



模拟电子技术基础

Fundamentals of Analog Electronic

主讲教师：张静秋

3.9 放大电路的频率响应

教学内容（教学重点）

3.9.1 RC 电路的频率响应（一阶高/低通电路频率特性）

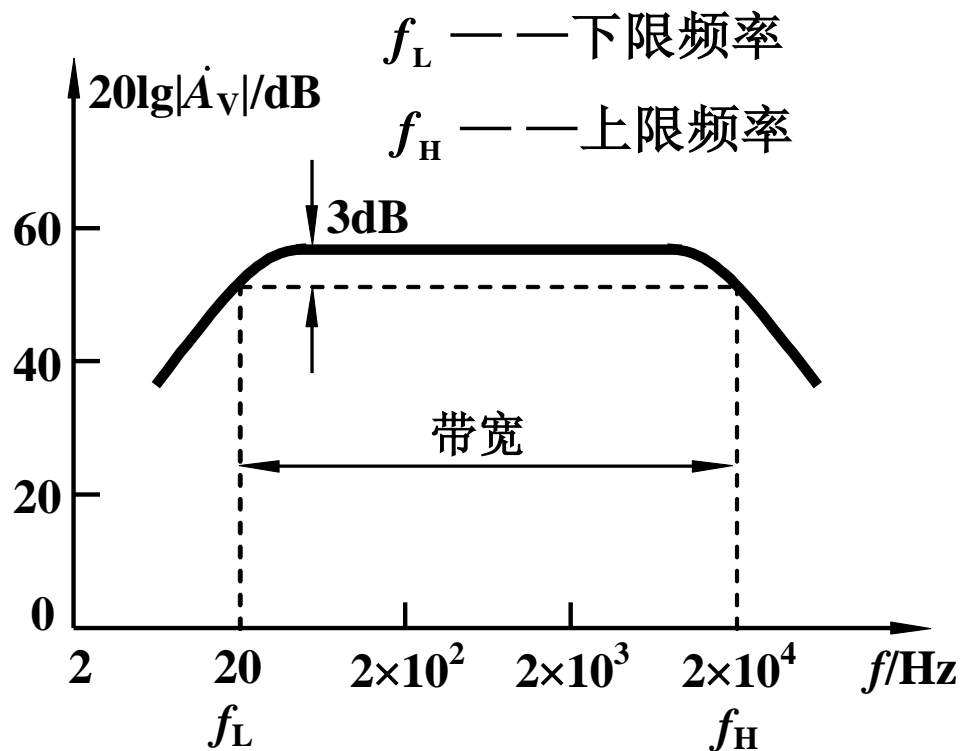
3.9.2 晶体管的高频等效模型（BJT简化 π 模型）

3.9.3 共射放大电路的频率响应（通频带的估算方法）

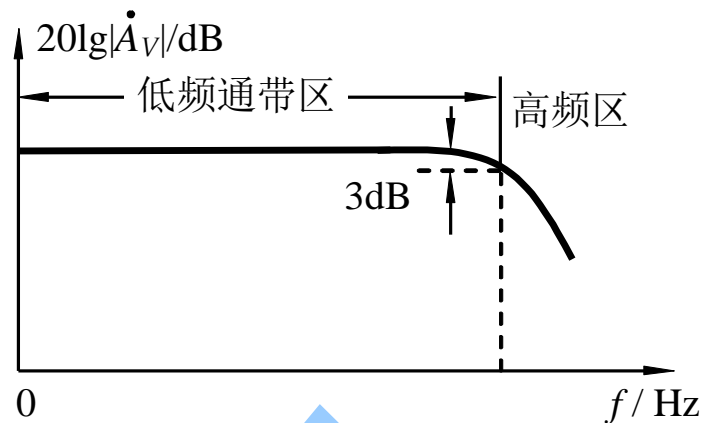
3.9.4 放大电路的增益带宽积

◆ 复习： 频率响应---通频带

例1：普通音响放大器的幅频特性



例2：直流放大电路的幅频特性



集成运算
放大器

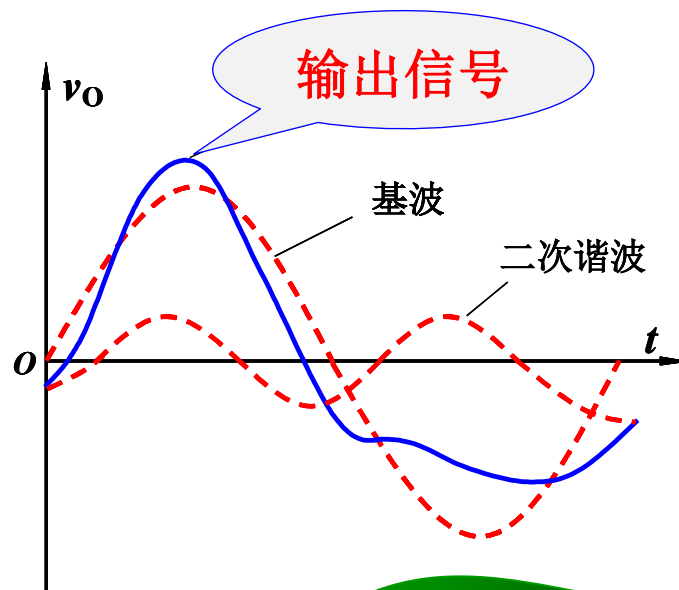
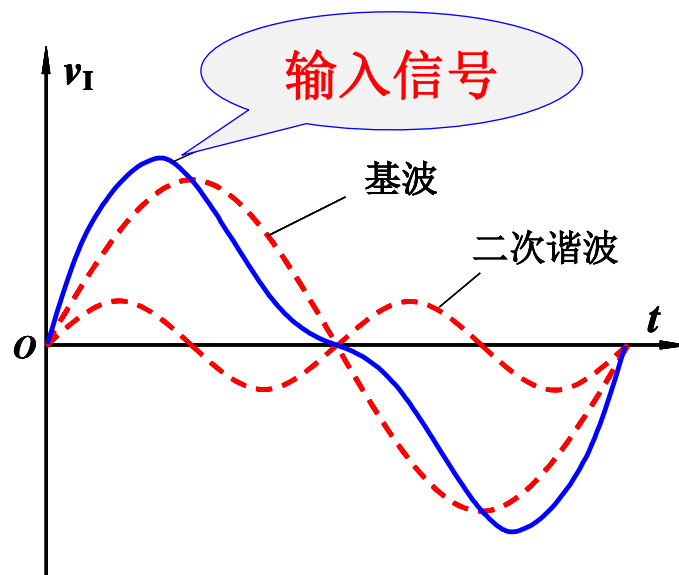
- **频率失真：**是由电抗器件（即线性器件）引起，也称为线性失真。

幅度失真：

放大器对不同频率的信号增益不同而产生的失真。

相位失真：

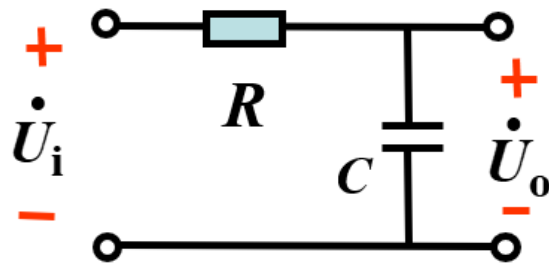
对不同频率信号的时延不同，产生的失真。



3.9.1 RC电路的频率响应

1、RC低通电路的频率响应

1) 频率特性的描述



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

令 $\omega_H = 1/(RC)$ $\tau = RC$ 则 $f_H = 1/(2\pi RC)$ —上限截止频率

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{幅频特性} \quad |\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f/f_H)^2}} \\ \text{相频特性} \quad \varphi = -\arctan f/f_H \end{array} \right.$$

2) RC 低通电路的频率特性曲线

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

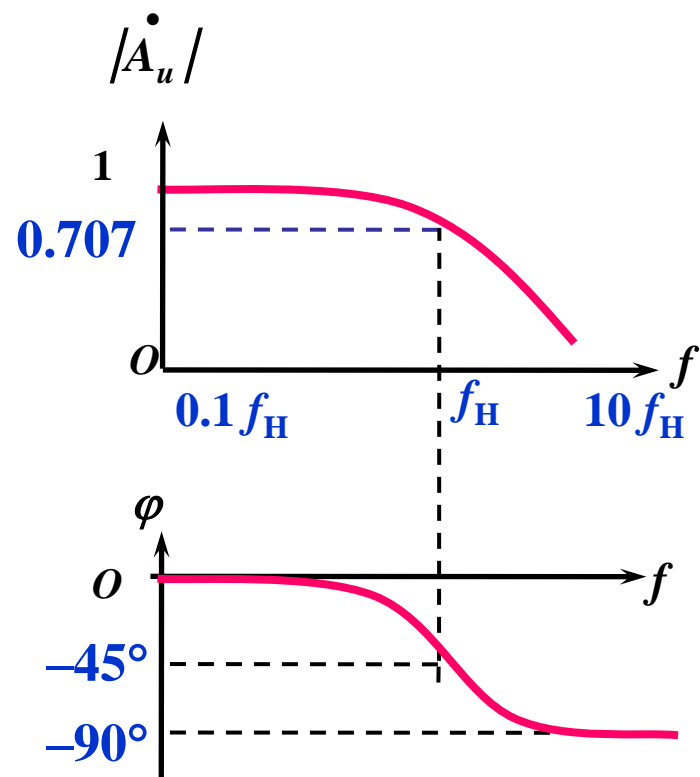
$$\varphi = -\arctan f / f_H \quad \text{滞后}$$

◆ 取3个特殊点:

$$f = 0.1 f_H \quad \text{时}, |\dot{A}_u| = 1 ; \varphi = -5.7^\circ$$

$$f = f_H \quad \text{时}, |\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0.707 ; \varphi = -45^\circ$$

$$f = 10 f_H \quad \text{时}, |\dot{A}_u| \rightarrow 0 ; \varphi \rightarrow -84.3^\circ$$



3) *RC* 低通电路波特图

$$\begin{cases} L(j\omega) = 20\lg|\dot{A}_u| = -20\lg\sqrt{1 + (f / f_H)^2} \\ \varphi = -\arctan f / f_H \end{cases}$$

