

第二章 基本放大电路

——王文俊

山西农业大学

二十九、复合管

• 1、复合管的组成原则

在实际应用中，可用多只晶体管或场效应管构成复合管来取代基本电路中的管子，从而进一步改善放大电路的性能。

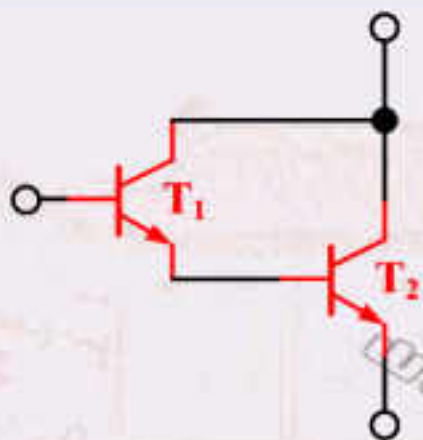
复合管的 组成原则

在正确的外加电压下，每只管子的各极电流均有合适的通路，且工作在放大区或恒流区。

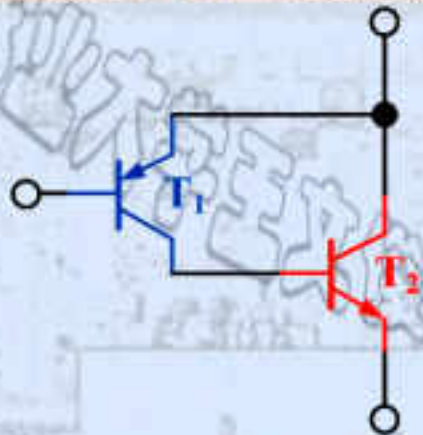
为实现电流放大，应将第一只管的集电极（漏极）或发射极（源极）电流作为第二只管子的基极电流。

• 2、晶体管构成的复合管

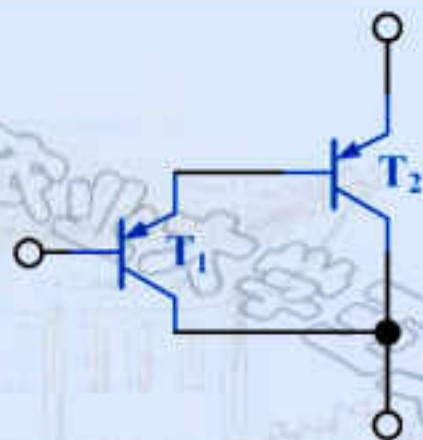
相同类型或不同类型的晶体管组合，都可构成复合管。



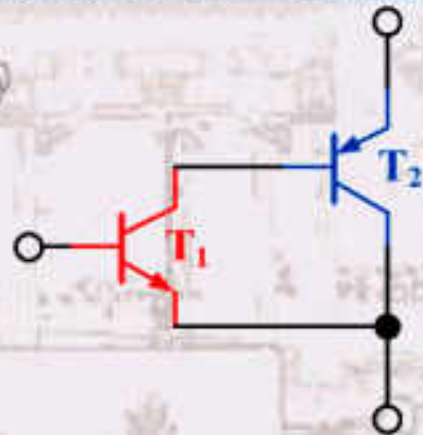
由两只 **NPN** 型管组成



由 **PNP** 和 **NPN** 型管组成



由两只 **PNP** 型管组成

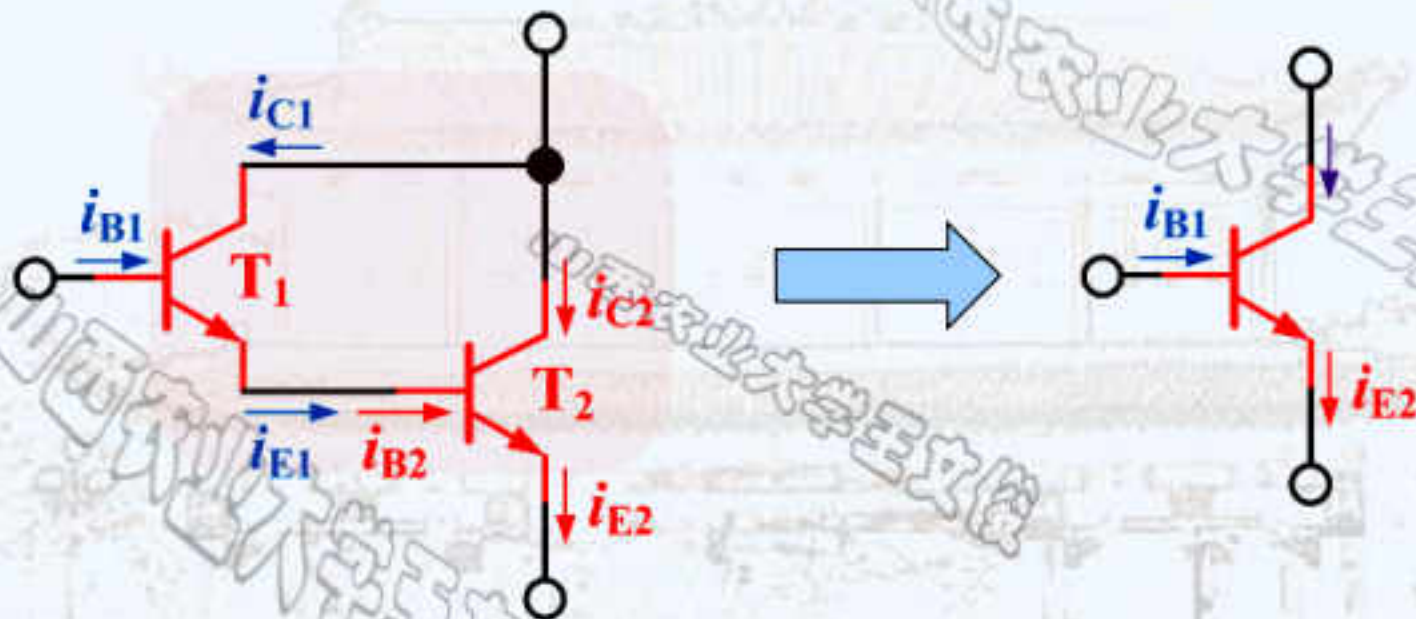


由 **NPN** 和 **PNP** 型管组成

• 2、晶体管构成的复合管

根据复合管的组成原则进行分析，判断是否为复合管。

① 由两只 NPN 型管组成



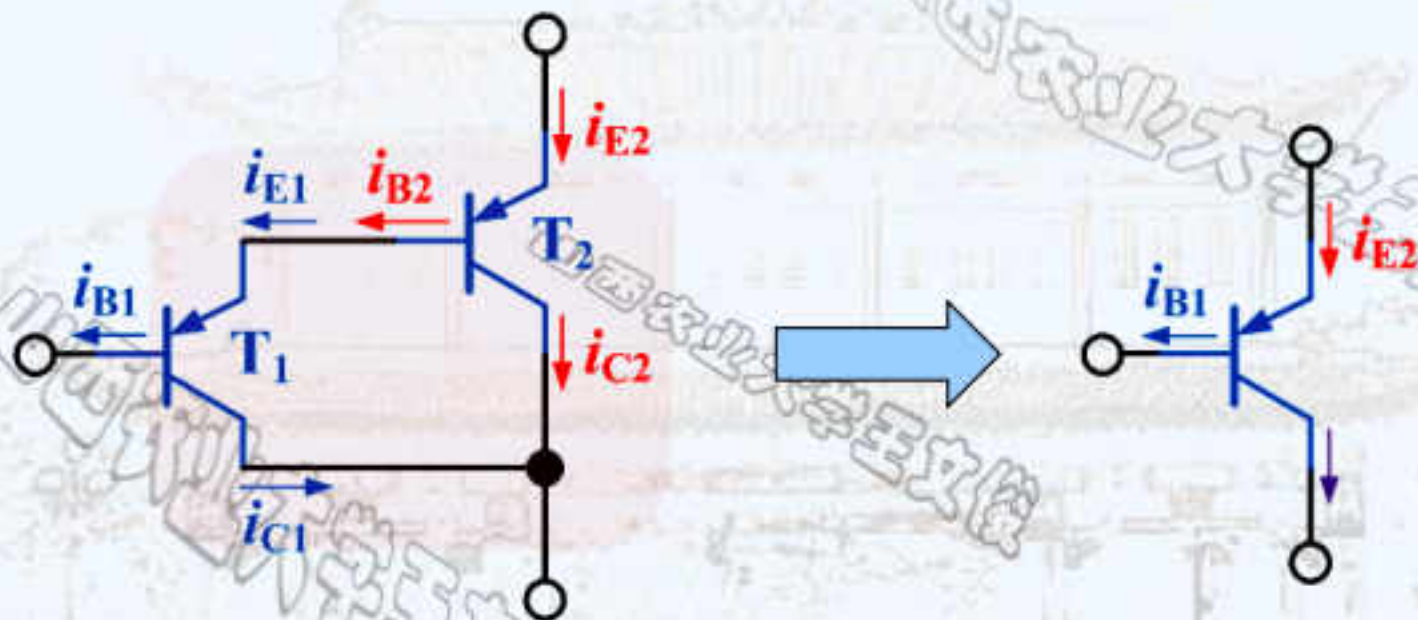
- 两只管子各极都有合适的通路；
- T_1 管的发射极电流作为 T_2 管的基极电流，即 $i_{B2} = i_{E1}$ 。

- 复合管等效为与第一级 T_1 管同类型的管子。

• 2、晶体管构成的复合管

根据复合管的组成原则进行分析，判断是否为复合管。

② 由两只 PNP 型管组成



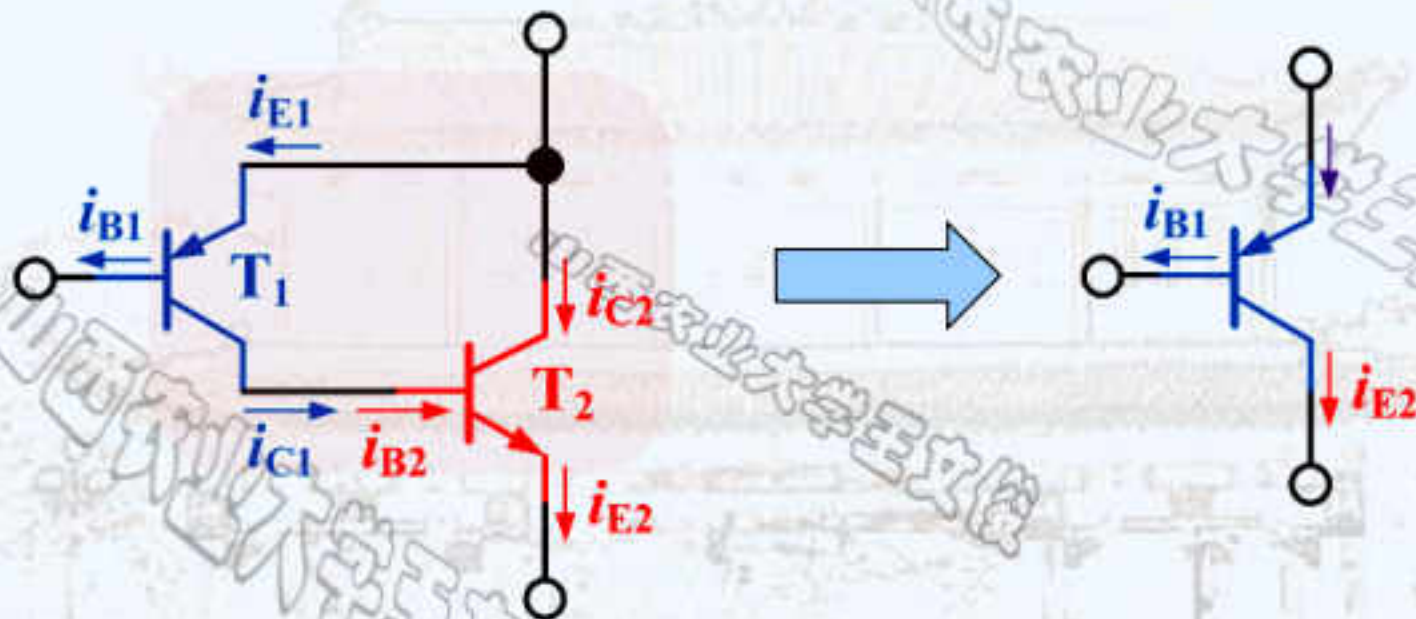
- 两只管子各极都有合适的通路；
- T_1 管的发射极电流作为 T_2 管的基极电流，即 $i_{B2} = i_{E1}$ 。

- 复合管等效为与第一级 T_1 管同类型的管子。

• 2、晶体管构成的复合管

根据复合管的组成原则进行分析，判断是否为复合管。

③ 由 PNP 和 NPN 型管组成



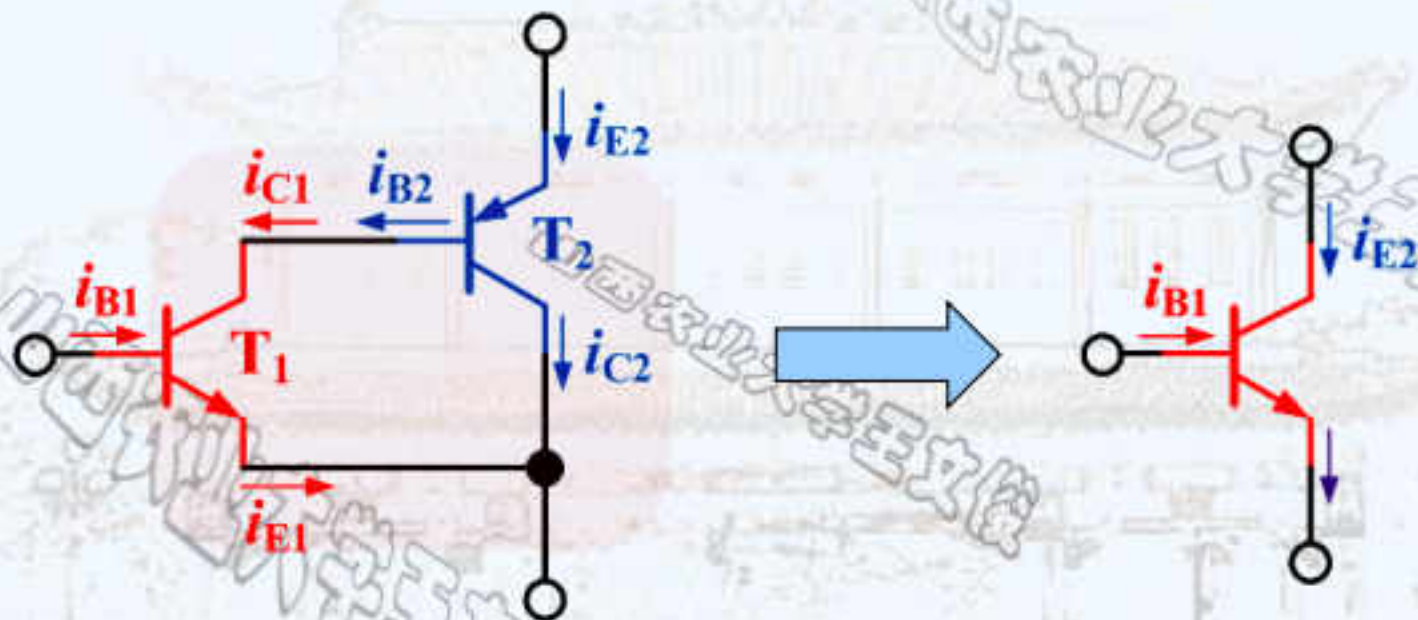
- 两只管子各极都有合适的通路；
- T_1 管的集电极电流作为 T_2 管的基极电流，即 $i_{B2} = i_{C1}$ 。

- 复合管等效为与第一级 T_1 管同类型的管子。

• 2、晶体管构成的复合管

根据复合管的组成原则进行分析，判断是否为复合管。

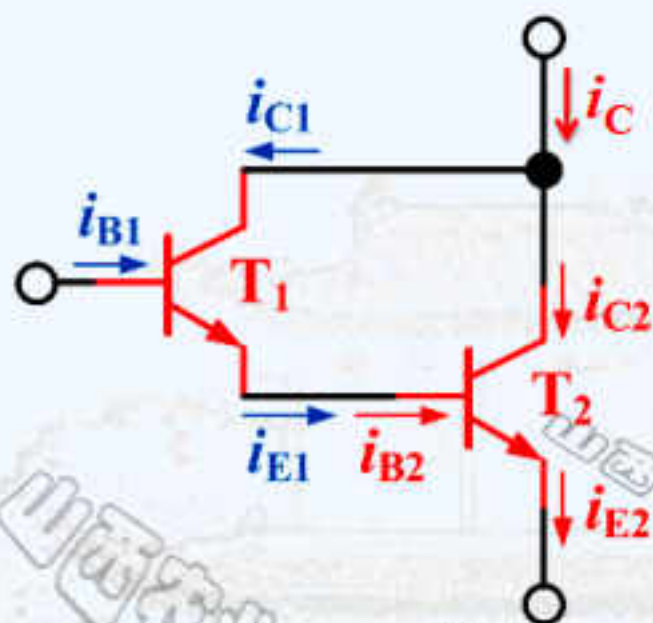
④ 由 NPN 和 PNP 型管组成



- 两只管子各极都有合适的通路；
- T_1 管的集电极电流作为 T_2 管的基极电流，即 $i_{B2} = i_{C1}$ 。

- 复合管等效为与第一级 T_1 管同类型的管子。

• 3、晶体管复合管的电流放大系数



由两只 NPN 型管
组成的复合管

复合管的电流放大系数为：

设 T_1 管的电流放大系数为 β_1 ，则：

$$\begin{cases} i_{E1} = (1 + \beta_1) i_{B1} \\ i_{C1} = \beta_1 i_{B1} \end{cases}$$

