

第三章 高频小信号放大器

(2学时)

本章重点： 高频小信号谐振放大器的工作
原理及性能指标计算

难 点： 谐振放大器的性能分析

3.1 引言

一、高频放大器的作用与分类

高频放大器的作用：放大高频信号

工作频率范围：（300K-300M）Hz

高频放大器的分类

1、按信号大小分：

高频功率放大器（大信号，通常用于发射机中）

高频小信号放大器（接收机前端的主要部分）

2、按负载分

谐振放大器：LC谐振回路作负载

非谐振放大器：以传输线变压器作负载

二、高频小信号放大器

按元器件分：

1、以分立元件为主的高频小信号调谐放大器（用LC谐振回路作负载）：可分为谐振放大器（频率可调，主要做高频放大级，接收天线后第一级放大器）和中频（频带）放大器（频率固定的中放电路）。

2、以集成电路为主的集中选频放大器：用集中选择性滤波器做负载。

二、高频小信号放大器

按带宽分：

1、**窄频带放大器：**窄带放大器用LC谐振回路或集中选频滤波器做负载，具有放大、选频的功能。其中心频率在（几百-几百M）Hz范围内，频带宽度约（几~几十M）Hz。

2、**宽带放大器：**用纯阻或变压器做负载，带宽较宽，越（几M~几百M）Hz。

三、对高频小信号放大器的要求

- 噪声越小越好
- 增益要高，即放大量要大，但是为了防止非线性失真，增益又不宜过大，且放大器在工作频段内应该是稳定的。
- 放大器一般通过传输线直接和天线或天线滤波器相连，放大器的输入端必须和它们有很好的匹配，以达到功率最大传输。
- 应具有一定的选频功能，抑制带外和镜像频率干扰。

三、高频小信号调谐放大器的主要质量指标

1、增益

(1) 电压放大倍数 $A_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$

或 电压增益 $20 \lg A_v = 20 \lg \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} \text{ dB}$

(2) 功率放大倍数 $A_p = \frac{P_o}{P_i}$

或 功率增益 $10 \lg A_p = 10 \lg \frac{P_o}{P_i} \text{ dB}$

对高频小信号放大器的要求是在中心频率 f_0 处及带宽内，有足够大的电压增益 A_v ，而在其它频率处增益减小。如图3.1.1所示。

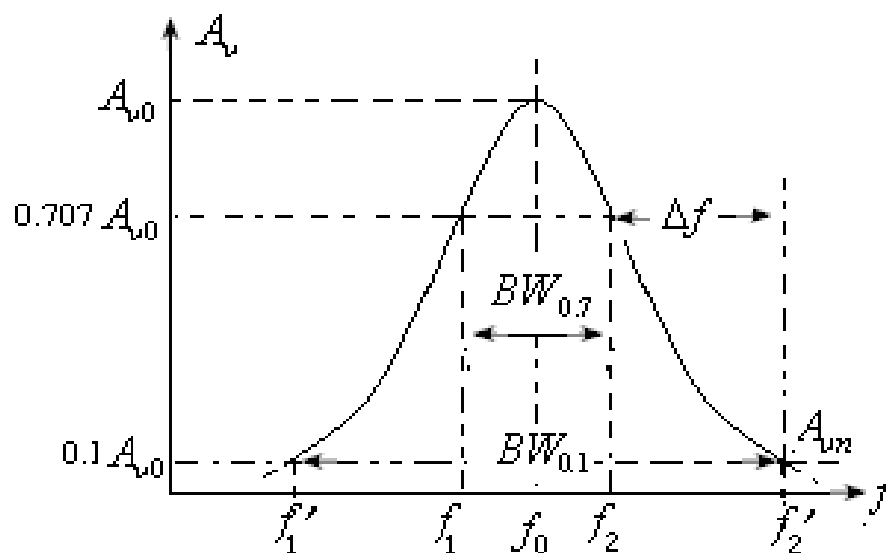


图3.1.1 调谐放大器电压增益的频率特性曲线

2. 通频带 $BW_{0.7}$

通频带也称为3dB带宽：指放大电路的电压增益比中心频率 f_0 处的增益下降3dB时的上、下限频率之间的频带，用 $BW_{0.7}$ 表示，如图3.1.1所示。

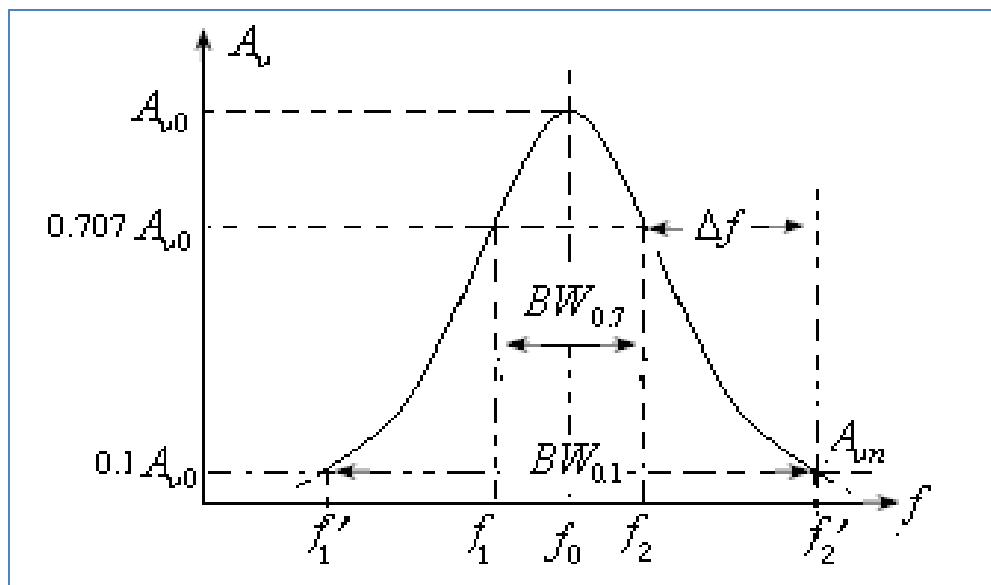


图3.1.1 调谐放大器电压增益的频率特性曲线

$$BW_{0.7} = f_2 - f_1 = 2\Delta f_{0.7}$$

$BW_{0.7}$ 决定于负载回路 Q 值及形式；且随级数的增加带宽越来越窄。同时用途不同，要求的带宽 $BW_{0.7}$ 也各不相同。如

中波广播（AM）： $BW_{0.7} = 9 \text{ kHz}$

超短波广播（FM）： $BW_{0.7} = 75 \text{ KHz}$

电视信号： $BW_{0.7} = 8 \text{ MHz}$

3、选择性

表示放大电路从各种干扰信号中选择有用信号，抑制干扰信号的能力，等于在中心频率 f_0 上的电压放大倍数 A_{v0} 与偏离 f_0 为 Δf 处的放大倍数 A_{vn} 的比值，即

