



第三章 高频小信号放大器

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）

又可分为：

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）

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）。



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, 约 (几M~几百M) Hz。



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。

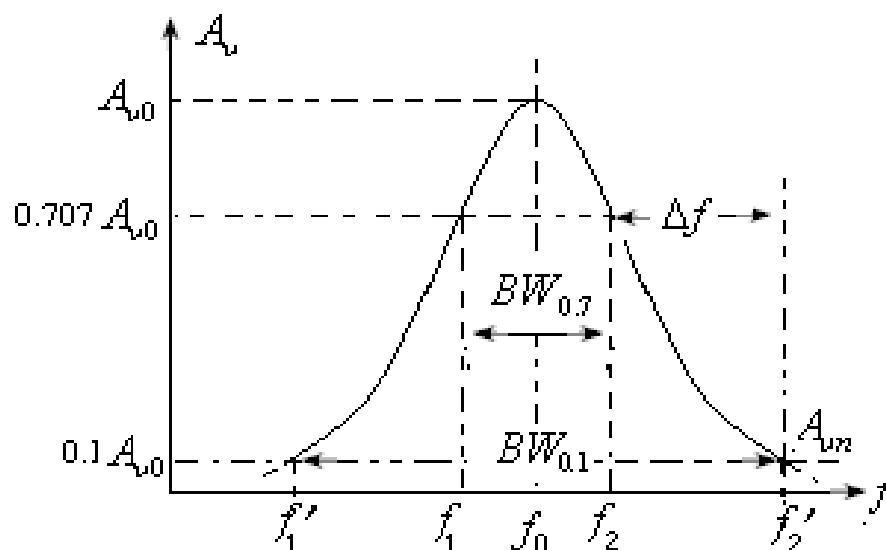
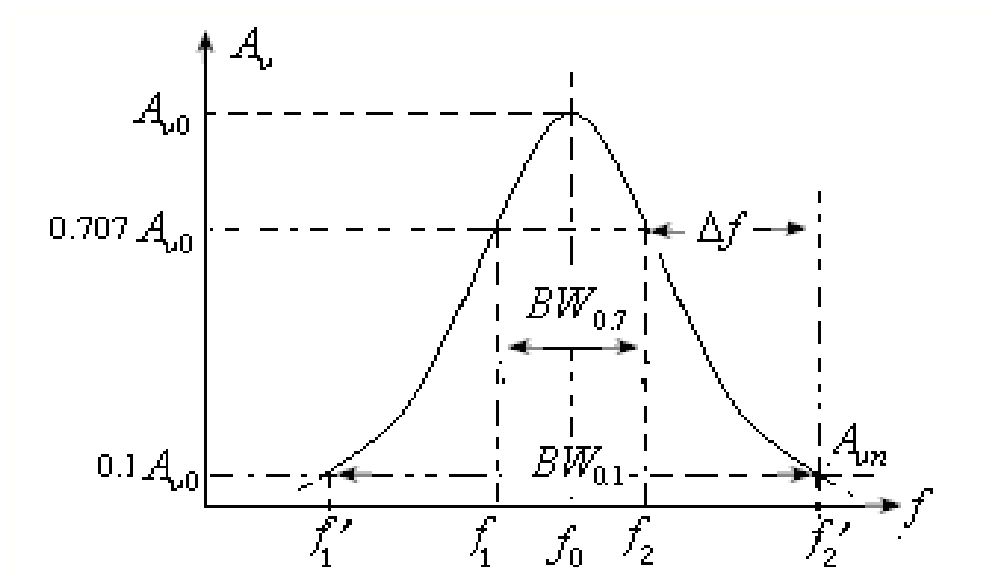


图3.1.1 调谐放大器电压增益的频率特性曲线



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。



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

图3.1.1 调谐放大器电压增益的频率特性曲线



$BW_{0.7}$ 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： $BW_{0.7} = (6 \sim 8) \text{ kHz}$

