

《基础物理实验》实验报告

实验名称 实验四 温度与热导率的测量 指导教师 靳硕学
姓 名 学号 分班分组及座号 号 (例: 1-04-5 号)
实验日期 2023 年 10 月 12 日 实验地点 427 调课/补课 ☐ 是 成绩评定

第一部分：动态法测定良导体的热导率

【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。

【实验仪器与用具】

RB-II 型热导率动态测量仪 (仪器主机由用绝热材料紧裹侧表面的圆棒状样品、热电偶阵列传感器、实现边界条件的脉动热源及冷却装置组成)、软件“热导率动态测量仪 2015”等。

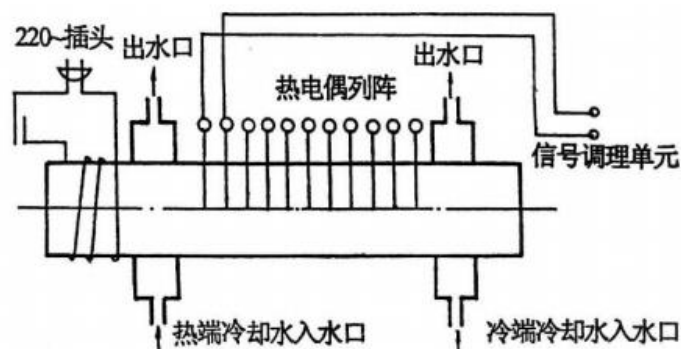


图 1 主机结构示意图 (上) 与内部照片 (下)

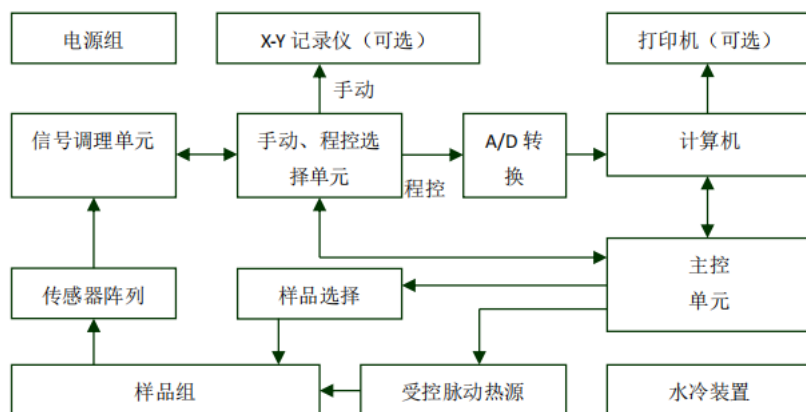


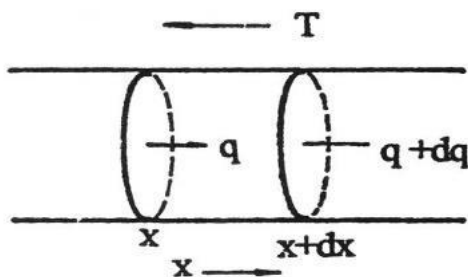
图2 热导率动态测量以结构框图

【实验原理】

1. 导出热流方程

为了使问题简化，令热量沿一维传播，故将样品制成棒状，取一小段样品如图。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 为待测材料的热导率， A 为截面面积， $\frac{dT}{dx}$ 为温度对坐标 x 的梯度。

将等式 1 两侧同时对坐标 x 微分，得到

$$d \frac{dq}{dt} = -kA \frac{d^2T}{dx^2} dx \quad 2$$

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和密度，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。

2. 温度的简谐变化规律

等式 4 的解表示出各点的温度随时间的变化，添加边界条件，令热端的温度按照简谐关系变化，即

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

另一端用冷水冷却，保持恒定低温 T_0 ，则联立等式 4 和等式 5 可得样品中各位置的温度为

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

其中 T_0 是直流成分， α 是线性成分的斜率，从等式 6 中可以知，热端（ $x=0$ ）处温度按简谐方式变化时，这种变化以衰减波的形式在棒内向冷端传播，称为热波。

根据上述等式，我们 可以得到：

1. 热波波速：

$$V = \sqrt{2D\omega} \quad 7$$

2. 热波波长：

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{2D}{\omega}} \quad 8$$

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就可以计算出 D 。然后再由 $D = \frac{k}{c\rho}$ 计算出材料的热导率 k 。本实验采用公式 7 可以得到

