

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

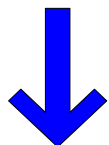
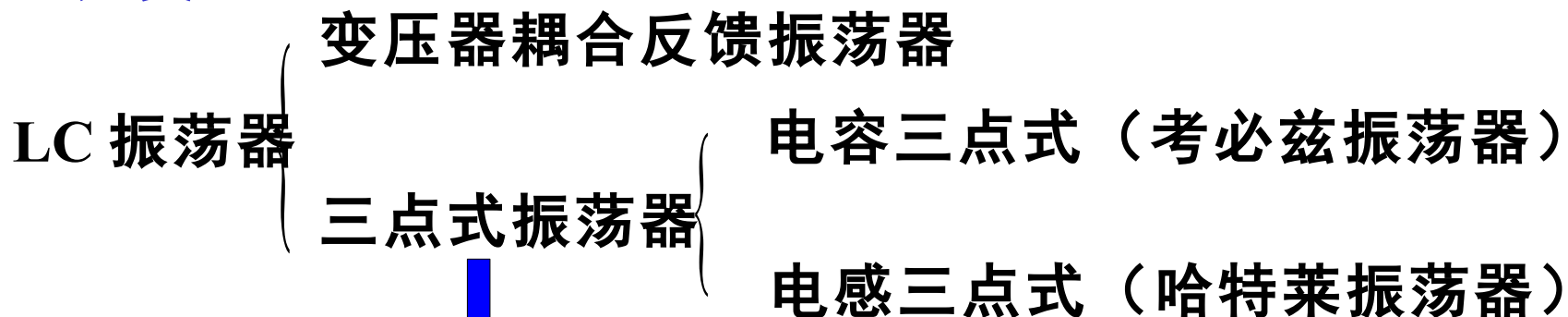
4.2 LC 振荡器

