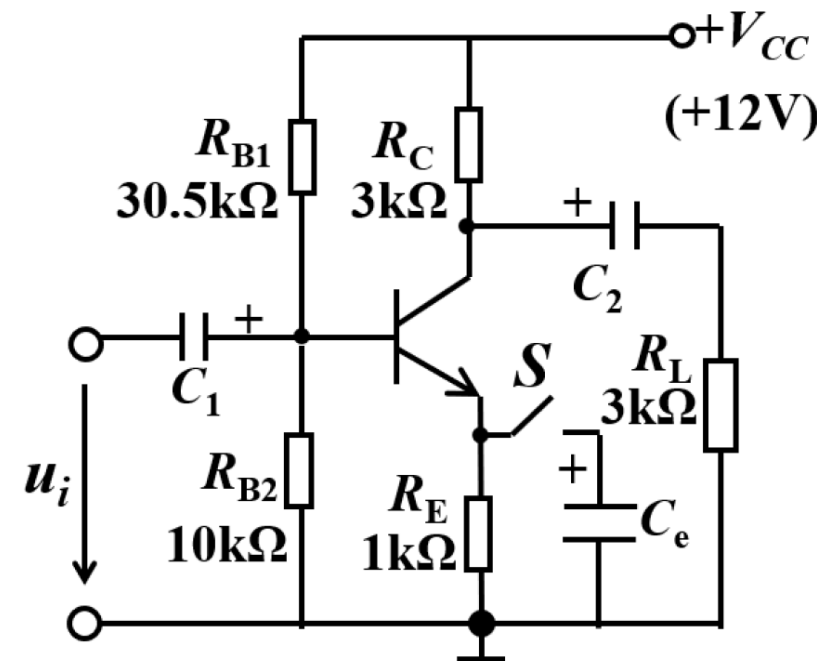
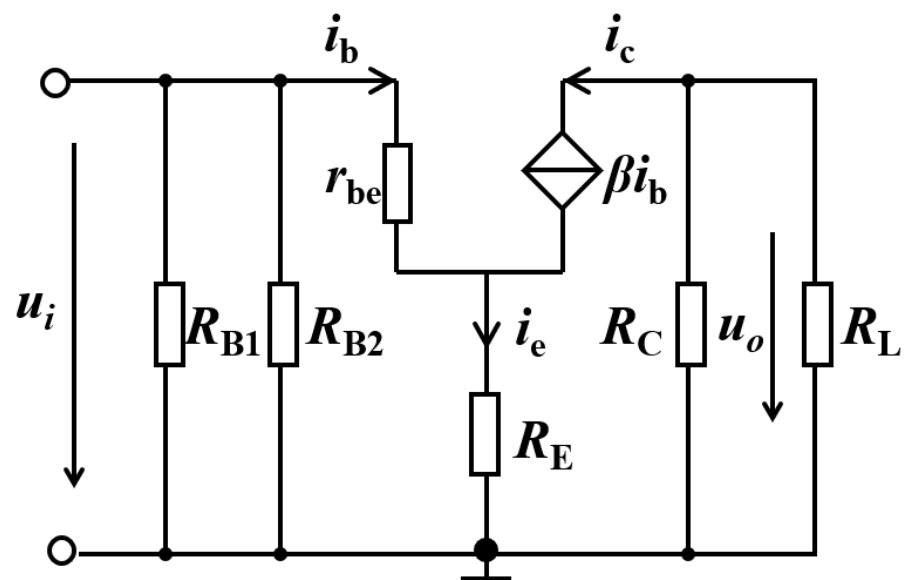


作业1：分析实验五的电路图 → 所有计算请保留到小数点后两位



$R_E$ 会造成共射电路的 $|A_u|$ 变小

动态性能指标	无旁路电容作用的电路 ( $R_E$ 对交流有负反馈)	有旁路电容作用的电路 ( $R_E$ 对交流无负反馈)
电压放大倍数 $A_u$	$\frac{-\beta(R_C//R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_E} \approx -1.466$	$\frac{-\beta(R_C//R_L)}{r_{be}} \approx -111.94$
输入电阻 $r_i$	$R_{B1} // R_{B2} // [r_{be} + (1 + \beta)R_E] \approx 7.014 \text{ k}\Omega$	$R_{B1} // R_{B2} // r_{be} \approx 1.138 \text{ k}\Omega$
输出电阻 $r_o$	$r_o = R_C = 3 \text{ k}\Omega$	$r_o = R_C = 3 \text{ k}\Omega$

结论：交流负反馈会稳定 $|A_u|$ （误差小）， $r_i$ 变大，通频带变宽。

# 放大电路的通频带 → 动态性能指标

通频带（带宽）：反映了放大电路对不同频率信号的适应能力

横轴：输入交流电压 $u_i$ 的频率 $f$

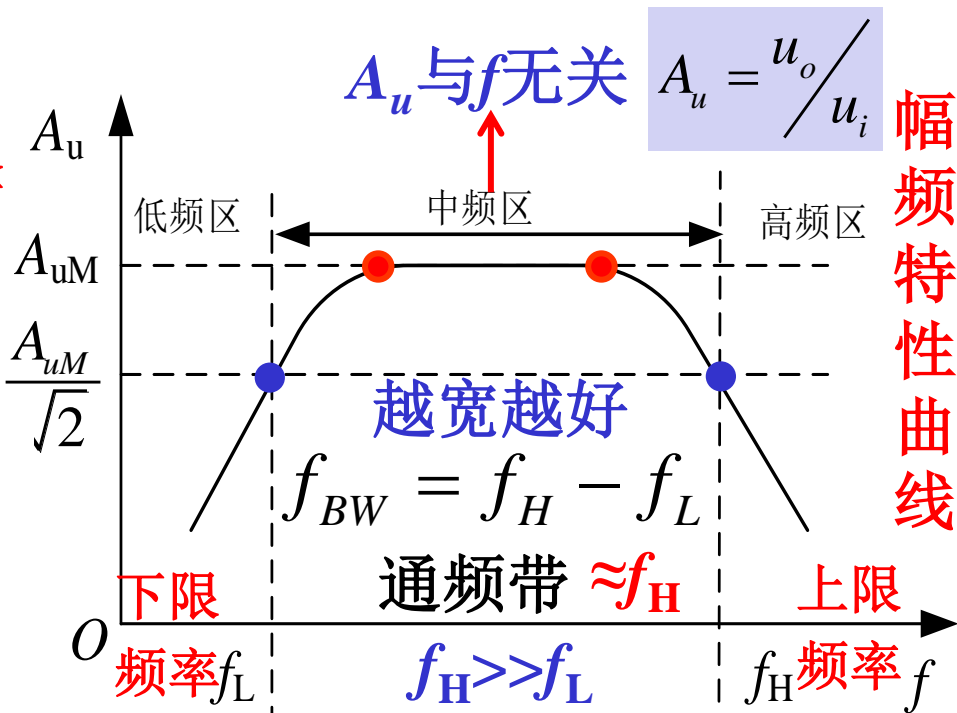
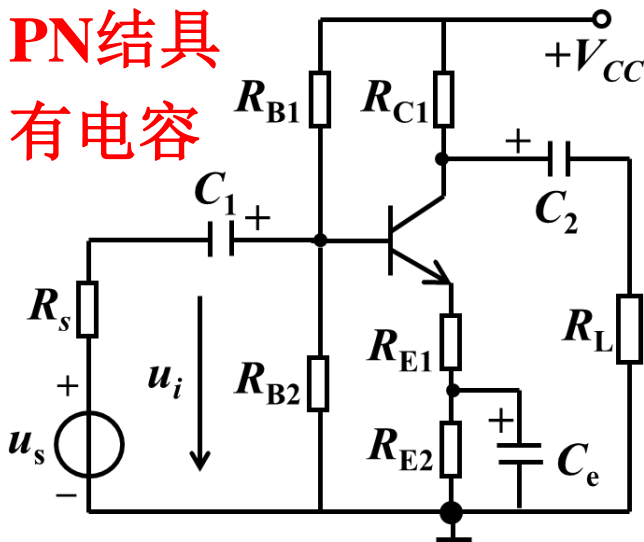
$f$ 过大或过小都会造成 $A_u$ 的下降