$$V^2 = 2 \frac{k}{c\rho} \omega$$

则

$$k = \frac{V^2 c\rho}{4\pi f} = \frac{V^2 c\rho}{4\pi} T \quad 9$$

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是：热量在样品中一维传播；热端温度按简谐变化。

【实验内容】

测量铜棒和铝棒的导热率。（先测铜棒后测铝棒）

实验前检查各处连接管路是否有堵塞，而后才能打开水源。开始实验前需将仪器的盖子打开，并仔细阅读上面的注意事项。

1. 打开水源，从出水口观察流量，要求水流稳定（将阀门稍微打开即可）

(1) 热端水流量较小时, 待测材料内温度较高, 水流较大时, 温度波动较大。因此热端水流要保持一个合适的流速, 阀门开至 1/3 开度即可。

(2) 冷端水流量要求不高, 只要保持固定的室温即可。

(3) 调节水流的方法是保持电脑操作软件的数据显示曲线幅度和形状较好为好。

(4) 两端冷却水管在两个样品中是串连的, 水流先走铝后走铜。一般先测铜样品, 后测铝样品, 以免冷却水变热。

(5) 实际上不用冷端冷却水也能实验, 只是需要很长时间样品温度才能动态平衡。而且环境温度变化会影响测量。

2. 打开电源开关, 主机进入工作状态

3. “程控”工作方式

(1) 完成前述实验步骤, 调节好合适的水流量。因进水电磁阀初始为关闭状态, 需要在测量开始后加热器停止加热的半周期内才调整和观察热端流速。

(2) 打开操作软件。操作软件使用方法参见实验桌内的“实验指导”中“操作软件使用”部分说明。(注意: 实验结束后请勿将该资料带回)

(3) 接通电源。

(4) 在控制软件中设置热源周期 T (T 一般为 180s)。选择铜样品或铝样品进行测量。测量顺序最好先铜后铝。

(5) 设置 x, y 轴单位坐标。 x 方向为时间, 单位是秒, y 方向是信号强度, 单位为毫伏(与温度对应)。

(6) 在“选择测量点”栏中选择一个或某几个测量点。

(7) 按下“操作”栏中“测量”按钮, 仪器开始测量工作, 在电脑屏幕上画出 $T \sim t$ 曲线簇, 如下图所示。上述步骤进行 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”, 可选择打印出曲线, 或在界面顶部“文件”菜单中选择对应的保存功能, 将对应的数据存储下来, 供数据测量所用。“平滑”功能尽量不要按, 防止信号失真。

(8) 实验结束后, 按顺序先关闭测量仪器, 然后关闭自来水, 最后关闭电脑。这样可以防止因加热时无水冷却导致仪器损坏。

【实验数据】

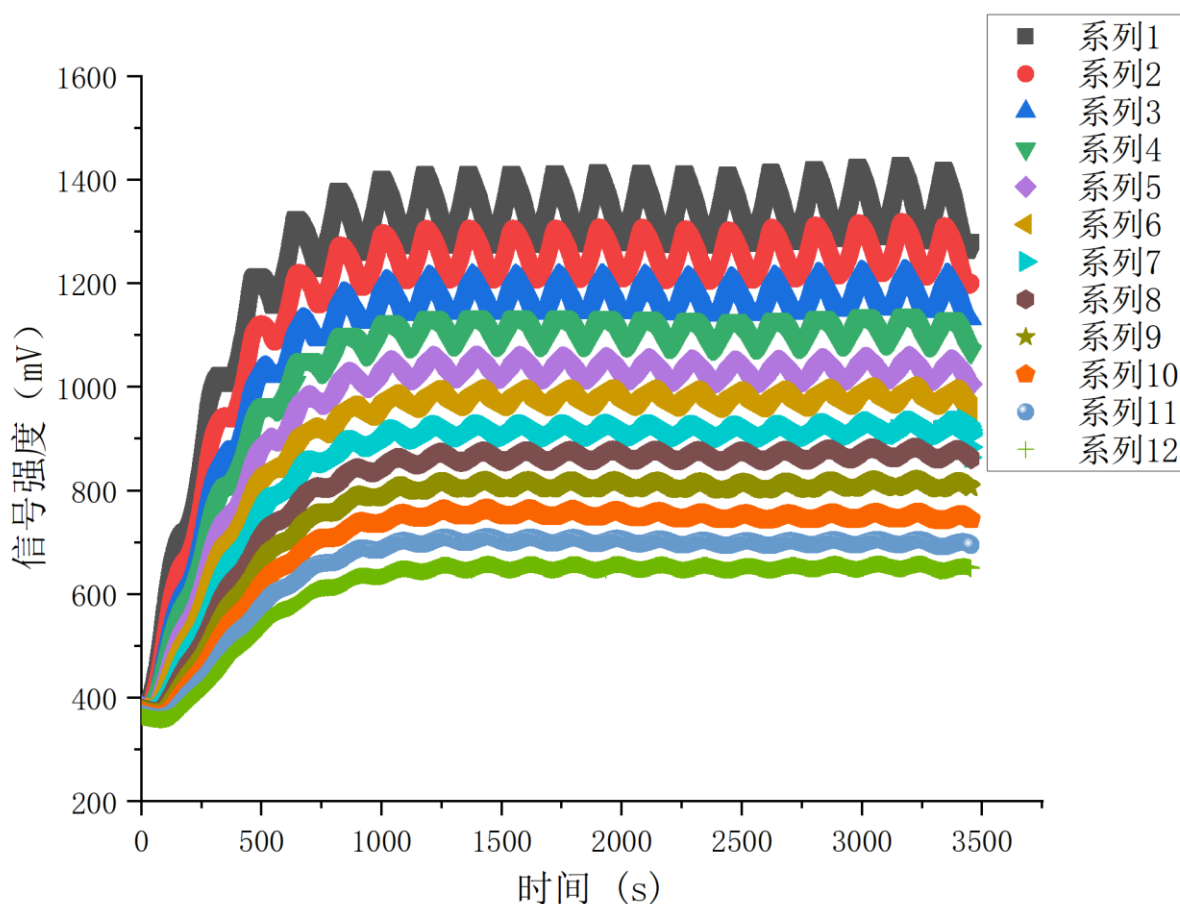
将软件所记录的数据保存, 利用公式 $V = \frac{l_0}{t_{n+1} - t_n}$ 计算波速后, 利用公式 $k = \frac{V^2 C_p}{4\pi f} = \frac{V^2 C_p}{4\pi} T$ 求得材料的热导率。

