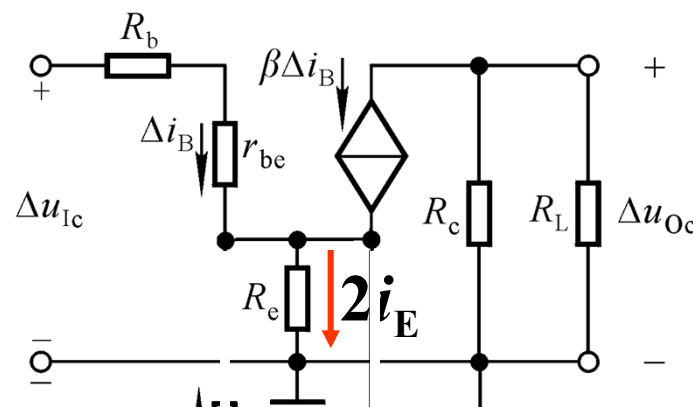
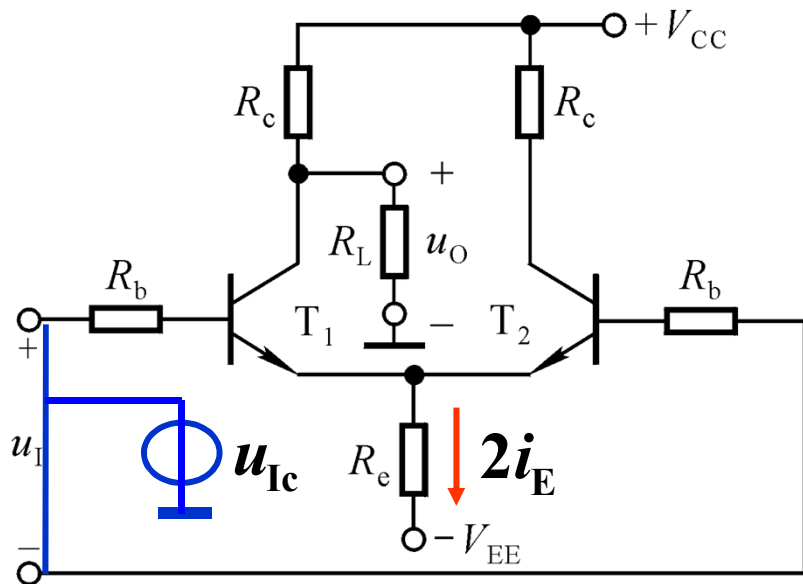


➤ 共模电压放大倍数 A_c 及共模抑制比 K_{CMR} **思考：** R_e 是否越大越好？



$$A_c = \frac{\Delta u_{Oc}}{\Delta u_{Ic}} = \frac{-\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be} + (1 + \beta)2R_e}$$

$$A_d = -\frac{1}{2} \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$$

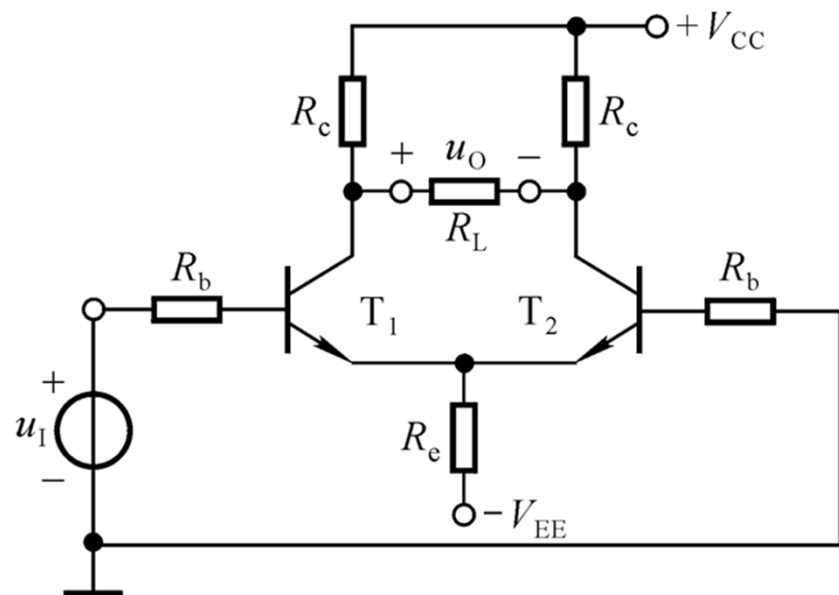
当 $(1 + \beta)2R_e \gg (R_b + r_{be})$ 时

$$A_c \approx -\frac{R_c // R_L}{2R_e} \quad R_e \uparrow \rightarrow |A_c| \downarrow, K_{CMR} \uparrow$$

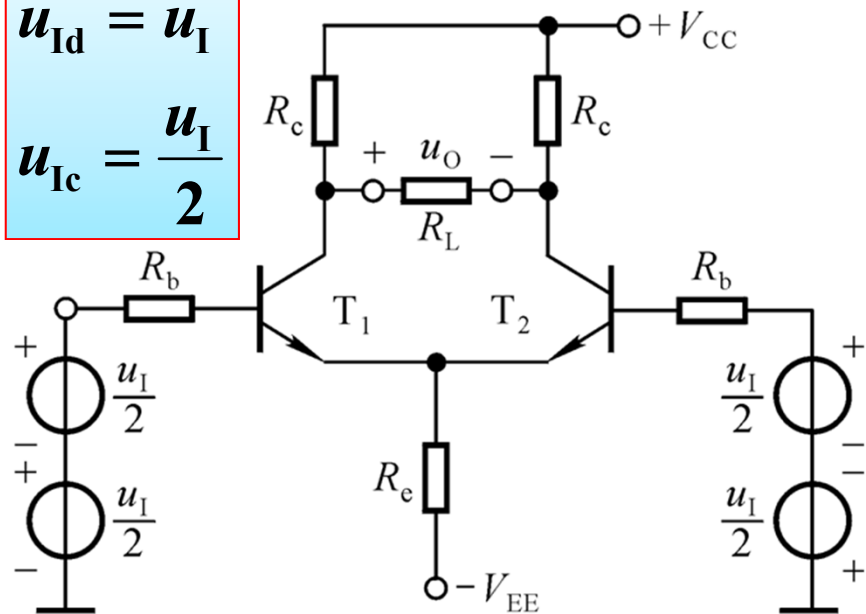
$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \approx \frac{\beta R_e}{R_b + r_{be}}$$

