

## 第4章 放大电路的频率响应

### 本章要求:

- 一、掌握频率响应的基本概念：上限频率、下限频率、通频带和波特图；
- 二、了解晶体管的高频等效模型；
- 三、了解单管共射放大电路频率响应的分析方法；
- 四、理解多级放大电路频率响应与组成它的各级电路频率响应间的关系，能够定性分析多级放大电路的频率响应，能够估算截止频率。

# 目 录

4.1 频率响应概述

4.2 晶体管的高频等效模型

4.3 场效应管的高频等效模型

4.4 单管放大电路的频率响应

4.5 多级放大电路的频率响应

4.6 频率响应与阶跃响应

# 4.1 频率响应概述

## 4.1.1 研究放大电路频率响应的必要性

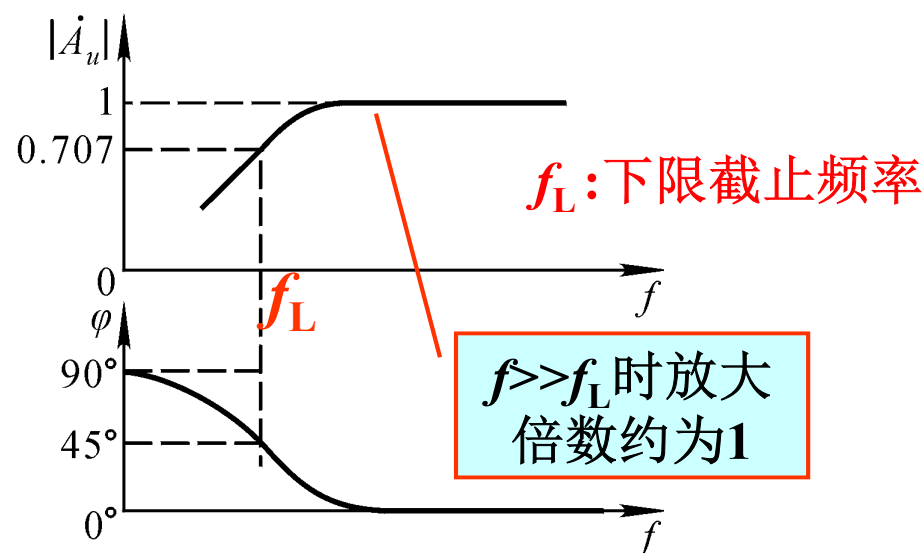
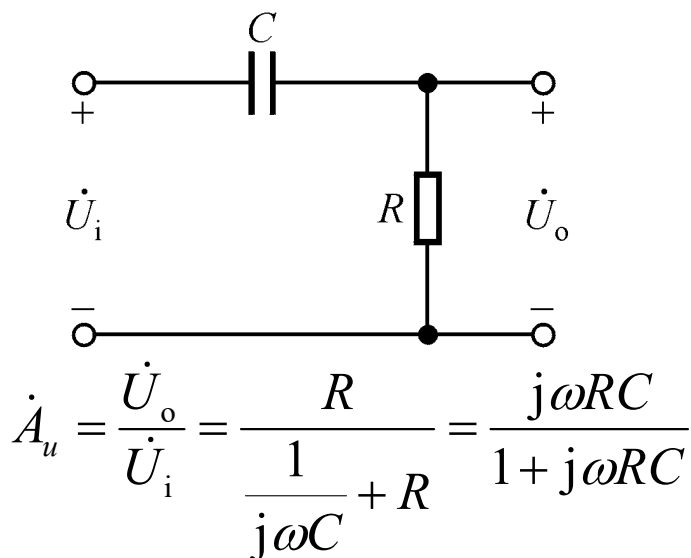
由于放大电路中耦合电容、旁路电容、半导体器件极间电容的存在，使放大倍数是信号频率的函数，这种函数关系称为**频率响应或频率特性**。

任何一个具体的放大电路都有一个确定的**通频带**。因此，在设计和使用放大电路时应使其通频带与信号频率相适应。

## 4.1.2 频率响应的基本概念

一、高通电路:信号频率越高,输出电压越接近输入电压。

由于耦合电容的存在,对信号构成了高通电路



$$\text{令 } f_L = \frac{1}{2\pi RC}, \text{ 则 } \dot{A}_u = \frac{j f / f_L}{1 + j f / f_L}$$

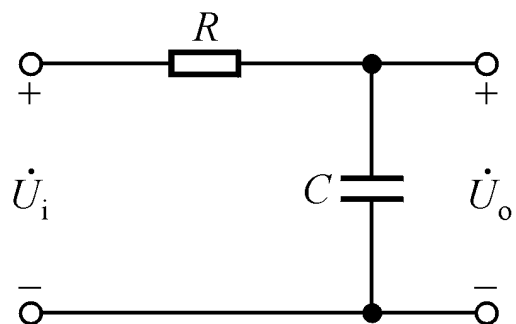


$$\begin{cases} |\dot{A}_u| = \frac{f / f_L}{\sqrt{1 + (f / f_L)^2}} & \text{幅频特性} \\ \varphi = 90^\circ - \arctan(f / f_L) & \text{相频特性} \end{cases}$$

$\tau = RC$ ,  $C$ 所在回路的时间常数

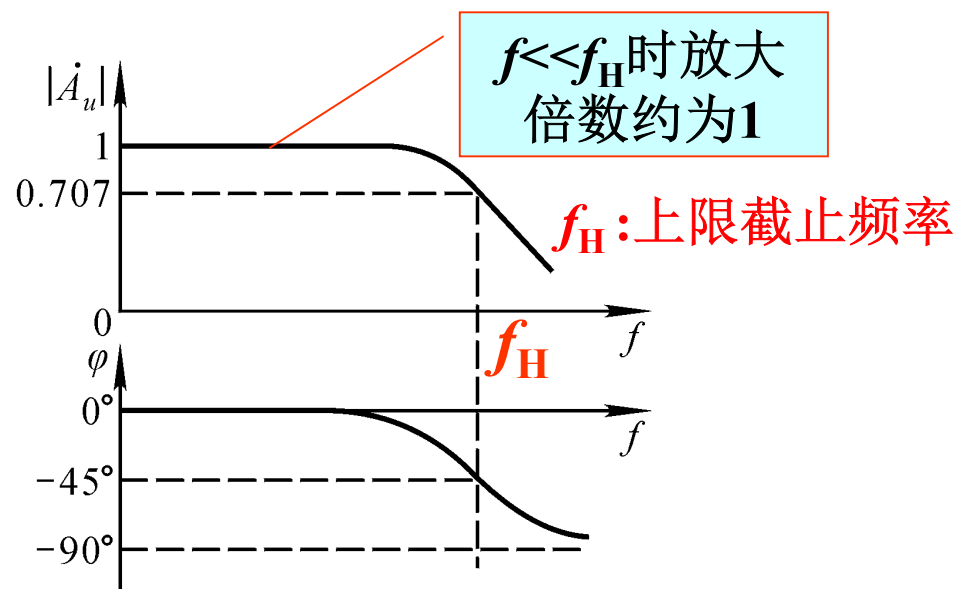
二、低通电路:信号频率越低,输出电压越接近输入电压。

由于半导体管极间电容的存在,对信号构成了低通电路



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

$$\text{令 } f_H = \frac{1}{2\pi RC}, \text{ 则 } \dot{A}_u = \frac{1}{1 + jf/f_H}$$



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

### 三、几个结论

- ① 高通电路的电压放大倍数为

$$\frac{jf/f_L}{1 + jf/f_L}$$

低通电路的电压放大倍数为

$$\frac{1}{1 + jf/f_H}$$

- ② 当  $f=f_L$  时放大倍数幅值约降到**0.707倍**，相角**超前45°**；  
当  $f=f_H$  时放大倍数幅值也约降到**0.707倍**，相角**滞后45°**。

- ③ 截止频率决定于电容所在回路的时间常数

$$f_{L(H)} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

- ④ 频率响应有幅频特性和相频特性两条曲线。

### 4.1.3 波特图

波特图由对数幅频特性和对数相频特性组成

高通电路的对数幅频特性：

$$|\dot{A}_u| = \frac{\frac{f}{f_L}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_L}\right)^2}}$$



$$20 \lg |\dot{A}_u| = 20 \lg \frac{f}{f_L} - 20 \lg \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_L}\right)^2}$$

