

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

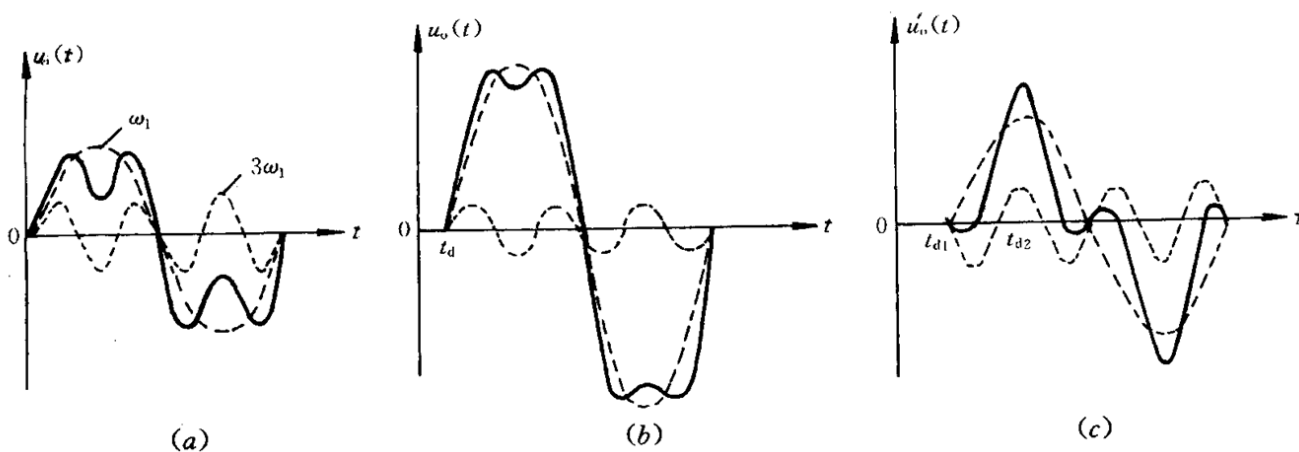


图 5-1 频率失真现象

(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

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

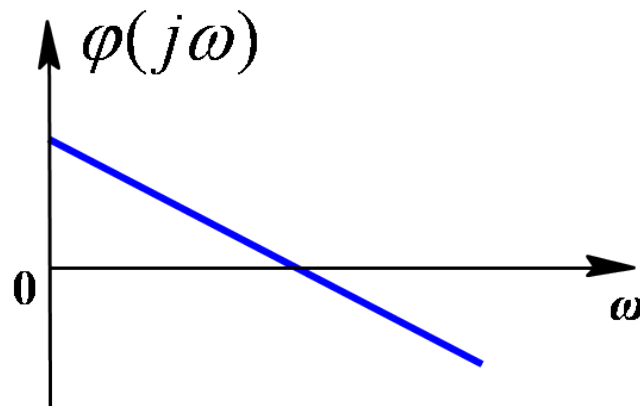
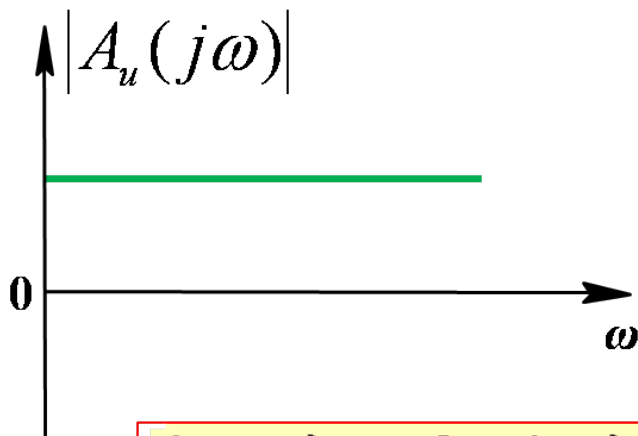
$|A_u(f)|$ —幅频响应/幅频特性, $\phi(f)$ —相频响应/相频特性

理想频率响应

$$\omega = 2\pi f$$

$$|A_u(j\omega)| = K (\text{常数})$$

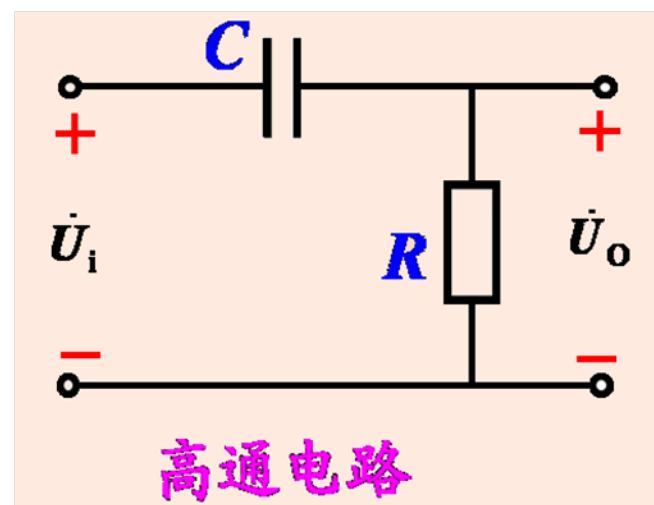
$$\varphi(j\omega) = \omega t_d (t_d \text{ 为常数})$$



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。



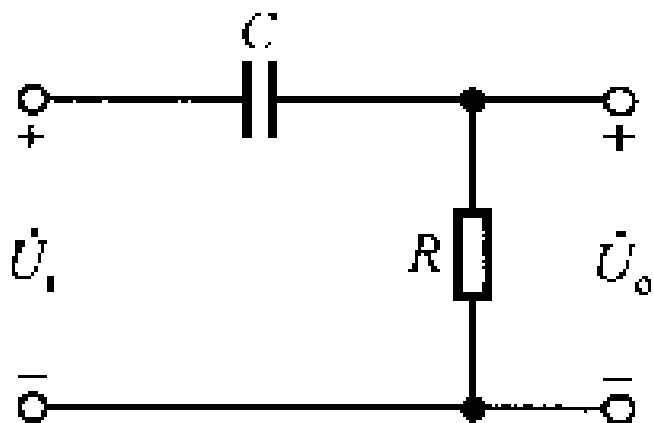
$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}}, \text{ 令 } f_L = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \tau_L},$$

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

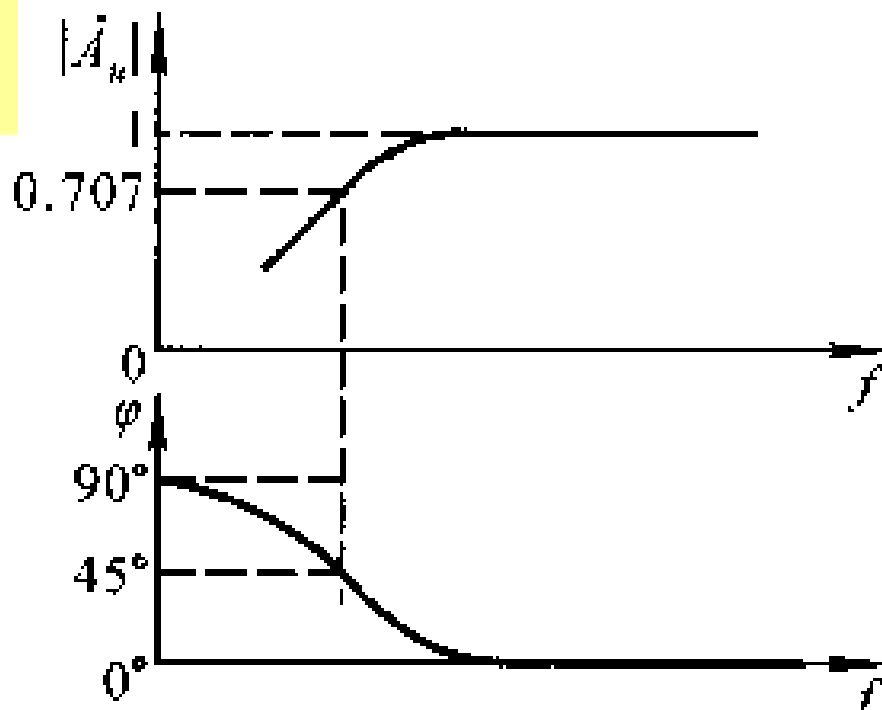
$$\left[\begin{array}{l} |\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}} \\ \varphi = \arctg(f_L/f) \end{array} \right.$$

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。

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



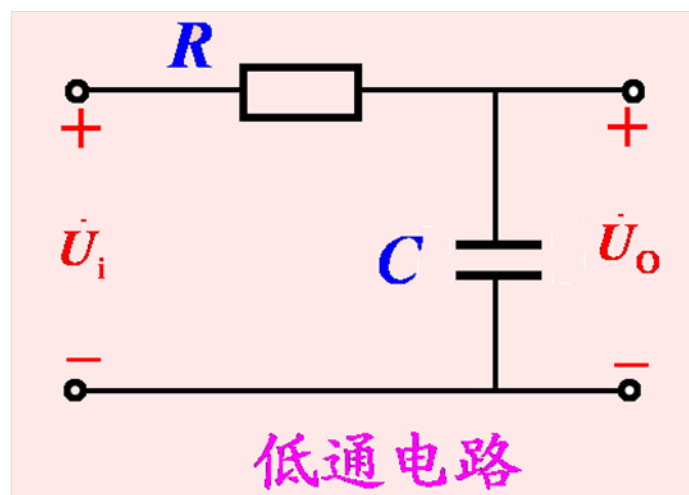
a) 高通电路



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）。

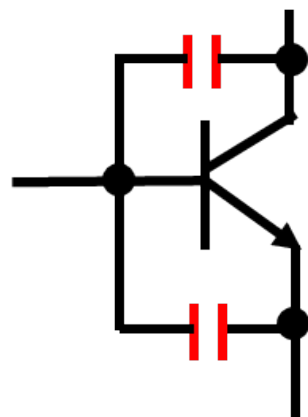
但随着频率 f 的增大→极间电容的容抗减小→因而其分流作用增强→由图知：实际被放大的电流减小→放大倍数下降。



