

差动放大器

实验目的

1

熟悉差分放大器的工作原理，加深理解其性能和特点

2

学习差动放大器静态工作点的设置方法、掌握差模电压增益 A_{ud} 、共模电压增益 A_{uc} 、共模抑制比 K_{CMR} 、输入阻抗、输出阻抗等主要性能指标的测试方法。

3

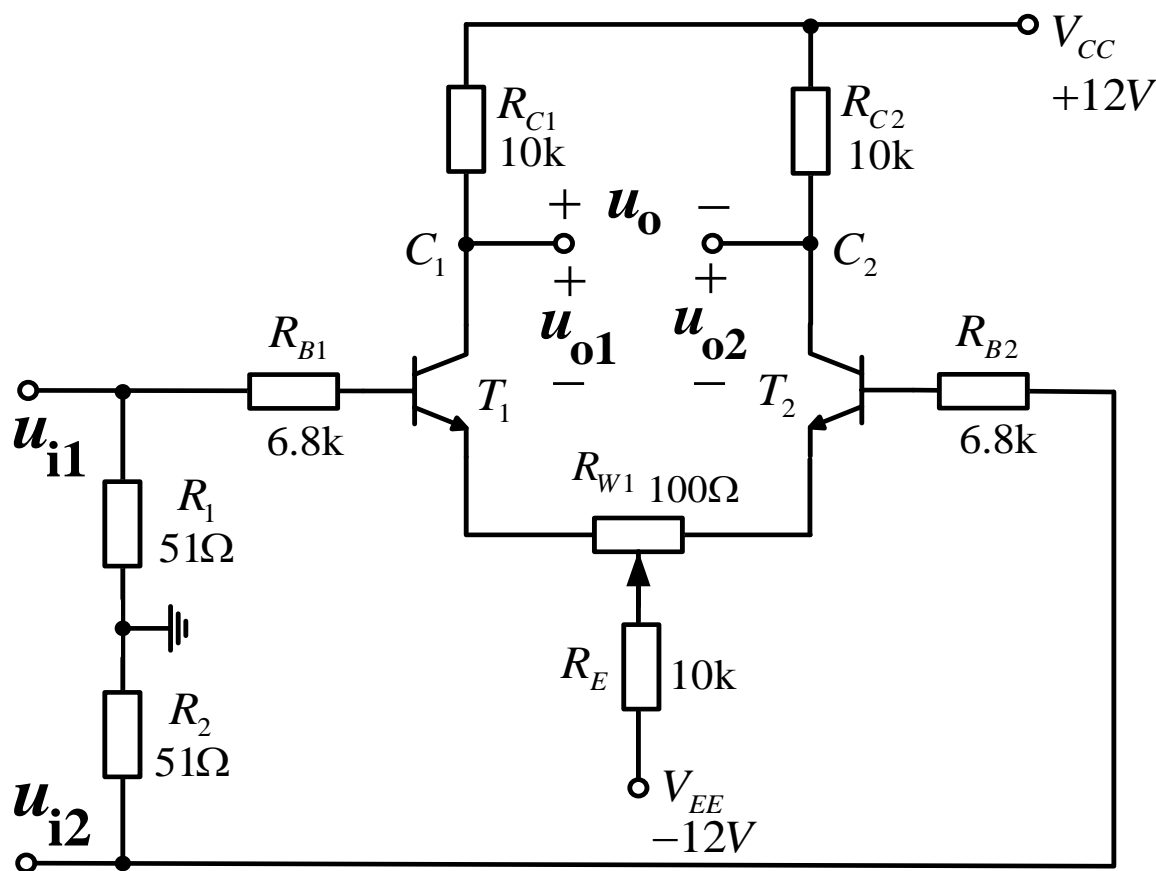
了解基本差动放大器与具有镜像恒流源的差动放大器的性能差别。





实验原理

■ 典型差动放大电路



±12V用实验箱右上角的

电路结构对称，参数相等，两个三极管的输入、输出特性相同。调节 R_{W1} 电位器可以适当修正电路对称性

差模输入：两个输入端分别加入大小相等，极性相反的信号

共模输入：两个输入端同时加入大小和极性都相同的信号



实验原理

1. 差动放大器的主要性能指标

差模电压增益 A_{ud} :