已知相邻热电偶间距 l_0 为 2cm，铜的比热容为 0.385J/gK ，密度为 8.92g/cm^3 ；铝的比热容为 0.9J/gK ，密度为 2.7g/cm^3 。

1. 铜棒的导热率的测量

根据实验中导出的数据进行图像绘制可得到铜棒温度随时间变化曲线如下图所示：（纵轴信号强度与温度相对应）

T-t 曲线（铜）



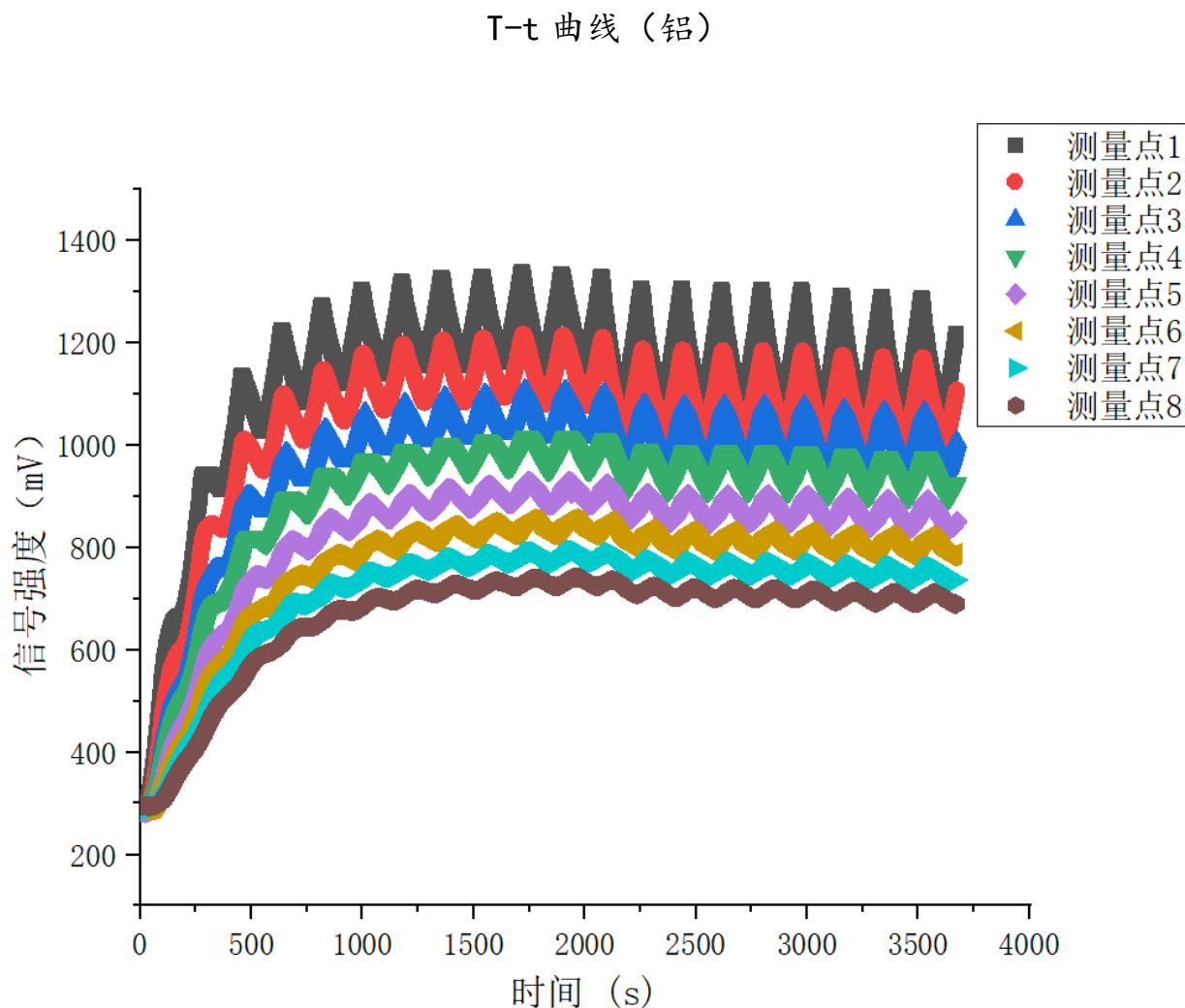
根据公式计算波速和热导率结果如下表：

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)	2619.52	2625.52	2632.52	2642.04	2651.04	2657.52
波速 (m/s)	0.003333	0.002857	0.002101	0.002222	0.003086	
波速平均值:	0.002720 m/s		热导率:	363.93 W/(m·K)		

查阅资料可知，在温度为 300K 时，铜的导热系数约为 401 W/(m·K) ，经计算，相对误差约为 9.24%，可视为在一定精度范围内较为准确。

2. 铝棒的导热率的测量

根据实验中导出的数据进行图像绘制可得到铜棒温度随时间变化曲线如下图所示：（纵轴信号强度与温度相对应）



根据公式计算波速和热导率结果如下表：

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)	1718.04	1723.04	1730.52	1740.04	1747.52	1757.04
波速 (m/s)	0.004000	0.002674	0.002101	0.002674	0.002101	
波速平均值:	0.002710 m/s		热导率:	255.60 W/(m·K)		

