第三章　高频小信号放大器

通信电路与系统

教学目标：

1）了解高频小信号放大器的功能、分类及技术指标

2）掌握高频小信号放大器的等效电路及分析方法

3）了解放大器的稳定性及放大电路噪声

教学内容：

3.1 概述

3.2 晶体管的高频小信号等效电路

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

3.4 小信号谐振放大器的稳定性

3.7 放大电路噪声及低噪声放大器

3.1 概述

1. 高频小信号放大器功能、特点、分类

1）**功能**：

- 对**微弱**的**高频**信号进行**不失真**放大

2）**特点**：

- **高频**：晶体管工作于高频，需考虑极间电容（将在晶体管等效电路中体现）
- **对小信号进行无失真放大**：晶体管工作于线性范围内（晶体管用二端口网络等效）

3）**分类**：

- 按频带：**窄带放大器**与宽带放大器
- 按负载：**谐振放大器**与非谐振放大器

3.1 概述

通信电路与系统

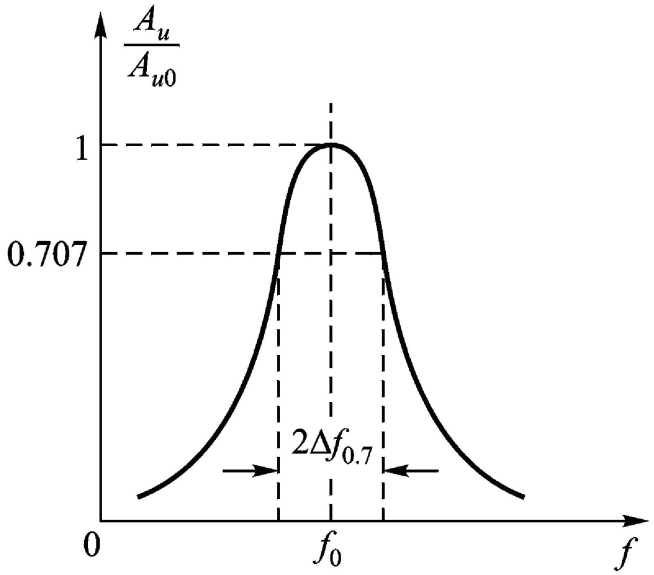
2. 主要技术指标

1）电压增益与功率增益：

电压增益：$\dot{A}_u = \dfrac{\dot{u}_o}{\dot{u}_i}$　　功率增益：$A_P = \dfrac{P_o}{P_i}$

2）通频带：

通频带的定义是放大器的电压增益下降到最大值的 $1/\sqrt{2}$ 倍时，所对应的频带宽度。常用 $2\Delta f_{0.7}$ 来表示。



放大器通频带大小应该与信号带宽匹配！

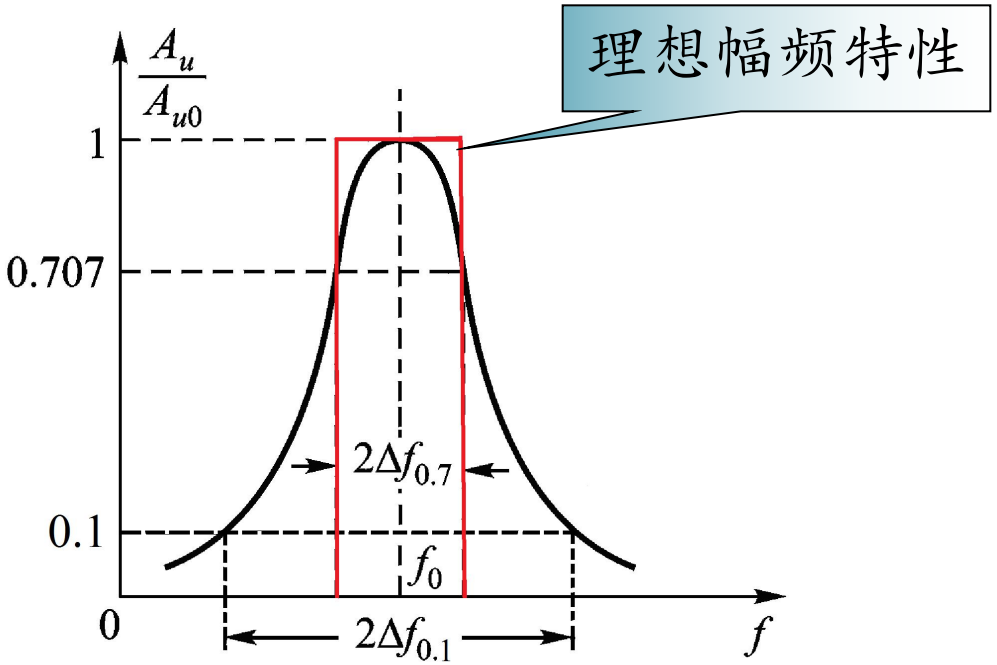
3.1 概述

3）矩形系数：**用于表征放大器选择性好坏。**

选择性指选择有用信号、抑制无用信号的能力！

$$K_{r0.1}=\frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}}$$

$2\Delta f_{0.1}$表示电压增益下降到最大值的0.1倍时对应的频带宽度



矩形系数越小，说明选择性越好！

3.1 概述

4）噪声系数：表征放大器噪声性能好坏的参量，反映放大器本身产生噪声大小

$$N_F = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} = \frac{\text{输入信噪功率比}}{\text{输出信噪功率比}}$$

