



# 第6章 放大电路的频率响应

2学时



# 第6章 放大电路的频率响应

---

5.1 频率响应概述

5.2 RC电路的频率响应

5.3 晶体管的高频等效模型

5.4 单管放大电路的频率响应

5.5 多级放大电路的频率响应

# 放大电路的频率响应

## 作业

- 习题 6-4、6-5第1问、6-13

# 6.1 频率响应概述

## 频率响应产生的原因

晶体管极间电容；放大电路的耦合电容、旁路电容和分布电容

电容的容抗  $\frac{1}{j\omega C}$  随着信号频率的变化而变化，因而使放大电路对不同频率信号的放大效果将不完全相同。

这说明放大电路的电压放大倍数（增益）是输入信号频率的函数，这种函数关系叫做“频率响应”或者“频率特性”。

中频段：

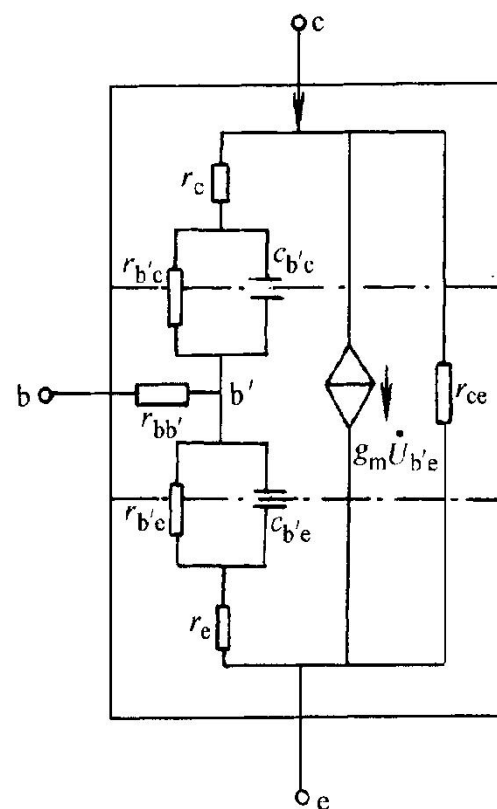
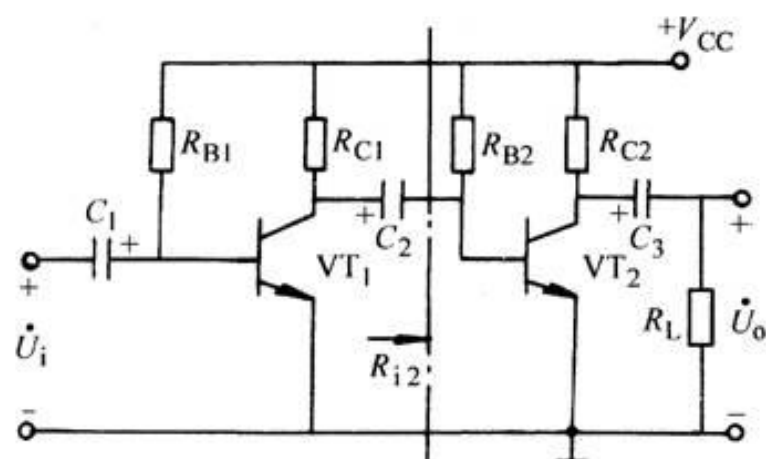
耦合电容、旁路电容阻抗

小→短路

晶体管结电容的容抗

大→开路

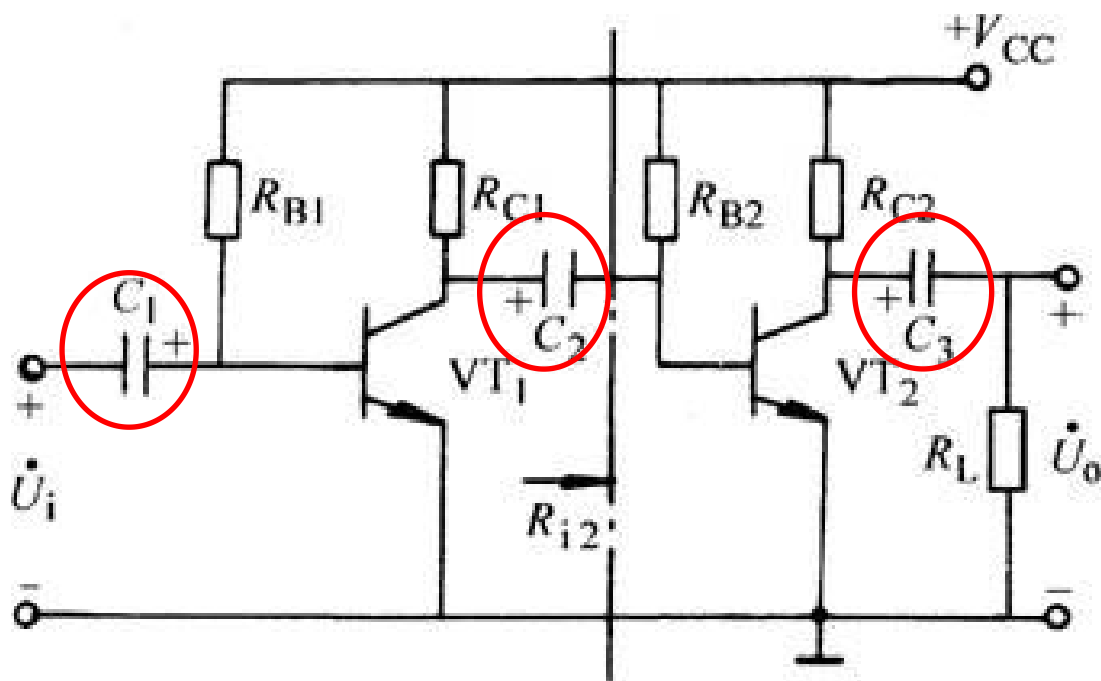
不考虑放大电路的频率特性。



低频段：

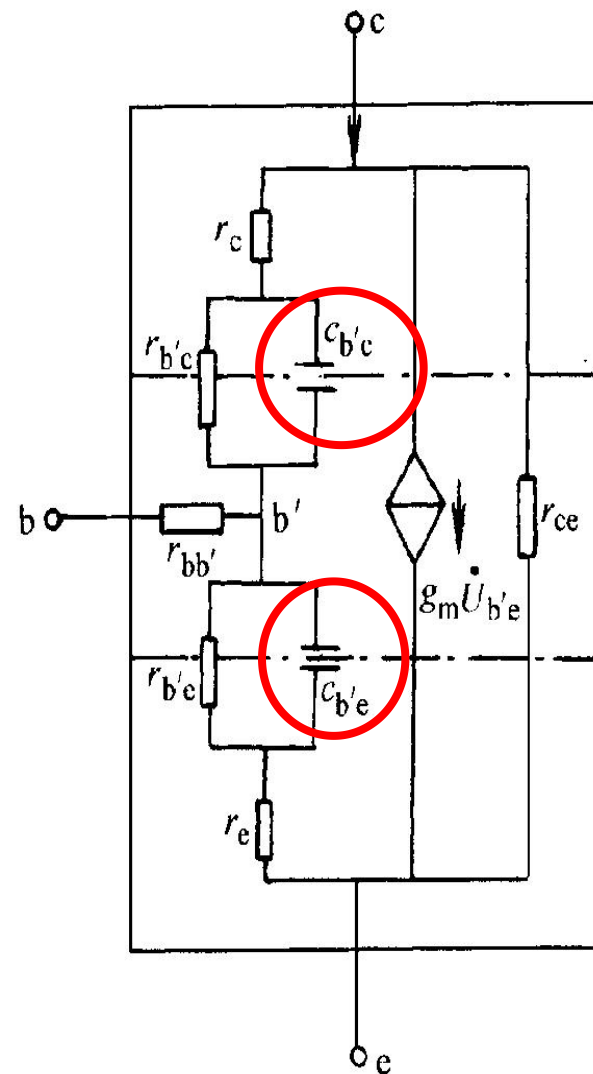
晶体管结电容  $\rightarrow$  开路

耦合电容和旁路电容的容抗增大，对信号传输的作用不可忽略。



高频段：

耦合电容，旁路电容  $\rightarrow$  短路  
晶体管结电容和线路分布电容  
的容抗很小，对电流的并联分流  
作用不可忽略，同样会使增益的  
幅值减小，同时产生附加相位移。



