

### 第3章习题解答

3-1 小信号放大器的主要质量指标有哪些？设计时遇到的主要问题是什么？解决方法如何？

【解】

①主要指标有：增益、通频带、选择性、工作稳定性及噪声系数。

②设计时遇到的主要问题是：工作稳定性与噪声。

为使放大器工作稳定，应在设计和工艺方面使放大器远离自激。为降低噪声，可选用低噪声管，正确选择工作点与合适的电路。

3-2 晶体管 3DG6C 的特征频率  $f_T = 250\text{MHz}$ ,  $\beta_0 = 50$ 。求该管在  $f = 1$ 、20 和 50MHz 时的  $\beta$  值。

【解】

$$\text{有 } f_T = \beta_0 f_\beta \text{ 得 } f_\beta = \frac{f_T}{\beta_0} = 5\text{MHz}$$

$$f = 1\text{MHz 时, } \beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} = 49$$

$$f = 20\text{MHz 时, } \beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} = 21.1$$

$$f = 50\text{MHz 时, } \beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} = 5$$

3-3 说明  $f_0$ ,  $f_T$  和  $f_{\max}$  的物理意义。为什么  $f_{\max}$  最高， $f_T$  次之， $f_\beta$  最低？ $f_{\max}$  受不受电路阻态的影响？请分析说明。

【解】

①  $f_\beta$  是晶体管  $\beta$  值随频率的升高而下降到低频率  $\beta_0$  的  $1/\sqrt{2}$  时的频率。

② 频率继续升高， $\beta$  值继续下降，时它下降为 1 时的频率，即为特征频率  $f_T$ ，

显然， $f_T > f_\beta$ 。

③ 频率继续升高，使晶体管的功率增益降为 1 时的频率，称为最高频率  $f_{\max}$ ，

因而  $f_{\max} > f_T, f_{\max}$  仅由晶体管自身的参数所定与电路的组态无关。

3-4 晶体三极管在  $V_{CE} = 10\text{V}$ ,  $I_E = 1\text{mA}$  时的  $f_T = 250\text{MHz}$ ，又  $r_{bb'} = 70\Omega$ ,  $C_{b'c} = 3\text{pF}$ ，

$\beta_0 = 50$ ，求该管在频率  $f = 10\text{MHz}$  时的共发电路的  $y$  参数。

【解】

补充条件  $g_{ce} = 10\mu\text{S}$

$$\text{确定 } g_m \text{ 与 } C_{b'e} \text{ 的值，由于 } r_e = \frac{26\text{mV}}{I_E} = 26\Omega; \therefore g_m = \frac{1}{r_e} = \frac{1}{26}\text{S} = 38.5 \times 10^{-3}\text{S}$$

$$\text{又 } f_T = \frac{1}{2\pi r_e (C_{b'c} + C_{b'e})}; \therefore (C_{b'c} + C_{b'e}) = 24.5\text{pF}, \text{得 } C_{b'e} = 24.5 - C_{b'c} = 21.5\text{pF}$$

$$\text{又 } g_{bb'} = \frac{1}{r_{bb'}} = \frac{1}{70} = 14.3 \times 10^{-3}\text{S}$$

$$y_{ie} = \frac{g_{bb'}(j\omega)(C_{b'c} + C_{b'e})}{g_{bb'} + j\omega(C_{b'c} + C_{b'e})} = (0.164 + j1.52) \times 10^{-3}\text{S}$$

$$y_{re} = \frac{-g_{bb'}(j\omega)C_{b'c}}{g_{bb'} + j\omega(C_{b'c} + C_{b'e})} = -(0.02 + j0.186) \times 10^{-3}\text{S}$$

$$y_{fe} = \frac{g_{bb'}(g_m - j\omega C_{b'c})}{g_{bb'} + j\omega(C_{b'c} + C_{b'e})} = (38 - j4.3) \times 10^{-3}\text{S}$$