设 T_2 管的电流放大系数为 β_2 ，则：

$$i_{C2} = \beta_2 i_{B2}$$

因为 $i_{B2} = i_{E1}$ ，所以：

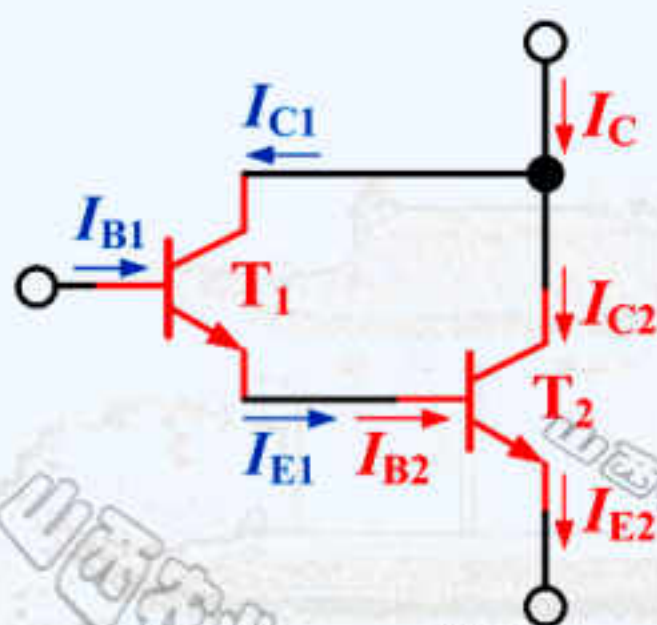
$$i_{C2} = \beta_2 (1 + \beta_1) i_{B1}$$

集电极总电流为：

$$i_C = i_{C1} + i_{C2} = \beta_1 i_{B1} + \beta_2 (1 + \beta_1) i_{B1}$$

$$\beta = \frac{i_C}{i_{B1}} = \frac{\beta_1 i_{B1} + \beta_2 (1 + \beta_1) i_{B1}}{i_{B1}} = \beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2 \approx \beta_1 \beta_2$$

• 4、晶体管复合管的穿透电流（静态）



设 T_1 管的电流放大系数为 β_1 ，则：

$$\begin{cases} I_{C1} = \beta_1 I_{B1} + I_{CEO1} \\ I_{E1} = (1 + \beta_1) I_{B1} + I_{CEO1} \end{cases}$$

设 T_2 管的电流放大系数为 β_2 ，则：

$$I_{C2} = \beta_2 I_{B2} + I_{CEO2}$$

因为 $I_{B2} = I_{E1}$ ，所以：

$$\begin{aligned} I_{C2} &= \beta_2 [(1 + \beta_1) I_{B1} + I_{CEO1}] + I_{CEO2} \\ &= (\beta_2 + \beta_1 \beta_2) I_{B1} + (\beta_2 I_{CEO1} + I_{CEO2}) \end{aligned}$$

由两只 NPN 型管
组成的复合管

集电极总电流为：

复合管的穿透电流

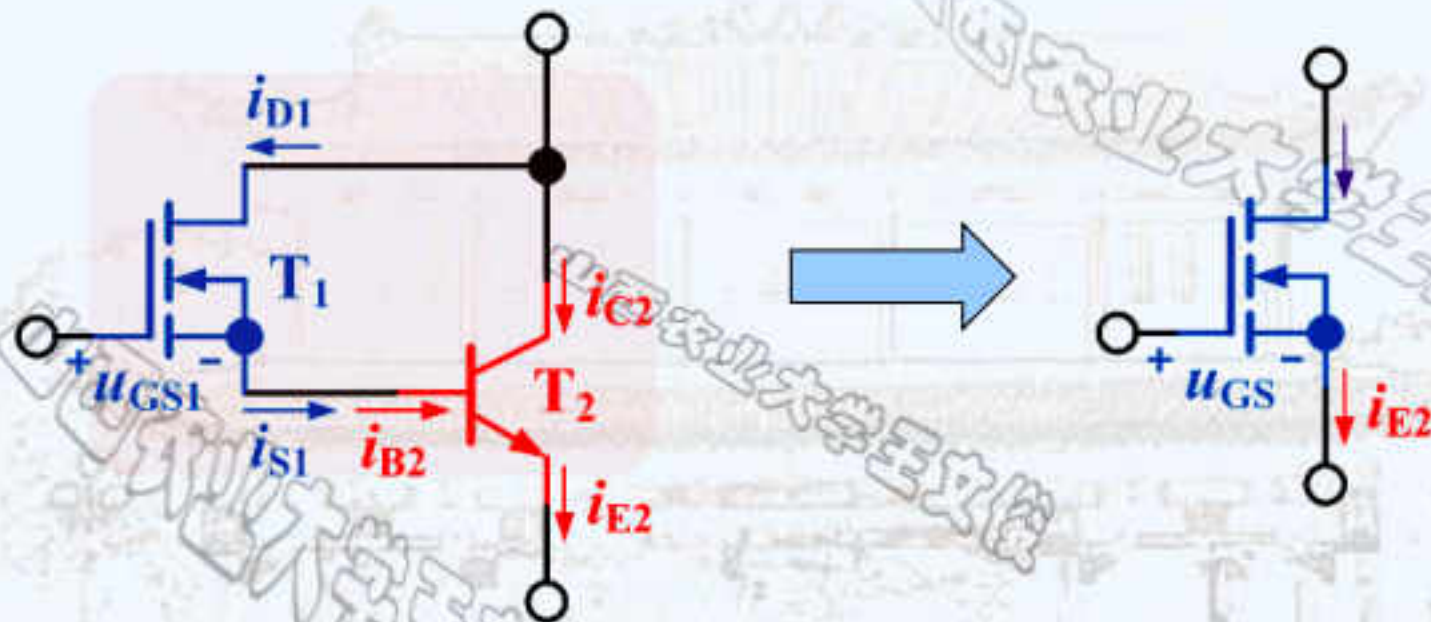
$$I_C = I_{C1} + I_{C2} = (\beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) I_{B1} + (1 + \beta_2) I_{CEO1} + I_{CEO2}$$

复合管穿透电流变大，电路温度稳定性变差。

• 5、场效应管与晶体管构成复合管

场效应管与晶体管组合，也可构成复合管。

由 N 沟道增强型 MOS 管和 NPN 型晶体管组成



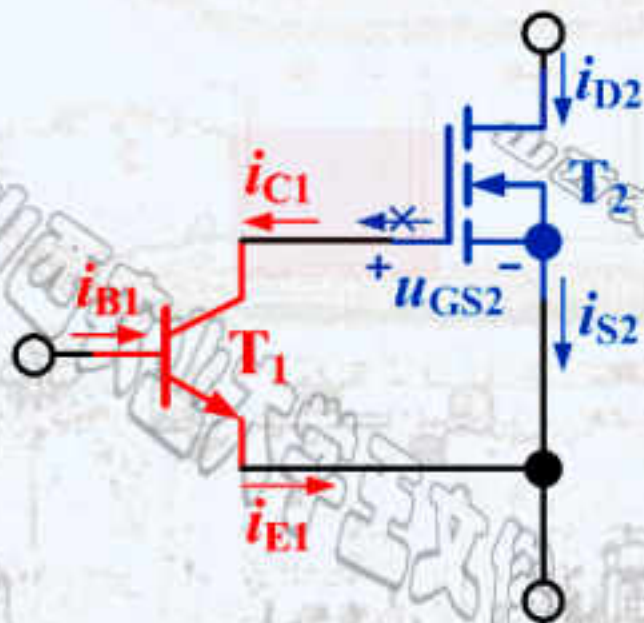
- 两只管子各极都有合适的通路；
- T_1 管的源极电流作为 T_2 管的基极电流，即 $i_{B2} = i_{S1}$ 。

- 复合管等效为与第一级 T_1 管同类型的管子。

• 5、场效应管与晶体管构成复合管

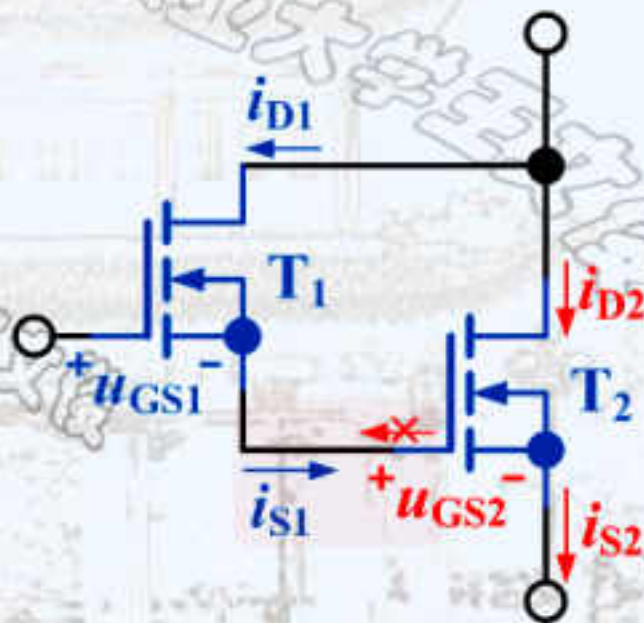
场效应管构成复合管时，只能在复合管的第一级。

由 NPN 型晶体管和 N 沟道增强型 MOS 管组成



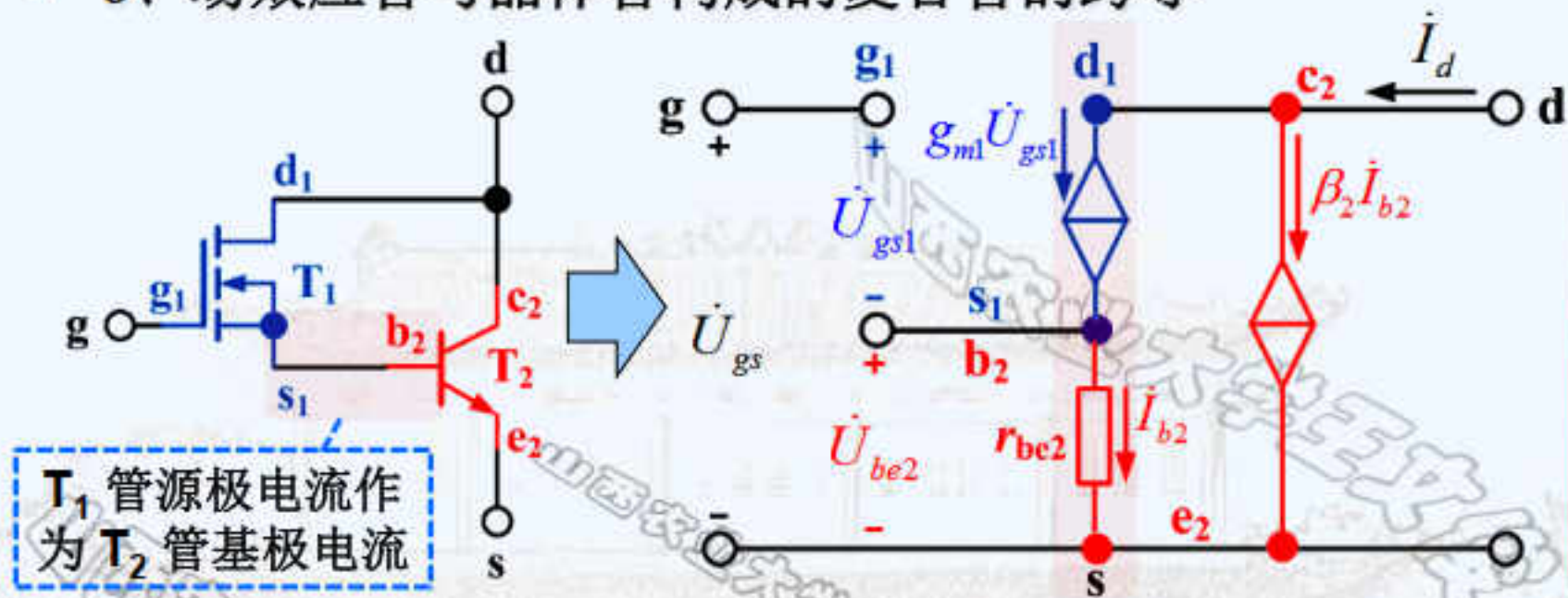
- 晶体管的集电极电流没有合适的通路，因此不是复合管。

由两只 N 沟道增强型 MOS 管组成



- 第一级MOS管的源极电流没有合适的通路，因此不是复合管。

6、场效应管与晶体管构成的复合管的跨导



栅-源电压:

$$\dot{U}_{gs} = \dot{U}_{gs1} + \dot{U}_{be2} = \dot{U}_{gs1} + \dot{I}_{b2} r_{be2} = \dot{U}_{gs1} + g_{m1} \dot{U}_{gs1} r_{be2} = (1 + g_{m1} r_{be2}) \dot{U}_{gs1}$$

漏极电流: $\dot{I}_d = g_{m1} \dot{U}_{gs1} + \beta_2 \dot{I}_{b2} = g_{m1} \dot{U}_{gs1} + \beta_2 g_{m1} \dot{U}_{gs1} = (1 + \beta_2) g_{m1} \dot{U}_{gs1}$

复合管跨导: $g_m = \frac{\dot{I}_d}{\dot{U}_{gs}} = \frac{(1 + \beta_2) g_{m1} \dot{U}_{gs1}}{(1 + g_{m1} r_{be2}) \dot{U}_{gs1}} = \frac{(1 + \beta_2) g_{m1}}{1 + g_{m1} r_{be2}} \approx \frac{\beta_2 g_{m1}}{1 + g_{m1} r_{be2}}$

• 7、复合管的特点

晶体管构成的复合管有很高的电流放大系数

- 在信号源输入电流不变的情况下，可以获得很大的输出驱动电流；在使用时应注意选择中等功率管或高功率管。
- 在输出驱动电流不变的情况下，从信号源索取的电流会非常的小，这对微弱信号的放大非常具有重要意义。

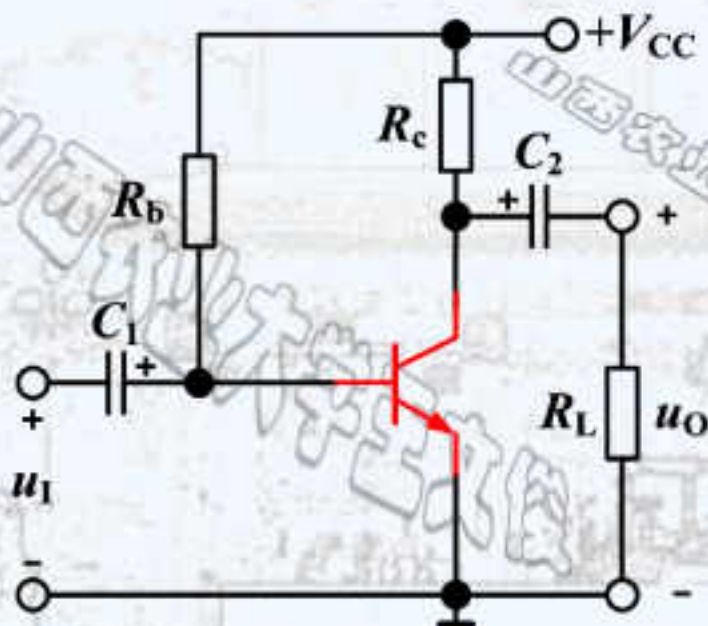
构成复合管的管子数目不宜太多

- 当构成复合管的管子数目太多时：
 - 因结电容的作用，电路高频特性变坏；
 - 因复合管穿透电流很大，电路温度稳定性变差；
 - 为保证复合管中每一只管子都工作在放大区，必然要求复合管的直流管压降足够大，这就需要通过提高电源电压。

