

# 浙 江 大 学

## 物 理 实 验 报 告

实验名称: 用双臂电桥测低电阻

指导教师: 邬宗秀

信 箱 号: 67

专 业: 自动化(控制)

班 级: 控制1901

姓 名: 孟世元

学 号: 3190104700

实验日期: 12 月 10 日 星期 四 上/下午



## 【实验目的】

1. 掌握双臂电桥测量低电阻的原理和使用方法
2. 了解单臂电桥与双臂电桥的关系和区别

## 【实验原理】（电学、光学画出原理图）

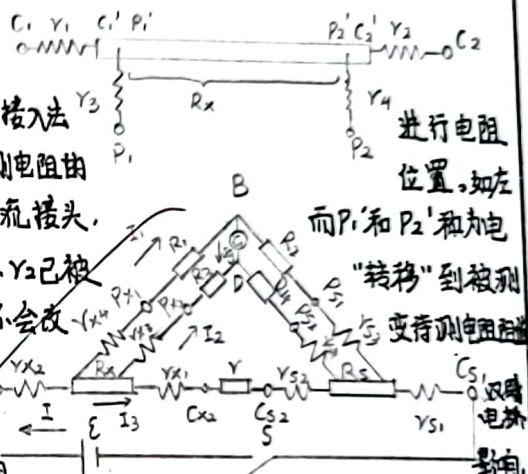
为消除(或减小)接线电阻和引线电阻对测量结果的影响,用四端接入法连接。与两端接入法相比,四端接入法“转移”了附加电阻相对于待测电阻的位置。如图所示,  $C_1, P_1, P_2, C_2$  是一个完整的低值电阻, 其中  $C_1$  和  $C_2$  称为电流接头, 而  $P_1$  和  $P_2$  称为电位接头, 介于电位接头之间的电阻才是实测电阻  $R_x$ , 附加电阻  $Y_1, Y_2$  已被电阻之外, 而新增加的附加电阻  $Y_3, Y_4$  并不与  $R_x$  直接串联, 因此不会改变采用四端接入法的低电阻接入原单臂电桥, 演变成如图所示。为了消除附加电阻影响, 分别接入了阻值均大于  $10\Omega$  的标准电阻  $R_3$  和  $R_4$ , 且为考虑电桥平衡时  $R_1/R_2$  与  $R_3/R_4$  的差别对测量结果的影响, 用阻值小于  $0.001\Omega$  的粗导线  $Y$  来连接电阻  $R_x$  和  $R_5$ 。此外, 电路中加接一放大电路, 用以增加灵敏度, 使不平衡电流  $I_g$  通过放大后再由检流计指示。

当电桥达到平衡时, 通过检流计的电流  $I_g = 0$ , B、D 两点电位相等, 此时通过  $R_1$  和  $R_2$  的电流相等, 记为  $I_1$ , 通过  $R_3$  和  $R_4$  的电流也相等, 记为  $I_2$ , 根据基尔霍夫定律, 有:  $I_1 R_1 = I_3 R_x + I_2 R_3$   $I_2 R_2 = I_3 R_5 + I_1 R_4$   $I_2 (R_3 + R_4) = (I_3 - I_2) Y$  解方程组得  $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_5 + \frac{R_4 Y}{R_3 + R_4 + Y} (\frac{R_1}{R_2} - \frac{R_3}{R_4})$  若在电桥使用过程中始终保持  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  则第二项为零, 式为  $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_5$

可见, 双臂电桥与惠斯登电桥表达式相同, 当双臂电桥调节平衡时, 比较臂电阻  $R_5$  和  $\frac{R_1}{R_2}$  乘积即可得  $R_x$ 。为了确保持  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$  在电桥使用过程中始终成立, 将两对比率臂 ( $\frac{R_1}{R_2}, \frac{R_3}{R_4}$ ) 选用双十进制电阻箱。它的基本原理是将两个相同十进制电阻的转臂连接在同一转轴上, 这样在转臂由任一位置都将保持  $R_1$  和  $R_3$ ,  $R_2$  和  $R_4$  分别相等。在实际双臂电桥中, 很难做到  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ , 为了减小误差, 要求电阻  $Y$  越小越好, 因此使用阻值小于  $0.001\Omega$  的粗导线来连接  $R_x$  与  $R_5$ 。

