# 第五章 基本放大电路

## —— 5.5 放大电路的频率特性

李泳佳
东南大学电子系国家ASIC工程中心
yongjia.li@outlook.com

# 第五章内容

5.1 放大电路的组成及技术指标

5.2 放大电路的分析方法

5.3 放大电路的稳定偏置

5.4 各种基本组态放大电路的分析与比较

**5.5 放大电路的频率相应**

5.6 一般组合放大电路

# 本节内容

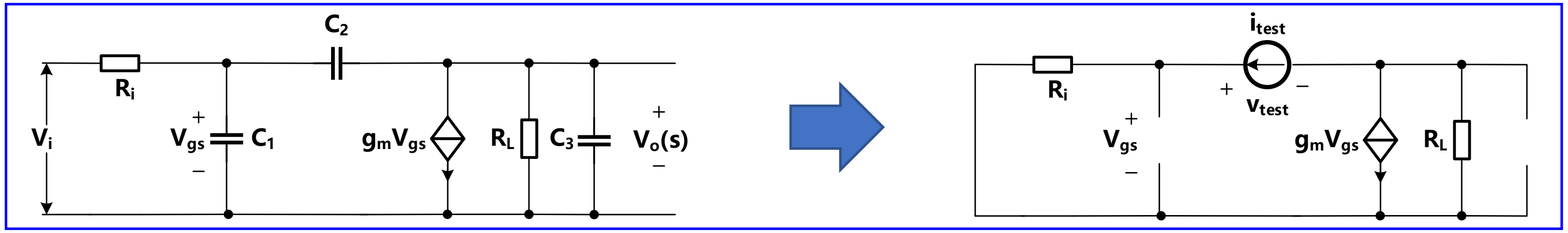
# 5.5.3 三极管的高频参数——回顾

✓ **开路时间常数法：计算步骤**

- 计算每个电容两端的等效电阻（其他电容开路）
- 每个电容乘以其两端的等效电阻，得到对应时间常数$\tau_i$
- 将每一个$\tau_i$求和，估算上限截止频率$\omega_H$

$$H(s)=\frac{A}{(\tau_1 s+1)(\tau_2 s+1)\ldots(\tau_n s+1)}\approx\frac{A}{(\tau_1+\tau_2\ldots+\tau_n)s+1}$$

$$\omega_H=\frac{1}{\tau_1+\tau_2\ldots+\tau_n}$$

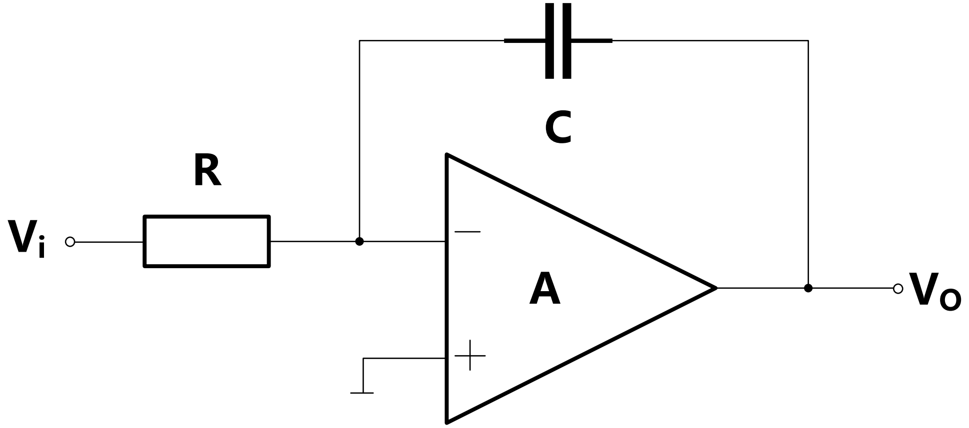


# 5.5.3 三极管的高频参数——回顾

✓ **密勒效应：**

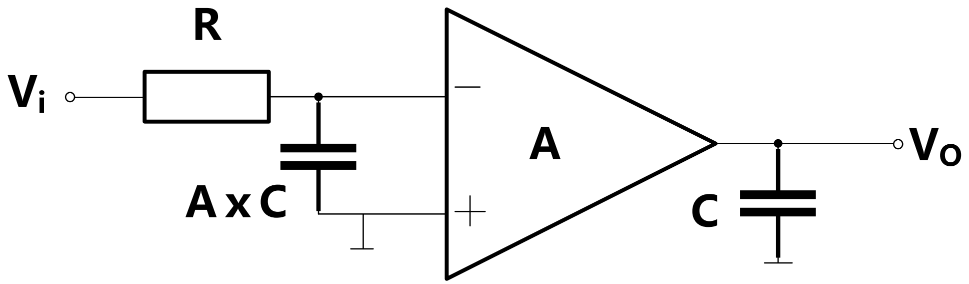
- 计算积分器的传输函数

$$\frac{V_i - V_-}{R} \times \frac{1}{sC} = V_o, \quad v_- \times A = -v_o$$




$$\Rightarrow \frac{V_o}{V_i} = -\frac{A}{1+sCR\times A}$$

- 运用密勒效应计算




$$\frac{V_o}{V_i} = -\frac{A}{1+sCR\times A}$$

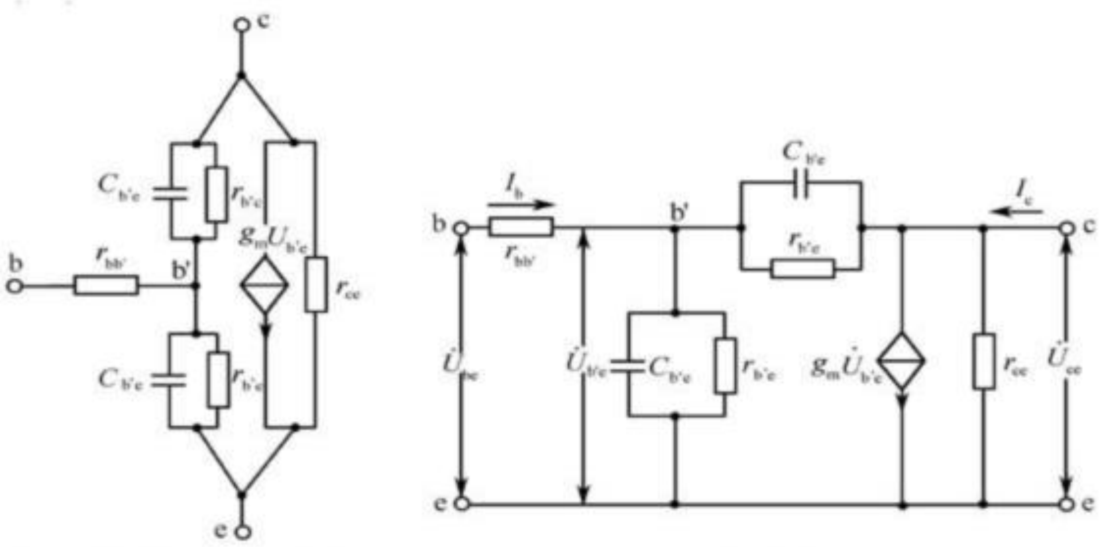
# 5.5.3 三极管的高频参数——回顾

✓ **混合 π 型高频小信号模型：**

- 等效电路
- 参数计算

$$r_{b'e} = (1+\beta_o)\frac{26mV}{I_E(mA)}$$

$$g_m \approx \frac{\beta_0}{r_{b'e}} = \frac{I_{EQ}(mA)}{26mV} = 38.5I_{EQ}(mS)$$