$$S = \frac{A_{v0}}{A_{vn}}$$

显然，S值越大
表明电路的选择
性越好。

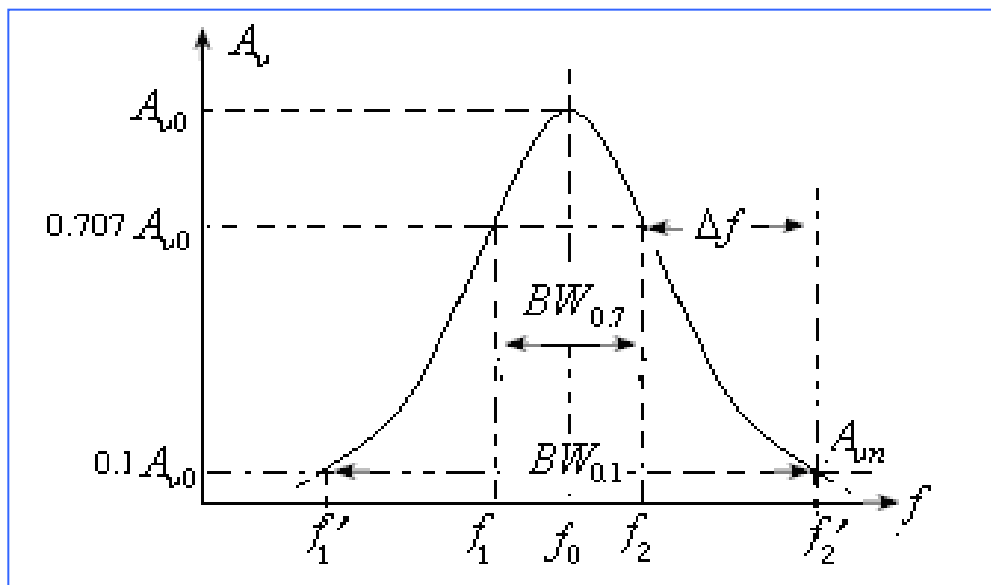


图3. 1. 1 调谐放大器电压增益的频率特性曲线

实际中，也可用矩形系数来衡量放大器的频率特性与理想矩形的接近程度。

$$\text{矩形系数定义为 } K_{r0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}}$$

式中 $BW_{0.1}$ 为放大电路增益下降到最大值的0.1时的失谐（偏离 f_0 ）宽度。如图3.1.1所示。

理想情况下，选频特性应为矩形（带通滤波器），即

$$K_{r0.1} = 1$$

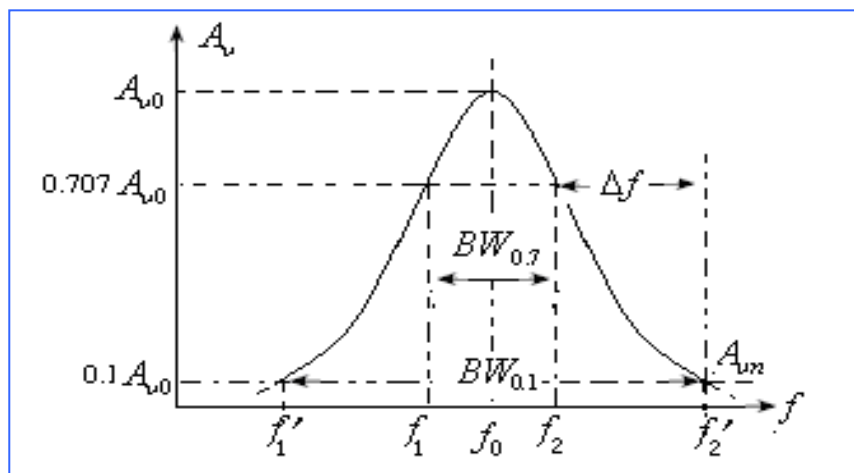


图3.1.1 调谐放大器电压增益的频率特性曲线

4. 工作稳定性

指放大器的工作状态、晶体管参数、电路元件参数等发生可能变化时，其主要质量指标的稳定程度。放大器的不稳定现象表现为增益 A_{v0} 的变化，中心频率 f_0 的偏移，通频带 $BW_{0.7}$ 变窄，谐振曲线变形等，极限状态是放大器产生自激。

稳定措施：限制每级的增益、选择内反馈小的晶体管、应用中和或失配法、采取必要的工艺措施等。

5. 噪声系数

表征信号经放大后，信噪比变坏的程度。噪声系数的定义是放大器的输入信噪比（输入端的信号功率与噪声功率之比）与输出信噪比之比，即

$$N_F = \frac{p_{si}/p_{ni}}{p_{so}/p_{no}}$$

N_F 通常是大于1的， N_F 越接近于1，放大器的输出噪声越小。

放大器中产生噪声的原因有放大器本身产生的噪声。在多级级联的放大器中，前一、二级放大器的噪声对整个放大器的噪声起决定作用。为了减少放大器的内部噪声，在设计与制作时应当采用低噪声管，正确的选择工作点电流，选用合适的电路等。

3.2 高频小信号调谐放大器

高频小信号调谐放大器的电路组成：

晶体管+LC谐振回路

3.2.1 晶体管高频等效电路

一是物理模拟（混合 π ）等效电路

另一是形式等效电路（ Y 参数等效电路）

一、混合 π 型等效电路

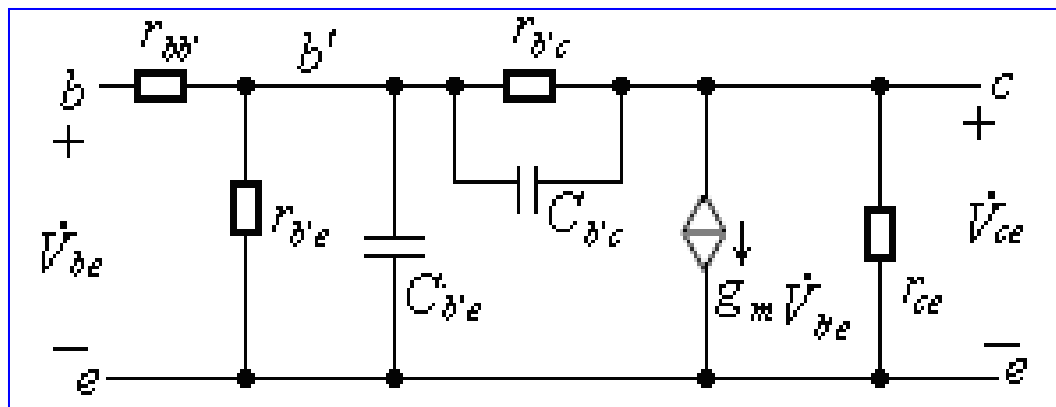


图3.2.1 晶体管高频共发射极混合 π 型等效电路

各主要参数有关的公式如下：

$$\left\{ \begin{array}{l} g_m \approx \frac{1}{r_e} \\ r_{b'e} = (1 + \beta_o) r_e \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} r_e = \frac{V_T}{I_{EQ}} \approx \frac{26(mV)}{I_{EQ}(mA)} \\ C_{b'e} + C_{b'c} = \frac{1}{2\pi f_T r_e} \end{array}$$

- $r_{bb'}$ 基区体电阻，约15~50 Ω ;
- $r_{b'e}$ 发射结电阻 r_e 折算到基极回路的等效电阻，
约几十 Ω ~几千 Ω ;
- $r_{b'c}$ 集电结电阻，约10k Ω ~10M Ω ;
- r_{ce} 集电极—发射极电阻，几十k Ω 以上;
- $C_{b'e}$ 发射结电容，约10pF~几百pF;
- $C_{b'c}$ 集电结电容，约几pF;
- g_m 晶体管跨导，几十mS以下。

另外，常用的晶体管高频共基极等效电路如图3.2.2中图（a）所示，图（b）是简化等效电路。

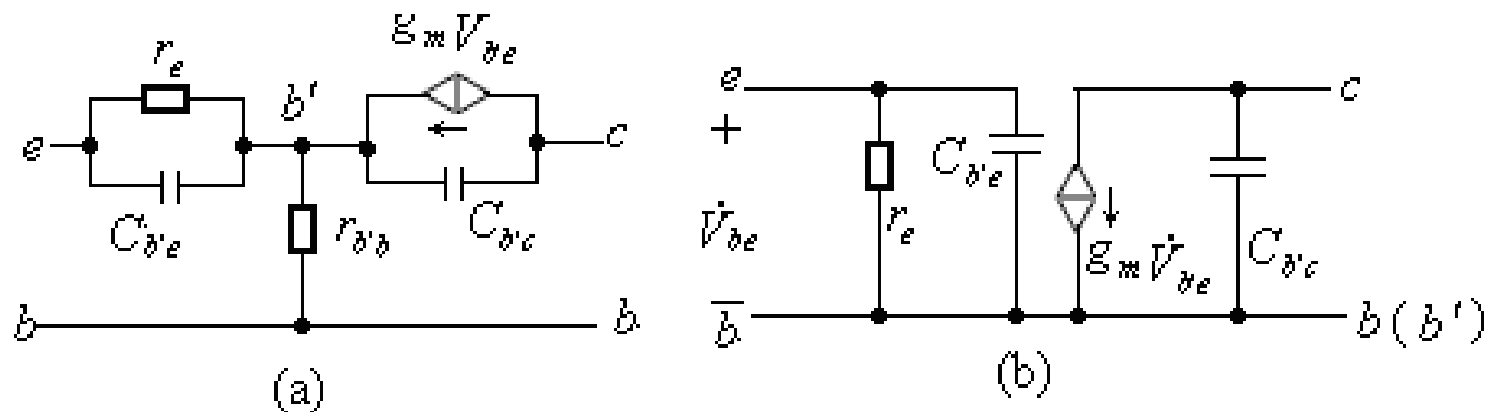


图3.2.2 晶体管高频共基极等效电路及其简化电路

二、Y 参数等效电路

双口网络即具有两个端口的网络，如图3.2.3所示。

Y参数方程是选取各端口的电压为自变量，电流为因变量，其方程如下

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = y_{11}\dot{V}_1 + y_{12}\dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 = y_{21}\dot{V}_1 + y_{22}\dot{V}_2 \end{cases}$$

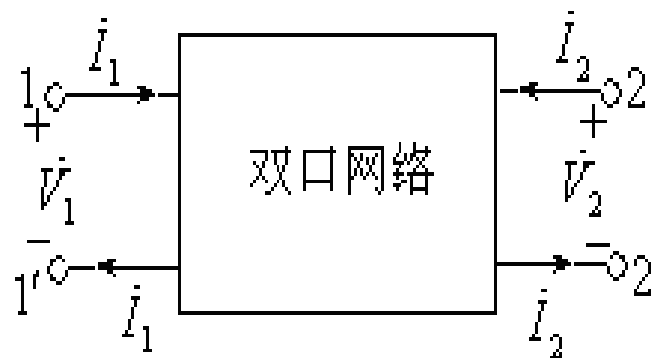


图3.2.3 双口网络

其中 y_{11} 、 y_{12} 、 y_{21} 、 y_{22} 四个参量均具有导纳量纲，即

$$\begin{cases} y_{11} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_1} \right|_{\dot{V}_2=0} (S) & y_{21} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_1} \right|_{\dot{V}_2=0} (S) \\ y_{12} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_2} \right|_{\dot{V}_1=0} (S) & y_{22} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_2} \right|_{\dot{V}_1=0} (S) \end{cases}$$