## 频率响应的表示方法

电路的频率特性包括：幅频特性

相频特性

**幅频特性：**指电压增益的幅值和频率的关系。

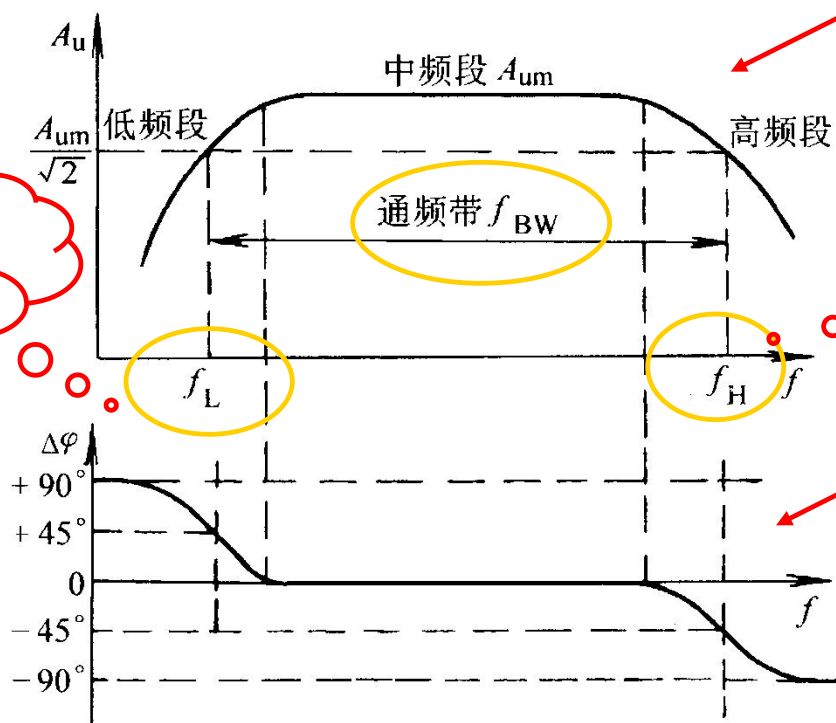
**相频特性：**指输出电压与输入电压之间的相位差和频率的关系。



通常把中频段的电压增益用 $A_{um}$ 表示。

当 $A_{um}$ 在高频端和低频段下降到0.707 $A_{um}$ 时所对应的两个频率点叫做放大电路的“截止频率”。

# 频率响应的表示方法



下限截止频率

幅频特性指电压增益的幅值和频率  $f$  的关系。

上限截止频率

相频特性指输出电压与输入电压之间的相位差  $\varphi$  和频率的关系。

## 6.2 RC电路的频率响应

### 波特图

信号的频率范围很宽（几赫到几百兆赫以上）

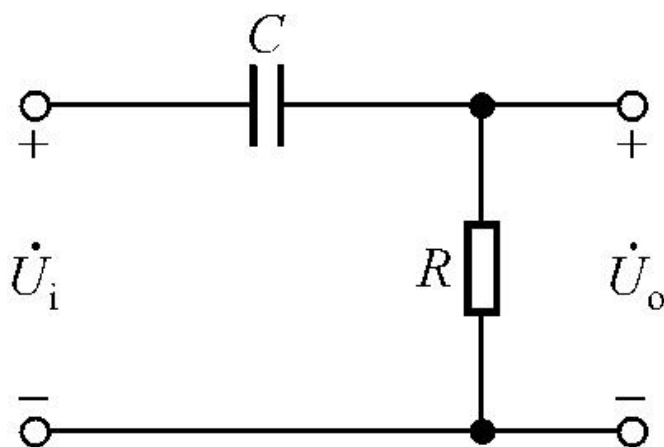
放大电路的放大倍数也很大（百万倍）

压缩坐标，扩大视野，画频率特性曲线时：

频率坐标采用对数刻度

幅值（以dB为单位）或相角采用线性刻度

## 1. 高通电路及频率响应



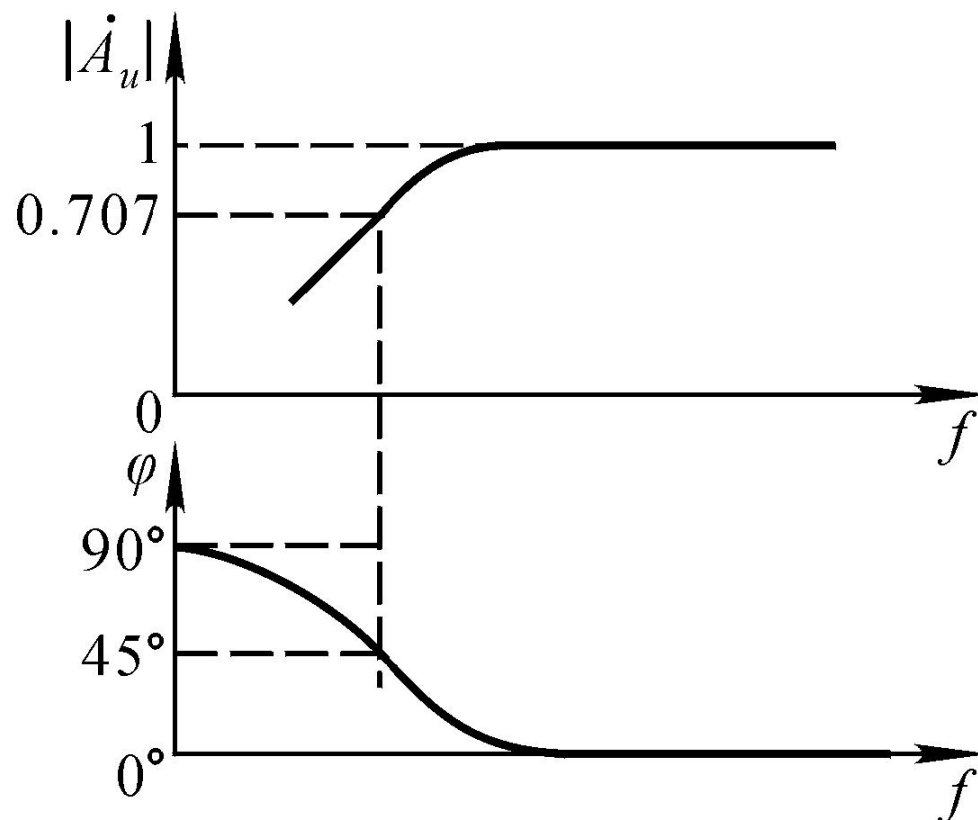
$$f_L = \frac{\omega_L}{2\pi} = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}}$$

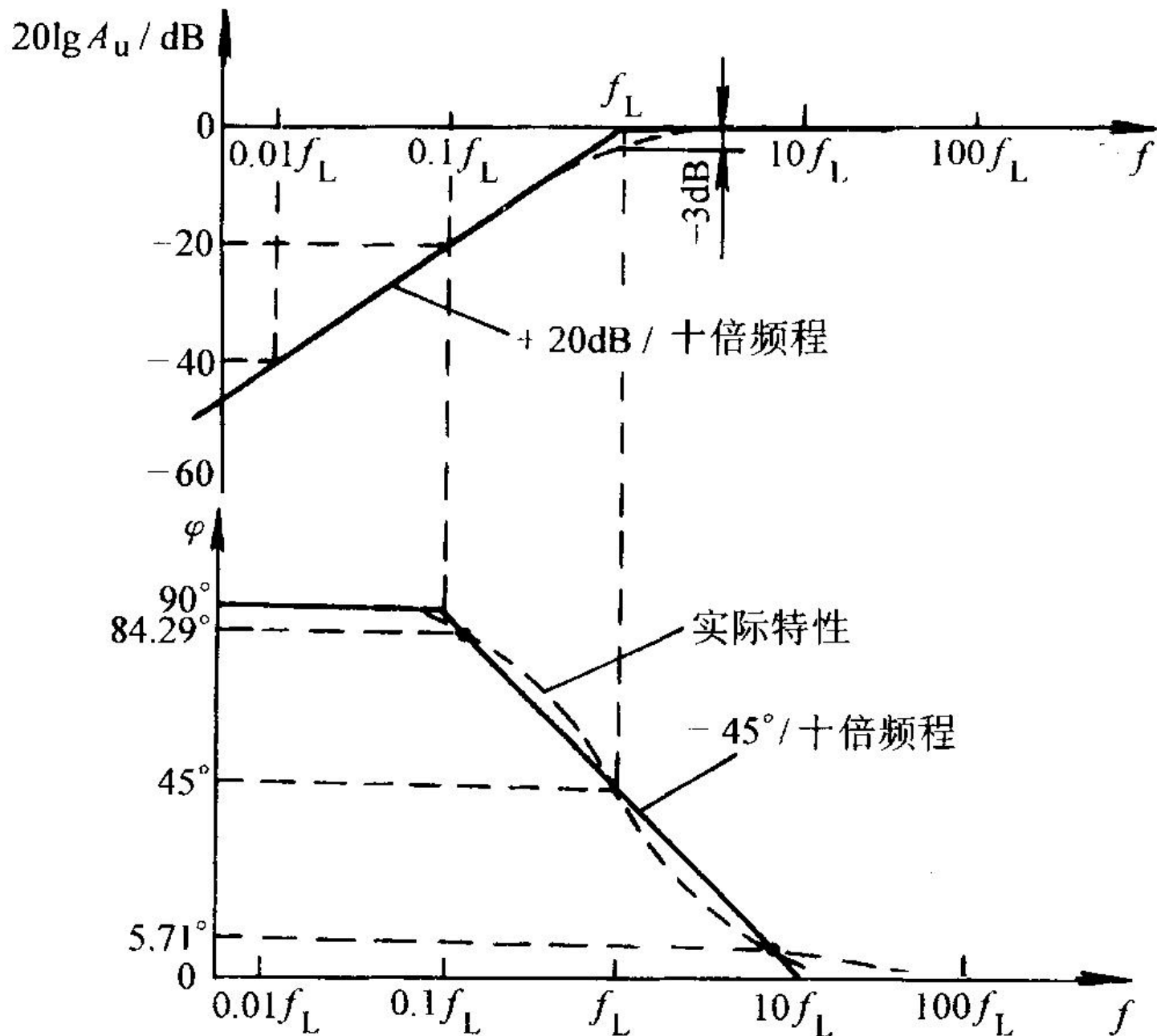
$$\dot{A}_u = \frac{1}{1 + \frac{\omega_L}{j\omega}} = \frac{j \frac{f}{f_L}}{1 + j \frac{f}{f_L}}$$

$$\dot{A}_u = \frac{1}{1 + \frac{\omega_L}{j\omega}} = \frac{j \frac{f}{f_L}}{1 + j \frac{f}{f_L}}$$

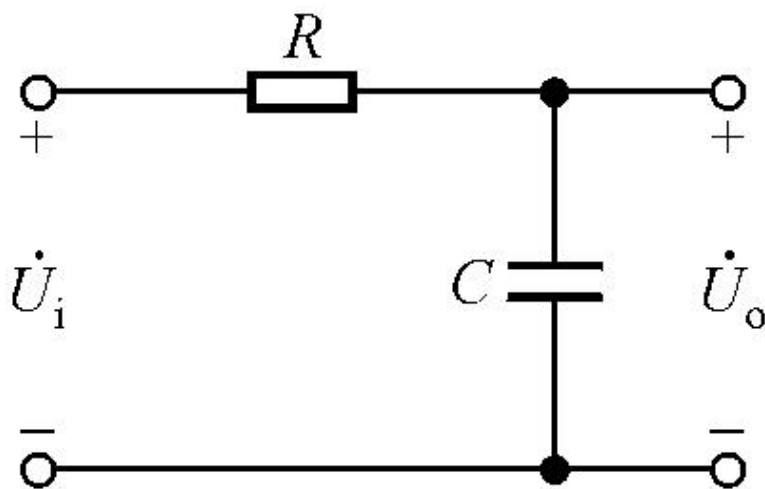
$$A_u = \frac{\frac{f}{f_L}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_L}\right)^2}}$$



