



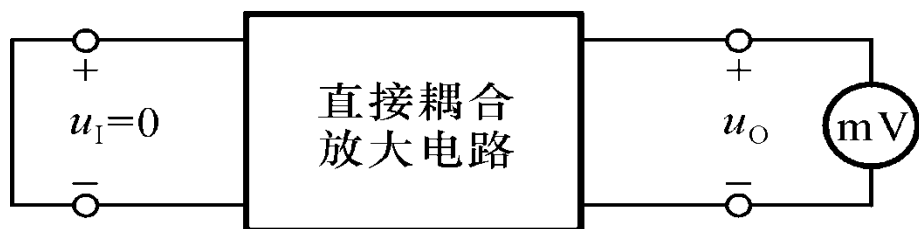
差分放大器

实验目的

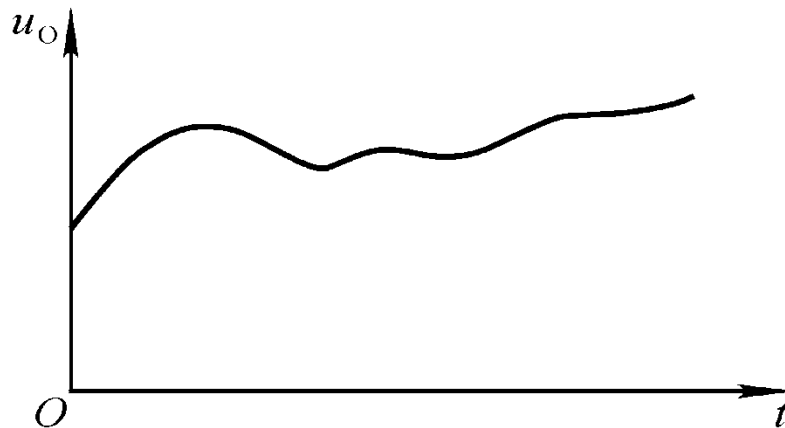
- 熟悉差分放大器的工作原理、加深理解其性能和特点；
- 掌握典型差分放大器和具有恒流源的差分放大器性能差别；
- 学习差分放大器主要性能指标的测试方法。

实验原理

直接耦合放大电路的零点漂移现象



$$\Delta u_I = 0, \Delta u_O \neq 0$$



产生的原因：电源电压的波动，温度变化，元器件的老化。

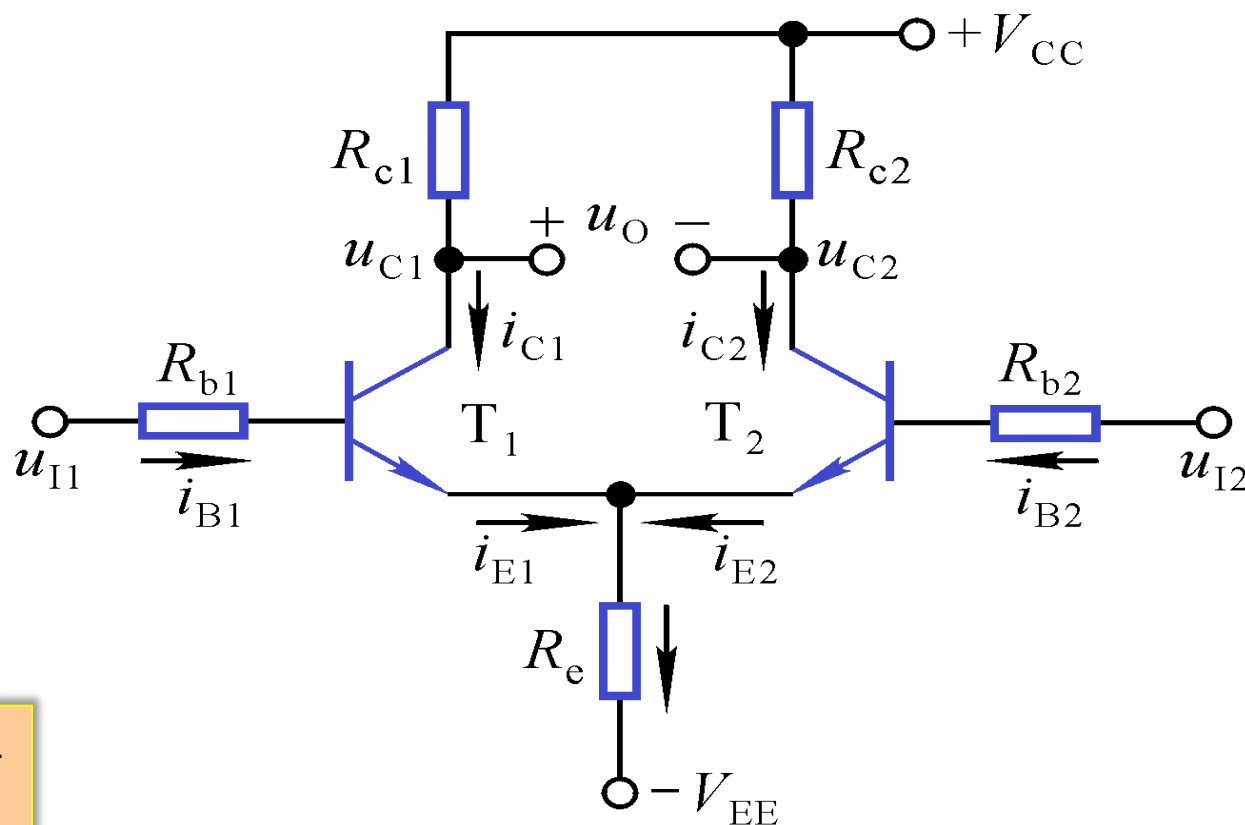
抑制的方法：引入直流负反馈，温度补偿。

有效的电路：“差分放大电路”

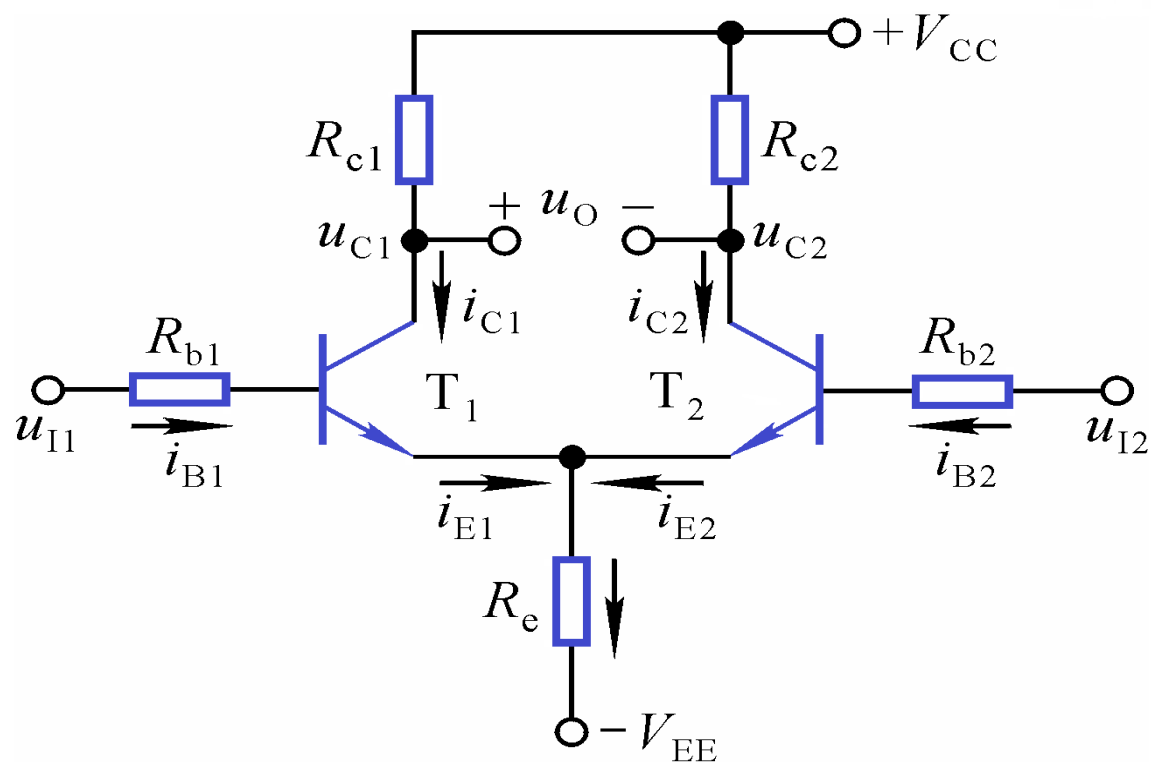
■ 典型差分放大电路

典型的差分放大电路是由两个单管放大电路，通过射极公共电阻耦合构成。

电路的参数对称，两个三极管的特性相同。



1.电路抑制零点漂移的原理



当 $u_{i1} = u_{i2} = 0$ 时:

