC电磁谐振系统
  - 高稳频率源：固体谐振系统构成的振荡器，不但频率稳定性、频率准确度高，而且体积、耗电均很小，因此，在许多领域被广泛地采用



- **改进电路形式：克拉泼电路和西勒电路，可以大大降低晶体管极间分布电容对振荡频率的影响；有时我们也利用固体谐振系统如晶体来消除晶体管参数对谐振系统的影响**

## **消弱不稳定因素对谐振特性的影响**

- **晶体管的输入阻抗、输出阻抗、外接负载阻抗、各种分布电容和引线电感都是影响回路标准性的重要的不稳定因素**
  - **晶体管的参数（输入输出阻抗等）受工作点的影响较大，因此注意选择工作点稳定的电路与良好的稳压电源电路**
  - **选择合适的回路与器件、回路与负载间的接入系数（耦合系数），尽可能减小不稳定的分布电容和引线电感的影响**
  - **为了阻止负载对振荡器的影响，振荡器一般都是通过具有高输入阻抗的射随器输出**
    - **如必须直接联结时，也应采用变比较大的降压变压器，或分压比很小的电容分压网络再与其它负载相联接**

- 在通信系统和各种电子设备中，晶体振荡器是最常见的具有高稳定性和高准确度的正弦波振荡电路

## 5.5 晶体振荡器

- 利用石英晶体的压电效应和反压电效应对正弦波振荡器进行控制
  - 晶体振荡器也是反馈振荡器，决定频率的元件是晶体（固体谐振腔）而不是LC谐振腔
  - 晶体振荡器突出的优点是可以产生频率稳定性和准确度很高的正弦波，这是由于石英晶体的物理性能和化学性能十分稳定的缘故，它们对周围环境条件（如温度、湿度、大气压力）的变化不敏感
    - 晶体振荡器可以比较容易地实现 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 的频率稳定性
    - 对晶体施加恒温控制，还可提高到 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 数量级

- **压电效应：**按某种方式将石英晶体切割成一定厚度的薄片，对薄片施加机械力（压力、拉力、扭力等）时，会产生正负电荷的集聚；反之亦然
  - 如果周期性地施加力，就会有周期性的电输出；反之，如果在晶体上施加变化的电压，并且电信号的频率和晶体的固有振荡频率接近，晶体就会产生机械振动

## **石英谐振器的工作原理**

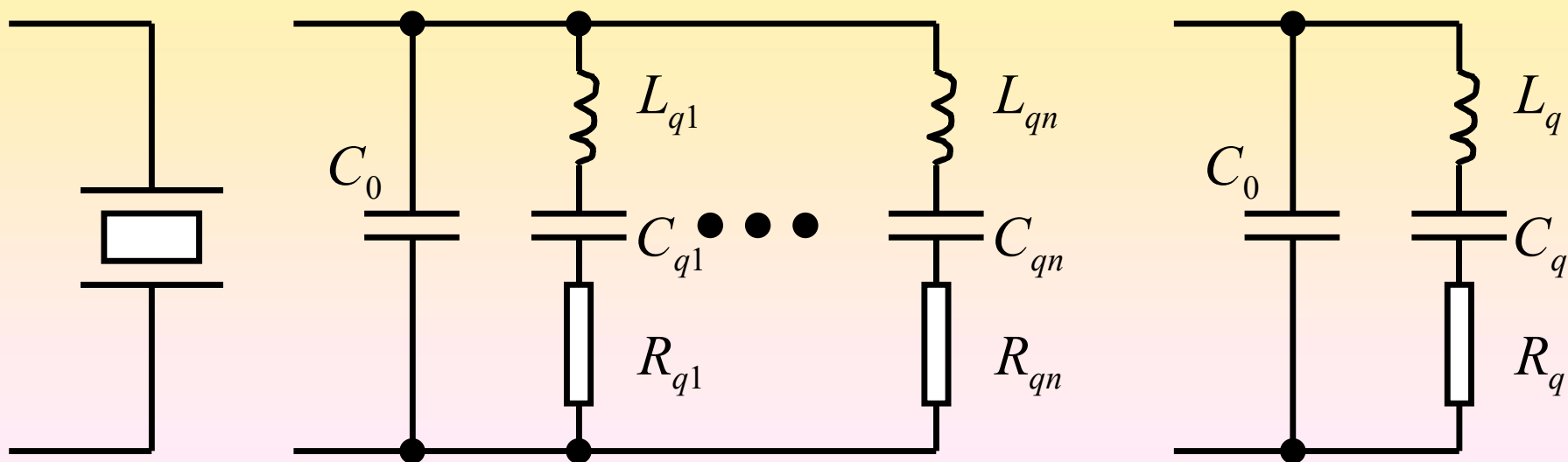
- **把石英谐振腔接入振荡环路，并以一定频率的交变电压激励，使其产生机械形变**
- **该机械形变也会同时激发起频率相同的电荷变化**
  - 该变化以电压或电流的形式通过振荡环路的反馈与放大，重新作用于石英晶片上，补充了振荡过程中的能量消耗，环路则可建立起等幅正弦振荡
- **这种以电振荡促进机械形变，以机械形变激发电振荡的过程，构成了石英晶体对振荡频率的控制**

$$f \propto \frac{1}{t}$$

# 石英晶体的固有振荡频率

- 石英晶体的固有振荡频率和薄片厚度有关系
  - 振荡频率越高，晶片就越薄
    - 传统切割工艺晶体的谐振频率很难达到30MHz，晶片太薄，易损坏。可采用化学蚀刻方法得到薄晶片，使谐振频率达到350MHz
- 晶片越薄越易损坏，实用性不强。可采用让晶体工作于泛音方式
  - 泛音方式采用与基频的谐波振荡，频率为基频的3倍、5倍、7倍到9倍
    - 采用泛音状态，普通晶体振荡器的工作频率可达200MHz

# 石英谐振器的等效电路



$C_0$  晶体极间电容 几 $pF$ 到几十 $pF$

$L_q$  晶体质量等效  $0.1H$ 到百 $H$

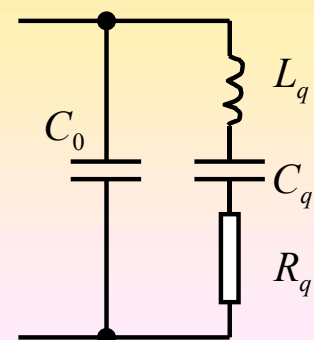
$C_q$  晶体刚性等效 小于 $1pF$ , 一般为 $10^{-3} \sim 10^{-4} pF$

$R_q$  机械形变能耗 几百 $\Omega$

$Q_0$   $10^4 \sim 10^6$

分立电感 100

$$p = \frac{C_q}{C_0} \quad Q = \frac{1}{R_q} \sqrt{\frac{L_q}{C_q}}$$



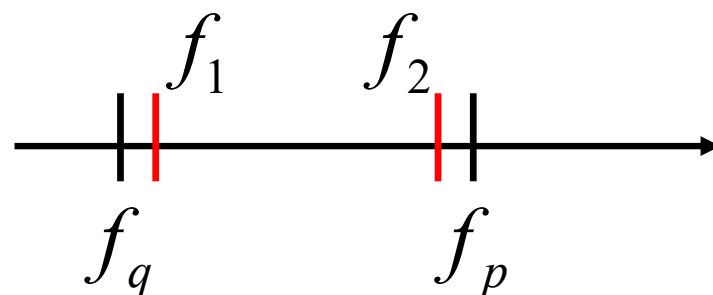
# 晶体的谐振频率

$$Z(j\omega) = \frac{\left( R_q + j\omega L_q + \frac{1}{j\omega C_q} \right) \left( \frac{1}{j\omega C_0} \right)}{\left( R_q + j\omega L_q + \frac{1}{j\omega C_q} \right) + \left( \frac{1}{j\omega C_0} \right)} = R(\omega) + jX(\omega) = Z(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