$$\varphi = 90 - \arctan\left(\frac{f}{f_L}\right)$$



## 2. 低通电路及频率响应



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

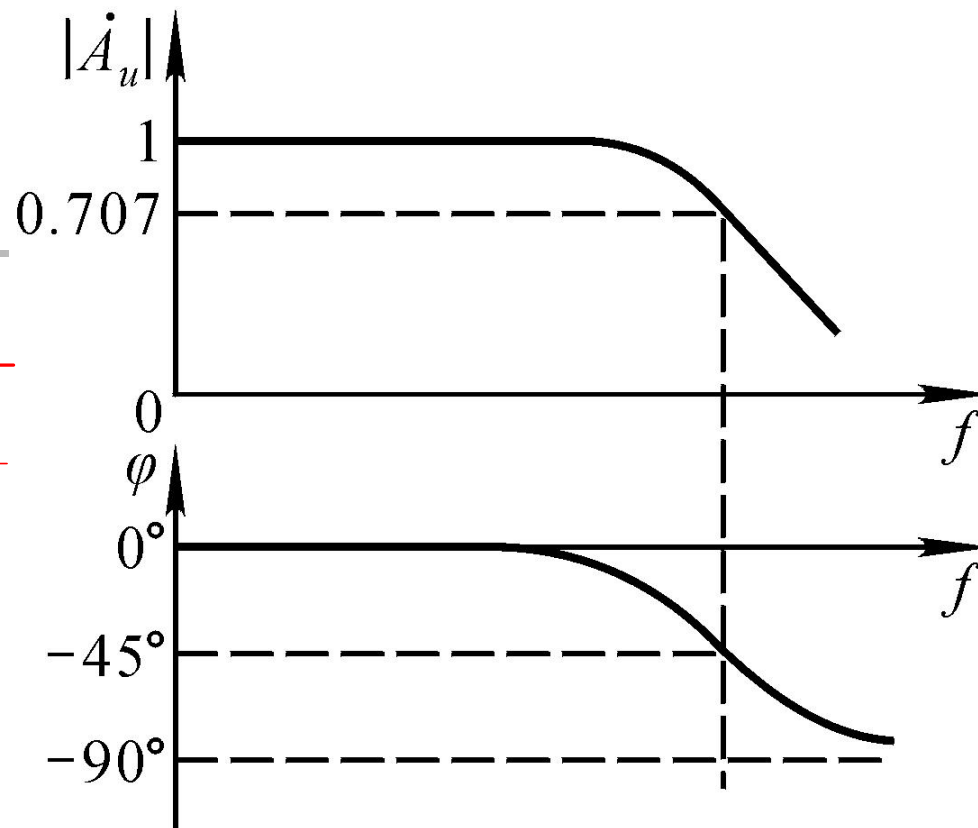
$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$\dot{A}_u = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}} = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_H}}$$

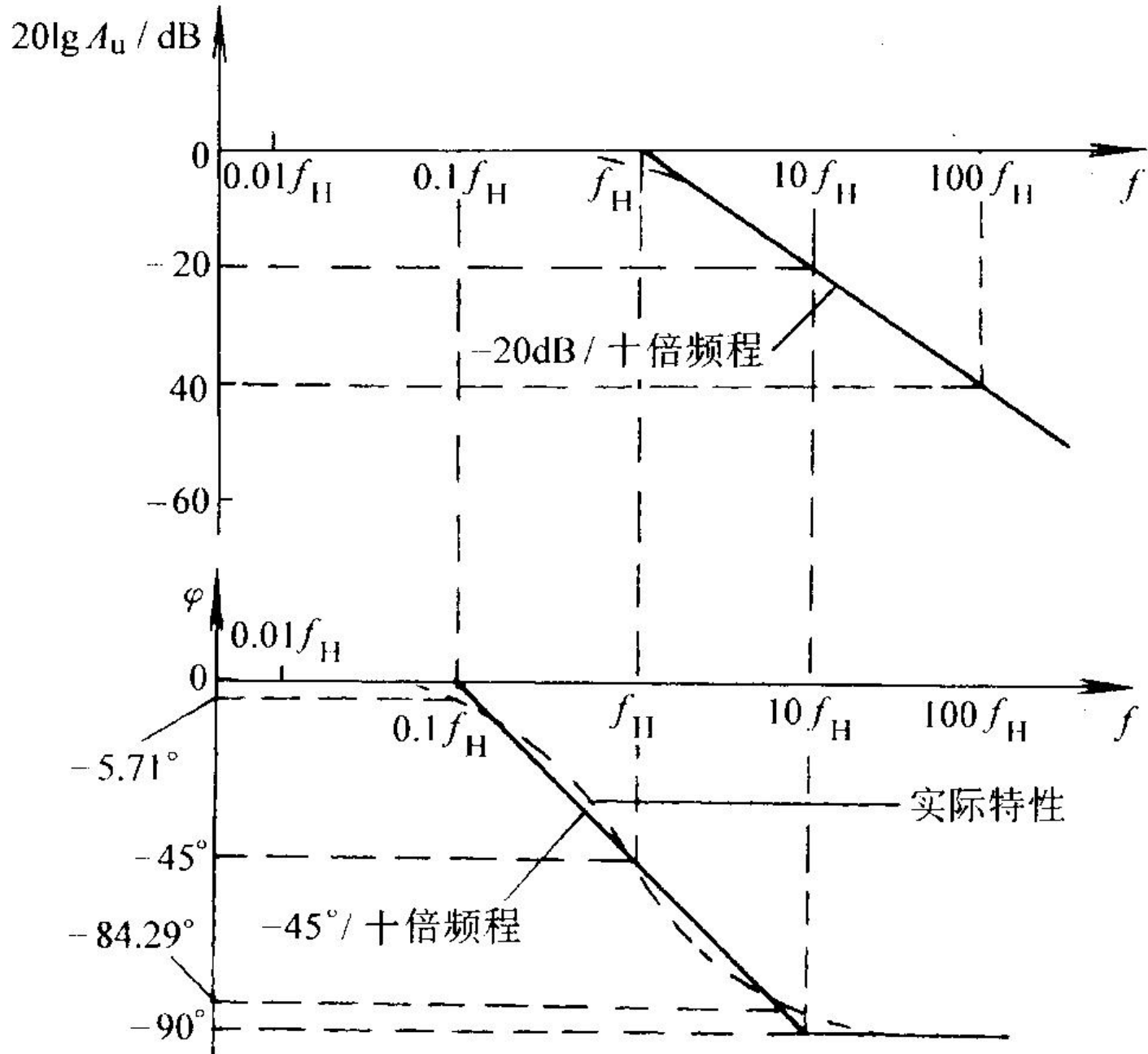
$$\dot{A}_u = \frac{1}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}} = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_H}}$$

$$A_u = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2}}$$

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{f}{f_H}\right)$$







## 6.3 晶体管高频等效模型

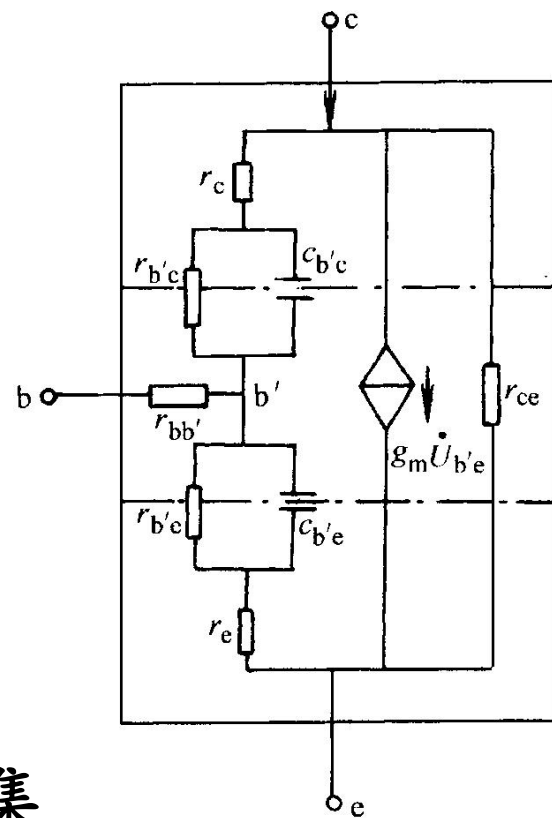
### 晶体管的高频等效模型

#### 混合参数 $\pi$ 形模型

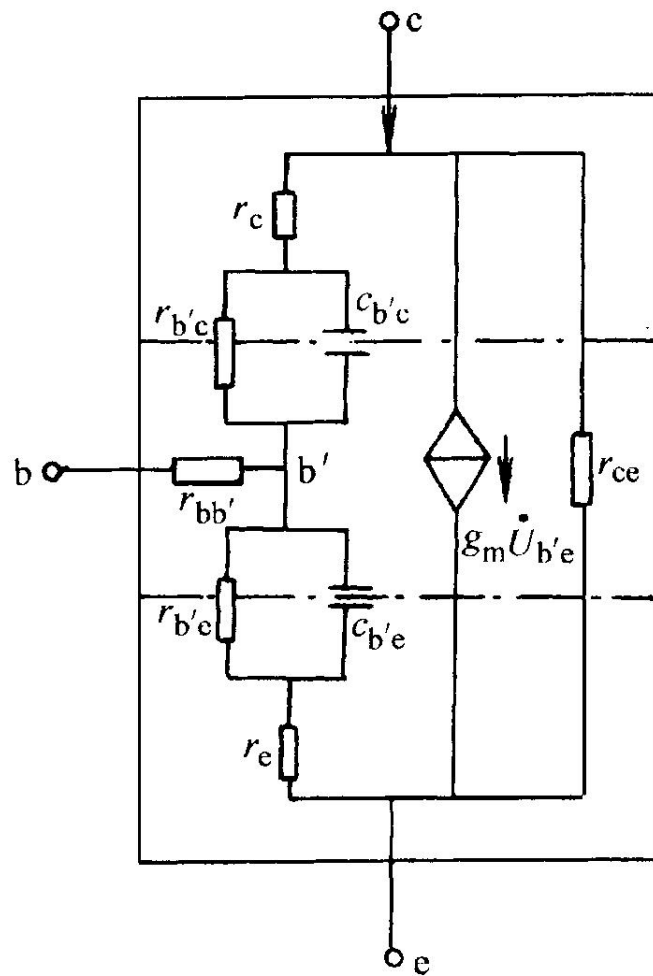
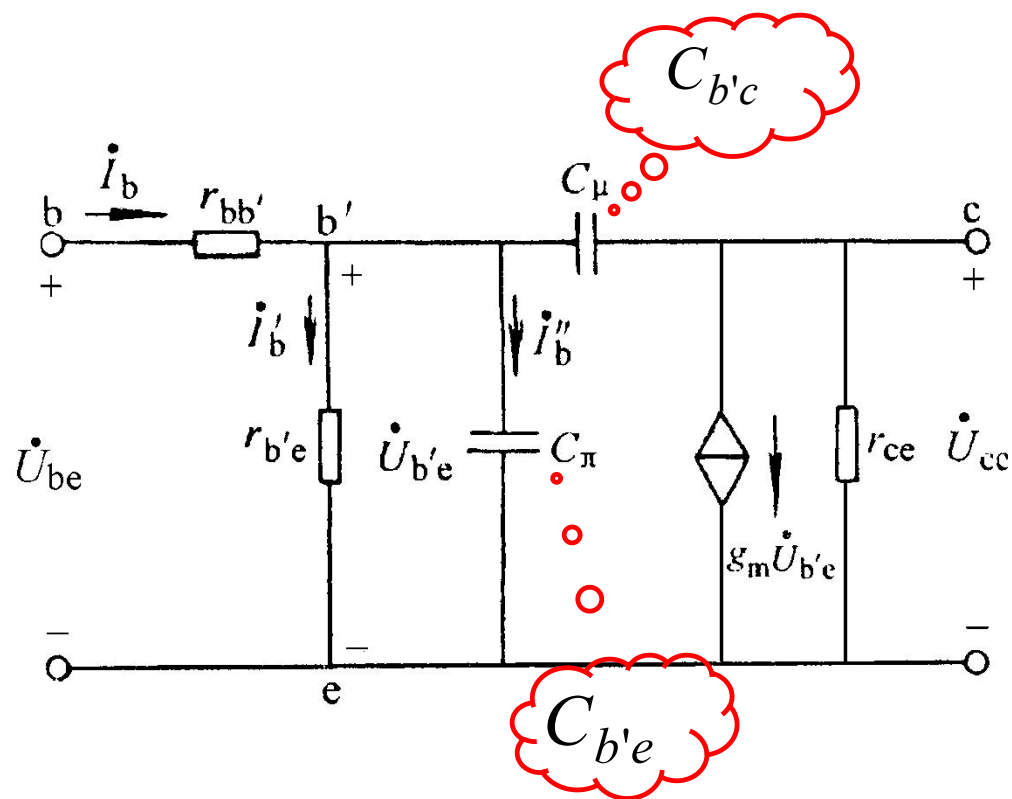
考虑到晶体三极管发射结和集电结电容的作用，每个PN结均可用一个并联的结电容和结电阻等效。

