

非平衡电桥实验报告

摘要

非平衡电桥在工业和生产上有广泛的应用。本实验以控制变量法为基础，电阻箱、铜丝、加热台等材料和工具，简单探讨了电阻变化量与物理量之间的变化关系，了解了非平衡电桥的基本性质和铜丝电阻与温度之间的关系，并给出了一些实验结果偏差的讨论。

关键词

非平衡电桥；外接电阻箱法；线性拟合。

1. 引言

直流电桥是一种精密的电阻测量仪器，具有重要的应用价值，按电桥的测量方式可分为平衡电桥和非平衡电桥。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，如单臂直流电桥（惠斯登电桥）、双臂直流电桥（开尔文电桥），它们只能用于测量具有相对稳定状态的物理量。但在实际工程和科学实验中，很多物理量是连续变化的，只能采用非平衡电桥才能测量。

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。

2. 实验原理和方法

2.1. 实验仪器

直流稳压电源、电阻箱、Keithy2000（微伏表）、漆包线铜丝、加热台、温度计、导线、烧缸等。

2.2. 实验原理

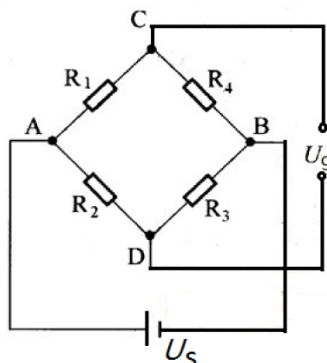


图 1 非平衡电桥电路图

直流非平衡电桥原理如图 1 所示。

当 $\frac{R_3}{R_2} = \frac{R_4}{R_1}$ 时，电桥平衡，有 $U_g = 0$ 。

当用 $R_4 + \Delta R$ 代替 R_4 时， $\frac{R_3}{R_2}$ 不等于 $\frac{R_4 + \Delta R}{R_1}$ ，此时 U_g 不等于 0，为非平衡状态。

U_g 为高精电压表值，测量C、D二点输出电压（电压表内阻看着无穷大），应用电路分析知识，可算出输出的非平衡电压为：

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

分析上式，可以得到电桥的三种形式：

- (1) 等臂电桥： $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 \equiv R_0$
- (2) 卧式电桥： $R_1 = R_4, R_2 = R_3$ （关于输出对称电桥）
- (3) 立式电桥： $R_1 = R_2, R_3 = R_4$ （关于电源对称电桥）

将等臂条件代入（1）式经简化得：

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

其中 $\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$ 称为电阻的应变变量，或叫“相对改变量”。我们在设计电桥时，令 $\Delta R \ll R_0$ ，则 $\delta \rightarrow 0$ ，于是有：

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

这样，非平衡电桥输出电压 U_g 与桥臂电阻的变化量 ΔR ，成正比，为线性关系。当 ΔR 较大时，（2）式中的 $\delta/2$ 项不能省略，此时 U_g 与 δ 呈非线性关系。

3. 实验内容和步骤

3.1. 实验一：研究非平衡电桥的输出的线性范围和灵敏度

用外接电阻箱法研究非平衡电桥的 U_g 与 δ 的关系，作出 $U_g - \delta$ 曲线，并对此实验曲线与理想直线（式（3））之间进行误差分析，以确定电桥输出的线性范围和灵敏度。

实验步骤如下：

- (1) 调节电源输出电压，同时用万用表直流电压档来校准，使其输出电压为 $U_s = 2.0V$ 。电路如图 1 所示并用导线连接好，用高精度台式万用表（Keithy2000）来测量 U_g 。
- (2) 先取电桥为等臂，即： $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0 = 1k\Omega$ ，由于导线存在有一定的电阻，微调 R_3 的值，使 U_g 为零，此时电桥平衡，并记录 R_3 的具体值。
- (3) 改变 R_4 从 800Ω 至 1200Ω ，每次变化量为 20Ω ，按顺序记下各 U_g 的值，作出 $U_g - \delta$ 曲线。
- (4) 根据公式（3）过原点作一条直线 $U_g^{理论} - \delta$ ，并与实际测量的 $U_g^{实测} - \delta$ 曲线进行比较，得出 $U_g - \delta$ 的线性关系成立的 δ 取值范围。
- (5) 测算在此桥臂电阻值下，电桥在零点附近的绝对灵敏度。

