

直流非平衡电桥

姓名 PB*****

学院级本科**班

年月**日 14:00 *号台

摘要：本实验运用非平衡电桥探究了电阻变化量与引起其变化的物理量之间的关系，采用外接电阻箱法和线性拟合的操作手段对实验结果进行分析，可知增大 R_0 可以扩大线性范围，减小线性拟合的相对误差，但零点灵敏度不足，而采用较小的 R_0 可以大大增加灵敏度，并且对电阻相对量的范围影响较小，并给出了对电阻温度系数的不确定度分析。

关键词：非平衡电桥；外接电阻箱法；线性拟合

1 前言

直流电桥可用于精密测量电阻，按照测量方式课分为平衡电桥与非平衡电桥，其中平衡电桥只能测量具有相对稳定状态的物理量，但非平衡电桥通过测量连续变化的电阻值，可以测量连续变化的物理量。根据桥式电路中电桥输出的不平衡电压，进行相应的线性运算处理可以得到电阻的变化量，进而可以探究电阻变化量与引起其变化的物理量之间的关系。

2 实验原理和方法

2.1 实验仪器

直流稳压电源、电阻箱、万用表（伏特表）、Keithy2000（微伏表）、漆包线铜丝、加热台、温度计、导线、陶瓷杯等。

2.2 实验原理

直流非平衡电桥在桥臂电阻值满足 $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3}$ 时电桥平衡，即 $U_g = 0$ 。

若 R_4 变为 $R_4 + \Delta R$ ， $U_g \neq 0$ ，为非平衡状态。 U_g 为高精度电压表值，测量两条支路中间节点的电压差，也就是输出电压假设电压表内阻近似于无穷大，应用电路分析知识，可得

$$U_g = \frac{R_2 R_4 + R_2 \Delta R - R_1 R_3}{(R_1 + R_4)(R_2 + R_3) + \Delta R(R_2 + R_3)} U_s; \text{ 我们采用等臂电桥, 即 } R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0.$$

将上述二式化简可得 $U_g = \frac{U_s}{4} \delta \frac{1}{1 + \frac{\delta}{2}}$ ， $\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$ 称为电阻的应变变量。若使电阻变化量远小于电阻阻值，则 δ 接近于 0。此时有 $U_g = \frac{U_s}{4} \delta$ 。

此时，非平衡电桥输出的电压 U_g 与桥臂电阻值的变化量 ΔR 成正比，为线性关系。当 ΔR 较大时，分母上的 $\frac{\delta}{2}$ 不能忽略， U_g 与 ΔR 呈非线性关系。

3 实验步骤

3.1 实验一

1. 将电路连接好，设置电源输出电压为 2.0V，取电桥为等臂， $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1\text{k}\Omega$ ，微调 R3 阻值，使 $U_g = 0$ ，记录 R_3 。
2. 改变 R4 从 800 到 1200 Ω ，每次变化量为 Ω ，记录 U_g 的值，作出 $U_g - \delta$ 曲线。
3. 根据理想情况下，即 δ 接近于 0 时的公式，过原点作一条直线 $U_g^{theory} - \delta$ ，并与实际测量得到的曲线作比较，得出 $U_g - \delta$ 线性关系成立的 δ 取值范围。
4. 计算电桥在此桥臂电阻值下，零点附近的绝对灵敏度。

3.2 实验二

1. 取电桥为等臂，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ ，第一次 $R_0 = 5000\Omega$ ，第二次为 50Ω 。微调 R_3 使 $U_g = 0$ ，记录取值。
2. 改变 R_4 电阻，步长为 2%，范围为正负 20%。测量并记录数据，画图测算线性范围，并计算零点绝对灵敏度和相对灵敏度。
3. (a) 根据 $U_g - \delta$ 线性关系成立的 δ 取值范围变化，得出其与 R_0 大小的关系。
(b) 根据零点绝对灵敏度变化，得出其与 R_0 大小的关系。