由于放大器内部会产生噪声，导致输出信噪功率比降低，所以噪声系数大于1，

噪声系数越小越好，说明放大器内部产生的噪声越小

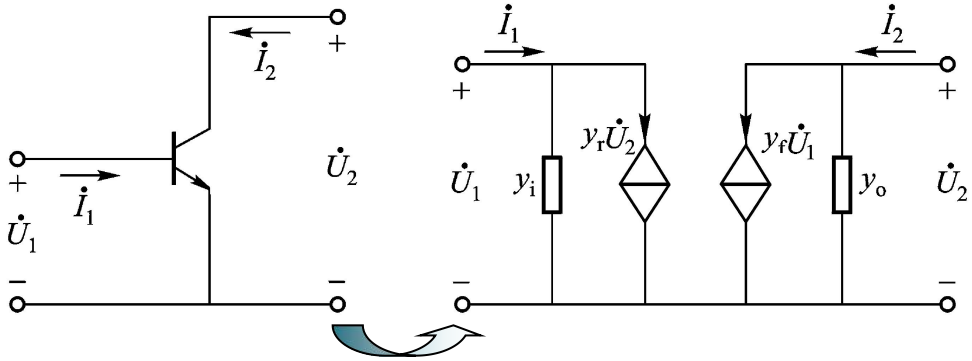
3.2 晶体管高频小信号等效电路

通信电路与系统

1. 晶体管的y参数等效电路

由于高频小信号放大器工作于小信号、线性放大状态，晶体管采用二端口网络来等效，以两个端口的电压作为自变量，电流作为因变量，可推出y参数等效电路：

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



$y_{11} = y_i = \dot{I}_1 / \dot{U}_1 \big|_{U_2=0}$ 输入导纳

$y_{21} = y_f = \dot{I}_2 / \dot{U}_1 \big|_{U_2=0}$ 正向传输导纳

$y_{12} = y_r = \dot{I}_1 / \dot{U}_2 \big|_{U_1=0}$ 反向传输导纳

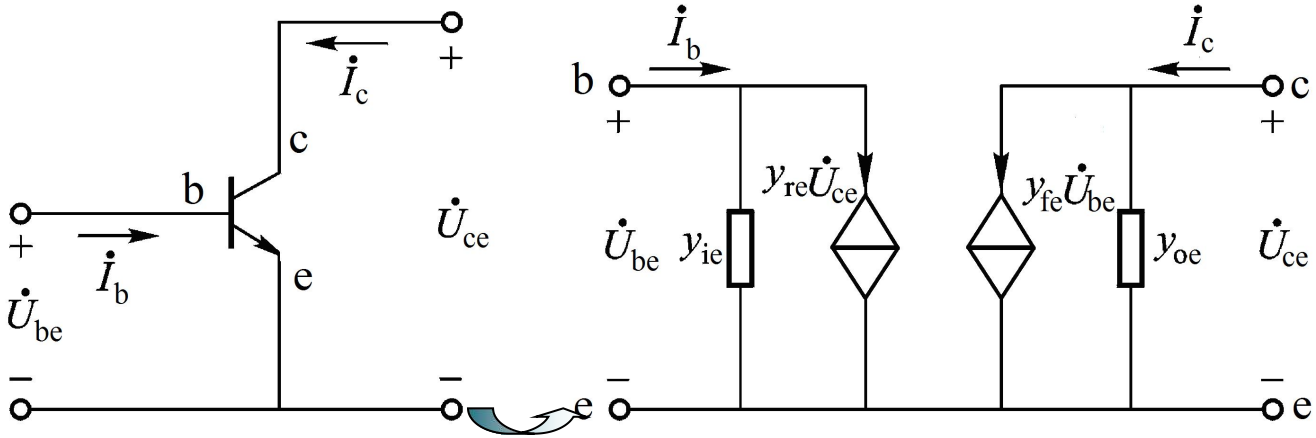
$y_{22} = y_o = \dot{I}_2 / \dot{U}_2 \big|_{U_1=0}$ 输出导纳

注意下标i,f,r,o的含义

广東工業大學 Guangdong University of Technology

3.2 晶体管高频小信号等效电路

对于共射极组态的y参数等效电路：



$$\dot{I}_1 = \dot{I}_b \qquad \dot{U}_1 = \dot{U}_{be} \qquad \dot{I}_2 = \dot{I}_c \qquad \dot{U}_2 = \dot{U}_{ce}$$

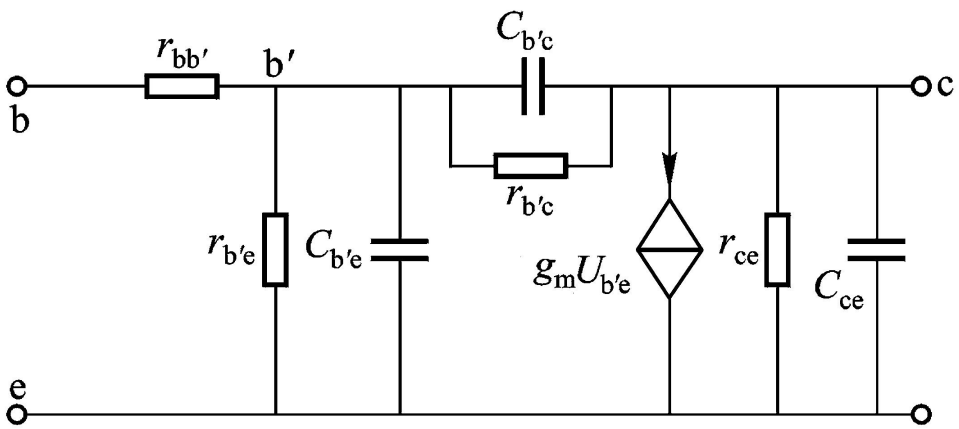
$$y_{ie} = \dot{I}_b / \dot{U}_{be}\Big|_{U_{ce}=0} \qquad y_{re} = \dot{I}_{be} / \dot{U}_{ce}\Big|_{U_{be}=0}$$

$$y_{fe} = \dot{I}_c / \dot{U}_{be}\Big|_{U_{ce}=0} \qquad y_{oe} = \dot{I}_c / \dot{U}_{ce}\Big|_{U_{be}=0}$$

3.2 晶体管高频小信号等效电路

通信电路与系统

2. 晶体管的混合π等效电路



$r_{bb'}$ 是基区扩展电阻，$r_{b'e}$ 是发射结电阻，$C_{b'e}$ 是发射结的结电容。

对比混合π等效电路和y参数等效电路，经推导可获得两个重要结论：

$$y_{ie} = g_{ie} + j\omega C_{ie} \qquad y_{oe} = g_{oe} + j\omega C_{oe}$$

请记住以上两个公式，后面分析电路时要用！

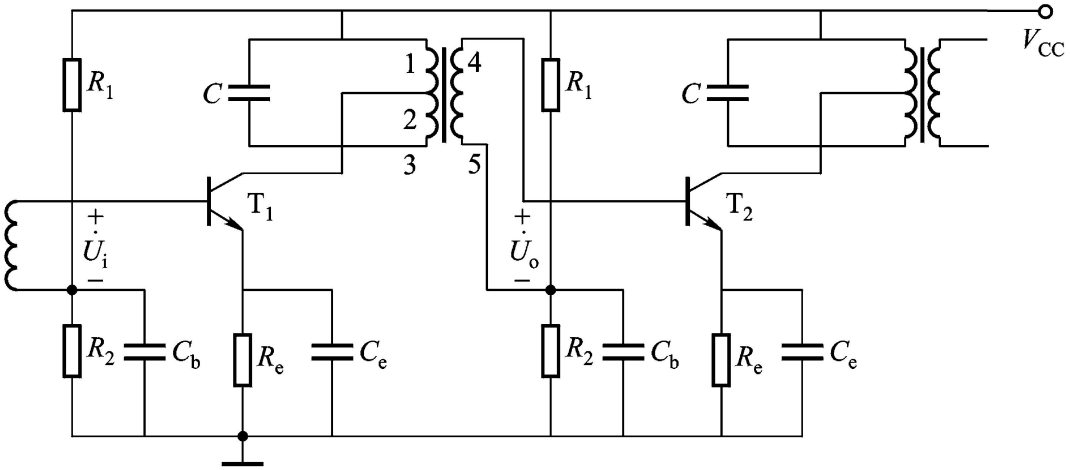
3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

通信电路与系统

1. 单调谐回路谐振放大器

单调谐回路是指放大器负载只有一个LC回路

1）放大电路



该放大电路是两级放大电路，每一级都以一个LC回路作为负载，通常取一级放大器出来分析。分析的基本思路是先画出交流等效电路，并利用晶体管y参数以及LC回路的部分接入变换等化简电路，最后求出放大器技术指标。