$$u_o = U_{C1} - U_{C2} = 0$$

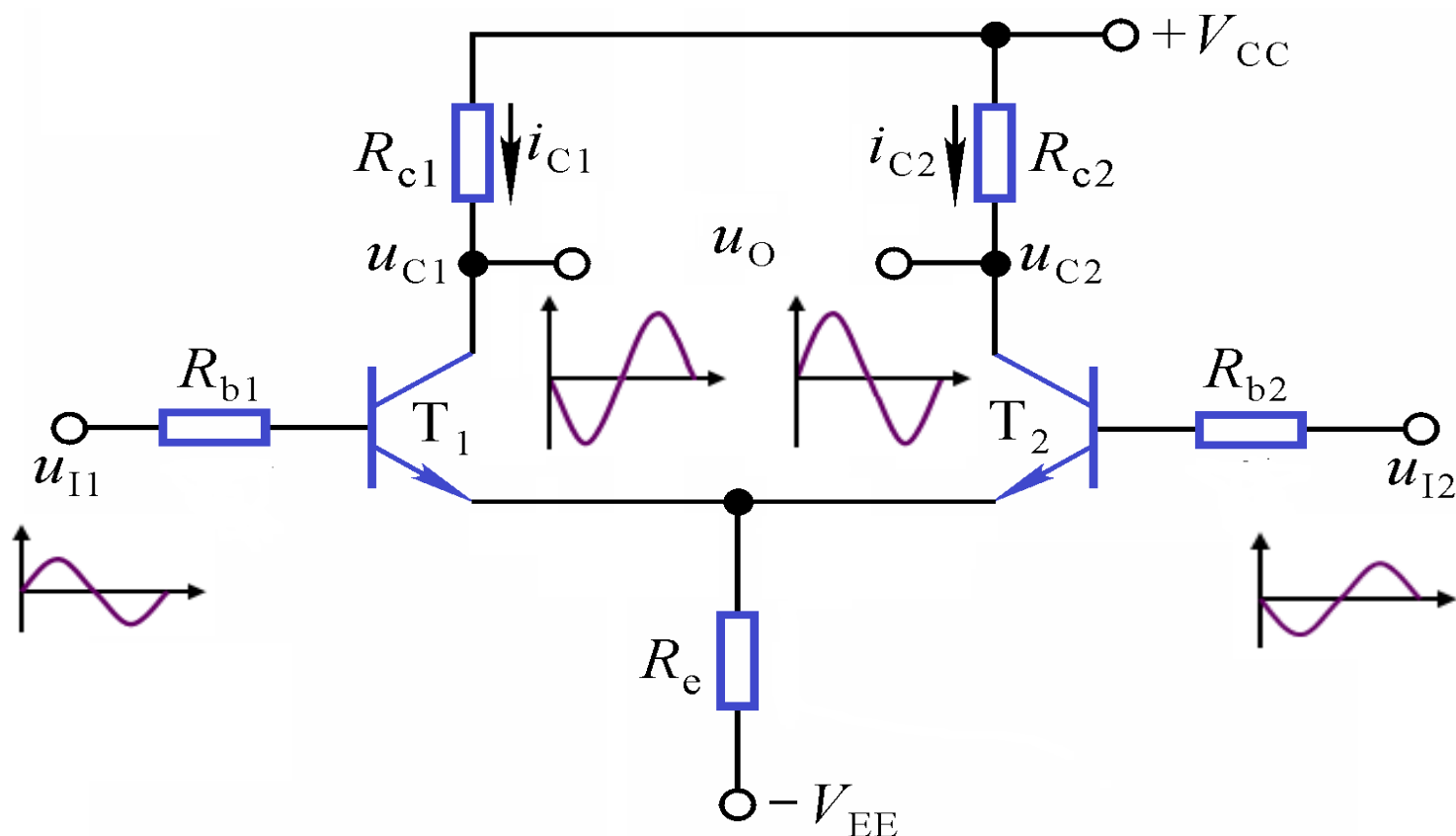
当温度变化时:

$$u_o = (U_{C1} + \Delta u_{C1}) - (U_{C2} + \Delta u_{C2}) = 0$$

2.差分放大电路的信号输入

(1) 差模信号

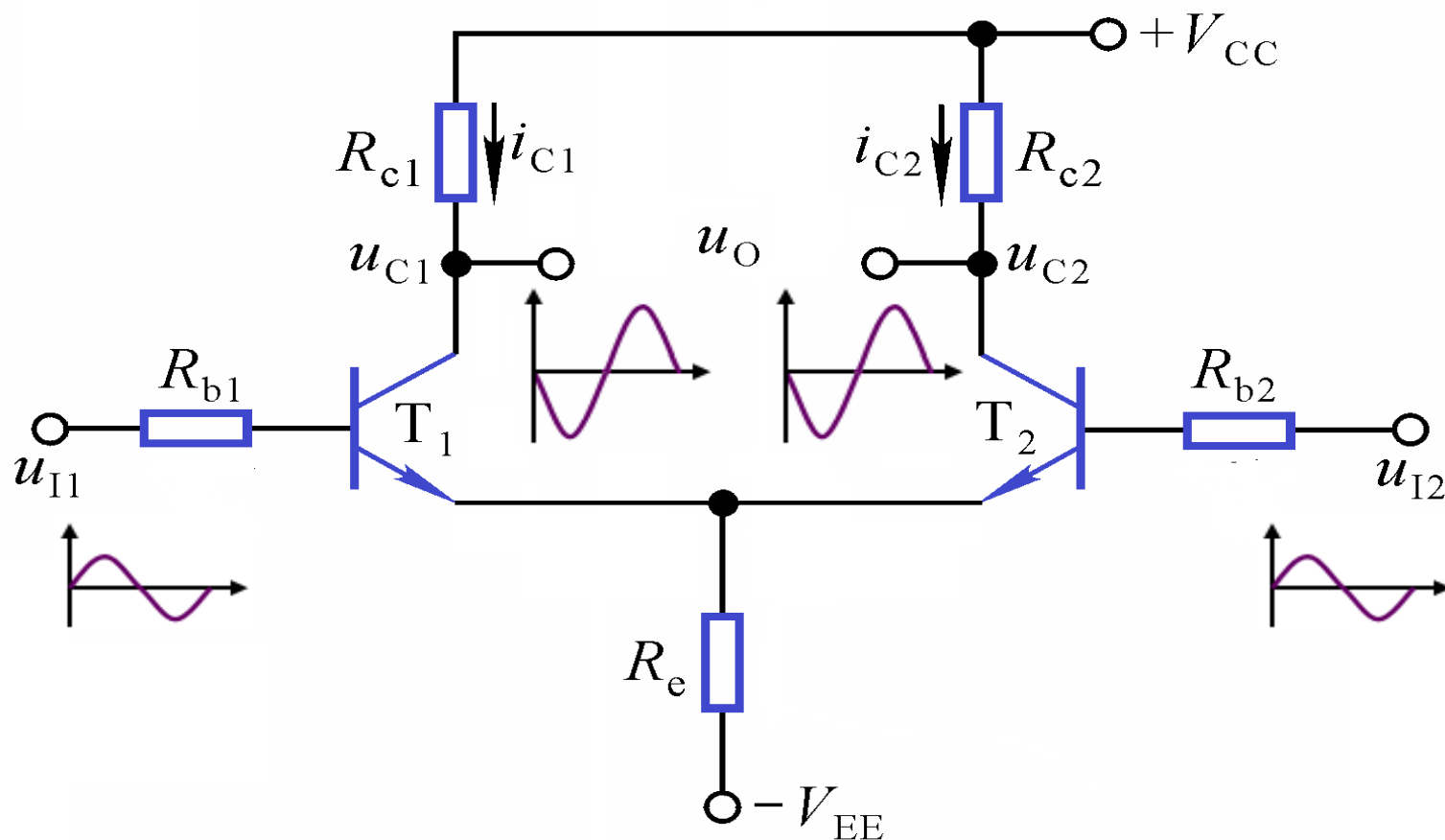
大小相等、极性相反的一对输入信号。通常为有用信号。



2.差分放大电路的信号输入

(2) 共模信号

大小相等、极性相同的一对输入信号。通常为温漂和干扰信号。



2.差分放大电路的信号输入

(3) 任意信号

通常将一对任意信号分解为差模信号 u_{id} 和共模信号 u_{ic} 两部分,来分别定义差模信号和共模信号。

差模信号

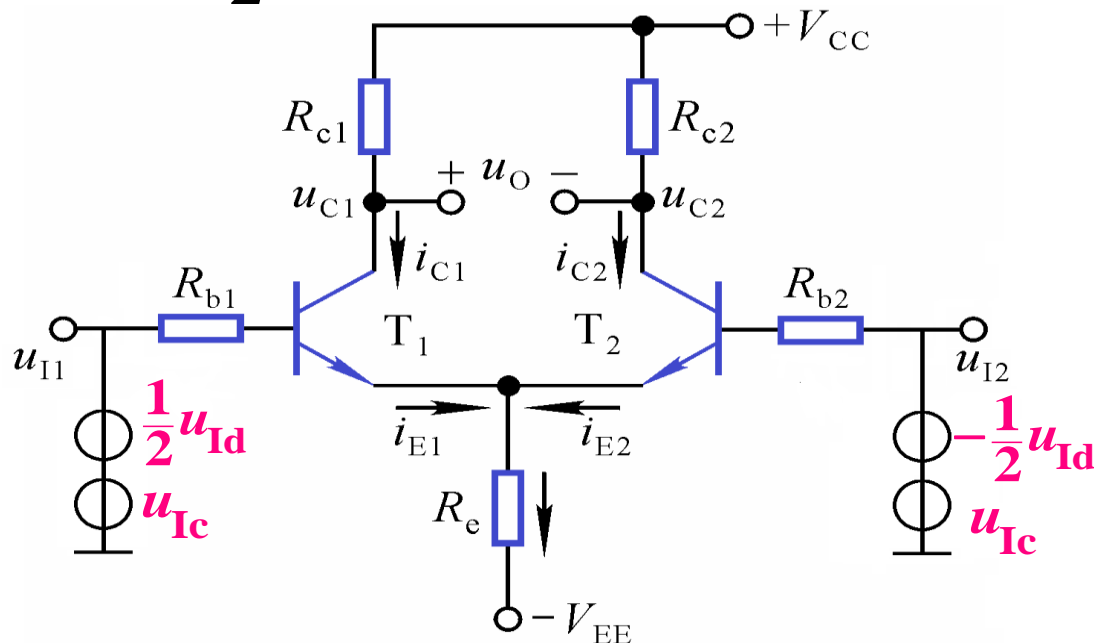
$$u_{Id} = u_{I1} - u_{I2}$$

共模信号

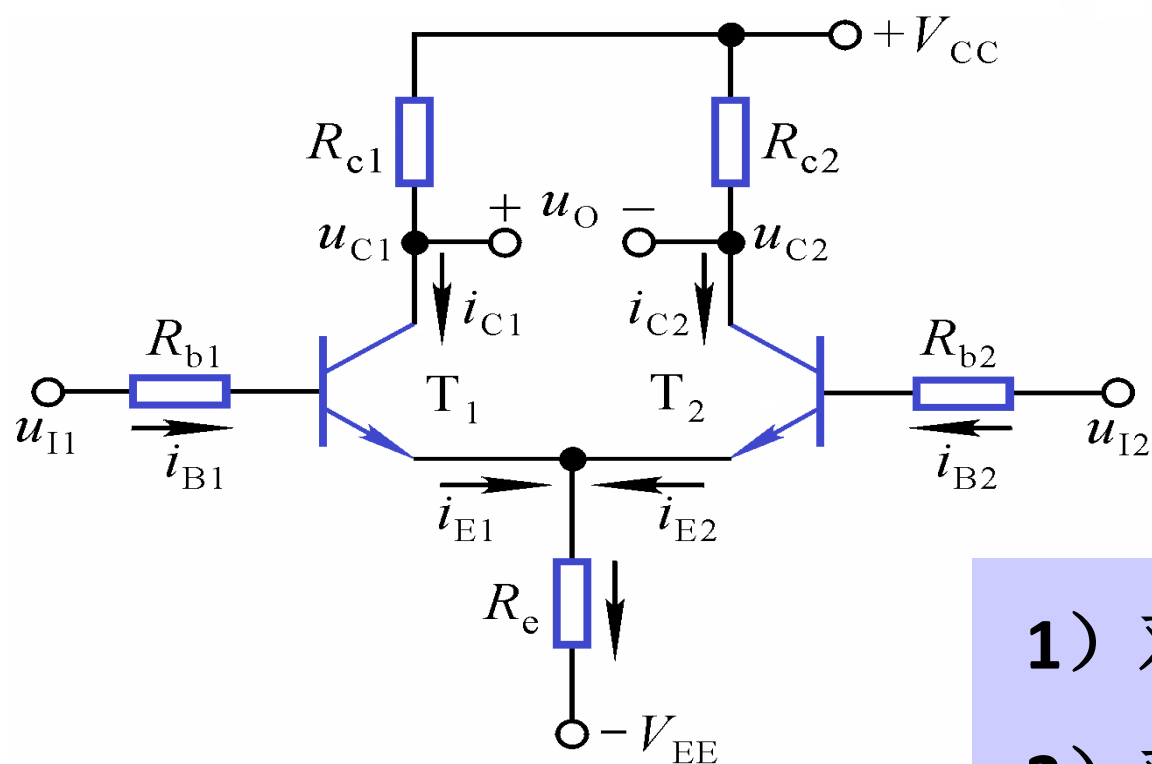
$$u_{Ic} = \frac{u_{I1} + u_{I2}}{2}$$

$$u_{I1} = \frac{1}{2}u_{Id} + u_{Ic}$$

$$u_{I2} = -\frac{1}{2}u_{Id} + u_{Ic}$$



3. 差分放大电路的输入输出方式

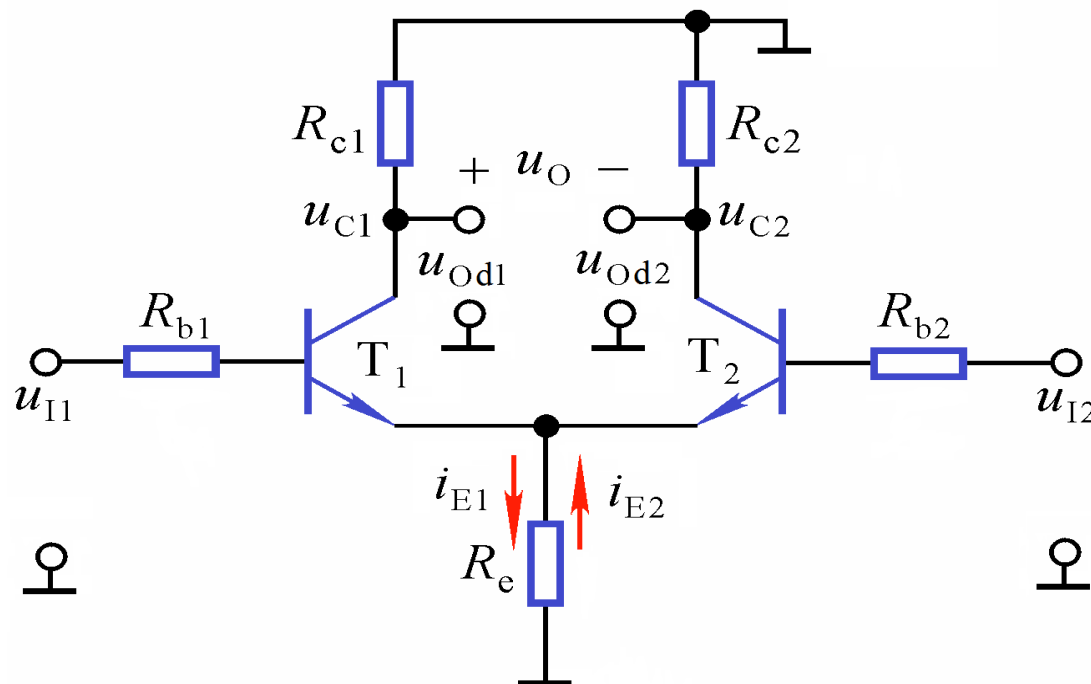


- 1) 双端输入-双端输出
- 2) 双端输入-单端输出
- 3) 单端输入-双端输出
- 4) 单端输入-单端输出

4.对差模信号的放大作用

$u_{I1} = -u_{I2}$, i_{E1} 和 i_{E2} 大小相等, 方向相反, 因此在 R_e 上产生的交流压降为0。

所以把 R_e 视为交流短路, R_e 对差模信号不起作用。



双入双出差分放大电路的交流通路

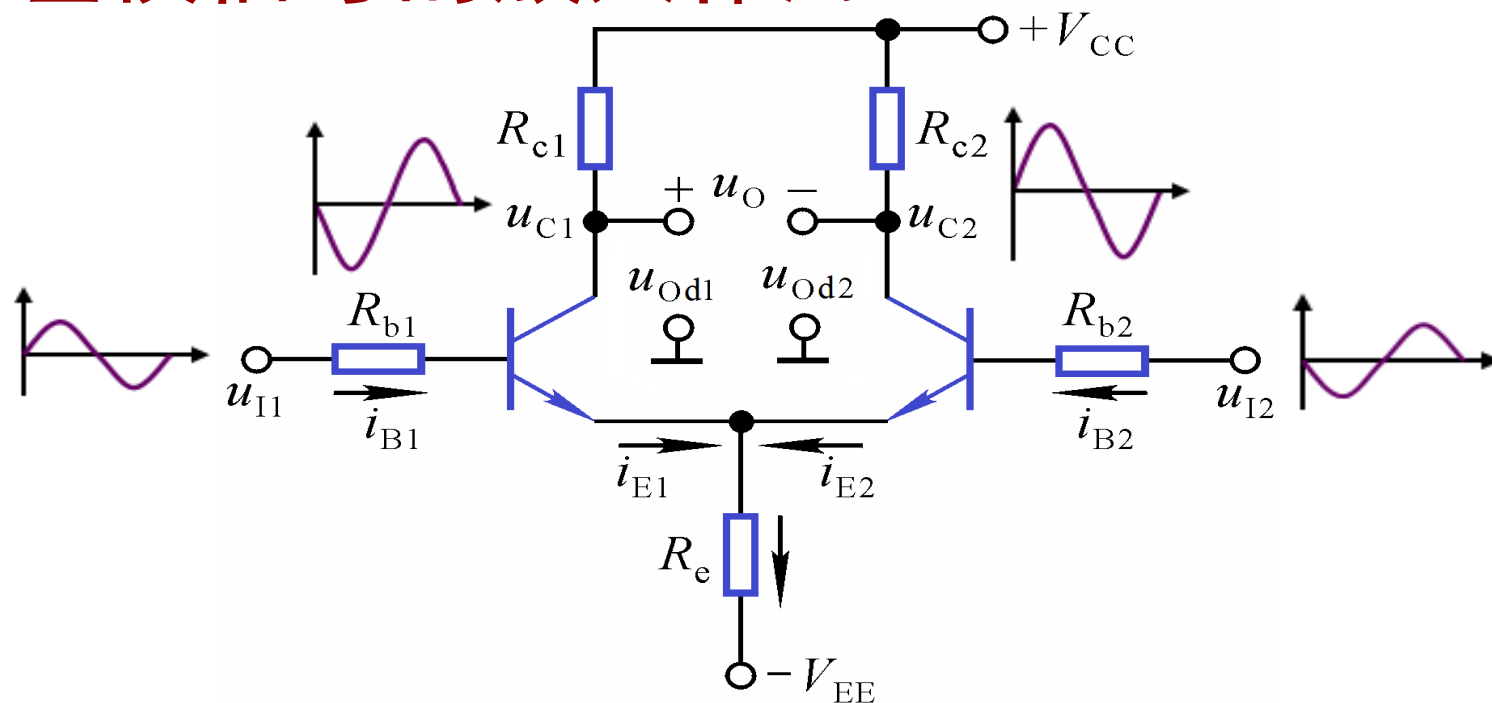
单端输入: 令 $u_{I1} = u_I$, $u_{I2} = 0$

