

第四章 例题

例 4-1 图 P4-1 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) $L_1 C_1 = L_2 C_2 > L_3 C_3$;

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

试分析上述四种情况是否都能振荡，振荡频率 f_1 与回路谐振频率有何关系？属于何种类型的振荡器？

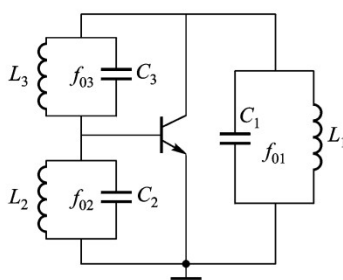


图 P4-1

题意分析：该电路属于三端式振荡器，是否能振荡就要看是否满足“射同它异”的原则，即要让 L_1 、 C_1 回路与 L_2 、 C_2 回路在振荡时呈现的电抗性质相同， L_3 、 C_3 回路与它们的电抗性质不同。图中三个回路均为并联谐振回路，根据并联谐振回路的相频特性可知，工作频率大于回路的谐振频率时，回路呈容性；工作频率小于回路的谐振频率时，回路呈感性。

解：要使得电路可能振荡，根据三端式振荡器的组成原则有： L_1 、 C_1 回路与 L_2 、 C_2 回路在振荡时呈现的电抗性质相同， L_3 、 C_3 回路与它们的电抗性质不同。又由于三个回路都是并联谐振回路，根据并联谐振回路的相频特性，该电路要能够振荡三个回路的谐振频率必须满足 $f_{03} > \max(f_{01}, f_{02})$ 或 $f_{03} < \min(f_{01}, f_{02})$ ，所以：(1) $f_{01} < f_{02} < f_{03}$ ，故电路可能振荡，可能振荡的频率 f_1 为 $f_{02} < f_1 < f_{03}$ ，属于电容反馈的振荡器；

(2) $f_{01} > f_{02} > f_{03}$ ，故电路可能振荡，可能振荡的频率 f_1 为 $f_{02} > f_1 > f_{03}$ ，属于电感反馈的振荡器；

(3) $f_{01} = f_{02} < f_{03}$ ，故电路可能振荡，可能振荡的频率 f_1 为 $f_{01} = f_{02} < f_1 < f_{03}$ ，属于电容反馈的振荡器；

(4) $f_{01} > f_{02} = f_{03}$, 故电路不可能振荡。

讨论： 本题用三个并联谐振回路代替了基本电路中的三个电抗元件，判断时同样应满足“射同它异”的原则，这就要通过对回路的相频特性去判断。图中回路全是并联回路，若全换上串联或部分改为串联又如何分析呢，读者根据该题的分析方法自行练习。

例 4-2 将图 P4-2 所示的互感耦合振荡器交流通路改画为实际线路，并注明互感的同名端。

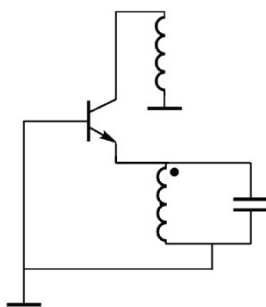
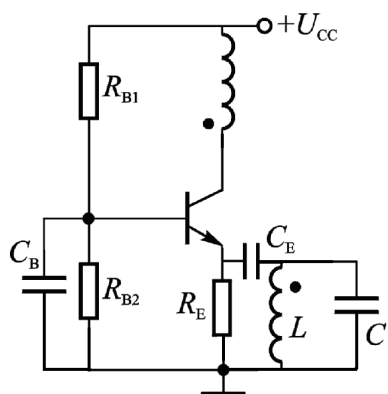


图 P4-2

题意分析： 这是一个互感耦合的振荡器，首先需要根据振荡器起振的相位条件判断出互感的同名端，然后根据起振时的振幅条件设计偏置电路，即起振时三极管应偏置在线性放大区，此时即可以设计出实际电路了。

