

最大化直流测量性能实用指南

目录

SMU基础知识

- SMU工作原理

- 测量精度

- 测量精度与测量速度的权衡

- 脉冲

DC测量的最佳做法

- 使用远程感测法消除电线电阻的影响

- 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

结论

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,对仪器参数进行微小的调整也可能产生不同的结果。为了达到最高精度,您需要先彻底了解您的仪器才能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DC测量。

首先回顾了仪器的基础知识、SMU的使用方法以及仪器设置相关的功能。然后介绍了测试系统中有助于减少各种DC测量误差的最佳工程实践。本指南在常见的测量场景下介绍这些最佳实践,以便您直观地理解何时何地最有效地应用所涵盖的概念。

SMU基础知识

SMU是一种精密电源仪器,具备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,不仅提供双极性电压,还可吸收功率。由于SMU具有多样化功能,您可能不太理解如何使用SMU进行所需的测量。

SMU工作原理

SMU的一个关键特性是灵活的四象限输出(图1)。输出可以提供正电压和正电流、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作为电源输出功率,在第二和第四象限,SMU作为负载吸收功率。输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)提供的电源。图1中所示的IV边界是实际仪器的IV关系图的简化版本。实际的SMU扩展了脉冲模式的IV界限(参见“脉冲”部分)。

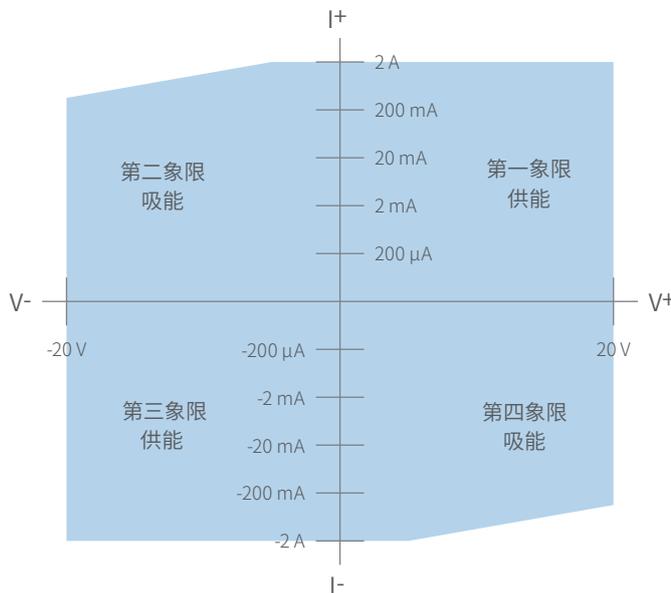


图 1. 简化的SMU IV工作关系图

大多数SMU可以在恒定电压模式或恒定电流模式下运行。在恒压模式下,SMU充当电压源,使输出端的电压保持恒定,但电流输出会发生变化。此模式可以设置电流上限,以确保SMU不会将太多电流输出给待测设备(DUT)。例如,如果SMU连接到20kΩ负载并且电流上限设置为1.5 mA,则电压可以从0 V扫描到20 V而不会达到电流上限,如图2所示。

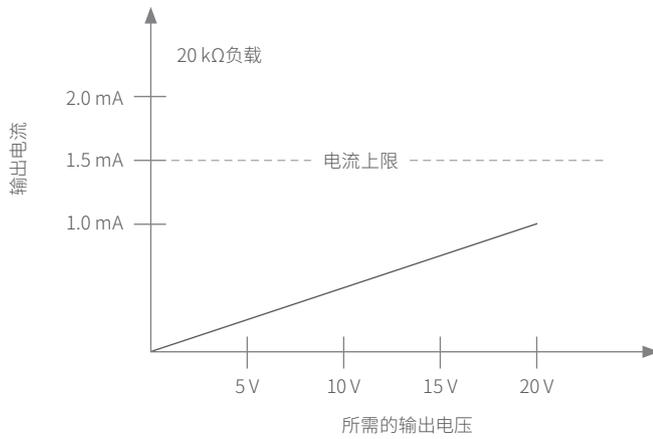


图2.在恒压模式和20kΩ负载下工作时的SMU输出, 电流限制设置为1.5 mA

但是, 如果负载为10kΩ, 虽然不会超过电流上限, 但电压无法从0 V扫描到20 V。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。

$$V = IR$$

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

$$V=15V$$

根据上述计算, 当电压输出达到15 V时, SMU将达到1.5 mA电流上限。当达到电流上限时, 该通道处于饱和区。通道处于饱和区是指由于已达到所设置的上限, 通道无法输出所需的电平的情况。当SMU在饱和区运行时, 即使要求的输出电压大于15 V, 实际输出电压也不会超过15 V。这个概念如图3所示。一旦SMU输出达到1.5 mA电流限制, 虽然要求的电压高于15 V, 但实际电压不超过15 V。此功能对于确保SMU不会因为供电过多而损坏DUT非常有用。

