

《基础物理实验》实验报告

学号 00000000 姓名 我是谁 实验日期 2025.04.01 星期 二 下午

热电偶的特性及其应用

一、实验目的

1. 了解热电偶测温的基本原理和方法
2. 了解热电偶定标的基本方法
3. 掌握热电偶的基本规律

二、实验仪器

快速变温控温实验仪, 自组装热电偶, 高精度万用表, 保温杯(冰块)。

三、实验原理

1821 年塞贝克 (T. J. Seebeck) 发现, 当构成回路的两种不同金属的两个连接点温度不同时, 回路中会有恒定电流产生, 这表示两种金属的接触处由于温度差而产生了电动势, 即温差电动势, 该现象称为塞贝克效应, 这种电路称为热电偶, 如图 1 所示。

热电偶的温差电动势与两接头之间的温度关系比较复杂, 可以用下式表示:

$$E = \int_{T_1}^{T_2} [S_B(T) - S_A(T)] dT$$

$S(T)$ 表示金属的塞贝克系数, T_2 为热端的温度, T_1 为冷端的温度。但是在较小温差范围内可以近似的认为温差电动势 E 与温度差 $(T_2 - T_1)$ 成正比, 即:

$$E = C(T_2 - T_1)$$

式中 C 称为温差系数, 单位为 $\mu V \cdot ^\circ C^{-1}$, 它表示两接点的温度相差 $1^\circ C$ 时所产生的电动势, 其大小取决于组成热电偶材料的性质, 即:

$$C = \frac{k}{e} \cdot \ln \left(\frac{n_{0A}}{n_{0B}} \right)$$

式中 k 为玻尔兹曼常量, e 为电子电量, n_{0A} 和 n_{0B} 为两种金属单位体积内的自由电子数目。

对于热电偶而言, 有如下两个常见定律:

1. 中间导体定律

在热电偶回路中接入中间导体(第三导体), 只要中间导体两端温度相同, 中间导体的引入对热电偶回路总电动势没有影响。

2. 中间温度定律

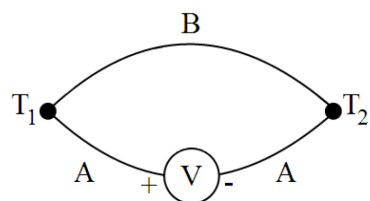


图 1: 两种不同金属构成的闭合电路

热电偶回路两接点(温度为 T 、 T_0)间的热电势,等于热电偶在温度为 T 、 T_n 时的热电势与在温度为 T_n 、 T_0 时的热电势的代数和,如图 2 所示。 T_n 称中间温度。

热电偶的定标

利用温差热电偶测量温度时必须进行定标,即用实验的方法测量热电偶温差电动势与测量端温度之间的关系曲线,定标方法有以下两种:

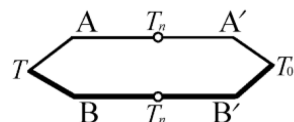


图 2: 中间定律连线示意图

1. 比较法

用被校准热电偶与一个标准热电偶或标准热电阻去测同一个温度,测得一组数据,其中被校热电偶测得的热电势即由标准热电偶或标准热电阻所测的热电势所校准,在被校准热电偶的适用范围内改变不同的温度,进行逐点校准,就可以得到被校准热电偶的一条校准曲线。这种定标方法设备简单,操作方便,但其准确程度受到标准热电偶或标准热电阻准确度的限制。

2. 固定点法

纯金属在融化和凝固过程中,其融化和凝固温度不随环境温度改变而改变,从而利用这些纯物质的融化和凝固温度作为已知温度,测出热电偶在这些温度下对应的电动势,利用作图法或最小二乘法拟合实验曲线,求出温差系数 C ,从而得到热电势与温度关系曲线。这种定标方法准确度很高,已被定为国际温标复现、校准的基准。

四、实验内容

本实验定标时使用快速变温控温实验仪温度 (Pt100) 作为参照。

1. 测试实验室提供的热电偶的温差电动势随着热端温度变化的特性

测试时。保持冷端处于 0°C (冰水混合物),热端温度从 30°C 到 70°C 之间每变化 5°C 记录一次温控电动势的值。根据测得数据作图 $E - T$, 求出温差系数 C_1 。

2. 验证中间导体定律

将第三种金属串联接入上述热电偶电路中,并使第三种金属的两个连接端处于相同的温度,测试该热电偶的温差电动势随着热端温度的变化特性。根据测得数据作图 $E - T$, 求出温差系数 C_2 。比较步骤 1 和步骤 2 所得数据,比较 C_1 和 C_2 , 验证中间导体定律。

