

## 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

## 4.4 石英晶体振荡器

石英晶体振荡器是利用石英晶体谐振器作滤波元件构成的振荡器，其振荡频率由石英晶体谐振器决定。

石英晶体振荡器有很高的标准性和极高的品质因数，因此石英晶体具有较高的频率稳定度。

### 一、石英晶体谐振器

#### 1. 物理特性

石英晶体之所以能成为电的谐振器，是由于它具有压电效应。

- **压电效应（正压电效应）** ————当晶体受外力作用（如伸缩、切变、扭曲等）而变形时，就在它对面的表面上产生正负电荷，呈现出电压。

## 4.4 石英晶体振荡器

● **反压电效应**————当晶体两面加电压时，晶体又会发生机械形变。

→ 交变电压 → 周期性机械震动 → 交变电压

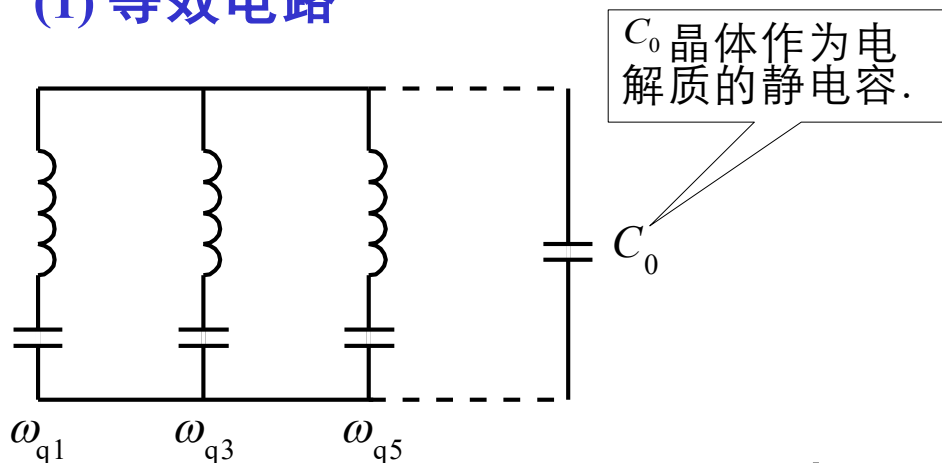
当所加电压频率等于晶体本身固有的机械震荡频率时，压电效应最明显，即产生交变电压与机械振动共振，晶体振荡器正是基于这一原理。