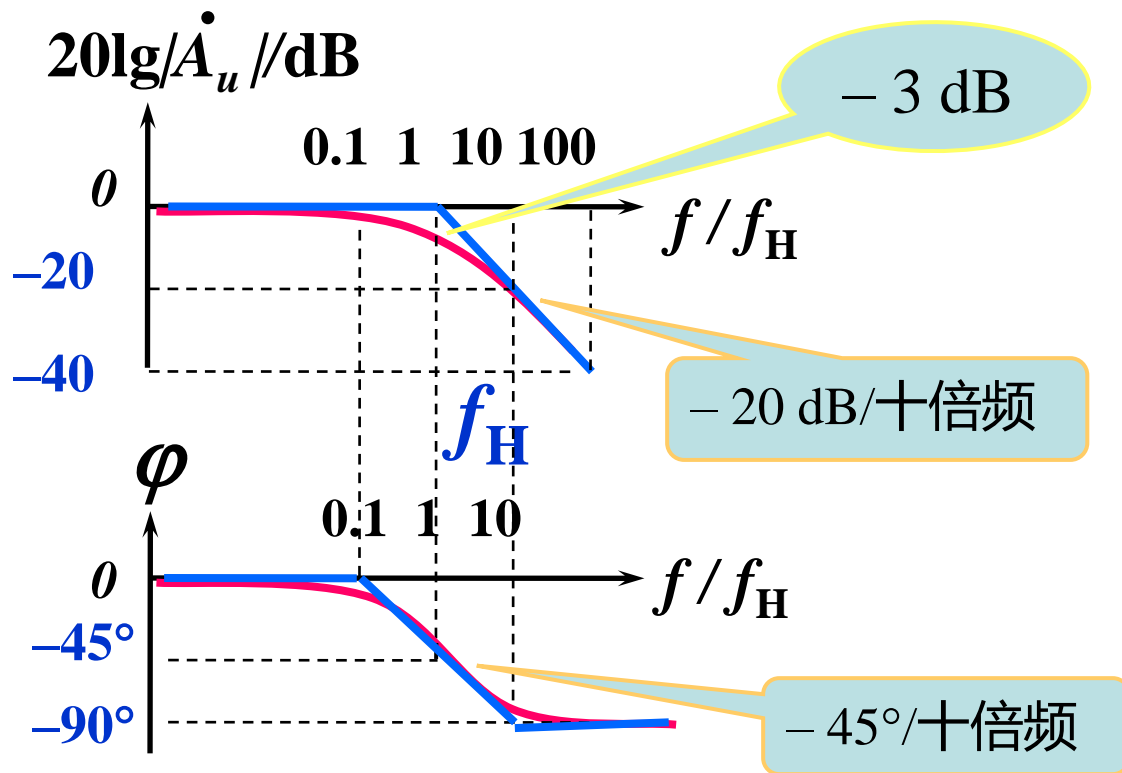
◆ 取特殊值:

$$f \ll f_H \quad 20\lg|A_u| = 0 \text{ dB} \quad \varphi \approx 0^\circ$$

$$f = f_H \quad 20\lg|A_u| = -20\lg 0.707 = -3 \text{ dB} \quad \varphi = -45^\circ$$

$$f \gg f_H \quad 20\lg|A_u| = -20\lg f / f_H \quad \varphi = -90^\circ$$

3) RC 低通电路波特图

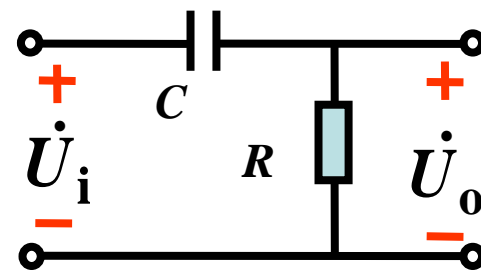


● 波特图的优点:

能够扩大频率的表达范围, 并使作图方法得到简化

2、RC 高通电路的频率响应

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



令 $\omega_L = 1/RC$

则 $f_L = 1/2\pi RC$

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

➤ 线性频率特性:

$$\left\{ \begin{array}{l} |\dot{A}_u| = \frac{1}{\sqrt{1 + (f_L / f)^2}} \\ \varphi = 90^\circ - \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{f_L}\right) \end{array} \right.$$

➤ 对数频率特性:

$$\left\{ \begin{array}{l} L(j\omega) = 20\lg|\dot{A}_u| = -20\lg\sqrt{1 + (f_L / f)^2} \\ \varphi = 90^\circ - \operatorname{arctg}\left(\frac{f}{f_L}\right) \end{array} \right.$$

2、RC 高通电路的频率响应

$$f \geq 10 f_L \quad 20\lg|\dot{A}_u| = 0 \text{ dB}$$

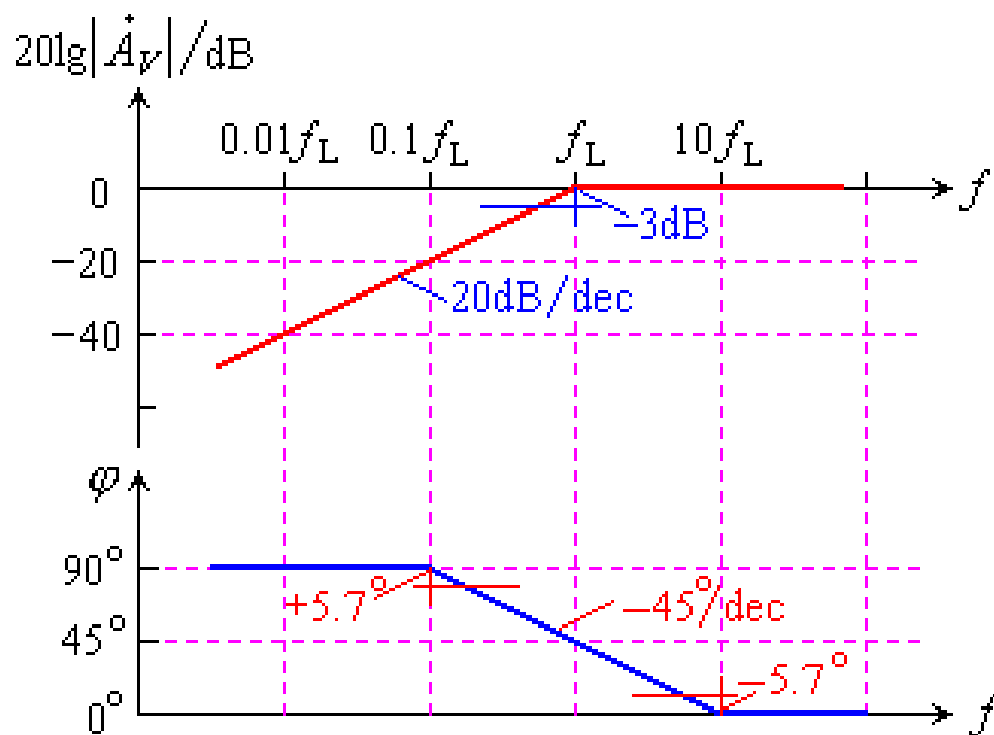
$$\varphi \approx 0^\circ$$

$$f = f_L \quad 20\lg|\dot{A}_u| = 20\lg 0.707 = -3 \text{ dB}$$

$$\varphi = 45^\circ$$

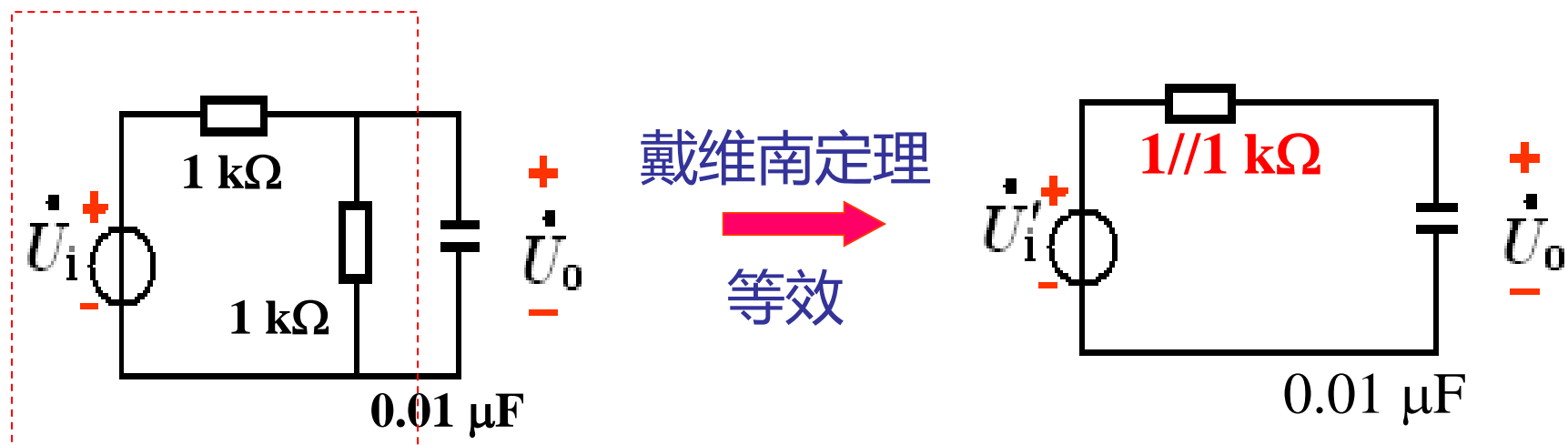
$$f \leq 0.1 f_L \quad 20\lg|\dot{A}_u| = -20\lg f / f_H$$

$$\varphi \approx 90^\circ$$



一阶RC 高通电路的Bode图

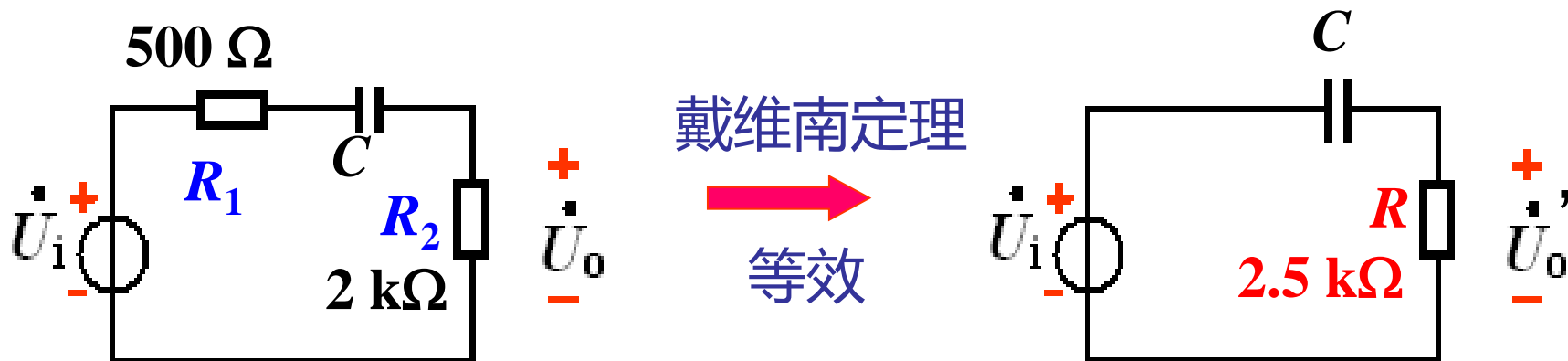
例1： 求已知一阶低通电路的上限截止频率。



$$f_H = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 0.5\text{ k}\Omega \times 0.01\text{ }\mu\text{F}} = 31.8\text{ (kHz)}$$

- 结论：将电容断开后其余部分进行戴维南等效，可以直接套用上述公式求解截止频率，其中 R 就是戴维南等效电阻。

例2：已知一阶高通电路的 $f_L = 300 \text{ Hz}$ ，求电容 C 。



$$C = \frac{1}{2\pi f_L R} = \frac{1}{2 \times 3.14 \times 300 \text{ Hz} \times 2500 \Omega} = 0.212 (\mu\text{F})$$

可以证明：

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2}}{1 + \frac{1}{j\omega(R_1 + R_2)C}} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{1}{1 - j \frac{f_L}{f}}$$

3.9.2 晶体管的高频等效模型

1、晶体管的混合 π 型的建立

➤ PN结结电容的影响：

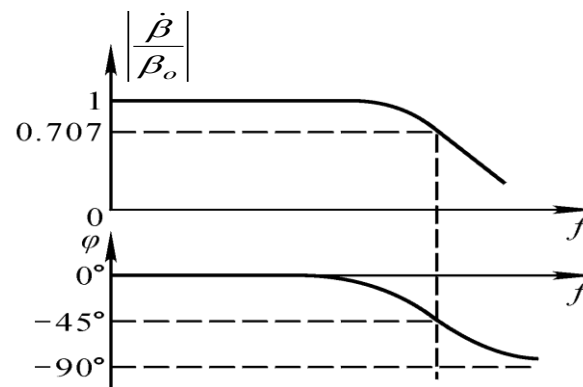
在低频和中频情况下，晶体管PN结极间电容的容抗很大，而结电阻很小，两者并联时，可以忽略极间电容的作用；

