第五章 放大电路的频率响应

第五章 放大电路的频率响应

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

§5.1 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

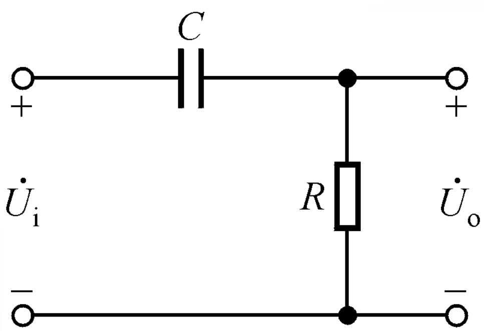
放大电路对信号频率的适应程度，即信号频率对放大倍数的影响。

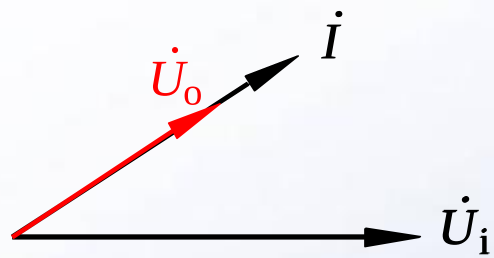
由于放大电路中耦合电容、旁路电容、半导体器件极间电容的存在，使放大倍数为频率的函数。

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。

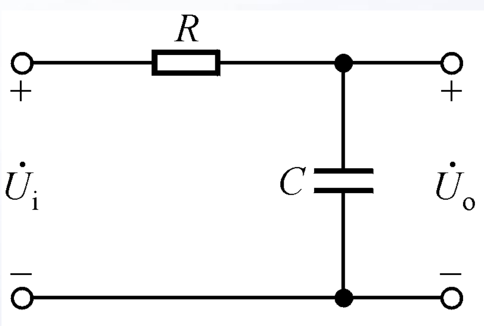


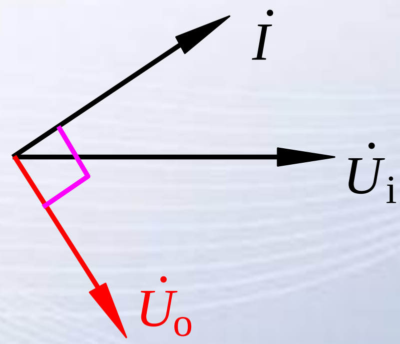


$\dot U_o$超前$\dot U_i$，当 $f\to 0$时；

$|\dot U_o|\to 0$，$\dot U_o$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。





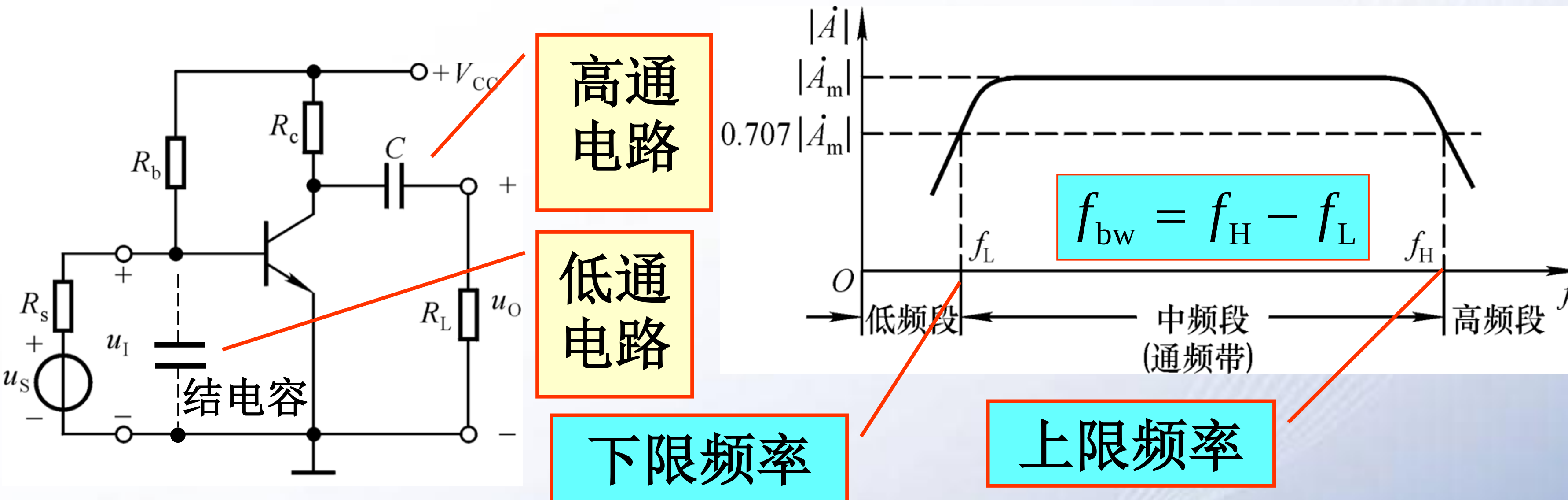
$\dot U_o$滞后$\dot U_i$，当 $f\to \infty$时；

$|\dot U_o|\to 0$，$\dot U_o$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。

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

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。

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

§5.2 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

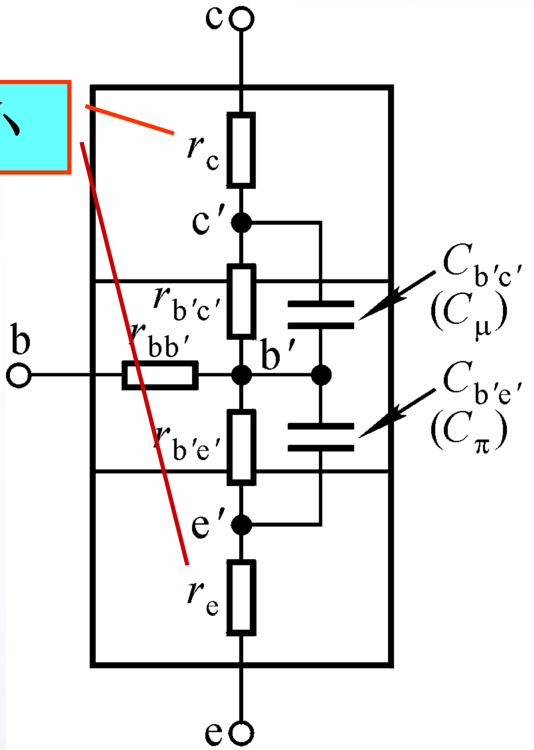
三、晶体管的频率参数

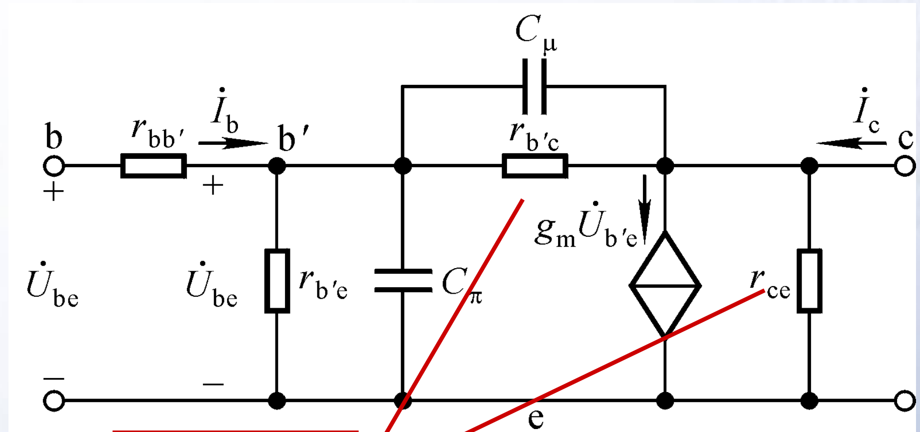
华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