## 4.4 石英晶体振荡器

## 一、石英晶体谐振器

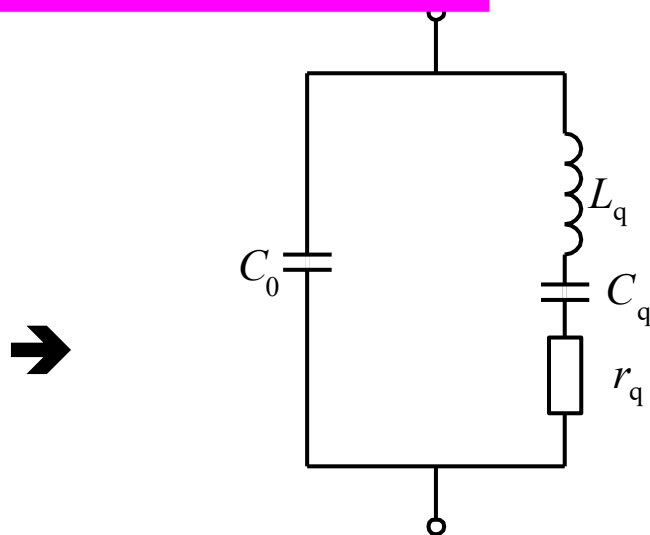
## 1. 等效电路及阻抗特性

## (1) 等效电路



(a) 基频及各次泛音等效电路

由于各次谐振频率相隔较远，互相影响很小，因此在具体应用中，只需考虑某一频率附近的电路特性，如图（b）所示。



(b) 谐振频率附近的等效电路

由图可知，晶体有两个谐振频率：串联谐振频率和并联谐振频率。

与通常的谐振回路相比，晶体的参数  $L_q$ 、 $C_q$  与一般的电感、电容有很大不同， $L_q$  这里一般很大， $C_q$  很小。

## 4.4 石英晶体振荡器

## 一、石英晶体谐振器

## 1. 等效电路及阻抗特性

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

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

由于  $C_0 \gg C_q$ ,  $f_q$  与  $f_0$  非常接近。

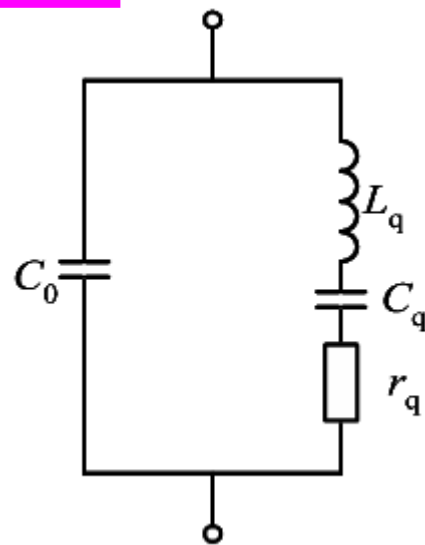
当  $C_q / C_0 \ll 1$

$$f_0 = f_q \left(1 + \frac{1}{2} \frac{C_q}{C_0}\right)$$

相对频差为:  $\frac{\Delta f}{f_q} = \frac{f_0 - f_q}{f_q} \approx \frac{C_q}{2C_0}$

接入系数:  $p = \frac{C_q}{C_q + C_0} \approx \frac{C_q}{C_0} \ll 1$

品质因素:  $Q_q = \frac{\omega_q L_q}{r_q}$  很大



## 4.4 石英晶体振荡器

### 一、石英晶体谐振器

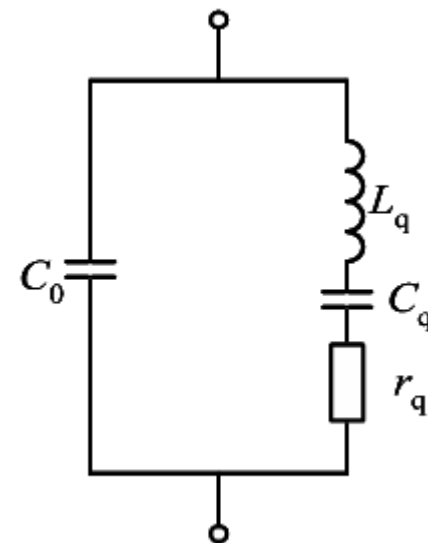
#### 1. 等效电路及阻抗特性

等效电路阻抗的一般表示式为

$$Z_e = \frac{-j \frac{1}{\omega C_0} \left[ r_q + j \left( \omega L_q - \frac{1}{\omega C_q} \right) \right]}{r_q + j \left( \omega L_q - \frac{1}{\omega C_q} \right) - j \frac{1}{\omega C_0}}$$

在忽略  $r_q$  后，上式可化简为

$$Z_e = jX_e \approx -j \frac{1}{\omega C_0} \frac{1 - \frac{\omega_q^2}{\omega^2}}{1 - \frac{\omega_0^2}{\omega^2}}$$



