

二、 LC 正弦波振荡电路

将电容和电感并联起来，在电容上施加一定电压后可产生零输入响应。这种响应在电容的电场和电感的磁场中交替转换便可形成正弦波振荡。

如果将该电路作为选频网络和正反馈，再加上基本放大电路和稳幅电路就构成 LC 正弦波振荡电路。

LC 正弦波振荡电路的选频电路由电感和电容构成，可以产生高频振荡($>1\text{MHz}$)。

1、LC并联电路频率特征

如图为一LC并联回路，
 R 为电路总等效电阻。

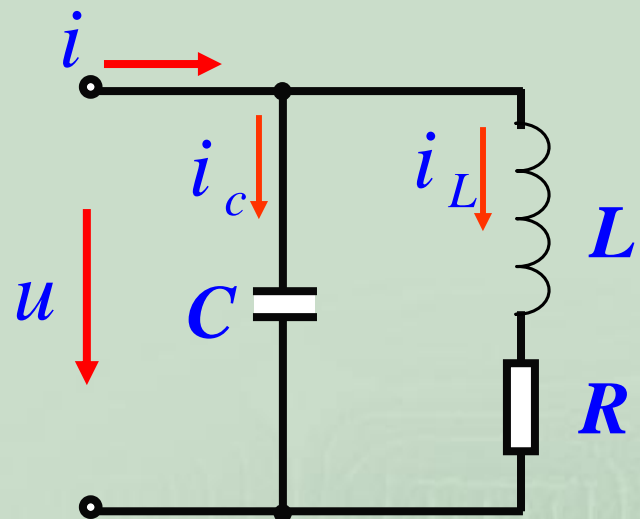
(1) 谐振频率

电路等效电抗

$$Z = \frac{\frac{1}{j\omega C} (R + j\omega L)}{\frac{1}{j\omega C} + R + j\omega L}$$

通常电路中感抗远大于电路损耗，即 $\omega L \gg R$ ，则

$$\begin{aligned} Z &= \frac{\frac{1}{j\omega C} (R + j\omega L)}{\frac{1}{j\omega C} + R + j\omega L} \approx \frac{\frac{1}{j\omega C} \cdot j\omega L}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \\ &= \frac{\frac{L}{C}}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \end{aligned}$$



$$Z = \frac{\frac{L}{C}}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})}$$

当式中虚部系数为0时，Z为实数，电路中电流与电压同相位。此时电路产生谐振，谐振频率即为

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$$

$$2\pi f_0 L - \frac{1}{2\pi f_0 C} = 0$$

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



(2) 谐振电抗

当电路处于谐振时电抗为：

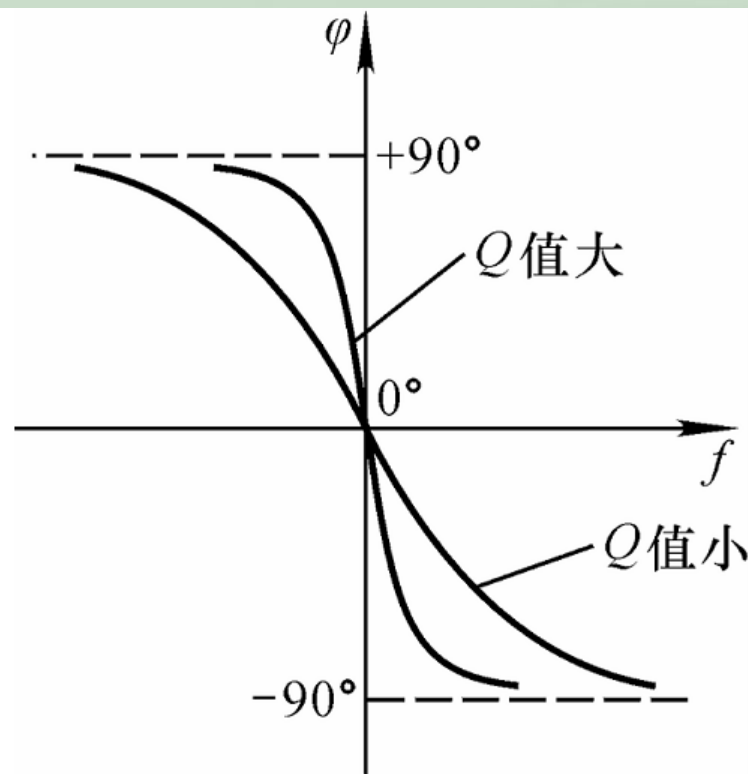
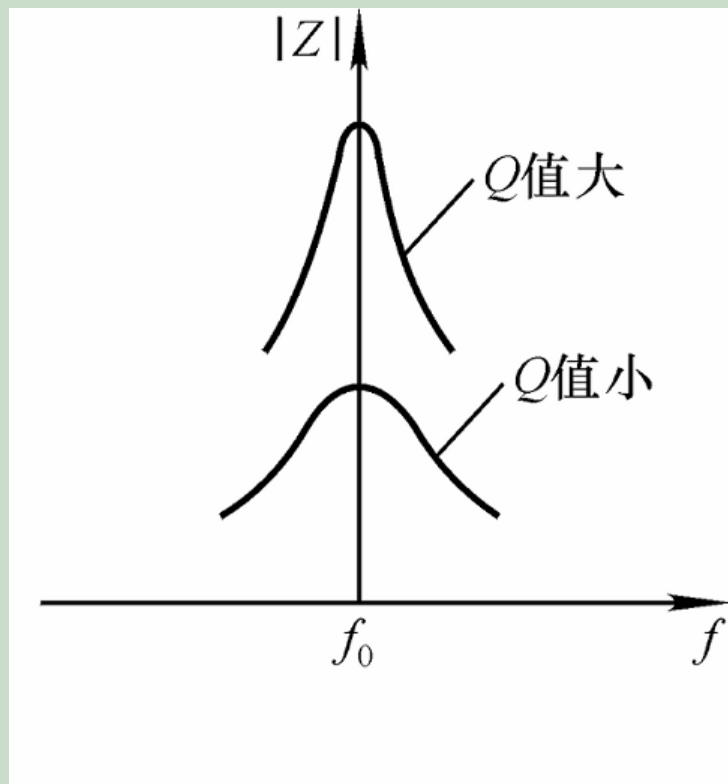
$$Z = \frac{\frac{L}{C}}{R + j(\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C})} = \frac{L}{RC} = Q\omega_0 L = \frac{Q}{\omega_0 C}$$

式中 $Q = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$ ，称为回路品质因数，是用来评价电路选频特性的指标。