谐振时， $Z(j\omega)$ 表现为纯阻： $\varphi(\omega) = 0$

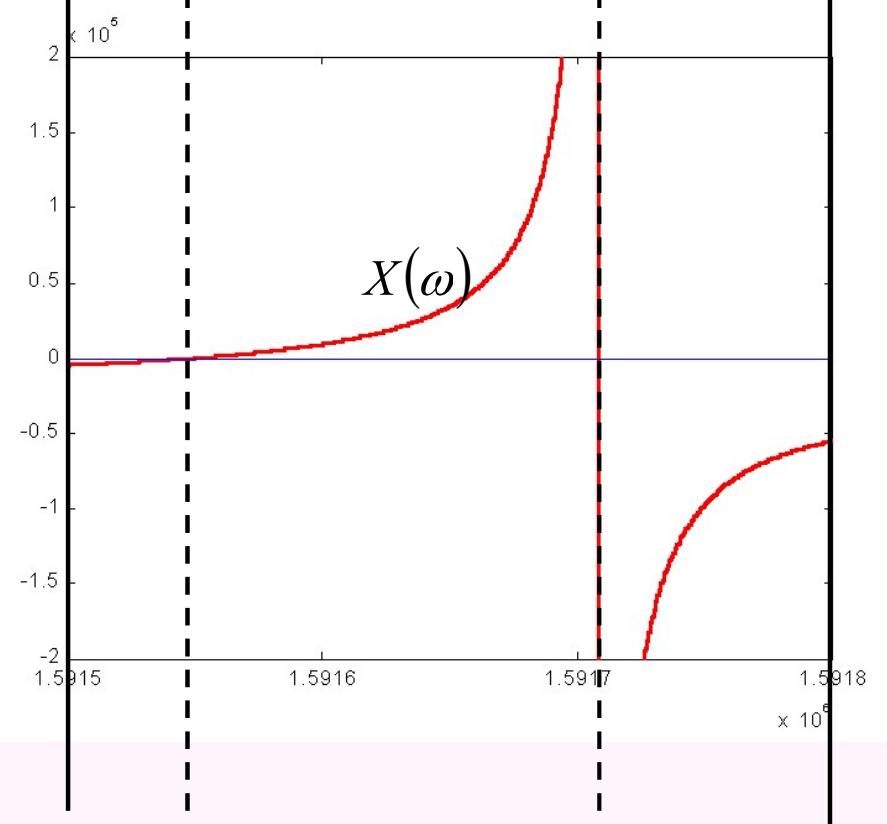
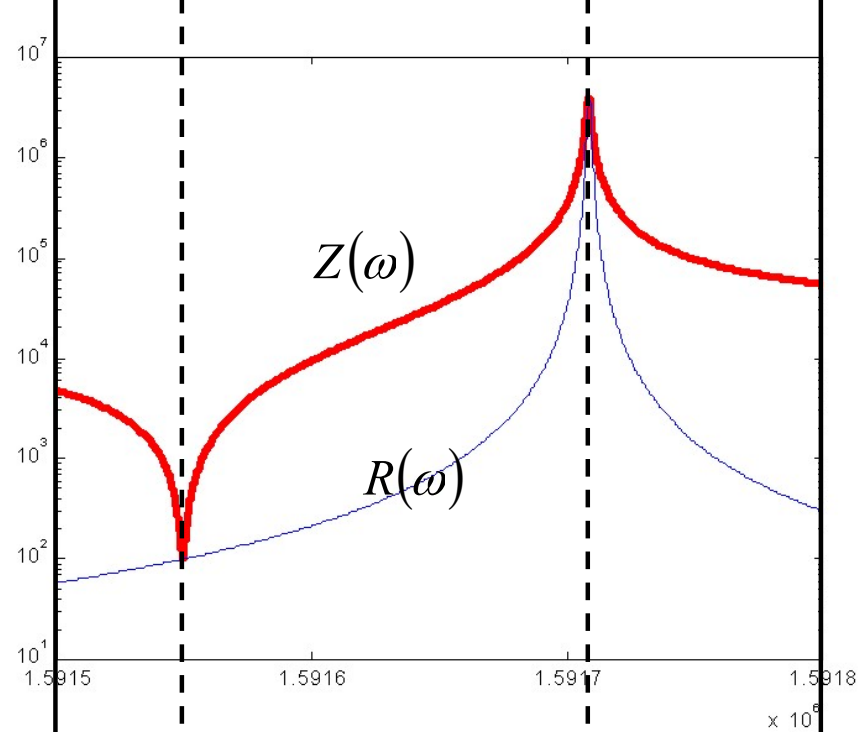
$$f_1 \approx f_q \left( 1 + \frac{1}{2pQ^2} \right) \approx f_q$$

$$f_2 \approx f_p \left( 1 - \frac{1}{2pQ^2} \right) \approx f_p$$

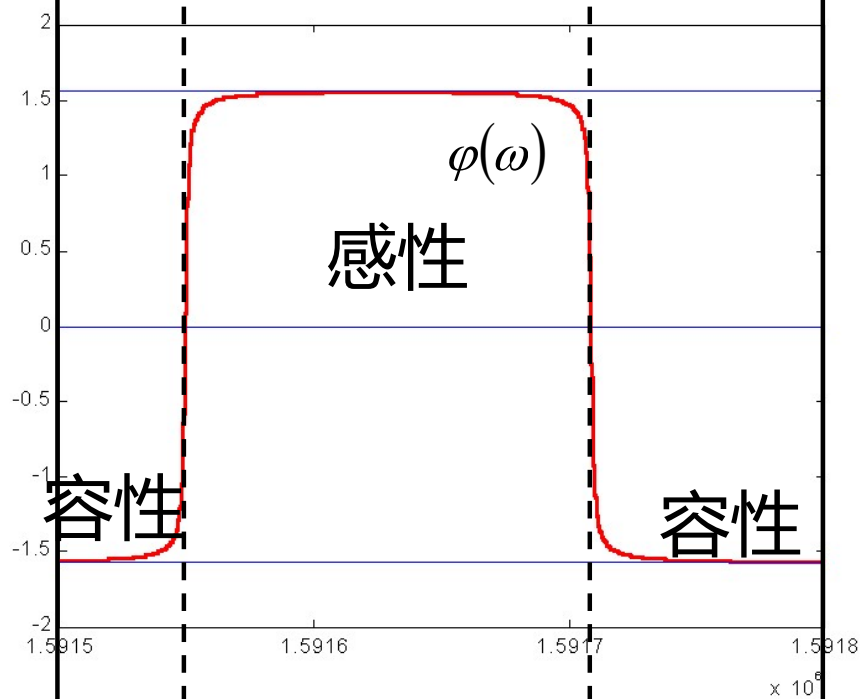


$$\text{串联谐振: } f_q = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q C_q}}$$

$$\text{并联谐振: } f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q \frac{C_q C_0}{C_q + C_0}}}$$



$$Z(j\omega) = R(\omega) + jX(\omega) = Z(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$



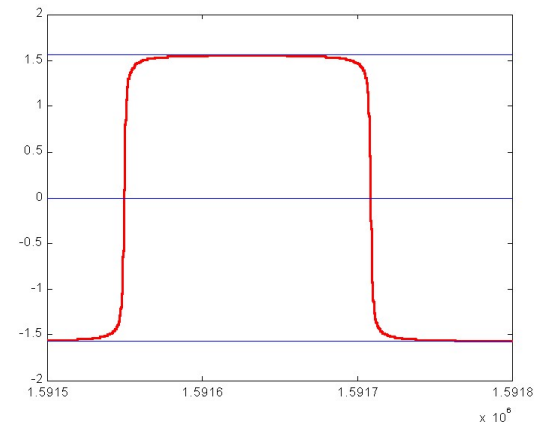
$$Q = \frac{1}{R_q} \sqrt{\frac{L_q}{C_q}} \quad p = \frac{C_q}{C_0} \quad f_1 \approx f_q = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q C_q}} \quad f_2 \approx f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_q \frac{C_q C_0}{C_q + C_0}}}$$

# 晶体谐振器的基本特性

- 很高的等效品质因数:  $10^4$ - $10^6$ 
  - 石英谐振器最大的特点是具有很大的等效电感量和很小的损耗电阻
- 很小的接入系数:  $10^{-3}$  -  $10^{-4}$ 
  - 当外界电抗元件与之相连接时, 对石英谐振器的固有谐振特性的影响是十分微弱的
- 具有两个谐振频率, 且两个谐振频率十分接近

$$f_2 - f_1 \approx f_p - f_q \approx \frac{p}{2} f_q$$

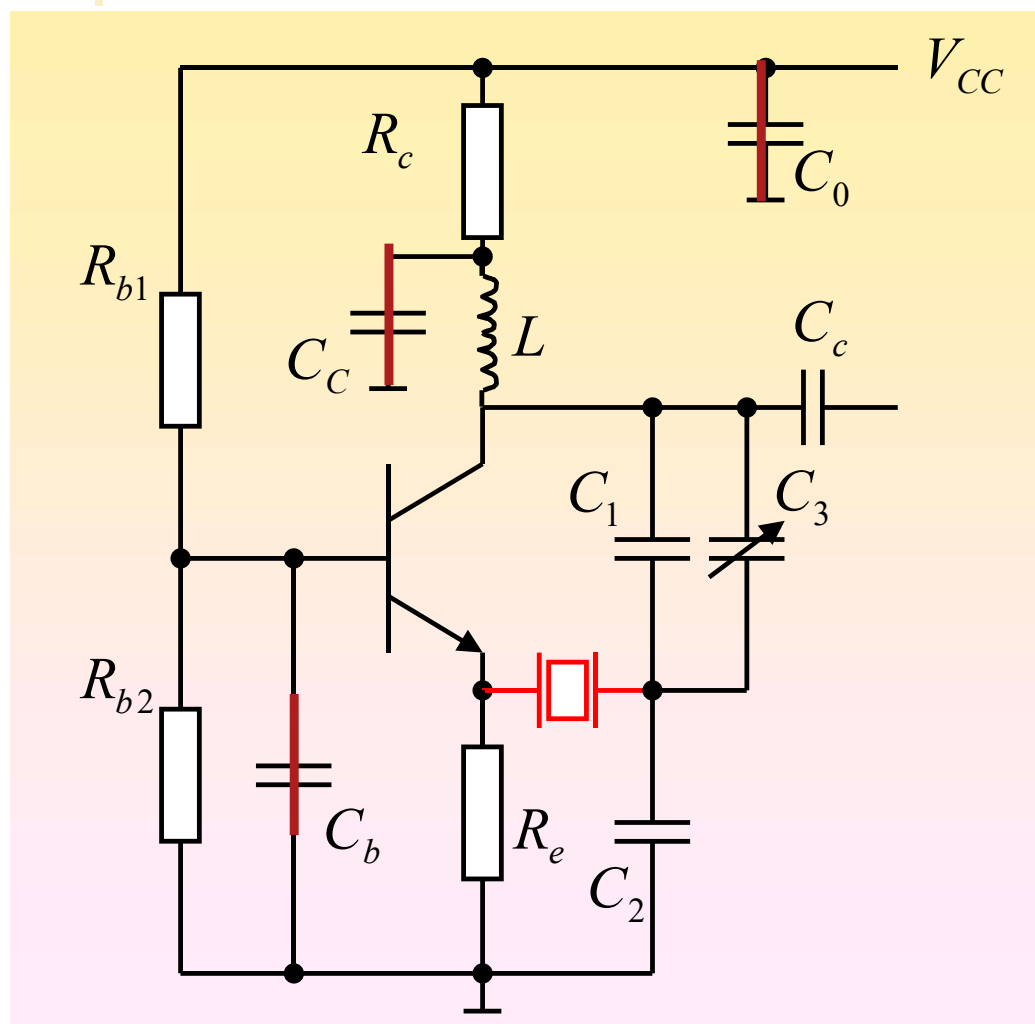
- 石英谐振器的两种工作方式
  - 高Q短路线:  $f = f_q$ : 串联型晶体振荡器
  - 等效L:  $f_q < f < f_p$ : 并联型晶体振荡器



