



中山大學 物理与天文学院
SUN YAT-SEN UNIVERSITY SCHOOL OF PHYSICS AND ASTRONOMY

低温技术平台与高温超导研究

黄罗琳 戴鹏辉 杨舒云 丁侯凯

中山大学物理与天文学院，中国珠海市大学路 2 号，519082

行非凡之事，成未竟之功

2025 年 4 月 10 日

E1：低温技术平台与高温超导研究

实验时间： 2025 年 3 月 21 日
实验地点： 教学楼物理实验室 A101
环境信息： 室温 26°
实验人 1： 黄罗琳 22344001
实验人 2： 戴鹏辉 22344016
实验人 3： 杨舒云 22344020
实验人 4： 丁侯凯 22344009
指导老师 指导老师

注意事项

实验报告由预习、实验和分析与讨论三部分组成，并附封面页与附件。预习报告要求课前深入研读实验手册，掌握实验原理，熟悉仪器设备及其使用方法，完成实验思考题，并提前准备实验记录表（可参考实验报告模板打印）。实验记录需客观、详细地记录实验条件、现象及数据，须使用圆珠笔或钢笔书写并签名（铅笔记无效）。原始记录必须完整保留，包括错误和修改内容，错误更正需按标准程序进行。实验记录不得录入计算机打印，但可扫描手写笔记后打印，实验结束前须经指导教师检查并签字。数据处理与分析环节需对原始数据进行处理（除以仪器学习为主的实验外），评估数据的可靠性和合理性，并以标准格式呈现（图表需编号并规范引用）。此外，还需分析实验现象，回答实验思考题，规范引用数据，并最终得出实验结论。实验报告需在实验结束后一周内提交（特殊情况不超过两周）。

特别说明

本实验报告模板基于 MIT License 许可协议进行分发和使用，使用本模板即表示您同意遵守相关条款。本模板由组内成员 pifuyuini 与 Jade Moon 共同开发，随着我们步入高年级阶段的近代物理实验课程，实验报告的书写要求也随之提升——不再局限于套用固定格式的模板，而是更加注重参考学术论文的结构与风格来完成实验报告，这也是本模板设计的初衷。因此，与基础物理实验课程中学院提供的“标准模板”相比，本报告在架构和行文风格上均作出了一定的调整。如本报告的格式或内容与老师或助教的阅读习惯存在差异，敬请谅解。

目录

1 预习报告	3
1.1 实验目的	3
1.2 仪器用具	3
1.3 原理概述	4
1.3.1 低温技术	4
1.3.2 强磁场技术	4
1.3.3 电阻的测量	5
1.3.4 基于 LabVIEW 编程的实验管理	6
1.3.5 超导电性简介	6
1.4 前思考题	7
1.5 第二周实验的实验方案	12
1.5.1 实验目的	12
1.5.2 实验设备	12
1.5.3 实验准备	12
1.5.4 实验过程	12
2 实验过程	13
2.1 实验前期准备	13
2.1.1 接线准备	13
2.1.2 温度准备	14
2.1.3 LabVIEW 准备	14
2.2 转变温度测量	14
2.3 外加磁场对样品转变温度影响	15
2.3.1 实验过程	15
2.3.2 初步讨论	16
3 分析与讨论	17
3.1 数据分析	17
3.1.1 超导讨论	17
3.1.2 超导转变温度	18
3.1.3 磁场对于超导转变温度影响	18
3.1.4 理论建模	20
3.2 实验进一步讨论	21
3.2.1 温度的测量	21
3.2.2 电阻的测量	22

3.3 总结讨论	22
4 附录	24
4.1 补充材料	24
4.2 原始数据与桌面	24
4.3 个人签名	25



预习报告

1.1 实验目的

- ▶ 学习基本的低温技术，掌握深冷温区的获得和测量方法（实验内容 1、2、3）；
- ▶ 学习超导电性的两个基本特征：零电阻和迈斯纳效应；通过实验认识磁场对超导临界温度的影响；学习多变量对研究对象影响的研究方法。
- ▶ 学习将弱信号测量技术应用于超导转变的测量：直流、交流四引线法用于零电阻特性测量（实验内容 1），交流磁化率测量（实验内容 2）；学习为测量提供磁场条件。
- ▶ 复习巩固信号提取方法之“本底扣除”，包括硬件设计中的物理扣除和数据处理时的数值扣除。
- ▶ 学习通过电磁铁获得中强磁场的方法，了解磁场强度、分布均匀性与电磁铁的磁隙宽度的关系（实验内容 4）；
- ▶ 巩固和加深数据采集系统的认识，学习用 LabView 管理实验（实验内容 1、2、3）。

1.2 仪器用具

表 1：仪器用具清单

编号	仪器用具名称	主要参数
1	锁相放大器	OE1022E (BNC 接口)
2	NI 数据采集器	PXle4081、PXle4083/4
3	数字多用表	RIGOL DM3058E
4	直流恒流源	IT6411S (ITECH)
5	压控电流源	OE4201 (SMA 接口)
6	磁场系统	EM3 电磁铁 +P10-40 电源
7	液氮低温恒温器	SV-12
8	制冷机	CTI 微型制冷机，45~320K
9	取样电阻	SMA 接口， 10Ω 、 1Ω
10	Y 系高温超导带 (截片)	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$, 银包裹 (T_c 90K)
11	Bi 系高温超导带 (截片)	$\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_3\text{O}_{10}$ (T_c 105K)
12	高温超导陶瓷	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 陶瓷样品， $2 \times 2 \times 8 \text{ mm}^3$
13	高温超导织构样品	$\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ 织构样品 (各向异性)

1.3 原理概述

1.3.1 低温技术

在物理实验中，通常将液氦温度（4.2K）以上至室温的范围称为低温液氦温区，而液氮温度（77K）以上至室温的范围称为低温液氮温区。4.2K 以下的区域则归为极低温范围。

低温环境的获得依赖于制冷和隔热两个关键因素。制冷通过移除物体的热量来降低其温度，而隔热则防止外界热量回流。当系统内外的热量交换达到平衡时，温度趋于稳定。

常见的制冷方式包括使用液氮等制冷剂和制冷机。本实验主要采用液氮制冷，即利用专用设备制备液氮，并通过输送方式冷却实验装置和样品。这种方法具有投入少、降温快、噪声低等优势，但由于主要依赖制冷剂的潜热，冷量利用率较低，同时输液较麻烦，维持低温时间有限。