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

2）交流等效电路

交流等效电路的画法：

① 将直流电源V_{CC}看成是交流接地

② 旁路电容、耦合电容短路

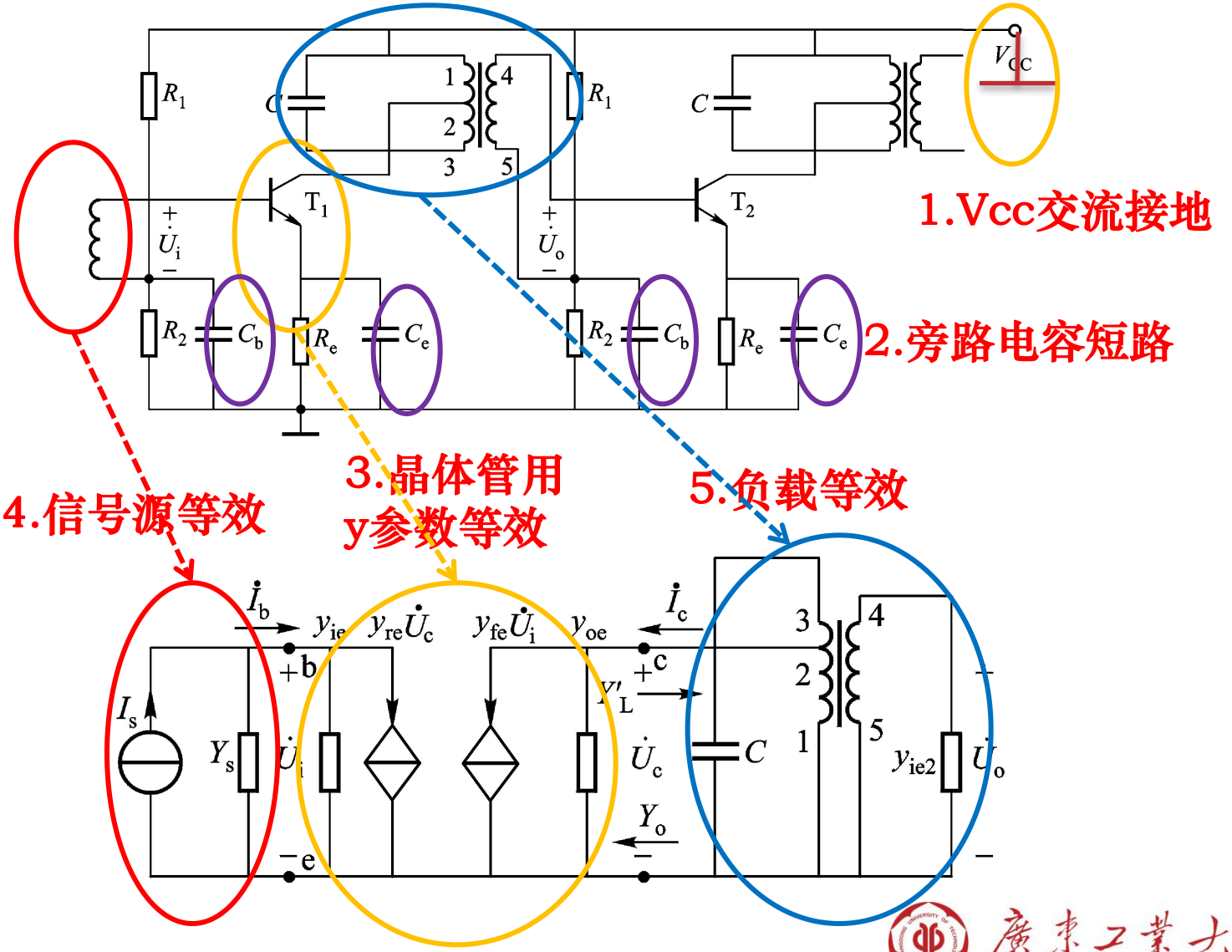
③ 晶体管用y参数取代

④ 信号源用Is和Ys代替

⑤ 前级的负载应包含后级的输入导纳

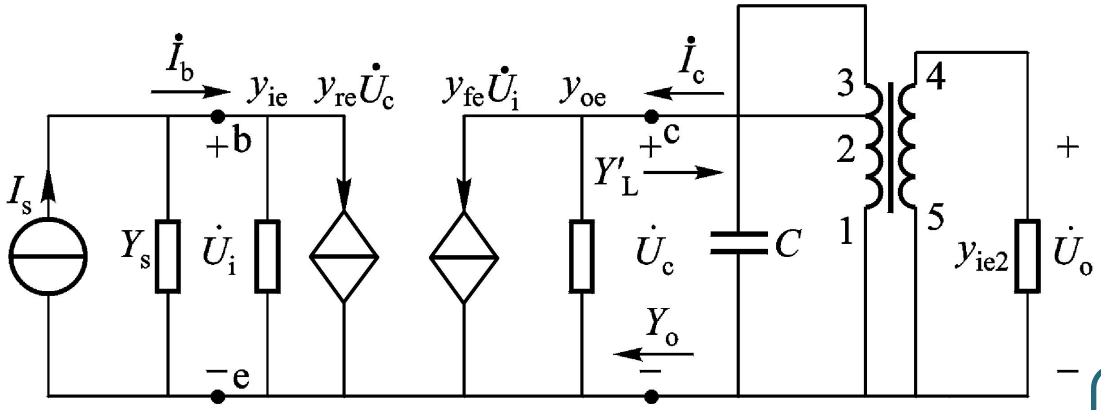
3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

通信电路与系统



3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

3）放大器输入导纳与输出导纳



反向传输导纳的存在对输入有影响

晶体管特性：

$$\begin{cases} \dot{I}_b = y_{ie}\dot{U}_i + y_{re}\dot{U}_c \\ \dot{I}_c = y_{fe}\dot{U}_i + y_{oe}\dot{U}_c \end{cases}$$

负载伏安特性：$\dot{I}_c = -Y'_L\dot{U}_c$

放大器输入导纳Y_i

$$Y_i = \frac{\dot{I}_b}{\dot{U}_i} = y_{ie} - \frac{y_{fe}y_{re}}{y_{oe} + Y'_L}$$

放大器输入导纳受负载影响

同理可得放大器输出导纳Y_o：

$$Y_o = \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_c} = y_{oe} - \frac{y_{fe}y_{re}}{y_{ie} + Y_s}$$