## 4.4 石英晶体振荡器

### 一、石英晶体谐振器

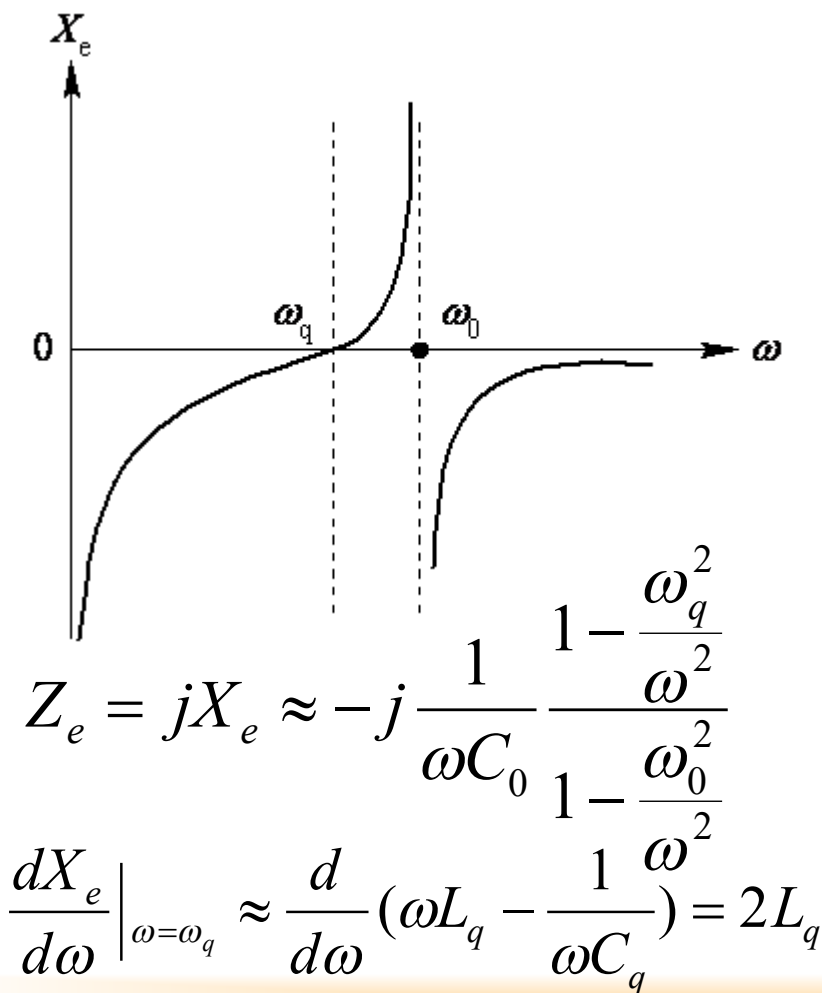
#### 1. 等效电路及阻抗特性

当  $f < f_q$  或  $f > f_0$  时，回路呈容性；  
当  $f = f_q$  时，回路呈感性。

**晶体振荡器的特点：**

- (1) 晶体的谐振频率  $f_q$  很稳定，因为晶体参数由其尺寸决定，受外界因素影响小；
- (2) 品质因素很大；
- (3) 接入系数很小
- (4) 晶体在工作频率附近阻抗变化率很大，有很高的并联谐振阻抗。

**应用：**除了可作振荡器的振荡回路外，还可以频率窄带滤波器



## 4.4 石英晶体振荡器

---

### 二、石英晶体振荡器频率稳定度

石英晶体谐振器与一般的谐振回路相比具有优良的特性，具体表现为：

- (1) 石英晶体谐振器具有很高的标准性。
- (2) 石英晶体谐振器与有源器件的接入系数  $p$  很小，一般为  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 。
- (3) 石英晶体谐振器具有非常高的  $Q$  值。



## 4.4 石英晶体振荡器

### 三、晶体振荡器电路

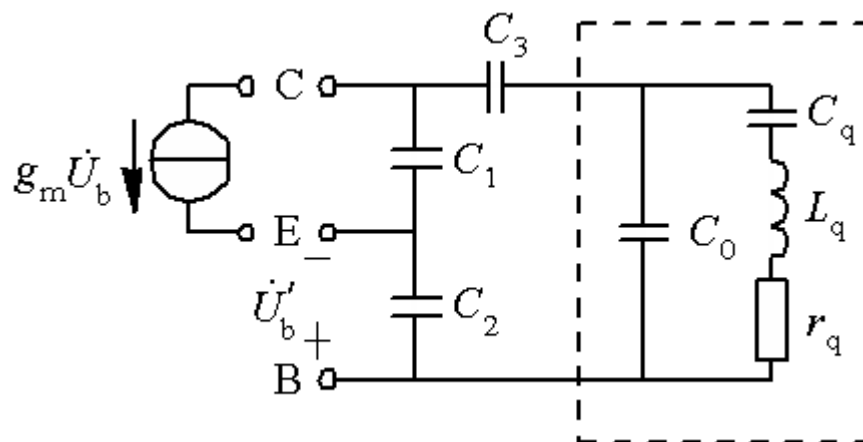
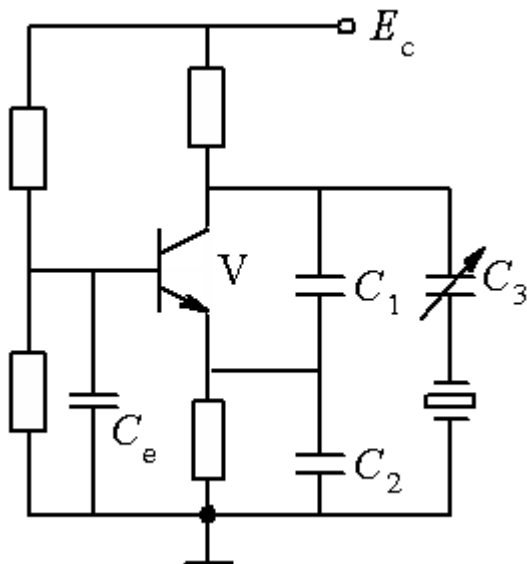
#### 晶体振荡器