电视信号： $BW_{0.7} = 6 \text{ MHz}$



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。

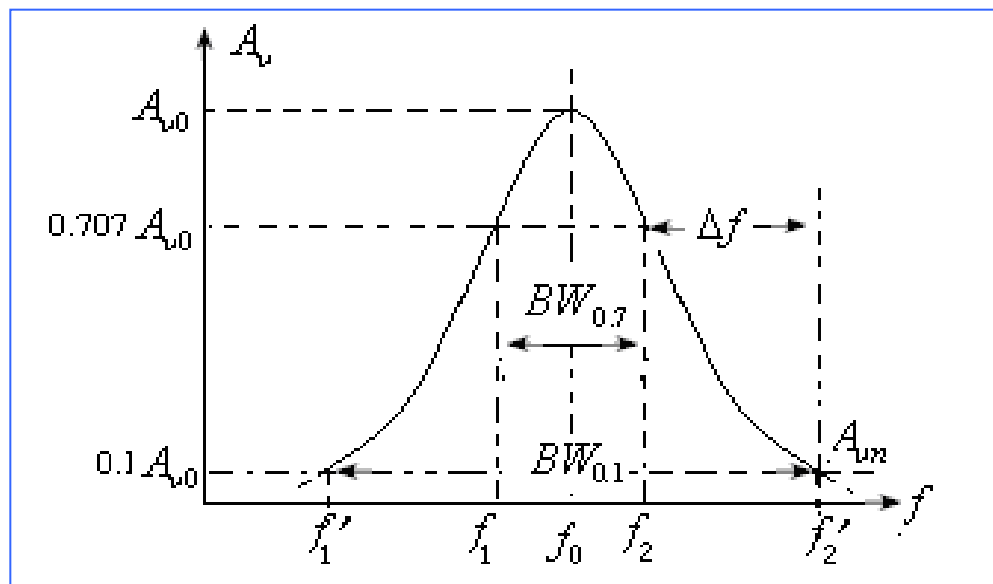


图3.1.1 调谐放大器电压增益的频率特性曲线



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。

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

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

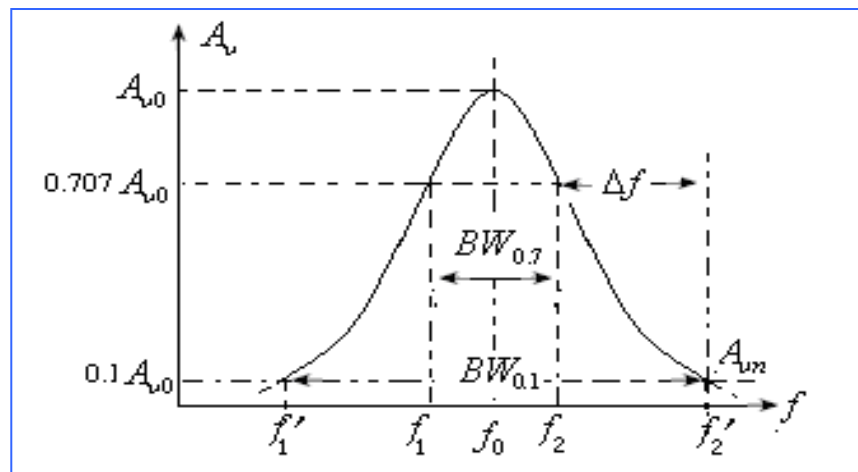


图3.1.1 调谐放大器电压增益的频率特性曲线



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，其极限状态是放大器产生自激。



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^和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

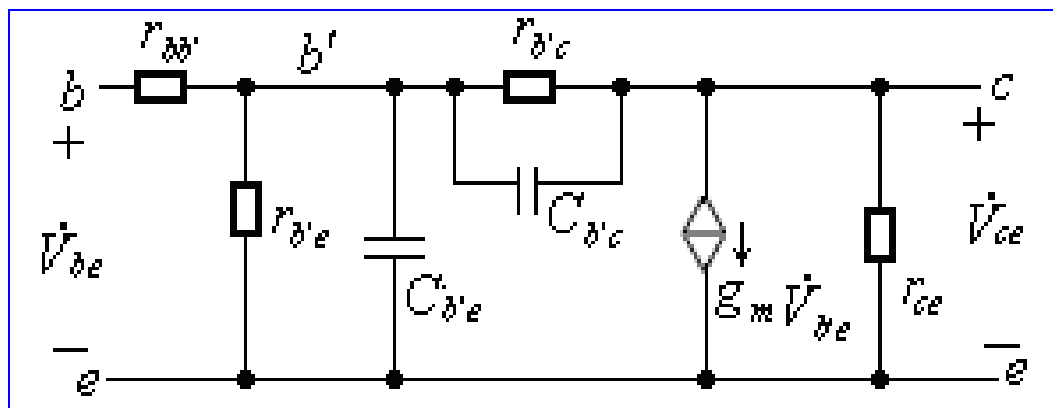


图3.2.1 晶体管高频共发射极混合 π 型等效电路

各主要参数有关的公式如下：

$$\begin{cases} g_m \approx \frac{1}{r_e} & r_e = \frac{V_T}{I_{EQ}} \approx \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})} \\ r_{b'e} = (1 + \beta_o) r_e & C_{b'e} + C_{b'c} = \frac{1}{2\pi f_T r_e} \end{cases}$$