综上所述, 双臂电桥测量低电阻时从以下几个方面消除(或减小)了附加电阻对测量结果影响:

(1) 由于待测电阻  $R_x$  与比较臂电阻  $R_5$  之间用阻值小于  $0.001\Omega$  的粗导线相连, 可以看出即使  $\frac{R_1}{R_2}$  与  $\frac{R_3}{R_4}$  之间有很小差别, 待测电阻总是按  $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_5$  计算, 这样就减小了这部分附加电阻对测量结果的影响。(2)  $R_x$  和  $R_5$  电流接头  $C_1, C_2, C_5, C_5$  的附加电阻  $Y_{x1}, Y_{x2}, Y_{51}, Y_{52}$  因都连接到双臂电桥电流测量回路中, 只对它的工作电流  $I$  产生影响, 而对电桥平衡无影响, 所以这部分附加电阻对测量结果没有影响。(3)  $R_x$  和  $R_5$  电位接头  $P_1, P_2, P_5, P_5$  的附加电阻  $Y_{x3}, Y_{x4}, Y_{53}, Y_{54}$  分别连接到双臂电桥电压测量回路中, 由于与它们相串联的桥臂电阻  $R_1, R_2, R_3, R_4$  阻值都为  $10\Omega$  以上, 与它们相比这部分附加电阻可忽略不计, 对测量结果影响也极小, 因此这部分附加电阻对测量结果的影响也可忽略不计。





## 【实验内容】(重点说明)

## 1. 测量金属导体的电阻率

- (1) 金属导体的电阻率  $\rho = R \cdot \frac{S}{L} = R \cdot \frac{\pi d^2}{4L}$ 。将待测金属导体(黄铜棒)接入双臂电桥(注意电流、电位接头次序), 测出阻值。利用游标卡尺测出待测金属导体直径  $d$ , 并读出电位接头间的长度  $L$ , 计算出该导体的电阻率
- (2) 分别求出  $R$ 、 $d$ 、 $L$  的不确定度, 并写出各分量不确定表达式, 利用间接测量计算合成不确定度的方法计算出电阻率的相对不确定度  $\frac{U(\rho)}{\rho}$  (3) 写出电阻率的相对不确定度  $\frac{U(\rho)}{\rho}$

## 2. 测量金属导体的电阻温度系数

金属导体的电阻会随温度变化而发生变化, 其阻值随温度的变化关系为:  $R = R_0(1 + \alpha t + \beta t^2 + \gamma t^3 + \dots)$  式中  $R$  和  $R_0$  分别表示温度  $t$  和  $0^\circ\text{C}$  时的阻值,  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为待测材料的电阻温度系数。当温度不太高时, 电阻和温度的关系近似为线性关系, 因此上式为  $R = R_0(1 + \alpha t)$ 。为了避免在  $0^\circ\text{C}$  测量  $R_0$ , 可从待测电阻  $R_{x1} = R_0(1 + \alpha t_1)$  和  $R_{x2} = R_0(1 + \alpha t_2)$  两式中消去  $R_0$ 。  $\alpha = \frac{R_{x2} - R_{x1}}{R_{x1}t_2 - R_{x2}t_1}$  式中  $t_1$ 、 $t_2$  由温度计测得,  $R_{x1}$ 、 $R_{x2}$  由双臂电桥测得, 实验步骤如下

