

4.3.2 动态分析 三、小信号分析

难点：**BJT** 非线性、多变量，难以直接分析。

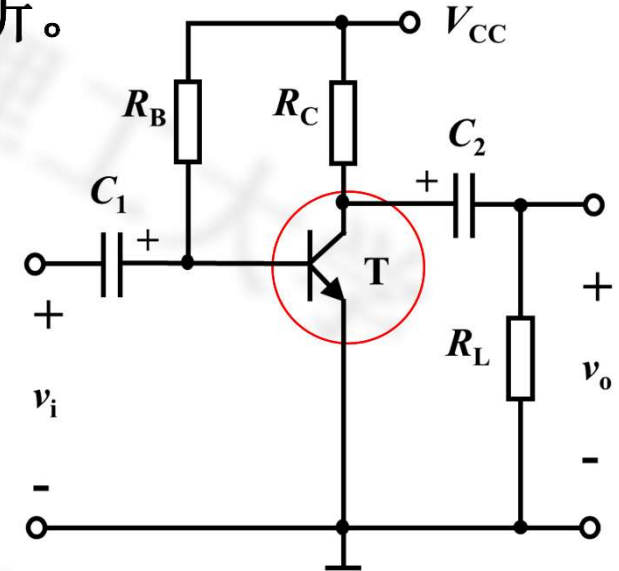
全信号 = 直流偏置 + 交流小信号

思路：

先**直流静态**（静态工作点分析）

再**交流动态**（小信号分析，局部线性化）

总输出为两者的叠加。



基于**IV**曲线的**图解分析法**：直观但是不方便做参数计算。

小信号分析： 1) 器件的小信号模型； 2) 小信号等效电路分析。

- 广泛用于放大电路交流特性分析，容易快速估算交流参数。
- 小信号分析是数学实质是在静态工作点处求偏导 ❤️

4.3.2 小信号模型分析法 1. BJT小信号模型的建立

(1) H参数的引出 (Hybrid混合) (从数学模型角度)

适用范围：低频（忽略寄生电容）交流小信号分析。

$$\begin{aligned} v_{BE} &= f_1(i_B, v_{CE}) \\ i_C &= f_2(i_B, v_{CE}) \end{aligned} \quad \xrightarrow{\text{全微分}} \quad \begin{aligned} dv_{BE} &= \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}} di_B + \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_{BQ}} dv_{CE} \\ di_C &= \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}} di_B + \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_{BQ}} dv_{CE} \end{aligned}$$

常数！

基本思想：小范围内，可以把非线性问题进行线性化处理。

用小信号交流分量表示

$$v_{be} = h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \quad \mathbf{e: 共射接法} \quad \mathbf{r: 反向传输}$$

$$i_c = h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \quad \mathbf{i: 输入} \quad \mathbf{o: 输出} \quad \mathbf{f: 正向传输}$$

四个参数量纲各不相同，故称为混合参数（H参数）。

4.3.2 小信号模型分析法 1. BJT小信号模型的建立

(2) BJT的H参数小信号模型（微变等效电路）（数学物理模型）

$$\begin{aligned} v_{be} &= h_{ie} i_b + h_{re} v_{ce} \\ i_c &= h_{fe} i_b + h_{oe} v_{ce} \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} v_{be} \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{ie} & h_{re} \\ h_{fe} & h_{oe} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_b \\ v_{ce} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{be} & \mu_r \\ \beta & 1/r_{ce} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_b \\ v_{ce} \end{bmatrix}$$

