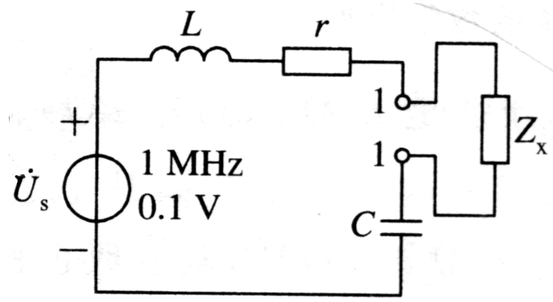
通信电路课后习题答案

1.1 在题图 1.1 所示的电路中，信号源频率 f_0=1MHz，回路空载 Q 值为 100，r 是回路损耗电阻。将 1—1 端短路，电容 C 调到 100pF 时回路谐振。如将 1—1 端开路后再串接一阻抗 Z_x（由电阻 r_x 与电容 C_x 串联），则回路失谐，C 调至 200pF 时重新谐振，这时回路有载 Q 值为 50。试求电感 L、未知阻抗 Z_x。

解:



(1)空载时 $f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow L=\dfrac{1}{4\pi^2 C f_0^2}=253uH$

由 $Q_0=\dfrac{X_c}{r} \Rightarrow r=\dfrac{1}{2\pi f_0 C Q_0}=15.9\Omega$

(2)谐振时，$C_{\text{总}}=100\,pF$

串入C_x后，$C_{\text{总}}=\dfrac{CC_x}{C+C_x}$

$\therefore\ C_x=\dfrac{CC_{\text{总}}}{C-C_{\text{总}}}=200\,pF$

由 $Q=\dfrac{X_{\text{总}}}{r_{\text{总}}}$

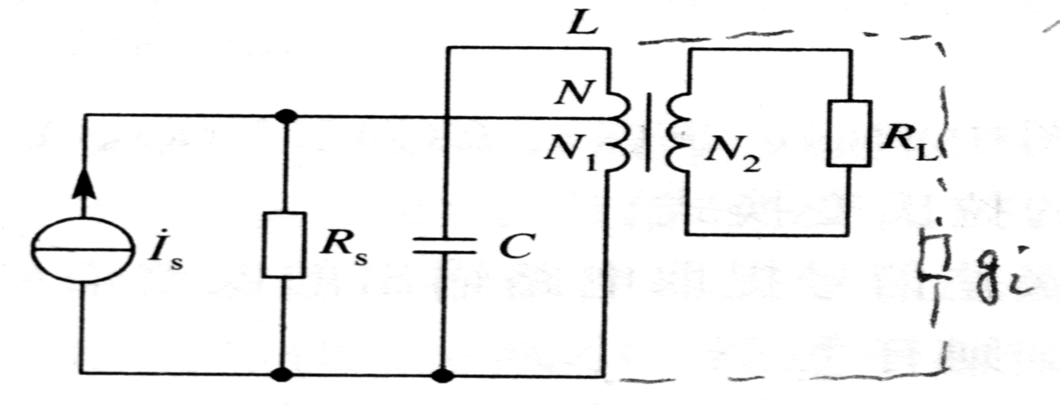
$\therefore r_{\text{总}}=r_x+r=\dfrac{X_{\text{总}}}{Q}$

$\therefore r_x=\dfrac{2\pi f_0 L}{Q}-r=15.9\Omega$

$\therefore Z_x=r_x-j\dfrac{1}{\omega C_x}=15.9\Omega-j795.8\Omega$

1．2 在题图 1.2 所示的电路中，已知回路谐振频率 f_0=465kHz，Q_0=100，N=160 匝，N_1=40 匝，N_2=10 匝。C =200pF，R_s=16kΩ，R_L=1kΩ。试求回路电感 L、有载 Q 值和通频带 $BW_{0.7}$。

解:



由 $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \Rightarrow L = \dfrac{1}{4\pi^2 f_0^2 C} = 586uH$

并联谐振:

$$Q_0 = \frac{\omega_0 C}{g_{e0}} \Rightarrow g_{e0} = \frac{\omega_0 C}{Q_0} = 5.84\times10^{-6} s \qquad (R_{e0} = 171.2k\Omega)$$

$$g_L = \frac{1}{R_L} = 10^{-3} s$$

折合到线圈两端:

$$g_L' = n_2^2 g_L = (\frac{10}{160})^2 \times 10^{-3} = 3.91\times10^{-6} s$$

$$g_s' = n_1^2 g_s = (\frac{40}{160})^2 \times \frac{1}{16} \times 10^{-3} = 3.91\times10^{-6} s \quad (R_s = 255.7k\Omega)$$

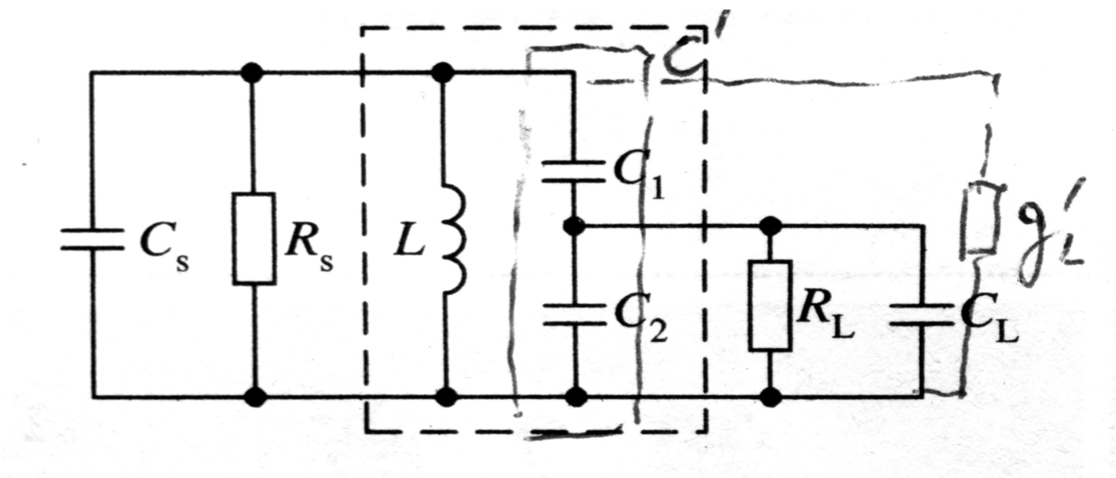
$$\therefore g_\Sigma = g_s' + g_L' + g_{e0} = 1.36\times10^{-5} s \qquad (R_\Sigma = 73.2k\Omega)$$

$$Q_e = \frac{\omega_0 C}{g_\Sigma} \text{ B } 43$$

$$BW_{0.7} = \frac{f_0}{Q_e} \text{ B } 10.8kHz$$

1．3 在题图 1.3 所示的电路中，L=0.8uH，C_1 = C_2 =20pF，R_s=10kΩ，R_L=5kΩ，Q_0=100。试求回路在有载情况下的谐振频率 f_0，谐振电阻 R_Σ，回路有载 Q 值和通频带 $BW_{0.7}$。

解：



$$C_2' = C_2 + C_L = 40\,pF$$

$$C_\Sigma = \frac{C_1 \times C_2'}{C_1 + C_2'} + C_s = 18.3\,pF$$

谐振频率：$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}} = 4.16 \times 10^7\,Hz$

由 $Q_0 = \frac{\omega_0 C}{g_{e0}} \Rightarrow g_{e0} = \frac{\omega_0 C}{Q_0} = 4.78 \times 10^{-6}\,s$

$$g_L = \frac{1}{R_L} = 2 \times 10^{-4}\,s$$

$$g_L' = n^2 g_L = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2'}\right)^2 g_L = 2.2 \times 10^{-5}\,s$$

$$g_s = \frac{1}{R_s} = 10^{-4}\,s$$

$$\therefore g_\Sigma = g_s + g_L' + g_{e0} = 1.698 \times 10^{-4}\,s$$

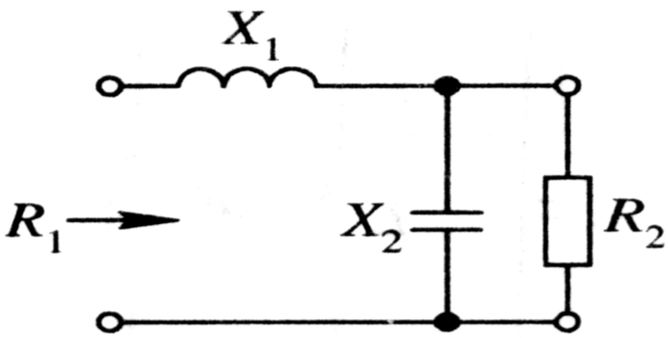
$$R_\Sigma = \frac{1}{g_\Sigma} = 5.88k$$

$$Q_e = \frac{\omega_0 C_\Sigma}{g_\Sigma} \text{ B } 28.1$$

$$BW_{0.7} = \frac{f_0}{Q_e} \text{ B } 1.48MHz$$

1．4 设计一个 LC 选频匹配网络，使 50Ω 负载与 20Ω 的信号源电阻匹配。如果工作频率 20MHz，各元件的值是多少？

解：



$$|X_1| = \sqrt{R_1(R_2 - R_1)}$$

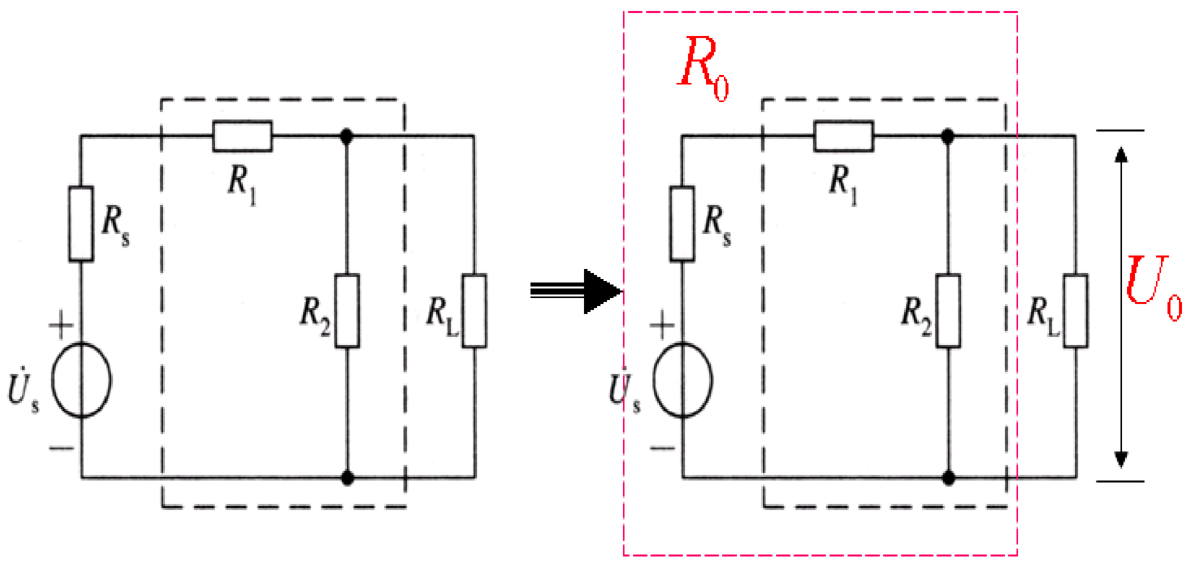
$$\therefore L = \frac{|X_1|}{2\pi f_0} = 1.95 \times 10^{7}\, H$$

$$|X_2| = R_2\sqrt{\frac{R_1}{R_2 - R_1}}$$

$$\therefore C = \frac{1}{2\pi f_0 |X_2|} = 195\, pF$$

1．6 试求题图 1.6 所示虚线框内电阻网络的噪声系数。

解：



$$P_{sAi}=\frac{U_s^2}{4R_s}$$

根据戴维南定律有：

$$R_0=(R_1+R_s)//R_2=\frac{(R_1+R_s)R_2}{R_1+R_s+R_2}$$

$$U_0=\frac{R_2}{R_1+R_s+R_2}U_s$$

$$\therefore P_{sA0}=\frac{U_0^2}{4R_0}=\frac{R_2U_s^2}{4(R_1+R_s)(R_1+R_s+R_2)}$$

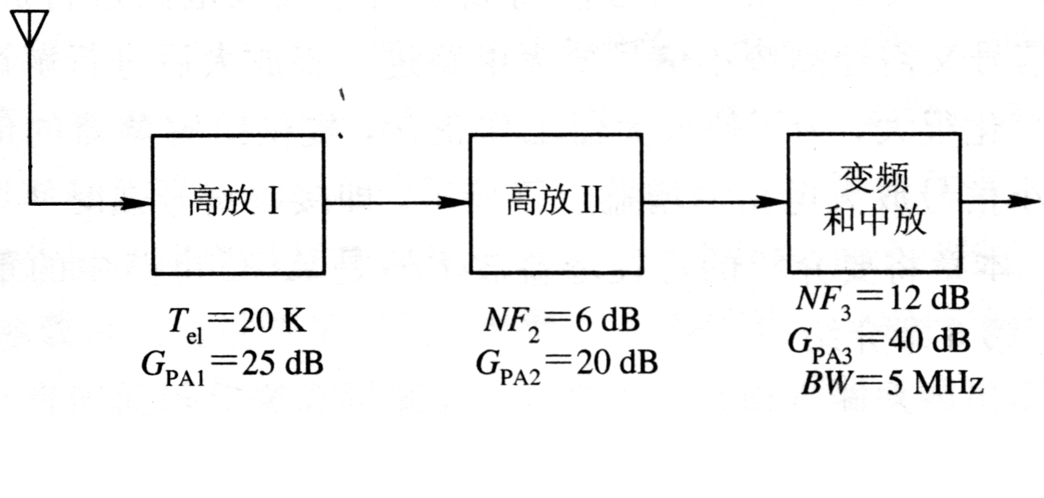
$$\therefore G_{PA}=\frac{P_{sA0}}{P_{sAi}}=\frac{R_2R_s}{(R_1+R_s)(R_1+R_s+R_2)}$$

