应用指南

从 μΩ 到 PΩ 的广泛电阻测量解决方案



KEYSIGHT TECHNOLOGIES

引言

电阻测量是针对材料、电子器件和电路的基本测试之一。尽管世界上有多种多样的电阻测量方法，但我们更倾向于使用简单方便的数字万用表（DMM）。

初看起来，电阻测量非常简单和易于操作，似乎只要按照欧姆定律采集并测量电压或电流即可。然而事实上，各种误差源的存在会妨碍我们进行精确的电阻测量。与此同时，电阻范围的不相同也会导致测量结果存在差异。因此，要获得可靠的测量结果，根据被测器件（DUT）的具体特性选择合适的仪器至关重要。
是德科技公司拥有丰富的、从微欧到皮欧的电阻测量解决方案，其中总有一款会是满足您的电阻测量需求的不二之选。

图 1 显示了是德科技针对被测电阻提供的各种电阻测量解决方案。

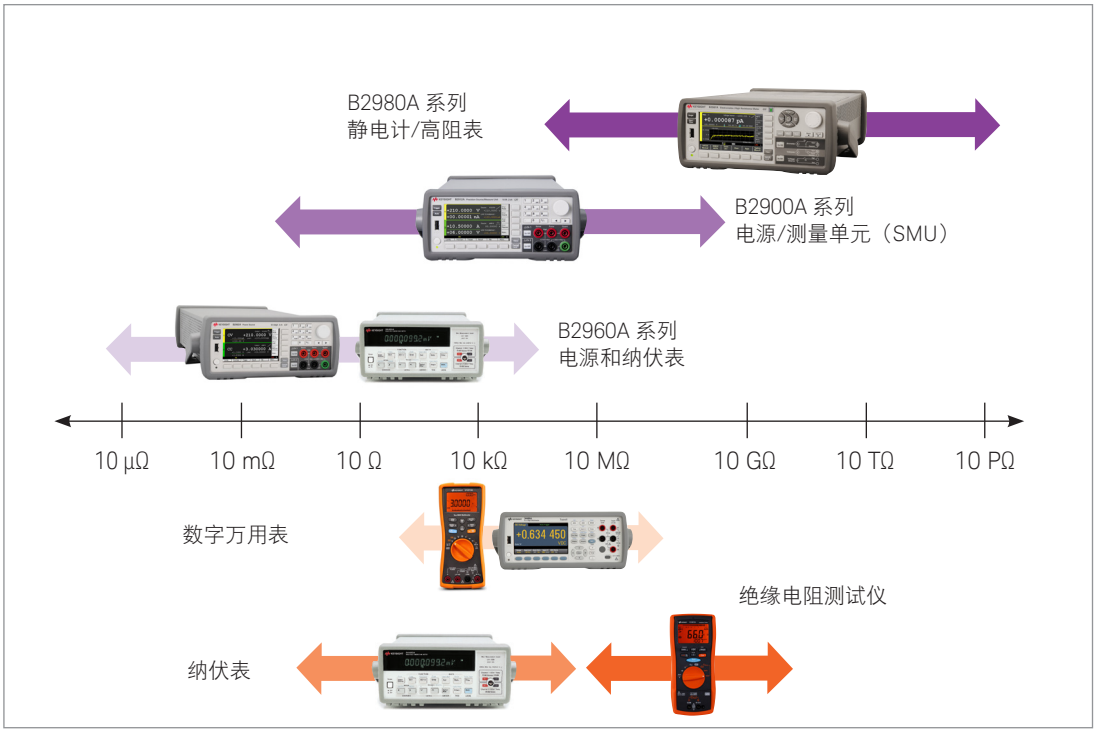


图 1 是德科技电阻测量解决方案

是德科技电阻测量解决方案

多功能电阻测量解决方案

方便易用的 DMM 是很常用的电阻测量工具。是德科技提供有各种 DMM，如手持式和台式仪表。这使您能够针对自己的测量要求和使用环境来选择最适合的型号。大多数 DMM 只支持自动电阻测量模式，每个量程上的测试电流基本上是固定的。手持式 DMM 通常仅支持 2 线连接，而大多数台式 DMM 可以支持 2 线和 4 线连接。点击下面的链接，了解更多详情：
www.keysight.com/find/dmm



图 2. 是德科技数字万用表

是德科技还提供 Keysight B2900A 精密电源/测量单元（SMU），带来一种通用的电阻测量解决方案，支持 10 fA 到 3 A（直流）/10.5 A（脉冲）的电流范围和 100 nV 到 210 V 电压范围。SMU 兼具电流源、电压源、电流计和电压计功能，这些功能可在单台仪器内轻松切换（参见图 3）。

