

5.5 晶体振荡器

5.5.1 石英晶体振荡器的频率稳定度

1、石英晶体谐振器具有很高的标准性，石英晶体的物理性能和化学性能十分稳定，它的尺寸受外接因素如温度、湿度等影响很小，因而等效电路的 L_q , C_q 值很稳定，串联谐振频率 f_q 很稳定。

2、石英晶体谐振器与有源器件的接入系数 $n = \frac{C_q}{C_q + C_0} \ll 1$

大大减弱了有源器件极间电容等参数和外电路不稳定因素对石英晶体的影响，使石英晶体的振荡频率基本不受外接不稳定因素影响。

3、石英晶体谐振器具有非常高的 Q 值，可达几万到几百万，维持振荡频率稳定不变的能力极强。

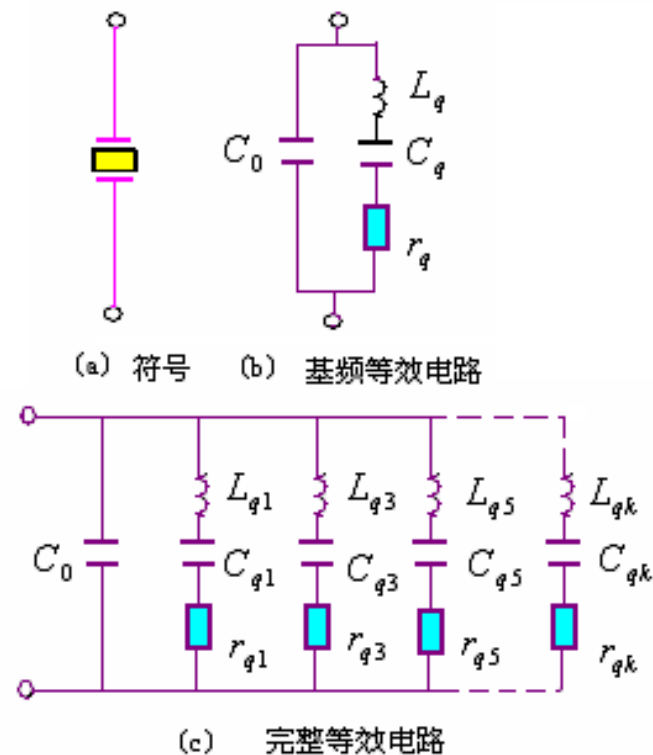
石英晶体的等效电路：

其中， 串联谐振频率：

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

并联谐振频率：

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



石英晶体的符号和等效电路

晶体的振动模式存在多谐性，除了基频振动外，还会产生奇次谐波的泛音振动。泛音晶体大部分应用三次至七次的泛音振动，很少用七次以上。

石英晶体的实际应用：

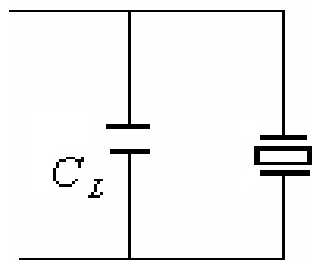
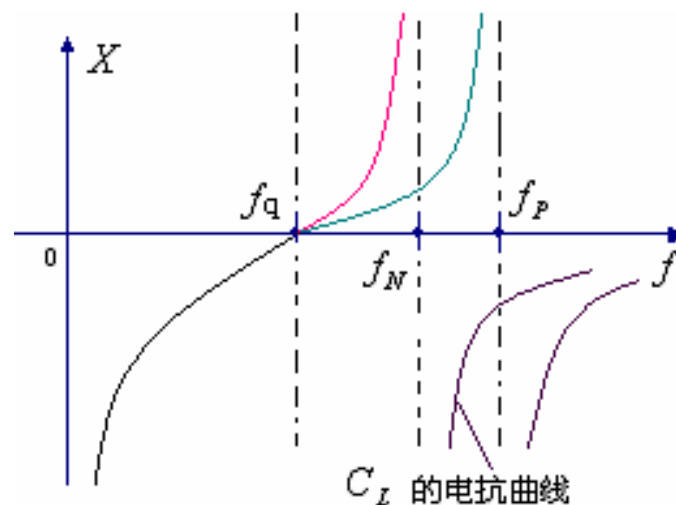


