

非平衡电桥测量铂电阻的温度系数

马江岩

2021 年 11 月 28 日

摘要

传感器是能感受规定的被测量并按照一定的规律转换成可用输出信号的器件或装置, 通常由敏感元件和转换元件组成. 通过传感器将温度、压力、湿度等非电学量转换为电压等电学量进行检测, 作为现代信息技术的基础——传感器技术越来越广泛地应用在非电学量测量和智能检测、自动控制系统中. 使用电阻型传感器时 (如温度、压力等), 经常用到非平衡电桥电路. 本实验用非平衡电桥和铂电阻温度传感器组成测温电路, 测量此电路的输出-输入特性, 并测定铂电阻的温度系数.

1 用非平衡电桥测量铂电阻的温度系数

设 R_T 为温度 T 时的铂电阻阻值, R_0 为 0°C 时铂电阻的阻值. 在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内, R_T 与 T 的关系可近似为

$$R_T = R_0(1 + A_1 T),$$

其中 A_1 为正温度系数, 约 $3.85 \times 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1}$.

使用非平衡电桥测量铂电阻温度系数的电路如图 1 所示. 图中 I 为电流源; R_1, R_2 为固定电阻, 组成比例电阻; R_P 为可调电阻, 用作平衡电阻; R_T 为铂电阻; U_{out} 为非平衡电桥的输出电压, 则

$$U_{\text{out}} = I_1 R_T - I_2 R_P.$$

如果取 $R_1 = R_2$, 且 $R_1 \gg R_T, R_2 \gg R_P$, 则

$$U_{\text{out}} = \frac{I_0}{2}(R_T - R_P).$$

令 R_P 等于铂电阻在 0°C 时的阻值 R_0 , 代入上式, 则上式可写为

$$U_{\text{out}} = \frac{I_0}{2}\Delta R = \frac{I_0}{2}R_0 A_1 \Delta T. \quad (1)$$

由上式可知, 如果电流 I_0 保持恒定, 检测 U_{out} 的电压表内阻足够大, 非平衡电桥输出电压 U_{out} 和温度的改变量 ΔT 近似呈线性关系.

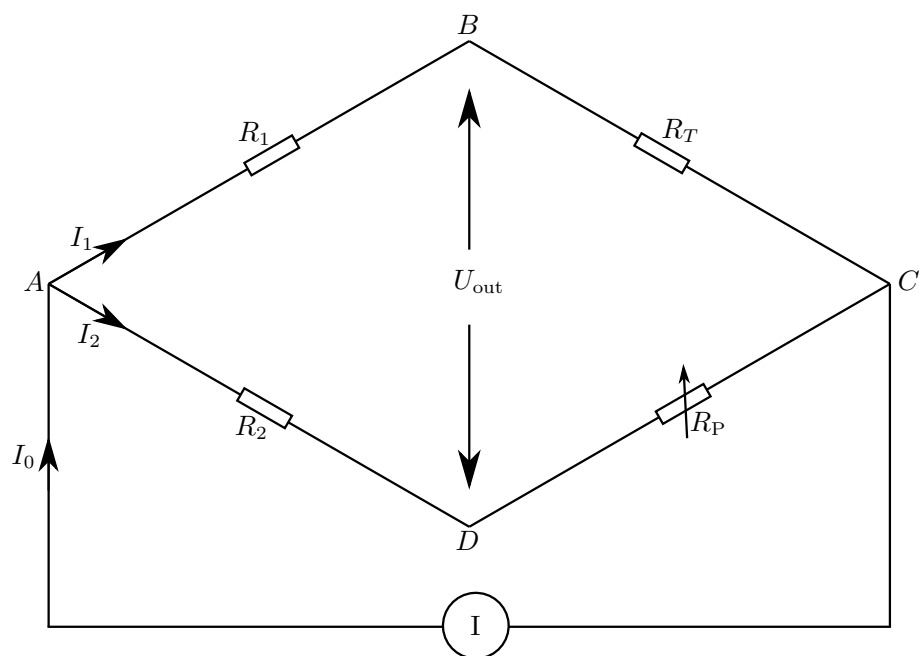


图 1: 非平衡电桥原理图.