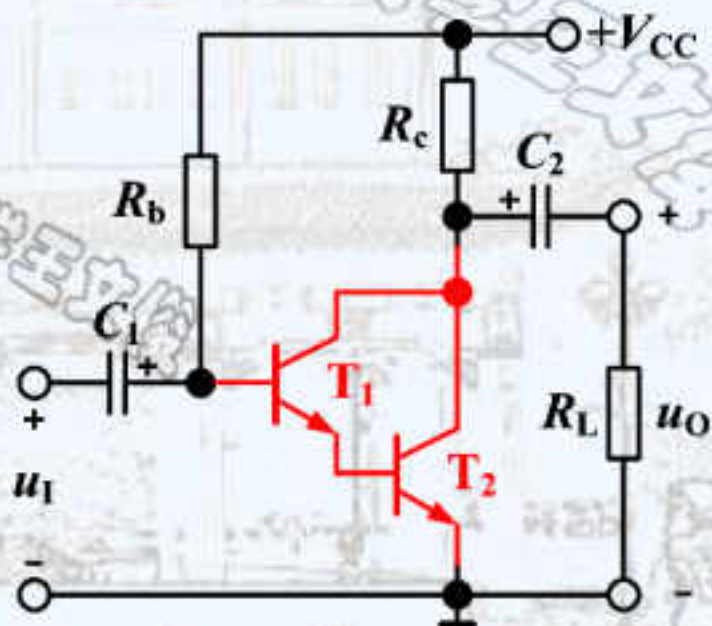
三十、复合管共射放大电路

• 1、复合管共射放大电路

将阻容耦合共射放大电路中的晶体管用复合管取代，便可得到复合管共射放大电路。

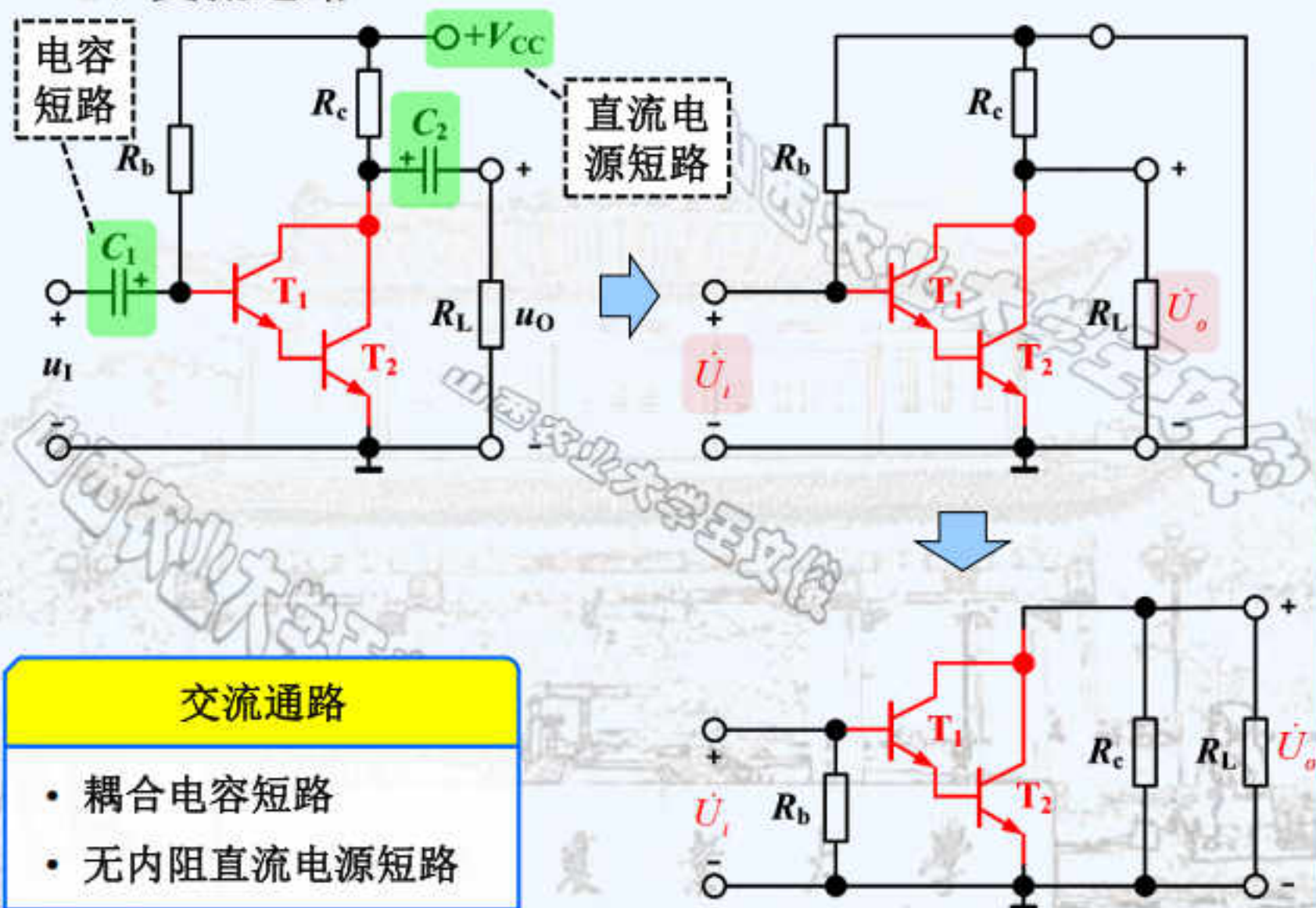


阻容耦合共射放大电路

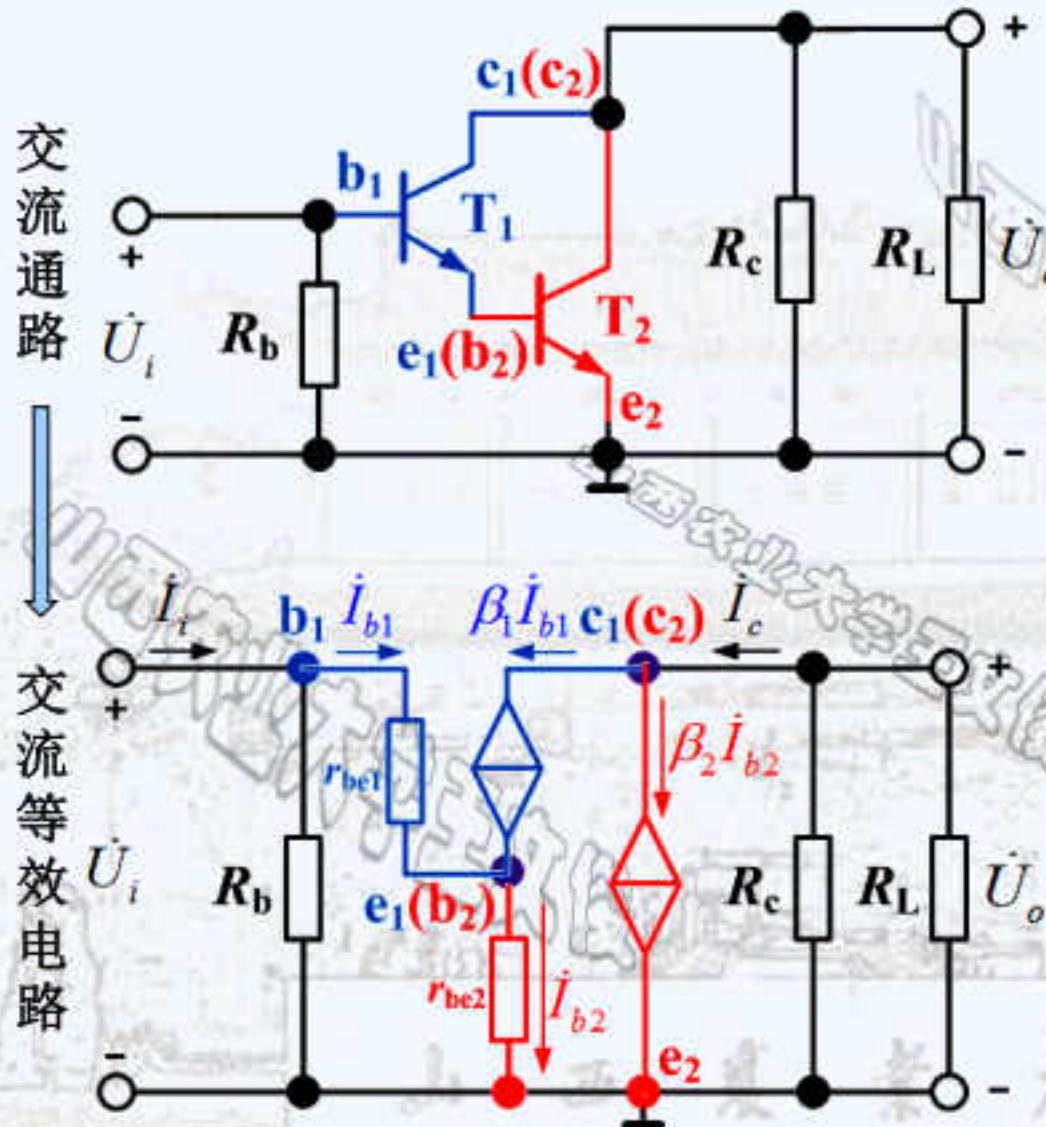


复合管共射放大电路

• 2、交流通路



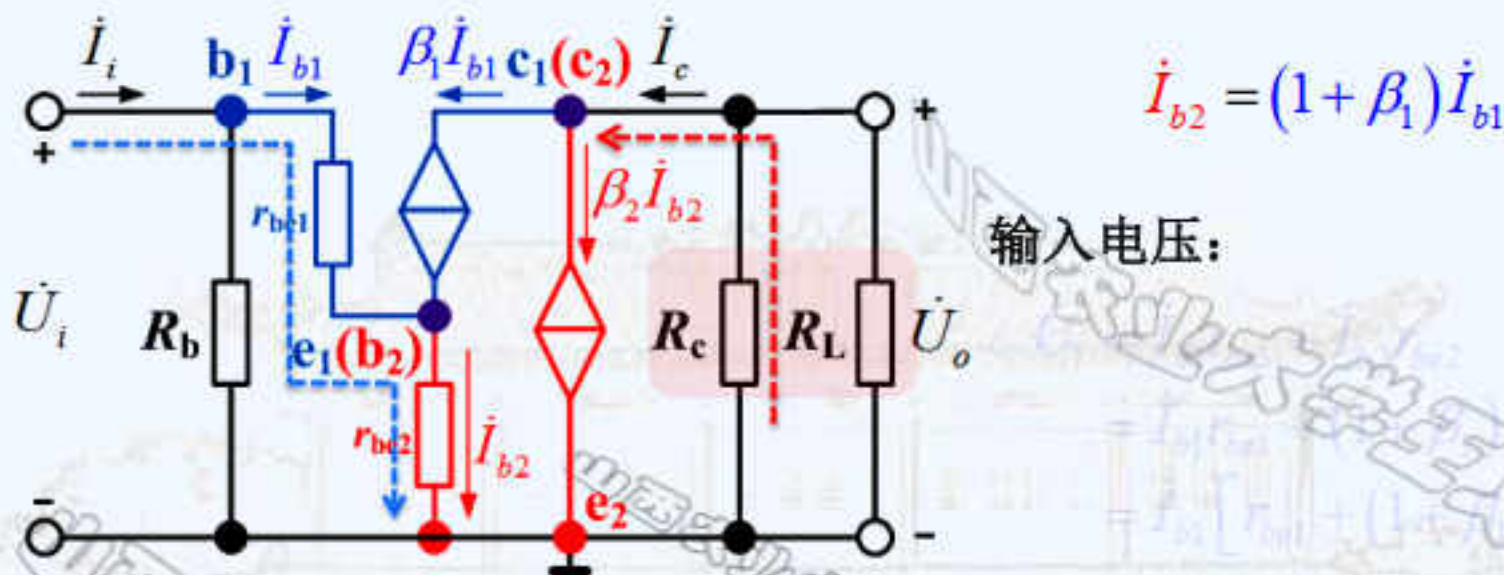
3、交流等效电路



T_1 管发射极电流作为
 T_2 管基极电流：

$$\dot{I}_{b2} = (1 + \beta_1) \dot{I}_{b1}$$

4、电压放大倍数



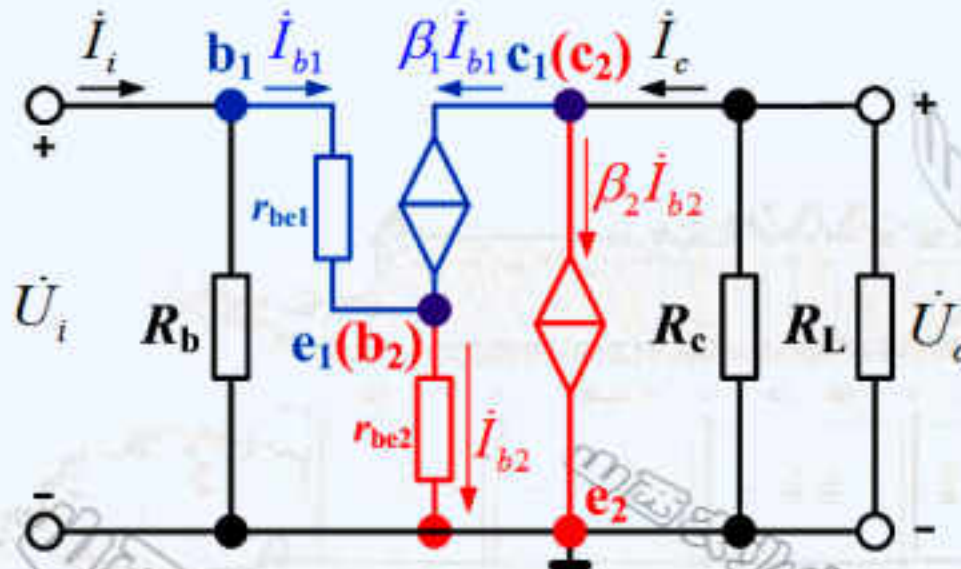
输出电压:

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_o &= -\dot{I}_c (R_c \parallel R_L) \\
 &= -(\beta_1 \dot{I}_{b1} + \beta_2 \dot{I}_{b2}) (R_c \parallel R_L) \\
 &= -(\beta_1 + \beta_2 + \beta_1 \beta_2) (R_c \parallel R_L) \dot{I}_{b1} \\
 &\approx -\beta_1 \beta_2 (R_c \parallel R_L) \dot{I}_{b1}
 \end{aligned}$$

电压放大倍数:

$$\begin{aligned}
 \dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \approx \frac{-\beta_1 \beta_2 (R_c \parallel R_L) \dot{I}_{b1}}{\dot{I}_{b1} [r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}]} \\
 &\approx -\frac{\beta_1 \beta_2 (R_c \parallel R_L)}{r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}}
 \end{aligned}$$

• 5、输入电阻 R_i



$$I_{b2} = (1 + \beta_1) I_{b1}$$

输入电压:

$$\begin{aligned} \dot{U}_i &= \dot{I}_{b1} r_{be1} + \dot{I}_{b2} r_{be2} \\ &= \dot{I}_{b1} r_{be1} + (1 + \beta_1) \dot{I}_{b1} r_{be2} \\ &= \dot{I}_{b1} [r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}] \end{aligned}$$

输入电流: $\dot{I}_i = \dot{I}_{R_b} + \dot{I}_{b1} = \frac{\dot{U}_i}{R_b} + \dot{I}_{b1}$

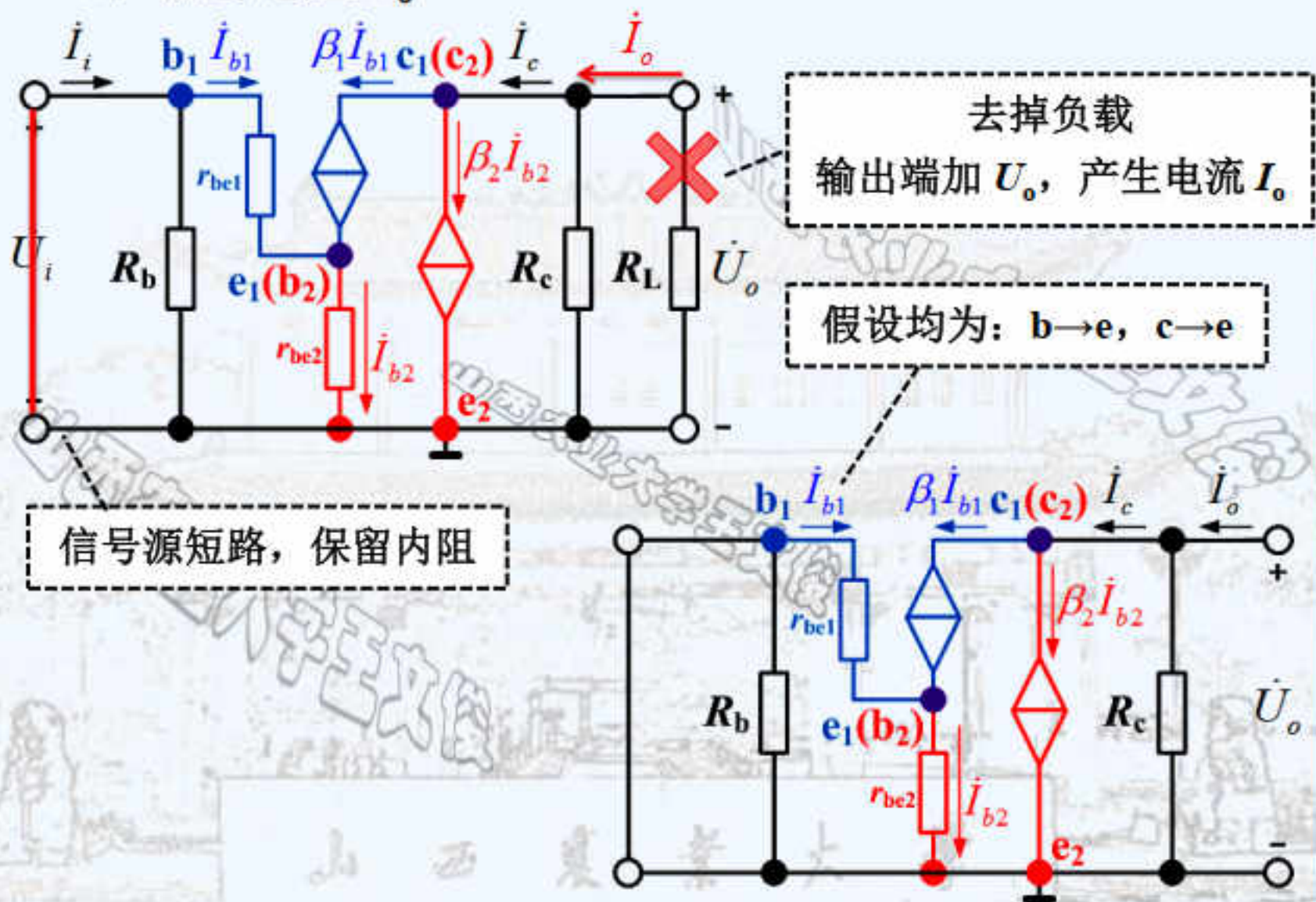
联立得, 输入电阻: $R_i = R_b \parallel [r_{be1} + (1 + \beta_1) r_{be2}]$

单管共射放大电路

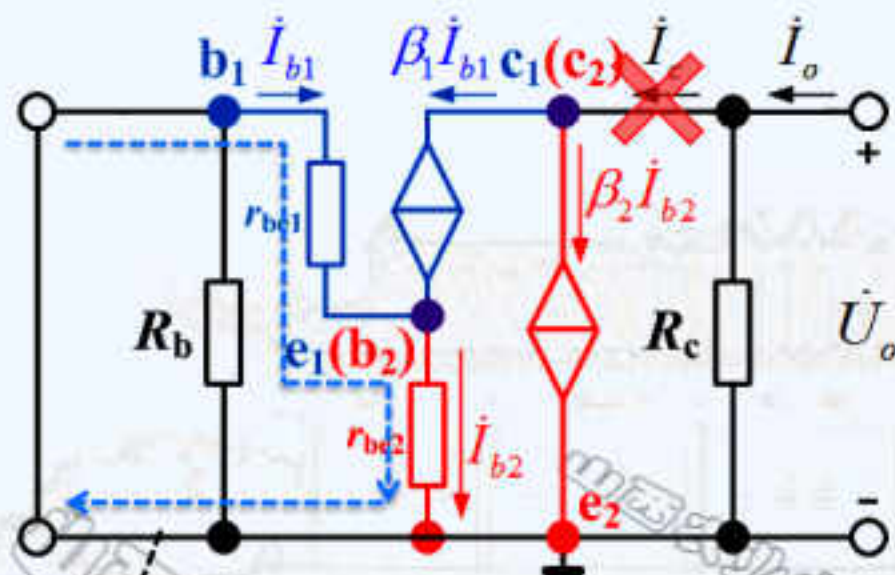
$$R_i = R_b \parallel r_{be}$$

与基本共射放大电路相比, 复合管共射放大电路的输入电阻显著增大。说明当输入电压相同时, 从信号源索取的电流显著减小, 降低了对信号源输出电流的要求。

6、输出电阻 R_o



6、输出电阻 R_o



输出端电压: $U_o = U_o$

输出端电流: $I_o = I_{R_c} = \frac{U_o}{R_c}$

输出电阻:

$$R_o = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{\left(\frac{U_o}{R_c}\right)} = R_c$$

