

《基础物理实验》实验报告

实验名称: 温度与热导率的测量 指导教师: 靳硕学 jinshuoxue@ihep.ac.cn
姓名: 丁毅 学号: 2023K8009908031 班级/专业: 2308/电子信息 分组序号: 2-05
实验日期: 2024.12.10 实验地点: 教学楼 427 是否调课/补课: 否 成绩: _____

目录

1 第一部分: 动态法测定良导体的热导率	2
1.1 实验目的	2
1.2 实验仪器与用具	2
1.3 实验原理	2
1.4 实验步骤	3
1.5 实验结果与数据分析	3
1.5.1 动态法测铜的热导率	3
1.5.2 动态法测铝的热导率	4
2 第二部分: 温度的测量和温度计的设计	5
2.1 实验目的	5
2.2 实验仪器与用具	6
2.2.1 DHT-2 热学实验装置温控仪	6
2.2.2 UJ36a 型便携式直流电位差计	6
2.2.3 DHQJ-5 型教学用多功能电桥	6
2.3 实验原理	6
2.3.1 用电位差计测热电偶的温差电动势	6
2.3.2 金属电阻温度计	7
2.3.3 半导体热敏温度计	7
2.3.4 设计非平衡电桥实现对热敏电阻的实时测量	8
2.4 实验步骤	8
2.4.1 用电位差计测热电偶的温差电动势	8
2.4.2 用平衡电桥测热敏电阻和铜电阻的电阻值	8
2.4.3 用非平衡电桥制作热敏电阻温度计	9
2.5 实验结果与数据分析	9
2.5.1 用电位差计测热电偶温差电动势	9
2.5.2 平衡电桥测铜电阻温度特性曲线	9
2.5.3 平衡电桥测热敏电阻温度特性曲线	10
2.5.4 利用非平衡电桥设计温度计	11
3 思考题	11
4 实验总结与心得体会	12
附录 A 原始数据记录表	13
附录 B Matlab 源码	15

1 第一部分：动态法测定良导体的热导率

1.1 实验目的

- (1) 通过实验学会一种测量热导率的方法;
- (2) 了解动态法的特点和优越性;
- (3) 认识热波, 加强对波动理论的理解。

1.2 实验仪器与用具

仪器主机由绝热材料紧裹侧表面的圆棒状样品^①、热电偶列阵、实现边界条件的脉动热源及冷却装置组成。样品中热量将只沿轴向传播, 在任意一个垂直于棒轴的截面上各点温度相同。那么只要测得轴线上各点温度分布, 就能够确定整个棒体上的温度分布。温度的测量通过热电偶列阵实现: 将热电偶偶端均匀插在棒内轴线处, 两个相邻偶间距离均为 2 cm, 此外还需用冷却水冷却, 以保证棒尾的温度 T_0 恒定, 进而防止整个棒温起伏。

本实验仪器包括样品单元、控制单元和记录单元三大部分, 有手动、程控两种工作方式。这两种方式的差异在于记录单元。手动方式使用高精度 $x-y$ 记录仪, 而程控方式用计算机实现对整个系统的控制、数据的采集、记录与绘图。

1.3 实验原理

在样品上取一小段作为棒元, 示意图如图 (1)。根据热传导定律, 单位时间内流过某垂直于传播方向上面积 A 的热量, 即热流为

$$\frac{dq}{dt} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

其中 k 为待测材料热导率, A 为截面积, $\frac{dT}{dx}$ 为温度对 x 的梯度。

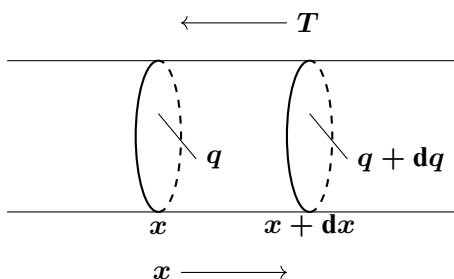


图 1: 棒元示意图

将上式两边对坐标取微分有

$$\frac{d^2q}{dxdt} = -kA \frac{d^2T}{dx^2} \Rightarrow d\frac{dq}{dt} = -kA \frac{d^2T}{dx^2} dx \quad (2)$$

根据能量守恒定律, 任一时刻棒元的热平衡方程为

$$C\rho A dx \frac{dT}{dt} = d\frac{dq}{dt} = -kA \frac{d^2T}{dx^2} dx \quad (3)$$

其中 C, ρ 分别为材料的比热容与密度, 由此可得热流方程

$$\frac{dT}{dt} = D \frac{d^2T}{dx^2} \quad (4)$$

其中 $D = \frac{k}{C\rho}$ 称为热扩散系数。上式的解表示了各点温度随时间的变化, 其具体形式取决于边界条件。若令热端温度随时间简谐变化, 即

$$T = T_0 + T_m \sin \omega t \quad (5)$$

^①本实验选用铜、铝两种样品。

另一端用冷水冷却, 保持恒定低温 T_0 , 则上式的解, 即棒中各点的温度为

$$T = T_0 - \alpha x + T_m \exp\left(-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}x\right) \sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2D}}x\right) \quad (6)$$

其中 T_0 为直流成分, α 为线性成分的斜率, 从上式可以看出:

- (a) 热端 ($x = 0$) 处温度按简谐方式变化时, 这种变化将以衰减波的形式在棒内向冷端传播, 称为热波;
 (b) 热波波速 $v = \sqrt{2D\omega}$; (c) 热波波长 $\lambda = 2\pi\sqrt{\frac{2D}{\omega}}$.

因此在热端温度变化的角频率已知的情况下, 只要测出波速或波长即可计算出 D 。再由 $D = \frac{k}{C\rho}$ 计算出材料的热导率 k 。本实验根据 $v = \sqrt{2D\omega}$ 可得

$$v^2 = 2\frac{k}{C\rho}\omega \implies k = \frac{v^2 C\rho}{4\pi f} = \frac{v^2 C\rho}{4\pi} T \quad (7)$$

其中 f , T 分别为热端温度按简谐变化的频率和周期。实现上述测量的关键在于热量在样品中一维传播、热端温度按简谐变化。

1.4 实验步骤

- (1) 检查各处连接管路是否有堵塞, 然后打开水源, 从出水口观察流量, 要求水流稳定。两个冷却水管在两个样品中是串联的, 水流先铝后铜, 故而一般先测铜样品, 后测铝样品, 以免冷却水变热。
- (2) 打开电源, 主机进入工作状态。
- (3) 打开操作软件, 在控制软件中设置热源周期 $T = 180\text{ s}$, 先选用铜样品进行测量。
- (4) 按下“操作”栏中“测量”按钮, 使仪器开始测量工作, 在窗口上画出 $T-t$ 曲线族。测量约 40 分钟后, 系统进入动态平衡, 样品内温度动态稳定。此时按下“暂停”, 在“文件”菜单中保存相应数据。
- (5) 换用铝样品重做步骤 4。
- (6) 将实验数据通过网络发送给自己, 先关闭测量仪器, 再关闭计算机。

