

# 第2章 小信号调谐放大器

---

2.1 概述

2.2 LC谐振回路

2.3 单调谐放大器

2.4 晶体管高频等效电路及频率参数

2.5 高频调谐放大器

2.6 调谐放大器的级联

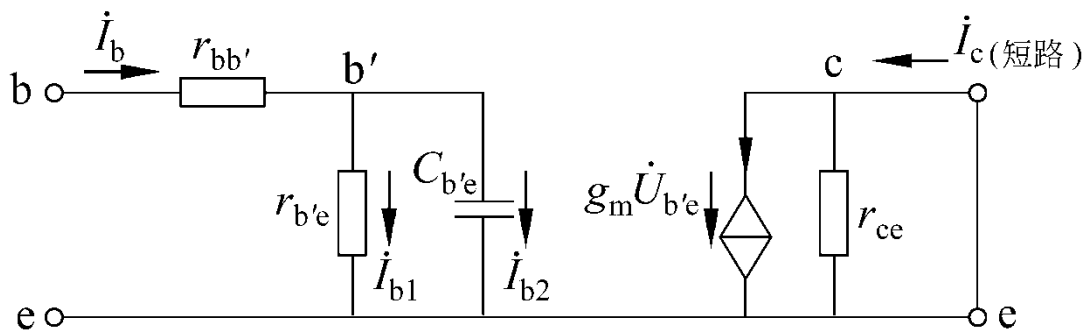
2.7 高频调谐放大器的稳定性

2.8 集中选频小信号调谐放大器

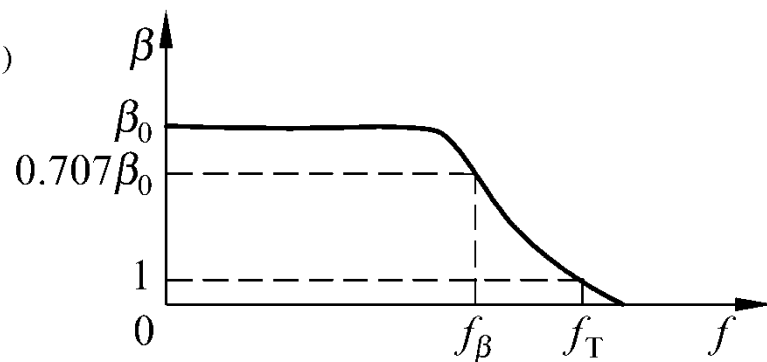
## 2.4.4 晶体管的高频放大能力及其频率参数

晶体管在高频情况下的放大能力随频率增高而下降。

### 1. $\beta$ —— 共发射极电流放大系数



$$\text{定义 } \beta = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{U_{ce}=0} \Rightarrow \beta = \frac{\beta_0}{1 + jf / f_\beta}$$



$f_\beta$  ——  $\beta$  截止频率

$\beta$  下降至1时的频率，称为特征频率。 $f_T$  是表示晶体管丧失电流放大能力时的极限频率。

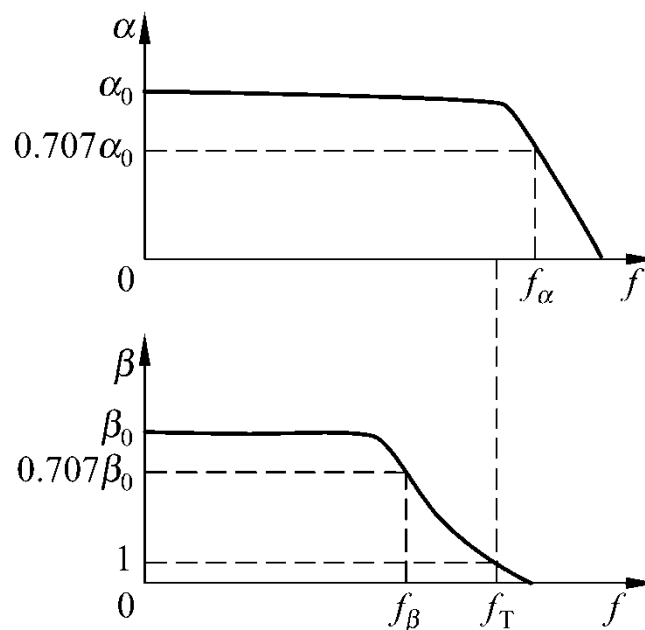
## 2. $\alpha$ ——共基极电流放大系数，定义为

$$\alpha = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_e} \right|_{\dot{U}_{cb}=0}$$