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

4）等效电路的简化

为了分析简化，通常假设方向传输导纳$y_{re}=0$。

简化步骤：

① 令$y_{re}=0$，忽略信号源；

② 变压器二次侧导纳等效到一次侧LC并联回路两端；

③ 晶体管ce极部分接入等效到LC并联回路两端；

特别注意：

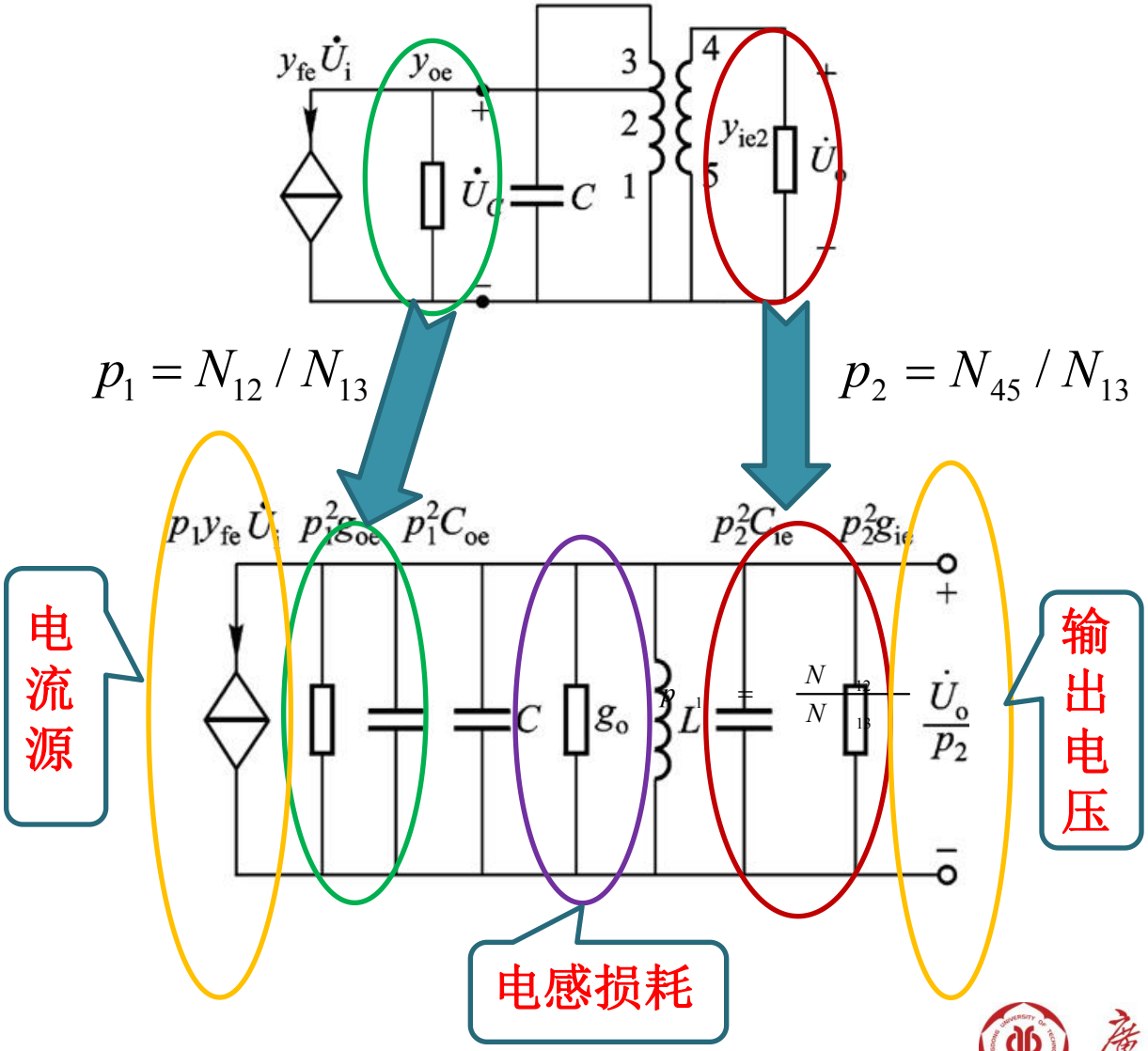
① 等效变换时接入系数需要正确计算

② 输入、输出导纳需要等效成电阻和电容的并联

③ 需要考虑LC回路中电感的损耗电阻

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

通信电路与系统



3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

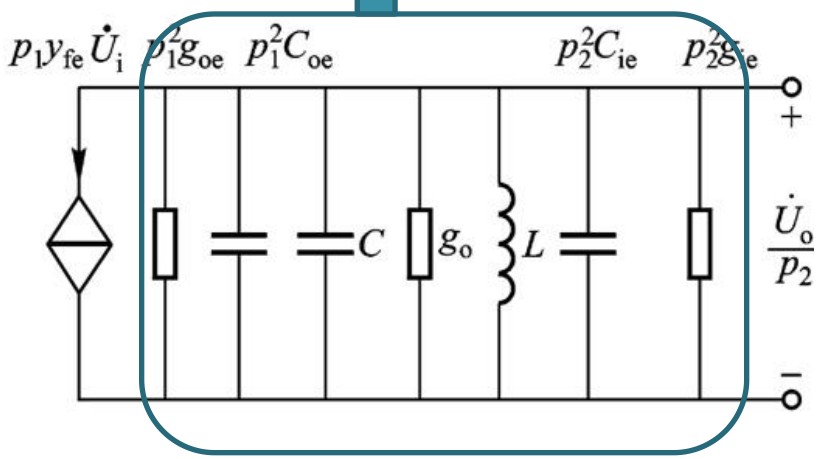
2. 技术指标

在求技术指标之前，需要将简化等效电路的电导和电容进行合并

总电导： $g_\Sigma = p_1^2 g_{oe} + g_0 + p_2^2 g_{ie}$

总电容： $C_\Sigma = p_1^2 C_{oe} + C + p_2^2 C_{ie}$

总导纳： $Y_\Sigma = g_\Sigma + j\omega C_\Sigma + \dfrac{1}{j\omega L}$



负号是什么含义？

$$\frac{\dot{U}_o}{p_2} = -\frac{p_1 y_{fe}\dot{U}_i}{Y_\Sigma}$$

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

1）电压增益 $\dot{A}_u$

$$\begin{cases} Y_\Sigma = g_\Sigma + \mathrm{j}\omega C_\Sigma + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L} \\ \dfrac{\dot{U}_\mathrm{o}}{p_2} = -\dfrac{p_1 y_\mathrm{fe}\dot{U}_\mathrm{i}}{Y_\Sigma} = -\dfrac{p_1 y_\mathrm{fe}\dot{U}_\mathrm{i}}{g_\Sigma + \mathrm{j}\omega C_\Sigma + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L}} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \quad \dot{A}_u = \frac{\dot{U}_\mathrm{o}}{\dot{U}_\mathrm{i}} = -\frac{p_1 p_2 y_\mathrm{fe}}{g_\Sigma + \mathrm{j}\omega C_\Sigma + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega L}}$$

电压增益是频率函数！

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

谐振时电压增益 $\dot{A}_{u0}$

回路谐振时，放大器可以获得最大增益

谐振频率：$\omega_0 = \dfrac{1}{\sqrt{LC_\Sigma}}$

最大电压增益：$\dot{A}_{u0} = -\dfrac{p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma}$

电压增益的模：$|A_{u0}| = \dfrac{p_1 p_2 |y_{fe}|}{g_\Sigma}$

电压增益的相位：$180^\circ + \varphi_{fe}$

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

2）谐振曲线：表示放大器相对电压增益与输入信号频率的关系曲线

相对电压增益：

$$\frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{u0}}=\frac{1}{1+\mathrm{j}Q_\mathrm{L}\left(\dfrac{\omega}{\omega_0}-\dfrac{\omega_0}{\omega}\right)}=\frac{1}{1+\mathrm{j}Q_\mathrm{L}\left(\dfrac{f}{f_0}-\dfrac{f_0}{f}\right)}$$

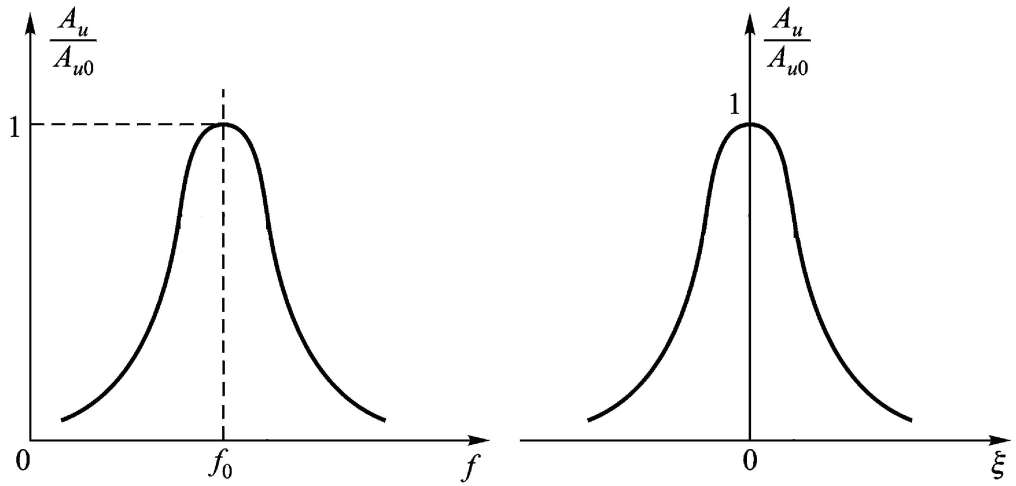
$$=\frac{1}{1+\mathrm{j}Q_\mathrm{L}(2\Delta f/f_0)}=\frac{1}{1+j\xi}$$