$g_m \dot{U}_{b'e}$  表示受发射结电压控制的集电结电流（压控电流源）。

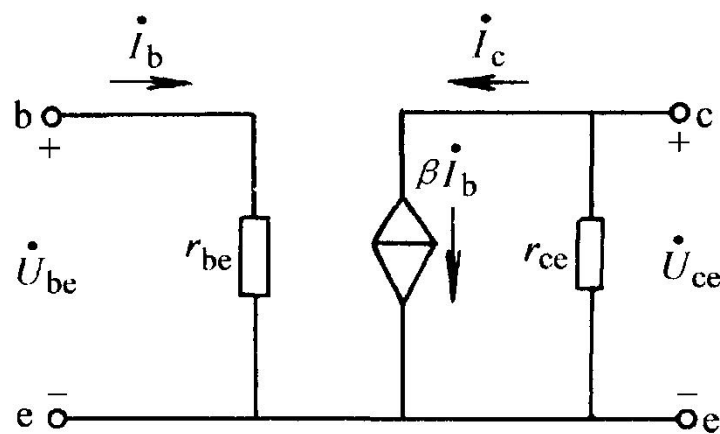
略去  $r_e$ 、 $r_c$ ，开路  $r_{b'c}$ ，得到简化的晶体管的高频小信号等效模型



# 晶体管的混合参数 $\pi$ 形等效电路

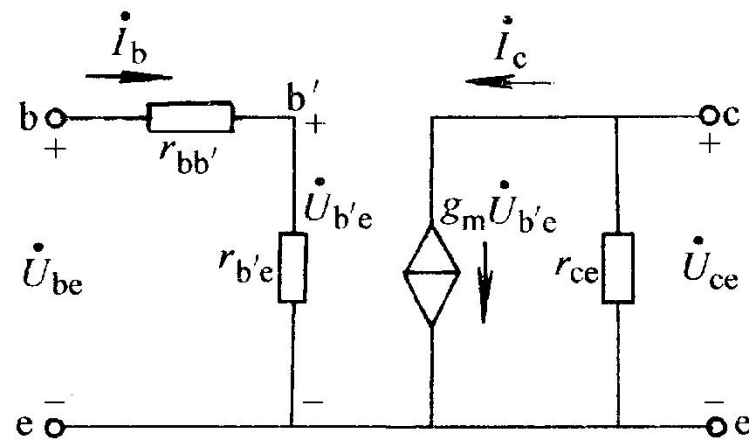


当频率不高时，晶体管的结电容  $C_\pi$  和  $C_\mu$  的数值都很小，它们的影响可以忽略。这时混合参数  $\pi$  形等效电路就可以转化为 H 参数等效电路。



a)

简化H参数等效电路



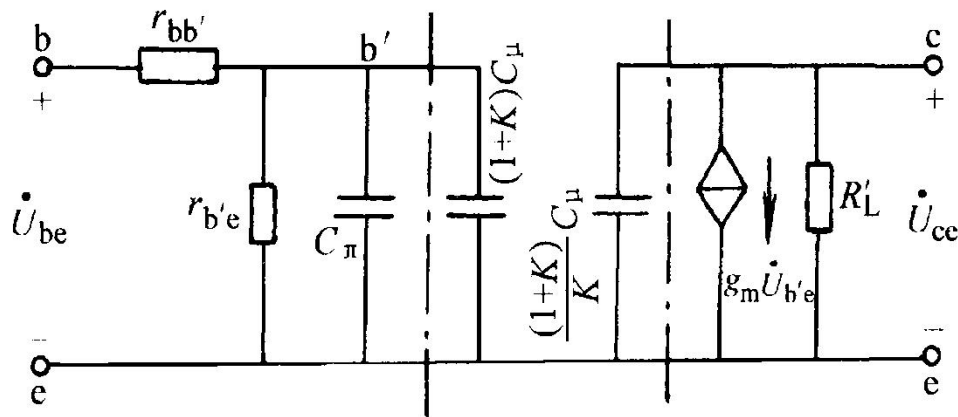
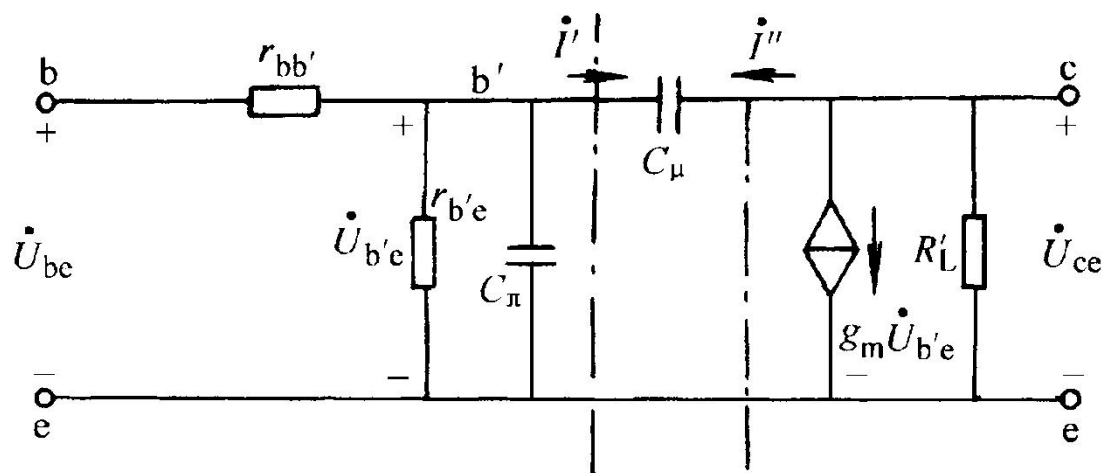
b)

中低频时混合 $\pi$ 形等效电路

比较两个电路

$$r_{b'e} = (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}} \quad g_m = \frac{I_{CQ}}{U_T}$$

## 混合参数 $\pi$ 形等效电路的简化

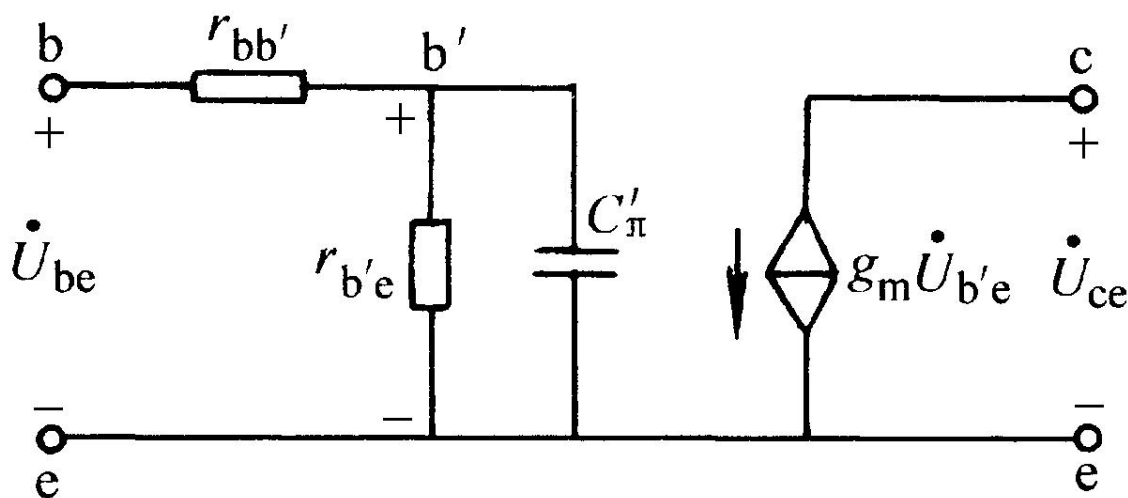


$$K = \left| \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}} \right| = g_m R_L'$$

将混合 $\pi$ 形等效电路通过密勒定理进行单向化转换，将 $C_{\mu}$ 等效在输入回路和输出回路中。

把输入端并联电容合并，令  $C'_\pi = C_\pi + (1+K)C_\mu$   
 $(1+1/K)C_\mu \approx C_\mu$  通常的值很小，可以忽略。