- (1) 待测电阻已被封装在加热炉内, 并浸泡在机油中。实验可采用升温 and 降温两种方法完成
- (2) 升温法: 根据实验温度需要, 设定加热温度上限, 方法为: 开启温控仪电源, 显示屏显示为环境温度, 将“测量-设定”转换开关置于“设定”档, 转动“设定调节”旋钮, 将所需加热温度上限设定好, 再将开关置于“测量”档。然后根据环境温度和所需升温的上限及升温速度来确定温控仪面板上“加热选择”开关的位置。该开关分为“1、2、3”三档, 由“断”位置打向任意一档, 即开始加热, 指示灯亮, 升温由高低及速度以“1”档最低最慢, “3”档最高最快, 在加热过程中根据实际升温要求, 选择合适档位, 以减小加热惯性。若在加热升温时, 温度高于设定值, 调节“PID调节”向“-”方向调节, 反之, 升温达不到设定值, “PID调节”向“+”方向调节
- (4) 在加热过程中, 调节双臂电桥, 进行电阻测量。每隔  $5^\circ\text{C}$  左右记录一次阻值及其对应温度值
- (5) 降温法: 先将待测电阻加热至一定温度, 然后关闭开关开启风扇。降温中, 每隔  $5^\circ\text{C}$  左右记录一次阻值及温度值
- 充分利用实验数据, 将数据组合代入求出  $\alpha$ , 再求平均值  $\bar{\alpha}$ 。作  $R-t$  特性曲线, 根据曲线求出  $\alpha$  值, 与  $\bar{\alpha}$  比较, 求相对误差

## 【实验器材及注意事项】

实验器材: QJ-41 型双臂电桥中,  $C_1$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $C_2$  为待测电阻的四端接入端口,  $B$  为检流计电源开关。使用时打开电桥电源开关,  $B$  开关拨至“通”档, 利用“调零”旋钮将指针调零, 并将“灵敏度”旋钮逆时针旋到底, 此时电桥灵敏度最低。选择合适的倍率, 按下  $B$ 、 $G$  按钮, 调节“电阻粗调”和“电阻细调”, 使电桥达到平衡, 顺时针旋转“灵敏度”旋钮, 相应提高一些灵敏度, 再次调节电桥达到平衡, 继续增加灵敏度, 直至最高灵敏度时调得电桥平衡, 此时测得的阻值才是最接近真值。将“电阻粗调”示数加上“电阻细调”示数乘上倍率即可求出待测电阻阻值

