



第四章 正弦振荡器

- 4. 1 反馈型正弦振荡器基本原理
- 4. 2 振荡器分析预备知识
- 4. 3 正弦振荡器分析举例
- 4. 4 石英晶体正弦波振荡器
- 4. 5 阻容振荡器（RC振荡器）

4.4 石英晶体正弦波振荡器



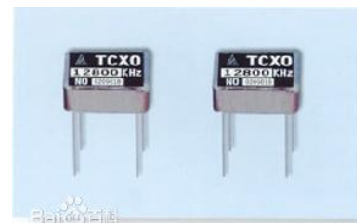
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

4.4.1 石英晶体谐振器

外形呈六角锥体的 SiO_2 晶体，按不同空间角度切割成片状制成的晶体谐振器。



2520石英晶体谐振器



压电效应

压 → 电效应：外力 → 晶体形变 → 符号相反、电荷量相等且与外力大小成正比的电荷。

电 → 压效应：电场 → 机械形变（与外电场垂直方向产生与外电场大小成正比的机械形变）。

多点谐振性

固有谐振频率：基频、泛音频率。

泛音频率与基频近似成奇数倍关系，在这些频率下，大小相同的交变外力产生最强的交变电荷，或大小相同的交变电场产生最强的机械形变。

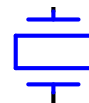
4.4 石英晶体正弦波振荡器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

4.4.2 石英晶体等效电路及参数

石英晶体具有谐振系统的特性，当外加交变电压与石英晶体发生谐振时，电极上产生的交变电荷最多，通过石英晶体的交变电流也就最大，可等效为一个串联谐振电路。



XTAL
电路符号

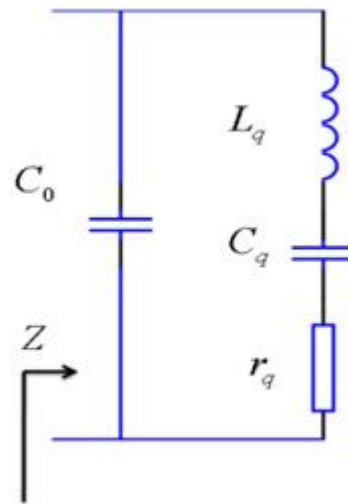
1. 石英谐振器等效电路

L_q ：动态电感，取决于质量，较大，约为 $10^{-3} \sim 10^2 \text{H}$ 。

C_q ：动态电容，很小，取决于弹性， $10^{-4} \sim 10^{-1} \text{pF}$ 。

r_q ：动态电阻，损耗，很小，1至几十欧姆。

C_0 ：支架电容（静态电容），为两敷银层电极，支架电容和引线电容的总和约几个皮法。



等效电路

4.4 石英晶体正弦波振荡器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

2. 特点

①品质因数 Q_q 很高，可达几万到几百万。

$$Q_q = \frac{\sqrt{L_q / C_q}}{r_q}$$

②接入系数很小，外电路参数不稳定对石英谐振器的影响很小。

$$p = \frac{C_q}{C_0 + C_q} \approx \frac{C_q}{C_0} = 10^{-4} \sim 10^{-3}$$

3. 两个谐振频率

串联谐振频率：

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

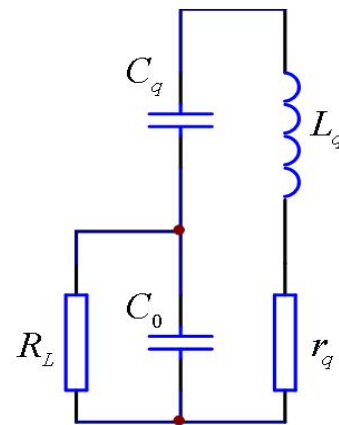
并联谐振频率：

$$\omega_p = \frac{1}{\sqrt{L_q \frac{C_q C_0}{C_q + C_0}}} = \omega_s \frac{1}{\sqrt{\frac{C_0}{C_q + C_0}}} = \omega_s \sqrt{1 + \frac{C_q}{C_0}}$$