$$\begin{aligned} u_{I1} &= \frac{1}{2} u_I + \frac{1}{2} u_I \\ u_{I2} &= \frac{1}{2} u_I - \frac{1}{2} u_I \end{aligned}$$

共模信号 差模信号

在单端输入时, 差模信号输入的同时总是伴随着共模信号的输入。

4.对差模信号的放大作用



差模放大倍数 A_d :

$$\text{双端输出: } A_d = \frac{u_{Od}}{u_{Id}} = \frac{u_{Od1} - u_{Od2}}{u_{I1} - u_{I2}} = \frac{2u_{Od1}}{2u_{I1}} = -\beta \frac{R_c}{R_b + r_{be}}$$

$$\text{单端输出: } A_{d1} = \frac{u_{Od1}}{u_{Id}} = \frac{u_{Od1}}{2u_{I1}} = \frac{1}{2} A_d$$

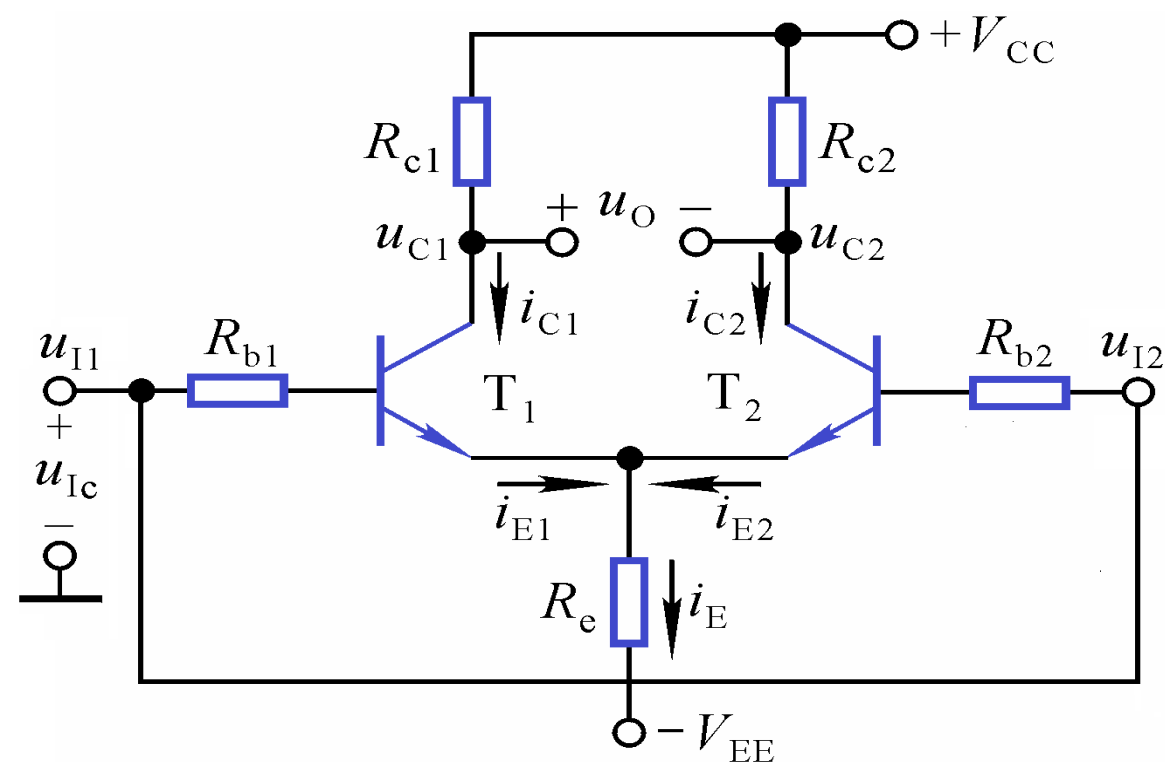
A_d 同单管
电路的 A_u

差分放大电路四种接法的性能比较

接法 性能	双端输入 双端输出	双端输入 单端输出	单端输入 双端输出	单端输入 单端输出
A_d	$-\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$	$-\frac{1}{2} \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$	$-\frac{\beta(R_c // \frac{R_L}{2})}{R_b + r_{be}}$	$-\frac{1}{2} \frac{\beta(R_c // R_L)}{R_b + r_{be}}$
R_{od}	$2R_c$	R_c	$2R_c$	R_c
R_{id}	$2(R_b + r_{be})$	$2(R_b + r_{be})$	$2(R_b + r_{be})$	$2(R_b + r_{be})$