3.2. 实验二：研究桥臂电阻对非平衡电桥的输出的线性范围和灵敏度的影响

保持电源电压 $U_s = 2.0V$ 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。

实验步骤如下：

- (1) 电路图仍如图 1 所示，保持电源电压 $U_s = 2.0V$ 不变，取电桥为等臂，即 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_0$ ， R_0 改取 5000Ω 和 50Ω ，微调 R_3 的值，使 U_g 为零，此时电桥平衡，并记录 R_3 的具体值。
- (2) 改变 R_4 的阻值，每次改变量为 $R_4/2\%$ 。取值范围取 $(R_0 - 20\%R_0, R_0 + 20\%R_0)$ 。记录桥路输出电压数据，画图测算线性范围，并计算电桥在零点附近的绝对灵敏度。
- (3) 结合实验一数据，分析 U_g 与 δ 之间近似满足线性关系时的 R_4 取值范围，此范围的长度 ΔR_4 与 R_0 大小之间的关系；同时分析实测零点绝对灵敏度大小与 R_0 大小之间的关系。

3.3. 实验三：使用非平衡电桥测量铜丝的电阻温度系数

利用搭建的直流非平衡电桥，测量并记录铜丝的电阻，以及其电阻随温度的改变值。计算铜丝的电阻温度系数，在 0°C 和 20°C 时的值和不确定度。

实验步骤如下：

- (1) 由于铜丝电阻较小，取桥臂电阻为 50Ω ，用 Keithy2000 来测量桥路输出电压 U_g 。保持恒压源输出电压为 $2.0V$ ，微调 R_3 的值，使 U_g 尽可能的小 ($< |0.01\text{mV}|$)，并记录对应的 $U_{g0\text{min}}$ 。
- (2) 把 3m 长，直径为 0.60mm 的铜丝（漆包线）串联到 R_4 所在的桥臂上。把铜丝浸没在陶瓷杯内的水中，用温度计测量水温 t ，记录水温并测量当前水温下桥路输出电压 $U_g(t)$ 值，并与没有串联铜丝时 $U_{g0\text{min}}$ 比较。
- (3) 用加热台对杯子里水进行加热，铜丝温度缓慢上升。每隔 5°C 记录一下对应的 $U_g(t)$ ，直到 85°C 为止。
- (4) 根据各个不同温度点下的 $U_g(t)$ 值（与没有串联铜丝时 $U_{g0\text{min}}$ 比较），利用简单的线性关系（式（3）），计算出铜丝在各个温度点下的电阻值 $R_{Cu}(t)$ ，并作出 $R_{Cu}(t) - t$ 的散点图以及拟合直线。求出拟合直线的斜率，并推算 0°C 和 20°C 时的铜丝电阻。
- (5) 根据电阻温度系数定义式 $\alpha_T = k/R_T$ ，计算铜丝的在 0°C 和 20°C 处的电阻温度系数 α_t ，以及在 $P = 95\%$ 置信概率下的相对不确定度 u_α/α 和绝对不确定度 u_α （A 类不确定度）。

4. 实验结果和分析

4.1. 实验一：研究非平衡电桥的输出的线性范围和灵敏度

4.1.1. 测算线性关系成立范围

表 1: $R_0 = 1k\Omega$ 时，桥路二端点 C、D 输出电压差与桥臂电阻改变量 ΔR 的关系 ($R_3 = 999.6\Omega$)

