

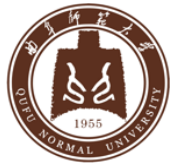
CEC

# 高频小信号放大器

## High Frequency Class A Amplifiers

2025年4月3日

学而不厌 诲人不倦



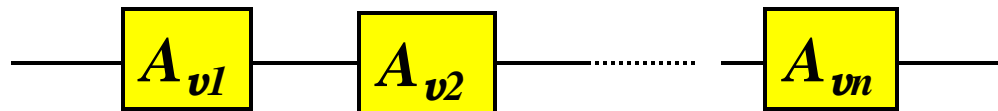
# Chapter 3 高频小信号放大器

- ➡ 3.1 概述
- ➡ 3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数
- ➡ 3.3 单调谐回路谐振放大器
- ➡ **3.4 多级单调谐回路谐振放大器**
- ➡ 3.5 双调谐回路谐振放大器
- ➡ 3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施
- ➡ 3.7 谐振放大器常用电路和集成电路谐振放大器
- ➡ 3.9 放大器中的噪声
- ➡ 3.10 噪声的表示和计算方法

## 3.4 多级单调谐回路谐振放大器

### ➤ 1. 电压增益

若单级放大器的增益不能满足要求，就要采用多级放大器。



$$\begin{aligned}\dot{A}_v(j\omega) &= \frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} = \frac{\dot{V}_{o1}(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)} \cdot \frac{\dot{V}_{o2}(j\omega)}{\dot{V}_{o1}(j\omega)} \cdots \frac{\dot{V}_{on}(j\omega)}{\dot{V}_{o(n-1)}(j\omega)} \\ &= \dot{A}_{v1}(j\omega) \cdot \dot{A}_{v2}(j\omega) \cdots \dot{A}_{vn}\end{aligned}$$

如果各级放大器是由完全相同的单级放大器所组成，则

$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2} \cdots \dot{A}_{vn} = \left(\dot{A}_{v1}\right)^n$$

## 3.4 多级单调谐回路谐振放大器

### ➤ 1. 电压增益

如果各级放大器是由完全相同的单级放大器所组成，则

$$\dot{A}_v = \dot{A}_{v1} \cdot \dot{A}_{v2} \cdots \dot{A}_{vn} = (\dot{A}_{v1})^n$$
$$\dot{A}_v = \left[ -\frac{p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma} \cdot \frac{1}{1 + jQ_L \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \right]^n$$

$$\dot{A}_v = \left( -\frac{p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma} \right)^n \cdot \left[ \frac{1}{1 + jQ_L \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)} \right]^n \quad \dot{A}_{v0} = \left( -\frac{p_1 p_2 y_{fe}}{g_\Sigma} \right)^n$$

