

§ 3.5

三种组态放大器的中频特性

1. 共发射放大器
2. 共集放大器
3. 共基放大器
4. 放大电路的设计

1. 共发射放大器

- **中频交流小信号分析**

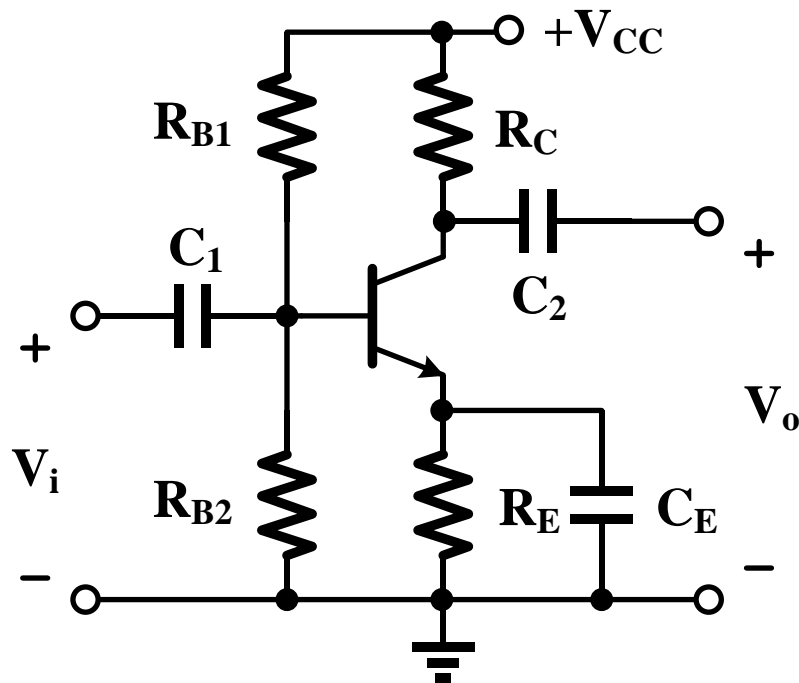
- 分析对象：BJT基本放大电路的中频交流通路
- 分析内容：中频交流性能指标
- 分析方法：模型法（使用BJT交流小信号模型）

- **分析步骤：**

- 第一步：提取放大电路对应的中频交流通路
- 第二步：利用小信号模型替换BJT
- 第三步：根据定义分析中频交流性能指标

1. 共发射放大器

● 电路结构

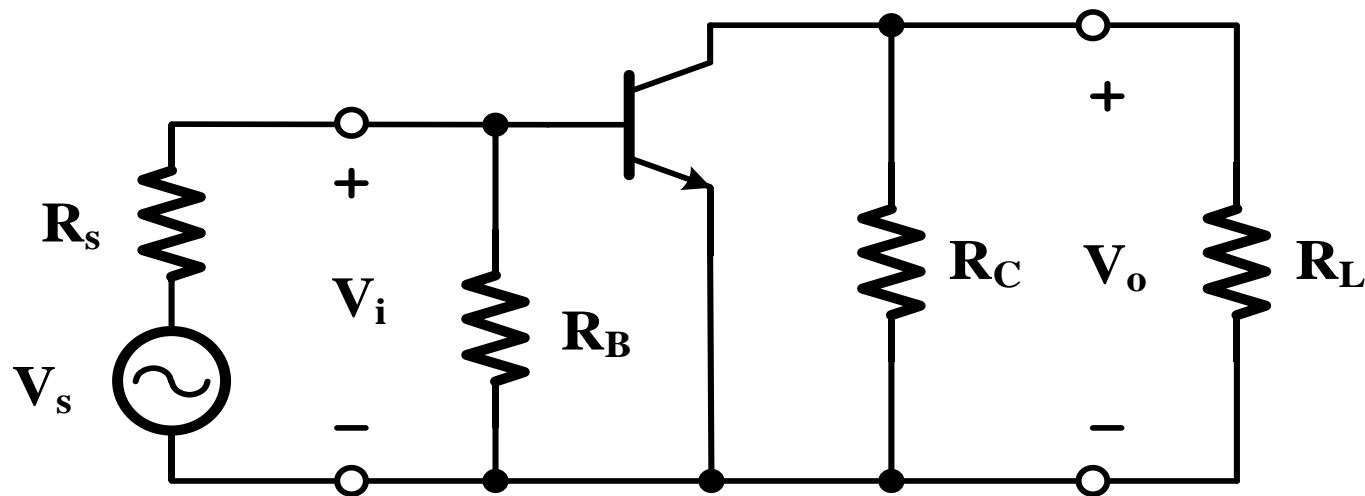


直流偏置电路：定基压偏置，保证BJT处于放大态

交流工作组态：共发组态

1. 共发射放大器

● 中频交流通路



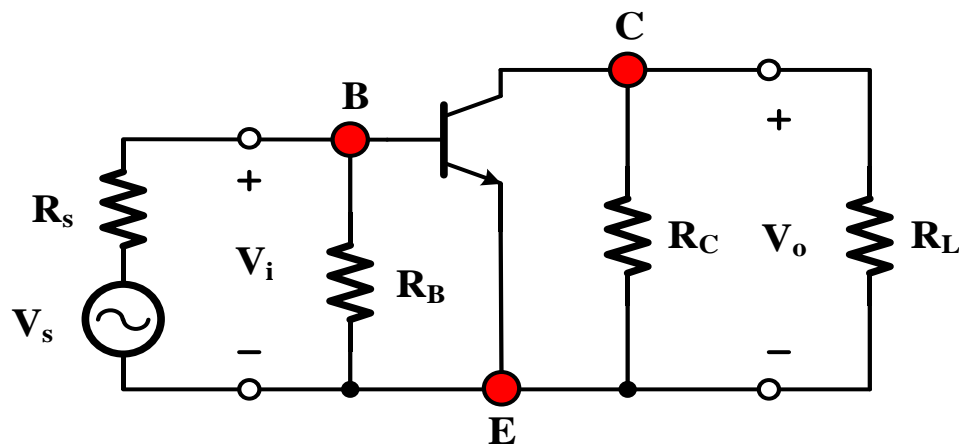
基极等效电阻：
$$R_B = R_{B1} \parallel R_{B2}$$

中频：放大器的工作频段，放大器的交流性能指标在该频段内与频率无关

中频交流通路的画法：直流电压源交流接地，耦合电容、旁路电容交流短路

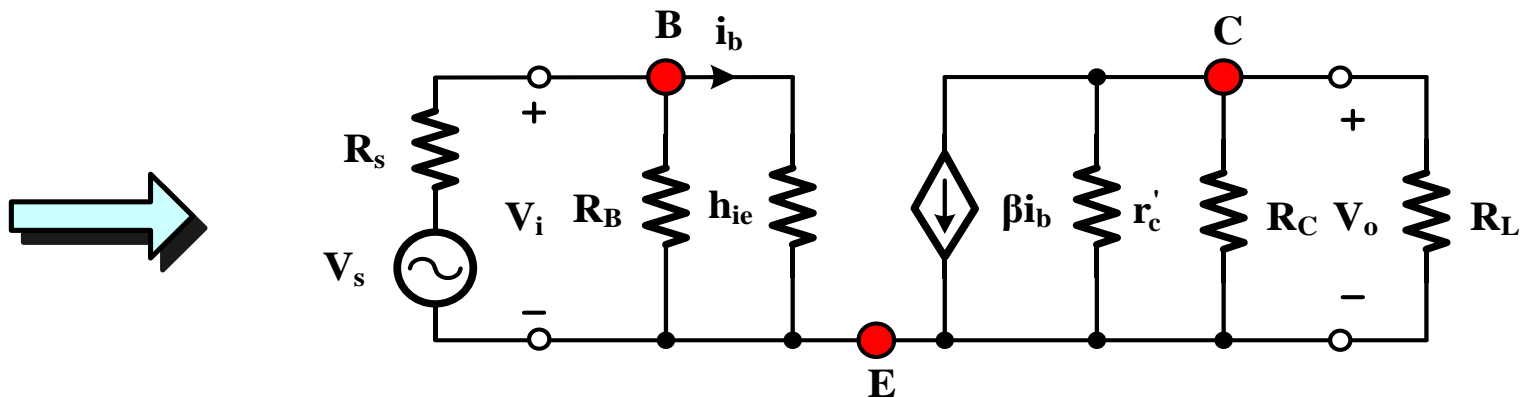
1. 共发射放大器

● 中频交流等效电路



绘图要求：

1. 一般情况下，集电结电阻 r'_c 可以忽略不计，不必画出
2. 作中频交流等效电路图时，请标明输入与输出端口的电流、电压及其方向，标明控制电流 i_b 的方向



