



# 第三章 高频谐振放大器

- 3.1 高频小信号放大器
- 3.2 高频功率放大器的原理与特性
- 3.3 高频功率放大器的实际线路



### 3.1 高频小信号放大器

#### 一、概述

“小信号”——指的是输入信号的电平较低，放大器工作在他的线性范围。

1. 功能：放大各种无线电设备中的高频小信号、阻抗变换和选频滤波

#### 2. 分类

(a) 根据频带宽度可分为窄带放大器和宽带放大器。一般被放大的都是窄带信号。

小信号放大器的基本类型是频带（窄带）放大器，它是以各种选频电路作负载，如并联谐振回路、耦合谐振回路等；

如果要放大多个高频信号，这时用高频宽带放大器，采用无选频作用的负载电路，如高频变压器或传输线变压器。



(b) 按有源器件可分为以分立源件为主的高频放大器和以集成电路为主的集中选频放大器。

### 3. 特点:

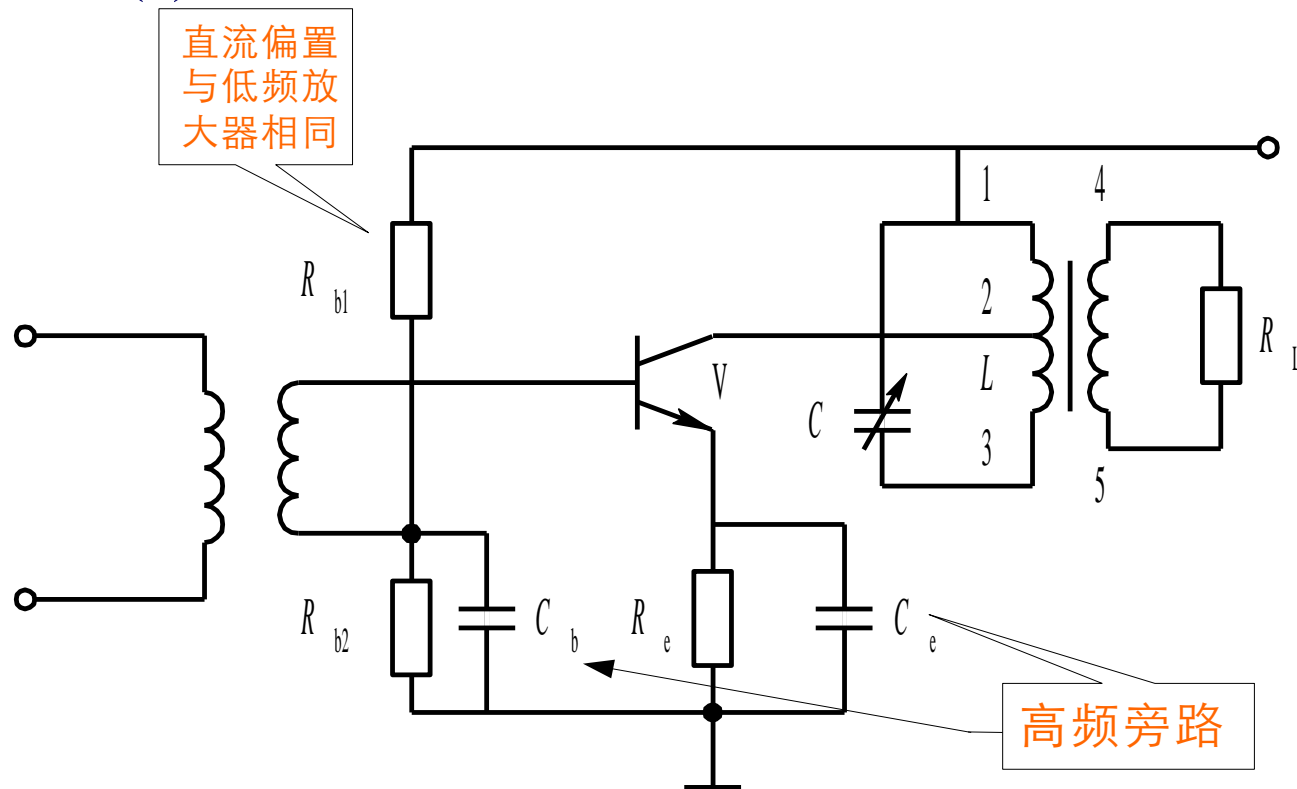
- (1) 管子线性放大, 输入信号很小, 着眼于电压增益。
- (2) 以 LC 回路做负载, 完成滤波和阻抗匹配。