3.3 实验三

1. 取桥臂电阻值为 50Ω ，微调 R_3 使得 U_g 尽可能小。
2. 把 3 米长，直径为 0.60 毫米的铜丝漆包线串联在 R_4 所在的桥臂上。把铜丝浸没在陶瓷杯内水中，测量水温 t ，记录水温并测量对应的 U_g 值，计算铜丝当前温度下的电阻值 $R_{Cu}(t)$ 。
3. 用加热台对杯内水进行加热，铜丝温度缓慢上升，每隔 5 摄氏度记录对应 U_g 值，直到水温达到 85 摄氏度为止。
4. 根据不同温度下的 U_g 值，利用理想状态下的线性关系计算出铜丝在各个温度点下的电阻值 $R_{Cu}(t)$ ，并作出 $R_{Cu} - t$ 拟合直线，求其斜率 $k = \frac{dR}{dt}$ ，并推算 0 摄氏度和 20 摄氏度下的铜丝拟合电阻值 \bar{R}_0 和 \bar{R}_2 。
5. 根据电阻温度系数定义公式 $\alpha_T = \frac{k}{R_T}$ ，计算铜丝在 0 摄氏度和 20 摄氏度下的 α_T 。最后，分析和计算二个不同温度处的电阻温度系数 α_T ，以及 $P = 95\%$ 置信概率下的不确定度 u_α 。
6. 将非平衡电桥测量出的铜丝电阻值与用电阻定律公式的计算值进行比较，分析产生差别的原因。

4 实验结果和分析

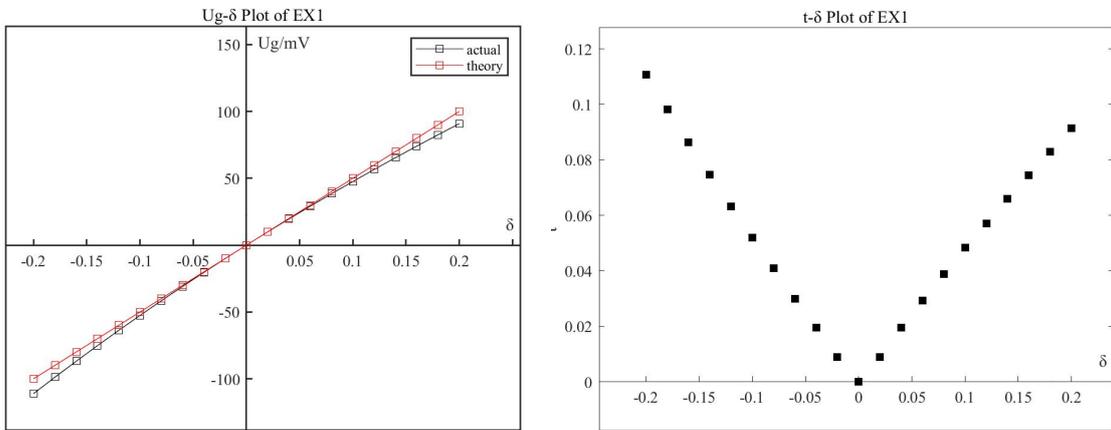
4.1 数据记录和处理

4.1.1 实验一

$R_0 = 1k\Omega$ 时, U_g 与 δ 之间的关系, 此时 $R_3 = 1000.01\Omega$

ex1	初态R3=1000.01Ω						Ug≈0.0007mV					
R4/Ω	800	820	840	860	880	900	920	940	960	980	1000	
δ	-0.2	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.1	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	0	
Ug/mV	-111.07	-98.84	-86.90	-75.22	-63.79	-52.60	-41.64	-30.90	-20.39	-10.09	0.002	
R4/Ω	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180	1200		
δ	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2		
Ug/mV	9.91	19.61	29.12	38.45	47.58	56.58	65.39	74.04	82.53	90.87		

由此可绘制出 $U_g - \delta$ 曲线与 $t - \delta(t = \frac{|U_g^{\text{theory}} - U_g^{\text{actual}}|}{U_g^{\text{theory}}})$ 散点图, 如下:



对记录到的实验数据逐点进行分析, 受制于测量精度, 可知在 $(-0.0943, 0.1066)$ 范围内, U_g 与 δ 线性关系成立。与理论上线性关系成立的 δ 取值范围相比基本吻合。