一、振荡器的组成原则

1. 定义：

以 LC 谐振回路作为相移网络的反馈振荡器—— LC 振荡器

2. 分类：

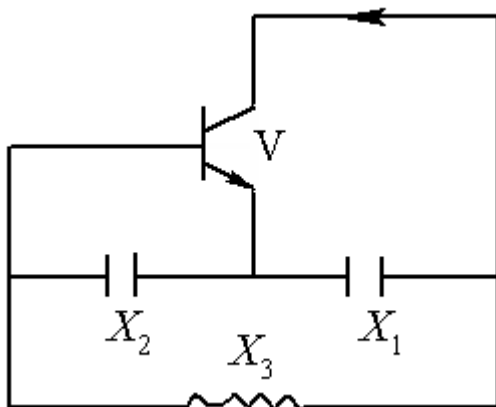


LC 回路的三个端点与
晶体管的三个电极分
别连接而成的电路

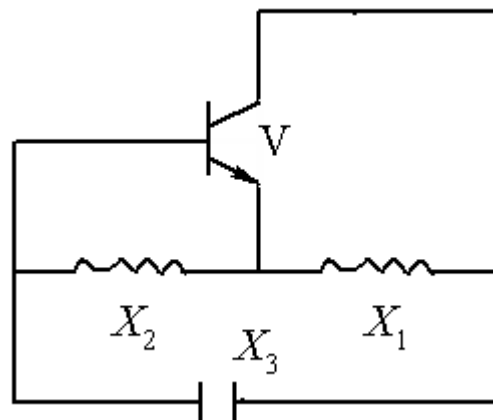
4.2 LC 振荡器

一、振荡器的组成原则

2. 分类：



考必兹振荡器



哈特莱振荡器

4.2 LC 振荡器

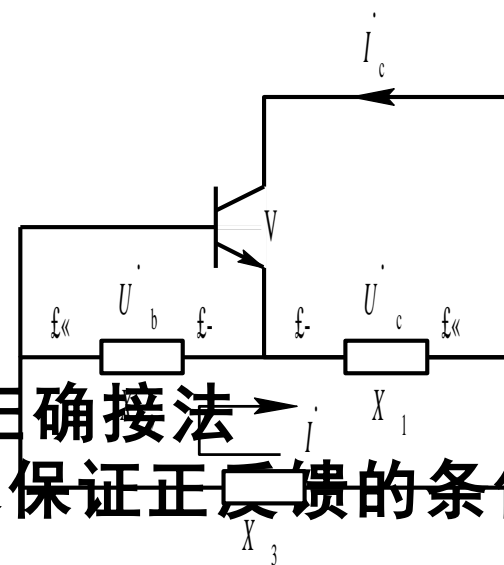
一、振荡器的组成原则

3. 组成原则

主要原则是判断是否满足正反馈条件

① 变压器耦合 → 靠同名端来保证

② 三点式 → 靠电容、电感的正确接法来保证正反馈的条件



忽略回路损耗及三极管的分布参数，根据谐振回路的性质
谐振时回路应呈纯电阻性，故：

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0$$

4.2 LC 振荡器

一、振荡器的组成原则

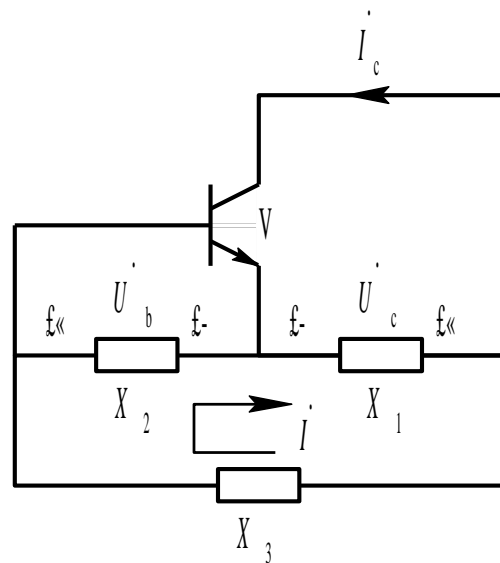
3. 组成原则

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0$$

电路中三个电抗元件不能同时为感抗或容抗，应由两种不同性质的电抗元件组成。

回路谐振，并且不考虑晶体管参数影响时，有：

$$\left. \begin{array}{l} \varphi_L = 0 \quad \varphi_f = 0 \quad \longrightarrow \quad \varphi_{F'} = 0 \\ \text{而：} \quad F' = \frac{-\dot{U}_b}{\dot{U}_c} \end{array} \right\} \longrightarrow U_b \text{ 与 } -U_c \text{ 同相}$$

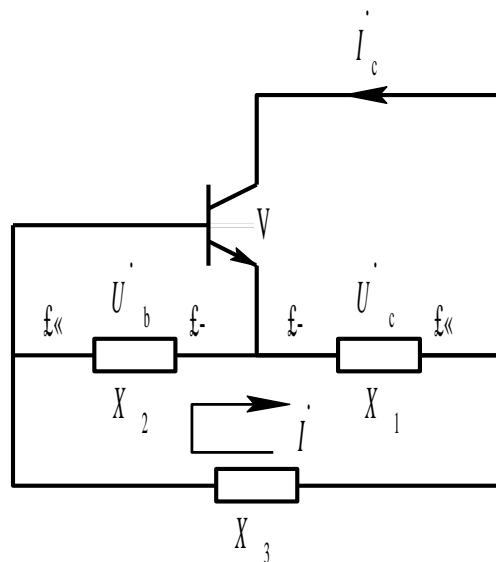


4.2 LC 振荡器

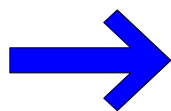
一、振荡器的组成原则

3. 组成原则

当回路 Q 值很高时，回路电流 I 远大于晶体管的基极电流，集电极电流以及发射机电流，故有：

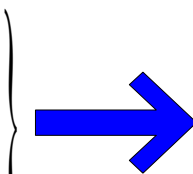


$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_b &= jX_2 \dot{I} \\ \dot{U}_c &= -jX_1 \dot{I} \\ U_b \text{ 与 } -U_c \text{ 同相} \end{aligned} \right\}$$