### 4. 性能指标要求

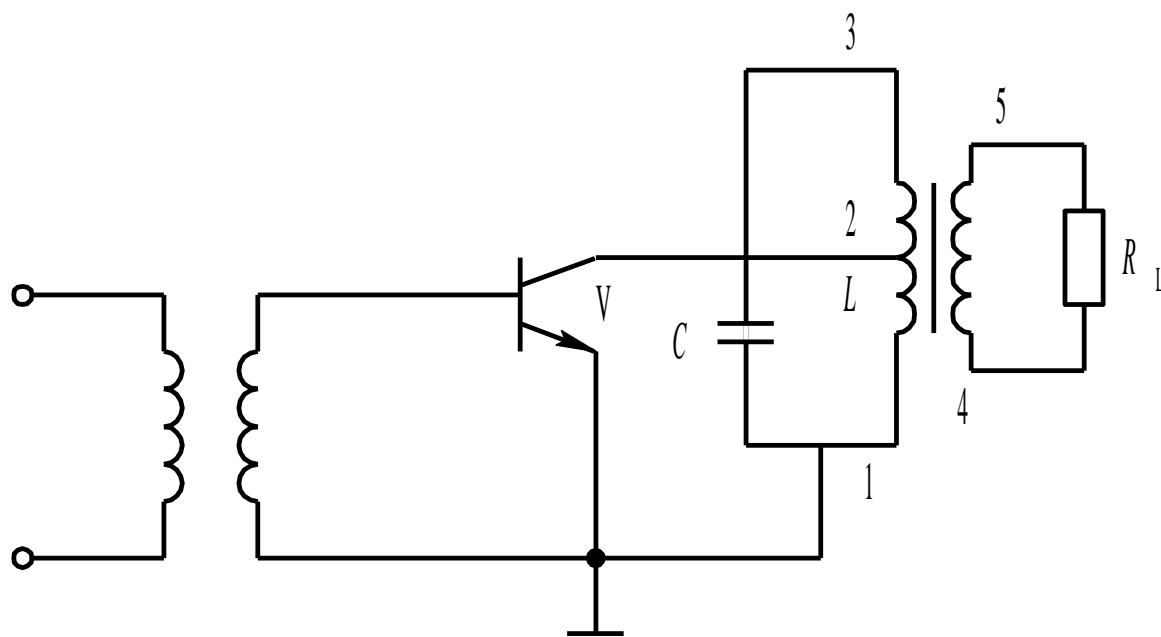
- (1) 增益高, 即放大量大
- (2) 频率选择性要好。选择所需信号, 抑制无用信号的能力要强。放大器的频带宽度和矩形系数是衡量选择性的重要参数。
- (3) 工作稳定可靠。要求放大器的性能尽可能的不受外界因素变化的影响, 不产生任何自激。