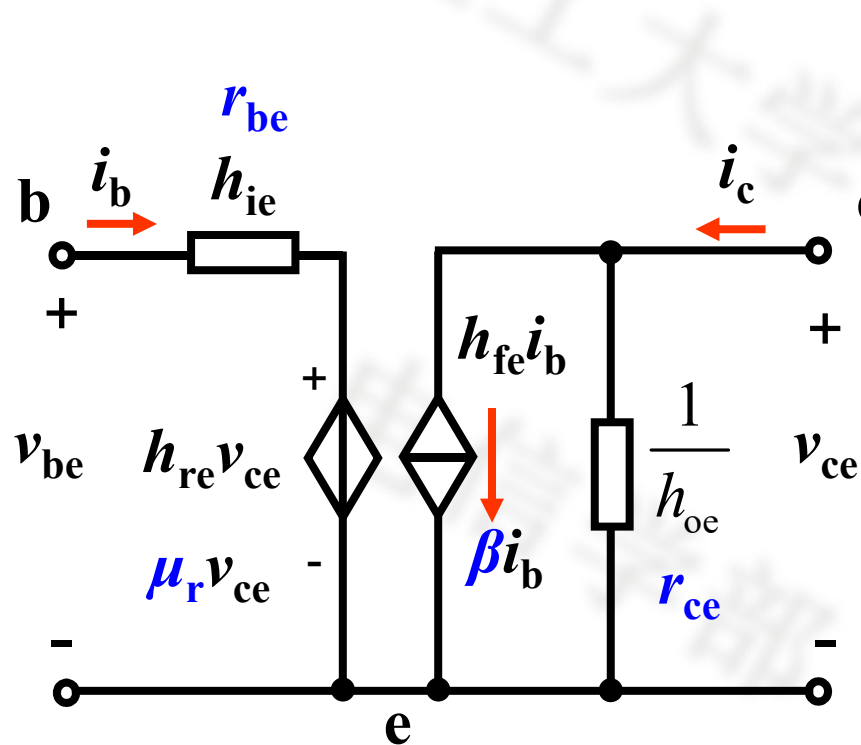


图4.3.11(b) H参数小信号模型

$$h_{ie} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}}$$

$v_{ce}=0$ 输出交流短路
b-e间动态电阻 r_{be}

$$h_{re} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial v_{CE}} \right|_{I_{BQ}}$$

$i_b=0$ 输入交流开路
电压传输比 μ_r

$$h_{fe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}}$$

$v_{ce}=0$ 输出交流短路
电流放大系数 β

$$h_{oe} = \left. \frac{\partial i_C}{\partial v_{CE}} \right|_{I_{BQ}}$$

$i_b=0$ 输入交流开路
c-e间动态电导 $1/r_{ce}$

4.3.2 小信号模型分析法 1. BJT小信号模型的建立

(3) H参数的确定（放大区，从物理模型角度）

① 输入回路

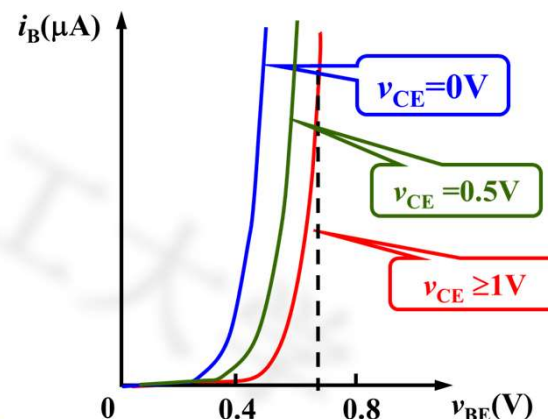
$$r_{be} = \left. \frac{\partial v_{BE}}{\partial i_B} \right|_{V_{CEQ}} = r_{bb'} + (1 + \beta)(r'_e + r_e)$$

基区体电阻
几十至几百欧

发射区体电阻
很小可忽略

发射结电阻 $r_e \approx \frac{V_T}{I_{EQ}} \stackrel{@RT}{\approx} \frac{26\text{mV}}{I_{EQ}}$

