

# 《基础物理实验》实验报告

实验名称 温度的测量, 用动态法测定良导体的热导率 指导教师 赵同宪  
姓 名 陈苏 学号 2022K8009906009 分班分组及座号 1-03-5 号 (例: 1-04-5 号)  
实验日期 2023 年 11 月 6 日 实验地点 教学楼 710 调课/补课 ☐ 是 成绩评定           

## 实验目的

1. 认识热波的概念, 加强对波动理论的理解;
2. 了解动态法的特点, 学习用动态法测定良导体的热导率;
3. 学习用电位差计测热电偶的温差电动势, 用平衡电桥测热敏电阻和铜电阻的温度特性曲线;
4. 设计非平衡电桥电路, 实现对热敏电阻的实时测量.

## 实验仪器

### 1. 热导率动态测量主机

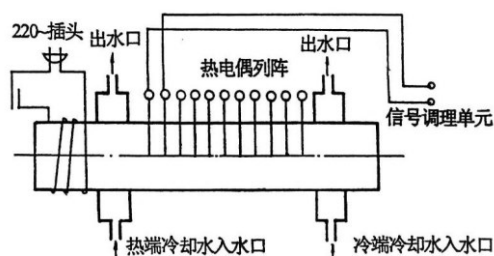


图 1-1 主机结构示意图



图 1-2 主机内部照片

如图 1 所示, 仪器主机由用绝热材料紧裹侧表面的圆棒状样品 (铜或铝), 热电偶列阵, 边界上的脉动热源及冷却装置组成.

样品中热量将沿轴向传播, 在任意一个垂直于棒轴的截面上各点的温度相同. 温度的测量采用热电偶列阵, 即将热电偶一端插在棒内轴线处, 每两个相邻热电偶间距离均为 2cm, 为保持棒尾的温度恒定, 以防止整个棒温起伏, 通入冷却水冷却.

### 2. DHT-2 热学实验装置温控仪

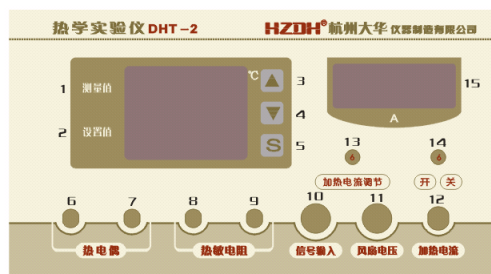


图 2 DHT-2 热学实验装置温控仪前面板

装置前面板如图 2 所示. 本实验采用 DHT-2 型热学实验仪, 由温控仪和保温炉组成. 保温炉内装有热电偶温度计, 铜电阻温度计, 热敏电阻温度计. 装置通过加热丝升温, 通过底部风扇降温, 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.

### 3. UJ36a 型直流电位差计



图 3 UJ36a 型直流电位差计面板

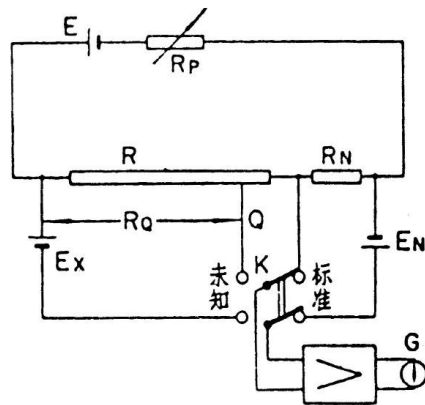


图 4 UJ36a 型直流电位差计原理电路图

UJ36a 型直流电位差计面板和原理电路图如图 3, 图 4 所示. 热电偶的电压通过 UJ36a 型便携式直流电位差计进行测量. 将电键开关 (4) 拨到“标准”, 这时内置标准电池的电动势由电阻 $R_N$ 上的电压降补偿, 设电路中电流为 $I$ , 即有

$$E_N = IR_N.$$

再电键开关 (4) 拨到“未知”, 同时移动触头 $Q$ , 使检流计再次指零, 此时触头 $Q$ 的读数为 $R_Q$ , 这时被测量的电动势由电阻 $R_Q$ 上的电压降补偿, 即有

$$E_x = IR_Q.$$

因此测得

$$E_x = \frac{R_Q}{R_N} E_N.$$

在实际的调节过程中,  $R_Q$  的调节用步进盘 (3) 进行粗调, 用滑线盘 (8) 进行细调. 初始时将倍率开关拨到“X1”或者“X0.2”, 调节调零旋钮 (6) 将检流计调零; 将电键开关 (4) 拨到“标准”, 调节工作电流调节变阻器, 使检流计指零; 将电键开关 (4) 拨到“未知”, 调节步进读数盘和滑线读数盘使检流计再次指零. 将未知电压 $U_x$ 接入未知接线柱 (1)(2), 则读数为

$$U_x = (\text{步进盘 (3) 读数} + \text{滑线盘 (8) 读数}) \times \text{倍率}.$$

### 4. DHQJ-5 型教学用多功能电桥



图 5 DHQJ-5 型教学用多功能电桥面板

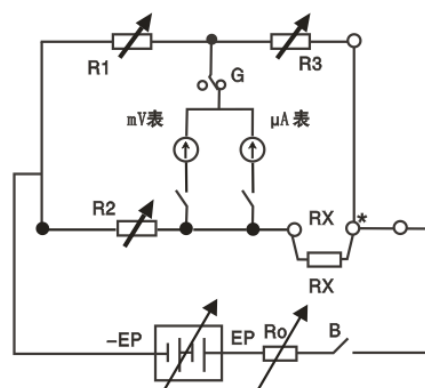


图 6 DHQJ-5 型教学用多功能电桥原理电路图

DHQJ-5 型教学用多功能电桥面板和原理电路图如图 5, 图 6 所示. DHQJ-5 型教学用多功能电桥具有开放式电桥, 双臂电桥, 单臂电桥, 功率电桥及非平衡使用的单臂电桥等功能, 可以用平衡电桥测热敏电