$A_u$ 下降原因：电路中存在电容

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

串接 并接

PN结具有电容



当 $f$ 过低时：交流通路中串接的外部电容（耦合和旁路电容）的分压会造成 $A_u \downarrow$

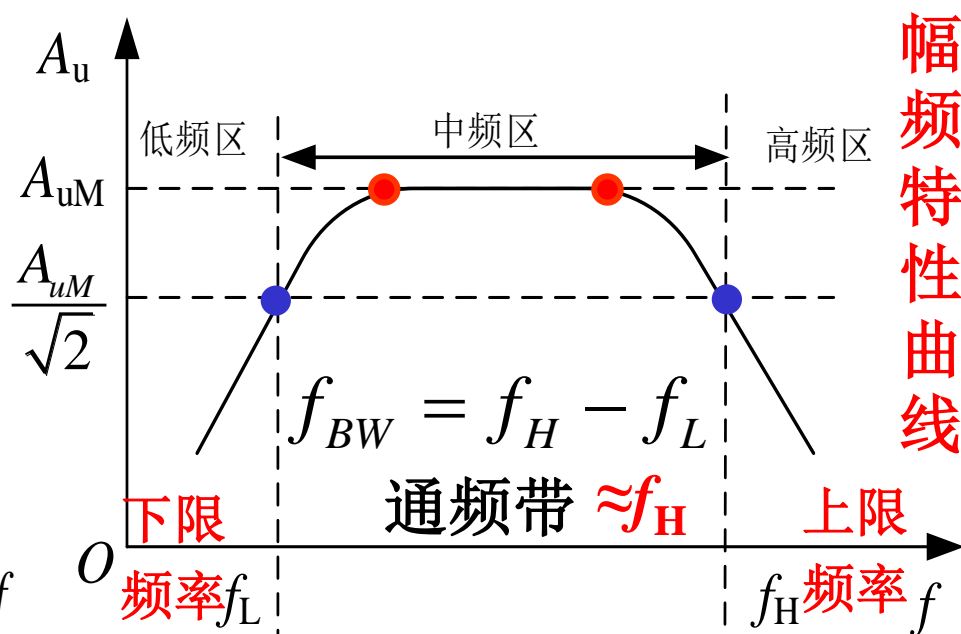
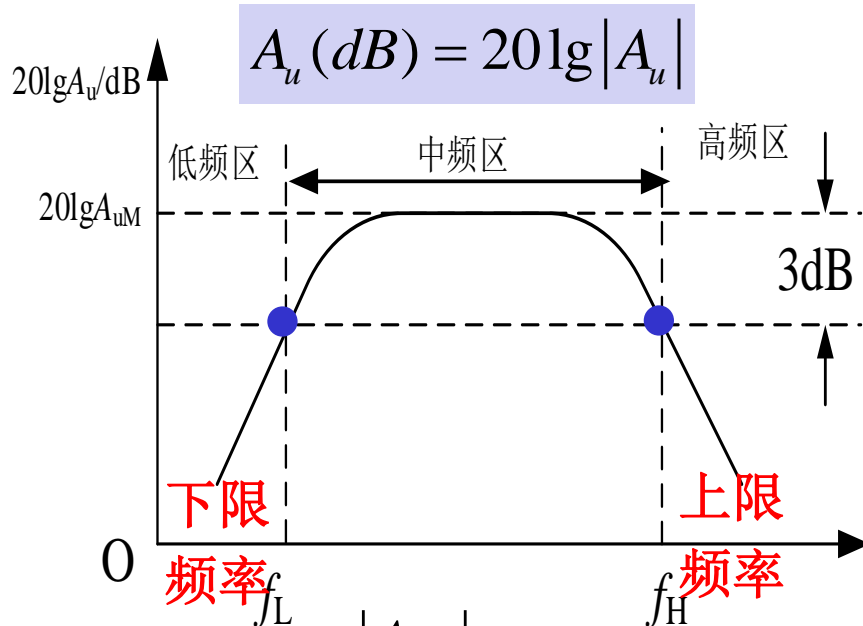
当 $f$ 过高时：三极管内两个PN结自带的极间电容的分流作用会造成 $A_u \downarrow$ 。

注意：均有上限截止频率

注意：直接耦合电路由于没有串接电容所以没有下限截止频率 $f_L$

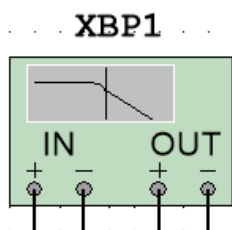
实验要求用Multisim中的波特仪测量放大电路的幅频特性曲线  
做实验之前必须先修改虚拟三极管的参数才能测量上限频率。

∴虚拟三极管不存在极间电容 ∴  $C_{be}$  和  $C_{bc}$  均需设为  $10\text{pF}=10^{-11}\text{F}$



$$20\lg \frac{|A_{uM}|}{\sqrt{2}} = 20\lg|A_{uM}| - 20\lg(\sqrt{2}) = A_{um}(\text{dB}) - 3\text{dB}$$

注意：绘制幅频特性曲线时，横轴和纵轴一般都采用对数坐标。



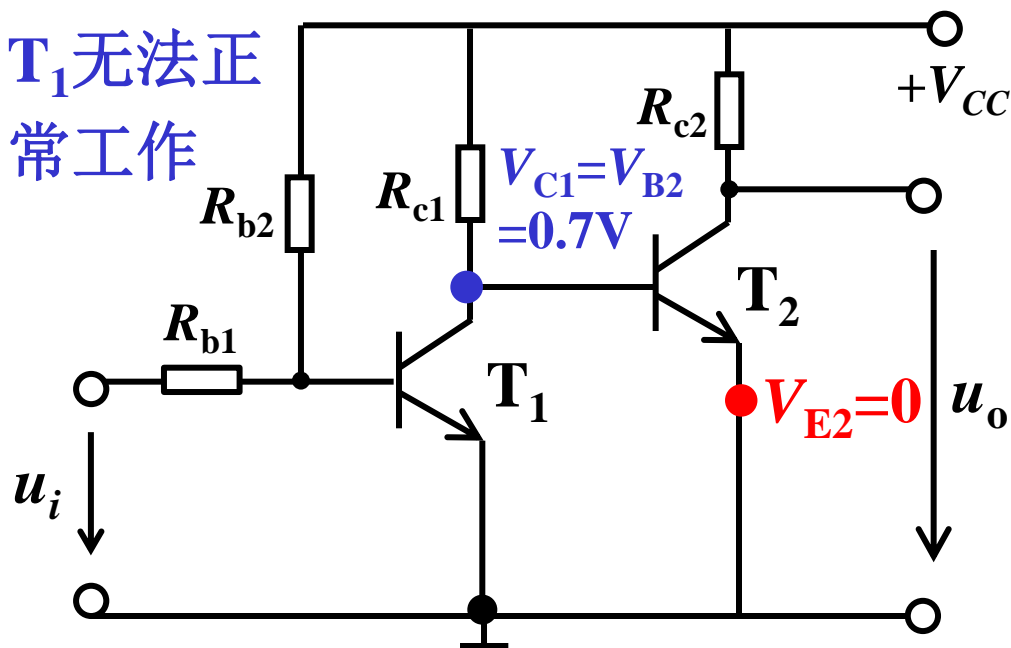
注意：波特仪的连接方式与示波器非常相似

区别：波特仪只能在仿真运行中绘制一次幅频曲线  
每次改变电路后一定要重新仿真来重新绘制该曲线

# § 4 多级放大电路

这张图的错误？

$T_1$ 无法正常工作



降低 $U_{omax} \leftarrow$ 降低 $U_{Fm} \leftarrow I_C$ 变小

NPN的直接耦合会造成 $V_C$ 逐级抬高

思考：让 $V_{E2} > 0$ 后，有什么新问题？

$V_{C1} = V_{B2} > 0.7 \rightarrow V_{C1} > V_{B1} \rightarrow T_1$ 正常工作

但为保证 $T_2$ 正常工作 $\rightarrow V_{C2} > V_{B2} = V_{C1}$

解决方案：让 $V_{E2} > 0$ ，P165

法1：在 $T_2$ 的E极加入 $R_{e2}$

缺点：加入 $R_{e2}$ 会降低 $|A_{u2}|$

法2：用反偏稳压管代替 $R_{e2}$

法3：用正偏二极管代替 $R_{e2}$

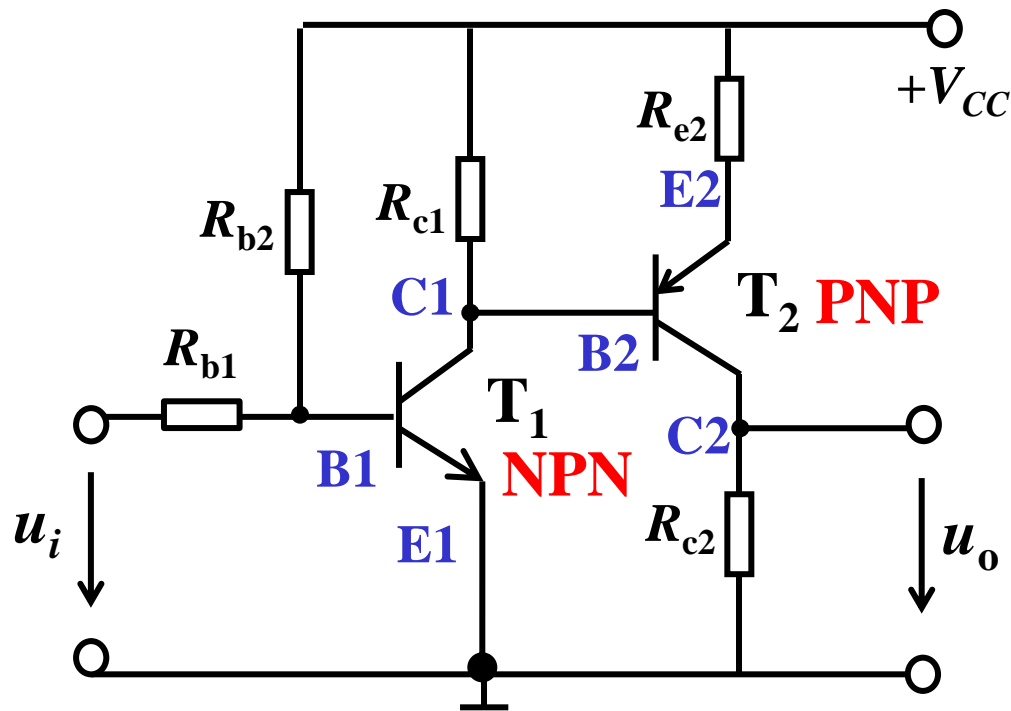
画微变等效图时， $D_Z$ 和 $D$ 均可视为很小的动态电阻，因此对 $|A_{u2}|$ 的影响非常小。