ω_s 和 ω_p 相差很小，相差几十到几百Hz。

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

p —接入系数，很小

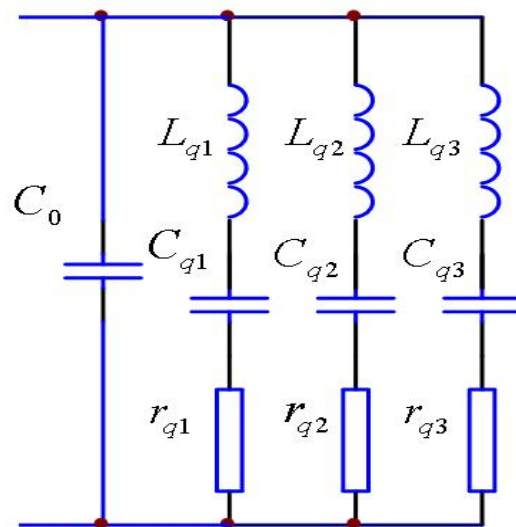


4.4 石英晶体正弦波振荡器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

4. 泛音等效电路



5. 其它参数

①**温度系数**：温度每变化 1°C 所引起的相对频率变化量。

②**拐点温度**：与温度系数最小值对应的温度，制作高稳定的晶振时，要保证晶体工作在拐点温度上。

③**负载电容**：对晶体而言的总外部电容。晶体只有在规定的负载电容下工作，才能保证标称频率的准确性和稳定性。指明负载电容的晶体一般工作在基频模式。

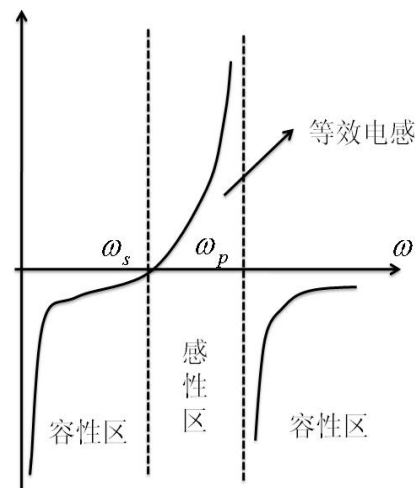
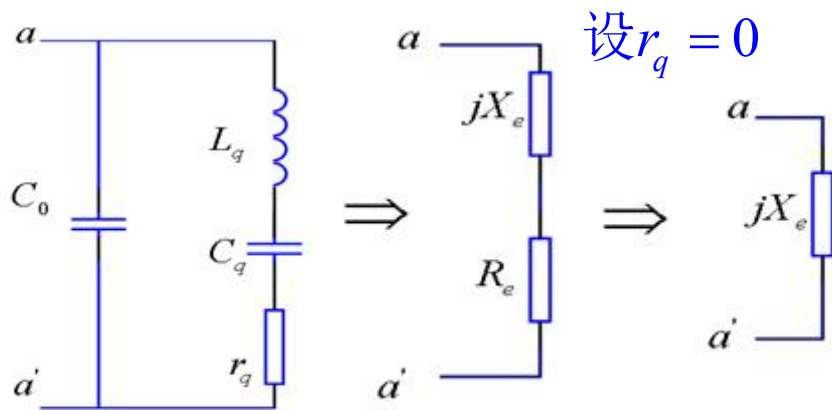
④**泛音次数**：一般为小于9的奇数，指明泛音次数的晶体最好工作在泛音模式。

⑤**激励电平**：指频率相对变化量与流过晶体的电流间的函数关系，是保证晶体管安全工作的重要参数，当晶体处于过激励状态，频率稳定度会明显变坏，过激励情况严重甚至会振碎晶片。

4.4 石英晶体正弦波振荡器



4.4.3 石英晶体的阻抗特性



间隔很小，非常陡峭。石英晶体通常工作在这段频率范围狭窄的电感区，曲线的斜率大，利于稳频。

电抗曲线

(1) $\omega > \omega_p$, 电抗呈容性

(2) $\omega_s < \omega < \omega_p$, 电抗呈感性

$$L_e = -\frac{1}{\omega(C_0 + C_q)} \frac{1 - \omega_s^2 / \omega^2}{1 - \omega_p^2 / \omega^2}$$

(3) $\omega < \omega_s$, 电抗呈容性

(4) $\omega = \omega_p$, $Z_e \rightarrow \infty$, 并联谐振

(5) $\omega = \omega_s$, $Z_e = 0$, 串联谐振

$$\begin{aligned} Z_e = jX_e &= \frac{1}{j\omega C_0} // \left(\frac{1}{j\omega C_q} + j\omega L_q \right) \\ &= j \left[-\frac{1 - \omega^2 / \omega_s^2}{\omega(C_q + C_0)(1 - \omega^2 / \omega_p^2)} \right] \end{aligned}$$

