第 1 章 高频小信号谐振放大器

1.1 给定串联谐振回路的 $f_0 = 1.5\text{MHz}$， $C_0 = 100\text{pF}$，谐振时电阻 $R = 5\Omega$，试求 Q_0 和 L_0。又若信号源电压振幅 $U_{ms} = 1\text{mV}$，求谐振时回路中的电流 I_0 以及回路上的电感电压振幅 U_{Lom} 和电容电压振幅 U_{Com}。

解：（1）串联谐振回路的品质因数为

$$Q_0 = \frac{1}{\omega_0 C_0 R} = \frac{1}{2\pi \times 1.5 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-12} \times 5} \approx 212$$

根据 $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_0 C_0}}$ 有：

$$L_0 = \frac{1}{C_0 (2\pi f_0)^2} = \frac{1}{100 \times 10^{-12} \times 4\pi^2 \times 1.5^2 \times 10^{12}} \approx 1.1258 \times 10^{-4}(\text{H}) = 113\mu\text{H}$$

（2）谐振时回路中的电流为

$$I_0 = \frac{U_{ms}}{R} = \frac{1}{5} = 0.2(\text{mA})$$

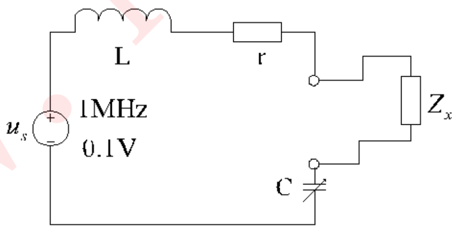
回路上的电感电压振幅为

$$U_{Lom} = Q_0 U_{ms} = 212 \times 1 = 212(\text{mV})$$

回路上的电容电压振幅为

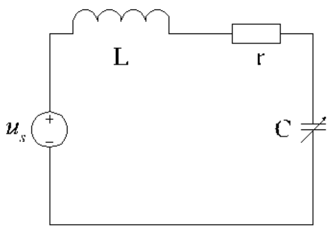
$$U_{Com} = -Q_0 U_{ms} = -212 \times 1 = -212(\text{mV})$$

1.2 在图题 1.2 所示电路中，信号源频率 $f_0 = 1\text{MHz}$，信号源电压振幅 $U_{ms} = 0.1\text{V}$，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 调至 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。

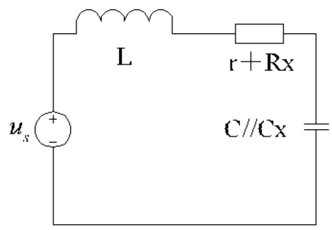


图题1. 2

解：（1）空载时的电路图如图(a)所示。



(a) 空载时的电路



(b)有载时的电路

根据 $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 有：

$$L=\frac{1}{C(2\pi f_0)^2}=\frac{1}{100\times10^{-12}\times4\pi^2\times10^{12}}\approx2.533\times10^{-4}(\mathrm{H})=253\mu\mathrm{H}$$

根据$Q_0=\frac{1}{\omega_0C_1r}=\frac{\omega_0L}{r}$有：

$$r=\frac{1}{\omega_0C_1Q_0}=\frac{1}{2\pi\times10^6\times100\times10^{-12}\times100}\approx15.92(\Omega)$$

（2）有载时的电路图如图(b)所示。

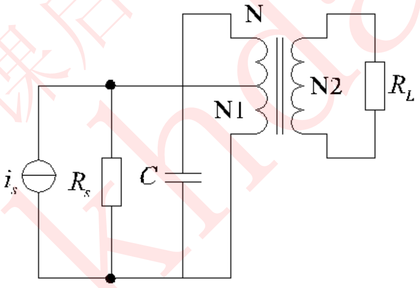
空载时，$C=C_1=100\mathrm{pF}$时回路谐振，则$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_1}}$，$Q_0=\frac{\omega_0L}{r}=100$；

有载时，$C=C_2=200\mathrm{pF}$时回路谐振，则$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_2\|C_x)}}$，$Q_L=\frac{\omega_0L}{r+R_x}=50$。

∴根据谐振频率相等有$C_1=C_2\|C_x=\frac{C_2C_x}{C_2+C_x}$，解得：$C_x=200\mathrm{pF}$。

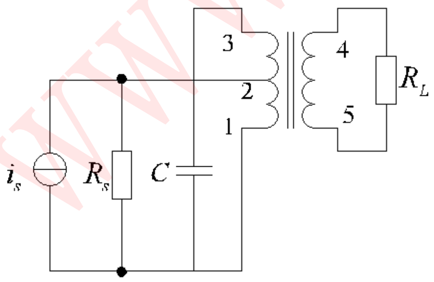
根据品质因数有：$\frac{r+R_x}{r}=\frac{100}{50}=2$，解得$R_x=r=15.92(\Omega)$。

1.3 在图题 1.3 所示电路中，已知回路谐振频率$f_0=465\mathrm{kHz}$，$Q_0=100$，$N=160$匝，$N_1=40$匝，$N_2=10$匝，$C=200\mathrm{pF}$，$R_s=16\mathrm{k}\Omega$，$R_L=1\mathrm{k}\Omega$。试求回路电感L、有载Q值和通频带B。

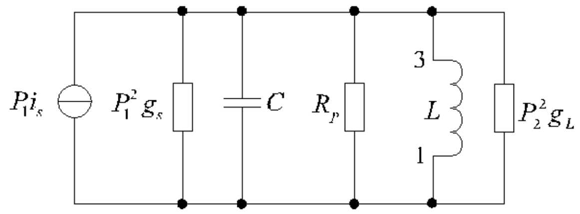


图题1. 3

解：本电路可将部分接入电路（图（a））等效成电路图（b）。



图（a）



图（b）

图中，R_p为谐振电阻，部分接入系数$P_1=N_1/N=40/160=1/4$，$P_2=N_2/N=10/160=1/16$。

根据谐振频率有：

$$L=\frac{1}{C(2\pi f_0)^2}=\frac{1}{200\times10^{-12}\times4\pi^2\times465^2\times10^6}\approx5.857\times10^{-4}(\mathrm{H})=586\mu\mathrm{H}$$

根据空载时的品质因数$Q_0=\dfrac{R_p}{\omega_0 L}=\omega_0 CR_p$有：

$$R_p=\frac{Q_0}{\omega_0 C}=\frac{100}{2\pi\times465\times10^3\times200\times10^{-12}}\approx1.711\times10^5(\Omega)$$

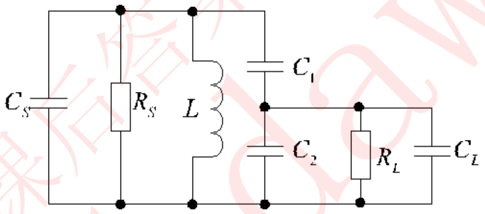
根据图（b）有载时的品质因数为

$$Q_L=\frac{\omega_0 C}{P_1^2 g_s+g_p+P_2^2 g_L}=\frac{2\pi\times465\times10^3\times200\times10^{-12}}{\dfrac{1}{1.711\times10^5}+\dfrac{1}{16\times10^4}+\dfrac{1}{16^2\times5\times10^3}}\approx45.38$$

∴通频带为

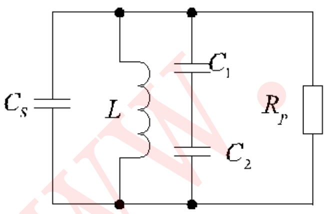
$$B=\frac{f_0}{Q_L}=\frac{465\times10^3}{45.38}\approx1.025\times10^4(\mathrm{Hz})=10.25\mathrm{kHz}$$

1.4 在图题 1.4 所示电路中，$L=0.8\mu\mathrm{H}$，$C_1=C_2=20\mathrm{pF}$，$C_S=5\mathrm{pF}$，$R_S=10\mathrm{k\Omega}$，$C_L=20\mathrm{pF}$，$R_L=5\mathrm{k\Omega}$，$Q_0=100$。试求回路在有载情况下的谐振频率f_0、谐振电阻R_p（不计R_S和R_L）、Q_L值和通频带B。

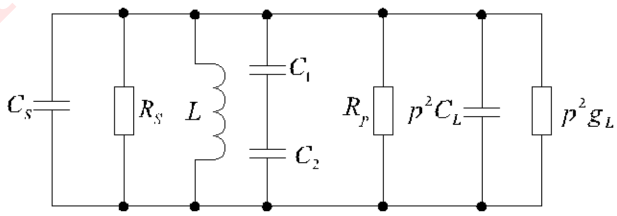


图题1. 4

解：将R_L、C_L看作负载导纳，并折合至回路两端，则空载时和有载时的电路如下图所示。



图（a）空载时



图（b）有载时

部分接入系数$p=\dfrac{C_1}{C_1+C_2}=\dfrac{20}{20+20}=\dfrac{1}{2}$，$C=\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}=\dfrac{20\times20}{20+20}=10(\mathrm{pF})$

回路总电容$C_\Sigma=C_S+C+p^2C_L=5+10+\dfrac{1}{4}\times20=20(\mathrm{pF})$

（1）有载时的谐振频率为

$$f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{0.8\times10^{-6}\times20\times10^{-12}}}\approx39.789\times10^6(\mathrm{Hz})=39.8\mathrm{MHz}$$

（2）根据$Q_0=\dfrac{R_p}{\omega_0 L}$有

$$R_p=Q_0\omega_0 L=100\times 2\pi\times 39.8\times 10^6\times 0.8\times 10^{-6}\approx 20005.6(\Omega)=20.01\text{k}\Omega$$

（3）有载时的品质因数为

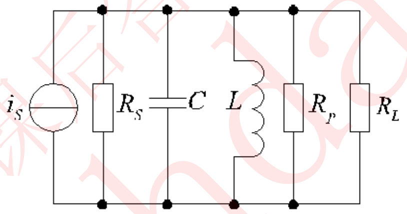
$$Q_L=\frac{R_S \,\|\, R_p \,\|\, \frac{1}{p^2}R_L}{\omega_0 L}=\frac{Q_0}{1+\frac{R_p}{R_S}+p^2\frac{R_p}{R_L}}=\frac{100}{1+\frac{20.01}{10}+\frac{1}{4}\times\frac{20.01}{5}}\approx 24.99$$

（4）通频带为

$$B=\frac{f_0}{Q_L}=\frac{39.8\times 10^6}{24.99}\approx 1.592\times 10^6(\text{Hz})=1.592\text{MHz}$$

1.6（1）并联谐振回路如图题 1.6 所示。已知通频带$B=2\Delta f_{0.7}$，电容为C，若回路总电导$g_\Sigma=g_S+G_p+G_L$。试证明：$g_\Sigma=4\pi\Delta f_{0.7}C$。

（2）若给定$C=20\text{pF}$，$2\Delta f_{0.7}=0.6\text{MHz}$，$R_p=10\text{k}\Omega$，$R_S=10\text{k}\Omega$，求$R_L$。



图题1.6

（1）证明：

有载品质因数$Q_L=\dfrac{R_\Sigma}{\omega_0 L}=R_\Sigma\omega_0 C=\dfrac{\omega_0 C}{g_\Sigma}$ ······（1）

通频带$B=\dfrac{f_0}{Q_L}=2\Delta f_{0.7}$ ······（2）

（1）代入（2）中有：$2\Delta f_{0.7}=f_0\times\dfrac{g_\Sigma}{\omega_0 C}=\dfrac{g_\Sigma}{2\pi C}$

故$g_\Sigma=4\pi\Delta f_{0.7}C$。

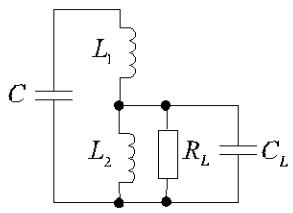
（2）解：根据（1）有：$g_\Sigma=4\pi\Delta f_{0.7}C=2\pi\times 2\Delta f_{0.7}\times C=2\pi\times 6\times 10^6\times 20\times 10^{-12}\approx 7.5398\times 10^{-4}(\text{S})$

$g_S=\dfrac{1}{R_S}=\dfrac{1}{10\times 10^3}=1\times 10^{-4}(\text{S})$；$G_p=\dfrac{1}{R_p}=\dfrac{1}{10\times 10^3}=1\times 10^{-4}(\text{S})$

故$G_L=g_\Sigma-G_p-g_S=7.5398\times 10^{-4}-10^{-4}-10^{-4}=5.5398\times 10^{-4}(\text{S})$

因此$R_L=\dfrac{1}{G_L}=\dfrac{1}{5.5398\times 10^{-4}}\approx 1.8\times 10^3(\Omega)=1.8\text{k}\Omega$

1.7 并联谐振回路与负载间采用部分接入方式，如图题 1.7 所示，已知 $L_1 = 4\mu H$，$L_2 = 4\mu H$（L_1、L_2 间互感可以忽略），$C = 500pF$，空载品质因数 $Q_0 = 100$，负载电阻 $R_L = 1k\Omega$，负载电容 $C_L = 10pF$。计算谐振频率 f_0 及通频带 B。



图题1.7

解：设回路的谐振电阻为 R_p，图题 1.7 可等效为图 1.7。

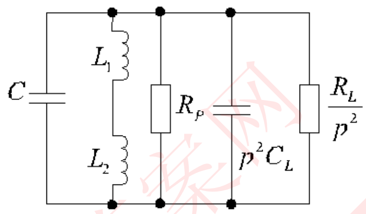


图1.7

图中的接入系数为 $p = \frac{L_2}{L_1 + L_2} = \frac{4}{4+4} = \frac{1}{2}$；回路两端总电感 $L = L_1 + L_2 = 4 + 4 = 8(\mu H)$；回路两端总电容 $C_\Sigma = C + p^2 C_L = 500 + \frac{1}{4} \times 10 = 502.5(pF)$。

（1）谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{8\times10^{-6}\times502.5\times10^{-12}}} \approx 2.5102\times10^6(Hz) \approx 2.51MHz$$

（2）由 $Q_0 = \frac{R_p}{\omega_0 L}$ 有

$$R_p = Q_0\omega_0 L = 100\times2\pi\times2.51\times10^6\times8\times10^{-6} \approx 1.2617\times10^4(\Omega) \approx 12.6k\Omega$$

$$\therefore Q_L = \frac{R_p \sqcup \frac{1}{p^2}R_L}{\omega_0 L} = \frac{Q_0}{1 + p^2\frac{R_p}{R_L}} = \frac{100}{1+\frac{1}{4}\times\frac{12.6}{1}} \approx 24.06$$

$$\therefore 通频带\ B = \frac{f_0}{Q_L} = \frac{2.51\times10^6}{24.06} \approx 1.043\times10^5(Hz) = 104.3kHz$$

1.8 某高频晶体管 CG322A，当 $I_E = 2mA$，$f_0 = 39MHz$ 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}，$|y_{fe}|$，φ_{fe}，$|y_{re}|$，φ_{re} 的值。

解：根据题意有：

$$g_{ie} = 2.8\text{mS}$$

$$C_{ie} = \frac{3.5\times10^{-3}}{2\pi f_0} = \frac{3.5\times10^{-3}}{2\pi\times39\times10^6} \approx 1.428\times10^{-11}\text{(F)=14.28pF}$$

$$g_{oe} = 0.2\text{mS}$$

$$C_{oe} = \frac{2\times10^{-3}}{2\pi f_0} = \frac{2\times10^{-3}}{2\pi\times39\times10^6} \approx 8.162\times10^{-12}\text{(F)=8.16pF}$$

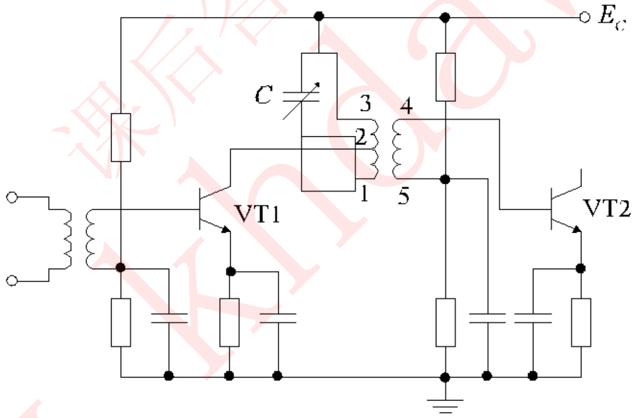
$$|y_{fe}| = \sqrt{36^2+27^2} = 45(\text{mS})$$

$$\varphi_{fe} = \arctan\left(\frac{-27}{36}\right) \approx -37^\circ$$

$$|y_{re}| = \sqrt{(-0.08)^2+(-0.3)^2} \approx 0.310(\text{mS})$$

$$\varphi_{re} = 180^\circ + \arctan\left(\frac{-0.3}{-0.08}\right) \approx 255^\circ$$

1.9 在图题 1.9 所示的调谐放大器中，工作频率 $f_0 = 10.7\text{MHz}$，$L_{1-3} = 4\mu\text{H}$，$Q_0 = 100$，$N_{1-3} = 20$ 匝，$N_{2-3} = 50$ 匝，$N_{4-5} = 5$ 匝。晶体管 3DG39 在 $I_E = 2\text{mA}$，$f_0 = 10.7\text{MHz}$ 时测得：$g_{ie} = 2860\mu\text{S}$，$C_{ie} = 18\text{pF}$，$g_{oe} = 200\mu\text{S}$，$C_{oe} = 7\text{pF}$，$|y_{fe}| = 45\text{mS}$，$|y_{re}| = 0$。画出用 Y 参数表示的放大器微变等效电路，试求放大器电压增益 A_{uo} 和通频带 B。



图题1.9

解：其交流通路如图 1.9（a）所示，相应的 Y 参数微变等效电路如图 1.9（b）所示。

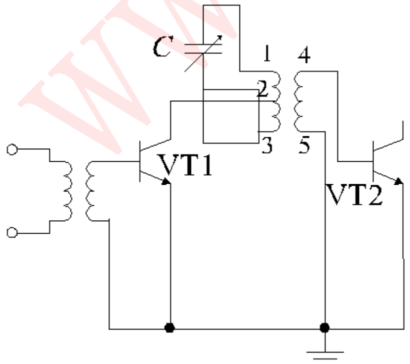


图1.9(a)

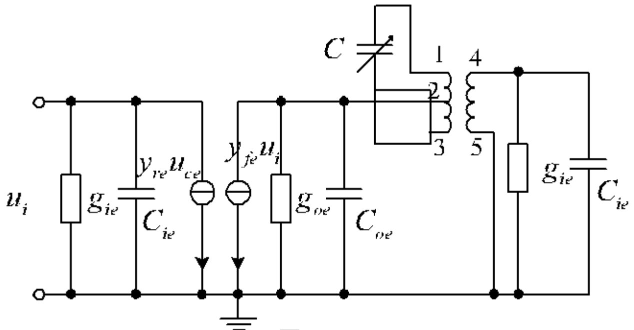


图1.9(b)

将（b）图中的集电极回路、负载折合到谐振回路两端的等效电路如图（c）所示。

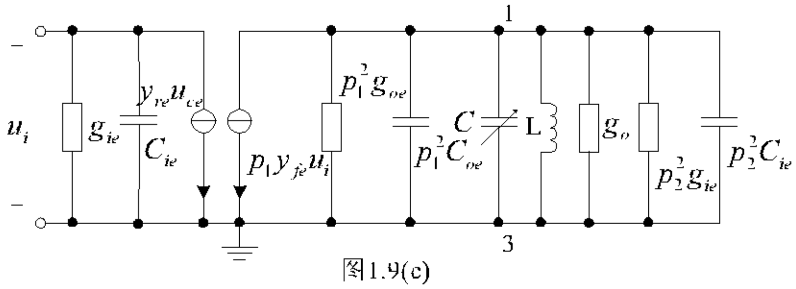


图1.9(c)

图中：g_o 为谐振回路的损耗电导，接入系数 $p_1=\frac{N_{23}}{N_{13}}=\frac{5}{20}=\frac{1}{4}$， $p_2=\frac{N_{45}}{N_{13}}=\frac{5}{20}=\frac{1}{4}$

由 $Q_0=\frac{1}{\omega_0 L_{13} g_o}$ 有：

$$g_o=\frac{1}{Q_0\omega_0 L_{13}}=\frac{1}{100\times 2\pi\times 10.7\times 10^6\times 4\times 10^{-6}}\approx 3.719\times 10^{-5}(\mathrm{S})$$

回路总电导：

$$g_\Sigma=g_o+p_1^2 g_{oe}+p_2^2 g_{ie}=3.719\times 10^{-5}+(1/4)^2\times 200\times 10^{-6}+(1/4)^2\times 2860\times 10^{-6}\approx 228.44\times 10^{-6}(\mathrm{S})$$

∴放大器电压增益为： $A_{uo}=\frac{p_1p_2|y_{fe}|}{g_\Sigma}=\frac{45\times 10^{-3}}{4\times 4\times 228.44\times 10^{-6}}\approx 12.3$

有载品质因数为 $Q_L=\frac{1}{\omega_0 L_{13} g_\Sigma}=\frac{1}{2\pi\times 10.7\times 10^6\times 4\times 10^{-6}\times 228.44\times 10^{-6}}\approx 16.278$

∴通频带 $B=\frac{f_0}{Q_L}=\frac{10.7\times 10^6}{16.278}\approx 0.657\times 10^6(\mathrm{Hz})=0.657\mathrm{MHz}$

1.10 图题 1.10 是中频放大器单级电路图。已知工作频率 $f_0=30\mathrm{MHz}$，回路电感 $L=1.5\mu\mathrm{H}$，$Q_0=100$，$N_1/N_2=4$， $C_1\sim C_4$ 均为耦合电容或旁路电容。晶体管采用 CG322A，Y 参数与题 1.8 的相同。

（1）画出 Y 参数表示的放大器微变等效电路。

（2）求回路总电导 g_Σ。

（3）求回路总电容 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 $f_0=10\mathrm{MHz}$ 时，应在回路两端并联多大的电阻？

解：（1）其交流通路如图 1.10（a）所示，相应的 Y 参数微变等效电路如图 1.10（b）所示。图中：g_o 为谐振回路的损耗电导，接入系数 $p=\frac{N_2}{N_1}=\frac{1}{4}$。

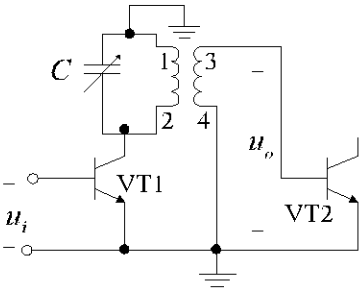


图1.10(a)

