电子电路基础C

是电子技术入门性质的技术基础课

授课老师：文凤

书山有路勤为径

学海无崖苦作舟

第3章　放大电路的频率响应

主要内容

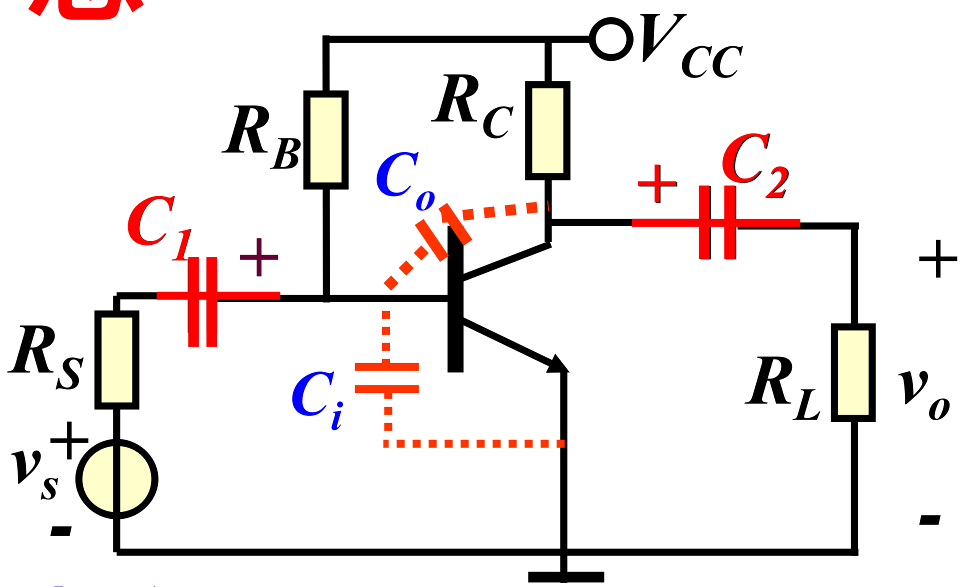
第5.1节 频率响应的一般概念

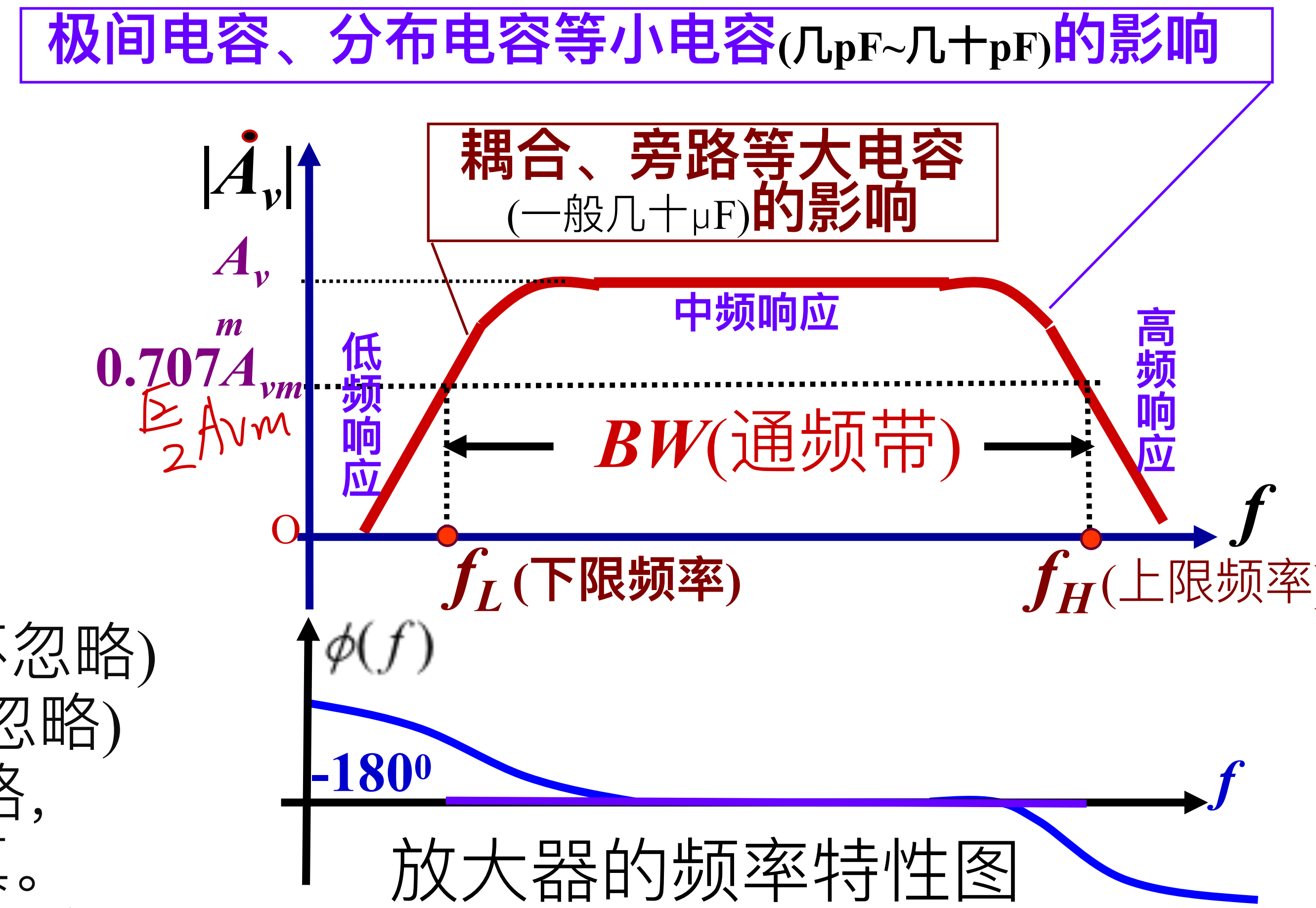
第5.2节 单管共射放大电路的频率响应

第5.3节 多级放大器的频率特性

3.1 放大器的一般概念

放大器的频率特性





放大器的频率特性图

低频段： 耦合电容C_1、C_2(阻抗≠0不忽略)
管子极间电容C_i、C_o(阻抗→∞忽略)
隔直电容构成RC高通电路，
A将随f↓而↓产生低频失真。

中频段： 耦合电容C_1、C_2(阻抗≈0忽略)
管子极间电容C_i、C_o(阻抗→∞忽略)
各容抗的影响可忽略，A=常数(与f无关)

高频段： 耦合电容C_1、C_2(阻抗≈0忽略)
管子极间电容C_i、C_o(阻抗?∞不忽略)
极间电容构成RC低通电路，
A将随f↑而↓，产生高频失真。

通频带： $BW = f_H - f_L$

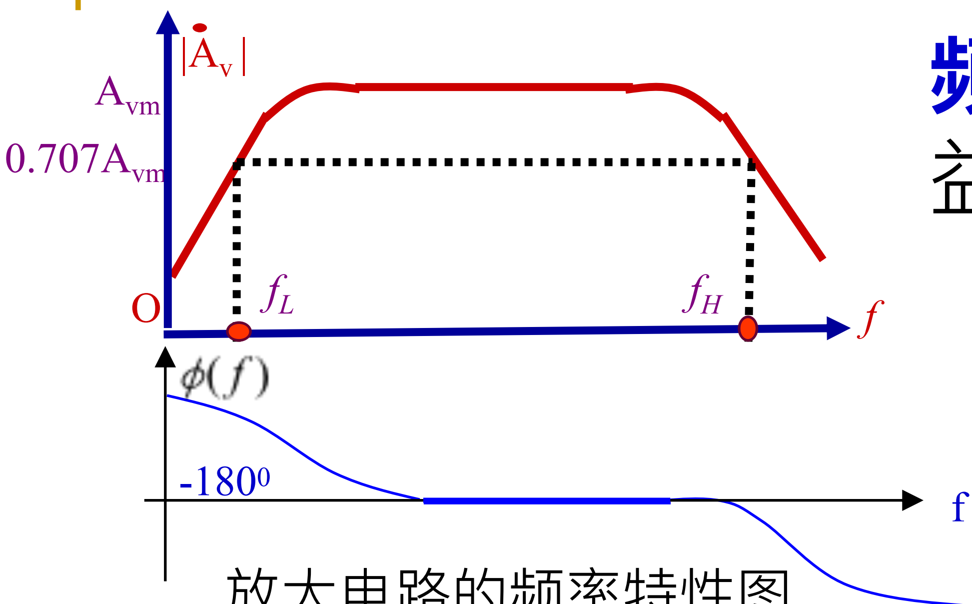
A与f间的关系为：

中频增益

$$\dot{A}_v = \frac{A_{vm}}{(1 - j\frac{f_L}{f})\boxed{(1 + j\frac{f}{f_H})}}$$

高通因　　低通因子

频率响应的基本概念：幅频特性和相频特性



放大电路的频率特性图

频率特性(也称频率响应)：放大器的增益$\dot{A}$随信号频率的改变而改变的特性.

放大器的频率特性反映了放大器对不同频率的信号的适应能力。

对输入信号各频率分量不同等放大，则输出会产生幅度失真。
对输入信号各频率分量的时延不同，则输出会相位失真。
放大器增益在稳态情况应采用复数表达：

$$\dot{A}(jf) = \left|\dot{A}(jf)\right| e^{j\varphi_A(f)} = A(f)e^{j\varphi_A(f)}$$

其中

- $A(f)$：是放大器对不同频率f信号幅度的放大倍数，它是频率的函数，它与频率之间的关系称为**幅频特性**；
- $\varphi(f)$：是放大器对不同频率f信号产生的相移，它也是频率的函数，它与频率之间的关系称为**相频特性**；

波特图　系统频率特性分析步骤

波特图：

放大器频率特性直接影响输出信号的质量及对放大器的稳定性。

放大器的频率特性可用频率特性图(幅频特性、相频特性图）来表示。

用半对数坐标画出的频率特性图称为波特图：

将**增益的dB数**作纵坐标
将**频率的对数**作横坐标
作幅频特性波特图

结合P_{127}习题5-1

dB数= 20lg倍数

A_u	0.01	0.1	0.707	1	$\sqrt{2}$	2	10	100
$20\lg A_u(dB)$	-40	-20	-3	0	3	6	20	40

$$倍数 = 10^{\frac{dB数}{20}}$$

将**频率的对数**作横坐标
将**相位等刻度**作纵坐标
作相频特性波特图

不同用途的放大器对频率失真具有不同的要求：

对音频放大器：要求较好的幅频特性
对图象放大器：要求幅频特性、相频特性都好

0Hz → 直流分量

返回

例题：

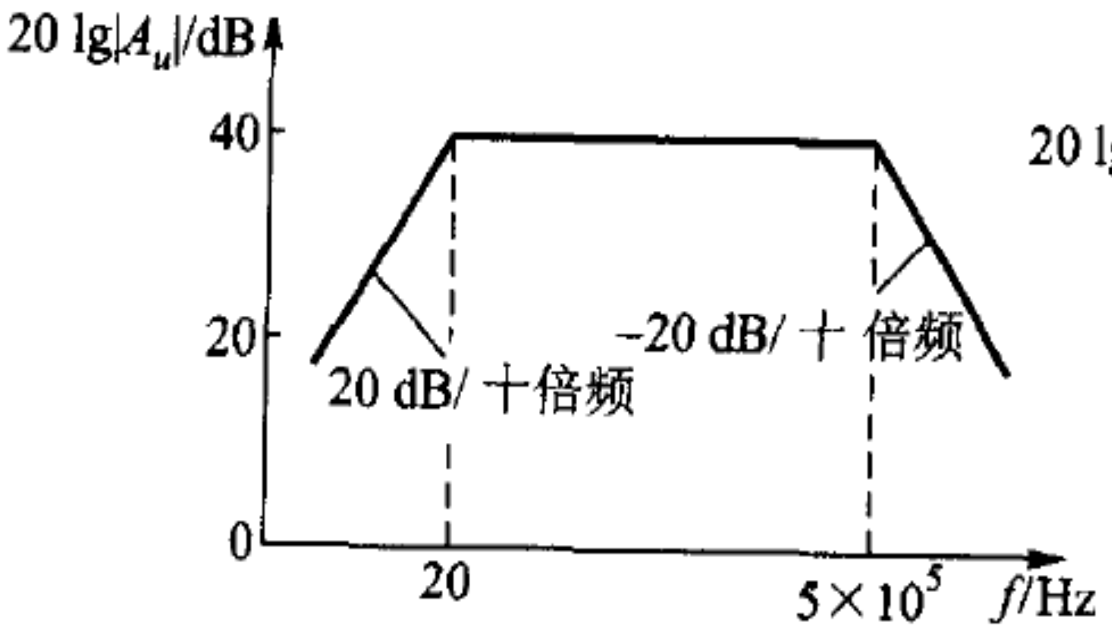
$20\lg 100 = 20\lg 10^2 = 40$

若某一放大电路的电压放大倍数为100倍，则其对数电压增益是多少分贝？

另一放大电路的对数电压增益为 80 dB，则其电压放大倍数是多少？

假设两个单管共射放大电路的对数幅频特性分别如图(a)和(b)所示

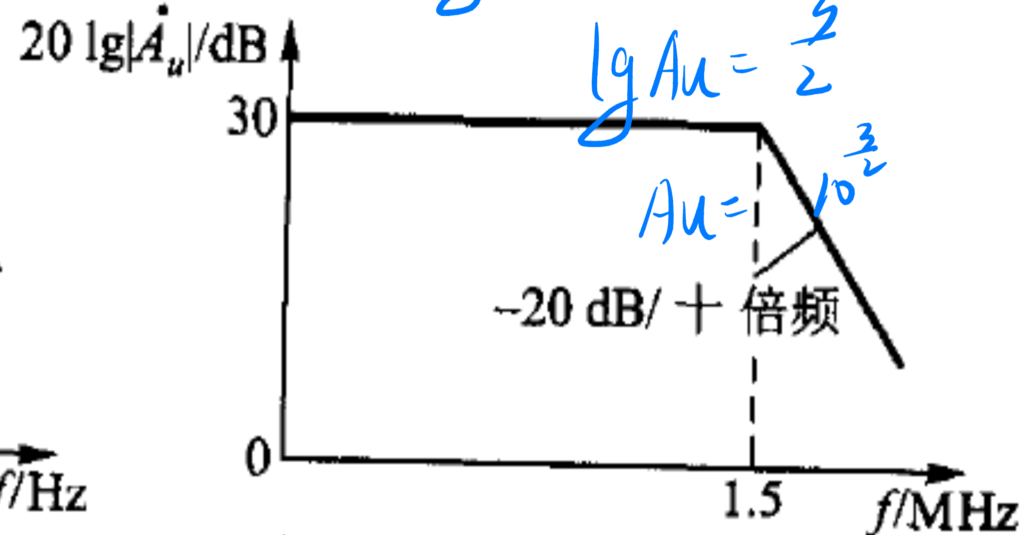
$4 = \lg x \quad x = 10^4$



(a)