指差动放大电路对差模输入信号的放大倍数。差模电压增益越大，放大电路的性能越好。

$$A_{ud} = \frac{\Delta U_{od}}{\Delta U_{id}}$$

共模电压增益 A_{uc} :

指差动放大电路共模输入信号的放大倍数。共模电压增益越小，放大电路的性能越好。

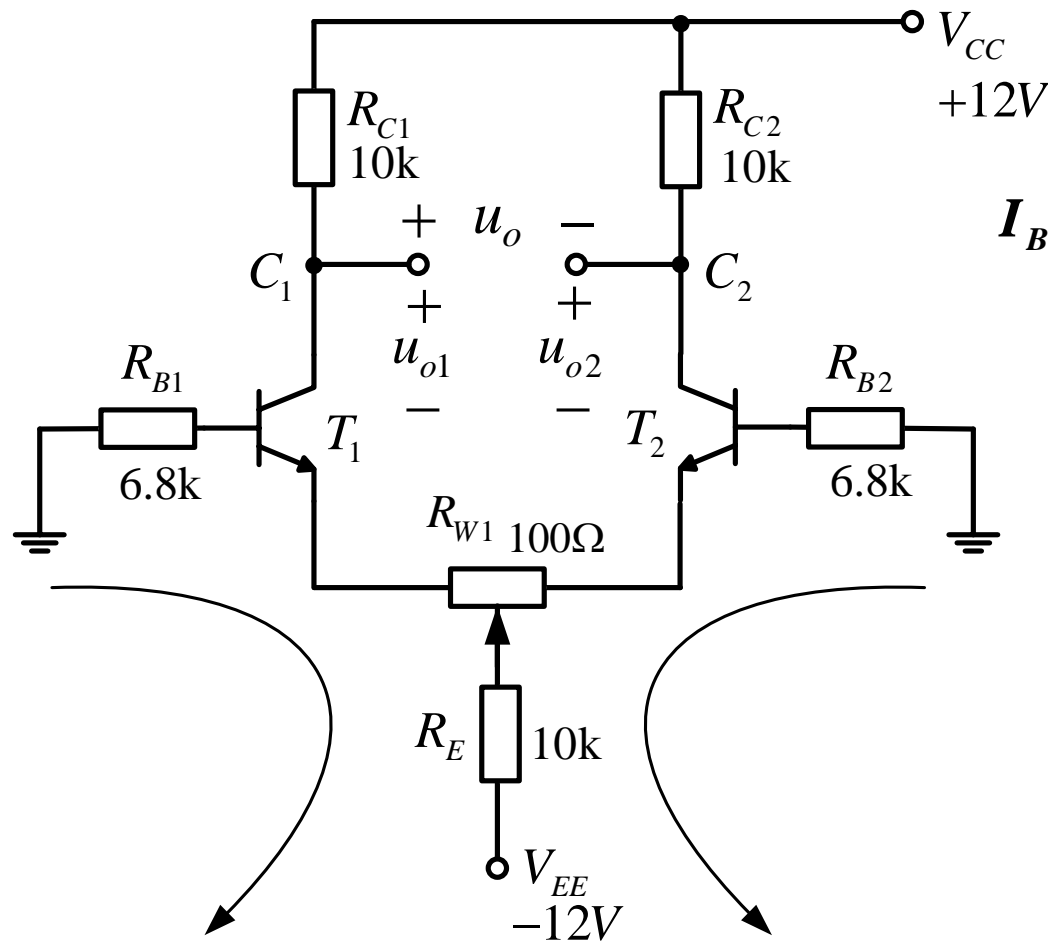
$$A_{uc} = \frac{\Delta U_{oc}}{\Delta U_{ic}}$$

共模抑制比 K_{CMR} :

指差模电压放大倍数与共模放大倍数之比，它表明差动放大电路对共模信号的抑制能力。

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| \quad \text{或:} \quad K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uc}} \right| (\text{dB})$$