电流放大系数
 i_e/i_b



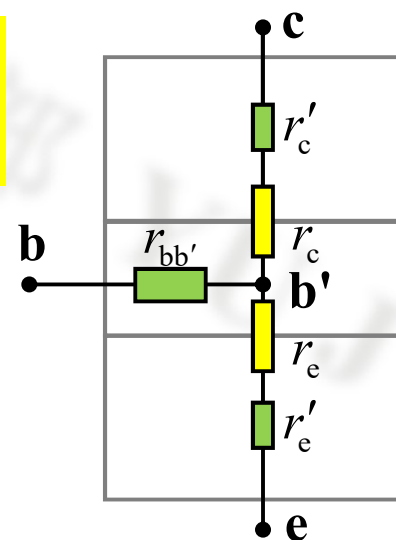
对于小功率三极管：

$$r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$

适用范围： $0.1\text{mA} < I_{EQ} < 5\text{mA}$

交流电阻 r_{be} 的量级：几百欧~几千欧。

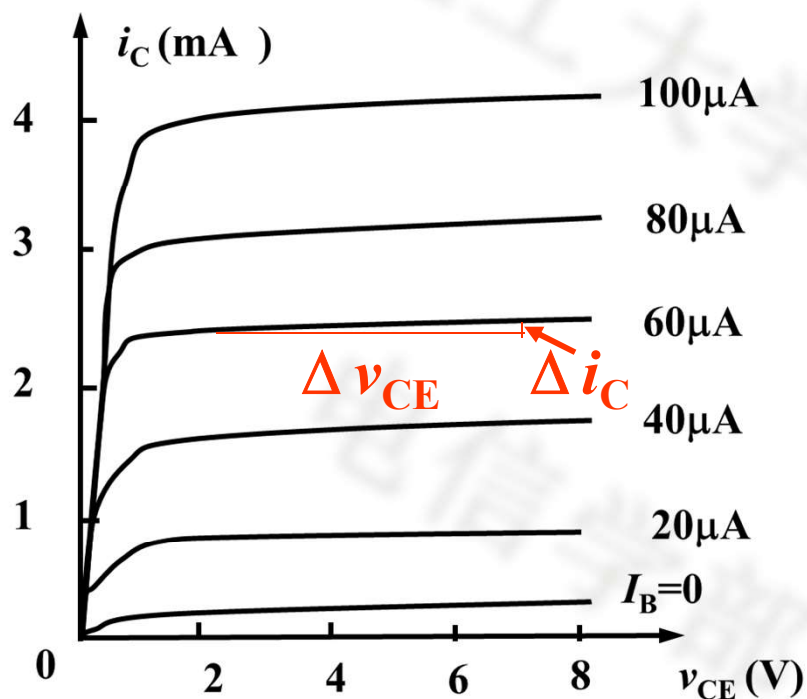
放大区工作的BJT， v_{CE} 对 i_B 影响可忽略，
 $\rightarrow \mu_r = 10^{-3} \sim 10^{-4}$ 忽略不计！



4.3.2 小信号模型分析法 1. BJT小信号模型的建立

(3) H参数的确定（放大区BJT）

② 输出回路



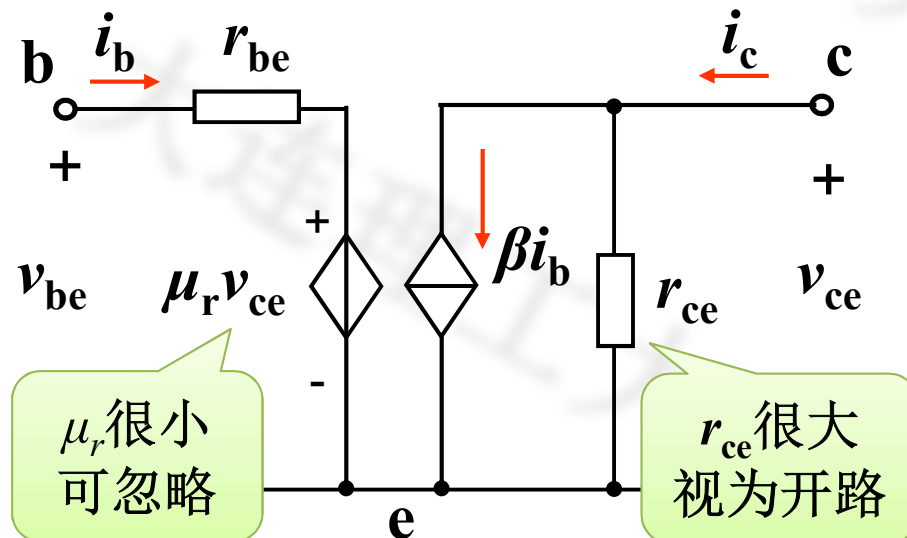
(1) 输出端相当于一个受 i_b 控制的电流源。 $i_c = \beta i_b$

(2) 考虑 v_{CE} 对 i_C 的影响，输出端还要并联一个电阻 r_{ce} 。

$$r_{ce} = \left. \frac{\partial v_{CE}}{\partial i_C} \right|_{I_{BQ}} \approx \frac{\Delta v_{CE}}{\Delta i_C}$$

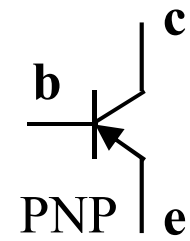
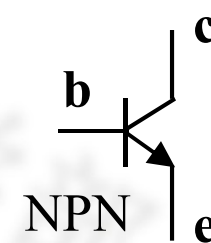
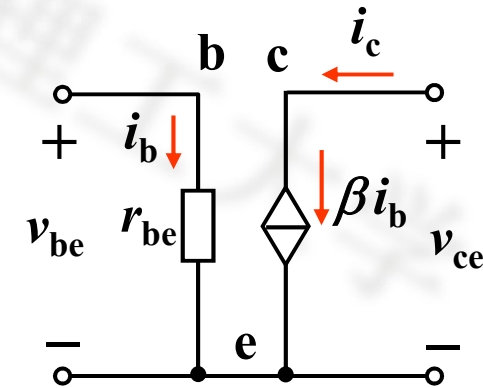
- 工作在放大区时 i_C 曲线近似平行于电压轴， r_{ce} 很大；
- 兆欧姆量级，常视为无穷大。

