

2.8 放大电路的频率特性

实际问题举例



“高保真”（High fidelity 或 hi-fi）——音响的最高品质



上页

下页

后退

2.8.1 频率响应和频率失真

频率响应——放大电路输入幅度相同的正弦波信号时，输出信号的幅度与相位随信号频率变化而变化的特性。

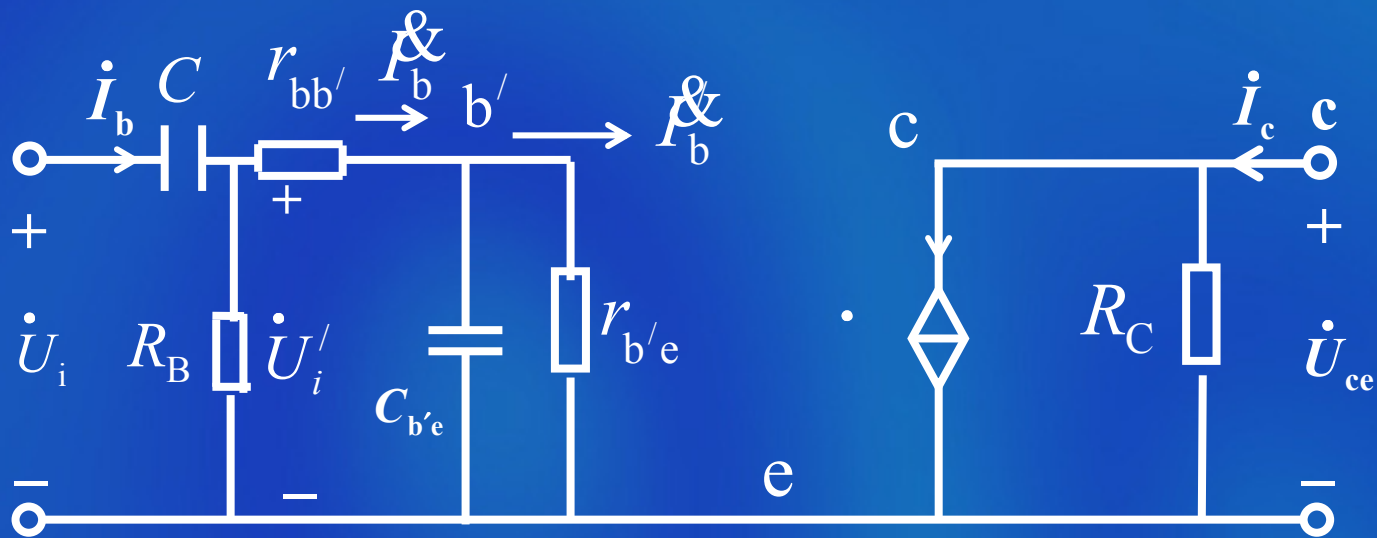
频率失真——放大电路对不同频率的输入信号，有不同的放大能力和相移，从而使输出信号产生了失真。

频率失真也称为线性失真（因为晶体管工作于放大区时出现的失真）。

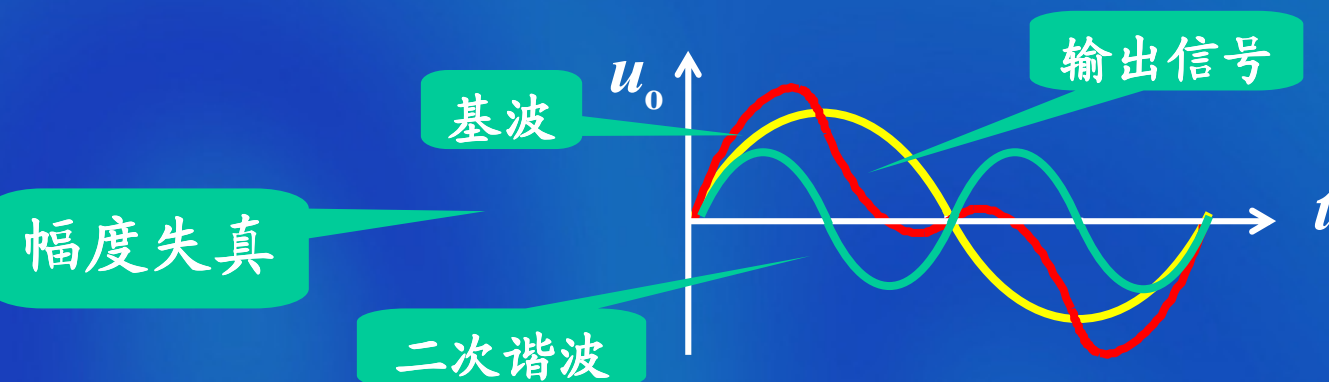
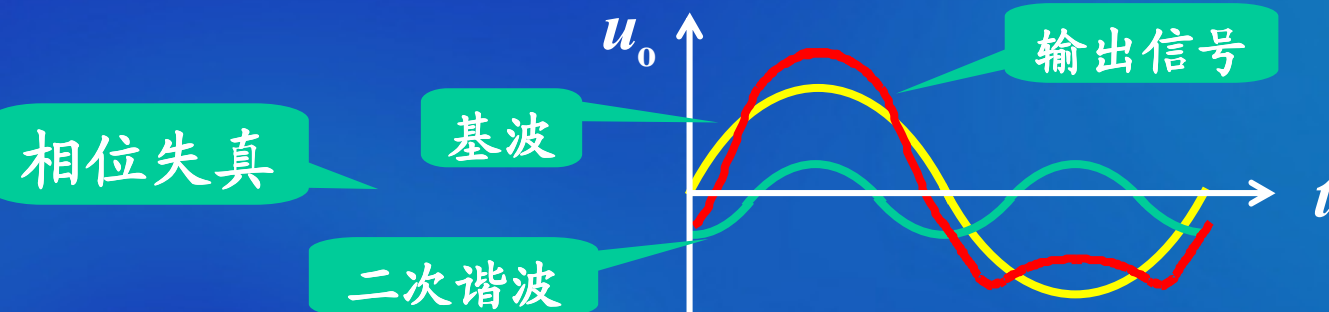
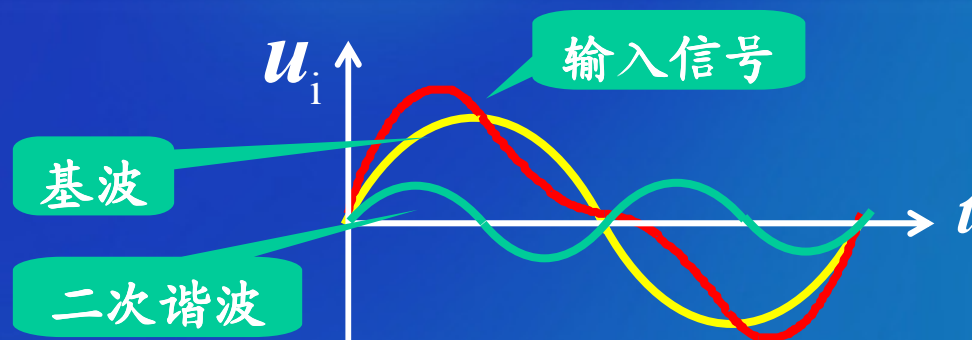
频率失真产生的原因： 放大电路存在电抗元件

$$f \downarrow \longrightarrow X_C = \frac{1}{2\pi f C} \neq 0 \uparrow U_i' \downarrow \longrightarrow U_O \downarrow$$

$$f \uparrow \longrightarrow \begin{matrix} \text{晶体管结} \\ \text{电容阻抗} \end{matrix} \downarrow \& \text{分流} \longrightarrow U_O \downarrow$$



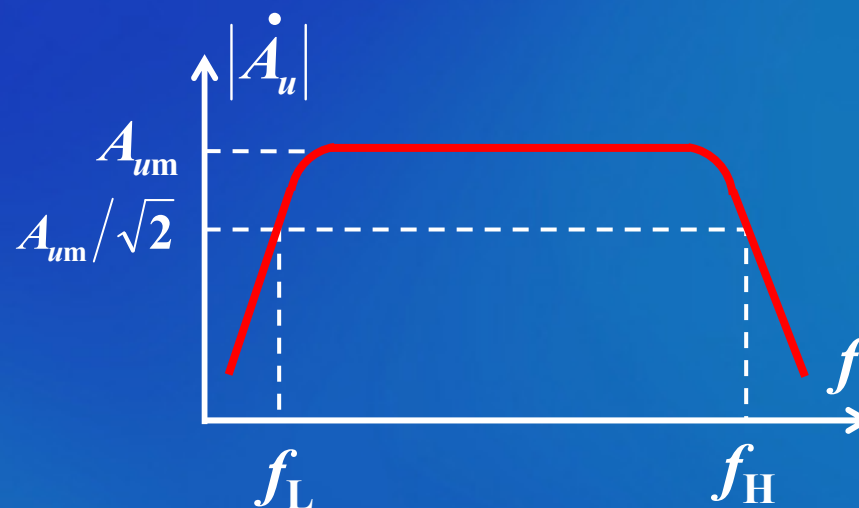
频率失真 { 相位失真
幅度失真



2.8.2 放大电路的频率响应和瞬态响应

1. 频率响应

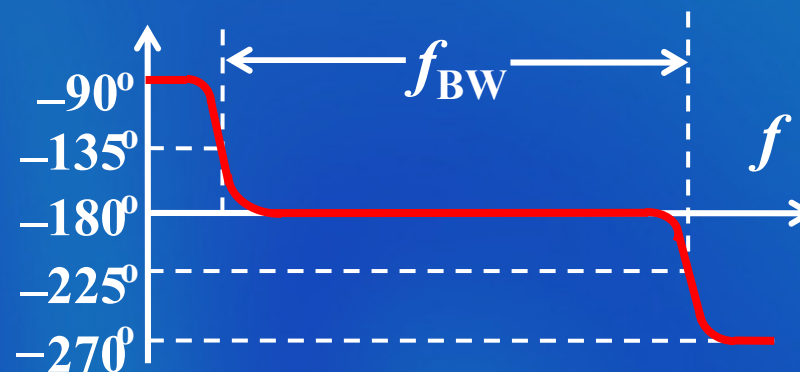
频率特性 { 幅频特性 $|\dot{A}_u| \sim f$
相频特性 $\varphi \sim f$

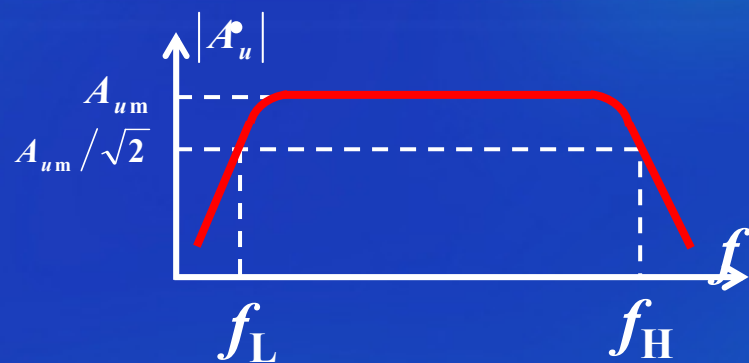


描述频率特性的参数

$$f_L、f_H、f_{bw}$$

频域法——在频率范畴内研究频率特性的方法,或称稳态法。

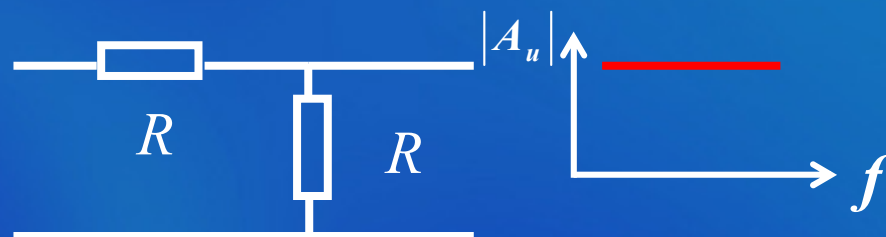




低频区 \longrightarrow 高通 $\xrightarrow{\text{等效}}$



中频区 \longrightarrow 纯电阻 $\xrightarrow{\text{等效}}$



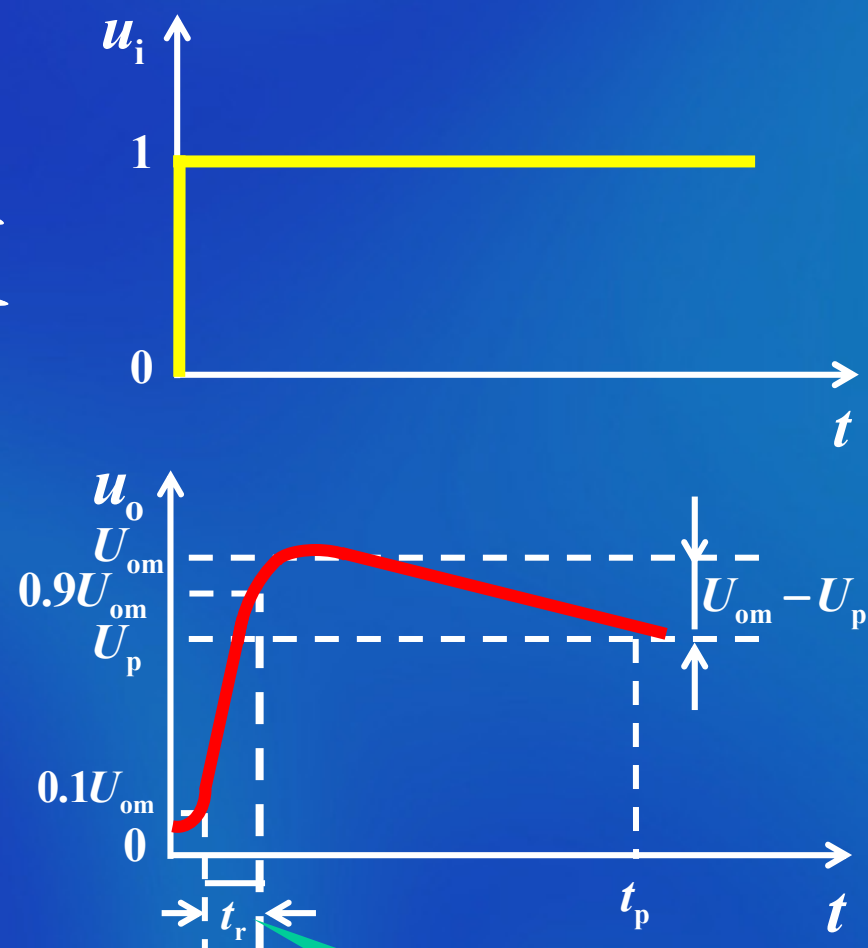
高频区 \longrightarrow 低通 $\xrightarrow{\text{等效}}$



2. 瞬态响应

瞬态响应——将一单位阶跃信号加到放大电路的输入端，观察输出信号随时间变化的情况。

瞬态法——通过分析研究放大电路瞬态响应，研究放大电路的频率特性的方法。



上升时间

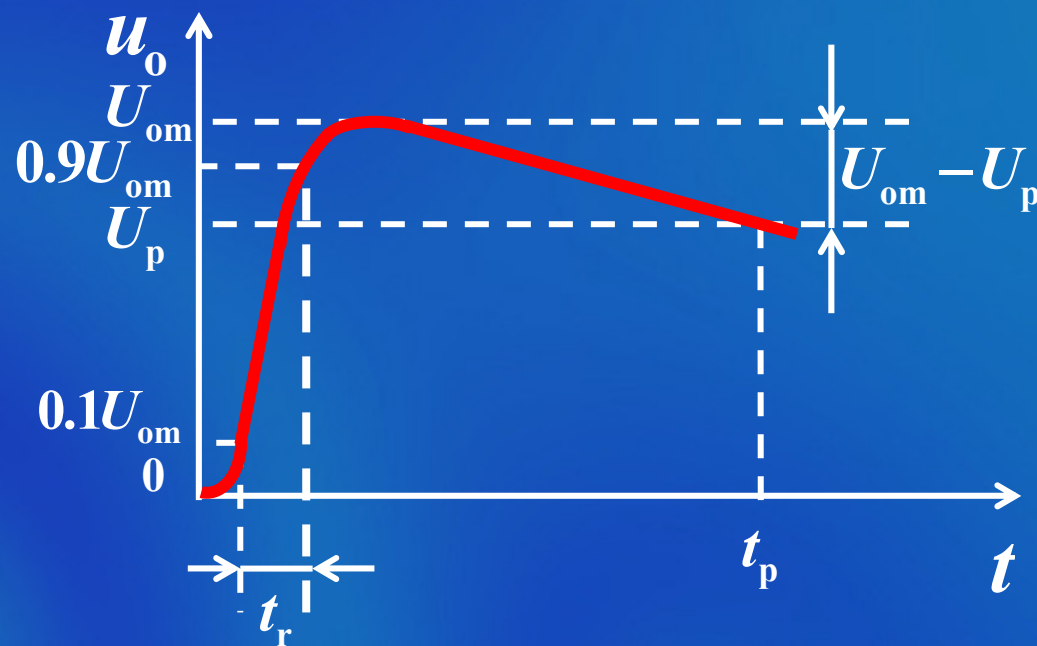
失真的表示 { 上升时间 t_r
平顶降落率 δ ($\delta = \frac{U_{om} - U_{op}}{U_{om}} \times 100\%$)