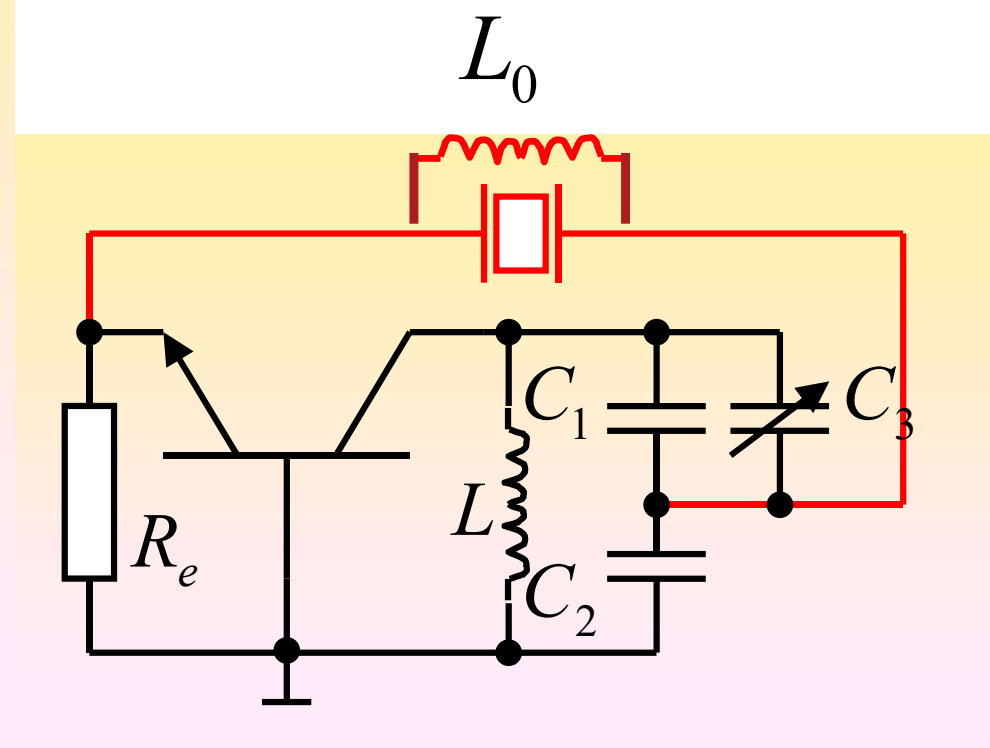


要求 $LC$ 回路谐振频率 $f_0$ 近似等于晶体串联谐振频率 $f_q$

## 串联型晶体振荡器：晶体做高Q短路线



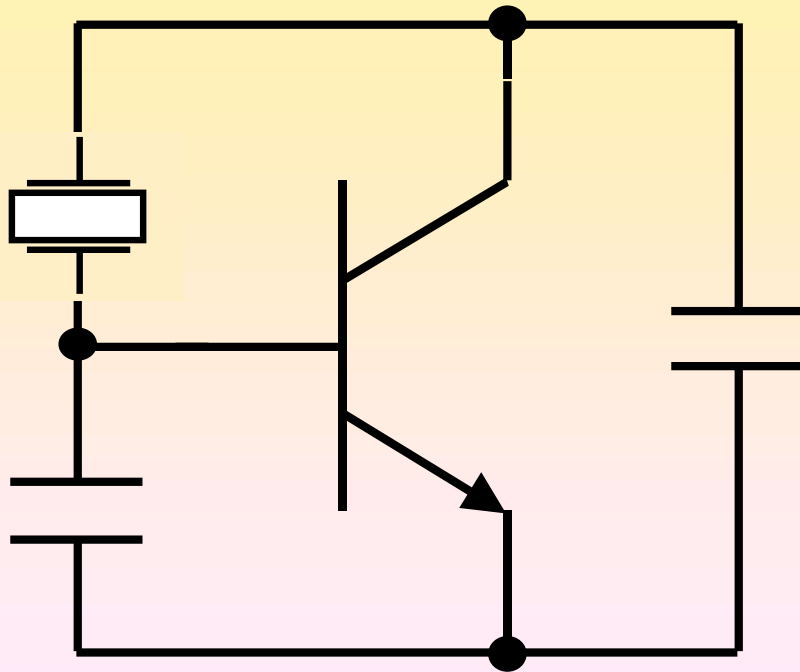
$$f_q = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}$$



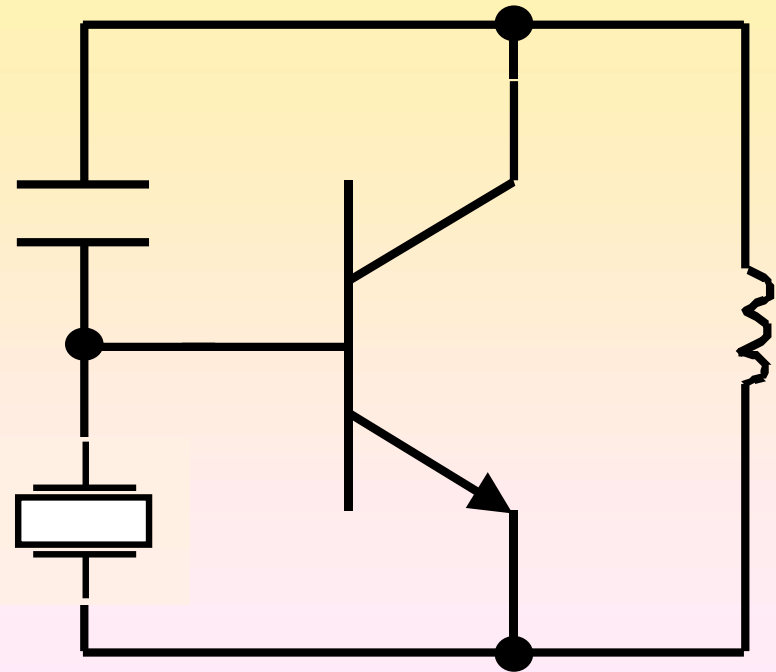
- 石英晶体被晶体管输入阻抗所并联，降低了有载品质因数，也就降低了频率稳定度，故密勒电路使用不多