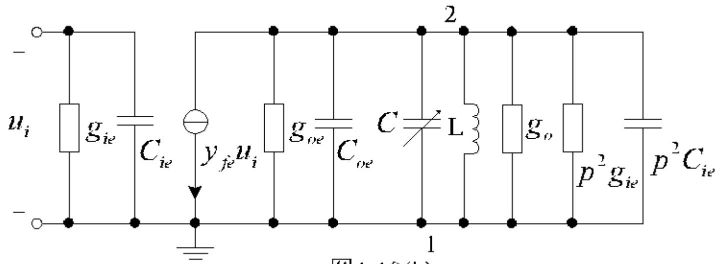


图1.10(b)

（2）山 $Q_0=\dfrac{1}{\omega_0 L g_o}$ 有：

回路的损耗电导 $g_o=\dfrac{1}{Q_0\omega_0 L}=\dfrac{1}{100\times2\pi\times10.730\times10^6\times1.5\times10^{-6}}\approx3.5368\times10^{-5}(\text{S})$

回路总电导为

$$g_\Sigma=g_o+g_{oe}+p^2g_{ie}=3.5368\times10^{-5}+200\times10^{-6}+(1/4)^2\times2860\times10^{-6}\approx414.118\times10^{-6}(\text{S})$$

（3）山 $f_0=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}$ 有

$$C_\Sigma=\frac{1}{L(2\pi f_0)^2}=\frac{1}{1.5\times10^{-6}\times(2\pi\times30\times10^6)^2}\approx1.8763\times10^{-11}(\text{F})=18.763\text{pF}$$

（4）放大器的电压增益为 $A_u=\dfrac{u_o}{u_i}=\dfrac{pu_{12}}{u_{be}}$

山图（b）有：$u_{12}=-\dfrac{y_{fe}u_i}{g_\Sigma+\dfrac{1}{j\omega L}+j\omega C_\Sigma}=-\dfrac{y_{fe}u_{be}}{g_\Sigma+\dfrac{1}{j\omega L}+j\omega C_\Sigma}$ $\left(\begin{aligned}g_\Sigma&=g_o+g_{oe}+p^2g_{ie}\\C_\Sigma&=C_o+C_{oe}+p^2C_{ie}\end{aligned}\right)$

$$\therefore\ A_u=-\frac{py_{fe}}{g_\Sigma+\dfrac{1}{j\omega L}+j\omega C_\Sigma}$$

∴谐振时的电压增益为 $|A_{uo}|=\dfrac{p|y_{fe}|}{g_\Sigma}=\dfrac{\frac{1}{4}\times45\times10^{-3}}{414.118\times10^{-6}}\approx27.17$

（5）山 $B=\dfrac{f_0}{Q_L}$ 有

$$Q_L=\frac{f_0}{B}=\frac{30\times10^6}{10\times10^6}=3$$

设并联的电阻为 R，则有

$$R=\frac{1}{\dfrac{1}{Q_L\omega_0 L}-g_\Sigma}=\frac{1}{\dfrac{1}{3\times2\pi\times30\times10^6\times1.5\times10^{-6}}-414.118\times10^{-6}}\approx1307.5(\Omega)=1.31\text{k}\Omega$$

1.11 在二级单调谐放大器中，工作频率为 465kHz，每级 LC 回路的 $Q_L=40$，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_L 为多少？

解：（1）总通频带 $B_3=\sqrt{2^{1/3}-1}\dfrac{f_0}{Q_L}=\sqrt{2^{1/3}-1}\dfrac{465\times10^3}{40}\approx5.927\times10^3(\text{Hz})=5.927\text{kHz}$

（2）由 $B_3=\sqrt{2^{1/3}-1}\dfrac{f_0}{Q_L}$ 有

$$Q_L=\frac{\sqrt{2^{1/3}-1}f_0}{B_3}=\frac{\sqrt{2^{1/3}-1}\times465\times10^3}{10\times10^3}\approx23.7$$

1.12 设有一级单调谐回路中频放大器，其通频带 $B=4\text{MHz}$，$A_{uo}=10$，如果再用一级完全相同的放大器与之级联，这时两级中放总增益和通频带各为多少？若要求级联后的总频带宽度为4MHz，问每级放大器应如何改变？改变后的总增益是多少？

解：（1）总增益 $A_u=A_{uo}^2=10^2=100$

（2）总通频带 $B_2=\sqrt{2^{1/2}-1}\times B=\sqrt{2^{1/2}-1}\times4\times10^6\approx2.574\times10^6(\text{Hz})=2.574\text{MHz}$

（3）若 $B_2=4\text{MHz}$，则每级放大器的通频带为

$$B'=\frac{B_2}{\sqrt{2^{1/2}-1}}=\frac{4\times10^6}{\sqrt{2^{1/2}-1}}\approx6.215\times10^6(\text{Hz})=6.215\text{MHz}$$

由于每级 $A_{uo}=\dfrac{k}{g_\Sigma}$，$B=\dfrac{f_0}{Q_L}=\dfrac{f_0}{\omega_0 C}g_\Sigma=\dfrac{1}{2\pi C}g_\Sigma$，故每级 $A_{uo}B=\dfrac{k}{g_\Sigma}\dfrac{1}{2\pi C}g_\Sigma=\dfrac{k}{2\pi C}=K$（常数），因此有：

$$A_{uo}'=\frac{K}{B'}=\frac{A_{uo}B}{B'}=\frac{10\times4}{6.215}\approx6.436$$

故总电压增益 $A_u'=A_{uo}'^2\approx6.436^2\approx41.42$。

第 2 章　高频功率放大器

2.1 为什么低频功率放大器不能工作于丙类，而高频功率放大器则可工作于丙类？

答：两种放大器最根本的不同点是：低频功率放大器的工作频率低，但相对频带宽度却很宽，因而只能采用无调谐负载，工作状态只能限于甲类、甲乙类至乙类（限于推挽电路），以免信号严重失真；而高频功率放大器的工作频率高，但相对频带宽度窄，因而可以采用选频网络作为负载，可以在丙类工作状态，由选频网络滤波，避免了输出信号的失真。

2.2 丙类放大器为什么一定要用调谐回路作为集电极负载？回路为什么一定要调到谐振状态？回路失谐将产生什么结果？

答：选用调谐回路作为集电极负载的原因是为了消除输出信号的失真。只有在谐振时，调谐回路才能有效地滤除不需要的频率，只让有用信号频率输出。此时，集电极电流脉冲只在集电极瞬时电压最低区间流通，因而电流脉冲最小，平均电流 I_{co} 也最小。若回路失谐，则集电极电流脉冲移至集电极瞬时电压较高的区间流通，因而电流脉冲变大，I_{co} 上升，同时，输出功率下降，集电极耗散功率将急剧增加，以致烧损放大管。因此，回路失谐必须绝对避免。

2.3 提高高频放大器的效率与功率，应从哪儿方面入手？

答：（1）使放大器工作于丙类，并用选频网络作为负载；

（2）适当选取电流导通角 θ_c。

2.9 晶体管放大器工作于临界状态，$R_p = 200\Omega$，$I_{co} = 90\text{mA}$，$E_C = 30\text{V}$，$\theta_c = 90°$。试求 P_o 与 η。

解：查课本后附录得：$g_1(\theta_c) = g_1(90°) = 1.57$

$$I_{cm1} = I_{co} g_1(\theta_c) = 90 \times 1.57 = 141.3(\text{mA})$$

$$\therefore P_o = \frac{1}{2} I_{cm1}^2 R_p = \frac{1}{2} \times (141.3 \times 10^{-3})^2 \times 200 \approx 1.997(\text{W}) = 2\text{W}$$

$$P_D = E_C I_{co} = 30 \times 90 \times 10^{-3} = 2.7(\text{W})$$

$$\therefore \eta = \frac{P_o}{P_D} = \frac{2}{2.7} \times 100\% \approx 74.1\%$$

2.10 已知谐振功率放大器的导通角 θ_c 分别为 $180°$、$90°$ 和 $60°$ 时，都工作在临界状态，且三种情况下的 E_C、$I_{c\max}$ 也都相同。试计算三种情况下效率 η 的比值和输出功率 P_o 的比值。

解：（1）$\eta = \dfrac{P_o}{P_D} = \dfrac{I_{cm1}^2 R_p}{2E_C I_{co}} = \dfrac{I_{c\max}^2 \alpha_1^2(\theta_c) R_p}{2E_C I_{c\max} \alpha_0(\theta_c)} = \dfrac{I_{c\max} R_p}{2E_C} \times \dfrac{\alpha_1^2(\theta_c)}{\alpha_0(\theta_c)}$

$\because E_C$、$I_{c\max}$、R_p 相同，因此有

$$\eta_1 : \eta_2 : \eta_3 = \frac{\alpha_1^2(180°)}{\alpha_0(180°)} : \frac{\alpha_1^2(90°)}{\alpha_0(90°)} : \frac{\alpha_1^2(60°)}{\alpha_0(60°)} = \frac{0.5^2}{0.5} : \frac{0.5^2}{0.319} : \frac{0.391^2}{0.218} = 1 : 1.567 : 1.403 \approx 1 : 1.57 : 1.40$$

（2）$P_o = \dfrac{1}{2} I_{cm1}^2 R_p = \dfrac{1}{2} I_{c\max}^2 R_p \alpha_1^2(\theta_c)$

$$\therefore P_{o1} : P_{o2} : P_{o3} = \alpha_1^2(180°) : \alpha_1^2(90°) : \alpha_1^2(60°) = 0.5^2 : 0.5^2 : 0.391^2 \approx 1 : 1 : 0.61$$

2.11 已知谐振功率放大器电路，$E_C = 24\text{V}$，$P_o = 5\text{W}$。当 $\eta = 60\%$ 时，试计算 P_C 和 I_{co}。若保持 P_o 不变，η 提高到 80%，则 P_C 和 I_{co} 减小为多少？

解：（1）$\eta = \dfrac{P_o}{P_D} = \dfrac{P_o}{P_C + P_o}$

$$\therefore P_C = \frac{1-\eta}{\eta} \times P_o = \frac{1-0.6}{0.6} \times 5 \approx 3.33(\text{W}) \qquad P_D = \frac{P_o}{\eta} = \frac{5}{0.6} \approx 8.33(\text{W})$$

$$\therefore I_{co} = \frac{P_D}{E_C} = \frac{8.33}{24} \approx 0.35(\text{A})$$

（2）$P_C = \dfrac{1-\eta}{\eta} \times P_o = \dfrac{1-0.8}{0.8} \times 5 = 1.25(\text{W}) \qquad P_D = \dfrac{P_o}{\eta} = \dfrac{5}{0.8} = 6.25(\text{W})$

$$\therefore I_{co} = \frac{P_D}{E_C} = \frac{6.25}{24} \approx 0.26(\text{A})$$

2.12 实测一谐振功放，发现 P_o 仅为设计值的 20%，I_{co} 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} 接近于设计值？

解：通常功放设计工作在临界状态，则：$P_o = P_{临界} \times 20\%$，$I_{co} \approx I_{co临界}$。

根据 P73 图 2.17 知：此功放工作于欠压工作状态。故增大 R_p 就可使此功放工作于临界状态，P_o 及 I_{co} 都可接近于设计值。

2.14 某一晶体管谐振功率放大器，已知 $E_C = 24\text{V}$，$I_{co} = 250\text{mA}$，$P_o = 5\text{W}$，电压利用系数 $\xi = 1$。试求 P_D、η、R_p、I_{cm1} 和电流导通角 θ_c。

解：（1）$P_D = E_C I_{co} = 24 \times 250 \times 10^{-3} = 6(\text{W})$

（2）$\eta = \dfrac{P_o}{P_D} \times 100\% = \dfrac{5}{6} \times 100\% \approx 83.3\%$

（3）$U_{cm1} = \xi \times E_C = 24\text{V} \qquad R_p = \dfrac{U_{cm1}^2}{2P_o} = \dfrac{24^2}{2\times 5} = 57.6(\Omega)$

（4）$I_{cm1} = \dfrac{2P_o}{U_{cm1}} = \dfrac{2\times 5}{24} \approx 0.417(\text{A})$

（5）$g_1(\theta_c) = \dfrac{I_{cm1}}{I_{co}} = \dfrac{0.417}{0.25} \approx 1.67$　　查附录知：$g_1(78^\circ) = 1.67$，故 $\theta_c = 78^\circ$。

2.15 一高频功放以抽头并联谐振回路作负载，谐振回路用可变电容调谐。工作频率 $f = 5\text{MHz}$，谐振时电容 $C = 200\text{pF}$，回路有载品质因数 $Q_L = 20$，放大器要求的最佳负载阻抗 $R_{pcr} = 50\Omega$。试计算回路电感 L 和接入系数 p_L。

解：（1）根据 $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 有：

$$L = \frac{1}{C(2\pi f_0)^2} = \frac{1}{200\times 10^{-12} \times (2\pi \times 5 \times 10^6)^2} \approx 5.066 \times 10^{-6}(\text{H}) = 5.066\mu\text{H}$$

（2）设并联谐振回路谐振阻抗为 R_p，则有：$Q_L=\dfrac{R_p}{\omega_0 L}=\omega_0 CR_p$

$$\therefore R_p=\frac{Q_0}{\omega_0 C}=\frac{20}{2\pi\times5\times10^6\times200\times10^{-12}}\approx3183.1(\Omega)$$

$$\therefore p_L=\sqrt{\frac{R_{pcr}}{R_p}}=\sqrt{\frac{50}{3183.1}}\approx0.125$$

2.16 某高频谐振功率放大器工作于临界状态，输出功率为 15W，且 $E_C=24$，导通角 $\theta_c=70°$。功放管参数为：$g_{cr}=1.5\text{A/V}$，$I_{CM}=5\text{A}$。试问：

（1）直流电源提供的功率 P_D、功放管的集电极损耗功率 P_C、效率 η 和临界负载电阻 R_{pcr} 各是多少？（注：$\alpha_0(70°)=0.253$，$\alpha_1(70°)=0.436$）

（2）若输入信号振幅增大一倍，功放的工作状态将如何改变？此时的输出功率约为多少？

（3）若负载电阻增大一倍，功放的工作状态将如何改变？

（4）若回路失谐，会有何危险？如何指示调谐？

解：仿照 P72 例 2-1，先求 ξ_{cr}。

$$\because I_{c\max}=g_{cr}(E_C-U_{cm1})=g_{cr}E_C(1-\xi_{cr})$$

$$\therefore P_o=\frac{1}{2}U_{cm1}I_{cm1}=\frac{1}{2}E_C\xi_{cr}I_{c\max}\alpha_1(\theta_c)=\frac{1}{2}E_C\xi_{cr}g_{cr}E_C(1-\xi_{cr})\alpha_1(\theta_c)$$

即 $\xi_{cr}^2-\xi_{cr}+\dfrac{2P_o}{E_C^2 g_{cr}\alpha_1(\theta_c)}=0$

$$\therefore \xi_{cr}=\frac{1}{2}+\sqrt{\frac{1}{4}-\frac{2P_o}{E_C^2 g_{cr}\alpha_1(\theta_c)}}=\frac{1}{2}+\sqrt{\frac{1}{4}-\frac{2\times15}{24^2\times1.5\times0.436}}\approx0.9127$$

（1）$U_{cm1}=E_C\xi_{cr}=24\times0.9127\approx21.9(\text{V})$　　$I_{cm1}=\dfrac{2P_o}{U_{cm1}}=\dfrac{2\times15}{21.9}\approx1.3699(\text{A})$

$$\therefore I_{c\max}=\frac{I_{cm1}}{\alpha_1(70°)}=\frac{1.3699}{0.436}\approx3.1419(\text{A})$$

① $I_{co}=I_{c\max}\alpha_0(70°)=3.1419\times0.253\approx0.7949(\text{A})$

$P_D=E_C I_{co}=24\times0.7949\approx19.08(\text{W})$

② $P_C=P_D-P_o=19.08-15=4.08(\text{W})$

③ $\eta=\dfrac{15}{19.08}\times100\%\approx78.6\%$

④ $R_{pcr}=\dfrac{U_{cm1}}{I_{cm1}}=\dfrac{21.9}{1.3699}\approx15.99(\Omega)$

（2）由于功放工作于临界状态，若 U_{bm} 增大一倍，则功放的工作状态进入过压工作状态。

$U_{bm}\uparrow\rightarrow i_c$ 下凹部分↑且 I_{co}、I_{cm1} 缓增 $\rightarrow P_o=\dfrac{1}{2}I_{cm1}^2R_p$ 缓增（几乎不变）（P75 图 2.20）

（3）由于功放工作于临界状态，若 R_p 增大一倍，则

$\because R_p \uparrow \rightarrow |g_d| \downarrow \rightarrow$ 功放的工作状态进入过压工作状态。（P73 图 2.17）

（4）回路失谐时负载阻抗 Z_p 模值即 $|Z_p| \downarrow \rightarrow |g_d| \uparrow \rightarrow$ 进入欠压状态 $\rightarrow I_{co}$、$I_{cm1} \uparrow$、$U_{cm1} \downarrow \rightarrow P_D \uparrow = E_C I_{co}$、$P_o \downarrow = \frac{1}{2} U_{cm1} I_{cm1} \cos\varphi \rightarrow P_C \uparrow = P_D - P_o \rightarrow$ 功耗大，烧坏管子。

用 I_{co} 的最小值来指示调谐。

2.17 高频大功率晶体管 3DA4 的参数为 $f_T = 100\text{MHz}$，$\beta = 20$，额定输出功率 $P_o = 20\text{W}$，临界饱和线跨导 $g_{cr} = 0.8\text{A/V}$，用它做成 2MHz 的谐振功率放大器，选定 $E_C = 24\text{V}$，$\theta_c = 70°$，$I_{C\max} = 2.2\text{A}$，并工作于临界状态。试计算 R_p、P_o、P_C、η 与 P_D。

解：临界状态时，$I_{c\max} = g_{cr}(E_C - U_{cm1})$

$$\therefore U_{cm1} = E_C - \frac{I_{c\max}}{g_{cr}} = 24 - \frac{2.2}{0.8} = 21.25(\text{V})$$

$$I_{co} = I_{c\max}\alpha_0(\theta_c) = 2.2 \times 0.253 = 0.5566(\text{A}) \quad I_{cm1} = I_{c\max}\alpha_1(\theta_c) = 2.2 \times 0.436 = 0.9592(\text{A})$$

（1）$R_p = \dfrac{U_{cm1}}{I_{cm1}} = \dfrac{21.25}{0.9592} \approx 22.15(\Omega)$

（2）$P_o = \dfrac{1}{2} U_{cm1} I_{cm1} = \dfrac{1}{2} \times 21.25 \times 0.9592 \approx 10.19(\text{W})$

（3）$P_D = E_C I_{co} = 24 \times 0.5566 \approx 13.36(\text{W})$

（4）$P_C = P_D - P_o = 13.36 - 10.19 = 3.17(\text{W})$

（5）$\eta = \dfrac{P_o}{P_D} \times 100\% = \dfrac{10.19}{13.36} \times 100\% \approx 76.27\%$

第 3 章　正弦波振荡器

3.1 为什么振荡电路必须满足起振条件、平衡条件和稳定条件？试从振荡的物理过程来说明这三个条件的含义。

答：（1）在刚接通电源时，电路中会存在各种电扰动，这些扰动在接通电源瞬间会引起电路电流的突变（如晶体管 i_b 或 i_c 突变），这些突变扰动的电流均具有很宽的频谱，由于集电极 LC 并联谐振回路的选频作用，其中只有角频率为谐振角频率 ω_o 的分量才能在谐振回路两端产生较大的电压 $u_o(j\omega_o)$。通过反馈后，加到放大器输入端的反馈电压 $u_f(j\omega_o)$ 与原输入电压 $u_i(j\omega_o)$ 同相，并且有更大的振幅，则经过线性放大和正反馈的不断循环，振荡电压振幅会不断增大。故要使振荡器在接通电源后振荡幅度能从小到大增长的条件是：

$$u_f(j\omega_o) = T(j\omega_o)u_i(j\omega_o) > u_i(j\omega_o)$$

即：　$T(j\omega_o) > 1$　　……起振条件

（2）振荡幅度的增长过程不可能无休止地延续下去。随着振幅的增大，放大器逐渐由放大区进入饱和区或截止区，其增益逐渐下降。当因放大器增益下降而导致环路增益下降至 1 时，振幅的增长过程将停止，振荡器达到平衡状态，即进入等幅状态。振荡器进入平衡状态后，直流电源补充的能量刚好抵消整个环路消耗的能量。故平衡条件为：

$$T(j\omega_o) = 1$$

（3）振荡器在工作过程中，不可避免地要受到各种外界因素变化的影响，如电源电压波动、噪声干扰等。这些会破坏原来的平衡条件。如果通过放大和反馈的不断循环，振荡器能产生回到原平衡点的趋势，并且在原平衡点附近建立新的平衡状态，则表明原平衡状态是稳定的。振荡器在其平衡点须具有阻止振幅变化、相位变化的能力，因此：

振幅平衡状态的稳定条件是：$\left.\dfrac{\partial T(\omega_o)}{\partial U_i}\right|_{U_i=U_{iA}} < 0$；

相位平衡状态的稳定条件是：$\left.\dfrac{\partial \varphi_T(\omega_o)}{\partial \omega}\right|_{\omega=\omega_o} < 0$

3.2 图题 3.2 所示的电容反馈振荡电路中，$C_1 = 100\text{pF}$，$C_2 = 300\text{pF}$，$L = 50\mu\text{H}$。画出电路的交流等效电路，试估算该电路的振荡频率和维持振荡所必需的最小电压放大倍数 $A_{u\min}$。

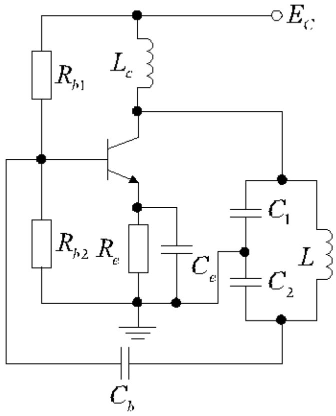
解：电路的交流等效电路如图 3.2 所示。（L_c 开路，E_C 短接到地，R_e、C_e、C_b 被短路）

振荡频率 $f_s \approx \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$，式中 $C = \dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2} = \dfrac{100\times300}{100+300} = 75(\text{pF})$

$$\therefore f_s \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{50\times10^{-6}\times75\times10^{-12}}} \approx 2.599\times10^6(\text{Hz}) = 2.6\text{MHz}$$