$$y_{oe} = \frac{[g_{ce}(g_{bb'}^2 + \omega^2 C_{b'e}^2 + \omega^2 g_m C_{b'e} C_{b'c})] + j \frac{\omega C_{b'c} g_{bb'}(g_{bb'} + g_m) + \omega^3 C_{b'c} C_{b'e}(C_{b'c} + C_{b'e})}{g_{bb'}^2 + \omega^2(C_{b'c} + C_{b'e})}}{g_{bb'}^2 + \omega^2(C_{b'c} + C_{b'e})} = (0.089 + j0.68) \times 10^{-3}\text{S}$$

3-5 试证明  $m$  级 ( $\eta = 1$ ) 双调谐放大器的矩形系数为

$$K_{r0.1} = \sqrt[4]{\frac{10^m - 1}{\frac{1}{2^m} - 1}}$$

【解】

对于单级双调谐放大器：

$$\frac{A_v}{A_{v0}} = \frac{2}{\sqrt{4 + \xi^4}}$$

因此， $m$  级双调谐放大器应有：

$$\left(\frac{A_v}{A_{v0}}\right)^m = \left(\frac{2}{\sqrt{4 + \xi^4}}\right)^m = \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\xi}{\sqrt{2}}\right)^4}}\right)^m$$

已知  $\xi = Q_L \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}$  所以  $\frac{\xi}{\sqrt{2}} = Q_L \frac{2\Delta\omega}{\sqrt{2}\omega_0}$

而单级双调谐放大器的通频带为:  $2\Delta f_{0.7} = \sqrt{2} \frac{f_0}{Q_L}$

$$\left(\frac{A_v}{A_{v0}}\right)^m = \left(\frac{2}{\sqrt{4+\xi^4}}\right)^m = \left(\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2\Delta f}{2\Delta f_{0.7}}\right)^4}}\right)^m$$

当  $\left(\frac{A_v}{A_{v0}}\right)^m = \frac{1}{\sqrt{2}}$  时,  $2\Delta f = (2\Delta f_{0.7})_m$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = \left(\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{(2\Delta f_{0.7})_m}{2\Delta f_{0.7}}\right)^4}}\right)^m \rightarrow (2\Delta f_{0.7})_m = \sqrt[4]{2^{\frac{1}{m}}-1} \times (2\Delta f_{0.7});$$

当  $\left(\frac{A_v}{A_{v0}}\right)^m = \frac{1}{10}$  时,  $2\Delta f = (2\Delta f_{0.1})_m$

$$\frac{1}{10} = \left(\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{(2\Delta f_{0.1})_m}{2\Delta f_{0.7}}\right)^4}}\right)^m \rightarrow (2\Delta f_{0.1})_m = \sqrt[4]{10^{\frac{2}{m}}-1} \times (2\Delta f_{0.7});$$

最后得:  $K_{r0.1} = \frac{(2\Delta f_{0.1})_m}{(2\Delta f_{0.7})_m} = \sqrt{\frac{10^{\frac{2}{m}}-1}{2^{\frac{1}{m}}-1}}$

3-6 在图(3-1)中, 晶体三极管的直流工作点是  $V_{CE} = +8V, I_E = 2mA$ ; 工作频  $f_0 = 10.7MHz$ ;

调谐回路采用中频变压器  $L_{1-3} = 4\mu H, Q_0 100$ , 其抽头为  $N_{2-3} = 5$  圈,  $N_{1-3} = 20$  圈  $N_{4-5} = 5$

