

4 微小阻抗测量实验

4.1 交流四引线法测量阻抗原理

影响小阻抗测量的因素有：(1) 引线电阻，(2) 引线样品的接触电势，(3) 因两引线样品接触点的温度不同所产生的温差电势。测量小阻抗不能单纯地提高通过样品的电流，因为增大焦耳热更容易导致温差电势。当待测样品电阻值与引线电阻值相当时，常规二引线测量电阻就不可避免地包含了导线的电阻；通过四引线法把电流引线与电压测量引线分开，直接测量样品的电压降，可扣除引线电阻。接触电势和热电势是直流电压，用直流四引线法测量时，是通过反向测量电流测得的电压与正向电流没得的电压差来消除接触电势和热电势的；而对于交流法测量，电流方向本身就是正、反向变化的，接触电势与热电势自然被消除。

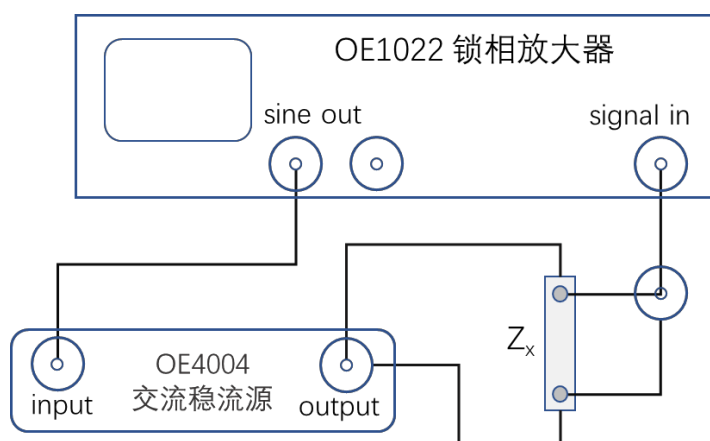
4.2 应用锁相放大器的四引线法测量小阻抗

有两种方案实现交流四引线法测量微小阻抗。这里所谓微小阻抗指微欧、微亨。

一种用稳流电源，即交流电流振幅不随负载变化；另一种是允许测量电流变化，但几乎同时（时间间隔范围内负载不发生变化）测量电流和负载电压降，而电流是通过测量与待负载串联的标准电阻上的压降得到。

第一种方案可以用一台锁相放大器实时测量负载的阻抗及其变化，这里先介绍第一种方案，稳流源使用 OE4004 电流源，它通过锁相放大器输出信号控制，频率与控制信号相同，电流在 $1.00 \sim 100\text{mA}$ 范围内与控制信号的振幅相关，即锁相放大器控制信号为 1.00V 时，稳流源输出电流为 100mA (I_{pp} 对 V_{pp} ，或 I_{rms} 对 V_{rms})。

按四线法连接样品（如图 D1-33 所示），对于纯电阻，用 OE1022 测量的样品电压降除以稳流源电流，即可得到负载阻抗值。对于非纯电阻，需要通过获得样品电压降相对于通过样品电流的相位差来确定阻抗的成分和大小。



图D1-33 交流四引线法测量微小电阻接线图（若要测量电流相位，需改善此方案）
样品：

精密电阻 (1.0Ω , 0.1Ω ;

厚膜电阻 (1.0Ω , 10Ω , 50Ω) 特点：电感、电容极小，适用于电压取样；

自备电阻 1：用 500mm 长的 $\Phi 1.0$ 的漆包线（或电线）对折为 250mm 长的双线后绕在直径

10mm 的圆管上；因对折线正反方向电流抵消，（在工艺误差范围内）得到的是一个纯线绕电阻；

自备电阻 2：用 500mm 长的 $\Phi 1.0$ 的漆包线（或电线）直接绕在 10mm 的圆管上，因此，除样品 的电阻外，样品 还有绕成线圈的电感；
稳流电源输出电流

$$\tilde{I} = I_s e^{i(\omega t + \theta_I)} \quad (D1-30)$$

样品两端的输出电压为，

$$\tilde{V} = V_s e^{i(\omega t + \theta_V)} \quad (D1-31)$$

其中， θ_V 和 θ_I 分别是样品电压和电流的相位；从式(D1-30)和(D1-31)中计算出阻抗值：

$$\tilde{R} = \frac{V_s e^{i(\omega t + \theta_V)}}{I_s e^{i(\omega t + \theta_I)}} = \frac{V_s}{I_s} [\cos(\theta_V - \theta_I) + i \sin(\theta_V - \theta_I)] \quad (D1-32)$$

其中， $\frac{V_s}{I_s} \cos(\theta_V - \theta_I)$ 为纯电阻。

【建议选用扫频功能测量阻抗随频率的变化，并通过软件记录数据，以降低人工记录强度。数据处理时，从记录数据中取多点平均以降低统计误差。但要注意时间常数、扫频时间及采样频率之间的关系，才能获得稳定可靠的数据。】

