

第三章 高频小信号放大器

3.1 高频小信号放大器的分类和指标

3.2 晶体管高频小信号等效电路



3.1 高频小信号放大器的分类和指标

高频小信号放大器分类

- 按所用器件：**晶体管**、场效应管、集成电路
- 按电路形式：**单级放大器**和**多级放大器**
- 按频谱宽度：**窄带放大器**和**宽带放大器**
- 按负载性质：**谐振放大器**和**非谐振放大器**

★ 本章重点：**单级高频谐振小放**

3.1 高频小信号放大器的分类和指标

高频小信号放大器质量指标



3.1 高频小信号放大器的分类和指标

高频小信号放大器质量指标

➤ 增益

➤ 电压增益: $\dot{A}_V = \frac{\dot{V}_o}{\dot{V}_i}$

➤ 功率增益: $A_P = \frac{P_o}{P_i}$

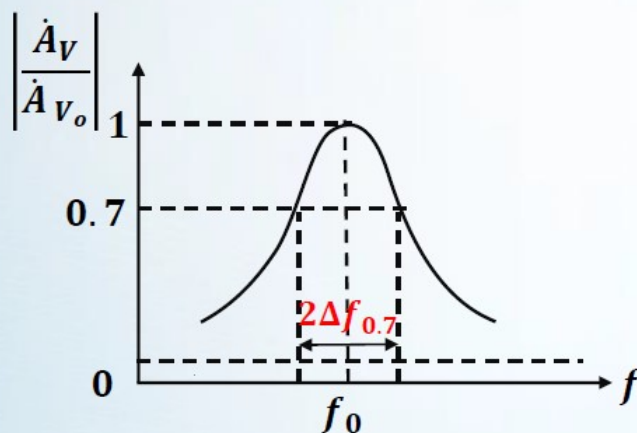
3.1 高频小信号放大器的分类和指标

高频小信号放大器质量指标

➤ 通频带（3dB带宽）

- 放大器电压增益下降到最大值0.707倍时所对应频率范围 $2\Delta f_{0.7}$

$$\left| \frac{\dot{A}_V}{\dot{A}_{V0}} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} \sim 2\Delta f_{0.7} \text{ (高小放通频带)}$$



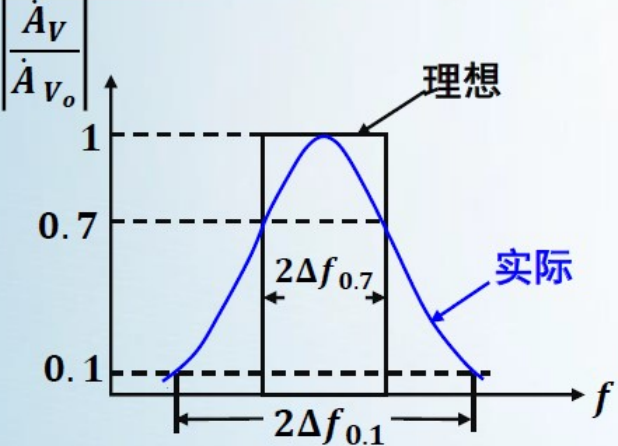
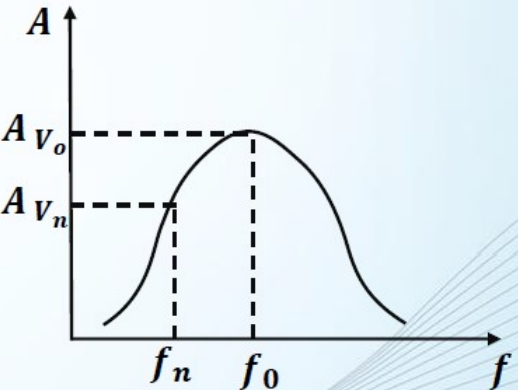
类比回顾

- $|N(f)| = \left| \frac{\dot{i}}{\dot{i}_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} \sim 2\Delta f_{0.7}$ (串谐通频带)
- $|N(f)| = \left| \frac{\dot{v}}{\dot{v}_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}} \sim 2\Delta f_{0.7}$ (并谐通频带)