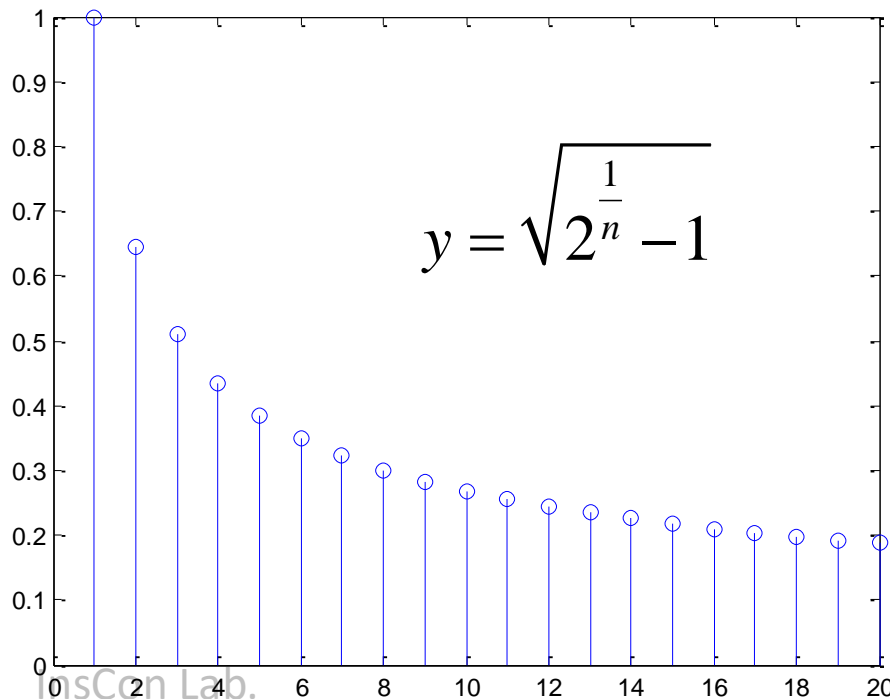
## 3.4 多级单调谐回路谐振放大器

### ➤ 2. 通频带

$$\frac{A_v}{A_{v0}} = \frac{1}{[1 + Q_L^2 (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2]^{\frac{n}{2}}} \approx \frac{1}{[1 + (Q_L \frac{2\Delta\omega}{\omega_0})^2]^{\frac{n}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$n$ 级放大器的通频带

$$(2\Delta\omega_{0.7})_n = \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1} \frac{\omega_0}{Q_L} = \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1} (2\Delta\omega_{0.7})_{\text{单级}}$$



例：若 $f_0=30\text{MHz}$ ，所需通频带为 $4\text{MHz}$ ，则：

单级实现所要求的品质因数为

$$Q_L = \frac{f_0}{2\Delta f_{0.7}} = \frac{30}{4} = 7.5$$

2级实现所要求的品质因数为

$$Q_L = \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1} \frac{f_0}{2\Delta f_{0.7}} = 4.83$$

## 3.4 多级单调谐回路谐振放大器

### ➤ 3. 选择性 (矩形系数)

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} = \frac{2\Delta\omega_{0.1}}{2\Delta\omega_{0.7}} = \frac{\sqrt{100^{\frac{1}{n}} - 1}}{\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}}$$

$$\frac{A_v}{A_{v0}} = \frac{1}{[1 + Q_L^2 (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2]^{\frac{n}{2}}} \approx \frac{1}{[1 + (Q_L \frac{2\Delta\omega}{\omega_0})^2]^{\frac{n}{2}}} = \frac{1}{10}$$

