

# 第七章 振荡器 (Oscillator)

7.1 反馈型振荡器的基本原理

7.2 LC振荡器

7.3 振荡器的频率稳定度

7.4 石英晶体振荡器

7.5 RC振荡器

# 7.1 反馈振荡器的工作原理

➤ 振荡器是一种不需要外加输入信号能够自激输出交变信号的电子装置。它起到把直流电源能量转变为交流输出能量的作用。

作用：信号发生、交变能量发生

根据不同的分类方法，可以把振荡器分为：

- 按波形分：正弦波振荡器  
非正弦波振荡：多谐振荡器（方波、三角波等）
- 按原理分：反馈振荡器（变压器、LC、晶体、RC）  
负阻振荡器

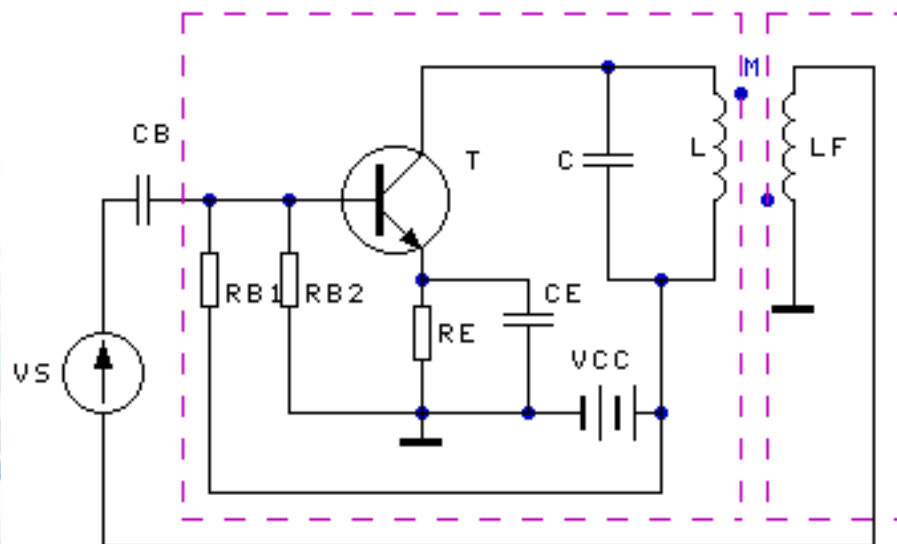
本章主要讨论反馈型正弦波振荡器

# 7.1 反馈振荡器的工作原理

## 1. 反馈振荡器的电路及模型

### ▣ 反馈振荡器的模型

- ▣ 反馈振荡器是把有源器件接成**正反馈环路**来构成的，一个典型的反馈振荡器电路例子如图，由主网络和反馈网络两部分构成。



根据图中变压器同名端的标注情况，反馈到输入端的信号与原输入信号同相，为正反馈。

# 7.1 反馈振荡器的工作原理

从该方框图可得出闭环系统的**传递函数**如下：

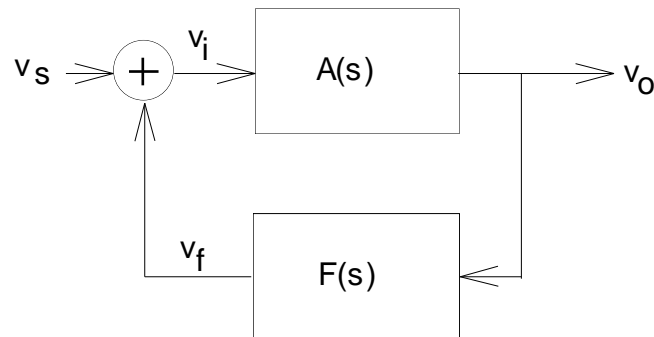
$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = \frac{A(s)}{1 - A(s)F(s)} = \frac{A(s)}{1 - T(s)}$$

其中：

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)}, \quad F(s) = \frac{V_f(s)}{V_o(s)}$$

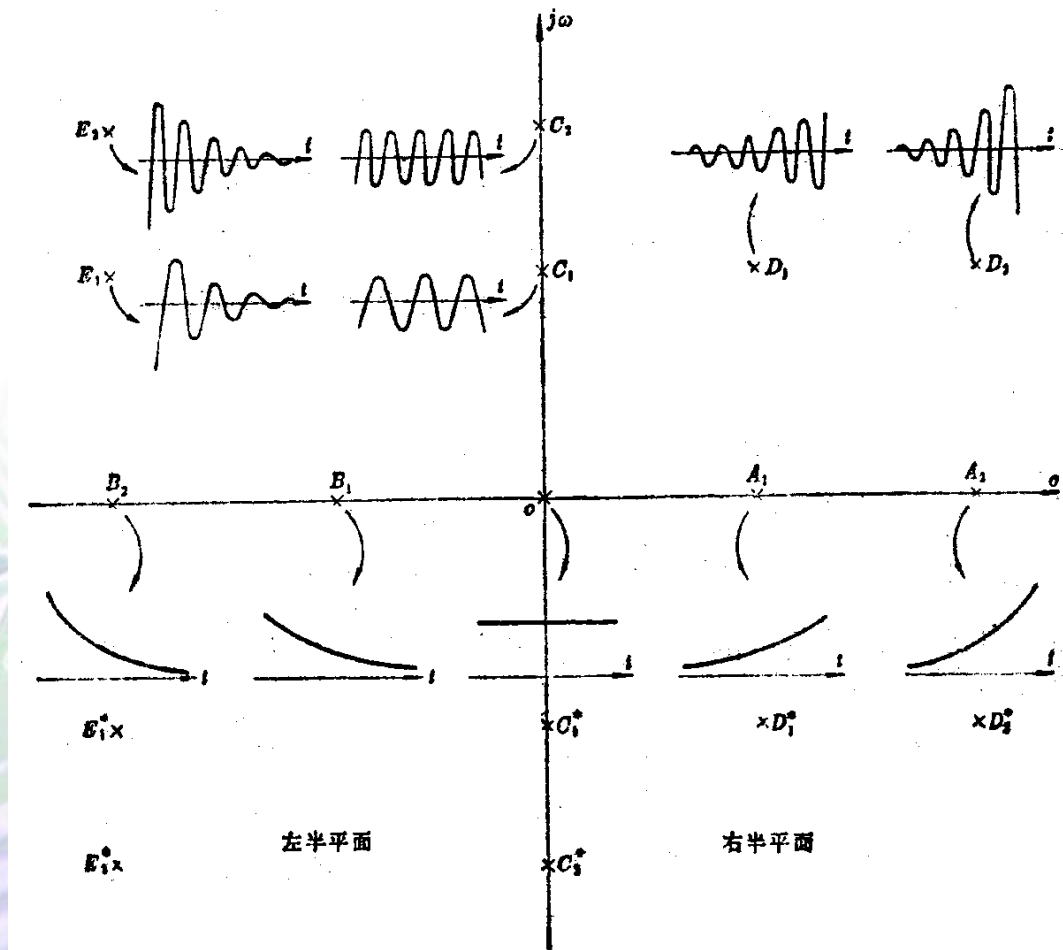
开环传递函数（或称之为**环路增益**）为：

$$T(s) = \frac{V_f(s)}{V_s(s)} = A(s)F(s)$$



# 7.1 反馈振荡器的工作原理

- 从信号理论可知，对于一个可实现系统来讲，其极点分布与相应的冲击响应关系如图：



## 7.1 反馈振荡器的工作原理

- 要得到单一频率的正弦波冲激响应，则 $H(s)$ 必须是二阶系统，且其极点必须在虚轴上，则要求 $T(j\omega_0)$ 必须为1，即：

$$T(j\omega_0) = A(j\omega_0)F(j\omega_0) = 1$$

或  $|T(j\omega_0)| = 1, \varphi_T(\omega_0) = 2n\pi \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$

- 从另外一个角度来看，当满足此条件后的 $H(s)$ 幅频特性为无穷大，才使得当输入为0时输出不为0成为可能。

**起振过程：**极点在右半平面，热噪声激励， $T > 1$ ， $v_o$ 增幅振荡；

**非线性限幅：**波形幅度增大，进入非线性区，等效增益减小， $T$ 下降，极点向左移动，向虚轴靠近；

**平衡—稳定振荡：**限幅作用明显，反馈等于输入， $T = 1$ ，达到平衡，极点落在虚轴上，持续振荡。

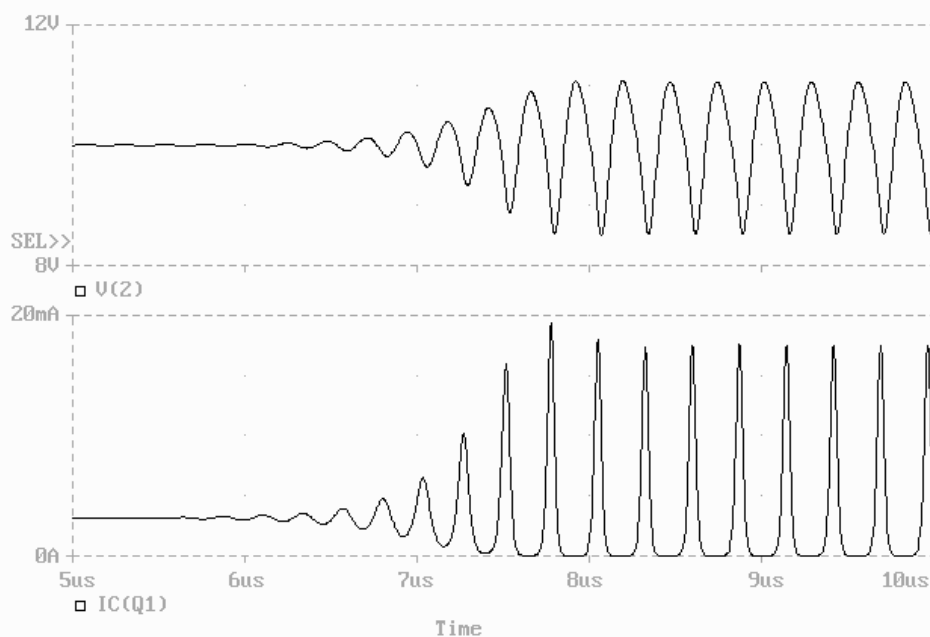
# 7.1 反馈振荡器的工作原理

振荡器的组成：

- 实现能量转换的有源器件，如晶体管T；
- 控制振荡频率的选频回路，如LC选频回路；
- 保证自激工作的正反馈网络，如图中的变压器M；
- 保证稳定工作的非线性环节，如图电路中靠T工作到截止(或饱和)来实现。

