

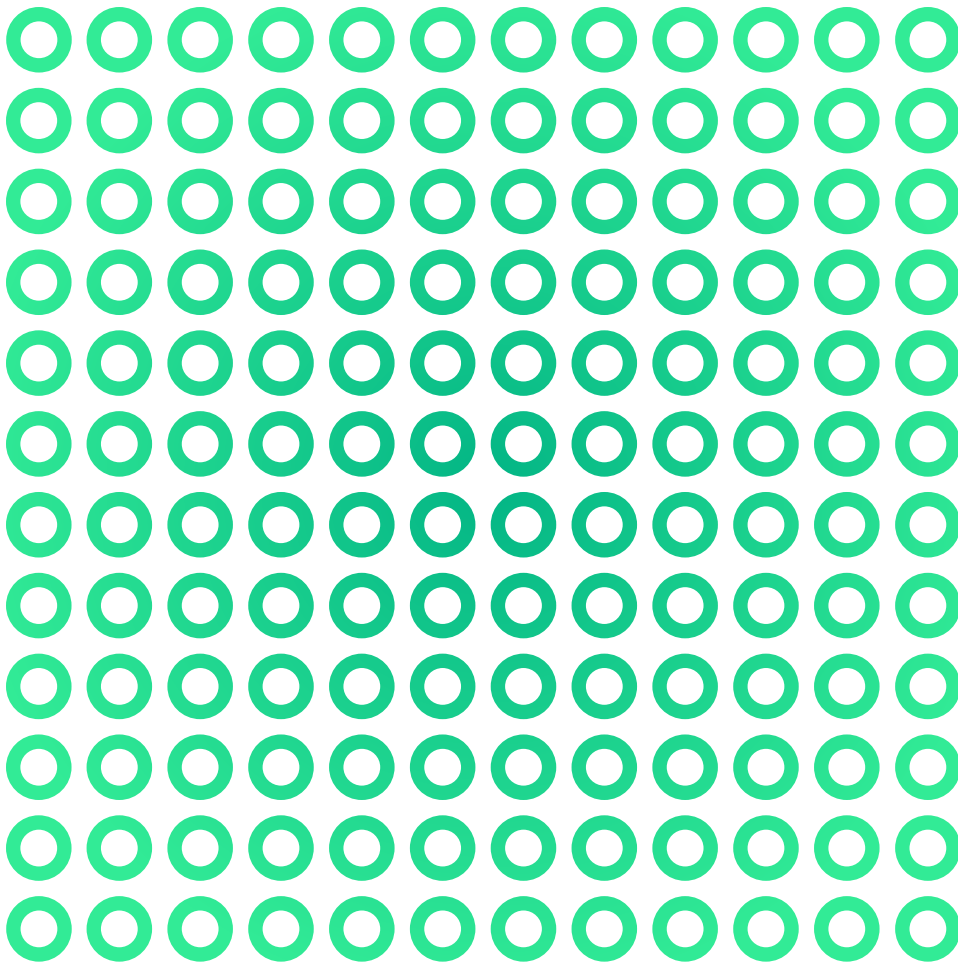


NI is now part of Emerson.



技术白皮书

高效直流测量实用指南





目录

03 引言

03 SMU基础知识

SMU工作原理

06 精度

测量精度与测量速度的权衡

脉冲

10 直流测量最佳实践

使用远端感应法消除导线电阻的影响

偏移电压补偿

最小化外部噪声

通过保护层避免电流泄漏

了解校准的重要性

17 结论

引言

获得精确的直流测量结果是许多应用的常见需求，但仅仅购买高精度和高灵敏度的仪器是不够的。各种不同的误差源都会影响读数的准确性。此外，对仪器设置进行微小的调整也会产生不同的结果。为了达到更高的精度，您需要先彻底了解您的仪器，同时使用各种方法来减少误差。

本指南介绍如何使用源测量单元(SMU)来进行直流测量。我们首先回顾了仪器的基础知识、SMU的使用方法以及正确设置仪器的一些技巧。然后介绍了在配置测试系统时，减少直流测量误差的一些主要最佳实践。为了让您能够直观地理解在何时何地更高效地应用我们介绍的这些概念，我们通过一些常见的测量场景来介绍这些最佳实践。

SMU基础知识

SMU是一种精密电源仪器，兼具电压输出和测量以及电流输出和测量功能。这种对电压和电流的控制使您可以灵活地通过欧姆定律计算电阻和功率。SMU提供四象限输出，不仅作为电压源，提供双极性电压，也可用作负载，消耗电能。由于SMU的功能灵活多样，要了解如何使用SMU进行所需的测量可能很有挑战性。

SMU工作原理

SMU的一个关键特性是灵活的四象限输出(图1),即输出正电压和正电流、负电压和正电流、负电压和负电流或正电压和负电流。

在第一和第三象限, SMU作为电源, 发出功率, 在第二和第四象限, SMU作为负载, 消耗功率。发出功率是指为电路提供激励信号, 而吸收功率是指消耗由外部有源元件(例如电压调节器的输出端)提供的电能。图1中所示的IV关系边界是实际仪器的IV关系边界图的简化版本。在实际的SMU中, 脉冲模式下的IV关系边界会更宽(参见脉冲部分)。

大多数SMU可以在恒压模式或恒流模式下运行。在恒压模式下, SMU充当电压源, 输出端的电压保持恒定, 但电流输出会发生变化。在此模式下, 您可以通过设置电流上限, 来确保SMU不会输出过高的电流给待测设备(DUT)。例如, 如果SMU连接到20 kΩ负载并且电流上限设置为1.5 mA, 则电压可以在0 V - 20 V之间变化, 而不会达到电流上限, 如图2所示。