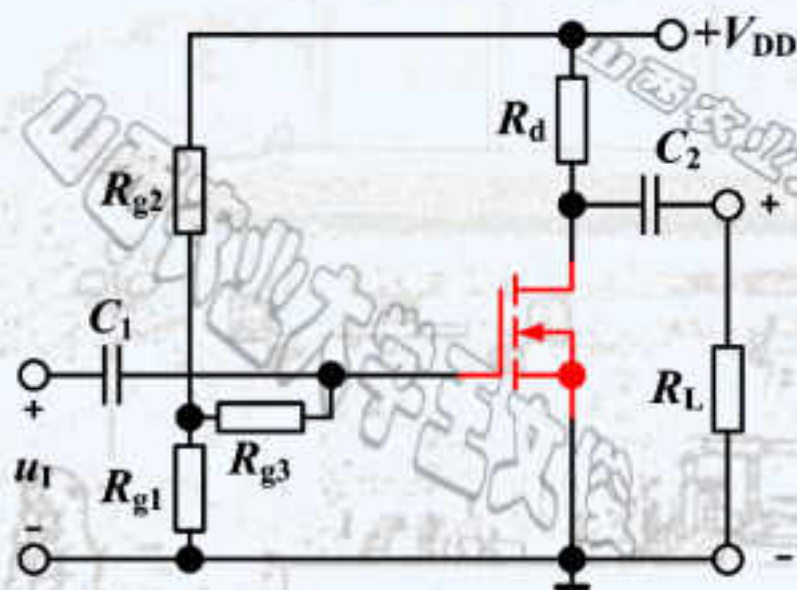
回路电流为 0

$$\begin{cases} I_{b1} = 0 \\ I_{b2} = (1 + \beta_1) I_{b1} = 0 \\ I_c = \beta_1 I_{b1} + \beta_2 I_{b2} = 0 \end{cases}$$

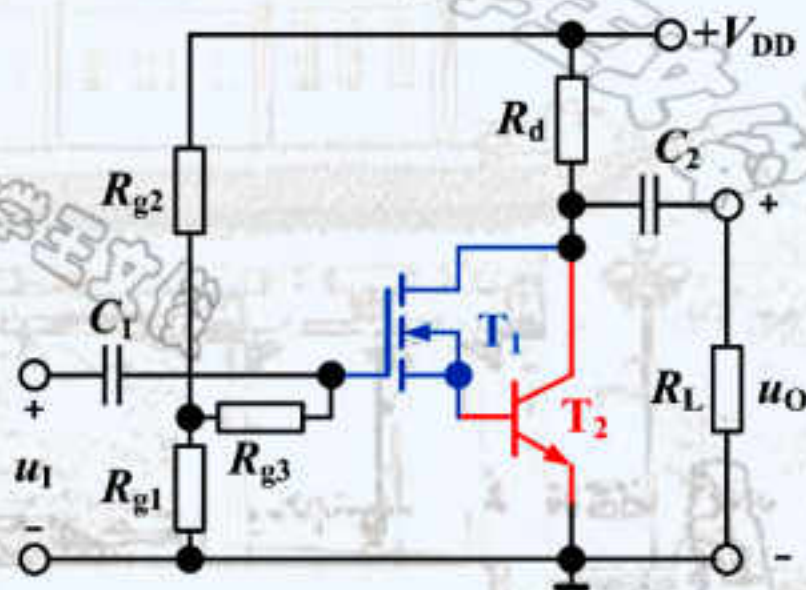
三十一、复合管共源放大电路

• 1、复合管共射放大电路

将阻容耦合共源放大电路中的场效应管用复合管取代，便可得到复合管共源放大电路。

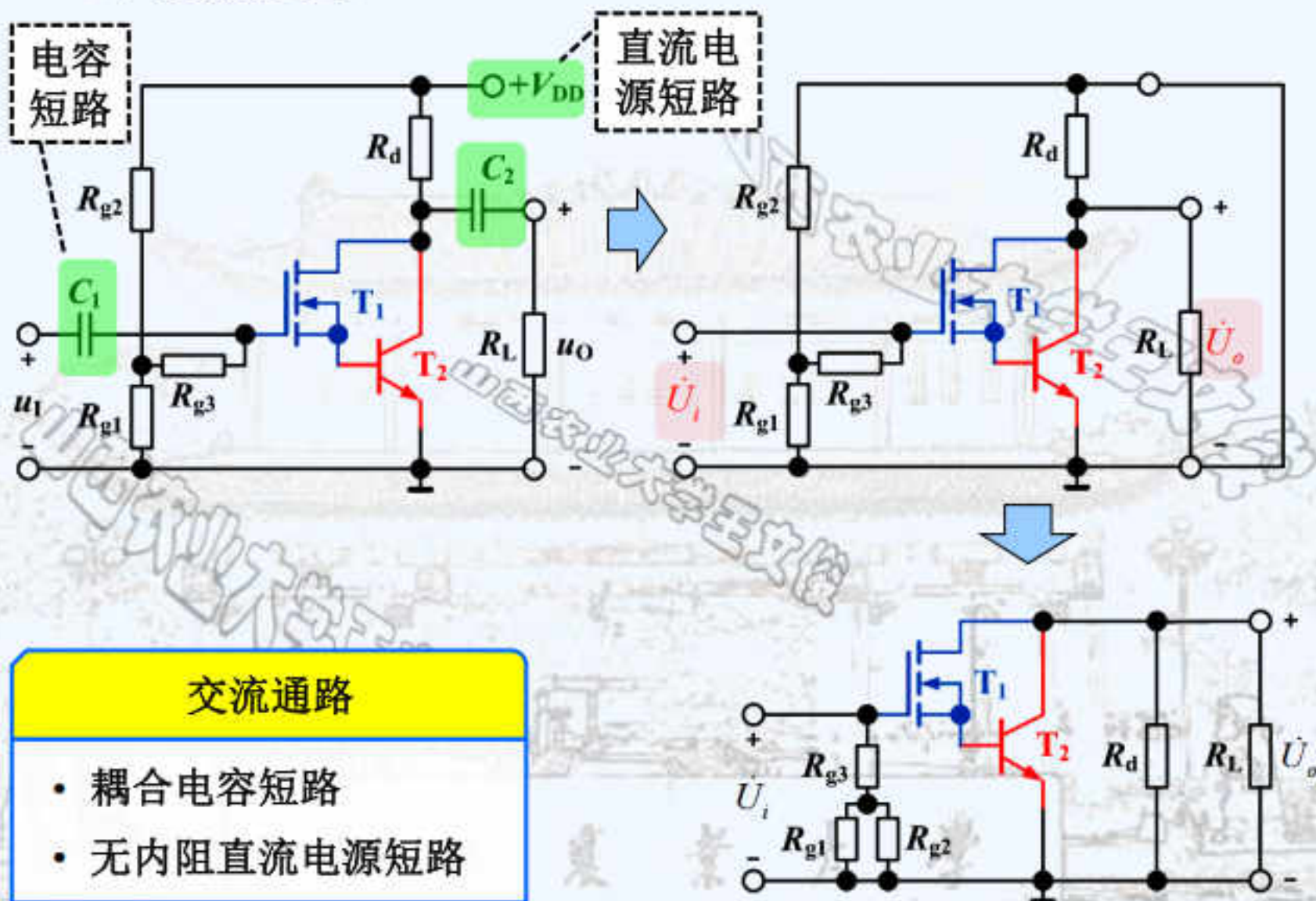


阻容耦合共源放大电路

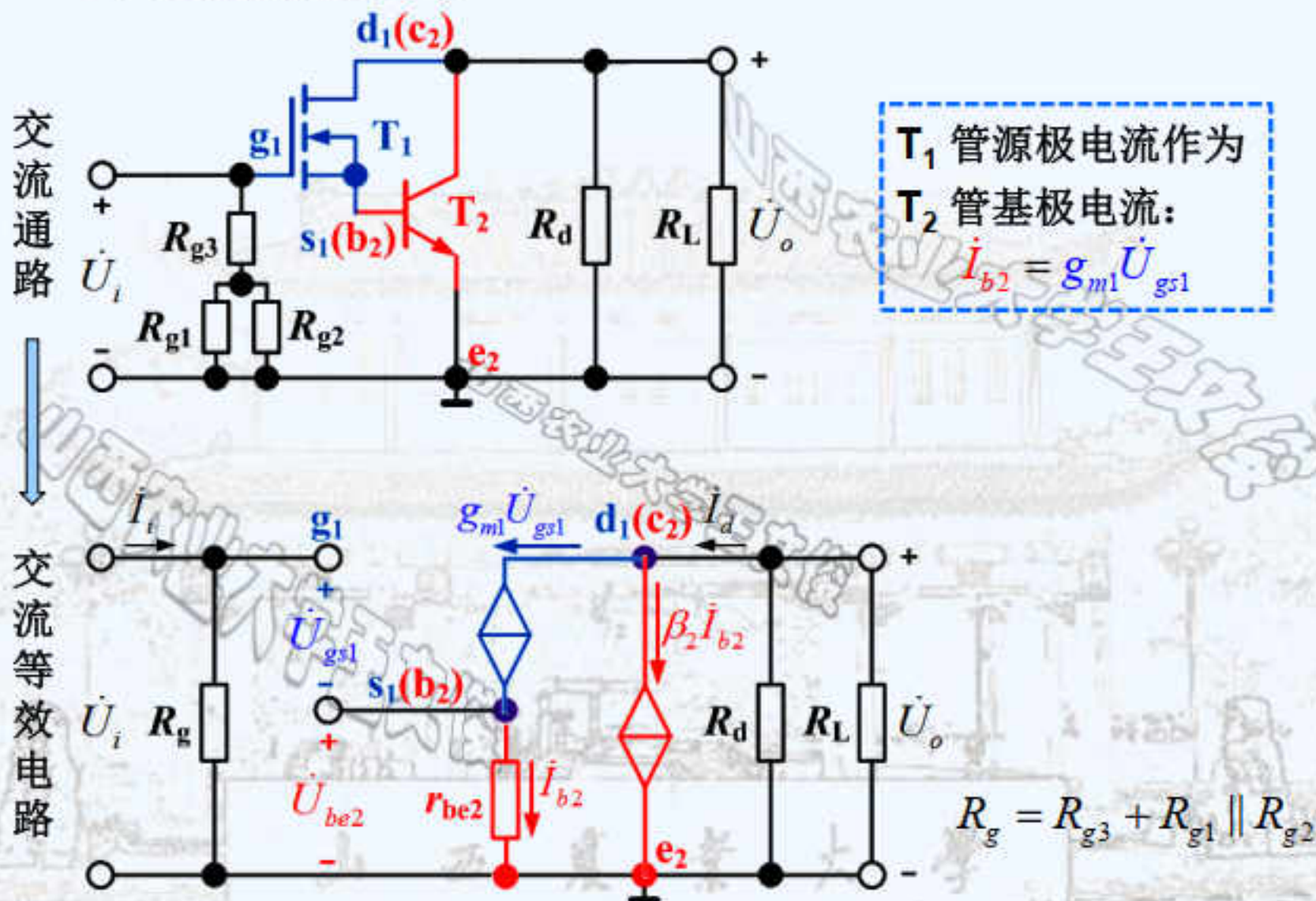


复合管共源放大电路

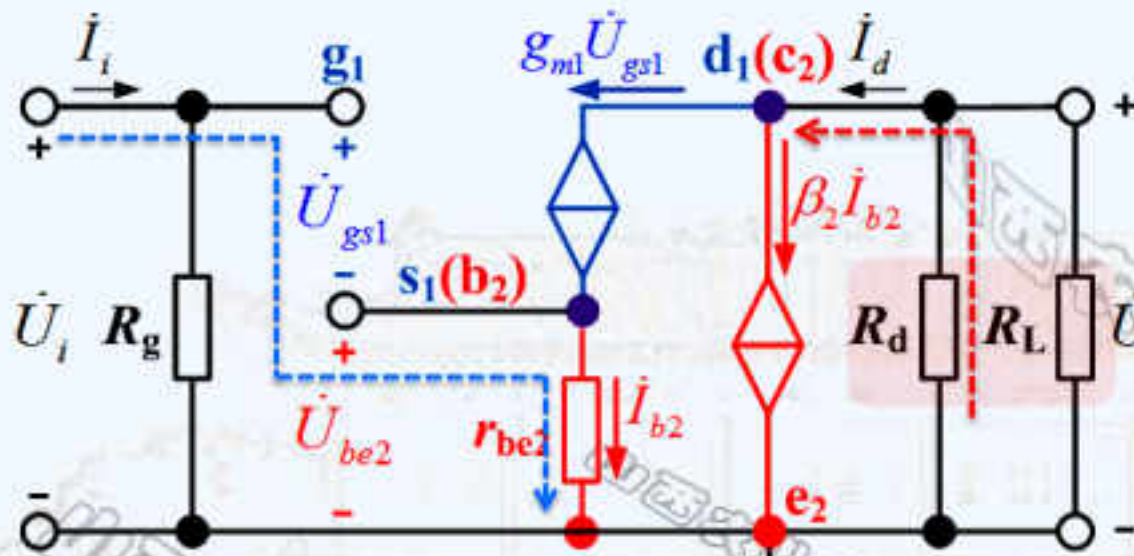
• 2、交流通路



3、交流等效电路



4、电压放大倍数



输入电压:

$$\begin{aligned} \dot{U}_i &= \dot{U}_{gs1} + \dot{U}_{be2} \\ &= \dot{U}_{gs1} + \dot{I}_{b2} r_{be2} \\ &= \dot{U}_{gs1} + g_{m1} \dot{U}_{gs1} r_{be2} \\ &= (1 + g_{m1} r_{be2}) \dot{U}_{gs1} \end{aligned}$$

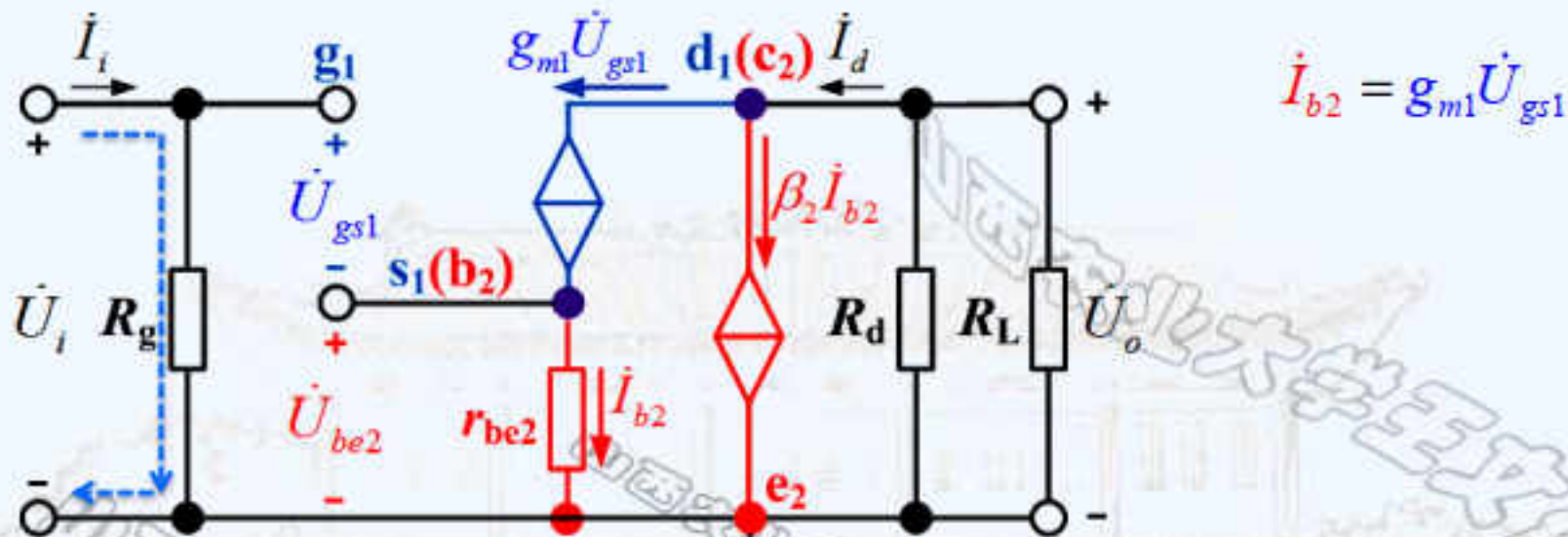
漏极电流: $\dot{I}_d = g_{m1} \dot{U}_{gs1} + \beta_2 \dot{I}_{b2} = g_{m1} \dot{U}_{gs1} + \beta_2 g_{m1} \dot{U}_{gs1} = (1 + \beta_2) g_{m1} \dot{U}_{gs1}$

输出电压: $\dot{U}_o = -\dot{I}_d (R_d \parallel R_L) = -(1 + \beta_2) g_{m1} \dot{U}_{gs1} (R_d \parallel R_L)$

电压放大倍数:

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-(1 + \beta_2) g_{m1} \dot{U}_{gs1} (R_d \parallel R_L)}{(1 + g_{m1} r_{be2}) \dot{U}_{gs1}} = -\frac{(1 + \beta_2) g_{m1} (R_d \parallel R_L)}{1 + g_{m1} r_{be2}}$$