3.1 高频小信号放大器的分类和指标

高频小信号放大器质量指标

► **选择性：**选出有用信号，抑制干扰信号的能力

$\text{矩形系数 } K_{r0.1} = \frac{2\Delta f_{0.1}}{2\Delta f_{0.7}}$	$\text{抑制比 } d_n = \frac{A_{V_o}}{A_{V_n}}$
表示实际曲线接近理想曲线的程度	表示对某干扰信号 f_n 的抑制能力
	

3.1 高频小信号放大器的分类和指标

高频小信号放大器质量指标

➤ 稳定性

- 指在电源电压变化或器件参数变化时上述三参数的稳定程度
- 极端情况：自激

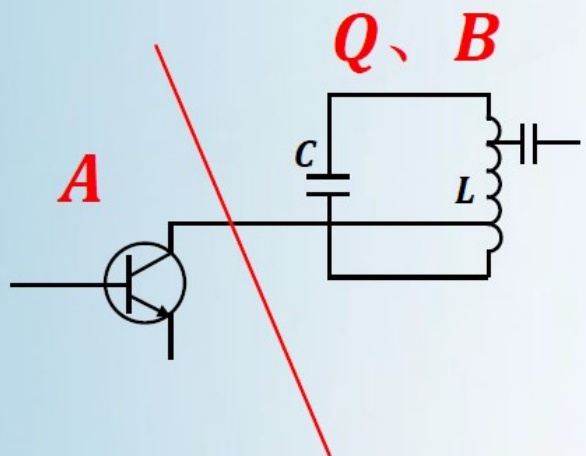
➤ 噪声系数

- N_F 越接近1越好

$$N_F = \frac{S_i/N_i}{S_o/N_o}$$

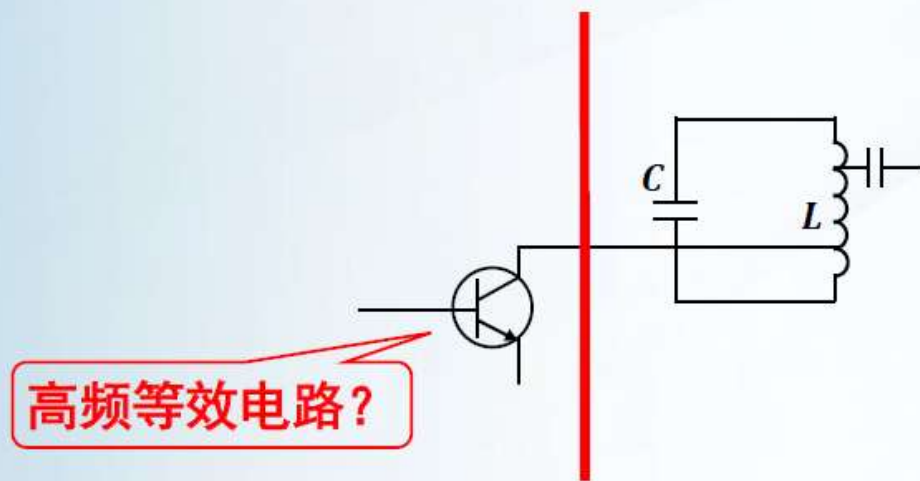
3.1 高频小信号放大器的分类和指标

要点提示—高频谐振小放



3.2 晶体管高频小信号等效电路

高频谐振小放



➤ 思路:

高频谐振小放 = 晶体管 + 并谐回路 (带抽头)

