

## 第 四 章

# 放大电路的频率响应

### 4.1 放大电路的频率性

### 4.2 多级放大器的频率响应

## 小结



## 4.1 放大电路的频率性

### 引言

4.1.1 简朴 $RC$ 低通和高通电路的频率特征

4.1.2 晶体管以及其单级放大电路的频率特征

4.1.3 集成运算放大器高频参数及其影响

## 引言

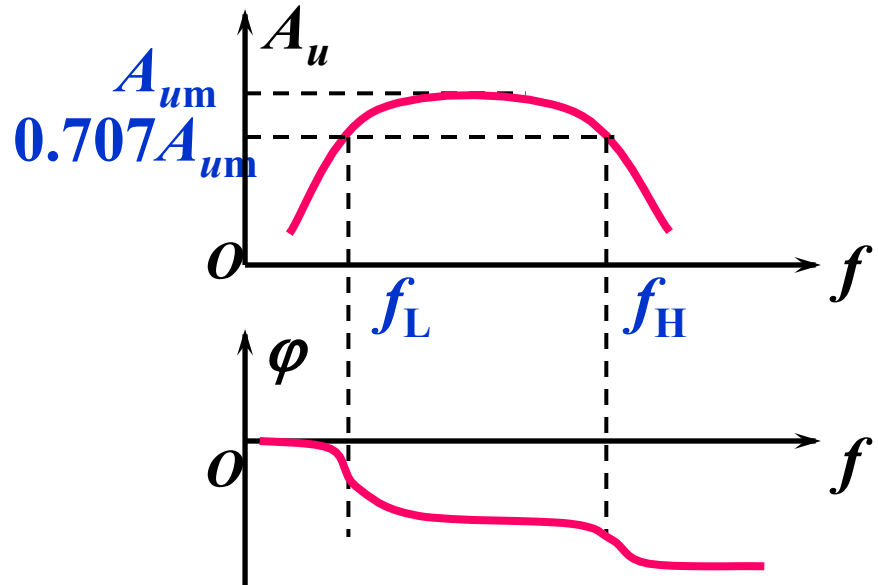
### 1. 幅频特征和相频特征

$$\underline{\dot{A}}_u = A_u(f) \angle \varphi(f)$$

$\begin{cases} A_u(f) & \text{— 幅频特征} \\ \varphi(f) & \text{— 相频特征} \end{cases}$

$f_L$  — 下限截止频率

$f_H$  — 上限截止频率



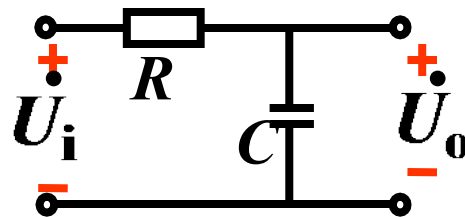
### 2. 频带宽度(带宽) $BW$ (Band Width)

$$BW = f_H - f_L \approx f_H$$

## 4.1.1 简朴 RC 低通和高通电路的频率特征

### 一、RC 低通电路的频率特征

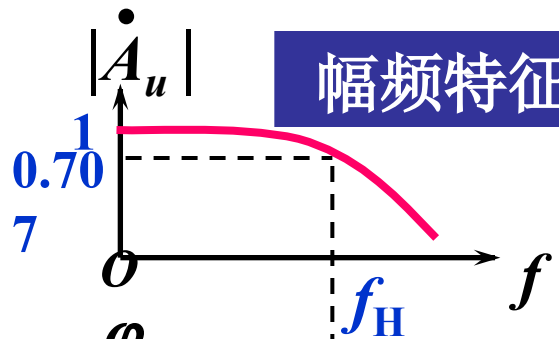
#### 1. 频率特征的描述



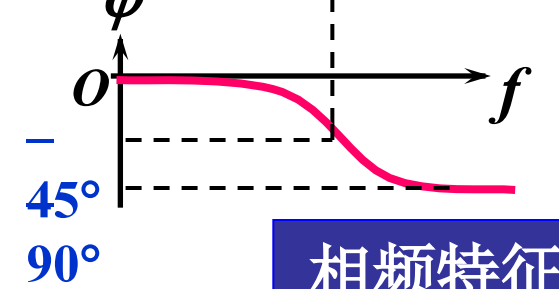
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_H}}$$

$$\text{令 } 1/RC = \omega_H$$

$$\text{则 } f_H = 1/2\pi RC$$



幅频特征



相频特征

$$\begin{cases} |\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_H)^2}} \\ \varphi = -\arctan f/f_H \end{cases}$$