而在高频情况下，晶体管的极间电容的容抗变小，与其结电阻相比，极间电容的影响就不能被忽略了。

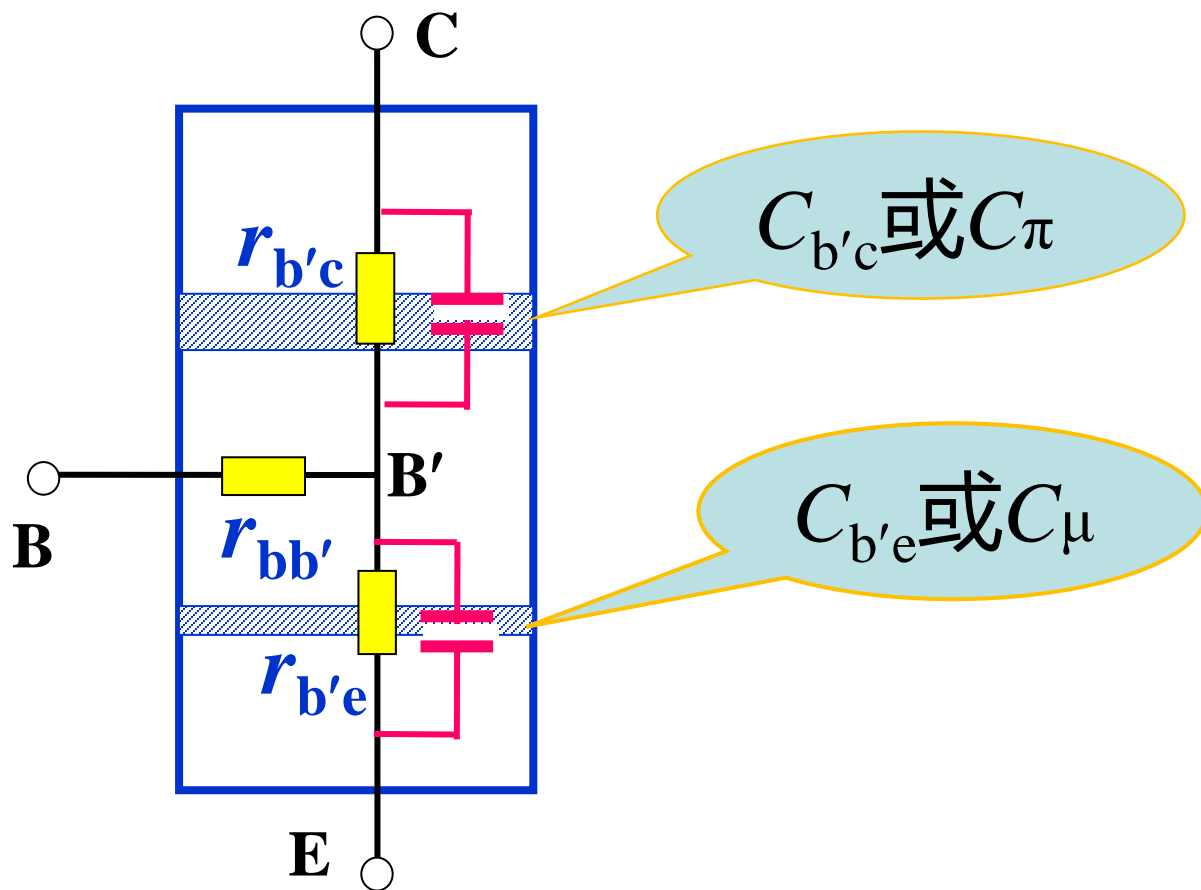
➤ β 的影响：

因 β 值随频率升高而降低。

- 高频段不能采用 H 参数模型。



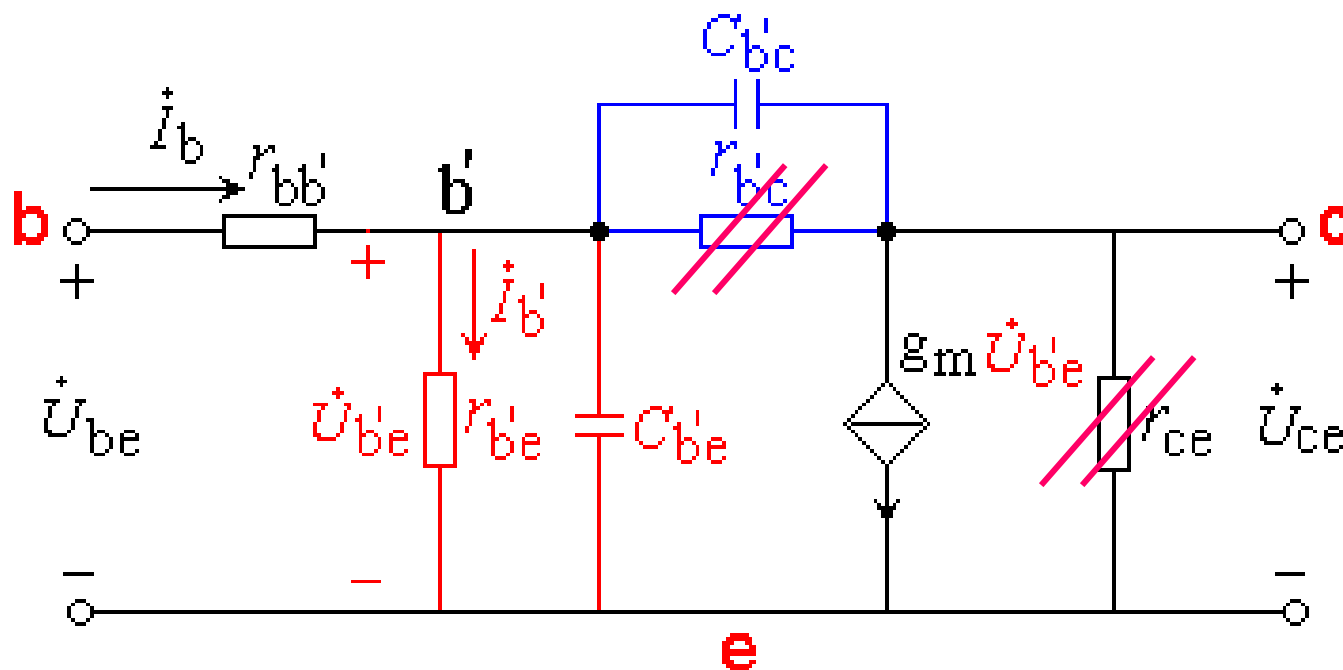
1、晶体管的混合 π 型的建立



BJT简化的结构示意图

1、晶体管的混合 π 型的建立

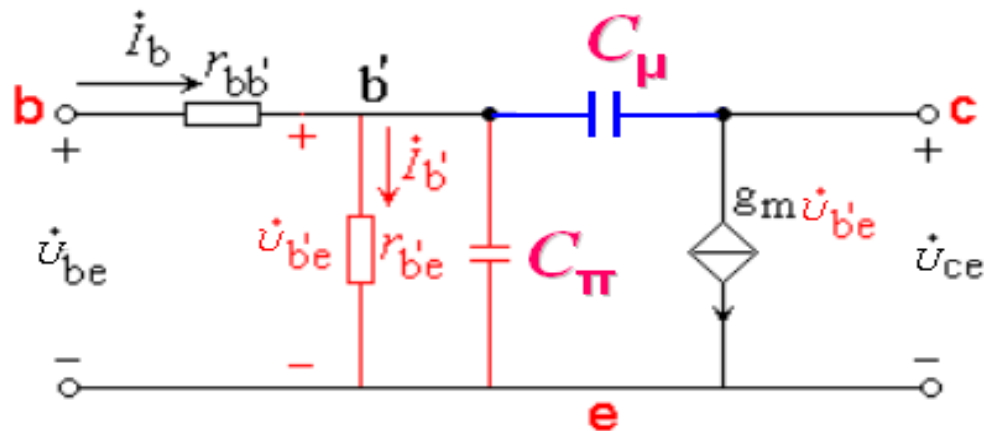
$r_{ce} \gg R_L$ $r_{b'c} \gg C_\mu$ 的容抗



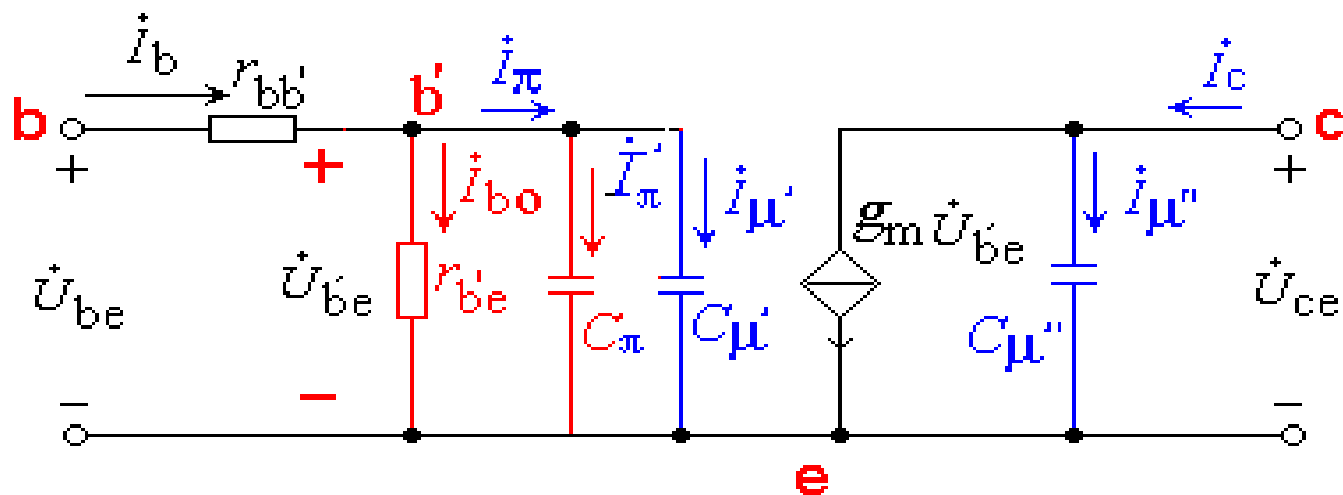
BJT的混合 π 模型

在工程上: $C_{b'c} = C_\mu'$ $C_{b'e} = C_\pi$

2、BJT混合π模型的单向化



将 C_μ 单向化: C_μ 与 C'_μ 和 C''_μ 中的电流相同。



BJT的混合 π 模型

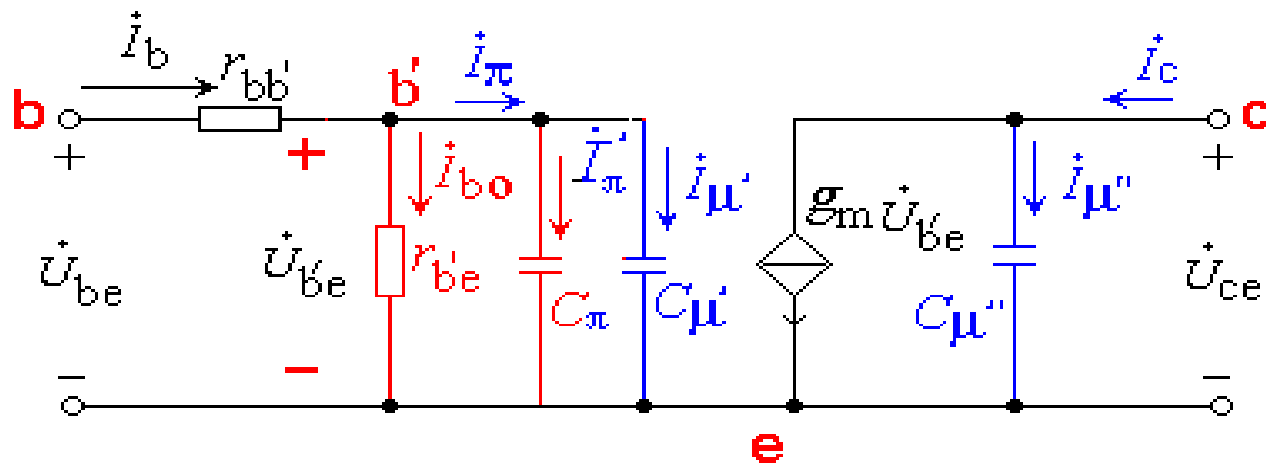
2、BJT混合π模型的单向化 —输入侧

$$\dot{I}_{\pi} = \dot{I}_{\mu'} + \dot{I}'_{\pi}$$

$$\dot{I}_{\mu'} = (\dot{U}_{b'e} - \dot{U}_{ce}) j\omega C_{\mu} = \dot{U}_{b'e} \left(1 - \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}}\right) j\omega C_{\mu}$$

$$\dot{U}_{ce} = -g_m \dot{U}_{b'e} R'_L \quad \dot{I}_{\mu} = \dot{U}_{b'e} (1 + g_m R'_L) j\omega C_{\mu}$$