## 二、高频小信号谐振放大器的工作原理

图 3—1(a) 是一典型的高频小信号谐振放大器的实际线路。



(a) 实际线路



(b) 交流等效电路

图中采用**抽头谐振回路**作为放大器负载，对信号频率谐振，即  $\omega = \omega_0$ ，**完成阻抗匹配和选频滤波功能**。

输入的是高频小信号，放大器工作在A（甲）类状态

甲类（A）工作状态：晶体管发射结一直处于正向偏置；

乙类（B）工作状态：晶体管发射结半个周期正向，半个周期反向；

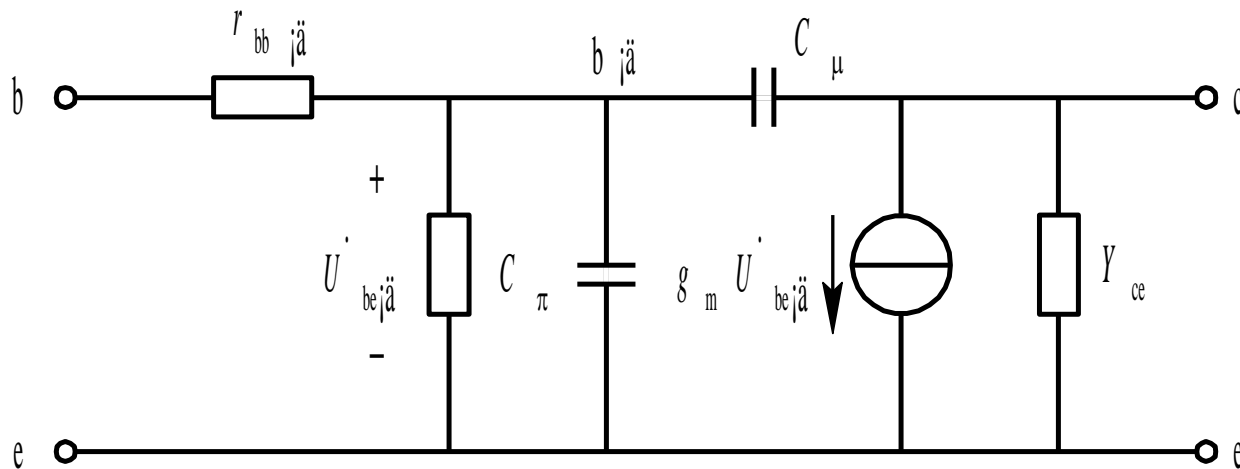
甲乙类（AB）工作状态：介于甲类和乙类之间。正偏时间大于半个周期

丙类（C）：发射结正偏时间小于半个周期。

## 三、放大器性能分析

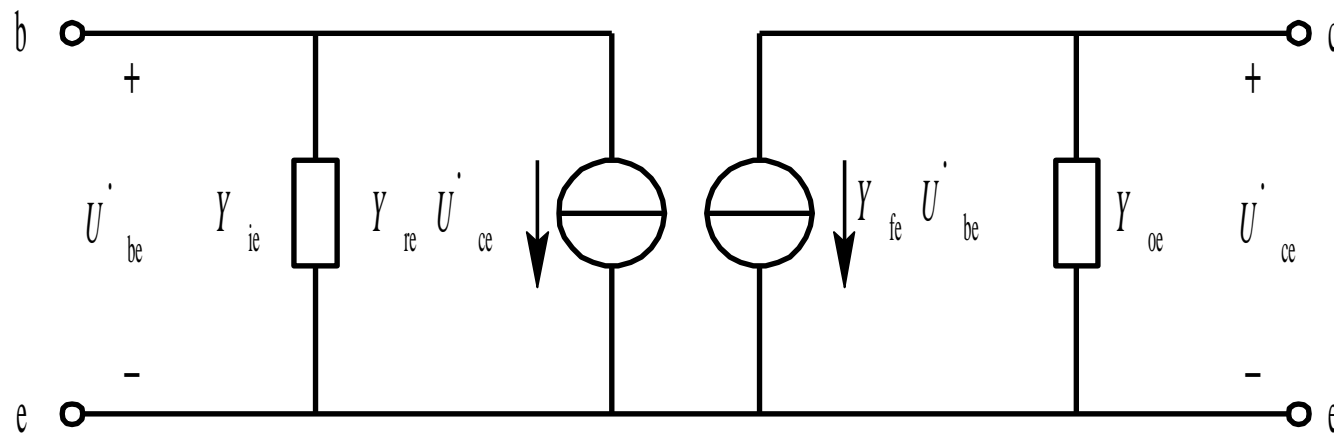
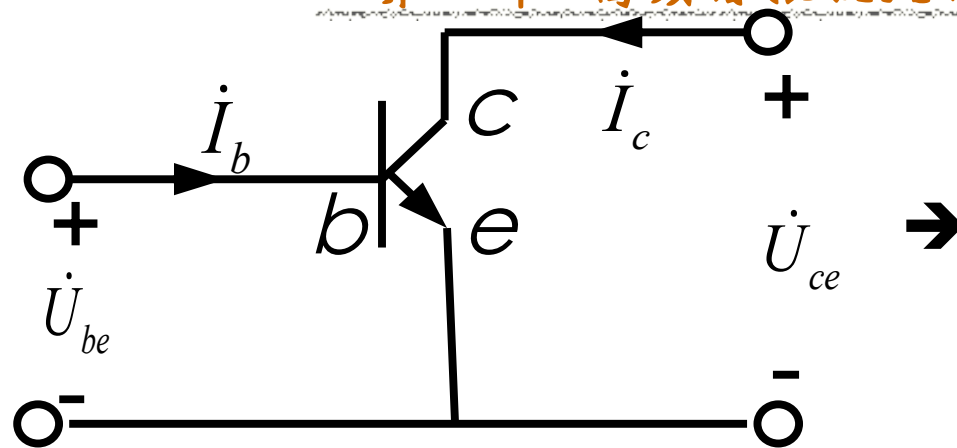
### 1. 晶体管高频等效电路

图 3—2(a) 是晶体管在高频运用时的混  $\Pi$  等效电路



(a)

图中， $C_{\pi}=C_{b'e}$ ； $C_{\mu}=C_{b'c}$ ，直接用混  $\pi$  等效电路分析放大器性能很不方便，因此用 Y 参数等效电路来分析。



(b) Y 参数等效电路



其中：

$Y_{ie}$  是输出交流短路时的输入导纳：
$$Y_{ie} = \frac{\dot{I}_b}{\dot{U}_b} \Big|_{\dot{U}_{ce}=0}$$

$Y_{re}$  是输入交流短路时的反向传输导纳：
$$Y_{re} = \frac{\dot{I}_b}{\dot{U}_{ce}} \Big|_{\dot{U}_{be}=0}$$

$Y_{fe}$  输出交流短路时正向传输导纳：
$$Y_{fe} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_{be}} \Big|_{\dot{U}_{ce}=0}$$

$Y_{oe}$  是输入交流短路时输出导纳：
$$Y_{oe} = \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_{ce}} \Big|_{\dot{U}_{be}=0}$$





晶体管的 Y 参数可以直接测量得到，也可根据混等效电路换算得来。在忽略  $r_{b'e}$  及满足  $C_\pi \gg C_\mu$  的条件下，Y 参数与混  $\Pi$  参数之间的关系为：