保存数据功能即保存阻抗测量或扫频测量得到的结果，只有在完成测量工作后，保存数据的按钮才能够被选择。数据会以Excel 文件格式保存于程序路径。

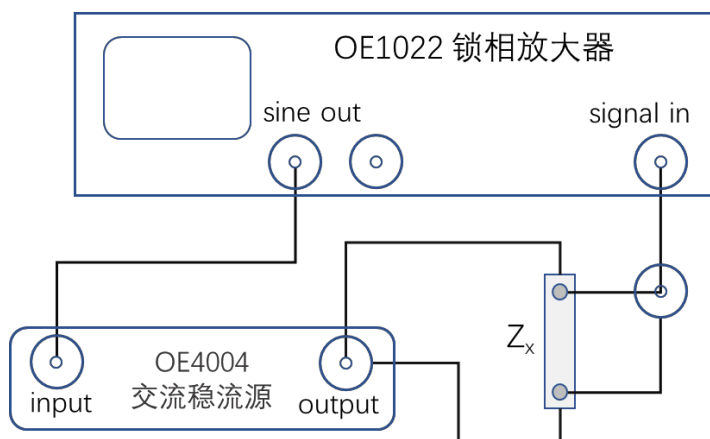
4. 微小电阻测量实验

方案一微小阻抗测量

- (1) 按图D1-33 连接好测量电路；
 - a) 用BNC-夹具信号线将待测元件电压线连接到OE1022 的信号输入 signal in;
 - b) 用BNC-BNC 信号线连接OE1022 的“SINE OUT”接口与OE4004 的“Vin”接口;
 - c) 用 BNC 夹具信号线连接OE4004 的“V_{out}”接口与样品的电流线;
- (2) 使用USB 线连接 OE1022 (USB 接口在后面板) 与PC 机, 并在PC 机上打开阻抗测量的 LabVIEW 程序OE1022_Console_CN。
- (3) 在界面或OE1022 的REF PHASE 菜单下, Ref. source 选择 Internal, Ref;
- (4) 按下前面板 GAIN TC 按键进入子菜单, 在 Sensitivity 中选择 1V Reserve 选择 Normal, Time Constant 选择 100ms, Filter DR dB/oct 选择24。
- (5) 在程序OE1022_Console_CN设置扫频类型对数扫频类型, 扫频步进为 100%, 开始频率 250Hz, 扫频截止频率128.000kHz, 步进时间1000ms, Sine output 设置为0.600Vrms, 采样率1000;
- (6) 开始测量, 记录稳源电流值 I_s , 扫频完成后获得EXCEL文件, 将文件中的电压、相位记录样品电压、样品电压相位中;
- (7) 将待测元件更换为 $10\ \Omega$ 的厚膜电阻, 按原电路连接;
- (8) 开始扫频, 完成后获得EXCEL文件, 将文件中的相位记录到电流相位中;
- (9) 分析数据, 代入式 (D1-30) 和 (D1-31) 中计算出阻抗。

注意：面包板会引入接触电阻，四引线法如何接电压线？

用BNC-夹具信号线连接电压线与OE1022 信号输入端。



图D1-33 交流四引线法测量微小电阻接线图

表 D1-4 方案一微小阻抗测量实验数据记录表

时间:		地点:		测量人员:
测量电流 I_s/mA		样品标称电阻 R_0/Ω		
频率 f/Hz	电流相位 $\theta_I/^\circ$	样品电压 V_S/V	样品电压 相位 $\theta_V/^\circ$	测量电阻 R_m/Ω
250				
500				
1000				
2000				
8000				
16000				
32000				
64000				
128000				