解决方案：

方法：采用NPN和PNP级联

利用放大条件相反把 $V_C \downarrow$

## § 4 多级放大电路



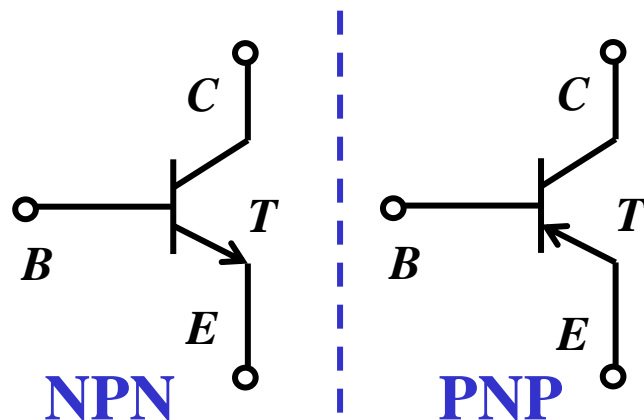
注意：每一级都是采用B入C出

**NPN-PNP级联直接耦合共射放大电路**

不管是NPN还是PNP，共射都是电压反相放大，共集则同相跟随

$V_{C1} = V_{B2} > V_{C2} \rightarrow$  通过两者交替使用，可避免 $V_C$ 一直抬升或降低  
直接耦合放大电路的分析只要求掌握P165图5-52(a)

**PNP管和NPN管的  
放大条件正好相反**



$V_C > V_B > V_E$      $V_E > V_B > V_C$

箭头含义1：正常工作时  
管脚电位的递减顺序

例题1: P165 图5-52(a)

思考:  $R_{B2}$ 和 $R_{E2}$ 的作用?

$R_{B2}$ 保证 $T_1$ 的发射结正偏

$R_{E2}$ 保证 $T_1$ 的集电结反偏

$$V_{C1} = U_{BE2} + I_{E2}R_{E2} > 0.7V$$

静态分析:

步骤1: 画出直流通路: 将交流电源除源, 变成一根导线

步骤2: 确定各级的Q点  $\rightarrow$  已知 $U_{BE}$ 去估算  $I_B$ 、 $I_C$ 、 $U_{CE}$

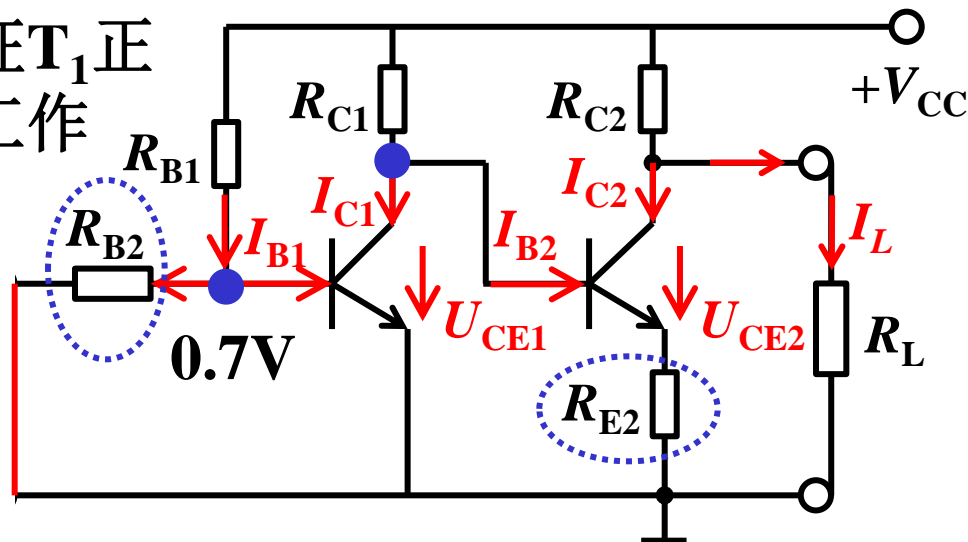
$$KCL: I_{B1} = I_{RB1} - I_{RB2} \quad I_{B1} = \frac{V_{CC} - 0.7}{R_{B1}} - \frac{0.7}{R_{B2}} \quad I_{C1} = \beta_1 I_{B1} \quad I_{C1} \neq I_{RC1}$$

$$\left. \begin{aligned} U_{CE1} &= V_{CC} - (I_{C1} + I_{B2})R_{C1} \\ U_{CE1} &= 0.7 + (1 + \beta_2)I_{B2}R_{E2} \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{直接耦合的静态工作点Q会相互影响} \\ \text{联立方程组, 即可求出 } U_{CE1} \text{ 和 } I_{B2} \end{array}$$

$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} \quad \text{空载} \rightarrow U_{CE2} = V_{CC} - I_{C2}R_{C2} - I_{E2}R_{E2} \quad I_{E2} = (1 + \beta_2)I_{B2}$$

$$\left. \begin{aligned} \text{有载 } U_{CE2} &= V_{CC} - (I_{C2} + I_L)R_{C2} - I_{E2}R_{E2} \\ U_{CE2} + I_{E2}R_{E2} &= I_L R_L \end{aligned} \right\} \begin{array}{l} \text{联立方程组, 即可求 } U_{CE2} \text{ 和 } I_L \\ \text{写出表达式即可 (无需求解)} \end{array}$$

保证 $T_1$ 正常工作



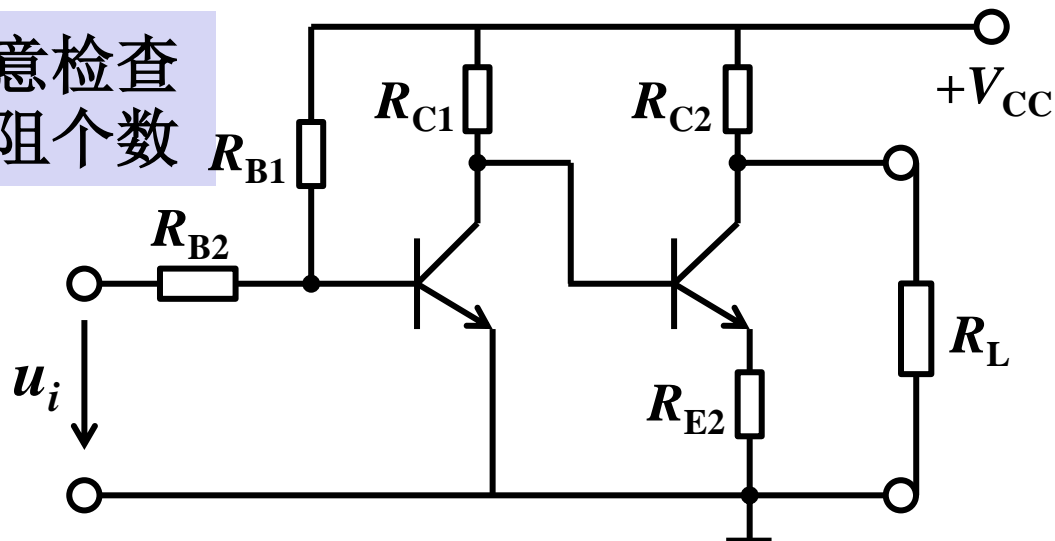
## 动态分析:

- ① 画出微变等效电路  
先画前级再画后级

$$r_{be1} = r_{bb}' + (1 + \beta_1) \frac{26(mV)}{I_{E1}(mA)}$$

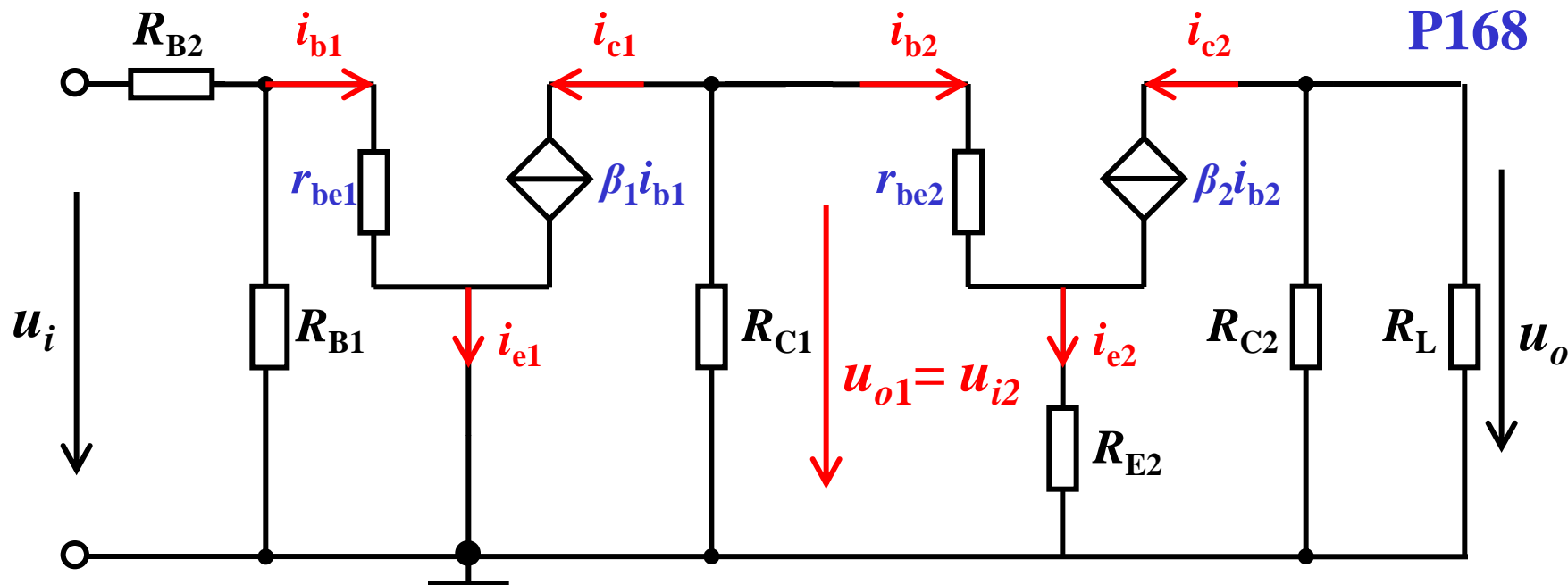
$$r_{be2} = r_{bb}' + (1 + \beta_2) \frac{26(mV)}{I_{E2}(mA)}$$

