



5.2 LC正弦波振荡器

采用LC谐振回路作为选频网络的振荡器

LC正弦波振荡器有三种实现电路:

- 互感耦合振荡器
- 三点式振荡器
- 集成电路LC振荡器

LC振荡器可用来产生几十kHz到几百MHz的正弦波信号。



5.2.1 互感耦合振荡器

常见的互感耦合振荡器电路。

注意：耦合电容

C_B 的作用。如果将 C_B 短路，则基极通过变压器次极直流接地，振荡电路不能起振。

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

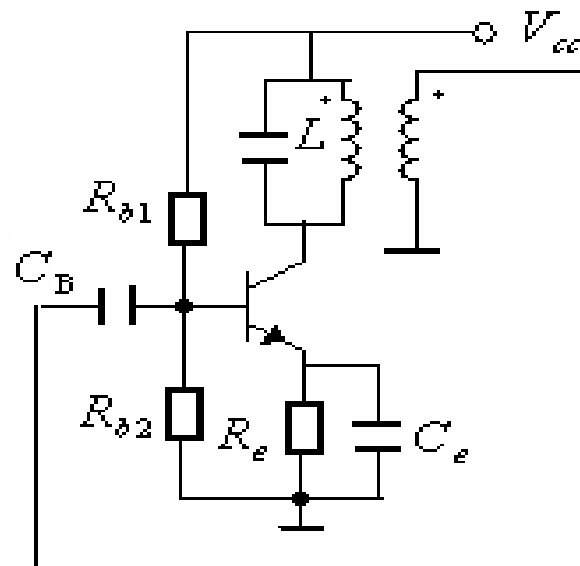


图5.1.3 集电极调谐互感耦合振荡器电路



其他形式的电路

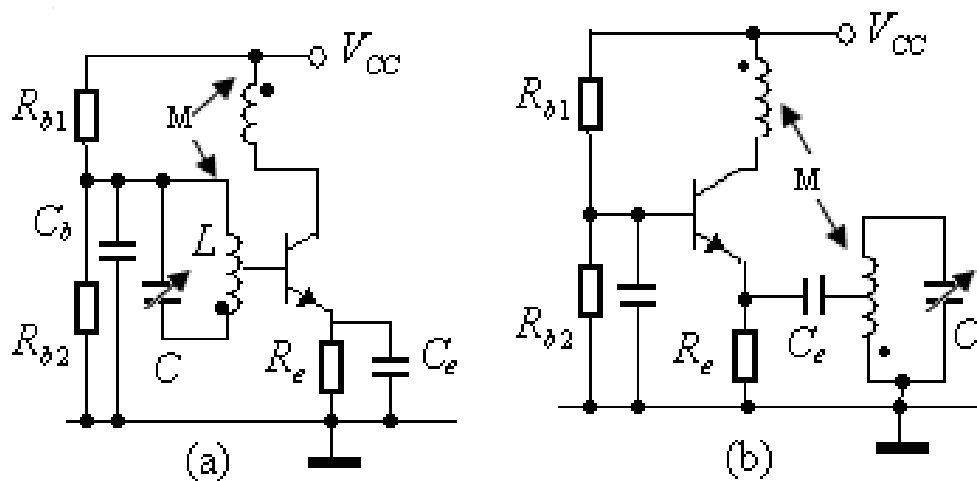


图5.2.1 互感耦合振荡电路举例
a) 基极选频 b) 发射极选频

采用部分接入，减少三极管输入电阻对选频网络Q的影响。



例5.2.1 判断图例5.2.2所示两极互感耦合振荡电路能否起振。

解：这是一个共基—共集反馈电路，容易满足振幅条件。

相位条件判断：

$$v_{e1} \uparrow \rightarrow v_{c1} \uparrow \rightarrow v_{b2} \downarrow \rightarrow v_{e2} (v_{e1}) \downarrow$$

可见电路是负反馈，不能产生振荡。

怎样修改才能产生振荡？

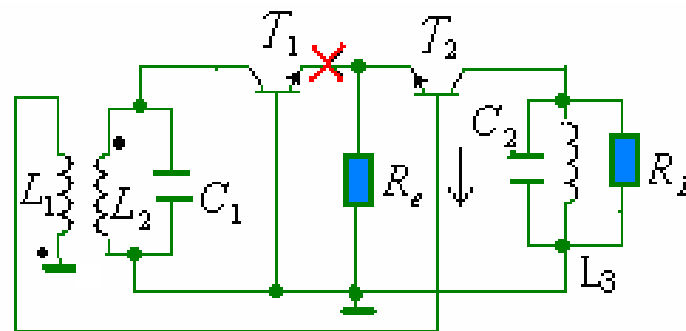


图5.2.2 例5.2.1图



5.2.2 三点式振荡电路

三点式振荡器的工作频率可达到几百兆赫。

一、电路组成法则（相位条件）

在三点式电路中，L C回路中与发射极相连接的两个电抗元件必须为同性质，另外一个电抗元件必须为异性质。

回路品质因数足够高，当回路

谐振时，满足 $X_{ce} + X_{be} + X_{bc} \approx 0$

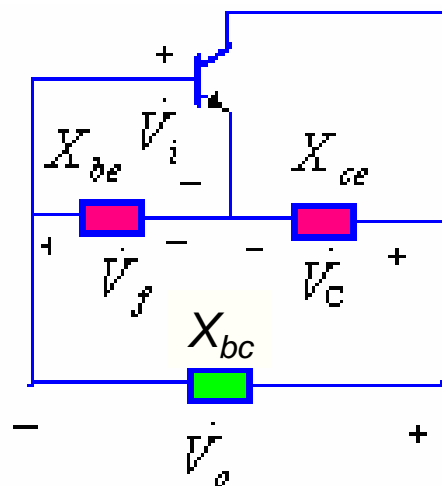


图5.2.3 三点式振荡器的原理图



证明：假定LC回路由纯电抗元件组成，分别为 X_{ce} X_{be} X_{bc} 同时忽略晶体管的阻抗效应，则当回路谐振 ($\omega = \omega_0$) 时，回路呈纯阻性，有

$$X_{ce} + X_{be} + X_{bc} \approx 0$$

则有 $X_{ce} \approx -X_{be} - X_{bc}$

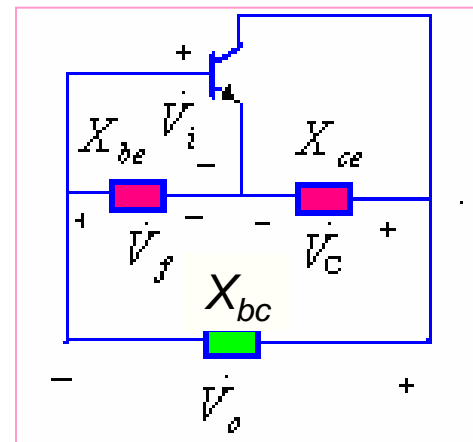
由于 \dot{V}_f 是 \dot{V}_c 在 X_{be} X_{bc} 支路分配在 X_{be} 上的电压，

$$\dot{V}_f = \frac{jX_{be}\dot{V}_c}{j(X_{be} + X_{bc})} \approx -\frac{X_{be}}{X_{ce}}\dot{V}_c$$