图5.5.1 石英晶体产品的标称频率



电抗特性曲线

石英晶体产品的标称频率为 f_N ，是指石英晶体两端并接一电容 C_L 后的并联谐振频率

$$f_N = f_q \sqrt{1 + \frac{C_q}{C_0 + C_L}} \approx f_q \left(1 + \frac{1}{2} \frac{C_q}{C_L + C_0} \right)$$

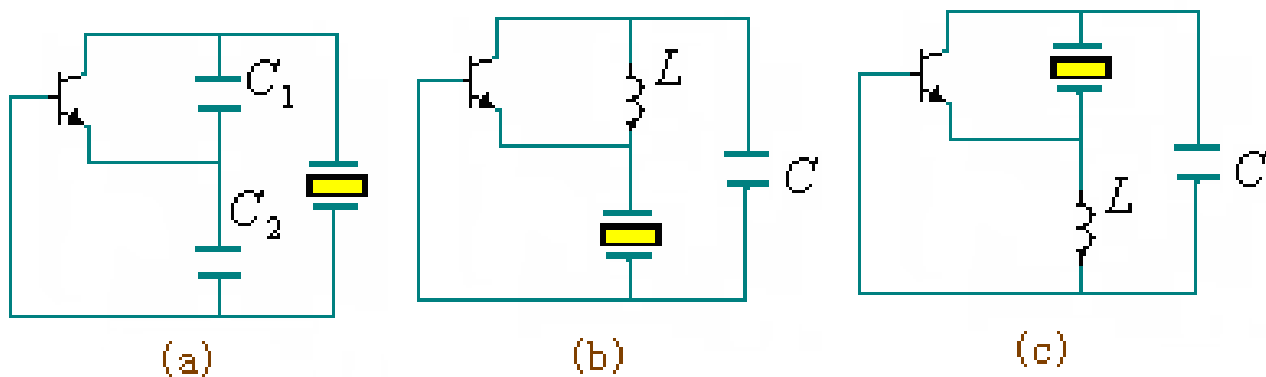
通常值为 30pF（高频晶体）。

5.5.2 晶体振荡电路

晶体振荡器分为

- **并联型晶体振荡器：**将石英晶体作为等效电感元件用在三点式电路中，工作在感性区。
- **串联型晶体振荡器：**将石英晶体作为一个高选择性的短路元件串接在正反馈支路上，工作在它的串联谐振频率上。

一、并联型晶体振荡器



- (a) 皮尔斯晶振 (cb型)：晶体接在晶体管cb之间。
- (b) 密勒晶振 (be型)：晶体接在晶体管be极之间。
- (c) (ce型) 石英晶体接在晶体管ce极之间；这种电路不常用。

1、皮尔斯晶振

(1) 原理电路

(2) 电路特点:

A、 振荡回路与晶体管、负载之间的耦合很弱。晶体管 c、b 端与 LC 回路的接入系数:

$$n_{cb} = \frac{C_q}{C_q + C_0 + C_L},$$

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

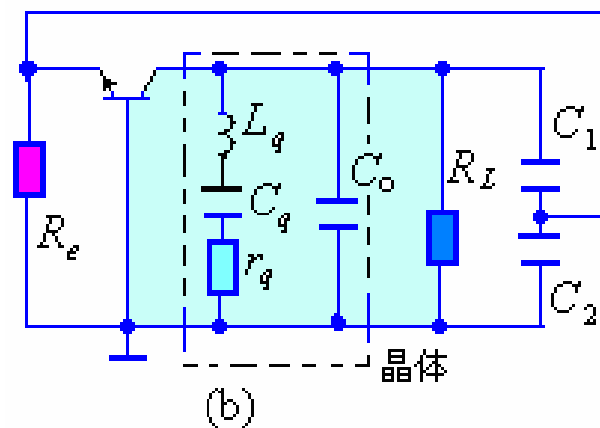
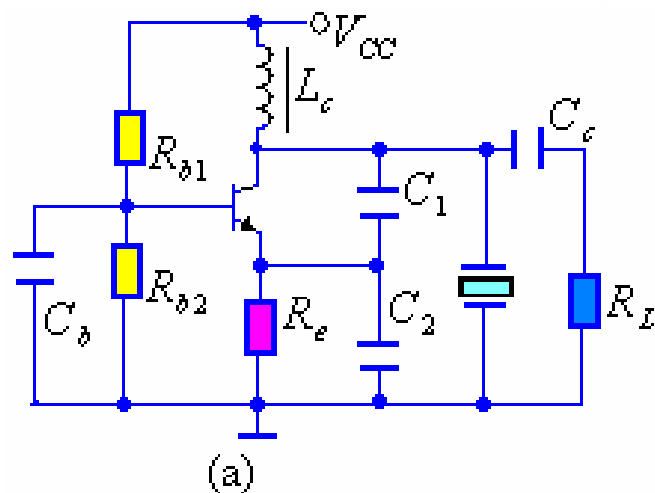