实验采用三线接法, 降低了导线电阻和接触电阻的影响.

实验所用 VC9806 型数字万用表 20 mA 挡允差为 $0.5\% \times \text{读数} + 0.004 \text{ mA}$, 200 mV 挡允差为 $0.05\% \times \text{读数} + 0.03 \text{ mV}$, ZX96 型直流电阻箱允差如表 1 所示.

表 1: ZX96 型直流电阻箱允差.

$\times 10 \text{ k}\Omega$	$\times 1 \text{ k}\Omega$	$\times 100 \Omega$	$\times 10 \Omega$	$\times 1 \Omega$	$\times 0.1 \Omega$
$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.1\%$	$\pm 0.5\%$	$\pm 2\%$

按图 1 所示连接电路, 调节 R_P 为铂电阻在 0°C 时的阻值, 即 100.0Ω , 电源电流 $I_0 = 4.001 \text{ mA}$. 将冰水混合物置于保温杯中, 不断搅拌, 注意搅拌的方式应为不断将冰压入水下. 同时将数字温度计及铂电阻温度传感器置于保温杯中, 测得冰水混合物的温度为 0.0°C . 此时

$$U_{\text{out}} = 0.10 \text{ mV}.$$

在电热杯中加入适量水, 为防止水沸腾时溢出, 水面应离杯口至少 4 cm . 将数字温度计及铂电阻温度传感器置于电热杯中, 先不加热, 测得室温为 24.2°C , 此时

$$U_{\text{out}} = 17.60 \text{ mV}.$$

随后加热电热杯, 同时不断搅拌, 每上升一定的温度就停止加热, 待温度稳定时记下此时的 U_{out} , 实验数据如表 2 所示.

表 2: 非平衡电桥测量铂电阻的温度系数实验数据.

$T(^{\circ}\text{C})$	0.0	24.2	40.9	56.5	71.6	83.3	100.0
$U_{\text{out}}(\text{mV})$	0.10	17.60	31.47	43.25	54.58	63.32	75.90

对表 2 中的数据用最小二乘法进行拟合, 如图 2 所示.

拟合直线的斜率为

$$K = 0.762 \text{ mV}/^{\circ}\text{C},$$

U_{out} 与 T 的相关系数为

$$r = 0.99989.$$

一方面, 由最小二乘法拟合带来的不确定度为

$$\sigma_{K_{\text{fit}}} = K \sqrt{\frac{\frac{1}{r^2} - 1}{n - 2}} = 0.005 \text{ mV}/^{\circ}\text{C};$$

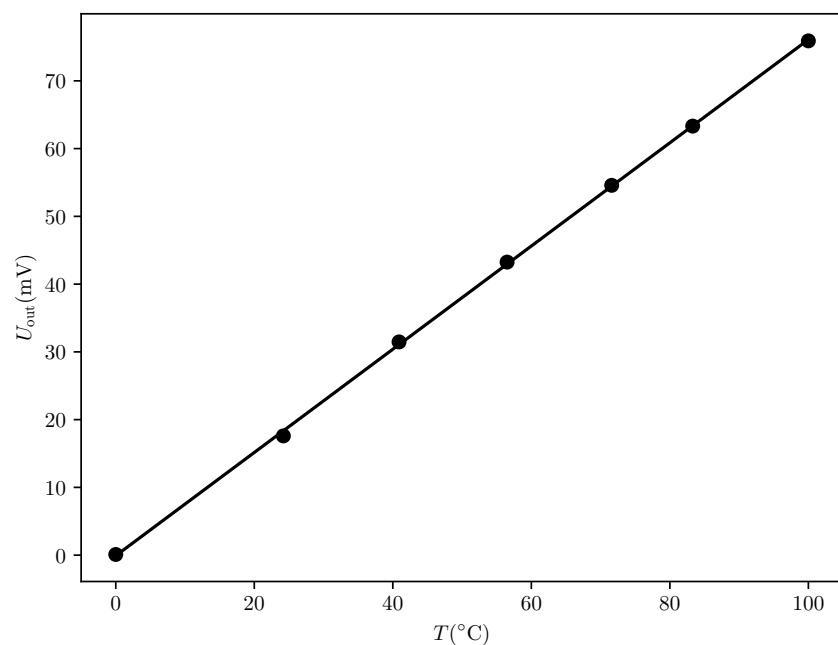


图 2: 最小二乘法拟合铂电阻阻值与温度关系实验数据.

