清華大學
Tsinghua University

第四章
放大电路的频率响应

§4.1 频率响应的有关概念

§4.2 晶体管的高频等效电路

§4.3 放大电路的频率响应

§4.1 频率响应的有关概念

一、本章要研究的问题

二、高通电路和低通电路

三、放大电路中的频率参数

四、波特图

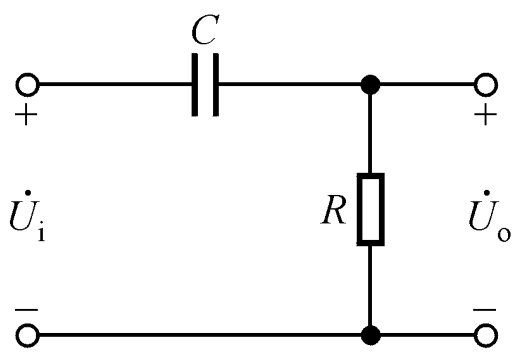
一、研究的问题

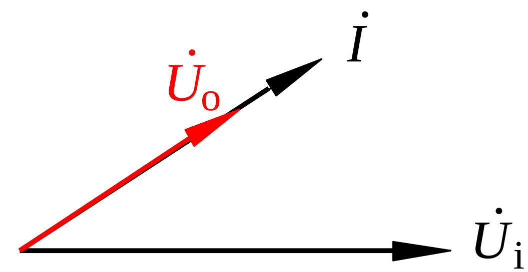
- 信号频率对放大电路动态参数(放大倍数)的影响
  - 耦合电容、旁路电容、半导体器件极间电容的影响
  - 放大倍数为频率的函数
- 实用放大电路的频率要求
  - 使用放大电路时，应了解其信号频率的适用范围
  - 设计放大电路时，应满足信号频率的范围要求

二、高通电路和低通电路

（1）高通电路

- **幅值&相位 (定性)：** 信号频率越高，输出电压越接近输入电压信号；频率越低，输出电压幅值趋于0，相位趋于-90°

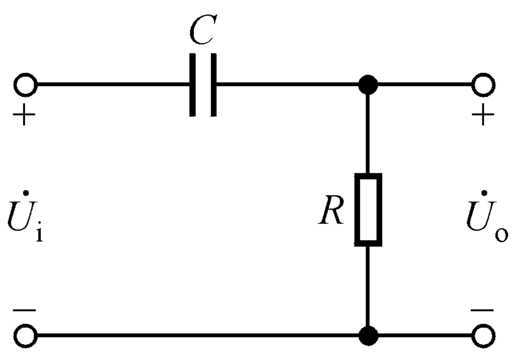




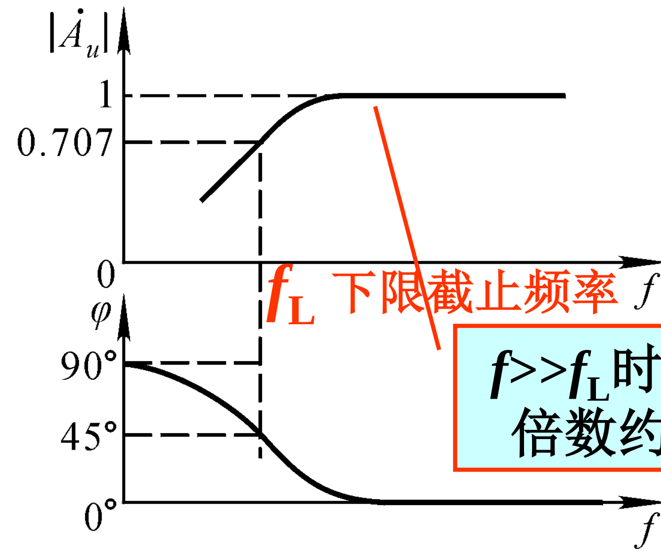
$\dot U_o$超前$\dot U_i$，$f \to 0$，$\left|\dot U_o\right| \to 0$，$\dot U_o$超前$\dot U_i$ 90°。

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

□ 幅值&相位 (定量) ——幅频&相频特性



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



$f >> f_L$时放大倍数约为1

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

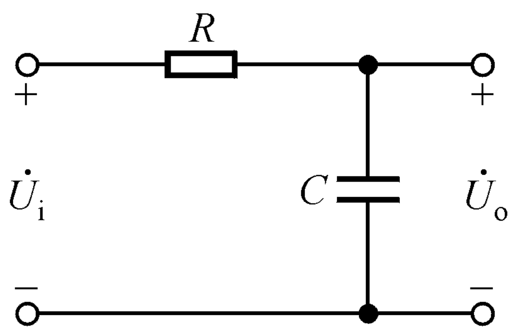
⇨

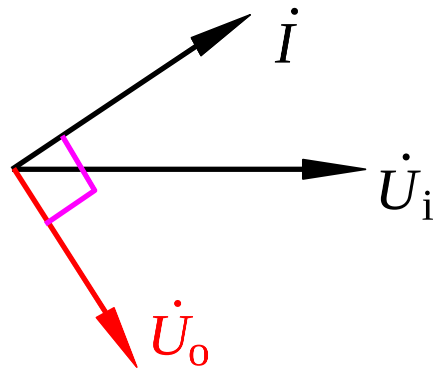
$$\begin{cases} |\dot{A}_u| = \dfrac{f / f_L}{\sqrt{1 + (f / f_L)^2}} \\ \varphi = 90° - \arctan(f / f_L) \end{cases}$$

低频段放大倍数表达式的特点？下限截止频率的特征？

（2）低通电路

- **幅值&相位 (定性)：** 信号频率越低，输出电压越接近输入电压信号； 频率越高，输出电压幅值趋于0，相位趋于90°

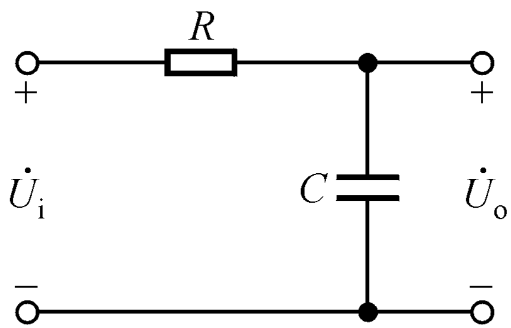




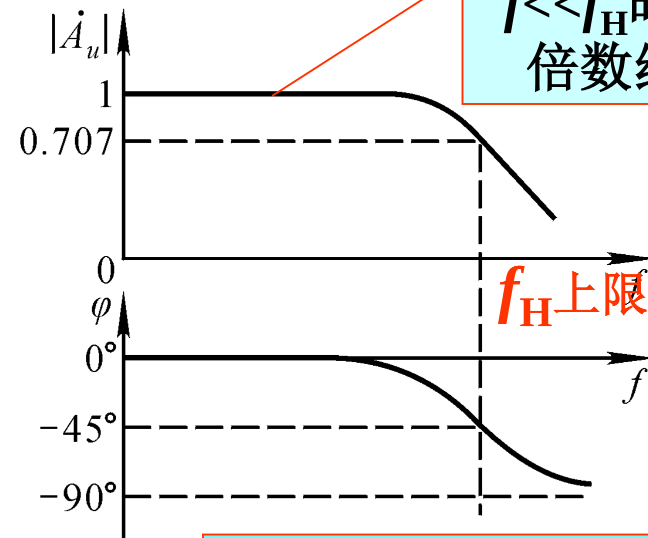
$$\dot{U}_\mathrm{o}\text{落后}\dot{U}_\mathrm{i},\ f\to\infty\ ,\left|\dot{U}_\mathrm{o}\right|\to 0,\ \dot{U}_\mathrm{o}\text{落后}\dot{U}_\mathrm{i}\,90°\text{。}$$

$$\dot{A}_u=\frac{\dot{U}_\mathrm{o}}{\dot{U}_\mathrm{i}}=\frac{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C}}{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C}+R}=\frac{1}{1+\mathrm{j}\omega RC}$$

◻ 幅值&相位 (定量) ——幅频&相频特性



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



f<<f_H时放大倍数约为1

f_H上限截止频率

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

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

高频段放大倍数表达式的特点？上限截止频率的特征？

（3）几点结论

① 电路低频段的放大倍数需乘因子 $\dfrac{\mathrm{j}f/f_{\mathrm{L}}}{1+\mathrm{j}f/f_{\mathrm{L}}}$

电路高频段的放大倍数需乘因子 $\dfrac{1}{1+\mathrm{j}f/f_{\mathrm{H}}}$

② 当 $f=f_{\mathrm{L}}$时放大倍数幅值约降到**0.707倍**，相角**超前45°**

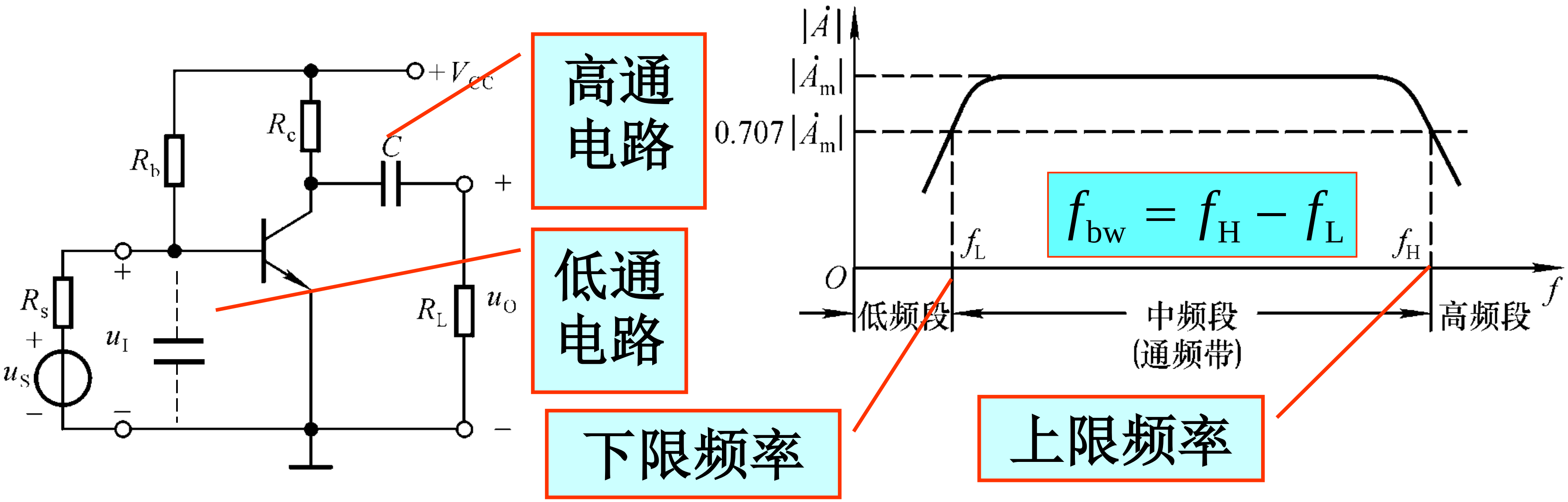
当 $f=f_{\mathrm{H}}$时放大倍数幅值也约降到**0.707倍**，相角**滞后45°**

③ 截止频率决定于电容所在回路的时间常数

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

④ 频率响应有幅频特性和相频特性两条曲线

三、放大电路中的频率参数



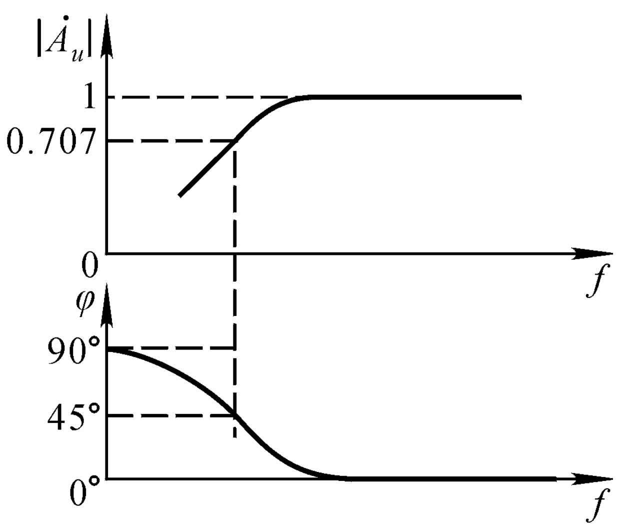
§ 在低频段，随着信号频率逐渐降低，耦合电容、旁路电容等的容抗增大，使动态信号损失，放大能力下降

§ 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

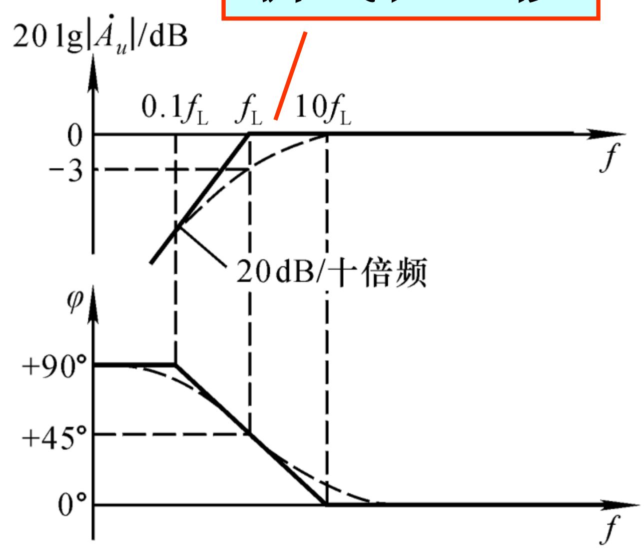
四、波特图

- 作用
  - 利用有限的坐标系表示宽范围的变化量
  - 将变化量的乘除运算转换为加减运算
- 坐标
  - 横轴：$\lg f$；纵轴：$20\lg\left|\dot{A}_u\right|$ (单位：分贝/dB)，φ
- 以高通电路为例

$$\begin{cases} 20\lg\left|\dot{A}_u\right| = -10\lg\left(1+\left(f_L/f\right)^2\right) \\ \varphi = 90^\circ - \arctan\left(f/f_L\right) \end{cases}$$



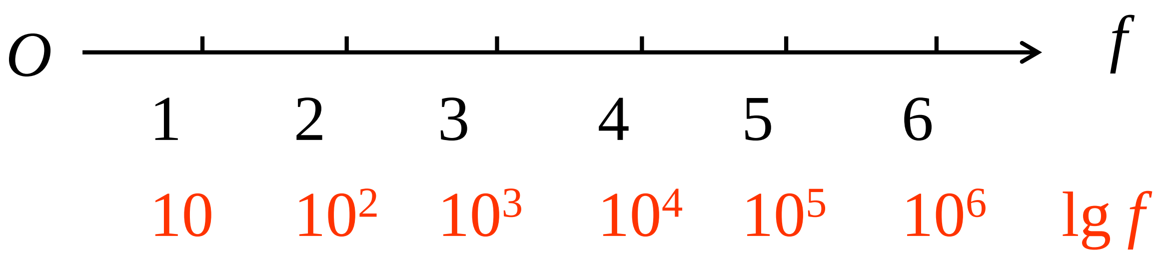
折线化近似



讨论一

1. 若干个放大电路的放大倍数分别为1、10、10^2、10^3、10^4、10^5，它们的增益分别为多少？

2. 为什么波特图开阔了视野？同样长度的横轴，在单位长度不变的情况下，采用对数坐标后，最高频率是原来的多少倍？



§ 4.2 晶体管的高频等效电路

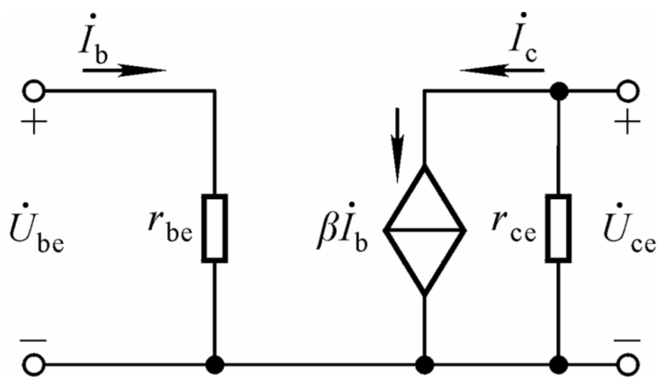
一、混合π模型

二、电流放大倍数的频率响应

三、晶体管的频率参数

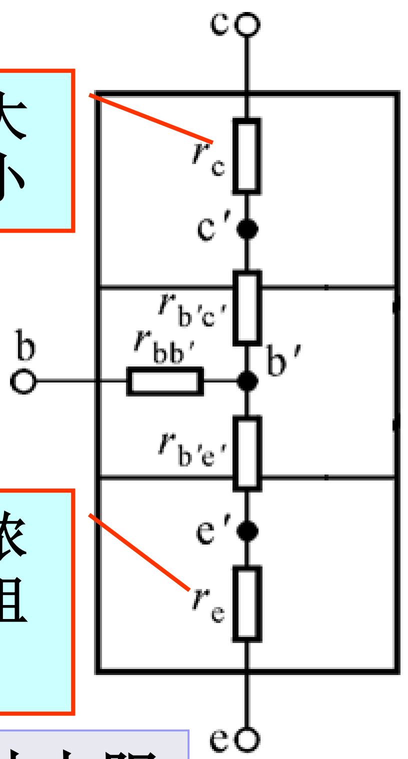
一、晶体管的高频等效模型

1.低、中频混合模型



i_c受i_b控制的电流源

因面积大而阻值小



因多子浓度高而阻值小

$r_{bb'}$：基区体电阻　　$r_{b'e'}$：发射结电阻

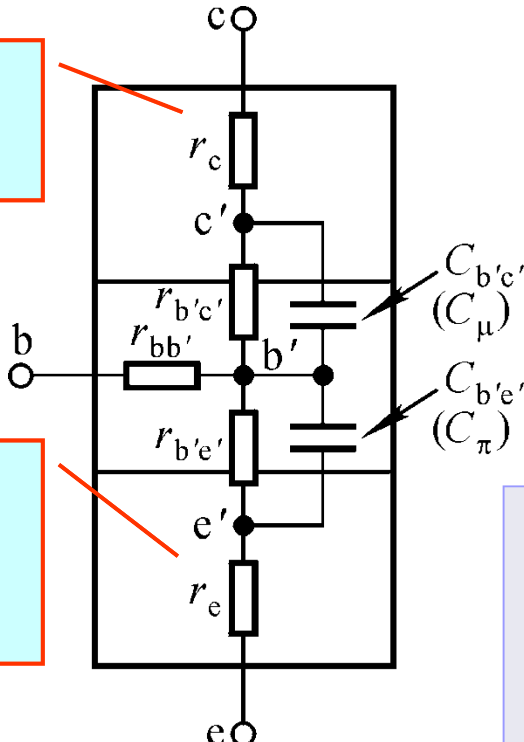
r_e：发射区体电阻　　$r_{b'c'}$：集电结电阻

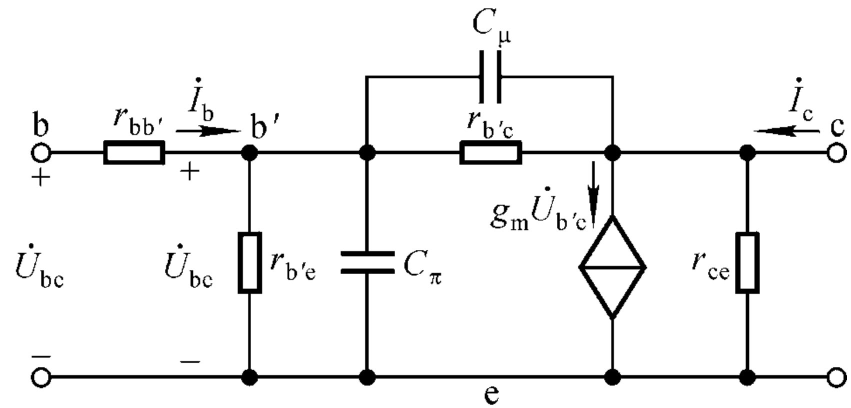
r_c：集电区体电阻

2. 高频混合π模型

因面积大而阻值小

因多子浓度高而阻值小





为什么引入参数g_m？

$r_{bb'}$：基区体电阻　　$r_{b'e'}$：发射结电阻

C_π：发射结电容 (几~几十pF)

r_e：发射区体电阻　　$r_{b'c'}$：集电结电阻

C_μ：集电结电容 (0.1~几pF)

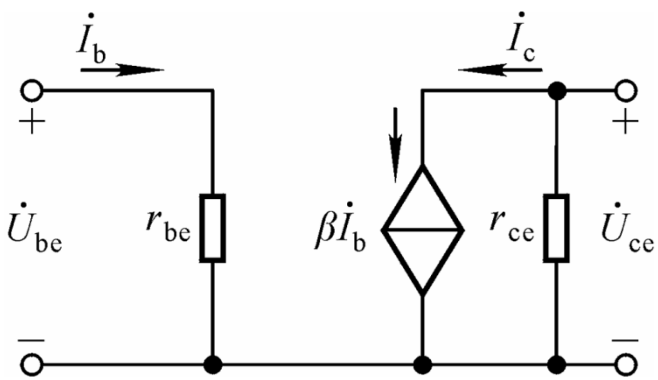
r_c：集电区体电阻

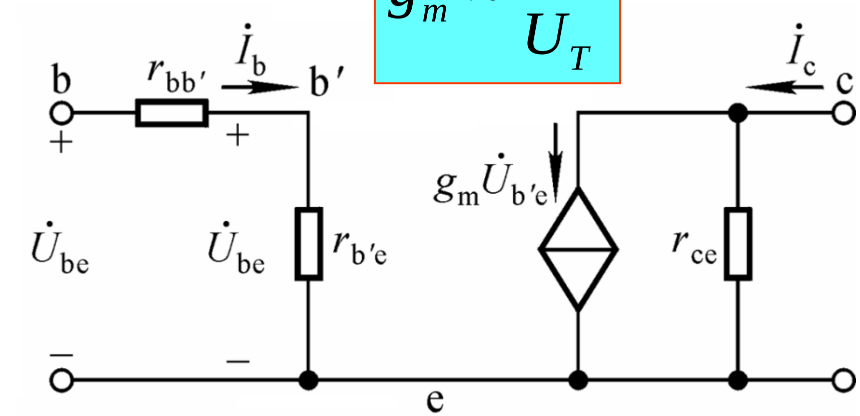
g_m：跨导，不随信号频率而变化

跨导，不随信号频率变化而变化

$$g_m \approx \frac{I_{EQ}}{U_T}$$

➢ g_m是什么？

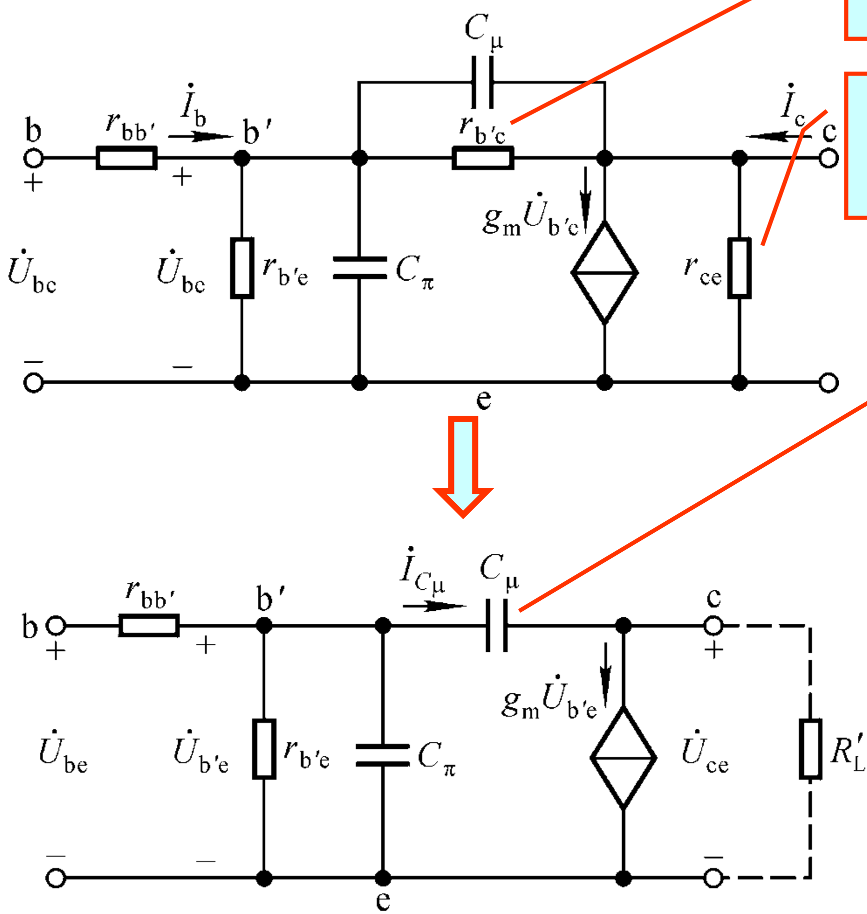




i_c受i_b控制的电流源　　**i_c受$u_{b'e}$控制的电流源**

$$\dot{I}_c = \beta_0 \dot{I}_b = \beta_0 \frac{\dot{U}_{b'e}}{r_{b'e}} = \frac{\beta_0}{r_{b'e}} \dot{U}_{b'e} = g_m \dot{U}_{b'e} \quad \begin{cases} g_m = \dfrac{\beta_0}{r_{b'e}} \\ r_{b'e} = (1+\beta_0)\dfrac{U_T}{I_{EQ}} \end{cases}$$

混合π模型：忽略大电阻的分流

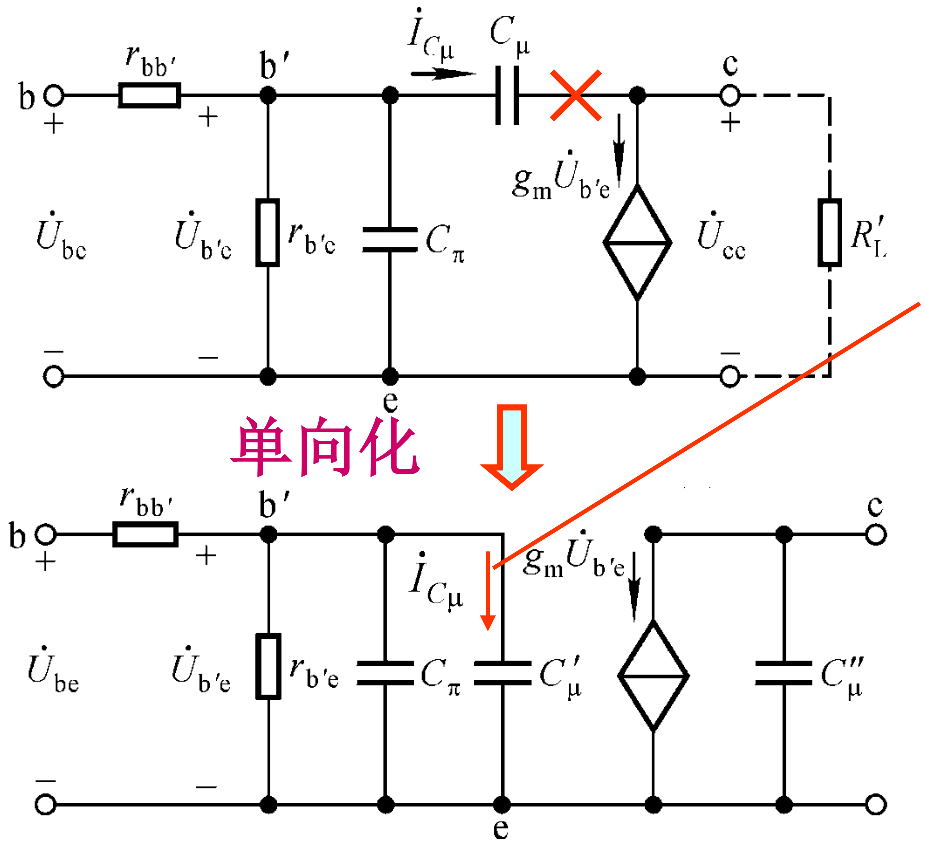


因在放大区承受反向电压而阻值大

因在放大区i_C几乎仅决定于i_B而阻值大

C_μ连接了输入回路和输出回路，引入了反馈，信号传递有两个方向，使电路的分析复杂化

混合 π 模型的单向化 (Miller等效变换)



$$\dot{I}_{C\mu}=\frac{\dot{U}_{b'e}-\dot{U}_{ce}}{X_{C\mu}}=(1-k)\frac{\dot{U}_{b'e}}{X_{C\mu}}$$

$$k=\dot{U}_{ce}/\dot{U}_{b'e}\approx -g_m R_L^{'}$$

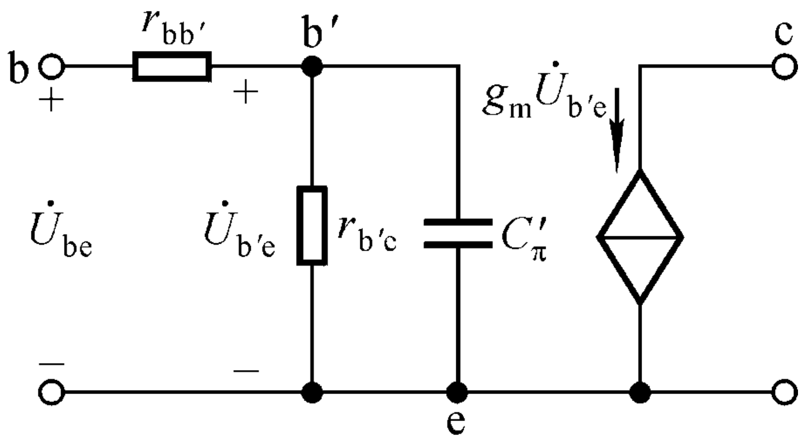
等效变换后电流不变

$$X_{C'\mu}=\frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{I}_{C\mu}}\approx\frac{X_{C\mu}}{1+g_m R_L^{'}}$$

$$C_\mu^{'}\approx(1+g_m R_L^{'})C_\mu$$

同理可得，$C_\mu^{''}\approx\dfrac{k-1}{k}\cdot C_\mu$

混合π模型的参数



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

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

为何不考虑 C''_μ？

如何得到模型中的参数？

- 从低中频模型求 k
  - $k = \dot{U}_{ce} / \dot{U}_{b'e} = -g_m R'_L$
- 从手册上查 $C_\mu, r_{bb'}$
- $C'_\pi = C_\pi + C'_\mu$

$=?$

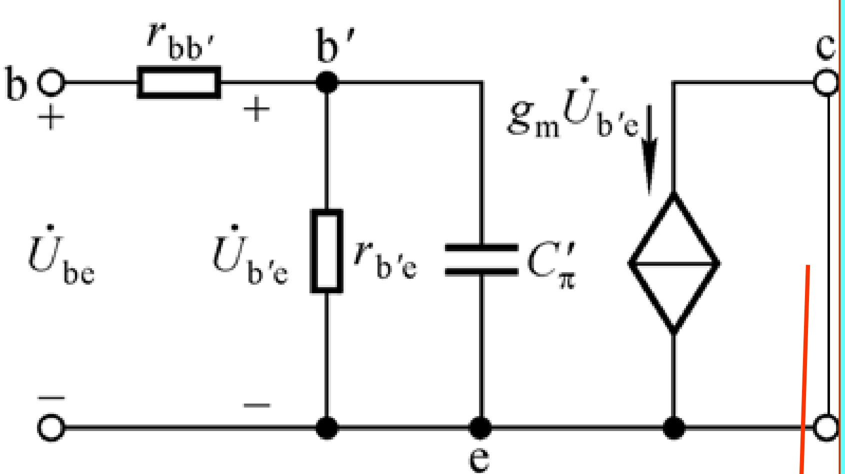
$$C'_\mu = (1-k) C_\mu$$

二、电流放大倍数的频率响应

1. 晶体管放大倍数的频率响应

$$\dot{\beta}=\frac{\dot{I}_{c}}{\dot{I}_{b}}\bigg|_{U_{CE}}$$

因为$k=-g_{m}R_{L}^{'}=0$，所以$C_{\pi}^{'}=C_{\pi}+C_{\mu}$



为什么短路？

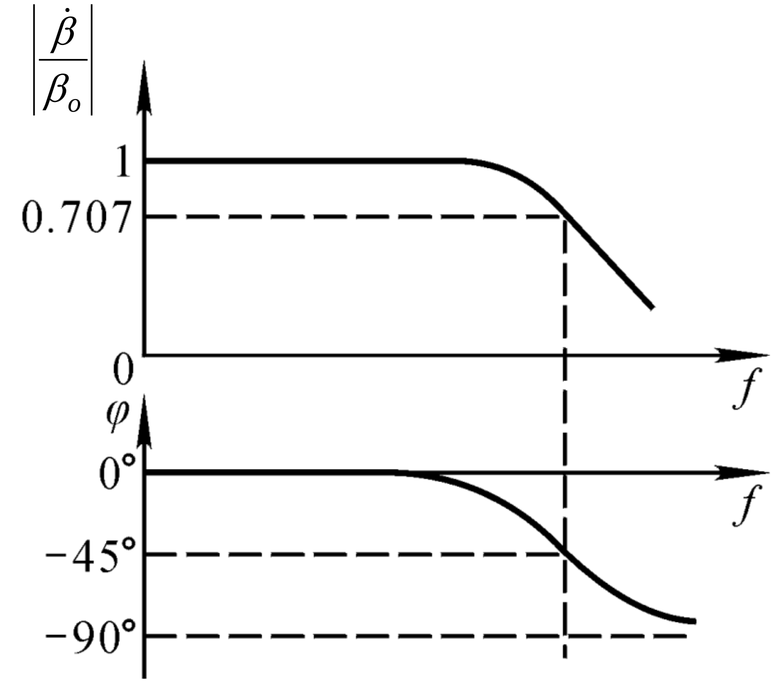
$$\dot{\beta}=\frac{\dot{I}_{c}}{I_{r_{b'e}}+I_{C'_{\pi}}}=\frac{g_{m}\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}_{b'e}[\frac{1}{r_{b'e}}+j\omega\,(C_{\pi}+C_{\mu})]}$$

$$=\frac{\beta_{0}}{1+j\frac{f}{f_{\beta}}}$$

$$f_{\beta}=\frac{1}{2\,\pi\,r_{b'e}(C_{\pi}+C_{\mu})}$$

2. 电流放大倍数的频率特性曲线

$$\dot{\beta}=\frac{\beta_0}{1+\mathrm{j}\dfrac{f}{f_\beta}} \Rightarrow \begin{cases} \left|\dot{\beta}\right|=\dfrac{\beta_0}{\sqrt{1+\left(\dfrac{f}{f_\beta}\right)^2}} \\ \varphi=-\mathrm{tg}^{-1}\dfrac{f}{f_\beta} \end{cases}$$

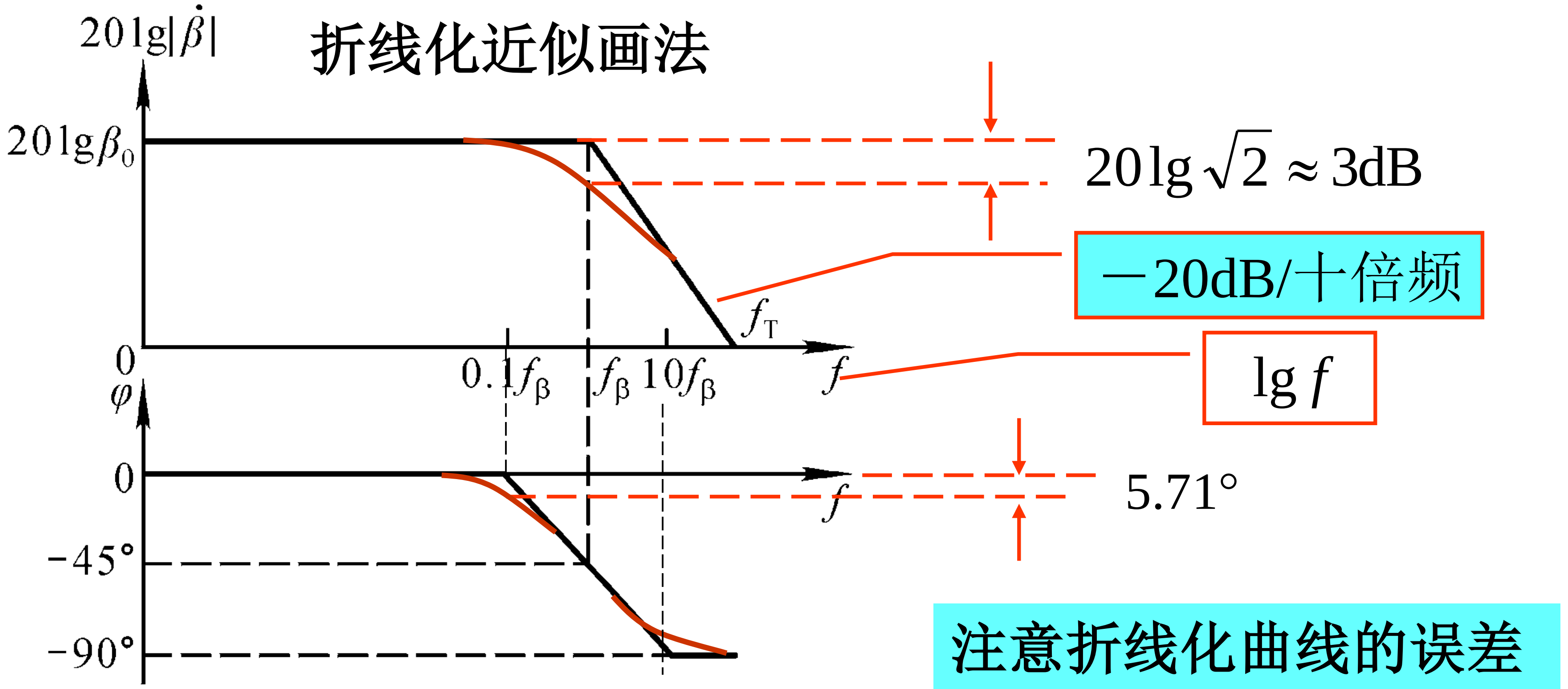


$f << f_\beta$ 时，$\left|\dot{\beta}\right| \approx \beta_0$；

$f = f_\beta$ 时，$\left|\dot{\beta}\right| = \dfrac{\beta_0}{\sqrt{2}} \approx 0.707\beta_0$， $\varphi = -45°$；

$f >> f_\beta$ 时，$\left|\dot{\beta}\right| \approx \dfrac{f_\beta}{f}\cdot\beta_0$； $f \to \infty$ 时，$\left|\dot{\beta}\right| \to 0$， $\varphi \to -90°$

➢ 电流放大倍数的波特图



$20\lg|\dot{\beta}|$
折线化近似画法
$20\lg\beta_0$
$20\lg\sqrt{2}\approx 3\text{dB}$
－20dB/十倍频
f_T
0
$0.1f_\beta$
f_β
$10f_\beta$
f
$\lg f$
φ
0
f
5.71°
-45°
-90°
注意折线化曲线的误差

三、晶体管的频率参数

共射截止频率　共基截止频率　特征频率　集电结电容

f_β、f_α、f_T、$C_{ob}(C_\mu)$。

使$|\dot{\beta}|=1$时的频率为f_T

$$f_T \approx f_\alpha \approx \beta_0 f_\beta$$

$$\dot{\beta}=\frac{\beta_0}{1+j\frac{f}{f_\beta}} \qquad f_\beta=\frac{1}{2\pi r_{b'e}(C_\pi+C_\mu)}$$

手册查得

通过以上分析得出的结论：

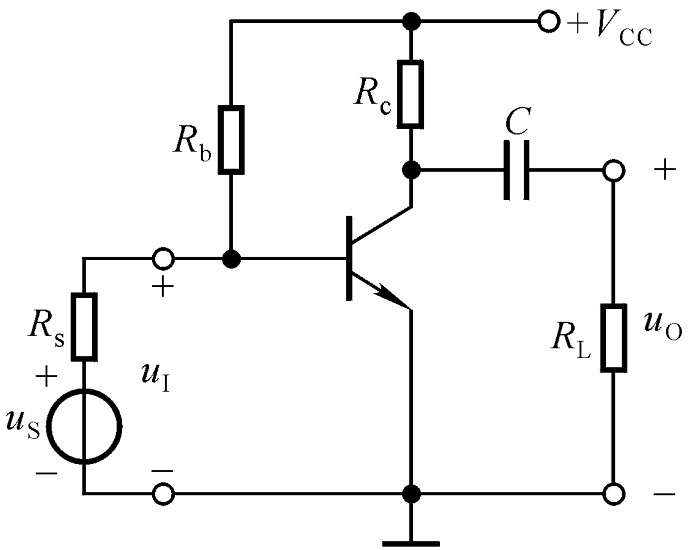
① 低频段和高频段放大倍数的表达式；

② 截止频率与时间常数的关系；

③ 波特图及其折线画法；

④ C_π的求法

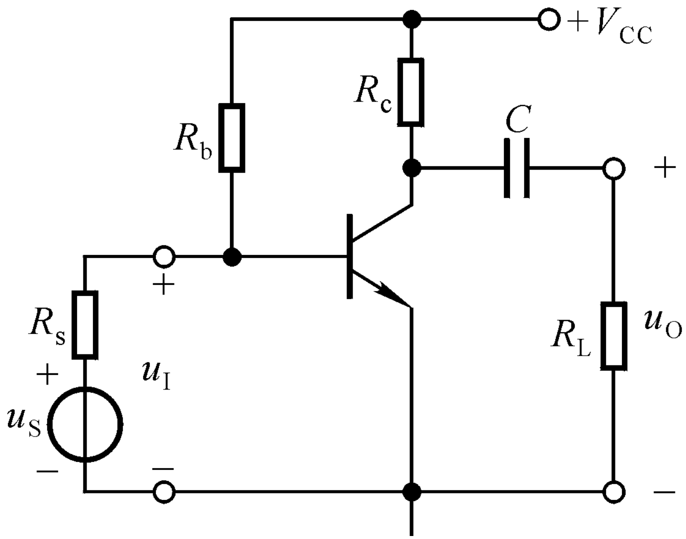
讨论二



电路如图。已知各电阻阻值；静态工作点合适，集电极电流I_{CQ}＝2mA；晶体管的$r_{bb'}$=200Ω，C_{ob}=5pF，f_β=1MHz。

试求解该电路中晶体管高频等效模型中的各个参数。

讨论二

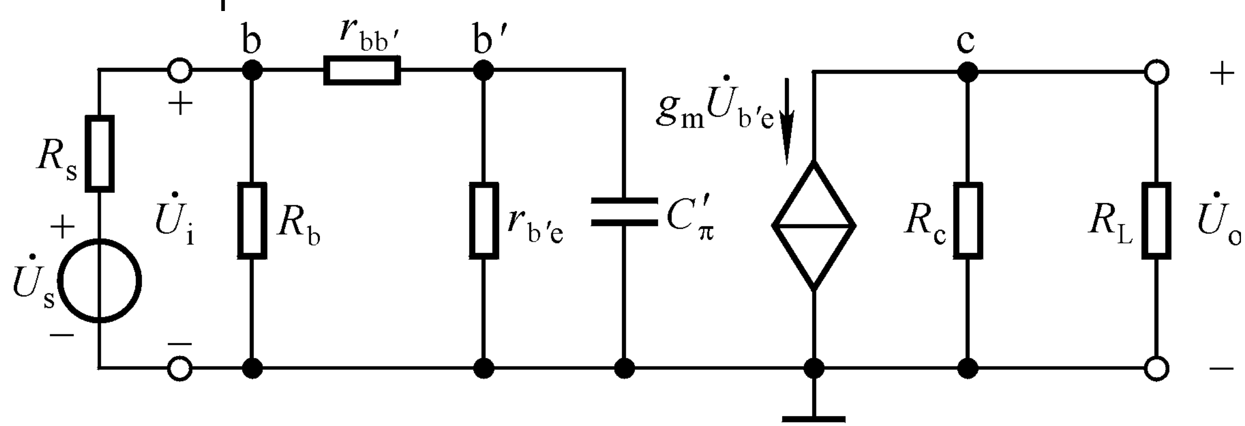


$$I_{CQ} \rightarrow g_m、r_{b'e}$$

$$C_\mu(\approx C_{ob})、g_m、R_c、R_L \rightarrow C'_\mu$$

$$f_\beta、C_\mu(\approx C_{ob})、r_{b'e} \rightarrow C_\pi$$

$$C'_\mu + C_\pi = C'_\pi$$

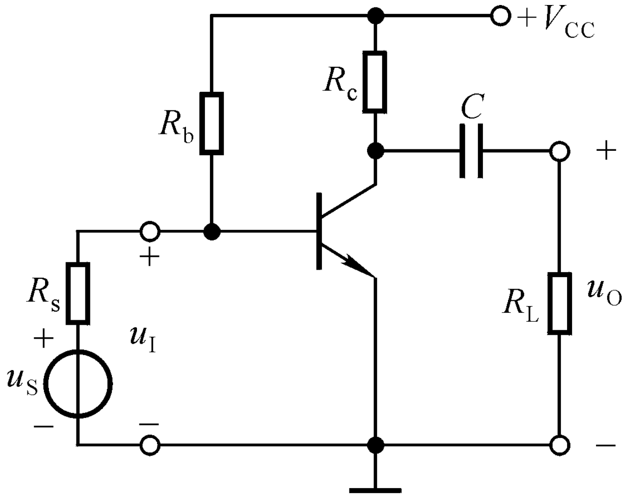


§ 4.3 放大电路的频率响应

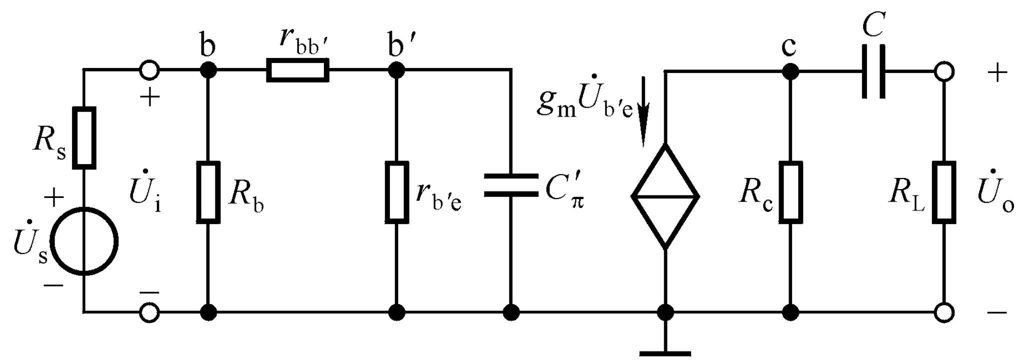
一、单管共射放大电路的频率响应

二、多级放大电路的频率响应

一、单管共射放大电路的频率响应



适用于信号频率从0～∞的
交流等效电路

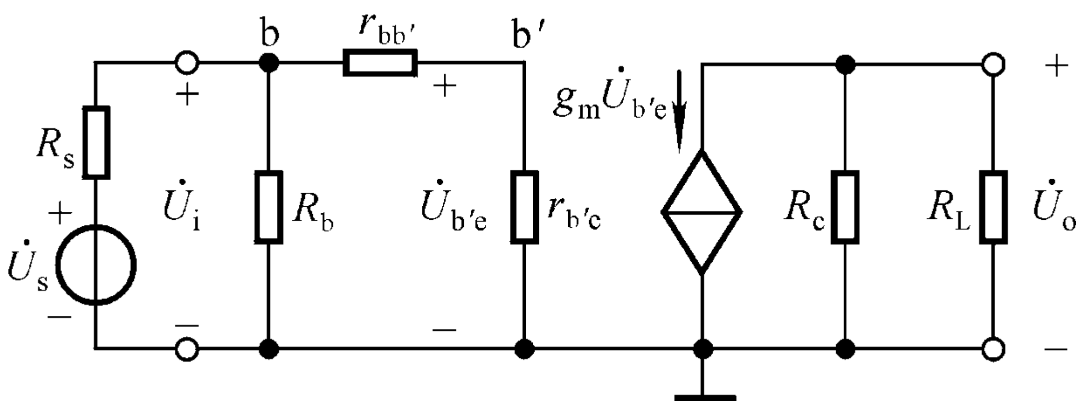


中频段：C 短路，C'_π 开路

低频段：考虑C 的影响，C'_π 开路

高频段：考虑 C'_π 的影响，C 短路

1. 中频电压放大倍数



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

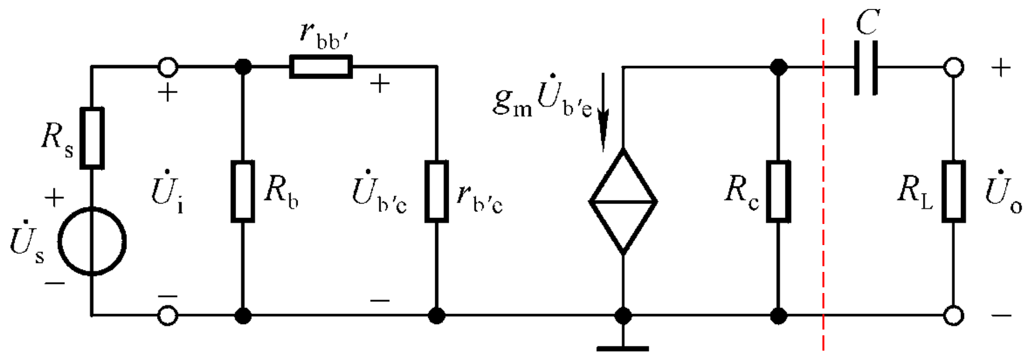
$$=\frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s}\cdot\frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}_i}\cdot\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{b'e}}$$

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

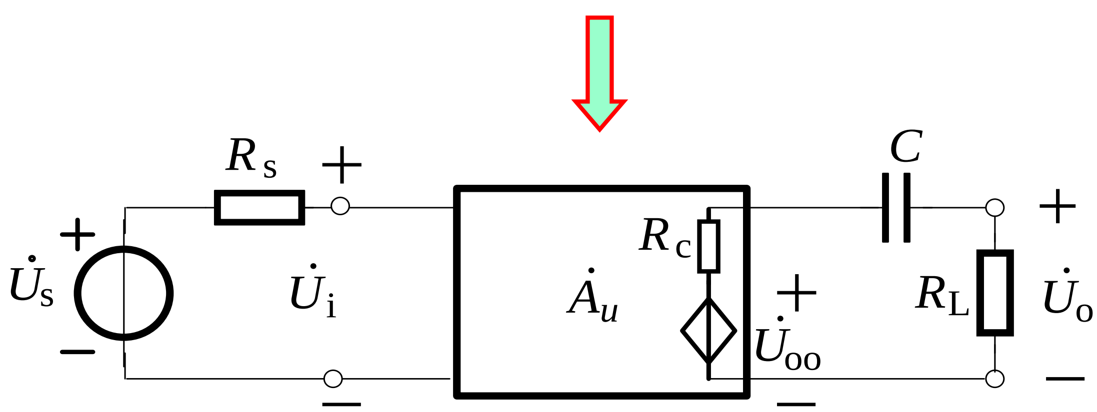
空载时：$$\boxed{\dot{A}_{usmo}=\frac{R_i}{R_s+R_i}\cdot\frac{r_{b'e}}{r_{be}}\cdot(-g_mR_c)}$$

✓与用*h*等效模型求出的结果相同！

2. 低频电压放大倍数：定性分析

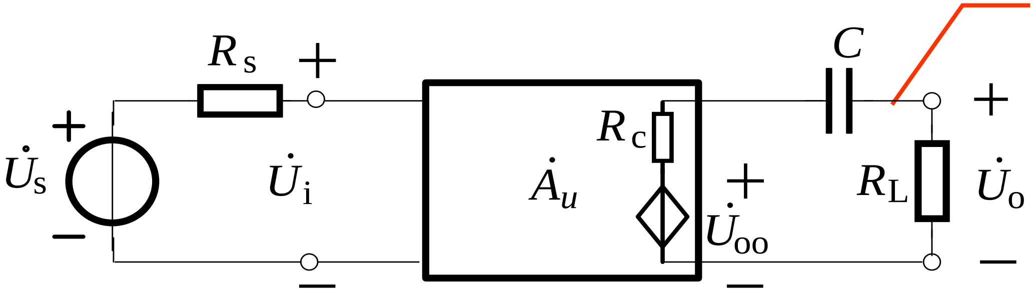


$$\dot{A}_{usmo} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot (-g_m R_c)$$



$\dot{U}_o$超前$\dot{U}_{oo}$，当 $f \to 0$ 时，$|\dot{U}_o| \to 0$，$\dot{U}_o$超前$\dot{U}_{oo}$ $90°$

2. 低频电压放大倍数：定量分析



C所在回路的时间常数？

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

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

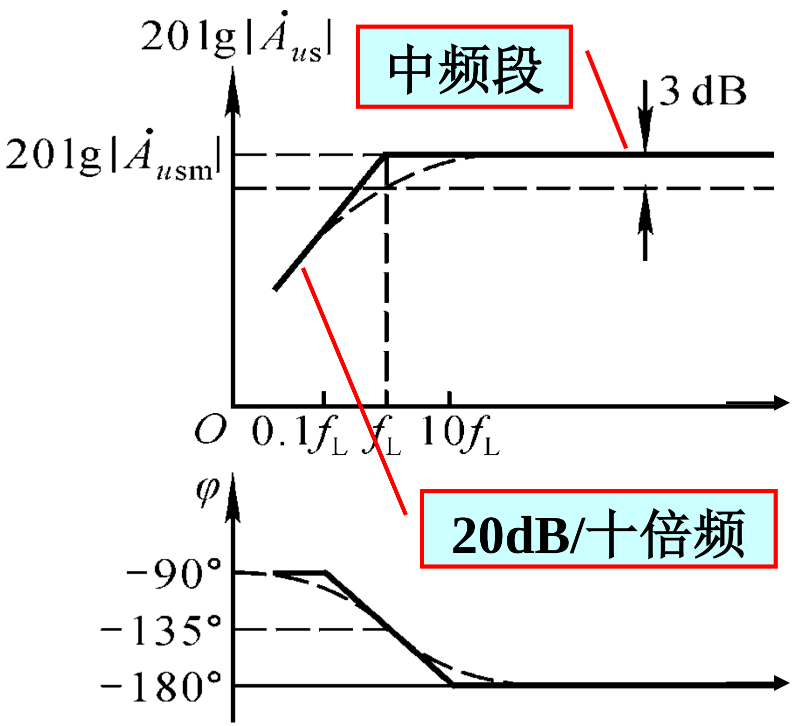
$$\dot{A}_{usl} = \dot{A}_{usmo} \cdot \frac{R_L}{R_c + \dfrac{1}{j\omega C} + R_L} \cdot \frac{R_c + R_L}{R_c + R_L} = \frac{\dot{A}_{usm}}{1 + \dfrac{1}{j\omega (R_c + R_L) C}}$$

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

2. 低频电压放大倍数：低频段频率响应分析

$$\dot{A}_{usl}=\frac{\dot{A}_{usm}(\mathrm{j}f/f_{\mathrm{L}})}{1+\mathrm{j}f/f_{\mathrm{L}}} \qquad f_{\mathrm{L}}=\frac{1}{2\pi(R_{c}+R_{\mathrm{L}})C}$$

$$\begin{cases}20\lg\left|\dot{A}_{usl}\right|=20\lg\left|\dot{A}_{usm}\right|-20\lg\dfrac{1}{\sqrt{1+(\dfrac{f_{\mathrm{L}}}{f})^{2}}}\\ \varphi=-180^{\circ}+(90^{\circ}-\arctan\dfrac{f}{f_{\mathrm{L}}})\end{cases}$$



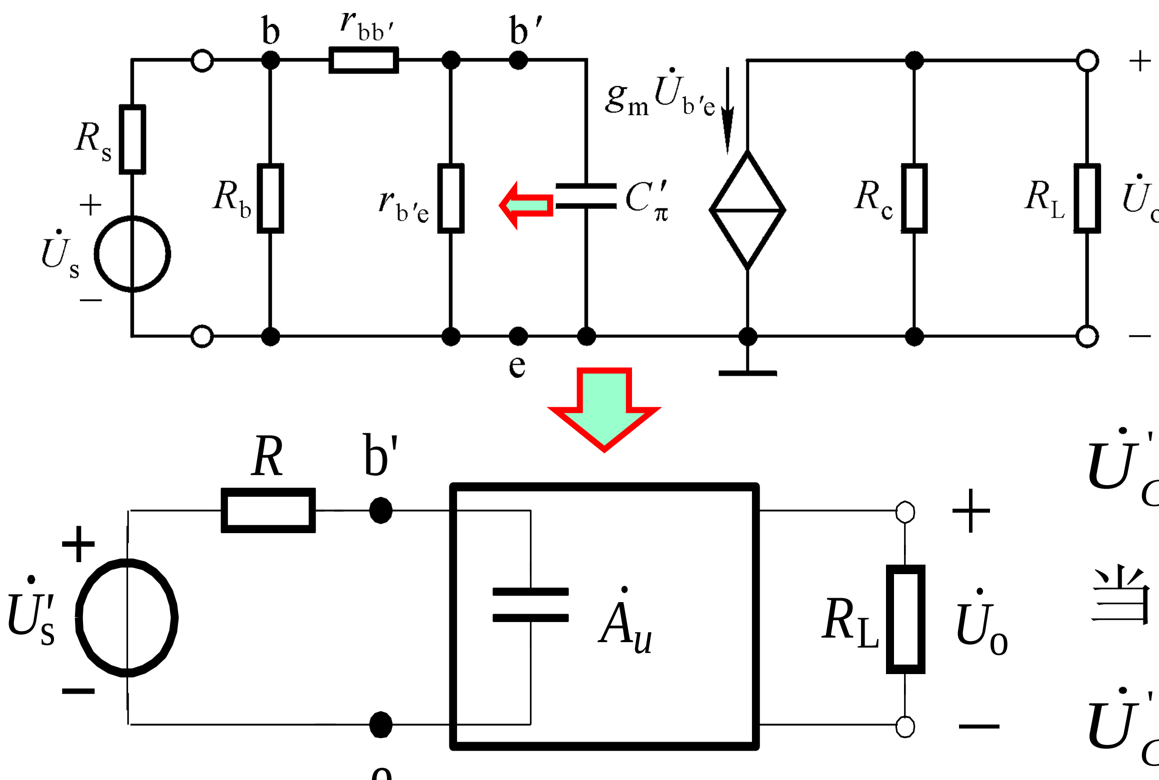
$f \gg f_{\mathrm{L}}$时，$20\lg\left|\dot{A}_{us}\right| \approx 20\lg \dot{A}_{usm}$

$f = f_{\mathrm{L}}$时，$20\lg\left|\dot{A}_{us}\right|$下降3dB， $\varphi=-135°$

$f \ll f_{\mathrm{L}}$时，$20\lg\left|\dot{A}_{us}\right| \approx 20\lg(\dot{A}_{usm}\dfrac{f_{\mathrm{L}}}{f})$

$f \to 0$ 时，$\left|\dot{A}_{us}\right| \to 0$， $\phi \to -90°$

3. 高频电压放大倍数：定性分析



$\dot U'_{C_\pi}$ 滞后 U'_s,

当 $f \to \infty$ 时, $\left|\dot U'_{C_\pi}\right| \to 0$,

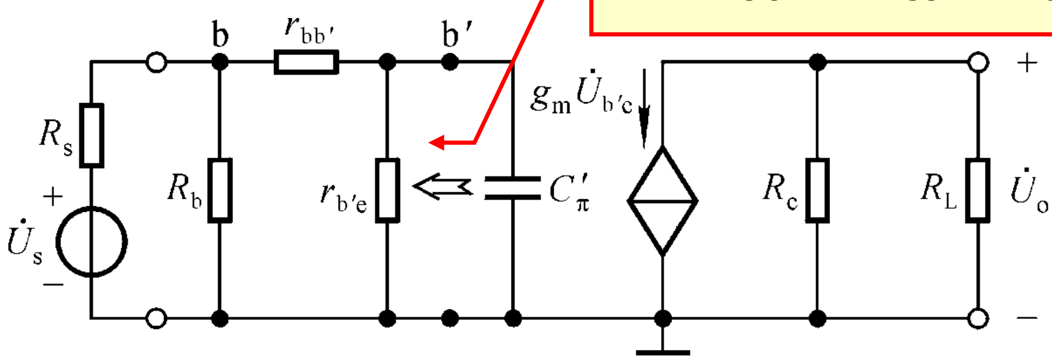
$\dot U'_{C_\pi}$ 滞后 $U'_s(-90°)$

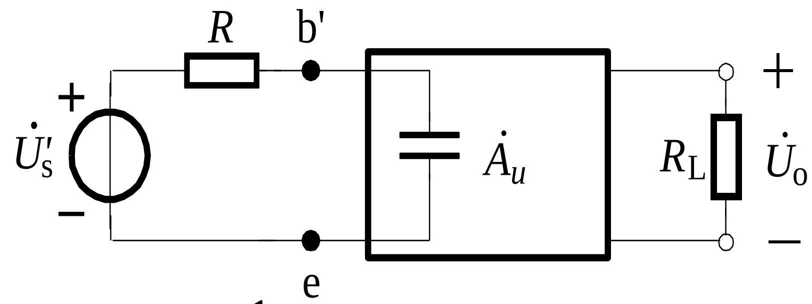
$$\dot U'_s = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \dot U_s, \quad R = r_{b'e} // (r_{bb'} + R_b // R_s)$$

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

3. 高频电压放大倍数：定量分析

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

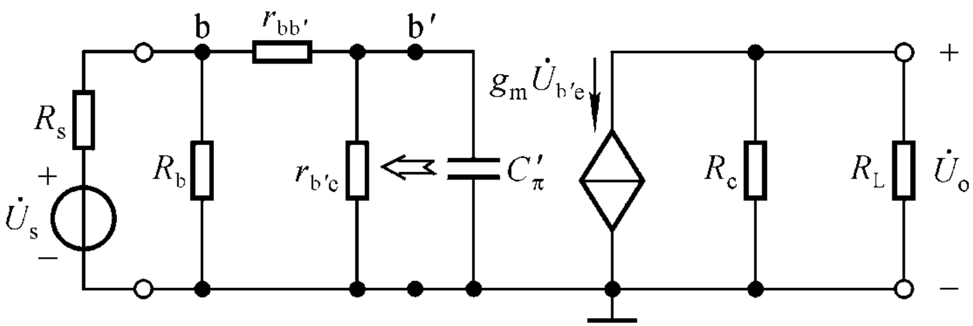




$$\dot{A}_{ush} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}'_s}{\dot{U}_s} \cdot \frac{\dot{U}_{C'_\pi}}{\dot{U}'_s} \cdot \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{C'_\pi}} = \frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{\dfrac{1}{j\omega C'_\pi}}{R + \dfrac{1}{j\omega C'_\pi}} \cdot (-g_m R'_L)$$

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

3. 高频电压放大倍数：高频段频率响应分析



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

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

$$\begin{cases} 20\lg|\dot{A}_{ush}| = 20\lg|\dot{A}_{um}| - 20\lg\sqrt{1 + (\dfrac{f}{f_H})^2} \\ \varphi = -180° - \arctan\dfrac{f}{f_H} \end{cases}$$

$f << f_H$时，

$20\lg|\dot{A}_{ush}| \approx 20\lg|\dot{A}_{usm}|$;

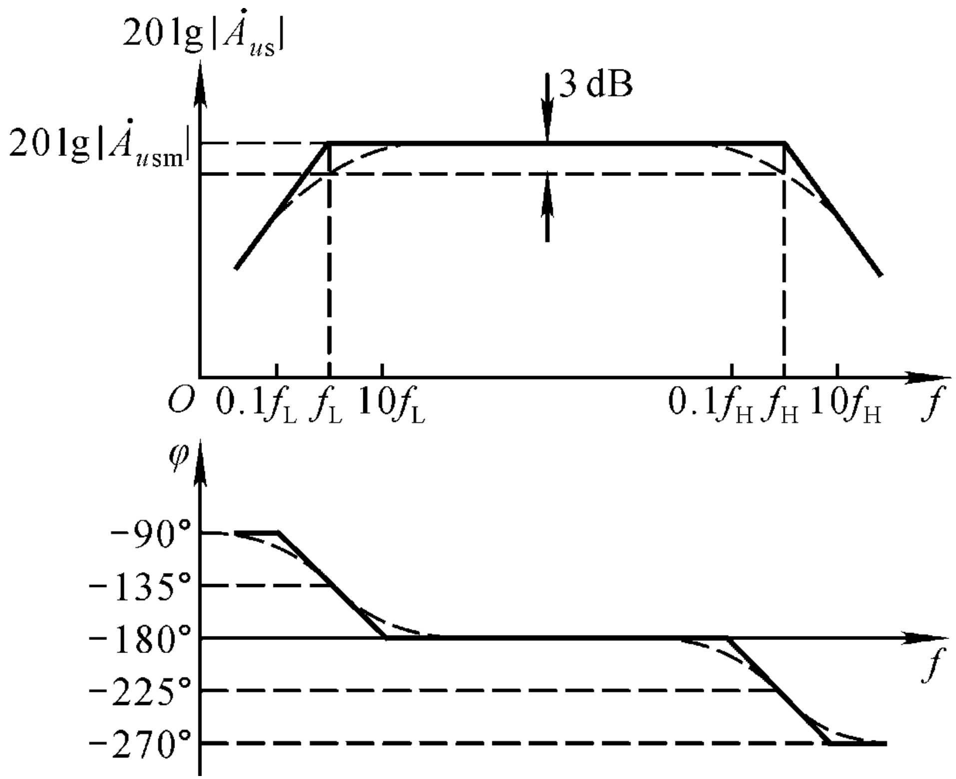
$f = f_H$时，

$20\lg|\dot{A}_{ush}|$下降3dB， $\varphi = -225°$

$f >> f_H$时，f 每增大10倍，$20\lg|\dot{A}_{ush}|$下降20dB；

$f \to \infty$时， $|\dot{A}_{ush}| \to 0$， $\phi \to -270°$

4. 电压放大倍数的波特图



全频段放大倍数表达式：

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

$$=\frac{\dot{A}_{usm}(\mathrm{j}\frac{f}{f_L})}{(1+\mathrm{j}\frac{f}{f_L})(1+\mathrm{j}\frac{f}{f_H})}$$

$$=\frac{\dot{A}_{usm}}{(1+\frac{f_L}{\mathrm{j}f})(1+\mathrm{j}\frac{f}{f_H})}$$

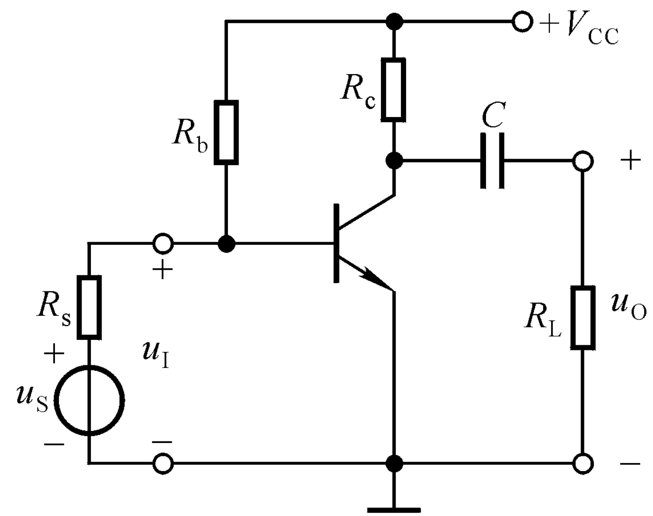
5. 带宽增益积：定性分析

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

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

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

$$C_\pi'\approx C_\pi+(1+g_mR_L')C_\mu$$



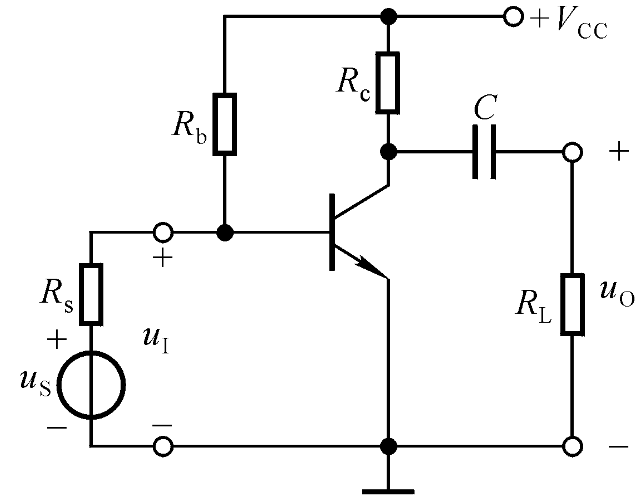
带宽增益积 $\left|\dot{A}_{um}f_{bw}\right|\approx\left|\dot{A}_{um}f_H\right|$

$$\begin{cases} g_mR_L'\uparrow\rightarrow\left|\dot{A}_{um}\right|\uparrow \\ g_mR_L'\uparrow\rightarrow C_\pi'\uparrow\rightarrow f_H\downarrow \end{cases}$$

矛盾

当提高增益时，带宽将变窄；反之，增益降低，带宽将变宽

5. 带宽增益积：定量分析



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

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

$$C_\pi'\approx C_\pi+(1+g_mR_L')C_\mu$$

若$\boldsymbol{r_{be}<<R_b}$、 $\boldsymbol{R_s<<R_b}$、$g_mR_L'>>1$、$C_\mu>>C_\pi$，则可以证明图示电路的

约为常量

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

说明决定于管子参数

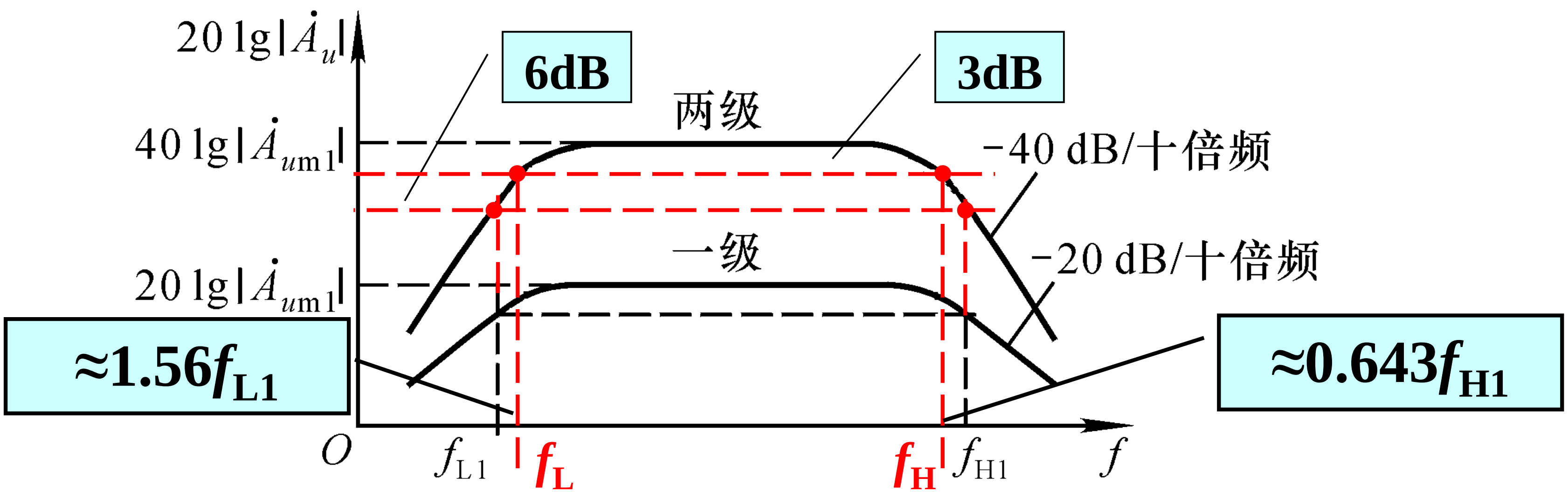
- 对于大多数放大电路，增益提高，带宽都将变窄，盲目地追求宽频带和增益都不可取
- 要想制作宽频带放大电路需用高频管，必要时需采用共基电路

二、多级放大电路的频率响应

1. 定性分析

- 多级放大电路频率特性为各级放大电路频率特性之和（需考虑前后级的相互影响）

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



$f_L > f_{L1}$，$f_H < f_{H1}$，频带变窄！

2. 截止频率的估算

- 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

$$\begin{cases} f_{\mathrm{L}} > f_{\mathrm{L}k} \\ f_{\mathrm{H}} < f_{\mathrm{H}k} \qquad (k=1,2,\ldots,n) \\ f_{\mathrm{bw}} < f_{\mathrm{bw}k} \end{cases}$$

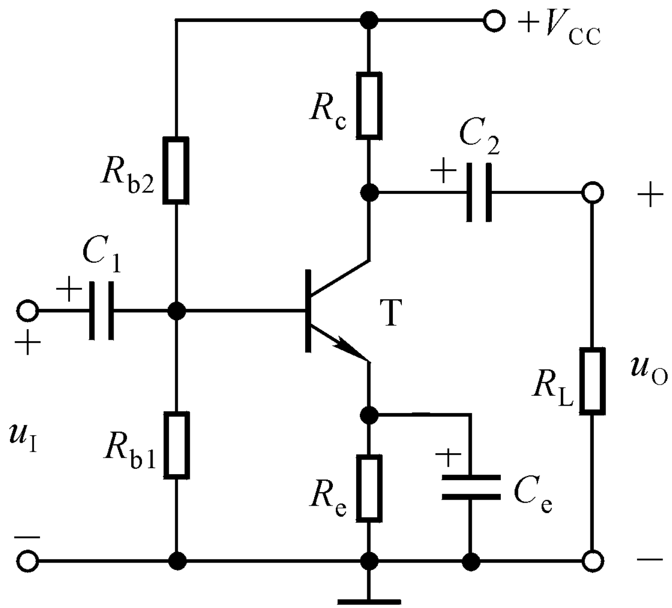
由于 $$\begin{cases} 20\lg\left|\dot{A}_u\right| = \sum_{k=1}^{n} 20\lg\left|\dot{A}_{uk}\right| \\ \varphi = \sum_{k=1}^{n} \varphi_k \end{cases}$$

