

第四章

放大电路的频率响应

前几章的讨论中，我们把放大器的增益看作是与频率无关的参量。

但实际上：待放大的**信号都有一定的频率范围**。如视频信号频带宽度是25Hz~6MHz。这样，由于**电抗元件**的影响，放大器就会对不同频率的信号**放大倍数**和**延迟时间**不同，引起**幅度失真**和**相位失真**。幅度失真和相位失真总称为**频率失真或线性失真**。

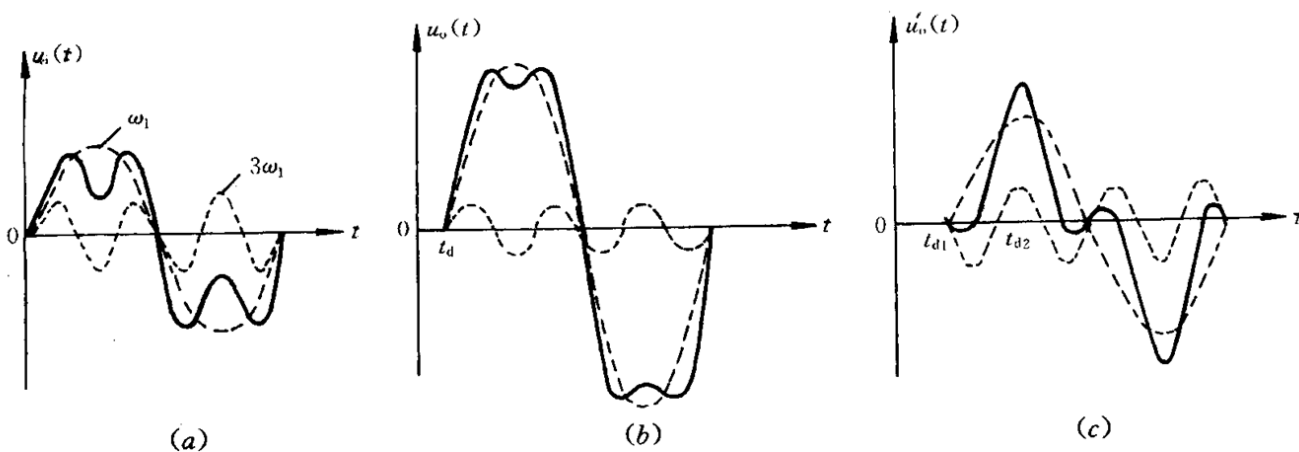


图 5-1 频率失真现象

(a) 待放大信号；(b) 振幅频率失真；(c) 相位频率失真

注意：

考虑频率失真的放大电路，电路参数都以复数形式出现，因此，从本章开始，相关参数也改用复数形式表示。

如： A_u 用 \dot{A}_u 表示

U_o 用 \dot{U}_o 表示

线性失真与非线性失真的比较

项 目		线性失真	非线性失真
不同点	起因	由电路中的线性电抗元件引起（如L、C）	由电路中的非线性元件（如：三极管或场效应管的特性曲线的非线性等）引起
	结果	只会使各频率分量信号的比例关系和时间关系发生变化，或滤掉某些频率分量的信号，但不会产生新的频率分量信号	能产生新的频率分量的信号
相同点		使输出信号产生畸变	

§4.1 放大电路的频率响应和频率失真

1. 频率响应的表示方法

$$\dot{A}_u = |A_u(f)| \angle \phi(f), \text{ 其中}$$

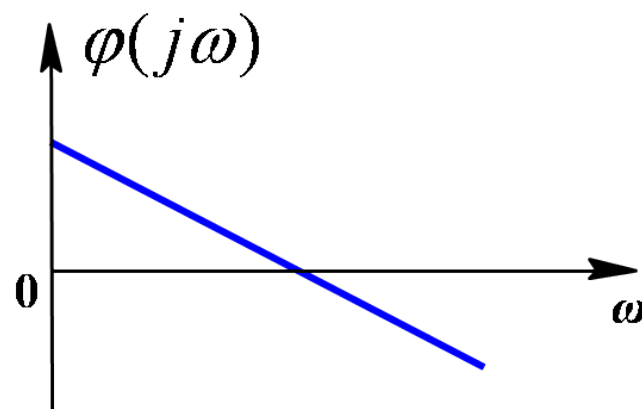
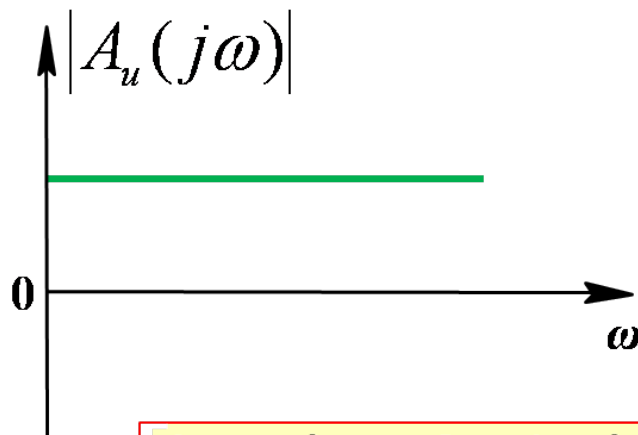
$|A_u(f)|$ —幅频响应/幅频特性, $\phi(f)$ —相频响应/相频特性

理想频率响应

$$\omega = 2\pi f$$

$$|A_u(j\omega)| = K (\text{常数})$$

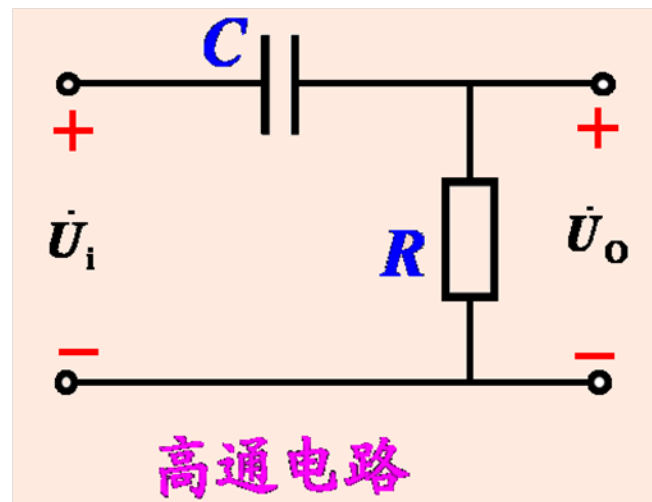
$$\varphi(j\omega) = \omega t_d (t_d \text{为常数})$$



但 f 过低或是过高, 都会造成频率失真

低频区，耦合/旁路电容对信号构成了高通电路（即耦合/旁路电容对高频信号相当于短路）。

但随着频率 f 的下降→耦合电容的容抗增大→因而其分压作用增强→由图知：输出电压下降→放大倍数下降。



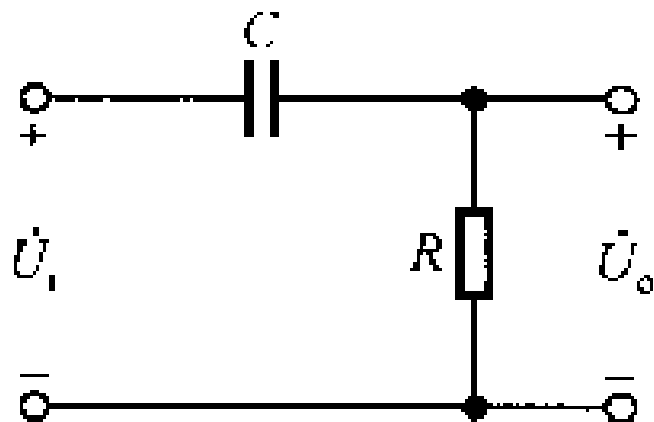
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}}, \text{ 令 } f_L = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \tau_L},$$

$$\text{则 } \dot{A}_u = \frac{1}{1 - j \frac{f_L}{f}}$$

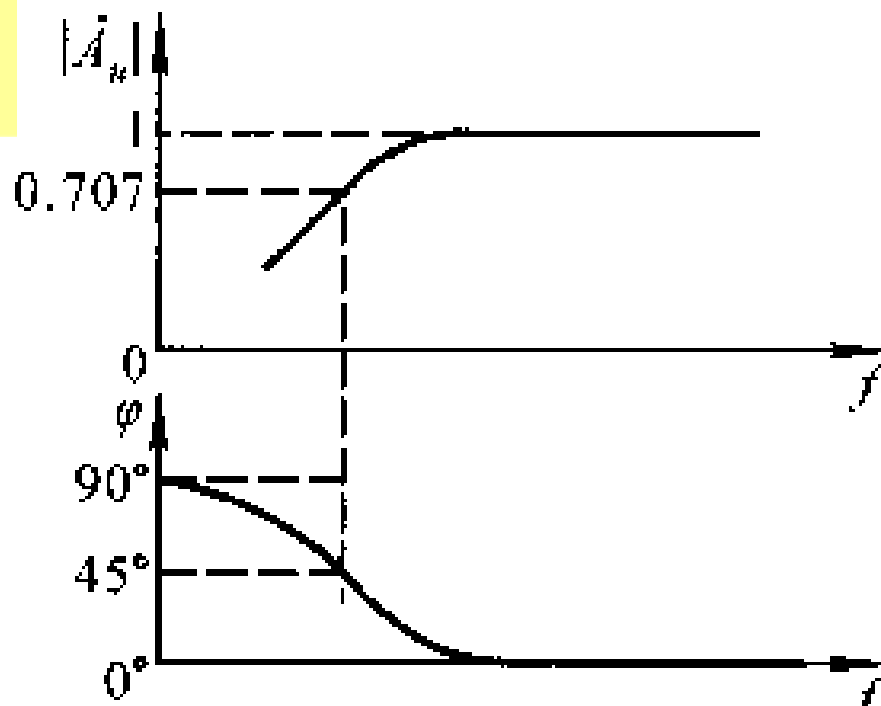
$$\left[\begin{array}{l} |\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (\frac{f_L}{f})^2}} \\ \varphi = \arctg(\frac{f_L}{f}) \end{array} \right.$$

在放大电路的低频区，影响频率响应的是耦合电容和旁路电容。这些电容对低频响应的影响，可用RC高通电路来模拟。

$$\begin{cases} |A_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}} \\ \varphi = \arctg(f_L/f) \end{cases}$$



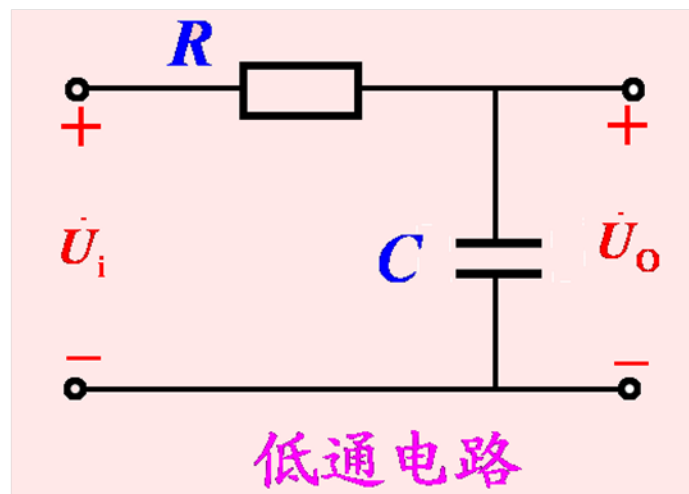
a) 高通电路



b) 频率响应

高频区，极间电容对信号构成了低通电路（即极间电容对低频信号相当于开路）。

但随着频率 f 的增大→极间电容的容抗减小→因而其分流作用增强→由图知：实际被放大的电流减小→放大倍数下降。



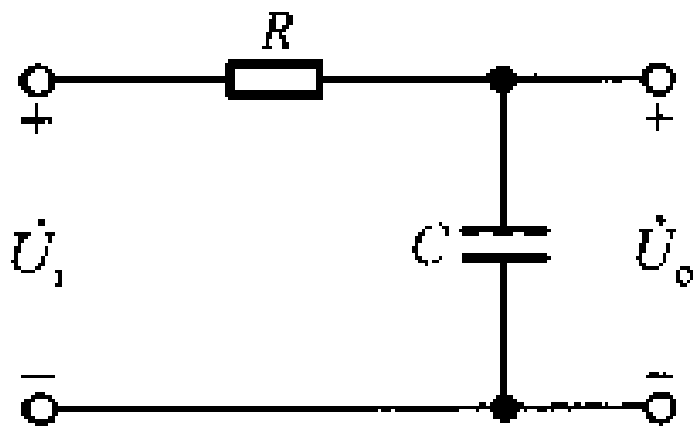
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{R + \frac{1}{j\omega C}}, \quad \text{令 } f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \tau_H},$$