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。

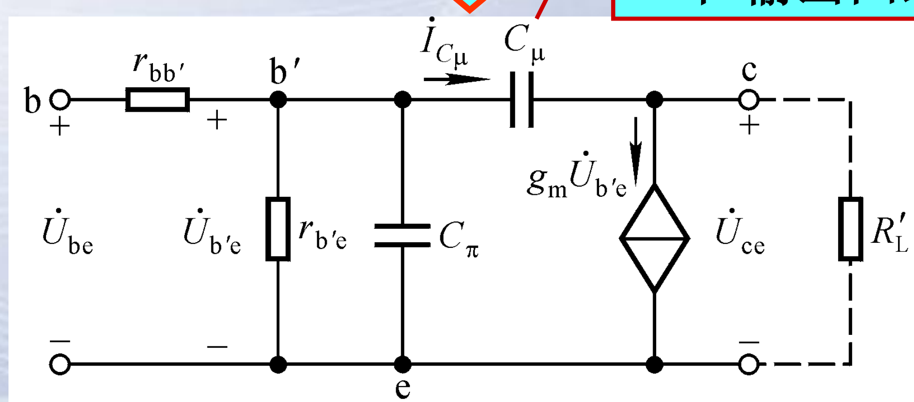
阻值小





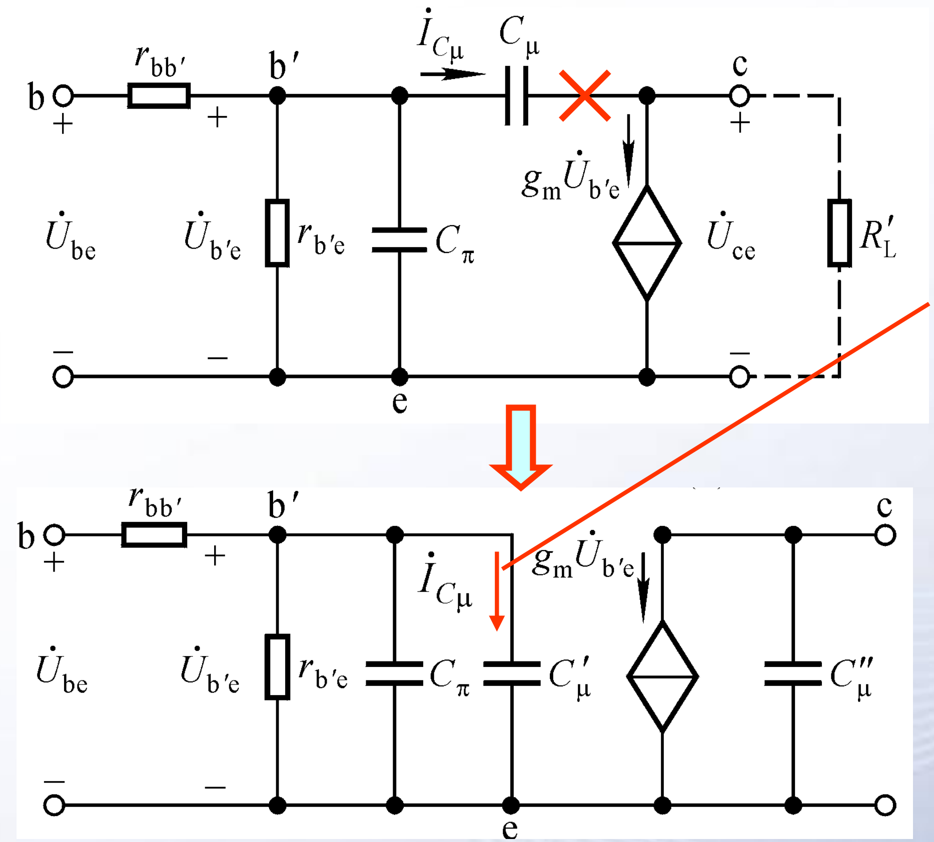
阻值大

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

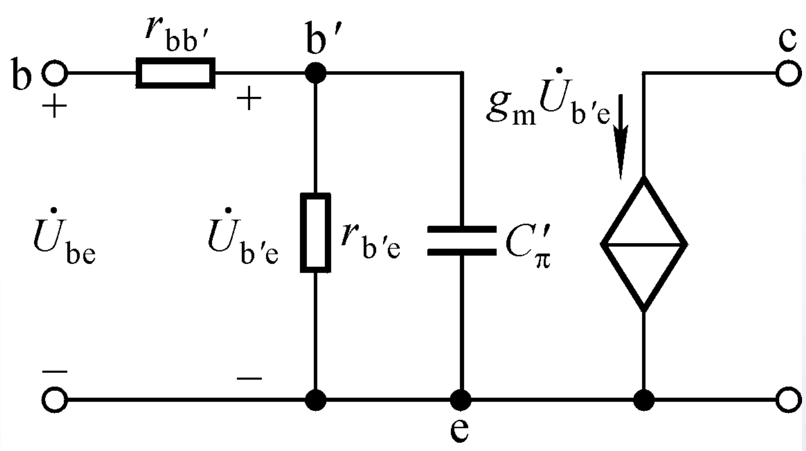
$$X_{C'\mu}=\frac{\dot U_{b'e}}{\dot I_{C\mu}}\approx\frac{X_{C\mu}}{1+g_m R_L^{'}}$$

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

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

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

3. 晶体管简化的高频等效电路



为什么不考虑C''_μ?

如何得到模型中的参数?

$r_{bb'}$、C_μ可从手册查得

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

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

＝?

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

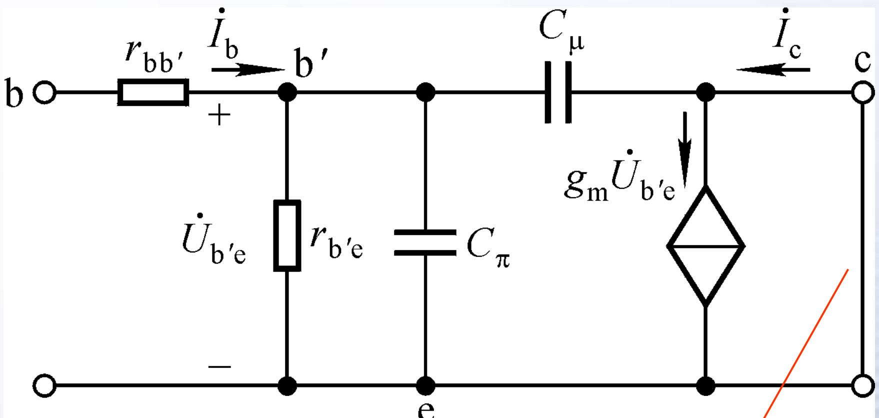
$$g_m = \frac{\beta_0}{r_{b'e}} \approx \frac{I_{EQ}}{U_T}$$

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

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

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



为什么短路？

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

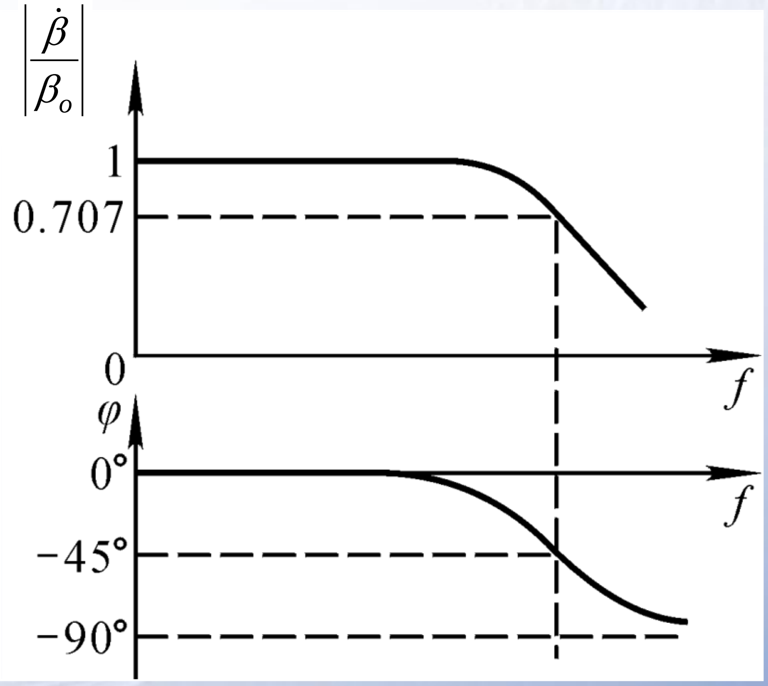
$$=\frac{\beta_0}{1+\mathrm{j}\frac{f}{f_\beta}}$$