4.4 石英晶体正弦波振荡器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

晶体谐振器特点总结

(1) 参数 L_q, C_q, C_0 由晶体尺寸决定，由于晶体本身特性稳定，受外界因素（如温度，震动）影响小，非常稳定。

(2) 有非常高的品质因素Q。一般很容易得到数值上万的Q值（而普通线路和回路Q只能达到100~200）。当外部因素变化而引起振荡器环路相位变化时，具有极强的相位补偿能力。

(3) 接入系数非常小，一般为 10^{-3} 数量级，甚至更小。外部电路参数、器件参数的变化几乎对晶体等效LC回路影响极小。

(4) 在工作频率附近阻抗变化率大，有很高的并联谐振阻抗。

所有这些特点决定了晶体谐振器频率稳定度比一般振荡回路要高。

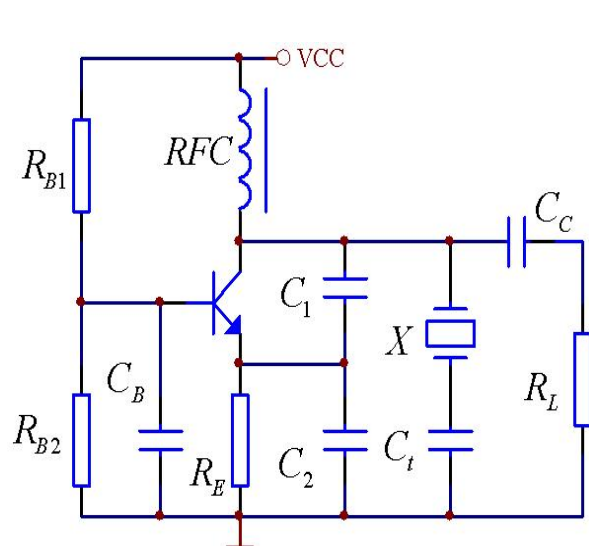
4.4 石英晶体正弦波振荡器



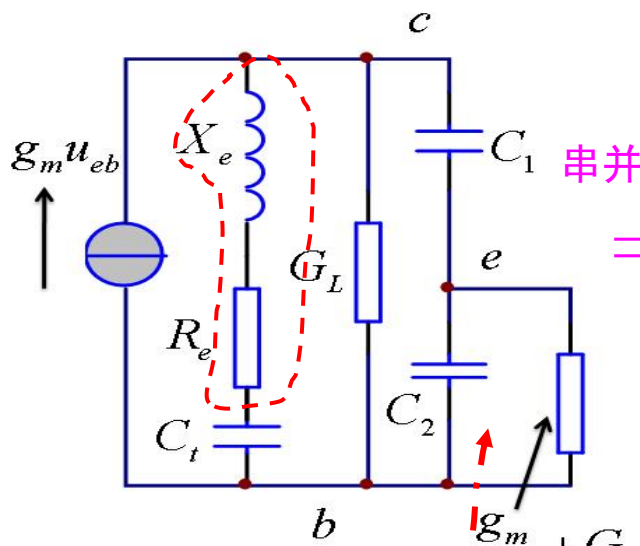
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