- $r_{bb'}$ 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

图 (a) 所示，图 (b)是简化等效电路。

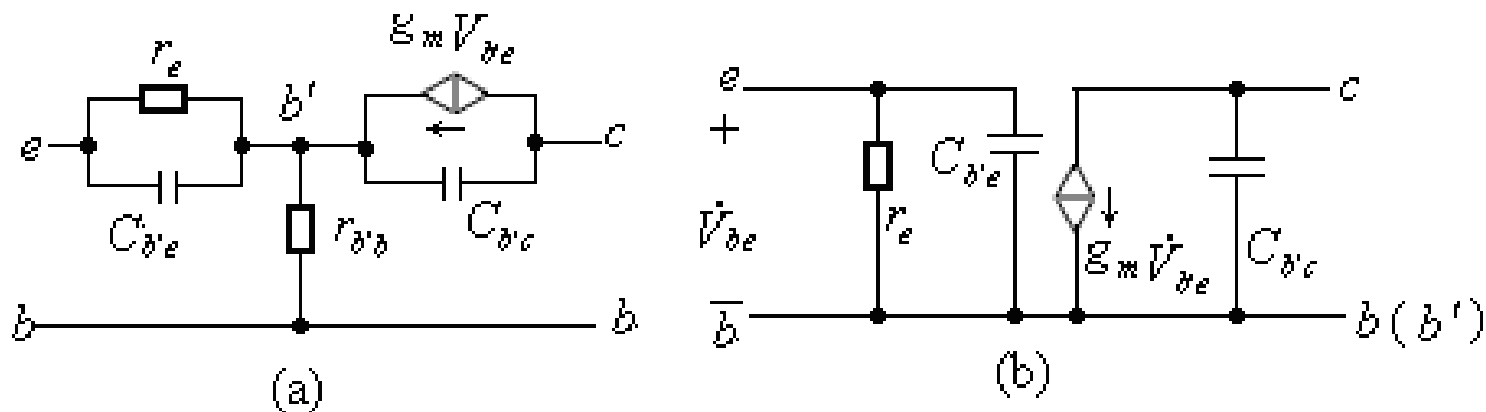


图3.2.2 晶体管高频共基极等效电路及其简化电路



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，电流为应变量，其方程如下

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

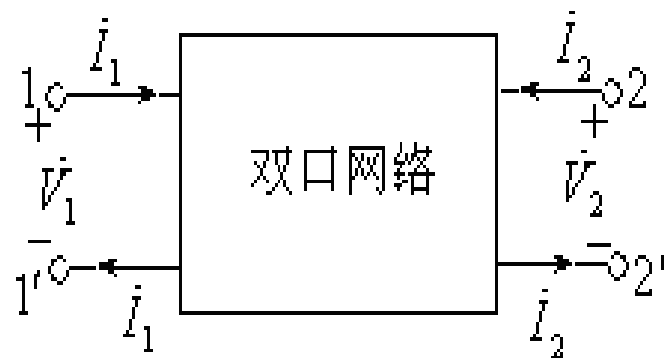


图3.2.3 双口网络



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

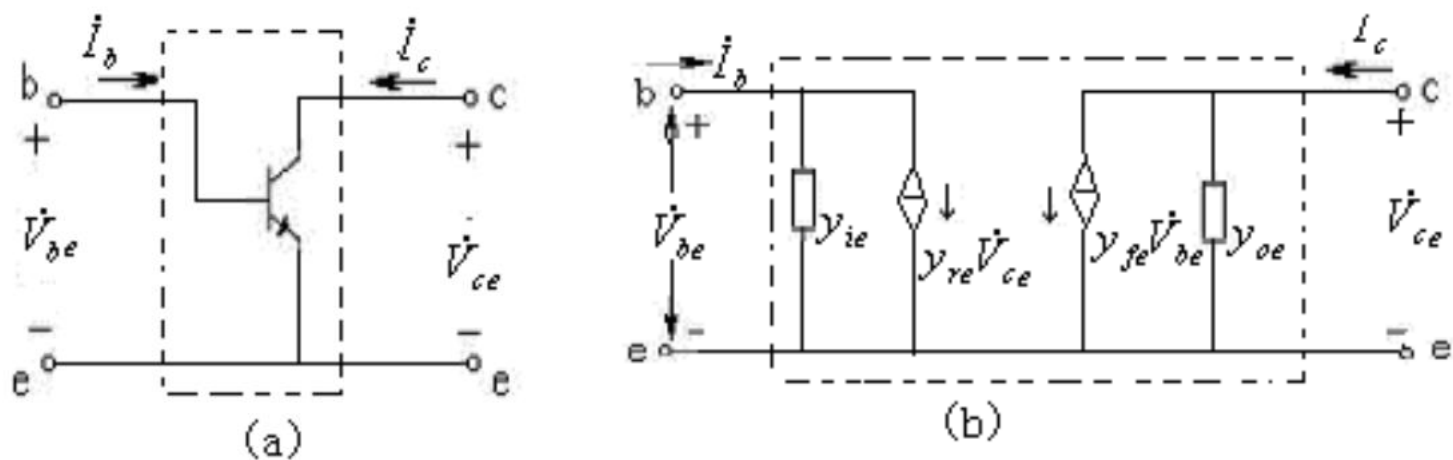


图3.2.4 共发射极接法的晶体管 Y 参数等效电路

$$\begin{cases} I_b = y_{ie} V_{be} + y_{re} V_{ce} \\ I_c = y_{fe} V_{be} + y_{oe} V_{ce} \end{cases}$$