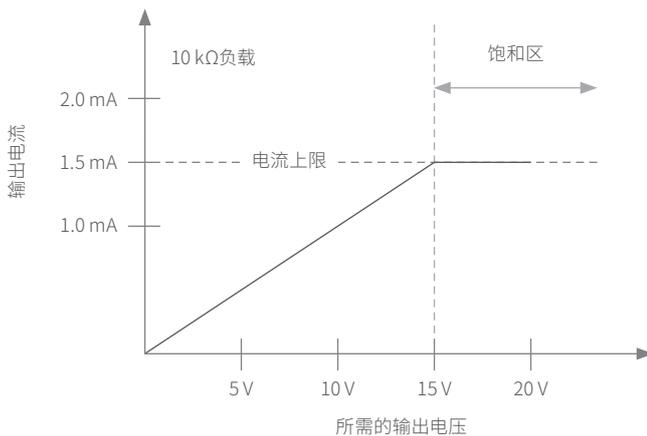


图3.在恒定电压和10kΩ负载下工作时的SMU输出处于饱和区

当SMU处于恒定电流模式时, 类似的原则适用。也就是SMU充当电流源, 在电压发生变化的同时保持输出端的电流恒定。这种情况可以设置电压上限, 并且一旦通道达到该限制值, 就表示处于饱和区。

SMU在恒定电压和恒定电流模式下的工作方式可应用于常见的测量场景。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,同时将电流电平设置为零。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有效地充当高阻抗负载。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。这允许SMU像电压表或电流表一样使用。

SMU作为电压表:

- SMU置于直流电流模式
- 电流范围设置为最低
- 输出电流为0 A

SMU作为电流表:

- SMU置于直流电压模式
- 电压范围设置为最低
- 输出电压为0 V

测量精度

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规范及其含义。大多数SMU将精度描述为偏移误差和增益误差的组合。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,就可以确定给定测量的总精度。NI SMU通常以绝对单位(mV或 μA)来表示偏移误差,并且增益误差则表示为读数或请求值的百分比。这是因为无论输出的是什么值,偏移误差都是一样的。但是由于增益误差描述的是斜率差,误差的大小会随着输出的增大而增大。

以NI PXIe-4139 SMU测量5 mA电流为例来说明精度的计算。此测量需要使用SMU的10 mA测量量程。根据PXIe-4139的规范,在10 mA量程内,SMU精度是读数的0.022%+ 200 nA。在此精度规范中,0.022%表示增益误差,200 nA表示偏移误差。将两者相加就等于完整的精度值。

精度= 增益误差 + 偏移误差

$$\text{精度} = (0.022\% * 5 \text{ mA}) + 200 \text{ nA} = 1.3 \mu\text{A}$$

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。

影响仪器精度的主要因素是仪器温度。上述示例计算的精度只有在电路板温度处于最后一次自校准完成时电路板温度的 $\pm 1^\circ\text{C}$ 范围内时才有效。例如,如果在执行自校准时电路板温度为 25°C ,则只有当前电路板温度介于 24°C 和 26°C 之间时,该精度值才有效。

当电路板温度在自校准温度的 $\pm 5^\circ\text{C}$ 范围内时,增益和失调误差都会增大;精度变为(读数的0.03%) + 600 nA。使用新公式重新计算5 mA测量的精度:

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

温度的微小差异使仪器精度降低了 $0.8\mu\text{A}$ 。进行低电平电流或电压测量时,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。孔径时间是模数转换器(ADC)读取SMU电压或电流的时间段。在图4中,孔径时间决定了测量周期的持续时间。通过改变仪器的孔径时间,可以灵活地扩大采集窗口来进行高精度测量或缩小窗口来进行高速采集。延长测量孔径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。



图 4. SMU的孔径时间图示例

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图如图5所示。可以看到，如果增加孔径时间，噪声水平会显著降低。此外，较高电压量程内的噪声水平也比较高。如果需要进行低电压或低电流测量，则应将仪器的测量量程设置为最低值。

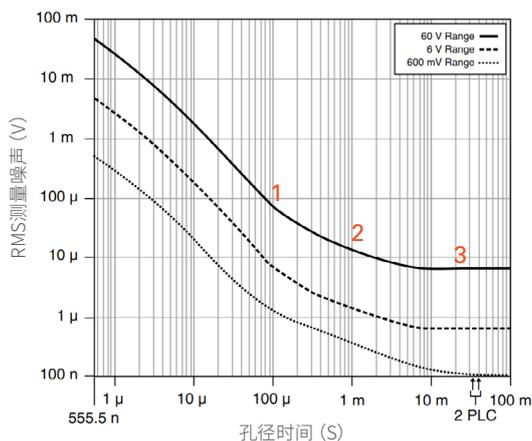


图 5. 电压测量噪声与测量孔径时间关系图

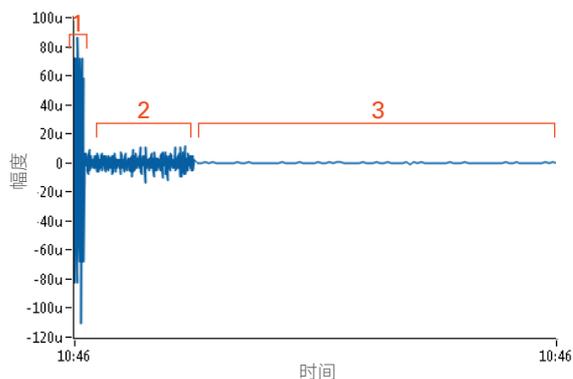


图 6. 不同测量孔径时间下的PXIe-4139噪声性能

图6显示了在三种不同孔径设置下使用60 V量程的PXIe-4139 SMU的实际噪声性能。在图中的第1部分，孔径时间设置为100μs。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1ms，读数中的噪声大大降低了。在最后一部分，孔径时间设置为16.7ms，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。

