

# 普通物理实验报告

## 实验十四 直流电桥测量电阻

### 一、 数据处理

#### 1、 测量各电阻的实际值

用 Fluke8808A 台式表测量标准电阻阻值列表：

200Ω档， $\sigma_R = 0.03\% \times \text{读数} + 0.004\% \times \text{量程}$ 。

2kΩ、20kΩ档， $\sigma_R = 0.02\% \times \text{读数} + 0.003\% \times \text{量程}$ 。

表 1.1.1 各电阻的实际值表

型号	$100\Omega - R_A$	$100\Omega - R_B$	$10k\Omega - R_A$	$10k\Omega - R_B$	$1k\Omega - R_B$	$R_x$
阻值(Ω)	100.590	99.931	10004.1	10026.1	1000.12	$32.751\Omega$
所用量程	200 Ω	200 Ω	20 kΩ	20 kΩ	2 kΩ	200 Ω
$\sigma_R(\Omega)$	0.02	0.02	1.5	1.5	0.15	0.01

#### 2、 将平衡电桥测电阻的结果列表：

表 1.1.2 平衡电桥测电阻的条件、直接量和间接量表

条件				直接量			间接量		
E(V)	$R_h(\Omega)$	$R_1(\Omega)$	$R_2(\Omega)$	$R_0(\Omega)$ 平衡	$R_0'(\Omega)$ 不平 衡	$\Delta n(\text{格})$	$\Delta R_0(\Omega)$	$R_x(\Omega)$	S(格)
2.0	0	100	100	32.7	32.6	5	0.1	32.7	1635
		100	1k	326.6	326.1	1	0.5	32.66	653.2
		10k(A)	10k(B)	32.7	35.7	3	3	32.7	32.7
		10k(B)	10k(A)	33.0	33.8	1	0.8	33.0	41.25
	3k	100	100	32.7	32.0	2	0.7	32.7	93.43
1.0	0	100	100	32.7	32.6	3	0.1	32.7	981

实测电压： $E_1 = 1.9938V, E_2 = 0.9690V$ 。

ZX96 型直流电阻器允差：10kΩ, 1kΩ, 100Ω, 10Ω:  $\pm 0.1\%$ ; 1Ω:  $\pm 0.5\%$ ; 0.1Ω:  $\pm 2\%$ 。

3、计算交换桥臂测量法测得的电阻值及其不确定度：

$$R_x = \sqrt{R_{01} \cdot R_{02}} = 32.8\Omega$$

单次测量电阻的不确定度为：

$$\sigma_{R_x} = \sqrt{(\delta R_x)^2 + \left(\frac{R_0}{R_2}\right)^2 \sigma_{R_1}^2 + \left(\frac{R_0 R_1}{R_2^2}\right)^2 \sigma_{R_2}^2 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \sigma_{R_0}^2}$$
$$\delta R_x = \frac{0.2 R_x}{S}$$
$$\sigma_{R_x} = \frac{R_x}{2} \sqrt{\frac{\sigma_{R_{01}}^2}{R_{01}^2} + \frac{\sigma_{R_{02}}^2}{R_{02}^2}} = 0.11\Omega$$
$$R_x \pm \sigma_{R_x} = (32.8 \pm 0.11)\Omega$$

4、计算测得的各个电阻值的不确定度：

$$\sigma_{R_x} = \sqrt{(\delta R_x)^2 + \left(\frac{R_0}{R_2}\right)^2 \sigma_{R_1}^2 + \left(\frac{R_0 R_1}{R_2^2}\right)^2 \sigma_{R_2}^2 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \sigma_{R_0}^2}$$

代入数值，不确定度列表如下：

表 1.1.3 各个电阻值的不确定度

	$R_{x1}$	$R_{x2}$	$R_{x3}$	$R_{x4}$	$R_{x5}$	$R_{x6}$
$\sigma_{R_{x,i}}/\Omega$	0.03	0.02	0.2	0.1	0.08	0.03
$\sigma_{R_{x,i}}/R_x$	0.09%	0.07%	0.6%	0.5%	0.2%	0.1%

二、 分析与讨论

1、电阻不确定度中各主要成分的贡献，各桥臂精度和电桥灵敏度对不确定度的影响

$$\sigma_{R_x} = \sqrt{(\delta R_x)^2 + \left(\frac{R_0}{R_2}\right)^2 \sigma_{R_1}^2 + \left(\frac{R_0 R_1}{R_2^2}\right)^2 \sigma_{R_2}^2 + \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^2 \sigma_{R_0}^2}$$