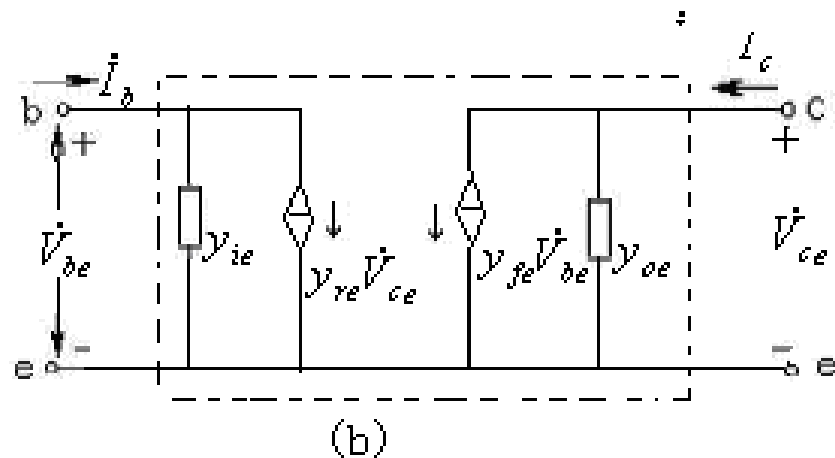
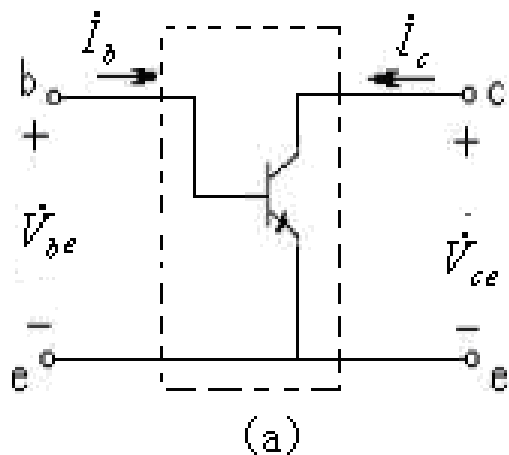