“借助基于PXI的新平台，我们不仅保持了测量性能和完整性，同时将半导体验证的成本降低了3倍，吞吐量提升了10倍。”

Ray Morgan, 产品线经理, ON Semiconductor

一种常见的最佳做法是将孔径时间设置为电源周期的整数倍。在电网频率为60 Hz的国家/地区，一个电源周期等于16.67 ms，但对于50 Hz电网的国家/地区，一个电源周期就等于20 ms。如果在多个电源周期内进行采样时，则60 Hz或50 Hz噪声就等于直流测量结果的平均值。

许多应用都要求缩短测试时间，这意味着减小孔径时间。但是，低孔径时间可能会在测量中引入额外的噪声，影响读数的准确性。而另一方面，如果要检查负载的瞬态响应并且精度不是

主要考虑因素时,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。在开发应用程序时,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。脉冲功能可在短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曲线图是不同的(图7给出了更详细的IV曲线图)。

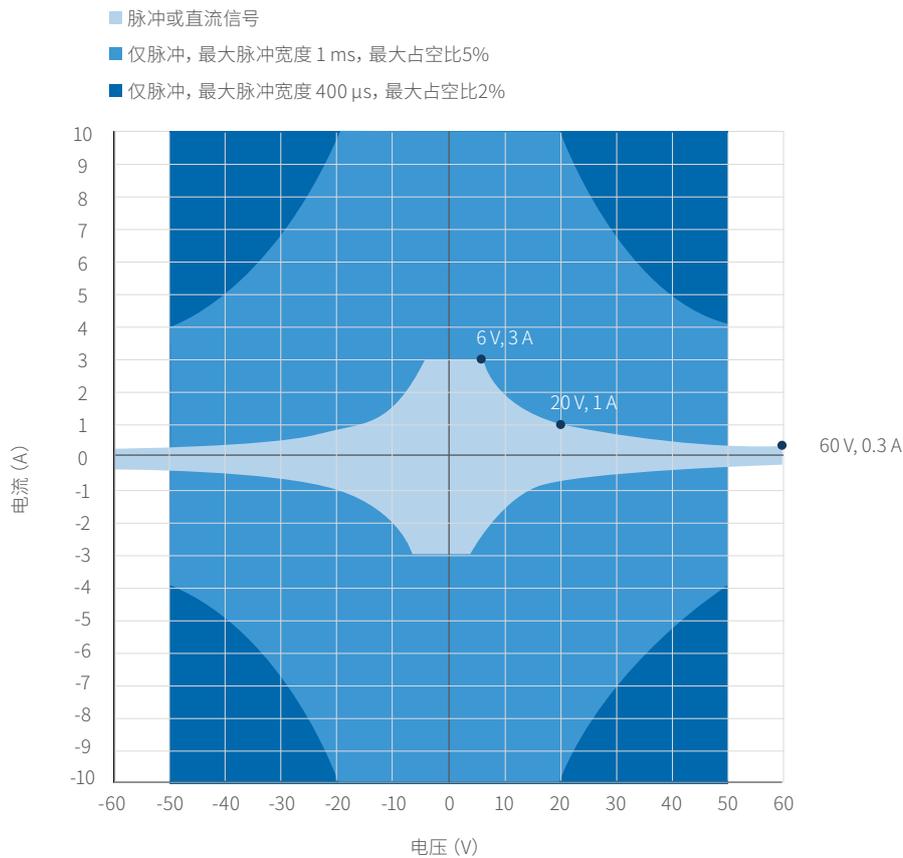


图7. 具有脉冲功能的SMU IV关系图示例

具有脉冲功能的SMU采用了独特的输出架构,以提供高于额定DC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。当设备输出脉冲时,电容器放电以提供超出标准规范的功率。由于这些SMU暂时输出的功率大于电源提供的功率,因此该功率输出的速度和持续时间会受到一定限制。对关键脉冲参数的限制确保了SMU能够始终如一地输出所需的功率,而不会因为过多的功率而过热。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。

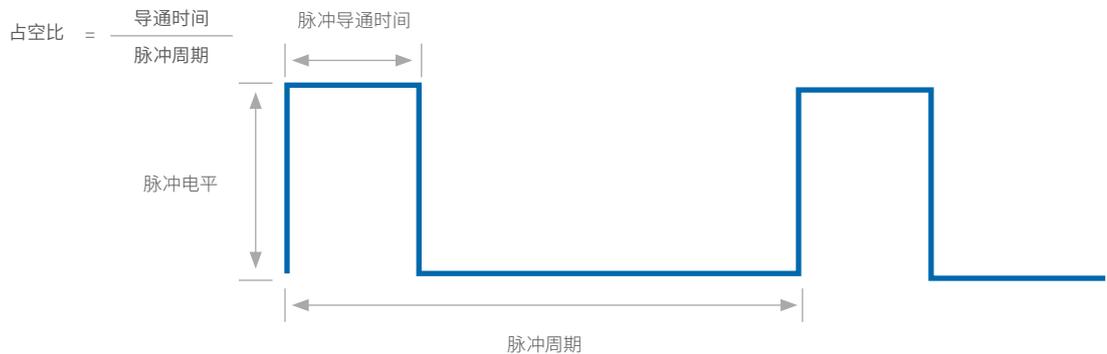


图8. SMU的主要脉冲参数

脉冲通常用于限制高功率测试期间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，需要使用具有足够快采样速率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。