阻, 并采用非平衡电桥对热敏电阻进行实时测量. 在电桥平衡时, 检流计中的电流和电压均为 0, 待测电阻值即为

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}.$$

本实验中用电桥测量热敏电阻的过程如下:

- (1) RN 选择“单桥”, 工作方式选择“单桥”, 电源选择“3V”, G 开关选择“G 内接”;
- (2) 设置好  $R_1 = R_2 = 1000\Omega$ , 接入未知电阻  $R_x$ . (注意  $R_x$  端子下方短接片应接好.)
- (3) 打开仪器开关, 按下毫伏表下方“2V”按钮, 调节“调零”旋钮使得电压表显示为零. 然后按下“200mV”和“20mV”再次调零.
- (4) 按下“2V”按钮和“接入”按钮, 调节  $R_3$  使电压表示数为零. 然后按下“200mV”和“20mV”再次调零, 即得  $R_3$  的精确值.

## 实验原理

### 1. 动态法测定良导体的热导率

根据热传导定律, 在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

$$\frac{dq}{dt} = -kA \frac{dT}{dx},$$

其中  $k$  为待测材料的热导率,  $A$  为截面积,  $dT/dx$  是温度梯度. 由对于任意一个微元的热平衡方程

$$\frac{d^2 q}{dt^2} = C\rho A \frac{dT}{dt},$$

即得热流方程

$$\frac{dT}{dt} = D \frac{d^2 T}{dx^2}.$$

其中  $D = k/C\rho$  称为热扩散系数, 其中  $C$ ,  $\rho$  分别为材料的比热容与质量密度.

如果热端的温度简谐方式周期变化, 即设  $x = 0$  处

$$T = T_0 + T_m \sin \omega t,$$

另一端用冷水冷却, 保持恒定低温  $T_0$ , 则热流方程的解为

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

其中,  $T_0$  是直流成分,  $\alpha$  是线性成分的斜率, 从上述式子中可以看出:

- (1) 热端 ( $x = 0$ ) 温度的变化将以衰减波的形式在棒内向冷端传播, 称为热波. 热波的波速为  $V = \sqrt{2D\omega}$ , 波长为  $\lambda = 2\pi\sqrt{2D/\omega}$ ;

- (2) 在热端温度变化的角频率  $\omega$  已知的情况下, 只要测出波速或波长就可以求  $D$ , 然后再由  $D = k/C\rho$  计算出材料的热导率

$$k = \frac{V^2 C\rho}{4\pi f} = \frac{V^2 C\rho}{4\pi} T.$$

### 2. 用电位差计测热电偶的温差电动势

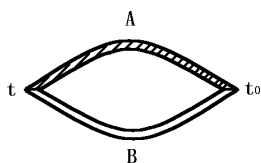


图 7 温差电动势原理示意图

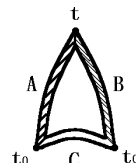


图 8 温差电动势测量示意图

热电偶亦称温差电偶,是由两种不同材料的金属丝的 A, B 端点彼此紧密接触而组成的. A, B 端点之间的温差电动势 $E_x$ 仅与两接点处的温差有关,在一定的温度范围内有近似关系

$$E_x = \alpha(t - t_0).$$

其中 $\alpha$ 称为温差电系数.不同金属组成的热电偶对应的 $\alpha$ 也不同.

为了测量温差电动势,就需要在图 7 的回路中接入电位差计.为使测量仪器的引入不能影响热电偶在一定的温差 $t - t_0$ 下产生的 $E_x$ ,把 A, B 两根不同化学成份的金属丝的一端焊在一起,构成热电偶的热端(工作端).将另两端各与铜引线(即第三种金属 C)焊接,构成两个同温度( $t_0$ )的冷端(自由端),如图 8 所示.

将冷端置于冰水混合物中,即保持 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ,并将热端置于待测温度处.通过电位差计读取待测电压 $U_x$ 即得相应的温差电动势 $E_x$ ,绘制 $E_x - t$ 曲线并进行线性回归,计算 $\alpha$ .

### 3. 用平衡电桥测量金属电阻的温度特性

一般来说,金属的电阻随温度的变化,可以描述为

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

一般在温度不是很高的情况下,可以忽略温度二次项,即

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

用控温仪将铜电阻的温度控制在一系列温度值上,待温度稳定后,利用平衡电桥测量并计算出铜电阻的阻值.绘制 $R_x - t$ 曲线并进行线性回归,计算 $\alpha$ ,这就是温度计的标定.进行标定后的铜电阻就可以当作温度计用于温度测量.

### 4. 用平衡电桥测量半导体热敏电阻的温度特性

半导体热敏电阻(NTC)具有负的电阻温度系数,电阻值随温度升高而迅速下降,可以用指数函数来描述为

$$R_T = Ae^{B/T},$$

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, $T$ 为绝对温度.热敏电阻特性曲线示意图如图 9 所示.