滞后

$f = 0$  时,  $|\dot{A}_u| = 1$  ;  $\varphi = 0$

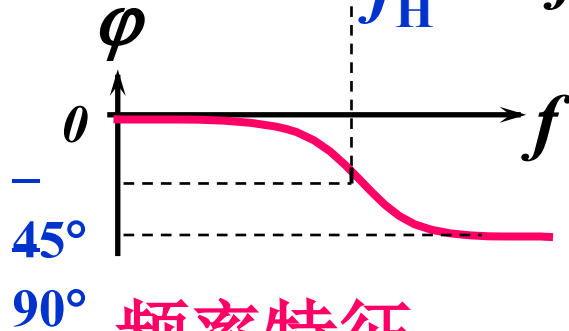
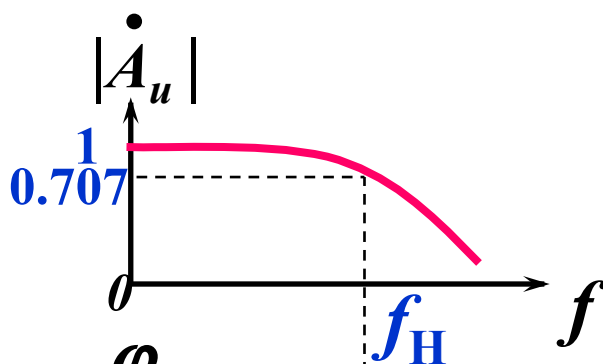
$f = f_H$  时,  $|\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707$  ;  $\varphi = -45^\circ$

$f \gg f_H$  时,  $|\dot{A}_u| \rightarrow 0$  ;  $\varphi \rightarrow -90^\circ$

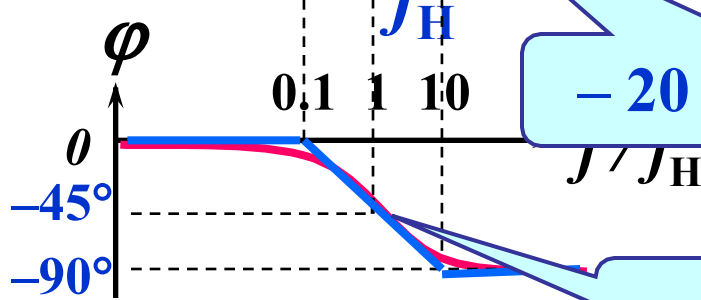
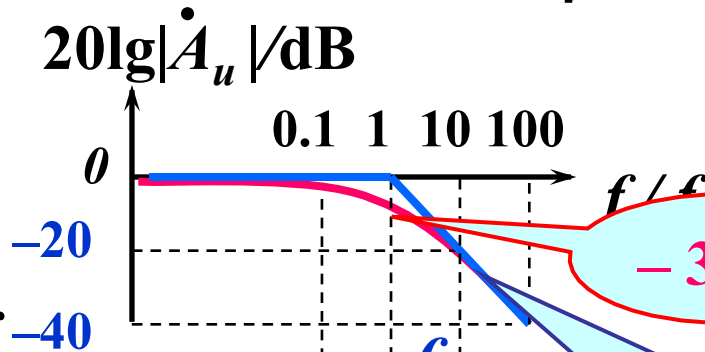


## 2. 频率特征的波特图

$$\begin{cases} |\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1+(f/f_H)^2}} \\ \varphi = -\arctan f/f_H \end{cases}$$