3. 验证中间温度定律

以人体手温(约为 35°C)作为中间温度,保持冷端处于 0°C ,手握热端,测得 $E_{0-\text{手}}$;保持热端处于 75°C ,手握冷端,测得 $E_{\text{手}-75}$;保持冷端处于 0°C ,热端处于 75°C ,测得 E_{0-75} ,验证中间温度定律。

五、数据记录

原始数据详见附页。

六、数据处理

1. 测量热电偶系数根据数据绘制 $E - T$ 曲线 (见图 3), 根据拟合曲线得到的斜率, 得出热电偶的温差系数 $C_1 = 63.47 \pm 0.13 \mu\text{V}^{\circ}\text{C}^{-1}$ 。

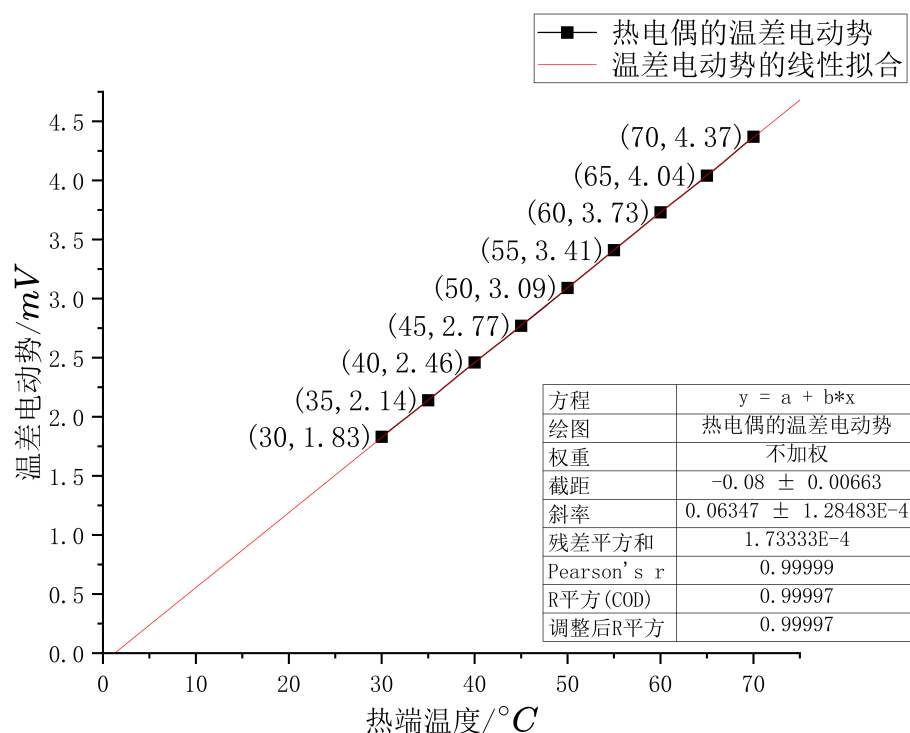


图 3: 热电偶的 $E - T$ 曲线及其线性拟合

2. 验证中间导体定律

根据数据绘制 $E - T$ 曲线（见图 4），根据拟合曲线得到的斜率，得出热电偶的温差系数 $C_2 = 64.03 \pm 0.19 \mu V^\circ C^{-1}$ 。比较 C_1 和 C_2 , $C_1 \approx C_2$, 得以验证中间导体定律。

