

# 利用2460型数字源表®源测量单元 (SMU) 仪器，使用大电流进行低阻器件测量

## 概述

低阻测量提供了识别随时间变化的电阻要素的好办法。通常，这类测量用于评估器件或材料是否因环境因素（如热量、疲劳、腐蚀、振动等）而降级。对于许多应用而言，这些测量通常低于  $10\Omega$ 。阻值的变化往往是两个触点之间发生某种形式降级的最好指示。为了评估高功率电阻器、断路器、开关、母线、电缆、连接器及其他电阻元件，通常使用大电流进行低阻测量。



大多数数字多用表(DMM)不具备通过大电流进行低阻测量的能力。可通过数字多用表(DMM)与电源一起进行测量，但为了实现测量过程自动化，这些仪器首先必须集成于系统，然后必须人工计算电阻。

利用源测量单元 (SMU) 仪器或数字源表®仪器，可以简化大电流激励的低阻测量。数字源表仪器能够源和测量电流和电压。吉时利2460型大电流数字源表源测量单元 (SMU) 仪器具有拉/灌大电流并测量电压和电流的灵活性，使之成为测量低阻器件（需要高达7A激励电流）的完美解决方案。2460型仪器可以自动计算电阻，因此无需人工计算。其远程检测和偏移补偿等内建特性有助于优化低阻测量。2460型仪器分辨率小于  $1m\Omega$ 。

通过2460型仪器前面板或后面板端子，均可进行低阻测量，如图1和图2所示。注意，可以分别使用前面板端子或后面板端子，但不能交叉连接混合。

当引线与被测器件(DUT)连接时，注意FORCE LO与SENSE LO与DUT待测器件(DUT)引线一端相连，FORCE HI与SENSE HI与DUT待测器件(DUT)引线另一端相连。检测。连接应当尽量靠近待测电阻。这个4线测量消除了测试引线电阻对测量的影响。

图1给出前面板连接，可以通过额定电流最大值为7A的4根绝缘香蕉电缆进行连接，如两组吉时利8608型高性能鳄鱼夹测试线组。

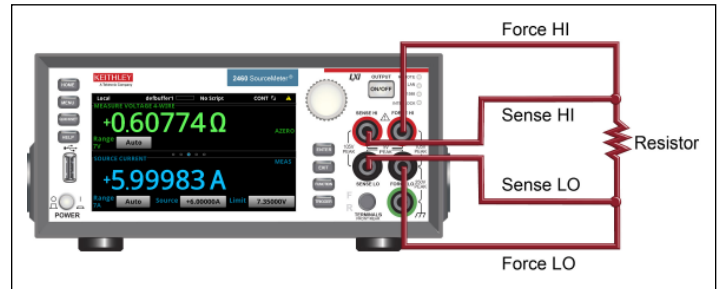


图1 进行低阻测量时2460型仪器前面板连接

图2给出后面板连接，可以通过2460-KIT型螺丝端子连接器套件 (2460型仪器包括该套件) 或2460-BAN型香蕉测试引线/适配器电缆进行连接。

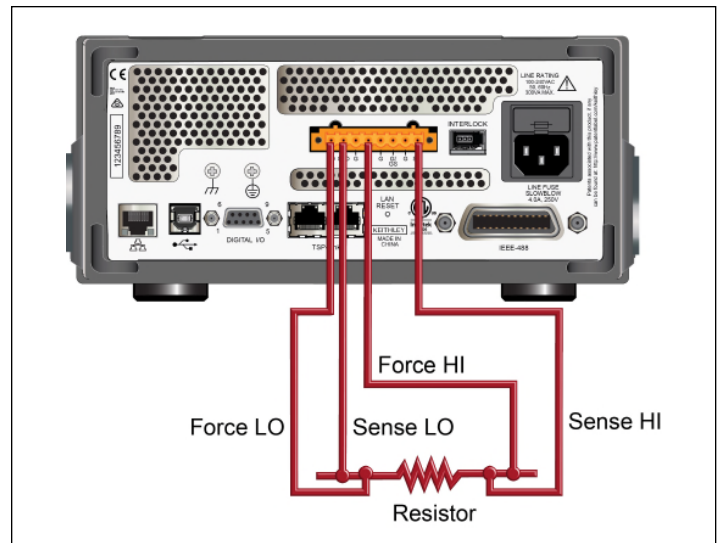


图2 进行低阻测量时2460型仪器后面板连接

## 常见的低电阻测量误差源

低电阻测量的误差源有很多种，包括引线电阻、非欧姆接触以及器件加热。

## 引线电阻

如图3所示，所有测试引线都具有一定的电阻，某些引线电阻高达数百毫欧。如果引线电阻足够高，可能导致不正确的测量。

## 热电电压

当电路的不同部分处在不同的温度之下，或者当不同材料的导体互相接触时，就会产生热电动势或热电电压。实验室温度波动或敏感电路附近的气流可能引起测试电路温度梯度变化，可能产生几微伏的热电电压。