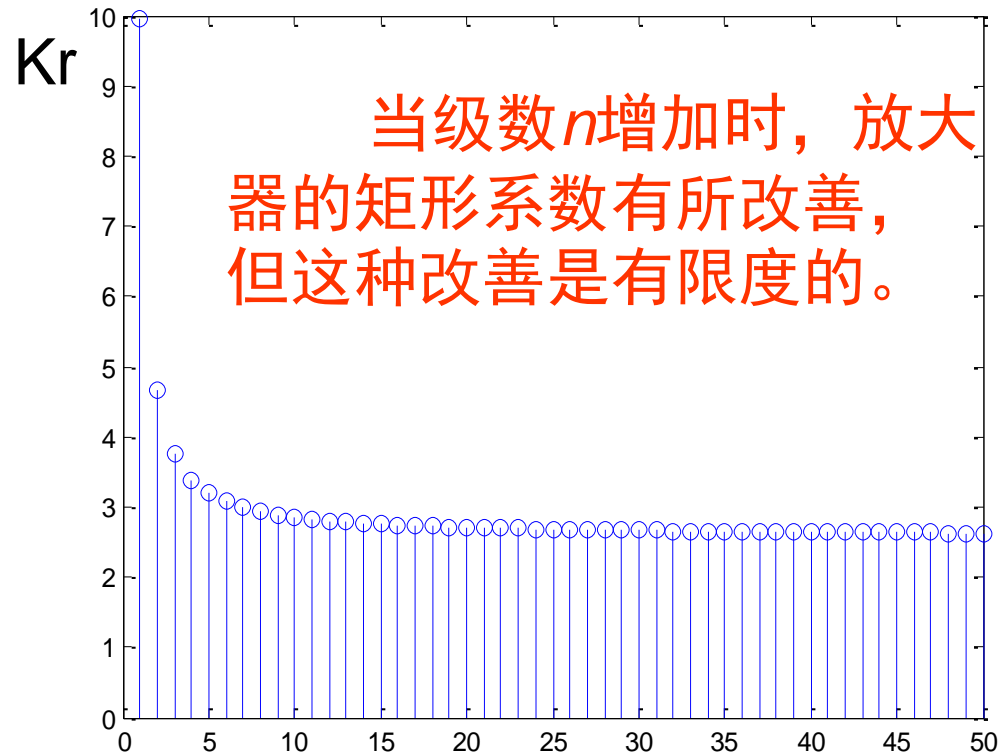
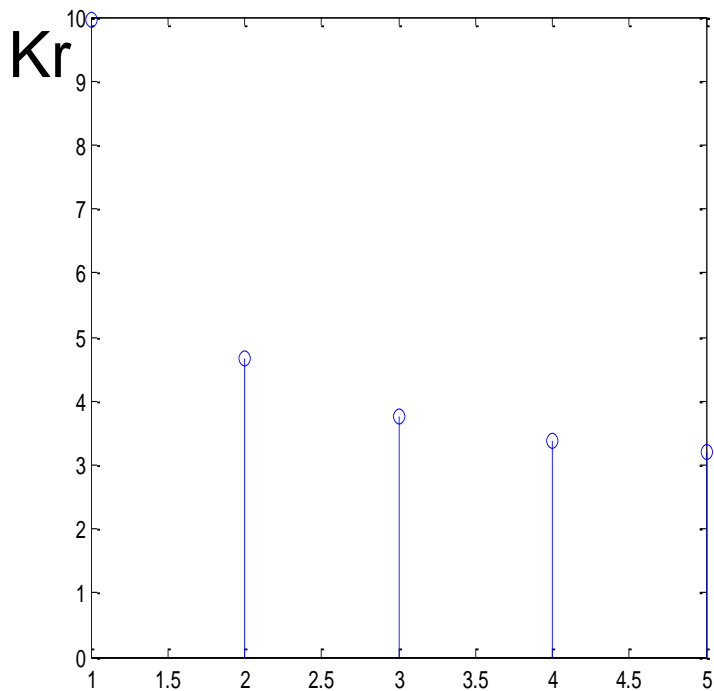
$$2\Delta\omega_{0.1} = \sqrt{10^{\frac{2}{n}} - 1} \frac{\omega_0}{Q_L}$$

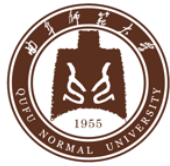
$$\text{通频带 } 2\Delta\omega_{0.7} = \sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1} \frac{\omega_0}{Q_L}$$

## 3.4 多级单调谐回路谐振放大器

### ➤ 3. 选择性 (矩形系数)

$$K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}} = \frac{2\Delta\omega_{0.1}}{2\Delta\omega_{0.7}} = \frac{\sqrt{100^{\frac{1}{n}} - 1}}{\sqrt{2^{\frac{1}{n}} - 1}}$$