因为这是一个由反相放大器组成的正反馈电路， \dot{V}_i 与 \dot{V}_f 同相，

\dot{V}_c 与 \dot{V}_i 反相，所以必有 $\frac{X_{be}}{X_{ce}} > 0$ 成立。即 X_{ce} X_{be} 必须是同

性质电抗，因而 X_{bc} 必须是异性质的电抗。





例 5.2.2 在例图5.2.4所示振荡器交流等效电路中，三个LC并联回路的谐振频率分别是： $f_1 = 1/(2\pi\sqrt{L_1C_1})$

$$f_2 = 1/(2\pi\sqrt{L_2C_2}) \quad f_3 = 1/(2\pi\sqrt{L_3C_3})$$

试问 f_1 、 f_2 、 f_3 满足什么条件时该振荡器能正常工作？

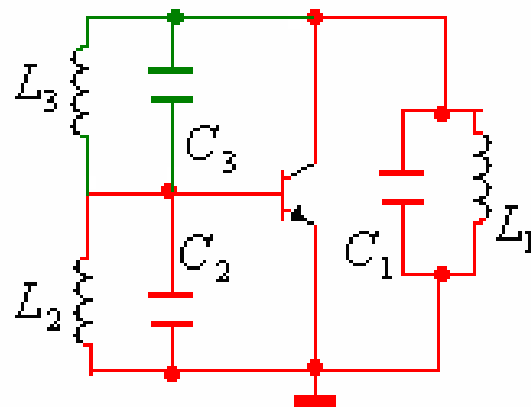


图5.2.4 例5.2.2图

解：若组成**电容三点式**，则在振荡频率 f_{osc1} 处，

$$\text{应满足 } f_1 \leq f_2 < f_{osc1} < f_3 \quad \text{或} \quad f_2 \leq f_1 < f_{osc1} < f_3$$

若组成**电感三点式**，则在振荡频率 f_{osc2} 处，应满足

$$f_1 \geq f_2 > f_{osc2} > f_3 \quad \text{或} \quad f_2 \geq f_1 > f_{osc2} > f_3$$



二、电容三点式电路（又称考毕兹电路，Coplitts）

1、电路分析

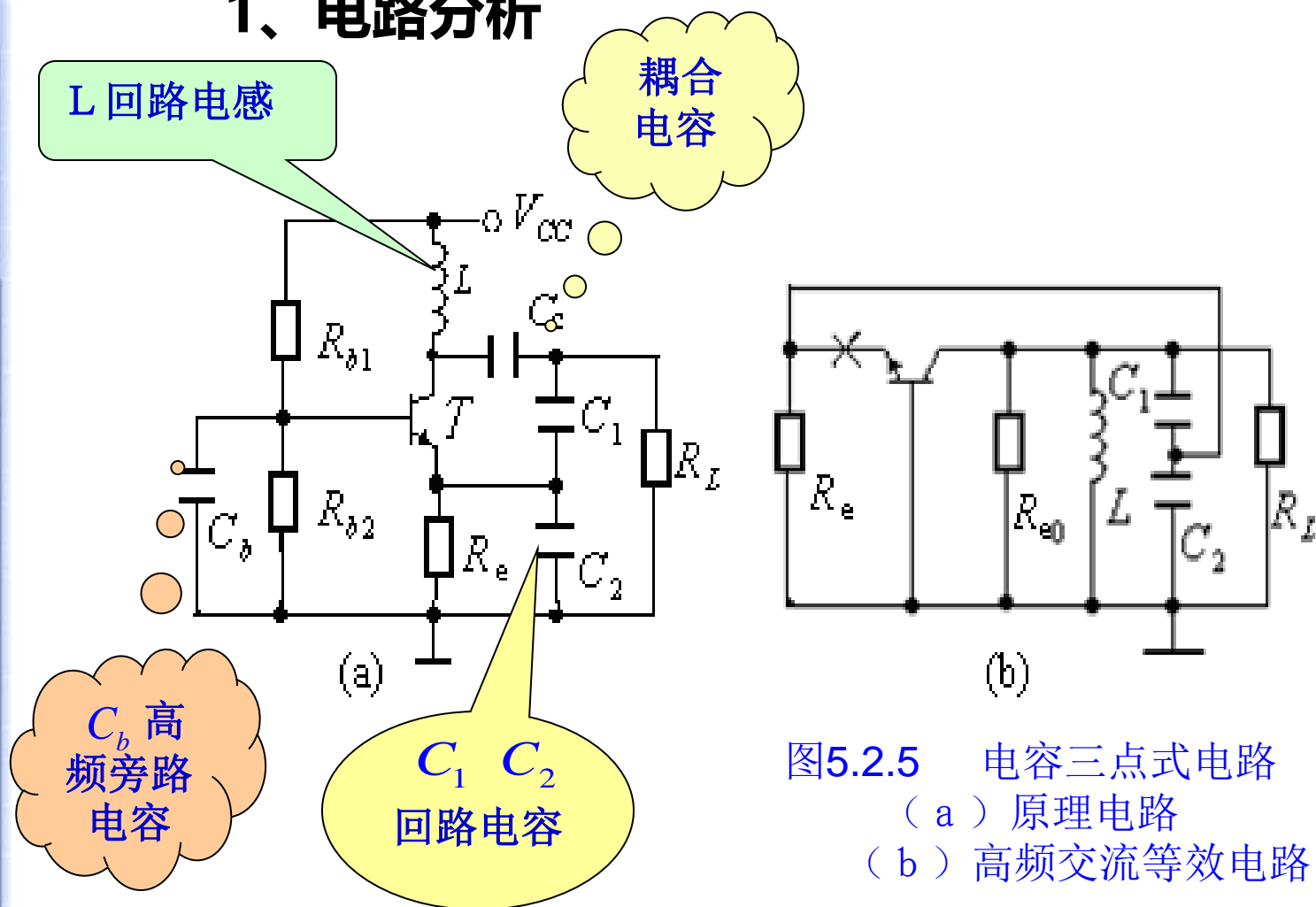
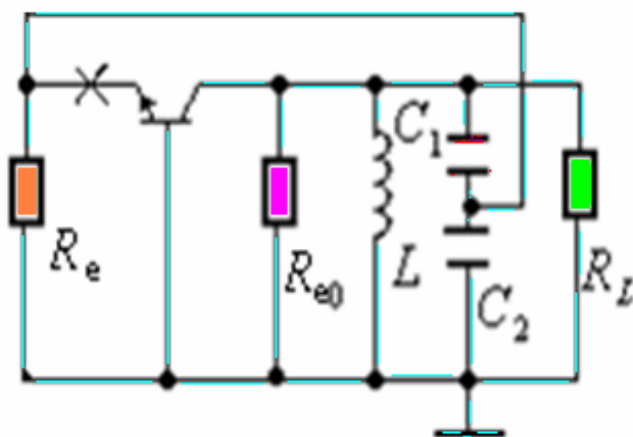