用Pspice仿真得到其集电极电压 $v_{CE}$ 和集电极电流 $i_C$ 波形如图。

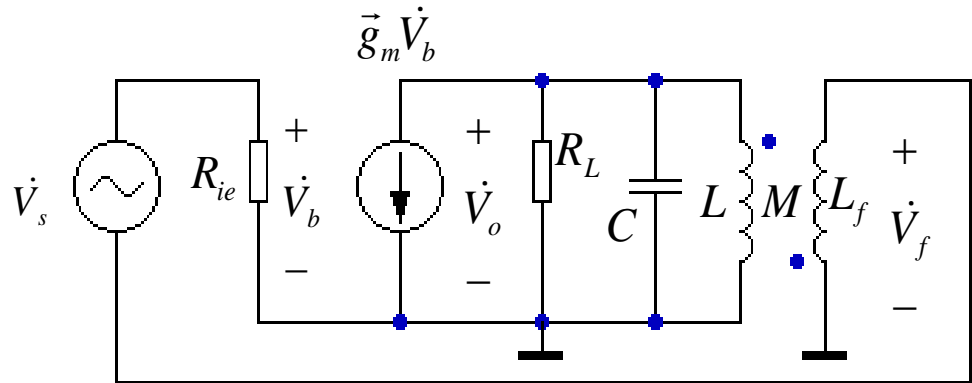
对该电路进行等效分析如下。



# 7.1 反馈振荡器的工作原理

考虑到失真后的等效跨导，等效负载电阻，画出其交流等效电路如图：

$$F(s) = \frac{V_f(s)}{V_o(s)} = -\frac{M}{L}$$



$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_b(s)} = \frac{-\bar{g}_m \frac{s}{C}}{s^2 + \frac{s}{R_L C} + \frac{1}{LC}}$$

$$T(s) = \frac{V_f(s)}{V_b(s)} = A(s)F(s) = \frac{\bar{g}_m M \frac{s}{LC}}{s^2 + \frac{s}{R_L C} + \frac{1}{LC}}$$

$$H(s) = \frac{V_o(s)}{V_s(s)} = \frac{A(s)}{1 - T(s)} = \frac{-\bar{g}_m \frac{s}{C}}{s^2 + \left( \frac{1}{R_L C} - \bar{g}_m \frac{M}{LC} \right) s + \frac{1}{LC}}$$



## 7.1 反馈振荡器的工作原理

$$\text{令 } b = \frac{1}{R_L C} - \frac{\bar{g}_m M}{LC}, \quad c = \frac{1}{LC}$$

则 $H(s)$ 的两个极点的位置为:

$$s_{1,2} = -\frac{b}{2} \pm j\sqrt{c - \frac{b^2}{4}}$$

若要求极点在右半平面, 则有:

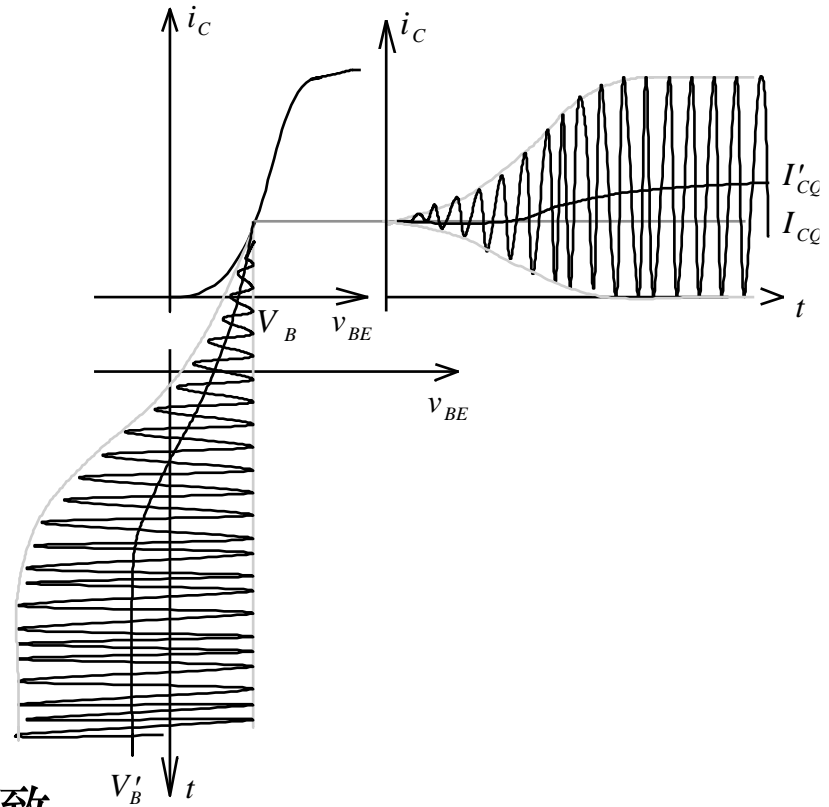
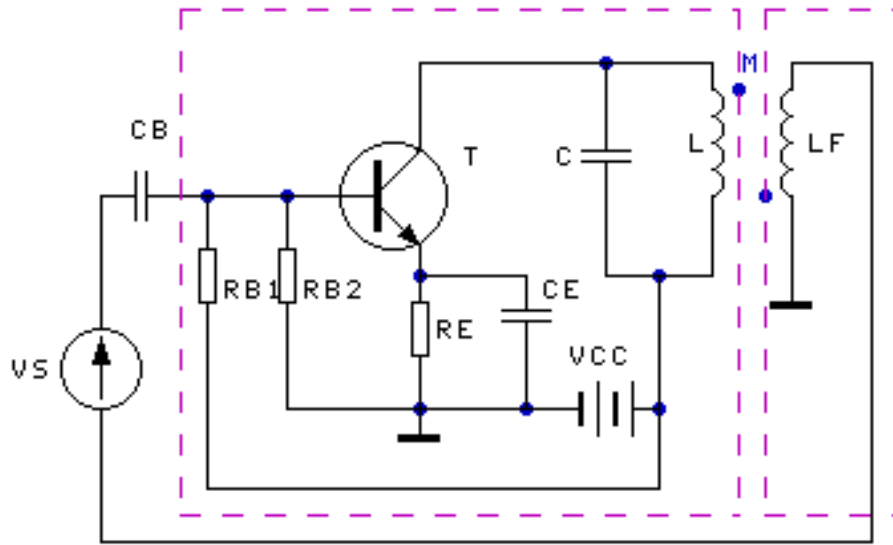
$$\frac{1}{R_L C} - \frac{\bar{g}_m M}{LC} < 0 \quad \Rightarrow \quad \bar{g}_m R_L > \frac{L}{M}$$

在 $\omega_0$ 处有,  $A(s) = -\bar{g}_m R_L$ ,  $F(s) = -\frac{M}{L}$ , 可得:

$$T(j\omega_0) = A(j\omega_0)F(j\omega_0) = \frac{MR_L \bar{g}_m}{L} > 1$$

- 在开始起振时, 由于 $\bar{g}_m$ 较大, 极点位置比较靠右,  $v_o$ 振幅增长较快, 随着管子进入非线性区工作,  $\bar{g}_m$ 逐渐变小, 极点向左朝虚轴靠拢,  $v_o$ 振幅增长趋缓, 最后满足 $\bar{g}_m R_L = L/M$ 时极点到虚轴上, 维持等幅振荡。

## 7.2 LC振荡器



振荡器的自给偏置与工作点变化：

当电流波形的负边进入截止区后，会导致平均分量上升，在 $R_e$ 上得到反向的偏置，更进一步限制了输出波形幅度的上升。

# 7.1 反馈振荡器的工作原理

## 反馈振荡器的起振、平衡和稳定条件

**起振条件：** 满足正反馈，且环路增益 $T$ 大于1，即：

$$|T(j\omega_0)| > 1$$

$$\varphi_T(j\omega_0) = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

**平衡条件：** 满足正反馈，且环路增益 $T$ 等于1，即：

$$|T(j\omega_0)| = 1$$

$$\varphi_T(j\omega_0) = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

幅度平衡条件  
相位平衡条件

对图例电路，把平衡条件用复数形式来表示，有：

$$T(j\omega_0) = T(\omega_0)e^{j\varphi_T(\omega_0)} = A(\omega_0)F(\omega_0)e^{j[\varphi_A(\omega_0)+\varphi_F(\omega_0)]}$$

$$Z_i = \frac{\dot{V}_b}{\dot{I}_b} = |Z_i|e^{j\varphi_i}, \quad \dot{\beta} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} = |\beta|e^{j\varphi_\beta}, \quad Z_o = |Z_o|e^{j\varphi_o}, \quad \dot{F} = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_C} = |F|e^{j\varphi_F}$$

## 7.1 反馈振荡器的工作原理

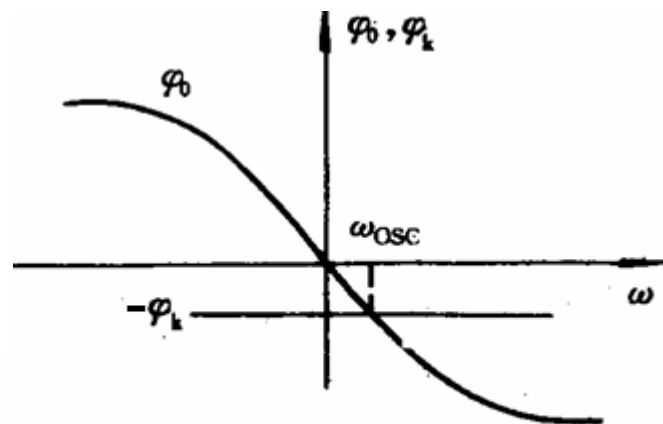
$$A(j\omega_0) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-I_c Z_o}{I_b Z_i} = -\beta \frac{Z_o}{Z_i}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} |T(j\omega_0)| = \frac{|Z_o|}{|Z_i|} |\beta| |F| = 1 \\ \varphi_o + \varphi_\beta + \pi - \varphi_i + \varphi_F = 2n\pi \end{cases}$$

令  $\varphi_k = \varphi_\beta + \varphi_F + \pi - \varphi_i$  为晶体管和反馈支路引入的相移，则有：

$$\varphi_o + \varphi_k = 2n\pi, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

由于一般  $\varphi_k$  较小，则满足平衡条件时回路相移  $\varphi_o$  也较小。也就是说，**振荡器应工作在回路的谐振频率附近**，这也就说明了振荡器的工作频率主要决定于回路谐振频率的基本原因。



$\varphi_o$  与  $\varphi_k$  的交点决定  $\omega_{osc}$

# 7.1 反馈振荡器的工作原理

- **稳定条件**：是指在外界干扰作用使得电路偏离平衡状态后，由于电路内部的自我矫正作用，恢复原来的平衡状态所要求满足的条件。有振幅和相位两方面的稳定条件。

- **振幅稳定条件**：

$$\text{平衡 } T(v_i)=1, \begin{cases} \text{干扰} \rightarrow v_o \downarrow, \text{ 若 } T(v_i - \Delta v) > 1 \rightarrow v_o \uparrow \\ \text{干扰} \rightarrow v_o \uparrow, \text{ 若 } T(v_i + \Delta v) < 1 \rightarrow v_o \downarrow \end{cases} \Rightarrow \text{恢复原 } v_o, \text{ 稳定}$$

故有振幅稳定条件：
$$\Rightarrow \left. \frac{\partial |T(j\omega_0)|}{\partial v_i} \right|_{\text{平衡点}} < 0$$

幅度稳定条件一般是由电路中的非线性元件来实现的。例如进入饱和、截止区的晶体管，输出不随输入变化，必然其增益会下降，从而保证幅稳条件满足。也有在反馈回路中加入二极管来限幅，保证幅稳条件的实际应用。

某些电路中存在不稳定的平衡点。——硬激励现象

# 7.1 反馈振荡器的工作原理

□ 相位稳定条件:

$$\text{平衡 } \varphi_T(\omega_{\text{osc}}) = 0 \left\{ \begin{array}{l} \text{干扰} \rightarrow \omega_{\text{osc}} \downarrow, \text{ 若 } \varphi_T(\omega_{\text{osc}} - \Delta\omega) > 0, \\ \quad \rightarrow \varphi_T(t_2) - \varphi_T(t_1) > 0, \rightarrow \omega_{\text{oscnew}} = \omega_{\text{oscold}} + d\varphi_T / dt \uparrow \\ \text{干扰} \rightarrow \omega_{\text{osc}} \uparrow, \text{ 若 } \varphi_T(\omega_{\text{osc}} + \Delta\omega) < 0, \\ \quad \rightarrow \varphi_T(t_2) - \varphi_T(t_1) < 0, \rightarrow \omega_{\text{oscnew}} = \omega_{\text{oscold}} + d\varphi_T / dt \downarrow \end{array} \right. \Rightarrow \text{恢复原 } \omega_{\text{osc}}$$