图3.2.4 共发射极接法的晶体管Y参数等效电路

其中

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

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

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 $C_{b'e} \gg C_{b'c}$ ）

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



3.2.2 单调谐回路谐振放大器

一、电路组成及工作原理

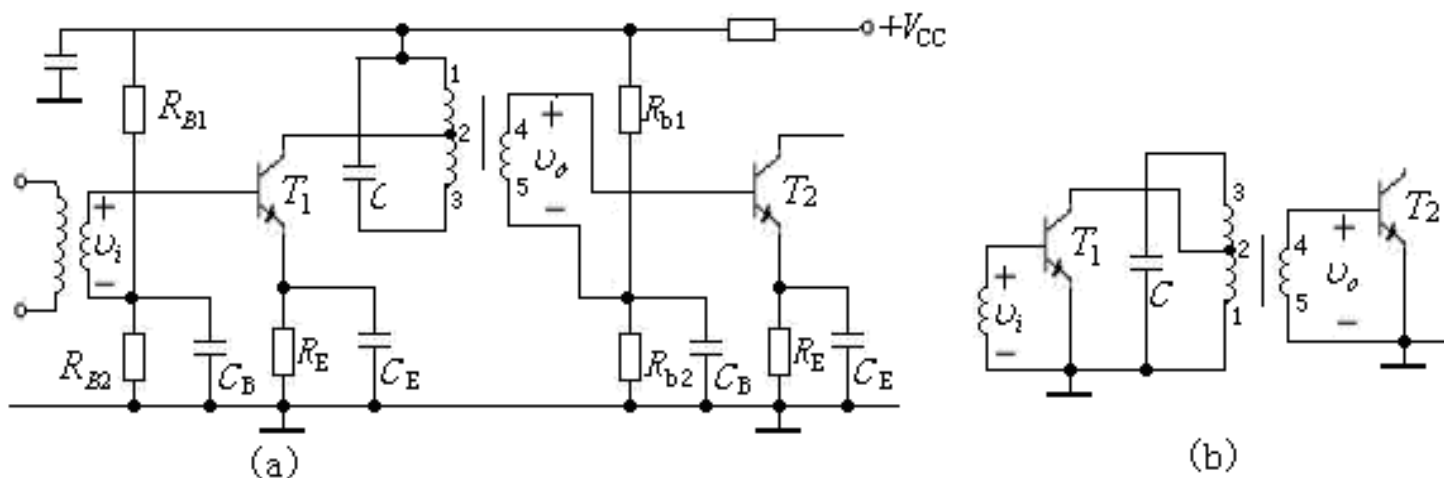


图3.2.5 高频调谐放大器的典型线路

(a) 原理电路 (b) 交流通路

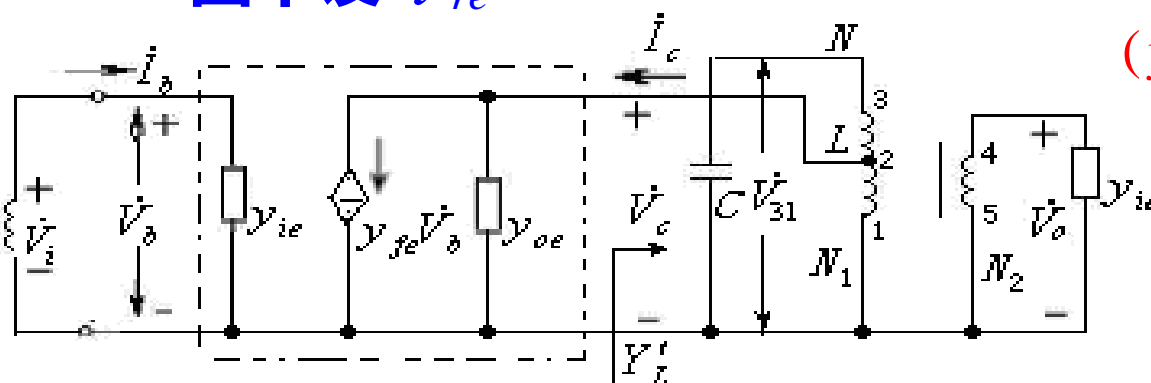
LC振荡回路作为晶体管放大器的负载，为放大器提供选频回路。振荡回路采用抽头连接，可以实现阻抗匹配。