## 并联型晶体振荡器：晶体作电感用

皮尔斯



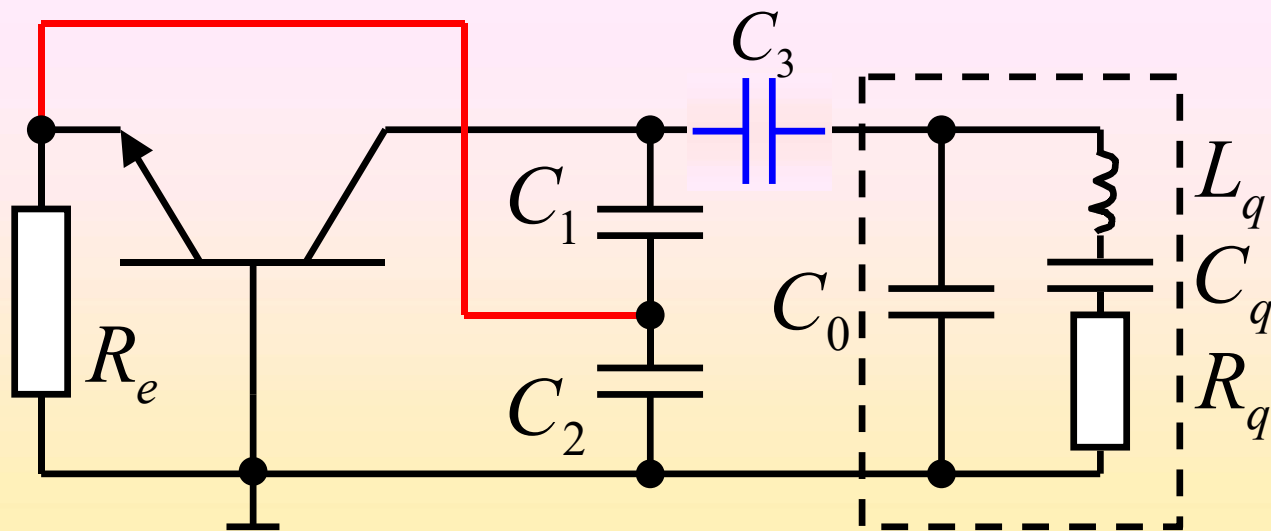
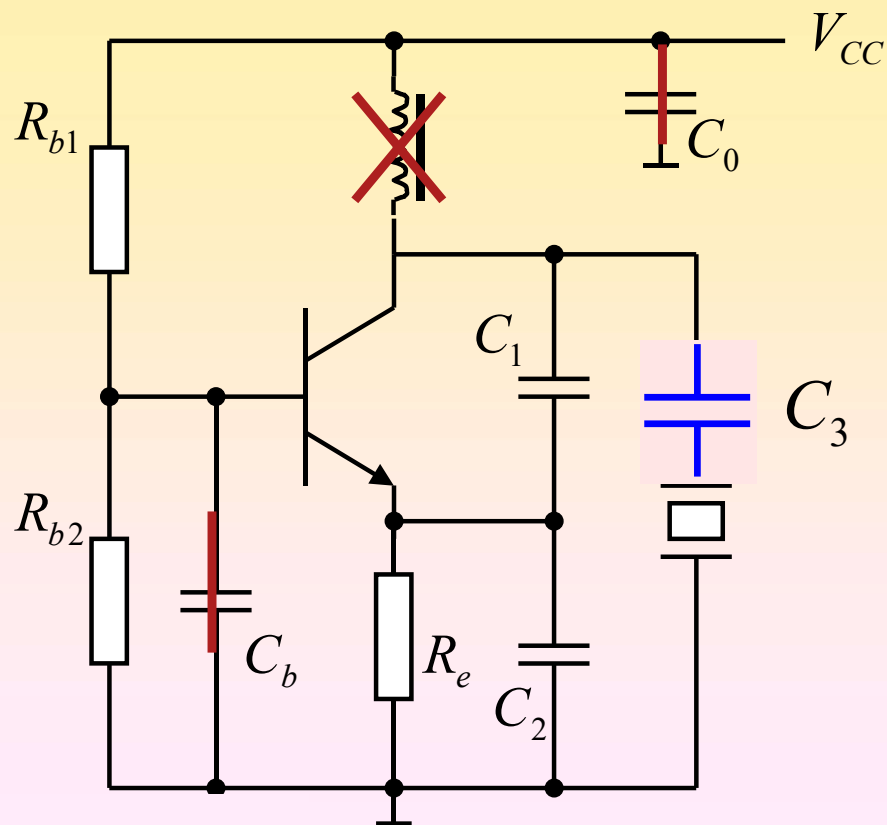
密勒



# 皮尔斯电路

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_q C_q \frac{C_0 + C_L}{C_q + C_0 + C_L}}}$$

$$\approx f_q \left( 1 + \frac{C_q}{2(C_0 + C_L)} \right) \approx f_p \left( 1 - \frac{C_q C_L}{2C_0 C_0} \right)$$



$$C_L = C_1 \text{串} C_2$$

$\Rightarrow$

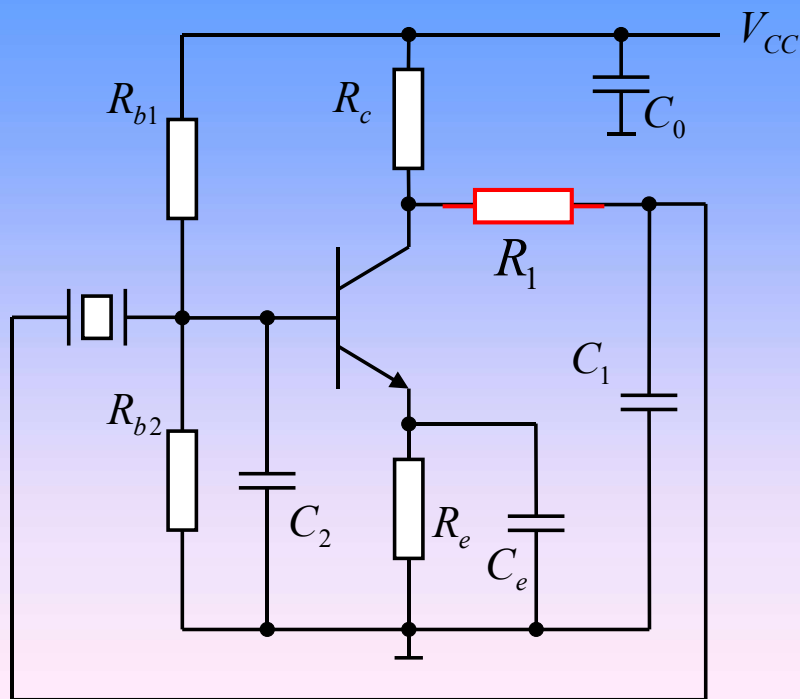
$$C_L = C_1 \text{串} C_2 \text{串} C_3 \approx C_3$$