a. t_r 与 f_H 的关系

$$t_r f_H \approx 0.35$$

b. δ 与 f_L 的关系

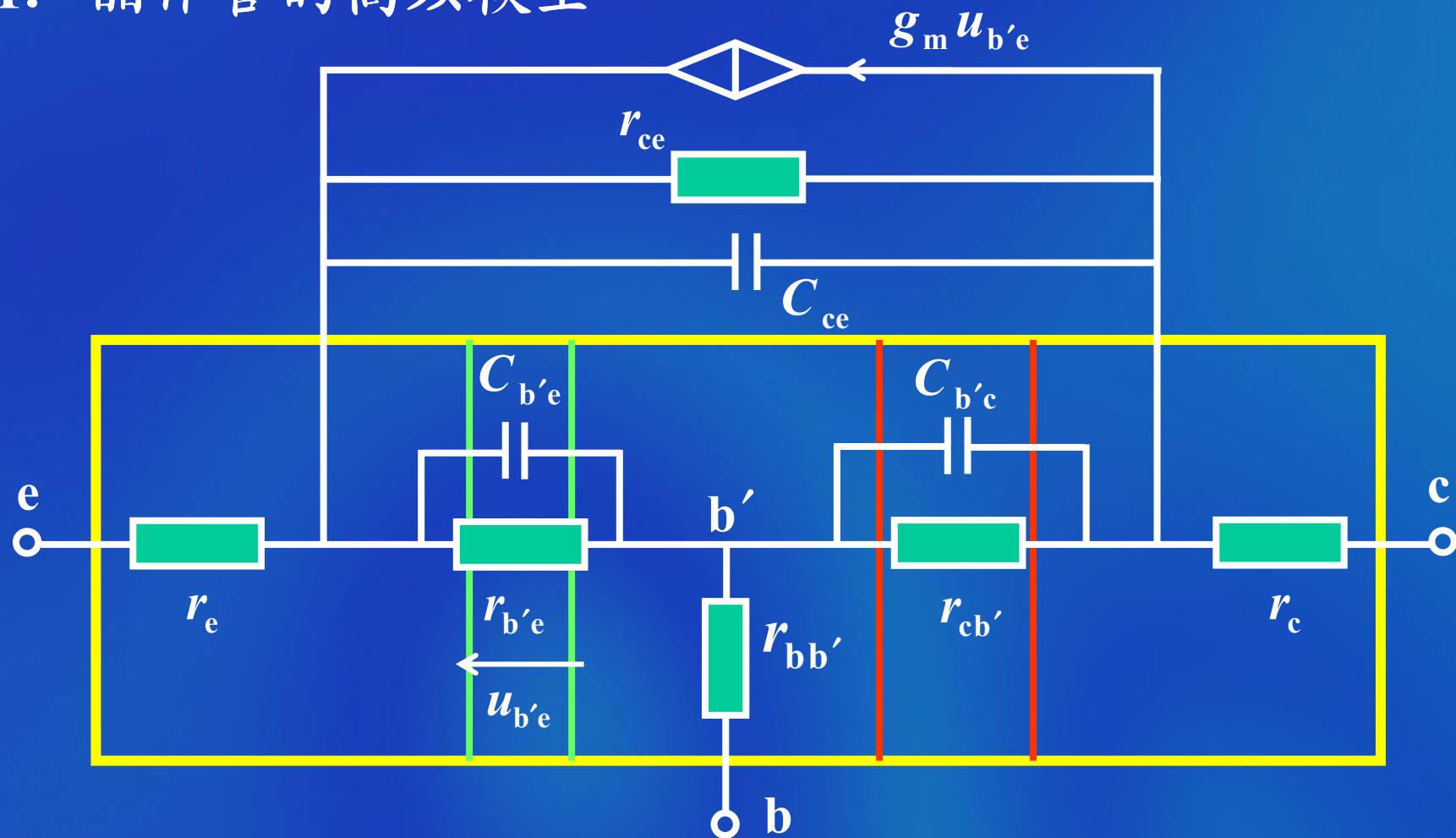
$$\delta = 2 \pi f_L t_p \times 100\%$$



2.8.3 晶体管的高频特性

1. 晶体管的高频模型

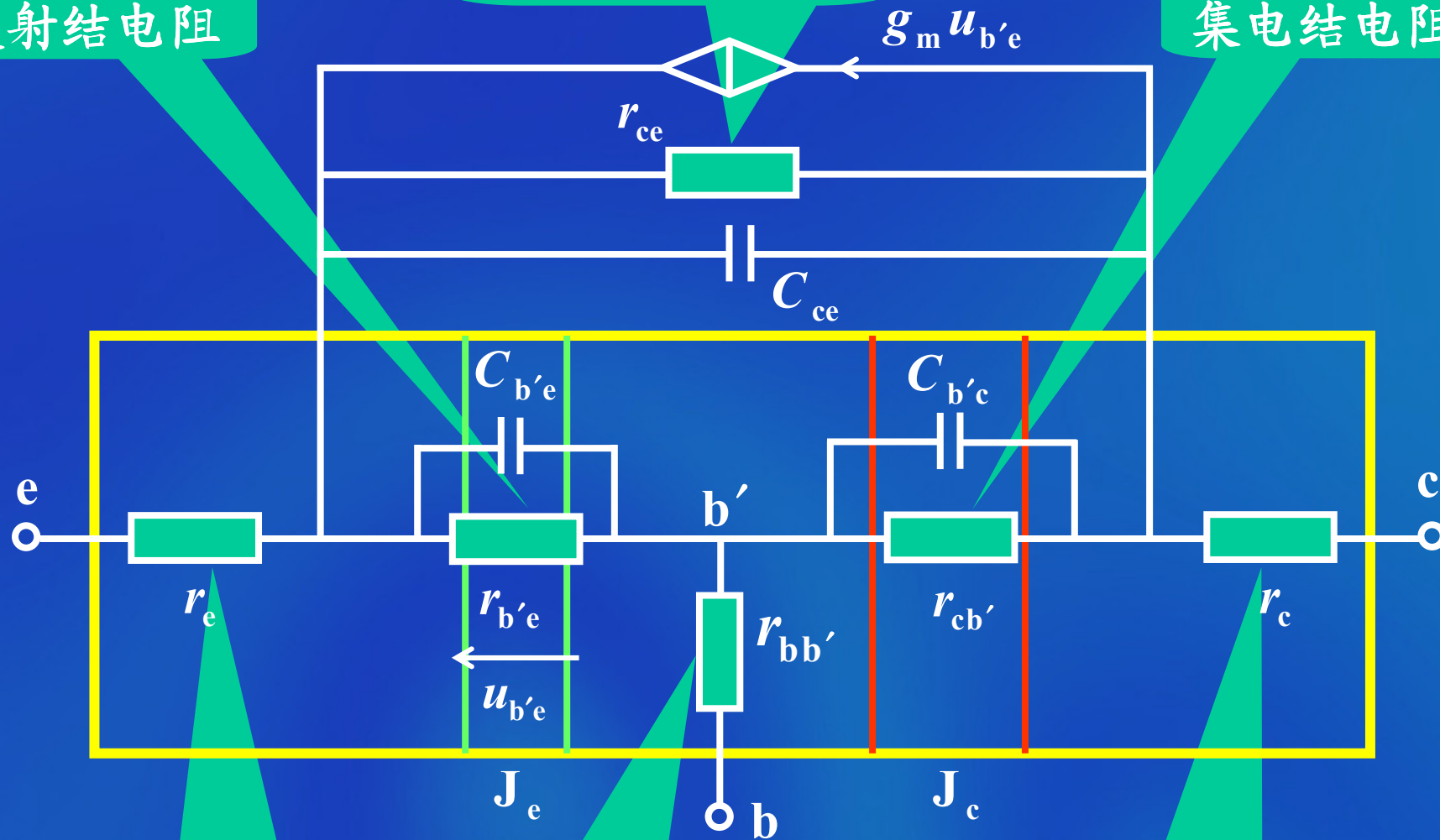
晶体管结构示意图



发射结电阻

C、E极间电阻

集电结电阻



发射区体电阻

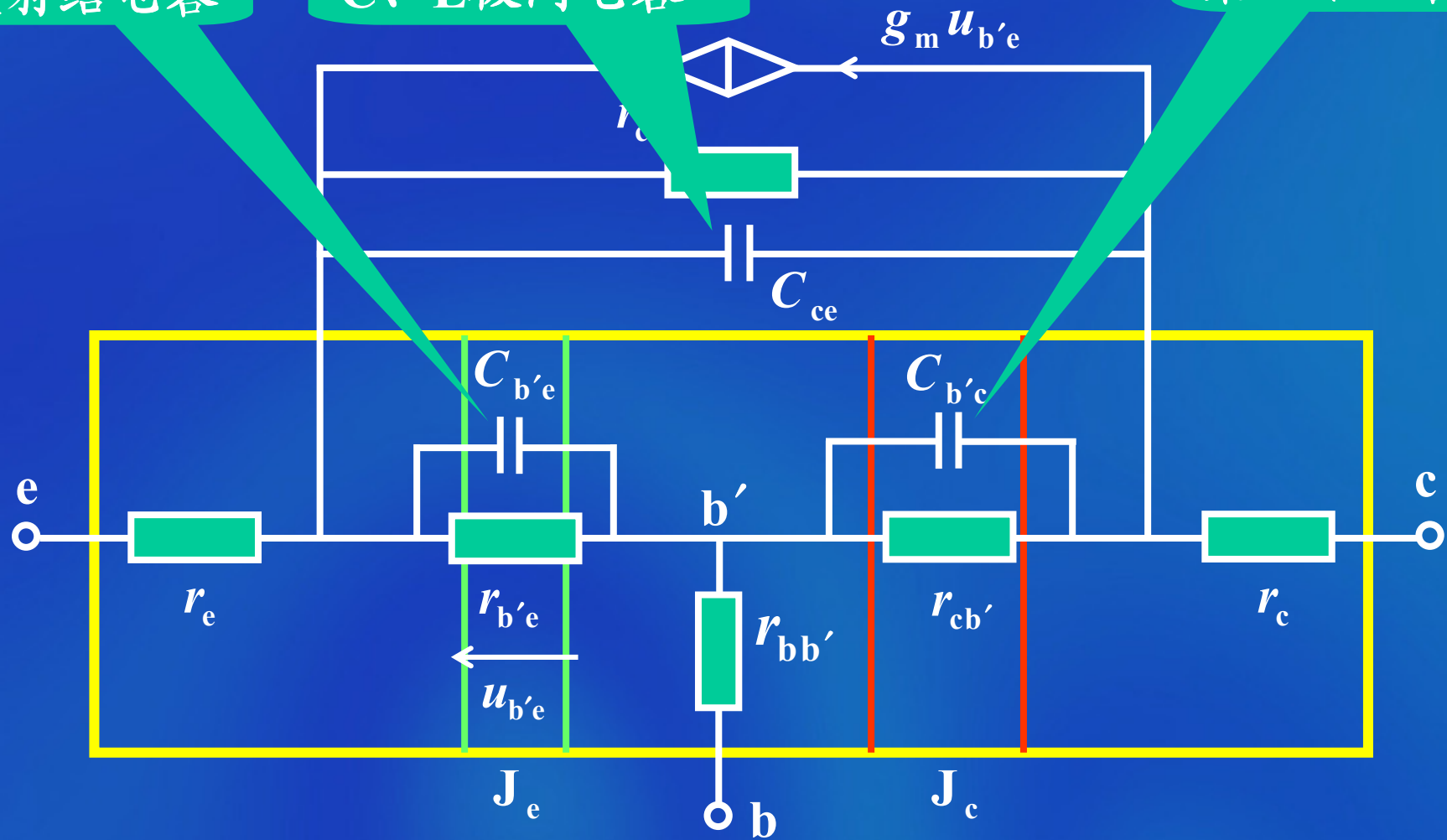
基区体电阻

集电区体电阻

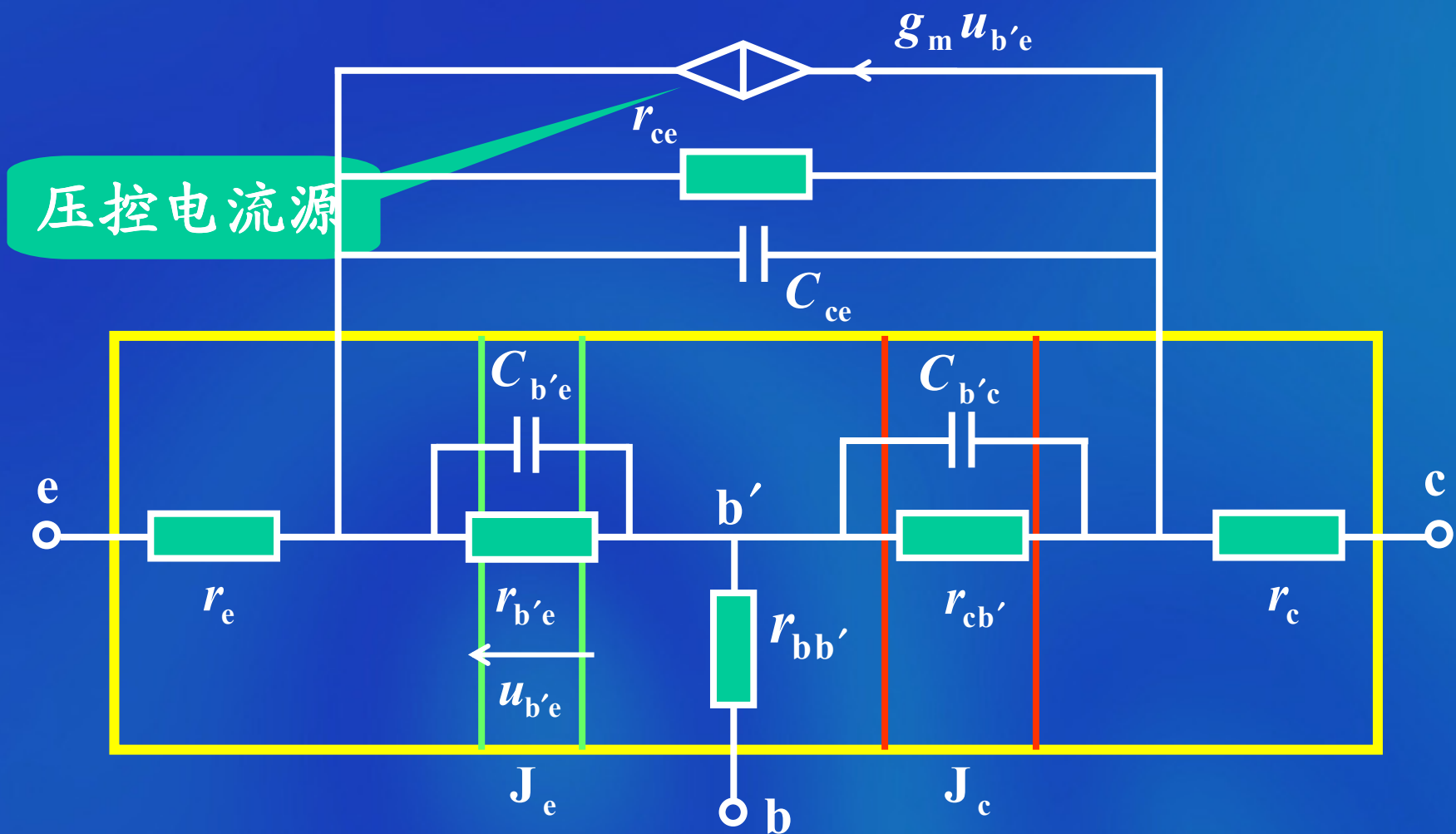
发射结电容

C、E极间电容

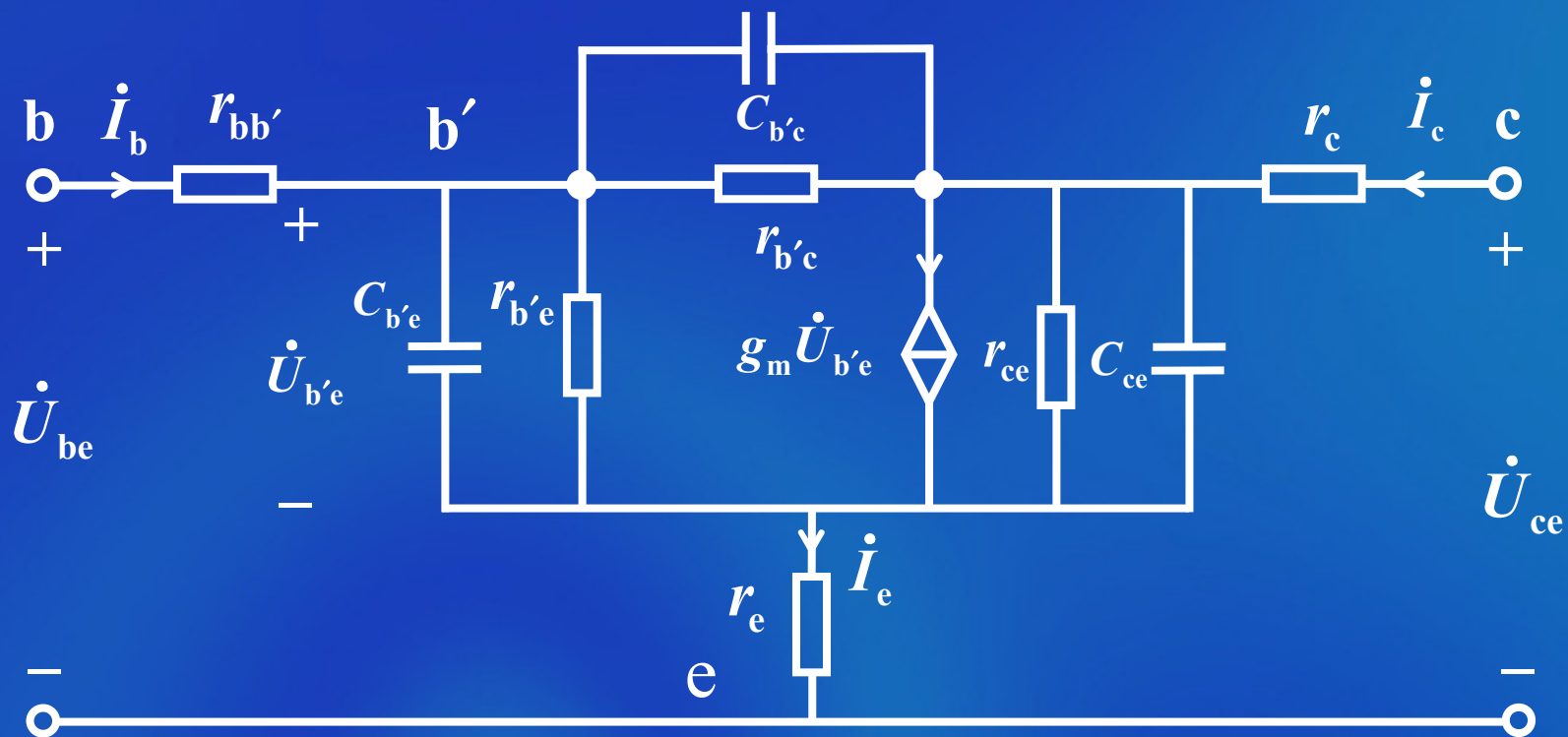
集电结电容



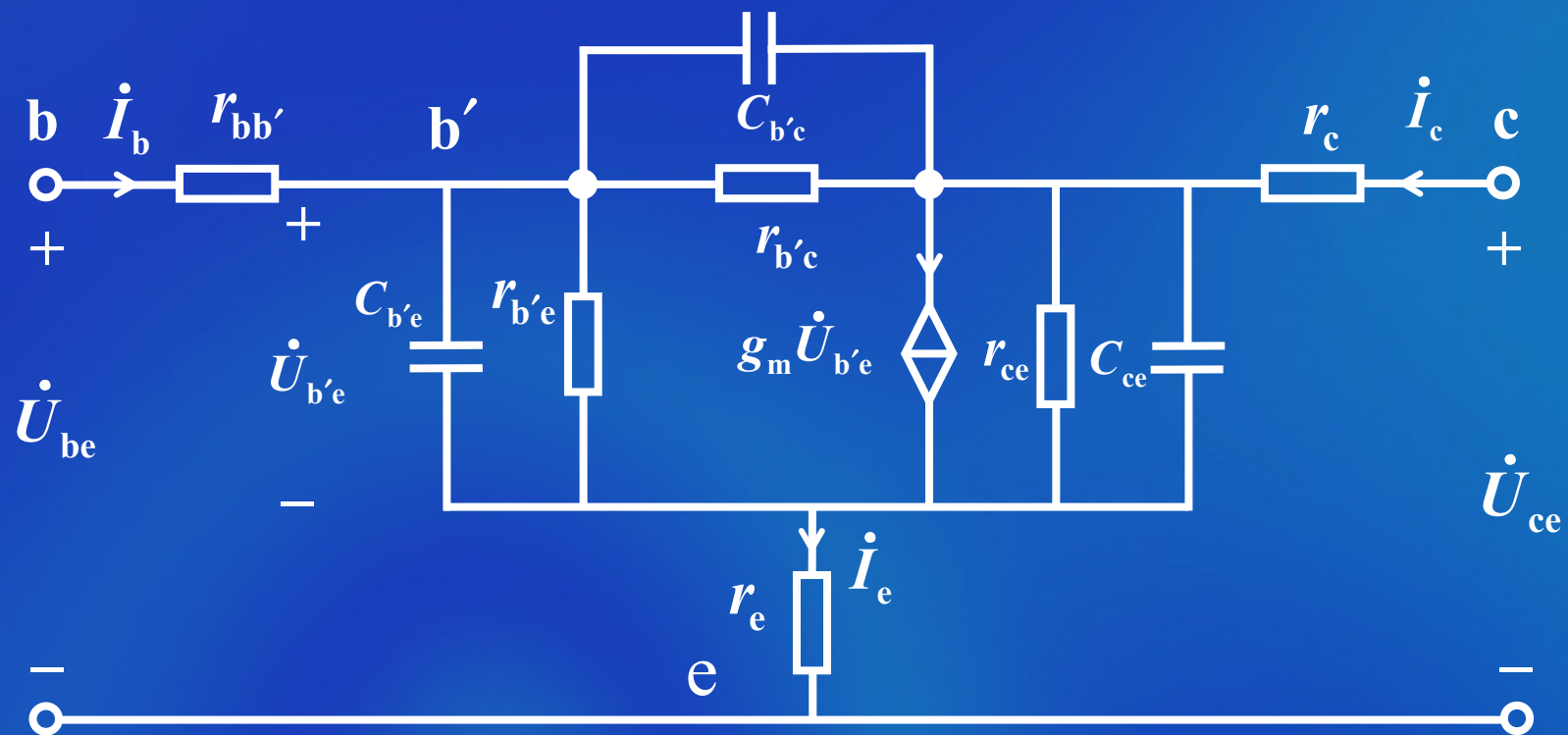
集电极电流将与发射结电阻两端的电压成正比



电路模型

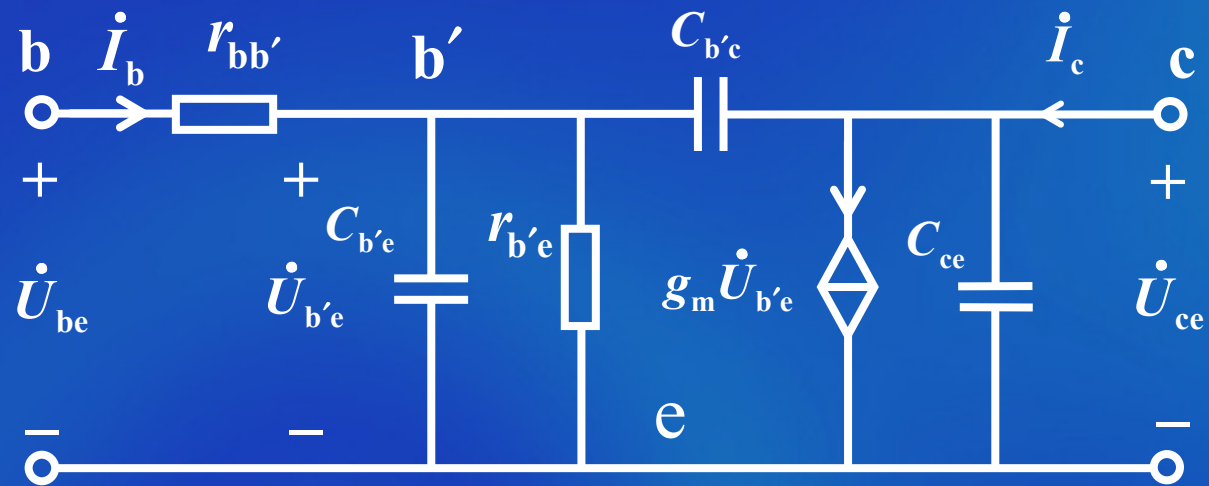


晶体管混合 π 型等效模型

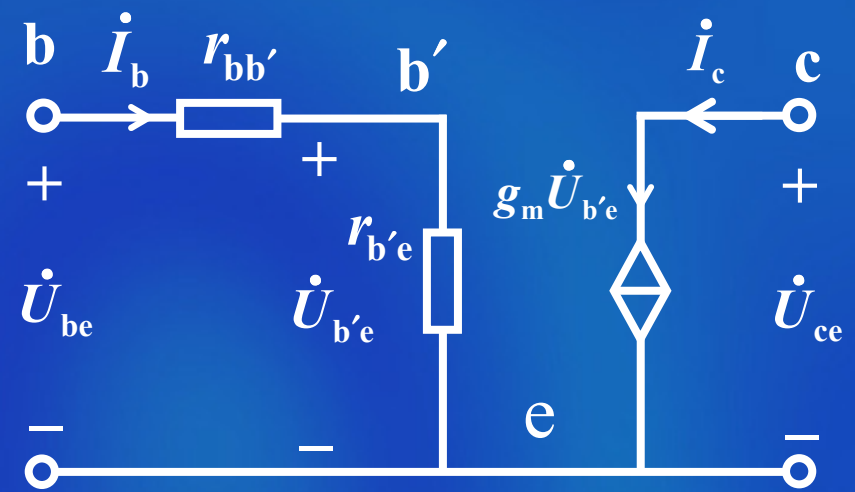
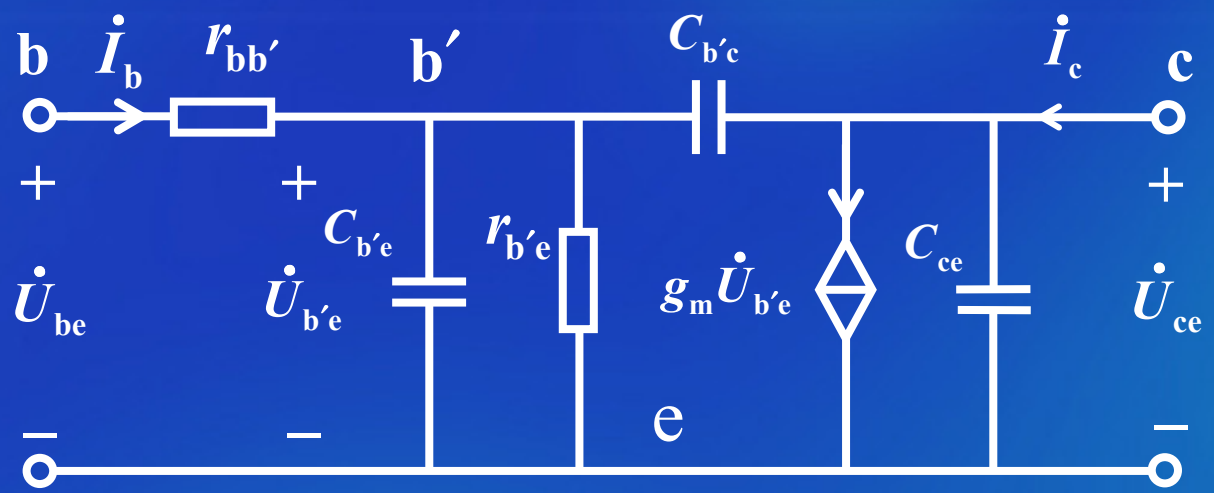


通常 r_e 、 r_c 很小， r_{ce} 、 $r_{b'c}$ 很大，均可以忽略。

简化的混合 π 型等效模型

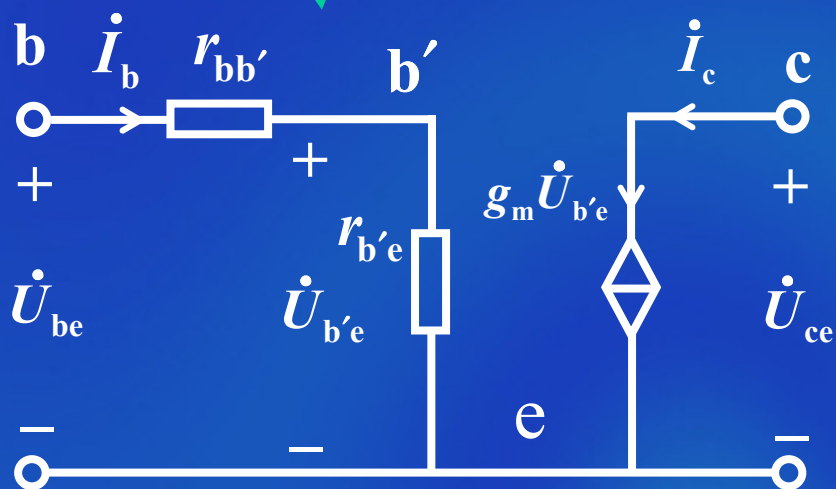


低频混合 π 型等效电路

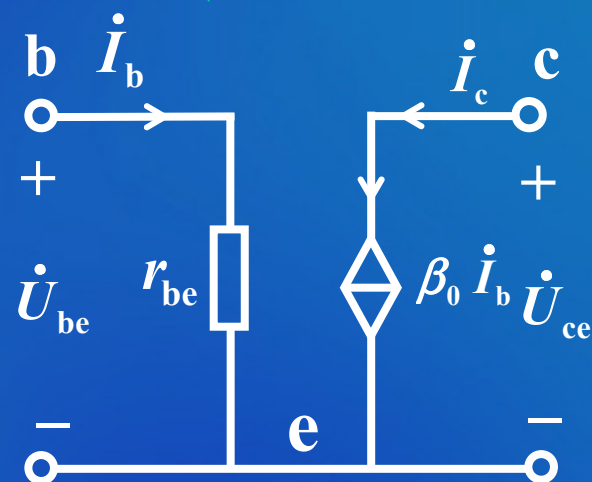


晶体管混合 π 型低频等效电路与微变等效电路的关系

低频等效电路



微变等效电路



两者等效





两者等效

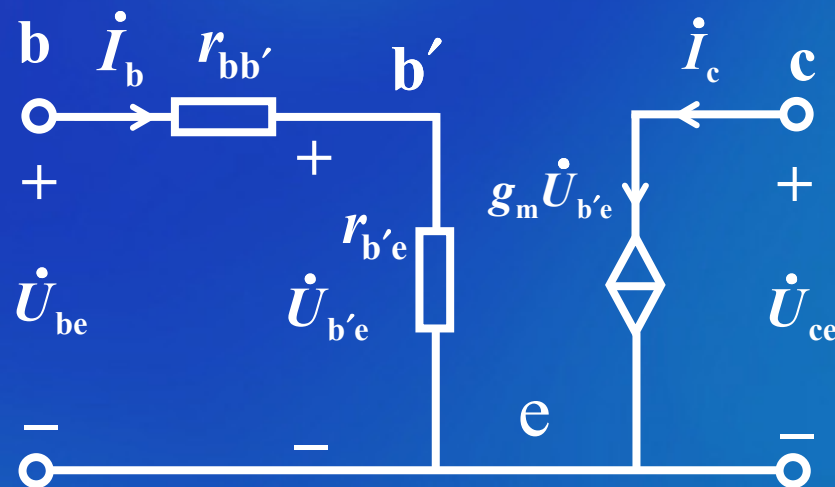
故有

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

$$\beta_0 = g_m r_{b'e}$$

其中 β_0 为晶体管低频电流放大系数

g_m 的物理意义:

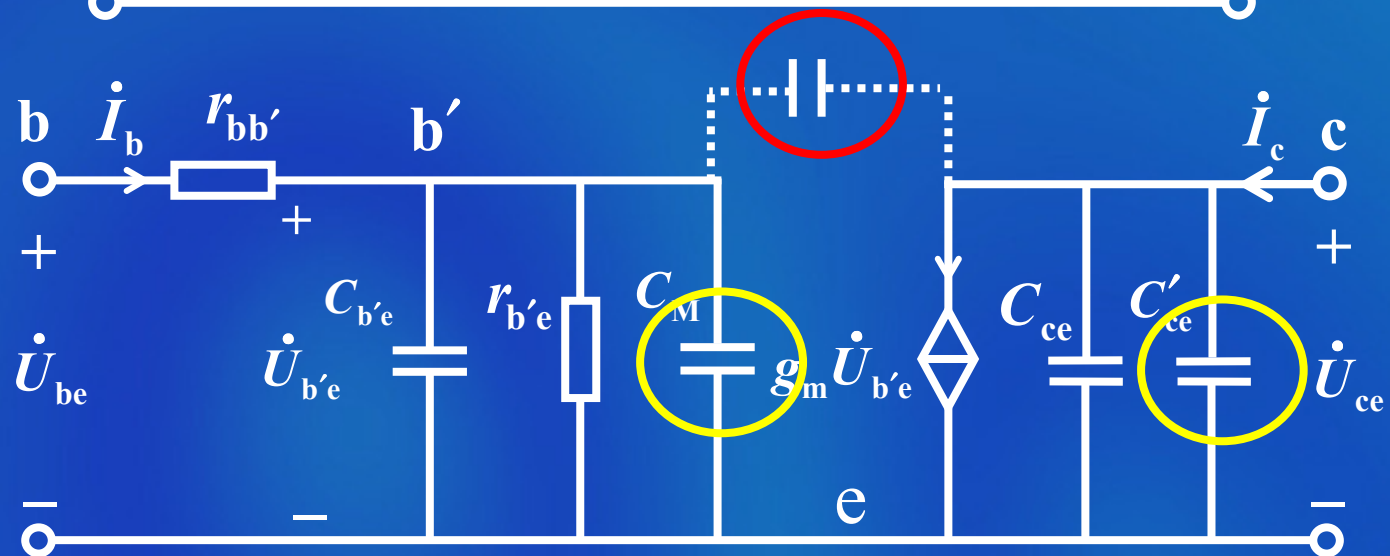
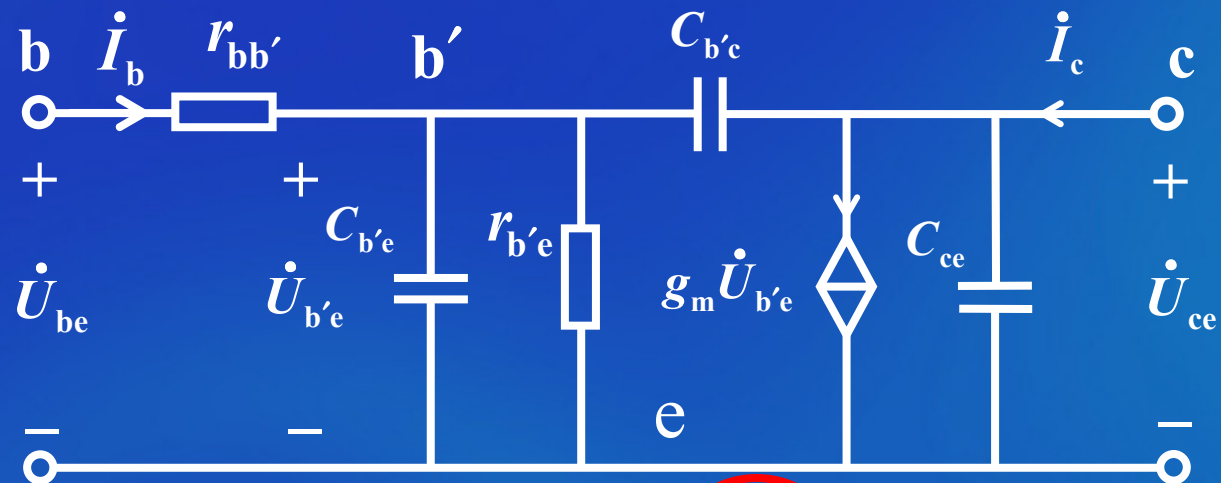


表示晶体管的发射结电压 $\dot{U}_{b'e}$ 对管子集电极电流 \dot{I}_c 的控制能力，称为跨导。

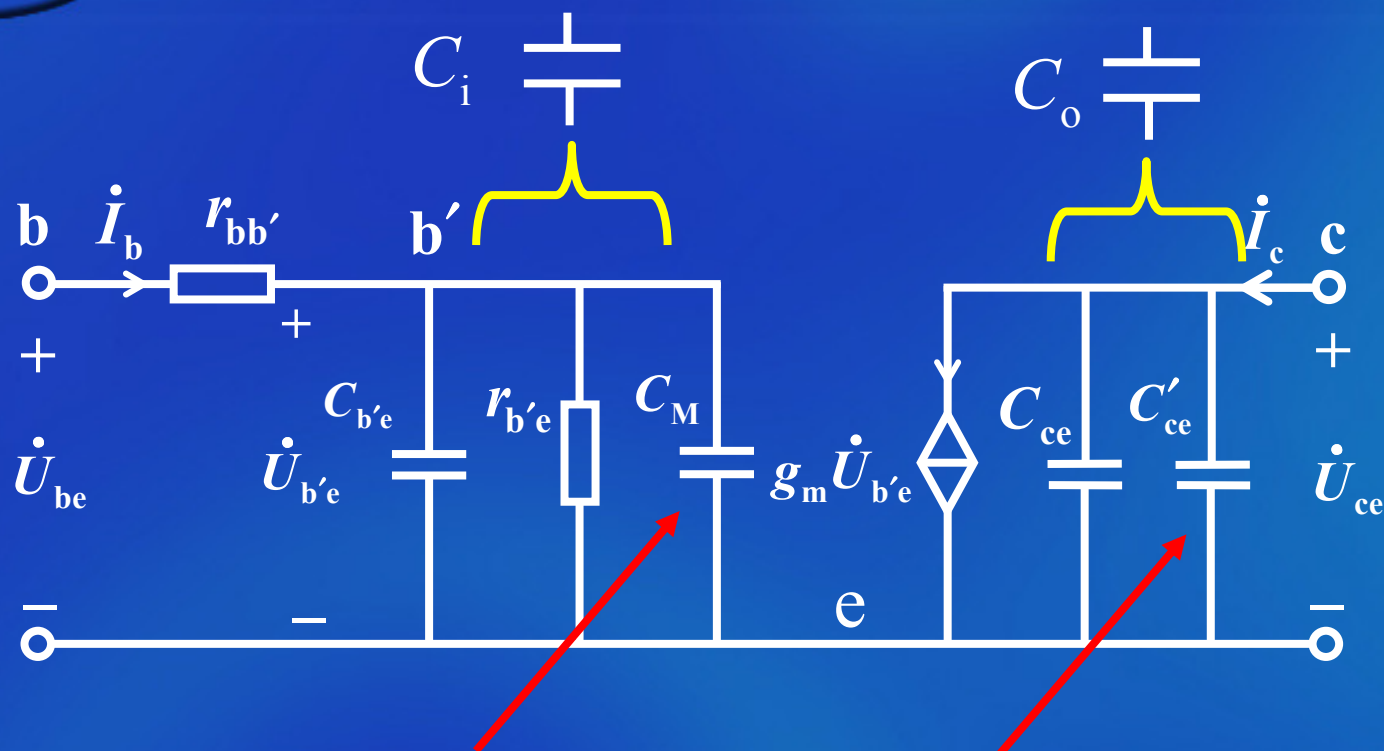
定义:

$$g_m = \left. \frac{di_C}{du_{B'E}} \right|_{u_{CE}=\text{常数}}$$

晶体管混合 π 型电路的密勒等效电路



密勒等效电路



图中

$$C_M = C_{b'e} (1 - \dot{A})$$

$$C'_{ce} = C_{b'e} \left[1 - \frac{1}{\dot{A}} \right]$$

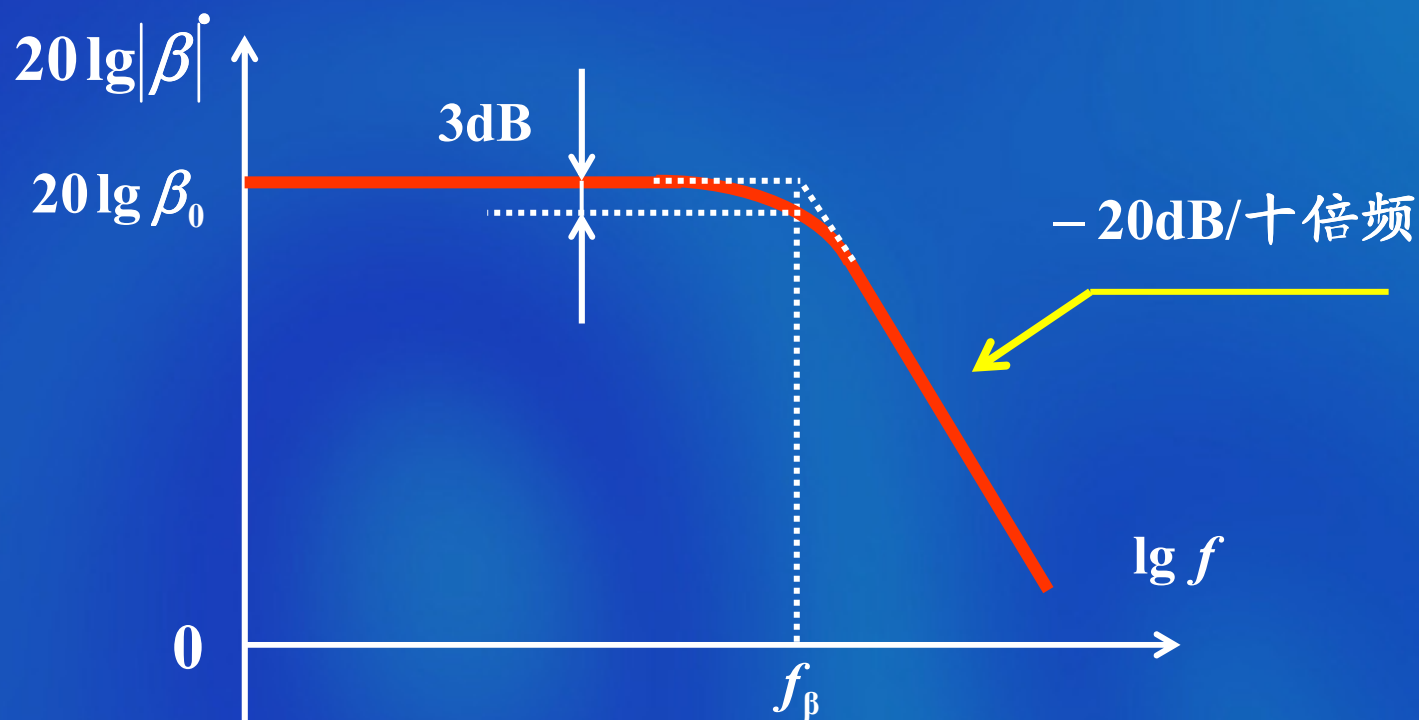
式中

$$\dot{A} = \frac{\dot{U}_{ce}}{\dot{U}_{b'e}} \approx \frac{U_{ce}}{U_{b'e}}$$

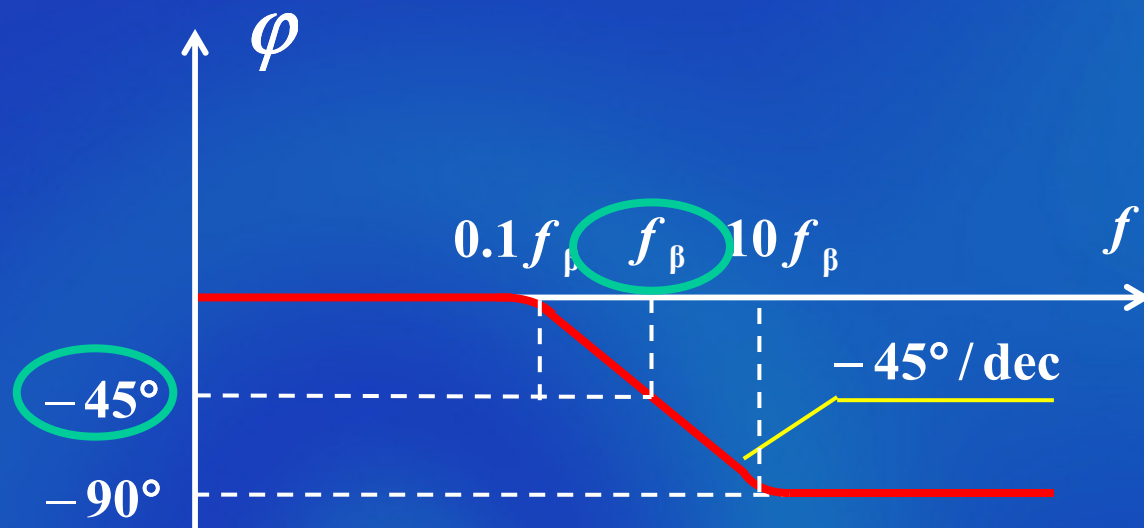
2. 晶体管的高频特性和高频参数

(1) 晶体管电流放大倍数 $\dot{\beta} = \beta(f)$

实际的幅频曲线



β 的相频特性



(2) 晶体管特征频率 f_T

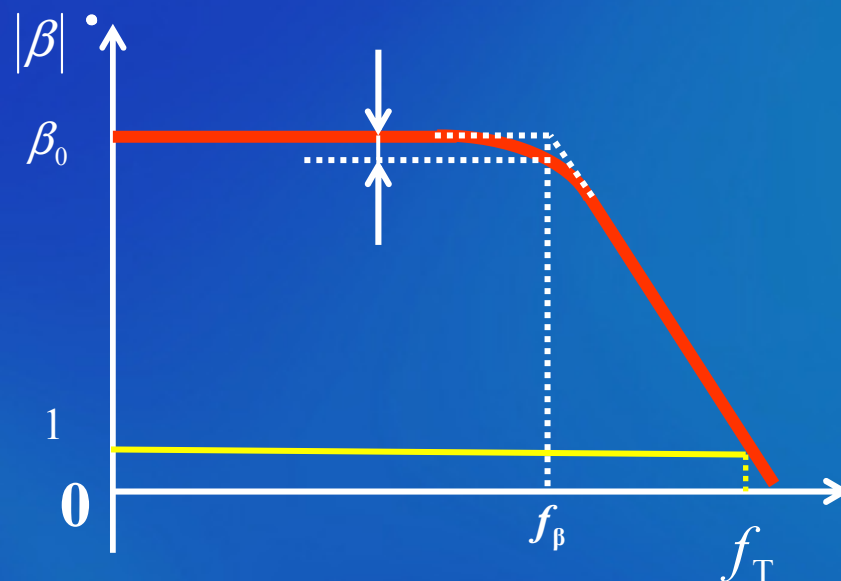
定义

当 $f=f_T$ 时, $|\beta|=1$

$$1 = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + [f_T/f_\beta]^2}}$$

由于 $f_T \gg f_\beta$ f_β 和 f_T 都与晶体管的静态工作点有关

故 $f_T \approx \beta_0 f_\beta$ f_T 是衡量晶体管高频特性的最常用指标



(3) 晶体管电流放大倍数 $\alpha = \dot{\alpha}(f)$

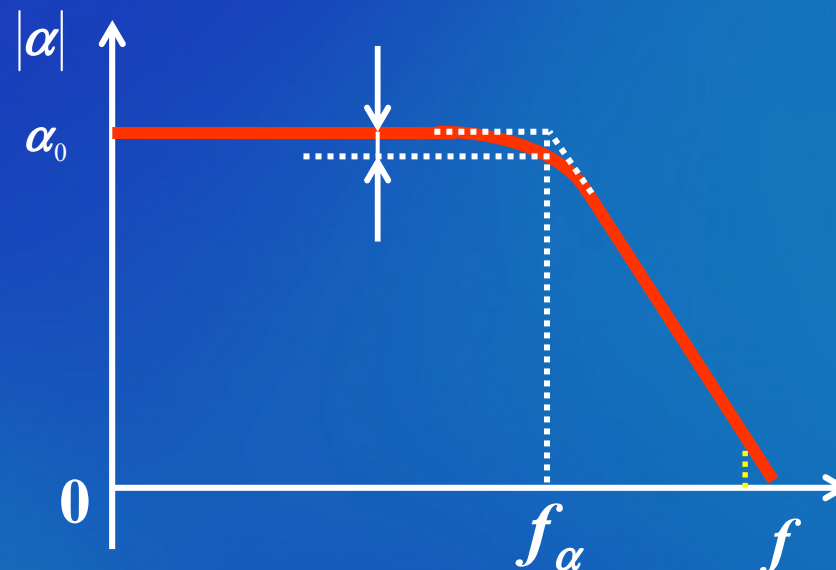
可以证明

$$\dot{\alpha} = \frac{\alpha_0}{1 + jf/f_\alpha}$$

式中

α_0 ——晶体管共基极低频电流放大系数

f_α ——晶体管共基极截止频率



由 α 与 β 的关系 $\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}$

将 $\beta = \frac{\beta_0}{1 + jf/f_\beta}$ 代入上式

得晶体管共基极截止频率

$$f_\alpha = (1 + \beta_0) f_\beta$$

通常将 $f_\alpha > 3\text{MHz}$ 的晶体管称为高频管

将 $f_\alpha < 3\text{MHz}$ 的晶体管称为低频管

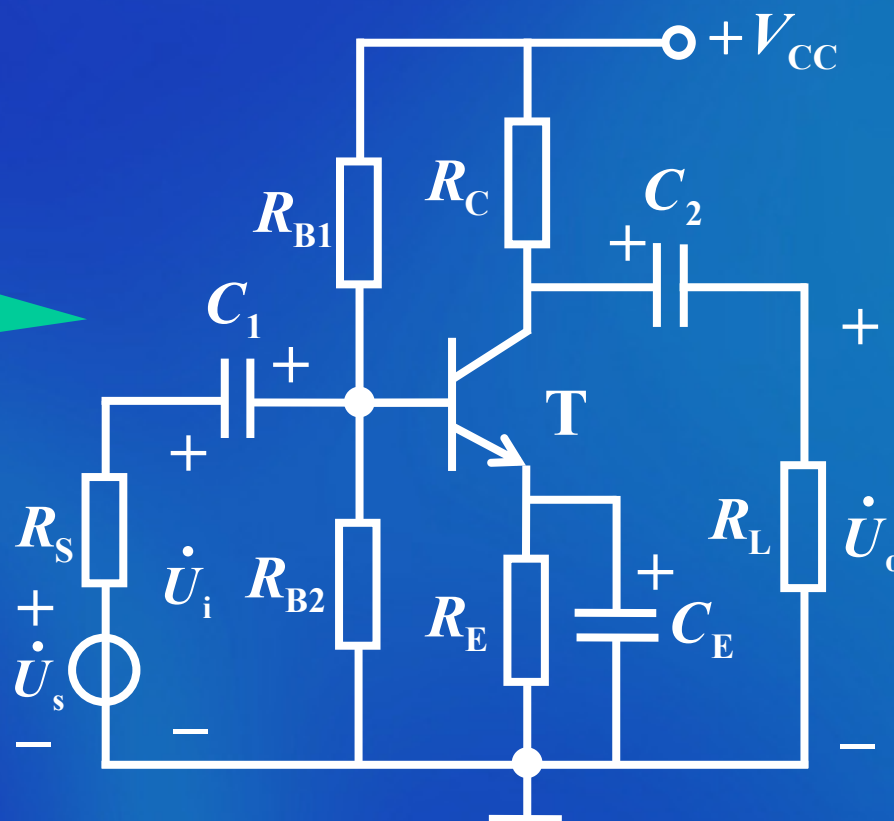
2.8.4 单管共射极放大电路的频率响应

单管共射极
放大电路

电路中存在的电容:

a. 耦合电容、旁路电容

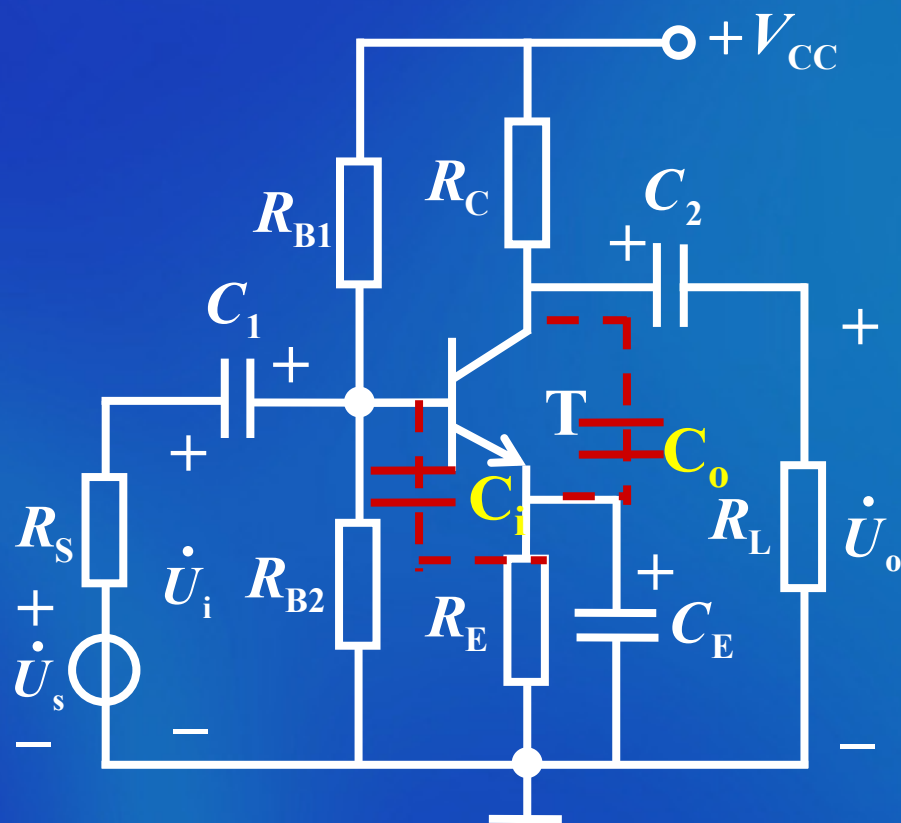
b. 结电容、极间电容、分布电容及负载电容等



不同电容对电路性能的影响

a. 耦合电容、旁路电容较大，主要影响电路的低频性能。

b. 结电容、极间电容及分布电容等很小，主要影响电路的高频性能。



不同频率区域对电容的处理原则

a. 低频区

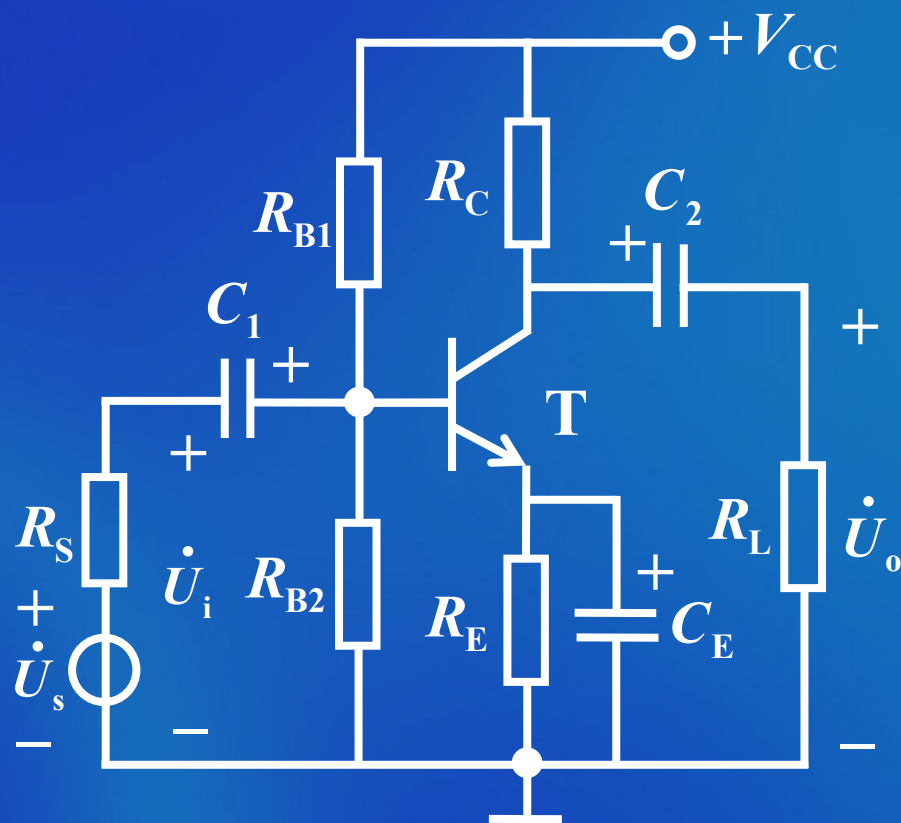
考虑耦合电容、旁路电容的作用。

结电容、极间电容及分布电容等小电容视为开路。

b. 中频区

耦合电容、旁路电容视为短路。

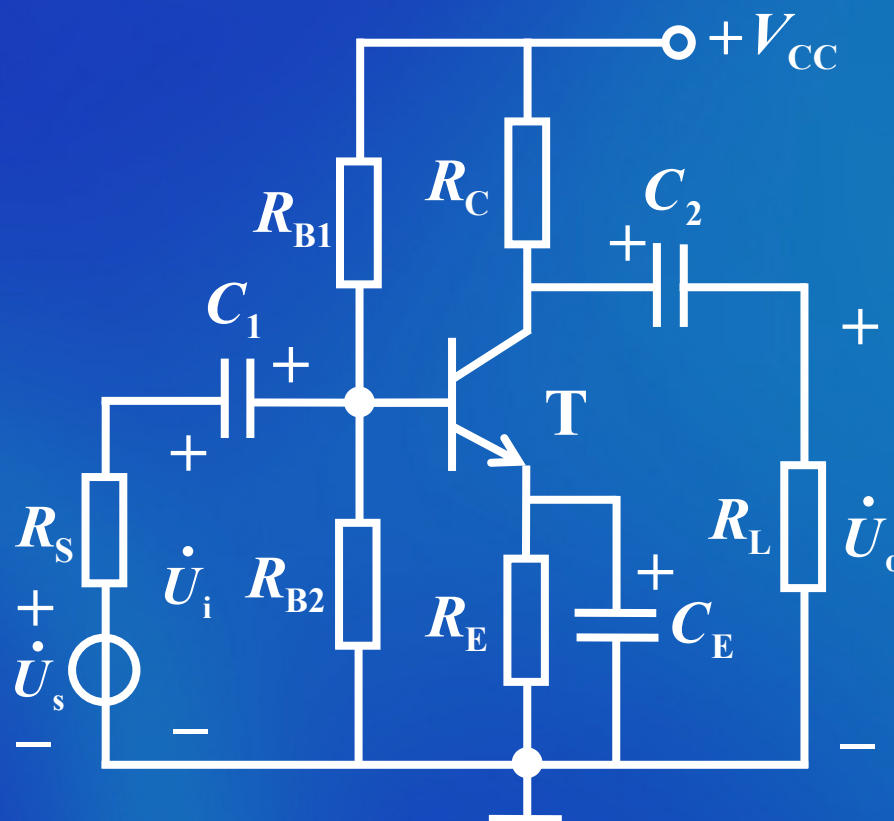
结电容、极间电容及分布电容等仍视为开路。



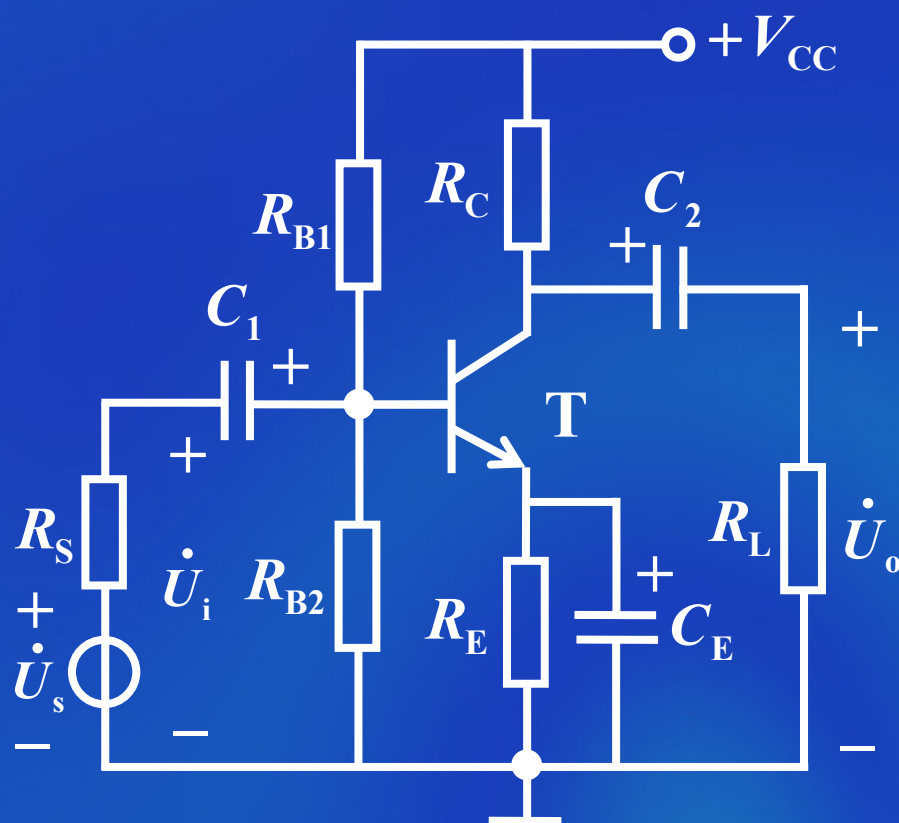
c. 高频区

耦合电容、旁路电容视为短路。

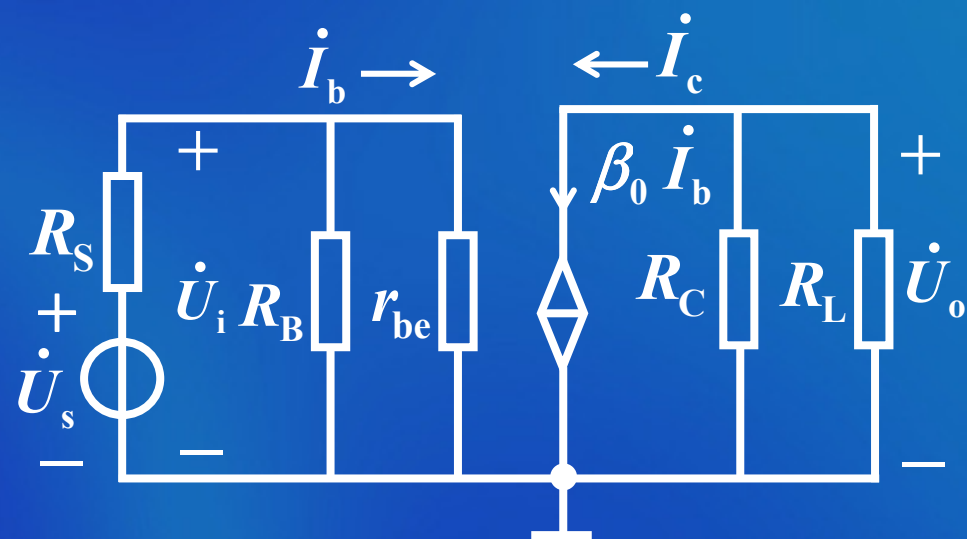
考虑结电容、极间电容及分布电容等小电容的作用。

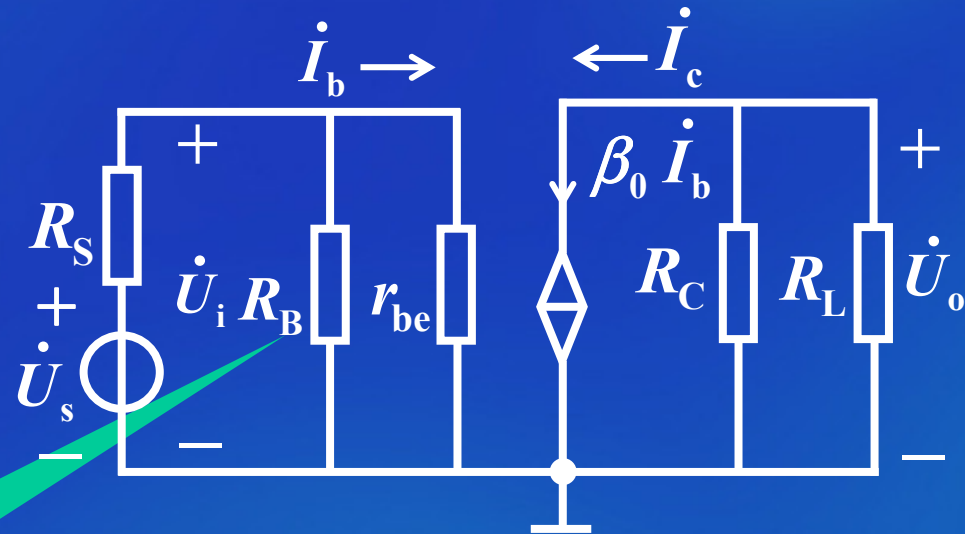


1. 中频区的频率响应

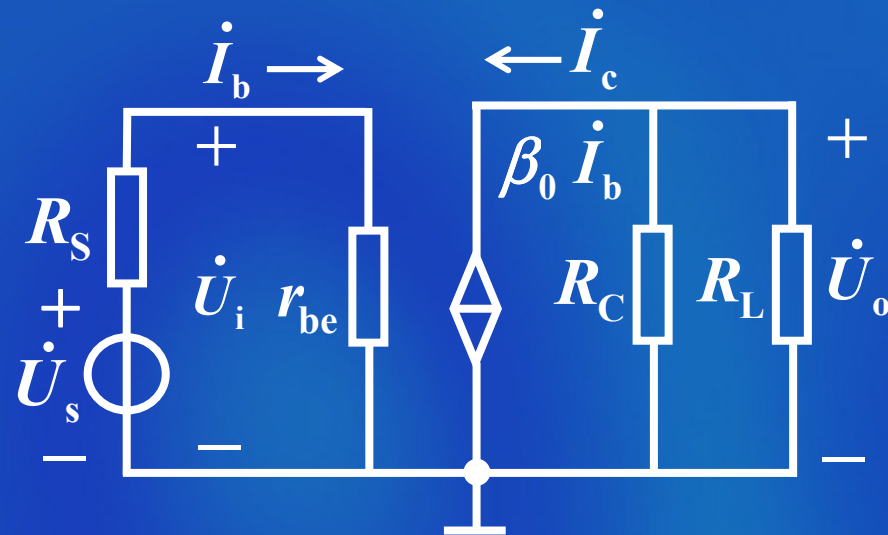


中频区微变等效电路





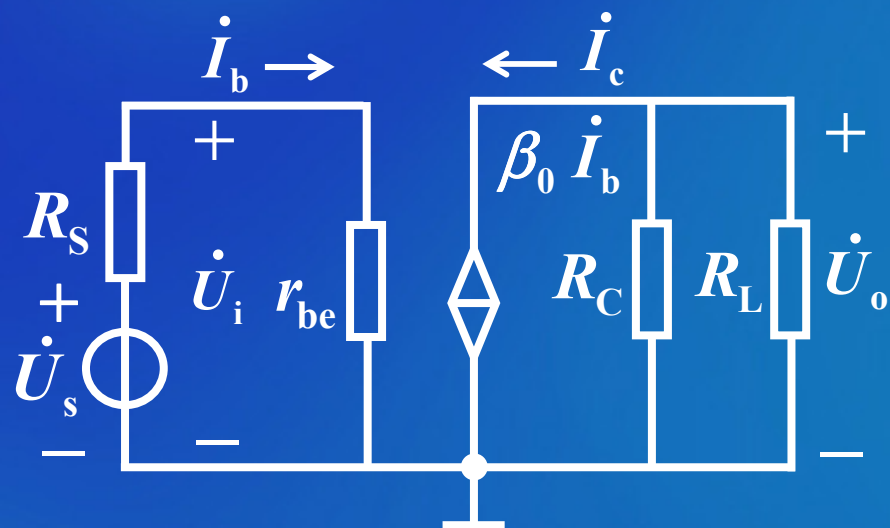
忽略 R_B



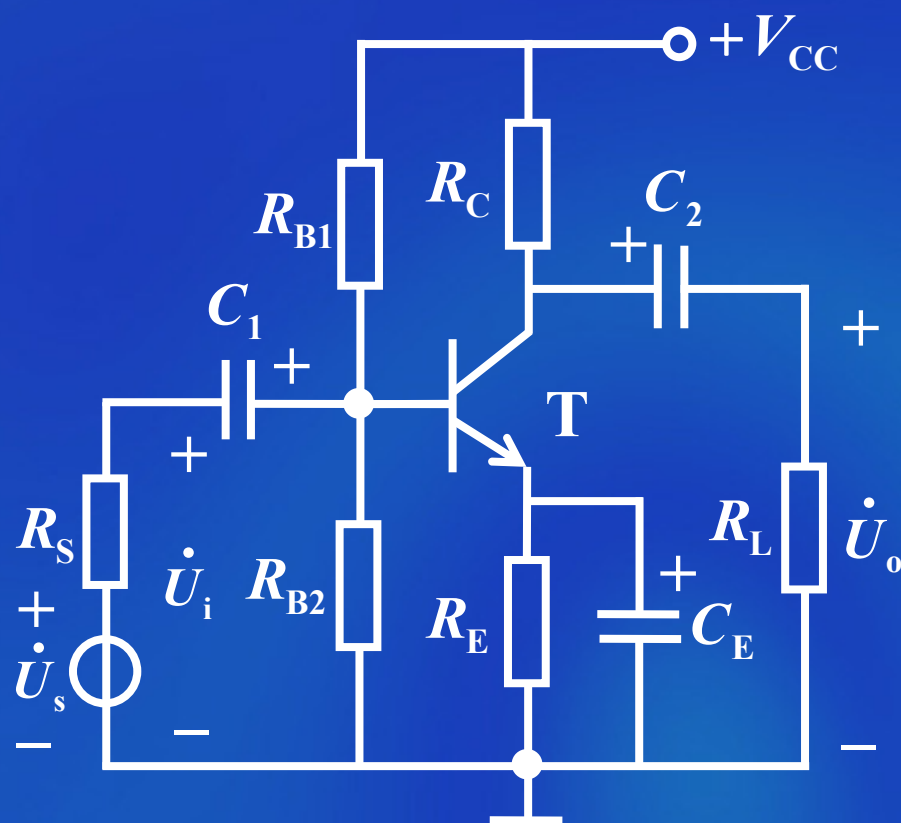
电压放大倍数

$$\dot{A}_{um} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = - \frac{\beta_0 R'_L}{r_{be}}$$

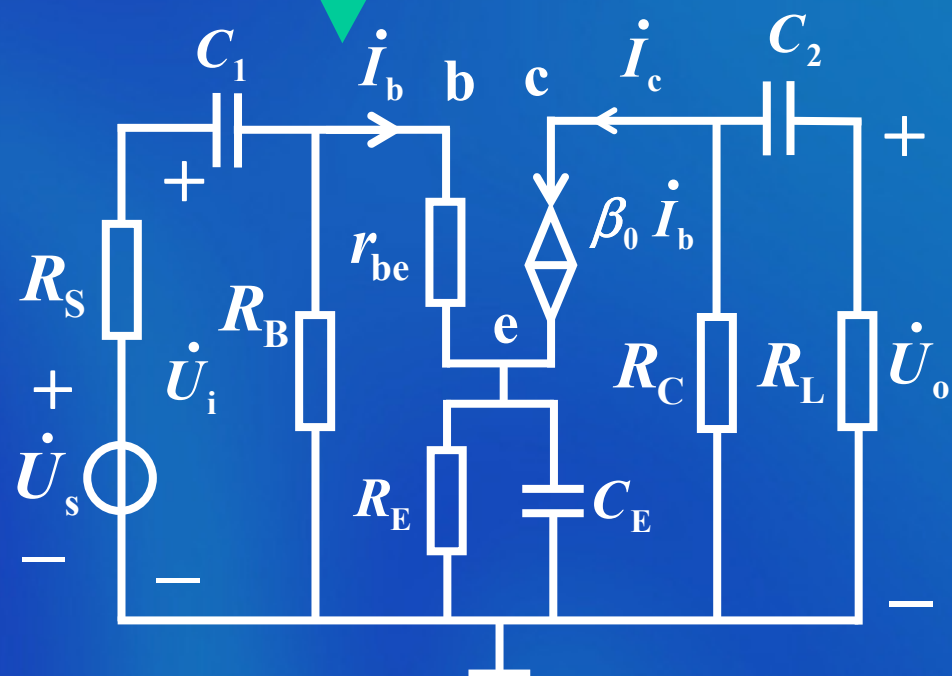
$$\begin{aligned} \dot{A}_{ums} &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = \frac{\dot{U}_i}{\dot{U}_s} \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \\ &= - \frac{r_{be}}{R_s + r_{be}} \frac{\beta_0 R'_L}{r_{be}} \\ &= \frac{\beta_0 R'_L}{R_s + r_{be}} \angle -180^\circ \\ &= |\dot{A}_{ums}| \angle \varphi \end{aligned}$$

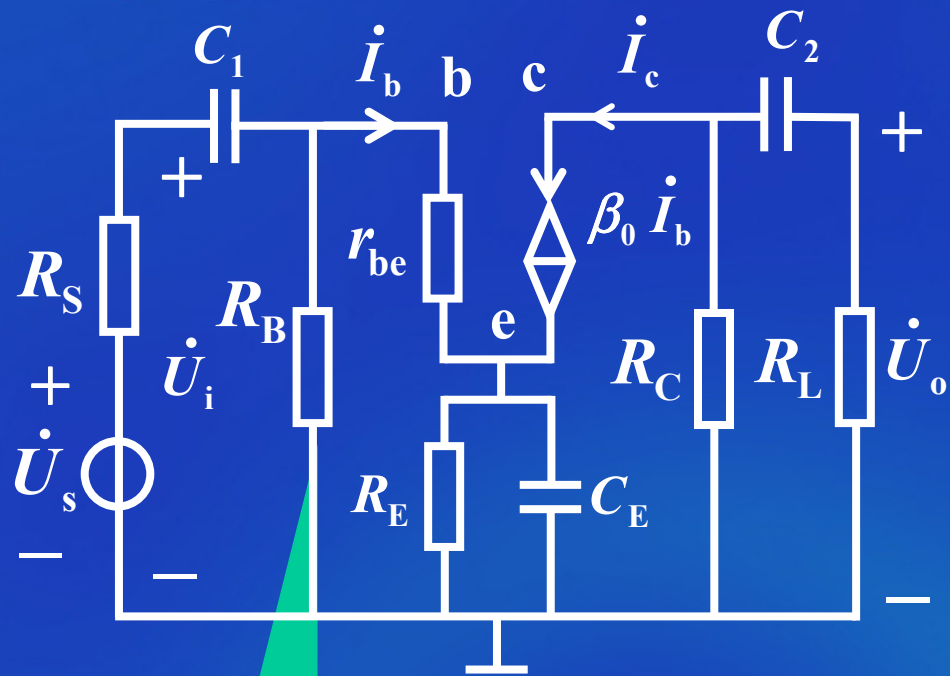


2. 低频区的频率响应和下限截止频率

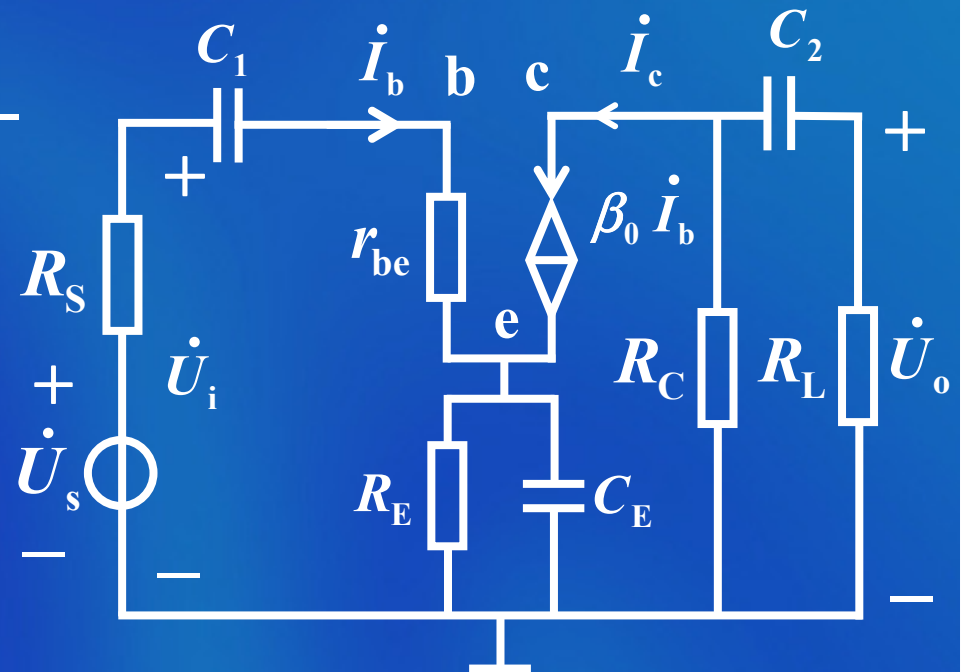


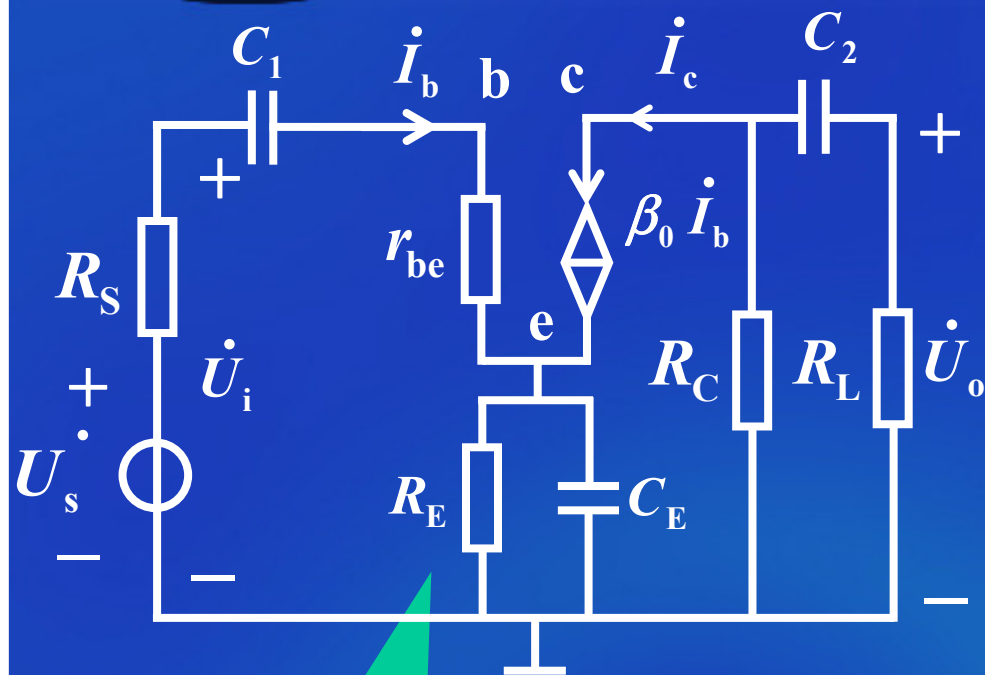
低频微变等效电路



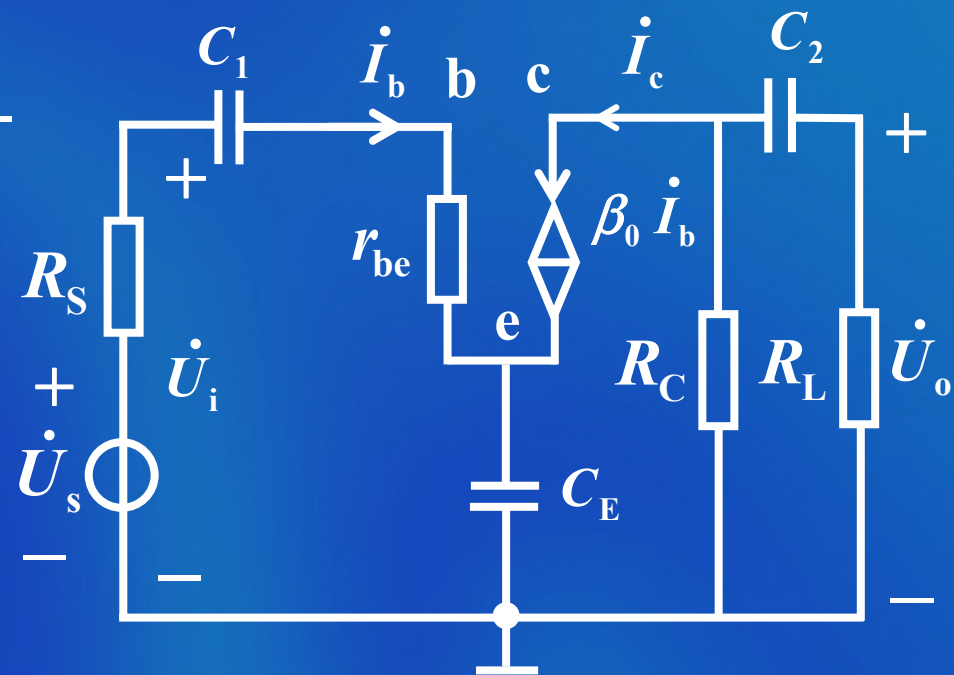


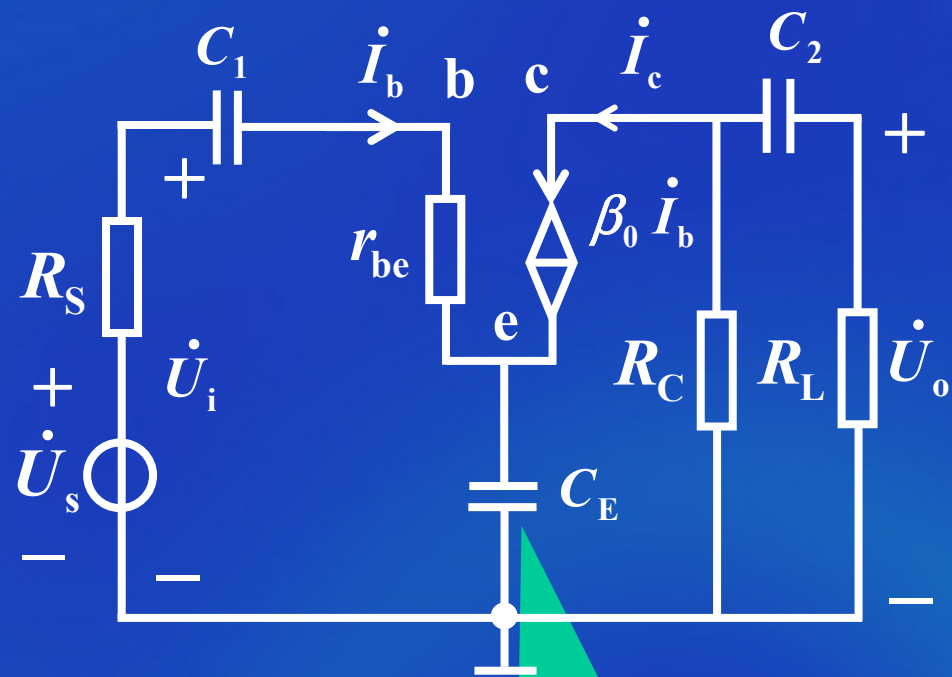
忽略 R_B



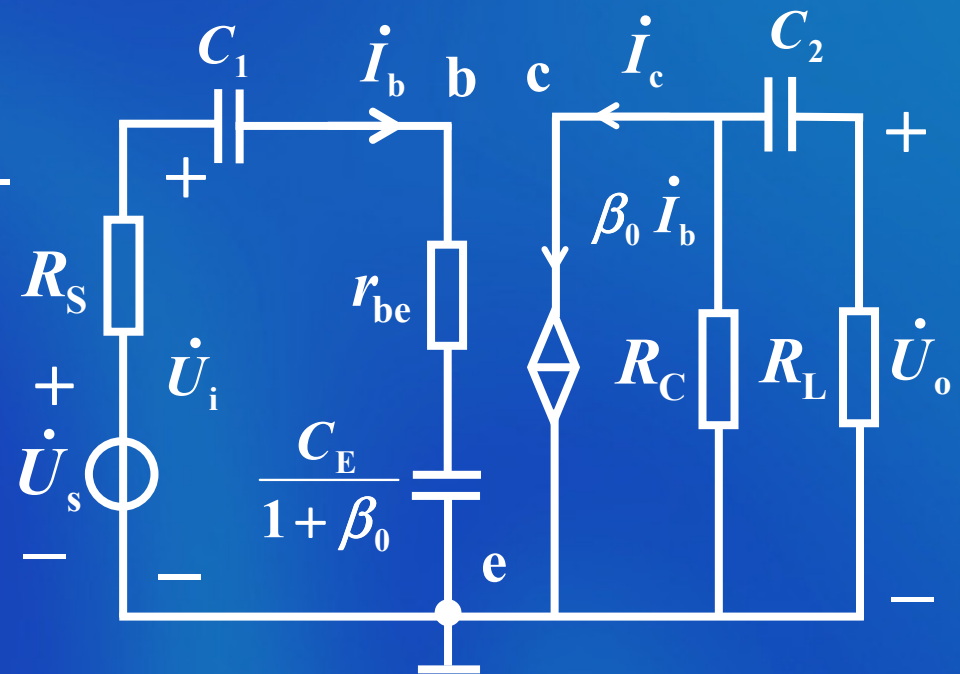


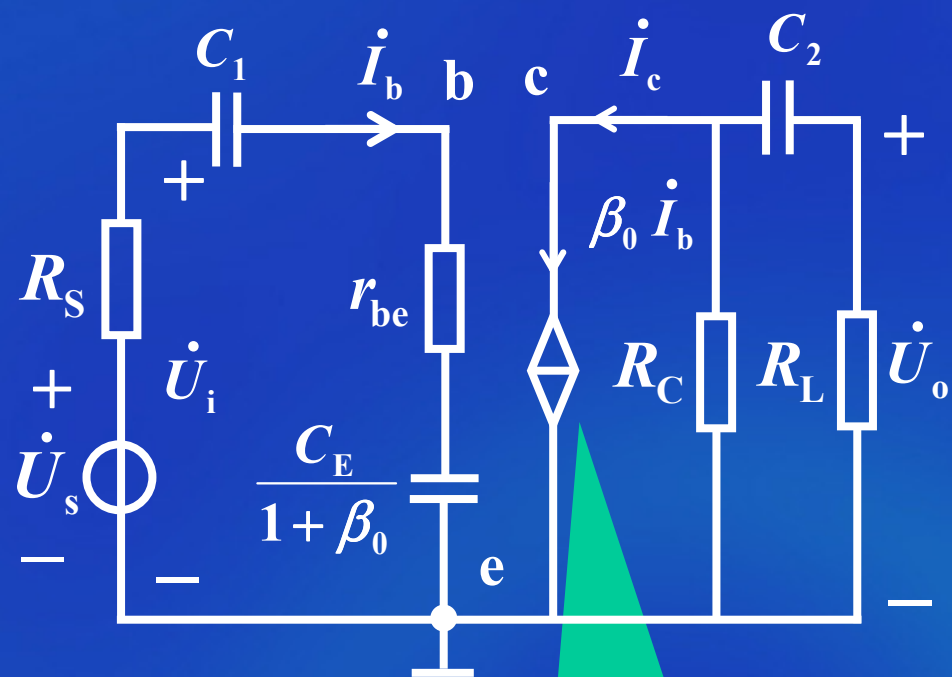
忽略 R_E (因 $R_E \gg 1/\omega_L C_E$)