一般在工程上会做如下近似：

（1）分析放大器的增益时，忽略  $y_{re}$  的影响；分析放大器稳定性时，考虑  $y_{re}$  的影响。

（2）小信号放大器，窄带工作，故在讨论的频率范围内，近似认为各参数为常数，不随频率变化。

$$Y_{ie} \square \frac{j\omega C_\pi}{1 + j\omega C_\pi r_{bb}} \quad (3-1)$$

$$Y_{oe} \square j\omega C_u + \frac{j\omega C_\pi r_{bb} g_m}{1 + j\omega C_\pi r_{bb}} \quad (3-2)$$

$$Y_{fe} \square \frac{g_m}{1 + j\omega C_\pi r_{bb}} \quad (3-3)$$

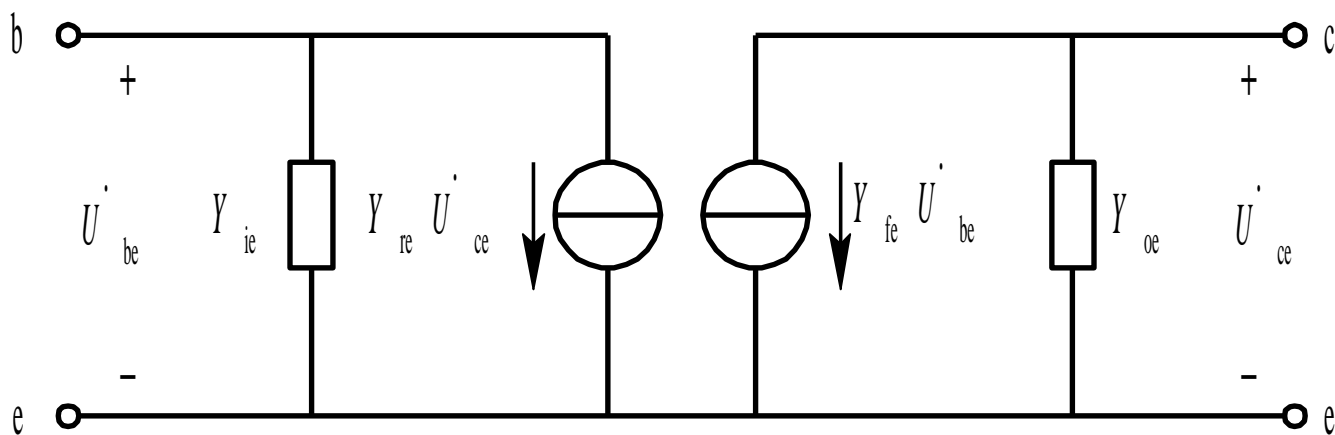
$$Y_{re} \square \frac{-j\omega C_u}{1 + j\omega C_\pi r_{bb}} \quad (3-4)$$



Y 参数等效电路的参数方程为：

$$\dot{I}_b = Y_{ie} \dot{U}_b + Y_{re} \dot{U}_c \quad (3-5a)$$

$$\dot{I}_c = Y_{fe} \dot{U}_b + Y_{oe} \dot{U}_c \quad (3-5b)$$



(b) Y 参数等效电路

## 2. 放大器的性能参数

图 3-1 的高频等效电路为：

$Y_s$  电源导纳；  $Y_L'$  是负载导纳

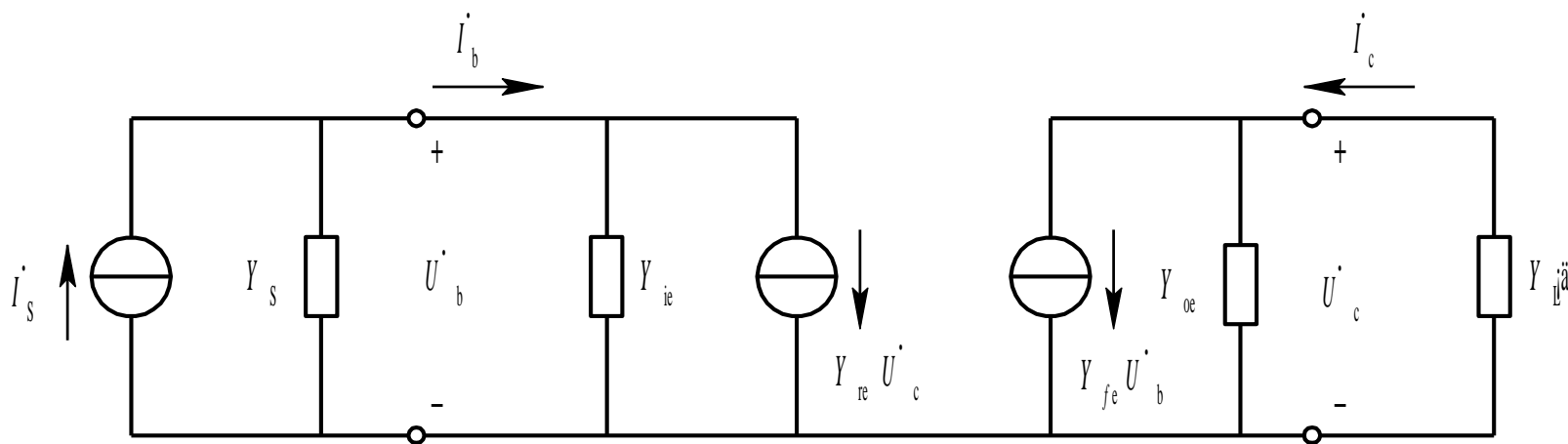


图 3-3 高频小信号放大器的高频等效电路

从图中可以看出：

$$\dot{I}_b = \dot{I}_s - Y_s \dot{U}_b \quad (3-6a) \quad \text{外部}$$

$$\dot{I}_c = -Y_L' \dot{U}_c \quad (3-6b) \quad \text{方程}$$

$$\dot{I}_b = Y_{ie} \dot{U}_b + Y_{re} \dot{U}_c \quad (3-5a) \quad \text{内部}$$

$$\dot{I}_c = Y_{fe} \dot{U}_b + Y_{oe} \dot{U}_c \quad (3-5b) \quad \text{方程}$$



根据以上方程可以导出高频小信号放大器的主要性能指标：

## ① 电压放大倍数 $K$

由 3-5b 、 3-6b 可得：
$$K = \frac{U_c}{U_b} = -\frac{Y_{fe}}{Y_{oe} + Y_L} \quad (3-7)$$