低通电路的对数幅频特性：

$$|\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2}}$$

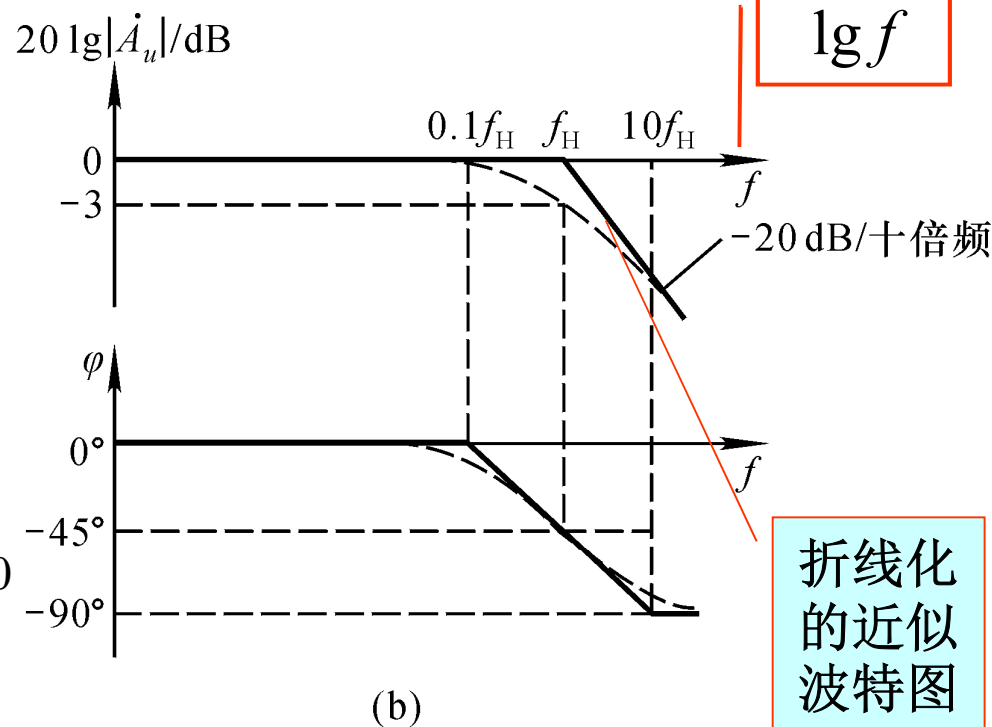
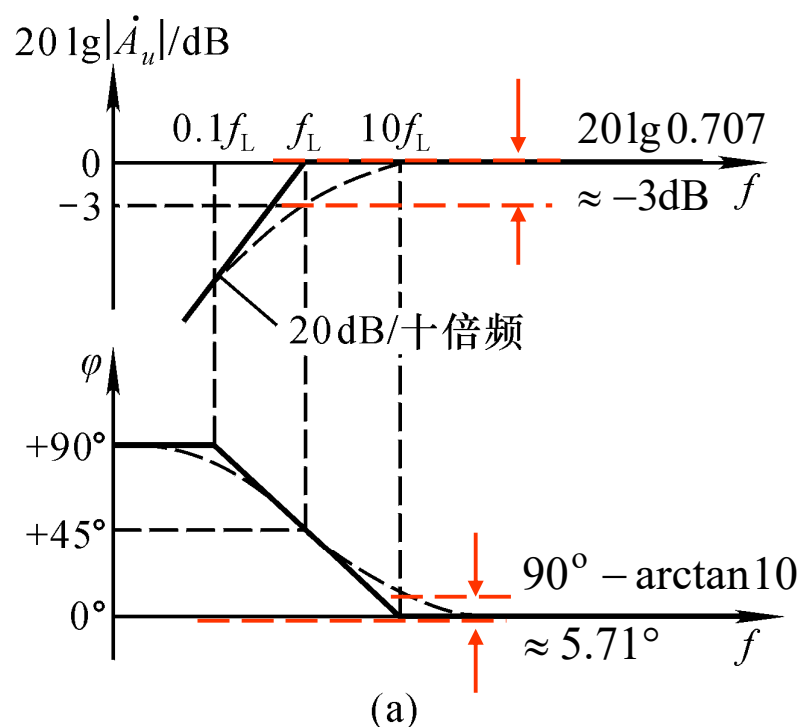


$$20 \lg |\dot{A}_u| = -20 \lg \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2}$$

## 4.1 频率响应概述

$$20 \lg |\dot{A}_u| = 20 \lg \frac{f}{f_L} - 20 \lg \sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_L} \right)^2}$$

$$20 \lg |\dot{A}_u| = -20 \lg \sqrt{1 + \left( \frac{f}{f_H} \right)^2}$$



高通电路与低通电路的波特图

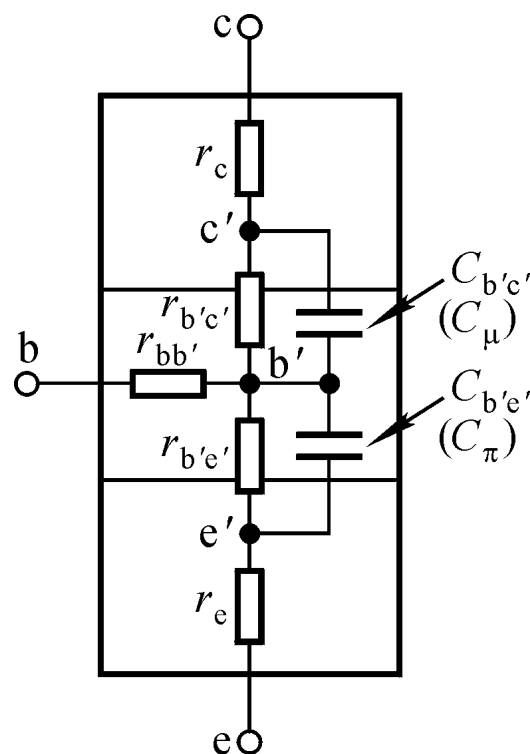
采用对数坐标系，横轴为 $\lg f$ ，可开阔视野；纵轴为 $20 \lg |\dot{A}_u|$ ，单位为“分贝”（dB），使得“ $\times$ ” $\rightarrow$ “ $+$ ”