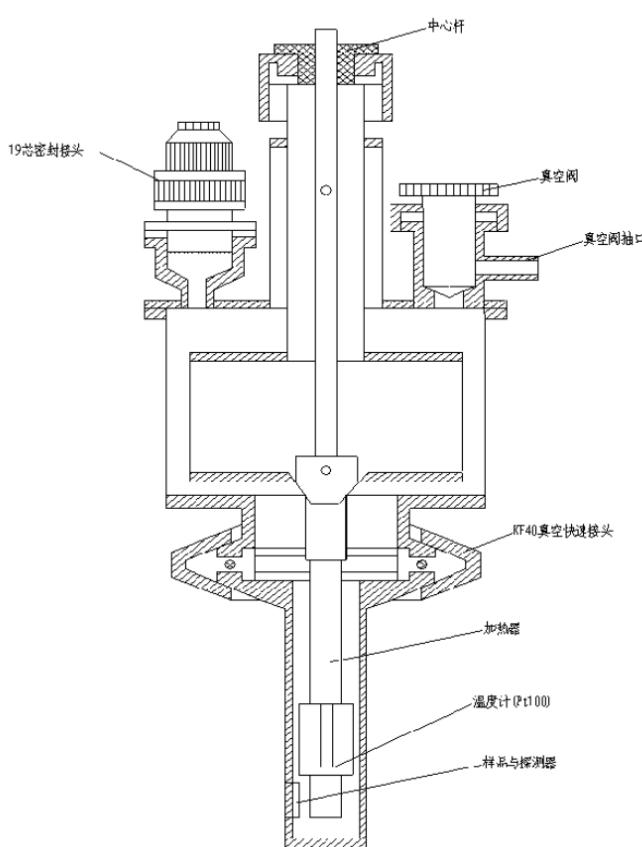


图 1：漏热式液氮恒温器结构

1.3.2 强磁场技术

实验中常用的人造强磁场包括脉冲磁场、超导磁场和电磁铁磁场。本实验采用电磁铁作为磁场源。

电磁铁由铁磁材料作为磁芯，外绕螺线管产生磁场。由于铁磁材料的高磁导率（约 10^3 量级），在较小电流下即可获得较强磁场。磁隙两侧通常设计成锥形以聚焦磁场，其极限磁感应强

度取决于铁磁材料的饱和磁化强度，一般在数特斯拉范围。根据磁路定理，磁隙越宽，磁场强度越低。

出于安全考虑，实验室内电磁铁的磁感应强度通常限制在 0.6T 以内，实验区域内禁止存放无关物品或携带铁磁材料。由于铁磁性材料的磁滞效应，磁场与外加电流的对应关系并非严格线性，因此建议使用电源的磁场模式（FIELD），该模式具备自动消磁功能，并可借助特斯拉计测量磁场，精确控制磁感应强度。

液氮恒温器通常固定安装电磁铁，使样品位置相对磁隙稳定；对于循环制冷机恒温器，电磁铁可沿导轨水平移动，实验前需标定磁场与相对位置。

1.3.3 电阻的测量

▶ 直流四引线测量电阻

传统两引线测量方式不可避免地引入引线电阻和接触电阻，特别是在小电阻测量中误差较大。采用四引线法可以有效消除这些影响。由于电压表的输入阻抗较大（约 $10^{10}\Omega$ ），流经测量引线的电流极小，因此接触电阻和引线电阻造成的电压降可忽略。

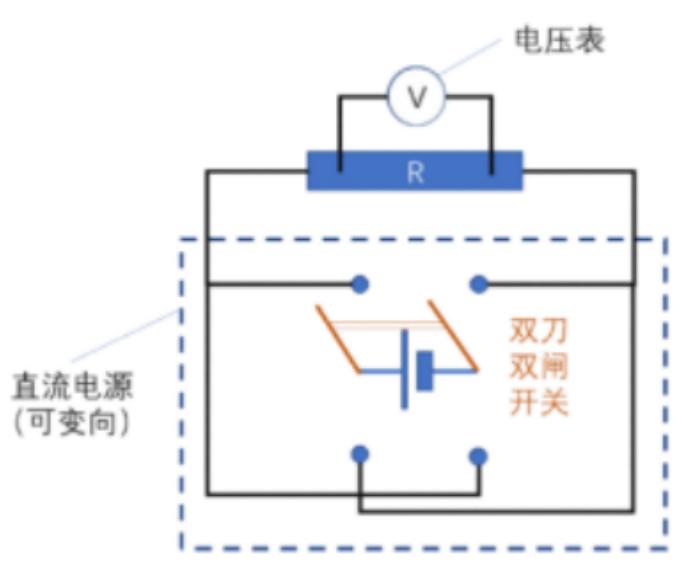


图 2：直流四引线法测量电阻原理

由于样品电极可能不对称，焦耳热、接触热阻以及温度梯度的不同可能引入温差电势和接触电势。直流四引线法通过反向电流测量来抵消这些误差，电阻计算公式如下：

$$R = \frac{V_+ - V_-}{2I} \quad (1)$$

其中， V_+ 和 V_- 分别为正向与反向电流下的电压测量值。

▶ 交流四引线测量电阻

交流测量方法可进一步消除温差电势和接触电势的影响。在交流测量中，通过测量电压有效值 ($V_{pp}/2\sqrt{2}$)，可以获得交流电抗信息。

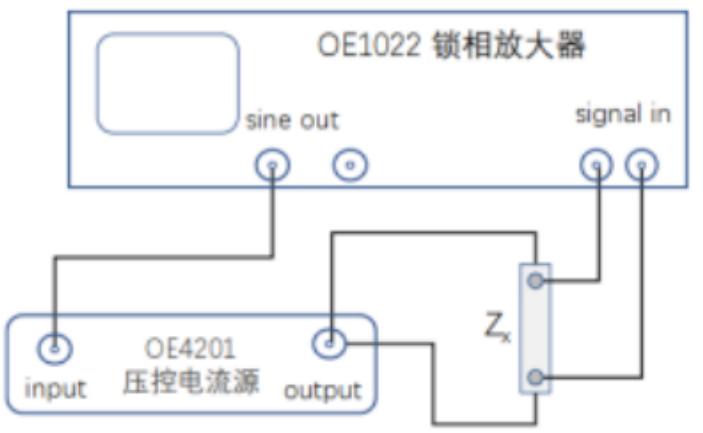


图 3：交流四引线法测量电阻原理

由于交流测量涉及容抗和感抗，测量频率的选择至关重要。锁相放大器可用于提高测量精度，并有效滤除噪声。然而，低频可能引入 $1/f$ 噪声，而过高频率可能导致引线寄生效应的影响。