■皮尔斯电路工作频率范围宽：1kHz~40MHz

■电路简单，输出功率大

■短期频率稳定度极高

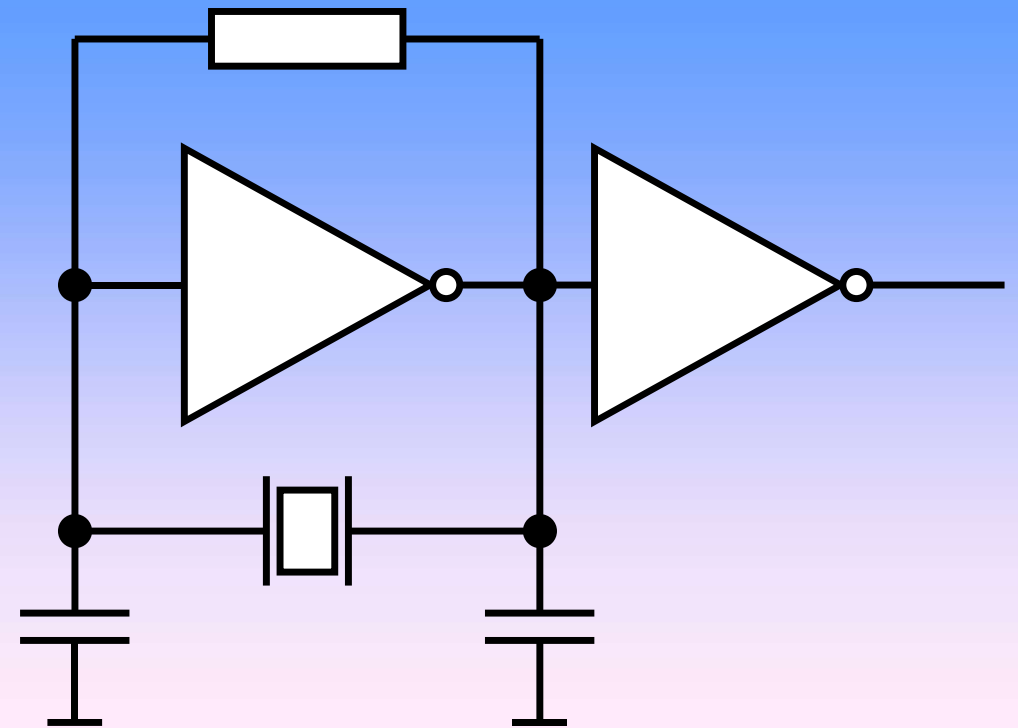
# 皮尔斯电路的其他形式



晶体管反相  $180^\circ$

$R_1$ ,  $C_1$  相位滞后  $65^\circ$

晶体,  $C_2$  相位滞后  $115^\circ$

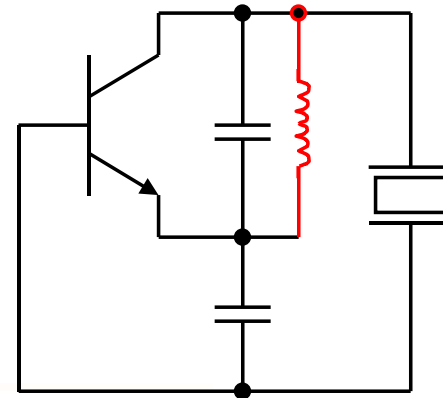


■ 计算机常用振荡电路

■ 频率稳定性不如分立元件的好

■ 数字芯片构成，费用低

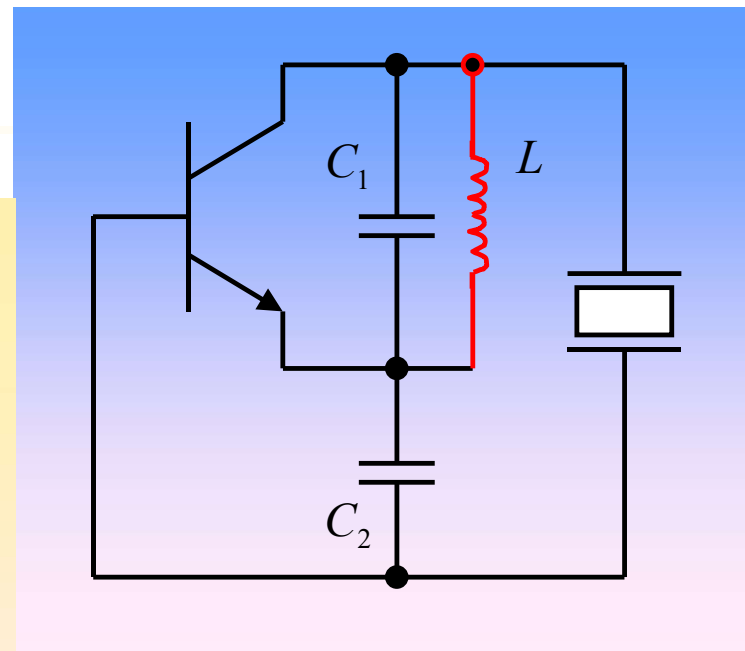
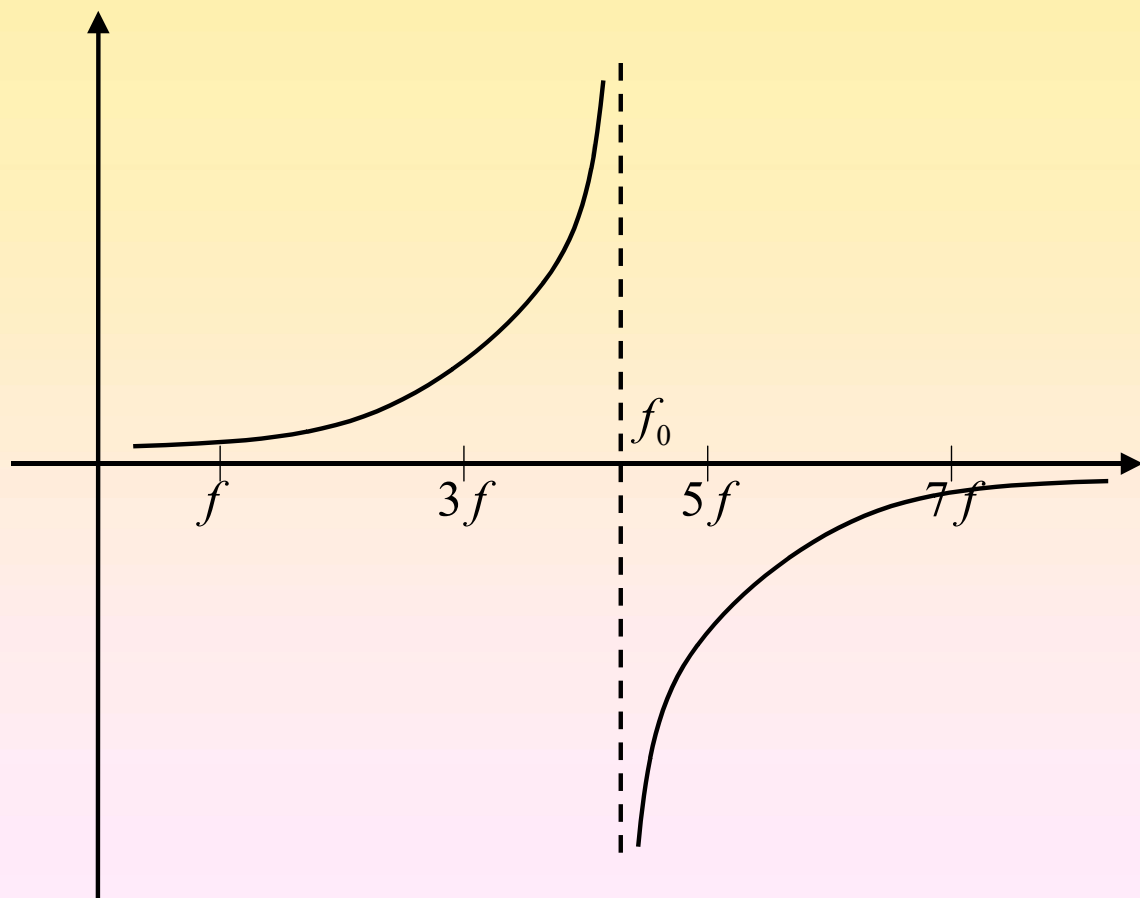
# 泛音晶体振荡器



- 利用石英谐振器的泛音特性对频率实行控制的振荡器称为泛音晶体振荡器
  - 泛音是基音的奇数倍
- 一般来说，基音的振荡强度总是比泛音大，应用泛音晶体做振荡器时，应确保振荡器的振荡频率在该次泛音上
  - 因此，泛音振荡器的振荡环路中还应包括泛音选择回路作为放大器的选频回路
    - 图中，LC并联谐振回路用于代替基音晶振中的电容，它具有选频作用

- $f < f_0$ , 回路呈现感性, 不满足三点式正反馈条件
- $f > f_0$ , 回路呈现容性, 在 $n$ 次泛音处满足振荡条件

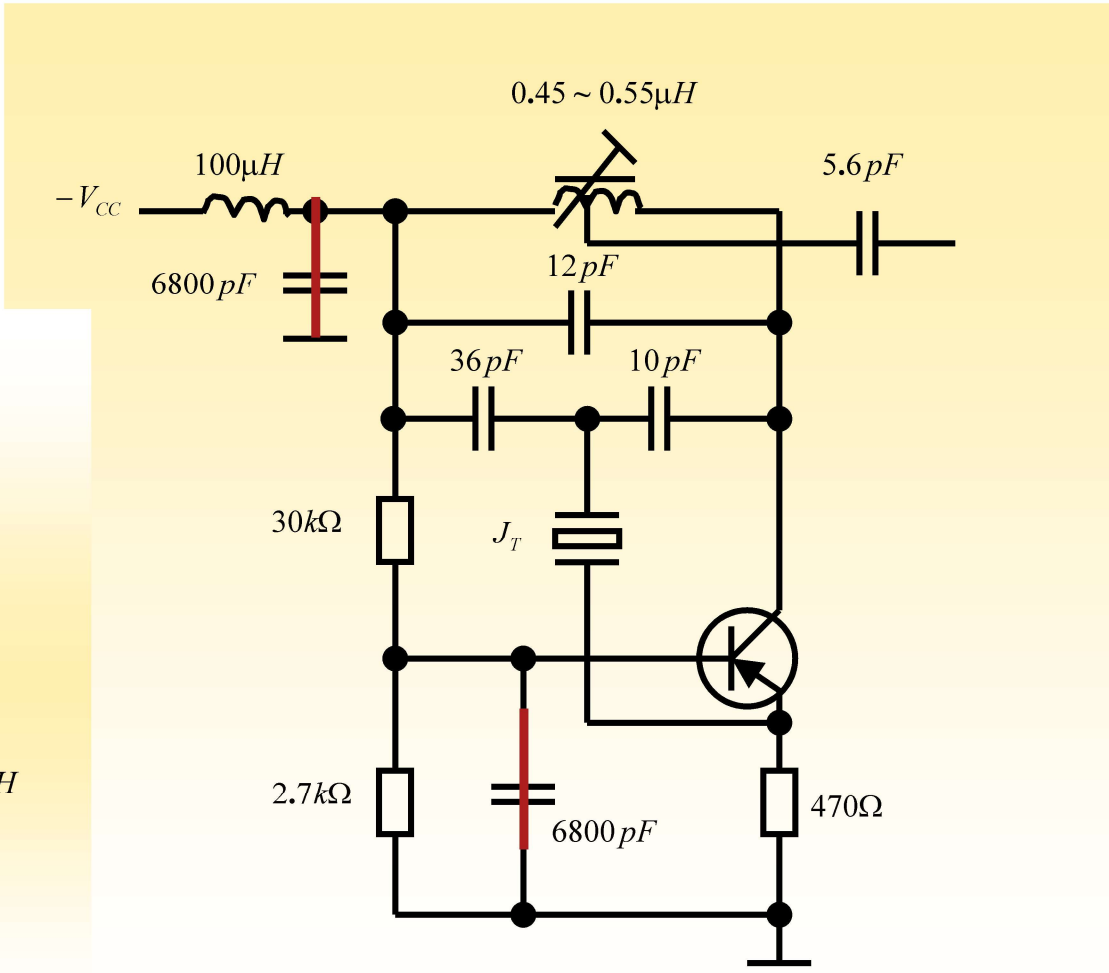
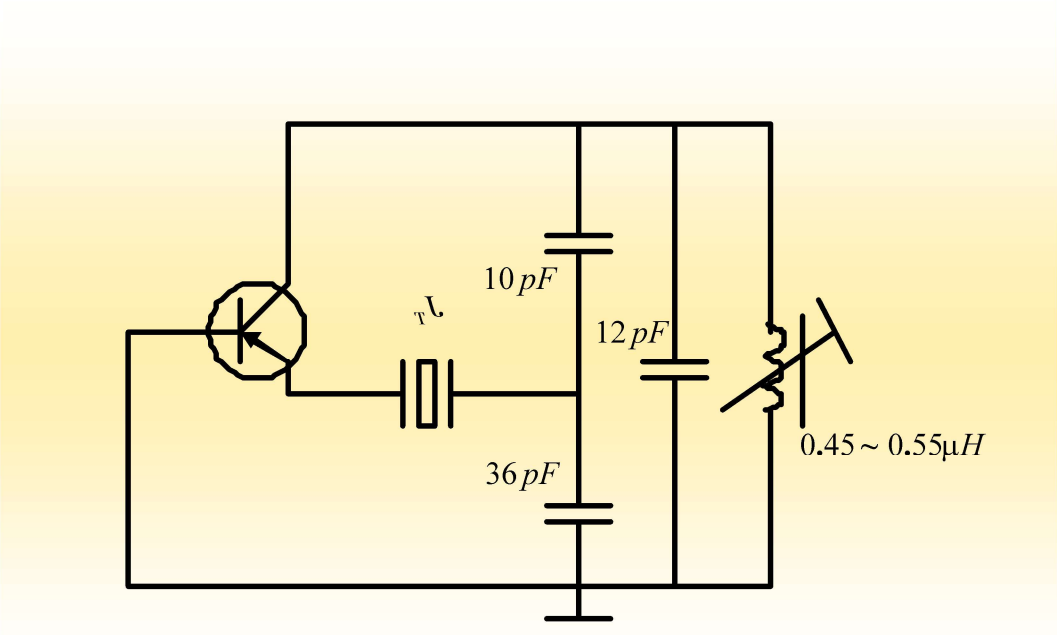
## 并联型泛音振荡器