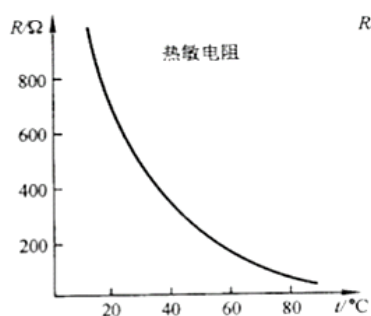


图 9 热敏电阻特性曲线

为了求得准确的 $A$ 和 $B$ ,先将上式两边取对数得

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

用控温仪将热敏电阻温度控制在一系列温度点上,用平衡电桥测出对应的电阻,绘制 $\ln R_T - 1/T$ 曲线并进行线性回归,计算 $A$ 和 $B$ .

## 5. 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图 11 所示. 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, 非平衡时电桥电压  $U_0$  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, 就可以对温度进行实时测量.

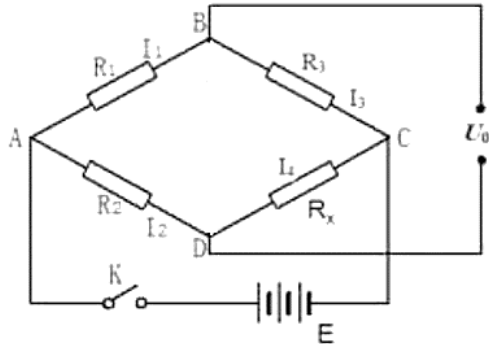


图 11 非平衡电桥电路图

忽略流过电压表的电流, 可以求得

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

对  $U_0$  进行泰勒级数展开, 保留至二阶项可以得到

$$U_0 = U_0(T_1) + U_0'(T_1)(T - T_1) + \frac{1}{2} U_0''(T_1)(T - T_1)^2.$$

其中  $T_1$  为测试区间中间值. 实验中监测 30-50°C 的温度区间, 则  $T_1 = 40^\circ\text{C}$ . 又令  $U_0''=0$  得

$$R_T = A e^{\frac{B}{T}} = \frac{B + 2T}{B - 2T} R_2.$$

于是选取特定的  $R_1, R_2$  和  $R_3$ , 就可以将  $U_0$  表达为

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

其中

$$\lambda = \left( \frac{B + 2T_1}{2B} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) E,$$

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

$$R_2 = \frac{B - 2T}{B + 2T} R_x(T_1),$$

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

## 实验步骤与实验数据

### 1. 动态法测定铜棒和铝棒的热导率

(1) 打开冷却水源.

(2) 接通电源, 在控制软件中设置热源周期  $T = 180\text{s}$ , 选择测量铜样品.

(3) 按下操作栏中“测量”按钮, 仪器开始测量工作, 在电脑屏幕上画出若干组  $T-t$  曲线. 上述步骤进行 40 分钟后, 按下“暂停”并保存数据.

(4) 测量完铜样品后切换成铝样品, 重复上面的测量并保存数据.

实验中通过测量铜棒和铝棒中热波的波速 $v$ ，从而得到热导率

$$\kappa = \frac{v^2 c \rho T}{4\pi}.$$

对于铜棒，比热容 $c = 0.385 \times 10^3 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，密度 $\rho = 8.92 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ；对于铝棒，比热容 $c = 0.9 \times 10^3 \text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，密度 $\rho = 2.7 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ .

测量相邻测量点 $n$ 和 $n + 1$ 之间热波峰值传播的时间差 $t_n$ 和 $t_{n+1}$ ，求出对应的波速

$$v = \frac{l_0}{t_{n+1} - t_n}.$$

表 1 动态法测量铜的热导率表

$n$	1	2	3	4	5	6	平均值
$t_n/\text{s}$	3519.04	3525.04	3535.04	3542.52	3550.52	3556.04	
$v = \frac{l_0}{t_{n+1} - t_n}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$3.33 \times 10^{-3}$	$2.00 \times 10^{-3}$	$2.67 \times 10^{-3}$	$2.50 \times 10^{-3}$	$3.64 \times 10^{-3}$		$2.83 \times 10^{-3}$

由此估算出 $\kappa = 394 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

对 $n = 1, 2$ 的第 3001-7096 组数据进行 FFT，得到 $t_2 - t_1 = (7.8 \pm 0.9) \text{s}$ ，即 $v = (2.6 \pm 0.3) \times 10^{-3} \text{m/s}$ . 由此得 $\kappa = (330 \pm 80) \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

表 2 动态法测量铝的热导率表

$n$	1	2	3	4	5	6	平均值
$t_n/\text{s}$	3338.04	3344.04	3351.52	3361.52	3370.52	3382.52	
$v = \frac{l_0}{t_{n+1} - t_n}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$3.33 \times 10^{-3}$	$2.67 \times 10^{-3}$	$2.00 \times 10^{-3}$	$2.22 \times 10^{-3}$	$1.67 \times 10^{-3}$		$2.38 \times 10^{-3}$

由此估算出 $\kappa = 279 \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

对 $n = 1, 2$ 的第 3001-7096 组数据进行 FFT，得到 $t_2 - t_1 = (8.8 \pm 1.6) \text{s}$ ，即 $v = (2.3 \pm 0.4) \times 10^{-3} \text{m/s}$ . 由此得 $\kappa = (180 \pm 70) \text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ .

2. 用电位差计测热电偶的温差电动势

按图 12 所示连接线路，并将热电偶的冷端置于冰水混合物中.

