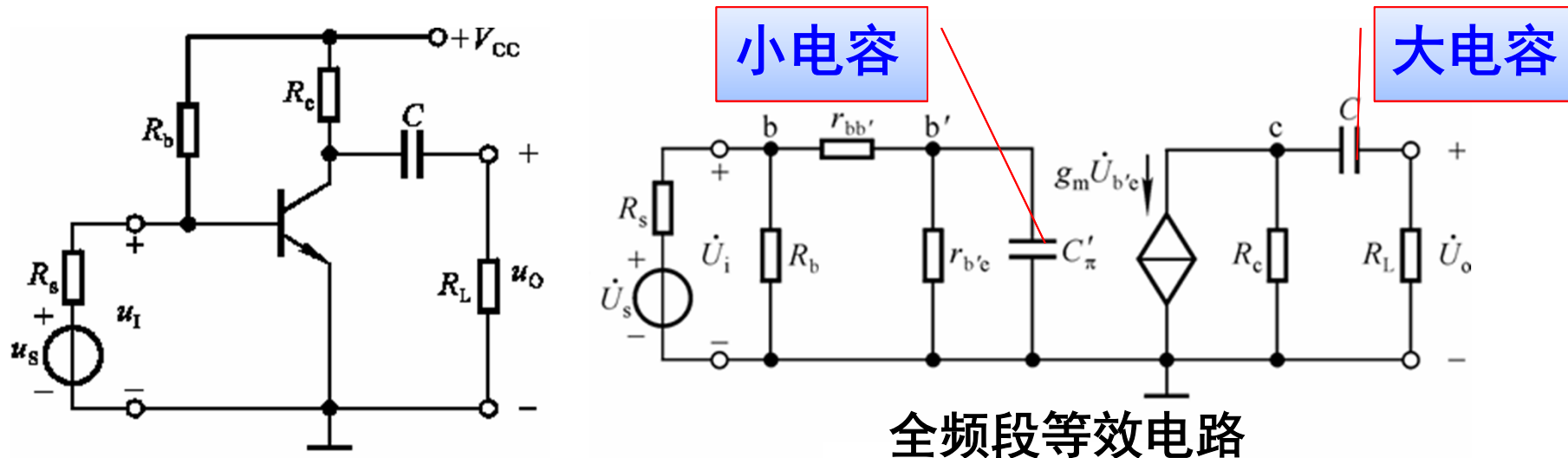


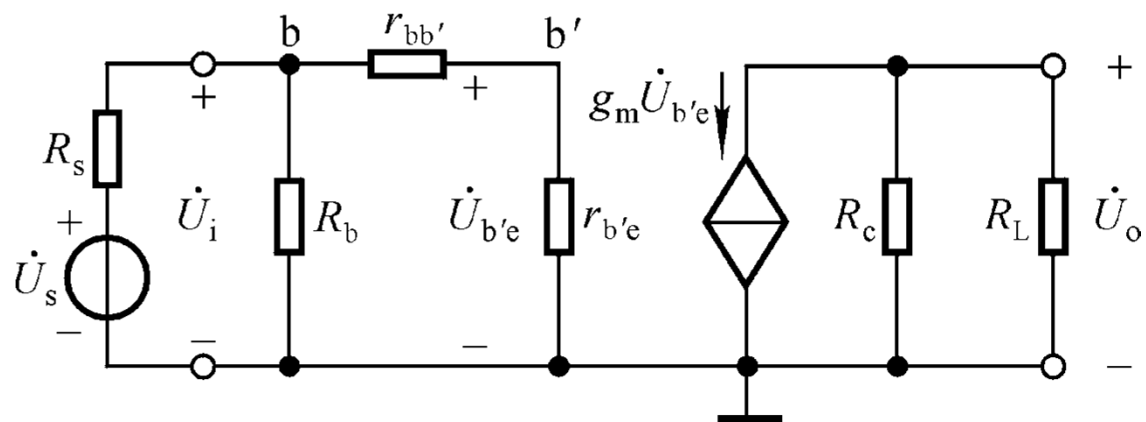


## 5.4 单管共射放大电路的频率响应



	低频段(<1kHz)	中频段(>1kHz)	高频段(>1MHz)
$ Z_{C'_\pi} $ (pF)	很大	大	较小
$ Z_C $ (uF)	大	较小	很小
等效电路	保留 $C$ , $C'_\pi$ 开路	$C$ 短路, $C'_\pi$ 开路	保留 $C'_\pi$ , $C$ 短路