“长尾”式差分电路： R_e 对共模信号具有负反馈的作用，能抑制共模信号，同时又不影响差模信号的放大。

(2) 单端输入双端输出



$$u_{Id} = u_I$$
$$u_{Ic} = \frac{u_I}{2}$$



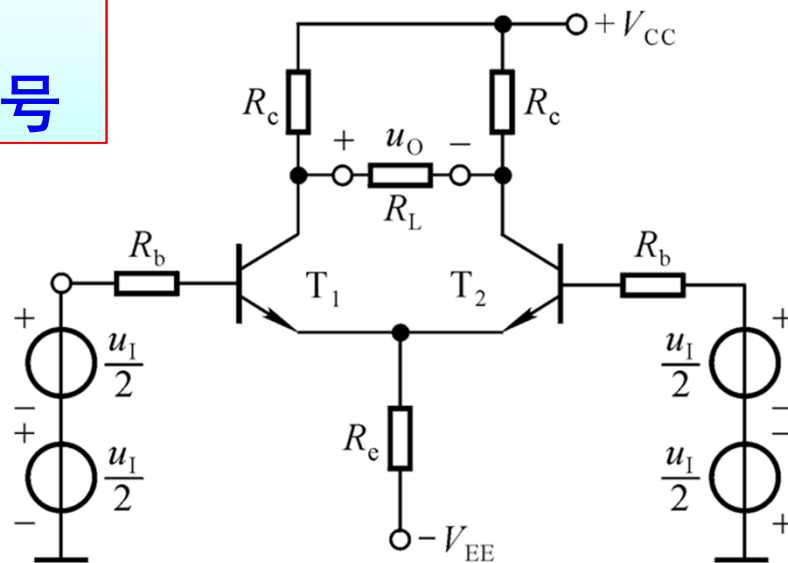
等效为双端输入双端输出

- **静态：** 同双端输入双端输出
- **动态：** 将输入信号分解为一对差模信号和一对共模信号

单端输入缺点：
人为输入了共模信号

$$u_{Id} = u_I$$

$$u_{Ic} = \frac{u_I}{2}$$



等效为双端输入双端输出

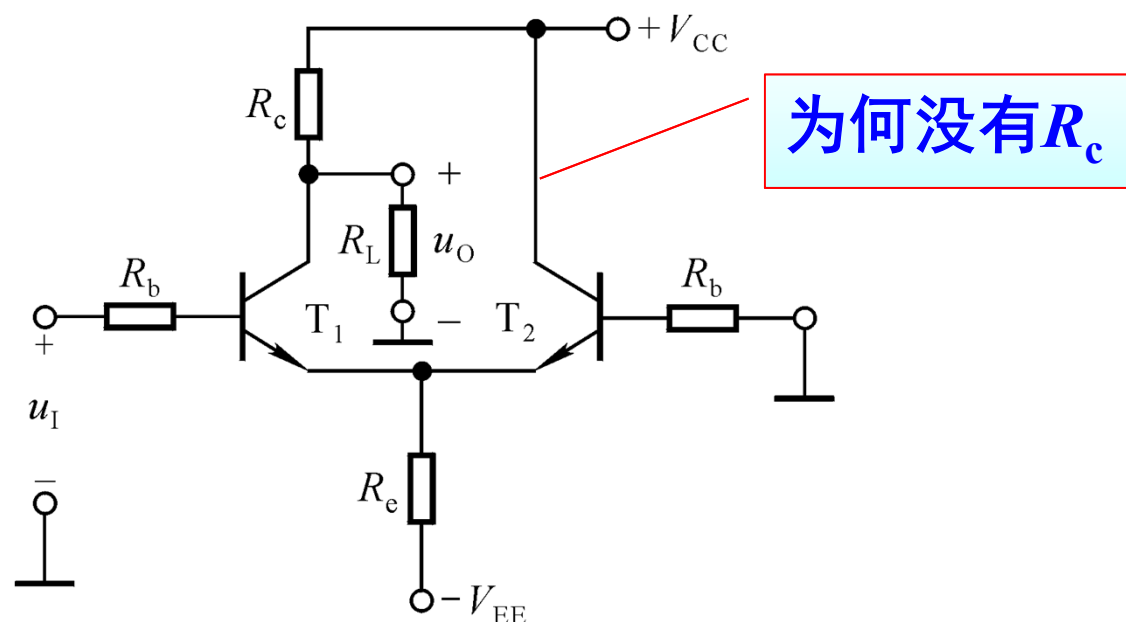
$$A_d = -\frac{\beta(R_c // \frac{1}{2}R_L)}{R_b + r_{be}}$$