故有相位稳定条件:  $\left. \frac{\partial \varphi_T(\omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_{\text{osc}}} < 0$

相位稳定条件一般是靠并联谐振回路的相频特性在 $\omega_0$ 处有负斜率来保证的。

# 例题

例7-1：判断如图电路能否振荡？并请说明原因。

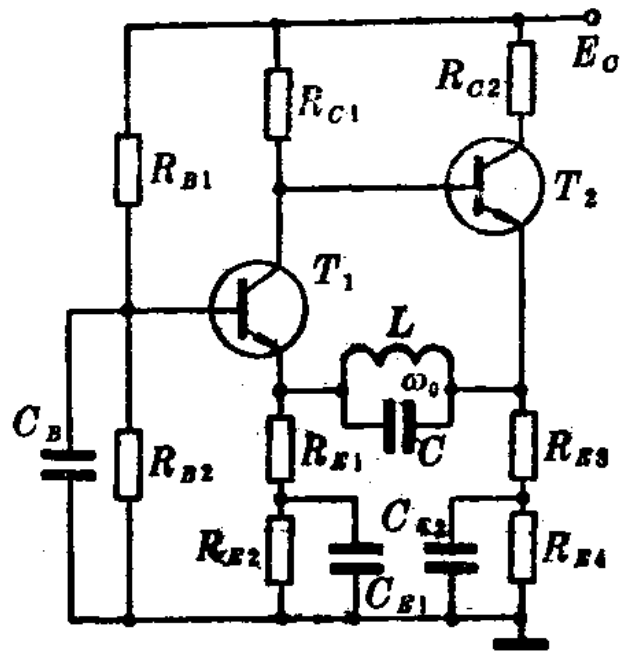
解：设LC支路的电抗远远大于 $R_{E3}$ 的电阻值， $T_2$ 发射极的输出电压主要决定于 $R_{E3}$ ，与 $T_1$ 发射极输入的电压同相，若LC回路谐振，呈纯阻性 $R_e$ ，则反馈电压为 $R_e$ 与 $R_{E1}$ 的分压，满足正反馈的要求。但从环路增益的相频特性来看，有：

$$F(j\omega) = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} = \frac{R_{E1}}{Z_p(j\omega) + R_{E1}} = \frac{R_{E1}}{\frac{R_e}{1+j\xi} + R_{E1}}$$

$$= \frac{R_{E1}(1+j\xi)}{R_e + R_{E1} + jR_{E1}\xi}$$

$$\varphi_f(\omega) = \arctan \xi - \arctan \frac{R_{E1}\xi}{R_e + R_{E1}} \quad \text{令 } A = \frac{R_{E1}}{R_e + R_{E1}} < 1$$

$$\left. \frac{\partial \varphi_f}{\partial \omega} \right|_{\omega=\omega_0} \propto \left. \frac{\partial \varphi_f}{\partial \xi} \right|_{\xi=0} = \left( \frac{1}{1+\xi^2} - \frac{A}{1+A^2\xi^2} \right) \Bigg|_{\xi=0} = 1 - A > 0$$



不满足相位稳定条件，故不能振荡。

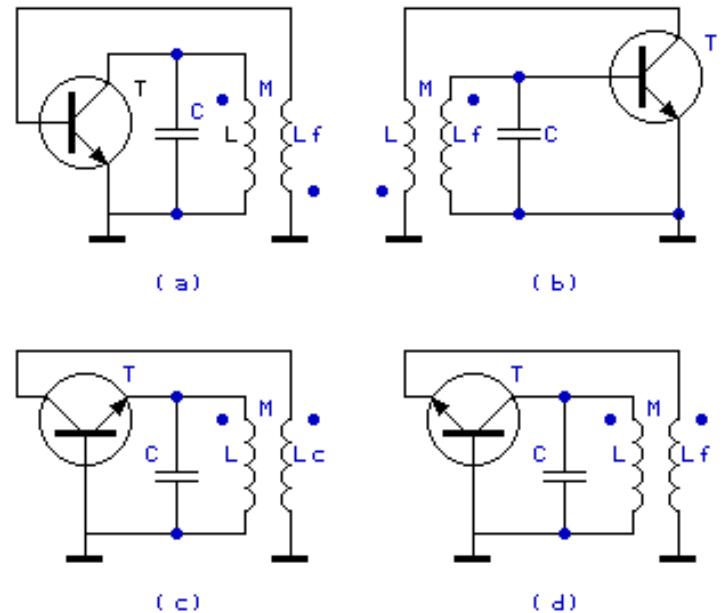
## 7.2 LC振荡器

- 采用LC振荡回路作为选频网络的反馈振荡器统称为LC振荡器。
- 根据反馈网络的类型，可以有互感（变压器）耦合型LC振荡器和三点式LC振荡器等两种实现结构。

### 互感耦合型LC振荡器：

4种互感耦合的LC振荡器电路如图。具有LC选频网络，其互感同名端方向满足正反馈要求。

必须有合适的偏置电压和交流信号通路才能正常工作。





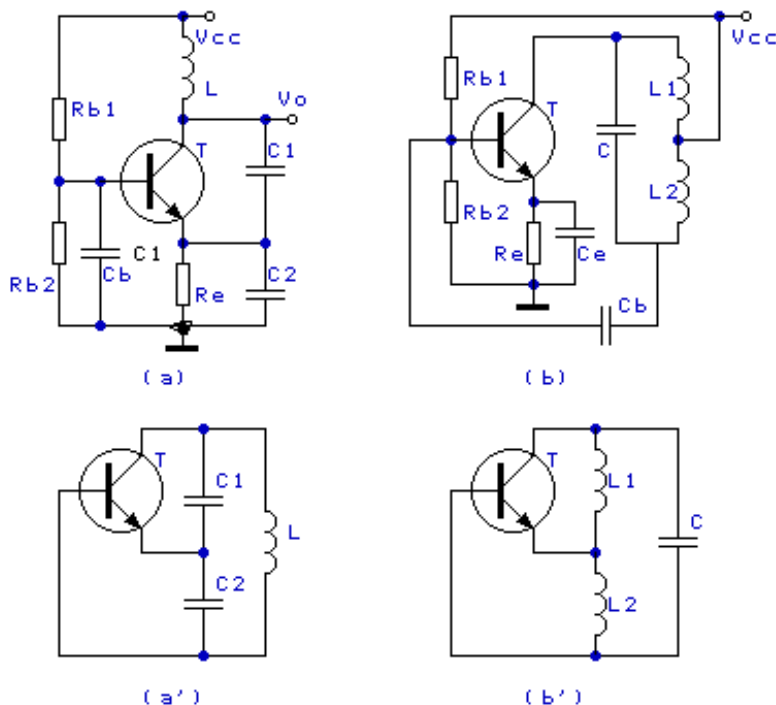
## 7.2 LC振荡器

### 三点式LC振荡电路

晶体管的三个端口接到回路的三个节点上得到的振荡器称为三点式振荡器。有两种三点式振荡电路，如图所示：

左图为Colpitts电路，亦称为**电容三点式**电路；右图为Hartley电路，也叫做**电感三点式**电路。

三点式振荡器的反馈电压取自回路的电抗元件的分压，故其电抗元件的类型必须符合一定的要求。



## 7.2 LC振荡器

三点式振荡器的构成原则：

画出一般的三点式电路如图。忽略晶体管输出阻抗的影响和回路元件损耗的影响，谐振时应满足：  
 $X_1 + X_2 + X_3 = 0$ ，从端口上来看，回路呈纯阻性，有：

$$T(\omega_0) = AF = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} = A \frac{X_2}{X_2 + X_1}$$

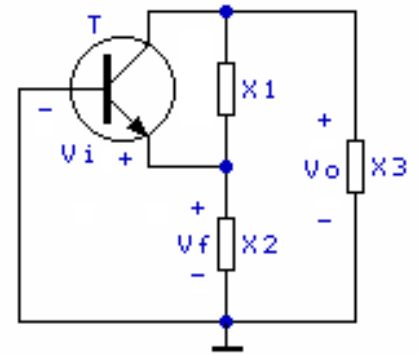
由相位平衡条件  $\varphi_T = 2n\pi$ ,  $n=0, 1, 2, \dots$ ,

$\Rightarrow X_1$ 与 $X_2$ 为同性质的电抗元件，

$X_3$ 为与它们相反性质的电抗元件。

这就是三点式振荡器的电路构成原则。

$X_1, X_2$ 同为电容， $X_3$ 为电感，称为电容三点式振荡器， $X_1, X_2$ 同为电感， $X_3$ 为电容，称为电感三点式振荡器。

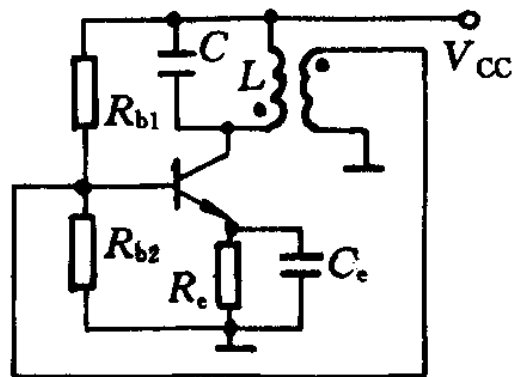


## 7.2 LC振荡器

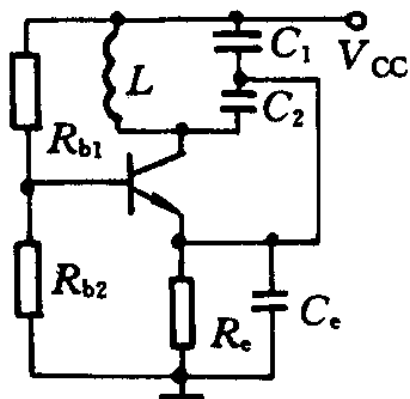
- 在考虑振荡器是否能正常工作的问题时，除了起振条件、平衡条件和稳定条件以外，还有以下一些直观的电路结构上的问题需要注意：
  1. 直流偏置是否合适：电源极性与管子匹配否、直流通路通不通、有无被电感旁路的情况，有无必须的隔离电阻。
  2. 选频回路正确否：LC元件全不全，电路类型对不对，连接位置对不对。
  3. 交流通路正确否：有无被电阻断路、被电容旁路的现象。

# 例题

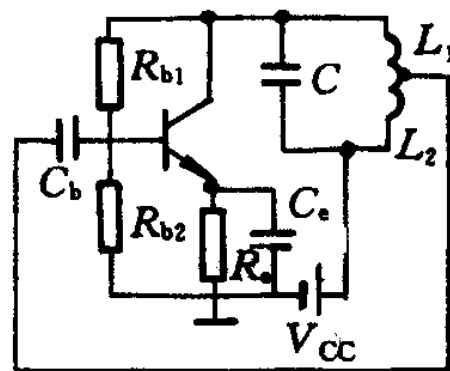
例7-2：检查如图振荡器电路有哪些错误，并加以改正。



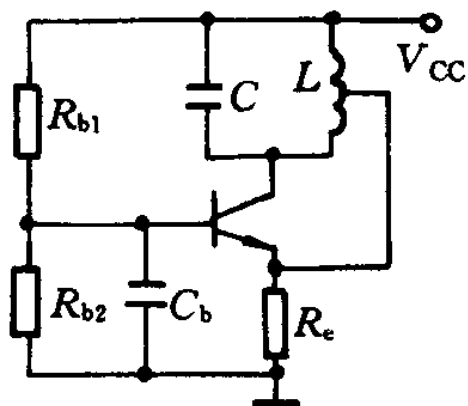
(a)



