

# 西南大学材料与能源学院

## 本科课程实验报告



课程名称：材料物理性能学

授课专业：材料物理

班级年级：2023 级 3 班

学生姓名：黄德勇

课程成绩：

教师姓名：唐剑锋

20 25 - 20 26 学年第 二 学期



# 实验报告

姓名:黄德勇 学号:222023319210132 专业班级:材料物理3班 成绩:

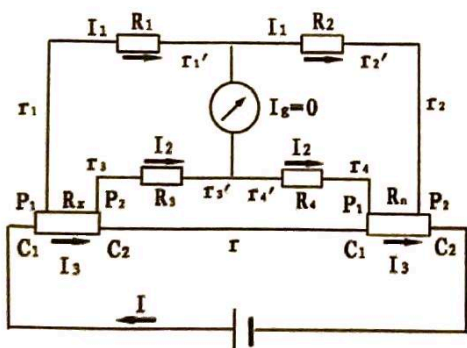
实验课程	材料物理性能学		
实验名称	双臂电桥测量金属电阻率		
实验时间		实验地点	

## 一、实验预习

### 1. 实验目的

- ① 学习双臂电桥测量低值电阻的原理和方法。
- ② 用双臂电桥校正电阻箱的低值档
- ③ 测定金属的电阻率

### 2. 实验原理



双臂电桥灵敏度定义为:

$$S = \frac{\Delta n}{\frac{\Delta R}{R}}$$

其中,  $\Delta n$  为检流计偏离平衡位置的格数

$\Delta R/R$  为桥臂的电阻变化量

电阻值小于  $1\Omega$  的低值电阻测量中, 导线电阻和接触电阻的干扰 (约  $10^{-2}\Omega$ ) 不可忽略, 惠斯登电桥无法消除其影响。此时, 双臂电桥 (开文电桥) 通过将待测电阻  $R_x$  和标准电阻  $R_n$  均接成四端电阻 (电流端  $C_1, C_2$ ; 电压端  $P_1, P_2$ ) 并利用附加的  $R_3, R_4$  桥臂满足  $R_1/R_2 = R_3/R_4$  条件, 使连接电阻满足  $r$  的值趋于消除。

电桥平衡时 (检流计示零), 被测电阻为:

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

式中,  $R_1/R_2$  即为面板上的倍率 (倍率),  $R_n$  为已知标准低值电阻。

导体的电阻率由几何关系给出 (截面圆导体):

$$\rho = R \frac{A}{L} = R \frac{\pi D^2}{4L}$$

式中  $D$  为导体直径,  $L$  为电压端  $P_1, P_2$  之间的导体长度,  $R$  为测得电阻值。

### 3. 实验内容

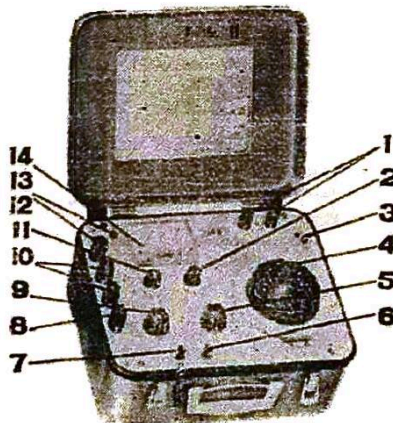
实验内容分为三部分：首先用双臂电桥校正电阻箱低值档的实际阻值；然后将金属导体如 Cu、Al、Fe，制成圆端电阻，测出其电阻值，再结合螺旋测微计（游标卡尺）的导体直径和长度，计算电阻率；最后再测量电桥桥的灵敏度。

## 二、实验过程

### 1. 实验装置

QJ 44型双臂电桥，电阻箱、游标卡尺、螺旋测微计等

### 2. 实验装置示意图



1. 电桥外接工作电源接线柱；
2. 检流计灵敏度调节旋钮；
3. 晶体管检流计工作电源开关；
4. 滑线读数盘；
5. 步进读数开关；
6. 检流计按钮开关(G)；
7. 电桥工作电源按钮开关(B)；
- 8、12. 被测电阻电流端接线柱 ( $C_1$ 、 $C_2$ )；
9. 倍率读数旋钮；
10. 被测电阻电位端接线柱 ( $P_1$ 、 $P_2$ )；
11. 检流计电气调零旋钮；
13. 外接指零仪插座；
14. 检流计

### 3. 实验步骤

#### (1) 校正电阻箱 $\times 0.1 \Omega$ 档

- ① 将待测电阻箱的  $0 \sim 0.9 \Omega$  接于实验装置示意图中的 8、10、12 的接线柱 (四端接法)
- ② 将电阻箱各档旋到零, 测定零位电阻  $R_0$  (旋钮接触电阻, 约  $10^{-4} \Omega$ ).
- ③ 分别将电阻箱旋至  $0.1 \sim 0.9 \Omega$ , 选择合适倍率, 测出对应电阻值  $R_{测}$ , 按校正值即为  $R_{标} = R_{测} - R_0$ .