单通道锁相放大器外部参考信号法测小阻抗——设计并验证 2

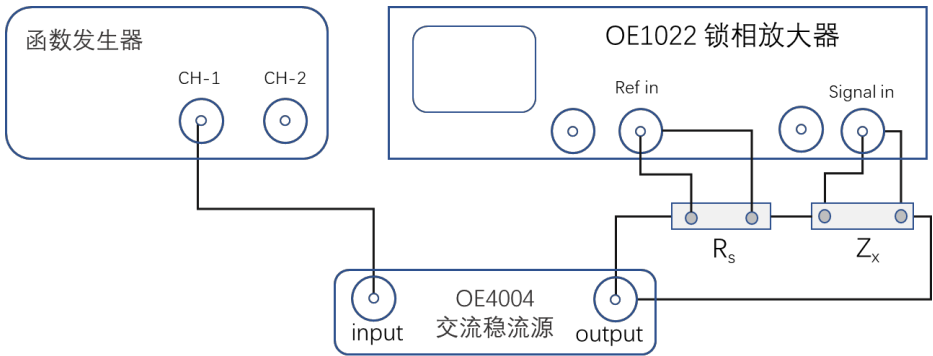


图 D1-35 单通道锁相放大器（OE1022）外部参考信号测量小阻抗的原理图。

(1) 按图D1-33 连接好测量电路；

- a) 用BNC-BNC信号线连接信号发生器CH1与OE004 “ V_{in} ”接口；
- b) 用BNC-夹具信号线连接OE4004 的“ V_{out} ”接口与厚膜电阻 R_s , 待测元件 Z_x 的一侧电流线；
- c) 用面包板将 R_s , Z_x 串联；
- d) 用BNC-夹具信号线将待测元件电压线连接到OE1022 的信号输入signal in；
- e) 用BNC-夹具信号线将厚膜电阻电压线连接到OE1022 的参考信号输入Ref in；
- (2) 使用USB 线连接 OE1022 (USB 接口在后面板) 与PC 机, 并在PC 机上打开阻抗测量的 LabVIEW 程序OE1022_Console_CN。
- (3) 在界面或OE1022 的REF PHASE 菜单下, Ref. source 选择External, Ref；
- (4) 按下前面板 GAIN TC 按键进入子菜单, 在 Sensitivity 中选择 1V Reserve 选择 Normal, Time Constant 选择 100ms, Filter DR dB/oct 选择24。
- (5) 在信号发生器设置扫频类型对数扫频类型, 每秒两倍频程, 开始频率 250Hz, 扫频截止频率128.000kHz, 步进时间1000ms, Sine output 设置为 0.600Vrms, 采样率1000；
- (6) 开始测量, 记录稳源电流值 I_s , 扫频完成后获得EXCEL文件, 将文件中的电压、相位记录样品电压、样品电压相位中；
- (7) 将待测元件更换为 10Ω 的厚膜电阻, 重复(4)扫频；
- (8) 开始扫频, 完成后获得EXCEL文件, 将文件中的相位记录到电流相位中；分析数据, 代入式(D1-30)和(D1-31)中计算出阻抗, 验证方案一测量结果。

D1-4.2单通道锁相放大器外部参考信号法测小阻抗——设计并验证 2

时间:		地点:		测量人员:
测量电流 I_S/mA		样品标称电阻 R_0/Ω		
频率 f/Hz	电流相位 $\theta_I/^\circ$	样品电压 V_S/V	样品电压 相位 $\theta_V/^\circ$	测量电阻 R_m/Ω
250				
500				
1000				

2000				
8000				
16000				
32000				
64000				
128000				

【预习报告思考题】

本实验内容之方案一按研究型实验要求。锁相放大器的好处是超强的信号提取能力，但作为交流法，其测量结果包含更多的信息，如相位信息。除纯电阻以外，电感、电容都会对测量结果产生影响。（例如，通过改变导线的弯曲形状来改变其电感）

1. 交流四引线法是如何消除引线电阻、热电势和接触电势的影响的？

通过四引线法把电流引线与电压测量引线分开，直接测量样品的电压降，可扣除引线电阻；利用交流法测量，电流方向本身就是正、反向变化的，接触电势与热电势自然被消除。

2. 本实验介绍的测量方法属于直接测量还是间接测量？

属于间接测量，测量时得到的结果为电流、电压、相位需要代入式(D1-30)和(D1-31)中计算出阻抗，所以属于间接测量。

3. 如何通过实验判断待测电阻是否纯电阻？如果不是，则如何从中分离出纯电阻？

通过实验，测量待测样品的电压相位以及通过样品的电流相位，如果二者相位一致，则可以判断电阻为纯电阻，否则不是；

若待测电阻中存在感抗或者容抗，可以通过串联大小合适的电容箱或者电感箱，以消除待测电阻的感抗或容抗，提取待测电阻的纯电阻成分。

4. 如何测量稳流源输出电流的相位？【警告：不能将稳流的输出直接接入锁相放大器的输入端】请推导待测样品的交流阻抗与锁相放大器测量值之间的关系。

将待测样品更换为厚膜电阻，测量其两端电压的相位，由于厚膜电阻电感、电容极小，其两端电压相位与通过它的电流相位一致，从而测量得到稳源输出电流的相位。

实验测量得到稳源输出电流大小、相位，待测电阻两端电压的大小、相位，有：

稳流电源输出电流

$$\tilde{I} = I_s e^{i(\omega t + \theta_I)}$$

样品两端的输出电压为，

$$\tilde{V} = V_s e^{i(\omega t + \theta_V)}$$

其中， θ_V 和 θ_I 分别是样品电压和电流的相位；从式(D1-30)和(D1-31)中计算出阻抗值：

$$\tilde{R} = \frac{V_s e^{i(\omega t + \theta_V)}}{I_s e^{i(\omega t + \theta_I)}} = \frac{V_s}{I_s} [\cos(\theta_V - \theta_I) + i \sin(\theta_V - \theta_I)] \quad (*)$$

其中， $\frac{V_s}{I_s} \cos(\theta_V - \theta_I)$ 为纯电阻。

式(*)即为待测样品的交流阻抗与锁相放大器测量值之间的关系式。

5. (选) OE1022 锁相放大器(包括其测量软件)带有扫频功能，是否可以利用该功能对不同的内部参考频率实现自动测量？

可以利用该功能对不同的内部参考频率实现自动测量；在锁相放大器前面板的菜单栏选择[REF/PHASE]子菜单进入，<Ref. source>选择<Internal Sweep>内部参考信号扫频。在此设置下，信号发生器根据设置的参数进行内部扫频，可以对<Sweep>进行设置。

【实验报告思考题】

1. 分析引线对小阻抗精密测量的影响；
2. 分析所测量相位(差)值的物理含义。