## 非欧姆接触

当接点两端的电位差与流过接点的电流不是线性比例关系的情况下，出现非欧姆接触。非欧姆接触可能发生在由氧化膜形成的低压电路或其它非线性连接中。为了避免非欧姆接触现象，应当选用适当的接点材料，如钢或金。要确保输入端钳位电压足够的高，以避免由于源接点的非线性而产生的问题。为了减少因伏特计非欧姆接触带来的误差，采用屏蔽和适当的接地措施，以降低交流干扰。

关于非欧姆接触的详情请参考最新版的吉时利的低水平测量手册。

## 器件加热

进行低电阻测量时所使用的电流常常要比进行高电阻测量时所使用的电流大得多。如果测试电流足够高，而使器件的电阻值发生变化时，就要考虑器件的功率耗散问题。电阻器的功率耗散由下式决定：

$$P = I^2 R.$$

从这个关系式可以看出，当电流增加一倍时，器件的功率耗散会增加到4倍。因此，把器件加热效应降至最低的一个办法是，在保持待测器件（DUT）两端期望电压的同时，尽可能使用最低的电流。如果电流电平不能降低，可以考虑使用窄电流脉冲而非直流信号。

## 怎样成功实施低阻、大电流测量

### • 引线电阻和4线（开尔文）方法

电阻的测量常常使用图3所示的两线方法来进行。我们迫使测试电流流过测试引线和被测电阻（R）。然后仪表通过同一套测试引线来测量电阻两端的电压，并计算出相应的电阻数值。

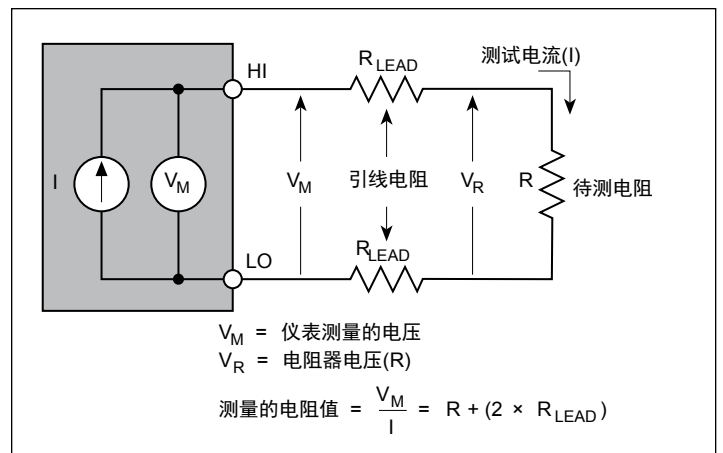


图3 利用源测量单元（SMU）仪器进行2线电阻测量

两线测量方法用于低阻测量时的主要问题是测量结果中增加了引线的总电阻（ $R_{LEAD}$ ）。由于测试电流（ $I$ ）在引线电阻上产生了一个小的、但是很重要的电压降，所以仪表测量的电压（ $V_M$ ）就不会和被测电阻（ $R$ ）上的电压完全相同，于是产生了相当的误差。典型的引线电阻在 $1m\Omega \sim 10m\Omega$ 范围内，所以当被测电阻小于 $10\Omega \sim 100\Omega$ 时，就很难用两线测量方法来获得准确的测量结果（取决于引线电阻的数值）。

由于两线方法的局限性，所以对低阻测量来说，人们一般都喜欢采用如图4所示的四线连接方法（开尔文法）。在这种配置下，迫使测试电流（ $I$ ）经过一套测试引线流过被测电阻（ $R$ ）；而待测器件（DUT）两端电压则是通过称为检测引线的第二套引线来测量的。虽然在检测引线中有小的电流流过，但是这些电流在所有实际测量工作中都是可以忽略的。