令放大倍数 $|K| = g_m R'_L$ ，则定义 $C_{\mu'} = (1 + |K|)C_{\mu}$



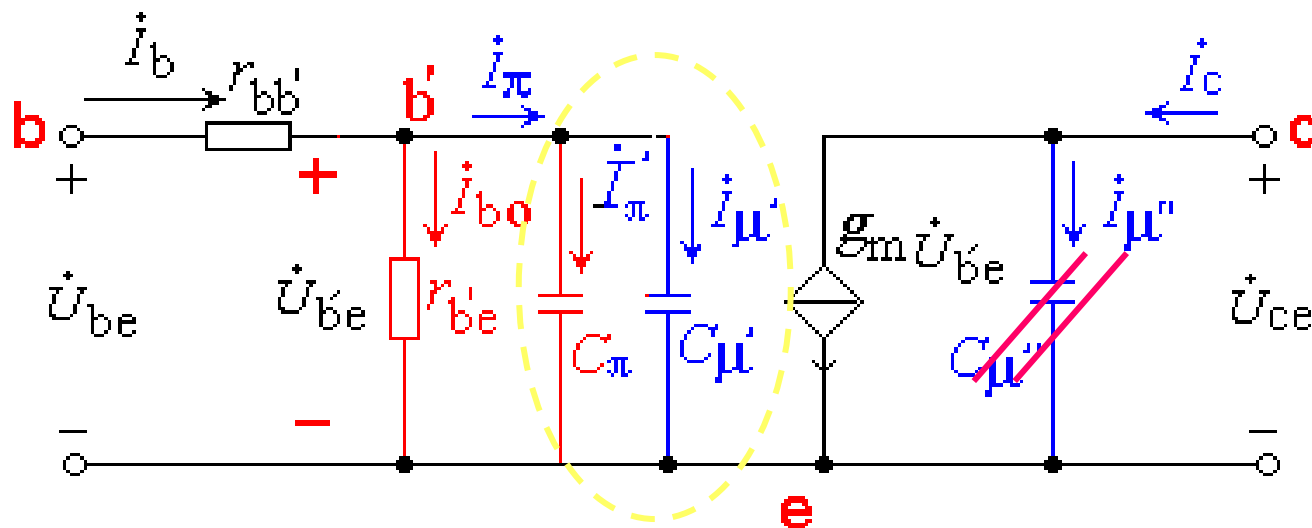
BJT的混合π模型

2、BJT混合π模型的单向化——输出侧

$$I_{\mu''} = (\dot{U}_{ce} - \dot{U}_{b'e}) j\omega C_{\mu} = \dot{U}_{ce} \left(1 + \frac{1}{|K|}\right) j\omega C_{\mu}$$

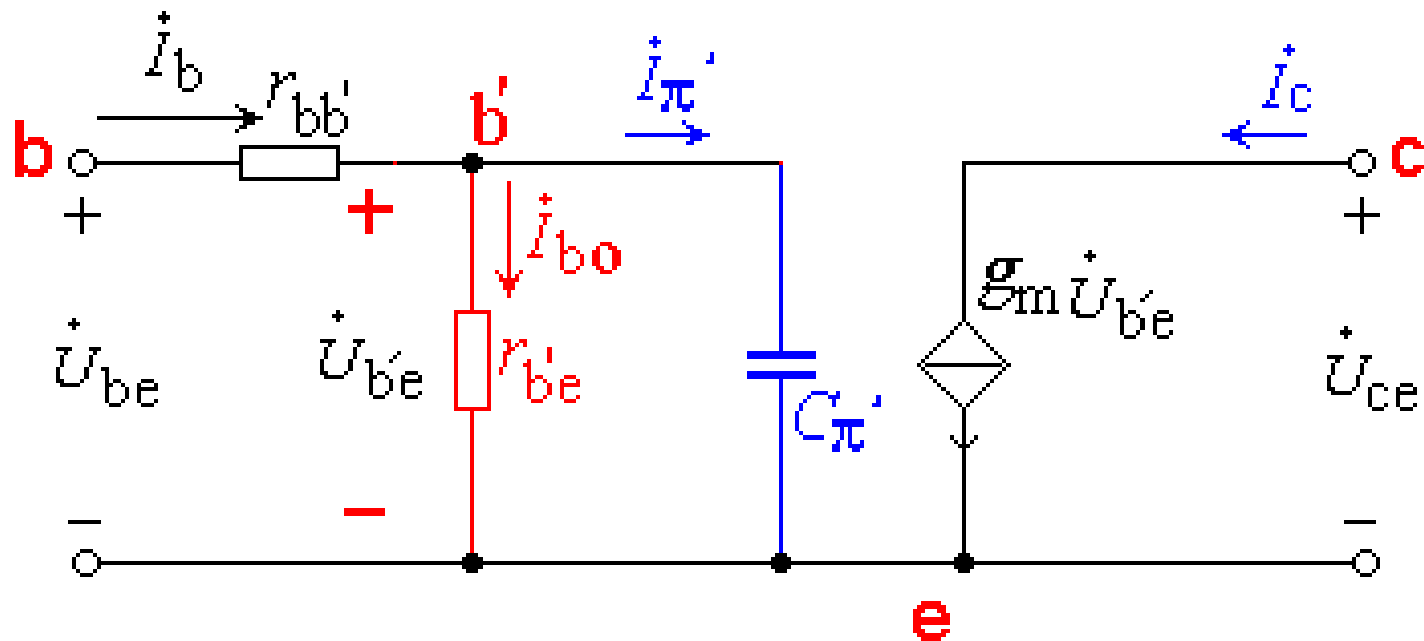
$$C_{\mu''} = \frac{1+K}{K} C_{\mu} \quad \because C_{\mu''} \ll C'_{\mu} \quad \text{其影响可忽略}$$

令： $C'_{\pi} = C_{\pi} + C'_{\mu}$ 得： 高频简化模型



BJT的混合π模型

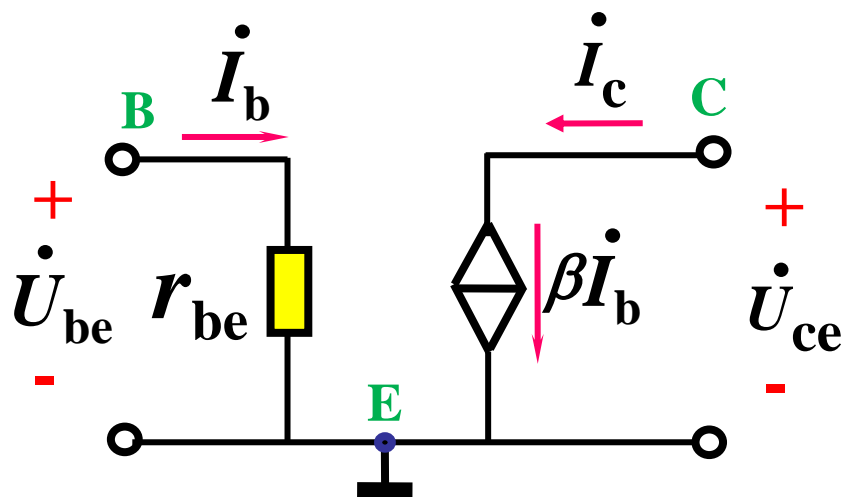
2、混合 π 模型的单向化 — BJT简化混合 π 模型



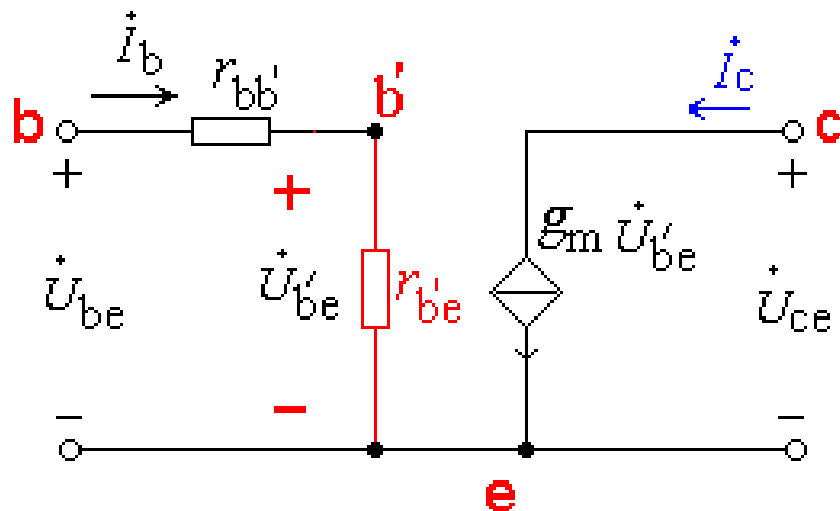
- **混合 π 模型**由结构而建立，形状像 Π ，参数量纲各不相同。

3、混合 π 模型的主要参数

混合 π 模型主要参数的计算依据:



h 参数模型



混合 π 模型

- 混合 π 模型与 h 参数模型在低频时是等效的。

3、混合 π 模型的主要参数

1) 导出 g_m

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

$$i_c = \beta_0 i_b = g_m \dot{U}_{b'e} \quad \text{而} \quad \dot{U}_{b'e} = i_b r_{b'e}$$