要维持振荡首先要满足的振荡条件为：$T(j\omega_o) > 1$，即 $|A_uF| > 1$，而 $F = \dfrac{C_1}{C_2} = \dfrac{1}{3}$，故有

$$A_{u\min} = 3$$



图题3.2

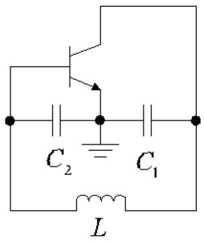
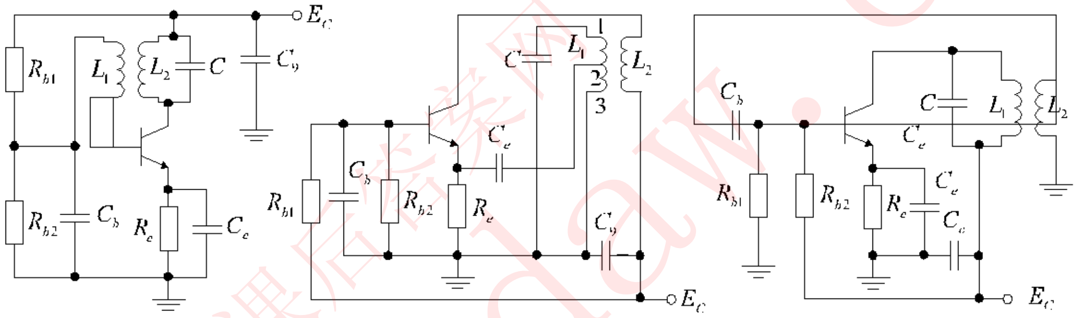


图3.2

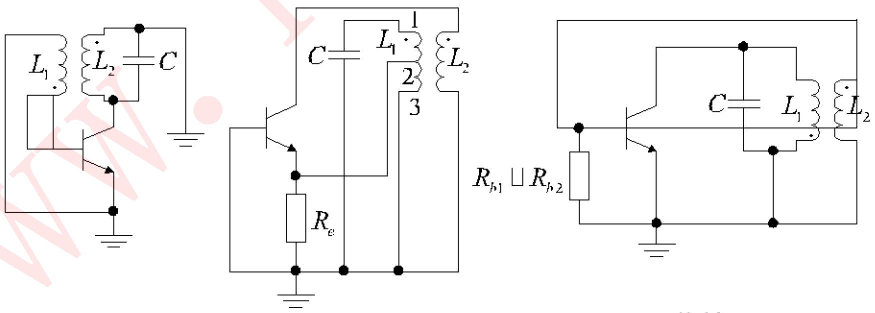
3.3 图题 3.3 所示为互感耦合反馈振荡器，画出其高频等效电路，并注明电感线圈的同名端。



(a) (b) (c)

图题3.3

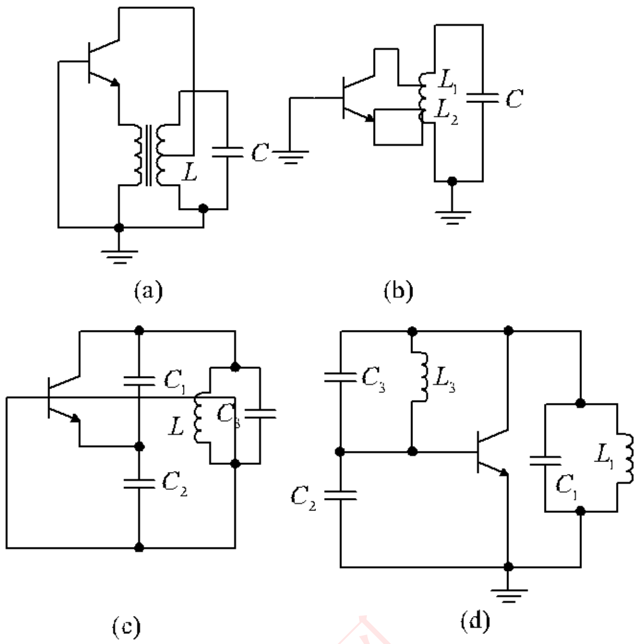
解：相应的高频等效电路以及电感线圈的同名端（利用瞬时极性法来判断）如下图所示。



(a)（共射） (b)（共基） (c)（共射）

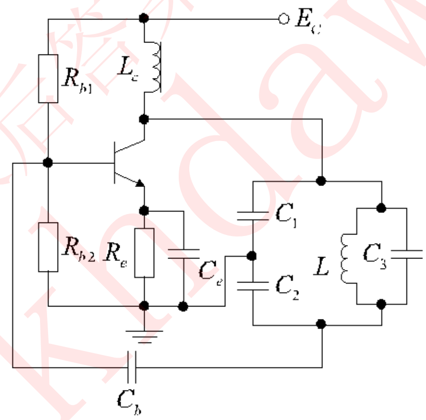
图3.3

3.4 试将图题 3.4 所示的几种振荡器交流等效电路改画成实际电路，对于互感耦合振荡器电路须标注同名端，对双回路振荡器须注明回路固有谐振频率的范围。



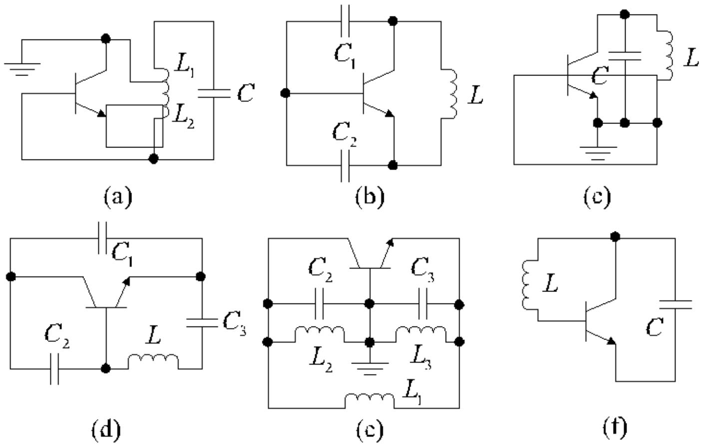
图题3.4

解：以图（c）为例，应该加上直流偏置电路，则实际电路为：



其振荡频率 $f_s < f_3 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_3}}$。

3.5 利用相位条件的判断准则，判断图题 3.5 所示的三点式振荡器交流等效电路，哪个是不可能振荡的？哪个是可能振荡的？属于哪种类型的振荡电路？有些电路应说明在什么条件下才能振荡。



图题3.5

解：（a）可以振荡，属于电感三点式振荡电路；

（b）（c）（d）不可能振荡，因为不满足相位条件；

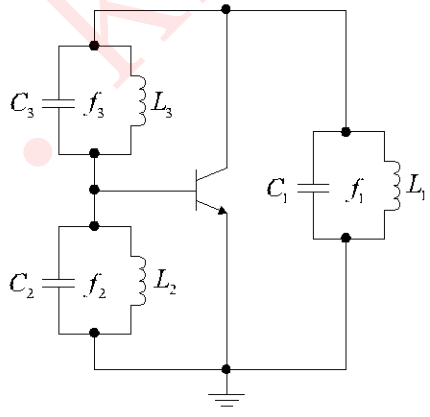
（e）可能振荡，条件是：L_2C_2 呈容性，L_3C_3 呈感性，即：$f_3=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_3C_3}}>f>f_2=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$，属于电感三点式振荡电路；

（f）可能振荡，条件：考虑极间电容 $C_{b'e}$，属于电容三点式振荡电路。

3.6 图题 3.6 所示是一个三回路振荡器的等效电路。设有下列四种情况：

（1）$L_1C_1>L_2C_2>L_3C_3$；（2）$L_1C_1<L_2C_2<L_3C_3$；（3）$L_1C_1=L_2C_2>L_3C_3$；（4）$L_1C_1<L_2C_2=L_3C_3$

试分析上述四种情况是否都能振荡，振荡频率与回路谐振频率有何关系？

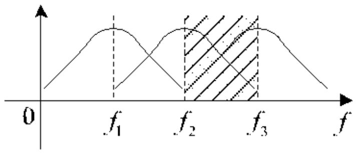


图题3.6

解：根据三点式振荡电路组成原则来判断，即 L_1C_1、L_2C_2 同性质，L_3C_3 为异性质。设：$f_1=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_1C_1}}$、

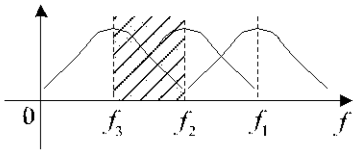
$f_2=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_2C_2}}$、$f_3=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{L_3C_3}}$。

（1）$L_1C_1 > L_2C_2 > L_3C_3$ 即：$f_1 < f_2 < f_3$



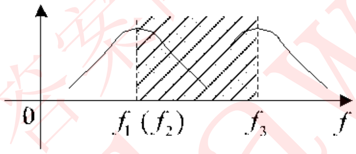
当 $f_1 < f_2 < f_3$ 时，为电容三点式振荡电路；

（2）$L_1C_1 < L_2C_2 < L_3C_3$ 即：$f_1 > f_2 > f_3$



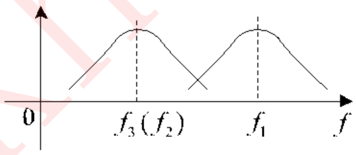
当 $f_1 > f_2 > f_3$ 时，为电容三点式振荡电路；

（3）$L_1C_1 = L_2C_2 > L_3C_3$ 即：$f_1 = f_2 < f_3$



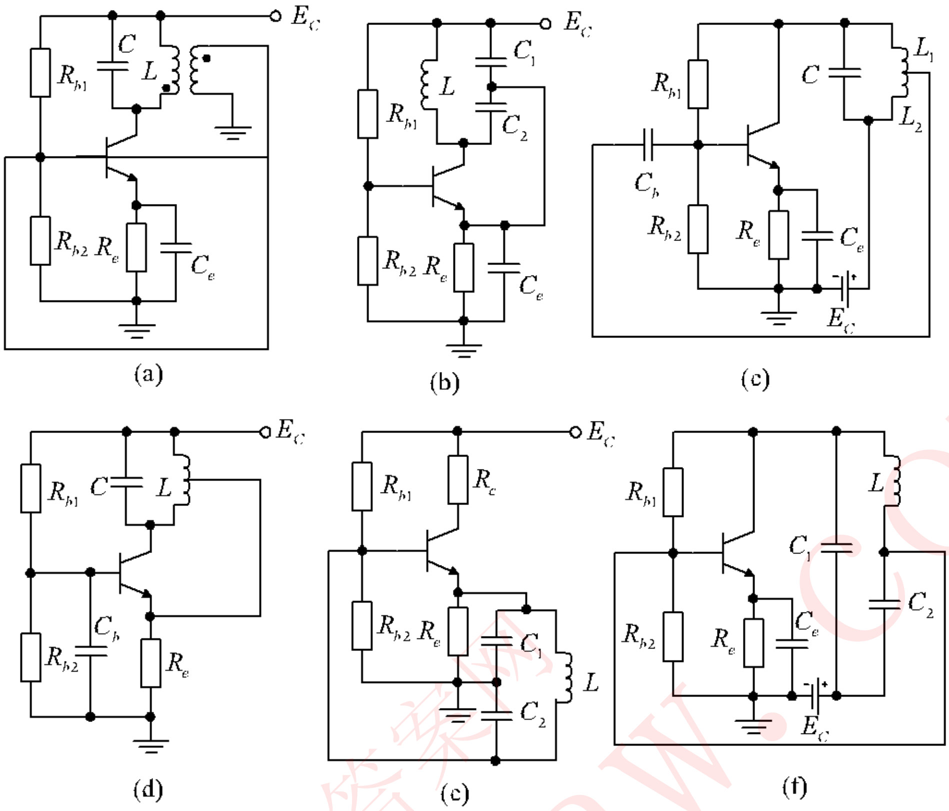
当 $f_1 = f_2 < f_3$ 时，为电感三点式振荡电路；

（4）$L_1C_1 < L_2C_2 = L_3C_3$ 即：$f_1 > f_2 = f_3$



当 $f_1 > f_2 = f_3$ 时，此电路不能起振。

3.7 试检查图题 3.7 所示的振荡器电路有哪些错误，并加以改正。



图题3.7

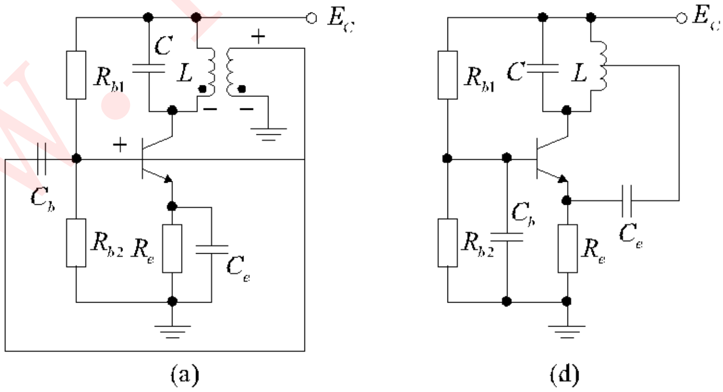
解：以图（a）、（d）为例，可检查直流偏置电路和交流通路（正反馈）来判断。

图（a）：直流电源被变压器的次级线圈短路到地，加不到晶体管基极，故应加隔直电容 C_b；

交流通路：通过瞬时极性法得知，此反馈为负反馈，故应修改同名端的标注。

图（d）：直流电源通过电感 L、电阻 R_e 到地，加不到晶体管基极，故应加隔直电容 C_e；

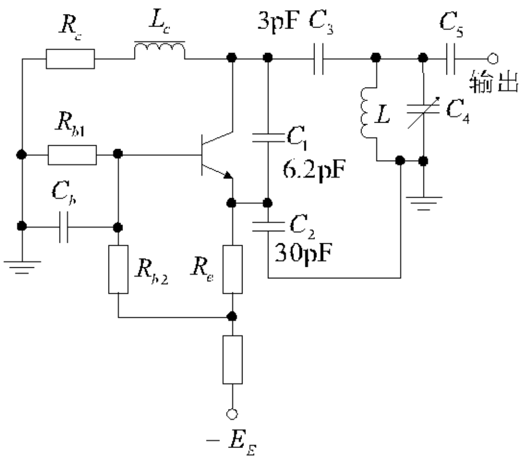
交流通路正确。



3.8 某振荡电路如图题 3.8 所示。

（1）试说明各元件的作用。

（2）回路电感 $L=1.5\mu\text{H}$，要使振荡频率为 $f_o=49.5\text{MHz}$，则 C_4 应调到何值？



图题3.8

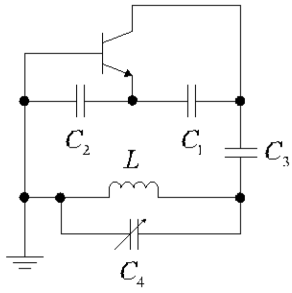


图3.8

解：(1) C_1、C_2、C_3、C_4、L 构成振荡回路；R_{b1}、R_{b2}：偏置电阻；L_c：高频扼流圈；C_b：旁路电容；R_c：集电极负载电阻；R_e：发射极偏置电阻；C_5：隔直电容。

(2) 交流等效电路如图 3.8 所示。

振荡回路两端总电容为

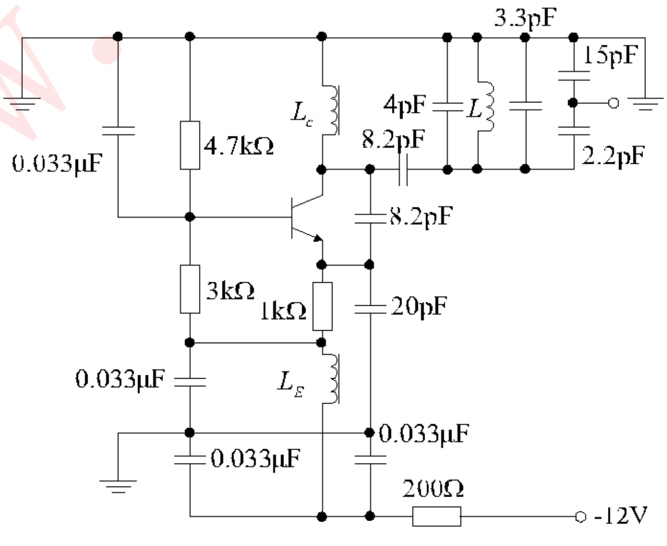
$$C = C_4 + \frac{C_1C_2C_3}{C_1C_2 + C_1C_3 + C_2C_3}$$

而振荡频率 $f_s = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

$$\therefore C = \frac{1}{(2\pi f_s)^2 L} = \frac{1}{(2\pi \times 49.5 \times 10^6)^2 \times 1.5 \times 10^{-6}} \approx 6.891 \times 10^{-12}(\mathrm{F}) = 6.891\mathrm{pF}$$

$$\therefore C_4 = C - \frac{C_1C_2C_3}{C_1C_2 + C_1C_3 + C_2C_3} = 6.891 - \frac{6.2 \times 30 \times 3}{6.2 \times 30 + 6.2 \times 3 + 30 \times 3} \approx 4.997(\mathrm{pF}) \approx 5\mathrm{pF}$$

3.9 图题 3.9 所示振荡电路的振荡频率 $f_o = 50\mathrm{MHz}$，画出其交流等效电路并求回路电感 L。



图题3.9

解：交流等效电路如图 3.9 所示。

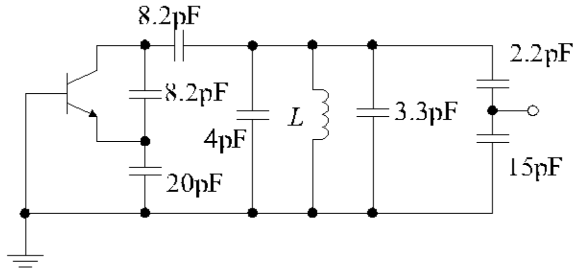


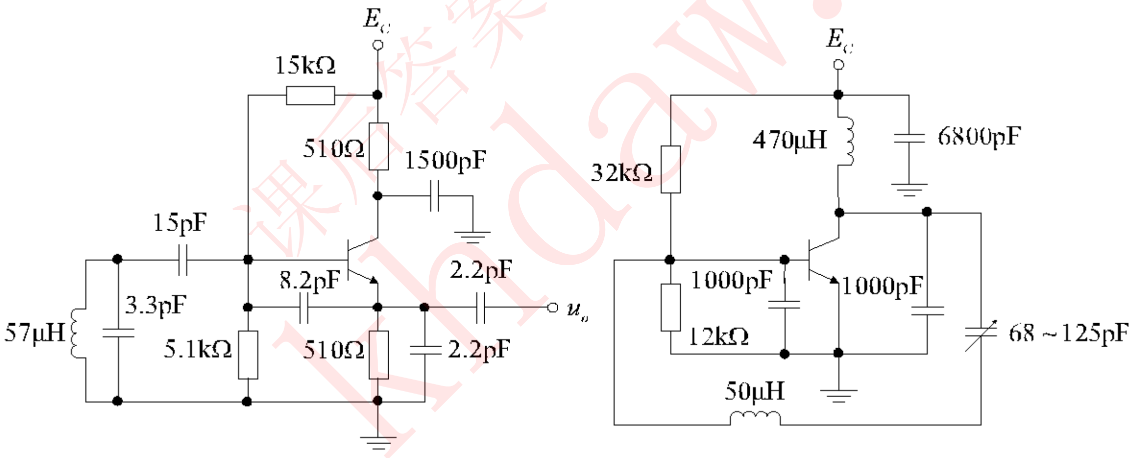
图3.9

回路两端总电容 $C = 4 + 3.3 + \frac{2.2\times 15}{2.2+15} + \frac{8.2\times 8.2\times 20}{8.2+8.2+20} \approx 12.621(\text{pF})$

$\therefore L = \frac{1}{(2\pi f_o)^2 C} = \frac{1}{(2\pi\times 50\times 10^6)^2\times 12.621\times 10^{-12}} \approx 8.028\times 10^{-7}(\text{H}) = 0.8\mu\text{H}$

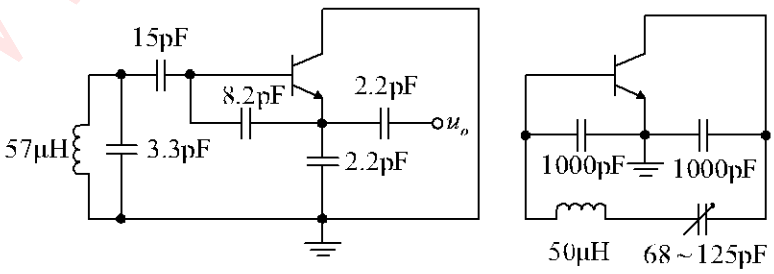
3.10 对于图题 3.10 所示各振荡电路：

（1）画出高频交流等效电路，说明振荡器类型；（2）计算振荡频率。



图题3.10

解：（1）交流等效电路如图 3.10 所示。



(a)西勒振荡电路　(b)克拉泼振荡电路

图3.10

（2）图（a）：

回路两端总电容 $C = 3.3 + \frac{8.2\times 2.2\times 15}{8.2+2.2+15} \approx 4.8548(\text{pF})$

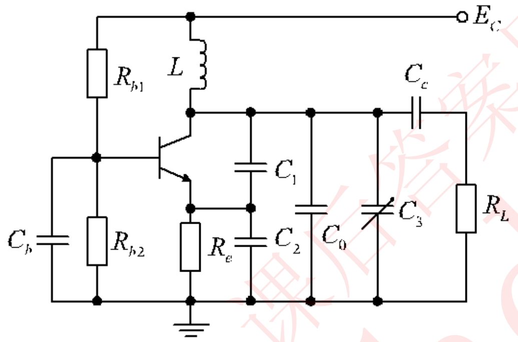
$$\therefore 振荡频率\ f_s=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{57\times10^{-6}\times4.8548\times10^{-12}}}\approx9.567\times10^{6}(\mathrm{Hz})=9.567\mathrm{MHz}$$

图（b）:

$$回路两端总电容\ C=\frac{1}{\frac{1}{1000}+\frac{1}{1000}+\frac{1}{68\sim125}}\approx(59.859\sim100)(\mathrm{pF})$$

$$\therefore 振荡频率\ f_s=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{50\times10^{-6}\times(59.859\sim100)\times10^{-12}}}\approx(2.25\sim2.91)\times10^{6}(\mathrm{Hz})$$

