

# 浙江大学

## 物理实验报告

实验名称：\_\_\_铁磁材料居里温度测量\_\_\_

实验桌号：\_\_\_\_\_

指导教师：\_\_\_\_\_宁凡龙\_\_\_\_\_

班级：\_\_\_\_\_

姓名：\_\_\_\_\_

学号：\_\_\_\_\_

实验日期: 2025 年 10 月 21 日 星期二上午

(此处填实验选课系统内日期)

浙江大学物理实验教学中心

如有实验补做，补做日期：  
情况说明：

### 一、预习报告（10 分）

（注：将已经写好的“物理实验预习报告”内容拷贝过来）

## 1. 实验综述（5 分）

（自述实验现象、实验原理和实验方法，不超过 300 字，5 分）

### 1. 实验原理

#### （1）铁磁质的磁化规律

铁磁材料具有独特的磁畴结构（如图 1），当铁磁质处于外磁场中时，对外呈现宏观磁性。

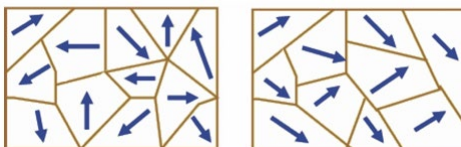


图 1 磁畴结构（左）未加磁场 （右）加磁场

然而，当温度升高到一定程度（即居里温度）时，热运动会破坏磁畴内部的有序排列，导致材料失去铁磁性，转变为顺磁性。

#### （2）用交流电桥测量居里温度

本实验利用交流电桥测量这一特性，将铁磁材料作为电感线圈的磁芯，其磁导率的变化会直接影响线圈的电感值。当电感值随温度突变时，会引起电桥的失衡状态发生显著变化，从而通过电压表的读数反映出来。

## 2. 实验方法

实验采用 RL 交流电桥法（图 2）。首先连接好电桥电路，并在空心线圈不插入样品时平衡电桥。然后将待测的铁磁材料样品插入，此时电桥会失衡。接着，以缓慢的加热速率逐渐升高温度，并记录不同温度下交流电压表的读数。最后，根据记录的电压-温度数据绘制 U-T 曲线，曲线发生突变的温度即为居里温度。

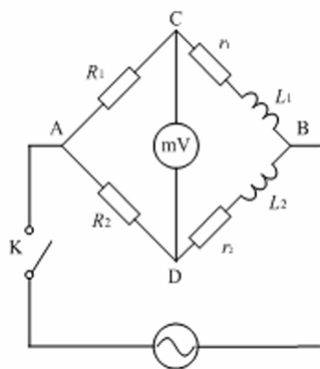


图 2 RL 电桥

## 3. 实验现象

在实验中，当铁磁材料样品插入交流电桥的一个电感线圈中并开始加热时，最初电桥会不平衡，交流电压表显示一个较大的读数。随着温度的升高，电压表的读数会逐渐变化，当达到某一特定温度时，电压表的读数会发生一个显著的突变并迅速减小，趋近于零，表明电桥再次趋于平衡。这个发生突变的温度就是该铁磁材料的居里温度。

## 2. 实验重点（3 分）

（简述本实验的学习重点，不超过 100 字，3 分）

1. 理解铁磁材料失去磁性的临界温度及其在材料科学中的重要性。
2. 了解铁磁性转变为顺磁性的磁畴瓦解过程。

3. 理解掌握交流电桥平衡的条件。
4. 掌握利用电感变化引起电桥失衡来测量居里温度的原理和方法。

### 3.实验难点（2 分）

（简述本实验的实现难点，不超过 100 字，2 分）

1. 注意加热速率对测量结果的影响，确保样品受热均匀且温度测量准确，避免滞后效应。
2. U-T 曲线上居里温度点是一个突变区域，精确判断最大变化率点需要细致观察和数据分析。