图5.5.2 皮尔斯晶体振荡器电路

(a) 实际电路

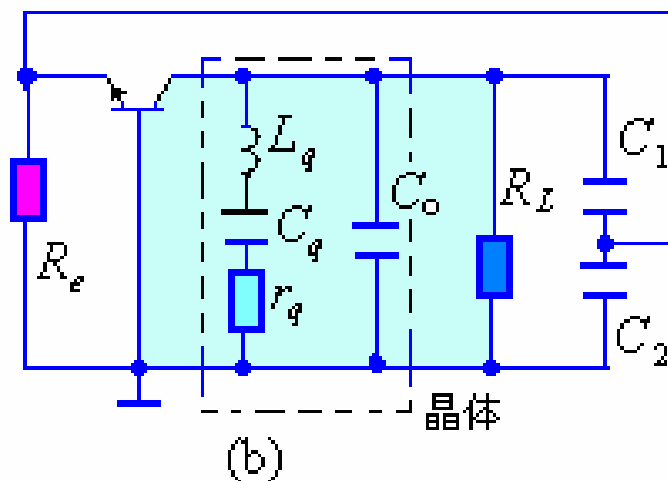
(b) 高频交流通路

c、e 端与LC回路的接入系数：

$$n_{ce} = \frac{C_2}{C_1 + C_2} \cdot n_{cb}$$

e、b 端与LC回路的接入系数：

$$n_{eb} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \cdot n_{cb}$$



以上三个接入系数一般均小于 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ ，所以外电路中的不稳定参数对振荡回路影响很小，提高了回路的标准性。

B、振荡频率几乎由石英晶体的参数决定：

$$f_{osc} = f_q \sqrt{1 + \frac{C_q}{C_0 + C_L}}$$

而石英晶体本身的参数具有高度的稳定性。

在实用时，一般需加入微调电容，用以微调回路的谐振频率，保证电路工作在晶体外壳上所注明的标称频率。

C、 由于振荡频率 f_{osc} 一般调谐在标称频率 f_N 上，位于晶体的感性区内，电抗曲线陡峭，稳频性能极好。

D、 石英晶体的 Q 值和特性阻抗 $\rho = \sqrt{\frac{L_q}{C_q}}$

都很高，所以晶体的谐振电阻很大，一般可达 $10^{10} \Omega$ 以上。这样即使外电路接入系数很小，此谐振电阻等效到晶体管输出端的阻抗仍很大，使晶体管的电压增益能满足振幅起振条件的要求。

- C_1 和 C_2 的串接电容（等效为 C_L ）直接并联到晶体的两端，是晶体的负载电容。如果其值等于晶体规定的数值，则振荡电路的振荡频率就是晶体的标称频率。
- 一方面，由于生产工艺的不一致性及老化等原因；另一方面， C_L 中包含了外接反馈电容、晶体管极间电容及各种杂散电容等不稳定因素，影响了振荡频率的稳定性，振荡频率往往与晶体标称频率稍有偏差。
- 在振荡频率准确度要求很高的场所（如，精密测时、测频装置），振荡电路必须设置微调元件。如右图所示。通过将小电容 C_3 和 C_4 与晶体串联，以隔离外部电路与石英谐振器的耦合，适当调节 C_4 ，可使振荡器工作在标称频率上。