一般  $Y_L' \gg Y_{oe} \rightarrow \therefore K \approx -Y_{fe} Z_L \quad Z_L = \frac{1}{Y_L'}$

## ② 输入导纳 $Y_i$ :

由 ( 3-5a ) 和 ( 3-7 ) 有：

$$Y_i = \frac{I_b}{U_b} = Y_{ie} + \frac{Y_{re} \dot{U}_c}{U_b} = Y_{ie} - \frac{Y_{fe} Y_{re}}{Y_{oe} + Y_L} \quad (3-8)$$



③ 输出导纳  $Y_o$       $Y_o = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_c} \right|_{I_S=0}$

由 (3-5b) 有:  $\frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_c} = Y_{oe} + Y_{fe} \frac{\dot{U}_b}{\dot{U}_c}$

由 (3-5a、3-6a) 以及  $I_S=0$  , 有:

$$\dot{I}_b = -Y_s \dot{U}_b = Y_{ie} \dot{U}_b + Y_{re} \dot{U}_c \Rightarrow \frac{\dot{U}_b}{\dot{U}_c} = \frac{Y_{re}}{Y_s + Y_{ie}}$$

$$\Rightarrow Y_o = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_c} \right|_{I_S=0} = Y_{oe} - \frac{Y_{re} Y_{fe}}{Y_s + Y_{ie}} \quad (3-9)$$



## ④ 通频带和矩形系数

$$B_{0.707} = \frac{f_o}{Q_L}$$

式中：  $f_0$  为回路谐振频率： $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\square}}$

$L$  为回路电感； $C_\square$  为回路总电容

$Q_L$  为有载品质因素： $Q_L = \frac{1}{\omega_0 L g_\square}$

$g_\Sigma$  为回路总电导。

因为负载是一单谐振回路，故矩形系数  $K_{0.1}$  为 9.95 。



## 四、高频谐振放大器的稳定性

### 1. 不稳定的原因

晶体管高频工作时，由于  $Y_{re}$  的存在（混  $\pi$  电路中的  $C_{\mu}$ ），使输出信号反馈到输入端，引起输入电流的变化，如果反馈在信号某一频率上满足正反馈条件，则会产生自激振荡。

关键： $Y_{re}$  的存在

反向传输导纳  $Y_{re}$  引入的输入导纳，记为  $Y_{ir}$ 。忽略

$r_{bb'}$  的影响，则由式 (3-3)、(3-4) 有

将  $Y_{oe}$  归入负载中，并考虑谐振频率  $\omega_0$  附近情况，有

$$Y_{re} \approx -j\omega C_u$$



将  $Y_{oe}$  归入负载中，并考虑谐振频率  $\omega_0$  附近情况，有

$$Y_{oe} + Y'_L = C'_L = G'_L \left(1 + j2Q_L \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)$$

则

$$Y_{ir} \approx -\frac{-j\omega_0 C_u g_m}{C'_L \left(1 + j2Q_L \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)} = j \frac{\omega_0 C_u g_m}{C'_L \left(1 + j2Q_L \frac{\Delta\omega}{\omega_0}\right)} \quad (3-11)$$