## 一、中频电压放大倍数 $C$ 短路, $C'_\pi$ 开路



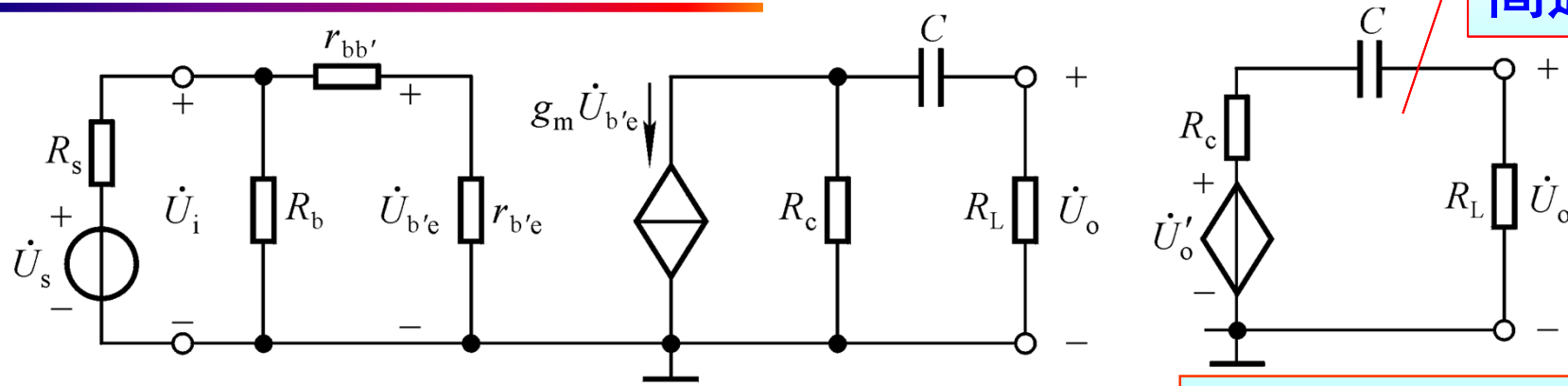
$$\begin{aligned} \dot{A}_{usm} &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{b'e}} \\ &= \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot (-g_m R'_L) \end{aligned}$$

$R_i = R_b // r_{be}$

$R'_L = R_c // R_L$

与用  $h$  参数等效模型求出的结果相同

## 二、低频电压放大倍数 考虑 $C$ 的影响, $C'_\pi$ 开路



高通电路

$$\dot{A}_{usl} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}_i} \cdot \frac{\dot{U}'_o}{\dot{U}_{b'e}} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}'_o}$$

$$\dot{U}'_o = -g_m \dot{U}_{b'e} R_c$$

$$R_i = R_b // r_{be}$$

$$\dot{A}_{usl} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot (-g_m R_c) \cdot \frac{R_L}{(R_c + R_L) + \frac{1}{j\omega C}}$$

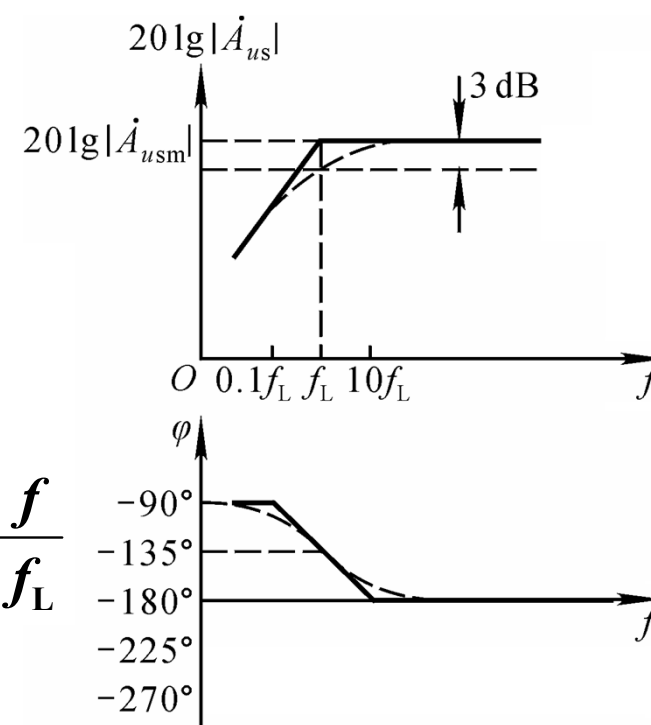
$$\dot{A}_{usl} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot (-g_m R_c) \cdot \frac{\frac{R_L}{(R_c + R_L)}}{1 + \frac{1}{j\omega(R_c + R_L)C}}$$

$$\dot{A}_{usl} = \dot{A}_{usm} \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega(R_c + R_L)C}} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{1 + \frac{f_L}{jf}}$$

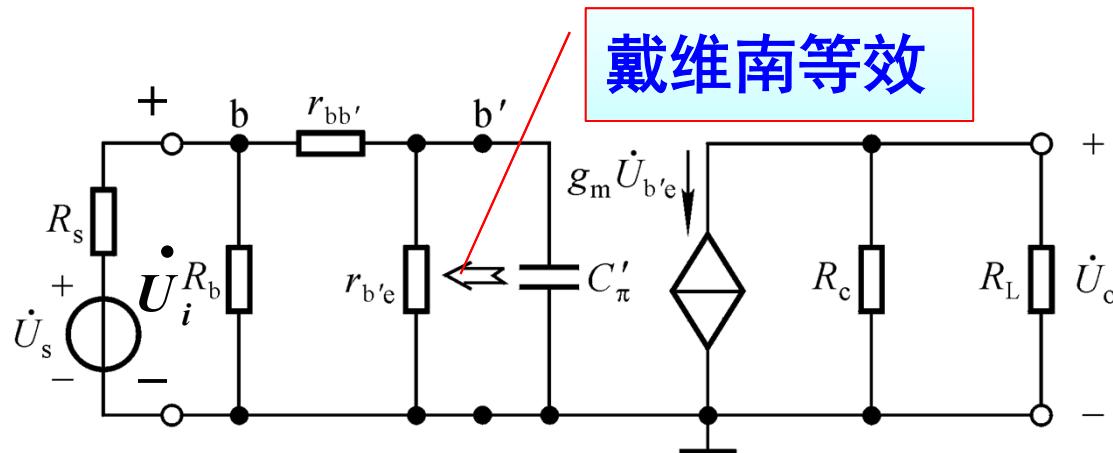
下限截止频率 $f_L$   
决定于耦合电  
容 $C$ 所在回路  
的时间常数

$$\text{令 } f_L = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C}$$

$$\begin{cases} 20\lg |A_{usl}| = 20\lg |A_{usm}| - 10\lg \left[ 1 + \left( \frac{f_L}{f} \right)^2 \right] \\ \phi = -180^\circ + (90^\circ - \arctan \frac{f}{f_L}) = -90^\circ - \arctan \frac{f}{f_L} \end{cases}$$