查阅资料可知，在温度为 300K 时，铜的导热系数约为 237 W/(m·K)，经计算，相对误差约为 7.84%，可视为在一定精度范围内较为准确。

【思考题·心得体会】

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

在得到的数据中，选择一个确定时刻 t ，读出这一时刻对应的所有热电偶的电压值，再根据热电偶电压-温度之间的换算关系，计算出每一个位置热电偶对应的温度，从而画出该 t 时刻的热波，即 $T-x$ 曲线。

2. 为什么较后面测量点的 $T \sim t$ 曲线振幅越来越小？

根据公式 $T = T_0 - \alpha x + T_m e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}x} \cdot \sin\left(\omega t - \sqrt{\frac{\omega}{2D}}x\right)$ 可知，温度的振幅为 $T_m e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}x}$ ，即振幅随 x 的增大而减小。较后面测量点的 x 越来越大，故 $T-t$ 曲线振幅越来越小。

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？

因为铜的导热性比铝的导热性好，故热流在铜棒中传播速度较快，需要较多的测量点进行测量。如果测量点少的话，则会出现热散失前无法测量到的情况，导致测量结果不准确。

4. 实验中误差的来源有哪些？

- (1) 实验仪器自身的误差，如测温点热电偶损坏等；
- (2) 热端或冷端的水流不稳定，系统无法达到动态平衡，影响测量结果；
- (3) 环境温度变化对测量的影响；
- (4) 样品纯度，实验中样品纯度未知，可能存在影响热导率的杂质。

在这一部分实验中，我们可以看到测量精度由于仪器精度、样品纯度等问题误差相对较大。同时，在波峰值数据对应多个时间点时，我们应该选取时间中间值的方法减少误差。

对比铜和铝的热导率测量结果，可以看到铝的相对误差较小，可能因为铜的温度不够，或测量时外界干扰较多。

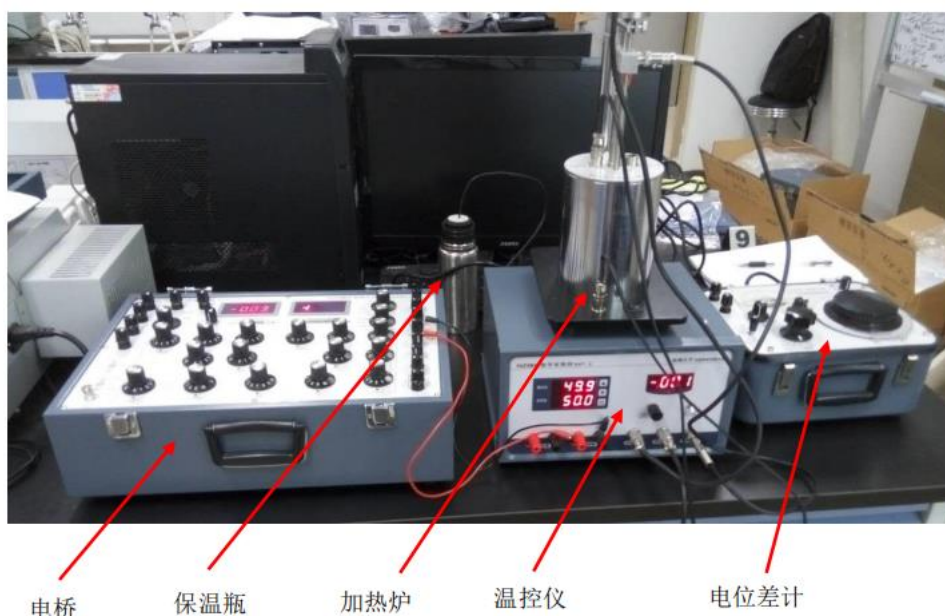
第二部分：温度的测量和温度计的设计

【实验目的】

1. 用电位差计测量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。

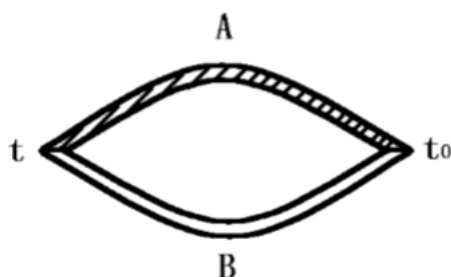
【实验仪器与用具】

DHT-2 型热学实验仪器（内含热电偶温度计、铜电阻温度计、热敏电阻温度计、加热炉、风扇、温控仪等），UJ36a 型便携式直流电位差计，DHQJ-5 型教学用多功能电桥，热电偶，保温杯等。