解： 设计的振荡器实际电路如图所示。



讨论： 设计实际电路时需要注意高频电路的组成原则，特别注意正确使用旁路电容、耦合电容以及扼流圈。

例 4-3 (1) 检查图 P4-3 所示的振荡器线路，有哪些错误？并加以改正。

(2) 根据改正后的电路，写出各振荡器的工作频率。

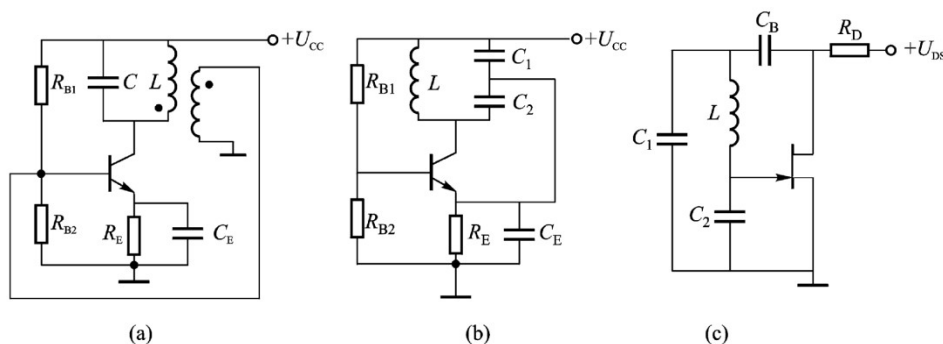


图 P4-3

题意分析：检查振荡器线路是否正确一般步骤为：(1) 检查交流通路是否正确及是否存在正反馈，正反馈的判断对互感耦合电路应检查同名端，对三端式电路检查是否满足“射同它异”的组成原则；(2) 检查直流通路是否正确。需要进一步注意的是，为了满足起振的振幅条件，起振时应使放大器工作在线性放大区，即对于三极管电路，直流通路应使得 E 结正偏、C 结反偏；对于场效应管电路，如果是结型场效应管或耗尽型场效应管，应使 U_{GS} 在 0 至 U_P 之间，如果是增强型场效应管，则应使 U_{GS} 大于门限电压，而选择 U_{DS} 时 N 沟道的场效应管应大于 0，P 沟道的场效应管应小于 0。

解：图 P4-3 (a) 为互感耦合的振荡器，交流通路正确，但反馈为负反馈，故应改变同名端；检查直流通路发现，基极直流电位被短路接地，故应加隔直电容。改正后的电路如图 P4-4 (a) 所示。该电路的工作频率为

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

图 P4-3 (b) 为三端式的振荡器，检查交流通路时发现基极悬空，而发射极由于旁路电容 C_E 存在，使其短路接地，回路电容 C_1 被短路掉，故去掉旁路电容 C_E 、基极增加一旁路电容，这样才满足三端式组成原则；直流通路正确。改正后的电路如图 P4-4 (b) 所示。该电路的工作频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}}$$

图 4-3 (c) 场效应管三端式电路，交流通路正确；检查直流通路发现，栅极无直流偏置，故应加直流偏置电路，所加的直流偏置电路应保证起振时工作在线性放大状态。改正后

的电路如图 P4-4 (c) 所示。该电路的工作频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}}}$$

讨论：在高频电子线路中，直流要有直流通路，交流要有交流通路，必须要遵守。分析时，一般先检查交流通路是否正确，是否满足正反馈的要求，再检查直流通路是否正确，这样不易出错。上述步骤全部完成后，再复查一下，以免顾此失彼。另外，可以认为振荡器的工作频率就是谐振回路的谐振频率。