圈。试计算放大器的下列各值: 电压增益、功率增益、能频带, 回路插入损耗(设放大器

前级匹配  $g_s = g_{ie}$ )。晶体管在  $V_{CE} = 8V, I_E = 2mA$  时参数如下:

$$g_{ie} = 2860\mu S; C_{ie} = 18pF$$

$$g_{oe} = 200\mu S, C_{oe} = 7pF$$

$$|y_{fe}| = 45mS; \varphi_{fe} = -54^\circ$$

$$|y_{re}| = 0.31mS; \varphi_{re} = -88.5^\circ$$

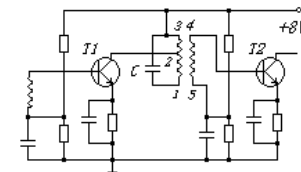


图 (3-1)

【解】

为了计算放大器的增益, 应求出与谐振回路并联的总电导  $G'_p = G_p + g'_{o1} + g'_{i2}$ ,

为此, 首先计算出接入系数  $p_1$  与  $p_2$  有:

$$p_1 = \frac{N_{23}}{N_{13}} = \frac{5}{20} = \frac{1}{4}; p_2 = \frac{N_{45}}{N_{13}} = \frac{1}{4}$$

$$g'_{o1} = p_1^2 g_{eo} = \left(\frac{1}{4}\right)^2 \times (200 \times 10^{-6}) S$$

因而

$$g'_{i2} = p_2^2 g_{ie} = \left(\frac{1}{4}\right)^2 \times (2860 \times 10^{-6}) S$$

谐振回路固有的谐振电导为:

$$G_p = \frac{1}{Q_0 \omega_0 L} = 37 \times 10^{-6} S$$

于是:  $G'_p = G_p + g'_{o1} + g'_{i2} = 228.25 \times 10^{-6} S$

谐振时的电压增益为:

$$A_{vo} = -\frac{p_1 p_2 y_{fe}}{G'_p} = 12.3$$

功率增益为:

$$A_{po} = (A_{vo})^2 = 151.3$$

此时回路的有载 Q 值为:

$$Q_L = \frac{1}{G'_p \omega_0 L} = 16.2$$

因而通频带为:

$$2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q_L} = 0.66 MHz$$

插入损耗为:

$$K1 = \frac{1}{(1 - \frac{Q_L}{Q_s})^2} = \frac{1}{(1 - \frac{16.2}{100})^2} = 1.42$$

3-7 图 (3-2) 表示一单调谐回路中频放大器。已知工作频率  $f_0 = 10.7\text{MHz}$ , 回路电感

$L = 4\mu\text{H}$ ,  $Q_0 = 100$ 。L 的圈数  $N = 20$ ，接入系数  $p_1 = p_2 = 0.3$ 。由晶体管手册查得，其

主要参数为： $f_T \geq 250\text{MHz}$ ,  $r_{bb'} = 70\Omega$ ,  $C_{b'c} \approx 3\text{pF}$ 。静态工作点电流由  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  决定

现  $I_E = 1\text{mA}$ ，对应的  $\beta_0 = 50$ 。图中， $R_1 = 15\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 6.2\text{k}\Omega$ 、 $R_3 = 1.5\text{k}\Omega$ 、

$R_4 = 10\text{k}\Omega$ 、 $R_5 = 100\Omega$ 、 $C_1 = 1000\text{pF}$ 、 $C_3 = 56\text{pF}$ 、 $C_5 = 1000\text{pF}$  求：

- 1) 单级电压增益  $A_{10}$ ；
- 2) 单级通频带  $2\Delta f_{0.7}$ ；
- 3) 四级的总电压增益  $(A'_{v0})_4$ ；
- 4) 四级的部通频带  $(2\Delta f_{0.7})_4$ ；
- 5) 如四级的总通频带  $(2\Delta f_{0.7})_4$  保持和单级的通频带  $2\Delta f_{0.7}$  相同，则单级的通频带应加宽多少？四级的总电压增益下降多少？

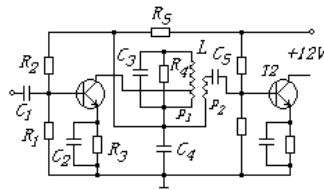


图 (3-2)