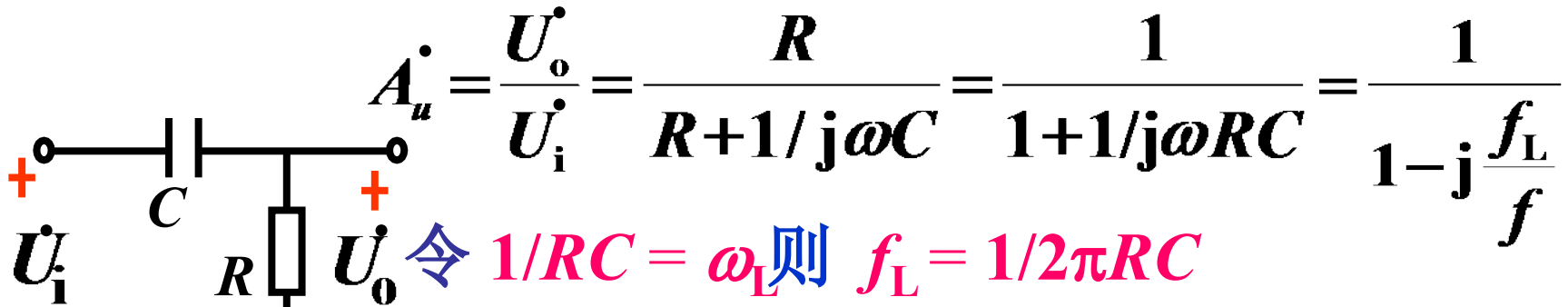
频率特征



波特图



## 二、RC 高通电路的频率特征



$$\left\{ \begin{aligned} |A_u| &= \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}} \\ \varphi &= \arctan f_L/f \quad \text{超前} \end{aligned} \right.$$

$f \geq 10 f_L \quad 20\lg|A_u| = 0 \text{ dB}$

$\varphi \approx 0^\circ$

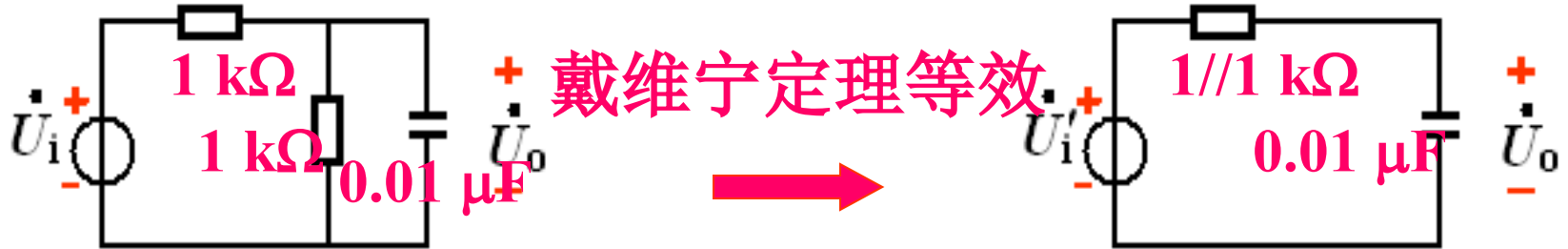
$f = f_L \quad 20\lg|A_u| = 20\lg 0.7071 = -3 \text{ dB}$