在零点附近的电桥绝对灵敏度为

$$S_{U_a} = \frac{1}{4} \frac{U_s}{R_0} = 0.5mA$$

相对灵敏度为

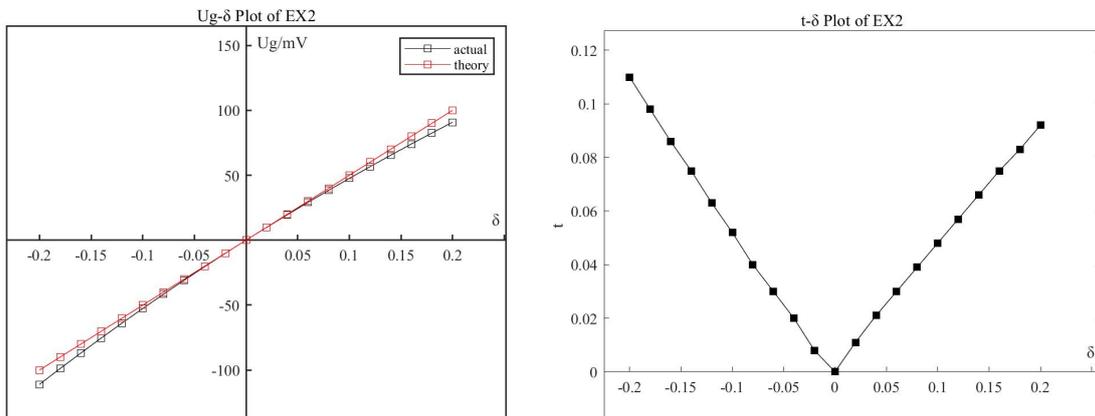
$$S_{U_r} = \frac{1}{4} U_s = 0.5V$$

4.1.2 实验二

1. $R_0 = 5k\Omega$ 时, U_g 与 δ 之间的关系, 此时 $R_3 = 5001.1\Omega$

ex2.1	R0=5kΩ		初态R3=4998.70Ω					Ug≈0.0010mV				
R4/kΩ	4	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5	
δ	-0.2	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.1	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	0	
Ug/mV	-111.04	-98.83	-86.90	-75.22	-63.78	-52.60	-41.62	-30.91	-20.39	-10.08	0.00	
R4/kΩ	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5	5.6	5.7	5.8	5.9	6		
δ	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2		
Ug/mV	9.89	19.59	29.10	38.43	47.58	56.56	65.38	74.03	82.52	90.85		

由此可绘制出 $U_g - \delta$ 曲线与 $t - \delta (t = \frac{|U_g^{\text{theory}} - U_g^{\text{actual}}|}{U_g^{\text{theory}}})$ 散点图，如下：



对记录到的实验数据逐点进行分析，受制于测量精度，可知在 $(-0.0999, 0.10624)$ 范围内， U_g 与 δ 线性关系成立。与理论上线性关系成立的 δ 取值范围相比基本吻合。

在零点附近的电桥绝对灵敏度为

$$S_{U_a} = \frac{1}{4} \frac{U_s}{R_0} = 0.1 \text{mA}$$

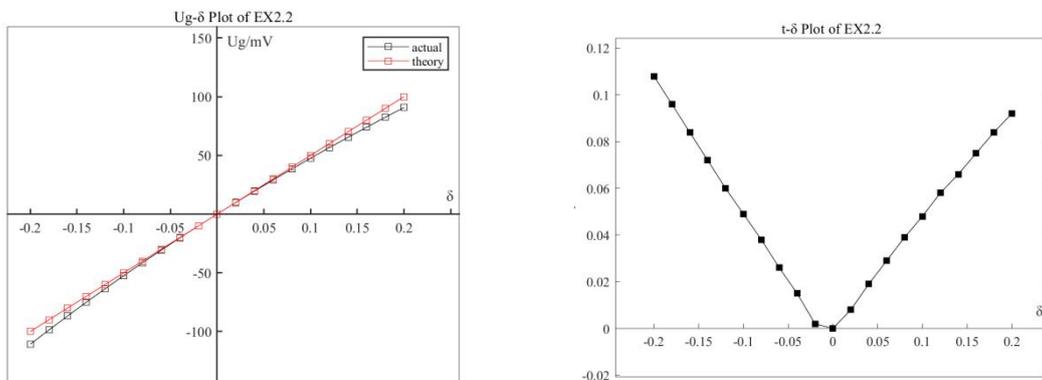
相对灵敏度为

$$S_{U_r} = \frac{1}{4} U_s = 0.5V$$

2. $R_0 = 50\Omega$ 时， U_g 与 δ 之间的关系，此时 $R_3 = 50.05\Omega$

ex2.2	R0=50Ω				初态R3=50.03Ω				Ug≈0.0217mV				
R4/Ω	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50		
δ	-0.2	-0.18	-0.16	-0.14	-0.12	-0.1	-0.08	-0.06	-0.04	-0.02	0		
Ug/mV	-110.81	-98.63	-86.71	-75.04	-63.62	-52.45	-41.50	-30.79	-20.29	-10.00	0.0217		
R4/Ω	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60			
δ	0.02	0.04	0.06	0.08	0.1	0.12	0.14	0.16	0.18	0.2			
Ug/mV	9.92	19.62	29.12	38.44	47.58	56.55	65.35	73.99	82.47	90.79			