3.2 晶体管高频小信号等效电路

晶体管工作在高频时：

电流放大系数与频率有明显关系：

频率越高电流放大系数越小

直接导致晶体管放大能力下降，限制其在高频的应用范围

限制晶体管在高频的应用范围主要因素：

1. 管子发射结电容 $C_{b'e}$

2. 管子集电结电容 $C_{b'c}$

3. 基区体电阻 $r_{b'b}$

高频晶体管分析常用两种等效电路：混合 π 参数等效电路和y参数等效电路。

3.2 晶体管高频小信号等效电路

一. 晶体管高频小信号等效电路

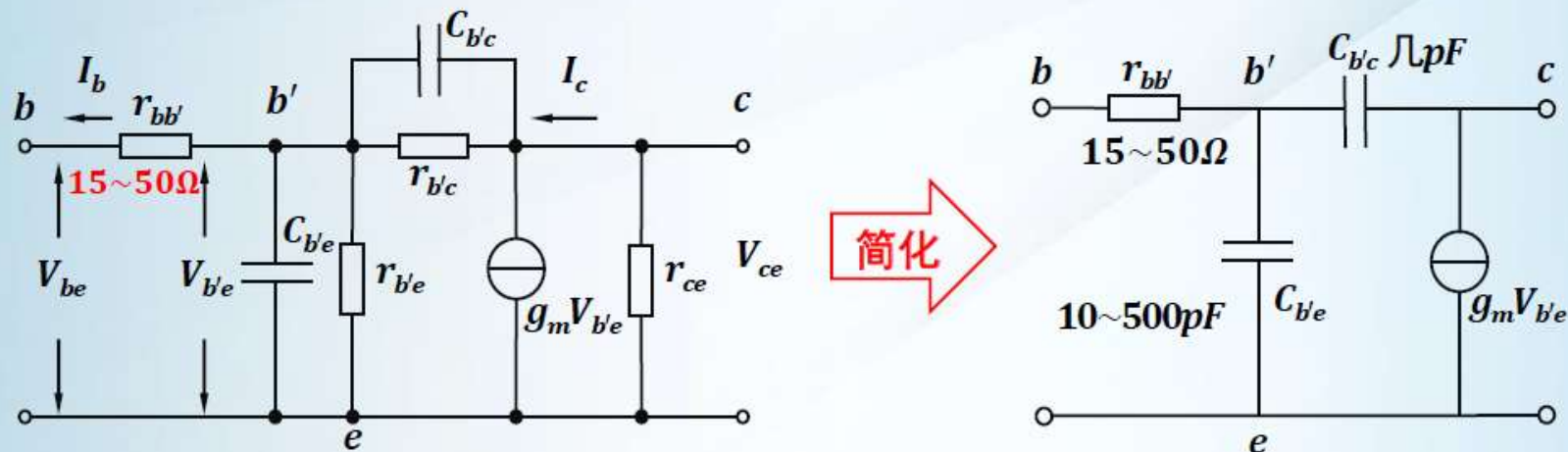
晶体管的
高频小
信号等
效电路
主要有
两种表
示方法

物理模型等效电路：混合 π 参数等效电路。该电路表示的晶体管物理概念清晰，等效电路中各元件参数与频率基本无关，适合很宽的频率范围。晶体管低频等效电路就是混合 π 参数等效电路的特例。

网络参数等效电路：由于晶体管的使用主要是了解其外部特性而不是其内部运动规律。为计算方便，撇开晶体管内部的物理过程，只着眼于其外部特性，即输入端和输出端的电压和电流关系。基于这种想法广泛采用另一种等效电路—— y 参数等效电路。

3.2 晶体管高频小信号等效电路

混合 π 等效电路 (物理模拟等效电路)