1. 共发射放大器

● 中频电压增益分析

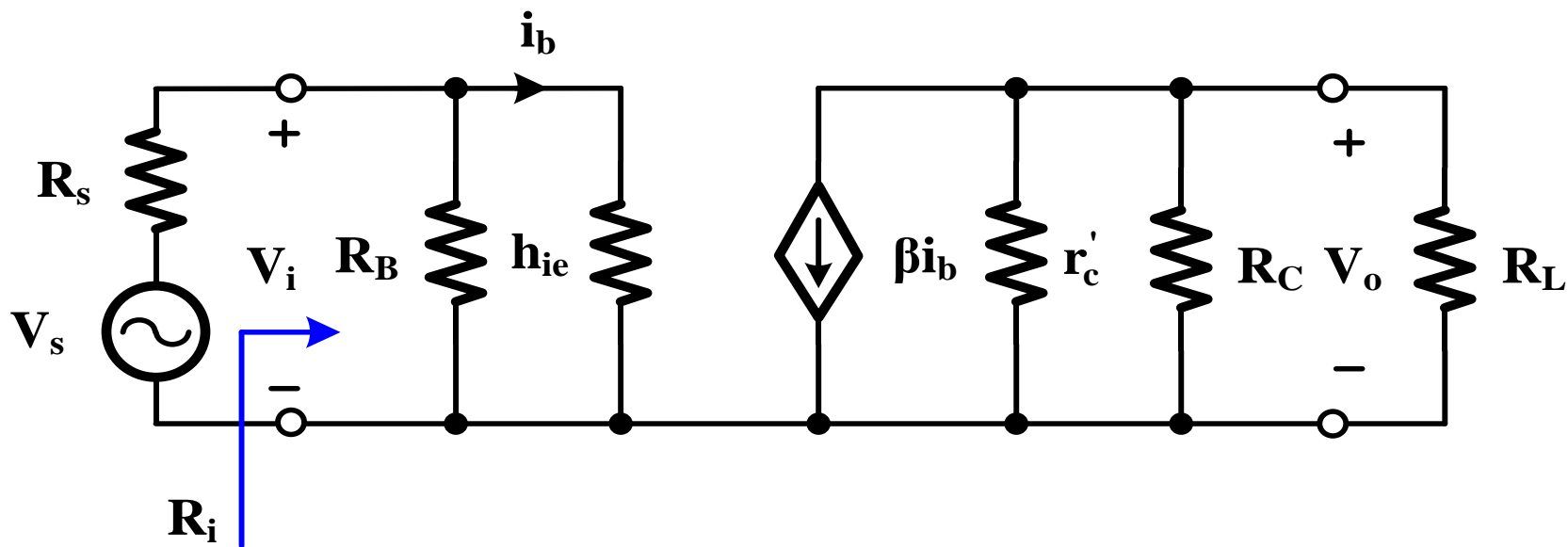
$$\begin{cases} V_o = -\beta i_b (R_C \parallel R_L) \\ V_i = i_b h_{ie} \end{cases} \Rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} \bigg|_{R_L} = \frac{-\beta (R_C \parallel R_L)}{h_{ie}}$$

● 中频电流增益分析

$$\begin{cases} I_o = -\beta i_b \frac{R_C}{R_C + R_L} \\ I_i = i_b \frac{R_B + h_{ie}}{R_B} \end{cases} \Rightarrow A_I = \frac{I_o}{I_i} \bigg|_{R_L} = -\beta \frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{R_B}{R_B + h_{ie}}$$

1. 共发射放大器

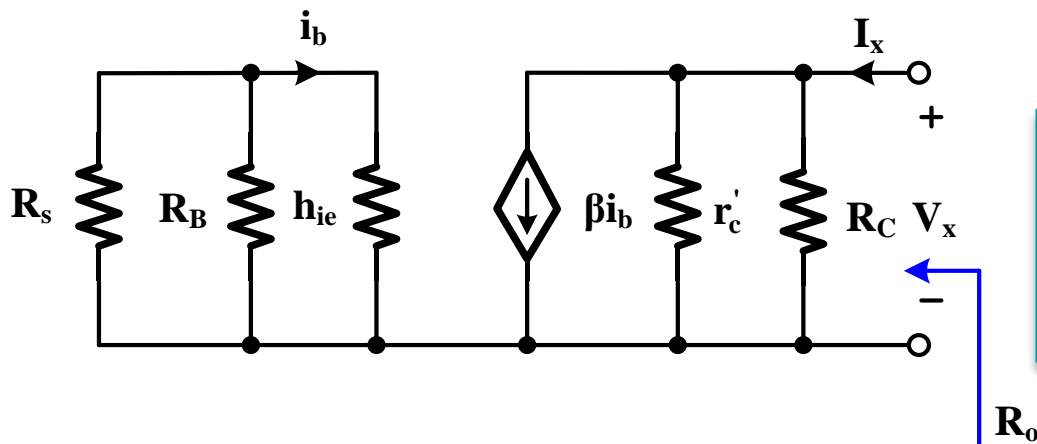
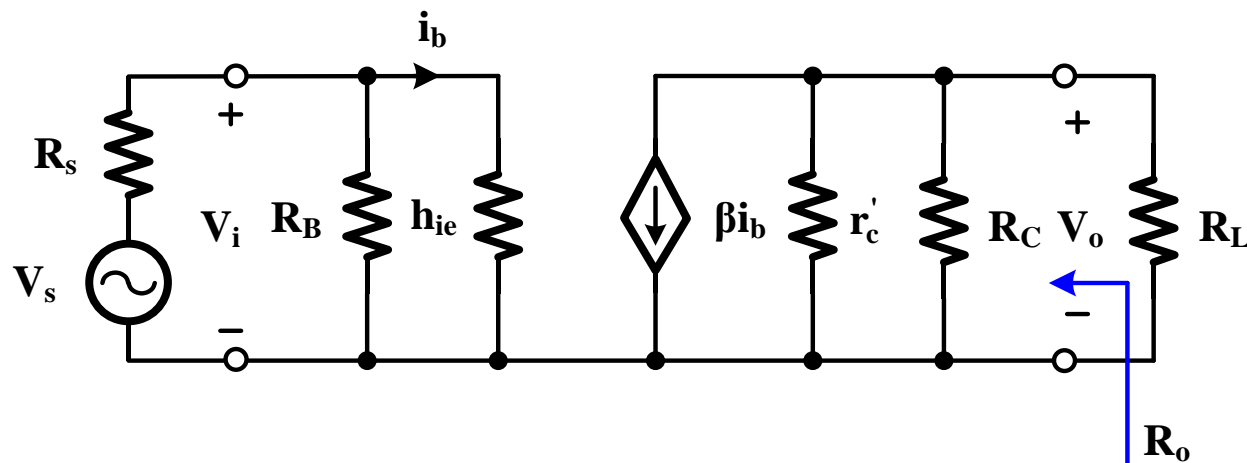
- 输入阻抗分析



$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_B \parallel h_{ie}$$

1. 共发射放大器

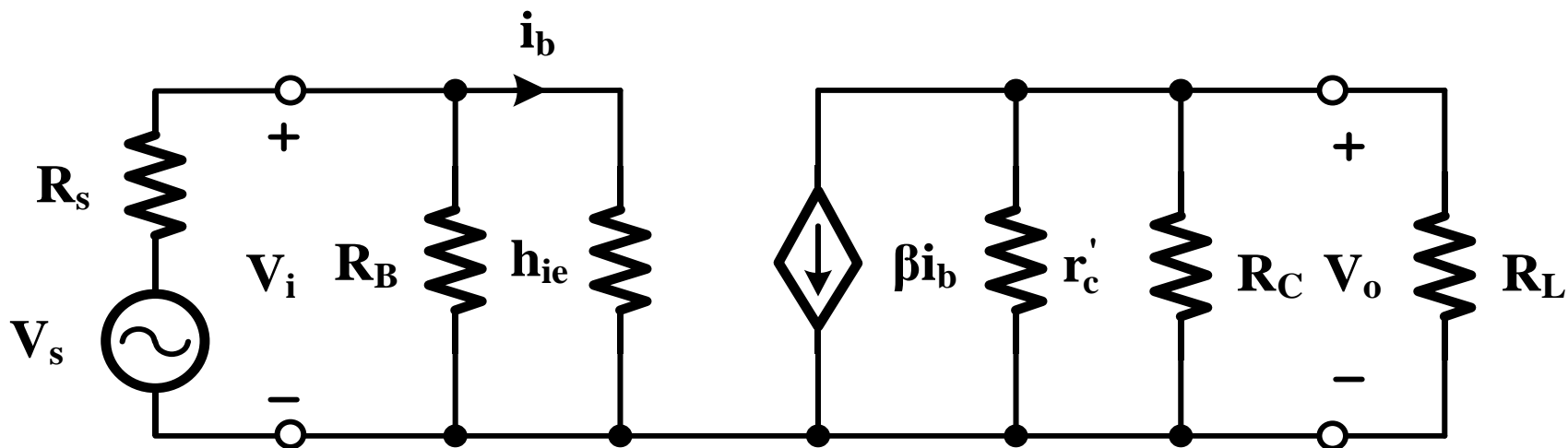
● 输出阻抗分析



$$R_o = \frac{V_x}{I_x} = r'_c \parallel R_C \approx R_C$$

1. 共发射放大器

● 中频源电压增益分析



$$A_{V_s} = \left. \frac{V_o}{V_s} \right|_{R_L} = A_V \frac{R_i}{R_i + R_s} = \frac{-\beta (R_C \parallel R_L)}{h_{ie}} \frac{R_B \parallel h_{ie}}{R_B \parallel h_{ie} + R_s}$$

