

如何实现精确的低电压和低电阻测量

前言.....	2	热电EMF和失调补偿方法.....	9	选用指南.....	18
低电压测量.....	2	非欧姆接触.....	12	名词解释.....	19
失调电压.....	2	器件的发热.....	12	联系方式.....	22
噪声.....	6	干电路测试.....	12		
共模电流和扭转误差.....	8	电感性器件的测试.....	13		
低电阻测量.....	9	低电压: 基于霍尔效应的测量.....	14		
引线电阻和四线法.....	9	低电阻: 超导电阻测量.....	17		

低电压测量

前言

低电压和低电阻测量常常是针对具有低的源阻抗的器件和材料进行的。本e手册讨论了低压测量中存在的若干潜在的误差源, 如何尽可能降低其对测量精度的影响, 并探讨了低电阻测量的潜在误差源, 包括引线电阻、热电EMF、非欧姆接触、器件发热、干电路测试和电感器件测量。

在测量较高电压的时候通常被忽略的偏置电压和噪声源, 却会在低电压测量中造成显著的误差。这些因素会对低压测量精度产生显著的影响。

失调电压

理想情况下, 当电压计与一个阻抗较低的、内部无电压源的电路相连接时, 它的读数应当为零。不过, 电路中的许多误差源却可以被视为一个非零的电压偏移。这些电源包括热电EMF、RFI (射频干扰) 整流产生的失调电压以及电压计输入电路的失调等。

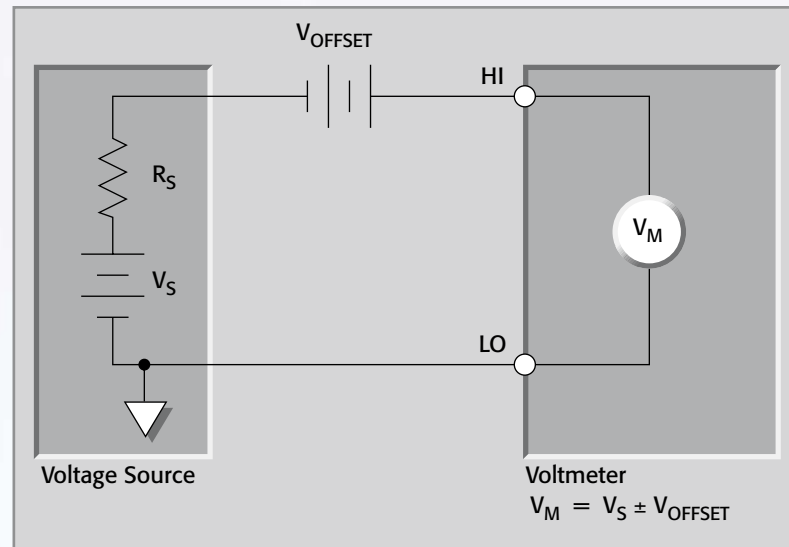


图1 失调电压对电压测量精度的影响

正如图1所示的那样, 任何失调电压 (V_{OFFSET}) 都将添加至源电压 (V_S) 上或者削弱源电压, 因此, 仪表测量到的电压变为:

$$V_M = V_S \pm V_{OFFSET}$$

两种电压的相对极性将决定失调电压是添加到源电压上, 还是削弱源电压。稳定的偏移 (失调) 一般可以通过将测试引线的端子端接到一起并让仪器归零[相关 (relative)]的方法来消除。不过, 请注意, 失调偏移的对消可能需要频繁地进行再归零, 特别是热电EMF的情形。

热电EMF

热电电压 (热电EMFs) 是低电压测量中最常见的误差源。当电路的不同部分处于不同温度下时以及当由不同材料构成的导体连接到一起是, 就会产生这些电压, 如图2所示。表1总结了各种不同材料相对于铜的Seebeck系数 (Q_{AB})。