$f_\alpha$  ——  $\alpha$ 截止频率

## 3. 参数间的关系

$$f_\beta < f_T < f_\alpha$$



$f_\alpha$  最高，说明在高频情况下共基接法的频率响应应优于共射接法。

#### 4. 最高振荡频率 $f_{\max}$

晶体管共射极接法功率增益 $A_p=1$ 时的工作频率。 $f_{\max}$ 表示晶体管所能够适应的**最高极限频率**。在此工作频率时晶体管已经不能得到功率放大。当 $f > f_{\max}$ 时，无论使用什么方法都不能使晶体管产生振荡。

频率参数关系  $f_{\max} > f_T > f_\beta$

➤  $f_T$ 、 $f_\beta$ 是晶体管的重要参数。在实际工作中，为不使 $\beta$ 过小，应选择 $f_T$ 远大于工作频率，至少3-5倍。

# 第2章 小信号调谐放大器

---

2.1 概述

2.2 LC谐振回路

2.3 单调谐放大器

2.4 晶体管高频等效电路及频率参数

2.5 高频调谐放大器

2.6 调谐放大器的级联

2.7 高频调谐放大器的稳定性

2.8 集中选频小信号调谐放大器

## 2. 6调谐放大器的级联

---

实际应用中，为了提高增益或改善选择性，采用多级级联放大器。

- 多级单调谐放大器（同步调谐放大器）
- 参差调谐放大器
- 双调谐回路放大器

## 2. 6调谐放大器的级联

### 2. 6. 1 多级单调谐放大器（同步调谐放大器）

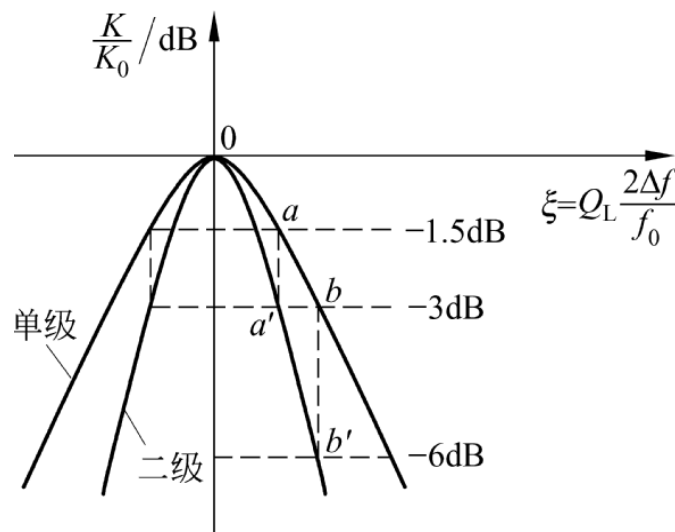
#### 1. 多级放大器的增益

假设有 $n$ 级放大器，特性相同，每一级均调谐于同一频率 $f_0$ 。

总增益  $K = K_1 \cdot K_2 \cdots K_n$

如果各级放大器的增益相同，  
则归一化谐振曲线表达式

$$\left| \frac{K_v}{K_{v0}} \right| = \frac{1}{[1 + (Q_L \frac{2\Delta f}{f_0})^2]^{\frac{n}{2}}}$$



## 2. 通频带

令

$$\frac{1}{[1 + (Q_L \frac{2\Delta f}{f_0})^2]^{\frac{n}{2}}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \Rightarrow 2\Delta f_{0.7(\text{总})} = \sqrt{2^{1/n} - 1} \cdot \frac{f_0}{Q_L}$$

或  $B_n = \sqrt{2^{1/n} - 1} \cdot B_1$

$\sqrt{2^{1/n} - 1}$  —— 缩小系数 (缩减因子)

①  $n \uparrow \rightarrow B_n \downarrow$

② 保持  $B_n$  不变  $\rightarrow B_1 \uparrow$  (各级)  $\rightarrow K_1 \downarrow$  (各级)