对无源网络：

$$NF=\frac{1}{G_{PA}}=1+\frac{R_1}{R_s}+\frac{(R_1+R_s)^2}{R_2R_s}$$

1．8 某卫星接收机的线性部分如题图 1.8 所示，为满足输出端信噪比为 20dB 的要求，高放 I 输入端信噪比应为多少？

解：



$$NF_1 = 1 + \frac{T_e}{T_0} = 1.0689$$

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_{PA1}} + \frac{NF_3 - 1}{G_{PA2}G_{PA3}} = 1.0788$$

$$10\lg NF = 10\lg \frac{SNR_{Ai}}{SNR_{Ao}} = SNR_{Ai}(dB) - SNR_{Ao}(dB)$$

$$\therefore SNR_{Ai}(dB) = 10\lg NF + SNR_{Ao}(dB) = 20.33dB$$

2．1　　已知高频晶体管 3CG322A，当 I_{EQ}=2mA，f_0=30MHz 时测得 Y 参数如下：

$y_{ie} = (2.8 + j3.5)mS$ ；　　　　$y_{re} = (-0.08 - j0.3)mS$

$y_{fe} = (36 + j27)mS$ ；　　　　$y_{oe} = (0.2 + j2)mS$

试求 $g_{ie}, C_{ie}, g_{oe}, C_{oe}, |y_{fe}|, \varphi_{fe}, |y_{re}|, \varphi_{re}$ 的值。

解：

由 $y_{ie} = (2.8 + j3.5)mS$ 得：　$g_{ie} = 2.8mS$ ；$C_{ie} = 3.5/\omega = 18.5pF$

由 $y_{oe} = (0.2 + j2)mS$ 得：　$g_{oe} = 0.2mS$ ；$C_{oe} = 2/\omega = 10.6pF$

由 $y_{re} = (-0.08 - j0.3) = 0.31\angle -105^0\ mS$ 得：　$|y_{re}| = 0.31mS$ ；$\varphi_{re} = -105^0$

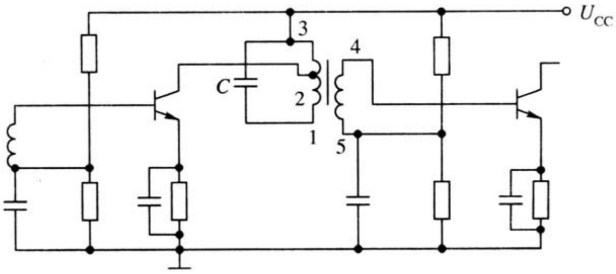
由 $y_{fe} = (36 + j27) = 45\angle -37^0\ mS$ 得：　$|y_{fe}| = 45mS$ ；$\varphi_{fe} = -37^0$

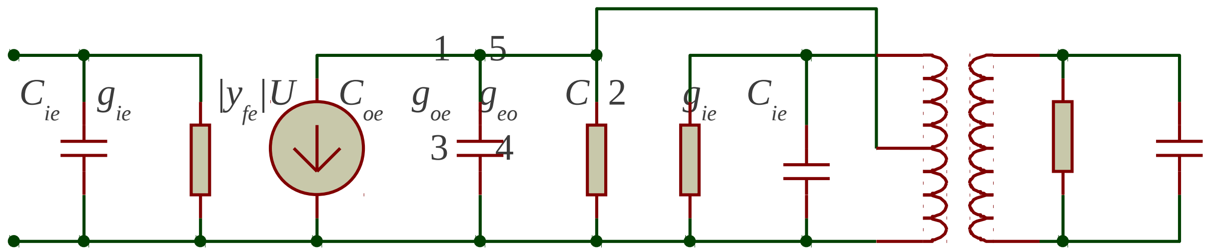
2．2 在题图 2.2 所示调谐放大器中，工作频率 f_0=10.7MHz，$L_{1\sim3}$=4μH，Q_0=100， $N_{1\sim3}$=20 匝， $N_{2\sim3}$=5 匝 ， $N_{4\sim5}$=5 匝 。 晶 体 管 3DG39 在 I_{EQ}=2mA ， f_0=10.7MHz 时 测 得 ：

$g_{ie}=2860\mu S, C_{ie}=18pF, g_{oe}=200\mu S,$

$C_{oe}=7pF, \left|y_{fe}\right|=45mS, \left|y_{re}\right|=0$。试求放大器的电压增益 A_{u0} 和通频带 $BW_{0.7}$。

解：Y 参数等效电路：





(1)

$$n_1=\frac{n_{23}}{n_{13}}=\frac{1}{4}\ ;\ n_2=\frac{n_{45}}{n_{13}}=\frac{1}{4}$$

$$g_{eo}=\frac{1}{Q_0\omega_0 L_{13}}=37uS$$

$$g_{\Sigma}=n_1^2 g_{oe}+n_2^2 g_{ie}+g_{eo}=228.25mS$$

$$\therefore A_{u0}=\frac{n_1 n_2\left|y_{fe}\right|}{g_{\Sigma}}=12.3$$

(2)

$$\text{Q}\left.\begin{array}{l} Q_e=\dfrac{1}{g_{\Sigma}\omega_0 L_{13}} \\ f_0=\omega_0/2\pi \end{array}\right\}\Rightarrow$$

$$BW_{0.7}=f_0/Q_e=2\pi f_0^2 g_{\Sigma}L_{13}=0.66MHz$$

2．3 题图 2.3 是中频放大器单级电路图。已知工作频率 f_0=30MHz，回路电感 L=1.5μH，Q_0=100，

$N_1/N_2=4$， $C_1\sim C_4$均为耦合电容或旁路电容。晶体管采用 3CG322A，在工作条件下测得 Y 参数与题 2.1 相同。

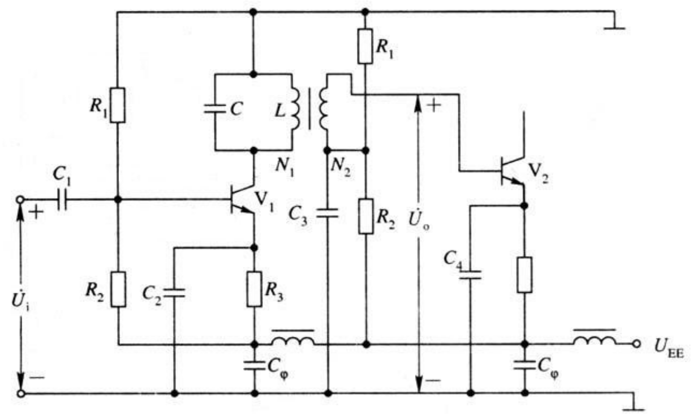
（1）画出 Y 参数表示的放大器等效电路。

（2）求回路谐振电导 g_Σ。

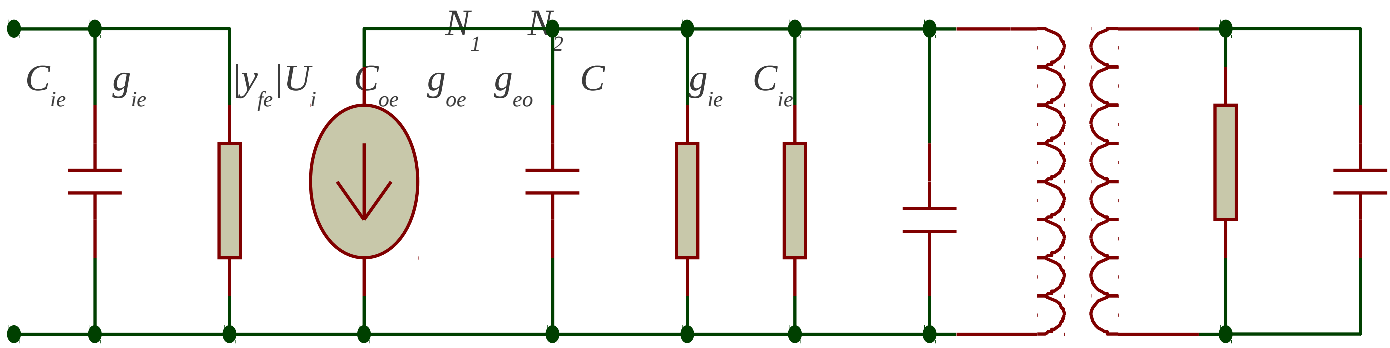
（3）求回路电容 C_Σ的表达式。

（4）求放大器电压增益 A_{uo}。

（5）当要求该放大器通频带为 10MHz 时，应在回路两端并联多大的电阻 R_P？



解：（1）等效电路：



(2)

$$n_1=1\ ;\ n_2=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{4}$$

$$g_{eo}=\frac{1}{Q_0\omega_0 L}=35.4uS$$

$$g_{\Sigma}=n_1^2 g_{oe}+n_2^2 g_{ie}+g_{eo}=200+175+35.4=410.4uS$$

(3)

$$C_{\Sigma}=C_{oe}+n_2^2 C_{ie}+C_{eo}$$

(4)

$$A_{u0}=\frac{n_1 n_2 \left|y_{fe}\right|}{g_{\Sigma}}=\frac{45\times 10^{-3}}{4\times 410.4\times 10^{-6}}=27.4$$

(5)

$$10MHz=BW'_{0.7}=2\pi f_0^{\ 2} g'_{\Sigma} L$$

$$\therefore g'_{\Sigma}=BW'_{0.7}/2\pi f_0^{\ 2} L=1179.52uS$$

$$\therefore R_P=1/(g'_{\Sigma}-g_{\Sigma})=1.3k\Omega$$

2．4　在三级调谐放大器中，工作频率为 465kHz，每级 LC 回路的 Q_e=40，试问总的通频带是多少？如果要使总的通频带为 10kHz，则允许最大 Q_e 为多少？

解：

(1)

$$BW_3 = \sqrt{2^{1/3}-1}\, f_0/Q_e$$

$$= \sqrt{2^{1/3}-1} \times 465\times10^3/40 = 5.93kHz$$

(2)

由得 $BW_n = \sqrt{2^{1/n}-1}\, f_0/Q_e$ ：

$$Q_e = \sqrt{2^{1/n}-1}\, f_0/BW_n$$

$$= \sqrt{2^{1/3}-1} \times 465\times10^3/10^4 = 23.7$$

2．5 已知单调谐放大器谐振电压增益 A_{u0}=10，通频带 $BW_{0.7}$=4MHz，如果再用一级放大器与之级联，这时两级放大器总增益和通频带各为多少？若要求级联后总通频带仍为 4MHz，则每级放大器应总样改动？改动后总谐振电压增益是多少？

解：

(1)两级放大器的总增益:

$$A_{u\Sigma}=A_1\times A_2=100$$

通频带为:

$$BW_2=\sqrt{2^{1/2}-1}\times BW_{0.7}$$

$$=\sqrt{2^{1/2}-1}\times 4\times 10^6=2.57MHz$$

(2)要使 $BW_2=4MHz$，则必须使

$$BW'_{0.7}=BW_2\Big/\sqrt{2^{1/2}-1}=6.22MHz$$

由

$$\left.\begin{aligned}BW_{0.7}&=f_0/Q_e\\ Q_e&=R_\Sigma/\omega_0 L\end{aligned}\right\}\Longrightarrow BW_{0.7}=2\pi f_0^2 L/R_\Sigma$$ 知:

可采用减小回路并联谐振电阻 R_Σ 的方法展宽通频带.

(3)设原单级增益为 A_{u0}，通频带展宽后的增益为 A'_{u0}:

由 $$A_{u0}=\frac{n_1 n_2\left|y_{fe}\right|}{g_\Sigma}$$

得 $$\frac{A_{u0}}{A'_{u0}}=\frac{g'_\Sigma}{g_\Sigma}$$

将 $BW_{0.7}=2\pi f_0^2 Lg_\Sigma$ 代入上式得:

$$A'_{u0}=\frac{BW_{0.7}}{BW'_{0.7}}\times A_{u0}=6.4$$

两级总增益为:

$$A''_{u0}=A'_{u0}\times A'_{u0}=41.3$$

3．1　　已知谐振功率放大电路 U_{cc}=24V，P_0=5W。当 η_c=60%时，试计算 P_c 和 I_{co}。若 P_o 保持不变，η_c 提高到 80%，则 P_c 和 I_{co} 减小为多少？

解:

(1)

$$由\eta=\frac{P_o}{P_D} \Rightarrow P_D=\frac{P_o}{\eta_c}=\frac{5}{0.6}=8.33w \qquad (\frac{25}{3}w)$$

$$\therefore P_c=P_D-P_o=8.33-5=3.33w \qquad (\frac{10}{3}w)$$

$$由P_D=U_{cc}\times I_{co} \Rightarrow I_{co}=\frac{P_D}{U_{cc}}=0.35A \qquad (\frac{25}{72}A)$$

(2)若η_c提高到80%，重复上面的计算得:

$$P_D=\frac{P_o}{\eta_c}=6.25w$$

$$P_c=P_D-P_o=1.25w$$

$$I_{co}=\frac{P_D}{U_{cc}}=0.26A$$

3．2 已知谐振功率放大电路工作在乙类状态，U_{cc}=24V，R_{Σ}=53Ω，P_o=5W。试求 P_D、η_c和集电极电压利用系数 ξ。

解:

(1)求 ξ

$$由 P_o=\frac{1}{2}I_{c1m}^2R_\Sigma=\frac{1}{2}\frac{U_{cm}^2}{R_\Sigma}\quad\Longrightarrow U_{cm}=\sqrt{2P_oR_\Sigma}=23V$$

$$\therefore \xi=\frac{U_{cm}}{U_{cc}}=\frac{23}{24}=95.8\%$$

(2)求 P_D,η_c

解法1:

$$\because \left.\begin{aligned} I_{c1m}&=I_{cm}\alpha_1(90^o)=\frac{1}{2}I_{cm}\\ I_{c0}&=I_{cm}\alpha_0(90^o)=\frac{1}{\pi}I_{cm}\end{aligned}\right\}\Longrightarrow I_{c0}=\frac{2}{\pi}I_{c1m}$$

$$\therefore \eta_c=\frac{P_o}{P_D}=\frac{1}{2}\frac{I_{c1m}U_{cm}}{I_{c0}U_{cc}}=75.36\%$$

$$P_D=\frac{P_o}{\eta_c}=6.63w$$

解法2:

$$\eta_c=\frac{1}{2}\xi g_1(\theta)=\frac{1}{2}\xi\frac{\alpha_1(\theta)}{\alpha_0(\theta)}=\frac{1}{2}\xi\frac{1/2}{1/\pi}=75.36\%$$

$$P_D=\frac{P_o}{\eta_c}=6.63w$$

3．3 已知谐振功率放大电路的导通角 θ 分别为 180^0、90^0 和 60^0 时都工作在临界状态，且三种情况下的 U_{cc} 和 I_{cm} 也都相同。试计算三种情况下的效率 η_c 的比值和输出功率 P_o 的比值。

