第四章 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

一、研究的问题

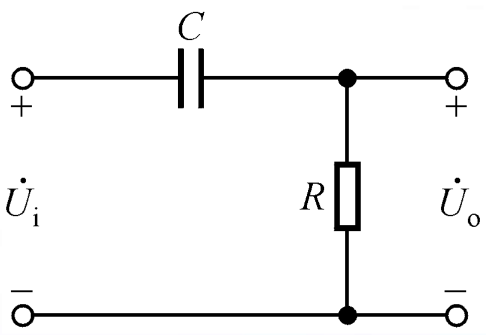
放大电路对信号频率的适应程度，即信号频率对放大倍数的影响。

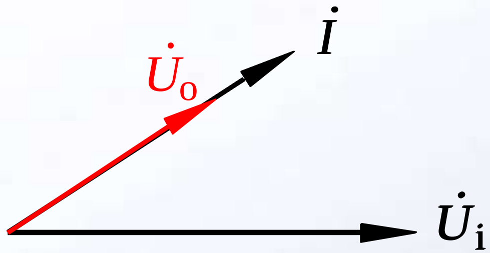
由于放大电路中耦合电容、旁路电容、半导体器件极间电容的存在，使放大倍数为频率的函数。

在使用一个放大电路时应了解其信号频率的适用范围，在设计放大电路时，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:信号频率越高，输出电压越接近输入电压。

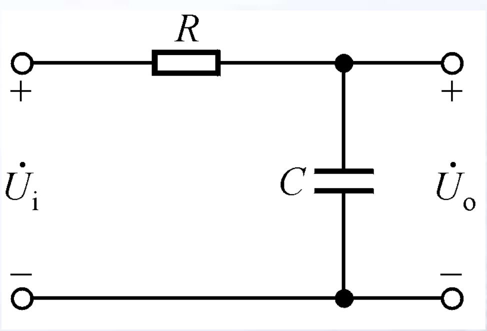


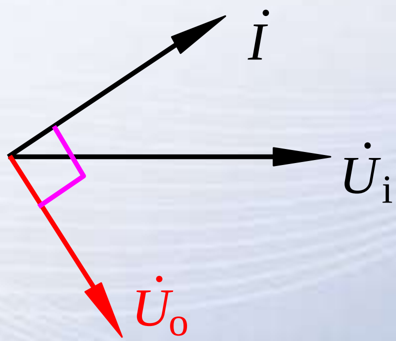


$\dot{U}_o$超前$\dot{U}_i$，当 $f\to 0$时；

$\left|\dot{U}_o\right|\to 0$，$\dot{U}_o$超前$\dot{U}_i$ 90°。

2. 低通电路:信号频率越低，输出电压越接近输入电压。





$\dot{U}_o$滞后$\dot{U}_i$，当 $f\to \infty$时；

$\left|\dot{U}_o\right|\to 0$，$\dot{U}_o$滞后$\dot{U}_i$ 90°。

使输出电压幅值下降到70.7%，相位为±45°的信号频率为截止频率。

4.1.2　频率响应的基本概念

一、 高通电路

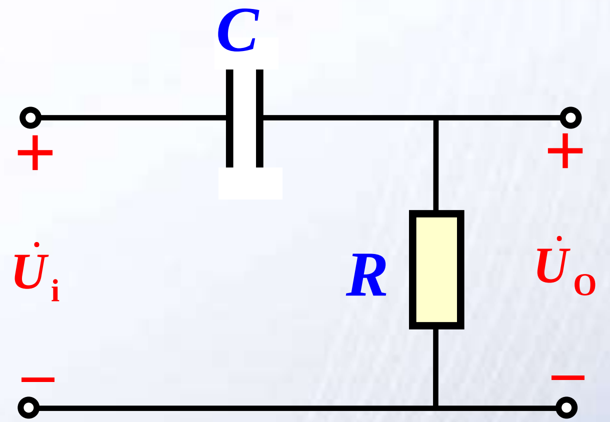


图 4.1.1（a）　*RC* 高通电路

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

$$=\frac{1}{1+\frac{1}{j\omega RC}}$$

令：$f_L=\frac{1}{2\pi RC}=\frac{1}{2\pi\tau_L}$

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

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

相角：$\varphi=90-\arctan(\frac{f}{f_L})$

f_L 称为下限截止频率

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

放大电路的对数频率特性称为波特图。

则有：

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

当 $f >> f_L$ 时，$20\lg\left|\dot{A}_u\right| \approx 0\ \mathrm{dB}$

当 $f << f_L$ 时，$20\lg\left|\dot{A}_u\right| \approx -20\lg\frac{f_L}{f} = 20\lg\frac{f}{f_L}$

当 $f = f_L$ 时，$20\lg\left|\dot{A}_u\right| = -20\lg\sqrt{2} = -3\mathrm{dB}$

对数幅频特性：

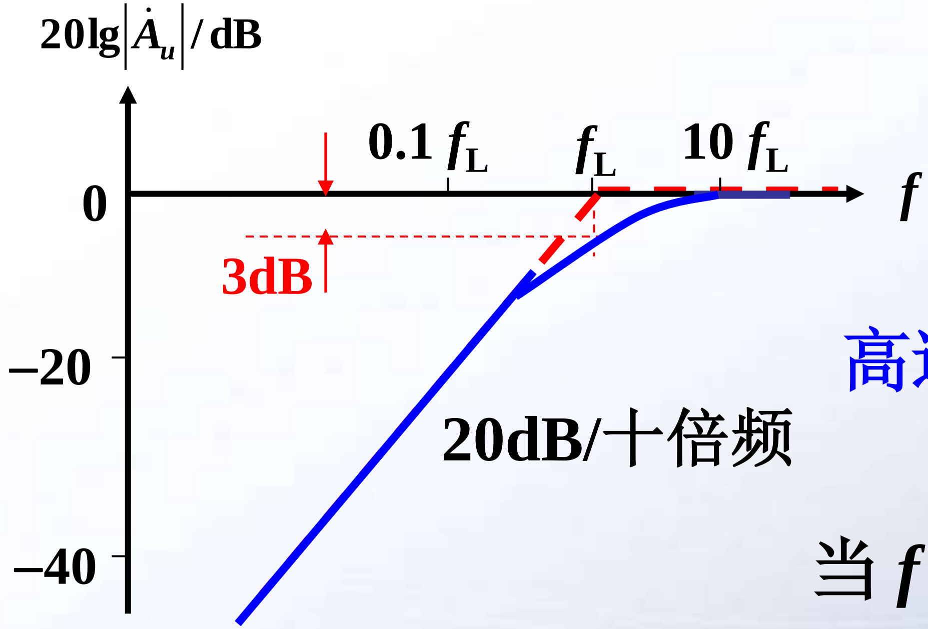


图 4.1.3（a） 幅频特性

实际幅频特性曲线：

最大误差为 3 dB，发生在 $f = f_L$ 处

高通特性：

当 $f \geq f_L$（高频）， $|\dot{A}_u| \approx 1$

当 $f < f_L$（低频）， $|\dot{A}_u| < 1$

且频率愈低，$|\dot{A}_u|$ 的值愈小，低频信号不能通过。

对数相频特性

相角： $\varphi = 90 - \arctan(\frac{f}{f_L})$

$f >> f_L$ 时， $\varphi \approx 0°$;

$f << f_L$ 时， $\varphi \approx 90°$;

$f = f_L$ 时， $\varphi = 45°$

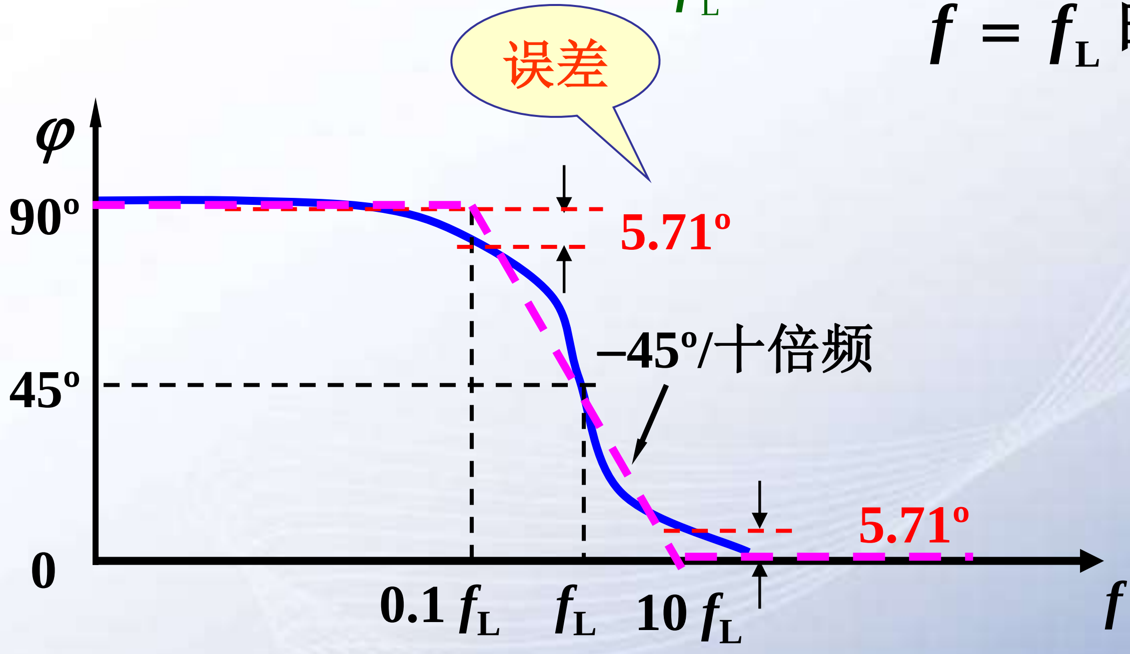


图 5.1.3（a） 相频特性

在低频段，高通电路产生 0 ~ 90° 的超前相移。

二、 *RC* 低通电路的波特图

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

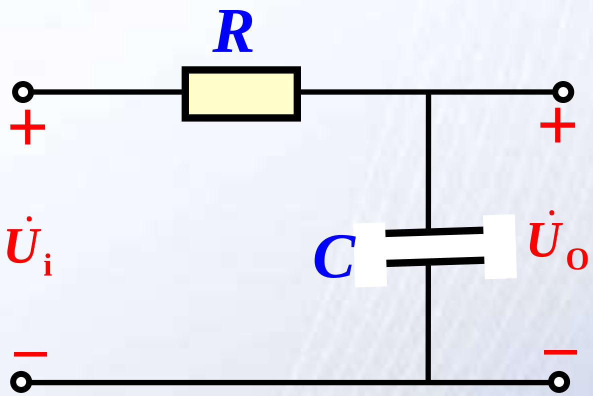


图 4.1.2　*RC* 低通电路图

令： $f_\mathrm{H} = \dfrac{1}{2\pi\tau_\mathrm{H}} = \dfrac{1}{2\pi RC}$

f_H 称为上限截止频率

则： $\dot{A}_u = \dfrac{1}{1 + \mathrm{j}\omega\tau_\mathrm{H}} = \dfrac{1}{1 + \mathrm{j}\dfrac{f}{f_\mathrm{H}}}$

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

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{f}{f_\mathrm{H}}\right)$$

对数幅频特性：

对数相频特性：

在高频段，低通电路产生0~ 90° 的滞后相移。

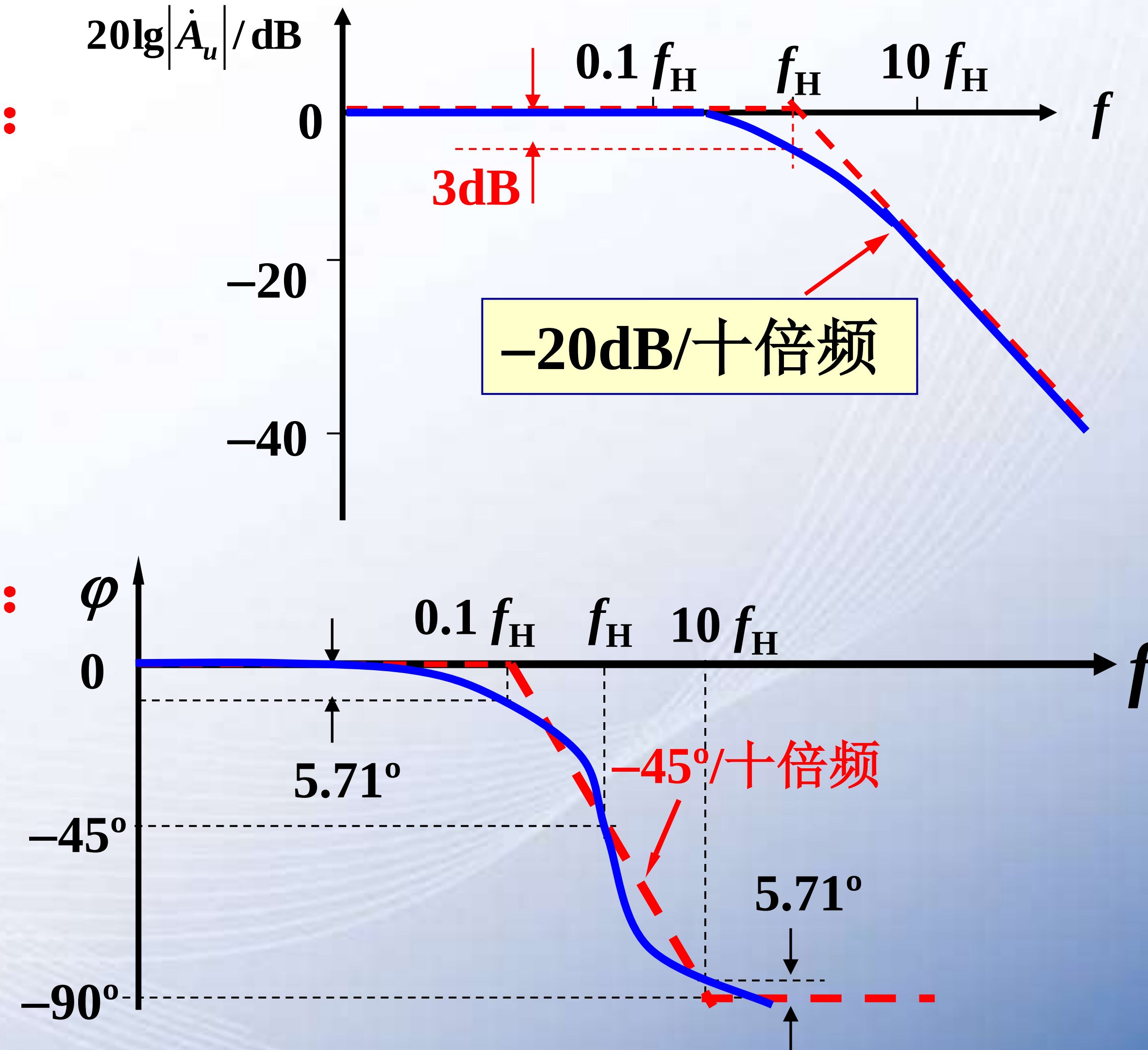
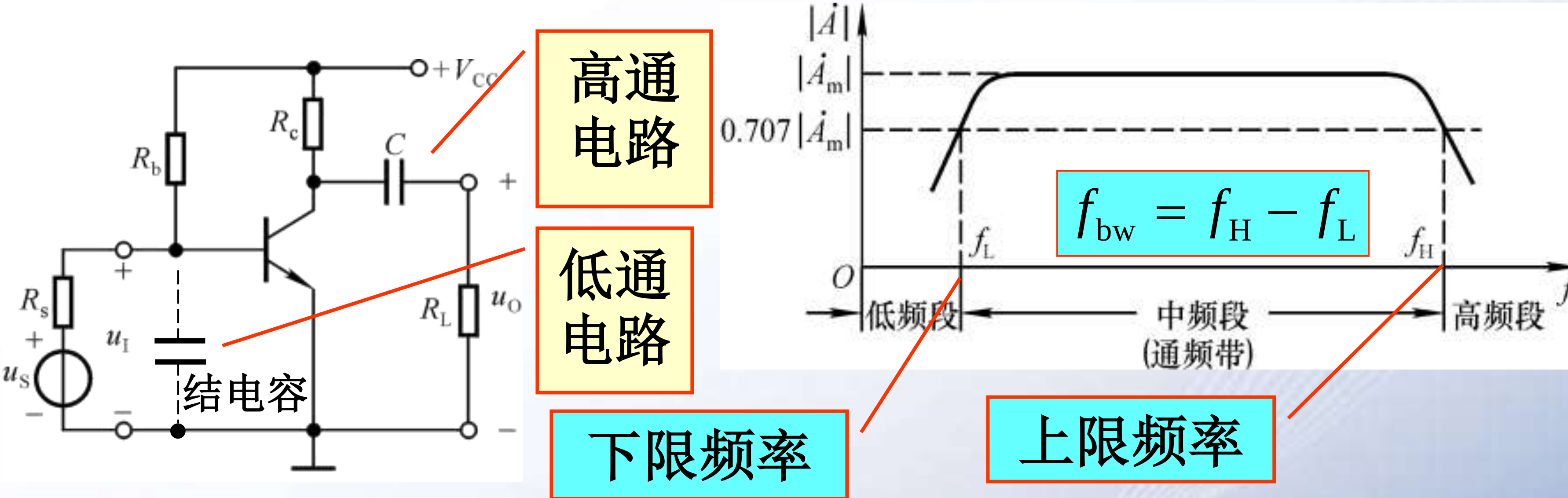