对LC振荡电路，Z为实常数，故谐振电抗为纯阻抗。

当L越大，C越小，R也越小时，则谐振时Q值越大，Z也越大，即满足振幅条件。

另外，Z还是 f_0 的函数。谐振时Q值越大，Z的相角随 f_0 变化也越急剧，即选频效果越好。



(3) \dot{i} 与 \dot{I}_L (\dot{I}_C) 关系

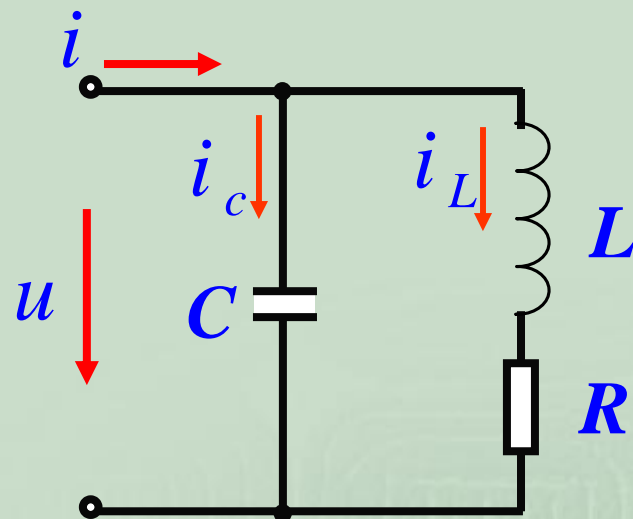
谐振时

$$\dot{U} = \dot{i} Z_0 = \frac{Q}{\omega_0 C} \dot{i}$$

C上电流为

$$\dot{I}_C = \omega_0 C \dot{U} = \omega_0 C \cdot \frac{Q}{\omega_0 C} \dot{i} = Q \dot{i}$$

通常 $Q \gg 1$, 故 $\dot{I}_C = \dot{I}_L \gg \dot{i}$, 即谐振时LC回路的电流比输入电流大得多, 则 \dot{i} 的影响可以忽略, 也就是说外界只需加很小的激励便会在回路中产生很大响应。

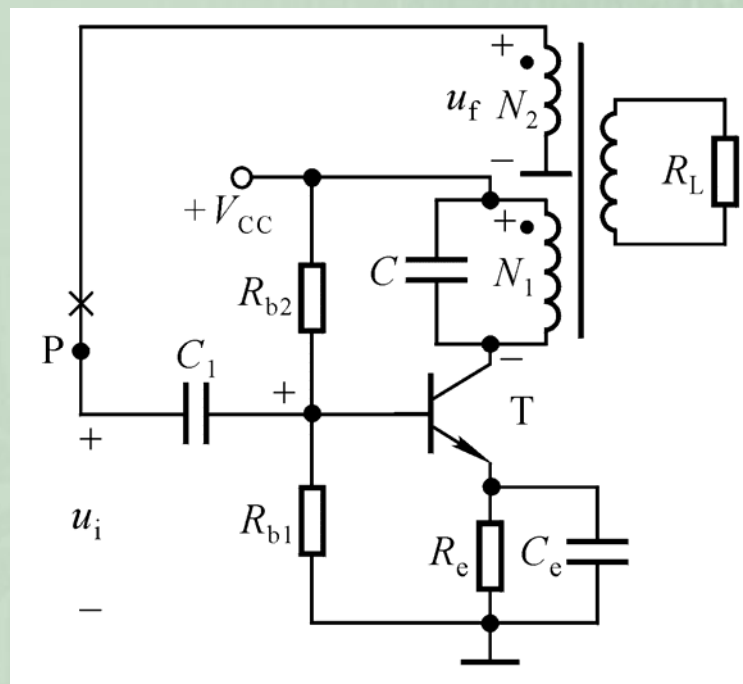


如果将 LC 并联选频电路加入基本放大电路，并引入正反馈取代输入信号，则电路将成为正弦波振荡电路。

根据引入反馈方式的不同可分为变压器反馈式、电感反馈式、电容反馈式三种形式振荡电路。

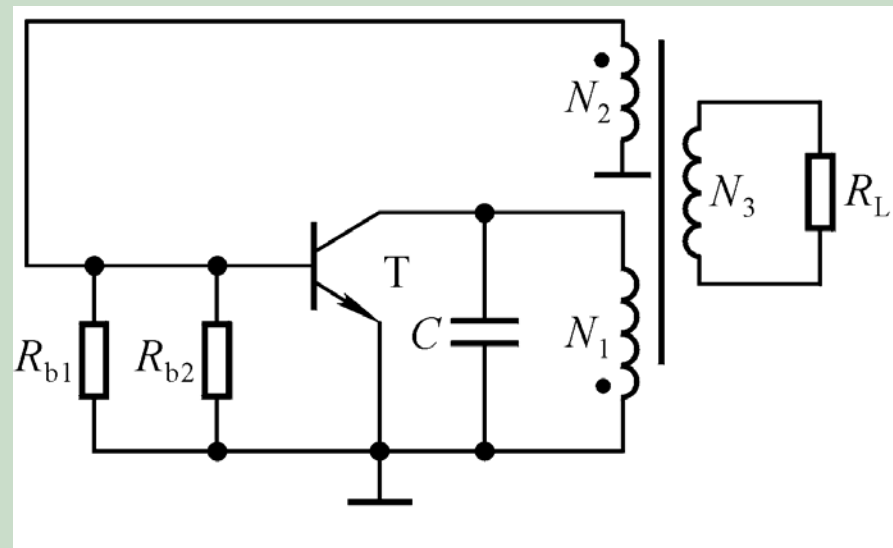
2、变压器反馈式振荡电路

电路如图， C 、 N_1 为选频网络， N_2 为正反馈电路，正弦波信号由变压器副边绕组传送到负载。



电路的交流通路如图，LC (N1) 回路产生谐振时的谐振频率为 f_o ，谐振时LC电路呈纯阻性， u_c 与 u_i 反相位。

变压器上绕组的相位关系：



互为同名端的相位相同；互为异名端的相位相反。

电路为正反馈，满足振荡电路相位平衡条件。

LC振荡电路起振的幅值条件为：

$$|AF| \geq 1 \Rightarrow \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} \right| = \left| \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_i} \right| \geq 1 \Rightarrow |\dot{U}_f| \geq |\dot{U}_i|$$

选择变压器原、副边匝数比，该条件容易满足。该电路依靠放大电路自身和选频网络实现稳幅。

3、电感反馈式振荡电路

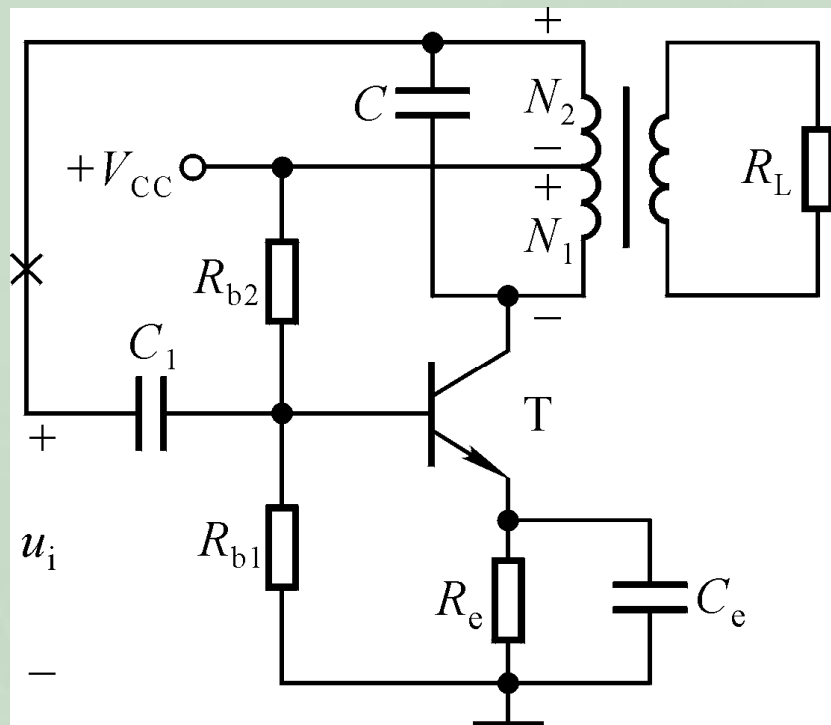
为了克服变压器反馈中选频与反馈回路间因磁路耦合造成的工作不稳定的缺陷，将电路作适当改进，便形成了电感反馈式振荡电路，如图所示。