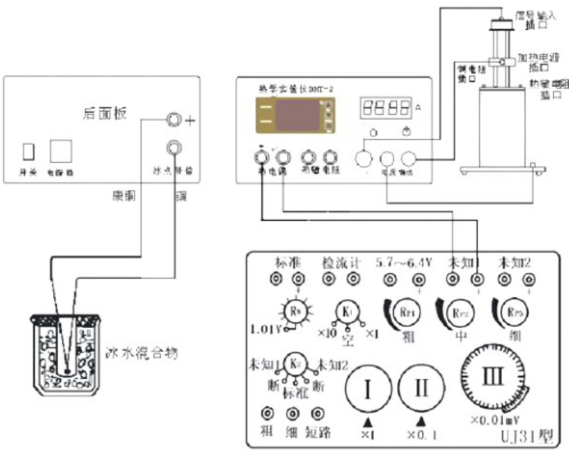


图 12 温差电动势测量电路图

室温为25.1℃，冷端温度 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ 。测量热电偶热端温度 $t$ ，用电位差计测量对应的温差电动势 $E_x$ 。由

$$E_x = \alpha(t - t_0),$$

绘制 $E_x$ - $t$ 图像并线性回归，得到斜率 $k$ 和截距 $b$ 。

表 3 温差电动势的测量表

$t/^\circ\text{C}$	25.1	31.0	35.3	39.9	45.4	50.1
$E_x/\text{mV}$	4.92	6.18	6.92	7.60	8.74	9.71

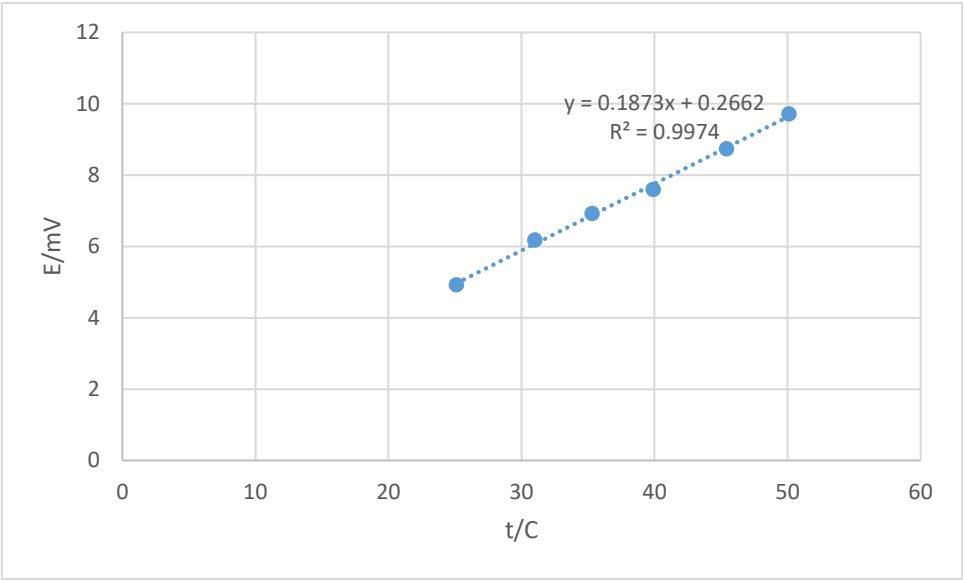


图 12 温差电动势温度趋势图，统计量 $k = 0.187 \pm 0.008$ ， $b = 0.27 \pm 0.19$ ， $r^2 = 0.9974$

即得 $\alpha = (0.187 \pm 0.008)\text{mV/K}$ 。

### 3. 用平衡电桥测量铜金属电阻的温度特性

室温为25.1℃。将铜金属电阻温度保持为 $t$ ，用电桥测量对应的电阻 $R_x$ 。线性拟合 $R_x - t$ 得到斜率 $k$ 和截距 $b$ ，由

$$E_x = \alpha(t - t_0),$$

绘制 $E_x$ - $t$ 图像并线性回归，得到斜率 $k$ 和截距 $b$ 。

表 4 铜电阻温度特性的测量表

$t/^\circ\text{C}$	25.1	31.0	35.3	39.9	45.4	50.1
$R_x/\Omega$	57.5	58.7	59.5	60.5	61.6	62.8

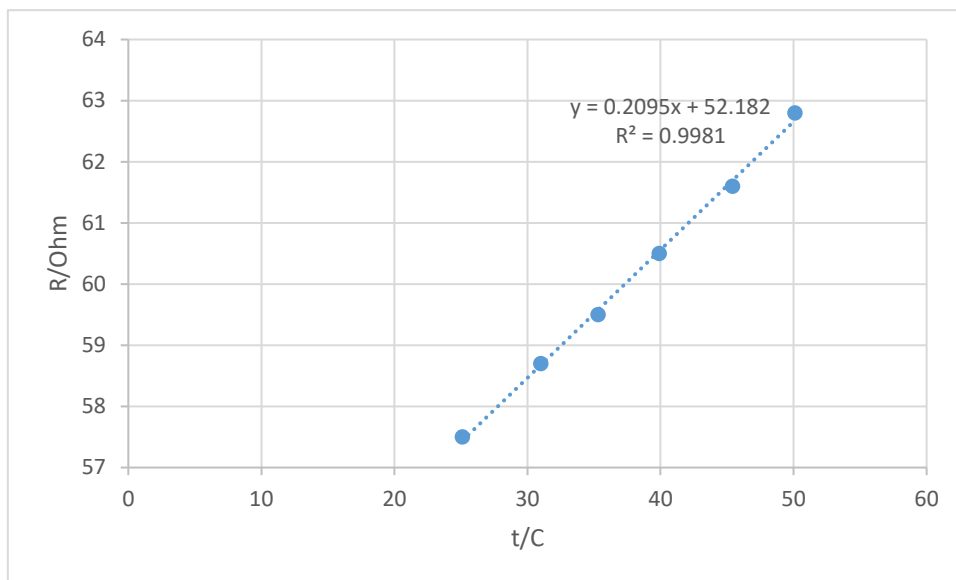


图 13 金属电阻温度趋势图, 统计量  $k = 0.210 \pm 0.008$ ,  $b = 52.18 \pm 0.18$ ,  $r^2 = 0.9981$

即得  $\alpha = (0.210 \pm 0.008)\Omega/K$ .