图 4.1.3(b)　低通电路的波特图

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。

§4.2 晶体管的高频等效电路

一、混合π模型

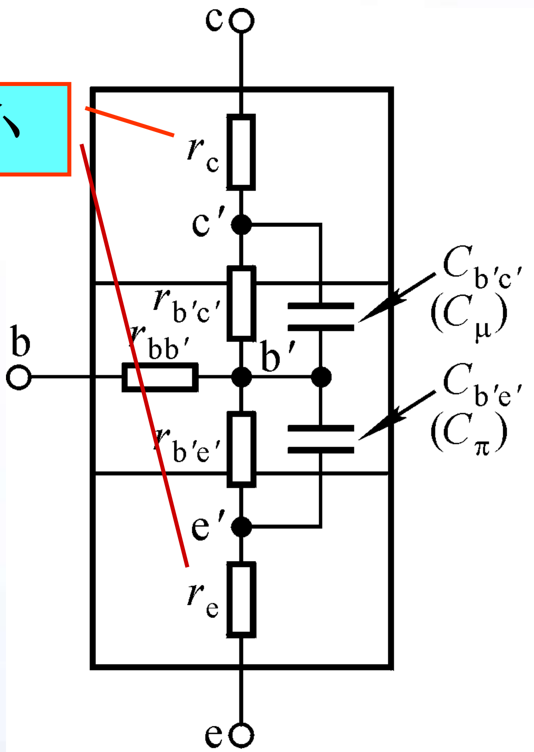
二、电流放大倍数的频率响应

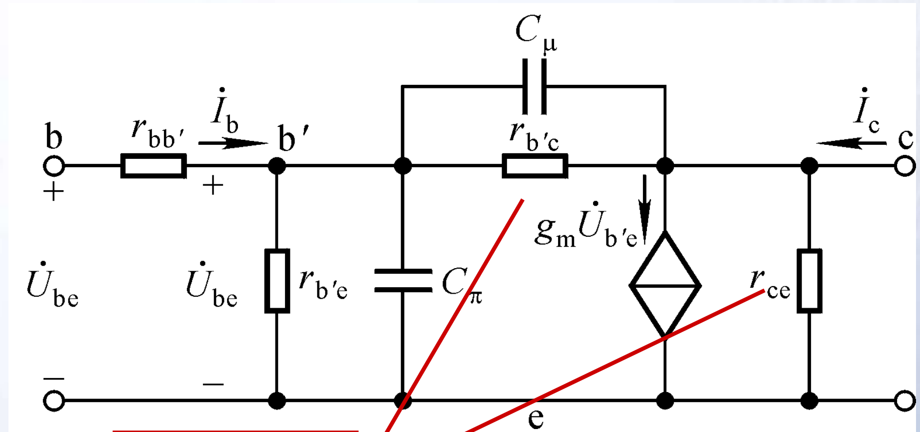
三、晶体管的频率参数

一、混合π模型

1. 模型的建立：由结构而建立，形状像Π，参数量纲各不相同。

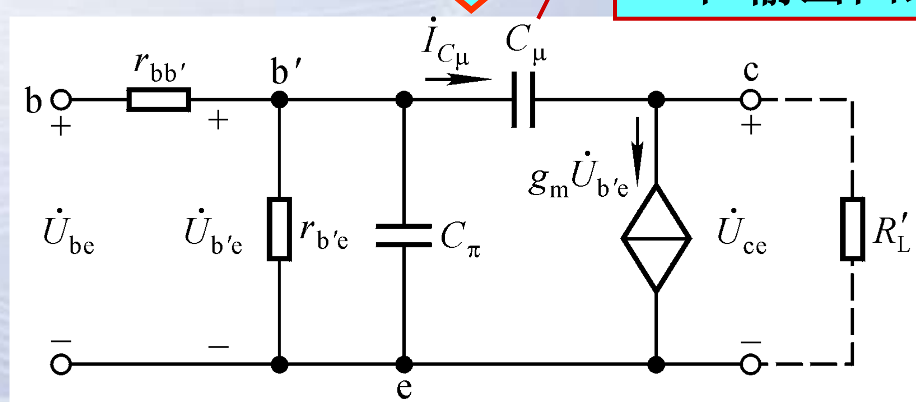
阻值小





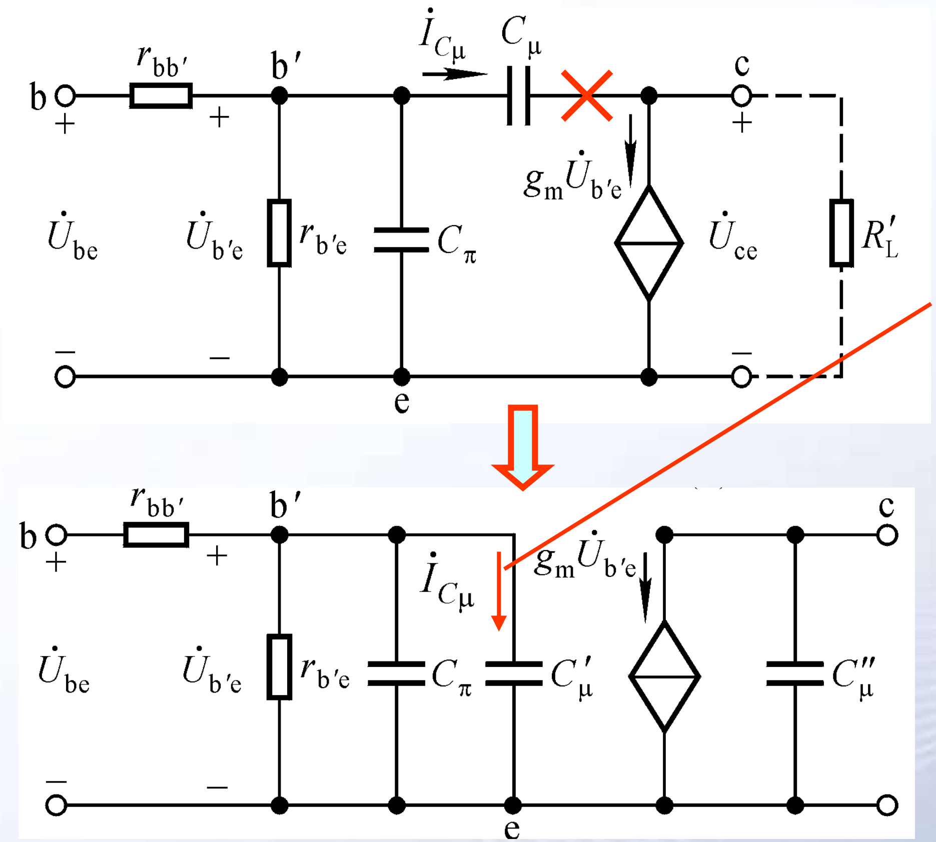
阻值大

连接了输入回路和输出回路



g_m为跨导，它不随信号频率的变化而变。

2. 混合π模型的单向化（使信号单向传递）



$$\dot I_{C\mu}=\frac{\dot U_{b'e}-\dot U_{ce}}{X_{C\mu}}=(1-k)\frac{\dot U_{b'e}}{X_{C\mu}}$$

$$k\approx -g_m R_L'$$

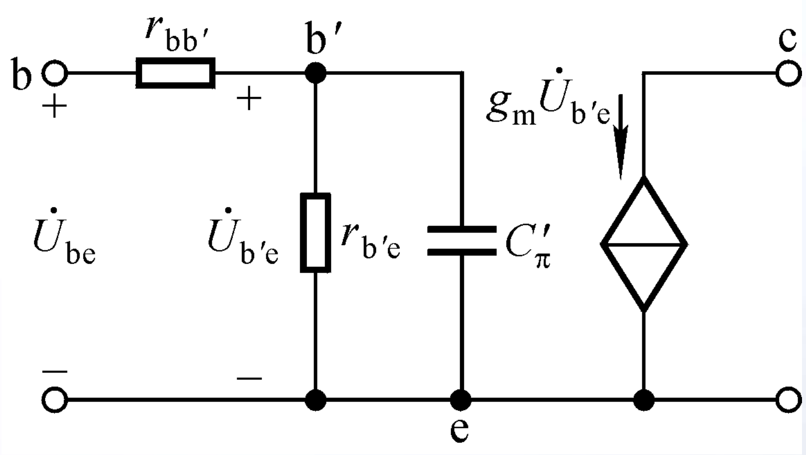
等效变换后电流不变

$$X_{C'\mu}=\frac{\dot U_{b'e}}{\dot I_{C\mu}}\approx\frac{X_{C\mu}}{1+g_m R_L'}$$

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

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

3. 晶体管简化的高频等效电路



为什么不考虑 C''_μ?

$r_{bb'}$、C_μ可从手册查得

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

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

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

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

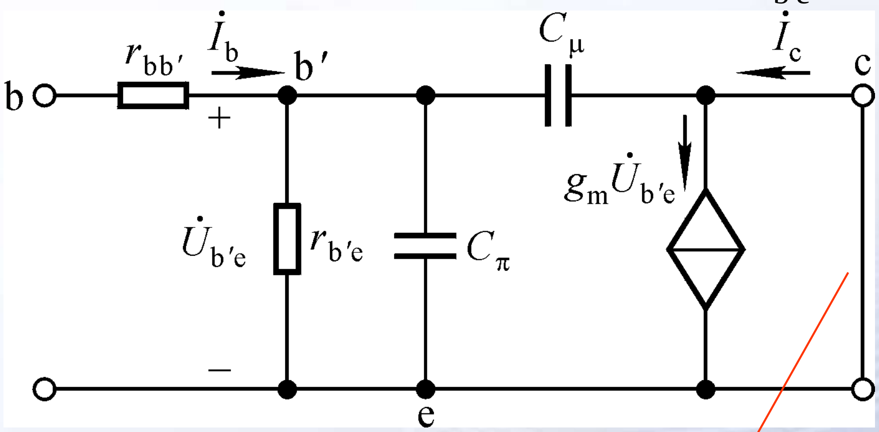
二、电流放大倍数的频率响应

1. 适于频率从0至无穷大的表达式

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

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

$$g_{\mathrm{m}}=\frac{\beta_0}{r_{\mathrm{b'e}}}$$



为什么短路？

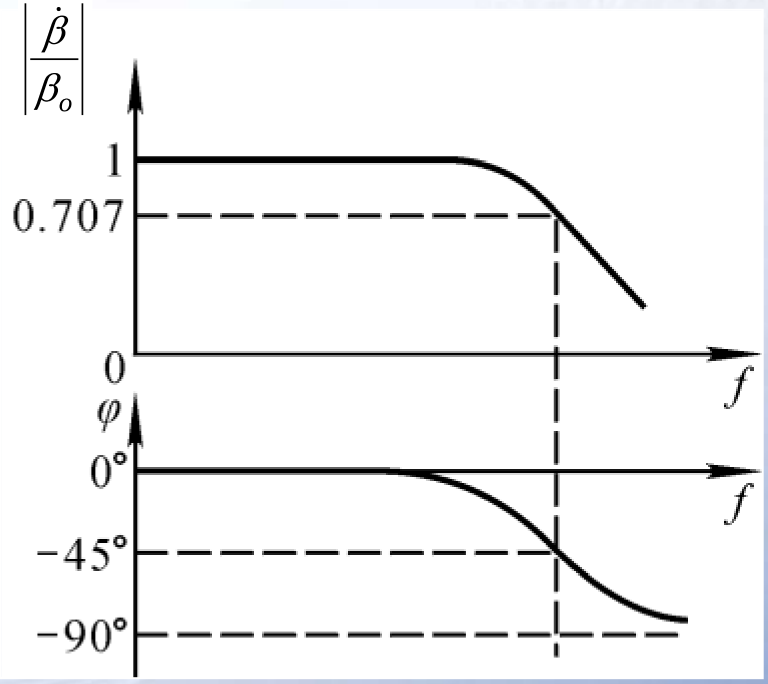
$$\dot{\beta}=\frac{g_{\mathrm{m}}\dot{U}_{\mathrm{b'e}}}{\dot{U}_{\mathrm{b'e}}[\frac{1}{r_{\mathrm{b'e}}}+\mathrm{j}\omega(C_{\pi}+C_{\mu})]}$$

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

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

2. 电流放大倍数的频率特性曲线

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

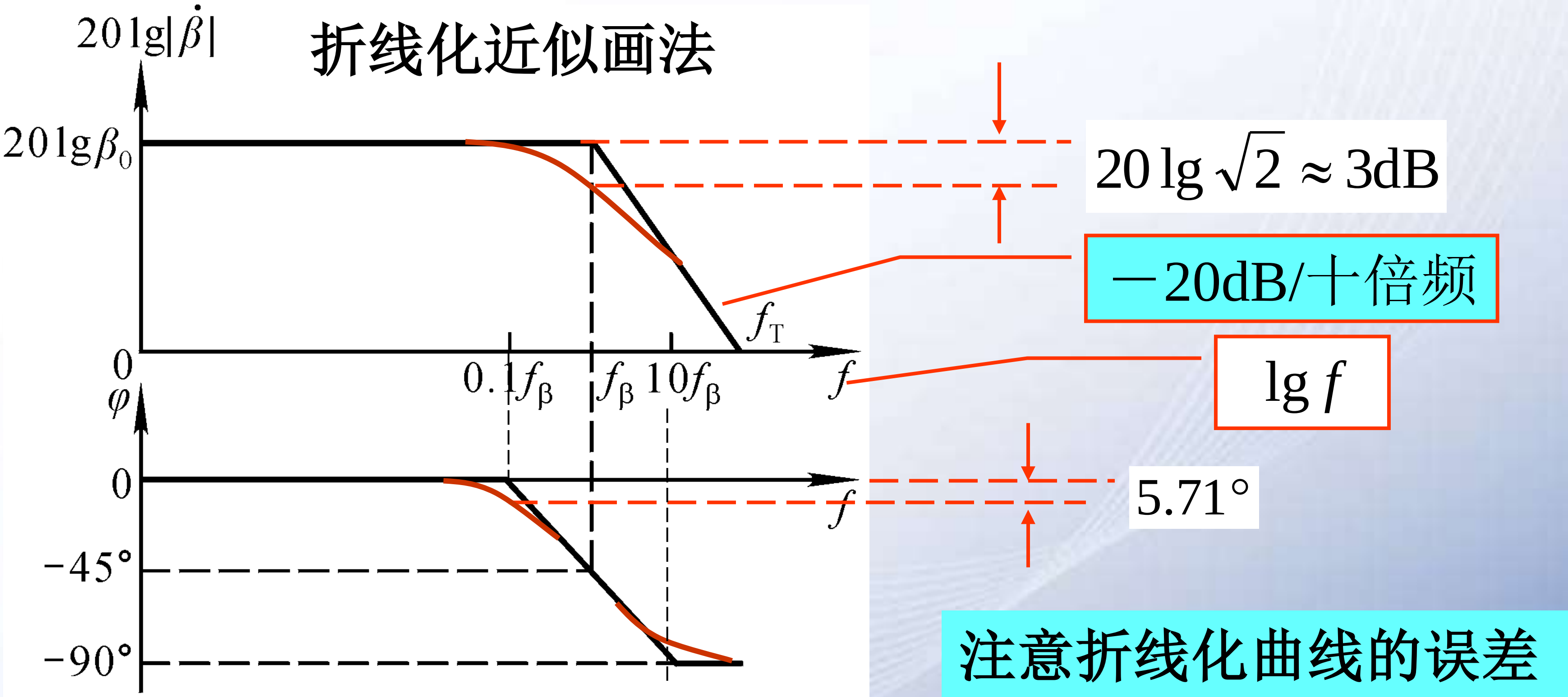


$f << f_\beta$ 时，$|\dot{\beta}| \approx \beta_0$;

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

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

3. 电流放大倍数的波特图：采用对数坐标系



采用对数坐标系，横轴为**lg** ***f***，可开阔视野；纵轴为 $20\lg\left|\dot{\beta}\right|$，单位为“分贝”（**dB**），使得“ ×”→“ ＋” 。

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、$C_\mathrm{ob}(C_\mu)$。

使$|\dot{\beta}|=1$时的频率为f_T

$$f_\mathrm{T} \approx f_\alpha \approx \beta_0 f_\beta$$

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

手册查得

通过以上分析得出的结论：

① 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；

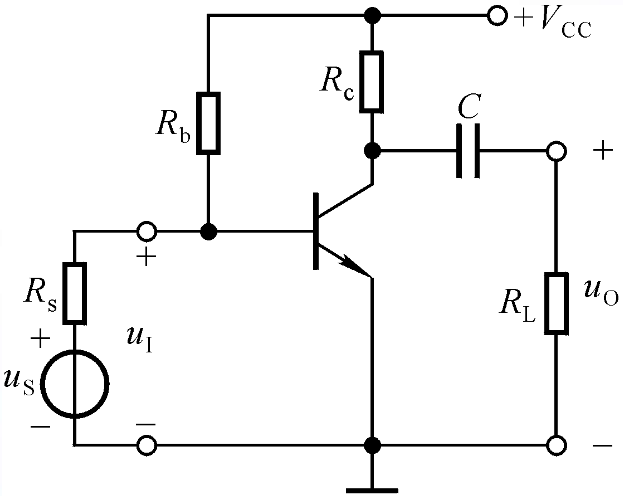
④ C_π的求法。

§4.3 放大电路的频率响应

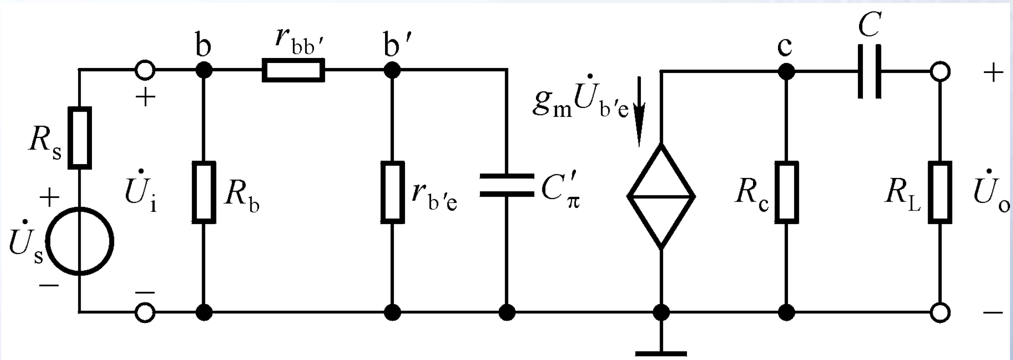
一、单管共射放大电路的频率响应

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

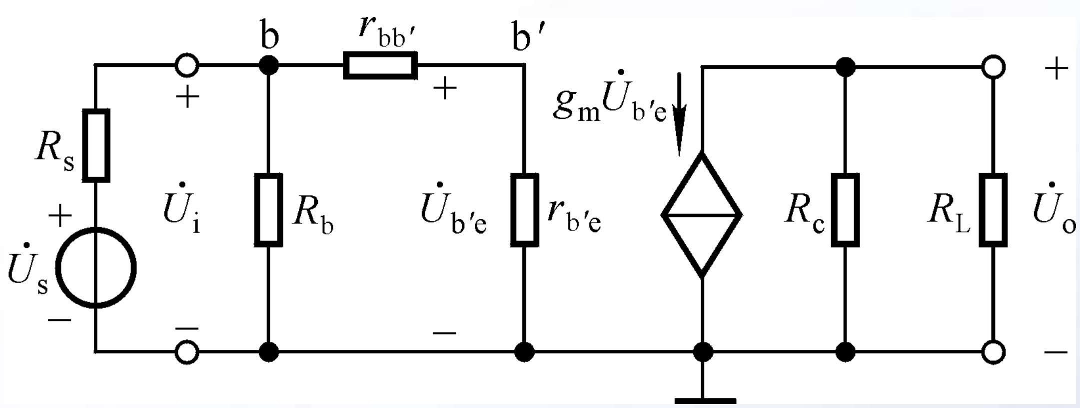


中频段：C 短路，C'_π 开路。

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



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

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

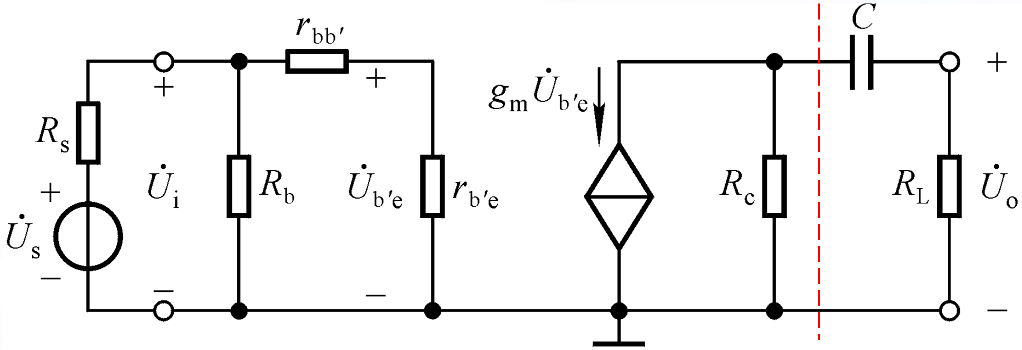
带负载时：

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

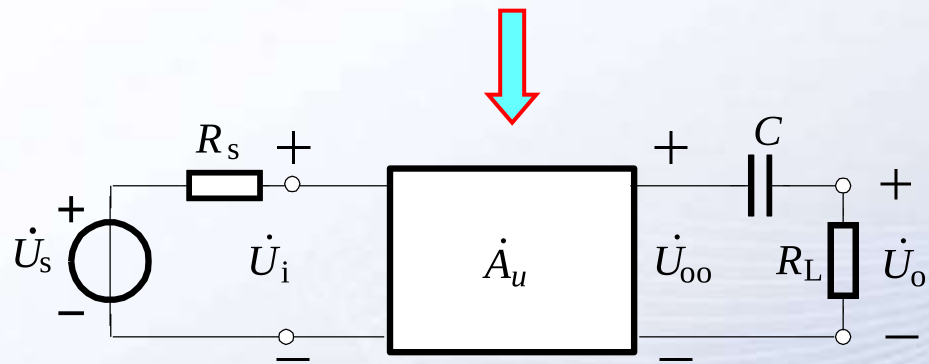
空载时：

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

2. 低频电压放大倍数:定性分析

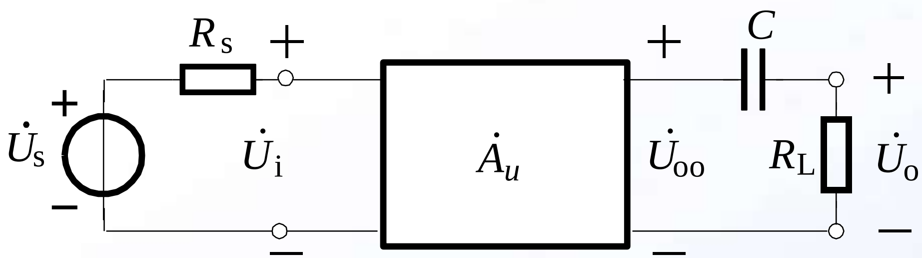


$$\dot{A}_{usmo}=\frac{R_i}{R_s+R_i}\cdot\frac{r_{b'e}}{r_{be}}\cdot(-g_m R_c)$$



$\dot{U}_o$超前$\dot{U}_{oo}$，当 $f\rightarrow 0$时,$\left|\dot{U}_o\right|\rightarrow 0$，$\dot{U}_o$超前$\dot{U}_{oo}$ $90°$。

2. 低频电压放大倍数：定量分析



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

$$\dot A_{usl} = \frac{\dot U_o}{\dot U_s} = \frac{\dot U_{oo}}{\dot U_s} \cdot \frac{\dot U_o}{\dot U_{oo}} = \dot A_{usmo} \cdot \frac{R_L}{R_c + \frac{1}{j\omega C} + R_L}$$

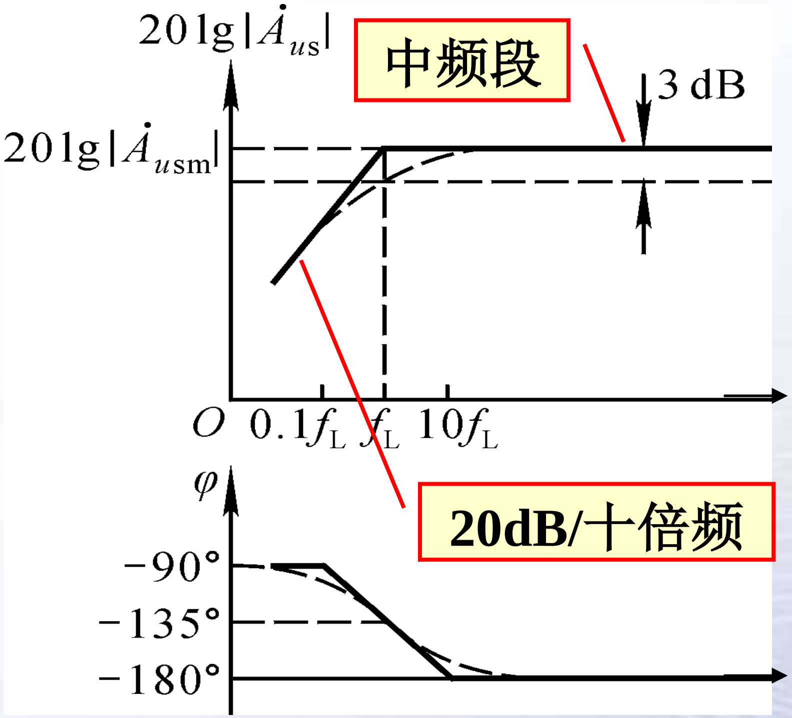
$$\dot A_{usl} = \dot A_{usmo} \cdot \frac{R_L}{R_c + \frac{1}{j\omega C} + R_L} \cdot \frac{R_c + R_L}{R_c + R_L} = \frac{\dot A_{usm}}{1 + \frac{1}{j\omega (R_c + R_L) C}}$$

$$\boxed{\dot A_{usl} = \frac{\dot A_{usm}}{1 + f_L/(jf)} = \frac{\dot A_{usm}(j f / f_L)}{1 + j f / f_L} \qquad f_L = \frac{1}{2\pi (R_c + R_L)}}$$

2. 低频电压放大倍数：低频段频率响应分析

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

$$\begin{cases}20\lg\left|\dot{A}_{usl}\right|=20\lg\left|\dot{A}_{usm}\right|-20\lg\dfrac{1}{\sqrt{1+(\dfrac{f_L}{f})^2}}\\[2ex]\varphi=-180°+(90°-\arctan\dfrac{f}{f_L})\end{cases}$$



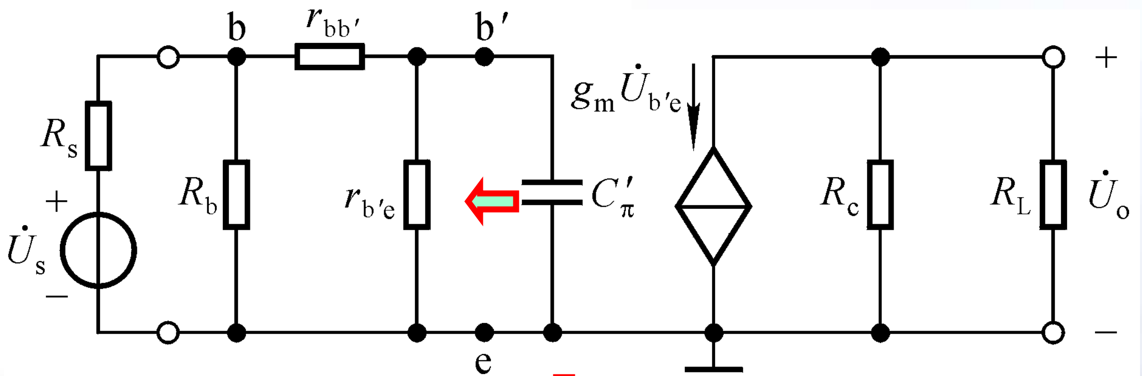
$f>>f_L$时，$20\lg\left|\dot{A}_{us}\right|\approx 20\lg\dot{A}_{usm}$

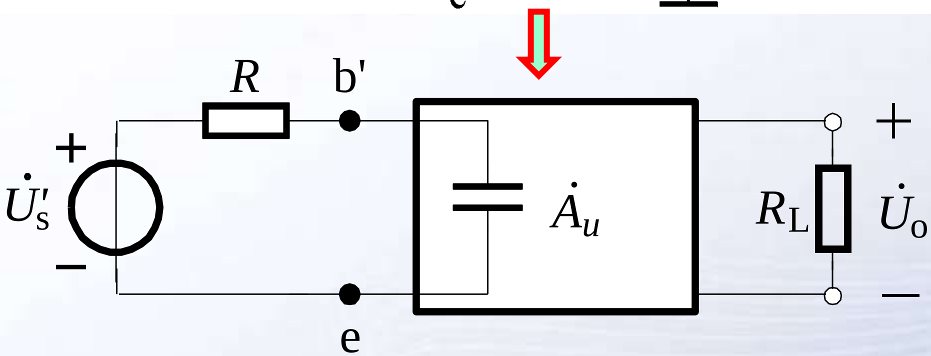
$f=f_L$时，$20\lg\left|\dot{A}_{us}\right|$下降3dB，$\varphi=-135°$

$f<<f_L$时，$20\lg\left|\dot{A}_{us}\right|\approx 20\lg(\dot{A}_{usm}\dfrac{f_L}{f})$

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

3. 高频电压放大倍数：定性分析





$\dot U'_{C_\pi}$ 滞后 U'_s，

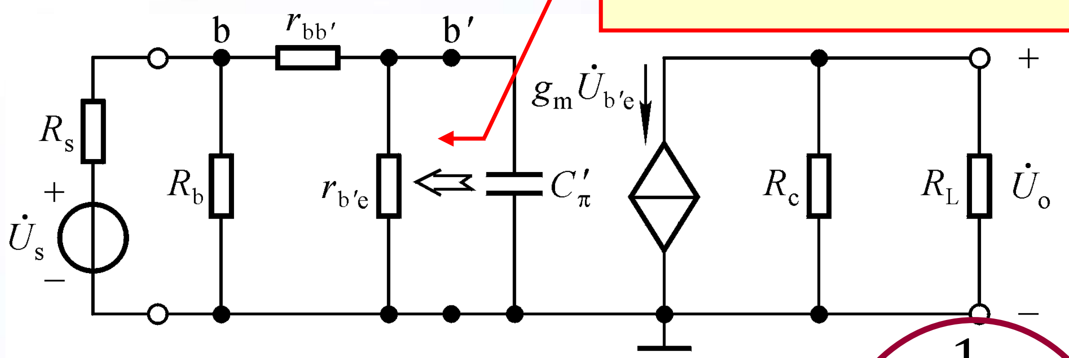
当 $f\to\infty$ 时，$\left|\dot U'_{C_\pi}\right|\to 0$，

$\dot U'_{C_\pi}$ 滞后 $U'_s(-90°)$。

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

3. 高频电压放大倍数：定量分析

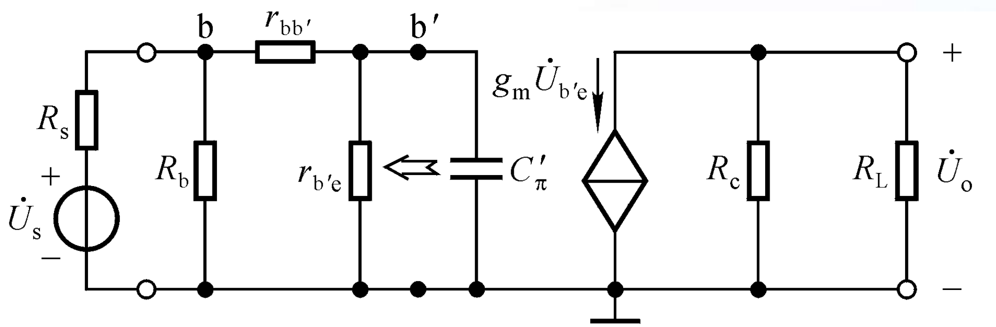
$$R = r_{b'e} \,//\, (r_{bb} + R_b \,//\, R_s)$$