$R_4(\Omega)$	800	820	840	860	880	900	920	940	960	980	1000
$\Delta R = R_4 - R_0 (\Omega)$	-200	-180	-160	-140	-120	-100	-80	-60	-40	-20	0
$U_g\text{实测}(\text{mV})$	-111.1282	-98.9175	-86.973	-75.2835	-63.8448	-52.6433	-41.6708	-30.9325	-20.4115	-10.1048	0
$U_g\text{线性}(\text{mV})$	-100.0000	-90.0000	-80.0000	-70.0000	-60.0000	-50.0000	-40.0000	-30.0000	-20.0000	-10.0000	0
$ [U_g\text{线性} - U_g\text{实测}]/U_g\text{线性} $	0.1113	0.0991	0.0872	0.0755	0.0641	0.0529	0.0418	0.0311	0.0206	0.0105	0
$R_4(\Omega)$	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180	1200	
$\Delta R = R_4 - R_0 (\Omega)$	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200	
$U_g\text{实测}(\text{mV})$	9.8966	19.604	29.124	38.4589	47.6195	56.6046	65.4225	74.0765	82.5721	90.9124	
$U_g\text{线性}(\text{mV})$	10.0000	20.0000	30.0000	40.0000	50.0000	60.0000	70.0000	80.0000	90.0000	100.0000	
$ [U_g\text{线性} - U_g\text{实测}]/U_g\text{线性} $	0.0103	0.0198	0.0292	0.0385	0.0476	0.0566	0.0654	0.0740	0.0825	0.0909	

非平衡电桥实验报告

信息科学技术学院

PB23061234

房杰

PHYS1009B.05

2024 年 12 月 9 日

根据此表做出 $U_g - \Delta R$ 拟合曲线。根据公式 (3) 过原点做一条直线 $U_g^{\text{理论}} = 500\delta$, 令 $U_\delta = \frac{|U_g^{\text{实测}} - U_g^{\text{理论}}|}{|U_g^{\text{理论}}|}$, 并做出 $U_\delta - \Delta R$ 关系图, 当 $U_\delta < 0.05$ 时, 即认为 $U_g - \Delta R$ 线性关系成立。

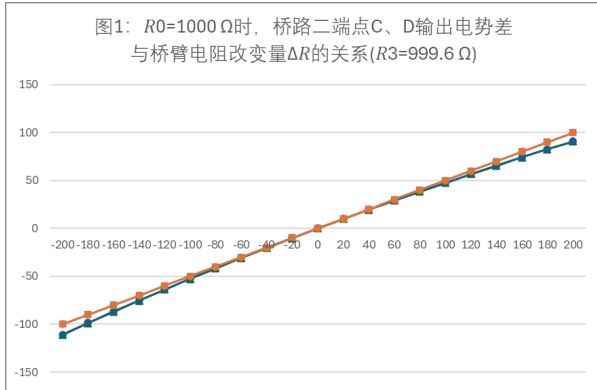


图 4.1.1 $R_0 = 1000\Omega$ 时 $U_g^{\text{理论}} - \delta$ 直线以及 $U_g^{\text{实际}} - \delta$ 拟合曲线

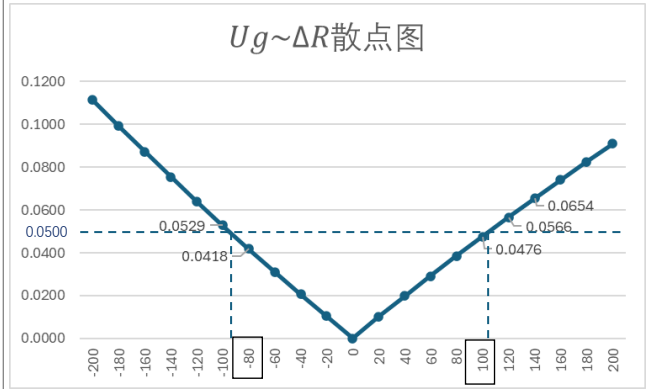


图 4.1.2 $R_0 = 1000\Omega$ 时 $U_\delta - \delta$ 关系图

如图 4.1.1、图 4.1.2 所示, $U_g - \Delta R$ 线性关系成立的 ΔR 取值范围为 $-80 < \Delta R < 100$, $U_g - \delta$ 线性关系成立的 δ 取值范围为 $-0.08 < \delta < 0.10$, 与理论值误差均小于 5%, 误差在合理范围内。