#### 4. 用平衡电桥测量半导体热敏电阻的温度特性

当前室温为  $25.1^\circ\text{C}$ . 测量热敏电阻温度  $t$  和对应的热力学温度  $T$ , 用电桥测量对应的电阻  $R_T$ . 绘制曲线  $R_T - t$ , 观察热敏电阻的温度特性; 由

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

绘制  $\ln R_T - 1/T$  图像并线性回归, 得到斜率  $k$  和截距  $b$ , 则  $A = e^b$ ,  $B = k$ .

表 5 热敏电阻温度特性的测量表

$t/^\circ\text{C}$	31.0	34.9	40.0	44.5	50.1
$R_T/\Omega$	2093.0	1788.9	1465.1	1217.4	984.9
$(1/T)/\text{K}^{-1}$	0.003288	0.003246	0.003193	0.003148	0.003094
$\ln R_T$	7.64635	7.48936	7.28968	7.10447	6.89254

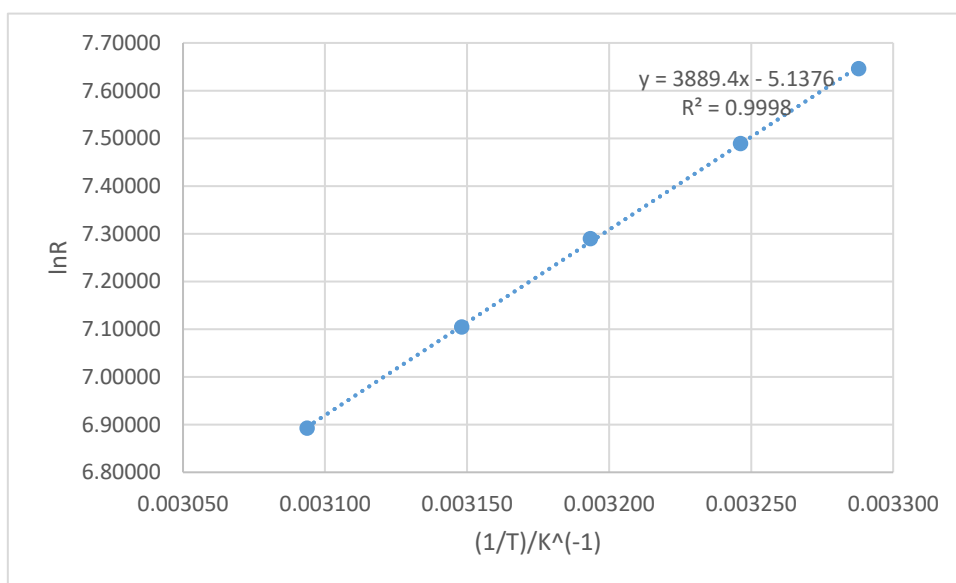


图 14 热敏电阻温度趋势图, 统计量  $k = 3889 \pm 46$ ,  $b = -5.13 \pm 0.10$ ,  $r^2 = 0.999979$



即得 $A = (0.0059 \pm 0.0011)\Omega$ ,  $B = (3889 \pm 46)K$ .

## 5. 设计非平衡电桥的温度测量装置

搭建非平衡电桥温度测量装置. 电源开关打到“0~2V 测量”档, 调节电压为所需值. 保持电压不变将电源选择开关打到“0~2V 非平衡”档, 将热敏电阻连接到点桥上, 并将 $R_1$ ,  $R_2$ 和 $R_3$ 调节到对应值. 这时非平衡电桥已经调好. 由电桥示数为

$$U_0 = \lambda + m(t' - t_1)$$

可以读出测试温度 $t'$ .

由

$$E = \frac{4BT_1^2 m}{4T_1^2 - B^2}$$

$$R_2 = \frac{B - 2T_1}{B + 2T_1} R_x(T_1)$$

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

令 $R_3 = 1000.0\Omega$ , 计算电桥对应的各参数如下.

温度区间: 30-50°C;

热敏电阻特性常数:  $A = 0.0059$ ,  $B = 3889$ ;

表头参数选择: 初始示数 $\lambda = -0.4V$ , 分度值 $m = -0.01V/^\circ C$ ;

工作电源电压:  $E = 1.035V$ ,  $R_2 = 1058.7\Omega$ ,  $R_1 = 34.4\Omega$ ;

实际值:  $R_2 = 1058.7\Omega$ ,  $R_1 = 34.4\Omega$ ,  $R_3 = 1000.0\Omega$ .

测量数据如表 6 所示. 将电桥如此调节, 测量热敏电阻设定温度 $t$ 和电桥示数 $U_0$ , 对比测试温度 $t'$ 并绘制校正曲线.