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

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

3. 高频电压放大倍数：高频段频率响应分析



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

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

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

$f \ll f_H$时，

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

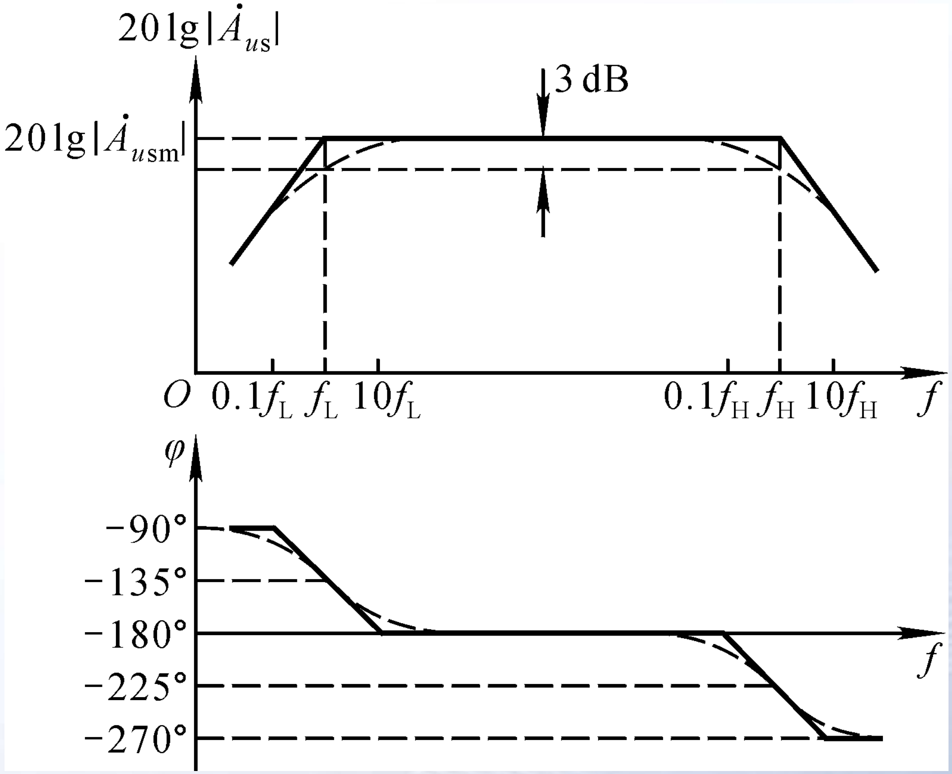
$f = f_H$时，

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

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

$f\to\infty$时，$\left|\dot{A}_{ush}\right|\to 0$，$\varphi\to -270°$。

4. 电压放大倍数的波特图



全频段放大倍数表达式：

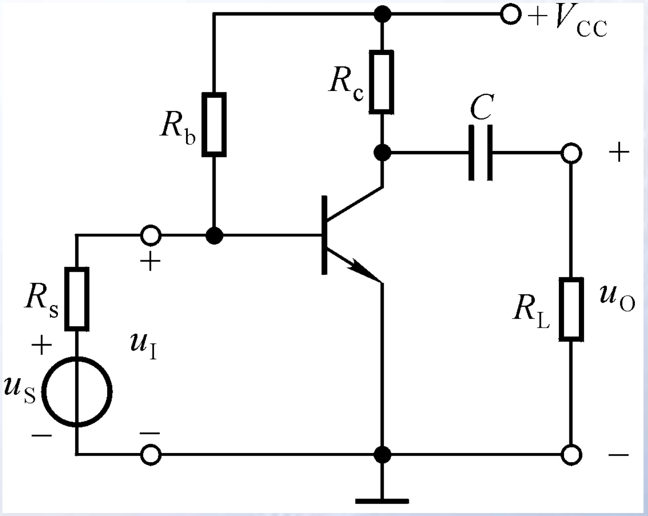
$$\dot{A}_{us}=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$$

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

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

5. 带宽增益积：定性分析

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



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

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

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

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

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

矛盾

当提高增益时，带宽将变窄；反之，增益降低，带宽将变宽。

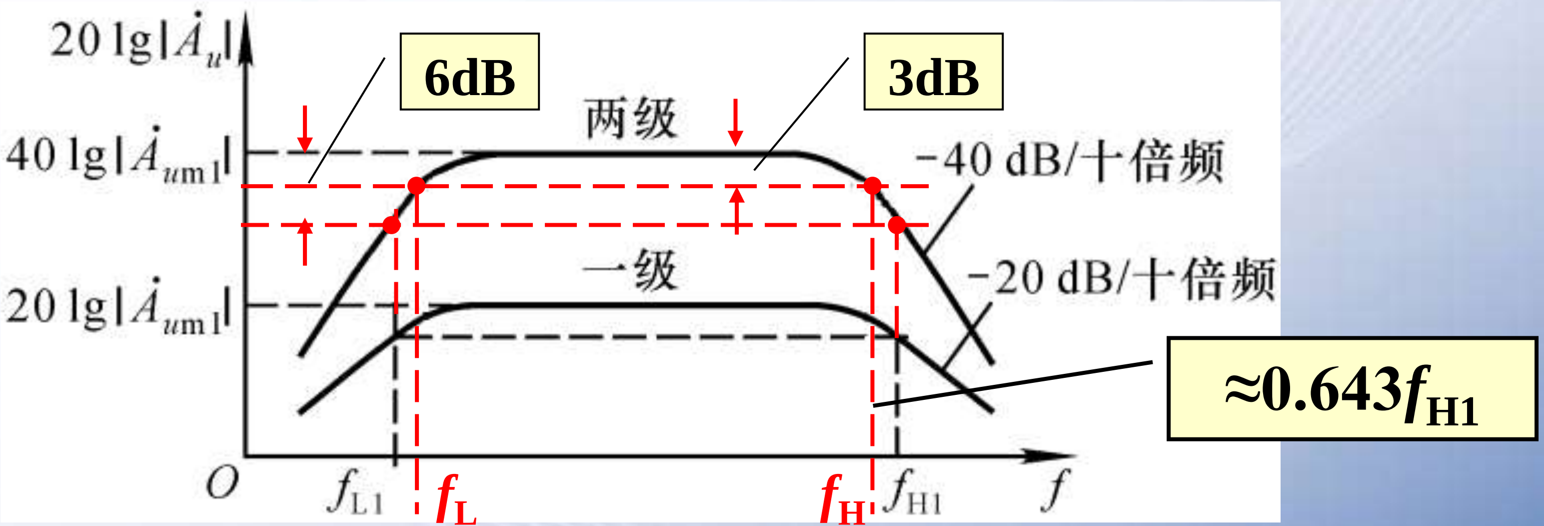
对于大多数放大电路，增益提高，带宽都将变窄。

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. 讨论： 一个两级放大电路每一级（已考虑了它们的相互影响）的幅频特性均如图所示。

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



$f_L > f_{L1}$，$f_H < f_{H1}$，频带变窄！