2. 典型差动放大电路的直流通路



$$I_B = \frac{-V_{EE} - V_{BE}}{R_{B1} + 2(1 + \beta)R_E + (1 + \beta)\frac{R_{W1}}{2}}$$

$$I_C = \beta I_B$$

$$U_C = V_{CC} - I_C R_C$$

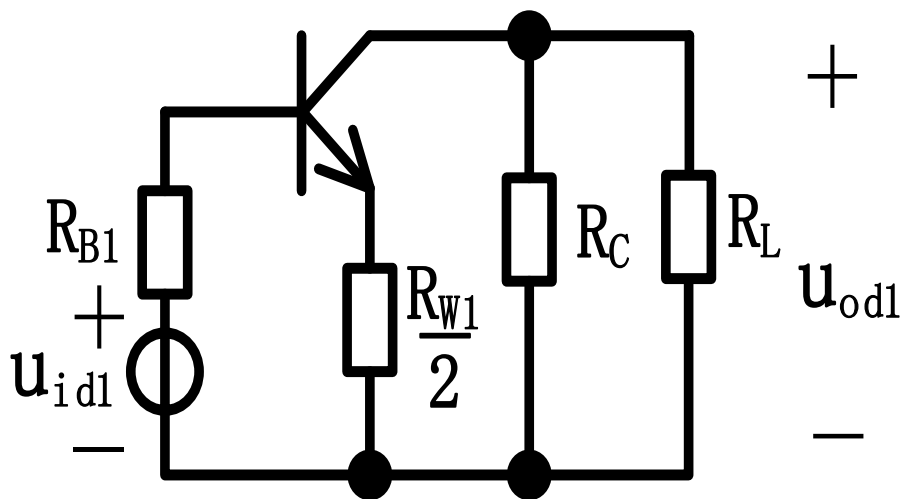
$$U_{CE} = V_{CC} + |V_{EE}| - I_C R_C$$

$$-2I_C R_E - I_C \frac{R_{W1}}{2}$$



实验原理

3. 典型差动放大电路的差模电压增益



差模半电路(单端输出)

$$+ \quad A_{ud\frac{1}{2}} = \frac{U_{od1}}{U_{id1}} = \frac{-\beta R'_L}{(R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2})}$$

单端输出时差模电压增益:

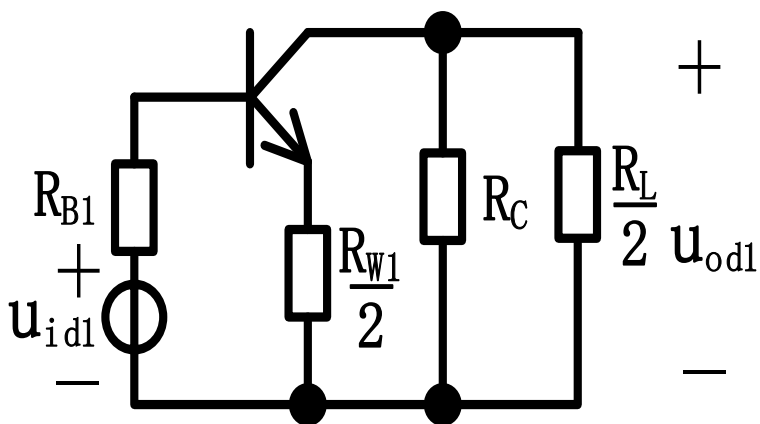
$$\begin{aligned} - \quad A_{ud1} &= \frac{\frac{1}{2} U_{od}}{U_{id}} = \frac{U_{od1}}{2U_{id1}} = \frac{1}{2} A_{ud\frac{1}{2}} \\ &= \frac{1}{2} \frac{-\beta R'_L}{(R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2})} \end{aligned}$$

其中, $R'_L = R_C \parallel R_L$, $A_{ud\frac{1}{2}}$ 为单管电压增益, β 取 160



实验原理

3. 典型差动放大电路的差模电压增益（续）



差模半电路(双端输出)

双端输出时差模电压增益:

$$A_{ud} = \frac{U_{od1} - U_{od2}}{U_{id1} - U_{id2}} = \frac{2U_{od1}}{2U_{id1}} = A_{ud\text{半}}$$
$$= \frac{-\beta R'_L}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}}$$