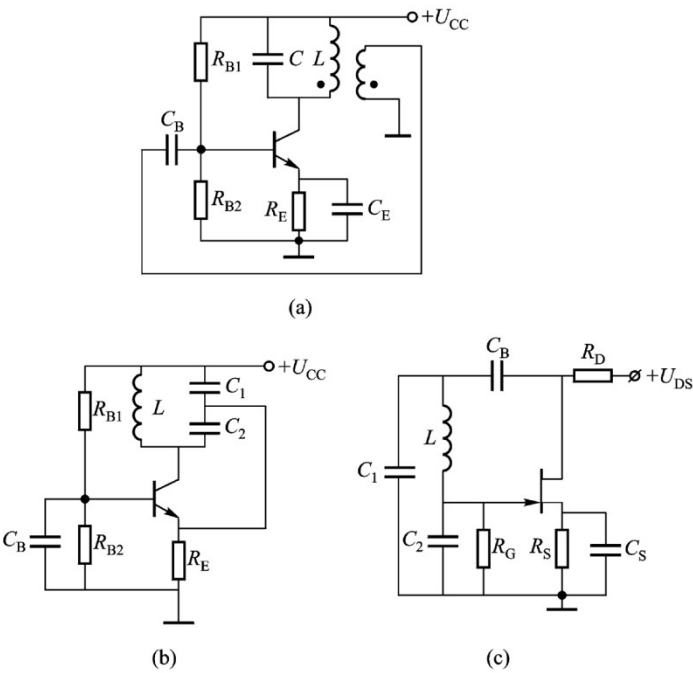


图 P4-4 正确线路图

例 4-3 请给图 P4-5 (a) 所示的交流等效电路加上直流通路。

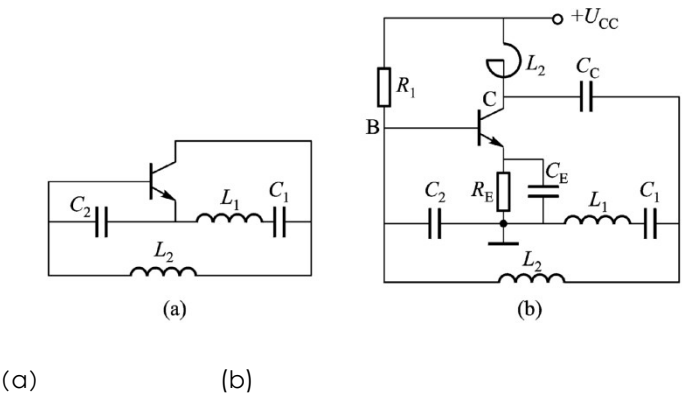


图 P4-5

题意分析：本题给出了交流等效电路，为了使振荡器能正常工作，起振时三极管必须工作在放大状态，加直流通路时应满足此条件。但要强调指出的是，在振荡器电路中，为了兼顾起振过程和稳定状态的技术要求，各类振荡器一般要采用自偏压电路。

解：加上直流通路后的电路如图 P4-5 (b) 所示。

讨论：在直流通路应注意回路的电感是否对直流短路，图 P4-5 (b) 中如果不加电容 C_c ，电感 L_2 将使三极管的 B、C 两点直流短路，从而不能满足起振的要求。图中电阻 R_e ，对直流将产生自偏压，使振荡器工作点稳定。已知交流等效电路，构成实际电路看似简单，但一些细节问题不能忽略。

例 4.4 一振荡器等效电路如图 P4-6 所示。已知： $C_1 = 600\text{pF}$ ， $C_3 = 20\text{pF}$ ，
 $C_5 = 12 \sim 250\text{pF}$ ，反馈系数大小为 $F = 0.4$ ，振荡器的频率范围为 $1.2\text{MHz} \sim 3\text{MHz}$ ，试计算： (1) C_2 ； (2) C_4 ； (3) L

