

《直流非平衡电桥》实验报告

PB21081601 张芷苒 12月1号下午 4号

1 摘要

实验中使用了外界电阻箱法研究非平衡电桥的 U_g 与 δ 的关系以及探究非平衡电桥的线性范围和灵敏度与桥臂电阻 R_0 的关系，得出电压差在一定范围内随 δ 线性变化，且该线性变化区间长度受桥臂电阻的变化所影响。实验使用了非平衡电桥法测量铜丝的电阻温度系数，并对结果进行不确定度计算以及误差分析。经本实验的研究，认为非平衡电桥可以应用于测量连续变化的物理量，并得出相对精确的结果。

2 背景介绍

当分析和计算电桥线路时，必然会遇到电桥脱离平衡状态的情况，即电桥处在不平衡的状态。测量实践中，有时并非是利用电桥的平衡状态，而是根据电桥电路指示仪表非零的指示值来确定测量结果。按照这个原理工作的电桥就称为非平衡电桥。非平衡电桥的基本原理是通过桥式电路来测量电阻，根据电桥输出的不平衡电压，再进行简单的线性运算处理，从而得到电阻的变化量，以及引起电阻变化的其它物理量，如温度、压力、形变等。

3 实验原理和方法

3.1 实验仪器

直流稳压电源、电阻箱、万用表(用作伏特表)、Keithy2000 (用作微伏表)、铜丝 (漆包线)、加热台、温度计、导线等。

3.2 实验原理

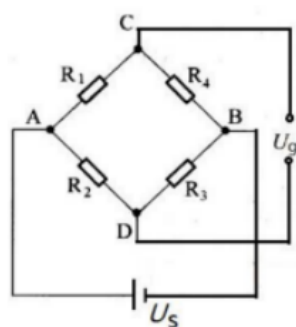


图1 直流非平衡电桥电路图

按照图 1 搭建好电路后，用 $R_4 + \Delta R$ 替代 R_4 表示电桥非平衡状态。为高精度电压表值，由电路分析可以计算得到输出的非平衡电压为：

$$U_g = \frac{R_2 R_4 + R_2 \Delta R - R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + \Delta R(R_2 + R_3)} \cdot U_s \quad (1)$$

将等臂条件代入该式，化简得：

$$U_g = \frac{U_s}{4} \cdot \delta \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{2}\delta} \quad (2)$$

其中， $\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$ 称为电阻的应变变量（相对该变量）。令 $\Delta R \ll R_0$ ，则 $\delta \rightarrow 0$ ，于是有：

$$U_g = \frac{U_s}{4} \cdot \delta = \frac{U_s}{4R_0} \cdot \Delta R \quad (3)$$

在 ΔR 较小时， U_g 与 ΔR 线性关系成正比； ΔR 较大时， $\frac{\delta}{2}$ 不可忽略，此时呈非线性关系。

4 实验内容和步骤

4.1 实验一

外界电阻箱法研究非平衡电桥的 U_g 与 δ 关系

按电路图 (图1) 组装好电路后, 调节电源输出电压为 $U_0 = 2.0V$ 。

取电桥为等臂 $1k\Omega$, 因为导线存在电阻, 所以电桥未平衡, 然后调节 $R_3 = 1000.25\Omega$ 使得电桥平衡。改变 R_4 从 800Ω 到 1200Ω , 每次变化量为 20Ω , 按顺序记下各 U_g 的值, 得到表 1。[注: 表格在数据测量和处理部分, 下同]

根据公式 (3) 过原点做一条直线, 并与实际测量的曲线进行比较, 得出 U_g 的线性关系成立的 δ 取值范围, 测算在此桥臂电阻值下, 电桥在零点附近的绝对灵敏度。

4.2 实验二

研究非平衡电桥的线性范围和灵敏度与 R_0 的关系

保持电源电压不变, 改变 R_0 的值, 研究非平衡电桥的线性范围和灵敏度与 R_0 的关系 (定性): 取电桥为等臂 $5k\Omega$, 发现电桥未平衡, 然后调节 $R_3 = 5000.43\Omega$ 使得电桥平衡。改变 R_4 从 $4k\Omega$ 到 $6k\Omega$, 每次变化量为 100Ω , 按顺序记下各 U_g 的值, 得到表 2;

其次取电桥为等臂 50Ω , 发现电桥未平衡, 然后调节 $R_3 = 49.92\Omega$ 使得电桥平衡。改变 R_4 从 40Ω 到 60Ω , 每次变化量为 1Ω , 按顺序记下各 U_g 的值, 得到表 3。