$R_x$ 的不确定度是由四项组成的，第一项依赖于检流计灵敏度，后三项来自于桥臂的精度。由于 $R_1$ 、 $R_2$ 是由台式表测得的，对总不确定度的贡献较小。而 $\delta R_x$ 对不确定度的贡献依赖于 S，当 S 为 $10^1$ 数量级时， $\delta R_x$ 的贡献占主导，当 S 为 $10^2$ 或更大数量级时， $\delta R_x$ 的贡献较小。

2、

观察上面的不确定度表，发现 $R_{x2}$ 的不确定度最小。观察公式不难发现，在固定 $R_1$ 的情况下，提高 $R_2$ 的阻

值,  $\sigma_{R_x}$  会减小, 有利于精度的提升。但是, 在第三、四组中, 同时提高  $R_1$ 、 $R_2$  的阻值, 精度下降较多。在第 5 组中, 保护电阻的阻值远大于其他组, 电桥灵敏度降低, 从而导致不确定度与第 1 组相比增大。在第 6 组中, 电源电压减小, 导致电桥灵敏度较第一组而言减半。但是由于在该情形下  $\delta R_x$  对总不确定度的贡献很小, 没有影响最终的不确定度。

## 2、如何提高电桥法测电阻的精度

- (1) 在  $R_1$  维持小阻值的情况下, 适当提高  $R_2$  的阻值;
- (2) 降低保护电阻阻值;
- (3) 在合理范围内提升电源电压;
- (4) 尽可能使用精确的仪器测量  $R_1$ 、 $R_2$ ;
- (5) 提高检流计的灵敏度;
- (6) 进行多次测量或者使用交换臂法测量电阻。

## 三、收获与感想

本次实验过程很大程度上锻炼了我对于数据是否准确的判断力。由于我们可以在理论上提前判断各组实验测出的检流计灵敏度的大小关系, 因此这可以作为实验过程中数据处理是否正确、操作是否失误的一项参考。

第一次处理完数据后, 我的数据中第 2 组和第 6 组的灵敏度与理论值误差非常大, 在老师的提醒下和自己的细心检查下, 我发现第 2 组数据的误差是由于计算失误导致的, 第 6 组实验的误差是由于操作中未将电位器调至最小阻值处导致的。这次经历告诉我, 可以随时通过实验过程中的数据处理检查自己的操作细节是否正确, 随机应变。

此外, 我们也可以通过实验结果和理论值的比较来总结归纳如何使实验结果更精确的方法。比如在此次实验中, 我们结合电阻不确定度的理论公式和各个电阻实际的不确定度的贡献, 来归纳总结出提高电桥法测量精度的方法。

# 实验十五 直流电桥测量电阻

## 一、 数据处理

1、 画电路图，连接非平衡电桥测温电路，铂电阻传感器使用三线接法。

设置电源电压为 19V，电桥桥臂阻值 $R_1$ 和 $R_2$ 均为  $10\text{k}\Omega$ ，记录这些条件参数(实测值)。

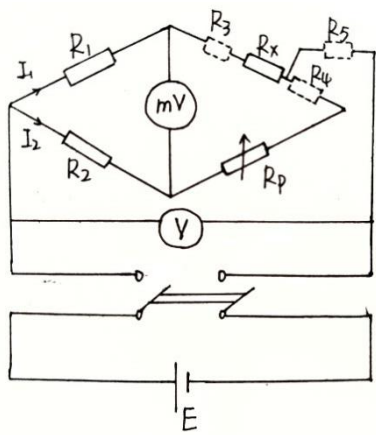


图 2.1.1 非平衡电桥三线接法测量铂电阻温度电路图

VC9806+万用表 20V 档测量电源电压为 19.009V。

$$\sigma_E = \frac{e_E}{\sqrt{3}} = \frac{0.05\% \times 19.009 + 0.003}{\sqrt{3}} = 7.2 \times 10^{-3}(\text{V})$$

Fluke8808A 台式表测量桥臂电阻 $R_1 = 10004.1\Omega$ ， $R_2 = 10026.1\Omega$ 。

2、 让铂电阻温度为水的冰点，此时调节电桥平衡。记录数据：

$$T = 0^{\circ}\text{C}, R_0 = 100.3\Omega$$

3、 逐步改变铂电阻的温度直至水的沸点，记录其温度和电桥非平衡电压的系列数据

表 2.1.1 电桥非平衡电压关于铂电阻温度变化表

T/ $^{\circ}\text{C}$	0.00	17.65	27.20	41.08	54.82	69.44	85.42	100.62
$U_{out}/\text{mV}$	0.00	12.72	19.65	29.25	39.00	49.75	60.77	71.5