电路实例1：

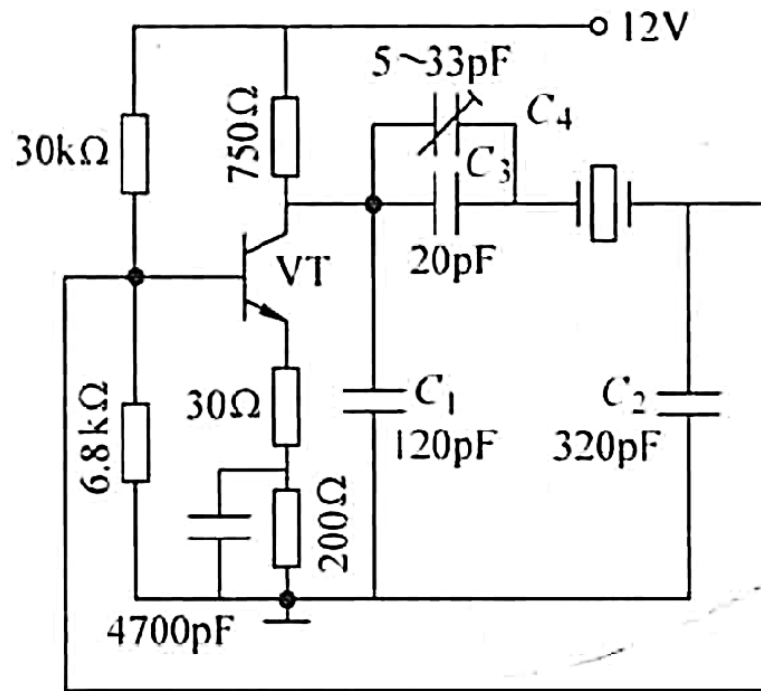


图5.5.3 采用微调电容的晶体振荡电路

- 在频率要求比较高的场所，可将晶体或整个振荡器置于恒温槽内，并将槽内温度设置在晶体拐点温度附件（频率—温度特性曲线上的点）。采用这种措施的振荡电路，频率稳定度可以提高到 10^{-10} 数量级。
- 此外，还可以采用变容管的温度补偿电路。在下页图中， T_1 管接成皮尔斯晶振， T_2 管为共射放大器， T_3 管为射极跟随器。虚线框内为温度补偿电路，它是由 R_1 、 R_2 、 R_{t1} 、和 R_{t2} 、 R_3 构成的电阻分压器，其中， R_{t1} 和 R_{t2} 是阻值随周围温度变化的热敏电阻，该电路的作用是使 R_{t2} 和 R_3 上的分压值 V_t 反映周围温度的变化。将 V_t 加到与晶体相串联的变容二极管上，控制变容二极管的电容量变化来补偿因温度变化而引起的振荡频率的变化。如果 V_t 的温度特性与晶体的温度特性相匹配，振荡器的频率稳定度可以提高1~2个数量级。