4.4.4 石英晶体振荡器 三种用法：并联型，串联型，泛音型。

1. 并联型（L模式）：把晶体管当电感使用，代替电容三点式中的电感。



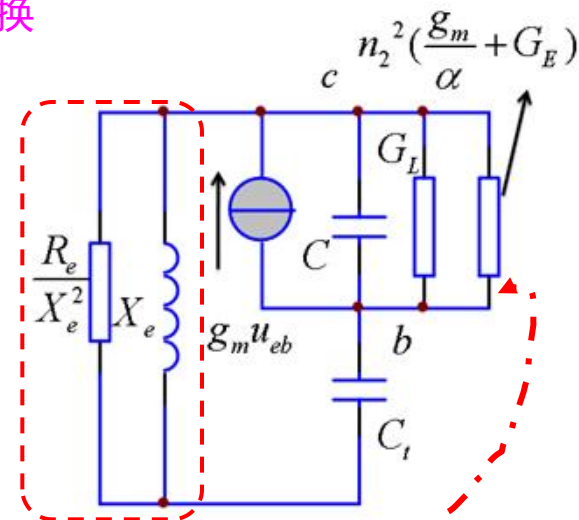
原理电路



交流等效电路

假定： $Q_{*2} = \frac{X_e}{R_e} > 10$

串并转换



电容部分接入

假定： $Q_{*1} = \frac{\omega C_2}{g_m / \alpha + G_E} > 10$

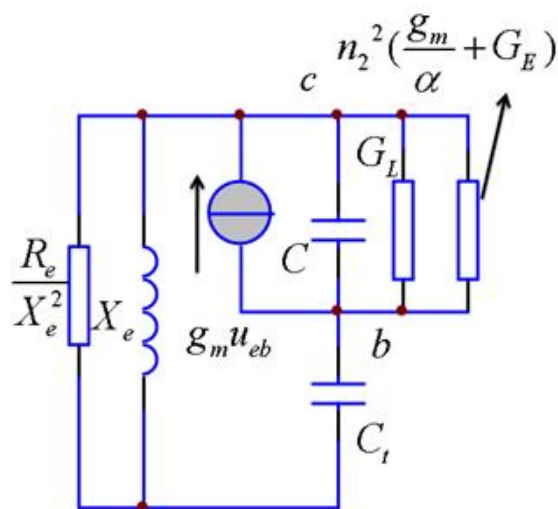
$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

$$n_2 = \frac{C}{C_2}$$

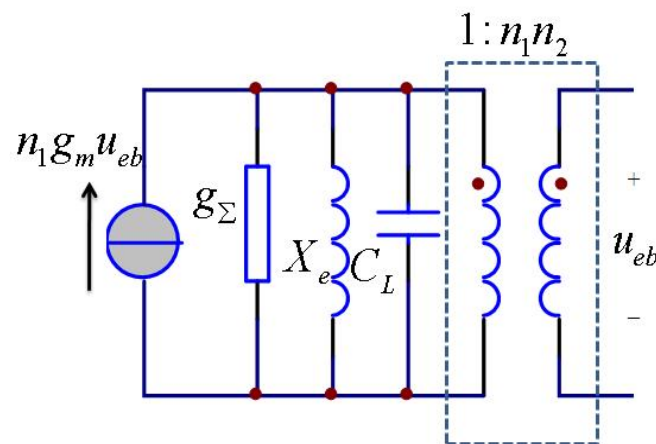
4.4 石英晶体正弦波振荡器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China



受控源
阻抗变换



$$C_L = \frac{C_t C}{C_t + C}$$

$$n_1 = \frac{C_L}{C}$$

$$g_{\Sigma} = n_1^2 [G_L + n_2^2 (g_m / \alpha + G_E)] + \frac{R_e}{X_e^2}$$

①谐振频率

$$u_f = n_1 n_2 \cdot n_1 g_m u_{eb} \left(\frac{1}{g_{\Sigma} + j\omega C_L + \frac{1}{jX_e}} \right) \Rightarrow \dot{T} = \dot{A} \dot{F} = \frac{u_f}{u_{eb}} = \frac{n_1^2 n_2 g_m}{g_{\Sigma} + j(\omega C_L - \frac{1}{X_e})}$$

$$\Rightarrow \varphi_T = -\arctg \frac{\omega C_L - \frac{1}{X_e}}{g_{\Sigma}} \Rightarrow \omega C_L - \frac{1}{X_e} = 0$$

决定实际
振荡频率的方程

4.4 石英晶体正弦波振荡器

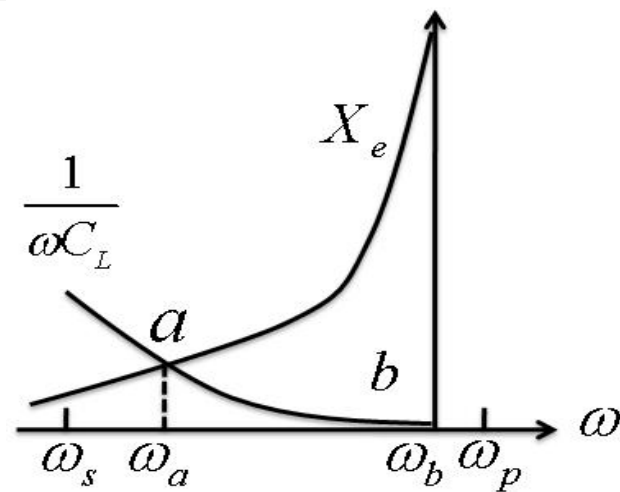


中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

决定实际
振荡频率的方程

$$\omega C_L - \frac{1}{X_e} = 0$$

满足方程的解有a和b两点。可证明，只有在a处
有 $\frac{d\varphi_T}{d\omega} < 0$ ，在b处 $\frac{d\varphi_T}{d\omega} > 0$ ，即只有a点是稳定的



