

惠斯通电桥及其应用实验报告

陈依皓 202211140007

实验时间：3月9日

● 【实验原理】

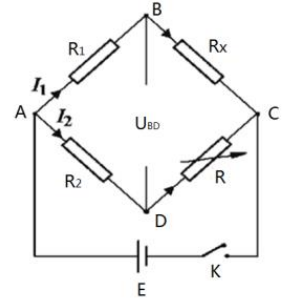
1. 惠斯通电桥的原理

对如图所示的电路图，B点与D点之间的电压为

$$U_{BD} = E \left(\frac{R_x}{R_x + R_1} - \frac{R}{R + R_2} \right) = E \frac{R_x R_2 - R_1 R}{(R_x + R_1)(R + R_2)}$$

我们通过调节可变电阻 R 的值，使 B 和 D 点等电位，即 $U_{BD}=0$ ，则有

$$R_x = \frac{R_1 R}{R_2}$$



本实验直接用数字电压表测量 U_{BD} ，以电压示数为零作为电桥平衡的指标

2. 惠斯通电桥测量电阻的误差分析

(1) 电桥灵敏度

我们把电压表的示数随 R 的改变快慢程度用电桥灵敏度衡量，电桥灵敏度定义式为

$$K = \frac{|U_{BD}|}{|R - R^*|}$$

式中， $(R - R^*)$ 为调节电阻的最大误差，记为

$$\Delta R_{eq} = \frac{\epsilon}{2K}$$

式中， ϵ 为数字电压表示数的最小改变量，在本实验中为 $0.01mV$

K 可以被实际测量，其值为

$$K = \frac{2m\epsilon}{|R^+ - R^-|}$$

m 为与 10 同数量级的整数；调节 R ，分别使 $U_{BD} = m\epsilon$ 和 $-m\epsilon$ ，此时对应的 R 分别记作 R^+

和 R^-

(2) 标准电阻的结构误差

已知电阻值的标称值与其真值有差距，则误差限 ΔR 可参考电路铭牌计算得出

(3) 不确定度的计算

针对两种不同的利用惠更斯电桥测量待测电阻阻值的方法，我们有不同的相对不确定度计算公式

第一种需要 3 个高精度的精密电阻，其相对不确定度为

$$\frac{u_{R_x}}{R_x} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\Delta R_1}{R_1}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_2}{R_2}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{eq}}{R}\right)^2}$$

第二种改进方法只需要一个高精度的精密电阻，需要调换 R_1 和 R_2 的位置，测量两次 R 值使电桥平衡，两次平衡时 R 的值分别为 $R^{(1)}$ 和 $R^{(2)}$ ，此时

$$R_x = \sqrt{R^{(1)} R^{(2)}}$$

其相对不确定度为

$$\frac{u_{R_x}}{R_x} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\Delta R^{(1)}}{R^{(1)}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R^{(2)}}{R^{(2)}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{eq}^{(1)}}{R^{(1)}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{eq}^{(2)}}{R^{(2)}}\right)^2}$$

如果 $R^{(1)}$ 和 $R^{(2)}$ 比较接近，此时更合理的可按下式估计

$$\frac{u_{R_x}}{R_x} = \frac{1}{2\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{\Delta R^{(1)}}{R^{(1)}} + \frac{\Delta R^{(2)}}{R^{(2)}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{eq}^{(1)}}{R^{(1)}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta R_{eq}^{(2)}}{R^{(2)}}\right)^2}$$

3. 非平衡电桥

惠斯通电桥可以用于把电阻的变化转换为电压输出

将原电路 R_x 位置换为隧道磁电阻 TMR，该电阻在 $|B|$ 比较小时，满足

$$R_T = R_{T0}(1 + \alpha B)$$

式中， R_{T0} 为 $B=0$ 时的电阻值； α 为磁阻系数

令 $B=0$ 时电桥平衡，则电桥的非平衡电压为

$$U_{BD} = \alpha E \frac{R R_{T0}}{(R + R_{T0})} B$$

式中， E 为电源电压

在本实验中，我们利用线圈提供磁场 B ，中心点的磁场为

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2r}$$

式中， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} T \cdot m/A$ 为真空的磁导率， N 和 r 分别为线圈的匝数和平均半径， I 为线圈中的电流

显然线圈电流 I 与 U_{BD} 为成正比关系

● 【实验内容及数据处理】

第一部分：惠斯通电桥的原理

(1)多次测量待测电阻的阻值

$$R_{\text{粗测}} = 2.219k\Omega; R_{\text{精确测量}} = 2.239k\Omega$$

$$\text{电源电压 } E = 1V$$

第一种方法，实验数据如下

$R1/\Omega$	2000	2500	2000
$R2/\Omega$	2000	1500	500
R/Ω	2213.61	1329.01	553.61
R_x/Ω	2213.61	2215.01	2214.44

$$\overline{R_x} = 2214.35\Omega$$

第二种方法，实验数据如下

$R1/\Omega$	2000	2500	2000
$R2/\Omega$	2000	1500	500
$R_{(1)}/\Omega$	2213.61	1329.01	553.61
$R_{(2)}/\Omega$	2215.51	3690.41	8856.01
R_x/Ω	2214.56	2214.63	2214.22