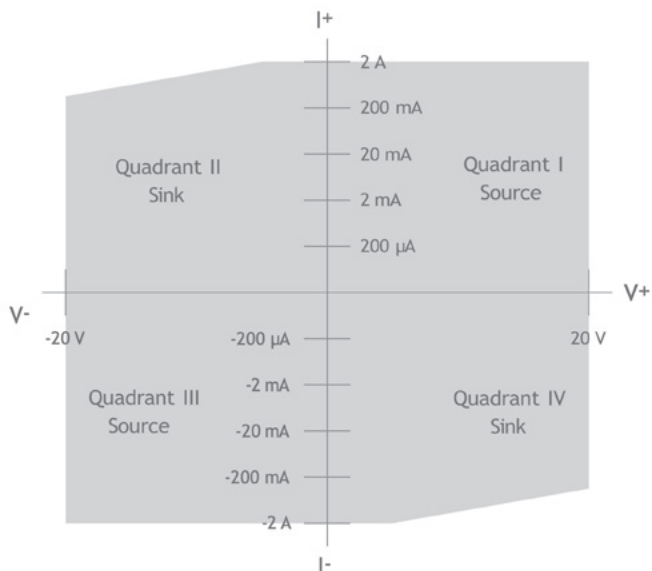


图1 简化的SMU IV运行边界图

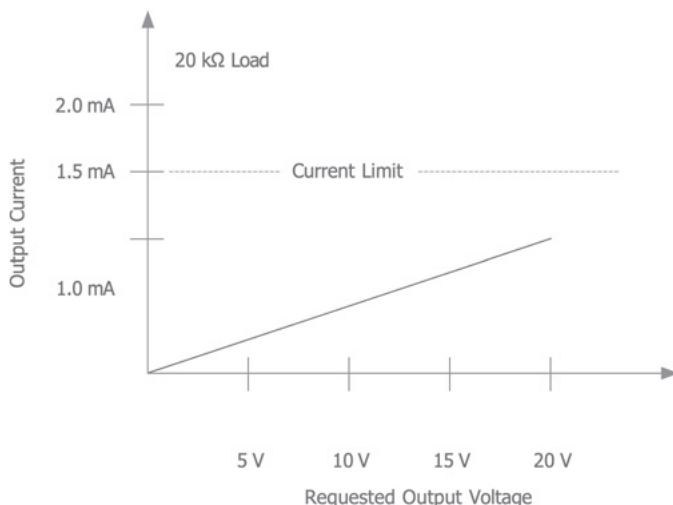


图2 在恒压模式和20 kΩ负载下工作时的SMU输出, 电流上限设置为1.5 mA

但是, 如果负载为10 kΩ, 虽然电流不会超过上限, 但电压显然无法从0 V变化到20 V。我们使用欧姆定律可以计算出SMU在什么时候会达到1.5 mA电流上限。

$$V = IR$$

$$V = 1.5 \text{ mA} * 10 \text{ k}\Omega$$

$$V = 15 \text{ V}$$

根据上述计算, 当电压输出达到15 V时, SMU的电流将达到1.5 mA上限, 此时该通道进入饱和状态。饱和状态是指通道由于电流达到编程设置的上限而无法提供所需的输出电平所处的状态。当SMU处于饱和状态时, 即使请求的输出电压大于15 V, 实际的输出电压也不会超过15 V。这一概念如图3所示。一旦SMU输出达到1.5 mA电流上限, 即进入饱和状态, 那么即使需要的电压超过15 V, 实际输出的电压也不会超过15 V。此功能旨在确保SMU不会因提供过多电源而损坏DUT, 十分实用。

当SMU处于恒流模式时, 同样如此。也就是说, SMU充当电流源时, 电压会发生变化, 但输出端的电流保持恒定。这时我们可以为电压设置一个上限, 当通道的电压达到该上限, 就进入饱和状态。

SMU作为恒压源和恒流源, 可应用于许多常见的测量场景。例如, 如果要使用SMU测量电压, 则可以将设备置于电流模式, 并使用最小电流量程, 同时将电流设置为零。这样SMU就会感应其接线端的电压, 同时允许最小量的电流流过模块; 这时SMU就相当于一个高阻抗负载。同样, 如果要使用SMU测量电流, 则应使用最小电压量程, 同时将设备置于电压模式以及零电压值; 这时SMU实际上处于短路状态。这使得SMU可用作为电压表或电流表。

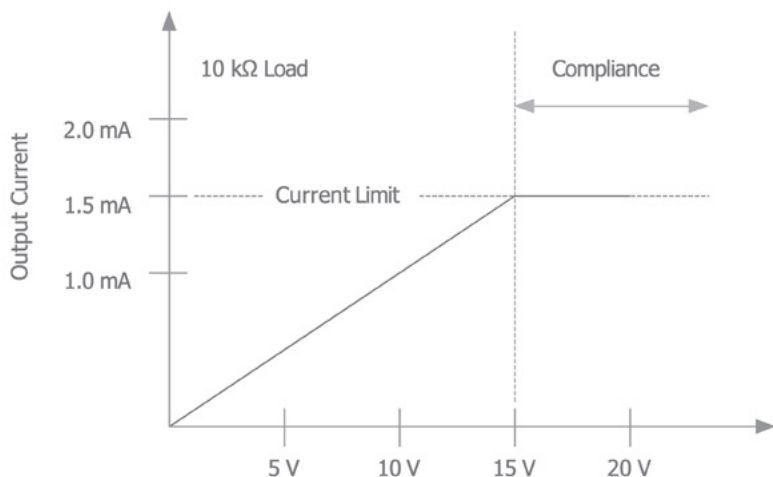


图3
在恒压和10 kΩ负载下, SMU输出处于饱和状态

SMU作为电压表:

- SMU置于直流电流模式
- 选择最低电流量程
- 输出电流为0 A

SMU作为电流表:

- SMU置于直流电压模式
- 选择最低电压量程
- 输出电压为0 V

精度

SMU和电源之间的主要区别在于精度的不同。如果要充分利用SMU，就必须先充分理解精度的规范及其含义。大多数SMU的精度通过偏移误差和增益误差之和来表示。偏移误差是指某个点实际输出与理想输出之间的差值，增益误差是指实际传递函数与理想传递函数之间的斜率差。将这两个误差相加，就可以确定指定测量的总精度。NI SMU通常以绝对单位 (mV或 μA) 指定偏移误差，增益误差以读数或请求值的百分比指定。这是因为无论要输出什么值，偏移误差都会产生相同的影响。但由于增益误差描述的是斜率的差异，误差的大小会随输出值的增大而增大。

举个例子，我们计算一下使用NIPXIe-4139SMU来测量5mA电流的精度。此测量需要使用SMU的10mA测量量程。根据PXIe-4139的规范，在10 mA量程内，SMU精度为读数的0.022% + 200 nA。在这个精度规格中，0.022%表示增益误差，而200 nA表示偏移误差。将两者相加，就是完整的精度。

$$\begin{aligned} \text{精度} &= \text{增益误差} + \text{偏移误差} \\ \text{精度} &= (0.022\% * 5 \text{ mA}) + 200 \text{ nA} = 1.3 \mu\text{A} \end{aligned}$$

代入当前读数值后，就得到精度为1.3 μA ，这意味着5 mA读数在实际电流的 $\pm 1.3 \mu\text{A}$ 范围内。

影响仪器精度的一个主要因素是仪器的温度。只有当板卡温度处于板卡完成最后一次自校准时的板卡温度的 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内，上述示例计算出的精度才是有效的。例如，如果执行自校准后板卡的温度为 25°C ，则精度规格仅在板卡的温度处在 24°C 至 26°C 之间时才有效。