- $L$ 、 $C_1$ 回路振荡在频率 $f_0$ 处, 使得泛音频率能够满足相位平衡条件和幅度平衡条件
- $n$ 次泛音振荡器,  $f_0$ 应选择在 $(n-2)$ 次和 $n$ 次之间

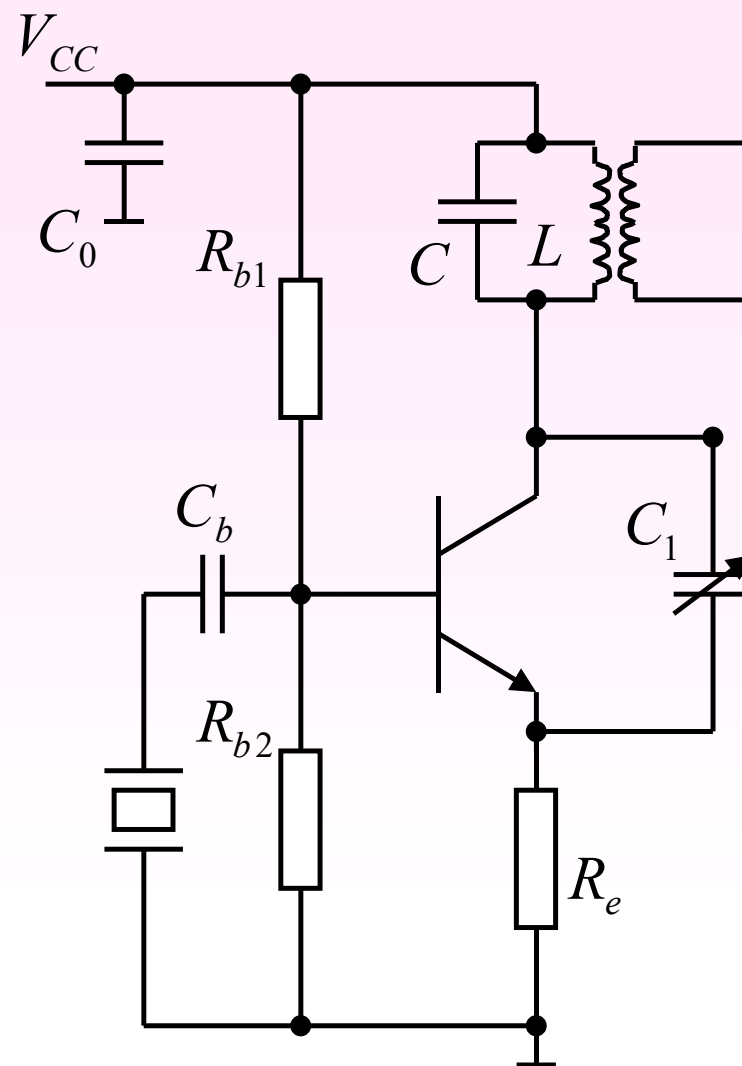
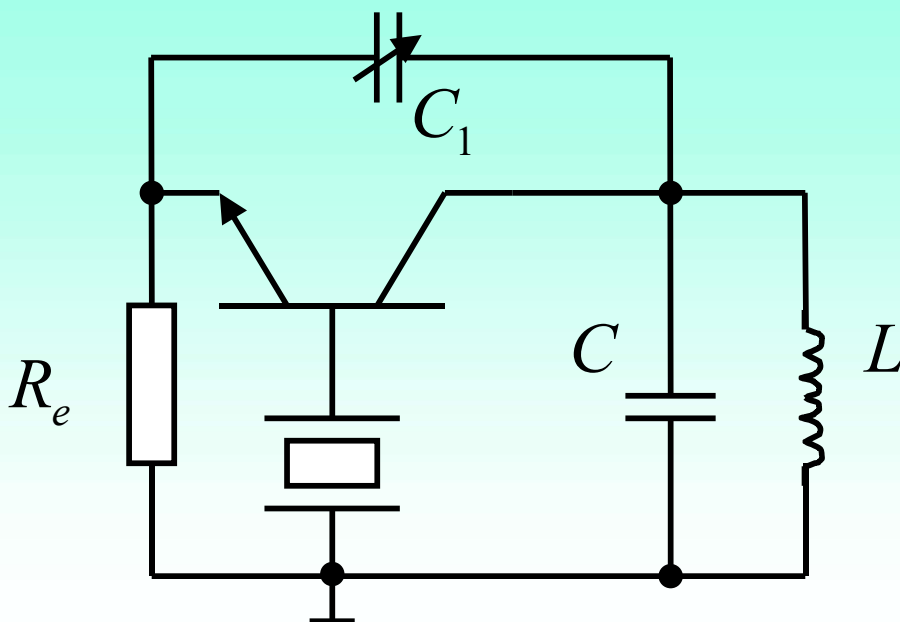


$$f_{OSC} = 48.3M \sim 53.3MHz$$



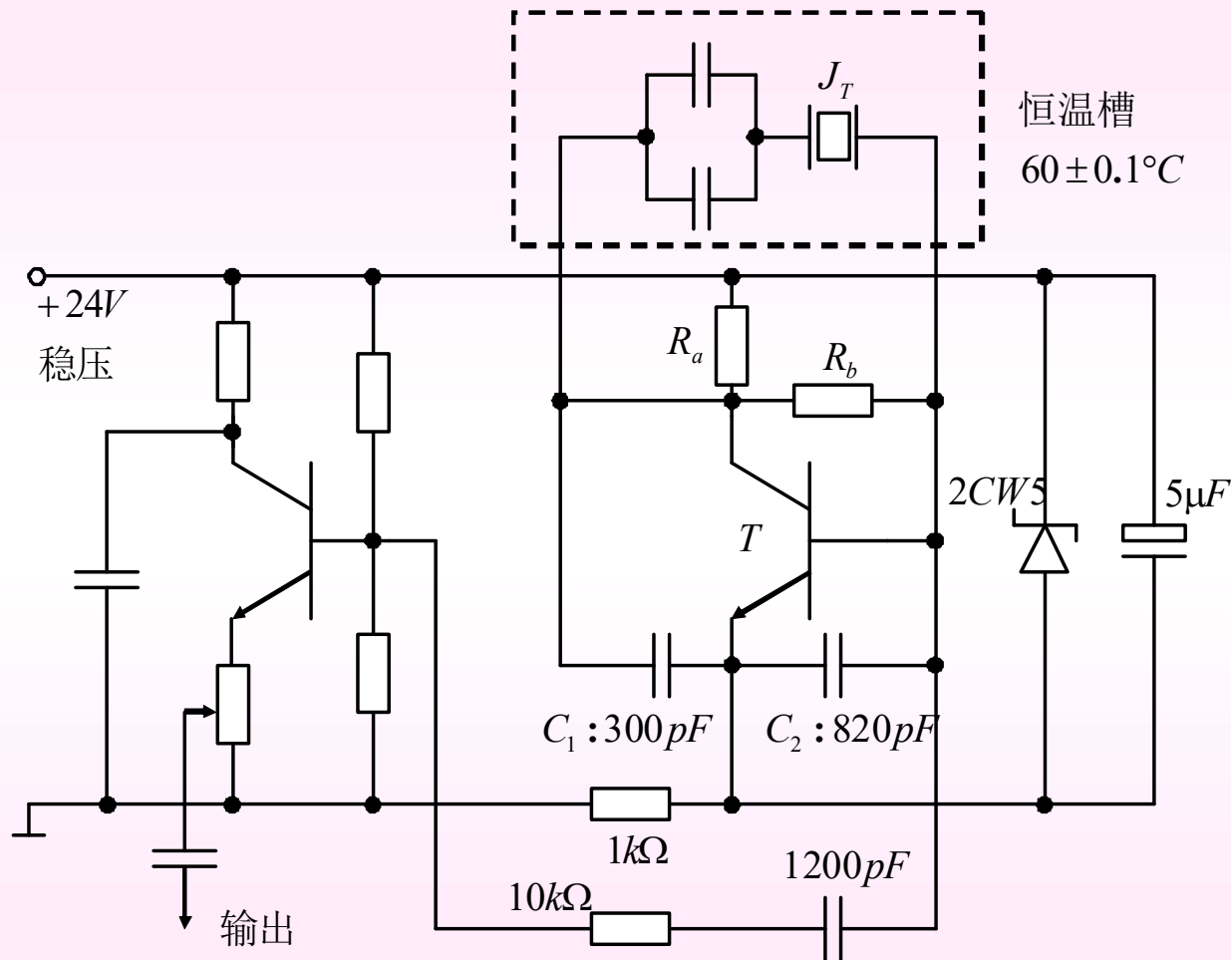
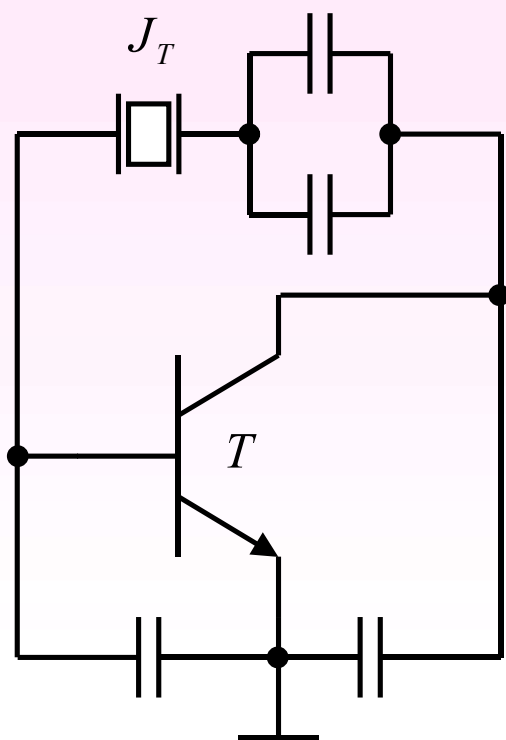
# 例