本实验电路采用交流压控电流源（最大输出 100mA），并使用锁相放大器（OE1022）进行电压采集，A、B 端采用差分输入方式。

1.3.4 基于 LabVIEW 编程的实验管理

实验中的低温与磁场系统由东方晨景提供，其温控和磁场控制模块已固定，支持 LabVIEW 驱动，可接受计算机指令，实现精准的温度与磁场控制。

本实验主要采用直流四引线法测量电阻，数据采集设备包括 NI PXIe4081、PXIe4083/4 和 IT6411S。

1.3.5 超导电性简介

超导是一种宏观量子现象，其本质是电子对（库珀对）的玻色-爱因斯坦凝聚。超导转变受温度、磁场和外加电流影响，可逆变换为正常态。

超导体具有两个基本特征：

- ▶ **零电阻**：在超导态下，电阻降至零，电流可无损耗流动。
- ▶ **抗磁性（迈斯纳效应）**：超导体会排斥外部磁场，使磁感应强度在其内部趋于零。

外加磁场超过临界值时，超导性消失，电阻恢复正常。对于第二类超导体（Type-II），存在两个临界磁场，超导体在其间进入混合态，形成磁通涡旋。

高温超导指超导转变温度高于 BCS 理论极限（33K）的材料，其机制超出传统电声相互作用模型范畴。

1.4 前思考题

Reflection Question 1.1:

深低温系统为什么要抽真空？

深低温系统需要抽真空主要是为了减少热传导、热对流和热辐射，从而达到良好的隔热效果。在低温条件下，即使是极小的热量输入也可能导致温度上升，影响实验的精度和稳定性。

- ▶ **减少气体传导漏热：**在大气环境下，气体分子通过碰撞传递热量。当系统被抽成真空中后，气体分子数量显著减少，气体传导的热量大幅降低。
- ▶ **抑制热对流：**在有空气的情况下，热空气会上升，冷空气下沉，形成对流，导致热量传递。抽真空中后，系统内部几乎没有空气，热对流基本消除。

Reflection Question 1.2:

真空泵产生一定的噪声，在达到真空要求后，是否可以关真空泵？关真空泵前，是否要先关真空阀门？

在达到真空要求后，可以关闭真空泵，但在关闭真空泵之前需要先关闭真空阀门。这样做的目的是：

- ▶ **维持低温系统的真空状态：**如果先关闭真空泵而不关闭阀门，空气可能会通过泵逆流进入系统，破坏真空环境。
- ▶ **防止泵油或杂质进入系统：**某些类型的真空泵在停止工作后，可能会有微量油雾或杂质回流到系统内部，对实验环境造成污染。

Reflection Question 1.3:

为什么要安装屏蔽罩（防辐射屏）？屏蔽罩用哪一类材料最好？

屏蔽罩（防辐射屏）主要用于减少低温设备与环境之间的热辐射交换，降低热负载，以提高系统的制冷效率。

- ▶ **屏蔽热辐射：**实验环境中，墙壁、设备和周围空气会向低温部分辐射热量，影响制冷效果。屏蔽罩可以阻挡和反射这些热辐射。
- ▶ **减少低温部件的热吸收：**采用高反射率的材料可以降低低温部件对环境辐射热的吸收，从而减小系统的稳态温度。
- ▶ **最佳材料选择：**本实验使用镀金紫铜作为屏蔽罩材料。紫铜具有良好的导热性能，可以快速均匀分布热量，而金的高反射率（尤其是在红外波段）能有效减少热辐射。

Reflection Question 1.4:

请估计直径为 12mm、长为 100mm，温度为 4K 的恒温器在无防辐射屏时的漏热约为多少？在采用一层防辐射屏后，其与环境之间的辐射漏热减少了多少？如果将防辐射屏的温度降到液氮温度（77K），则该防辐射屏的辐射漏热又为多少？

假设恒温器为圆柱体，直径为 12mm，长度为 100mm，温度为 4K，环境温度为 300K。我们计算其辐射漏热。

首先，计算圆柱体的表面积。圆柱的半径为：

$$r = \frac{12 \text{ mm}}{2} = 6 \text{ mm} = 0.006 \text{ m}$$

圆柱的长度为：

$$L = 100 \text{ mm} = 0.1 \text{ m}$$

圆柱的表面积由侧面和两个底面组成：

$$A_{\text{side}} = 2\pi r L = 2\pi(0.006 \text{ m})(0.1 \text{ m}) = 0.00377 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{top/bottom}} = \pi r^2 = \pi(0.006 \text{ m})^2 = 1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

总表面积为：

$$A = A_{\text{side}} + 2 \times A_{\text{top/bottom}} = 0.00377 \text{ m}^2 + 2 \times 1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^2 = 0.004 \text{ m}^2$$

根据斯图尔特-玻尔兹曼公式计算辐射热流：

$$Q = \sigma A \epsilon (T^4 - T_0^4)$$

其中， $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ ， $T = 4 \text{ K}$ ， $T_0 = 300 \text{ K}$ ， $\epsilon = 1$ 。代入计算：

$$Q \approx 1.84 \text{ W}$$

假设防辐射屏的发射率非常低（接近 0），能够显著减少辐射热流。因此，辐射漏热将大大减少。

若防辐射屏温度降至 77K，使用同样的公式计算：

$$Q_{\text{screen}} \approx 1.83 \times 10^{-3} \text{ W}$$

总结

- ▶ 无防辐射屏时的辐射漏热约为 1.84 W。
- ▶ 加入防辐射屏后，当屏幕温度降至 77K 时，辐射漏热降至约 0.00183 W。

Reflection Question 1.5:

铂电阻温度计位置不在样品旁边，有什么因素会影响样品温度偏离温度计的温度？偏离有多大？能否测量或通过建模进行定量分析？

温度计与样品之间存在温度偏差的主要影响因素包括：

1. **热传导阻抗：**样品与温度计之间的热连接方式及其热阻会影响温度的传递。连接材料的导热系数、接触热阻以及安装方式都可能导致温度差异。
2. **热容效应：**如果样品和温度计的热容相差较大，在温度变化过程中可能会出现温度滞后，导致两者的瞬时温度不同。
3. **寄生热流：**周围环境（如支架、样品台、引线）可能通过热传导或辐射方式影响样品，使其温度与温度计不同。
4. **环境温度波动：**实验环境的温度变化可能导致温度计和样品的热交换不同步，造成测量误差。

温度偏差的大小可以通过稳态热传导方程估计：

$$\Delta T = \frac{P_{\text{loss}}}{K_{\text{eff}}} \quad (2)$$

其中 P_{loss} 为寄生热流， K_{eff} 为温度计与样品之间的有效热导率。对于低温实验，可以使用有限元分析（FEM）或热传导模型进行建模分析，并通过实验测量（如热响应时间对比、热传导校准）进行验证和修正。

Reflection Question 1.6:

高磁场下电磁铁长时间工作会导致线圈温度升高，如何在满足实验需求的同时，使线圈电流最小、且实验时间最短？然后如何保护自己避免烫伤、又不影响线圈散热？

优化实验参数以降低线圈温升：

1. 计算实验所需的最低磁场，并选择对应的最小电流，避免过高电流造成不必要的功耗；
2. 采用合理的工作-休息周期，避免线圈长时间连续工作导致过热；
3. 预先准备好实验流程和设备，减少实验过程中电磁铁的工作时间；
4. 采用低电阻、高导热率的线圈材料（如铜线），降低焦耳热产生；
5. 若条件允许，可使用脉冲磁场代替持续磁场，以减少功耗和发热。