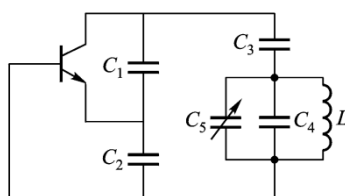


图 P4-6

题意分析：本题是一西勒振荡器。已知反馈系数的大小，根据反馈系数的定义很容易求出电容 C_2 大小。振荡器的工作频率近似认为回路的谐振频率，本电路只有一个电感，就要看电感两端呈现的总电容大小。由于电路中存在一可变的电容，因此回路的总电容有一可调的范围，相应的振荡器的频率也有一范围，回路总电容的最小值对应的是频率的最大值，回路总电容的最大值对应的是频率的最小值，由此列出方程组可以计算出 C_4 和 L 。

$$\text{解： } C_2 = \frac{C_1}{F} = \frac{600}{0.4} = 1500\text{pF}$$

由于 $C_3 \ll C_1$ 、 C_2 ，则回路的总电容 C 为

$$C \approx C_3 + C_4 + C_5$$

$$f_{\min} = 1.2 \times 10^6 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\max}}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{L \times (20 + C_4 + 250) \times 10^{-12}}}$$

$$f_{\max} = 3 \times 10^6 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\min}}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{L \times (20 + C_4 + 12) \times 10^{-12}}}$$

因此 $C_4 = 13.3 \text{ pF}$, $L = 62.2 \mu\text{H}$

讨论： 本题直接利用了反馈系数及频率的计算公式，是一基本题。需要特别强调的是：反馈系数的定义是反馈电压除以输出电压，指的是反馈到三极管 B、E 之间的电压除以三极管 C、E 之间的输出电压，有些同学经常认为振荡器的输出电压就是三极管输出电压，这是不准确的，有些电路是，有些电路并不是；另外，在计算时电压之比近似等于阻抗之比，只是由于回路电流远远大于外部电流所决定的。分析振荡器的工作频率时，采用工程处理方法，用回路的谐振频率代替工作频率，而且由于本题的谐振回路与三极管之间的耦合很小（接入系数小），近似计算工作频率其误差很小。

例 4-5 图 P4-7 是一电容反馈振荡器的实际电路，已知 $C_1 = 50 \text{ pF}$, $C_2 = 100 \text{ pF}$, $C_3 = 10 \sim 260 \text{ pF}$, 要求工作在波段范围，即 $f = 10 \sim 20 \text{ MHz}$, 试计算回路电感 L 和电容 C_0 。设回路无载 $Q_0 = 100$, 负载电阻 $R = 1 \text{ k}\Omega$, 晶体管输入电阻 $R_i = 500 \Omega$, 若要求起振时环路增益 $K_0 k_F = 3$, 问要求的跨导 g_m 和静态工作电流 I_{CQ} 必须多大？

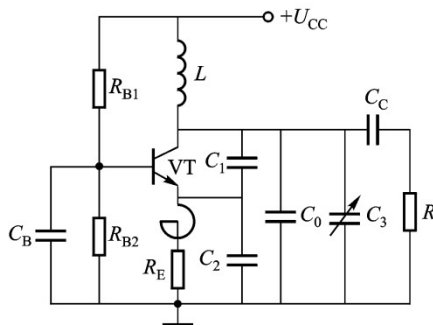


图 P4-7

题意分析： 在分析振荡器时，其工作频率可以用回路的谐振频率近似表示，由谐振频率的计算公式就可以得到回路的参数。由于振荡器工作在波段范围，不同频率时呈现的谐振阻抗不同，在晶体三极管的输出端呈现的等效电阻也就不同，放大器的增益也将不同，起振条件随之发生变化，故要考虑到波段内所有频率都应能正常起振，要求的 g_m 应大于计算出的 $g_{m\max}$ 才行。

解： $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 其中 C 为 $(C_1 \text{ 串 } C_2) \text{ 并 } C_0 \text{ 并 } C_3$ ，即

$$C = \frac{1}{1/C_1 + 1/C_2} + C_0 + C_3 = \begin{cases} 43.33 + C_0 & C_3 = 10 \text{ pF} \\ 293.33 + C_0 & C_3 = 260 \text{ pF} \end{cases}$$