## 二、原始数据（20 分）

（将有老师签名的“自备数据记录草稿纸”的扫描或手机拍摄图粘贴在下方，完整保留姓名，学号，教师签字和日期。）

### 三、结果与分析（60 分）

#### 1. 数据处理与结果（30 分）

（列出数据表格、选择适合的数据处理方法、写出测量或计算结果。）

室温：21.5℃      信号频率：1000Hz      居里温度参考值：78℃

##### （1）慢速升温

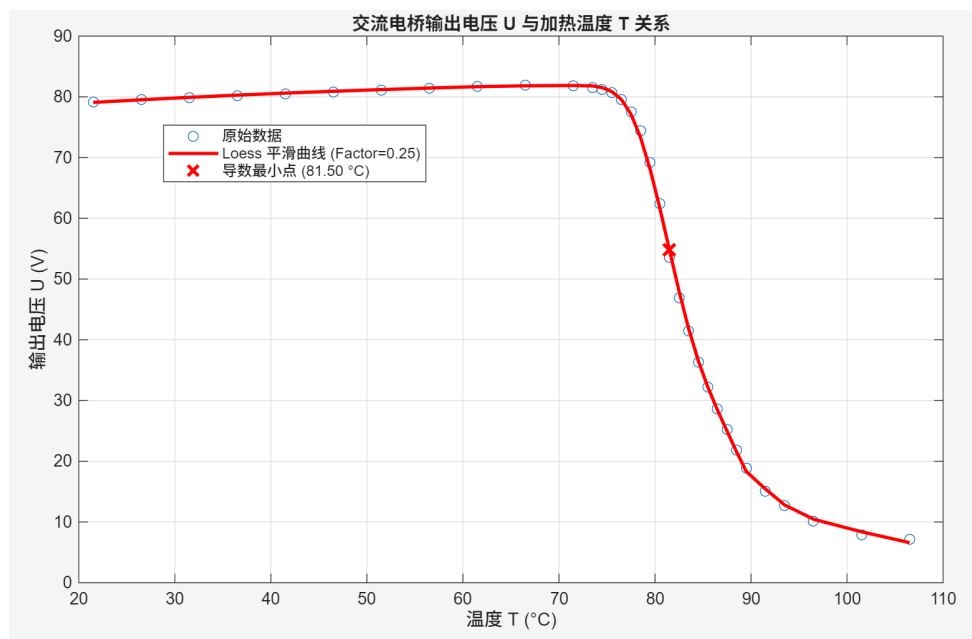


图 1 慢速升温拟合 U-T 曲线

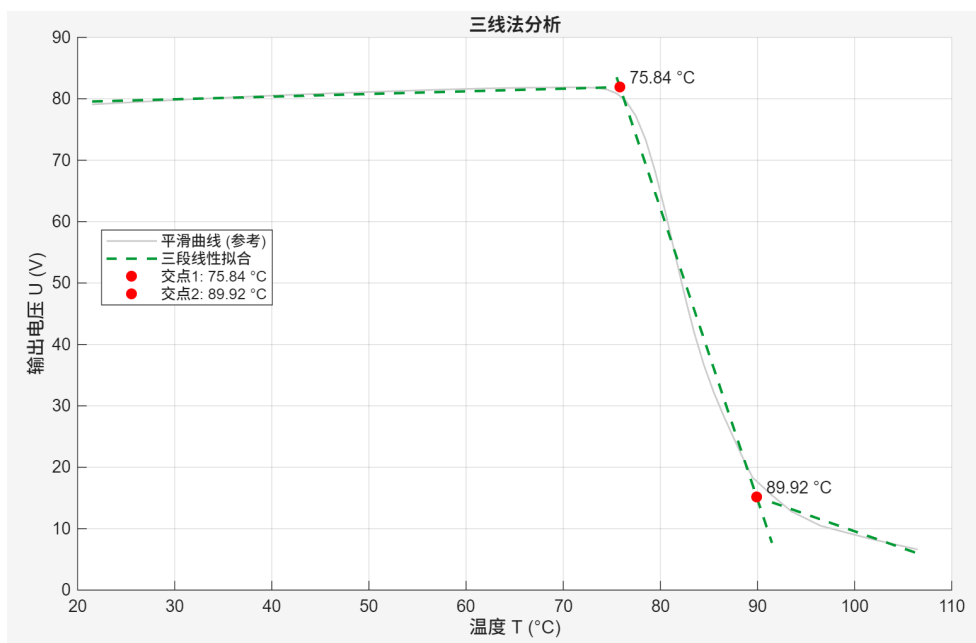


图 2 三线法求慢速升温居里温度

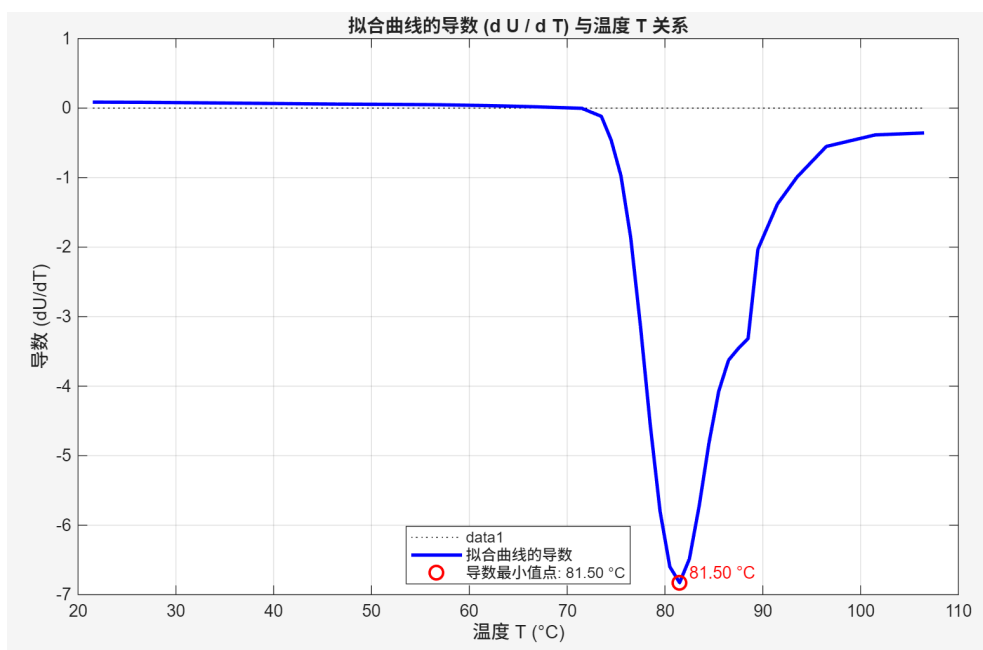


图 3 求导法求慢速升温居里温度

表 1 慢速升温数据记录

T(°C)	21.5	26.5	31.5	36.5	41.5	46.5	51.5	56.5	61.5	66.5
U(V)	79.1	79.6	79.9	80.2	80.5	80.8	81.1	81.4	81.7	81.9
T(°C)	71.5	73.5	74.5	75.5	76.5	77.5	78.5	79.5	80.5	81.5
U(V)	81.8	81.5	81.2	80.7	79.6	77.5	74.4	69.2	62.4	53.6
T(°C)	82.5	83.5	84.5	85.5	86.5	87.5	88.5	89.5	91.5	93.5
U(V)	46.9	41.5	36.3	32.2	28.6	25.2	21.8	18.9	15.1	12.7
T(°C)	96.5	101.5	106.5	\	\	\	\	\	\	\
U(V)	10.1	7.9	7.2	\	\	\	\	\	\	\