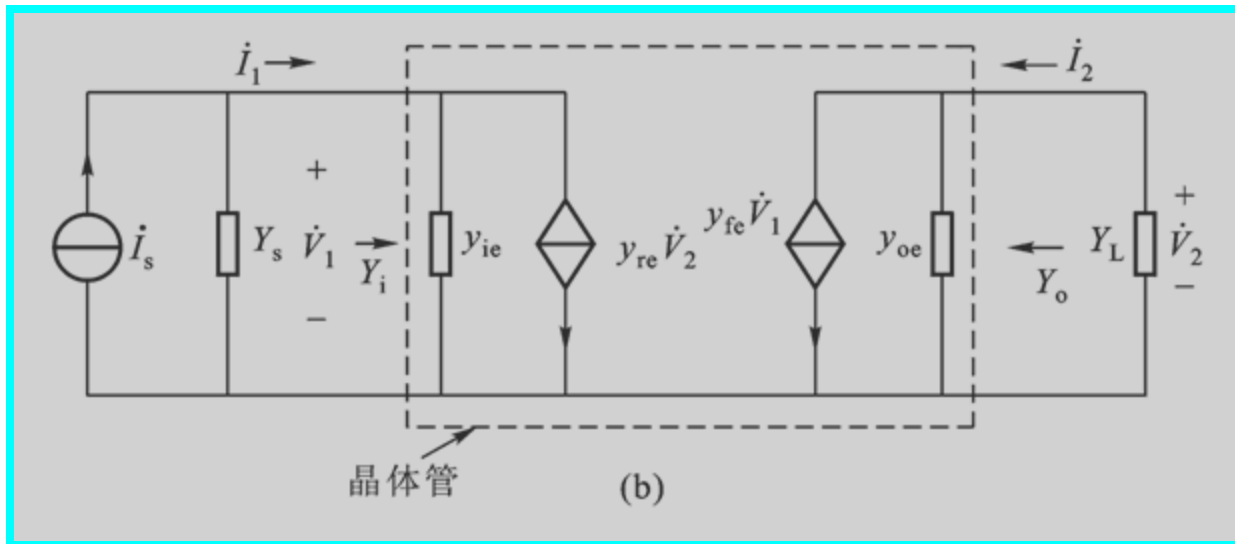
# Chapter 3 高频小信号放大器

- ➡ 3.1 概述
- ➡ 3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数
- ➡ 3.3 单调谐回路谐振放大器
- ➡ 3.4 多级单调谐回路谐振放大器
- ➡ 3.5 双调谐回路谐振放大器
- ➡ **3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施**
- ➡ 3.7 谐振放大器常用电路和集成电路谐振放大器
- ➡ 3.9 放大器中的噪声
- ➡ 3.10 噪声的表示和计算方法



## 3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施

### ➤ 1. 放大器的输入导纳和输出导纳



$$Y_i = y_{ie} - \frac{y_{re} y_{fe}}{y_{oe} + Y_L}$$

$$Y_o = y_{oe} - \frac{y_{re} y_{fe}}{y_{ie} + Y_s}$$

$$Y_i \Big|_{y_{re}=0} = y_{ie}$$

$$Y_o \Big|_{y_{re}=0} = y_{oe}$$

## 3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施

### ➤ 1. 放大器的输入导纳和输出导纳

由于晶体管存在  $y_{re} \neq 0$ ，输出电压  $V_o$  可以反作用到输入端引起电流的变化，这就是反馈作用。

放大器的输入导纳：

$$Y_i = y_{ie} - \frac{y_{fe} y_{re}}{y_{oe} + Y_L} = y_{ie} + Y_F$$

实际电路中，

$$y_{ie} = g_{ie1} + j\omega C_{ie1}$$

$$Y_F = g_F + jb_F$$

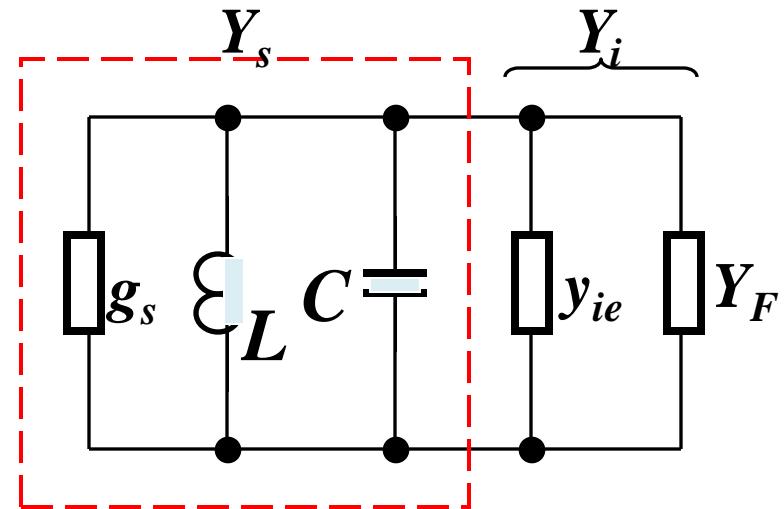


图3.6-1 等效输入端回路

## 3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施

### ➤ 1. 放大器的输入导纳和输出导纳

当有 $Y_F$ 时:

$Y_F = g_F + jb_F$ , 实际上  $g_F$  是与  $y_{fe}$ 、 $y_{re}$ 、 $y_{oe}$  和  $Y_L$  有关, 还与频率有关。

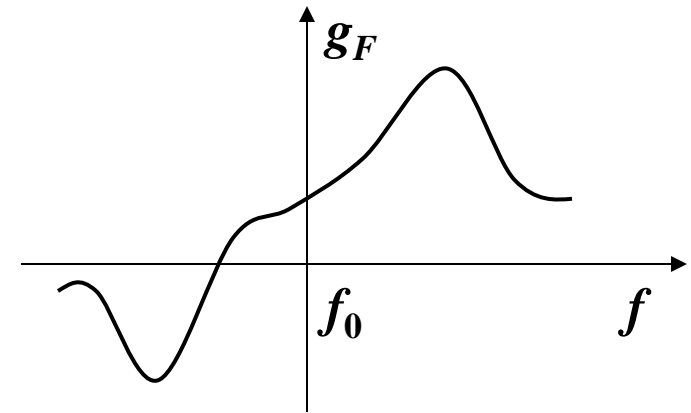


图3.6-2 反馈电导与频率的变化曲线

$Y_F$  的  $g_F$  使输入电导发生变化, 改变  $Q_L$  值;

$Y_F$  的  $b_F$  使输入谐振回路失谐, 影响增益  $A_v$ , 通频带  $2\Delta f_{0.7}$ , 选择性  $k_{r0.1}$ 。

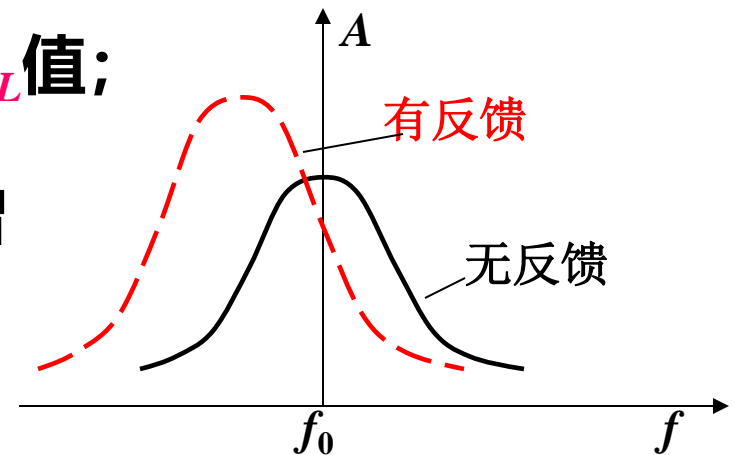


图3.6-3 反馈电导对放大器谐振曲线对影响

## 3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施

### 特别值得注意：

$g_F$  在某些频率出现负值，即负电导

$$g_F < 0 \Rightarrow g_{\Sigma} \downarrow \Rightarrow Q_L \uparrow \Rightarrow 2\Delta f_{0.7} \downarrow \Rightarrow A_v \uparrow$$