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

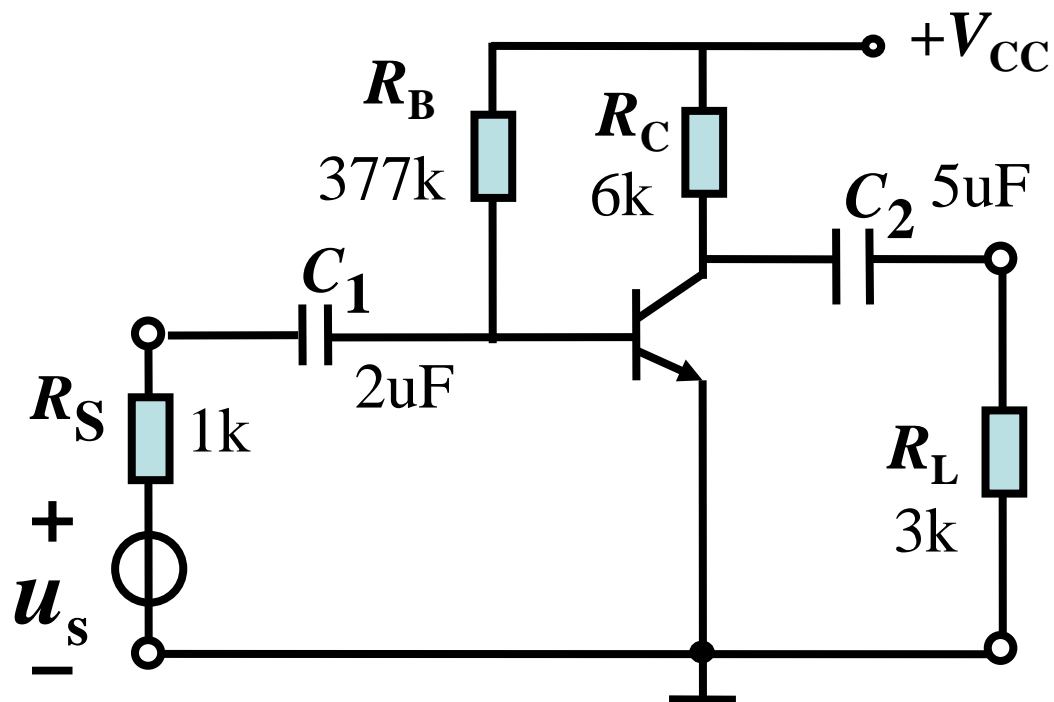
2) 导出 C'_π

$$\text{由 } f_T = \frac{\beta_0}{2\pi r_{b'e} C_\pi} \text{ 可计算 } C_\pi$$

f_T 和 C_μ 从手册中可查到

$$C'_\pi = C_\pi + C'_\mu = C_\pi + (1 + |\dot{K}|) C_\mu \quad \text{式中} \quad \dot{K} = \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}}$$

3.9.3 阻容耦合共射放大电路的频率响应



$$r_{bb'} = 100\Omega$$

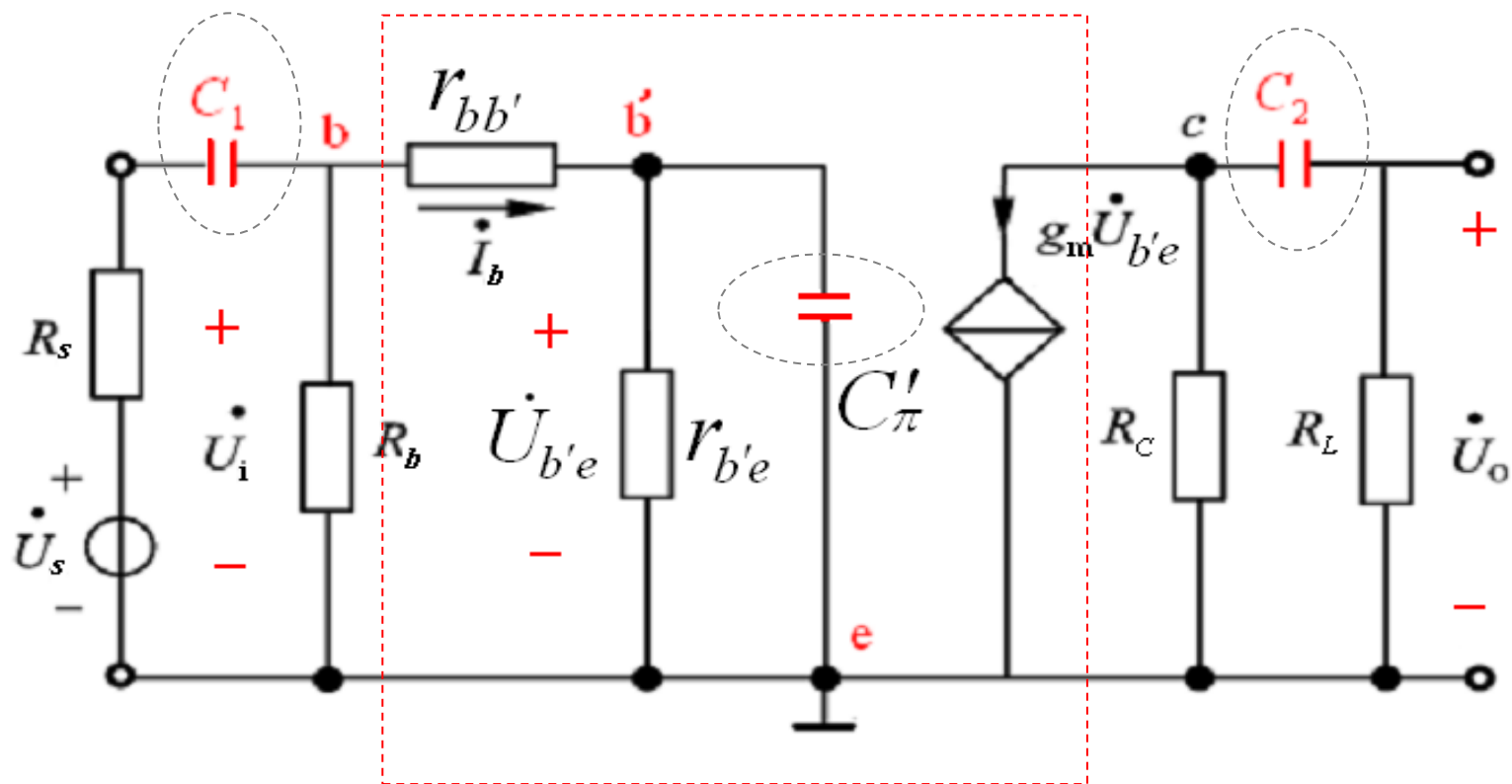
$$r_{b'e} = 900\Omega$$

$$g_m = 0.04\text{S}$$

$$C'_\pi = 500\text{pF}$$

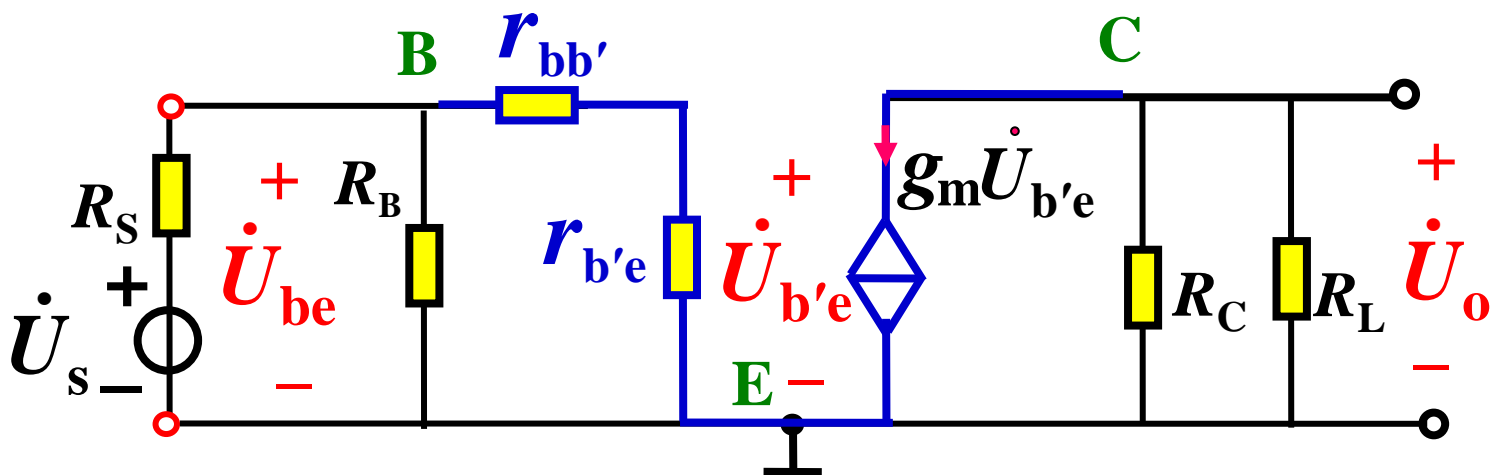
3.9.3 阻容耦合共射放大电路的频率响应

1、全频段小信号模型



共射放大电路 全频段-微变等效电路

2、中频段电压放大倍数 (C可视为短路, 结电容开路)



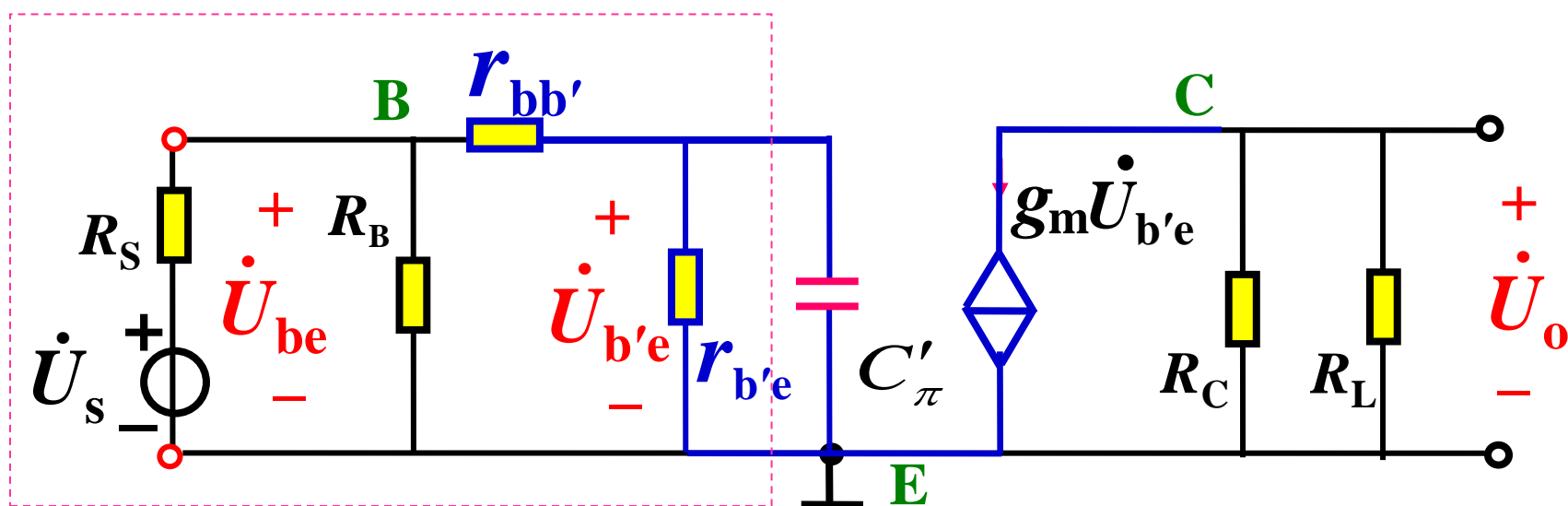
➤ 中频段源电压放大倍数:
$$\dot{A}_{usm} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{b'e}} \cdot \frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}_{be}} \cdot \frac{\dot{U}_{be}}{\dot{U}_s}$$

$$= \frac{-g_m \dot{U}_{b'e} (R_C // R_L)}{\dot{U}_{b'e}} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{R_B // r_{be}}{R_s + R_B // r_{be}}$$