• 5、输入电阻 R_i



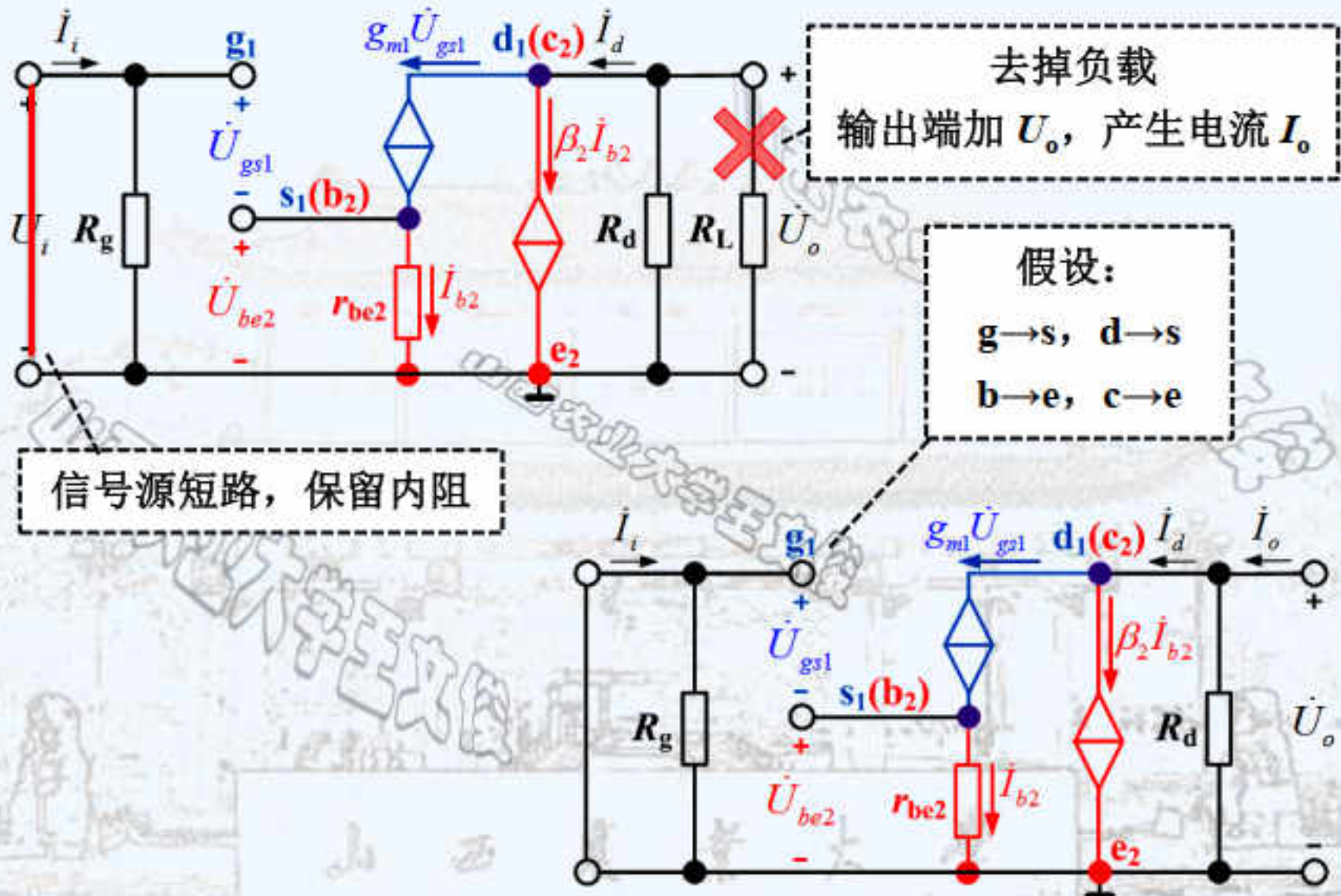
输入电压: $\dot{U}_i = \dot{I}_i R_g$

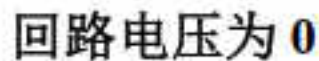
输入电流: $\dot{I}_i = \dot{I}_i$

输入电阻: $R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = R_g = R_{g3} + R_{g1} \parallel R_{g2}$

复合管共源放大电路的输入电阻比复合管共射放大电路的输入电阻大得多，突出体现了场效应管放大电路输入电阻大的优点。

• 6、输出电阻 R_o





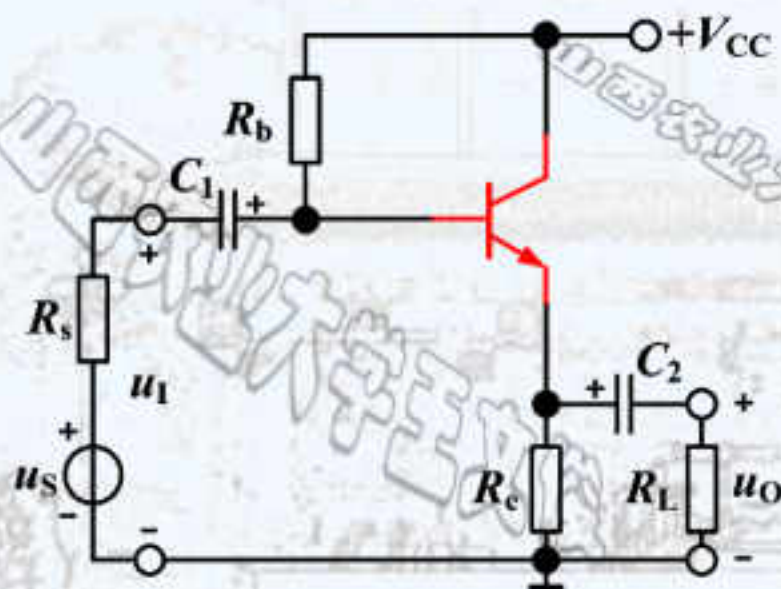
输出端电流: $I_o = I_{R_d} = \frac{U_o}{R_d}$

输出电阻: $R_o = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{\left(\frac{U_o}{R_d}\right)} = R_d$