电路实例2: 具有温度补偿晶体振荡器实用电路

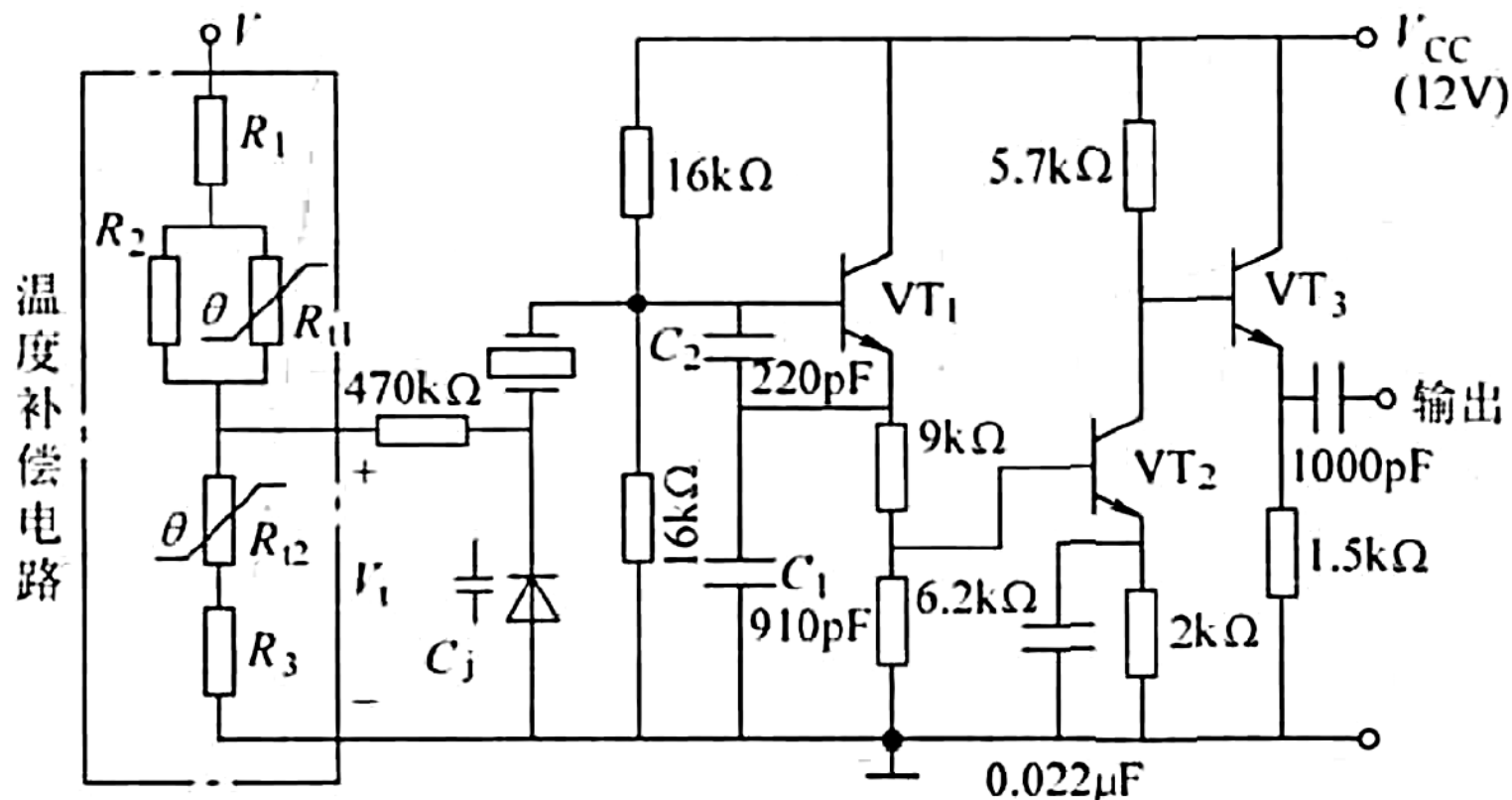


图5.5.4 温度补偿晶体振荡器实用电路

例 5.5.1

右图是一个数字频率计晶振电路，试分析其工作情况。

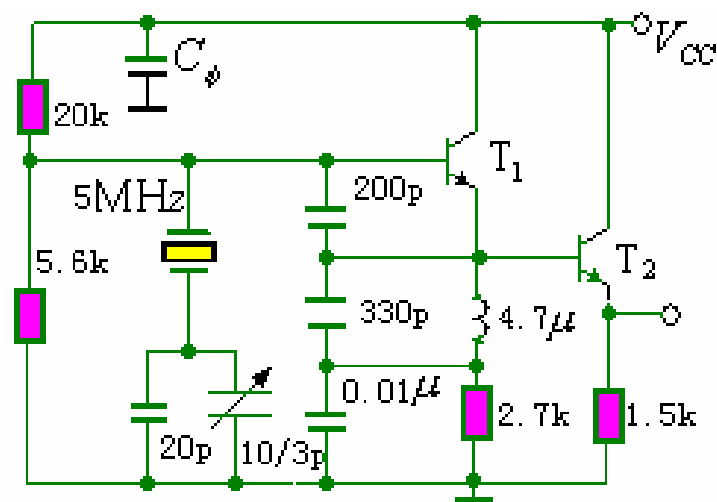
解：先画出 T_1 管高频交流

等效电路，如图（b）

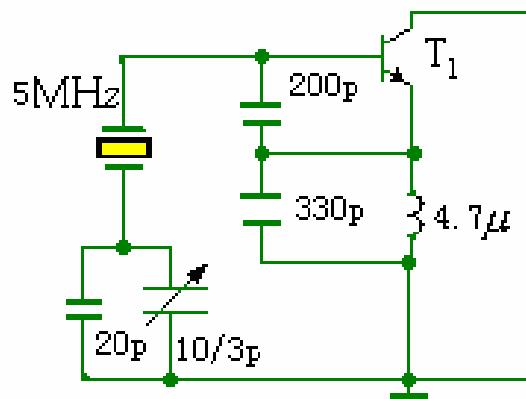
所示， $0.01\mu\text{F}$ 电容较大，

作为高频旁路电路，

T_2 管作射随器。



(a)



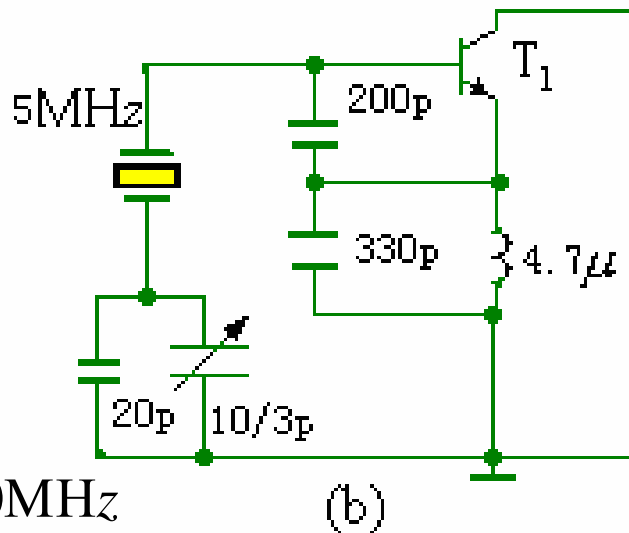