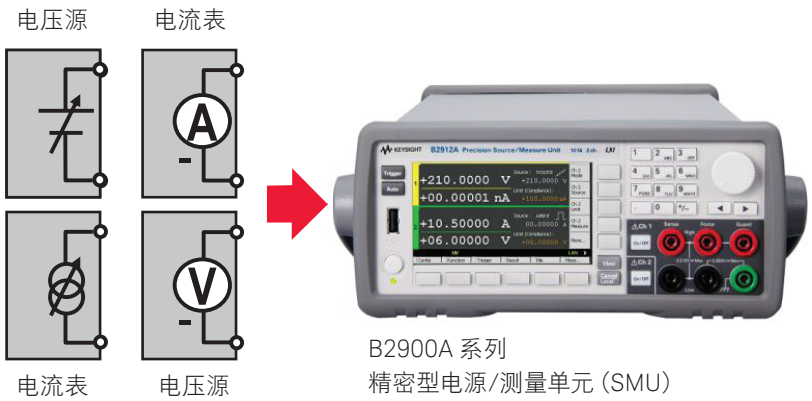


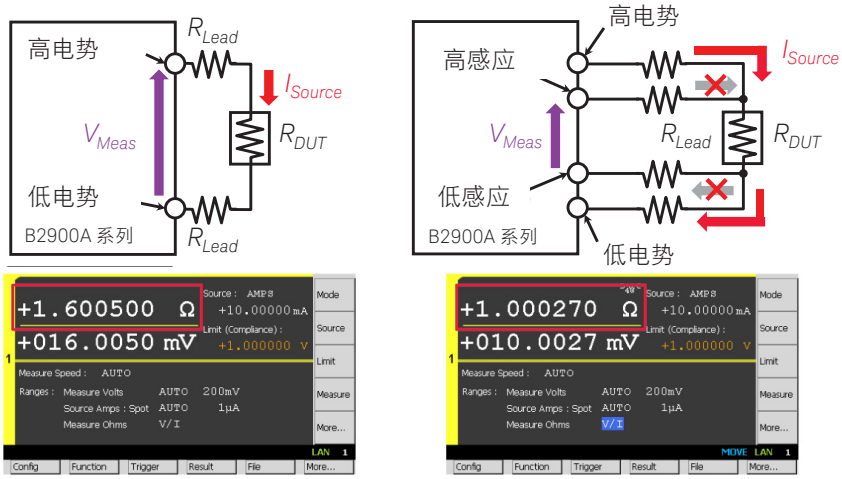
图 3. SMU 集四项测量功能于一身

这样，您无需任何额外设备即可评估电流-电压（IV）特性，包括器件的电阻。除了以更高的精度输出和测量电压或电流以外，SMU 还具有一致性测试功能，允许对电压或电流输出设置一个限值，防止损坏器件。如欲了解更多详情，请访问以下链接：
www.keysight.com/find/precisonSMU

下面列出了使用 SMU 进行电阻测量的优势：

- 提供电流和电压输出模式
- 一致性测试功能，允许设置电流或电压输出限值，以防止损坏器件
- 脉冲运行模式，防止器件因为自热效应导致测量结果失真（除直流运行模式以外）
- 手动测量模式，提供可选的电流或电压测试设置，可抑制因功耗而导致的自热效应（除自动测量模式以外）
- 4 线连接，可消除低电阻测量中的线缆电阻效应（2 线连接也具备此项功能）
- 电阻补偿功能，可最小化热电势 EMF 误差

图 4是使用 B2900A 系列 SMU 和一个 1 欧姆电阻器测量 4 线连接效应的示例。在低电阻测量中使用 4 线连接配置非常重要，因为残余引线电阻与被测器件（DUT）的电阻相当。B2900A 系列可以联合大多数台式 DMM 进行 4 线测量，其中一对引线提供电流源，另一对负责测量电压。这就消除了线缆的电阻效应，从而确保只会测到 DUT 两端的压降。4 线连接的测量结果是 1 欧姆，2 线连接的结果是 1.6 欧姆。这个 0.6 欧姆的差值就是被测线缆的残余引线电阻。B2900A 系列提供了丰富的、易于进行精确电阻测量的功能。



a) 使用 2 线连接时的结果　　b) 使用 4 线连接时的结果

图 4. 2 线连接的测量结果中包含残余引线电阻 R_{Lead}

低电阻测量解决方案

Keysight 34420A 7 ½ 数字纳伏表/微欧表是一款高灵敏度万用表，专为实现低电平测量进行了优化。它将低噪声电压测量与电阻和温度函数相结合，建立了低电平灵活度和高性能的新标准。它支持 1 欧姆到 1 兆欧的电阻测量范围。如欲了解更多详情，请访问：

www.keysight.com/find/34420A

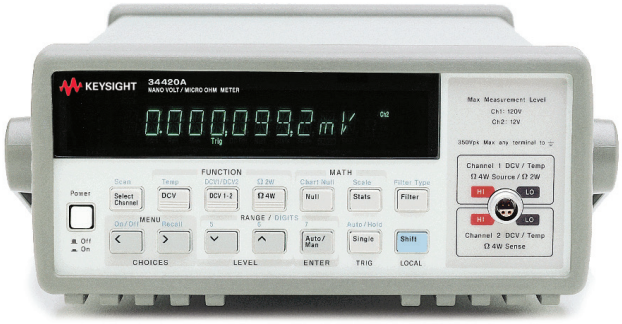


图 5. Keysight 34420A 7½ 位纳伏表/微欧表

某些类型的电阻测量需要非常精确的低电平电流源，以防止器件在测试时出现自热效应或被损坏。一般情况下，测量精度会随着被测电压或电流幅度的增加而提高。因此，对于低电阻值的器件来说，重要的是要保持测量电压尽量大。Keysight B2960A 系列 6.5 位低噪声电源配合 34420A 使用时可以满足这些测量要求。