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

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

2. 电流放大倍数的频率特性曲线

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



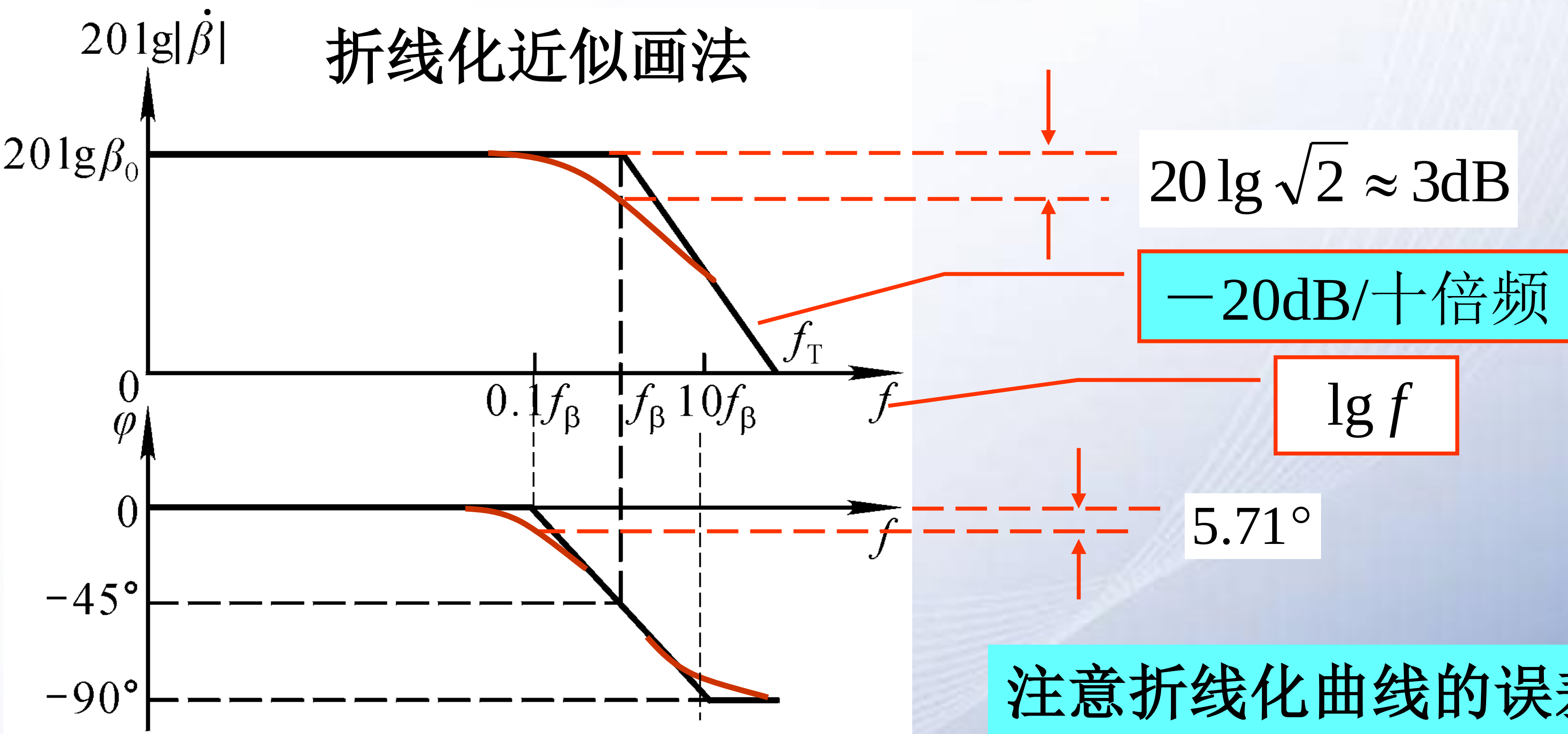
$f \ll f_\beta$ 时，$\left|\dot{\beta}\right| \approx \beta_0$;

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

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

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

3. 电流放大倍数的波特图：采用对数坐标系



注意折线化曲线的误差

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、$C_{ob}(C_\mu)$。

使 $|\dot\beta|=1$ 时的频率为 f_T

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

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

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；

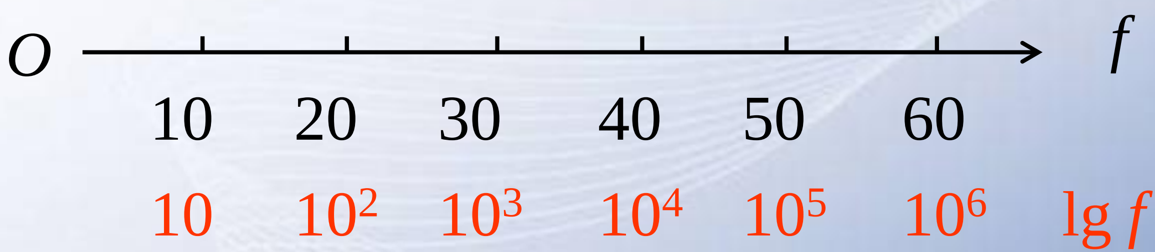
③ 波特图及其折线画法；

④ C_π的求法。

讨论一

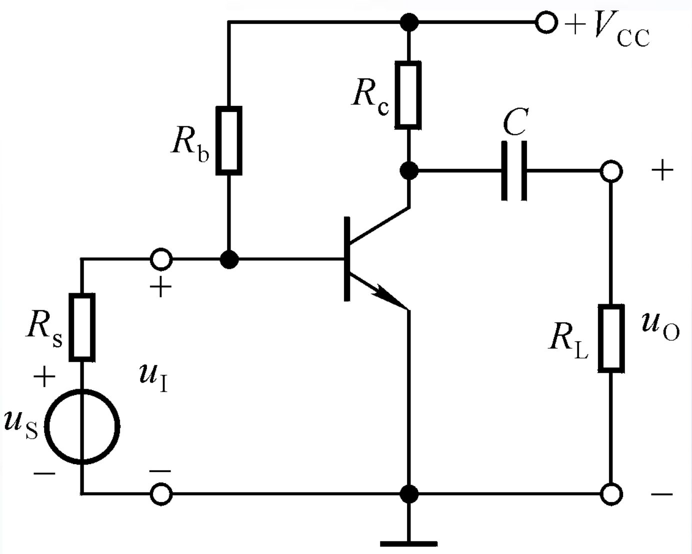
1. 若干个放大电路的放大倍数分别为1、10、10^2、10^3、10^4、10^5，它们的增益分别为多少？

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？



华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

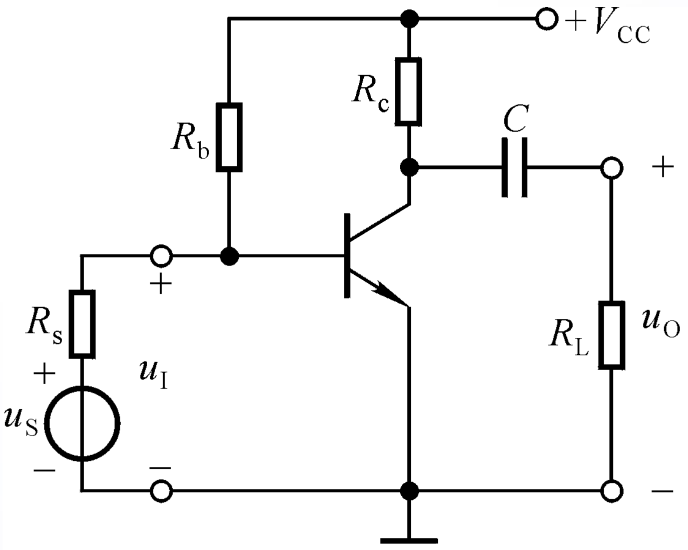
讨论二



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$r_{bb'}=200\Omega$，$C_{ob}=5pF$，$f_\beta=1MHz$。