$\lg A_u = \frac{3}{2}$

$A_u = 10^{\frac{3}{2}}$



100

(b)

① 分别说明两个放大电路的中频电压放大倍数 $|\dot{A}_{um}|$ 各等于多少，下限频率 f_L、上限频率 f_H 和通频带 BW 各等于多少；

② 试判断两个放大电路分别采用何种耦合方式(阻容耦合还是直接耦合)；

③ 分别示意地画出两个放大电路相应的对数相频特性。

返回波特图

返回3-6

二、系统频率特性分析一般步骤:

1）写出系统(如放大电路)稳态响应函数表达式 $A(j\omega)$

从系统的观点看，小信号放大器为线性时不变系统。

$$A(j\omega)=\frac{\dot{Y}(j\omega)}{\dot{X}(j\omega)}=H_0\frac{(j\omega-z_1)(j\omega-z_2)\cdots(j\omega-z_m)}{(j\omega-p_1)(j\omega-p_2)\cdots(j\omega-p_n)}=A_1e^{j\varphi_1}A_2e^{j\varphi_2}\cdots A_{n+m+1}e^{j\varphi_{n+m+1}}=A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

式中：标尺因子 $H_0=b_m/a_n$， z 为零点，p 为极点。$(m\leq n)$

2）绘制渐近波特图

$\varphi(\omega)=\varphi_1+\varphi_2+\cdots+\varphi_{n+m+1}$ 即系统总相位为各个因子相位的代数和

$$A(\omega)(dB)=20\lg(A_1A_2\cdots A_{n+m+1})=20\lg A_1+20\lg A_1+20\lg A_2+\cdots+20\lg A_{n+m+1}$$

即系统的总的dB数为各个因子的dB数的代数和

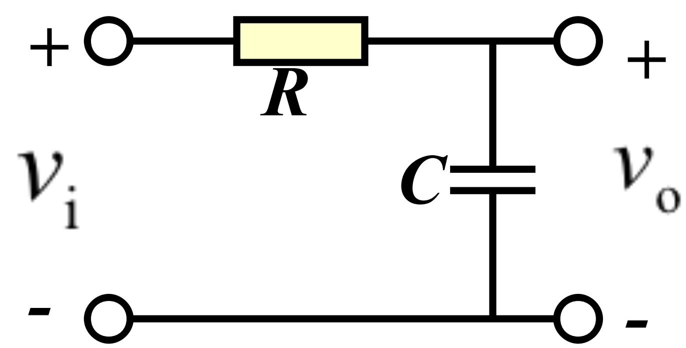
画系统的幅频（或相频）特性图时：只要将各个因子的幅频（或相频）特性波 特图在同一坐标中画出来，然后进行线性叠加即可

3）确定上、下限角频率

常见因子波特图的画法

三、稳态响应函数中基本因子的波特图

- RC 低通电路频率响应



由图得稳态响应函数表达式：

$$A_v(j\omega)=\frac{v_o}{v_i}=\frac{1/(j\omega C)}{R+1/(j\omega C)}=\frac{1}{1+j\omega/\omega_p}$$

式中 $\omega_P=1/\tau$，时间常数 $\tau=RC$

$$A_v(j\omega)=\frac{1}{1+j\omega/\omega_p}=A_v(\omega)e^{j\phi(\omega)}$$

幅值：$A_v(\omega)=\dfrac{1}{\sqrt{1+(\omega/\omega_p)^2}}$

或 $A_v(\omega)\big|_{dB}=-20\lg\sqrt{1+(\omega/\omega_p)^2}$

相角：$\varphi_A(\omega)=-\arctan(\omega/\omega_P)$

绘制渐进波特图：

确定上、下限频率

上限频率：$\omega_H=\omega_p=1/RC$　　下限频率：$\omega_L=0$

RC高通电路

绘制渐进波特图（低通）

根据 $\begin{cases} A_v(\omega)\big|_{\text{dB}} = -20\lg\sqrt{1+(\omega/\omega_p)^2} \\ \varphi_A(\omega) = -\arctan(\omega/\omega_p) \end{cases}$ ⇒ 画出幅频波特图 ⇒ 画出相频波特图

渐进波特图画法：

✔ 幅频

ω =ω p 时, $A_v(\omega)\big|_{\text{dB}} = -3\text{dB} \approx 0\text{dB}$

ω <<ω p 时, $A_v(\omega)\big|_{\text{dB}} \approx 0\text{dB}$

ω >>ω p 时, $A_v(\omega)\big|_{\text{dB}} \approx -20\lg\dfrac{\omega}{\omega_p}$

当$\omega=10\omega_p$时，$A_u(\omega)\approx -20dB$

当$\omega=100\omega_p$时，$A_u(\omega)\approx -40dB$

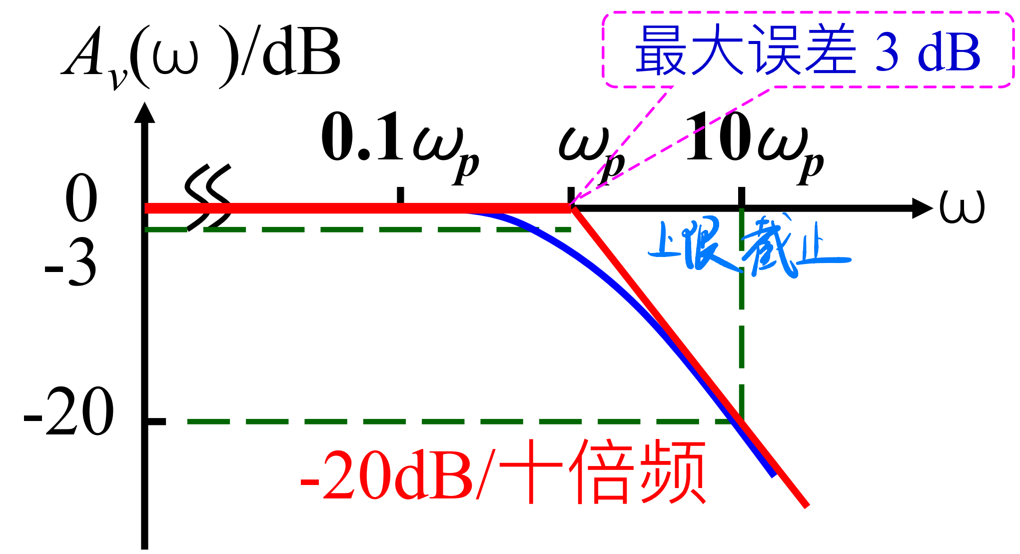
✔ 相频 10倍频、下降20dB

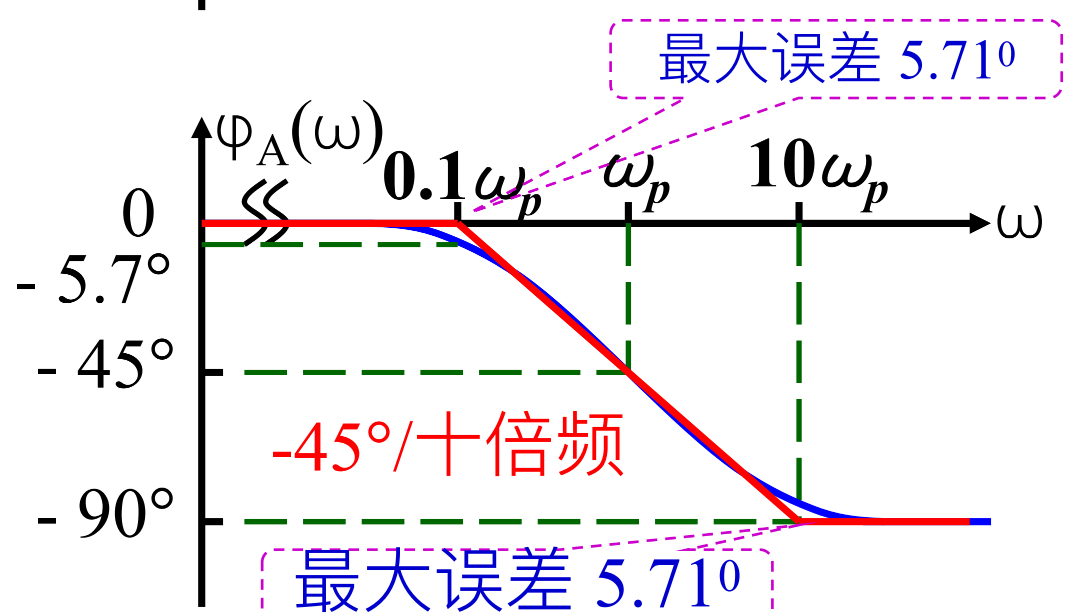
ω =ω p 时, $\varphi_A(\omega) \approx -45^\circ$

ω <0.1ω p 时, $\varphi_A(\omega) \approx 0^\circ$

ω >10ω p 时, $\varphi_A(\omega) \approx -90^\circ$

10倍频.下降45°

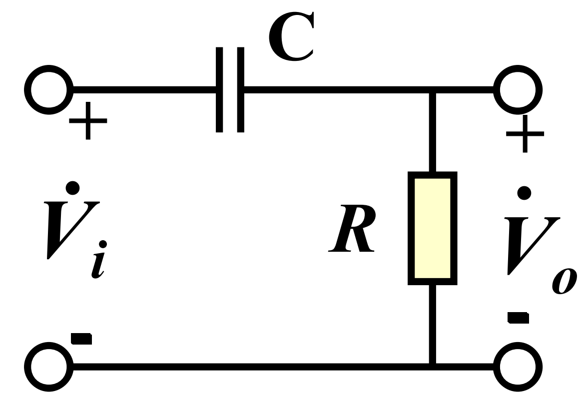




返回 RC高通电路

RC 高通电路频率响应

由图得稳态响应函数表达式：



$$A_v(j\omega)=\frac{\dot{V}_o(j\omega)}{\dot{V}_i(j\omega)}=\frac{R}{R+1/(j\omega C)}=\frac{1}{1-j\omega_P/\omega}$$

式中 $\omega_P=1/\tau$ ， 时间常数 $\tau=RC$

$= \frac{1}{RC}$

$$A_v(j\omega)=\frac{1}{1-j\omega_p/\omega}=A_v(\omega)e^{j\phi(\omega)}\Rightarrow\begin{cases}\text{幅值：}A_u(\omega)\big|_{dB}=-20\lg\sqrt{1+(\omega_P/\omega)^2}\\ \text{相角：}\varphi_A(\omega)=\arctan(\omega_P/\omega)\end{cases}$$

绘制渐进波特图：

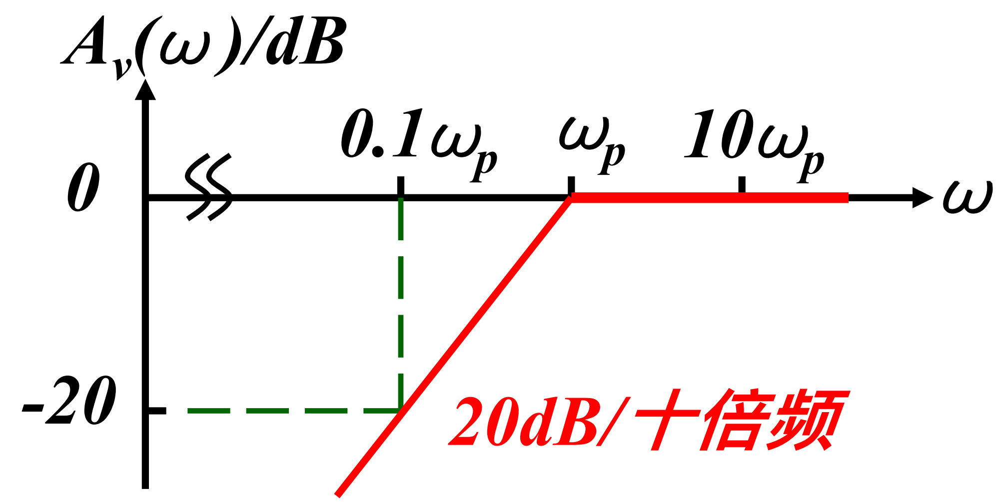
上限、下限角频率：

上限频率：$\omega_H\to\infty$ 下限频率：$\omega_L=\omega_p=1/RC$

其他因子的波特图

绘制渐进波特图(高通)

根据 $\begin{cases} A_u(\omega)\big|_{\mathrm{dB}} = -20\lg\sqrt{1+(\omega_{\mathrm{p}}/\omega)^2} \Rightarrow \text{画出幅频波特图} \\ \varphi_{\mathrm{A}}(\omega) = \arctan(\omega_{\mathrm{p}}/\omega) \Rightarrow \text{画出相频波特图} \end{cases}$