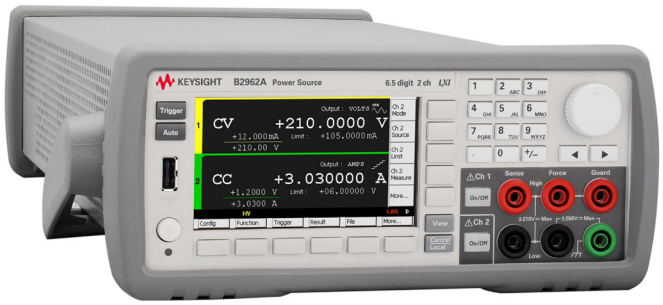


图 6. Keysight B2960A 系列 6.5 位低噪声电源

B2960A 系列是先进的双极电源，可以提供 6.5 位分辨率的电压或电流源，同时还能监控电压和电流，因此可以单独执行电阻测量。由于支持 4 象限运行，其输出极性既可以是正极，也可以是负极。因此，它可以提供 10 fA 到 3 A（直流）或 10.5 A（脉冲）的源电流，以及 100 nV 到 210 V 的源电压。如欲了解更多详情，请访问：

www.keysight.com/find/precisionSOURCE

B2961A 和 34420A 的组合带来卓越的低电阻测量性能。在图 7 所示的电阻测量方案中，由 34420A 执行电压测量，B2961A 负责提供精确的电流源。在该配置中，以 B2961A 为主按照预设的间隔执行测量，同时发送触发信号到 34420A，以进行电压测量。

34420A 也可以不借助其他仪器单独进行电阻测量。其最小电阻量程是 1 欧姆，最大输出电流是 10 mA。然而，B2960A 系列可以灵活地提供高达 3 A 的电流，使其测量分辨率比 34420A 单独使用时高出 300 倍，同时能保证足够的测量精度。然而，这也会增加功耗和自热效应。正如“功耗效应”章节的提醒，设定合适的测试电流是非常必要的。

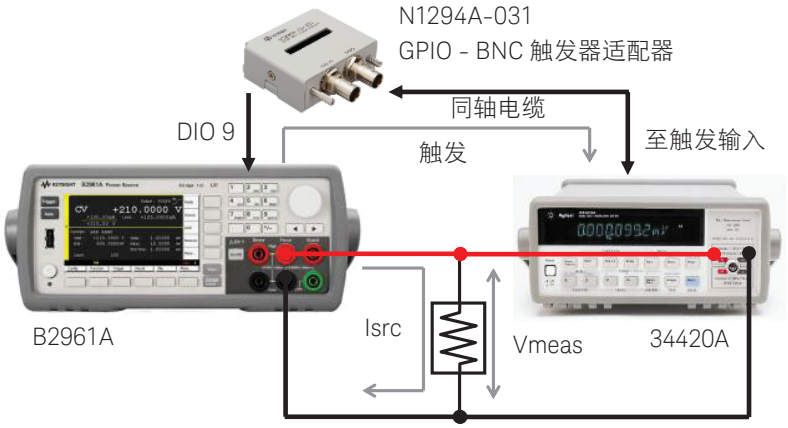


图 7. B2961A 和 34420A 低电阻测量解决方案示意图

图 8 显示了使用 10 mΩ 金属箔片电阻器的测量示例。B2961A 和 34420A 搭配，采用 500 mA 的测试电流实现了卓越的测量稳定性和精度；远远超过 34420A 单独使用时的性能表现。