其中，$\xi=Q_\mathrm{L}(2\Delta f/f_0)$称为广义失谐。

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

相对电压增益的模（**谐振特性曲线**）：

$$\frac{A_u}{A_{u0}}=\frac{1}{\sqrt{1+\left(\frac{2Q_L\Delta f}{f_0}\right)^2}} \qquad \frac{A_u}{A_{u0}}=\frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}}$$



相对电压增益的模是个频率函数，在谐振频率上获得最大值，偏离谐振频率时，相对电压增益迅速减小。

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

3）放大器的通频带

根据通频带定义，令 $A_u / A_{u0} = 1/\sqrt{2}$ 时，对应的 $2\Delta f$ 为放大器的通频带：

$$\frac{A_u}{A_{u0}} = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow \xi = Q_L \frac{2\Delta f_{0.7}}{f_0} = 1$$

$$\Downarrow$$

$$2\Delta f_{0.7} = f_0 / Q_L$$

通常，放大器的通频带是根据需放大的信号带宽确定的，由该公式可以看出，当要放大的信号带宽一定时，放大器的谐振频率越高，则要求回路Q值越大，也即要求回路损耗越小，实现越困难。

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

4）放大器的矩形系数

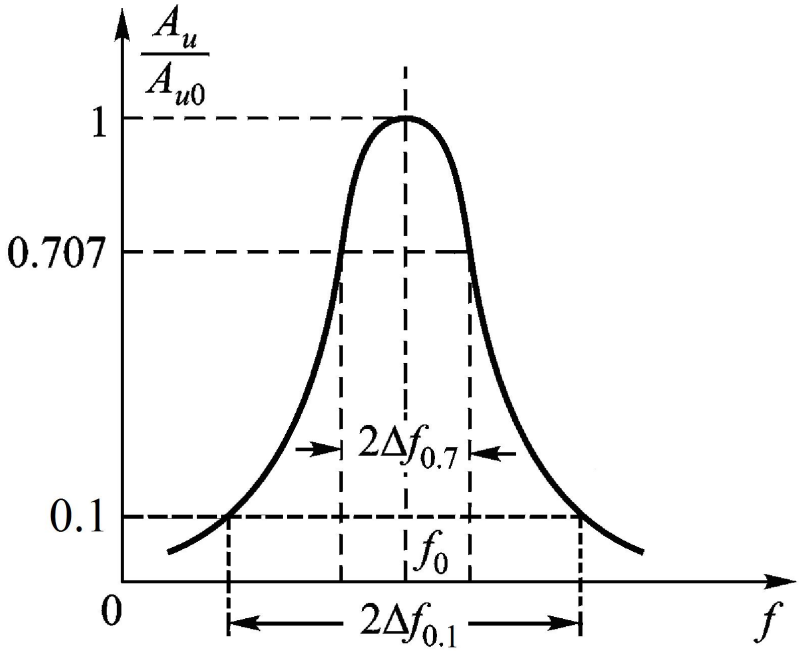
根据矩形系数定义：

$$K_{r0.1}=\frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}}$$

$$\frac{A_u}{A_{u0}}=\frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}}=\frac{1}{10}$$

$$2\Delta f_{0.1}=\sqrt{99}f_0/Q_L$$

$$K_{r0.1}=\sqrt{99}$$



矩形系数远大于1，说明其选择性不太好！

3.3 晶体管高频小信号谐振放大器

3. 多级放大器的技术指标

1）电压增益：

$$A_m = A_{u1} \cdot A_{u2} \cdot A_{u3} \cdots\cdots A_{um} \Rightarrow A_m = (A_{u1})^m$$

2）谐振曲线：

$$\frac{A_m}{A_{m0}} = \frac{1}{\left[1 + \left(Q_L \frac{2\Delta f}{f_0}\right)^2\right]^{\frac{m}{2}}}$$

3）通频带：

$$2(\Delta f_{0.7})_m = \sqrt{2^{\frac{1}{m}} - 1}(2\Delta f_{0.7})_1$$

4）矩形系数：

$$(K_{r0.1})_m = \frac{\sqrt{100^{\frac{1}{m}} - 1}}{\sqrt{2^{\frac{1}{m}} - 1}}$$