$r_{bb'}$ 基级电阻

$C_{b'e}$ 发射结电容

$C_{b'c}$ 集电结电容

与稳定性有关

$r_{b'e}$ 发射结电阻 $\Rightarrow r_{b'e}$ 大于 $C_{b'e}$ 容抗, 开路

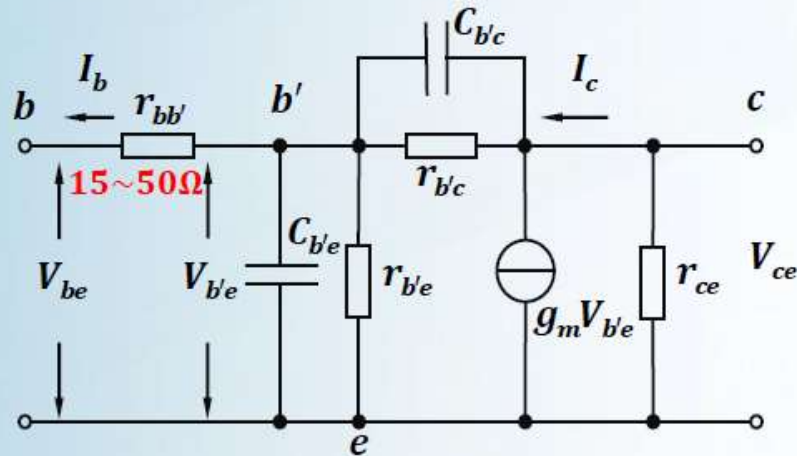
$r_{b'c}$ 集电结电阻 $\Rightarrow r_{b'c}$ 大于 $C_{b'c}$ 容抗, 开路

r_{ce} 集射级电阻 $\Rightarrow r_{ce}$ 大于回路负载, 开路

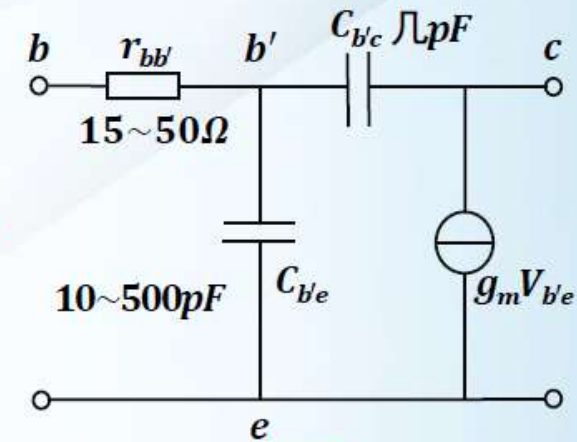
$g_m V_{b'e}$ 等效电流发生器, 表示晶体管放大作用 (g_m 跨导)

3.2 晶体管高频小信号等效电路

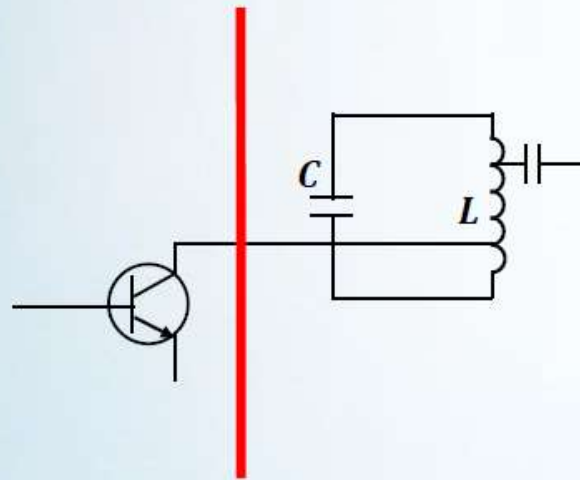
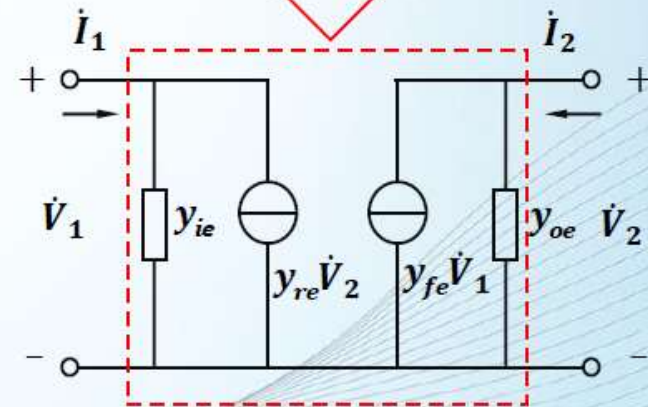
混合 π 等效电路 (物理模拟等效电路)