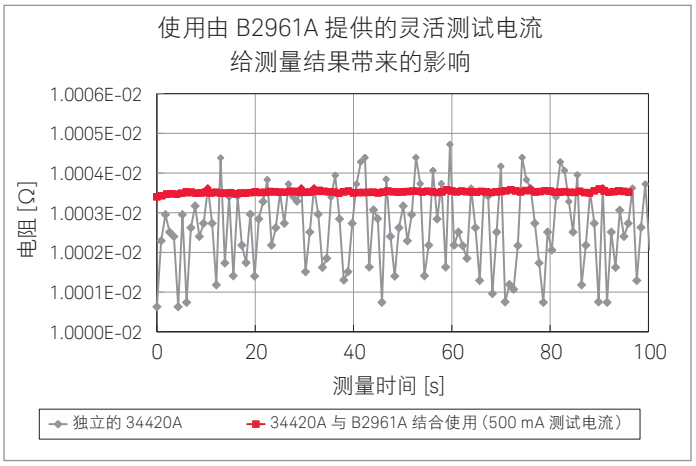


图 8. B2961A 通过使用灵活的测试电流实现了出色的测量效果

高电阻测量解决方案

在对旋转机器、线缆、开关、变压器和电力机械的预防性维护计划中，绝缘电阻测试通常是电气测试环节中的一部分，而在这些测试中，绝缘完整性是一项必然要求。预防性维护计划中的绝缘电阻测试有助于识别潜在的电气问题，从而减少不可预测的和过早的设备维修和更换成本。为此，Keysight U1450A/60A 系列绝缘电阻测试仪是一种非常理想的解决方案。凭借 U1450A/60A 系列丰富的测量功能、高效的自动报告生成能力以及高耐久性，您可以在大大提高日常工作效率。

如欲了解更多详情，请访问：

www.keysight.com/find/insulationtesters



图 9. Keysight U1450A/60A 系列绝缘电阻测试仪

Keysight B2980A 系列毫微微安计/皮安计和静电计/高阻表不但提供处于业界前沿的测量性能，还拥有难以比拟的诸多特性，从而保障最大化的测量置信度。毫微微安计/皮安计和静电计都支持 0.01 fA (10^{-17} A）的最小电流分辨率， 能够满足几乎所有现有和未来的低电平电流测量需求。静电计支持 1,000 V 的电压源功能，可以实现高达 10 PΩ (10^{16} Ω) 的电阻测量。静电计具有自动和手动电阻测量模式。利用手动电阻测量模式，您可以指定任意测试电压进行高电阻测量。如欲了解更多详情，请访问：

www.keysight.com/find/precisionMEASURE



图 10. Keysight B2980A 系列毫微微安计/皮安计和静电计/高阻表

已淘汰的 4339A/B 高阻表曾是多年来标准的电阻测量首选对象。B2980A 系列是与其最接近的替代产品。由于采用了与 4339A/B 不同的电流测量方法，B2980A 系列可提供比 4339A/B 更低的测量噪声和更高的测量速度，但其最大容性负载有一定限制。因此，在替换 4339A/B 时需要重点注意被测材料的容性负载。我们还提供了 N1413A 高阻表夹具适配器，以便为 B2980A 系列连接 4339A/B 的附件，如 16008B、16117B/C 和 16339A。我们也提供 B2980A 系列的附件（如 N1424A/B/C、N1425A/B、N1426A/B/C、N1427A/B 和 N1428A）。图 11 显示了包含 B2987A 和 N1424 的绝对材料电阻率测量解决方案的实例。



图 11. 进行电阻率测量的 B2987A 和 N1424 配置

电阻测量通常是在应用激励后，在某个特定时间进行。这是因为绝缘材料的电阻率通常不会快速收敛为某个稳定值。因此，所有的电阻规范都被强制要求必须对电阻测量的实施时间做出明确说明。B2980A 系列可以帮助您确定应用激励（通电）之后进行测量的具体时间。B2980A 系列的时域视图还可以显示从激励开始到启动测量之前的电阻变化，如图 12 所示。如欲了解更多详情，请访问：
www.keysight.com/find/SensitiveMeasurement

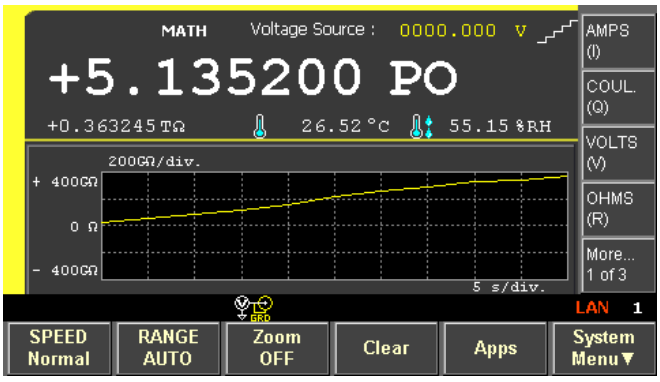


图 12. 使用 B2980A 系列进行电阻测量的示例

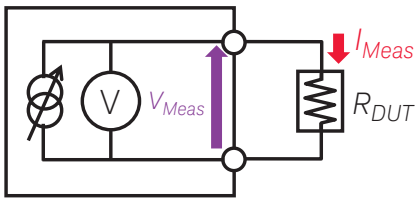
电阻测量中的主要误差因素

引线电阻

基本的 2 线连接是用于电阻测量的最常见配置。这种配置（如图 13a 所示）是使用同一对测试引线来提供电流源和测量电压。只要残余引线电阻与 DUT 的电阻相比可以忽略不计，就适合采用这种方法来测量电阻。