串联型

并联型

#### 1. 并联型晶体振荡器

##### ① 皮尔斯振荡器



## 4.4 石英晶体振荡器

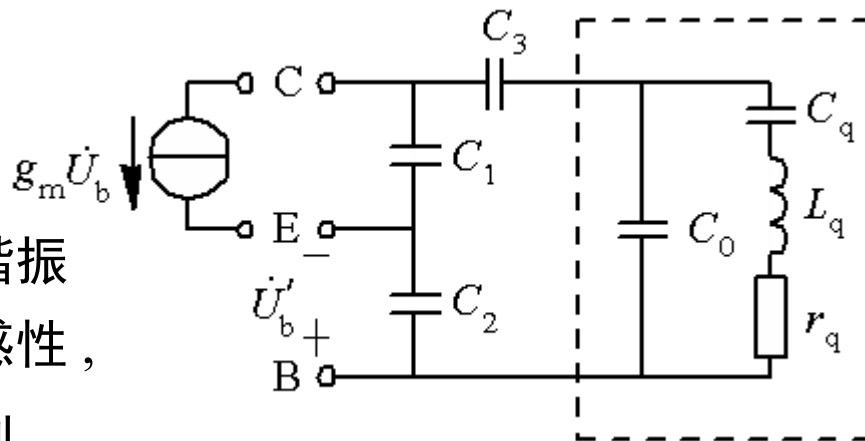
### 三、晶体振荡器电路

#### 1. 并联型晶体振荡器

##### ① 皮尔斯振荡器

当振荡器的振荡频率在晶体的串联谐振频率和并联谐振频率之间时晶体呈感性，该电路满足三端式振荡器的组成原则，而且该电路与电容反馈的振荡器对应，通常称为**皮尔斯 (Pierce) 振荡器**。

皮尔斯振荡器的工作频率应由  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$  及晶体构成的回路决定



皮尔斯振荡器

设外部电容为  $C_L$ ，由晶体电抗  $X_e$  与外部电容相等的条件，

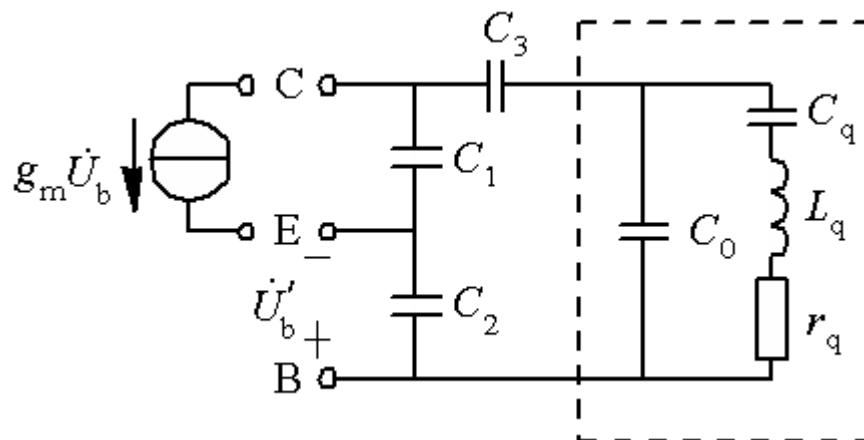
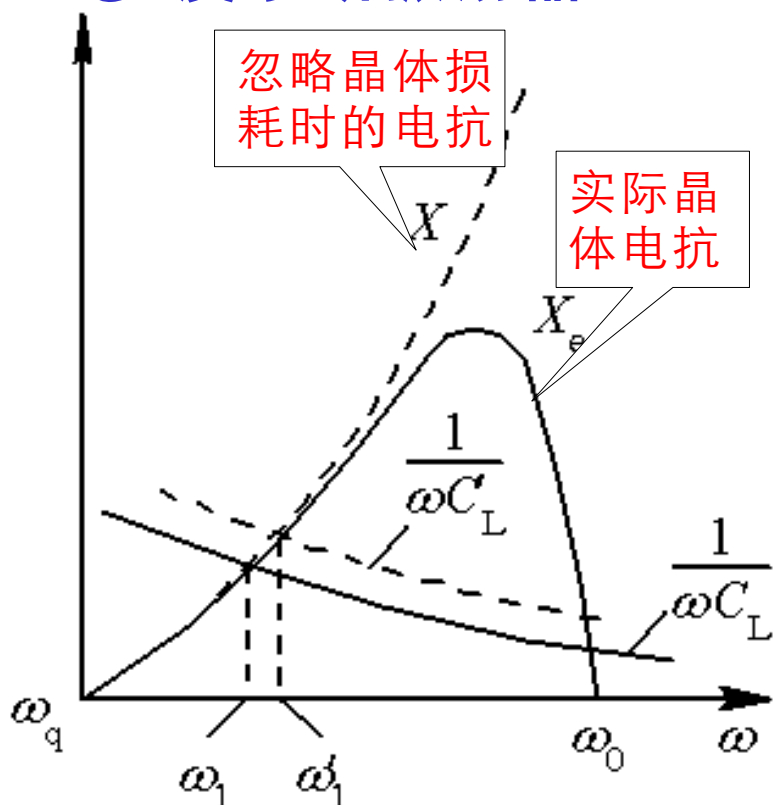
$$\text{则: } X_e - \frac{1}{\omega_1 C_L} = 0 \quad \frac{1}{C_L} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