1.5 实验结果与数据分析

相邻热电偶的间距 $l_0 = 2\text{ cm}$, 外源周期 $T = 180\text{ s}$; 铜的标准比热容 $0.385\text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 密度 $8.92\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; 铝的标准比热容位 $0.880\text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 密度 $2.7\text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

1.5.1 动态法测铜的热导率

依据实验时实际得到的数据, 作出数据图像如图 3 所示。在 Excel 中读取“同一组”数据的峰值时间, 可以得到:

表 1: 铜样品不同测量点的峰值时间

热电偶序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
峰值电压 (mV)	1196.3	1081.5	979.0	894.8	820.3	753.2	692.1	636.0	588.4	543.2	488.3	419.9
峰值时间 (s)	2616.5	2618.5	2622.5	2629.5	2633.5	2642.5	2648.0	2659.5	2662.5	2666.0	2675.0	2689.5
相对位置 (cm)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22

令拟合函数为 $x = vt + x_0$, 其中 t 为峰值时间, x 为相对位置。依据表中数据, 做最小二乘拟合, 可以得到:

$$v = 3.0068 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 0.30068 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}, \quad x_0 = -7.8488 \text{ m} \quad (8)$$

具体拟合情况及其优度如图 2 所示。由波速 v 可求得铜的热导率 k_{Cu} :

$$k_{\text{Cu}} = \frac{1}{4\pi} \rho C T v^2 = 444.7195 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (9)$$

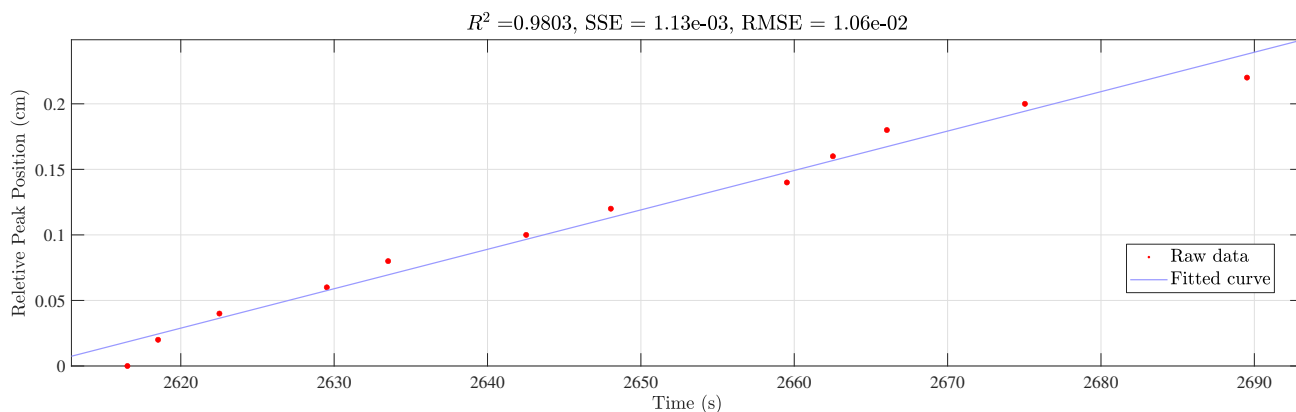


图 2: 铜样品热波波速拟合情况

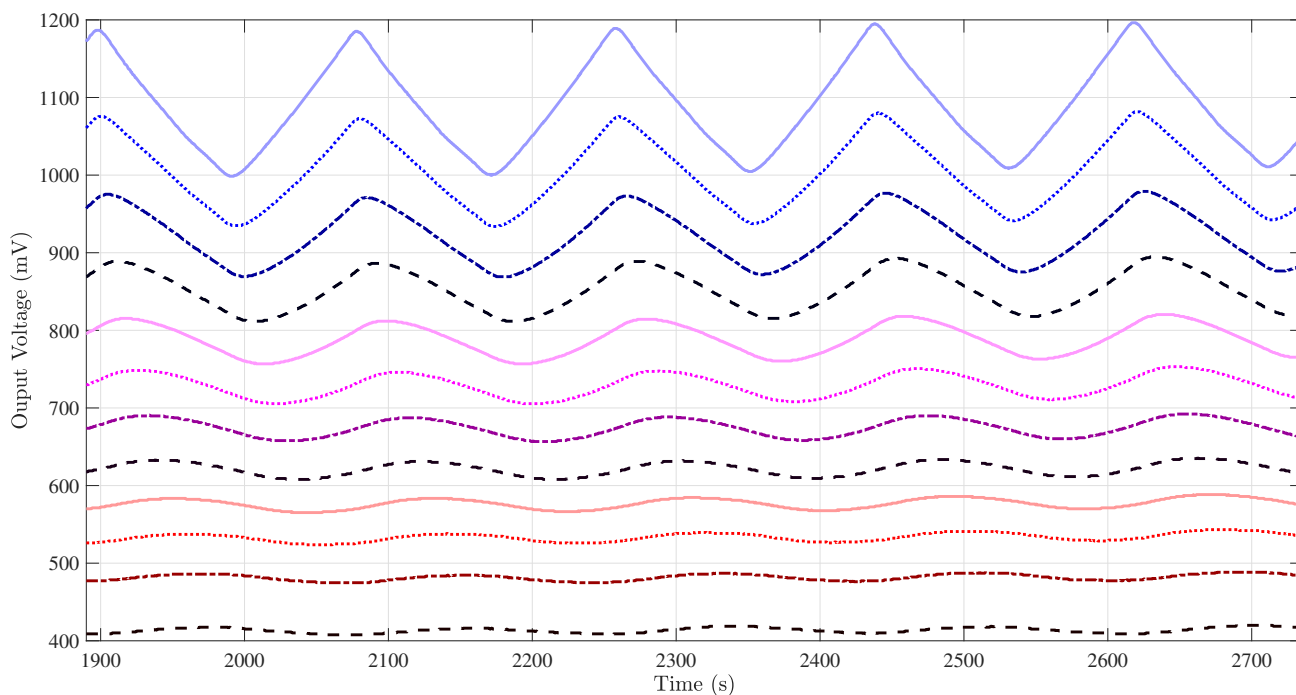


图 3: 动态法测铜样品热导率时 12 个热电偶的电压数据

1.5.2 动态法测铝的热导率

依据实验时实际得到的数据, 作出数据图像如图 5 所示。在 Excel 中读取“同一组”数据的峰值时间, 可以得到:

表 2: 铝样品不同测量点的峰值时间

热电偶序号	1	2	3	4	5	6	7	8
峰值电压 (mV)	1873.8	1689.5	1513.7	1373.3	1236.6	1112.1	996.1	905.8
峰值时间 (s)	2627.5	2637.0	2647.0	2660.0	2661.5	2663.0	2667.0	2668.5
相对位置 (cm)	0	2	4	6	8	10	12	14

令拟合函数为 $x = vt + x_0$, 其中 t 为峰值时间, x 为相对位置。依据表中数据, 做最小二乘拟合, 可以得到:

$$v = 3.0541 \times 10^{-3} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} = 0.30541 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}, \quad x_0 = -8.0354 \text{ m} \quad (10)$$