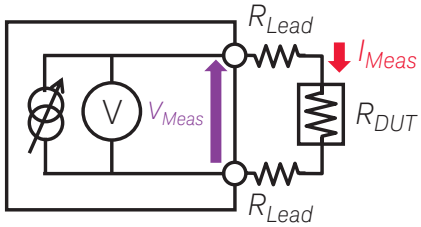
然而，在残余引线电阻与 DUT 的电阻相当，并且二者都非常低的电阻测量中，2 线测量法的测量结果就会不够准确（参见图 13b）。在这种情况下，可以采用 4 线连接配置（远程检测）来消除这种误差。4 线测量是用一对引线提供电流源，用另一对引线测量电压。这就可以消除线缆的电阻效应，从而确保只会测到 DUT 两端的压降（参见图 13c）。

手持式数字万用表通常仅支持 2 线连接，但大多数台式 DMM、34420A 和所有 SMU 都同时支持 2 线和 4 线连接。



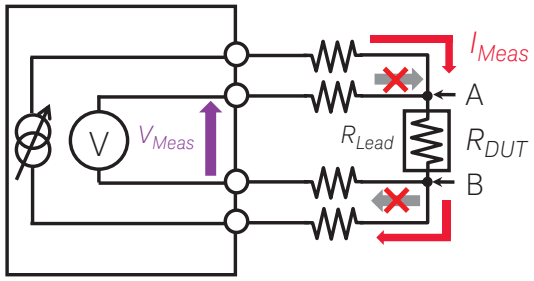
$$R_{Meas} = \frac{V_{Meas}}{I_{Meas}} = R_{DUT}$$

a) 2 线连接 ($R_{DUT} \gg R_{Lead}$)



$$R_{Meas} = \frac{V_{Meas}}{I_{Meas}} = R_{DUT} + 2 \times R_{Lead}$$

b) 2 线连接 ($R_{DUT} \approx R_{Lead}$)



$$R_{Meas} = \frac{V_{Meas}}{I_{Meas}} = R_{DUT}$$

c) 4 线连接

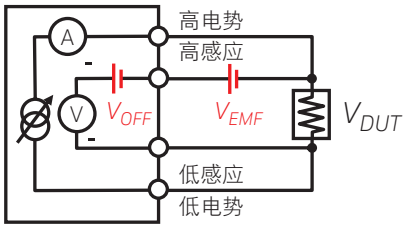
图 13. 使用 4 线连接，可以消除由残余引线电阻导致的测量误差。

热电势 (EMF)

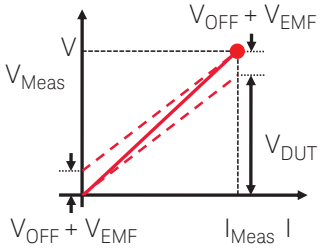
在测量小电阻时，受仪器固有的偏置电压（偏压）以及电阻自身产生的、或所用导线因金属材料的不同在不同温度下产生的 EMF 的影响，会导致测量不准确。DUT、中继（比如多路复用器）和测量仪器之间的联结点都需要被考虑到。每个金属材料之间的联结点都会形成一个热电偶，产生与结点温度成比例的电压。全铜接头可以让误差最小化。图 14a 示出了这些效应的等效电路模型。在测量低电阻时，由于 DUT 两端的压降很小，丝毫的偏移和 EMF 电压效应都变得不容忽视（参见图 14b）。偏压补偿可以进一步最小化热电势误差。图 13c 是一个偏压补偿测量的示意图。如果启用了偏压补偿功能，仪器会自动进行两点测量，并使用下面的等式计算电阻值。

$$R_{comp} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1}$$

其中，V_1 是当电流设为 I_1（0 安培或开路）时测得的电压。V_2 是当电流设为测试电流 I_2 时测得的电压。在 2 线和 4 线测量中，均可使用偏压补偿。偏压补偿可以提高测量精度，但也会降低测量速度。某些手持式 DMM、34420A、B2900A 系列和 B2980A 系列都提供了此项功能。

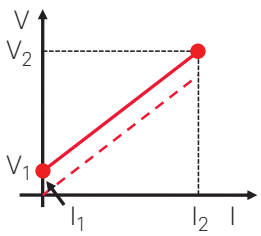


a) 热 EMF 导致的误差因素



$$R_{Meas} = \frac{V_{Meas}}{I_{Meas}} = \frac{V_{DUT}}{I_{Meas}} + \frac{V_{OFF} + V_{EMF}}{I_{Meas}} = R_{DUT} + R_{Error}$$

b) 没有偏置补偿的测量



$$R_{Meas} = \frac{V_2 - V_1}{I_2 - I_1} = R_{DUT}$$

c) 偏置补偿效应

图 14. 用于消除偏压和热电势效应的补偿

抑制热电势效应的另一种方法是建立“交变极性”（alternating polarity）测试电流，也称作“Delta 法”、“交错法”或“正向/反向法”。这在测量小电阻时非常重要，因为由偏压和电势产生的误差可能会显著影响测量精度（参见图 15a）。对于以提供电流源和测量电压的方式进行的电阻测量，下面的等式显示了这些误差对它们的影响：

$$R_{Meas} = \frac{V_{Meas}}{I_{Src}} = \frac{V_{DUT}}{I_{Src}} + \frac{V_{Error}}{I_{Src}} = R_{DUT} + R_{Error}$$