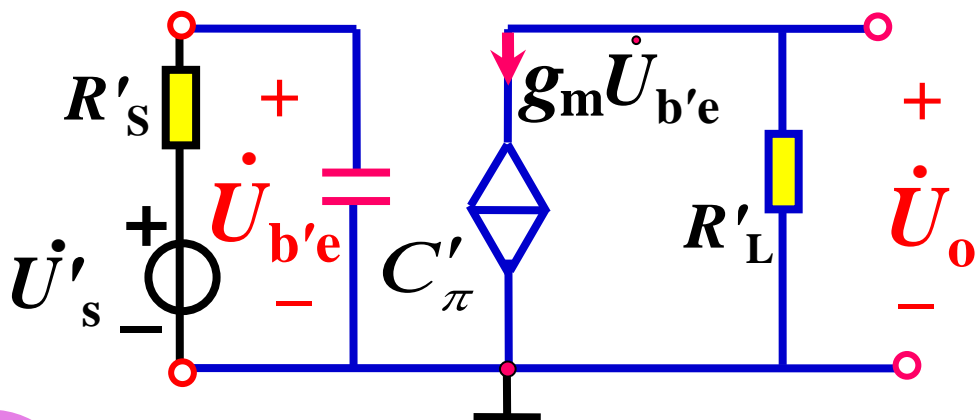
$$= -g_m R'_L \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{R_B // r_{be}}{R_s + R_B // r_{be}}$$

可知: $\varphi = -180^\circ$

3、高频电压放大倍数 (C 视为短路, 仅考虑 C'_π 的影响)



共射放大电路 高频段-微变等效电路



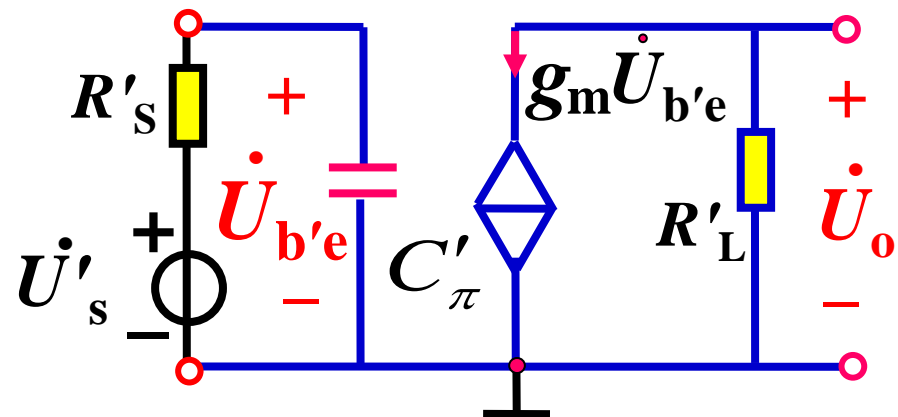
共射放大电路 高频段-戴维宁等效电路

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

$$U'_s = \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{R_B // r_{be}}{R_s + R_B // r_{be}} U_s$$

3、高频电压放大倍数

➤ 高频段源电压放大倍数



共射放大电路 高频段-戴维宁等效电路

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

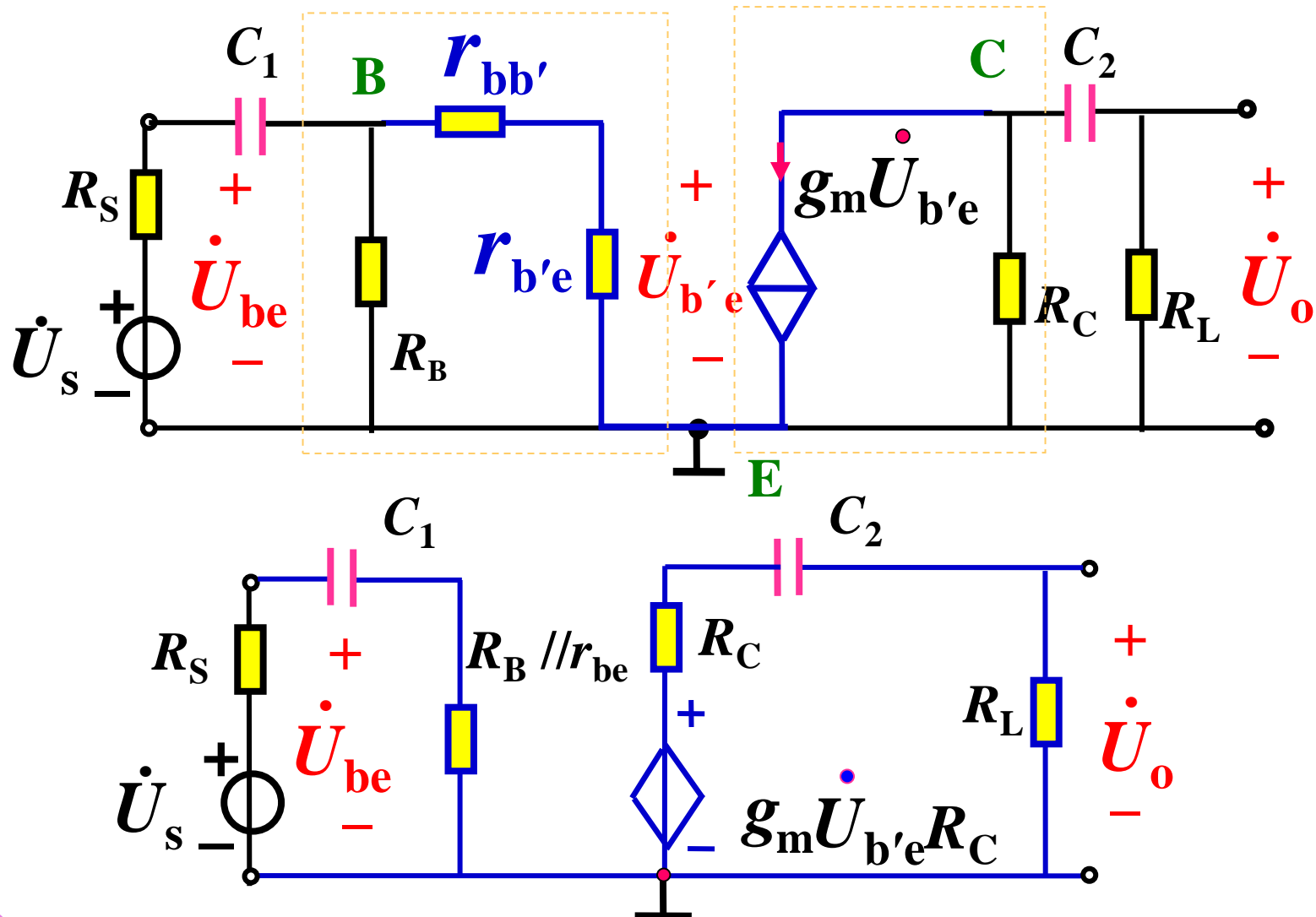
$$= -g_m R'_L \cdot \frac{1}{1 + j\omega C'_\pi R'_s} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{R_B // r_{be}}{R_s + R_B // r_{be}}$$

$$= \dot{A}_{sm} \cdot \frac{1}{1 + j\omega C'_\pi R'_s} = \dot{A}_{sm} \cdot \frac{1}{1 + j \frac{f}{f_H}}$$

➤ 上限截止频率

$$f_H = \frac{1}{2\pi R'_s C'_\pi} = 0.64 \text{ MHz}$$

4、低频段电压放大倍数 （结电容视为开路；仅考虑耦合电容影响）



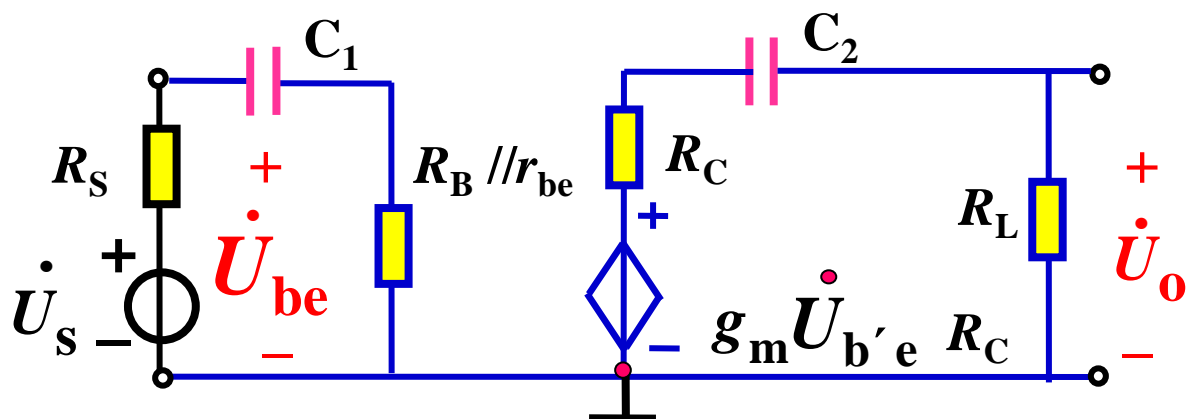
共射放大电路 低频段-戴维宁等效电路

4、低频段电压放大倍数

$$\dot{A}_{usL} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{b'e}} \cdot \frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}_{be}} \cdot \frac{\dot{U}_{be}}{\dot{U}_s} = \dot{A}_{sm} \cdot \frac{j \frac{f}{f_{L1}}}{1 + j \frac{f}{f_{L1}}} \cdot \frac{j \frac{f}{f_{L2}}}{1 + j \frac{f}{f_{L2}}}$$

$$= \frac{-g_m R_C R_L j \omega C_2}{(R_C + R_L) j \omega C_2 + 1} \cdot \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{R_B // r_{be} j \omega C_1}{(R_s + R_B // r_{be}) j \omega C_1 + 1}$$

$$= \frac{j \omega C_2 (R_C + R_L)}{(R_C + R_L) j \omega C_2 + 1} \cdot (-g_m R'_L) \frac{r_{b'e}}{r_{be}} \cdot \frac{\frac{R_B // r_{be}}{R_s + R_B // r_{be}} j \omega C_1 (R_s + R_B // r_{be})}{(R_s + R_B // r_{be}) j \omega C_1 + 1}$$



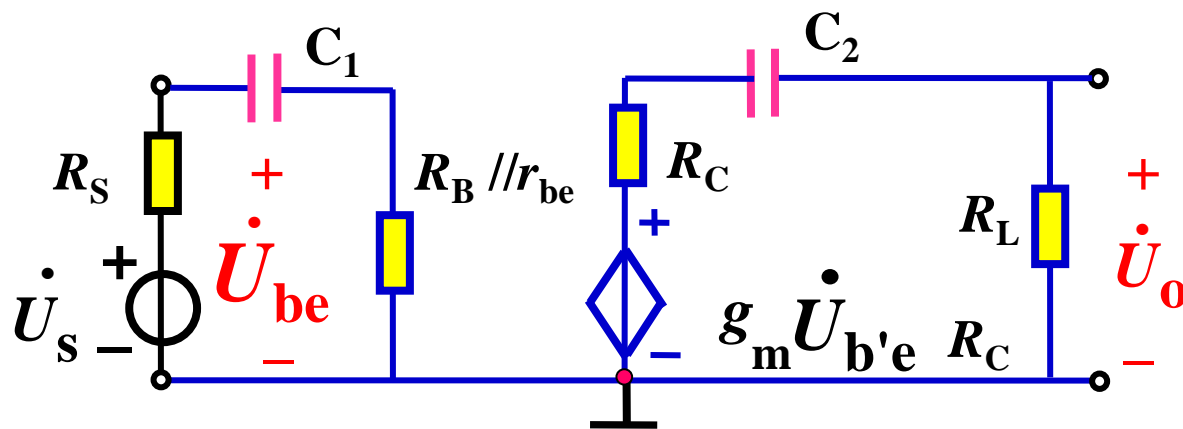
共射放大电路 低频段-戴维宁等效电路

4、低频段电压放大倍数

$$\dot{A}_{suL} = \dot{A}_{sm} \cdot \frac{j \frac{f}{f_{L1}}}{1 + j \frac{f}{f_{L1}}} \cdot \frac{j \frac{f}{f_{L2}}}{1 + j \frac{f}{f_{L2}}}$$