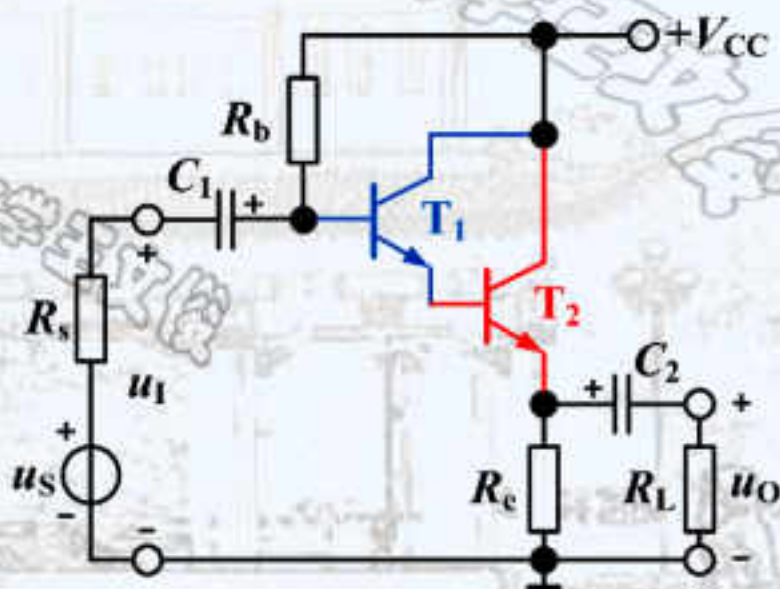
三十二、复合管共集放大电路

• 1、复合管共射放大电路

将阻容耦合共集放大电路中的晶体管用复合管取代，便可得到复合管共集放大电路。

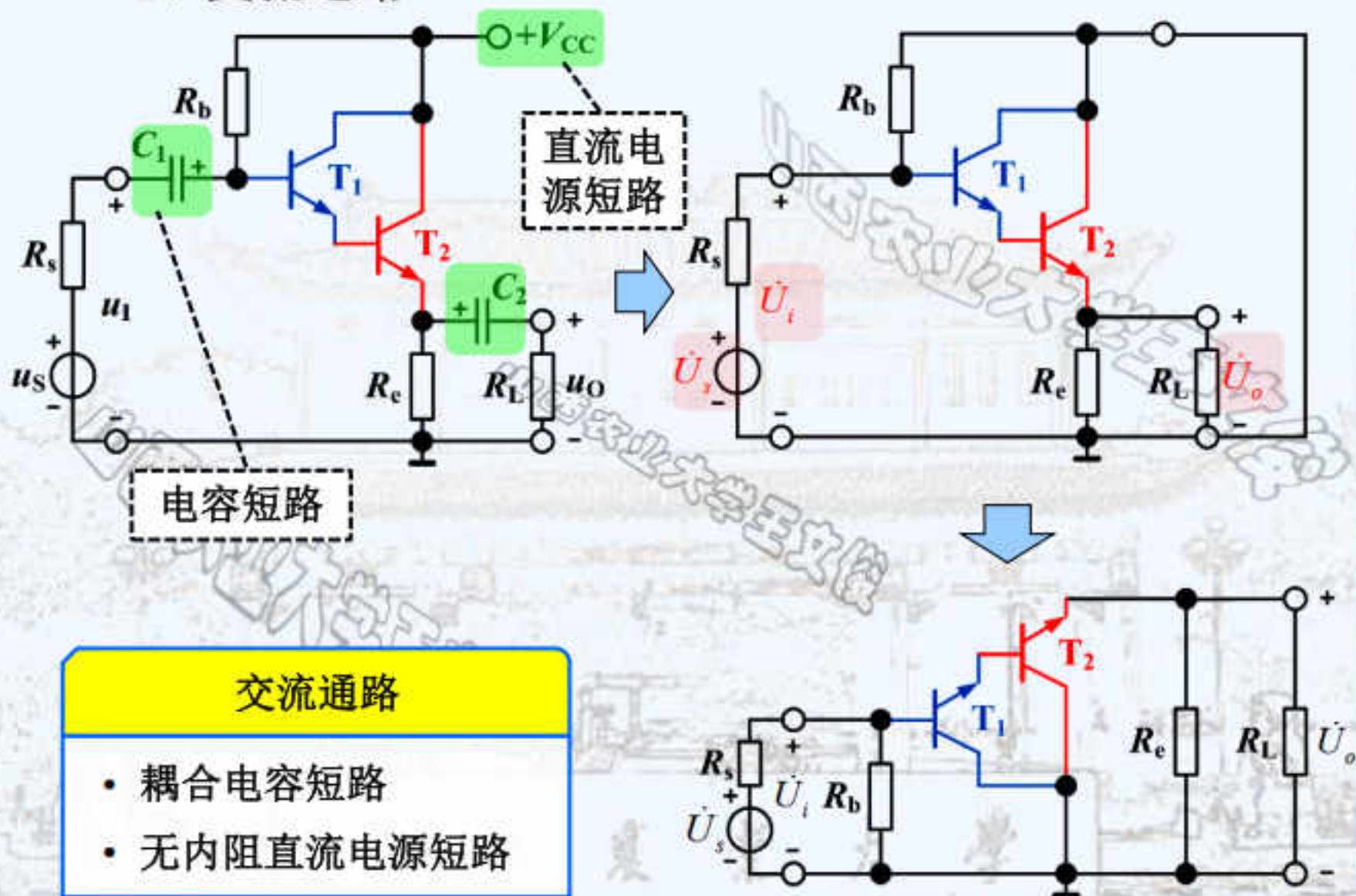


阻容耦合共集放大电路



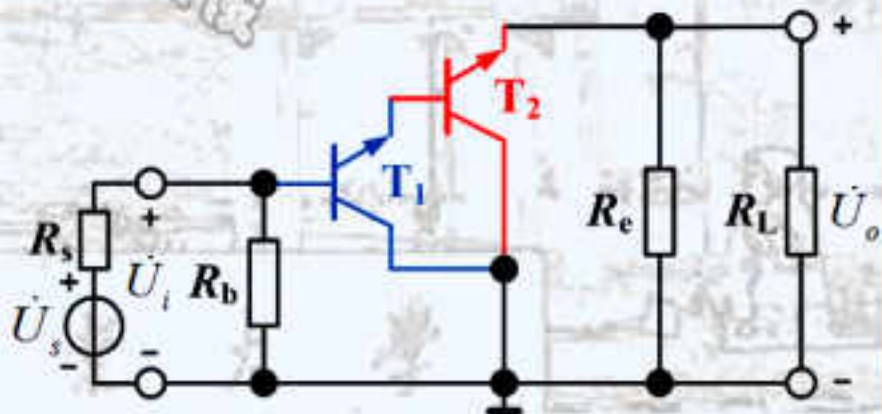
复合管共集放大电路

• 2、交流通路

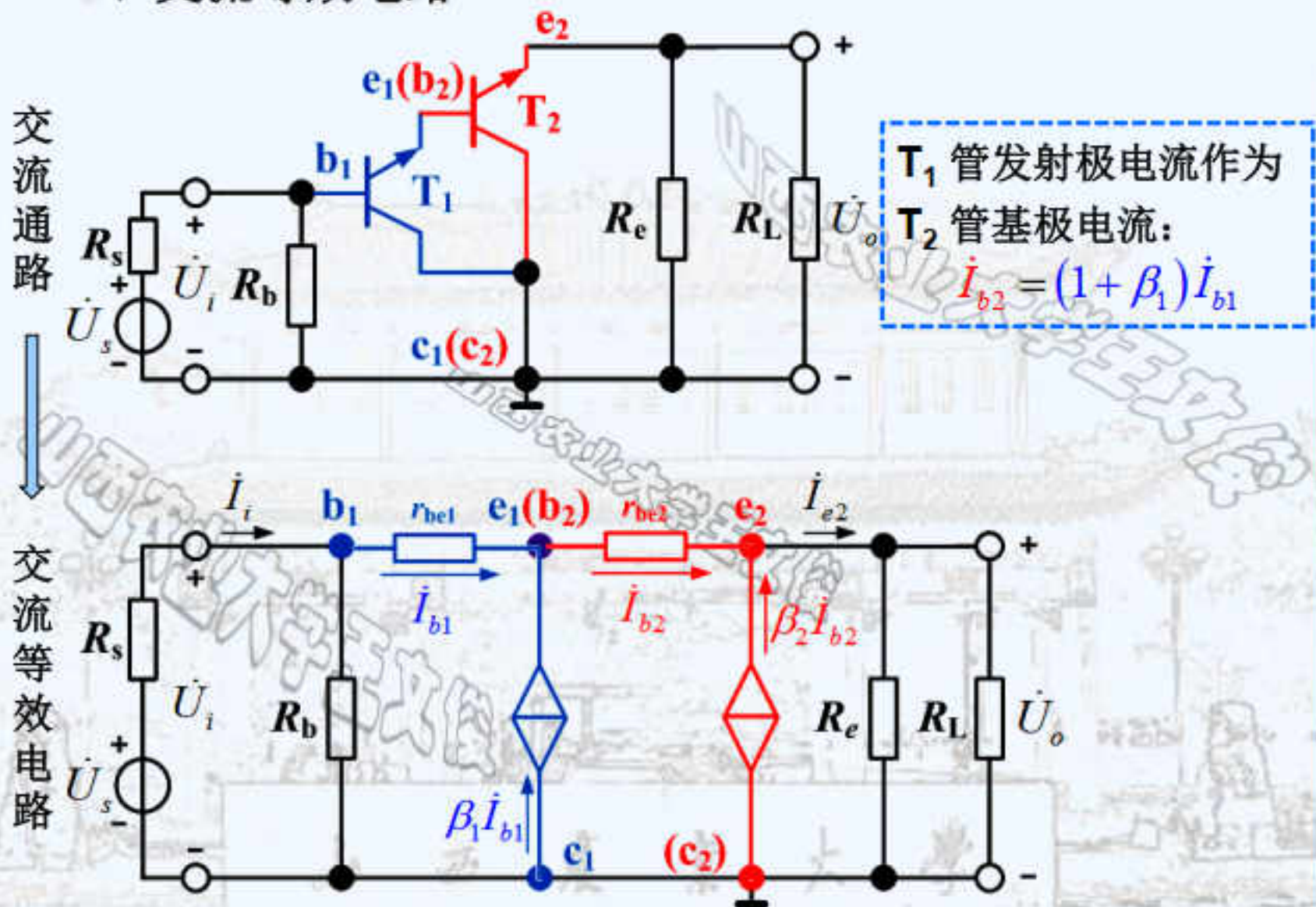


交流通路

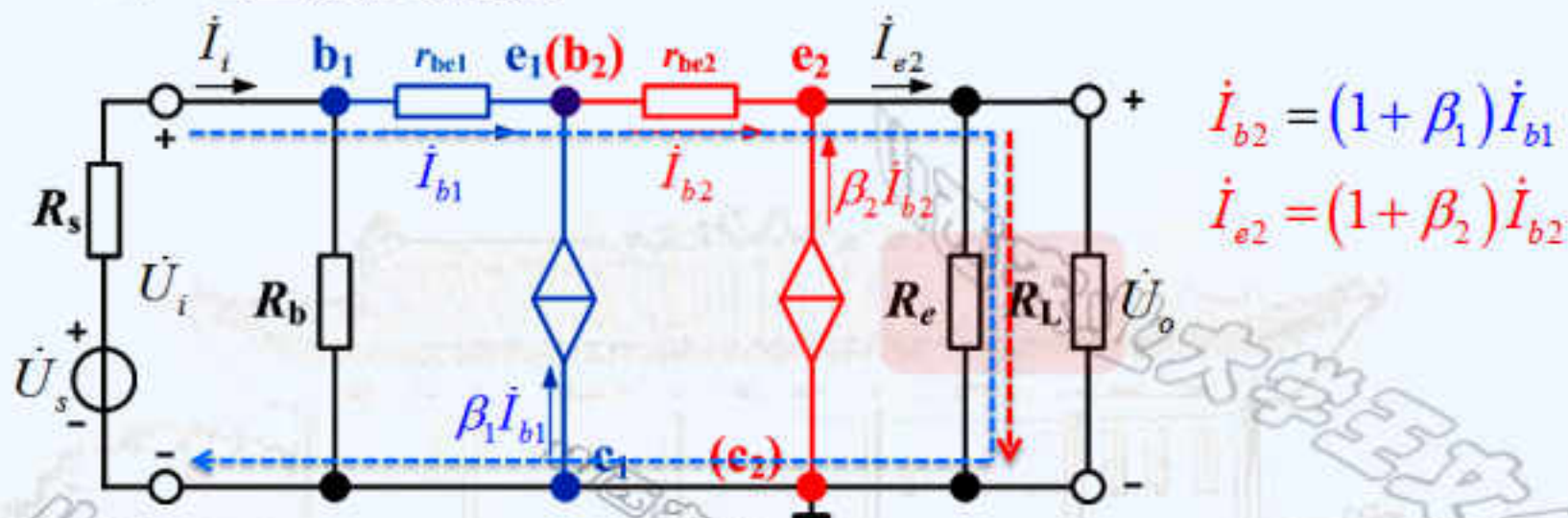
- 耦合电容短路
- 无内阻直流电源短路



3、交流等效电路



4、电压放大倍数



$$\dot{I}_{b2} = (1 + \beta_1) \dot{I}_{b1}$$

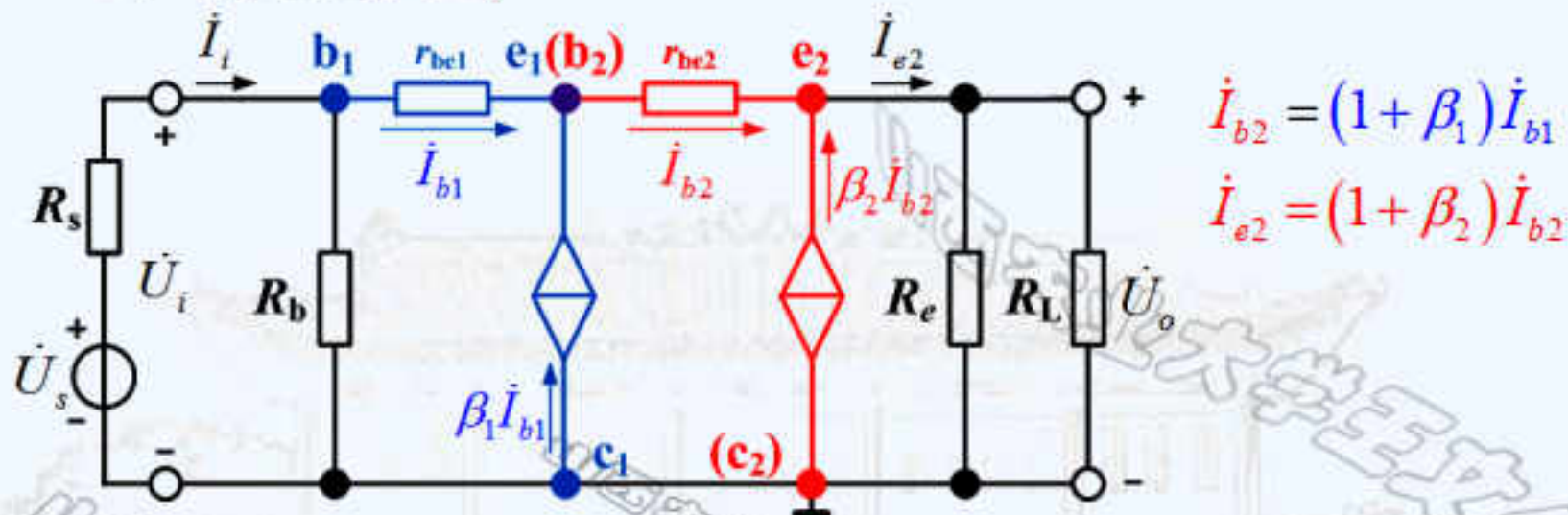
$$\dot{I}_{e2} = (1 + \beta_2) \dot{I}_{b2}$$

输入电压:

输出电压: $\dot{U}_o = \dot{I}_{e2} (R_e \parallel R_L) = (1 + \beta_1)(1 + \beta_2) \dot{I}_{b1} (R_e \parallel R_L)$

电压放大倍数: $\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(R_e \parallel R_L)}{r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2} + (1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(R_e \parallel R_L)}$

5、输入电阻 R_i



输入电压: $\dot{U}_i = \dot{I}_{b1} [r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2} + (1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(R_e \parallel R_L)]$

输入电流: $\dot{I}_i = \dot{I}_{R_b} + \dot{I}_{b1} = \frac{\dot{U}_i}{R_b} + \dot{I}_{b1}$

联立得, 输入电阻:

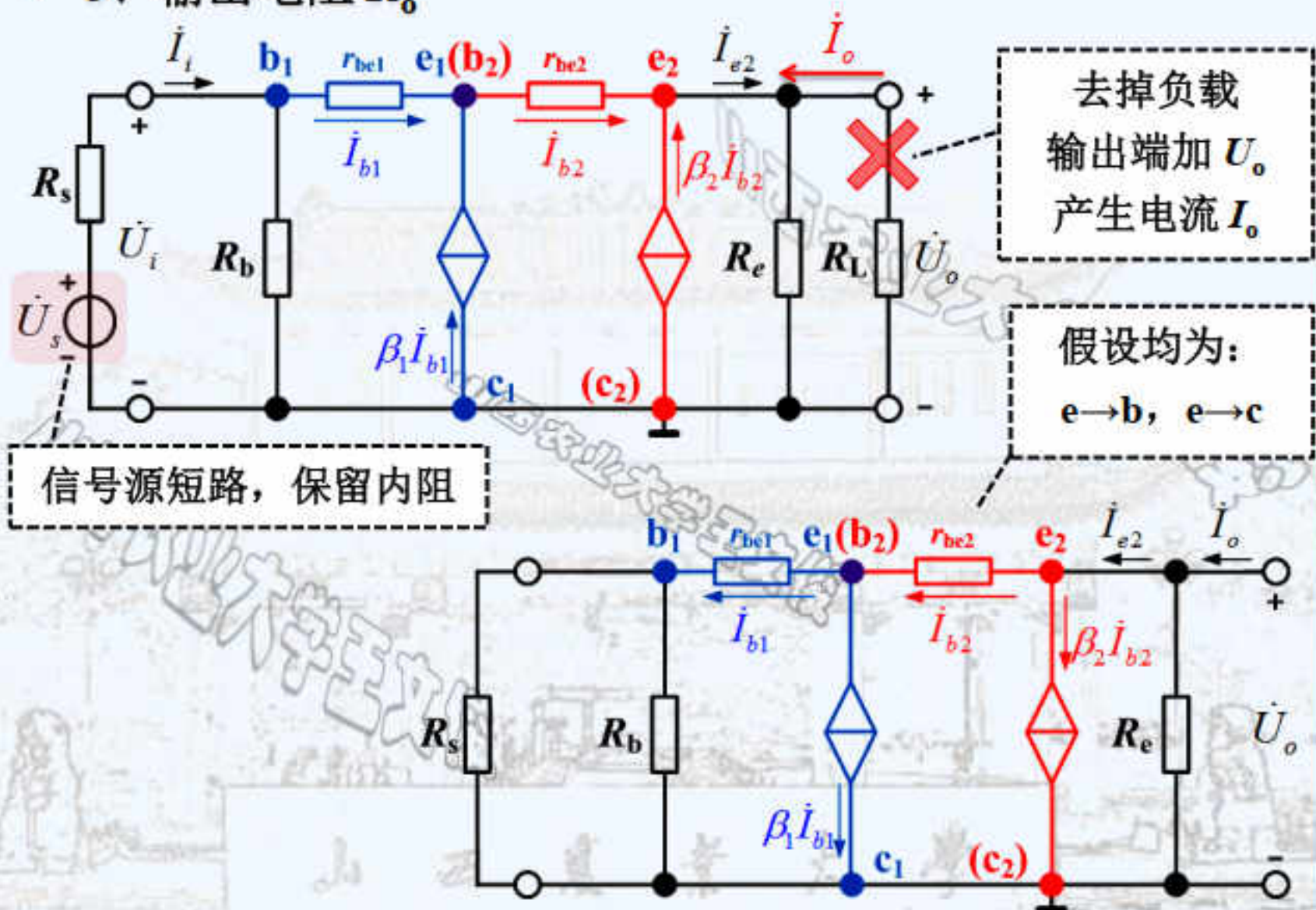
$$R_i = R_b \parallel [r_{be1} + (1 + \beta_1)r_{be2} + (1 + \beta_1)(1 + \beta_2)(R_e \parallel R_L)]$$

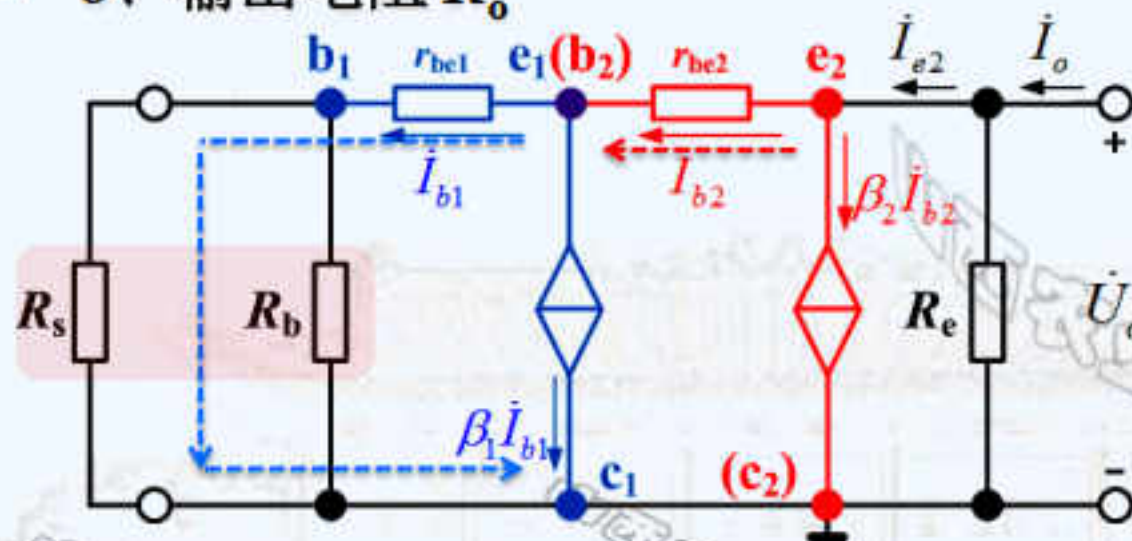
单管共集放大电路

$$R_i = R_b \parallel [r_{be} + (1 + \beta)(R_e \parallel R_L)]$$

采用复合管后, 输入电阻进一步提高; 共集放大电路的输入电阻与负载电阻有关。任何放大电路的输入电阻都与信号源无关。

6、输出电阻 R_o





$$\dot{I}_{b2} = (1 + \beta_1) \dot{I}_{b1}$$

$$\dot{I}_{\epsilon 2} = (1 + \beta_2) \dot{I}_{b2}$$

e₁-c₁ 间电压: $U_{e_1c_1} = I_{b_1} (r_{be1} + R_s \parallel R_b)$

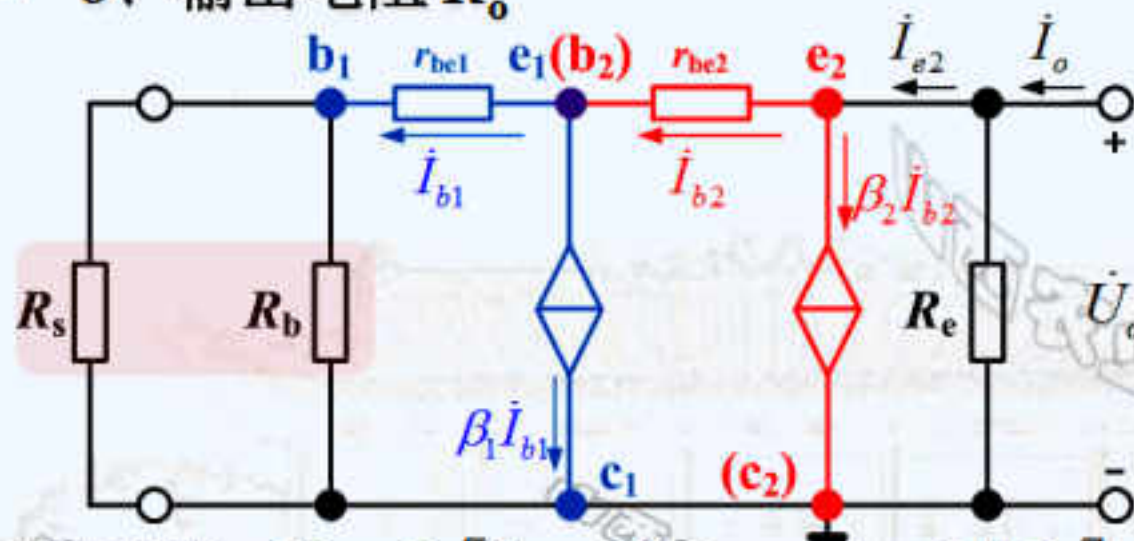
e₂-e₁ 间电压: $U_{e_2e_1} = I_{b2}r_{be2} = (1 + \beta_1)I_{b1}r_{be2}$

输出电压: $U_o = U_{e2e1} + U_{e1c1}$

$$= (1 + \beta_1) I_{b1} r_{be2} + I_{b1} (r_{be1} + R_s \parallel R_b)$$

$$= I_{b1} [(1 + \beta_1) r_{be2} + r_{be1} + R_s \parallel R_b]$$

• 6、输出电阻 R_o



$$I_{b2} = (1 + \beta_1) I_{b1}$$

$$I_{e2} = (1 + \beta_2) I_{b2}$$

输出电压: $U_o = I_{b1} [(1 + \beta_1) r_{be2} + r_{be1} + R_s \parallel R_b]$

输出电流: $I_o = I_{e2} + I_{R_e} = (1 + \beta_1)(1 + \beta_2) I_{b1} + \frac{U_o}{R_e}$

联立得, 输出电阻: $R_o = R_e \parallel \frac{r_{be2} + \frac{r_{be1} + R_s \parallel R_b}{1 + \beta_1}}{1 + \beta_2}$

单管共集放大电路

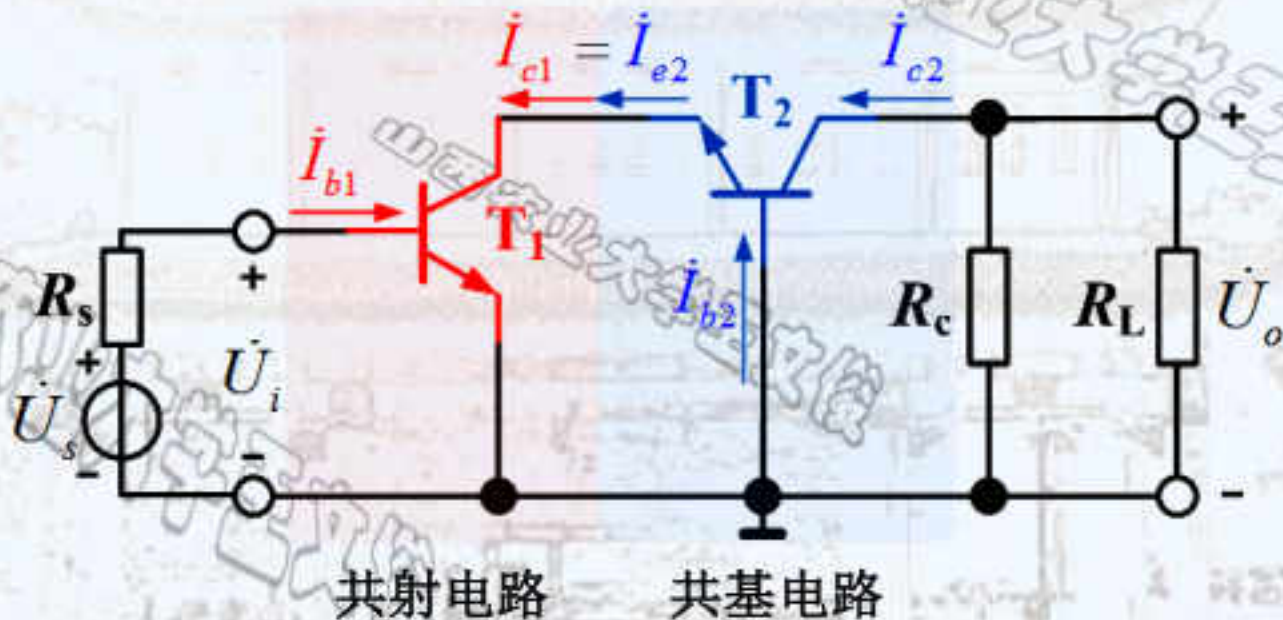
$$R_o = R_e \parallel \frac{r_{be} + R_b \parallel R_s}{1 + \beta}$$