■ X_1 、 X_2 应为
同性质的电抗元
件

$$X_1 + X_2 + X_3 = 0$$



■ X_3 与 X_1 、 X_2
的电抗性质相反

4.2 LC 振荡器

一、振荡器的组成原则

3. 组成原则

■ X_1 、 X_2 应为同性质的电抗元件

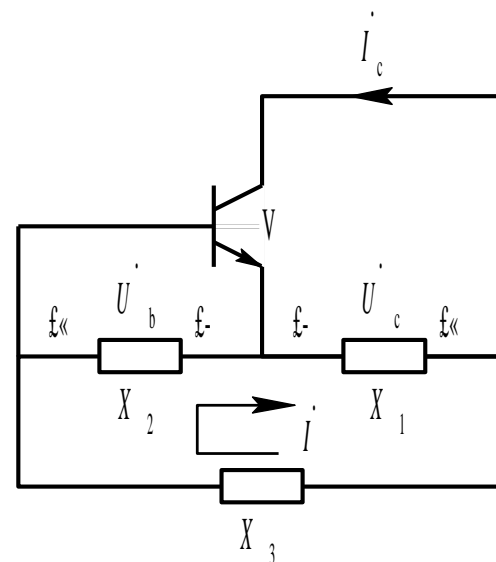
■ X_3 与 X_1 、 X_2 的电抗性质相反

晶体管：

场效应管：

射同余异

源同余异



4.2 LC 振荡器

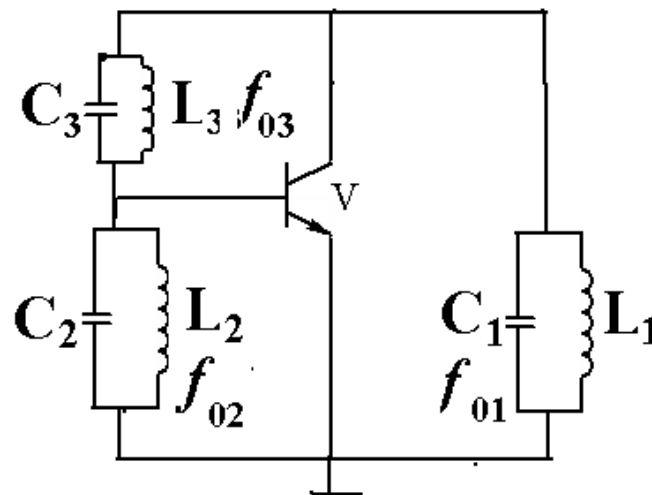
一、振荡器的组成原则

例：图 4-7 是一三回路振荡器的等效电路，设有下列四种情况：

(1) $L_1 C_1 > L_2 C_2 > L_3 C_3$

(2) $L_1 C_1 < L_2 C_2 < L_3 C_3$

(3) $L_1 C_1 = L_2 C_2 > L_3 C_3$



试分析上述四种情况是否都能振荡，振荡频率与回路谐振频率有何关系，属于何种类型的振荡器？

4.2 LC 振荡器

一、振荡器的组成原则

解：

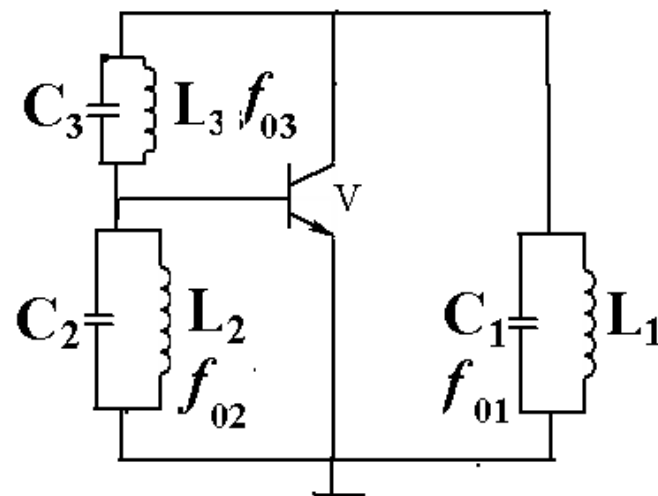
三个电抗元件均由并联谐振回路组成

并联谐振回路的性质：

$$\begin{cases} f > f_0 & \text{容性} \\ f < f_0 & \text{感性} \end{cases}$$

要使该电路能够振荡，则回路 1、2 呈现相同的电抗特性，3 则与 1、2 呈现不同的电抗特性。

即工作频率 f 应该同时大于 f_{01} 和 f_{02} 而小于 f_{03} ；或者同时小于 f_{01}, f_{02} 而大于 f_{03}



4.2 LC 振荡器

一、振荡器的组成原则

解：（1） $L_1 C_1 > L_2 C_2 > L_3 C_3$

→ $f_{01} < f_{02} < f_{03}$ → 当 $f_{02} < f < f_{03}$ ，则电路可能震荡

，
属于电容反馈振荡器

（2） $L_1 C_1 > L_2 C_2 > L_3 C_3$

→ $f_{01} > f_{02} > f_{03}$ → 当 $f_{02} > f > f_{03}$ 时，电路可能振荡
属于电感反馈振荡器

（3） $L_1 C_1 = L_2 C_2 > L_3 C_3$

→ $f_{01} = f_{02} < f_{03}$ → $f_{01} = f_{02} < f < f_{03}$ 时，电路可能震荡
属于电容反馈振荡器

4.2 LC 振荡器

一、振荡器的组成原则

解：

$$(4) L_1 C_1 < L_2 C_2 = L_3 C_3$$

$f_{01} > f_{02} = f_{03} \Rightarrow$ 此时电路不可能震荡。

下图是一些常见振荡器的高频电路，读者不妨自行判断它们是由哪种基本线路演变而来的。

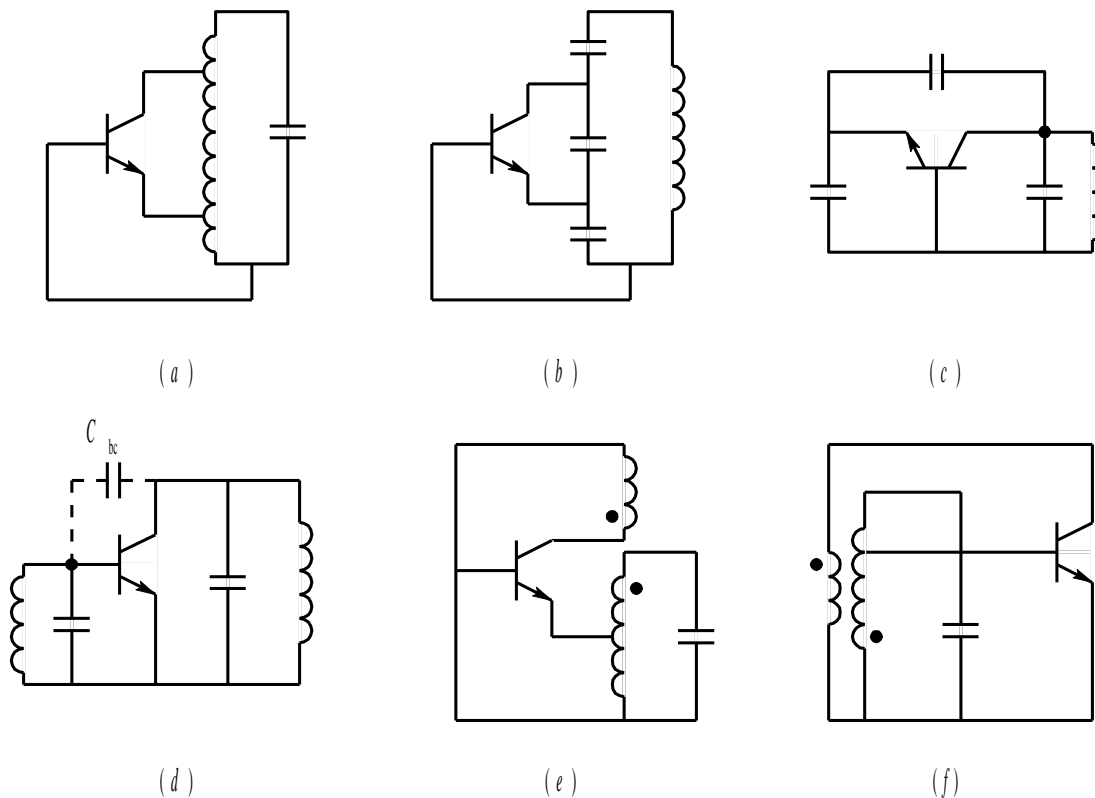
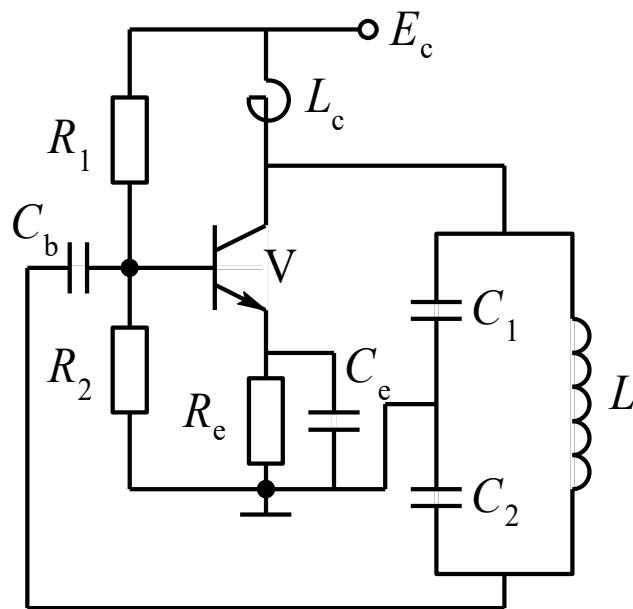