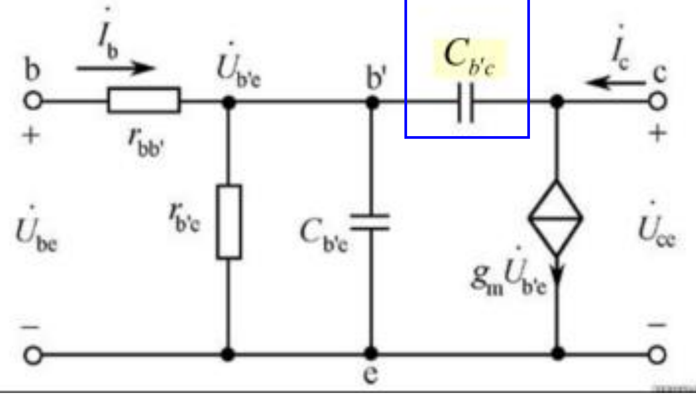



(a) 三极管的物理模拟电路　　(b) 混合π型

简化：

忽略$r_{b'c}$、 $r_{ce}$

忽略$C_{b'c}$、 $C_{b'e}$



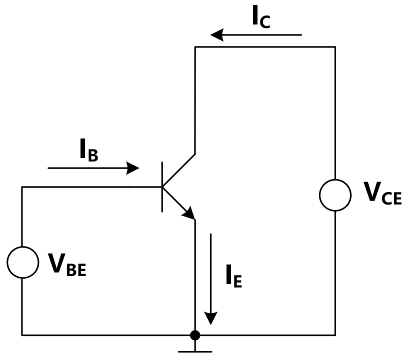

✓ **三极管手册中给出$C_{b'c}$和fT，**

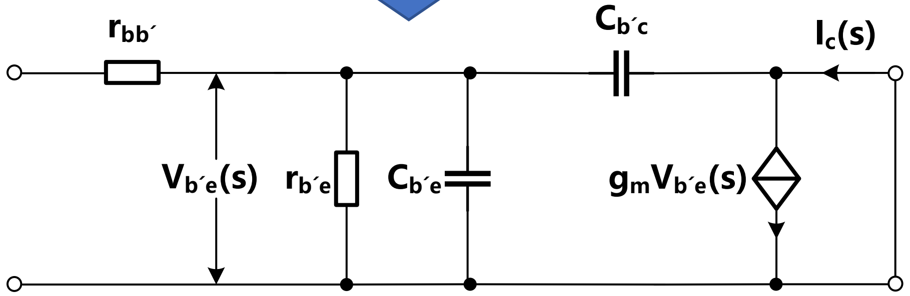
$$C_{b'e} \approx \frac{g_m}{2\pi f_T}$$

# 5.5.3 三极管的高频参数

✓ **电流放大系数β的频率响应：**

- 共射极截止频率$f_\beta$： $\beta = \frac{I_c}{I_b}$， $V_{CE}$加恒定电压




$$I_b = V_{b'e}\left(\frac{1}{r_{b'e}} + sC_{b'e} + sC_{b'c}\right)$$

$$I_c = V_{b'e}(g_m - sC_{b'c})$$

$$\beta = \frac{g_m - sC_{b'c}}{\frac{1}{r_{b'e}} + sC_{b'e} + sC_{b'c}} \approx \frac{g_m r_{b'e}}{1 + sr_{b'e}(C_{b'e} + C_{b'c})} = \frac{\beta_0}{1 + j\frac{f}{f_\beta}}$$

其中， $s = j\omega$， $\omega = 2\pi f$， $\beta_0 = g_m r_{b'e}$

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

# 5.5.3 三极管的高频参数

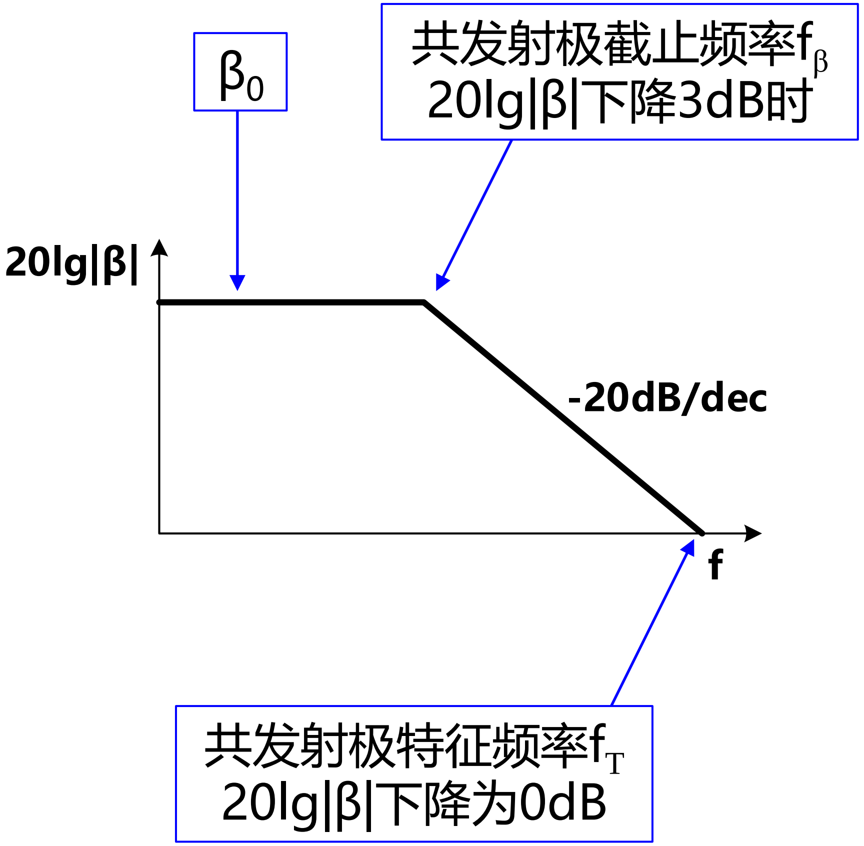
✓ **电流放大系数β的频率响应：**

- 共射极截止频率$f_\beta$：$\beta=\frac{I_c}{I_b}$，$V_{CE}$加恒定电压

$$\beta=\frac{\beta_0}{1+j\frac{f}{f_\beta}},\quad \beta_0=g_m r_{b'e},\quad f_\beta=\frac{1}{2\pi r_{b'e}(C_{b'e}+C_{b'c})}$$

- 共射极特征频率$f_T$：$\beta=\frac{\beta_0}{\sqrt{1+(\frac{f_T}{f_\beta})^2}}\approx 1$

$$f_T=\beta_0 f_\beta=\frac{g_m r_{b'e}}{2\pi r_{b'e}(C_{b'e}+C_{b'c})}\approx\frac{g_m}{2\pi C_{b'e}}$$