由此可绘制出 $U_g - \delta$ 曲线与 $t - \delta (t = \frac{|U_g^{\text{theory}} - U_g^{\text{actual}}|}{U_g^{\text{theory}}})$ 散点图，如下：



对记录到的实验数据逐点进行分析,受制于测量精度,可知在 $(-0.0948, 0.1056)$ 范围内, U_g 与 δ 线性关系成立。与理论上线性关系成立的 δ 取值范围相比基本吻合。

在零点附近的电桥绝对灵敏度为

$$S_{U_a} = \frac{1}{4} \frac{U_s}{R_0} = 0.01A$$

相对灵敏度为

$$S_{U_r} = \frac{1}{4} U_s = 0.5V$$

4.1.3 实验三

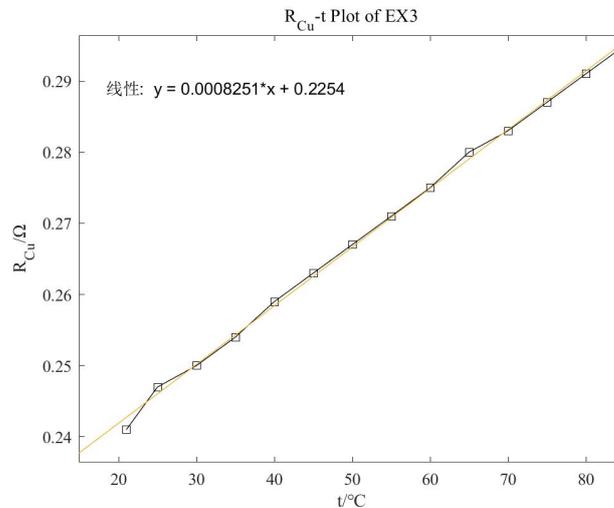
$$R_0 = 50\Omega, U_{g \min} = 0.0217mV, R_3 = 50\Omega$$

ex3	R0=50Ω			Us=2.0V			初态R3=50.03Ω				Ug≈0.0217mV			
t/°C	21	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Ug/mV	2.41	2.47	2.50	2.54	2.59	2.63	2.67	2.71	2.75	2.80	2.83	2.87	2.91	2.95

由 2.2 节公式(4), 可计算出铜丝电阻

t/°C	21	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
Rcu/Ω	0.241	0.247	0.25	0.254	0.259	0.263	0.267	0.271	0.275	0.28	0.283	0.287	0.291	0.295

由此可绘制出 $R_{Cu} - t$ 拟合曲线, 如下图



拟合直线的斜率 $k = 8.251 \times 10^{-4} \Omega/^\circ C$, 由此计算 $0^\circ C$ 和 $20^\circ C$ 时铜丝电阻拟合值分别为 $\widetilde{R}_0 = 0.2254\Omega, \widetilde{R}_2 = 0.2419\Omega$. 根据电阻温度系数定义公式 $\alpha_T = \frac{k}{R_T}$, 可计算铜丝在 $0^\circ C$ 和 $20^\circ C$ 时的电阻温度系数为 $\alpha_0 = 0.00366^\circ C^{-1}, \alpha_{20} = 0.00341^\circ C^{-1}$.

类似地, 可以选取 $40^\circ C$ 和 $60^\circ C$ 时的拟合数据计算对应的电阻温度系数, 得到 $\alpha_{40} = 0.00319^\circ C^{-1}, \alpha_{60} = 0.00300^\circ C^{-1}$, 并有 A 类不确定度 $u_A = 1.13007 \times 10^{-4}$.

根据电阻定律公式计算, $R_{20} = 0.189\Omega$, 和实验结果有很大差别。原因可能是铜丝漆包线破损导致漏电。

5 结论

非平衡电桥是一种精密的测量电阻仪器，在本次实验中我们学习了其组成与工作原理，应用外接电阻箱法，通过测量桥路输出电压与电阻改变量探究了引起电阻变化的物理量。分析实验结果可以知道增大 R_0 可以扩大线性范围，减小线性拟合的相对误差，但零点灵敏度不足；采用较小的 R_0 可以大大增加灵敏度，并且对电阻相对量的范围影响较小。