另一方面, 由于电压表也具有允差, 其最大值为

$$e_U = 75.90 \text{ mV} \times 0.05\% + 0.03 \text{ mV} = 0.068 \text{ mV},$$

故由电压表允差带来的不确定度为

$$\sigma_{K_U} = \frac{e_U / \sqrt{3}}{\sqrt{\sum_{i=1}^7 (T_i - \bar{T})^2}} = 0.0005 \text{ mV}/^\circ\text{C}.$$

斜率的总的不确定度为

$$\sigma_K = \sqrt{\sigma_{K_{\text{fit}}}^2 + \sigma_{K_U}^2} = 0.005 \text{ mV}/^\circ\text{C}.$$

电源电流 I_0 的不确定度为

$$\sigma_{I_0} = \frac{1}{\sqrt{3}}(4.001 \times 0.5\% + 0.004) \text{ mA} = 0.014 \text{ mA},$$

电阻箱阻值 R_0 的不确定度为

$$\sigma_{R_0} = \frac{1}{\sqrt{3}}(100 \times 0.1\%) \Omega = 0.058 \Omega.$$

由式 (1), 铂电阻的温度系数为

$$A_1 = \frac{2K}{I_0 R_0} = 3.81 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

其不确定度为

$$\sigma_{A_1} = A_1 \sqrt{\left(\frac{\sigma_K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{I_0}}{I_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{R_0}}{R_0}\right)^2} = 0.03 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1},$$

故测量结果为

$$A_1 = (3.81 \pm 0.03) \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

可以看到, 与标准值 $3.85 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 相比, 测量值偏小.

2 思考题

1. 实验中有哪些因素会引起输出-输入非线性误差? 对测量的影响有多大? 本实验采取了什么措施, 用以改善非平衡电桥的线性?

在推导公式 (1) 的过程中, 我们做出了一些假设. 若我们的实际电路不满足这些假设, 例如 $R_1 \gg R_T$, $R_2 \gg R_P$, I_0 保持恒定, 检测 U_{out} 的电压表的内阻足够大, 则会导致非线性误差, 造成测量结果不够准确. 另外, 若温度范围超过了 $0 \sim 100^\circ\text{C}$, 也会引入非线性误差. 实验中, 选取较大的 R_1, R_2 , 所用电压表内阻较大、使用恒流源, 在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 温度范围内测量, 改善了非平衡电桥的线性.

2. 处理实验数据时, 如果发现 $U_{\text{out}} - T$ 拟合直线截距不为零, 是何原因? 这是否会影响测温精度?

一方面, 我们是对实验中所测 7 个数据点进行拟合, $T = 0^\circ\text{C}$ 所对应的数据点也参与拟合, 拟合直线由于拟合误差本就不一定过原点. 另一方面, 铂电阻在 0°C 时的阻值和电阻箱阻值都存在不确定度, 也会导致 $T = 0^\circ\text{C}$ 时 U_{out} 不为零. 上述因素可能会影响测温精度.

3 分析与讨论

实验中, 我们注意到测量值小于实验室的标准值. 这可以做如下的理论上的解释. 公式 (1) 是近似的结果, U_{out} 的准确表达式为

$$U_{\text{out}} = I_1 R_T - I_2 R_P = I_1 R_0 (1 + A_1 T) - I_2 R_0,$$

即 U_{out} 与 T 关系曲线的切线斜率为

$$K = I_1 R_0 A_1.$$

随着温度升高, R_T 升高, 而总电流 I_0 保持恒定, 故 I_1 减小, 即斜率减小. 关系曲线在 $T = 0^\circ\text{C}$ 时的曲线斜率才是 $\frac{I_0}{2} R_0 A_1$, 全部数据点的拟合直线的斜率小于 $\frac{I_0}{2} R_0 A_1$, 即测量值偏小.

参考文献

- [1] 吕斯骅, 段家祗, 张朝晖. 新编基础物理实验[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.