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

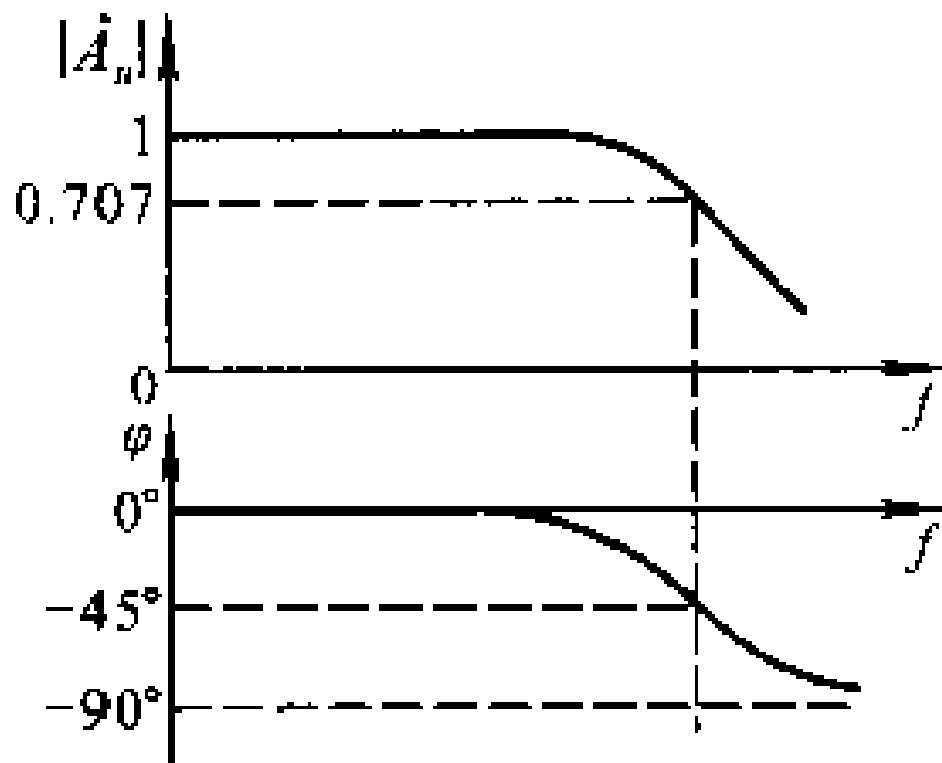
$$\left[\begin{array}{l} |\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}} \\ \varphi = -\arctg(f/f_H) \end{array} \right.$$

在放大电路的高频区，影响频率响应的是管子的极间电容，这些电容对高频响应的影响可用RC低通电路来模拟。

$$\begin{cases} |A_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}} \\ \varphi = -\arctg(f/f_H) \end{cases}$$

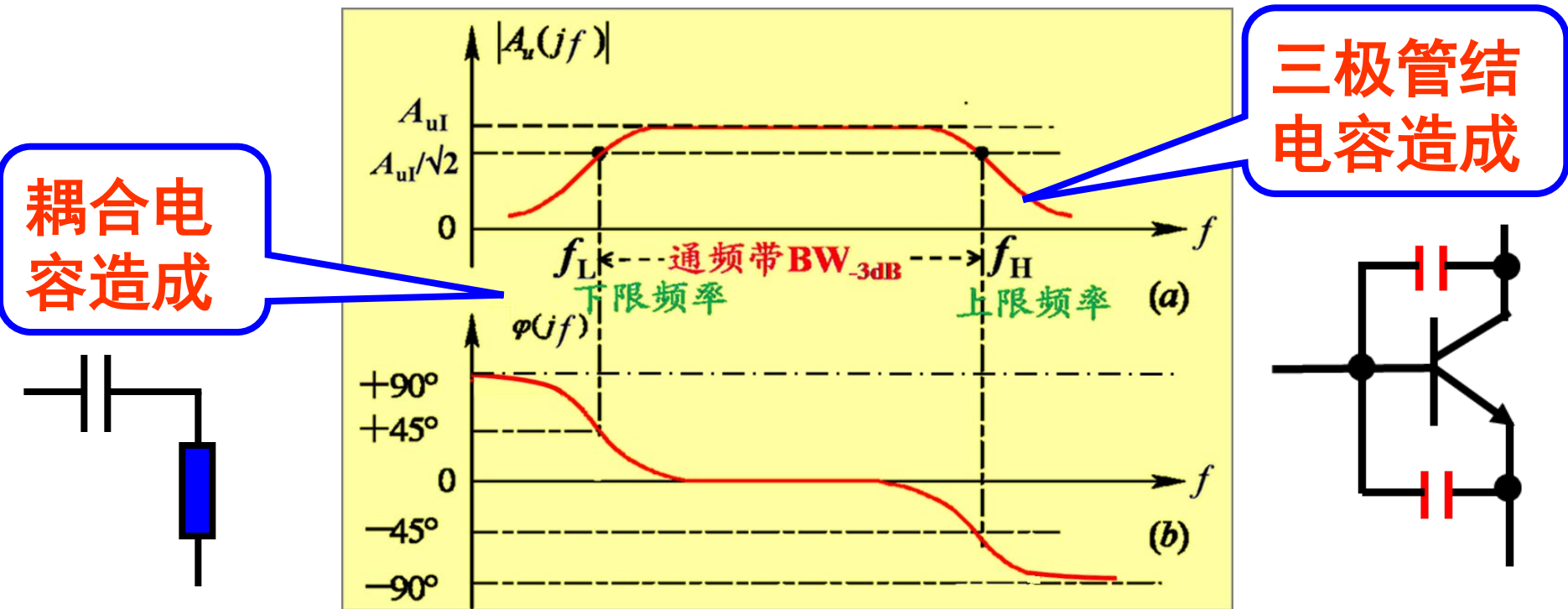


a) 低通电路



b) 频率响应

阻容耦合放大电路的幅频响应：



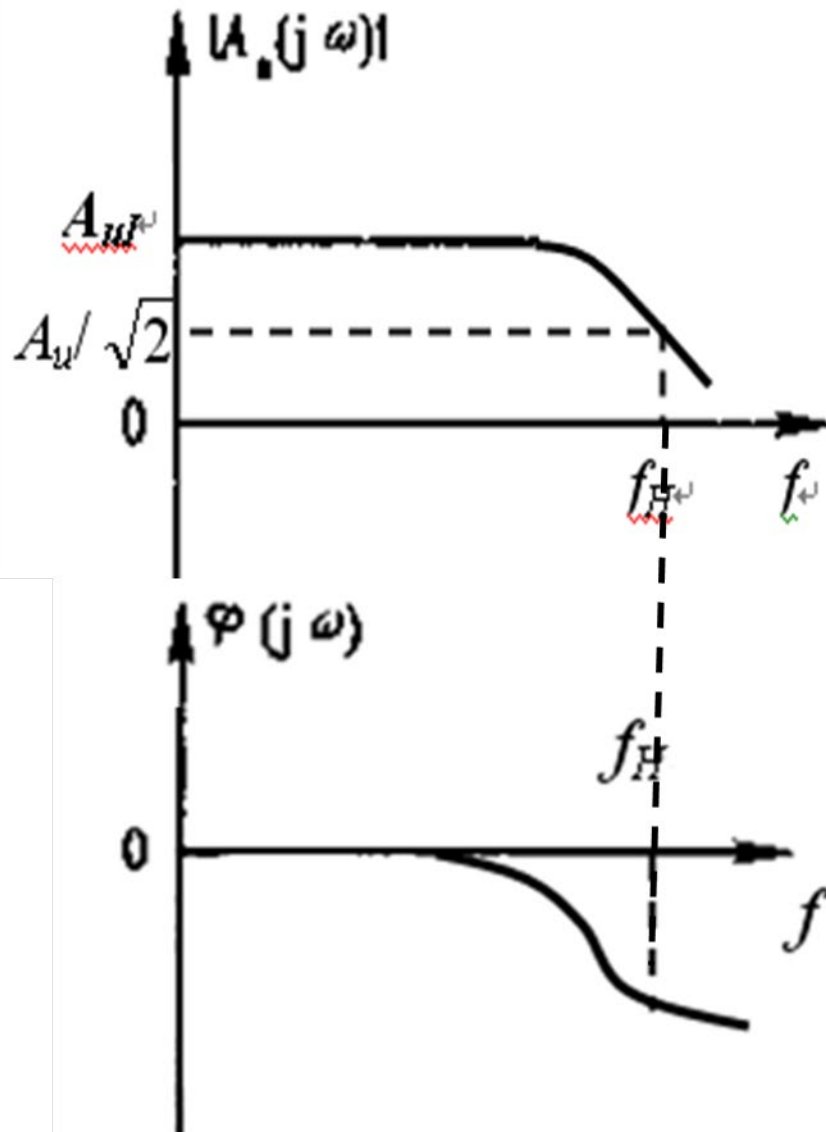
$$|A_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}}$$

$$\varphi = \arctg(f_L/f)$$

$$|A_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}}$$

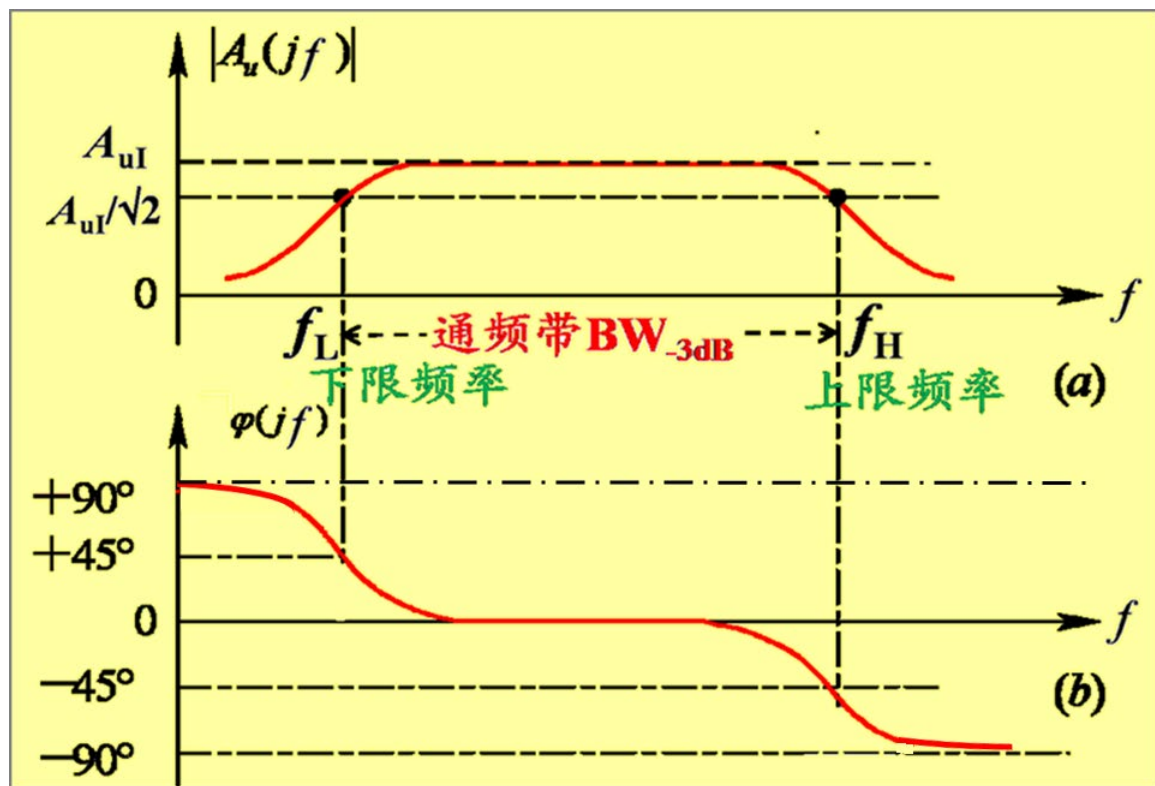
$$\varphi = -\arctg(f/f_H)$$

直接耦合放大电路的幅频特性



采用直接耦合的方式可降低放大电路的下限截止频率，扩大通频带。

阻容耦合放大电路的幅频响应：

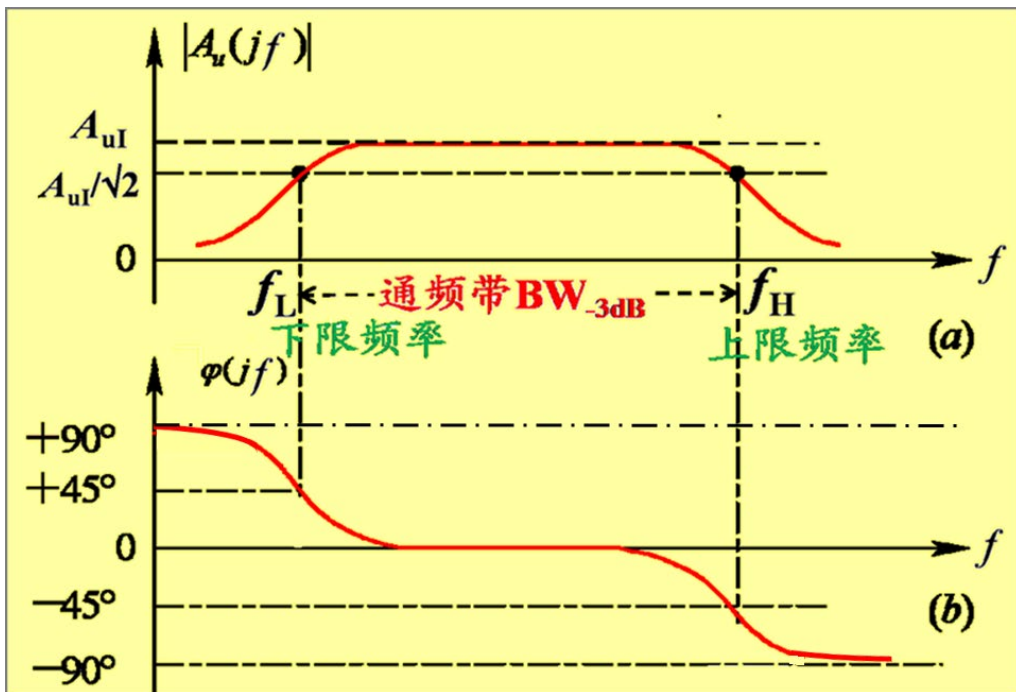


$$\left[\begin{array}{l} |A_{uI}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}} \\ \varphi = \arctg(f_L/f) \end{array} \right.$$

$$\left[\begin{array}{l} |A_{uI}| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}} \\ \varphi = -\arctg(f/f_H) \end{array} \right.$$