目测居里温度为：82℃

三线法求得居里温度为： $\frac{75.84+89.92}{2}^{\circ}\text{C} = 82.88^{\circ}\text{C}$

求导法求得居里温度为：81.50℃

## (2) 降温

降温到 50℃时，已经远离居里温度，并且电压基本回到实验开始的值，由于实验时间限制，没有进一步降低到室温。

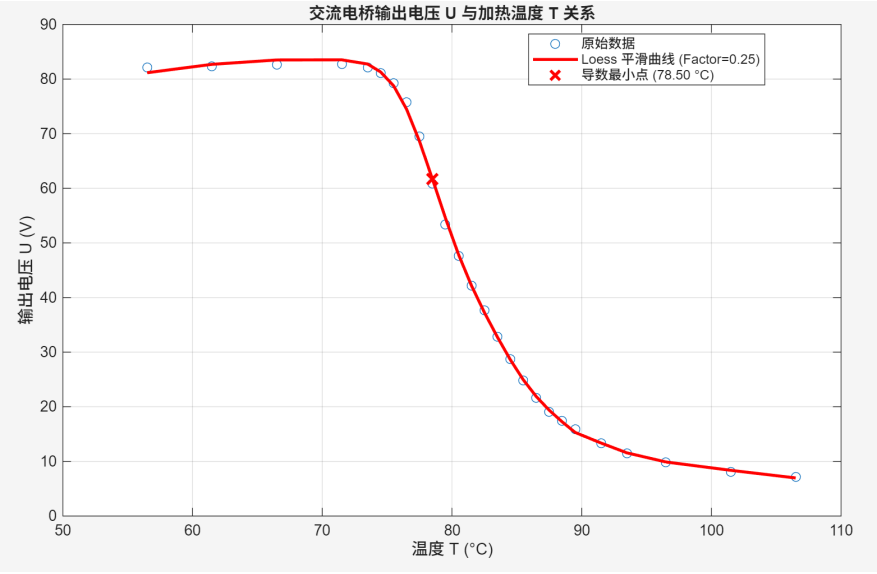


图 4 降温拟合 U-T 曲线

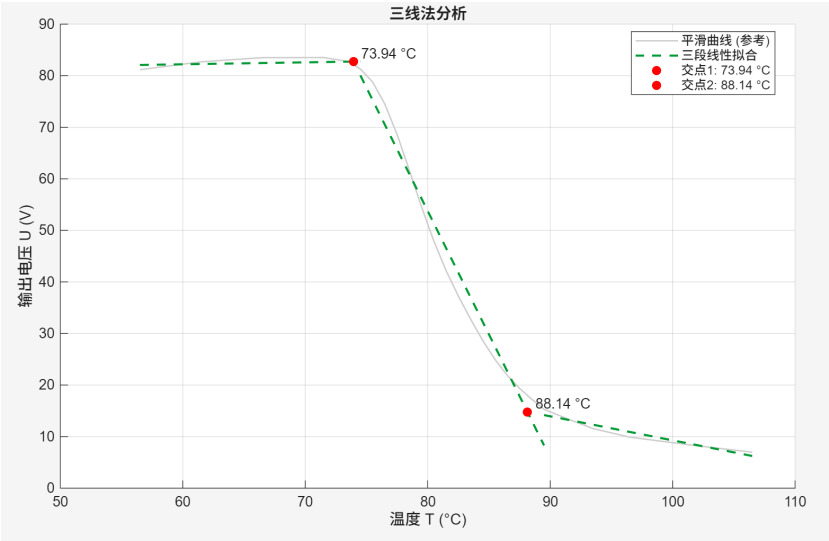


图 5 三线法求降温居里温度

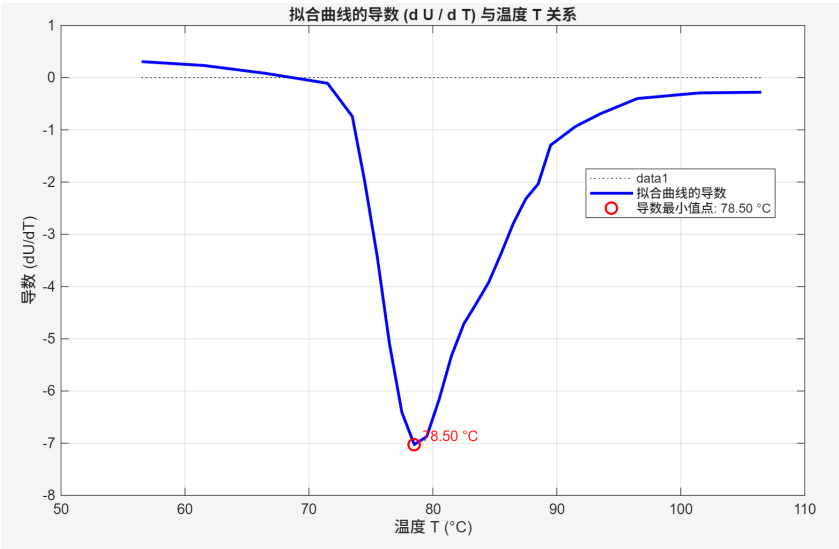


图 6 求导法求降温居里温度

表 2 降温数据记录

T(°C)	56.5	61.5	66.5	71.5	73.5	74.5	75.5	76.5	77.5	78.5
U(V)	82.1	82.3	82.5	82.3	81.9	81.5	81.3	80.5	79.1	76.9
T(°C)	79.5	80.5	81.5	82.5	83.5	84.5	85.5	86.5	87.5	88.5
U(V)	73.6	68.9	60.9	54.8	46.4	42.4	37.3	32.6	28.1	25.7
T(°C)	89.5	91.5	93.5	96.5	101.5	106.5	111.5	116.5	\	\
U(V)	22.6	17.3	14.2	10.9	8.2	6.9	6.3	6.1	\	\