二、电路性能分析

1、放大器的小信号等效电路及其简化

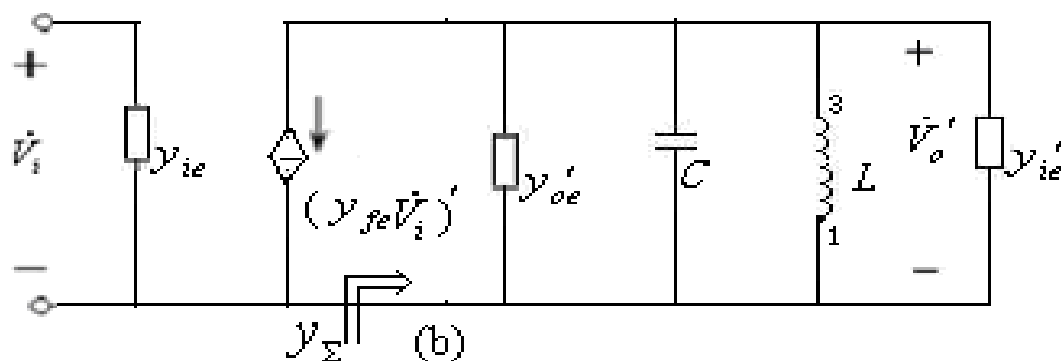
图中设 $y_{re} \approx 0$



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

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

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

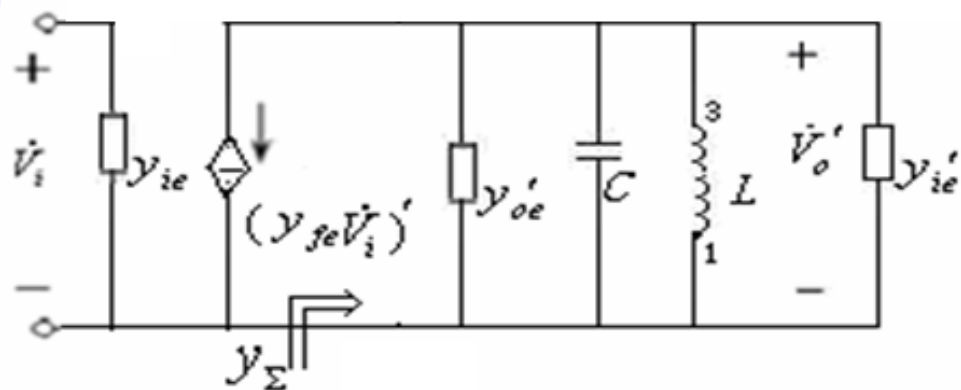


$$\dot{V}_o' = \frac{1}{n_2} \dot{V}_o$$

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

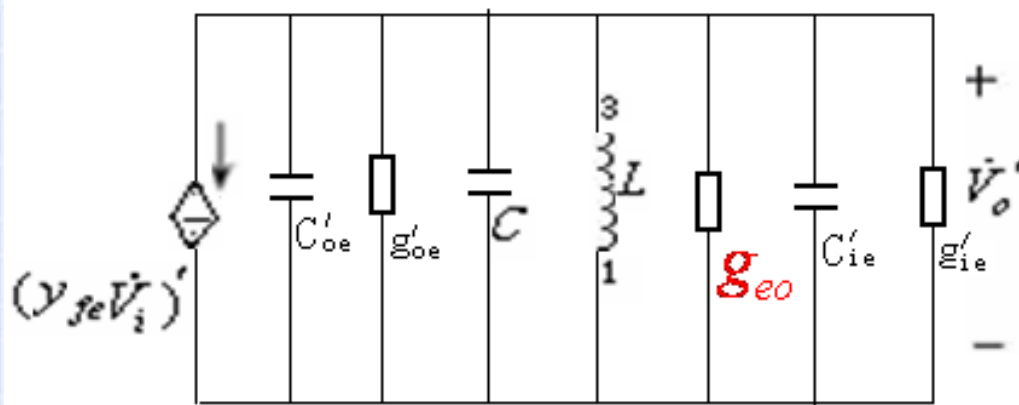
$$n_2 = \frac{N_{45}}{N_{31}}$$

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



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

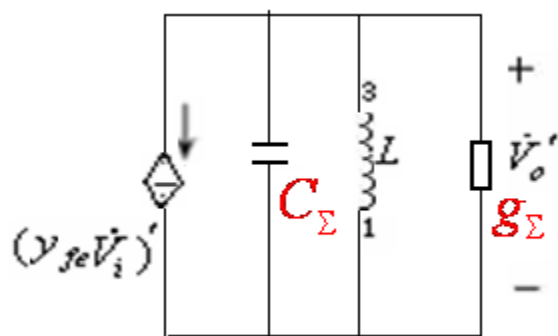
$$g_{\Sigma} = n_1^2 g_{oe} + n_2^2 g_{ie} + g_{eo}$$



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

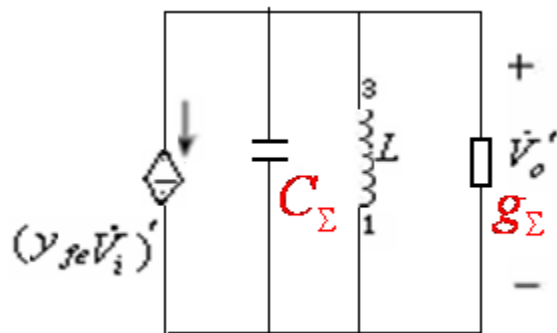
$$g_{eo} = \frac{1}{R_{e0}} = \frac{1}{Q_0} \sqrt{\frac{C}{L}}$$

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



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

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



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

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

2、电路性能分析

(1) 电压放大倍数 (增益)

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



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

$$A_{v0} = \frac{V_{o0}}{V_i} = \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{g_\Sigma}$$