因此, 增益和通频带存在严重矛盾。



### 3. 选择性

$$B_{0.7} = 2\Delta f_{0.7(\text{总})} = \sqrt{2^{1/n} - 1} \cdot \frac{f_0}{Q_L} \Rightarrow K_{0.1} = \frac{B_{0.1}}{B_{0.7}} = \frac{\sqrt{100^{1/n} - 1}}{\sqrt{2^{1/n} - 1}}$$
$$B_{0.1} = 2\Delta f_{0.1(\text{总})} = \sqrt{100^{1/n} - 1} \cdot \frac{f_0}{Q_L}$$

<b>n</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>K<sub>0.1</sub></b>	<b>9.95</b>	<b>4.66</b>	<b>3.75</b>	<b>3.4</b>	<b>3.2</b>	<b>3.1</b>

①多级级联放大器的选择性比单级好。

②当n>3时，选择性的改善程度不明显。所以不能靠增加级数改善选择性。

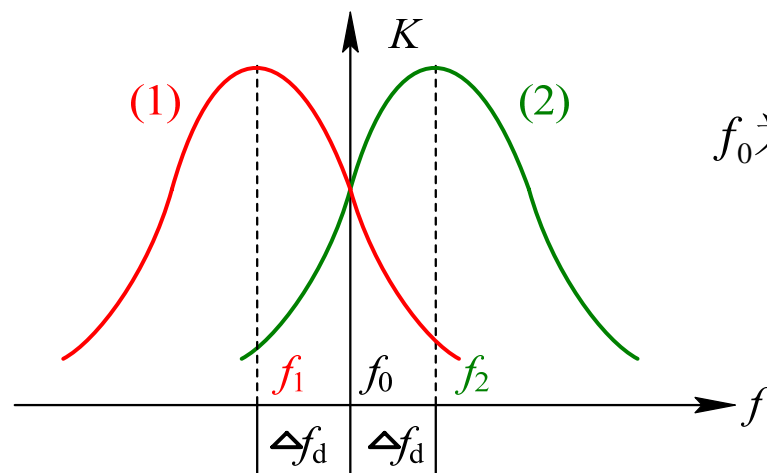
③改善：采用参差调谐放大器、双调谐回路放大器。

## 2.6.2 参差调谐放大器

- 目的：展宽通频带
- 类型：双参差调谐，三参差调谐

### 1. 双参差调谐放大器

结构：两级为一组，一级调谐在  $f_1 = f_0 - \Delta f_d$ ，一级调谐在  $f_2 = f_0 + \Delta f_d$ 。



$f_0$  为信号的中心频率

由曲线，在  $f_1$  至  $f_2$  频率范围内，两回路特性变化趋势相互补偿；对每一个谐振回路而言，都是工作于失谐状态。

在统一的广义失谐  $\xi$  坐标系中，第一级

$$\left| \frac{K_v}{K_{v0}} \right|_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + (\xi + \xi_0)^2}}$$

第二级

$$\left| \frac{K_v}{K_{v0}} \right|_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + (\xi - \xi_0)^2}}$$

$$\xi_0 = Q_L \frac{2\Delta f_d}{f_0}$$

广义参差失谐量

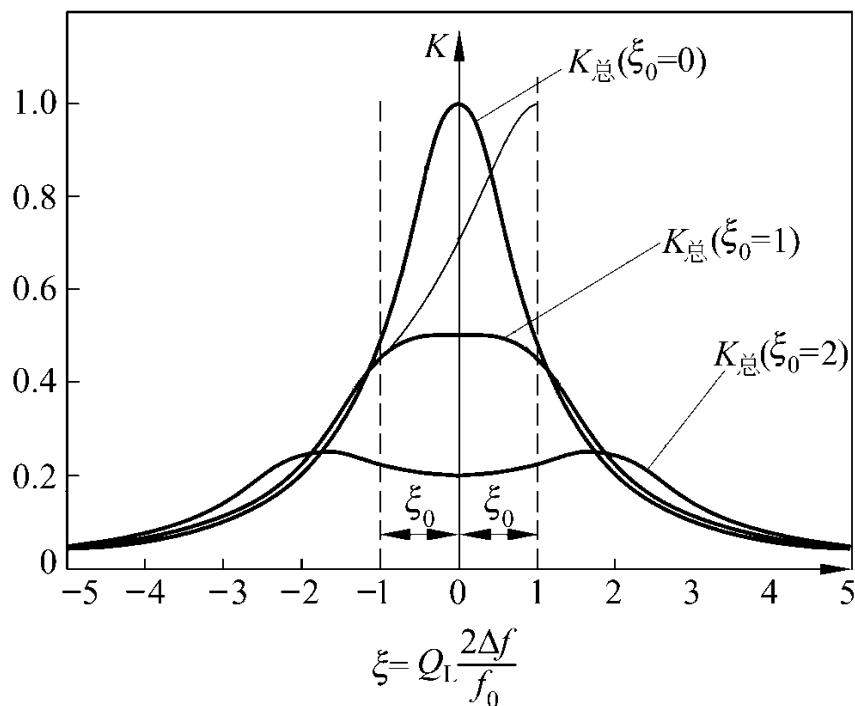
两级相乘  $K = \frac{1}{\sqrt{1 + (\xi + \xi_0)^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (\xi - \xi_0)^2}} = \frac{1}{\sqrt{(1 + \xi_0^2 - \xi^2)^2 + 4\xi^2}}$