4.3.2 小信号模型分析法 1. BJT小信号模型的建立



(4) 小信号模型的简化

简化



给初学者的建议:

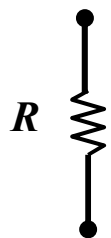
- 标明**b c e**端口;
- $r_{be} \approx r_{bb'} + (1+\beta) V_T / I_{EQ}$; 先静态分析获得 I_{EQ}
- i_b 是流过 r_{be} 的电流, $i_c = \beta i_b$ 是受控电流源;
- i_c 和 i_b 的参考方向均指向**e**极, **PNP**与**NPN**模型完全相同;

4.3.2 小信号模型分析法 2. 其它器件的中频小信号模型

- 通频带内（中频）：耦合电容短路，寄生电容开路；
- 数学实质是在静态工作点处求偏导：
 - 电路中所有电阻保持不变；
 - 恒压电源等效为短路；
 - 恒流电源等效为开路。

V_{CC} 、 V_{EE} 等效为接地！

理想电阻



大信号

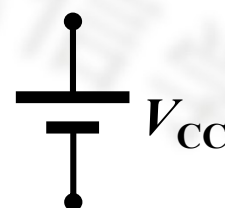
$$R = \frac{v_R}{i_R}$$



小信号

$$r = \frac{\partial v_R}{\partial i_R} = R$$

理想恒压源



大信号

$$V_{CC} = \text{常数}$$



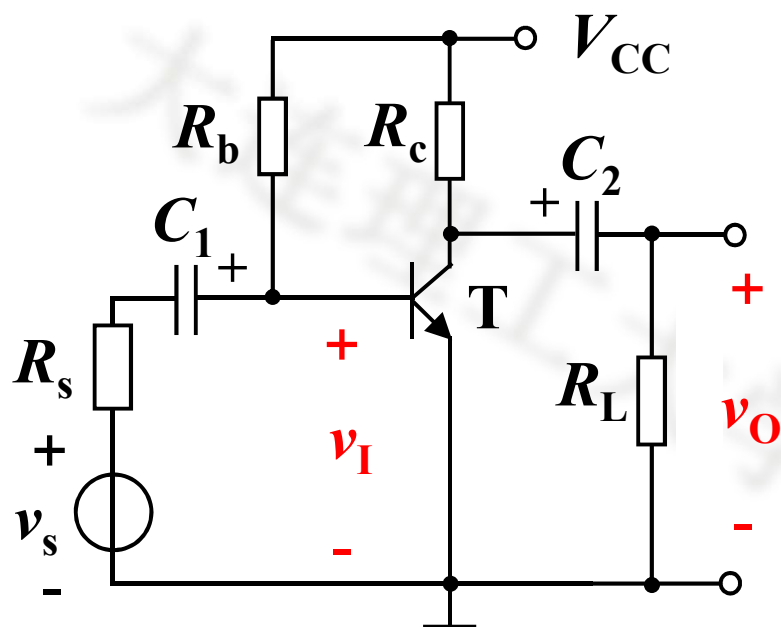
小信号（短路）

$$v_{cc} = 0$$

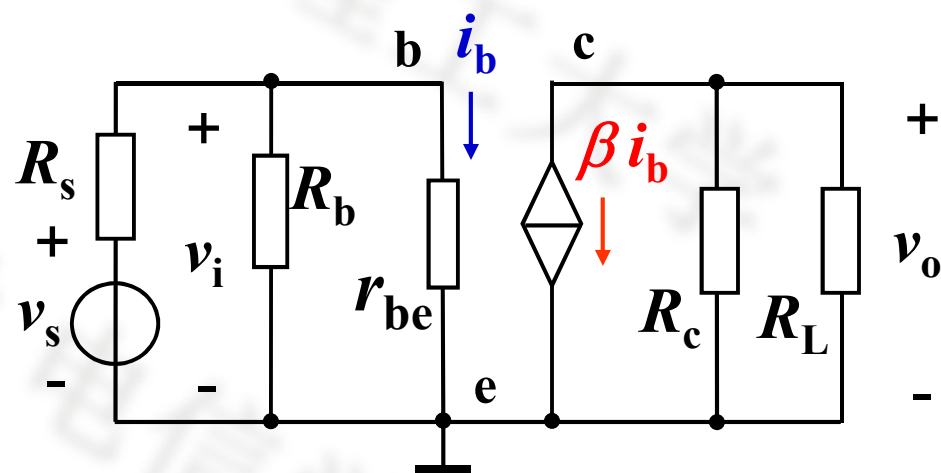
$$r = \frac{\partial V_{CC}}{\partial i_{CC}} = 0$$