3.11 图题 3.11 所示是一电容反馈振荡器的实际电路，已知 $C_1=50\mathrm{pF}$，$C_2=100\mathrm{pF}$，$C_3=10\sim260\mathrm{pF}$，要求工作在波段范围，即 $f=10\sim20\mathrm{MHz}$，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 $R_L=1\mathrm{k\Omega}$，晶体管输入电阻 $R_i=500\Omega$，若要求起振时环路增益 $A_uF=3$，问要求的跨导 g_m 必须为多大？



图题3.11

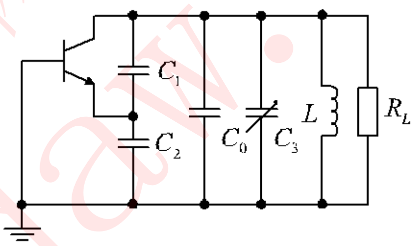


图3.11-1

解：（1）交流等效电路如图 3.11-1 所示，并将高频小信号等效电路折合到 c、e 两端，变成图 3.11-2。图中 $g_\Sigma=k_F^2g_{ie}+p^2g_L'$，而 $g_L'=g_p+g_L$（g_p 为回路的谐振电导）。

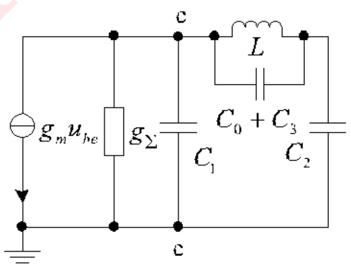


图3.11-2

（2）回路两端总电容 $C=C_0+C_3+\dfrac{C_1C_2}{C_1+C_2}$，振荡频率 $f=\dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

① $C_3=10\mathrm{pF}$ 时对应的 $f=20\mathrm{MHz}$，则：

$$20\mathrm{MHz}=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}}\qquad 式中\ C'=C_0+C_3+\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}=C_0+10+\frac{50\times100}{50+100}\qquad ①$$

② $C_3=260\mathrm{pF}$ 时对应的 $f=10\mathrm{MHz}$，则：

$$10\mathrm{MHz}=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC''}}\qquad 式中\ C''=C_0+C_3+\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}=C_0+260+\frac{50\times100}{50+100}\qquad ②$$

由①②式有：$C'/C''=1/4$，代入①②式中可解得：$C_0=40\text{pF}$

根据 $C_3=10\text{pF}$ 时对应的 $f=20\text{MHz}$ 有：

$$C'=40+10+\frac{50\times100}{50+100}\approx83.33(\text{pF})$$

$$\therefore L=\frac{1}{(2\pi f)^2C}=\frac{1}{(2\pi\times20\times10^6)^2\times83.33\times10^{-12}}\approx0.76\times10^{-7}(\text{H})=0.76\mu\text{H}$$

（3）利用课本上求 A_{uo} 的方法求解。假设回路的谐振电阻为 R_p。

$$Q_0=\frac{R_p}{\omega_0L}\qquad\therefore R_p=Q_0\omega_0L=100\times(10\sim20)\times10^6\times0.76\times10^{-6}\approx(4.775\sim9.550)\times10^3(\Omega)$$

b、e 两端总电导为

$$g_\Sigma=k_F^2g_{ie}+p^2g_L'=\frac{1}{4}\times\frac{1}{500}+\frac{9}{4}\times\left[\frac{1}{(4.775\sim9.55)\times10^3}+10^{-3}\right]\approx(2.9856\sim3.22115)\times10^{-3}(\text{S})$$

而 $A_{uo}=\dfrac{u_{ceo}}{u_{beo}}=\dfrac{g_mu_{beo}/g_\Sigma}{u_{beo}}=\dfrac{g_m}{g_\Sigma}$

若要求 $A_{uo}F=3$，其中 $F=\dfrac{C_1}{C_2}=\dfrac{1}{2}$，则要求 $A_{uo}=6$

$$\therefore g_m=6g_\Sigma=6\times(2.9856\sim3.22115)\times10^{-3}\approx(17.91\sim19.33)\times10^{-3}(\text{S})$$

3.13 某晶体的参数为 $L_q=19.5\text{H}$，$C_q=2.1\times10^{-4}\text{pF}$，$C_o=5\text{pF}$，$r_q=110\Omega$。试求：

（1）串联谐振频率 f_q；

（2）并联谐振频率 f_p；

（3）品质因数 Q_q 和等效并联谐振电阻 R_q。

解：（1）串联谐振频率为

$$f_q=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_qC_q}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{19.5\times2.1\times10^{-16}}}\approx2.4870996\times10^6(\text{Hz})$$

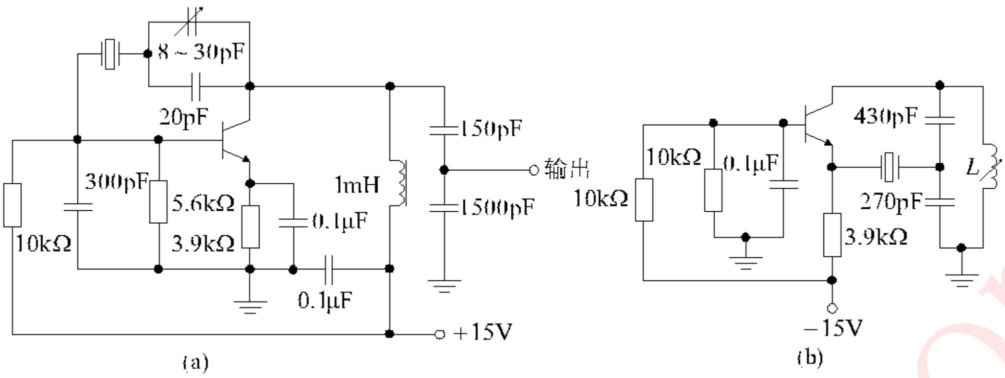
（2）并联谐振频率为

$$f_p=\frac{1}{2\pi\sqrt{L_q\dfrac{C_qC_0}{C_q+C_0}}}=\frac{1}{2\pi\sqrt{19.5\times\dfrac{2.1\times10^{-4}\times5}{2.1\times10^{-4}+5}}}\approx2.4871518\times10^6(\text{Hz})$$

（3）$Q_q=\dfrac{\omega_qL_q}{r_q}=\dfrac{2\pi\times2.4870996\times10^6\times19.5}{110}\approx2.77\times10^6$

$$R_p=\frac{L_q}{C_qr_q}=\frac{19.5}{2.1\times10^{-4}\times10^{-12}\times110}\approx0.84415584\times10^{15}(\Omega)=844.15584\times10^6\text{M}\Omega$$

3.14 试画出图题 3.14 所示各振荡器的交流等效电路，说明晶体在电路中的作用，并计算反馈系数 F。其中：图（a）为 10MHz 晶振；图（b）为 25MHz 晶振。



图题3.14

解：（1）交流等效电路如图 3.14 所示。图（a）中晶体相当于电感，图（b）中晶体相当于小电阻。

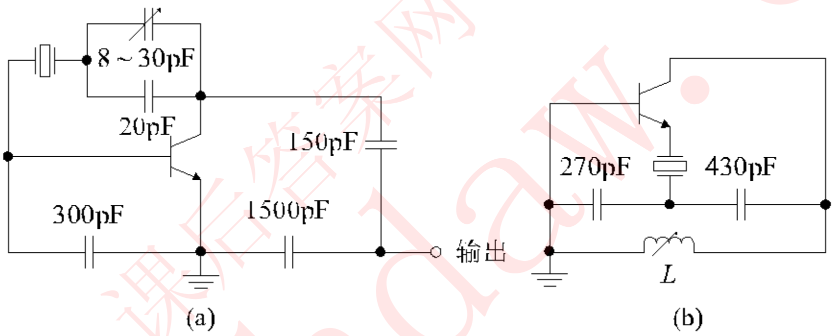
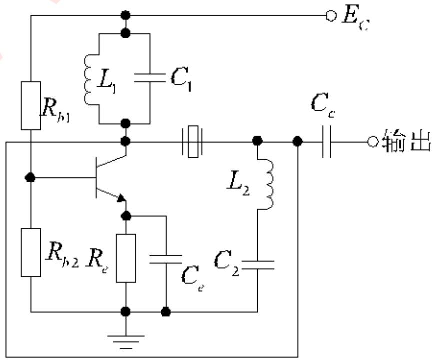


图3.14

（2）反馈系数：

图（a）：$F=\dfrac{C_1}{C_2}=\dfrac{150\times1500/(150+1500)}{300}\approx0.4545$　　图（b）：$F=\dfrac{C_1}{C_2}=\dfrac{430}{270}\approx1.59$

3.16 晶体振荡电路如图题 3.16 所示，已知 $\omega_1=1/\sqrt{L_1C_1}$，$\omega_2=1/\sqrt{L_2C_2}$，试分析电路能否产生自激振荡；若能振荡，试指出振荡角频率 ω 与 ω_1、ω_2 之间的关系。



图题3.16

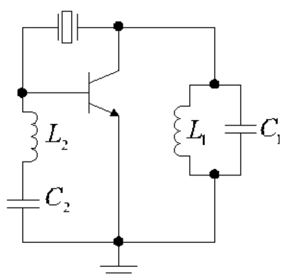
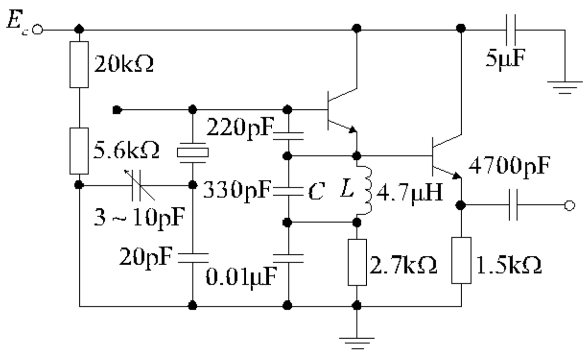


图3.16

解：其交流等效电路如图 3.16 所示。其中晶体相当于电感，而 L_1C_1 与 L_2C_2 呈容性。

此电路可产生自激振荡，且条件是：$\omega_1 < \omega_q < \omega < \omega_p < \omega_2$。

3.17 如图题 3.17 所示为输出振荡频率为 5MHz 的二次泛音晶体振荡器。试画出高频等效电路并说明 LC 回路的作用。



图题3.17

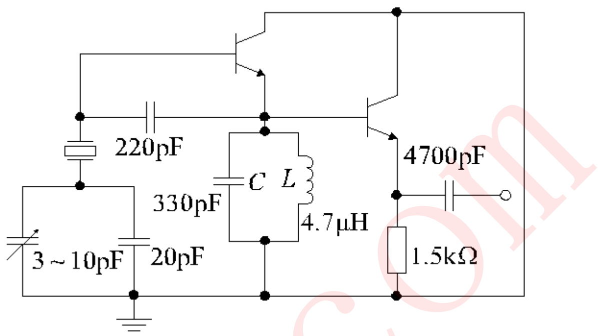
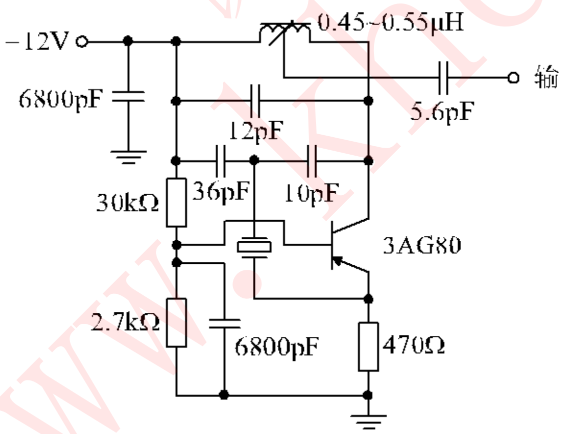


图3.17

解：高频等效电路如图 3.17 所示。

LC 回路在 $f = 5\text{MHz}$ 频率上呈容性。

3.18 图题 3.18 所示是实用的晶体振荡器电路，试画出其交流等效电路，并指出是哪一种振荡器，晶体在电路中的作用是什么？



图题3.18

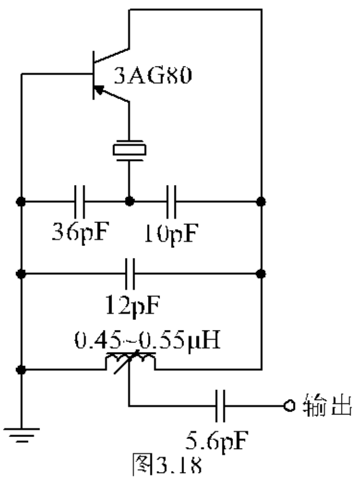


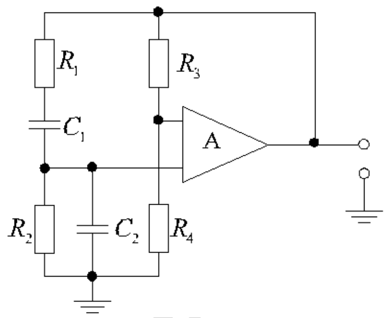
图3.18

解：（1）交流等效电路如图 3.18 所示。

（2）晶体相当于小电阻。它是电容三点式振荡电路。晶体在电路中的作用主要是稳频。

3.23 图题 3.23 所示为用集成运放组成的文氏电桥振荡器。

（1）说明电路中各元件的功能；（2）标出集成运放输入端的极性。



图题3.23

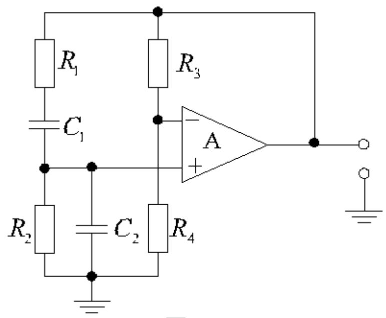


图3.23

解：R_1C_1、R_2C_2组成串/并联 RC 选频网络，运放、R_3、R_4组成同相放大器。其极性标示如图 3.23 所示。

第 4 章 频率变换电路基础

4.1 非线性器件的伏安特性为 $i = a_1 u + a_2 u^2$，其中的信号电压为

$$u = U_{cm}\cos\omega_c t + U_{\Omega m}\cos\Omega t + \frac{1}{2}U_{\Omega m}\cos 2\Omega t$$

式中，$\omega_c \gg \Omega$。求电流 i 中的组合频率分量。

解：$i = a_1 u + a_2 u^2$

$$= a_1\left(U_{cm}\cos\omega_c t + U_{\Omega m}\cos\Omega t + \frac{1}{2}U_{\Omega m}\cos 2\Omega t\right) + a_2\left(U_{cm}\cos\omega_c t + U_{\Omega m}\cos\Omega t + \frac{1}{2}U_{\Omega m}\cos 2\Omega t\right)^2$$

$$= a_1\left(U_{cm}\cos\omega_c t + U_{\Omega m}\cos\Omega t + \frac{1}{2}U_{\Omega m}\cos 2\Omega t\right) + a_2\left(U_{cm}^2\cos^2\omega_c t + U_{\Omega m}^2\cos^2\Omega t + \frac{1}{4}U_{\Omega m}^2\cos^2 2\Omega t\right)^2$$

$$+a_2\left(2U_{cm}U_{\Omega m}\cos\omega_c t\cos\Omega t + U_{cm}U_{\Omega m}\cos\omega_c t\cos 2\Omega t + U_{\Omega m}^2\cos\Omega t\cos 2\Omega t\right)$$

∴电流 i 中的频率分量为 ω_c、Ω、2Ω、$2\omega_c$、4Ω、$\omega_c \pm \Omega$、$\omega_c \pm 2\Omega$、3Ω。其中组合频率分量为：$\omega_c \pm \Omega$、$\omega_c \pm 2\Omega$。

4.2 非线性器件的伏安特性为

$$i = \begin{cases} g_d u & (u > 0) \\ 0 & (u < 0) \end{cases}$$

式中，$u = U_Q + U_{1m}\cos\omega_1 t + U_{2m}\cos\omega_2 t$。设 U_{2m} 很小，满足线性时变条件，且 $U_Q = \frac{1}{2}U_{1m}$，求时变电导 $g(t)$ 的表达式，并讨论电流 i 中的组合频率分量。

解：本题可用开关函数分析法来分析。

$$i = \begin{cases} g_d u & (u > 0) \\ 0 & (u < 0) \end{cases} = g_d s(t) u，\quad 其中\ s(t) = \begin{cases} 1 & (u > 0) \\ 0 & (u < 0) \end{cases}$$

∴时变电导 $g(t) = g_d s(t) = g_d\left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\cos\omega_1 t - \frac{2}{3\pi}\cos 3\omega_1 t + \cdots\right)$

∴ $i = g_d s(t) u = g_d\left(\frac{1}{2} + \frac{2}{\pi}\cos\omega_1 t - \frac{2}{3\pi}\cos 3\omega_1 t + \cdots\right)\left(U_Q + U_{1m}\cos\omega_1 t + U_{2m}\cos\omega_2 t\right)$

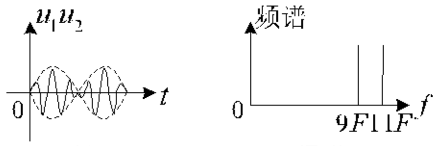
∴电流 i 中的组合频率分量为 $(2n-1)\omega_1 \pm \omega_2$（$n \in N$）。

4.3 两个信号的数学表达式分别为：$u_1 = \cos 2\pi Ft\,\mathrm{V}$，$u_2 = \cos 20\pi Ft\,\mathrm{V}$。写出两者相乘后的数学表达式，并画出其波形图和频谱图。

解：$u_1 u_2 = \cos 2\pi Ft \times \cos 20\pi Ft = \frac{1}{2}(\cos 22\pi Ft + \cos 18\pi Ft)$　　（DSB 信号）

频谱表达式为 $\frac{\pi}{2}\left[\delta(f + 11F) + \delta(f - 11F) + \delta(f + 9F) + \delta(f - 9F)\right]$

其波形与频谱图分别为



(a)波形 (b)频谱

图4.3

4.4 一非线性器件的伏安特性为 $i = a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3$，式中

$$u = U_Q + U_{1m}\cos\omega_1 t + U_{2m}\cos\omega_2 t + U_{3m}\cos\omega_3 t$$

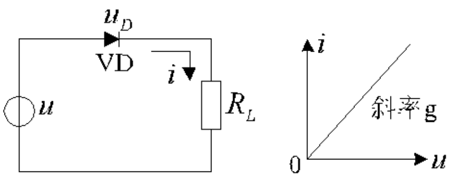
试写出电流 i 中组合频率分量的频率通式，说明它们试由 i 中的哪些乘积项产生的，并求出其中 ω_1、$2\omega_1+\omega_2$、$\omega_1+\omega_2-\omega_3$ 的频率分量的振幅。

解：∵ $i = a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3$ 且 $u = U_Q + U_{1m}\cos\omega_1 t + U_{2m}\cos\omega_2 t + U_{3m}\cos\omega_3 t$

∴电流 i 所含的频率分量有：直流、基波分量（ω_1、ω_2、ω_3）、二次谐波分量（$2\omega_1$、$2\omega_2$、$2\omega_3$）、组合频率分量（$\omega_1\pm\omega_2$、$\omega_1\pm\omega_3$、$\omega_2\pm\omega_3$）、三次谐波分量（$3\omega_1$、$3\omega_2$、$3\omega_3$）、组合频率分量（$2\omega_1\pm\omega_2$、$2\omega_1\pm\omega_3$、$2\omega_2\pm\omega_3$、$2\omega_2\pm\omega_1$、$2\omega_3\pm\omega_1$、$2\omega_3\pm\omega_2$、$\omega_1+\omega_2\pm\omega_3$、$\omega_1-\omega_2\pm\omega_3$）。

频率分量	振幅
ω_1	$(a_1 + 2a_2U_Q + 3a_3U_Q^2)U_{1m}$
$2\omega_1+\omega_2$	$\frac{3}{4}a_3U_{1m}^2U_{2m}$
$\omega_1+\omega_2-\omega_3$	$\frac{3}{2}a_3U_{1m}U_{2m}U_{3m}$

4.5 若二极管 VD 的伏安特性曲线可用图题 4.5（b）中的折线来近似，输入电压为 $u = U_m\cos\omega_o t$。试求图题 4.5（a）中电流 i 各频谱分量的大小（设 g、R_L、U_m 均已知）。



(a) (b)

图题4.5

解：此电路可以实现半波整流功能。

根据图（a）可得到：

$u>0$ 时，VD 导通，且 $i = \dfrac{u-u_D}{R_L} = \dfrac{u-\frac{1}{g}i}{R_L}$，∴ $i = \dfrac{u}{R_L+\frac{1}{g}} = \dfrac{gu}{1+gR_L}$；

$u<0$ 时，VD 截止，$i=0$。

引入单向开关函数 $s(t)$，且 $s(t)=\begin{cases}1 & (u>0)\\ 0 & (u<0)\end{cases}$，有

$$i=\frac{gu}{1+gR_L}s(t)$$

$$=\frac{gU_m}{1+gR_L}\cos\omega_o t\left(\frac{1}{2}+\frac{2}{\pi}\cos\omega_o t-\frac{2}{3\pi}\cos 3\omega_o t+\cdots\right)$$

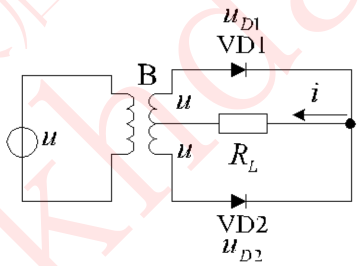
$$=I_m\left(\frac{1}{2}\cos\omega_o t+\frac{2}{\pi}\cos^2\omega_o t-\frac{2}{3\pi}\cos 3\omega_o t\cos\omega_o t+\cdots\right)\qquad \left(I_m=\frac{gU_m}{1+gR_L}\right)$$

$$=I_m\left(\frac{1}{\pi}+\frac{1}{2}\cos\omega_o t+\frac{1}{\pi}\cos 2\omega_o t-\frac{1}{3\pi}\cos 4\omega_o t-\frac{1}{3\pi}\cos 2\omega_o t+\cdots\right)$$

$$=I_m\left(\frac{1}{\pi}+\frac{1}{2}\cos\omega_o t+\frac{2}{3\pi}\cos 2\omega_o t-\frac{2}{15\pi}\cos 4\omega_o t+\cdots\right)$$