简化



转换



3.2 晶体管高频小信号等效电路

(1) 晶体管高频Y参数方程组

若取电压 u_{BE} 、 u_{CE} 为自变量，电流 i_B 、 i_C 为参变量，则

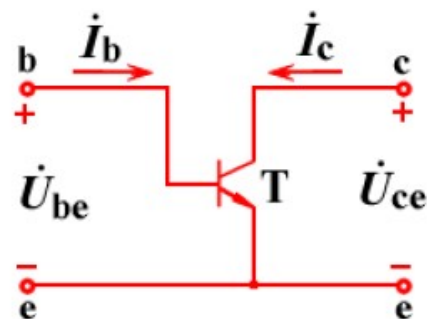
$$i_B = f_1(u_{BE}, u_{CE}) \quad i_C = f_2(u_{BE}, u_{CE})$$

$$di_B = \left. \frac{\partial i_B}{\partial u_{BE}} \right|_{U_{CEQ}} \cdot du_{BE} + \left. \frac{\partial i_B}{\partial u_{CE}} \right|_{U_{BEQ}} \cdot du_{CE} \rightarrow \dot{I}_b = Y_{ie} \dot{U}_{be} + Y_{re} \dot{U}_{ce}$$

$$di_C = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{BE}} \right|_{U_{CEQ}} \cdot du_{BE} + \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_{U_{BEQ}} \cdot du_{CE} \rightarrow \dot{I}_c = Y_{fe} \dot{U}_{be} + Y_{oe} \dot{U}_{ce}$$

$$Y_{ie} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{U}_{be}} \right|_{\dot{U}_{ce}=0} \quad Y_{re} = \left. \frac{\dot{I}_b}{\dot{U}_{ce}} \right|_{\dot{U}_{be}=0} \quad Y_{fe} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_{be}} \right|_{\dot{U}_{ce}=0} \quad Y_{oe} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{U}_{ce}} \right|_{\dot{U}_{be}=0}$$

Y参数为短路导纳参数

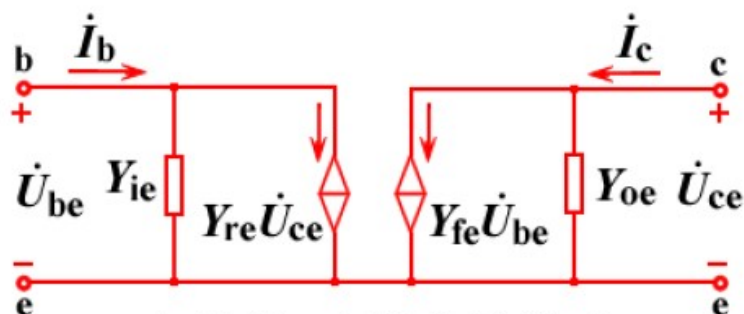


3.2 晶体管高频小信号等效电路

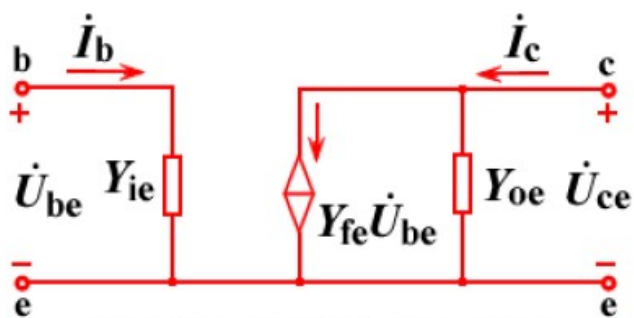
(2) 晶体管Y参数等效模型

$$\dot{I}_b = Y_{ie} \dot{U}_{be} + Y_{re} \dot{U}_{ce}$$

$$\dot{I}_c = Y_{fe} \dot{U}_{be} + Y_{oe} \dot{U}_{ce}$$



完整的Y参数等效模型



简化的Y参数等效模型

3.2 晶体管高频小信号等效电路

y参数等效电路

✧ 优点：计算方便；

✧ 缺点：**y**参数是频率的函数，频率不同，各参数也不一样。

y 参数的求法：

1. 实际测量：输出端交流短路，输入端加测试信号，测出 y_{ie} , y_{fe} ；
输入端交流短路，输出端加测试信号，测出 y_{re} , y_{oe} 。
2. 通过混合 π 型等效电路，换算出**y**参数。