电路中变压器线圈 N_1 、 N_2 按同一方向绕制，在中间抽出抽头，故有始端、尾端、中间抽头三个端点，称为**电感三点式振荡电路**。

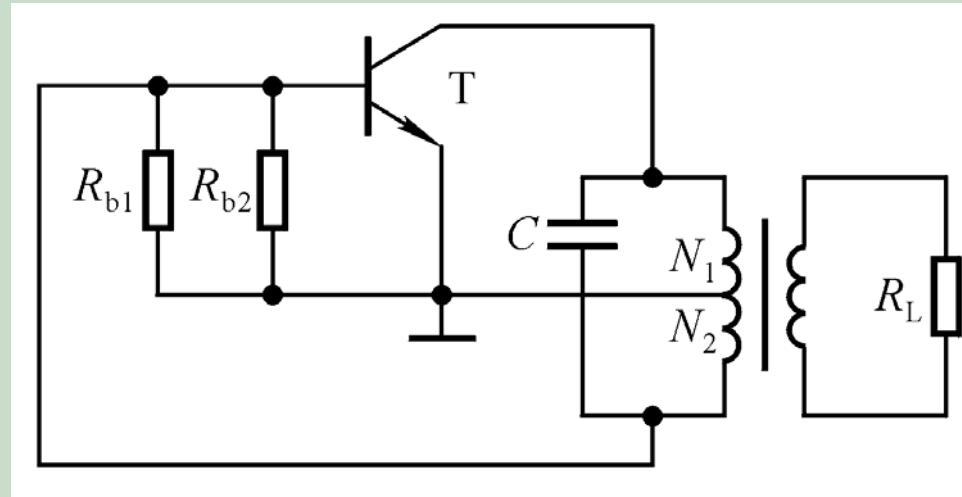
三个端点的相位关系为：

若电感中间抽头交流接地，
则首、尾端相位相反；

若电感首端或尾端交流接地，
则另两端点相位相同。



电路的交流通路如图，可以看出满足相位条件；幅值条件在BJT的 β 及 Q 值一定条件下容易满足，故该电路能够起振。其振荡频率为：



$$f_o \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L'C}}$$

其中 L' 为谐振回路等效电感。

$$L' = L_1 + L_2 + 2M \quad (M \text{ 为 } L_1、L_2 \text{ 间互感})$$

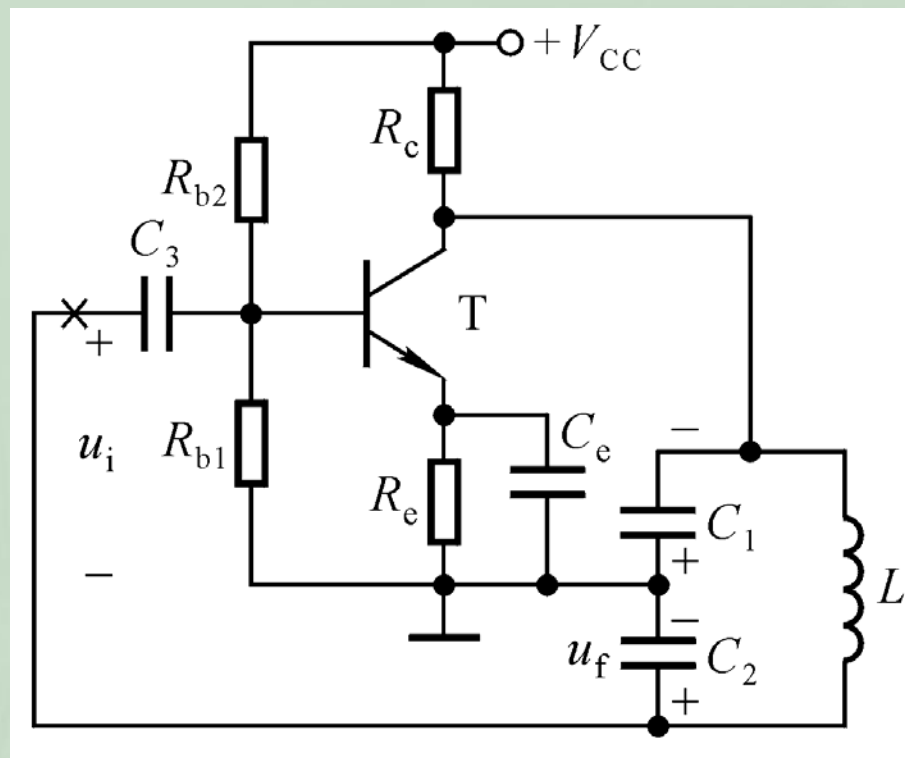
该电路常用于需经常改变振荡频率的场合，它可以通过改变电容容量实现频率的改变。

4、电容反馈式振荡电路

由于电感反馈式电路中反馈电压取自电感，使得输出波形中高次谐波分量增多，波形变坏。如果将反馈电压取自电容，则可使输出波形得到改善（容抗随频率升高而减小）；按该思想设计的电路称为**电容三点式振荡电路**。如图。

该电路是将电感三点式中的电感和电容的位置互换，并增加 R_C 构成。

该电路的相位满足正反馈条件；幅值条件取值合适也容易满足。故该电路可以振荡。

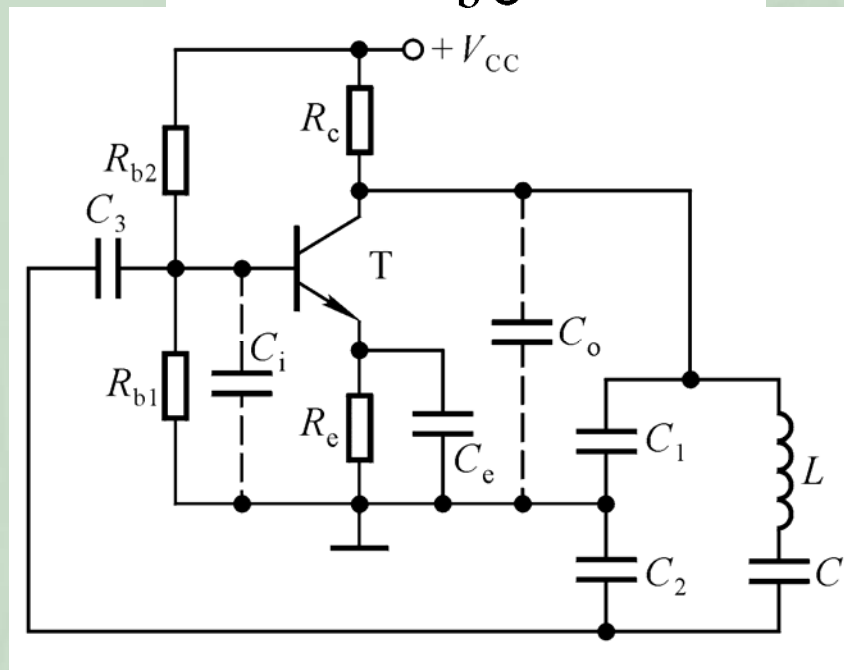
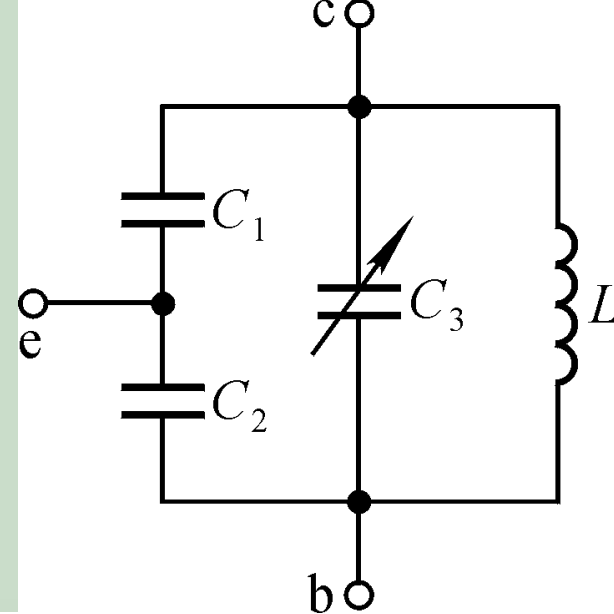