【实验原理】

1. 用电位差计测热电偶的温差电动势



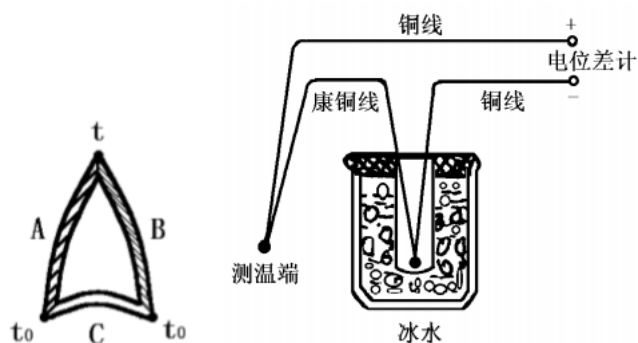
对于热电偶（如上图），当两个接点温度不同时，在回路中会产生温差电动势 E_x （又称热电动势）。当组成热电偶的材料一定时，温差电动势 E_x 仅与两接点处的温度有关，两接点的温差在一定温度范围内有如下近似关系式：

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

10

其中， α 为温差电系数，与热电偶的材料有关，其数值上等于两接点温度差为 1°C 时所产生的电动势。

如下图所示，将 A、B 两根不同化学成分的金属丝的一端焊接在一起，且处于同一温度 t_0 ，构成热电偶的热端，将另外两端与铜引线（即第三种金属 C）焊接，构成冷端。根据伏打定律可知，此时该闭合回路的温差电动势与上述只有 A、B 两种金属组成回路时的数值完全相等。将铜引线与电位差计相连，就构成了热电偶温度计。



实验过程中，将冷端置于冰水混合物中，保持 $t_0=0^\circ\text{C}$ ，热端置于待测温处，即可测得对应的温差电动势，再根据事先校正好的曲线或数据来求出温度 t 。

2. 用平衡电桥测电阻的温度特性曲线

(1) 金属电阻温度计

一般来说，金属的电阻与温度间有如下关系：

$$R_x = R_{x0}(1 + \alpha t + \beta t^2) \quad 11$$

其中， R_{x0} 为 $t=0^\circ\text{C}$ 时金属的电阻值，本实验中，铜电阻传感器 $R_{x0}=50\Omega$ ，温度系数 $\alpha = 4.289 \times 10^{-3}/^\circ\text{C}$ ， $\beta = -2.133 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$ 。

在温度不太高时，可将二次项 βt^2 忽略不计，此时金属电阻与温度可近似为线性关系，即

$$R_x = R_{x0}(1 + \alpha t) \quad 12$$

实验时，利用控温仪改变铜电阻的温度，并用平衡点桥测量铜电阻的阻值，做出 R-T 曲线，即为铜电阻的温度特性曲线。根据线性拟合结果可以得到铜电阻的温度系数 α ，完成温度计的标定。

(2) 半导体热敏温度计

区别于铜电阻，半导体热敏电阻 (NTC) 的电阻温度系数为负，即电阻随温度升高而降低，同时，其阻值与温度也不满足线性关系。

热敏电阻的电阻 R_T 与温度 T 满足以下关系式：

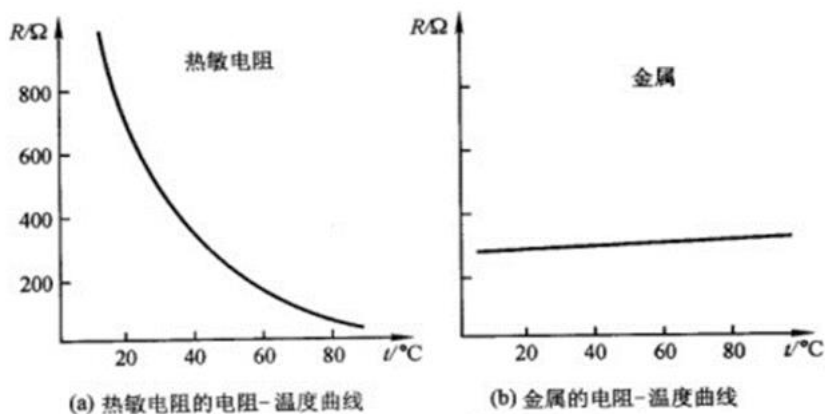
$$R_T = Ae^{\frac{B}{T}} \quad 13$$

其中，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。为了求出 A、B 的具体值，将公式 13 进行如下变换：

$$\ln R_T = \ln A + \frac{B}{T} \quad 14$$

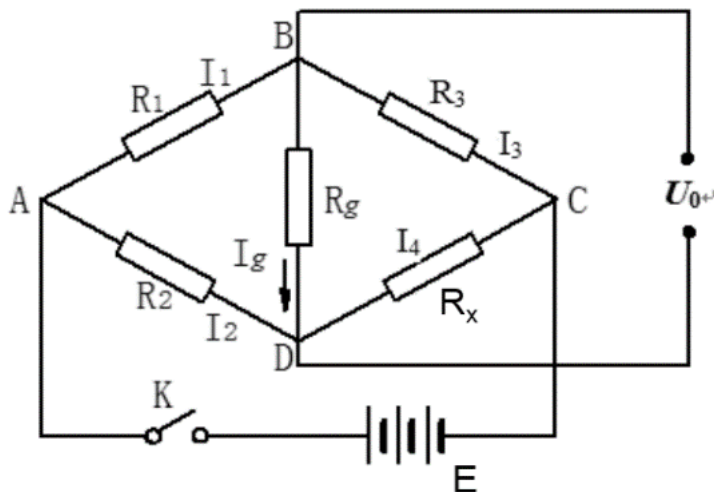
此时 $\ln R_T$ 与 $\frac{1}{T}$ 满足线性关系，根据实验数据对 $\ln R_T$ 与 $\frac{1}{T}$ 进行线性拟合。斜率为 B，截距为 $\ln A$ ，由此可计算两个常数的具体值。