$$A_c = 0$$

$$\Delta u_O = \Delta u_{Id} A_d + \Delta u_{Ic} A_c = u_I A_d$$

$$\Delta u_O = -\frac{\beta R'_L}{R_b + r_{be}} u_I$$

(3) 单端输入单端输出方式



静态和动态参数的分析与双端输入单端输出的电路一样

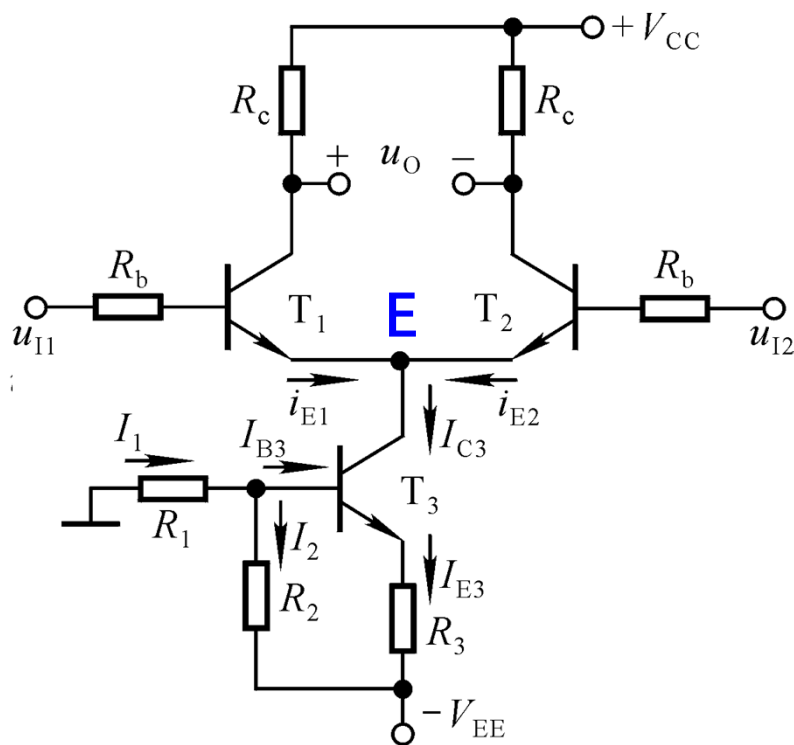
分析方法只与输出方式有关

等效为双端输入，但有共模输入信号

	双端输出		单端输出	
	双端输入	单端输入	双端输入	单端输入
差模放大倍数 A_d	$-\beta \frac{R_c // \frac{1}{2} R_L}{R_b + r_{be}}$		$-\frac{1}{2} \frac{\beta (R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$	
输入电阻 R_i	$2(R_b + r_{be})$		$2(R_b + r_{be})$	
输出电阻 R_o	$2R_c$		R_c	
共模放大倍数 A_c	0 (主要靠电路的对称性)		$\approx -\frac{R_c // R_L}{2 R_e}$	
共模抑制比 K_{CMR}	∞		$\approx \frac{\beta R_e}{R_b + r_{be}}$	

靠 R_e 的负反馈

3. 恒流源式差分放大电路



长尾式差分放大电路缺点：

- 单端输出时 $A_c \neq 0$; $A_c \approx -\frac{R_c // R_L}{2R_e}$
- 增大 R_e 影响静态，影响集成。

恒流源优点：

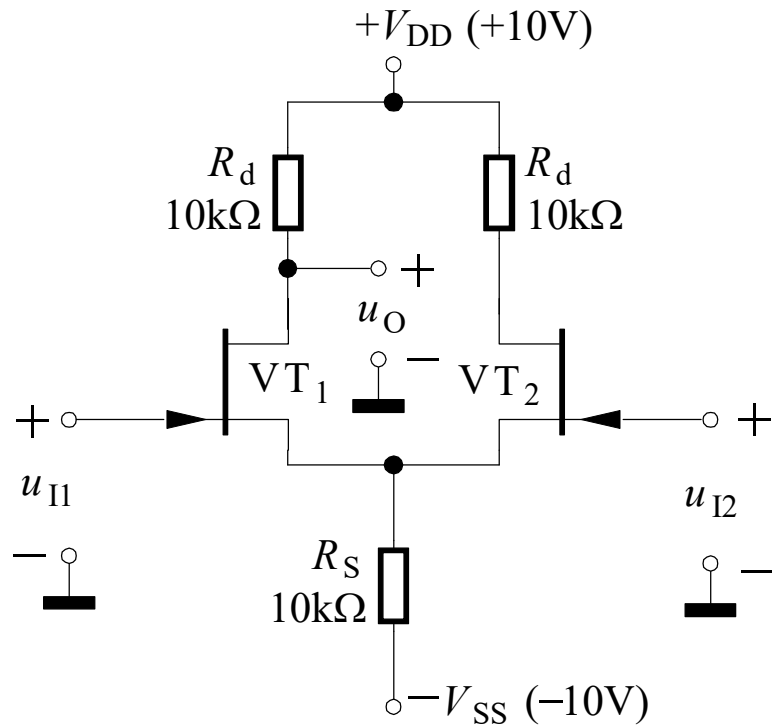
- 能设置好静态；
- 动态阻抗 $\approx \infty$ ，对双端输出和单端输出方式均有 $A_c \approx 0$, $K_{CMR} \approx \infty$ 。抑制共模能力强

$$I_E \approx I_{E3}$$

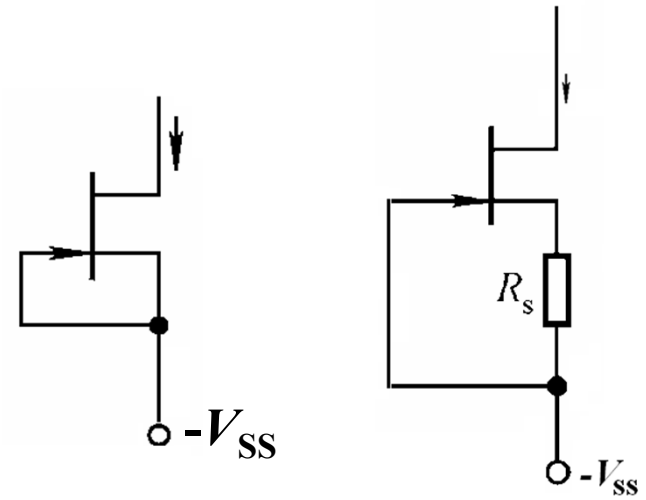
$$\approx \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{EE} - U_{BEQ} \right) / R_3$$