◆ 双端输出时的差模放大倍数、输出电阻是单端输出时的2倍

5.对共模信号的抑制作用

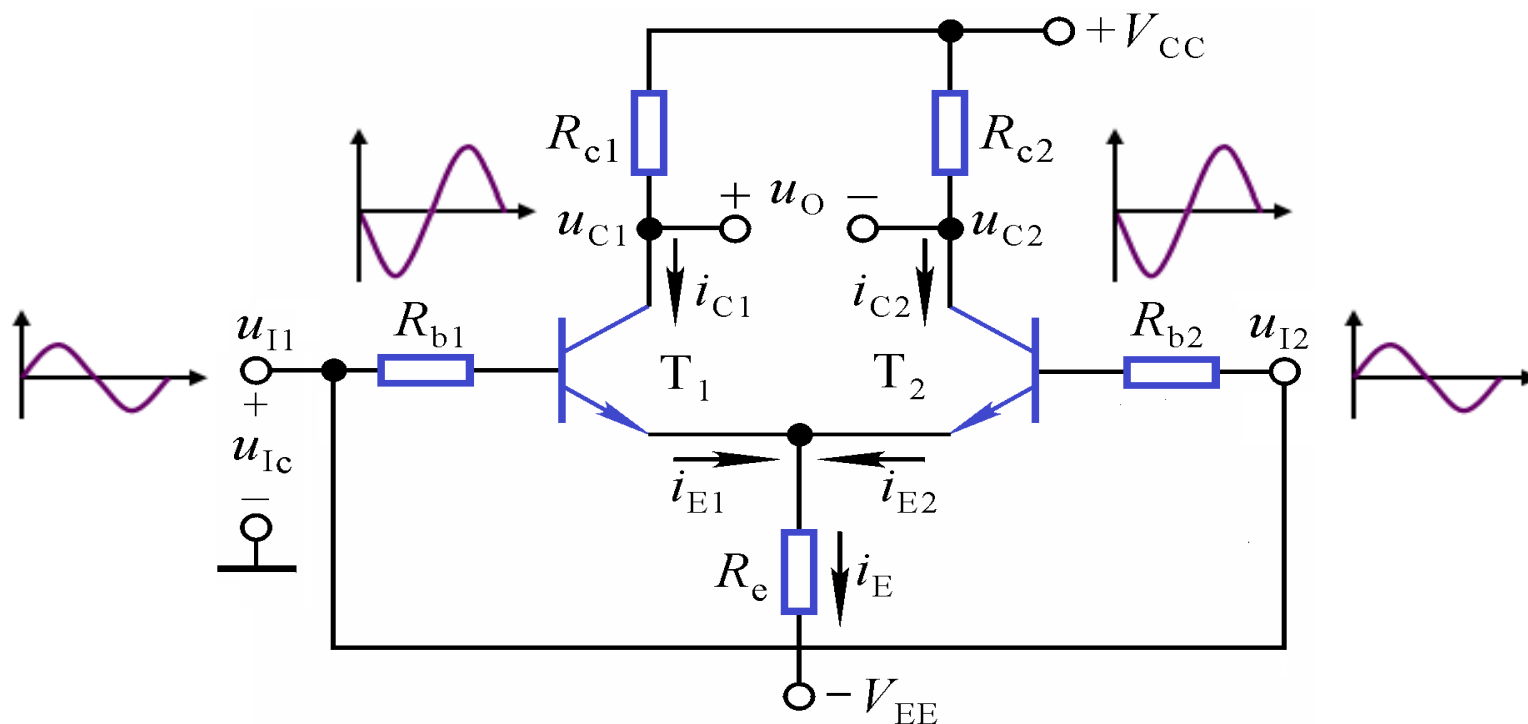


$u_{I1}=u_{I2}=u_{Ic}$, i_{E1} 和 i_{E2} 大小相等, 方向相同, $i_E=i_{E1}+i_{E2}$ 。

R_e 对共模信号的负反馈作用抑制了信号中的共模成分, R_e 越大, 负反馈作用越强, 抑制效果越好。

如 $T(^{\circ}\text{C})\uparrow (u_{Ic}\uparrow) \rightarrow i_{C1}\uparrow i_{C2}\uparrow \rightarrow i_E\uparrow \rightarrow u_E\uparrow \rightarrow u_{BE1}\downarrow u_{BE2}\downarrow \rightarrow i_{B1}\downarrow i_{B2}\downarrow \rightarrow i_{C1}\downarrow i_{C2}\downarrow$

5.对共模信号的抑制作用

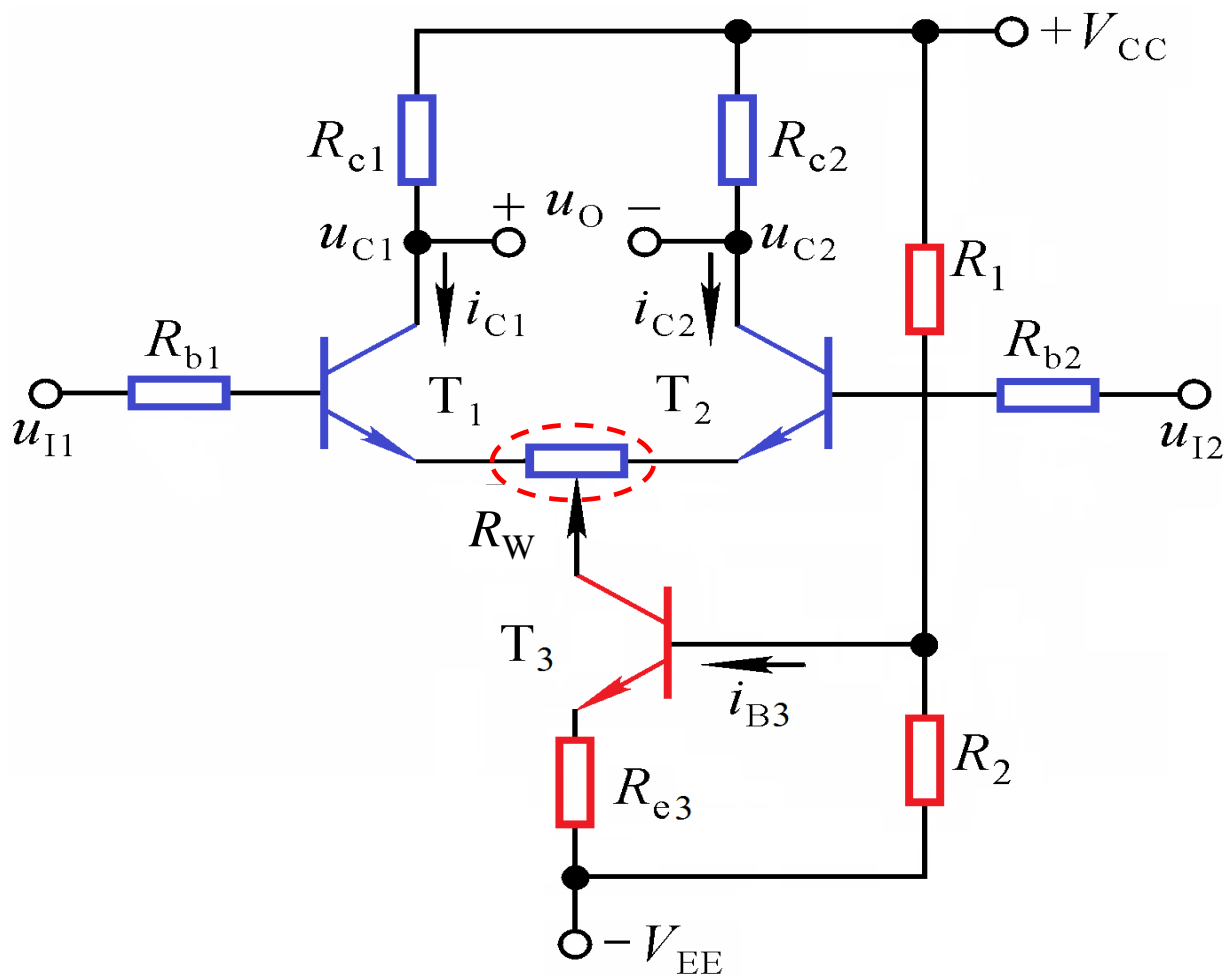


共模放大倍数 A_c :

$$\text{双端输出: } A_c = \frac{u_{Oc}}{u_{Ic}} = \frac{u_{Oc1} - u_{Oc2}}{u_{Ic}} = \frac{0}{u_{Ic}} = 0 \quad (\text{理想})$$

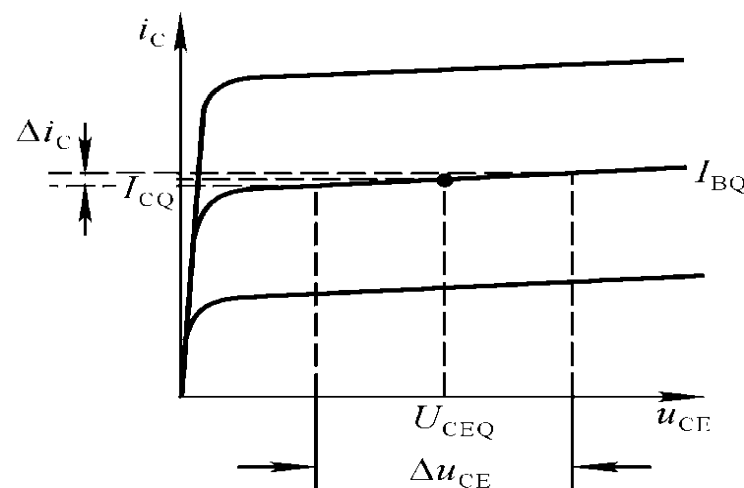
$$\text{单端输出: } A_{c1} = \frac{u_{Oc1}}{u_{Ic}} = \frac{-\beta R_c}{R_b + r_{be} + 2(1 + \beta)R_e} \approx -\frac{R_c}{2R_e}$$