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi(R_s + R_i)C_1} = 40Hz$$

$$f_{L2} = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C_2} = 3.5Hz$$



共射放大电路 低频段-戴维宁等效电路

5、单管共射放大电路频率特性—表达式

$$\dot{A}_{us} = \dot{A}_{usm} \frac{j f / f_{L1}}{1 + j f / f_{L1}} \cdot \frac{j f / f_{L2}}{1 + j f / f_{L2}} \cdot \frac{1}{1 + j f / f_H}$$

或：

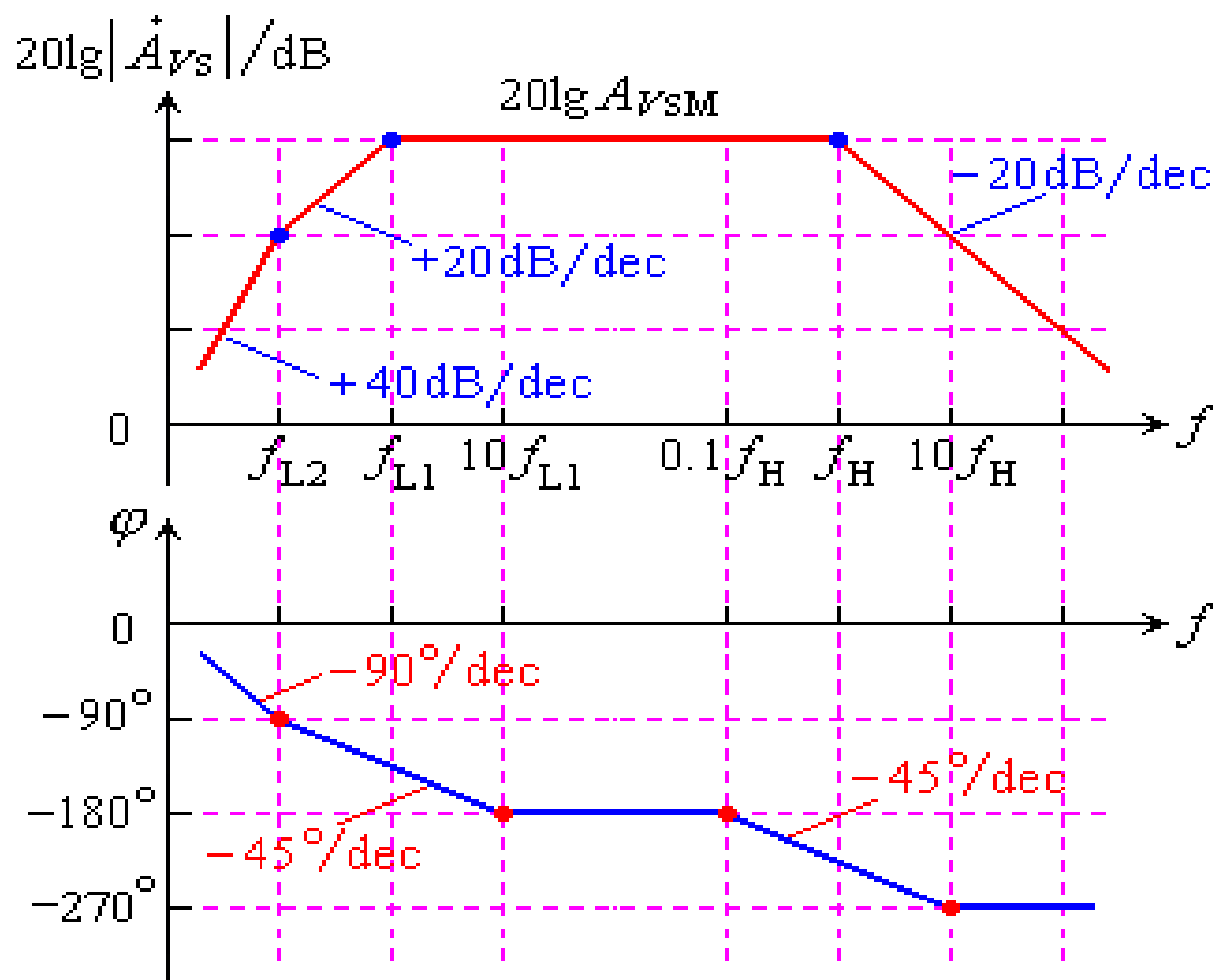
$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{A}_{usm}}{(1 - j f_{L1} / f) \cdot (1 - j f_{L2} / f) \cdot (1 + j f / f_H)}$$

式中：

$$\begin{cases} f_{L1} = \frac{1}{2\pi(R_s + R_i)C_1} & f_H = \frac{1}{2\pi R'_s C'_\pi} \\ f_{L2} = \frac{1}{2\pi(R_c + R_L)C_2} \end{cases}$$

- 结论：引起放大倍数降低的原因，在低频段是耦合电容和旁路电容，在高频段是三极管的结电容。

6、单管共射放大电路频率特性—Bode图



- 与中频段相比，放大电路在低/高频段会发生线性失真。

例3：某电路电压放大倍数 $\dot{A}_u = \frac{-10jf}{(1+j\frac{f}{10})(1+j\frac{f}{10^5})}$

试求解：

1) $\dot{A}_u = ?$ $f_L = ?$ $f_H = ?$

2) 画出波特图。

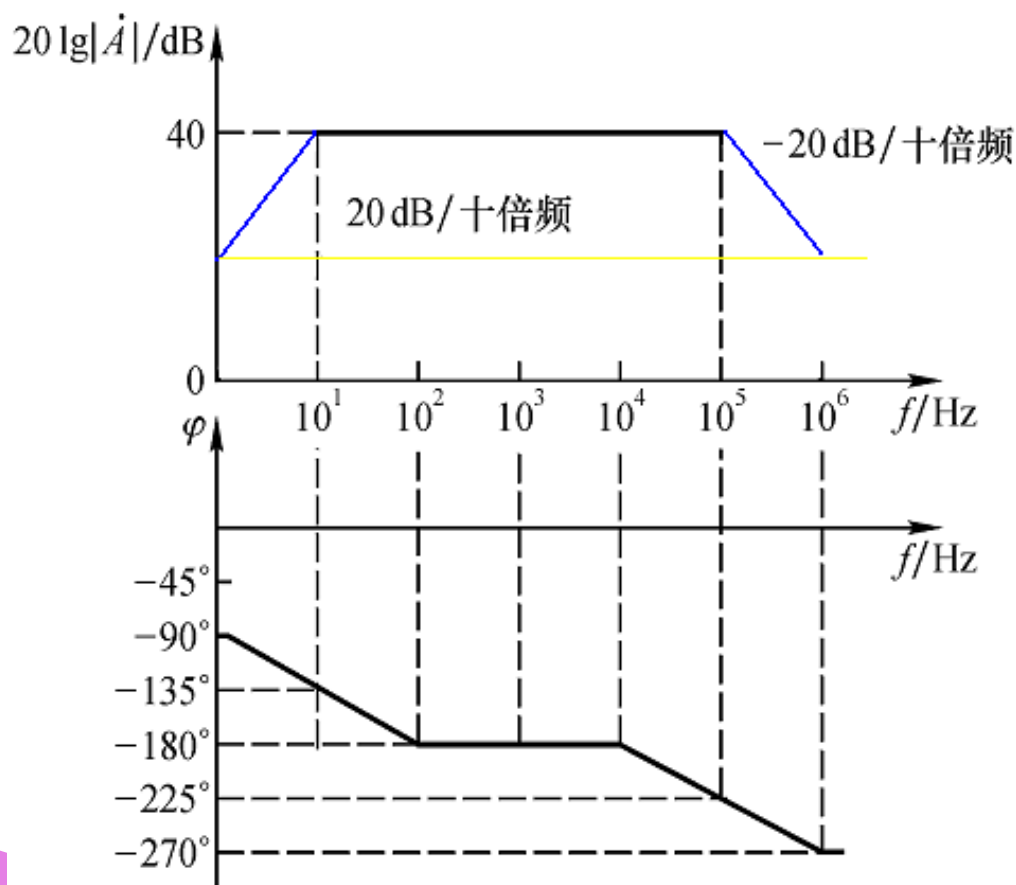
[解] 1) 变换电压放大倍数的表达式为标准形式
求解 \dot{A}_u 、 f_L 、 f_H

$$\dot{A}_{us} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{j f / f_L}{1 + j f / f_L} \cdot \frac{1}{1 + j f / f_H}$$

例3 [解] 1)

电压放大倍数的标准形式: $\dot{A}_{us} = \dot{A}_{usm} \cdot \frac{j f / f_L}{1 + j f / f_L} \cdot \frac{1}{1 + j f / f_H}$

2) Bode图



$$\dot{A}_u = \frac{-100 \cdot j \frac{f}{10}}{(1 + j \frac{f}{10})(1 + j \frac{f}{10^5})}$$

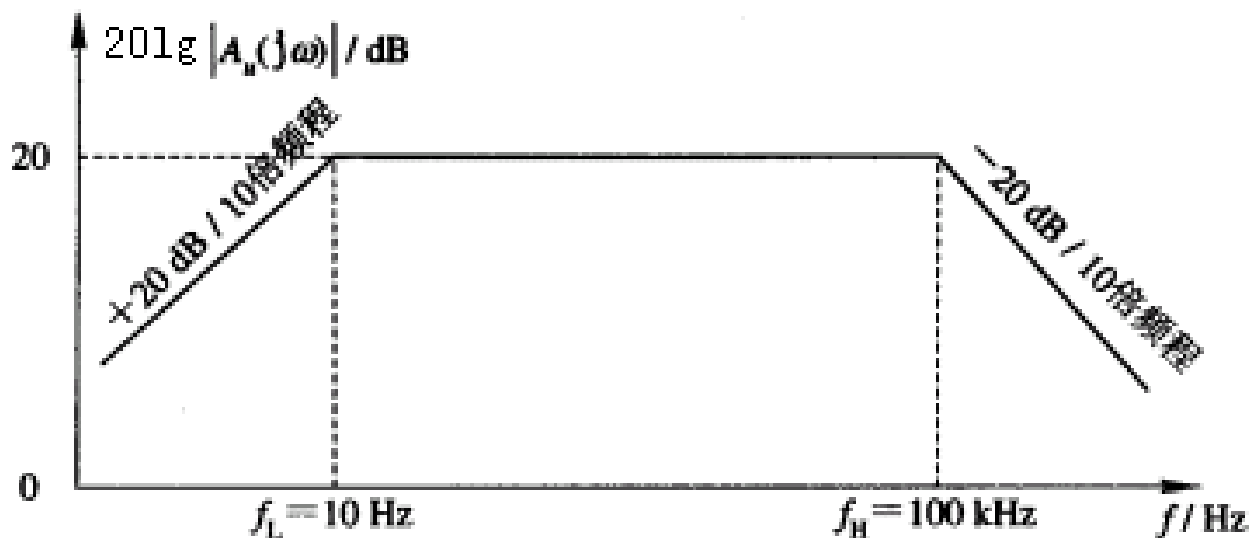
$$\dot{A}_{um} = -100$$

$$f_L = 10 \text{ Hz}$$

$$f_H = 10^5 \text{ Hz}$$

例4 某放大电路的频率响应如图所示。

- 1) 该电路的中频放大倍数 $|A_{um}| = ?$
- 2) 该电路的增益频率响应 $A_U(j\omega)$ 表达式如何?
- 3) 若已知其输出电压最大不失真动态范围为 $U_{om} = 10V$,
当输入信号 $U_i = 0.1\sin(2\pi \times 1.5 \times 10^2)t + 2\sin(2\pi \times 50 \times 10^3)t(V)$ 时,
试判断输出信号是否会失真? 说明理由。