为求出  $K$  最大值，令  $\frac{\partial K}{\partial \xi} = 0$ ，解得

$$\xi = 0, \pm \sqrt{\xi_0^2 - 1}$$

## 讨论：参差放大器的频率特性与广义失谐量 $\xi_0$ 有关

1.  $\xi_0 < 1$ ，谐振曲线为单峰； $\xi_0 > 1$ ，谐振曲线为双峰。
2.  $\xi_0 = 1$ ，两者的分界线，相当于单峰中最平坦的情况。
3.  $\xi_0$  愈小，频率曲线愈尖（ $\xi = 0$ ）；随着  $\xi_0$  的增加，峰值的高度也随之下降，且下凹。



$$\begin{cases} \xi_0 = 1 \\ \xi_0 = 0 \\ \xi_0 = 2 \end{cases}$$

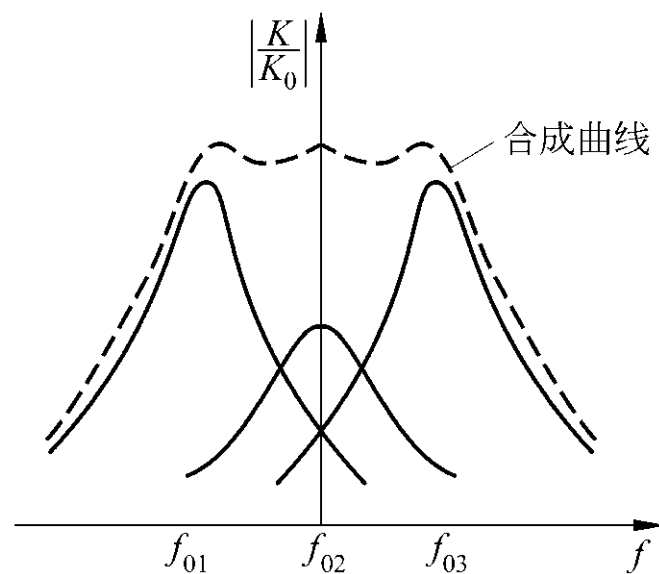
总通频带展宽，但增益下降

如  $\xi_0 = 1$ ，增益下降  $\frac{1}{2}$

$\xi_0$  愈大，下凹愈严重。

## 2. 三参差调谐放大器

- 结构：三级为一组
- 优点：幅频特性更接近矩形，通频带更宽
- 缺点：难调整



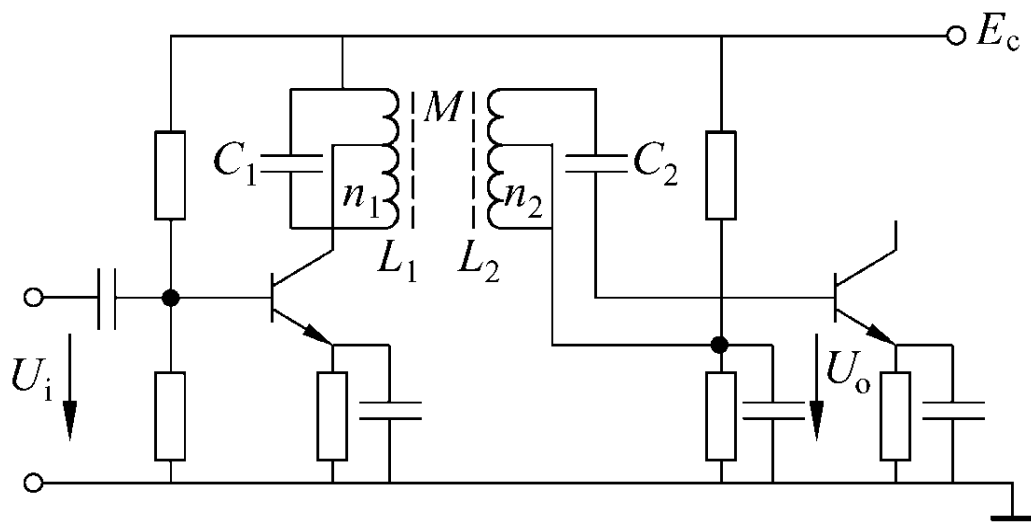
两级工作于参差调谐的双峰状态，第三级调谐于  $f_0$

$$f_{01} = f_0 - \Delta f_d$$

$$f_{02} = f_0$$

$$f_{03} = f_0 + \Delta f_d$$

### 2.6.3 双调谐回路放大器



电压增益 $|K_v|$   
式 (2-99)

图2-36双调谐回路放大器图