采用复合管后, 输出电阻进一步降低; 共集放大电路的输出电阻与信号源内阻有关。任何放大电路的输出电阻都与负载无关。

三十三、共射 - 共基放大电路

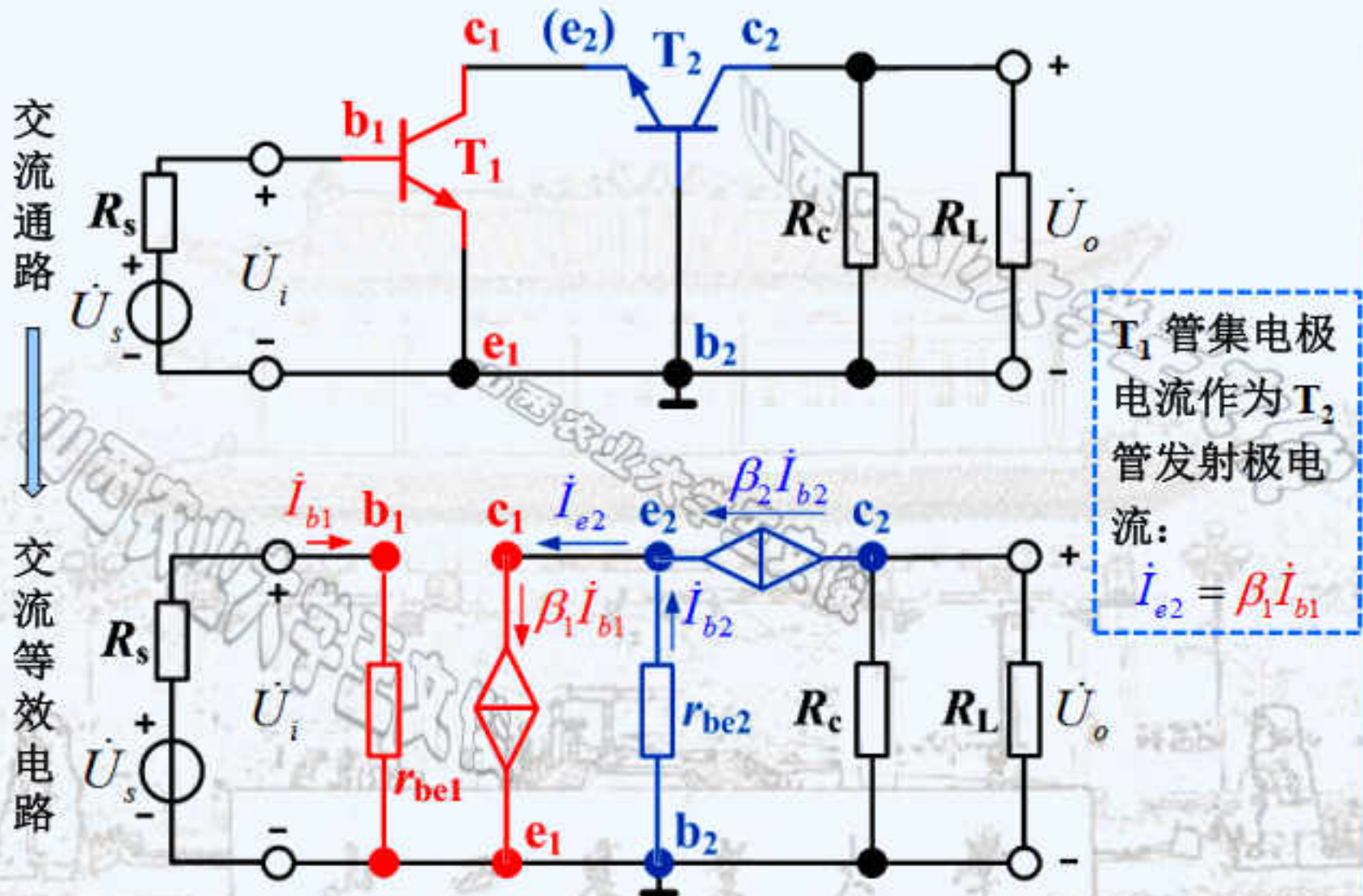
• 1、共射 - 共基放大电路

将共射电路与共基电路组合在一起，就得到了共射 - 共基放大电路。

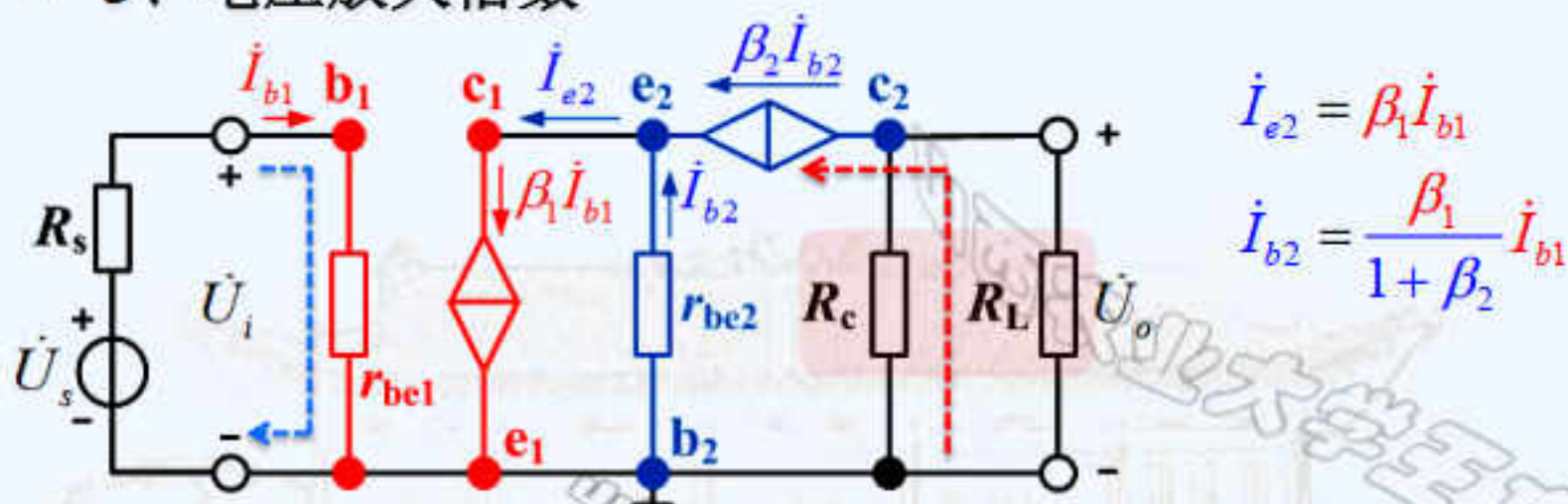


将两种基本接法组合，可同时获得两种接法的优点：既保持共射放大电路电压放大能力强的优点，又获得了共基放大电路较好的高频特性。

2、交流等效电路



• 3、电压放大倍数



$$\dot{I}_{e2} = \beta_1 \dot{I}_{b1}$$

$$\dot{I}_{b2} = \frac{\beta_1}{1 + \beta_2} \dot{I}_{b1}$$

输入电压:

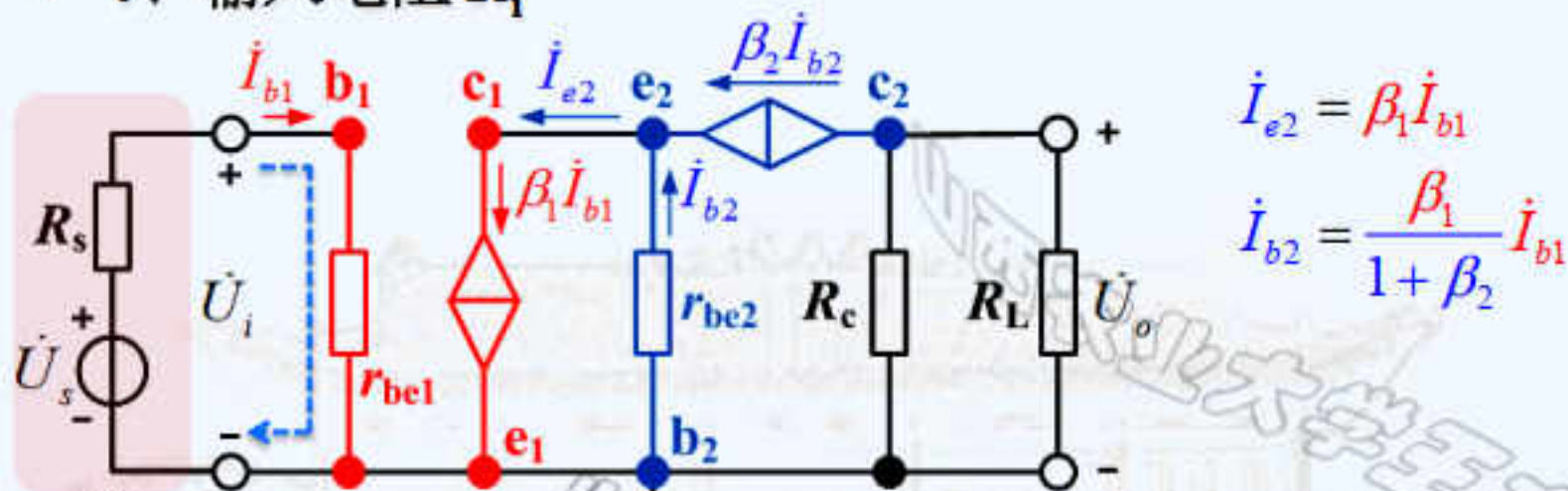
电压放大倍数:

输出电压:

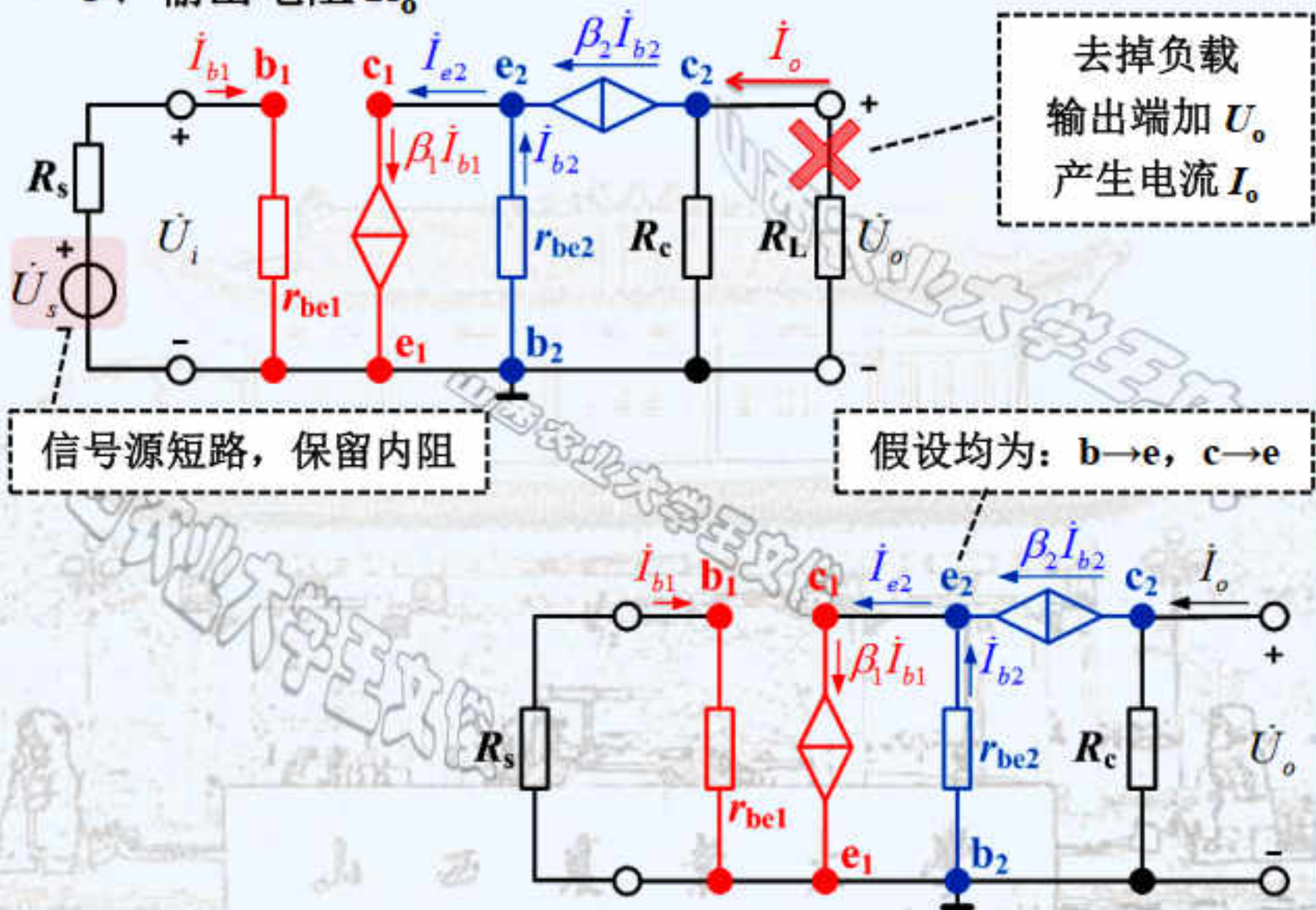
$$\begin{aligned} \dot{U}_o &= -\dot{I}_{c2} (R_c \parallel R_L) \\ &= -\beta_2 \dot{I}_{b2} (R_c \parallel R_L) \\ &= -\beta_2 \frac{\beta_1}{1 + \beta_2} \dot{I}_{b1} (R_c \parallel R_L) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{A}_u &= \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{-\beta_2 \frac{\beta_1}{1 + \beta_2} \dot{I}_{b1} (R_c \parallel R_L)}{\dot{I}_{b1} r_{be1}} \\ &= -\frac{\beta_2}{1 + \beta_2} \frac{\beta_1 (R_c \parallel R_L)}{r_{be1}} \\ &\approx -\frac{\beta_1 (R_c \parallel R_L)}{r_{be1}} \end{aligned}$$

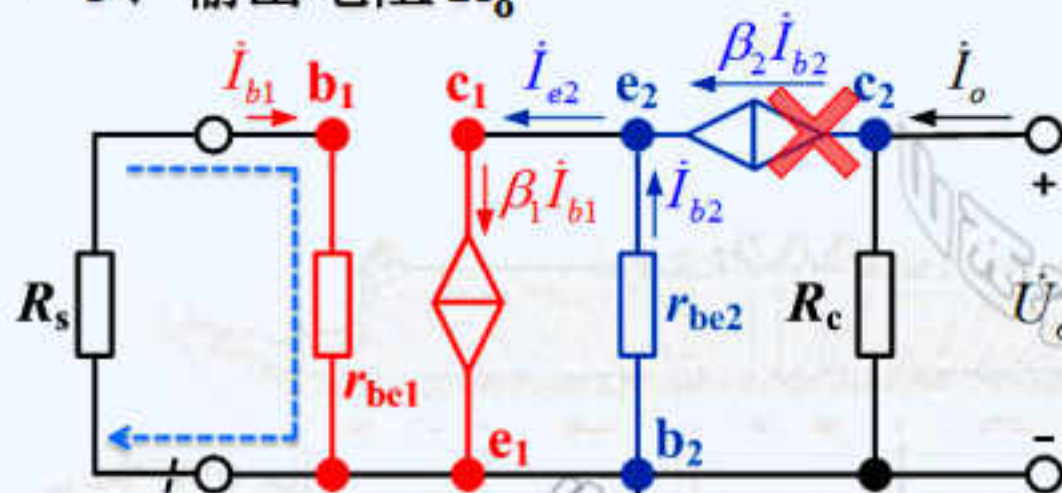
4、输入电阻 R_i



5、输出电阻 R_o



5、输出电阻 R_o



回路电流为 0

$$\begin{cases} I_{b1} = 0 \\ I_{e2} = \beta_1 I_{b1} = 0 \\ I_{c2} = \beta_2 I_{b2} = 0 \end{cases}$$

输出端电压: $U_o = U_o$

输出端电流: $I_o = I_{R_c} = \frac{U_o}{R_c}$

输出电阻:

$$R_o = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{\left(\frac{U_o}{R_c}\right)} = R_c$$

• 6、共射-共基、共射、共基放大电路比较

接法	共射*	共基*	共射 - 共基
A_v	$-\frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{r_{be}}$	$\frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{(1+\beta)R_e + r_{be}}$	$\approx -\frac{\beta_1(R_c \parallel R_L)}{r_{be1}}$
R_i	r_{be}	$R_e + \frac{r_{be}}{(1+\beta)}$	
R_o	R_c	R_c	R_c
频带	窄	宽	较宽

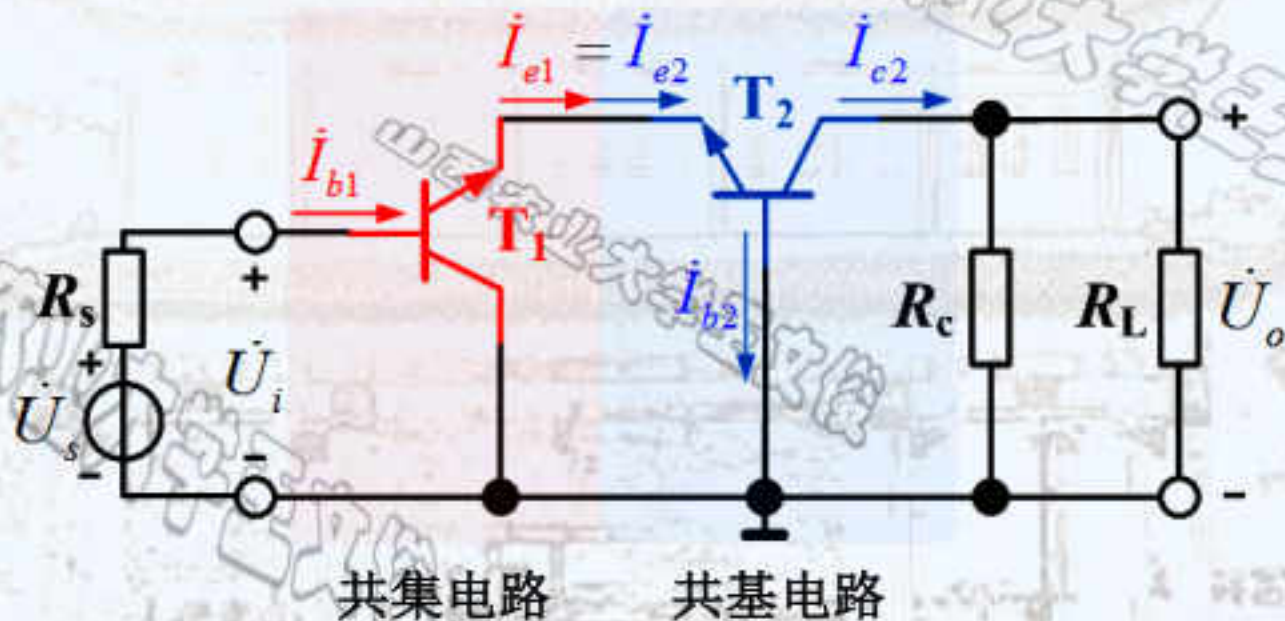
*注：为便于比较，令原式中的 $R_b = 0$ ， $R_c = R_c \parallel R_L$ 。