如果板卡温度在自校准温度的 $\pm 5^\circ\text{C}$ 范围，那么增益和偏移误差都会增加；精度规格变为(读数的0.03%) + 600 nA。这时，使用新的精度规格重新计算刚才5 mA读数的精度：

$$\text{精度} = (0.03\% * 5 \text{ mA}) + 600 \text{ nA} = 2.1 \mu\text{A}$$

代入当前读数值后，就得到精度为1.3 μA ，这意味着5 mA读数在实际电流的 $\pm 1.3 \mu\text{A}$ 范围内。

温度发生微小差异就使得仪器精度降低了0.8 μA 。因此，进行低电流或电压测量时，应定期进行自校准，以校正这些温度影响(参见[校准部分](#))。

测量精度与测量速度的权衡

SMU的测量速度可以通过孔径时间来确定。孔径时间是指模数转换器(ADC)读取SMU电压或电流所需的时间。在图4中,孔径时间决定了测量周期的持续时间。我们可以通过改变仪器的孔径时间,灵活地扩大采样周期来进行高精度测量,或缩小采样周期来实现高速采集。增加测量孔径时间可使仪器有更多的时间进行采样和取平均,从而降低测量噪声。

SMU规范包含了孔径时间如何影响测量噪声的定量数据。比如, PXIe-4139 SMU孔径时间与测量噪声的关系如图5所示。可以看到,噪声随着孔径时间的增加而快速降低。此外,电压量程也会影响噪声水平,当电压量程较高时,噪声会增大。如果需要进行低电压或低电流测量,则应选择仪器的最低测量量程。

图6显示了60 V量程下PXIe-4139 SMU在三种不同孔径时间下的实际噪声性能。在图中的第1部分,孔径时间设置为100 μ s。可以看到,孔径时间越短,噪声越高。在第2部分,孔径时间设置为1 ms,读数中的噪声大大降低了。在最后一部分,孔径时间设置为16.7 ms,也就是一个电源周期 (power line cycle)。在此设置值下,噪声最小,几乎可忽略不计。

一种常见的业界实践是将孔径时间设置为电源周期的整数倍。在电网频率为60Hz的国家/地区中,一个电源周期等于16.67 ms,但在电网频率为50 Hz的国家/地区中,一个电源周期就等于20 ms。如果在多个电源周期内采样,直流测量的噪声就会取60 Hz或50 Hz噪声的平均值。



图4 SMU相对于采样信号的孔径时间示意图

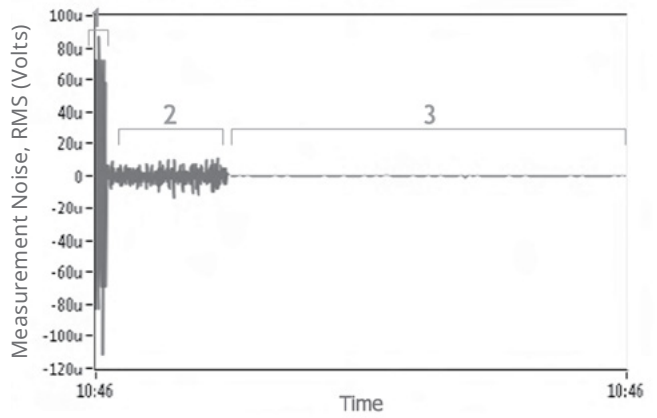


图5 电压测量噪声与测量孔径时间的关系曲线

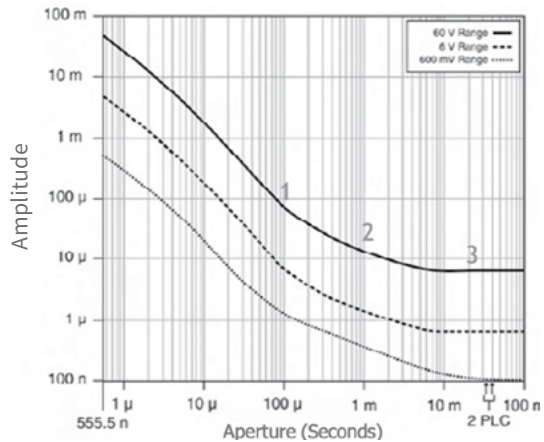


图6 时间

我们知道，有许多应用都要求尽可能缩短测试时间，这就意味着需要减小孔径时间。但是，减小孔径时间可能会在测量中引入额外的噪声，降低读数的精度。而另一方面，如果我们要研究负载的瞬态响应并且不太需要考虑精度时，则可以在短孔径时间下使用SMU将信号数字化。例如，PXIe-4139 SMU的采样速率最高可达1.8 MS/s，这使您能够详细观察信号的瞬态特性。因此，在开发应用时，请务必牢记速度和精度之间的权衡。

脉冲

许多SMU的另一个有用特性是脉冲。但是脉冲可在很短的一段时间内超出仪器的最大功率电平。因此，使用脉冲模式与DC模式时，SMU的IV关系图是不同的(图7给出了更详细的IV关系图)。

具有脉冲功能的SMU采用独特的输出架构，可提供高于额定直流上限的功率。这类SMU具有内部电容器，当设备不供电时，电容器会进行充电。而当设备输出脉冲时，电容器则会放电，提供超出标准规范的功率。由于这些SMU会短暂地输出大于电源的功率，这时，我们会对输出的速度和持续时间进行一定的限制，也会对其他一些关键脉冲参数进行限制，从而确保SMU能够始终如一地输出所需的功率，而不会因为过高的功率而过热。这些参数包括占空比、最大功率、最大脉冲导通时间、最小脉冲导通时间和最小脉冲周期。



图7 脉冲模式下的SMU IV关系示例图

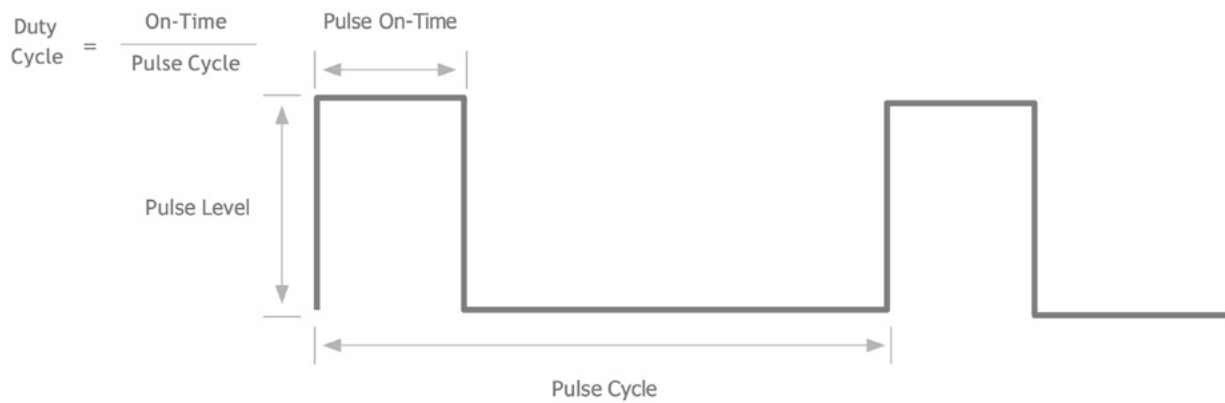


图8 SMU的主要脉冲参数

在进行高功率测试时，脉冲通常用于限制DUT的功耗。如果向DUT提供恒定的高功率DC信号，则DUT的温度会不断升高，并且这种温度变化会导致DUT的电气和物理特性发生变化。如果温度变化足够大，就会影响测量结果甚至损坏DUT。但通过脉冲功率，就可以降低通过DUT的平均功耗，并最大限度地降低自热效应。