放大倍数下降为中频区的 $1/\sqrt{2}$ 时所对应的频率为下限频率 f_L 和上限频率 f_H 。对应的相位 $\varphi = \pm 45^\circ$

$$|A_u(jf_L)| = |A_u(jf_H)| = \frac{1}{\sqrt{2}} |A_{uI}| = 0.707 |A_{uI}|$$



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。

$$|A_u(jf_L)| = |A_u(jf_H)| = \frac{1}{\sqrt{2}} |A_{uI}| = 0.707 |A_{uI}|$$

$$20 \lg |A_u(jf_L)| = 20 \lg |A_u(jf_H)| = 20 \lg |A_{uI}| - 3 \text{dB}$$

通频带BW(-3dB带宽): $BW = f_H - f_L$ —表征放大器的线性失真许可范围内的信号频带宽度。

增益频带积: $G \cdot BW = |A_{uI} \cdot BW|$

思考

- 放大电路的通频带是越大越好吗？

对于通频带的选择，并不是越宽越好，对给定信号而言，通频带过宽不仅没有必要，而且还会窜入更多的干扰和噪声，需根据信号的频谱而定。



放大电路的输入信号频率升高到上限截止频率时，放大倍数幅值下降到中频放大倍数的0.707倍，或说下降了3 dB；放大倍数的相位与中频时相比，附加相移约为-45度。

2.波特图

波特图是一种采用对数坐标且进行折线化近似的频率特性曲线。

采用对数坐标的二个优点：

拓宽视野：

把放大倍数的乘除运算转化为加减运算。

幅频特性波特图：

横轴采用对数刻度 $\lg f$ ，

纵轴采用 $20\lg|\dot{A}_u|$ 表示，单位是分贝 (dB)。

相频特性波特图：

横轴采用对数刻度 $\lg f$ ，

纵轴仍用 φ 表示。

以高通电路为例，说明波特图的画法。

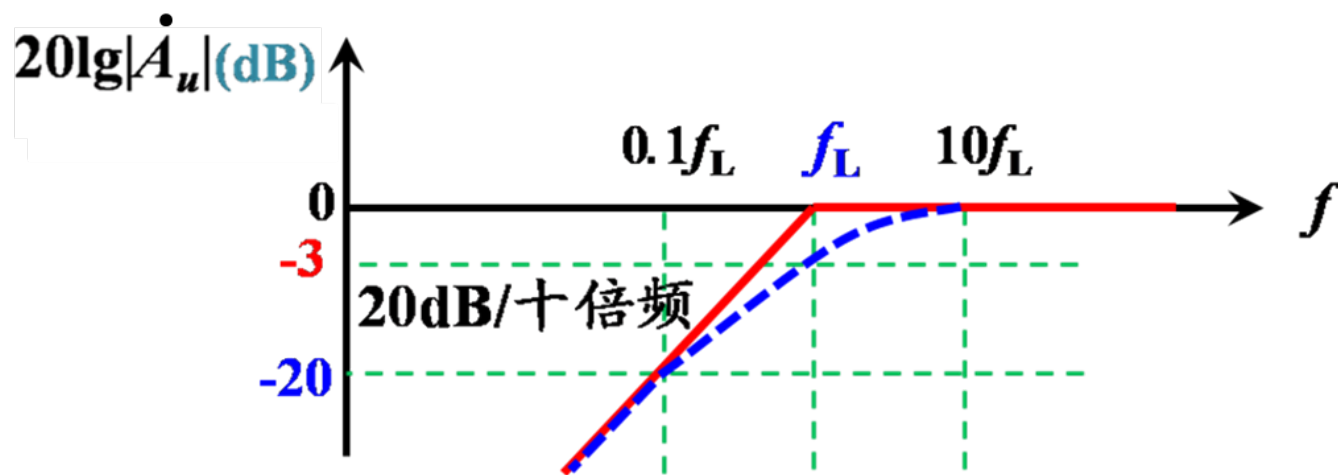
低频区高通电路的幅频响应函数:

$$|A_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}}$$

- ① 当 $f = f_L$ 时, $|A_u| = 1/\sqrt{2}$, $20\lg|A_u| = -3(\text{dB})$
- ② 当 $f \gg f_L$ 时, $|A_u| \approx 1$, $20\lg|A_u| = 0(\text{dB})$
- ③ 当 $f \ll f_L$ 时, $|A_u| \approx f/f_L$, $20\lg|A_u| = 20\lg(f/f_L)(\text{dB})$

例: 当 $f = 0.1f_L$ 时, $20\lg|A_u| = -20(\text{dB})$

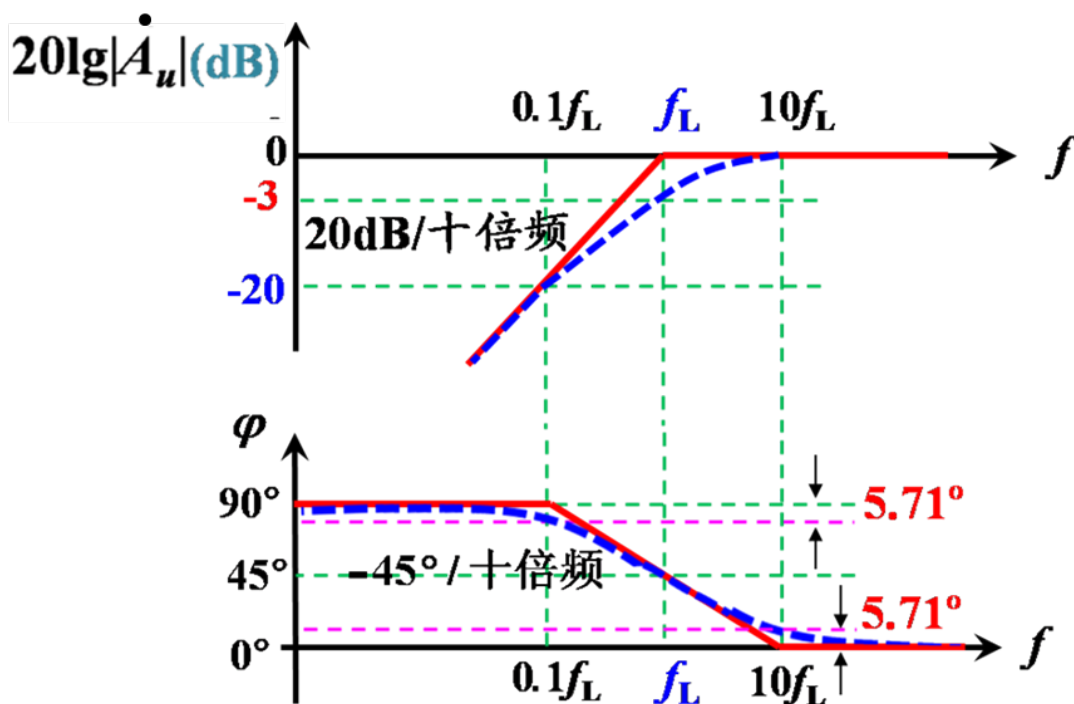
即此区间可等效成斜率为 **20dB/十倍频** 的直线



低频区的幅频波特图由两段直线组成(以 f_L 为拐点)。最大误差为 3dB, 发生在 $f = f_L$ 处。

低频区高通电路
的相频响应函数: $\varphi = \arctg\left(\frac{f_L}{f}\right)$

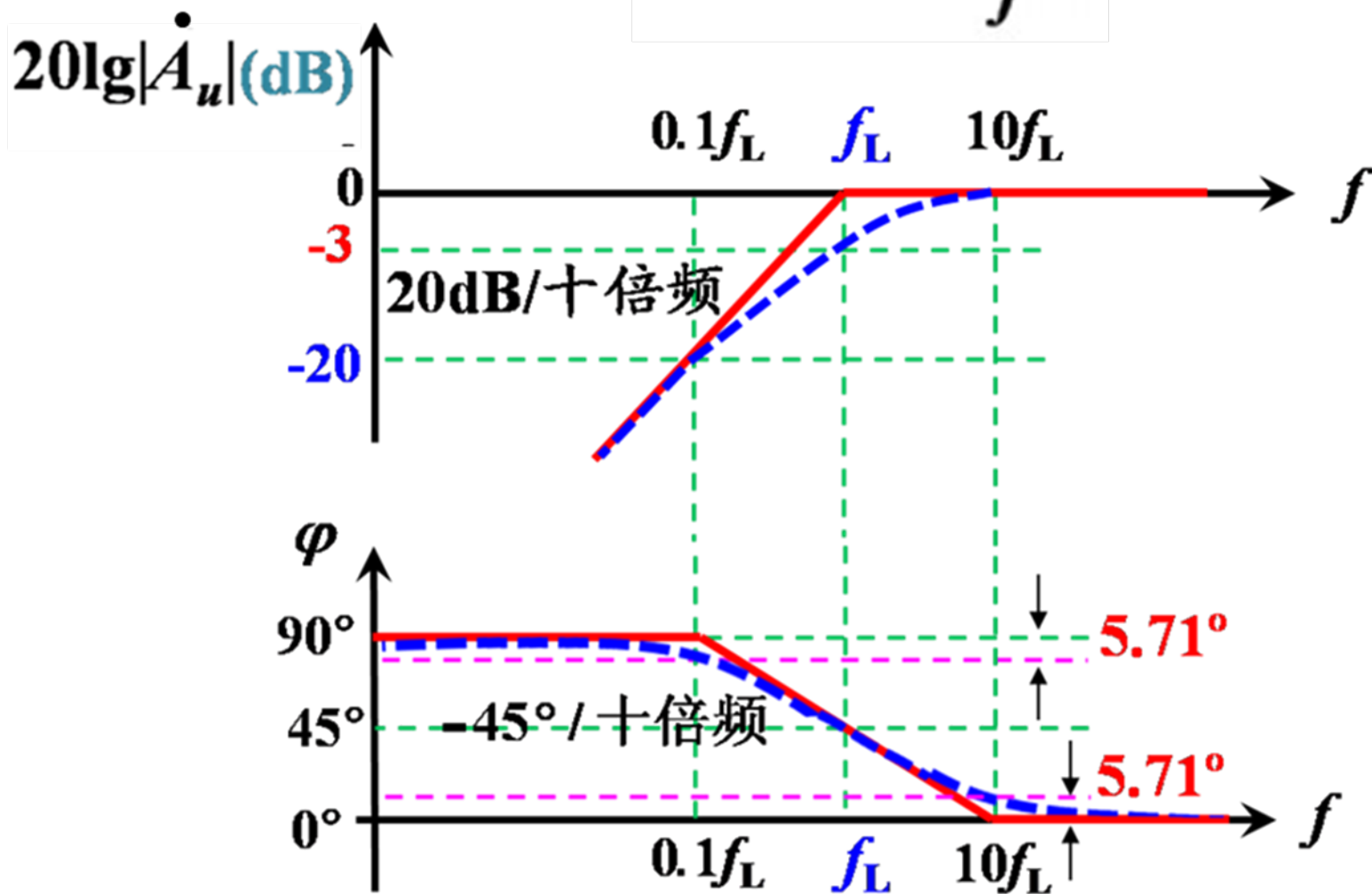
- ① 当 $f=0.1f_L$ 时, $\varphi \approx 84.29^\circ$, 近似取 90° ;
- ② 当 $f=10f_L$ 时, $\varphi \approx 5.71^\circ$, 近似取 0° 。
- ③ 当 $f=f_L$ 时, $\varphi=45^\circ$, 所以 $0.1f_L < f < 10f_L$ 这一区间可等效成斜率为 $-45^\circ/\text{十倍频}$ 的直线。



低频区的相频波特图由三段直线组成(以 $0.1f_L, 10f_L$ 为拐点)。最大误差为 5.71° , 发生在拐点处。

★ 低频区 \dot{A}_u 的波特图

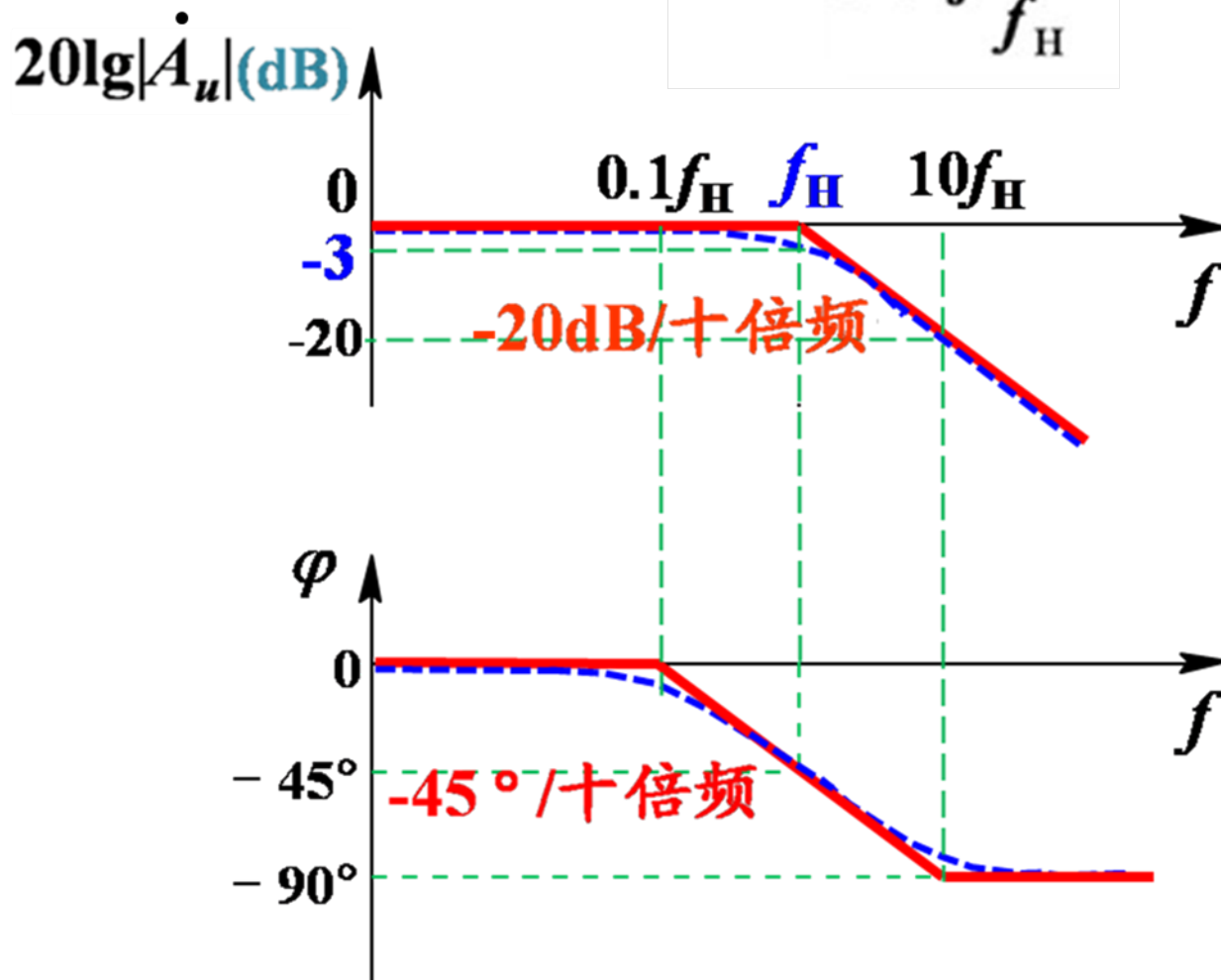
$$\dot{A}_u = \frac{1}{1 - j \frac{f_L}{f}}$$