安全防护与散热措施：

1. 在电磁铁周围安装强制风冷系统或水冷系统，提高散热效率；
2. 避免直接接触电磁铁线圈，可使用耐高温手套或隔热工具；

3. 在实验区域设置高温警告标识，提醒实验人员注意安全；
4. 确保线圈周围的空气流通，避免阻挡散热通道，如避免密封电磁铁外壳；
5. 在实验过程中监测线圈温度，若温度超限，则暂停实验并让线圈冷却。

Reflection Question 1.7:

本实验中样品位置的磁场与霍尔探头测量的磁场有多大的偏差？如何校正？校正时电磁铁电源能选用“磁场模式”吗？为什么？

磁场测量偏差的来源：

1. 霍尔探头的测量点与样品位置存在空间偏移，导致测量磁场与样品实际磁场不同；
2. 由于磁场不完全均匀，磁隙内不同位置的磁场强度可能存在梯度；
3. 霍尔探头的零点漂移或非线性误差可能导致测量值偏差。

磁场校正方案：

1. 在不同位置测量磁场分布，绘制磁场梯度图，确定样品位置的实际磁场；
2. 采用磁通计或 NMR 磁强计对霍尔探头测量进行标定，提高测量准确性；
3. 通过有限元模拟计算磁场分布，并与实验测量进行对比，修正偏差。

是否可以使用“磁场模式”进行校正？：

可以，因为磁场模式采用反馈控制，能通过测量的磁场值调节电流，使磁场更加稳定和可控；若霍尔探头位置与样品不同，磁场模式可能基于探头位置调整电流，导致样品位置磁场仍有偏差，因此仍需额外校正。

Reflection Question 1.8:

如果采用“磁场模式”加磁场，会有剩磁问题吗？

磁场模式的剩磁特性：

- ▶ 磁场模式带有自动消磁功能，能在设定磁场归零时，逐步降低电流并消除剩磁；
- ▶ 可使用高斯计检查剩磁，并在必要时手动执行额外的消磁步骤。

Reflection Question 1.9:

外加磁场与电流方向的夹角不同，洛伦兹力不同，从而超导体的磁流阻大小不同。针对研究磁场（矢量）对超导转变的影响，写出你的实验方案。

研究超导体在不同方向外加磁场下的超导转变特性，探究磁流阻的各向异性及磁场对超导态稳定性的影响。**实验装置与测量方法：**

- ▶ 采用低温恒温器（液氮系统）提供稳定低温环境；
- ▶ 采用三轴磁铁或旋转样品台，以控制磁场方向；
- ▶ 采用四引线法测量样品的电阻，并结合锁相放大器提高信噪比；
- ▶ 记录不同磁场方向（相对于电流）的临界磁场、超导转变温度及磁流阻；
- ▶ 通过特斯拉计测量实际磁场分布，并校正样品的取向误差。

数据分析：

- ▶ 研究磁场方向对超导转变温度的影响；
- ▶ 计算各向异性参数，分析磁通运动与洛伦兹力的关系；

Reflection Question 1.10:

用直流法和交流法测量电阻有何差异？对于交流法测量电阻，是否可以有效地扣除测量系统中感抗和容抗的贡献？如何扣除？

直流法 vs. 交流法：

- ▶ 直流法通过恒流源施加电流，测量电压并计算电阻，适用于大多数金属和半导体；
- ▶ 交流法采用锁相放大器，可有效抑制低频噪声，提高测量微小电阻的精度；
- ▶ 交流法可通过相敏检测，分离出样品的阻性、感抗和容抗成分。

扣除感抗和容抗的方法：选择合适的测量频率，使感抗和容抗的影响最小；通过锁相放大器的相敏检测功能，仅提取与电流同相的信号分量（即纯电阻部分）；进行背景测量，记录连接导线及仪器内部的寄生电抗，并进行补偿。

Reflection Question 1.11:

与标准四引线法（四电极）相比，两电极四引线有何不同，并说明在超导态能否测出零电阻。

两电极四引线 vs. 标准四引线：

- ▶ 标准四引线法（四电极）采用独立的电流和电压测量引线，可有效消除接触电阻影响；
- ▶ 两电极四引线法在样品两端接有公共电极，测量信号仍然会受到接触电阻的影响。

在超导态的测量问题：

- ▶ 在超导态，理想情况下超导体应呈零电阻；
- ▶ 若使用四电极法，则测量的电压降为零，可以确定超导转变；若使用两电极四引线法，由于接触电阻的存在，测得的电压可能非零，导致测量误差；
- ▶ 可以通过 I-V 特性测试超导跃迁点，以更准确判断超导态的形成。

1.5 第二周实验的实验方案

1.5.1 实验目的

本实验旨在探究外加磁场如何影响超导转变时电阻随温度的变化。通过精确测量样品在不同磁场条件下的超导转变温度，并分析其变化趋势，以深入理解磁场对超导体电子态的影响。

1.5.2 实验设备

- ▶ 低温系统（包含液氮恒温器）
- ▶ 交流四引线测量系统（电流源、纳伏表）
- ▶ LabVIEW 控制系统
- ▶ 电磁铁及电源
- ▶ 真空系统（机械泵、真空阀等）
- ▶ 温度控制系统（控温仪、温度计）

1.5.3 实验准备

1. 确认真空球阀处于关闭状态，检查样品罩、机械泵等处的卡箍是否闭紧。
2. 关闭真空阀后，打开真空泵并运行至少 2 分钟，确保无明显的“呼噜”声后，缓慢旋转打开真空阀至完全打开，使系统抽真空。
3. 真空泵运行 20 分钟后，逆时针旋转丝杆至“液氮针阀”完全打开，并使用漏斗向制冷仪内注入液氮，直到有少量液氮漏出。
4. 注入完毕后，用纱布将排气孔裹住，防止空气进入冷凝水凝固堵塞针阀。
5. 当温度降至 200K 附近时，关闭真空阀，并关闭真空泵。
6. 使用 LabVIEW 程序控制温度，选择合适的挡位和调整丝杆高度，从而达到所需的升降温速率。

1.5.4 实验过程

1. 使用交流四引线法测量电阻，通过 LabVIEW 程序实现实时的电阻测量，对于温度可以考虑进行已标定电阻的温度换算。
2. 设置外加磁场梯度，重复步骤 1，测量得到不同外磁场条件下的超导转变温度。
3. 记录超导转变温度随外磁场强度的变化，绘制曲线并分析数据。