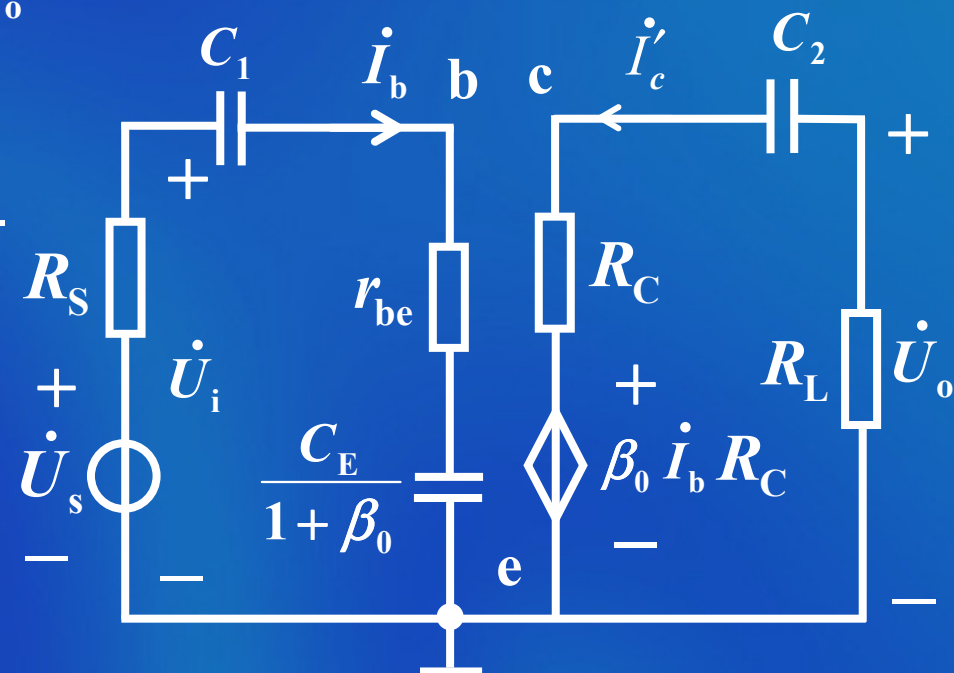


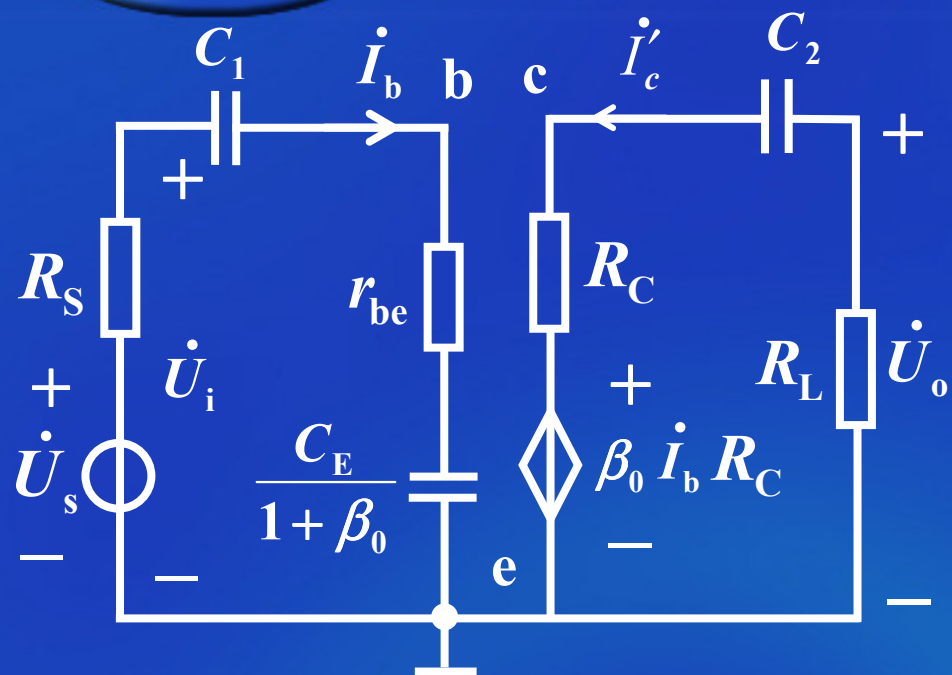
将 C_E 等效到输入回路





将电流源转换为电压源

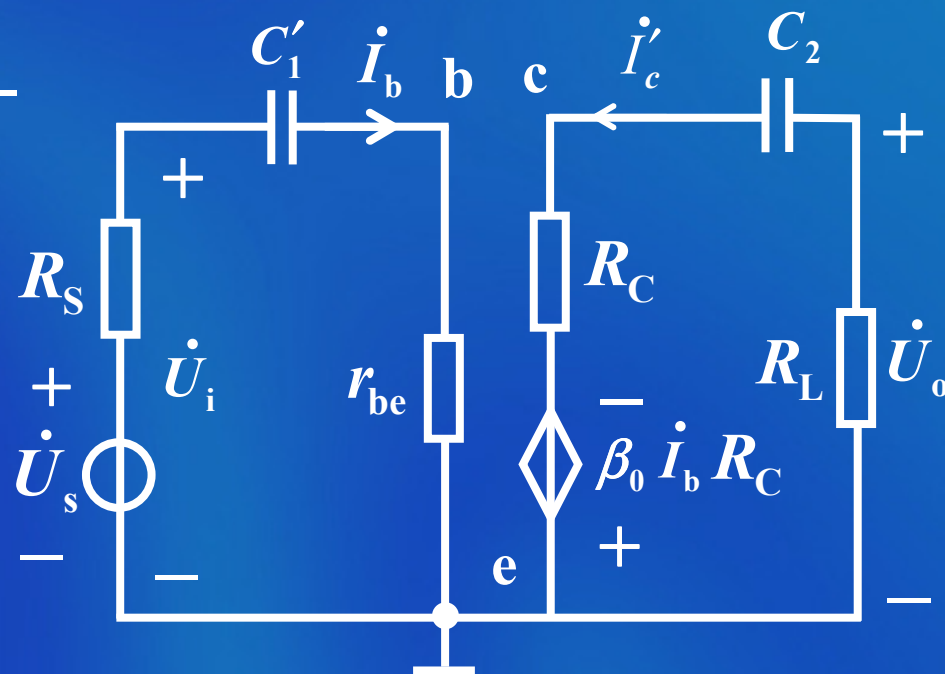




将输入回路电容合并

图中

$$C'_1 = \frac{\frac{C_E}{1 + \beta_0} C_1}{\frac{C_E}{1 + \beta_0} + C_1}$$



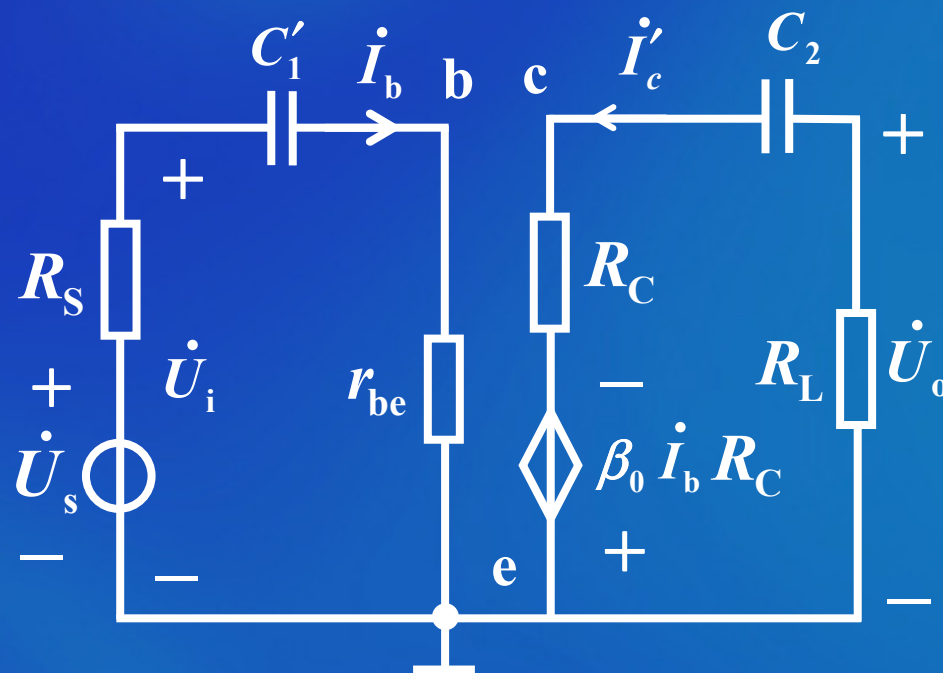
在输出回路

$$\dot{U}_o = -\dot{I}'_c R_L$$

$$\dot{I}'_c = \frac{\beta_0 \dot{I}_b R_C}{R_L + R_C + \frac{1}{j\omega C_2}}$$

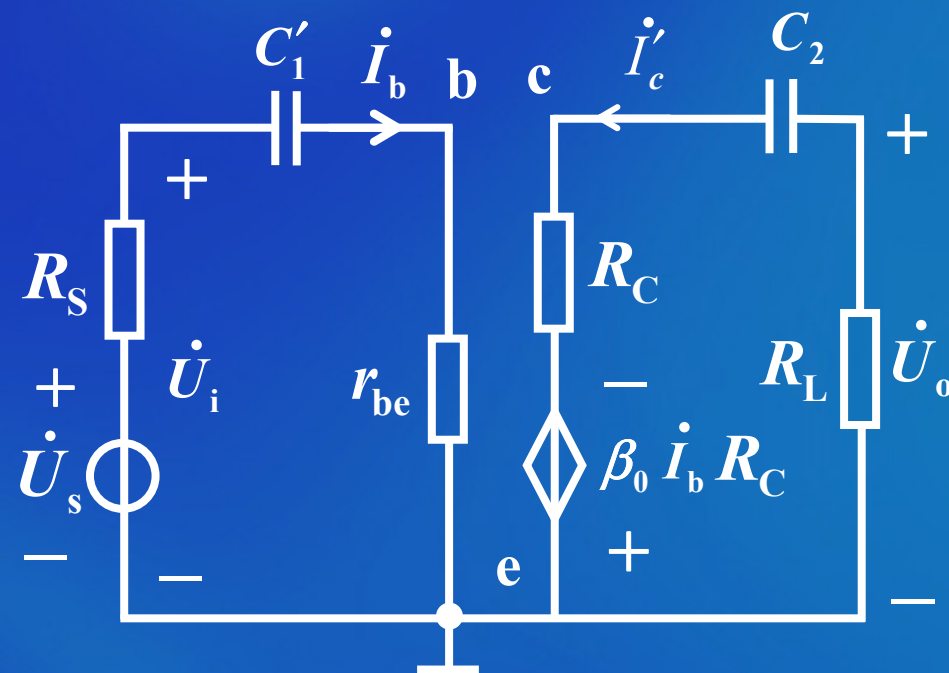
故

$$\dot{U}_o = \frac{-\beta_0 \dot{I}_b R_C R_L}{R_L + R_C + \frac{1}{j\omega C_2}} = -\beta_0 \dot{I}_b \frac{R_C R_L}{R_L + R_C} \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega(R_L + R_C)C_2}}$$



在输入回路

$$\begin{aligned} \dot{I}_b &= \frac{\dot{U}_s}{R_s + r_{be} + \frac{1}{j\omega C_1'}} \\ &= \frac{1}{R_s + r_{be}} \frac{\dot{U}_s}{1 + \frac{1}{j\omega(R_s + r_{be})C_1'}} \end{aligned}$$



由

$$\dot{U}_o = -\beta_0 \dot{I}_b \frac{R_C R_L}{R_L + R_C} \frac{1}{1 + \frac{1}{j\omega(R_L + R_C)C_2}}$$

$$\dot{I}_b = \frac{1}{R_s + r_{be}} \frac{\dot{U}_s}{1 + \frac{1}{j\omega(R_s + r_{be})C_1'}}$$

得低频区放大电路电压放大倍数

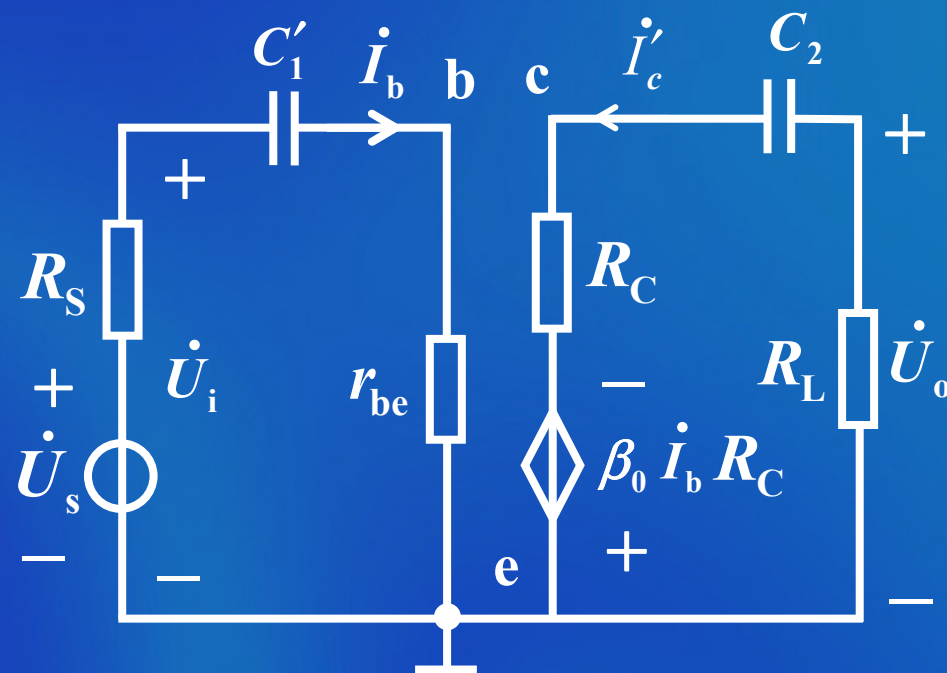
$$\dot{A}_{uLs} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = -\frac{\beta_0 R_L'}{R_s + r_{be}} \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega(R_s + r_{be})C_1'}} \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega(R_c + R_L)C_2}}$$

$$\dot{A}_{uLs} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = -\frac{\beta_0 R'_L}{R_s + r_{be}} \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega(R_s + r_{be})C'_1}} \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega(R_c + R_L)C_2}}$$

上式中，令

$$\tau_{L1} = (R_s + r_{be})C'_1$$

$$\tau_{L2} = (R_c + R_L)C_2$$



τ_{L1} 、 τ_{L2} 分别为输入、输出回路的时间常数。

$$\dot{A}_{uLs} = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} = -\frac{\beta_0 R'_L}{R_s + r_{be}} \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega \tau_{L1}}} \frac{1}{1 - j \frac{1}{\omega \tau_{L2}}}$$

令 $\omega_{L1} = \frac{1}{\tau_{L1}} \quad \omega_{L2} = \frac{1}{\tau_{L2}}$

中频电压
放大倍数

$$\dot{A}_{uLs} = -\frac{\beta_0 R'_L}{R_s + r_{be}} \frac{1}{1 - j \frac{\omega_{L1}}{\omega}} \frac{1}{1 - j \frac{\omega_{L2}}{\omega}}$$

$$= \dot{A}_{ums} \frac{1}{1 - j \frac{f_{L1}}{f}} \frac{1}{1 - j \frac{f_{L2}}{f}}$$

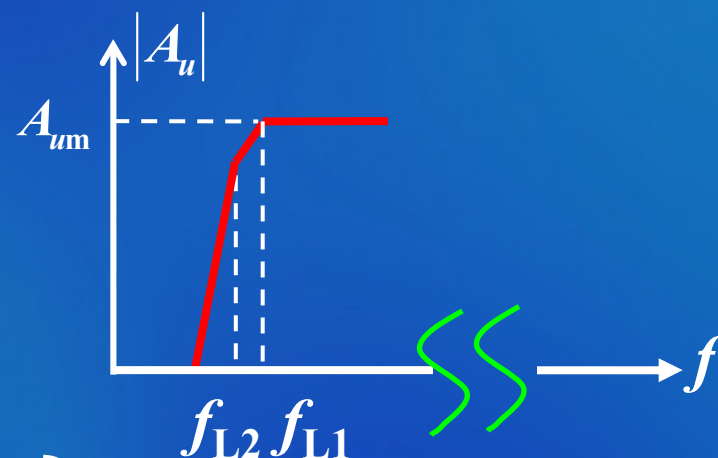
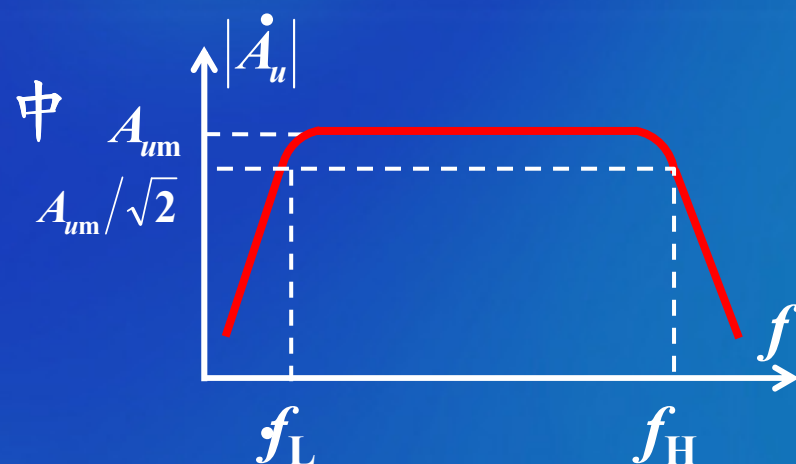
$$\text{式 } \dot{A}_{uLs} = \dot{A}_{ums} \frac{1}{1 - j \frac{f_{L1}}{f}} \frac{1}{1 - j \frac{f_{L2}}{f}}$$

$$f_{L1} = \frac{\omega_{L1}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_{L1}}$$

$$= \frac{1}{2\pi(R_s + r_{be})C_1'}$$

$$f_{L2} = \frac{\omega_{L2}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\tau_{L2}}$$

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



f_{L1} } 取大 (5-10倍) 的为 f_L
 f_{L2}

一般情况下，由于

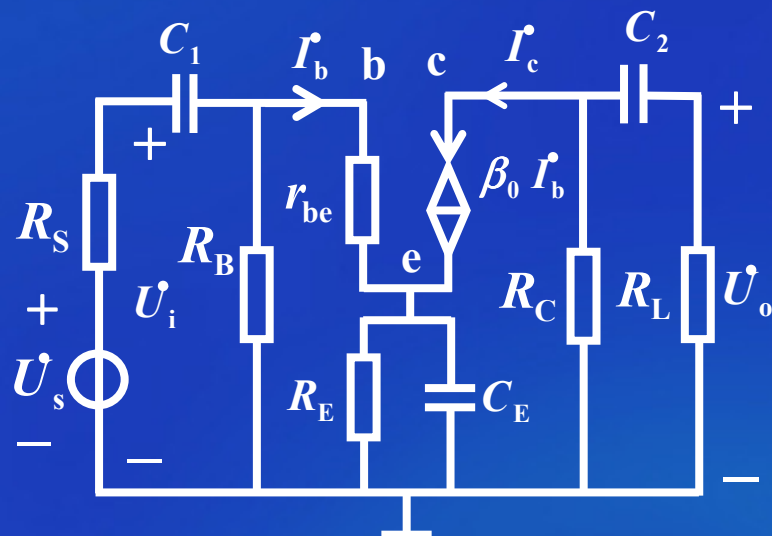
$$\frac{C_E}{1+\beta_0} \ll C_1$$

$$C'_1 = \frac{\frac{C_E}{1+\beta_0} C_1}{\frac{C_E}{1+\beta_0} + C_1} \approx \frac{C_E}{1+\beta_0}$$

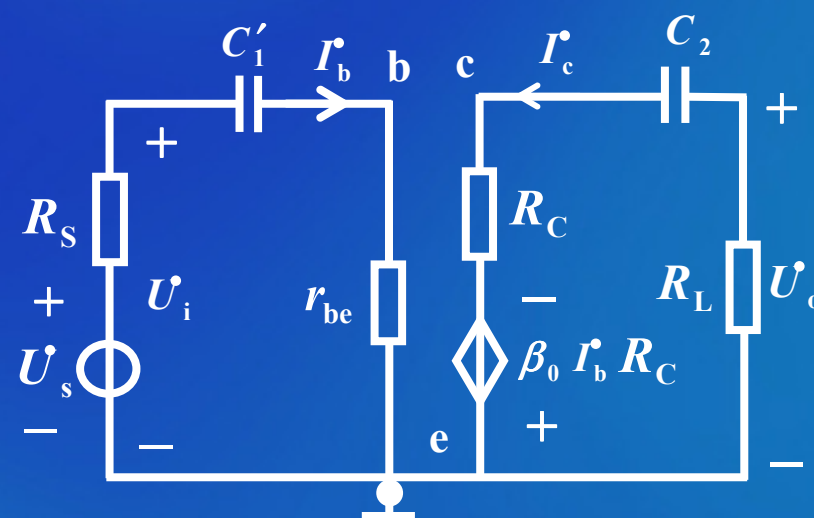
即旁路电容折算到输入端的等效电容很小。

故旁路电容是影响电路低频性能的主要元件。

总结：放大电路低频区分析



放大电路的低频微变等效电路



简化低频微变等效电路

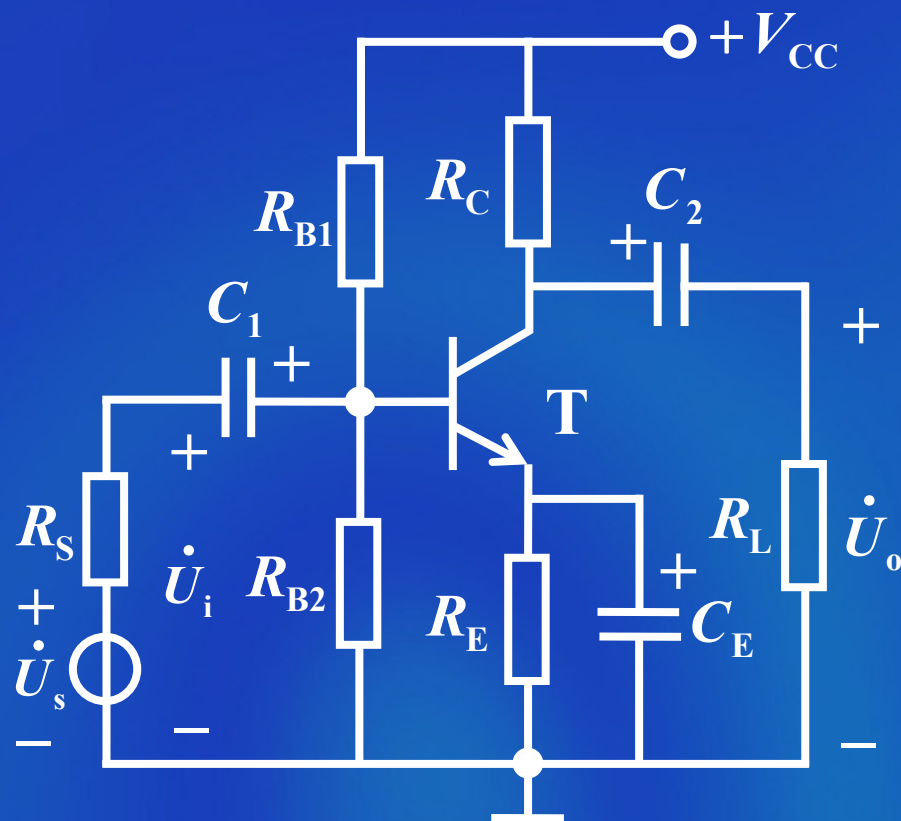
求
$$\left\{ \begin{aligned} f_{L1} &= \frac{1}{2\pi(R_S + r_{be})C_1} \\ f_{L2} &= \frac{1}{2\pi(R_C + R_L)C_2} \end{aligned} \right.$$