具体拟合情况及其优度如图 4 所示。由波速 v 可求得铝的热导率 k_{Al} :

$$k_{Cu} = \frac{1}{4\pi} \rho C T v^2 = 317.4435 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad (11)$$

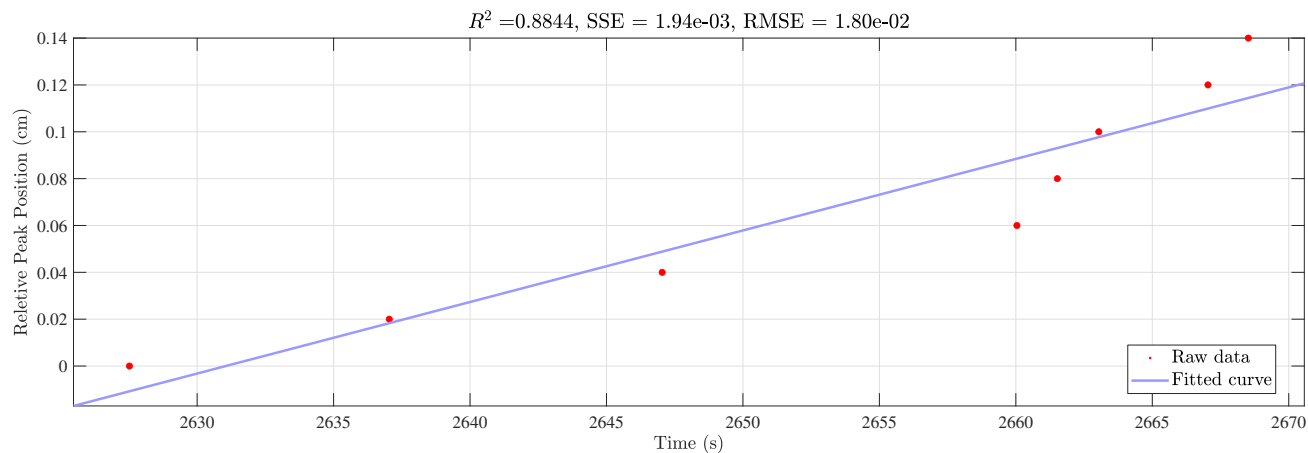


图 4: 铝样品热波波速拟合情况

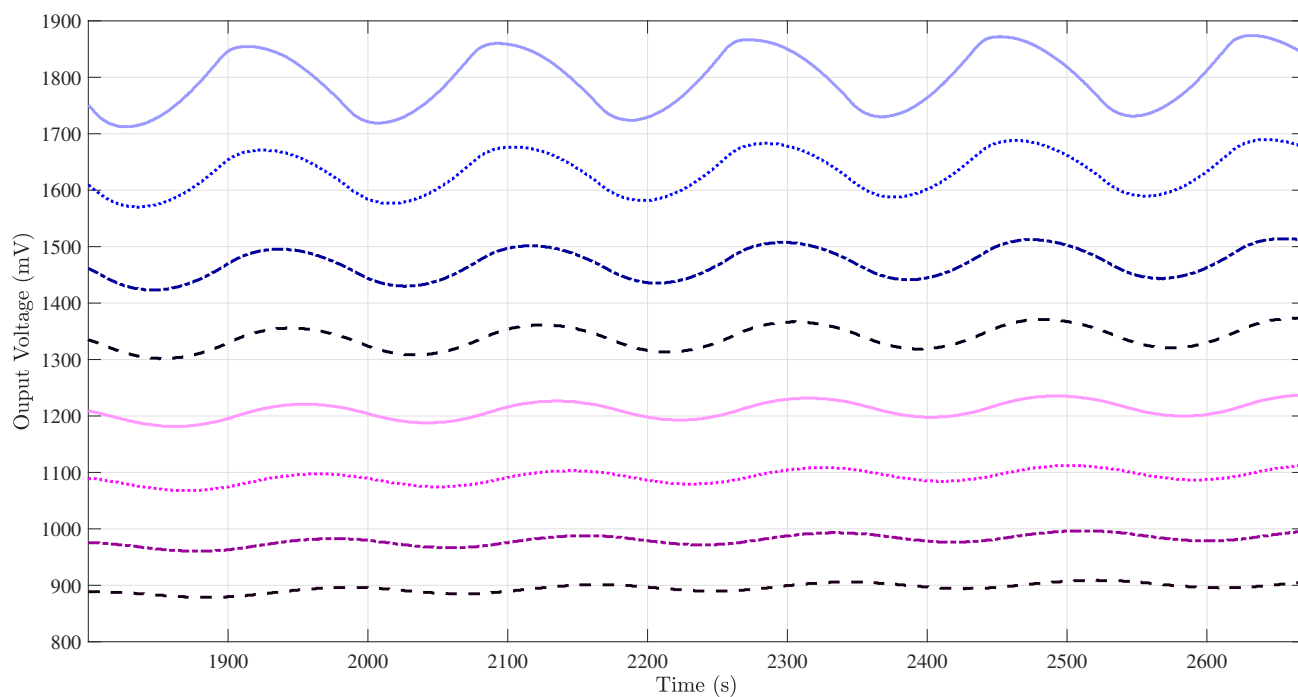


图 5: 动态法测铝样品热导率时 8 个热电偶的电压数据

2 第二部分：温度的测量和温度计的设计

2.1 实验目的

- (1) 用电位差计测热电偶的温差电动势；
- (2) 用平衡电桥测热敏电阻和铜电阻的温度特性曲线；
- (3) 设计非平衡电桥实现对热敏电阻的实时测量。

2.2 实验仪器与用具

2.2.1 DHT-2 热学实验装置温控仪

本实验采用 DHT-2 型热学实验仪进行温度计的控温, 其内装有热电偶温度计、铜电阻温度计、热敏电阻温度计, 通过加热丝升温、风扇降温, 可以用来测试不同类型温度计的温度特性曲线、确定温度系数等。

使用过程中依次将“信号输入”、“加热电流”依次与加热炉上接口相连, 然后连接电源、打开电源开关。

按设定键 (S) 选择温度位数, 用上下键加减数值, 连续未按设定键 (S) 八秒, 自动停止闪烁并返回正常显示设定值。设定加热温度后打开面板上的加热电流开关。本次实验中建议加热电流为 0.6 A。

2.2.2 UJ36a 型便携式直流电位差计

本实验采用 UJ36a 型便携式直流电位差计测量热电偶的电压。利用补偿法原理测量直流电压 (或电动势) 和对各种直流毫伏表及电子电位差计进行刻度矫正。

本次实验的实际调节过程中, 接入待测电压后将倍率开关拨到“ $\times 0.2$ ”, 调零检流计, 将电键开关拨到“标准”, 调节工作电流调节变阻器, 使检流计再次指零, 将电键开关拨到未知。调节滑线读数盘使得检流计再次置零, 那么未知电压读数为

$$U_x = \text{滑线盘读数} \times \text{倍率} \quad (12)$$

2.2.3 DHQJ-5 型教学用多功能电桥

本实验采用 DHQJ-5 型教学用多功能电桥进行电阻测定与温度计的实时测量, 具有开放式电桥、双臂电桥、单臂电桥、功率电桥和非平衡使用的单臂电桥等功能, 本次实验主要再单臂电桥下, 用平衡电桥测温度计的电阻, 用非平衡电桥对温度计进行实时测量。