实验过程

2.1 实验前期准备

2.1.1 接线准备

由于实验台的选择，本小组主要完成对于超导转变温度的测量，这里就需要对于样品的电阻进行测量，对于测量电路的接线，主要通过如下所示的接线图来进行：

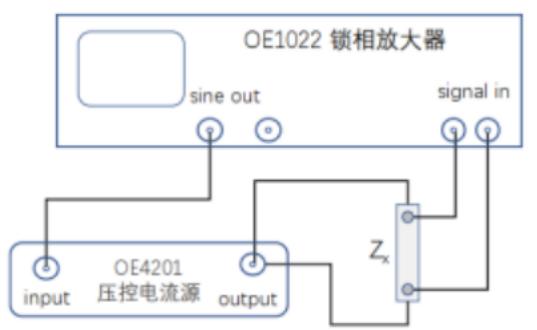


图 4：交流四引线法

实际操作过程中，对于实验线路操作，经过了很多尝试，由于对于接线过程中相关器件的内部结构的不熟悉，经历了很多次纠错的经过，最终接线如下：

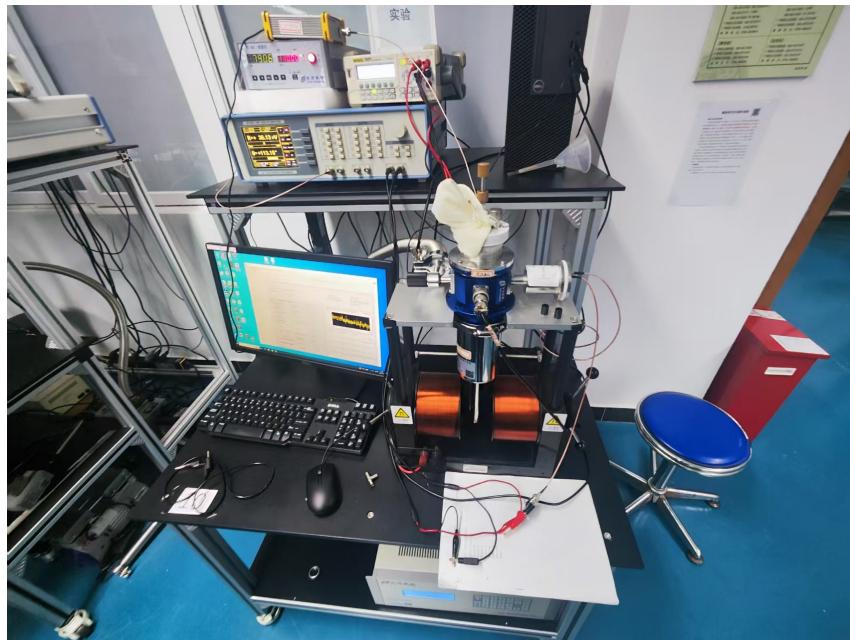


图 5：实际接线图

2.1.2 温度准备

实验主要通过液氮降温，对于理论的转变温度来说，液氮理论上已经满足实验所需的温度条件，但是实际操作过程中，我们发现，实际上根据 Pt1000 给出的数值再与讲义后的对照表进行对照，发现温度与控温器给出的温度相差很大，这一点会在分析讨论部分给出本小组的意见。

除了常规液氮降温，在实验过程中，在老师的启发下，本小组将恒温器液氮部分的出气口连接到一个抽气泵，通过加快液氮蒸发的速度，从而达到更低温度的效果，但是实际实验结果来看，效果并没有达到预期。

2.1.3 LabVIEW 准备

实验软件的准备也同样出现了很多问题，基本上也属于摸索阶段，对于接口的试错导致不得不一次又一次进行重启软件，最后得出了如下接口对应关系：

- ▶ 控温仪 TC202 → COM7
- ▶ 3058E → USB0::0X1
- ▶ 电磁铁电源 → COM1
- ▶ 锁相放大器 → COM3

2.2 转变温度测量

温度区间取 80k 至 110k(绘图时对于数据进行了裁剪)，功率采用 15%，升温降温分别测量，最终得出的实验数据绘图后显示为：

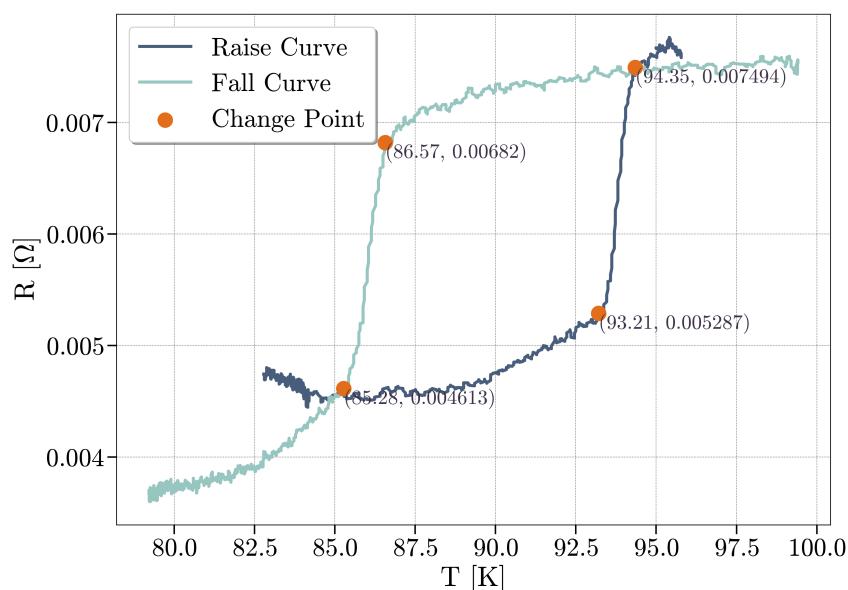


图 6：升温与降温转变温度

2.3 外加磁场对样品转变温度影响

2.3.1 实验过程

本实验是选择了讲义中给出的众多实验问题中其中一个：

外磁场或外加电流如何影响超导转变时的电阻随温度 (T_c) 的变化？

相关实验方案已经在本实验报告预习报告部分给出了，本方案于实验的第二周进行。

其中与讲义不同的是，讲义中给出需采用电磁铁电源中的磁场模式 (FIELD)，但是在本实验中采用的是电流模式，故通过特斯拉计测量出如下电流与磁场对应关系：

表 2：电流与磁场的关系

电流/A	1	2	3	4	5	6	7	8
磁场/KGS	0.6732	1.2414	1.8436	2.4955	3.0319	3.6071	4.1647	4.7109