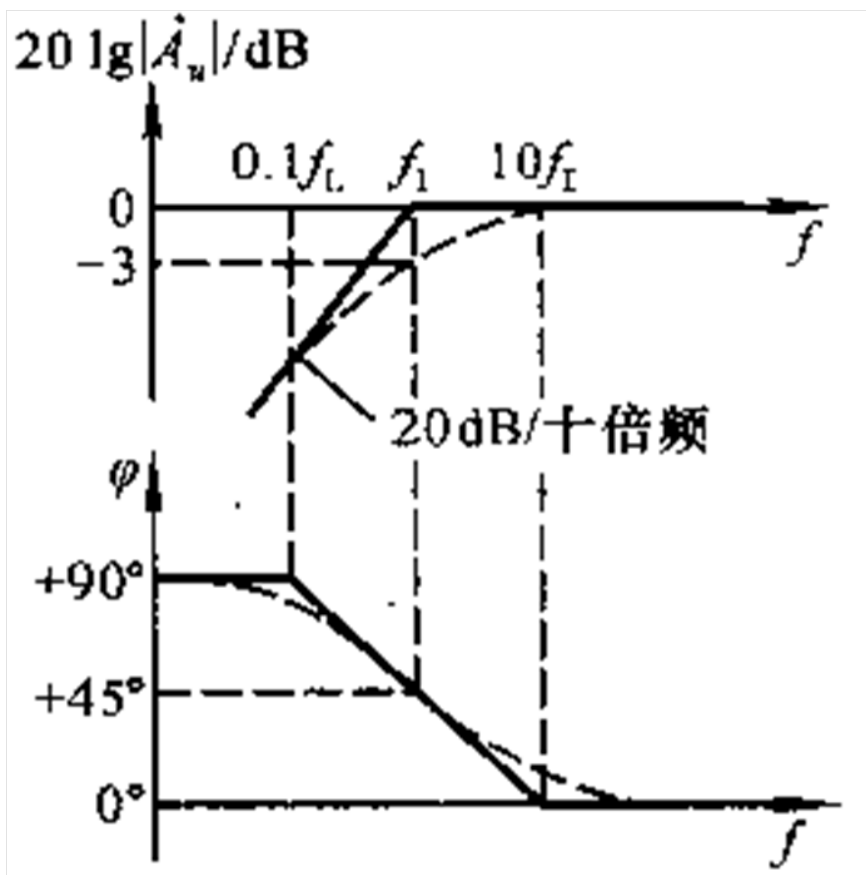




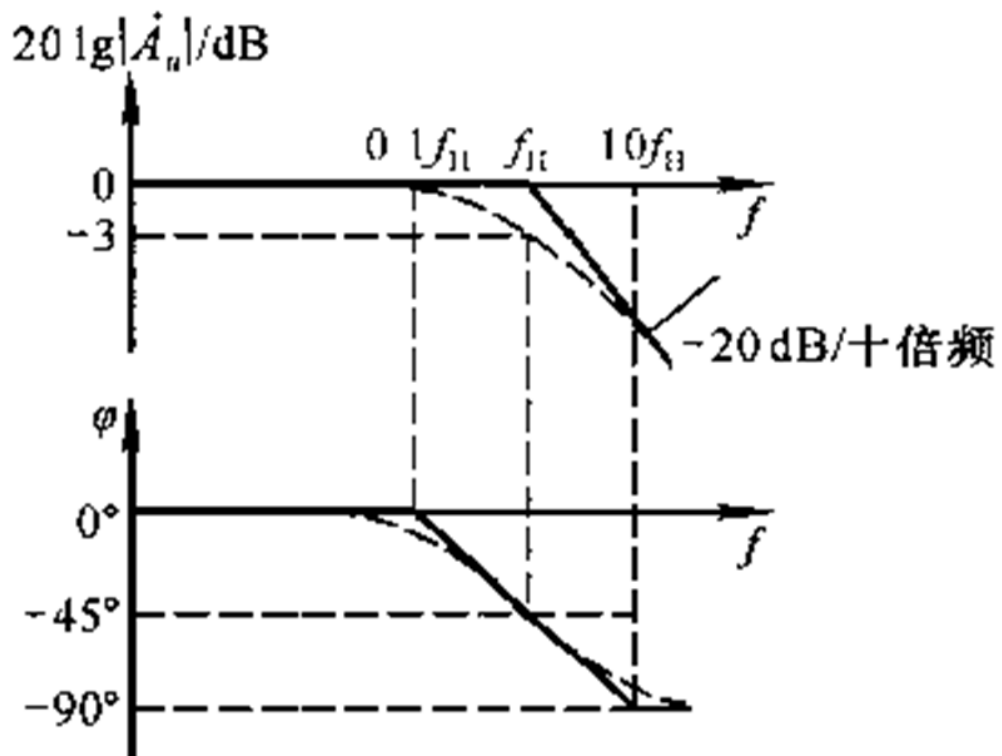
高频区的波特图

$$\dot{A}_u = \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_H}}$$





图a) 高通电路的波特图
(放大器的低频特性)



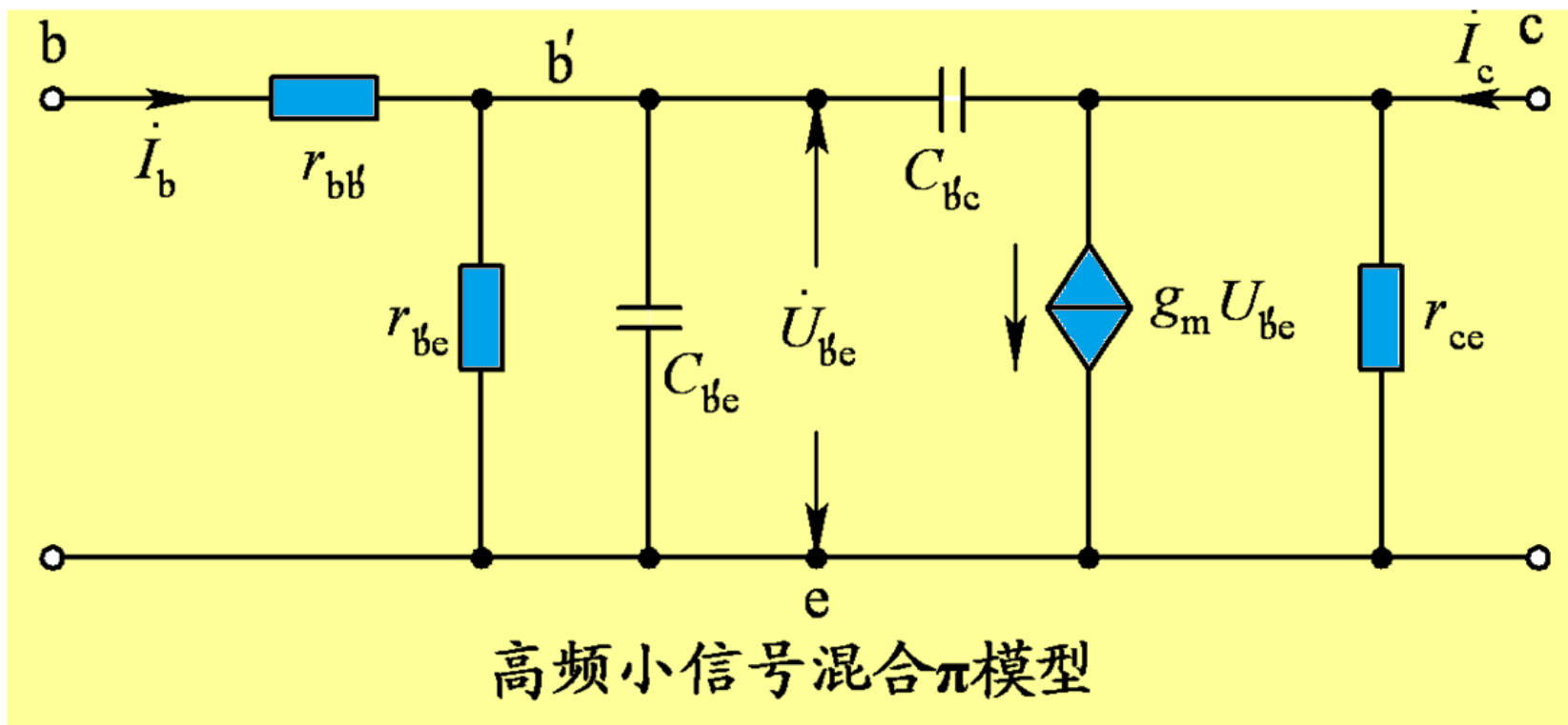
图b) 低通电路的波特图
(放大器的高频特性)

结论:

- (1) 电路的截止频率决定于电容所在回路的时间常数。
- (2) 当信号频率等于下限频率 f_L 或上限频率 f_H 时, 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。