$\varphi = 45^\circ$

$f \leq 0.1 f_L \quad 20\lg|A_u| = -20\lg f/f_L$

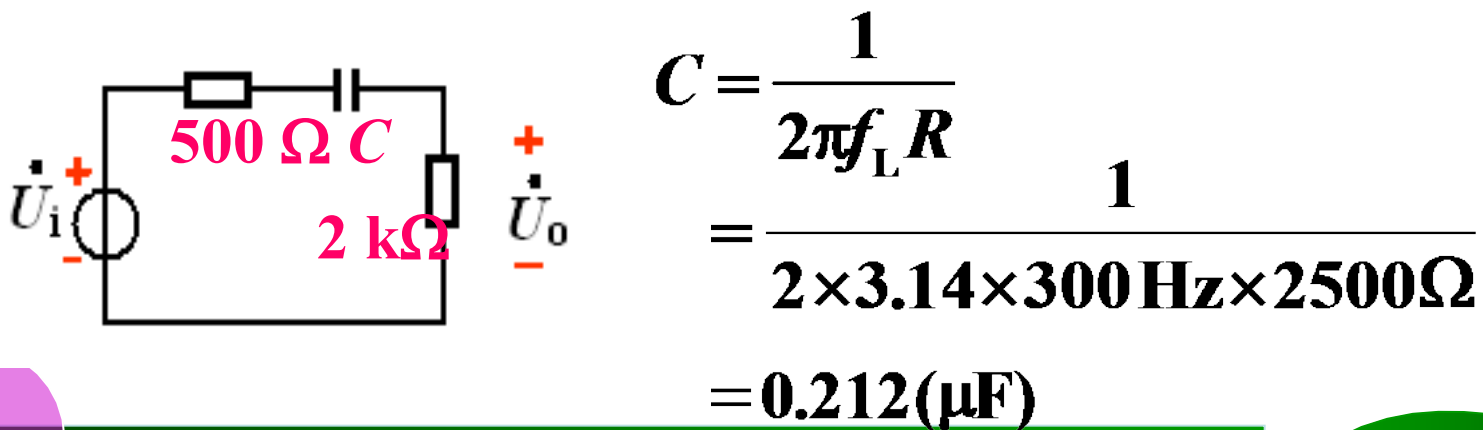
$\varphi \approx 90^\circ$

例 4.1.1 求已知一阶低通电路的上限截止频率。



$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 0.5 \text{ k}\Omega \times 0.01 \mu\text{F}} = 31.8 \text{ (kHz)}$$