故电流 i 中各频谱分量及其大小分别为：直流分量（$\frac{1}{\pi}I_m$）、基波分量（$\frac{1}{2}I_m$）、偶次谐波分量（$\frac{2}{(n^2-1)\pi}I_m$，n 为偶数）。

4.6 同 4.5 题，试计算图题 4.6 电路中电流 i 各频谱分量的大小。设变压器 B 的变压比为 $1:2$，VD1 与 VD2 特性相同（如图题 4.5（b）所示）。



图题4.6

解：此电路可以实现全波整流功能。

根据图题 4.6 可得到：

$u>0$ 时，VD1 导通、VD2 截止，且 $i_1=\dfrac{u-u_{D1}}{R_L}=\dfrac{u-\frac{1}{g}i_1}{R_L}=\dfrac{gu-i_1}{gR_L}$，$\therefore i_1=\dfrac{gu}{1+gR_L}$；

$u<0$ 时，VD1 截止、VD2 导通，且 $i_2=-\dfrac{u+u_{D2}}{R_L}=-\dfrac{u+\frac{1}{g}i_2}{R_L}=-\dfrac{gu+i_2}{gR_L}$，$\therefore i_2=-\dfrac{gu}{1+gR_L}$。

引入双向开关函数 $s(t)$，且 $s(t)=\begin{cases}1 & (u>0)\\ -1 & (u<0)\end{cases}$，有

$$i=\frac{gu}{1+gR_L}s(t)$$

$$
\begin{aligned}
&= \frac{gU_m}{1+gR_L}\cos\omega_o t\left(\frac{4}{\pi}\cos\omega_o t - \frac{4}{3\pi}\cos 3\omega_o t + \cdots\right) \\
&= I_m\left(\frac{4}{\pi}\cos^2\omega_o t - \frac{4}{3\pi}\cos 3\omega_o t\cos\omega_o t + \cdots\right) \qquad \left(I_m = \frac{gU_m}{1+gR_L}\right) \\
&= I_m\left(\frac{2}{\pi} + \frac{2}{\pi}\cos 2\omega_o t - \frac{2}{3\pi}\cos 4\omega_o t - \frac{2}{3\pi}\cos 2\omega_o t + \cdots\right) \\
&= I_m\left(\frac{2}{\pi} + \frac{4}{3\pi}\cos 2\omega_o t - \frac{4}{15\pi}\cos 4\omega_o t + \cdots\right)
\end{aligned}
$$

故电流i中各频谱分量及其大小分别为：直流分量（$\frac{2}{\pi}I_m$）、偶次谐波分量（$\frac{4}{(n^2-1)\pi}I_m$，n为偶数）。

第 5 章 振幅调制、解调及混频

5.1 有一调幅波的表达式为

$$u = 25(1 + 0.7\cos 2\pi 5000t - 0.3\cos 2\pi 10000t)\cos 2\pi 10^6 t$$

（1）试求它所包含的各分量的频率与振幅；

（2）绘出该调幅波包络的形状，并求出峰值与谷值幅度。

解：（1）此调幅波所含的频率分量与振幅为

频率（Hz）	10^6	$10^6 \pm 5000$	$10^6 \pm 10000$
振幅（V）	25	8.75	3.75

（2）此调幅波的包络为：

$$U_m(t) = 25(1 + 0.7\cos 2\pi 5000t - 0.3\cos 2\pi 10000t) \overset{令}{=} 25(1 + 0.7\cos\theta - 0.3\cos 2\theta)$$

利用高等数学求极值的方法求解出包络的峰值与谷值：

当 θ=180° 时，包络的谷值为 0；当 θ=54.3° 时，包络的峰值约为 1.504。

5.2 有一调幅波，载波功率为 100W。试求当 $m_a = 1$ 与 $m_a = 0.3$ 时每一边频的功率。

解：设调幅波载波功率为 P_c，则边频功率为 $P_c P_u = \frac{1}{4} m_a^2 P_c = P_l$。

（1）$m_a = 1$ 时，$P_u = P_l = \frac{1}{4} P_c = \frac{1}{4} \times 100 = 25(\mathrm{W})$

（2）$m_a = 0.3$ 时，$P_u = P_l = \frac{1}{4} \times 0.3^2 \times P_c = \frac{1}{4} \times 0.09 \times 100 = 2.25(\mathrm{W})$

5.3 一个调幅发射机的载波输出功率为 5kW，$m_a = 70\%$，被调级的平均效率为 50%。试求：

（1）边频功率；

（2）电路为集电极调幅时，直流电源供给被调级的功率；

（3）电路为基极调幅时，直流电源供给被调级的功率。

解：设调幅波载波功率为 P_c，则边频功率为 $P_u = \frac{1}{4} m_a^2 P_c = P_l$。

（1）$\because P_u = P_l = \frac{1}{4} m_a^2 P_c$

$\therefore P_{边频} = \frac{1}{2} m_a^2 P_c = \frac{1}{2} \times 0.7^2 \times 5 = 1.225(\mathrm{kW})$

（2）集电极调幅时：$\eta = \frac{P_o}{P_D} = \frac{P_c}{P_D} = 50\%$

$\therefore P_D = \frac{P_c}{\eta} = \frac{5}{0.5} = 10(\mathrm{kW})$

（3）基极调幅时：$\eta = \frac{P_o}{P_D} = 50\%$，而 $P_o = P_c + P_u + P_l = 5 + 1.225 = 6.225(\mathrm{kW})$

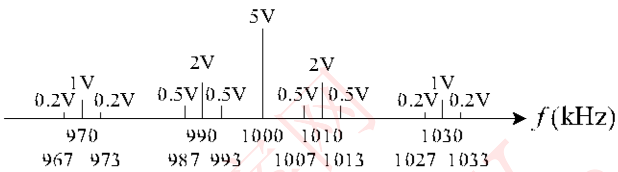
$\therefore P_D = \frac{P_o}{\eta} = \frac{6.225}{0.5} = 12.45(\mathrm{kW})$

5.4 载波功率为 1000W，试求 $m_a=1$ 与 $m_a=0.7$ 时的总功率和两边频的功率各为多少？

解：设载波功率为 P_c，则 $P_c=1000\text{W}$，边频功率为 $P_u=\frac{1}{4}m_a^2P_c=P_l$，总功率为 $P=P_c+2P_u=(1+\frac{1}{2}m_a^2)P_c$，因此

m_a	P_u	P_l	P
1	250W	250W	1500W
0.7	122.5W	122.5W	1245W

5.6 图题 5.6 示出一振幅调制波的频谱。试写出这个已调波的表达式，并画出其实现调幅的方框图。

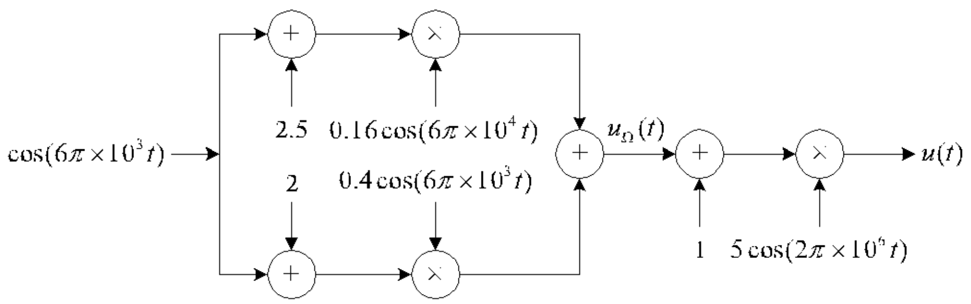


图题5.6

解：（1）根据频谱得到该已调波的表示式为：

$$u(t)=5\cos(2\pi\times10^6t)+2\cos(2\pi\times990\times10^3t)+2\cos(2\pi\times1010\times10^3t)+\cos(2\pi\times970\times10^3t)+\cos(2\pi\times1030\times10^3t)$$
$$+0.5\cos(2\pi\times987\times10^3t)+0.5\cos(2\pi\times993\times10^3t)+0.5\cos(2\pi\times1007\times10^3t)+0.5\cos(2\pi\times1013\times10^3t)$$
$$+0.2\cos(2\pi\times967\times10^3t)+0.2\cos(2\pi\times973\times10^3t)+0.2\cos(2\pi\times1027\times10^3t)+0.2\cos(2\pi\times1033\times10^3t)$$
$$=5\cos(2\pi\times10^6t)+2\cos(2\pi\times990\times10^3t)+2\cos(2\pi\times1010\times10^3t)$$
$$+\cos(2\pi\times970\times10^3t)+\cos(2\pi\times1030\times10^3t)$$
$$+\cos(2\pi\times990\times10^3t)\cos(2\pi\times3\times10^3t)+\cos(2\pi\times1010\times10^3t)\cos(2\pi\times3\times10^3t)$$
$$+0.4\cos(2\pi\times970\times10^3t)\cos(2\pi\times3\times10^3t)+0.4\cos(2\pi\times1030\times10^3t)\cos(2\pi\times3\times10^3t)$$
$$=5\cos(2\pi\times10^6t)$$
$$+2[1+0.5\cos(2\pi\times3\times10^3t)]\cos(2\pi\times990\times10^3t)+2[1+0.5\cos(2\pi\times3\times10^3t)]\cos(2\pi\times1010\times10^3t)$$
$$+[1+0.4\cos(2\pi\times3\times10^3t]\cos(2\pi\times970\times10^3t)+[1+0.4\cos(2\pi\times3\times10^3t]\cos(2\pi\times1030\times10^3t)$$
$$=5\cos(2\pi\times10^6t)$$
$$+2[1+0.5\cos(2\pi\times3\times10^3t)]\times[\cos(2\pi\times990\times10^3t)+\cos(2\pi\times1010\times10^3t)]$$
$$+[1+0.4\cos(2\pi\times3\times10^3t]\times[\cos(2\pi\times970\times10^3t)+\cos(2\pi\times1030\times10^3t)]$$
$$=5\cos(2\pi\times10^6t)$$
$$+4[1+0.5\cos(2\pi\times3\times10^3t)]\times\cos(2\pi\times10^6t)\cos(2\pi\times10\times10^3t)$$
$$+2[1+0.4\cos(2\pi\times3\times10^3t)]\times\cos(2\pi\times10^6t)\cos(2\pi\times30\times10^3t)$$
$$=5\cos(2\pi\times10^6t)\{1+0.4[1+0.4\cos(2\pi\times3\times10^3t)]\times\cos(2\pi\times30\times10^3t)+0.8[1+0.5\cos(2\pi\times3\times10^3t)]\times\cos(2\pi\times10\times10^3t)\}$$
$$=5\cos(2\pi\times10^6t)\{1+0.4[1+0.4\cos(6\pi\times10^3t)]\times\cos(6\pi\times10^4t)+0.8[1+0.5\cos(6\pi\times10^3t)]\times\cos(2\pi\times10^4t)\}$$
$$=5\cos(2\pi\times10^6t)\{1+0.16[2.5+\cos(6\pi\times10^3t)]\times\cos(6\pi\times10^4t)+0.4[2+\cos(6\pi\times10^3t)]\times\cos(2\pi\times10^4t)\}$$

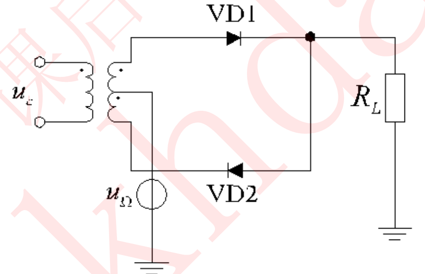
（2）由（1）知：此信号是一个 AM 信号，其调制信号又是由两个 AM 信号构成。相应的实现框图为：



5.7 图题 5.7 所示二极管平衡调幅电路中，单频调制信号 $u_\Omega = U_{\Omega m}\cos\Omega t$，载波信号 $u_c = U_{cm}\cos\omega_c t$，且 $U_{cm} \gg U_{\Omega m}$，即满足线性时变条件，两个二极管 VD1、VD2 的特性相同，均为

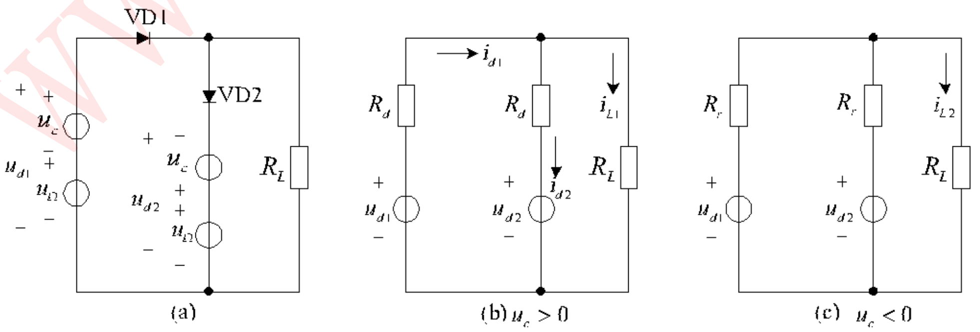
$$i_d = \begin{cases} g_d u_d = \dfrac{u_d}{R_d} & (u_d > 0) \\ g_r u_d = \dfrac{u_d}{R_r} & (u_d < 0) \end{cases}$$

式中，R_d 和 R_r 分别为二极管的正、反向电阻，且 $R_r \gg R_d$。试求输出双边带调幅波电流的表达式。



图题5.7

解：设输入变压器匝数比为 1：1。当 $u_c > 0$ 时，VD1、VD2 导通；$u_c < 0$ 时，VD1、VD2 均截止，故其等效电路如图（a）所示，$u_c > 0$ 时的等效电路如图（b）所示，其中 $u_{d1} = u_c + u_\Omega$，$u_{d2} = -u_c + u_\Omega$。



（1）$u_c > 0$ 时，流过 R_L 的电流设为 i_{L1}，则有：　　　　（利用叠加定理求解）

电压源u_{d1}单独作用时，$i_{d1}=\dfrac{u_{d1}}{R_d+R_d\parallel R_L}$，且$i_{L1}'=i_{d1}\times\dfrac{R_d}{R_d+R_L}$

电压源u_{d2}单独作用时，$i_{d2}=-\dfrac{u_{d2}}{R_d+R_d\parallel R_L}$，且$i_{L1}''=-i_{d2}\times\dfrac{R_d}{R_d+R_L}$

$\therefore i_{L1}=i_{L1}'+i_{L1}''=\dfrac{u_{d1}}{R_d+R_d\parallel R_L}\times\dfrac{R_d}{R_d+R_L}+\dfrac{u_{d2}}{R_d+R_d\parallel R_L}\times\dfrac{R_d}{R_d+R_L}=\dfrac{u_{d1}+u_{d2}}{R_d+2R_L}=\dfrac{2u_\Omega}{R_d+2R_L}$

（2）$u_c<0$时，流过R_L的电流设为i_{L2}，同理可求得：

$$i_{L2}=\frac{2u_\Omega}{R_r+2R_L}$$

综合（1）（2）有：一个周期内，i_L为：

$$i_L=\begin{cases}\dfrac{2u_\Omega}{R_d+2R_L} & (u_c>0)\\[2ex] \dfrac{2u_\Omega}{R_r+2R_L} & (u_c<0)\end{cases}$$

引入开关函数：

$$s_1(t)=\begin{cases}1 & (u_c>0)\\ 0 & (u_c<0)\end{cases}\qquad s_2(t)=\begin{cases}0 & (u_c>0)\\ 1 & (u_c<0)\end{cases}=1-s_1(t)$$

则有：

$$\begin{aligned}i_L&=\frac{2u_\Omega}{R_d+2R_L}s_1(t)+\frac{2u_\Omega}{R_r+2R_L}s_2(t)\\&=\frac{2u_\Omega}{R_d+2R_L}s_1(t)+\frac{2u_\Omega}{R_r+2R_L}[1-s_1(t)]\\&=\frac{2u_\Omega}{R_r+2R_L}+2u_\Omega s_1(t)\left[\frac{1}{R_d+2R_L}-\frac{1}{R_r+2R_L}\right]\\&=\frac{2u_\Omega}{R_r+2R_L}+\frac{2(R_r-R_d)}{(R_d+2R_L)(R_r+2R_L)}u_\Omega s_1(t)\end{aligned}$$

将$s_1(t)$进行傅立叶级数展开有：

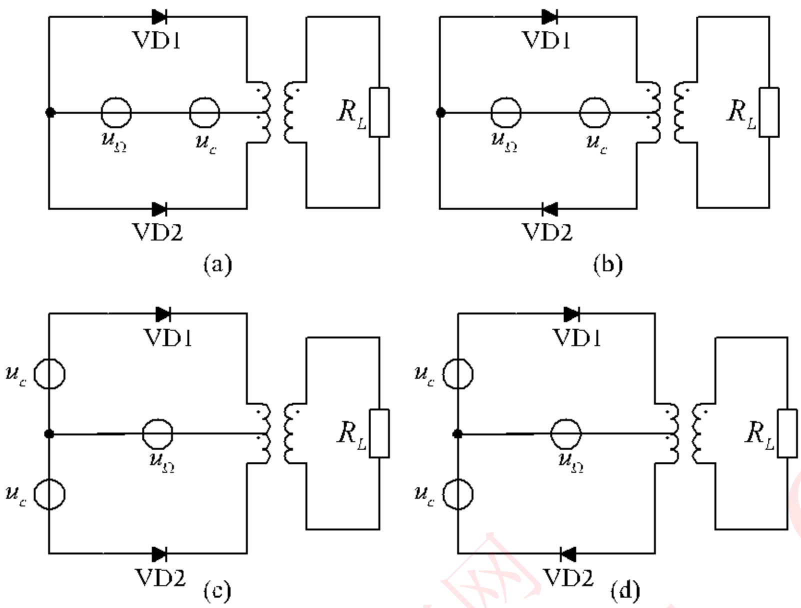
$$s_1(t)=\frac{1}{2}+\frac{2}{\pi}\cos\omega_c t-\frac{2}{3\pi}\cos 3\omega_c t+\cdots$$

$$\therefore i_L=\frac{2u_\Omega}{R_r+2R_L}+\frac{2(R_r-R_d)}{(R_d+2R_L)(R_r+2R_L)}U_{\Omega m}\cos\Omega t\left(\frac{1}{2}+\frac{2}{\pi}\cos\omega_c t-\frac{2}{3\pi}\cos 3\omega_c t+\cdots\right)$$

∴输出的双边带调幅波电流表达式为

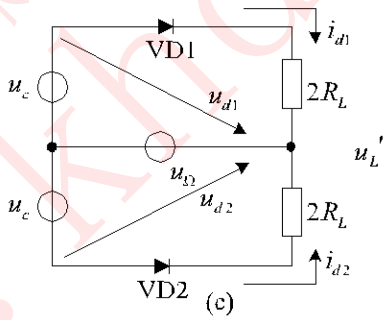
$$i_L'=\frac{4U_{\Omega m}}{\pi}\times\frac{(R_r-R_d)}{(R_d+2R_L)(R_r+2R_L)}\cos\Omega t\cos\omega_c t$$

5.8 判断图题 5.8 中，哪些电路能实现双边带调幅作用？并分析其输出电流的频谱。已知：调制信号$u_\Omega=U_{\Omega m}\cos\Omega t$，载波信号$u_c=U_{cm}\cos\omega_c t$，且$U_{cm}\gg U_{\Omega m}$，$\omega_c\gg\Omega$。二极管 VD1、 VD2 的伏安特性均为从原点出发斜率为 g_d 的直线。



图题5.8

解：设变压器的匝数比为 2：1，则负载 R_L 等效至初级的电阻为 $4R_L$，且 VD1、VD2 的伏安特性为 $i_d = g_d u_d$。以（c）图为例介绍分析过程，做如图的假设，图中 $u_{d1} = u_c + u_\Omega$，$u_{d2} = -u_c + u_\Omega$。



当 $u_c > 0$ 时，VD1 导通，VD2 截止；$u_c < 0$ 时，VD1 截止，VD2 均导通。则利用开关函数分析法有：

$$i_{d1} = \frac{u_{d1}}{r_d + 2R_L} s_1(t) \qquad i_{d2} = \frac{u_{d2}}{r_d + 2R_L} s_2(t) \qquad \text{式中，} s_1(t) = \begin{cases} 1 & (u_c > 0) \\ 0 & (u_c < 0) \end{cases}, \quad s_2(t) = \begin{cases} 0 & (u_c > 0) \\ 1 & (u_c < 0) \end{cases}$$

$$\therefore u_L' = 2R_L(i_{d1} - i_{d2}) = 2R_L\left[\frac{u_{d1}}{r_d + 2R_L} s_1(t) - \frac{u_{d2}}{r_d + 2R_L} s_2(t)\right] = 2R_L\left[\frac{u_c + u_\Omega}{r_d + 2R_L} s_1(t) - \frac{-u_c + u_\Omega}{r_d + 2R_L} s_2(t)\right]$$

$$= 2R_L\left\{\frac{u_c}{r_d + 2R_L} + \frac{u_\Omega}{r_d + 2R_L}\left[s_1(t) - s_2(t)\right]\right\} = 2R_L\left\{\frac{u_c}{r_d + 2R_L} + \frac{u_\Omega}{r_d + 2R_L} s(t)\right\}$$

式中， $s(t)=\begin{cases}1 & (u_c>0)\\-1 & (u_c<0)\end{cases}$

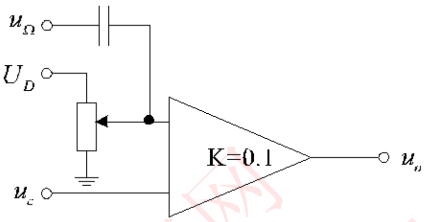
因此，（c）图可产生 AM 信号。

结论：（a）图没有输出，（b）图可产生 DSB 信号，（d）图可实现倍频的作用。

5.12 用图题 5.12 所示的其输入、输出动态范围为 ±10V 的模拟相乘电路实现普通调幅。若载波电压振幅为 5V，欲得 100% 的调幅度。求：

（1）容许的最大调制信号的幅度为多少？

（2）若相乘系数 $K=1$，其他条件不变，容许的最大调制信号的幅度为多少？



图题5.12

解：设调制系数为 k_a，则由图知：$u_o=K[U_D+u_\Omega(t)]\times u_c(t)$

根据调幅指数 m_a 定义 $m_a=\dfrac{U_{\Omega m}}{U_D}=1$ 有：$U_{\Omega m}=U_D$

$\therefore U_{om}=K[U_D+U_{\Omega m}]\times U_{cm}=2KU_{\Omega m}\times U_{cm}$ 即 $U_{\Omega m}=\dfrac{U_{om}}{2KU_{cm}}$