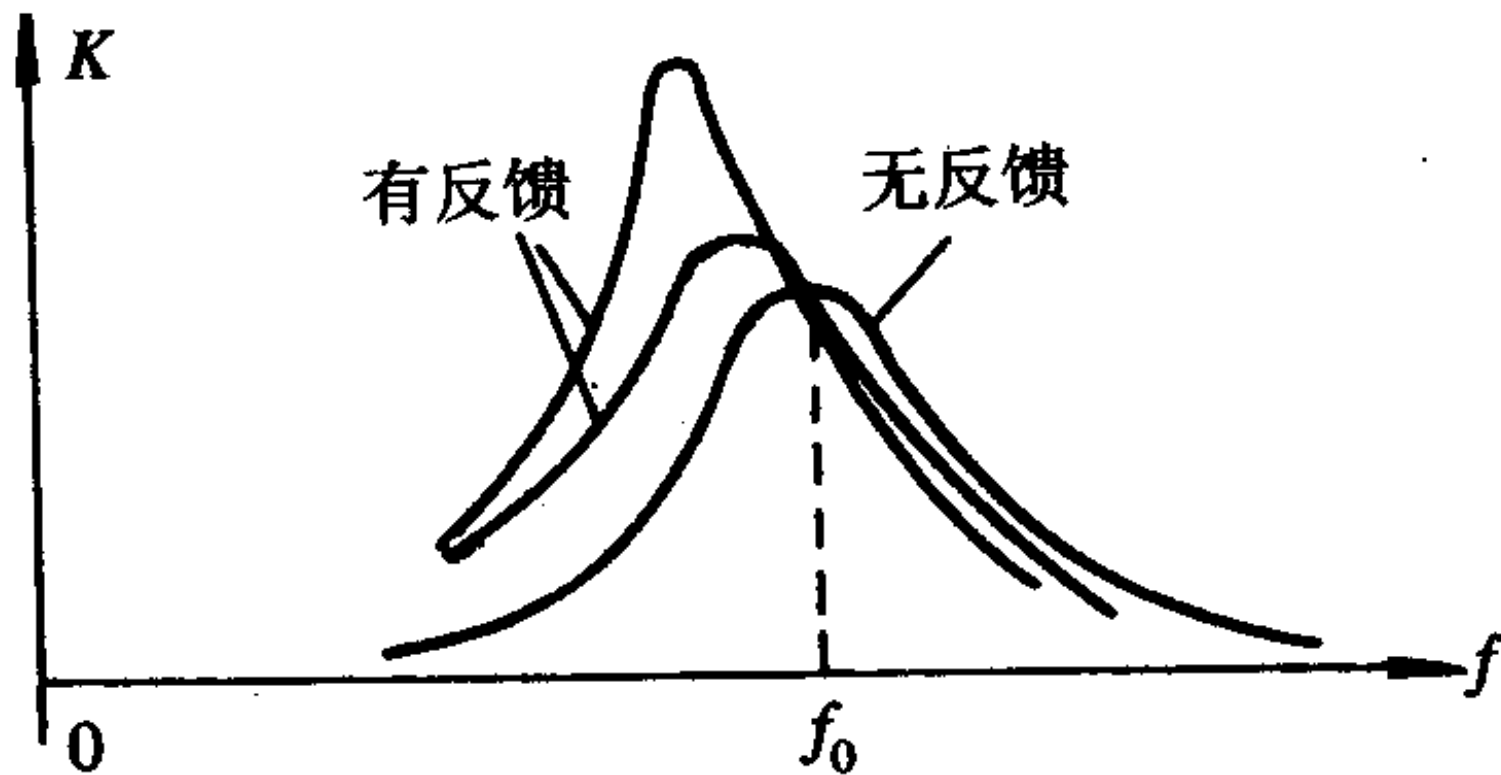


图 3-4 放大器的频率特性



### 2. 提高放大器稳定性的方法

提高稳定性的关键是消除自激，有以下两种方法：

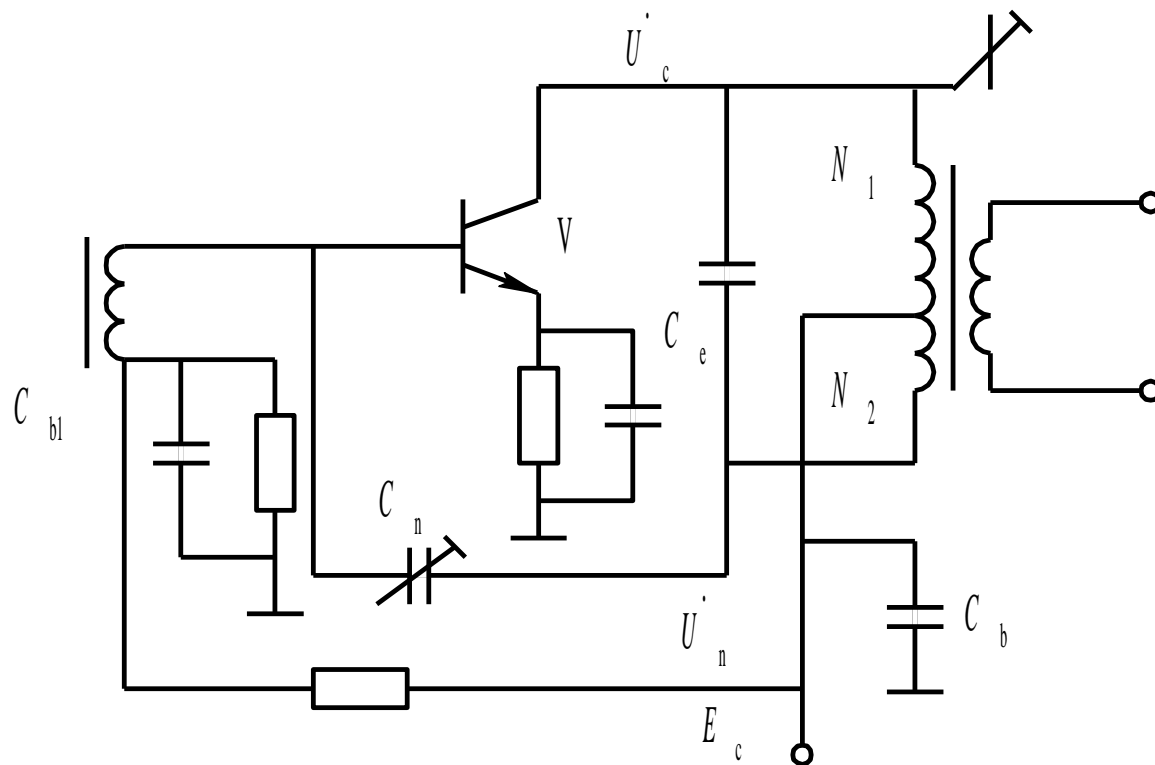
(1) 减少反馈参数  $Y_{re}$

a. 选  $Y_{re}$  小的管子； b. 中和法抵消  $Y_{re}$  (**中和法**)