$$\overline{R_x} = 2214.47\Omega$$

(2) 测量电桥的灵敏度，估计测量结果的不确定度

a) 电桥灵敏度

在本次实验中，取 $m=10$; $\epsilon=0.01mV$

测量得

$$R^+ = 2214.51 \, \Omega ; R^- = 2212.61 \, \Omega$$

计算得电桥灵敏度

$$K = 0.105 \text{mV } \Omega^{-1}$$

故

$$\Delta R_{eq} = \frac{\epsilon}{2K} = 0.048 \, \Omega$$

第一种方法，三组数据的待测阻不确定度分别为

$R1/\Omega$	2000	2500	2000
$R2/\Omega$	2000	1500	500
R/Ω	2213.61	1329.01	553.61
R_x/Ω	2213.61	2215.01	2214.44
$\frac{U_{Rx}}{R_x}/V \cdot \Omega^{-1}$	0.01196	0.01191	0.01445

第二种方法，三组数据的待测阻不确定度分别为

$R_{(1)}/\Omega$	2213.61	1329.01	553.61
$R_{(2)}/\Omega$	2215.51	3690.41	8856.01
R_x/Ω	2214.56	2214.63	2214.22
$\frac{U_{Rx}}{R_x}/V \cdot \Omega^{-1}$	0.00058	0.00083	0.00163

第二部分：非平衡电桥

实验目的：用 TMR 元件搭建非平衡电桥，确定 TMR 的磁阻系数 α

在本次实验中，我们将原电路图 R_x 位置替换为隧道磁电阻 TMR

B=0 时，隧道磁电阻记为 R_0

实验参数如下表

电桥电动势 E/V	R_1/Ω	R_2/Ω	R_0/Ω	线圈匝数 N	线圈平均直径 r/mm
1	2000	2000	17044	300	67.5

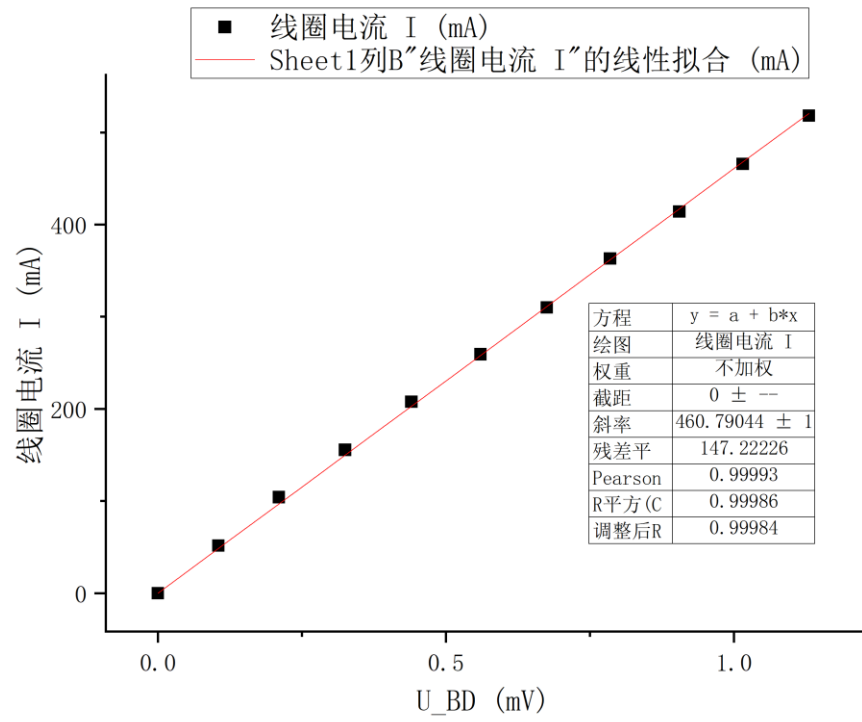
实验测量数据如下表

从 5V 开始，以 0.5V 为步频改变线圈电路电动势，并改变线圈电流方向，正反两次测量，取相应平均值后进行数据拟合

U_{BD}/mV	线圈电流 I/mA
-1.12	-514.7
-1.01	-463.0
-0.89	-412.1
-0.77	-361.6
-0.66	-309.4
-0.55	-258.7
-0.43	-207.4
-0.31	-155.4
-0.20	-104.1
-0.09	-51.6
0	0

U_{BD}/mV	线圈电流 I/mA
1.14	521.9
1.02	468.7
0.92	416.1
0.80	364.7
0.69	310.9
0.57	259.8
0.45	208.3
0.34	155.6
0.22	104.3
0.12	51.8
0	0

数据拟合结果如图



得磁阻尼系数

$\alpha = 1.2436\ T^{-1}$

● 【实验反思】

1. 在这次实验中第一次接触不确定度，对不确定度的计算较为陌生，需要进一步学习
2. 本次实验的电路比之前遇到的实验电路更复杂，在接线过程中注意原件的摆放可以降低接错线的可能性
3. 计算过程中要注意好各物理量的单位与物理含义，本次实验中我误把线圈上标注的平均直径当作平均半径计算，造成结果有较大偏差。