此时 R_4 取值范围为 $920\Omega < R_4 < 1100\Omega$ 。

4.1.2. 测算电桥在零点附近的绝对灵敏度

在 $\delta = 0$ 处, 绝对灵敏度 $S = \frac{U_\delta}{4R_0} = \frac{2}{4 \times 1000} = 0.0005$ 。

4.2. 实验二: 研究桥臂电阻对非平衡电桥的输出的线性范围和灵敏度的影响

4.2.1. 当 $R_0 = 5000\Omega$ 时

实验数据如下表:

表 2: $R_0 = 5k\Omega$ 时, 桥路二端点 C、D 输出电压差与桥臂电阻改变量 ΔR 的关系 ($R_3 = 4999.5\Omega$)

$R_4(\Omega)$	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4700	4800	4900	5000
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	-1000	-900	-800	-700	-600	-500	-400	-300	-200	-100	0
$U_g^{\text{实测}}(\text{mV})$	-111.1482	-98.9356	-86.9878	-75.2965	-63.8528	-52.6508	-41.6832	-30.9412	-20.4189	-10.1072	0
$U_g^{\text{线性}}(\text{mV})$	-100.0000	-90.0000	-80.0000	-70.0000	-60.0000	-50.0000	-40.0000	-30.0000	-20.0000	-10.0000	0
$ U_g^{\text{线性}} - U_g^{\text{实测}} / U_g^{\text{线性}}$	0.1115	0.0993	0.0873	0.0757	0.0642	0.0530	0.0421	0.0314	0.0209	0.0107	0
$R_4(\Omega)$	5100	5200	5300	5400	5500	5600	5700	5800	5900	6000	
$\Delta R = R_4 - R_0(\Omega)$	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
$U_g^{\text{实测}}(\text{mV})$	9.9032	19.6125	29.1342	38.4716	47.6343	56.6219	65.4408	74.0965	82.5952	90.9365	
$U_g^{\text{线性}}(\text{mV})$	10.0000	20.0000	30.0000	40.0000	50.0000	60.0000	70.0000	80.0000	90.0000	100.0000	
$ U_g^{\text{线性}} - U_g^{\text{实测}} / U_g^{\text{线性}}$	0.0097	0.0194	0.0289	0.0382	0.0473	0.0563	0.0651	0.0738	0.0823	0.0906	

根据此表做出 $U_g - \Delta R$ 拟合曲线。根据公式 (3) 过原点做一条直线 $U_g^{\text{理论}} = 500\delta$, 令 $U_\delta = \frac{|U_g^{\text{实测}} - U_g^{\text{理论}}|}{|U_g^{\text{理论}}|}$, 并做出 $U_\delta - \Delta R$ 关系图, 当 $U_\delta < 0.05$ 时, 即认为 $U_g - \Delta R$ 线性关系成立。

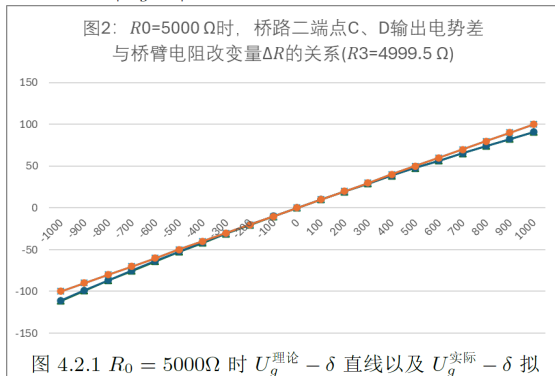


图 4.2.1 $R_0 = 5000\Omega$ 时 $U_g^{\text{理论}} - \delta$ 直线以及 $U_g^{\text{实际}} - \delta$ 拟合曲线