$g_F < 0$  可以理解为回路提供能量， $g_F$  越大，影响越严重。

当  $g_F$  负值抵消  $g_s + g_{ie}$  的正值时，即

$$g_{\Sigma} = 0 \Rightarrow Q_L \rightarrow \infty \Rightarrow \text{自激}$$

即使  $g_F$  负值没有全部抵消

$$g_F + g_s + g_{ie} < g_s + g_{ie}$$

不产生自激，也潜在不稳定因素。

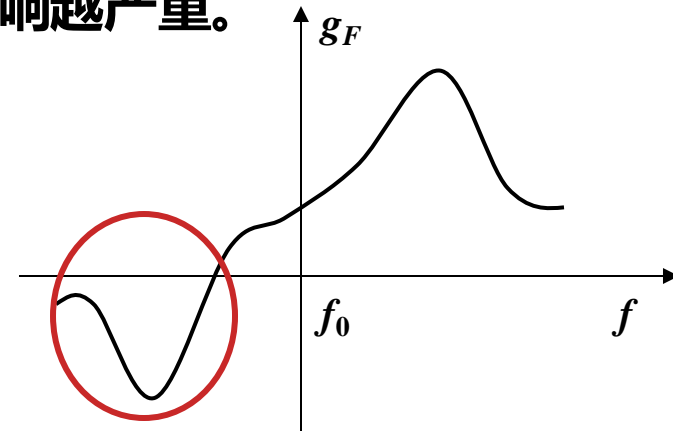


图3.6-2 反馈电导与频率的变化曲线

因此，消除不稳定因素，克服或降低  $y_{re}$  的影响，远离自激点。

## 3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施

### ➤ 2. 放大器不产生自激振荡和远离自激的条件

当  $Y_s + Y_i = 0$  时，表示反馈的能量抵消了回路的损耗的能量，且电纳部分也恰好抵消。

$$Y_s + Y_i = g_s + jB_s + g_i + jB_i = 0$$

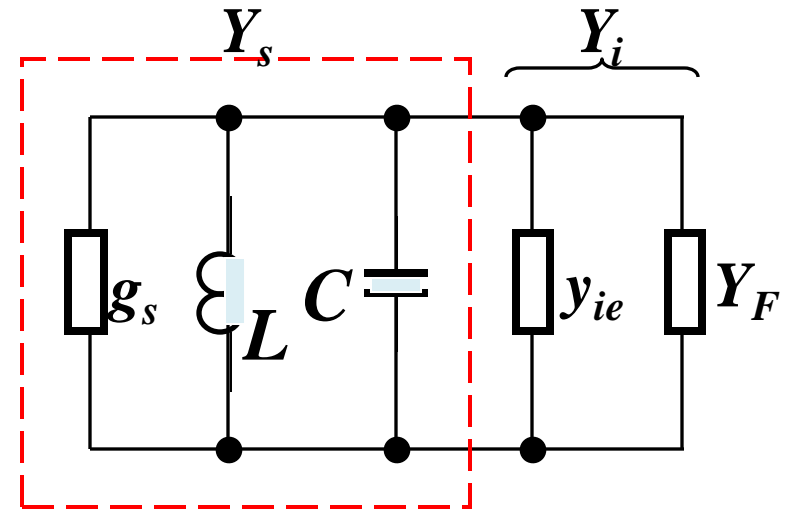


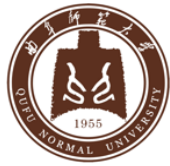
图3.6-1 等效输入端回路

### 产生自激的条件

$$Y_s + y_{ie} - \frac{y_{fe} y_{re}}{y_{oe} + Y_L} = 0 \quad \Rightarrow$$

$$\frac{(Y_s + y_{ie})(y_{oe} + Y_L')}{y_{fe} y_{re}} = 1$$

$$Y_s + y_{ie} = g_s + g_{ie} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C_{ie} = (g_s + g_{ie})(1 + j\xi_1)$$



## 3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施

### ➤ 2. 放大器不产生自激振荡和远离自激的条件

$$Y_s + y_{ie} = g_s + g_{ie} + j\omega C + \frac{1}{j\omega L} + j\omega C_{ie} = (g_s + g_{ie})(1 + j\xi_1)$$

式中  $\xi_1 = Q_1 \left( \frac{f}{f_o} - \frac{f_o}{f} \right) \quad f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C + C_{ie})}} \quad Q_1 = \frac{\omega(C + C_{ie})}{g_s + g_{ie}}$

若用幅值和角度形式表示

$$Y_s + y_{ie} = (g_s + g_{ie})\sqrt{1 + \xi_1^2} \cdot e^{j\varphi_1} \quad \text{式中 } \varphi_1 = \arctan \xi_1$$

同理  $y_{oe} + Y_L = (g_{oe} + G_L)\sqrt{1 + \xi_2^2} \cdot e^{j\varphi_2} \quad \text{式中 } \varphi_2 = \arctan \xi_2$