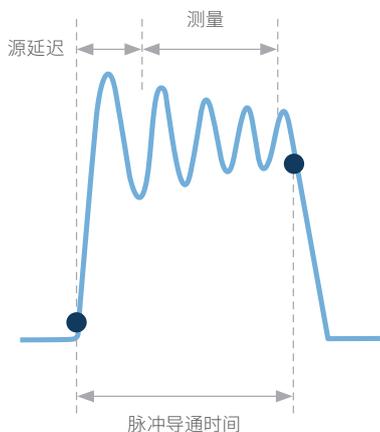


图9. 欠阻尼瞬态响应

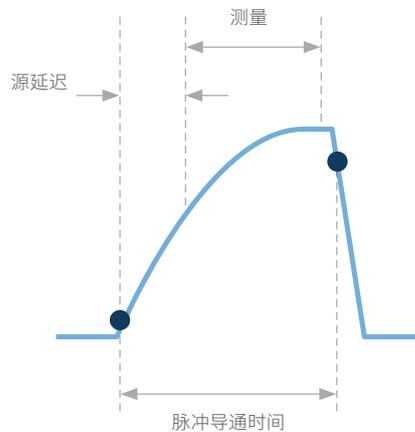


图10. 过阻尼瞬态响应

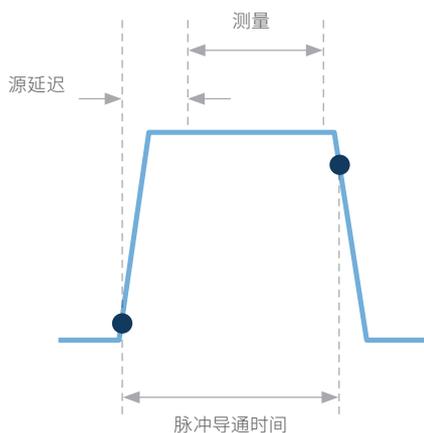


图11. 临界阻尼瞬态响应

DC测量的最佳做法

除了SMU仪器本身，测试设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。如果感兴趣的信号包含大量噪声，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，但本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SMU，因此使用的许多示例都包含此仪器。将本节中的最佳做法与上一节中的仪器信息相结合，可以帮助您全面了解如何进行高精度直流测量。

使用远程感测法消除电线电阻的影响

远程感测是一种用于消除测量中电线电阻影响的方法。在标准的2线配置中，如果将电源设置为5 V电源，则DUT的电压会略低于5 V，因为电压电位会由于电线电阻而下降。例如，一根3米长的24AWG铜线具有约0.25Ω的电阻。如果SMU提供5 V和1 A电压，则整个电线长度的压降为0.25 V。远程感测可消除这种影响，确保DUT的电压为精确的5 V。

远程感测采用4线配置,包括一对高阻抗感测线。在远程感测测量时,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。流过输出导线的大量电流会导致通过导线后的电压降较大,但是流过高阻抗感测线的电流几乎可忽略不计,这使得由于导线电阻引起的电压降也可忽略不计。使用感测线和SMU,就可以通过增加输出电压来补偿由于导线电阻引起的电压降,从而维持感测线上所需的输出电压。这意味着为DUT提供的电压更接近实际定义的电压。

“与同等的传统台式设备(吉时利和安捷伦的产品)相比,这套系统可节省约20,000美元的成本。节省的成本主要来自模块化产品、空间和能耗的节省以及开发时间的缩短。”

Junifer B. Frenila, 产品工程师, Analog Devices

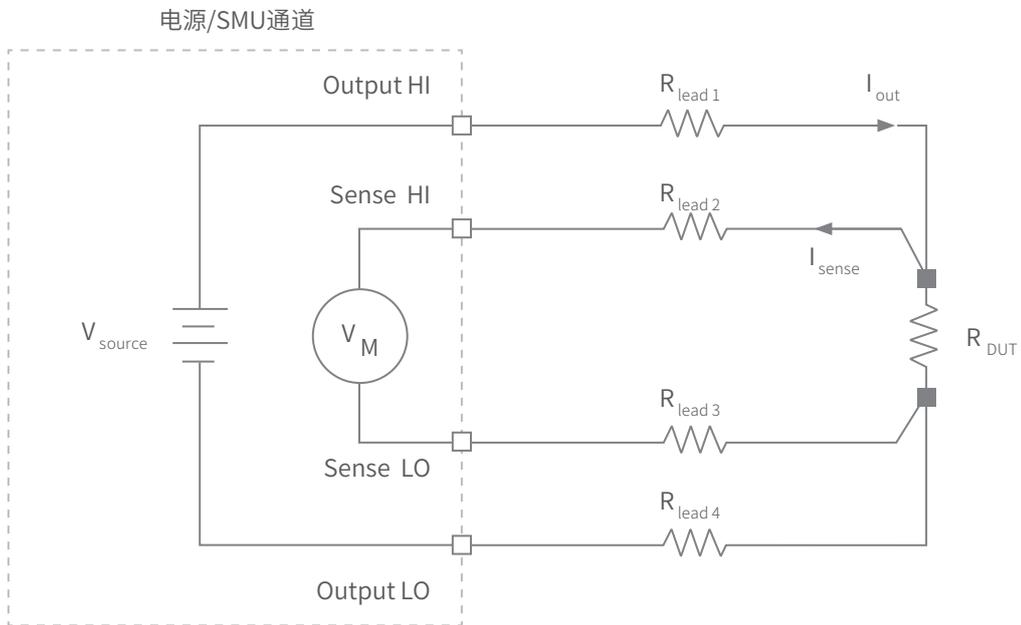


图12. 4线远程感测测量电路图

具有远程感测功能的设备在进行远程感测时对关于如何计算精度有额外的规定。为了更好地理解如何计算这种精度,我们以PXIe-4139 SMU为例。此示例使用SMU上的600 mV量程计算500 mV输出的远程感测精度。表1显示了其他电路属性。