结论：并联型晶体振荡器的振荡频率在串联谐振
频率附近的感性区内。

②起振条件（在振荡频率处）

$$\dot{T} = \frac{n_2 n_1^2 g_m}{g_\Sigma} = \frac{n_2 n_1^2 g_m}{n_1^2 [G_L + n_2^2 (G_E + g_m / \alpha)] + \frac{R_e}{X_e}}$$

$$\begin{aligned} \dot{T} &= \dot{A} \dot{F} = \frac{u_f}{u_{eb}} \\ &= \frac{n_1^2 n_2 g_m}{g_\Sigma + j(\omega C_L - \frac{1}{X_e})} \end{aligned}$$

$$= \frac{n_2 n_1^2 g_m}{n_1^2 [G_L + n_2^2 (G_E + g_m / \alpha)] + \omega^2 C_L^2 R_e} > 1$$

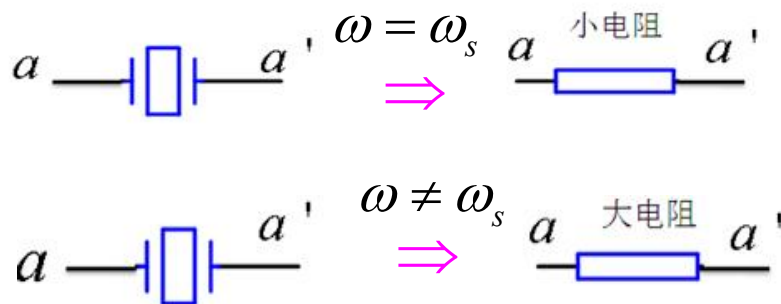
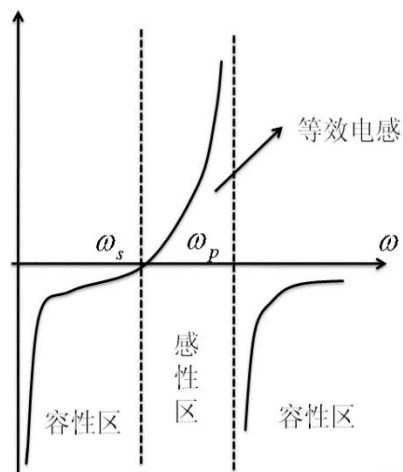
$$\Rightarrow g_m > \frac{(C_1 + C_2)^2}{C_1 C_2} G_L + \frac{C_1}{C_2} G_E + \omega^2 C_1 C_2 r_q = g_{m,\min}$$

4.4 石英晶体正弦波振荡器



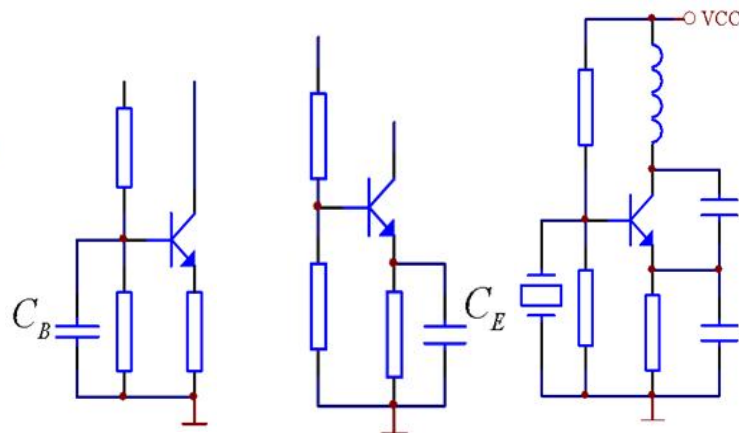
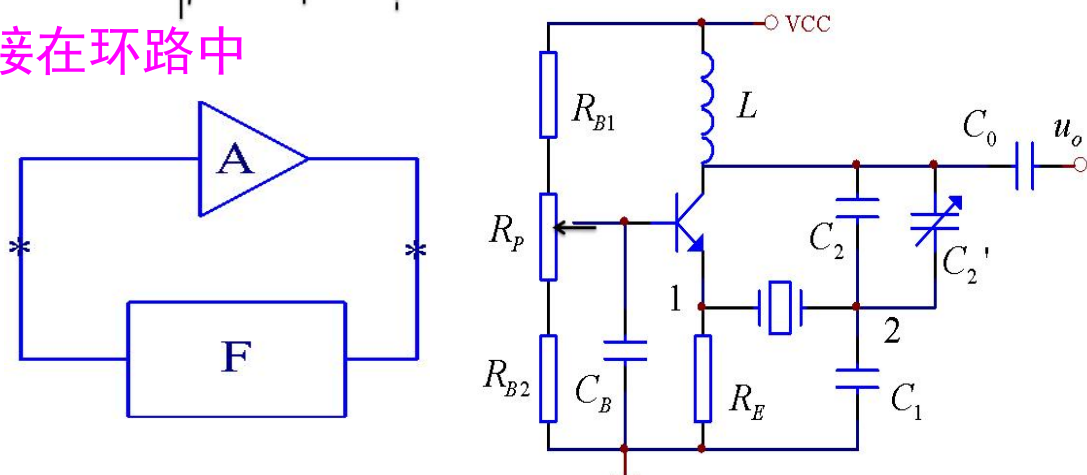
中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