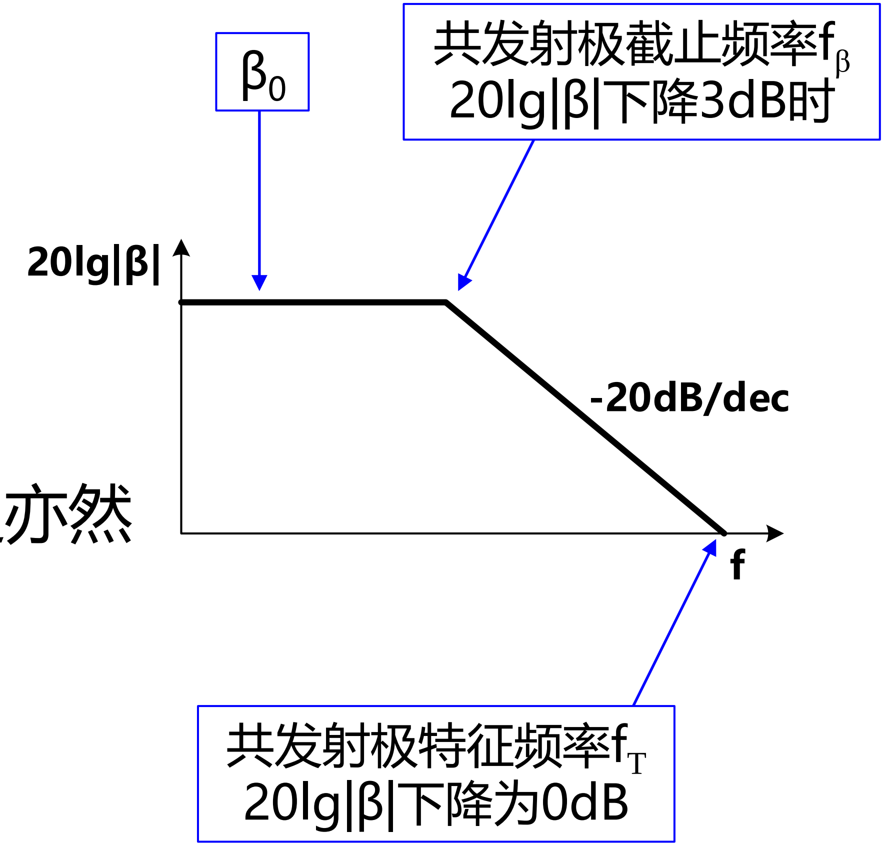
# 5.5.3 三极管的高频参数

✓ **电流放大系数β的频率响应：**

- 共射极截止频率$f_\beta$和特征频率$f_T$：

$$f_T = \beta_0 f_\beta = \frac{g_m r_{b'e}}{2\pi r_{b'e}(C_{b'e}+C_{b'c})} \approx \frac{g_m}{2\pi C_{b'e}}$$

- 单极点系统：-20dB/十倍频→ x 0.1/十倍频
- 增益带宽积恒定：增益变大，带宽变小，反之亦然

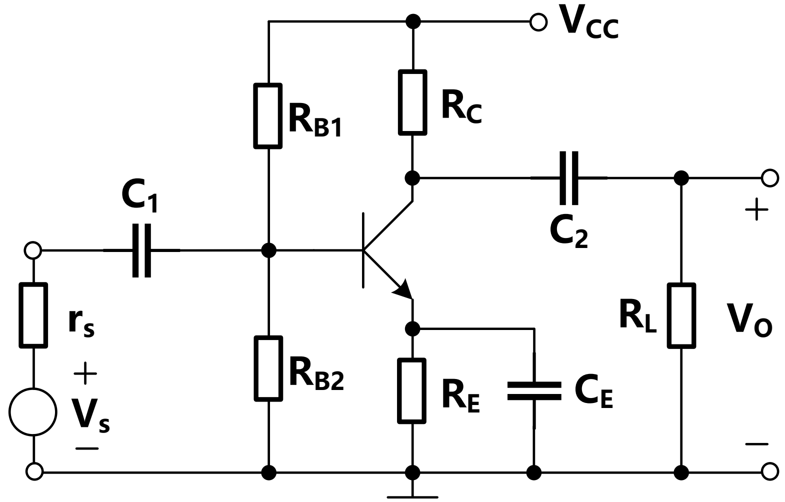


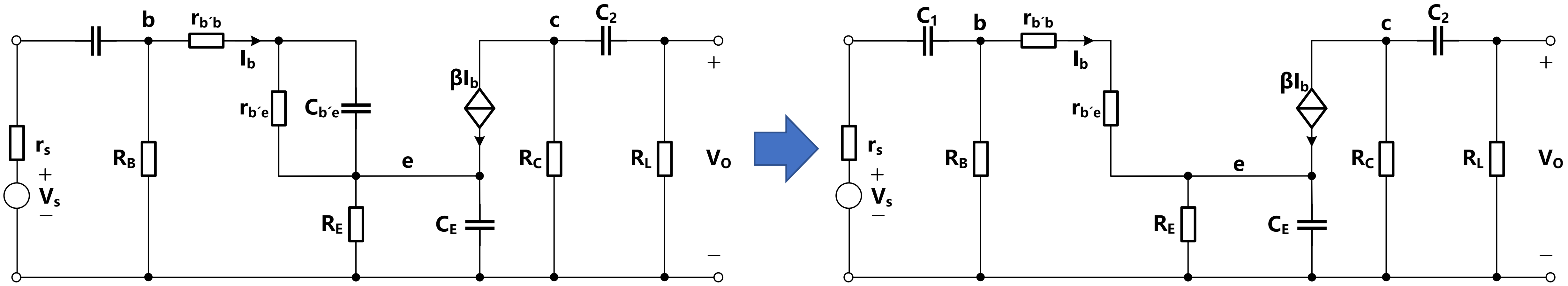
# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

✓ **微变等效电路：低频，推导传递函数**

- $R_B=R_{B1}//R_{B2}$远大于电路输入阻抗
- $C_E$足够大，在低频范围内远小于$R_E$

$$\left|\frac{1}{j\omega C_E}\right| << R_E$$

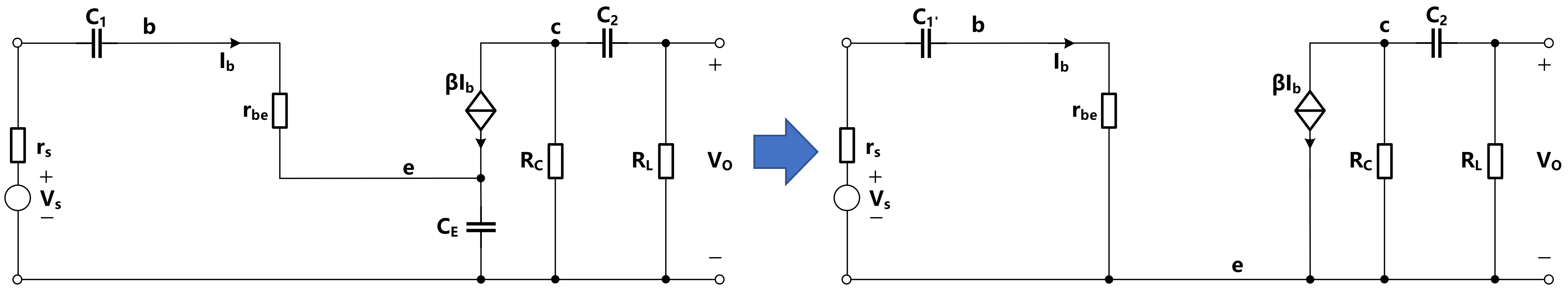


# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

✓ **微变等效电路：低频，推导传递函数**

- 将$C_E$分别等效到输入和输出回路
- 输入：$V_e=(1+\beta)I_b\frac{1}{sC_E}\rightarrow Z=\frac{V_e}{I_b}=\frac{(1+\beta)}{sC_E}\rightarrow C_{E'}=\frac{C_E}{1+\beta}\rightarrow C_{1'}=\frac{C_1C_E}{(1+\beta)C_1+C_E}$