目测居里温度为：79℃

三线法求得居里温度为： $\frac{73.94+88.14}{2}^{\circ}\text{C} = 81.04^{\circ}\text{C}$

求导法求得居里温度为：78.50℃

### (3) 快速升温

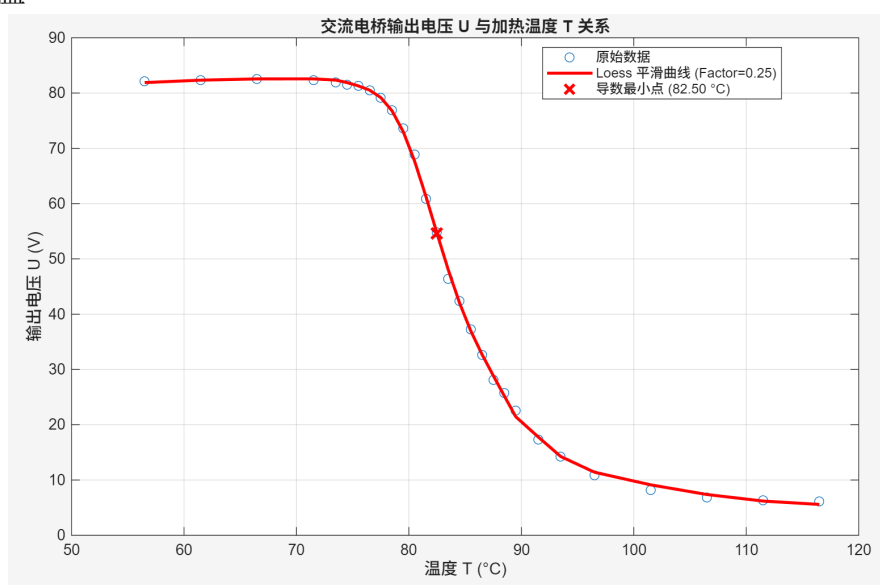


图 7 快速升温拟合 U-T 曲线

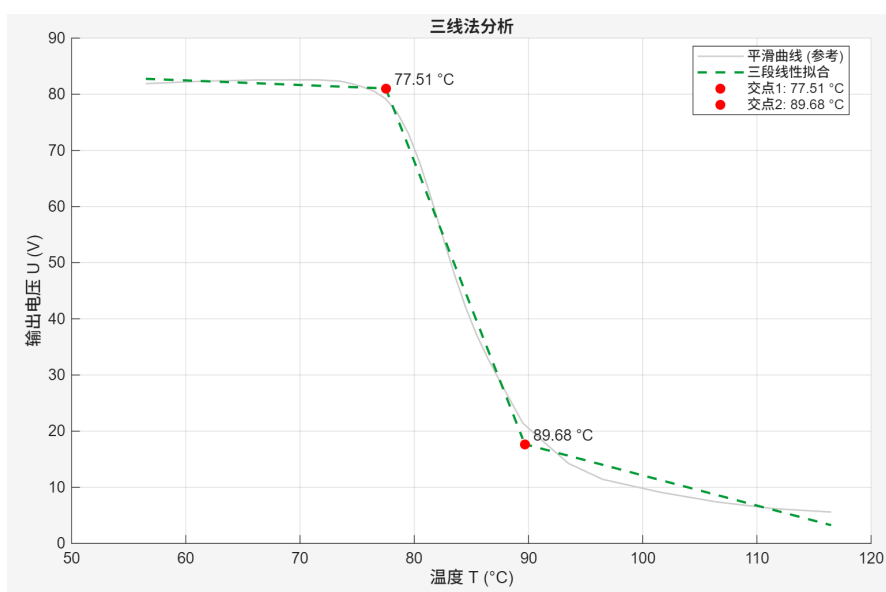


图 8 三线法求快速升温居里温度

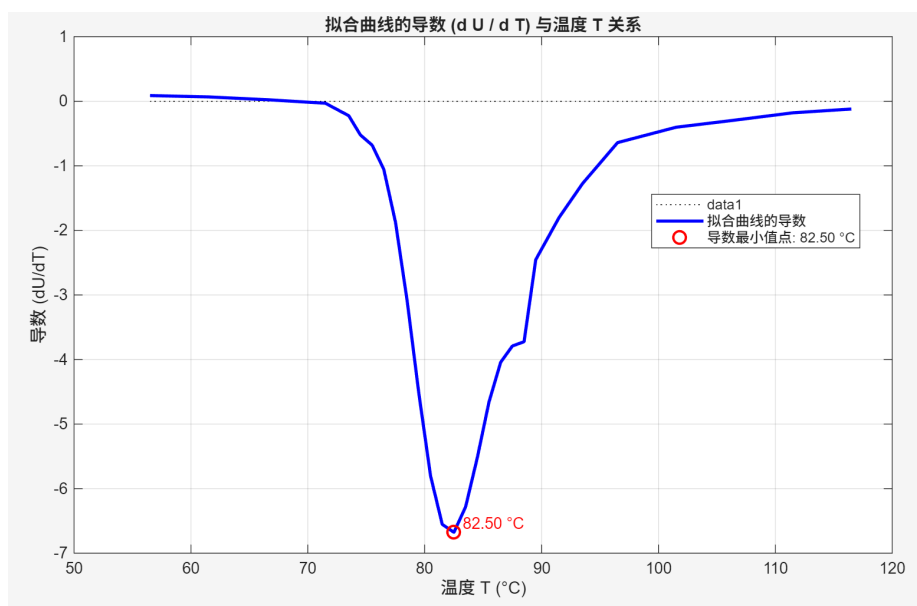


图 9 求导法求快速升温居里温度

表 3 快速升温数据记录

T(°C)	56.5	61.5	66.5	71.5	73.5	74.5	75.5	76.5	77.5	78.5
U(V)	82.1	82.3	82.5	82.3	81.9	81.5	81.3	80.5	79.1	76.9
T(°C)	79.5	80.5	81.5	82.5	83.5	84.5	85.5	86.5	87.5	88.5
U(V)	73.6	68.9	60.9	54.8	46.4	42.4	37.3	32.6	28.1	25.7
T(°C)	89.5	91.5	93.5	96.5	101.5	106.5	111.5	116.5	\	\
U(V)	22.6	17.3	14.2	10.9	8.2	6.9	6.3	6.1	\	\