(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。

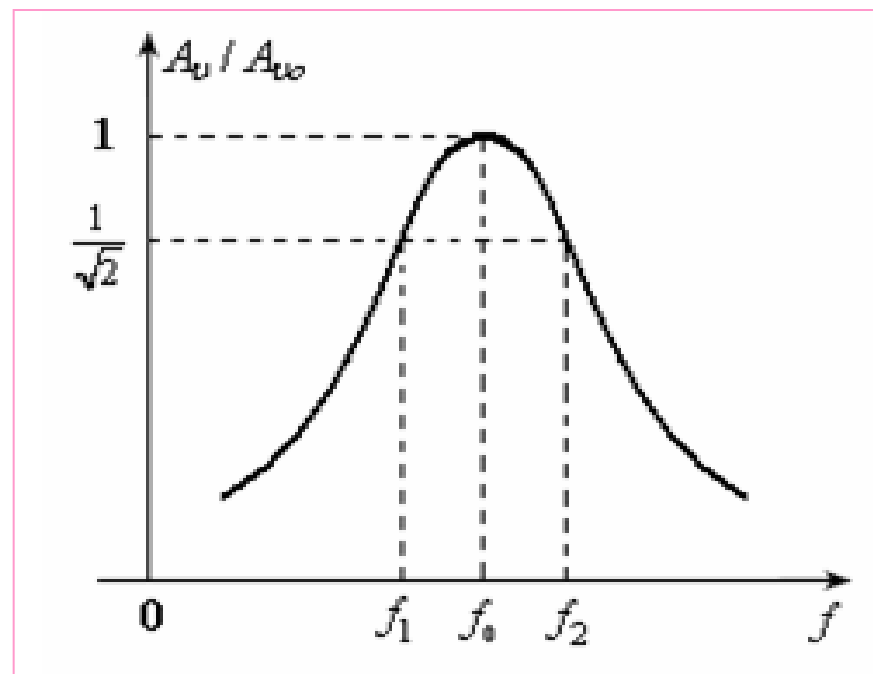


图2.2.7 放大器的谐振曲线



(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

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

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

$$A_{v0} \cdot BW_{0.7} = \frac{n_1 n_2 y_{fe}}{2\pi C_{\Sigma}}$$

(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？

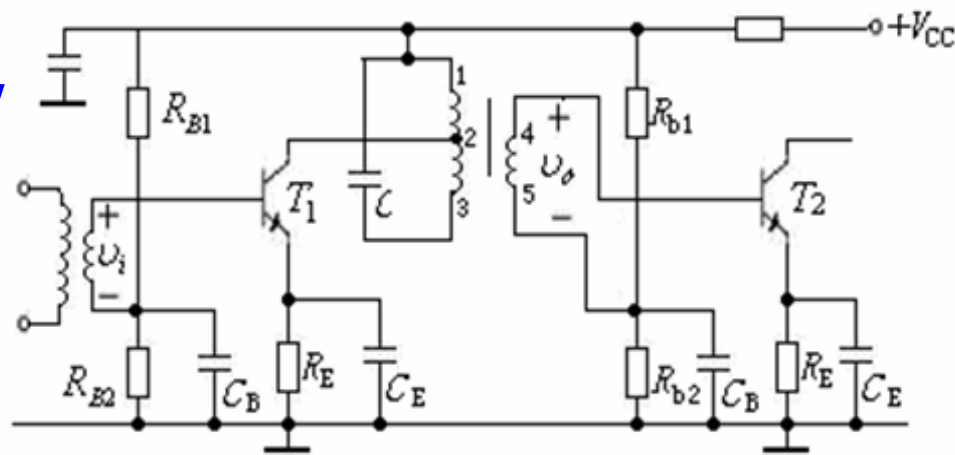
2、电压增益振幅与晶体管参数、负载电导、回路谐振电导和接入系数的关系如何？为了增大电压增益，应如何选择上述参数？

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:



$g_{ie}=1.2\text{mS}$, $C_{ie}=12\text{pF}$; $g_{oe}=400\mu\text{S}$, $C_{oe}=95\text{pF}$;
 $|y_{fe}|=58.3\text{mS}$, $\varphi_{fe}=-22^\circ$; $|y_{re}|=310\mu\text{S}$, $\phi_{ie}=-88.8^\circ$;
回路电感 $L=1.4\mu\text{H}$, 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

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

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

回路总电导 $g_{\Sigma} = g_{e0} + n_1^2 g_{oe} + n_2^2 g_{ie}$

$$= 0.0384 \times 10^{-3} + 0.4 \times 10^{-3} + 0.3^2 \times 1.2 \times 10^{-2}$$
$$= 0.55 \times 10^{-3}(\text{S})$$

电压增益为 $A_{v0} = \frac{n_1 n_2 |y_{fe}|}{g_{\Sigma}} = \frac{1 \times 0.3 \times 58.3}{0.55} \approx 32$



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（自学）

双调谐回路谐振放大器具有频带较宽、选择性较好的优点。

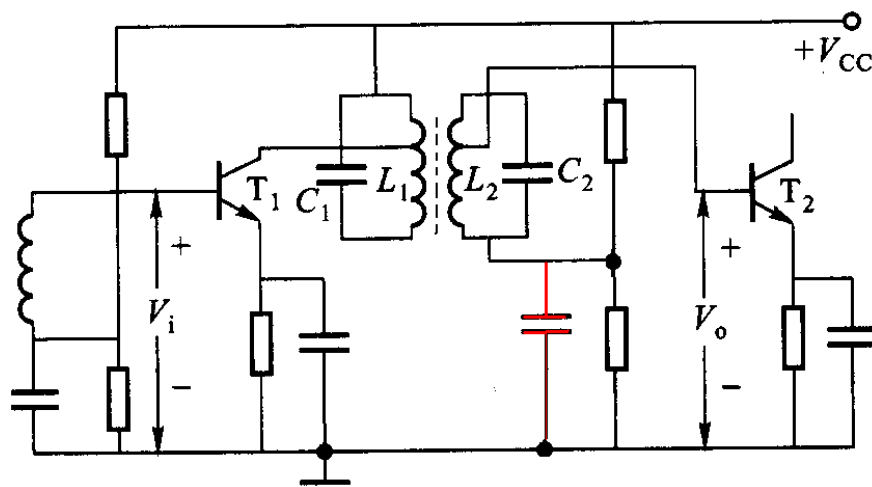
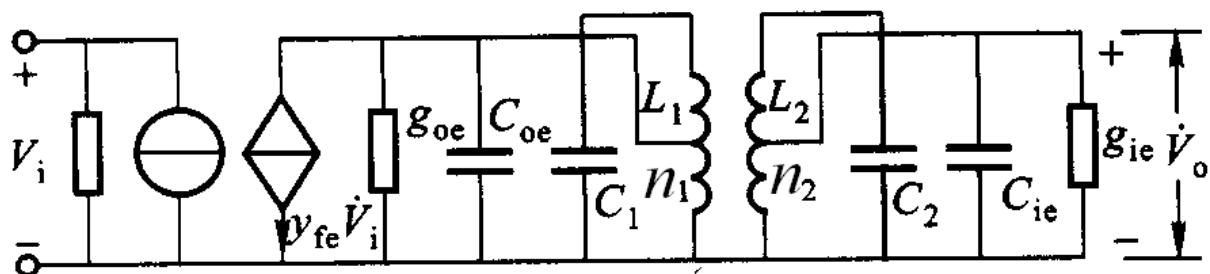


