



模拟电子技术基础

放大电路的频率响应

雷 飞

010-67392914

leifei@bjut.edu.cn

6.1 频率响应概述

研究放大电路频率响应的必要性

由于放大电路中存在电抗性元件及晶体管极间电容，所以电路的放大倍数为频率的函数，这种关系称为**频率响应或频率特性**。

小信号等效模型只适用于低频信号的分析。

06 放大电路的频率响应

6.2 频率响应的基本概念

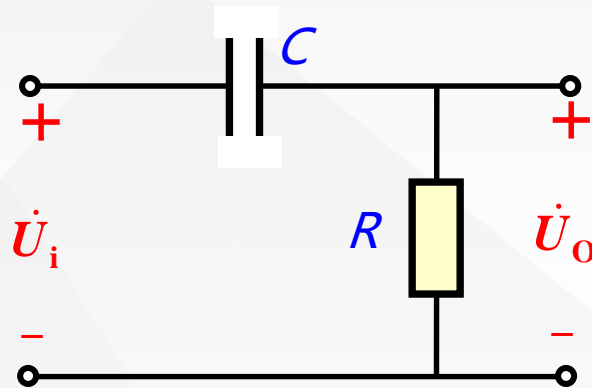
一、高通电路

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

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

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

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



RC 高通电路

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

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

f_L 称为下限截止频率

06 放大电路的频率响应

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

放大电路的**对数频率特性**称为**波特图**。

则有：

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

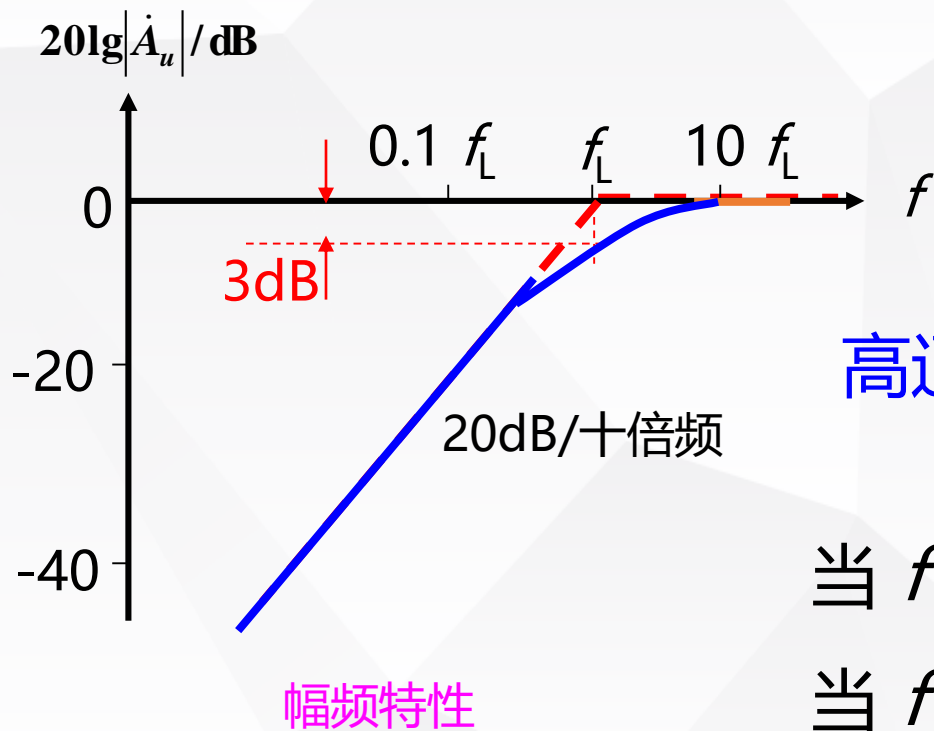
$$\text{当 } f \gg f_L \text{ 时, } 20\lg|\dot{A}_u| \approx 0 \text{ dB}$$

$$\text{当 } f \ll f_L \text{ 时, } 20\lg|\dot{A}_u| \approx -20\lg\frac{f_L}{f} = 20\lg\frac{f}{f_L}$$

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

06 放大电路的频率响应

对数幅频特性:



最大误差为 3 dB, 发生在 $f = f_L$ 处

实际幅频特性曲线:

高通特性:

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

当 $f < f_L$ (低频), $|\dot{A}_u| < 1$

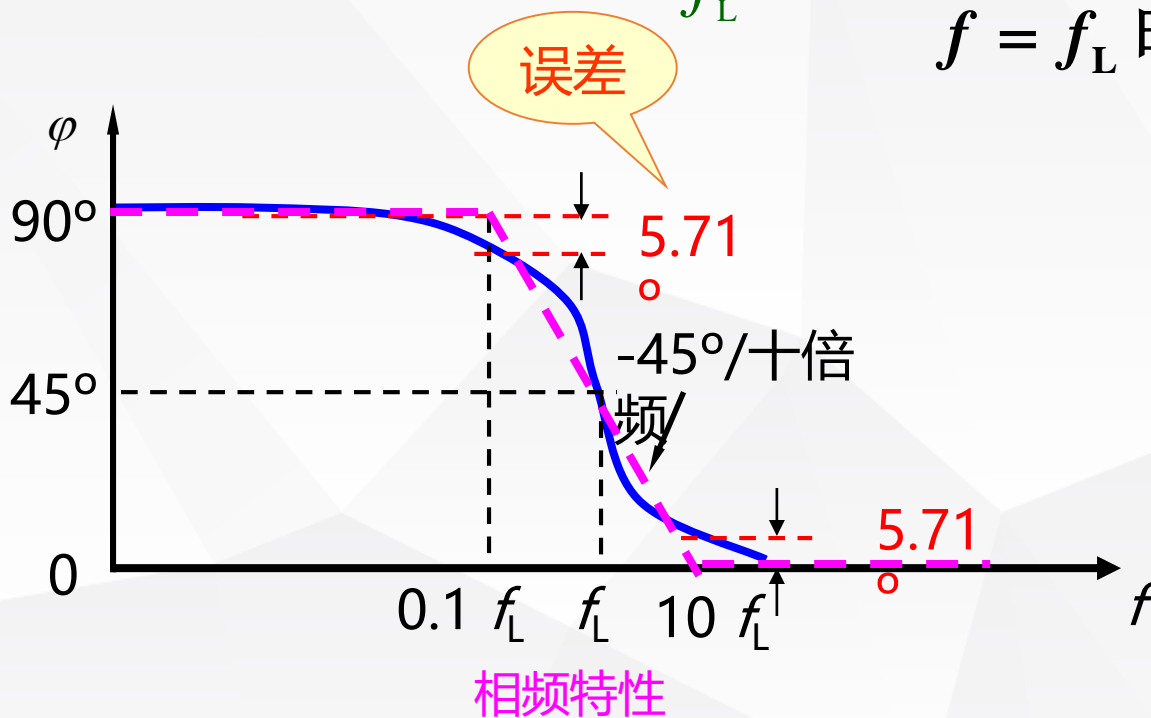
且频率愈低, $|\dot{A}_u|$ 的值愈小, 低频信号不能通过。

06 放大电路的频率响应

对数相频特性

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

$f \gg f_L$ 时, $\varphi \approx 0^\circ$;
 $f \ll f_L$ 时, $\varphi \approx 90^\circ$;
 $f = f_L$ 时, $\varphi = 45^\circ$