■ 具有恒流源的差分放大电路



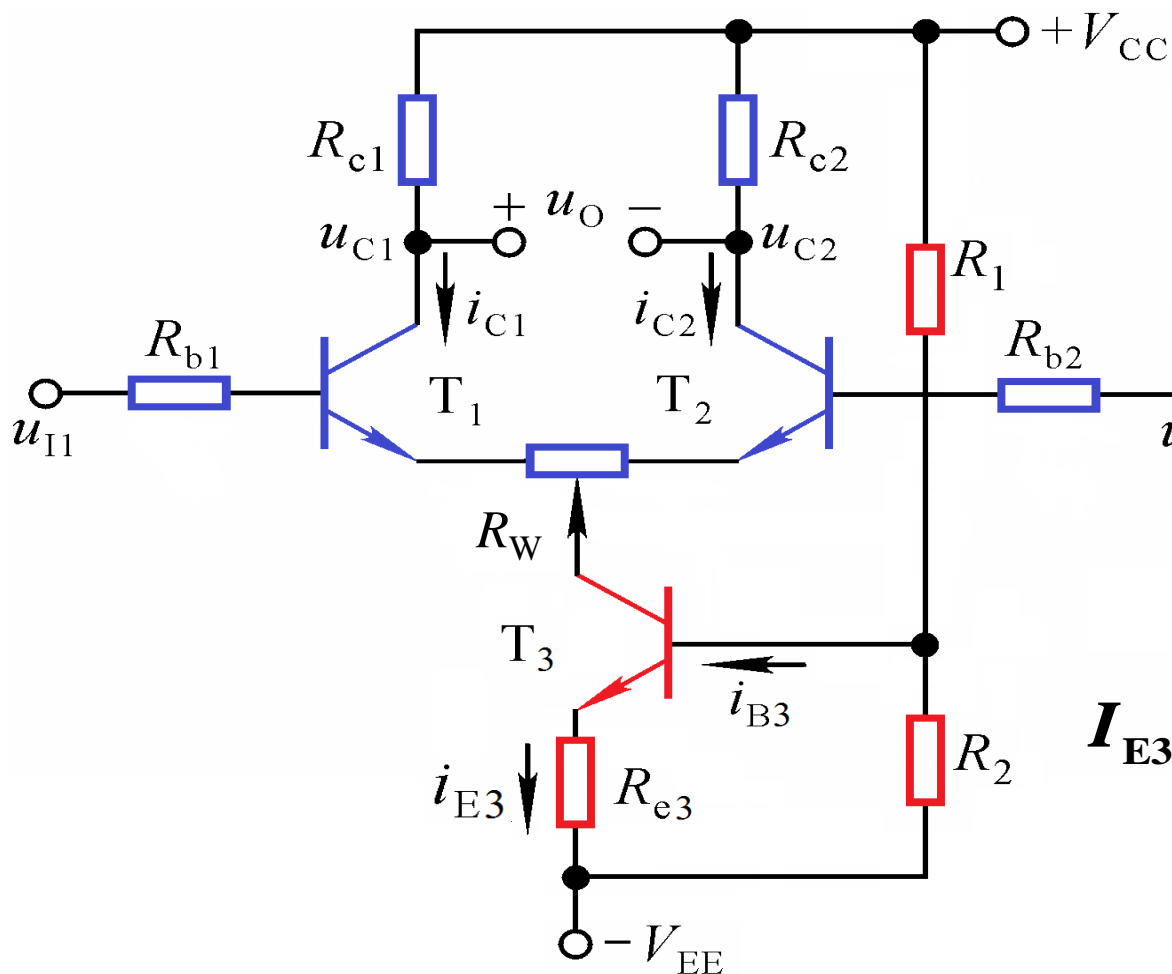
用恒流源代替 R_e ，因为 i_{B3} 一定时，工作在放大区的 i_{C3} 基本恒定。其交流电阻为

$$r_{ce} = \left. \frac{\Delta u_{CE}}{\Delta i_C} \right|_{i_B = \text{定值}}$$



$$R'_e \approx r_{ce3} \left(1 + \frac{\beta R_{e3}}{r_{be3} + R_{b3} + R_{e3}} \right) \quad \text{其中 } R_{b3} = R_1 // R_2$$

■ 具有恒流源的差分放大电路



静态工作点

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_{C3} \approx \frac{1}{2} I_{E3}$$

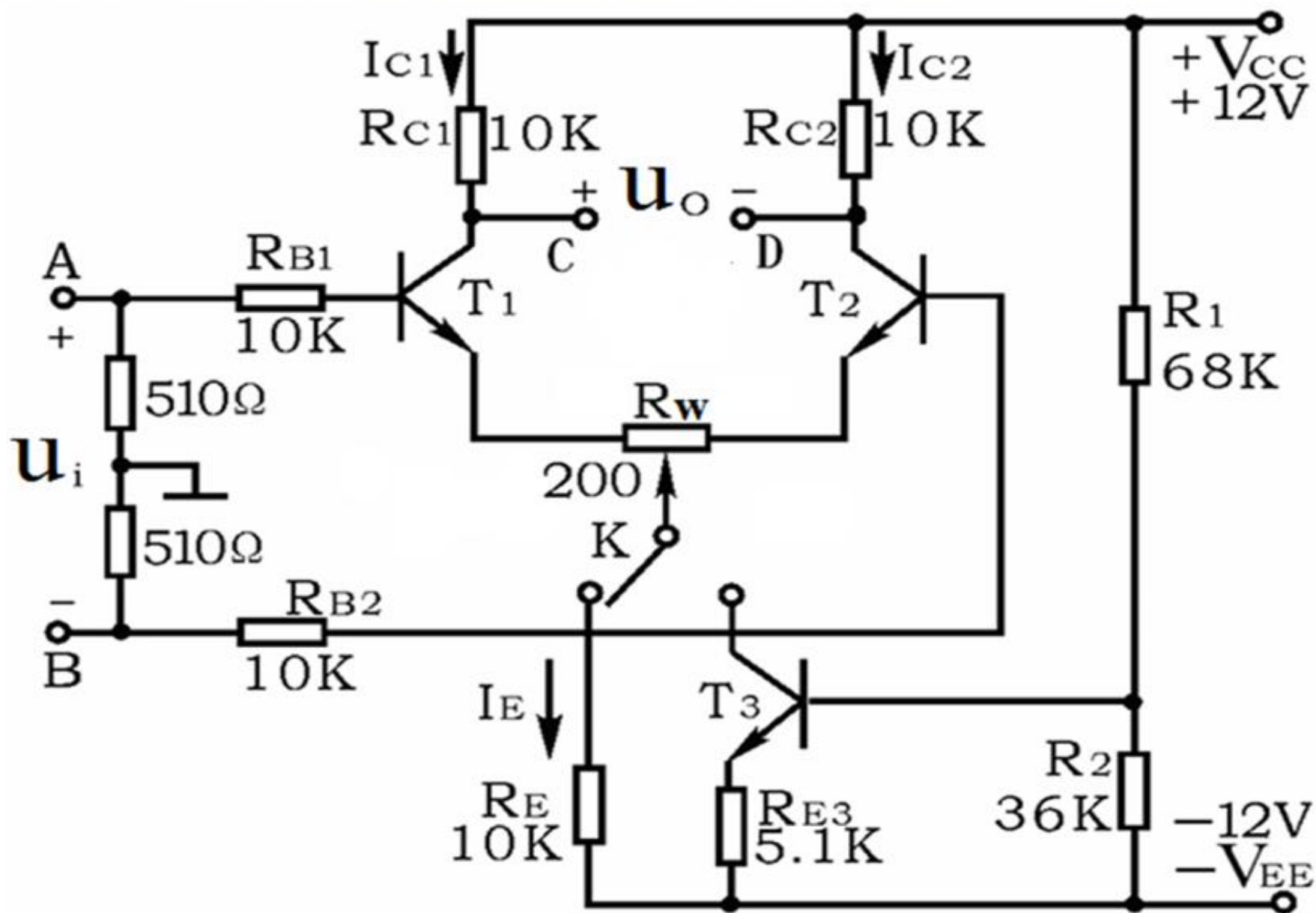
$$I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} (V_{CC} + |V_{EE}|) - U_{BE3}}{R_{E3}}$$