解:

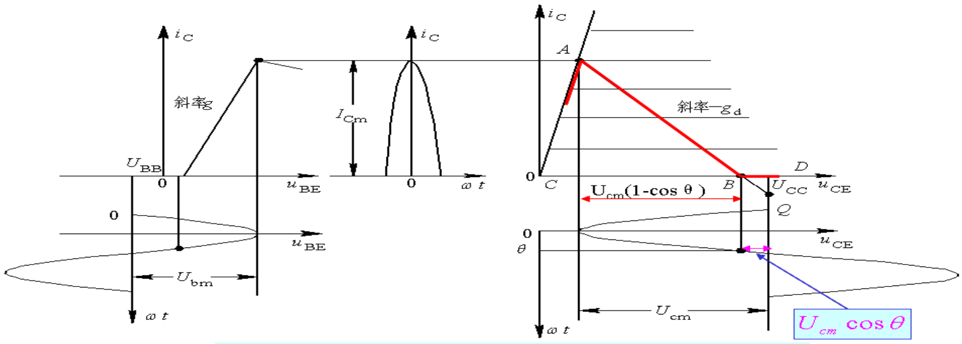


图 3.2.5 折线化转移特性和输出特性分析

$$\text{Q}\ \alpha_0(\theta)=\frac{\sin\theta-\theta\cos\theta}{\pi(1-\cos\theta)}$$

$$\therefore\ \alpha_0(180^o)=0.5\quad \alpha_0(90^o)=\frac{1}{\pi}\approx 0.318\quad \alpha_0(60^o)=\frac{\sqrt{3}}{\pi}-\frac{1}{3}\approx 0.218$$

$$\text{Q}\alpha_1(\theta)=\frac{\theta-\sin\theta\cos\theta}{\pi(1-\cos\theta)}$$

$$\therefore\ \alpha_1(180^o)=0.5\quad \alpha_1(90^o)=0.5\quad \alpha_1(60^o)=\frac{2}{3}-\frac{\sqrt{3}}{2\pi}\approx 0.319$$

$$\text{由}\ \left.\begin{array}{l} U_{cc}(180^o)=U_{cc}(90^o)=U_{cc}(60^o) \\ I_{cm}(180^o)=I_{cm}(90^o)=I_{cm}(60^o) \end{array}\right\}\Rightarrow 2U_{cm}(180^o)=U_{cm}(90^o)=U_{cm}(60^o)$$

$$\text{又Q}\ \eta_c=\frac{P_o}{P_D}=\frac{1}{2}\frac{I_{c1m}U_{cm}}{I_{c0}U_{cc}}=\frac{1}{2}\frac{I_{cm}\alpha_1(\theta)U_{cm}}{I_{cm}\alpha_0(\theta)U_{cc}}$$

$$\therefore\eta_c(180^o):\eta_c(90^o):\eta_c(60^o)=\frac{1}{2}\frac{\alpha_1(180^o)}{\alpha_0(180^o)}:\frac{\alpha_1(90^o)}{\alpha_0(90^o)}:\frac{\alpha_1(60^o)}{\alpha_0(60^o)}=\frac{1}{2}:1.57:1.79$$

$$\text{又Q}\ P_o=\frac{1}{2}I_{c1m}U_{cm}=\frac{1}{2}I_{cm}\alpha_1(\theta)U_{cm}$$

$$\therefore P_o(180^o):P_o(90^o):P_o(60^o)=\frac{1}{2}\alpha_1(180^o):\alpha_1(90^o):\alpha_1(60^o)=\frac{1}{2}:1:0.78$$

3．4 已知晶体管输出特性中饱和临界线跨导 g_{cr}=0.8A/V，用此晶体管做成的谐振功放电路，U_{cc}=24V， θ=90^0， I_{cm}=2.2A，并工作在临界状态，试计算 P_o、P_D、η_c 和 R_Σ。（已知 $\alpha_0(70^o)=0.253,\alpha_1(70^o)=0.436$ ）

解:

$$\because U_{ce}=\frac{I_{cm}}{g_{cr}}=\frac{2.2}{0.8}=2.75V$$

$$\therefore U_{cm}=U_{cc}-U_{ce}=24-2.75=21.25V$$

$$\therefore P_o=\frac{1}{2}I_{c1m}U_{cm}=\frac{1}{2}I_{cm}\alpha_1(\theta)U_{cm}=10.9W$$

$$P_D=I_{c0}U_{cc}=U_{cc}\alpha_0(\theta)I_{cm}=13.36W$$

$$\therefore \eta_c=\frac{P_o}{P_D}=76.3\%$$

又：

$$U_{cm}=I_{c1m}R_{\Sigma}=I_{cm}\alpha_1(\theta)R_{\Sigma}$$

$$\therefore R_{\Sigma}=\frac{U_{cm}}{I_{cm}\alpha_1(\theta)}=22.2\Omega$$

3．6 实测一谐振功放，发现 P_o 仅为设计值的 20%，却略大于设计值。试问该功放工作在什么状态？如何调整才能使 P_o 和 I_{co} 接近设计值。 解：

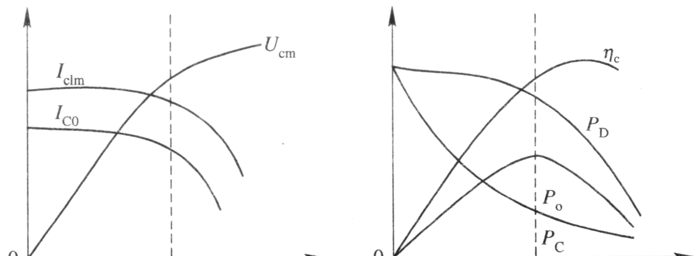


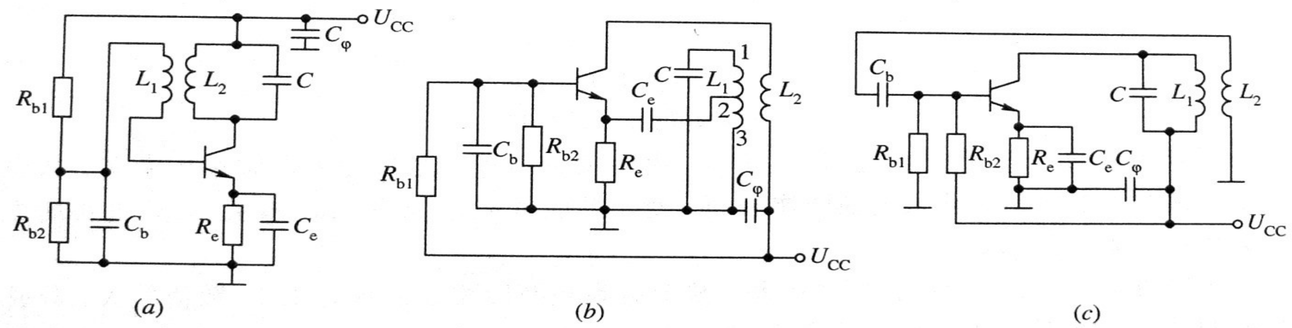
图 3.2.7 谐振功放的负载特性曲线

（1） 由图 3.2.7 可知，该功放工作在欠压状态。

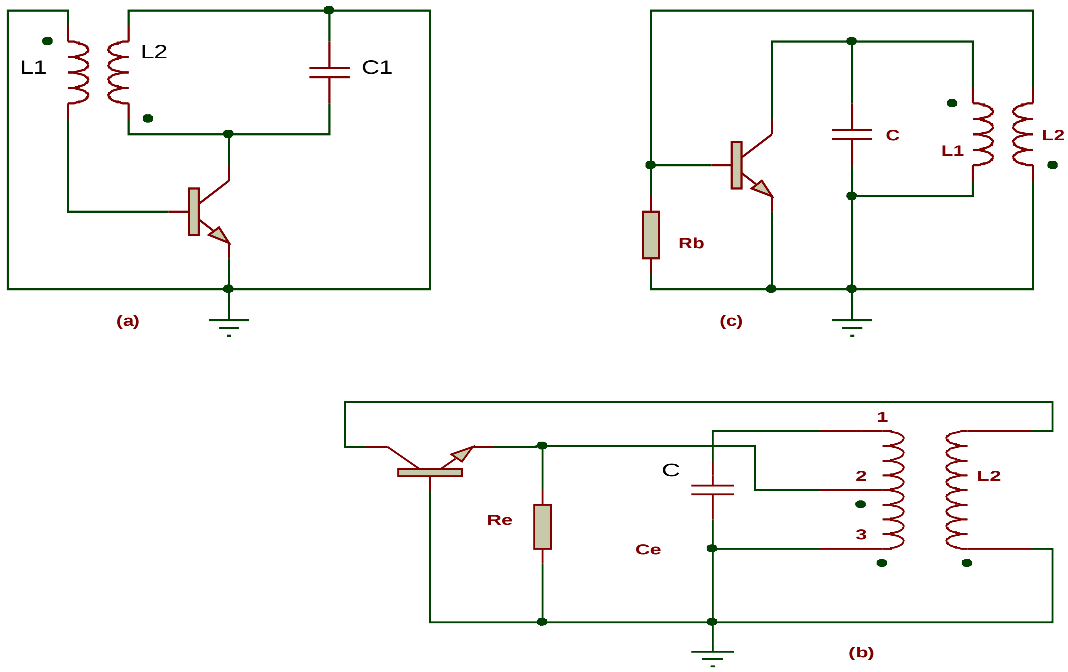
（2） 由于造成功放工作在欠压状态的原因可能有以下几种情况，因此必须根据具体情况进行调整（见 P60 例 3.3）：

a) 若负载电阻 R_Σ 偏小，可增大 R_Σ。
b) 若静态工作点 U_{BB} 偏低，可提高 U_{BB}。
c) 若激励信号 U_{bm} 不足，可增大 U_{bm}。

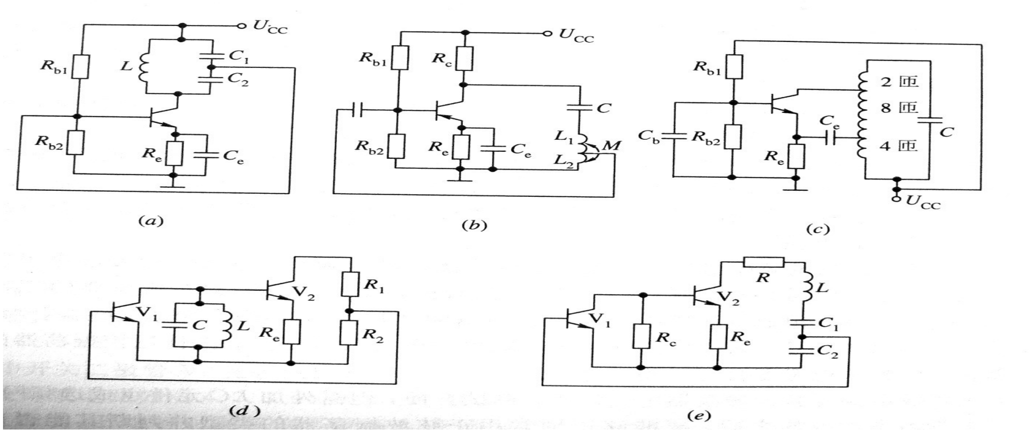
4．1 题图所示为互感耦合反馈振荡器，画出其高频等效电路，并注明电感线圈的同名端。



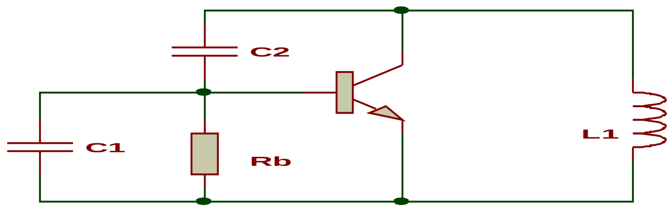
解：等效电路图如下：



4．2 题图所示各振荡电路中，哪些能够产生振荡？哪些不能够产生振荡？为什么？



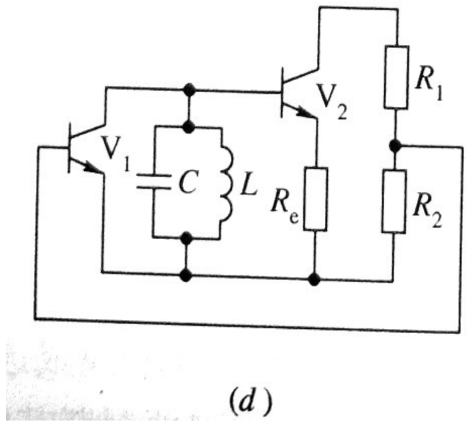
解：（a）图交流等效电路如下图所。此图不满足三点式振荡电路的振荡条件，不能起振。

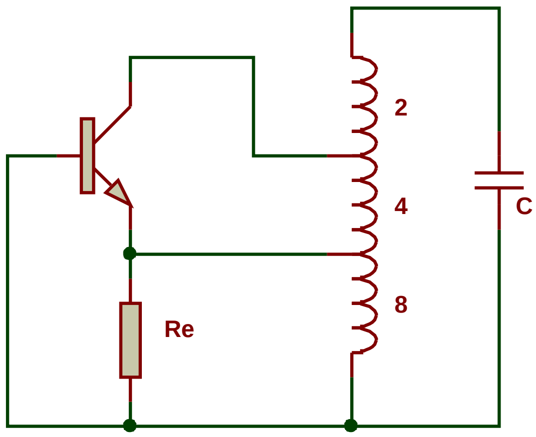


(a)