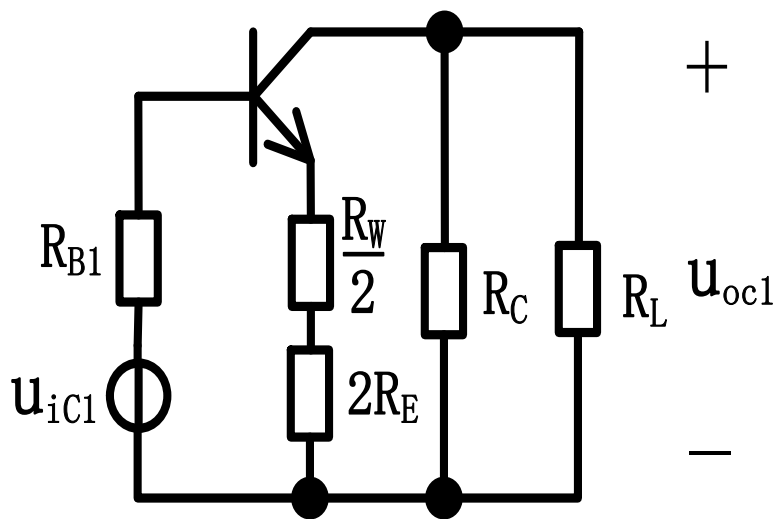
$$\text{其中, } R'_L = R_C // \frac{R_L}{2}$$

由此可见，虽然差动放大器电路用了两个晶体管，但它的电压放大能力只相当于单管共射放大电路。因而差动放大器是以牺牲一个管子的放大倍数为代价，换取了对零点漂移的抑制。



实验原理

7. 典型差动放大电路的共模电压增益



共模半电路(单端输出)

双端输出时共模电压增益:

$$A_{uC} = \frac{U_{oc1} - U_{oc2}}{U_{ic}} = 0$$

单端输出时共模电压增益:

$$\begin{aligned} A_{uC1} &= A_{uC2} = \frac{U_{oc1}}{U_{ic1}} \\ &= \frac{-\beta R'_L}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2} + 2(1 + \beta) R_E} \end{aligned}$$



实验原理

5. 典型差动放大电路的共模抑制比

差动放大器性能的优劣常用共模抑制比 K_{CMR} 来衡量，即：

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uC}} \right| \quad \text{或} \quad K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{uC}} \right| \quad (\text{dB})$$

单端输出时，共模抑制比为：

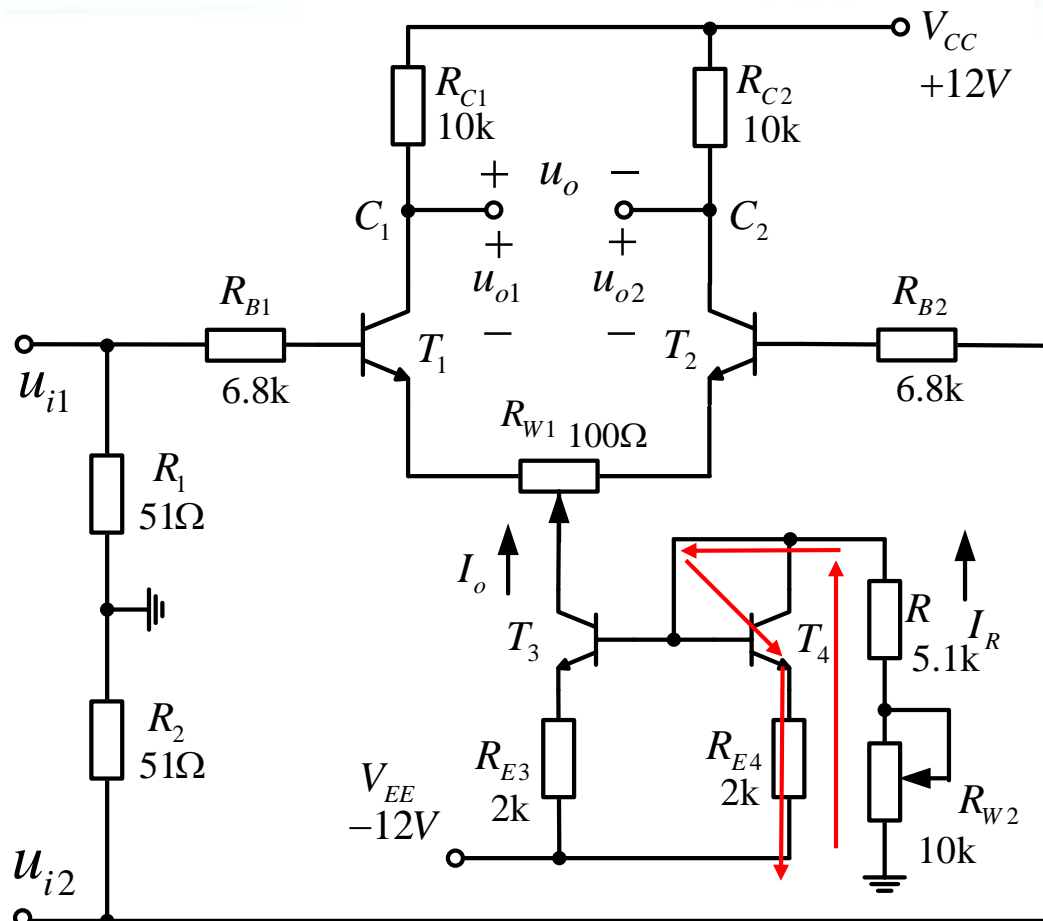
$$K_{CMR} = \frac{A_{ud1}}{A_{uC1}} = \frac{\beta R_E}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}}$$

双端输出时，共模抑制比为：

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uC}} \right| = \infty$$

K_{CMR} 越大，抑制零漂能力越强。

■ 具有恒流源的差动放大电路



静态工作点:

$$I_R = 2I_{B4} + I_{C4}$$

$$= \frac{2I_{C4}}{\beta} + I_{C4}$$

$$\approx I_{C4} = -I_0$$

$$I_0 = -2I_{C1} = -2I_{C2} = -I_R$$

$$= \frac{V_{EE} + 0.7V}{R + R_{W2} + R_{E4}}$$

$$U_{C1} = U_{C2} = V_{CC} - I_{C1}R_{C1} = V_{CC} + \frac{I_0 R_{C1}}{2}$$



实验原理

1. 恒流源差动放大电路的差模电压增益

双端输出时差模电压增益:

$$A_{ud} = \frac{U_{od}}{U_{id}} = \frac{U_{od1} - U_{od2}}{U_{id1} - U_{id2}} = \frac{2U_{od1}}{2U_{id1}} = A_{ud\frac{1}{2}} = \frac{-\beta R'_L}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}}$$

$$\text{其中, } R'_L = R_C \parallel \frac{R_L}{2}$$

单端输出时差模电压增益:

$$A_{ud1} = \frac{U_{od1}}{U_{id}} = \frac{U_{od1}}{2U_{id1}} = \frac{1}{2} A_{ud\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \frac{-\beta R'_L}{(R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2})}$$

$$\text{其中, } R'_L = R_C \parallel R_L$$



实验原理

2. 具有恒流源的差动放大电路的共模电压增益

单端输出时共模电压增益:

$$A_{u_{C1}} = \frac{U_{OC1}}{U_{iC}} = A_{u_{C2}} = \frac{-\beta R'_L}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2} + 2(1 + \beta) R'_e} \approx \frac{R'_L}{2R'_e}$$

$$R'_e = r_{ce3} \left(1 + \frac{\beta R_{E3}}{r_{be3} + R_{E3} + R_B} \right)$$

由于 r_{ce3} 一般为几百千欧, 所以 $R'_e \gg R'_L$

双端输出时共模电压增益:

$$A_{u_C} = \frac{U_{OC1} - U_{OC2}}{U_{iC}} = 0$$



实验原理

3. 具有恒流源的差动放大电路的共模抑制比

单端输出时，共模抑制比为：

$$K_{CMR} = \frac{A_{ud1}}{A_{uC1}} = \frac{\beta R'_e}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}}$$