分析举例

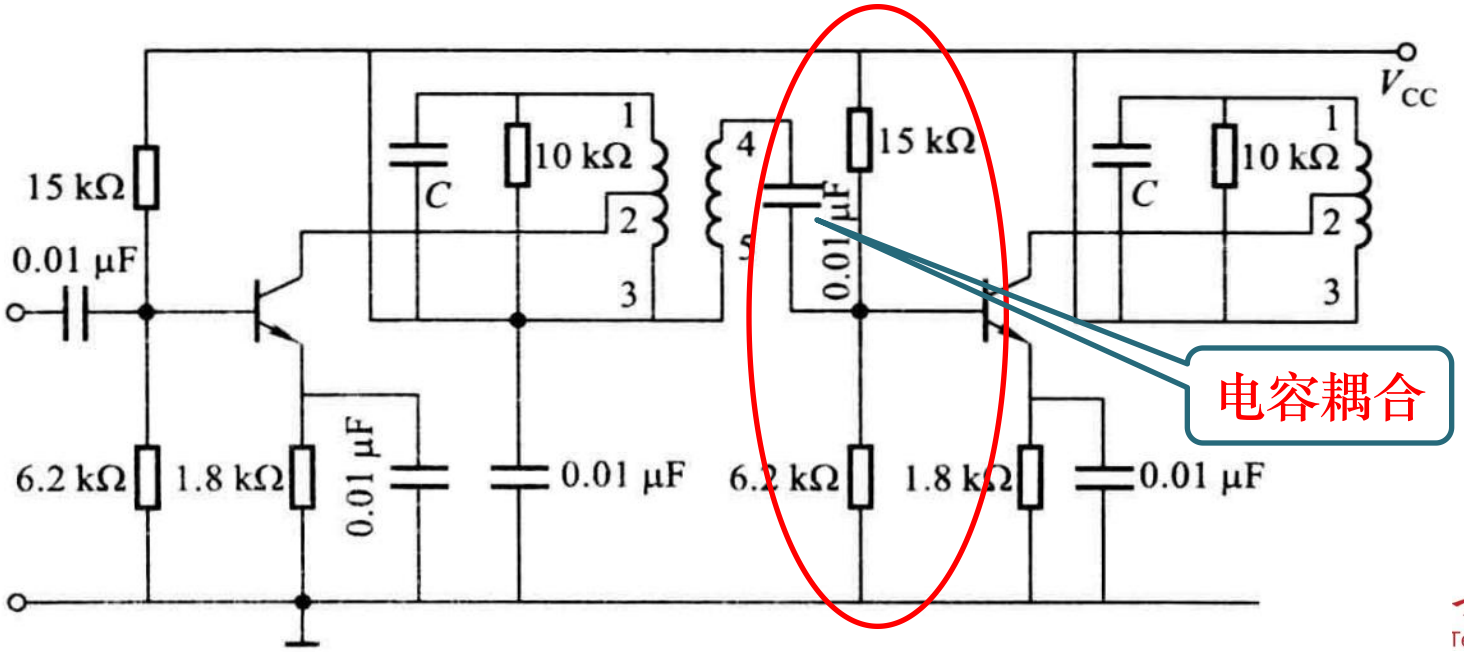
已知：$f_0 = 10.7MHz$

$L = 4\mu H$，$Q_0 = 100$，$N_{13} = 20$，$N_{23} = 6$，$N_{45} = 5$

$y_{ie} = (2.86 + j3.4)mS$，$y_{re} = (0.08 - j0.3)mS$

$y_{fe} = (26.4 - j36.4)mS$，$y_{oe} = (0.2 + j1.3)mS$

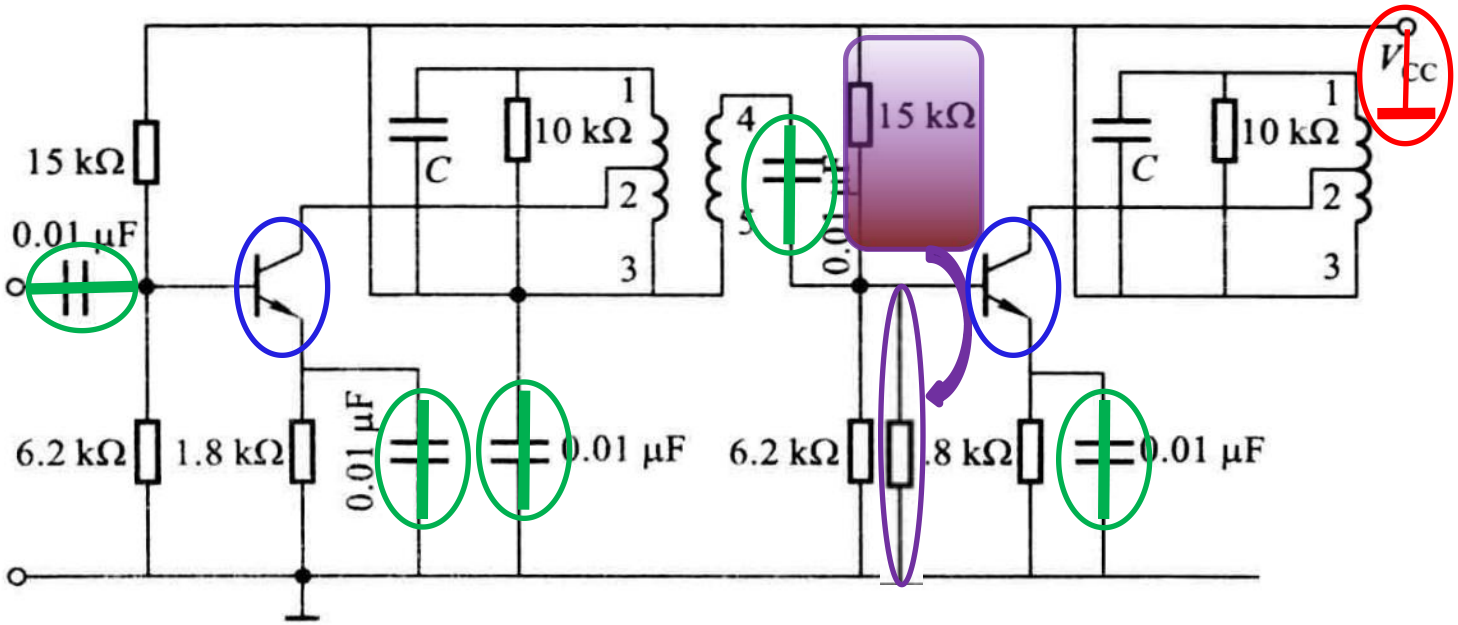
求：电容C、最大增益A_{u0}、通频带$2\Delta f_{0.7}$、矩形系数$K_{r0.1}$



如何画交流等效电路?

④偏置电阻
如何处理?

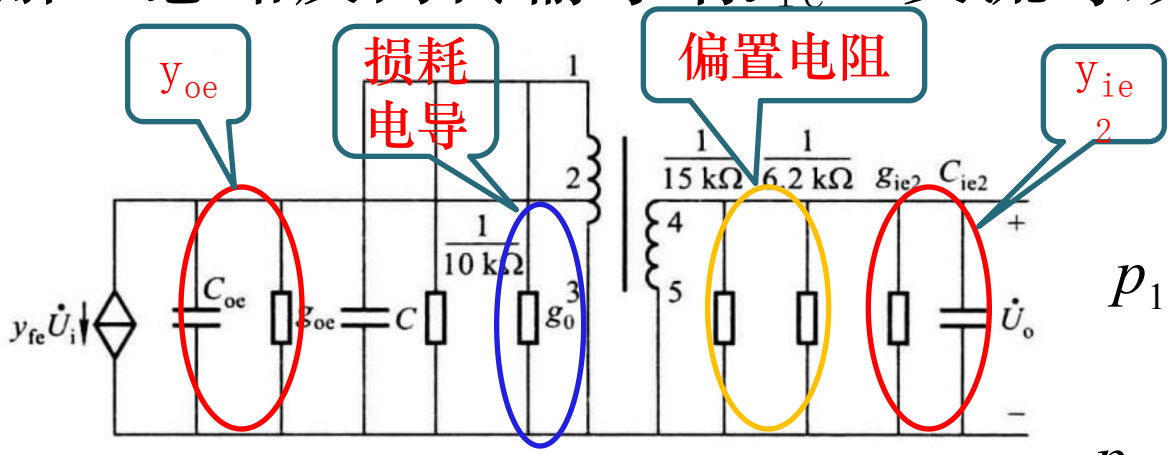
①Vcc接地;



③晶体管
用y参数等效

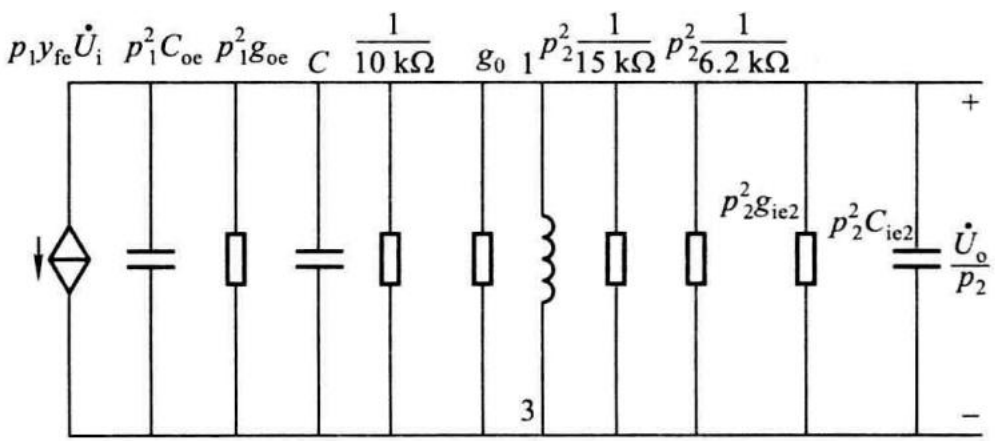
②旁路电容、
耦合电容短路;