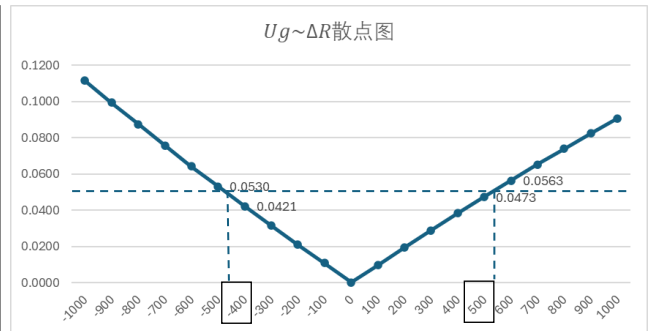


图 4.2.2 $R_0 = 5000\Omega$ 时 $U_\delta - \delta$ 关系图

非平衡电桥实验报告

信息科学技术学院

PB23061234

房杰

PHYS1009B.05

2024 年 12 月 9 日

如图 4.2.1, 图 4.2.2 所示, $U_g - \Delta R$ 线性关系成立的 ΔR 取值范围为 $-400 < \Delta R < 500$, $U_g - \delta$ 线性关系成立的 δ 取值范围为 $-0.08 < \delta < 0.10$, 与理论值误差均小于 5%, 误差在合理范围内。此时 R_4 取值范围为 $4600\Omega < R_4 < 5500\Omega$ 。

同实验一方法, 在 $\delta = 0$ 处, 绝对灵敏度 $S = \frac{U_S}{4R_0} = \frac{2}{4 \times 5000} = 0.0001$ 。

4.2.2. 当 $R_0 = 50\Omega$ 时

实验数据如下表:

表 3: $R_0 = 50\Omega$ 时, 桥路二端点 C、D 输出电压差与桥臂电阻改变量 ΔR 的关系 ($R_3 = 49.91\Omega$)

R4(Ω)	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
$\Delta R = R_4 - R_0$ (Ω)	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
Ug实测(mV)	-110.8512	-98.6402	-86.692	-75.0223	-63.5978	-52.4206	-41.4682	-30.7362	-20.2296	-9.9364	0
Ug线性(mV)	-100.0000	-90.0000	-80.0000	-70.0000	-60.0000	-50.0000	-40.0000	-30.0000	-20.0000	-10.0000	0
$ (Ug线性 - Ug实测)/Ug线性 $	0.1085	0.0960	0.0836	0.0717	0.0600	0.0484	0.0367	0.0245	0.0115	-0.0064	0
R4(Ω)	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	
$\Delta R = R_4 - R_0$ (Ω)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Ug实测(mV)	9.985	19.6985	29.2048	38.5309	47.6742	56.651	65.4641	74.1108	82.5966	90.8876	
Ug线性(mV)	10.0000	20.0000	30.0000	40.0000	50.0000	60.0000	70.0000	80.0000	90.0000	100.0000	
$ (Ug线性 - Ug实测)/Ug线性 $	0.0015	0.0151	0.0265	0.0367	0.0465	0.0558	0.0648	0.0736	0.0823	0.0911	

根据此表做出 $U_g - \Delta R$ 拟合曲线。根据公式 (3) 过原点做一条直线 $U_g^{\text{理论}} = 500\delta$, 令 $U_\delta =$

$\frac{|U_g^{\text{实测}} - U_g^{\text{理论}}|}{|U_g^{\text{理论}}|}$, 并做出 $U_\delta - \Delta R$ 关系图, 当 $U_\delta < 0.05$ 时, 即认为 $U_g - \Delta R$ 线性关系成立。

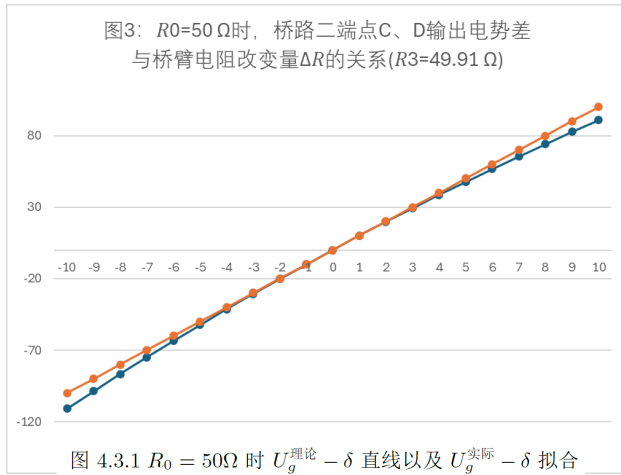


图 4.3.1 $R_0 = 50\Omega$ 时 $U_g^{\text{理论}} - \delta$ 直线以及 $U_g^{\text{实际}} - \delta$ 拟合曲线