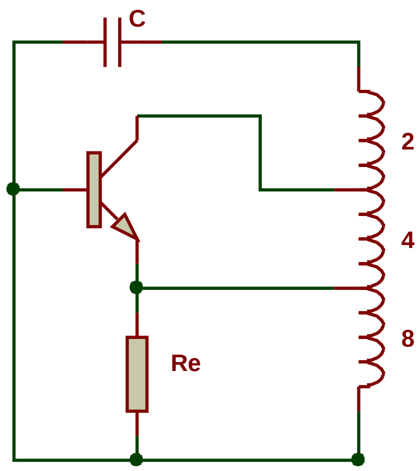
（b）图交流等效电路如图下所示，此电路反馈选频网络利用了串联谐振回路阻抗特性，其相频特性为正斜率，不满足相位稳定条件，因此不能起振。

（c）图交流等效电路如下图所示，此电路为三点式振荡电路，若三极管 bc 极之间的支路为容性电路，将满足三点式振荡电路的振荡条件，可以起振。





(c)

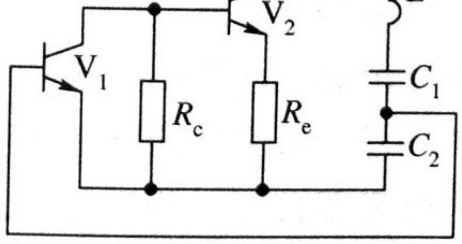


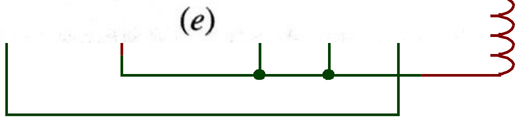
(c)

（d）图电路反馈选频网络利用了并联谐振回路阻抗特性，其相频特性为负斜率，满足相位稳定条件，并联谐振回路谐振阻抗最大，满足环路增益大于 1 的要求，反馈环路为正反馈，因此能够起振。

（e）图电路反馈选频网络利用了串联谐振回路阻抗特性，其相频特性为正斜率，不满足相位稳定条件，因此不能起振。

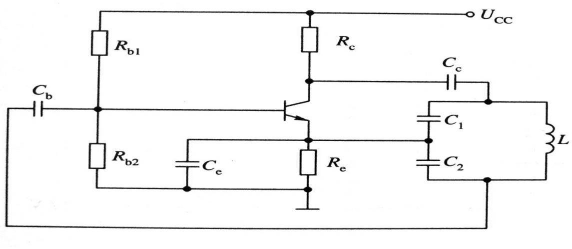
4.3 在题图所示的电容三点式电路中，C1=100pF，C2=300pF，L=50uH，试求电路的振荡频率 f_0 和维持振荡所必须的最小电压增益



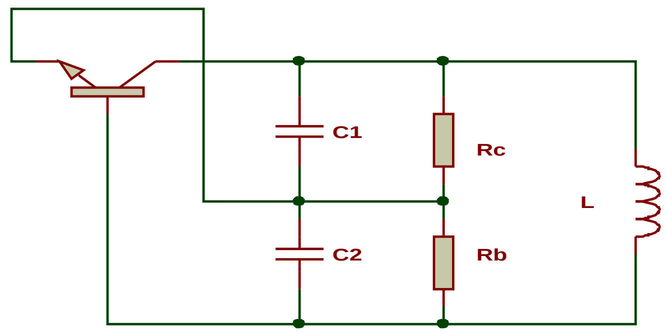


(b)

A_{umin}。

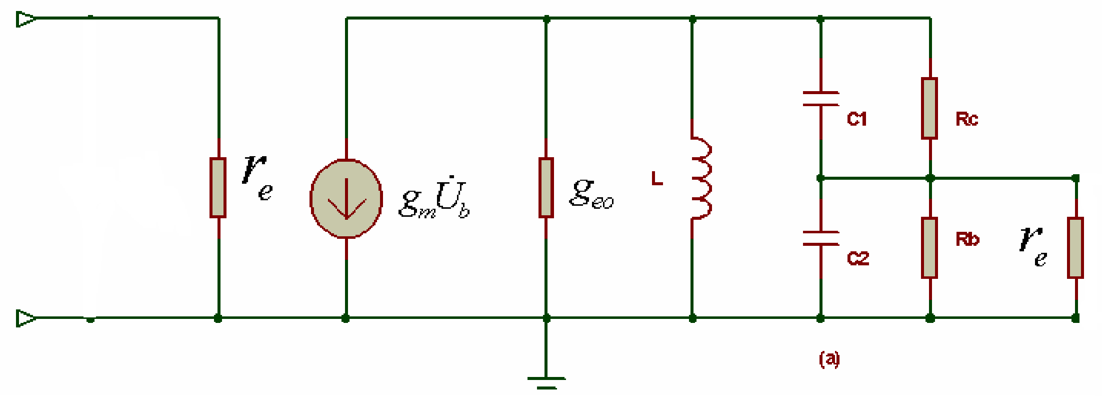


解：其交流等效电路如图所示：



(a)

其共基极 π 参数等效电路如图所示：



(a)

1 振荡频率：

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}}}=2.6MHz$$

2 最小电压增益 A_{umin}：

$$F=\frac{U_{C2}}{U_L}=\frac{IX_{C2}}{I(X_{C1}+X_{C2})}=\frac{C_1}{C_1+C_2}$$

由 $|AF|$ 得 ≥ 1

$$A_{umin}\geq\frac{1}{F}=\frac{C_1+C_2}{C_1}=4$$

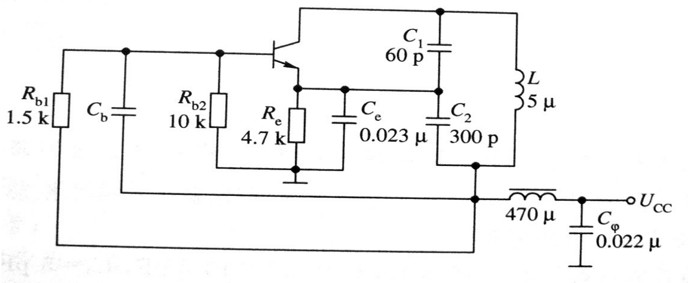
4．4 已知题图中所示振荡器中晶体管在工作条件下的 Y 参数为：g_{ie}=2mS,g_{oe}=20uS,$|y_{fe}|$

=20.6mS，L，C_1和C_2组成的并联回路Q_0=100。

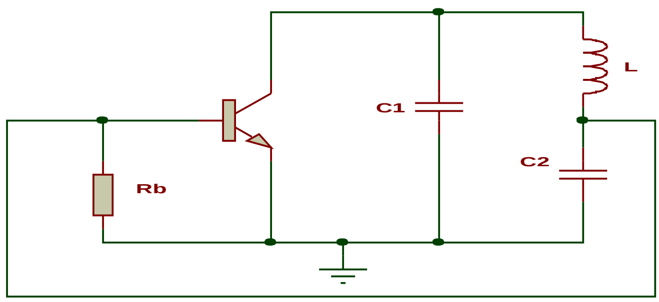
（1）画振荡器的共射交流等效电路。

（2）估算振荡频率和反馈系数。

（3）根据振幅起振条件判断该电路是否起振。



解：（1）振荡器的共射交流等效电路：



(a)

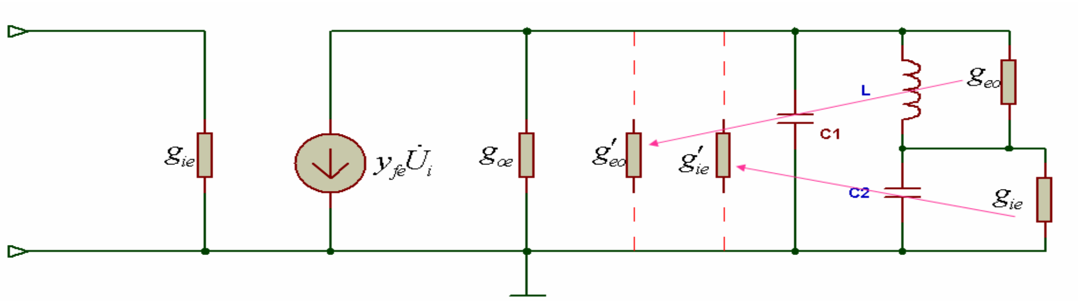
（2）振荡频率和反馈系数：

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{L\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}}}=10MHz$$

$$F=\frac{U_{C2}}{U_{c1}}=\frac{IX_{C2}}{IX_{C1}}=\frac{C_1}{C_2}=\frac{1}{5}$$

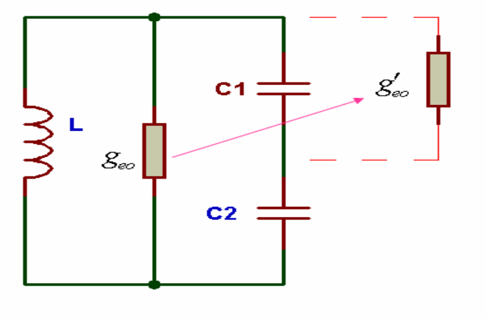
（3）该电路起振条件判断：

① y参数等效电路：



(b)

②

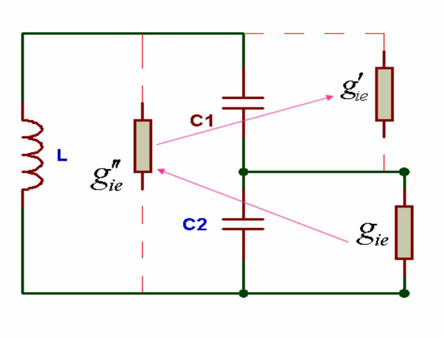


$$g_{eo} = n^2 g'_{eo} = \left(\frac{C_2}{C_1+C_2}\right)^2 g'_{eo}$$

$$\therefore g'_{eo} = \left(\frac{C_1+C_2}{C_2}\right)^2 g_{eo}$$

$$= \left(\frac{C_1+C_2}{C_2}\right)^2 \frac{1}{Q_o \omega_0 L}$$

③



$$\left.\begin{aligned} g''_{ie} &= \left(\frac{C_1}{C_1+C_2}\right)^2 g_{ie} \\ g''_{ie} &= \left(\frac{C_2}{C_1+C_2}\right)^2 g'_{ie} \end{aligned}\right\} \Longrightarrow g'_{ie} = \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 g_{ie}$$

④

$$\dot{T} = \frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{U}_{C2}}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{F}\dot{U}_{C1}}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{F}\left|y_{fe}\right|\dot{U}_i / g_{\Sigma}}{\dot{U}_i} = \frac{\dot{F}\left|y_{fe}\right|}{g_{\Sigma}}$$

因为起振条件要求：$\dot{T} \ge 1$

所以有：

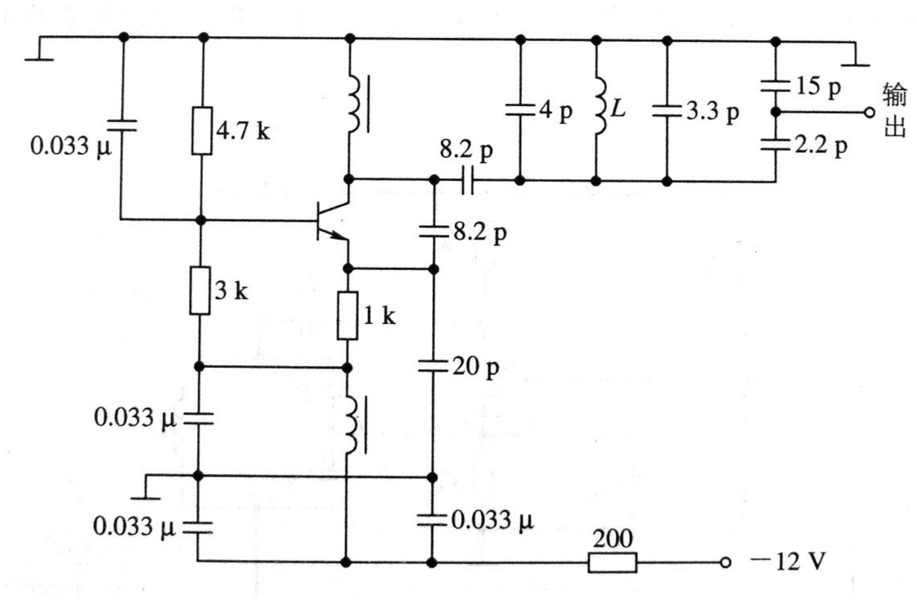
$$
\left|y_{fe}\right| \geq \frac{g_{\Sigma}}{\dot{F}} = \frac{1}{\dot{F}}\left(g_{oe} + g'_{eo} + g'_{ie}\right)
$$

$$
= \frac{1}{\dot{F}}\left[g_{oe} + \left(\frac{C_1 + C_2}{C_2}\right)^2 \frac{1}{Q_o \omega_0 L} + \left(\frac{C_1}{C_2}\right)^2 g_{ie}\right]
$$

$$
= 0.73mS
$$

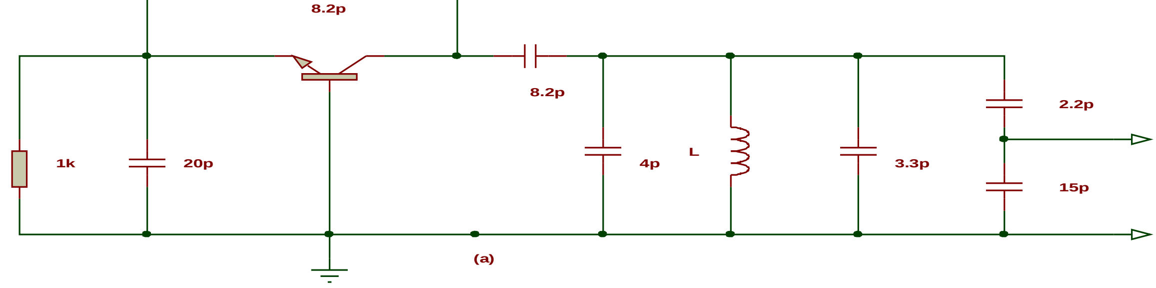
由题目条件$|y_{fe}|$=20.6mS 知此电路可以起振。

4．5 题图所示振荡电路的振荡频率为 f_0=50MHz，画出其交流等效电路并求回来电感 L。



0.033 μ
4.7 k
8.2 p
4 p
L
3.3 p
15 p
2.2 p
输
出
8.2 p
3 k
1 k
20 p
0.033 μ
0.033 μ
0.033 μ
200
−12 V