目测居里温度为：83℃

三线法求得居里温度为： $\frac{77.51+86.68}{2}^{\circ}\text{C} = 82.10^{\circ}\text{C}$

求导法求得居里温度为：82.50℃

## 2. 误差分析（20 分）

（运用测量误差、相对误差或不确定度等分析实验结果，写出完整的结果表达式，并分析误差原因。）

本实验采用目测法、三线法和求导法三种方法对慢速升温、降温、快速升温三种情况下的居里温度进行测定，并与参考值进行比较。

参考值：78℃

表 4 实验结果与误差分析汇总

	目测法		三线法		求导法	
	结果 (°C)	相对误差	结果 (°C)	相对误差	结果 (°C)	相对误差
慢速升温	82	5%	82.88	6%	81.50	5%
降温	79	1%	81.04	4%	78.50	0.60%
快速升温	83	6%	82.10	5%	82.50	6%

计算过程：

（1）慢速升温

相对误差分别为：

$$\text{目测：} \frac{|82-78|}{78} = 5\%$$

$$\text{三线法：} \frac{|82.88-78|}{78} = 6\%$$

$$\text{求导法：} \frac{|81.5-78|}{78} = 5\%$$

（2）降温

相对误差分别为：

$$\text{目测：} \frac{|79-78|}{78} = 1\%$$

$$\text{三线法：} \frac{|81.04-78|}{78} = 4\%$$

$$\text{求导法：} \frac{|78.50-78|}{78} = 0.6\%$$

（3）快速升温

相对误差分别为：

$$\text{目测：} \frac{|83-78|}{78} = 6\%$$

$$\text{三线法：} \frac{|82.10-78|}{78} = 5\%$$

$$\text{求导法：} \frac{|82.5-78|}{78} = 6\%$$

从实验结果可以看出，求导法在降温条件下测得的居里温度（78.50℃）与参考值（78℃）最为接近，相对误差仅为0.6%。

误差来源分析：

#### 1. 系统误差分析——热滞后效应：

对比三种情况下最客观的求导法结果：快速升温（82.50℃）>慢速升温（81.50℃）>降温（78.50℃）。这种差异主要由热滞后效应引起。

在升温过程中，加热器产生的热量首先传递给外部的铜管和温度传感器，然后才传导至铁氧体样品内部。因此，当样品中心实际达到居里温度发生磁性转变时，温度传感器测得的温度已经高于样品内部的实际温度。加热速率越快，这种内外温差越大，导致测得的居里温度系统性偏高。实验数据（快速升温值>慢速升温值）完美地印证了这一点。

在降温过程中，情况相反。外部首先冷却。当样品中心发生磁性转变时，温度传感器测得的外部温度已经低于样品内部的实际温度，导致测得的居里温度系统性偏低或更接近真实值。

（因为降温过程通常比加热过程更接近于自然热平衡）。本次实验中降温测量结果最为准确，说明实验中的降温速率可能非常接近于动态平衡条件。

## 2. 方法误差分析：

- a) 目测法：该方法完全依赖于实验者的主观判断。这种方法主观性强，可复现性差，误差最大，仅能作为一种粗略的估计。
- b) 三线法：该方法通过作直线找交点，比目测法更为规范。然而，三条直线的拟合区间依赖于操作者选择的位置，选择位置的微小差异会显著影响切线的斜率，进而改变交点的位置。因此，该方法虽然引入了计算，但仍存在较大的误差，其准确性介于目测法和求导法之间。
- c) 求导法：该方法寻找的是  $U-T$  曲线斜率绝对值最大的点，即电压变化最剧烈的点。这在物理上对应于磁化强度变化最快的温度点，是居里温度最客观、最公认的定义之一。它不依赖于主观判断，只要原始数据和平滑拟合能够真实反映实验过程，其结果就具有最高的客观性和可复现性。