## 4.2 晶体管的高频等效电路

### 4.2.1 晶体管的混合 $\pi$ 模型

晶体管的结构：由体电阻、结电阻、结电容组成。



$r_{bb'}$ : 基区体电阻

$r_{b'e'}$ : 发射结电阻

$C_{\pi}$ : 发射结电容

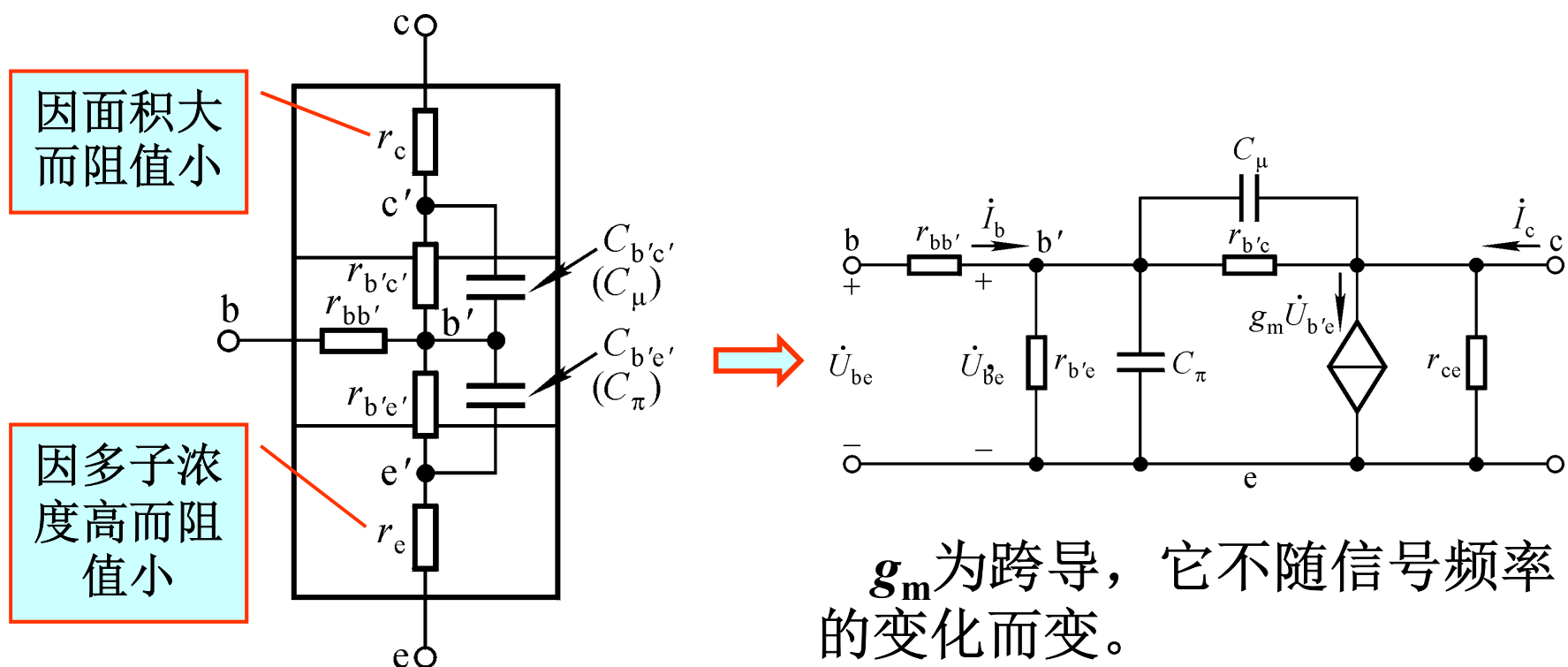
$r_e$ : 发射区体电阻

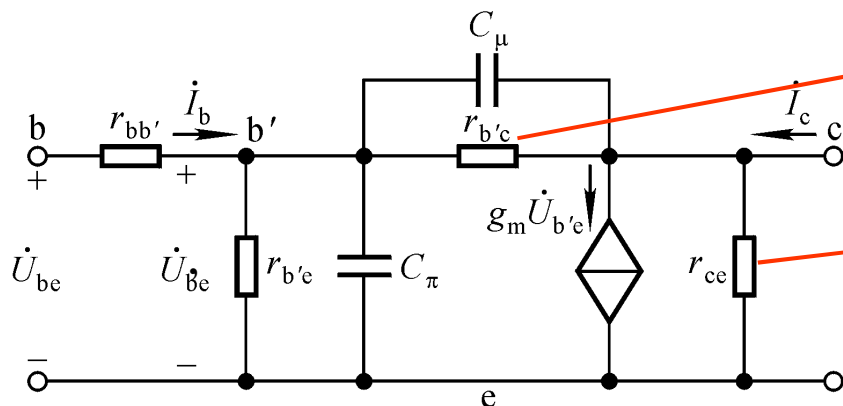
$r_{b'c'}$ : 集电结电阻

$C_{\mu}$ : 集电结电容

$r_c$ : 集电区体电阻

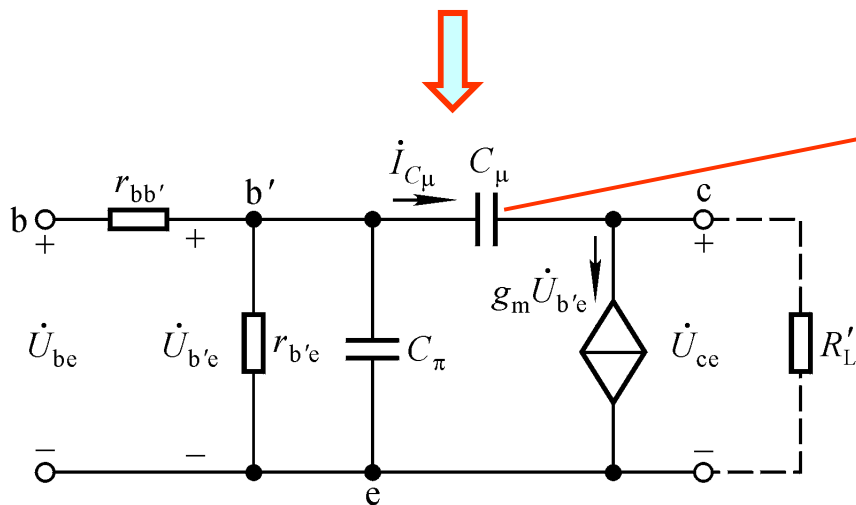
混合  $\pi$  模型：忽略小电阻，考虑集电极电流的受控关系



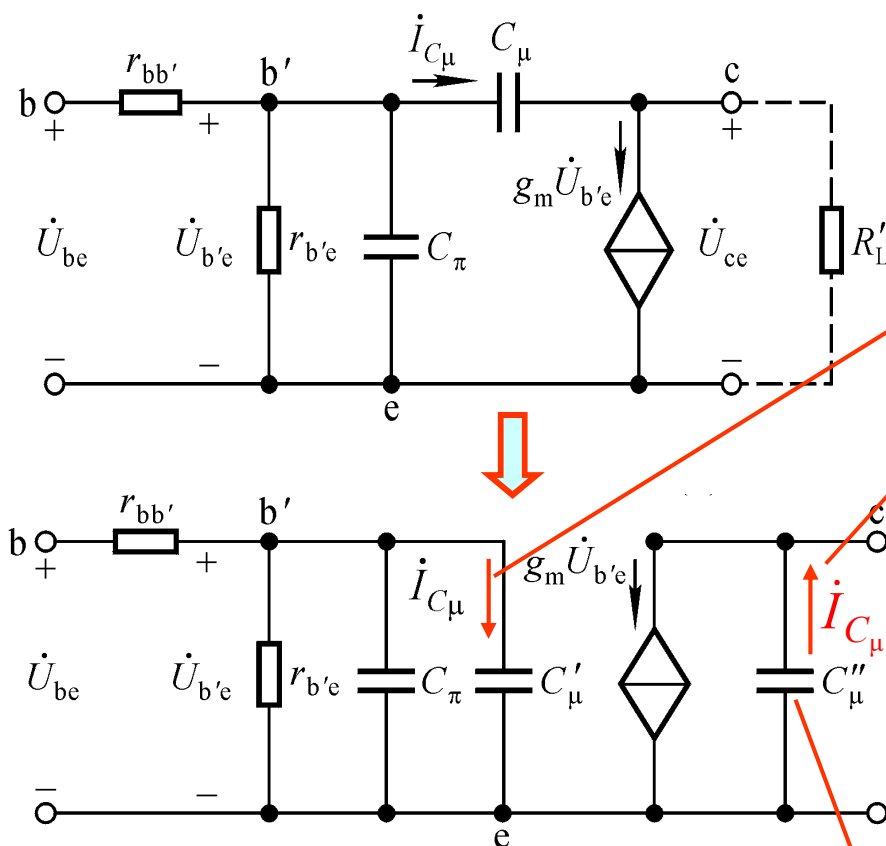
简化的混合  $\pi$  模型：忽略大电阻的分流

因在放大区承受反向电压而阻值大

因在放大区  $i_c$  几乎仅决定于  $i_B$  而阻值大



$C_\mu$  跨接在输入回路和输出回路之间，使电路的分析复杂化。

单向化后的混合 $\pi$ 模型

$$I_{C_\mu} = \frac{\dot{U}_{b'e} - \dot{U}_{ce}}{Z_{C_\mu}} = (1 - \dot{K}) \frac{\dot{U}_{b'e}}{Z_{C_\mu}}$$

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}} \text{ 即电压放大倍数}$$

等效变换后电流不变

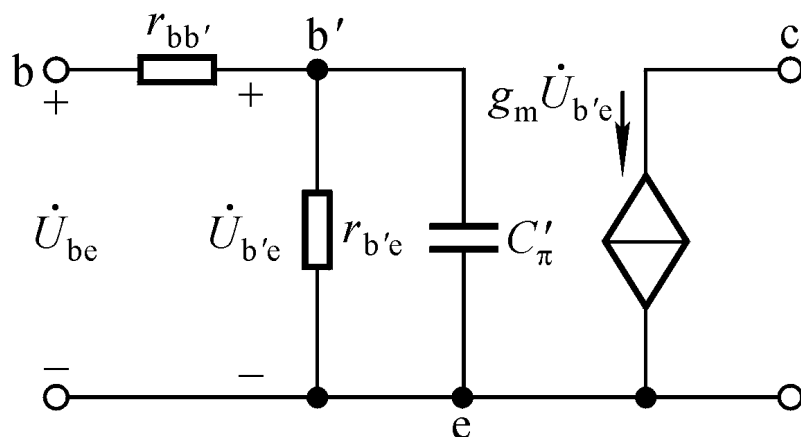
$$Z_{C'_\mu} = \frac{\dot{U}_{b'e}}{I_{C_\mu}} = \frac{Z_{C_\mu}}{1 - \dot{K}}$$

$$C'_\mu = (1 - \dot{K}) C_\mu$$

$$\text{同理可得, } C''_\mu = \frac{\dot{K} - 1}{\dot{K}} \cdot C_\mu$$

$$C'_\pi = C_\pi + C'_\mu = C_\pi + (1 - \dot{K}) C_\mu$$

容抗远大于  
负载电阻

简化的晶体管高频等效模型（混合 $\pi$ 模型）

$r_{bb'}$  可从手册查得

$$r_{b'e} = (1 + \beta_0) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

$$C_{\pi}' = C_{\pi} + (1 - \dot{K}) C_{\mu}$$

$C_{\pi}'$  称为极间电容

低频段电流放大系数

$$\beta_0 \dot{I}_b = g_m \dot{U}_{b'e} = g_m \dot{I}_b r_{b'e}$$

$$g_m = \frac{\beta_0}{r_{b'e}} \approx \frac{I_{EQ}}{U_T}$$

$C_{\mu} \approx C_{ob}$  可从手册查得

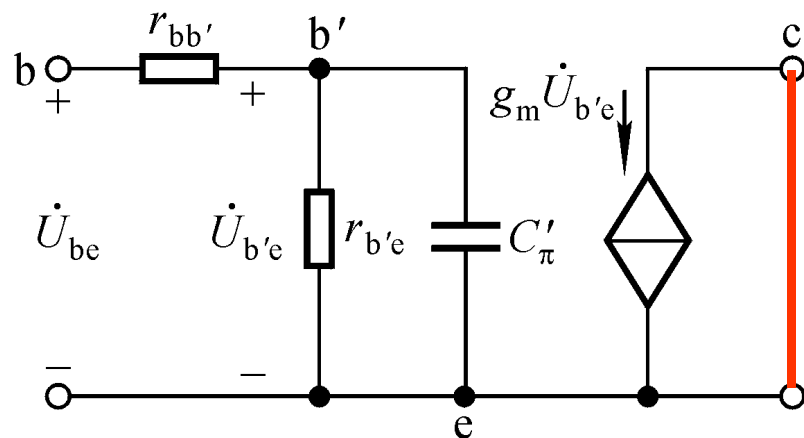
$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}} \text{ 即电压放大倍数}$$