(b)

图5.5.5 例 5.5.1图

(a) 数字频率计晶振电路 (b) 高频交流等效电路

由高频交流等效电路可以看到，
 T_1 管的c、e极之间有一个 $L C$ 回路，
 其谐振频率为：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{4.7 \times 10^{-6} \times 330 \times 10^{-12}}} \approx 4.0\text{MHz}$$

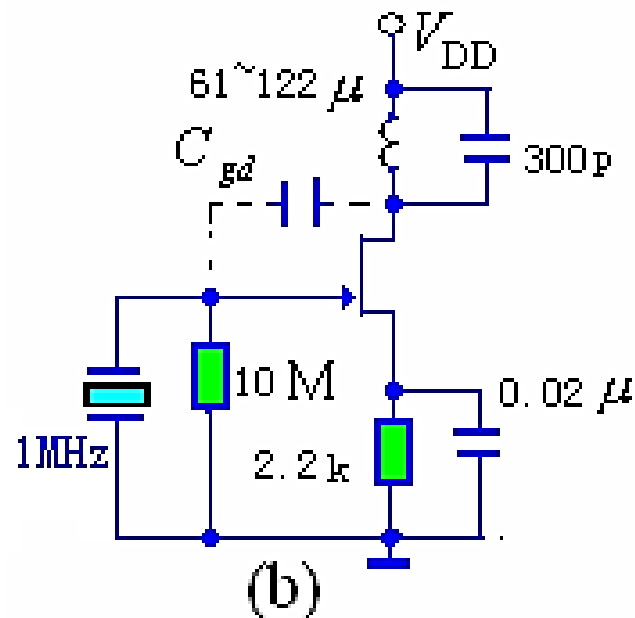
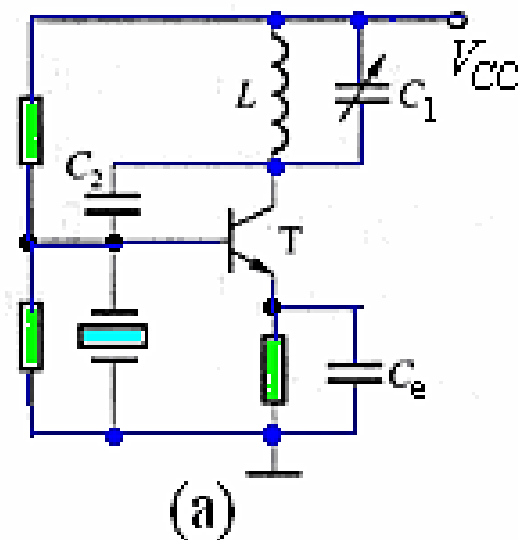