解：忽略反向传输导纳y_{re}。交流等效电路如下：



$$p_1 = \frac{N_{23}}{N_{13}} = 0.3$$

$$p_2 = \frac{N_{45}}{N_{13}} = 0.25$$



$$g_\Sigma = ?$$

$$C_\Sigma = ?$$

由 y 参数的表示式可得

$$g_{ie} = 2.86\ \text{mS}, \quad C_{ie} = \frac{3.4 \times 10^{-3}}{2\pi \times 10.7 \times 10^{6}}\ \text{F} = 50.57\ \text{pF}$$

$$g_{oe} = 0.2\ \text{mS}, \quad C_{oe} = \frac{1.3 \times 10^{-3}}{2\pi \times 10.7 \times 10^{6}}\ \text{F} = 19.34\ \text{pF}$$

$$|y_{fe}| = \sqrt{26.4^2 + 36.4^2}\ \text{mS} = 44.97\ \text{mS}, \quad \varphi_{fe} = \arctan\frac{-36.4}{26.4} = -54°$$

由 L 及 Q_0 可得

$$g_0 = \frac{1}{2\pi f_0 L Q_0} = \frac{1}{2\pi \times 10.7 \times 10^{6} \times 4 \times 10^{-6} \times 100}\ \text{S} = 37.19\ \mu\text{S}$$

根据交流等效电路可得

$$g_{\Sigma} = p_1^2 g_{oe} + \frac{1}{R} + g_0 + p_2^2 \frac{1}{15 \times 10^3} + p_2^2 \frac{1}{6.2 \times 10^3} + p_2^2 g_{ie}$$

$$= 348.19\ \mu\text{S}$$

$$C_{\Sigma} = p_1^2 C_{oe} + C + p_2^2 C_{ie}$$

根据工作频率、电感可求出总电容

$$C_{\Sigma}=\frac{1}{(2\pi f_0)^2 L}=\frac{1}{(2\pi\times 10.7\times 10^6)^2\times 4\times 10^{-6}}\ \mathrm{F}=55.31\ \mathrm{pF}$$

$$C_{\Sigma}=p_1^2 C_{oe}+C+p_2^2 C_{ie} \Rightarrow C=C_{\Sigma}-p_1^2 C_{oe}-p_2^2 C_{ie}=50.41\ \mathrm{pF}$$

$$|A_{u0}|=\frac{p_1 p_2 |y_{fe}|}{g_{\Sigma}}=\frac{0.3\times 0.25\times 44.97\times 10^{-3}}{348.19\times 10^{-6}}=9.69$$

$$Q_L=\frac{1}{2\pi f_0 L g_{\Sigma}}=\frac{1}{2\pi\times 10.7\times 10^6\times 4\times 10^{-6}\times 348.19\times 10^{-6}}=10.68$$

$$2\Delta f_{0.7}=\frac{f_0}{Q_L}=\frac{10.7}{10.68}\ \mathrm{MHz}\approx 1.00\ \mathrm{MHz}$$

$$K_{r0.1}=\sqrt{99}$$

3.4 小信号谐振放大器的稳定性

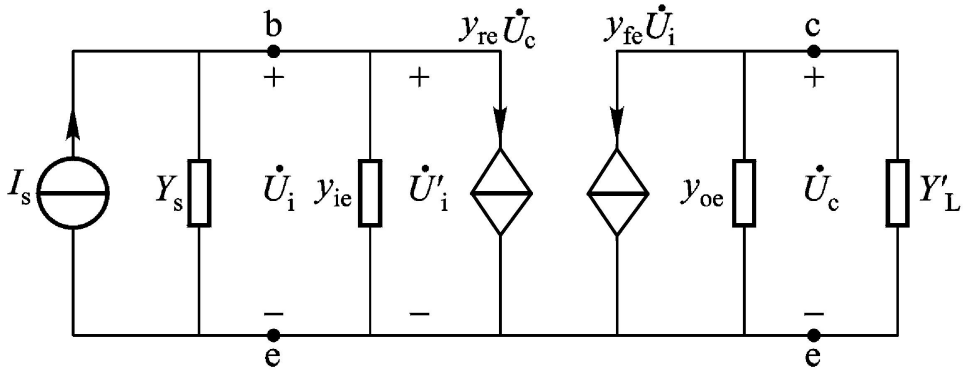
通信电路与系统

1. 不稳定原因

由于晶体管**反向传输导纳y_{re}不为0**，放大器的输出电压会反向作用到输入端，有可能导致放大器产生**自激**，造成放大器**不稳定**。

2. 评价稳定性的指标

1）**稳定系数S**：输入电压与反馈电压的比值：$S=\dfrac{\dot{U}_i}{\dot{U}_i'}$



$$\dot{U}_i \xrightarrow{y_{fe}} \dot{U}_c=-\frac{y_{fe}\dot{U}_i}{y_{oe}+Y_L'}$$

$$\dot{U}_i'=-\frac{y_{re}\dot{U}_c}{y_{ie}+Y_s} \xleftarrow{y_{re}}$$

S越大，放大器越稳定！

廣東工業大學 Guangdong University of Technology

3.4 小信号谐振放大器的稳定性

通信电路与系统

2）稳定增益

晶体管不采用任何稳定措施，满足稳定系数S要求时，放大器工作于谐振频率的最大电压增益。

稳定增益计算公式：

$$|A_{u0}|_s = \sqrt{\frac{2|y_{fe}|}{S|y_{re}|[1+\cos(\varphi_{fe}+\varphi_{re})]}}$$

由公式可知，放大器的稳定增益通常由稳定系数S以及晶体管y参数决定。

稳定增益告诉人们在设计放大器时，放大器的增益不能超过其稳定增益

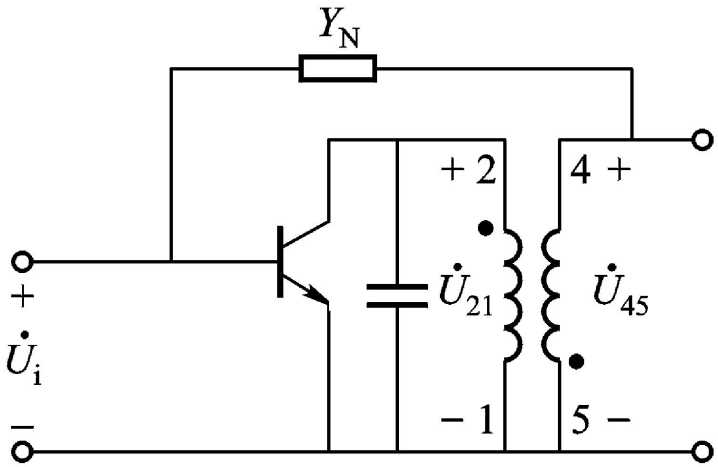
3.4 小信号谐振放大器的稳定性

3）提高谐振放大器稳定性的措施

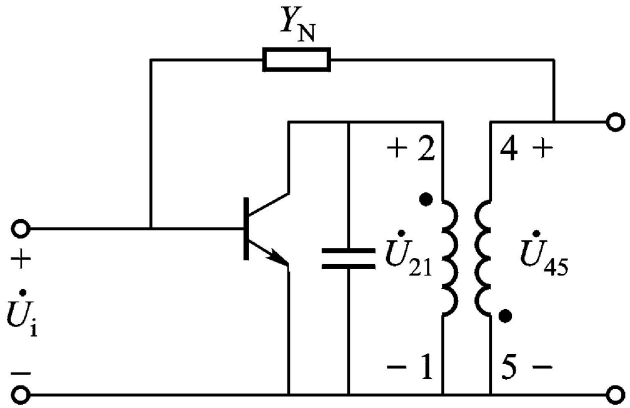
不采取其他措施时，放大器的稳定增益通常比较小，可以采用一些措施来提高放大器的增益，从而提高放大器的稳定性。