图5.2.5 电容三点式电路
(a) 原理电路
(b) 高频交流等效电路



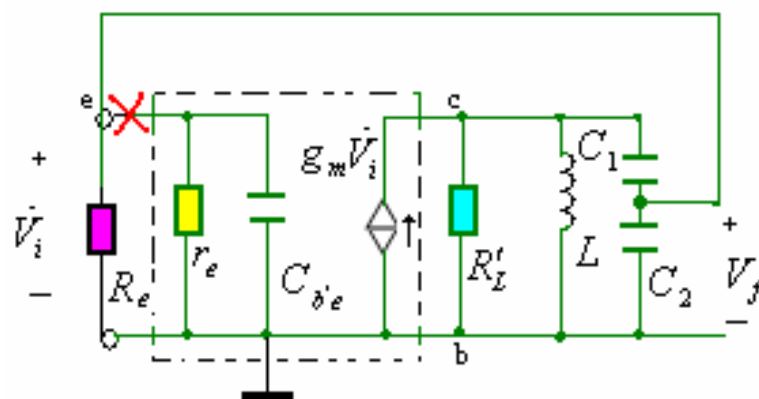
(b)

电容三点式高频交流等效电路

$$R_{e0} = Q_0 \omega_{osc} L$$

令: $R'_L = R_{e0} \parallel R_L$

且忽略晶体管输出电容的影响。可以得到微变等效电路:

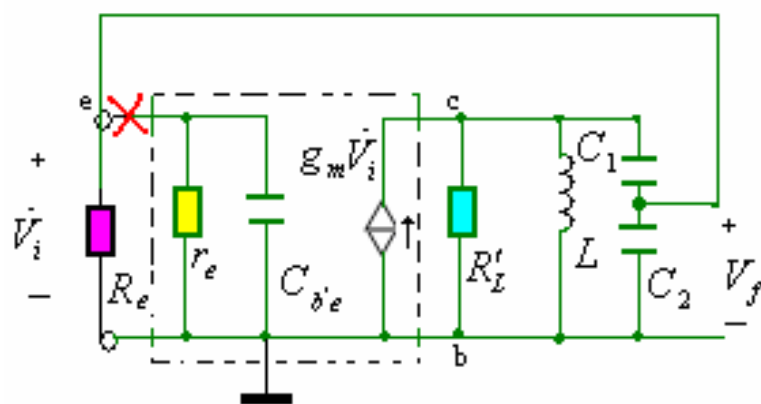


微变等效电路



2、考毕兹电路起振条件的近似分析

(1) 电路的简化



在×处断开，并
考虑到负载作用，
得到：

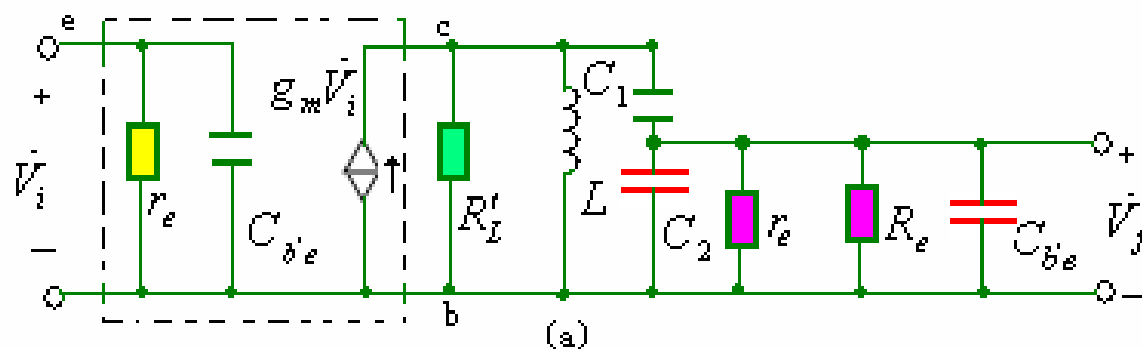


图5.2.6 小信号 等效电路



以下分析的前提条件是：假设满足阻抗部分接入的变换条件，
即回路品质因数足够大！

由 (a) 到 (b) :

$$C'_2 = C_2 + C_{b'e}$$

$$\dot{V}'_f = \frac{1}{n} \dot{V}_f$$

接入系数 $n = \frac{C_1}{C_1 + C'_2}$

(通常 $r_e \ll R_e$)

$$r'_e = \frac{1}{n^2} (r_e // R_e) \approx \frac{1}{n^2} r_e$$

由 (b) 到 (c) :

$$G = g'_L + g'_e = \frac{1}{R'_L} + \frac{1}{r'_e}$$

等效电纳

$$B = \omega C - \frac{1}{(\omega L)} \quad C = \frac{C_1 C'_2}{C_1 + C'_2}$$

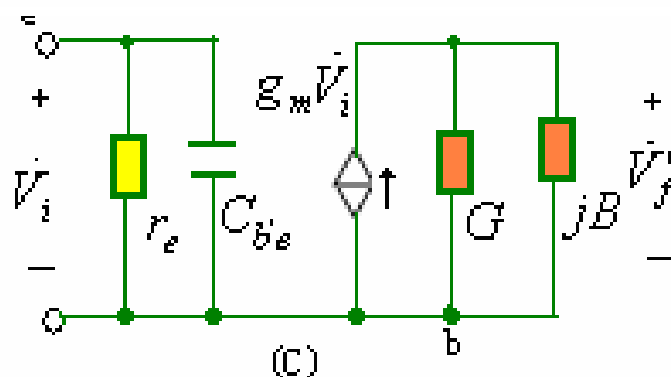
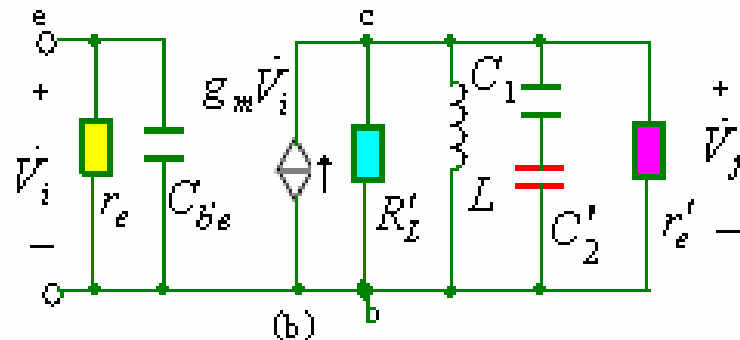
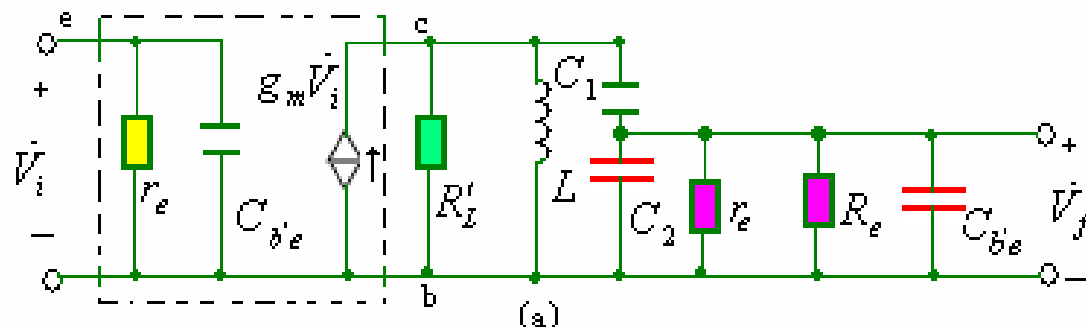