思考： 如何设置静态？
如何分析静态、动态？

JFET组成的差分放大电路

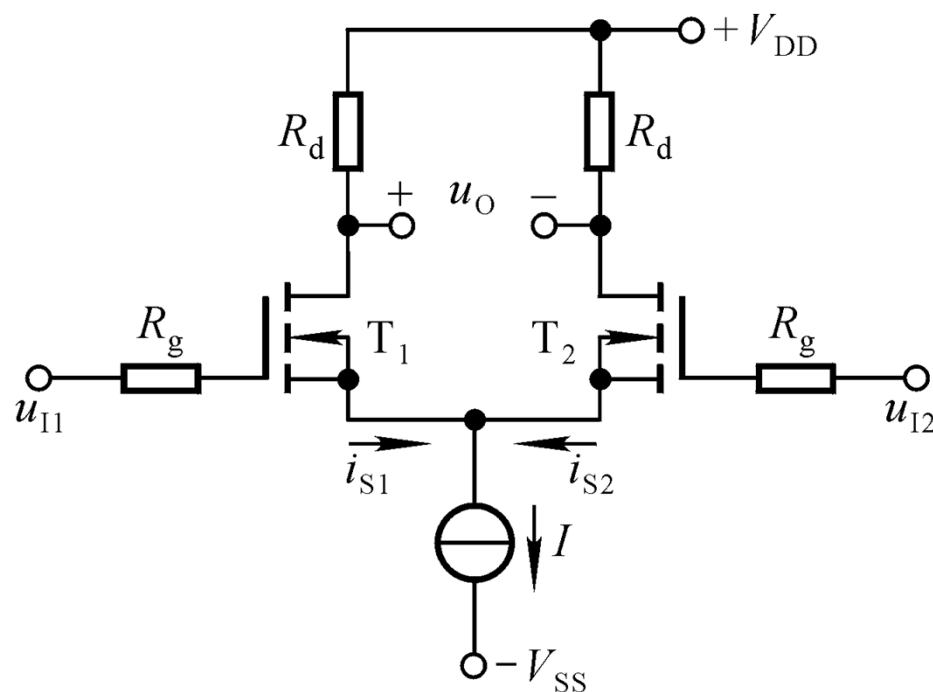


JFET恒流源

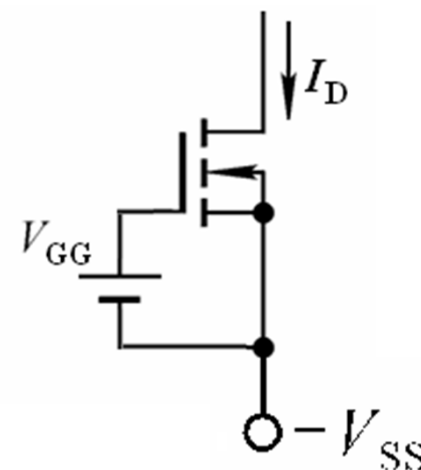


思考：如何设置静态？如何分析静态、动态？

MOSFET组成的恒流源式差分放大电路



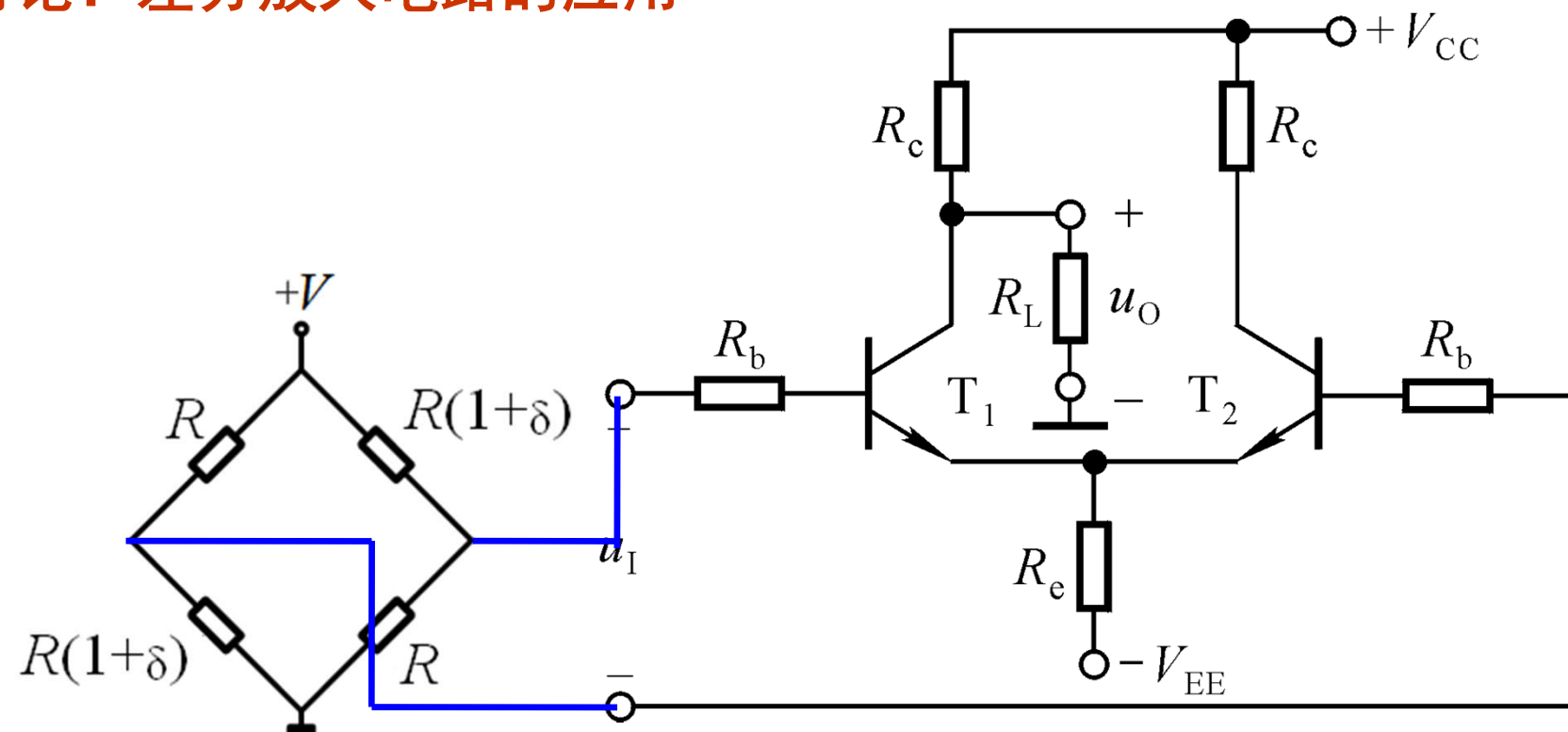
MOSFET恒流源



思考：

- 如何设置静态？如何分析静态、动态？
- 差分放大电路若参数不对称，将对静态和动态产生何影响？

讨论：差分放大电路的应用



复习思考题：

- 差分放大电路分析方法可以总结为几种？
- 双端（差分）输入和单端输入的区别？
- 双端输出和单端输出抑制温漂的方法有何不同？
- 为什么采用恒流源式差分放大电路？此时电路中静态电流如何确定？加差模和共模信号时恒流源如何等效？
- 何种情况采用差分放大电路或稳Q电路？
- u_{Id} 有上限吗？ u_{Ic} 有上限吗？
- 哪些信号可视为 u_{Ic} ？