谐振频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}}$ ，品质因数 $Q_{L1} = Q_{L2}$

耦合系数 $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} = \frac{M}{L}$  (松耦合，指 $k$ 值较小)

广义耦合系数 $\eta = kQ_L$

## 2.6.3 双调谐回路放大器

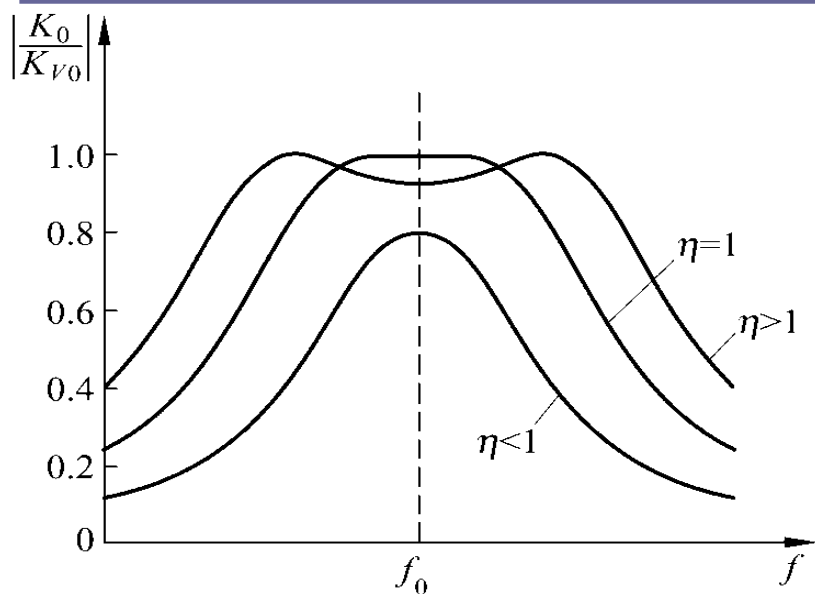


图 2-38 不同耦合程度时的谐振曲线

$\eta < 1$ , 弱耦合, 单峰

$\eta = 1$ , 临界耦合

$\eta > 1$ , 强耦合, 双峰; 有起伏

① 临界耦合时有较好的选择性: 谐振曲线顶部较平坦, 下降部分较陡

② 通频带:  $B = \sqrt{2} \frac{f_0}{Q_L}$

③ 矩形系数:  $K_{0.1} = \frac{B_{0.1}}{B_{0.7}} = 3.16$

较小, 更接近于理想矩形

临界状态——最佳工作状态。  
通频带和选择性的矛盾较单调谐回路有了较大改善。

# 四种调谐放大器比较

	单回路	两级级联 $\xi_0 = 0$	双参差 $\xi_0 = 1$	双调谐 $\xi = 0, \eta = 1$	三参差 $\xi_0 = 2$
广义通频带 $Q_L \frac{2\Delta f_{0.7}}{f_0}$	1	$\sqrt{2^{\frac{1}{2}} - 1} \approx 0.64$	$\sqrt{2} \approx 1.4$	1.4	3
矩形系数 $K_{0.1}$	9.95	4.66	3.16 增益下降	3.16	