4.3.2 小信号模型分析法

3、共射放大电路的小信号分析



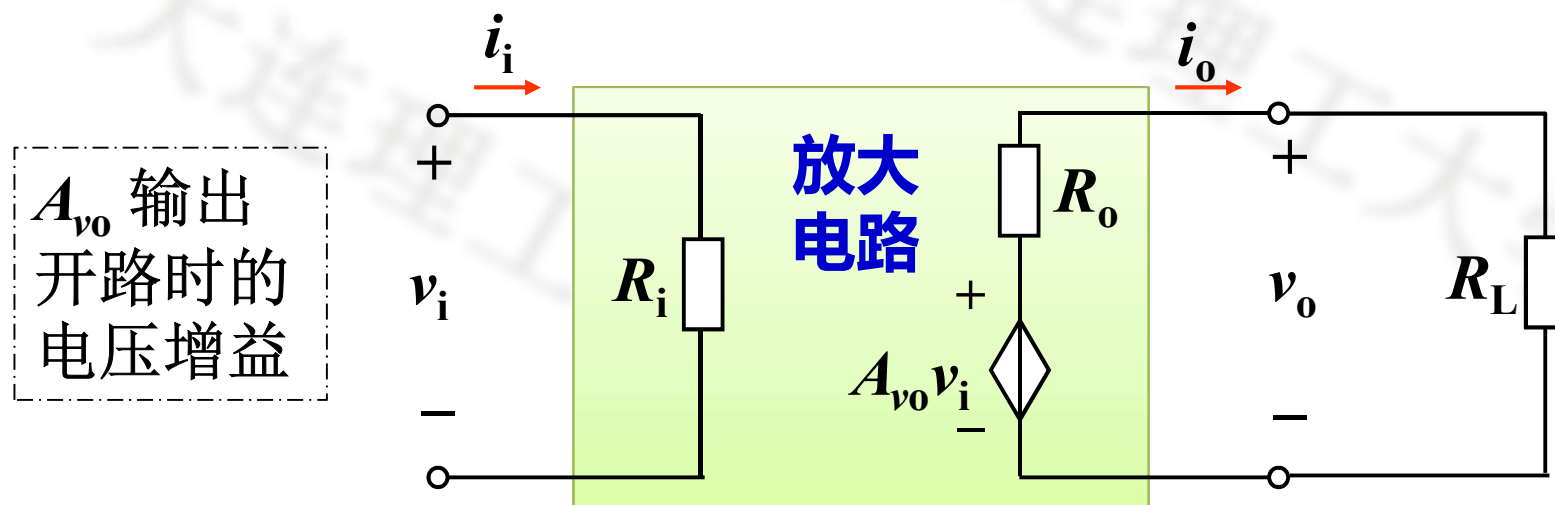
(1) 画小信号等效电路



- 需要分析哪些参数？
- 如何进行分析和计算？

4.3.2 小信号模型分析法 3、共射放大电路的小信号分析

小信号分析的任务：以电压放大电路为例



输入电阻

$$R_i = \frac{v_i}{i_i}$$

期望：无穷大

输出电阻
(输出开路, $v_i=0$)