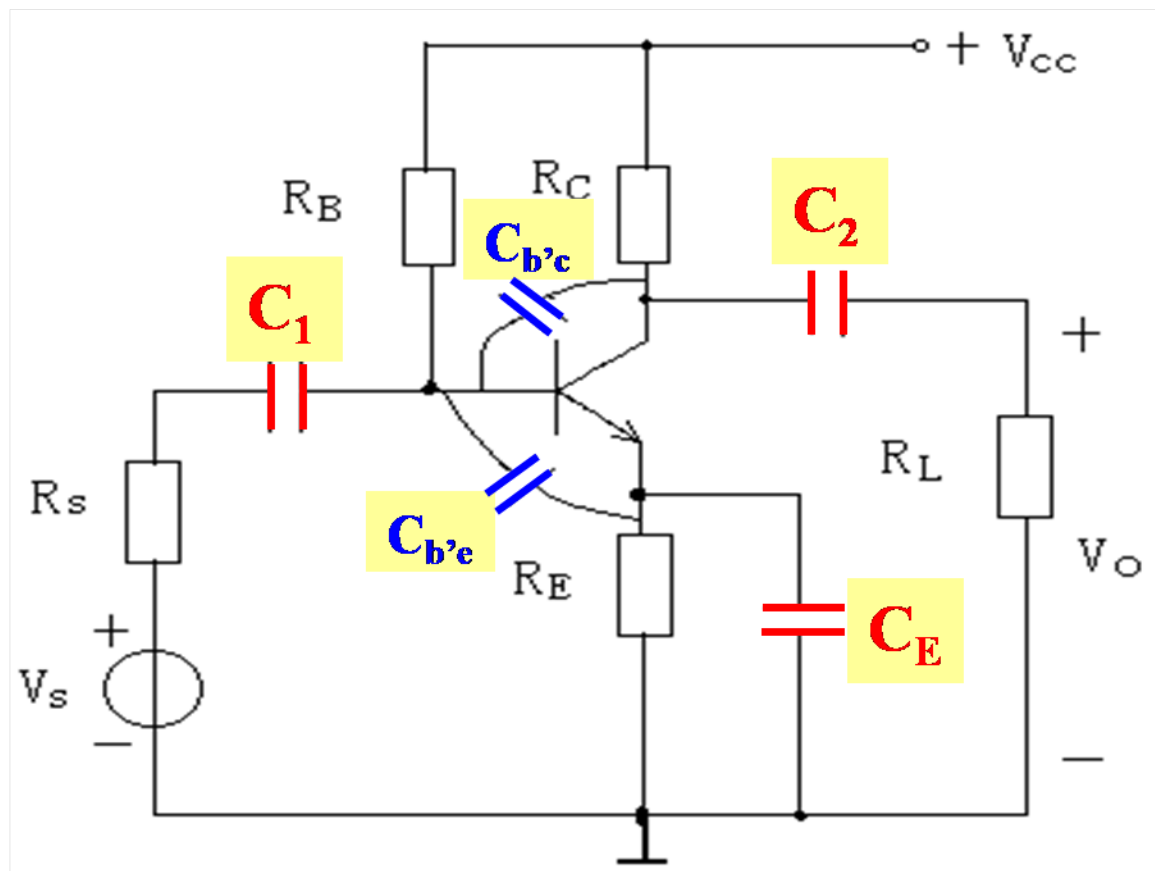
§4.2 晶体管的高频小信号模型和高频参数

以前讲的晶体/场效应管等效模型只适用于低频小信号的分析，现在介绍高频小信号模型。



高频区，极间电容 $C_{b'e}$ ， $C_{b'c}$ 的分流作用不能忽略。

含各种电容的单级共射放大器：



C_1 、 C_2 、 C_E μF 量级，称为**大电容**。

$C_{b'e}$ 、 $C_{b'c}$ pF 量级，称为**小电容**。

1、中频段

$$\frac{1}{\omega C_{\text{大}}} \rightarrow 0$$

大电容视为短路。

$$\frac{1}{\omega C_{\text{小}}} \rightarrow \infty$$

小电容视为开路。

放大器的交流通路是阻性网络，

所以： 增益A=常数。

2、低频段

$$\omega \downarrow \Rightarrow \frac{1}{\omega C_{\text{大}}} \uparrow$$

大电容不能视为短路。

$$\omega \downarrow \Rightarrow \frac{1}{\omega C_{\text{小}}} \uparrow$$

小电容更能视为开路。

可见：

在低频段： C_1 、 C_2 、 C_E 不可忽略，不可视为短路；
极间电容可忽略。

3、高频段

$$\omega \uparrow \Rightarrow \frac{1}{\omega C_{\text{大}}} \rightarrow 0$$

大电容可视为短路

$$\omega \uparrow \Rightarrow \frac{1}{\omega C_{\text{小}}} \downarrow$$

小电容不能视为开路

可见：

在高频段： C_1 、 C_2 、 C_E 可视为短路；

极间电容不可忽略，不能视为开路。

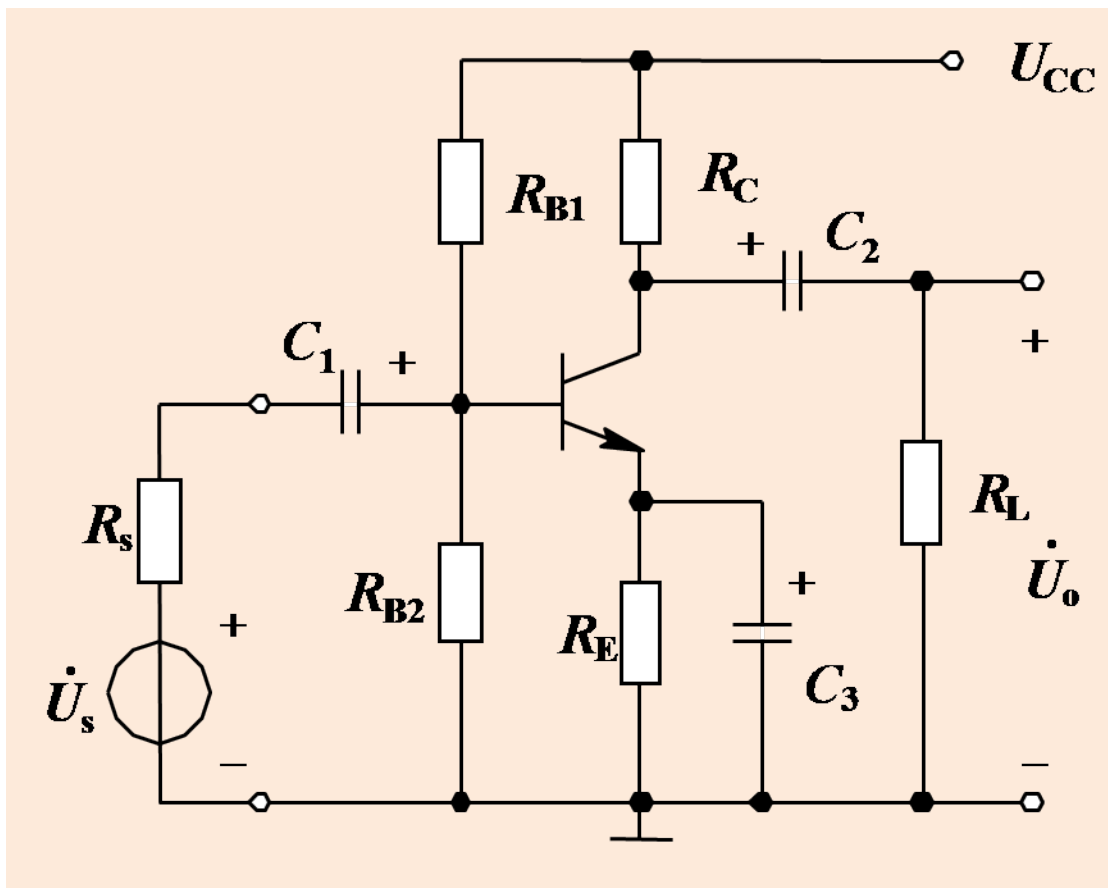
单管放大电路的频率响应

中频段: 耦合电容可认为交流短路, 极间电容可视为交流断路。即各种电抗影响忽略, A_u 与 f 无关;

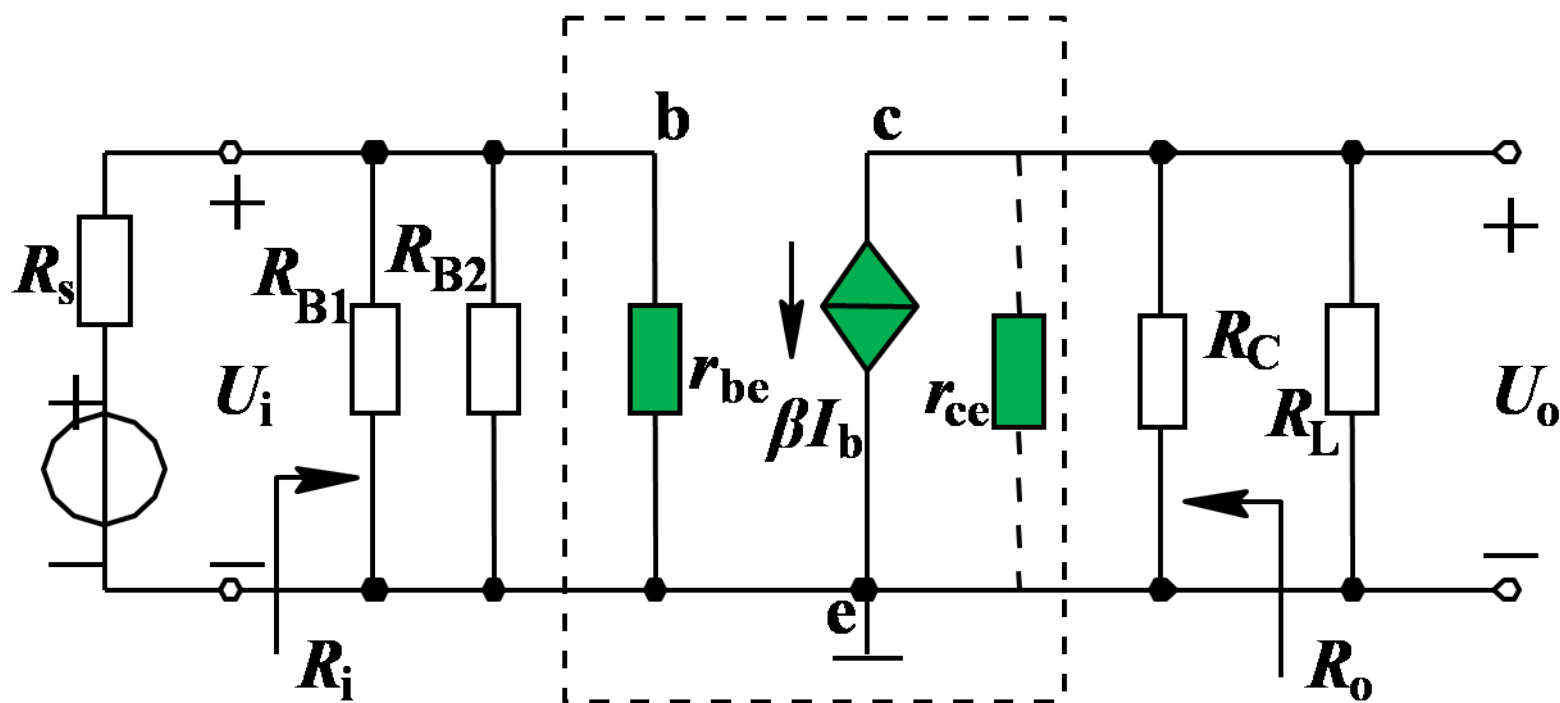
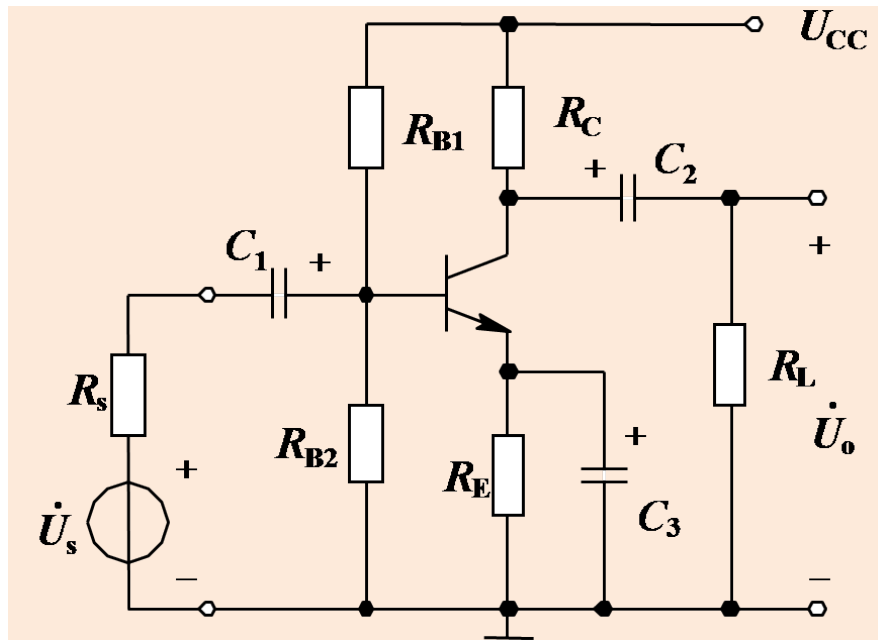
低频段: 极间电容可视为交流断路, 但耦合电容构成高通电路。即耦合电容的影响不能忽略, A_u 降低;

高频段: 耦合电容可认为交流短路, 但极间电容构成低通电路。即极间电容的影响不能忽略, A_u 降低。

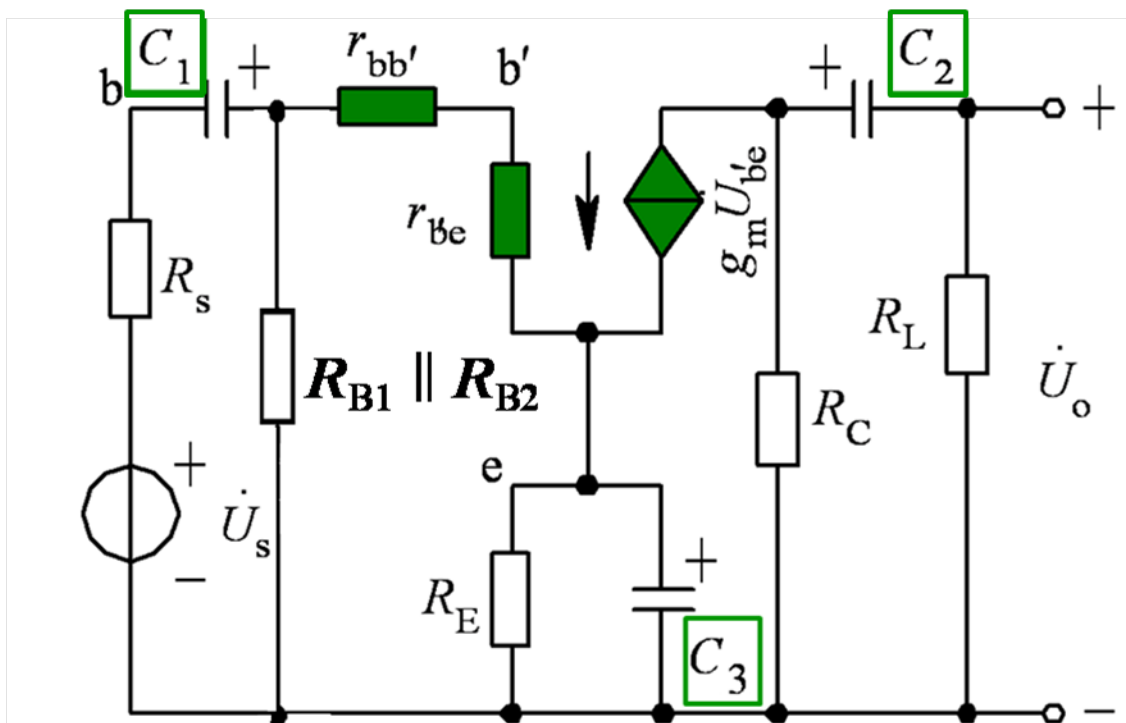
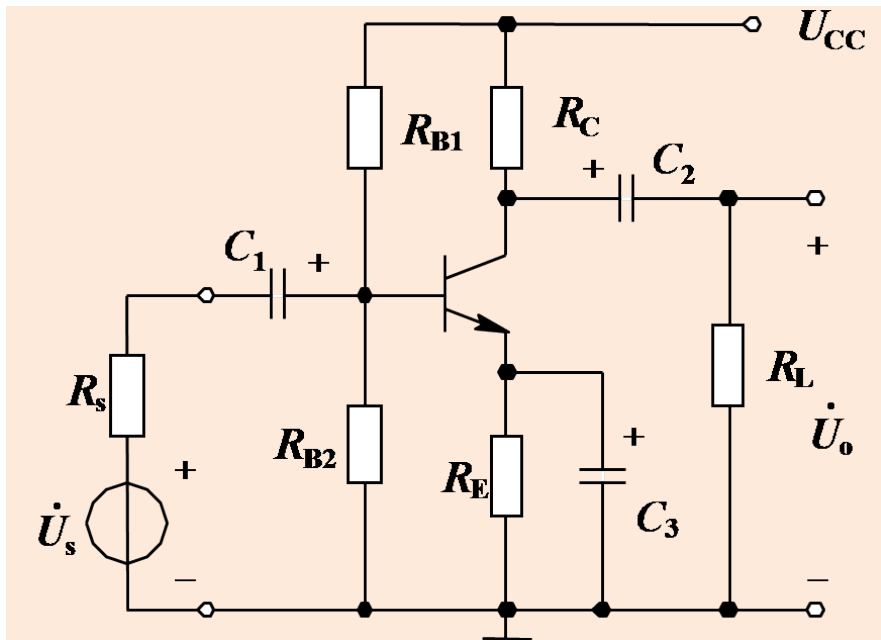
画出该电路低频区、中频区和高频区的小信号等效电路。