注意检查  
电阻个数



$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = \frac{u_o \times u_{o1}}{u_i \times u_{i2}} = \frac{u_{o1}}{u_i} \times \frac{u_o}{u_{i2}} = A_{u1} \times A_{u2}$$

- ② 求解动态性能指标



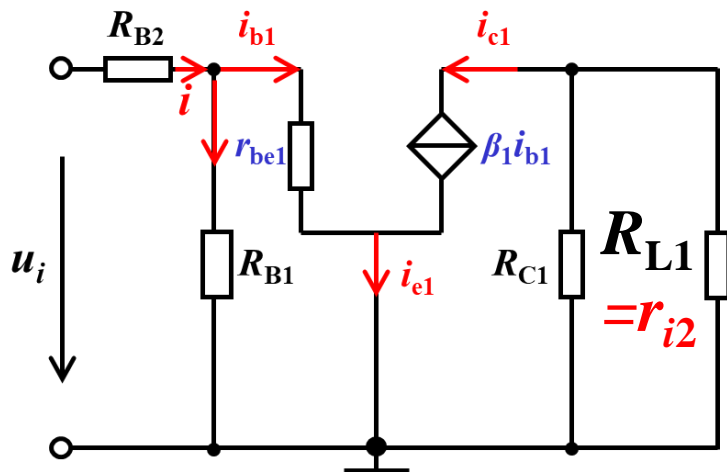
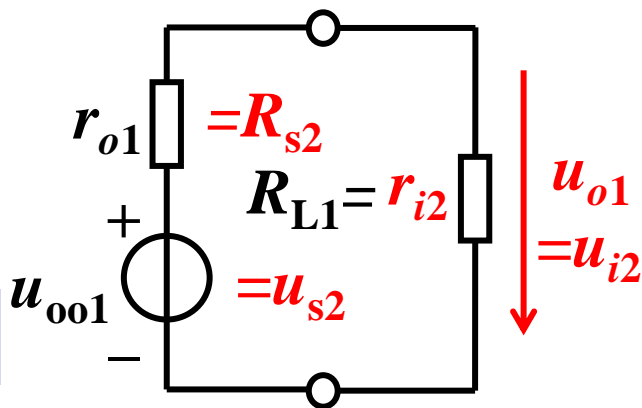
1、电压放大倍数  $A_u = A_{u1} \times A_{u2} \rightarrow$  分开求  $A_{u1}$  和  $A_{u2}$

前一级是后一级的信号源

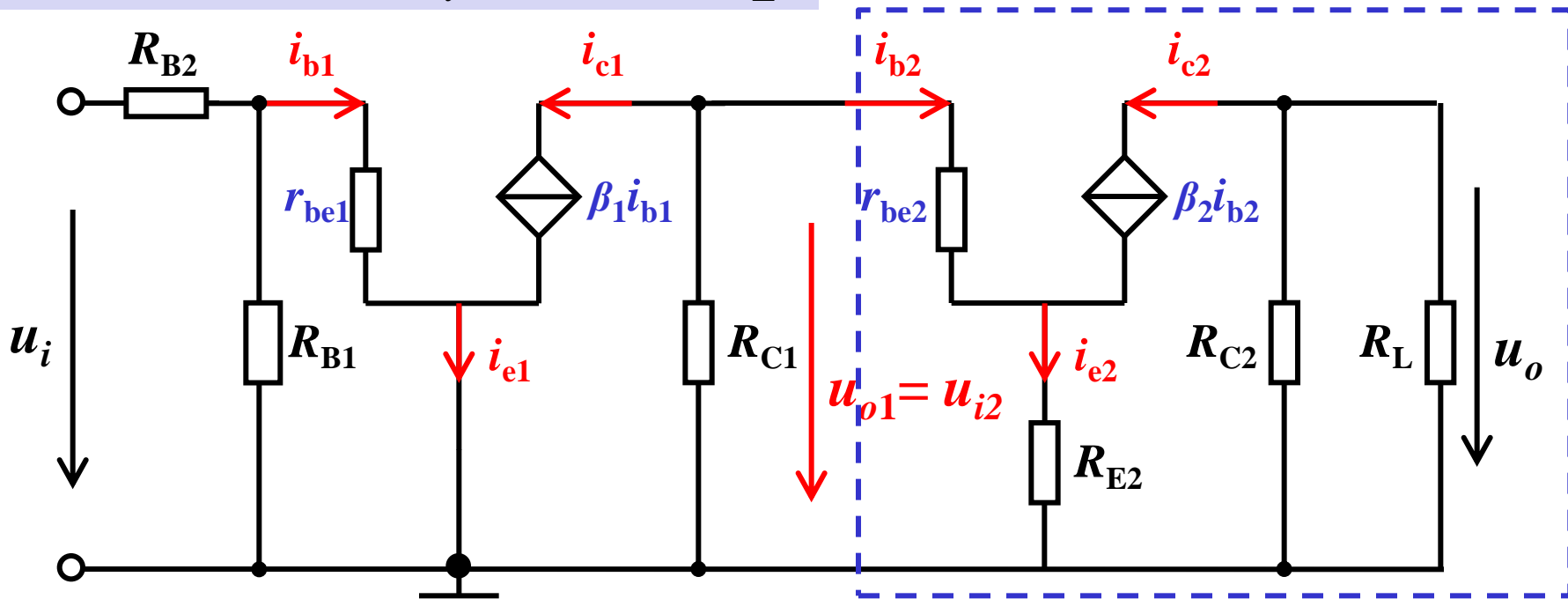
$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{? i_{c1}}{? i_{b1}}$$

$$u_{o1} = -i_{c1}(R_C // R_{L1})$$

$$u_{o1} = -i_{c1}(R_{C1} // r_{i2})$$



注意：后一级的  $r_i$  = 前一级的  $R_L$





1、电压放大倍数  $A_u = A_{u1} \times A_{u2} \rightarrow$  分开求  $A_{u1}$  和  $A_{u2}$  跳板法

$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{-\beta_1 i_{b1} (R_{C1} // r_{i2})}{i (R_{B2} + R_{B1} // r_{be1})}$$

思考:  $u_i$  和  $i_{b1}$  有什么关系?

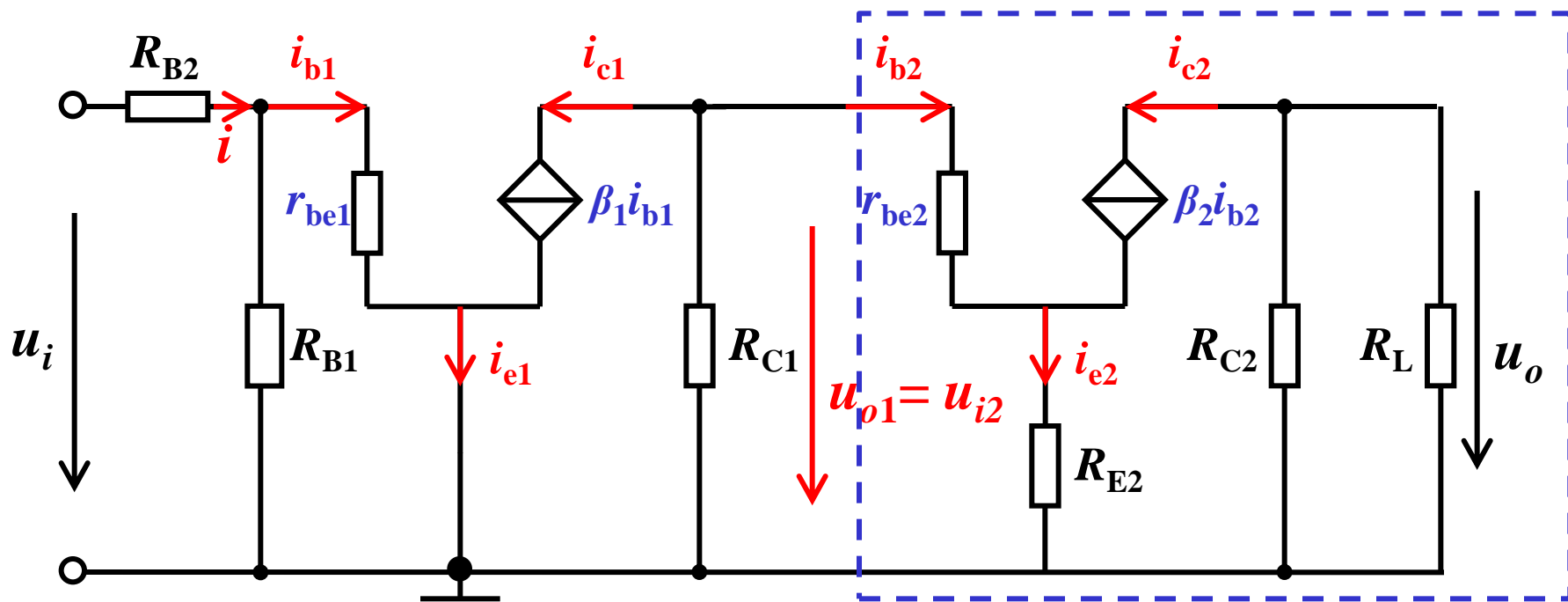
方法1: 以总电流  $i$  为跳板

先找  $u_i$  和  $i$  的关系再找  $i$  和  $i_{b1}$  关系?

$$= \frac{-\beta \frac{R_{B1}}{R_{B1} + r_{be1}} \cancel{i} (R_{C1} // r_{i2})}{\cancel{i} (R_{B2} + R_{B1} // r_{be1})} = \frac{-\beta_1 (R_{C1} // r_{i2}) R_{B1}}{r_{be1} R_{B2} + R_{B1} R_{B2} + r_{be1} R_{B1}}$$

分流公式:

$$i_{b1} = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + r_{be1}} i$$



1、电压放大倍数  $A_u = A_{u1} \times A_{u2} \rightarrow$  分开求  $A_{u1}$  和  $A_{u2}$  跳板法

思考:  $u_i$  和  $i_{b1}$  有什么关系?