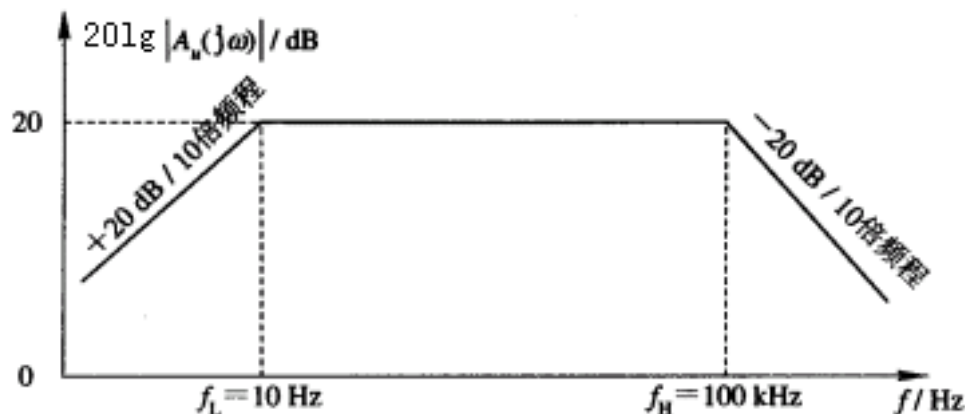


[例4] 解 1) $|\dot{A}_{um}| = 10$

$$2) \dot{A}_u(j\omega) = \dot{A}_{um} \frac{j \frac{f}{f_L}}{(1 + j \frac{f}{f_L})(1 + j \frac{f}{f_H})} = \frac{10 \cdot j \frac{f}{10}}{(1 + j \frac{f}{10})(1 + j \frac{f}{10^5})}$$

3) 输出电压会失真。

输入信号中有两个频率成分150Hz和50KHz，这两种信号的放大倍数均为10，所以幅度为2V的信号被放大后将超过最大不失真输出幅度 $\sqrt{2}U_{om} = 14V$ 而产生非线性失真。



3.9.4 多级放大电路的频率响应

1、对放大电路频率响应的要求

要实现不失真（幅值失真与相位失真）放大，

希望 f_L 要小于信号频率的最低频分量，

f_H 要高于信号频率的最高频分量。

2、放大电路频率响应的改善

- 为了改善低频响应，最好采用直接耦合；
- 为了改善高频响应，可以采用高频管或共基电路等；

3、放大电路的增益带宽积

$$|A_{usm} \cdot f_{BW}| \approx |A_{usm} \cdot f_H| \approx \frac{1}{2\pi(r'_{bb} + R_s)C_\mu} = \text{常数}$$

1.多级放大器频率特性

$$A_u(j\omega) = A_{u1}(j\omega)A_{u2}(j\omega)\cdots A_{un}(j\omega) = \prod_{k=1}^n A_{uk}(j\omega)$$

$$20\lg|A_u(j\omega)| = \sum_{k=1}^n 20\lg|A_{uk}(j\omega)|$$

$$= 20\lg|A_{u1}(j\omega)| + 20\lg|A_{u2}(j\omega)| + \cdots + 20\lg|A_{un}(j\omega)|$$

$$\varphi(j\omega) = \varphi_1(j\omega) + \varphi_2(j\omega) + \cdots + \varphi_k = \sum_{k=1}^n \varphi_k(j\omega)$$

1、多级放大器频率特性

1) 设单级放大器的增益表达式为:

$$\dot{A}_{uk} = \frac{\dot{A}_{umk}}{1 + j \frac{f}{f_{Hk}}}$$

2) 则总增益:

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{um1}}{1 + j \frac{f}{f_{H1}}} \times \frac{\dot{A}_{um2}}{1 + j \frac{f}{f_{H2}}} \times \cdots \times \frac{\dot{A}_{umn}}{1 + j \frac{f}{f_{Hn}}}$$

3) 幅度增益:

$$|\dot{A}_u| = \frac{|\dot{A}_{um}|}{\sqrt{[1 + (\frac{f}{f_{H1}})^2][1 + (\frac{f}{f_{H2}})^2] \cdots [1 + (\frac{f}{f_{Hn}})^2]}}$$

4) 总相位差:

$$\Delta\varphi = -\arctan(\frac{f}{f_{H1}}) - \arctan(\frac{f}{f_{H2}}) \cdots \arctan(\frac{f}{f_{Hn}})$$

2、多级放大器的上限频率 f_H

$$\text{由 } |\dot{A}_u| = \frac{|\dot{A}_{um}|}{\sqrt{[1 + (\frac{f}{f_{H1}})^2][1 + (\frac{f}{f_{H2}})^2] \cdots [1 + (\frac{f}{f_{Hn}})^2]}}$$

$$\text{当 } f = f_H \text{ 时 } \left| \frac{\dot{A}_u}{\dot{A}_{um}} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\text{则: } [1 + (\frac{f_H}{f_{H1}})^2][1 + (\frac{f_H}{f_{H2}})^2] \cdots [1 + (\frac{f_H}{f_{Hn}})^2] = 2$$

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

3、多级放大器的下限频率 f_L

设单级放大器的低频增益为：
$$\dot{A}_{uk} = \frac{\dot{A}_{uIk}}{1 - j \frac{f_{Lk}}{f}}$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{A}_{uI1}}{1 - j \frac{f_{L1}}{f}} \times \frac{\dot{A}_{uI2}}{1 - j \frac{f_{L2}}{f}} \times \dots \times \frac{\dot{A}_{uIn}}{1 - j \frac{f_{Ln}}{f}}$$

$$\Delta\varphi = \arctan \frac{f_{L1}}{f} + \arctan \frac{f_{L2}}{f} + \dots + \arctan \frac{f_{Ln}}{f}$$

$$\text{当 } f = f_L \text{ 时 } \left| \frac{\dot{A}_{usL}}{\dot{A}_{usm}} \right| = \prod_{k=1}^n \frac{f / f_{LK}}{\sqrt{1 + (f / f_{LK})^2}} = \prod_{k=1}^n \frac{1}{\sqrt{1 + (f_{LK} / f)^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$\text{则: } f_L \approx \sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + \dots + f_{Ln}^2}$$

例5：已知某电路的幅频特性如图所示，试问：

- 1) 该电路的耦合方式；
- 2) 该电路由几级放大电路组成；
- 3) 当 $f = 10^4 \text{Hz}$ 时，附加相移为多少？
当 $f = 10^5$ 时，附加相移又约为多少？
- 4) 试写出 A_u 的表达式，并近似估算该电路的上限频率 f_H

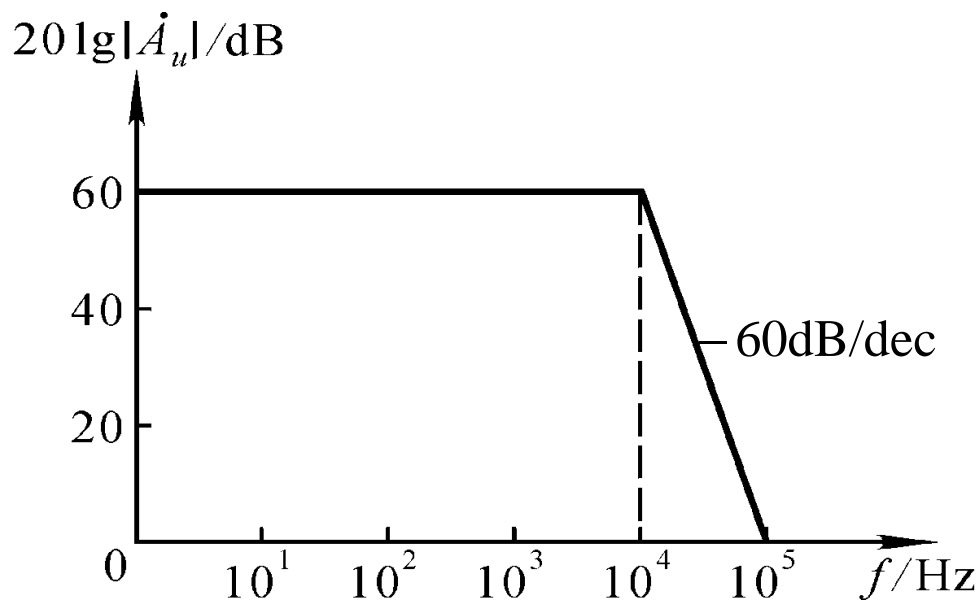
答案：

1)

因为下限截止频率为0，
所以为直接耦合电路；

2)

因为在高频段幅频特性为
-60dB/十倍频，
所以电路为三级放大电路；



例5 3) 当 $f = 10^4 \text{Hz}$ 时, 附加相移为多少?

当 $f = 10^5$ 时, 附加相移又约为多少?

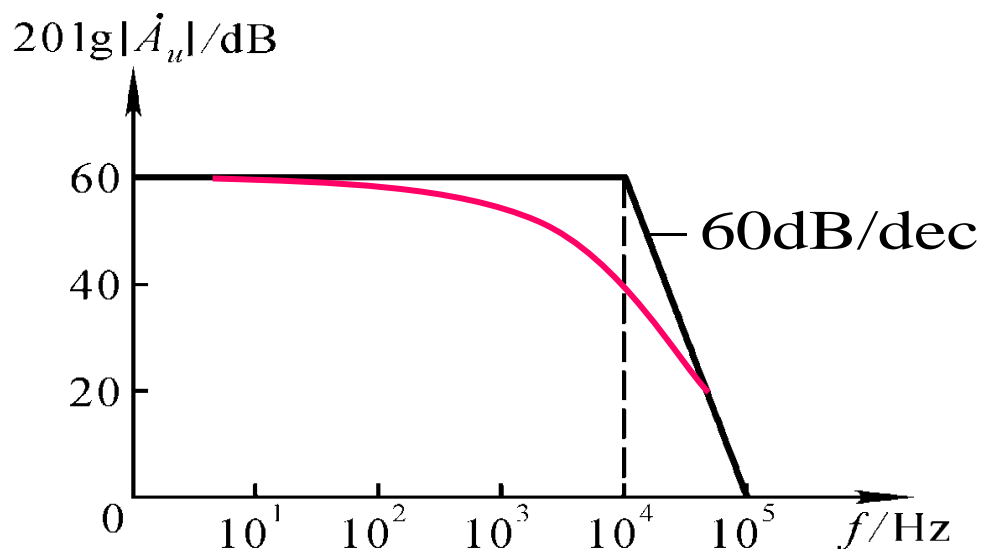
4) 试写出 A_u 的表达式, 并近似估算该电路的上限频率 f_H

解答: 3) 当 $f = 10^4 \text{Hz}$ 时, $\phi' = -135^\circ$;

当 $f = 10^5 \text{Hz}$ 时, $\phi' \approx -270^\circ$ 。

$$4) \quad \dot{A}_u = \frac{\pm 10^3}{(1 + j \frac{f}{10^4})^3}$$

$$f_H \approx \frac{f_H'}{1.1\sqrt{3}} \approx 5.2 \text{kHz}$$



◆ 论文索引

附件2-模拟电子技术混合教学模式的探讨与实践

《电子制作》2019(15):69-73.”

附件3-共射共基和共集三种基本放大电路特性的仿真研究

《电子制作》2016年23期 ISSN:1006-5059

附件4-静态工作点对放大电路性能指标的影响

《电子制作》2017(11):61-64+56.