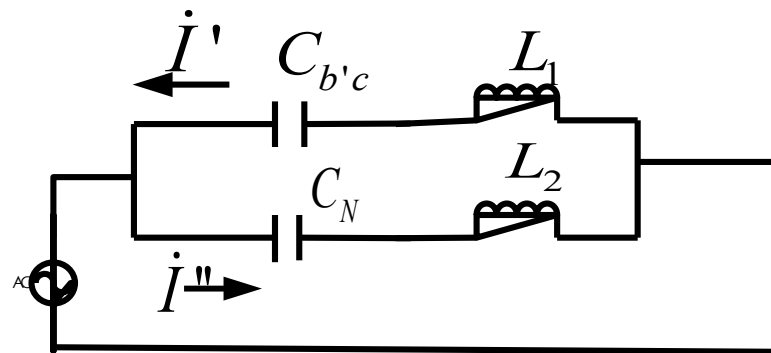
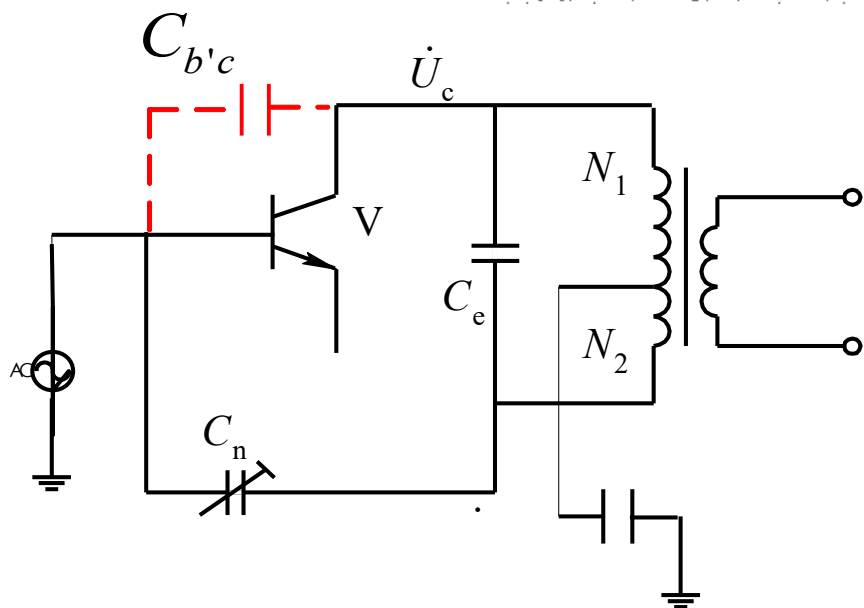
(2) 降低放大器的增益 (**失配法**)：破坏正反馈的振幅条件。

a. 中和法

**基本思想**：在输入输出端引入一附加的外部反馈电路 (**中和电路**) 来抵消晶体管内部参数  $Y_{re}$  的反馈作用，从而保证放大器的稳定工作。



(a)



由电桥平衡条件（对臂阻抗乘积相等）有：

$$\frac{1}{j\omega_0 C_{b\bar{c}}} j\omega_0 L_2 = \frac{1}{j\omega_0 C_N} j\omega_0 L_1$$