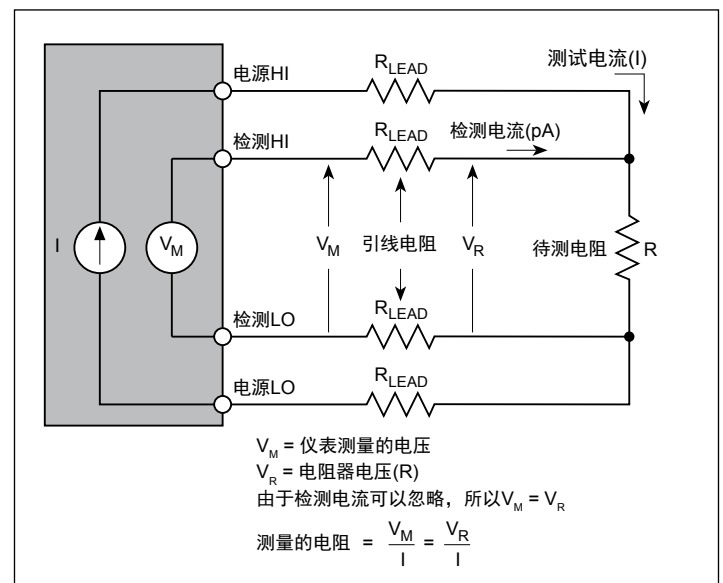


图4 利用源测量单元（SMU）仪器进行4线电阻测量

由于检测引线电压降可以忽略不计，所以仪表测量出的电压 ( $V_M$ ) 和电阻 ( $R$ ) 上的电压实际上是相同的。这样，就能以比两线方法高得多的准确度来确定电阻的数值。注意，应当把电压取样引线连到尽可能接近被测电阻的地方，以避免在测量中计入测试引线的电阻。

• 热电电压(热电动势)和偏置补偿欧姆法

偏置补偿欧姆法是实现热电动势最小化的一种技术。如图5a所示，只在测量周期的一部分时间里将源电流加到被测电阻上。当源电流接通时，仪器测量出的总电压包括电阻器上的电压降和热电动势(图5b)。在测量周期的后半段时间内，将源电流关闭。这时仪表测量出的总电压就只是电路中出现的热电动势(图5c)。如果在测量周期的后半段时间内，能够将 $V_{EMF}$ 准确地测出，就可以从测量周期前半段时间所测量出的电压中将其减去，这样偏置补偿电压测量结果就成为：

$$V_M = V_{M1} - V_{M2}$$

$$V_M = (V_{EMF} + I_R) - V_{EMF}$$

$$V_M = I_R$$

于是，

$$R = V_M / I$$

同样，我们注意到，该测量过程消除了热电动势项 ( $V_{EMF}$ )。

### 仪器局限性

即使像源测量单元 (SMU) 仪器这种可提供高达7A直流电流的仪器在总输出功率方面也具有局限性，这可能影响测量得到的电阻阻值。这个局限性源自设备设计，而且通常取决于设计参数，如仪器内部电源的最大输出、设备中使用分立器件的安全工作区、仪器内部电路板上的金属线间隔等。有些设计参数受到最大电流极限的限制，有些设计参数受到最大电压极限的限制，还有一些设计参数受到最大功率极限 ( $I \times V$ ) 的限制。

图6给出2460型仪器在不同工作点的最大直流电流和最大功率。例如，源测量单元 (SMU) 功率包络最大电流为7A(图中的A点)，最大电压为100V(D点)。源测量单元 (SMU) 可以输出地最大功率是100W，在D点时达到该功率 ( $1A \times 100V$ )。在A点，其功率低于49W。

