|  |
| --- |
| **《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.

1. 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.

1. 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 型携带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上的电压降补偿,设电路中电流为, 即有

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

因此测得

在实际的调节过程中, RQ 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. 将未知电压接入未知接线柱 (1)(2), 则读数为

1. 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

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，接入未知电阻. (注意 Rx端子上方短接片应接好.)

(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, 调节使电压表示数为零. 然后按下“200mV” 和 “20mV” 再次调零, 即得的精确值.

# 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的热量, 即热流为

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

即得热流方程

其中称为热扩散系数, 其中, 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, 即设处

另一端用冷水冷却, 保持恒定低温, 则热流方程的解为

其中, 是直流成分, 是线性成分的斜率, 从上述式子中可以看出:

(1) 热端 () 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, 波长为;

(2) 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求, 然后再由计算出材料的热导率

1. 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

其中称为温差电系数. 不同金属组成的热电偶对应的也不同.

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下产生的, 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 () 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, 并将热端置于待测温度处. 通过电位差计读取待测电压即得相应的温差电动势, 绘制曲线并进行线性回归, 计算.

1. 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

一般在温度不是很高的情况下, 可以忽略温度二次项, 即

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. 绘制曲线并进行线性回归, 计算, 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.

1. 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

其中是与材料性质的电阻器几何形状有关的常数, 是与材料半导体性质有关的常数, 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 |

为了求得准确的和, 先将上式两边取对数得

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, 绘制曲线并进行线性回归, 计算和.

1. 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, 非平衡时电桥电压随实时变化, 通过计算选取合适的以及, 让测试电压随温度线性变化, 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

对进行泰勒级数展开, 保留至二阶项可以得到

其中为测试区间中间值. 实验中监测30-50℃的温度区间, 则. 又令=0得

于是选取特定的, 和, 就可以将表达为

其中

# 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, 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, 从而得到热导率

对于铜棒, 比热容, 密度; 对于铝棒, 比热容, 密度.

测量相邻测量点和之间热波峰值传播的时间差和, 求出对应的波速

表1 动态法测量铜的热导率表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均值 |
|  | 3519.04 | 3525.04 | 3535.04 | 3542.52 | 3550.52 | 3556.04 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

由此估算出.

对的第3001-7096组数据进行FFT, 得到, 即. 由此得.

表2 动态法测量铝的热导率表

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 平均值 |
|  | 3338.04 | 3344.04 | 3351.52 | 3361.52 | 3370.52 | 3382.52 |
|  |  |  |  |  |  |  |  |

由此估算出.

对的第3001-7096组数据进行FFT, 得到, 即. 由此得.

1. 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, 冷端温度. 测量热电偶热端温度, 用电位差计测量对应的温差电动势. 由

绘制图像并线性回归, 得到斜率和截距.

表3 温差电动势的测量表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 25.1 | 31.0 | 35.3 | 39.9 | 45.4 | 50.1 |
|  | 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, , |

即得.

1. 用平衡电桥测量铜金属电阻的温度特性

室温为. 将铜金属电阻温度保持为, 用电桥测量对应的电阻. 线性拟合得到斜率和截距, 由

绘制图像并线性回归, 得到斜率和截距.

表4 铜电阻温度特性的测量表

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 25.1 | 31.0 | 35.3 | 39.9 | 45.4 | 50.1 |
|  | 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, , |

即得.

1. 用平衡电桥测量半导体热敏电阻的温度特性

当前室温为. 测量热敏电阻温度和对应的热力学温度, 用电桥测量对应的电阻. 绘制曲线, 观察热敏电阻的温度特性; 由

绘制图像并线性回归, 得到斜率和截距, 则, .

表5 热敏电阻温度特性的测量表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 31.0 | 34.9 | 40.0 | 44.5 | 50.1 |
|  | 2093.0 | 1788.9 | 1465.1 | 1217.4 | 984.9 |
|  | 0.003288 | 0.003246 | 0.003193 | 0.003148 | 0.003094 |
|  | 7.64635 | 7.48936 | 7.28968 | 7.10447 | 6.89254 |

|  |
| --- |
| 图14 热敏电阻温度趋势图, 统计量, , |

即得, .

1. 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，和调节到对应值. 这时非平衡电桥已经调好. 由电桥示数为

可以读出测试温度.

由

令, 计算电桥对应的各参数如下.

温度区间: ;

热敏电阻特性常数: , ;

表头参数选择: 初始示数，分度值;

工作电源电压: ，，;

实际值: ，，.