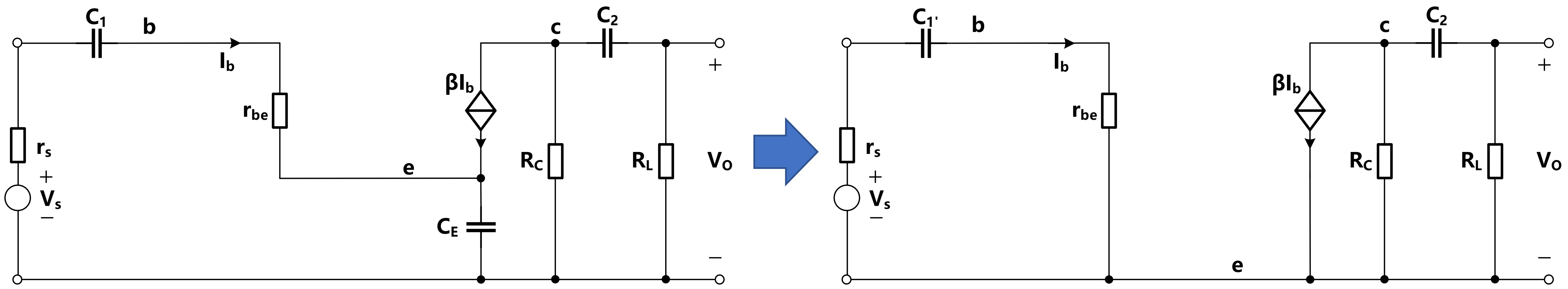
# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

✓ **微变等效电路：低频，推导传递函数**

- 将$C_E$分别等效到输入和输出回路

- **输入：** $V_e = (1+\beta)I_b\frac{1}{sC_E} \rightarrow Z = \frac{V_e}{I_b} = \frac{(1+\beta)}{sC_E} \rightarrow C_{E'} = \frac{C_E}{1+\beta} \rightarrow C_{1'} = \frac{C_1C_E}{(1+\beta)C_1+C_E}$

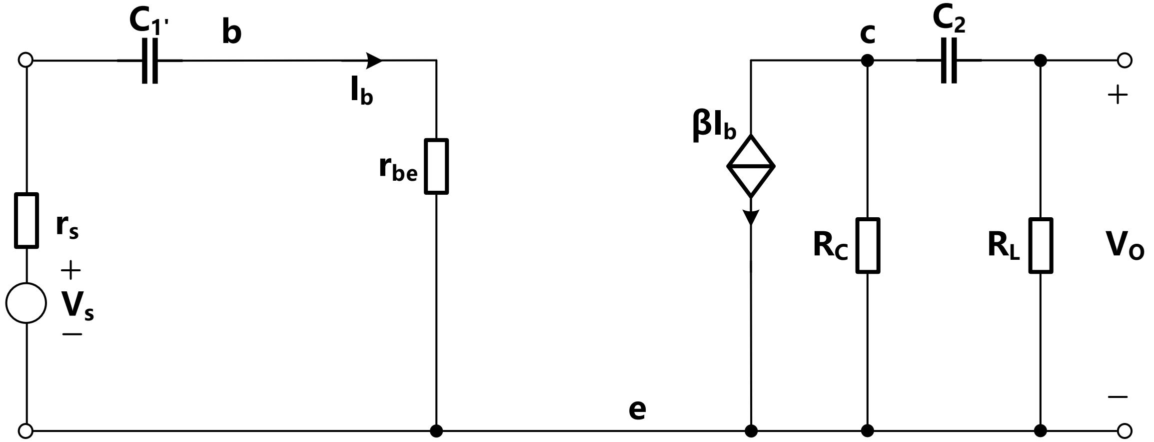
- **输出：** 一般有$C_E \gg C_2$，忽略$C_E$



# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

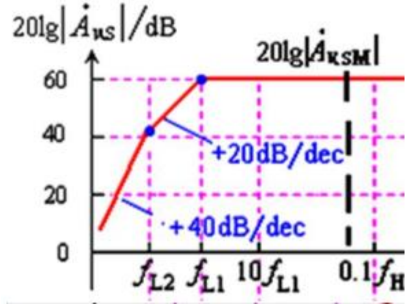
✓ **微变等效电路：低频，推导传递函数**

- 将$C_E$分别等效到输入和输出回路
- **输入：** $V_s = (r_s + r_{be} + 1/sC_{1'})I_b$
- **输出：** $V_o = -\beta I_b R_C \dfrac{R_L}{(R_C+R_L+1/sC_2)}$




$$\frac{V_o}{V_s} = -\beta I_b R_C \frac{R_L}{(R_C+R_L+1/sC_2)} \cdot \frac{1}{\left(r_s+r_{be}+\frac{1}{sC_{1'}}\right)I_b} = -\beta \frac{sC_2R_LR_C}{1+sC_2(R_L+R_C)} \cdot \frac{sC_{1'}}{1+sC_{1'}(r_s+r_{be})}$$

$$\omega_{L1} = \frac{1}{C_2(R_L+R_C)}, \quad \omega_{L2} = \frac{1}{C_{1'}(r_s+r_{be})}, \quad \omega = 2\pi f$$



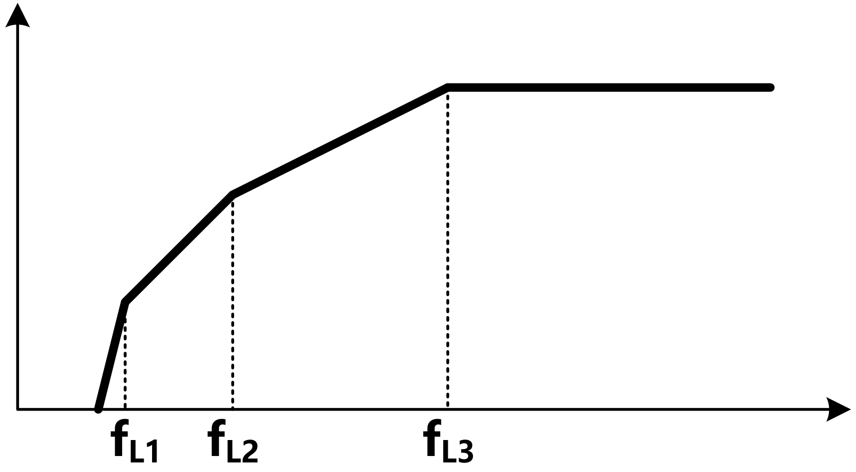
# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