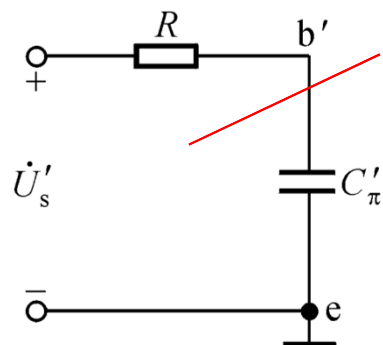
### 三、高频电压放大倍数 考虑 $C'_\pi$ 的影响, $C$ 短路



戴维南等效

$$\dot{A}_{ush} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$$

$$= \frac{\dot{U}'_s}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}'_s} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{b'e}}$$



低通电路

$$R'_i = R_b // r_{be}$$

$$= \frac{R'_i}{R_s + R'_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega RC'_\pi}} \cdot (-g_m R'_L)$$

$$\dot{U}'_s = \dot{U}_s \cdot \frac{R'_i}{R_s + R'_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}}$$

$$R = r_{b'e} // (r_{bb'} + R_s // R_b)$$

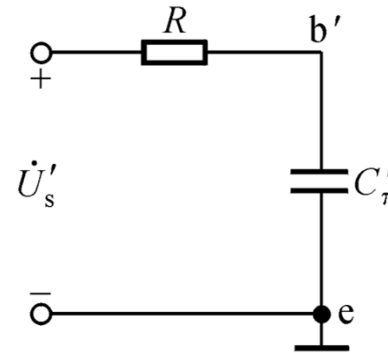
$$= \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{1 + j\omega RC'_\pi}$$

$$\dot{A}_{ush} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{1 + j\omega RC'_\pi}$$

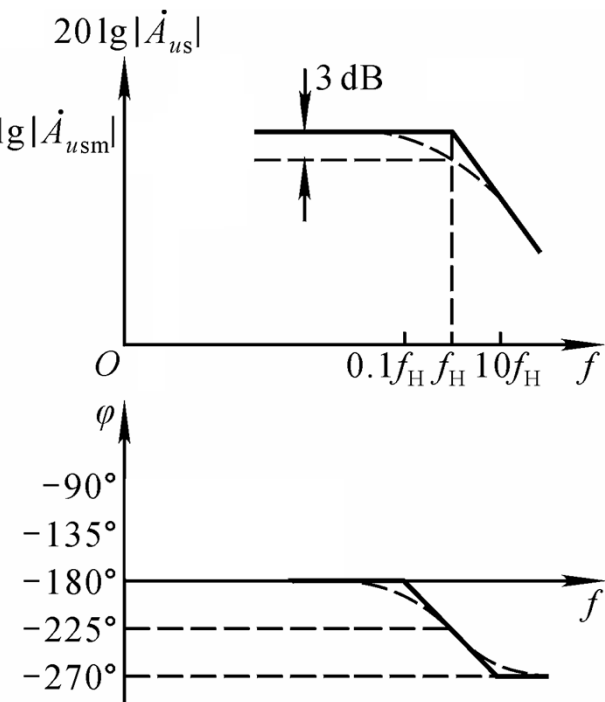
$$\text{令 } f_H = \frac{1}{2\pi RC'_\pi}$$

上限截止频率 $f_H$ 决定于电容 $C'_\pi$ 所在回路的时间常数

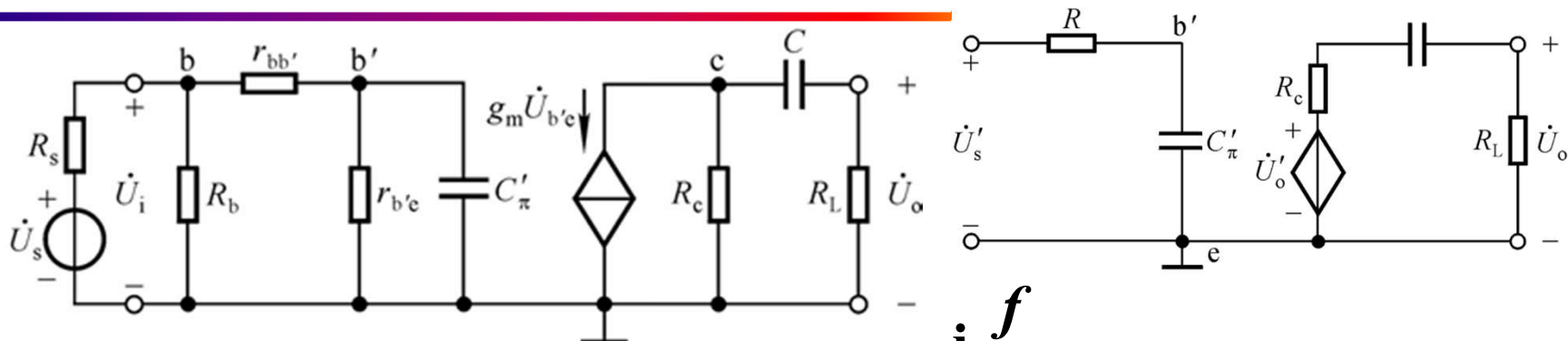
$$\dot{A}_{ush} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_H}}$$



$$\begin{cases} 20\lg |A_{ush}| = 20\lg |A_{usm}| - 10\lg \left[ 1 + \left( \frac{f}{f_H} \right)^2 \right] \\ \phi = -180^\circ - \arctan \frac{f}{f_H} \end{cases}$$