方法1: 以总电流  $i$  为跳板

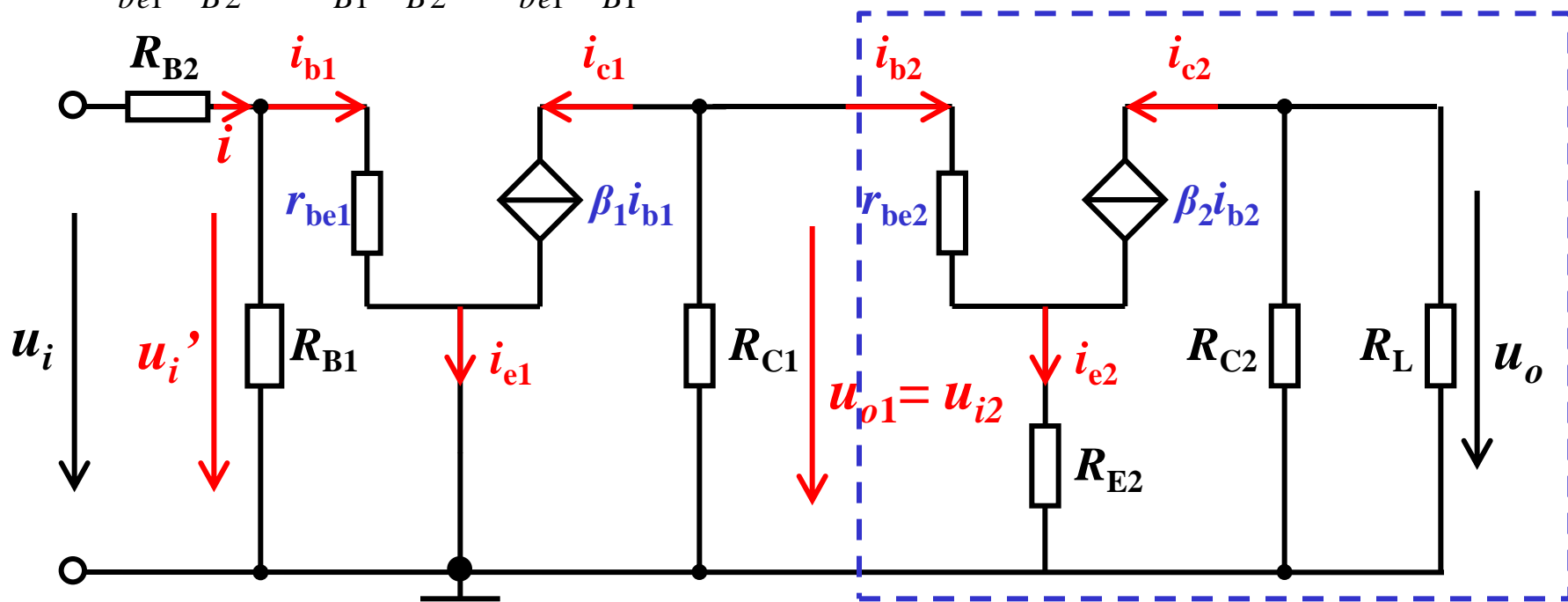
方法2: 以分电压  $u_i'$  为跳板  
 $u_i'$  和  $u_i$  关系?

$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{u_{o1} \times u_i'}{u_i \times u_i'} = \frac{u_{o1}}{u_i'} \times \frac{u_i'}{u_i}$$

$$= \frac{-\cancel{\beta_1 i_{b1}} (R_{C1} // r_{i2})}{\cancel{i_{b1}} r_{be1}} \times \frac{R_{B1} // r_{be1}}{R_{B2} + R_{B1} // r_{be1}}$$

$$A_{u1} = \frac{-\beta_1 (R_{C1} // r_{i2}) R_{B1}}{r_{be1} R_{B2} + R_{B1} R_{B2} + r_{be1} R_{B1}}$$

分压公式:  $u_i' = \frac{R_{B1} // r_{be1}}{R_{B2} + R_{B1} // r_{be1}} \times u_i$



1、电压放大倍数  $A_u = A_{u1} \times A_{u2} \rightarrow$  分开求  $A_{u1}$  和  $A_{u2} \rightarrow A_u > 1$

∴ 与恒流源串联的电阻无需考虑

∴ 读  $r_i$  时只考虑发射极电阻折算

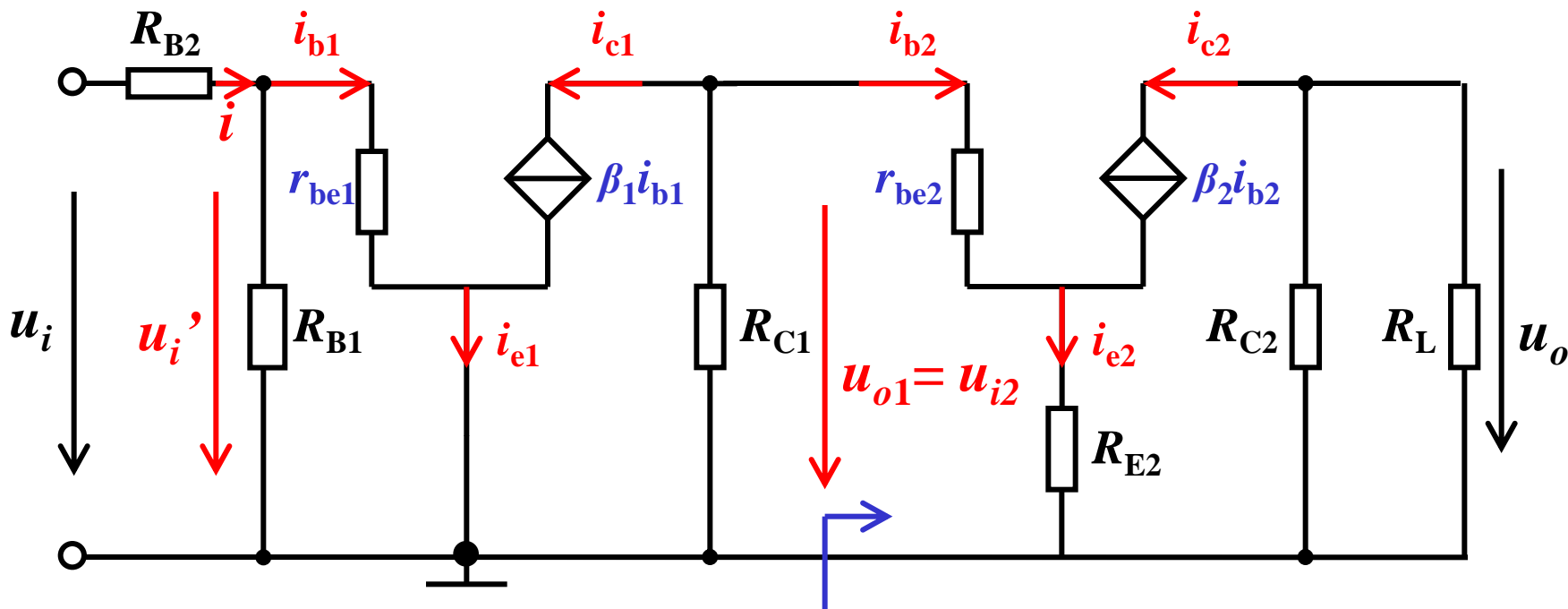
$$r_{i2} = \frac{u_{i2}}{i_{b2}} = \frac{\cancel{i_{b2}} r_{be2} + (1 + \beta_2) \cancel{i_{b2}} R_{E2}}{\cancel{i_{b2}}} = r_{be2} + (1 + \beta_2) R_{E2} \rightarrow \text{与 } R_{C2} \text{ 和 } R_L \text{ 无关}$$

$r_{i2} = ? \rightarrow$  从第二级输入端看进去的等效电阻

$$A_{u2} = \frac{u_o}{u_{i2}} = \frac{-i_{c2}(R_{C2} // R_L)}{i_{b2} r_{be2} + i_{e2} R_{E2}} = \frac{-\beta_2 \cancel{i_{b2}} (R_{C2} // R_L)}{\cancel{i_{b2}} r_{be2} + (1 + \beta_2) \cancel{i_{b2}} R_{E2}}$$

$$A_{u1} = \frac{-\beta_1 (R_{C1} // r_{i2}) R_{B1}}{r_{be1} R_{B2} + R_{B1} R_{B2} + r_{be1} R_{B1}}$$