例 5.1.2 已知一阶高通电路的  $f_L = 300 \text{ Hz}$ ，求电容  $C$





## 4.1.2 晶体管及其单级放大电路的频率特征

### 一、单级阻容耦合放大器的中频和低频特征

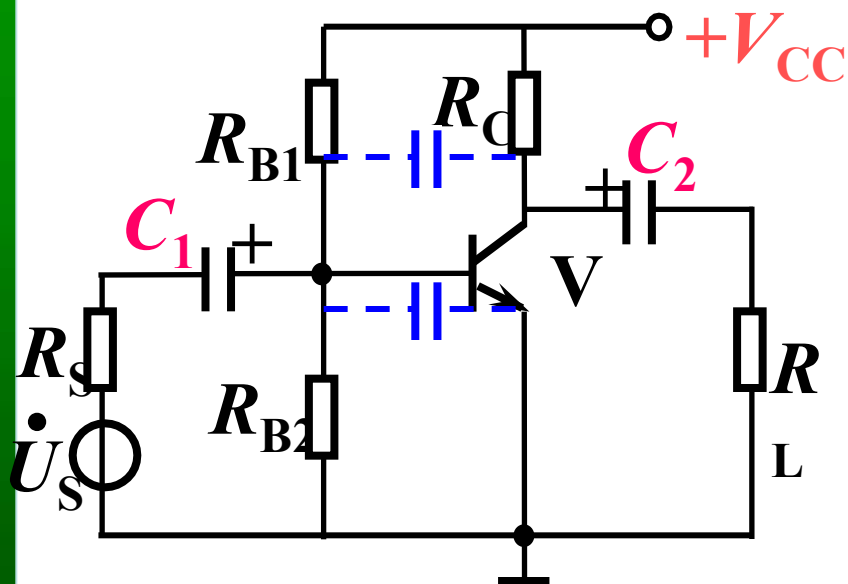
#### 1. 中频特征

$C_1$ 、 $C_2$  可视为短路

极间电容可视为开路

$$A_{us} \approx \frac{-\beta R'_L}{r_{be} + R_s} = A_{us0}$$

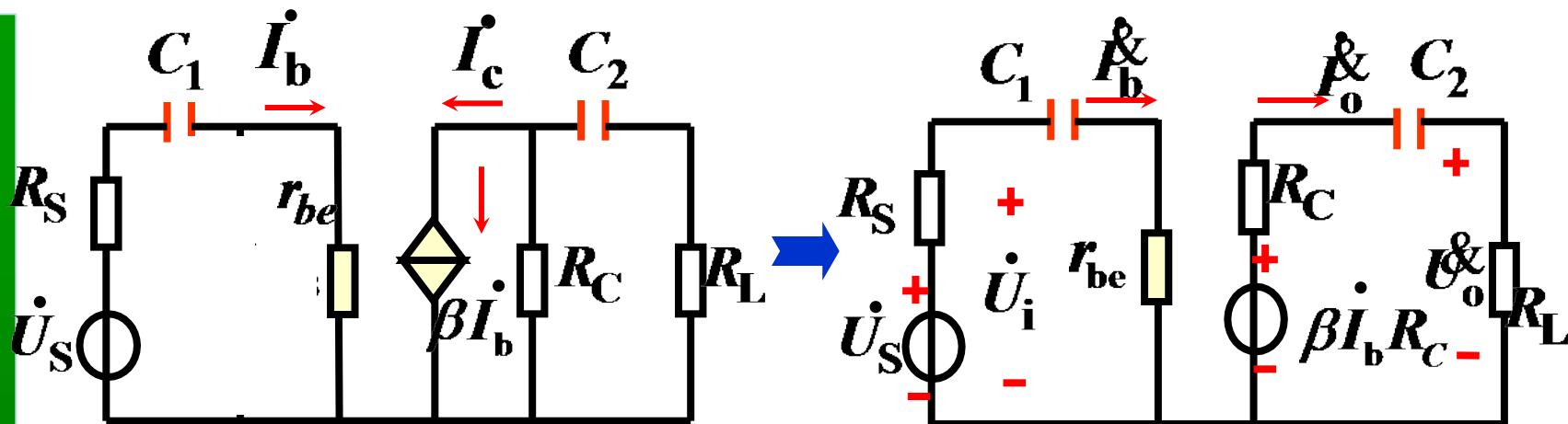
$$\varphi = -180^\circ$$



#### 2. 低频特征：极间电容视为开路

耦合电容  $C_1$ 、 $C_2$  与电路中电阻串联容抗不能忽视

# 模拟电子技术



$$A_{us} = \frac{R'_B \gg r_{be} \dot{A}_{us0}}{1 - j f_L / f}$$

$$A_{us} = \frac{A_{us0}}{\sqrt{1 + (f_L / f)^2}}$$

$$\varphi = -180^\circ + \arctan(f_L / f)$$

$$f_L = \{ \max(f_{L1}, f_{L2}) \}$$

结论: 频率降低,  $A_{us}$  随之减小, 输出比输入电压相位超前。

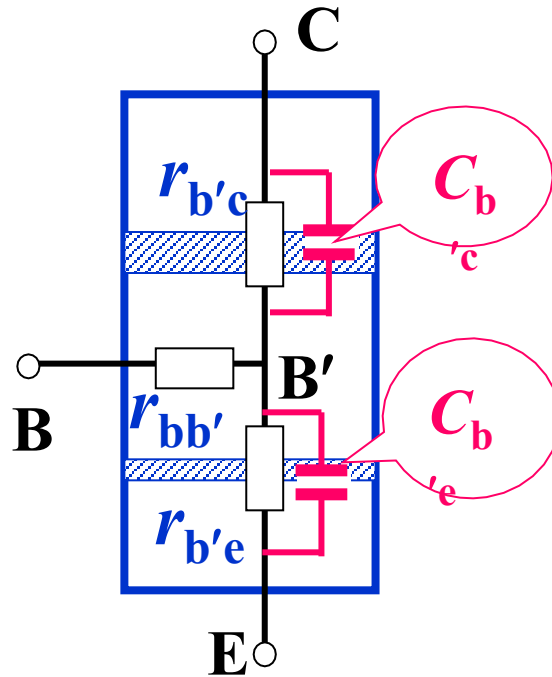
$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi(R_S + r_{be})C_1}$$

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi(R_C + R_L)C_2}$$

## 二、单级放大器的高频性

### 1. 晶体三极管的混合 $\pi$ 型等效电路

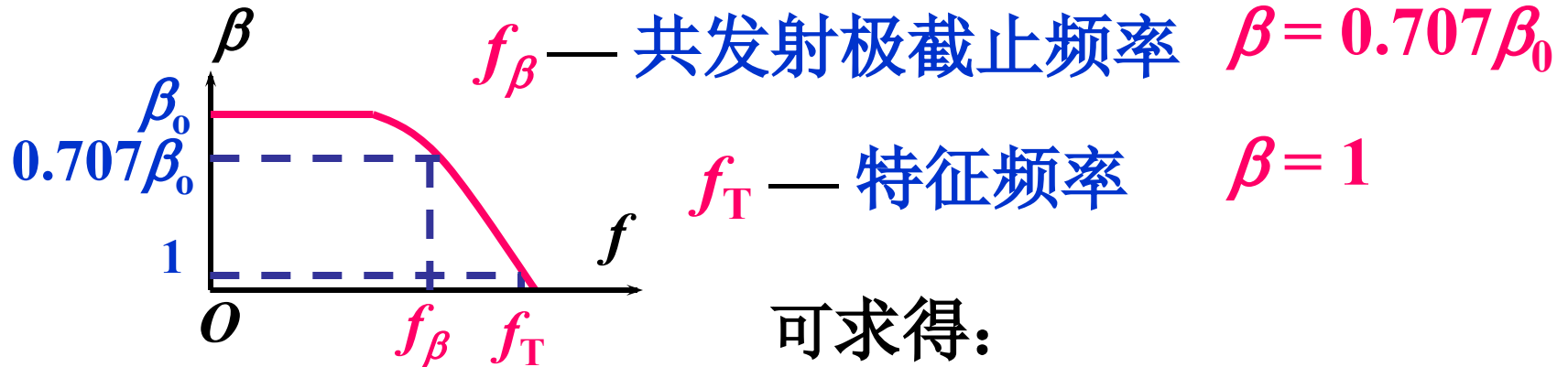
因  $\beta$  值随频率升高而降低，高频下不能采用  $H$  参数等效电路。



