

差动放大器

实验报告

信息科学技术学院 神 PB22114514

信息科学技术学院 李 毅 PB22051031

教室：电四楼 101 室 座位号：8

2023 年 11 月 22 日

第一部分 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. 学习差分放大器的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. 熟悉基本差分放大器电路与具有镜像恒流源的差分放大器电路的性能差别。

第二部分 实验内容

本实验所用差分放大器电路图如图 2.1 所示。

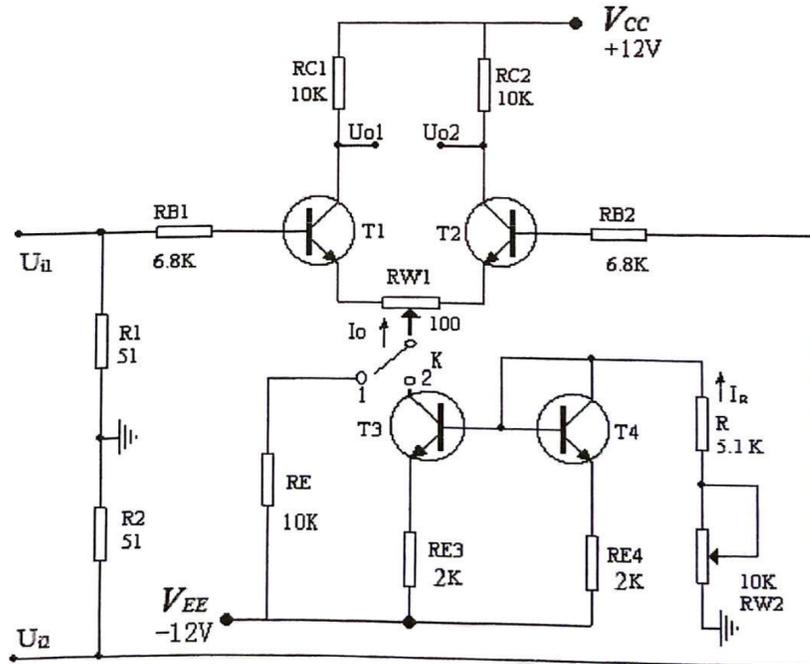


图 2.1 差分放大器

当开关 K 接 1 时，为典型差分放大电路。其中 T_1, T_2 为差分对管，与电阻 $R_{B1}, R_{B2}, R_{C1}, R_{C2}$ ，以及电位器 R_{W1} 共同组成差分放大的基本电路。且 $R_{B1}=R_{B2}, R_{C1}=R_{C2}$ 。

当开关 K 接 2 时，为具有恒流源的差分放大电路。 T_3 与 T_4 与电阻 $R_{E3}, R_{E4}, R, R_{W2}$ 共同组成镜像恒流源电路。

本实验均采用单端输入方式，图中两个 51Ω 电阻不接。

1. 典型差分放大电路的性能调试

(1) 调整静态工作点

由于电路做工问题，静态时电路并不对称，需要调节。不加输入信号，将 U_{i1}, U_{i2} 对地短路，调节 R_{W1} 点位器，使 $U_{O1} = U_{O2}$ 。

用万用表直流电压档分别测量差分对管 T_1, T_2 的各极电位，得到下表。

表 2.1.1 典型差动放大电路静态工作点

	U_{C1}	U_{C2}	U_{E1}	U_{E2}	U_{B1}	U_{B2}
对地点位测量值	6.18V	6.18V	-0.63V	-0.64V	-18.8mV	-19.7mV

(2) 测量差模放大倍数 A_{ud}

将 U_{i2} 接地，从 U_{i1} 段输入 $U_{id} = 20mV$ (有效值)， $f=1kHz$ 。测量得到：

输入电压实际值 $U_{id}=20.17mV$

单端输出电压 $U_{od1}=0.773V$ ， $U_{od2}=0.762V$

双端出差模电压 $U_{od}=U_{od1} + U_{od2}=1.535V$

双端出差模放大倍数 $A_{ud} = \frac{U_{od}}{U_{id}} = 76.10$

单端出差模放大倍数 $A_{ud1} = \frac{U_{od1}}{U_{id}} = 38.32$ ， $A_{ud2} = \frac{U_{od2}}{U_{id}} = 37.78$ 。

用示波器 (AC 耦合) 测量得到 U_{od1} (黄) , U_{od2} (绿) , U_{od} (紫) 波形如下图：

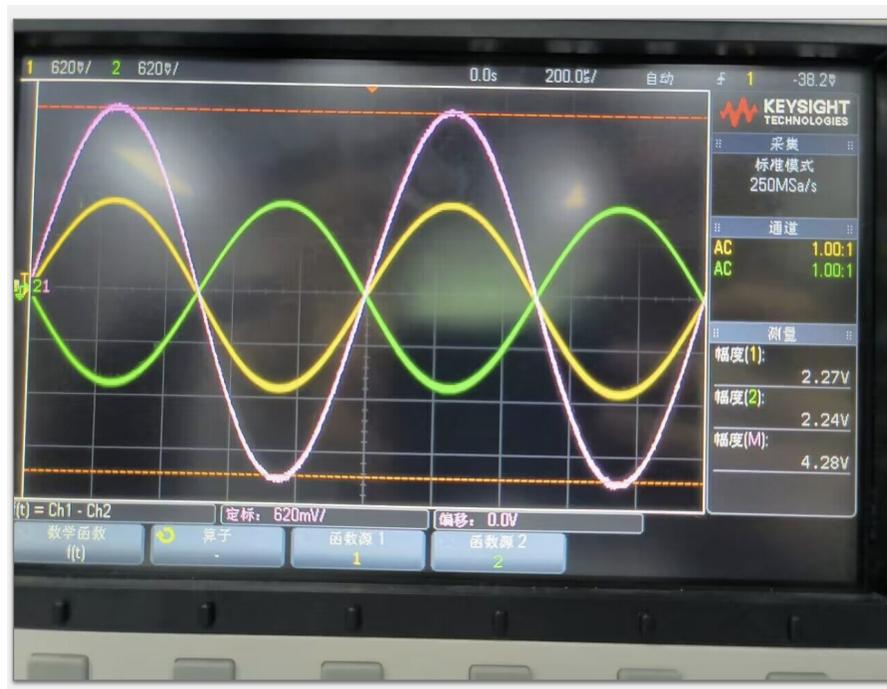


图 2.2 差模增益波形

下面进行理论分析：

$$基极电流 I_B = \frac{-V_{EE} - U_{BE}}{R_{B1} + 2(1 + \beta)R_E + (1 + \beta)\frac{R_{W1}}{2}} = -0.00393mA$$

$$发射极电流 I_E = \beta I_B = 0.632mA$$

$$交流输入电阻 r_{be} = 300\Omega + (1 + \beta)\frac{26mV}{I_E} = 6.932k\Omega$$

$$\text{理论双端输出差模放大倍数 } A'_{ud} = \frac{-\beta R_C}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}} = 73.91$$

$$\text{理论单端输出差模放大倍数 } A'_{ud1} = A'_{ud2} = \frac{-\beta R_C}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2}} = 36.96$$

$$\text{双端输出与理论值的相对误差为 } \delta_{A_{ud}} = \frac{|A'_{ud} - A_{ud}|}{A'_{ud}} = 2.96\%$$

$$\text{单端输出与理论值的相对误差为 } \delta_{A_{ud1}} = \frac{|A'_{ud1} - A_{ud1}|}{A'_{ud1}} = 3.67\%, \delta_{A_{ud2}} = \frac{|A'_{ud2} - A_{ud2}|}{A'_{ud2}} = 2.22\%$$

误差均在合理范围之内。

(3) 测量差模输入电阻

差模信号单端输入模式，在信号源 U_S 与 U_{i1} 输入端之间串接一个 $R_S = 10k\Omega$ 的电阻， U_s 等于 $80mV$ （有效值）， $f=1kHz$ ，测量得：实际 $U_s=80.3mV$ ， $U_{i1}=68.7mV$ 。得出差模输入电阻：

$$R_{id} = \frac{U_{i1}}{\frac{U_s - U_{i1}}{R_S}} = 59.22k\Omega$$

(4) 测量差模输出电阻

差模信号单端输入单端输出模式， U_s 等于 $50mV$ （有效值）， $f=1kHz$ ，空载时 $U_{od1} = 1.836V$ ，有载时 $U_{od1L} = 0.921V$ 。得出差模输出电阻：

$$R_{od1} = \frac{U_{od1} - U_{od1L}}{U_{od1L}} R_L = 9.93k\Omega$$

(5) 测量共模放大倍数 A_{uc}

将输入端的 U_{i1}, U_{i2} 两点接在一起，从 U_{S1} 端输入 $90mV$ （有效值）， $f=1kHz$ 的共模信号。测量得到：

输入电压实际值 $U_{ic}=89.7mV$

单段输出电压 $U_{oc1}=44.5mV$ ， $U_{oc2}=45.3mV$

双端输出差模电压 $U_{oc}=0.8mV$

$$\text{双端输出差模放大倍数 } A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} = 8.91 \times 10^{-3}$$

$$\text{单端输出差模放大倍数 } A_{uc1} = \frac{U_{oc1}}{U_{ic}} = 0.496, A_{uc2} = \frac{U_{oc2}}{U_{ic}} = 0.505。$$

用示波器（AC 耦合）测量得到 U_{oc1} （黄）， U_{oc2} （绿）， U_{oc} （紫）波形如下图：

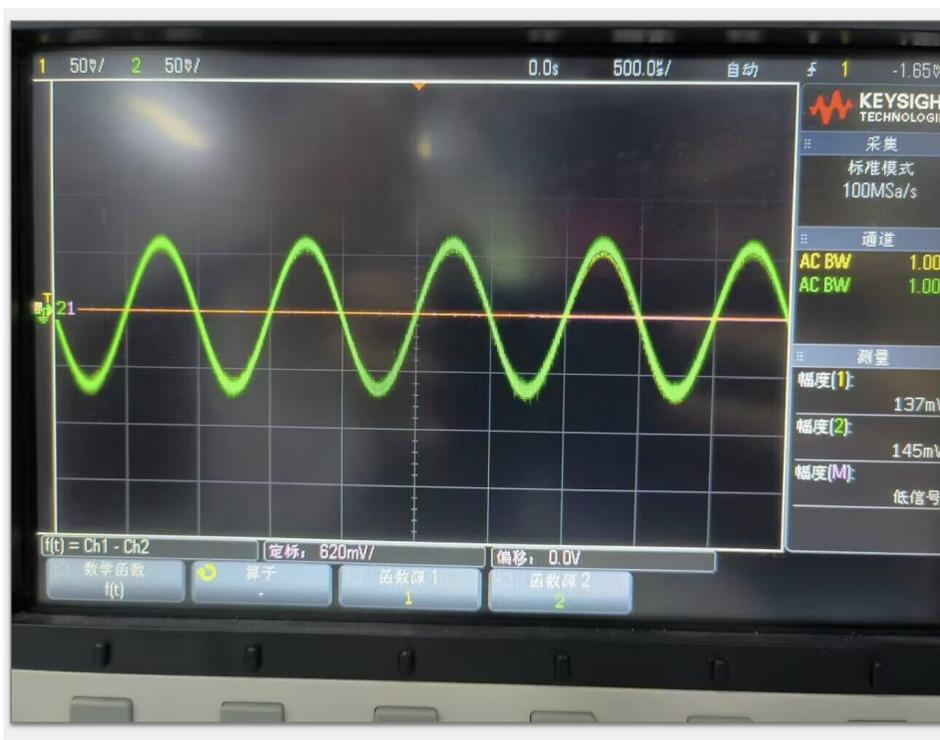


图 2.3 共模增益波形

下面进行理论分析:

$$\text{单端输出的共模电压增益 } A'_{u_{C1}} = A'_{u_{C2}} = \frac{-\beta R_C}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{W1}}{2} + 2(1 + \beta) R_e} = -0.494。$$

双端输出的共模电压增益 $A_{u_C} = 0$ 。

测得双端输出值很小，在误差允许范围内。

$$\text{单端输出与理论值的相对误差为 } \delta_{A_{u_{C1}}} = \frac{|A'_{u_{C1}} - A_{u_{C1}}|}{A'_{u_{C1}}} = 0.40\%, \delta_{A_{u_{C2}}} = \frac{|A'_{u_{C2}} - A_{u_{C2}}|}{A'_{u_{C2}}} = 2.23\%, \text{ 误差均在合理范围之内。}$$

(6) 计算双端输出和单端输出的共模抑制比

根据测量结果得出:

$$\text{单端输出时, 共模抑制比为: } K_{CMR1} = \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} = 77.26, K_{CMR2} = \frac{A_{ud2}}{A_{uc2}} = 74.81$$

$$\text{双端输出时, 共模抑制比为: } K_{CMR} = \frac{A_{ud}}{A_{uc}} = 8541.0$$

2. 具有恒流源的差动放大电路的性能调试

(1) 调整静态工作点

不加输入信号，将 U_{i1}, U_{i2} 对地短路，调节 R_{W1} 点位器，使 $U_{O1} = U_{O2}$ 。调节 R_{w2} 电位器，

$$\text{使 } I_0 = 2 \frac{U_{c1}}{R_{C1}} = 1mA$$

实际测量得到 $U_{RC1} = 5.001V, R_{W2} = 4.32k\Omega$ 。

用万用表直流电压档分别测量差分对管 T_1, T_2 的各极电位，得到下表。

表 2.2.1 具有恒流源的差动放大电路静态工作点

	U_{C1}	U_{C2}	U_{E1}	U_{E2}	U_{B1}	U_{B2}
对地点位测量值	6.86V	6.86V	-0.63V	-0.63V	-16.64mV	-17.41mV

(2) 测量差模放大倍数 A_{ud}

将 U_{i2} 接地，从 U_{i1} 端输入 $U_{id} = 20\text{mV}$ (有效值)， $f=1\text{kHz}$ 。测量得到：

输入电压实际值 $U_{id}=20.10\text{mV}$

单端输出电压 $U_{od1}=0.732\text{V}$ ， $U_{od2}=0.730\text{V}$

双端输出差模电压 $U_{od}=U_{od1} + U_{od2}=1.462\text{V}$

双端输入差模放大倍数 $A_{ud} = \frac{U_{od}}{U_{id}} = 72.74$

单端输入差模放大倍数 $A_{ud1} = \frac{U_{od1}}{U_{id}} = 36.42$ ， $A_{ud2} = \frac{U_{od2}}{U_{id}} = 36.32$ 。

(3) 测量共模放大倍数 A_{uc}

将输入端的 U_{i1}, U_{i2} 两点接在一起，从 U_{S1} 端输入 90mV (有效值)， $f=1\text{kHz}$ 的共模信号。测量得到：

输入电压实际值 $U_{ic}=89.7\text{mV}$

单端输出电压 $U_{oc1}=1.085\text{mV}$ ， $U_{oc2}=1.334\text{mV}$

双端输出差模电压 $U_{oc}=0.249\text{mV}$

双端输出差模放大倍数 $A_{uc} = \frac{U_{oc}}{U_{ic}} = 2.78 \times 10^{-3}$

单端输出差模放大倍数 $A_{uc1} = \frac{U_{oc1}}{U_{ic}} = 0.0121$ ， $A_{uc2} = \frac{U_{oc2}}{U_{ic}} = 0.0149$ 。

(4) 计算双端输出和单端输出的共模抑制比

根据测量结果得出：

单端输出时，共模抑制比为： $K_{CMR1} = \frac{A_{ud1}}{A_{uc1}} = 3010$ ， $K_{CMR2} = \frac{A_{ud2}}{A_{uc2}} = 2438$

双端输出时，共模抑制比为： $K_{CMR} = \frac{A_{ud}}{A_{uc}} = 26165$

第三部分 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？

在实验中对差分放大器进行调零是非常重要的，原因如下：

差分放大电路中的器件参数可能并非完全对称，在静态时会存在偏置，通过调零能使差分放大器在没有输入信号时输出为 0，从而消除电路参数不对称带来的影响。如果不经过调零，当外界温度变化或电源电压波动时，不对称偏置将会造成输出误差。

2. 差分放大器中的 R_E 和恒流源起什么作用？提高 R_E 阻值会受到什么限制？

典型差分放大电路作双端输入双端输出时，在电路参数完全对称的情况下，输出电压 $U_{OC1} = U_{OC2}$ ，共模增益为：

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

共模抑制比 K_{CMR} 为无穷大，从两管集电极输出的共模信号被完全抵消。实际情况中虽然做不到电路完全对称，通过取较大的射极电阻 R_E ，仍然能够获得较高的共模抑制比。

作双端输入单端输出时，共模电压增益表达式为：

$$\begin{aligned} A_{uC1} &= \frac{U_{OC1}}{U_{iC}} = A_{uC2} \\ &= \frac{-\beta R'_L}{R_{B1} + r_{be} + (1 + \beta) \frac{R_{w1}}{2} + 2(1 + \beta) R_E} \\ &\approx -\frac{R'_L}{2R_E} \end{aligned}$$

这使得单端输出的共模增益 $A_{uC1} \neq 0$ ，则 K_{CMR} 为有限值。但是取较大的 R_E ，使其远大于 R'_L 有利于提高共模抑制比，从而提高放大器对于零点漂移、电源波动等干扰信号的抑制能力。

R_E 的提高将导致 R_E 上产生较大的直流压降，使直流损耗变大，并且要求有较大的电源电压，因此不能无限制地提高 R_E 阻值。对于恒流源差动放大电路，由于恒流源具有很大的交流等效电阻，替代 R_E 之后可以明显提高差动电路的共模抑制比。

3. 典型差分放大器电路与恒流源差动放大电路在观测共模输出 u_{OC1} 与 u_{OC2} 的波形时，其大小、极性及共模抑制比 K_{CMR} 有何区别？

由上一题的分析可知，恒流源差动放大电路的 R_E 远大于典型差动放大电路，因而共模电压增益前者远小于后者，共模抑制比前者远大于后者，由于两种电路都在集电极输出，因而极性不变。

致 谢

感谢中国科学技术大学信息与计算机实验教学中心