注意事项: 1. 实验开始前, 待测低值电阻与双臂电桥、加热炉与温控仪之间的信号输入线应可靠连接

2. 转动“PID调节”及“设定调节”旋钮时, 应轻微用力, 以免损坏电位器

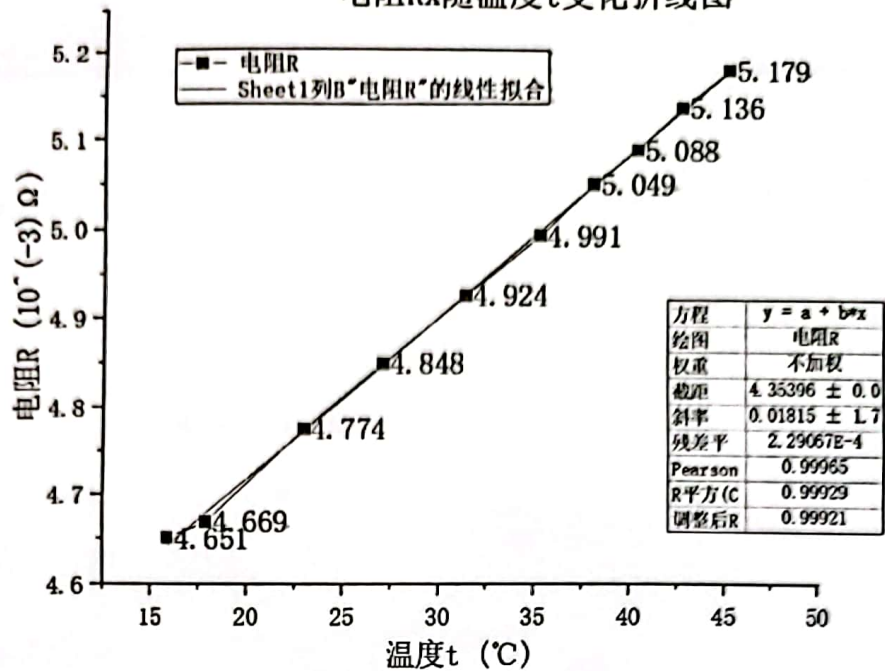
3. 加热或降温过程中, 不要将加热炉体升起, 避免机油溅出

4. 出于低温电阻耐高温局限及保护仪器的目的, 设定加温的上限值不能超过

$100^\circ\text{C}$



电阻Rx随温度t变化折线图



【数据处

1. 测量金属

由于都只

由  $\rho =$ 求出  $F$ 

## 2. 测量金属与体电阻温度系数

1) 利用公式  $\alpha = \frac{R_{x2} - R_{x1}}{R_{x1} t_2 - R_{x1} t_1}$  测量

- 共 5 组数据, 分为 5 组

$$\alpha_1 = \frac{R_{x6} - R_{x1}}{R_{x1} t_6 - R_{x1} t_1} = \frac{4.991 - 4.651}{4.651 \cdot 35.4 - 4.651 \cdot 15.9} (^{\circ}\text{C})^{-1} = 4.00 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\alpha_2 = \frac{R_{x7} - R_{x2}}{R_{x2} t_7 - R_{x2} t_2} = \frac{5.049 - 4.669}{4.669 \cdot 38.2 - 4.669 \cdot 17.9} (^{\circ}\text{C})^{-1} = 4.24 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\alpha_3 = \frac{R_{x8} - R_{x3}}{R_{x3} t_8 - R_{x3} t_3} = \frac{5.088 - 4.774}{4.774 \cdot 40.5 - 4.774 \cdot 23.0} (^{\circ}\text{C})^{-1} = 4.11 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\alpha_4 = \frac{R_{x9} - R_{x4}}{R_{x4} t_9 - R_{x4} t_4} = \frac{5.136 - 4.848}{4.848 \cdot 42.9 - 4.848 \cdot 27.1} (^{\circ}\text{C})^{-1} = 4.19 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\alpha_5 = \frac{R_{x10} - R_{x5}}{R_{x5} t_{10} - R_{x5} t_5} = \frac{5.179 - 4.924}{4.924 \cdot 45.4 - 4.924 \cdot 31.5} (^{\circ}\text{C})^{-1} = 4.22 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5}{5} = 4.15 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1} \quad \text{平均值计算仪 A 类不确定度}$$

$$\Delta\alpha = \sqrt{\frac{\sum (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{5 \cdot 45 - 1}} = 4 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1} \quad \alpha = (4.15 \pm 0.04) \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\text{相对标准值 } 4.33 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1} \quad \text{偏差为 } \frac{|4.15 - 4.33|}{4.33} \times 100\% \approx 4\%$$

(2) 利用拟合直线

拟合方程  $y = a + bx$ 

$$R = R_0 (1 + \alpha t) = R_0 + R_0 \alpha t$$

由图中计算 斜率  $0.01815 = R_0 \alpha$ 截距  $4.35396 = R_0$ 

$$\alpha = 4.17 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1} \quad (\text{作出图像如页上})$$

$$\text{相对标准值 } 4.33 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1} \quad \text{偏差为 } \frac{|4.17 - 4.33|}{4.33} \times 100\% \approx 4\%$$





## 【数据处理与结果】

$$R = (4.443 \pm 0.002) \times 10^{-4} \Omega$$

1. 测量金属导体电阻率  $R = 4.443 \times 10^{-4} \Omega$   $U(R) = \text{量程} \times 0.2\% = 0.01 \times 0.2\% = 2 \times 10^{-7} \Omega$

$$l = 25.00 \text{ cm} \quad U(l) = \frac{0.5 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \quad l = (25.00 \pm 0.03) \text{ cm}$$

$$d = 4.58 \text{ mm} \quad U(d) = \frac{0.02 \text{ mm}}{\sqrt{3}} \quad d = (4.58 \pm 0.01) \text{ mm}$$