4.3 实验三

利用搭建的非平衡电桥, 测量并记录铜丝(Cu)的电阻, 以及其电阻随温度的改变值。

取桥臂电阻为 50Ω , 保持电源电压为 $2.0V$, 微调 $R_3 = 49.93\Omega$ 使电桥平衡。将 3 米长, 直径为 $0.60mm$ 的铜丝串联接到 R_4 所在桥臂上, 把铜丝浸泡在水中, 用温度计测量水温 18°C , 记录此时 $U_g(t) = 2.247mV$ 。用加热台对杯子里的水加热, 每隔 $5min$ 记录一次对应的 $U_g(t)$ 值, 直到 85°C 为止, 得到表 4。

5 实验结果及分析

5.1 实验数据

1. $R_3 = 1000.25\Omega$

$R_4(\Omega)$	$U_g(mV)$	$R_4(\Omega)$	$U_g(mV)$	$R_4(\Omega)$	$U_g(mV)$
800	-111.204	940	-31.053	1080	38.410
820	-99.062	960	-20.523	1100	47.574
840	-87.138	980	-10.208	1120	56.657
860	-75.438	1000	-0.094	1140	65.473
880	-63.990	1020	9.827	1160	74.132
900	-52.780	1040	19.540	1180	82.638
920	-41.800	1060	29.065	1200	90.989

表 1 $R_0 = 1000\Omega$ 实验数据

2. $R_3 = 5000.43\Omega$

$R_4(\Omega)$	$U_g(mV)$	$R_4(\Omega)$	$U_g(mV)$	$R_4(\Omega)$	$U_g(mV)$
4000	-111.200	4700	-30.950	5400	38.474
4100	-98.808	4800	-20.423	5500	47.628
4200	-87.033	4900	-10.104	5600	56.613
4300	-75.330	5000	0.012	5700	65.430
4400	-63.882	5100	9.914	5800	74.082
4500	-52.670	5200	19.631	5900	82.571
4600	-41.698	5300	29.157	6000	90.902

表 2 $R_0 = 5000\Omega$ 实验数据

3. $R_3 = 49.92\Omega$

$R_4(\Omega)$	$U_g(mV)$	$R_4(\Omega)$	$U_g(mV)$	$R_4(\Omega)$	$U_g(mV)$
40	-111.014	47	-30.855	54	38.469
41	-98.806	48	-20.338	55	47.735
42	-86.867	49	-10.037	56	56.608
43	-75.183	50	0.010	57	65.425
44	-63.748	51	9.911	58	74.077
45	-52.553	52	19.618	59	82.569
46	-41.592	53	29.135	60	90.900

表 3 $R_0 = 50\Omega$ 实验数据

4. $R_3 = 49.92\Omega$

$^{\circ}\text{C}$	$U_g(mV)$	$^{\circ}\text{C}$	$U_g(mV)$	$^{\circ}\text{C}$	$U_g(mV)$	$^{\circ}\text{C}$	$U_g(mV)$
18	2.247	38	2.386	58	2.542	78	2.729
23	2.279	43	2.425	63	2.593	83	2.783
28	2.313	48	2.463	68	2.636	88	2.832
33	2.353	53	2.501	73	2.684	85	2.801

表 4 测量Cu的电阻实验数据

5.2 实验数据处理

5.2.1 实验一：外界电阻箱法研究非平衡电桥的 U_g 与 δ 关系

结合公式 (3) 以及表1 数据，用 origin 软件绘出图 2：

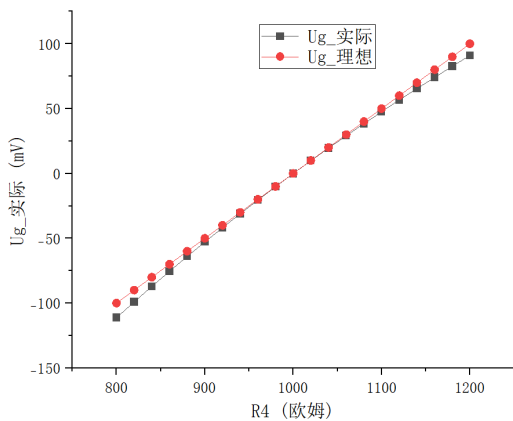


图2 $R_0 = 1000\Omega$ 数据图

记 $K = \frac{|U_{real} - U_{ideal}|}{|U_{ideal}|}$, 当 $K \leq \frac{5}{100}$ 时可以认为 $U_g \sim g$ 线性关系成立。由表 1 的数据做出如下表 5:

δ	K	δ	K	δ	K
-0.2	0.113	-0.06	0.035	0.08	0.040
-0.18	0.101	-0.04	0.026	0.10	0.049
-0.16	0.089	-0.02	0.020	0.12	0.056
-0.14	0.078	0	null	0.14	0.065
-0.12	0.066	0.02	0.018	0.16	0.073
-0.10	0.055	0.04	0.023	0.18	0.082
-0.08	0.045	0.06	0.031	0.20	0.090

表 5

由表知, 当 $-0.08 \leq \delta \leq 0.10$ 时线性关系成立; 而理论上其成立范围为 $-0.095 \leq \delta_{ideal} \leq 0.105$ 。对比可得实际测得的范围是理论测得范围的真子集, 所以可以认为测量误差在允许范围内。

计算电桥在零点附近的绝对灵敏度的公式:

$$S_{Ua} = \lim_{\Delta R \rightarrow 0} \frac{\Delta U_g}{\Delta R} = \frac{1}{4} \cdot \frac{U_s}{R_0} \quad (4)$$

代入数据计算得到绝对灵敏度 $S_{Ua} = 0.5 \times 10^{-3}(A)$ 。

5.2.2 实验二: 探究非平衡电桥的线性范围和灵敏度与 R_0 的关系

同实验一, 用软件画出不同取值 R_0 时 U_g 的实际值与理想值曲线如下图 3, 4.

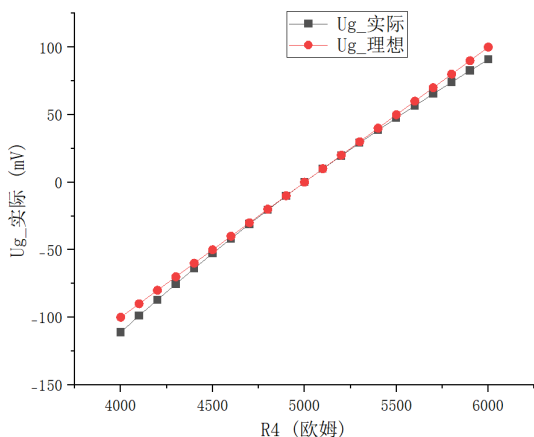


图 3 $R_0 = 5000\Omega$ 数据图

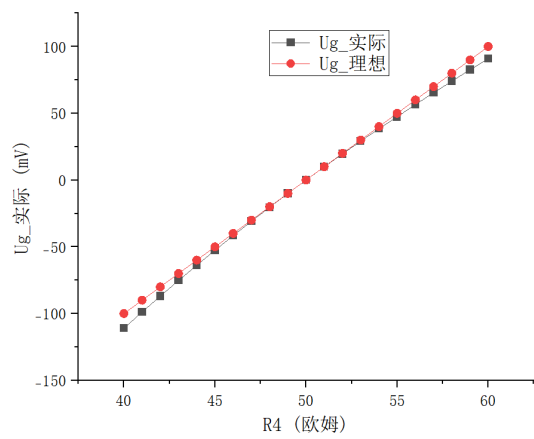


图 4 $R_0 = 50\Omega$ 数据图

经计算分别列出 δ 与 K 的关系表格如下表 6, 7.

δ	K	δ	K	δ	K
-0.2	0.112	-0.06	0.032	0.08	0.038
-0.18	0.100	-0.04	0.021	0.10	0.047
-0.16	0.088	-0.02	0.010	0.12	0.056
-0.14	0.076	0	null	0.14	0.065
-0.12	0.065	0.02	0.009	0.16	0.073
-0.10	0.053	0.04	0.019	0.18	0.082
-0.08	0.042	0.06	0.028	0.20	0.090

表 6

δ	K	δ	K	δ	K
-0.2	0.110	-0.06	0.029	0.08	0.038
-0.18	0.098	-0.04	0.017	0.10	0.048
-0.16	0.086	-0.02	0.004	0.12	0.057
-0.14	0.074	0	null	0.14	0.065
-0.12	0.062	0.02	0.009	0.16	0.074
-0.10	0.051	0.04	0.019	0.18	0.083
-0.08	0.040	0.06	0.029	0.20	0.091

表 7

同实验一，观察得：

- $-0.08 \leq \delta_{5k} \leq 0.10$ 时，线性关系成立；
- $-0.08 \leq \delta_{50} \leq 0.10$ 时，线性关系成立。

由公式 (4)，代入数据得：

- $R_0 = 5000\Omega$ 时, 电桥在零点附近的绝对灵敏度为 $S_{U_a} = 0.0001(A)$;
- $R_0 = 50\Omega$ 时, 电桥在零点附近的绝对灵敏度为 $S_{U_a} = 0.0100(A)$.