晶体管共射混合参数  $\pi$  型等效电路的简化图：



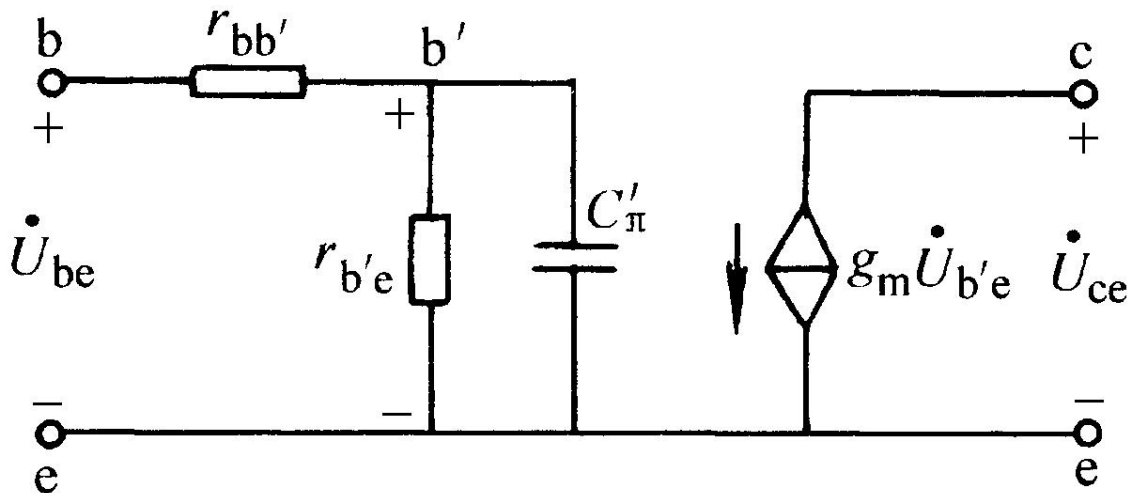
$$r_{b'e} = (\beta + 1) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

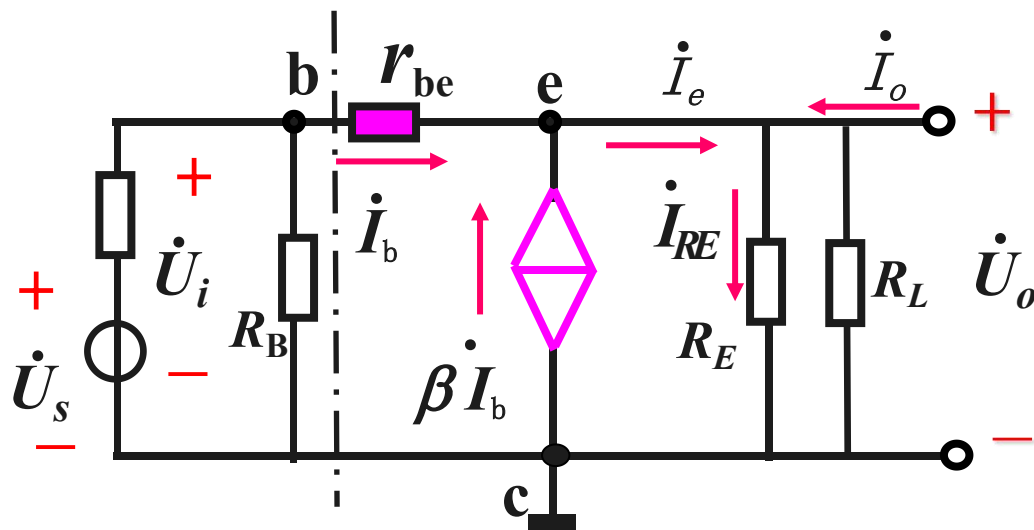
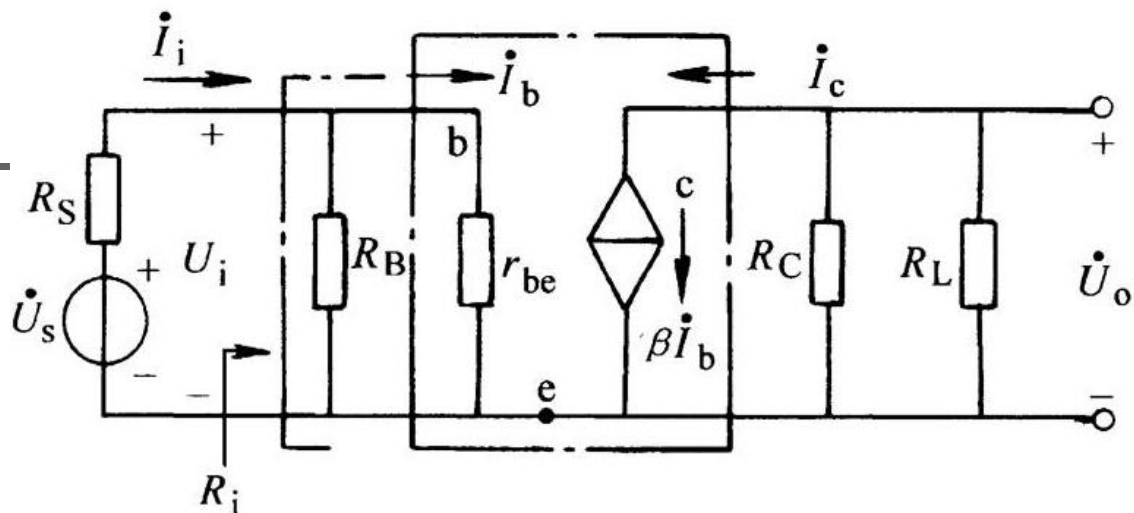
$$g_m = \frac{U_T}{I_{CQ}}$$

$$C'_\pi = C_\pi + (1 + K)C_\mu,$$

其中  $K = g_m R'_L$ ,  $C_\pi = g_m / (2\pi f_T)$

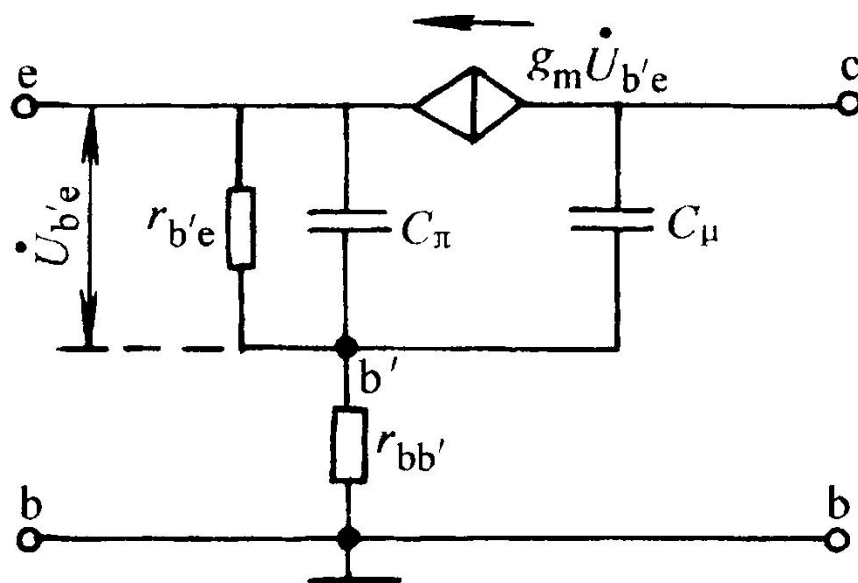
$f_T$  和  $C_\mu$  ( $C_{ob}$ ) 可以从手册中查到



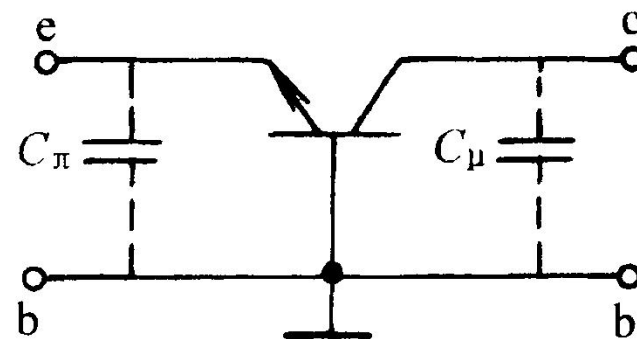




## 共基接法晶体管的高频小信号模型



a)



b)

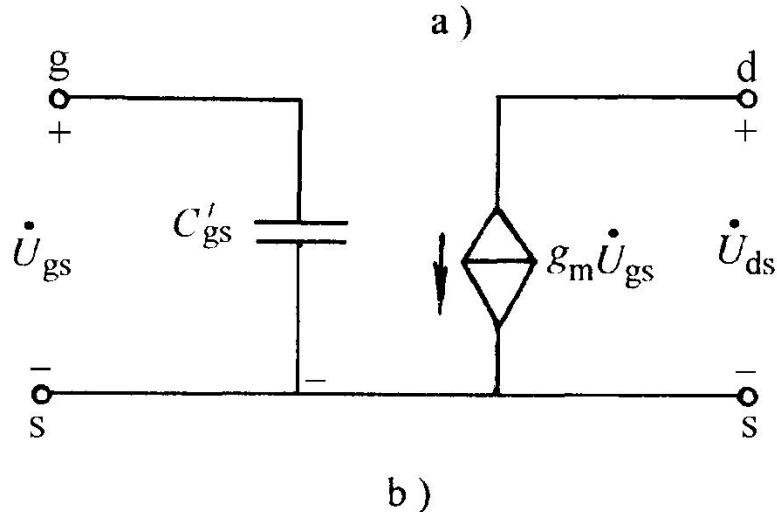
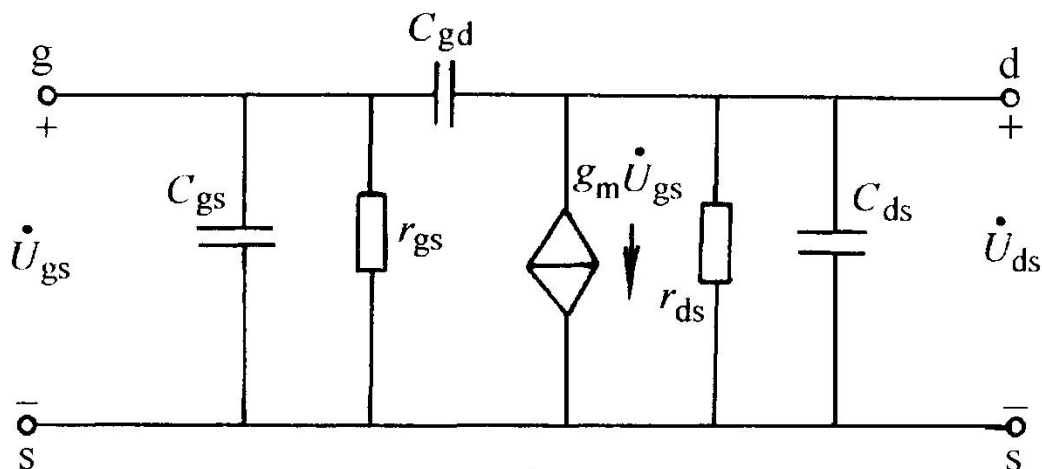
由于共基接法输入与输出端没有电容 $C_u$ ，所以 $C'_\pi = C_\pi + (1+K)C_u$ 中没后一项，值小很多，所以上限截止频率大，带宽也就宽。

# 场效应管的高频等效模型

共源接法场效应管的混合参数 $\pi$ 形等效电路如图。

( $r_{gs}$ 、 $r_{ds}$ 大开路)