## 4.4 石英晶体振荡器

### 三、晶体振荡器电路

#### 1. 并联型晶体振荡器

##### ① 皮尔斯振荡器



$$X_e - \frac{1}{\omega_1 C_L} = 0$$

该图中有两个交点，靠近串联谐振频率  $\omega_q$  附近的  $\omega_1$  是稳定工作点。

忽略晶体损耗时的电抗与实际电抗  $X_e$  很接近

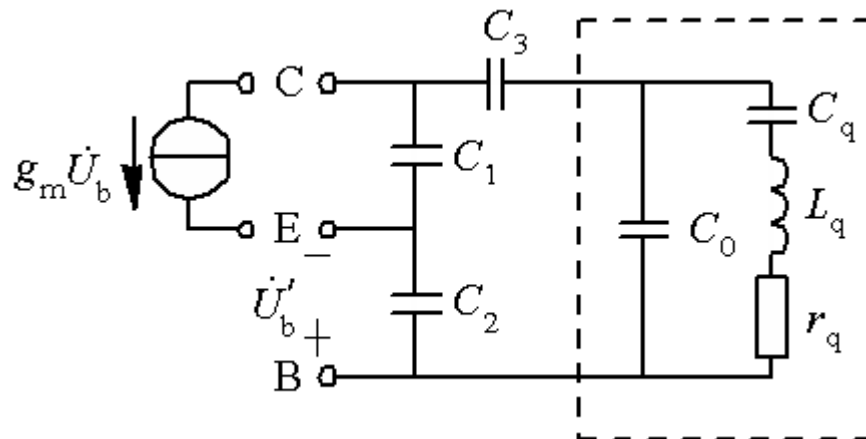
振荡频率  $f_1$  等于包括并联电容  $C_L$  在内的并联谐振频率。

## 4.4 石英晶体振荡器

### 三、晶体振荡器电路

#### ① 皮尔斯振荡器

$C_L$  与晶体静电容  $C_0$  并联，  
引入等效接入系数  $p'$



$$p' = \frac{C_q}{C_L + C_0 + C_q} \approx \frac{C_q}{C_L + C_0}$$

$$f_1 = f_q \left(1 + \frac{p'}{2}\right) \quad \text{故改变 } C_L, \text{ 可以微调 } f_1$$