解：交流等效电路：



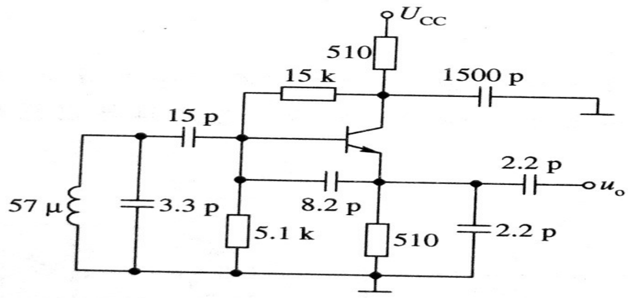
8.2p
8.2p
1k
20p
4p
L
3.3p
2.2p
15p
(a)

$$C=\frac{1}{\frac{1}{8.2}+\frac{1}{8.2}+\frac{1}{20}}+4+3+\frac{15\times 2.2}{15+2.2}=12.6p$$

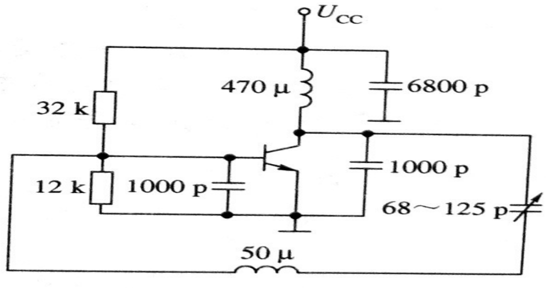
$$L=\frac{1}{4\pi^2 f^2 C}=0.8uH$$

4．6 对题图所示各振荡电路：

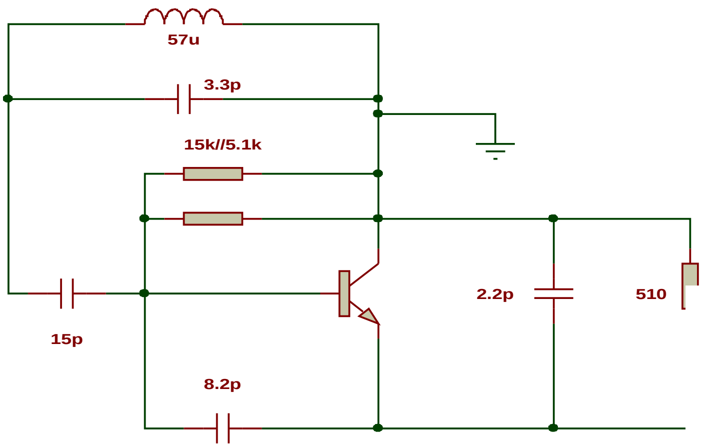
（1）画出高频交流等效电路，说明振荡器类型；



(a)



(b)

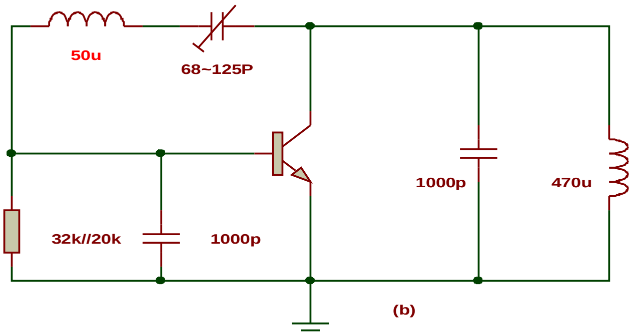


(a)

$$C=\frac{1}{\frac{1}{8.2}+\frac{1}{2.2}+\frac{1}{15}}+3.3=4.85p$$

$$f=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=9.58MHz$$

3　图（b）



(b)

$$C_{\min}\approx\frac{1}{\frac{1}{1000}+\frac{1}{1000}+\frac{1}{68}}=60p$$

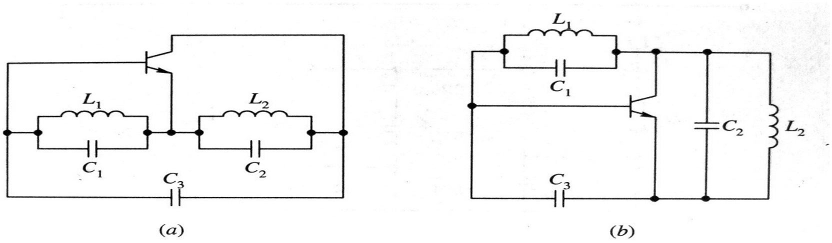
$$C_{\max}\approx\frac{1}{\frac{1}{1000}+\frac{1}{1000}+\frac{1}{125}}=100p$$ 此电路有三个谐振频率：50uH 电感与可变电容形成的串联谐振

$$f_3=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=2.91: 2.25MHz$$

频率 f_1，470uH 电感与 1000pF 电容的并联谐振频率 f_2,两个 1000pF 电容与可变电容和 50uH 电感串连形

成的谐振环路的谐振频率 f_3，只有 $f_3 > f_1 > f_2$，此电路才能满足电容三点式振荡电路的要求，从上面交流等效电路中可看出，上述条件是满足的，因此此电路为电容三点式振荡电路。

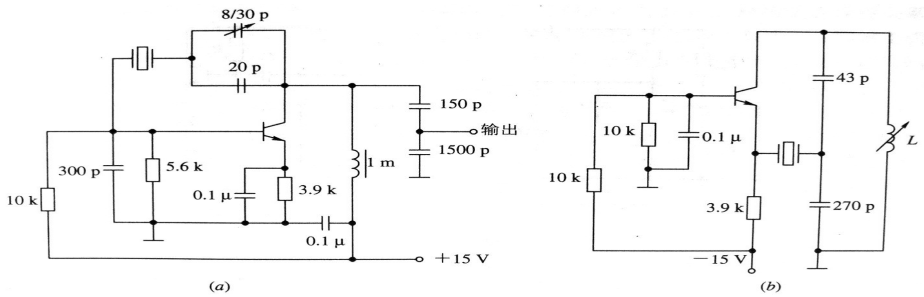
4．7 在题图所示的两个振荡电路中，两个 LC 并联谐振回路的谐振频率分别是 $f_1 = 1/(2\pi\sqrt{L_1C_1})$ 和 $f_2 = 1/(2\pi\sqrt{L_2C_2})$，试分别求两个电路中振荡频 f_0 与 f_1、f_2 之间的关系，并说明振荡电路的类型。



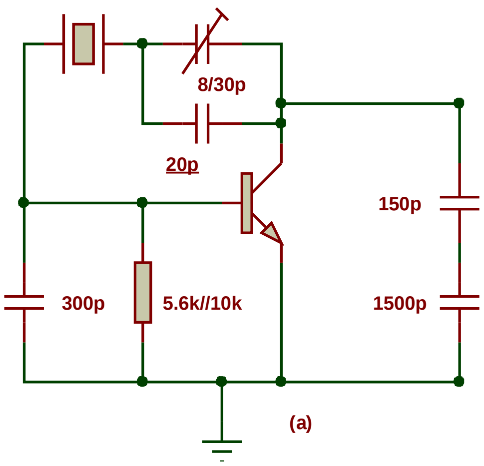
解：（1）图（a）显然只能构成电感三点式振荡电路。根据三点式振荡电路的组成法则，此电路中三极管发射极所接两个支路都必须为感性；对并联谐振回路，只有外加频率低于其谐振频率才表现为感性，因此图（a）中，$f_0 < f_1$、f_2。

（2）图（b）显然只能构成电容三点式振荡电路。根据三点式振荡电路的组成法则，此电路中三极管发射极所接两个支路都必须为容性；另一支路必须为感性。对并联谐振回路，只有外加频率低于其谐振频率才表现为感性；外加频率高于其谐振频率才表现为容性。因此图（a）中，$f_2 < f_0 < f_1$。

4．9 题图 4.9(a)、(b)分别为 10MHz 和 25MHz 的晶体振荡器。试画出交流等效电路，说明晶体在电路中的作用，并计算反馈系数。



解：图（a）的交流等效电路：

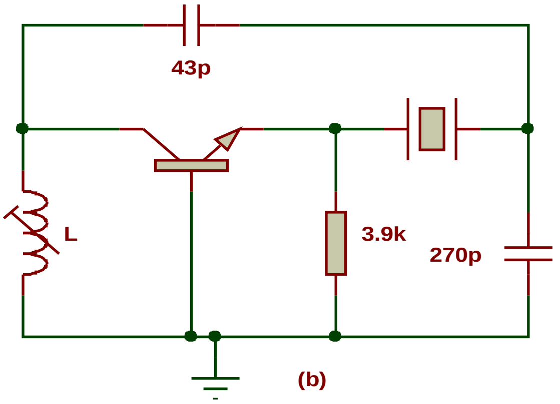


$$F = \frac{U_{be}}{U_{cb}} = \frac{IX_{be}}{I(X_{be} + X_{ce})}$$

$$= \frac{1/300}{1/300 + 1/150 + 1/1500}$$

$$= \frac{5}{16} = 0.31$$

图（b）的交流等效电路：



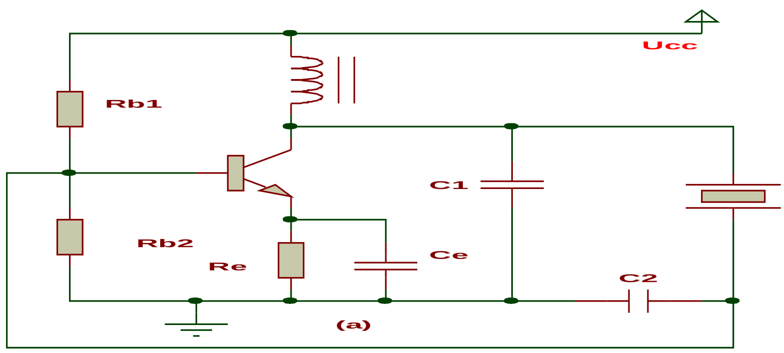
(b)

$$F=\frac{U_{be}}{U_{cb}}=\frac{IX_{be}}{I(X_{be}+X_{ce})}$$
$$=\frac{1/270}{1/270+1/43}$$
$$=\frac{43}{313}=0.14$$

4．10 试画出同时满足下列要求的一个实用晶体振荡电路：

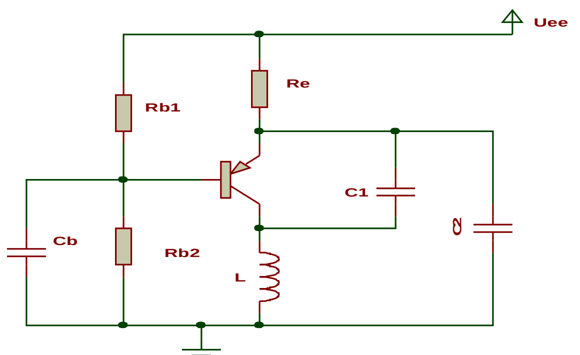
（1）采用 NPN 管；
（2）晶体谐振器作为电感元件；
（3）晶体管 c、e 极之间为 LC 并联回路；
（4）晶体管发射极交流接地。

解：电路如图所示：

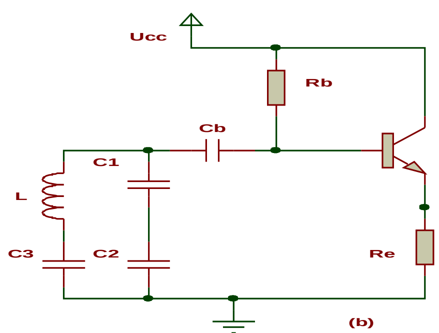


(a)

4．12 试将晶体谐振器正确地接入题图所示电路中，以组成并联型或串联型晶振电路。

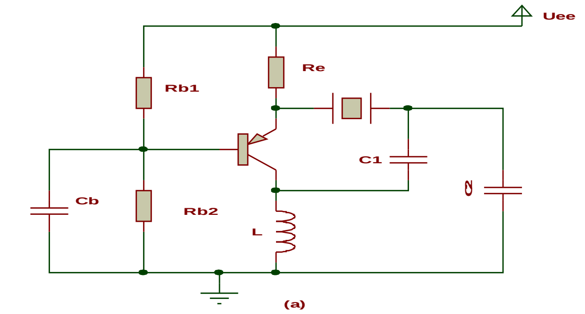


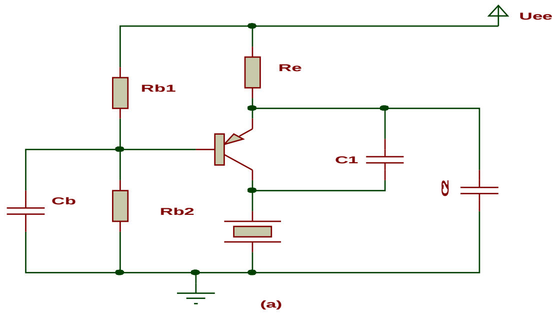
(a)



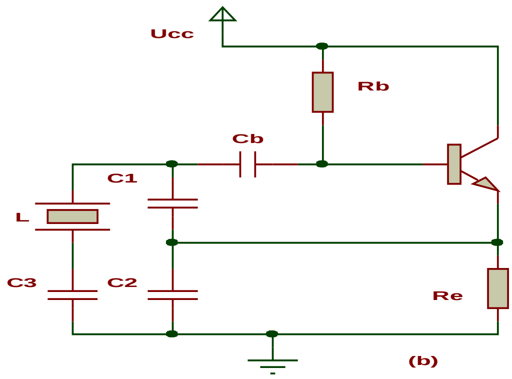
(b)