共模抑制比 K_{CMR}

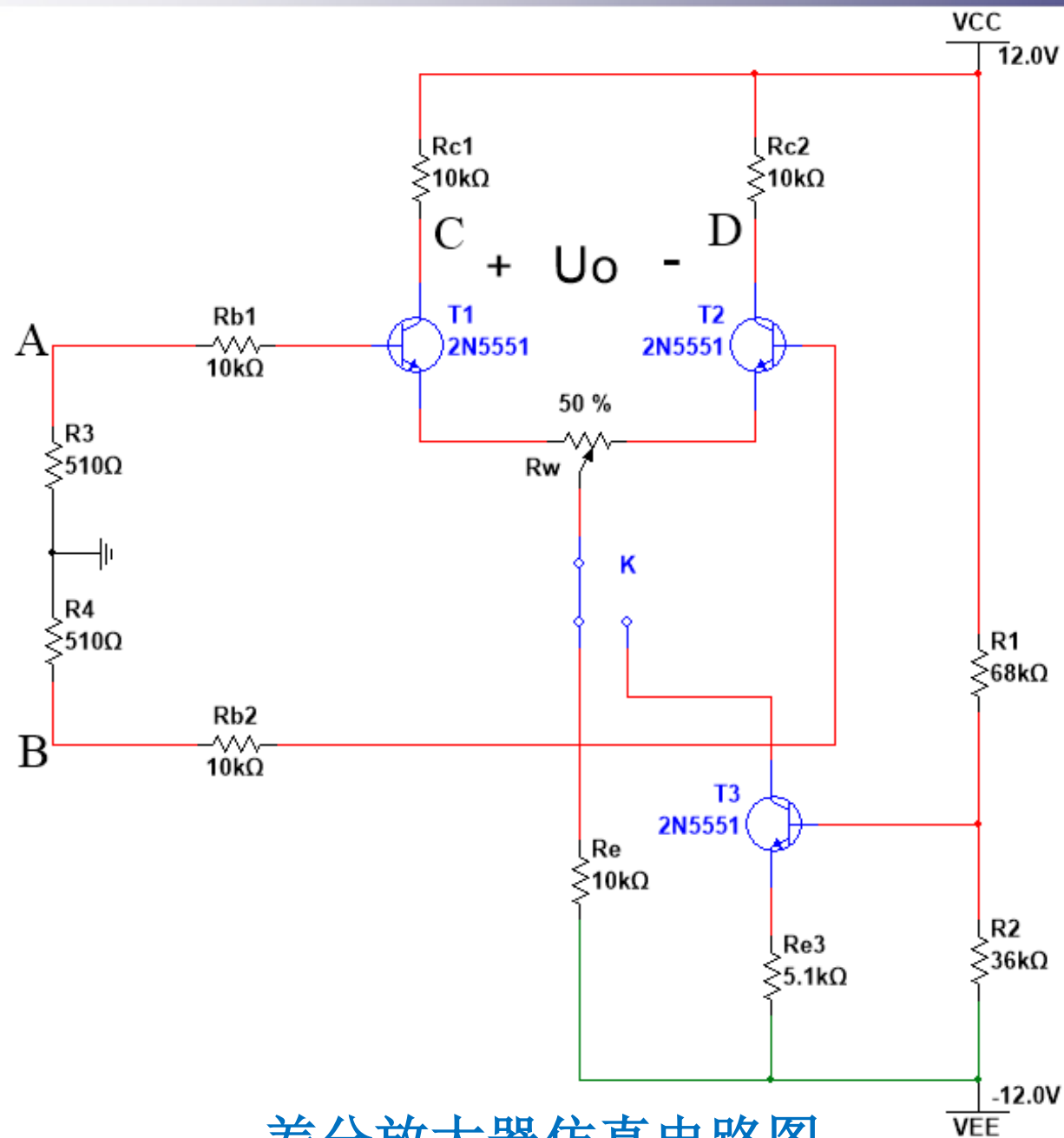
$$K_{CMR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

A_d 越大, A_c 越小, K_{CMR} 就越大, 差分放大电路的性能越好。在电路参数理想对称的情况下, $K_{CMR} = \infty$ 。因其数值大, 通常用分贝 (dB) 表示:

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$



差分放大器实验原理图



差分放大器仿真电路图

- 本实验中晶体管T1、T2为2N5551，是一对差分对管。
- R_w 为调零电位器，如果电路不对称，调节 R_w ，使输出电压 u_o 在静态时为零。
- 当开关K置左边时，构成典型的差分放大器。当开关K置右边时，构成具有恒流源的差分放大器。

实验内容

1. 直流工作点的测试:

K先置左边（**典型**），输入**A、B短路并接地**，万用表接到输出**C、D**点，调**R_w**使表为零，电路处于对称平衡状态，万用表**直流电压档**测差分对管的集电极、发射极、基极电位，填入下表。**K**再置右边（**具有恒流源**），重复上述过程。

K	U_{C1}	U_{E1}	U_{B1}	U_{C2}	U_{E2}	U_{B2}
置左边						
置右边						

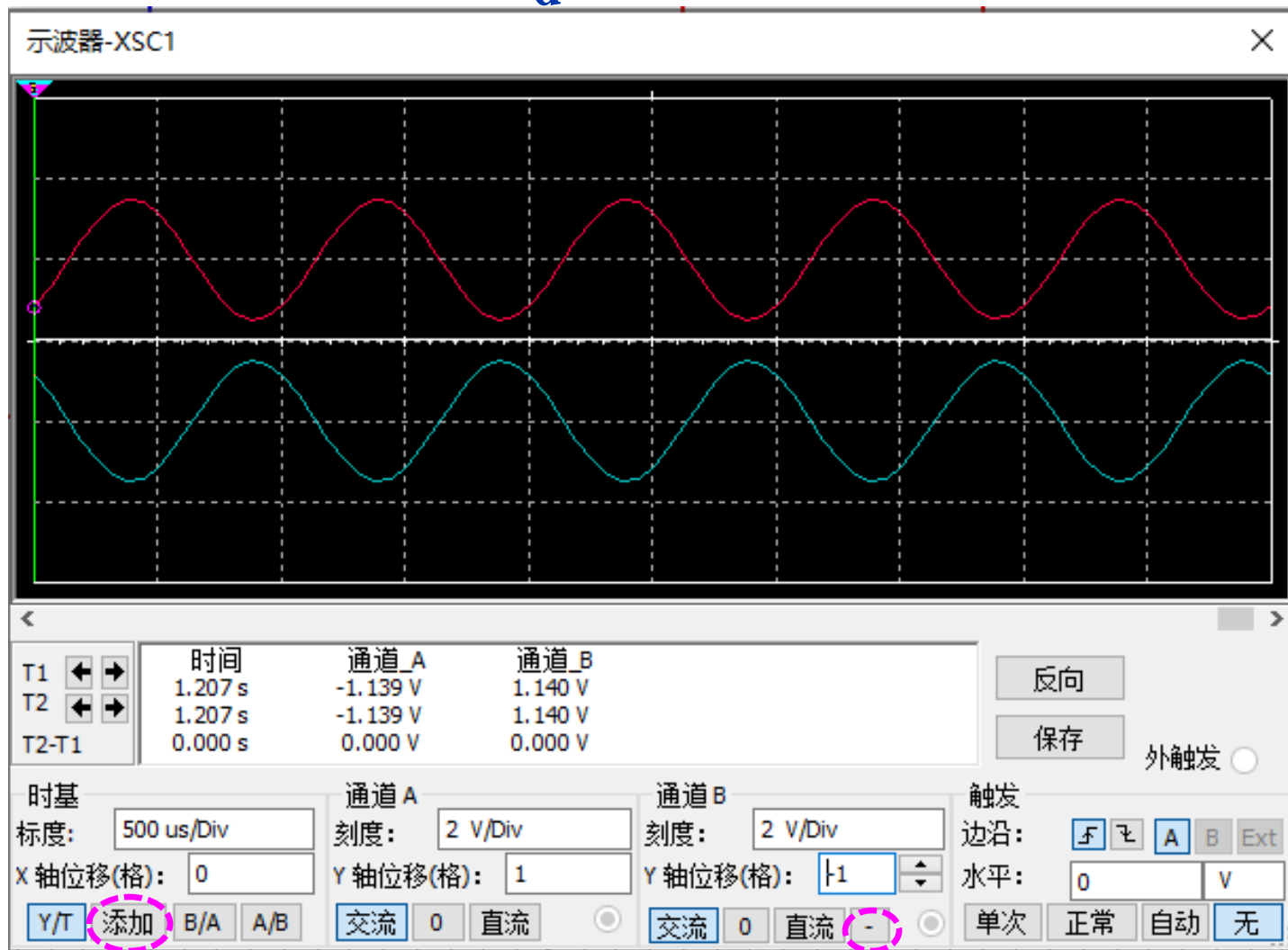
2. 测量差模放大倍数 A_d ：

双端输入-单端输出、双端输出 ($R_L=\infty$):

从A端、B端输入 $u_{Id}=140\text{mV}$ (峰峰值), $f=1\text{KHz}$ 的正弦信号, 用万用表 ACV 档测量差模 u_{Id} 、 $u_{Od1}(C)$ 、 $u_{Od2}(D)$ 和 u_{Od} 的值, 填入下表; 并用示波器测量记录 u_{Od1} 、 u_{Od2} 和 u_{Od} 的波形。