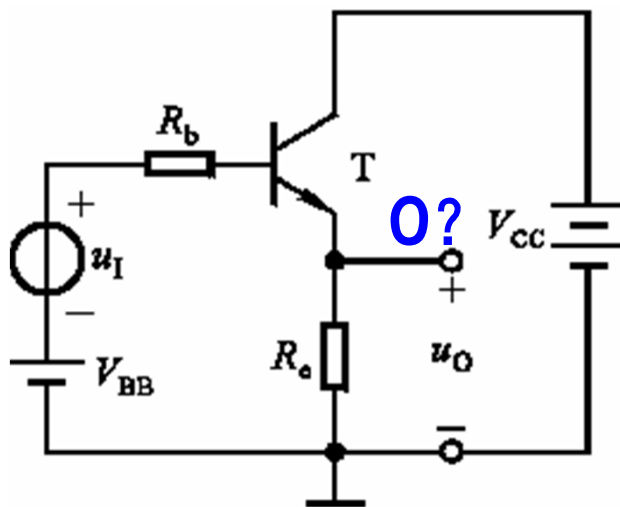
4.3 直接耦合互补输出级

(Direct coupled complement output)

1、对直接耦合输出级的要求：

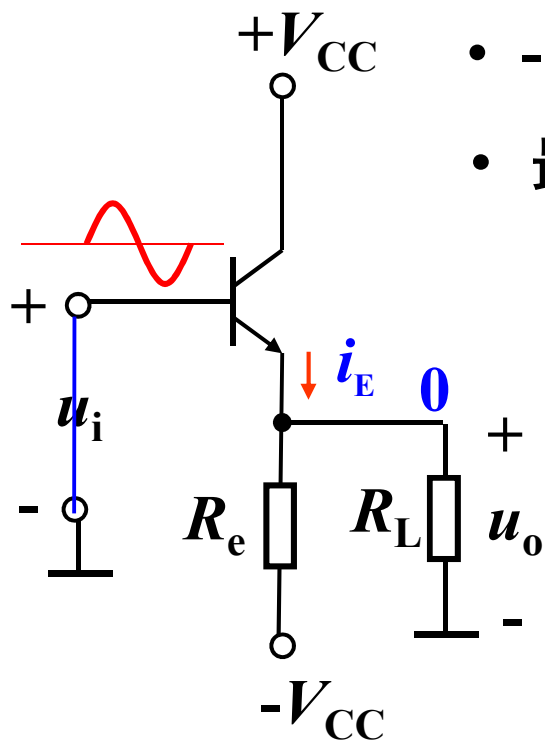
- (1) 带负载能力强；
- (2) 负载上无静态功耗；
- (3) 输出功率大：最大不失真输出幅度尽可能大，且正、负向最大不失真输出幅度尽可能对称；

常采用带负载能力强的**射极跟随器**来实现



2、单管射极跟随器作为输出级电路

负载上静态功耗 ≈ 0



- $-V_{CC}$ 保证静态时发射结导通且 $U_O \approx 0$ (设 $U_{on} \approx 0$)

- 最大不失真输出电压

当 $U_{CE} = U_{CES}$ 时晶体管饱和

正向最大输出电压为 $(V_{CC} - U_{CES})$

当 $i_E = 0$ 时晶体管截止

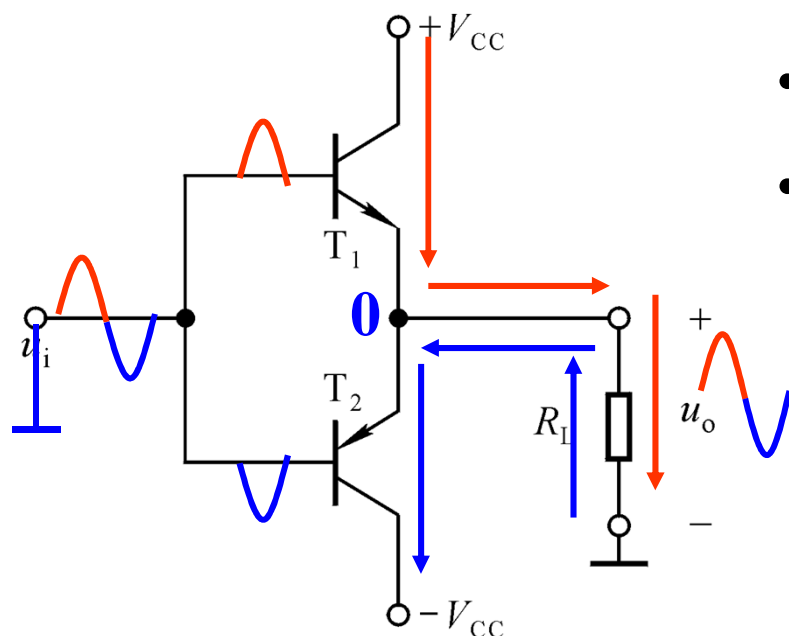
负向最大输出电压为 $-V_{CC} * \frac{R_L}{R_e + R_L}$