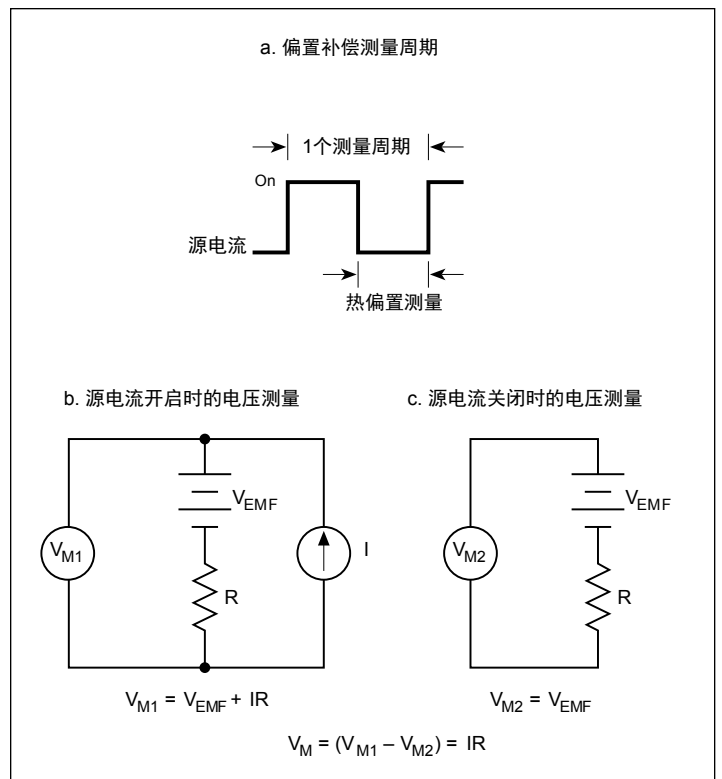


图5 偏置补偿欧姆方法

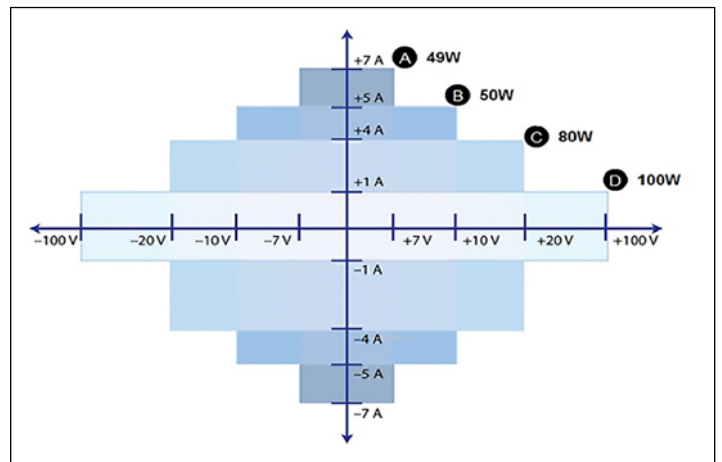


图6 2460型大电流源测量单元 (SMU) 仪器功率包络

### 利用2460型数字源表仪器的大电流能力进行低阻器件测量

通过2460型仪器前面板或者远程接口，使用SCPI代码或TSP代码进行低阻测量。步骤如下：

- 重置仪器；
- 选择源电流并测量电阻；
- 选择源电流值；
- 选择4线(远程检测)模式。这将消除引线电阻对测量精度的影响。

- 启用偏置补偿。这将减少因热电电压带来的偏置。
- 开启源输出并开始测量。
- 通过前面板或远程接口生成读数。
- 关闭源输出。

## 通过前面板设置测量

通过前面板设置应用：

将2460型仪器与待测器件进行连接。

1. 重置仪器：
  - a. 按压**MENU**按键。
  - b. 在系统下，选择**Manage**。
  - c. 选择**System Reset**。
  - d. 选择**OK**。
2. 按压**FUNCTION**按键。
3. 在源电流和测量下，选择**Resistance**。
4. 按压**HOME**按键。
5. 在SOURCE CURRENT区域，选择Source旁边的按钮，选择源值。
6. 按压**MENU**按键。在测量下，选择**Settings**。
7. 在检测模式下，选择**4-Wire Sense**。
8. 接着是偏置补偿，选择**On**。
9. 按压**HOME**按键。
10. 按压**OUTPUT ON/OFF**开关，启用输出，并开始测量。
11. 按压**OUTPUT ON/OFF**开关，禁用输出，并停止测量。