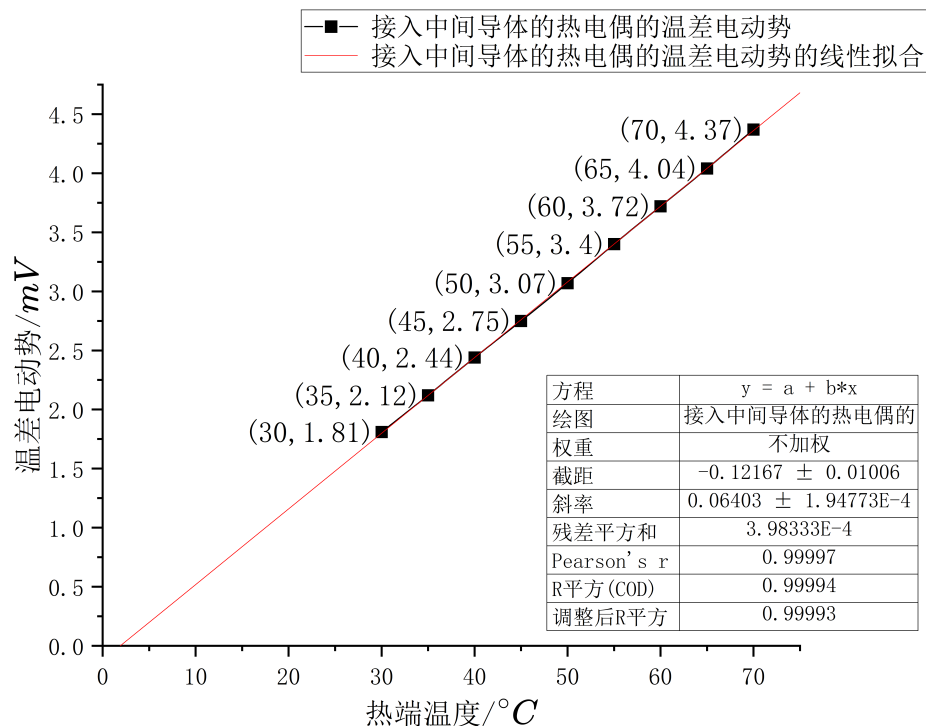


图 4: 接入中间导体的热电偶的 $E - T$ 曲线及其线性拟合

3. 验证中间温度定律

根据数据可知, $E_{0-手} = 2.02 \text{ mV}$; $E_{手-75} = 2.59 \text{ mV}$, 则 $E_{0-手} + E_{手-75} = 4.61 \text{ mV}$; $E_{0-75} = 4.69 \text{ mV}$, 相对误差为 $u = \frac{|(E_{0-手} + E_{手-75}) - E_{0-75}|}{E_{0-75}} \times 100\% = 1.706\%$, 可以近似认为 $E_{0-手} + E_{手-75} \approx E_{0-75}$, 得以验证中间温度定律。

七、误差分析

1. 实验室中有大量会发射电磁波的设备, 会对高精度电压表的测量造成干扰, 导致测量结果不准确。
2. 恒温箱的温度呈现阻尼振动, 需要较长时间稳定, 且难以达到完全稳定。
3. 热端温度会受到室温的影响, 冷端的温度会受到保温杯内壁的影响, 导致温度不稳定。
4. 接入的中间导体的两端温度不完全相同, 可能会导致中间导体定律的验证不完全准确。
5. 手捏住热端/冷端时, 手的温度不稳定, 可能会导致中间温度定律的验证不完全准确。

八、思考题

在温度相关的实验中, 常采用先升温后降温再取平均值的方法, 该方法的优点是什么? 该方法是否也适用于本实验? 为什么?

答:

1. 减少热滞效应的影响;

许多温度传感器或被测系统存在热惯性, 导致升温与降温过程中温度变化的响应速度不一致。通过双向测量并取平均, 可以部分抵消这种动态误差, 提高数据的准确性。

2. 平衡系统误差;

实验装置的热膨胀、环境温度波动等因素可能导致升、降温时的测量值存在方向性偏差。取平均值有助于平衡此类系统性误差, 使结果更接近真实值。

3. 识别材料特性差异。

某些材料的物理性质在升、降温过程中可能不同。双向测量能更全面地反映材料特性, 而取平均可简化复杂行为的分析。

适用于热电偶特性测试和中间导体定律的验证, 但不适用于中间温度定律的验证。

因为中间导体定律的验证是基于热电偶在不同温度下的电动势关系, 升、降温时的测量值可能会受到热滞效应的影响, 导致结果不准确。通过升、降温两次测量并取平均值, 可有效抵消热滞引起的系统误差。中间温度定律验证无动态温度变化需求, 只需在特定温度下测量电动势, 因此不需要升、降温两次测量并取平均值。

九、实验结论

本实验使用快速变温控温实验仪 (Pt100) 的温度为参照, 测量了热电偶的温差电动势随着热端温度变化的特性, 并通过统计学方式得到了其温差系数 $C_1 = 63.47 \pm 0.13 \mu\text{V}^\circ\text{C}^{-1}$; $C_2 = 64.03 \pm 0.19 \mu\text{V}^\circ\text{C}^{-1}$, 得出接入中间导体前后的温差系数 $C_1 \approx C_2$, 验证了中间导体定律, 通过测得 $E_{0-手} = 2.02 \text{ mV}$; $E_{手-75} = 2.59 \text{ mV}$; $E_{0-75} = 4.69 \text{ mV}$, 故而 $E_{0-手} + E_{手-75} \approx E_{0-75}$, 验证中间温度定律。实验结果表明, 热电偶的温差电动势与温度差成正比, 且中间导体定律和中间温度定律均成立。