2. 串联型 (r模式)：把晶体管当成一个对频率敏感的开关，接在环路任一处或放大器的偏置电阻旁代替高频旁路电容。



替代高频旁路电容

接在环路中



串联型晶振的振荡频率就是晶体谐振器的串联谐振频率 ω_s 。

4.4 石英晶体正弦波振荡器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

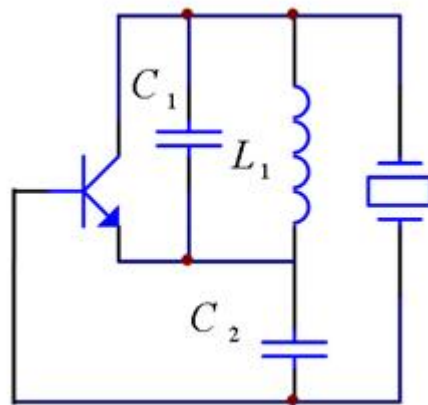
3. 泛音模式：基音晶体的标称频率与晶体的厚度近似成反比关系，谐振频率越高，晶片越薄，Q值低，加工困难，易老化，容易振碎。实际应用中，多采用泛音模式。

泛音模式与基音模式的区别在于多了一个**抑制电路**，其作用是抑制低次泛音（包括基音）和其它不需要的高次泛音（低次泛音更容易满足幅度条件）。抑制电路是通过复合电抗代替三点式电路中的一个电抗来实现的。

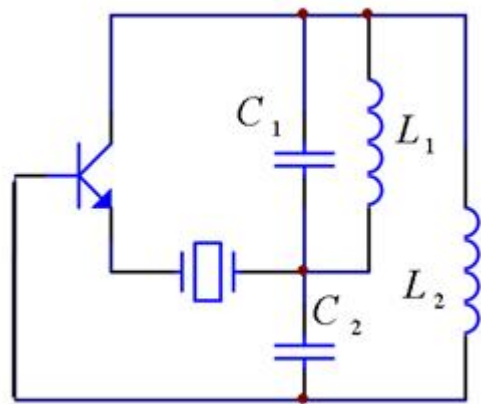
复合电抗 L_1C_1

$$j\omega C_1 + \frac{1}{j\omega L_1} = j(\omega C_1 - \frac{1}{\omega L_1})$$
$$\Rightarrow \omega C_1 - \frac{1}{\omega L_1} > 0, \text{即 } \omega > \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \text{ 呈容性}$$

$$\Rightarrow \omega C_1 - \frac{1}{\omega L_1} < 0, \text{即 } \omega < \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} \text{ 呈感性}$$



并联型



串联型

若要得到5次泛音频率，使 L_1C_1 回路的谐振频率介于3次泛音频率和5次泛音频率之间，对3次泛音及基音， L_1C_1 回路呈感性，不满足相位平衡条件，对7次以上的高次泛音， L_1C_1 回路呈现很大的等效电容 C_1' ，幅值平衡条件难以满足。若 C_1' 与耦合电容等数量级时，不可看作振荡电路，容抗较小，不能振荡。

4.4 石英晶体正弦波振荡器



中国科学技术大学
University of Science and Technology of China

- 作业：
 - 4.17（图（c）（d）有错误需指出）