在平衡电桥下, 检流计中的电流与电压均为 0, 则待测电阻值为

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_3 \quad (13)$$

非平衡电桥是单臂电桥在非平衡状态下的一种工程应用。DHQJ-5 在非平衡使用时, 其造作步骤基本与单臂电桥相同, 但测量目的与方法有很大差异, 在本次实验中, 选用非平衡电桥电压的变化线性表示热敏电阻温度计测量温度的变化。

2.3 实验原理

2.3.1 用电位差计测热电偶的温差电动势

热电偶又被称作温差电偶, 是由 A,B 两种不同材料的金属丝的端点彼此紧密接触而成的。当两个接点处于不同温度 t, t_0 时, 在回路中会产生直流电动势, 该电动势被称为温差电动势或热电动势。当组成热电偶的材料一定时, 温差电动势 E_x 仅与两接点处的温度有关, 且两接点的温度在一定温度范围内有如下近似关系式:

$$E_x \approx \alpha(t - t_0) \quad (14)$$

其中 α 称为温差电系数, 对于不同金属组成的热电偶, α 不同。

为了测量温差电动势, 就需要将热电偶接入电位差计, 但测量仪器的引入不能影响热电偶的性质, 故而实验时需保证一定条件。根据伏打定律, 即在 A,B 两种金属之间接入第三种金属 C, 且其与 A,B 两接点处于同一温度, 这样的闭合回路的温差电动势与上述只有 A,B 两种金属组成回路中的温差电动势数值完全相同。所以通常将 A,B 两根化学成分不同的金属丝一端焊接在一起, 构成热电偶的热端, 将另两端各与铜引线^②焊接, 构成两个同温度的冷端。

^②即第三种金属 C。

铜引线 with 电位差计相连, 从而构成了一个热电偶温度计。通常将冷端置于冰水混合物中, 保持 $t_0 = 0^\circ\text{C}$, 将热端置于待测温度处, 即可测得相应的温差电动势。

2.3.2 金属电阻温度计

金属电阻温度计: 一般而言, 金属电阻随温度的变化规律为

$$R_x = R_{x0} (1 + \alpha t + \beta t^2) \quad (15)$$

其中 R_{x0} 为 $t = 0^\circ\text{C}$ 时的电阻值。如铜电阻的相关参数为

$$R_{x0} = 50\ \Omega \quad \alpha = 4.289 \times 10^{-3}^\circ\text{C}^{-1} \quad \beta = 2.133 \times 10^{-7}^\circ\text{C}^{-2} \quad (16)$$

通常, 在温度不是很高的情况下, 可忽略温度二次项 βt^2 , 从而可将金属的电阻值随温度的变化看作线性变化, 即

$$R_x = R_{x0} (1 + \alpha t) = R_{x0} + \alpha t R_{x0} \quad (17)$$

利用控温仪将铜电阻的温度控制在一系列的温度值上, 待温度稳定后, 用平衡电桥测出铜电阻的阻值, 画出温度-阻值曲线, 进行线性拟合即可求出温度系数。

2.3.3 半导体热敏温度计

半导体热敏电阻 NTC 通常由一些金属氧化物如 Fe_3O_4 、 MgCr_2O_4 等半导体制成。在这些半导体内部, 自由电子数目随着温度升高迅速增加, 导电能力的增强很快, 所以 NTC 具有负的温度系数, 随着温度升高, 其电阻值迅速下降。通过改良也可以设计出正温度系数的热敏电阻, 简称 PTC。

热敏电阻的电阻温度特性可以用下述指数函数来描述:

$$R_T = A e^{B/T} \quad (18)$$

式中 A 是与材料性质的电阻器几何形状有关的常数, B 是与材料半导体性质有关的常数, T 为绝对温度。

为了求得准确的 A, B , 可将上式两边取对数:

$$\ln R_T = \ln A + \frac{B}{T} \quad (19)$$

选定不同的温度 T , 可得到不同的 R_T 。

当 $T = T_1$ 时, 有

$$\ln R_{T_1} = \ln A + \frac{B}{T_1} \quad (20)$$

当 $T = T_2$ 时, 有

$$\ln R_{T_2} = \ln A + \frac{B}{T_2} \quad (21)$$

将以上两式相减后可得

$$B = \frac{\ln R_{T_1} - \ln R_{T_2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad (22)$$

常用半导体热敏电阻的 B 值约在 1500 ~ 5000 之间。

将式 (22) 代入式 (19) 可得

$$A = R_{T_1} e^{-B/T_1} \quad (23)$$

利用控温仪将热敏电阻温度控制在一系列温度点上, 用平衡电桥测出相应的电阻, 根据式 (19) 进行线性拟合, 可以求出热敏电阻的温度系数 A, B ; 若只测两个温度点, 也可以通过式 (22) 和 (23) 求出 A, B 。

2.3.4 设计非平衡电桥实现对热敏电阻的实时测量

非平衡电桥的电路图如右图所示。非平衡电桥的测试步骤与平衡电桥一样, 只是选用电压表测两端电压, 认为电压表内阻无穷大, 忽略流过电压表的电流。平衡时电桥电压为 0, 而非平衡电桥电压 U_0 随 R_x 实时变化, 通过计算选取合适的 R_1, R_2, R_3 以及 E , 让测试电压 U_0 随温度 t 线性变化, 则可以对温度进行实时测量。可求得:

$$U_0 = \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) E \quad (24)$$

其中:

$$R_x = A e^{B/T} \quad (25)$$

A, B 的值可分别根据式 (22), (23) 求得。

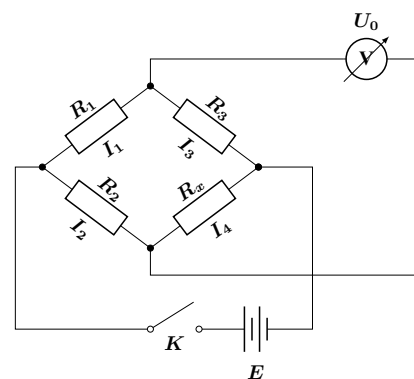


图 6: 非平衡电桥电路图

将式 (25) 代入式 (24) 即可得到 U_0 与 T 间的函数关系, 对 U_0 作泰勒展开, 略去三阶及以上的高阶项, 可以得到

$$U_0 = U_{01} + U_0'(T - T_1) + U_0''(T - T_1)^2 \quad (26)$$

其中 T_1 为测试区间的中间值, 例如监测 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 的温度区间, 取 $T_1 = 40^\circ\text{C}$ 。令 $U_0'' = 0$, 可得

$$R_x = A e^{B/T} = \frac{B + 2T}{B - 2T} R_2 \quad (27)$$

那么得到 U_0 关于 T 的线性表达:

$$U_0 = \lambda + m(t - t_1) \quad (28)$$

其中

$$\lambda = \left(\frac{B + 2T_1}{2B} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) E = U_{01}, \quad m = \left(\frac{4T_1^2 - B^2}{4BT_1^2} \right) E = U_0' \quad (29)$$