在仪器屏幕的MEASURE VOLTAGE区域显示测量结果。

通过前面板查看测量结果、TREND刷屏和GRAPH全屏

通过仪器前面板可以查看电阻测量结果以及正在施加的电流。



图7 2460型仪器主屏幕前面板图

在TREND刷屏上看到的电阻测量结果随时间而变化。为了进入该屏幕，刷击主屏底部，将出现类似图8的图形。

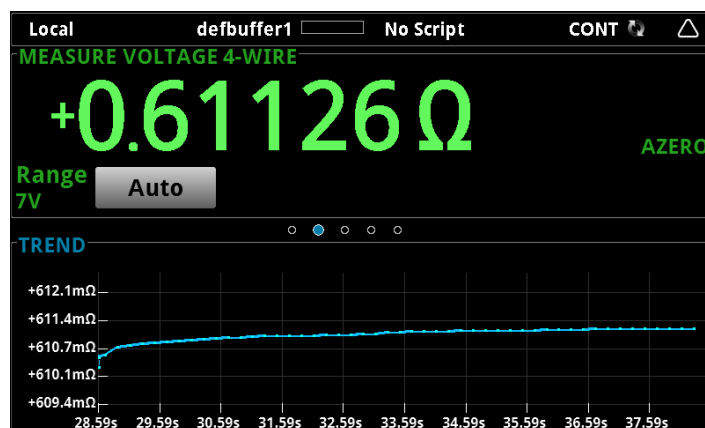


图8 2460型仪器TREND刷屏

如果想全屏查看图形，可以刷屏TREND，开启Graph屏幕。

通过前面板查看缓冲区的统计数据

2460型仪器前面板的STATISTICS刷屏可以显示各种测量统计数据，包括：

- 缓冲区名称
- 读数的最小值、最大值、平均值
- 标准偏差



图9 2460型仪器的STATISTICS刷屏

使用SCPI指令设置低阻应用

利用下面的SCPI指令序列，可以通过源电流和测量电阻进行100次低阻测量。在这个实例中，源电流幅度和极限电压时自动设置的。利用远程命令改变前面板显示屏，以显示TREND刷屏，允许查看屏幕顶部的数字数据和屏幕底部的图形数据。

在具体的编程环境下运行该代码时，可能需要进行一定更改。对于本实例应用，发送以下指令：

命令	说明
*RST	重置2460型仪器
TRIG:LOAD:LOOP:SIMP 100	配置简单环路触发模型模板，读取100个读数
SENS:FUNC "RES"	设置电阻测量
SENS:RES:RANG:AUTO ON	开启自动量程
SENS:RES:OCOM ON	支持偏移补偿
SENS:RES:RSEN ON	设置使用4线检测模式
DISP:SCR PLOT	展示TREND屏幕渐变
OUTP ON	开启输出
INIT	启动读取读数
*WAI	等待完成
TRAC:DATA? 1, 100, "defbuffer1", READ, REL	从缓存1读取电阻和时间值
OUTP OFF	关闭输出

### 使用TSP指令设置低阻应用

下面的TSP代码是为运行吉时利测试脚本构建器(TSB)而设计的。TSB是一个软件工具，可以登录吉时利仪器网站免费下载。一旦安装，TSB可以用于编写代码和开发校本，用于TSP支持的仪器。关于如何使用这个工具的信息，请查看TSB在线帮助文件以及2460型仪器参考手册中“TSP使用介绍”部分。

如果使用其他编程环境，可能需要修改这个TSP代码实例。2460型仪器的默认配置是使用SCPI指令集。在向仪器发送TSP指令之前，始终选择TSP指令集。

为启用TSP指令：

1. 按压**MENU**按键。
2. 在系统下，选择**Settings**。
3. 对于指令集，选择**TSP**。
4. 提示重启时，选择**Yes**。

这个TSP指令序列通过源电流和测量电阻进行100次低阻测量。在这个实例中，源电流幅度和极限电压时自动设置的。利用远程命令改变前面板显示屏，以显示TREND刷屏。这允许查看屏幕顶部的数字数据和屏幕底部的图形数据。在代码执行后，将在测试脚本构建器的仪表台上显示有关数据。

对于本实例应用，发送以下指令：

```

—— 将仪器重置为默认设置
reset()
—— 配置简单环路触发器模型模板，
读取100个读数
trigger.model.load("SimpleLoop", 100)
—— 将前面板显示改为TREND刷屏
display.changescreen(display.SCREEN_PLOT_SWIPE)
—— 设置测量电阻，使用4线检测和偏置补偿
—— 和偏置补偿
smu.measure.func = smu.FUNC_RESISTANCE
smu.measure.sense = smu.SENSE_4WIRE
smu.measure.offsetcompensation = smu.ON
—— 开启输出
smu.source.output = smu.ON
—— 启动触发模型，并等待，直到完成。
trigger.model.initiate()
waitcomplete()
—— 关闭输出
smu.source.output = smu.OFF
—— 从defbuffer1读取电阻和时间值
print("Resistance:\tTime:")
for i = 1, 100 do
print(string.format("%ft%f", defbuffer1[i], defbuffer1.
relativetimestamps[i]))
结束

```

### 结束语

2460型数字源表源测量单元（SMU）仪器非常适合大电流、低阻器件和组件的特性分析，因为它具有4象限设计、高功率输出，而且能够准确地测量电流和电压。使用单一仪器进行这类测试，可以简化测试设置、缩短编程时间并节省机架空间。

说明书如有变动不另行通知。所有吉时利的注册商标或 商标名称都是吉时利仪器的财产。  
所有其它注册商标或商标名称都是相应公司的财产。  
此版本为中文译本，仅供参考。您购买前请务必详细阅读本文件的英文原件。



更自信的测试

---

吉时利仪器

邮箱: china@keithley.com

网址: www.keithley.com.cn

有关如何购买或寻找销售合作伙伴的更多信息，请访问<http://www.keithley.com.cn/company/bizcenter>。