1. 共发射放大器

- 单级共发射放大器的中频性能

- 关于电压/电流的反相放大器，中频增益可达数十倍
- 中频输入/输出阻抗适中

- 单级共发射放大器存在的问题

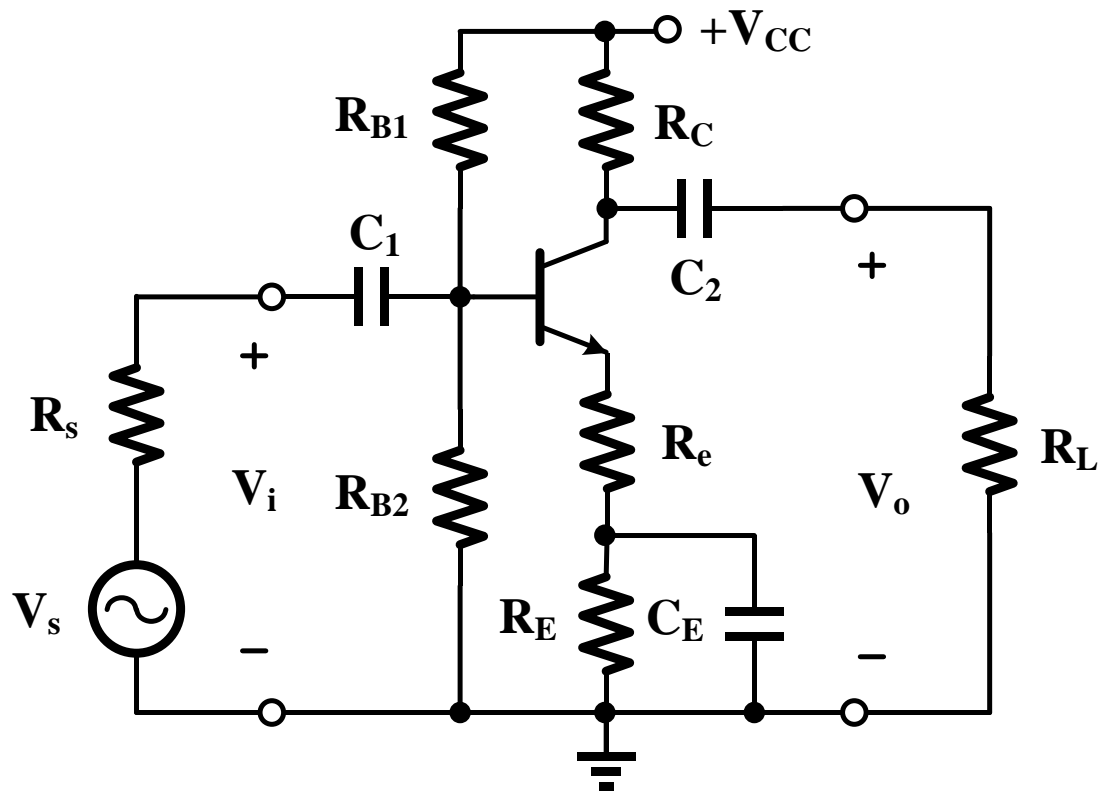
- 放大器的电压增益和电流增益都与 β 有线性关系，而 β 参数稳定性较差，故放大器的增益稳定性较差

$$A_V = \frac{-\beta(R_C \parallel R_L)}{h_{ie}}$$

$$A_I = -\beta \frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{R_B}{R_B + h_{ie}}$$

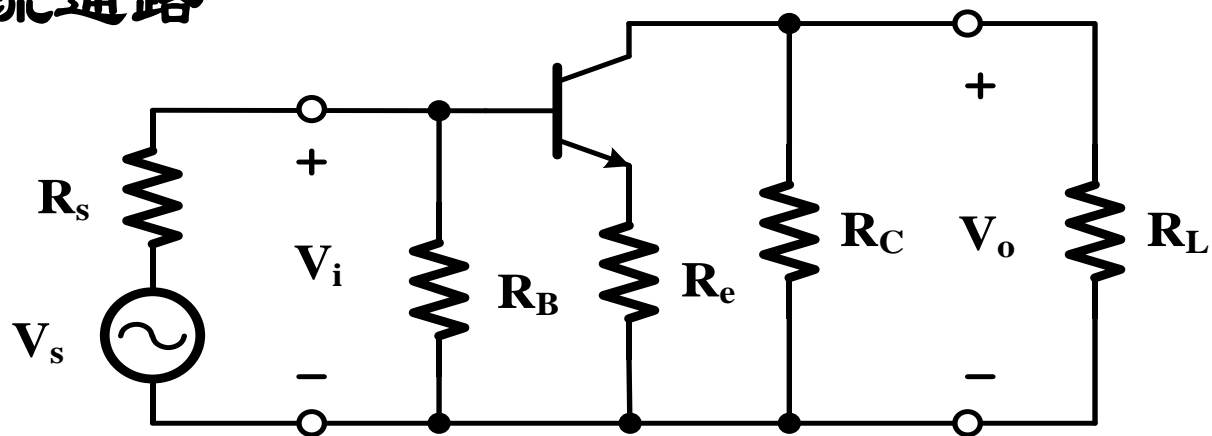
1. 共发射放大器

- 解决途径：发射极串入退化电阻 R_e

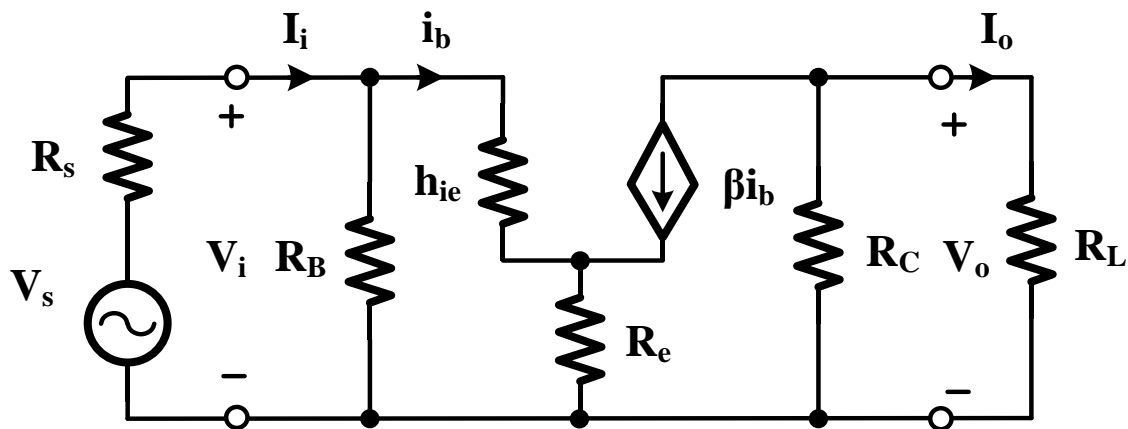


1. 共发射放大器

● 中频交流通路



● 中频交流等效电路



1. 共发射放大器

● 中频电压增益分析

$$\begin{cases} V_o = -\beta i_b (R_C \parallel R_L) \\ V_i = i_b h_{ie} + (1 + \beta) i_b R_e \end{cases} \Rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-\beta (R_C \parallel R_L)}{h_{ie} + (1 + \beta) R_e}$$

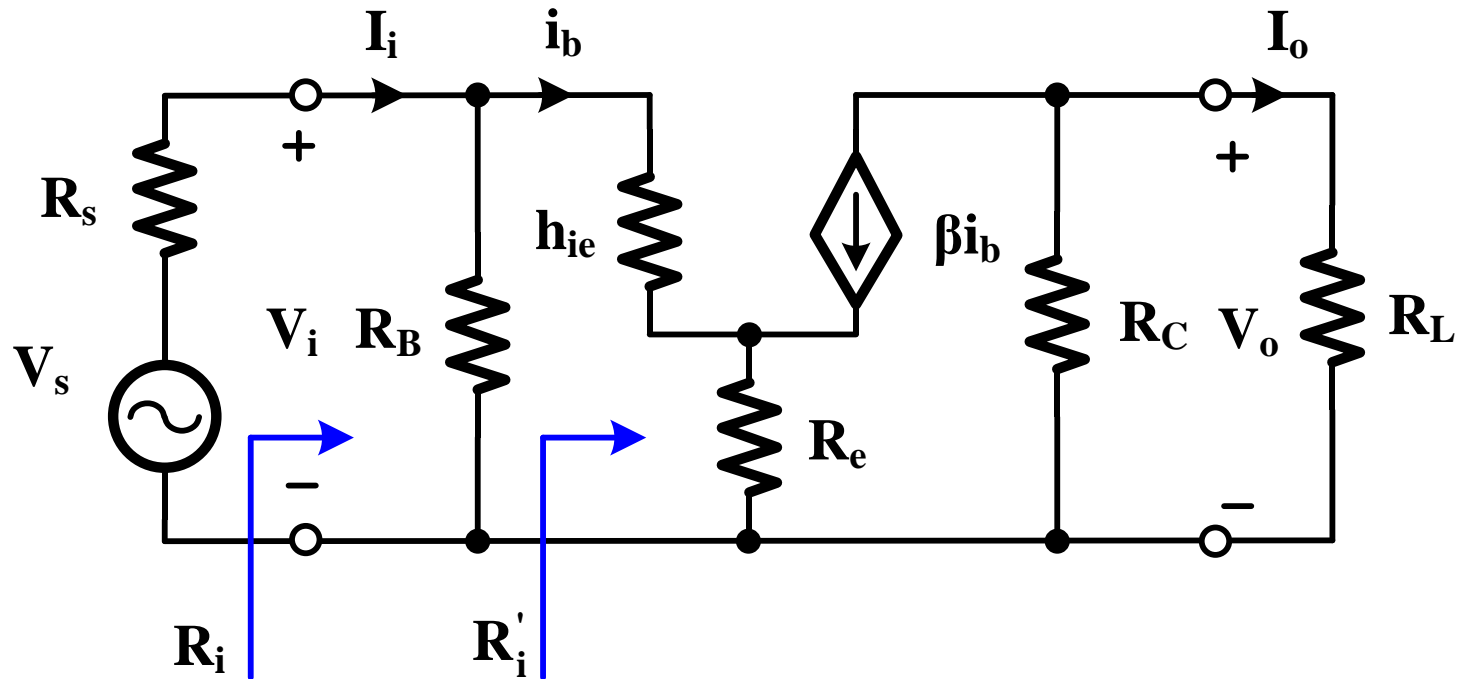
$$r_b \approx 0 \Rightarrow A_v \approx \frac{-\beta (R_C \parallel R_L)}{(1 + \beta)(R_e + r_e)} \approx \frac{R_C \parallel R_L}{R_e + r_e}$$

发射极电阻的影响：

1. 发射极支路串入小电阻 R_e ，降低了电压增益 A_v ，且 R_e 越大， A_v 降低的越多
2. 发射极支路串入小电阻 R_e ，使得电压增益 A_v 与晶体管参数 β 几乎无关，从而改善了中频电压增益的稳定性

1. 共发射放大器

● 输入阻抗



1. 共发射放大器

$$R'_i = \frac{V_i}{i_b} = h_{ie} + (1 + \beta) R_e$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_B \parallel R'_i = R_B \parallel (h_{ie} + (1 + \beta) R_e)$$