使用脉冲模式时的另一个考虑因素是SMU的瞬态响应。在脉冲模式下进行测试时，脉冲宽度应足够长，以便仪器能够稳定地进行测量，但也必须足够短，以尽量减少DUT的自热效应。为此，需要确保瞬态响应处于临界阻尼状态。当响应为欠阻尼状态时，如图9所示，输出会发生过冲或变得不稳定，这无法提供良好的测量结果，甚至可能损坏DUT。如果响应为过阻尼状态时，如图10所示，脉冲不能足够快地达到所需的输出电平。而当响应处于临界阻尼状态时，如图11所示，信号很快稳定下来并有充足的时间测量脉冲。为了确保SMU产生干净的脉冲，需要使用采样速率足够快的仪器对瞬态响应进行数字化。某些SMU (如PXIe-4139) 具有此功能，但如果您的SMU不具备此功能，则需要使用示波器。

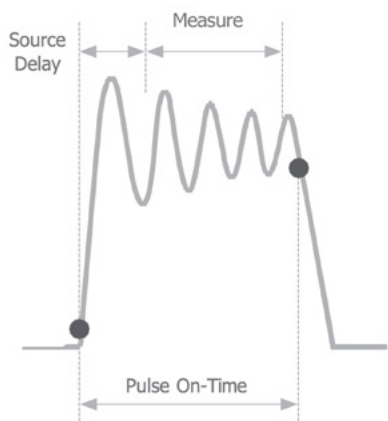


图9 欠阻尼瞬态响应

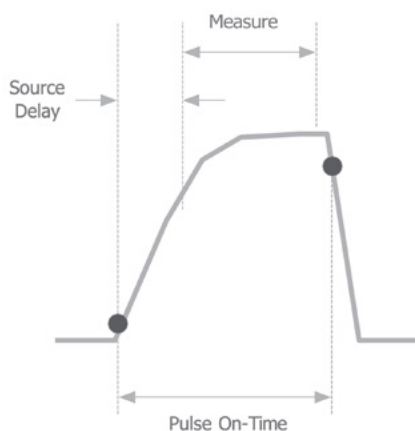


图10 过阻尼瞬态响应

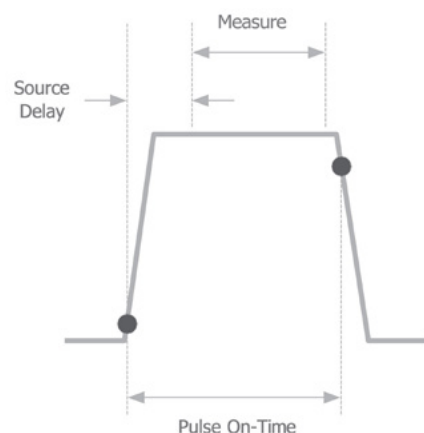


图11 临界阻尼瞬态响应

直流测量最佳实践

除了SMU仪器本身，测试系统的配置也是影响测量的关键因素。仪器并无法弥补信号质量差的问题。如果要实现高精度的直流测量，就需要高保真信号。如果目标信号包含大量噪声，即使使用高质量的仪器也无法获得准确的测量结果。许多不同的噪声和误差来源都会影响信号的质量，本技术白皮书介绍了多种方法来解决这些问题。由于不同类型的测量容易受到不同类型的误差的影响，因此还需要知道何时以及如何应用每种方法。本节中讨论的方法适用于所有类型仪器进行的直流测量，而不仅仅是SMU。但是，由于本指南主要侧重于介绍SMU，因此使用的许多范例都包含此仪器。将本节中的最佳工程实践与上一节中的仪器设置相结合，可以帮助您全面了解如何进行高精度直流测量。

使用远端感应法消除导线电阻的影响

远端感应方法有助于消除导线电阻对测量结果的影响。在标准的2线配置中，如果将电源设置为5 V电源，则DUT的实际电压会略低于5V，因为电压会由于导线的电阻而有所降低。例如，3米长、24 AWG的铜线电阻约为0.25 Ω。如果SMU提供5V和1A电源，则整条电线的压降为0.25 V。远端感应法可消除这种影响，确保DUT的电压为精确的5 V。

远端感应法采用4线配置，包括一对高阻抗感测线。在远端感应测量时，一对导线连接输出电流源，而另一对导线直接连接DUT接线端进行电压测量。在图12中，Output HI和LO线连接输出电流源，Sense HI和Sense LO线则直接测量DUT端子的电压。大量电流流经Output端导线后，会导致电压出现明显的下降，但是Sense端的导线由于具有高阻抗，流经的电流值几乎可忽略不计，因此Sense端由于导线电阻引起的电压降也可忽略不计。因此，感测导线和SMU的作用，就是通过增加输出电压来补偿由于导线电阻引起的电压降，从而维持感测导线上所需的输出电压。这也意味着为DUT提供的电压更接近实际需要的电压。

具有远端感应功能的设备在进行远端感应时，对精度的计算有额外的规定。为了更好地理解精度的计算方式，我们以PXIe-4139SMU为例进行说明。此示例使用SMU上的600 mV量程计算500 mV输出的远端感应精度。表1显示了其他系统属性。

使用600 mV量程时，SMU的精度为0.016%+ 30 μV。

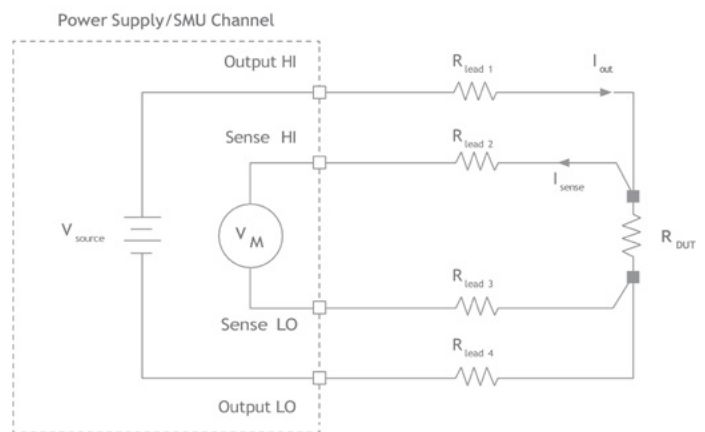


图12
4线远端感应测量电路图

HI路径的导线压降	3 V
HI感测线的电阻	2 Ω
LO路径的导线压降	2.5 V
LO感测线的电阻	1.5 Ω

表1
远端感应测量电路的属性

因此, 该仪器的远端感应电压精度规格为:

“在电压精度的基础上, 每伏HI导线压降增加 (3 ppm的电压量程 + 11 μ V)
以及每 Ω 对应感测导线电阻每伏导线压降增加1 μ V”

您可以使用以下公式计算远端感应精度:

$$\begin{aligned} \text{精度} &= (\text{SMU精度, 范围} = 600 \text{ mV}) + \text{导线电压降引起的误差} + \\ &\quad \text{每个导线电阻的导线电压降引起的误差} \\ \text{精度} &= (500 \text{ mV} * 0.016\% + 30 \mu\text{V}) + \frac{600 \text{ mV} * 3 \text{ ppm} + 11 \mu\text{V}}{1 \text{ V导线压降}} * 3 \text{ V} + \frac{1 \mu\text{V}}{\text{V} * \Omega} * 3 \text{ V} * 2 \Omega + \frac{1 \mu\text{V}}{\text{V} * \Omega} * 2.5 \text{ V} * 1.5 \Omega \\ \text{精度} &= (80 \mu\text{V} + 30 \mu\text{V}) + 12.8 \mu\text{V} * 3 + 6 \mu\text{V} + 3.8 \mu\text{V} \\ \text{精度} &= 158.2 \mu\text{V} \end{aligned}$$

这意味着实际输出电压在500 mV \pm 158.2 μ V范围内。在上面的计算中, 括号中的部分表示使用600 mV量程时SMU的精度。公式的其余部分代表远端感应的电压精度。

使用远程感应法时, 应将感测线连接到尽可能靠近DUT的位置。这可让感测线准确读取DUT处的电压。但有时候感测线无法直接连接到DUT, 例如, DUT位于板卡上无法直接探测的区域。当发生这种情况时, 在远程感应连接处提供的电压是准确的, 但是在远程感应连接处和实际DUT之间的额外电阻会引起电压下降。为了确保DUT读取准确的电压电平, 可以使用一些SMU来配置负输出电阻。为了避免不必要的电压降, 可以将负输出电阻编程为等于远程感应连接处和DUT之间的路径电阻。这样, 即使远端感应线不能直接连接到DUT, 仪器也能为DUT提供准确的电压。

远端感应法特别适用于低电阻测量。SMU和数字万用表(DMM)都可以用来测量电阻, 只需提供电流输出, 然后测量电压, 最后根据公式来计算电阻。如果要进行低于100 k Ω 的精密电阻测量时, 为了尽量减少导线电阻的影响, 需要使用4线远端感应配置而不是2线配置。前面已经介绍了使用2线法时导线电阻对电压测量的影响。由于电阻测量值是基于电压的测量值计算得到, 因此不准确的电压读数会导致电阻读数不准确。而4线法则可以消除导线电阻的影响, 从而提供更准确的测量结果。

表2显示了远程感应测量的优势。该数据由DMM通过开关测量电阻器生成。开关的导线电阻使得测量值增加了0.522 Ω , 对应的误差为5.24%。而远端感应方法可以消除导线电阻的误差, 获得更准确的读数。

使用远程感应法时, 请务必记住仪器的一些限制。比如, SMU和DMM可以补偿的电压降都有一定上限。例如, PXIe-4139可以补偿每根导线最高3 V的电压降。这意味着仪器可以补偿HI侧的3 V压降和LO侧的另一个3 V压降。达到该上限后, 仪器将无法再完全补偿导线电阻。如果无法补偿导线电阻, 测量精度就会降低。

使用远端感应法补偿导线电阻

实际电阻	未使用远程感应法的测量值	使用远程感应法的测量值
9.958 Ω	10.48 Ω	9.958 Ω

表2
远端感应法对测量结果的影响

偏移电压补偿

对于低电压测量，需要消除偏移电压的影响。偏移电压的一个常见来源是热电动势。在热电偶中，两种金属导体之间存在温度差，形成了热电动势，从而将误差电压引入电路。例如，如果采用SMU与开关的组合来进行测量，则信号路径中会存在不同的金属触点，这些开关便是热电动势误差的来源。开关规范通常会标明热电动势。NIPXI-2530矩阵开关使用簧片继电器，并且热电动势 $<50\ \mu\text{V}$ 。如果测量值在毫伏范围或更低的范围内，则该开关的热电动势会引起明显的误差。

偏移补偿是一种可用于抵消热电动势影响的方法。要使用SMU实现偏移补偿，需要对设备进行编程，使其进行两次测量。这些测量如图13所示。

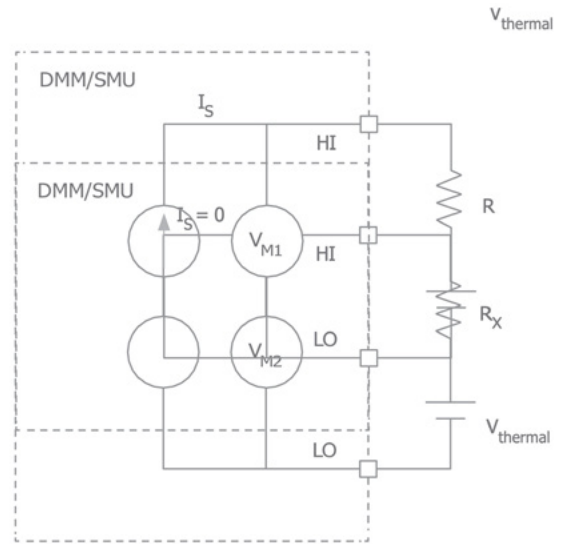


图13
偏移补偿测量法的周期

在第一个测量周期，SMU电流源接通，电压的测量会包含热电动势。在第二个测量周期中，SMU电流源断开，这意味着它仅测量由热电动势引起的电压。将第一个测量值减去第二个测量值，就可以得到不包含热电动势影响的精确测量值。