图 4—7 几种常见振荡器的高频电路

4.2 LC 振荡器

二、电容反馈振荡器

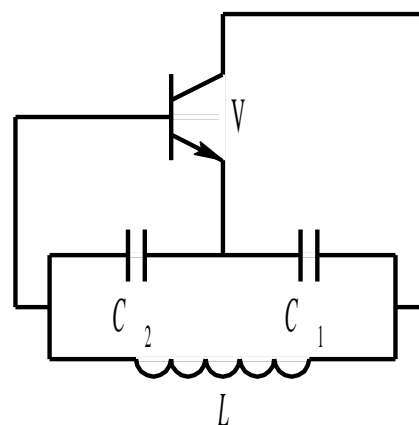
1. 电路



(a)

实际电路

C_b 隔直电容;
 L_c 通直断交;
 C_e 旁路电容;
 R_1, R_2, R_e 直流偏置电阻



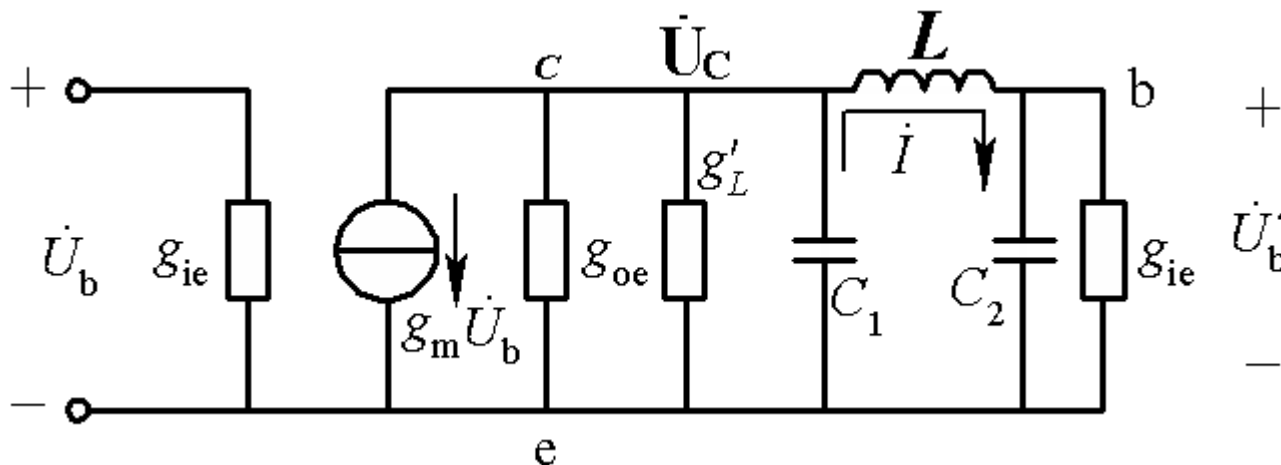
(b)