图5.2.6 推导 $T(j\omega)$ 的等效电路



(2) 环路增益计算:

因为
$$\dot{V}'_f = \frac{g_m \dot{V}_i}{G + jB} = \frac{1}{n} \dot{V}_f$$

所以

$$T(j\omega) = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_i} = \frac{ng_m}{G + jB} = \frac{ng_m}{g'_L + g'_e + j(\omega C - \frac{1}{\omega L})}$$

(3) 振荡频率的计算:

令 $T(j\omega)$ 分母的虚部为零, 可得到振荡器的振荡角频率为

$$\omega_{osc} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

一般要求 $T(\omega_{osc})$ 为3~5。

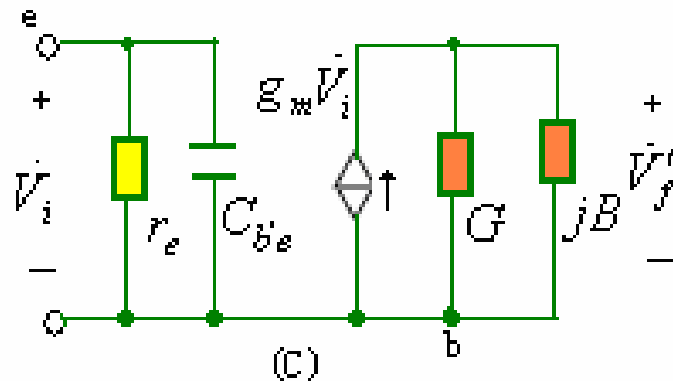
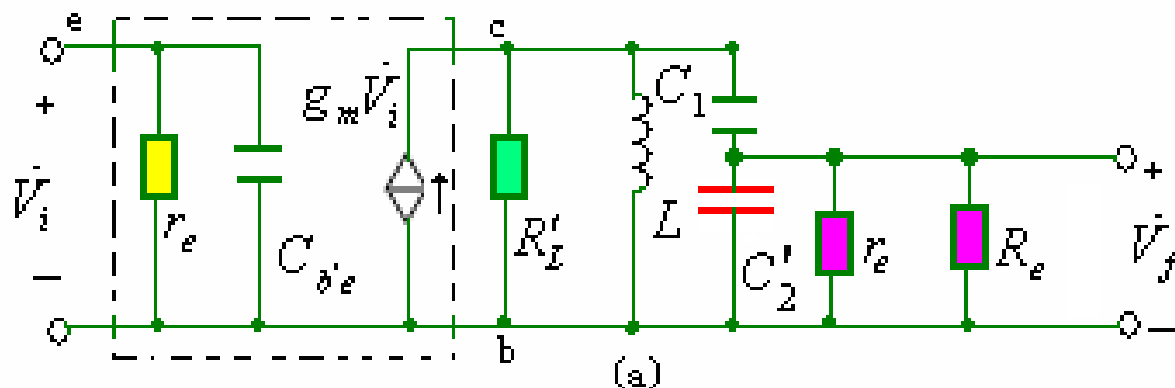


图5.2.6 推导 $T(j\omega)$ 的等效电路



$$g_m > \frac{1}{n} (g'_L + g'_e) = \frac{1}{n} g'_L + n g_e$$

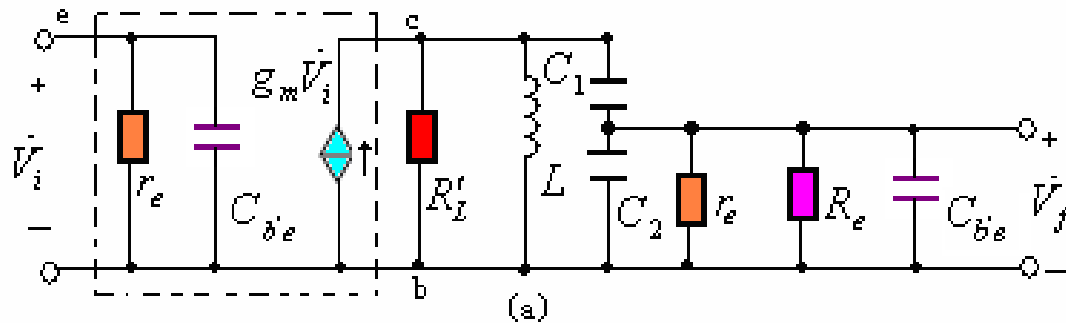
其中 $g_m \approx \frac{I_{EQ}}{26 \text{ mV}}$ $g'_L = \frac{1}{R_L \parallel R_{e0}}$, $g_e = \frac{1+\beta}{r_{b'e}} = \frac{1}{r_e}$

(4) 电路的反馈系数 $F = n = \frac{C_1}{C_1 + C'_2}$

一般要求 $T(\omega_{osc})$ 为 3 ~ 5。反馈系数一般为 $1/8 \sim 1/2$



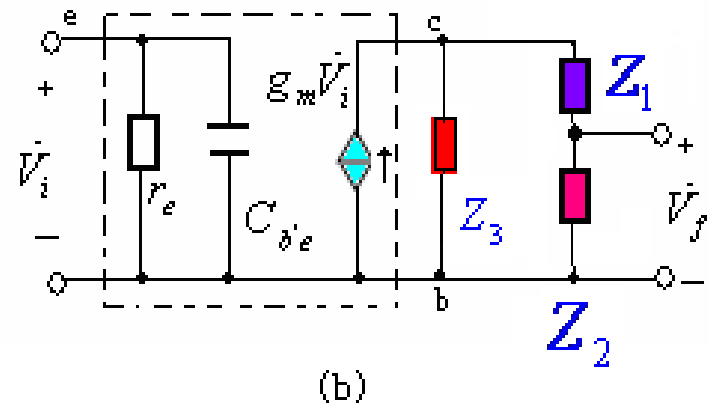
3、实际考虑（不考虑品质因数的大小，按现实情况分析）



在图5.2.6(a)中，令

$$Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1} \quad Z_3 = \frac{1}{g'_L + 1/j\omega L}$$

$$Z_2 = \frac{1}{g_i + j\omega C'_2} \quad g_i = \frac{1}{r_e} + \frac{1}{R_e} \quad C'_2 = C_2 + C_{b'e}$$