在低频段, 高通电路产生 $0 \sim 90^\circ$ 的超前相移。

06 放大电路的频率响应

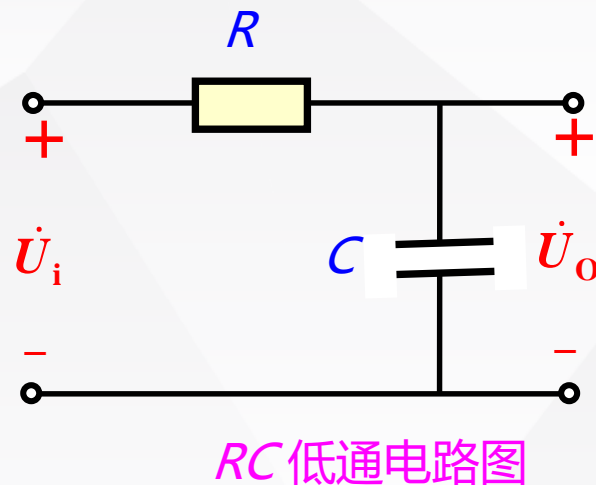
二、RC 低通电路的波特图

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

$$\text{令： } f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = \frac{1}{2\pi RC}$$

f_H 称为上限截止频率

$$\text{则： } \dot{A}_u = \frac{1}{1 + j\omega\tau_H} = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_H}}$$

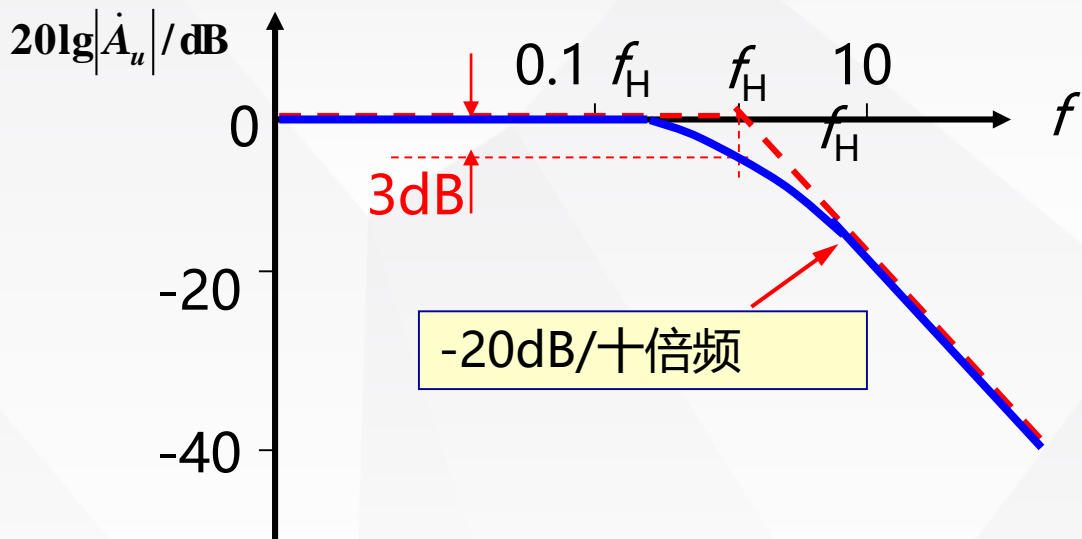


$$|\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2}}$$

$$\varphi = -\arctan\left(\frac{f}{f_H}\right)$$

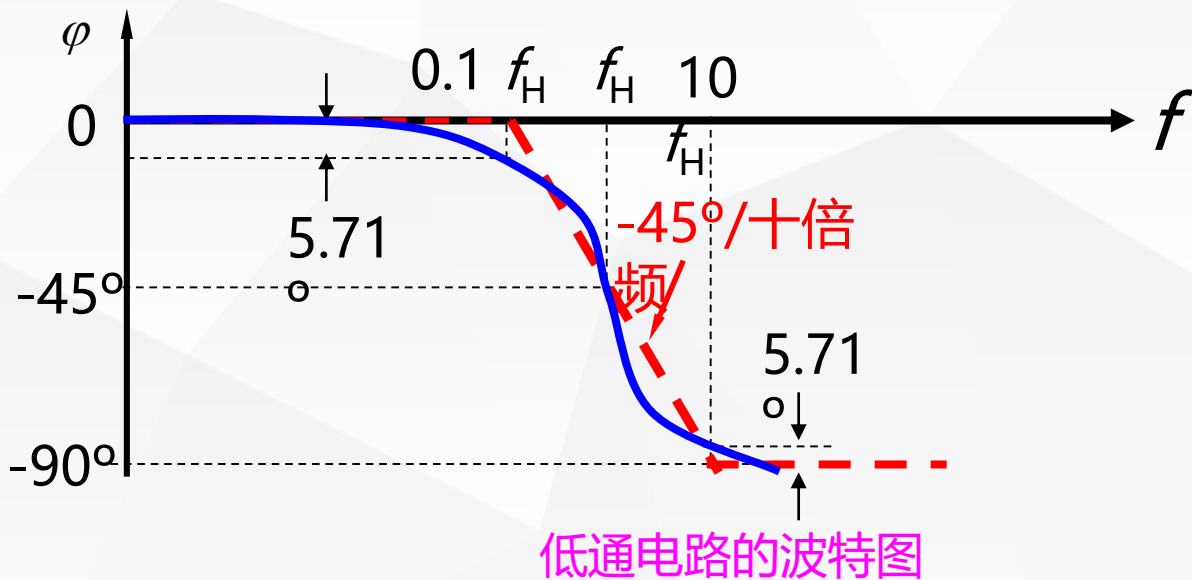
06 放大电路的频率响应

对数幅频特性:



对数相频特性:

在高频段，低通电路产生 $0 \sim 90^\circ$ 的滞后相移。



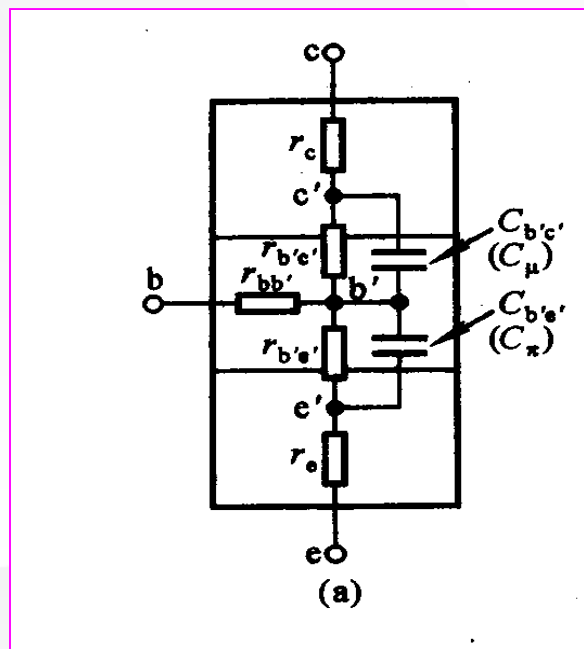
小结

- (1) 电路的截止频率决定于电容所在回路的时间常数 τ ，即决定了 f_L 和 f_H 。
- (2) 当信号频率等于 f_L 或 f_H 放大电路的增益下降3dB，且产生 $+45^\circ$ 或 -45° 相移。
- (3) 近似分析中，可以用折线化的近似波特图表示放大电路的频率特性。

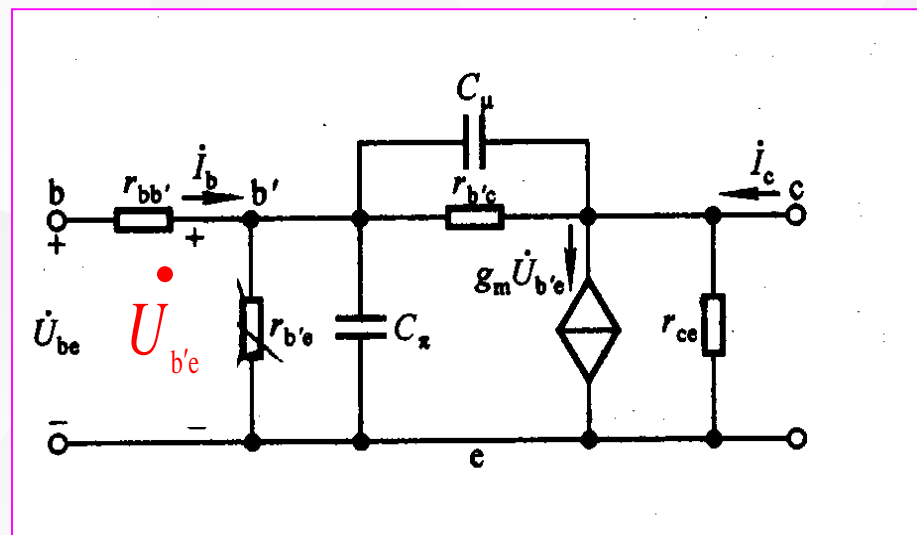
6.3 晶体管的高频等效模型

一、晶体管的混合 π 模型

1. 完整的混合 π 模型



(a) 晶体管的结构示意图



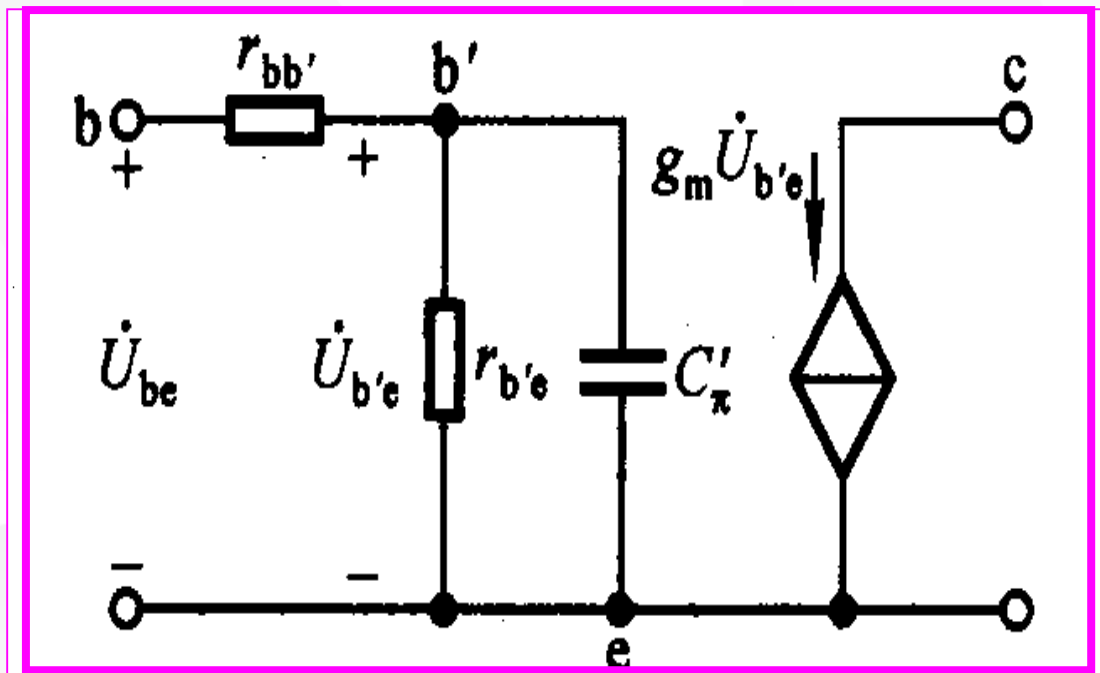
(b) 混合 π 模型

晶体管结构示意图及混合 π 模型

➤ 06 放大电路的频率响应

2.简化的混合 π 模型

通常情况下, r_{ce} 远大于c--e间所接的负载电阻, 而 $r_{b'c}$ 也远大于 C_μ 的容抗, 因而可认为 r_{ce} 和 $r_{b'c}$ 开路。