场效应管等效电路中的输入电容  $C_{gs}$  较大，它的高频特性要比双极型晶体管差些。



## 6.4 单管共射放大电路的频率响应

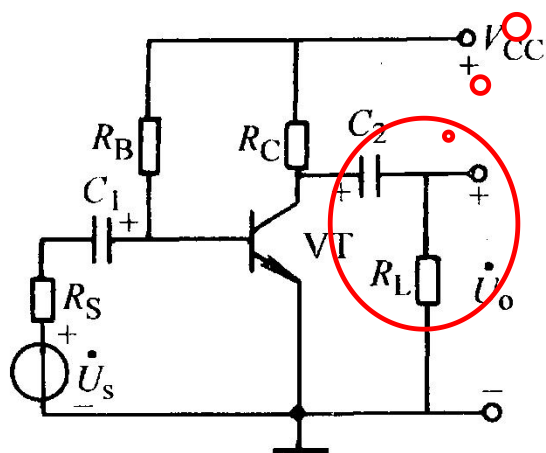
**中频段**，极间电容因为容抗大而视为开路，耦合电容和旁路电容因为容抗小而视为短路；

**低频段**，主要考虑耦合和旁路电容的影响，将极间电容视为开路；

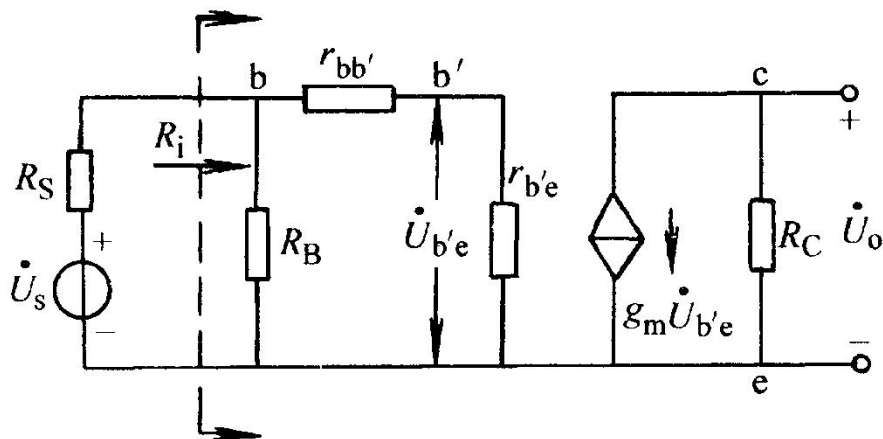
**高频段**，主要考虑极间电容的影响，而耦合和旁路电容可以视为短路。

## 1. 基本放大电路的中频响应

归入下一级



a)



b)

单管共射放大电路电路图和中频等效电路

中频段电压增益：

$$A_{usm} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{b'e}} \frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}_i} \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s}$$

$$A_{usm} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = - \frac{R_i}{R_S + R_i} \bullet \frac{r_{b'e}}{r_{bb'} + r_{b'e}} g_m R_C$$

幅频特性和相频特性：

$$\begin{cases} 20 \lg A_{usm} = 20 \lg \left[ \frac{R_i}{R_S + R_i} \bullet \frac{r_{b'e}}{r_{bb'} + r_{b'e}} g_m R_C \right] \\ \varphi = -180^\circ \end{cases}$$

$A_{usm}$  和  $\varphi$  均为实数，其波特图的中频段都是一条水平线。

## 基本放大电路的低频响应 $f \leq f_L$

低频段电压增益为：

$$\mathbf{A}_{usL} = \mathbf{A}_{usm} \frac{1}{1 + 1/j\omega\tau_L} = \mathbf{A}_{usm} \frac{jf/f_L}{1 + jf/f_L}$$

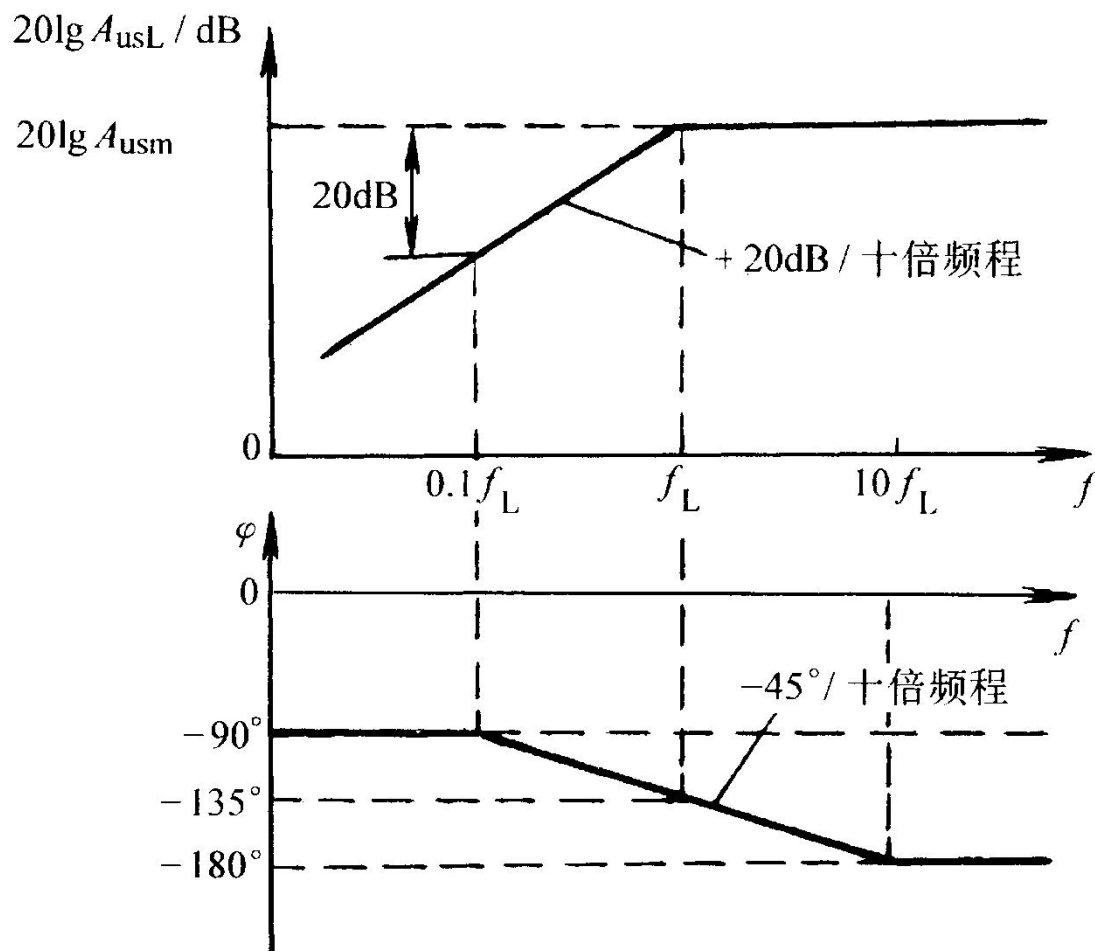
其中

$$f_L = \frac{1}{2\pi\tau_L} = \frac{1}{2\pi(R_S + R_i)C_1}$$

$$\tau_L = (R_S + R_i)C_1$$

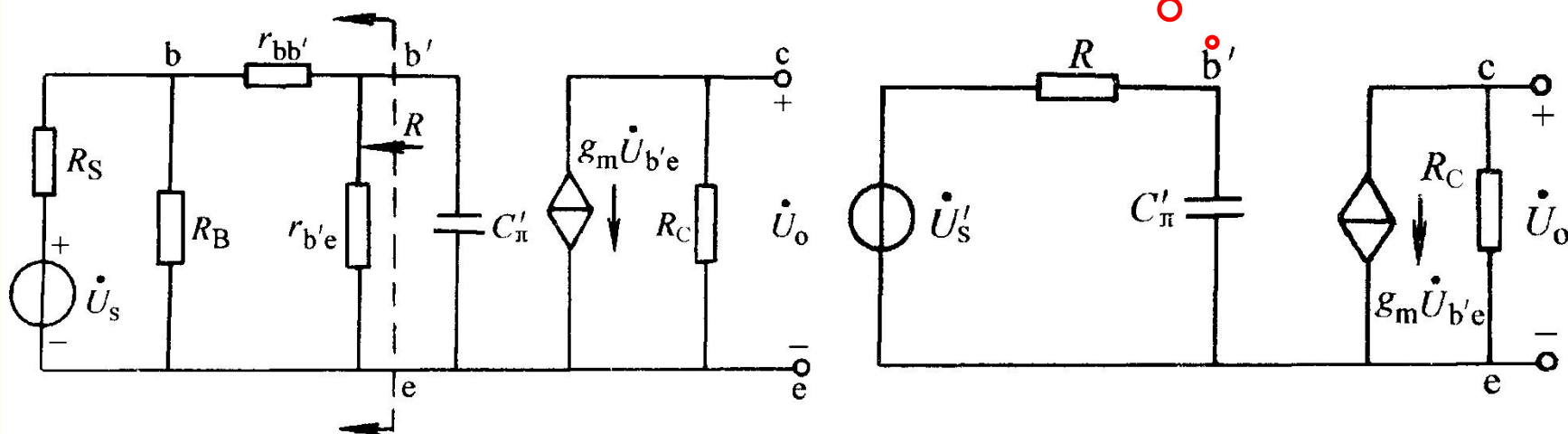
基本放大电路在低频段是一个RC高通特性。

# 低频段波特图



# 基本放大电路的高频响应 $f \geq f_H$

应用戴维南定理





高频段电压增益为：

$$\mathbf{A}_{usH} = \mathbf{A}_{usm} \frac{1}{1 + j\omega RC'_{\pi}} = \mathbf{A}_{usm} \frac{1}{1 + jf/f_H}$$