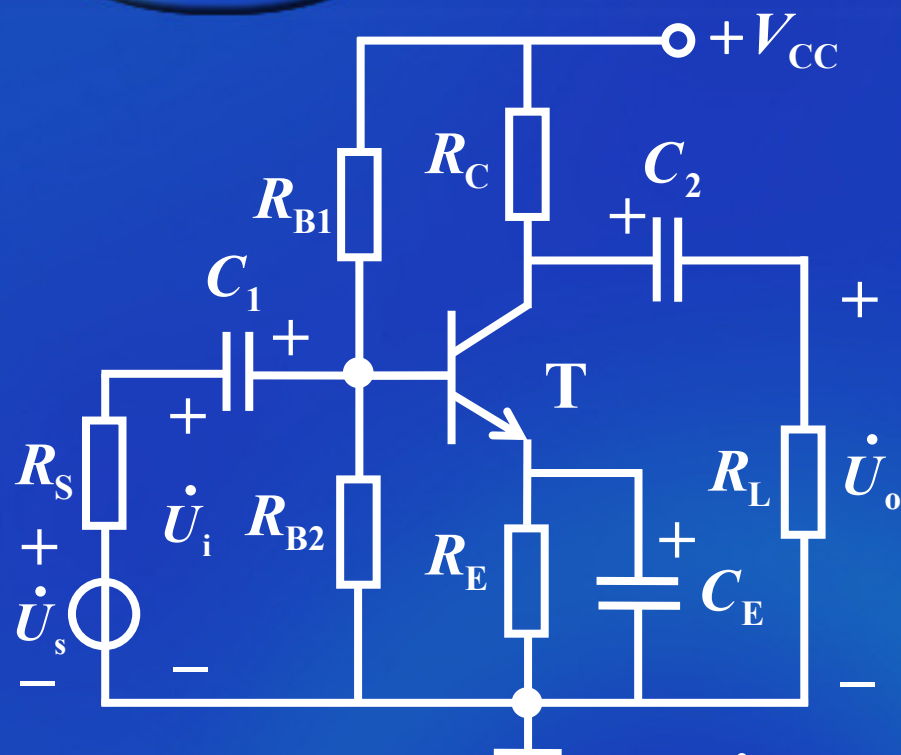
取大（5-10倍）的为 f_L

一般情况下，若 C_E 存在，则它决定 f_L

若差异不大，则
$$f_L \approx 1.1(f_{L1}^2 + f_{L2}^2)^{1/2}$$

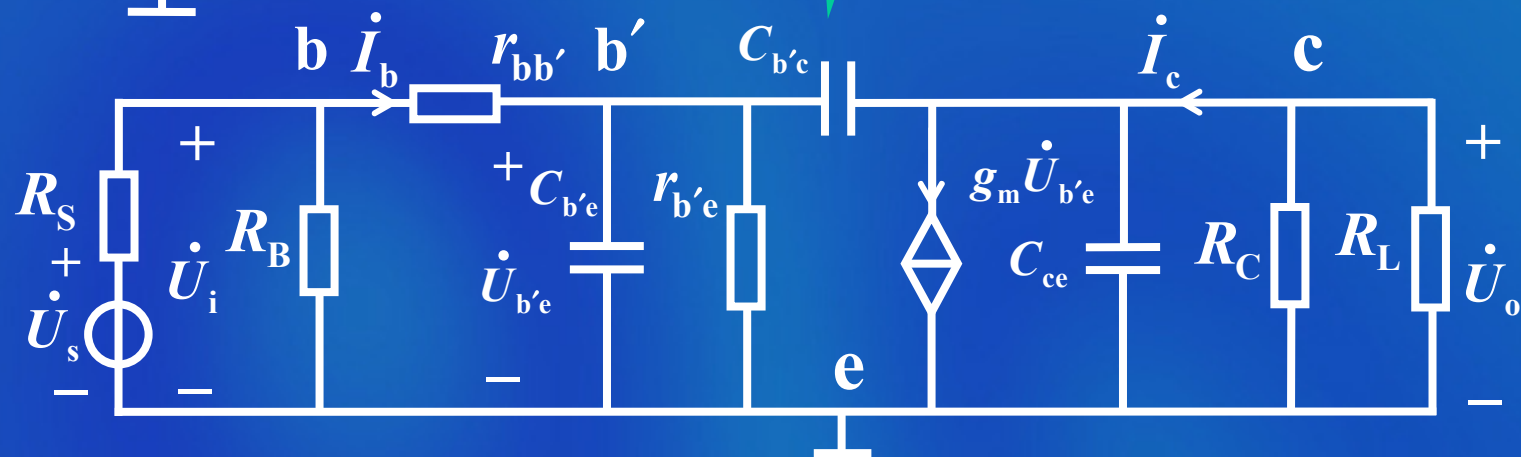
3. 高频区的频率响应和上限截止频率

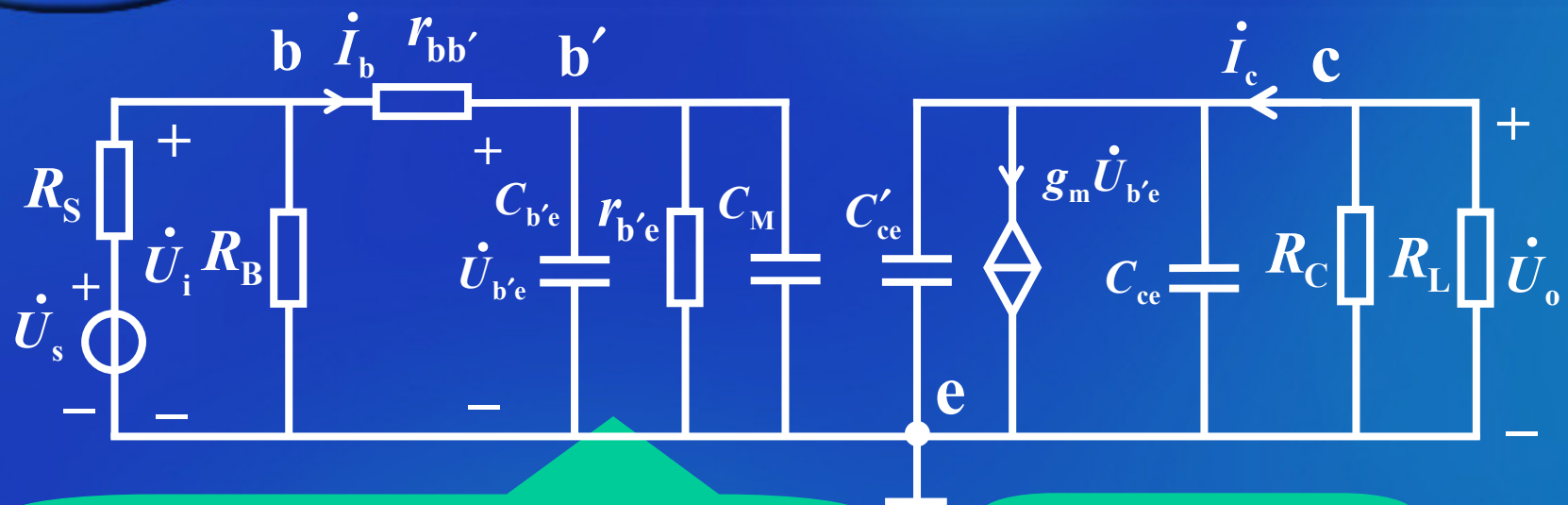




对 $C_{b'c}$ 密勒等效

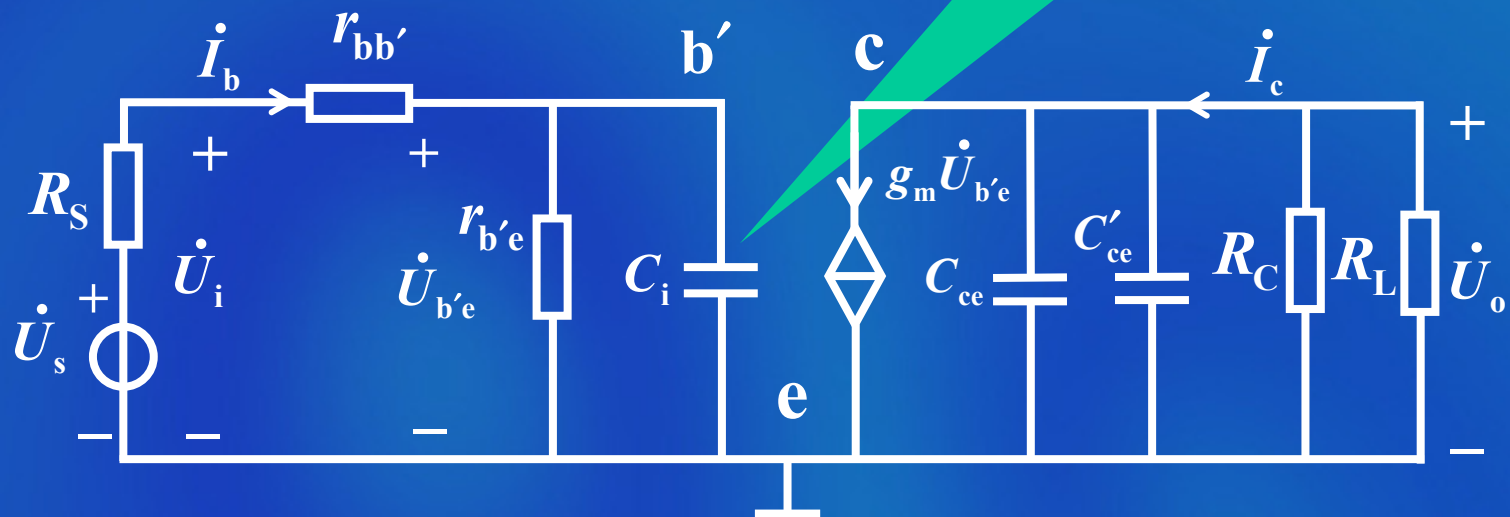
高频等效电路

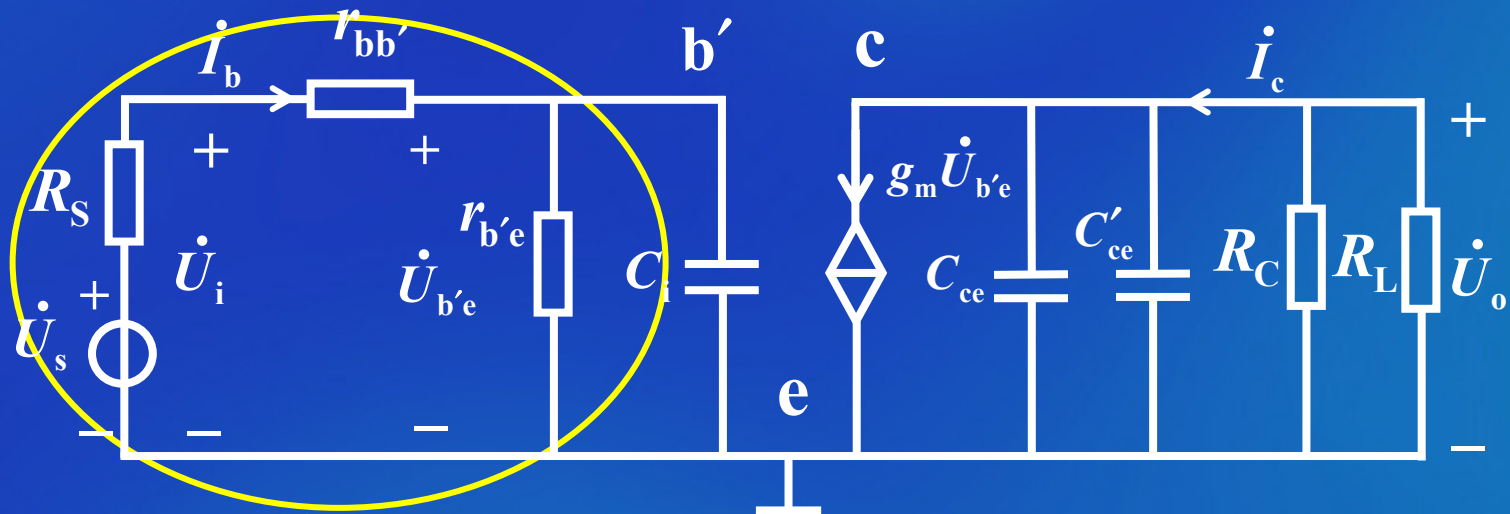




对输入回路简化、等效

$$C_i = C_M + C_{b'e}$$

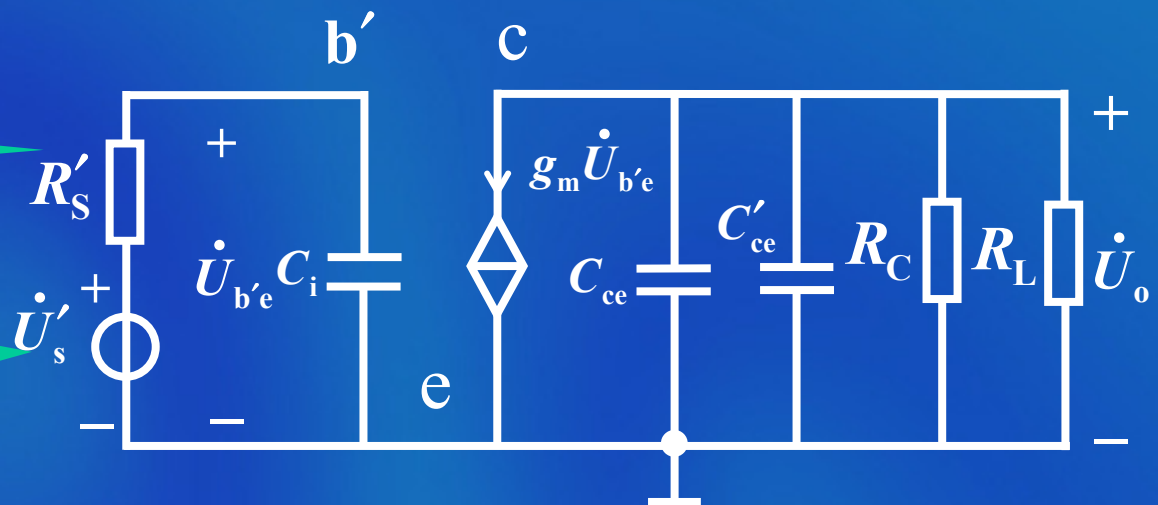


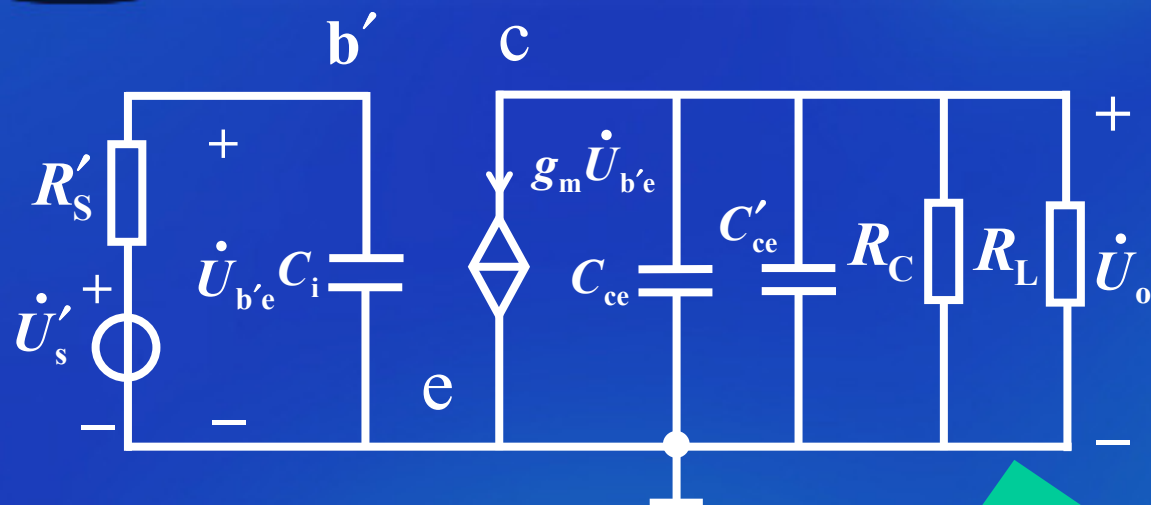


戴维南等效

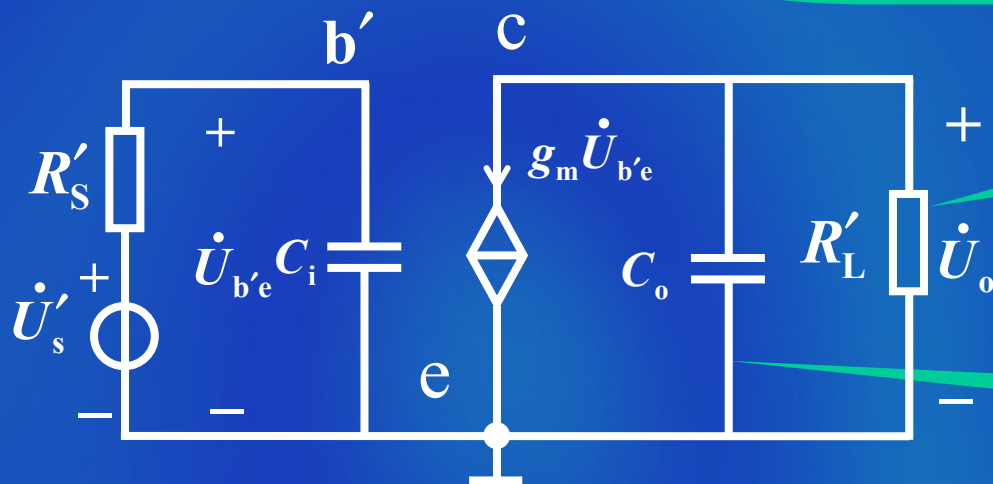
$$R'_s = (R_s + r_{bb'}) // r_{b'e}$$

$$\dot{U}'_s = \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \dot{U}_s$$



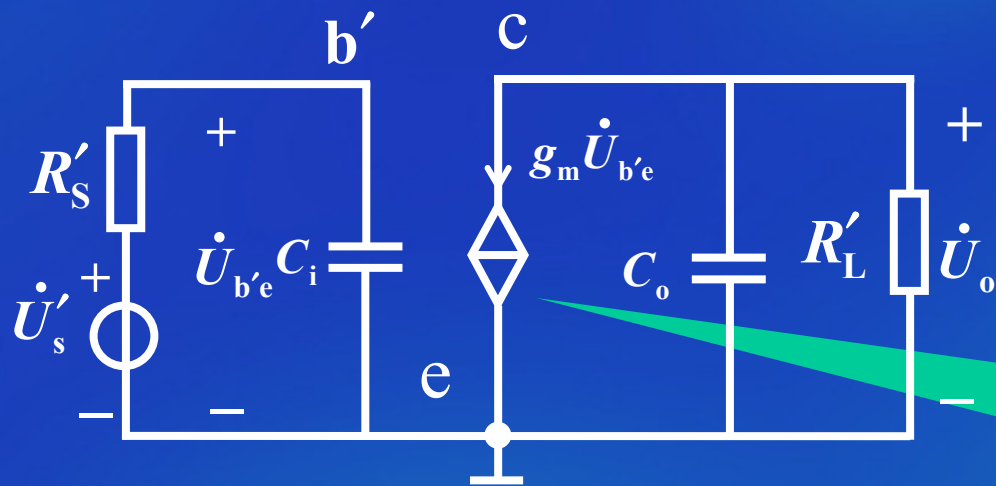


对输出回路简化、等效

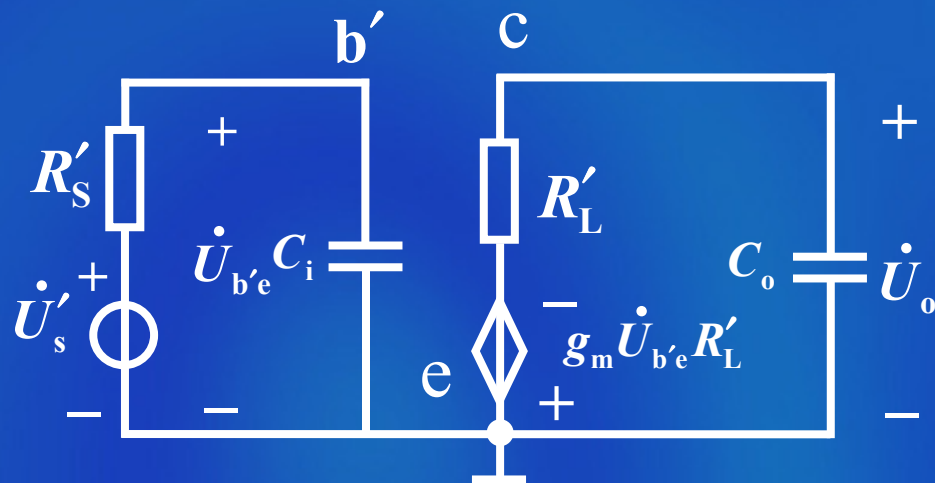


$$R'_L = R_L // R_C$$

$$C_o = C_{ce} + C'_{ce}$$



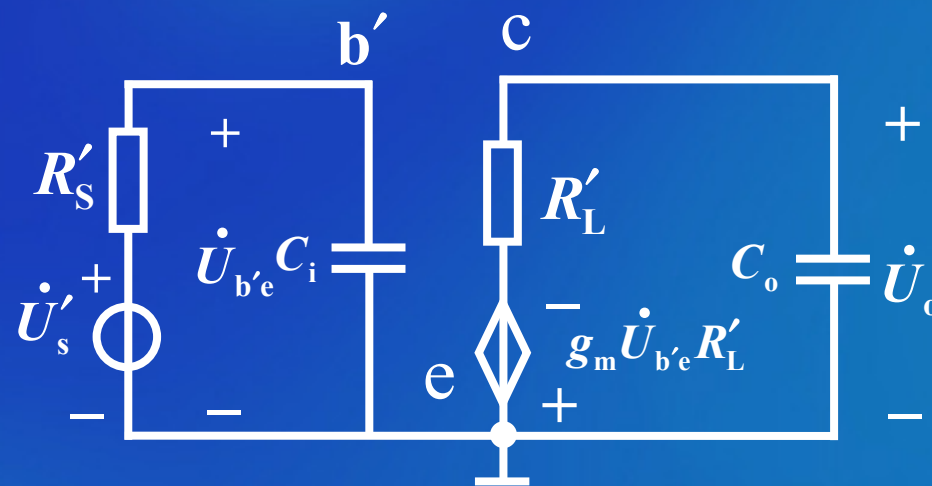
将电流源转换为电压源



由图可知

$$\dot{U}_o = \frac{1}{R'_L + \frac{1}{j\omega C_o}} (-g_m \dot{U}'_{be} R'_L)$$

$$= \frac{-g_m \dot{U}'_{be} R'_L}{1 + j\omega C_o R'_L}$$



$$\dot{U}'_{be} = \frac{1}{R'_s + \frac{1}{j\omega C_i}} \dot{U}'_s$$

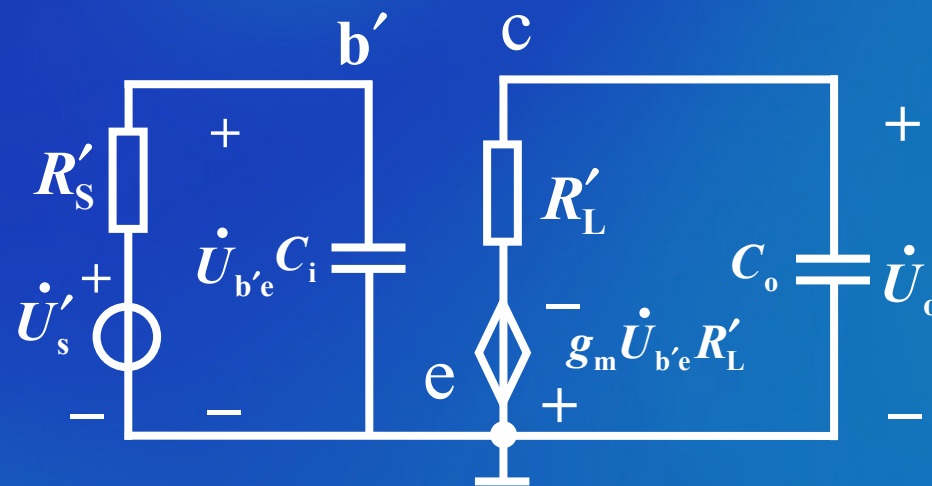
$$= \frac{\dot{U}'_s}{1 + j\omega C_i R'_s}$$