表 6 非平衡电桥设定温度和测试温度测量表

$t/^\circ C$	33.3	37.0	40.2	45.5	49.9
$U_0/V$	-0.333	-0.368	-0.401	-0.454	-0.499
$t'/^\circ C$	33.3	36.8	40.1	45.4	49.9
$t - t'/^\circ C$	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0

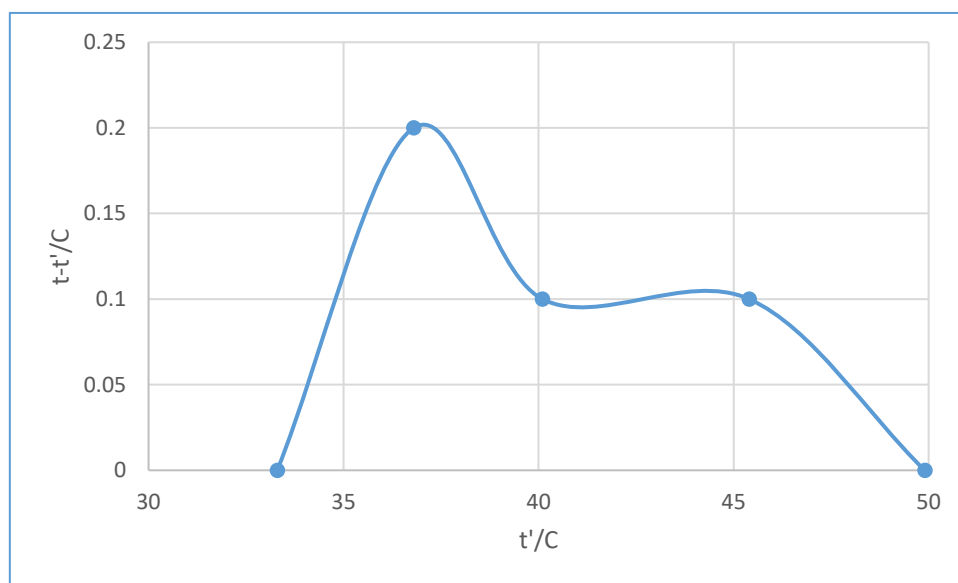


图 15 温度测量装置的校准曲线

可见实验装置与现实测量符合得很好。

## 实验结论

本次实验中，我学习了波动法测量热导率及其数据处理，以及热电偶和热敏电阻的原理和使用方法。

热导率的测量误差达到了 25%。在测量和数据处理的过程中，不论是波峰还是零点，都存在随机偏差过大和测量精度不足的问题。加上输入波形的浮动，以至于实验数据的 FFT 需要手动挑选滤波。我的用 FFT 计算相位的数据处理方法还需要改进。

测量热敏电阻时，由于温度是浮动的，对阻值的测量达不到完全恒温，存在约 2% 的随机偏差。而组装温度测量装置时，其测量精度要求相对于仪器本身并不高，加上测量温区小，因此前面的测量误差并未对测量精度造成影响。

## 思考题

### 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？

从数据表格中分别读取热波稳定传播时各测温点在 $t$ 的温度，按照

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

来拟合对应的曲线即可。具体来讲，可以对前 8 个点做 FFT 来拟合 $\sqrt{\omega/2D}$ 和 $\alpha$ 。

### 2. 为什么较后面测量点的 $T-t$ 曲线振幅越来越小？

由于热波的振幅中含有因子 $e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}x}$ ，较后面的位置接近冷端，热波衰减的很快。

### 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？

铝的热导率比铜低，因此因子 $e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2D}}x}$ 衰减的更快。铝棒较后面测温点的温度几乎不发生变化，波峰难以确定。实验中看到，从第 6 个测量点数据开始就已经没有测量价值了。

### 4. 实验中误差的来源有哪些？

各测温点间距的误差；热量在传播中的耗散；未达到稳定热稳态的波动；测量精度和数据处理精度的限制。

### 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？

低温实验的环境中，细小温度变化引起的阻值变化可忽略，使用四线式伏安法可以方便的精确测量温度。但工业仪表常处在高温环境下，电阻值受温度的影响较为明显，此时使用廉价的非平衡电桥法可以动态测量电阻，可以得到了更好的结果，同时测温元件的耐久度也更高。

### 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？

采用三线制，将三根导线其中的一根接到电桥的电源端，其余两根分别接到热电阻所在的桥臂及与其相邻的桥臂上，从而消除导线线路电阻带来的测量误差。

附录: 原始数据



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 陈苏 学号 2022K8009906009 分班分组座号 1-03-5 号 (例: 1-04-5 号)

实验日期 2023 年 11 月 6 日 成绩评定 教师签字 赵同亮

1. 热波波速的测量 (存储数据, 在实验报告上精确计算)  $T=180s$

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。  
 $T=180s$  动态法测铜的热导率  $C=385$   
 $k = \frac{V^2 C \rho T}{4\pi}$   $\rho = 8920$

测量点 $n$	1	2	3	4	5	6
对应峰值时间 $t(s)$	3519.04	3525.04	3535.04	3542.52	3550.52	3556.04
波速 $(m/s)$	$3.33 \times 10^{-3}$	$2.00 \times 10^{-3}$	$2.67 \times 10^{-3}$	$2.50 \times 10^{-3}$	$3.64 \times 10^{-3}$	
波速平均值:	$2.83 \times 10^{-3} m/s$		热导率: 394			

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 $t(s)$	3338.04	3344.04	3351.52	3361.52	3370.52	3382.52
波速 $(m/s)$	$3.33 \times 10^{-3}$	$2.67 \times 10^{-3}$	$2.00 \times 10^{-3}$	$2.22 \times 10^{-3}$	$1.67 \times 10^{-3}$	
波速平均值:	$2.38 \times 10^{-3} m/s$		热导率: 279			

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

室温:  $t = 25.1^\circ C$  电动势:  $E_x = 4.92$  mv 冷端温度:  $t_0 = 0^\circ C$

温度 $t (^\circ C)$	30	35.3	39.9	45.4	50.1
电动势 $E_x (mv)$	6.18	6.92	7.60	8.74	9.78

3. 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  $\alpha$ .)