3.2 晶体管高频小信号等效电路

混合 π 参数等效电路与 y 参数等效电路的转换

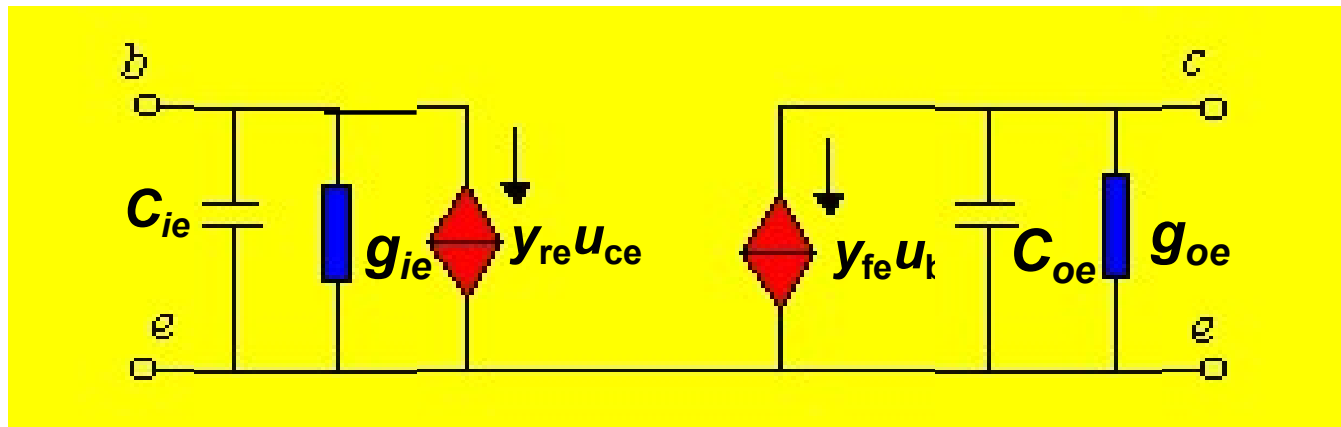
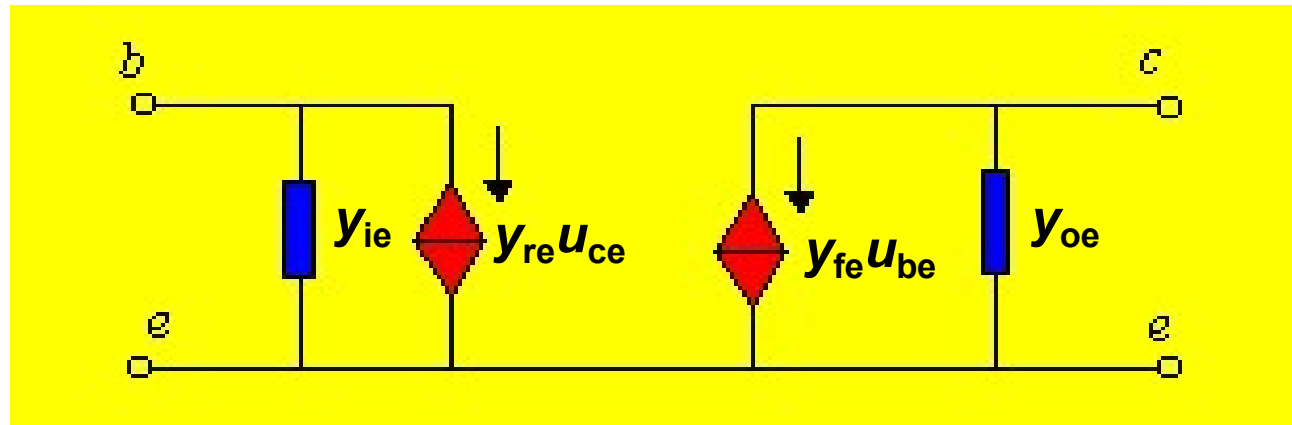
四个 y 参数都是复数，为了计算方便，可表示为：