## 四、总的电压放大倍数的表达式及波特图



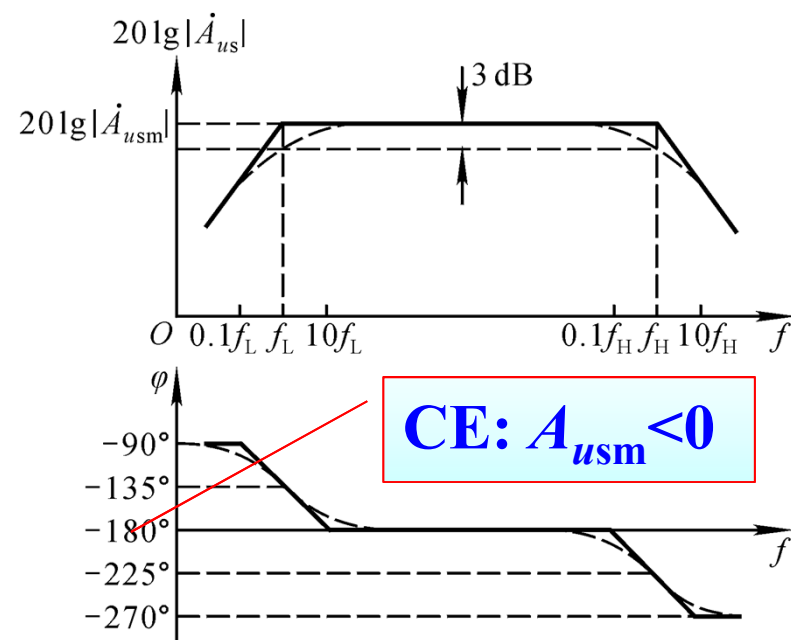
$$\dot{A}_{us} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{1}{1 + \frac{f_L}{jf}} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_H}} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{j\frac{f}{f_L}}{1 + j\frac{f}{f_L}} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_H}}$$

一般 $f_L$ 和 $f_H$ 相差很大

当 $f$ 在 $f_L$ 附近,  $\dot{A}_{us} \approx \dot{A}_{usl}$

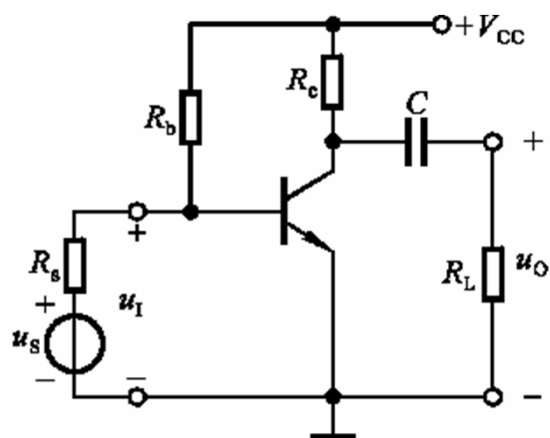
当 $f_L \ll f \ll f_H$ 时,  $\dot{A}_{us} \approx \dot{A}_{usm}$

当 $f$ 在 $f_H$ 附近,  $\dot{A}_{us} \approx \dot{A}_{ush}$



CE:  $A_{usm} < 0$

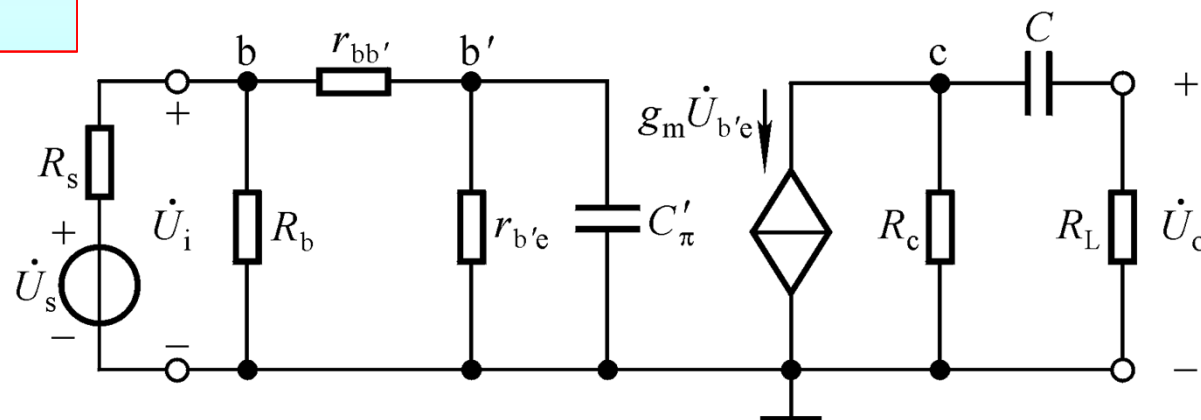
## 总结：放大电路频率响应分析步骤



$f_L$  决定于耦合电容所在回路的时间常数

- 1、求  $Q$  点
- 2、画全频段等效电路
- 3、求解等效电路参数--即混合  $\pi$  模型参数
- 4、求解中频电压放大倍数  
( $C'_\pi$  开路, 耦合、旁路电容短路)
- 5、求解  $f_L$ 、 $f_H$  及总的电压放大倍数
- 6、画波特图