最终数据输出结果如下，相关数据讨论见分析讨论部分：

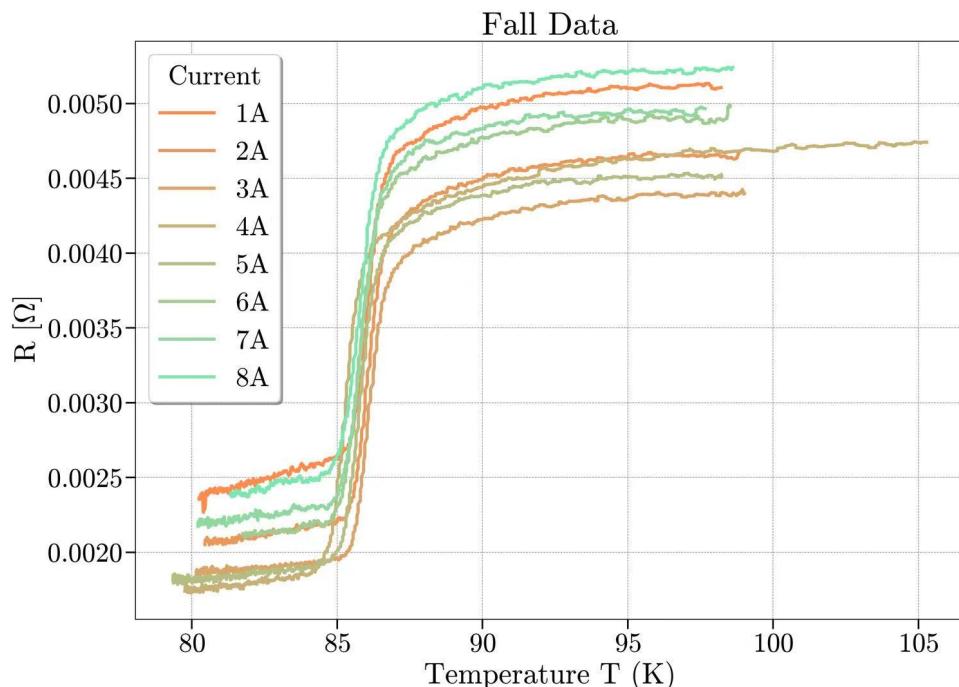


图 7：不同线圈电流下，样品在降温过程的电阻变化

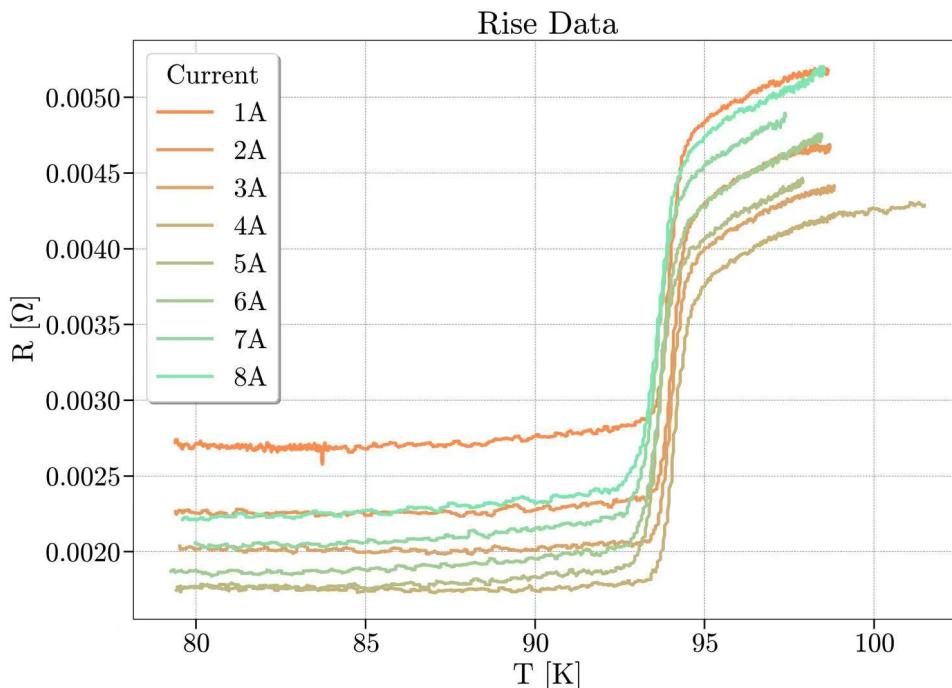


图 8：不同线圈电流下，样品在升温过程的电阻变化

2.3.2 初步讨论

从实验结果来看，并不能一个能够分析出规律的结果。

在实验现场当我们发现这个问题后，经过与老师讨论，通过的如下一系列操作优化实验：

- ▶ 减小升温功率，之前为保证升温功率能够使得恒温器能够达到目标温度，采用了 15% 挡位，但是考虑到可能会导致升温速率过快，器件传导不及时等问题，降低了升温功率为 1%，但是随之而来的问题就变为，当温度在 84K 左右时，已经无法升温了，不得不再次调回 15% 挡位，实际结果并没有区别。
- ▶ 调整液氮挡位，由于考虑到，液氮在器件中可能冷却能力不足，通过调整器件挡杆来调整液氮，但是实际上也收效甚微。
- ▶ 选择读取 Pt1000 给出的电阻值来进行温度换算，但是与实际温度对照表进行对照后，发现，大相径庭，如果选择 Pt1000 的数据作为实际测量温度的话，那么超导转变温度已经与实际测量温度相差甚远。

尝试了众多优化方案后，依旧无法得出一个具有规律的实验结果，最终本小组决定采用最开始的实验数据进行分析，尽管没有完成实验预期，但是在分析讨论部分，我会给出个人对于实验优化方向的理解与讨论。



分析与讨论

3.1 数据分析

3.1.1 超导讨论

对于判断待测样品是否为超导体，通常需要基于超导体的两个基本特性来进行判断。这两个基本特性是：

1. **零电阻性**：超导体在其临界温度以下会表现出零电阻性。当样品温度降到其超导转变温度（通常称为临界温度， T_c ）以下时，其电阻将突然降为零，并且在整个超导状态下维持零电阻。通过测量电阻与温度的关系，可以确认这一点。如果在某一温度点电阻骤降至零，并在后续保持不变，则样品有可能是超导体。
2. **完全抗磁性（迈斯纳效应）**：超导体具有完全抗磁性，也就是说，当超导体进入超导状态时，它会排斥磁场，表现为磁通量完全被排除在其内部。这种现象称为迈斯纳效应。实验上，通常通过测量样品在低于临界温度时的磁响应来确认这一点。如果在低于临界温度时样品的磁场强度显著减弱或消失，则说明样品可能具有迈斯纳效应，表明它可能是超导体。

因此，要判断待测样品是否超导，实验中需要：

- ▶ **测量电阻**：观察样品的电阻随温度变化的情况，确认是否存在零电阻的转变。
- ▶ **测量磁性**：使用磁场探测设备测量样品在临界温度以下的磁场响应，确认是否存在迈斯纳效应。