---

## □ 结论:

1. 单调谐放大器的优点是：电路简单，调试容易；

缺点是：选择性差，增益和通频带的矛盾比较突出。

2. 改善放大器的选择性以及解决通频带和增益之间的矛盾的方法是：采用调谐放大器的级联——参差放大器、双调谐回路放大器；

缺点是：调试较为困难。

# 作业

---

教材 2—22

# 第2章 小信号调谐放大器

---

2.1 概述

2.2 LC谐振回路

2.3 单调谐放大器

2.4 晶体管高频等效电路及频率参数

2.5 高频调谐放大器

2.6 调谐放大器的级联

2.7 高频调谐放大器的稳定性

2.8 集中选频小信号调谐放大器

## 2. 7 高频调谐放大器的稳定性

### 2. 7. 1 晶体管内部反馈的有害影响

$$y_{re} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{U}_c} \right|_{U_b=0}$$

输出电压反作用于输入端，从而形成内部反馈，且随着工作频率的升高，这种反馈越来越强。

前面讨论的放大器，都是假定工作于稳定状态，输出端对输入电路没有影响，即  $y_{re} = 0$

实际上， $y_{re} \neq 0$ ，因而将引起内部反馈。

晶体管内部反馈的有害影响：

- ① 放大器调试困难
- ② 放大器工作不稳定

## 一、放大器调试困难

---

内部反馈使放大器的输入导纳与负载 $Y_L$ 有关 (2-111)

在调整输出回路时，改变 $Y_L$ ，放大器的输入端就受到影响

$$Y_i = \frac{\dot{I}_b}{\dot{U}_b} = y_{ie} - \frac{y_{fe} y_{re}}{y_{oe} + Y_L}$$

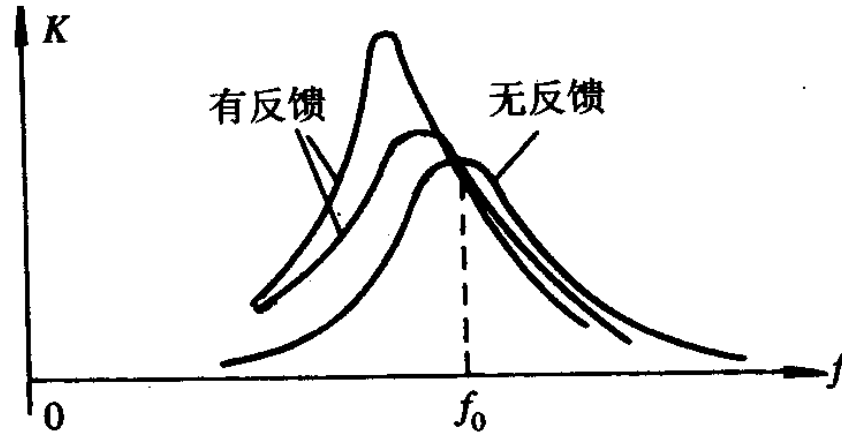
输出导纳与信号源 $Y_s$ 有关 (2-112)

调整输入回路时， $Y_s$ 改变了，放大器的输出导纳也随之改变，输出电路的调谐和匹配又发生了影响。

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

## 二、放大器工作不稳定

晶体管内部反馈的另一有害影响是使放大器的工作不稳定



增益、通频带、选择性受到影响，谐振曲线发生畸变

## 2.3.2 解决的方法

---

1、从晶体管本身想办法，因为  $y_{re}$  主要由  $C_{b'c}$  决定，从晶体管制造工艺的着手，减小  $C_{b'c}$ ，减小反向传输导纳  $y_{re}$