$f_H$  决定于  $C'_\pi$  所在回路的时间常数





## 五、放大电路频率响应的改善和增益带宽积

通常 $f_{bw}=f_H-f_L\approx f_H$ ，与 $C'_\pi$ 所在回路的时间常数有关

$$C'_\pi = C_\pi + C'_\mu \approx C_\pi + (1 + g_m R'_L) C_\mu \quad C_\pi = \frac{\beta}{2\pi r_{b'e} f_T} - C_\mu = \frac{g_m}{2\pi f_T} - C_\mu$$

### 1、增加带宽的措施：

- 选用 $C_{ob}$ 小、 $f_T$ 大的高频晶体管
- 减小 $g_m R'_L$
- 减小 $C'_\pi$ 所在回路的电阻（选 $r_{bb'}$ 小的晶体管）
- 必要时采用共基（或共栅）放大电路

### 2、增益带宽积：提高增益与增大带宽的矛盾

当晶体管和电路结构选定后，增益与带宽的乘积近似等于某一常量

$$\bullet \quad A_{usm} f_{bw} \approx C$$



## 5.5 多级放大电路的频率响应

### 一、多级放大电路频率特性的定性分析

$\dot{A}_u = \prod_{k=1}^n \dot{A}_{uk}$ ,  $\dot{A}_{uk}$  为各级放大电路的电压 放大倍数

$$\dot{A}_{um} = \prod_{k=1}^n \dot{A}_{umk} \quad \dot{A}_{ul} = \prod_{k=1}^n \dot{A}_{ulk} \quad \dot{A}_{uh} = \prod_{k=1}^n \dot{A}_{uhk}$$

幅频特性和相频特性为

$$\begin{cases} 20 \lg |\dot{A}_u| = \sum_{k=1}^n 20 \lg |\dot{A}_{uk}| \\ \varphi = \sum_{k=1}^n \varphi_k \end{cases}$$

多级放大电路频率特性为各级放大电路频率特性之和

## 二、截止频率的估算

### 1、下限频率 $f_L$

根据 $f_L$ 的定义，当 $f=f_L$ 时

$$|\dot{A}_{ul}| = \prod_{k=1}^n \frac{|\dot{A}_{umk}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{Lk}}{f}\right)^2}} \quad |\dot{A}_{ul}| = \frac{\prod_{k=1}^n |\dot{A}_{umk}|}{\sqrt{2}} \quad f_L \approx 1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^n f_{Lk}^2} = 2$$

### 2、上限频率 $f_H$

根据 $f_H$ 的定义可得

$$|\dot{A}_{uh}| = \prod_{k=1}^n \frac{|\dot{A}_{umk}|}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{Hk}}\right)^2}}$$

$$f_H \approx \frac{1}{1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^n \frac{1}{f_{Hk}^2}}}$$