交流等效电路

4.2 LC 振荡器

二、电容反馈振荡器

2. 高频等效电路



由于起振时，晶体管工作在小信号线性放大区，因此分析该电路时做以下**假设**：

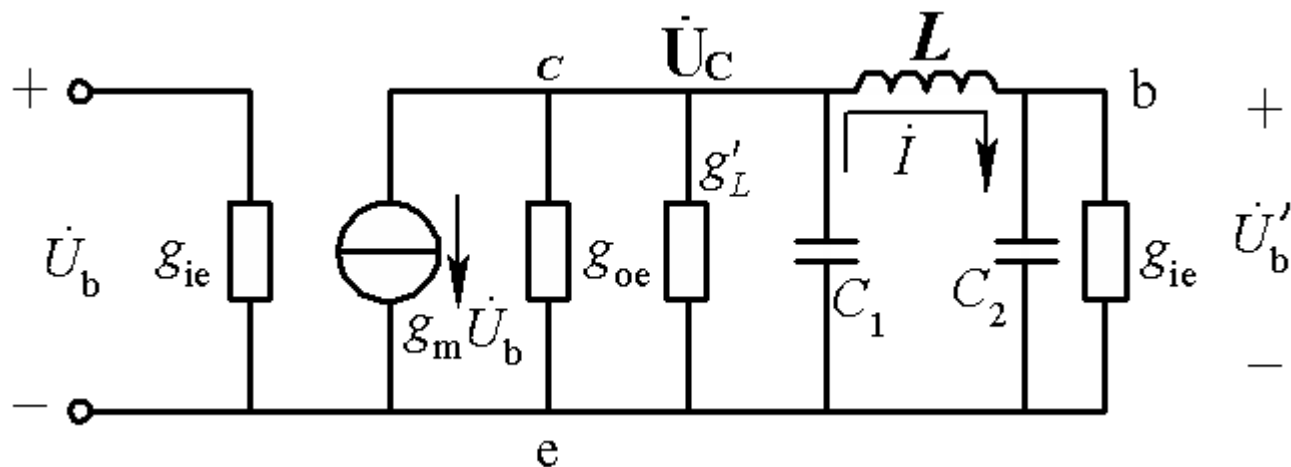
- ① 忽略晶体管内部反馈的影响，即令 $y_{re}=0$ ；
- ② 忽略晶体管的输入电容，输出电容，或者将其包含在 C_1 ， C_2 中；
- ③ 忽略 i_c 对 U_b 的相移，用跨到 g_m 代替 Y_{fe} ；
- ④ g_L' 是除晶体管以外的电路中，所以电导折算到 C、E 两端的总电导。

4.2 LC 振荡器

二、电容反馈振荡器

3. 分析

(1) 振荡频率



$$U_c = \frac{-g_m \dot{U}_b}{g_{oe} + g_L' + j\omega C_1 + \frac{1}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2 + g_{ie}}}}$$

$$U_b' = \frac{\frac{1}{j\omega C_2 + g_{ie}}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2 + g_{ie}}} U_c = \frac{1}{-\omega^2 LC_2 + j\omega L g_{ie} + 1} U_c$$

4.2 LC 振荡器

二、电容反馈振荡器

3. 分析

(1) 振荡频率

$$\begin{aligned}
 U_c &= \frac{-g_m \dot{U}_b}{g_{oe} + g_L' + j\omega C_1 + \frac{1}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2 + g_{ie}}}} \\
 U_b' &= \frac{\frac{1}{j\omega C_2 + g_{ie}}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_2 + g_{ie}}} U_c = \frac{1}{-\omega^2 LC_2 + j\omega L g_{ie} + 1} U_c \\
 T(j\omega) &= \frac{U_b'}{U_b} = \frac{-g_m}{[1 - \omega^2 LC_2 + j\omega L g_{ie}][g_{oe} + g_L' + j\omega C_1] + j\omega C_2 + g_{ie}}
 \end{aligned}
 \quad \rightarrow$$

4.2 LC 振荡器

二、电容反馈振荡器

3. 分析

(1) 振荡频率

$$T(j\omega) = \frac{U_b'}{U_b} = \frac{-g_m}{[1 - \omega^2 LC_2 + j\omega Lg_{ie}][g_{oe} + g_L' + j\omega C_1] + j\omega C_2 + g_{ie}}$$

令 $T(j\omega)$ 的虚部为 0，即其相位为 0，得：

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{g_{ie}(g_{oe} + g_L')}{C_1 C_2}}$$

➔ 电路振荡频率

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$\omega \approx \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

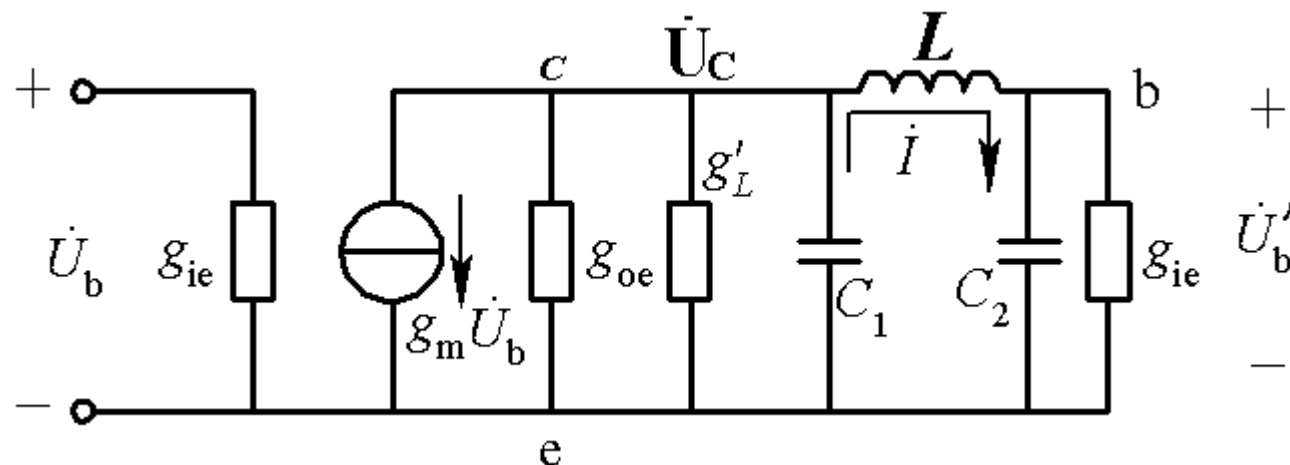
➔ 振荡频率可用回路谐振频率来近似

4.2 LC 振荡器

二、电容反馈振荡器

3. 分析

(2) 反馈系数



忽略 g_{ie} 时，有：

$$k_F = |F(j\omega)| = \frac{U_b'}{U_c} = \frac{I / \omega C_2}{I / \omega C_1} = \frac{C_1}{C_2}$$