下面是该计算的公式。在该公式中， V_{OC} 表示施加偏移补偿后的电压。 V_{M1} 是电流源开启时的电压测量值， V_{M2} 是电流源断开时的电压测量值。 I_S 表示SMU电流源提供的电流， R_X 表示负载的电阻。最后， $V_{thermal}$ 是由热电动势引起的偏移电压。

$$V_{OC} = V_{M1} - V_{M2} = (I_S R_X + V_{thermal}) - V_{thermal} = I_S R_X$$

两次测量都包括热电动势偏移 $V_{thermal}$ 。因为在两次测量中都存在偏移电压，所以第一次测量减去第二次测量就消除了这种偏移的影响。

消除偏移电压的另一种方法是电流反转方法。与偏移补偿方法一样，电流反转方法也需要进行两次测量。使用正电流进行第一次测量，使用负电流进行第二次测量。下一个公式是这些测量的数学计算公式表示。

$$\begin{aligned} V_{M1} &= I_S R_X + V_{thermal} \\ V_{M2} &= -I_S R_X + V_{thermal} \end{aligned}$$

同样，由于两个测量都包括 V_{thermal} ，因此可以两次测量相减就可以消除此偏移，如下所示。

$$V_{\text{CR}} = \frac{V_{M1} - V_{M2}}{2} = \frac{(I_S R_x + V_{\text{thermal}}) - (-I_S R_x + V_{\text{thermal}})}{2} = I_S R_x$$

电流反转方法的一个优点是它的测量精度比偏移补偿方法更高。这是因为该方法会对两个测量值取平均，得到最终测量值。这种方法的缺点是需要一个能够同时提供正电流和负电流的设备，而偏移补偿方法只需要正电流。

最小化外部噪声

在进行灵敏度测量时，需要考虑噪声对读数的影响。噪声可能来自多种来源，例如电磁干扰或寄生电容。电磁干扰包括来自频谱内许多频率的干扰。电视、AM/FM收音机和电源线都可能成为电磁干扰源。当带电物体靠近测量电路时就会发生寄生电容。当两根不同电压的电导体相互靠近时，它们之间的电场会吸引电荷留在其表面。这可能表现为振荡噪声或测量偏移。使用屏蔽可以减少电场的影响，并最大限度减少测量误差。

屏蔽是指使用由导电材料制成的屏障来屏蔽电磁场，以减少空间中的电磁场。在实际应用中，应对整个测量电路进行屏蔽，这样就可以屏蔽DUT和连接DUT的电缆。法拉第笼和屏蔽电缆已经广泛应用于屏蔽DUT周围区域和导线。同轴电缆是一种常见的屏蔽电缆。它们的内芯被封闭在一个被屏蔽层包围的绝缘层中。外屏蔽层可以保护内芯免受电噪声的影响（见图14）。可以看到，屏蔽层连接到仪器的LO端子。因此，屏蔽层所捕获的任何电磁干扰或寄生电容都会流到接地端而不是仪器的HI端子。HI和LO端子之间的寄生电容可以通过在电缆上添加保护层来解决（请参阅[通过保护层避免电流泄漏](#)部分）。如果仪器的LO端子采用浮地连接，则应在测试装置周围增加另一个屏蔽笼，以免操作员意外触摸屏蔽。

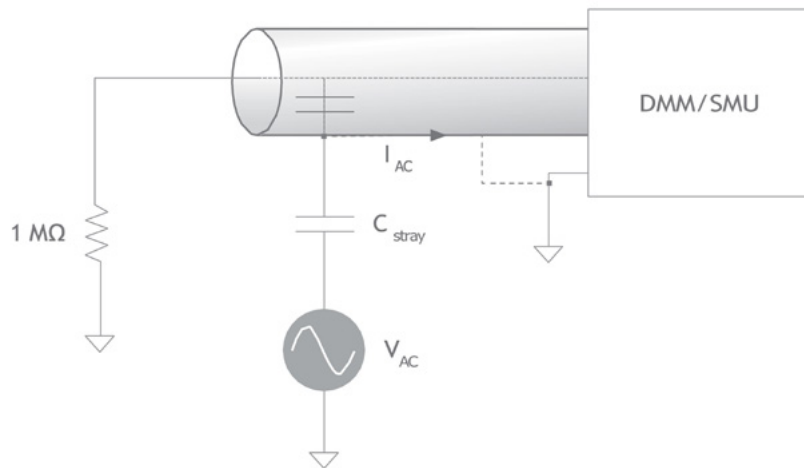


图14 电路图展示了屏蔽层如何通过导电材料制成的屏障阻挡电磁场，来减少空间中的电磁场。

屏蔽尤其适用于高阻抗测量。在图14中，可以看到 I_{AC} 是噪声源 V_{AC} 引起的电流。如果不使用屏蔽，则测量电路中会出现感应电流。如果是高电阻测量，则感应电流的影响会被放大。根据欧姆定律，如果电阻很高， I_{AC} 在测量中会引起较大的电压误差。因此，在测量高电阻DUT时，屏蔽的作用就非常重要。

使用屏蔽电缆将DUT连接到仪器时，应将屏蔽层连接到仪器接地端或DUT接地端，但不能同时连接两个接线端。这是为了避免在测量电路中形成接地回路。当系统具有两个接地参考点但处于不同的电压电位时，就会形成接地回路。这导致电流在两个地面参考之间流动，从而影响测量结果。如果DUT接地并且电缆的屏蔽层连接到DUT接地和仪器接地，则可能形成接地回路。只需在一端连接屏蔽层，就可以消除这个潜在的问题。

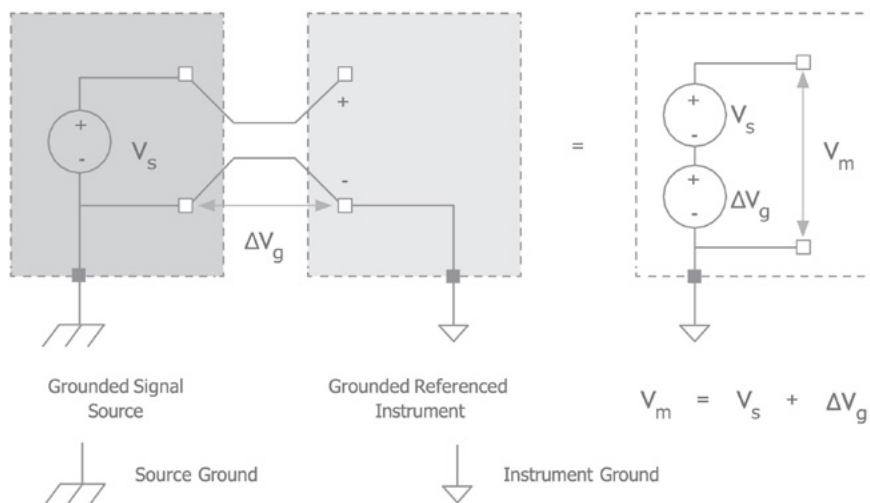


图15 使用接地参考系统测量的接地信号源会引入接地回路和测量误差。

另一种可能的外部噪声源是磁场。磁场在电路中感测的电压量与电路所包围的面积成正比。如果测量导线在电路中产生较大的环路，则系统更容易受到磁噪声的影响。一个常见的简单解决方案是使用双绞线电缆。使用双绞线电缆时，由于导线绞合在一起，从而减小了电路所包围的面积，使系统不易受到磁噪声的影响。双绞线电缆周围还可以增加屏蔽层，以保护导线免受外部电磁噪声的影响。