3.1.2 超导转变温度

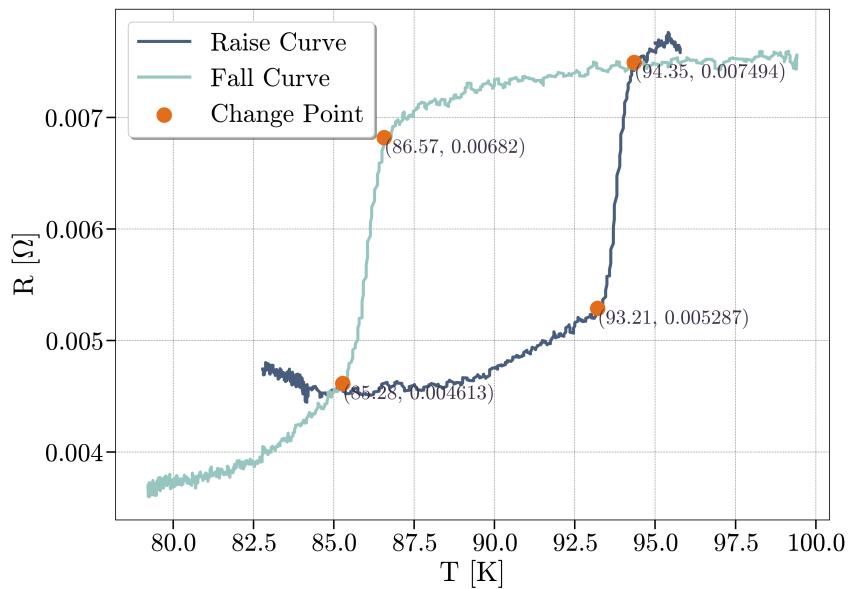


图 9：升温与降温转变温度

第一周实验中，我们的重点是熟悉仪器，同时测量了一组数据，即“样本在温度升高和降低的条件下的电阻值”。数据绘制的图像如上图所示。

可以发现，在升温过程中，温度在 93.21K 时，电阻值发生明显的转变，在 94.35K 时，电阻值转变开始趋于平缓；在降温过程中，温度在 86.57K 时，电阻值发生明显转变，在 85.28K 时，电阻值转变开始趋于平缓。