由于都只测量了一次,  $R, l, d$  不确定度均为 B 类不确定度, 计算如上

由  $\rho = R \frac{\pi \cdot d^2}{4l}$   $\rho$  为间接测量量, 不确定度计算需使用传导公式

$$\ln \rho = \ln R + \ln \frac{\pi}{4} + 2 \ln d - \ln l$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta R}{R} + 2 \frac{\Delta d}{d} - \frac{\Delta l}{l}$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{U(\rho)}{\rho} = \sqrt{\left(\frac{U(R)}{R}\right)^2 + \left(2 \frac{U(d)}{d}\right)^2 + \left(\frac{U(l)}{l}\right)^2}$$

$$\text{求出 } \rho = 2.93 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m} \quad U(\rho) \approx 1.3 \times 10^{-10} \Omega \cdot \text{m}$$

$$\rho = (2.93 \pm 0.01) \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$$

不确定度的修约法则

## 2. 测量金属导体电阻温度系数

1) 利用公式  $\alpha = \frac{R_{x2} - R_{x1}}{R_{x1} t_2 - R_{x1} t_1}$  测量

一共 5 组数据, 分为 5 组

$$\alpha_1 = \frac{R_{x6} - R_{x1}}{R_{x1} t_6 - R_{x1} t_1}$$

$$= \frac{4.991 - 4.651}{4.651 \cdot 35.4 - 4.991 \cdot 15.9} (^{\circ}\text{C})^{-1} = \frac{4.00 \times 10^{-3}}{4.24 \times 10^{-3}} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\alpha_2 = \frac{R_{x7} - R_{x2}}{R_{x2} t_7 - R_{x2} t_2}$$

$$= \frac{4.991 - 4.669}{4.669 \cdot 35.4 - 4.991 \cdot 17.9} (^{\circ}\text{C})^{-1} = \frac{4.04 \times 10^{-3}}{4.11 \times 10^{-3}} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\alpha_3 = \frac{R_{x8} - R_{x3}}{R_{x3} t_8 - R_{x3} t_3}$$

$$= \frac{5.088 - 4.774}{4.774 \cdot 40.5 - 5.088 \cdot 20.0} (^{\circ}\text{C})^{-1} = \frac{4.11 \times 10^{-3}}{4.11 \times 10^{-3}} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\alpha_4 = \frac{R_{x9} - R_{x4}}{R_{x4} t_9 - R_{x4} t_4}$$

$$= \frac{5.136 - 4.848}{4.848 \cdot 42.9 - 5.136 \cdot 21.1} (^{\circ}\text{C})^{-1} = 4.19 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\alpha_5 = \frac{R_{x10} - R_{x5}}{R_{x5} t_{10} - R_{x5} t_5}$$

$$= \frac{5.179 - 4.924}{4.924 \cdot 45.4 - 5.179 \cdot 31.5} (^{\circ}\text{C})^{-1} = 4.22 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_5}{5} = 4.15 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1} \quad \text{平均值计算仅 A 类不确定度}$$

$$\Delta \alpha = \sqrt{\frac{\sum (\alpha_i - \bar{\alpha})^2}{5 \times (5-1)}} = 4 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1} \quad \alpha = (4.15 \pm 0.04) \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\text{相对标准值 } 4.33 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1} \quad \text{偏差为 } \frac{|4.15 - 4.33|}{4.33} \times 100\% \approx 4\%$$