K	u_{Id}	u_{Od1}	u_{Od2}	u_{Od}	$A_d=u_{Od}/u_{Id}$	$A_{d1}=u_{Od1}/u_{Id}$
置左边						
置右边						

2. 测量差模放大倍数 A_d ：（续）



上图为单端输出仿真结果，双端输出可选择CHA-CHB

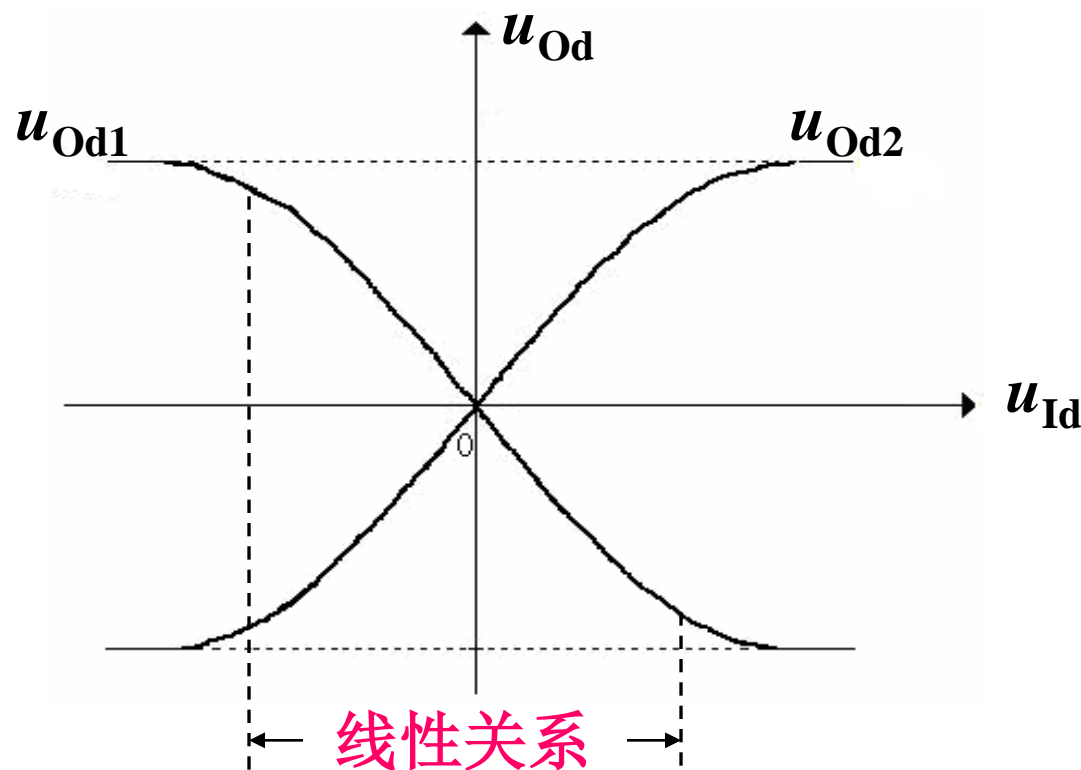
3. 测量共模放大倍数 A_c :

将A、B两点短路，从AB输入正弦信号 $u_{Ic}=600\text{mV}$ (峰峰值)， $f=1\text{KHz}$,用万用表ACV档测量共模 u_{Ic} 、 u_{Oc1} (C)、 u_{Oc2} (D)和 u_{Oc} 的值，填入下表，并用示波器测量记录 u_{Oc1} 、 u_{Oc2} 和 u_{Oc} 的波形。

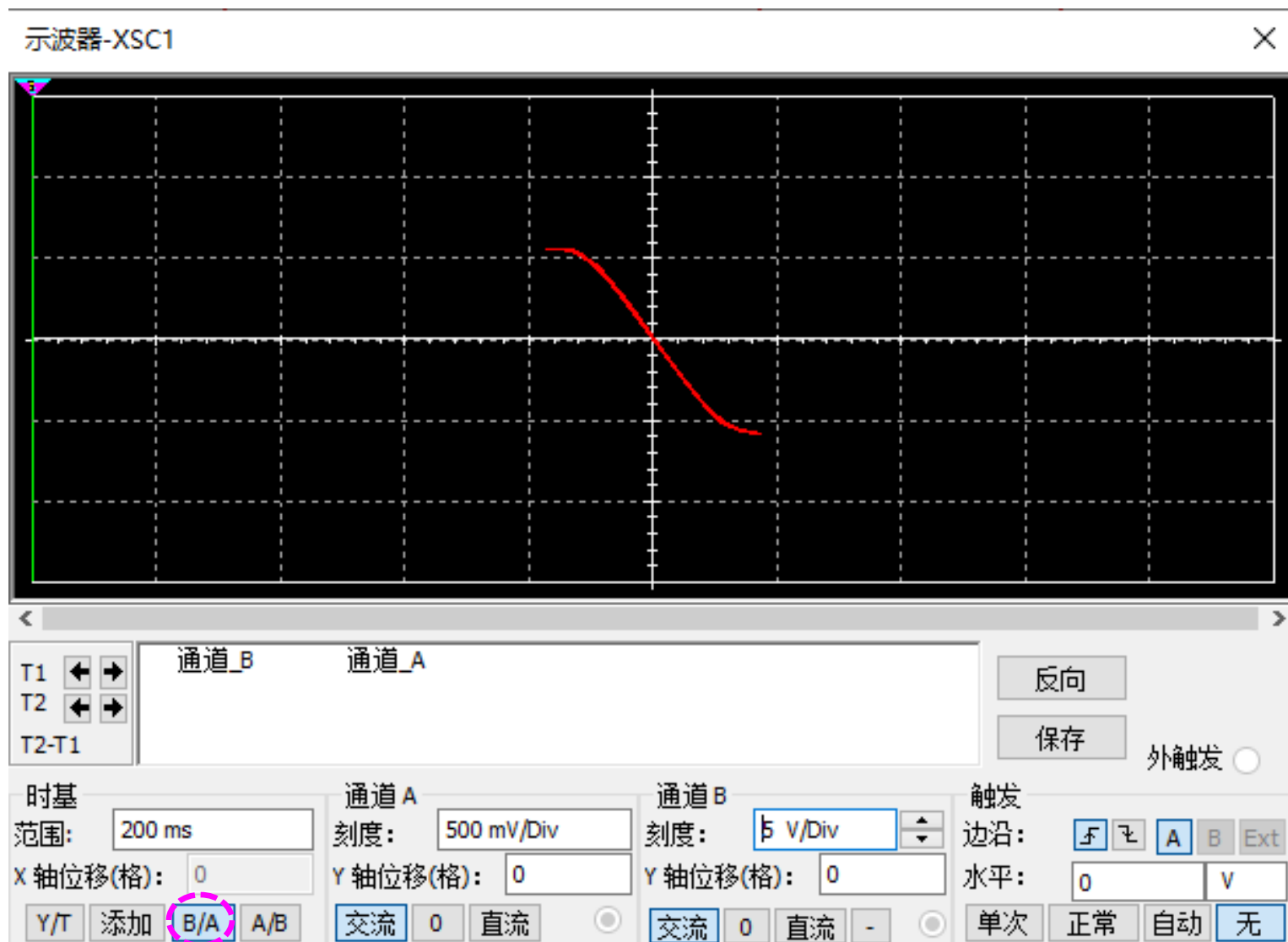
K	u_{Ic}	u_{Oc1}	u_{Oc2}	u_{Oc}	$A_c=u_{Oc}/u_{Ic}$	$A_{c1}=u_{Oc1}/u_{Ic}$
置左边						
置右边						

*4. 测量差模电压传输特性: (选做)

K置左边 (典型), 从A端输入正弦信号 $f=1\text{KHz}$, B接地, 用示波器的X-Y模式观察电压传输特性曲线, 逐渐增大 u_{Id} , 使输出进入限幅区, 观察并记录差模电压传输特性曲线。分别测出线性区的斜率 $K_1=u_{Od1}/u_{Id}$, $K_2=u_{Od2}/u_{Id}$ 。



*4. 测量差模电压传输特性: (选做)



5. 计算共模抑制比 K_{CMR} :

$$K_{\text{CMR}} = 20\lg \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad (\text{双端输出})$$

典型差分放大电路	K_{CMR}	
恒流源差分放大电路	K_{CMR}	

思考题:

1. 为什么电路在工作前需进行调零?
2. 差分放大器的差模输出电压是与输入电压的差还是与输入电压的和成正比?
3. 单端输出对共模信号是否具有抑制作用?

实验设备与器件

函数发生器

直流电源

示波器

万用表

三极管**2N5551**

电位器

电阻若干