问题： 正负向最大不失真输出电压不对称！

3、互补电路

(1) 工作原理

- 静态： $U_O=0$ ，静态功耗为零
- 动态：假设 T_1 、 T_2 的 $U_{on} \approx 0$



正半周 T_1 导通， T_2 截止，
 u_o 跟随 u_i 变化， $U_{om}=V_{CC}-|U_{CES}|$

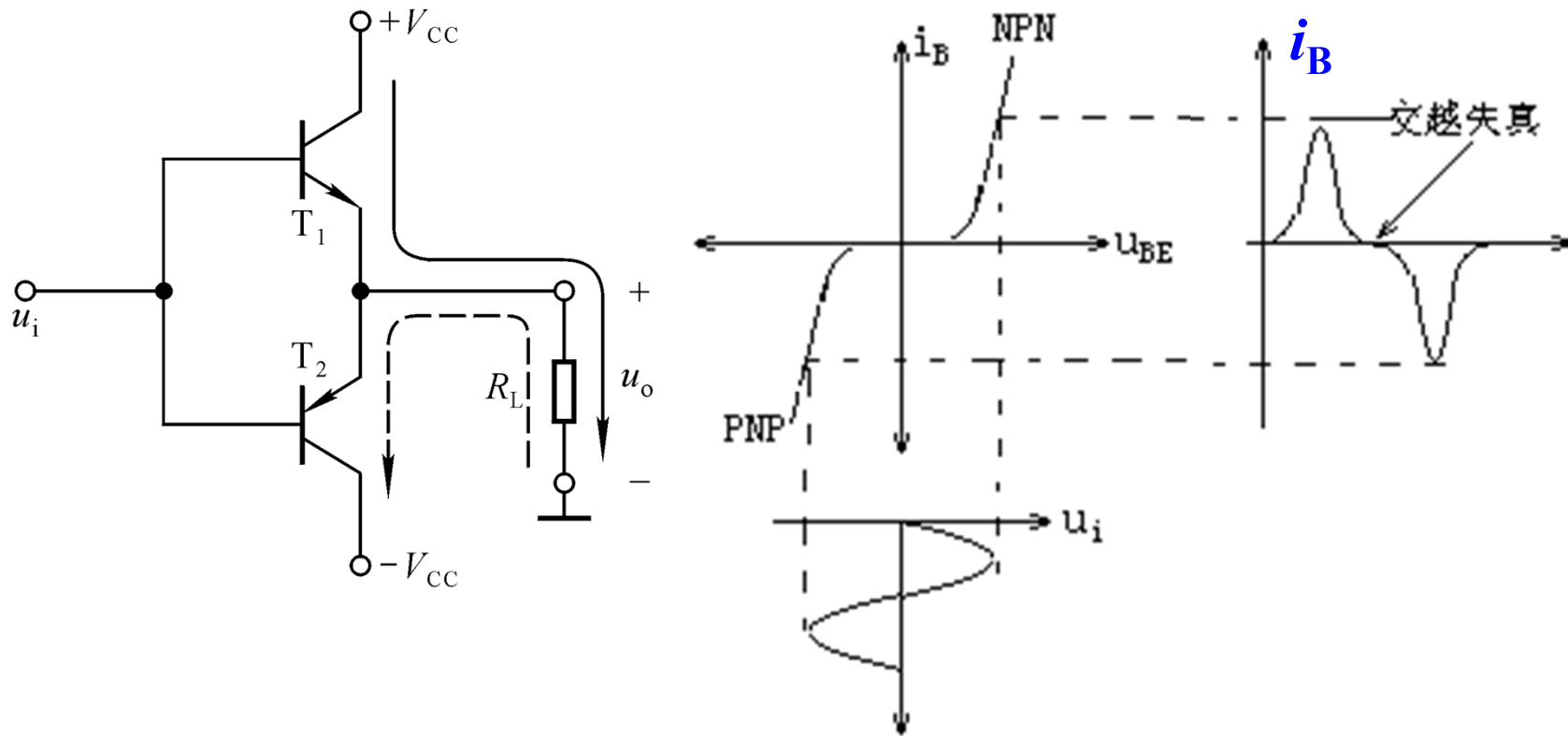
负半周 T_1 截止， T_2 导通，
 u_o 仍跟随 u_i 变化， $U_{om}=V_{CC}-|U_{CES}|$

T_1 ， T_2 以**互补**的方式交替工作，分别在信号的半周内处于导通状态，称为**互补电路**

(2) 交越失真 (Crossover Distortion)

T_1 、 T_2 的实际输入特性存在死区

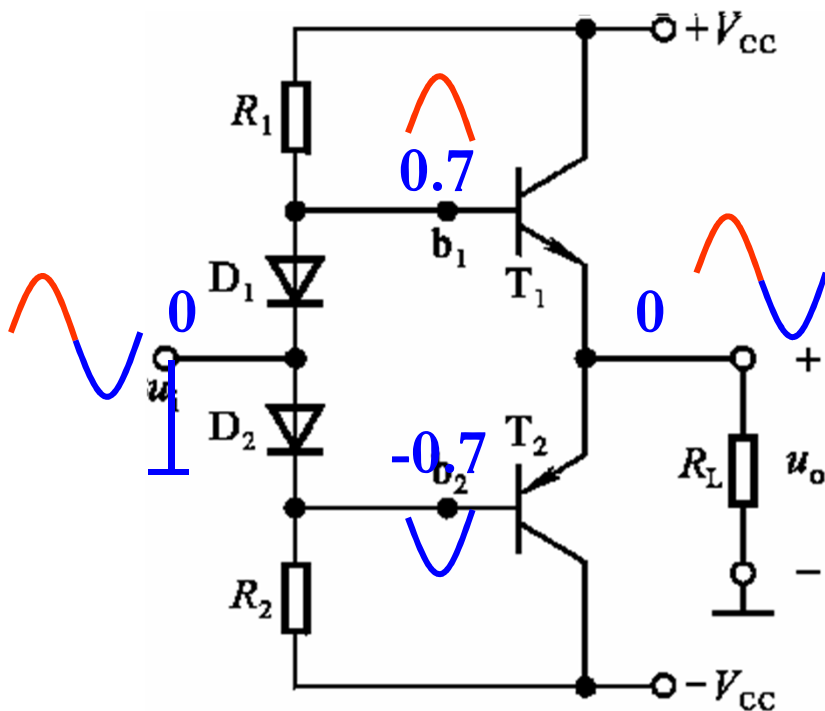
交越失真：静态时 $U_{BE1}=U_{BE2}=0$ ，当输入信号较小时不足以使 T_1 、 T_2 导通，使得 u_o 不能跟随 u_i 变化。