所以在晶振工作频率 5 MHz 处，此 $L C$ 回路等效为一个电容。可见，这是一个皮尔斯振荡电路，晶体等效为电感，容量为3 pF~10 pF 的可变电容起微调作用，使振荡器工作在晶振的标称频率上 5 MHz 。

2、密勒晶振电路

图5.5.6(a)为密勒（Miler）振荡器。由于晶体与晶体管的低输入阻抗并联，降低了有载品质因数 Q_e ，故密勒振荡器的频率稳定度较低。实际上，密勒振荡电路通常不采用晶体管，而是采用输入阻抗高的场效应管来提高回路的标准性和频率的稳定性，如图5.5.6(b)所示。

图5.5.6密勒振荡电路
(a) 晶体管密勒振荡电路
(b) 场效应管密勒振荡电路



3、泛音晶振电路

在工作频率较高的晶体振荡器中，多采用泛音晶体振荡电路。

假设泛音晶振为五次泛音，标称频率为 5 MHz，基频为 1 MHz，则 LC_1 回路必须调谐在三次和五次泛音频率之间，比如 **3.5 MHz**。

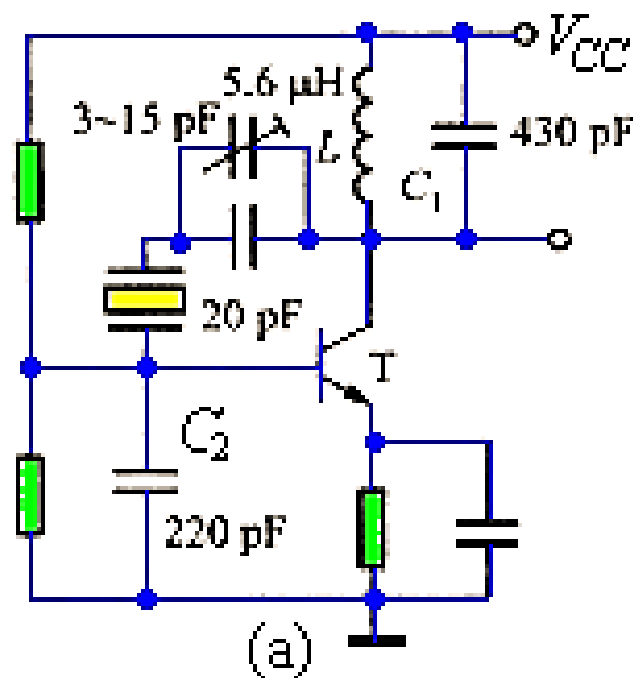
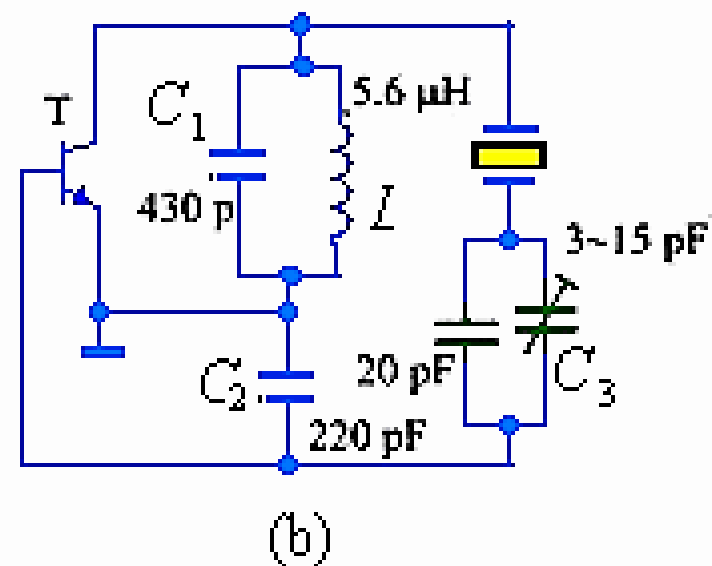