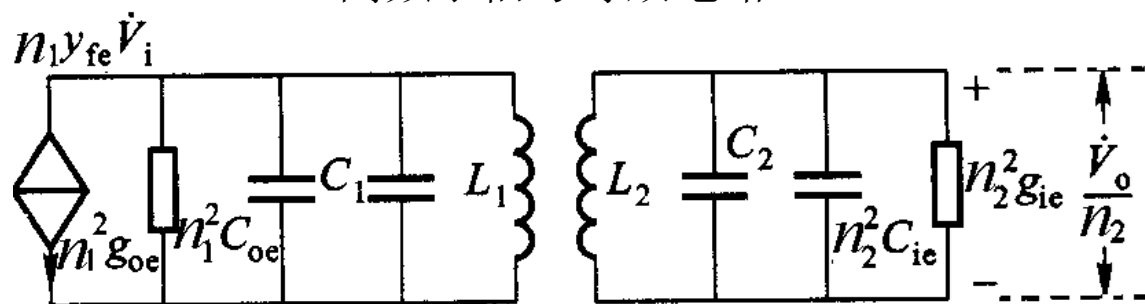
图3.2.7 (a)

**电路特点：并联型
互感耦合回路**

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： $L_1 = L_2 = L$

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

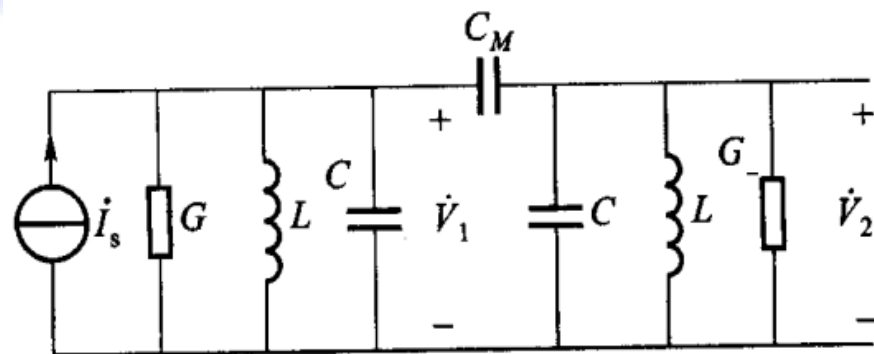
$$n_1^2 g_{oe} = n_2^2 g_{ie} = g$$

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

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



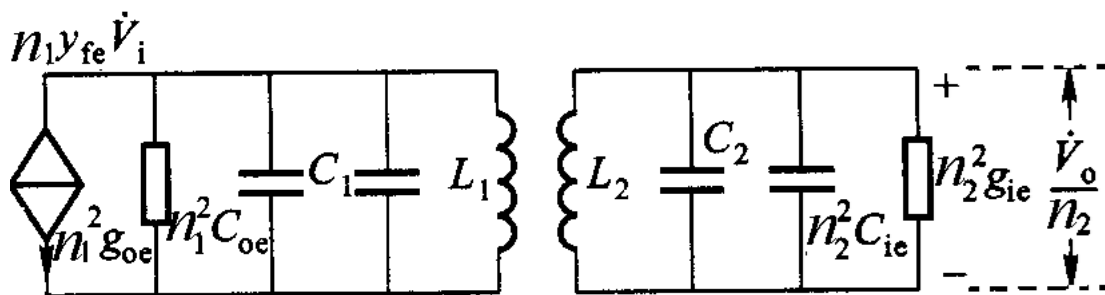
$$V_2 = \frac{I_s \eta}{G \sqrt{(1 - \xi^2 + \eta^2)^2 + 4\xi^2}}$$



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电压耦合谐振回路



互感耦合谐振回路

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

其中 $\eta = \frac{\omega M}{g}$ 为耦合因数



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

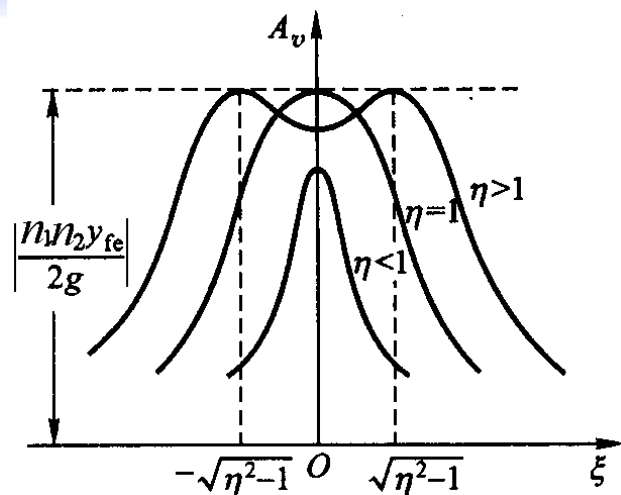


图3.2.8 双调谐回路谐振放大器的谐振特性曲线



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。



3.2.5 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？



作业:

3.11 3.12 3.13 3.15

预习: 4.1 4.2

信息科学与工程学院
山东大学