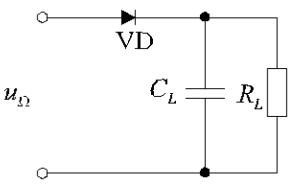
（1）K=0.1 时，$|U_{om}|\le 10\text{V}$，$U_{cm}=5\text{V}$

$\therefore |U_{\Omega m}|\le\dfrac{10}{2\times0.1\times5}=10\text{V}$

（2）K=1 时，$|U_{om}|\le 10\text{V}$，$U_{cm}=5\text{V}$

$\therefore |U_{\Omega m}|\le\dfrac{10}{2\times1\times5}=1\text{V}$

5.13 大信号二极管检波电路如图题 5.13 所示，若给定 $R_L=5\text{k}\Omega$，输入调制系数 $m=0.3$ 的调制信号。试求：



图题5.13

（1）载波频率 $f_c=465\text{kHz}$，调制信号最高频率 $F=3400\text{Hz}$，电容 C_L 应如何选？检波器输入阻抗约为多少？

（2）若 $f_c=30\text{MHz}$，$F=0.3\text{MHz}$，C_L 应选为多少？其输入阻抗大约是多少？

（3）若C_L被开路，其输入阻抗是多少？已知二极管导通电阻$R_D = 80\Omega$。

解：此题应考虑满足如下条件：

①检波器输出的高频纹波小，则$C_L \gg \dfrac{1}{\omega_c R_L}$

②为了避免产生惰性失真，则$R_L C_L \le \dfrac{\sqrt{1-m^2}}{\Omega_{\max} m}$

③为了减小输出的低频交流信号的频率失真，则$C_L \ll \dfrac{1}{\Omega_{\max} R_L}$

（1）$f_c = 465\text{kHz}$，$F = 3400\text{Hz}$

条件①：$C_L \gg \dfrac{1}{2\pi \times 465 \times 10^3 \times 5 \times 10^3} \approx 6.845 \times 10^{-11}(\text{F})$

条件②：$C_L \le \dfrac{\sqrt{1-m^2}}{\Omega_{\max} m R_L} = \dfrac{\sqrt{1-0.3^2}}{2\pi \times 3400 \times 0.3 \times 5 \times 10^3} \approx 2.977 \times 10^{-8}(\text{F})$

条件③：$C_L \ll \dfrac{1}{\Omega_{\max} R_L} = \dfrac{1}{2\pi \times 3400 \times 5 \times 10^3} \approx 9.362 \times 10^{-9}(\text{F})$

综合上述结果有：$68\text{pF} < C_L < 9362\text{pF}$

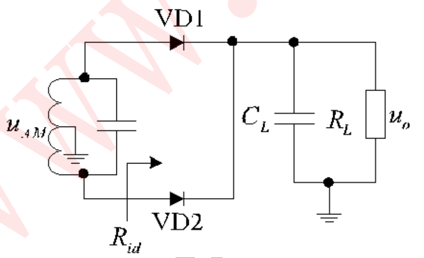
输入电阻$R_{id} \approx \dfrac{R_L}{2} = 2.5\text{k}\Omega$

（2）$f_c = 30\text{MHz}$，$F = 0.3\text{MHz}$　同理可求得：$1.06\text{pF} < C_L < 106\text{pF}$

输入电阻$R_{id} \approx \dfrac{R_L}{2} = 2.5\text{k}\Omega$

5.14 在图题 5.14 所示的检波电路中，两只二极管的静态伏安特性均为从原点出发、斜率为$g_d = 1/R_D$的折线，负载$Z_L(\omega_c) = 0$。试求：

（1）导通角θ_c；（2）电压传输系数K_d；（3）输入电阻R_{id}。



图题5.14

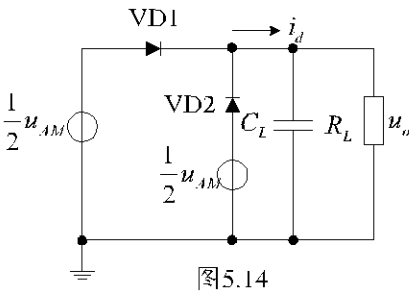


图5.14

解：原电路图可等效为图 5.14。当$u_{AM} > 0$时，VD1 导通，VD2 截止，C 充电；峰值过后，VD1 截止，C 放电；当$u_{AM} < 0$时，VD1 截止，VD2 导通，C 充电；峰值过后，VD2 截止，C 放电，因此在u_{AM}的一个周期内，C 充放电各两次。根据上述分析，相当于R_L变为$2R_L$。

（1）θ

$$\theta \approx \sqrt[3]{\frac{3\pi R_D}{2R_L}} = \sqrt[3]{\frac{3\pi}{2g_d R_L}}$$

（2）K_d　　（利用的定义求解）

二极管两端电压 $u_d = \frac{1}{2}u_{AM} - u_o$

$$\therefore i_d = g_d u_d = \frac{1}{2}g_d(u_{AM} - 2u_o) = \frac{1}{2}g_d[U_{im}(1+m_a\cos\Omega t)\cos\omega_c t - 2u_o]$$

令 $i_d = 0$，则 $u_o = \frac{1}{2}U_{im}(1+m_a\cos\Omega t)\cos\theta$

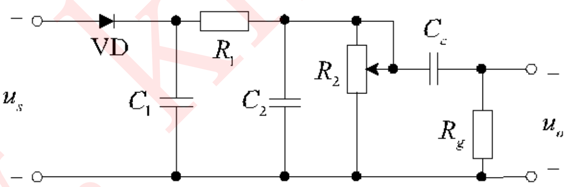
$$\therefore K_d = \frac{U_{om}}{m_a U_{im}} = \frac{\frac{1}{2}U_{im}m_a\cos\theta}{m_a U_{im}} = \frac{1}{2}\cos\theta$$

（3）等效输入电阻 R_{id}　　（利用的定义求解）

由功率守恒有 $\frac{U_{im}^2}{2R_{id}} = \frac{K_d^2 U_{im}^2}{R_L}$

$$\therefore R_{id} = \frac{1}{2K_d^2}R_L = \frac{2R_L}{\cos^2\theta} \approx 2R_L$$

5.15 在图题 5.15 所示的检波电路中，$R_1 = 510\Omega$，$R_2 = 4.7\text{k}\Omega$，$C_C = 10\mu\text{F}$，$R_g = 1\text{k}\Omega$。输入信号 $u_s = 0.51(1+0.3\cos 10^3 t)\cos 10^7 t(\text{V})$。可变电阻的接触点在中心位置和最高位置时，试问会不会产生负峰切割失真？



图题5.15

解：该检波器的交流负载为 $R_\Omega = R_1 + \frac{R_2' R_g}{R_2' + R_g}$，直流负载为 $R = R_1 + R_2'$

不会产生负峰切割失真的条件为：$m_a \le \frac{R_\Omega}{R}$

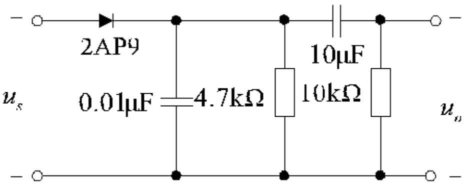
（1）R_2 触点在中心位置时，$R_2' = \frac{R_2}{2} = 2.35\text{k}\Omega$

$$\frac{R_\Omega}{R} = \frac{510 + \frac{2.35\times 1}{2.35+1}\times 10^3}{510 + 2.35\times 10^3} \approx 0.424 > m_a = 0.3$$　∴不会产生负峰切割失真。

（2）R_2 触点在最高位置时，$R_2' = R_2 = 4.7\text{k}\Omega$

$$\frac{R_\Omega}{R}=\frac{510+\frac{4.7\times1}{4.7+1}\times10^3}{510+2.35\times10^3}\approx0.256<m_a=0.3$$ ∴会产生负峰切割失真。

5.16 检波电路如图题 5.16 所示，其中 $u_s=0.8(1+0.5\cos\Omega t)\cos\omega_s t(\mathrm{V})$，$F=5\mathrm{kHz}$，$f_s=465\mathrm{kHz}$，$r_D=125\Omega$。试求输入电阻 R_{id} 及传输系数 K_d，并检验有无惰性失真及底部切割失真。



图题5.16

解：（1）输入电阻 $R_{id}\approx\frac{R}{2}=\frac{1}{2}\times4.7=2.35(\mathrm{k}\Omega)$

（2）传输系数 K_d

电流导通角 $\theta\approx\sqrt[3]{\frac{3\pi r_D}{R_L}}=\sqrt[3]{\frac{3\pi\times125}{4.7\times10^3}}\approx0.6305(\mathrm{rad})\approx36^\circ$

∴ $K_d=\cos\theta=\cos36^\circ\approx0.809$

（3）无惰性失真的条件为 $RC\le\frac{\sqrt{1-m_a^2}}{\Omega m_a}$

$RC=4.7\times10^3\times0.01\times10^{-6}=4.7\times10^{-5}$

$$\frac{\sqrt{1-m_a^2}}{\Omega m_a}=\frac{\sqrt{1-m_a^2}}{2\pi Fm_a}=\frac{\sqrt{1-0.5^2}}{2\pi\times5\times10^3\times0.5}\approx5.513\times10^{-5}$$

∴ $RC\le\frac{\sqrt{1-m_a^2}}{\Omega m_a}$ 条件成立，因此无惰性失真。

（4）无底部切割失真的条件为 $m_a\le\frac{R_\Omega}{R}$

$R_\Omega=R\,//\,R_L=4.7\,//\,10\approx3.197(\mathrm{k}\Omega)$　　$R=4.7\mathrm{k}\Omega$

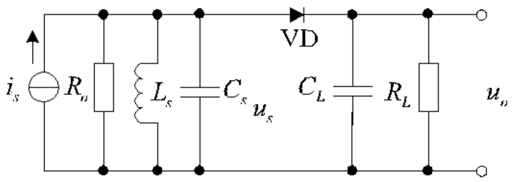
∴ $\frac{R_\Omega}{R}=\frac{3.197}{4.7}\approx0.68>m_a=0.5$ 条件成立，因此无底部切割失真。

5.17 在图题 5.17 所示的检波电路中，输入信号回路为并联谐振电路，其谐振频率 $f_o=10^6\mathrm{Hz}$，回路本身谐振电阻 $R_o=20\mathrm{k}\Omega$，检波负载 $R_L=10\mathrm{k}\Omega$，$C_L=0.01\mu\mathrm{F}$，$r_D=100\Omega$。

（1）若 $i_s=0.5\cos2\pi\times10^6t(\mathrm{mA})$，求检波器的输入电压 u_s 及检波器输出电压 $u_o(t)$ 的表

达式；

（2）若 $i_s = 0.5(1+0.5\cos 2\pi\times10^3 t)\cos 2\pi\times10^6 t(\text{mA})$，求输出电压 $u_o(t)$ 的表达式。



图题5.17

解：包络检波器的等效输入电阻 $R_{id} \approx \dfrac{R}{2} = 5\text{k}\Omega$。

由于输入信号回路的谐振频率刚好是 i_s 的载频，故：$u_s = i_s \times (R_o \parallel R_{id})$

检波器的检波系数 $K_d = \cos\theta$，而 $\theta \approx \sqrt[3]{\dfrac{3\pi r_D}{R_L}} = \sqrt[3]{\dfrac{3\pi\times100}{10\times10^3}} \approx 0.455(\text{rad}) \approx 26.07^\circ$

$\therefore K_d = \cos\theta = \cos 26.07^\circ \approx 0.898$

$\therefore$ 检波器的输出电压 $u_o(t) = K_d \times (u_s$ 的包络$)$

（1）$i_s = 0.5\cos 2\pi\times10^6 t(\text{mA})$

$u_s = i_s \times (R_o \parallel R_{id}) = 0.5\times10^{-3}\times\cos 2\pi\times10^6 t \times (20k \parallel 5k) = 2\cos 2\pi\times10^6 t(\text{V})$

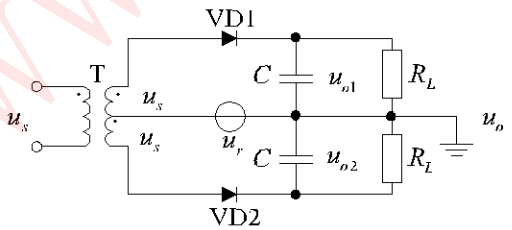
$\therefore u_o(t) = K_d \times U_{sm} = 0.898\times2 \approx 1.8(\text{V})$

（2）$i_s = 0.5(1+0.5\cos 2\pi\times10^3 t)\cos 2\pi\times10^6 t(\text{mA})$

$u_s = i_s \times (R_o \parallel R_{id}) = 0.5\times10^{-3}\times(1+0.5\cos 2\pi\times10^3 t)\cos 2\pi\times10^6 t\times(20k \parallel 5k)$
$= 2(1+0.5\cos 2\pi\times10^3 t)\times\cos 2\pi\times10^6 t(\text{V})$

$\therefore u_o(t) = K_d \times U_{sm}(t) = 0.898\times2(1+0.5\cos 2\pi\times10^3 t) \approx 1.8(1+0.5\cos 2\pi\times10^3 t)(\text{V})$

5.18 图题 5.18 所示为双平衡同步检波器电路，输入信号 $u_s = U_s\cos(\omega_c+\Omega)t$，$u_r = U_r\cos\omega_c t$，$U_r \gg U_s$。求输出电压 $u_o(t)$ 的表达式，并证明二次谐波的失真系数为零。



图题5.18

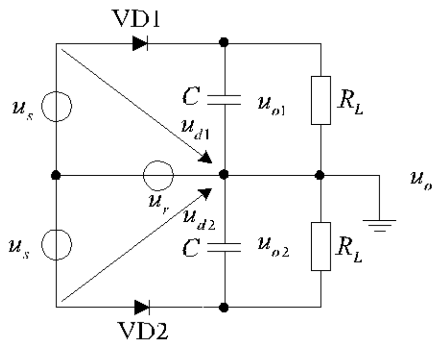


图5.18

解：其等效电路如图 5.18 所示，此电路为双平衡叠加型同步检波器。

图中：$u_{d1} = u_s + u_r$，$u_{d2} = -u_s + u_r$，而

$$
\begin{aligned}
u_{d1} &= u_s + u_r \\
&= U_s\cos(\omega_c + \Omega)t + U_r\cos\omega_c t \\
&= U_s\cos\Omega t\cos\omega_c t - U_s\sin\Omega t\sin\omega_c t + U_r\cos\omega_c t \\
&= (U_s\cos\Omega t + U_r)\cos\omega_c t - U_s\sin\Omega t\sin\omega_c t \\
&= \sqrt{(U_s\cos\Omega t + U_r)^2 + U_s^2\sin^2\Omega t}\cos[\omega_c t + \varphi(t)] \\
&= \sqrt{U_s^2 + U_r^2 + 2U_sU_r\cos\Omega t}\cos[\omega_c t + \varphi(t)] \\
&= U_{d1}(t)\cos[\omega_c t + \varphi(t)]
\end{aligned}
$$

$$\therefore u_{o1} = K_dU_{d1}(t) = K_dU_r\sqrt{1 + \left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2 + 2\frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t}$$

$$\because U_s \ll U_r \qquad \therefore \frac{U_s}{U_r} \ll 1$$

$$\therefore u_{o1} \approx K_dU_r\sqrt{1 + 2\frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t}$$

将上式进行幂级数展开，并忽略二次及以上分量($(1+x)^n \approx 1 + nx + \frac{n(n-1)}{2!}x^2$)有：

$$
\begin{aligned}
u_{o1} &\approx K_{d1}U_r\sqrt{1 + 2\frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t} \\
&\approx K_{d1}U_r\left[1 + \frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t + \frac{4}{2}\times\frac{1}{2}\times\left(\frac{1}{2} - 1\right)\times\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2\cos^2\Omega t\right] \\
&= K_{d1}U_r\left[1 + \frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t - \frac{1}{2}\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2\cos^2\Omega t\right] \\
&= K_{d1}U_r\left[1 - \frac{1}{4}\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2 + \frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t - \frac{1}{4}\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2\cos 2\Omega t\right]
\end{aligned}
$$

同理：

$$
\begin{aligned}
u_{d2} &= -u_s + u_r \\
&= -U_s\cos(\omega_c + \Omega)t + U_r\cos\omega_c t \\
&= -U_s\cos\Omega t\cos\omega_c t + U_s\sin\Omega t\sin\omega_c t + U_r\cos\omega_c t \\
&= (-U_s\cos\Omega t + U_r)\cos\omega_c t + U_s\sin\Omega t\sin\omega_c t \\
&= \sqrt{(-U_s\cos\Omega t + U_r)^2 + U_s^2\sin^2\Omega t}\cos[\omega_c t - \phi(t)] \\
&= \sqrt{U_s^2 + U_r^2 - 2U_sU_r\cos\Omega t}\cos[\omega_c t - \phi(t)]
\end{aligned}
$$

$$u_{o2} \approx K_{d2}U_r\sqrt{1-2\frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t}$$

$$\approx K_{d2}U_r\left[1-\frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t+\frac{4}{2}\times\frac{1}{2}\times\left(\frac{1}{2}-1\right)\times\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2\cos^2\Omega t\right]$$

$$=K_{d2}U_r\left[1-\frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t-\frac{1}{2}\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2\cos^2\Omega t\right]$$

$$=K_{d2}U_r\left[1-\frac{1}{4}\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2-\frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t-\frac{1}{4}\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2\cos 2\Omega t\right]$$

若 $K_{d1}=K_{d2}=K_d$，则

$u_o=u_{o1}-u_{o2}$

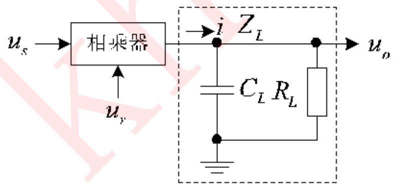
$$=K_dU_r\left[1-\frac{1}{4}\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2+\frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t-\frac{1}{4}\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2\cos 2\Omega t\right]-K_dU_r\left[1-\frac{1}{4}\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2-\frac{U_s}{U_r}\cos\Omega t-\frac{1}{4}\left(\frac{U_s}{U_r}\right)^2\cos 2\Omega t\right]$$

$=2K_dU_s\cos\Omega t$

∴由上式可知：二次谐波的失真系数为 0。

5.19 图题 5.19 所示为一乘积型同步检波器电路模型。相乘器的特性为 $i=Ku_su_r$，其中 K 为相乘系数，$u_r=U_r\cos(\omega_c t+\varphi)$。试求在下列两种情况下输出电压 u_o 的表达式，并说明是否有失真？假设 $Z_L(\omega_c)\approx 0$，$Z_L(\Omega)\approx R_L$。

（1）$u_s=mU_c\cos\Omega t\cos\omega_c t$；（2）$u_s=\frac{1}{2}mU_c\cos(\omega_c+\Omega)t$。



图题5.19

解：由于 $Z_L(\omega_c)\approx 0$，$Z_L(\Omega)\approx R_L$，故 R_LC_L 为低通滤波器。

（1）$u_s=mU_c\cos\Omega t\cos\omega_c t$　　（DSB 信号）

$i=Ku_su_r$

$=KmU_c\cos\Omega t\cos\omega_c t\times U_r\cos(\omega_c t+\varphi)$

$=\frac{K}{2}mU_cU_r\cos\Omega t[\cos(2\omega_c t+\varphi)+\cos\varphi]$

经 R_LC_L 低通滤波器后输出为：$u_o=i(0)\times R_L=\frac{K}{2}mU_cU_rR_L\cos\varphi\cos\Omega t$　（可实现无失真解调，只是振幅有一定的衰减）

（2）$u_s=\frac{1}{2}mU_c\cos(\omega_c+\Omega)t$　　（上边带信号）

$$
\begin{aligned}
i &= K u_s u_r \\
&= \frac{K}{2} m U_c \cos(\omega_c + \Omega)t \times U_r \cos(\omega_c t + \varphi) \\
&= \frac{K}{2} m U_c U_r [\cos\omega_c t \cos\Omega t - \sin\omega_c t \sin\Omega t] \cos(\omega_c t + \varphi) \\
&= \frac{K}{2} m U_c U_r [\cos\Omega t \cos\omega_c t \cos(\omega_c t + \varphi) - \sin\Omega t \sin\omega_c t \cos(\omega_c t + \varphi)] \\
&= \frac{K}{4} m U_c U_r \{\cos\Omega t[\cos\varphi + \cos(2\omega_c t + \varphi)] - \sin\Omega t[\sin(2\omega_c t + \varphi) - \sin\varphi]\}
\end{aligned}
$$

经 $R_L C_L$ 低通滤波器后输出为：

$$u_o = i(0) \times R_L = \frac{K}{4} m U_c U_r R_L (\cos\varphi \cos\Omega t + \sin\varphi \sin\Omega t) = \frac{K}{4} m U_c U_r R_L \cos(\Omega t - \varphi)$$

（可实现无失真解调，只是有固定的相移 φ 即延时）

5.20 上题中，若 $u_s = \cos\Omega t \cos\omega_c t$，当 u_r 为下列信号时

（1） $u_r = 2\cos\omega_c t$；（2） $u_r = \cos\left[(\omega_c + \Delta\omega)t + \varphi\right]$。

试求输出电压 u_o 的表达式，判断上述情况可否实现无失真解调，为什么？

解：（1） $u_r = 2\cos\omega_c t$ （与发端载波同步）

$$i = K u_s u_r = K \cos\Omega t \cos\omega_c t \times 2\cos\omega_c t = K \cos\Omega t (1 + \cos 2\omega_c t)$$