求解使增益下降3dB的频率，经修正，可得

$$\boxed{f_{\mathrm{L}} \approx 1.1\sqrt{\sum_{k=1}^{n} f_{\mathrm{L}k}^2} \qquad \frac{1}{f_{\mathrm{H}}} \approx 1.1\sqrt{\sum_{k=1}^{n} \frac{1}{f_{\mathrm{H}k}^2}}}$$

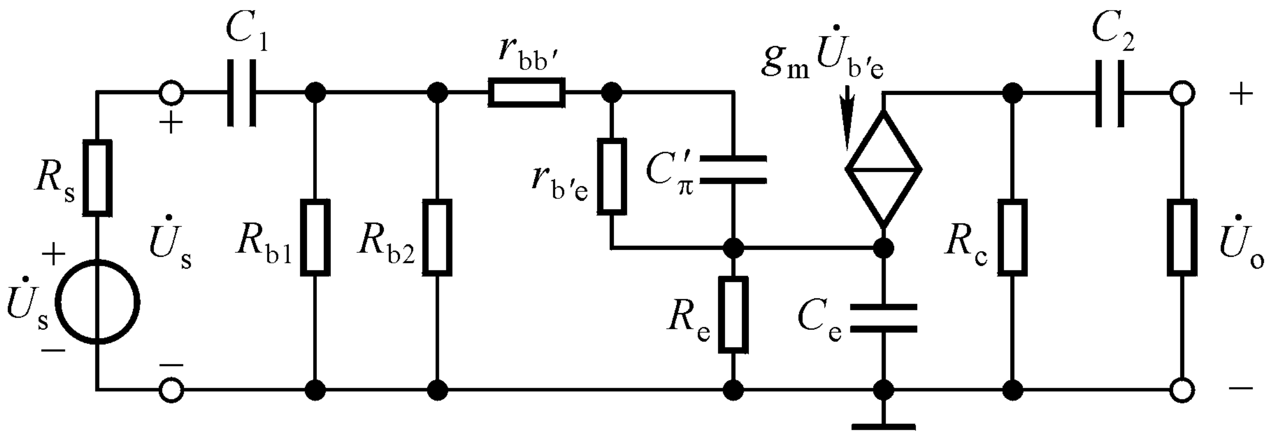
1.1为修正系数

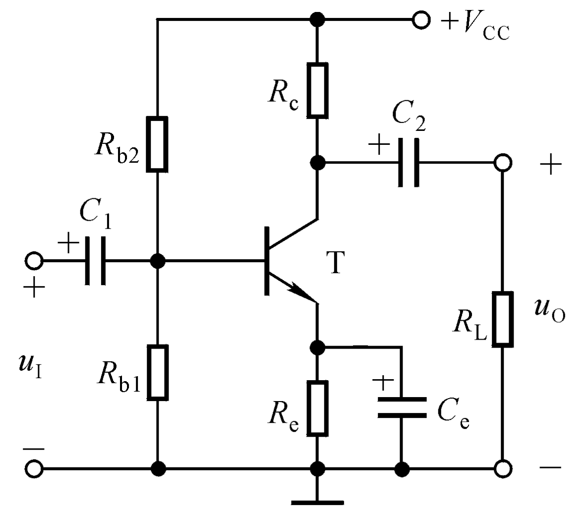
讨论一



1. 信号频率为0～∞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？

讨论一：时间常数分析





分别考虑C_1、C_2、C_e、C'_π所确定的截止频率。

C_2、C_e短路，C'_π 开路，求出 $\tau_1 = (R_s + R_{b1} // R_{b2} // r_{be})C_1$

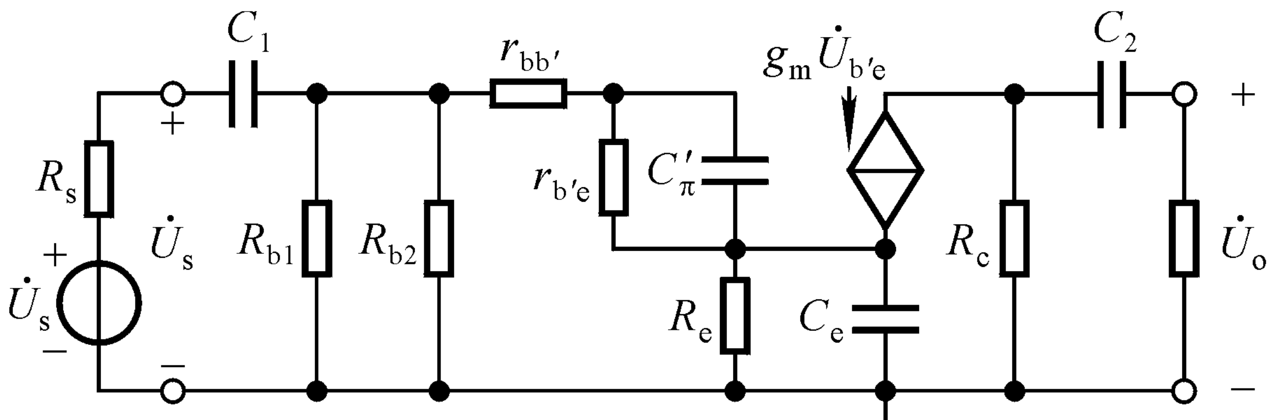
C_1、C_e短路，C'_π 开路，求出 $\tau_2 = (R_c + R_L)C_2$

C_1、C_2短路，C'_π开路，求出 $\tau_e = (R_e // \frac{r_{be} + R_s // R_{b1} // R_{b2}}{1+\beta})C_e$

C_1、C_2、C_e短路，求出

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

讨论一：电压放大倍数分析



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

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

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

很小！

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

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

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

$$f_{L3}=1/(2\pi\tau_e)$$

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

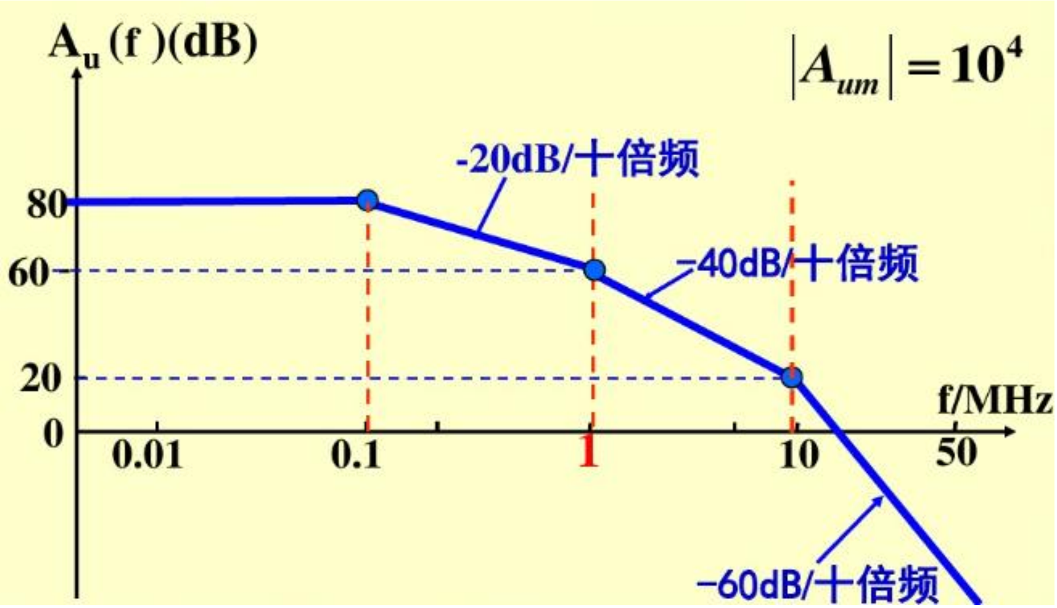
$$\dot{A}_u=\dot{A}_{um}\cdot\frac{j^3f^3/f_{L1}f_{L2}f_{L3}}{(1+jf/f_{L1})(1+jf/f_{L2})(1+jf/f_{L3})(1+jf/f_H)}$$

讨论二：波特图

已知某三级放大电路的电压增益函数为：

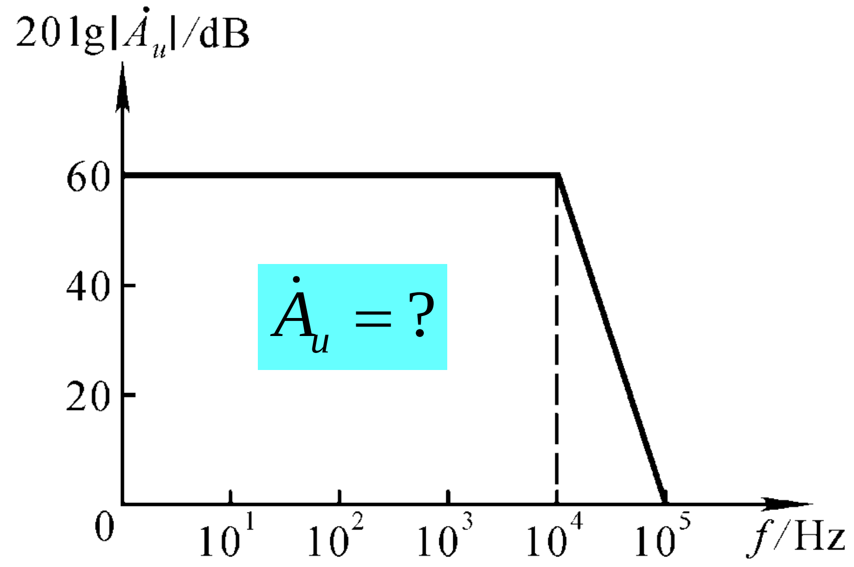
$$\dot{A}_u(jf)=\frac{-10^4}{\left(1+j\frac{f}{0.1}\right)\left(1+j\frac{f}{1}\right)\left(1+j\frac{f}{10}\right)}$$

画出幅频波特图，并确定中频电压增益（频率单位为MHz）。



讨论三

已知某放大电路的幅频特性如图所示，讨论下列问题：



1. 该放大电路为几级放大电路?
2. 耦合方式?
3. 在 $f = 10^4$Hz 时，增益下降多少？附加相移φ'＝？
4. 在 $f = 10^5$Hz 时，附加相移$\varphi'\approx$?
5. 画出相频特性曲线；
6. f_H＝？