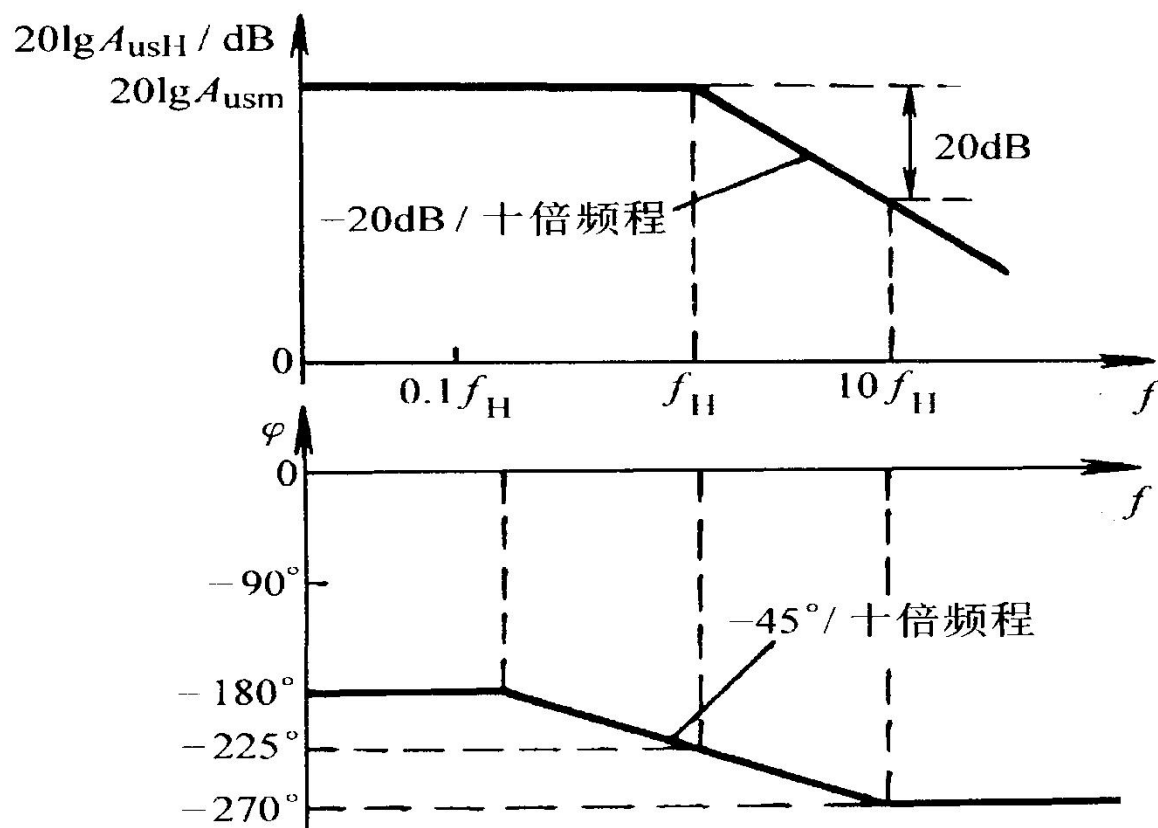
其中

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = \frac{1}{2\pi RC'_{\pi}}$$

$$\tau_H = RC'_{\pi}$$

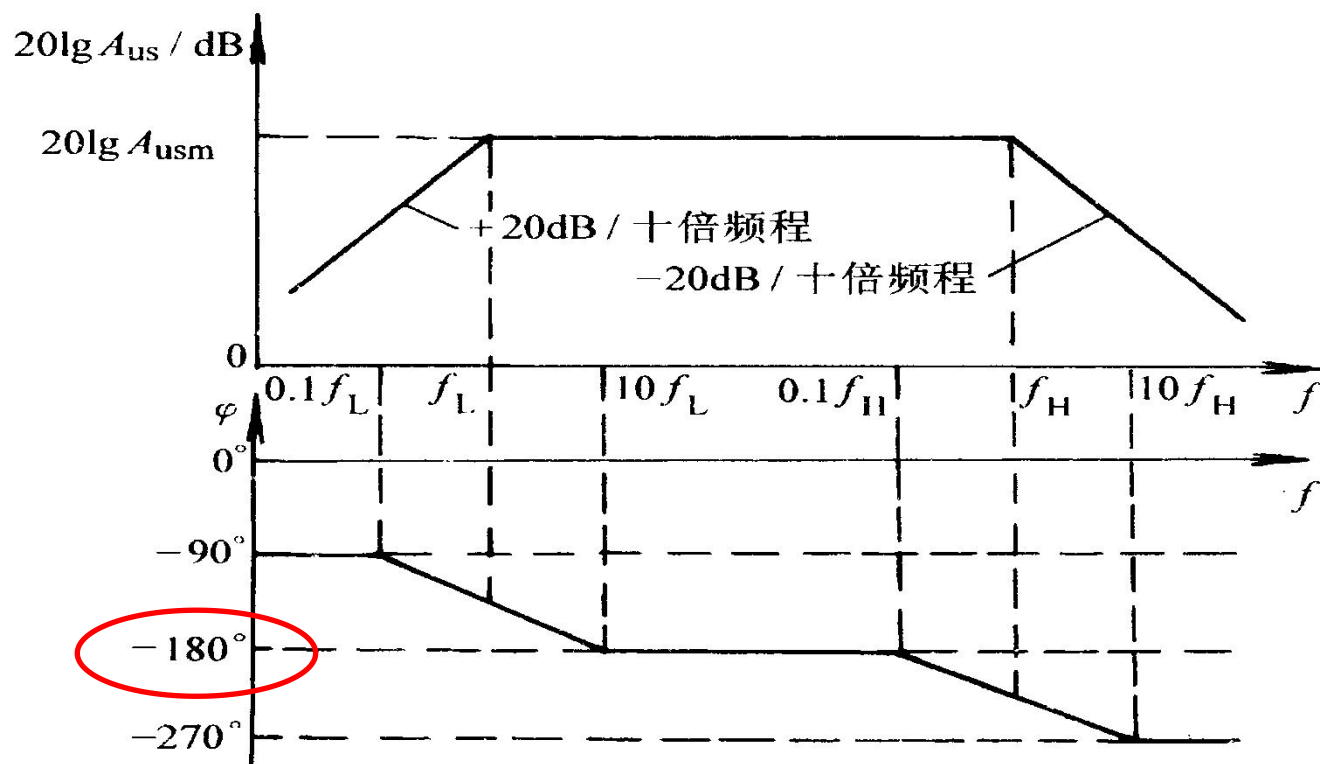
基本放大电路在高频段是一个RC低通特性。

# 高频段波特图



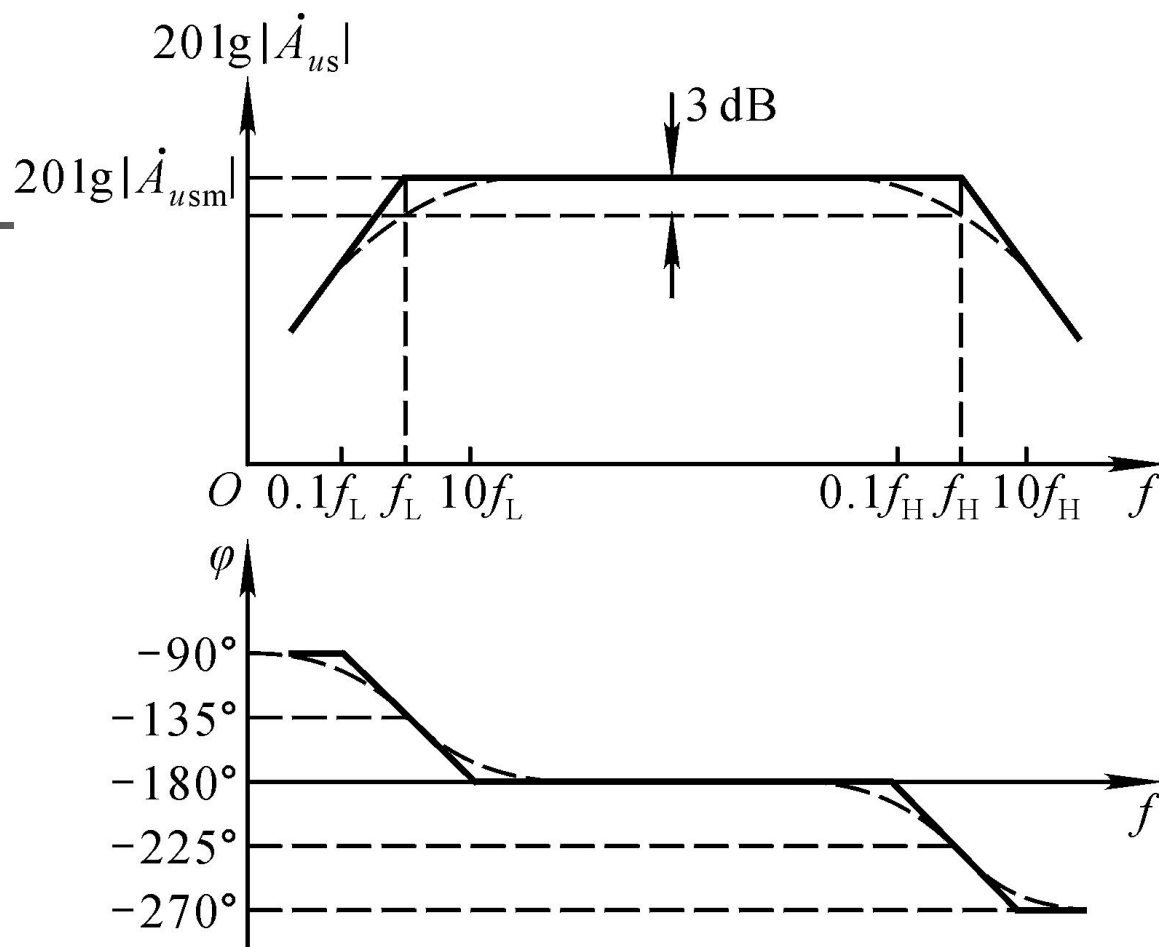
# 完整的单管共射放大电路的频率响应

## 完整波特图



完整的电压增益表达式:

$$\mathbf{A}_{us} = \mathbf{A}_{usm} \frac{j f / f_L}{(1 + j f / f_L)(1 + j f / f_H)}$$



低频段 $A_u$ 下降且产生相移,主要受耦合电容、旁路电容的影响。

高频段 $A_u$ 下降且产生相移,主要受晶体管极间电容、电路中寄生电容的影响。

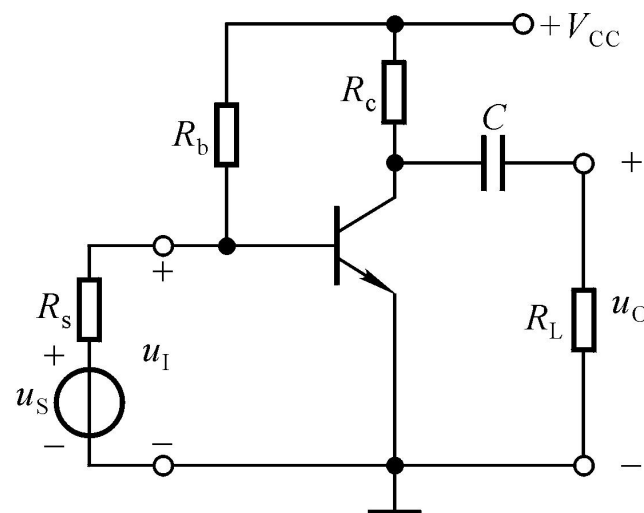
# 带宽增益积 (1) 定性分析

$$\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot [-g_m (R_c // R_L)]$$

$$f_{bw} = f_H - f_L \approx f_H$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi [r_{b'e} // (r_{bb'} + R_b // R_s)] C'_\pi}$$

$$C'_\pi \approx C_\pi + (1 + g_m R'_L) C_\mu$$



带宽增益积  $|\dot{A}_{um} f_{bw}| \approx |\dot{A}_{um} f_H|$

$$\begin{cases} g_m R'_L \uparrow \rightarrow C'_\pi \uparrow \rightarrow f_H \downarrow \\ g_m R'_L \uparrow \rightarrow |\dot{A}_{um}| \uparrow \end{cases}$$