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

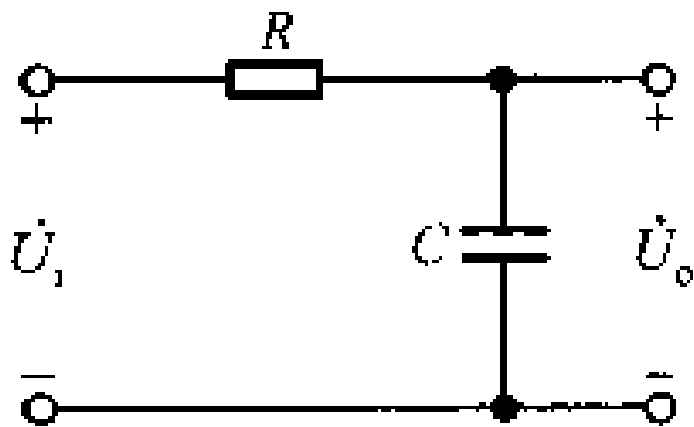
$$\text{则 } \dot{A}_u = \frac{1}{1 + j\frac{f}{f_H}}$$

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

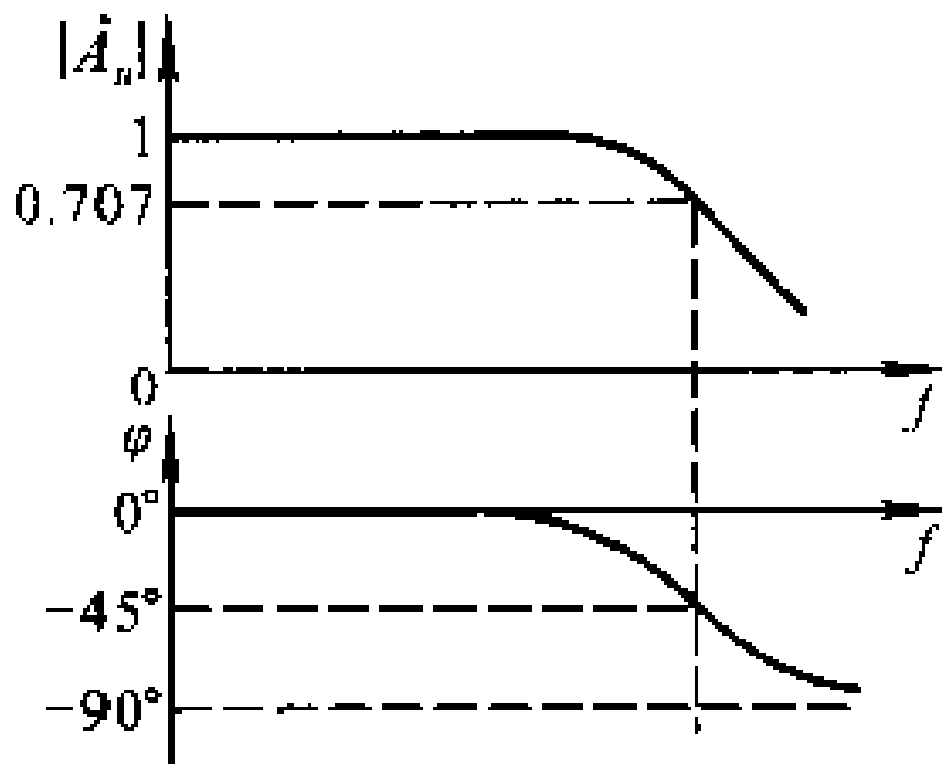


在放大电路的高频区，影响频率响应的是管子的极间电容，这些电容对高频响应的影响可用RC低通电路来模拟。

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



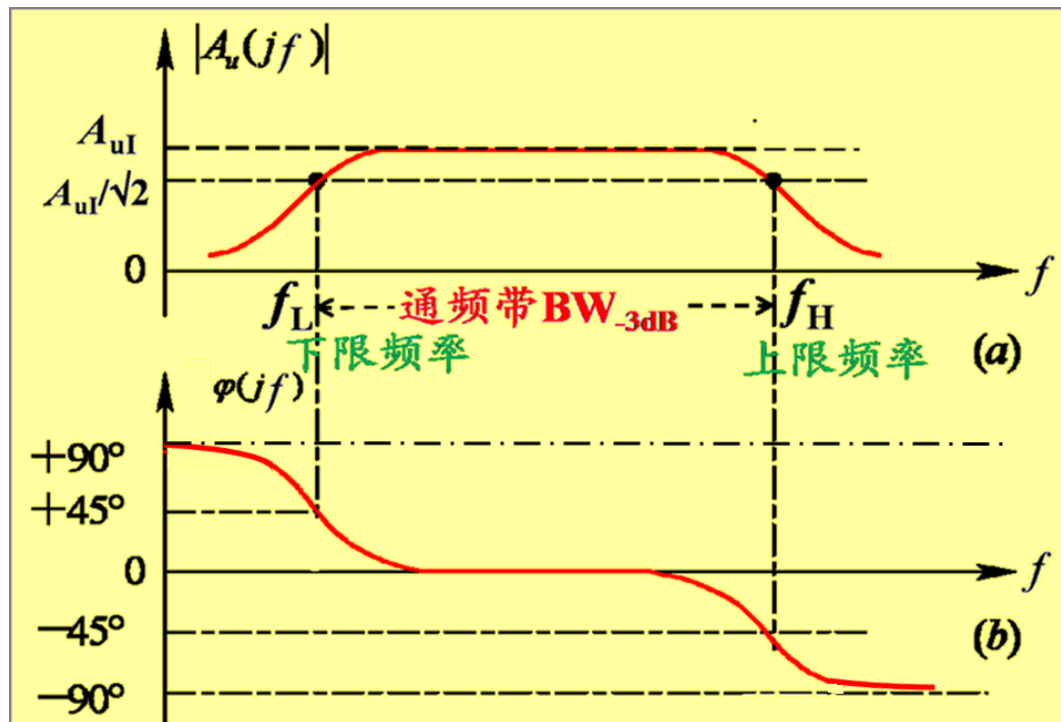
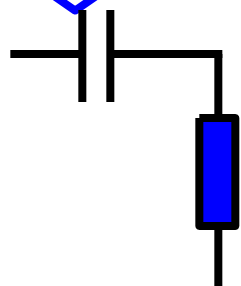
a) 低通电路



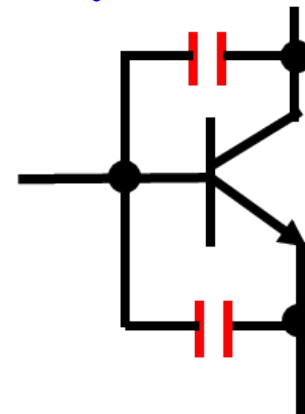
b) 频率响应

阻容耦合放大电路的幅频响应:

耦合电
容造成



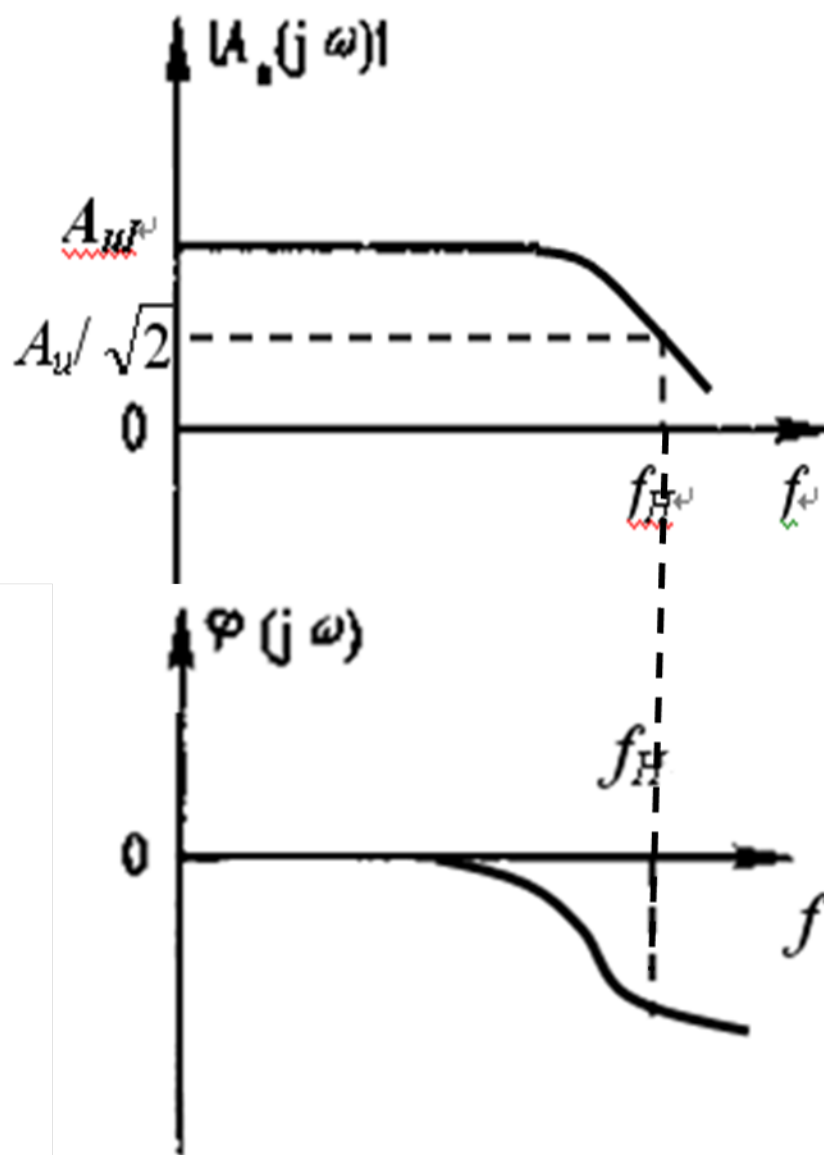
三极管结
电容造成



$$\left\{ \begin{aligned} |A_u| &= \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}} \\ \varphi &= \arctg(f_L/f) \end{aligned} \right.$$