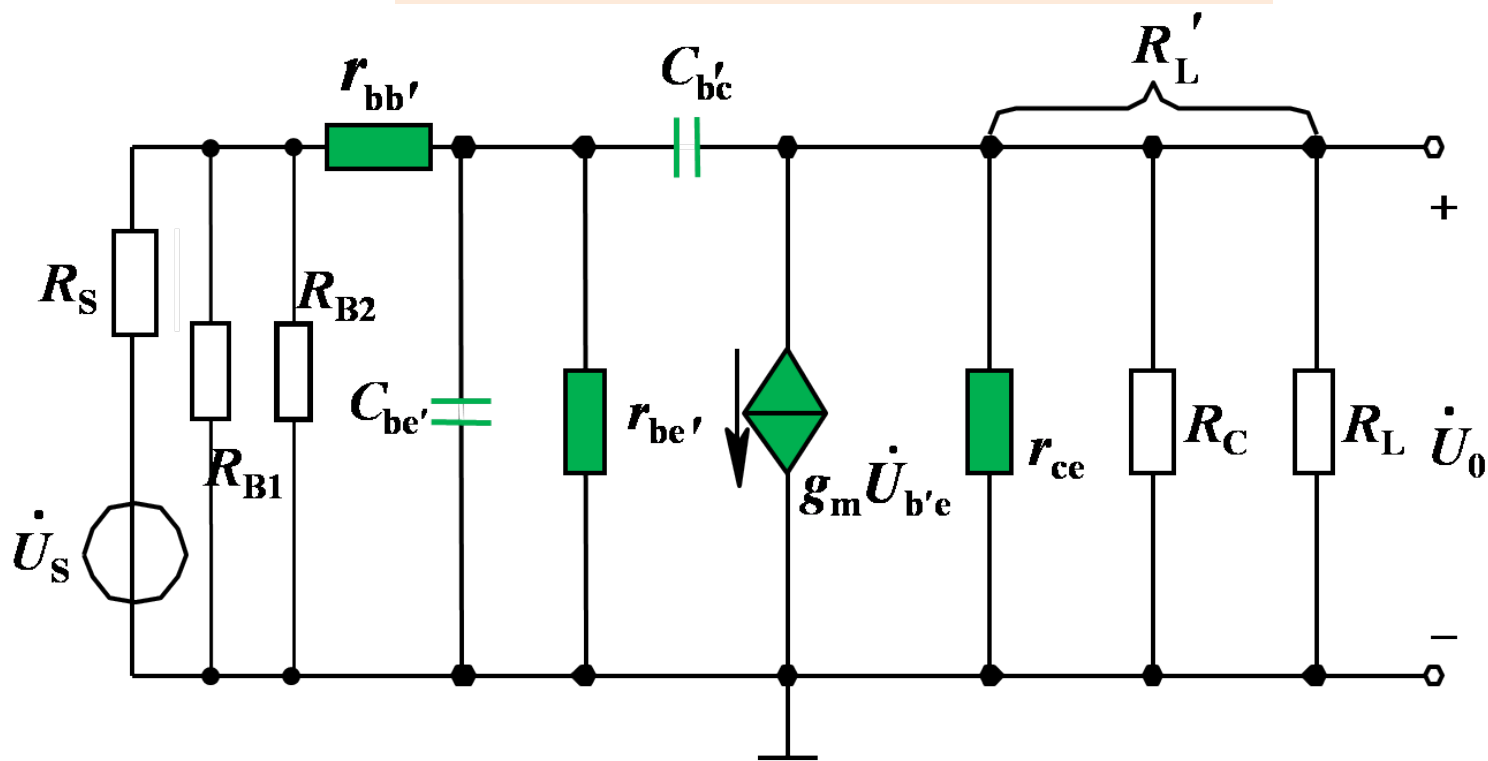
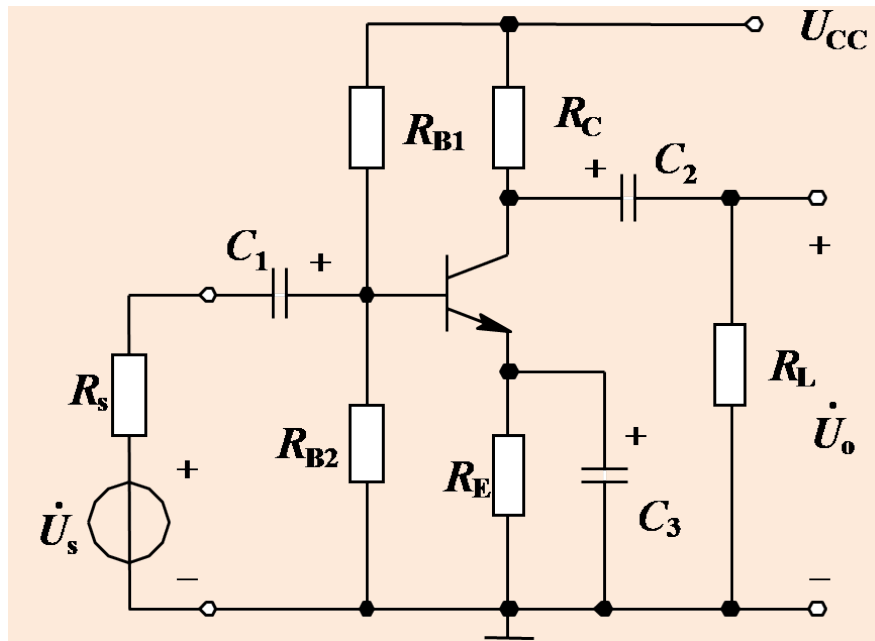
中频区小信号等效电路



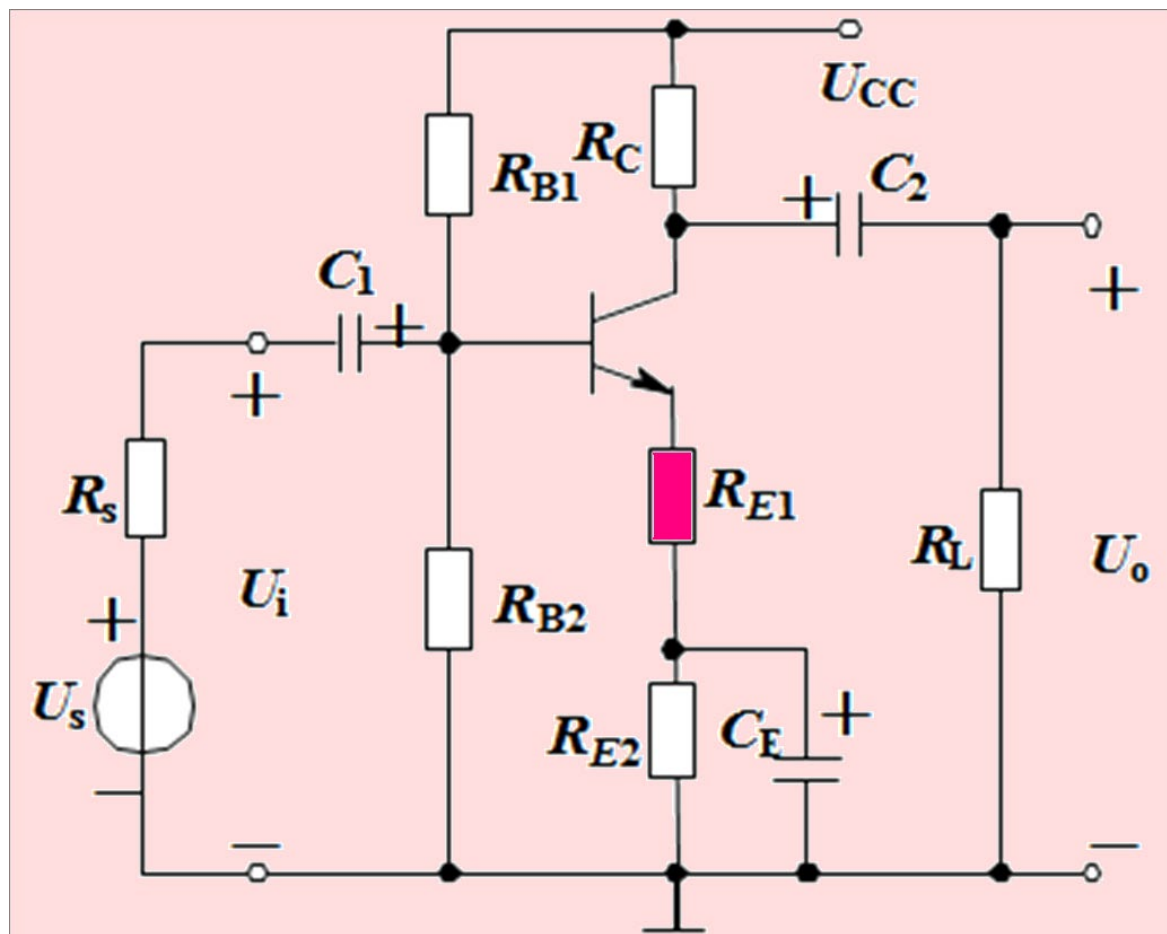
低频区小信号等效电路



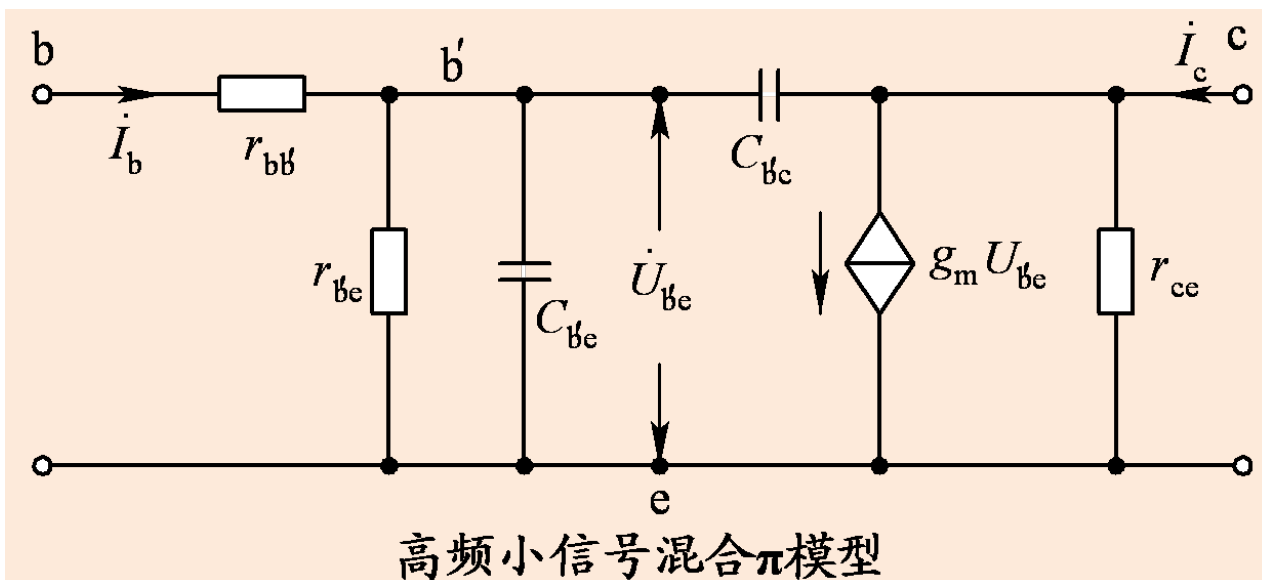
高频区小信号等效电路



画出该电路低频区、中频区和高频区的小信号等效电路。



高频参数：共射电流放大系数 β 及其上限频率 f_β



$$\beta(j\omega) = \frac{\dot{I}_c}{\dot{I}_b} \Big|_{c, e \text{ 短路}} = \frac{g_m \dot{U}_{b'e}}{\dot{I}_b}$$

g_m 不随信号频率的变化而变, β_0 为直流电流放大倍数。

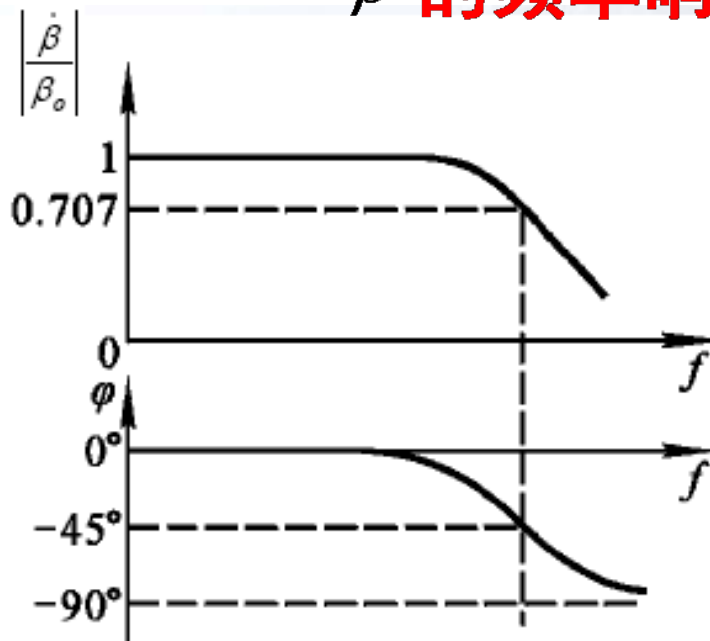
其中, $g_m \approx \frac{\beta_0}{r_{b'e}}$, $\dot{U}_{b'e} = \dot{I}_b (r_{b'e} \parallel \frac{1}{j\omega C_{b'e}}) = \dot{I}_b \frac{r_{b'e}}{1 + j\omega r_{b'e} C_{b'e}}$