$$R_o = \frac{v_o}{i_o}$$

无穷小

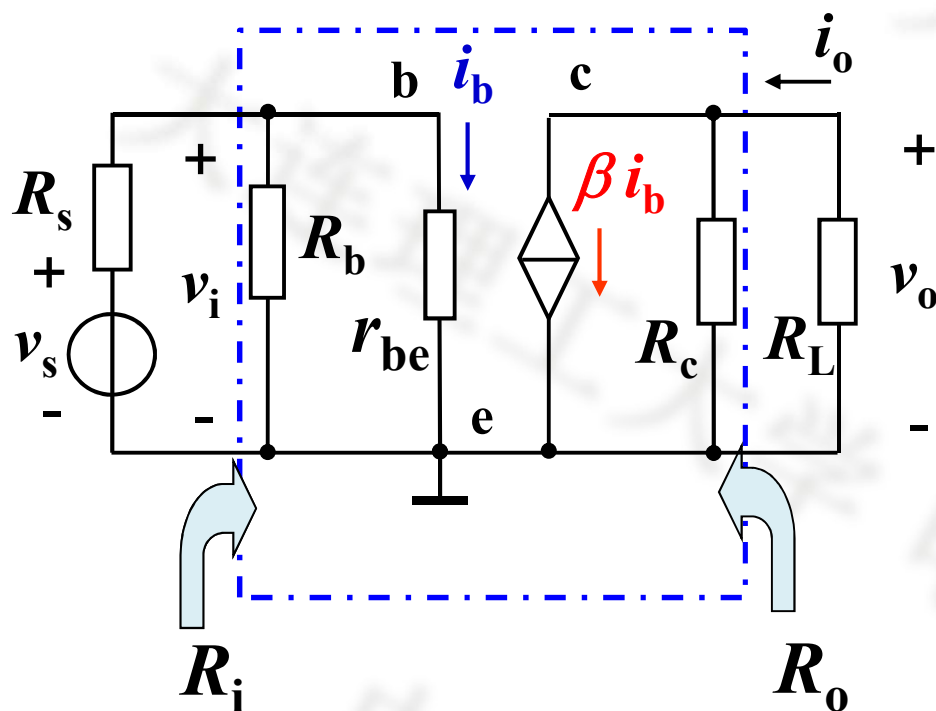
接负载后的小信号电压增益

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} < A_{vo}$$

高增益

4.3.2 小信号模型分析法

3、共射放大电路的小信号分析



(1) 画小信号等效电路

(2) 计算输入电阻 R_i

$$R_i = \frac{v_i}{i_i} = R_b // r_{be}$$

$$r_{be} \approx r_{bb'} + (1+\beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$

(3) 计算输出电阻 R_o

$$R_o = \frac{v_o}{i_o} = R_c$$

$$\because i_b = 0$$

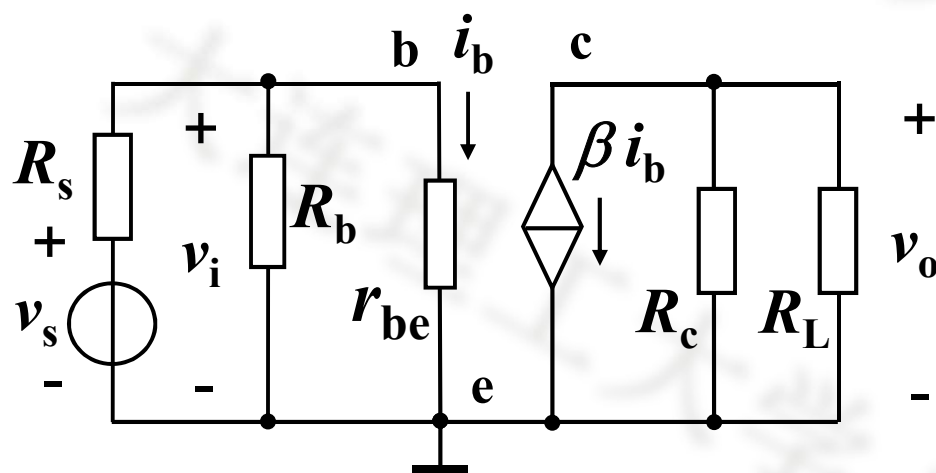
$$\therefore \beta i_b = 0$$

求输出电阻 R_o 的步骤:

1. 断开负载;
2. 输入电压置零;
3. 输出端加电压测电流。

4.3.2 小信号模型分析法

3、共射放大电路的小信号分析



增大电压增益的途径:

1. 选择 β 大的BJT 😊;
2. 减小 r_{be} (😞 减小了 R_i);
3. 增大 R_c (😞 增大了 R_o)。

(1) 画小信号等效电路

(2) 输入电阻 R_i

$$R_i = R_b // r_{be}$$

(3) 输出电阻 R_o

$$R_o = R_c$$

(4) 计算电压增益 $A_v = v_o / v_i$

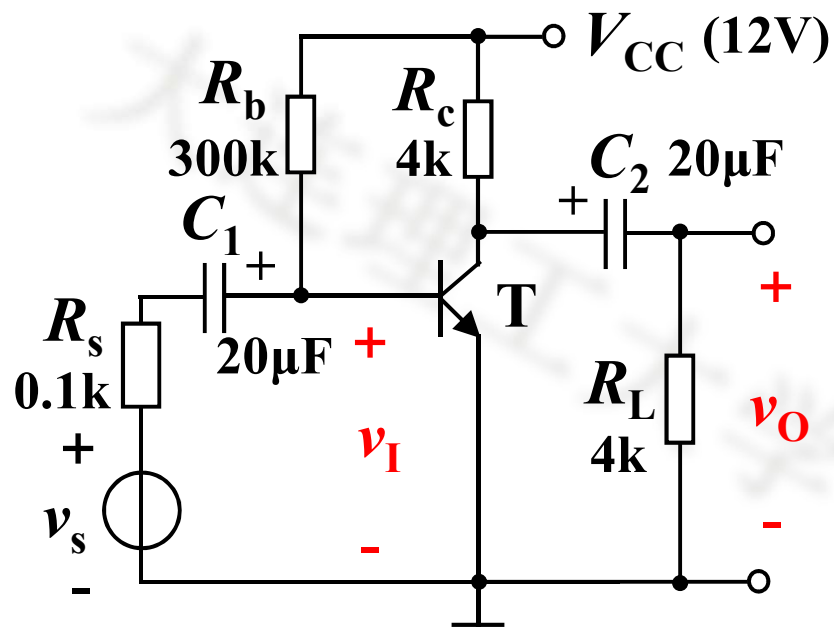
$$v_i = i_b r_{be}$$

$$v_o = -\beta i_b (R_c // R_L)$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = \frac{-\beta (R_c // R_L)}{r_{be}}$$

4.3.2 小信号模型分析法

3、共射放大电路的小信号分析



例：左图所示电路中的BJT的
 $\beta=40$, $r_{bb'}=200\Omega$, $V_{BEQ}=0.7V$ 。

(1) 求静态工作点 I_{BQ} , I_{CQ} , V_{CEQ}

(2) 求 R_i 、 R_o 、 A_v

(3) 若 R_L 开路，则 A_v 如何变化？

解：(1) 算静态工作点，并计算 r_{be}

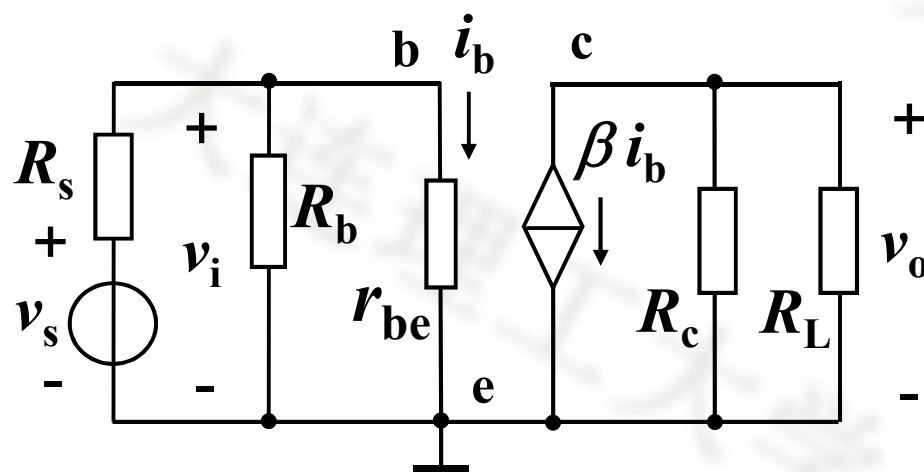
$$I_{BQ} = \frac{V_{CC} - V_{BEQ}}{R_b} \approx \frac{12}{300k} = 40\mu A \quad I_{CQ} \approx \beta I_{BQ} \approx 40 \times 40\mu = 1.6mA$$

$$V_{CEQ} = V_{CC} - R_c I_{CQ} \approx 12 - 4k \times 1.6m = 5.6V$$

$$r_{be} = r_{bb'} + (1 + \beta) \frac{V_T}{I_{EQ}} \approx 200\Omega + (1 + 40) \frac{26mV}{1.6mA} \approx 866\Omega$$