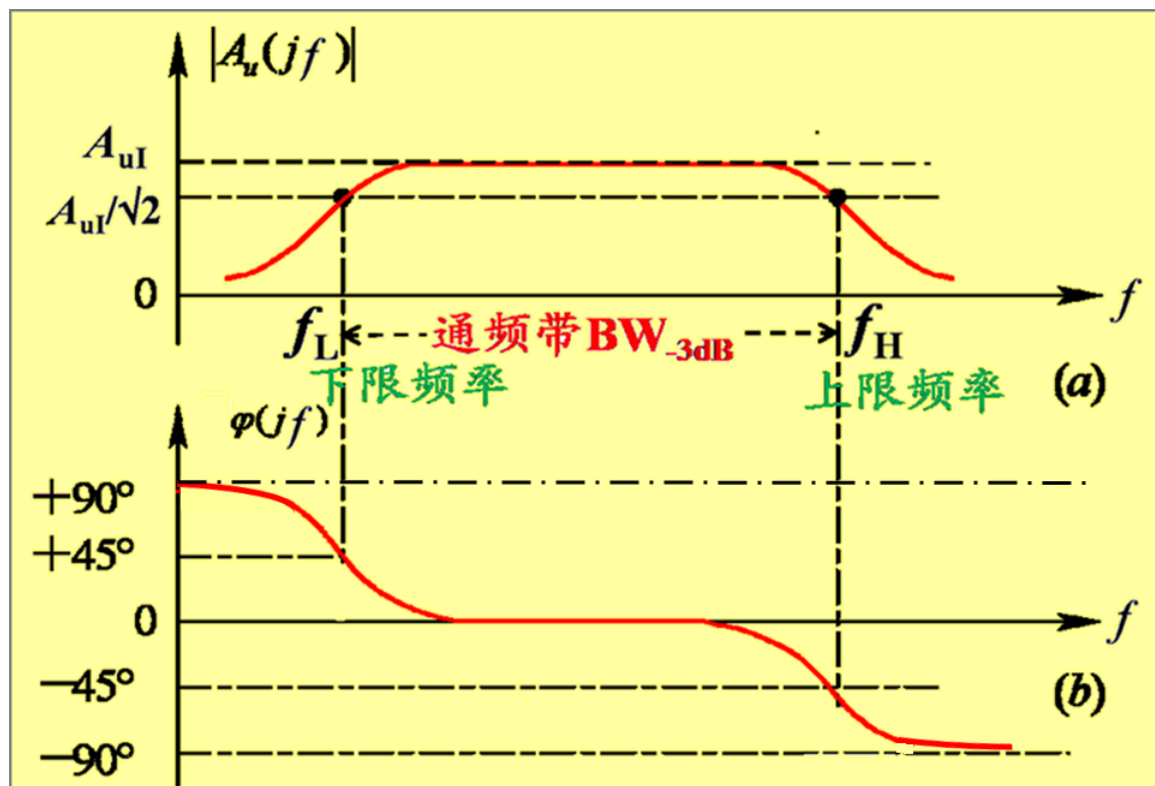
$$\left\{ \begin{aligned} |A_u| &= \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}} \\ \varphi &= -\arctg(f/f_H) \end{aligned} \right.$$

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：

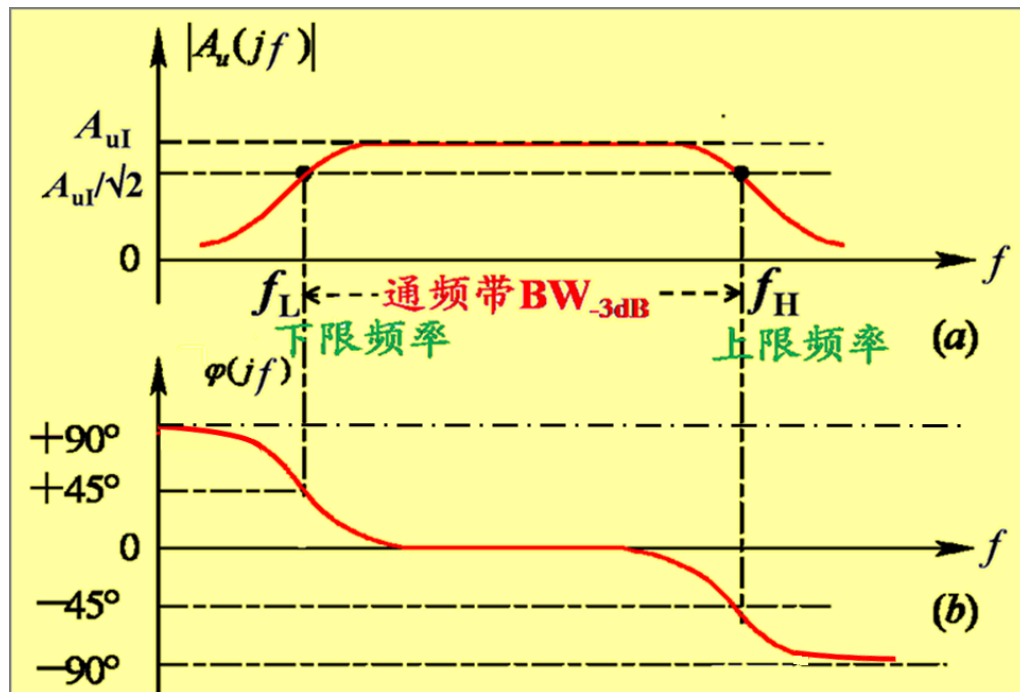


$$\left[\begin{array}{l} |A_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L/f)^2}} \\ \varphi = \arctg(f_L/f) \end{array} \right.$$

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

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，或者说下降了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。

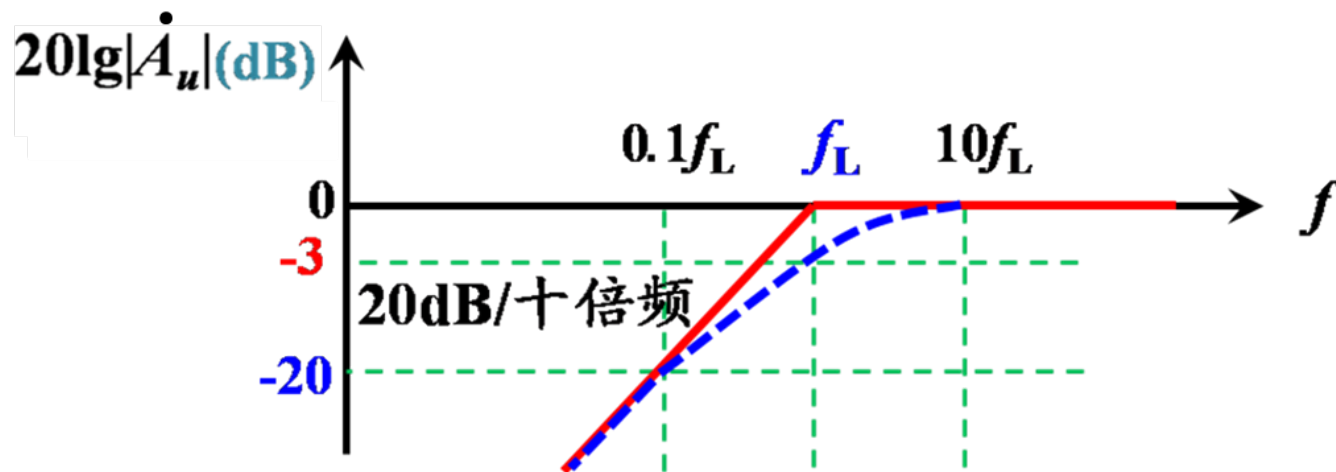
低频区高通电路
的幅频响应函数:

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

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

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

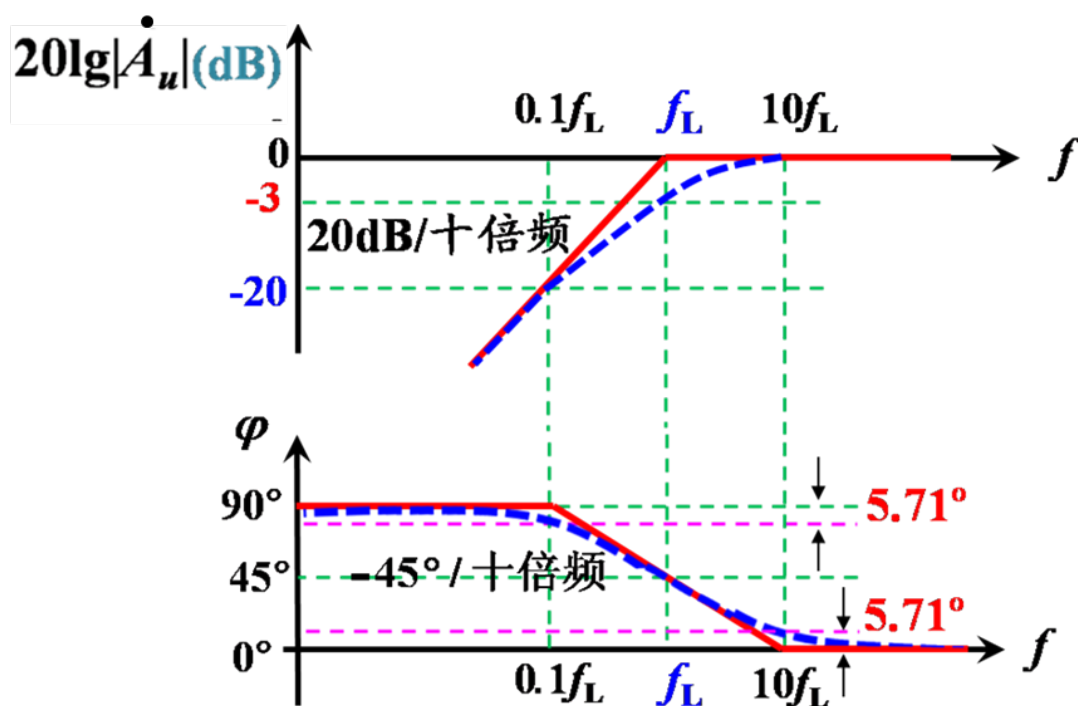
即此区间可等效成斜率为 **20dB/十倍频** 的直线



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: $\varphi = \arctg\left(\frac{f_L}{f}\right)$