通过保护层避免电流泄漏

屏蔽的作用是防止外部电磁干扰影响测量，而保护层(guarding)的作用则是防止屏蔽和测量电路之间出现泄漏电流和寄生电容。如果使用没有保护层的电缆时，比如同轴电缆，电缆绝缘层就会与负载并联，导致泄漏电流在HI和LO端子之间流动。在图16中， I_L 表示HI和LO之间的泄漏电流。这意味着SMU设备测量的电流是负载电流 I_{Load} 和泄漏电流 I_L 之和。

在进行低电流和超低电流测量时，保护层尤为重要。为了说明这一点，我们来看一下在使用同轴电缆输出50V时，泄漏电流会对测量产生多大影响。在同轴电缆中，绝缘层将内芯和外屏蔽层隔开。理想情况下，绝缘层的电阻是无穷大的，但实际上电阻值是有上限的。每根同轴电缆的绝缘电阻各不相同，假设给定电缆的电阻为100 GΩ。这时就可以计算通过绝缘层的泄漏电流。

$$I_L = \frac{50\text{ V}}{100\text{ G}\Omega} = 0.5\text{ nA}$$

根据此计算结果，如果应用需要进行毫微安级测量时，就不能使用同轴电缆。另外，随着电压电平增加，泄漏电流值也会增加。

因此，如果要进行低电平电流测量，应该使用三轴电缆。图18显示了三轴电缆的示意图。三轴电缆在电缆芯和屏蔽之间有一层额外的导电护套，称为护罩。

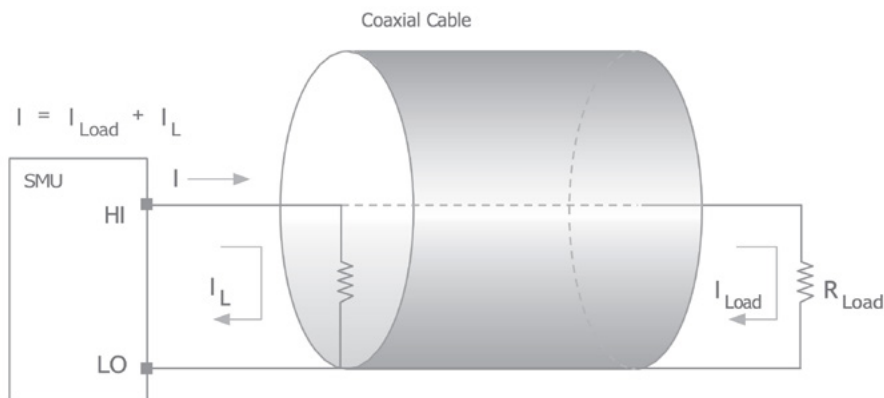


图16
同轴电缆的泄漏电流

该中间层连接到SMU的保护端子。SMU上的保护端子由跟随HI端子电压的单位增益缓冲器驱动。单位增益缓冲器是一个负反馈运算放大器(见图17),其中运算放大器的输出 V_{out} 连接到其负输入端子。当运算放大器的正输入端子 V_{in} 连接到SMU的HI端子时,运算放大器的输出电压与SMU上的HI端子的电压相匹配。

由于三轴线缆的保护层连接到该单位增益缓冲器,保护层与HI端子处于相同的电压电位,HI端子和保护端子之间的压降为0V(见图18)。

在电压电位没有差异的情况下,泄漏电流不会在HI和保护层之间流动。一些泄漏电流 I_{Guard} 仍然从保护输出端流向LO,但由于电流由单位增益缓冲器而非HI提供,因此泄漏不会影响输出或测量。因此三轴电缆可以消除泄漏电流的影响,并提供更准确的电流测量。

使用保护层还可以减少SMU的HI和LO端子之间的寄生电容。当两个处于不同电压电位的电导体靠近时,它们之间的电场会吸引电荷留在表面。这个现象就是寄生电容。对于同轴电缆,内芯(HI)靠近外屏蔽层(LO),会导致寄生电容。由于HI和LO之间的电压差异很大,因此电容需要更长的时间来充电,这意味着信号需要更长的时间才能稳定。如果使用保护层,HI和保护之间的电容不必充分充电,因为它们处于相同的电压电位。这就缩短了信号的稳定时间。

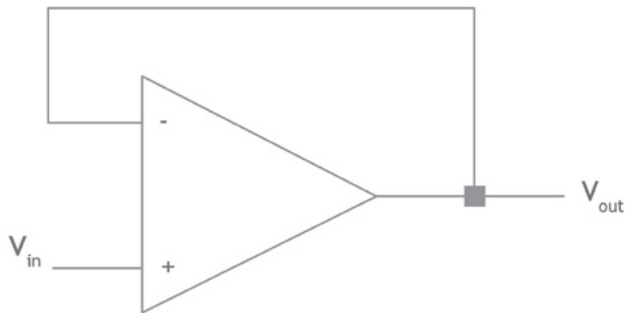


图17
单位增益缓冲器

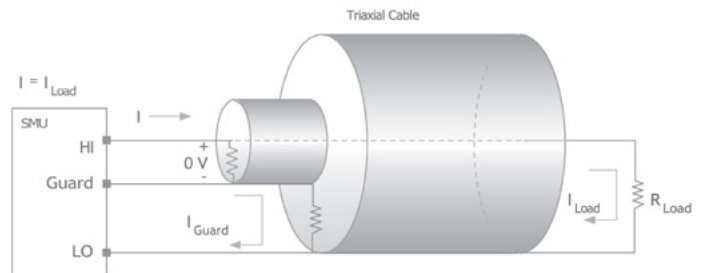


图18
使用保护层的效果

保护层的一个常见应用是输入泄漏测试。输入泄漏测试测量的是流经芯片高阻抗输入引脚的电流值。理想的输入引脚具有无限大阻抗,因而不会产生电流。然而,真实DUT的阻抗虽然很大,但它是有限的,因而会存在通常为微安或更低量级的弱电流。此测试通常使用SMU进行,因为SMU可同时作为电压源和电流表,在输出电压的同时测量电流。