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

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

$$y_{fe} = |y_{fe}| e^{j\varphi_{fe}}$$

$$y_{re} = |y_{re}| e^{j\varphi_{re}}$$



其中 g_{ie} 和 g_{oe} 称为输入，输出电导； C_{ie} 和 C_{oe} 为输入，输出电容； $|y_{fe}|$ 和 $|y_{re}|$ 为正向，反向传输幅频特性； φ_{fe} 和 φ_{re} 为相频特性

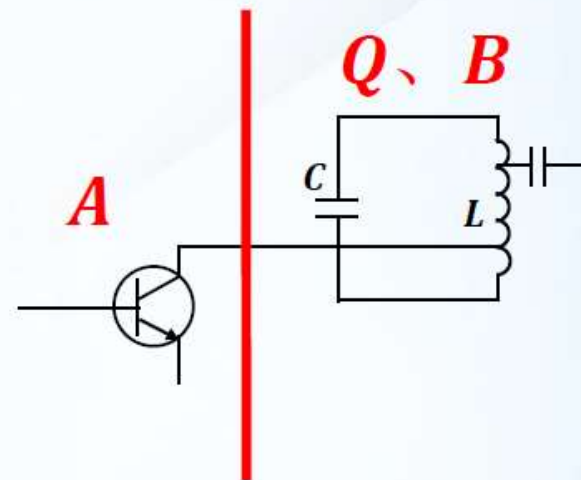
3.2 晶体管高频小信号等效电路

要点提示—晶体管高频等效电路

混合 π 等效电路

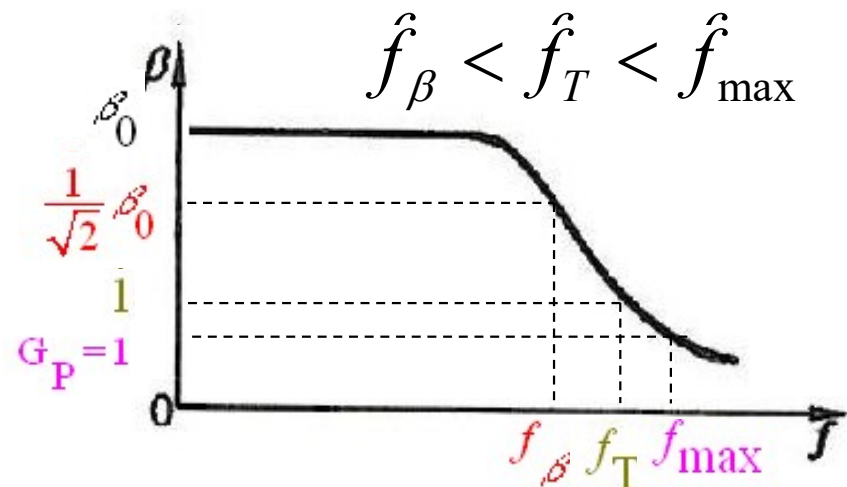
简化 → 混合 π 等效电路

转换 → Y参数等效电路



3.2 晶体管高频小信号等效电路

(三). 晶体管的频率参数(表征晶体管的高频特性)



(1) 截止频率 f_β

共发射极电路的电流放大系数 β 随工作频率的上升而下降；当 $|\beta|$ 下降到 β_0 的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时的频率，称为截止频率 f_β 。

(2) 特征频率 f_T

当 $|\beta| = 1$ 时的频率称为特征频率 f_T 。 $|\beta| = \frac{f_T}{f}$ ，粗略估计管子的 β 值。（其中 f_T 可查得、 f 指工作频率）（ $f \gg f_\beta$ ）

(3) 最高振荡频率 f_{\max}

当晶体管的功率增益 $G_P = 1$ 时的工作频率，称为最高振荡频率。

$$f_{\max} \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g_m}{4r_{bb'}C_{be}'C_{bc}'}}$$

通常取：工作频率 = $(\frac{1}{3} \sim \frac{1}{4}) f_{\max}$
(振荡频率)