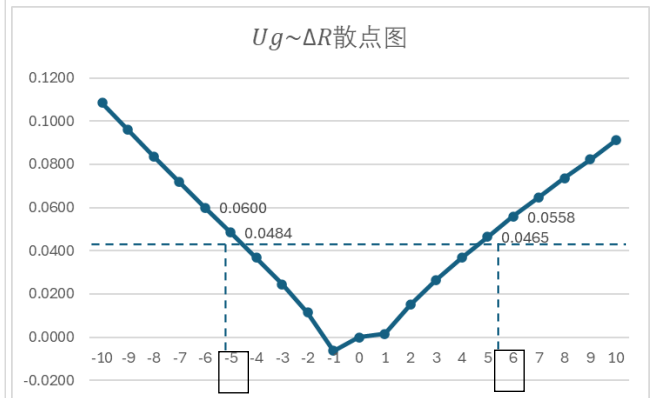


图 4.3.2 $R_0 = 50\Omega$ 时 $U_\delta - \delta$ 关系图

如图 4.3.1, 图 4.3.2 所示, $U_g - \Delta R$ 线性关系成立的 ΔR 取值范围为 $-5 < \Delta R < 6$, $U_g - \delta$ 线性关系成立的 δ 取值范围为 $-0.1 < \delta < 0.12$, 与理论值误差均小于 5%, 误差在合理范围内。此时 R_4 取值范围为 $45\Omega < R_4 < 56\Omega$ 。

同实验一方法, 在 $\delta = 0$ 处, 绝对灵敏度 $S = \frac{U_S}{4R_0} = \frac{2}{4 \times 50} = 0.01$ 。

4.2.3. 总结

综合在 $R_0 = 1000\Omega$, $R_0 = 5000\Omega$, $R_0 = 50\Omega$ 下的三组数据, 发现 R_0 越大, $U_g - \delta$ 线性关系成立的 δ 取值范围越大, 零点绝对灵敏度越小。

4.3. 实验三: 使用非平衡电桥测量铜丝的电阻温度系数

测量结果如下表所示。

T(°C)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
Ug/mV	2.6041	2.6348	2.6650	2.6967	2.7336	2.7730	2.8152	2.8625	2.9000	2.9372	2.9762	3.0140	3.0584	3.0685
R/mΩ	251.41	254.48	257.50	260.67	264.36	268.30	272.52	277.25	281.00	284.72	288.62	292.40	296.84	297.85

其中 $R = 4 \frac{U_g - U_{gmin}}{U_S}$, $U_{gmin} = 0.09mV$.

由此可绘制出 $R_{Cu} - t$ 拟合曲线如下图:

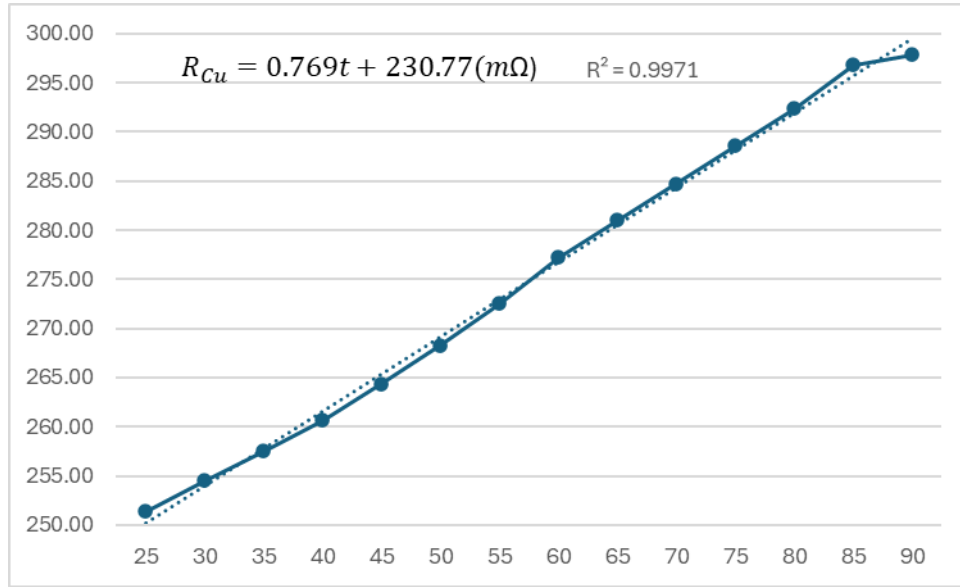


图 4.3 温度与铜丝电阻的关系

如图 4.3 所示, $R_{Cu} = 0.769t + 230.77(m\Omega)$ 。由此计算出在 0°C 和 20°C 时铜丝电阻的拟合值分别为 $230.77m\Omega$ 和 $246.15m\Omega$ 。根据电阻温度系数定义公式 $\alpha_T = k/R_T$, 铜丝在 0°C 和 20°C 时电阻温度系数为 $0.00333(^{\circ}\text{C})^{-1}$ 和 $0.00312(^{\circ}\text{C})^{-1}$ 。

由图, 相关系数 $r = 0.99855$

斜率 k 的标准不确定度 $u_k = k \sqrt{\frac{1}{12-2} - \frac{1}{12-2}} = 1.312 \times 10^{-2}$

截距 b 的标准不确定度 $u_b = \sqrt{x^2} u_k = 0.9459$

设斜率与截距的相关系数为 0, 则相对不确定度 $\frac{u_a}{a} = \sqrt{\left(\frac{u_k}{k}\right)^2 + \left(\frac{u_b}{b}\right)^2} = 1.755 \times 10^{-2}$

20°C 时绝对不确定度 $u_{a_{20}} = \frac{u_a}{a} \times R_{20^{\circ}\text{C}} = 4.320 \times 10^{-3}$

根据铜丝参数 $\rho = 0.0175\Omega \times \frac{mm^2}{m}$; $l = 3m$; $\Phi = 0.60mm$, 得出 20°C 下, 铜丝电阻为 0.1857Ω 。

与实验结果的误差达到了 30.58%, 猜测可能是因为铜丝漆包线破损导致漏电使得电阻变大。

5. 思考题

5.1. 简述直流非平衡电桥与直流平衡电桥的关系

直流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。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。

因此, 直流非平衡电桥可以看作是直流平衡电桥的一种扩展应用形式, 用于测量无法通过平衡条件精确测量的连续变化的物理量。

5.2. 为什么在实验内容 1 中, ΔR_4 的绝对值相同时, R_4 小于 1000Ω 时的 U_g 值比 R_4 大于 1000Ω 时的 U_g 值, 绝对值大?

因为:

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

对 (2) 式求导得:

$$U_g' = \frac{U_s}{4} \frac{4}{(2 + \delta)^2}$$

故当 $\delta < 0$ 时的 U_g 大于 $\delta > 0$ 时的 U_g , R_4 小于 1000Ω 时的 U_g 变化率更大, 故在 ΔR_4 的绝对值相同时, U_g 的绝对值更大。此点在图 4.1.3, 图 4.2.3, 图 4.3.3 中也有体现。

5.3. 假设用非平衡电桥来测量一个热敏电阻的电阻值随温度的变化, $U_s = 2.0V$, 毫伏表最小刻度为 $1mV$, 在室温 ($35^\circ C$) 到 $85^\circ C$ 度范围内, 热敏电阻的电阻值改变 50Ω 。取等臂电桥, 为了保证测量的灵敏度 (即: 每隔 $5^\circ C$ 读一次输出电压值, 变化量不小于 $1mV$) 并且保持 (与理论线性之间的) 误差小于 5% 的线性范围, 请问 R_0 取多少比较合适? (指取值范围的上、下限。)