混合 π 模型的简化 (a)简化的混合 π 模型

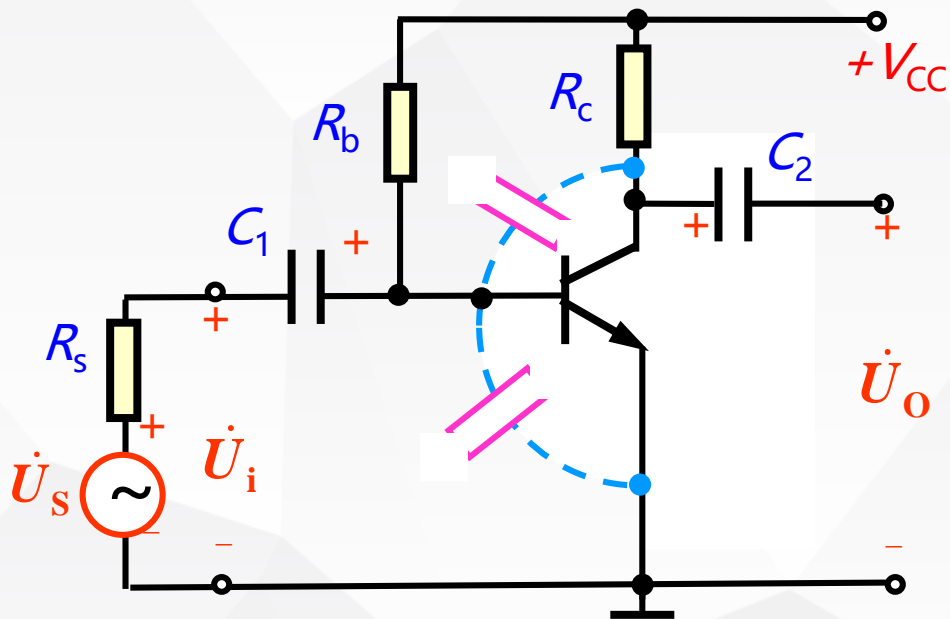
06 放大电路的频率响应

6.4 单管共射放大电路的频率响应

中频段： 各种电抗影响忽略， A_u 与 f 无关；

低频段： 隔直电容压降增大， A_u 降低。与电路中电阻构成 RC 高通电路；

高频段： 三极管极间电容并联在电路中， A_u 降低。而且，构成 RC 低通电路。



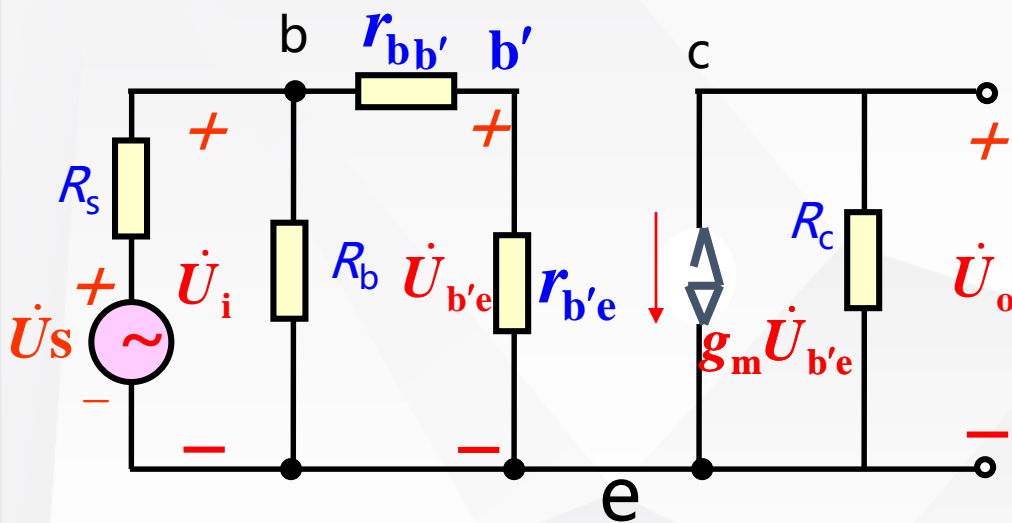
单管共射放大电路

06 放大电路的频率响应

一、中频电压放大倍数

耦合电容可认为交流短路；极间电容可视为交流断路。

1. 中频段等效电路



中频段等效电路

由图可得

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

式中 $R_i = R_b // r_{be}$

$$\dot{U}_o = -g_m \dot{U}_{b'e} R_c = -\frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} g_m R_c \dot{U}_s$$

06 放大电路的频率响应

2. 中频电压放大倍数

$$\dot{A}_{usm} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = -\frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} g_m R_c$$

已知 $g_m = \frac{\beta}{r_{b'e}}$, 则

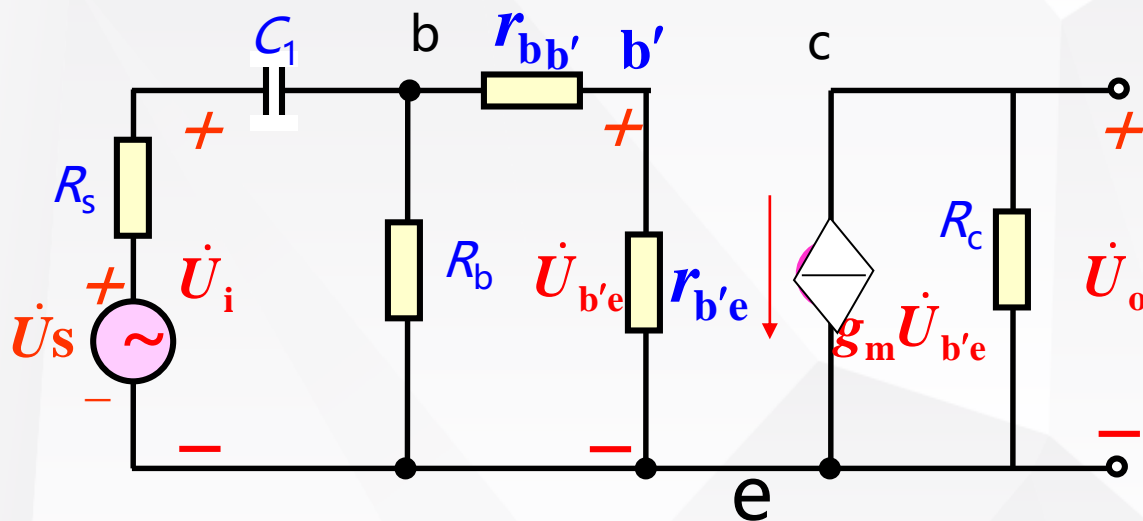
$$\dot{A}_{usm} = -\frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{\beta R_c}{r_{be}}$$

结论：中频电压放大倍数的表达式，与利用简化 h 参数等效电路的分析结果一致。

06 放大电路的频率响应

二、低频电压放大倍数

考虑隔直电容的作用，其等效电路：



C_1 与输入电阻构成
 RC 高通电路

低频等效电路

$$\dot{U}_{b'e} = \frac{R_i}{R_s + R_i + \frac{1}{j\omega C_1}} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \dot{U}_s$$

式中

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

06 放大电路的频率响应

$$\dot{U}_{b'e} = \frac{R_i}{R_s + R_i + \frac{1}{j\omega C_1}} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \dot{U}_s$$

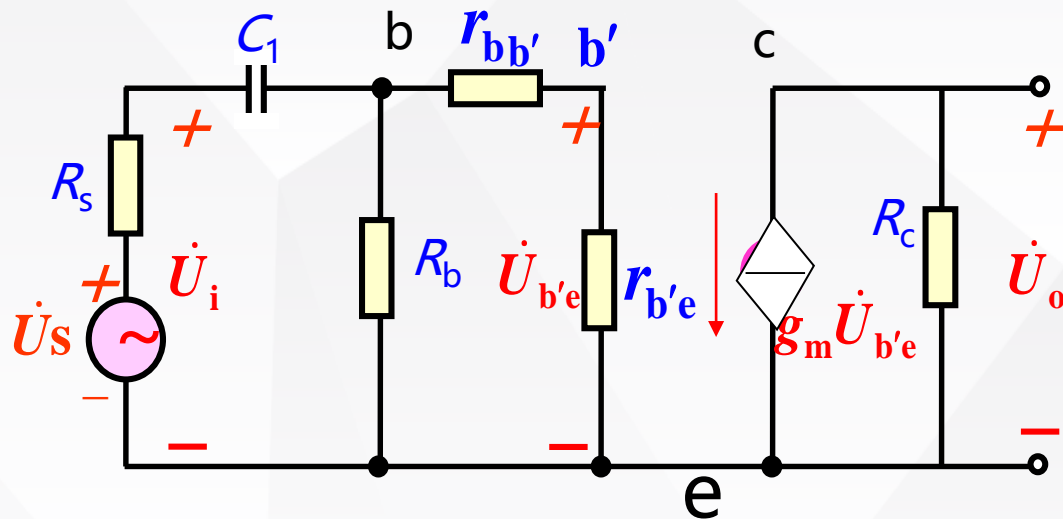
输出电压

$$\dot{U}_o = -g_m \dot{U}_{b'e} R_c$$

$$= -\frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} g_m R_c \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega(R_s + R_i)C_1}} \dot{U}_s$$