发射极电阻的影响：

1. 发射极支路串入交流小电阻 R_e ，增大了共发射放大器的输入阻抗 R_i ，从而降低信号源内阻 R_s 对源电压增益 A_{Vs} 的影响

● 中频源电压增益分析

$$A_{Vs} = A_v \frac{R_i}{R_i + R_s}$$

1. 共发射放大器

● 电流增益分析

$$\left. \begin{aligned} I_o &= -\beta i_b \frac{R_C}{R_C + R_L} \\ I_i &= i_b \left(1 + \frac{h_{ie} + (1 + \beta) R_e}{R_B} \right) \end{aligned} \right\}$$

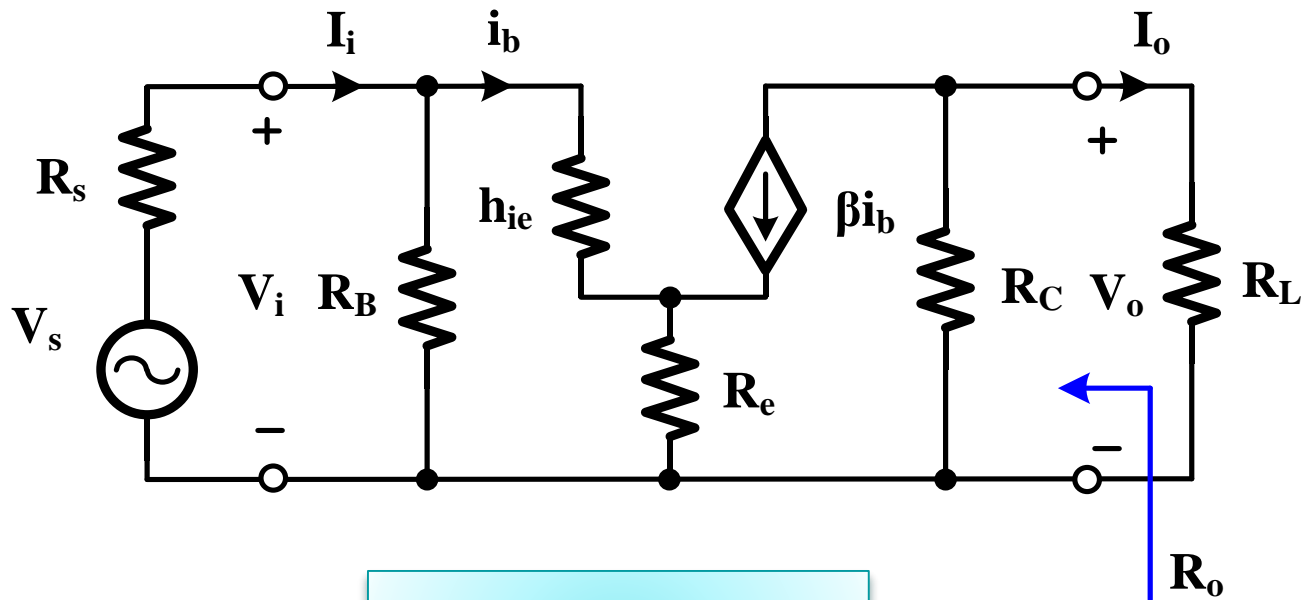
$$\Rightarrow A_I = \frac{I_o}{I_i} \bigg|_{R_L} = -\beta \frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{R_B}{R_B + h_{ie} + (1 + \beta) R_e}$$

发射极电阻的影响：

1. 发射极支路串入小电阻 R_e ，对中频电流增益 A_I 有一定影响，但是影响较小

1. 共发射放大器

- 输出阻抗分析

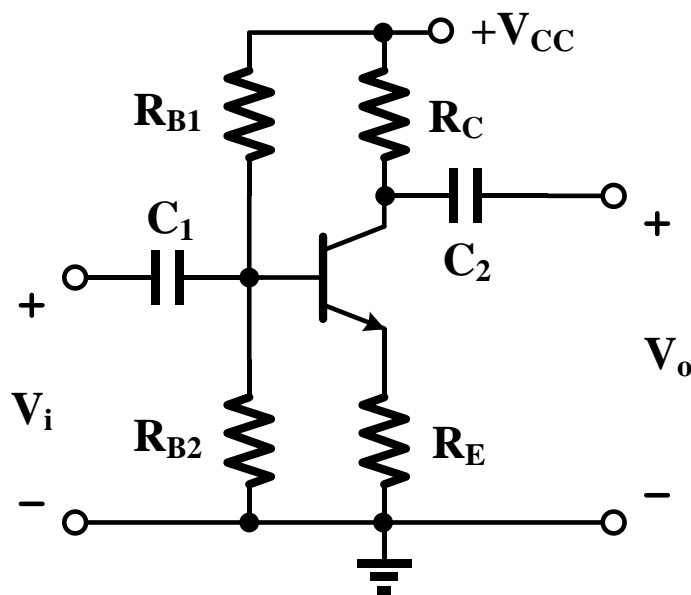


$$R_o = R_C$$

1. 共发射放大器

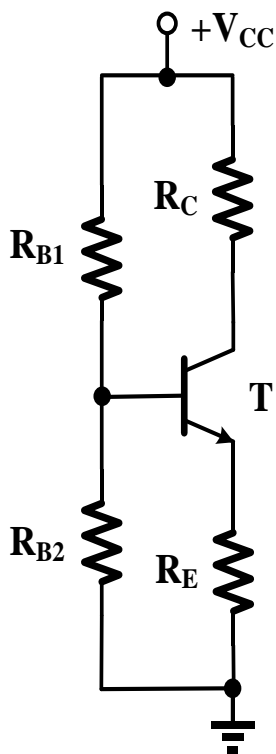
● 例：BJT单管共发射放大器的中频分析

图示电路中， $V_{CC}=10V$ ， $R_E=3K\Omega$ ， $R_{B1}=30K\Omega$ ， $R_{B2}=20K\Omega$ ， $R_C=5K\Omega$ ，晶体管参数 $\beta=120$ ， $V_{BEon}=0.7V$ ，若 r_b 可忽略不计，试求该放大器中频电压增益和输入阻抗。



1. 共发射放大器

- 第一步：先画出直流通路，做直流分析



解：

假设BJT处于放大态，则有

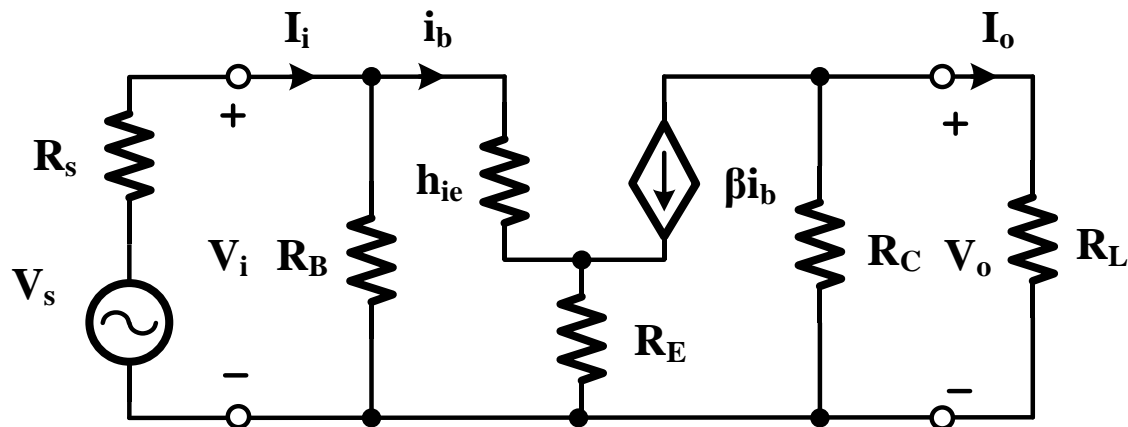
$$I_{EQ} \approx \frac{\frac{20}{20+30} \times 10 - V_{BEon}}{R_E} = 1.1\text{mA} \Rightarrow I_{CQ} \approx I_{EQ} = 1.1\text{mA}$$

$$\Rightarrow V_{CEQ} = 10 - (R_C + R_E)I_{CQ} = 1.2\text{V} > V_{BEon} \Rightarrow \text{假设成立}$$

$$r_e = \frac{26}{I_{EQ}} = 23.6\Omega \Rightarrow h_{ie} = r_b + (1 + \beta)r_e = 2.86\text{K}\Omega$$

1. 共发射放大器

- 第二步：画中频交流通路及其等效电路



- 第三步：完成中频交流分析

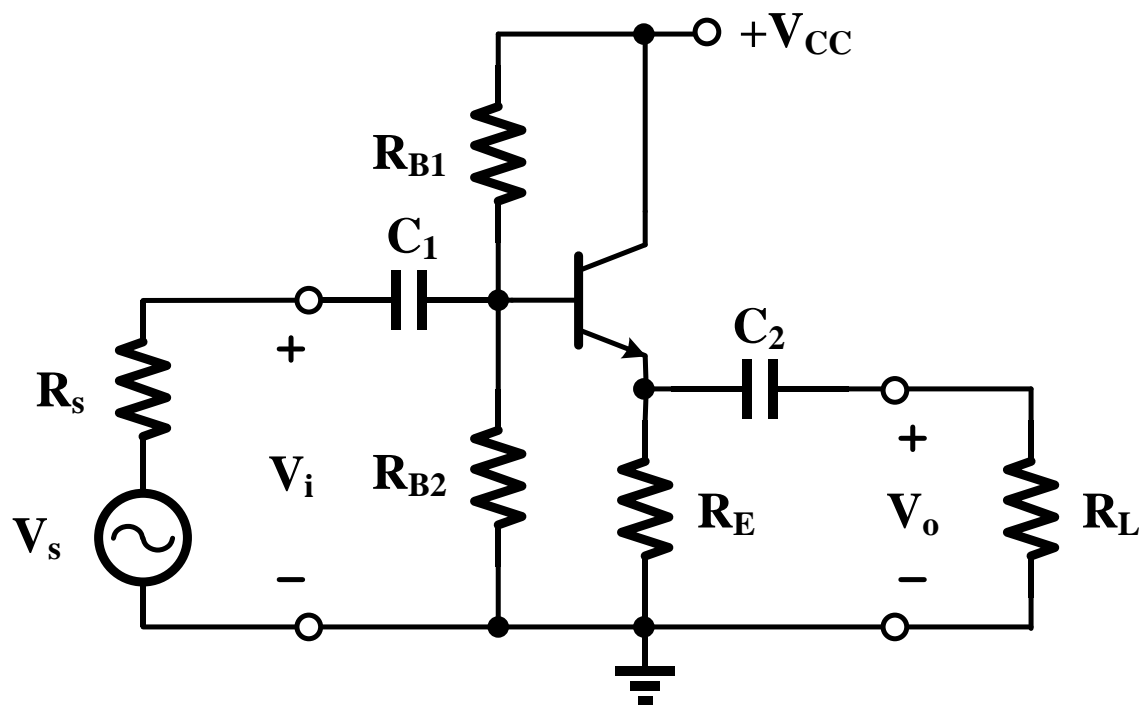
$$\begin{cases} V_o = -\beta i_b R_C \\ V_i = i_b h_{ie} + (1 + \beta) i_b R_E \end{cases} \Rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{-\beta R_C}{h_{ie} + (1 + \beta) R_E} = -1.64$$

$$R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_B \parallel R'_i = R_B \parallel (h_{ie} + (1 + \beta) R_E) = 22.52 \text{K}\Omega$$