结论：

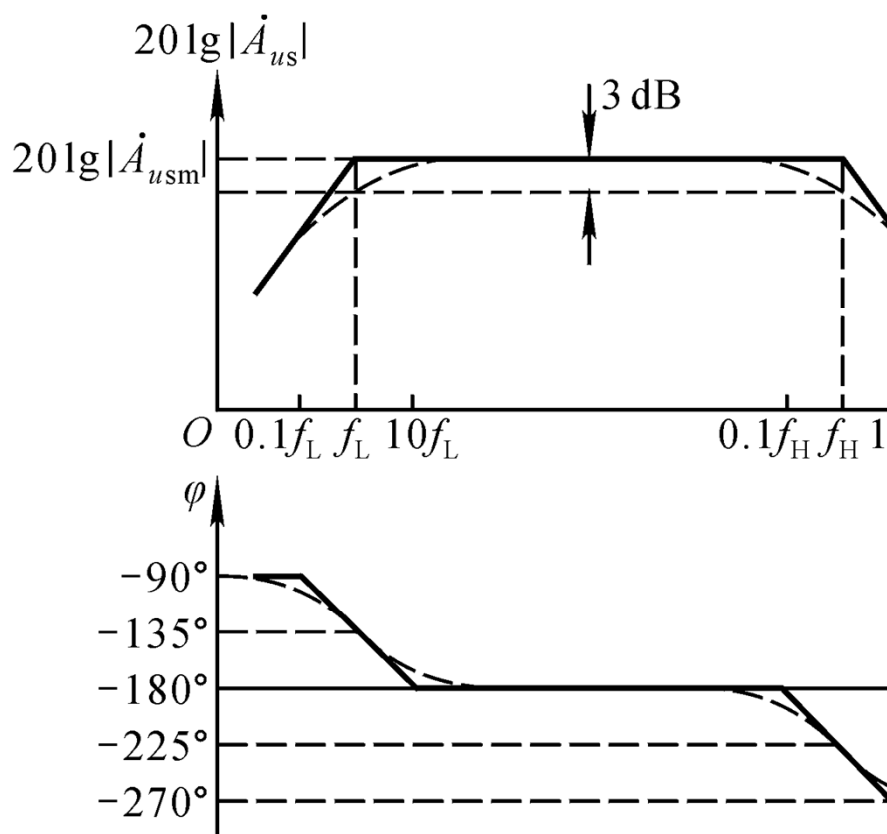
$$f_L > f_{Lk}$$

$$f_H < f_{Hk}$$

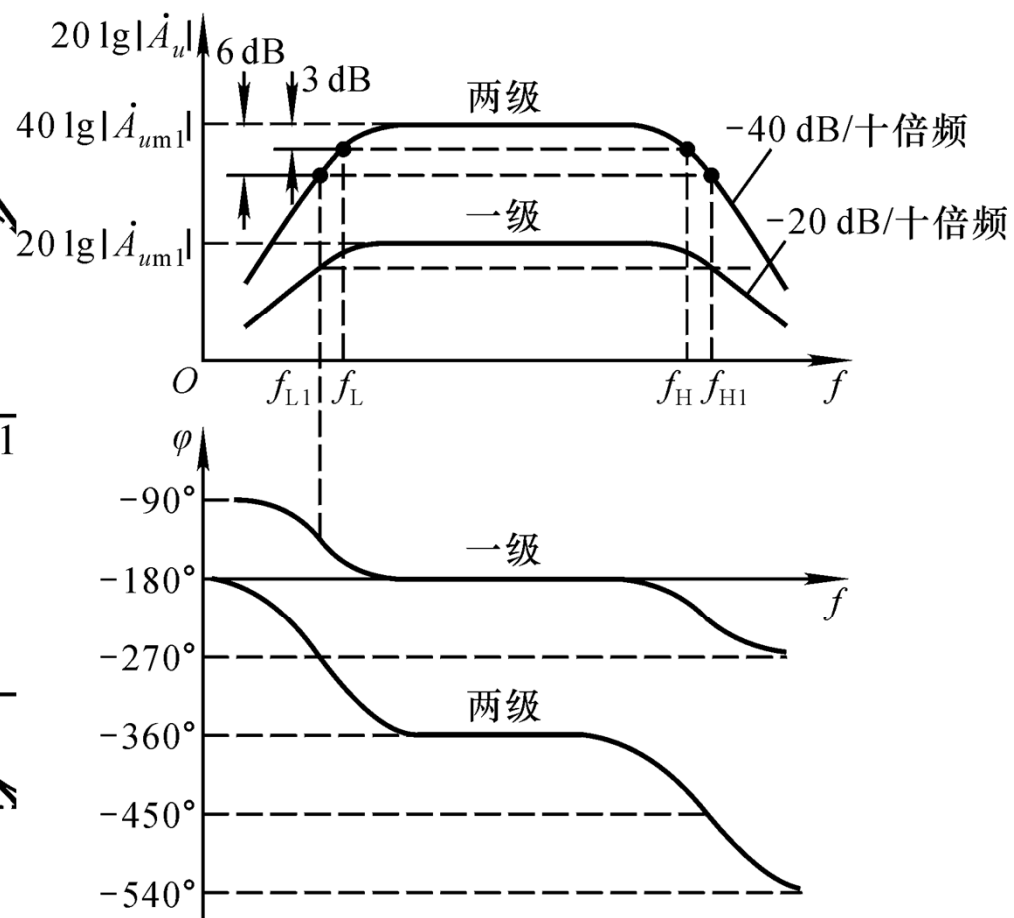
$$f_{bw} < f_{bwk}$$

若某级 $f_L$ 比其它的大很多，则它近似为多级放大电路的 $f_L$   
若某级 $f_H$ 比其它的小很多，则它近似为多级放大电路的 $f_H$

## 讨论1：单管和两级阻容耦合共射放大电路波特图比较 直接耦合放大电路波特图？三级放大电路？

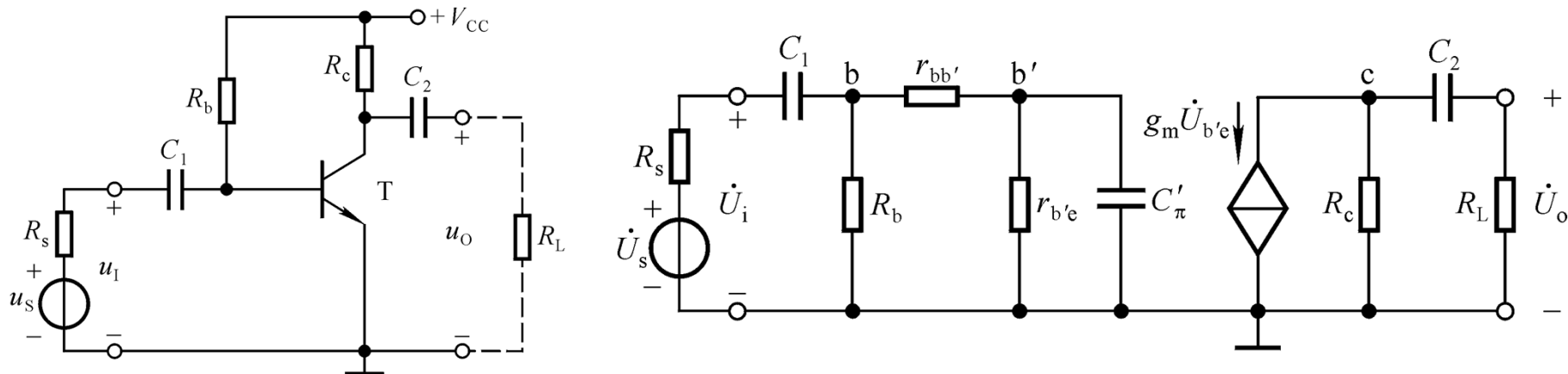


单管阻容耦合共射放大电路波特图



两级阻容耦合共射放大电路波特图

## 讨论2、阻容耦合单管共射放大电路频率特性分析



1、求解中频电压放大倍数  $A_{usm}$

2、求解  $f_L$ 、 $f_H$

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