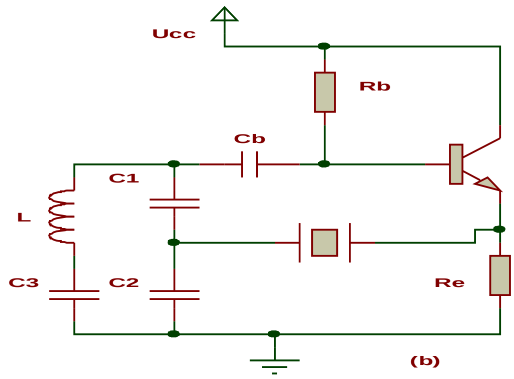
解：（a）图可构成的电路：





（b）图可构成的电路：





5．1 已知非线性器件的伏安特性为 $i = a_o + a_1 u + a_2 u^2 + a_3 u^3 + a_4 u^4$，若 $u = U_{m1}\cos\omega_1 t + U_{m2}\cos\omega_2 t$，试写出电流 i 中有哪些组合频率分量，说出其中 $\omega_1 \pm \omega_2$ 分量是由 i 哪些项产生的。

解：（1）频率组合分量为：（见例 5.3）

$$\omega_0 = \left| p\omega_1 \pm q\omega_2 \right| \qquad p，q = 0, 1, 2\ 3\ 4$$

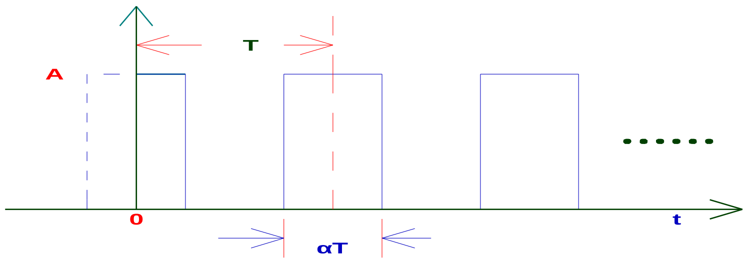
（2）$\omega_1 + \omega_2$ 是由 i 中的 a_2u^2 和 a_4u^4 项产生的。

5．2 已知非线性器件的伏安特性为：

$$i = \begin{cases} g_D u & u > 0 \\ 0 & u \le 0 \end{cases}$$

若 $u = U_Q + U_{m1}\cos\omega_1 t + U_{m2}\cos\omega_2 t$，且 $U_Q = -\frac{1}{2}U_{m1}$，$U_{m2} = U_{m1}$，满足线性时变条件，求时变电导 g(t)的表达式。

解：（1）补充：对下图所示开关函数 K(t)，其傅立叶级数可按以下步骤求解：



$$a_0=\frac{2}{T}\int_0^T K(t)dt=\frac{1}{T}\left[\int_0^{\frac{\alpha T}{2}}Adt+\int_{T-\frac{\alpha T}{2}}^{T}Adt\right]=2A\alpha$$

$$a_k=\frac{2}{T}\int_0^T K(t)\cos k\omega t dt=\frac{2}{T}\times\frac{A}{k\omega}\left[\int_0^T\cos(k\omega t)d(k\omega t)\right]$$

$$=\frac{A}{k\pi}\left[\sin k\omega t\Big|_0^{\frac{\alpha T}{2}}+\sin k\omega t\Big|_{T-\frac{\alpha T}{2}}^{T}\right]=\frac{2A}{k\pi}\sin k\pi\alpha$$

$$b_k=0$$

$$\because K(t)=\frac{a_0}{2}+\sum_{k=1}^{\infty}a_k\cos k\omega t$$

$$\therefore K(t)=A\left\{\alpha+\frac{2}{\pi}\left[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k}\sin k\pi\alpha\cos k\omega t\right]\right\}$$

(2)

当时，只有 U_Q $\frac{1}{2}U_{m1}$ 时才有电流，$U_Q+U_{m1}\cos\omega_1 t>0$ i

即： $\cos\theta=\cos\omega_1 t>\frac{1}{2}$ ； $\theta<\frac{\pi}{3}$.

由： $\frac{T}{2\pi}=\frac{\alpha T/2}{\pi/3}\implies\alpha=\frac{1}{3}$

$\therefore$开关函数 $K(\omega_1 t)=\frac{1}{3}+\frac{2}{\pi}\left[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k}\sin\frac{k\pi}{3}\cos k\omega_1 t\right]$

又由式(5.3.6)式知：

$i_c=g_D K(\omega_1 t)(U_{m1}\cos\omega_1 t+U_{m2}\cos\omega_2 t)$

$\therefore g(t)=g_D K(\omega_1 t)=\frac{g_D}{3}+\frac{2g_D}{\pi}\left[\sum_{k=1}^{\infty}\frac{1}{k}\sin\frac{k\pi}{3}\cos k\omega_1 t\right]$

i_c中的组合频率分量有：直流，$k\omega_1$，$|\pm k\omega_1\pm\omega_2|$ $k=0,1,2\cdots$

6．1 已知普通调幅信号表达式为

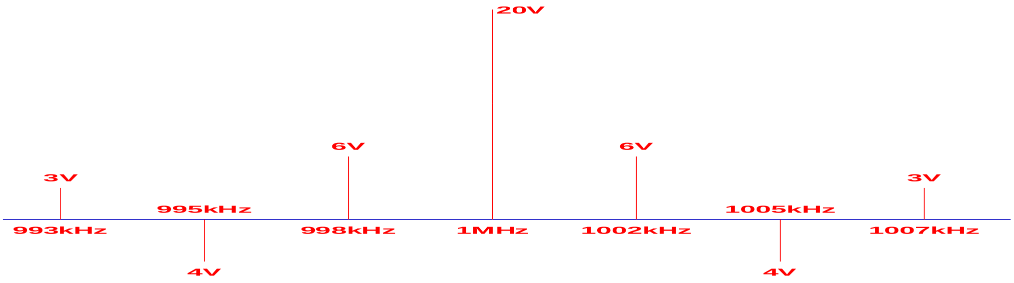
$$u_{AM}(t)=20(1+0.6\cos 2\pi\times 2000t-0.4\cos 2\pi\times 5000t$$
$$+0.3\cos 2\pi\times 7000t)\cos 2\pi\times 10^6 tV$$

（1） 写出此调幅信号所包含的频率分量及其振幅；
（2） 画出此调幅信号的频谱图，写出带宽；
（3） 求出此调幅信号的总功率、边带功率、载波功率及功率利用率。（设负载为 1 欧）

解：(1)

$$u_{AM}(t)=20\cos 2\pi\times10^6 t+6\left[\cos 2\pi(10^6+2000)t+\cos 2\pi(10^6-2000)t\right]$$
$$-4\left[\cos 2\pi(10^6+5000)t+\cos 2\pi(10^6-5000)t\right]$$
$$+3\left[\cos 2\pi(10^6+7000)t+\cos 2\pi(10^6-7000)t\right]$$

（2）带宽：$BW=1007kHz-993kHz=14kHz$



（4） 载波功率：$P_c=\dfrac{U_{cm}^2}{2R}=\dfrac{1}{2}\times20^2=200W$

边带功率：

$$P_1=\frac{1}{2}\times6^2\times2=36W$$

$$P_2=\frac{1}{2}\times4^2\times2=16W$$

$$P_3=\frac{1}{2}\times3^2\times2=9W$$

总功率：$P_{总}=P_c+P_1+P_2+P_3=261W$

功率利用率：$\eta_{SB}=\dfrac{P_1+P_2+P_3}{P_c+P_1+P_2+P_3}=\dfrac{61}{261}\times100\%=23.4\%$

6．2 已知单频普通调幅信号的最大振幅为 12V，最小振幅为 4V，试求其中载波振幅和边频振幅各是多少？调幅指数又是多少？

解：

$$M_a=\frac{U_{\max}-U_{\min}}{U_{\max}+U_{\min}}=\frac{12-4}{12+4}=0.5$$

又 $M_a=\dfrac{U_{\max}-U_{cm}}{U_{cm}}\Longrightarrow U_{cm}=\dfrac{U_{\max}}{1+M_a}=8V$

又 $M_a=\dfrac{U_{\Omega m}}{U_{cm}}\Longrightarrow U_{\Omega m}=M_a\times U_{cm}=4V$

$$U_{边}=\frac{1}{2}U_{\Omega m}=2V$$

6．3 在图 6.3.1 所示集电极调幅电路中，载波输出功率为 50W，平均调幅指数为 0.4，集电极平均效率为 50%，求直流电源提供的平均功率 P_D，调幅信号产生的交流功率 P_Ω 和总输出平均功率 P_{av}。

解：

$$M_a = \frac{U_{\Omega m}}{U_{cm}} \Longrightarrow U_{\Omega m} = M_a \times U_{cm}$$

$$\text{又} \quad \because P_c = \frac{U_{cm}^2}{2R} \Longrightarrow U_{cm} = \sqrt{2RP_c}$$

$$\therefore \text{调制信号功率：} \quad P_\Omega = \frac{U_{\Omega m}^2}{2R} = M_a^2 P_c = 8W$$

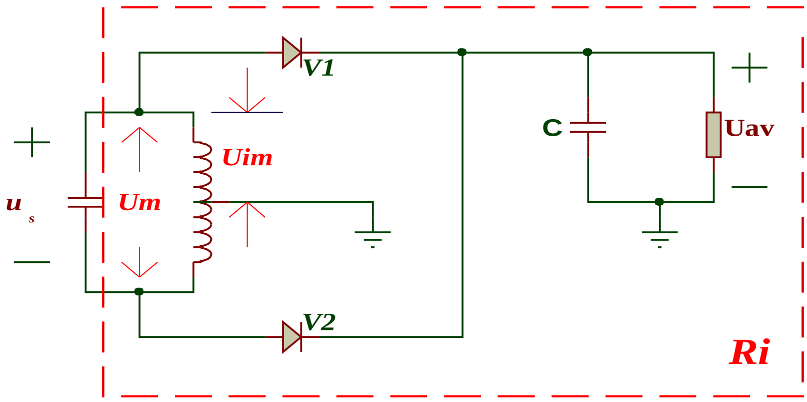
$$\text{总输出功率：} P_{av} = (1 + \frac{1}{2} M_a^2) P_c = 54W$$

$$\text{由} \quad \eta_c = \frac{P_{出}}{P_{入}} = \frac{P_{av}}{P_\Omega + P_D} \Longrightarrow P_D = \frac{P_{av}}{\eta_c} - P_\Omega = 100W$$

6．4 题图所示为推挽二极管检波电路。设二极管伏安特性是从原点出发的直线，若输入 $u_s = U_m \cos \omega_c t$，流经二极管的周期性窄脉冲电流 i 可用傅氏级数展开为 $i \approx I_{AV}(1 + 2\cos\omega_c t + 2\cos 2\omega_c t + \cdots)$，$R_L C$ 是理想低通滤波器。试求：

（1）电压传输系数 $\eta_d = U_{AV}/U_m$。

（2）输入电阻 $R_i = U_m/I_{1m}$，其中 I_{1m} 是流经二极管电流 i 中的基波分量振幅。



解：（1）理想状态下:

$$U_{AV} = U_{im} = \frac{1}{2} U_m$$

$$\therefore \eta_d = U_{AV}/U_m = 0.5$$

(2)输入电阻:

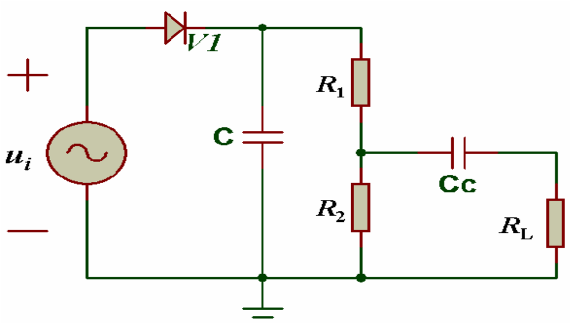
$$P_{in}=\frac{U_m^2}{2R_i}$$

$$P_{out}=\frac{U_{AV}^2}{R_L}=\frac{\left(U_m/2\right)^2}{R_L}=\frac{U_m^2}{4R_L}$$

$$Q\ P_{in}=P_{out}$$

$$\therefore R_i=2R_L$$

6．6 在图示二极管检波电路中，已知二极管导通电阻 R_d=100Ω、R_1=1KΩ、R_2=4KΩ。输入调幅信号载频 f_c=4.7MHz，调制信号的频率范围为 100~5kHz，M_{max}=0.8，若希望电路不产生惰性失真和底部切割失真，则对电容 C 和负载 R_L 的取值有何要求？



解：（1）对滤波电容 C 的要求：

$$X_c \ll R$$

即：$\frac{1}{\omega_c C} \ll R_1+R_2$

∴取 $(R_1+R_2)C? \frac{5\sim10}{\omega_c}$

即： $C? \frac{5\sim10}{(R_1+R_2)\,\omega_c}=\frac{5\sim10}{5\times10^3\times2\pi\times4.7\times10^6}=(5\sim10)6.8\times10^{-12}(F)$

（2）避免惰性失真：由式（6.45）得

$$RC \ll \frac{\sqrt{1-M_a^2}}{M_a\Omega}=\frac{\sqrt{1-0.8^2}}{0.8\times2\pi\times5\times10^3}=23.88\times10^{-6}$$

又 $Q\quad R=R_1+R_2$

$$\therefore \qquad C\le\frac{23.88\times10^{-6}}{R}=\frac{23.88\times10^{-6}}{5\times10^3}=4.777\times10^{-9}(F)$$

综合(1)(2)得滤波电容的取值范围：

$$(5\sim10)6.8\times10^{-12}(F)\le C\le4.777\times10^{-9}(F)$$

(3)避免切割失真：由（6.4.6）式

$$M_a \le \frac{R_L}{R+R_L} = \frac{R'}{R}$$

其中: $R' = R_1 + R_2 R_L/(R_2+R_L)$;　　$R = R_1 + R_2$

$\therefore R_L \ge 12k\Omega$

6．8 在图（6.5.6）所示晶体管混频电路中，若晶体管转移特性为：$i_c = f(u_{BE}) = I_{es} e^{\frac{1}{U_T}u_{BE}}$，$u_L = U_{Lm}\cos\omega_L t$，$u_L >> u_s$，求混频跨导。

解：由 P111（5.3.1）式：

$$i_c \approx f(U_Q + U_L) + f'(U_Q + U_L)u_s$$
$$= I_0(t) + g(t)u_s$$

其中： $g(t) = f'(U_Q + U_L)u_s = \left.\frac{\partial i_c}{\partial u_{BE}}\right|_{u_{BE}=U_{BB0}+U_{Lm}\cos\omega_L t}$