#### (2) 测定导体电阻率

- ① 将铜 (或铝、铁) 导体制成四端电阻, 用双臂电桥测出  $P_1, P_2$  间的电阻  $R_x$ ,
- ② 用游标卡尺 (螺旋测微计) 在不同位置测导体直径  $D$  和  $P_1 P_2$  间长度  $L$  各 5 次, 取平均值.

#### (3) 测定电桥灵敏度

在电桥平衡后, 微调  $R_n$ , 记录检流计偏转格数  $\Delta n$  以及对应的  $\frac{\Delta R}{R}$ , 计算灵敏度  $S$ .

#### 一些注意事项:

- 测有电感线圈直流电阻时, 应先按“B”后按“G”; 泄压时先断“G”后断“B”.
- 若检流计满偏, 应立即松开“B”键, 调好步进值后再按.
- 导线电阻小于  $0.1 \Omega$ , 否则可能反映接触不良.
- 测量完后, 将“B”开关扳至反向位置, 松开“B”和“G”.

标准电阻: (ms/m)

黄铜螺柱 10\*20 外六角 (1) 13.43 (2) 13.35 (3) 13.31 (4) 13.35 (5) 13.29

铝螺柱 10\*20 外六角 (1) 25.17 (2) 25.03 (3) 25.00 (4) 24.87 (5) 24.83

西南大学材料与能源学院

#### 4. 实验现象记录和数据记录

长度与直径

次数	1	2	3	4	5	平均
Cu						
直径 (mm)	1.000	0.980	0.998	0.980	0.983	0.988
长度 (mm)	42.00	42.10	42.00	42.00	42.00	42.00
Al						
直径 (mm)	0.900	0.850	0.780	0.770	0.790	0.818
长度 (mm)	55.30	55.30	55.30	55.30	55.30	55.30
Fe						
直径 (mm)	0.900	0.850	0.780	0.770	0.790	0.818
长度 (mm)	34.00	34.00	34.00	34.00	34.00	34.00

测量 R

Cu

倍率:  $\times 1$

示数	1	2	3	平均
值 ( $\Omega$ )	0.00111	0.00111	0.00113	0.00111

$$\rho = 0.00111 \times \frac{\pi \times (0.998 \times 10^{-3})^2}{4 \times 42.00 \times 10^{-3}} \approx 2.03 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$$

Al

倍率:  $\times 100$  [2] 电阻大, 说明非纯 Al, 有  $Al_2O_3$  的寄生电阻存在

示数	1	2	3	平均
值 ( $\Omega$ )	0.05625	0.0625	0.05625	0.05830

$$\rho = 0.05830 \times \frac{\pi \times (0.818 \times 10^{-3})^2}{4 \times 55.30 \times 10^{-3}} \approx 5.54 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$$

Fe

倍率:  $\times 10$

示数	1	2	3	平均
值 ( $\Omega$ )	0.011	0.011	0.011	0.011

$$\rho = 0.011 \times \frac{\pi \times (0.818 \times 10^{-3})^2}{4 \times 34.00 \times 10^{-3}} \approx 1.70 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$$

$$P = R \frac{I_0^2}{4L}$$

5.15

### 三、分析讨论

#### 1. 实验结果与分析

不确定度计算

各量A类不确定度 (Cu取n=5, t=2.776; Al、Fe直径同Cu; R取n=3, t=4.303)  
Cu直径D (偏差: +0.012, -0.008, +0.010, -0.008, -0.005):

$$\sigma_D = 0.00995 \text{ mm}, \quad \Delta_A = \frac{2.776 \times 0.00995}{\sqrt{5}} = 0.012 \text{ mm}$$

$$\Delta_B = 0.004 \text{ mm} \text{ (由螺旋测微计)}, \quad \Delta_D = \sqrt{0.012^2 + 0.004^2} = 0.013 \text{ mm}$$

Cu长度L (偏差: -0.02, +0.08, -0.02, -0.02, -0.02):

$$\sigma_L = 0.0447 \text{ mm}, \quad \Delta_A = 0.056 \text{ mm}, \quad \Delta_B = 0.02 \text{ mm} \text{ (游标卡尺)}$$

$$\Delta_L = \sqrt{0.056^2 + 0.02^2} = 0.069 \text{ mm}$$

Al和Fe同理, 考虑电阻R的不确定度 (仪器等级0.2%,  $\Delta_B = R \times 0.2\%$ )