令 $f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e} C_{b'e}}$ 为 $\dot{\beta}$ 的上限频率，则

$$\dot{\beta}(j\omega) = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_\beta}} = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{f}{f_\beta}}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} |\dot{\beta}| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + (\frac{f}{f_\beta})^2}} \\ \varphi = -\arctg(f/f_\beta) \end{array} \right.$$

$\dot{\beta}$ 的频率响应与低通电路相似。

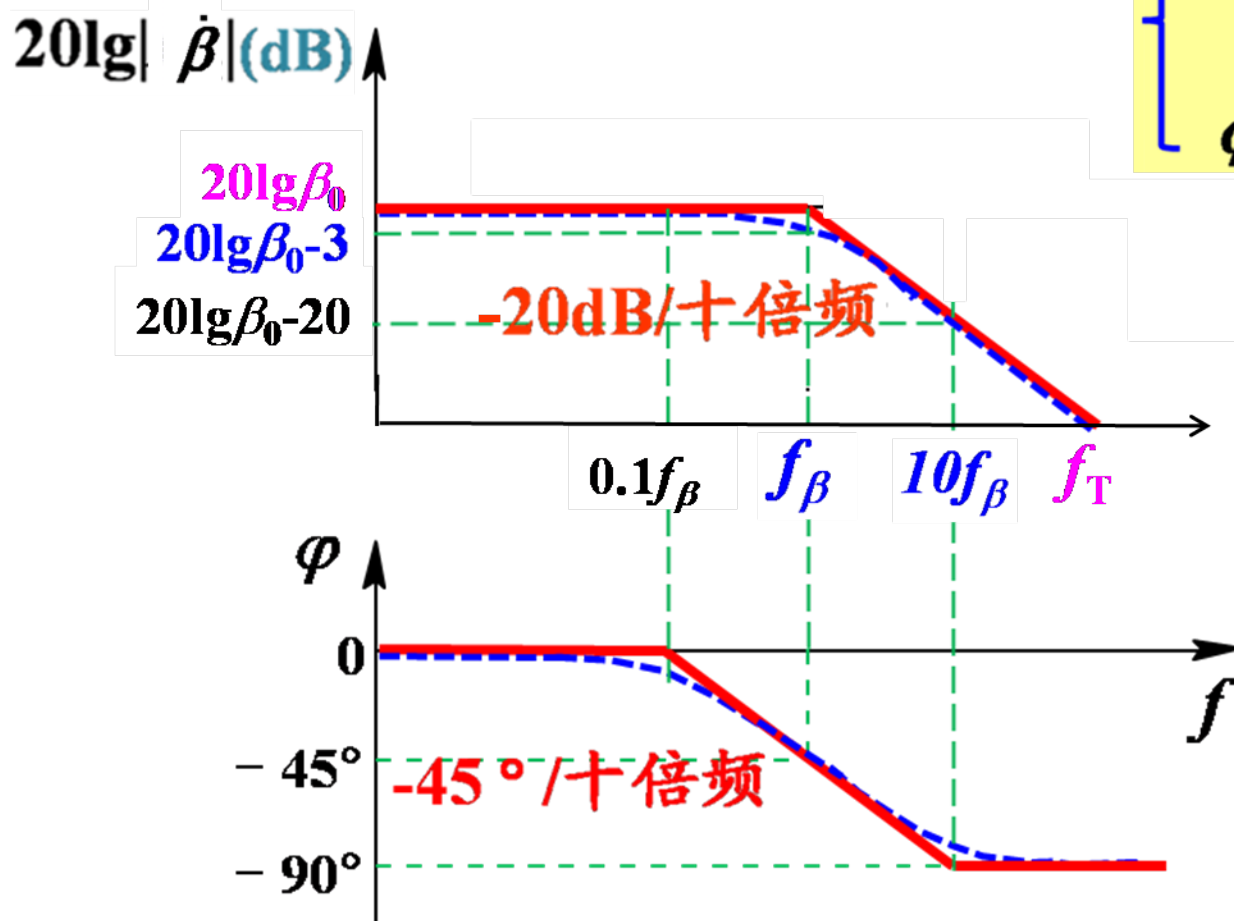


$$f \ll f_\beta \text{ 时, } |\dot{\beta}| \approx \beta_0;$$

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

$$f \rightarrow \infty \text{ 时, } |\dot{\beta}| \rightarrow 0, \quad \varphi \rightarrow -90^\circ$$

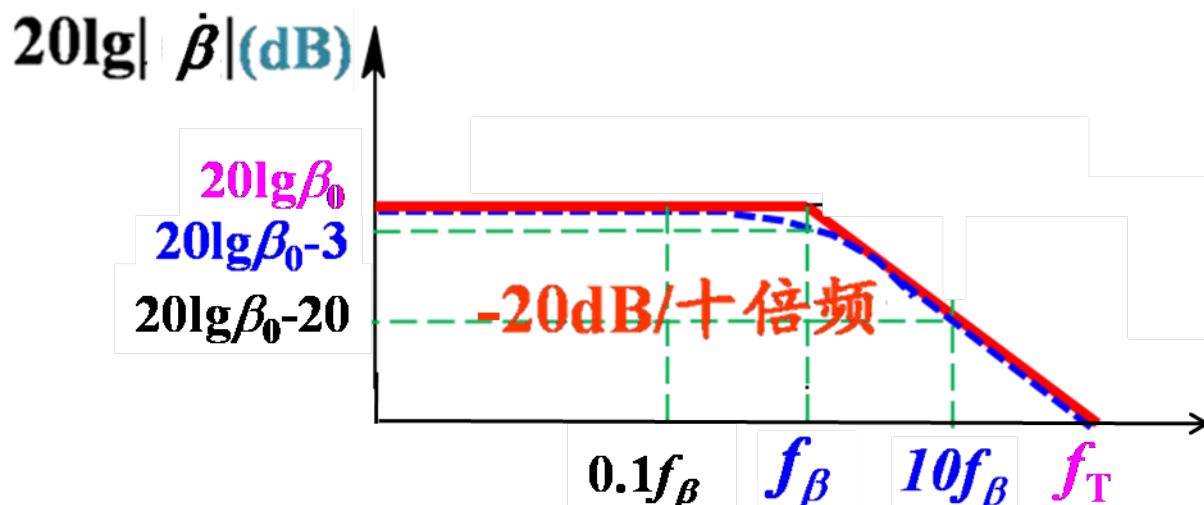
$\dot{\beta}(j\omega)$ 的波特图:



$$|\dot{\beta}| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}}$$

$$\varphi = -\arctg\left(\frac{f}{f_\beta}\right)$$

$$f_\beta = \frac{1}{2\pi r_{b'e} C_{b'e}}$$



特征频率 f_T

定义： $|\dot{\beta}(j\omega)|$ 下降到 1 所对应的频率。

$$|\dot{\beta}(jf_T)| = \frac{\beta_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_T}{f_\beta}\right)^2}} \approx \frac{\beta_o}{\frac{f_T}{f_\beta}} = 1$$

因此：

$$f_T \approx \beta_o f_\beta = \frac{1}{2\pi r_e C_{b'e}} \gg f_\beta$$

共基电流放大系数 $\dot{\alpha}(jf)$ 及 f_α

$$\dot{\alpha}(j\omega) = \frac{\dot{\beta}(jf)}{1 + \dot{\beta}(jf)} = \frac{\alpha_0}{1 + j\frac{f}{f_\alpha}}$$

$$\text{其中 } f_\alpha = (1 + \beta_0)f_\beta = \frac{1}{2\pi r_e C_{b'e}}, \quad \alpha_0 = \frac{\beta_0}{1 + \beta_0}$$

所以 $f_\alpha \approx f_T \gg f_\beta$

三个参数之间的关系：

$$f_{\beta} = \frac{1}{2\pi r_{b'e} C_{b'e}}$$

$$f_T \approx \beta_o f_{\beta} = \frac{1}{2\pi r_e C_{b'e}} \gg f_{\beta}$$

$$f_{\alpha} \approx f_T \gg f_{\beta}$$

§4.5 多级放大器的频率效应

多级放大器总的上限频率 f_H 小于其中任何一级的上限频率 f_{Hk} ，而总的下限频率 f_L 大于 其中任何一级的下限频率 f_{Lk} ；多级放大器总的通频带变窄了。

作业：

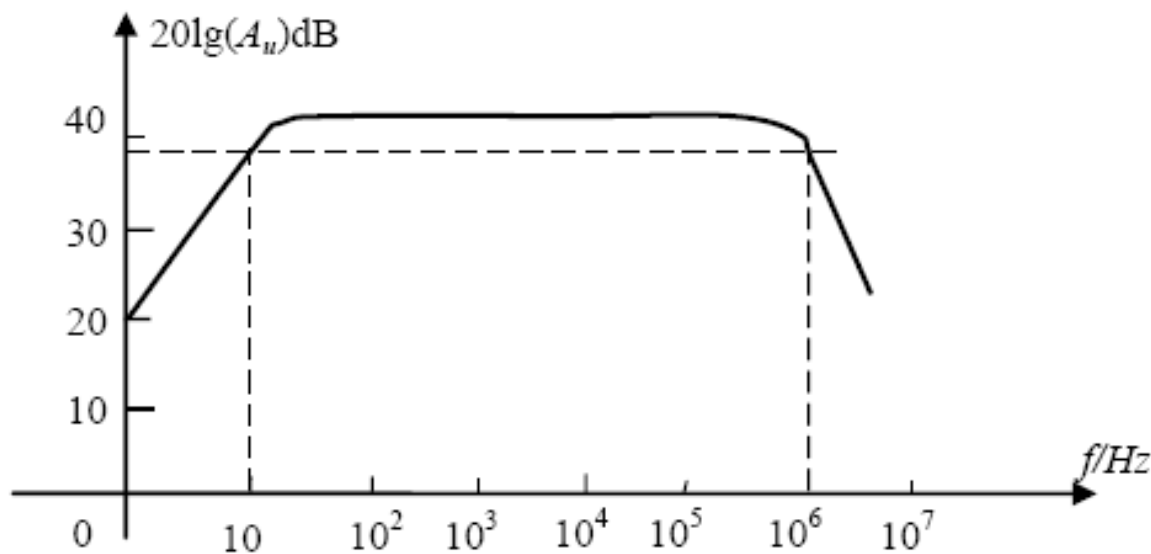
 4.1

 4.3

 4.4

 4.6(1)

4.1

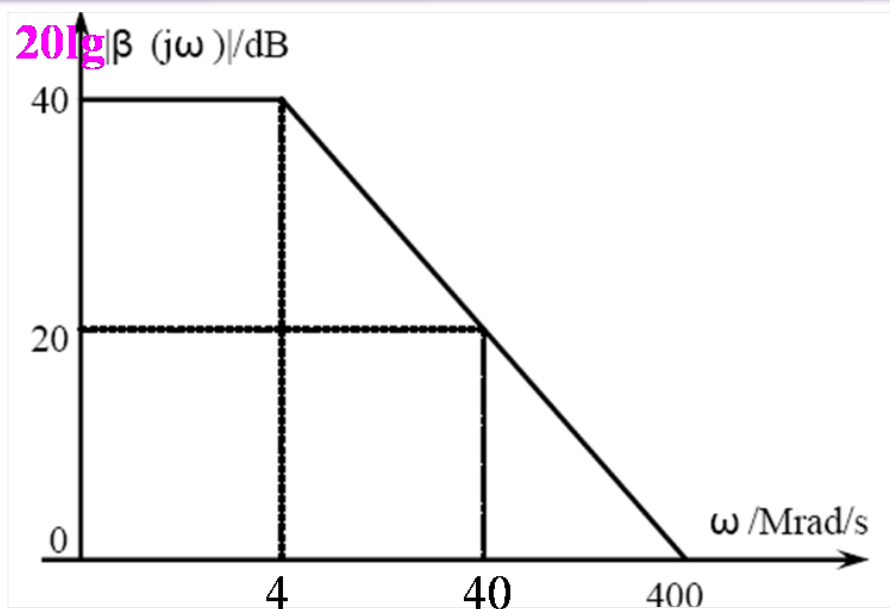


解: (1)由图知, 中频增益约为41dB, 上限频率 $f_H=10^6\text{Hz}$, 下限频率 $f_L=10\text{Hz}$, 通频带 $BW=10^6-10\approx 10^6\text{Hz}$ 。