经 $R_L C_L$ 低通滤波器后输出为： $u_o = i(0) \times R_L = K R_L \cos\Omega t$，可实现无失真解调。

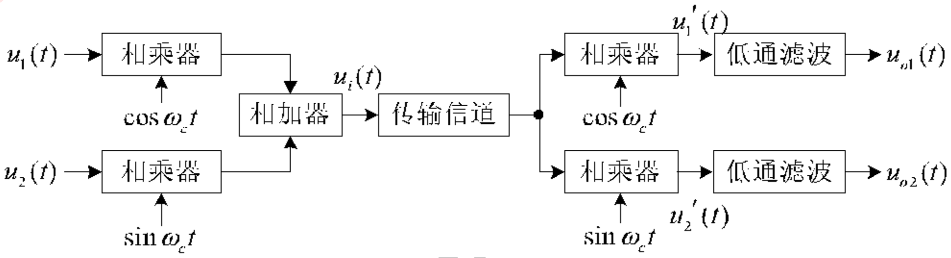
（2） $u_r = \cos\left[(\omega_c + \Delta\omega)t + \varphi\right]$ （与发端载波有频差和相移）

$$i = K u_s u_r = K \cos\Omega t \cos\omega_c t \times \cos\left[(\omega_c + \Delta\omega)t + \varphi\right]$$

$$= \frac{K}{2} \cos\Omega t \left\{\cos\left[(2\omega_c + \Delta\omega)t + \varphi\right] + \cos\left(\Delta\omega \times t + \varphi\right)\right\}$$

经 $R_L C_L$ 低通滤波器后输出为： $u_o = i(0) \times R_L = \frac{K}{2} R_L \cos\Omega t \cos\left(\Delta\omega \times t + \varphi\right)$，不能实现无失真解调。

5.21 图题 5.21 所示是正交平衡调制与解调的方框图。它是多路传输技术的一种。两路信号分别对频率相同但相位正交（相差 90°）的载波进行调制，可实现用一个载波同时传送两路信号（又称为正交复用方案）。试证明在接收端可以不失真地恢复出两个调制信号来（设相乘器的相乘系数为 K1，低通滤波器的通带增益为 K2）。



图题5.21

证明：如图假设各点信号。正交平衡调制后的信号 $u_i(t)$ 为：

$u_i(t)=u_1(t)\cos\omega_c t+u_2(t)\sin\omega_c t$

因此根据图有：

$$u_1'(t)=K_1u_i(t)\cos\omega_c t$$
$$=K_1u_1(t)\cos^2\omega_c t+K_1u_2(t)\sin\omega_c t\cos\omega_c t$$
$$=\frac{K_1}{2}u_1(t)(1+\cos2\omega_c t)+\frac{K_1}{2}u_2(t)\sin2\omega_c t$$

$$u_2'(t)=K_1u_i(t)\sin\omega_c t$$
$$=K_1u_1(t)\sin\omega_c t\cos\omega_c t+K_1u_2(t)\sin^2\omega_c t$$
$$=\frac{K_1}{2}u_1(t)\sin2\omega_c t+\frac{K_1}{2}u_2(t)(1-\cos2\omega_c t)$$

经低通后，$u_{o1}(t)=\dfrac{K_1K_2}{2}u_1(t)$　　$u_{o2}(t)=\dfrac{K_1K_2}{2}u_2(t)$

∴接收端可以无失真地恢复出两个调制信号 $u_1(t)$、$u_2(t)$。

5.23 二极管平衡电路如图题 5.23 所示。现有以下几种可能的输入信号：

$u_1=U_\Omega\cos\Omega t$；$u_2=U_c\cos\omega_c t$；$u_3=U_m(1+m_1\cos\Omega_1 t)\cos\omega_c t$；$u_4=U_4\cos(\omega_c t+m_f\sin\Omega t)$；

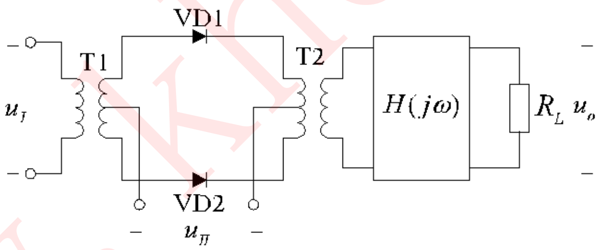
$u_5=U_r\cos\omega_r t$，$\omega_r=\omega_c$；$u_6=U_L\cos\omega_L t$；$u_7=U_7\cos\Omega_1 t\cos\omega_c t$

问：该电路能否得到下列输出信号？若能，此时电路中的 u_I 及 u_{II} 为哪种输入信号？应采用什么滤波器，其中心频率及带宽各为多少？（不需要推导计算，直接给出结论）

（1）$u_{o1}=U(1+m\cos\Omega t)\cos\omega_c t$；（2）$u_{o2}=U\cos\Omega t\cos\omega_c t$；（3）$u_{o3}=U\cos(\omega_c+\Omega)t$；

（4）$u_{o4}=U\cos\Omega_1 t$；（5）$u_{o5}=U\cos(\omega_I t+m_f\sin\Omega t)$；（6）$u_{o6}=U(1+m_1\cos\Omega_1 t)\cos\omega_I t$；

（7）$u_{o7}=U\cos\Omega_1 t\cos\omega_I t$。



图题 5.23

解：（1）$u_{o1}=U(1+m\cos\Omega t)\cos\omega_c t$　　（AM 信号）

故：$u_I=u_2$（载波），$u_{II}=u_1$（调制信号）　（题 5.8（c）），$H(j\omega)$ 为带通滤波器，$f_o=f_c$，$B=2F\left(F=\dfrac{\Omega}{2\pi}\right)$

（2）$u_{o2}=U\cos\Omega t\cos\omega_c t$　　（DSB 信号）

故：$u_I=u_1$（调制信号），$u_{II}=u_2$（载波），$H(j\omega)$ 为带通滤波器，$f_o=f_c$，$B=2F$

（3）$u_{o3}=U\cos(\omega_c+\Omega)t$　　（上边带信号）

故：$u_I=u_1$（调制信号），$u_{II}=u_2$（载波），$H(j\omega)$ 为带通滤波器，$f_o=f_c+\dfrac{F}{2}$，$B=F$

（4）$u_{o4}=U\cos\Omega_1 t$　　（调制信号）——乘积型同步检波器

故：$u_I=u_7$（DSB 信号），$u_{II}=u_5$（本地载波），$H(j\omega)$ 为低通滤波器，$B=F$

（5） $u_{o5}=U\cos(\omega_I t+m_f\sin\Omega t)$　　（FM 信号混频后的信号）

故：$u_I=u_4$（FM 信号），$u_{II}=u_6$（本振信号），$H(j\omega)$ 为中频滤波器，$f_o=f_I$，$B=2(m_f+1)F$

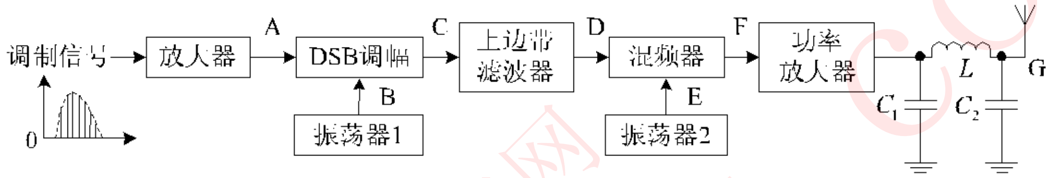
（6） $u_{o6}=U(1+m_1\cos\Omega t)\cos\omega_I t$　　（AM 信号混频后的信号）

故：$u_I=u_3$（AM 信号），$u_{II}=u_6$（本振信号），$H(j\omega)$ 为中频滤波器，$f_o=f_I$，$B=2F$

（7） $u_{o7}=U\cos\Omega_1 t\cos\omega_I t$　　（DSB 信号混频后的信号）

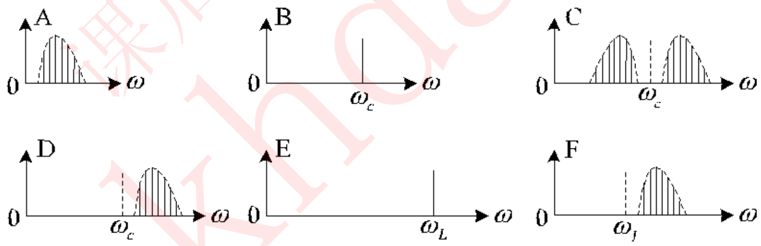
故：$u_I=u_7$（DSB 信号），$u_{II}=u_6$（本振信号），$H(j\omega)$ 为中频滤波器，$f_o=f_I$，$B=2F$

5.24 图题 5.24 所示为单边带（上边带）发射机方框图。调制信号为 300～3000Hz 的音频信号，其频谱分布如图所示。试画出图中方框中各点输出信号的频谱图。



图题5.24

解：A 点：调制信号，B 点：载波信号，C 点：DSB 信号，D 点：上边带信号，E 点：本振信号，F 点：中频的上边带信号，G 点：放大后的 F。各点输出信号的频谱图如下图所示。



5.25 某超外差接收机的工作频段为 0.55～25MHz，中频 $f_I=455\text{kHz}$，本振 $f_I>f_c$。试问波段内哪些频率上可能出现较大的组合干扰（6 阶以下）。

解：由题意知：$f_c=0.55\sim25\text{MHz}$ 且 $f_L=f_c+f_I$，$f_I=455\text{kHz}$

产生组合干扰的信号频率与中频间关系为：

$$\frac{f_c}{f_I}=\frac{p+1}{q-p}$$

$$\therefore \frac{f_c}{f_I}=\frac{0.55}{0.455}\sim\frac{25}{0.455}=1.2\sim54.9$$

查 P226 表 5.2 有：

（二阶干扰） $p=1$，$q=2$，$f_c/f_I=2$，即：$f_c=2f_I=910\text{kHz}$

（五阶干扰） $p=2$，$q=3$，$f_c/f_I=3$，即：$f_c=3f_I=1365\text{kHz}$

（六阶干扰） $p=2$，$q=4$，$f_c/f_I=3/2$，即：$f_c=\frac{3}{2}f_I=682.5\text{kHz}$

5.26 试分析与解释下列现象：

（1）在某地，收音机接收到 1090kHz 信号时，可以收到 1323kHz 的信号；

（2）收音机接收 1080kHz 信号时，可以听到 540kHz 信号；

（3）收音机接收 930kHz 信号时，可同时收到 690kHz 和 810kHz 信号，但不能单独收到其中的一个台（例如，另一个台停播）。

解：（1）此现象为产生了副波道干扰 （四阶）

由题意知：$f_c = 1090\text{kHz}$，则 $f_L = f_c + f_I = 1090 + 465 = 1555(\text{kHz})$

$f_n = 1323\text{kHz}$

$pf_L - qf_n = p \times 1555 - q \times 1323$

$\therefore$ 当 $p = q = 2$ 时， $pf_L - qf_n = p \times 1555 - q \times 1323 = 2 \times 232 = 464(\text{kHz}) \approx f_I$

（2）此现象为产生了副波道干扰 （三阶）

由题意知：$f_c = 1080\text{kHz}$，则 $f_L = f_c + f_I = 1080 + 465 = 1545(\text{kHz})$

$f_n = 540\text{kHz}$

$\therefore$ 当 $p = 1$， $q = 2$ 时， $pf_L - qf_n = 1 \times 1545 - 2 \times 540 = 465(\text{kHz}) = f_I$

（3）此现象为产生了互调干扰

由题意知：$f_c = 930\text{kHz}$， $f_{n1} = 690\text{kHz}$， $f_{n2} = 810\text{kHz}$

$\because$ $f_{n2} - f_{n1} = 810 - 690 = 120(\text{kHz})$， $f_c - f_{n2} = 930 - 810 = 120(\text{kHz})$

$\therefore$ $f_{n2} - f_{n1} = f_c - f_{n2}$，为二阶互调干扰。

第 6 章 角度调制与解调

6.1（1）当 FM 调制器的调制灵敏度 $k_f = 5\text{kHz/V}$，调制信号 $u_\Omega(t) = 2\cos(2\pi\times2000t)$ 时，求最大频率偏移 Δf_m 和调制指数 m_f；

（2）当 PM 调制器的调相灵敏度 $k_p = 2.5\text{rad/V}$，调制信号 $u_\Omega(t) = 2\cos(2\pi\times2000t)$ 时，求最大相位偏移 $\Delta\varphi_m$。

解：（1）FM： $\Delta f(t) = k_f u_\Omega(t) = 5\times10^3\times2\cos(2\pi\times2000t) = 10^4\times\cos(2\pi\times2000t)$ （$F = 2000\text{Hz}$）

$$\therefore \Delta f_m = 10^4\text{Hz} = 10\text{kHz} \qquad m_f = \frac{\Delta f_m}{F} = \frac{10^4}{2000} = 5$$

（2）PM： $\Delta\varphi(t) = k_p u_\Omega(t) = 2.5\times2\cos(2\pi\times2000t) = 5\cos(2\pi\times2000t)$ （$F = 2000\text{Hz}$）

$$\therefore m_p = \Delta\varphi(t)\big|_{\max} = \Delta\varphi_m = 5\text{rad}$$

6.2 角调波 $u(t) = 10\cos(2\pi\times10^6 t + 10\cos 2000\pi t)$。试确定：（1）最大频偏；（2）最大相偏；（3）信号带宽；（4）此信号在单位电阻上的功率；（5）能否确定这是 FM 波或是 PM 波？

解：由题意得： $\varphi(t) = 2\pi\times10^6 t + 10\cos(2000\pi t)$ （$F = 1000\text{Hz}$）

$$\therefore \Delta\varphi(t) = 10\cos(2000\pi t)$$

$$\Delta\omega(t) = \frac{d\Delta\varphi(t)}{dt} = -2\times10^4\pi\sin(2000\pi t)$$

$$\therefore \Delta f(t) = \frac{\Delta\omega(t)}{2\pi} = -10^4\sin(2000\pi t)$$

（1） $\Delta f_m = 10^4\text{Hz} = 10\text{kHz}$

（2） $\Delta\varphi_m = 10\text{rad}$

（3） $B = 2(\Delta f_m + F) = 10^4 + 1000 = 22000(\text{Hz}) = 22\text{kHz}$

（4） $P = \frac{1}{2}U^2 = \frac{1}{2}\times10^2 = 50(\text{W})$

（5）不能确定

6.3 调制信号 $u_\Omega(t) = 2\cos 2\pi\times10^3 t + 3\cos 3\pi\times10^3 t$，载波为 $u_c = 5\cos 2\pi\times10^7 t$，调频灵敏度 $k_f = 3\text{kHz/V}$。试写出此 FM 信号的表达式。

解：由题意得瞬时频率为

$$\omega(t) = \omega_c + k_f u_\Omega(t) = 2\pi\times10^7 + 6\pi\times10^3(2\cos 2\pi\times10^3 t + 3\cos 3\pi\times10^3 t)(\text{rad/s})$$

$$\therefore \text{瞬时相位}\ \varphi(t) = \int_{-\infty}^{t}\omega(\tau)d\tau = \int_{-\infty}^{t}[2\pi\times10^7 + 6\pi\times10^3(2\cos 2\pi\times10^3\tau + 3\cos 3\pi\times10^3\tau)]d\tau$$

$$= 2\pi\times10^7 t + \frac{6\pi\times10^3}{2\pi\times10^3}\times2\sin 2\pi\times10^3 t + \frac{6\pi\times10^3}{3\pi\times10^3}\times3\sin 3\pi\times10^3 t$$

$$= 2\pi\times10^7 t + 6\sin 2\pi\times10^3 t + 6\sin 3\pi\times10^3 t$$

$$\therefore u_{FM}(t) = U_{cm}\cos\varphi(t) = 5\cos[2\pi\times10^7 t + 6\sin 2\pi\times10^3 t + 6\sin 3\pi\times10^3 t](\text{V})$$

6.4 已知调制信号为 $u_\Omega(t) = U_\Omega\cos 2\pi\times10^3 t$，$m_f = m_p = 10$，求此时 FM 波和 PM 波的带宽。若 U_Ω 不

变，F 增大一倍，两种调制信号的带宽如何变化？若 F 不变，U_Ω 增大一倍，两种调制信号的带宽如何变化？若 U_Ω 和 F 都增大一倍，两种调制信号的带宽又如何变化？

解：由题意得：$F = 10^3\text{Hz}$

（1）$B_{FM} = 2(m_f+1)F = 2(10+1)\times10^3 = 22\times10^3(\text{Hz}) = 22\text{kHz}$

$B_{PM} = 2(m_p+1)F = 2(10+1)\times10^3 = 22\times10^3(\text{Hz}) = 22\text{kHz}$

（2）FM：$m_f = \dfrac{k_f U_\Omega}{F}$　　　PM：$m_f = \dfrac{k_f U_\Omega}{F}$

∴当 U_Ω 不变，$F\to 2F$ 时，$m_f \to \frac{1}{2}m_f$，m_p 不变；

∴ $B_{FM}' = 2(m_f'+1)F' = 2(5+1)\times2\times10^3 = 24\times10^3(\text{Hz}) = 24\text{kHz}$

$B_{PM}' = 2(m_p+1)F' = 2(10+1)\times2\times10^3 = 44\times10^3(\text{Hz}) = 44\text{kHz}$（增大一倍）

（3）FM：$m_f = \dfrac{k_f U_\Omega}{F}$　　　PM：$m_f = \dfrac{k_f U_\Omega}{F}$

∴当 F 不变，$U_\Omega \to U_\Omega' = 2U_\Omega$ 时，$m_f \to m_f' = 2m_f$，$m_p \to m_p' = 2m_p$；

∴ $B_{FM}' = B_{PM}' = 2(m_p'+1)F' = 2(20+1)\times10^3 = 42\times10^3(\text{Hz}) = 42\text{kHz}$

（4）FM：$m_f = \dfrac{k_f U_\Omega}{F}$　　　PM：$m_f = \dfrac{k_f U_\Omega}{F}$

∴当 $F\to 2F$，$U_\Omega \to U_\Omega' = 2U_\Omega$ 时，m_f 不变，$m_p \to m_p' = 2m_p$；

∴ $B_{FM}' = 2(m_f+1)F' = 2(10+1)\times2\times10^3 = 44\times10^3(\text{Hz}) = 44\text{kHz}$

$B_{PM}' = 2(m_p'+1)F' = 2(20+1)\times2\times10^3 = 84\times10^3(\text{Hz}) = 84\text{kHz}$

6.5 调频振荡回路由电感 L 和变容二极管组成，$L = 2\mu\text{H}$，变容二极管的参数为：$C_o = 225\text{pF}$，$\gamma=1/2$，$U_D = 0.6\text{V}$，$U_Q = -6\text{V}$，调制信号 $u_\Omega(t) = 3\sin10^4 t$。求输出 FM 波时：

（1）载波 f_o；（2）由调制信号引起的载频漂移 Δf_o；（3）最大频率偏移 Δf_m；（4）调频灵敏度 k_f。

解：变容二极管的结电容为：$C_j = C_{jQ}(1+m\cos\Omega t)^{-\gamma}$，其中 $C_{jQ} = \dfrac{C_o}{\left(1+\dfrac{U_Q}{U_D}\right)^\gamma}$，$m = \dfrac{U_{\Omega m}}{U_D+U_Q}$。

（1）$C_{jQ} = \dfrac{C_o}{\left(1+\dfrac{|U_Q|}{U_D}\right)^\gamma} = \dfrac{225}{\left(1+\dfrac{6}{0.6}\right)^{1/2}} \approx 67.84(\text{pF})$

∴ $f_o = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_{jQ}}} = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{2\times10^{-6}\times67.84\times10^{-12}}} \approx 13.663\times10^6(\text{Hz}) = 13.7\text{MHz}$

（2）调制指数 $m = \dfrac{U_{\Omega m}}{U_D+|U_Q|} = \dfrac{3}{0.6+6} \approx 0.4545$

∴ $\Delta f_o = \dfrac{\gamma}{8}\left(\dfrac{\gamma}{2}-1\right)m^2 f_o = \dfrac{1}{16}\left(\dfrac{1}{4}-1\right)0.4545^2\times13.7\times10^6 \approx 0.133\times10^6(\text{Hz}) = 133\text{kHz}$

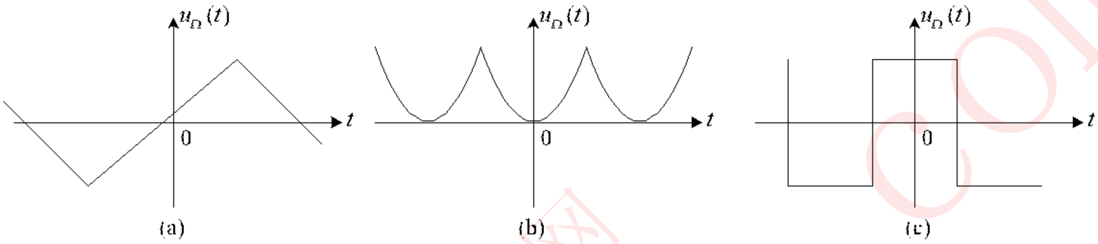
（3）$\Delta f_m = \dfrac{\gamma}{2} m f_o = \dfrac{1}{4} 0.4545 \times 13.7 \times 10^6 \approx 1.557\text{MHz}$

（4）$k_f = \dfrac{\gamma}{2} \dfrac{f_o}{U_D + |U_Q|} = \dfrac{1}{4} \times \dfrac{13.7 \times 10^6}{0.6 + 6} \approx 0.519 \times 10^6 (\text{Hz/V})$

6.6 调制信号 $u_\Omega(t)$ 的波形如图题 6.6 所示。

（1）画出 FM 波的 $\Delta\omega(t)$ 和 $\Delta\varphi(t)$ 曲线；

（2）画出 PM 波的 $\Delta\omega(t)$ 和 $\Delta\varphi(t)$ 曲线；

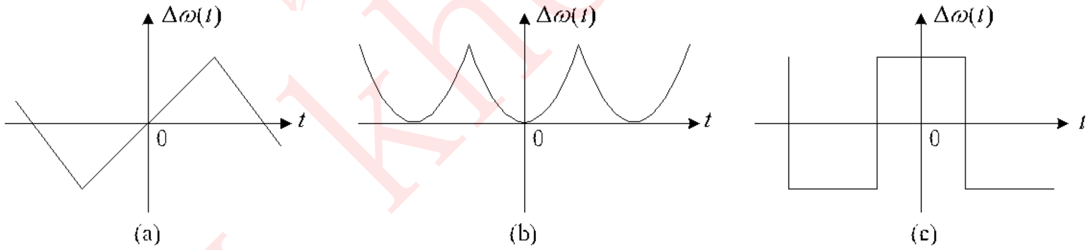


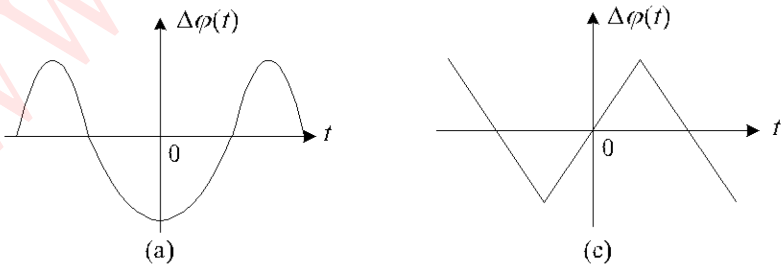
图题6.6

解：FM 波：$\Delta\omega(t) = k_f u_\Omega(t)$，$\Delta\varphi(t) = \int_{-\infty}^{t} \Delta\omega(\tau) d\tau$