✔ 幅频渐近波特图

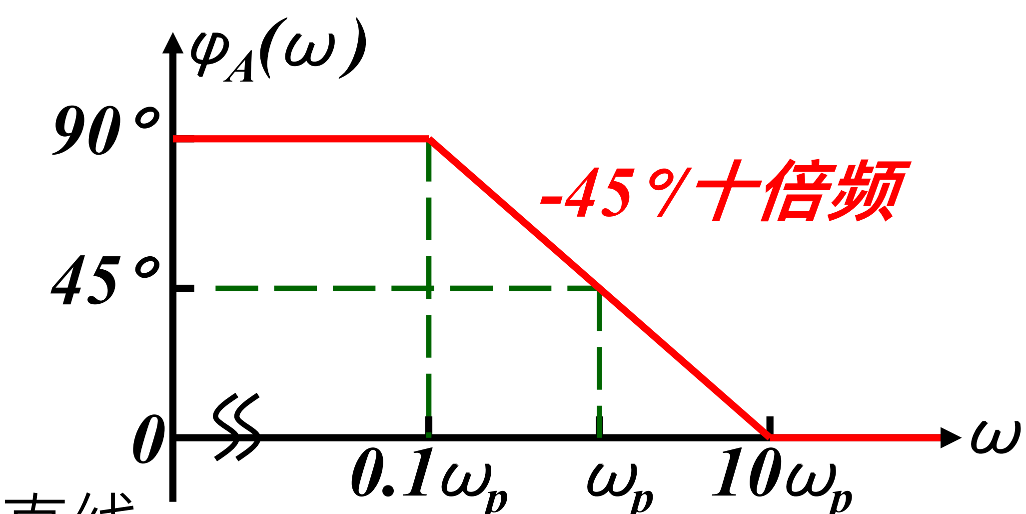
因 $\omega=\omega_p$ 时， $A_u(\omega)\big|_{\mathrm{dB}} = -3\mathrm{dB} \approx 0\mathrm{dB}$

$\omega>\omega_p$： 0dB水平线；

$\omega<\omega_p$： 斜率为(20dB/十倍频)的直线。

当 $\omega = 0.1\omega_p$ 时， $A(\omega) \approx -20dB$

当 $\omega = 0.01\omega_p$ 时， $A(\omega) \approx -40dB$



✔ 相频渐近波特图：

$\omega<0.1\omega_p$： 90°的水平线。

$\omega=\omega_p$： ϕ=45°。

$0.1\omega_p<\omega<10\omega_p$： 斜率为(–45°/十倍频)的直线。

$\omega>10\omega_p$： 0°水平线。

返回

零点因子的波特图

$$A(j\omega)=1+j\omega/\omega_p=A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

$$\begin{cases} A(\omega)=20\lg\sqrt{1+(\omega/\omega_p)^2} \\ \varphi(\omega)=\arctan\dfrac{\omega}{\omega_p} \end{cases}$$

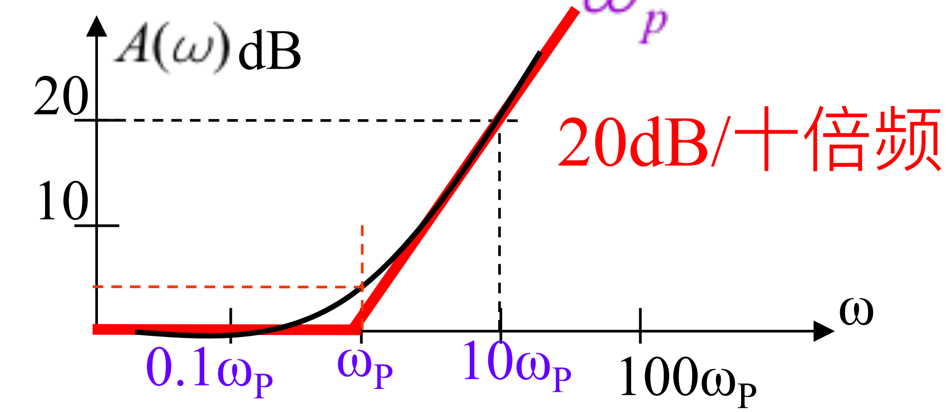
当$\omega>>\omega_p$时，$A(\omega)\approx 20\lg\dfrac{\omega}{\omega_p}dB$

当$\omega=\omega_p$时，$A(\omega)=-3dB$

当$\omega<<\omega_p$时，$A(\omega)\approx 0dB$

当$\omega=10\omega_p$时，$A(\omega)\approx 20dB$

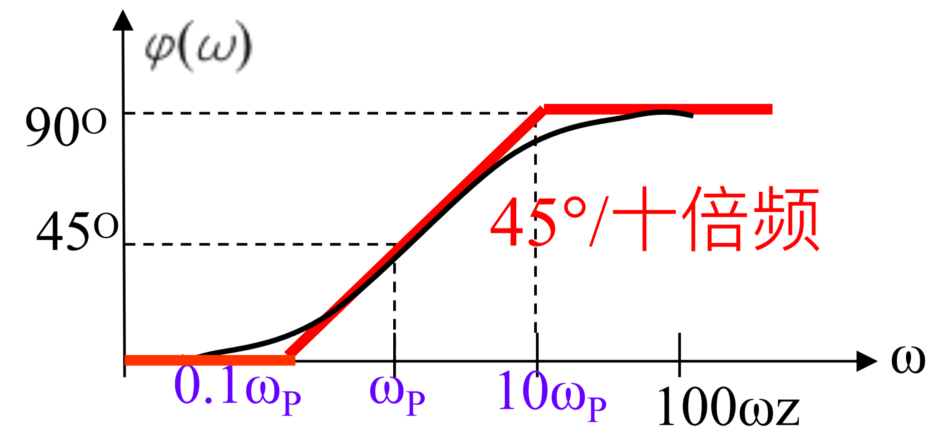
当$\omega=100\omega_p$时，$A(\omega)\approx 40dB$



当$\omega\le 0.1\omega_p$时，$\varphi(\omega)\approx 0$

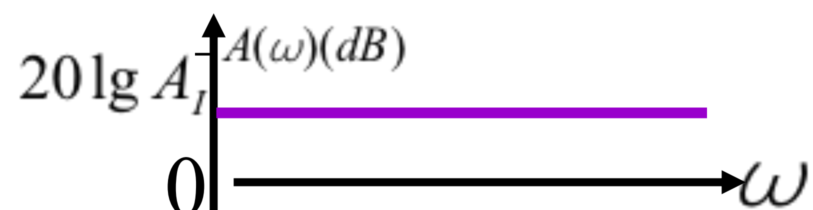
当$\omega=\omega_p$时，$\varphi(\omega)=45^0$

当$\omega\ge 10\omega_p$时，$\varphi(\omega)\to 90^0$



常数因子的波特图：

$$A(j\omega)=A_I=A(\omega)e^{j\varphi(\omega)} \Rightarrow \begin{cases} A(\omega)=A_I \\ \varphi(\omega)=0 \end{cases}$$



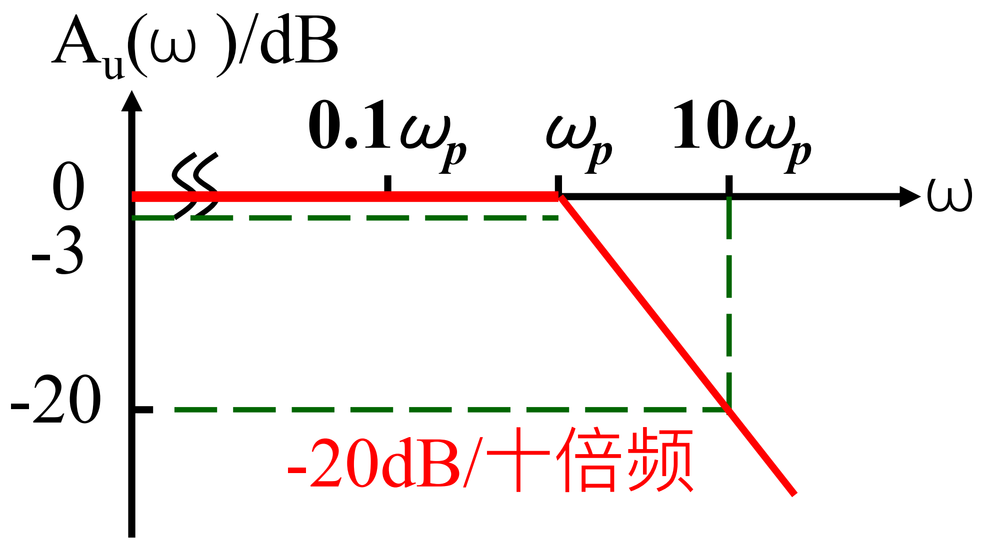
反相 $\varphi(\omega)=\pm\pi$

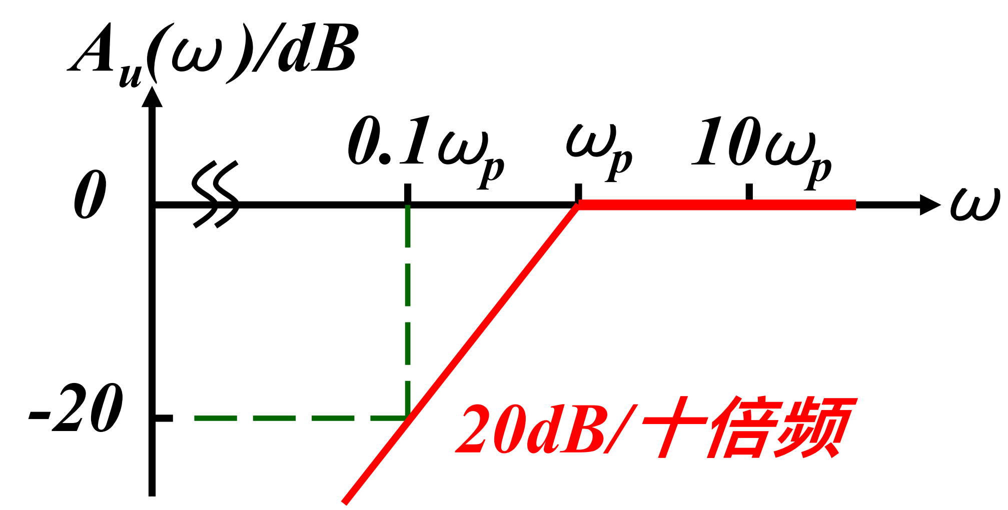
习题3-6

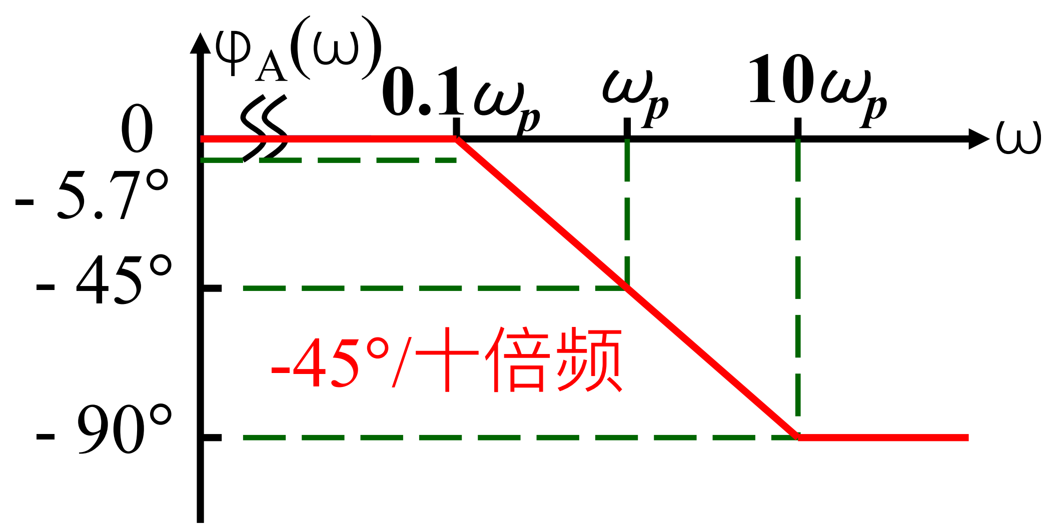
常见因子波特图（复习）

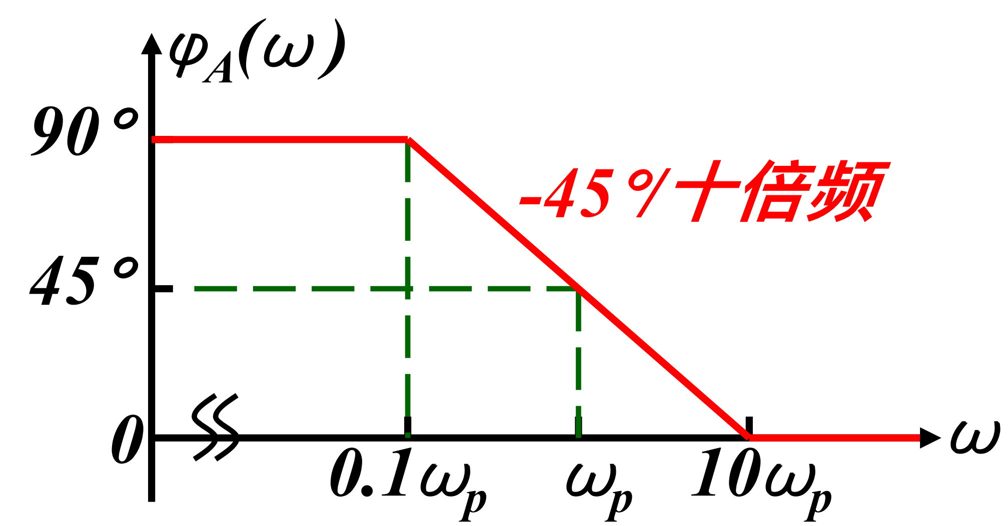
$$\dot{A}_u(j\omega)=\frac{1}{1+j\omega/\omega_p}=A_u(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$

$$\dot{A}_u(j\omega)=\frac{1}{1-j\omega_p/\omega}=A_u(\omega)e^{j\varphi(\omega)}$$