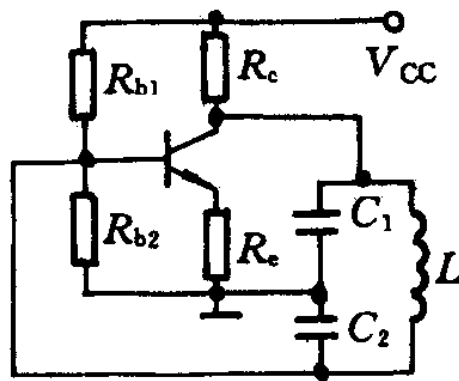
(b)



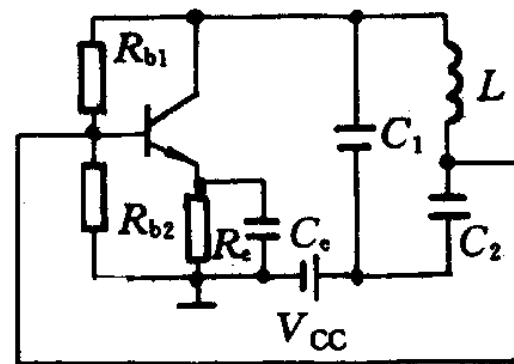
(c)



(d)

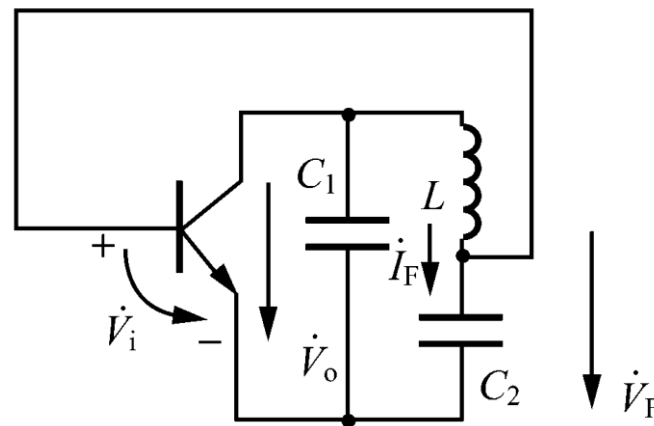
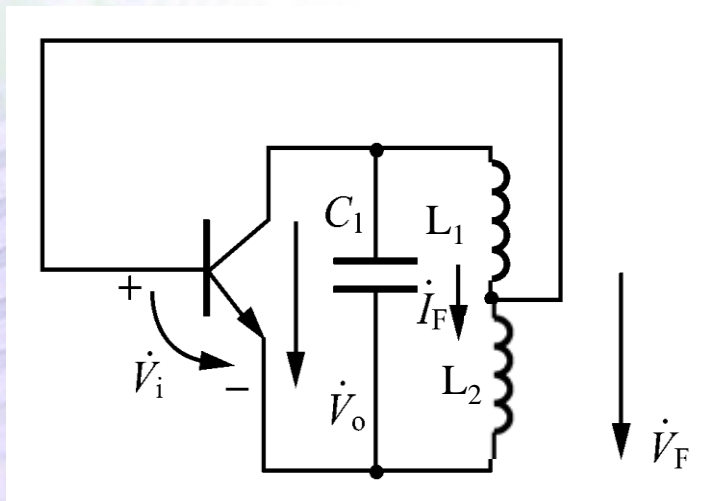
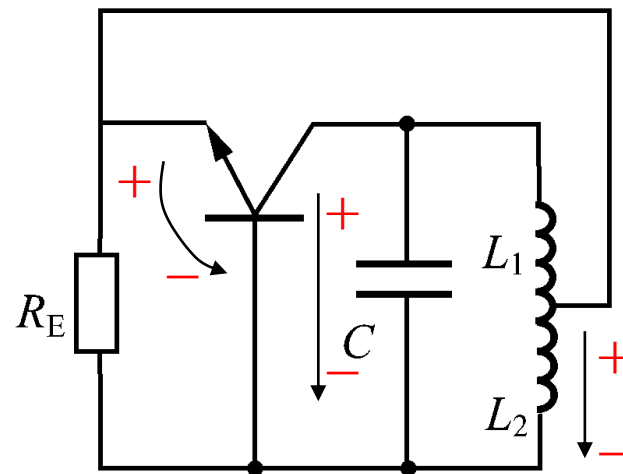
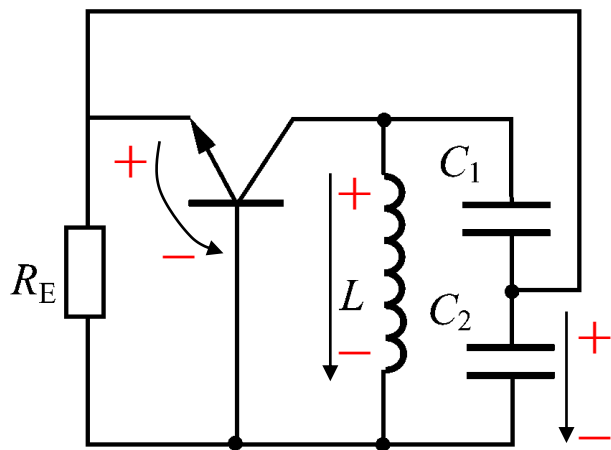


(e)



(f)

# 7.2 LC振荡器



负反馈

## 7.2 LC振荡器

### ● 三点式振荡器性能分析

计算振荡频率、环路增益，分析起振条件等

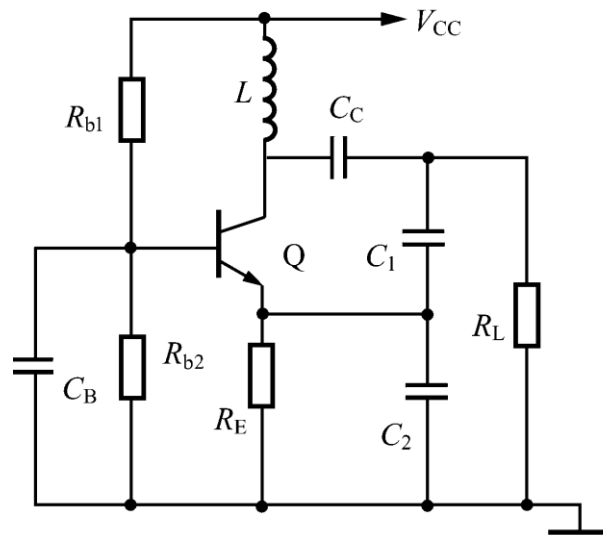
#### (1) 分析直流偏置

NPN管，电源 $V_{CC}$ 为正

$R_{b1}$ 、 $R_{b2}$ 、 $R_E$ 为直流偏置电阻

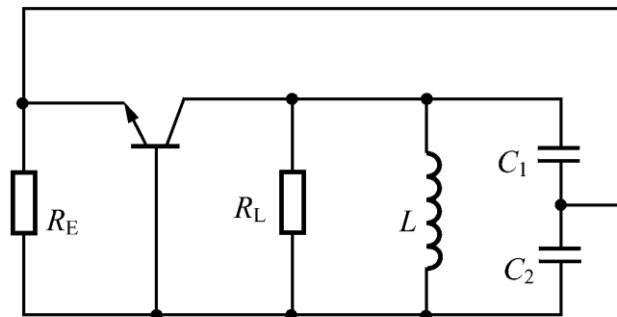
$R_L$ 为负载

$C_B$ 为交流旁路电容， $C_C$ 隔直电容



#### (2) 画交流通路图

原则：直流电源交流地  
大电容交流短路

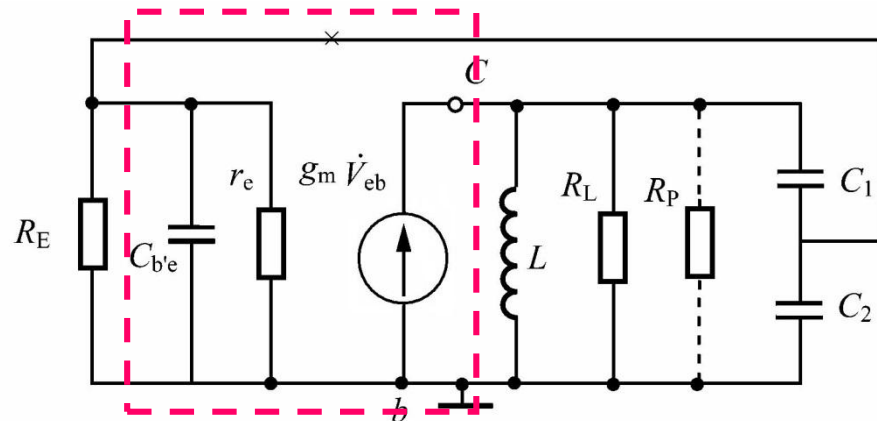


## 7.2 LC振荡器

### (3) 代入晶体管共基等效电路

其中 $R_p$ 是回路空载 $Q_0$ 引入的等效电阻

晶体管输入阻抗对谐振回路产生影响



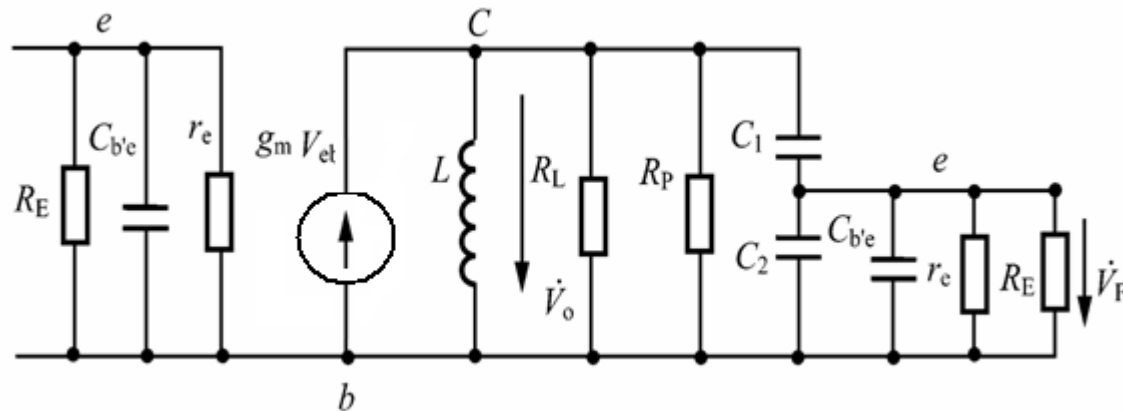
### (4) 计算振荡频率

① 振荡频率根据相位平衡

条件得出 (略)

② 振荡频率近似等于回路中心频率

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_1 C_2'}{C_1 + C_2'}}$$



$$C_2' = C_2 + C_{b'e}$$

## 7.2 LC振荡器

(5) 分析振幅起振条件 ——  $T = AF > 1$

① 计算放大器负载

$$\text{输入电导 } g_i = \frac{1}{r_e} + \frac{1}{R_E} \approx \frac{1}{r_e} = g_m$$

$$\text{回路接入系数 } P_{eb} = \frac{C_1}{C_1 + C_2'}$$

$$\text{等效输入电导 } g_i' = P_{eb}^2 \times g_i \approx \left( \frac{C_1}{C_1 + C_2'} \right)^2 g_i \quad (\text{设部分接入支路为高}Q)$$