HI路径导线压降	3 V
HI感测线电阻	2 Ω
LO路径导线压降	2.5 V
LO感测线电阻	1.5 Ω

表1.远程感测测量电路的属性

使用600 mV量程时,SMU的精度为0.016%+30μV。该仪器的远程感测电压精度等于:

"在电压精度规格的基础上,每伏HI导线压降增加(3 ppm的电压量程+11μV),而且对应每V导线压降每Ω感测导线电阻增加1μV"

这时可以使用以下公式计算感应精度：

精度 = (SMU精度, 量程=600 mV) + 导线压降引起的误差 + 每Ω导线电阻的压降引起的误差

$$\text{精度} = (500 \text{ mV} * 0.016\% + 30 \mu\text{V}) + \frac{600 \text{ mV} * 3 \text{ ppm} + 11 \mu\text{V}}{1 \text{ V导线压降}} * 3 \text{ V} + \frac{1 \mu\text{V}}{\text{V} * \Omega}$$

$$* 3 \text{ V} * 2 \Omega + \frac{1 \mu\text{V}}{\text{V} * \Omega} * 2.5 \text{ V} * 1.5 \Omega$$

$$\text{精度} = (80 \mu\text{V} + 30 \mu\text{V}) + 12.8 \mu\text{V} * 3 + 6 \mu\text{V} + 3.8 \mu\text{V}$$

$$\text{精度} = 158.2 \mu\text{V}$$

这意味着实际输出在500 mV±158.2μV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程感测电压精度规范。

使用远程感测时，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，如果DUT位于电路板上无法直接探测的区域。当发生这种情况时，在远程感测连接处提供的电压是准确的，但是在远程感测连接处和实际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测连接处和DUT之间的路径电阻。这样，即使感测线不能直接连接到DUT，仪器也能为DUT提供准确的电压。

远程感测特别适用于低电阻测量。电阻测量可以使用SMU和数字万用表 (DMM) 来实现，即根据输出的电流和测量的电压来计算电阻。如果要进行低于100kΩ的精密电阻测量时，需要使用4线远程感测配置而不是2线配置，以尽量减少导线电阻的影响。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。由于电阻测量值是使用电压测量值计算得到，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，从而生成更准确的测量结果。

表2显示了远程感测测量的优势。该数据是使用DMM经过一个开关测量电阻器得到的。开关的导线电阻使得测量值增加了0.522Ω，表示误差为5.24%。而远程感测方法可以消除导线电阻的误差并获得更准确的读数。

实际电阻	未使用远程感测法的测量值	使用远程感测法的测量值
9.958 Ω	10.48 Ω	9.958 Ω

表 2. 使用远程感测法补偿导线电阻

使用远程感测法时，请记住仪器的局限性。SMU和DMM的最大电压降是可以控制的。例如，PXIe-4139可以补偿每根导线最高3 V的电压降。这意味着设备可以补偿HI侧的3 V压降和LO侧的另一个3 V压降。达到该限制后，仪器将无法再完全补偿导线电阻。无法补偿的导线电阻会降低测量精度。

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。在热电动势中，由于不同金属制成的导线之间会形成热电偶，从而将误差电压引入电路。例如，如果采用开关与SMU的组合来进行测量，则由于信号路径中存在不同的触点，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。NI PXI-2530矩阵开关使用的是干簧继电器，热电动势<50μV。如果测量值在毫伏或更低范围内，则该开关的热电动势会导致明显的误差。

偏移补偿是一种可用于抵消热电动势影响的方法。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以进行两次测量。这些测量如图13所示。在第一个测量周期，SMU电流源接通，电压测量包括热电动势。在第二个测量周期中，SMU电流源关闭，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。这些测量如图13所示。在第一个测量周期，SMU电流源接通，电压测量包括热电动势。在第二个测量周期中，SMU电流源关闭，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。

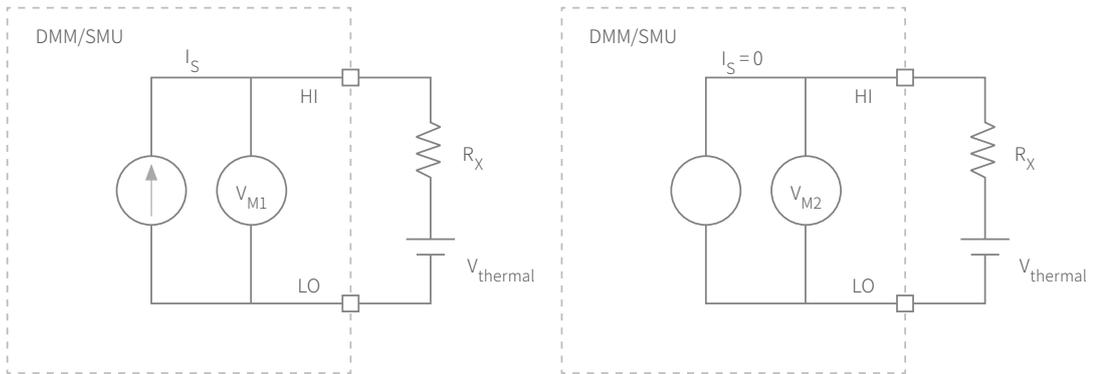


图13. 偏移补偿测量周期

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} 是电流源关闭时的电压测量值。 I_s 表示来自SMU电流源的电流， 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。