- 这是什么类型的振荡器？它是如何工作的？

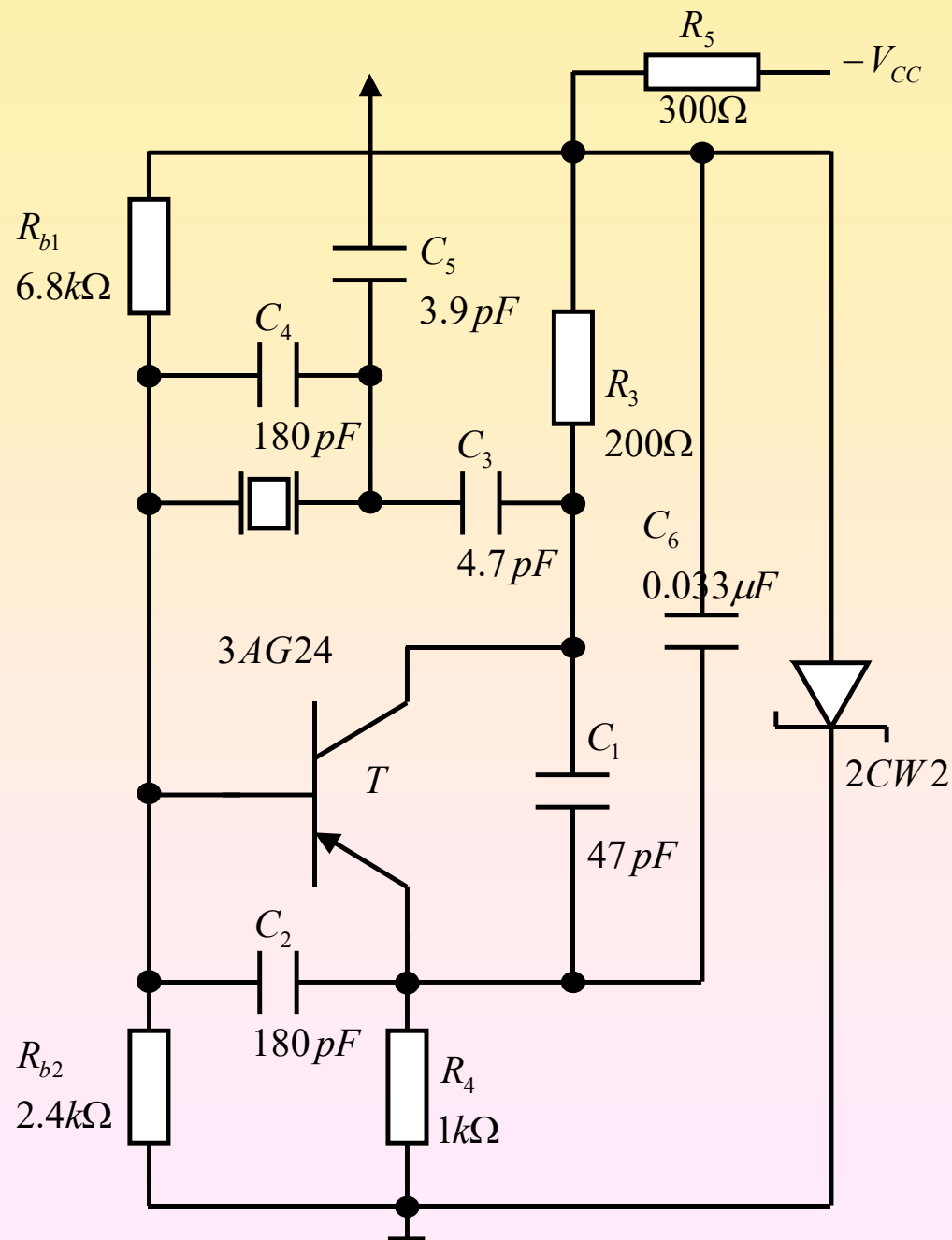
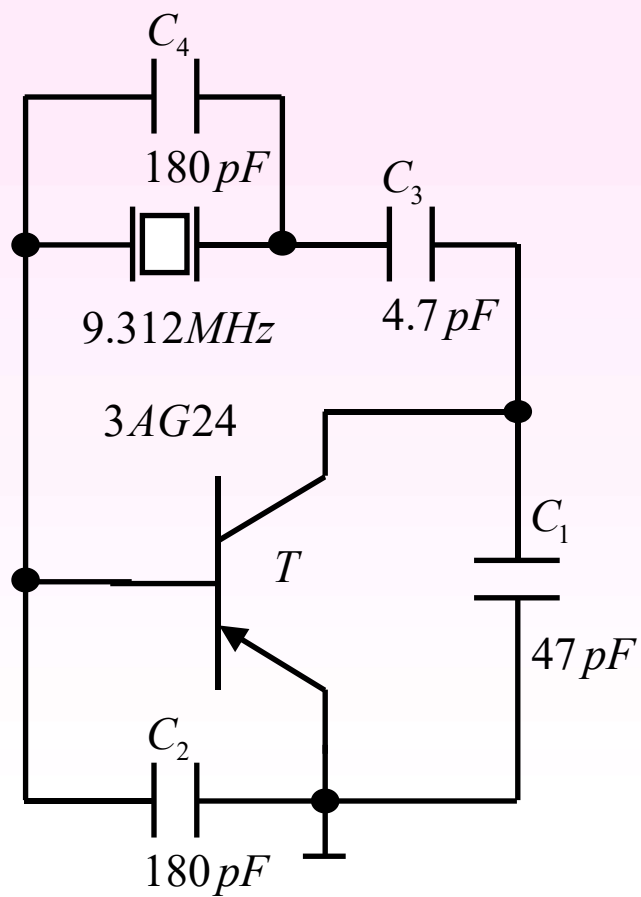




# 例：5-15

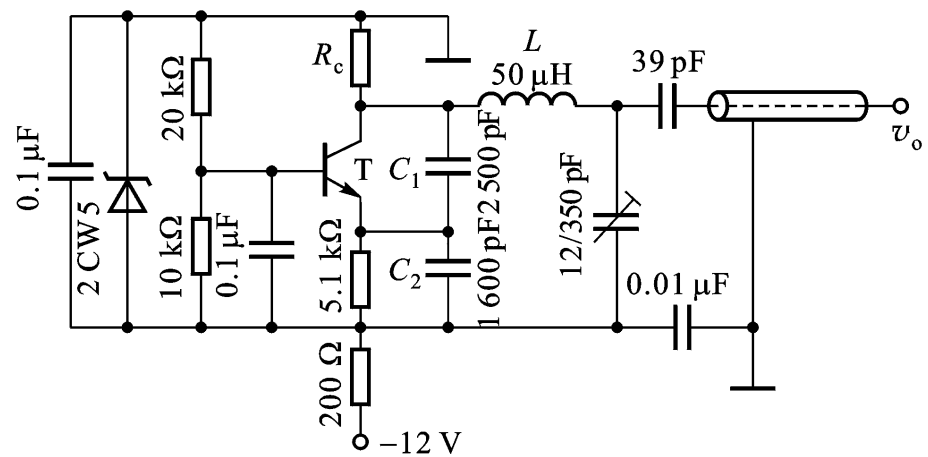


# 例：5-16



# 作业1

## 电容三点式



- 题图所示为改进型电容反馈正弦波振荡器。试求：（1）振荡频率；（2）反馈系数；（3）若把 $C_2$ 的数值增大一倍而其余参数不变，再求此时的振荡频率和反馈系数；（4）为什么改进型反馈正弦波振荡器的频率稳定度比一般电容三点式电路高。