将 g_{ie} 折算到放大器输出端，根据功率相等原则有：

$$U_c^2 g_{ie}' = U_b'^2 g_{ie} \rightarrow g_{ie}' = \left(\frac{U_b'}{U_c}\right)^2 g_{ie} = k_F^2 g_{ie}$$

$$(3) \text{ 总负载电导: } g_L = k_F^2 g_{ie} + g_{oe} + g_L = \frac{1}{R_L}$$

4.2 LC 振荡器

二、电容反馈振荡器

3. 分析

(4) 起振条件

由振荡器的振幅起振条件 $Y_f R_L F' > 1$ ，有：

$$g_m R_L k_F > 1 \longrightarrow g_m > \frac{1}{R_L k_F} = g_L \frac{1}{k_F} = k_F g_{ie} + \frac{1}{k_F} (g_{oe} + g_L)$$

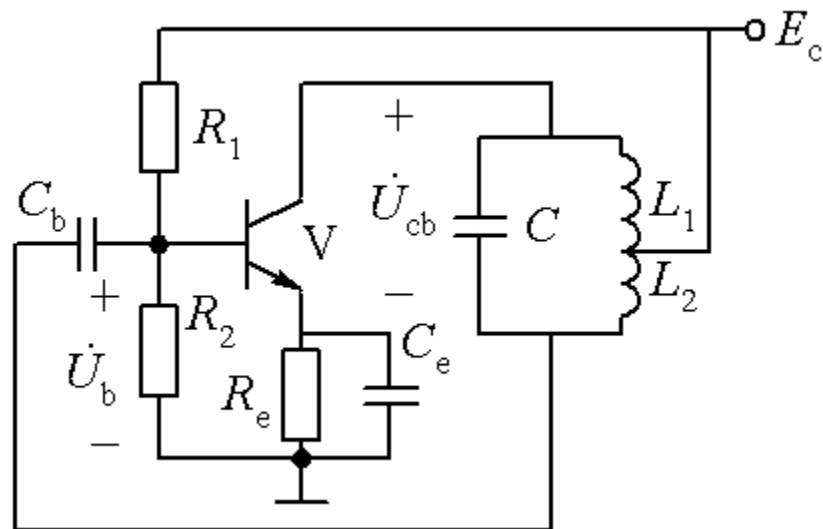
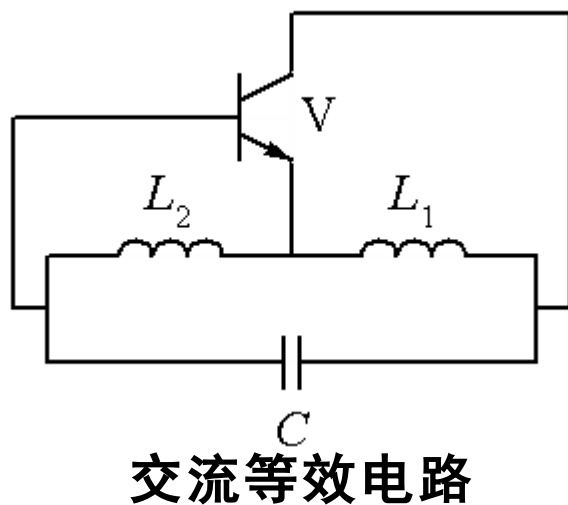
只要设计电路时，使晶体管的跨导满足上式，振荡器就可以振荡，在 g_m ， g_{ie} ， g_{oe} 一定时，可以通过调整 F ，来保证起振。