4、消除交越失真的互补电路

思路：给 T_1 、 T_2 的基极设置一定的静态电压，
使 T_1 、 T_2 处于微导通状态。

(1) 采用二极管

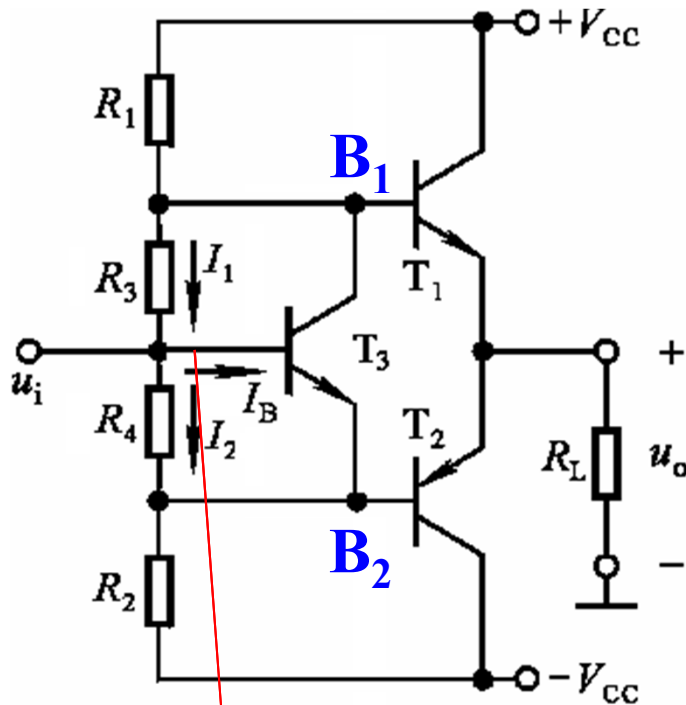


- 静态
 $U_I=0$ 、 $U_O=0$
- 动态
 u_o 跟随 u_i 变化，基本不失真

问题：

- R_1 、 R_2 能否去掉？
- 二极管的静态电流如何设置？
- 二极管动态如何等效？
- 晶体管导通时间？
- 有缺点吗？

(2) 采用 U_{BE} 倍增电路



U_{BE} 倍增电路近似等效为恒压源

$$I_1 \approx I_2 = \frac{U_{BE3}}{R_4}$$

$$U_{B1B2} \approx (R_3 + R_4)I_1 \approx \left(1 + \frac{R_3}{R_4}\right)U_{BE}$$

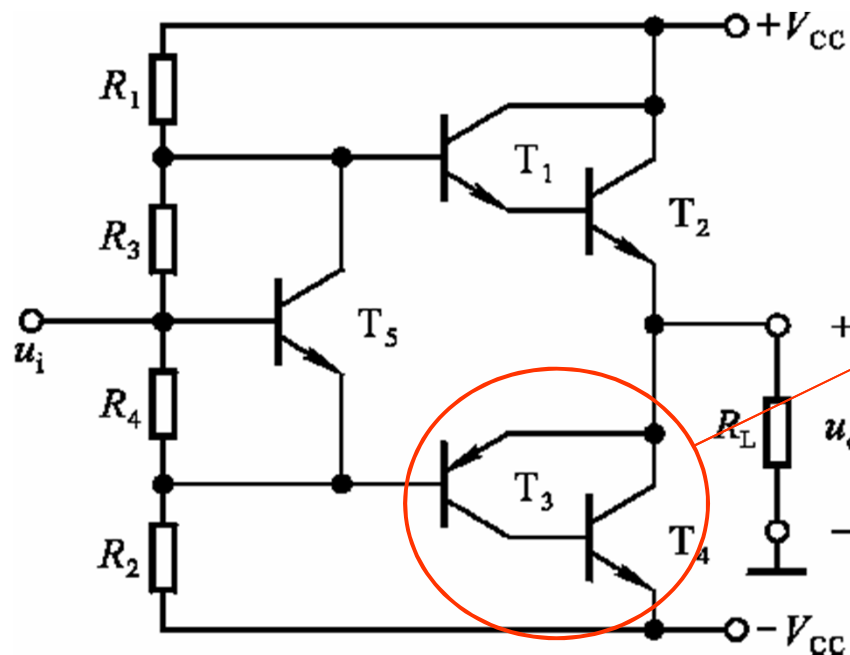
利用晶体管电路消除交越失真，通过合理选择 R_3 、 R_4 ，即可得到 U_{BE} 任意倍数的直流电压。