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。这些测量的数学公式表示如下。

$$V_{M1} = I_s R_x + V_{thermal}$$

$$V_{M2} = -I_s R_x + V_{thermal}$$

同样，由于两个测量都包括 $V_{thermal}$ ，因此可以通过这两个测量结果的组合来消除此偏移，如下所示。

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

电流反转方法的一个优点是它提供了比偏移补偿方法更高的精度测量。这是因为两个测量值取平均后得到了最终测量值。这种方法的缺点是需要一个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的做法。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得到广泛的应用，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）。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层。

“我们成功地将冗长的手动测试过程转换为高度自动化的测试过程，并将回归测试周期从数周缩短至数天，同时提高了可靠性、可重复性和可维护性。”

Sambit Panigrahi, 系统集成和工具负责人, Texas Instruments

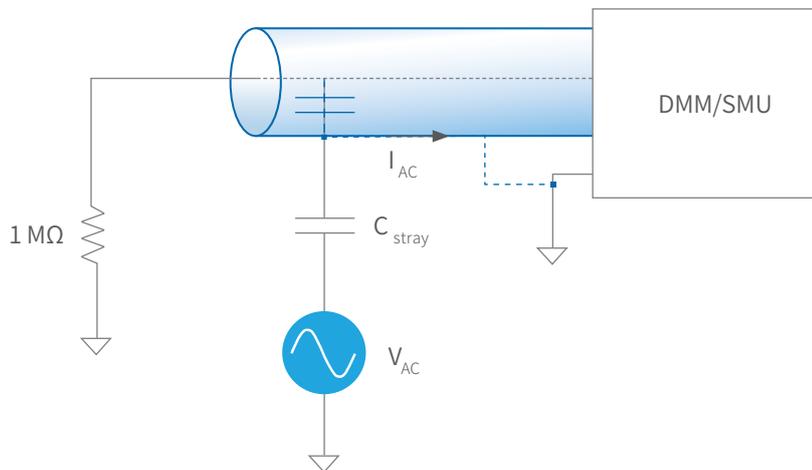


图14. 电路图说明屏蔽如何通过阻挡由导电材料制成的屏障来减少空间中的电磁场

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测电流。如果是高电阻测量，则感测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，在测量高阻DUT时，屏蔽非常重要。

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。如果仅在一个接地端连接屏蔽层，就可以消除这个潜在的问题。

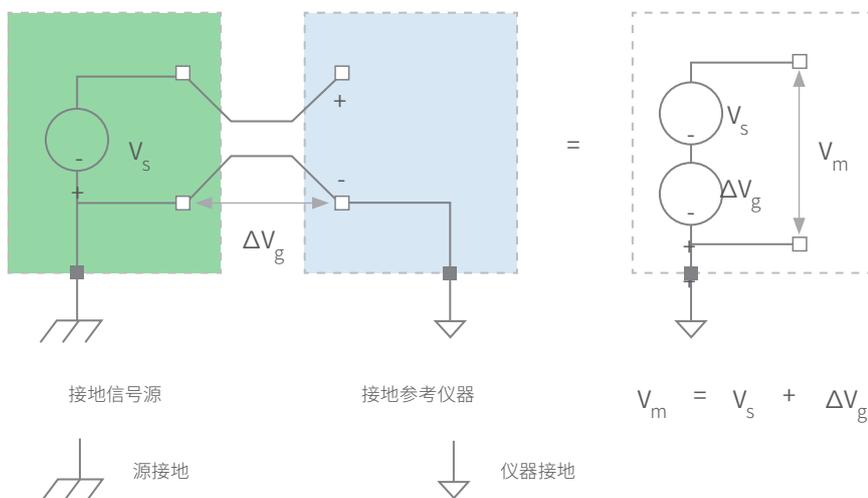


图15. 使用接地参考系统测量的接地信号源会引入接地回路和测量误差。

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。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

虽然屏蔽可以防止外部电磁干扰影响测量，但保护层 (guarding) 可以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，电缆绝缘层与负载并联，导致泄露电流在HI和LO端子之间流动。在图16中， I_L 表示HI和LO之间的泄露电流。这意味着SMU设备测量的电流是负载电流 I_{Load} 和泄露电流 I_L 之和。