首先提供正向和反向电流（I_{Src} 和 $-I_{Src}$），然后再对测得的两个电压值求平均数。这样，上述误差可以被消除了（参见图 15b）。下面的等式显示了如何利用这两个测量结果来计算电阻的实际值：

$$R_{Meas} = \frac{V_1 - V_2}{2 \times I_{Src}} = R_{DUT}$$

这可以通过 B2960A 的列表扫描模式结合 34420A 来实现。具体示例可通过是德科技官网进行查看。如欲了解更多详情，请访问：
www.keysight.com/find/low_resistance

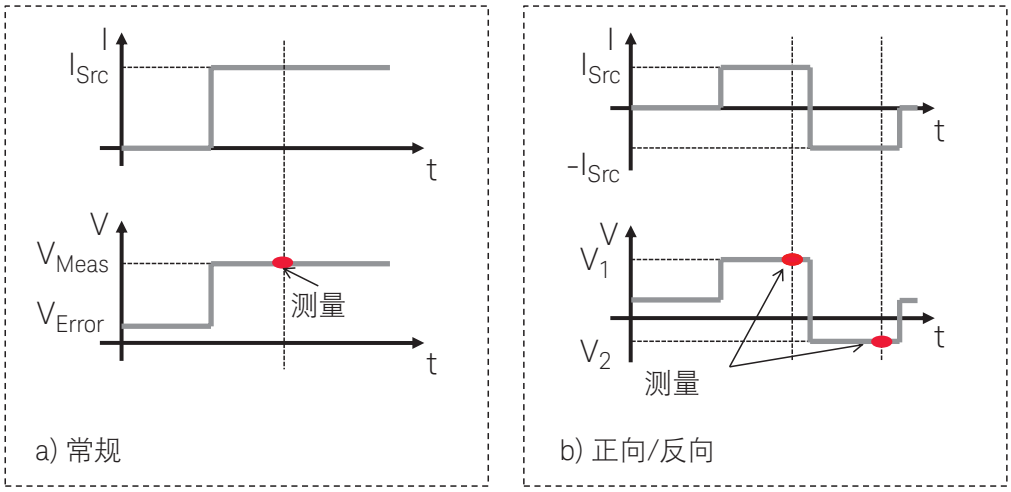


图 15. 用于消除电势引起的测量误差的方法

功耗效应

需要注意的是，在测量用于温度测量的电阻或测量其他会随温度变化的电阻器件时，仪器会在 DUT 中消耗部分功率。功耗效应可能影响测量精度。确定合适的测试电流非常重要，因为尽管较大的测试电流会提供较高的测量分辨率，但也会增加功耗和自热效应。

在使用数字万用表时，您可以选择具有较高量程的型号。他们会使用较低的电流源，可以减少自热效应。某些数字万用表，如 34420A，提供了较低的功率设置。使用低功率设置或较高的电阻范围时，要求数字万用表要有较高的分辨率。

在使用 B2900A 系列或 B2960A 系列时，您可以在手动测量模式下选择任意测试电流，这允许您进行灵活的测量，同时保持测量精度。

图 16 中的测量示例使用了电势极小的 10 mΩ 金属箔片电阻器。测量是采用不同的测试电流，配合使用 B2961A 和 34420A 来完成的。当测试电流为 10 mA 时，最小功耗是 1 mW，测试电流是 3 A 时，最大功耗是 90 mW。如图 16 所示，10 mA 的测试电流使测量结果表现出较大的波动，影响了精确表征；而其他电流值显示出了足够低的噪声电平，可以支持进行器件评估。然而，1 A 和 3 A 的测试电流所产生的器件自热效应，足以导致测量曲线随时间而变动。因此，500 mA 的测试电流看上去更适合该测量，并且会很好地平衡测量分辨率与功耗导致的热效应。

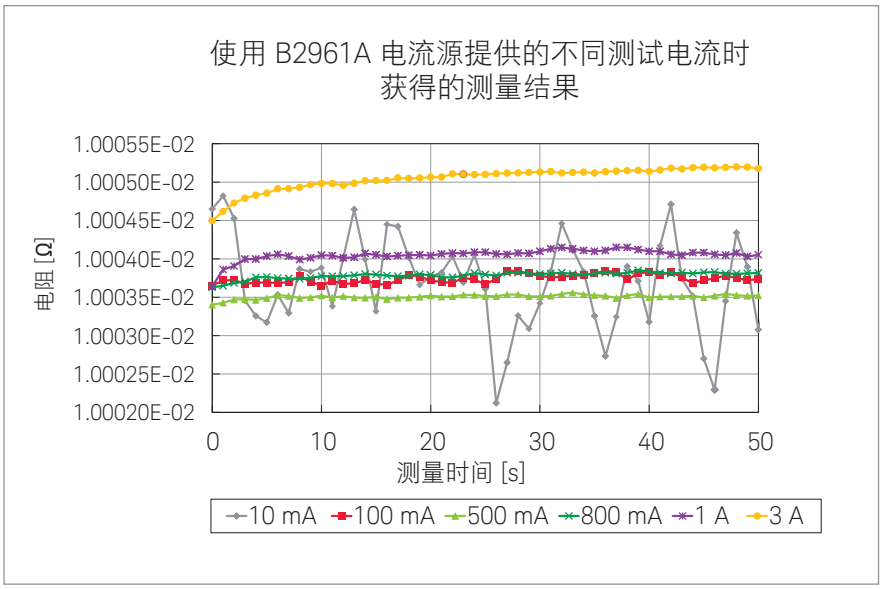


图 16. 使用 B2961A 作为电流源在不同测试电流下的测量结果

输出电压箝制

在电阻测量期间，对于某些类型的接触点，可能需要限制施加给它的电压。在确定测量电压和开路电压时，都应当把这个因素考虑在内。接触点表面如果发生氧化就可能会使电阻读数增大，这也增加了对限制电压的需求。如果电压太高，氧化层被刺破，又会导致电阻读数变低。

并非所有的 DMM 都提供内置的电压箝制电路；但是 34420A 的确提供了一定程度的开路箝制。10 到 100 欧姆量程的型号都支持限压测量。开路电压和测量电压设置了 20 mV、100 mV 或 500 mV 三个等级。

限制测量电压的能力已经是 B2900A 系列和 B2960A 系列当中的一项必备功能。您可以为测量电压设定任何限值，通过控制输出模式，这些 DMM 可在提供测试电流源的同时，把电压保持在限值以下。

建立时间效应

通常来说，测量路径中总会包含一些杂散阻抗，在应用电压时会导致电流泄露和介质吸收。如果您测量高于 100 kΩ 的电阻，这一点尤为重要，因为由于 RC 时间常数效应，建立过程可能会相当长。某些精密电阻和多功能校准器使用较大的并联电容（1000 pF 到 0.1 µF），它们具有很高的电阻值，可以过滤掉内部电路注入的噪声电流。由于介质吸收，线缆和其他器件中的非理想电容的建立时间，可能会比通过 RC 时间常数所预期的建立时间会更长。若要等待建立完成，需要在开始测量前等待一定的时间。测量之前需要的等待时间还会受到电压步进的影响。步进越大，需要等待的时间越长。

现代 DMM 能够插入自动测量建立时延。在线缆和器件的组合电容小于 200 pF 时，这些时延足以完成电阻测量。

除了具备自动测量时延时间函数以外，B2900A 系列、B2960A 系列和 B2980A 系列还允许手动设定测量时延时间，这有助于设定测量时延时间，从而优化测量时间和精度。

漏电流

测量路径中包含的某些杂散阻抗也会导致电流泄漏。线缆和测试夹具中的电流泄漏会导致致命的测测量误差，在测量电流较小（小于 1 毫微安）且测量较大的电阻（超过 1 GΩ）时尤为明显。在这种情况下，需要采用一种隔离技术来确保进行精确测量。

隔离措施是，主动在信号线外围包覆一层导体，使该导体的电压电位与信号的电压电位相同，从而有效地阻止电流泄漏。良好的隔离只能通过三轴连接器和布线手段得以实现。在三轴线缆中，信号线被隔离线（通过绝缘材料隔开）包覆，而隔离线又被接地屏蔽线（也通过绝缘材料隔开）包覆。下面图 17 示出了三同轴线缆的切面图。SMU 和静电计通常使用隔离和三轴引线进行高电阻测量。

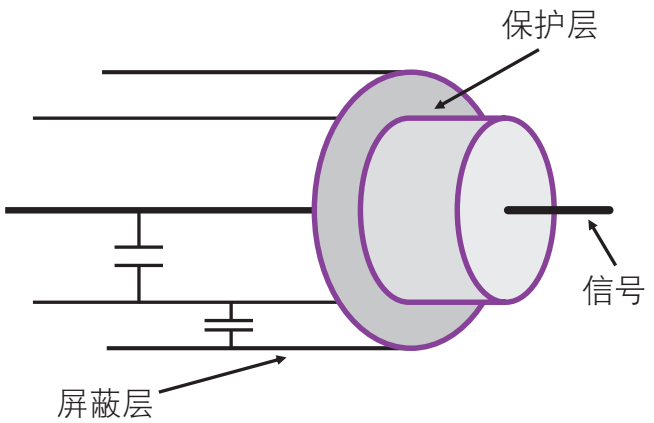


图 17. 这是三轴线缆的切面图，显示了屏蔽到隔离以及隔离到信号之间的寄生电容。

结论

电阻测量是针对材料、电子器件和电路的基本测试之一。是德科技拥有丰富的电阻测量解决方案，测量范围从微欧到皮欧无所不包；我们可以针对您不同的电阻测量需求，为您提供最佳选择。按照 DUT 的特性选择合适的仪器，对您获得可靠的测量结果至关重要。