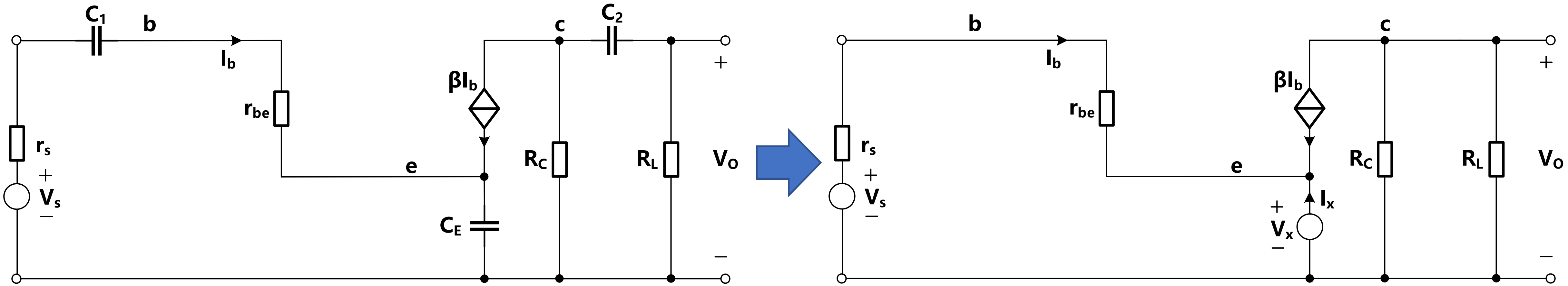
✓ 微变等效电路：低频，短路时间常数法

- $C_1$：$C_E$和$C_2$短路，$R_1=r_s//r_{be}$，$f_{L1}=\dfrac{1}{2\pi R_1 C_1}$

- $C_2$：$C_E$和$C_1$短路，$R_2=R_C+R_L$，$f_{L2}=\dfrac{1}{2\pi R_2 C_2}$

- $C_E$：$C_1$和$C_2$短路，$R_E=\dfrac{r_s+r_{be}}{1+\beta}$，$f_{L3}=\dfrac{1}{2\pi R_3 C_E}$



# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

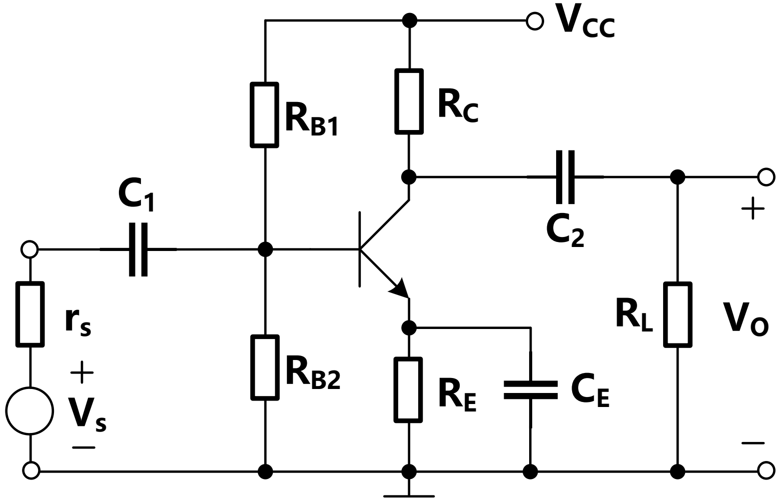
✓ **微变等效电路：高频，用密勒效应推导传递函数**

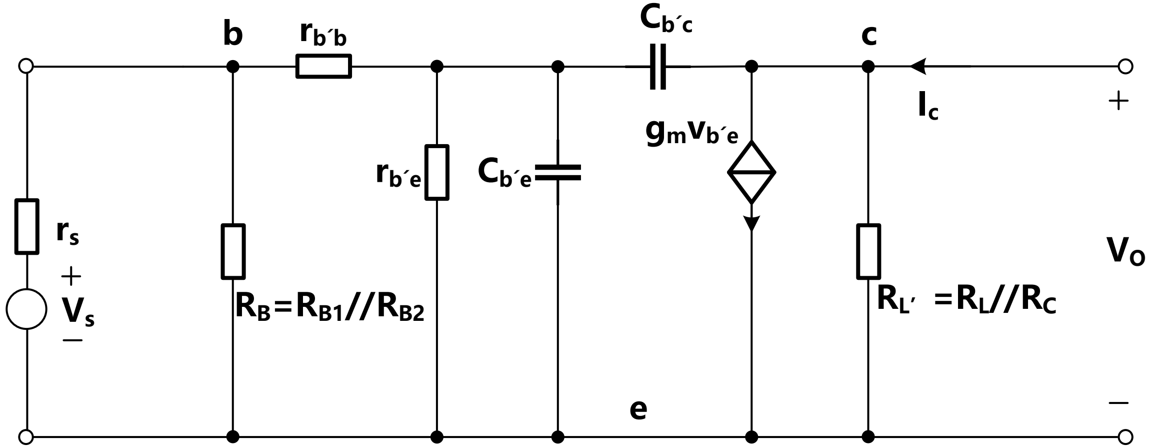
- KCL：

$$I_C(s) = g_m V_{b'e}(s) + [V_o(s) - V_{b'e}(s)]sC_{b'c}$$

$$V_o(s) = I_C(s) R_{L'}$$

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_{b'e}(s)} = -\frac{(g_m - sC_{b'c})R_{L'}}{1 + sC_{b'c}R_{L'}} \approx -g_m R_{L'}$$



# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

✓ **微变等效电路：高频，用密勒效应推导传递函数**

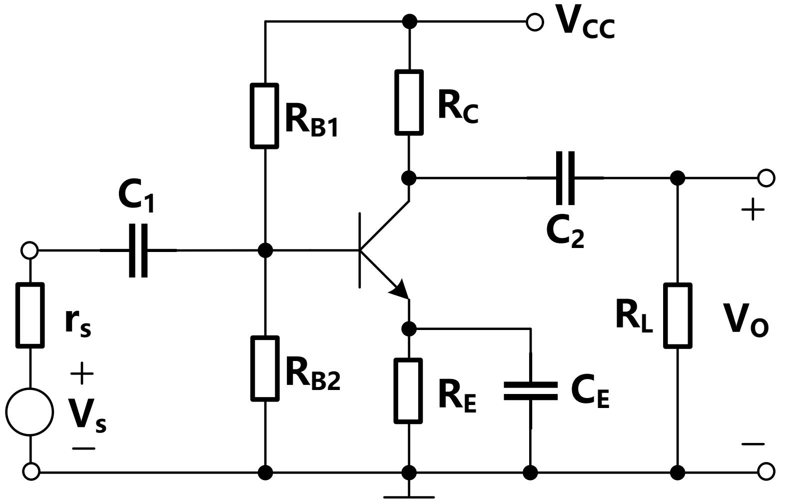
- KCL：

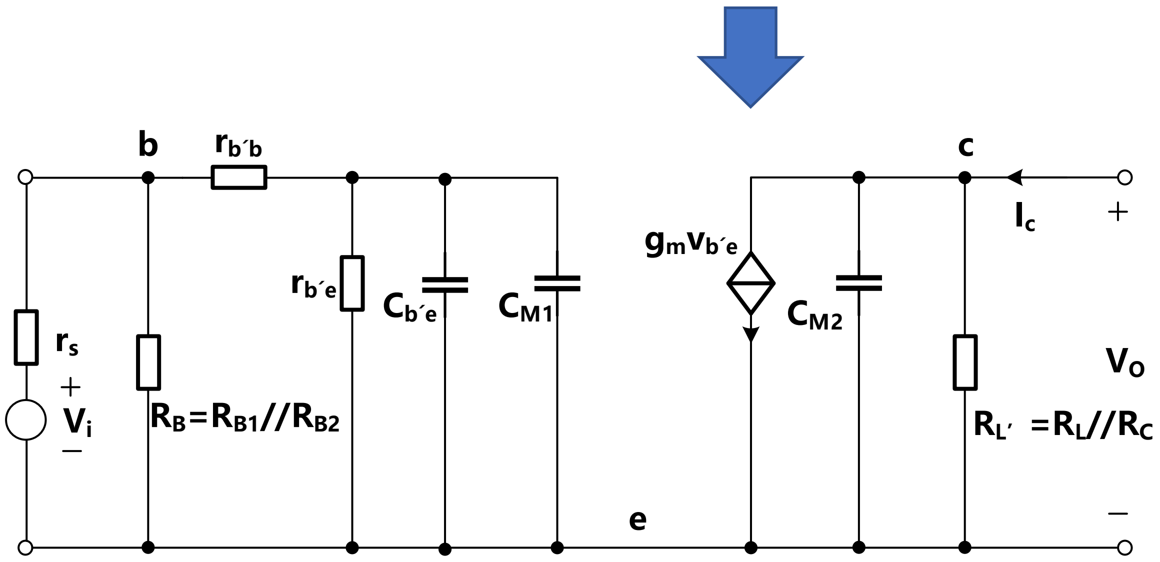
$$A(s)=\frac{V_o(s)}{V_{b'e}(s)}=-\frac{(g_m-sC_{b'c})R_{L'}}{1+sC_{b'c}R_{L'}}\approx -g_m R_{L'}$$

- 根据**密勒效应**：

$$C_{M1}\approx g_m R_{L'} C_{b'c}$$

$$C_{M2}\approx C_{b'c}$$



# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

✓ **微变等效电路：高频，用密勒效应推导传递函数**

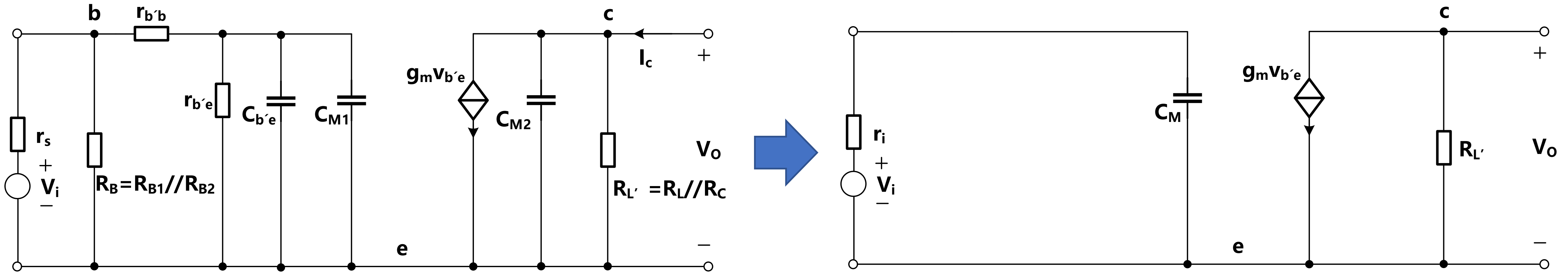
- 电阻简化：$r_s$与$R_B$并联，然后与$r_{b'b}$串联，然后与$r_{b'e}$并联

$$r_i = (r_{b'b} + r_s // R_B) // r_{b'e}$$

这里ri表述有问题，不是输入电阻

- 电容简化： $C_{M1}$与$C_{b'e}$并联(即 $C_M = C_{M1} + C_{b'e}$)，$C_{M2}$较小可以忽略

- 等效电路：低通RC滤波+跨导放大，$\frac{1}{1+sC_M r_i} \cdot g_m R_{L'}$



# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

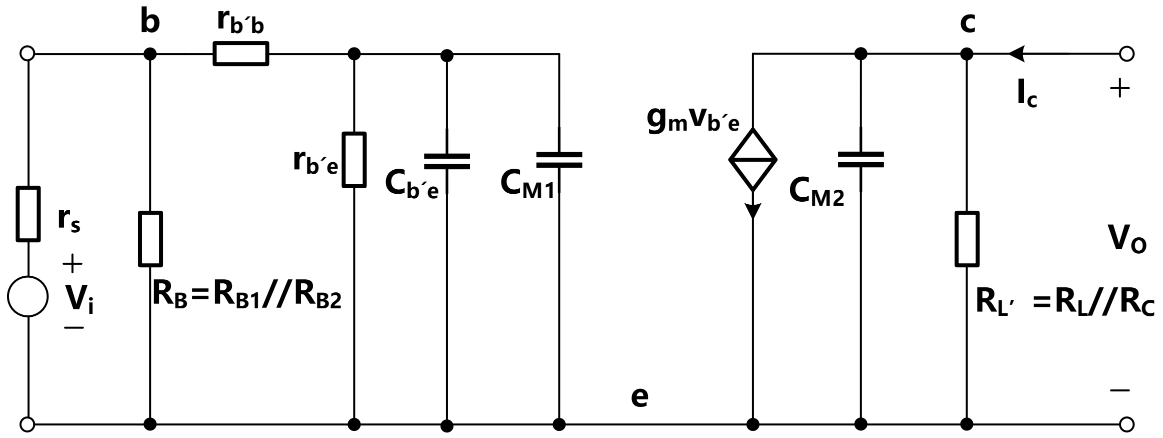
✓ 微变等效电路：高频，用密勒效应推导传递函数

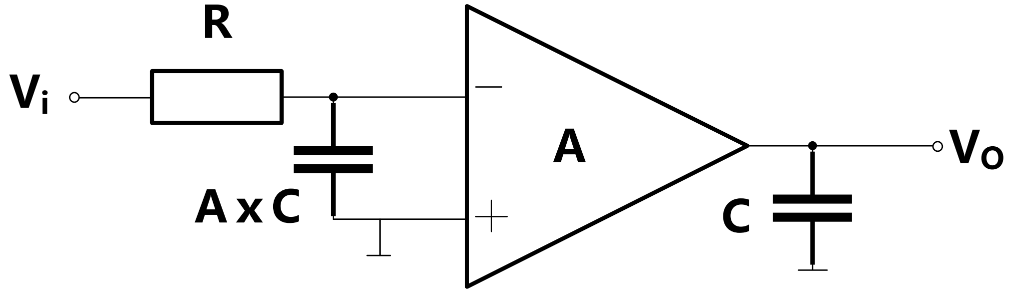
- 传递函数：

$$A(f)=A\frac{1}{1+j\frac{f}{f_H}}$$

其中，$A=\frac{V_o}{V_i}=\frac{V_{b'e}}{V_i}\cdot\frac{V_o}{V_{b'e}}=-\frac{r_{b'e}}{r_{b'b}+r_{b'e}}\cdot\frac{R_B//(r_{b'b}+r_{b'e})}{r_s+R_B//(r_{b'b}+r_{b'e})}\cdot g_m R_{L'}$

$$f_H=\frac{1}{2\pi r_i C_M}=\frac{1}{2\pi[(r_{b'b}+r_s//R_B)//r_{b'e}]\cdot C_M}$$