样品	$\Delta_A (\Omega)$	$\Delta_B (\Omega)$	$\Delta R (\Omega)$	$\Delta R / R$
Cu	0.000029	0.000022	0.000029	2.6%
Al	0.0896	0.00012	0.0896	154%
Fe	0	0.000022	0.000022	0.2%

Al的 $\Delta R / R$ 达154%, 表明三次电阻测试不一致, 测量结果不可靠。

电阻率计算

$$P = R \cdot \frac{\pi D^2}{4L}; \quad \frac{\Delta P}{P} = \sqrt{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)^2 + \left(\frac{2\Delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2}$$

样品	$\bar{R} (\Omega)$	$\bar{D} (\text{mm})$	$\bar{L} (\text{mm})$	$\pi \bar{D}^2 / 4L (\text{cm})$	$P (\Omega \cdot \text{m})$	$\Delta P / P$	$\Delta P (\Omega \cdot \text{m})$
Cu	0.0011	0.988	42.02	$1.825 \times 10^{-5}$	$2.03 \times 10^{-8}$	3.7%	$0.08 \times 10^{-8}$
Al	0.05833	0.818	55.30	$9.498 \times 10^{-6}$	$5.54 \times 10^{-7}$	-	无数
Fe	0.011	0.818	34.00	$1.546 \times 10^{-5}$	$1.70 \times 10^{-7}$	16.9%	$0.29 \times 10^{-7}$

与理论值的对比

样品	测量值 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	理论值 ( $\Omega \cdot \text{m}$ )	$E_r$ 相对误差	说明
Cu	$(2.03 \pm 0.08) \times 10^{-8}$	$1.72 \times 10^{-8}$	+18%	合理
Al	$5.54 \times 10^{-7}$	$1.00 \times 10^{-7}$	+70%	偏大
Fe	$(1.70 \pm 0.29) \times 10^{-7}$	$2.56 \times 10^{-8}$	+1991%	有误差

实验中Al使 $\times 100$ 才能使电流计不偏满, 说明, 此时Al不是纯Al, 存在有电阻值的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>寄生电阻, 说明Al已经有内部氧化或接触处有Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>的微小层;

Fe偏差也较大, 考虑铁合金中, 低碳钢  $\rho \approx 1.3 \times 10^{-7} \Omega \cdot \text{m}$ , 样品可能为低碳钢。

## 2. 问题提出与讨论

对于具有平面的导体,如何测量?什么是涡流电导仪?对于双臂电桥,当交换电流电压端后,会如何变化,为什么?  
什么是涡流电导仪

基于电磁感应原理工作,其探头内置激励线圈,通以高频交流电后在被测导体表面产生涡流,涡流大小受材料电导率影响,反过来改变线圈的阻抗,仪器通过测量阻抗变化来交维曲线,直接电桥 (Ms/m 或 % IACS).

涡流电导仪测量平面导体时,需要满足以下条件:

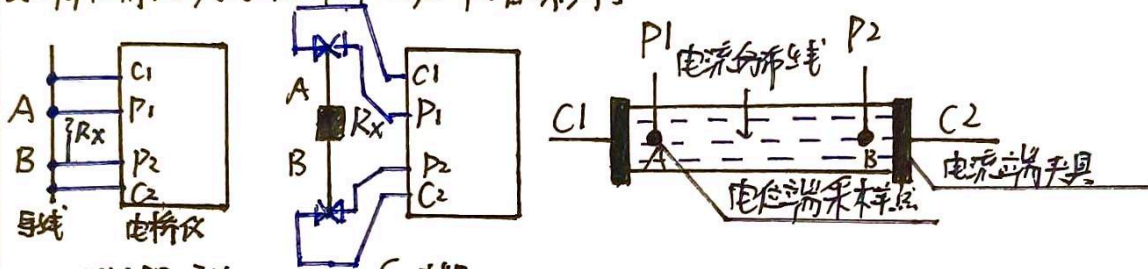
- (1) 表面平整度. 探头与测面间隙应尽量小且均匀,表面粗糙度过大会引入“脱离误差”.
- (2) 最小有效面积. 被测区域直径应大于探头直径的2倍以上,否则边缘效应使涡流在材料边缘发生畸变,引起测量偏低.
- (3) 最小厚度. 样品厚度须大于有效渗透深度  $\delta$ :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \mu_0 \mu_r \sigma}}$$