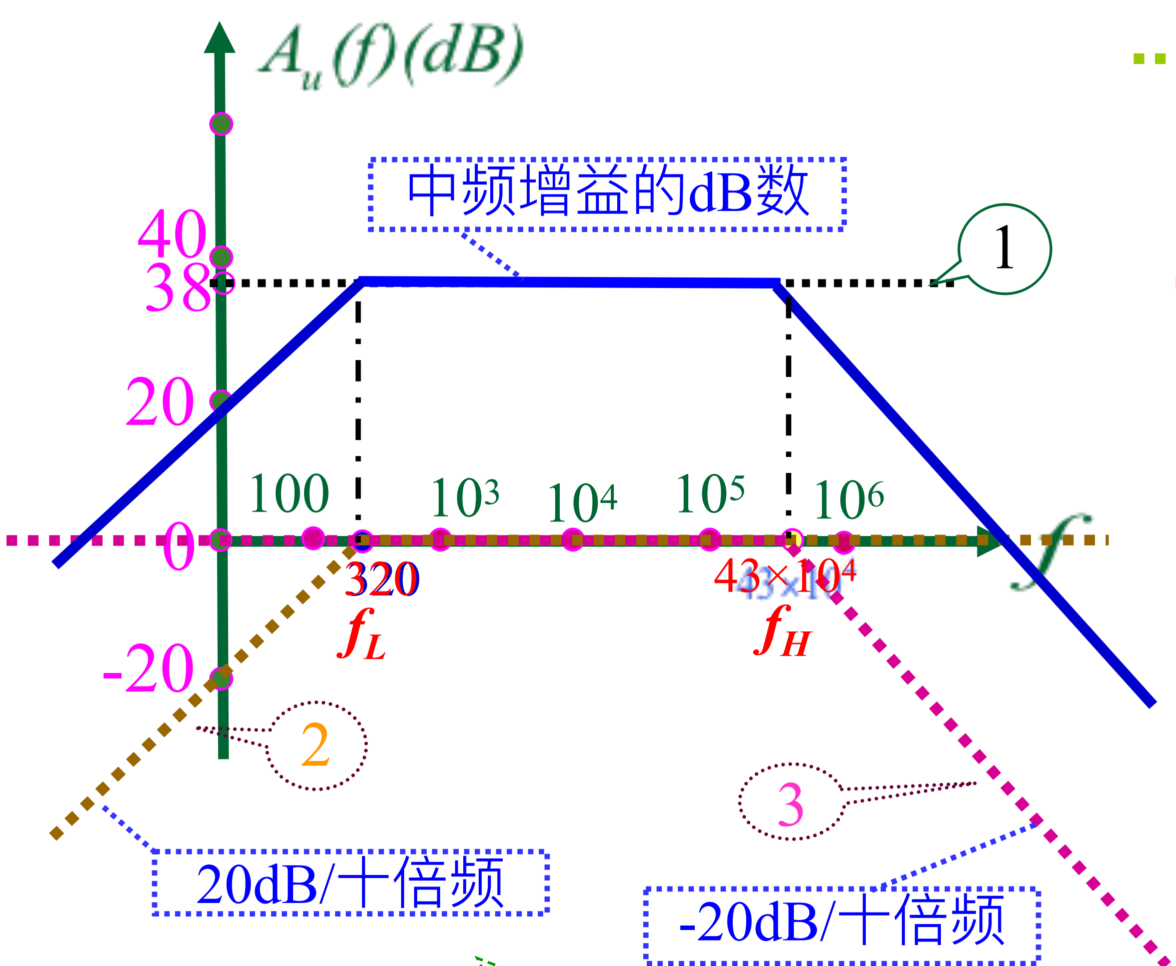
返回

例题: 已知某单管共射放大电路电压放大倍数的表达式：

作业：P_{127}习题5-3

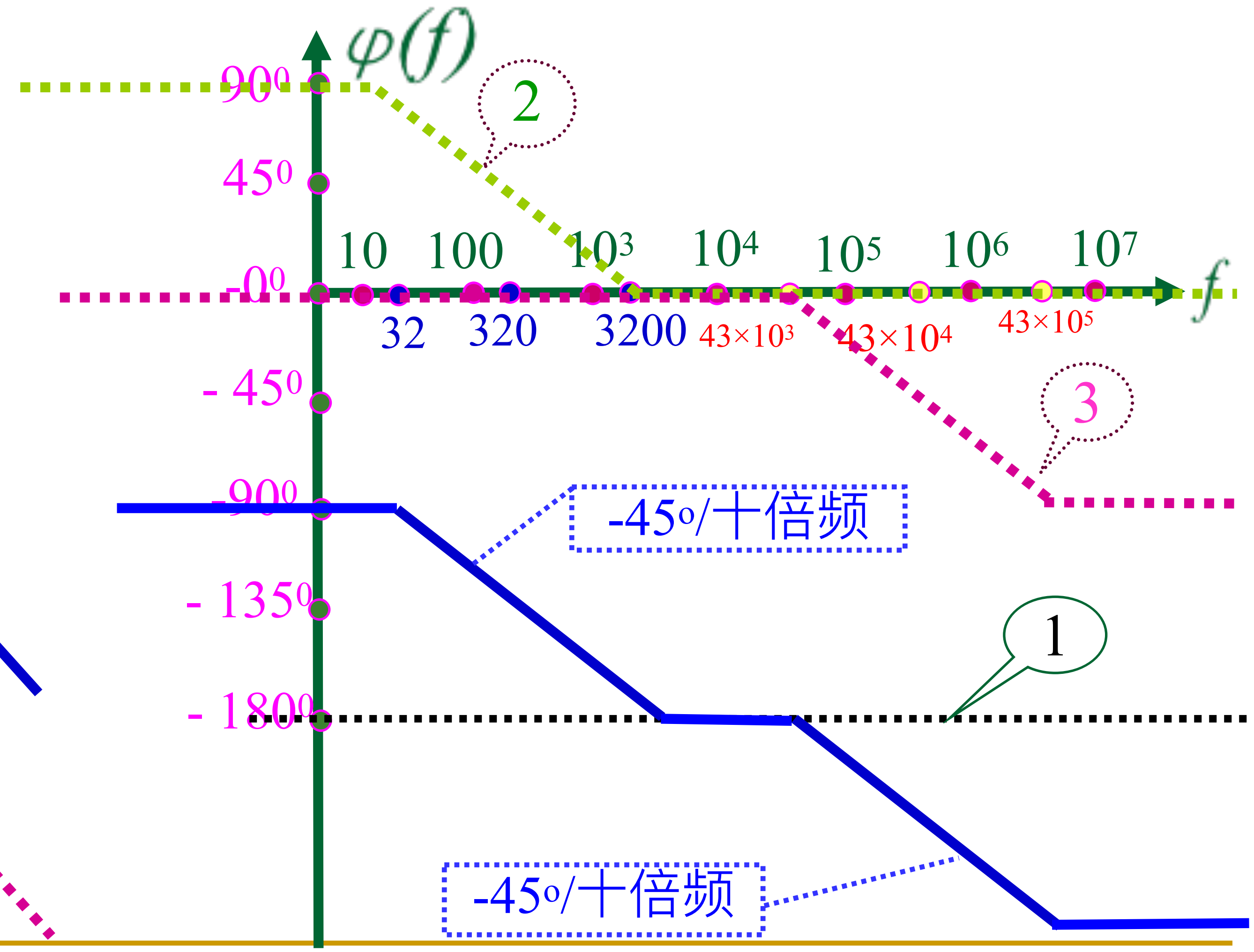
解：$$\dot{A}_u = -80\frac{1}{(1-j\frac{320}{f})(1+j\frac{f}{43\times10^4})} = \underbrace{-80}_{1}\cdot\frac{1}{\underbrace{1-j\frac{320}{f}}_{2}}\cdot\frac{1}{\underbrace{1+j\frac{f}{43\times10^4}}_{3}}$$

幅频特性波特图：



结合习题P_{127}习题5-3

相频特性波特图：



放大电路的频率响应

P_{127}习题5-2题：$A(s)=\dfrac{10^6(5+s)}{10(10+s)(10^2+s/2)}$

解：1. 令 s = jω，则频率特性表达式及标准形式为：

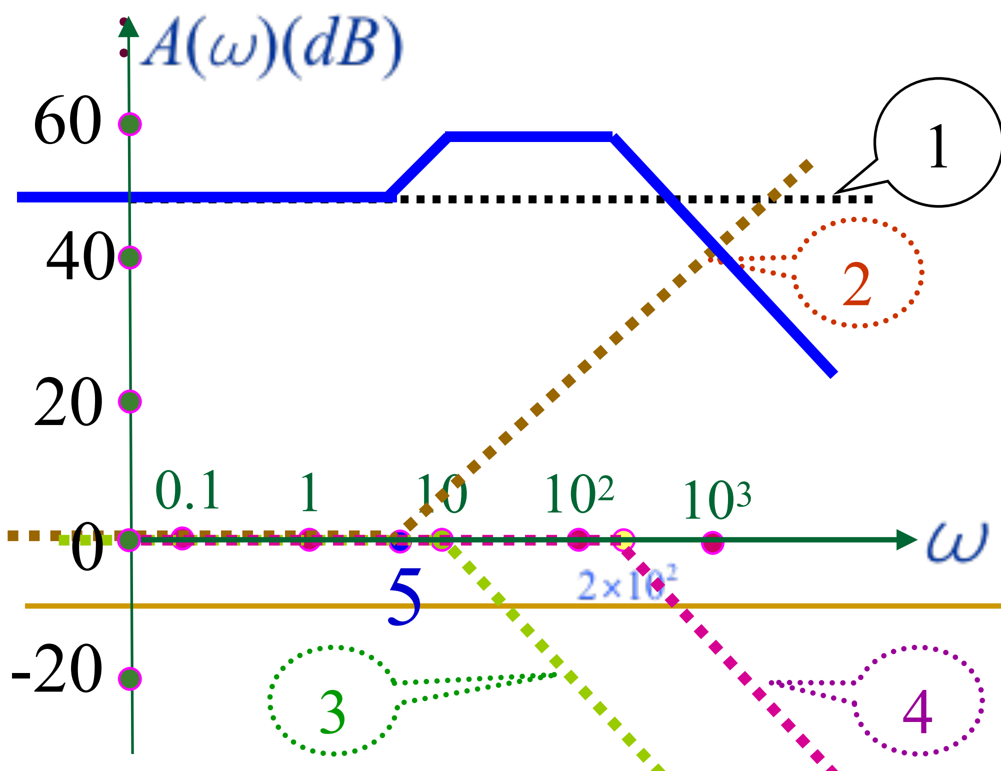
$$A(j\omega)=\frac{10^6(5+j\omega)}{10(10+j\omega)(10^2+j\omega/2)}=\frac{5\times10^6(1+j\omega/5)}{10\times10\times10^2(1+j\omega/10)(1+j\omega/2\times10^2)}$$

$$=\underbrace{5\times10^2}_{1}\cdot\underbrace{(1+j\omega/5)}_{2}\cdot\frac{1}{\underbrace{1+j\omega/10}_{3}}\cdot\frac{1}{\underbrace{1+j\omega/2\times10^2}_{4}}$$

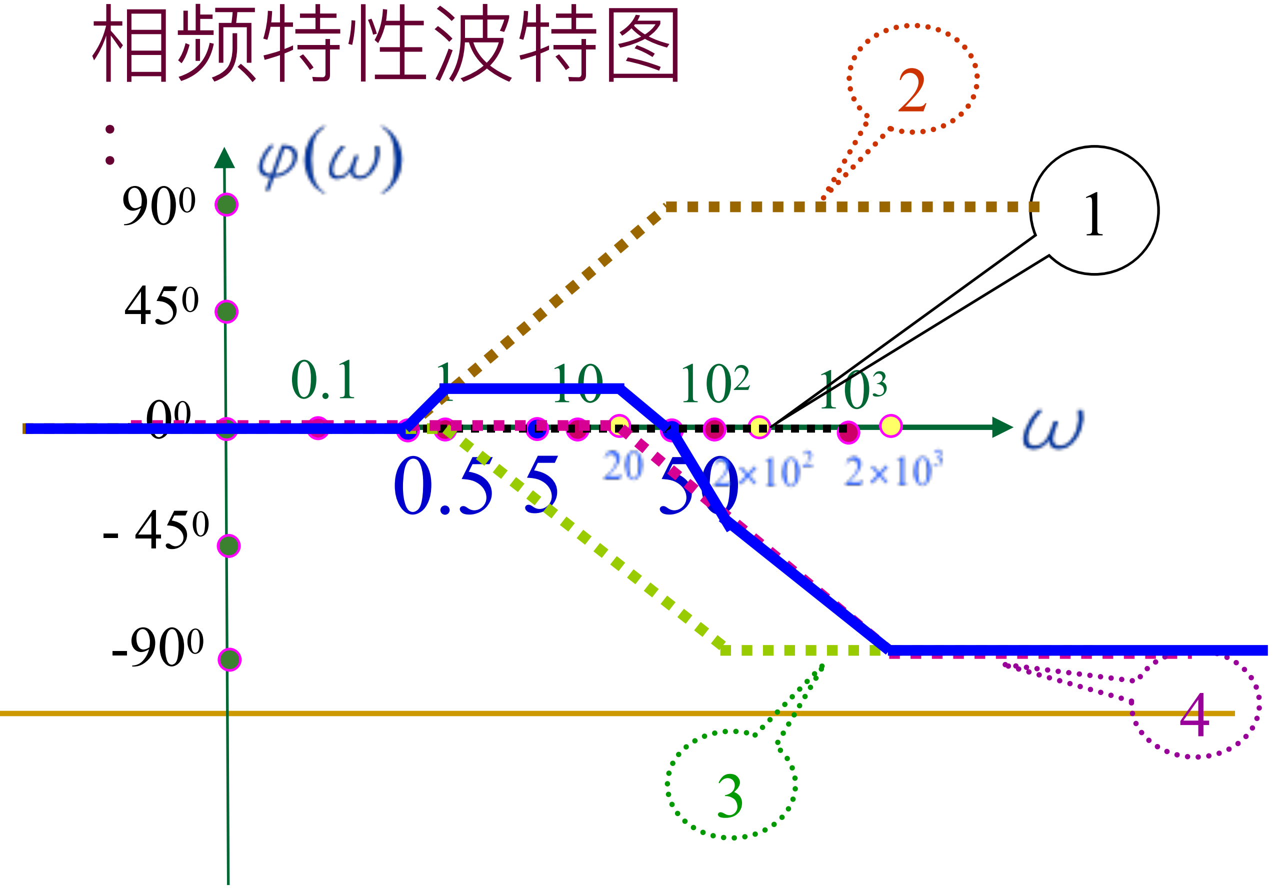
波特图与常见因子中的转折频率ω_p、0.1 ω_p、10ω_p相关，则在图中的横坐标上先将它们标出来。