$C_{b'e}$  : 几 pF, 限制着放大器频带的展宽



## 2. $\beta$ 与频率 $f$ 的关系

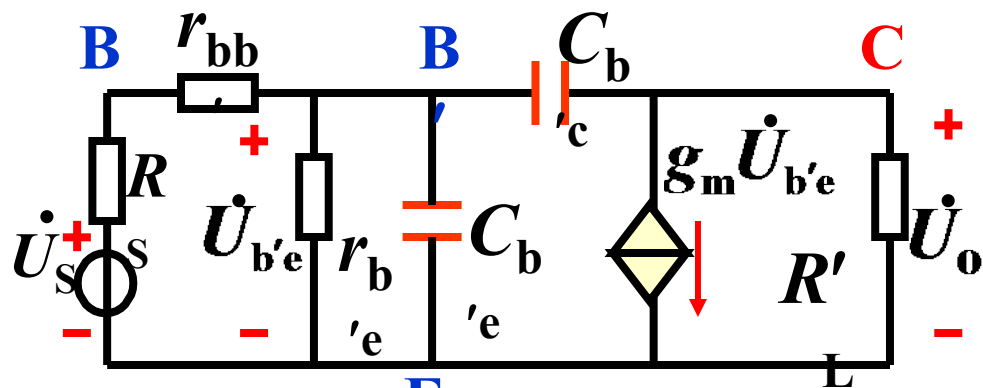


$$f_{\beta} = \frac{1}{2\pi r_{b'e} (C_{b'e} + C_{b'c})} \quad f_T = \frac{g_m}{2\pi (C_{b'e} + C_{b'c})} = \beta_0 f_{\beta}$$

一样可求得:  $f_{\alpha} = \frac{1}{2\pi r_e (C_{b'e} + C_{b'c})} = (1 + \beta_0) f_{\beta}$

可见:  $f_{\alpha} \approx f_T \gg f_{\beta}$

## 3. 晶体管单级放大电路高频特征



( $C_1, C_2$  视为短路)

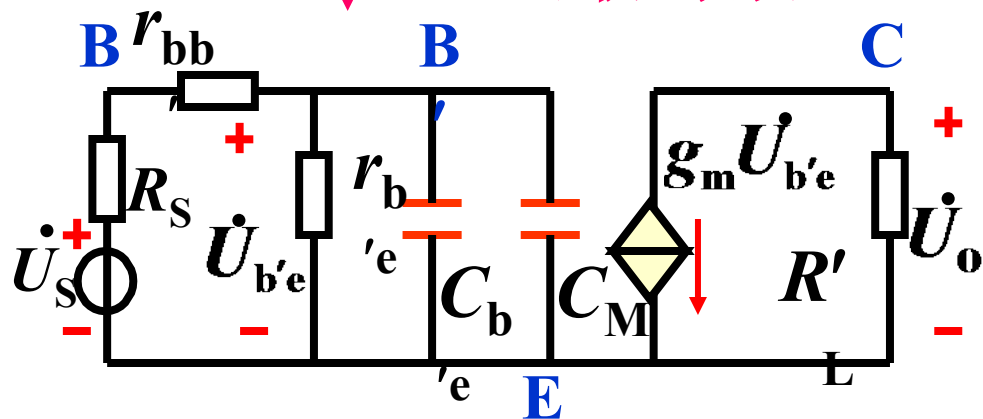
$$R'_L = R_C //$$

$$C_M = R_t (1 + g_m R'_L)$$

$$C_{b'c}$$

在输出回路略去  $C_{b'c}$

密勒等效



$$\omega_H = 1/R_t C_t$$

$$f_H = 1/2\pi R_t C_t$$

# 模拟电子技术

$$R_t = (R_S + r_{bb'}) // r_{b'e}$$

增益带宽积

$$C_t = C_{b'e} + C_M = C_{b'e} + (1 + g_m R'_L) C_{b'c}$$

$$G \cdot BW = A_{us0} \cdot f_H = \frac{1}{2\pi} \frac{g_m R'_L}{C_t (R_S + r_{bb'})} \quad (\text{常数})$$

$$\dot{A}_{us0} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{-g_m R'_L r_{b'e}}{R_S + r_{bb'} + r_{b'e}} = \frac{A_{us0}}{1 + j \frac{f}{f_H}}$$