混合  $\pi$  模型与第二章中的  $h$  参数等效模型  
在低频信号作用下具有一致性

## 4.2.2 晶体管电流放大系数的频率响应

$$\dot{\beta} = \left. \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} \right|_{U_{CE}}$$

表明此时c-e间无动态电压，  
即  $\dot{K} = 0$ ，所以  $C'_\pi = C_\pi + C_\mu$



$$\text{共射截止频率 } f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e} (C_\pi + C_\mu)}$$

可从手册查得

由这个公式可求得

$$\begin{aligned} \dot{\beta} &= \frac{g_m \dot{U}_{b'e}}{\dot{U}_{b'e} \left[ \frac{1}{r_{b'e}} + j\omega (C_\pi + C_\mu) \right]} \\ &= \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}} \\ g_m &= \frac{\beta_0}{r_{b'e}} \end{aligned}$$

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}}$$

电流放大系数随频率而变化

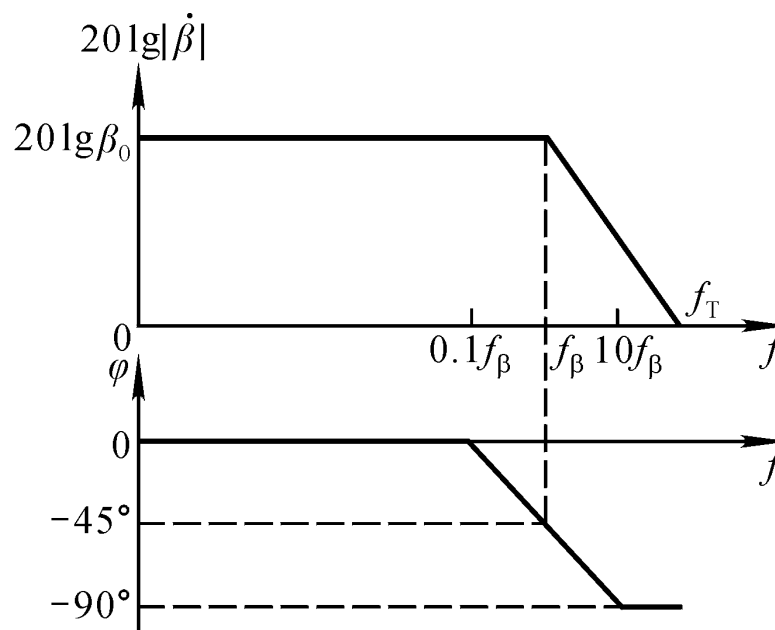
共射截止频率

共基截止频率

$f_\beta$ 、 $f_\alpha$ 、 $f_T$

特征频率

$\dot{\beta}$  的波特图

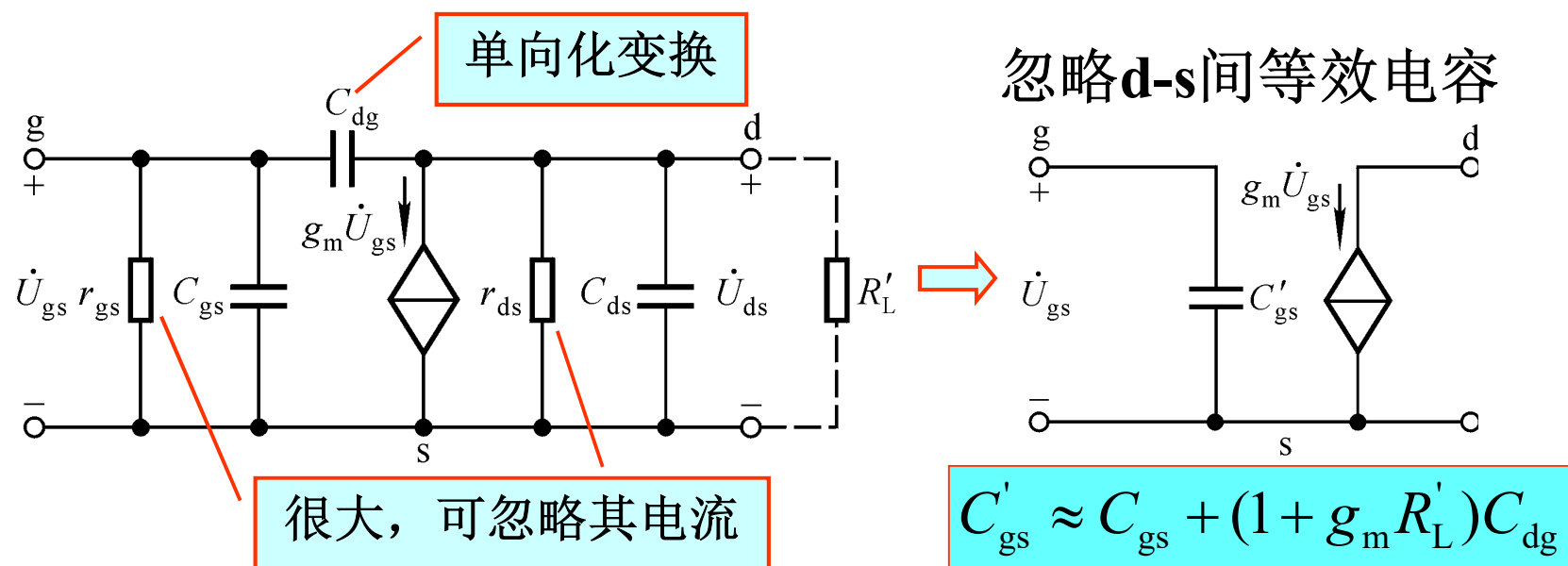


使 $|\dot{\beta}| = 1$ 时的频率为 $f_T$   
 $f_T \approx f_\alpha \approx \beta_0 f_\beta$

说明共基电路比共射电路频带宽很多

## 4.3 场效应管的高频等效电路

可与晶体管高频等效电流类比，简化、单向化变换。

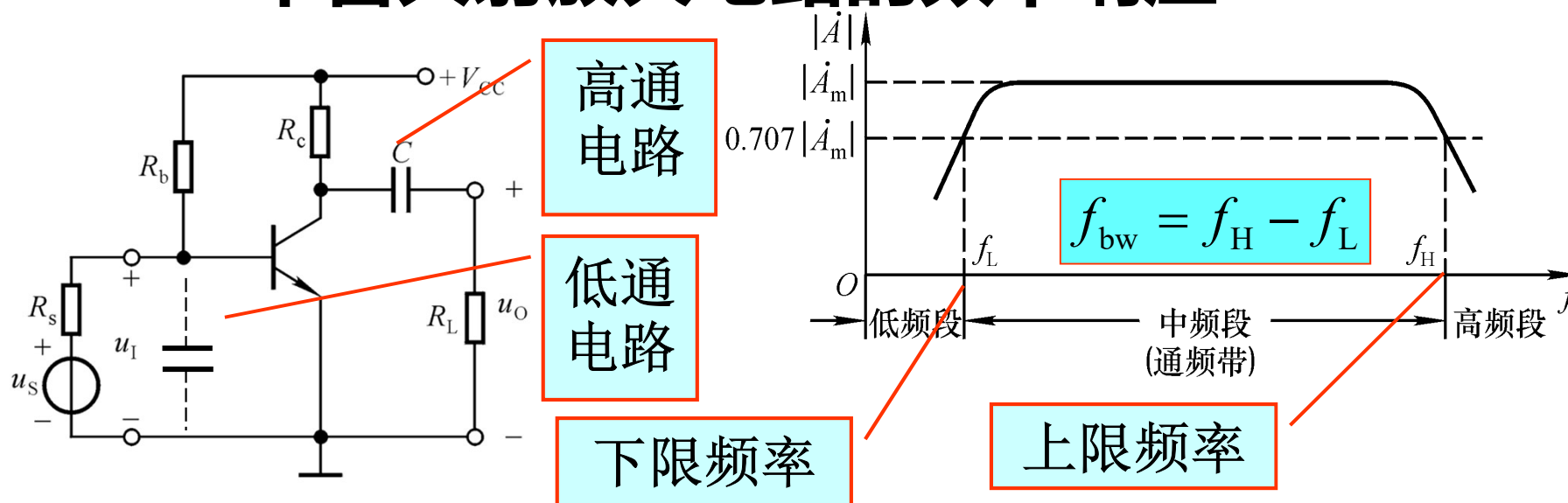


极间电容	$C_{gs}$	$C_{gd}$	$C_{ds}$
数值/pF	1~10	1~10	0.1~1



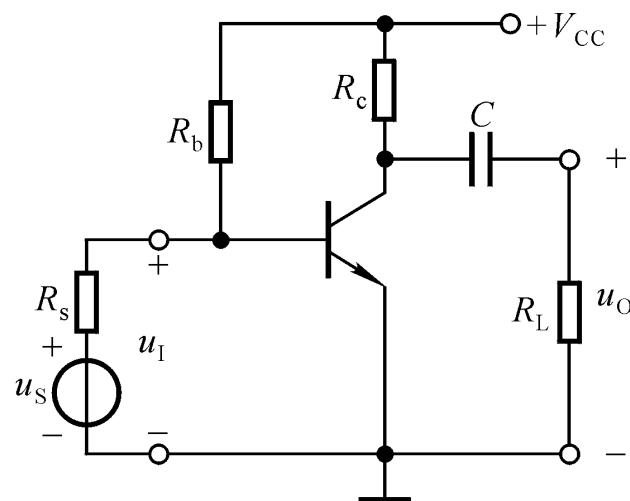
## 4.4 单管放大电路的频率响应

### 4.4.1 单管共射放大电路的频率响应

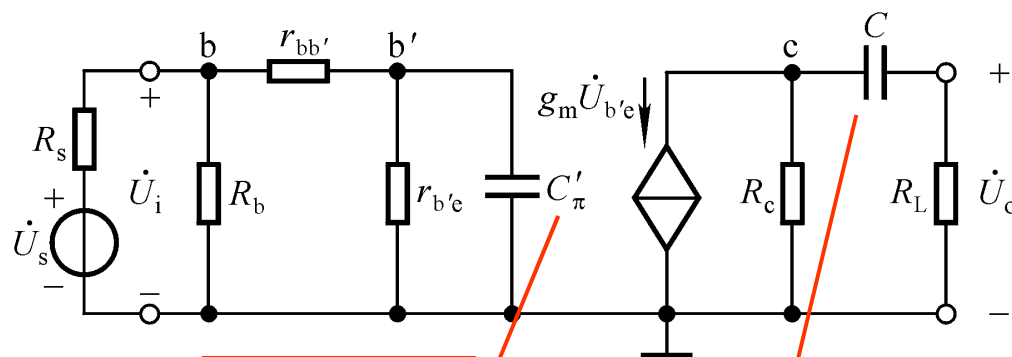


在低频段，随着信号频率逐渐降低，耦合电容、旁路电容等的容抗增大，使动态信号损失，放大能力下降。

在高频段，随着信号频率逐渐升高，晶体管极间电容和分布电容、寄生电容等杂散电容的容抗减小，使动态信号损失，放大能力下降。



适用于信号频率从 $0 \sim \infty$ 的交流等效电路(即全频交流等效电路)



极间电容

耦合电容 $C$ (或代表旁路电容)

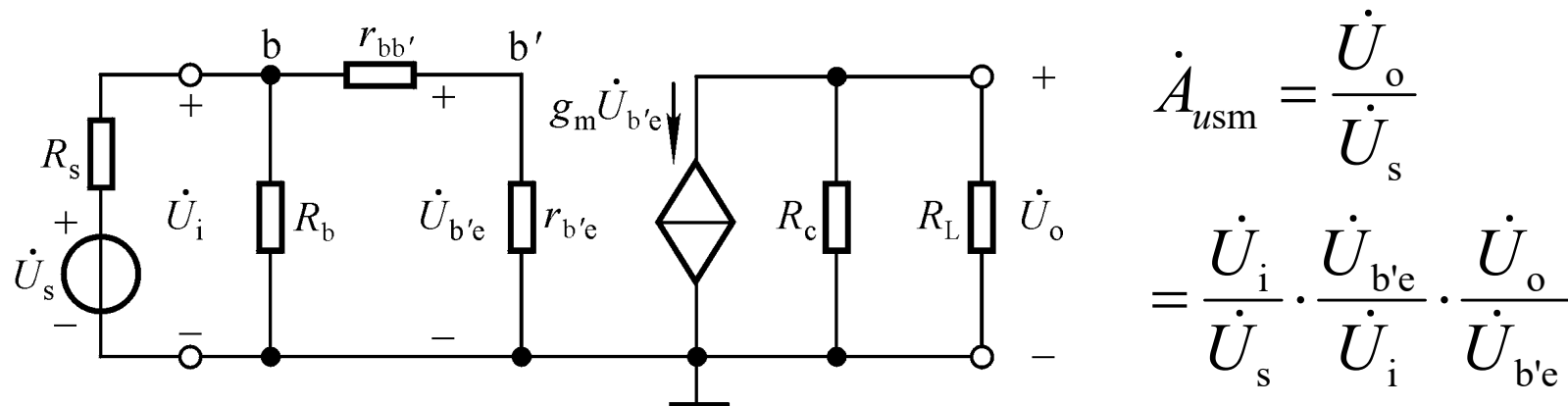
### 例4.4.1(1)(2)

中频段:  $C$  短路,  $C'_\pi$  开路。

低频段: 考虑 $C$  的影响,  $C'_\pi$  开路。

高频段: 考虑  $C'_\pi$  的影响,  $C$  短路。

## 1. 中频电压放大倍数（如第2章所述）



带负载时：

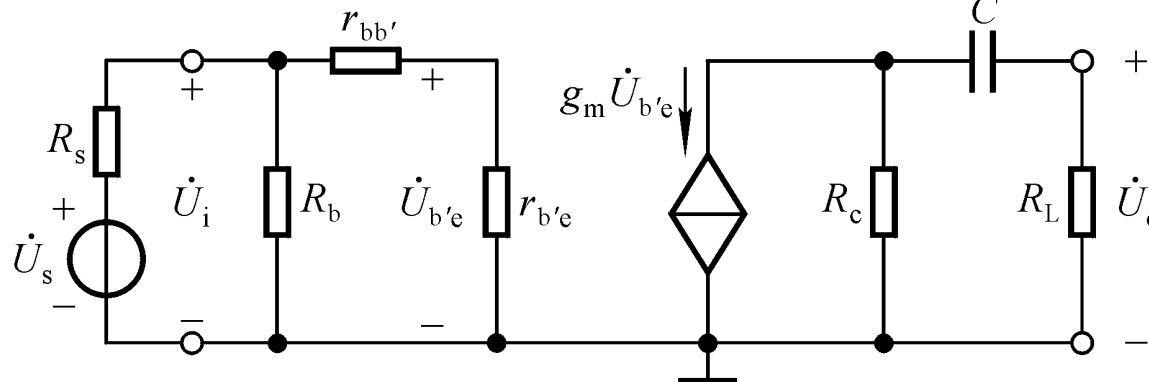
$$\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot [-g_m (R_c // R_L)]$$

空载时：

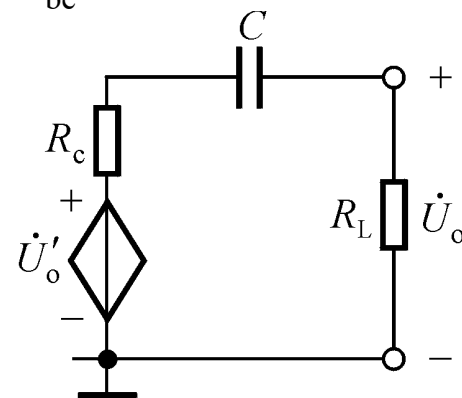
$$\dot{A}_{usmo} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot (-g_m R_c)$$

## 2. 低频电压放大倍数

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



(a)



(b)

$$\dot{A}_{usl} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}'_o}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}'_o} = \dot{A}_{usmo} \cdot \frac{R_L}{R_c + \frac{1}{j\omega C} + R_L}$$

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

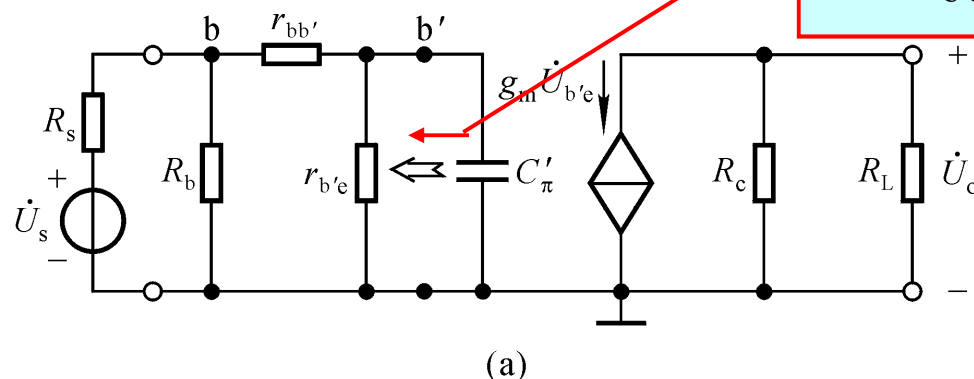
$$\dot{A}_{usl} = \dot{A}_{usm} \frac{jf/f_L}{1 + jf/f_L} \quad f_L = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C}$$