【解】

需补充条件：

$$y_{ie} = (0.15 + j1.45)\text{mS}、y_{oe} = (0.082 + j0.73)\text{mS}、y_{fe} = (38 - j4.2)\text{mS}、C_3 = 56\text{pF}$$

①单级电压输出增益输入端的阻抗为  $R_1$ 、 $R_2$  和  $g_{ie}$  的并联：

已知  $g_{ie} = 0.15\text{mS}$ ，因此：

$$g_{ie} = g_{ie} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = 0.378\text{mS}$$

回路谐振电导为：

考虑与回路并联的  $R_5 = 10\text{k}\Omega$ ，晶体管输出电导  $g_{oe}$  折合到回路两端的值

$g_{oe} = p_1^2 g_{oe} = 0.3^2 \times 0.082\text{mS}$  与下一级输入电导折合到回路两端的值

$g_{ie}^* = p_2^2 (g_{ie}) = 0.3^2 \times g_{ie}^* = 0.3^2 \times 0.378\text{mS}$ ，因而回路总电导为：

$$\begin{aligned} G_p^* &= G_p + \frac{1}{R_5} + p_2^2 g_{ie}^* + p_1^2 g_{oe}^* \\ &= [37 \times 10^{-6} + \frac{1}{10 \times 10^3} + 0.3^2 \times 0.378 \times 10^{-3} + 0.3^2 \times 0.082 \times 10^{-3}] \text{S} \\ &= 178 \times 10^{-6} \text{S} \end{aligned}$$

因此，谐振电压增益为：

$$A_{vo} = \frac{p_1 p_2 |y_{fe}|}{G_p^*} = 19.2$$

②单级通频带

回路总电容  $C_\Sigma = C_2 + p_1^2 C_{oe} + p_2^2 C_{ie}$

$$\omega_0 C_{oe} = 0.73\text{mS}, C_{oe} = \frac{0.73 \times 10^{-3}}{2\pi \times 10.7 \times 10^6} \text{F} = 10^{-11} \text{F}$$

$$\omega_0 C_{ie} = 1.45\text{mS}, C_{ie} = \frac{1.45 \times 10^{-3}}{2\pi \times 10.7 \times 10^6} \text{F} = 2.16 \times 10^{-11} \text{F}$$

$$C_\Sigma = 58.8\text{pF}; \therefore Q_L = \frac{\omega_0 C_\Sigma}{G_p^*} = 22.2$$

$$\text{于是: } 2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q_L} = 484 \times 10^3 \text{Hz}$$

③四级总电压增益为：

$$(A_{v0})_4 = (A_{v0})^4 = 135900$$

④四级总的通频带：

$$(2\Delta f_{0.7})^4 = \sqrt{2^{\frac{1}{4}} - 1} \times (2\Delta f_{0.7}) = 209.6\text{kHz}$$

⑤要求使  $(2\Delta f_{0.7})_4 = 482 \times 10^3 \text{Hz}$ ，则单级通道频带应加宽为：

$$\frac{1}{\sqrt{2^{\frac{1}{4}} - 1}} \times 482 \times 10^3 \text{Hz} = 1108\text{kHz}$$

相应的四级总增益下降为：

$$\sqrt{2^{\frac{1}{4}} - 1} \times 135900 = 59113$$

3-8 影响谐振放大器稳定性的因素是什么？反馈导纳的物理意义是什么？

【解】

影响放大器稳定性的主要因素是反馈导纳（反向传输导纳） $y_{re}$ 。它的物理意义是输出信号通过  $y_{re}$  反馈到输入端，从而使放大器工作不稳定，甚至引起振荡。

3-9 一个  $1000\Omega$  电阻在温度  $290K$  和  $10MHz$  频带内工作，试计算它两端产生的噪声电压和噪声电流的均方根值。

【解】

$$\begin{aligned}\bar{v}_n^2 &= 4kT\Delta f_n R \\ &= 4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 290 \times 10 \times 10^6 \times 1000 V^2 \\ &= 160.08 \times 10^{-12} V^2\end{aligned}$$