假设放大器输入输出回路相同, 即  $\xi_1 = \xi_2 = \xi \quad \varphi_1 = \varphi_2 = \varphi$

可得:  $\frac{(g_s + g_{ie})(g_{oe} + G_L)(1 + \xi^2)e^{j2\varphi}}{|y_{fe}| |y_{re}| e^{j(\varphi_{fe} + \varphi_{re})}} = 1 \quad \leftarrow \frac{(Y_s + y_{ie})(y_{oe} + Y_L)}{y_{fe}y_{re}} = 1$

## 3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施

### ➤ 2. 放大器不产生自激振荡和远离自激的条件

$$\frac{(g_s + g_{ie})(g_{oe} + G_L)(1 + \xi^2)e^{j2\varphi}}{|y_{fe}| |y_{re}| e^{j(\varphi_{fe} + \varphi_{re})}} = 1$$

要满足上式条件必须满足幅值和相位两个条件，即

幅值条件

$$\frac{(g_s + g_{ie})(g_{oe} + G_L)(1 + \xi^2)}{|y_{fe}| |y_{re}|} = 1$$

相位条件

$$2\varphi = \varphi_{fe} + \varphi_{re}$$

从幅值条件可看出

$|y_{re}|$  足够大时，左式数值减到1，满足幅值条件，产生自激；

$|y_{re}|$  足够小时，左式数值较大，不满足幅值条件，远离自激；

## 3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施

### ➤ 2. 放大器不产生自激振荡和远离自激的条件

定义  $S = \frac{(g_s + g_{ie})(g_{oe} + G_L)(1 + \xi^2)}{|y_{fe}| |y_{re}|}$  称为**谐振放大器的稳定系数**

若 $S = 1$ , 放大器自激, 若 $S \gg 1$ , 放大器稳定, 一般取 $S = 5 \sim 10$ 。

**说明:** 某 $f < f_o$ 时, ( $\xi = -1$ ) 满足相位条件, 可能产生自激。

假设  $g_s + g_{ie} = g_1$   $g_{oe} + G_L = g_2$  则得

$$S = \frac{2g_1g_2}{\omega_o C_{re} |y_{fe}|}$$

若使 $S \gg 1$ , 除选 $C_{re}$  较小的晶体管外,  $g_1$  和  $g_2$  越大越好。

放大器的电压增益写成

$$A_{vo} = \frac{|y_{fe}|}{g_2} \Rightarrow g_2 = \frac{|y_{fe}|}{A_{vo}}$$

由上式可见: **放大器的稳定性与增益相互矛盾。**



## 3.6 谐振放大器的稳定性与稳定措施

关于放大器稳定性的正确结论有（ ）。

- A** 谐振放大器的稳定系数越大工作越稳定
- B** 放大器的稳定性与增益相互矛盾
- C** 谐振放大器的稳定系数等于1时工作稳定
- D** 消除不稳定因素，克服或降低 $y_{re}$ 的影响，远离自激点。

ABD

## 本章小结

1. 高频小信号放大器是通常分为**谐振放大器**和**非谐振放大器**，谐振放大器的负载为**串、并联谐振回路或耦合回路**。
2. 高频小信号放大器由于信号小，可以认为它工作在管子的线性范围内，常采用**有源线性四端网络**进行分析。  
**Y参数等效电路和混合 $\pi$ 等效电路**是描述晶体管工作的重要模型。  
Y参数与混合 $\pi$ 参数有对应关系，Y参数不仅与静态工作点有关，而且是工作频率的函数。
3. 小信号谐振放大器的选频性能可由**通频带**和**选择性**两个质量指标来衡量。用**矩形系数**可以衡量实际幅频特性接近理想幅频特性的程度，矩形系数越接近于1，则谐振放大器的选择性愈好。
4. 单级单调谐放大器是小信号放大器的基本电路，其电压增益主要决定于管子的参数、信号源和负载，为了提高电压增益，谐振回路与信号源和负载的连接常采用**部分接入**方式。
5. 由于晶体管内部存在**反向传输导纳 $Y_{re}$** ，使晶体管成为**双向器件**，在一定频率下使回路的总电导为零，这时放大器会产生自激。为了克服自激常采用“中和法”和“失配法”使晶体管单向化。



*Thank You !*

Q & A