所以 Y 参数又称为短路导纳参数，即确定这四个参数时必须使某一个端口电压为零，也就是使该端口交流短路。

如共发射极接法的晶体管，如图3.2.4所示，相应的 Y 参数方程为

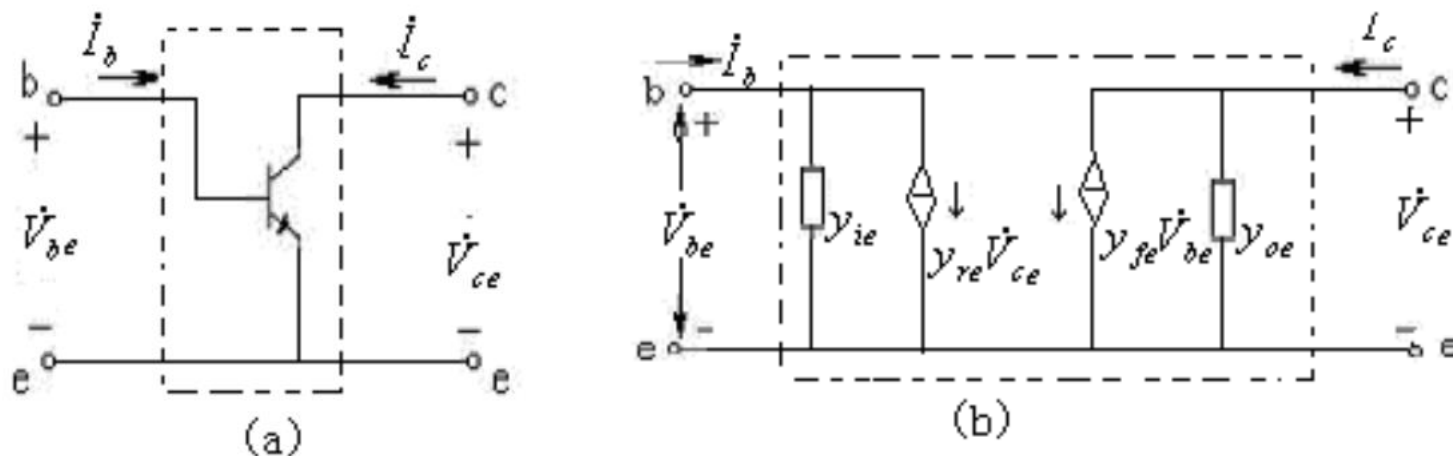


图3.2.4 共发射极接法的晶体管 Y 参数等效电路

$$\begin{cases} \dot{I}_b = y_{ie} \dot{V}_{be} + y_{re} \dot{V}_{ce} \\ \dot{I}_c = y_{fe} \dot{V}_{be} + y_{oe} \dot{V}_{ce} \end{cases}$$

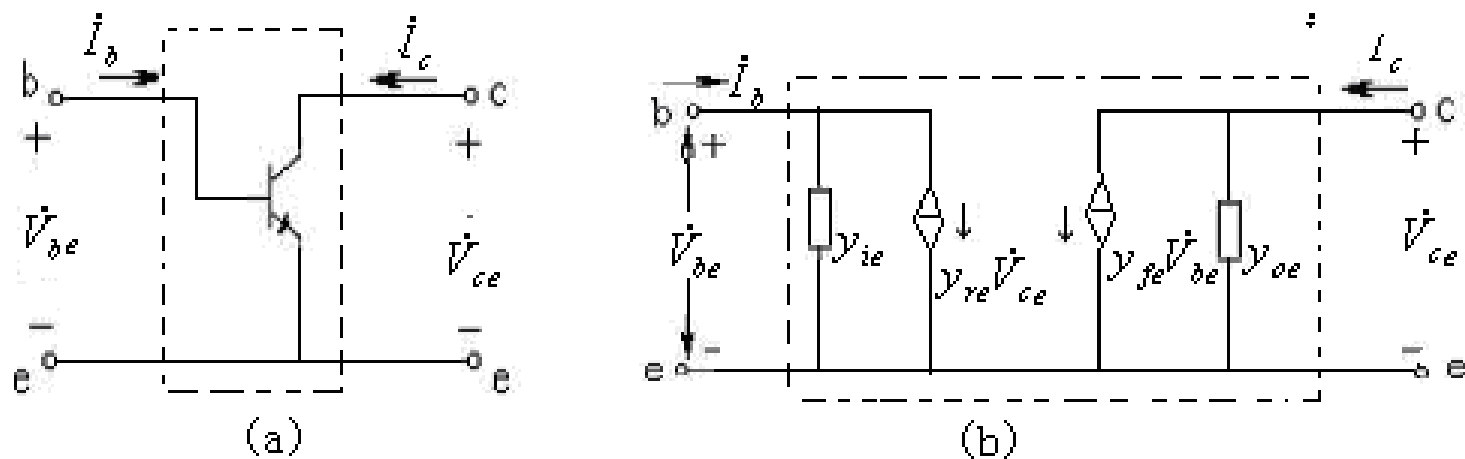


图3.2.4 共发射极接法的晶体管Y参数等效电路

其中

$$\begin{cases} y_{ie} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{V}_{be}} \right|_{\dot{V}_{ce}=0} & y_{fe} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{V}_{be}} \right|_{\dot{V}_{ce}=0} \\ y_{re} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{V}_{ce}} \right|_{\dot{V}_{be}=0} & y_{oe} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{V}_{ce}} \right|_{\dot{V}_{be}=0} \end{cases}$$

式中, y_{ie} 、 y_{re} 、 y_{fe} 、 y_{oe} 分别称为输入导纳、反向传输导纳、正向传输导纳和输出导纳。

三、Y 参数与混合 π 参数的关系

由混合 π 等效电路与 Y 参数的定义即可求出 Y 参数如下式（请自行推导得出下式, 推导过程中考虑到晶体管反偏集电结的电阻 $r_{b'c}$ 很大, 近似认为无穷, 同时考虑 $C_{b'e} \gg C_{b'c}$ ）

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{ie} = \frac{g_{b'e} + j\omega C_{b'e}}{1 + r_{b'b}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} = g_{ie} + j\omega C_{ie} \\ y_{oe} = g_{ce} + j\omega C_{b'c} + \frac{j\omega C_{b'e} r_{b'b} g_m}{1 + r_{b'b}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} = g_{oe} + j\omega C_{oe} \\ y_{re} = \frac{-j\omega C_{b'c}}{1 + r_{b'b}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} = |y_{re}| e^{j\varphi_{re}} \\ y_{fe} = \frac{g_m}{1 + r_{b'b}(g_{b'e} + j\omega C_{b'e})} = |y_{fe}| e^{j\varphi_{fe}} \end{array} \right.$$

显然，在高频工作时，由于晶体管的结电容不可忽略，Y参数是一个复数。晶体管Y参数中输入导纳和输出导纳通常可写成用电导和电容表示的直角坐标形式，而正向传输导纳和反向传输导纳通常可写成极坐标形式，即