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和电桥示数, 对比测试温度并绘制校正曲线.

表6 非平衡电桥设定温度和测试温度测量表

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  | 33.3 | 37.0 | 40.2 | 45.5 | 49.9 |
|  | -0.333 | -0.368 | -0.401 | -0.454 | -0.499 |
|  | 33.3 | 36.8 | 40.1 | 45.4 | 49.9 |
|  | 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时材料棒上的热波, 即曲线, 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的温度, 按照

来拟合对应的曲线即可. 具体来讲, 可以对前8个点做FFT来拟合和.

1. 为什么较后面测量点的曲线振幅越来越小?

由于热波的振幅中含有因子, 较后面的位置接近冷端, 热波衰减的很快.

1. 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.

1. 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.

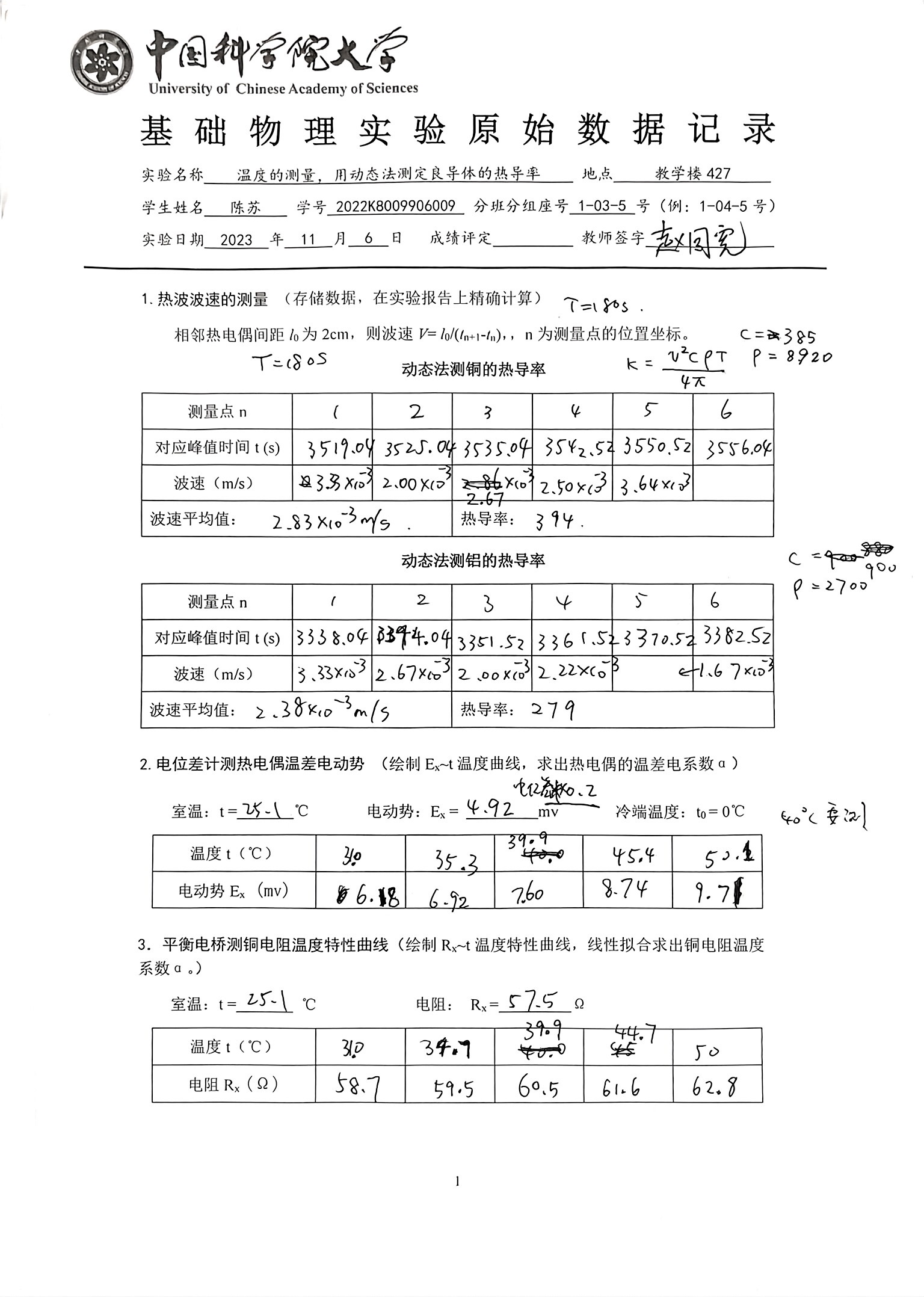
1. 为什么在低温实验中常用四线式伏安法测温度, 而工业仪表中常用非平衡电桥测温度?