又因为 g(t)为非正弦周期波，可用傅立叶级数展开：

$$g(t) = g_0 + \sum_{n=1}^{\infty} g_n \cos\omega_L t$$

其中： $g_n = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} g(t)\cos n\omega_L t d\omega_L t$

由图（6.5.6）知，其输出项中只有 u_I，即（ω_L-ω_S），所以只需求出 g_1 项，即：

$$g_1 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} g(t)\cos\omega_L t d\omega_L t$$

$$g(t) = \left.\frac{\partial i_c}{\partial u_{BE}}\right|_{u_{BE}=U_{BB0}+U_{Lm}\cos\omega_L t} = \left.\frac{\partial I_{es} e^{\frac{1}{U_T}u_{BE}}}{\partial u_{BE}}\right|_{u_{BE}=U_{BB0}+U_{Lm}\cos\omega_L t}$$

$$= \frac{I_{es} e^{\frac{1}{U_T}U_{BB0}}}{U_T} e^{\frac{1}{U_T}U_{Lm}\cos\omega_L t}$$

$$\therefore g_1 = \frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi} \frac{I_{es} e^{\frac{1}{U_T}U_{BB0}}}{U_T} e^{\frac{1}{U_T}U_{Lm}\cos\omega_L t} \cos\omega_L t d\omega_L t$$

$$\because e^{x}=1+x+\frac{x^{2}}{2!}+\cdots+\frac{x^{n}}{n!}+\cdots$$

$$\therefore g_{1}=\frac{1}{\pi}\int_{-\pi}^{\pi}\frac{I_{es}e^{\frac{1}{U_T}U_{BB0}}}{U_{T}}e^{\frac{1}{U_T}U_{Lm}\cos\omega_L t}\cos\omega_L t d\omega_L t$$

$$\approx\frac{I_{es}e^{\frac{1}{U_T}U_{BB0}}}{\pi U_{T}}\int_{-\pi}^{\pi}\left(\cos\omega_L t+\frac{U_{Lm}}{U_T}\cos^{2}\omega_L t+\frac{U_{Lm}^{2}}{U_T^{2}}\frac{\cos^{3}\omega_L t}{2!}+\frac{U_{Lm}^{3}}{U_T^{3}}\frac{\cos^{4}\omega_L t}{3!}+\cdots\right)d\omega_L t$$

$$=\frac{I_{es}e^{\frac{1}{U_T}U_{BB0}}}{\pi U_{T}}\left\{\frac{\pi U_{Lm}}{U_T}+\frac{U_{Lm}^{3}}{3!U_T^{3}}\int_{-\pi}^{\pi}\frac{(1+\cos 2\omega_L t)^{2}}{4}d\omega_L t\right\}$$

$$=\frac{I_{es}U_{Lm}e^{\frac{U_{BB0}}{U_T}}}{U_T^{2}}\left(1+\frac{U_{Lm}^{2}}{8U_T^{2}}\right)$$

$$i_{c}=I_{0}(t)+g_{0}u_{s}+g_{1}\cos\omega_L t\cdot u_{s}+\cdots$$

$$=I_{0}(t)+g_{0}u_{s}+\frac{1}{2}g_{1}U_{s}\{\cos(\omega_L-\omega_s)t+\cos(\omega_L+\omega_s)t\}+\cdots$$

其中：$u_{s}=U_{s}\cos\omega_s t$

∴经选频回路后

$$i_{I}=\frac{1}{2}g_{1}U_{s}\cos(\omega_L-\omega_s)t$$

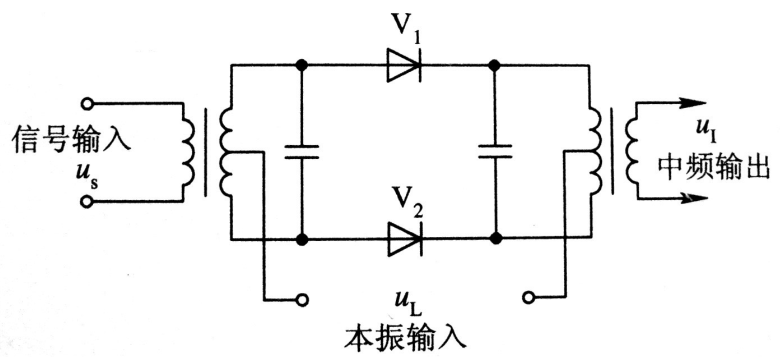
混频跨导为:

$$g_{c}=\frac{I_{I}}{U_{s}}=\frac{1}{2}g_{1}=\frac{I_{es}U_{Lm}e^{\frac{U_{BB0}}{U_T}}}{2U_T^{2}}\left(1+\frac{U_{Lm}^{2}}{8U_T^{2}}\right)$$

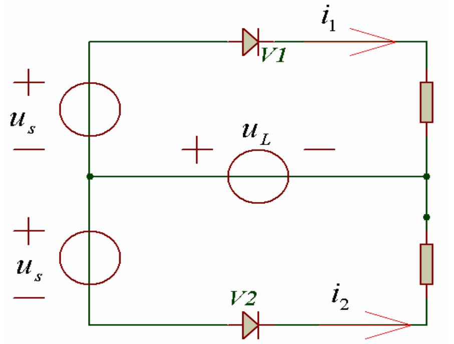
6．11 在题图所示混频器中，

(1)如果将输入信号 u_s 与本振 u_L 互换位置，则混频器能否正常工作？为什么？

(2)如果将二极管 V_1（或 V_2）的正负极倒置，则混频器能否正常工作？为什么？



解：设



$$u_L = U_{Lm}\cos\omega_L t$$

$$u_s = U_{sm}\cos\omega_s t$$

则:

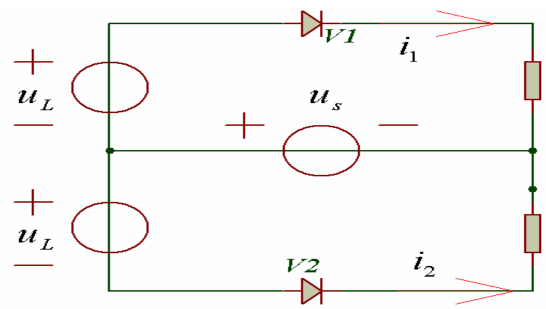
$$i_1 = g_D(u_S + u_L)K_1(\omega_L t)$$

$$i_2 = g_D(-u_S + u_L)K_1(\omega_L t)$$

$$i = i_1 - i_2 = 2g_D u_S K_1(\omega_L t)$$

从上面表达式可看出此调制为平衡调幅（DSB）。

（1） 当将输入信号 u_s 与本振 u_L 互换位置后有：



$$i_1 = g_D(u_S + u_L)K_1(\omega_L t)$$

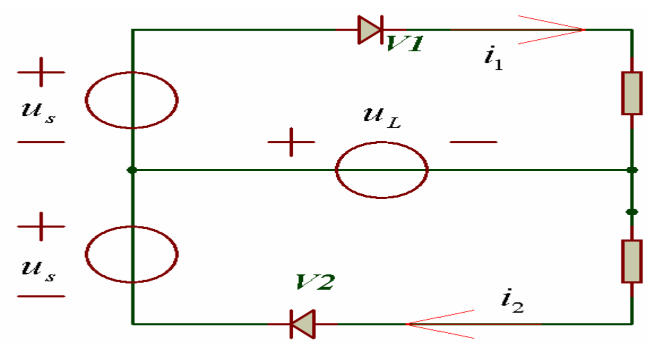
$$i_2 = g_D(u_S - u_L)K_1(\omega_L t - \pi)$$

$$i = i_1 - i_2 = g_D u_S[K_1(\omega_L t) - K_1(\omega_L t - \pi)] + g_D u_L[K_1(\omega_L t) + K_1(\omega_L t - \pi)]$$ 从上面

$$= g_D u_S K_2(\omega_L t) + g_D u_L$$

表达式可看出此调制为普通调幅（AM）。

（2） 若将 V_2 正负极对调后：



$$i_1 = g_D(u_S + u_L)K_1(\omega_L t)$$

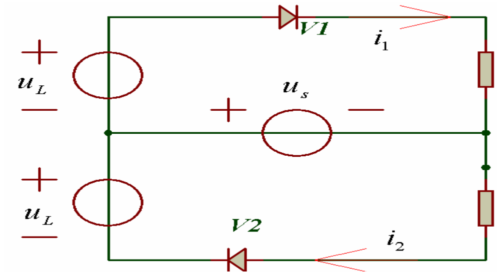
$$i_2 = g_D(u_S - u_L)K_1(\omega_L t - \pi)$$

$$i = i_1 + i_2 = g_D u_S[K_1(\omega_L t) + K_1(\omega_L t - \pi)] + g_D u_L[K_1(\omega_L t) - K_1(\omega_L t - \pi)]$$ 从

$$= g_D u_L K_2(\omega_L t) + g_D u_S$$

上面表达式可看出此电路不能产生调制信号。

（3）若将（1）中 V_2 正负极对调后：



$$i_1 = g_D(u_S + u_L)K_1(\omega_L t)$$
$$i_2 = g_D(-u_S + u_L)K_1(\omega_L t)$$
$$i = i_1 + i_2 = 2g_D u_L K_1(\omega_L t)$$

从上面表达式可看出此电路不能产生调制信号。

7．1 已知调制信号 u_Ω 由 1kHz 和 2kHz 两个频率组成，振幅分别是 1.5V 和 0.5V，若载波信号 $u_c = 5\cos 2\pi\times 10^8 tV$，且单位调制电压产生的频偏和相偏分别为 4kHz/V 和 0.2rad/V，试分别写出调频信号和调相信号的表达式。

解：

$$u_\Omega = 1.5\cos 2\pi\times 10^3 t + 0.5\cos 2\pi\times 2\times 10^3 t = U_{\Omega 1}\cos\Omega_1 t + U_{\Omega 2}\cos\Omega_2 t$$

$$\begin{aligned}
u_{FM} &= U_{cm}\cos\left[\omega_c t + k_f\int_0^t u_\Omega(t)dt\right] \\
&= U_{cm}\cos\left[\omega_c t + k_f\int_0^t (U_{\Omega 1}\cos\Omega_1 t + U_{\Omega 2}\cos\Omega_2 t)dt\right] \\
&= U_{cm}\cos\left[\omega_c t + \frac{k_f U_{\Omega 1}}{\Omega_1}\sin\Omega_1 t + \frac{k_f U_{\Omega 2}}{\Omega_2}\cos\Omega_2 t\right] \\
&= 5\cos\left[2\pi\times 10^8 tV + \frac{3}{\pi}\cos 2\pi\times 10^3 t + \frac{1}{2\pi}\cos 4\pi\times 10^3 t\right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_{PM} &= U_{cm}\cos\left[\omega_c t + k_p u_\Omega(t)dt\right] \\
&= U_{cm}\cos\left[\omega_c t + k_p(U_{\Omega 1}\cos\Omega_1 t + U_{\Omega 2}\cos\Omega_2 t)dt\right] \\
&= 5\cos\left[2\pi\times 10^8 tV + 0.3\cos 2\pi\times 10^3 t + 0.1\cos 2\pi\times 10^3 t\right]
\end{aligned}$$

7．2 已知调角信号 $u(t) = 10\cos(2\pi\times 10^8 t + \cos 4\pi\times 10^3 t)V$，

（1）若是调频信号，试写出载波频率 f_c、调制频率 F、调频指数 M_f 和最大频偏 $\triangle f_m$。

（2）若是调相信号，试写出载波频率 f_c、调制频率 F、调相指数 M_p 和最大频偏 $\triangle f_m$。

解：

（1）由 $u_{FM} = U_{cm}\cos\left[\omega_c t + \frac{k_f U_{\Omega m}}{\Omega}\sin\Omega t\right]$ 得

$$f = \frac{\omega_c}{2\pi} = \frac{2\pi\times 10^8}{2\pi} = 10^8\,Hz$$

$$M_f = \frac{k_f U_{\Omega m}}{\Omega} = 1$$

$$F = \frac{\Omega}{2\pi} = \frac{4\pi\times 10^3}{2\pi} = 2\times 10^3\,Hz$$

$$\Delta f_m = M_f F = 2\times 10^3\,Hz$$

(2)由 $u_{PM}=U_{cm}\cos\left[\omega_c t+k_p U_{\Omega m}\sin\Omega t\right]$ 得

$$f=\frac{\omega_c}{2\pi}=\frac{2\pi\times10^8}{2\pi}=10^8 Hz$$

$$M_p=k_p U_{\Omega m}=1$$

$$F=\frac{\Omega}{2\pi}=\frac{4\pi\times10^3}{2\pi}=2\times10^3 Hz$$

$$\Delta f_m=M_p F=2\times10^3 Hz$$

7．3 对于单频调频信号，若其调制信号振幅不变，频率 F 增大 1 倍，试问 $u_{FM}(t)$的最大频偏$\triangle f_m$和带宽 BW 有何变化？若调制信号频率不变，振幅增大 1 倍，试问 $u_{FM}(t)$的最大频偏$\triangle f_m$和带宽 BW 有何变化？若同时将调制信号频率和振幅增大 1 倍，试问 $u_{FM}(t)$的最大频偏$\triangle f_m$和带宽 BW 有何变化？

解:

由 $\Delta\Omega_m=k_f U_{\Omega m}$

及 $BW=2(M_f+1)F=2(\dfrac{k_f U_{\Omega m}}{\Omega}+1)\Omega=2(\Delta\omega_m+\Omega)$

可知:

（1）调制信号振幅不变，频率 F 增大 1 倍，则$\triangle f_m$不变、带宽 BW 增加;

（2）调制信号频率不变，振幅增大 1 倍，则$\triangle f_m$增加 1 倍、带宽 BW 增加;

（3）同时将调制信号频率和振幅增大 1 倍，则$\triangle f_m$增加 1 倍、带宽 BW 增加 1 倍。

7．4 若调制信号振幅不变而频率改变，试比较相应的调幅信号、调频信号和调相信号的频谱和带宽如何变化。

解：设调制信号为单频正弦波 $u_\Omega(t)=U_{\Omega m}\cos\Omega t$，载波为 $u_c(t)=U_{cm}\cos\omega_c t$