所以，噪声电压的均方根值为：

$$\sqrt{\bar{v}_n^2} = 12.65 \times 10^{-6} V = 12.65 \mu V$$

3-10 某晶体管的  $r_{bb'} = 70\Omega$ ,  $I_R = 1mA$ ,  $\alpha_0 = 0.95$ ,  $f_a = 500MHz$ ，求在室温  $19^\circ C$ ，通频带为  $200kHz$  时，此晶体管在频率为  $10MHz$  时的各噪声源数值。

【解】

$r_{bb'}$  中产生的热噪声为：

$$\begin{aligned}\bar{v}_{bn}^2 &= 4kT r_{bb'} \Delta f_n = 4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times (273 + 19) \times 70 \times 200 \times 10^3 V^2 \\ &= 0.2256 \times 10^{-12} V^2\end{aligned}$$

发射极的散粒噪声为：

$$\begin{aligned}\bar{i}_{en}^2 &= 2qI_E \Delta f_n \\ &= 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-3} \times 200 \times 10^3 A^2 \\ &= 0.64 \times 10^{-16} A^2\end{aligned}$$

集电极中的分配噪声为：

$$\bar{i}_{cn}^2 = 2qI_C \left(1 - \frac{|\alpha|^2}{\alpha_0}\right) \Delta f_n$$

$$\text{而 } \alpha = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_a}}$$

$$\text{于是 } \alpha^2 = \frac{\alpha_0^2}{1 + \left(\frac{f}{f_a}\right)^2} = \frac{0.95^2}{1 + \left(\frac{10 \times 10^6}{500 \times 10^6}\right)^2} \approx 0.95^2 = \alpha_0^2$$

因此：

$$\begin{aligned}\bar{i}_{cn}^2 &\approx 2qI_C (1 - \alpha_0) \Delta f_n \\ &= 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-3} \times (1 - 0.95) \times 200 \times 10^3 A^2 \\ &= 0.032 \times 10^{-16} A^2\end{aligned}$$

3-11 某接收机的前端电路由高频放大器、晶体混频器和中频放大器组成。已知晶体混频器的功率传输系数  $K_{p0} = 0.2$ ，噪声温度  $T_i = 60K$ ，中频放大器的噪声系数  $T_{ni} = 6dB$ 。现用

噪声系数为  $3dB$  的高频放大器来降低接收机的总噪声系数。如果要使总噪声系数降低到  $10dB$ ，则高频放大器的功率增益至少要几分贝？

【解】

噪声温度  $T_i$  与噪声系数的关系为：

$$T_i = (F_n - 1) T$$

令  $T = 290K$ ，对于混频器，设  $F_n = F_{n2}$ ，则：

$$F_{n2} = \frac{T_i}{T} + 1 = \frac{60}{290} + 1 = 1.21$$

在中放级， $F_{ni} = 6dB = 3.98$

在高放级， $F_{n1} = 3dB = 2$

可得：

$$(F_n)_\Sigma = F_{n1} + \frac{F_{n2} - 1}{A_{pH1}} + \frac{F_{ni} - 1}{A_{pH1} A_{pH2}}$$

已知  $(F_n)_\Sigma = 10dB = 10$ ,  $A_{pH2} = K_{pc} = 0.2$ ,  $F_{n1} = 2$ ,  $F_{n2} = 1.21$ ,  $F_{ni} = 3.98$

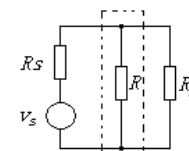
代入上式，有

$$10 = 2 + \frac{1.21 - 1}{A_{pH1}} + \frac{3.98 - 1}{A_{pH1} \times 0.2}$$

解得，所需高频放大器的功率增益为：

$$A_{pH1} = 1.89 \text{ 或 } 2.8dB$$

3-12 如图（3-3）所示，不考虑  $R_L$  的噪声，求虚线内线性网络的噪声系数  $F_n$ 。



图（3-3）

【解】

首先将电压源化为电流源，即：

$$i_s = \frac{v_s}{R_s} = v_s G_s$$

噪声电流的均方值为：

$$\overline{i_{ns}^2} = 4kT\Delta f_n G_s$$

R 内的噪声电流均方值为：

$$\overline{i_{nR}^2} = 4kT\Delta f_n \frac{1}{R} = 4kT\Delta f_n G$$

信号功率为：

$$P_{si} = \frac{i_s^2}{G_s + G + G_L}$$

输入噪声功率为：

$$P_{ni} = \frac{\overline{i_{ns}^2}}{G_s + G + G_L}$$

输出信号功率为：

$$P_{so} = \frac{i_s^2}{G_s + G + G_L}$$

输出噪声功率为：

$$P_{no} = \frac{\overline{i_{ns}^2} + \overline{i_{nR}^2}}{G_s + G + G_L}$$

由噪声系数的定义得：

$$F_n = \frac{P_{si} / P_{ni}}{P_{so} / P_{no}} = \frac{i_s^2 / \overline{i_{ns}^2}}{i_{so} / (\overline{i_{no}^2} + \overline{i_{nR}^2})} = \frac{\overline{i_{ns}^2} + \overline{i_{nR}^2}}{\overline{i_{ns}^2}} = 1 + \frac{G}{G_s} = 1 + \frac{R_s}{R}$$

3-13 当接收机线性级输出端的信号功率对噪声功率的比值超过 40dB 时，则接收机会输出满意的结果。该接收机输入级的噪声系数是 10dB，损耗为 8dB，下一级的噪声系数为 3dB，并具有较高的增益。若输入信号功率对噪声功率的比为  $1 \times 10^6$ ，问这样的接收机构造形式是否满足要求，是否需要一个前置放大器；若前置放大器增益为 10dB，则其噪声系数应为多少？

【解】

在无前置放大器的情况下，线性级总的噪声系数  $F_n$  为：

$$F_n = F_{n1} + \frac{F_{n2} - 1}{A_{p1}}$$

已知  $F_{n1}=10dB$  或  $F_{n1}=10$ ， $F_{n2}=3dB$  或  $F_{n2}=2$ 。

输入级的  $A_{p1}$  为衰减 8dB，即 6.31 倍，故有：

$$F_n = 10 + \frac{2-1}{1/6.31} = 16.31$$

另一方面，根据题意：

$$P_{si} / P_{ni} = 1 \times 10^5$$

$$F_n = \frac{P_{si} / P_{ni}}{P_{so} / P_{no}} = \frac{1 \times 10^5}{P_{so} / P_{no}}$$

$$\text{因此得到：} \frac{P_{so}}{P_{no}} = \frac{1 \times 10^5}{16.31} < 10^4$$

亦即输出信噪比小于 40dB，不满足要求，应加前置放大器。

要使  $\frac{P_{so}}{P_{no}} > 10^4$ ，则线性级总的噪声系数  $F'_n$  应小于 10，即应小于 10dB。加入增

益为  $A'_{p1}$  的前置放大器后，总的噪声系数变为：

$$\begin{aligned} F'_n &= F'_{n1} + \frac{F_{n1} - 1}{A'_{p1}} + \frac{F_{n2} - 1}{A'_{p1} A_p} \\ &= F'_{n1} + \frac{10 - 1}{A'_{p1}} + \frac{2 - 1}{A'_{p1} \times 1/6.31} \end{aligned}$$

设前置放大器的增益  $A'_{p1}=10$ ， $F'_{n1}=10$ ，则得：

$$10 = F'_{n1} + \frac{10 - 1}{10} + \frac{6.31}{10}$$

解得：

$$F'_{n1} = 8.469$$