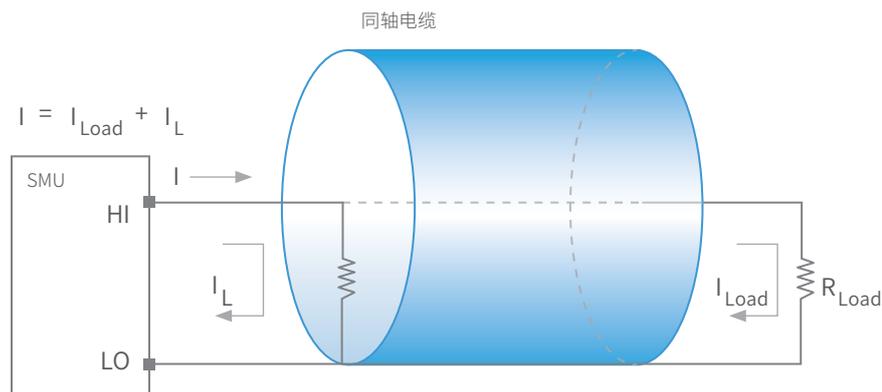


图16. 同轴电缆的泄露电流

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50 V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，但实际上电阻是有限的。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100GΩ。这时就可以计算通过绝缘层的泄露电流。

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

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

如果要进行这些低电平电流测量, 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。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。

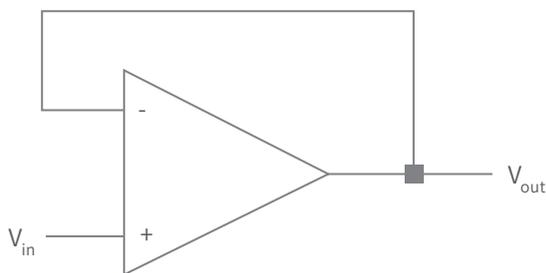


图17. 单位增益缓冲器

由于三轴电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0 V(见图18)。在电压电位没有差异的情况下, 泄漏电流不会在HI和保护装置之间流动。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露电流的影响, 并提供更准确的电流测量。

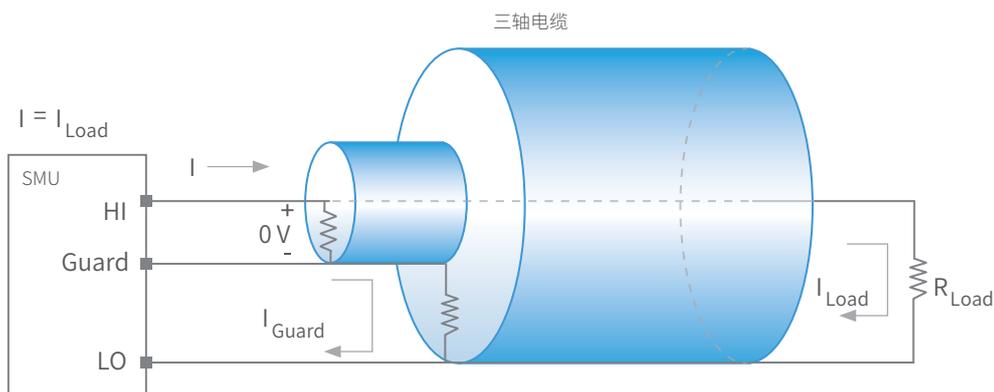


图18. 使用保护层的作用

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来稳定。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。这减少了信号的稳定时间。

需要使用保护层一种常见应用是输入泄漏测试。输入泄漏测试可以通过测量流入芯片上高阻抗输入引脚的电流来进行。理想的输入引脚具有无限阻抗，因而不会产生电流。然而，真实DUT的阻抗虽然很大，但是是有限的，因而会存在通常在微安或更低量级的弱电流。此测试通常使用SMU进行，因为SMU可以同时提供电压和测量电流。

由于是低电平电流测量，因此应使用SMU上的保护线来确保最准确的测量。将DUT连接到SMU后，应将SMU设置为源电压。此外还应设置电流限制以保护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的可接受限值进行比较，以查看DUT是否在规定范围内。请确保测量的不是SMU HI和LO端子之间的电流泄漏。如果在此应用中使用同轴电缆，测量值会包含来自电缆的漏电流，并且如果实际DUT漏电流在规格范围内时，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。

“将PXI平台广泛应用到我们的研发中心，并设立全球PXI冠军奖项以在全球范围内建立标准的验证流程，我们[提高了]测试覆盖率，进而优化了分析，提高了产品质量，这是传统机架式和台式仪器无法比拟的。”

Christian Paintz, 特性分析能力中心经理, Melexis GmbH

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，自我校准则用于校正温度引起的误差。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，自我校准则用于校正温度引起的误差。

外部校准的程序较为复杂，需要高精度的电压源。执行外部校准时，仪器的板载EEPROM校准常量会被调整和覆盖。设备驱动程序使用这些常量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电路板的所有通道。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显示了板卡的温度在24小时内的变化。图20显示了同一周期内偏移电压电平的变化情况。较高的温度导致轻微的正电压偏移，较低的温度导致负电压偏移。但是，如果在进行每次测量之前使用自校准，则可以消除由于温度引起的电压偏移，并且不会影响测量（参见图21）。