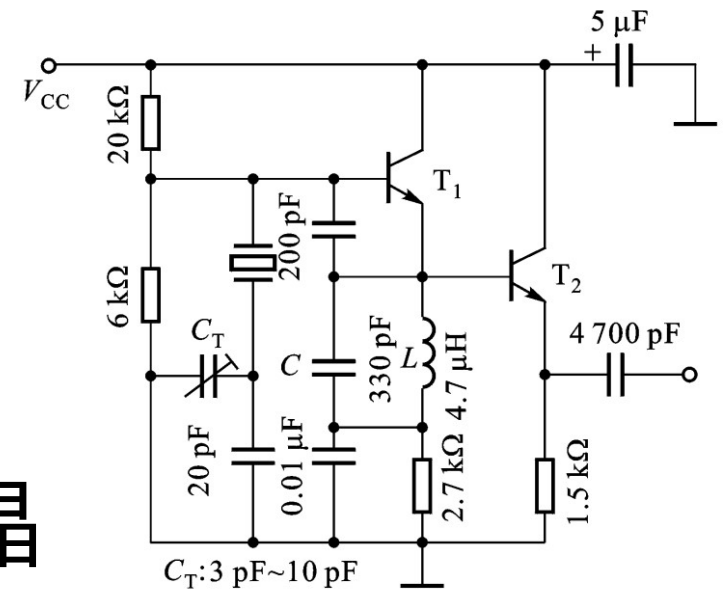


- 

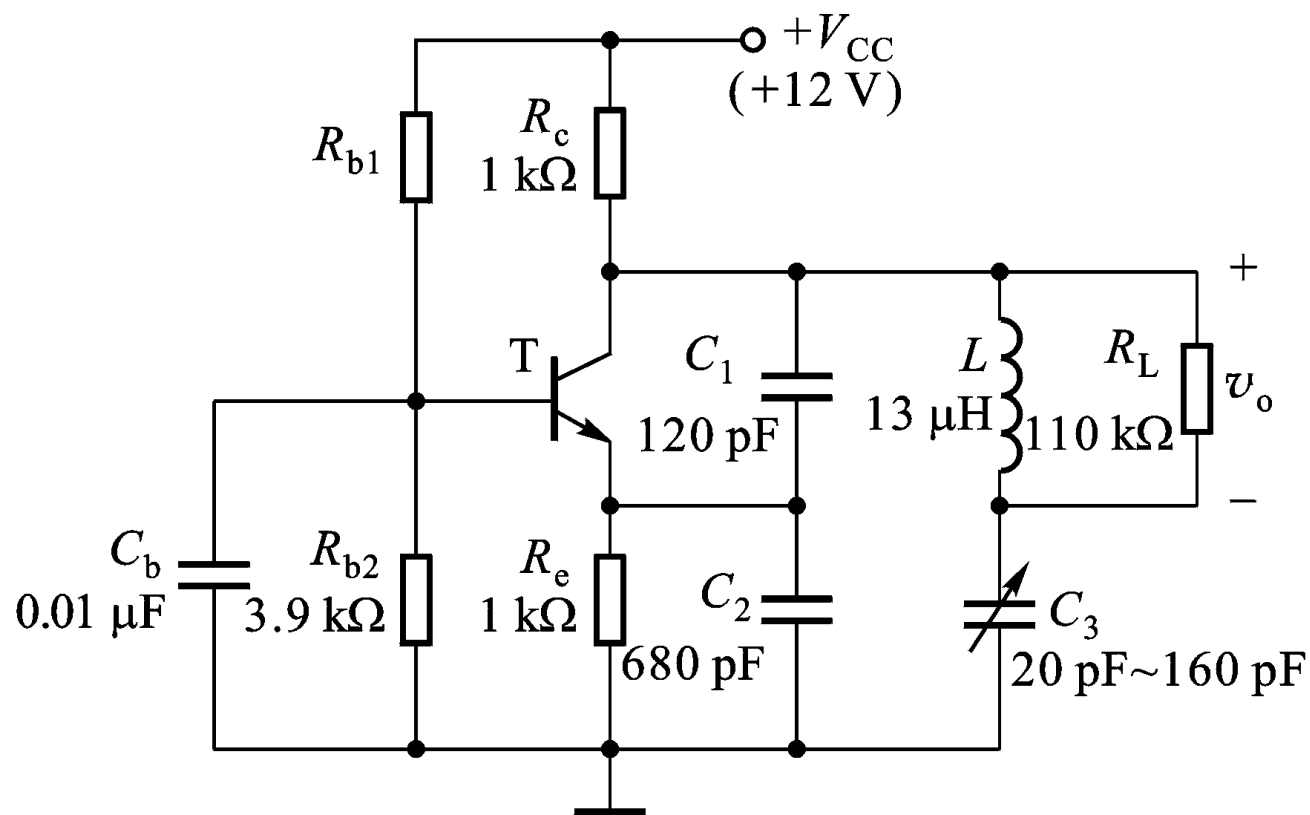
# 作业3

## 晶体振荡器

- 题图5.14所示三次泛音晶体振荡器的输出频率为5MHz，要求：
- (1) 画出高频等效电路；
- (2) 说明LC回路的作用；
- (3) 为什么振荡信号要由T2输出，而不是由T1直接输出。



# CAD作业1：教材5.20（克拉泼电路）

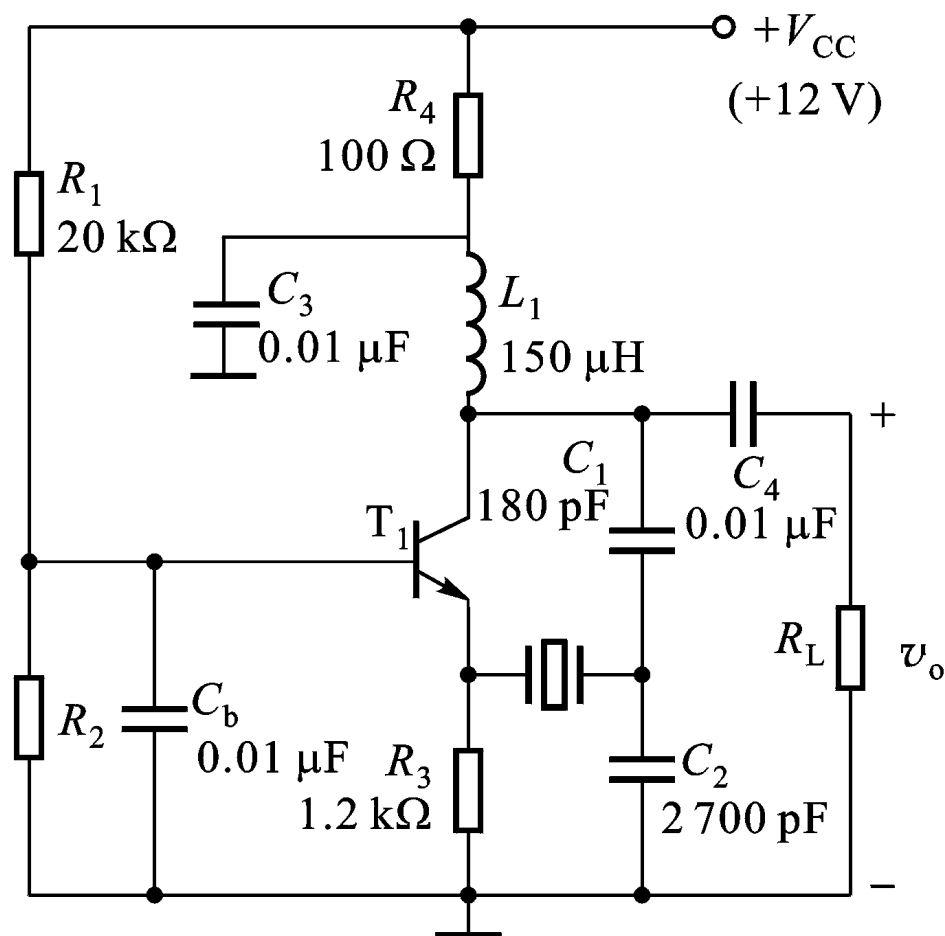


1、反馈系数对起振的影响

2、静态电流对振荡的影响

3、负载对振荡的影响

## CAD作业2: 5.22(串联型晶体振荡器)



- 1、设计LC网络, 使其振荡在1MHz
- 2、负载电阻对振荡的影响
- 3、静态电流对振荡的影响