低频时相当于高通电路

# 4.4 单管放大电路的频率响应

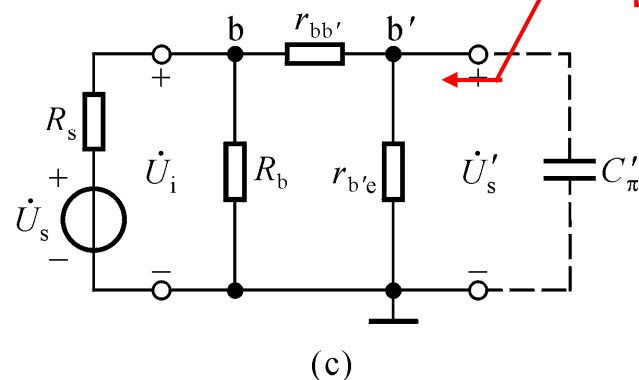
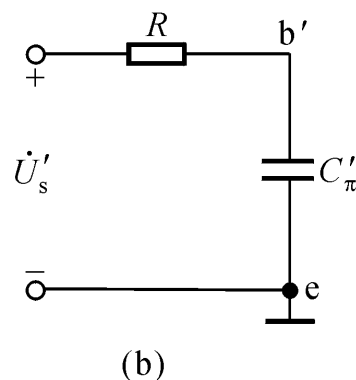
## 3. 高频电压放大倍数

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



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

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

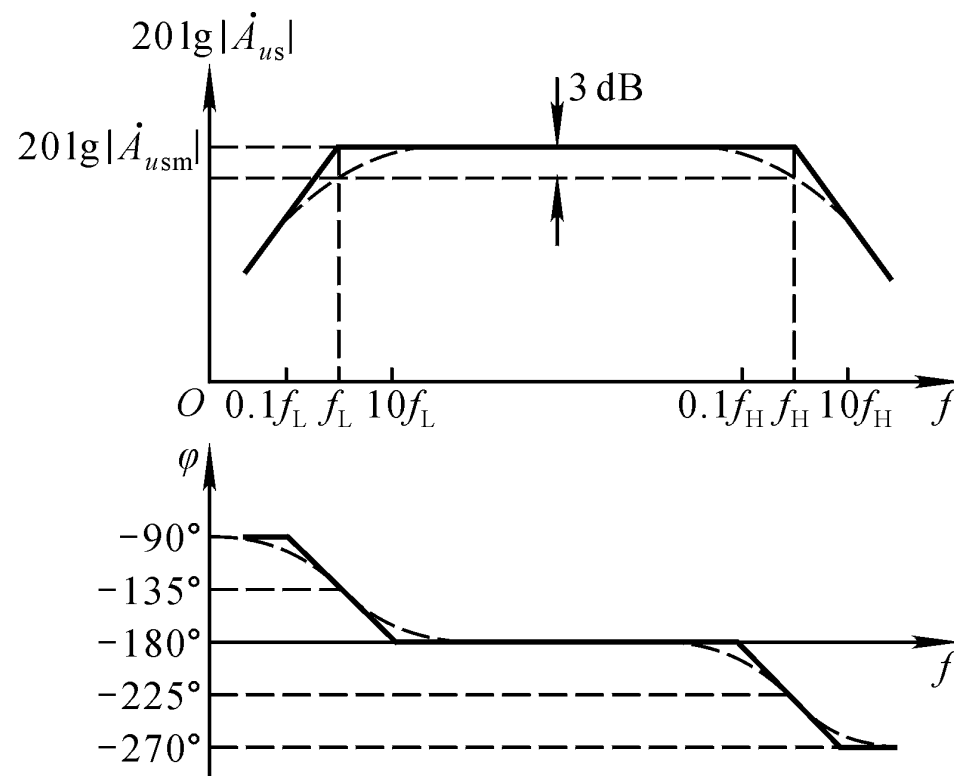


$$\begin{aligned} \dot{A}_{ush} &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}'_s}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}'_s} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{b'e}} \\ &= \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{j\omega RC'_\pi}{1 + \frac{1}{j\omega RC'_\pi}} \cdot (-g_m R'_L) \end{aligned}$$

$$\dot{A}_{ush} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{A}_{usm}}{1 + j \frac{f}{f_H}} \quad f_H = \frac{1}{2\pi RC'_\pi} = \frac{1}{2\pi [r_{b'e} // (r_{bb'} + R_b // R_s)] C'_\pi}$$

高频时相当于低通电路

## 4. 电压放大倍数的波特图



全频段放大倍数表达式：

$$\begin{aligned}\dot{A}_{us} &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \\ &= \frac{\dot{A}_{usm}(j\frac{f}{f_L})}{(1+j\frac{f}{f_L})(1+j\frac{f}{f_H})} \\ &= \frac{\dot{A}_{usm}}{(1+\frac{f_L}{jf})(1+j\frac{f}{f_H})}\end{aligned}$$

截止频率决定于电容所在回路的时间常数

$$f_{L(H)} = \frac{1}{2\pi\tau}$$

**例4.4.1(3)(4)(5)**

## 4.4.2 放大电路频率响应的改善和增益带宽积

### 1. 放大电路频率响应的改善

$$\dot{A}_{usl} = \dot{A}_{usm} \frac{jf/f_L}{1 + jf/f_L} \quad f_L = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C}$$

$$\dot{A}_{ush} = \frac{\dot{A}_{usm}}{1 + j\frac{f}{f_H}}$$
$$f_H = \frac{1}{2\pi[r_{be} // (r_{bb'} + R_b // R_s)]C_\pi'}$$

为了改善单管放大电路的低频特性，需加大耦合电容及其回路电阻，从而降低下限频率。然而这种改善是有限的，因此在信号频率很低的情况下，应采用直接耦合方式。

为了改善单管放大电路的高频特性，需减小极间电容及其回路电阻，从而增大上限频率。

## 2. 带宽增益积

$$\dot{A}_{usm} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot [-g_m (R_c // R_L)] \quad f_H = \frac{1}{2\pi [r_{b'e} // (r_{bb'} + R_b // R_s)] C_\pi'}$$

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

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

$$\begin{cases} g_m R_L' \uparrow \rightarrow C_\pi' \uparrow \rightarrow f_H \downarrow \\ g_m R_L' \uparrow \rightarrow |\dot{A}_{usm}| \uparrow \end{cases} \rightarrow \text{矛盾}$$

当提高增益时，  
带宽将变窄；反  
之，增益降低，  
带宽将变宽。

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

设  $r_{be} \ll R_b$ ，则  $R_i \approx r_{be}$ ；设  $R_s \ll R_b$ ，则  $R_b // R_s \approx R_s$ ；  
设  $(1 + g_m R_L') C_\mu \gg C_\pi$ ，且  $g_m R_L' \gg 1$ ，则  $C_\pi' \approx g_m R_L' C_\mu$ 。则可证明：

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



约为常量

$$\left| \dot{A}_{usm} f_{bw} \right| \approx \frac{1}{2\pi(r_{bb'} + R_s)C_{\mu}}$$

说明决定于管子参数

当晶体管选定后，增益带宽积也就大体确定，即增益提高多少倍，带宽就变窄多少倍。

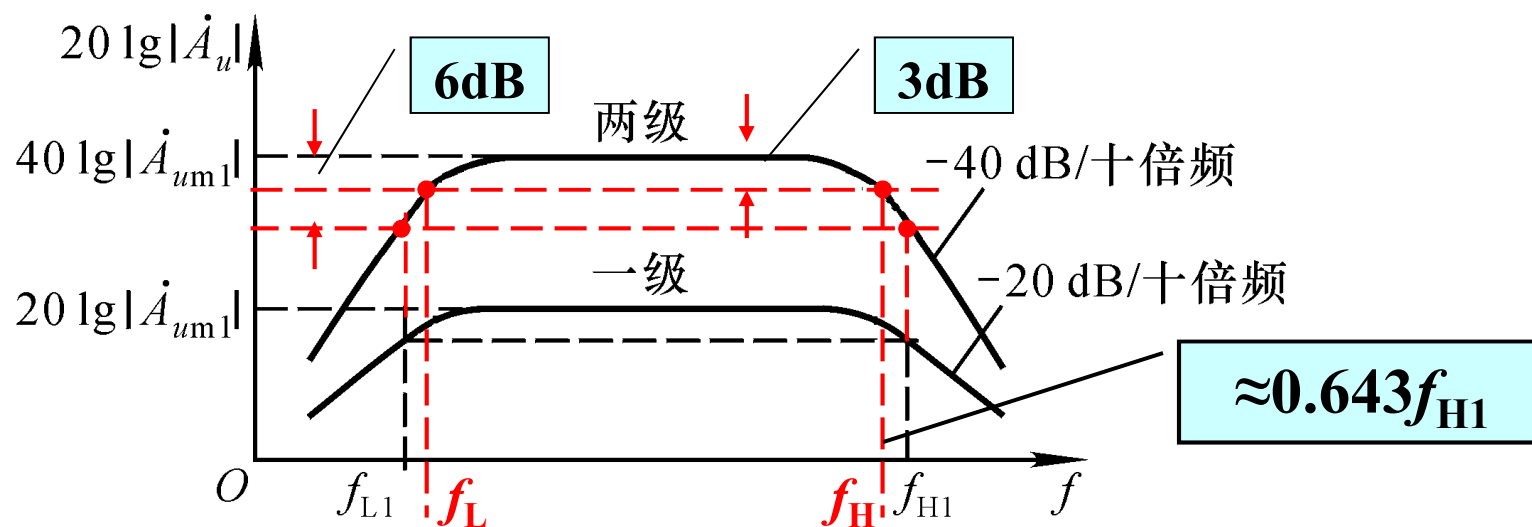
为了改善电路的高频特性，展宽通频带，首先应选用  $r_{bb'}$  和  $C_{ob}$  (即  $C_{\mu}$ ) 均小的高频管，同时还要尽量减小极间电容所在回路的等效电阻，还可考虑采用共基电路。