图5.5.7 泛音晶振电路

在 5 MHz 频率上, LC_1 回路呈容性, 振荡电路满足组成法则。对于基频和三次泛音频率来说, LC_1 回路呈感性, 电路不符合组



成法则, 不能起振。而在七次及其以上泛音频率, LC_1 回路虽呈现容性, 但等效容抗减小, 从而使电路的电压放大倍数减小, 环路增益小于1, 不满足振幅起振条件。

二、串联型晶体振荡器

串联型晶体振荡器是将石英晶体用于正反馈支路中，利用其串联谐振时等效为短路元件的特性，电路反馈作用最强，满足振幅起振条件，使振荡器在晶体串联谐振频率 f_q 上起振。而当频率偏离串联谐振时，晶体阻抗迅速增大，电路不能振荡。因此这种振荡器的振荡频率主要取决于晶体的串联谐振频率。为了减小 L ， C_1 ， C_2 ， C_3 回路对频稳度的影响，一般将他们调谐在晶体串联谐振频率附近。

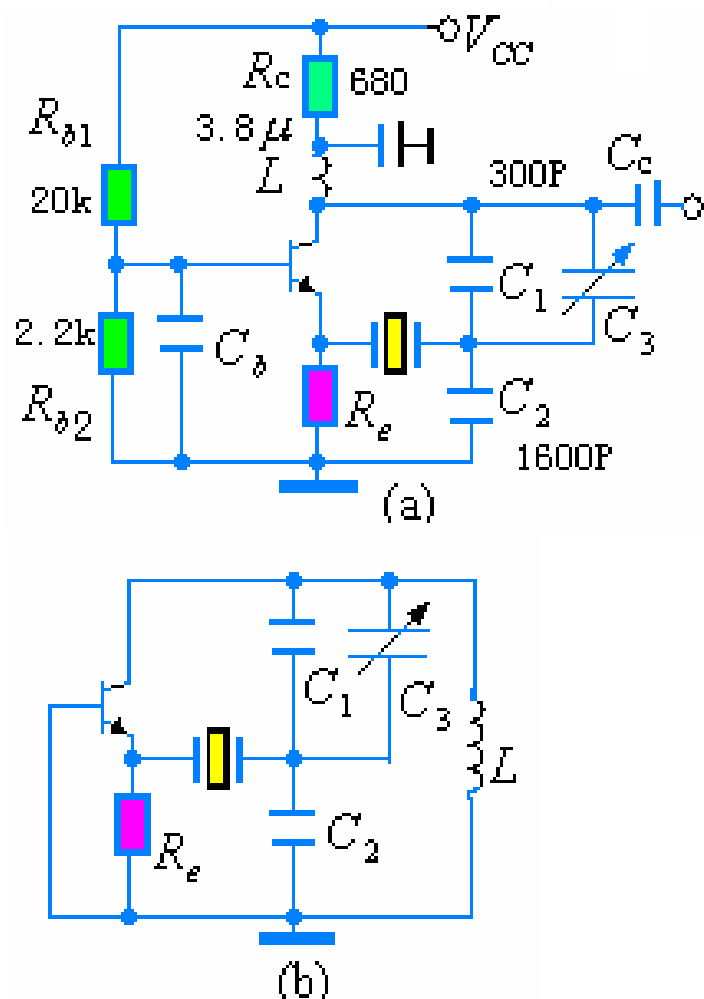


图5.5.8 串联型单管晶体振荡器电路

作业： 5.30 5.31

预习： 5.6

第六章 6.1