## 3. 其他误差来源：

- a) 样品放置：导热硅脂涂抹不均匀或样品未完全置于线圈中心，可能导致样品受热不均，使得磁性转变不是在某一瞬间完成，而是在一个较宽的温度范围内进行，这会使  $U-T$  曲线的转折区域变得平缓，影响判断精度。
- b) 高温区曲线斜率不为零：在温度远高于居里点（例如  $110^{\circ}\text{C}$  附近）后，曲线斜率仍不为零，理论上应趋于平坦。这可能是因为：
  - i. 铁氧体转变为顺磁性后，其磁化率虽小但仍与温度相关，导致电感值仍有微弱变化。
  - ii. 电桥中的电感线圈自身的电阻会随温度升高而增大，这也会轻微地影响电桥的平衡，反映在输出电压  $U$  上，导致曲线无法完全水平。

## 3. 实验探讨（10 分）

（对实验内容、现象和过程的小结，不超过 100 字。）

本实验利用交流电桥法测定铁氧体居里温度。通过分析不同升降温速率下的  $U-T$  曲线，观察到电压在居里点附近急剧下降的相变现象。数据证实，求导法是确定居里温度的客观方法，且加热速率越快，因热滞后效应导致的测量值偏高越显著。

## 四、思考题（10 分）

（解答教材或讲义或老师布置的思考题，请先写题干，再作答。）

### 1、铁磁物质的三个特性是什么？

**磁滞现象：**当从磁饱和状态撤去外磁场后，其磁化强度并不会归零，而是保留一部分剩磁，需要施加一个反向的磁场（矫顽力）才能使其磁性完全消失，此为磁滞现象。

**磁饱和：**当外磁场增大到一定程度时，所有磁畴都沿外磁场方向排列好，此时介质的磁化就达到饱和。之后即使再增加外磁场  $H$ ， $B$  也趋向于一个饱和值。

**存在居里温度点：**与  $H$  和  $B$  之间满足线性关系的非铁磁性介质不同，铁磁介质的  $H$ 、 $B$  与  $\mu$  之间呈现复杂的非线性关系。对于任何铁磁物质，都存在一个临界温度，当温度高于此值时，其铁磁性会消失，转变为顺磁性，这个临界温度就叫做居里点。

### 2、用磁畴理论解释样品的磁化强度在温度达到居里点时发生突变的微观机理是什么？

铁磁材料具有独特的磁畴结构，当铁磁质处于外磁场中时，对外呈现宏观磁性。

然而，当温度升高到一定程度（即居里温度）时，热运动会破坏磁畴内部的有序排列，磁畴便会“瓦解”，与磁畴联系的一系列铁磁性质会全部消失，导致材料失去铁磁性，转变为顺磁性。

对于任何铁磁物质都有这样一个临界温度，高于这个温度，铁磁性就消失，物质由铁磁状态转变为顺磁状态。这个临界温度就叫做铁磁质的居里点。

### 3、测出的 $U \sim T$ 曲线，为什么与横坐标没有交点？

当样品被加热到远高于居里温度后，铁磁性消失，转变为顺磁性。此时，样品的相对磁导率急剧下降，但它仍略大于空气，所以此时含有样品的线圈电感值仍然会略大于初始状态下空心线圈的电感值由于电感值没有完全恢复到初始的空心状态，电桥的平衡条件无法被再次完美满足。反映在  $U \sim T$  曲线上，就是曲线在高温区会趋近于一个非常小的正值，而不会与  $U=0$  的横坐标相交。

#### 注意事项：

1. 用 PDF 格式上传“实验报告”，文件名：学生姓名+学号+实验名称+周次。
2. “实验报告”必须递交在“学在浙大”本课程内对应实验项目的“作业”模块内。
3. “实验报告”成绩必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内查询。
4. 教学评价必须在“浙江大学物理实验教学中心网站”-“选课系统”内进行，学生必须进行教学评价，才能看到实验报告成绩，教学评价须在本次实验结束后 3 天内进行。

浙江大学物理实验教学中心制