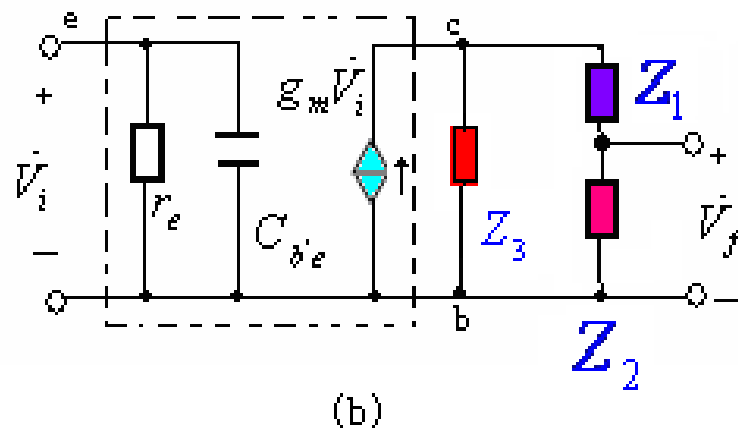


得到 (b) 图。



由 (b) 图求得反馈电压

$$\dot{V}_f = \frac{g_m \dot{V}_i}{\frac{1}{Z_1 + Z_2} + \frac{1}{Z_3}} \times \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$



所以

$$T(j\omega) = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_i} = \frac{g_m}{\frac{1}{Z_1 + Z_2} + \frac{1}{Z_3}} \times \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{g_m}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{Z_1}{Z_2 Z_3}}$$

将 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 代入上式整理后得

$$\dot{T}(j\omega) = \frac{g_m}{A + jB} = T(\omega)e^{j\phi_T(\omega)}$$



式中 $T(\omega) = \frac{g_m}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad \varphi_T(\omega) = -\arctan \frac{B}{A}$

且 $A = g'_L + g_i + g'_L \frac{C'_2}{C_1} - g_i / (\omega^2 LC_1)$

$$B = \omega C'_2 - \frac{1}{\omega C_1} g_i g'_L - C'_2 / (\omega LC_1) - 1 / \omega L$$

根据相位起振条件，令B=0可求得振荡器的振荡角频率

$$\omega_{osc} = \sqrt{\frac{1}{LC} + \frac{g_i g'_L}{C_1 C'_2}} = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{1 + \frac{g_i g'_L}{\omega_o^2 C_1 C'_2}} = \omega_o \sqrt{1 + \frac{g_i g'_L}{\omega_o^2 C_1 C'_2}}$$

振幅起振条件为

$$g_m > A = g'_L \left(1 + \frac{C'_2}{C_1}\right) + g_i \left(1 - \frac{1}{\omega_{osc}^2 LC_1}\right)$$



上述分析表明电容三点式振荡器的振荡角频率 ω_{osc} 与哪些因素有关？

- (1) 回路的固有角频率 ω_o
- (2) 回路固有谐振电阻 R_{eo}
- (3) 外接电阻 R_L
- (4) 三极管输入电阻 r_e

且 $\omega_{osc} > \omega_o$

在实际电路中，一般满足 $\omega_o^2 C_1 C_2' \ll g_i g_L'$

因此，工程估算时可近似认为： $\omega_{osc} = \omega_o = \frac{1}{\sqrt{LC}}$



三、电感三点式电路（哈特莱电路，Hartley）

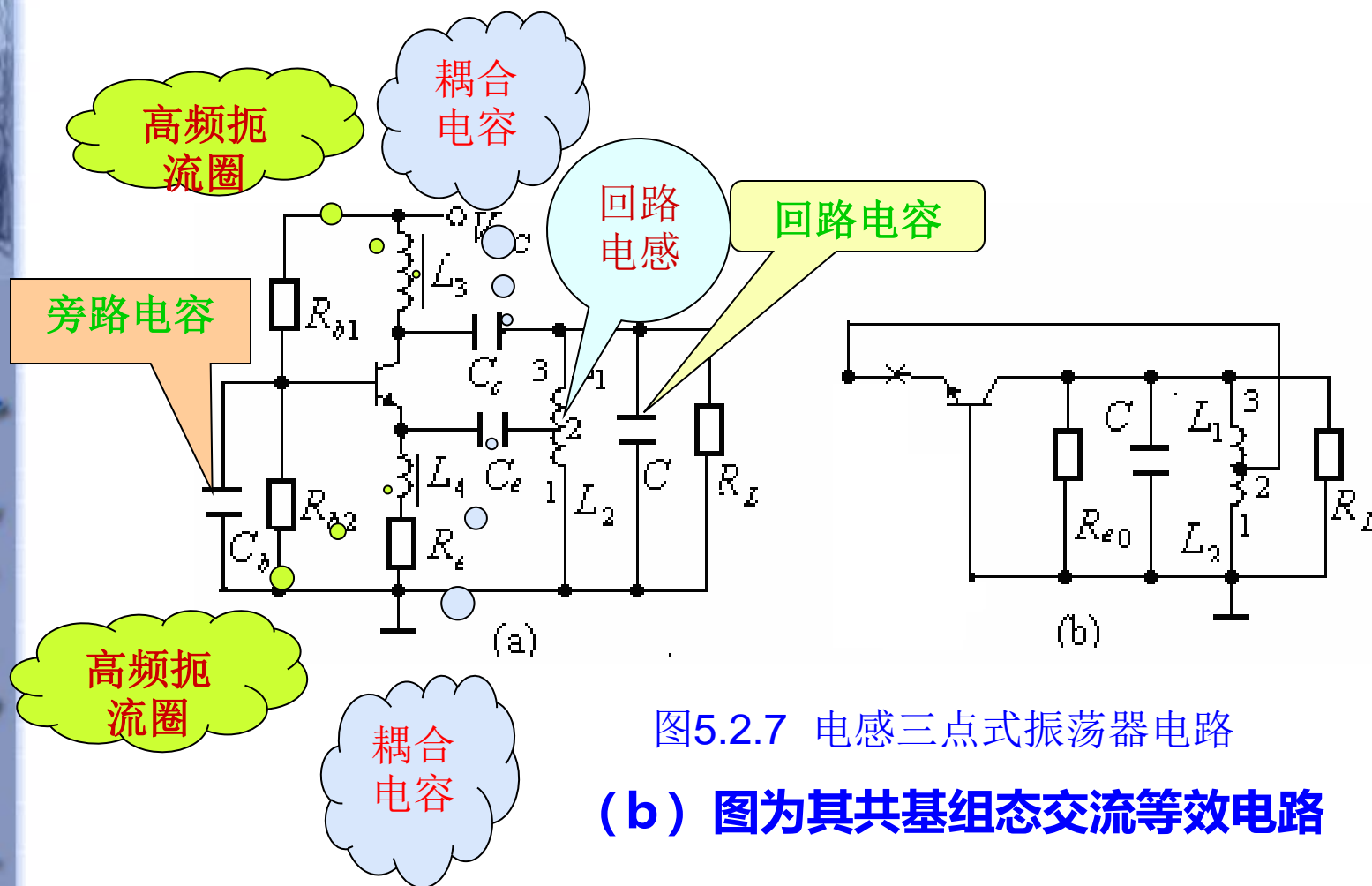
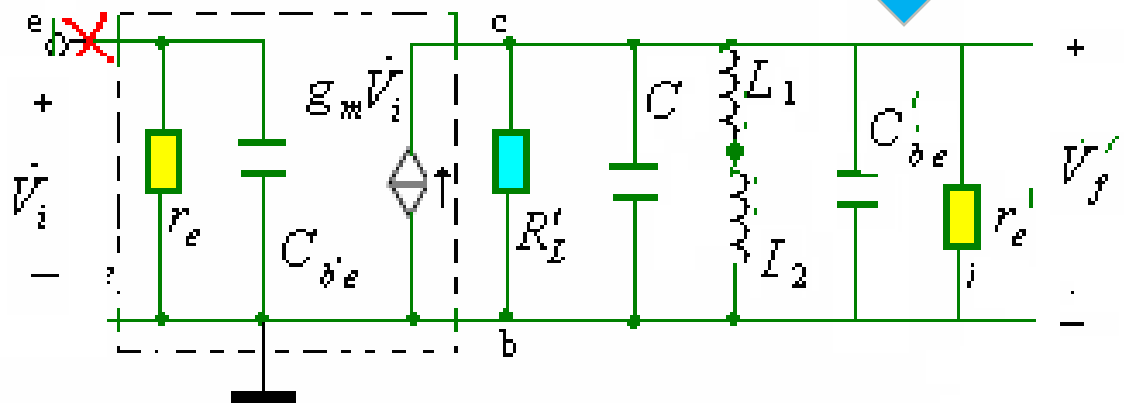
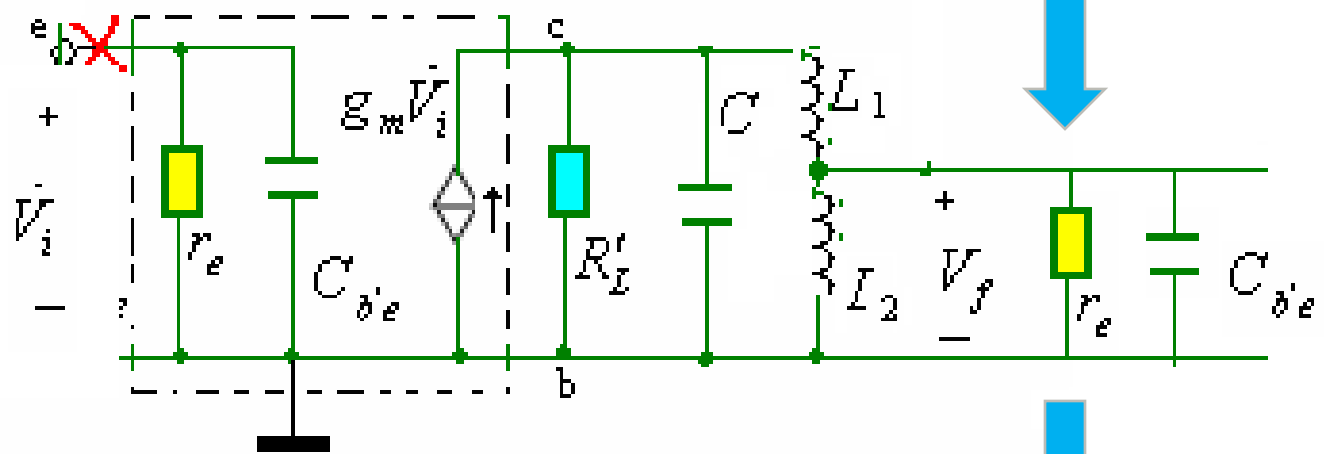
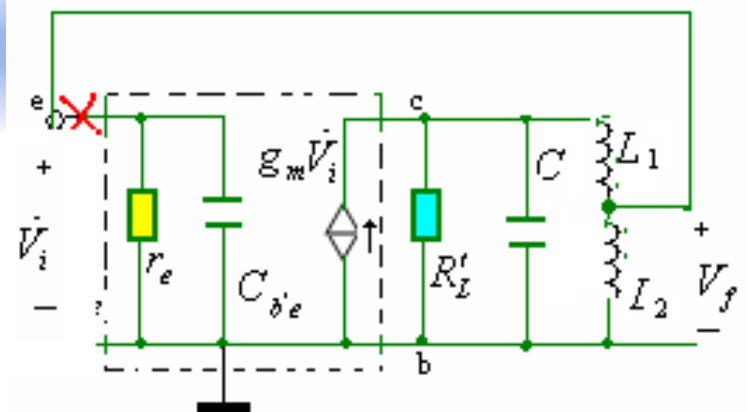
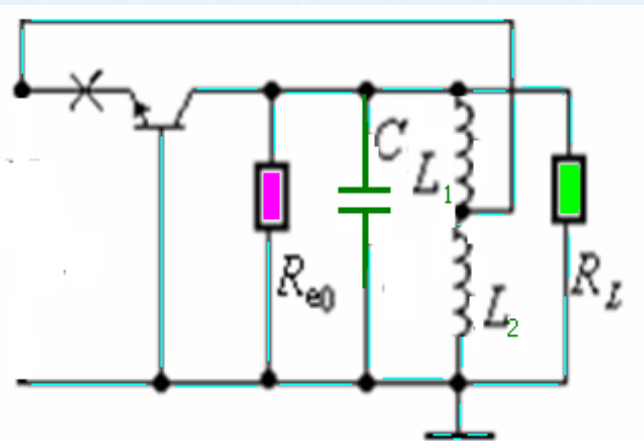


图5.2.7 电感三点式振荡器电路

(b) 图为其共基组态交流等效电路





该电路的振荡角频率 $\omega_{osc} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$

其中 $L = L_1 + L_2 \pm 2M$, M 为互感。

起振条件 $g_m > \frac{1}{n} g'_L + n g_e$ $g'_L = \frac{1}{R'_L}$ $g_e = \frac{1}{r_e}$