$$R = r_{be} // (r_{bb'} + R_s // R_b)$$

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

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

求某一个截止频率时，其它电容均作理想化处理：

低频：其它耦合电容和旁路电容短路，所有  $C'_\pi$  开路

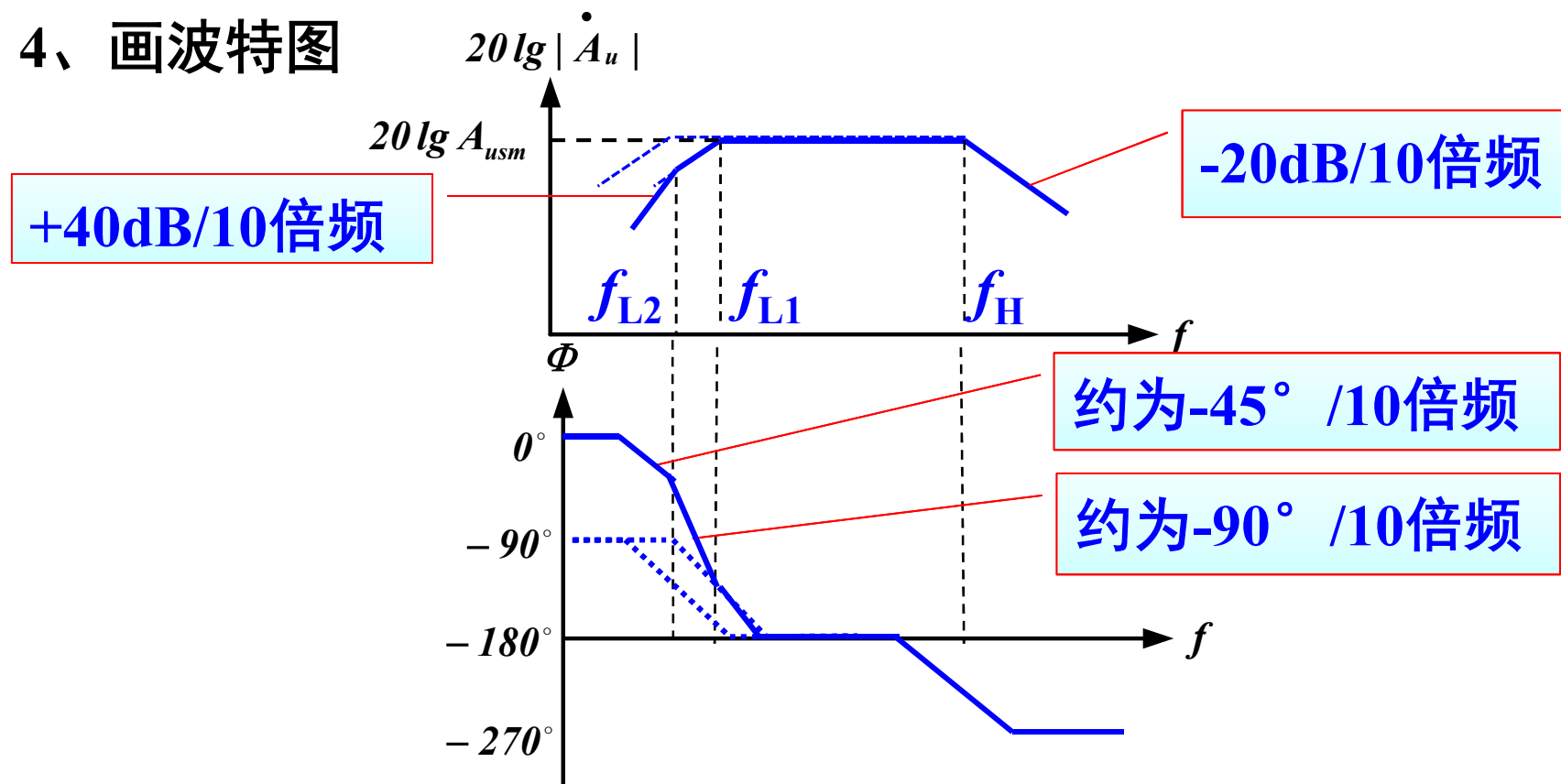
高频：其它  $C'_\pi$  开路，所有耦合电容和旁路电容短路

### 3、求总的电压放大倍数

$$\dot{A}_{us} = A_{usm} \cdot \frac{j\frac{f}{f_{L1}}}{1+j\frac{f}{f_{L1}}} \cdot \frac{j\frac{f}{f_{L2}}}{1+j\frac{f}{f_{L2}}} \cdot \frac{1}{1+j\frac{f}{f_H}}$$