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

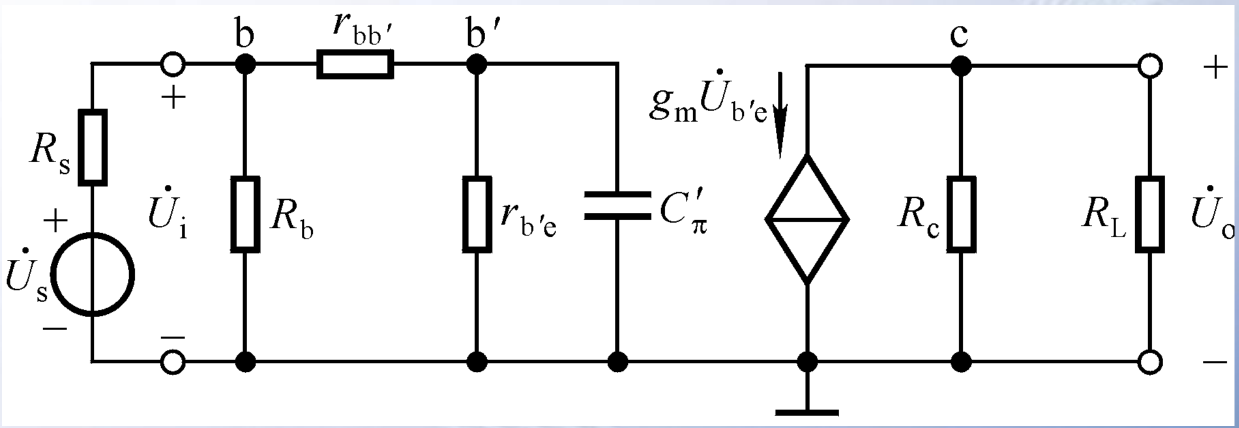


$$I_{CQ} \to g_m、r_{b'e}$$

$$C_\mu(\approx C_{ob})、g_m、R_c、R_L \to C_\mu'$$

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

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



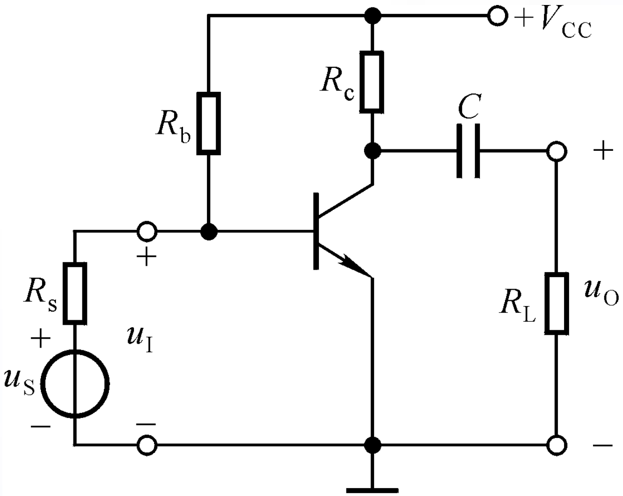
§5.3 放大电路的频率响应

一、单管共射放大电路的频率响应

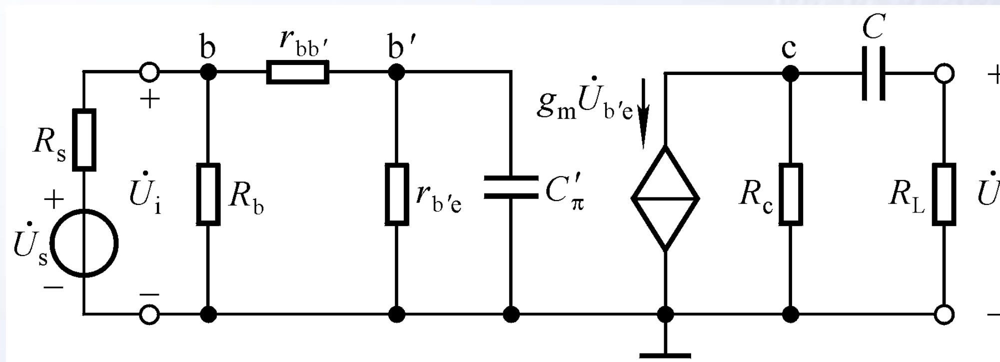
二、多级放大电路的频率响应

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

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



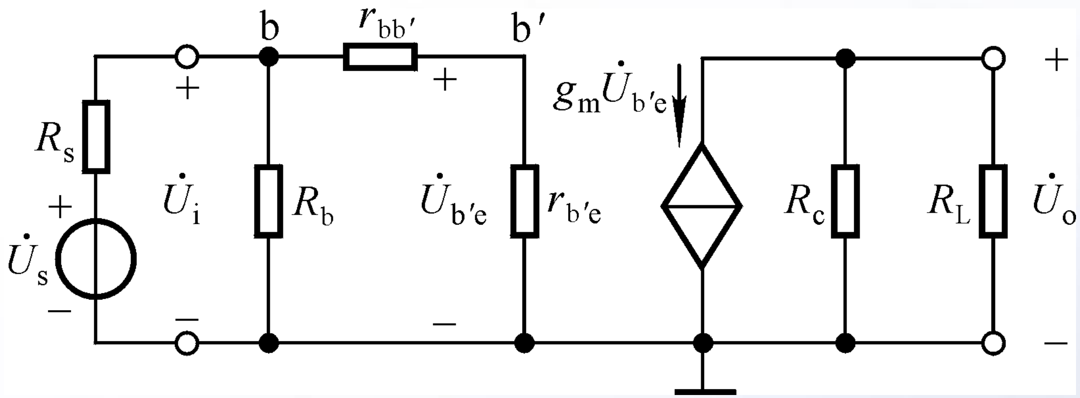
中频段：C 短路，C'_π 开路。

低频段：考虑C 的影响，C'_π 开路。

高频段：考虑 C'_π 的影响，C 开路。

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

1. 中频电压放大倍数



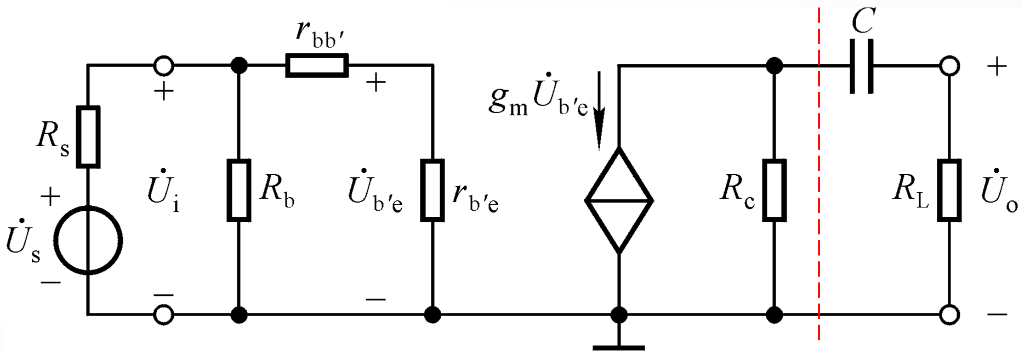
$$\dot{A}_{usm}=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}=\frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s}\cdot\frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}_i}\cdot\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{b'e}}$$

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

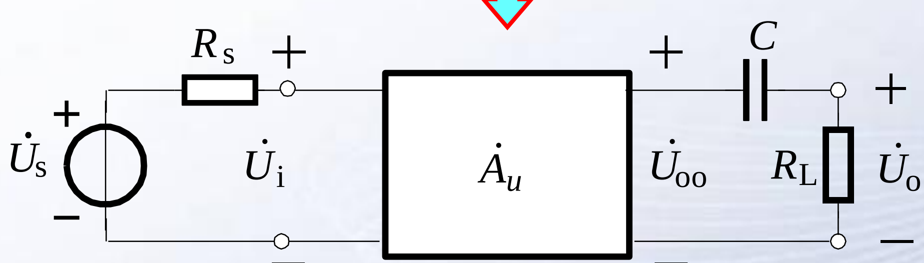
空载时：
$$\dot{A}_{usmo}=\frac{R_i}{R_s+R_i}\cdot\frac{r_{b'e}}{r_{be}}\cdot(-g_mR_c)$$