金属电阻和热敏电阻特性曲线示意图如图所示。



3. 设计非平衡电桥实现对热敏电阻的实时测量

非平衡电桥与平衡电桥的电路相同，如下图所示。



将电压表内阻近似为无穷大，可得 U_0 为：

$$U_0 = \left(\frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) E \quad 15$$

将热敏电阻的电阻和温度的关系（式 13）带入式 15 可得到 U_0 与 T 的关系式，再将其对 U_0 进行泰勒展开，保留到二阶项可得到：

$$U_0 = U_{01} + U_0'(T - T_1) + U_0''(T - T_1)^2 \quad 16$$

T1 为测试温度区间的中间值，在实验中即为 40°C=313K。取 $U_0''=0$ ，可以得到：

$$R_x = Ae^{\frac{B}{T}} = \frac{B + 2T}{B - 2T} R_2 \quad 17$$

最终可以得到 U_0 关于 T 的线性表达式：

$$U_0 = \lambda + m(t - t_1) \quad 18$$

$$\lambda = \left(\frac{B + 2T_1}{2B} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) E \quad m = \left(\frac{4T_1^2 - B^2}{4BT_1^2} \right) E \quad 19$$

根据已经求出的 B 和选定的 λ 和 m 的值，可计算出 E、 R_2 、 $\frac{R_1}{R_3}$ 的值，即有

$$E = \left(\frac{4BT_1^2}{4T_1^2 - B^2} \right) m \quad 20$$

$$R_2 = \frac{B - 2T}{B + 2T} R_{xT1} \quad 21$$

$$\frac{R_1}{R_3} = \frac{2BE}{(B + 2T_1)E - 2B\lambda} - 1 \quad 22$$

非平衡电桥电压 U_0 随 R_x 实时变化，通过上述计算选取合适的 R_1 、 R_2 、 R_3 和 E 的值，适当微调 R_1 、 R_2 使得在 40°C 时电压表示数接近 λ 。此时 U_0 随温度 t 线性变化，通过换算后可以进行实时温度测量。

【实验内容】

1. 用电位差计测热电偶的温差电动势

首先测出室温时热电偶的电动势，然后开启温控仪电源，给热端加热，在 30°C~50°C 区间，每隔 5°C 测一组 (t, E_x)，一定要等温度稳定后进行测试。绘制温度特性曲线，通过线性拟合求温度系数。

2. 用平衡电桥测热敏电阻和铜电阻的电阻值

开启温控仪电源，给热端加热，在 30°C~50°C 区间，每隔 5°C 测一组 (t, R_x)，一定要等温度稳定后进行测试。绘制温度特性曲线，通过线性拟合求温度系数。

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 30°C 和 50°C 测得的热敏电阻值计算 A 和 B, 然后根据式 25-27 计算得到 E, R_2 , R_1/R_3 值。

根据计算的 E, R_2 , R_1/R_3 值设定非平衡电桥的参数, 将控温仪温度设在 40°C , 微调 R_2 的阻值, 必要时也可以微调 R_1 和 R_3 的阻值, 使电压表测得电压接近 -400mV 。然后改变控温仪温度, 在 $30^{\circ}\text{C} \sim 50^{\circ}\text{C}$ 区间, 每隔 5°C 测一组 U_0 和 t , 观察自己制作的温度计测温的精度。

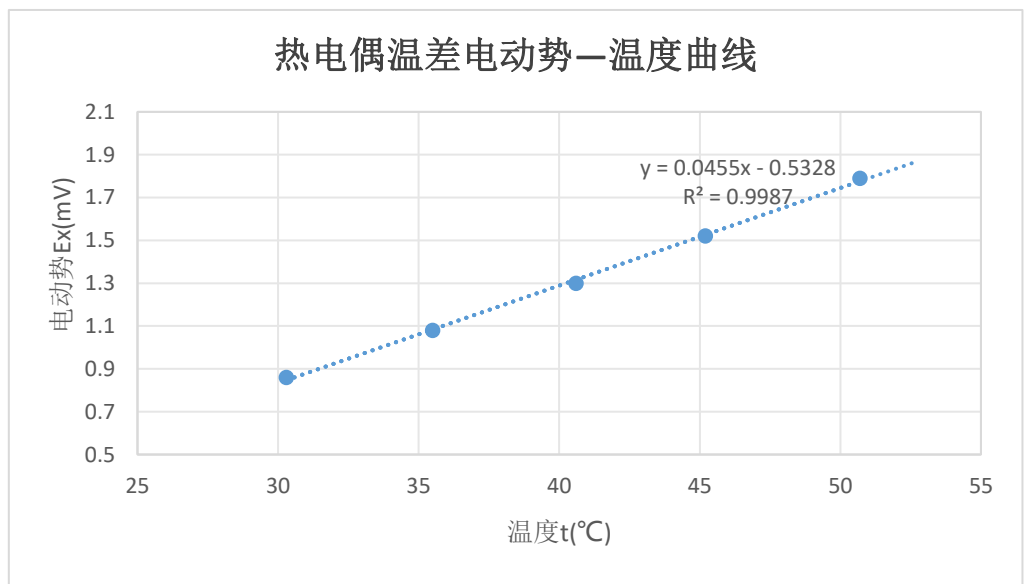
【实验数据】

1. 电位差计测热电偶的温差电动势 (绘制 $E_x \sim t$ 温度曲线, 求出热电偶的温差电系数 α)