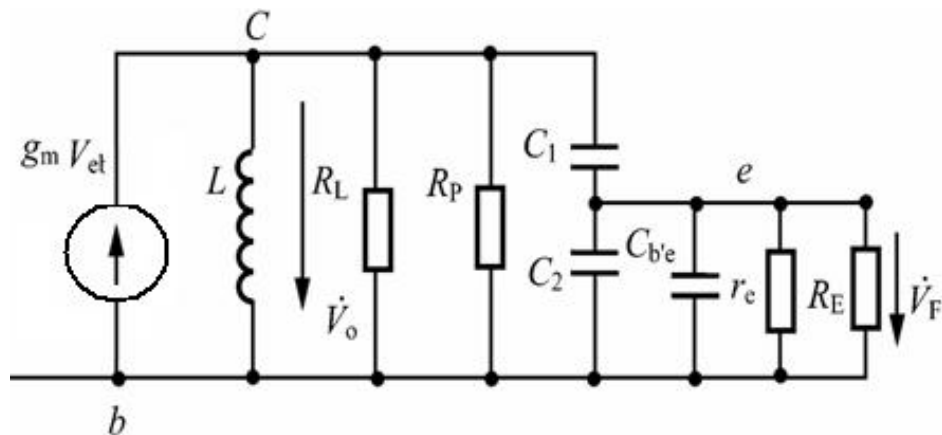
$$\text{放大器负载电导 } g_L'' = g_L' + g_i' = g_L' + P_{eb}^2 g_i \quad \text{其中 } g_L' = \frac{1}{R_L} + \frac{1}{R_p}$$

② 计算放大器增益

$$A = \frac{V_o}{V_{eb}} = \frac{g_m V_{eb}}{g_L''} \frac{1}{V_{eb}} = \frac{g_m}{g_L' + P_{eb}^2 g_i}$$

③ 计算反馈系数

$$F = \frac{V_F}{V_o} \approx P_{eb} = \frac{C_1}{C_1 + C_2'}$$



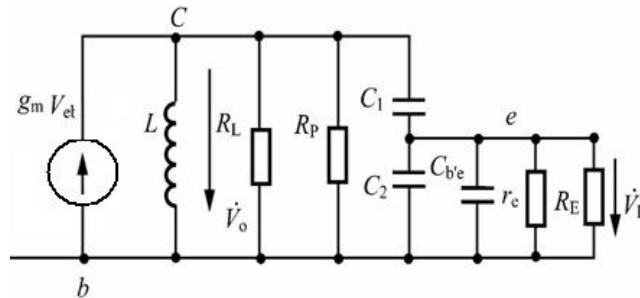


## 7.2 LC振荡器

④ 计算环路增益  $T$

$$T(\omega_{osc}) = AF = \frac{g_m}{g'_L + P_{eb}^2 g_i} P_{eb} > 1$$

满足起振条件



起振条件对电路参数的要求:

- 提高增益  $A$ 
  - 增大  $g_m$
  - 减小  $g'_L$   $g'_i$
- 增大反馈系数  $F \approx P_{eb}$

矛盾:

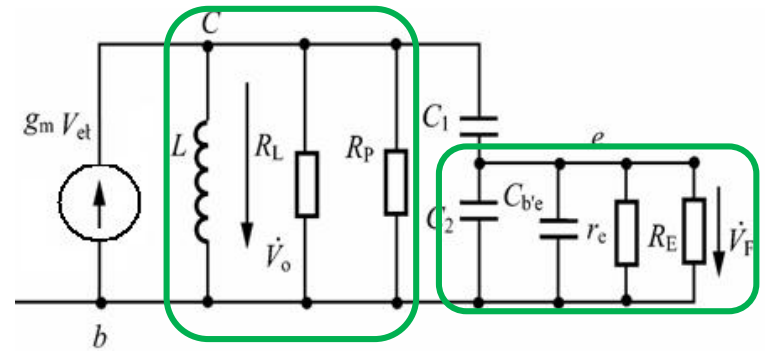
- 由于  $g_i \approx g_m$ ,  $g_m$  不能太大 —— 合理选择工作点
- 反馈系数  $F$  太大
  - 由于  $g'_i = P_{eb}^2 \times g_i$  使增益减小
  - 增大接入系数, 使回路  $Q$  降低

## 7.2 LC振荡器

### ✓ 实际考虑

考虑晶体管各参数及回路损耗的影响  
并按照相位平衡条件计算振荡频率

(证明见课本P258)



回路总电容  $C = \frac{C_1 C'_2}{C_1 + C'_2}$       回路中心频率  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

振荡频率  $\omega_{osc} = \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{g_i g'_L}{C_1 C'_2}} = \omega_0 \sqrt{1 + \frac{g_i g'_L}{\omega_0^2 C_1 C'_2}}$

由于  $\omega_0^2 C_1 C'_2 \gg g_i g'_L \longrightarrow \omega_{osc} \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

振荡频率近似等于回路中心频率

# 例题

例7-3：设计图示的考毕兹振荡器。

已知：晶体管在共射状态时的参数为

$C_{b'e} \approx 0$ ,  $r_{b'e} = 1200\Omega$ ,  $\beta = 30$

线圈电感  $L = 0.1\mu\text{H}$ , 空载品质因数  $Q_0 = 100$

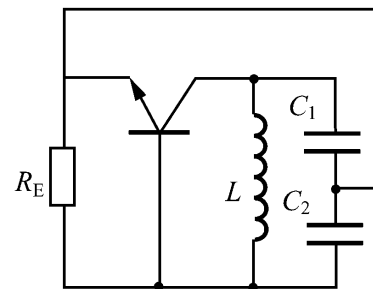
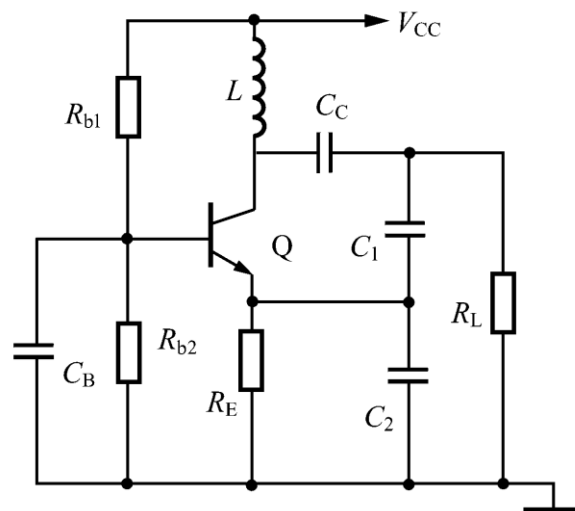
取回路电容  $C_1 = C_2$ , 回路的固有谐振频率:

$f_0 = 50\text{MHz}$ ,  $R_E = 1\text{k}\Omega$ ,  $R_L = \infty$

求：(1) 振荡器的振荡频率  $\omega_{\text{OSC}}$ ;

(2) 为保证顺利起振，回路的  $Q_0$  不能低于多少?

(课后自学)



## 7.3 振荡器的频率稳定度

- 评价振荡器的频率的主要指标有两个：即**准确度**与**稳定度**。

绝对准确度： $\Delta f = (f - f_0)$       相对准确度： $\frac{\Delta f}{f_0} = \frac{(f - f_0)}{f_0}$

- 所谓频率稳定，就是在各种外界条件发生变化的情况下，要求振荡器的实际工作频率与指定频率间的**偏差及偏差的变化小**。

频率稳定度定义一：
$$\sigma = \frac{\Delta f_{\max}}{f_0} \Big|_{t=\Delta t}$$

频率稳定度定义二：

瞬时稳定度：秒级

短期稳定度：一天以内

长期稳定度：一天以上

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

其中：
$$\left( \frac{\Delta \bar{f}}{f_0} \right) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{\Delta f}{f_0} \right)_i$$

## 7.3 振荡器的频率稳定度

### 影响频率稳定度的因素

由前面所讨论的内容可知：

$$\varphi_0 + \varphi_k = 2n\pi, n = 0, 1, 2, \dots$$

由 $\varphi_0$ 和 $\varphi_k$ 的交点可以确定振荡频率

下面利用这个原理来讨论 $\varphi_k$ ， $\omega_0$ ， $\varphi_0$ ， $Q_e$ 对频率稳定度的影响。

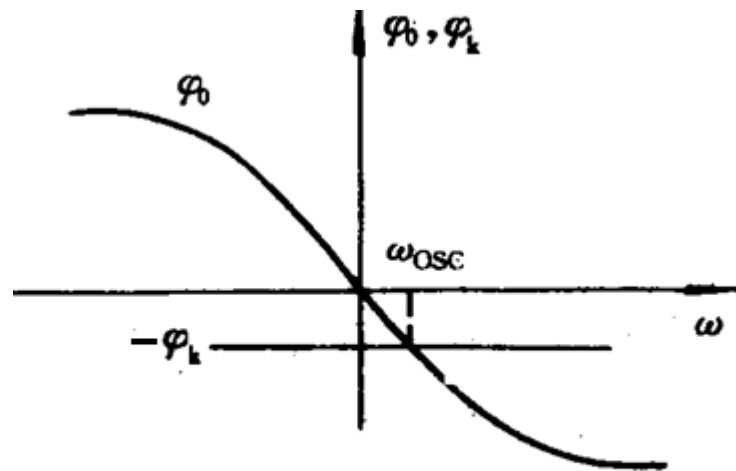


图 4-19  $\varphi_0$  与  $\varphi_k$  的交点决定  $\omega_{osc}$

# 7.3 振荡器的频率稳定度

## (1) $\Delta\omega_0$ 的影响

特性曲线平移,  $\Delta\omega_{osc} = \Delta\omega_0$

## (2) $\Delta Q_e$ 的影响

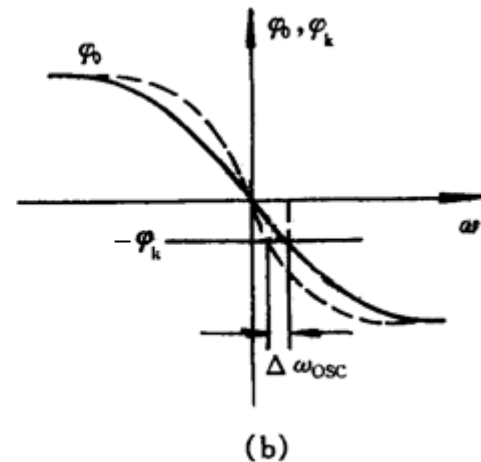
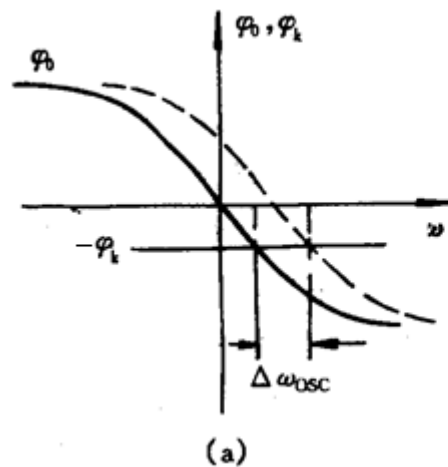
$Q_e$ 大, 对应的相频曲线更陡

$|\varphi_k|$ 大,  $\Delta\omega_{osc}$ 大;  $|\varphi_k|$ 小,  $\Delta\omega_{osc}$ 小

## (3) $\Delta\varphi_k$ 的影响

$|\varphi_k|$ 大,  $\Delta\omega_{osc}$ 大;  $|\varphi_k|$ 小,  $\Delta\omega_{osc}$ 小

$Q_e$ 小,  $\Delta\omega_{osc}$ 大;  $Q_e$ 大,  $\Delta\omega_{osc}$ 小



要减小  $\Delta\omega_{osc}$   $\rightarrow$

- I. 减小  $\Delta\omega_0$ ,  $\Delta Q_e$ ,  $\Delta\varphi_k$
- II. 增大  $Q_e$
- III. 减小  $\varphi_k$

## 7.3 振荡器的频率稳定度

改善频率稳定度的措施:

- 减小外界因素的变化
- 提高振荡回路的标准性
- 减小管子对回路的接入影响

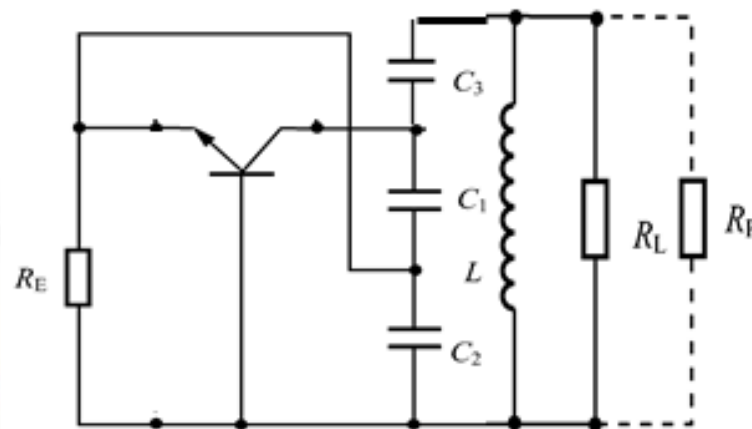
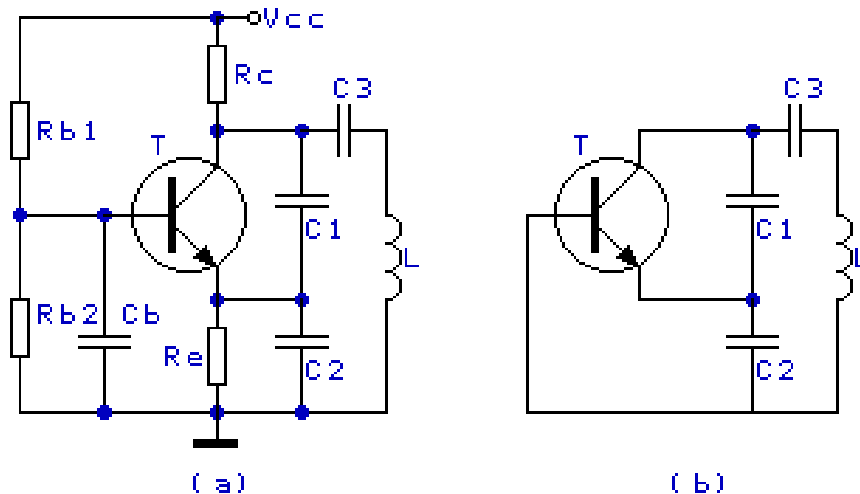
举例: 克拉泼(Clapp)振荡器电路:

选  $C_3 \ll C_1, C_3 \ll C_2$

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

$$\omega_{osc} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \approx \frac{1}{\sqrt{LC_3}}$$

不能为了提升 $\omega_{osc}$ 过分降低 $C_3$



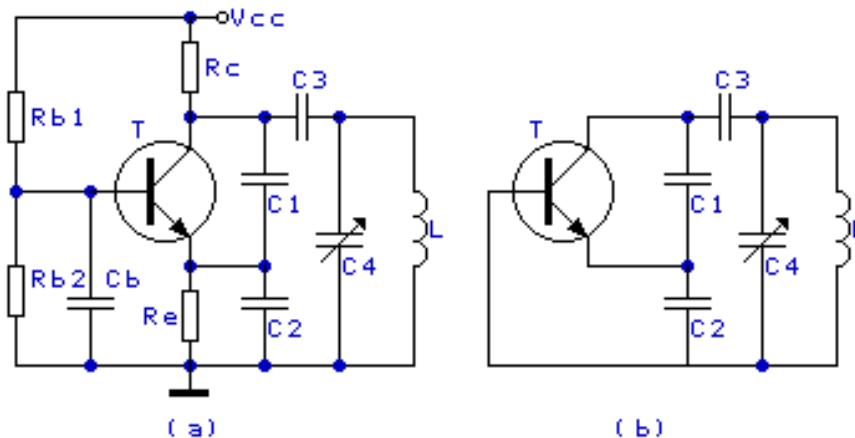
## 7.3 振荡器的频率稳定度

西勒(Seiler)振荡电路:

通过改变 $C_4$ 来改变振荡频率

$$C_{\Sigma} \approx C_3 + C_4$$

$$\omega_{\text{osc}} = \frac{1}{\sqrt{LC_{\Sigma}}} = \frac{1}{\sqrt{L(C_3 + C_4)}}$$



优点: 调整 $C_4$ 时, 不改变共基放大器输出端的接入系数



## 7.3 振荡器的频率稳定度

振荡器的相位噪声及其影响:

由于电路的固有噪声和有源器件非线性特性, 实际正弦波振荡器的输出信号为一调幅调相波:

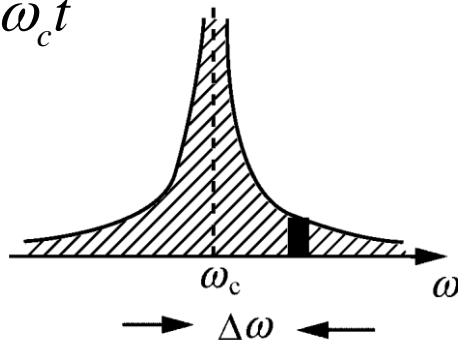
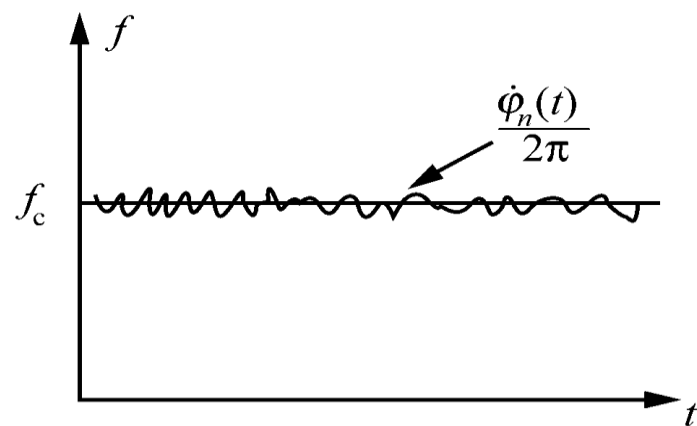
$$v(t) = A[1 + a(t)]\cos[\omega_c t + \phi_n(t)]$$

通过限幅或自偏置效应, 在振荡器平衡后, 可消除幅度噪声

$$v(t) = A\cos[\omega_c t + \phi_n(t)]$$

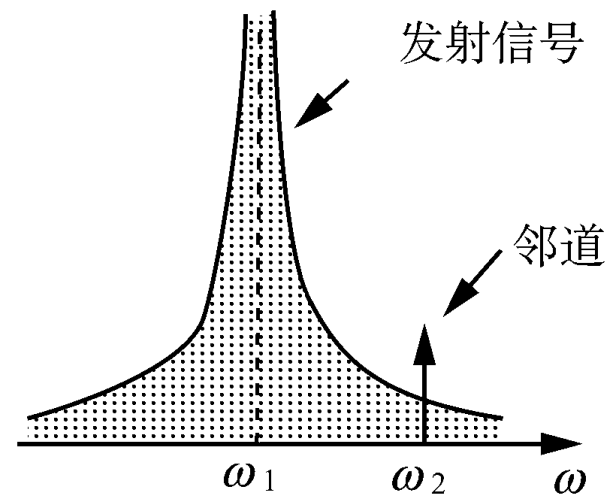
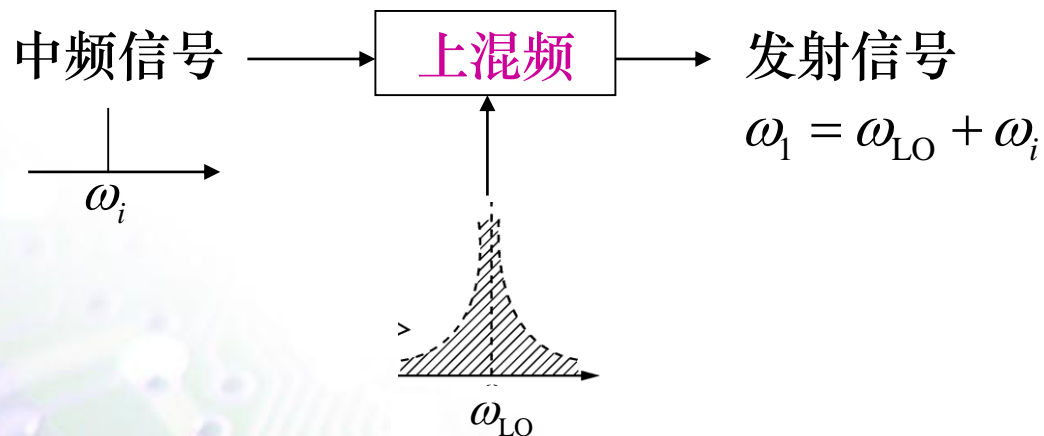
当  $\phi_n(t) \ll 1$  rad 时:

$$\begin{aligned}v(t) &= A\cos\phi_n(t)\cos\omega_c t - A\sin\phi_n(t)\sin\omega_c t \\ &\approx A\cos\omega_c t - A\phi_n(t)\sin\omega_c t\end{aligned}$$



## 7.3 振荡器的频率稳定度

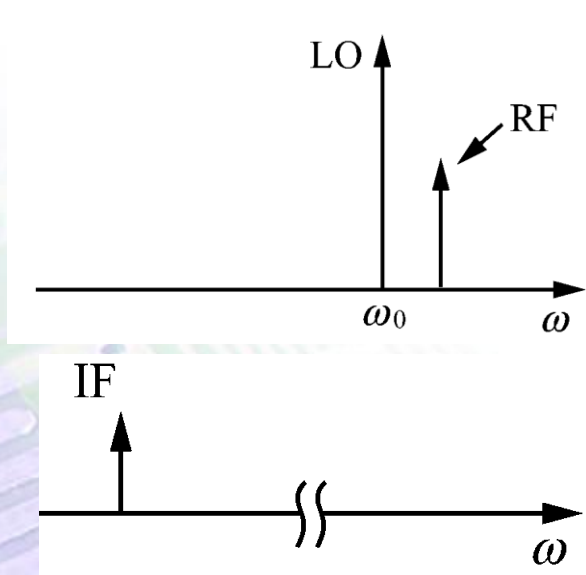
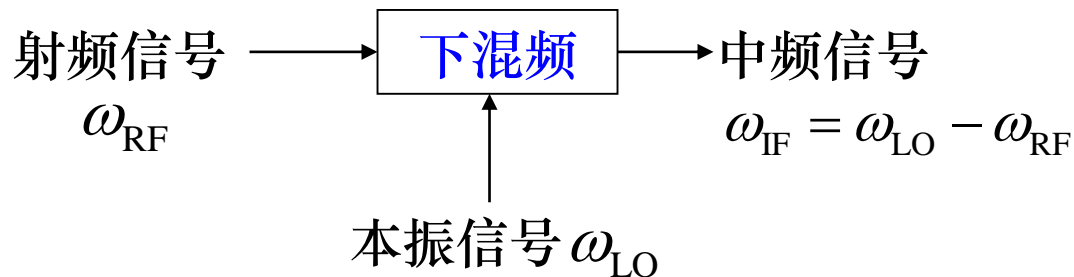
振荡器在发射机：



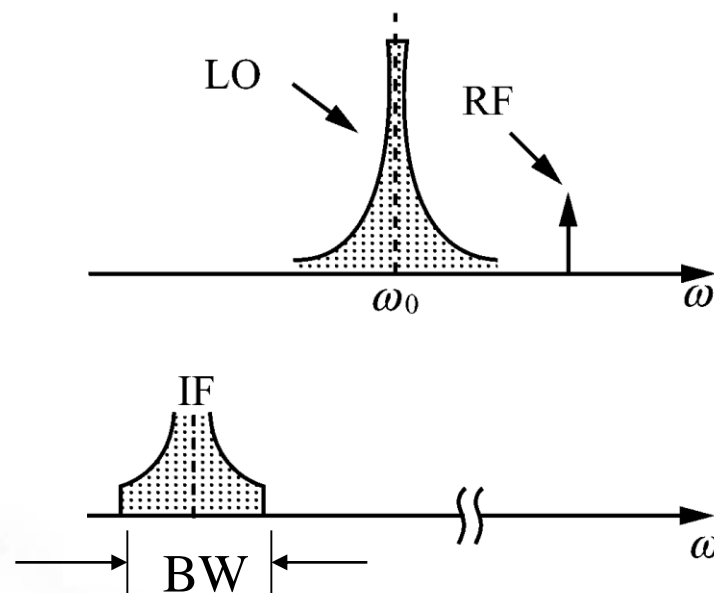
结果：上混频器将本振噪声转移到了发射频带内，发射信号不纯的频谱对邻道信号产生干扰。

# 7.3 振荡器的频率稳定度

振荡器在接收机:



无本振噪声

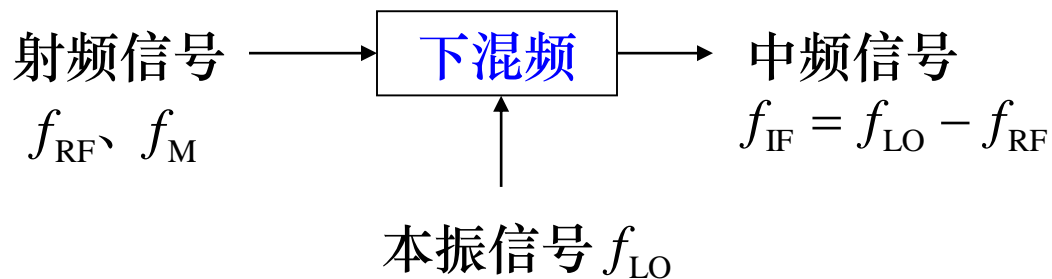


有本振噪声

结果: 下混频器将本振噪声转移到了中频段, 降低了信噪比

## 7.3 振荡器的频率稳定度

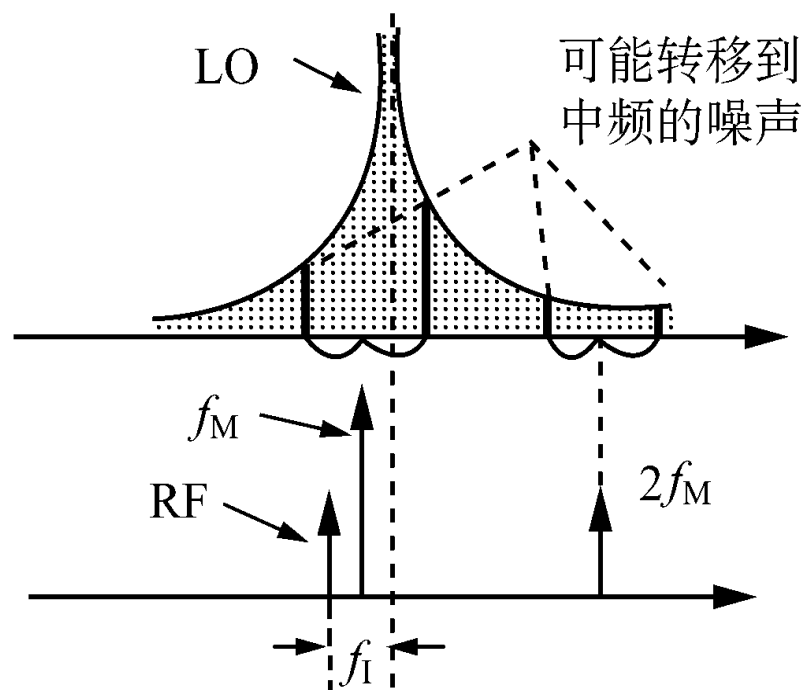
### 倒易混频



### 结果:

本振噪声的特定频点与强干扰  
进行倒易混频变成中频

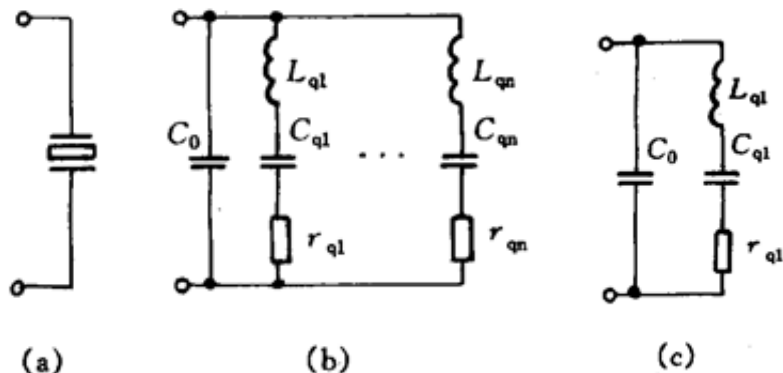
——降低中频信噪比



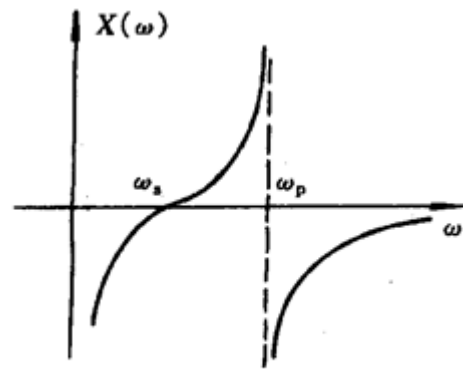
## 7.4 石英晶体振荡器

- ✓ LC振荡器的日频率稳定度一般 $10^{-3}$ ，要得到更高的频率稳定度，需要采用**石英晶体（简称“晶体”）振荡器**。
- ✓ 晶体振荡器是利用石英晶体谐振器极高的频率稳定特性来构成高频率稳定度正弦波振荡器的。其日频稳度性能一般可以达到 $10^{-6}$ 。通过采取一定的措施，更可使其频稳度达到 $10^{-12} \sim 10^{-13}$ 。
- ✓ 晶体谐振器是对石英晶体按照一定的角度切割下的薄片，再加上连线、支架，封装在金属外壳中得到的。
- ✓ 当把晶体接入电路后，由于正压电效应和反压电效应，晶体将会呈现同时存在机械振动和电振荡的工作形式，并存在基频振荡和奇次泛音振荡等不同的工作方式。
- ✓ 晶体的电路符号和等效电路如图。

## 7.4 晶体振荡器



晶体符号及其等效电路



晶体等效电抗特性

- ✓ 晶体的特点是具有很大的等效电感 $L_q$ 和很小的等效电容 $C_q$ ,  $r_q$ 。导致其有很高的等效 $Q$ 值。
- ✓ 从基音晶体的等效电路图(c)可以看出, 它具有两个谐振频率 $\omega_s$ ,  $\omega_p$ :

$$Q = \sqrt{\frac{L_q}{C_q}} \frac{1}{r_q}$$

$$\omega_s = \frac{1}{\sqrt{L_q C_q}}$$

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_q \frac{C_q C_0}{C_q + C_0}}} \approx \omega_s \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{C_q}{C_0} \right)$$

- ✓ 频率低于 $\omega_s$ 时呈容性; 高于 $\omega_s$ 低于 $\omega_p$ 呈感性; 高于 $\omega_p$ 时呈容性。
- ✓ 在振荡器中工作在 $\omega_s$ 上 (串联型) 或感性区 (并联型)。

## 7.4 晶体振荡器

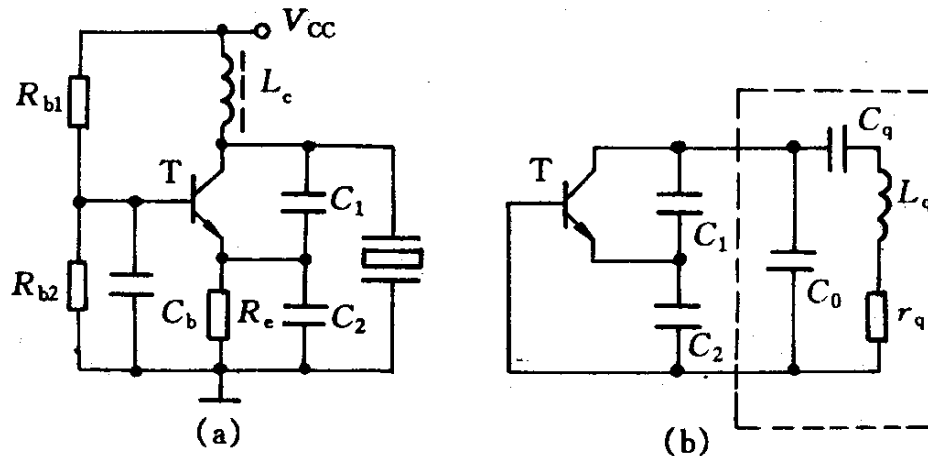
频率范围 (MHz)	型 号	频 稳 度/d	温度系数 $\left(\frac{\Delta f}{f}/^{\circ}\text{C}\right)$	$L_q/\text{H}$	$C_q/\text{pF}$
5	JA8	$5 \times 10^{-9}$	$< 1 \times 10^{-7}$	0.08	0.013
20~45	B04	$5 \times 10^{-9}$	$< 1 \times 10^{-7}$	0.08	0.0001
90~130	B04/L	$5 \times 10^{-9}$	$1 \times 10^{-7}$	依照频率定	
频率范围 (MHz)	$r_q/\Omega$	$C_0/\text{pF}$	$Q_q/\Omega$	负载电容/pF	振动方式
5	$\leq 10$	5	$\geq 50 \times 10^4$	30, 50, $\infty$	基 频
20~45	40	4.5	$\geq 50 \times 10^4$	30, 50, $\infty$	三次泛音
90~130	依照频率定		$\geq 50 \times 10^4$	30, 50, $\infty$	九次泛音

优点： $Q$ 值高，外电路的影响小，频率稳定度高

## 7.4 晶体振荡器

### ● 并联型晶体振荡器

在并联型晶体振荡器中，晶体呈现感性。典型电路为皮尔斯电路，相当于电容三点式电路。



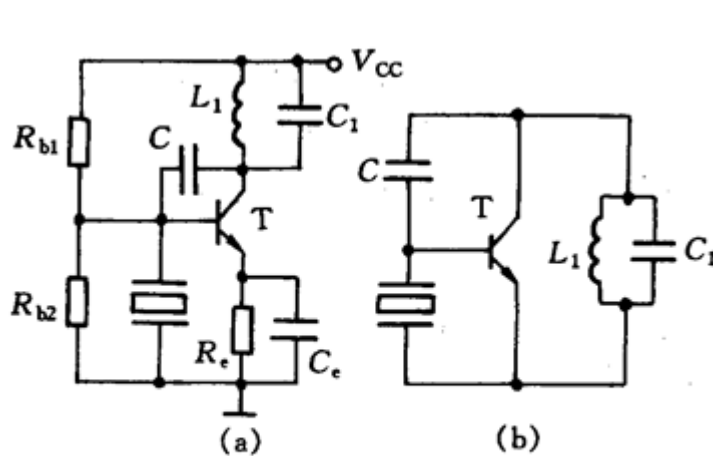
皮尔斯电路

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_q \frac{C_q(C_0 + C_L)}{C_q + (C_0 + C_L)}}} \approx \omega_s \left( 1 + \frac{1}{2} \times \frac{C_q}{C_0 + C_L} \right) \quad C_L = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