共射 - 共基放大电路，既保持共射放大电路电压放大能力强的优点，又获得了共基放大电路较好的高频特性。

三十四、共集 - 共基放大电路

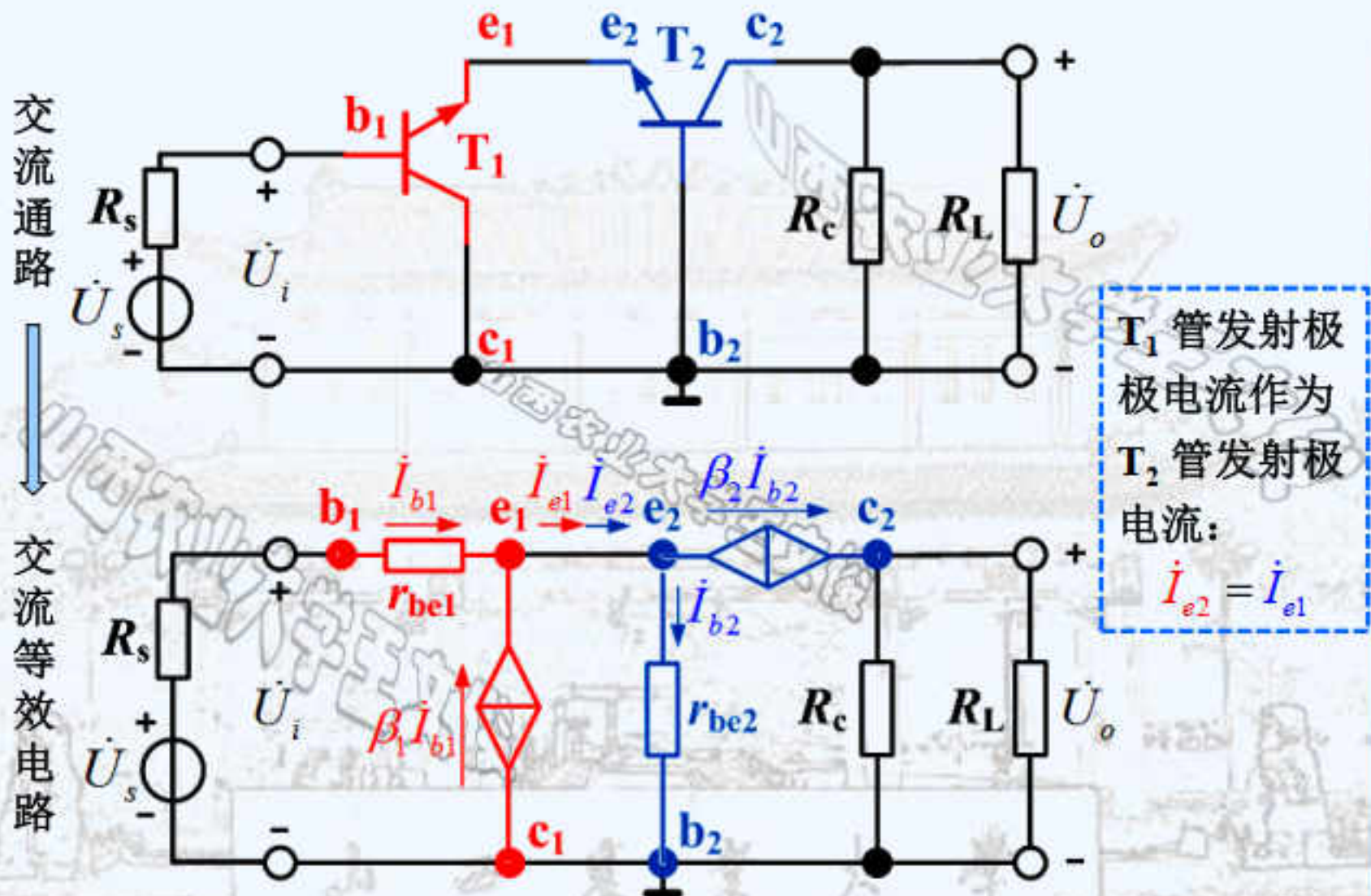
• 1、共集 - 共基放大电路

将共集电路与共基电路组合在一起，就得到了共集 - 共基放大电路。

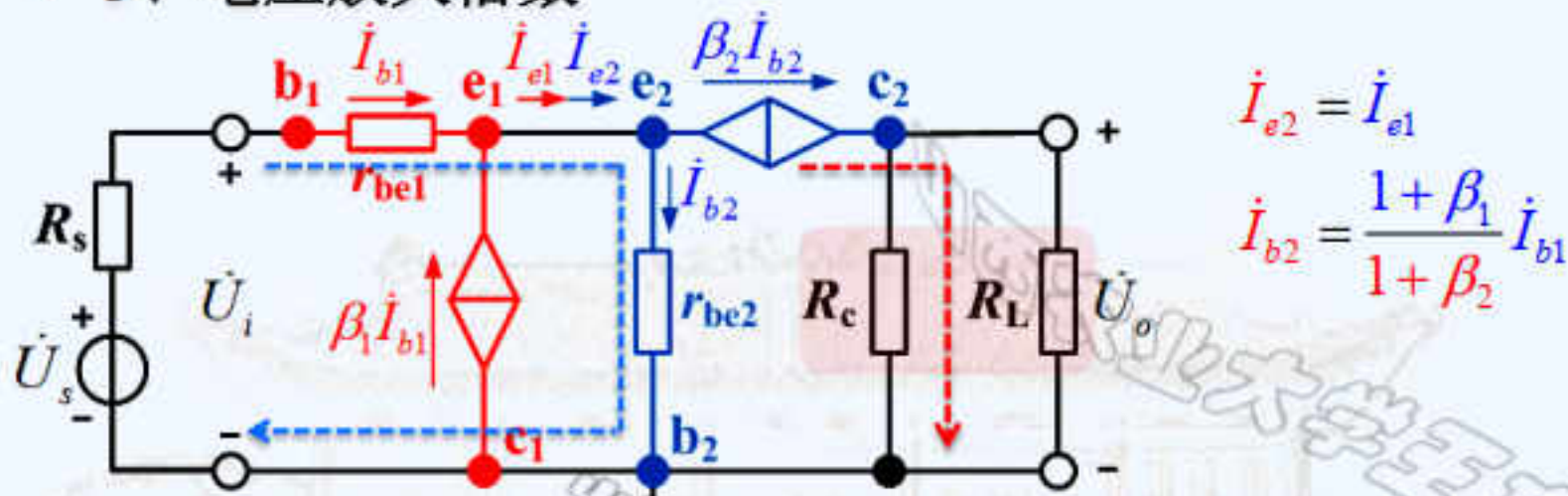


将两种基本接法组合，可同时获得两种接法的优点：既具共基电路的电压放大能力，又具有较宽的通频带。

2、交流等效电路



• 3、电压放大倍数



$$\dot{I}_{e2} = \dot{I}_{e1}$$

$$\dot{I}_{b2} = \frac{1 + \beta_1}{1 + \beta_2} \dot{I}_{b1}$$

输入电压:

输出电压:

电压放大倍数:

$$\dot{U}_o = \dot{I}_{c2} (R_c \parallel R_L)$$

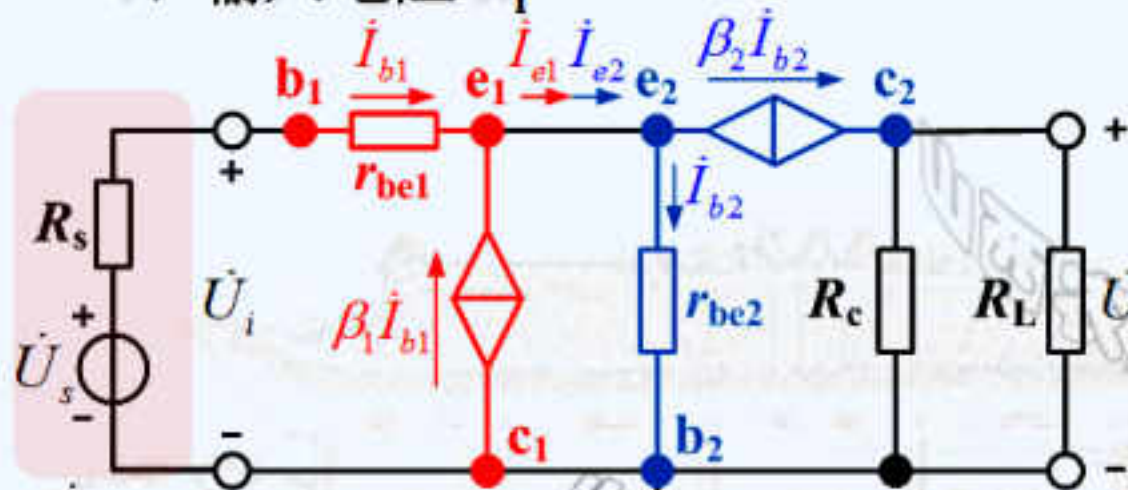
$$= \beta_2 \dot{I}_{b2} (R_c \parallel R_L)$$

$$= \beta_2 \frac{1 + \beta_1}{1 + \beta_2} \dot{I}_{b1} (R_c \parallel R_L)$$

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\beta_2 \frac{1 + \beta_1}{1 + \beta_2} \dot{I}_{b1} (R_c \parallel R_L)}{\dot{I}_{b1} r_{be1} + \frac{1 + \beta_1}{1 + \beta_2} \dot{I}_{b1} r_{be2}}$$

$$= \frac{\beta_2 (R_c \parallel R_L)}{\frac{1 + \beta_2}{1 + \beta_1} r_{be1} + r_{be2}}$$

4、输入电阻 R_i



$$\begin{aligned} \dot{I}_{e2} &= \dot{I}_{e1} \\ \dot{I}_{b2} &= \frac{1 + \beta_1}{1 + \beta_2} \dot{I}_{b1} \end{aligned}$$

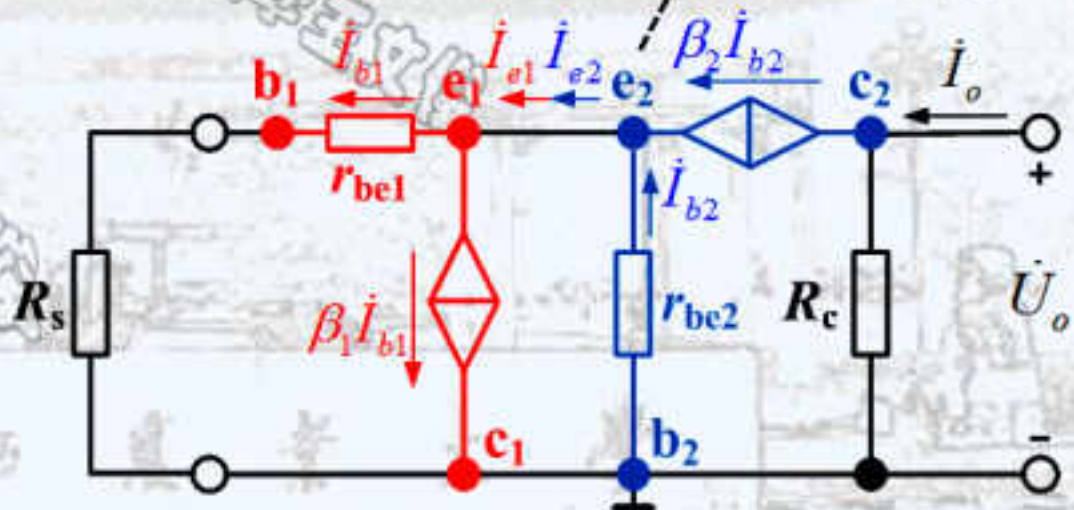
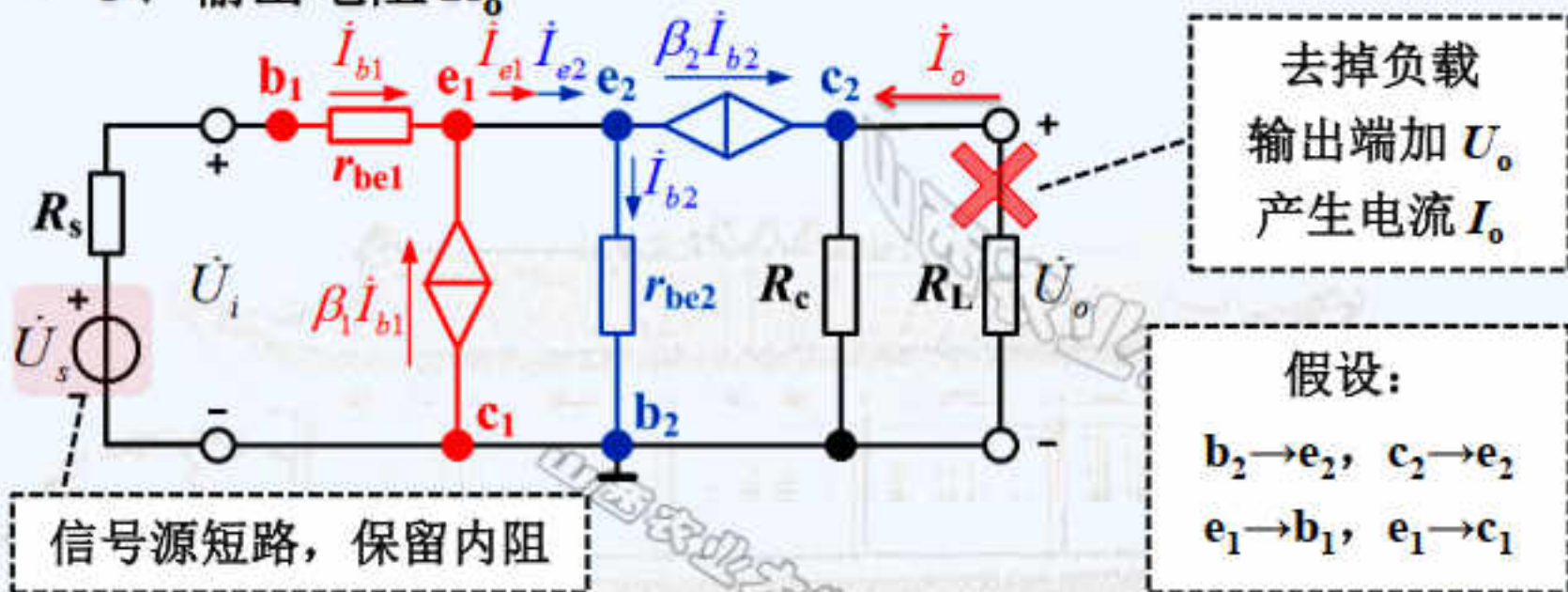
去掉信号源

输入电压:

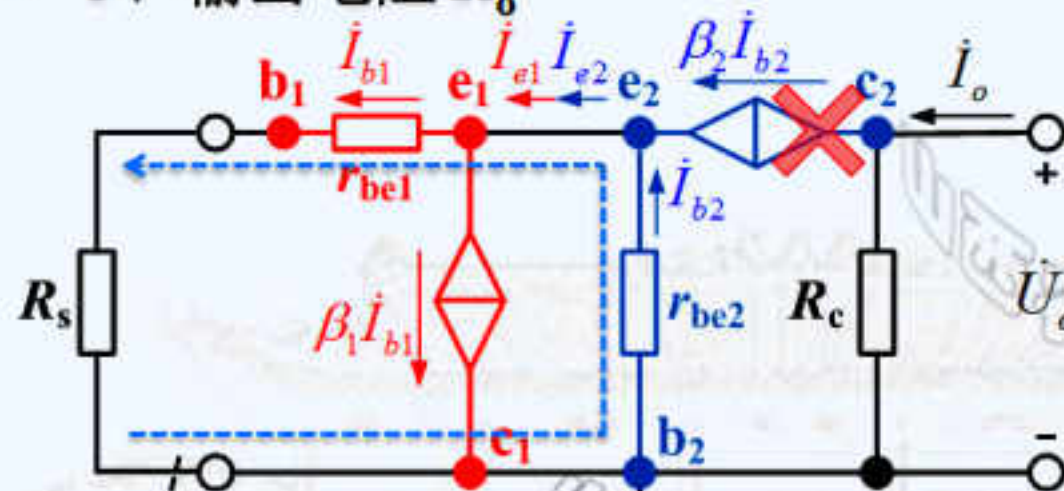
输入电流: $\dot{I}_i = \dot{I}_{b1}$

$$\text{输入电阻: } R_i = \frac{\dot{U}_i}{\dot{I}_i} = \frac{\dot{I}_{b1} \left[r_{be1} + \frac{1 + \beta_1}{1 + \beta_2} r_{be2} \right]}{\dot{I}_{b1}} = r_{be1} + \frac{1 + \beta_1}{1 + \beta_2} r_{be2}$$

5、输出电阻 R_o



• 5、输出电阻 R_o



回路电流为 0

$$\begin{cases} I_{b1} = 0 \\ I_{e2} = (1 + \beta_1) I_{b1} = 0 \\ I_{c2} = \beta_2 I_{b2} = 0 \end{cases}$$

输出端电压: $U_o = U_o$

输出端电流: $I_o = I_{R_c} = \frac{U_o}{R_c}$

输出电阻:

$$R_o = \frac{U_o}{I_o} = \frac{U_o}{\left(\frac{U_o}{R_c}\right)} = R_c$$

• 6、共集-共基、共集、共基放大电路比较

接法	共集*	共基*	共集 - 共基
A_v	$\frac{(1+\beta)R_e}{r_{be} + (1+\beta)R_e} \approx 1$	$\frac{\beta(R_c \parallel R_L)}{(1+\beta)R_e + \beta(R_c \parallel R_L)}$	$\frac{\beta_2(R_c \parallel R_L)}{(1+\beta_2)\frac{r_{be1}}{1+\beta_1} + r_{be2}}$
R_i	$r_{be} + (1+\beta)R_e$	$R_e + \frac{r_{be}}{(1+\beta)}$	$r_{be1} + (1+\beta_1)\frac{r_{be2}}{1+\beta_2}$
R_o	$R_e \parallel \frac{r_{be}}{1+\beta}$	R_c	R_c
频带	中	宽	宽

*注：为便于比较，令原式中的 $R_b = 0$ ， $R_c = R_c \parallel R_L$ 。

共集 - 共基放大电路，既具共基电路的一定的电压放大能力，又由于共集、共基均有较高的上限截止频率，具有较宽的通频带。