$$\frac{1}{C_L} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}$$

一般电路中  $C_3 \ll C_2, C_1$ ;  
→  $C_L$  主要由  $C_3$  决定

**实际电路中，用与晶体串一小电容  $C_3$  来微调振荡器。**

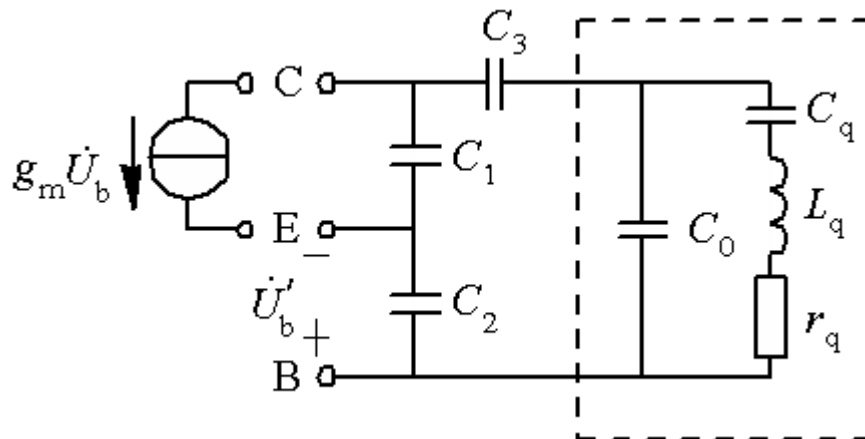
## 4.4 石英晶体振荡器

### 三、晶体振荡器电路

#### 1. 并联型晶体振荡器

##### ① 皮尔斯振荡器

反馈系数  $F$  :  $|F| = \frac{C_1}{C_2}$



晶体的品质因数  $Q_q$  很高  $\rightarrow$  并联谐振电阻  $R_0$  也很高

虽然接入系数  $p$  很小，但等效到晶体管  $c$ 、 $e$  两端的阻抗  $R_L$  仍很高，因此放大器的增益较大，电路容易满足振幅起振条件。

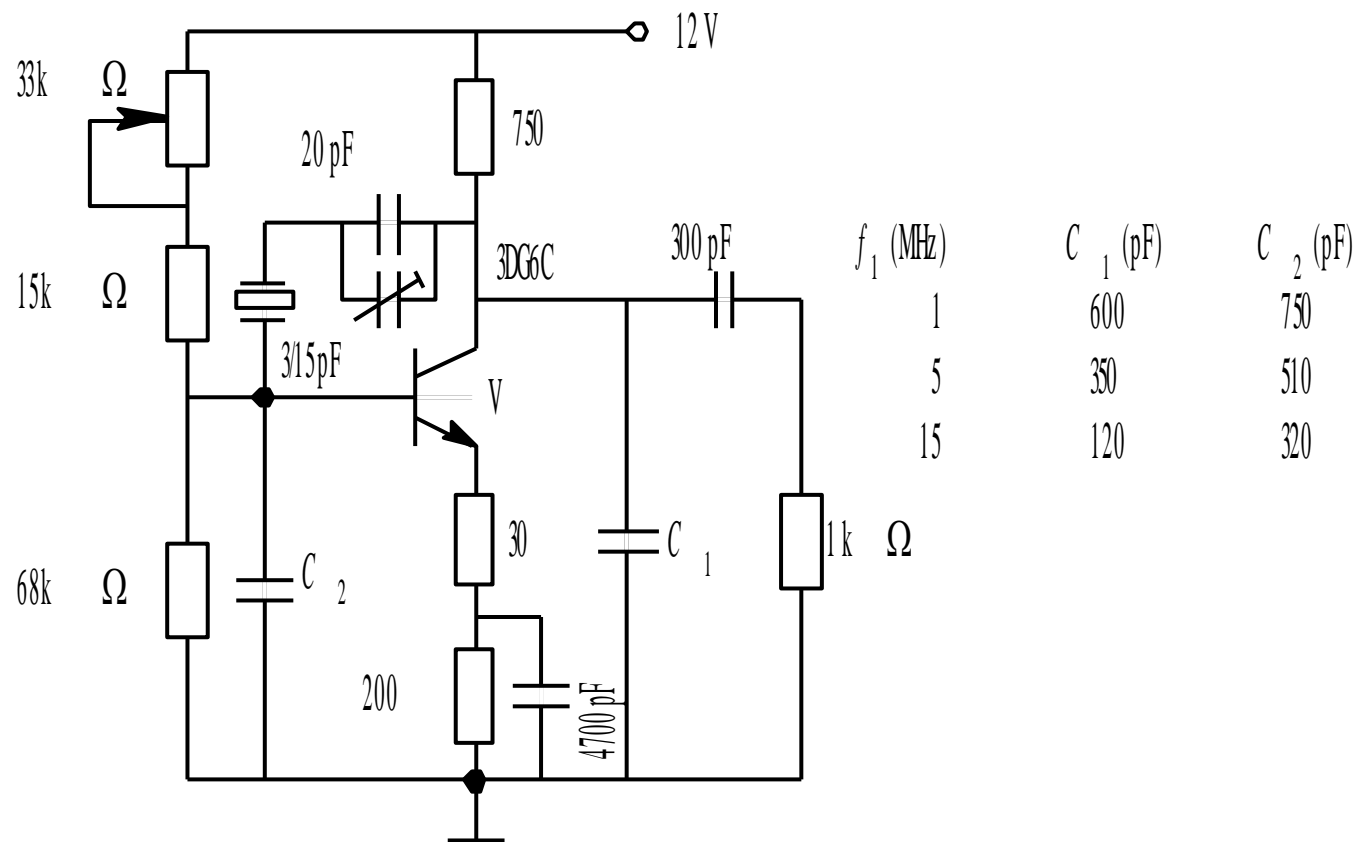


图 4—19 并联型晶体振荡器的实用线路