2. 共集放大器

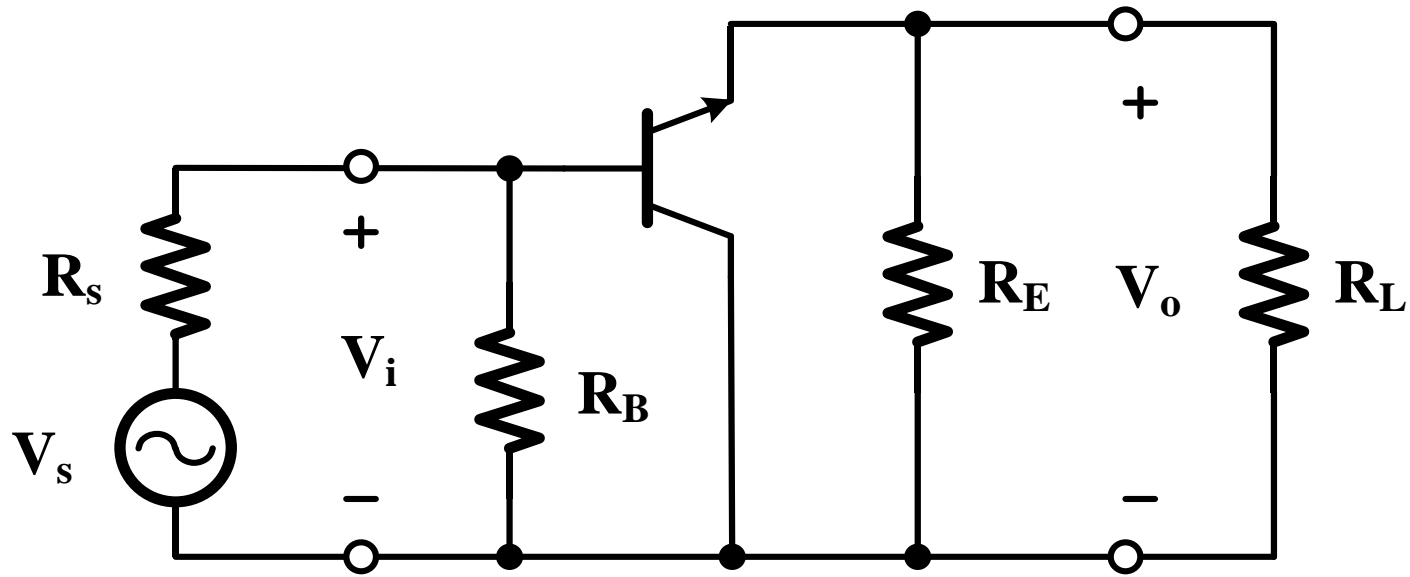
● 电路结构

- 直流偏置电路：定基压偏置，并保证BJT处于放大态
- 交流工作组态：共集组态



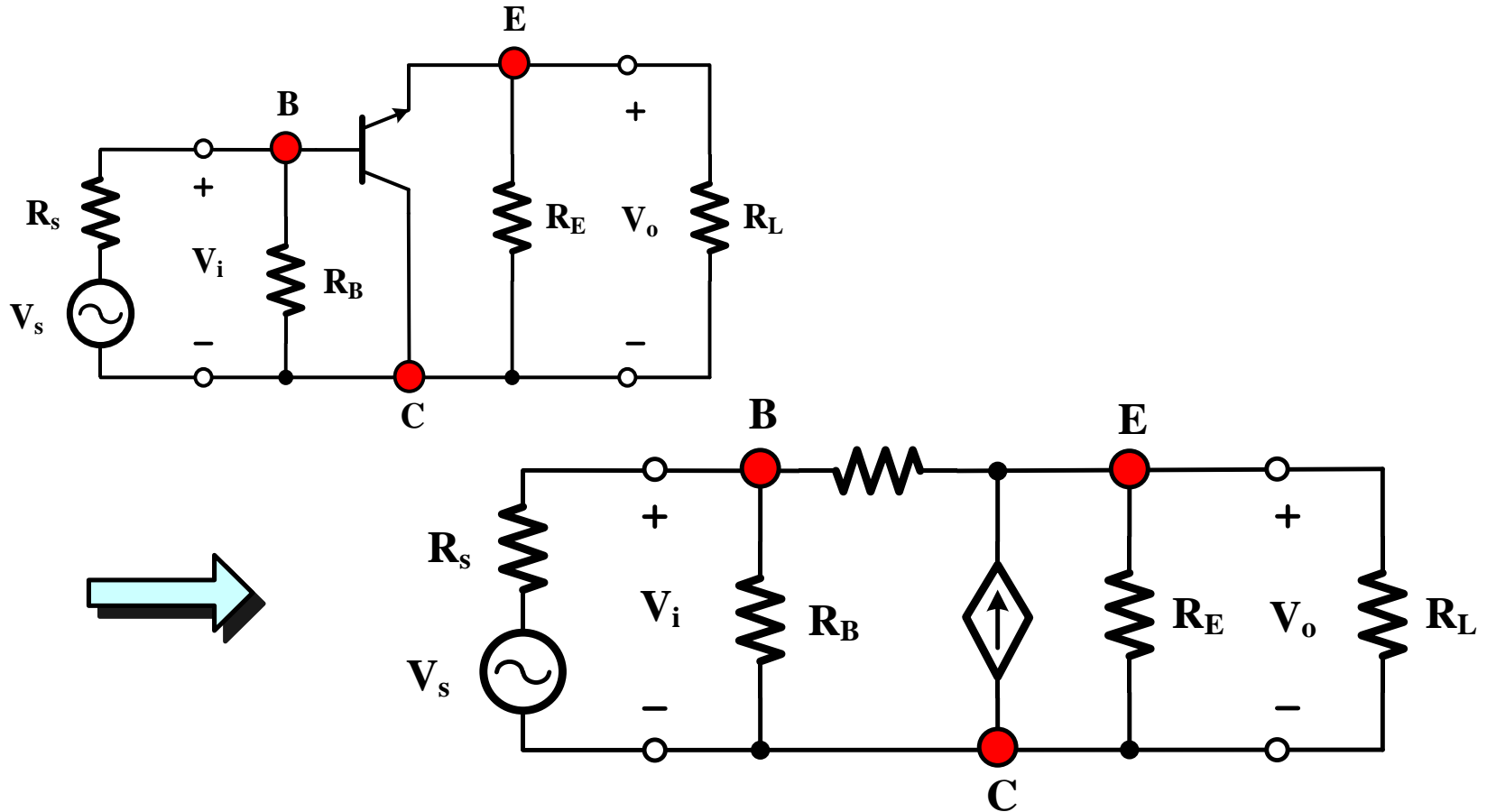
2. 共集放大器

- 中频交流通路



2. 共集放大器

● 中频交流等效电路



2. 共集放大器

● 电压增益分析

$$\left. \begin{aligned} V_o &= (1 + \beta) i_b (R_E \parallel R_L) \\ V_i &= i_b h_{ie} + (1 + \beta) i_b (R_E \parallel R_L) \end{aligned} \right\} \Rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{(1 + \beta)(R_E \parallel R_L)}{h_{ie} + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L)} \approx 1$$

射极跟随器：共集放大器的别称，即射极电压幅度和相位跟随基极电压变化

● 电流增益分析

$$\left. \begin{aligned} I_o &= (1 + \beta) i_b \frac{R_E}{R_E + R_L} \\ I_i &= i_b \left(1 + \frac{h_{ie} + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L)}{R_B} \right) \end{aligned} \right\}$$