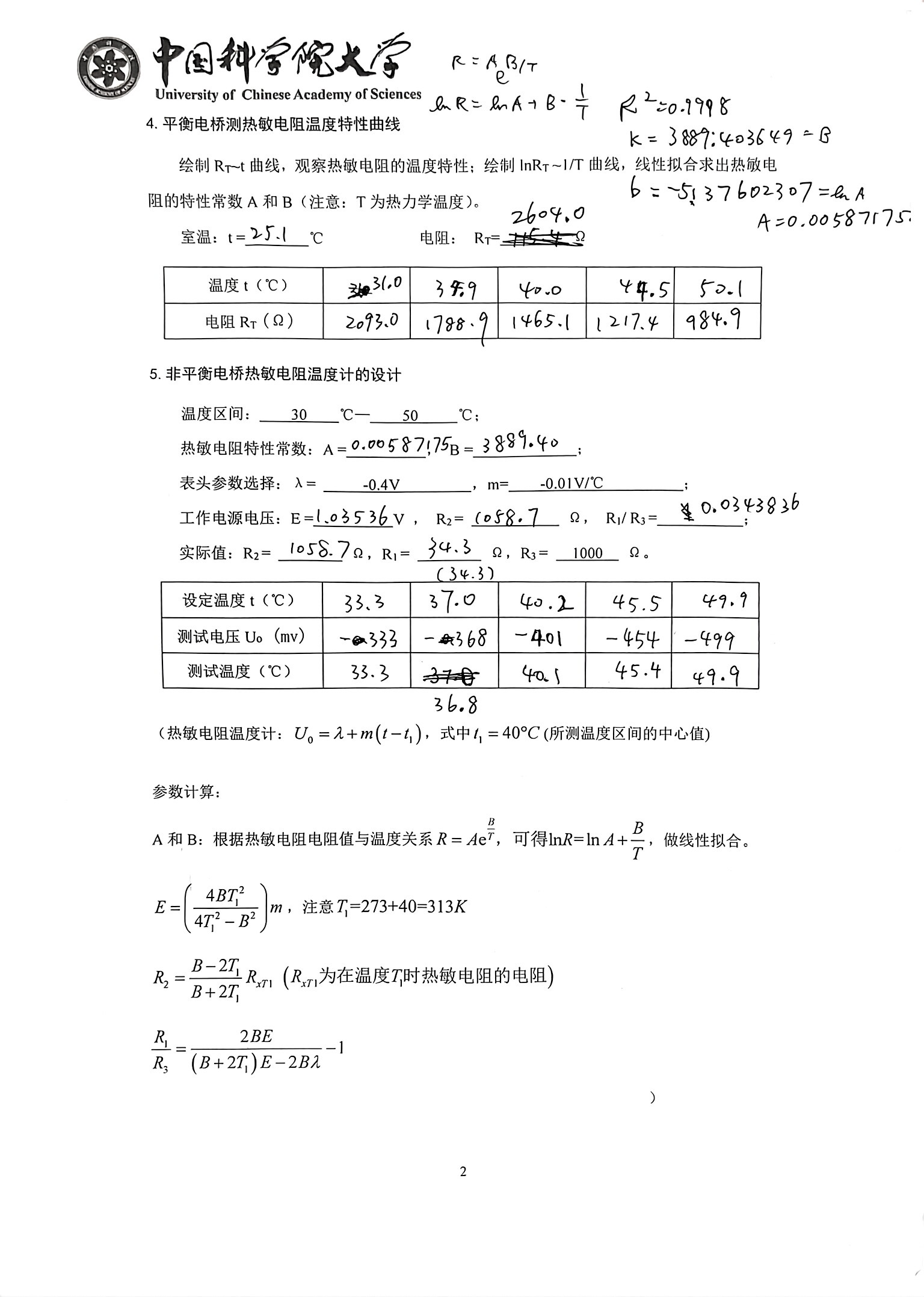
低温实验的环境中, 细小温度变化引起的阻值变化可忽略, 使用四线式伏安法可以方便的精确测量温度. 但工业仪表常处在高温环境下, 电阻值受温度的影响较为明显, 此时使用廉价的非平衡电桥法可以动态测量电阻, 可以得到了更好的结果, 同时测温元件的耐久度也更高.

1. 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





# 附录: 预习报告