2、根据传递函数画出其频率特性渐进波特图

幅频特性波特图：



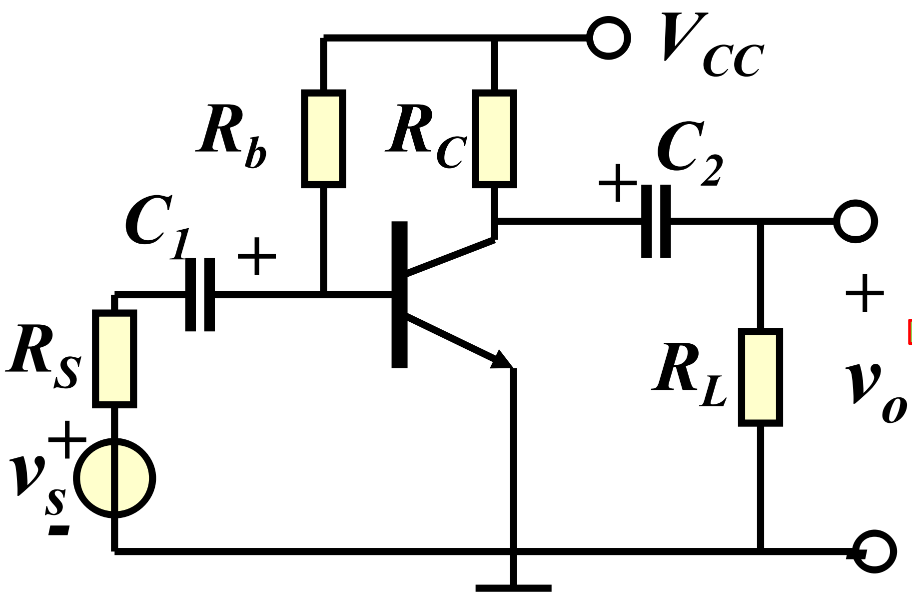
相频特性波特图：



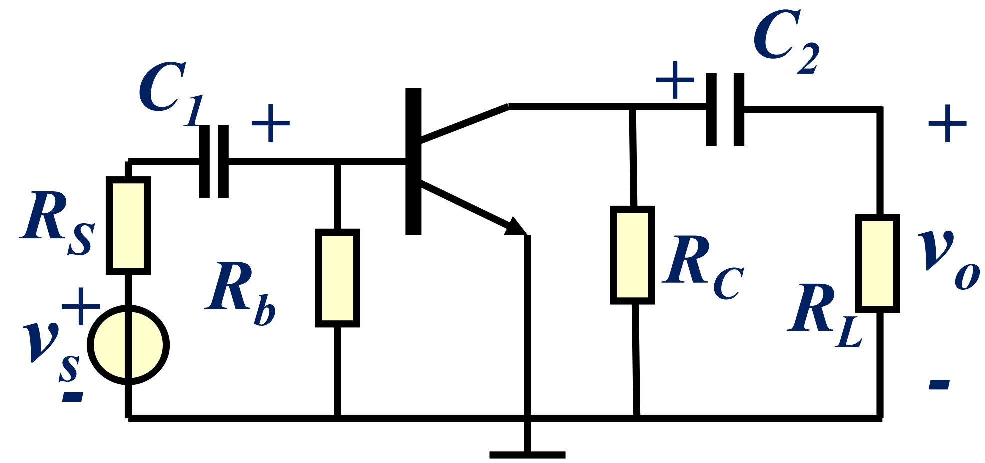
5.2、单元放大器频率特性基础

作业：P_{128}习题 5-4、5-5

对小信号放大器仍可用“微变等效电路”法进行分析。

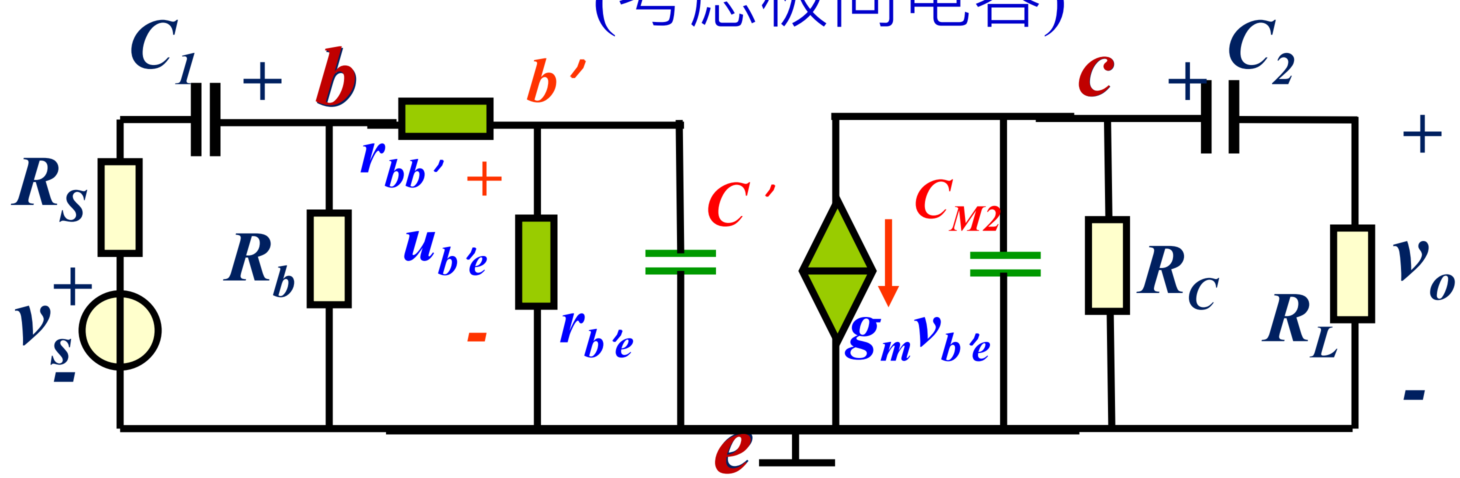


交流通路



微变等效电路

(考虑极间电容)



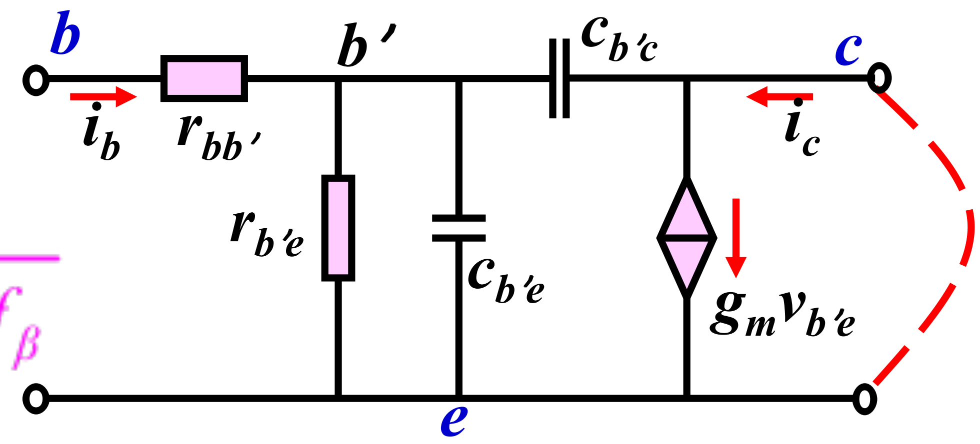
推导

$$A_{us}(jf) = \frac{u_o}{u_S}$$

一般将输入信号的频率范围分为中频、低频和高频三个频段。根据各频段的特点对图所示等效电路进行简化，从而得到各频段的放大倍数。

三极管的频率参数

共发电路截止频率 f_β



根据定义得: $\beta(jf) = i_c / i_b \Big|_{u_{ce}=0} = \dfrac{\beta_o}{1 + jf / f_\beta}$

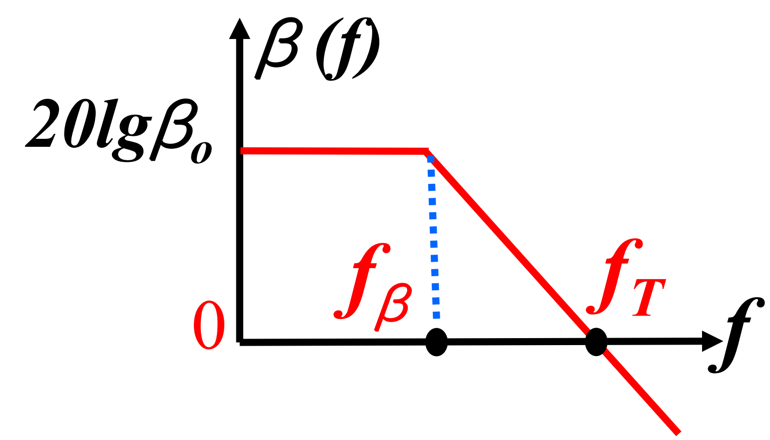
其中 $f_\beta = \dfrac{1}{2\pi r_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})} = f_H$

- 上限截止频率 f_β: 当 $\dot\beta$ 的幅值(dB数)下降 (3dB)时对应的频率

特征频率 f_T:

指 $\beta(f)$(倍数) 下降到1 时，对应的角频率。

当 $f = f_T$ 时 $\beta(f_T) = 1$



因此 $f_T \approx \beta_o f_\beta$

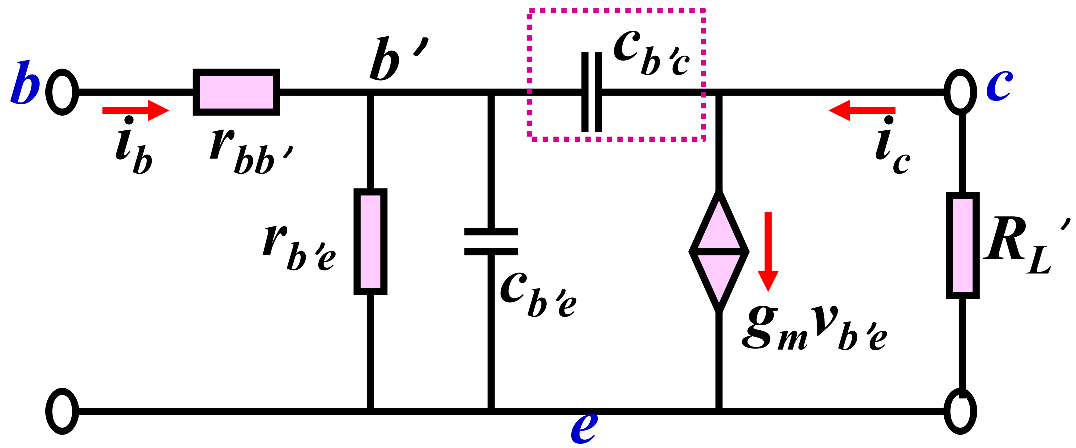
共基电路截止频率 f_α

$\alpha(jf) = \dfrac{\beta(jf)}{1+\beta(jf)} = \dfrac{\alpha_o}{1 + jf / f_\alpha}$ $\xrightarrow{\text{推导}}$ $f_\alpha \approx (1+\beta_o) f_\beta$

返回

➤ 混合Π型小信号电路模型及其频率参数

三极管的混合(忽略$r_{b'c}$)Π电路模型：

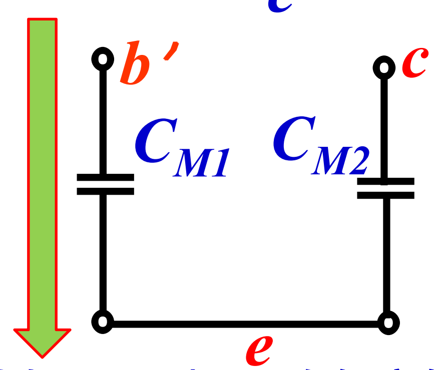


$$C_{M1} = (1-\dot{K})C_{b'c} = (1+g_m R_L')C_{b'c}$$

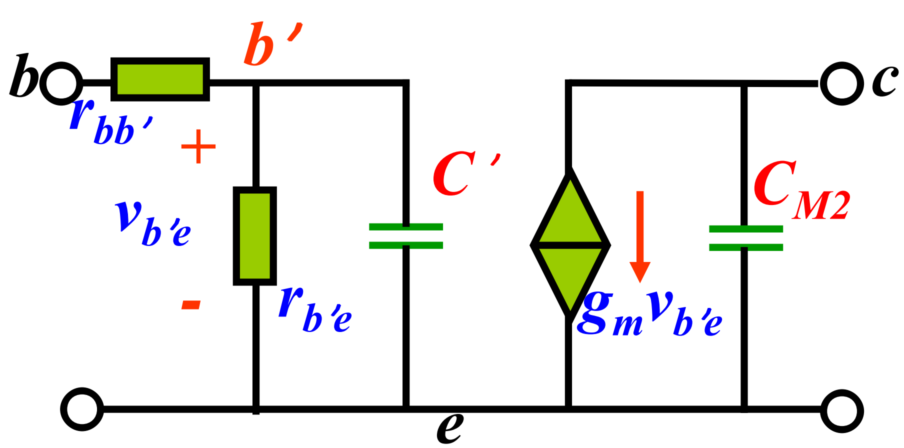
$$C_{M2} = (1-\frac{1}{\dot{K}})C_{b'c} \approx C_{b'c}$$