因此解得

$$L = 0.77 \mu H$$

$$C_0 = 40 pF$$

由于 $K_0 k_F = g_m R_L k_F$ ，而

$$k_F = \frac{C_1}{C_2} = 0.5$$

$$R_L = (R_o // R) p^2 // \frac{R_i}{k_F^2}$$

$$p = \frac{C_2}{C_1 + C_2} = \frac{2}{3}$$

$$R_o = 2\pi f L Q_0 = \begin{cases} 4.8356 k\Omega & f_0 = 10 MHz \\ 9.6712 k\Omega & f_0 = 20 MHz \end{cases}$$

$$R_L = \begin{cases} 311.5 \Omega & f_0 = 10 MHz \\ 336.1 \Omega & f_0 = 20 MHz \end{cases}$$

则

$$g_m = \begin{cases} 17.85 mS & f_0 = 10 MHz \\ 19.26 mS & f_0 = 20 MHz \end{cases}$$

$$\text{故 } g_m \geq 19.26 mS, I_{CQ} = g_m \times 26 mV \geq 0.5 mA$$

讨论：振荡器波段工作是靠改变电容实现的，波段低端频率对应的总电容值较大，波段高端频率对应的总电容值较小。另外，对于谐振回路而言，虽然无载 Q_0 不变，但频率改变也会影响谐振阻抗，从而改变起振的振幅条件；在关系式 $K_0 k_F = g_m R_L k_F$ 中，负载阻抗 R_L 是指晶体管发射极和集电极之间呈现的阻抗大小，即交流通路中所有的负载阻抗在 C、E 两端反映。对于图 4-20 电路，应考虑晶体管输入电阻在 C、E 端的反映阻抗，也应考虑回路本身的损耗在 C、E 端的反映阻抗以及所加的实际负载在 C、E 端的反映阻抗，本题都是部分接入方式，输入阻抗的影响可以看成由部分（B、E 两端）到全部（回路两端），再由全部到部分（C、E 两端）；而回路的谐振阻抗与实际负载是并联连接，它们的影响是由全部到部分（C、E 两端）。

例 4-6 电路如图 P4-8 所示， $C_1 = 51 pF$ ， $C_2 = 3300 pF$ ， $C_3 = 12 \sim 250 pF$ ， $L = 0.5 \mu H$ ， $R_L = 5 k\Omega$ ， $g_m = 50 mS$ ，回路 $Q_0 = 80$ ，试计算振荡器的振荡频率范围。

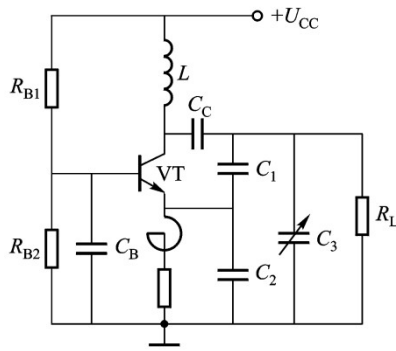


图 P4-8

题意分析：根据回路可以计算出振荡器的振荡频率范围，但是题目中告诉了跨导 g_m 的大小，要求计算出频率范围后检查一下是否在整个频率范围内都能满足起振的振幅条件，不能满足时，其频率范围由起振条件决定。

解：一般情况下，振荡器的振荡频率由谐振回路决定，谐振回路的谐振频率 f_0 为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{0.5 \times 10^{-6} \times C}} = \frac{225.2}{\sqrt{C}}$$

由图有

$$C = C_3 + 1 / \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \right) = \begin{cases} 62 \text{ pF} & C_3 = 12 \text{ pF} \\ 300 \text{ pF} & C_3 = 250 \text{ pF} \end{cases}$$

则

$$f_0 = \begin{cases} 28.6 \text{ MHz} & C_3 = 12 \text{ pF} \\ 13.0 \text{ MHz} & C_3 = 250 \text{ pF} \end{cases}$$