F 并非越大越好

4.2 LC 振荡器

二、电感反馈振荡器

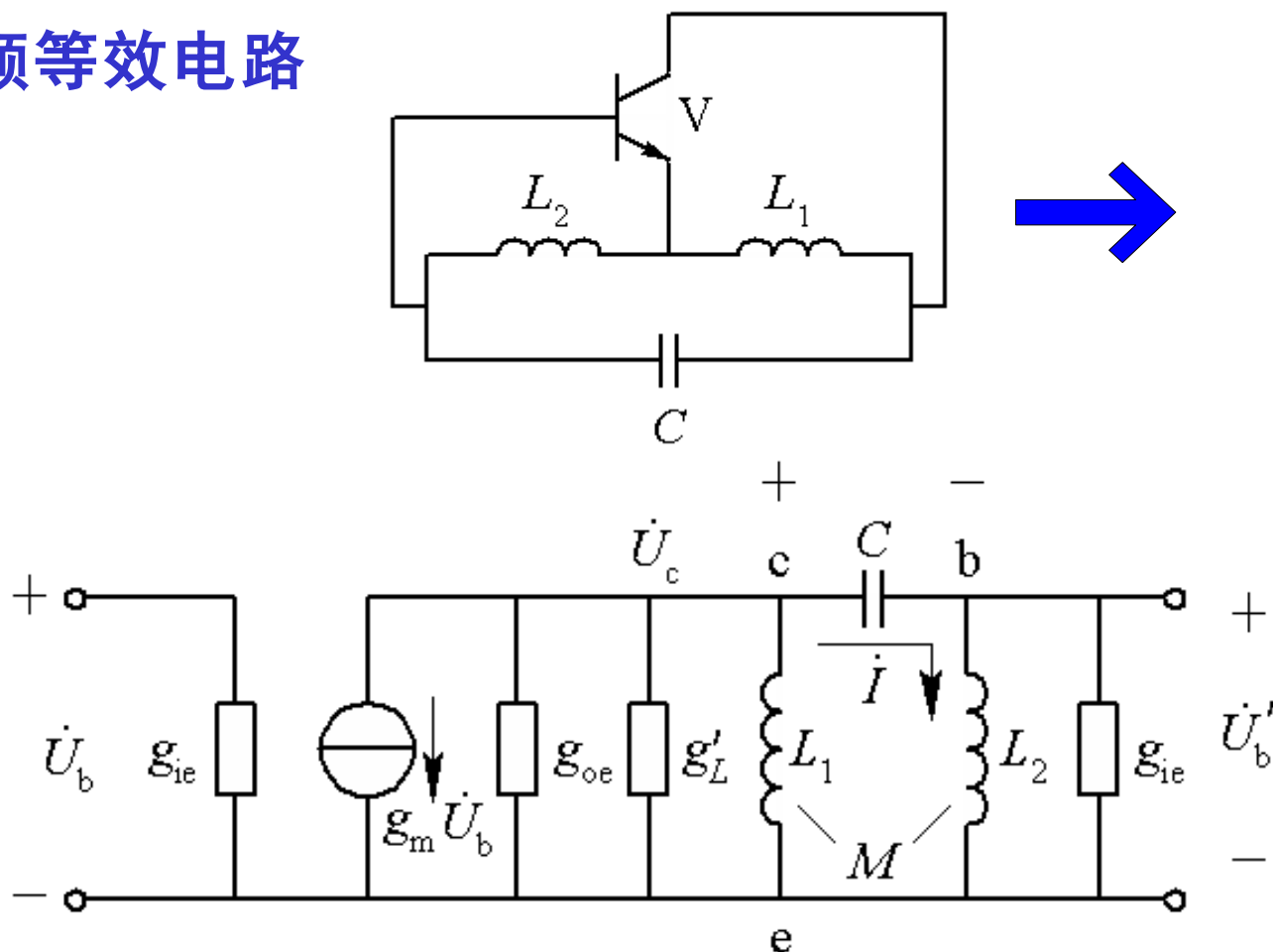
1. 电路



4.2 LC 振荡器

二、电感反馈振荡器

2. 高频等效电路

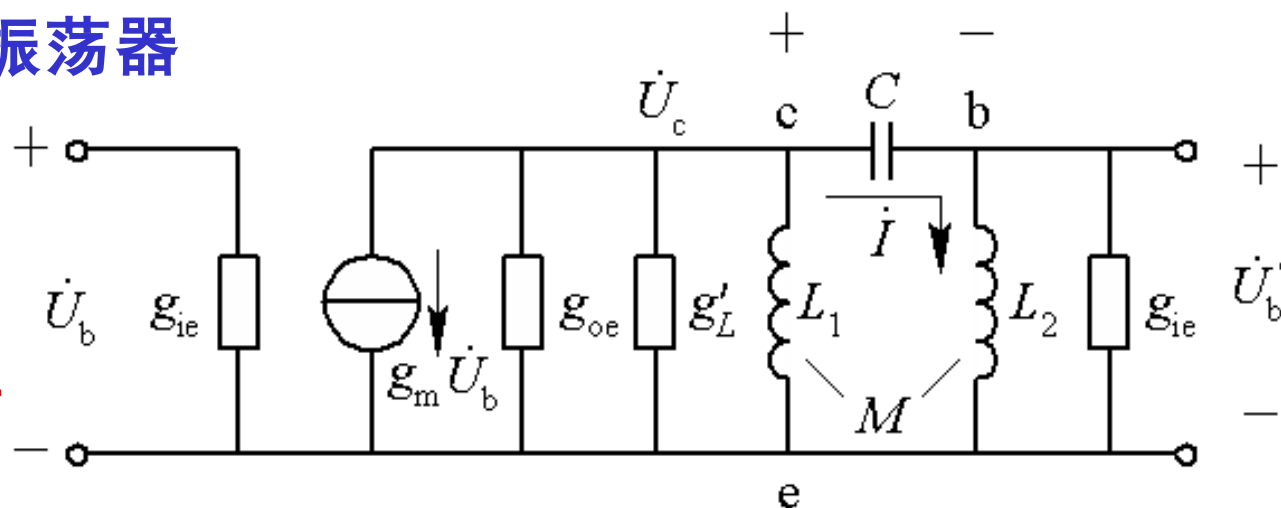


4.2 LC 振荡器

二、电感反馈振荡器

3. 分析

(1) 振荡频率



该振荡器的振荡频率同样可用回路的谐振频率近似表示，

$$\omega \approx \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad L = L_1 + L_2 + 2M$$

由相位平衡条件得到的振荡频率为：

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC + g_{ie}(g_{oe} + g'_L)(L_1 L_2 - M^2)}} \approx \omega_0$$

4.2 LC 振荡器

二、电感反馈振荡器

3. 分析

(1) 振荡频率

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{LC + g_{ie}(g_{oe} + g'_L)(L_1 L_2 - M^2)}} \quad \square \quad \omega_0$$