2、在电路上想办法把  $y_{re}$  的作用抵消或减小。

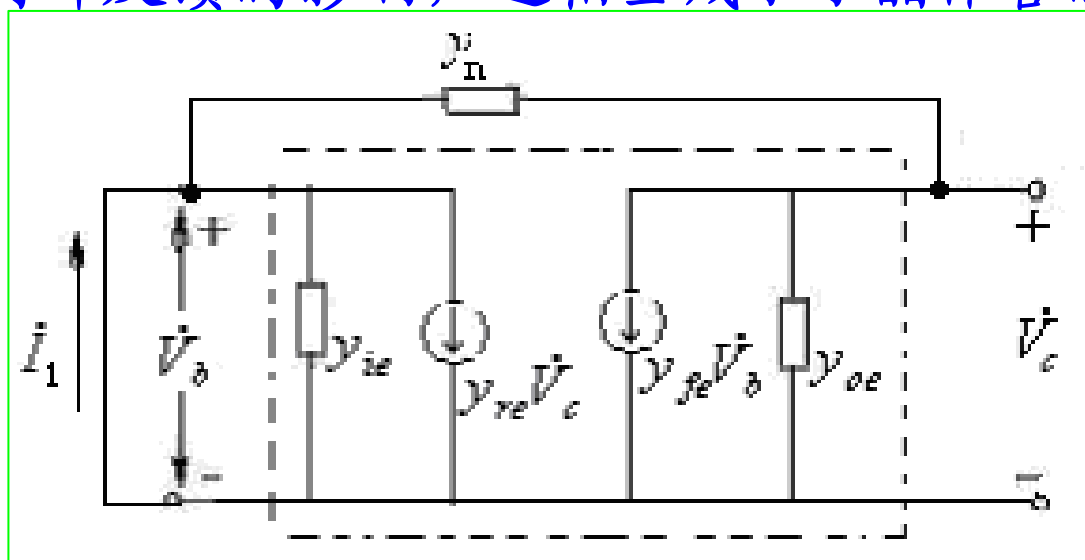
即从电路上设法消除晶体管的反向传输作用，使它变为单向器件。单向化的方法有两种，即中和法和失配法。