反馈系数的大小 F 为

$$F = \frac{C_1}{C_2} = \frac{51}{3300} = 0.015$$

现在应判断在谐振频率范围是否都能满足起振条件,即

$$g_m R'_L F > 1$$

其中

$$R'_L = p^2 (R_L // R_o) = \left(\frac{C_2}{C_1 + C_2} \right)^2 \times (R_L // Q_0 \omega_o L) = \begin{cases} 2.86 \text{ k}\Omega & f_0 = 28.6 \text{ MHz} \\ 1.93 \text{ k}\Omega & f_0 = 13.0 \text{ MHz} \end{cases}$$

所以

$$g_m R'_L F = \begin{cases} 2.15 & f_0 = 28.6 \text{ MHz} \\ 1.45 & f_0 = 13.0 \text{ MHz} \end{cases}$$

由此可见，在谐振频率范围内都能满足起振条件，故谐振频率范围即为振荡器的工作频率范围。

所以振荡器的工作频率范围为:13.0~28.6MHz。

讨论：由回路的参数可以求得振荡器的可能振荡范围，是否一定能够振荡还要看是否在所有的频率范围内均能满足起振的振幅条件。根据起振的振幅条件，也可以计算出该电路的振荡频率范围，取两个的交集即可。如果将题中的 g_m 改为 $g_m = 30mS$ ，则在频率的低端不能振荡，频率的低端应由起振的振幅条件决定，读者可以自行分析。

例 4. 7 将振荡器的输出送到一分频器中，则分频器输出信号的频率稳定度会发生怎样的变化？并说明原因。

题意分析：频率稳定度指的是指定时间间隔内的频率相对准确度，根据定义可以判定频率稳定度的变化情况。

解：由于频率稳定度指的是指定时间间隔内的频率相对准确度，振荡器的输出信号送到分频器后，绝对准确度和中心频率均除以相同的系数，因此相对准确度不变，频率稳定度也就不变。

讨论：振荡器的输出信号经分频后，其输出的偏差将减小，但相对准确度是不发生变化的，频率稳定度指的是相对准确度，因此频率稳定度不变，本题说明了对基本概念的理解、掌握尤为重要。同样的，将振荡器的输出送到倍频器中，则倍频器输出信号的频率稳定度会发生怎样的变化？读者自行分析。

例 4-8 一晶体振荡器电路如图 P4-9 所示，（1）画出交流等效电路，指出是何种类型的晶体振荡器。（2）该电路的振荡频率是多少？（3）晶体在电路中的作用。（4）该晶振有何特点？

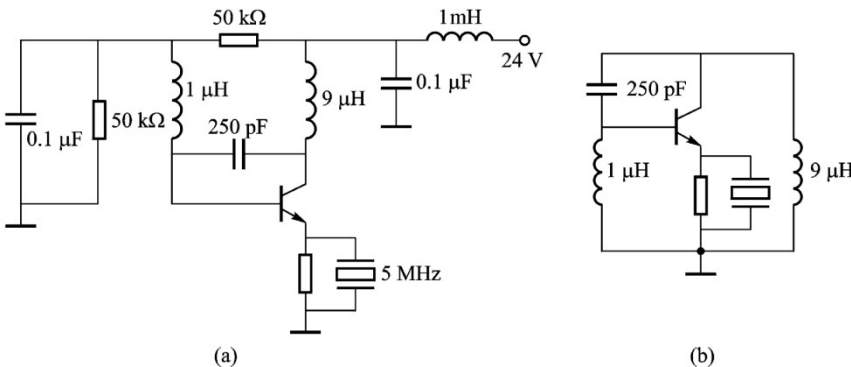


图 P4-9

题意分析：画出交流等效电路后，看晶体是回路的一部分，还是反馈网络的一部分。

如果晶体是回路的一部分时，晶体振荡器称为并联型晶振，晶体起等效电感的作用；

晶体是反馈网络的一部分时，晶体振荡器称为串联型晶振，晶体起选频短路线的作用。

对于晶体振荡器电路，其工作频率可以认为就是晶体的标称频率。

解：交流等效电路如图（b）所示，由图可知，该电路是串联型晶体振荡器，其工作频率为晶体的标称频率，即 5MHz。在电路中，晶体起选频短路线的作用。该晶振的特点是频率稳定度很高。

