

# 第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器(重点)

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结

## 2.1 概述

---

1. 高频小信号放大器的特点
2. 高频小信号放大器的分类
3. 高频小信号放大器的主要性能指标
4. 高频小信号放大器的分析方法

# 1. 高频小信号放大器的特点

---

(1) 中心频率较高 一般在几百kHz到几GHz。

调频电台中心频率88-108MHz，带宽0.1MHz；  
U波段的电视信号中心频率几百MHz，带宽8MHz  
手机信号中心频率GHz频段，带宽几MHz；

(2) 小信号

信号较小，线性（电压放大，甲类）

## 2. 高频小信号放大器的分类

- 按频谱宽度: 窄频带放大器和宽频带放大器
  - 相对频带（通频带与其中心频率的比值）
- 按负载性质: 谐振放大器和非谐振放大器
  - 以调谐回路为负载
  - 非调谐回路为负载
- 按电路形式: 单级放大器和多级放大器

### 3. 高频小信号放大器的主要性能指标

(1) 增益 电压增益:

$$\dot{A}_V = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

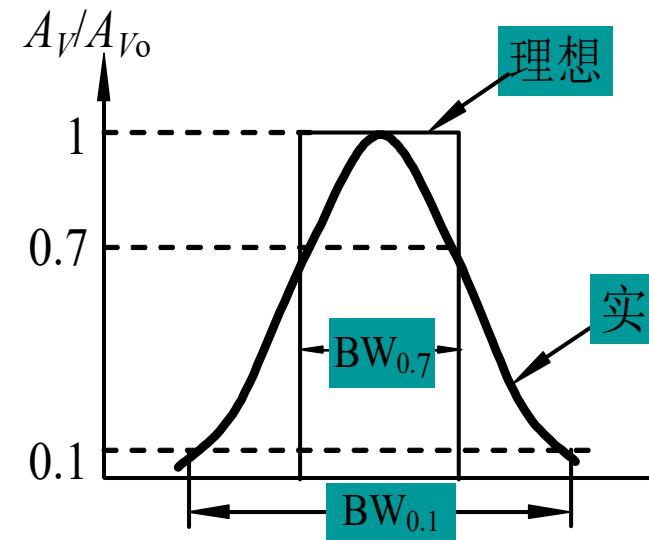
分贝表示:

$$\dot{A}_V = 20 \lg \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$$

(2) 通频带和选择性

$$BW_{0.7} = 2\Delta f_{0.7} = \frac{f_o}{Q_e}$$

$$K_{0.1} = \frac{BW_{0.1}}{BW_{0.7}} \geq 1$$



### (3) 噪声系数

$$NF = \frac{P_{si} / P_{ni}}{P_{so} / P_{no}} = \frac{P_{nAo}}{G_{pA} P_{nAi}} = 1 + \frac{P_{nAn}}{G_{pA} kT_0 \cdot BW}$$

$$NF = NF_1 + \frac{NF_2 - 1}{G_{PA1}} + \frac{NF_3 - 1}{G_{PA1} G_{PA2}} + \cdots + \frac{NF_n - 1}{G_{PA1} \cdots G_{PA(n)}}$$

# 4. 高频小信号放大器的分析方法

## I. Y参数等效模型 (窄放)

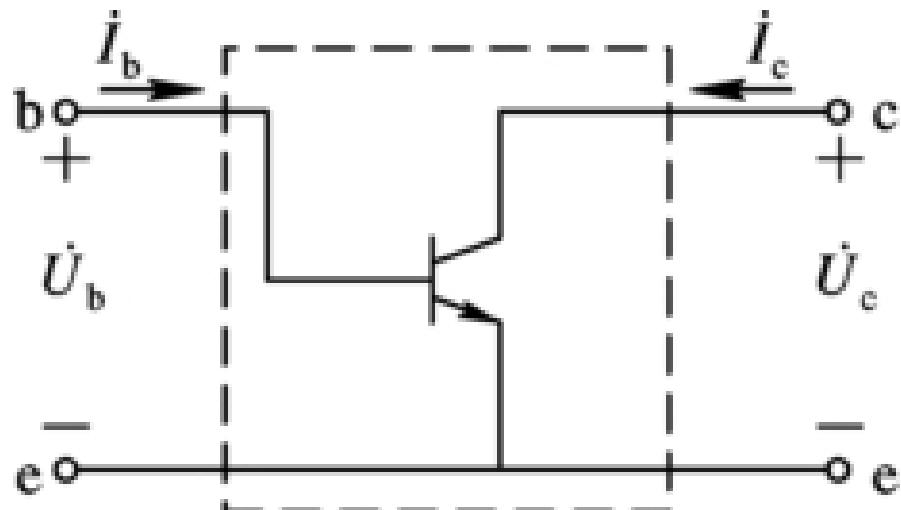
(网络参数/形式参数模型)

根据晶体管  
外特性等效

## II. 混合π型等效模型 (宽放)

根据晶体管内  
物理工作特性等

# I. Y参数等效电路 (形式等效电路, 窄放)



线性二端口网络

网络端口电流、电压的关系:

$$\begin{cases} i_b = f_1(u_b, u_c) \\ i_c = f_2(u_b, u_c) \end{cases}$$

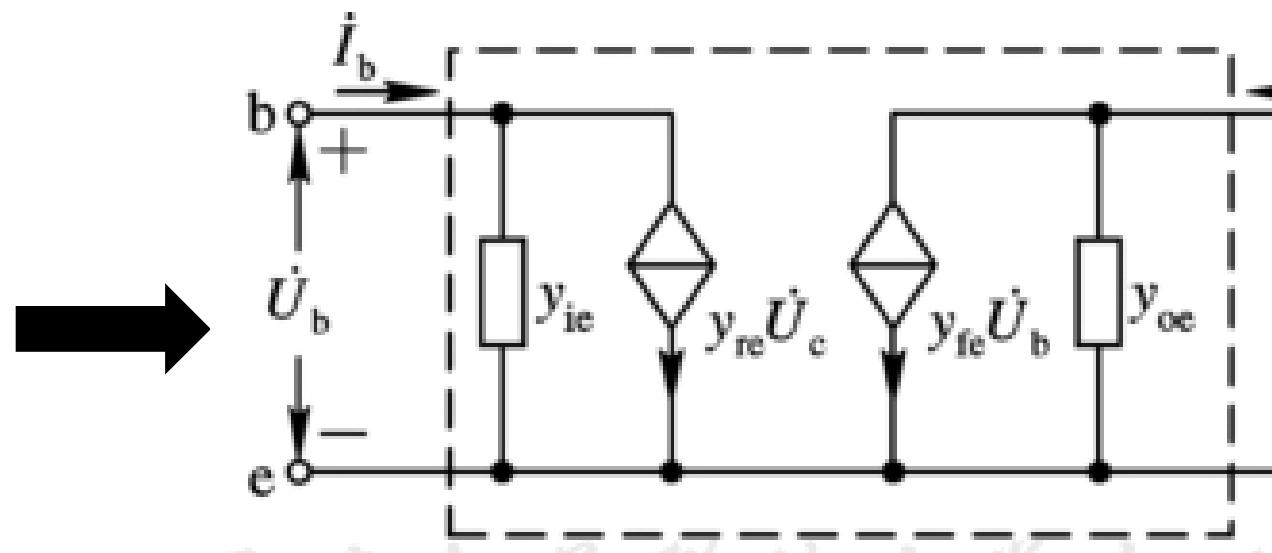
为研究各变化量之间关系, 求:

$$\begin{cases} di_b = \frac{\partial i_b}{\partial u_b} du_b + \frac{\partial i_b}{\partial u_c} du_c \\ di_c = \frac{\partial i_c}{\partial u_b} du_b + \frac{\partial i_c}{\partial u_c} du_c \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} \dot{I}_b = y_{ie}\dot{U}_b + y_{re}\dot{U}_c \\ \dot{I}_c = v_{re}\dot{U}_b + v_{ie}\dot{U}_c \end{cases}$$

# Y参数等效电路模型

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



# 短路导纳参数——Y参数的物理意义

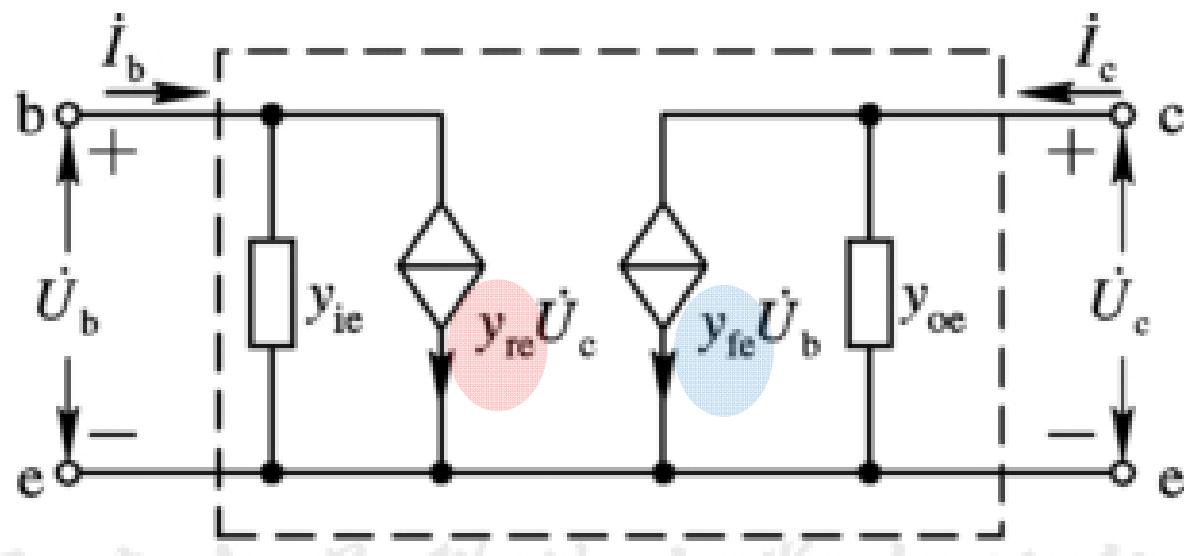
- 输入导纳  $y_{ie}$
- 反向传输导纳  $y_{re}$
- 正向传输导纳  $y_{fe}$
- 输出导纳  $y_{oe}$

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

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

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

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



## Y参数的特点

在高频电路中，一般Y参数都是复数，其形式如下

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

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

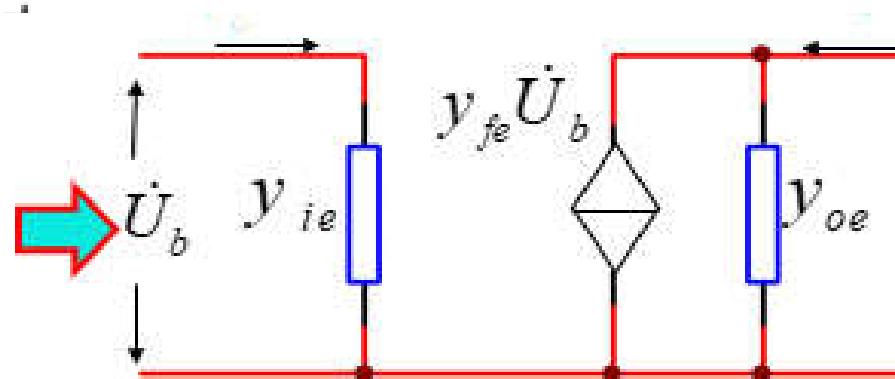
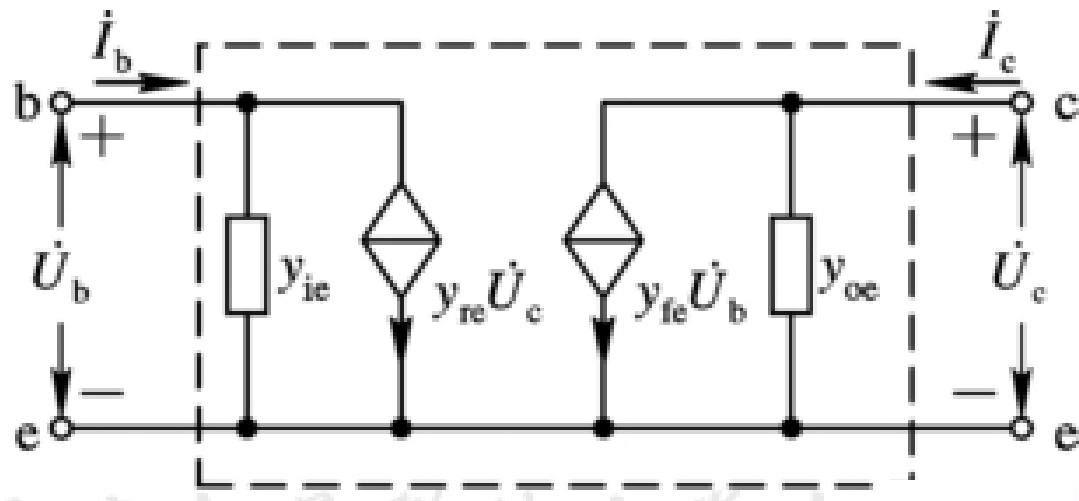
$$y_{fe} = |y_{fe}| \angle \phi_{fe}$$

$$y_{re} = |y_{re}| \angle \phi_{re}$$

1. Y参数是频率的函数（高小放大多为窄带，一需考虑 $f_0$ 附近的特性，在**BW**范围内认为其为常数）
2. Y参数只能用于小信号工作状态。

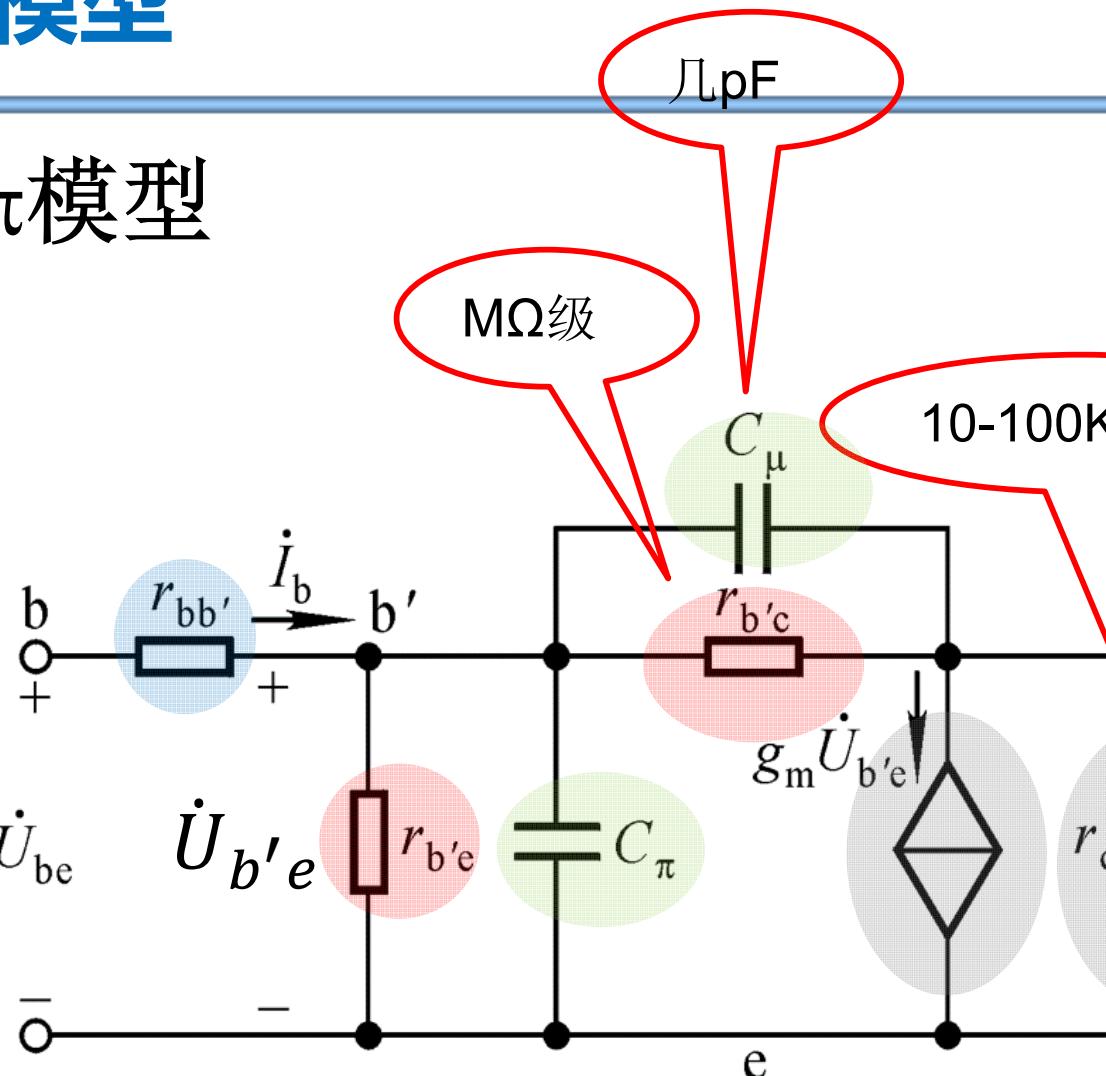
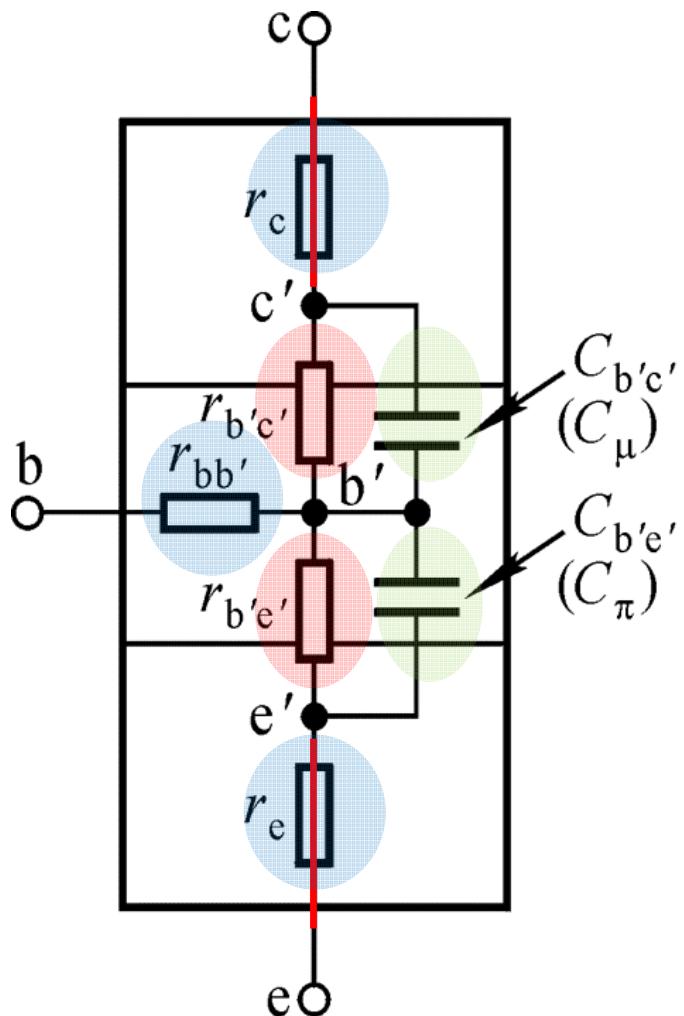
# Y参数等效电路模型的简化

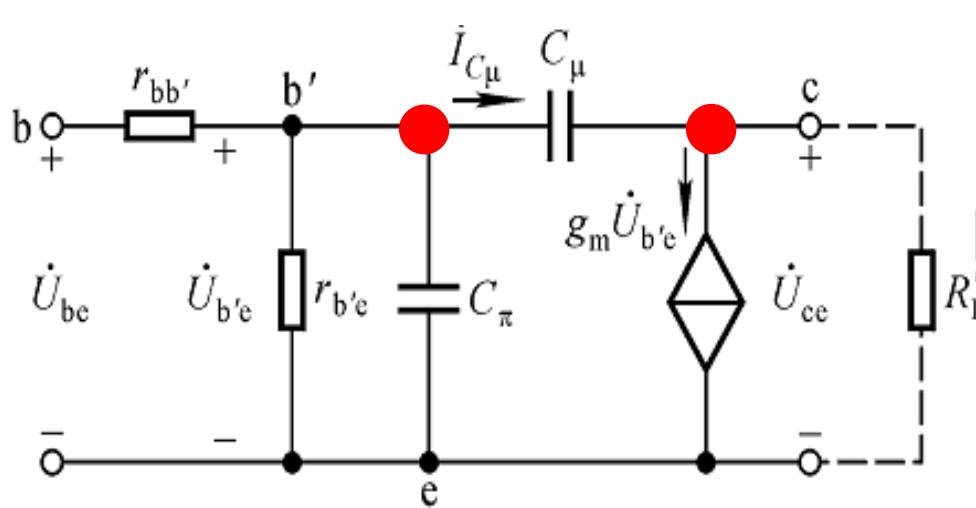
晶体管的单向化：一个放大器件，最好是单向器件，这样大器的输出回路就不会对输入回路产生影响，隔离性能好。因此可认为反向传输导纳 $y_{re} \approx 0$ 。



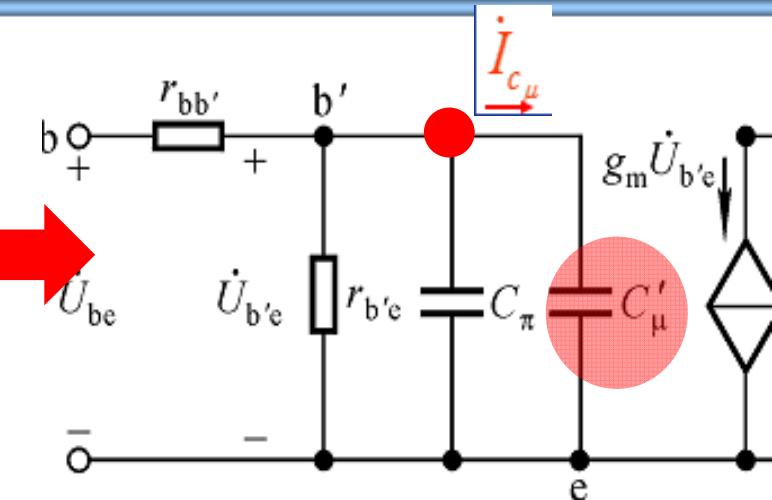
## II. 混合π型等效模型

### (1) 完整的混合π模型





(a)



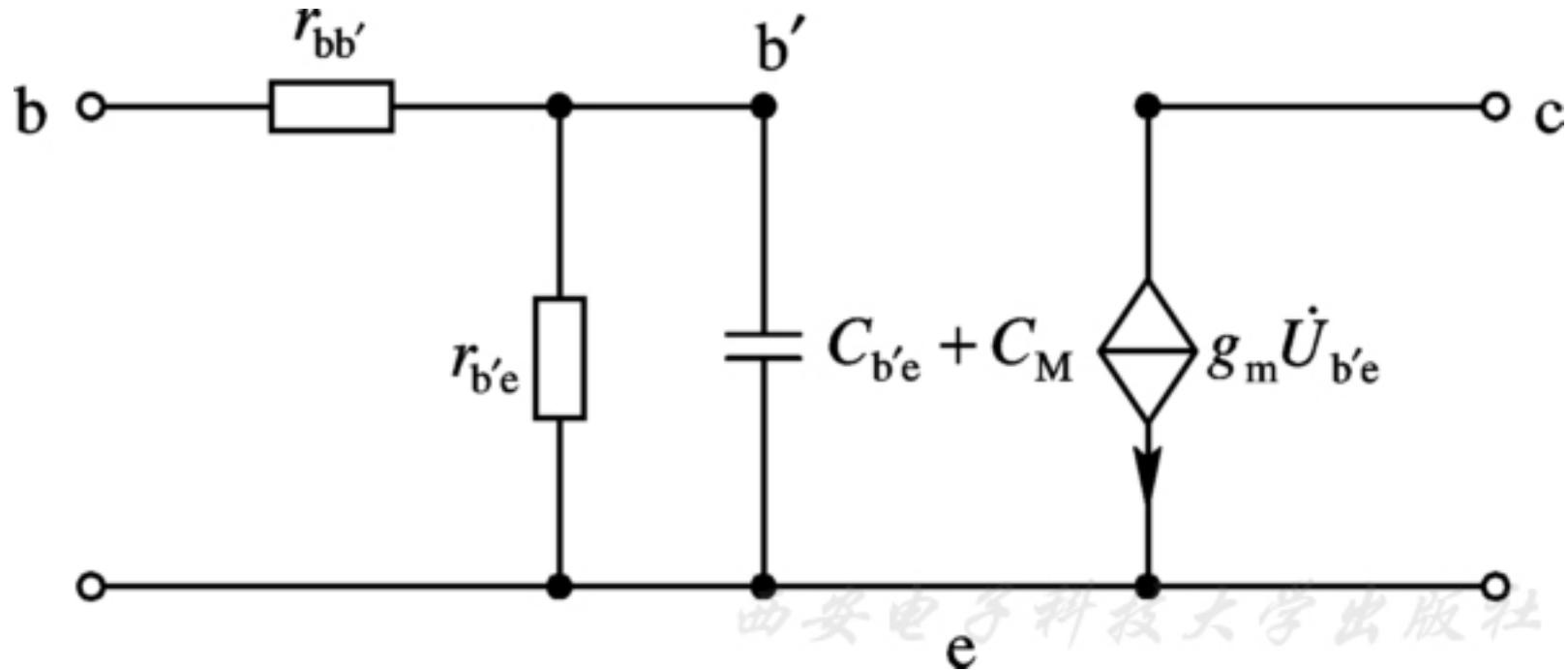
(b)

$$\Rightarrow C'_\mu = (1 - K)C_\mu = (1 + |K|)C_\mu \quad K \text{ 为中频增益}$$

$$C'_\mu = \frac{K-1}{K} \cdot C_\mu \approx C_\mu$$

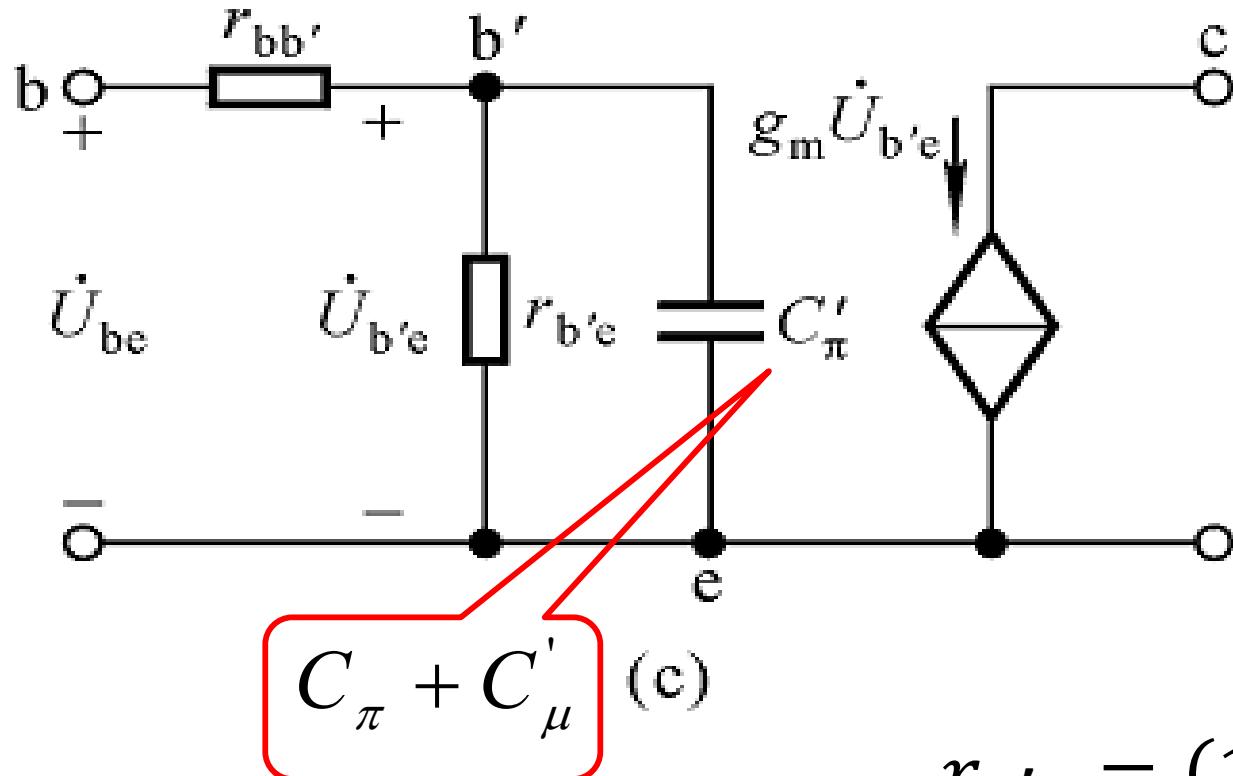
因  $X_{C'_\mu} \gg R_L$ , 故常

## (2) 简化的高频混π模型



- 此模型与h参数模型在低频(中频)信号作用下具有一致性。

### (3) 混π模型的主要参数



- 可从手册查

$r_{bb'}$ ,  $C_\mu$  ( $C_{ob}$ ) 及  $f$

$$C_{b'e} + C_{b'c} = \frac{1}{2}$$

$$r_{b'e} = (1 + \beta_0)r_e = (1 +$$

$$g_m = \frac{I_c}{U_{b'e}} = \frac{1}{r_e}$$

# 第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结

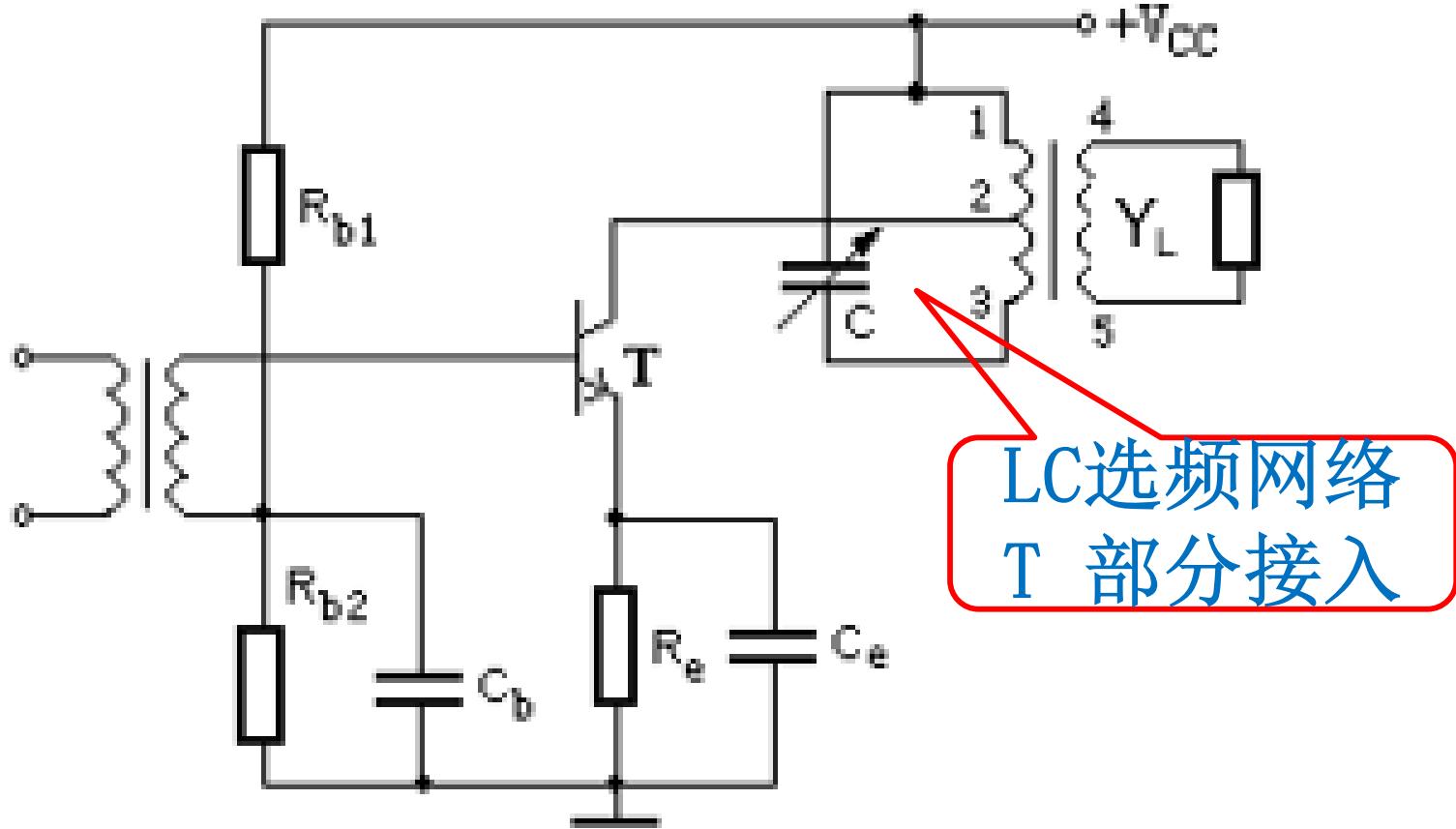
- 2.2.1 单管单调谐放大器
- 2.2.2 多级单调谐放大器
- 2.2.3 谐振放大器的稳定性

## 2.2.1 单管单调谐放大器

---

- 一、电路组成及特点**
- 二、电路性能参数分析**

# 一、电路组成及特点



# ■与低频小信号放大器的分析比较

表 1 分析步骤的异同点

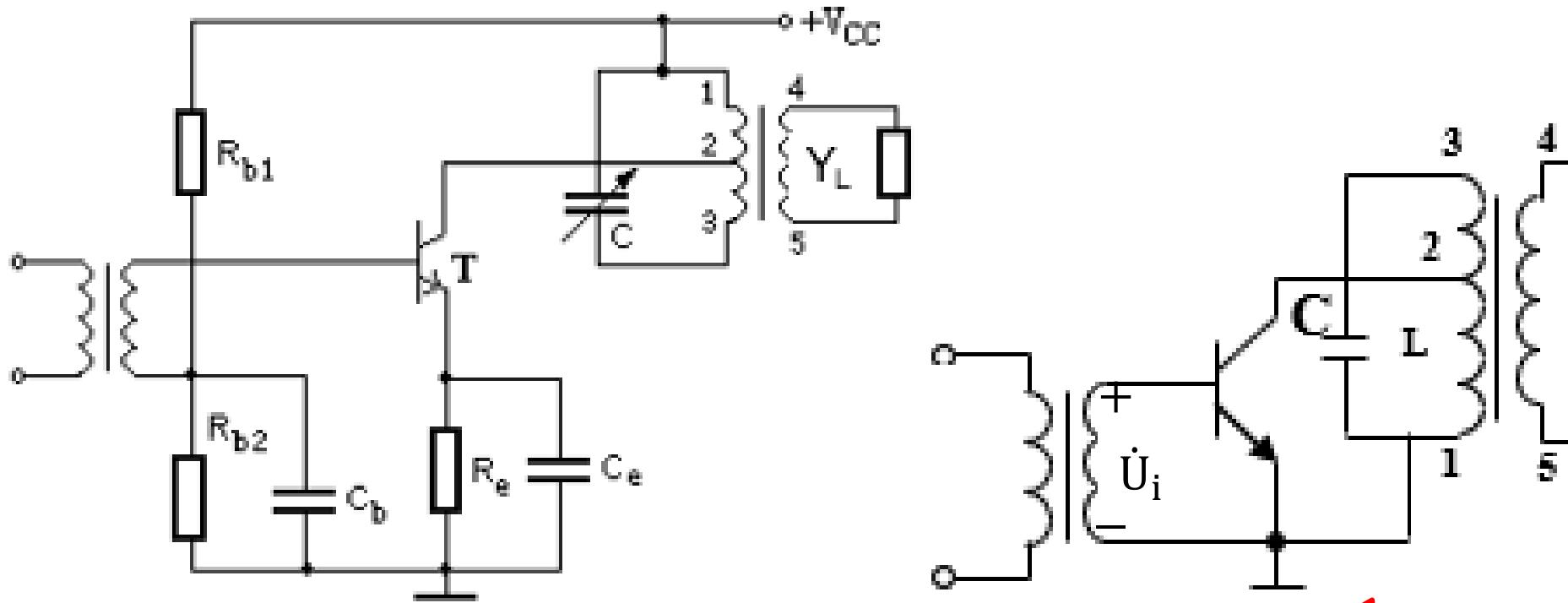
分析步骤	低频放大器	高频小信号放大器
步骤一	画直流通路,计算静态工作点	
步骤二	画交流通路	画高频交流通路
步骤三	画微变等效电路	画微变等效电路
步骤四	计算性能指标,如输入电阻、输出电阻、电压增益等	计算性能指标,如电压增益、通带

表 2 交流等效电路中电容、电感

工作 频段	电容		电感	
	大电容 (隔直、耦合、旁路电容)	小电容 (回路电容)	大电感 (扼流圈)	小电感 (回路电感)
低频	短路	开路		
高频	短路	保留	开路	保留

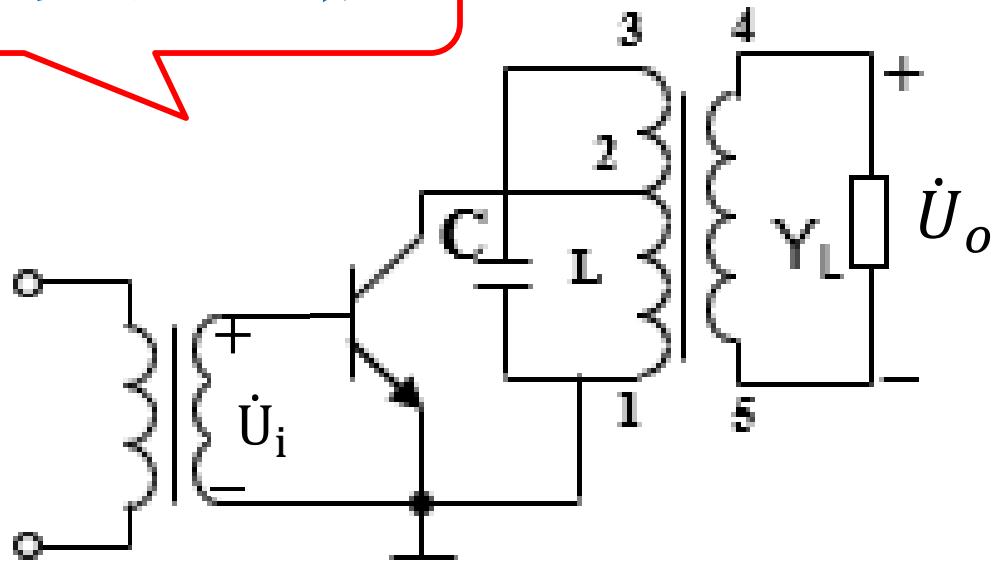
## 二. 电路性能参数分析

### 1. 画出交流通路、Y参数等效电路

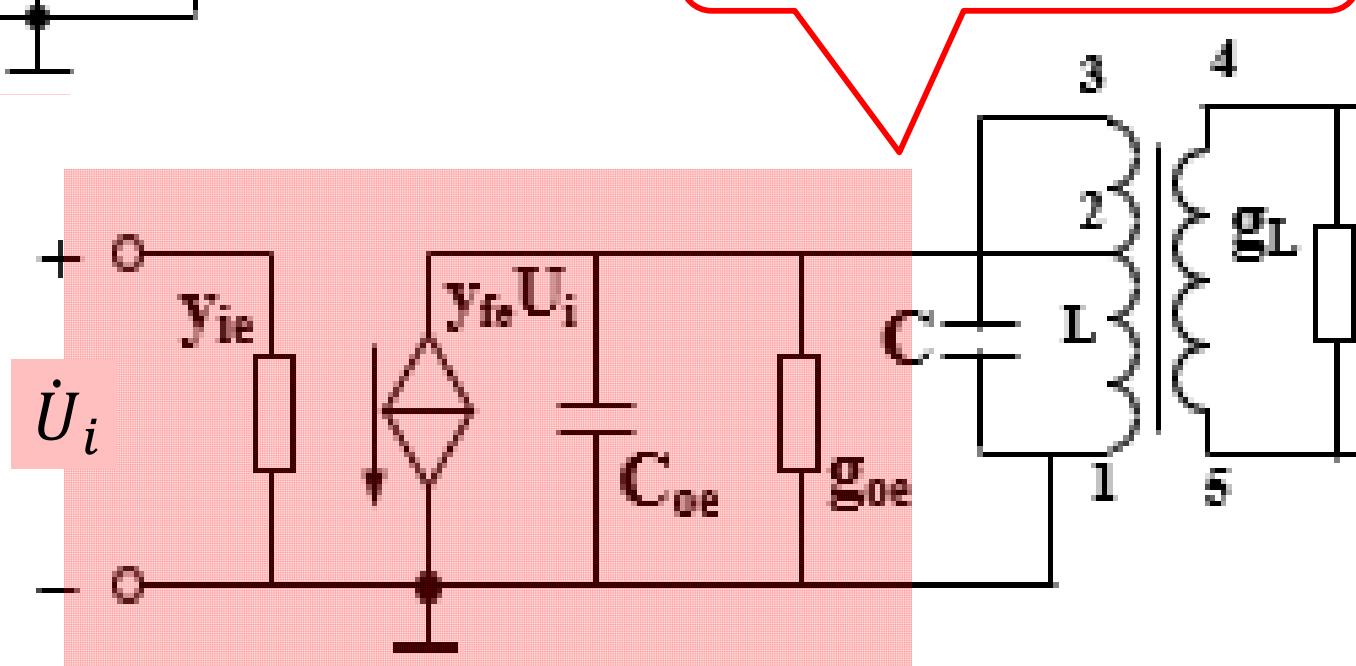


交流通路

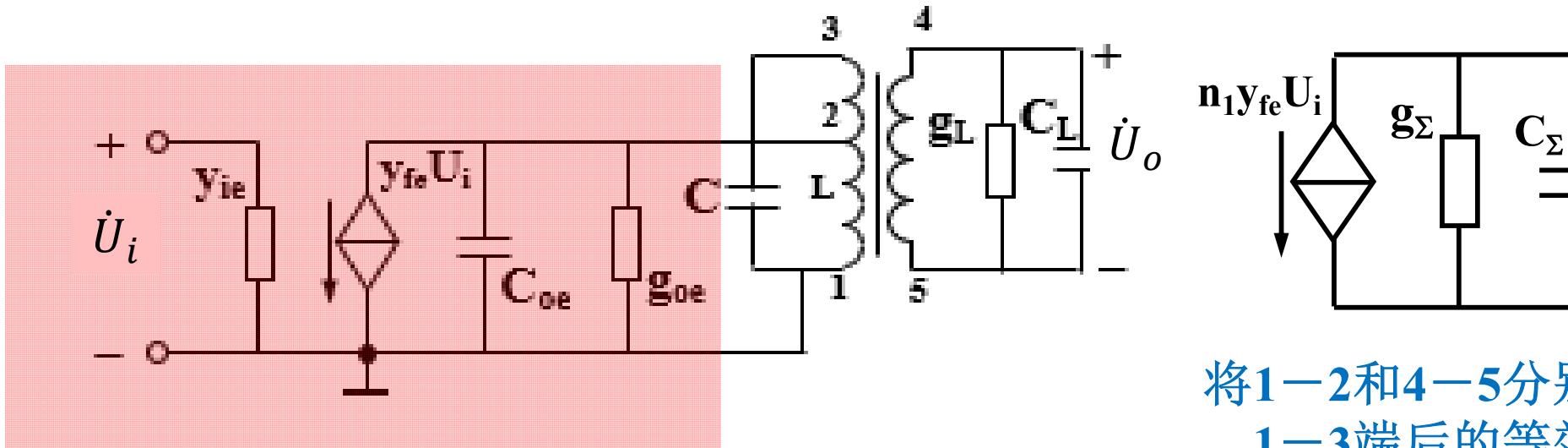
交流通路



Y参数等效电路



## 2、性能参数分析

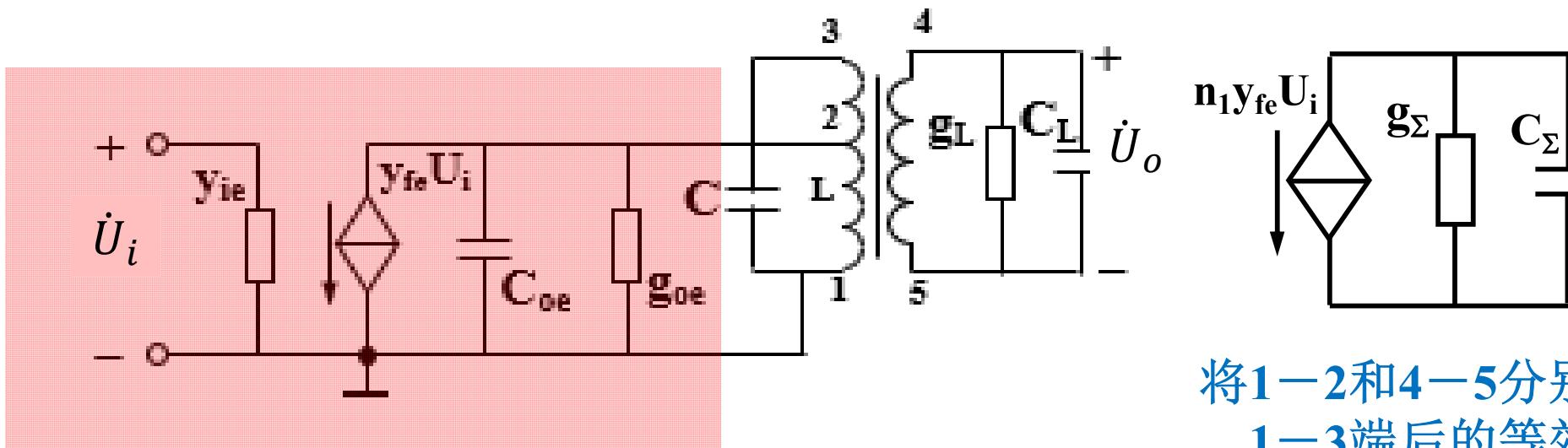


$$n_1 = \frac{N_{12}}{N_{13}}, \quad n_2 = \frac{N_{45}}{N_{13}}$$

$$\begin{cases} C_\Sigma = n_1^2 C_{oe} + n_2^2 C_L + C \\ g_\Sigma = n_1^2 g_{oe} + n_2^2 g_L + g_{s0} \end{cases}$$

( $g_{s0}$ 为LC回路的损)

## • 电压增益（电压放大倍数）

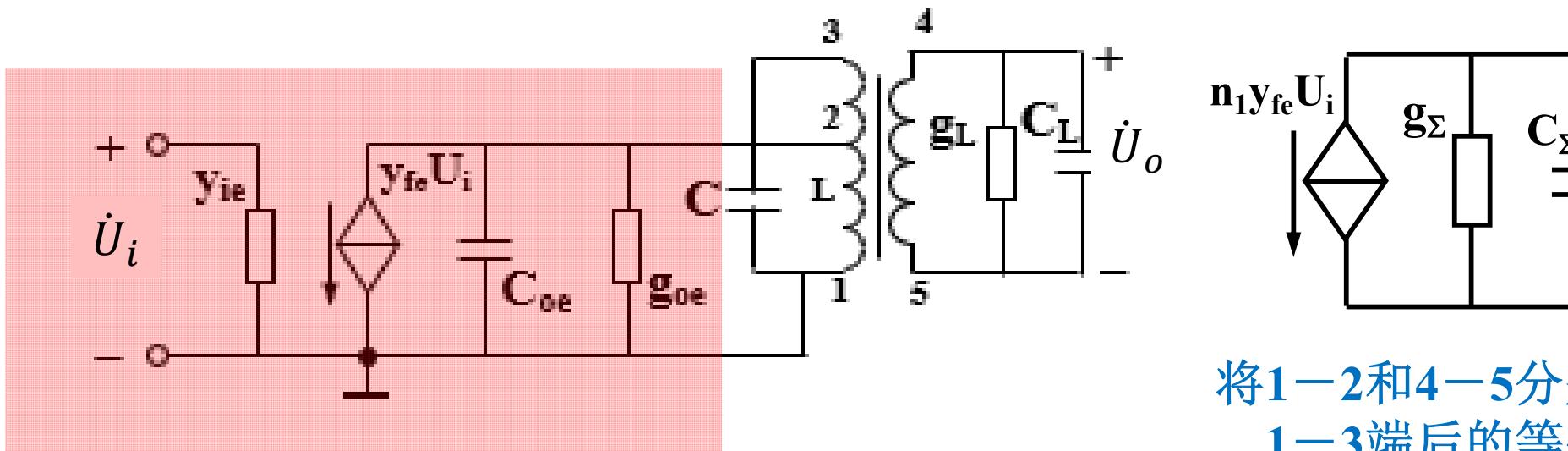


将1—2和4—5分别  
1—3端后的等效

$$\dot{U}'_o = I \cdot Z = \frac{n_1 y_{fe} \dot{U}_i}{g_\Sigma + j\omega C_\Sigma + \frac{1}{j\omega L}}$$

$$\dot{A}_u = - \frac{n_2 n_1 y_f}{g_\Sigma + j\omega C_\Sigma}$$

$$\dot{U}_o = n_2 \dot{U}'_o = \frac{n_2 n_1 y_{fe} \dot{U}_i}{g_\Sigma + j\omega C_\Sigma + \frac{1}{j\omega L}}$$



将1-2和4-5分  
1-3端后的等效

$$\dot{A}_u = - \frac{n_2 n_1 y_{fe}}{g_\Sigma + j\omega C_\Sigma + \frac{1}{j\omega L}}$$

- 谐振时的电压增益

$$\dot{A}_{u0} = - \frac{n_2 n_1 y_{fe}}{g_\Sigma}$$

## 几点说明：

$$\dot{A}_u = - \frac{n_2 n_1 y_{fe}}{g_\Sigma + j\omega C_\Sigma + \frac{1}{j\omega L}}$$

I.  $\dot{A}_u$ 是工作频率 $f$ 的函数。

II. 当 $\Delta f = 0$ ,  $\dot{A}_{u0} = - \frac{n_2 n_1 y_{fe}}{g_\Sigma}$

输入和输出之间的相位差: $180^\circ + \phi_{fe}$

当频率较低时,  $\phi_{fe} = 0$ , 输入输出相位差才是

III.  $A_{u0}$ 与晶体管参数、负载电导、回路谐振电导入系数有关。

- 通频带  $BW_{0.7}$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_\Sigma}} \quad Q_e = \frac{\omega_0 C_\Sigma}{g_\Sigma} = \frac{1}{\omega_0 L g_\Sigma}$$

$$BW_{0.7} = \frac{f_0}{Q_e} = f_0 \omega_0 L g_\Sigma = \frac{g_\Sigma}{2\pi C_\Sigma}$$

→  $A_{u0} = \frac{n_2 n_1 |y_{fe}|}{g_\Sigma} = \frac{n_2 n_1 |y_{fe}|}{2\pi C_\Sigma \cdot BW_{0.7}}$

$$A_{u0} \cdot BW_{0.7} = ?$$

# 第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结

2.2.1 单管单调谐放大器

2.2.2 多级单调谐放大器

2.2.3 谐振放大器的稳定性

## 2.2.2 多级单调谐放大器

如果多级放大器中的每一级都调谐在同一频率

- 增益
- 通频带
- 矩形系数

## ■ 增益

- 总电压增益振幅  $A_n = A_{u1}A_{u2}\cdots A_{un}$

若每级放大器的参数结构均相同

$$A_n = (A_{u1})^n = \frac{(n_1 n_2)^n |y_{fe}|^n}{\left[ g_\Sigma \sqrt{1 + \left( \frac{2\Delta f Q_e}{f_0} \right)^2} \right]^n}$$

- 谐振频率处电压增益振幅  $A_{n0} = \left( \frac{n_1 n_2}{g_\Sigma} \right)^n |y_{fe}|$

## ■ 通频带

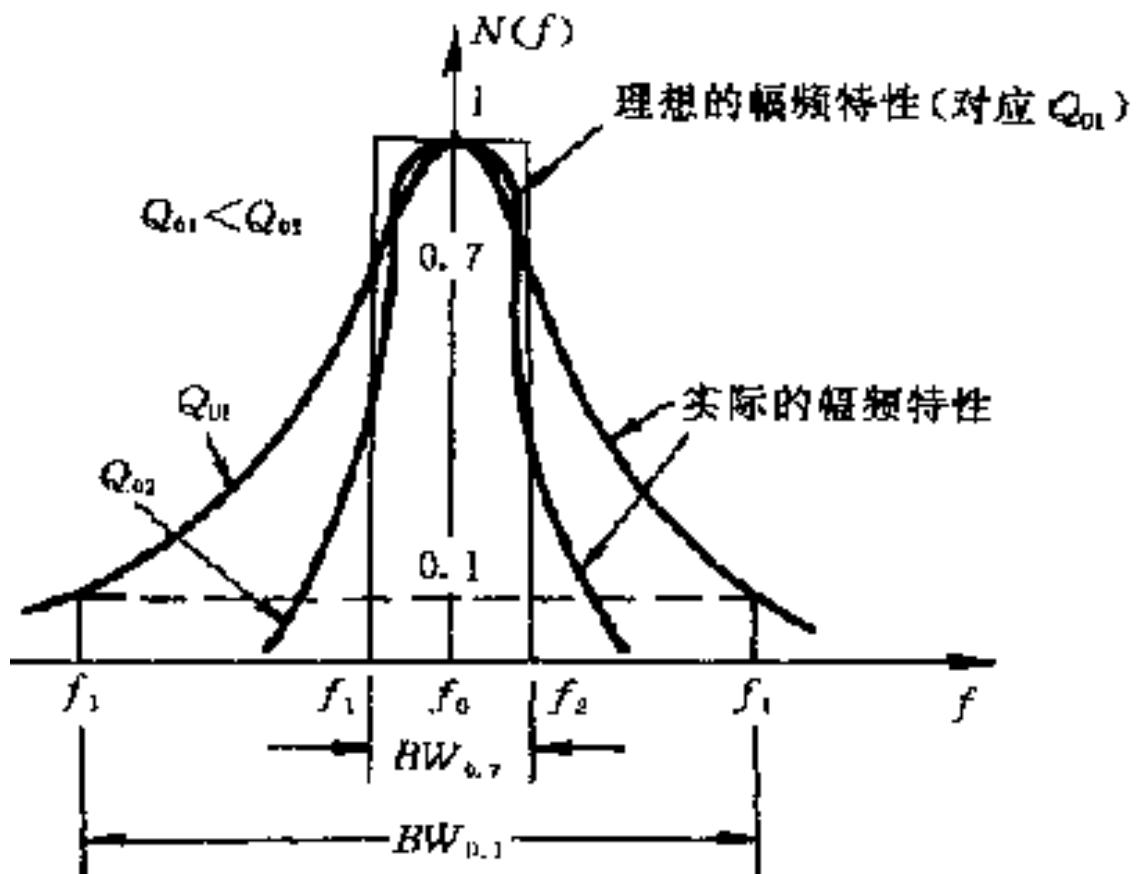
单位谐振函数为:  $N(f) = \frac{A_n}{A_{n0}} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{2\Delta f Q_e}{f_0}\right)^2\right]^{n/2}}$

$$BW_n = 2\Delta f_{0.7} = \sqrt{2^{1/n} - 1} \frac{f_0}{Q_e} = \sqrt{2^{1/n} - 1} B$$

级数n	1	2	3	4	5	6	7	8
$\sqrt{\frac{1}{2^n} - 1}$	1.0	0.64	0.51	0.43	0.39	0.35	0.32	0.3

结论: 级数n越多, 带宽越窄。

## ■ 矩形系数



$$K_{n0.1} = \frac{BW_{n0.1}}{BW_n} = \frac{\sqrt{100}}{\sqrt{2}}$$

级数 $n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
矩形系数 $K_{n0.1}$	9.95	4.90	3.74	3.40	3.20	3.10	3.00	2.93	2.89	2.85

表2.3.1 单调谐放大器矩形系数与级数的关系

从表上可以看出：

- 当级数n增加时，矩形系数有所改善，但这种改善是有限度的，级数越多， $K_{n0.1}$ 变化越缓慢。
- 当n趋于无穷大时，趋于2.56。和理想的矩形还有很大距离。

双调谐放大器可改善矩形系数和频带宽度这两个参数！

# 第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结

概述

2.2.1 单管单调谐放大

2.2.2 多级单调谐放大

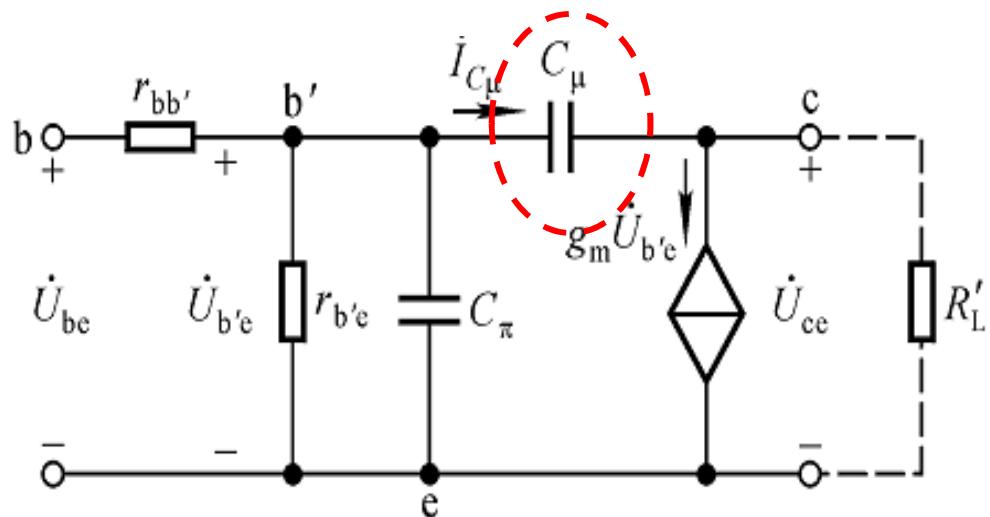
2.2.3 谐振放大器的稳

## 2.2.3 谐振放大器的稳定性

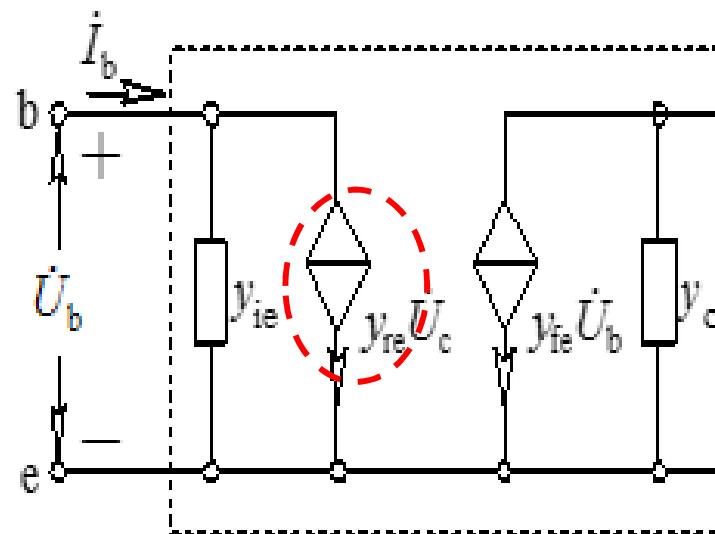
---

- 一、自激产生的原因
- 二、克服自激的方法

# 一、自激产生的原因



混合π型等效模型（宽放）



Y参数等效模型（ $y_{re}$ ）

由于Y参数中 $y_{re}$  ( $C_{b'c}$ ) 的存在。

## 二、克服自激的方法

---

由于 $y_{re}$  ( $C'_{bc}$ ) 的存在，晶体管是一个双向的元件。增强放大器的稳定性可以：

(一) 选用 $y_{re}$  ( $C'_{bc}$ ) 小的管子；

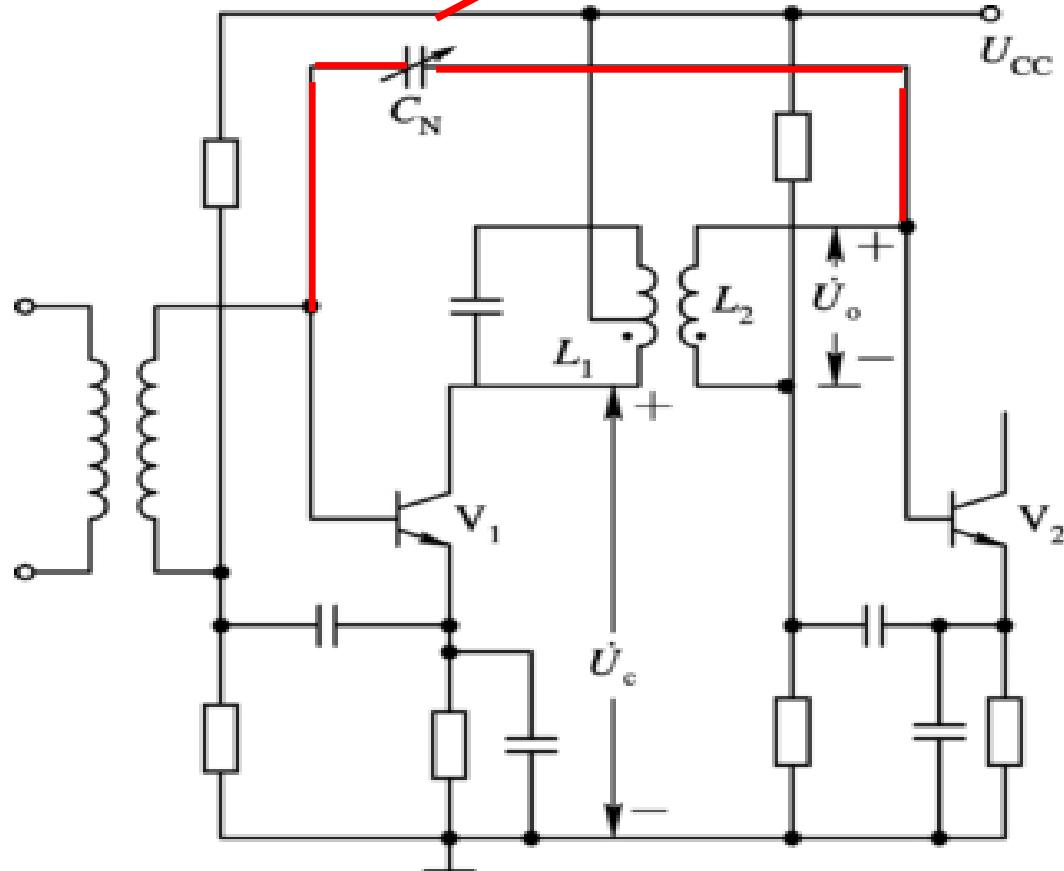
(二) 考虑实行晶体管的单向化。  
其单向化方法有：

(1) 中和法

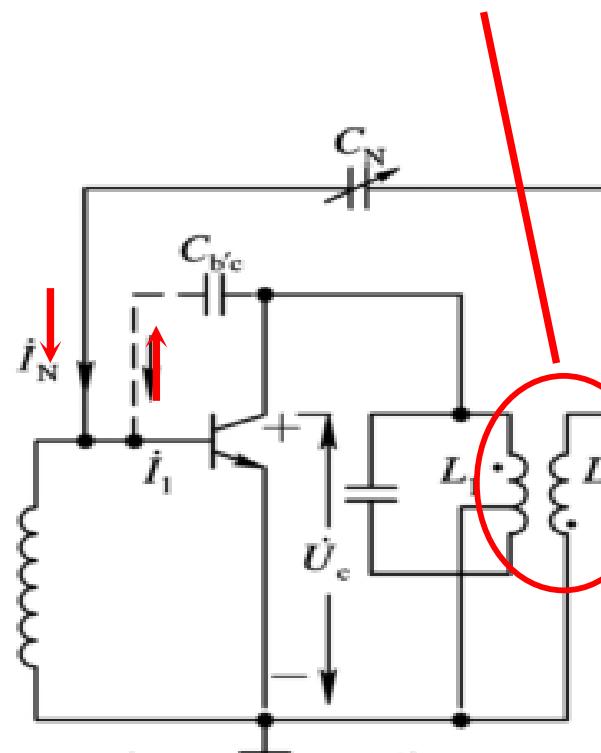
(2) 失配法

(1) 中和法

中和电容



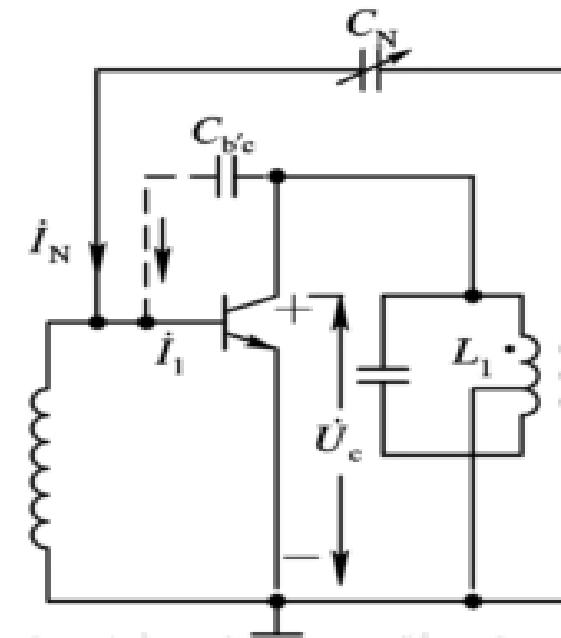
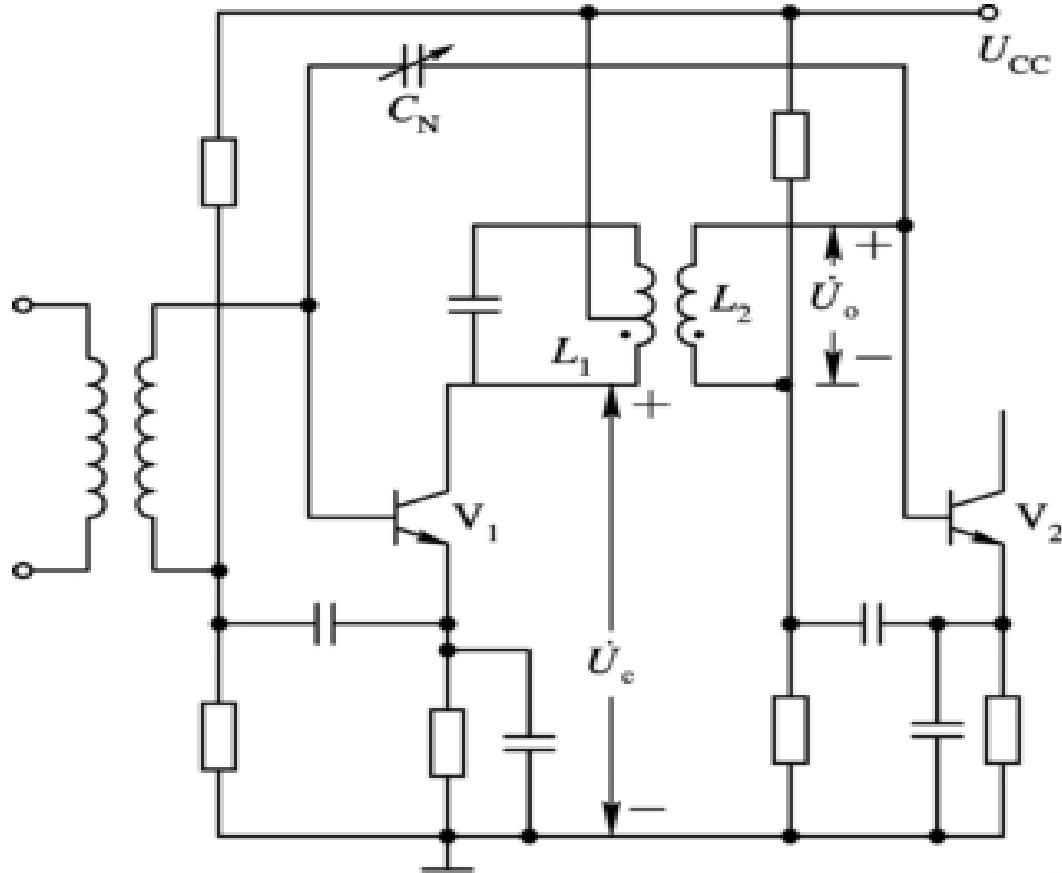
反相耦合变...



$$U_c j \omega C_{b'c} = U_o j \omega C_N$$

$$\frac{U_c}{U_o} = \frac{N_1}{N_2}$$

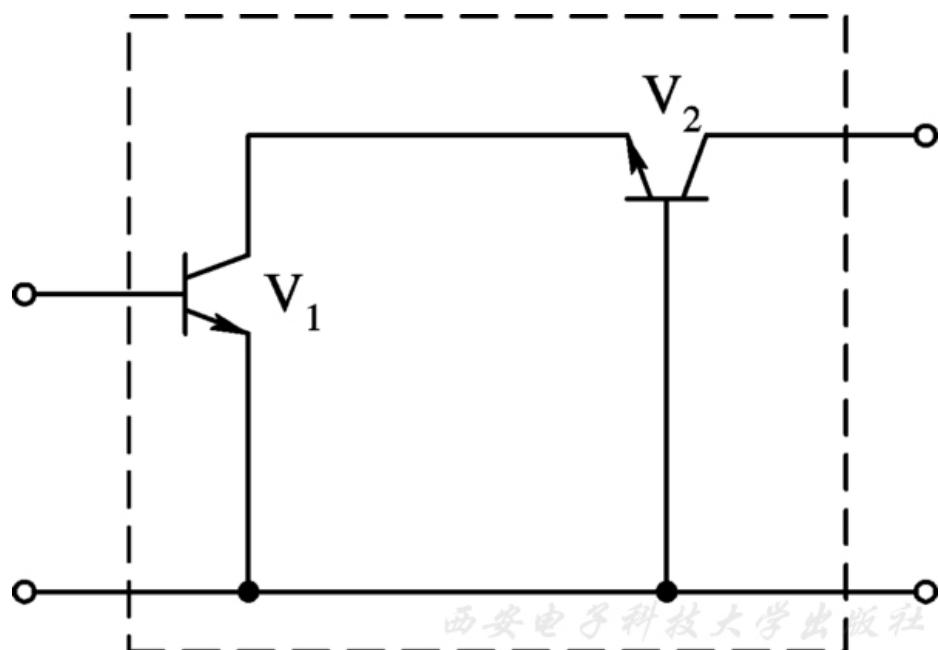
$$\left. \right\} C_N = \frac{L_2}{L_1}$$



**适用性:** 由于 $y_{re}$ 不是纯容性，且是频率的函数，所以只适用于固定频率的调谐放大器(如接收机的中频放大器)。

## (2) 失配法——共射-共基级联放大电路

原理：由于阻抗不匹配，输出电压减小，反馈使增益下降，提高稳定性。



电路优点：

- 稳定性提高
- 在很宽频率范围实现单向化

$V_1$ : 因  $R_{i2}$  小  $\rightarrow R'_{L1}$  减小  $\rightarrow \dot{A}_{u1}$  减小  $\rightarrow V_1$  内反馈

$V_2$ :  $C_{b'c}$  不构成内反馈

# 第2章 高频小信号放大电路

## 2.1 概述

## 2.2 谐振放大器

## 2.3 宽频带放大器

## 2.4 章末小结

二、应用和特点  
三、展宽放大器频带的

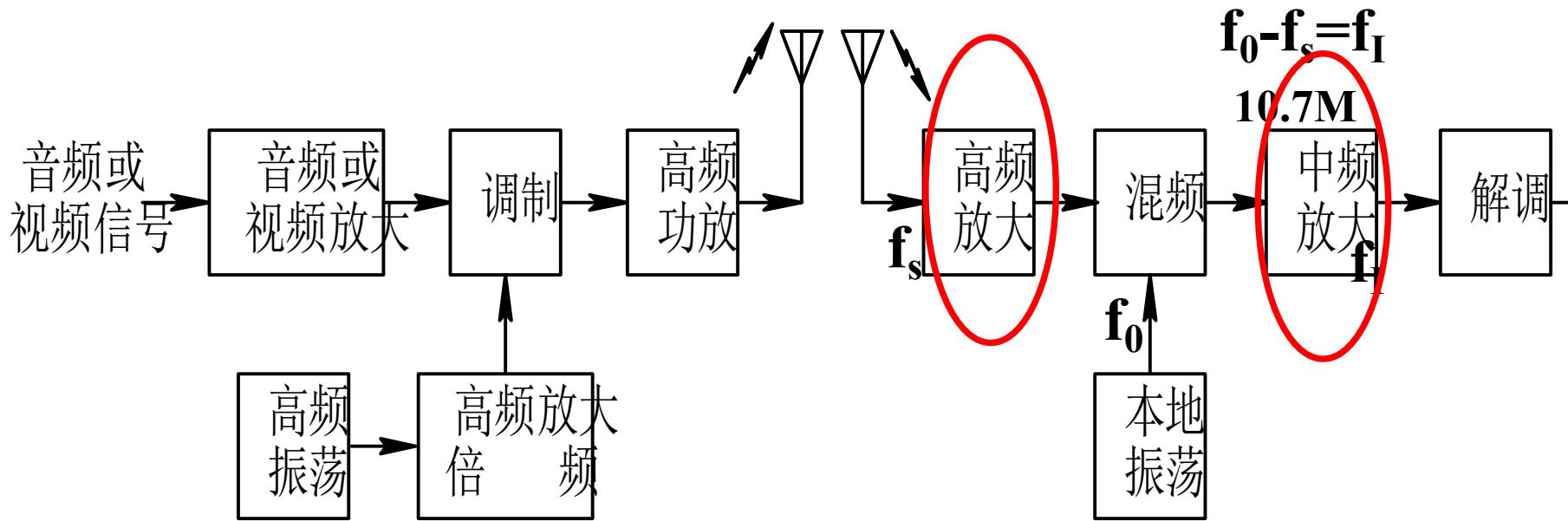
## 2.3 宽频带放大器

---

**一、应用和特点**

**二、展宽放大器频带的方法**

# 一、应用和特点



- 增益带宽积 $G \cdot BW$  ( $= A_u f_H$ ) 80M、100M、300M……
- 晶体管特性适合采用混 $\pi$ 等效电路。

## 二、展宽放大器频带的方法

即要提高 $f_H$ 。 主要方法：

- 1、组合电路法
- 2、反馈法
- 3、电感串并联补偿法

# 1. 组合电路法

- 放大电路三种组态的特点

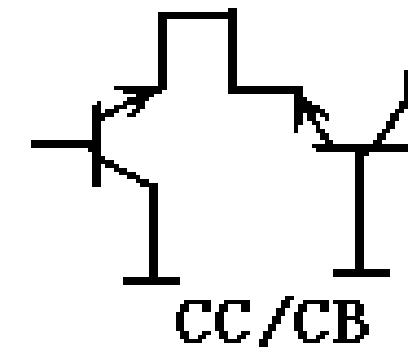
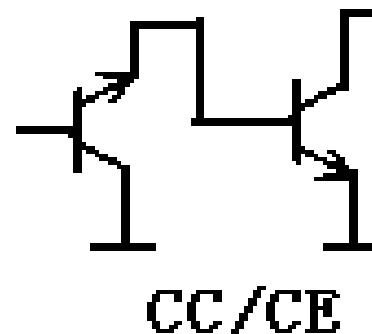
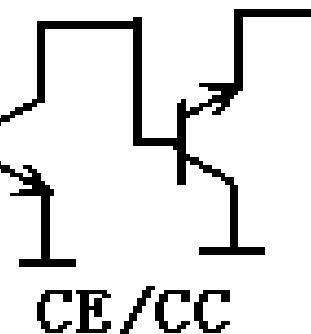
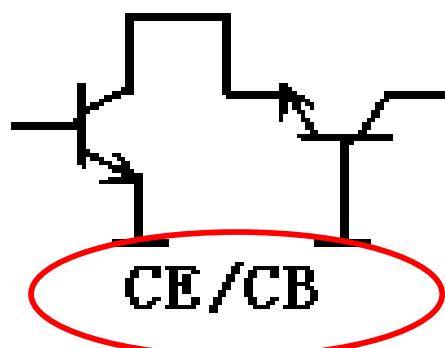
$$f_H = \frac{1}{2\pi RC}$$

共射:  $A_u$ 大,  $R_i$ 、 $R_o$ 中,  $f_H$ 低(因密勒效应)

共集:  $A_u$ 小,  $R_i$ 大,  $R_o$ 小,  $f_H$ 高

共基:  $A_u$ 大,  $R_i$ 小,  $R_o$ 大,  $f_H$ 较高

- 几种常见的组合电路

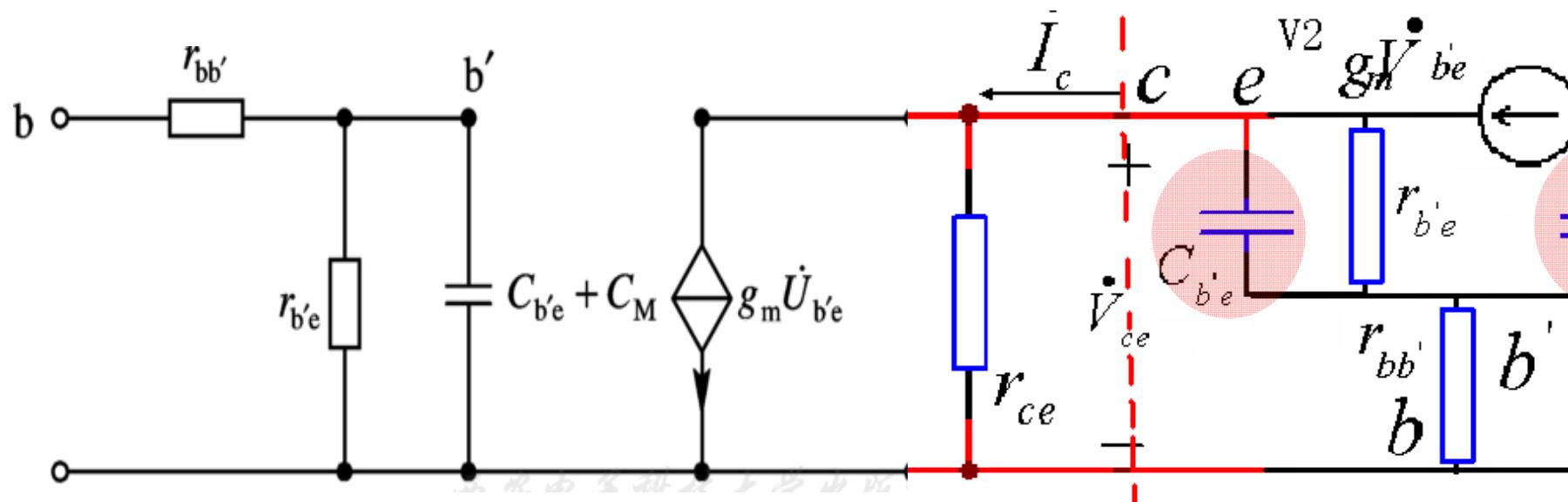


- 共射-共基组合电路

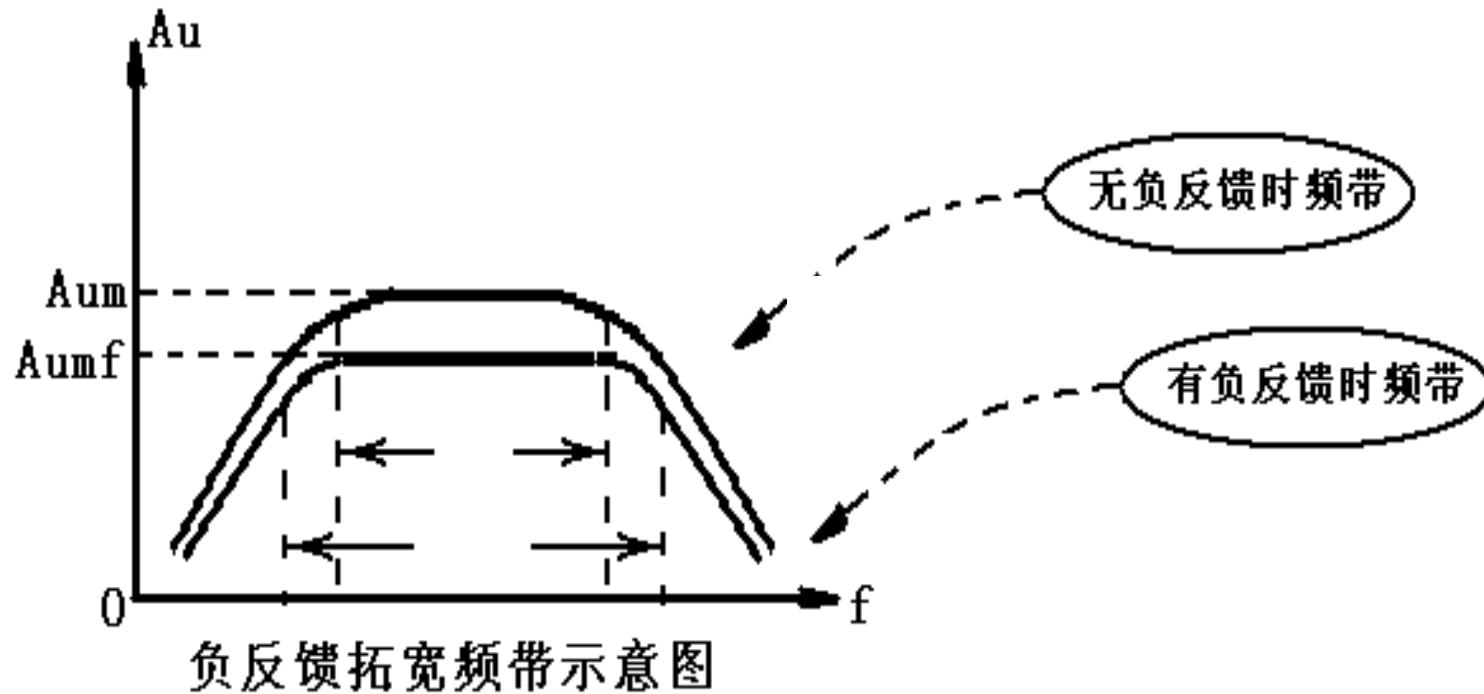
$f_H$ 由共射电路的 $f_{H1}$ 决定

$$C_M = (1 + g_m R_L) C_{b'e}$$

$$\frac{1}{f_H} \approx 1.1 \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \dots + \frac{1}{f_{Hn}^2}}$$

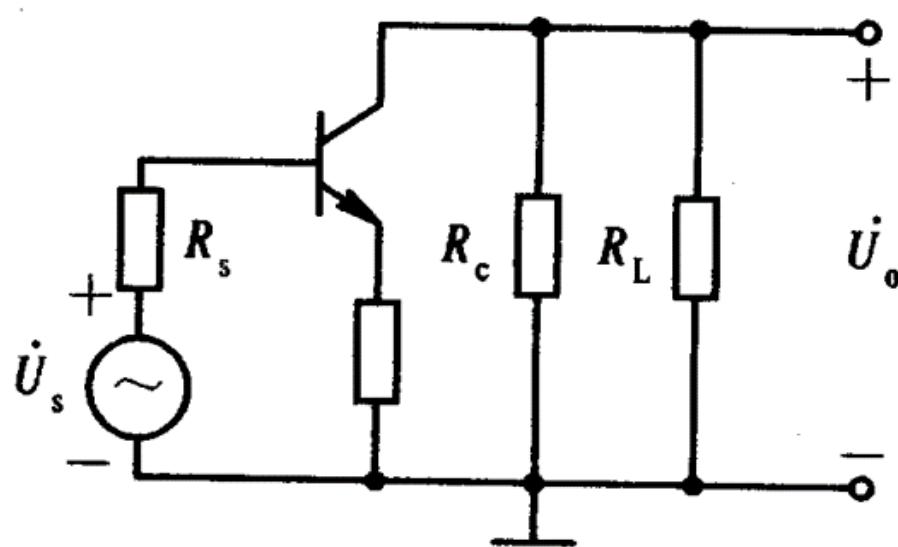


## 2. 负反馈法

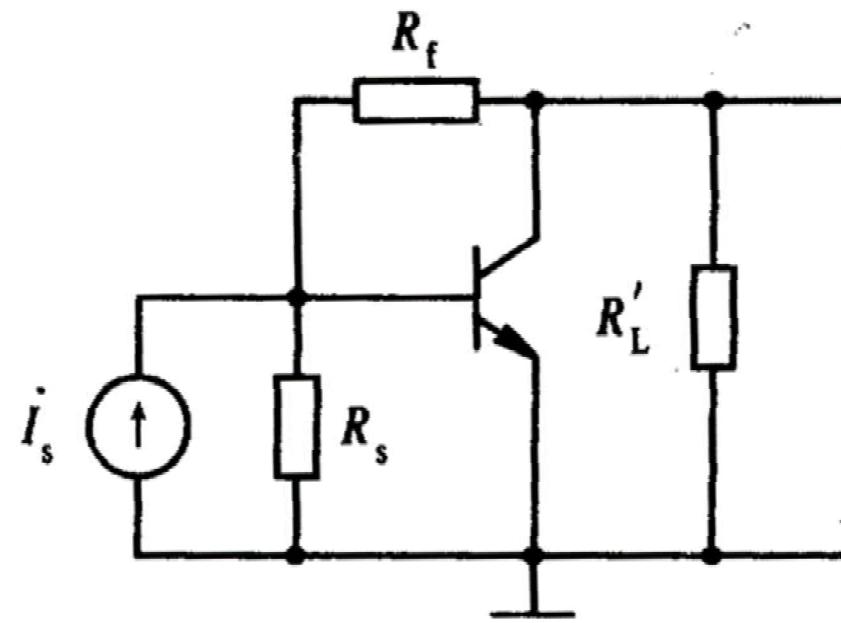


$$A_f = \frac{A}{1 + AF} \approx \frac{1}{F}$$

## • 单级负反馈放大电路



电流串联负反馈



电压并联负反馈

# • 集成宽带放大器LM733

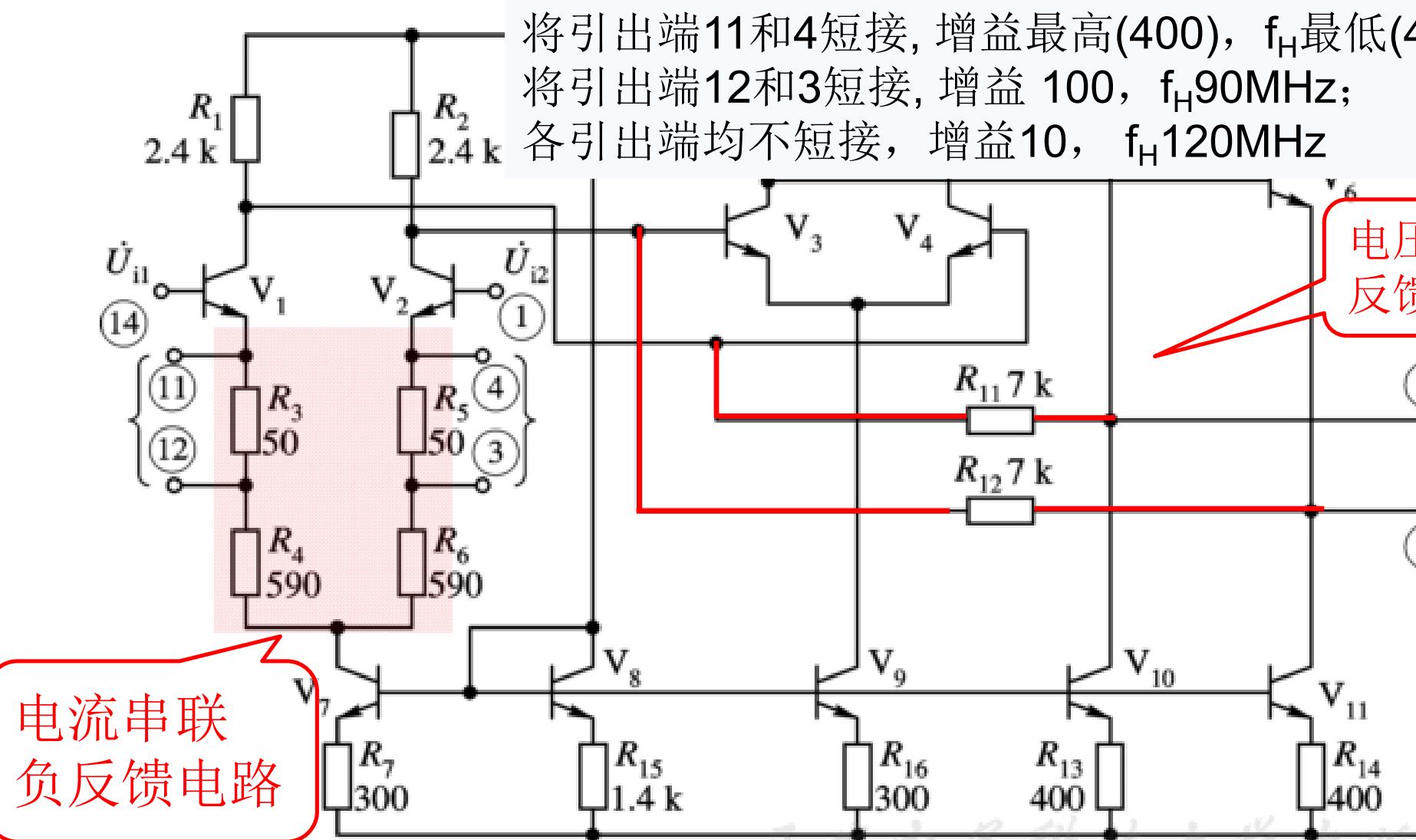
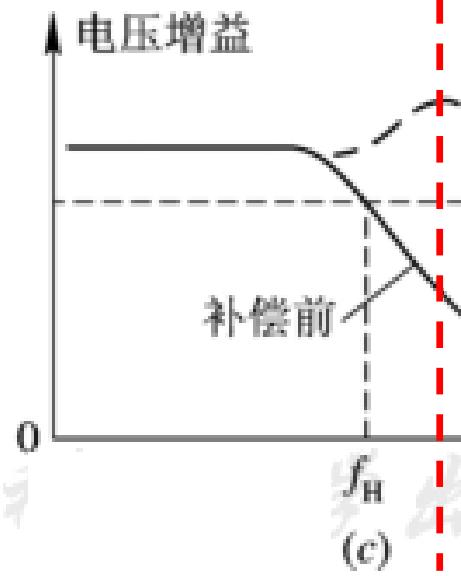
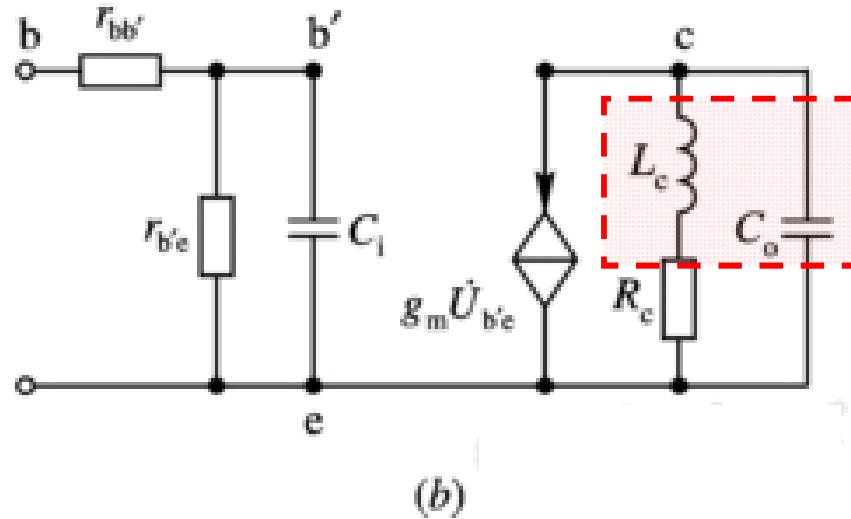
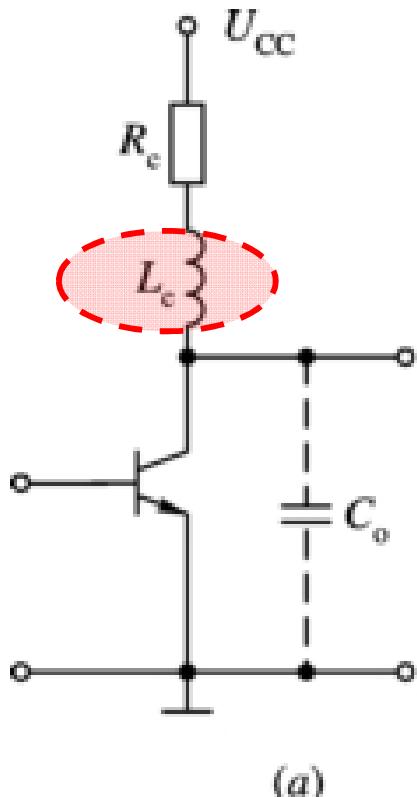


图 2.3.4 集成宽带放大器LM733内部电路图

### 3. 电感串并联补偿法

可采用多个电感串联或并入方式进行补偿，展宽频

- 集电极电感并联补偿电路



# 第2章 高频小信号放大电路

2.1 概述

2.2 谐振放大器

2.3 宽频带放大器

2.4 章末小结

# 课后作业

---

- 章末小结（自行总结）
- 习题(P47-48)： 2~5