(2) 利用拟合直线

$$\text{拟合方程 } y = a + bx$$

$$\text{由图中计算 斜率 } 0.01815 = R_0 \alpha$$

$$R = R_0 (1 + \alpha t) = R_0 + R_0 \alpha t$$

$$\text{截距 } 4.35396 = R_0$$

$$\alpha = 4.17 \times 10^{-3} (^{\circ}\text{C})^{-1} \quad (\text{作出图像如页上})$$

$$\text{相对标准值 } 4.33 \times 10^{-5} (^{\circ}\text{C})^{-1} \quad \text{偏差为 } \frac{|4.17 - 4.33|}{4.33} \times 100\% \approx 4\%$$



## 【误差分析】

1. 实验时温度计所显示加热中电阻温度相比电阻已经达到温度可能有一定的延后, 因此读出的温度可能有一定误差
2. 加热时温度变化较快, 读的温度可能略大于电桥恰好调节平衡时的温度, 也会造成误差
3. 我测量的数据间距比较小, 偶然性较大, 可能导致误差较大
4. 指针在高灵敏度时微安表指针偏转较快, 带来了判断捕捉平衡时刻的困难
5. 由于仪器偏差及个人不当操作导致的误差

## 【实验心得及思考题】

## 思考题

## 1. 双臂电桥与惠斯登电桥有哪些异同?

同: 都使用了检流计, 原理都是电位平衡。利用电桥平衡时的数据关系计算出待测电阻阻值  
 异: 惠斯登电桥只有单桥臂, 双臂电桥利用两桥臂减小和消除了<sup>附加电阻</sup>导致的误差, 使实验结果更加合理

## 2. 为什么双臂电桥测量低电阻时能够消除(或减小)附加电阻对测量结果的影响?

接头附加电阻都连接到双臂电桥<sup>电流</sup>测量回路中, 对电桥平衡无影响。而双臂电桥电压测量回路中串联的桥臂电阻  $R_1, R_2, R_3, R_4$  阻值都为  $10\Omega$  以上, 这部分电阻相比也可忽略。<sup>因附加</sup>  
 $R_x$  与  $R_s$  之间用阻值很小的导线相连, 即使  $R_x = R_s$  有很小差别, 待测电阻总是按  $R_x = \frac{R_1}{R_2} R_s$  计算, 这样就减小了这部分电阻对结果影响

## 3. 如果四端电阻的电流端和电位端接反了, 对测量结果有什么影响?

将不能消除实验时的接触电阻, 而实验时的接触电阻会对微小电阻的测量影响很大, 导致最后测量结果误差很大

## 实验心得

实验中我加深了自己对电路、电桥的理解。测量时我发现升高功率加热时升温太快, 不利于数据的准确, 于是我使用了低一些的加热功率, 却导致升温较慢, 由于测量时间有限, 我缩短了测量间隔, 每隔  $2.5^\circ\text{C}$  测一次电阻。我的数据在精度得到了提高, 但温度范围缩小了, 我在写实验报告处理数据时意识到了这一问题, 有点遗憾处理不完全。



【数据记录及草表】

1. 测量金属导体电阻率

$$R = 0.01 \cdot (0.08 + 0.00443) \Omega = 4.43 \times 10^{-4} \Omega$$

$$l = 25.00 \text{ cm}$$

$$d = 4.58 \text{ mm}$$

2. 测量金属导体的电阻温度系数

电阻  $R_x$  与温度  $t$  关系表

次数	升温 $t/^\circ\text{C}$	电阻 $R_x / \Omega$
1	15.9	$4.651 \times 10^{-3}$
2	17.9	$4.669 \times 10^{-3}$
3	23.0	$4.774 \times 10^{-3}$
4	27.1	$4.848 \times 10^{-3}$
5	31.5	$4.924 \times 10^{-3}$
6	35.4	$4.991 \times 10^{-3}$
7	38.2	$5.049 \times 10^{-3}$
8	40.5	$5.088 \times 10^{-3}$
9	42.9	$5.136 \times 10^{-3}$
10	45.4	$5.179 \times 10^{-3}$

教师签字： 邵 江 一