由于是温度差, 绝对温度 T 可换成摄氏温度 t 。而 λ 表示在温度区间中间值时对应的 U_0 值, m 表示灵敏度。

根据选定的 λ, m , 由两个温度点求得 A, B , 以及式 (27) 可计算得到 $R_2, \frac{R_1}{R_3}, E$, 具体表达式如下:

$$E = \left(\frac{4BT_1^2}{4T_1^2 - B^2} \right) m, \quad R_2 = \frac{B - 2T}{B + 2T} R_{xT_1}, \quad \frac{R_1}{R_3} = \frac{2BE}{(B + 2T_1)E - 2B\lambda} - 1 \quad (30)$$

根据计算结果即可设定非平衡电桥的相应参数。

2.4 实验步骤

2.4.1 用电位差计测热电偶的温差电动势

- (1) 在室温下测得热电偶的电动势。
- (2) 开启温控仪电源, 对热端加热, 在 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 区间内每隔 5°C 测定一组 (t, E_x) ③。
- (3) 绘制温度特性曲线, 通过线性拟合求得温度系数。

2.4.2 用平衡电桥测热敏电阻和铜电阻的电阻值

- (1) 在室温下测得热敏电阻、铜电阻的电阻值。
- (2) 在 $30 \sim 50^\circ\text{C}$ 区间内每隔 5°C 测定一组 (t, R_x) 。
- (3) 绘制温度特性曲线, 通过线性拟合求温度系数。

③ 需等温度稳定后进行读数测量。

2.4.3 用非平衡电桥制作热敏电阻温度计

选定 $\lambda = -400 \text{ mV}$, $m = -10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, $t_1 = 40^\circ\text{C}$, 根据在 30°C , 50°C 下测得的热敏电阻大小计算 A, B , 进而计算 $E, R_2, \frac{R_1}{R_3}$.

根据计算结果设定非平衡电桥的参数, 将温控仪温度设定为 40°C , 微调 R_2 阻值, 使得电压表测得电压接近 -400 mV .

改变温控仪温度, 在 $40 \sim 50^\circ\text{C}$ 区间内, 每隔 2.5°C 测得一组 U_0, t , 观察自制温度计测温的精度。

2.5 实验结果与数据分析

2.5.1 用电位差计测热电偶温差电动势

实验时将热电偶冷端置于冰水混合物中, 保持冷端为 0°C , 分别在室温与指定温度下测量温差电动势, 结果如下:

表 3: 不同温度下的温差电动势

温度 t ($^\circ\text{C}$)	27.1	30.3	35.5	40.0	44.9	49.9
电动势 U_x (mV)	0.880	0.936	0.916	1.068	1.148	1.202

显然, $(t, U) = (35.5^\circ\text{C}, 0.916 \text{ mV})$ 的数据严重偏离整体趋势, 为异常点 (可能是操作失误造成的), 舍去此点, 用剩下的点对函数 $U_x = \alpha(t - t_0)$ 作最小二乘拟合, 可以得到:

$$\alpha = 0.014200 \text{ mV} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}, \quad t_0 = -35.2805^\circ\text{C} \quad (31)$$

具体的拟合情况及优度如下:

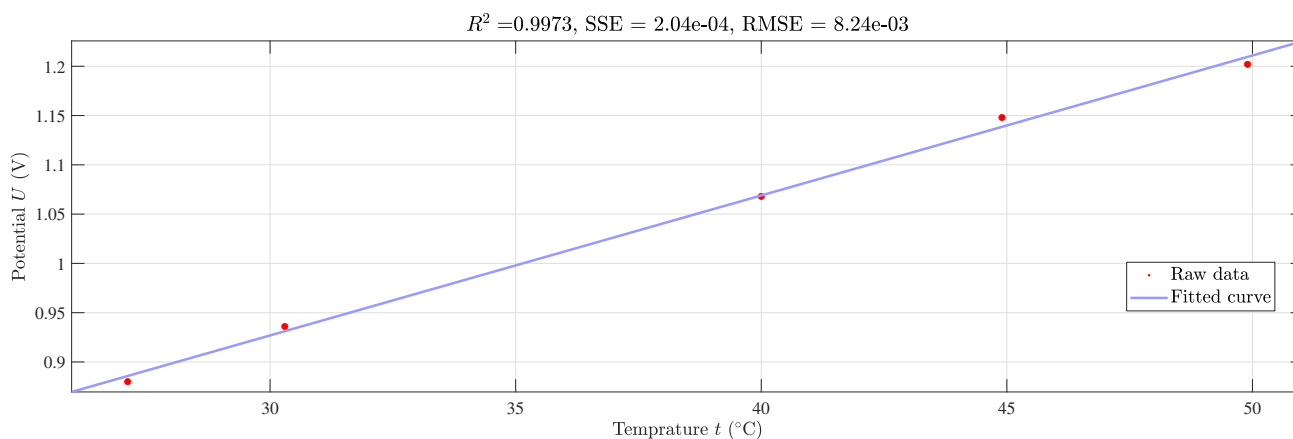


图 7: 电位差计测量热电偶温差电动势的线性拟合情况

2.5.2 平衡电桥测铜电阻温度特性曲线

利用平衡电桥法, 测不同温度下的铜电阻阻值, 得到数据如表 4 所示:

表 4: 不同温度下的铜电阻阻值

温度 t ($^\circ\text{C}$)	30.3	35.0	40.0	45.1	50.0
电阻 R (Ω)	57.8	58.8	59.9	61.1	62.2

依据上面数据, 对公式 $R(t) = (1 + \alpha t)R_0$ 进行拟合, 可以得到:

$$\alpha = 0.004400 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}, \quad R_0 = 50.9705 \text{ } \Omega \quad (32)$$

具体拟合情况如下图所示:

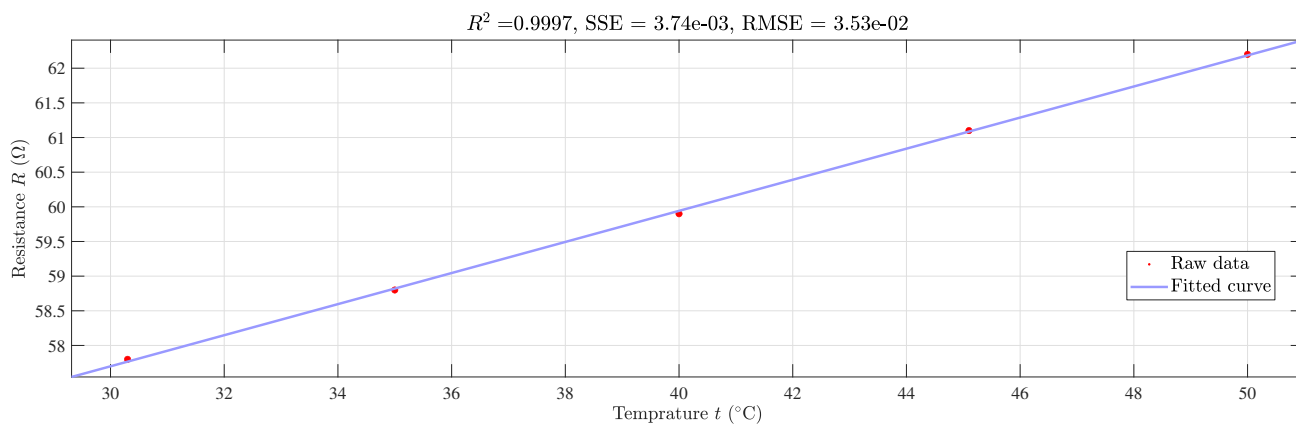


图 8: 不同温度下铜电阻值的线性拟合情况

2.5.3 平衡电桥测热敏电阻温度特性曲线

利用平衡电桥法, 测不同温度下的热敏电阻阻值, 得到数据如表 5 所示:

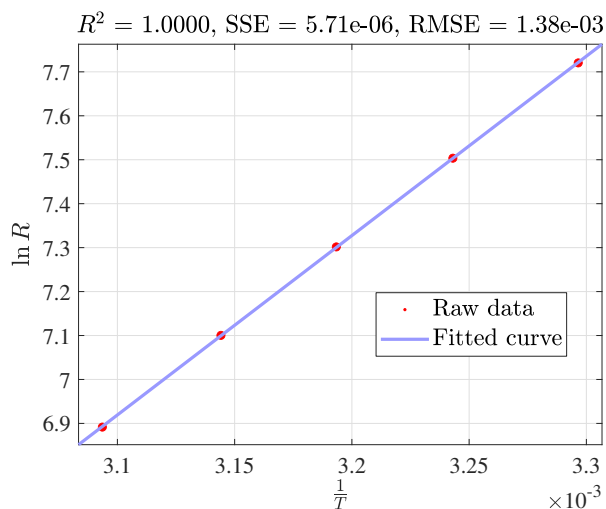
表 5: 不同温度下的热敏电阻阻值

温度 t ($^\circ\text{C}$)	30.2	35.2	40.0	44.9	50.1
电阻 R (Ω)	2253.7	1814.4	1482.7	1212.4	984.0

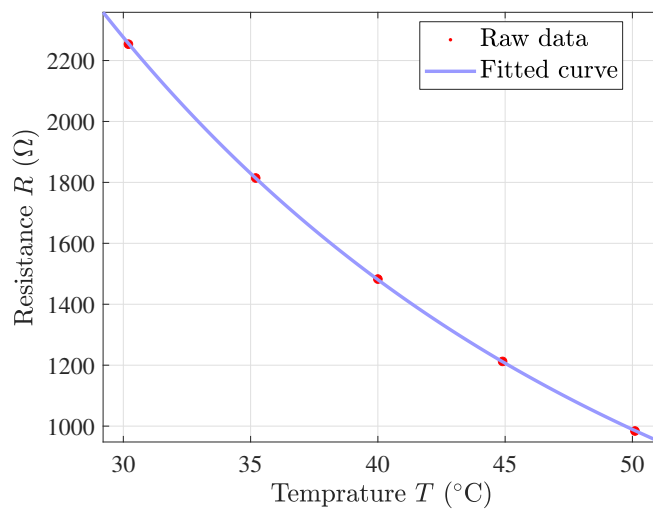
由上表数据求出 $\ln R$ 和 $\frac{1}{T}$, 并作线性拟合 $\ln R = B \cdot \frac{1}{T} + \ln A$, 可以得到:

$$A = e^{-5.7346} = 0.003232 \text{ } \Omega, \quad B = 4081.88 \text{ K} \quad (33)$$

依据拟合所得参数, 分别作出 $\ln R - \frac{1}{T}$ 曲线和 $R - T$ 曲线, 如图 9 所示:



(a) 热敏电阻 $\ln R$ 与 $\frac{1}{T}$ 的线性拟合情况



(b) 热敏电阻阻值关于温度变化的曲线

图 9: 热敏电阻阻值随温度变化的实验及拟合结果

2.5.4 利用非平衡电桥设计温度计

(1) 温度量程: $30^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$;

(2) 热敏电阻特性参数: $A = 0.003232\ \Omega$, $B = 4081.88\ \text{K}$;

(3) 表头参数选择: $\lambda = -0.4\ \text{V}$, $m = -10\ \text{mV} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

(4) 电路参数: $E = 0.9841\ \text{V}$, $R_1 = 17.1\ \Omega$, $R_2 = 1130.2\ \Omega^{\text{④}}$, $R_3 = 1000.0\ \Omega$

热敏电阻温度计测得温度 $t\ (^{\circ}\text{C})$ 与读数电压 $U\ (\text{V})$ 的关系为:

$$U_0 = \lambda + m(t - t_1) \implies t = t_1 + \frac{U_0 - \lambda}{m} \quad (34)$$

使用该温度计测量温度的结果如下:

表 6: 利用设计的温度计测量温度

设定温度 $t_0\ (^{\circ}\text{C})$	40.0	42.6	45.0	47.5	50.1
测试电压 $U_0\ (\text{mV})$	-400	-427	-452	-477	-501
测试温度 $t\ (^{\circ}\text{C})$	40	42.7	45.2	47.7	50.1

可以看到, 我们设计的温度计有较好的测量精度。

3 思考题

3.1 如果想知道某一时刻 t 时材料棒上的热波, 即 $T - x$ 曲线, 将如何做?

对一个给定的时刻 t , 以各热电偶的位置坐标为横坐标, 热电偶的电压数据为纵坐标作图。若想得到效果更好的 $T - x$ 图像, 则需使用更为密集的热电偶阵列。

3.2 为什么较后面测量点的 $T - t$ 曲线振幅越来越小?

由于热阻的存在, 在热波从近端向远端传播时, 有一部分能量损失, 从而使得热波的振幅随着 x 的增大而减小, 因此往后的测量点上的 $T - t$ 曲线振幅逐渐减小。

3.3 为什么实验中铝棒的测温点才 8 个, 而铜棒的测温点达到 12 个?

铝棒的热导率比铜更小, 故而曲线振幅下降得较快。从图 3 和图 5 中可以明显看出, 在 8 个测量点后 $T - t$ 曲线的振幅过小不易观察, 不利于数据采集与热导率计算, 而热导率较高的铜则在 12 个测量点后才出现这样的问题。

3.4 实验中误差的来源有哪些?

实验误差可能来自:

- (1) 实际使用的样品棒具有一定粗细且外表面不绝热, 外表面上热量的散失会使理论与实际产生偏差;
- (2) 实验器材带来的误差, 如热电偶质量、传感器间距、水流稳定程度、热电偶灵敏度等;
- (3) 数据处理过程中峰值的选取策略带来的误差 (本次实验我们采取严格最大值)。

3.5 为什么在低温实验中常用四线式伏安法测温度, 而工业仪表中常用非平衡电桥测温度?