上面的实验数据说明，该样品在 85K-94K 存在超导转变现象。

值得注意的是，升温过程的转变温度与降温过程的转变温度相差有 8K，显然在温度的测量中应该存在误差，这在后面再进行更详细的讨论。

3.1.3 磁场对于超导转变温度影响

在第二周的实验中，我们探究了被测样品在不同大小的外加磁场对样品转变温度的影响。实验数据的绘制图像如下所示：

我们将电阻值转变的部分截取出来，并标记出电阻值开始明显变化的点，如下所示。

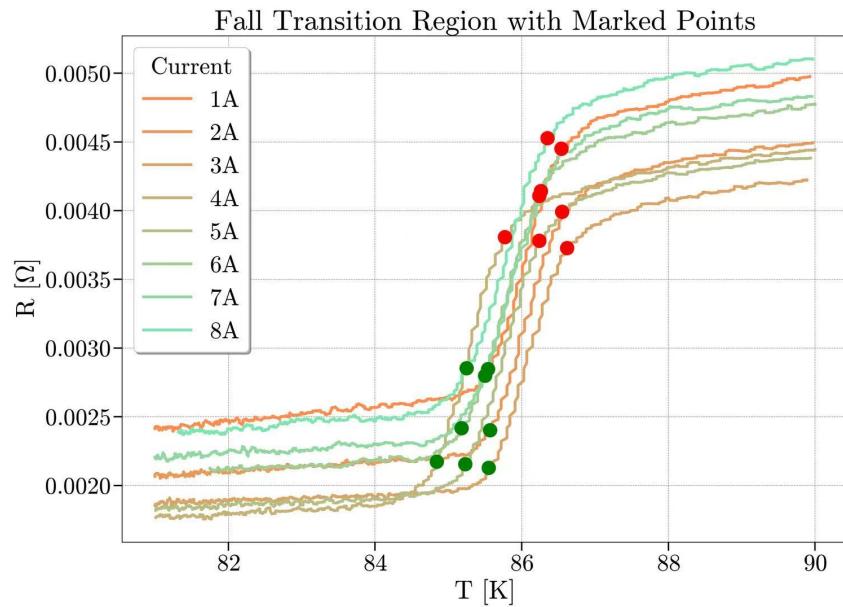


图 10: 电阻值转变开始变化的点

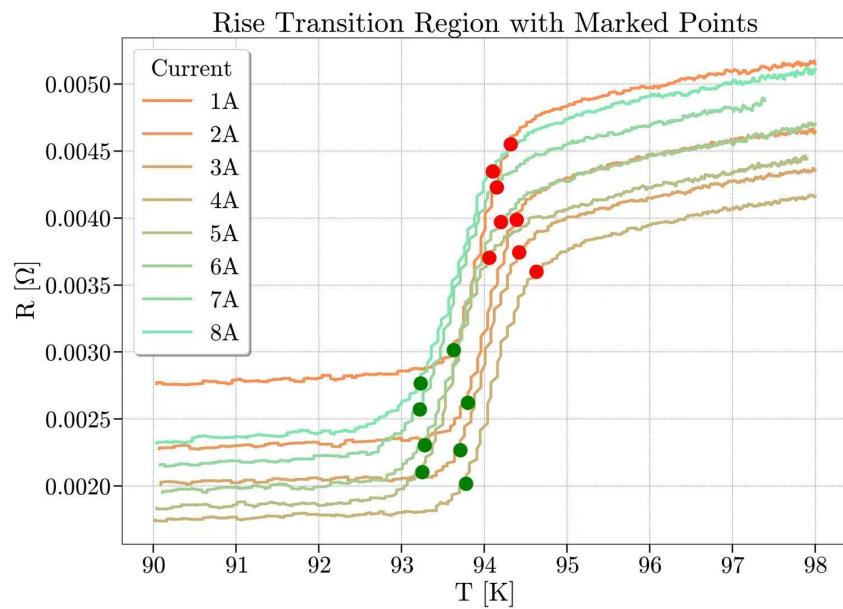


图 11: 电阻值转变开始变化的点

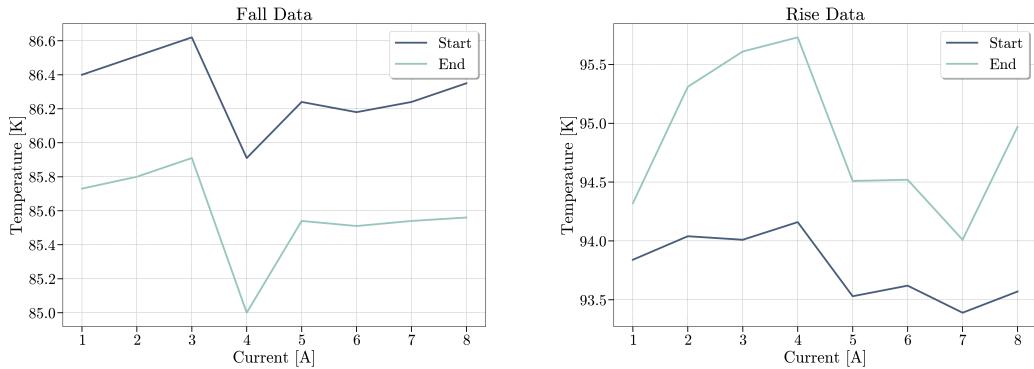


图 12：降温过程的转变温度与线圈电流的关系

图 13：升温过程的转变温度与线圈电流的关系

图12和13分别展示的是样品在降温和平升温过程的转变温度与线圈电流的关系。

从图中可以看出，该样品的转变温度变化对外磁场并不敏感，转变温度的上下波动更多的是测量误差。

3.1.4 理论建模

但是实际上，根据理论模型，本实验的操作会给出如下的预期实验结果：

超导体的超导转变温度（临界温度 T_c ）受到外加磁场的影响，外磁场的作用主要表现为两个方面：

- ▶ **磁场对超导电子配对的破坏作用：**超导现象的本质是库珀对（Cooper pairs）的形成，这些配对的电子在无外磁场时通过相互吸引形成超导态。当施加外磁场时，磁场会破坏这些库珀对，因为磁场会破坏电子对的相干性。
- ▶ **临界磁场的存在：**每种超导材料都有一个特定的临界磁场 (H_c)，超过这个临界磁场，超导体就会转变为正常态。外加的磁场会影响超导体的临界温度，因此，随着外磁场的增大，超导体的临界温度会降低。

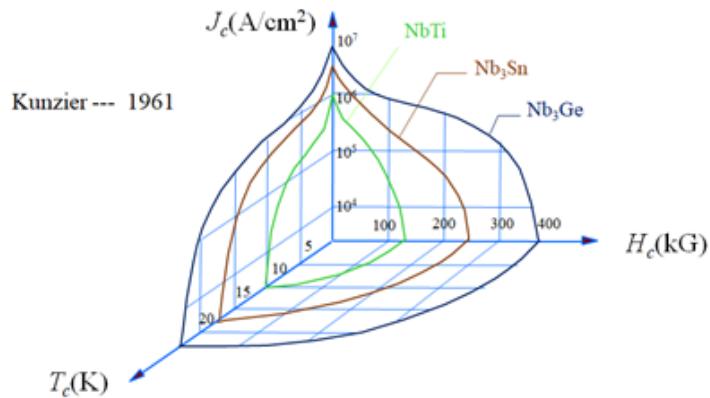


图 14：超导临界温度、临界电流密度与临界磁场之间的关系

阿尔希博格-吉尔伯特模型

在低温下，超导体的临界温度 T_c 与外加磁场 H 之间的关系可以用经验公式来描述。对于许多超导体（如高温超导体 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ ），这种关系可以近似表示为：

$$T_c(H) = T_c(0) \left(1 - \frac{H}{H_{c2}} \right)$$

其中：

- ▶ $T_c(H)$ 是在磁场 H 下的超导临界温度；
- ▶ $T_c(0)$ 是在零磁场下的超导临界温度；
- ▶ H_{c2} 是超导体的二级临界磁场（即磁场强度达到 H_{c2} 时，超导状态完全消失）。

该公式表明，随着外磁场的增大，临界温度 T_c 会线性下降，直到在临界磁场 H_{c2} 处，临界温度完全为零，超导体失去超导性质。

此外，外磁场不仅影响超导临界温度，还会影响超导转变的过程。随着外磁场的增大，超导体的超导转变过程变得更加缓慢。这是因为：

- ▶ **库珀对的破坏：**外磁场破坏了库珀对的形成，因此超导转变的过程变得更加平缓。
- ▶ **涡旋动态的引入：**在高磁场下，超导体内部会形成涡旋（vortices）。涡旋是磁场线通过超导体的区域，其中超导电流不能流动，从而增加了磁场下的能量损失，并使得超导转变变得更加缓慢。

根据上述理论，当外磁场逐渐增大时，超导临界温度会下降，并且转变过程变得更加缓慢，但是根据实际的实验数据并不能得出如此结论。

3.2 实验进一步讨论

3.2.1 温度的测量

理论上，我们预期的结果应该是，不论是升温过程还是降温过程，都有相同的转变温度；但是实际实验的测量结果显示，升温过程的转变温度为 94K 左右，降温过程的转变温度为 86K 左右，相差 8K，这已经超出了简单的“测量误差”的接受范围。

一个可能的原因是温度传感器的温度并未真实的反应样品的温度，而是存在一个滞后。 在我们的实验中，升温与降温采用动态法测量，温度变化速率不同，导致样品与温度计的温度响应存在差异。**升温时，温度计显示温度比样品实际温度高，测得转变温度偏高；降温时，温度计显示温度比样品实际温度低，测得转变温度偏低。**

一个改进的方向是，降低温度变化的速率，让被测样品与温度传感器之间达到热平衡，以此测得更准确的温度。

3.2.2 电阻的测量

理论上，我们应当预期在超导转变前后，样品具有相同的电阻值；但是测量结果显示，在反复测量的过程中，测量得到的电阻值存在较大的波动。

可能的原因是，我们所使用的压控电流源并不稳定，这会导致锁相放大器所测量得到的电压值也不稳定，造成较大的波动。

另一个可能的原因是，样品中可能存在温度梯度，会产生热电效应，导致额外的电压或电流，从而影响测量结果。

3.3 总结讨论

实验结果

总的来说，实验并没有得出一个合适的结果，尽管我们找到了超导转变温度带来的陡升和陡降，但是从结果来看，我们无法分析出符合理论模型的实验结果，实验数据分析部分也讨论了关于理论模型的预期结果，与我们的相差很大。

优化方向

我曾经在某研究所参与过一段时间的相关实验，其中某一环节需要使用到低温环境，所采用的同样是液氮降温，采用的与本实验中类似的恒温装置——一个低温杜瓦，根据当时的实验结果的数据来看，的确做到了正常的工作状态。



图 15：低温杜瓦

受此启发，对于实验中使用的漏热式液氮恒温器结构，我觉得一个优化方向是，提高实验装置的集成，通过设计紧凑型的低温杜瓦，能够将温控设备与样品测量系统更紧密地结合，减少热损失，提高实验的响应速度。**但是可能受限于样品本身的制作，以及具体仪器的尺寸问题。**

此外，增加集成的另一个方向是，实验仪器中，我们连接了大量的接线进行实验，比如为了分出锁相放大器的 A 和 B，我们连接了很繁琐的电路将其分开，这些接线带来的误差也可能对于实验结果产生影响，数据存在抖动（有些抖动极大），所以对于实验电路的集成也是优化方向之一。

最后，实验的控温算法也是优化方向之一，首先功率只有三挡，并且挡位与仪器实际的升温降温的环境并不匹配，这就导致了，功率低升不上去，功率高升得太快，从而导致了，温度测量延迟等问题；由于控温采用的时 PID 控温，参数的设定是否符合实验仪器本身，也可能导致实际控温效果较差，导致了最后实验结果的失败。