对比这些数据, 我们可以发现:

- 根据实际测量总结, 使得 $U_g \sim g$ 线性关系成立的 δ 范围, $R_0 = 50\Omega$ 时变窄, $R_0 = 5000\Omega$ 时略有变宽 (其实几乎无差别), 即随 R_0 的减小而变窄;
- 零点附近的绝对灵敏度会随 R_0 变大而变低。

5.2.3 实验三: 测量铜丝电阻、电阻温度系数在 0°C 和 20°C 时的值和不确定度

温度 18°C 时, $U_{g0\min} = -0.008\text{mV}$, 接入铜丝后, U_g 变为 2.247mV , 利用公式 (3), 代入计算得 $\Delta R = 0.2255\Omega$.

利用表 4 数据和公式 (3) 得到 T 与 R 的对应表格如下:

$T(^{\circ}\text{C})$	$R_{Cu}(\Omega)$	$T(^{\circ}\text{C})$	$R_{Cu}(\Omega)$	$T(^{\circ}\text{C})$	$R_{Cu}(\Omega)$	$T(^{\circ}\text{C})$	$R_{Cu}(\Omega)$
18	0.2255	23	0.2286	28	0.2321	33	0.236
38	0.2394	43	0.2433	48	0.2470	53	0.2509
58	0.2550	63	0.2601	68	0.2644	73	0.2692
78	0.2737	83	0.2791	88	0.2840	85	0.2808

表 8

用软件拟合得到曲线如下:

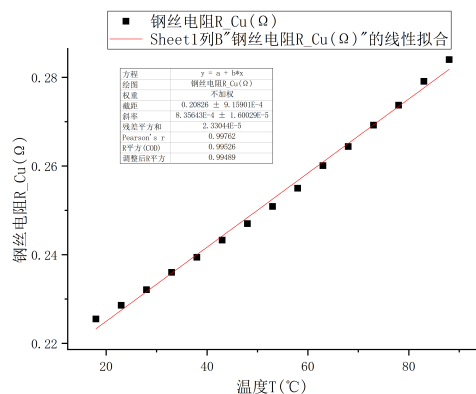


图 5

$$R_{Cu}(T) = 8.356 \times 10^{-4}T + 0.2083.$$

经过计算, $\frac{u_{\alpha_0}}{\alpha_0} = 0.0515$.

若使用电阻定律, 计算得到当温度 20°C 时, $R_{Cu}(T) = 0.1889(\Omega)$. 而我们通过实验得到的曲线线性拟合后计算得到 R 为 0.2250Ω . 可以知道: 实验测得的铜丝电阻偏大, 猜测是由于铜丝缠绕的铁柱里的电阻不可忽略或由于在温度计读数时, 水温和铜丝温度的差距不可忽略导致的。

5.3 思考题

1. 平衡电桥是把待测电阻与标准电阻进行比较, 通过调节电桥平衡, 从而测得待测电阻值, 如直流电桥 (开尔文电桥)。平衡电桥只能用于测量具有相对稳定状态的物理量。非平衡电桥由于在实际工程中和科学实验中测量连续变化的物理量。平衡电桥和非平衡电桥之间互相补充对方在测量物理量的不足之处, 属于互补关系。

2. 由公式 (1), 当 $\Delta R \leq 0$ 时, K 的变化量比当 $\Delta R \geq 0$ 时大, 所以当 $|\Delta R|$ 一定时, $R_4 < 1000\Omega$ 时的 U_g 值比 $R_4 > 1000\Omega$ 时的值绝对值大。
3. 由题目易得: 测量次数 $n=11$ (初始有一次测量), 可以知道每一次测量电阻变化 $\Delta R = 5\Omega$, 所以根据公式 (3), 可以解得结果为: $R_0 \leq 2500\Omega$. 又因为保持 (与理论线性之间的) 误差小于 5% 的线性范围, 即 δ 应该满足: $-0.095 \leq \delta \leq 0.105$, 解得: $R_0 \geq 475\Omega$. 综上, $475\Omega \leq R_0 \leq 2500\Omega$.
4. $\eta = \frac{\alpha - \alpha_2}{\alpha} = \frac{0.00303 - 0.0037}{0.00393} = 5.9\%$, 实验所得的电阻温度系数偏小。分析误差: 由于铜丝缠绕于两根金属棒上, 在加热时金属棒温度也会随之升高, 所以测得的电阻温度系数会受金属棒的影响。 U_{g0min} 的测量可能会有误差。

6 总结

直流非平衡电桥实验通过三个分实验探究了非平衡电桥的简要测量方法。我从本次实验中了解到了非平衡电桥的搭建方法与性质, 以及运用非平衡电桥测量变化的物理量的方法。