在低温环境下进行的实验对电路的精确度有严格的标准, 同时, 待测量的电阻值往往较小。四线制伏安法 () 能够有效地减少导线电阻对测量结果的干扰, 从而实现对低电阻值的高准确度测量, 这与低温实验的高标准相吻合。

^④由上一小节所得原 $R_2 = 1088.2\ \Omega$, (在 40°C 下) 接入电路重新调零后得 $R_2 = 1130.2\ \Omega$ 。

相对于低温实验的高标准, 工业应用对精确度的需求并不那么严格。在确保测量效果的前提下, 工业界倾向于选择成本更低、操作更简便的方法。不平衡电桥 (Unbalanced bridge) 相比四线制伏安法在成本上更具优势, 并且在输出和控制方面显示出更大的灵活性, 这使得不平衡电桥在工业应用中更为普遍。

3.6 工业仪表中使用的三线式非平衡电桥测温度是怎么消除引线电阻的?

图 10 是三线式非平衡电桥的电路示意图。当电桥两臂上的引线电阻 (即为 R_1 , R_2 所在支路) 大致相等时, 引线电阻对于实验结果的影响相互抵消, 从而消除了引线电阻的影响。

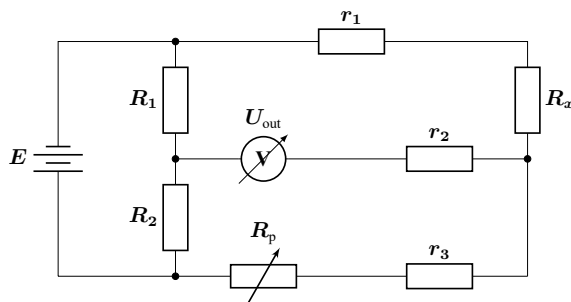


图 10: 三线式平衡电桥示意图

4 实验总结与心得体会

此次“热导实验”实验共分为两个部分, 主线是测热导率以及研究各种电阻在不同温度下的特性。尽管部分实验原理较为复杂, 但实验步骤均比较简单。实验的一个重要思想线性拟合, 以及是“对复杂的乘除依赖关系取对数, 以获得变量间的线性关系”, 令我印象深刻; 另一重点是数据的计算、拟合与逐差法分析, 在处理的过程中, 我也学到很多。实验总体上是成功的, 每个小节的实验都大致符合理论, 实验数据和图像也具有较强的说服力。

特别地, 在本次实验, 我利用了 Matlab 软件对实验数据作进一步的处理和分析, 包括换算、拟合、可视化等, 相比于常规数据处理和画图方法, 这大大提高了数据分析处理的速度的准确度, 也提高了作图的美观性。在今后的实验和研究工作中, 我还会继续深入学习和应用类似地计算软件, 增强自己的科学计算能力。科研不是考试, 我们应该充分利用好自己能接触到的资源, 合理使用工具, 更高效地发展自身。

另外, 这次实验让我感受到, 实验“结束”并不意味着实验就已经完成, 事实上这仅是数据测量的结束。在课后, 我们还需要重新整理实验原理和过程, 换算、分析、拟合实验数据, 作出合适的图像, 解释可能存在的误差等。在根据已有数据求所需结果时, 如何才能最大程度地利用已有数据, 同时又尽可能地降低二次误差。上面这些内容都需要体现在最终的实验报告中, 一点点累加起来, 着实花费了我很多精力。

但最后回过头来, 我认为一切都是值得的。当处理完毕的结果有力地验证了理论值时, 当实验数据图像与理论较好地契合时, 心中便迸发出无尽的喜悦, 也深深感受到物理“理论与实验结合”的魅力^⑤。

^⑤ 本次实验的预习报告是撰写实验报告的前半部分, 内容是重复的, 因此不再给出; 实验数据记录表和 Matlab 源码附在附录中



中国科学院大学

University of Chinese Academy of Sciences

基础物理实验原始数据记录

实验名称 温度的测量, 用动态法测定良导体的热导率 地点 教学楼 427

学生姓名 丁毅 学号 2022K8009908031 分班分组座号 2-05-6 号 (例: 1-04-5 号)

实验日期 2024 年 12 月 10 日 成绩评定 教师签字 郭志

1. 热波波速的测量 (存储数据, 在实验报告上精确计算)

相邻热电偶间距 l_0 为 2cm, 则波速 $V = l_0 / (t_{n+1} - t_n)$, n 为测量点的位置坐标。

动态法测铜的热导率

测量点 n	1	2	3	4	5	6
对应峰值时间 t (s)	2618 1196	2621 1082	2626 9	2634	2640	2648
波速 (m/s)						
波速平均值: 0.001877 m/s	热导率:					

0.003195 m/s

动态法测铝的热导率

测量点 n	1	2	3	4	5	6
对应峰值时间 t (s)	2271	2283	2300	2306	2312	2325
波速 (m/s)						
波速平均值: 0.001877 m/s	热导率:					

2. 电位差计测热电偶温差电动势 (绘制 E_x-t 温度曲线, 求出热电偶的温差电系数 α)室温: $t = 27.1^\circ\text{C}$ 电动势: $E_x = 0.880$ mv 冷端温度: $t_0 = 0^\circ\text{C}$

4.40

4.40 × 0.2

37.9		温度 t ($^\circ\text{C}$)	30.3	35.5	40.0	44.9	49.9
0.920		电动势 E_x (mv)	0.936	0.916	1.068	1.172	1.202

4.60

4.68 × 0.2

4.58 × 0.2

5.38

5.26

5.74

6.01

3. 平衡电桥测铜电阻温度特性曲线 (绘制 R_x-t 温度特性曲线, 线性拟合求出铜电阻温度系数 α .)室温: $t = 27.1^\circ\text{C}$ 电阻: $R_x = 57.1 \Omega$

温度 t ($^\circ\text{C}$)	30.3	35.0	40.0	45.1	50.0
电阻 R_x (Ω)	57.8	58.8	59.9	61.1	62.2



4. 平衡电桥测热敏电阻温度特性曲线

绘制 R_T-t 曲线, 观察热敏电阻的温度特性; 绘制 $\ln R_T-1/T$ 曲线, 线性拟合求出热敏电阻的特性常数 A 和 B (注意: T 为热力学温度)。

室温: $t = 27.3^\circ\text{C}$ ^{27.4} 电阻: $R_T = 2554.0 \Omega$

温度 t ($^\circ\text{C}$)	30.2	35.2	40.0	44.9	50.1
电阻 R_T (Ω)	2253.7	1814.4	1482.7	1212.4	984.0

5. 非平衡电桥热敏电阻温度计的设计

温度区间: $30^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}$;

热敏电阻特性常数: $A = e^{-5.7346} = 0.003232$, $B = 4081.880$;

表头参数选择: $\lambda = -0.4\text{V}$, $m = -0.01\text{V}/^\circ\text{C}$; $R_1 = 17.1$

工作电源电压: $E = 0.9841\text{V}$, $R_2 = 1088.23 \Omega$, $R_1/R_3 = 0.017119$;

实际值: $R_2 = 1530.2 \Omega$, $R_1 = 17.1 \Omega$, $R_3 = 1000 \Omega$.