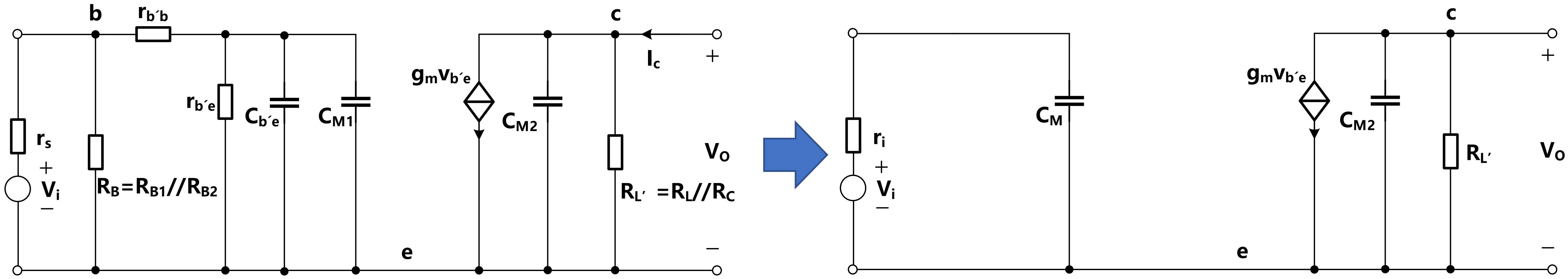
# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

✓ **微变等效电路：高频，开路时间常数法**

- $C_M$： $R_1=[(r_{b'b}+r_s\,//\,R_B)\,//\,r_{b'e}]$，$f_{H1}=\dfrac{1}{2\pi[(r_{b'b}+r_s//R_B)//r_{b'e}]\cdot C_M}$

- $C_{M2}$： $R_2=R_{L'}$，$f_{H2}=\dfrac{1}{2\pi R_{L'}C_{M2}}$

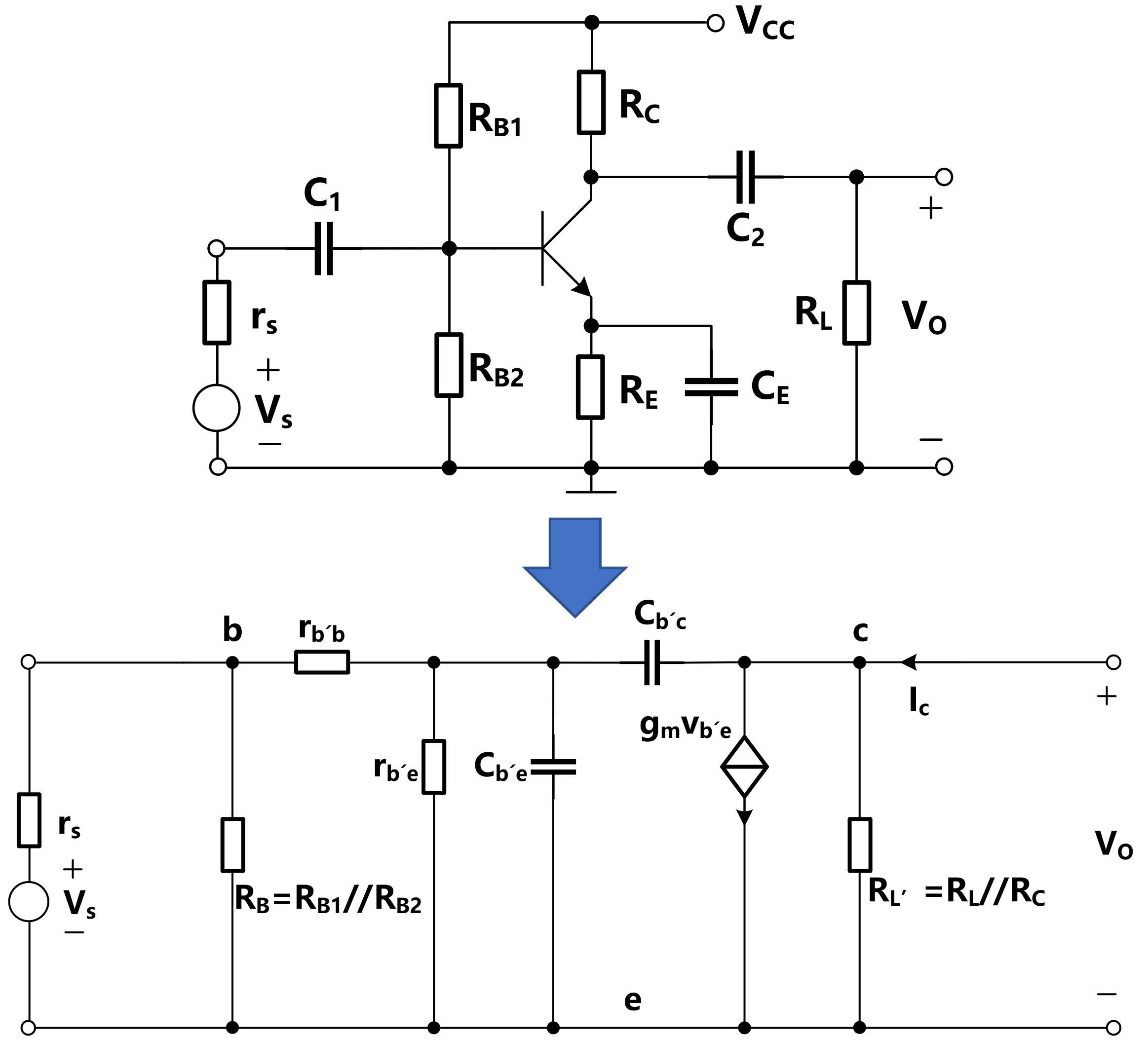
- $C_M$主导



# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

## ✓ 几点结论：

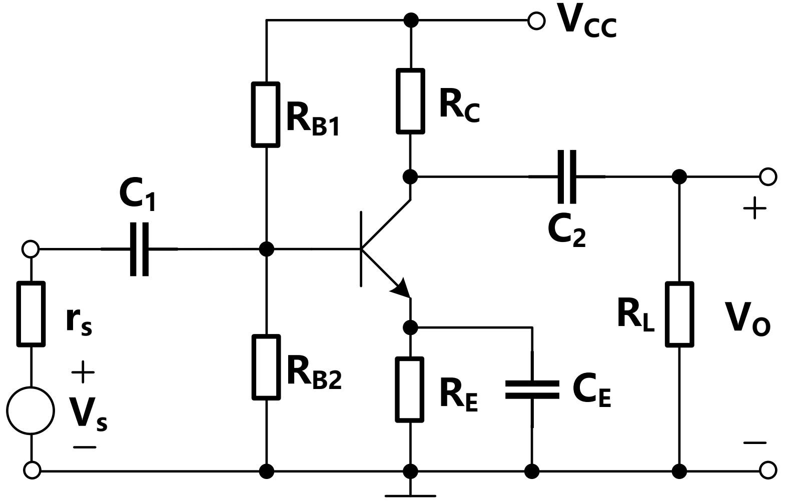
- 耦合电容、旁路电容决定高通，下限截止频率主要由低频时间常数中较小的一个决定
- 三极管的结电容和分布电容决定高频响应，上限截止频率由高频时间常数中较大的一个决定
- 通过密勒效应可知，若放大倍数增加，$C_M$也增加，上限截止频率就下降，通频带变窄。增益和带宽是一对矛盾，增益带宽积是放大器一项重要指标。



# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

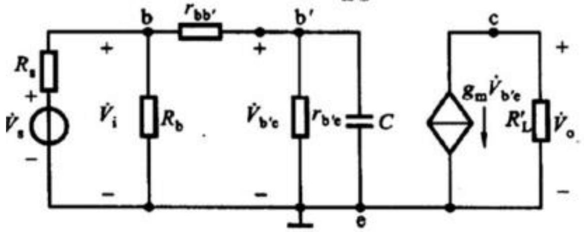
✓ **例题：**

电路在室温(300 K)下运行，且 BJT 的 $V_{BEQ}=0.6\ \text{V}$，$r_{bb'}=100\ \Omega$，$\beta_0=100$，$C_{b'c}=0.5\ \text{pF}$，$f_T=400\ \text{MHz}$；$V_{CC}=12\ \text{V}$，$R_{b1}=100\ \text{k}\Omega$，$R_{b2}=16\ \text{k}\Omega$，$R_e=1\ \text{k}\Omega$，$R_c=R_L=5.1\ \text{k}\Omega$，$R_s=1\ \text{k}\Omega$，试计算该电路的中频源电压增益及上限频率。




$$I_{CQ}\approx I_{EQ}=\frac{V_{BQ}-V_{BEQ}}{R_e}=\frac{\frac{R_{b2}}{R_{b1}+R_{b2}}V_{CC}-V_{BEQ}}{R_e}\approx 1\ \text{mA}$$

$$r_{b'e}=(1+\beta_0)\frac{V_T}{I_{EQ}}=(1+100)\times\frac{26\ \text{mV}}{1\ \text{mA}}\approx 2.63\ \text{k}\Omega$$



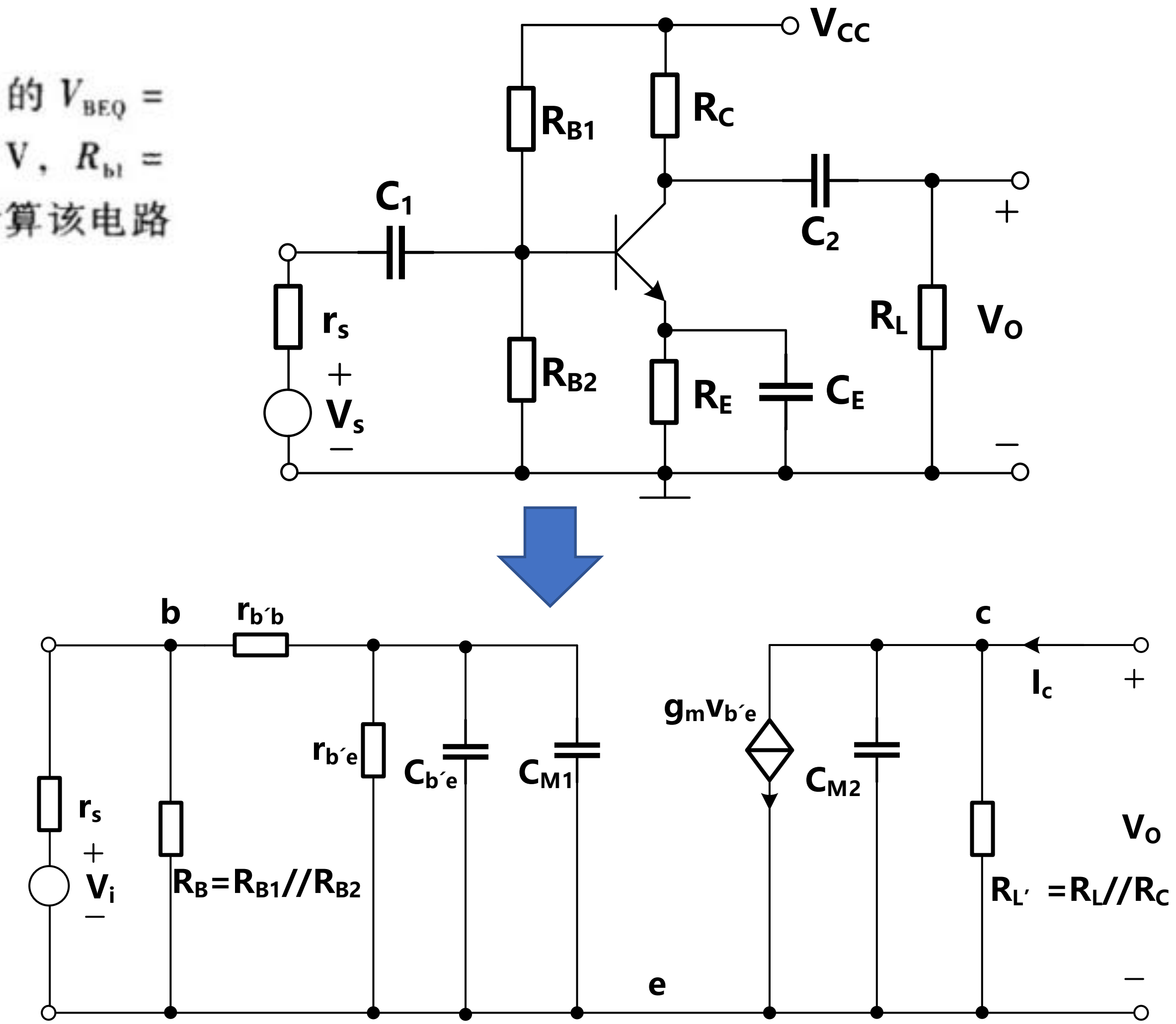

$$g_m=\frac{I_{EQ}}{V_T}=\frac{1\ \text{mA}}{26\ \text{mV}}\approx 0.038\ \text{S}$$

$$\dot A_{VSM}=-\frac{\beta_0 R'_L}{r_{be}}\cdot\frac{R_b\|r_{be}}{R_s+R_b\|r_{be}}\approx -65$$

# 5.5.4 共射放大电路的频率特性

✓ **例题：**

电路在室温(300 K)下运行，且 BJT 的 $V_{BEQ}=0.6\ \text{V}$，$r_{bb'}=100\ \Omega$，$\beta_0=100$，$C_{b'c}=0.5\ \text{pF}$，$f_T=400\ \text{MHz}$；$V_{CC}=12\ \text{V}$，$R_{b1}=100\ \text{k}\Omega$，$R_{b2}=16\ \text{k}\Omega$，$R_e=1\ \text{k}\Omega$，$R_c=R_L=5.1\ \text{k}\Omega$，$R_s=1\ \text{k}\Omega$，试计算该电路的中频源电压增益及上限频率。




$$C_{b'e}\approx\frac{g_m}{2\pi f_T}=\frac{0.038\ \text{S}}{2\times3.14\times400\times10^6\ \text{Hz}}\approx15.1\ \text{pF}$$

$$C_{M1}=(1+g_mR'_L)C_{b'c}\approx49\ \text{pF}$$

$$C=C_{b'e}+C_{M1}=(15.1+49)\ \text{pF}=64.1\ \text{pF}$$

$$R=r_{b'e}\|(r_{bb'}+R_b\|R_s)\approx0.74\ \text{k}\Omega$$

$$f_H=\frac{1}{2\pi RC}=\frac{1}{2\times3.14\times0.74\times10^3\ \Omega\times64.1\times10^{-12}\ \text{F}}$$
$$\approx3.36\ \text{MHz}$$