接入系数 $n = \frac{N_{12}}{N_{13}} = \frac{L_2 \pm M}{L_1 + L_2 \pm 2M}$

反馈系数 $F = n = \frac{L_2 \pm M}{L_1 + L_2 \pm 2M}$

反馈系数一般为 $1/10 \sim 1/2$



四、三点式电路的特点

电容三点式：反馈电压中高次谐波分量很小，因而输出波形好，接近正弦波。

反馈系数因与回路电容有关，如果用改变回路电容的方法来调整振荡频率，必将改变反馈系数，从而影响起振。

电感三点式：便于用改变电容的方法来调整振荡频率，而不会影响反馈系数，但反馈电压中高次谐波分量较多，输出波形差。

高次谐波在电感上的压降较大，因此反馈了较强的高次谐波到输入端，使得波形较差。



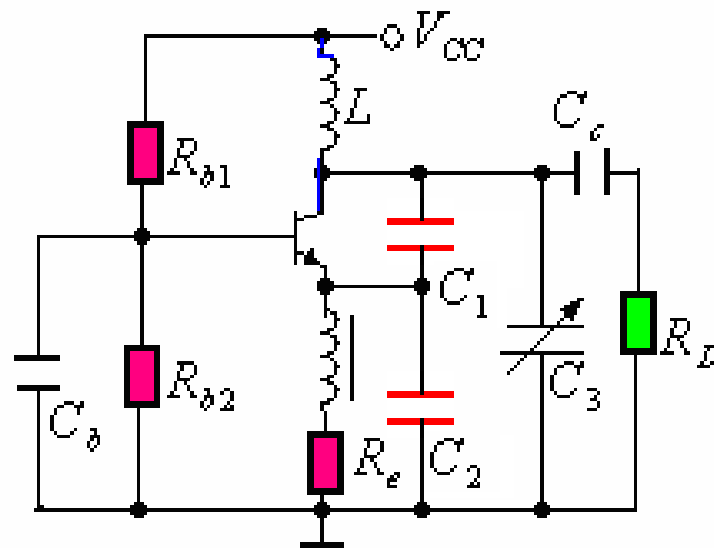
例 5.2.3 在如下图所示电容三点式振荡电路中, 已知

$$L = 0.5\mu\text{H}, C_1 = 51\text{pF}, C_2 = 3300\text{pF},$$

$$C_3 = 12 \sim 250\text{pF}, R_L = 5\text{k}\Omega$$

$$g_m = 30\text{mS}, C_{be} = 20\text{pF} \quad Q_0 = 80$$

试求起振的频率范围。

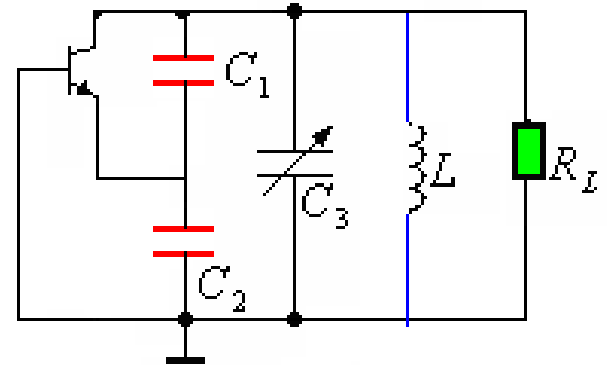




解: 题图的交流等效电路为

电路的有关参数如下

接入系数



$$n = \frac{C_1}{C_1 + C_2 + C_{b'e}} = \frac{51}{51 + 3300 + 20} \approx 0.015$$

$$\text{当 } C_3 = 12\text{pF} \text{ 时, } C_{\Sigma} = \frac{C_1(C_2 + C_{b'e})}{C_1 + C_2 + C_{b'e}} + C_3 \approx 66.23(\text{pF})$$

$$g_{e0} = \frac{1}{Q_0} \sqrt{\frac{C_{\Sigma}}{L}} = \frac{1}{80} \sqrt{\frac{62.23 \times 10^{-12}}{0.5 \times 10^{-6}}} \approx 0.14 \times 10^{-3}(\text{S})$$



因为 $g_L = \frac{1}{R_L} = \frac{1}{5 \times 10^3} = 0.2 \times 10^{-3} (S)$

$$g_e = \frac{1 + \beta}{r_{b'e}} \approx \frac{\beta}{r_{b'e}} = g_m = 30 \times 10^{-3} S$$

所以 $\frac{1}{n} g'_L + n g_e = \frac{1}{n} (g_L + g_{e0}) + n g_e$

$$= \frac{1}{0.015} (0.2 \times 10^{-3} + 0.14 \times 10^{-3}) + 0.015 \times 30 \times 10^{-3} \approx 23 \times 10^{-3} (S)$$

根据振幅起振条件 $g_m > \frac{1}{n} g'_L + n g_e$

可见 $C_3 = 12 pF$ 电路满足起振条件。

相应的振荡频率：

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_\Sigma}} = \frac{1}{2\pi \sqrt{0.5 \times 10^{-6} \times 62.23 \times 10^{-12}}} \approx 28.53 (MHz)$$



(2) 当 $C_3 = 250\text{pF}$ 时, 可求出相应的参数

$$\frac{1}{n} g'_L + n g_e \approx 34 \times 10^{-3} > g_m = 30 \times 10^{-3}$$

这时电路不满足起振条件。

在频率低端满足起振条件的临界值为

$$g_m = \frac{1}{n} g'_L + n g_e = \frac{1}{n} (g_{e0} + g_L) + n g_e$$

所以 $g_{e0} = n(g_m - n g_e) - g_L \approx 0.24 \times 10^{-3} (S)$



对应的总等效电容

$$C_{\Sigma} = L(Q_0 g_{e0})^2 \approx 184(\text{pF})$$

对应的可变电容

$$C_3 = C_{\Sigma} - \frac{C_1(C_2 + C_{b'e})}{C_1 + C_2 + C_{b'e}} \approx 184 - 50 = 134(\text{pF})$$

对应的振荡频率

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\Sigma}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.5 \times 10^{-6} \times 184 \times 10^{-12}}} \approx 16.59(\text{MHz})$$

所以，振荡电路的频率范围为16.59 ~ 28.53MHz。



5.2.3 单片集成振荡器

一、差分对管振荡电路

R_{ee} 为恒流源

I_0 的交流等效电阻。

根据瞬时极性法判断，在 T_1 管基极断开，有

$$v_{b1} \uparrow \rightarrow v_{e1}(v_{e2}) \uparrow \rightarrow v_{c2} \uparrow \rightarrow v_{b1} \uparrow$$

因此，此振荡器电路能正常工作。

共集电极共基极反馈电路

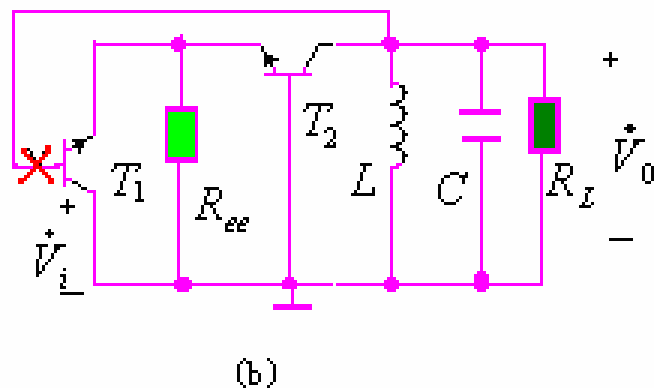
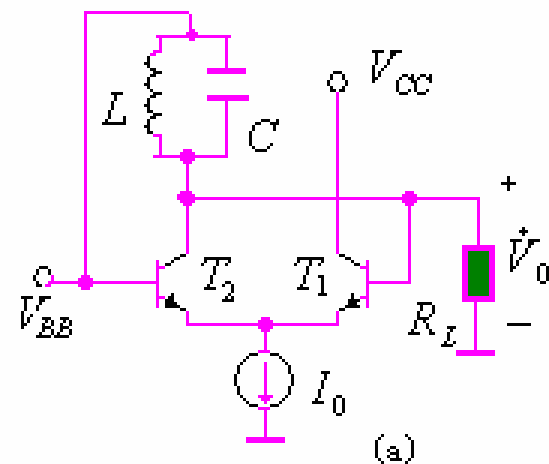