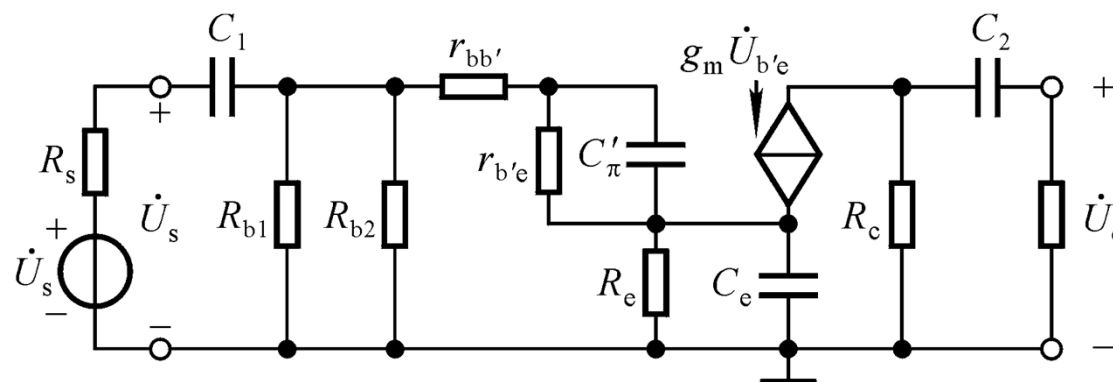
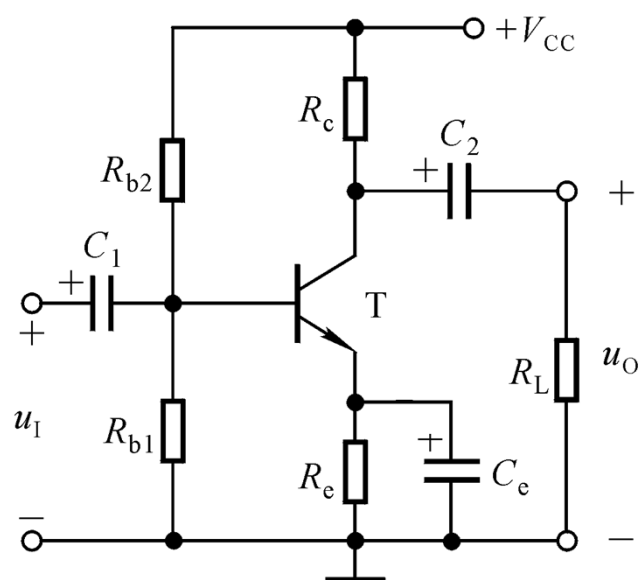
问题:  $f_{L1}=f_{L2}$ 时如何画?

### 4、画波特图

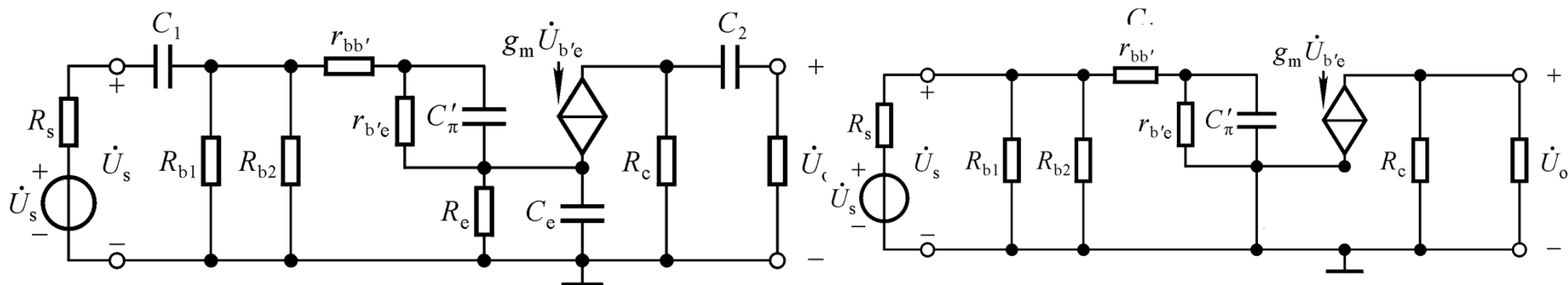


### 讨论3、稳Q电路频率响应分析

- 1、信号频率为  $0 \sim \infty$  时电压放大倍数的表达式？
- 2、若所有的电容容量都相同，则下限频率约等于多少？



$$A_{usm} = - \frac{R_i}{R_s + R_i} \frac{r_{b'e}}{r_{be}} g_m \cdot (R_c // R_L)$$



时间常数分析:

若电容值均相等, 则  $\tau_e \ll \tau_1, \tau_2$

$C_2$ 、 $C_e$  短路,  $C'_\pi$  开路, 求出

$$\tau_1 = (R_s + R_{b1} // R_{b2} // r_{be}) C_1$$

$C_1$ 、 $C_e$  短路,  $C'_\pi$  开路, 求出

$$\tau_2 = (R_c + R_L) C_2$$

$C_1$ 、 $C_2$  短路,  $C'_\pi$  开路, 求出

$$\tau_e = (R_e // \frac{r_{be} + R_s // R_{b1} // R_{b2}}{1 + g_m r_{b'e} \beta}) C_e$$

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_e$  短路, 求出

$$\tau_{C'_\pi} = [r_{b'e} // (r_{bb'} + R_s // R_{b1} // R_{b2})] C'_\pi$$

$$f_L \approx \frac{1}{2\pi \cdot \tau_e}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi \cdot \tau_{C'_\pi}}$$



## 第五章要求

- 1、掌握以下概念：频率响应，幅频特性，相频特性，上限频率，下限频率，通频带，波特图。
- 2、掌握晶体管的高频等效模型，掌握单管共射放大电路频率响应的分析，并能画出波特图。会求解电压放大倍数的表达式，由频率特性分析电压放大倍数表达式。

## 第五章基本电路、基本分析方法总结

电路总结（请自己将电路特点列表对比细化）：

混合 $\pi$ 高频模型；

单管共射放大电路低、中、高频交流等效电路。

方法总结：

- 画低、中、高频交流等效电路的方法；
- 通过电容所在回路估算时间常数和截止频率的方法；
- 求解电压放大倍数的方法，由频率特性分析电压放大倍数表达式的方法。
- 多级放大电路截止频率估算方法；
- 画波特图的方法。

## 第五章常见题型

- (1) 考查是否正确理解频率响应的有关基本概念。
- (2) 对放大电路频率响应的定性分析。
- (3) 根据电压放大倍数画波特图。
- (4) 根据波特图求电压放大倍数表达式。
- (5) 求解放大电路的上限频率和下限频率。