高频区电压放大倍数

$$\begin{aligned} \dot{A}_{uHs} &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_s} \\ &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_{b'e}} \frac{\dot{U}_{b'e}}{\dot{U}'_s} \frac{\dot{U}'_s}{\dot{U}_s} \end{aligned}$$

由于 $\dot{U}_o = \frac{-g_m \dot{U}'_{be} R'_L}{1 + j\omega C_o R'_L}$

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

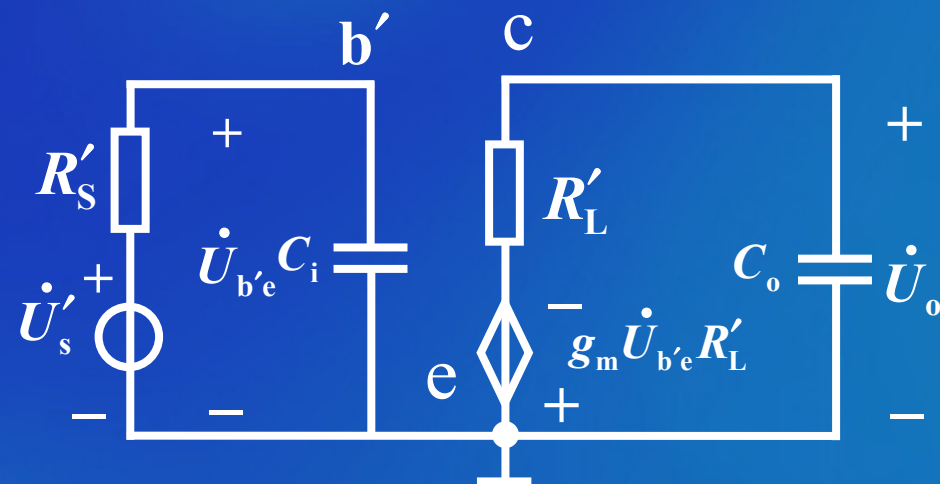


$$\dot{U}'_s = \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \dot{U}_s$$

$$\begin{aligned}
 \dot{A}_{uHs} &= \frac{r_{b'e}}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \frac{1}{1 + j\omega C_i R'_s} \frac{-g_m R'_L}{1 + j\omega C_o R'_L} \\
 &= \frac{-(g_m r_{b'e}) R'_L}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \frac{1}{1 + j\omega C_i R'_s} \frac{1}{1 + j\omega C_o R'_L} \\
 &= \frac{-\beta_0 R'_s}{R_s + r_{bb'} + r_{b'e}} \frac{1}{1 + j\omega C_i R'_s} \frac{1}{1 + j\omega C_o R'_L}
 \end{aligned}$$

 \dot{A}_{ums}

$$= \frac{-\beta_0 R'_s}{R_s + r_{be}} \frac{1}{1 + j\omega C_i R'_s} \frac{1}{1 + j\omega C_o R'_L}$$



$$\dot{A}_{u_{Hs}} = \dot{A}_{u_{ms}} \frac{1}{1 + j\omega C_i R'_S} \frac{1}{1 + j\omega C_o R'_L}$$

令 $\tau_{H1} = R'_S C_i$

$$\tau_{H2} = R'_L C_o$$

τ_{H1} 、 τ_{H2} 分别为输入、输出回路的时间常数

那么

$$\omega_{H1} = \frac{1}{\tau_{H1}} = \frac{1}{R'_S C_i}$$

$$\omega_{H2} = \frac{1}{\tau_{H2}} = \frac{1}{R'_L C_o}$$

或

$$f_{H1} = \frac{\omega_{H1}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R'_S C_i}$$

$$f_{H2} = \frac{\omega_{H2}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R'_L C_o}$$

故

$$\dot{A}_{uHs} = \dot{A}_{ums} \frac{1}{1 + j\omega C_i R'_S} \frac{1}{1 + j\omega C_o R'_L}$$

$$= \frac{\dot{A}_{ums}}{(1 + j\frac{\omega}{\omega_{H1}})(1 + j\frac{\omega}{\omega_{H2}})}$$

$$= \frac{\dot{A}_{ums}}{(1 + j\frac{f}{f_{H1}})(1 + j\frac{f}{f_{H2}})}$$

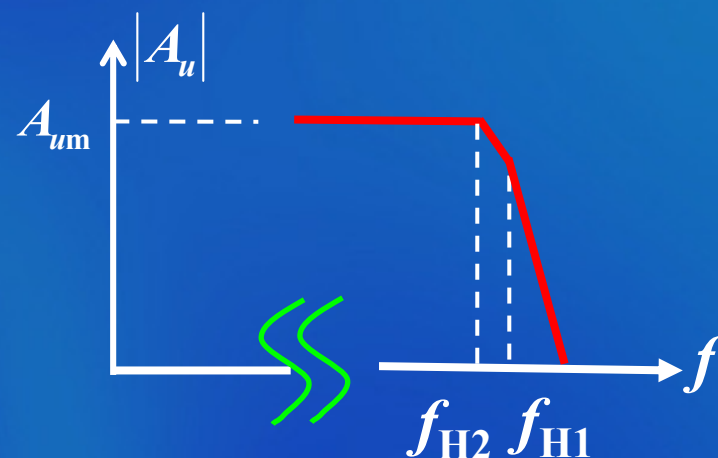
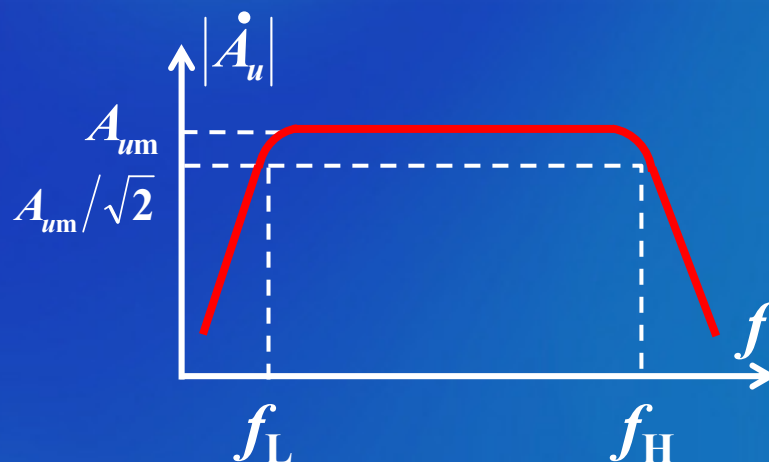
$$f_{H1} = \frac{\omega_{H1}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R'_S C_i}$$

$$f_{H2} = \frac{\omega_{H2}}{2\pi} = \frac{1}{2\pi R'_L C_o}$$

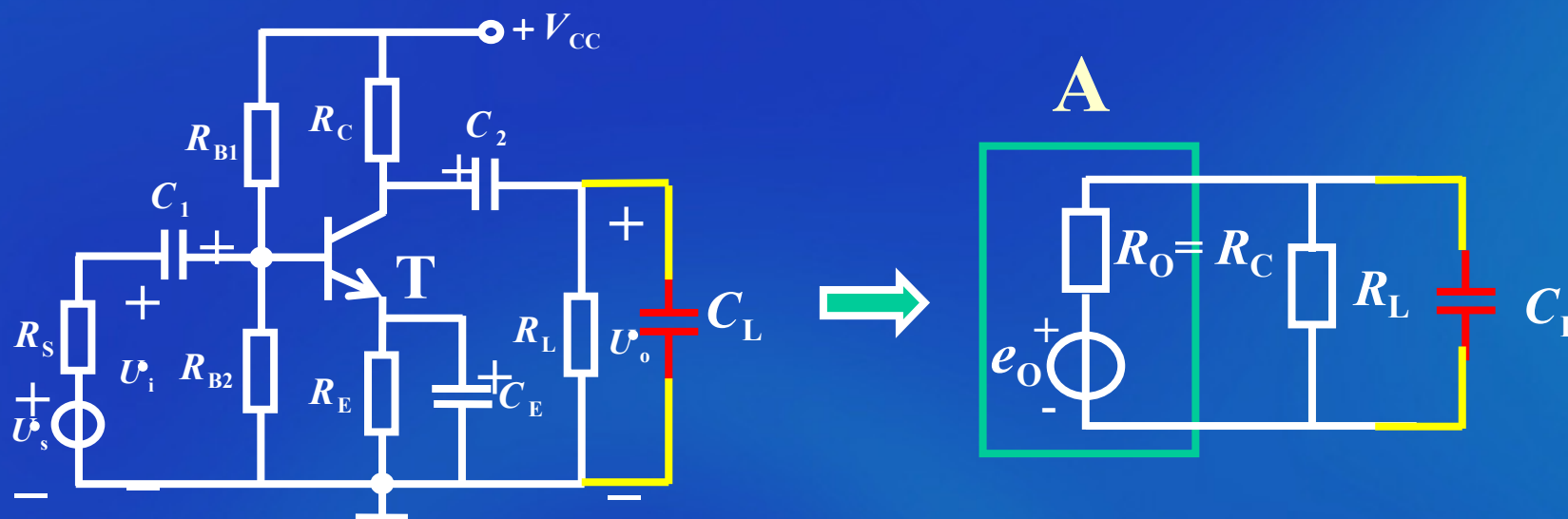
取小（5-10倍）的为 f_H

$$f_H = \frac{1}{2\pi\tau_H}$$

若差异不大，则 $f_H \approx 0.9(f_{H1}^{-2} + f_{H2}^{-2})^{-1/2}$



总 结：放大电路高频区分析



求 $\left\{ \begin{array}{l} f_{H1} = \frac{1}{2\pi\tau_{1H(T)}} \\ f_{H2} = \frac{1}{2\pi(R_C // R_L)C_L} \end{array} \right.$ ← 结电容的时间常数 } 取小的 (5-10倍) 为 f_H

一般情况下, 若 C_L 存在, 则它决定 f_H

若差异不大, 则 $f_H \approx 0.9(f_{H1}^{-2} + f_{H2}^{-2})^{-1/2}$

名词:

惯性元件——指其能量不能突变的元件(如电容)。

惯性环节——含惯性元件的回路。

当低频区只考虑一个电容 C_1' 或 C_2

高频区只考虑一个电容 C_i 或 C_o

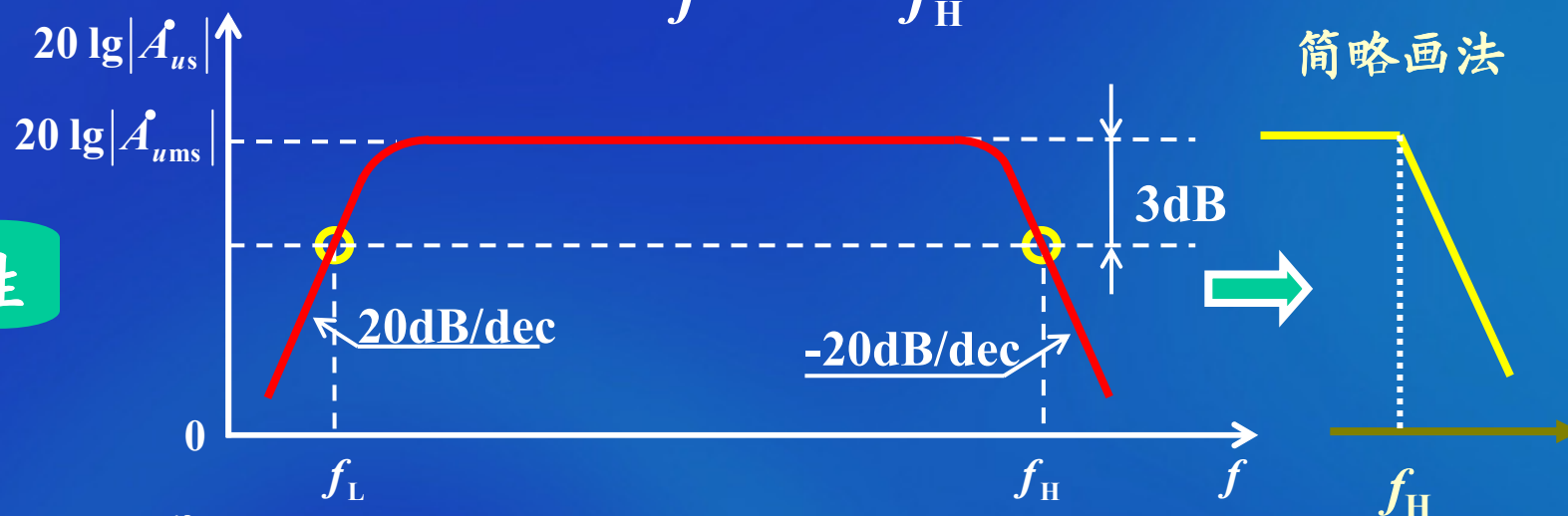
即当低、高频区的等效电路都只含一个惯性环节时

放大电路的电压放大倍数可表示为

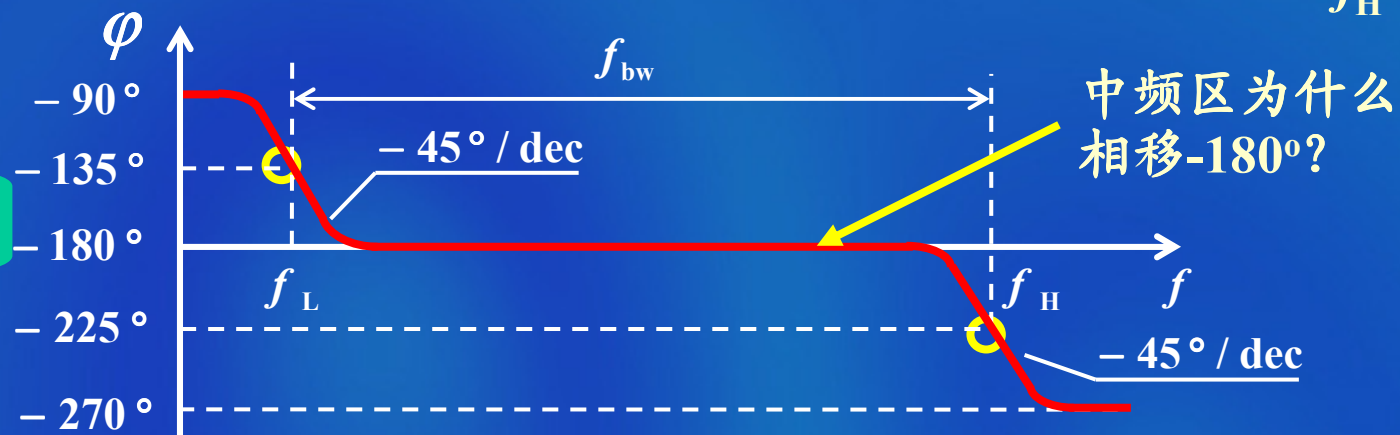
$$\dot{A}_{us} = \frac{\dot{A}_{ums}}{(1 - j\frac{f_L}{f})(1 + j\frac{f}{f_H})}$$

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

幅频特性



相频特性



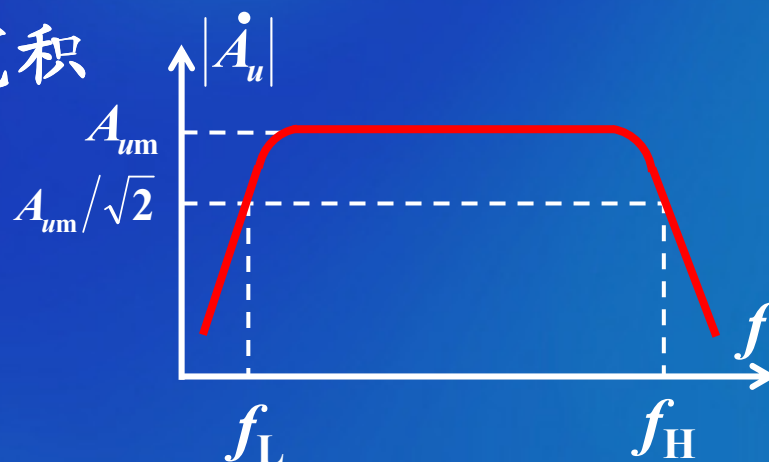
2.8.5 放大电路的增益带宽积

放大电路的带宽

$$f_{bw} = f_H - f_L$$

由于 $f_H \gg f_L$

故 $f_{bw} \approx f_H$



增益带宽积GBP (gain bandwidth product)

GBP的定义

$$\text{GBP} = A_{ums} f_{bw} \approx A_{ums} f_H$$

2.8.6 多级放大电路的频率响应

设放大电路的低高频区的等效电路均有多个惯性环节

1. 如果各个惯性环节决定的下限截止频率分别为

$$f_{L1}, f_{L2}, \dots, f_{Ln}$$

则，电路的下限截止频率 f_L

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

特别地, 当 $f_{Li} \gg f_{Lj}$ ($j=1, n \quad j \neq i$) 时

$$f_L \approx f_{Li} \quad \Rightarrow \quad \text{下限截止频率取大的}$$

b. 各个惯性环节决定的上限截止频率分别为

$$f_{H1}, f_{H2}, \dots, f_{Hn}$$

电路上限截止频率 f_H

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

$$= 0.9(f_{H1}^{-2} + f_{H2}^{-2} + \dots + f_{Hn}^{-2})^{-1/2}$$

特别地，当 $f_{Hi} \ll f_{Hj}$ ($j=1, n \quad j \neq i$) 时

$$f_H \approx f_{Hi} \quad \Rightarrow \quad \text{上限截止频率取小的}$$

小结：

对于多级放大电路（相对于单级放大电路）：

- (1) 增益高。
- (2) 下限截止频率 f_L 增大。
- (3) 上限截止频率 f_H 降低。
- (4) 频带 f_{bw} 变窄。

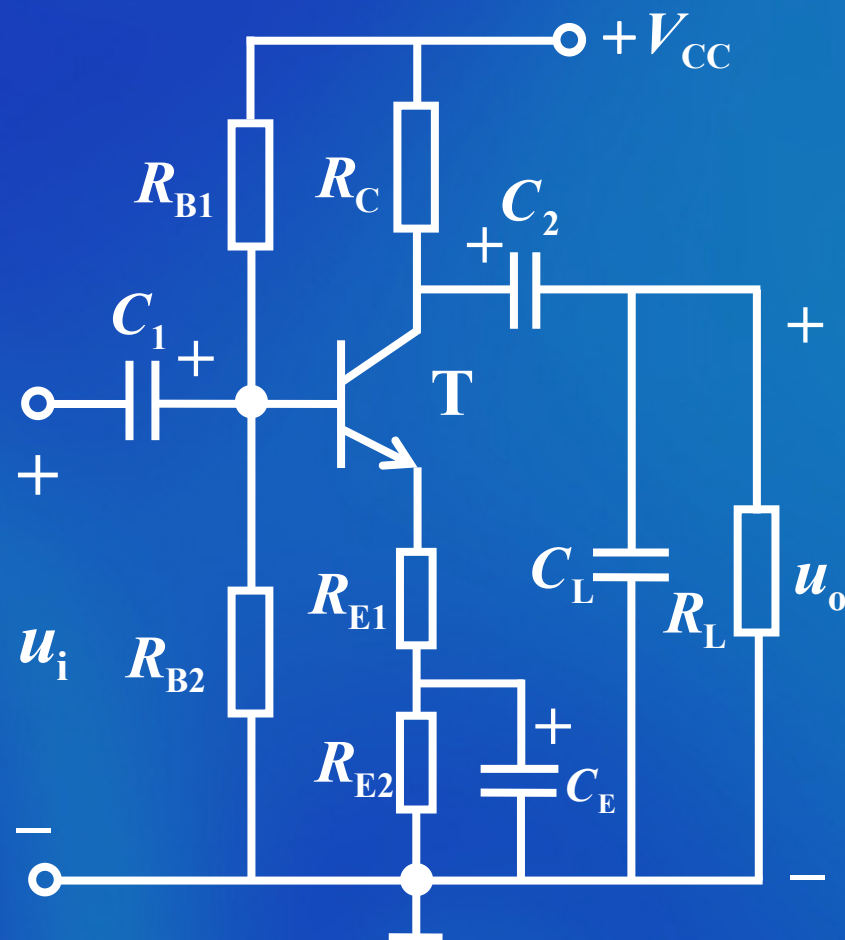
思考题

1. 通常影响晶体管高频性能的主要因素有那些？
2. 影响放大电路低频性能的主要因素是什么？
3. 放大电路频率特性用波特图表示有何好处？

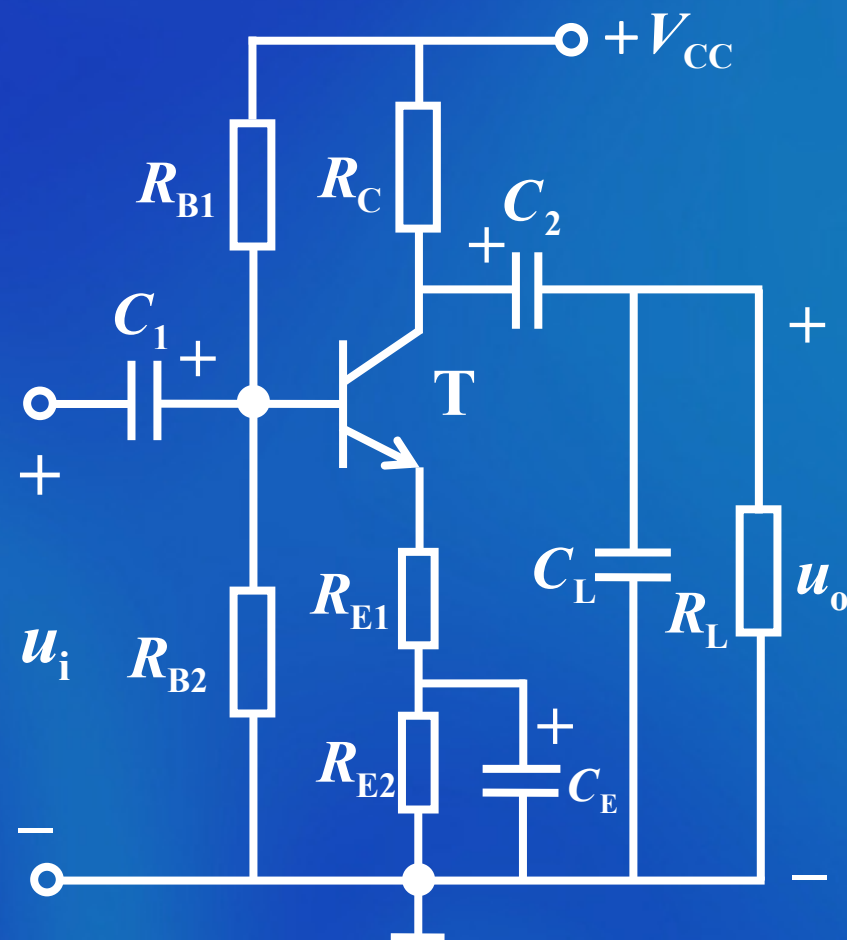
练习题

例1 在图示放大电路中，
已知 $V_{CC}=15V$, $R_{B1}=90k\Omega$,
 $R_{B2}=60k\Omega$,
 $R_C=R_L=2k\Omega$, $R_{E1}=0.2k\Omega$,
 $R_{E2}=1.8k\Omega$, $C_1=C_2=10\mu F$,
 $C_E=50\mu F$, $C_L=1600pF$ 。

三极管的 $r_{bb'}=300\Omega$,
 $\beta=100$, $U_{BE}=0.7V$, 结电
容可以忽略。试求：



- (1) 静态工作点 I_{CQ} , U_{CEQ} ;
- (2) A_{um} 、 R_i 、 R_o ;
- (3) 估计上、下限截止频率 f_H 和 f_L ;
- (4) U_{opp} 及输入电压最大值 U_{im} ;
- (5) 当输入电压 u_i 的最大值大于 U_{im} 时, 输出将首先出现什么失真?