4、 对非平衡电桥测温电路的输出-输入曲线作图，作线性拟合。

采用 Origin 软件做图，图像如下：

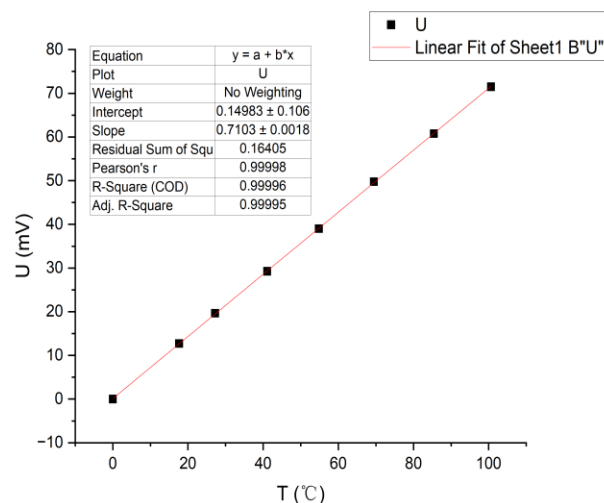


图 2.1.2 非平衡电桥测温电路的输出-输入曲线

其中,

线性回归斜率为

$$k = (0.7103 \pm 0.0018) \text{ mV}/^{\circ} \text{C}$$

截距为

$$b = (0.14983 \pm 0.106) \text{ mV}$$

相关系数为

$$r = 0.9998$$

直线方程为

$$U_{out} = -0.14983 + 0.7103 T(\text{mV})$$

测温电路灵敏度即为拟合直线的斜率

$$S = 0.7103 \text{ mV}/^{\circ} \text{C}$$

- 5、推导稳压电源情况下的铂电阻温度系数 A1 理论公式，由输出~输入曲线线性拟合的斜率计算铂电阻温度系数 A1，估计其不确定度。将测量结果与参考值比较。

已知  $\Delta R_T \ll R_1 + R_0$ ,  $R_p \approx R_0$

$$\begin{aligned} U_{out} &= E \left( \frac{R_2}{R_2 + R_p} - \frac{R_1}{R_1 + R_0 + \Delta R_T} \right) \\ &= E \left( \frac{R_2}{R_2 + R_p} - \frac{R_1}{R_1 + R_0} \times \left( 1 + \frac{\Delta R_T}{R_1 + R_0} \right)^{-1} \right) \end{aligned}$$

对其进行小量展开，原式可化为：

$$\begin{aligned}U_{out} &\approx \frac{ER_1}{(R_1 + R_0)^2} \cdot \Delta R_T + E \left( \frac{R_2}{R_2 + R_0} - \frac{R_1}{R_1 + R_0} \right) \\&= \frac{ER_1 R_0 A_1 \Delta T}{(R_1 + R_0)^2} + E \left( \frac{R_2}{R_2 + R_0} - \frac{R_1}{R_1 + R_0} \right)\end{aligned}$$

所以，根据拟合得到的斜率和 $A_1$ 的关系，

$$A_1 = \frac{k(R_1 + R_0)^2}{ER_1 R_0} = 3.8021 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

下面推导出 $A_1$ 的不确定度：

$$\sigma_{A_1} = A_1 \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_E}{E}\right)^2 + \left(\frac{R_1 - R_0}{(R_1 + R_0)R_1} \sigma_{R_1}\right)^2 + \left(\frac{R_0 - R_1}{(R_1 + R_0)R_0} \sigma_{R_0}\right)^2}$$

代入得：

$$\begin{aligned}\sigma_{A_1} &= 0.0054 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \\A_1 \pm \sigma_{A_1} &= (3.8021 \pm 0.0054) \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}\end{aligned}$$

将测量结果与参考值比较，参考值 $A_1 = 3.85 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ，测量值略小于参考值。

## 二、分析与讨论

比较铂电阻温度系数的测量结果与理论值，估计由于公式近似所带来的系统误差：

测量值略小于参考值。

由于在推导 $A_1$ 时，利用了 $\Delta R_T \ll R_1 + R_0$ ， $R_p \approx R_0$ 的近似。并且，在 $0^\circ \text{C}$ 到 $100^\circ \text{C}$ 温度范围内，电阻和温度并不是完全线性的关系。随着温度增大，铂电阻的也会温度增大，这将导致线性拟合准确程度降低。事实上，如果作更高阶的近似，曲线的斜率会不断减小。以上误差都有可能导致测量结果偏小。

## 三、收获与感悟

本次实验是我第一次在实验中接触三线接法，经过老师在课堂上的讲解，我了解到原来现在在科技前沿领域，四线接法甚至更多线接法已经广泛应用于许多方面，这无疑拓宽了我的视野，也让我意识到，我们可以利用从二线接法到三线接法的思想去学习四线甚至更多线接法的原理，我相信这也是普物实验课程开展的一个小目标，就是让我们从最简单的物理原理出发，学习物理逻辑和思想，从而为以后接触科技的最前沿打下坚实的基础。