$$y_{ie} = g_{ie} + j\omega C_{ie} \quad y_{re} = |y_{re}| \angle \phi_{re}$$

$$y_{fe} = |y_{fe}| \angle \phi_{fe} \quad y_{oe} = g_{oe} + j\omega C_{oe}$$

3.2.2 单调谐回路谐振放大器

一、电路组成及工作原理

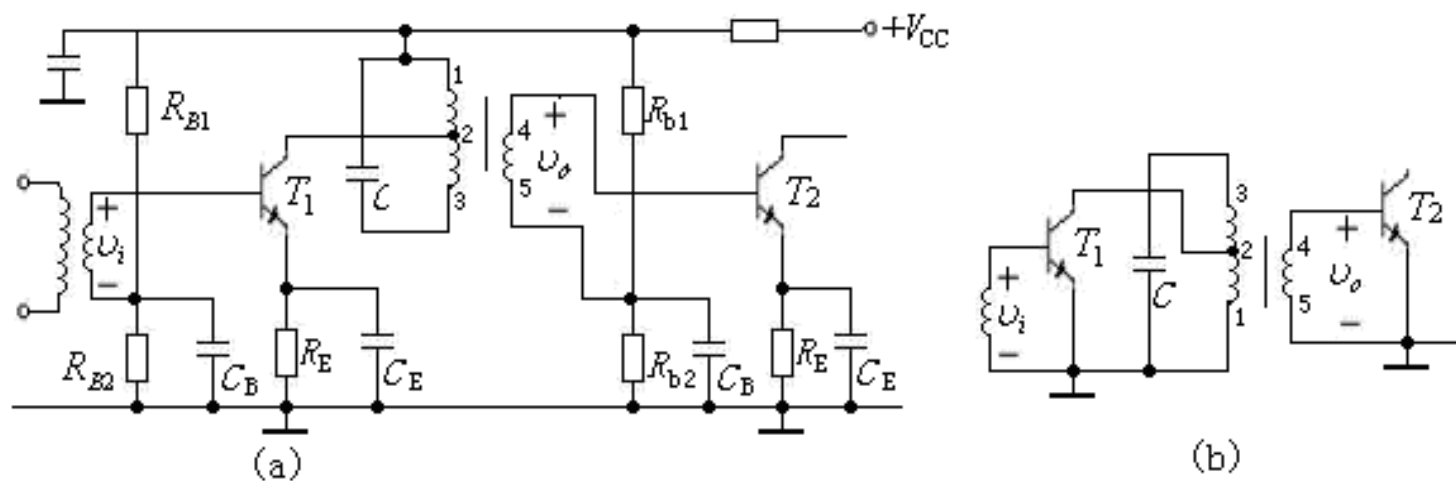


图3.2.5 高频调谐放大器的典型线路
(a) 原理电路 (b) 交流通路

R_{B1} R_{B2} R_E 构成晶体管的分压式电流反馈直流偏置电路，以保证晶体管工作在甲类状态。

旁路电容 C_B 、 C_E 对高频旁路，电容值比低频放大器中小得多。

LC谐振回路作为晶体管放大器的负载，为放大器提供选频回路。振荡回路采用抽头连接，可以实现阻抗匹配。

二、电路性能分析

1、放大器的小信号等效电路及其简化

图中设 $y_{re} \approx 0$

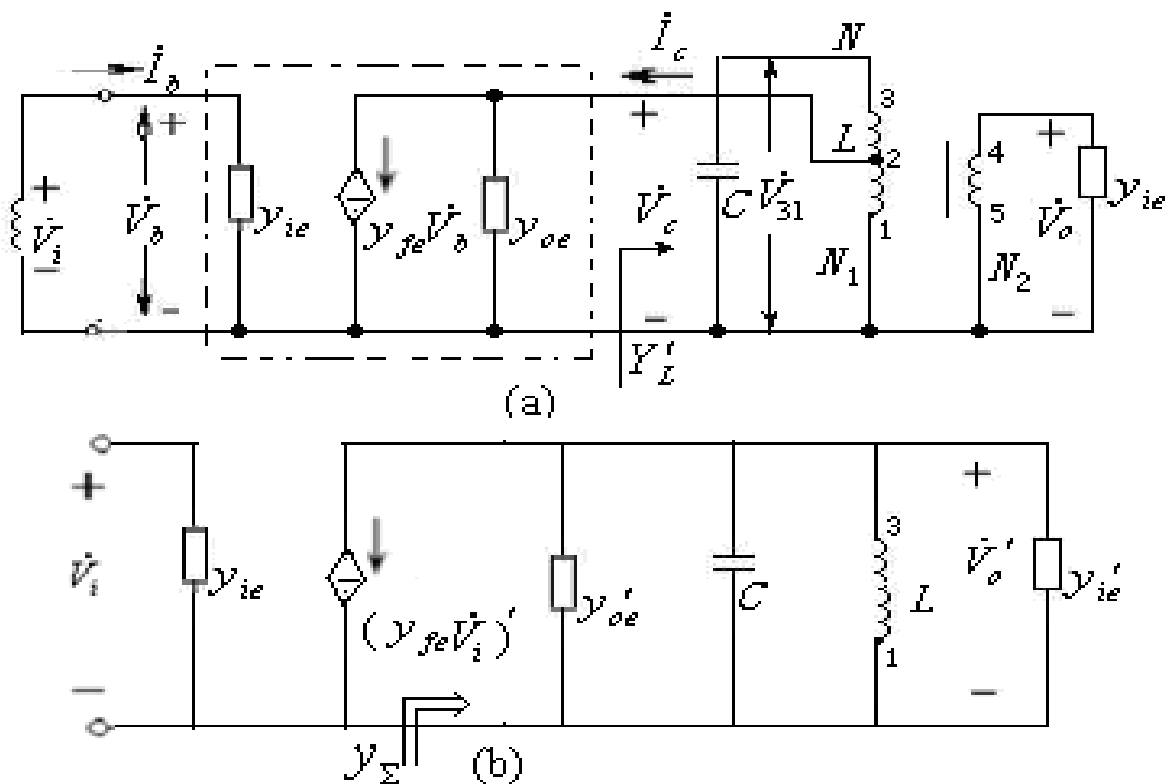


图3.2.6 单管放大器的小信号
(a) 小信号等效电路 (b) 简化电路

$$(y_{fe} \dot{V}_i)' = n_1 y_{fe} \dot{V}_i$$

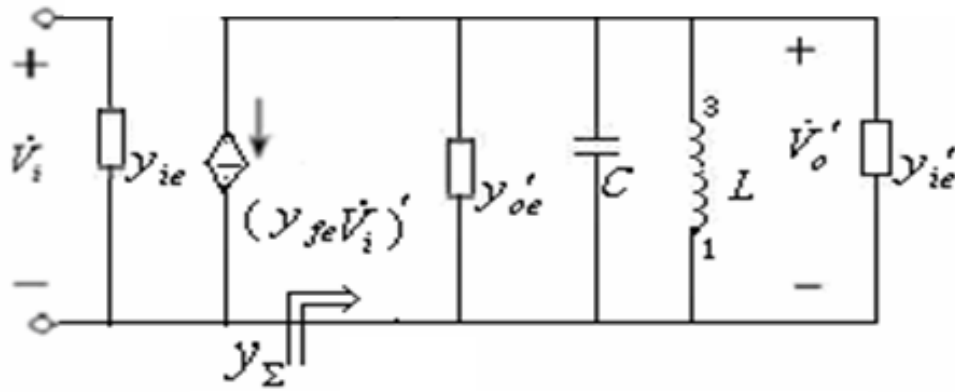
$$y'_{ie} = n_2^2 y_{ie}$$

$$y'_{oe} = n_1^2 y_{oe}$$

$$\dot{V}'_o = \frac{1}{n_2} \dot{V}_o$$

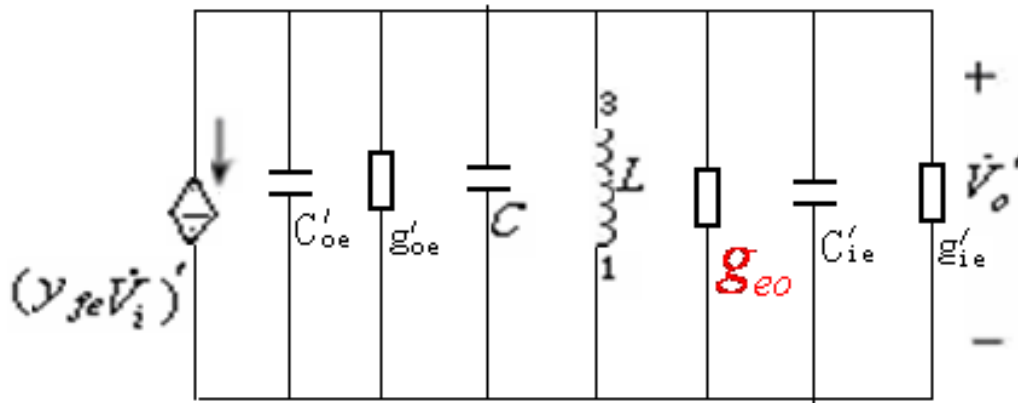
$$n_1 = \frac{N_{21}}{N_{31}}$$

$$n_2 = \frac{N_{45}}{N_{31}}$$



$$Q_e = \frac{\omega_0 C_{\Sigma}}{g_{\Sigma}} = \frac{1}{g_{\Sigma} \omega_0 L}$$

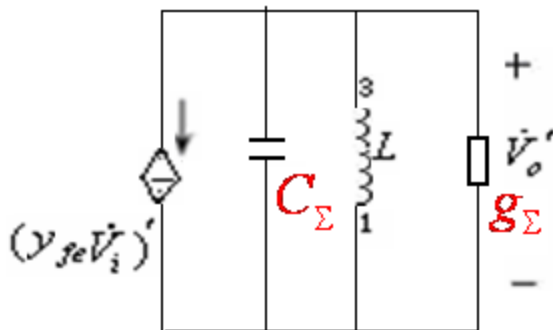
$$g_{\Sigma} = n_1^2 g_{oe} + n_2^2 g_{ie} + g_{eo}$$



$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC_{\Sigma}}}$$

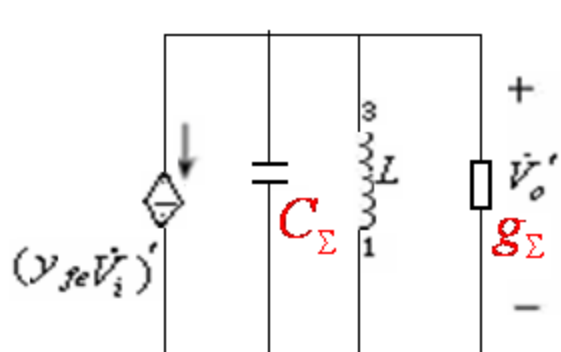
$$g_{eo} = \frac{1}{R_{e0}} = \frac{1}{Q_0} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

$$= \frac{\omega_0 C_{\Sigma}}{Q_0} = \frac{1}{Q_0 \omega_0 L}$$



$$C_{\Sigma} = n_1^2 C_{oe} // n_2^2 C_{ie} // C$$

$$= n_1^2 C_{oe} + n_2^2 C_{ie} + C$$



$$y_{\Sigma} = g_{\Sigma} + j(\omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L})$$

$$\dot{V}_o = n_2 \dot{V}_o' = -n_2 n_1 y_{fe} \dot{V}_i / y_{\Sigma}$$

2、电路性能分析

(1) 电压放大倍数（增益）

$$\dot{A}_v = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i} = \frac{-n_1 n_2 y_{fe}}{g_{\Sigma} + j(\omega C_{\Sigma} - \frac{1}{\omega L})} \approx -\frac{n_1 n_2 y_{fe}}{g_{\Sigma}(1 + jQ_e \frac{2\Delta f}{f_0})}$$

谐振电压放大倍数（增益）

$$\dot{A}_{v0} = \frac{\dot{V}_{o0}}{\dot{V}_i} = -\frac{n_1 n_2 y_{fe}}{g_\Sigma}$$