在60kHz下,铝的  $\delta \approx 0.3\text{mm}$ , 钢的  $\delta \approx 0.1\text{mm}$ , 因此一般金属样品只需要厚度  $> 1\text{mm}$  即可满足

- (4) 背面无影响. 背面若有金属片等其他导体,会干扰涡流分布,测量时应将样品置于绝缘垫上

双臂电桥交换电流端和电压端的影响



无引线电阻(导线)

一段电阻

四端电阻接法自标意义:

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_n \quad (\text{平衡条件, 连接电阻 } r \text{ 被消除})$$

端口	正常工作	平衡点
C1、C2 (电流端)	通过大电流	接触电阻在电流回路中, 不影响测量
P1、P2 (电压端)	测量电压降	几乎无电流, 接触电阻不影响测量.

若交换两组端口, 将发生:

- (1) 测量长度改变: 正常时测量的是 P1-P2 段电阻(有效段); 交换后变为测量 C1-C2 间的总电阻, 包含了 P1 以外的导线长度, 有效长度增大, 测量结果偏大.
- (2) 接触电阻重新进入测量: 原来 P1, P2 的接触电阻很小, 无电流不影响结果; 交换后它们变成电流端, 其接触电阻, 直接接入被测回路, 导致较大误差.
- (3) 电桥灵敏度下降: 被测电阻增大后, 若不重新选择倍率, 电桥可能偏离最佳工作范围.
- (4) 对低值电阻影响最致命: 接触电阻量级为  $10^{-4} \Omega$ . 对于被测  $R_x \sim 10^{-1} \Omega$  的样品, 引入误差可达  $10\% \sim 100\%$ .

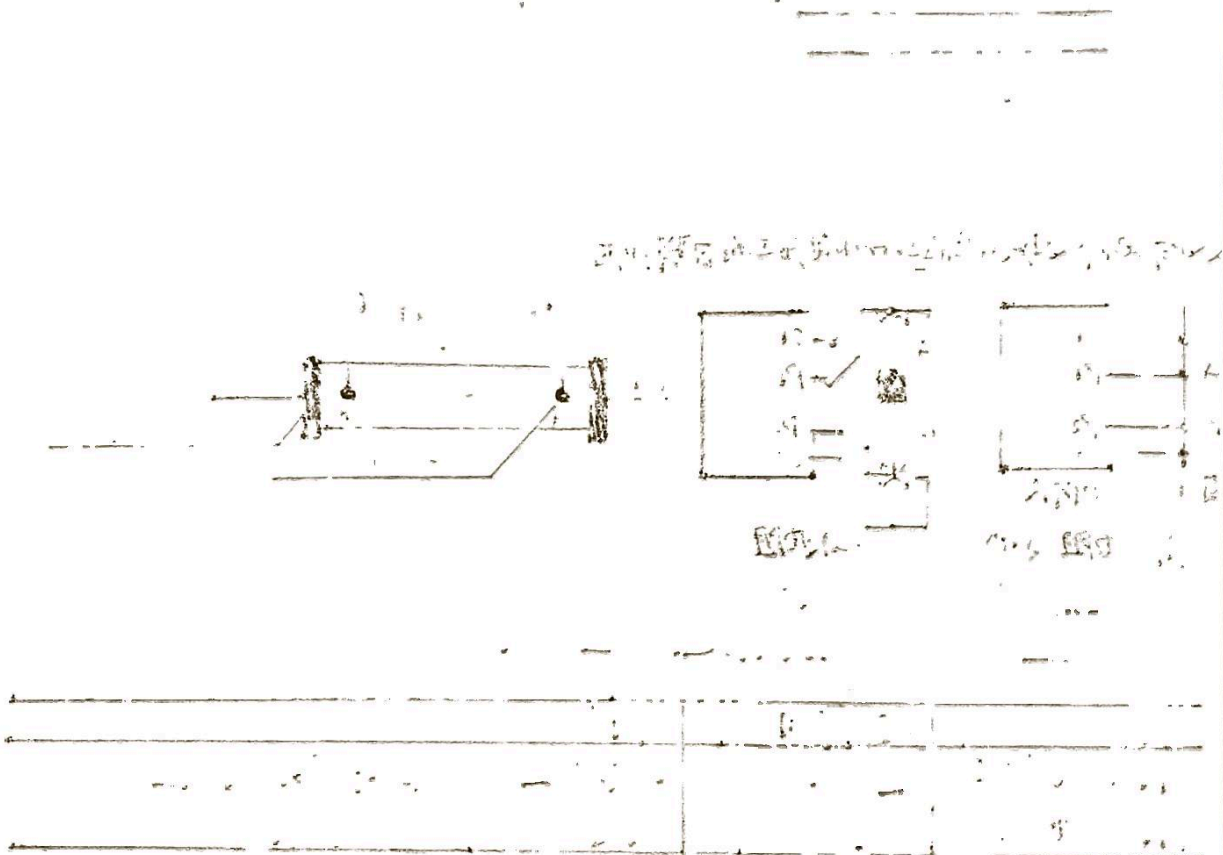
指导教师签名:

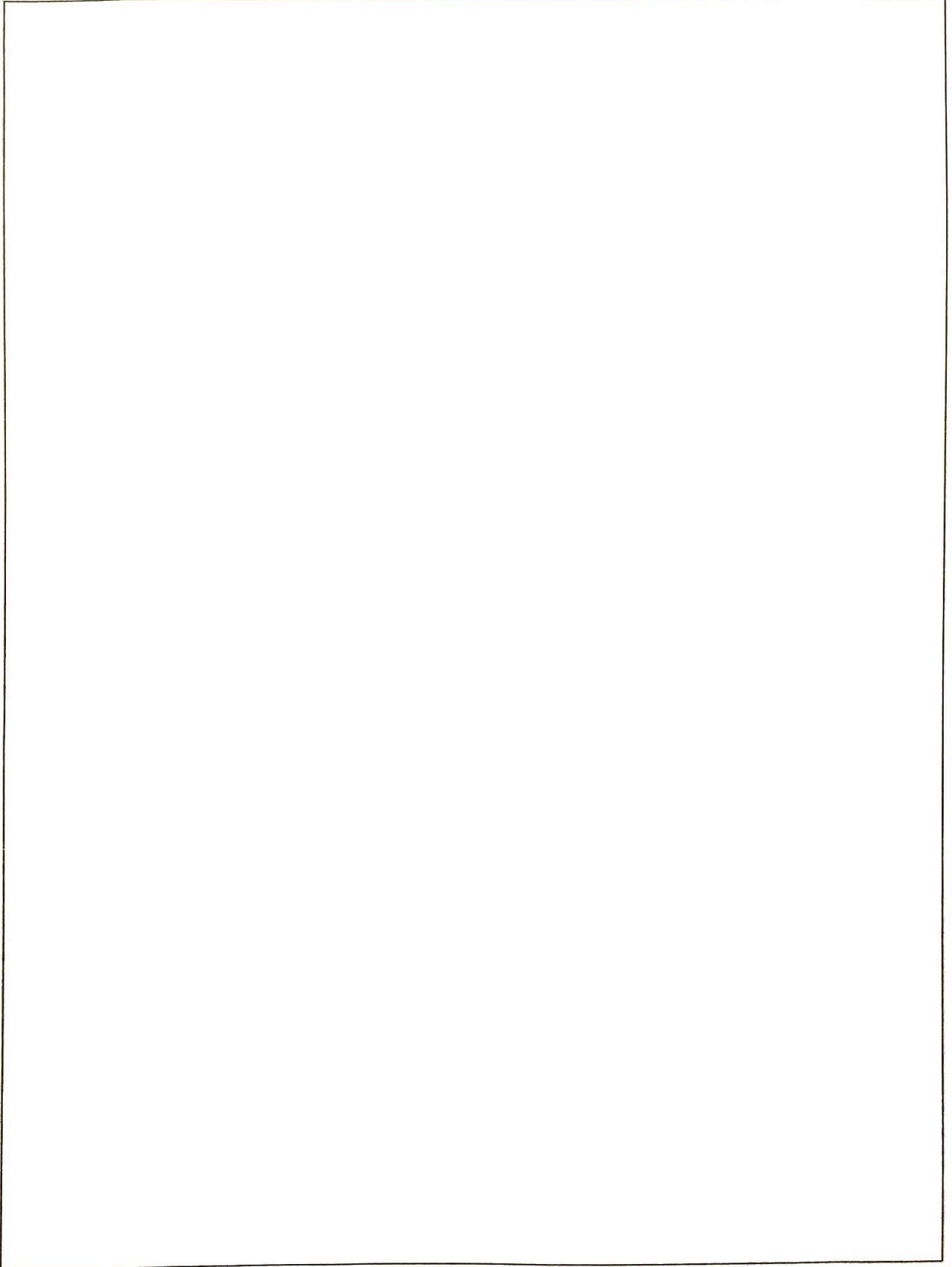
日期:

### 四、其它

备注：

1. 第四部分（其它）由教师自行规定填写内容，可为课程大纲设置但本实验报告前三部分未包含在内的学习任务。
2. 若本课程不涉及其它内容，教师不需要在第四部分后的“指导教师签名”处签名。





指导教师签名:

日期: