

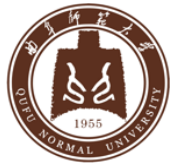
CEC

高频小信号放大器

High Frequency Class A Amplifiers

2025年3月13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

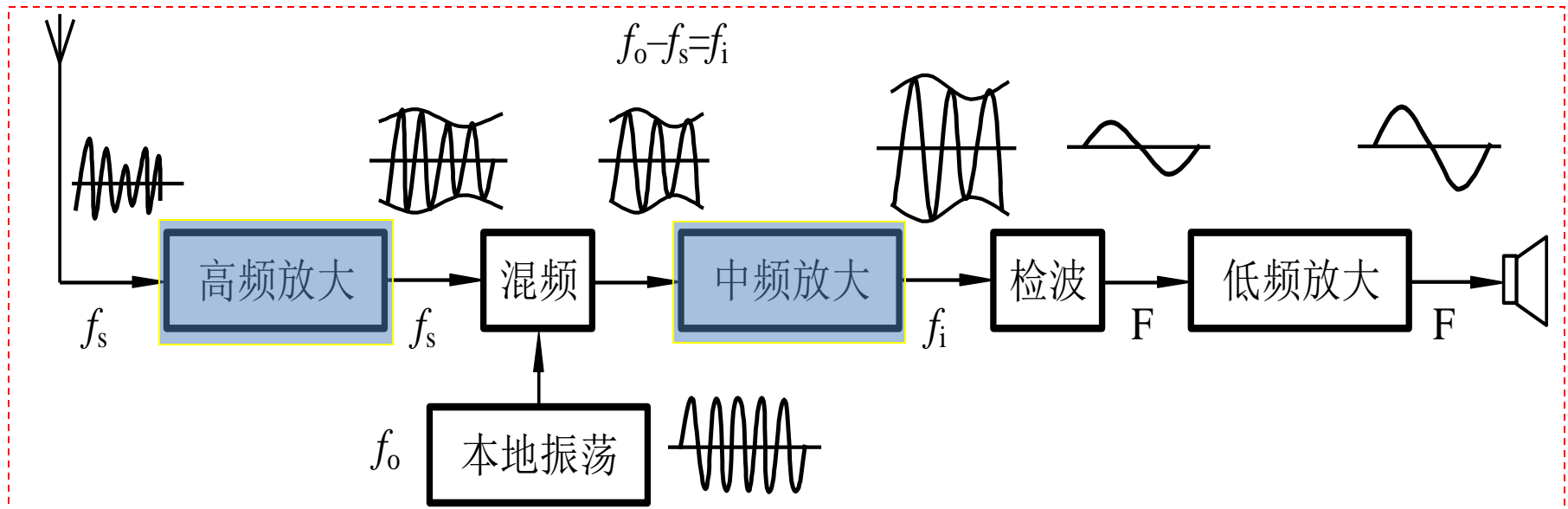
➡ 3.10 噪声的表示和计算方法

3.1 概述

➤ 高频小信号放大器的特点

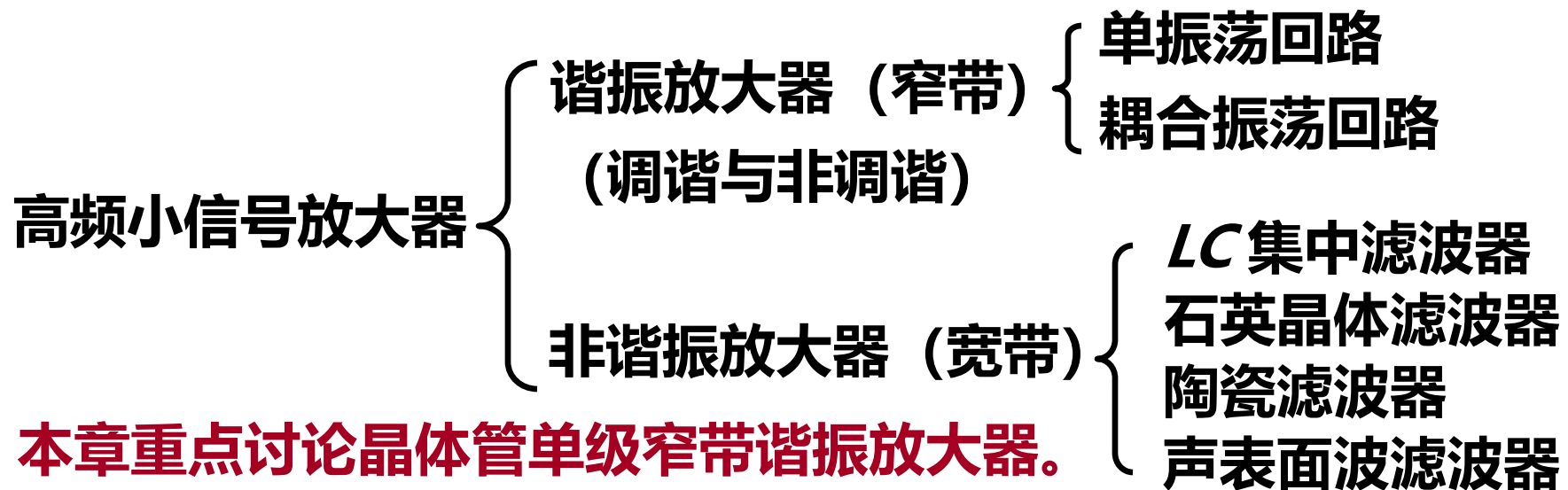
高频小信号(中心频率在几百kHz到几百MHz, 频谱宽度在几kHz到几十MHz的范围内)的放大器。通过的频带和中心频率之比是很小的(窄带), 一般都采用选频网络组成谐振或非谐振放大器。

普通调幅无线电广播所占带宽应为 9 kHz, 电视信号的带宽为 6 MHz左右。

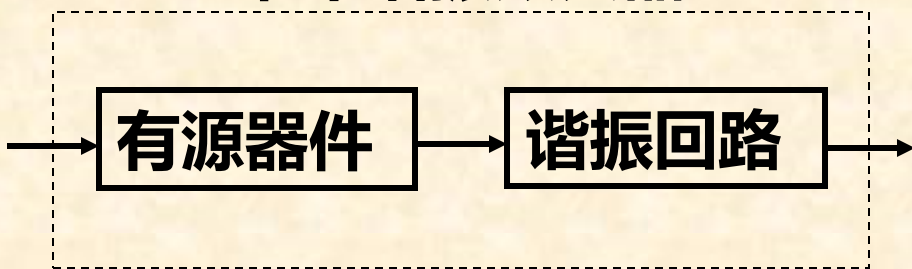


3.1 概述

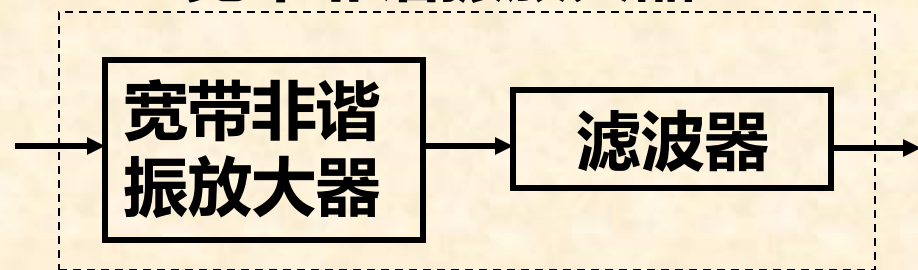
➤ 高频小信号放大器的分类



窄带谐振放大器



宽带非谐振放大器



3.1 概述

➤ 高频小信号放大器的主要质量指标

1) 增益：（放大系数）

电压增益： $A_v = \frac{V_o}{V_i}$

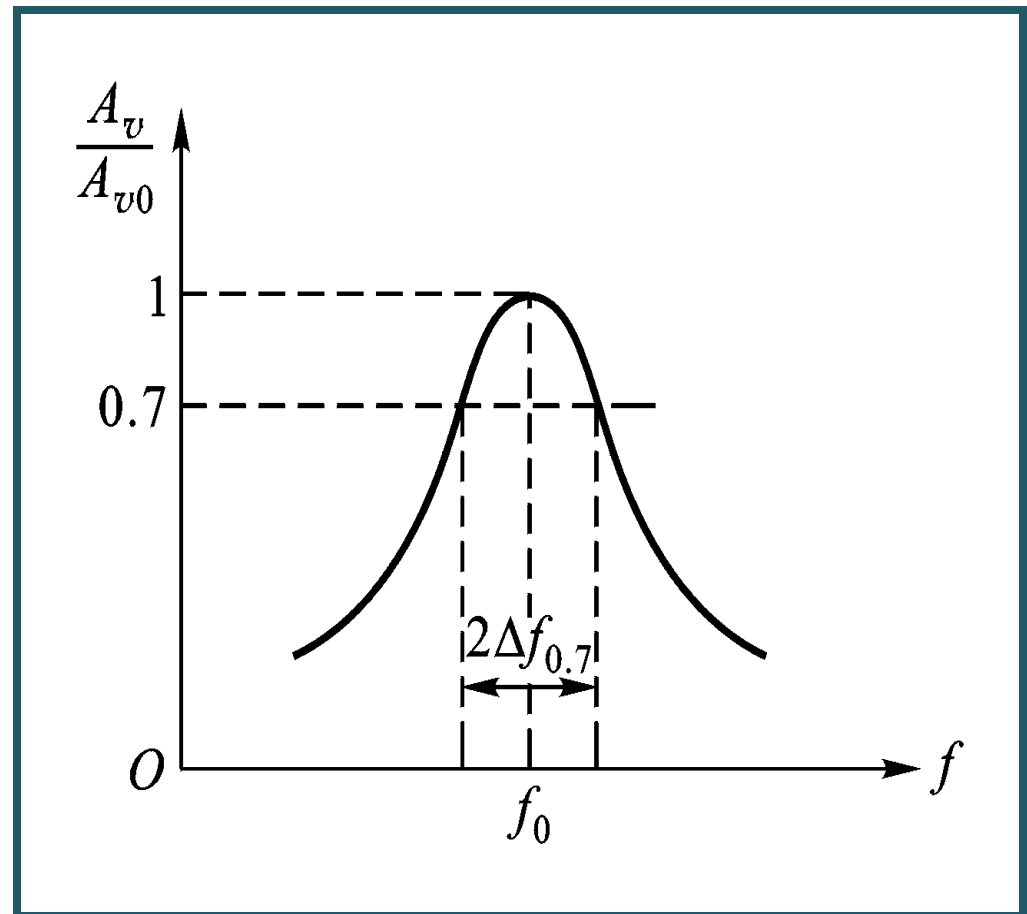
功率增益： $A_p = \frac{P_o}{P_i}$

分贝表示：

$$A_v = 20 \log \frac{V_o}{V_i}$$

$$A_p = 10 \log \frac{P_o}{P_i}$$

2) 通频带：



3.1 概述

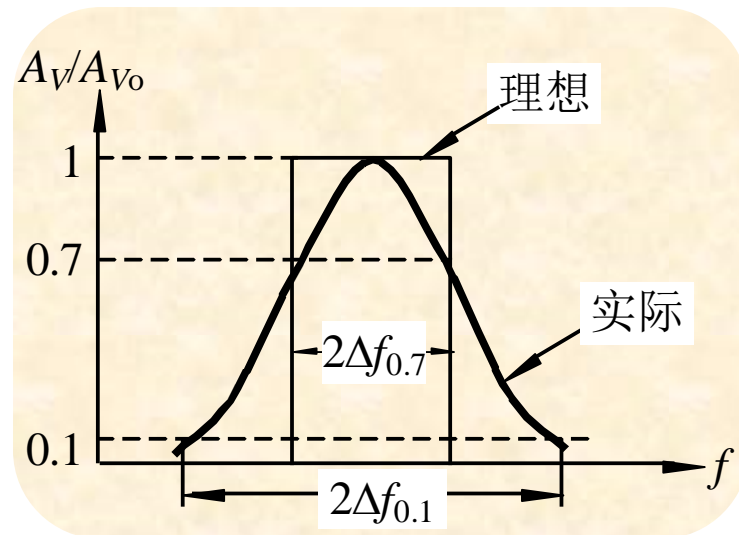
➤ 高频小信号放大器的主要质量指标

3) 选择性：从各种不同频率信号的总和（有用的和有害的）中选出有用信号，抑制干扰信号的能力称为放大器的选择性。选择性常采用**矩形系数**和**抑制比**来表示。

① 矩形系数：表示与理想滤波特性的接近程度。

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

$$K_{r0.01} = \frac{2\Delta f_{0.01}}{2\Delta f_{0.7}}$$



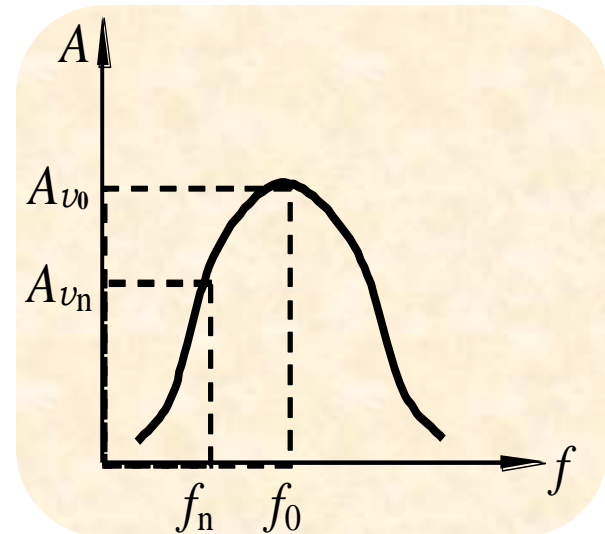
3.1 概述

➤ 高频小信号放大器的主要质量指标

3) 选择性：从各种不同频率信号的总和（有用的和有害的）中选出有用信号，抑制干扰信号的能力称为放大器的选择性。选择性常采用**矩形系数**和**抑制比**来表示。

② 抑制比：表示对某个干扰信号 f_n 的抑制能力，用 d_n 表示。

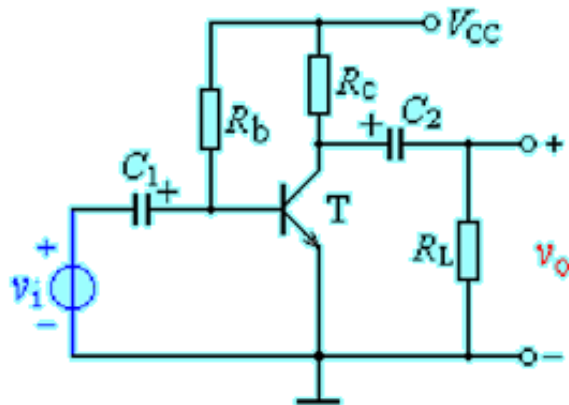
$$d_n = \frac{A_{v0} (\text{谐振点放大倍数})}{A_{vn} (\text{干扰的放大倍数})}$$



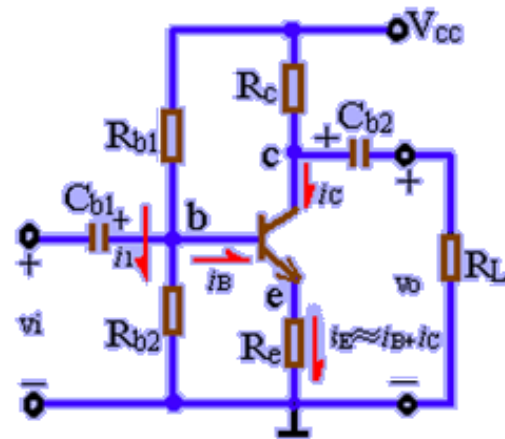
3.1 概述

➤ 高频小信号放大器的主要质量指标

4) 工作稳定性：指放大器的工作状态(直流偏置)、晶体管参数、电路元件参数等发生可能的变化时，放大器的主要特性的稳定。



基本共射极放大电路



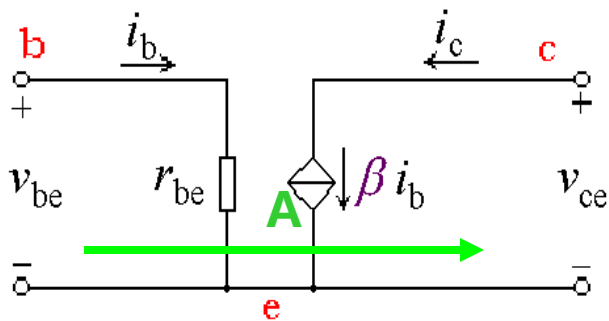
稳Q共射极放大电路

不稳定状态有增益变化，中心频率偏移，通频带变窄，谐振曲线变形，极端情况是放大器自激（主要由晶体管内部反馈引起），使放大器完全不能工作。

3.1 概述

➤ 高频小信号放大器的主要质量指标

4) 工作稳定性：指放大器的工作状态(直流偏置)、晶体管参数、电路元件参数等发生可能的变化时，放大器的主要特性的稳定。



低频小信号模型

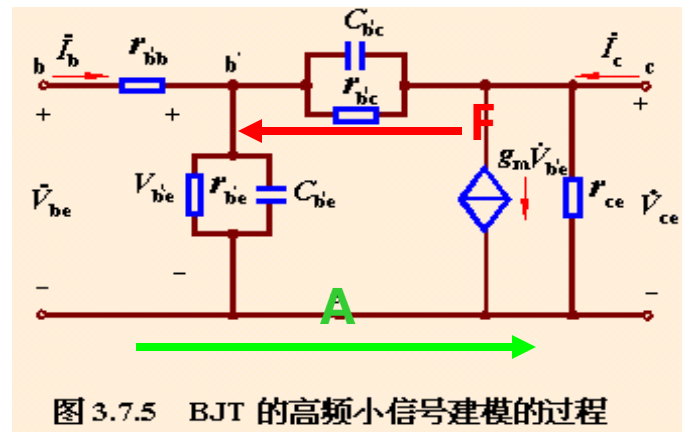
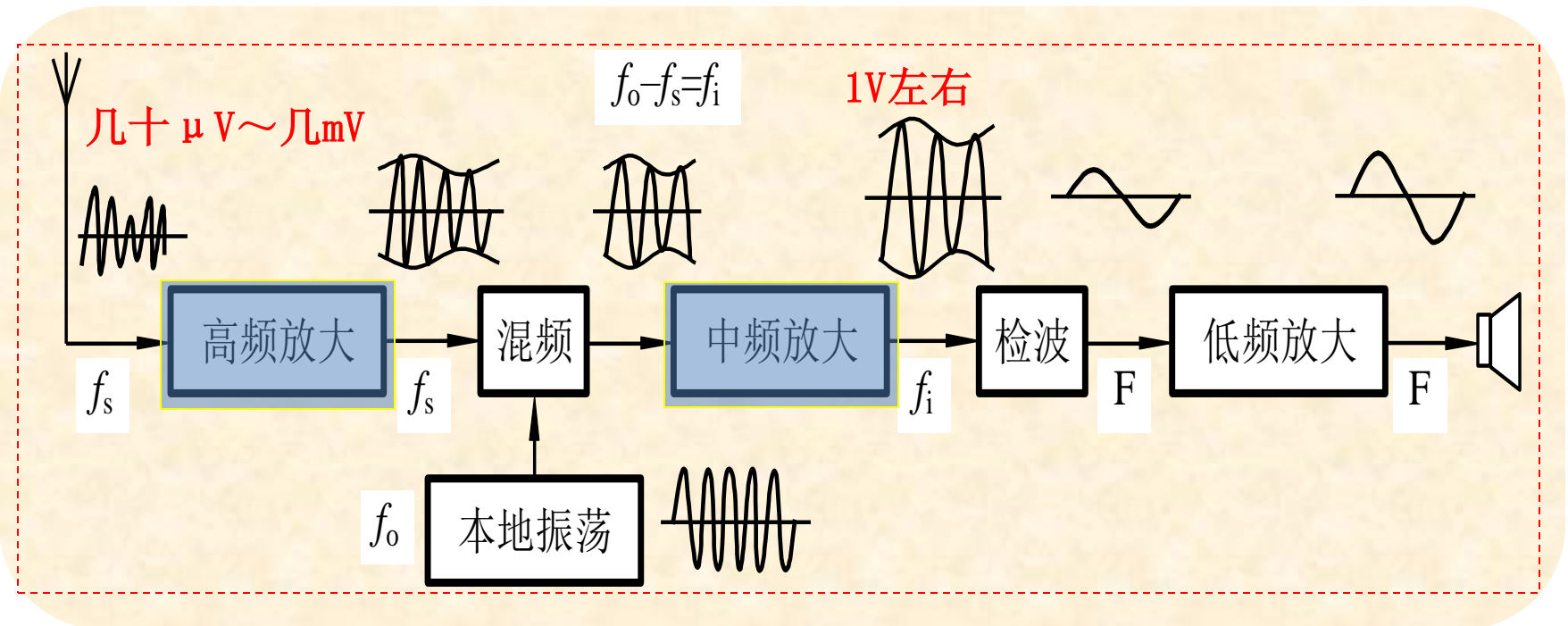


图 3.7.5 BJT 的高频小信号建模的过程

高频小信号模型

3.1 概述

➤ 高频小信号放大器的分析方法

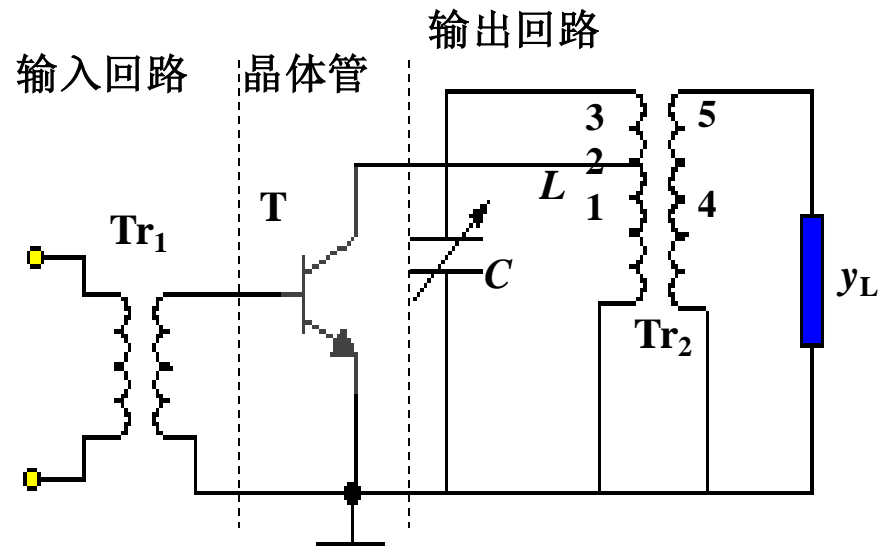
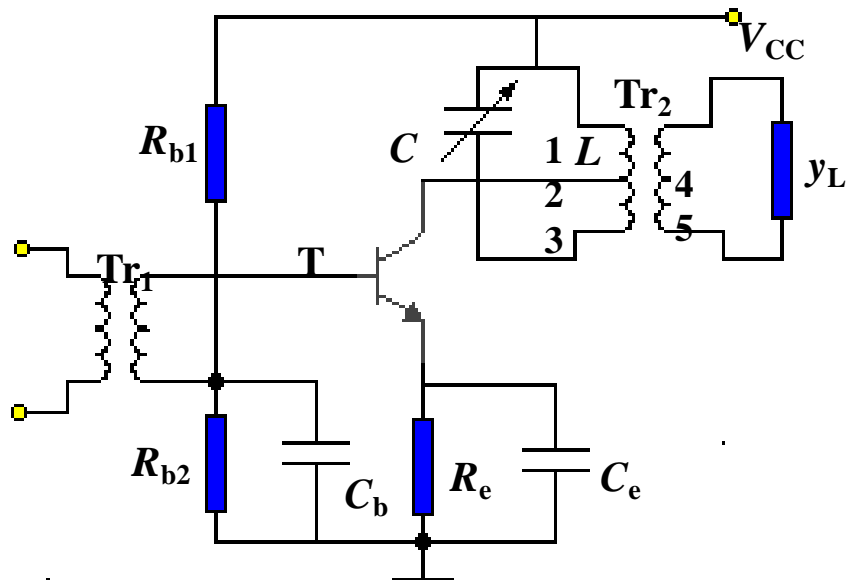


晶体管工作在线性区（放大区），可看成**线性元件**，可用双端口理论中有源四端网络参数微变等效电路来分析。

- ➡ 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

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

3.2.1 形式等效电路

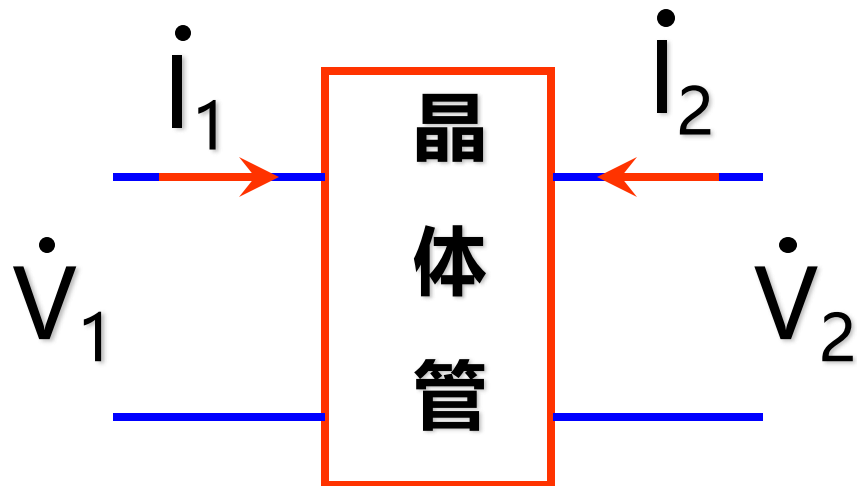


因为放大器由信号源、晶体管、并联振荡回路和负载阻抗并联组成，采用**导纳**分析比较方便，为此，引入**晶体管的（导纳） y 参数等效电路**。

晶体管工作在线性区，可看成线性元件，可用有源四端网络参数微变等效电路来分析。

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.1 形式等效电路



有源线性四端网络

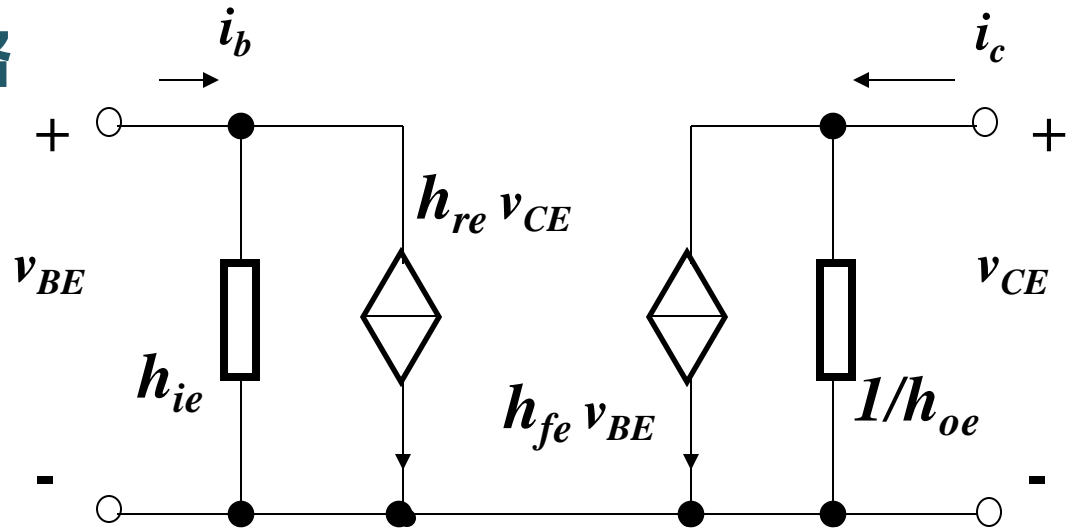
	自变量	参变量
h 参数系	$\dot{I}_1 \quad \dot{V}_2$	$\dot{I}_2 \quad \dot{V}_1$
z 参数系	$\dot{I}_1 \quad \dot{I}_2$	$\dot{V}_1 \quad \dot{V}_2$
y 参数系	$\dot{V}_1 \quad \dot{V}_2$	$\dot{I}_1 \quad \dot{I}_2$

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

3.2.1 形式等效电路

$$v_{BE} = f_1(i_B, v_{CE})$$

$$i_C = f_2(i_B, v_{CE})$$



低频 h 参数等效电路

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}}$$

输出端交流短路时的输入电阻;

$$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CE}}$$

输出端交流短路时的正向电流传输比;

$$h_{re} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B}$$

输入端交流开路时的反向电压传输比;

$$h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_B}$$

输入端交流开路时的输出电导;

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.1 形式等效电路

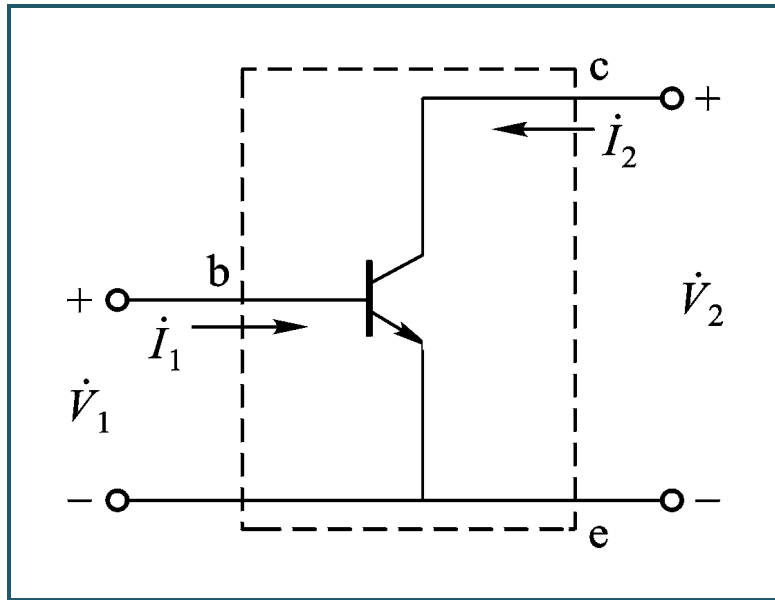


图 3.2.1 晶体管共发射极电路

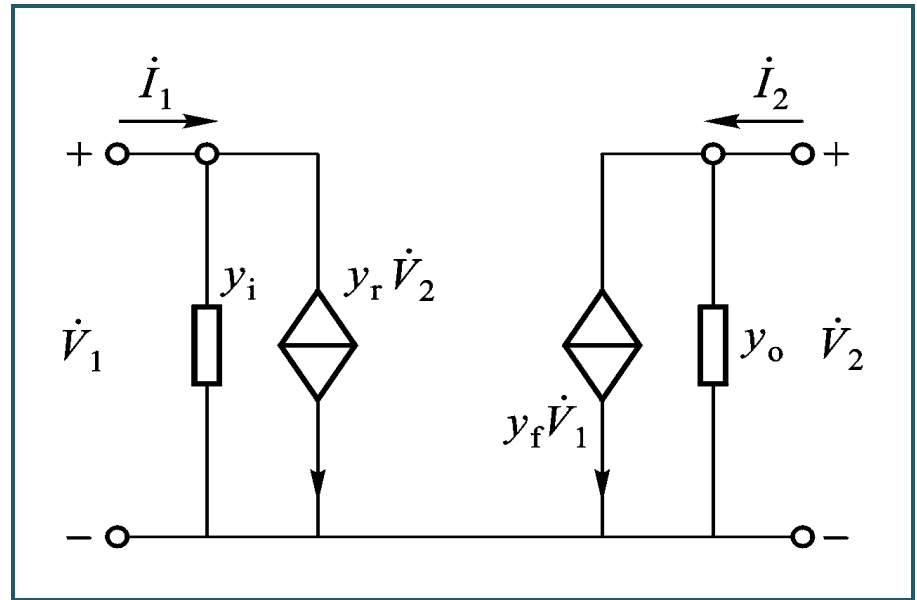


图 3.2.2 y 参数等效电路

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= y_i \dot{V}_1 + y_r \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 &= y_f \dot{V}_1 + y_o \dot{V}_2 \end{aligned} \Rightarrow \begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_i & y_r \\ y_f & y_o \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \end{bmatrix}$$

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.1 形式等效电路

$$\dot{I}_1 = y_i \dot{V}_1 + y_r \dot{V}_2$$

$$\dot{I}_2 = y_f \dot{V}_1 + y_o \dot{V}_2$$

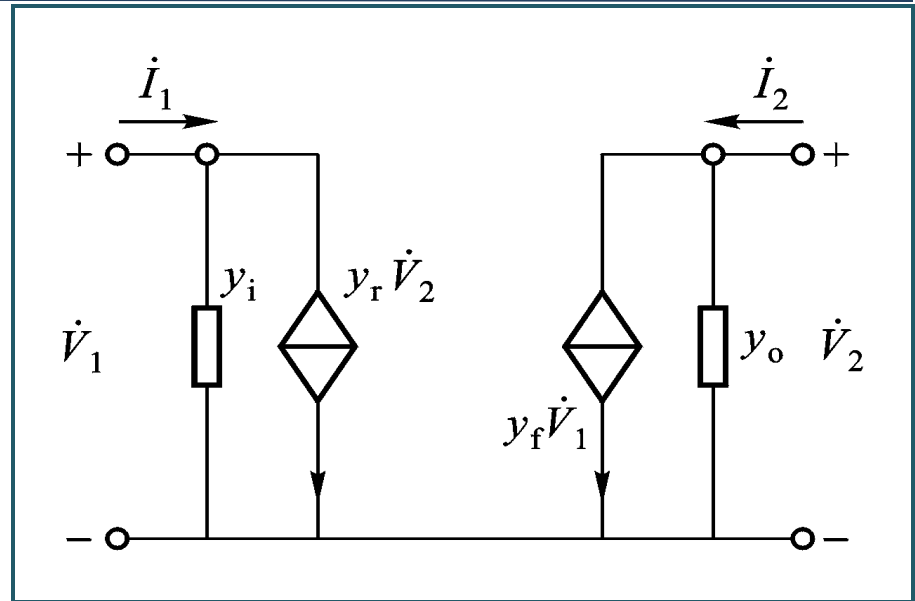


图 3.2.2 y 参数等效电路

$$y_i = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_1} \right|_{\dot{V}_2=0} \quad \text{称为输出短路时的输入导纳；}$$

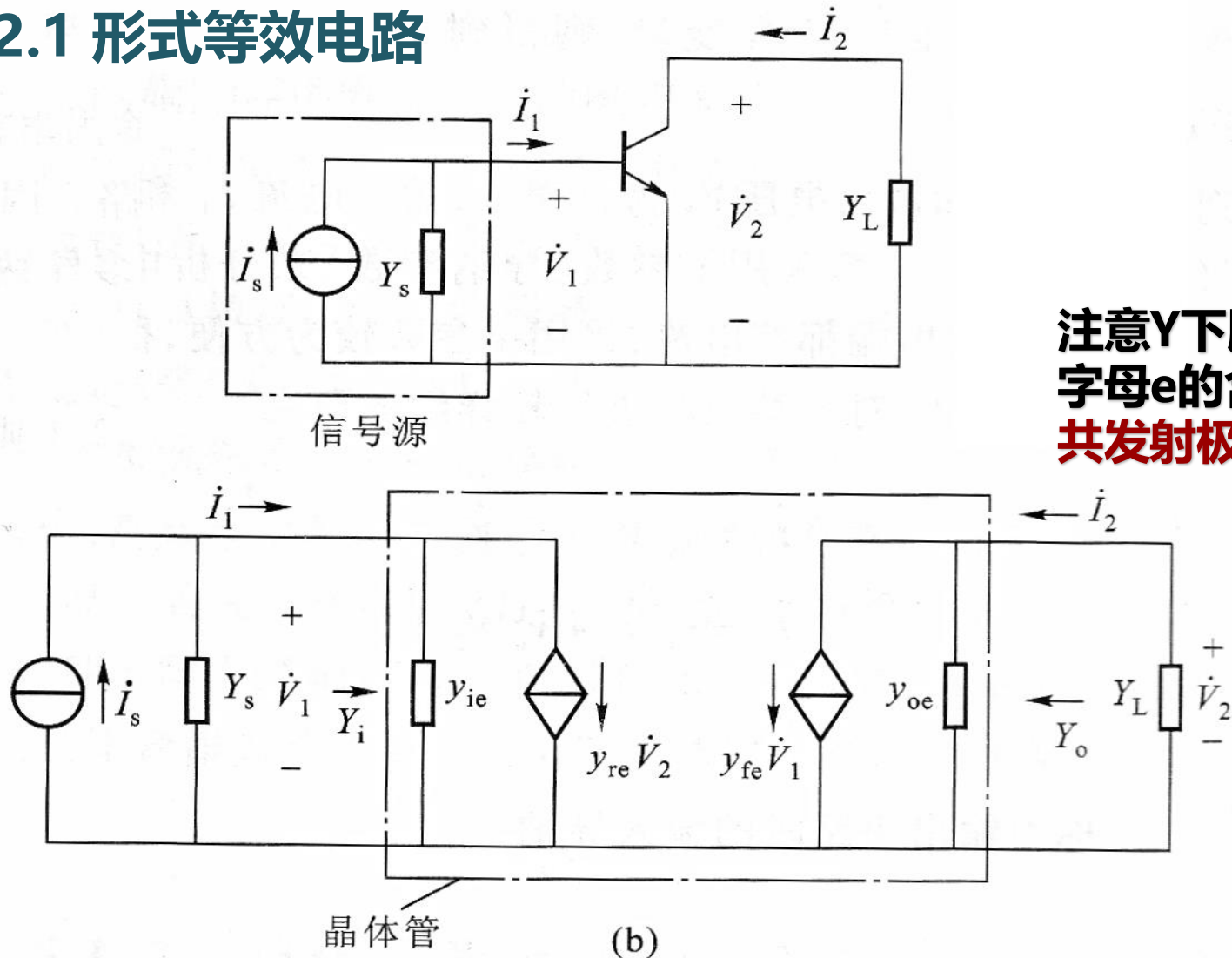
$$y_r = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_2} \right|_{\dot{V}_1=0} \quad \text{称为输入短路时的反向传输导纳；}$$

$$y_f = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_1} \right|_{\dot{V}_2=0} \quad \text{称为输出短路时的正向传输导纳；}$$

$$y_o = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_2} \right|_{\dot{V}_1=0} \quad \text{称为输入短路时的输出导纳。}$$

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.1 形式等效电路

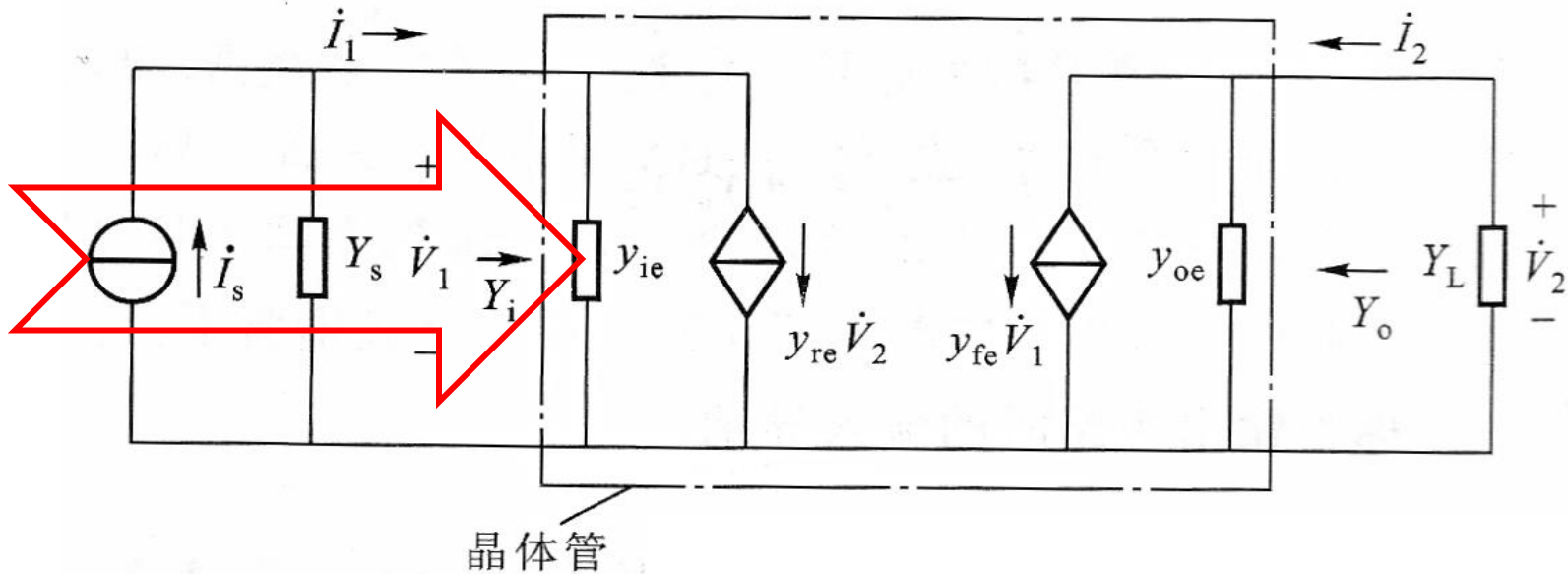


注意Y下脚标第二个字母e的含义：
共发射极电路参数

图 3.2.3 晶体管放大器及其 y 参数等效电路

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.1 形式等效电路



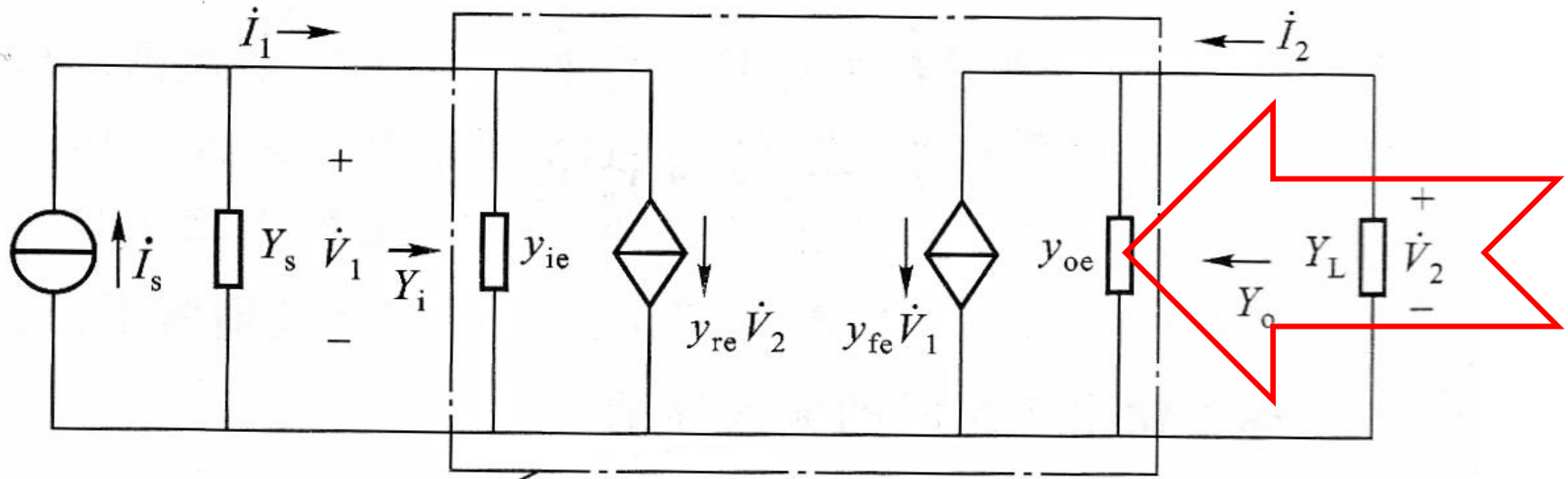
放大器输入导纳 Y_i

节点电流法

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = y_{ie} \dot{V}_1 + y_{re} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 = y_{fe} \dot{V}_1 + y_{oe} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 = -Y_L \dot{V}_2 \end{cases} \quad Y_i = y_{ie} - \frac{y_{re} y_{fe}}{y_{oe} + Y_L}$$

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

3.2.1 形式等效电路



晶体管
放大器输出导纳 Y_o

$$\begin{cases} \dot{I}_1 = y_{ie} \dot{V}_1 + y_{re} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 = y_{fe} \dot{V}_1 + y_{oe} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_1 = -Y_s \dot{V}_1 \quad (\dot{I}_s = 0) \end{cases}$$

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

$$A_v = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = - \frac{y_{fe}}{y_{oe} + Y_L}$$

小结

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= y_i \dot{V}_1 + y_r \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 &= y_f \dot{V}_1 + y_o \dot{V}_2 \end{aligned} \quad y_r = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_2} \right|_{\dot{V}_1=0} \quad y_f = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_1} \right|_{\dot{V}_2=0}$$

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

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

y_{fe} 表示输入电压对输出电流的控制作用（正向控制）

y_{re} 表示输出电压对输入电流的控制作用（反向控制）

y_{fe} 越大, 表示晶体管的放大能力越强;

y_{re} 越大, 表示晶体管的内部反馈越强。

y_{re} 的存在, 对实际工作带来很大危害, 是谐振放大器自激的根源, 同时也分析过程变得复杂, 因此应尽可能减小 或削弱它的影响。

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.2 混合 π 等效电路

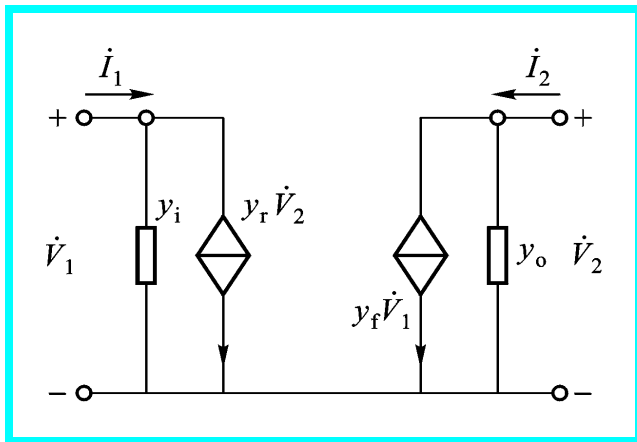
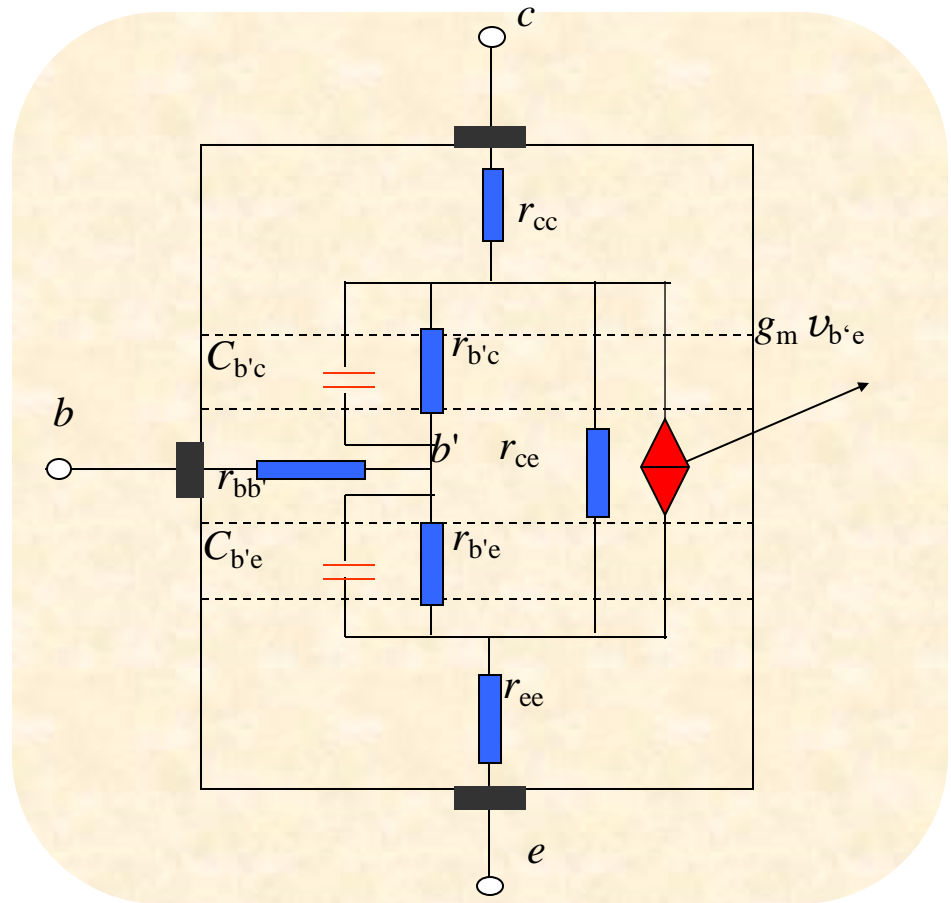


图 3.2.2 y 参数等效电路

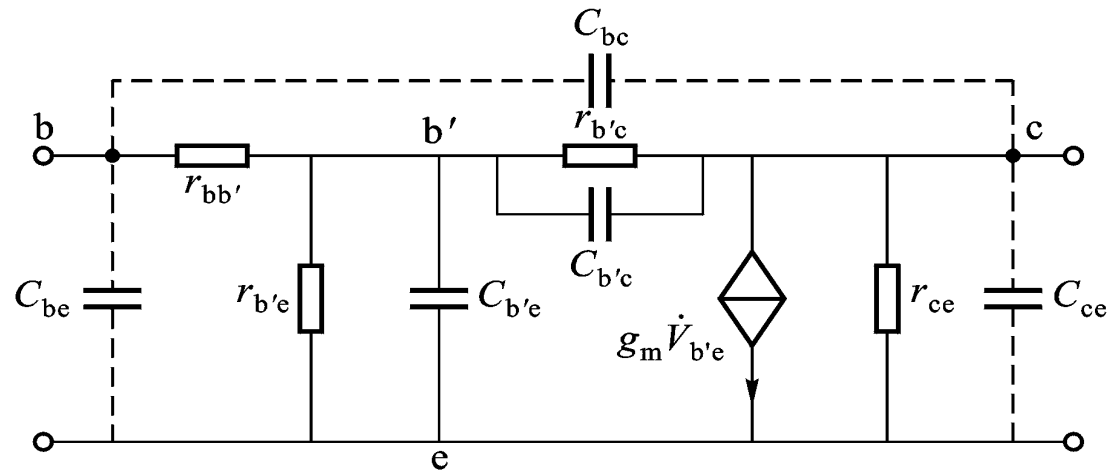
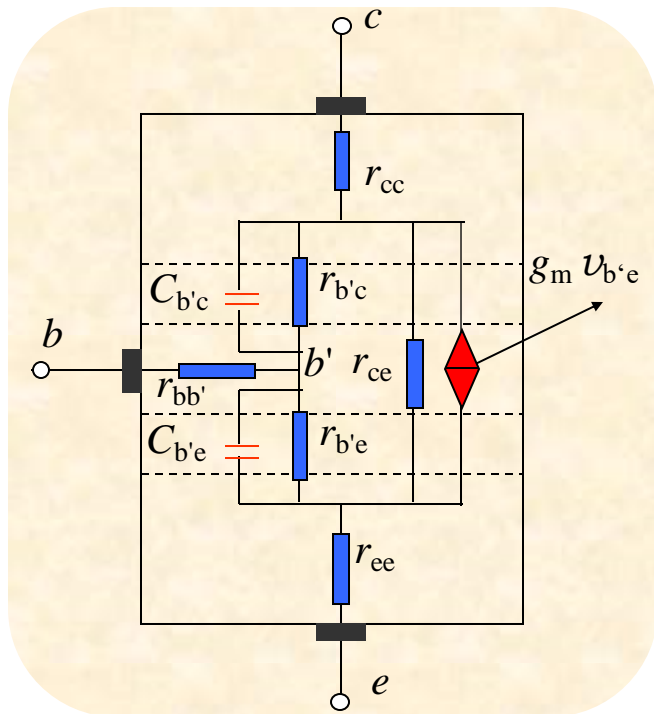
y (导纳) 参数的缺点:
 随频率变化;
 物理含义不明显。



晶体管物理等效电路

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.2 混合 π 等效电路



$$\begin{aligned} r_{b'c} &= 1 \text{ M}\Omega & C_{b'e} &= 500 \text{ pF} \\ r_{bb'} &= 25 \text{ }\Omega & C_{b'c} &= 5 \text{ pF} \\ r_{b'e} &= 150 \text{ }\Omega & r_{ce} &= 100 \text{ k}\Omega \\ g_m &= 50 \text{ mS} \end{aligned}$$

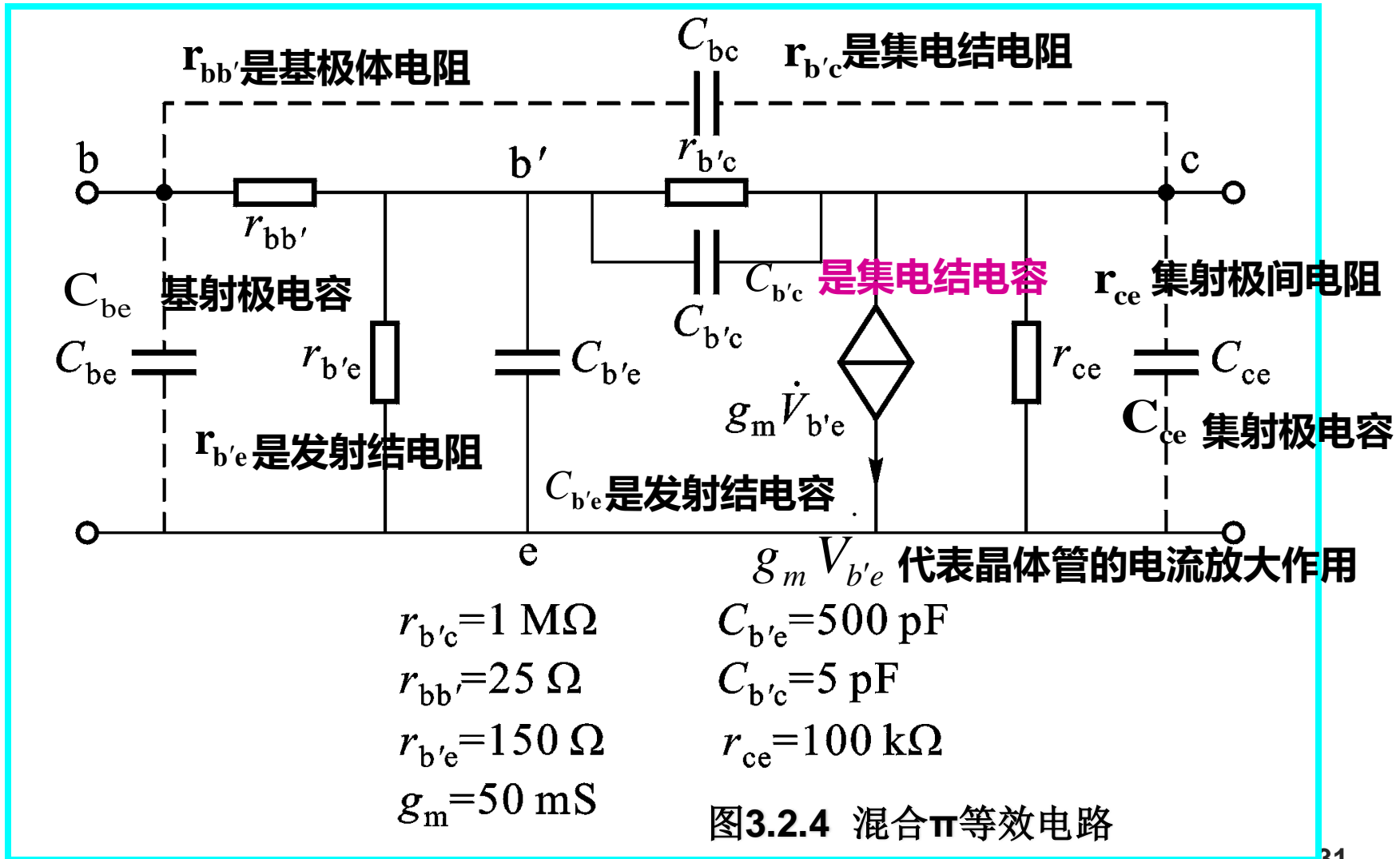
图 3.2.4 混合 π 等效电路

优点： 各个元件在很宽的频率范围内都保持常数。
缺点： 分析电路不够方便。

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

3.2.2 混合 π 等效电路

虚线连接的电容是分布电容



3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

3.2.3 等效电路参数的转换

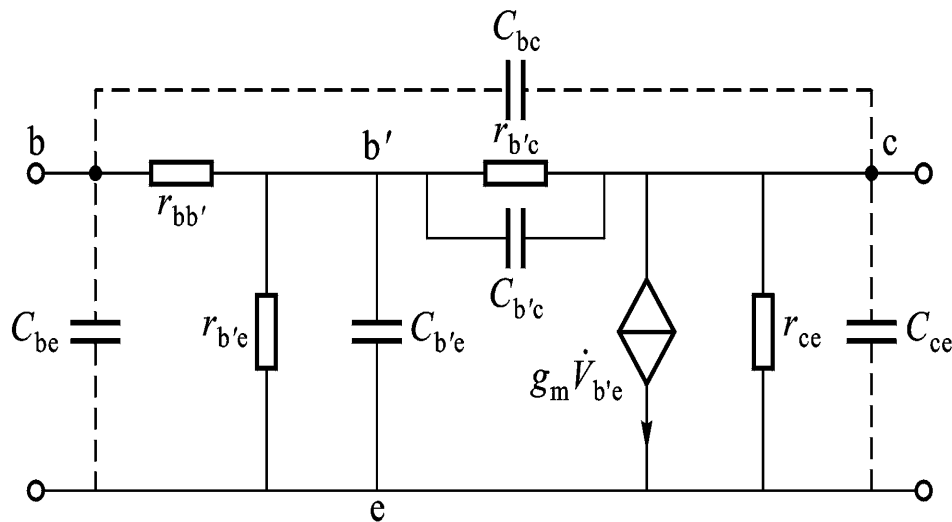
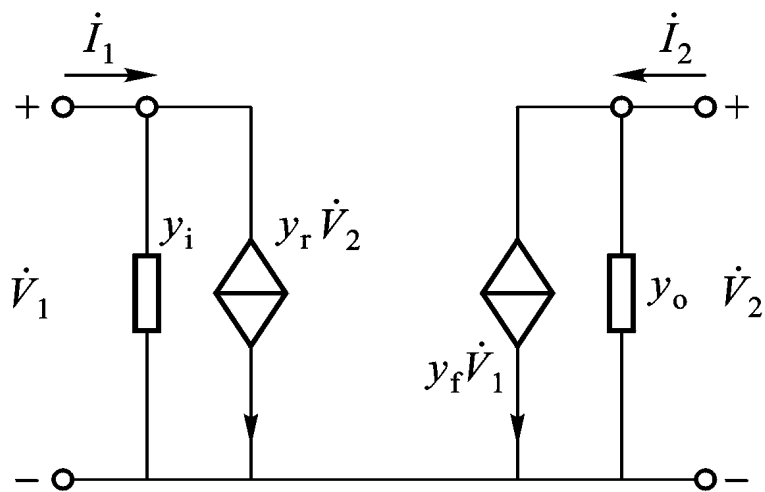


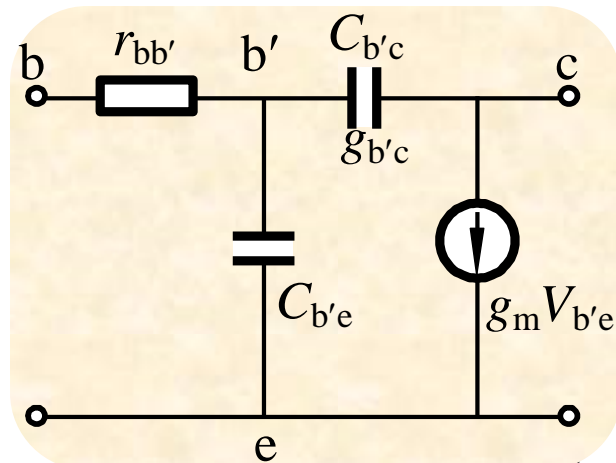
图 4.2.5 y 参数及混合 π 等效电路

$$r_{b'e} = \frac{26\beta_0}{I_E}$$

$$g_m = \frac{\beta_0}{r_{b'e}} = \frac{I_C}{26}$$

$$\frac{1}{\omega C_{b'e}} \ll r_{b'e}$$

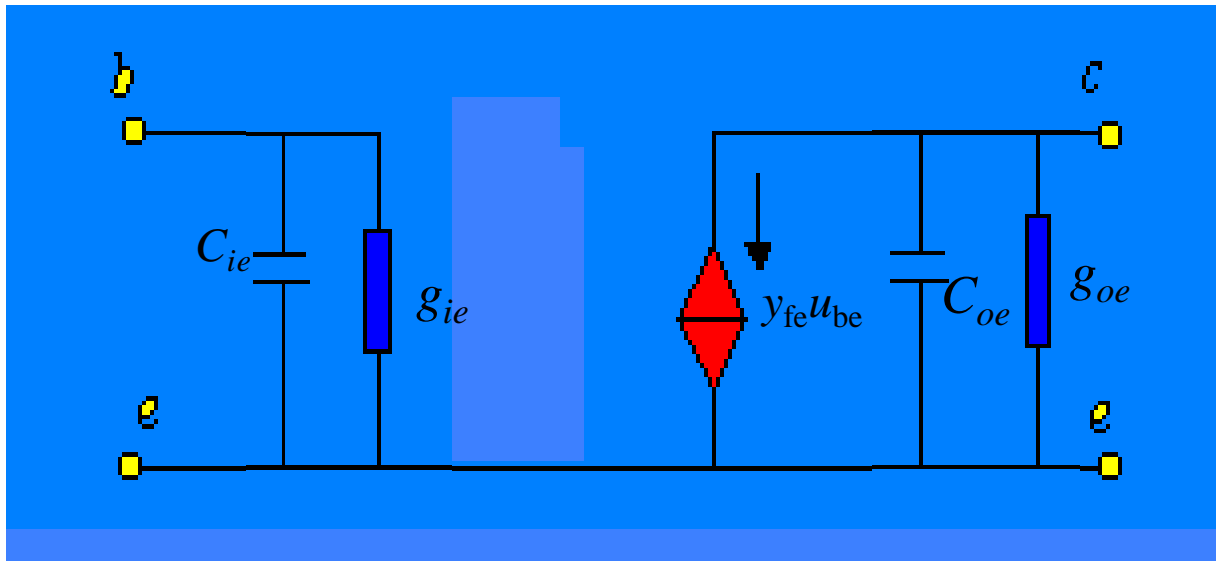
或 $f \gg f_\beta$



3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

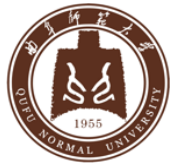
➤ 3.2.3 等效电路参数的转换

$$r_{bb'} \ll \frac{1}{\omega(C_{b'e} + C_{b'c})} \quad f \ll f_T \approx \frac{g_m}{2\pi(C_{b'e} + C_{b'c})}$$



$$y_{ie} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_1} \right|_{V_2=0} = g_{ie} + j\omega C_{ie} \quad y_{oe} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_2} \right|_{V_1=0} = g_{oe} + j\omega C_{oe}$$

Y参数 Y_{ie} 和 Y_{oe} 中的导纳变成混合 π 的电导和电容产生的电纳之和。



3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.3 等效电路参数的转换

$$r_{bb'} \ll \frac{1}{\omega(C_{b'e} + C_{b'c})} \quad f \ll f_T \approx \frac{g_m}{2\pi(C_{b'e} + C_{b'c})}$$

$$y_{ie} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_1} \right|_{V_2=0} = g_{ie} + j\omega C_{ie} \quad y_{ie} \approx g_{b'e} + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})$$

$$y_{oe} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_2} \right|_{V_1=0} = g_{oe} + j\omega C_{oe}$$

$$y_{oe} \approx g_{ce} + j\omega C_{b'c}$$

$$y_{fe} = \left. \frac{\dot{I}_2}{\dot{V}_1} \right|_{V_2=0} \approx \frac{g_m}{1 + j\omega(C_{b'e} + C_{b'c})r_{bb'}}$$

$$y_{fe} \approx g_m$$

$$y_{re} = \left. \frac{\dot{I}_1}{\dot{V}_2} \right|_{V_1=0} \approx -\frac{j\omega C_{b'c}}{1 + j\omega C_{b'e} r_{bb'}}$$

$$y_{re} = -j\omega C_{b'c}$$

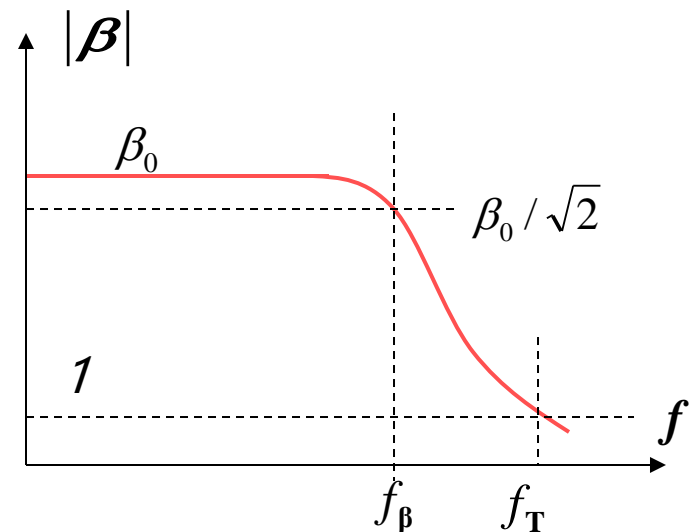
3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.4 晶体管高频参数

1. 截止频率

β 下降到低频值 β_0 的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时所对应的频率。

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}} \quad \beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}}$$



2. 特征频率 f_T

$\beta = 1$, 时所对应的频率。

当 $f > f_T$ 后, 共发接法的晶体管将不再有电流放大能力, 但仍可能有电压增益, 而功率增益还可能大于1。

3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.4 晶体管高频参数

2. 特征频率 f_T

$$\beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} = 1 \quad \text{所以 } f_T = f_\beta \sqrt{\beta_0^2 - 1}$$

通常 $\beta_0 \gg 1$, $f_T \approx \beta_0 f_\beta$

$$\text{当 } f \gg f_\beta \text{ 时, } \beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}} \approx \frac{f_T/f_\beta}{f/f_\beta} = \frac{f_T}{f}$$

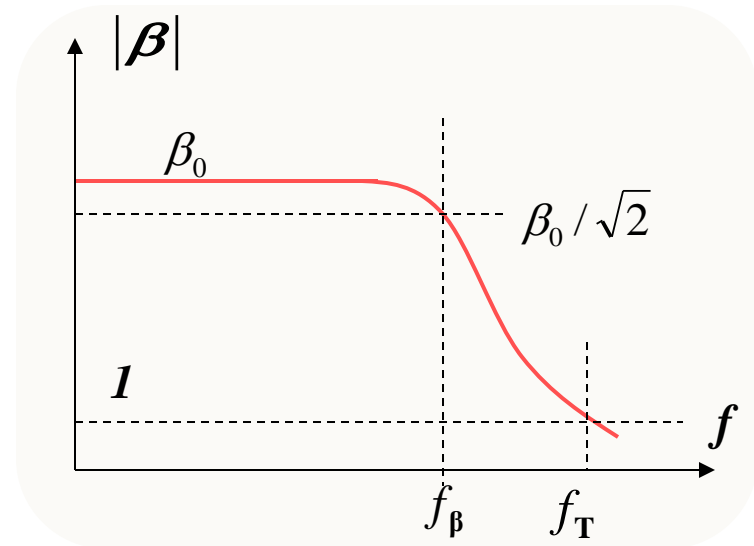


图3.2.6 β 截止频率和特征频率

即 $\beta \cdot f \approx f_T$

可以粗略计算在某工作频率 $f \gg f_\beta$ 的电流放大系数。



3.2 晶体管高频小信号等效电路与参数

➤ 3.2.4 晶体管高频参数

3. 最高振荡频率 f_{\max} 晶体管功率增益 $A_p=1$ 时的最高工作频率

$$f_{\max} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_m}{4r_{bb'}C_{b'e}C_{b'c}}}$$

$f \geq f_{\max}$ 后, $A_p < 1$, 晶体管已经不能得到功率放大。

由于晶体管输出功率恰好等于其输入功率是保证它作为自激振荡器的必要条件, 所以也不能使晶体管产生振荡。

为使电路工作稳定, 应有一定功率增益, 实际工作频率是最高频率的 $1/3 \sim 1/4$ 。

$$f_{\beta} < f_T < f_{\max}$$

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。
3. **Y参数等效电路和混合 π 等效电路**是描述晶体管工作的重要模型。Y参数与混合 π 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。



Thank You !

Q & A