室温:  $t = 25.1^\circ C$  电阻:  $R_x = 57.5 \Omega$

温度 $t (^\circ C)$	30	34.7	39.9	44.7	50
电阻 $R_x (\Omega)$	58.7	59.5	60.5	61.6	62.8



中国科学院大学  
University of Chinese Academy of Sciences

$$R = A e^{B/T}$$

$$\ln R = \ln A + B \cdot \frac{1}{T} \quad R^2 = 0.9998$$

#### 4. 平衡电桥测热敏电阻温度特性曲线

$$k = 3889.403649 = B$$

绘制  $R_T-t$  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)。

$$b = -5137602307 = \ln A$$

$$A = 0.00587175$$

室温:  $t = 25.1^\circ\text{C}$

电阻:  $R_T = 2604.0 \Omega$

温度 $t$ ( $^\circ\text{C}$ )	31.0	35.9	40.0	44.5	50.1
电阻 $R_T$ ( $\Omega$ )	2093.0	1788.9	1465.1	1217.4	984.9

#### 5. 非平衡电桥热敏电阻温度计的设计

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

热敏电阻特性常数:  $A = 0.00587175$ ,  $B = 3889.40$ ;

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

工作电源电压:  $E = 1.03536\text{V}$ ,  $R_2 = 1058.7 \Omega$ ,  $R_1/R_3 = 0.0343836$ ;

实际值:  $R_2 = 1058.7 \Omega$ ,  $R_1 = 34.3 \Omega$ ,  $R_3 = 1000 \Omega$ .

设定温度 $t$ ( $^\circ\text{C}$ )	33.3	37.0	40.2	45.5	49.9
测试电压 $U_0$ (mv)	-333	-368	-401	-454	-499
测试温度 ( $^\circ\text{C}$ )	33.3	37.0	40.1	45.4	49.9

36.8

(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))

参数计算:

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

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

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

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

## 基础物理实验预习报告

实验名称: 温度和热导率实验

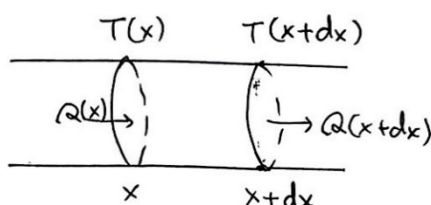
姓名: 陈苏 学号: 2022K8009906009 组号: 1-03-5

实验日期: 2023年11月6日 实验地点: 教学楼 427

## 实验原理

一、用动态法测量导体的热导率.

1. 导体中的热流

如图所示, 由热传导定律, 经过一维导体横截面积的热流为 ( $k$  是热导率)

$$Q(x) = -kA \frac{dT}{dx}$$

对于  $x \sim x+dx$  的部分导体横截面积元, 其温度的变化为 ( $c$  是材料的热容,  $\rho$  是材料密度)

$$c\rho A dx \cdot \frac{dT}{dt} = -Q(x+dx) + Q(x).$$

由  $Q(x+dx) = Q(x) + \frac{dQ}{dx} dx$ , 上式即为

$$c\rho A \frac{dT}{dt} = - \frac{dQ}{dx}$$

代入即得

$$\frac{dT}{dt} = \frac{k}{c\rho} \frac{d^2T}{dx^2}$$

记  $D = \frac{k}{c\rho}$  为热扩散系数, 上式即化为

$$\frac{dT}{dt} = D \frac{d^2T}{dx^2}.$$

在稳态时,  $\frac{dT}{dt} = 0$ , 即有  $\frac{d^2T}{dx^2} = 0$ , 因此材料中的温度是线性分布的。

若令边界  $x=0$  处的温度为  $T = T_0 + T_m \sin \omega t$ , 而另一边界 ( $x=\infty$ ) 处的温度为  $T_0$ , 则可以解出棒上的温度分布为

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

是一列衰减的行波, 其波速为  $v = \sqrt{2D\omega}$ , 衰减的特征波长  $\lambda = \sqrt{\frac{2D}{\omega}}$ 。

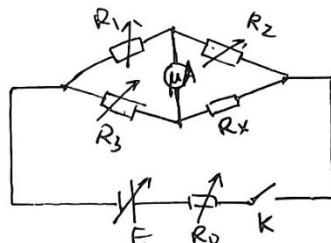
在测出两个测量点之间的间距以及它们之间的相位差后即可得  $v, \omega$ 。  
因此得

$$D = \frac{k}{c\rho} = \frac{v^2}{2\omega}, \text{ 即 } k = \frac{v^2 c\rho}{2\omega}$$

## 二、测量热电阻和热敏电阻的温度特性

### 1. 电桥和电位差计。

单臂平衡电桥。



如图所示, 当电桥达到平衡时, 有

$$R_1 R_x = R_2 R_3.$$

若  $R_x$  是被测电阻, 通过调整  $R_1, R_2, R_3$  使之平衡, 此时  $MA$  表的示数为零, 则

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1}$$

非平衡电桥。

将上图中的  $MA$  表改为电压表, 这时对于任意的  $R_x$ , 电压表示数为

$$U = \left( \frac{R_x}{R_2 + R_x} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) E.$$

若  $R_x$  有小变化, 其一阶项为,

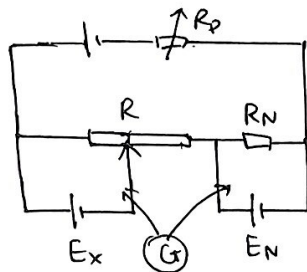
$$\Delta(U)_1 = \frac{E}{(R_2 + R_x)^2} \Delta(R_x)_1$$

二阶项为

$$\Delta(U)_2 = -\frac{2E}{(R_2 + R_x)^2} \Delta(R_x)_2$$

实验中测量出  $\Delta U = \alpha(R_x) + \beta(R_x)_2$  即可拟合出  $E$  和  $R_x$  的变化曲线.