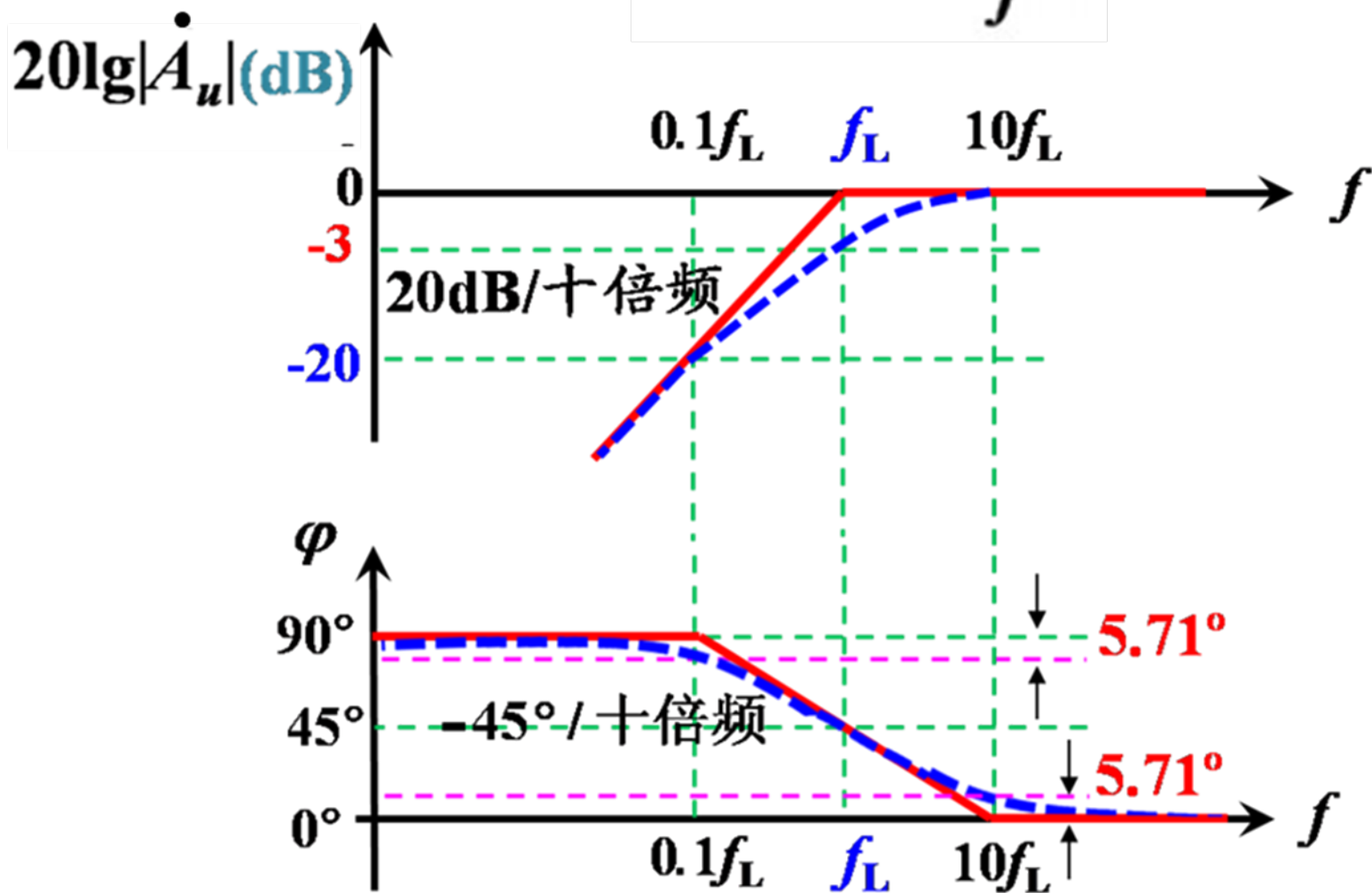
- ① 当 $f=0.1f_L$ 时, $\varphi \approx 84.29^\circ$, 近似取 90° ;
- ② 当 $f=10f_L$ 时, $\varphi \approx 5.71^\circ$, 近似取 0° 。
- ③ 当 $f=f_L$ 时, $\varphi=45^\circ$, 所以 $0.1f_L < f < 10f_L$ 这一区间可等效成斜率为 $-45^\circ/\text{十倍频}$ 的直线。



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 A_u 的波特图

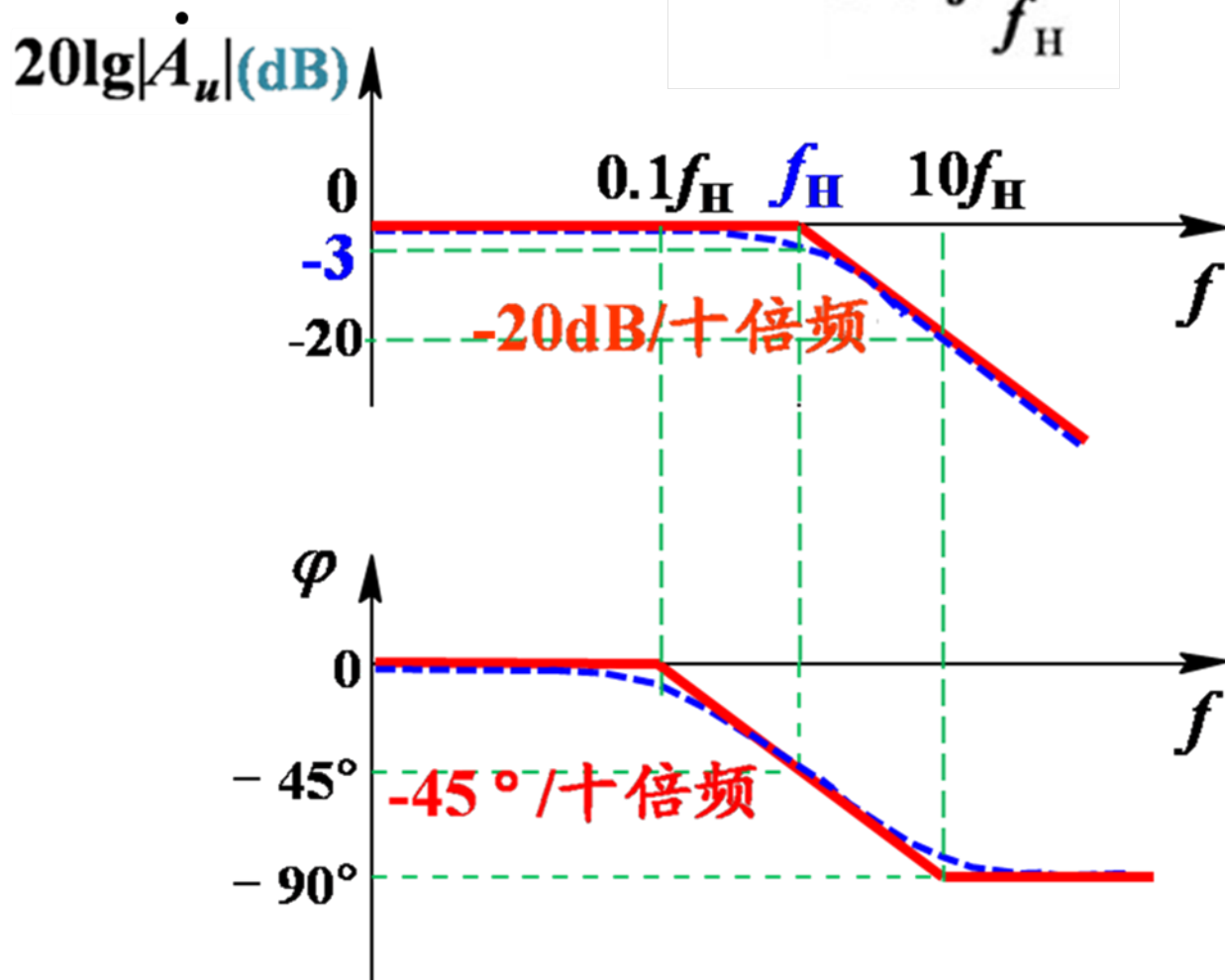
$$\dot{A}_u = \frac{1}{1 - j \frac{f_L}{f}}$$

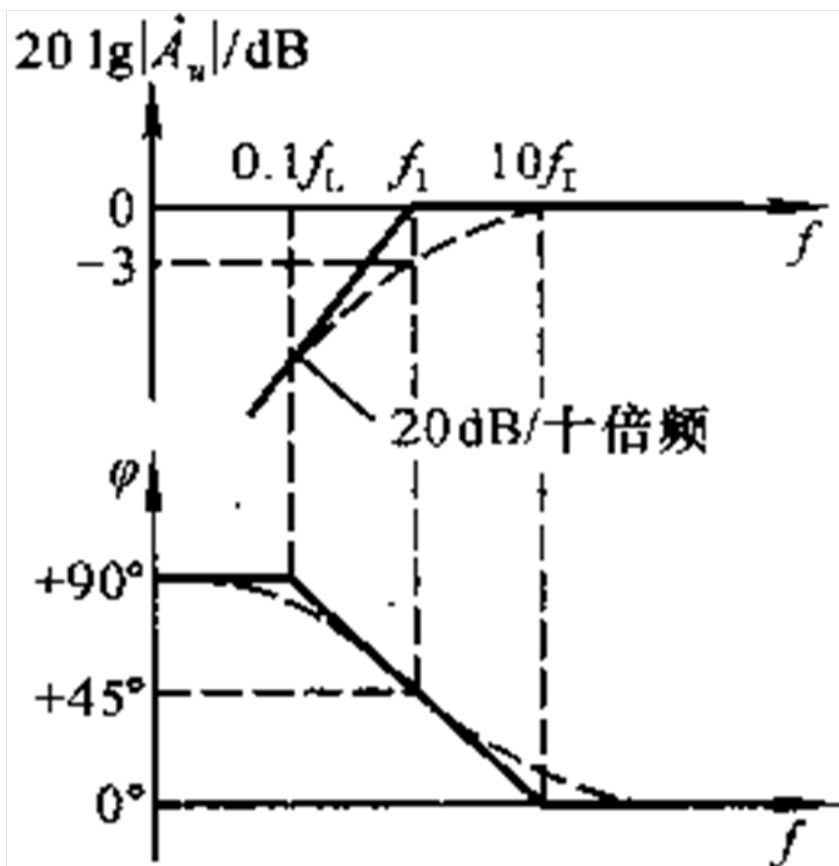




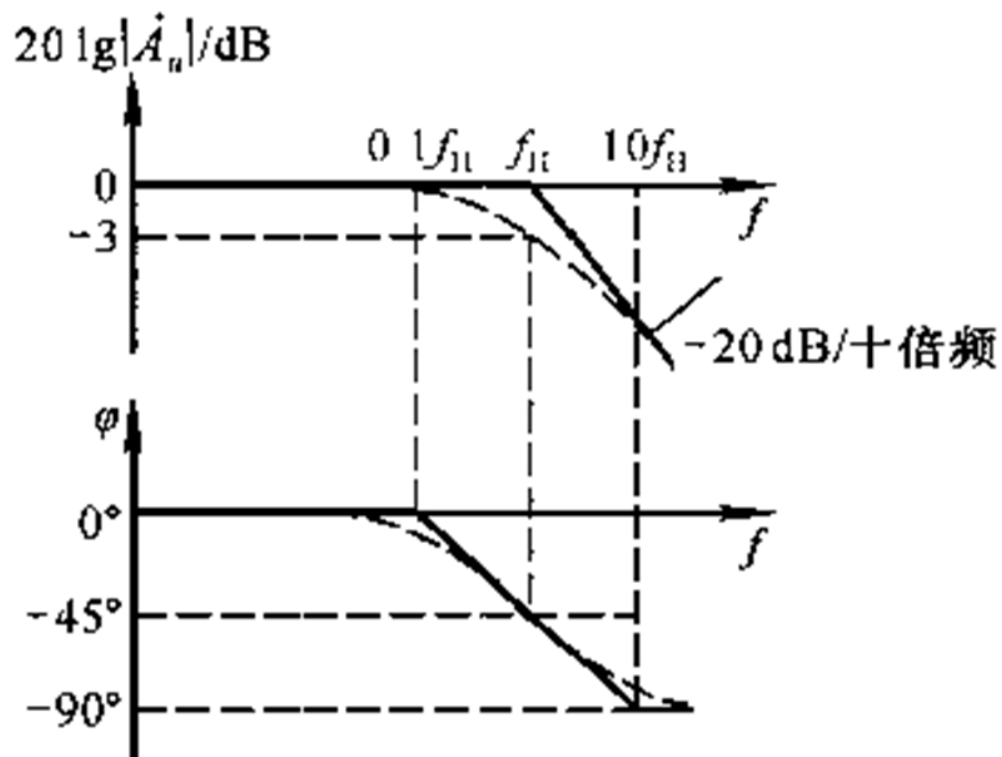
高频区的波特图

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





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)

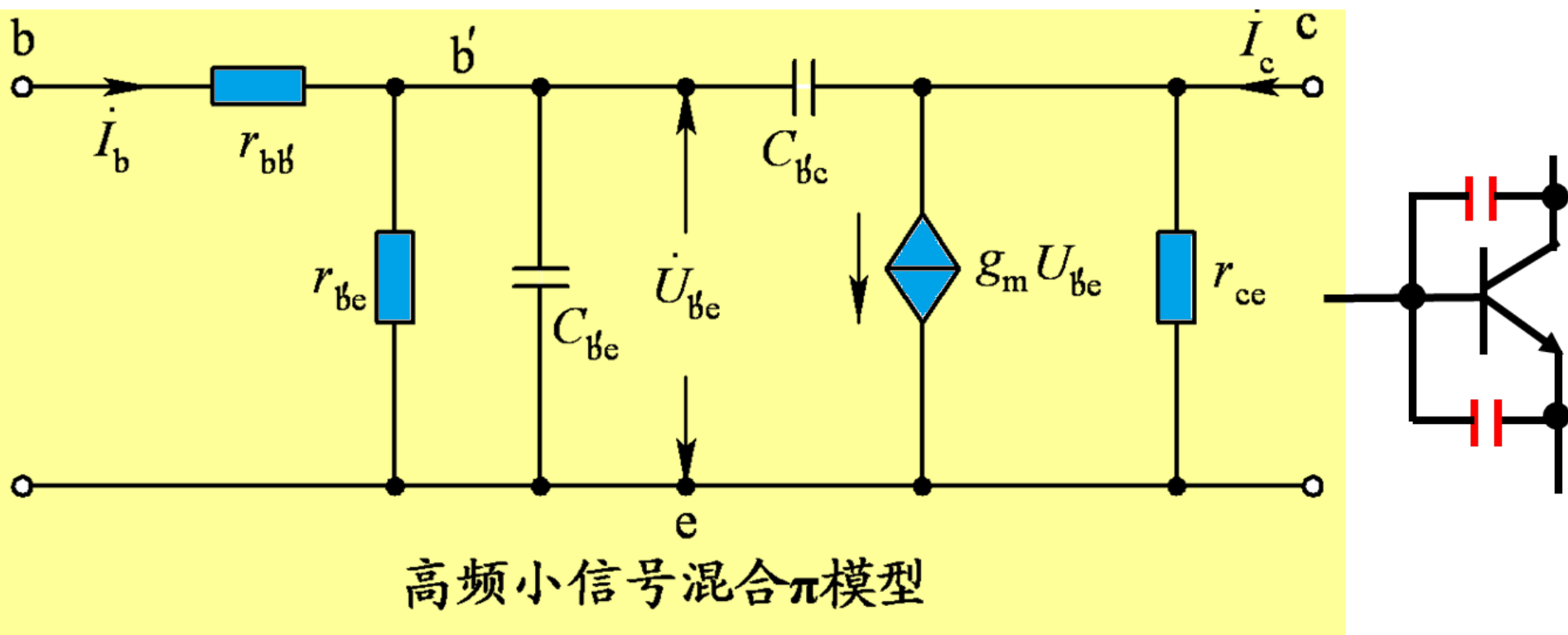
结论：

- (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°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。**



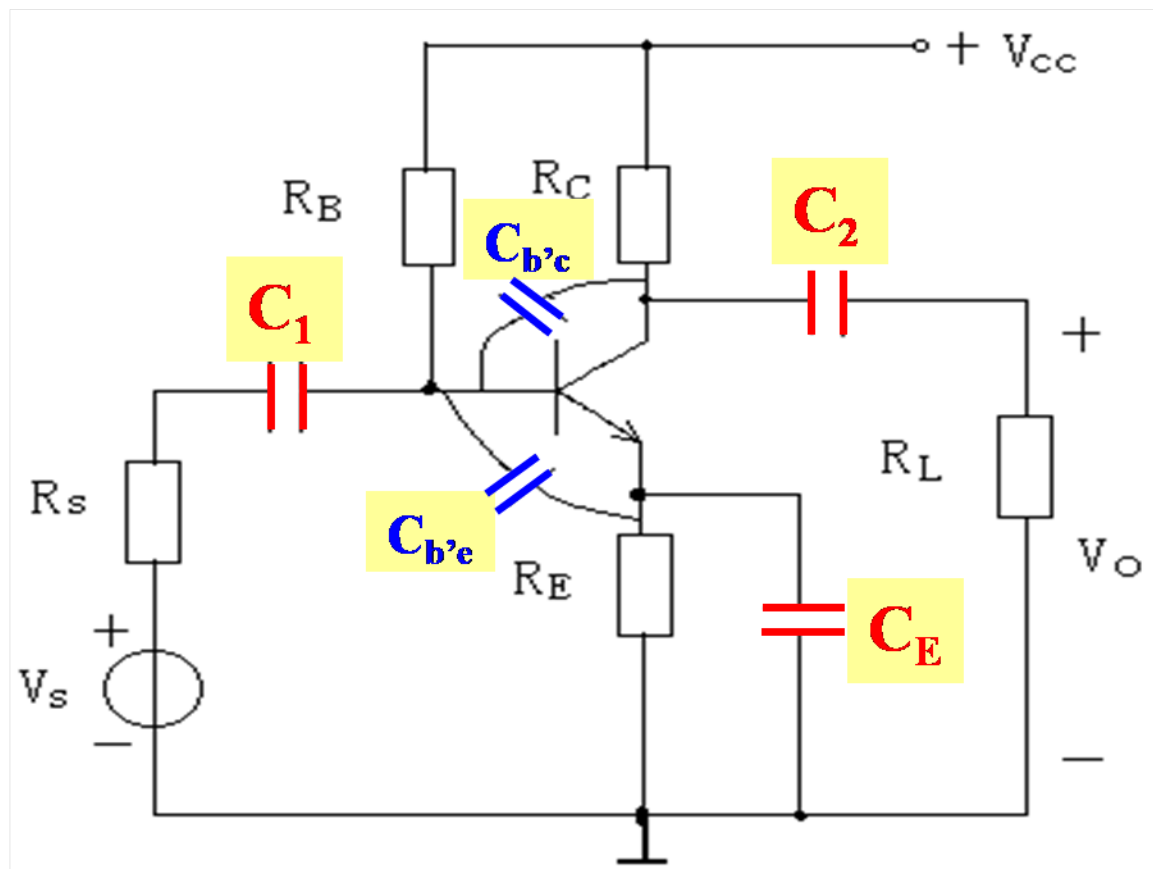
§4.2 晶体管的高频小信号模型和低频参数

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。

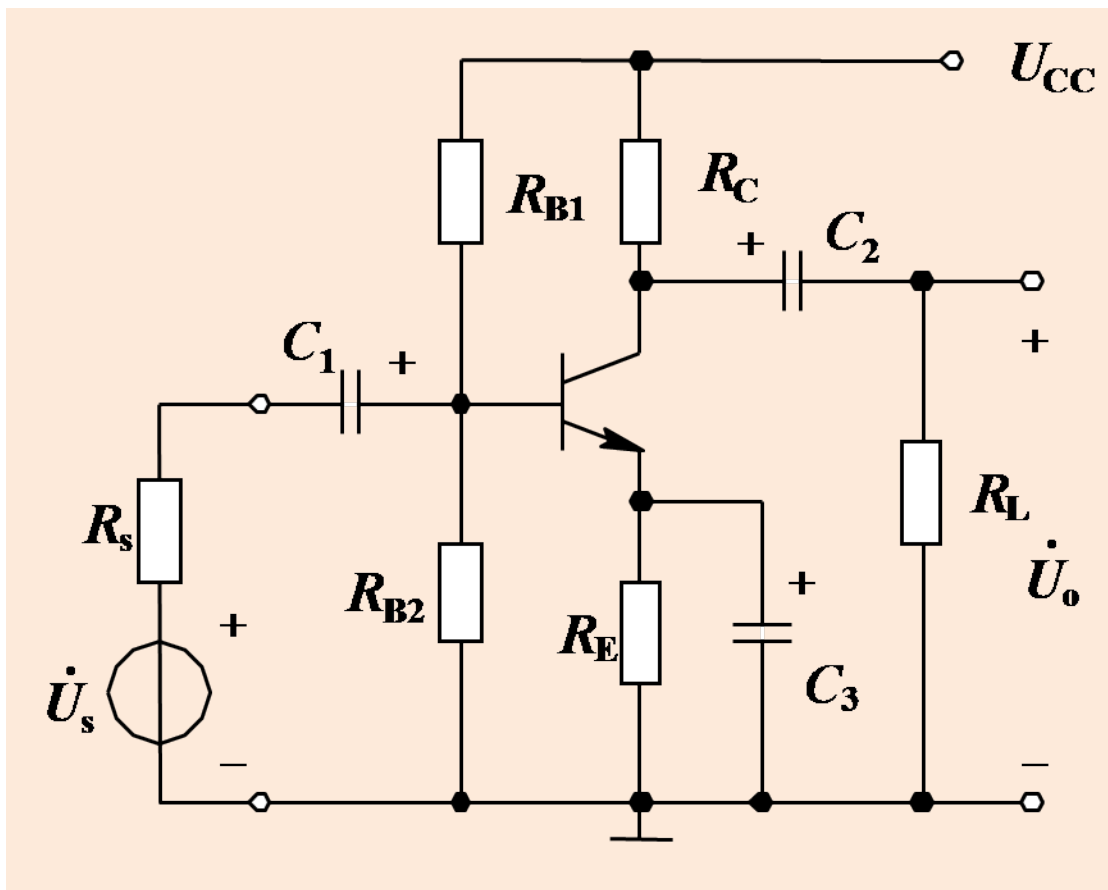
单管放大电路的频率响应

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；

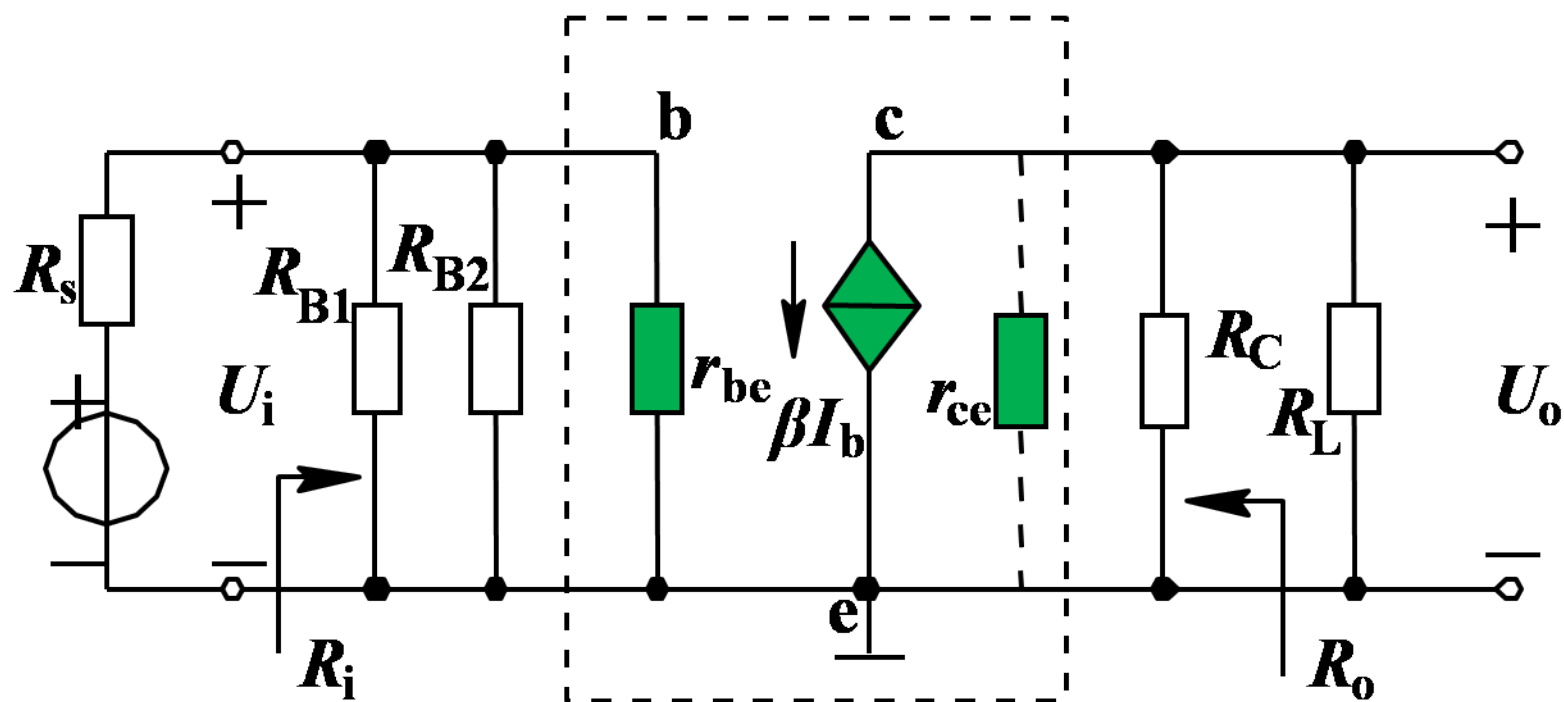
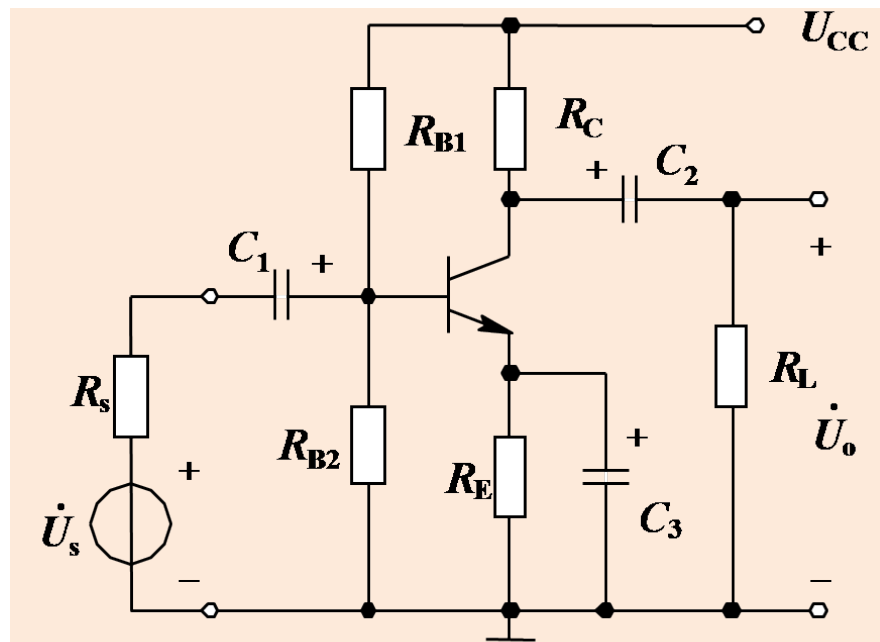
低频段：极间电容可视为交流断路，但耦合电容构成高通电路。即耦合电容的影响不能忽略， A_u 降低；

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。

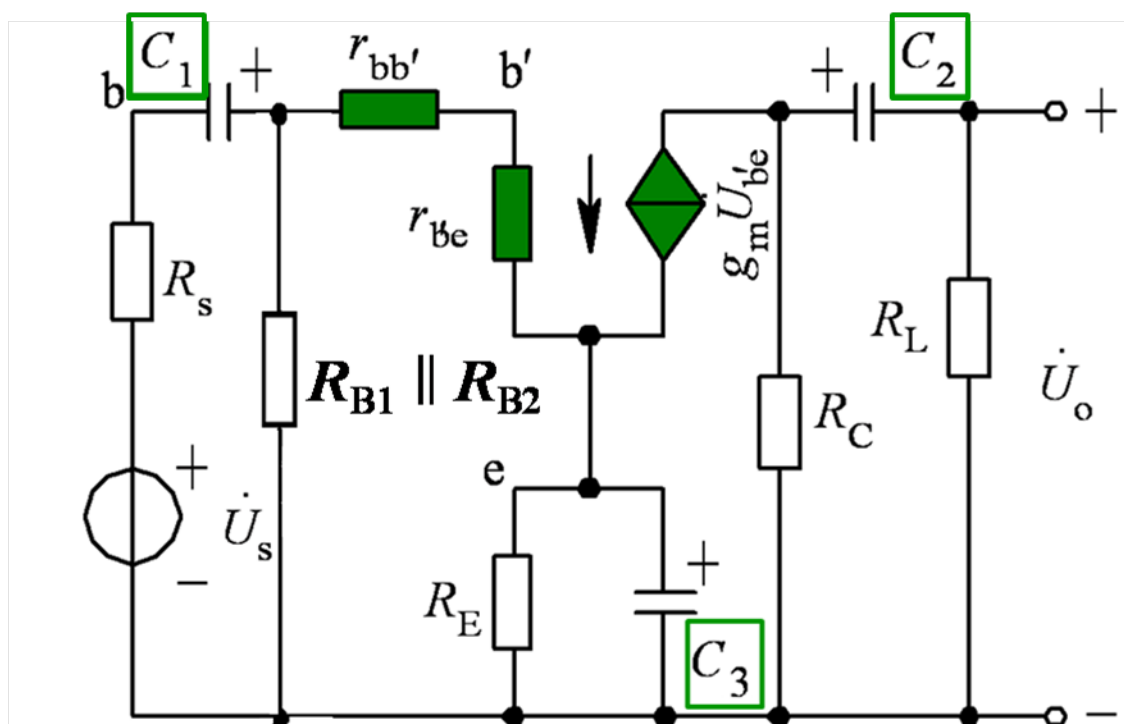
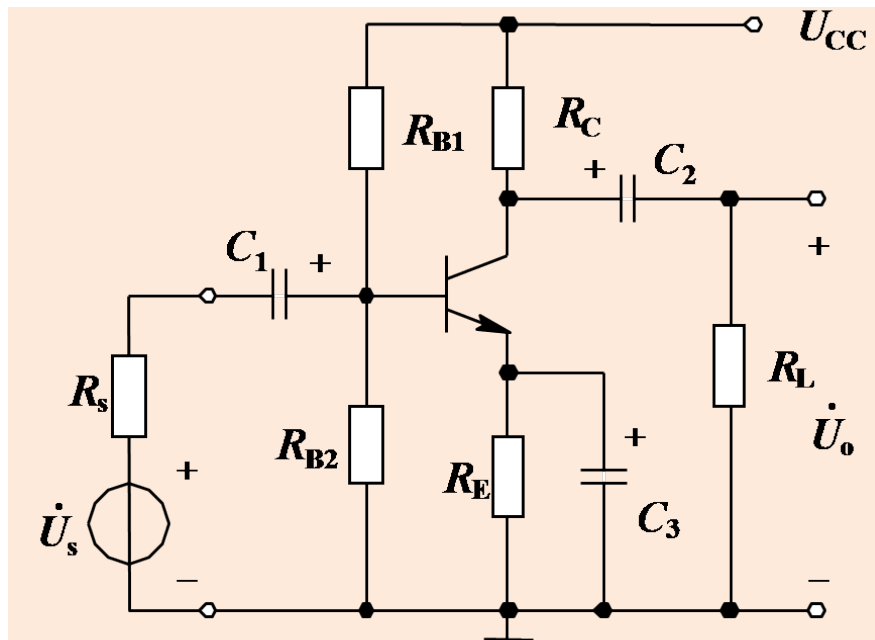
画出该电路低频区、中频区和高频区的小信号等效电路。



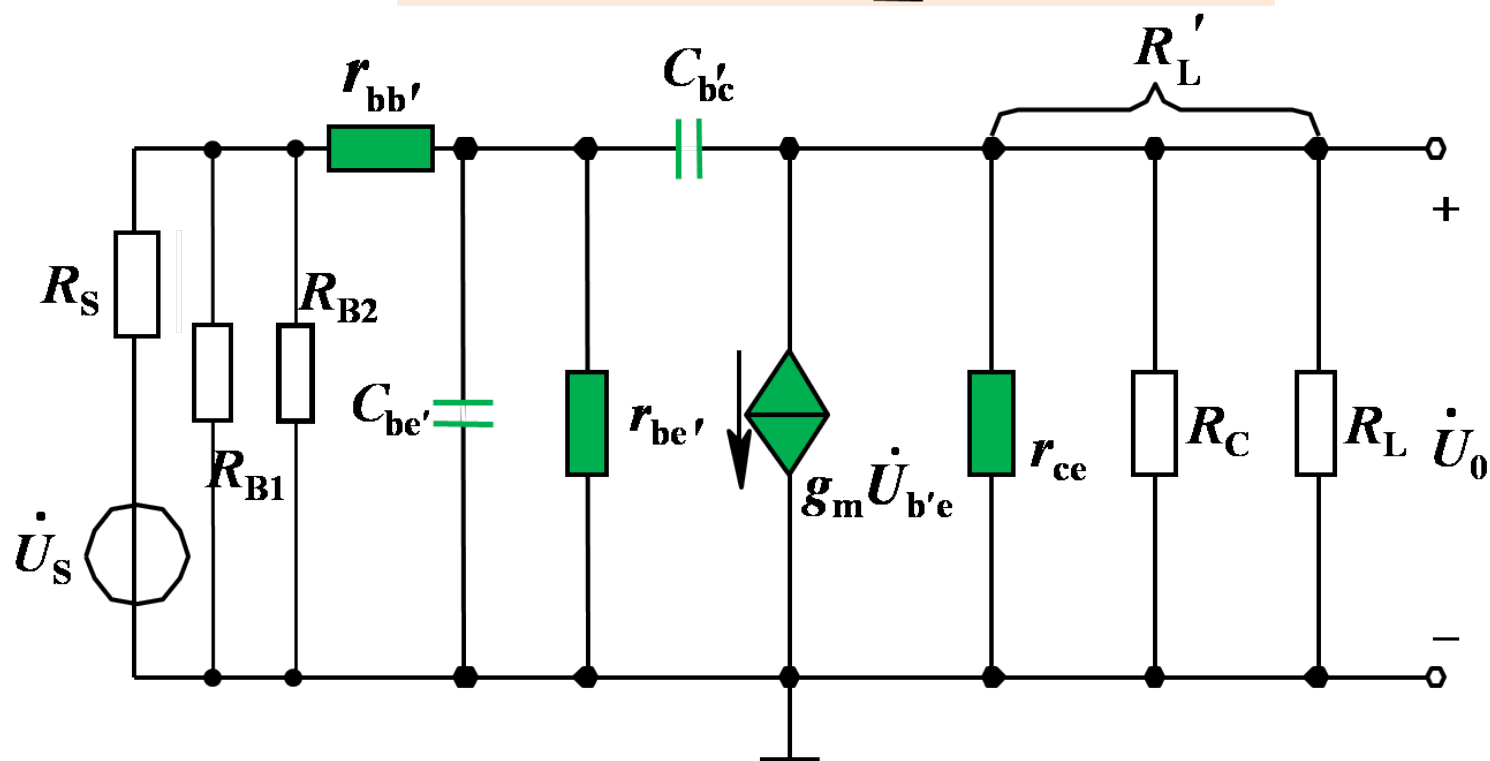
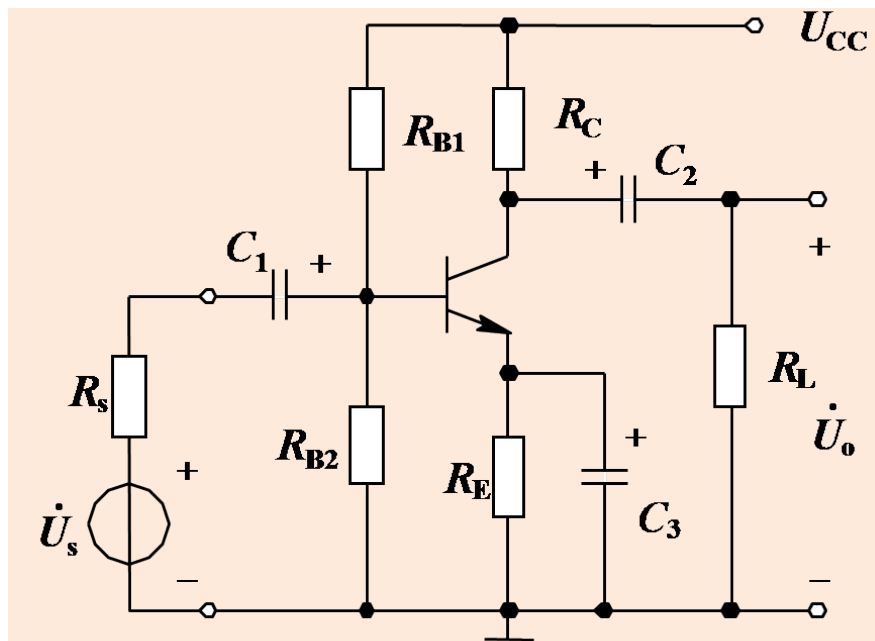
中频区小信号等效电路



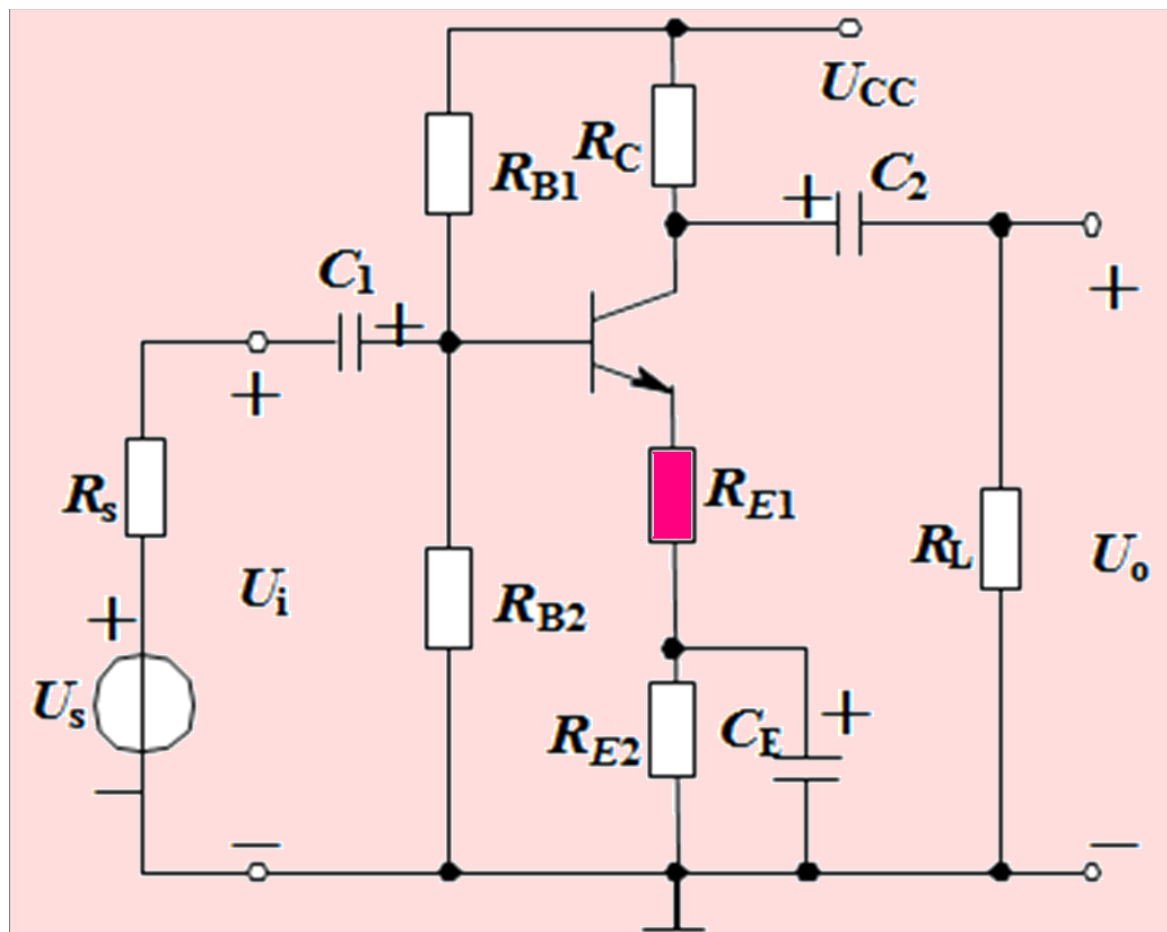
低频区小信号等效电路



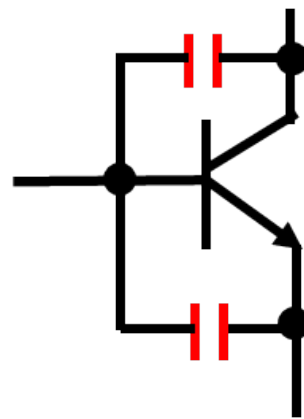
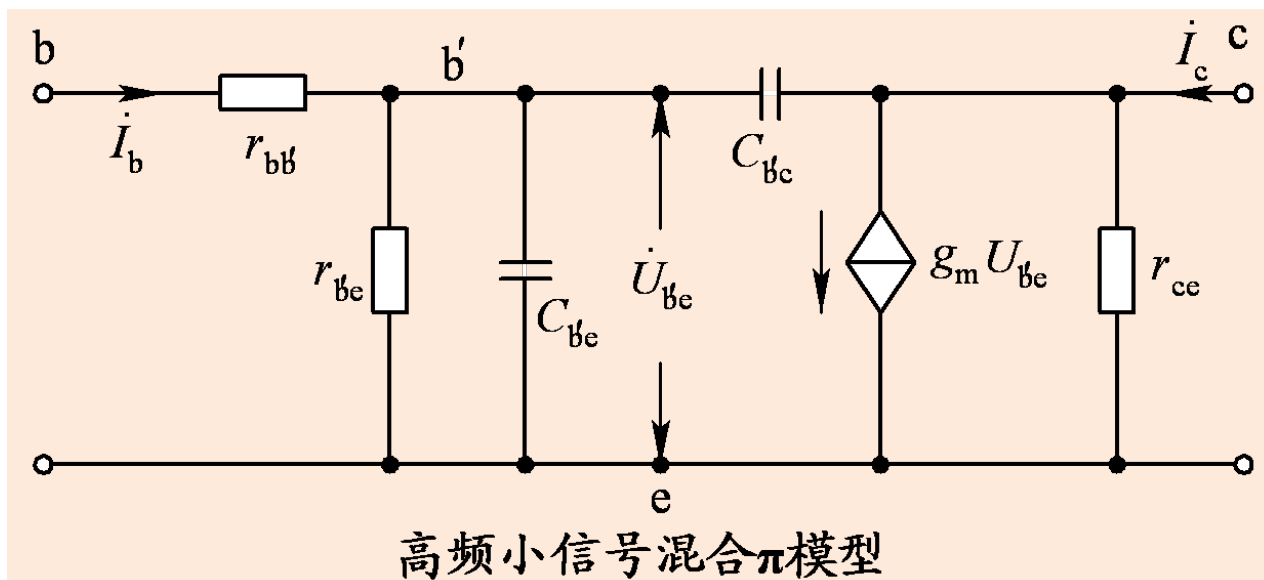
高频区小信号等效电路



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



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

g_m 不随信号频率的变化而变, β_0 为直流电流放大倍数。

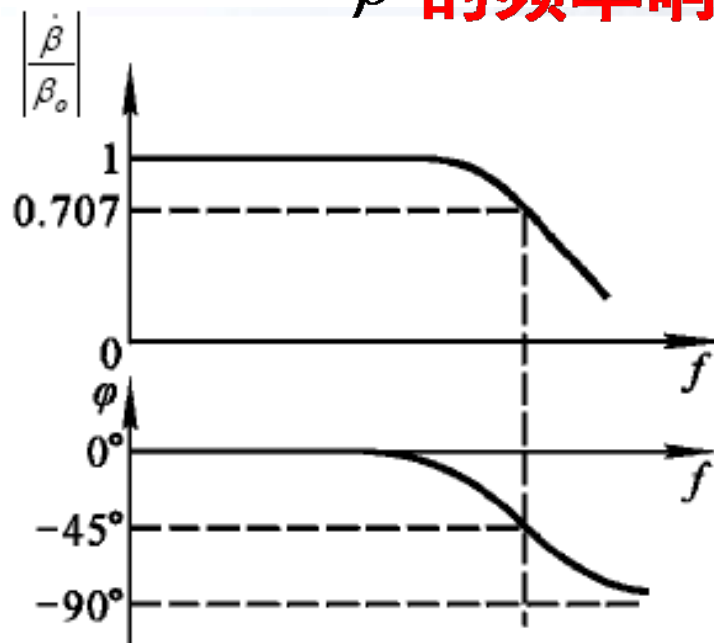
其中, $g_m \approx \frac{\beta_0}{r_{b'e}}$, $\dot{U}_{b'e} = \dot{I}_b(r_{b'e} // \frac{1}{j\omega C_{b'e}}) = \dot{I}_b \frac{r_{b'e}}{1 + j\omega r_{b'e} C_{b'e}}$

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。

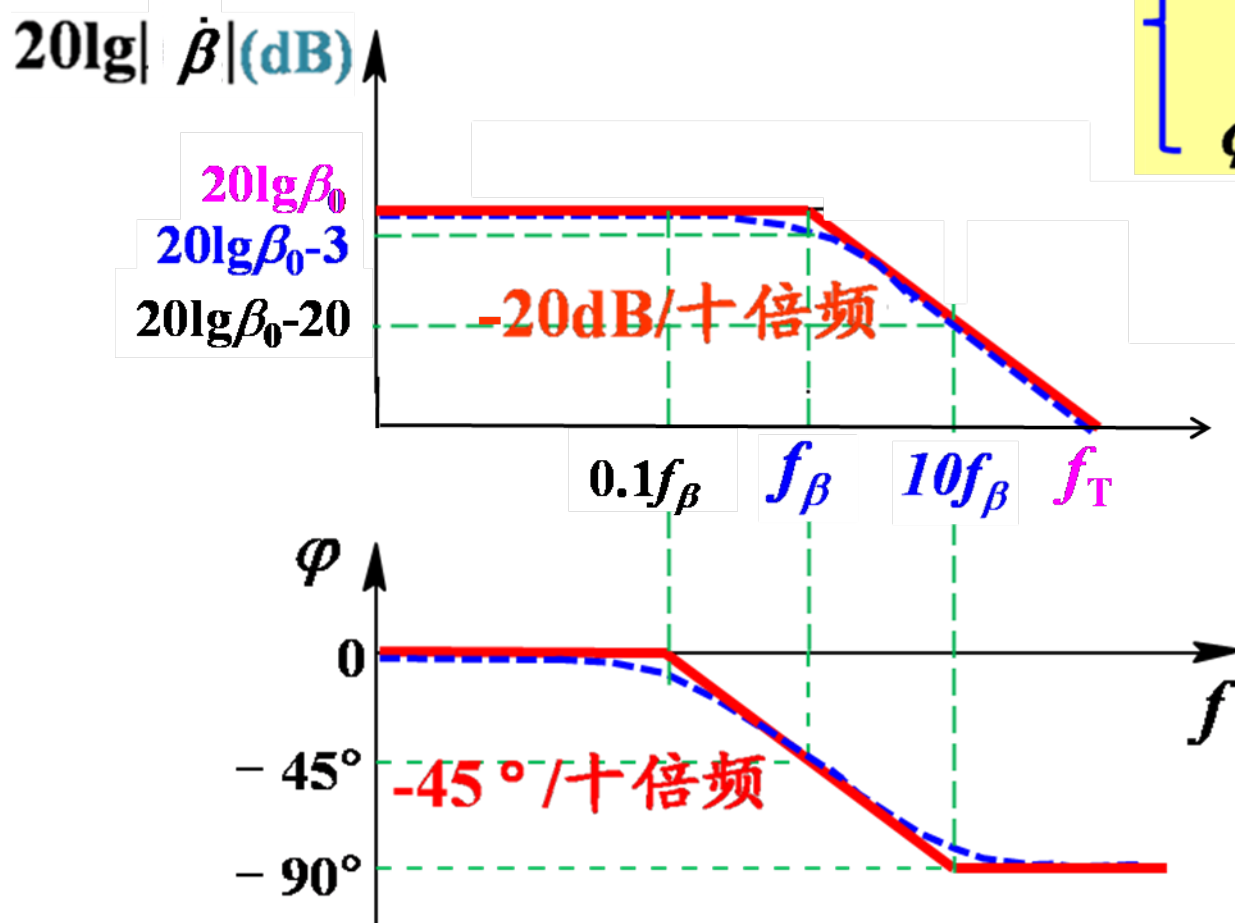


$$f \ll f_\beta \text{ 时, } |\dot{\beta}| \approx \beta_0;$$

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

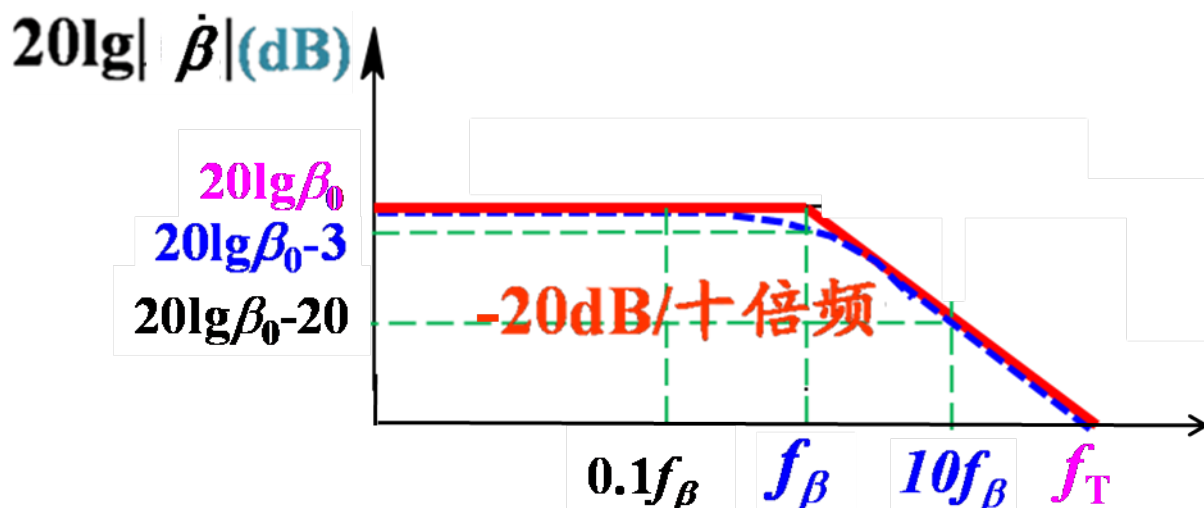
$$f \rightarrow \infty \text{ 时, } |\dot{\beta}| \rightarrow 0, \quad \varphi \rightarrow -90^\circ$$

$\dot{\beta}(j\omega)$ 的波特图:



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

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



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)