该电路振荡频率为：

$$f_o \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1 // C_2}}$$

由于反馈电压取自 C_2 ，并且谐波量少。输出波形较好。

如果在 L 回路中串入一小电容 C ，且 $C \ll C_1, C_2$ ，可使电路产生大于100MHz的振荡频率，并使输出稳定性大大增强。这种电路称为改进型电容三点式正弦波振荡电路。



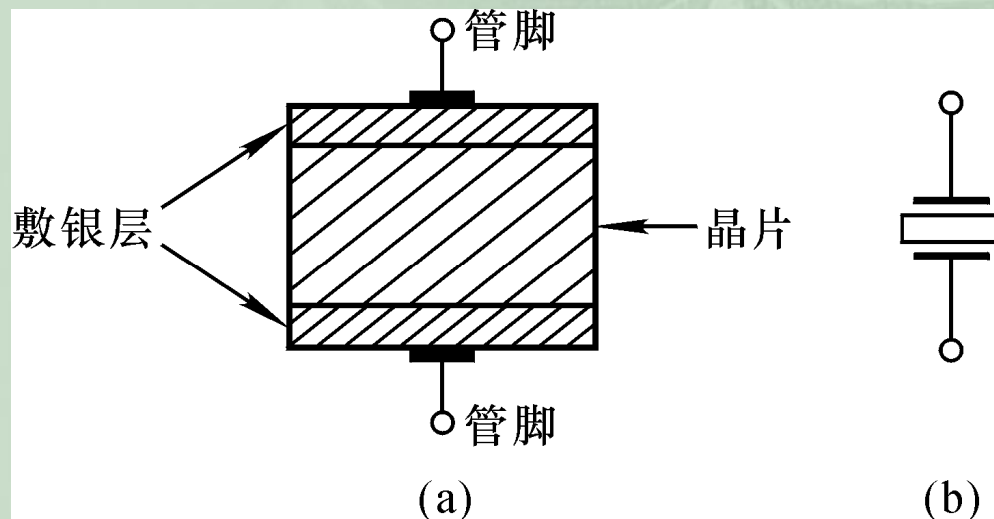
分析以共基放大电路为基础的振荡电路工作原理。

二、石英晶体正弦波振荡电路

LC 振荡电路虽可以产生较高频率正弦波和较好的稳定度，但其值有时会受到温度影响和制造工艺的限制。在实际通信电路和数字电路中要求高频率和高稳定性的振荡器，此时一般采用石英晶体振荡器。

石英晶体振荡电路是用石英晶体取代 LC 振荡电路中的 L 、 C 元件组成的正弦波振荡电路，其频率稳定度达 $10^{-9}\sim 10^{-11}$ 。

石英晶体的稳定性来自于所采用的石英晶体，其成分是 SiO_2 单晶体，在其两对应表面敷银并接上电极，封装后便形成石英晶体元件。



1、压电效应和压电振荡

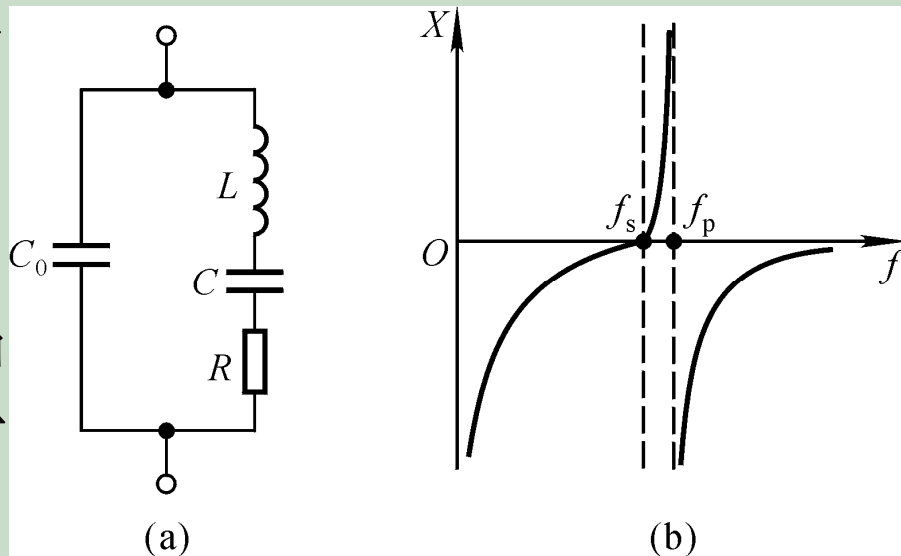
石英晶体之所以能做振荡电路是源于它的压电效应。在石英晶体两个极板间施加电场时，它将会产生一定的机械变形，而这种机械变形又会产生电场，这种物理现象称为**压电效应**。

如果在极板间施加交变电场，则晶体就会产生机械振动，同时机械振动又会产生交变电场，但其振幅都非常小。当外加交变电场的频率为某一特定值时，振幅会骤然增大，产生共振，称之为**压电振荡**。这一特定频率就是石英晶体的**固有频率**（由晶体尺寸决定），也称**谐振频率**。