室温: $t=26.0^{\circ}\text{C}$ 电动势: $E_x=0.730\text{mV}$ 冷端温度: $t_0=0^{\circ}\text{C}$

温度 $t (^{\circ}\text{C})$	30.3	35.5	40.6	45.2	50.7
电动势 $E_x (\text{mV})$	0.86	1.08	1.3	1.52	1.79

根据测得实验数据, 绘制出热电偶温差电动势与温度的图像如下:



根据公式 $E_x \approx \alpha(t - t_0)$, 从图中读出 $\alpha=0.0455$, $\alpha t_0=0.5328$, 可以求出 $t_0=11^{\circ}\text{C}$, 热电偶的温差电系数 $\alpha=0.0455\text{mV}/^{\circ}\text{C}$ 。

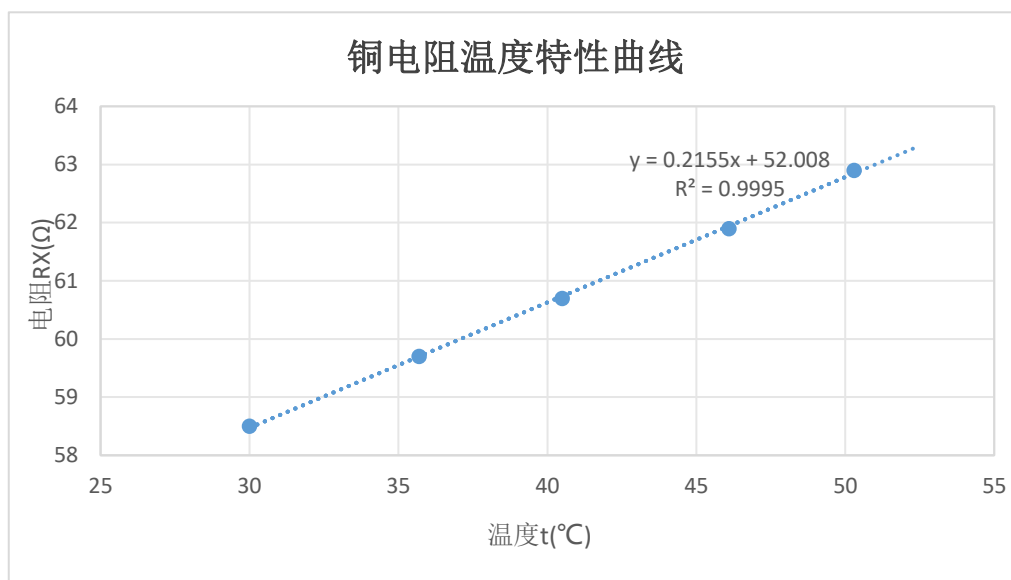
分析数据可知 t_0 比预设值偏大。经分析认为, 实验过程中, 冰水混合物的冰块由于室温升高等因素融化, 导致冷端温度较预设值偏高。

2. 平衡电桥测铜电阻温度特性曲线 (绘制 $R_x \sim t$ 温度特性曲线, 线性拟合求出铜电阻温度系数 α)

室温: $t=26.4^{\circ}\text{C}$ 电阻: $R_x=55.3\Omega$

温度 $t (^{\circ}\text{C})$	30.0	35.7	40.5	46.1	50.3
电阻 $R_x (\Omega)$	58.5	59.7	60.7	61.9	62.9

根据表中数据绘制铜电阻温度特性曲线如下：



根据公式 $R_x = R_{x0}(1 + \alpha t) = R_{x0} + \alpha t R_{x0}$ ，结合图像可知，测得铜电阻温度系数 α 为 $0.2155/52.008 = 0.00414\text{K}^{-1}$ 。对比理论值 $\alpha = 4.289 \times 10^{-3}\text{K}^{-1}$ ，可以计算出实验结果的相对误差为 3.47%。在误差范围内实验数据较为精准。