4.3.2 小信号模型分析法

3、共射放大电路的小信号分析



例： $\beta=40$, $r_{bb'}=200\Omega$, $V_{BEQ}=0.7V$

(1) 求 I_{BQ} , I_{CQ} , V_{CEQ}

(2) 求 R_i 、 R_o 、 A_v

(3) 若 R_L 开路，则 A_v 如何变化？

(2) 计算 R_i 、 R_o 、 A_v

$$R_i = R_b // r_{be} = 886 \Omega \quad R_o = R_c = 4k\Omega$$

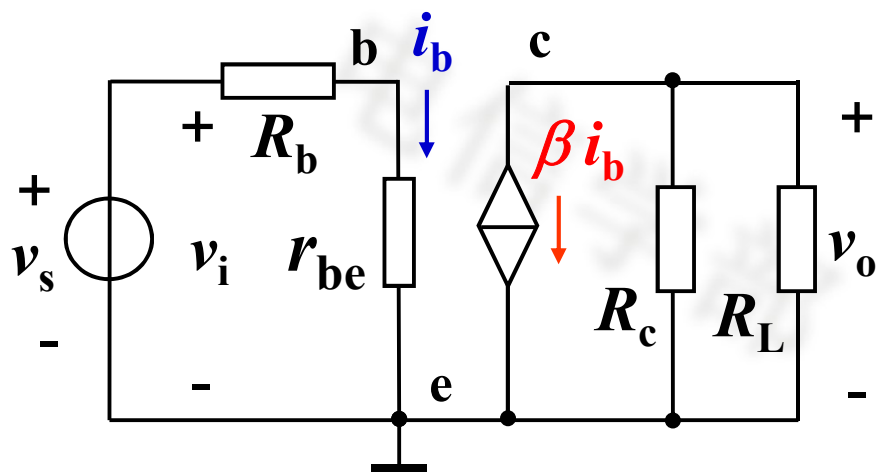
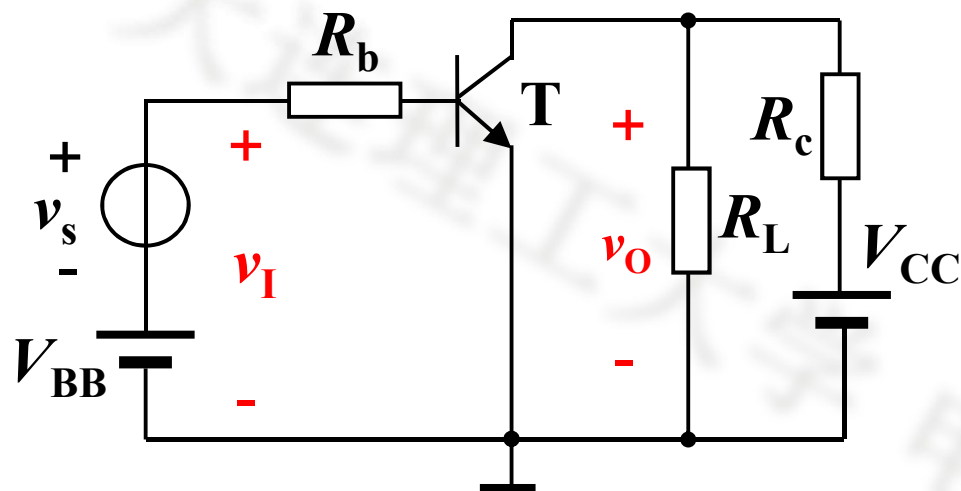
$$A_v = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be}} = -\frac{40(4k // 4k)}{0.87k} \approx 92.4$$

(3) R_L 开路时 $A_v = -\beta R_c / r_{be} = -184.8$

输出开路时，电压增益绝对值变大。

输出阻抗远小于负载时，电压增益趋近于开路增益。

课堂练习——基本共射放大电路小信号分析



(1) 画小信号等效电路

(2) 计算输入电阻 R_i

$$R_i = R_b + r_{be}$$

(3) 计算输出电阻 R_o

$$R_o \approx R_c$$

(4) 求电压增益 A_v

$$v_i = i_b (R_b + r_{be})$$

$$v_o = -i_c (R_c // R_L) = -\beta i_b R_L'$$

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} = -\frac{\beta R_L'}{R_b + r_{be}}$$

$$r_{be} \approx 200\Omega + (1 + \beta) \frac{26(\text{mV})}{I_{EQ}(\text{mA})}$$

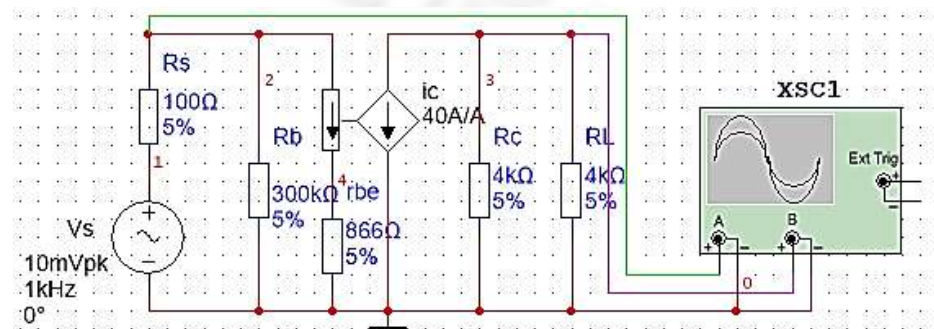
4.3.2 小信号模型分析法

• 本节小结

- ✓ 会画：小信号等效电路
- ✓ 会算： A_v R_i R_o

• 作业

- ✓ P188: 4.3.8, 4.3.9
- ✓ 共射放大电路的小信号等效电路计算、Multisim仿真分析



小信号等效电路

- 实质是什么？
- V_{CC} 为什么等效接地？
- 为什么没有电容？
- NPN和PNP一样吗？
- 三大参数的计算方法

预习：放大电路静态工作点稳定性问题；共集放大电路。

 qq: 308394387