低频电压放大倍数

$$\dot{A}_{usL} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \dot{A}_{usm} \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega(R_s + R_i)C_1}}$$



06 放大电路的频率响应

低频时间常数为:

$$\tau_L = (R_s + R_i)C_1$$

下限(-3 dB)频率为:

$$f_L = \frac{1}{2\pi\tau_L} = \frac{1}{2\pi(R_s + R_i)C_1}$$

则

$$\dot{A}_{usL} = \dot{A}_{usm} \frac{1}{1 - j\frac{f_L}{f}} = \dot{A}_{usm} \frac{j\frac{f}{f_L}}{1 + j\frac{f}{f_L}}$$

对数幅频特性

$$20\lg|\dot{A}_{usL}| = 20\lg|\dot{A}_{usm}| + 20\lg \frac{\frac{f}{f_L}}{\sqrt{1 + (\frac{f}{f_L})^2}}$$

对数相频特性

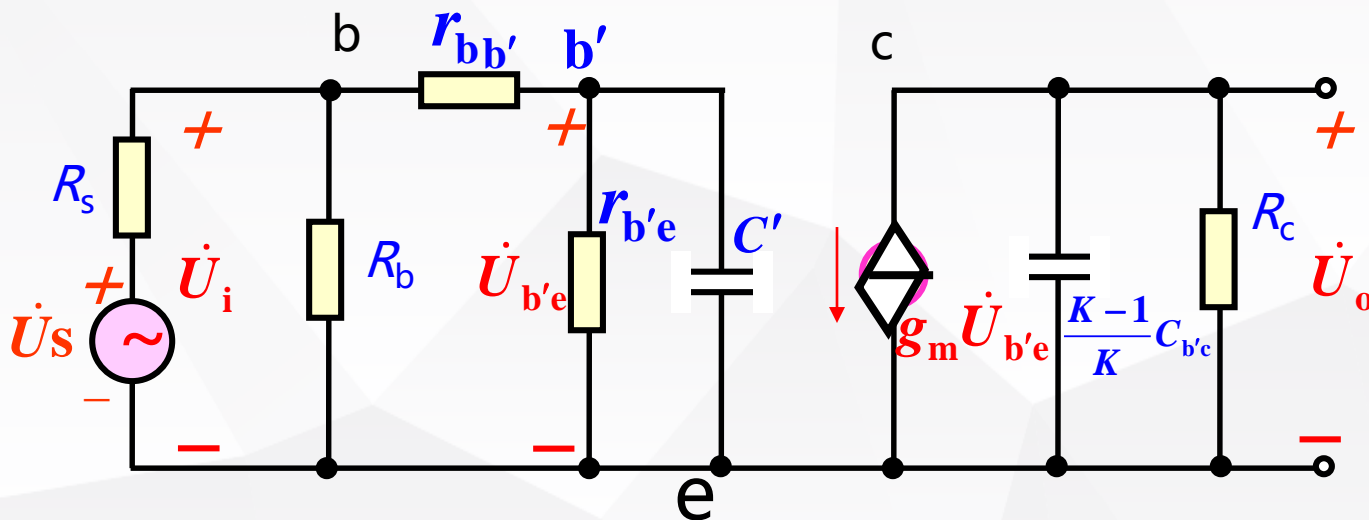
$$\varphi = -180^\circ + (90^\circ - \arctan \frac{f}{f_L}) = -90^\circ - \arctan \frac{f}{f_L}$$