双端输出时，共模抑制比为：

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{uC}} \right| = \infty$$

K_{CMR} 越大，抑制零漂能力越强。



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}	$2(R_b + r_{be})$	$2(R_b + r_{be})$	$2(R_b + r_{be})$	$2(R_b + r_{be})$

(公式中未考虑本实验电路中的 R_{w1})

- ◆ 差模电压增益、共模电压增益、共模抑制比、输入电阻、输出电阻都与输入方式无关。
- ◆ 双端输出时的差模电压增益、输出电阻是单端输出时的2倍



实验内容

一、典型差动放大电路性能测试

1. 测量静态工作点

构成典型差动放大电路，不加输入信号，将输入端 u_{i1} 、 u_{i2} 两点对地短路，调节 R_{W1} 电位器，使 $U_{C1}=U_{C2}$ 。同时用万用表直流档测量差分对管 T_1 、 T_2 的各极电位，记录数据于表1中。

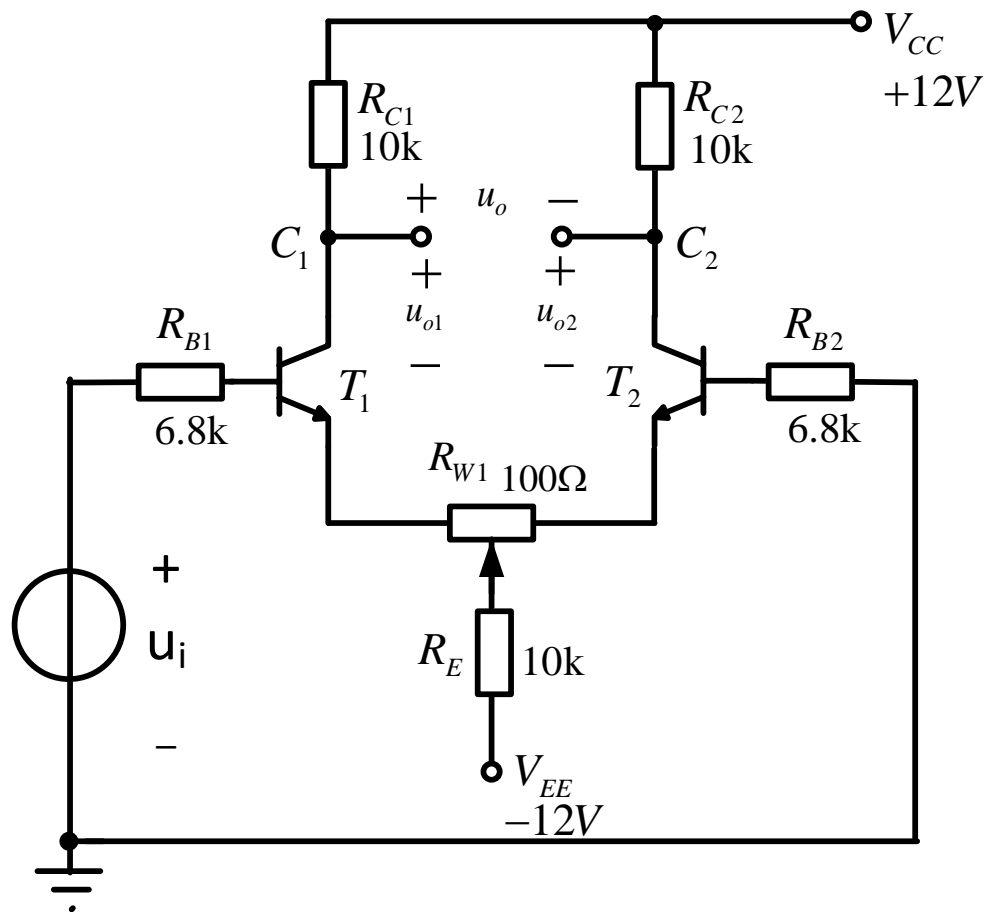
表1

对地 电位	U_{C1}	U_{C2}	U_{E1}	U_{E2}	U_{B1}	U_{B2}
测量值						



实验内容

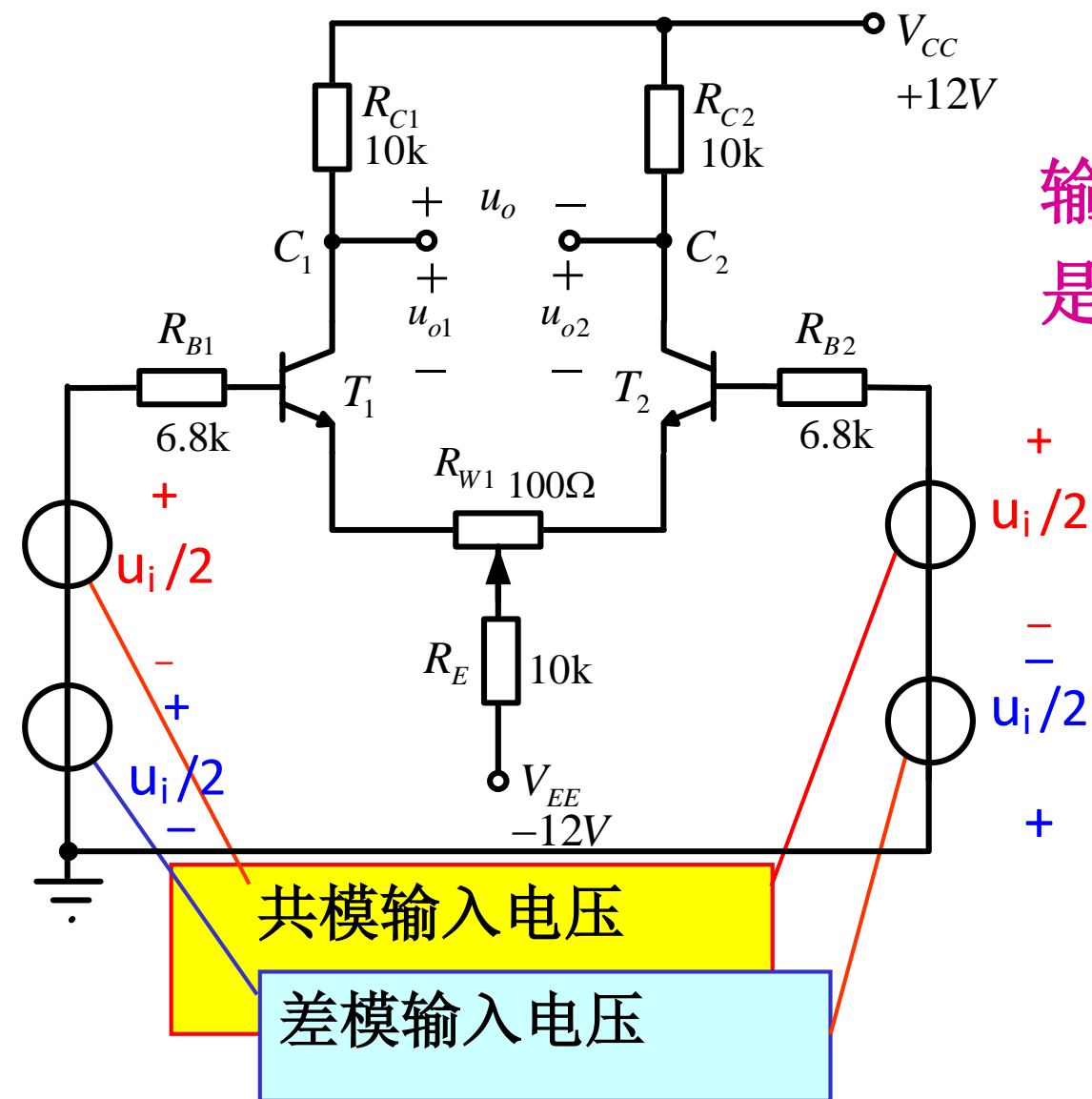
2. 测量差模电压放大倍数



单端输入接线图（两个**51Ω**不接）



实验内容



输入差模信号的同时总是伴随着共模信号输入

$$u_{ic} = u_i / 2$$

$$u_{id} = u_i$$



实验内容

2. 测量差模电压放大倍数(续)