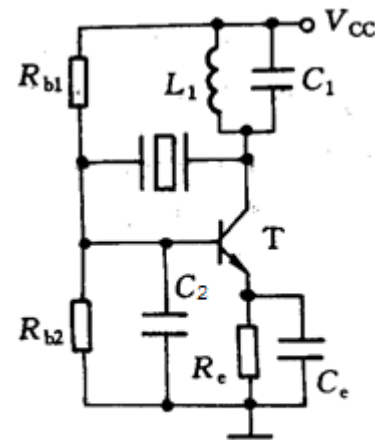


## 7.4 晶体振荡器

在密勒电路中，晶体也呈感性，电路的基本类型为电感三点式电路。



密勒电路



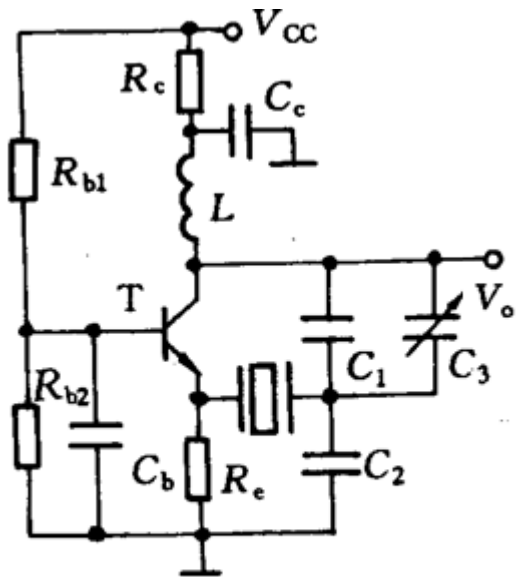
泛音晶体振荡器

泛音晶体振荡器中的LC回路用来抑制低次谐波分量，在低次谐波的频率上回路不满足三点式振荡电路的构成原则。

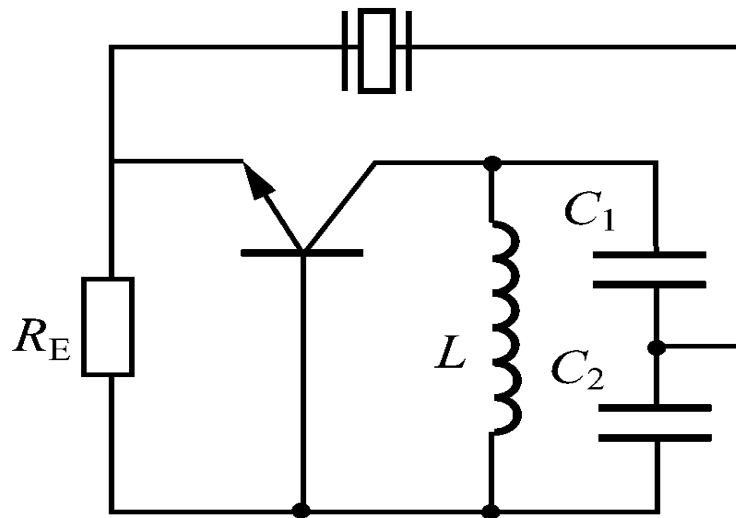
## 7.4 晶体振荡器

### ● 串联型晶体振荡器

在串联型晶振电路中，晶体工作在其串联谐振频率上。

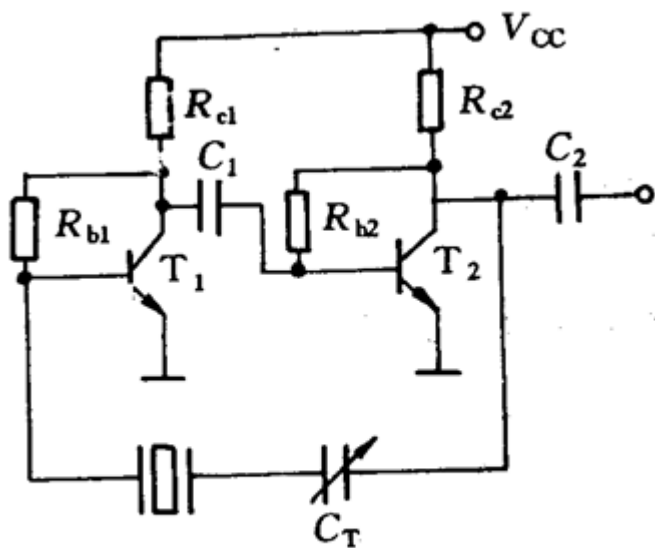


三点式串联型晶体振荡器

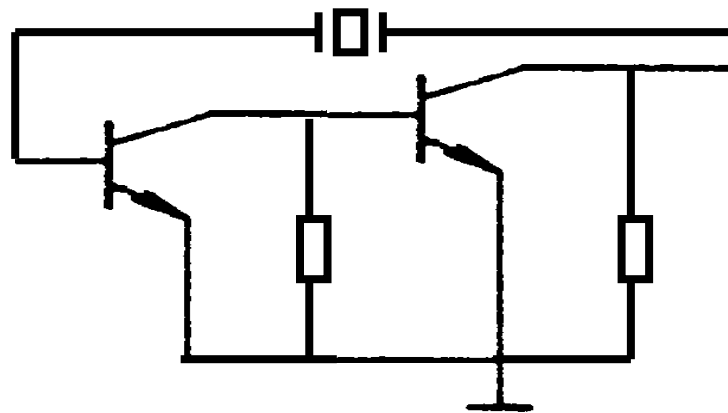


晶体在反馈支路上，振荡频率为 $\omega_s$

## 7.4 晶体振荡器



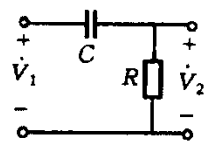
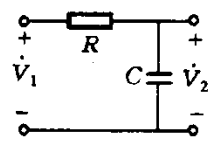
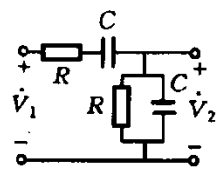
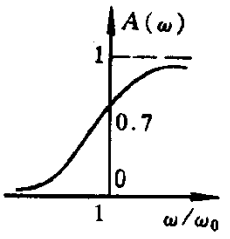
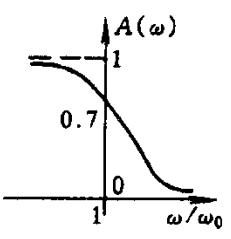
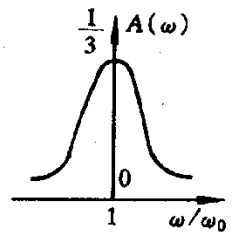
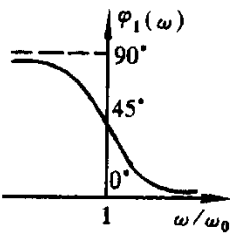
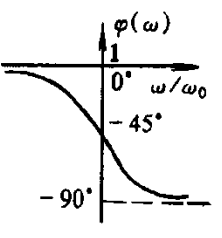
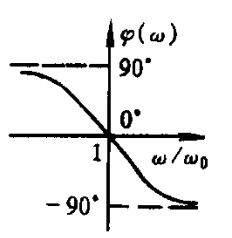
多级级联串联型晶体振荡器



晶体在反馈支路上，短路  
振荡频率为 $\omega_s$

# 7.5 RC振荡器

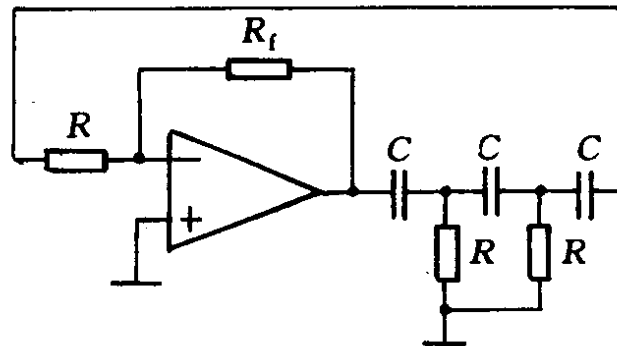
在低频频率下，通常都是采用RC振荡器，靠RC移相网络实现正反馈。

	超前移相电路	滞后移相电路	串并联选频电路
电路	 $A(j\omega) = j \frac{\omega/\omega_0}{1+j\omega/\omega_0}$	 $A(j\omega) = \frac{R}{1+j\omega/\omega_0}$	 $A(j\omega) = j \frac{\omega/\omega_0}{(1-\frac{\omega^2}{\omega_0^2}) + j 3 \frac{\omega}{\omega_0}}$
幅频特性			
相频特性			

RC 移相电路

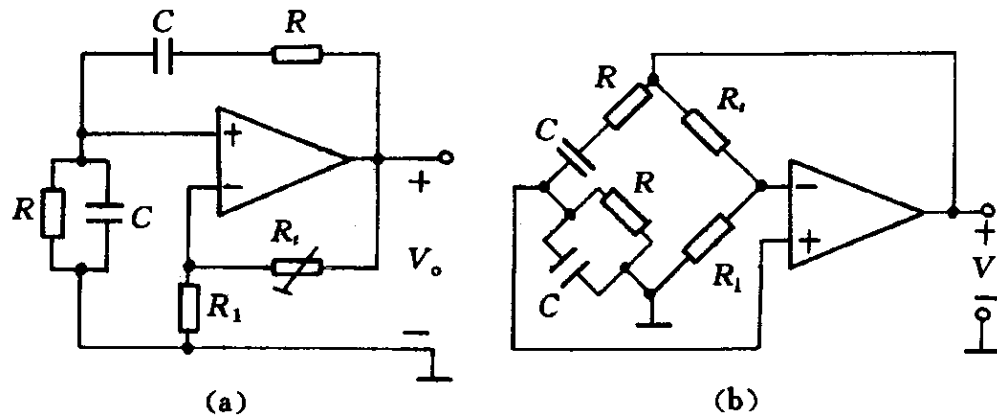
# 7.5 RC振荡器

超前移相RC振荡器:



用运放构成的 RC 振荡器

文氏桥RC振荡器:



外稳幅文氏桥振荡器

# 本章要点

- **掌握**反馈振荡器的基本工作原理，平衡条件、起振条件、幅度稳定条件、相位稳定条件。
- **掌握**LC振荡器的电路和分析：互感耦合、三点式电路，电路构成和振荡频率的计算。
- **掌握**晶体的基本特性（压电与反压电性）、等效特点（ $L_q$ 大， $r_q$ 小， $Q$ 值极高，频率稳定度的数量级）和等效电路（感性区、容性区、 $\omega_s$ 、 $\omega_p$ ）。掌握并联型晶体振荡器、串联型晶体振荡器的实现电路和工作原理。
- **掌握**LC振荡器振荡频率的确定方法，影响因素（ $\Delta\omega_0$ 、 $\Delta\varphi_k$ 、 $\varphi_k$ 、 $\Delta Q_e$ 、 $Q_e$ ），提高频稳度的措施（减小变化、减小 $\varphi_k$ 、增大 $Q_e$ ）。Clapp电路及其改善频稳度的原理。
- 了解RC振荡器的工作原理和电路。

# 作业

## ➤ 思考题

1. 全用线性器件能否构成振荡器？请说明原因。
2. 回路的 $Q$ 值大小对振荡器性能会有什么影响？
3. 三点式振荡器中的反馈系数越大是不是越容易起振？
4. 影响频率稳定度的因素有哪些？  
采取什么措施可以提高频率稳定度？
5. 为什么晶体振荡器具有很高的频率稳定度？

➤ 7-2、7-3、7-5、7-7、7-10、7-11、7-13、7-17