## 4.4 石英晶体振荡器

### 三、晶体振荡器电路

#### 1. 并联型晶体振荡器

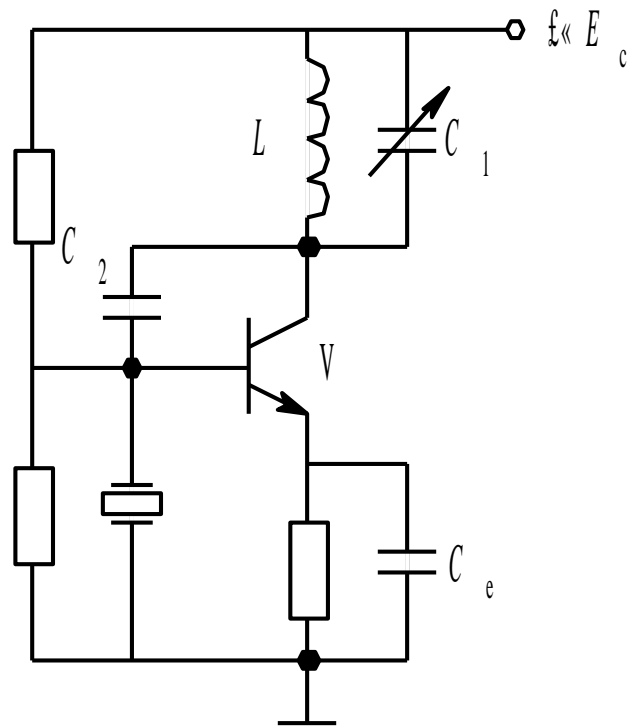
##### ② 密勒振荡器

只要晶体呈感性，即满足三端式振荡器的组成原则。

该电路类似于电感反馈振荡器，晶体与晶体管的低输入阻抗并联，降低了有载  $Q_L$ ，频率稳定度降低。

皮尔斯振荡器的频率稳定度较高，故常用的是皮尔斯振荡器。

当频率较高时，可采用泛音晶体构成。



密勒振荡器

## 4.4 石英晶体振荡器

### 三、晶体振荡器电路

#### 1. 并联型晶体振荡器

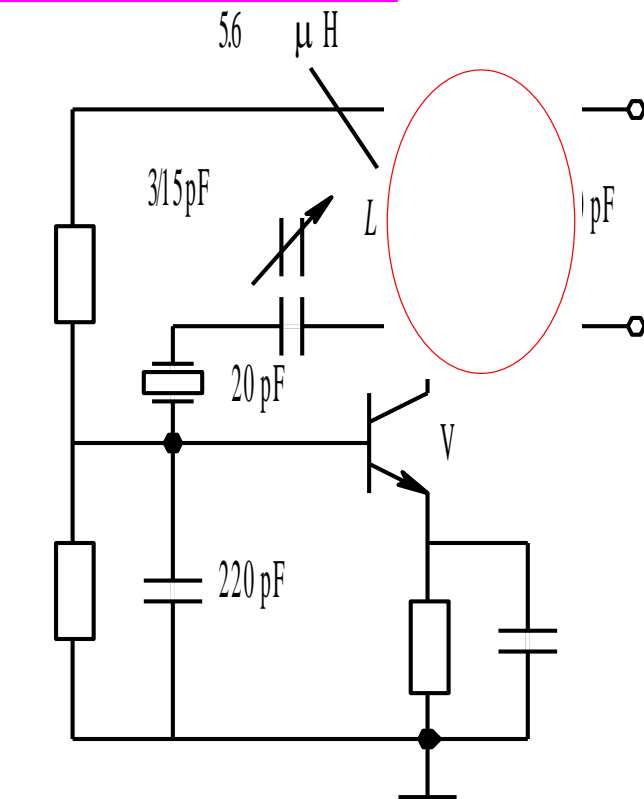
##### ③ 泛音晶体皮尔斯振荡器

问题：如果需要电路工作在 5 次泛音频率上，则 LC 回路的谐振频率应该在什么范围？

分析：要使该振荡器能够工作，则 LC 谐振回路必须呈容性。  
对于并联谐振回路有：

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{容性} & f > f_0 \\ \text{感性} & f < f_0 \end{array} \right.$$