$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}} \approx -g_m R_L'$$

$$C' = C_{b'e} + C_{M1}$$



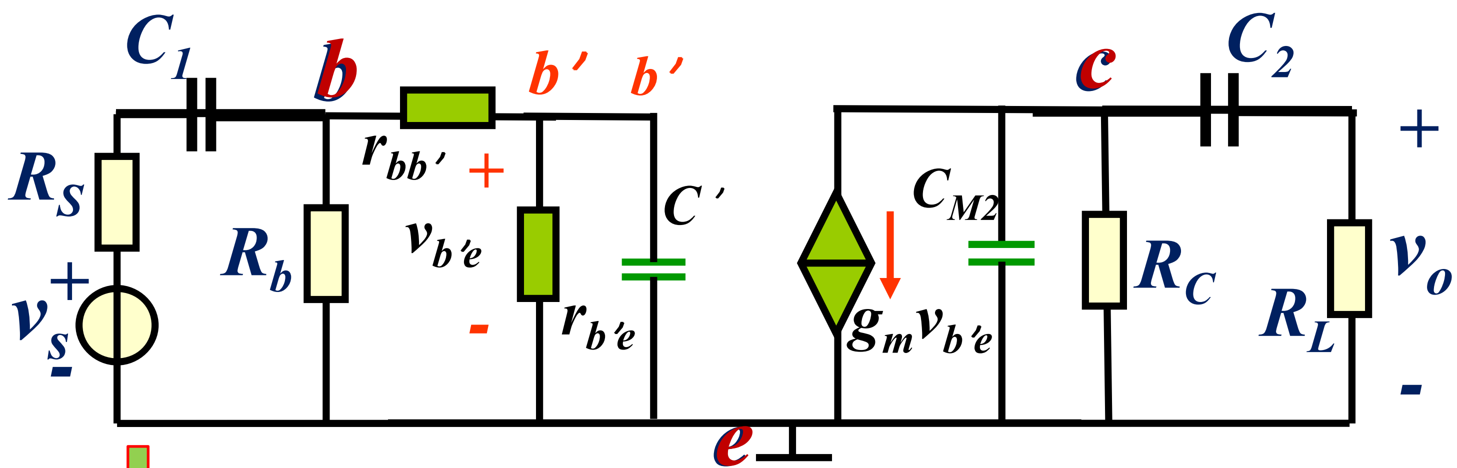
单向化的混合π等效电路



$$C' = C_{b'e} + (1+g_m R_L')C_{b'c}$$

三极管频率参数　返回高频分析　返回频响分析

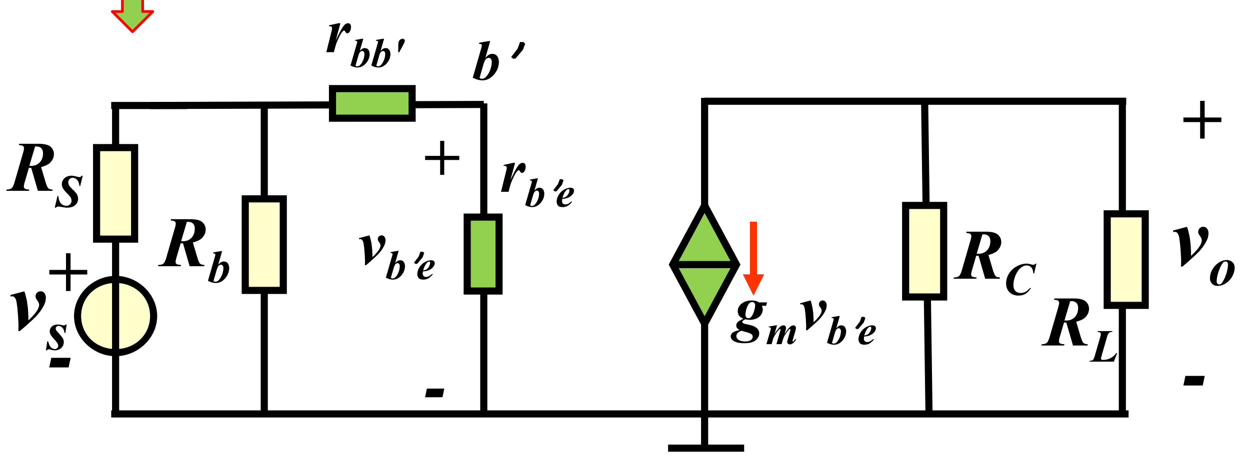
单级共发放大电路的中频响应： 中频源电压增益



中频时耦合电容（阻抗≈0）
管子极间电容（阻抗→ ∞）

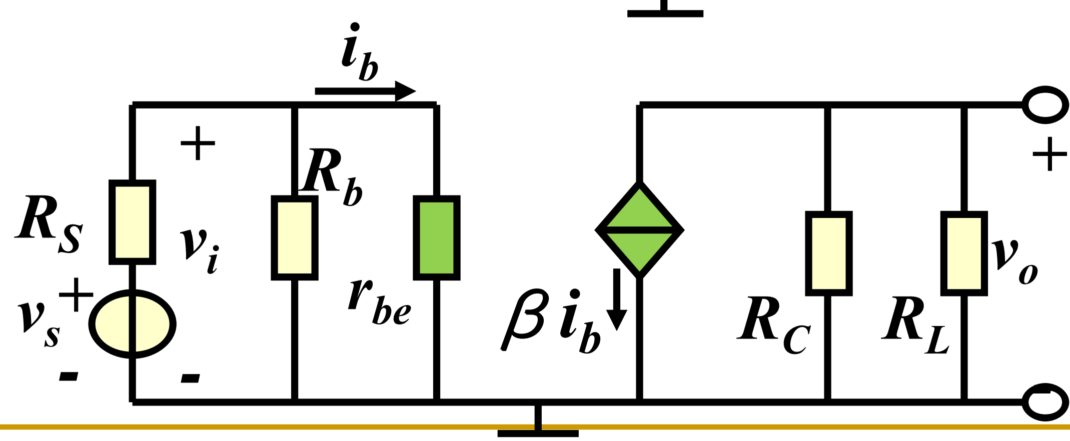
$$r_{be} = r_{bb'} + r_{b'e}$$

$$\beta = g_m r_{b'e}$$



中频源电压增益：

$$A_{vSI} = \frac{v_o}{v_S} = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{R_s + r_{be}}$$

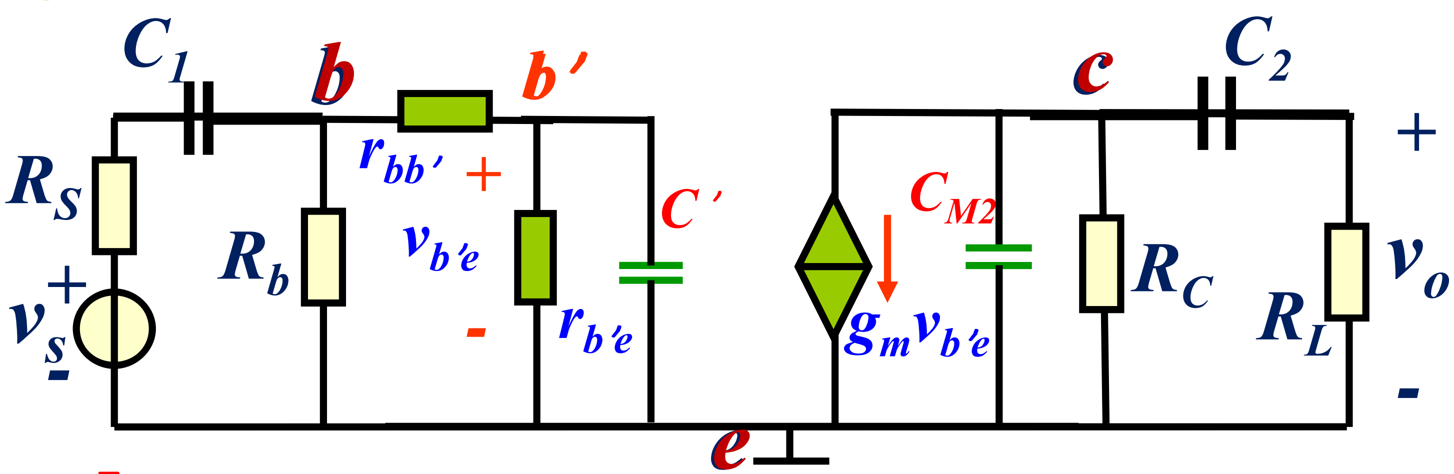


$R_b >> (r_{bb'} + r_{b'e})$，**可忽略**

返回频响分析

高频区的频率响应和上限频率f_H

作业：P_{128}习题5-5



$$f_{H2}=\frac{1}{2\pi R_L^{'}C_{b'c}}$$

高频稳态响应函数：

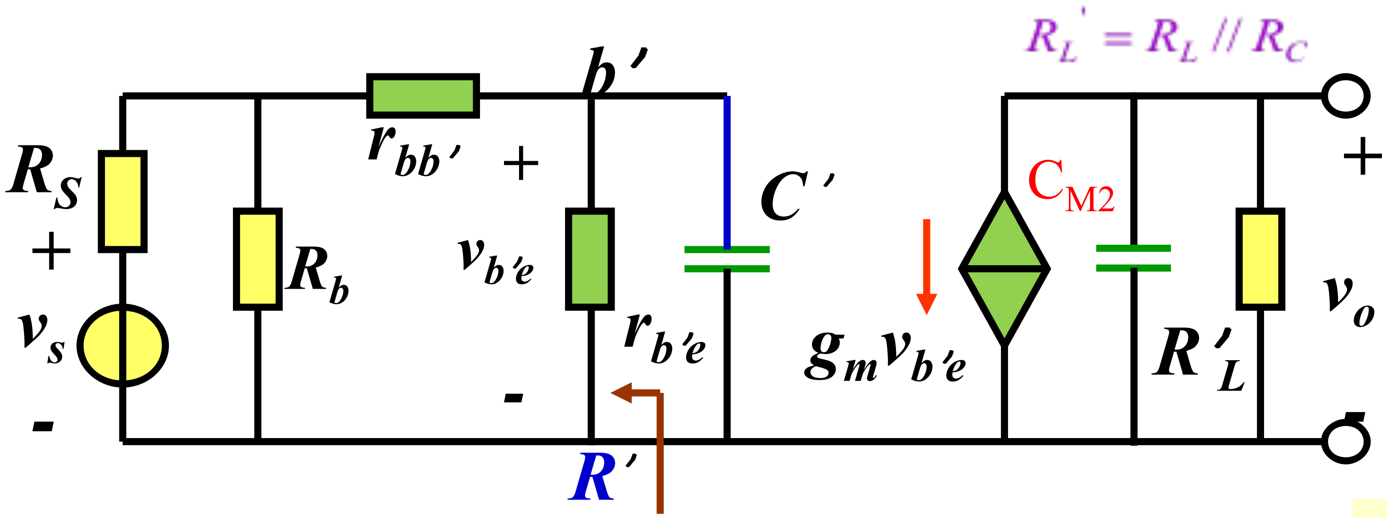
高频时耦合电容阻抗↓ （≈0）

管子极间电容阻抗↓(?∞)

$$A_{vsH}(jf)=\frac{v_o}{v_s}=\frac{A_{vsI}}{(1+jf/f_{H1})(1+jf/f_{H2})}$$

一般情况下$:f_{H2}>>f_{H1}$

(即C_{M2}的影响可忽略)$f_H\approx f_{H1}$



$$A_{vsH}(jf)=\frac{v_o}{v_s}\approx\frac{A_{vsI}}{1+jf/f_H}$$

$$C^{'}=C_{b'e}+(1+g_mR_L^{'})C_{b'c})\qquad C_{M2}\approx C_{b'c}$$

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

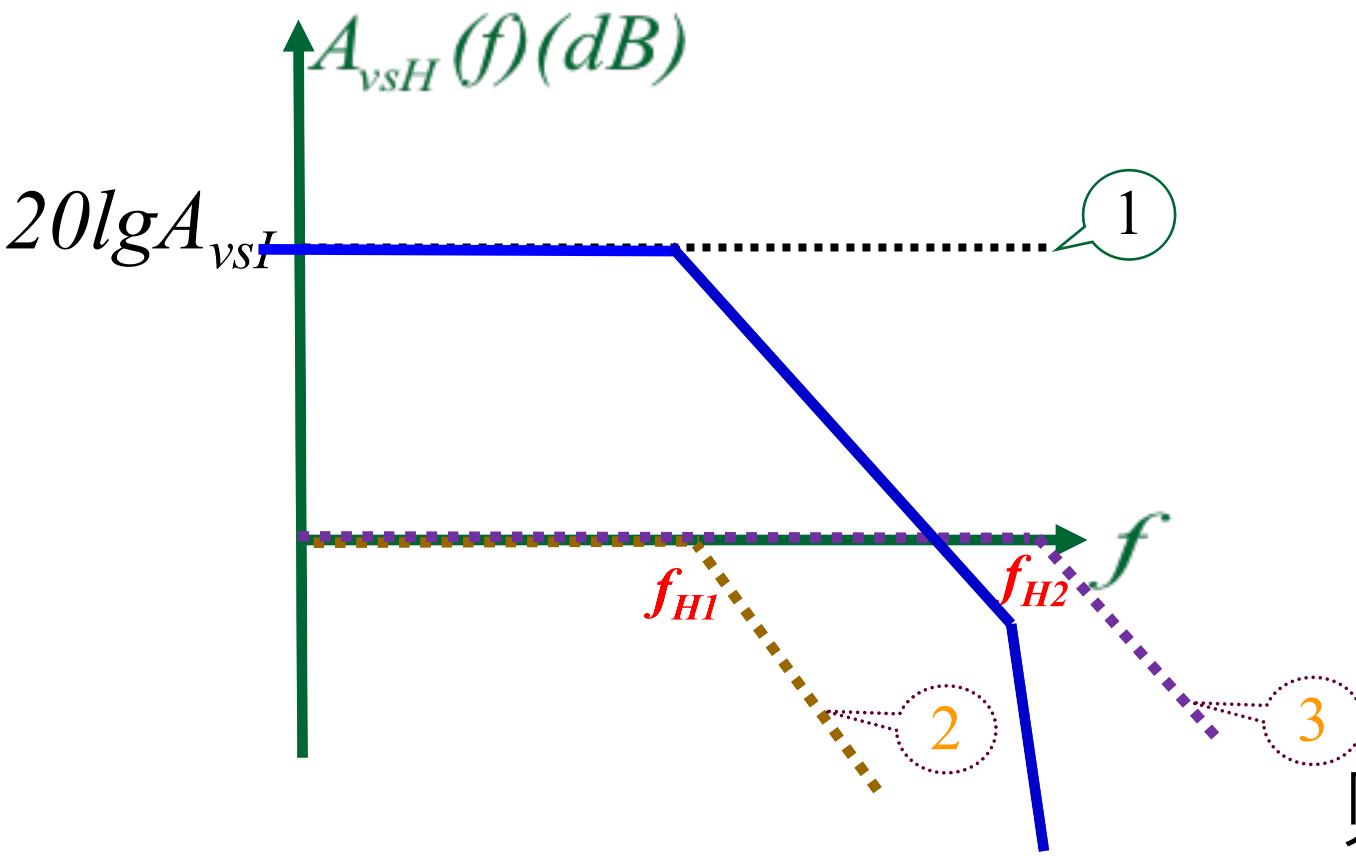
$$f_{H1}=\frac{1}{2\pi R^{'}C^{'}}\approx f_H$$

讨论　　返回频响分析

放大器的高频响应波特图

高频稳态响应函数：

$$A_{vsH}(jf)=\frac{v_o}{v_s}=\frac{A_{vsI}}{(1+jf/f_{H1})(1+jf/f_{H2})}$$



则 $f_H \approx f_{H1}$

返回

讨论

$$f_{H1}=\frac{1}{2\pi R'C'}$$

$$C'=C_{b'e}+(1+g_mR_L')C_{b'c})$$

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

要f_H大，就要求R'、C'小，因而要求：

1)选$r_{bb'}$、 $C_{b'e}$、 $C_{b'c}$小、f_T高的三极管→使f_H ↑

2)管子选定后

采用理想电压源($R_S\to 0$)激励时，$f_H\to f_T$(最高) 推到极限.