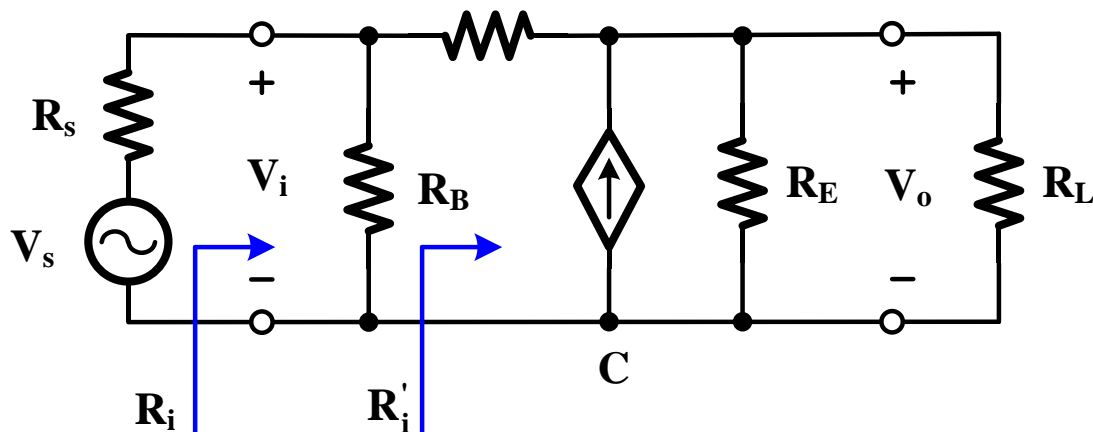
特点分析：

1. 共集放大器是电流同相放大器
2. 电流增益可以做到大于1，即有一定的功率增益

$$\Rightarrow A_I = \frac{I_o}{I_i} \bigg|_{R_L} = (1 + \beta) \frac{R_E}{R_E + R_L} \frac{R_B}{R_B + h_{ie} + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L)}$$

2. 共集放大器

● 输入阻抗



$$R'_i = \frac{V_i}{i_b} = h_{ie} + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L)$$

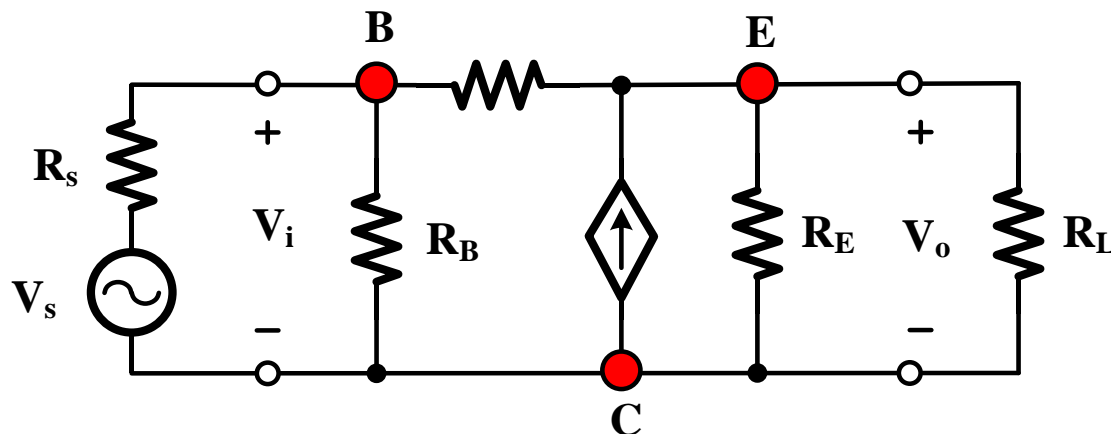
$$\Rightarrow R_i = \frac{V_i}{I_i} = R_B \parallel R'_i = R_B \parallel (h_{ie} + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L))$$

基极电阻对输入阻抗的影响：

1. R_B 是影响输入阻抗的重要因素，提高输入阻抗可通过增大 R_B 实现
2. 若忽略 R_B ，则共集放大器的输入阻抗将比共发射放大器高得多，且与负载相关

2. 共集放大器

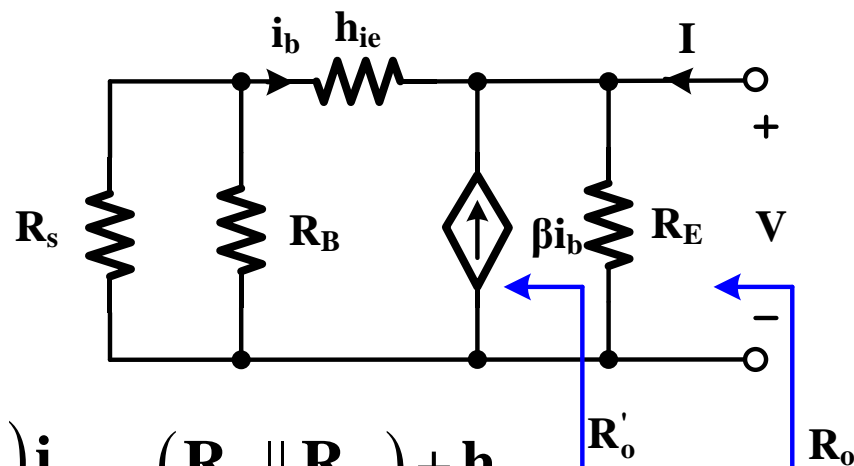
● 源电压增益分析



$$\begin{aligned} A_{V_s} &= \left. \frac{V_o}{V_s} \right|_{R_L} = A_V \frac{R_i}{R_i + R_s} \\ &= \frac{(1 + \beta)(R_E \parallel R_L)}{h_{ie} + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L)} \frac{R_B \parallel (h_{ie} + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L))}{R_s + R_B \parallel (h_{ie} + (1 + \beta)(R_E \parallel R_L))} \end{aligned}$$

2. 共集放大器

● 输出阻抗



$$R'_o = \frac{V}{I_1} = \frac{-((R_s \parallel R_B) + h_{ie})i_b}{-(1 + \beta)i_b} = \frac{(R_s \parallel R_B) + h_{ie}}{1 + \beta}$$

$$R_o = R_E \parallel R'_o = R_E \parallel \frac{(R_s \parallel R_B) + h_{ie}}{1 + \beta}$$

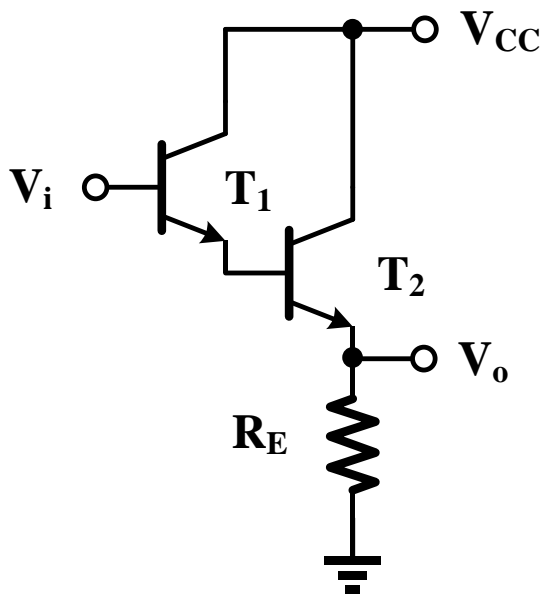
特点分析：

1. 共集放大器具有很低的输出阻抗，这说明共集放大器带负载的能力比较强
2. 射随器可用作输入级、输出级、或者作为阻抗变换器用于级间隔离、改善高频特性

2. 共集放大器

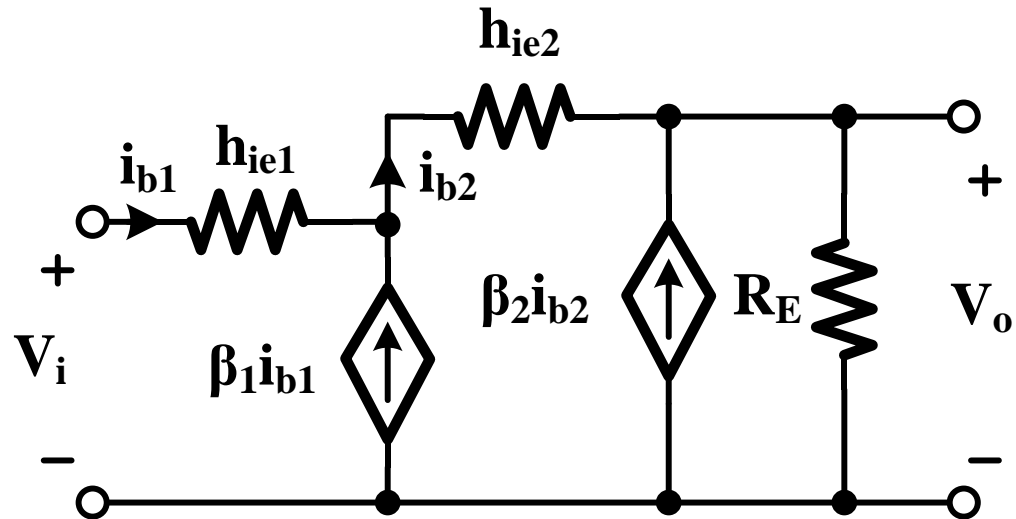
- 例：多BJT管放大器的中频分析

设图示放大器中 T_1 和 T_2 参数分别为： β_1 , β_2 , h_{ie1} , h_{ie2} , 求中频输入阻抗和输出阻抗。



2. 共集放大器

- 第一步：画中频交流等效电路



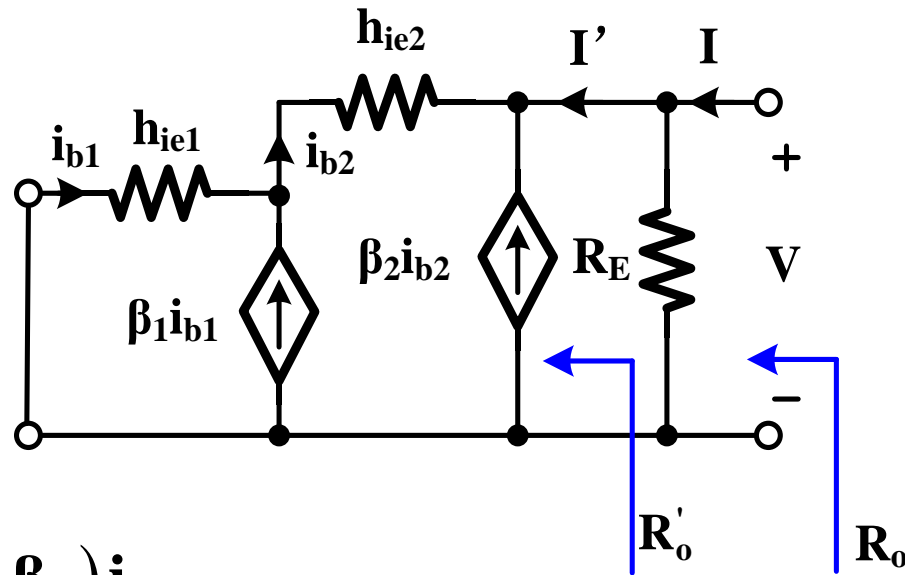
2. 共集放大器

- 第二步：完成中频交流分析

$$\begin{cases} \mathbf{I}_i = \mathbf{i}_{b1} \\ \mathbf{V}_i = \mathbf{i}_{b1} \mathbf{h}_{ie1} + \mathbf{i}_{b2} \mathbf{h}_{ie2} + (1 + \beta_2) \mathbf{i}_{b2} \mathbf{R}_E \\ \mathbf{i}_{b2} = (1 + \beta_1) \mathbf{i}_{b1} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \mathbf{R}_i = \frac{\mathbf{V}_i}{\mathbf{I}_i} = \mathbf{h}_{ie1} + (1 + \beta_1) \mathbf{h}_{ie2} + (1 + \beta_1)(1 + \beta_2) \mathbf{R}_E$$