要使电容工作在 5 次泛音频率上，则 LC 回路应该在 5 次泛音上呈容性，并且在 3 次泛音上应该呈感性，故谐振频率应满足：

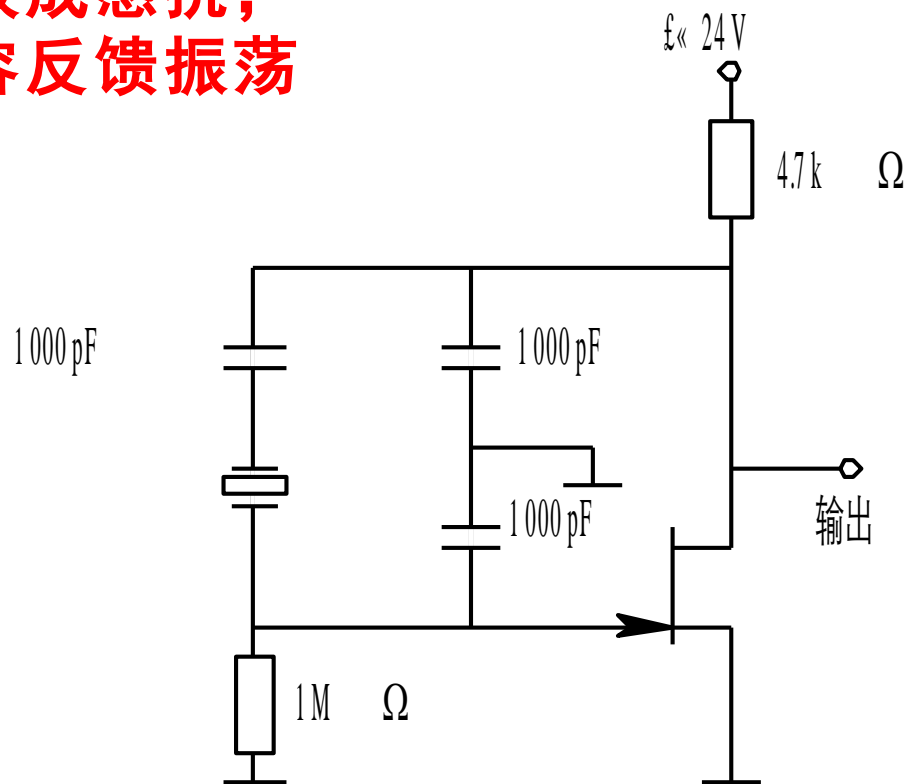


$$3f' < f_0 < 5f'$$

$f$  是晶体基频



晶体等效成感抗，  
构成电容反馈振荡  
器。



场效应管晶体并联型振荡器线路

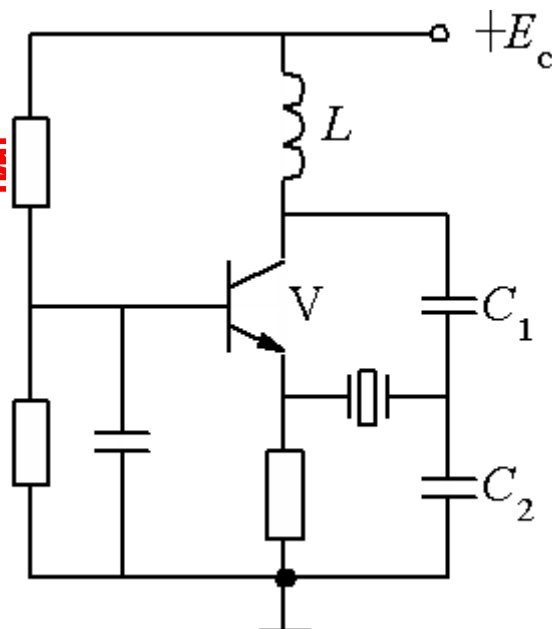
## 4.4 石英晶体振荡器

### 三、晶体振荡器电路

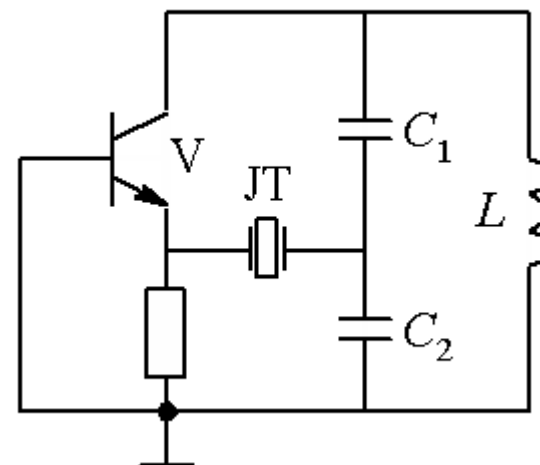
#### 2. 串联型晶体振荡器

该电路中，晶体接在振荡器要求低阻抗的两点之间，通常接在反馈电路中。

如果晶体短路，该电路即为电容反馈振荡器。



实际线路



等效电路

当  $f_1 = f_q$  时，晶体阻抗  $r_q$  近似为一短路线，满足相位条件和振幅条件，故能正常工作。

当  $f_1$  远离  $f_q$  时，晶体阻抗增大，反馈减弱，电路不满足振幅条件，电路不能工作。

稳频原理：

振荡频率主要由  $f_q$  决定，受外界影响小。