因电抗元件引起的相移为附加相移。 **低频段最大附加相移为+90度**

06 放大电路的频率响应

三、高频电压放大倍数

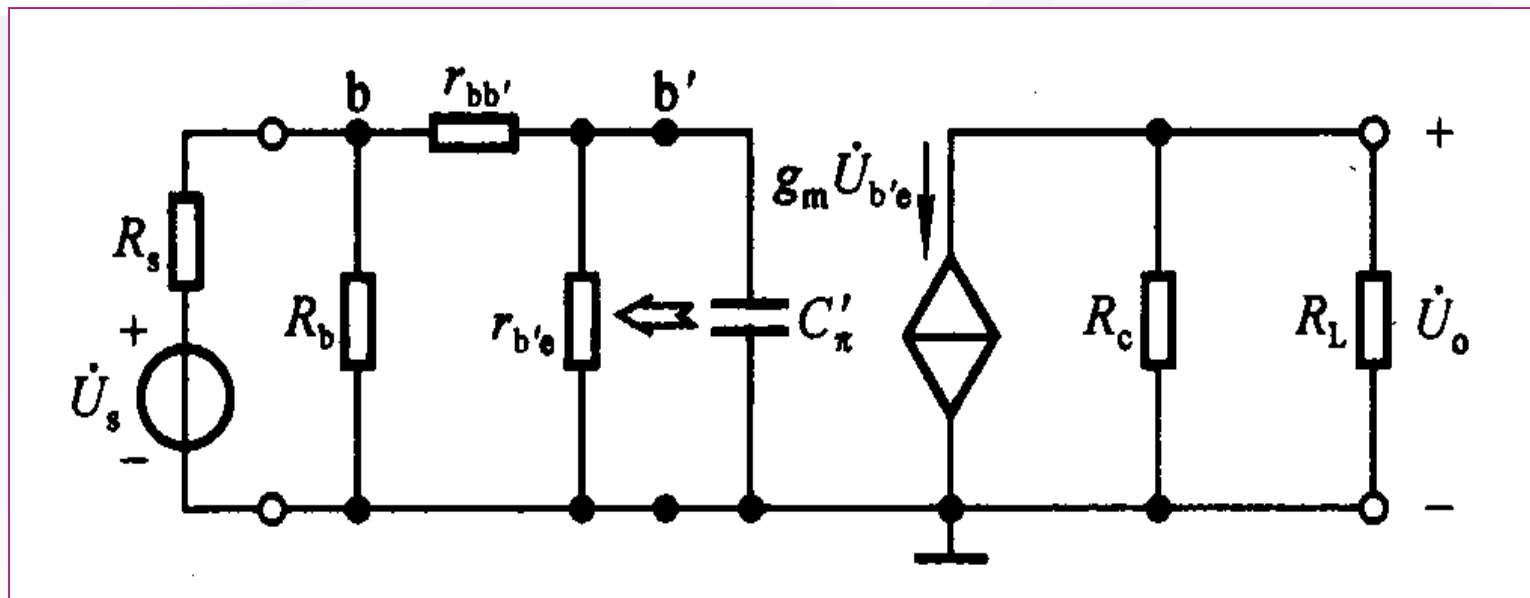
考虑并联在极间电容的影响，其等效电路：



高频等效电路

06 放大电路的频率响应

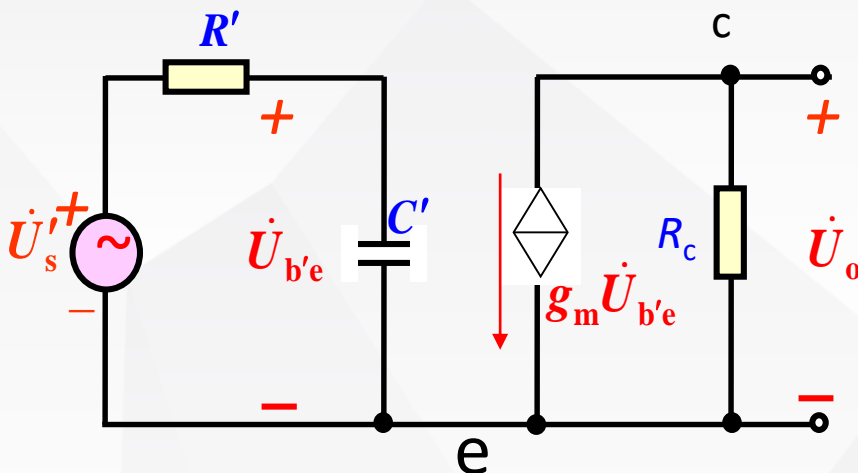
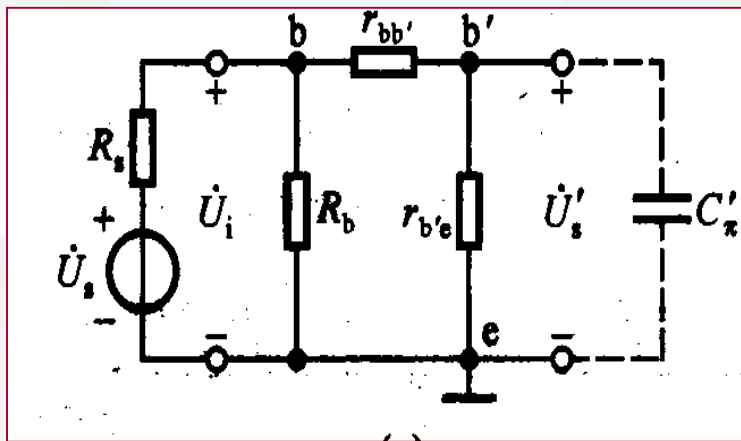
由于输出回路时间常数远小于输入回路时间常数，故可忽略输出回路的结电容。



高频等效电路的简化(a)

用戴维南定理简化

06 放大电路的频率响应



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

$$C' = C_{b'e} + (1 - K)C_{b'c} = C_{b'e} + (1 + g_m R_c)C_{b'c}$$

$$R' = r_{b'e} // [r_{bb'} + (R_s // R_b)] \quad \text{— } C' \text{ 与 } R' \text{ 构成 } RC \text{ 低通电路}$$

$$\dot{U}_{b'e} = \frac{\frac{1}{j\omega C'}}{R' + \frac{1}{j\omega C'}} \dot{U}_s' = \frac{1}{1 + j\omega R' C'} \dot{U}_s'$$

$$\dot{U}_o = -g_m \dot{U}_{b'e} R_c = -\frac{R_i}{R_s + R_i} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} g_m R_c \frac{1}{1 + j\omega R' C'} \dot{U}_s$$

06 放大电路的频率响应

$$\dot{A}_{usH} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \dot{A}_{usm} \frac{1}{1 + j\omega R' C'}$$

高频时间常数:

$$\tau_H = R' C'$$

上限(-3 dB)频率为:

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H} = \frac{1}{2\pi R' C'}$$

故

$$\dot{A}_{usH} = \dot{A}_{usm} \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_H}}$$

\dot{A}_{usH} 的对数幅频特性和相频特性

$$\left\{ \begin{array}{l} 20\lg|\dot{A}_{usH}| = 20\lg|\dot{A}_{usm}| - 20\lg\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_H}\right)^2} \\ \varphi = -180^\circ - \arctan \frac{f}{f_H} \end{array} \right.$$