单端输入方式（两个 51Ω 不用接）：将典型差动放大器输入端 u_{i2} 接地，从 u_{i1} 端输入正弦信号频率 $f=1\text{kHz}$ ，有效值 $U_i = 20\text{mV}$ （信号源接入电路后，用毫伏表测得），同时测出单端输出 $U_{od1}(U_{o1})$ 和 $U_{od2}(U_{o2})$ ，计算出单端输出电压放大倍数，双端输出电压放大倍数，并用示波器测量画出单端输出电压 $u_{od1}(u_{o1})$ ， $u_{od2}(u_{o2})$ 的 u_{od} 波形图。（ u_{od} 波形观察方法：CH1、CH2分别测 u_{od1} 和 u_{od2} 的波形，按下math按钮，算子选择“-”，此时可以测出 $u_{od}=u_{od1}-u_{od2}$ 波形参数，测量 U_{od} 时，测量源选择“数学函数”）。



实验内容

3. 测量差模输入电阻(教材上没有, 新增加的)

差模信号单端输入方式, 在信号源 u_s 与差分 U_{i1} 输入端之间串接一个 $R_s=10K\Omega$ 的电阻, $U_s=80mV$ (有效值), $f=1KHz$, 用毫伏表测量 $R_s=10K\Omega$ 前后对地电压 U_s 和 U_i , 计算差模单端输入时的输入电阻 R_i 。

4. 测量差模输出电阻(教材上没有, 新增加的)

$U_s=50mV$ (有效值), $f=1KHz$, 用毫伏表测量空载时的 U_o , 再测量有载(将 $R_L=10K\Omega$ 并接在T1的集电极和地之间)时的 U_L , 计算差模单端输入单端输出时的输出电阻 R_o 。

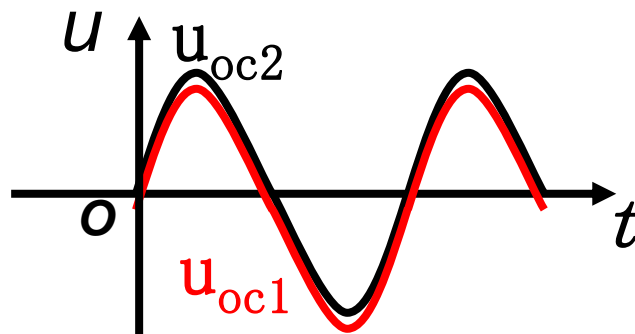
($R_s=10K\Omega$ 不接)



实验内容

5. 测量共模电压放大倍数

将输入端 u_{i1} 和 u_{i2} 两点连接在一起（两个 51Ω 不接），从 u_{i1} 和 u_{i2} 两端输入有效值 $U_{ic} = 90mV$ ，频率 $f=1kHz$ 的正弦信号，用毫伏表测量共模输入电压 U_{ic} 、共模单端输出电压 U_{oc1} ， U_{oc2} ，计算出单端共模电压放大倍数及双端共模电压放大倍数，并用示波器测量画出 u_{oc1} ， u_{oc2} 的波形及 u_{oc} （测 u_{oc} 波形方法同 u_{od} ）





实验内容

二、具有恒流源的差动放大电路性能测试

(1) 静态工作点调节

构成具有恒流源差动放大电路，不加输入信号，将输入端 u_{i1} 、 u_{i2} 两点对地短路，调节恒流源电路电位器 R_{W2} ，使 $U_{RC1}=5V$ 或 $U_{RC2}=5V$ ，则 $I_0=2U_{RC1}/R_{C1}=1mA$ 。用万用表直流档分别测量差分对管 T_1 、 T_2 的各极电位，记录数据于表2

表2	对地电位	U_{C1}	U_{C2}	U_{E1}	U_{E2}	U_{B1}	U_{B2}	$R_{W2}(k\Omega)$
	测量值							

(2) 重复典型差动放大电路实验内容2、5的测试。

实验思考题

1

为什么要对差分放大器进行调零，在实验中是否非常重要？

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

典型差动放大电路与恒流源差动放大电路在观测 u_{c1} 与 u_{c2} 的波形时，其大小、极性及共模抑制比 K_{CMR} 有何区别？为什么？

下次实验(101室): 共射极单管放大器

或者

负反馈放大器