采用理想恒流源($R_S\to\infty$)激励时，$f_H\to f_\beta$ (最低)

提高共发电路上限频率的方法：

- 在电路输入端采用低阻节点(即R_S小——采用理想电压源)。
- 在电路输出端也采用低阻节点(即 R_L'小，可与共基组合)。
- 引入负反馈扩展上限频率f_H。

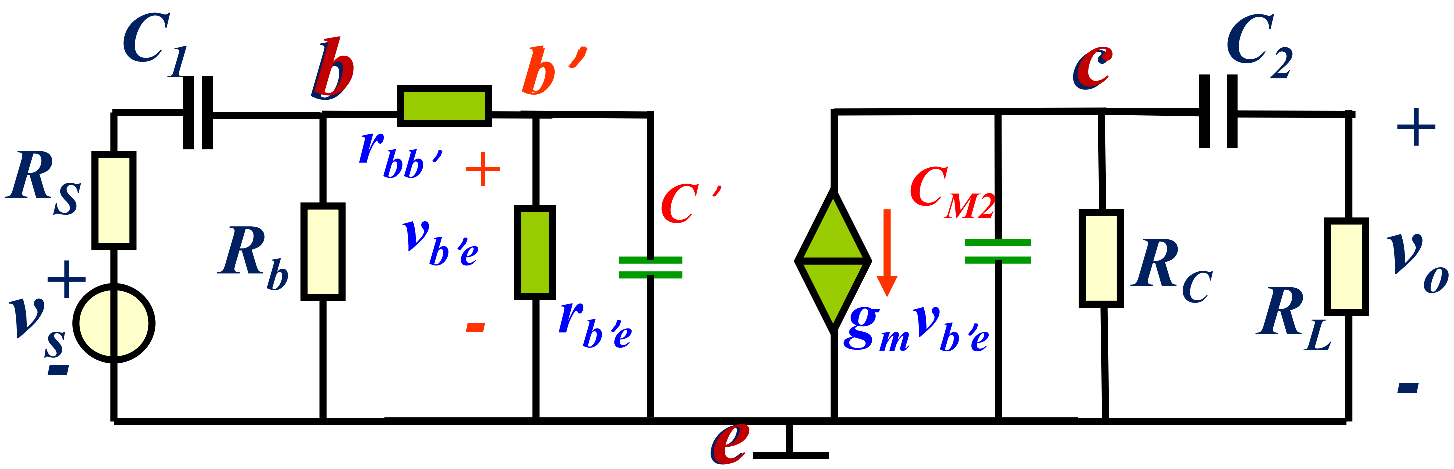
补充放大.

牺牲 增益 换带宽

返回高频分析

3. 低频区的频率响应和下限频率f_L

结合P_{128}习题5-7



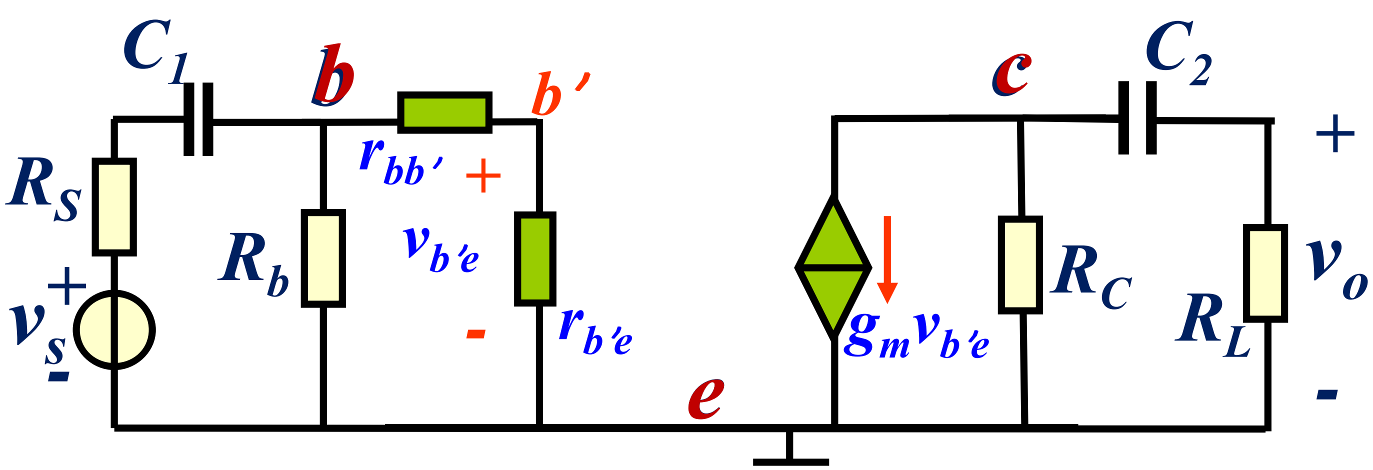
$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C_2}$$

低频稳态响应函数：

$$A_{vsL}(jf) = \frac{A_{vsI}}{(1 - j f_{L1}/f)(1 - j f_{L2}/f)}$$

低频时耦合电容阻抗↑ $(\neq 0)$

管子极间电容阻抗↑ $(\to\infty)$



一般有$f_{L1} > 5 f_{L2}$。

则$f_L = f_{L1}$

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

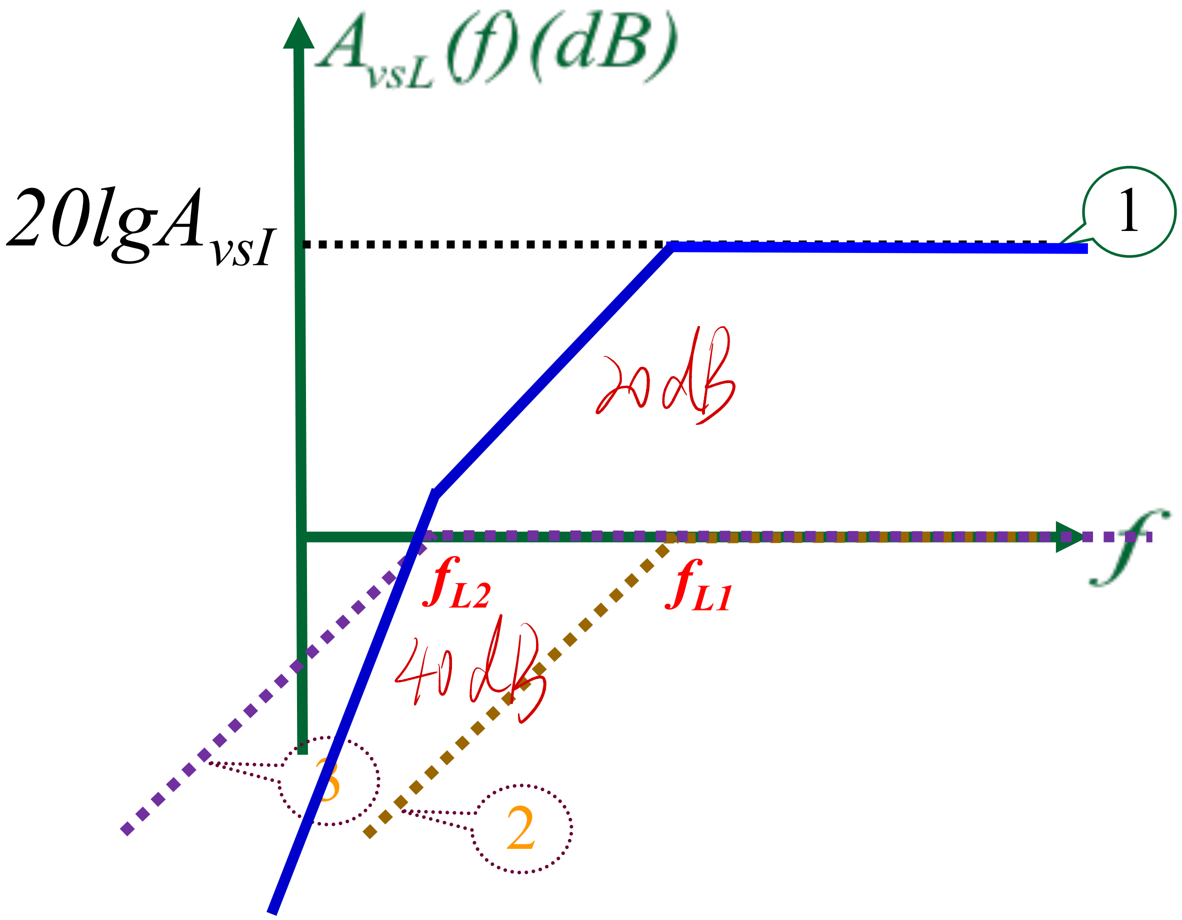
$$A_{vsL}(jf) \approx \frac{A_{vsI}}{1 - j f_L / f}$$

返回频响分析

放大器的低频响应波特图

低频稳态响应函数：

$$A_{vsL}(jf) = \frac{A_{vsI}}{(1 - j f_{L1}/f)(1 - j f_{L2}/f)} = A_{vsI} \cdot \frac{1}{1 - j f_{L1}/f} \cdot \frac{1}{1 - j f_{L2}/f}$$



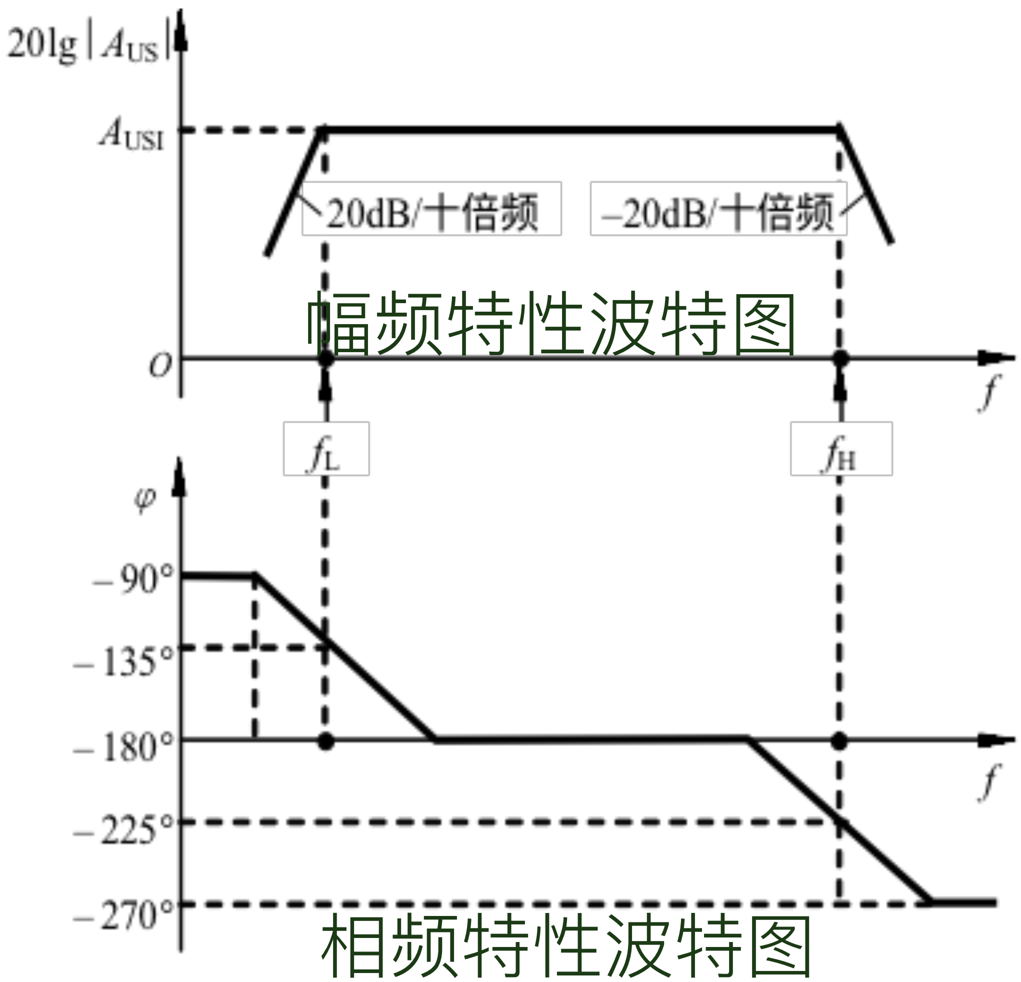
则 $f_L \approx f_{L1}$

返回

4. 完整的频率特性波特图及增益带宽积

综上所述，共发放大电路的频率特性表达式为：

$$\dot{A}_{vs} \approx \dot{A}_{vsI} \cdot \frac{1}{1-\mathrm{j}(f_L/f)} \cdot \frac{1}{1+\mathrm{j}(f/f_H)}$$



共射放大电路的频率响应图

❑ 共发电路增益带宽积 GBW

$$GBW = \left|A_{usI} \cdot B\right| \approx \left|A_{usI} \cdot f_H\right|$$

$$= \left| -\frac{\beta R'_L}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \cdot \frac{1}{2\pi R_t C_t} \right|$$