清華大學

2. 低频电压放大倍数：定性分析



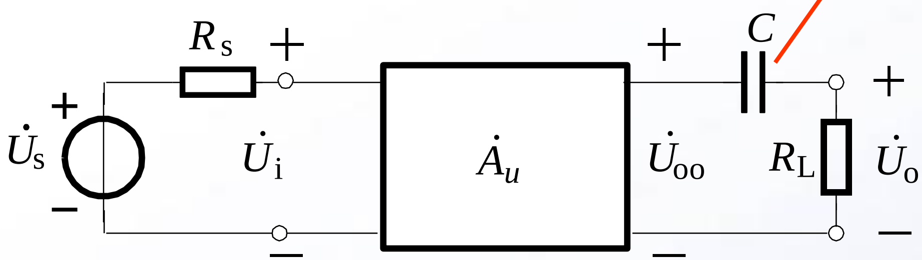
$$\dot{A}_{usmo}=\frac{R_i}{R_s+R_i}\cdot\frac{r_{b'e}}{r_{be}}\cdot(-g_mR_c)$$



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

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

2. 低频电压放大倍数：定量分析



C所在回路的时间常数？

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

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

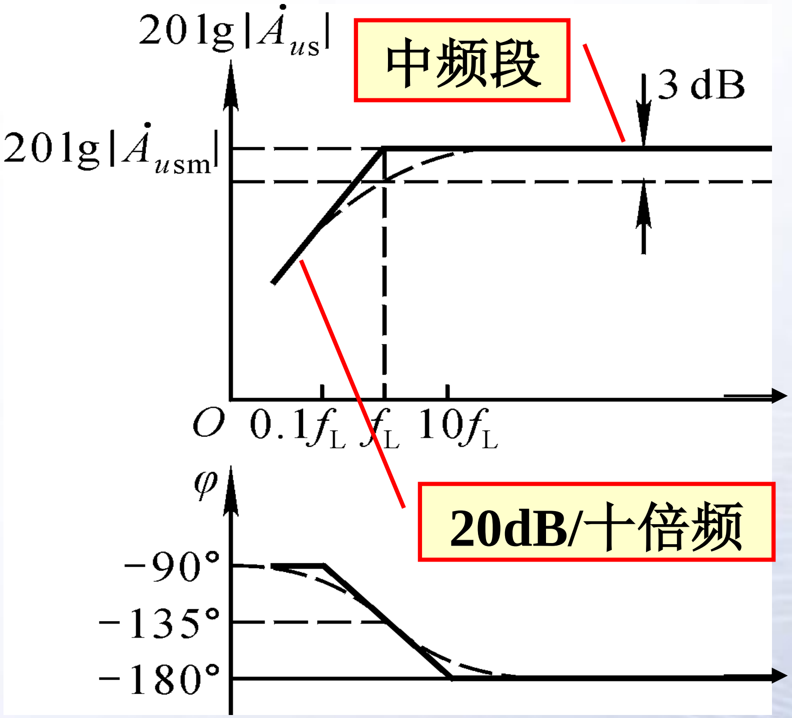
$$\dot A_{usl}=\dot A_{usmo}\cdot\frac{R_L}{R_c+\dfrac{1}{j\omega C}+R_L}\cdot\frac{R_c+R_L}{R_c+R_L}=\frac{\dot A_{usm}}{1+\dfrac{1}{j\omega(R_c+R_L)C}}$$

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

2. 低频电压放大倍数：低频段频率响应分析

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

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



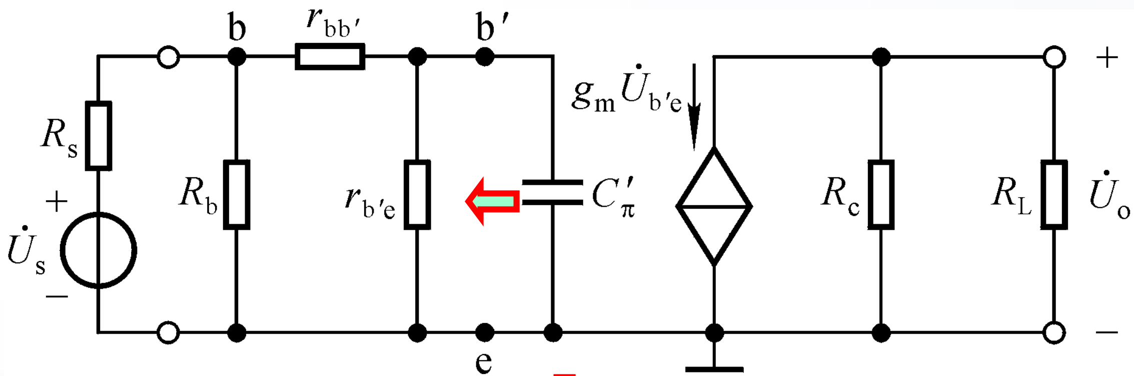
$f>>f_L$时，$20\lg\left|\dot{A}_{us}\right|\approx20\lg\dot{A}_{usm}$

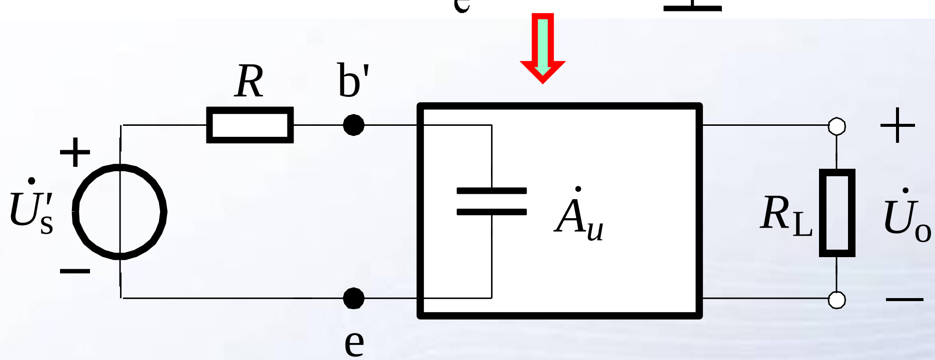
$f=f_L$时，$20\lg\left|\dot{A}_{us}\right|$下降3dB，$\varphi=-135^\circ$

$f<<f_L$时，$20\lg\left|\dot{A}_{us}\right|\approx20\lg(\dot{A}_{usm}\dfrac{f_L}{f})$

$f\to0$时，$\left|\dot{A}_{us}\right|\to0$，$\varphi\to-90^\circ$。

3. 高频电压放大倍数：定性分析





$\dot U'_{C_\pi}$ 滞后 U'_s，

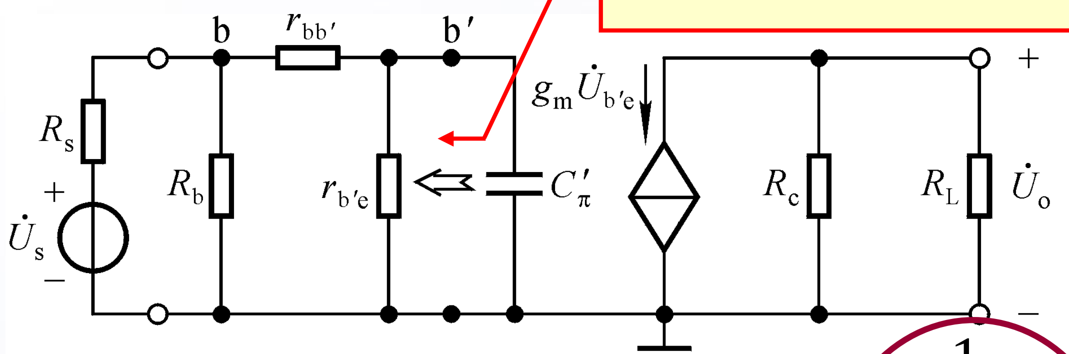
当 $f \to \infty$ 时，$\left|\dot U'_{C_\pi}\right| \to 0$，

$\dot U'_{C_\pi}$ 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

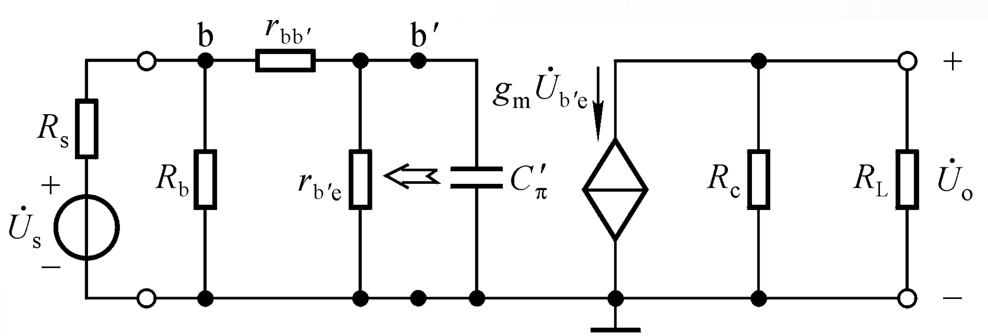
$$R = r_{\mathrm{b'e}} \mathbin{//} (r_{\mathrm{bb}} + R_{\mathrm{b}} \mathbin{//} R_{\mathrm{s}})$$



$$\dot{A}_{\mathrm{ush}} = \frac{\dot{U}_{\mathrm{o}}}{\dot{U}_{\mathrm{s}}} = \frac{\dot{U}'_{\mathrm{s}}}{\dot{U}_{\mathrm{s}}} \cdot \frac{\dot{U}_{C'_{\pi}}}{\dot{U}'_{\mathrm{s}}} \cdot \frac{\dot{U}_{\mathrm{o}}}{\dot{U}_{C'_{\pi}}} = \frac{R_{\mathrm{i}}}{R_{\mathrm{s}} + R_{\mathrm{i}}} \cdot \frac{r_{\mathrm{b'e}}}{r_{\mathrm{be}}} \cdot \frac{\dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C'_{\pi}}}{R + \dfrac{1}{\mathrm{j}\omega C'_{\pi}}} \cdot (-g_{\mathrm{m}} R'_{\mathrm{L}})$$

$$\dot{A}_{\mathrm{ush}} = \frac{\dot{U}_{\mathrm{o}}}{\dot{U}_{\mathrm{s}}} = \frac{\dot{A}_{\mathrm{usm}}}{1 + \mathrm{j}\dfrac{f}{f_{\mathrm{H}}}} \qquad f_{\mathrm{H}} = \frac{1}{2\pi R C'_{\pi}} = \frac{1}{2\pi [r_{\mathrm{b'e}} \mathbin{//} (r_{\mathrm{bb'}} + R_{\mathrm{b}} \mathbin{//} R_{\mathrm{s}})] C'_{\pi}}$$

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，

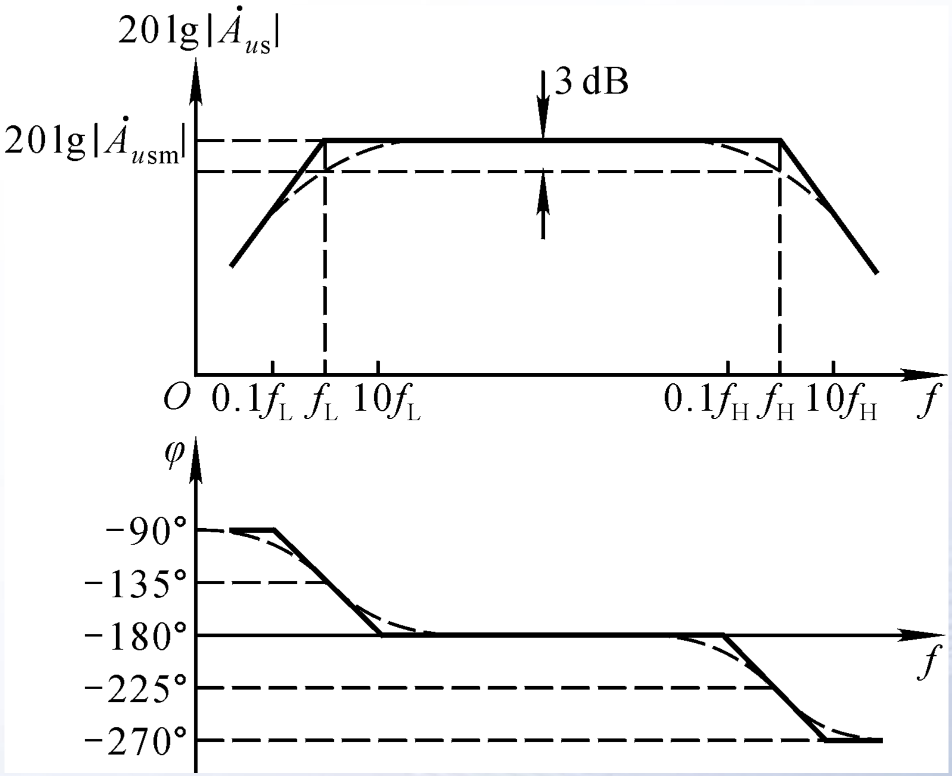
$20\lg\left|\dot{A}_{ush}\right|$下降3dB，$\varphi=-225°$

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

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

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

4. 电压放大倍数的波特图



全频段放大倍数表达式：

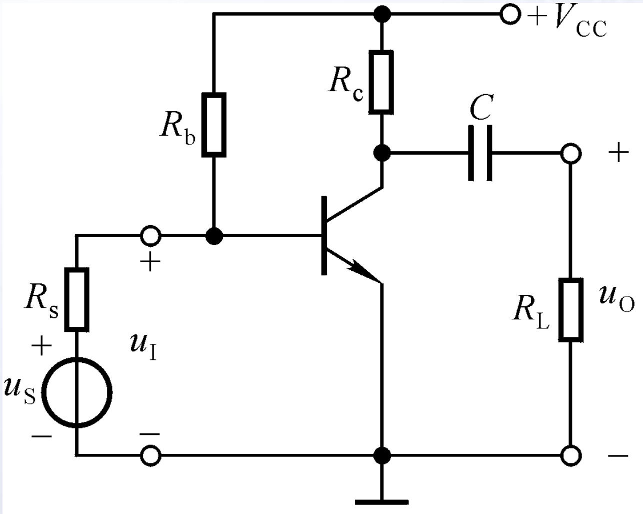
$$\dot{A}_{us}=\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s}$$

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

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

5. 带宽增益积：定性分析

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



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

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

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

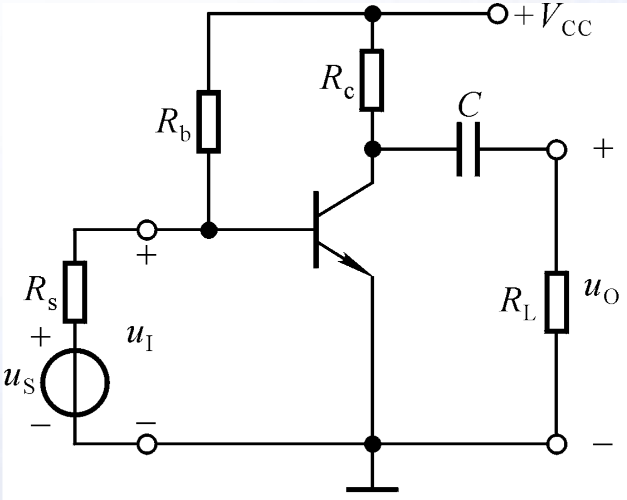
带宽增益积 $\left|\dot{A}_{um}f_{bw}\right|\approx\left|\dot{A}_{um}f_H\right|$

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

矛盾

当提高增益时，带宽将变窄；反之，增益降低，带宽将变宽。

5. 带宽增益积：定量分析



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

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

$$C'_\pi \approx C_\pi + (1 + g_m R'_L)C_\mu$$

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

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

约为常量

说明决定于管子参数

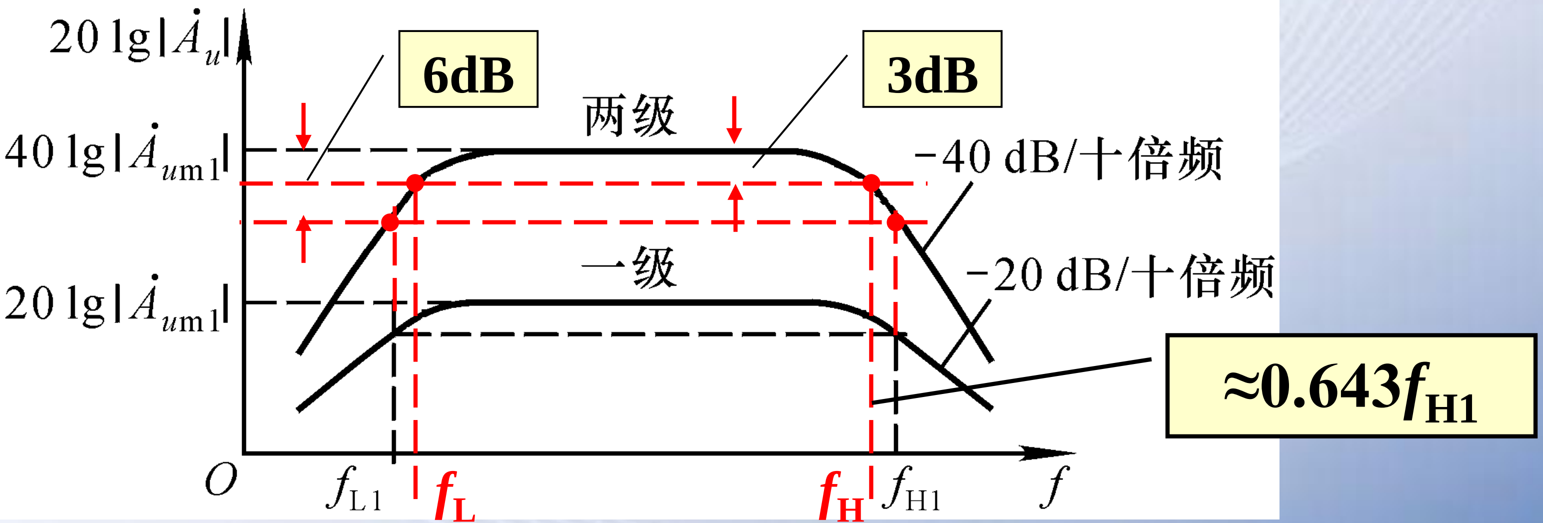
对于大多数放大电路，增益提高，带宽都将变窄。

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。

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



$f_L > f_{L1}$， $f_H < f_{H1}$， 频带变窄！

华成英 hchya@tsinghua.edu.cn

2. 多级放大电路的频率响应与各级的关系

对于n级放大电路，若各级的下、上限频率分别为f_{L1}～f_{Ln}、f_{H1}～f_{Hn}，整个电路的下、上限频率分别为f_L、f_H，则

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

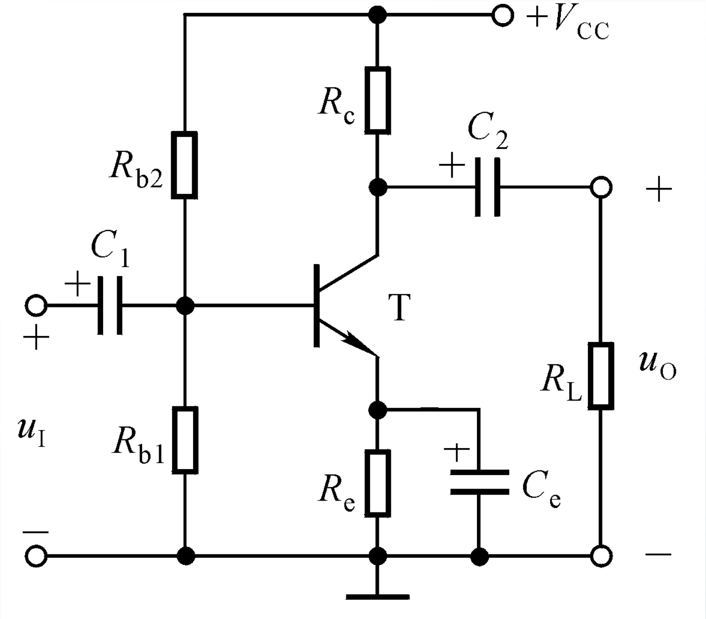
由于 $$\begin{cases} 20\lg\left|\dot{A}_u\right| = \sum_{k=1}^{n} 20\lg\left|\dot{A}_{uk}\right| \\ \varphi = \sum_{k=1}^{n} \varphi_k \end{cases}$$

求解使增益下降3dB的频率，经修正，可得

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

1.1为修正系数

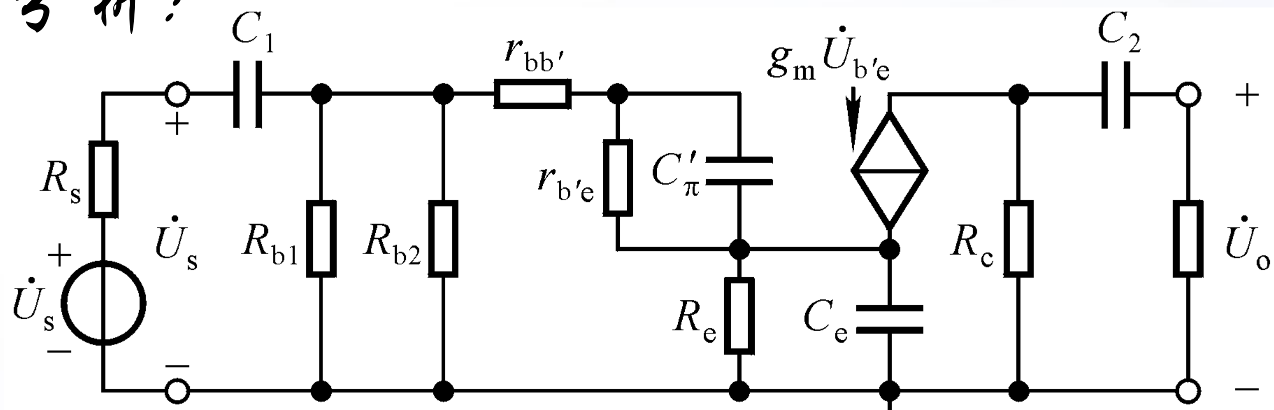
讨论一



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？

时间常数分析：



若电容值均相等，则τ_e<< τ_1、τ_2

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

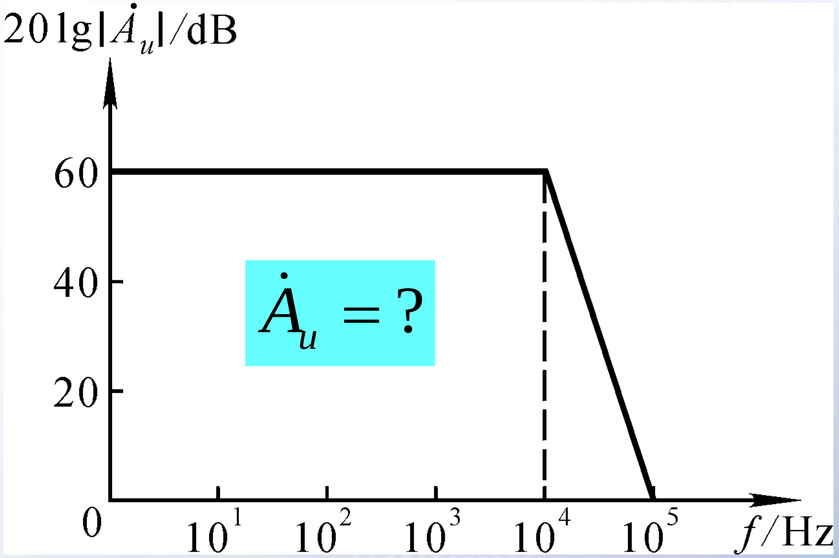
无本质区别

C_1、 C_2、 C_e短路，求出

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

讨论二

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?

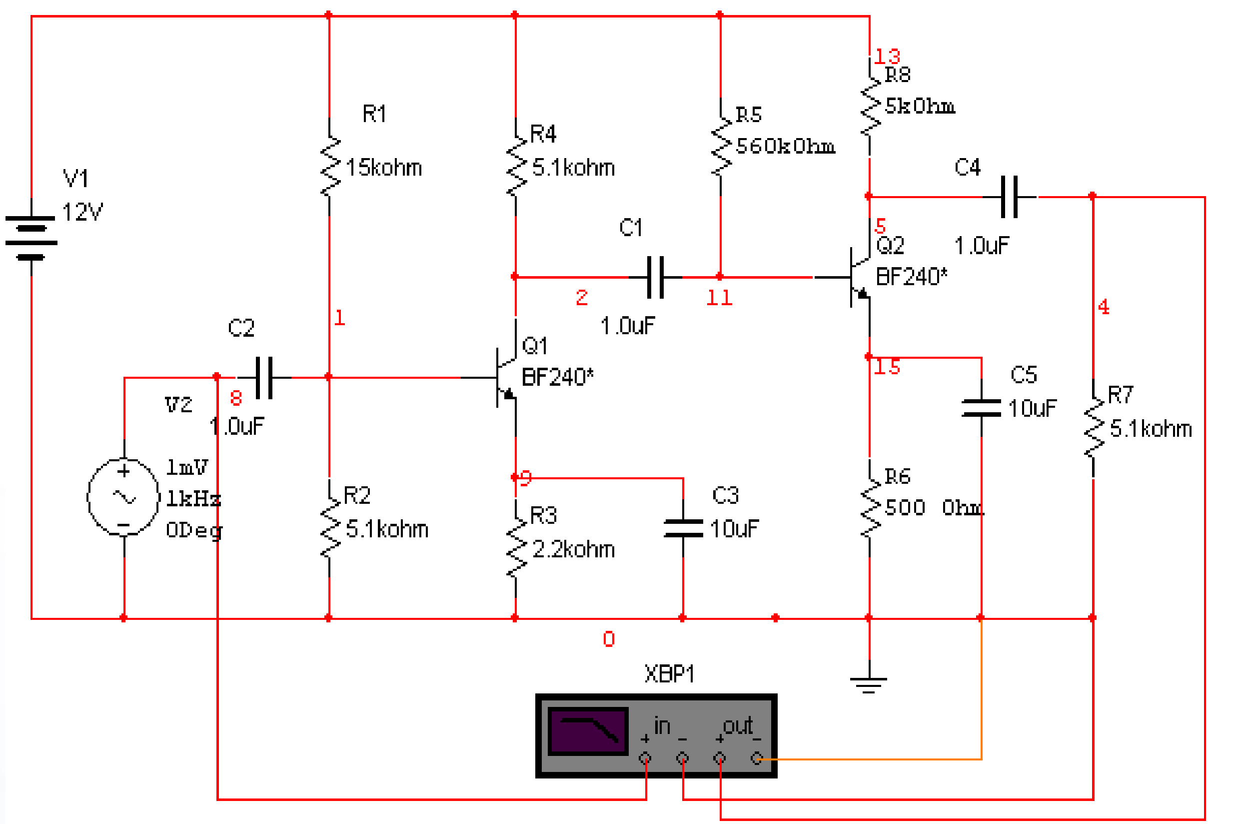
3. 在 f =10^4Hz 时，增益下降多少？附加相移φ'=？

4. 在 f =10^5Hz 时，附加相移$\varphi'\approx$?

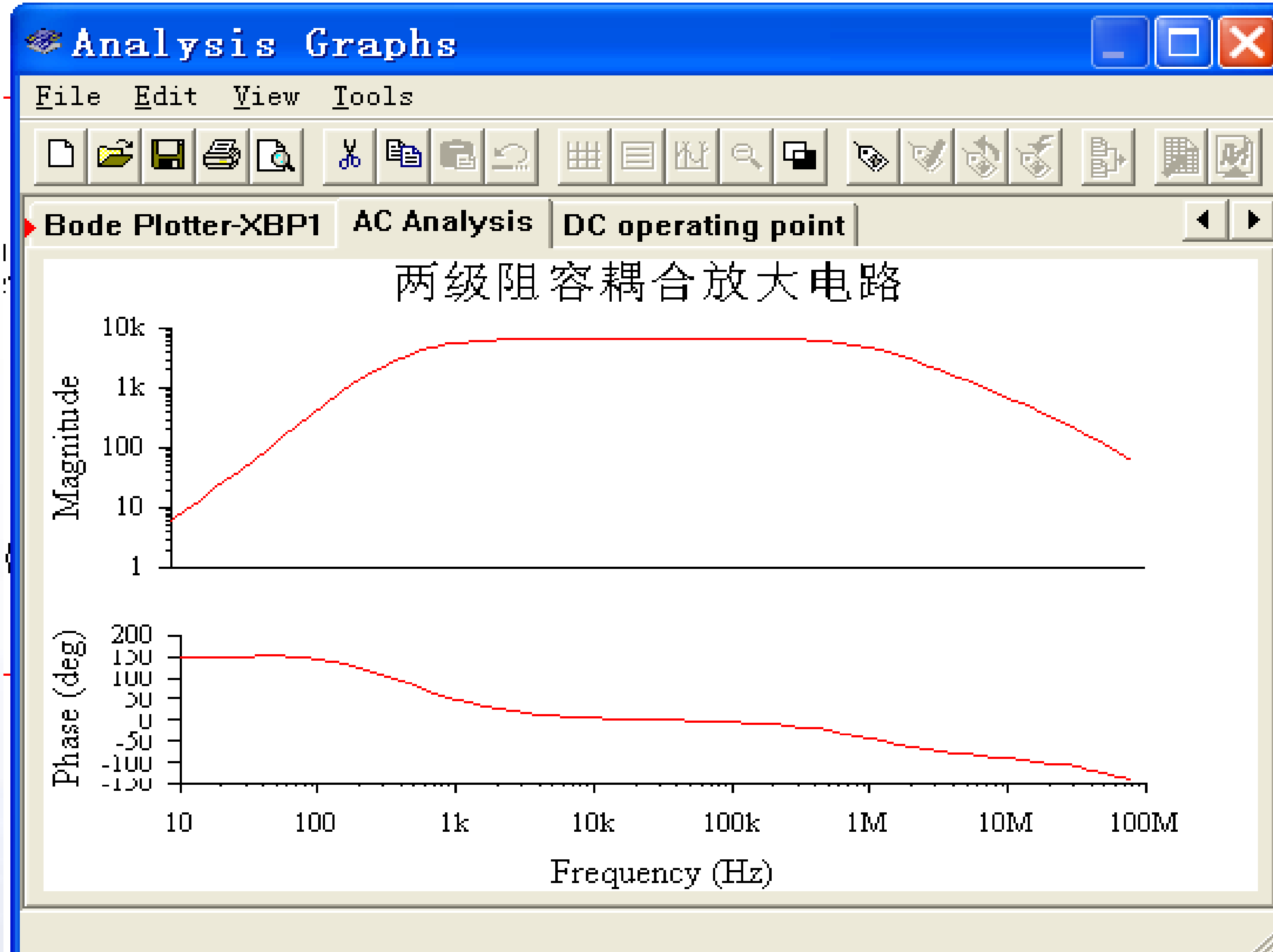
5. 画出相频特性曲线；

6. f_H=？

讨论三：两级阻容耦合放大电路的频率响应



DC Operating Point	
$15	959.68212m
$9	2.28285
$11	1.70401
$1	3.00870
$5	2.49511
$2	6.75628


Analysis Graphs
File Edit View Tools
Bode Plotter-XBP1
AC Analysis
DC operating point
两级阻容耦合放大电路
Magnitude
10k
1k
100
10
1
Phase (deg)
200
150
100
50
0
-50
-100
-150
10
100
1k
10k
100k
1M
10M
100M
Frequency (Hz)