(2)当 $u_i = 10 \sin(4\pi \cdot 10^6 t) (mV) + 20 \sin(2\pi \times 10^4 t) (mV)$ 时, 其中 $f=10^4\text{Hz}$ 的频率在中频段, 而 $f=2 \times 10^6\text{Hz}$ 的频率在高频段, 可见输出信号要产生失真, 即高频失真。

当 $u_i = 10 \sin(2\pi \cdot 5t) (mV) + 20 \sin(2\pi \times 10^4 t) (mV)$ 时, 产生低频失真。

4.3



解: β 的频率特性表达式为 $\dot{\beta}(j\omega) = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{\omega}{\omega_\beta}}$

当 $\omega=0$ 时, $20\lg |\dot{\beta}(j\omega)| = 20\lg |\beta_0|$

由图知, $20\lg |\beta_0| = 40$, $\therefore \beta_0 = 100$

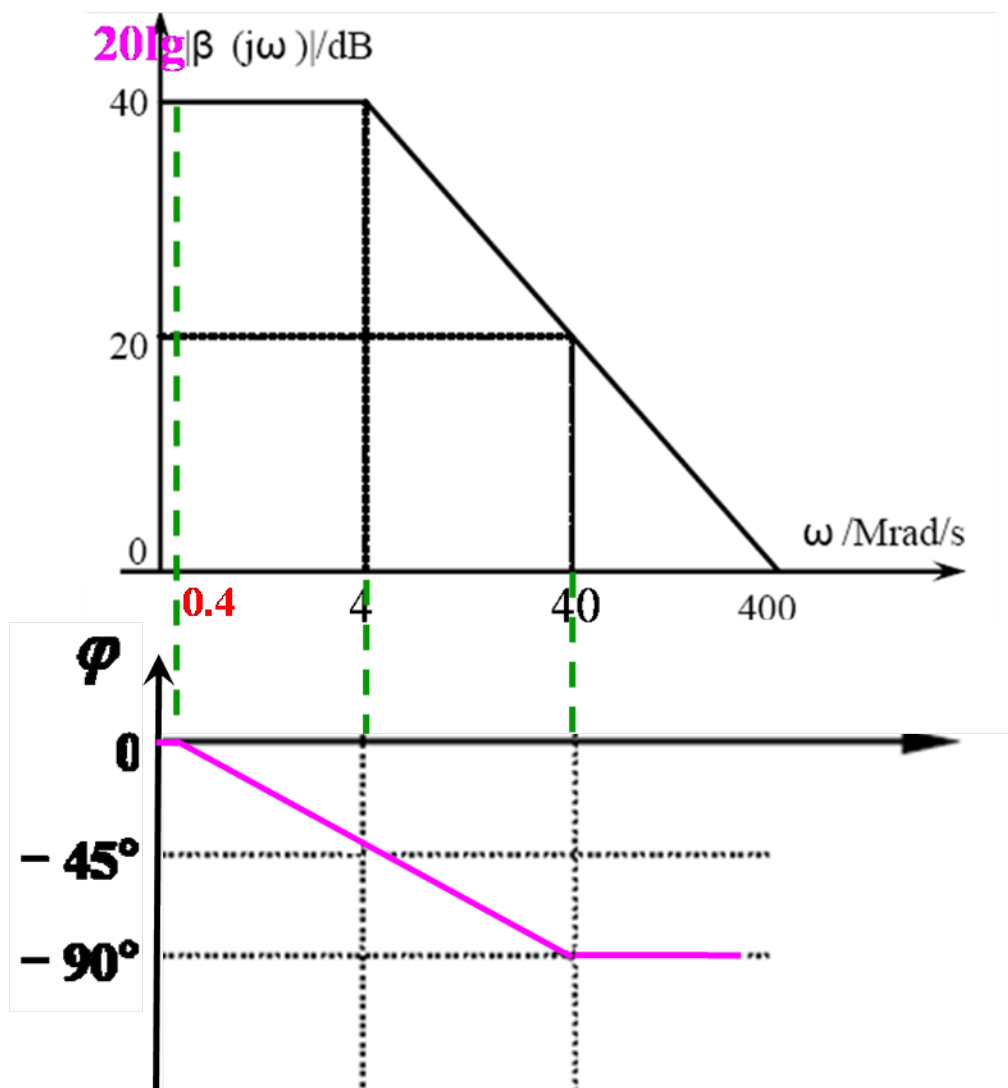
由波特图的画法知, $\omega_\beta = 4 \text{ Mrad/s}$

因为 $|\dot{\beta}(j\omega)|$ 下降到 1 所对应的角频率定义为特征角频率 ω_T

\therefore 由图知, $\omega_T = 400 \text{ Mrad/s}$ 或根据 $\omega_T \approx \beta_0 \omega_\beta = 400 \text{ Mrad/s}$

$$\left[\begin{array}{l} |\dot{\beta}| = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + (\frac{\omega}{\omega_\beta})^2}} \\ \varphi = -\arctg(\omega/\omega_\beta) \end{array} \right.$$

相频特性的近似波特图如图



4.4 已知中频增益为 $A_{UI}=40\text{dB}$ ，上限频率为 $f_H=2\text{MHz}$ ，下限频率 $f_L=100\text{Hz}$ ，输出不失真的动态范围为 $U_{opp}=10\text{V}$ 。

解： \because 中频增益 $20\lg |A_{UI}|=40\text{dB}$ ， $\therefore A_{UI}=100$ 倍

(1) $u_i(t)=0.1\sin(2\pi\times 10^4t)(\text{V})$ ，输入信号为**单一频率** $f=10^4\text{Hz}$ 的正弦波，所以**不存在频率失真**。但由于输入信号幅度 (0.1V) 较大，经100倍的放大后峰峰值为 $0.1\times 2\times 100=20\text{V}$ ，已大大超过输出不失真动态范围 ($U_{OPP}=10\text{V}$)，故输出信号将产生严重的非线性失真（波形出现限幅状态）。

4.4 已知中频增益为 $A_{UI}=40\text{dB}$ ，上限频率为 $f_H=2\text{MHz}$ ，下限频率 $f_L=100\text{Hz}$ ，输出不失真的动态范围为 $U_{opp}=10\text{V}$ 。

\therefore 中频增益 $20\lg |A_{UI}|=40\text{dB}$, $\therefore A_{UI}=100$ 倍

(2) $u_i(t)=10\sin(2\pi\times 3\times 10^6 t)(\text{mV})$ ，输入信号为**单一频率** $f=3\times 10^6\text{Hz}$ 的正弦波，虽然处于高频区，但也**不存在频率失真**。又因为信号幅度(10mV)较小，故经放大后，峰峰值为 $100\times 2\times 0.010=2\text{V}<U_{opp}=10\text{V}$ ，故也不出现非线性失真。

4.4 已知中频增益为 $A_{UI}=40\text{dB}$ ，上限频率为 $f_H=2\text{MHz}$ ，下限频率 $f_L=100\text{Hz}$ ，输出不失真的动态范围为 $U_{opp}=10\text{V}$ 。

\therefore 中频增益 $20\lg |A_{UI}|=40\text{dB}$, $\therefore A_{UI}=100$ 倍

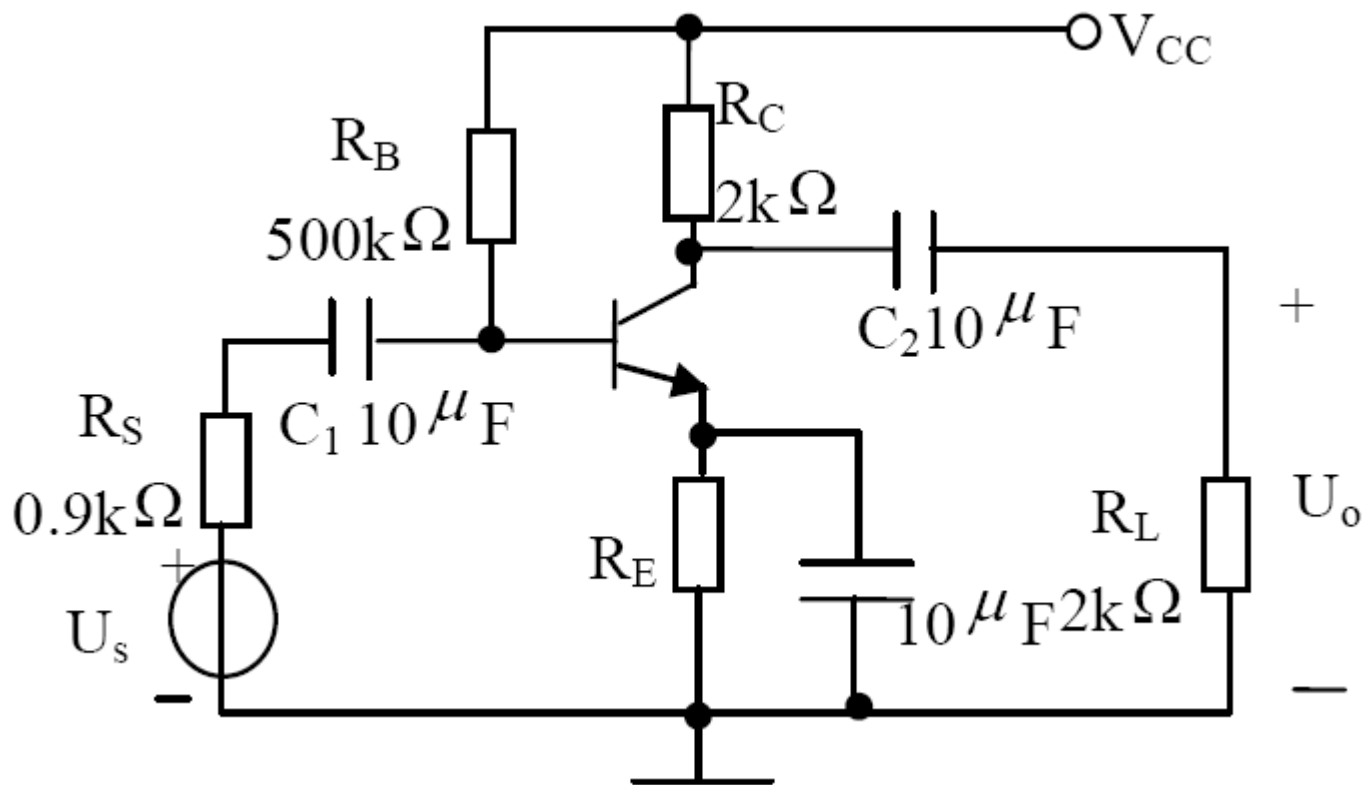
(3) $u_i(t)=10\sin(2\pi\times 400t)+10\sin(2\pi\times 10^6t)$ (mV)

输入信号的两个频率分别为400Hz及1MHz，均处于放大器的中频区，不会产生频率失真，又因为信号幅度较小(10mV)，故也不会出现非线性失真。

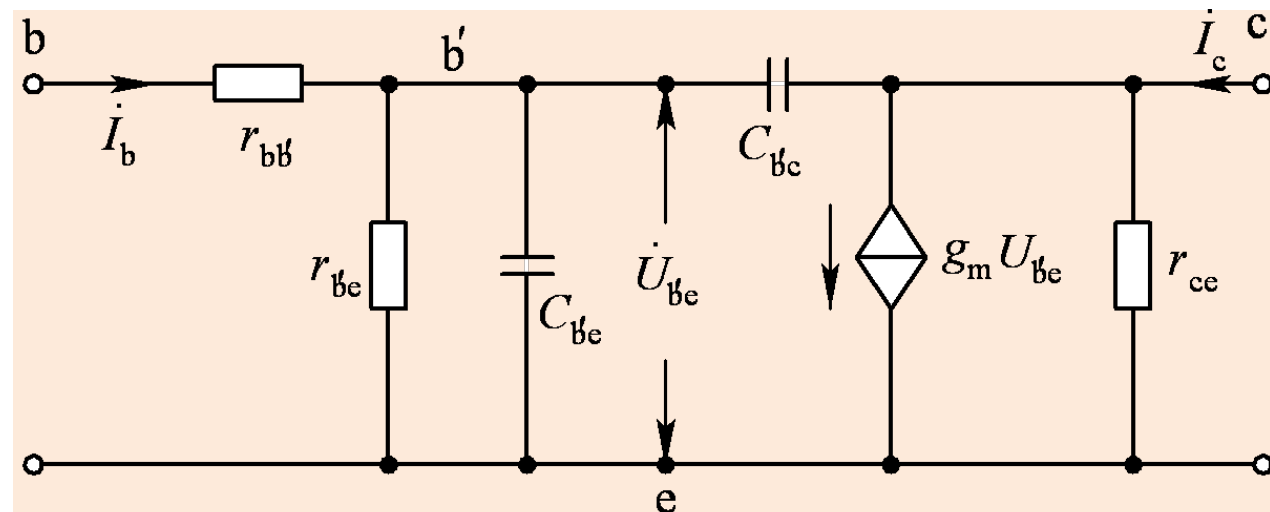
(4) $u_i(t)=10\sin(2\pi\times 10t)+10\sin(2\pi\times 5\times 10^4t)$ (mV)

输入信号的两个频率分别为10Hz及50KHz，一个处于低频区，而另一个处于中频区，故经放大后会出现低频频率失真，又因为信号幅度小，所以不会有非线性失真。(5) 同理可判断出，输入此信号会出现高频失真。

4.6(1)



高频段：耦合电容可认为交流短路，但极间电容构成低通电路。即极间电容的影响不能忽略 A_u 降低。

高频小信号混合 π 模型

其中

$$r_{b'e} = (1 + \beta)r_e = 1.01k\Omega$$

$$g_m = a/r_e \approx 1/r_e = 100mS$$