问题：

U_{BE} 倍增电路动态时如何等效？

5、准互补电路

为了增大输出电流，常采用复合管。在集成电路中不易做到NPN与PNP管完全对称，因而常用PNP与NPN的复合管代替PNP管，做到既对称又互补。



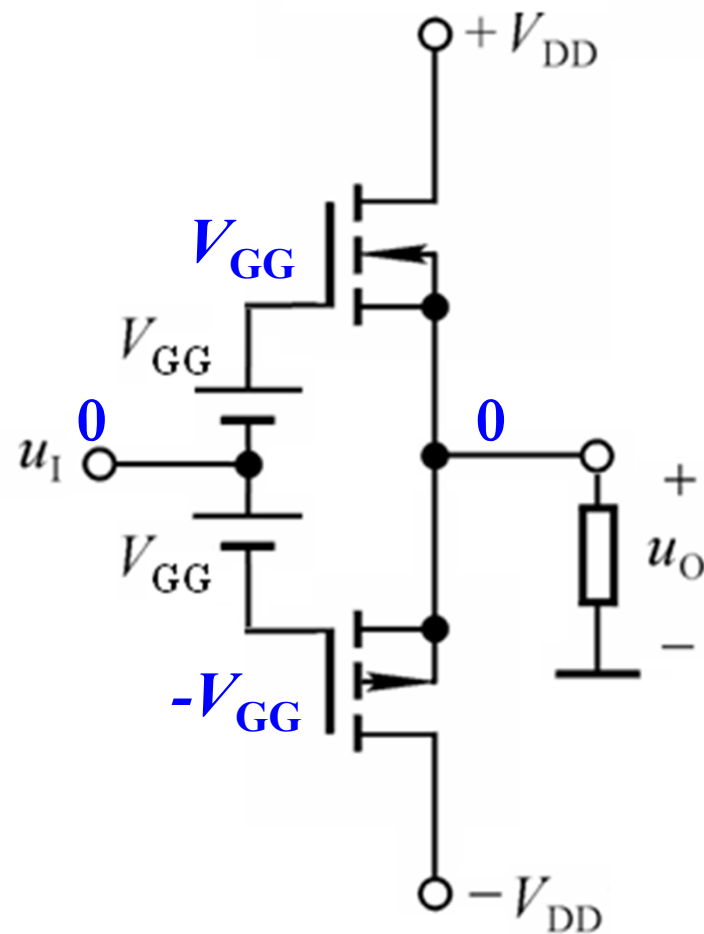
达林顿管

等效为
PNP型管

$$U_{B1B3} \approx \left(1 + \frac{R_5}{R_4}\right) U_{BE5} \approx 3U_{BE5}$$

补充：CMOS互补输出级电路

- $V_{GG} = |U_{GS(TH)}|$
- 去掉 V_{GG} ，如何设置静态？



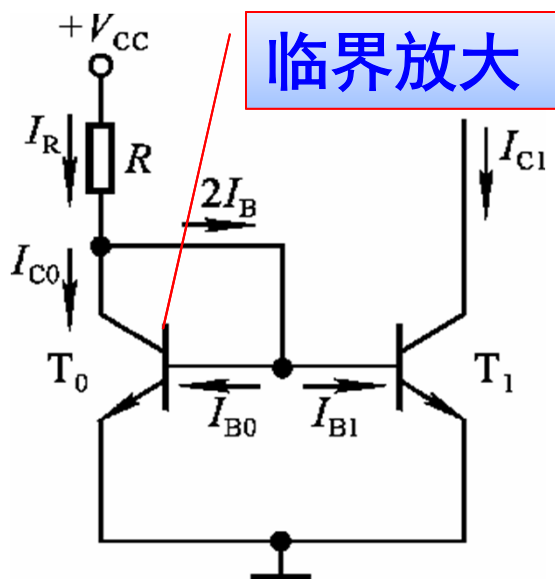


4.4 电流源 (Current Source)

集成运放中广泛采用各种电流源作为偏置电路和有源负载

1. 晶体管电流源

(1) 镜像电流源 (Current Mirror)



T_0 和 T_1 完全对称

$$U_{BE0} = U_{BE1}, \quad I_{B0} = I_{B1}, \quad I_{C0} = I_{C1}$$

$$I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE0}}{R}$$

$$I_R = I_{C0} + I_{B0} + I_{B1} = \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) I_{C1}$$

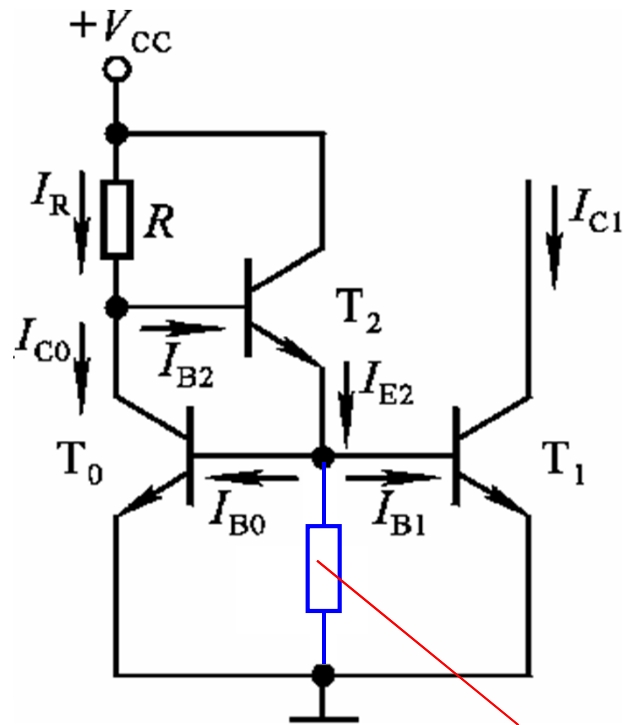
$$I_{C1} \approx I_R = \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R}$$

缺点:

- 当 β 较小时, 精度差;
- 当需要小电流时, 电阻 R 很大。

(2) 改进型镜像电流源

加射极输出器的电流源(Current Mirror with beta helper)



泄漏电阻提高
T₂的射极电流

$$\beta_0 = \beta_1 = \beta_2 = \beta$$

$$I_{C1} = I_{C0} = I_R - I_{B2}$$

$$= I_R - \frac{2I_{B1}}{1 + \beta} = I_R - \frac{2I_{C1}}{\beta(1 + \beta)}$$

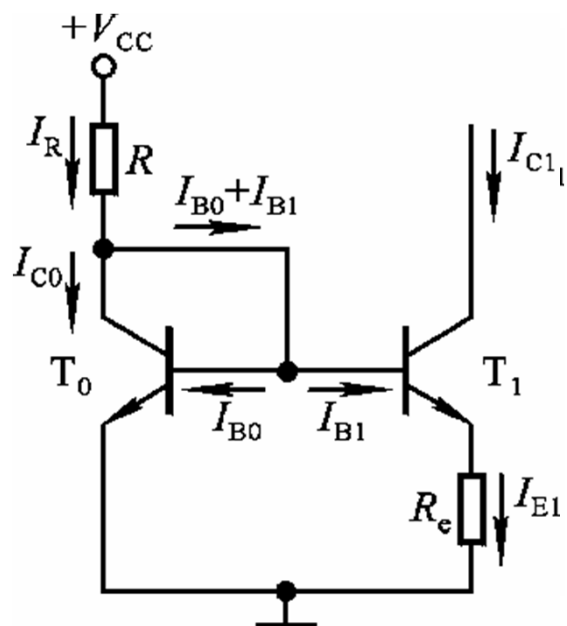
$$I_{C1} = \frac{I_R}{1 + \frac{2}{(1 + \beta)\beta}} \approx I_R$$

提高了镜像电流源的精度

$$I_R \approx \frac{V_{CC} - 2U_{BE0}}{R}$$

受 β 的
影响小

(3) 微电流源(Widlar Current Mirror)



$$I_{E1} R_e = U_{BE0} - U_{BE1}$$

$$I_{E0} \approx I_s e^{U_{BE0}/U_T}, I_{E1} \approx I_s e^{U_{BE1}/U_T}$$

$$\frac{I_{E0}}{I_{E1}} \approx e^{(U_{BE0} - U_{BE1})/U_T}$$

$$I_{E0} \approx I_R$$

$$I_{E1} \approx I_{C1}$$

$$U_{BE0} - U_{BE1} \approx U_T \ln\left(\frac{I_{E0}}{I_{E1}}\right) = I_{E1} R_e$$

$$I_{C1} \approx \frac{U_T}{R_e} \ln\left(\frac{I_R}{I_{C1}}\right)$$

通过增加射极电阻得到小而稳定的 I_{C1} (μA), 同时可提高输出电阻

实际电路设计时, 先确定所需的 I_{C1} 和 I_R , 再确定 R 和 R_e