## 4.5 多级放大电路的频率响应

### 4.5.1 定性分析

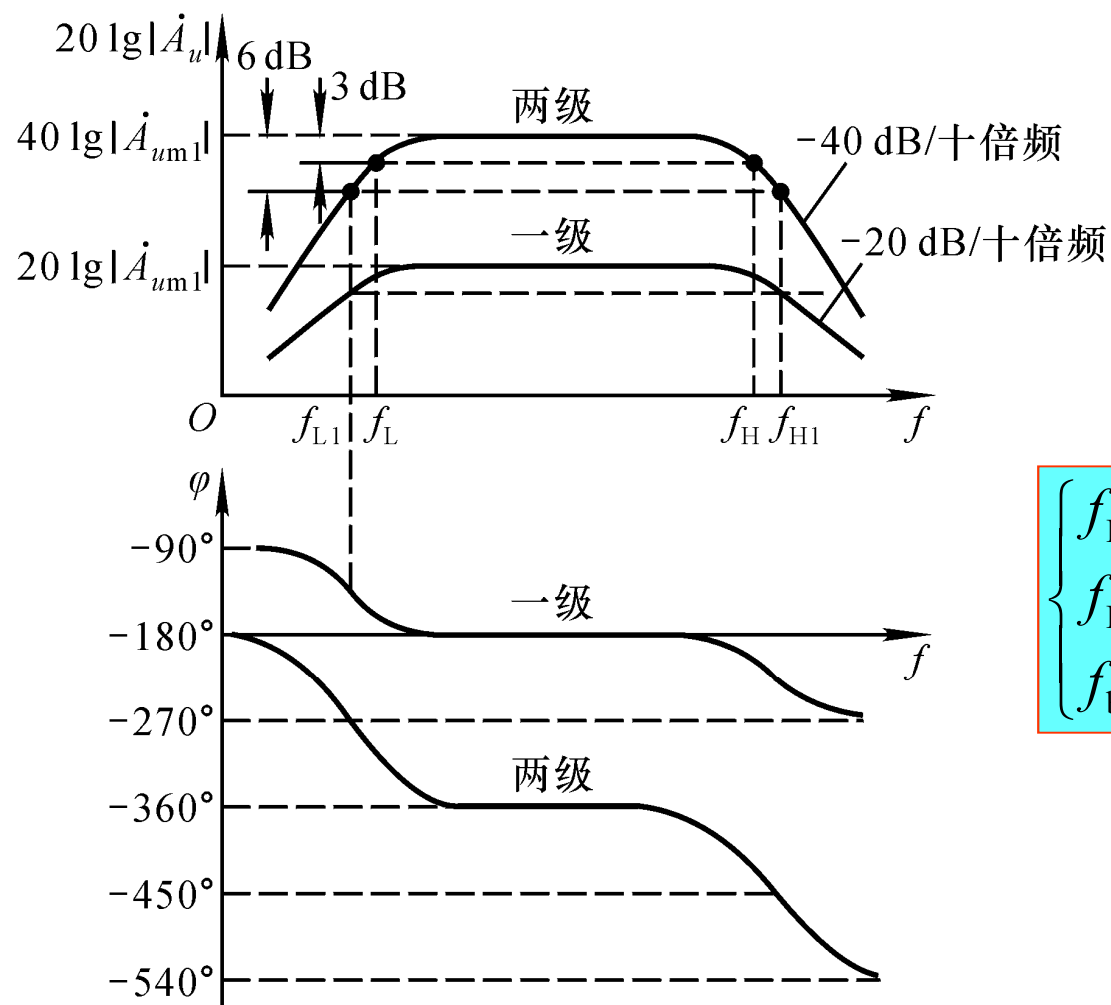
设一个两级放大电路中的每一级具有相同的频率响应，均如图所示。

$$20\lg|\dot{A}_u| = 20\lg|\dot{A}_{u1}| + 20\lg|\dot{A}_{u2}| = 40\lg|\dot{A}_{u1}|$$



$f_L > f_{L1}$ ,  $f_H < f_{H1}$ , 频带变窄!

## 两级放大电路的波特图



对于 $N$ 级放大电路，若各级的下、上限频率分别为 $f_{L1} \sim f_{LN}$ 、 $f_{H1} \sim f_{HN}$ ，整个电路的下、上限频率分别为 $f_L$ 、 $f_H$ ，则

$$\begin{cases} f_L > f_{Lk} \\ f_H < f_{Hk} \\ f_{bw} < f_{bwk} \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, N)$$

## 4.5.2 截止频率的估算

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

求解使增益下降3dB的频率，经修正，可得

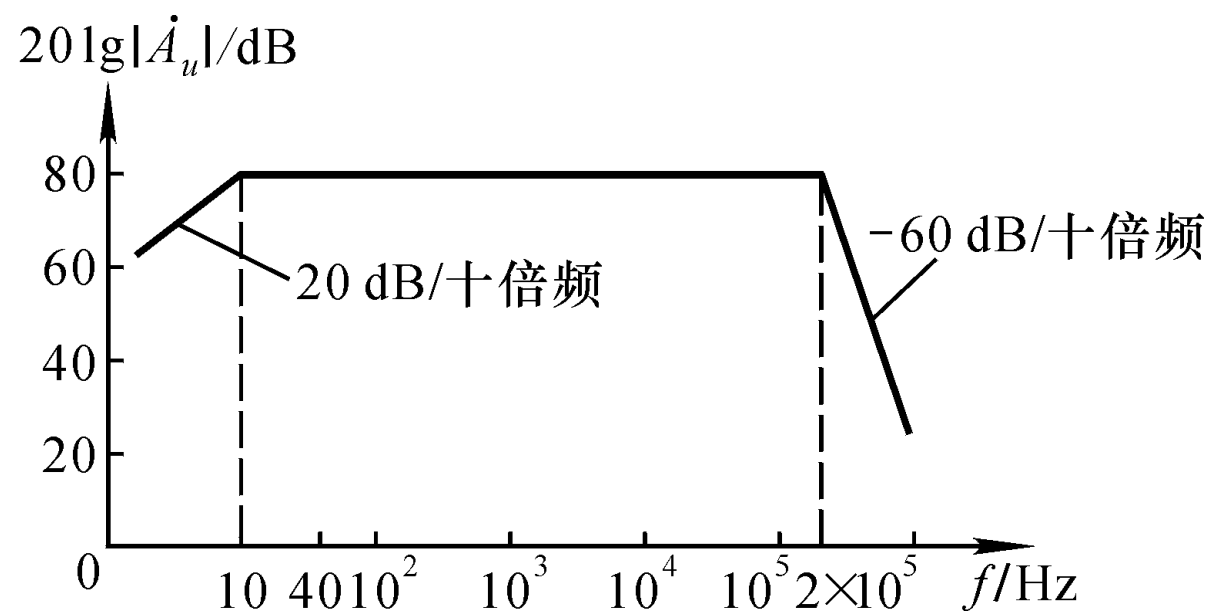
$$f_L \approx 1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^N f_{Lk}^2} \quad \frac{1}{f_H} \approx 1.1 \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{1}{f_{Hk}^2}} \quad 1.1 \text{为修正系数}$$

若**两级**放大电路是由两个具有相同频率特性的单管放大电路组成，  
则其 **$f_H \approx 0.643 f_{H1}$** ， **$f_L \approx 1.56 f_{L1}$** ；

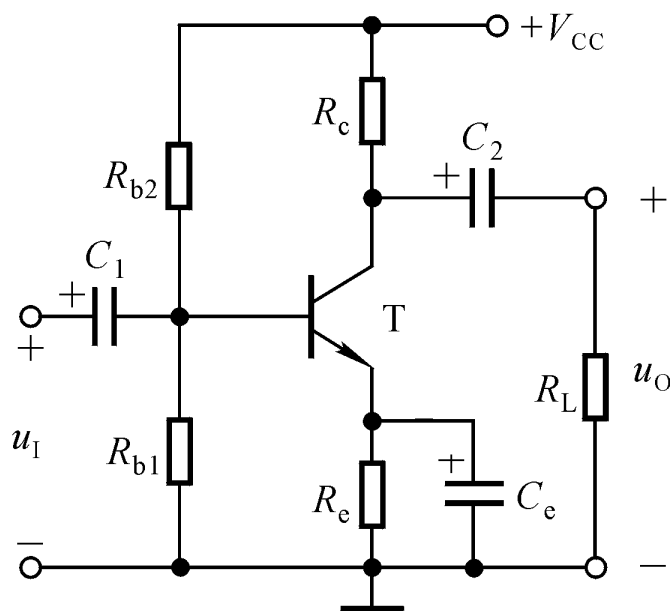
若**三级**放大电路是由三个具有相同频率特性的单管放大电路组成，  
则其 **$f_H \approx 0.52 f_{H1}$** ， **$f_L \approx 1.91 f_{L1}$** ；