2. 共集放大器



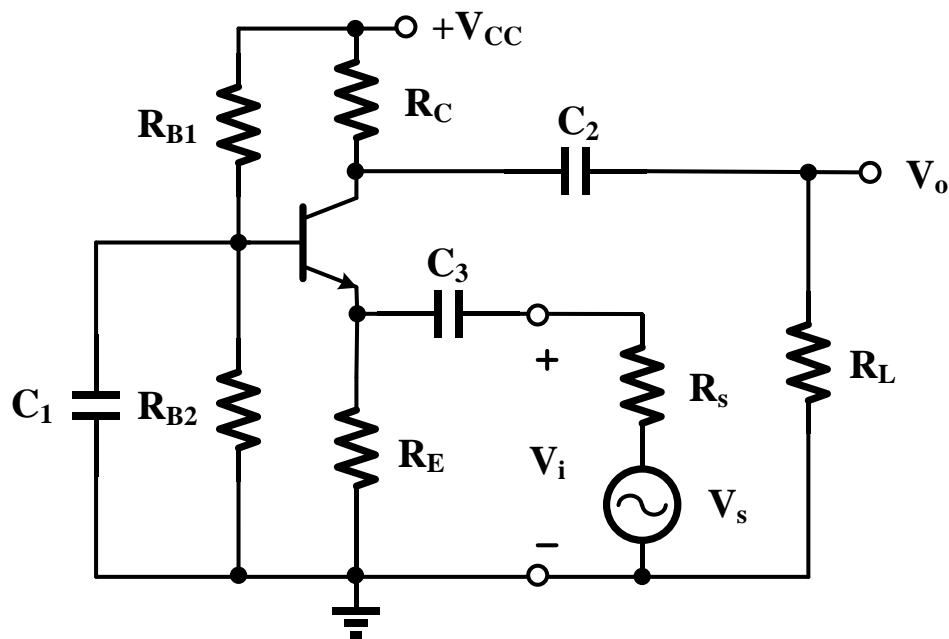
$$\begin{cases} I' = -(1 + \beta_2) i_{b2} \\ V = -h_{ie1} i_{b1} - h_{ie2} i_{b2} \Rightarrow R'_o = \frac{V}{I'} = \frac{h_{ie1}}{(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)} + \frac{h_{ie2}}{1 + \beta_2} \\ i_{b2} = (1 + \beta_1) i_{b1} \end{cases}$$

$$\Rightarrow R_o = \frac{V}{I} = R'_o \parallel R_E$$

3.共基放大器

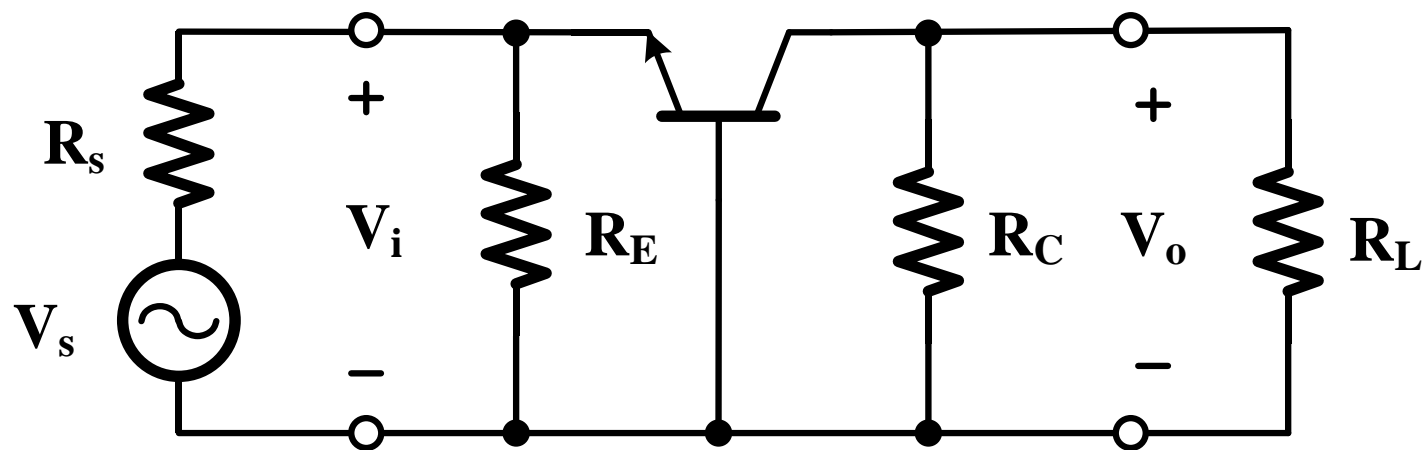
- 电路结构

- 直流偏置电路：定基压偏置，并保证BJT处于放大态
- 交流工作组态：共基组态



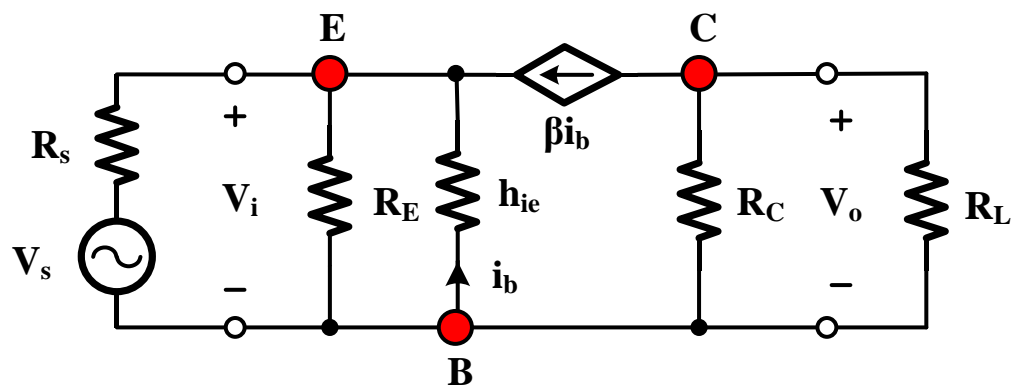
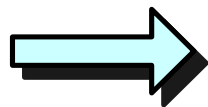
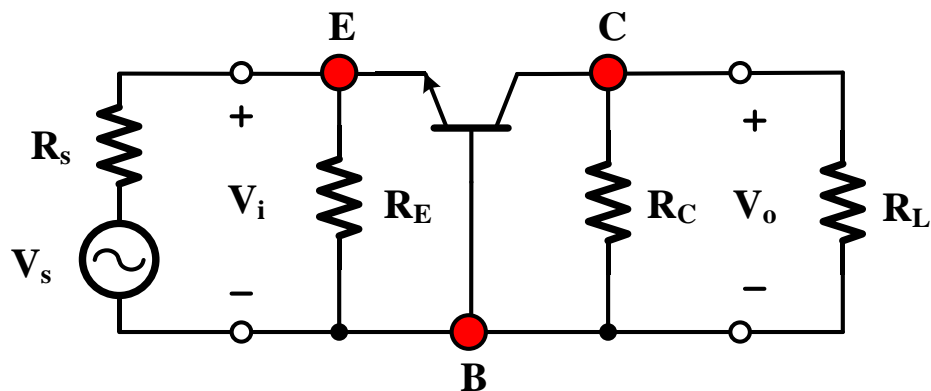
3. 共基放大器

- 中频交流通路



3. 共基放大器

- 中频交流等效电路



3.共基放大器

- 电压增益分析

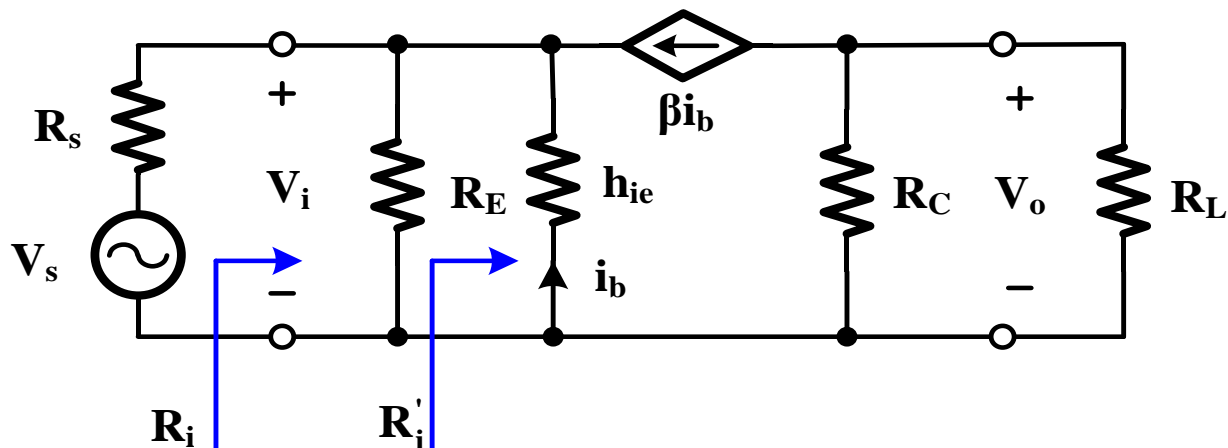
$$\left. \begin{array}{l} V_o = -\beta i_b (R_C \parallel R_L) \\ V_i = -i_b h_{ie} \end{array} \right\} \Rightarrow A_v = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\beta (R_C \parallel R_L)}{h_{ie}}$$