图5.2.10 差分对管振荡电路



二、E1648单片集成振荡器

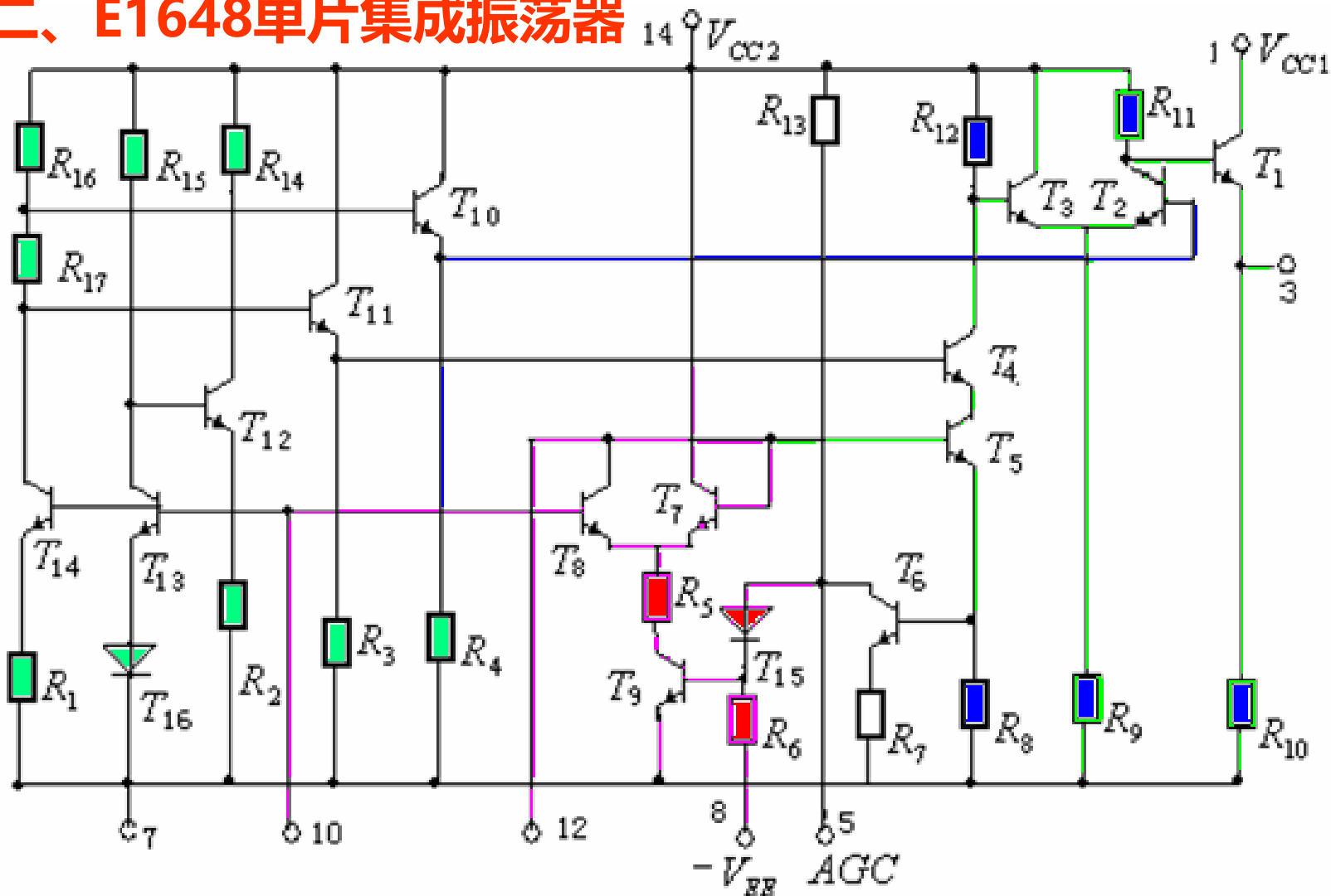


图5.2.11 单片集成振荡器E1648内部电路图



需要说明的是： T_{12} 与 T_{13} 管组成互补稳定电路，稳定

T_8 基极电位。若 T_8 基极电位受到干扰而升高，则有

$$v_{b8}(v_{b13}) \uparrow \rightarrow v_{c13}(v_{b12}) \downarrow \rightarrow v_{e12}(v_{b8}) \downarrow$$

这一负反馈作用使 T_8 基极电位保持恒定。

电路的振荡频率 $f_{osc} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1(C_1 + C_i)}}$

其中 $C_i \approx 6pF$ 是10、12脚之间的输入电容。

E1648的最高振荡频率可达225MHz。 E1648有1脚与3脚两个输出端。由于1脚和3脚分别是片内 T_1 管的集电极和发射极所以1脚输出电压的幅度可大于3脚的输出。

L_2C_2 回路应调谐在 振荡频率 f_{osc} 上。



图5.2.12是利用E1648组成的正弦波振荡器。

如果10脚与12脚外接包括变容二极管在内的LC元件，可以构成压控振荡器。显然，利用E1648也可以构成晶体振荡器。

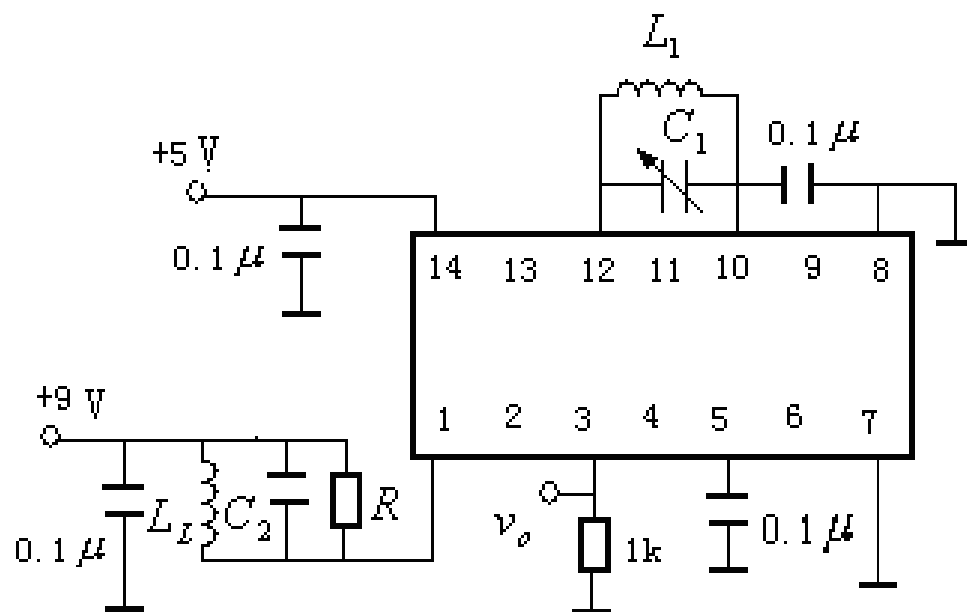


图5.2.12 E1648组成的正弦波振荡



作业: 5.17 5.19

预习 5.3 5.4 5.5