在多级放大电路中，若某级的下限频率**远高于**其它各级的下限频率，则整个电路的下限频率**近似为该级的下限频率**；同理，若某级的上限频率**远低于**其它各级的上限频率，则整个电路的上限频率**近似为该级的上限频率**。

## 例4.5.1

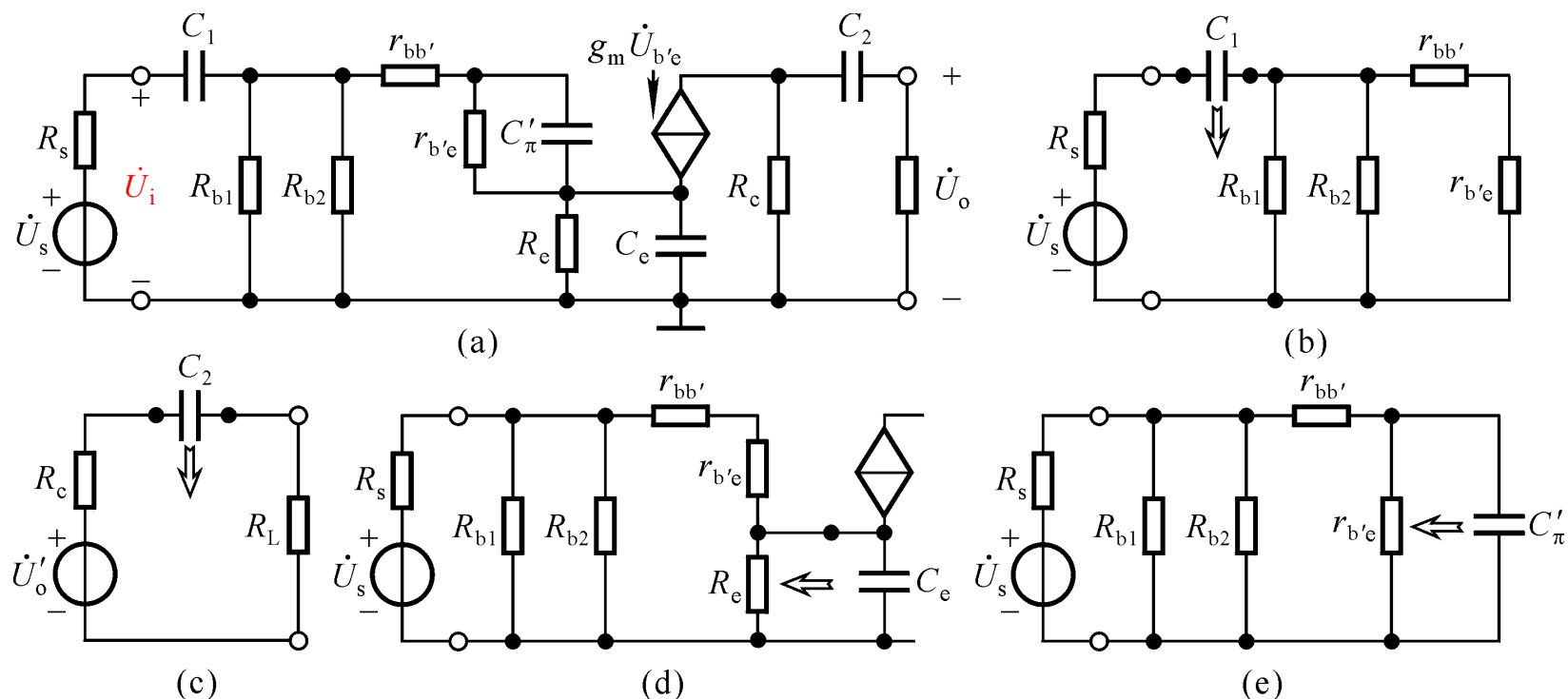


## 例4.5.2



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，则下限频率等于多少？

## 4.5 多级放大电路的频率响应



### 时间常数分析(低频)

$C_2$ 、 $C_e$ 短路,  $C_{\pi}'$ 开路, 求出

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

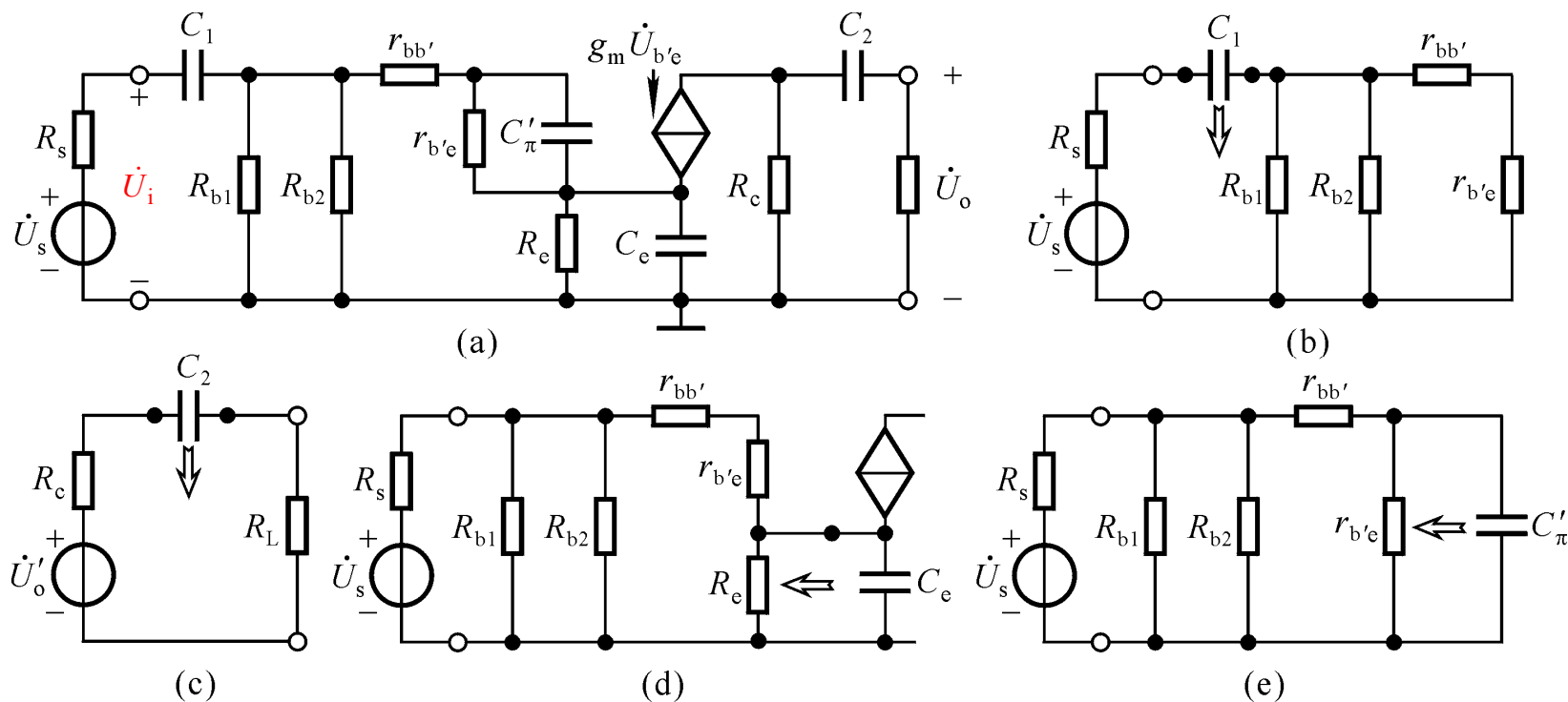
$C_1$ 、 $C_e$ 短路,  $C_{\pi}'$ 开路, 求出

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

$C_1$ 、 $C_2$ 短路,  $C_{\pi}'$ 开路, 求出

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

## 4.5 多级放大电路的频率响应



### 时间常数分析(高频)

$C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_e$ 短路，求出

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



## 电压放大倍数分析

$$\because C_1 = C_2 = C_e$$

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

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

$$\tau_e = \left( R_e // \frac{r_{be} + R_s // R_{b1} // R_{b2}}{1 + \beta} \right) C_e$$

很小!

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

$$f_{L1} = 1/(2\pi\tau_1)$$

$$f_{L2} = 1/(2\pi\tau_2)$$

$$f_{Le} = 1/(2\pi\tau_e)$$

$$f_H = 1/(2\pi\tau_{C_\pi'})$$

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{um} \cdot \frac{j^3 f^3 / f_{L1} f_{L2} f_{Le}}{(1 + jf/f_{L1})(1 + jf/f_{L2})(1 + jf/f_{Le})(1 + jf/f_H)}$$

$$\therefore f_L \approx f_{Le}$$

为了改善电路的低频特性， $C_e$ 应远大于  $C_1$ 、 $C_2$ 。  
当  $f_{L1}$ 、 $f_{L2}$  和  $f_{Le}$  相差不大时，可用公式求  $f_L$ 。

# 第 4 章

# 结 束