不可以用  $u_{o1}$  的公式



1、电压放大倍数  $A_u = A_{u1} \times A_{u2}$

偶数级共射实现对  $u_i$  同相放大  
奇数级共射实现对  $u_i$  反相放大

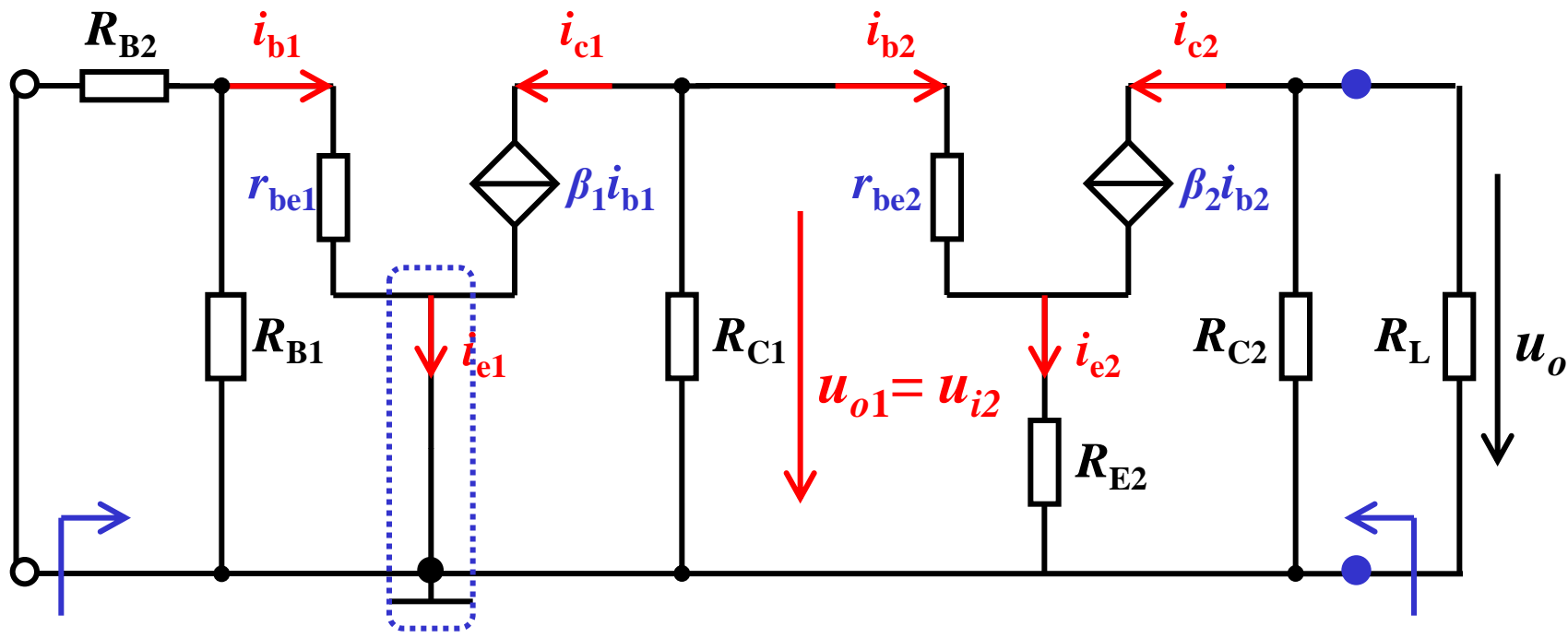
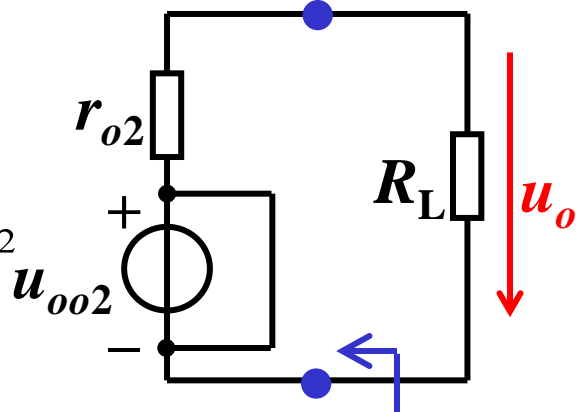
2、输入电阻  $r_i$   $r_i = R_{B2} + R_{B1} // r_{be1}$

结论：多级的  $r_i$  = 第一级的输入电阻  $r_{i1}$

3、输出电阻  $r_o = R_{C2} // r'$   $r' > r_{ce} = \infty$   $r_o = R_{C2}$

结论：多级的  $r_o$  = 最后一级的输出电阻  $r_{o2}$

结论：所有共射的  $r_o = R_C$



## 例题2：先做静态分析 不要求计算时直接用估算法

$$Q_1: V_{B1} = \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} V_{CC}$$

$$I_{E1} = \frac{V_{B1} - U_{BE1}}{R_{E1}} \quad I_{B1} = \frac{I_{E1}}{1 + \beta_1}$$

$$I_{C1} = \beta_1 I_{B1} \quad \text{公式无需代入}$$

$$U_{CE1} = V_{CC} - I_{C1} R_{C1} - I_{E1} R_{E1}$$

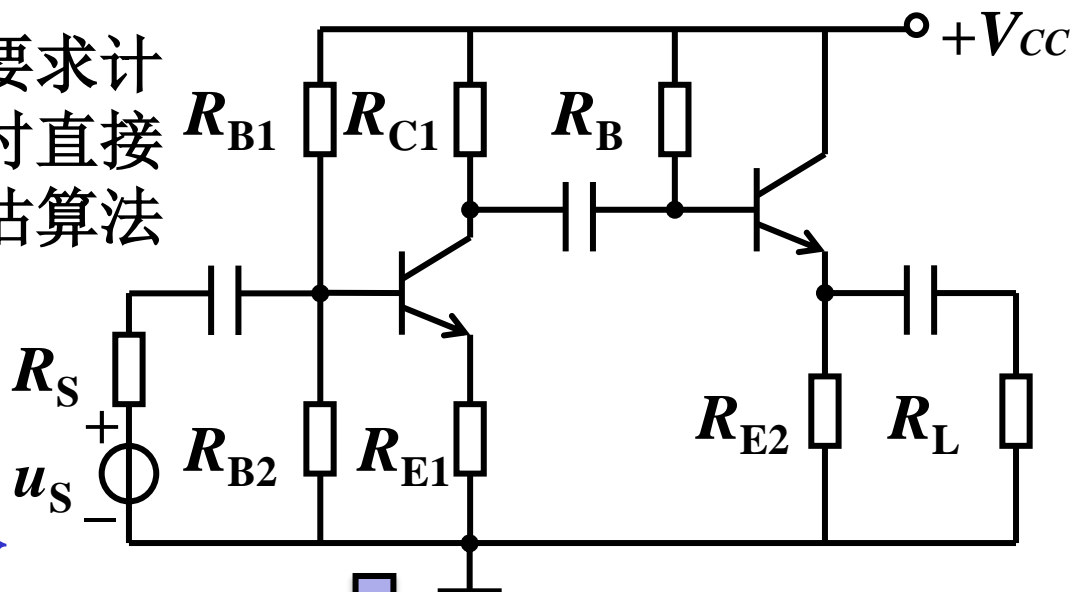
$$Q_2: V_{CC} = I_{B2} R_B + U_{BE2} + I_{E2} R_{E2}$$

$$I_{B2} = \frac{V_{CC} - U_{BE2}}{R_B + (1 + \beta_2) R_{E2}}$$

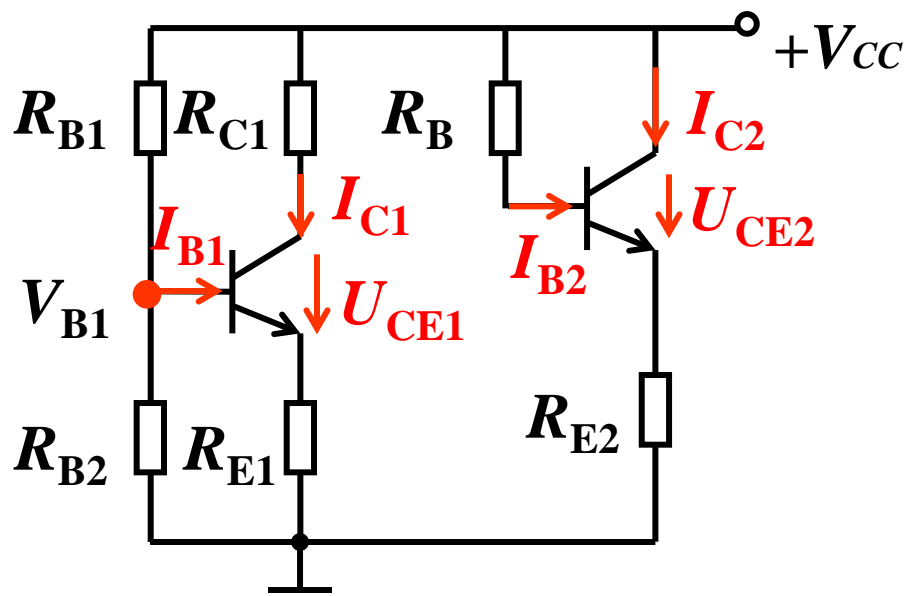
$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} \quad I_{E2} = (1 + \beta_2) I_{B2}$$

$$U_{CE2} = V_{CC} - I_{E2} R_{E2}$$

只写公式时， $I_E$ 不要约等于 $I_C$



↓ 将所有电容断开



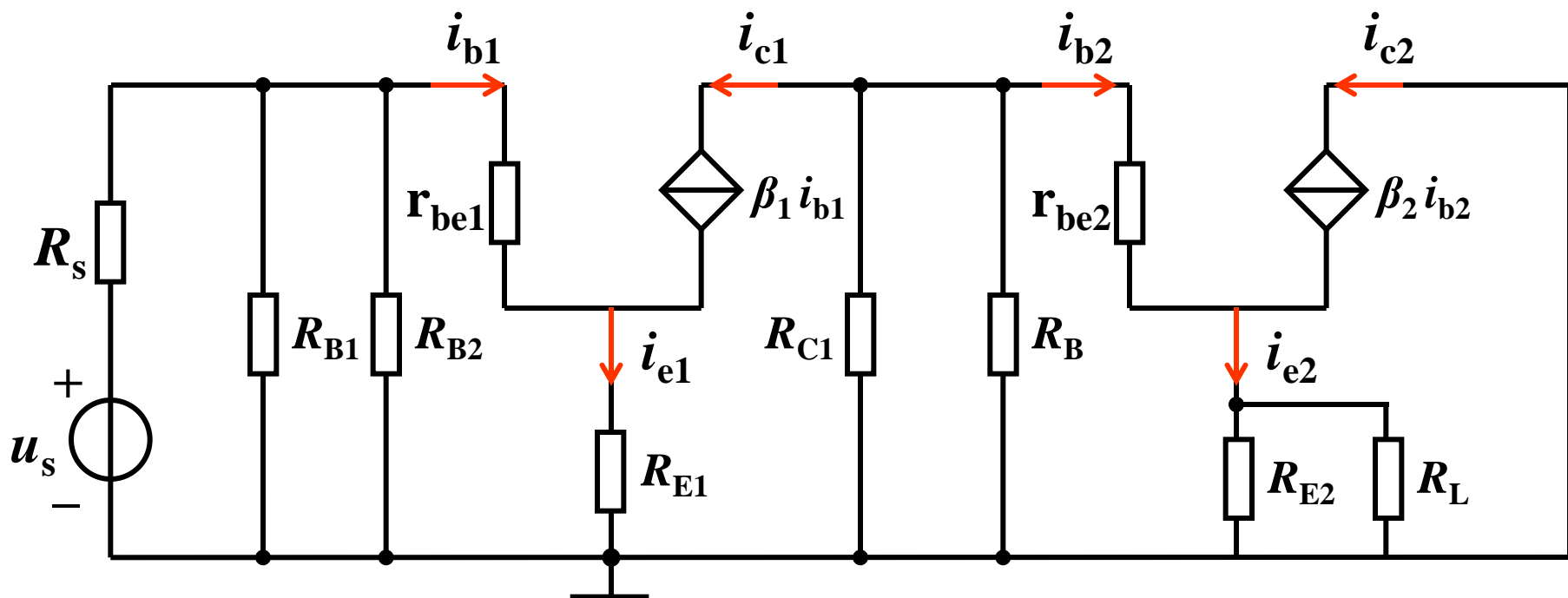
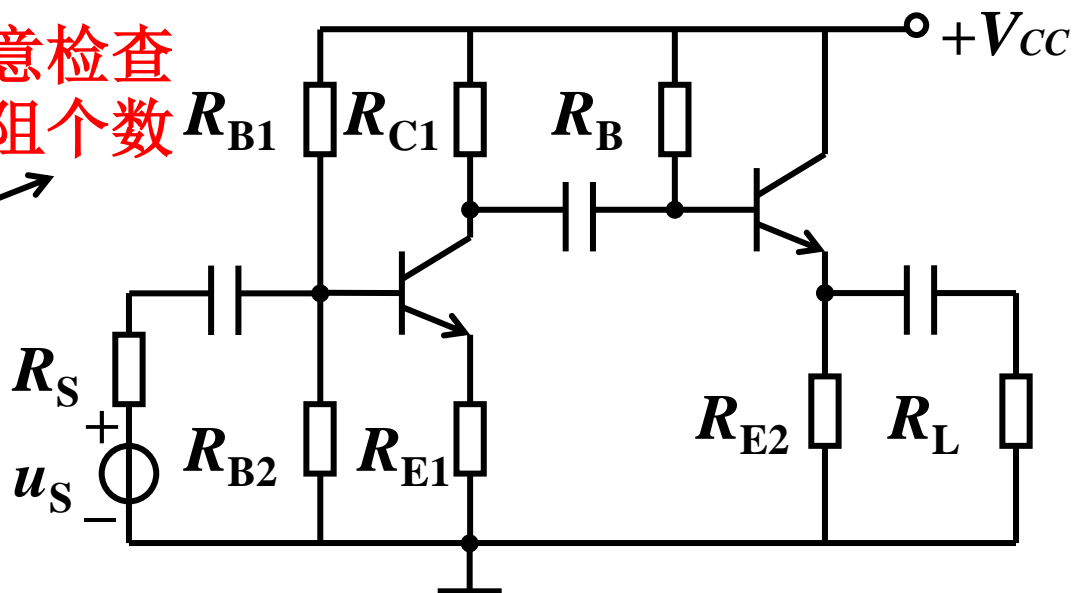
## 例题2：再做动态分析 注意检查电阻个数

① 画出微变等效电路

先画第一级再画第二级

$$r_{be1} = r_{bb}' + (1 + \beta_1) \frac{26(mV)}{I_{E1}(mA)}$$

$$r_{be2} = r_{bb}' + (1 + \beta_2) \frac{26(mV)}{I_{E2}(mA)}$$



② 求解动态性能指标 求 $A_{u2}$ 时 $u_{i2}$ 不能用 $u_{o1}$ ，应找 $u_{i2}$ 和 $i_{b2}$ 的关系！

1、 $Au = Au_1 \times Au_2$

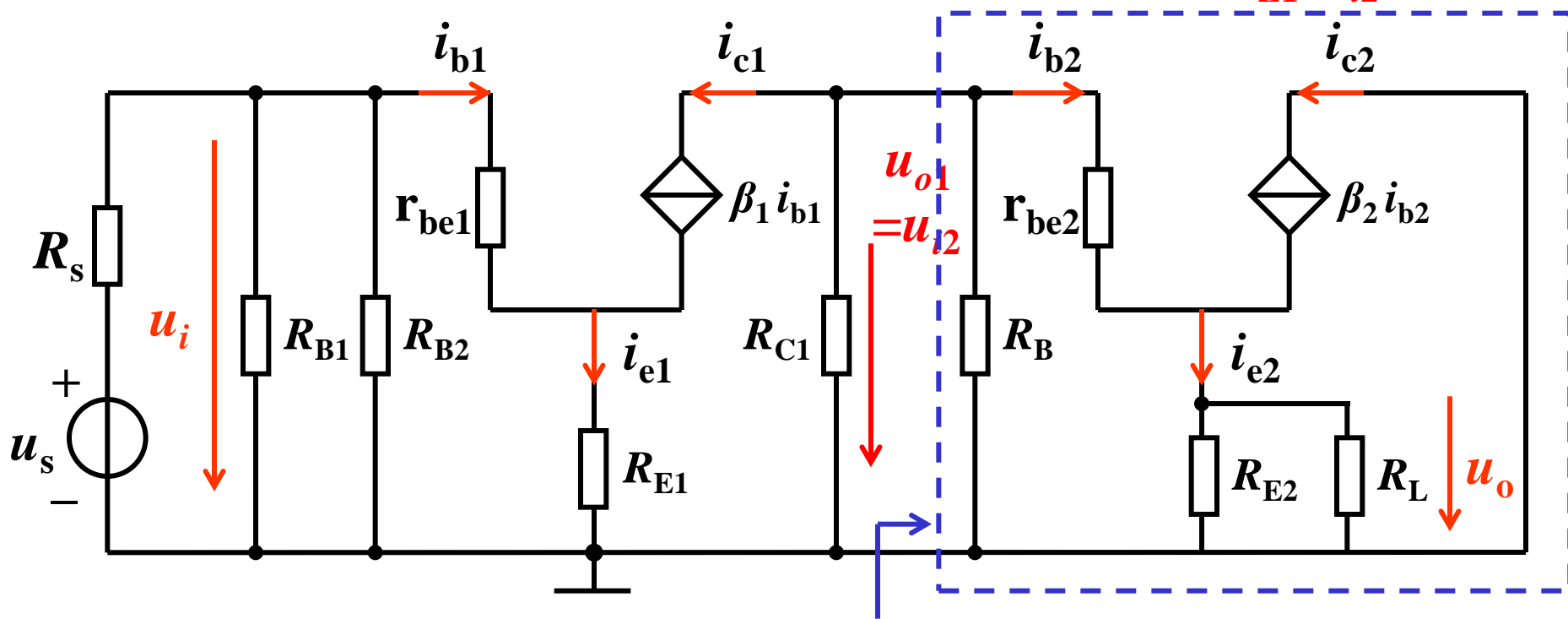
$$r_{i2} = R_B // [r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)]$$

检查：

$$A_{u1} = \frac{u_{o1}}{u_i} = \frac{-i_{c1} \times (R_{C1} // r_{i2})}{i_{b1} r_{be1} + i_{e1} R_{E1}} = \frac{-\cancel{\beta_1 i_{b1}} (R_{C1} // r_{i2})}{\cancel{i_{b1}} r_{be1} + (1 + \cancel{\beta_1}) \cancel{i_{b1}} R_{E1}} = \frac{-\beta_1 (R_{C1} // r_{i2})}{r_{be1} + (1 + \beta_1) R_{E1}} \quad A_{u1} < -1$$

$$A_{u2} = \frac{u_o}{u_{i2}} = \frac{i_{e2} (R_{E2} // R_L)}{i_{b2} r_{be2} + i_{e2} (R_{E2} // R_L)} = \frac{(1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)}{r_{be2} + (1 + \beta_2)(R_{E2} // R_L)} \quad 0 < A_{u2} \approx 1 < 1$$

$R_{L1} = r_{i2}$



电源电压放大倍数  $A_{us} = \frac{u_o}{u_s} = \frac{u_o \times u_i}{u_s \times u_i} = \frac{u_o}{u_i} \times \frac{u_i}{u_s} = A_u \times \frac{r_i}{R_s + r_i}$

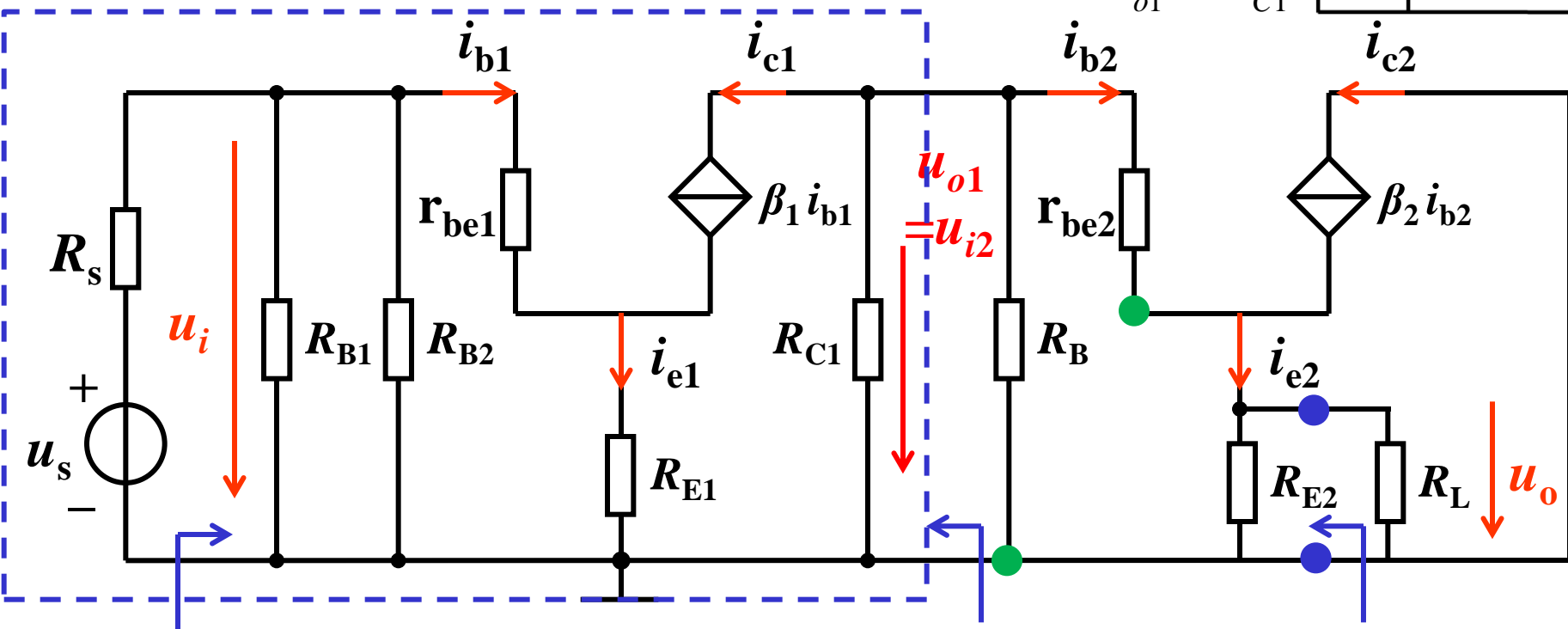
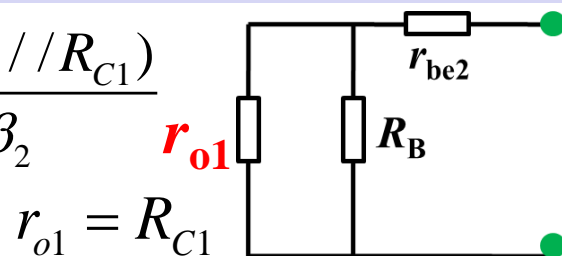
2、输入电阻  $r_i = r_{i1}$   $r_i = R_{B2} // R_{B1} // [r_{be1} + (1 + \beta_1)R_{E1}]$   $u_i = \frac{r_i}{R_s + r_i} \times u_s$

∴ 与恒流源串联的电阻无需考虑 ∴ 读  $r_i$  时只考虑发射极电阻折算

3、输出电阻  $r_o = R_{E2} // R'$   $R' = \frac{r_{be2} + (R_B // R_{C1})}{1 + \beta_2}$

读  $r_o$  时遇到受控源即可停止

流过  $i_{e2}$





思考：为什么 $r_o$ 和 $r_{o1}$ 有关？**因为第二级是共集电路**  
 共集的 $r_o$ 和 $R_S$ 有关； $r_o$ 与前级的 $r_{o1}$ （即 $R_{s2}$ ）有关

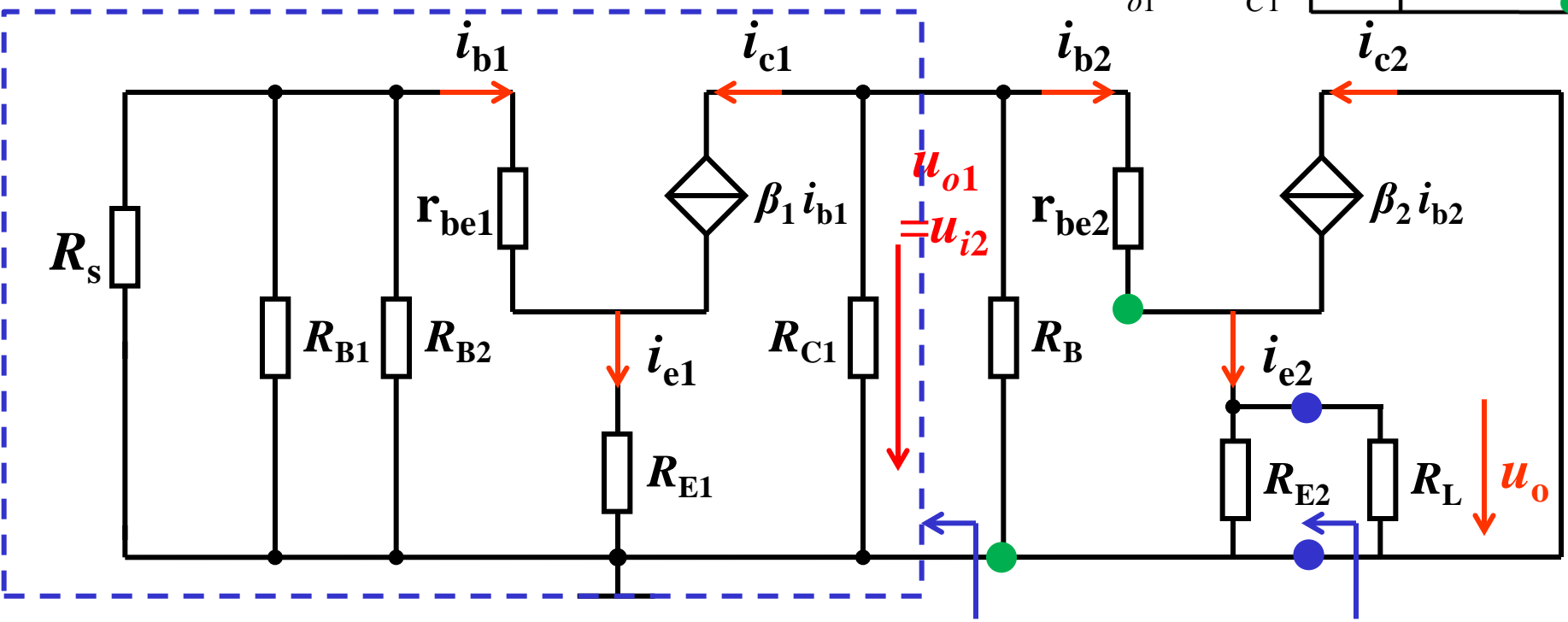
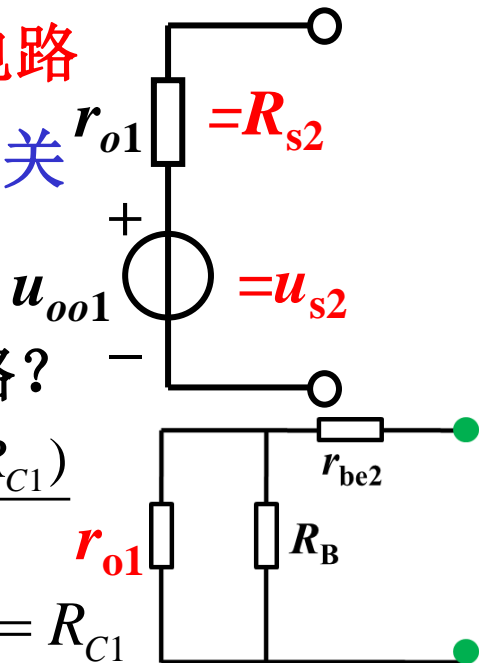
结论：前一级是后一级的信号源

思考：如果第一级是共集电路第二级是共射电路？

3、**输出电阻 $r_o$**   $r_o = R_{E2} // R'$   $R' = \frac{r_{be2} + (R_B // R_{C1})}{1 + \beta_2}$

读 $r_o$ 时遇到受控源即可停止

流过 $i_{e2}$



# 今晚作业

作业1: P169 例5-9

作业2: 对下图进行静态分析和动态分析; 只要求写出表达式