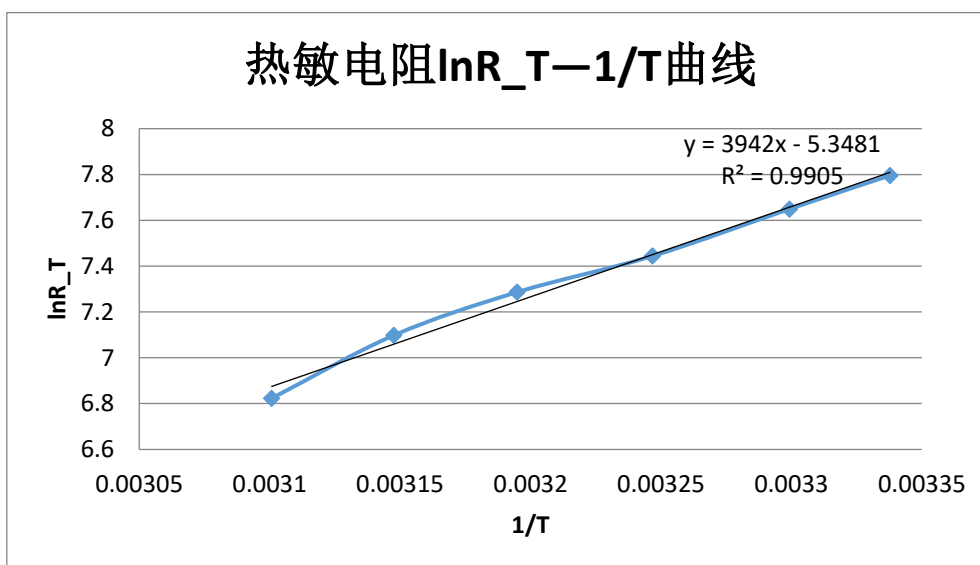
3. 平衡电桥测热敏电阻温度特性曲线

绘制 $R_T \sim t$ 曲线，观察热敏电阻的温度特性；绘制 $\ln R_T \sim 1/T$ 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： $t = 26.6^\circ\text{C}$ 电阻： $R_T = 2431.1\ \Omega$

温度 t (°C)	30.1	35.0	40.0	44.7	49.5
电阻 R_T (Ω)	2099.0	1710.0	1460.7	1209.9	918.9

根据实验数据绘制出 $\ln R_T \sim 1/T$ 曲线如下：



根据公式 $\ln R_T = \ln A + \frac{B}{T}$, 可得 $A = e^{-5.3481} = 0.0048 \Omega$, $B=3942K$ 。

4. 非平衡电桥热敏电阻温度计的设计

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, 求得热敏电阻特性常数 A 和 B ; 再根据以下公式分别求得工作电源电压 E , R_2 , R_1/R_3 的值。

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

$$R_2 = \frac{B - 2T_1}{B + 2T_1} R_{xT1} \quad (R_{xT1} \text{ 为在温度 } T_1 \text{ 时热敏电阻的电阻})$$

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

以下为根据设定和实验数据确定的取值:

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

热敏电阻特性常数: $A=0.0048$, $B=3942$;

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

工作电源电压: $E=1.0198V$, $R_2=1060.35 \Omega$, $R_1/R_3=0.0292$;

实际值: $R_2=1060.4 \Omega$, $R_1=28.0 \Omega$, $R_3=1000 \Omega$ 。

根据热敏电阻温度计 $U_0 = \lambda + m(t - t_1)$, 式中 $t_1=40^\circ\text{C}$ (所测温度区间的中心值), 求出对应测试温度 t , 得到以下表格:

设定温度 t ($^\circ\text{C}$)	40.0	42.5	45.1	47.4	50.0
测试电压 U_0 (mV)	-400	-424	-449	-474	-495
测试温度 t ($^\circ\text{C}$)	40.0	42.4	44.9	47.4	49.5

由上表数据可见, 设计的温度计在 $40^\circ\text{C} \sim 50^\circ\text{C}$ 之间的测量值是相当准确的, 相对误差最大值为 1%。

【思考题·心得体会】

1、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?

四线式伏安法通过将电流引入一个样品并测量电压降, 再根据欧姆定律进行计算, 减少了测量电阻的电阻对结果的影响, 四线式伏安法可以提供较高的测量精度。非平衡电桥可以提供较快的测量相应, 适用于更广泛的温度范围, 且对噪音和干扰等因素有较好的抗干扰性能。

低温实验通常需要较高的测温精度, 故选择四线式伏安法测温度; 工业仪表中需要较快

的响应时间、更大的测量范围、更好的抗干扰性能，故选择非平衡电桥测温度。

2、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？

三线式非平衡电桥通常包括一个测量电阻（一般为温度传感器），两根引线和一个电桥电路。在传统的两线式电桥中，两根引线的电阻的差异会影响电桥的平衡状态，引起测量误差。因此引入第三根线，将其连接到电桥的电源端，其余两根分别连接到热电阻所在的桥臂和相邻的桥臂上。这样就消除了引线电阻带来的误差。

在这一部分的实验中，实验测量和结果较为准确，相对误差较小。在制作热敏电阻温度计时，由于得到的电桥参数与实际值相差很少，因此得到的结果也十分准确。

【整体反思与总结】

对于本次实验整体而言，我通过老师和同学们的帮助以及自己的学习成功完成了本次实验。实验数据、计算结果与理论值的误差均不是很大。对于本次实验我有以下体会：

1. 实验前的预习很重要。通过预习可以掌握实验的基本原理，知道每一步是在做什么，不至于在实验中手忙脚乱。
2. 对于数据处理的方法要得当。如第一部分测量热导率的波峰时间的选择，应知道何时需要选取什么样的数据处理方法，这样才能使得实验结果更加准确。
3. 关注并减小误差。在实验中要留意可能带来误差的地方，并反思如何减少误差。同时对于一些基本操作，需要认真检查并对待。比如在实验中，利用电桥法测量电阻时，要注意两个已知电阻的阻值的比例关系对待测电阻阻值的影响。

总的来说，这次实验让我收获颇丰，学会了使用热学相关的实验仪器，利用 excel 进行线性拟合，初步利用 origin 进行作图。同时，这次的实验经历也为我之后的多次实验打下了基础，了解了预习时的重点，以及数据处理和误差分析时需要注意的地方。