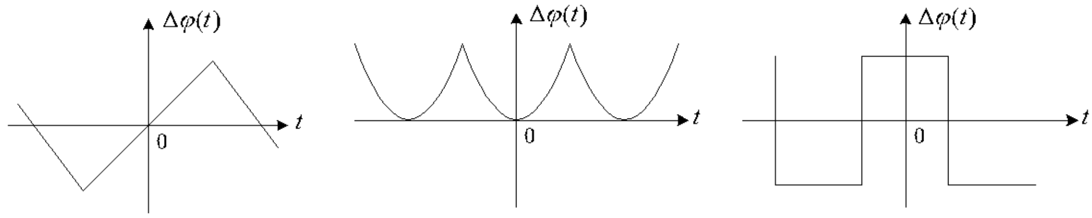
PM 波：$\Delta\omega(t) = \dfrac{d\Delta\varphi(t)}{dt}$，$\Delta\varphi(t) = k_p u_\Omega(t)$

（1）FM 波的 $\Delta\omega(t)$ 和 $\Delta\varphi(t)$ 曲线如下图所示：

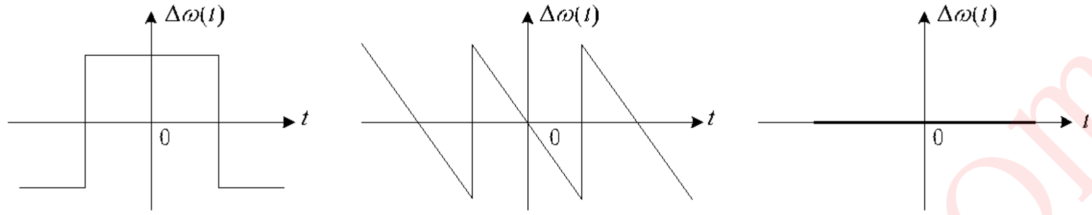




（2）PM 波的 $\Delta\omega(t)$ 和 $\Delta\varphi(t)$ 曲线如下图所示：



(a) (b) (c)



(a) (b) (c)

6.7 若 FM 调制器的调制指数 $m_f = 1$，调制信号 $u_\Omega(t) = U_\Omega \cos(2\pi \times 1000t)$，载波 $u_c(t) = 10\cos(10\pi \times 10^5 t)$。求：

（1）由表 6.2 所示的第一类贝塞尔函数数值表，求振幅明显的边频分量的振幅。

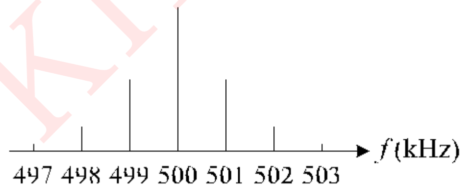
（2）画出频谱，并标出振幅的相对大小。

解：（1）由表 6.2 可得：调频指数 $m_f = 1$ 时，边频振幅分别为：

$J_0 U_{cm} = 0.77 \times 10 = 7.7$　$J_1 U_{cm} = 0.44 \times 10 = 4.4$

$J_2 U_{cm} = 0.11 \times 10 = 1.1$　$J_3 U_{cm} = 0.02 \times 10 = 0.2$

（2）其频谱为：



6.8 求 $u_c(t) = \cos(10^7\pi + 10^4\pi t^2)$ 的瞬时频率，说明它随时间的变化规律。

解：由题意得：瞬时相位 $\varphi(t) = 10^7\pi + 10^4\pi t^2$，故

瞬时频率 $f(t) = \dfrac{1}{2\pi} \times \dfrac{d\varphi(t)}{dt} = 5 \times 10^6 + 10^4 t$，且它随时间 t 成线性变化。

6.10 已知载波频率 $f_o = 100\text{MHz}$，载波振幅 $U_o = 5\text{V}$，调制信号 $u_\Omega(t) = \cos(2\pi \times 10^3 t) + 2\cos(2\pi \times 1500t)$，设最大频偏 $\Delta f_m = 20\text{kHz}$。试写出调频波的数学表达式。

解：本题的关键是求 k_f，利用 $\Delta f_m = k_f |u_\Omega(t)|_{\max}$ 求。

设调制灵敏度 k_f，则瞬时频偏为 $\Delta f(t) = k_f u_\Omega(t) = k_f[\cos(2\pi \times 10^3 t) + 2\cos(2\pi \times 1500t)]$。因此

$$\Delta f_m = k_f \left|u_\Omega(t)\right|_{\max} = k_f \left|\cos(2\pi\times10^3 t) + 2\cos(2\pi\times1500t)\right|_{\max}$$

令 $\theta = 2\pi\times500t$，则 $\Delta f(t) = k_f(\cos2\theta + 2\cos3\theta)$，再利用高等数学求极值的方法可得到 $\left|u_\Omega(t)\right|_{\max} = 3\text{V}$。

$$\therefore k_f = \frac{\Delta f_m}{\left|u_\Omega(t)\right|_{\max}} = \frac{20}{3}(\text{kHz/V})$$

$$\therefore \text{瞬时频率}\ f(t) = f_o + k_f u_\Omega(t) = 10^8 + \frac{20}{3}[\cos(2\pi\times10^3 t) + 2\cos(2\pi\times1500t)]$$

$$\therefore \text{瞬时相位}\ \varphi(t) = 2\pi\int_{-\infty}^{t} f(\tau)d\tau$$

$$= 2\pi\times10^8 t + \frac{40\pi}{3}\times10^3\left[\frac{\sin(2\pi\times10^3 t)}{2\pi\times10^3} + \frac{2\sin(2\pi\times1500t)}{2\pi\times1500}\right]$$

$$= 2\pi\times10^8 t + \frac{20}{3}\left[\sin(2\pi\times10^3 t) + \frac{4}{3}\times\sin(2\pi\times1500t)\right]$$

$$\therefore u_{FM}(t) = U_o\cos\varphi(t) = 5\cos\left[2\pi\times10^8 t + \frac{20}{3}\sin(2\pi\times10^3 t) + \frac{80}{9}\times\sin(2\pi\times1500t)\right]$$

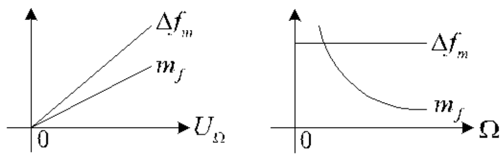
6.11 若调制信号 $u_\Omega(t) = U_\Omega\cos\Omega t$，试分别画出调频波的最大频偏 Δf_m、调制指数 m_f 与 U_Ω 和 Ω 之间的关系曲线。

解：瞬时频偏：$\Delta f(t) = k_f u_\Omega(t)$，最大频偏 $\Delta f_m = k_f\left|u_\Omega(t)\right|_{\max} = k_f U_\Omega$

$$\text{瞬时相移}\ \Delta\varphi(t) = 2\pi\int_{-\infty}^{t}\Delta f(\tau)d\tau = 2\pi\int_{-\infty}^{t}k_f u_\Omega(\tau)d\tau = \frac{2\pi k_f}{\Omega}U_\Omega\sin\Omega t$$

$$\therefore \text{调制指数}\ m_f = \Delta\varphi_m = \frac{2\pi k_f}{\Omega}U_\Omega$$

其曲线为：



6.12 变容二极管直接调频电路，如图题 6.12 所示。其中心频率为 360MHz，变容二极管的 $\gamma=3$，$U_D = 0.6\text{V}$，$u_\Omega(t) = U_\Omega\cos\Omega t$。图中 L_1 和 L_3 为高频扼流圈，C_3 为隔直流电容，C_5 和 C_4 为高频旁路电容。提示：该题变容二极管部分接入振荡回路中。

（1）分析电路工作原理和其余元件作用，画出交流等效电路；

（2）当 $C_{jQ} = 20\text{pF}$ 时，求振荡回路 L_2 的电感量；

（3）求调制灵敏度和最大频偏。

解：（1）各元件作用：L_1、L_3：高频扼流圈（通直流、$u_\Omega(t)$，阻高频信号）；C_3、C_8 为隔直流电容；C_4、C_5、C_6、C_7 为高频旁路电容；-8.4V 电源经 R_1 和 R_2 分压后给变容二极管提供静态负偏压；-15V 电源经 R_3 和 R_4 分压后给晶体管基极提供静态负偏压；C_1、C_2、L_2 及变容二极管组成电容三点式振荡器。其交流等效电路如图 6.12 所示。

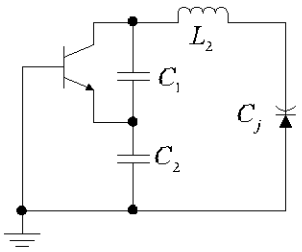


图6.12

（2）回路两端总电容为

$$C_\Sigma = \frac{1}{\frac{1}{C_1}+\frac{1}{C_2}+\frac{1}{C_j}} = \frac{1}{1+\frac{1}{0.5}+\frac{1}{20}} \approx 0.3279(\text{pF})$$

由 $f_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}}$ 有：

$$L = \frac{1}{(2\pi f_0)^2 C_\Sigma} = \frac{1}{(2\pi\times 360\times 10^6)^2\times 0.3279\times 10^{-12}} \approx 5.96\times 10^{-7}(\text{H}) \approx 0.6\mu\text{H}$$

（3）反向静态电压为

$$U_Q = \frac{R_2}{R_1+R_2}\times(-8.4) = \frac{56}{22+56}\times(-8.4) \approx -6.03(\text{V})$$

调制灵敏度 $S_f = \dfrac{\gamma}{2}\times\dfrac{f_0}{U_D+|U_Q|} = \dfrac{3}{2}\times\dfrac{360\times 10^6}{0.6+6.03} \approx 81.448\times 10^6(\text{Hz/V}) = 81.448\text{MHz/V}$

最大频偏 $\Delta f_m = \dfrac{\gamma}{2}mf_0 = \dfrac{\gamma}{2}\times\dfrac{U_{\Omega m}}{U_D+|U_Q|}f_0 = \dfrac{3}{2}\times\dfrac{360\times 10^6}{0.6+6.03} \approx 81.448\times 10^6(\text{Hz}) = 81.448\text{MHz}$

6.13 变容二极管调相电路如图题 6.13 所示。图中，C_1，C_4 为隔直电容，C_2，C_3 为耦合电容；$u_\Omega(t) = U_\Omega\cos\Omega t$；变容二极管参数 γ=2，$U_D = 1\text{V}$；回路等效品质因数 $Q_L = 20$。试求下列情况时的调相指数 m_p 和最大频偏 Δf_m。

（1）$U_\Omega = 0.1\text{V}$，$\Omega = 2\pi\times 10^3\text{rad/s}$；（2）$U_\Omega = 0.1\text{V}$，$\Omega = 4\pi\times 10^3\text{rad/s}$；（3）$U_\Omega = 0.05\text{V}$，$\Omega = 2\pi\times 10^3\text{rad/s}$。

解：（1）元件作用：C_1、C_4 为隔直流电容；C_2、C_3 为耦合电容；C_b、C_e 为旁路电容。其交流等效电路如图 6.13 所示。变容二极管两端的反向静态电压 $U_Q = 9\text{V}$。

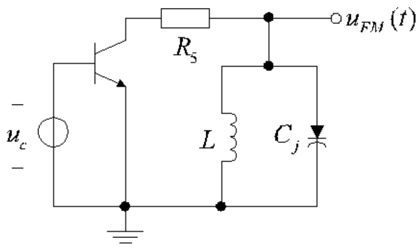


图6.13

（2）瞬时相移 $\Delta\varphi(t) = -Q_L\gamma m\cos\Omega t = -Q_L\gamma\dfrac{U_\Omega}{U_D + U_Q}\cos\Omega t$

∴最大相移为 $\Delta\varphi_m = Q_L\gamma\dfrac{U_\Omega}{U_D + U_Q} = m_p$

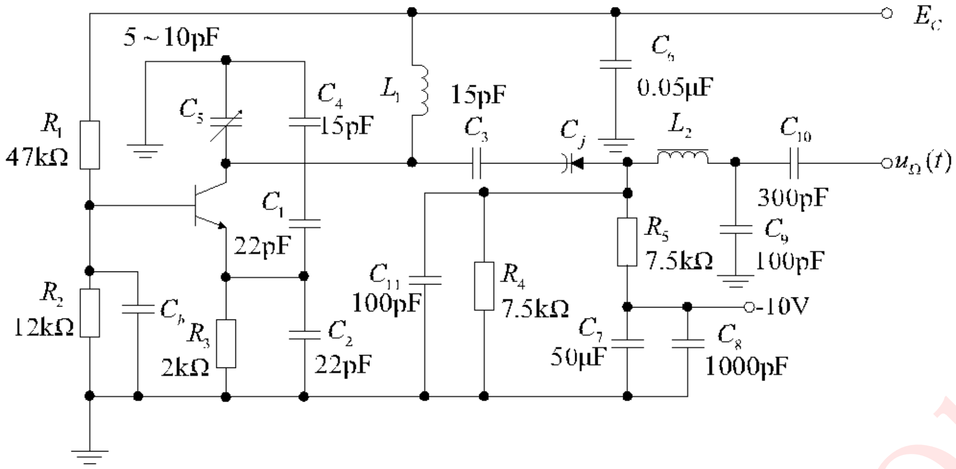
瞬时频偏 $\Delta\omega(t) = \dfrac{d\Delta\varphi(t)}{dt} = Q_L\gamma m\Omega\sin\Omega t = Q_L\gamma\Omega\dfrac{U_\Omega}{U_D + U_Q}\sin\Omega t$

∴最大频偏为 $\Delta f_m = \dfrac{Q_L\gamma\Omega}{2\pi}\times\dfrac{U_\Omega}{U_D + U_Q} = m_p\times\dfrac{\Omega}{2\pi}$

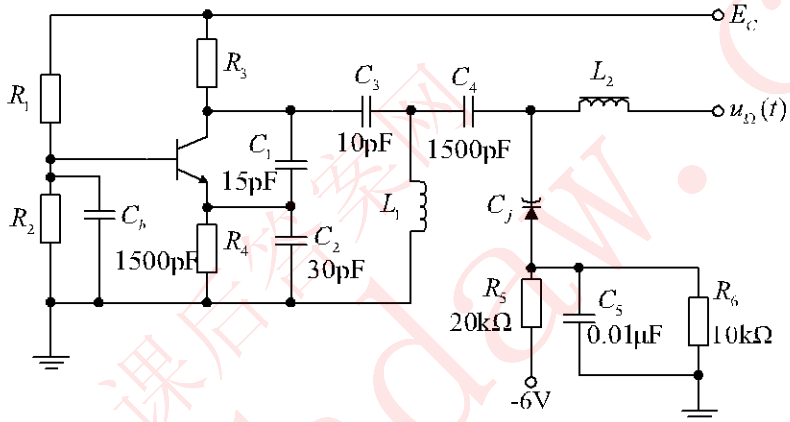
在上述 3 种情况下，调相指数和最大频偏分别是：

	①	②	③
	$U_\Omega = 0.1\text{V}$ $\Omega = 2\pi\times10^3\,\text{rad/s}$	$U_\Omega = 0.1\text{V}$ $\Omega = 4\pi\times10^3\,\text{rad/s}$	$U_\Omega = 0.05\text{V}$ $\Omega = 2\pi\times10^3\,\text{rad/s}$
调相指数 m_p	0.4rad	0.4rad	0.2rad
最大频偏 Δf_m	400Hz	800Hz	200Hz

6.14 图题 6.14 所示电路为两个变容二极管调频电路。试画出简化的高频等效电路，并说明各元件的作用。

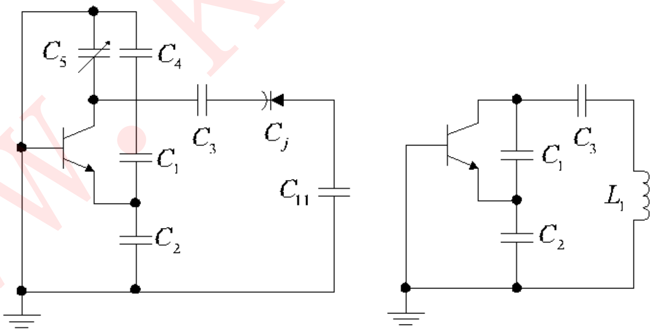


(a)



(b)

解：高频等效电路如图 6.14 所示。

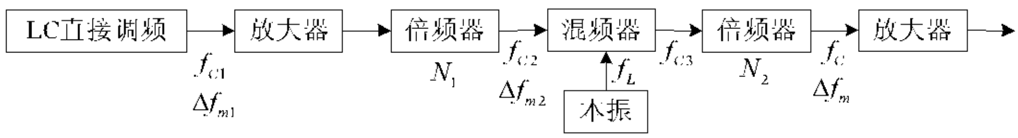


（a）　（b）

图6.14

6.15 一调频设备如图题 6.15 所示。要求输出调频波的载波频率 $f_c = 100\text{MHz}$，最大频偏 $\Delta f_m = 75\text{kHz}$。本振频率 $f_L = 40\text{MHz}$，已知调制信号频率 $F = 100\text{Hz} \sim 15\text{kHz}$，设混频器输出频率 $f_{c3} = f_L - f_{c2}$，两个倍频器的倍频次数 $N_1 = 5$，$N_2 = 10$。试求：

（1）LC 直接调频电路输出的 f_{c1} 和 Δf_{m1}；（2）两个放大器的通频带 BW_1、BW_2。



图题6.15

解：（1）由图有：

$f_{c2}=N_1 f_{c1}$， $\Delta f_{m2}=N_1\Delta f_{m1}$； $f_{c3}=f_L-f_{c2}$，$\Delta f_{m3}=\Delta f_{m2}$； $f_c=N_2 f_{c3}$， $\Delta f_m=N_2\Delta f_{m2}$

∴ $f_c=N_2(f_L-N_1 f_{c1})$， $\Delta f_m=N_1N_2\Delta f_{m1}$

$$∴ f_{c1}=\frac{N_2 f_L-f_c}{N_2N_1}=\frac{10\times40\times10^6-100\times10^6}{10\times5}=6\times10^6(\mathrm{Hz})=6\mathrm{MHz}$$

$$\Delta f_{m1}=\frac{\Delta f_m}{N_1N_2}=\frac{75\times10^3}{5\times10}=1.5\times10^3(\mathrm{Hz})=1.5\mathrm{kHz}$$

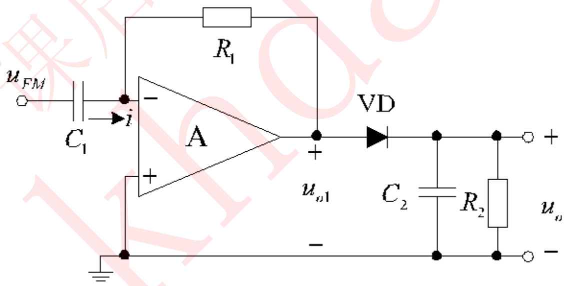
（2） $BW_1=2(\Delta f_{m1}+F_m)=2(1.5+15)=33(\mathrm{kHz})$

$BW_2=2(\Delta f_m+F_m)=2(75+15)=180(\mathrm{kHz})$

6.17 图题 6.17 所示电路为微分式鉴频电路。输入调频波

$$u_{FM}(t)=U_{FM}\cos(\omega_o t+\int U_\Omega\cos\Omega t dt)$$

试求 $u_{o1}(t)$ 和 $u_o(t)$ 的表达式。



图题6.17

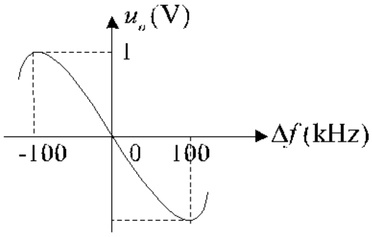
解：利用理想运放"虚断"、"虚短"的概念及欧姆定律有：

$$i=\frac{du_{FM}}{dt}C_1=-\frac{u_{o1}}{R_1}$$

$$∴ u_{o1}=-R_1C_1\frac{du_{FM}}{dt}=R_1C_1U_{FM}(\omega_o+U_\Omega\cos\Omega t)\sin(\omega_o t+\int U_\Omega\cos\Omega t dt)$$

∴ $u_o=K_d\times U_{o1}=K_dR_1C_1U_{FM}(\omega_o+U_\Omega\cos\Omega t)$ （设检波系数为 K_d ）

6.21 某鉴频器的鉴频特性如图题 6.21 所示。鉴频器的输出电压 $u_o=\cos4\pi\times10^3 t$ 。



图题6.21

（1）求鉴频跨导 S_D；

（2）写出输入信号 $u_{FM}(t)$ 和原调制信号 $u_\Omega(t)$ 的表达式；

（3）若此鉴频器为互感耦合相位鉴频器，要得到正极性的鉴频特性，应如何改变电路。

解：（1）鉴频跨导 $S_D = \dfrac{\Delta u_o}{\Delta f} = -\dfrac{1}{100} = -0.01(\text{V/kHz})$

（2）瞬时频偏 $\Delta f(t) = \dfrac{u_o(t)}{S_D} = -\dfrac{\cos 4\pi\times 10^3 t}{0.01} = -100\cos 4\pi\times 10^3 t(\text{kHz})$

∴原调制信号为 $u_\Omega(t) = -U_{FM}\cos 4\pi\times 10^3 t$

输入信号为 $u_{FM}(t) = U_{FM}\cos\left(\omega_o t + 2\pi\int_0^t \Delta f(\tau)d\tau\right)$

$$= U_{FM}\cos\left(\omega_o t - 2\times 10^5\pi\int_0^t \cos(4\pi\times 10^3\tau)d\tau\right)$$
$$= U_{FM}\cos\left[\omega_o t - 50\sin(4\pi\times 10^3 t)\right]$$

（3）若此鉴频器为互感耦合相位鉴频器，要得到正极性的鉴频特性，只要改变互感耦合的同名端、两个检波二极管的方向或鉴频器输出电压规定的正方向之一就可以了。