高频段最大附加相移为-90度

06 放大电路的频率响应

四、波特图

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

绘制波特图步骤：

1. 根据电路参数计算 \dot{A}_{usm} 、 f_L 和 f_H ；
2. 由三段直线构成幅频特性。

中频段：对数幅值 = $20\lg|\dot{A}_{usm}|$

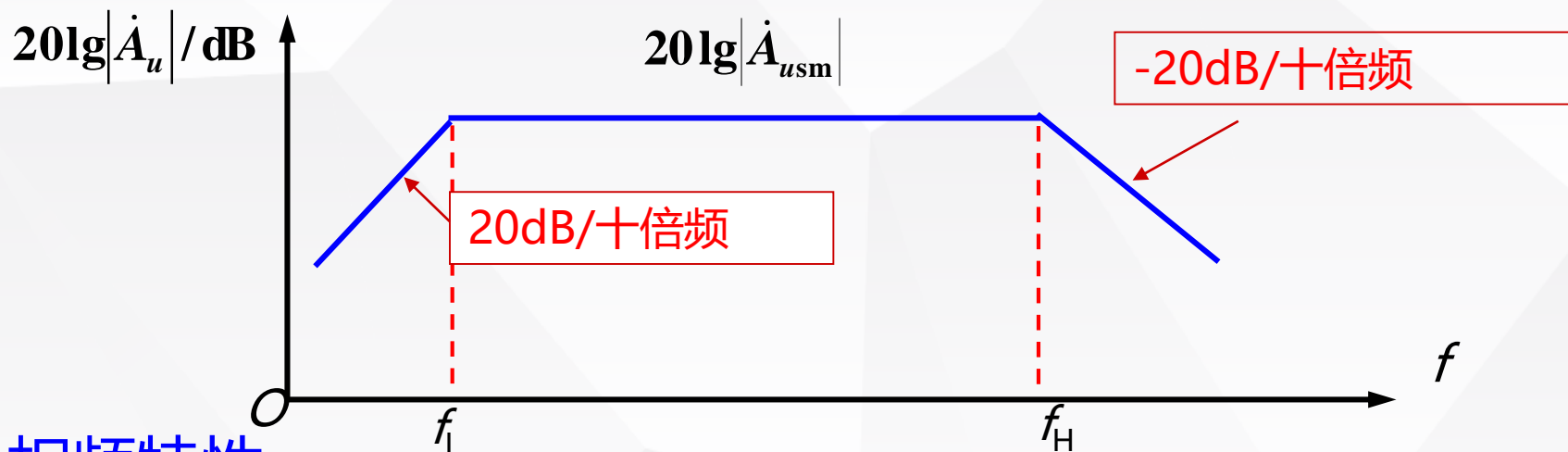
低频段： $f = f_L$ 开始减小，作斜率为 20 dB/十倍频直线

高频段： $f = f_H$ 开始增加，作斜率为 -20 dB/十倍频直线

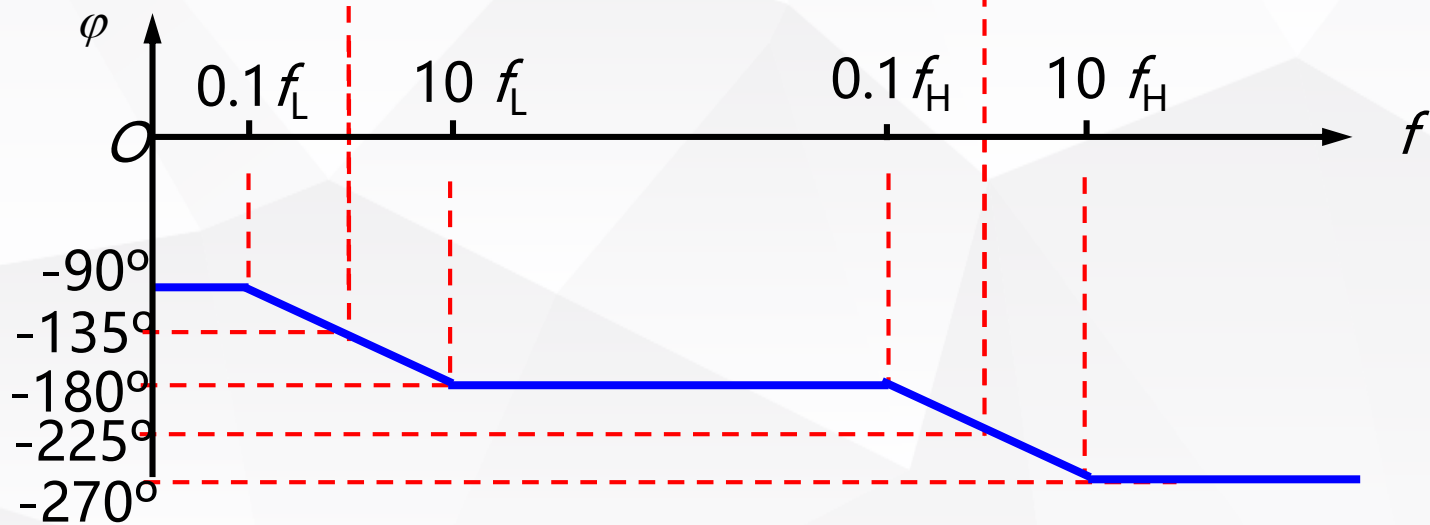
3. 由五段直线构成相频特性。

06 放大电路的频率响应

幅频特性



相频特性



6.5 多级放大电路的频率响应

在多级放大电路中含有多个放大管，因而在高频等效电路中有多个低通电路。在阻容耦合放大电路中，如有多个耦合电容或旁路电容，则在低频等效电路中就含有多个高通电路。

一、多级放大电路频率特性的定性分析

多级放大电路的电压放大倍数：

$$\dot{A}_u = \dot{A}_{u1} \cdot \dot{A}_{u2} \cdot \cdots \cdot \dot{A}_{un}$$

对数幅频特性为：

$$\begin{aligned} 20\lg|\dot{A}_u| &= 20\lg|\dot{A}_{u1}| + 20\lg|\dot{A}_{u2}| + \cdots + 20\lg|\dot{A}_{un}| \\ &= \sum_{k=1}^n 20\lg|\dot{A}_{uk}| \end{aligned}$$

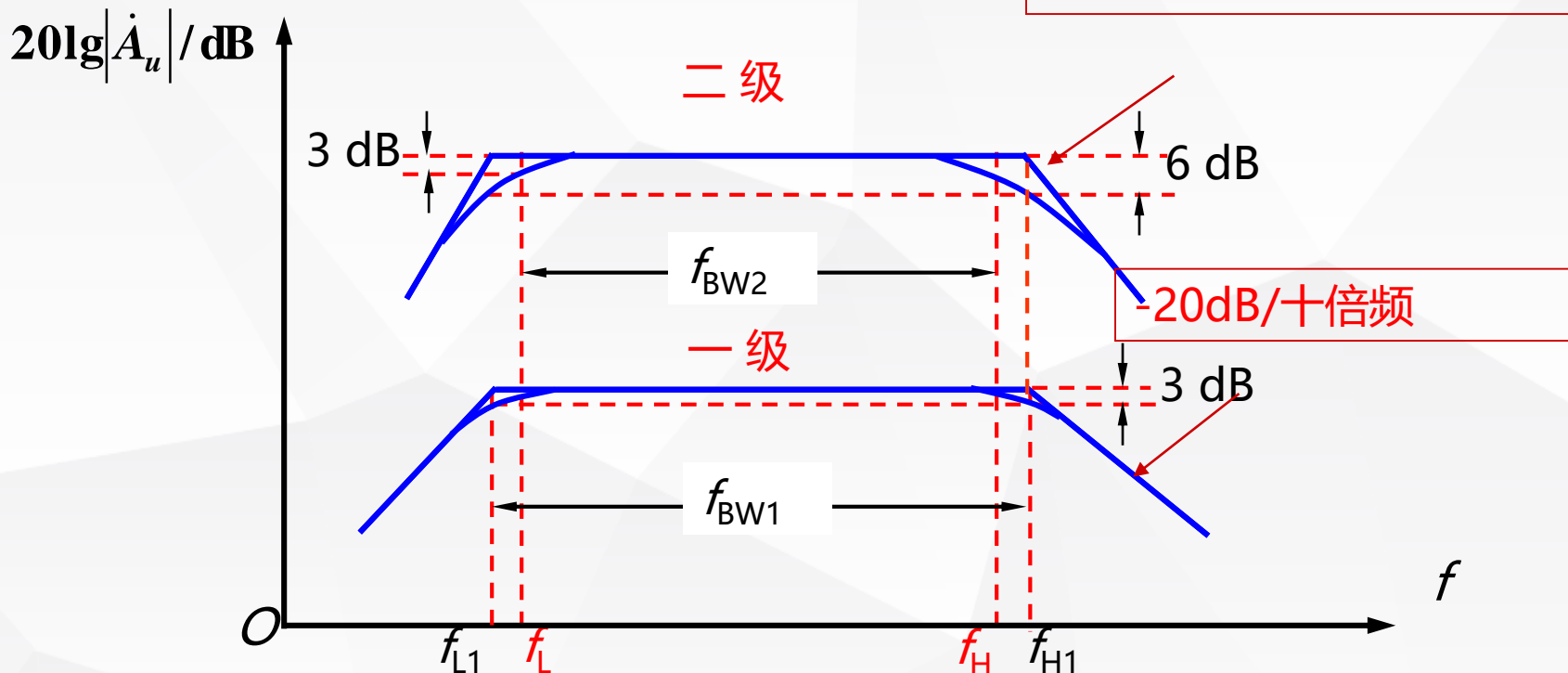
06 放大电路的频率响应

多级放大电路的总相位移为：

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \cdots + \varphi_n = \sum_{k=1}^n \varphi_k$$