设定温度 t ($^\circ\text{C}$)	40.0	42.6	45.0	47.5	50.1
测试电压 U_0 (mv)	-400	-427	-452	-477	-501
测试温度 t ($^\circ\text{C}$)	40.0				

(热敏电阻温度计: $U_0 = \lambda + m(t - t_1)$, 式中 $t_1 = 40^\circ\text{C}$ (所测温度区间的中心值))

$$\Rightarrow t = t_1 + \frac{U_0 - \lambda}{m}$$

参数计算:

A 和 B: 根据热敏电阻电阻值与温度关系 $R = Ae^{\frac{B}{T}}$, 可得 $\ln R = \ln A + \frac{B}{T}$, 做线性拟合。

$$E = \left(\frac{4BT_1^2}{4T_1^2 - B^2} \right) m, \text{ 注意 } T_1 = 273 + 40 = 313\text{K}$$

$$R_2 = \frac{B - 2T_1}{B + 2T_1} R_{xT_1} \quad (R_{xT_1} \text{ 为在温度 } T_1 \text{ 时热敏电阻的电阻})$$

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{2BE}{(B + 2T_1)E - 2B\lambda} - 1$$

附录 B Matlab 源码

```
1 %% Ex 04: 热导测量
2
3 %% 动态法测铜
4 clc, clear, close all
5 data = transpose(readmatrix("D:\a_RemoteRepo\GH.UCAS-BasicPhysicsExperiment\04-热导测量\data\DY 20241210
    电脑数据导出\铜可视 2.rdc", 'FileType', 'text'));
6 % 第一行是时间, 第二行是分割线 (无用)
7 stc = MyPlot(data(1, :), data(3:end, :));
8 stc.legend.Visible = 'off';
9 stc.label.x.String = 'Time (s)';
10 stc.label.y.String = 'Output Voltage (mV)';
11 ylim([400 1200])
12 %MyExport_pdf_docked
13
14 % 读取峰值时间
15 data = data(:, data(1, :)> 2600);
16 for i = 1:12
17     [Max(1, i), index] = max(data(2+i, :));
18     Max(2, i) = data(1, index);
19     %disp(['num ', num2str(i), ': max = ', num2str()])
20 end
21 Max
22 stc = MyPlot(data(1, :), data(3:end, :));
23
24 a = Max(2, 8);
25 Max(2, 8) = Max(2, 9);
26 Max(2, 9) = a;
27
28 [stc, fit] = MyFit_linear(Max(2, :), (0:2:22)*0.01);
29 stc.label.x.String = 'Time (s)';
30 stc.label.y.String = 'Relative Peak Position (cm)';
31
32 rho = 8.92e3;
33 C = 0.385e3;
34 T = 180;
35 v = fit.p1
36 k = rho*C*T*v^2/(4*pi)
37
38 MyPrint_xlsx(Max, 1)
39
40 %% 动态法测铝
41 clc, clear, close all
42 data = transpose(readmatrix("D:\a_RemoteRepo\GH.UCAS-BasicPhysicsExperiment\04-热导测量\data\DY 20241210
    电脑数据导出\铝 可视区.rda", 'FileType', 'text'));
43 data = data(1:10, :);
44 % 第一行是时间, 第二行是分割线 (无用)
45 stc = MyPlot(data(1, :), data(3:10, :));
46 stc.legend.Visible = 'off';
47 stc.label.x.String = 'Time (s)';
48 stc.label.y.String = 'Output Voltage (mV)';
49 ylim([800 1900])
50 %MyExport_pdf_docked
51
52 % 读取峰值时间
53 data = data(:, data(1, :)> 2400 & data(1, :) > 2600);
54 for i = 1:8
55     [Max(1, i), index] = max(data(2+i, :));
56     Max(2, i) = data(1, index);
57     %disp(['num ', num2str(i), ': max = ', num2str()])
58 end
```



```

59 Max
60 stc = MyPlot(data(1, :), data(3:end, :));
61
62
63 a = Max(2, 7);
64 Max(2, 7) = Max(2, 8);
65 Max(2, 8) = a;
66
67 [stc, fit] = MyFit_linear(Max(2, :), (0:2:14)*0.01);
68 stc.label.x.String = 'Time (s)';
69 stc.label.y.String = 'Relative Peak Position (cm)';
70
71 rho = 2.7e3;
72 C = 0.880e3;
73 T = 180;
74 v = fit.p1
75 k = rho*C*T*v^2/(4*pi)
76
77 MyPrint_xlsx(Max, 1)
78
79 %% 温差电动势
80 t = [27.1 30.3 35.5 40.0 44.9 49.9];
81 U = [0.880 0.936 0.916 1.068 1.148 1.202];
82
83 t = [27.1 30.3 40.0 44.9 49.9];
84 U = [0.880 0.936 1.068 1.148 1.202];
85 [stc, fit] = MyFit_linear(t, U);
86 t_0 = fit.p2/(-fit.p1)
87 stc.label.x.String = 'Temperature $t \ (^{\circ}\mathrm{C})$';
88 stc.label.y.String = 'Potential $U \ (\mathrm{V})$';
89
90
91 %% 铜电阻
92 t = [30.3 35.0 40.0 45.1 50.0];
93 R = [57.8 58.8 59.9 61.1 62.2];
94 [stc, fit] = MyFit_linear(t, R);
95 R_x0 = fit.p2
96 alpha = fit.p1/fit.p2
97 vpa(alpha)
98 stc.label.x.String = 'Temperature $t \ (^{\circ}\mathrm{C})$';
99 stc.label.y.String = 'Resistance $R \ (\Omega)$';
100
101 %% 热敏电阻
102 t = [30.2 35.2 40.0 44.9 50.1];
103 R = [2253.7 1814.4 1482.7 1212.4 984.0];
104 stc = MyPlot(t, R);
105
106 y = log(R);
107 x = 1./(t + 273.15);
108 [stc, fit] = MyFit_linear(x, y);
109 R_x0 = fit.p2
110 alpha = fit.p1/fit.p2
111 vpa(alpha)
112 stc.label.x.String = '$\frac{1}{T}$';
113 stc.label.y.String = '$\ln R$';
114 %MyExport_pdf
115
116 A = exp(fit.p2)
117 B = fit.p1
118
119 f = @(t) A*exp(B./(t + 273.15))'
120 stc = MyPlot_FitAndRaw(f, t, R);

```

```
121 stc.label.x.String = 'Temprature $T\ (^{\circ}\mathrm{C})$';  
122 stc.label.y.String = 'Resistance $R \ (\Omega)$';  
123  
124 %MyExport_pdf  
125  
126 %t = [40 42.6 45 47.5 48.5 50.1 52.5];  
127 %U = [0 -0.66 -1.24 -1.90 -2.57]*10^(-3)-0.4;  
128 U = [-400 -427 -452 -477 -501]*10^(-3)  
129 t_1 = 40;  
130 lambda = -0.4; m = -10e-3;  
131 t = t_1 + (U - lambda)/m
```