谐振电压放大倍数（增益）的振幅值

$$A_{vo} = \frac{V_{o0}}{V_i} = \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{g_\Sigma}$$

(2) 放大器的频率特性

$$N(jf) = \frac{\dot{A}_v}{\dot{A}_{v0}} = \frac{1}{1 + jQ_e \frac{2\Delta f}{f_0}}$$

其中幅频特性表达式为

$$N(f) = \frac{A_v}{A_{v0}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\Delta f Q_e}{f_0}\right)^2}}$$

放大器的频率特性曲线
如图示。

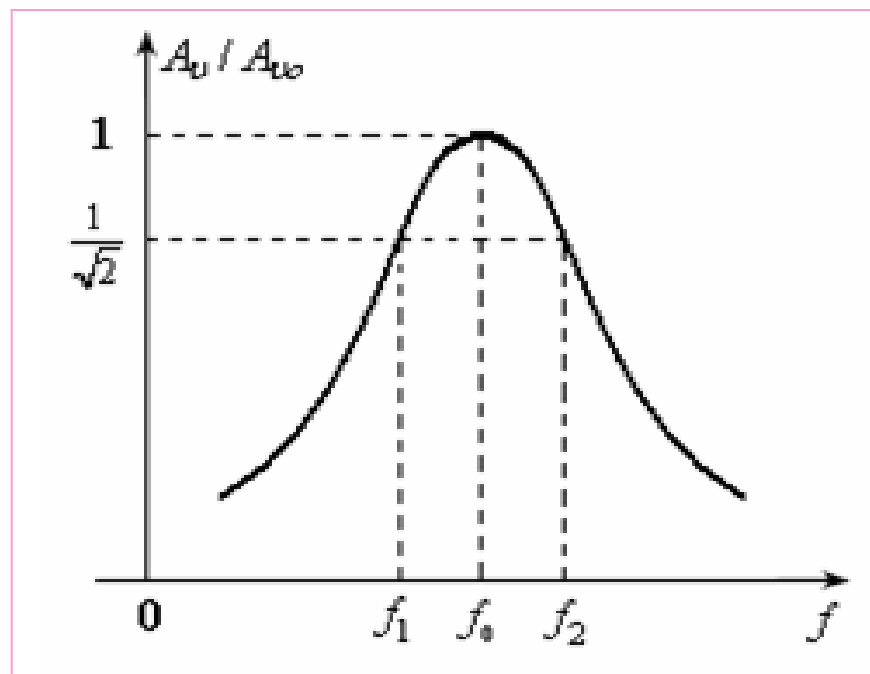


图2.2.7 放大器的谐振曲线

(3) 放大器的通频带

令 $N(f) = \frac{1}{\sqrt{2}}$ ，得到放大器的通频带为

$$BW_{0.7} = f_1 - f_2 = f_0 / Q_e$$

Q_e 越高，放大器的通频带越窄，反之越宽。

(4) 放大器的增益带宽积

$$\text{将 } Q_e = \frac{\omega_0 C_\Sigma}{g_\Sigma} = \frac{1}{g_\Sigma \omega_0 L}$$

$$\text{代入 } \dot{A}_{v0} = \frac{\dot{V}_{o0}}{\dot{V}_i} = -\frac{n_1 n_2 y_{fe}}{g_\Sigma}$$

得到放大器的增益带宽积为： $A_{v0} \cdot BW_{0.7} = \frac{n_1 n_2 y_{fe}}{2\pi C_{\Sigma}}$

- 当晶体管选定、电路元件参数确定后，放大器的增益带宽积为一个常量，通频带越宽，则增益越小。
- 因此，要想既得到较高的增益，有保证足够宽的通频带，除了选用 $|y_{fe}|$ 较大的晶体管外，还应该尽量减少谐振回路的总电容 C_{Σ} ，但也不能很小。因为，总电容是由电路的固有电容和外加电容组成，而固有电容不稳定，容易引起谐振曲线不稳定，使通频带改变，包括晶体管的输出电容、下级晶体管的输入电容、电感线圈的分布电容和安装电容等。为了减小不稳定电容的影响，希望增大外加电容 C ，从而增大总的电容 C_{Σ} ，因此， C_{Σ} 的取值要折中考虑。

(5) 矩形系数 $K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} = \sqrt{10^2 - 1} \approx 9.95$

小结

1、放大倍数 $\dot{A}_{v0} = -\frac{n_1 n_2 y_{fe}}{g_\Sigma}$ 中负号 (-) 的

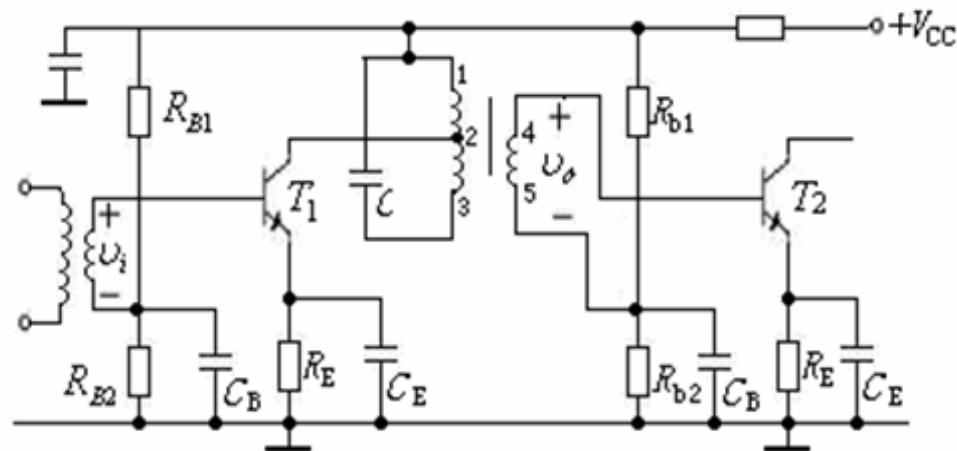
意义？输出电压 \dot{V}_o 和输入电压 \dot{V}_i 之间的相位差是？

2、电压增益振幅与晶体管参数、负载电导、回路谐振电导和接入系数的关系如何？为了增大电压增益，应如何选择上述参数？

3、由增益带宽积 $A_{v0} \cdot BW_{0.7} = \frac{n_1 n_2 y_{fe}}{2\pi C_\Sigma}$ 试说明：

晶体管选定以后 (y_{fe} 值已经确定)，接入系数不变时，放大器的谐振电压增益 A_{v0} 与那些因素有关？

例3.2.1 在图3.2.5中,
已知工作频率 $f_0=30\text{MHz}$,
 $V_{CC}=6\text{V}$, $I_{EQ}=2\text{mA}$ 。晶体管采用3DG47型NPN高频管, 其Y参数在上述工作条件和工作频率处的数值如下:



$$g_{ie} = 1.2\text{mS} \quad , \quad C_{ie} = 12\text{pF} \quad ; \quad g_{oe} = 400\mu\text{S} \quad , \quad C_{oe} = 95\text{pF} \quad ;$$

$$|y_{fe}| = 58.3\text{mS} \quad , \quad \varphi_{fe} = -22^\circ \quad ; \quad |y_{re}| = 310\mu\text{S} \quad , \quad \varphi_{re} = -88.8^\circ \quad ;$$

回路电感 $L = 14\mu\text{H}$, 接入系数 $n_1 = 1$, $n_2 = 0.3$, 回路空载品质因数 $Q_0 = 100$, 负载是另一级相同的放大器。求放大器的谐振电压增益 A_{v0} 、通频带 $BW_{0.7}$, 且回路电容 C 取多少时, 回路谐振?

解：暂不考虑 y_{re} 的作用（ $y_{re} = 0$ ）。

根据已知条件可得

$$R_{e0} = Q_0 \omega_0 L = 100 \times 2\pi \times 30 \times 10^6 \times 1.4 \times 10^{-6} \approx 26(\text{k}\Omega)$$

$$g_{e0} = \frac{1}{R_{e0}} = \frac{1}{26} \times 10^{-3} = 3.84 \times 10^{-5}(\text{S})$$

$$\begin{aligned} \text{回路总电导 } g_{\Sigma} &= g_{e0} + n_1^2 g_{oe} + n_2^2 g_{ie} \\ &= 0.0384 \times 10^{-3} + 0.4 \times 10^{-3} + 0.3^2 \times 1.2 \times 10^2 \\ &= 0.55 \times 10^{-3}(\text{S}) \end{aligned}$$

$$\text{电压增益为 } A_{v0} = \frac{n_2 n_2 |y_{fe}|}{g_{\Sigma}} = \frac{1 \times 0.3 \times 58.3}{0.55} \approx 32$$

回路总电容

$$C_{\Sigma} = \frac{25330}{f_0^2 L} = \frac{25330}{30^2 \times 1.4} \approx 20(\text{pF})$$

故外加电容C

$$C = C_{\Sigma} - n_1^2 C_{oe} - n_2^2 C_{ie} = 20 - 9.5 - 0.3^2 \times 12 \approx 9.4(\text{pF})$$

通频带

$$BW_{0.7} = \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{2\pi C_{\Sigma} A_{v0}} = \frac{0.3 \times 58.3 \times 10^{-3}}{2\pi \times 20 \times 10^{-12} \times 32} \approx 4.35(\text{MHz})$$