中和的目的就是使  $I' = I''$

调节  $C_N$ ，总可以使  $I' = I''$

调节  $C_N$  或  $N_1$  或  $N_2$  可实现中和抵消。

$$C_N = \frac{L_1}{L_2} C_{b\bar{c}} = \frac{N_1}{N_2} C_{b\bar{c}}$$

**局限性：** 因为  $C_{bc}$  随频率变化，因而中和只能在某一频率范围内进行。

## b. 失配法

失配法通过增加负载导纳，进而增加总回路导纳，使输出电路失配，输出电压相应减小，对输入端的影响也就减小。可见失配法使用**牺牲电路增益**来换取电路的稳定。

为了满足增益和稳定性的要求，失配法常用**共发 - 共基电路**

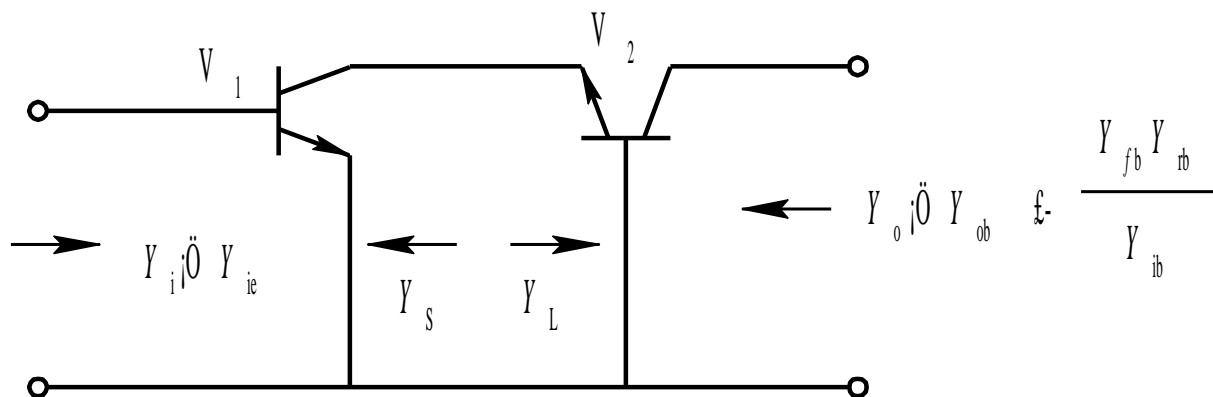


图 3—6 共发—共基电路



共基电路输入导纳大，而共发电路的输出导纳较小，二者相连相当于增大了共发电路的负载导纳而使之失配，从而使共发晶体管内部反馈减弱而提高系统稳定性。

共发电路在负载导纳很大的情况下，虽然电压增益减小，但电流增益仍很大；而共基电路虽然电流增益接近于 1，但电压增益较大，所以二者级联后，互相补偿，使电压增益和电流增益均较大。



## 五、多级谐振放大器

### 1. 多级单调谐放大器

多级单调谐放大器各级谐振频率相同，均为信号中心频率，各级谐振时电压放大倍数为  $K_{01}$ ， $K_{02}$ ， $\cdots$ ， $K_{0n}$ ，则放大器总的放大倍数为：

$$K_{0\Box} = K_{01} K_{02} \cdots K_{0n}$$

由单振荡回路归一化频率特性（参见 2-9）：

$$\alpha = \left| \frac{Z_p}{R_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \xi^2}}$$

则有  $n$  个回路的多级放大器的归一化频率特性为：

$$\alpha^n = (1 + \xi^2)^{-n/2}$$



## 2. 多级双调谐放大器

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4}\xi^4}} \quad (\text{参见 2-34})$$

$$\alpha^n = \left(1 + \frac{1}{4}\xi^4\right)^{-n/2}$$





表 3-1 多级单调谐放大器的带宽和矩形系数

级数 $n$	1	2	3	4	5
$B_z/B_1$	1.0	0.64	0.51	0.43	0.35
$K_{0.1}$	9.95	4.66	3.74	3.18	3.07

表 3-2 多级单调谐放大器的带宽和矩形系数

级数 $n$	1	2	3	4
$B_z/B_1$	1.0	0.8	0.71	0.66
$K_{0.1}$	3.15	2.16	1.9	1.8



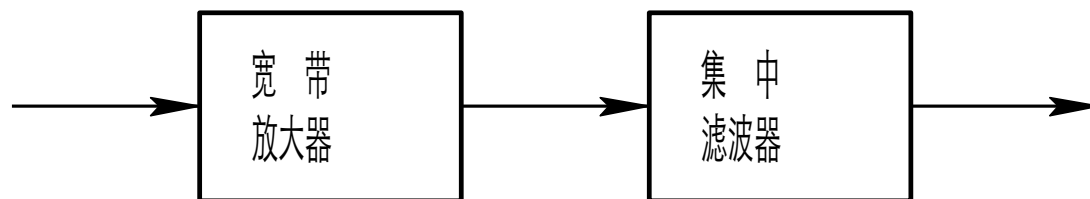
### 六、高频集成放大器

分类：(1) 非选频的高频集成放大器，以电阻或宽带高频F变压器作负载

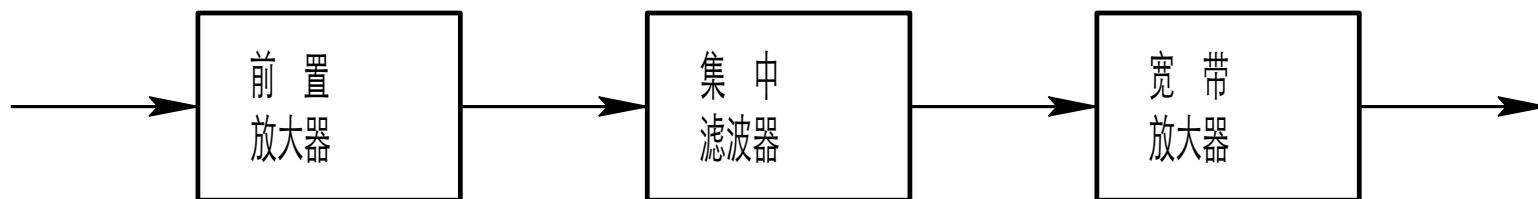
(2) 选频的高频集成放大器，用于需要有选频功能的场合

集中放大与集中滤波的优点：

- (1) 线路简单，性能可靠，调整方便；
- (2) 可满足不同频率的要求，频率特性较稳定
- (3) 可集成



(a)



(b)

图 3—10 集中选频放大器组成框图