特点分析：

1. 与共发射放大器相比，两种组态下放大器的电压增益幅度一样，但是相位相反，表明共基放大器是电压同相放大器

3. 共基放大器

● 输入阻抗



$$R'_i = \frac{V_i}{I'_i} = \frac{h_{ie}}{1 + \beta} \Rightarrow R_i = R_E \parallel R'_i = R_E \parallel \frac{h_{ie}}{1 + \beta}$$

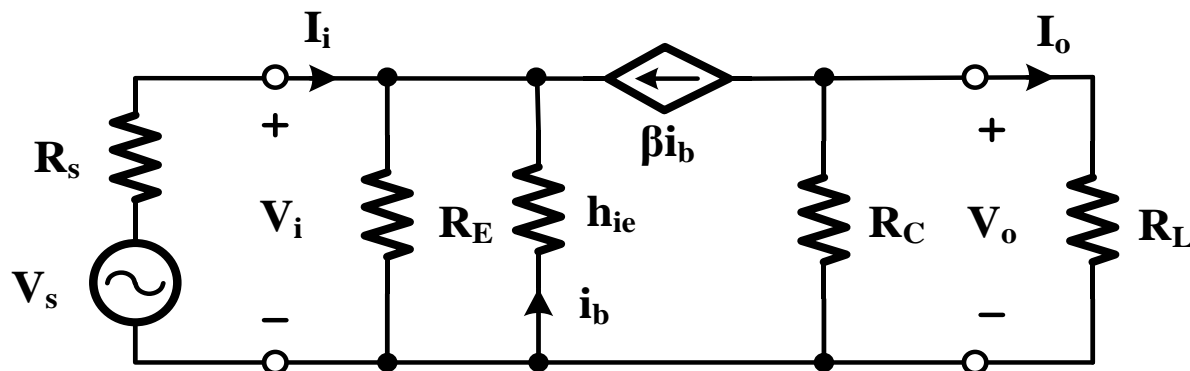
特点分析：

1. 共基放大器的输入阻抗很小，比较适合用电流源驱动

3. 共基放大器

● 电流增益分析

$$\left. \begin{aligned} I_o &= -\beta i_b \frac{R_C}{R_C + R_L} \\ I_i &= -(1 + \beta) i_b \left(\frac{R_E + \frac{h_{ie}}{1 + \beta}}{R_E} \right) \end{aligned} \right\}$$



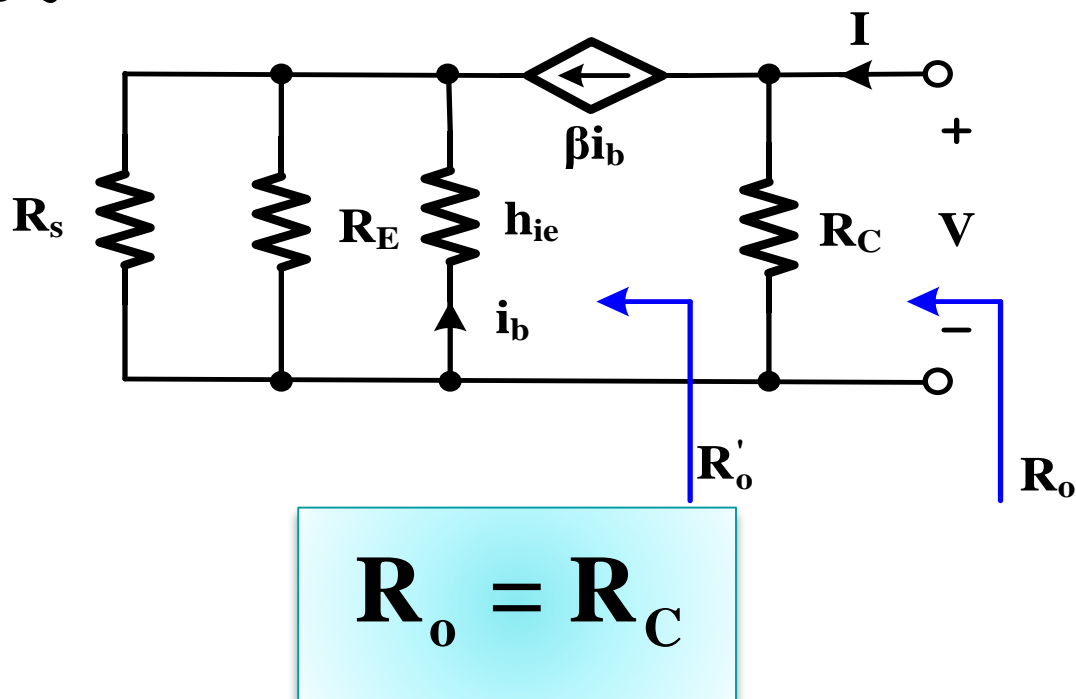
$$\Rightarrow A_I = \frac{I_o}{I_i} \bigg|_{R_L} = \frac{\beta i_b \frac{R_C}{R_C + R_L}}{(1 + \beta) i_b \left(\frac{R_E + \frac{h_{ie}}{1 + \beta}}{R_E} \right)} = \frac{\beta}{1 + \beta} \frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{R_E}{R_E + \frac{h_{ie}}{1 + \beta}} = \alpha \frac{R_C}{R_C + R_L} \frac{R_E}{R_E + \frac{h_{ie}}{1 + \beta}} \approx 1$$

特点分析：

1. 共基放大器也是电流的同相放大器，其电流增益小于1，但是若 $R_L \ll R_C$ 时，则比较接近于1，可作为电流跟随器使用

3. 共基放大器

● 输出阻抗



特点分析：

1. 尽管共基放大器的输出阻抗适中，但是与其输入阻抗相比，仍然具有数量级差异
2. 与共集放大器一样，该放大器也可以作为阻抗变换器来使用，只是与共集放大器性质相反

3.共基放大器

- 三种组态放大器比较

组态	A_V	A_I	R_i	R_o
共发	反相, >1	反相, >1	中	中
共集	同相, $=1$	同相, >1	高	低
共基	同相, >1	同相, $=1$	低	中(相对高)

4. 放大电路的设计

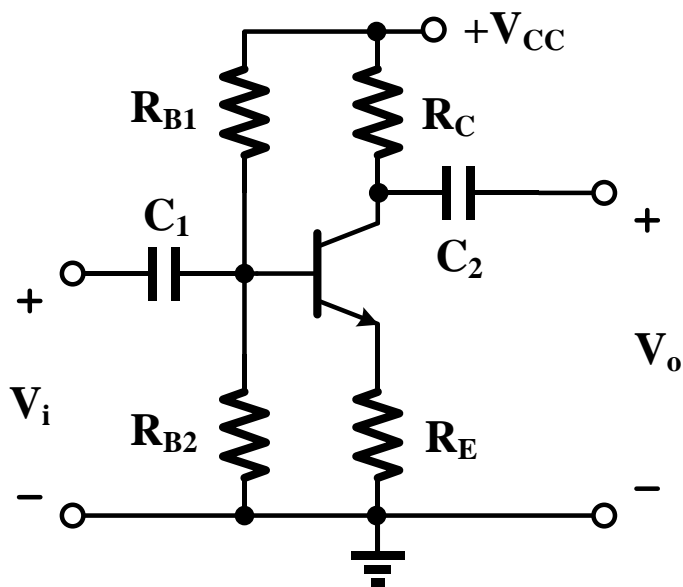
● 设计规格与BJT选型

	设计规格
电压增益 A_v	5倍 (14dB)
最大输出电压 V_{PP}	5V
输入阻抗 R_i	K Ω 量级
输出阻抗 R_o	K Ω 量级
频率特性	暂不考虑

	晶体管参数
电流放大系数 β	80
饱和电压 V_{CEsat}	0.3V
集电极额定电流 I_{CM}	150mA
集电极耗散功率 P_{CM}	200mW
反向击穿电压 V_{CB0}	50V
反向饱和电流 I_{CB0}	0.1 μ A

4. 放大电路的设计

● 选择电路结构



● 设计电路参数

- S1. 确定 I_{CQ} : 设定为mA量级, 例如1mA
- S2. 确定 R_E : 至少应能吸收约1.7V($V_{BE} + V_{PP}/A_V$)电压波动, 设为2K Ω
- S3. 确定 R_C : 依估算 $A_V = R_C/R_E$, 设为10K Ω
- S4. 确定 V_{CC} : 使输出不失真, 最低应提供14.8V ($V_{CEQ} \geq V_{CEsat} + V_{PP}/2$)电压, 设为15V
- S5. 确定 V_{CEQ} : 偏置在3V($V_{CC} - V_{RE} - V_{RC}$)位置
- S6. 确定 R_{B1} 和 R_{B2} : 要求 $V_{CC}/(R_{B1} + R_{B2}) \geq 10I_B$, 且 $V_B = V_E + 0.7V$, 取整后近似为100K Ω 和22K Ω
- S7. 确定电容: 均选择10 μF 量级即可
- S8. 验证输入阻抗: $R_i = R_B \parallel (h_{ie} + (1 + \beta) R_E) = 16.2K\Omega$
- S9. 验证输出阻抗: $R_o = R_C = 10K\Omega$
- S10. 验证耗散功率: $P_{CM} = V_{CEQ} * I_{CQ} = 3mW$