电位差计



如图, 电位差计用补偿法测出待测电压.

对于右侧的标准电压源, 当通过电流为零时处于补偿状态,  $E_N = IR_N$ .

调整左侧可变电阻  $R$ , 当通过电流为零时处于补偿状态,  $E_x = IR$ .

即得左侧的待测电压  $E_x = \frac{R}{R_N} E_N$ .

## 2. 热电偶.

热电偶由两种不同材料, 的金属丝端互相连制或. 两个接触端若温度不同, 便会产生温差电动势, 其大小近似为

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

正比于两端温差, 又称为温差电势.

将热电偶一端置于恒温下 (例如  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ ), 另一端放变温度, 即可测得  $\alpha$ .

(用电位差计测量温差电动势)



### 3. 金属电阻.

金属电阻阻值随温度的变化规律为

$$R_x = R_0 (1 + \alpha t + \beta t^2)$$

用电桥测量不同温度下的电阻即可确定其两个系数  $\alpha, \beta$ .

### 4. (半导体)热敏电阻.

半导体内部由于温度上升时电子热运动加剧, 阻值将会下降, 可以用公式描述为

$$R_x = A e^{B/T}$$

测量时由  $\ln R_x = \frac{B}{T} + \ln A,$

用电桥测量不同温度下的电阻即可确定其两个系数  $A, B$ .

另外, 如果需观测  $R_x$  随  $T$  升高而连续变化情况, 可以用不平衡电桥. 当温度随时间  $t$  缓慢升高时, 可以测出其变化. 例如对于热敏电阻,

$$\Delta(R_x)_1 = - \frac{AB e^{B/T}}{T^2} \Delta(T)_1$$

$$\Delta(R_x)_2 = \left( \frac{AB^2}{T^4} + \frac{2AB}{T^3} \right) e^{B/T} \Delta(T)_2.$$

即

$$\Delta(U)_1 = - \frac{EAB e^{B/T}}{T^2 (R_2 + R_x)^2} \Delta(T)_1$$

$$\Delta(U)_2 = \frac{-2EAB}{T^3 (R_2 + R_x)^2} \left( 2 + \frac{B}{T} \right) e^{B/T} \Delta(T)_2.$$

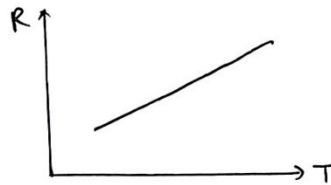
对之即得  $A, B$ .



预习知识。

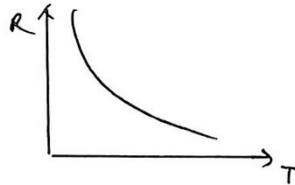
1. 电阻的温度特性曲线即其  $R-T$  曲线。

(a) 金属电阻  $R_x = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2)$



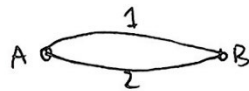
在一定的温度,  $\beta \sim 0$ . 这时电阻近似是线性的。

(b) (半导体)热敏电阻.  $R_x = Ae^{B/T}$



随温度升高, 电阻急剧下降。

2. 热电偶温度计由两块不同材质的金属片两端连接组成。



两端

当温度变化时, 即出现温差  $t-t_0$  时, 就会产生温差电动势

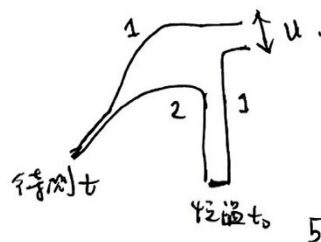
$$U = \alpha(t - t_0)$$

(用电位差计测量)

实际使用时, 将其一端置于温度恒定状态下, 另一端接触待测物体即得待测物体的温度。只要事先测出  $\alpha$ , 就可以用于推出待测温度。

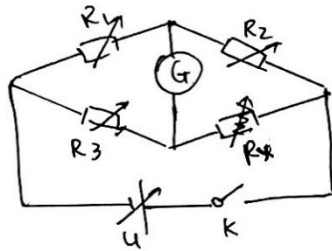
导致的温差电动势

装置如图所示。



(可以参考前面的实验原理部分)

3. 电桥:



当电桥平衡时, 电流计示数为零. 即此时  $R_x$  与  $R_2$  上电压相等:

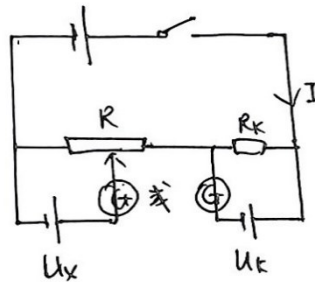
由此得

$$U_x = \frac{R_x}{R_3 + R_x} U = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U = U_2.$$

即有  $R_3 R_2 = R_1 R_x \Rightarrow R_x = \frac{R_3 R_2}{R_1}$

调整  $R_1, R_2, R_3$  使电桥平衡即可测量  $R_x$ .

电位差计.  $U_k, R_k$  都是标准电压或标准电阻.



如图, 当  $U_x, U_k$  上电流均为零时, 电路进入补偿状态. 此时主回路上电流

$I$  满足  $IR = U_x$ , 和  $IR_k = U_k$

参考  $U_k$  和  $R_k$  可得  $U_x = \frac{R}{R_k} U_k$ .

当  $U_k$  和  $R_k$  都已调好的状态下, 调节  $R$  即可测出  $U_x$  (补偿法)