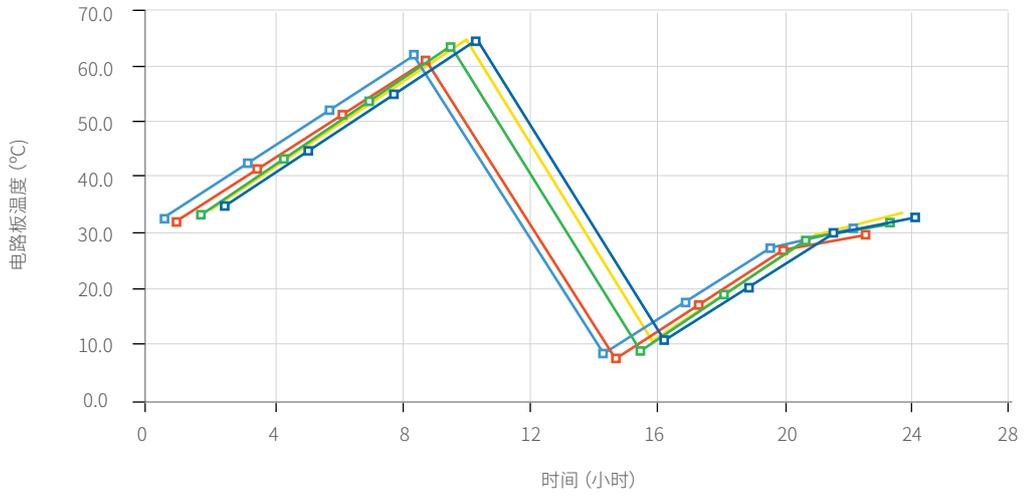


图19.测试板24小时内的温度变化情况

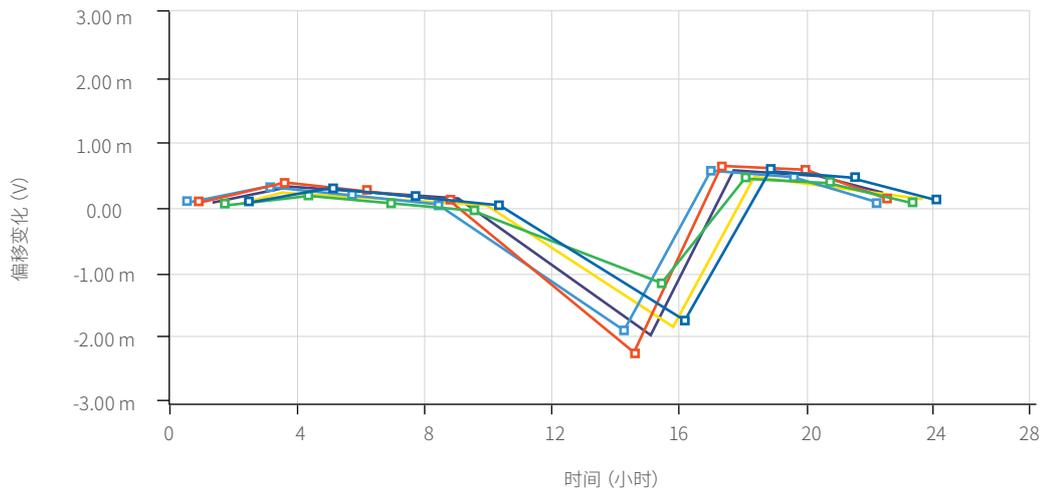


图20. 未进行自校准时的电压漂移

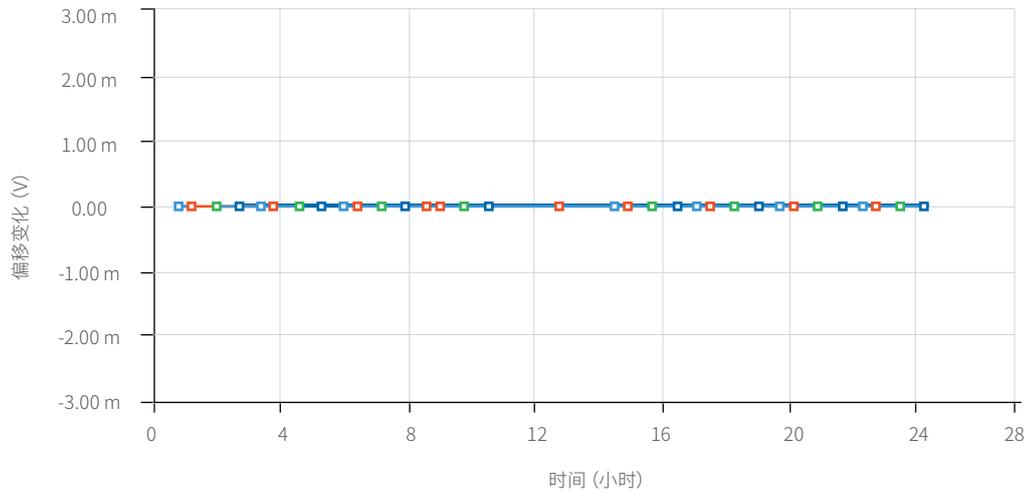


图21. 进行自校准后的电压漂移

请记住，自校准的精度仅与板载参考电压一样。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。

“我们的验证武器是一系列不断增加的高度自动化测试平台，我们将所有产品放到这些平台上进行最后的验证，确保没有任何缺陷后再交给客户。每个平台必须快速灵活且成本低廉，以便可以根据需要轻松扩展到整个公司，这就是为什么PXI是许多平台的核心原因。”

Marvin Landrum, 验证基础设施经理, Texas Instruments

结论

本指南中介绍的各种方法可帮助您为需要进行直流测量的应用提供更高的精度。将这些方法应用于您自己的测量系统时，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，如果在低电平电流测量时上升时间较慢，换成三轴电缆并添加保护可能会有所帮助。如果出现电源线噪声，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。请访问ni.com/smu。