$\delta = \frac{\Delta R}{R_0}$ 的理论范围为 $-\frac{10}{105} < \delta < \frac{10}{95}$, 本实验中要求量程为 50Ω , 初始处于零点位置, 同时并不确定热敏电阻是正温度系数还是负温度系数, 因此取 δ 小值进行计算。代入 $\Delta R = 50\Omega$ 得到 $R_0 = 525\Omega$ 。故下限为 $R_0 = 525\Omega$ 。

理论上电桥在零点附近的绝对灵敏度 $S = \lim_{\Delta R \rightarrow 0} \frac{\Delta U_g}{\Delta R} = \frac{U_s}{4R_0}$ 。本实验中要求电阻改变 5Ω 电压改变不小于 $1mV$, 即在零点附近的绝对灵敏度不小于 $0.2mV/\Omega$, 即为 $R_0 < 2500\Omega$ 。

故 $525\Omega < R_0 < 2500\Omega$ 。

5.4. 把计算出来的 Cu 丝电阻温度系数 ($t = 20^\circ C$) 与参考值 $0.00393(^\circ C)^{-1}$ 进行比较, 并分析测量的精确程度, 以及产生误差的可能原因。

测量值为 $0.00393(^\circ C)^{-1}$, 误差为 3.3%。由于实验中测量温度方法较为粗糙, 可能存在测量温度不准确; 同时不同的 Cu 丝可能有微小的差异, 导致温度系数不同。因此该误差可以认为在合理范围内。

6. 参考文献

直流非平衡电桥讲义—2024 年 9 月, 中科大物理实验教学中心

7. 附录: 原始数据

非平衡电桥实验报告

信息科学技术学院

PB23061234 房杰

PHYS1009B.05

2024 年 12 月 9 日

PB23061234 房杰

房杰

1. (1) (2) 记录得 $R_3 = 999.6 \Omega$

(3)

表 1 $R_0 = 1000 \Omega$ 时 CD 输出电压与桥臂电阻改变量的关系 ($R_3 = 999.6 \Omega$)

$R_4 (\Omega)$	800	820	840	860	880	900	920	940	960	980	
$U_g (mV)$	-111.1282	98.9175	-86.9730	-75.2835	-63.8448	-52.6493	-41.6708	-30.9325	-20.4115	-10.1048	
$R_4 (\Omega)$	1000	1020	1040	1060	1080	1100	1120	1140	1160	1180	1200
$U_g (mV)$	0	9.8966	19.6040	29.1240	38.4589	47.6195	56.6046	65.4225	74.0765	82.5721	90.9124

(4)

2. (1) 表 2 $R_0 = 5000 \Omega$ 时 CD 输出电压与桥臂电阻改变量的关系 ($R_3 = 4999.5 \Omega$)

$R_4 (\Omega)$	4000	4100	4200	4300	4400	4500	4600	4700	4800	4900	
$U_g (mV)$	-111.1482	-98.9356	-86.9878	-75.2965	-63.8528	-52.6508	-41.6832	-30.9442	-20.4189	-10.1072	
$R_4 (\Omega)$	5000	5100	5200	5300	5400	5500	5600	5700	5800	5900	6000
$U_g (mV)$	0	9.9032	19.6125	29.1342	38.4716	47.6343	56.6219	65.4408	74.0965	82.5822	90.9365

图...

表 3 $R_0 = 50 \Omega$ 时 CD 输出电压与桥臂电阻改变量的关系 ($R_3 = 49.91 \Omega$)

$R_4 (\Omega)$	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	
$U_g (mV)$	-110.8512	-98.8602	-86.8920	-75.0223	-63.5978	-52.4206	-41.4682	-30.7362	-20.2296	-9.9364	
$R_4 (\Omega)$	50 Ω	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
$U_g (mV)$	0	9.9850	19.5985	29.2048	38.8130	47.6742	56.6510	65.4641	74.1108	82.5966	90.8876

3. (1) $U_{g0min} = 0.09 mV$

(2) 常温水 $22.2^\circ C$, $U_g = 2.5742 mV$

温度 ($^\circ C$)	$25^\circ C$	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
$U_g (mV)$	2.6041	2.6348	2.6650	2.6967	2.7336	2.7730	2.8152	2.8625	2.9000	2.9372	2.9762	3.0140	3.0584	3.0685