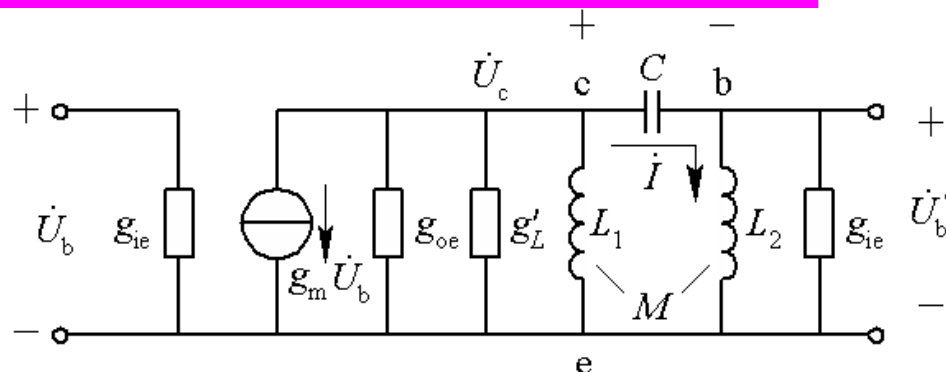
耦合越紧密，M 越大， ω_1 越接近 ω_0

4.2 LC 振荡器

二、电感反馈振荡器

3. 分析

(2) 反馈系数



工程上在计算反馈系数时不考虑 g_{ie} 的影响，反馈系数的大小为

$$k_F = |G(j\omega)| \approx \frac{L_2 + M}{L_1 + M}$$

(3) 起振条件

g_{ie} 等效到 C、E 两端的等效导纳为：

$$g_{ie}' = \left(\frac{U_b'}{U_c} \right)^2 g_{ie} = k_F^2 g_{ie}$$

总导纳为： $g_L = g_{ie} + g_{oe} + g_{ie}' = g_{ie} + g_{oe} + k_F^2 g_{ie}$

4.2 LC 振荡器

三、电感反馈振荡器

3. 分析

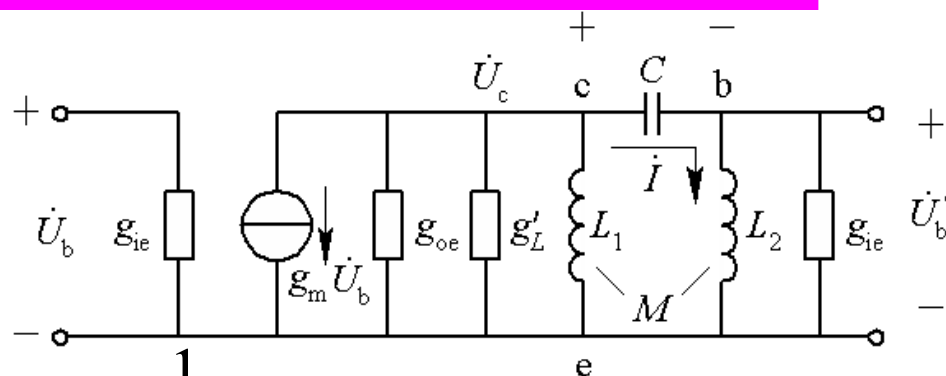
(3) 起振条件

$$g_L = g_{ie} + g_{oe} + K_F^2 g_{ie} = \frac{1}{R_L}$$

由振幅起振条件有：

$$K_F g_m R_L > 1 \rightarrow g_m > \frac{1}{K_F R_L} = g_L \frac{1}{K_F}$$

$$\rightarrow g_m > \frac{1}{K_F} (g_{ie} + g_{oe}) + K_F g_{ie}$$

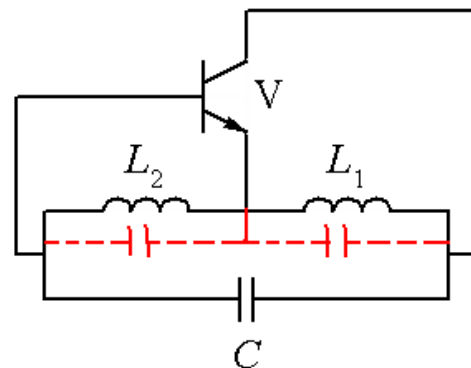


4.2 LC 振荡器

电容反馈振荡器与电感反馈振荡器的比较：

- ① 两种线路都比较简单，容易起振
- ② 电容反馈振荡器的振荡频率可以做的较高，而电感反馈振荡器较低

电感与极间电容并联，
频率高时，电抗性质改变，
相位条件将不满足



- ③ 电容反馈振荡器产生的振荡电压波形及频率稳定度比电感反馈振荡器产生的要好

因为晶体管工作在非线性状态，回路中存在高次谐波，高次谐波在电容上的压降小，在电感上的压降大。

4.2 LC 振荡器

电容反馈振荡器与电感反馈振荡器的比较：

- ④ 电容反馈振荡器一般工作在固定频率，而电感反馈振荡器工作频率较宽，可作为波段用振荡器。（改变 C ）

一般改变 $C \rightarrow$ 调节 ω

$\rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \text{电容反馈 } C \nearrow \square k_F \nearrow \rightarrow \text{一般工作在固定频率} \\ \text{电感反馈 } C \text{ 变化不影响 } k_F \rightarrow \text{工作频率宽} \end{array} \right.$