由于是低电流测量,因此应使用SMU上的保护线来确保最准确的测量。DUT连接到SMU后,应将SMU设置为源电压。此外还应设置电流上限以保护DUT免受损坏。SMU在提供电压的同时,会测量来自DUT的电流泄漏。然后将泄漏电流值与该DUT可接受的限制值进行比较,以查看DUT的参数是否在规定范围内。请确保此时测量的不是SMU HI和LO端子之间的泄漏电流。如果在此应用中使用同轴电缆,测量值会包含来自电缆的泄漏电流,并且如果实际DUT泄漏电流在规范规定的范围内时,可能导致DUT无法通过测试。而使用三轴电缆和SMU上的保护功能,就可以获得更精确的电流测量结果,并确保DUT不会意外故障。

了解校准的重要性

仪器需要进行校准才能确保性能达到规范规定的水平。校准的两种主要形式是外部校准和自校准。外部校准用于校正仪器上的漂移，自校准则用于校正温度引起的误差。

外部校准是一个非常复杂的过程，它需要一个高精度的电压源。执行外部校准时，仪器的板载EEPROM校准常数被擦写为新的值。设备驱动程序使用这些常数为给定测量返回适当值。外部校准主要用于校正板载参考的长期漂移或自校准无法校正的偏移。为了确保仪器满足对外公布的规范，建议每隔一到两年进行一次外部校准，具体取决于仪器。

自校准则较为简单，无需任何额外设备即可执行。此过程涉及将已知的内部参考路由到板卡的所有通道。然后在各种增益设置下读取参考电压并与预期值进行比较。这个不受温度影响的参考电压用于校正由温度变化引起的误差。由于组件的属性取决于工作温度，因此应使用自校准来补偿温度变化，并确保仪器尽可能准确。

图19、20和21中所示的曲线图显示了自校准的作用。这些图是通过将几个装置放入温度室并监测其性能而得到。图19显示了24小时内板卡温度的变化。图20显示了同一周期内偏移电压电平的变化情况。温度较高时，会出现轻微的正电压偏移，而温度较低时，则会出现负电压偏移。但是，如果在进行每次测量之前使用自校准，可以消除由于温度引起的电压偏移，并且不会影响测量结果（参见图21）。

请记住，自校准的精度与板载参考电压的精度完全一致。因此，必须在制造商建议的间隔内对仪器进行外部校准，以确保参考电压符合规范要求。

结论

本指南中介绍的各种方法可帮助您为直流测量应用提供更高的精度。在应用这些方法时，请记住每种方法针对的误差类型，这样才能将正确的解决方案应用于所遇到的测量问题。例如，在测量低电流时如果上升时间较慢，可换成三轴电缆并添加保护层。如果电源线出现噪声，可以为系统添加屏蔽，并将孔径时间设置为一个电源周期。掌握这些最佳实践可帮助您充分利用测试设备。

如需了解有关NI SMU及其自定义瞬态响应或高级序列生成功能的更多信息，请访问ni.com/smu。

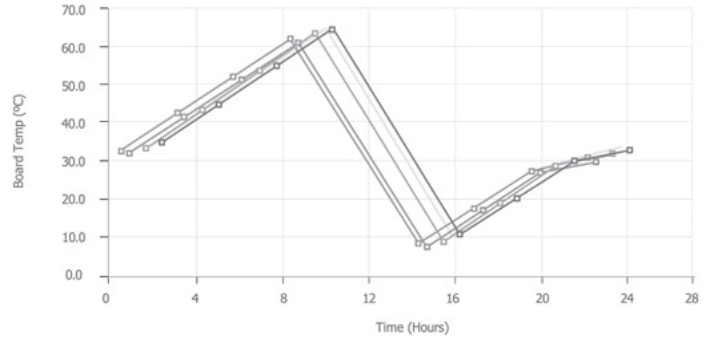


图19 测试板卡24小时内的温度变化情况

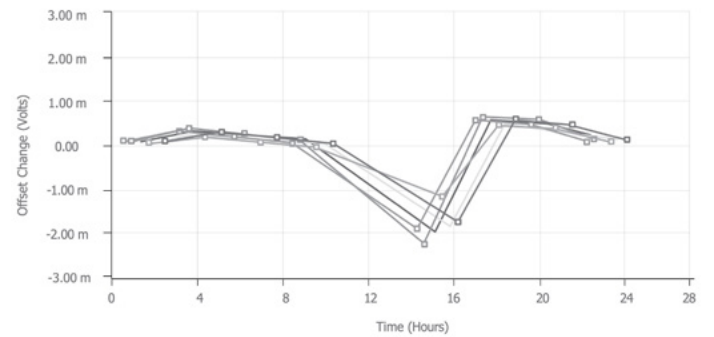


图20 未进行自校准时的电压漂移

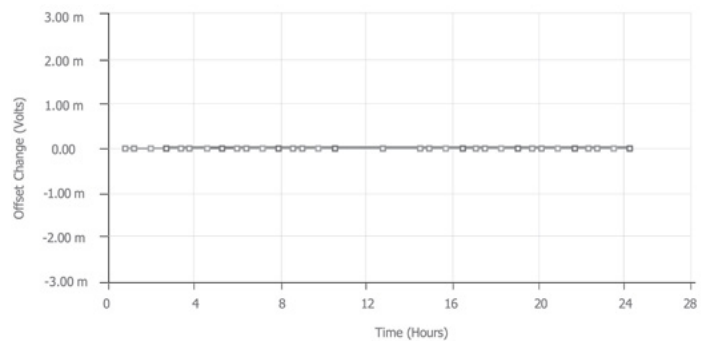


图21 进行自校准后的电压漂移

Emerson、Emerson Automation Solutions或其任何关联实体均不对任何产品的选择、使用或维护承担任何责任。正确选择、使用和维护任何产品的责任完全由购买者和最终用户承担。

National Instruments、NI和NI.com是Emerson Electric Co.测试和测量业务部门旗下一家公司的商标。Emerson和Emerson徽标是Emerson Electric Co.的商标和服务商标。


本出版物的内容仅供参考，尽管已尽力确保其准确性，但不应将其解释为对本出版物所述产品或服务或其使用或适用性的明示或暗示的担保或保证。所有销售均受我们的条款和条件约束，可应要求提供。我们保留随时修改或改进此类产品的设计或规范的权利，恕不另行通知。

NI
11500 N Mopac Expwy
Austin, TX 78759-3504

 [Linkedin.com/company/niglobal/](https://www.linkedin.com/company/niglobal/)

 [Twitter.com/NIglobal](https://twitter.com/NIglobal)

 [Youtube.com/@NIGlobalYoutube](https://www.youtube.com/@NIGlobalYoutube)

 [Instagram.com/niglobal/](https://www.instagram.com/niglobal/)

 [Facebook.com/NationalInstruments](https://www.facebook.com/NationalInstruments)