解: (1) 估算法

$$V_{BQ} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

$$= \frac{60}{90 + 60} \times 15$$

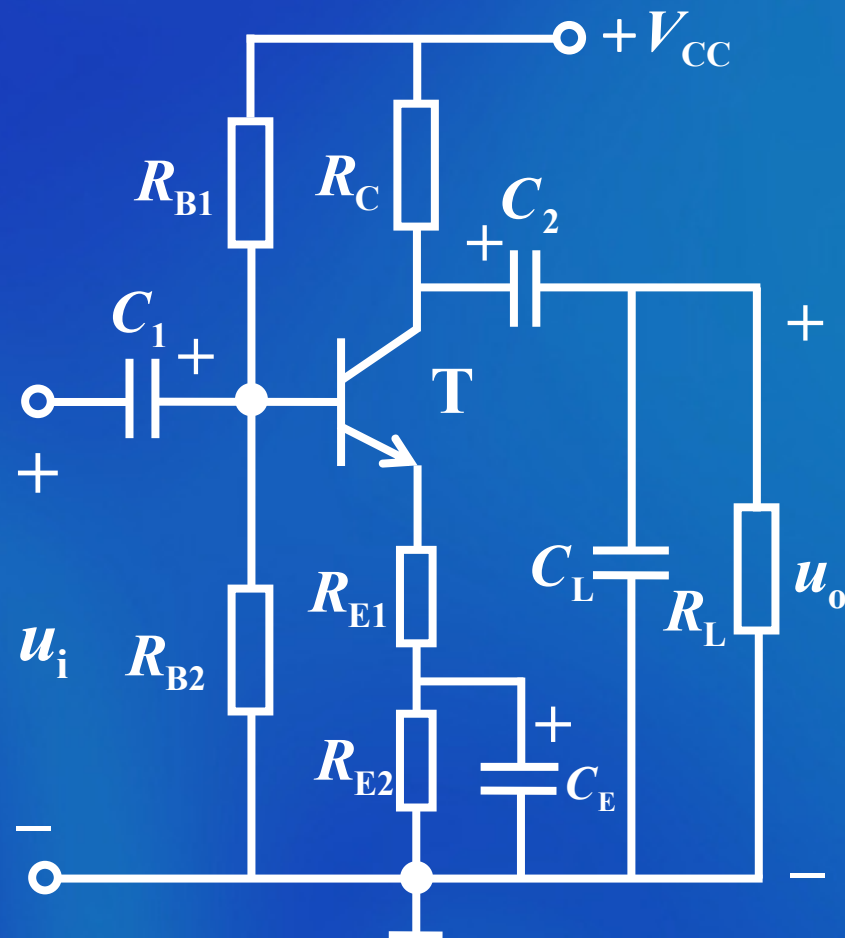
$$= 6V$$

$$I_{CQ} \approx I_{EQ}$$

$$= \frac{U_{BQ} - U_{BEQ}}{R_{E1} + R_{E2}}$$

$$= \frac{6 - 0.7}{2}$$

$$= 3.15mA$$



$$U_{CEQ} = V_{CC} - I_{CQ}R_C - I_{EQ}(R_{E1} + R_{E2})$$

$$\approx V_{CC} - I_{EQ} (R_C + R_{E1} + R_{E2})$$

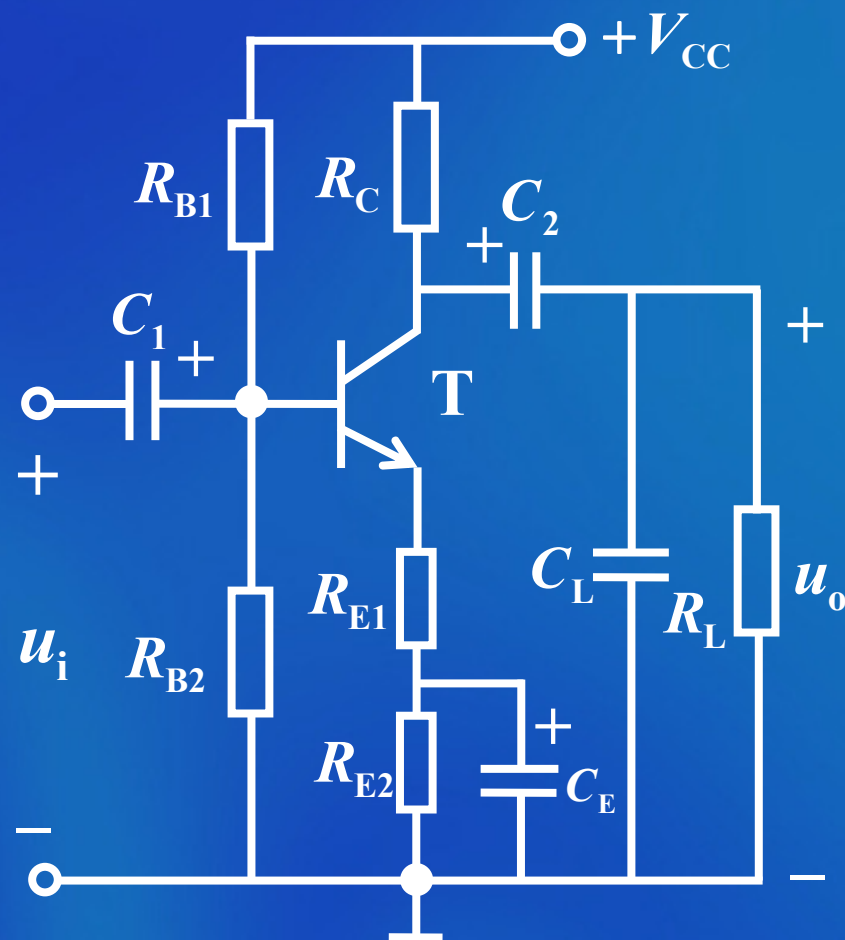
$$= 15 - 3.15 \times (2 + 2)$$

$$= 2.4 \text{ V}$$

$$(2) \quad r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{U_T}{I_{EQ}}$$

$$\approx 300 + 101 \times \frac{26}{3.15}$$

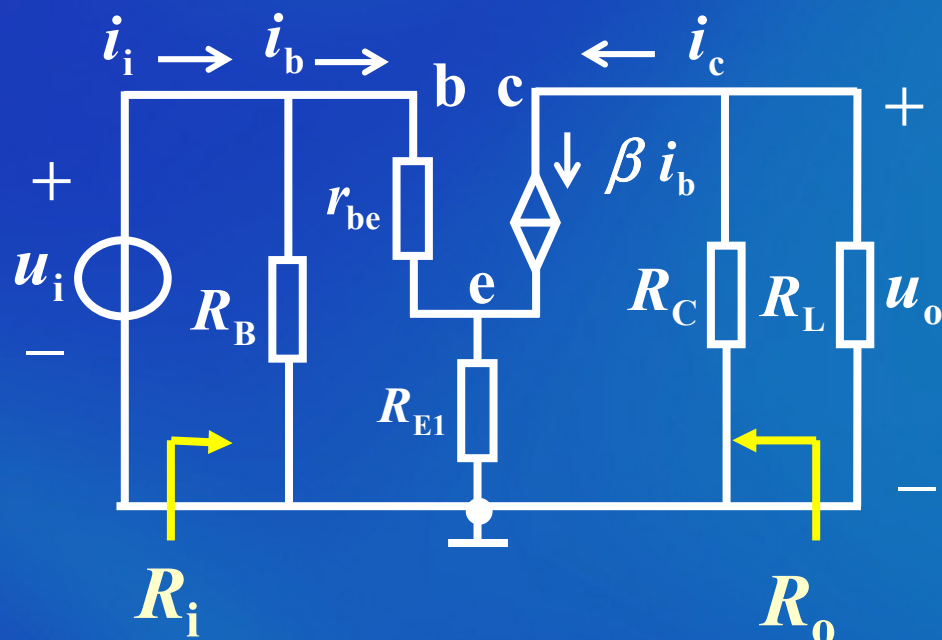
$$\approx 1.13 \text{ k}\Omega$$



$$\begin{aligned}\dot{A}_{um} &= \frac{-\beta R_L // R_C}{r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}} \\ &= \frac{-100 \times 2 // 2}{1.13 + 101 \times 0.2} \\ &\approx -4.7\end{aligned}$$

$$R_o = R_C = 2\text{k}\Omega$$

$$\begin{aligned}R_i &= R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta) R_{E1}] \\ &\approx 90 // 60 // [1.13 + 101 \times 0.2] \\ &\approx 13.4\text{k}\Omega\end{aligned}$$



(3) a. 估算法下限截止频率

单独考虑电容影响

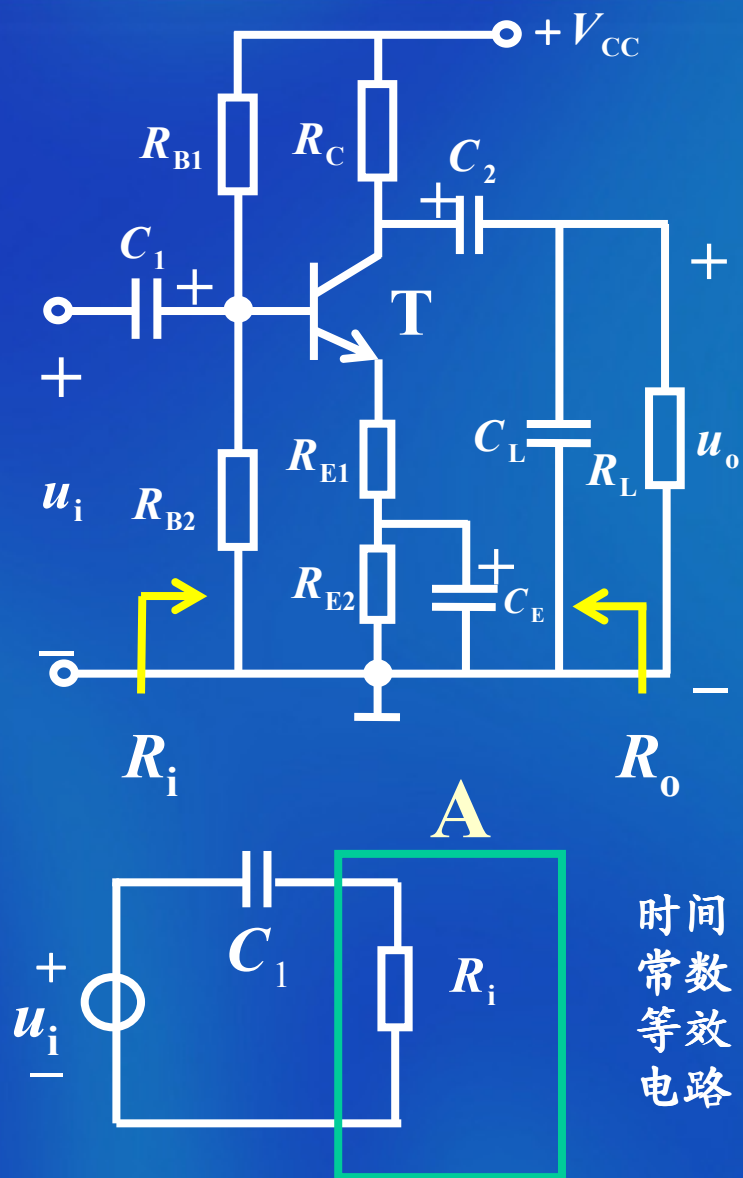
(a) C_1 决定的下限截止频率

将 C_E 和 C_2 看成短路

$$f_{L1} = \frac{1}{2\pi R_i C_1}$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 13.4 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}}$$

$$\approx 1.2 \text{Hz}$$



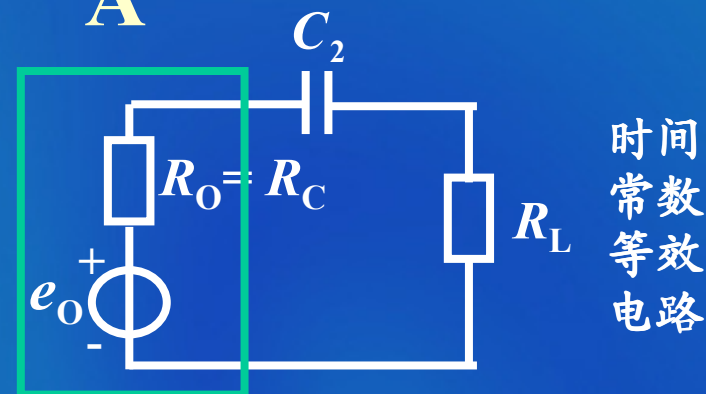
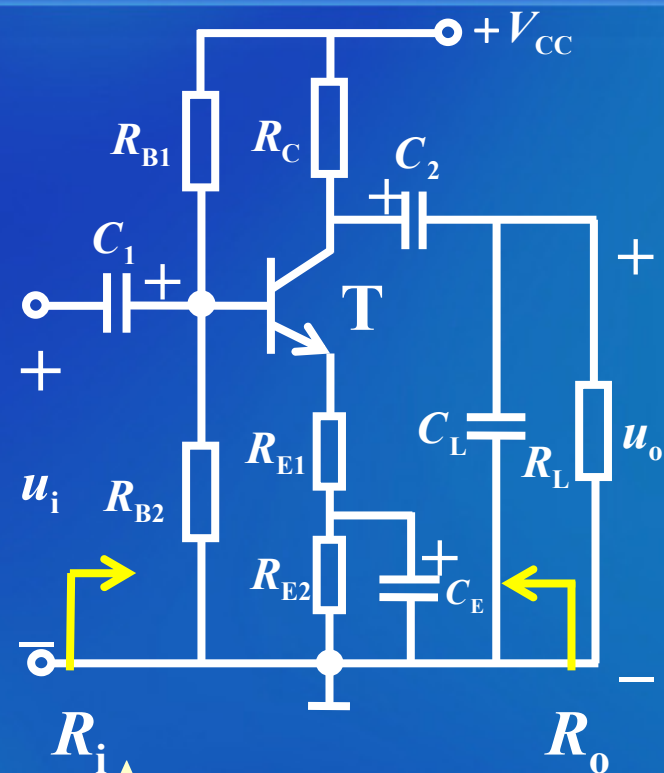
(b) C_2 决定的下限截止频率

将 C_1 和 C_E 看成短路

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

$$= \frac{1}{2\pi \times 4 \times 10^3 \times 10 \times 10^{-6}}$$

$$\approx 4\text{Hz}$$



(c) C_E 决定的下限截止频率

将 C_1 和 C_2 看成短路

忽略 R_B 的影响，电路可以从 C_E 前等效

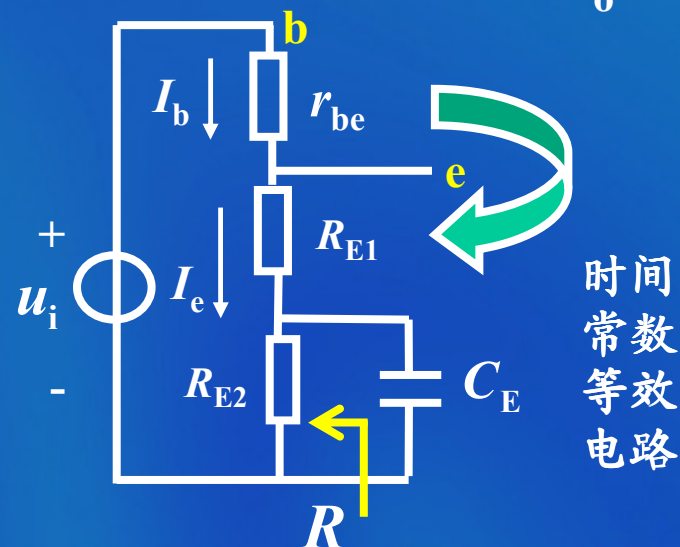
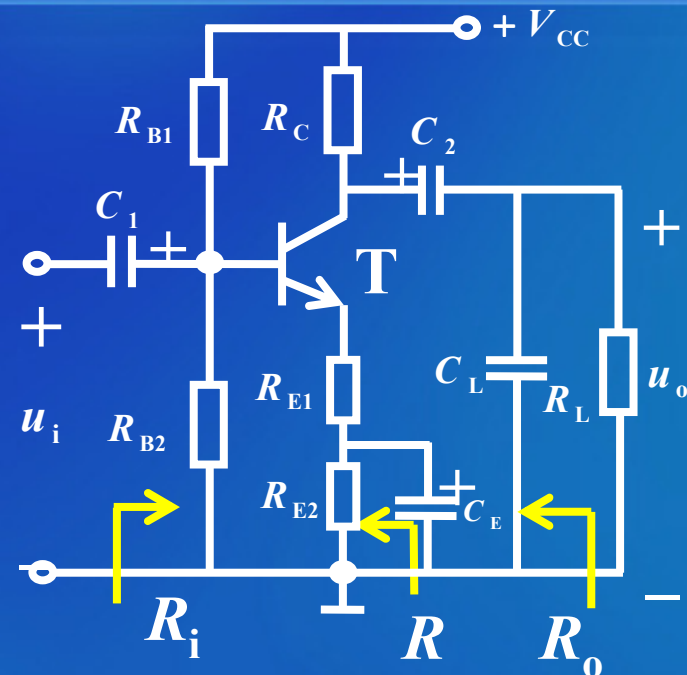
$$f_{L3} = \frac{1}{2\pi RC_E}$$

图中 $R = R_{E2} // [R_{E1} + \frac{r_{be}}{1+\beta}]$

$$\approx 0.18k\Omega$$

故 $f_{L3} = \frac{1}{2\pi RC_E}$

$$= \frac{1}{2\pi \times 0.18 \times 10^3 \times 50 \times 10^{-6}} \\ \approx 1.8Hz$$



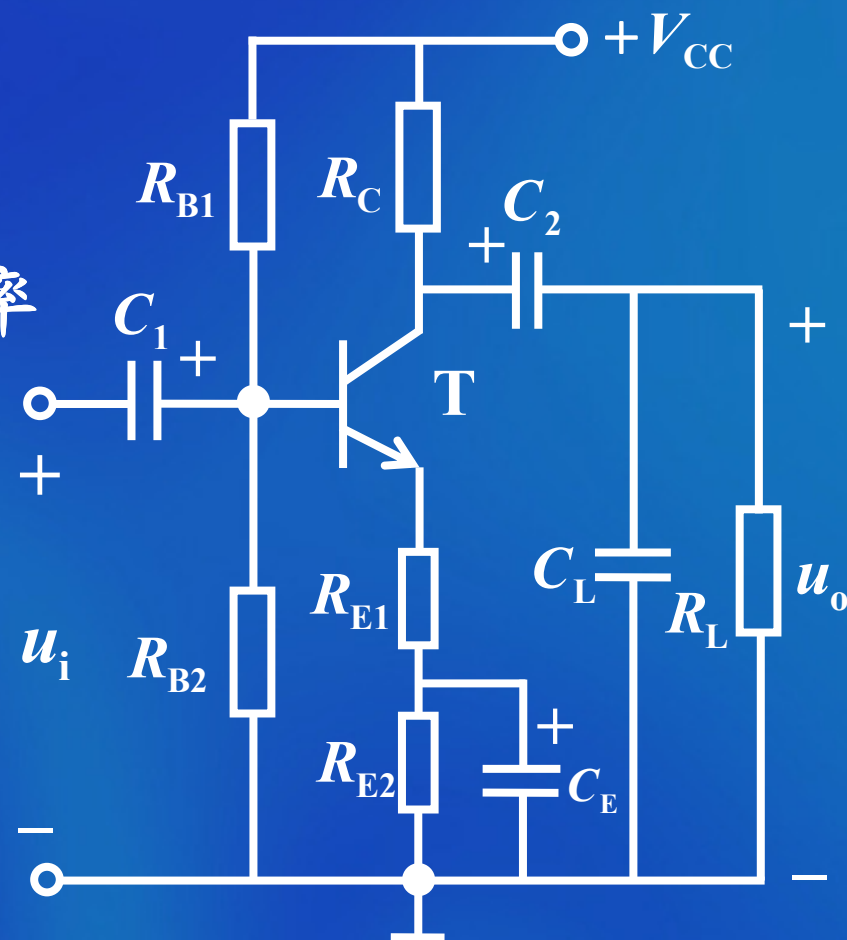
三个频率相差不大

由此可得电路的下限截止频率

$$f_L \approx 1.1\sqrt{f_{L1}^2 + f_{L2}^2 + f_{L3}^2}$$

$$= 1.1\sqrt{1.2^2 + 4^2 + 1.8^2}$$

$$\approx 5\text{Hz}$$



b. 估算法上限截止频率

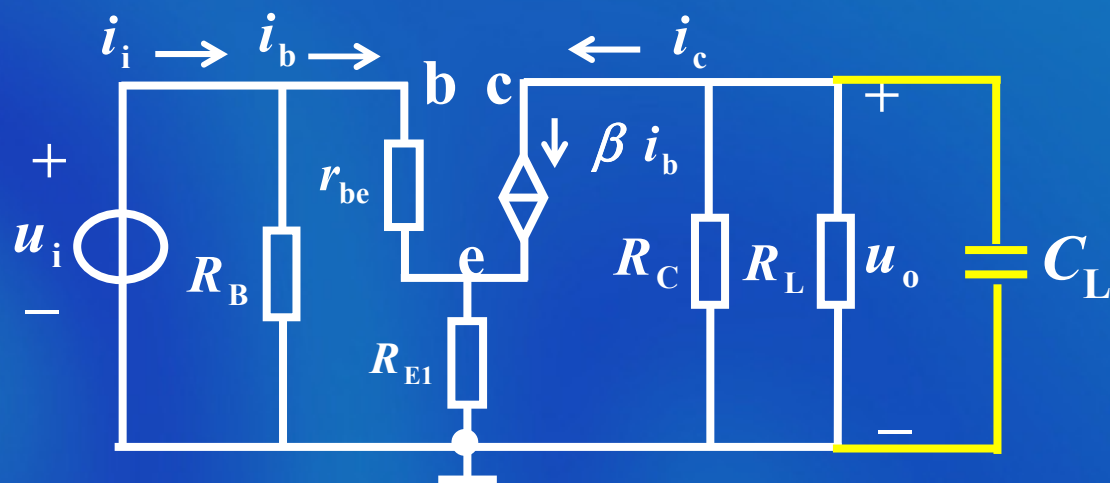
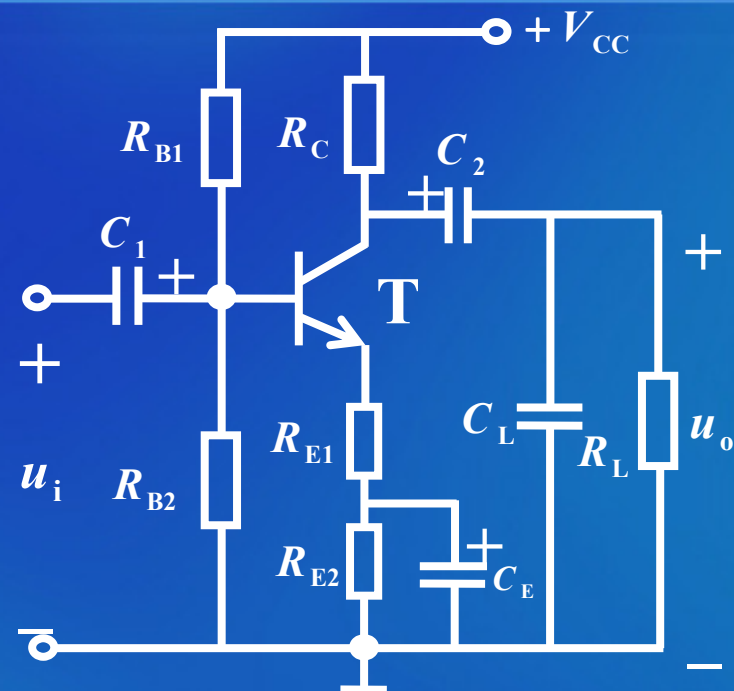
根据题意，忽略结电容的影响。则影响电路上限截止频率的电容只有 C_L 。

故

$$f_H = \frac{1}{2\pi(R_L // R_C)C_L}$$

$$= \frac{1}{2\pi \times 1 \times 10^3 \times 1600 \times 10^{-12}}$$

$$\approx 99.5 \text{ kHz}$$



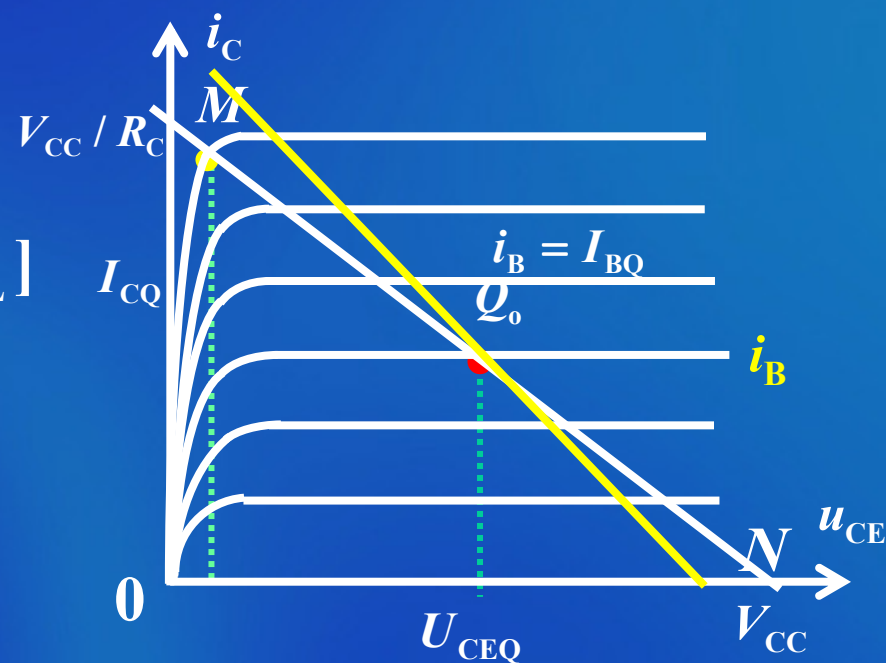
(4) 求 U_{opp} 及输入电压最大值 U_{im}

由 $U_{CEQ} = 2.4 \text{ V}$

得 $I_{CQ} R'_L = 3.15 \text{ V}$

$$U_{opp} = 2 \times \min[U_{CEQ}, I_{CQ} R'_L] = 4.8 \text{ V}$$

$$U_{im} = \frac{U_{opp}}{|A_{um}|} = \frac{2.4}{4.7} \approx 0.5 \text{ V}$$



(5) 当输入电压 u_i 的最大值大于 U_{im} 时，输出将首先出现什么失真？

由于 $I_{CQ}R'_L > U_{CEQ}$

故

当输入电压 u_i 的最大值大于 U_{im} 时

输出将首先出现饱和失真