（1） 调幅信号（AM）：频谱中只有 ω_c 和 $(\omega_c\pm\Omega)$。带宽为 $BW=2\Omega$；当频率 Ω 增加 1 倍，频谱成份没有变化，边带功率不变（$P_{av}=\frac{1}{4}M_a^2P_c=\frac{1}{8}\frac{U_{\Omega m}^2}{R}$），带宽增加 2 倍。

（2） 调频信号：频谱成份为 $(\omega_c\pm n\Omega)$。带宽为 $BW=2(\Delta\omega_m+\Omega)=2(k_f U_{\Omega m}+\Omega)$；当频率 Ω 增加 1 倍，由 $M_f=\frac{k_f U_{\Omega m}}{\Omega}$ 知 M_f减小，根据贝塞尔函数的性质知边频成份减少、边频功率减小，带宽增加。

（3） 调相信号：频谱成份为 $(\omega_c\pm n\Omega)$。带宽为 $BW=2(\Delta\omega_m+\Omega)=2(k_p U_{\Omega m}\Omega+\Omega)$；当频率 Ω 增加 1 倍，由 $M_p=k_f U_{\Omega m}$ 知 M_p不变，根据贝塞尔函数的性质知边频成份不变、边频功率不变，带

宽增加2倍。

7．5 已知调频信号 $u_{FM}(t)$和调相信号 $u_{pM}(t)$所对应的单频调制信号的频率均为 0.5kHz，M_f和 M_p分别为 3rad。

（1）试求 $u_{FM}(t)$和 $u_{FM}(t)$的最大频偏和带宽；

（2）若调制系数 $k_f(k_p)$不变，调制信号振幅不变，频率改为 1kHz，试求这两种调角信号的$\triangle f_m$和 BW；

（3）若调制系数 $k_f(k_p)$不变，调制信号频率不变，仍为 0.5kHz，而振幅降为原来的 1/2，试求这两种调角信号的$\triangle f_m$和 BW。

解：（1）FM：

$$\Delta f_m = M_f F = 3\times 0.5\times 10^3 Hz = 1.5kHz$$
$$BW = 2(M_f + 1)F = 4kHz$$

PM：

$$\Delta f_m = M_p F = 3\times 0.5\times 10^3 Hz = 1.5kHz$$
$$BW = 2(M_p + 1)F = 4kHz$$

（2）对 1kHz 的 FM 信号：

$$\left.\begin{array}{l} 0.5kHz:\ \Omega M_f = k_f U_{\Omega m} \\ 1kHz:\ \ \Omega' M_f' = k_f U_{\Omega m} \end{array}\right\} \Rightarrow M_f' = \frac{\Omega}{\Omega'} M_f = 1.5$$

$$\Delta f_m = M_f F = 1.5\times 1\times 10^3 Hz = 1.5kHz$$
$$BW = 2(M_f + 1)F = 5kHz$$

对 1kHz 的 PM 信号：

$$M_p' = k_p U_{\Omega m} = M_p = 3rad$$

$$\Delta f_m = M_p F = 3\times 1\times 10^3 Hz = 3kHz$$
$$BW = 2(M_p + 1)F = 8kHz$$

（3）0.5kHz， $1/2U_{\Omega m}$的 FM 信号：

$$M_f' = \frac{k_f U_{\Omega m}'}{\Omega} = \frac{k_f U_{\Omega m}/2}{\Omega} = \frac{1}{2} M_f = 1.5rad$$

$$\Delta f_m = M_f F = 1.5\times 0.5\times 10^3 Hz = 0.75kHz$$
$$BW = 2(M_f + 1)F = 2.5kHz$$

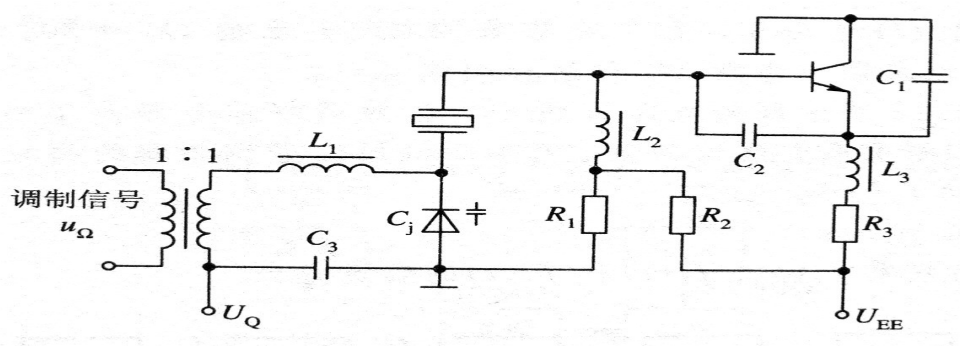
0.5kHz， $1/2U_{\Omega m}$的 PM 信号：

$$M_p' = k_p U_{\Omega m}' = k_p U_{\Omega m}/2 = M_p/2 = 1.5rad$$

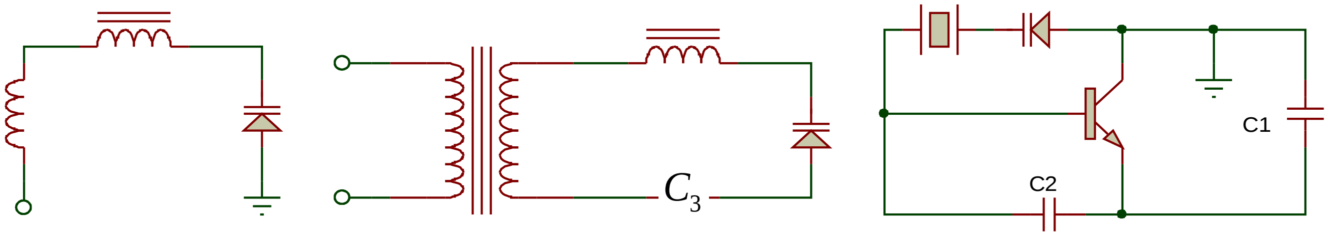
$$\Delta f_m = M_p F = 1.5\times 0.5\times 10^3 Hz = 0.75kHz$$
$$BW = 2(M_p + 1)F = 2.5kHz$$

7．8 在题图所示的晶振变容二极管调频电路中，若石英晶体谐振器的串联谐振频率 f_s=10MHz、串联电容 C_q与未加调制信号时变容二极管的静态结电容 C_{jQ}之比为 2×10^3，并联电容 C_0可以忽略，又变容二极管的参数 n=2，U_B=0.6V，加在变容管上的反偏电压 U_Q=2V，调制电压振幅为 U_m=1.5V。

（1）分别画出变容二极管直流通路、低频交流通路和高频等效电路，并说明这是哪一种振荡电路；
（2）求出最大线性频偏△f_m。



解：（1）变容二极管直流通路、低频交流通路和高频等效电路：此电路为电容三点式振荡电路。



（2）最大线性频偏△f_m：

$$m=\frac{U_{\Omega m}}{U_B+U_Q}=\frac{1.5}{2+0.6}=0.577$$

$$C_j=\frac{C_{jQ}}{(1+m\cos\Omega t)^n}=\frac{5C_q\times10^2}{(1+m\cos\Omega t)^2}$$

$$C_\Sigma=\frac{1}{1/C_1+1/C_2+1/C_j+1/C_q}\approx\frac{C_jC_q}{C_j+C_q}$$

$$=\frac{C_q}{1+2(1+m\cos\Omega t)^2\times10^{-3}}$$

$$\omega(t)=\frac{1}{\sqrt{LC_\Sigma}}=\frac{1}{\sqrt{LC_q/\left[1+2(1+m\cos\Omega t)^2\times10^{-3}\right]}}$$

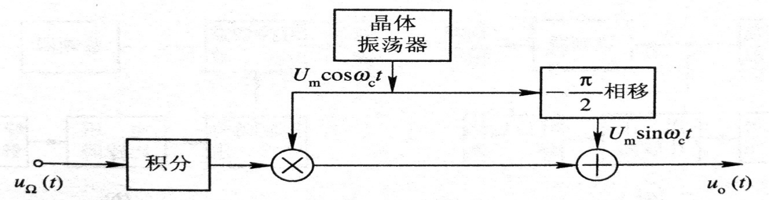
$$=\omega_0\sqrt{\left[1+2(1+m\cos\Omega t)^2\times10^{-3}\right]}$$

$$f_{m1}=f_0\sqrt{\left[1+2(1-0.577)^2\times10^{-3}\right]}=1.000178913\,f_0$$

$$f_{m2}=f_0\sqrt{\left[1+2(1+0.577)^2\times10^{-3}\right]}=1.002483844\,f_0$$

$$\Delta f_m=\frac{f_{m2}-f_{m1}}{2}=0.002304931\,f_0=11.525kHz$$

7．10 已知题图是间接调频方案，$u_\Omega(t)$是调制信号，输出 $u_o(t)$是调相信号，试写出 $u_o(t)$的表达式，并且说明在什么条件下此电路可以实现间接调频。



解：（1）$u_o(t)$的输出表达式为：

$$u_o(t)=(U_{cm}\cos\omega_c t)\left[k_p\int_0^t u_\Omega(t)dt\right]+U_{cm}\sin\omega_c t$$

（2）设间接调频输出表达式为：

$$u_o(t)=U_{cm}\sin\left[\omega_c t+k_p\int_0^t u_\Omega(t)dt\right]$$

$$=U_{cm}\left[\sin\omega_c t\cos\left\{k_p\int_0^t u_\Omega(t)dt\right\}+\cos\omega_c t\sin\left\{k_p\int_0^t u_\Omega(t)dt\right\}\right]$$

当 $k_p\int_0^t u_\Omega(t)dt<\frac{\pi}{12}$ 时

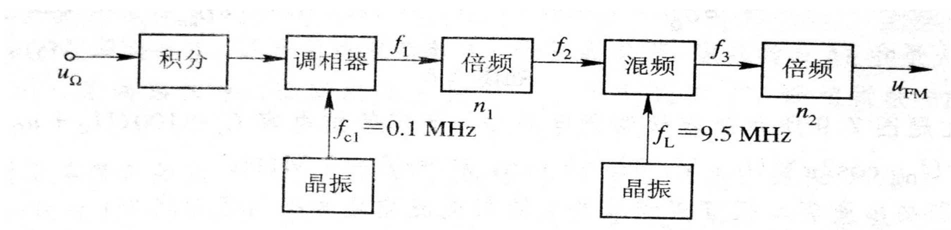
$$\cos(k_p\int_0^t u_\Omega(t)dt)\approx 1$$

$$\sin(k_p\int_0^t u_\Omega(t)dt)\approx k_p\int_0^t u_\Omega(t)dt$$

所以有：

$$u_o(t)\approx U_{cm}\sin\omega_c t+(U_{cm}\cos\omega_c t)\left[k_p\int_0^t u_\Omega(t)dt\right]$$

7．12 在题图所示的调频电路方框图中，已知调制信号频率 F=100~15kHz，载频 f_c=100MHz，要求最大线性频偏△f_m=75kHz，若调相器的调相指数 M_p=0.2rad，混频器输出频率 $f_3=f_L-f_2$，试求：
（1）倍频次数 n_1 和 n_2；
（2）各单元输出频率 $f_1(t)$、$f_2(t)$和 $f_3(t)$的表达式。



解：令

$$u_\Omega(t)=U_{\Omega m}\cos\Omega t$$

I、 积分：

$$u'_\Omega(t)=\int_0^t U_{\Omega m}\cos\Omega t dt=\frac{U_{\Omega m}}{\Omega}\sin\Omega t$$

II、 调相：

$$u_{PM}=U_{cm}\cos\left[\omega_c t+k_p u'_\Omega(t)\right]=U_{cm}\cos\left[\omega_c t+\frac{k_pU_{\Omega m}}{\Omega}\sin\Omega t\right]$$

III、　调相指数：$M_p=\dfrac{k_pU_{\Omega m}}{\Omega}$

则100Hz调制信号：$M_{p100}=\dfrac{k_pU_{\Omega m}}{200\pi}$

则15kHz调制信号：$M_{p15k}=\dfrac{k_pU_{\Omega m}}{30\pi}\times10^{-3}$

显然　$M_{p100}\gg M_{p15k}$

又　$\because M_p\le0.2$　$\therefore M_{p100}=0.2$

$k_pU_{\Omega m}=\Omega M_p=200\pi\times0.2=40\pi$

$\therefore M_{p15k}=\dfrac{k_pU_{\Omega m}}{30\pi}\times10^{-3}=\dfrac{4}{3}\times10^{-3}$

IV、　频偏：

$\Delta f_{m100}=M_{p100}F_{100}=0.2\times100=20Hz$

$\Delta f_{m15k}=M_{p15k}F_{15k}=\dfrac{4}{3}\times10^{-3}\times15\times10^{-3}=20Hz$

V、　倍频数：

$n=\dfrac{75\times10^3}{20}=3750$

$\because f_2=n_1\times f_1=n_1\times f_{c1}=n_1\times0.1$

$\therefore f_3=f_L-f_2=9.5\times10^6-0.1n_1$　　(a)

$\because f_c=f_3\times n_2$

$\therefore f_3\times n_2=100MHz$　　(b)

$n_1\times n_2=n=3750$　　(c)

由$(a)(b)(c)$得：

$n_1=75$　　$n_2=50$

VI、　频率表达式：

由 II 得：

$$\omega = \frac{d\phi}{dt} = 2\pi f_{c1} + k_p U_{\Omega m}\cos\Omega t$$

$$\therefore f_1 = f_{c1} + \frac{M_p \Omega}{2\pi}\cos\Omega t = f_{c1} + M_p F\cos\Omega t$$

其中 $F = \dfrac{\Omega}{2\pi}$

$$f_2 = n_1 \times f_1 = 75 \times 0.1 \times 10^6 + 75 M_p F\cos\Omega t$$

$$f_3 = f_L - f_2 = 9.5 \times 10^6 - \left(75 \times 0.1 \times 10^6 + 75 M_p F\cos\Omega t\right)$$

$$= 2 \times 10^6 - 75 M_p F\cos\Omega t$$

$$f_c = f_3 \times n_2 = 100MHz - 3750 M_p F\cos\Omega t$$