a）中和法：通过引入外部反馈电路来抵消晶体管内容的反馈作用。

中和法要保证经过外部反馈的电流与晶体管内部产生的反馈电流大小相等，方向相反！



3.4 小信号谐振放大器的稳定性



在Y_N与y_{re}同性质条件下，变压器的同名端保证电流流向相反

$$\dot{U}_i \longrightarrow \dot{U}_{21} \xrightarrow{\boxed{y_{re}}} y_{re}\dot{U}_{21}$$

反馈到输入端内部反馈电流

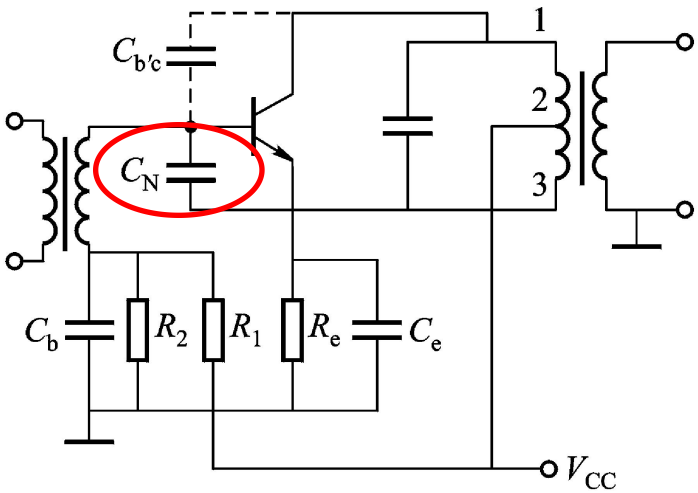
$$\dot{U}_{21} \longrightarrow \dot{U}_{45} \xrightarrow{\boxed{Y_N}} Y_N\dot{U}_{45}$$

反馈到输入端外部反馈电流

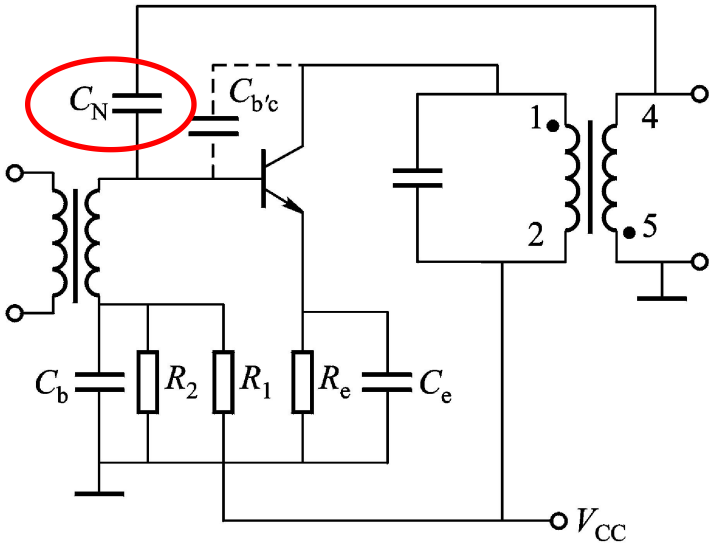
中和条件$\boxed{y_{re}\dot{U}_{21}}$和$\boxed{Y_N\dot{U}_{45}}$大小相等，流向相反

3.4 小信号谐振放大器的稳定性

典型中和电路：



(a)



(b)

$$C_N = \frac{U_{12}}{U_{32}} C_{b'c} = \frac{N_{12}}{N_{32}} C_{b'c}$$

$$C_N = \frac{U_{12}}{U_{45}} C_{b'c} = \frac{N_{12}}{N_{45}} C_{b'c}$$

3.4 小信号谐振放大器的稳定性

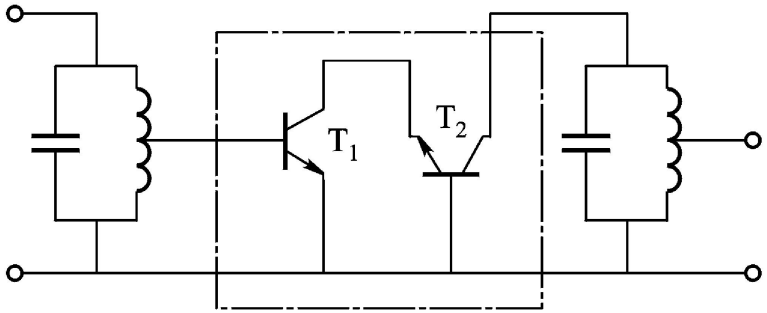
b）失配法：**通过降低放大器的电压增益，以确保满足稳定的要求。**

采用的方法：

①减小放大器的负载电阻(回路并电阻、改变接入系数)；

②放大器增加负反馈。

典型应用电路：共射共基级联放大电路



3.7 放大电路噪声

通信电路与系统

1. 噪声来源

1）电阻产生的热噪声

2）晶体管/场效应管产生的噪声

2. 噪声大小的衡量

1）等效噪声带宽：

2）噪声系数：输入端信号噪声功率比与输出端信号噪声功率比的比值，用N_F表示。

$$N_F = \frac{P_{si}/P_{ni}}{P_{so}/P_{no}} = \frac{\text{输入信噪功率比}}{\text{输出信噪功率比}}$$

3）噪声温度：把噪声看成是内部电阻在一定温度T下产生的噪声，该温度称为噪声温度。

3.7 放大电路噪声

3. 级联网络的噪声系数

N级网络的噪声系数：

$$N_F = N_{F1} + \frac{N_{F2}-1}{A_{PH1}} + \frac{N_{F3}-1}{A_{PH1}A_{PH2}} + \cdots + \frac{N_{Fn}-1}{A_{PH1}A_{PH2}\cdots\cdots A_{PH(n-1)}}$$

以上公式说明，多级网络的总噪声系数主要取决于前面两级，特别是第一级，后面各级的影响非常小。

对于高性能接收机，通常要求第一级放大器的噪声系数尽量小，增益尽量大，有利于降低接收机总噪声系数，提高接收机灵敏度。

4. 接收机灵敏度：保证接收机输出端一定信噪比时，接收端所要求的**最小有用信号功率**。

本章小结

1. 小信号放大器的功能、分类及技术指标（增益、通频带、矩形系数、噪声系数）；
2. 小信号放大器中晶体管的等效（y参数）；
3. 小信号放大器电路构成，画交流等效电路，分析小信号放大器技术指标；
4. 小信号放大器稳定性分析；
5. 放大器噪声分析。