


第一次提交时数据分析部分出错，电阻率不确定度公式用错了。仅在数据分析处做了修改，其他的和上次一致。



南开大学

作业纸

2212266
姓名 张恒硕 第 1 页

系别 工科试验班 班级 电光5班

组别座号: 43

日期: 3月17日, 星期五下午

电磁学实验报告: 直流双臂(凯尔文)电桥

预习部分

目的要求

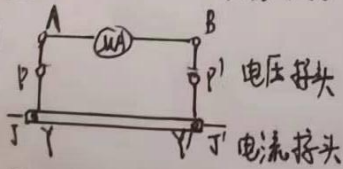
- 了解低电阻的结构特点.
- 掌握双臂电桥测量低阻的原理和方法

仪器用具

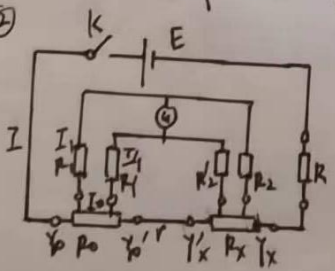
- R_1, R_1' (1000 Ω , 0.1级)
- 六旋鈕电阻箱 X_2 (0.1级)
- 标准低阻 R_0 (0.001 Ω , 准确到0.05%)
- 待测铜根, 不锈钢根, 铝根
- 限流电阻, 直流稳压电源, 电流计, 压触开关, 螺旋测微器

原理: 将低阻做成四端结构, 利用直流双臂电桥, 形成三个回路, 通过基尔霍夫定律可求解待测电阻与已知电阻的比例关系, 消除了接触电阻和接线电阻对低阻测量造成的误差与影响。

① 四端结构



②



电桥平衡时

$$\begin{cases} I_1 R_1 = I_0 R_0 + I_1' R_1' \\ I_1 R_2 = I_0 R_x + I_1' R_2' \\ (I_0 - I_1') r = I_1' (R_1' + R_2') \end{cases}$$

$$\therefore R_1 R_x = R_2 R_0 + (R_2 R_1' - R_1 R_2') \frac{r}{r + R_1' + R_2'}$$

预设 $R_2 R_1' - R_1 R_2' = 0$, 即 $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2'}{R_1'}$

$$\therefore R_x = \frac{R_2}{R_1} R_0$$

即平衡条件: $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2'}{R_1'} = \frac{R_x}{R_0}$

调节方式

- 调节 R_0
- 同步调节 R_2, R_2'

③ 电桥灵敏度: $S = \frac{\Delta I}{\frac{\Delta R_2}{R_2}} = \frac{\Delta I}{\frac{\Delta R_x}{R_x}}$
 有 $\frac{\Delta R_x}{R_x} = \frac{\Delta I}{S} \Rightarrow \Delta I \propto \frac{1}{S}$
 在忽略 r 时, $R_g = R_g + R_1 // R_2$
 $R_1 + R_2 + R_x + R_0 \approx R_1 + R_2$
 $S = \frac{U}{C} \cdot \frac{1}{(R_1 + R_2) + (2 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{R_x}{R_0}) R_g}$
 得出提高精度的方法: $I \uparrow$
 $C, R_g \downarrow$
 $R_1 + R_2, R_1', R_2' \downarrow$
 R_0, R_x 接近, $(\frac{R_1}{R_2} + \frac{R_x}{R_0}) \downarrow$

④ 不确定度: 当 $R_1 = R_1', R_2 = R_2'$ 时

$$\frac{dR_x}{R_x} = (1+k) \left(\frac{dR_2}{R_2} - \frac{dR_1}{R_1} \right) - k \left(\frac{dR_2'}{R_2'} - \frac{dR_1'}{R_1'} \right) + \frac{dR_0}{R_0}$$

其中 $k = \frac{r}{R_0 + R_x}$

$$R_x = \left[(1+k)^2 (R_2^2 + R_1^2) + k^2 (R_2'^2 + R_1'^2) + R_0^2 + \left(\frac{C}{S} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

⑤ 可将电源的极性换向, 以克服电流计回路的温差电动势

⑥ $\rho = R \frac{A}{l} = R \frac{\pi d^2}{4l} = R \frac{\pi D^2}{4l}$

实验部分

1. 铜棍电阻率的测量:

(1) 铜棍长度 (两个电压接头之间):

$$\Delta = 0.5 \text{ mm}, u_{bx} = \Delta/3 = 0.17 \text{ mm}$$

$$l = 41.30 - 3.69 = 376.1 \text{ mm}$$

$$l = 376.1 \pm 0.17 \text{ mm}$$

(2) 铜棍直径测量:

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
直径/mm	5.005	5.001	4.991	4.998	4.996	4.9982

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_{x_i}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.002354 \text{ mm}$$

$$u_{ax} = t_{(0.683, k)} s_{\bar{x}} = 1.14 * 0.002354 = 0.002684 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_x = 0.01 \text{ mm}, u_{bx} = \varepsilon_x / \sqrt{3} = 0.0058 \text{ mm}$$

$$u_x = \sqrt{u_{ax}^2 + u_{bx}^2} = 0.006391 \text{ mm}$$

$$d = 4.9982 \pm 0.006 \text{ mm}$$

(3) 调节电桥平衡:

电桥状态	$R_2(=R_2')$	R_x	$\Delta R_2(=\Delta R_2')$	ΔI	S
数据记录	333.0 Ω	$3.33 \times 10^{-4} \Omega$	20 Ω	0.9nA	14.985nA

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta R_2/R_2} = 14.985\text{nA}$$

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_0 = \frac{333.0}{1000} 0.001 = 3.33 \times 10^{-4} \Omega$$

$$\rho_x = \sqrt{(1+k)^2(\rho_1^2 + \rho_2^2) + k^2(\rho_1'^2 + \rho_2'^2) + \rho_0^2 + (0.1/S)^2} = 0.692\%$$

$$\text{其中: } \rho_0 = \rho_1 = \rho_1' = \rho_2 = \rho_2' = 0.1\%, k = 0.1$$

$$u_{R_x} = \rho_x R_x = 0.023 \times 10^{-4} \Omega$$

$$R_x = (3.330 \pm 0.023) \times 10^{-4} \Omega$$

(4) 电阻率:

$$\rho_{Rx} = \frac{R_x S}{L} = \frac{\pi R_x d^2}{4L} = 1.736 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m},$$

$$u_\rho = \rho \sqrt{(u_{R_x}/R)^2 + (2u_d/d)^2 + (u_L/L)^2} = 0.01281 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho = (1.736 \pm 0.013) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

2. 铝棍电阻率的测量:

(1) 铝棍长度:

$$\Delta = 0.5\text{mm}, u_{bx} = \Delta/3 = 0.17\text{mm}$$

$$l = 36.00 - 6.00 = 300.0\text{mm}$$

$$l = 300.0 \pm 0.17\text{mm}$$

(2) 铝棍直径测量:

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
直径/mm	4.945	4.947	4.943	4.952	4.941	4.9456

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_{x_i}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.001887\text{mm}$$

$$u_{ax} = t_{(0.683,k)} s_{\bar{x}} = 1.14 \times 0.001887 = 0.002151\text{mm}$$

$$\varepsilon_x = 0.01\text{mm}, u_{bx} = \varepsilon_x / \sqrt{3} = 0.0058\text{mm}$$

$$u_x = \sqrt{u_{ax}^2 + u_{bx}^2} = 0.006186\text{mm}$$

$$d = 4.9456 \pm 0.006\text{mm}$$

(3) 调节电桥平衡:

电桥状态	$R_2(=R_2')$	R_x	$\Delta R_2(=\Delta R_2')$	ΔI	S
数据记录	642.0 Ω	$6.42 \times 10^{-4} \Omega$	30 Ω	1.1nA	23.54nA

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta R_2/R_2} = 23.54\text{nA}$$

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_0 = \frac{642.0}{1000} 0.001 = 6.42 \times 10^{-4} \Omega$$

$$\rho_x = \sqrt{(1+k)^2(\rho_1^2 + \rho_2^2) + k^2(\rho_1'^2 + \rho_2'^2) + \rho_0^2 + (0.1/S)^2} = 0.464\%$$

其中: $\rho_0 = \rho_1 = \rho_1' = \rho_2 = \rho_2' = 0.1\%$, $k = 0.1$

$$u_{R_x} = \rho_x R_x = 0.02979 \times 10^{-4} \Omega$$

$$R_x = (6.420 \pm 0.030) \times 10^{-4} \Omega$$

(4) 电阻率:

$$\rho_{Rx} = \frac{R_x S}{L} = \frac{\pi R_x d^2}{4L} = 4.110 \times 10^{-8} \Omega \cdot m,$$

$$u_\rho = \rho \sqrt{(u_{R_x}/R)^2 + (2u_d/d)^2 + (u_L/L)^2} = 0.02179 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

$$\rho = (4.110 \pm 0.022) \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

3. 铁棍电阻率的测量

(1) 铁铝棍长度:

$$\Delta = 0.5mm, u_{bx} = \Delta/3 = 0.17mm$$

$$l = 36.00 - 6.00 = 300.0mm$$

$$l = 300.0 \pm 0.17mm$$

(2) 铁棍直径测量:

螺旋测微器零点读数: 0.012mm

测量次数	1	2	3	4	5	平均值
直径/mm	5.003	4.998	4.995	5.000	5.002	4.9996

$$s_{\bar{x}} = \frac{s_{x_i}}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.001453mm$$

$$u_{ax} = t_{(0.683,k)} s_{\bar{x}} = 1.14 \times 0.001453 = 0.001656mm$$

$$\varepsilon_x = 0.01mm, u_{bx} = \varepsilon_x / \sqrt{3} = 0.0058mm$$

$$u_x = \sqrt{u_{ax}^2 + u_{bx}^2} = 0.006032mm$$

$$d = 5.000 \pm 0.006mm$$

(3) 调节电桥平衡:

电桥状态	$R_2 (= R_2')$	R_x	$\Delta R_2 (= \Delta R_2')$	ΔI	S
数据记录	10972 Ω	$1.0972 \times 10^{-2} \Omega$	300 Ω	1.3nA	47.55nA

$$S = \frac{\Delta I}{\Delta R_2 / R_2} = 47.55nA$$

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_0 = \frac{10972}{1000} 0.001 = 1.0972 \times 10^{-2} \Omega$$

$$\rho_x = \sqrt{(1+k)^2(\rho_1^2 + \rho_2^2) + k^2(\rho_1'^2 + \rho_2'^2) + \rho_0^2 + (0.1/S)^2} = 0.2802\%$$

其中: $\rho_0 = \rho_1 = \rho_1' = \rho_2 = \rho_2' = 0.1\%$, $k = 0.1$

$$u_{R_x} = \rho_x R_x = 3.0744 \times 10^{-5} \Omega$$

$$R_x = (1097.2 \pm 3.1) \times 10^{-5} \Omega$$

(4) 电阻率:

$$\rho_{Rx} = \frac{R_x S}{L} = \frac{\pi R_x d^2}{4L} = 7.178 \times 10^{-8} \Omega \cdot m,$$

$$u_\rho = \rho \sqrt{(u_{R_x}/R)^2 + (2u_d/d)^2 + (u_L/L)^2} = 0.02685 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

$$\rho = (7.178 \pm 0.027) \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

系别 _____ 班级 _____ 姓名 _____ 第 6 页

考查题

1. 四端接法

2. 平衡条件: $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_2'}{R_1'} = \frac{R_x}{R_0}$
同步调节 R_2, R_2' 直到电流计示数为 0

思考题

1. 能
 $R_x = \frac{R_0 R_1 + (R_2 R_1' - R_1 R_2') r / (r + R_1' + R_2')}{R_1}$
但此时调节平衡没有明确的方式

2. BC
 $\because \rho = R \frac{l}{S}, l \uparrow, \frac{l}{S} \uparrow$
 $\therefore \rho$ 偏大

3. 单臂电桥

4. $\frac{dR_x}{R_x} = (1+k) \left(\frac{dR_2}{R_2} - \frac{dR_1}{R_1} \right) - k \left(\frac{dR_2'}{R_2'} - \frac{dR_1'}{R_1'} \right) + \frac{dR_0}{R_0}$
调换后为 $\frac{dR_x}{R_x} = (1+k) \left(\frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} \right) - k \left(\frac{dR_1'}{R_1'} - \frac{dR_2'}{R_2'} \right) + \frac{dR_0'}{R_0'}$
 $\therefore \frac{dR_x}{R_x} = \frac{dR_0}{R_0} + \frac{dR_0'}{R_0'}$
2