3.2.3 多级单调谐回路谐振放大器（自学）

如果多级放大器的每一级都调谐在同一频率上，则称为多级单调谐回路谐振放大器。

自学提示：

多级级联后放大器的总放大倍数将如何变化？

通频带将如何变化？变化的倍数是多少？

矩形系数又将如何变化？倍数是多少？

3.2.4 双调谐回路调谐放大器

双调谐回路谐振放大器具有频带较宽、选择性较好的优点。

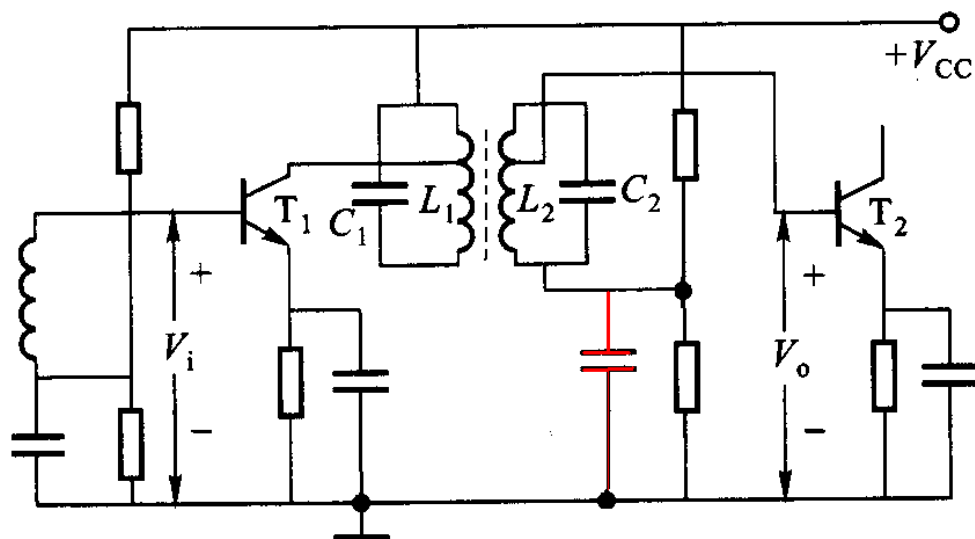
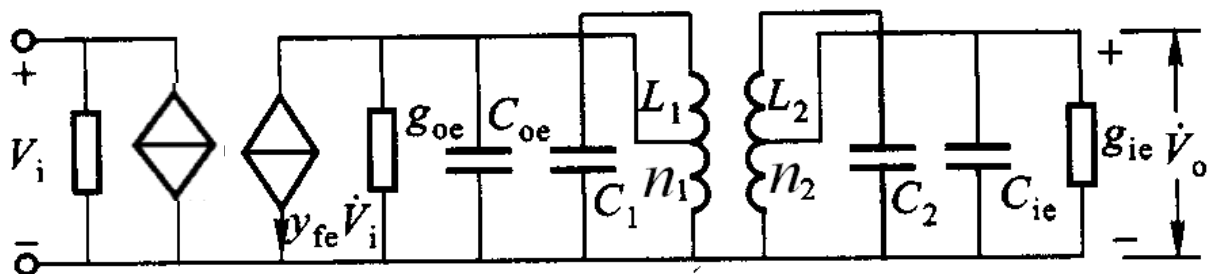


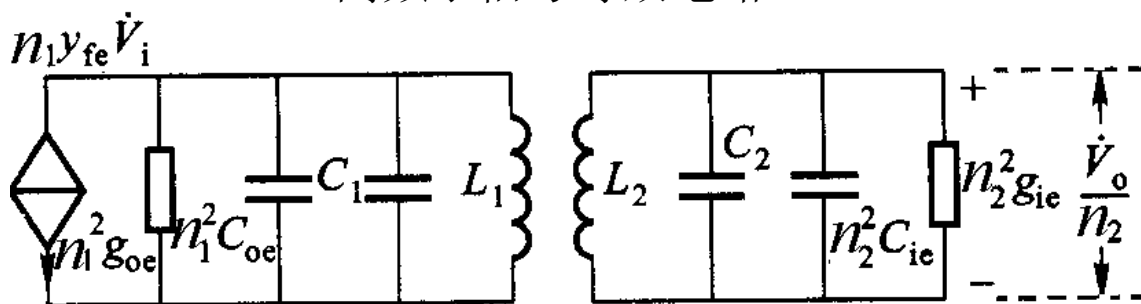
图3.2.7 (a)

互感耦合并联型回路

在实际应用中，通常初、次级回路都调谐到同一中心频率 f_0 上。



高频小信号等效电路



简化电路

为了分析方便，设两个回路元件参数都相同，即： $L_1 = L_2 = L$

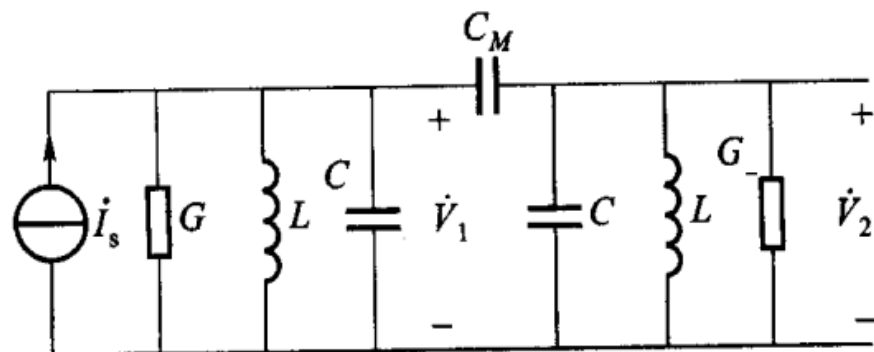
$$C_1 + n_1^2 C_{oe} = C_2 + n_2^2 C_{ie} = C$$

$$n_1^2 g_{oe} = n_2^2 g_{ie} = g$$

$$Q_{e1} = Q_{e2} = Q_e = \frac{1}{g \omega_0 L} = \frac{\omega_0 C}{g}$$

$$\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

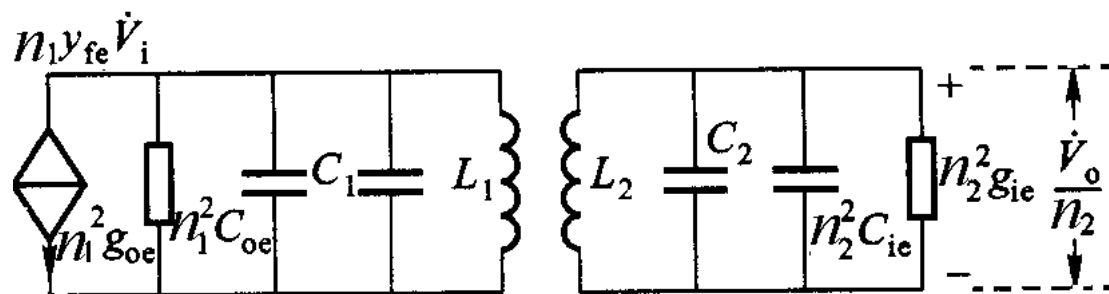
$$V_2 = \frac{I_s \eta}{G \sqrt{(1 - \xi^2 + \eta^2)^2 + 4\xi^2}}$$



式中 $\eta = \frac{\omega C_M}{G}$ 称为回路的耦合因数。

电容耦合谐振回路

电容耦合谐振回路中的规律同样适用于互感耦合谐振回路



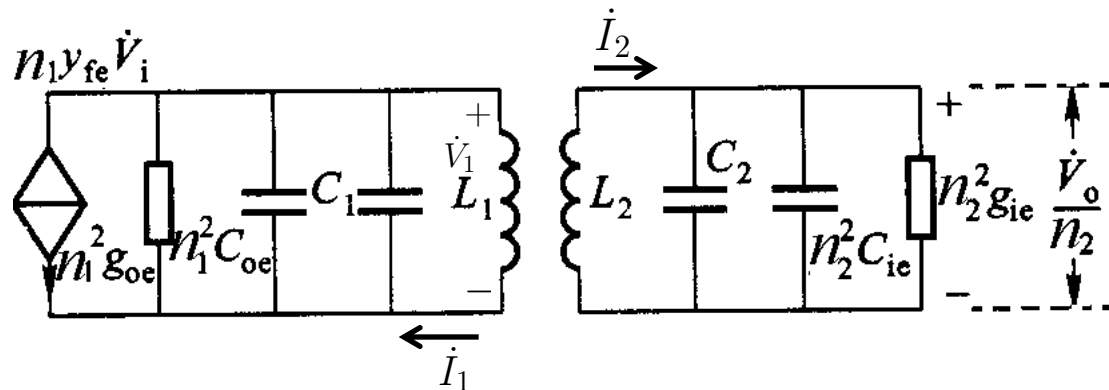
互感耦合谐振回路

$$\frac{V_o}{n_2} = \frac{n_1 |y_{fe}| V_i \eta}{g \sqrt{(1 - \xi^2 + \eta^2)^2 + 4\xi^2}}$$

其中 $\eta = \frac{M}{g\omega L^2} = \frac{\omega CM}{gL} \approx Q_e k$

为耦合因数

分析过程:



初级回路: $[n_1^2 g_{oe} + j\omega(n_1^2 C_{oe} + C_1)] \dot{V}_1 + \dot{I}_1 = -n_1 y_{fe} \dot{V}_i$