比较表：是德科技全方位的电阻测量解决方案

多功能电阻测量解决方案

型号		自动模式				手动模式	最大读数速率	2 线和 4 线 Ω	自动偏置补偿	低功率设置
		位数	范围	最小分辨率	精度					
手持式数字万用表	U1231A U1232A U1233A	3 1/2	600 Ω - 60 MΩ	100 mΩ	0.9%+3[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
	U1241B U1242B	4	1 kΩ - 100 MΩ	100 mΩ	0.3%+3[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
	U1251B	4 1/2	500 Ω - 50 MΩ	10 mΩ	0.08%+5[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
	U1252B U1253B	4 1/2	500 Ω - 500 MΩ	10 mΩ	0.05%+5[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
	U1271A	4 1/2	300 Ω - 100 MΩ	1 mΩ	0.2%+5[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
	U1272A U1273A	4 1/2	30 Ω - 300 MΩ	1 mΩ	0.2%+5[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	■	不适用
	U1273AX	4 1/2	30 Ω - 300 MΩ	1 mΩ	0.2%+5[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
台式数字万用表	U3401A	4 1/2	500 Ω - 50 MΩ	10 mΩ	0.1%+3[2]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
	U3402A	5 1/2	120 Ω - 120 MΩ	1 mΩ	0.05%+5[2]	不适用	不适用	■	不适用	不适用
	U3606B	5 1/2	100 Ω - 100 MΩ	1 mΩ	0.05%+0.005	不适用	26	■	不适用	不适用
	34450A	5 1/2	100 Ω - 100 MΩ	1 mΩ	0.05%+0.005[3]	不适用	190	■	不适用	不适用
	34460A	6 1/2	100 Ω - 100 MΩ	100 µΩ	0.014%+0.001[3]	不适用	300	■	不适用	不适用
	34461A	6 1/2	100 Ω - 100 MΩ	100 µΩ	0.010%+0.001[3]	不适用	1000	■	不适用	不适用
	34465A	6 1/2	100 Ω - 1 GΩ	100 µΩ	0.0040% + 0.0005[3]	不适用	50000	■	不适用	■
	34470A	7 1/2	100 Ω - 1 GΩ	10 µΩ	0.0040% + 0.0005[3]	不适用	50000	■	不适用	■
SMU	B2901A B2902A	6 1/2	2 Ω - 200 MΩ	1 µΩ	0.06%+0.0175[3]	■	50000	■	■	无[4]
	B2911A B2912A						100000			

1. 精度定义为 ±（读数的 % + 最低有效位数）
2. 精度定义为 ±（读数的 % + 位数）
3. 精度定义为 ±（读数的 % + 范围的 %）
4. 手动模式允许您使用较小的测试电流

比较表：是德科技全方位的电阻测量解决方案（续）

低电阻测量解决方案

型号	自动模式				手动模式	最大读数速率	2 线和 4 线 Ω	自动偏置补偿	低功率设置
	位数	范围	最小分辨率	精度					
34420A	7 1/2	1 Ω - 1 MΩ	100 nΩ	0.0060%+0.0002[3]	不适用	250	■	■	■
34420A 及 B2961A	7 1/2	1 Ω - 1 MΩ[5]	100 nΩ[5]	0.0060%+0.0002[5]	■	不适用	■[5]	■[5]	■[5]

高电阻测量解决方案

型号		自动模式				手动模式	最大读数速率	2 线和 4 线 Ω	自动偏置补偿	低功率设置
		位数	范围	最小分辨率	精度					
绝缘电阻测试仪	U1451A	3 1/2	66 GΩ	1 kΩ	1.5%+5[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
	U1452A	3 1/2	260 GΩ	1 kΩ	1.5%+5[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
	U1452AT	3 1/2	66 GΩ	1 kΩ	1.5%+5[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
	U1453A	3 1/2	260 GΩ	1 kΩ	1.2%+5[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
	U1461A	3 1/2	260 GΩ	1 kΩ	1.2%+5[1]	不适用	不适用	仅 2 线 Ω	不适用	不适用
静电计	B2985A B2987A	6 1/2	1 MΩ - 1 PΩ	1 Ω	0.135%+0.0001[3]	■	20000	仅 2 线 Ω	■[6]	无[7]

1. 精度定义为 ±（读数的 % + 最低有效位数）
2. 精度定义为 ±（读数的 % + 位数）
3. 精度定义为 ±（读数的 % + 量程的 %）
4. 手动模式使您能够使用较小的测试电流
5. 单独使用 34420A 时的测量值
6. 以算术运算功能的方式提供偏置补偿功能
7. 手动模式使您能够使用较小的测试电流

如欲了解更多信息，请访问：www.keysight.com

如需了解关于是德科技产品、应用和服务的更多信息，请与是德科技联系。
如欲获得完整的产品列表，请访问：www.keysight.com/find/contactus

KEYSIGHT TECHNOLOGIES

本文中的信息可不经通知而更改。© Keysight Technologies, 2015 - 2018, Published in USA, November 29, 2018, 5992-1212CHCN