矛盾

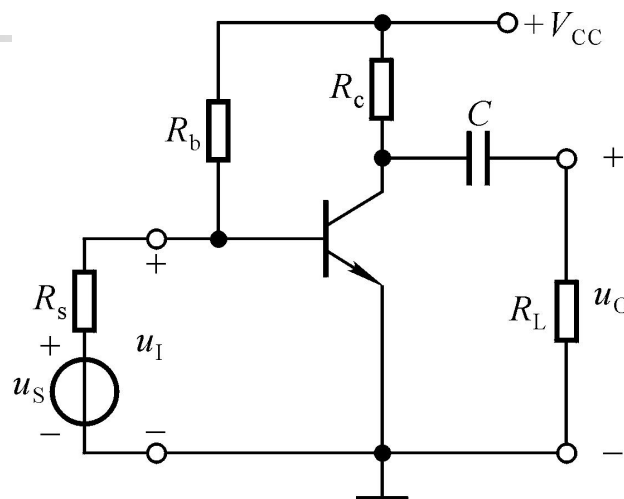
当提高增益时，带宽将变窄；反之，增益降低，带宽将变宽。

## (2) 定量分析

根据  $\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot [-g_m (R_c // R_L)]$

$$f_H = \frac{1}{2\pi [r_{b'e} // (r_{bb'} + R_b // R_s)] C_\pi'}$$

$$C_\pi' \approx C_\pi + (1 + g_m R_L') C_\mu$$



若  $r_{be} \ll R_b$ 、 $R_s \ll R_b$ 、 $g_m R_L' \gg 1$ ，则可以证明  
图示电路的

约为常量

$$|\dot{A}_{um} f_H| \approx \frac{1}{2\pi (r_{bb'} + R_s) C_\mu}$$

说明决定于  
管子参数

当晶体管选定后，增益带宽积大体确定：增益提高多少倍，带宽几乎变窄多少倍，这个结论具普遍性。



## 6.5 多级放大电路的频率响应

多级放大电路的电压增益：

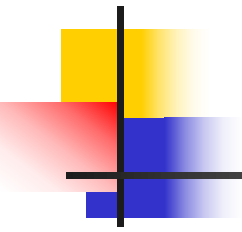
$$\mathbf{A}_u = \mathbf{A}_{u1} \bullet \mathbf{A}_{u2} \bullet \cdots \bullet \mathbf{A}_{un}$$

多级放大电路电压增益的波特图的表达式为：

$$20\lg |A_u| = 20\lg |A_{u1}| + 20\lg |A_{u2}| + \cdots + 20\lg |A_{un}|$$

$$= \sum_{k=1}^n 20\lg |A_{uk}|$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_n = \sum_{k=1}^n \varphi_k$$

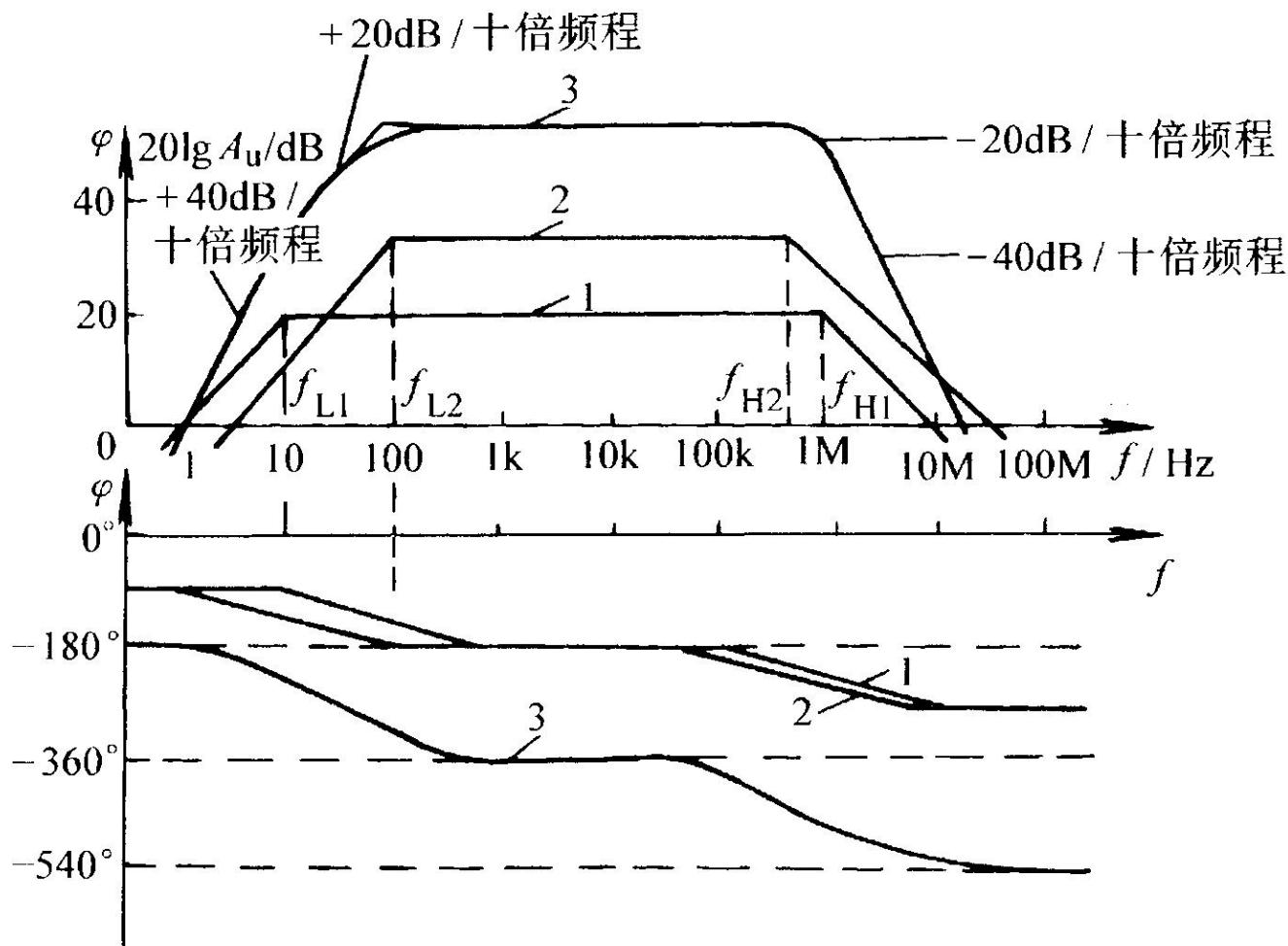

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_n = \sum_{k=1}^n \varphi_k$$

$$\begin{aligned} 20\lg |A_u| &= 20\lg |A_{u1}| + 20\lg |A_{u2}| + \cdots + 20\lg |A_{un}| \\ &= \sum_{k=1}^n 20\lg |A_{uk}| \end{aligned}$$

因此，只要把各级电压增益的波特图进行叠加，就可以得到多级放大电路总电压增益波特图。



已知两级放大电路，第一级放大倍数为20dB，上下限截止频率分别为1MHz和10Hz；第二级放大倍数为35dB，上下限截止频率分别为500kHz和100Hz。



# 多级放大电路下限截止频率的估算

- 多级放大电路的下限截止频率：

$$f_L = 1.1\sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + \dots + f_{Ln}^2}$$

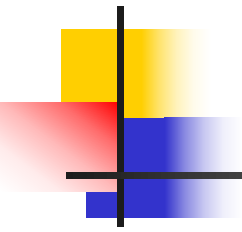
- 当各级的下限截止频率相差不多时，采用上式估算  $f_L$ 。如果其中某一级的  $f_{LK}$  比其余各级大（4-5）倍以上时，则可认为总的  $f_L \approx f_{LK}$ 。

# 多级放大电路上限截止频率的估算

- 多级放大电路上限截止频率：

$$\frac{1}{f_H} = 1.1 \sqrt{\left(\frac{1}{f_{H1}}\right)^2 + \left(\frac{1}{f_{H2}}\right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{f_{Hn}}\right)^2}$$

- 当各级的上限截止频率相差不多时，采用上式估算  $f_H$ 。如果其中某一级的  $f_{HK}$  是其余各级的 (1/4-1/5) 以下时，则可认为总的  $f_H \approx f_{HK}$ 。



例：放大电路的电压表达式为

$$\dot{A}_u = \frac{-100}{\left(1 + \frac{10}{jf}\right) \left(1 + j\frac{f}{10^4}\right) \left(1 + j\frac{f}{10^5}\right)}$$

该放大电路的中频电压增益？


下限截止频率为？



## 第六章要点

---

- 1、一个正弦波信号的周期、频率和角频率之间关系？
- 2、RC低通电路和RC高通电路的判断？
- 3、RC低通电路和高通电路的时间常数？时间常数和截止频率的关系？时间常数和角频率之间的关系？
- 4、为什么放大电路的放大倍数跟输入信号的频率有关？
- 5、是什么造成放大电路的放大倍数在低频段会下降？是什么原因造成放大的放大倍数在高频段会下降？
- 6、放大电路的幅频特性是什么样子的，放大电路的相频特性是什么样子的？

- 
- 7、熟悉放大电路中频电压增益 $A_{um}$ ，上限截止频率和下限截止频率的定义，通频带的定义
  - 8、不同类型的放大电路（共射、共集和共基电路）的幅频特性和相频特性都一样吗？
  - 9、三极管和场效应管的高频等效模型
  - 10、为什么共基放大电路可以实现宽频带放大？
  - 11、增益带宽积的概念
  - 12、多级放大电路上限截止频率和下限截止频率的计算
  - 13、多级放大电路的幅频特性和相频特性
  - 14、多级放大电路的放大倍数与中频增益、输入信号频率之间关系表达式