化简为: $(g + j\omega C) \dot{V}_1 + \dot{I}_1 = -n_1 y_{fe} \dot{V}_i$ (a)

另一公式: $\dot{I}_1 j\omega L - \dot{I}_2 j\omega M = \dot{V}_1$ (b)

次级回路: $[n_2^2 g_{ie} + j\omega(n_2^2 C_{ie} + C_2)] \frac{\dot{V}_o}{n_2} = \dot{I}_2$

化简为: $(g + j\omega C) \dot{V}_o = n_2 \dot{I}_2$ (c)

另一公式: $\dot{I}_1 j\omega M - \dot{I}_2 j\omega L = \frac{\dot{V}_o}{n_2}$ (d)

耦合系数: $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M}{L}$

品质因数: $Q_e = \frac{1}{g\omega_0 L} = \frac{\omega_0 C}{g}$

广义失谐:

$$\xi = Q_e \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) = \frac{1}{g} \left(\omega C - \frac{1}{\omega L} \right)$$

耦合因数:

$$\eta = \frac{M}{g\omega L^2} = \frac{\omega C M}{gL} \approx Q_e k$$

联立方程(a), (b), (c), (d), 考虑相关

近似可以得到输出电压的模值为:

$$V_o = \frac{n_1 n_2 |y_{fe}| V_i \eta}{g \sqrt{(1 - \xi^2 + \eta^2)^2 + 4\xi^2}}$$

由简化电路可以得到放大器的电压增益的表达式为

$$A_v = \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{g} \frac{\eta}{\sqrt{(1 - \xi^2 + \eta^2)^2 + 4\xi^2}}$$

双调谐回路放大器的电压增益与晶体管的正向传输导纳 $|y_{fe}|$ 成正比，与回路的电导 g 成反比。

在谐振时， $\xi = 0$ 谐振电压增益

$$A_{v0} = \frac{\eta}{1 + \eta^2} \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{g}$$

频率特性曲线

- 1) 弱耦合 $\eta < 1$ ，谐振曲线为单峰，且峰值出现在 f_0 ($\xi = 0$) 处。

$$A_{v0} = \frac{\eta}{1 + \eta^2} \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{g}$$

随着 η 的增加, A_{v0} 的值增加。

- 2) 临界耦合 $\eta = 1$ ，谐振曲线较平坦，仍为单峰, A_{v0} 在 f_0 ($\xi = 0$) 处出现最大峰值。

$$A_{v0} = \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{2g}$$

- 3) 强耦合 $\eta > 1$ ，谐振曲线出现双峰，两个峰点位置在 $\xi = \pm\sqrt{\eta^2 - 1}$

峰值处的增益为 $A_{v0} = \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{2g}$

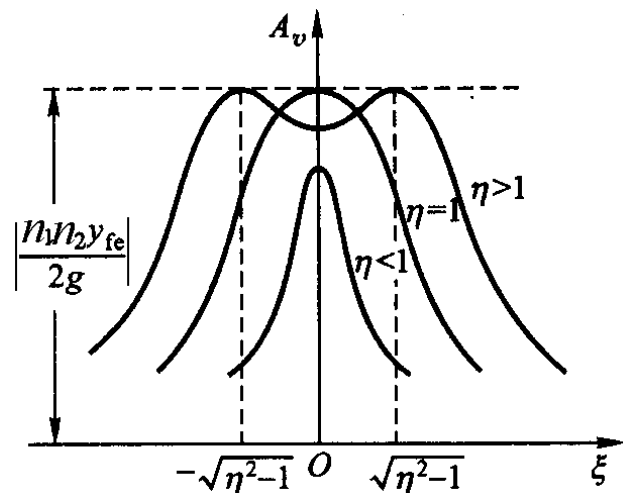


图3.2.8 双调谐回路谐振放大器的谐振特性曲线

归一化的频率特性曲线 $\frac{A_v}{A_{v0}}$ 与双调谐回路相同，所以具有与双调谐回路相同的选频滤波特性。

临界耦合时的通频带为

$$BW_{0.7} = \sqrt{2} \frac{f_0}{Q_e}$$

矩形系数为

$$K_{r0.1} = \sqrt[4]{100-1} \approx 3.16$$

因此，双调谐回路谐振放大器的矩形系数远比单调谐回路谐振放大器的小，它的谐振曲线更接近于矩形。

3.2.4 参差调谐放大器（自学）

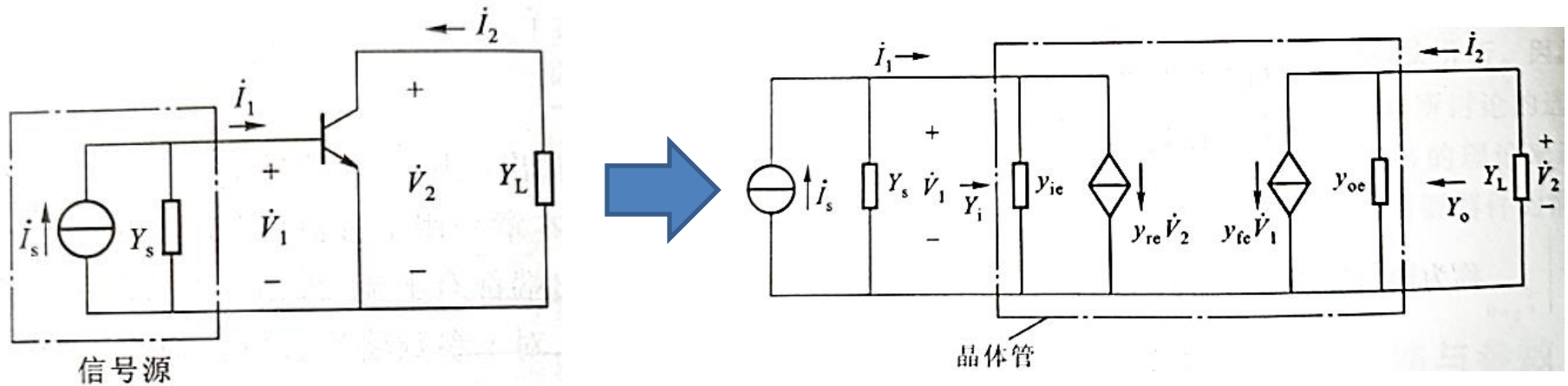
自学提示：

参差调谐放大器的放大倍数如何？

通频带将如何变化？

矩形系数又将如何变化？

3.3 谐振放大器的稳定性



$$\dot{I}_1 = y_{ie}\dot{V}_1 + y_{re}\dot{V}_2$$

$$\dot{I}_2 = y_{fe}\dot{V}_1 + y_{oe}\dot{V}_2$$

$$\dot{I}_2 = -Y_L\dot{V}_2$$

- 各y参数的第一个脚标i、o、r、f分别表示：
输入input、输出output、反向reverse、正向forward;
- 各y参数第二个脚标e表示这是共发射级电路的参数；若为共基级或共集电极电路，则第二个脚标即用b或c。

基于上页三个式子，可以得到 $\dot{I}_1 = \left(y_{ie} - \frac{y_{re}y_{fe}}{y_{oe} + Y_L} \right) \dot{V}_1$

因此输入导纳为 $Y_i = \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_1} = y_{ie} - \frac{y_{re}y_{fe}}{y_{oe} + Y_L}$

上式说明，输入导纳 Y_i 与负载导纳 Y_L 有关。

基于上页三个式子，可以得到 $\dot{I}_2 = \left(y_{oe} - \frac{y_{re}y_{fe}}{y_{ie} + Y_s} \right) \dot{V}_2$

因此输出导纳为 $Y_o = \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_2} = y_{oe} - \frac{y_{re}y_{fe}}{y_{ie} + Y_s}$

上式说明，输出导纳 Y_o 与信号源导纳 Y_s 有关。

晶体管内部存在 y_{re} 的反馈，所以它是一个双向元件，带来的不利影响为：

1、放大器调试困难：晶体管的集电极和基级之间存在结电容 $C_{b'c}$ ，使得 $y_{re} \neq 0$ ，从而形成内部反馈，而且随着工作频率的升高，这种反馈越来越强，导致输入和输出导纳之间互相影响，调整输入回路时影响输出导纳，调整输出回路时，影响输入导纳，电路的调整工作反复多次。

2、放大器不稳定：部分频率成分的信号如果满足了正反馈的条件，则一直放大，直到稳定，形成自激振荡。或者对某些频率反馈较强，某些频率反馈较弱，导致放大器的频率特性对不同频率成分的放大效果不一致，导致频率特性受到影响，通频带和选择性有所改变。

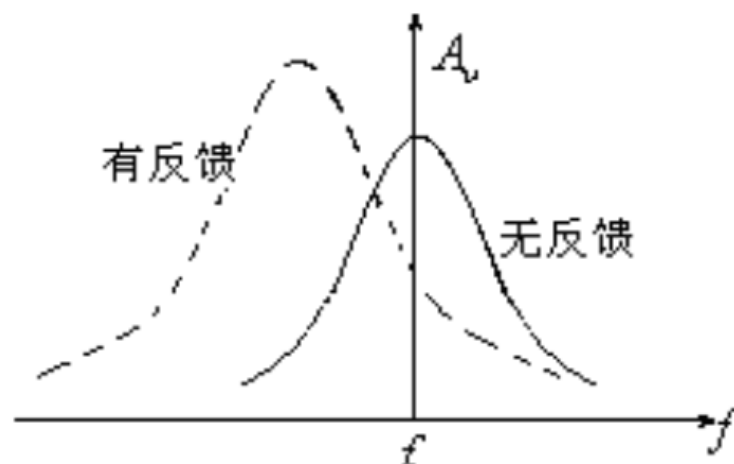


图2.3.1 晶体管内部负反馈对频率特性的影响

解决办法:

- 1、从晶体管本身想办法，因为 y_{re} 主要由 $C_{b'c}$ 决定，从晶体管的制造工艺着手，减小 $C_{b'c}$ ，达到减小反向传输导纳 y_{re} 的目的。
- 2、在电路上想办法把 y_{re} 的作用抵消或者减小。从电路上设法消除晶体管的发反向传输作用，使它变为单向器件。单向化的方法有两种：中和法和失配法。

中和法:

这种方法是在放大器的线路中插入一个外加的反馈电路来抵消 $C_{b'c}$ 内部反馈的影响，称为中和。这相当于减小了晶体管的 y_{re} ，放大器可以稳定地工作。

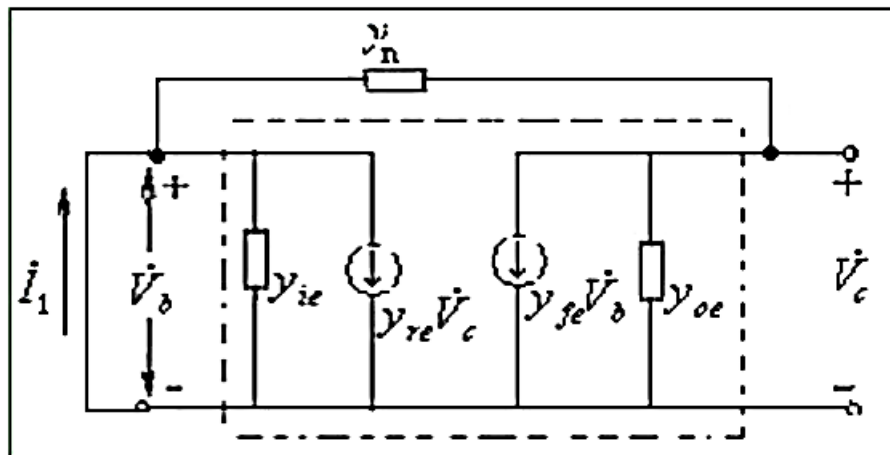


图2.3.2 中和原理

完全中和时，等效反向传输导纳等于零，即 $y_{ren} = 0$

内部反馈全部抵消，有图2.3.2知

$$y_{ren} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_c} \right|_{\dot{V}_b=0} = y_{re} - y_n$$

这时有: $y_n = y_{re}$

必须指出: y_{re} 与频率有关, 为了在所有频率下使 $y_{ren} = 0$, 必须使 y_n 与 y_{re} 的频率特性相同, 才能实现放大电路的单向化, 使输出完全不受输入的影响。但是, 要使 y_n 与 y_{re} 一样是不可能的, 实际电路中只能在一个频率点起到中和作用。

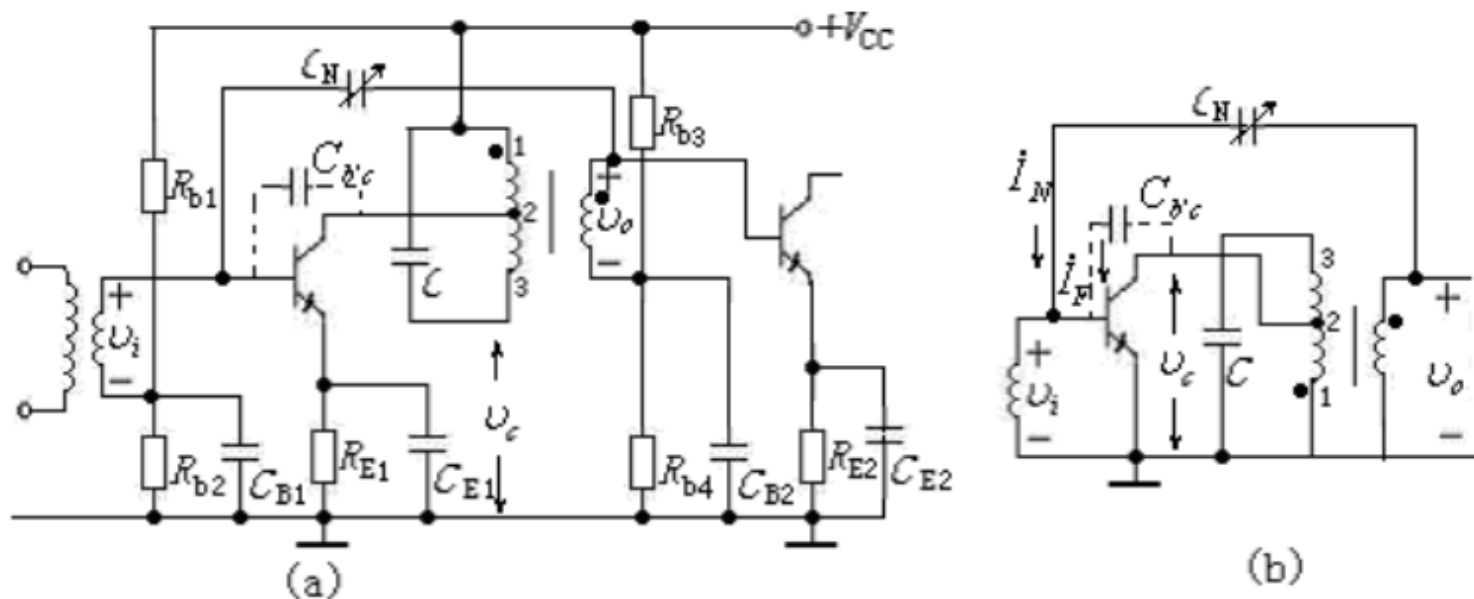


图2.3.3 放大器中的中和电路

失配法:

- 失配是指信号源内阻不与晶体管的输入阻抗匹配、晶体管输出端的负载阻抗不与本级晶体管的输出阻抗匹配。

- 如果负载导纳 Y_L 比晶体管的输出导纳 y_{oe} 大得多, 即 $y_{oe} \ll Y_L$, 则

有 $Y_i = y_{ie} - \frac{y_{re}y_{fe}}{y_{oe} + Y_L} \approx y_{ie}$, 消除了由于 y_{re} 的反馈作用导致的输出信号对输入信号的影响。

- 适配法实现晶体管
单向化最常用的办法是
采用共射—共基级联电路
组成的调谐放大器,
其稳定性较高,
得到了广泛的应用。

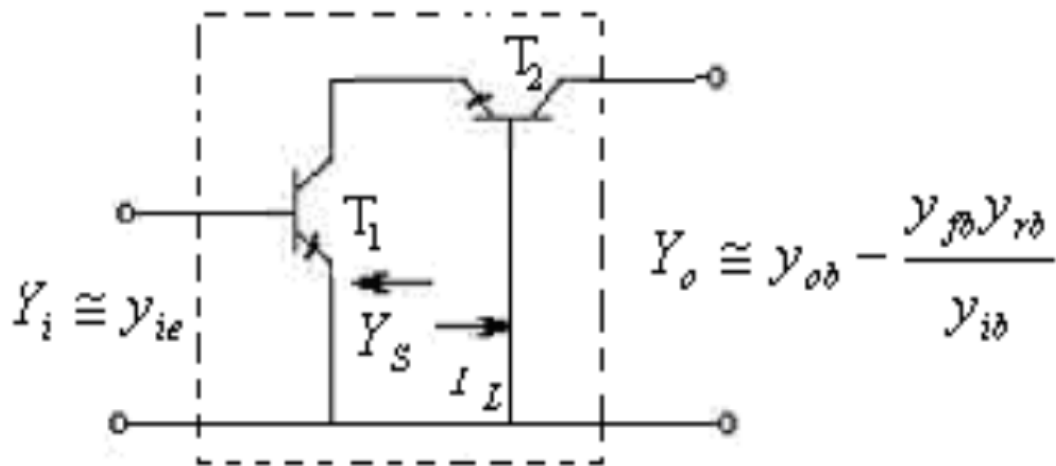


图2.3.4 共发射极—共基极级联的复合管

失配法的原理：

- 1、晶体管按照共基极连接时，输入导纳较大，它与输出导纳较小的共发射极连接时，相当于增大了共射极电路的负载导纳，而使之失配，从而减少了共射极电路的内部反馈，使复合管的输入导纳 $Y_i \approx y_{ie}$ ，提高了电路的稳定性。
- 2、按照共发射极连接的第一级晶体管 VT_1 的输出导纳较小，对于第二个晶体管 VT_2 来说，前级的输出导纳就是等效信号源的电导或导纳 Y_s ，由于 Y_s 小， VT_2 的输出导纳 Y_o 就只于本身的参数有关，而不受输入电路的影响。
- 3、这样就大大减少了输入和输出回路之间的牵扯作用，实际应用时，就可以把它作为单向器件了。共射极电路在负载导纳很大的情况下，电压增益小，但是电流增益仍然较大，而共基极电路的电压增益较大，总体上看复合管的电流增益和电压增益仍较大。

作业: 3. 11 3. 12 3. 13 3. 15

预习: 4. 1 4. 2