# 单向化方法

## 1. 中和法

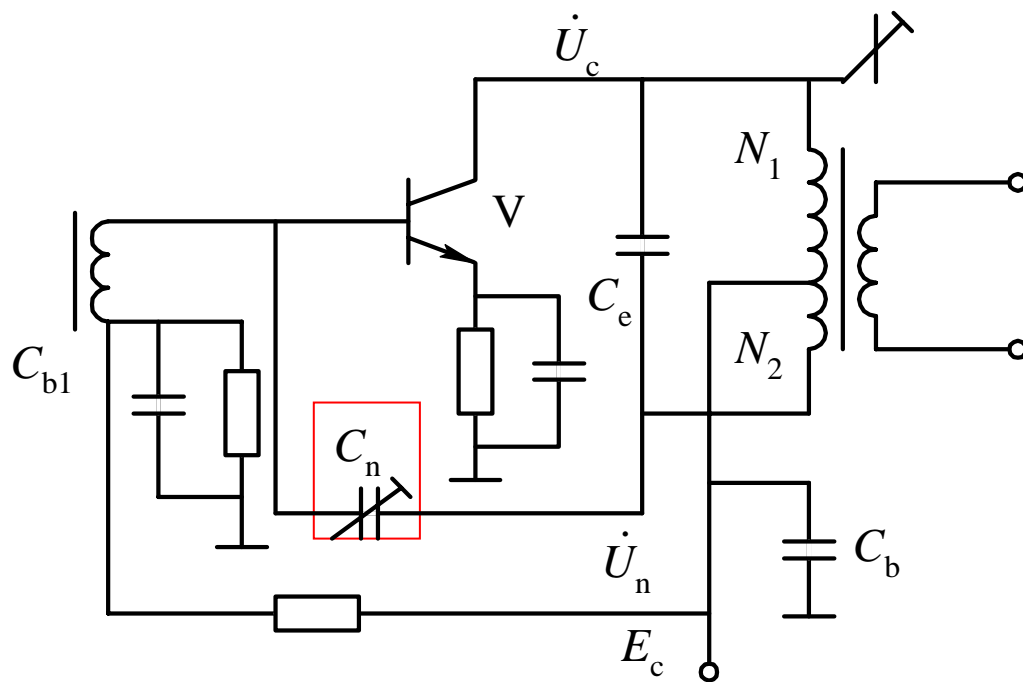
在放大器的线路中插入一个外加的反馈电路来抵消

$C_{b'c}$  内部反馈的影响，这相当减小了晶体管的  $y_{re}$ 。



由于 $y_{re}$ 与频率有关，不可能在所有频率下都使 $y_{re}$ 抵消。  
实际电路中只能在一个频率点起到中和作用。





目前仅在收音机中采用这种方法，要求较高的通信设备中大都不采用中和电路

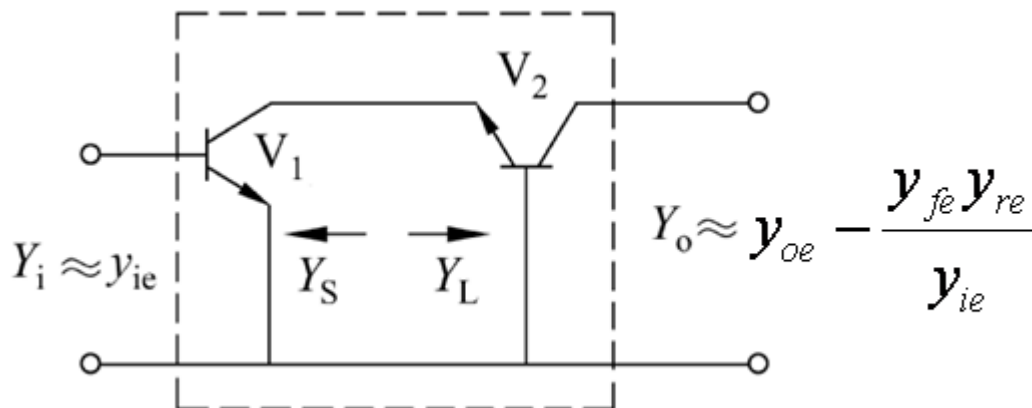
## 2. 失配法

①信号源内阻不与晶体管输入阻抗匹配

②晶体管输出端负载阻抗不与晶体管的输出阻抗匹配

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

$(Y_L \gg y_{oe})$



共射-共基组合电路

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

$(Y_s \ll y_{ie})$

- ✓ 共基电路输入阻抗低,  $Y_L$  大
- ✓ 级联后功率增益大

# 第2章 小信号调谐放大器

---

2.1 概述

2.2 LC谐振回路

2.3 单调谐放大器

2.4 晶体管高频等效电路及频率参数

2.5 高频调谐放大器

2.6 调谐放大器的级联

2.7 高频调谐放大器的稳定性

2.8 集中选频小信号调谐放大器

## 2.8 集中选频小信号调谐放大器

### 1. 集中选频放大器的组成框图



### 2. 主要优点

- 1) 电路简单, 调整方便;
- 2) 性能稳定;
- 3) 易于大规模生产、成本低。

---

2.8.1 石英晶体滤波器（压电效应）

2.8.2 陶瓷滤波器（压电效应）

2.8.3 声表面波滤波器（声电换能）

自学

# 小结:

---

## 一、本章重点：晶体管单调谐回路放大器

1、LC并联谐振电路的基本特性：

2、Y参数等效电路：

回路导纳、阻抗特性, 谐振频率, 谐振曲线, 通频带, 选择性等

$y_{ie}$ ,  $y_{re}$ ,  $y_{fe}$ ,  $y_{oe}$  都是频率的函数

### 3、质量指标：以单调谐放大器为例

#### (1) 增益

$$\frac{K_v}{K_{v0}} = \frac{1}{\sqrt{1 + (Q_L \frac{2\Delta f}{f_0})^2}}$$

谐振时,  $\Delta f = 0 (f = f_0)$  增益最大

功率增益——插入损耗  $20\lg(1 - \frac{Q_L}{Q_0})$

#### (2) 通频带

$$\frac{K_v}{K_{v0}} = 0.707 \rightarrow B_{0.7} = 2\Delta f_{0.7} = \frac{f_0}{Q_L}$$

$$Q_L = \frac{\omega_0 C}{g_\Sigma} = \frac{1}{\omega_0 L g_\Sigma}$$

级联时调谐放大器的通频带怎样变化？

---

### (3) 选择性

$$K_{0.1} = \frac{B_{0.1}}{B_{0.7}}, \quad \text{单调谐回路的选择性最差。}$$

Q 值越高，谐振曲线越陡峭，选择性越好，但通频带却越窄。

### (4) 稳定性: $y_{re} \neq 0$

解决方法：失配法——共射共基电路



## 4、重要概念：负载回路的“部分接入”

为了增大回路的有载Q值，提高电压增益，减少对回路谐振频率特性的影响，谐振回路与信号源和负载的连接大都采用部分接入方式。

(1) 接入系数

(2) 电感抽头、电容抽头、互感变压器接入方式的折算关系

例题：2-1

## 二、本章其他内容：

---

(1) 调谐放大器的级联——改善放大器的选择性，解决放大器的增益和通频带的矛盾。

(2) 晶体管的高频率参数