2、等效电路和频率特性

石英晶体的等效电路如图所示。当石英晶体不振动时，可等效为一个平板电容 C_0 ，称为静态电容；其值决定于晶片的几何尺寸和电极面积，一般约为几到几十皮法。

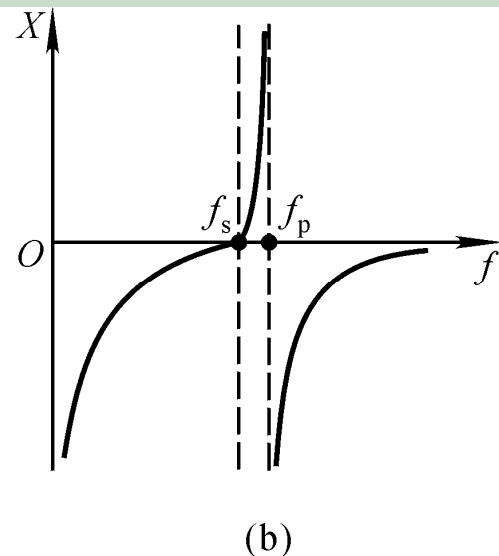
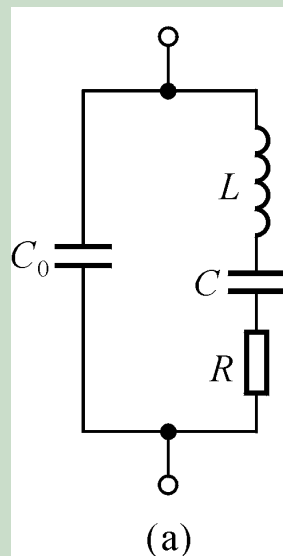


当晶片振动时，机械振动的惯性等效为电感 L ，其值为几毫亨到几十毫亨。晶片的弹性等效为电容 C ，其值仅为0.01到0.1pF，因此 $C \ll C_0$ 。晶片的摩擦损耗等效为电阻 R ，其值约为100 Ω ，理想情况下 $R=0$ 。



当等效电路中的 L 、 C 、 R 支路产生串联谐振时，该支路呈纯阻性，等效电阻为 R ，谐振频率

$$f_s \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



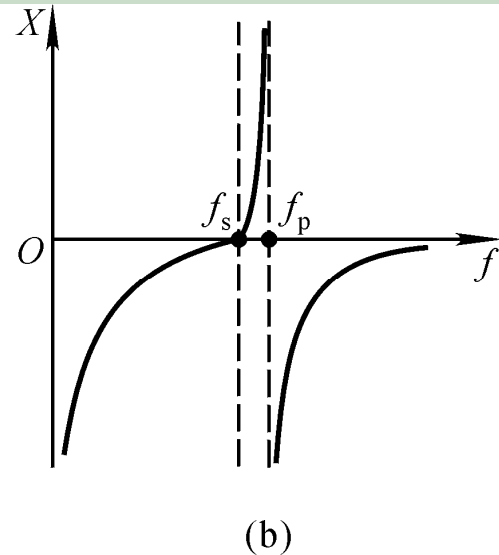
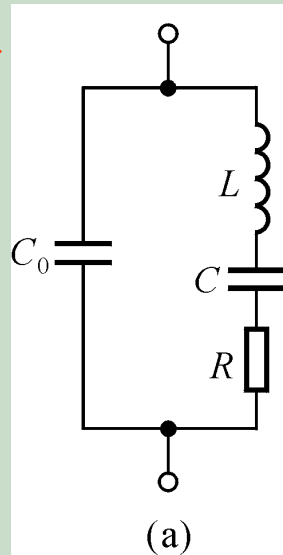
谐振频率下整个网络的电抗等于 R 并联 C_0 的容抗，因 $R \ll \omega_0 C_0$ ，故可以近似认为石英晶体也呈纯阻性，等效电阻为 R 。

当 $f < f_s$ 时， C_0 和 C 电抗较大，起主导作用，石英晶体呈容性。

当 $f > f_s$ 时， L 、 C 、 R 支路呈感性，将与 C_0 产生并联谐振，石英晶体又呈纯阻性，谐振频率：

$$f_P \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C//C_o)}} = f_s \sqrt{1 + \frac{C}{C_o}}$$

由于 $C \ll C_o$ ，所以 $f_p \approx f_s$ 。



当 $f > f_p$ 时，电抗主要决定于 C_o ，石英晶体又呈容性。因此，石英晶体电抗的频率特性如图所示，只有在 $f_s < f < f_p$ 的情况下，石英晶体才呈感性；并且 C 和 C_o 的容量相差愈悬殊， f_s 和 f_p 愈接近，石英晶体呈感性的频带愈狭窄。

根据品质因数的表达式：

$$Q \approx \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

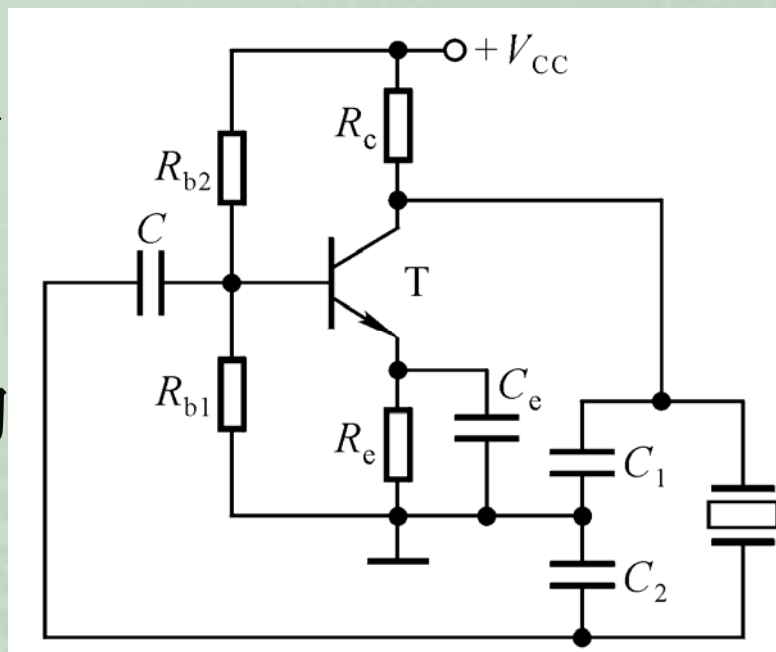
由于 C 和 R 的数值都很小， L 数值很大，所以 Q 值高达 $10^4 \sim 10^6$ 。

因为振荡频率几乎仅决定于晶片的尺寸，所以其稳定度 $\Delta f / f_0$ 可达 $10^{-6} \sim 10^{-8}$ ，一些产品甚至高达 $10^{-10} \sim 10^{-11}$ 。而即使最好的 LC 振荡电路， Q 值也只能达到几百，振荡频率的稳定度也只能达到 10^{-3} 。因此，石英晶体的选频特性是其它选频网络不能比拟的。

3、石英晶体正弦波振荡电路

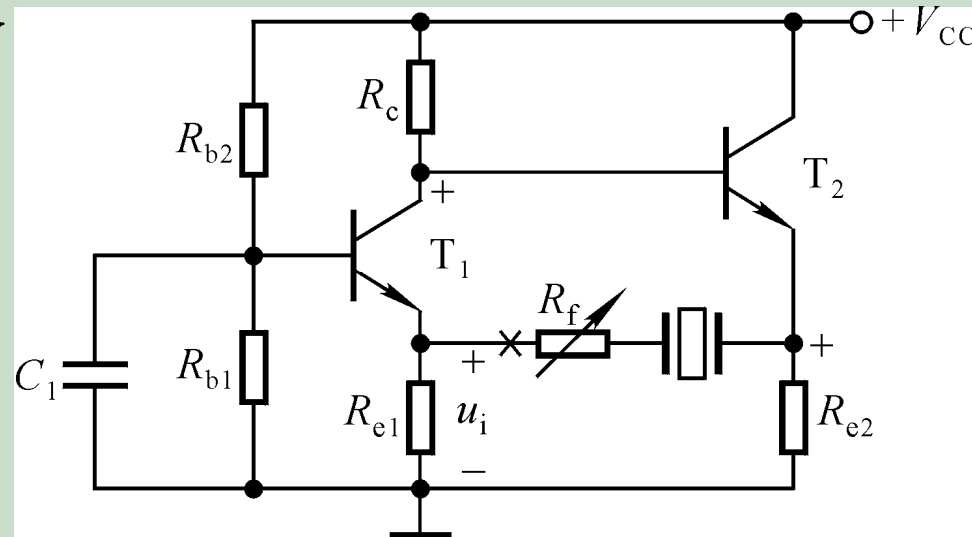
1) 并联型石英晶体正弦波振荡器

电容 C_1 和 C_2 与石英晶体中的 C_0 并联，总容量大于 C_0 ，当然远大于石英晶体中的 C ，所以电路的振荡频率等于石英晶体的并联谐振频率 f_p 。