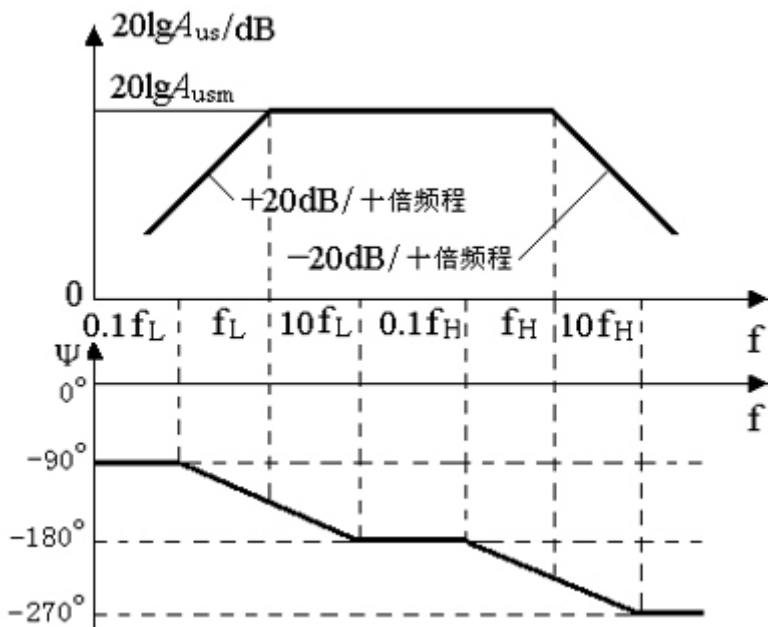
$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{A_{us0}}{1 + j \frac{\omega}{\omega_H}}$$

结论：频率升高， $A_u$  减小

输出相位滞后  
增益带宽积为常数

## 三、完整的单管共射放大电路的频率特征

将前面画出的单管共射放大电路频率特征的中频段、低频段和高频段画在同一张图上就得到了如图所示的**完整**的频率特征（波特）图。



共射电路完整波特图

实际上，同步也可得出单管共射电路完整的电压放大倍数表达式，  
即

$$A_{us} = A_{usm} \frac{jf/f_L}{(1+jf/f_L)(1+jf/f_H)}$$

由上图可看出，画单管共射放大电路的频率特征时，关键在于算出下限和上限截止频率  $f_L$  和  $f_H$ ，  
下限截止频率取决于低频时输入回路的时间数

$\tau_L$ ，由图可知： $\tau_L = (R + R_{in})C$ ，其中，

$$R_{in} = R_{in} \parallel (r_{be} + r_{be})$$

而一样，上限截止频率取决于高频时输入回路的时间常数  $\tau_H$ ；由图可知：

$\tau_H = RC'$ ，





其中

$$f_H = 1/2\pi\tau_H$$

所以，只要能正确的画出低频段和高频段的交流等效电路，算出输入回路的时间常数  $\tau_L$  和  $\tau_H$ ，则能够方便的画出放大电路的频率特征图。

**对数幅频特征：** 在  $f_L$  到  $f_H$  之间， $20\lg A_{us} = 20\lg A_{usm}$

是一条水平直线；在  $f \leq f_L$  时，是一条斜率为 +20Db/十倍频程的直线；在  $f \geq f_H$  时，是一

条斜率为+20Db/十倍频程的直线；在  $f \geq f_H$  时，  
是一条斜率为-20Db/十倍频程的直线。放大电路

的通频带  $f_{BW} = f_H - f_L$  。

**相频特征：** 在  $10f_L \leq f \leq 0.1f_H$  时， $\varphi = -180^\circ$  ；

在  $f \leq 0.1f_L$  时， $\varphi = -90^\circ$  ；

在  $f \geq 10f_H$  时， $\varphi = -270^\circ$  ；

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/056142024224010230>