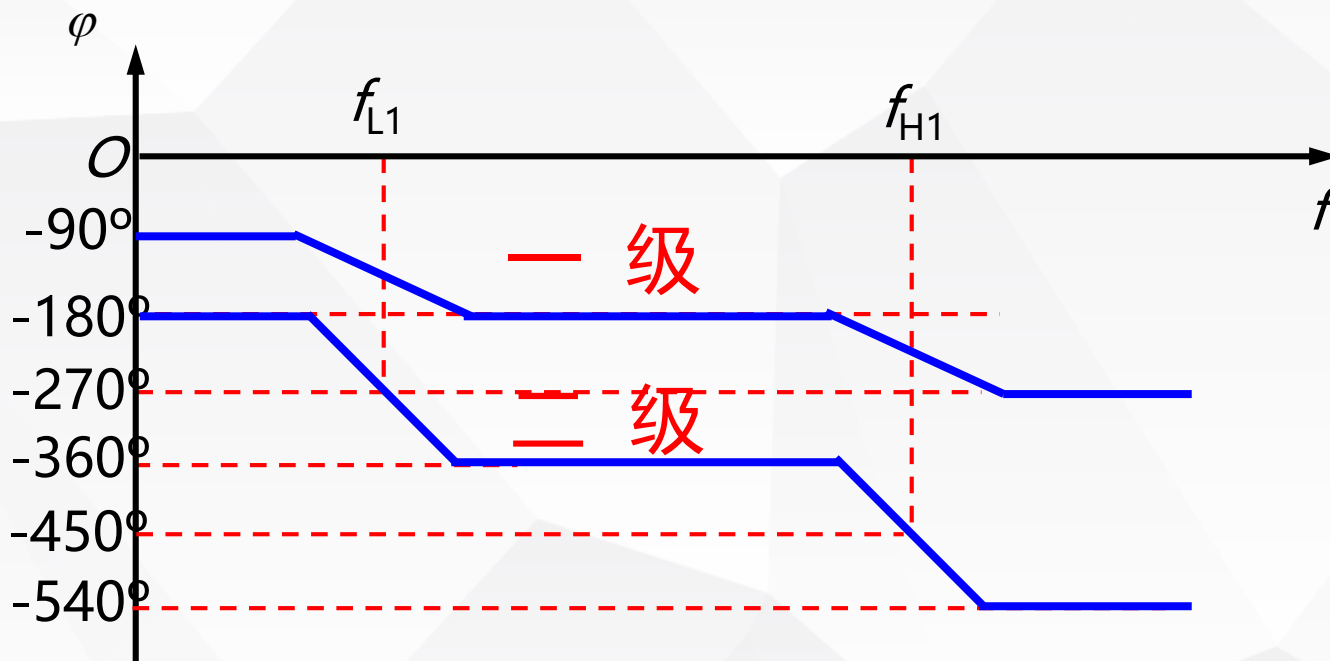
两级放大电路的波特图

幅频特性



06 放大电路的频率响应

相频特性



多级放大电路的通频带，总是比组成它的每一级的通频带为窄。

➤ 06 放大电路的频率响应

二、多级放大电路的上限频率和下限频率的估算

$$\frac{1}{f_H} \approx 1.1 \sqrt{\frac{1}{f_{H1}^2} + \frac{1}{f_{H2}^2} + \cdots + \frac{1}{f_{Hn}^2}}$$

$$f_L \approx 1.1 \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + \cdots + f_{Ln}^2}$$

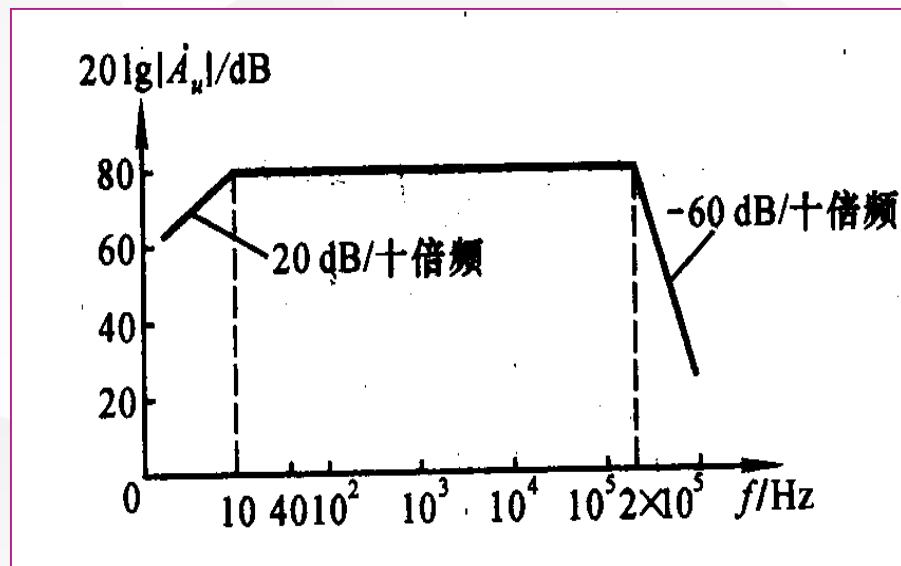
在实际的多级放大电路中，当各放大级的时间常数相差悬殊时，可取其主要作用的那一级作为估算的依据
即：若某级的下限频率远高于其它各级的下限频率，则可认为整个电路的下限频率就是该级的下限频率。同理若某级的上限频率远低于其它各级的上限频率，则可认为整个电路的上限频率就是该级的上限频率。

06 放大电路的频率响应

例 已知某电路的各级均为共射放大电路，其对数幅频特性如图所示。求下限频率、上限频率和电压放大倍数。

解：（1）低频段只有一个拐点，说明影响低频特性的只有一个电容，故电路的下限频率为10Hz。

（2）高频段只有一个拐点，斜率为-60dB/十倍频程，电路中应有三个电容，为三级放大电路。



$$f_H \approx 0.52f_{H1} = (0.52 \times 2 \times 10^6) \text{Hz} = 106 \text{KHz}$$

（3）电压放大倍数

$$\dot{A}_u = \frac{-10^3 jf}{(1 + j\frac{f}{10})(1 + j\frac{f}{2 \times 10^5})^3}$$