讨论：在串联型晶振中，只有振荡器的工作频率为晶体的标称频率时，晶体才相当于一短路线，电路的反馈最强，满足振幅条件，电路能正常工作；如果偏离标称频率，晶体呈现的阻抗将增大，反馈将减弱，影响振幅条件，导致电路不能正常工作，故在串联型晶振中晶体起选频短路线的作用。另外，晶振电路的工作频率为晶体的标称频率，从上面的说明中也可以知道。本题告诉了晶体的标称频率，如果没有直接告诉标称频率，而只给出晶体的参数，即 C_0 、 C_q 、 L_q 、 r_q ，那么计算出晶体的串联谐振频率，用串联谐振频率代替即可。

例 4-9 一晶体振荡器交流等效电路如图 P4-10 所示，（1）该电路属于何种类型的晶体振荡器，晶体在电路中的作用是什么？（2）画出该电路的实际线路；（3）若将 5MHz 的晶体换成 2MHz 的晶体，该电路是否能正常工作，为什么？

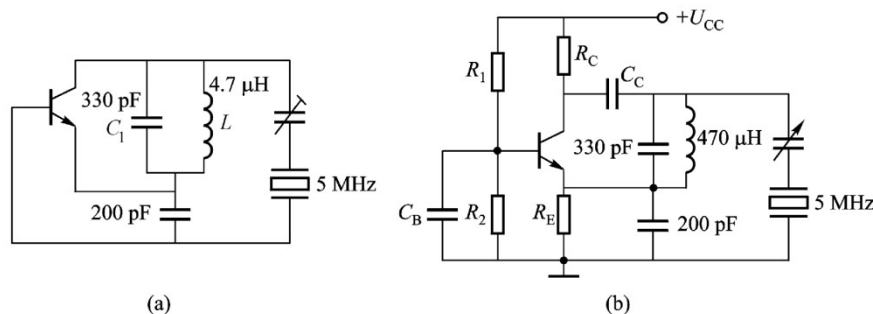


图 P4-10

题意分析：该电路中晶体是回路的一部分，因此为并联型晶体振荡器，但振荡器要能正常工作，必须使 $4.7 \mu H$ 的电感 L 与 $330 pF$ 的电容 C_1 构成的回路呈现容性，显然这是一个泛音晶体振荡器。 $4.7 \mu H$ 的电感 L 所起的作用就是抑制基频及低的泛音。设计实际线路时应注意振幅起振条件，为此起振时放大器应工作在线性放大状态，即初始时要保证三极管的 E 结正偏、C 结反偏，故基极一般采用组合偏置电路。

解：由于电感 L 与电容 C_1 构成的回路，其谐振频率为

$$f_{01} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times \sqrt{4.7 \times 10^{-6} \times 330 \times 10^{-12}}} \approx 4 MHz$$

而晶体的标称频率为 5MHz，电感 L 与电容 C_1 构成的回路在 5MHz 时呈现容性，振荡器可

以在 5MHz 工作。由此可见，这是一个并联型泛音晶振电路，晶体起等效电感的作用。该电路的实际线路如图（b）所示。

如果晶体换成 2MHz，则 2MHz 时电感 L 与电容 C_1 构成的回路呈现感性，不满足三端式振荡器的组成原则，故电路不能正常工作。

讨论：在工作频率较高时，晶振电路一般使用泛音晶振，为了工作在泛音情况下，应如图 P4-10 中所示加一抑制基频（工作在 3 次泛音下）或低次泛音（工作在较高的泛音下）的谐振回路。在画实际线路时，除考虑初始时放大器工作在线性放大区外，还应注意满足交流有交流通路、直流有直流通路的原则，为了使得振荡器工作稳定，一般应有自偏压措施。