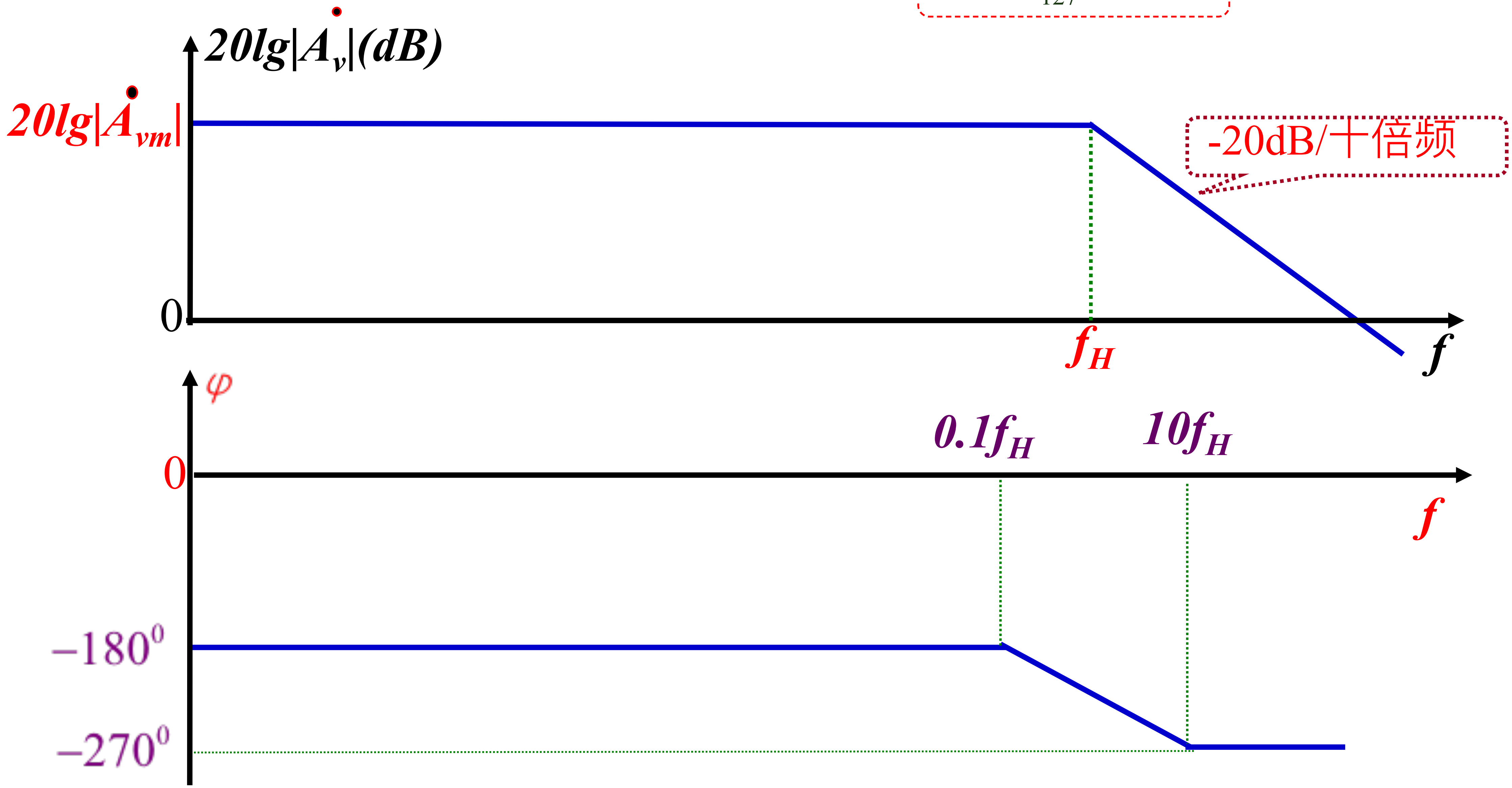
$$= \frac{\omega_T}{2\pi(1+\omega_T R'_L C_{b'c})} \cdot \frac{R'_L}{R_s + r_{bb'}}$$

1)选 $r_{bb'}$ 和 $C_{b'c}$ 小、ω_T 高的三极管 → 使 GBW↑。

2)R_L'↓ → ω_H↑，但 A_{usI}↓。需兼顾两者。

5.直接耦合单管共射放大电路的频率响应

结合P_{127}习题5-3



直接耦合单管共射放大电路的波特图

低频特性好

6、共基、共集放大电路的频率特性

共集放大电路的上限截止频率：$\omega_H \approx \omega_T \approx \beta\omega_\beta$

共基放大电路的上限截止频率：$\omega_H \approx \omega_\alpha \approx (1+\beta)\omega_\beta$

结论：

电压放大

三种组态电路中，共基电路频率特性最好、共发最差。

电子设备中，为改善电路频率响应，常要求放大器具有很高的上限频率（几MHz ~几千MHz）。

扩展上限频率的方法：

- 改进集成工艺，通过提高管子特征频率f_T扩展f_H。
- 利用组合电路扩展上限频率f_H。
- 利用电流模技术扩展上限频率f_H。
- 在放大电路中引入负反馈扩展上限频率f_H。

5.4、多级放大电路的频率响应

结合P_{128}习题5-6

多级放大电路总的电压放大倍数是各级电压放大倍数之积。

$$\dot{A}_v=\dot{A}_{v1}\cdot\dot{A}_{v2}\cdots\cdot\dot{A}_{vn}=\left|\dot{A}_v\right|e^{j\varphi}=\left|\dot{A}_{v1}\right|e^{j\varphi_1}\left|\dot{A}_v2\right|e^{j\varphi_2}\cdots$$

$$20\lg\left|\dot{A}_v\right|=20\lg\left|\dot{A}_{v1}\right|+20\lg\left|\dot{A}_{v2}\right|+\cdots+20\lg\left|\dot{A}_{vn}\right|=\sum_{k=1}^{n}20\lg\left|\dot{A}_{vk}\right|$$

即多级放大电路总增益的dB数为是各级增益dB数之和。

多级放大电路总相位为各级相位之和：$\varphi=\varphi_1+\varphi_2+\cdots\varphi_n=\sum_{k=1}^{n}\varphi_k$

$$f_L\approx1.1\sqrt{f_{L1}^2+f_{L2}^2+\cdots+f_{Ln}^2}$$

主要由大的来决定

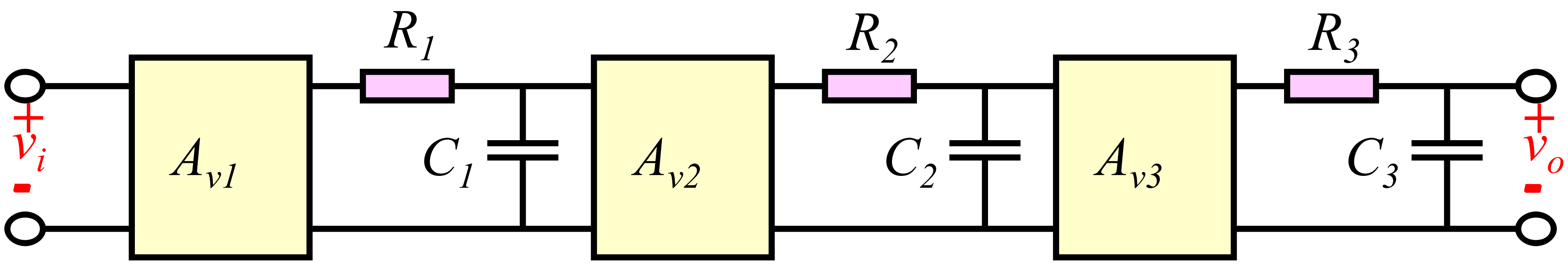
$$\frac{1}{f_H}\approx1.1\sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2}+\frac{1}{f_{H2}^2}+\cdots+\frac{1}{f_{Hn}^2}}$$

主要由小的来决定

应用举例

多级放大电路的频率响应举例

如图所示的三级理想电压放大器，$R_i \to \infty$，$R_o \to 0$。试画渐近波特图，并求 ω_H。已知 $R_1 C_1 > R_2 C_2 > R_3 C_3$。



利用 RC 低通电路分析结果，得传递函数表达式：

$$A_v(j\omega) = \frac{A_{vI}}{(1 + j\omega / \omega_{H1})(1 + j\omega / \omega_{H2})(1 + j\omega / \omega_{H3})}$$

式中 $\omega_{H1} = \dfrac{1}{R_1 C_1}$　$\omega_{H2} = \dfrac{1}{R_2 C_2}$　$\omega_{H3} = \dfrac{1}{R_3 C_3}$　$A_{vI} = A_{v1} \cdot A_{v2} \cdot A_{v3}$

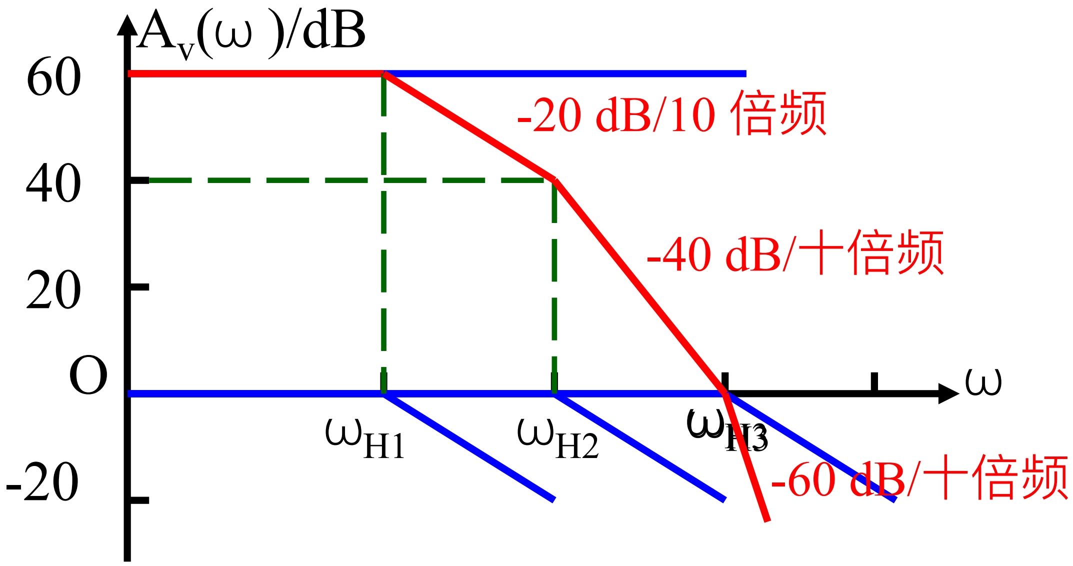
幅频及相频表达式：均为单阶因子波特图的叠加。

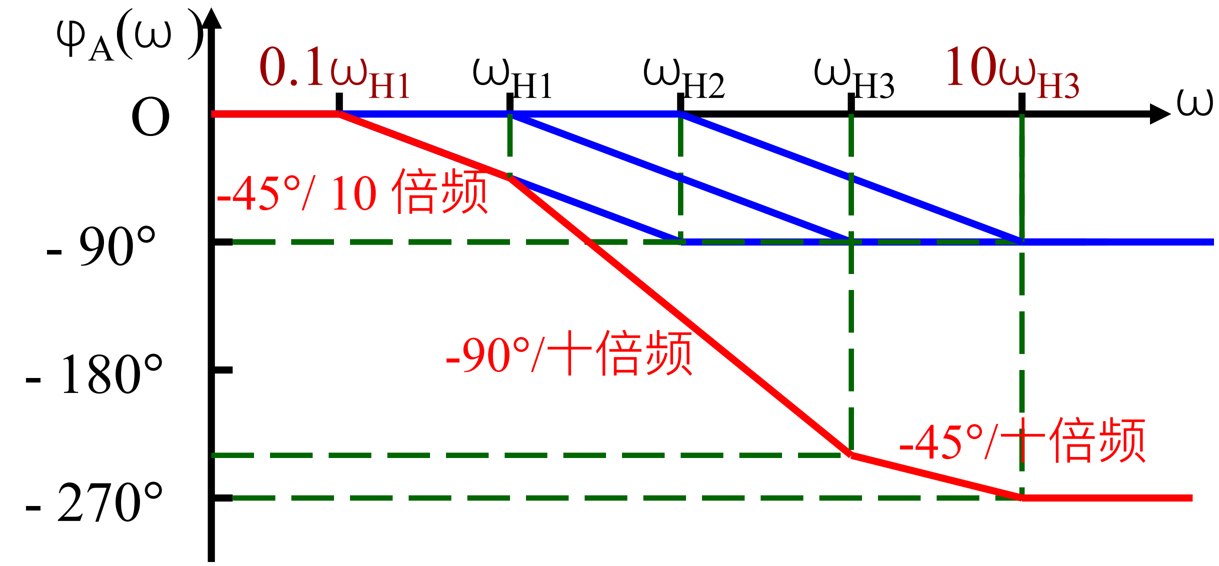
$$A_v(\omega)\Big|_{dB} = 20\lg A_{vI} - 20\lg \sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_{H1}})^2} - 20\lg \sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_{H2}})^2} - 20\lg \sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_{H3}})^2}$$

$$\varphi_A(\omega) = -\arctan \omega / \omega_{H1} - \arctan \omega / \omega_{H2} - \arctan \omega / \omega_{H3}$$

波特图及上、下限频率的分析

假设 $A_{vI}=60\ \text{dB}$，$\omega_{H3}=10\omega_{H2}=100\omega_{H1}$





? 确定上限角频率：$A_v(\omega_H)=\dfrac{A_{vI}}{\sqrt{[1+(\omega_H/\omega_{H1})^2][1+(\omega_H/\omega_{H2})^2][1+(\omega_H/\omega_{H3})^2]}}=\dfrac{A_{vI}}{\sqrt{2}}$

由定义知:当 $\omega=\omega_H$ 时

整理得到: $$\omega_H \approx \frac{1}{1.1\sqrt{1/\omega_{H1}^2+1/\omega_{H2}^2+1/\omega_{H3}^2}}$$

若 $\omega_{H2}\geq 4\omega_{H1}$， 则称 ω_{H1} 为主极点，ω_{H2}、 ω_{H3} 为非主极点。

上限角频率取决于主极点角频率：$\omega_H\approx\omega_{p1}$ 由小的来决定

同理可得多级电路的下限角频率：$\omega_L\approx 1.1\sqrt{\omega_{L1}^2+\omega_{L2}^2+\cdots+\omega_{Ln}^2}\approx\omega_{L1}$

若有：ω_{L1}》ω_{L2}、⋯、ω_{Ln}

结合P_{143}页习题3–9讲解

由大的来决定