2) 串联型石英晶体振荡电路

如图所示为串联型石英晶体振荡电路。电容 C_1 为旁路电容，对交流信号可视为短路。电路的第一级为共基放大电路，第二级为共集放大电路。

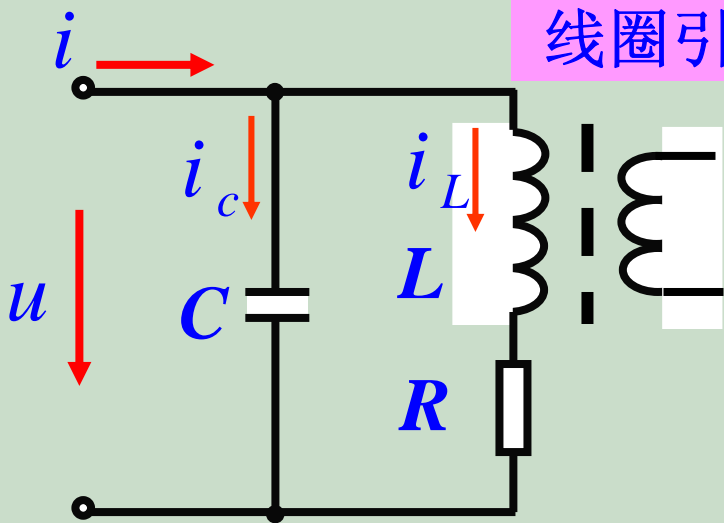


若断开反馈，给放大电路加输入电压，极性上“+”下“-”；则T1管集电极动态电位为“+”，T2管的发射极动态电位也为“+”。只有在石英晶体呈纯阻性，即产生串联谐振时，反馈电压才与输入电压同相，电路才满足正弦波振荡的相位平衡条件。所以电路的振荡频率为石英晶体的串联谐振频率 f_s 。调整 R_f 的阻值，可使电路满足正弦波振荡的幅值平衡条件。

例1: LC并联谐振电路中, $L=1\text{mH}$, $C=0.1\mu\text{F}$,
 $R=10\Omega$, $U=1\text{V}$ 。求谐振时的 f_0 、 I_0 、 I_C 、 I_L 。

LC并联谐振时
回路阻抗最大

谐振信号
通过互感
线圈引出



$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 15924 \text{ Hz}$$

$$Z_0 = \frac{L}{RC} = 1000 \Omega$$

$$I_0 = U/Z_0 = 1/1000 = 1 \text{ mA}$$

$$Z_C = \frac{1}{\omega C} = 100 \Omega$$

$$I_C = U/Z_C = 10 \text{ mA}$$

$$I_L = U/Z_{LR} = 9.95 \text{ mA}$$

结论:并联谐振电路中

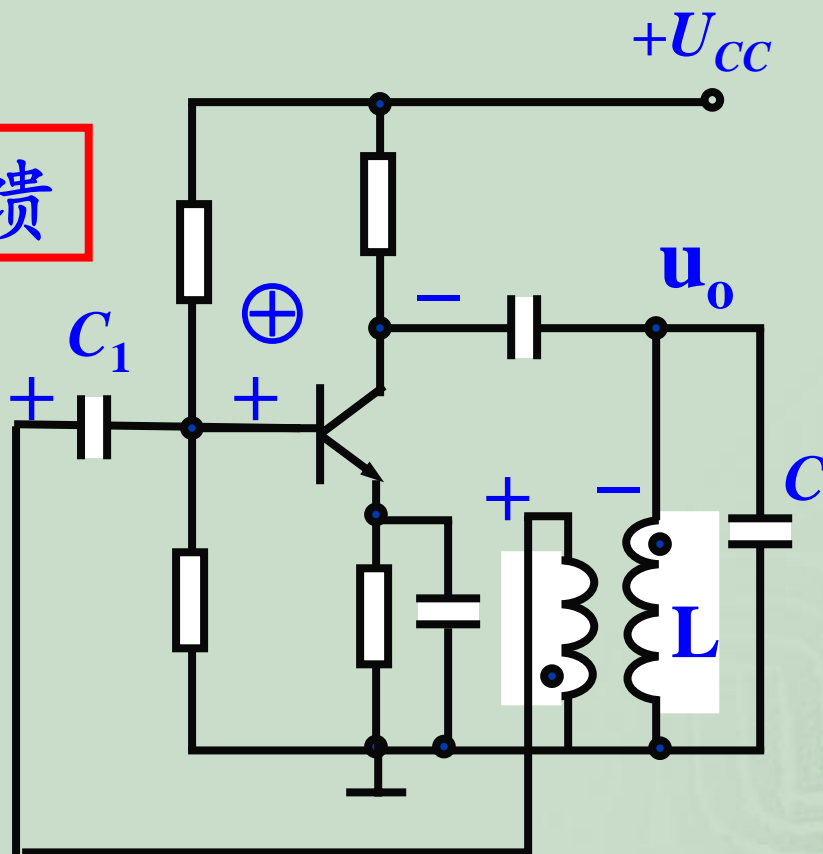
$$I_C \approx I_L \gg I_0$$

LC正弦波振荡器举例

例1:

正反馈

电感反馈式振荡电路



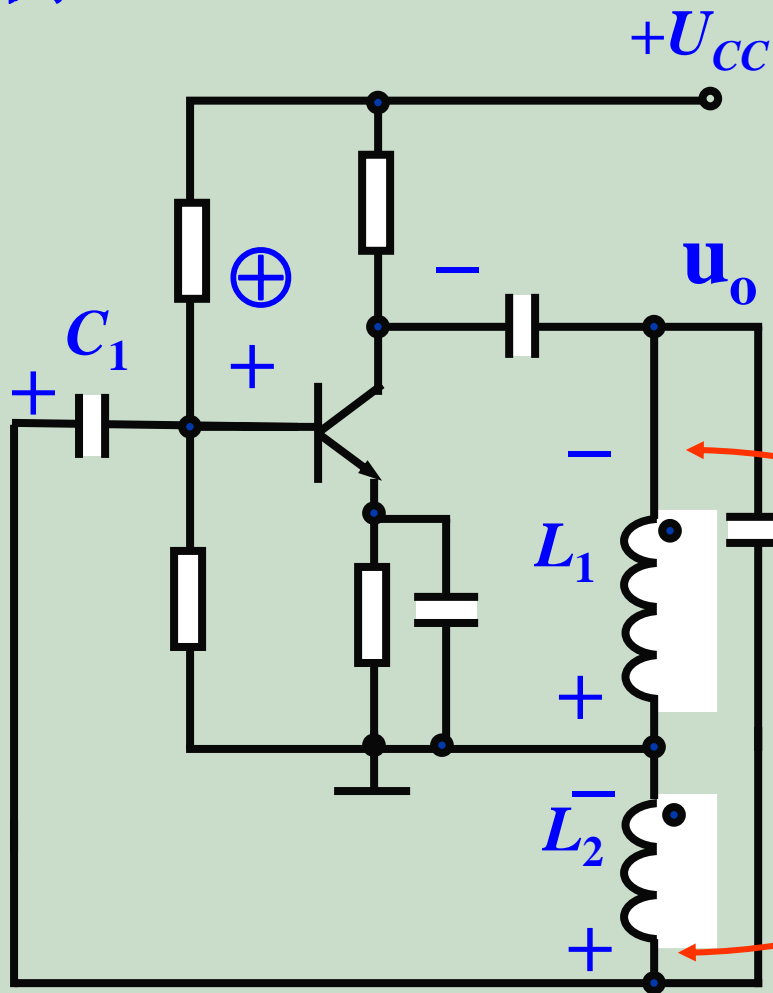
判断是否是正反馈：
用瞬时极性法判断

利用1: 晶体管共射极放大器，集电极电位变化与基极反相，发射极与基极同相。

利用2: 互感线圈的同极性端电位变化相位相同。

振荡频率: $f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

例2:



振荡频率:

$$f_0 \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_1+L_2+2M)C}}$$

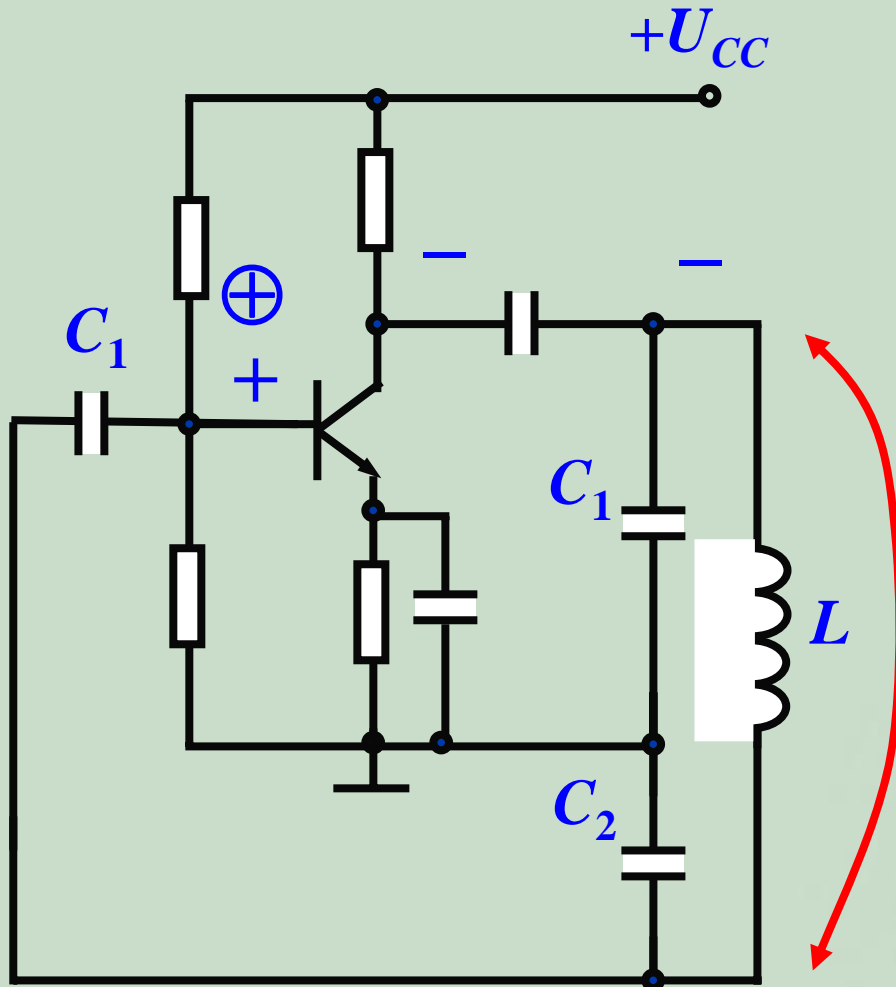
M为两线圈的互感

反相

正反馈

电感三点式振荡电路

例3:



正反馈

振荡频率:

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

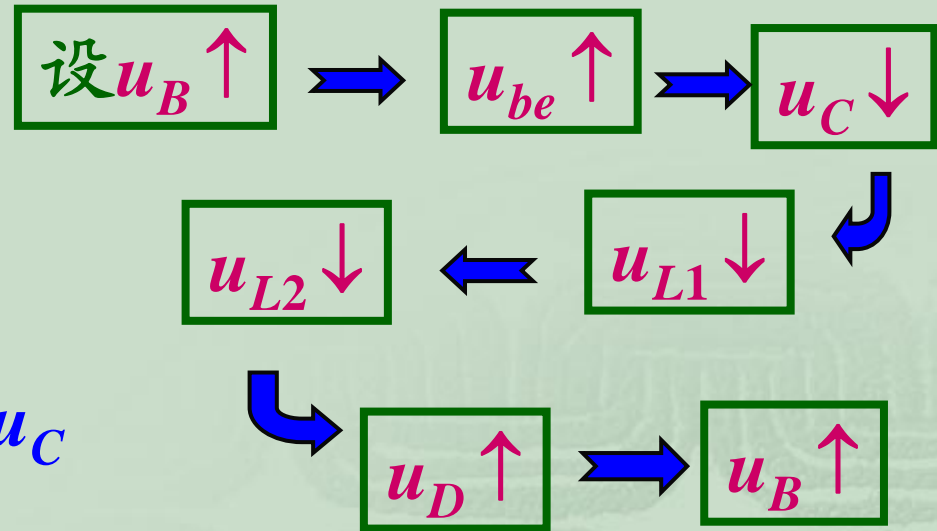
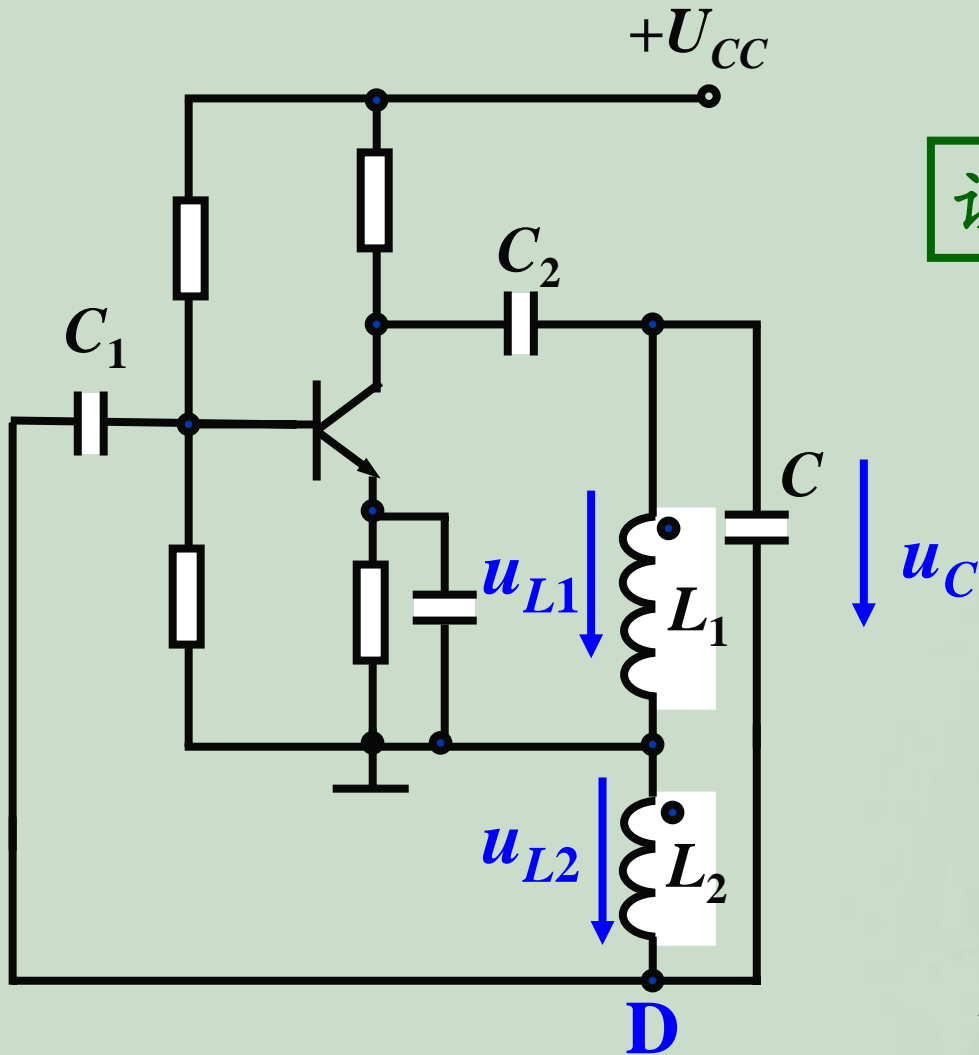
其中:

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

反相

电容三点式振荡电路

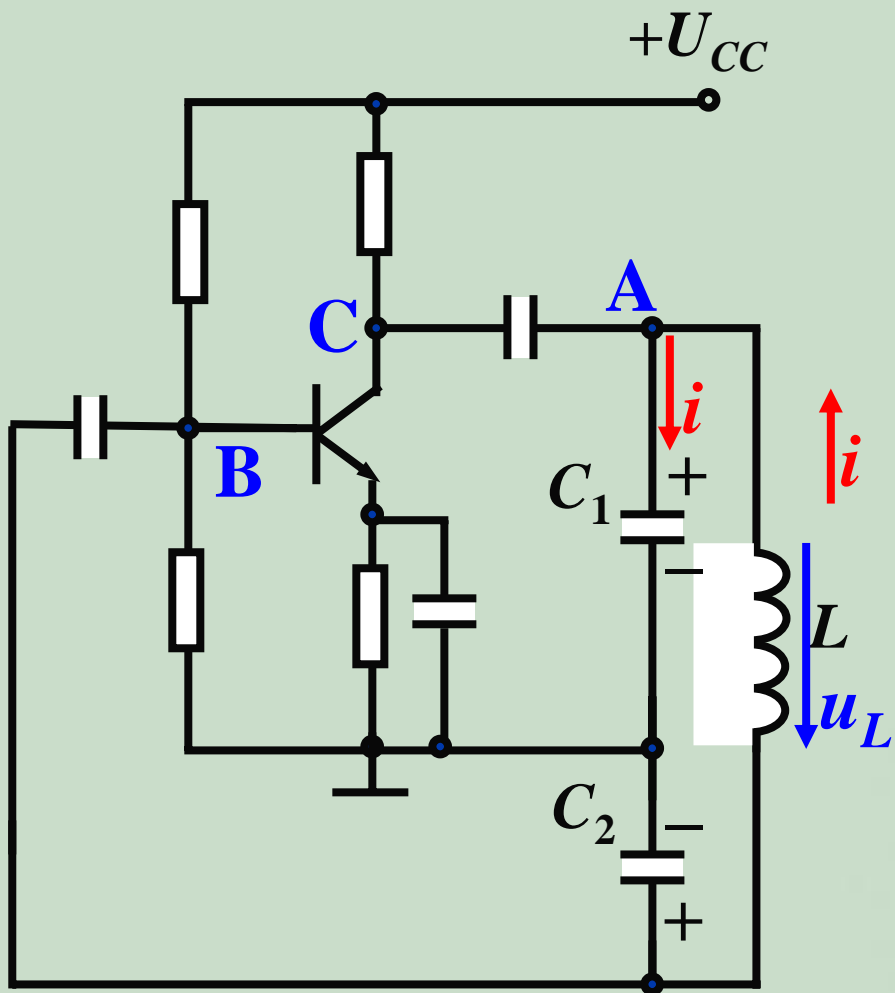
例2:



正反馈

频率由 C 、 L_1 、 L_2 谐振网络决定。

例3:



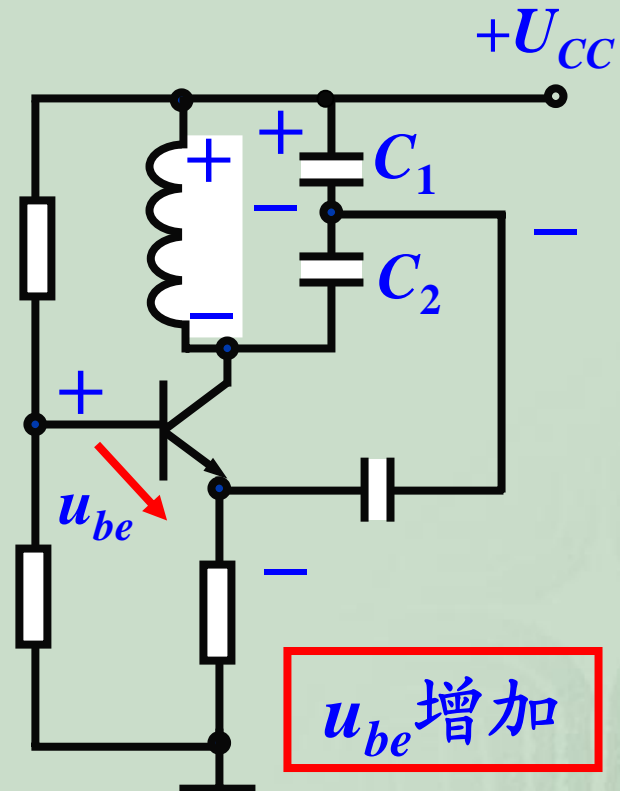
u_{C1} 减小时, u_{C2} 如何变化?
 设 L 、 C_1 、 C_2 组成的谐振网络中的电流为 i , 则

$$i = C_1 \frac{du_{C1}}{dt} = -C_2 \frac{du_{C2}}{dt}$$


正反馈

频率由 L 、 C_1 、 C_2 组成的谐振网络决定。

例4: 共基级电容反馈式振荡电路



u_{be} 增加

正反馈



作业： P463~464
10、11、12