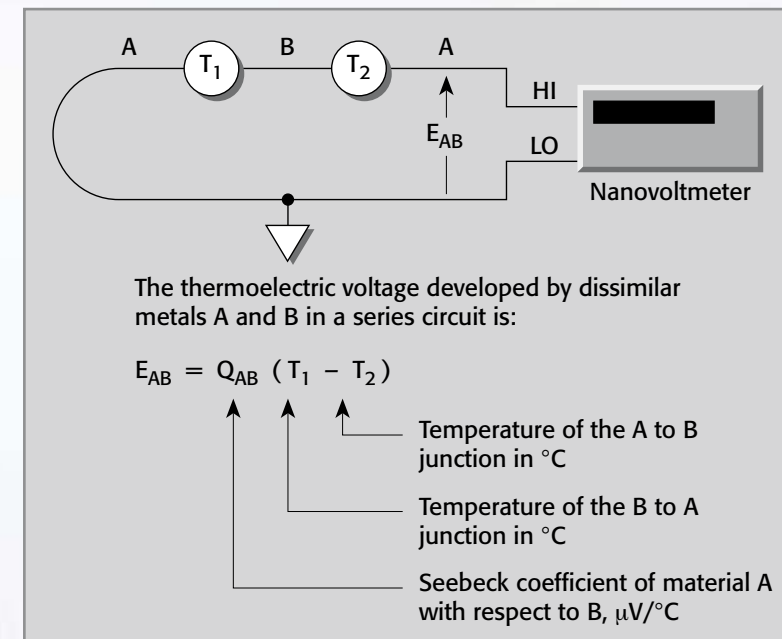


图2 热电EMF

特色资源

- 如何排查低压测量问题



- 精确的低阻测量肇始于对误差源的识别

更多资源

- 理解低压测量技术
- 问题: 低电阻测量中的误差源

咨询工程师

低电压测量

表1: Seebeck系数

材料对*	Seebeck系数 Q_{AB}
Cu - Cu	$\leq 0.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Ag	$0.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Au	$0.3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Pb/Sn	$1-3 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Si	$400 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - Kovar	$\sim 40-75 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Cu - CuO	$\sim 1000 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

*Ag = 银色 Au = 金 Cu = 铜 CuO = 氧化铜

Pb = 铅 Si = 硅 Sn = 锡

所有的导体都用相同材料来构建,可以最大限度减小热电EMF的产生。例如,卷边的压接铜接头或者接线片与铜线的套接形成的是铜-铜结,只产生极少的热电EMF。此外,连接头应该保持清洁,无氧化物。卷边压接的铜-铜连接,也称为“冷焊式的”,不会容许氧气透过,其Seebeck系数为 $\leq 0.2 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$,而Cu-CuO的连接系数可能高达 $1\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。

最大限度降低电路中的温度梯度,也可以减小热电EMF。降低温度梯度的一种方法是让构成金属结的材料对尽可能相互靠近,并让其与一个公共的、大尺寸的热沉保持良好的热耦合。必须采用具有高热导率的电绝缘体,不过,既然大多数电绝缘体导热性都比较差,故应当使用硬质阳极氧化铝、氧化铍、采用特殊充填料的环氧树脂、蓝宝石或者金刚石等特殊绝缘体,将金属结耦合到热沉上。

让测量设备充分暖机后,使之达到与恒温环境温度的热平衡,也可以减少热电EMF效应。仪器的归零功能可以补偿余下的任何热电EMF,只要它是较为恒定的。为了保持环境温度的恒定,应该防止设备受到太阳光的直射,避开排气扇和类似的热气流或者移动的空气。将连接点包裹在绝缘的泡沫中(例如聚亚安酯)也可以最大限度降低空气运动所造成的环境温度波动。

如何在电连接中避免热电EMF的影响

在一个简单的低压电路中,如图3所示的那样,连接点往往涉及处于不同温度下的不同的材料。这就产生了大量的热电EMF源,所有都与电压源和测量仪相连接。仪表的读数是所有这些干扰源的代数和。因此,重要的是,信号源和测量仪器之间的连接并不会干扰读数。

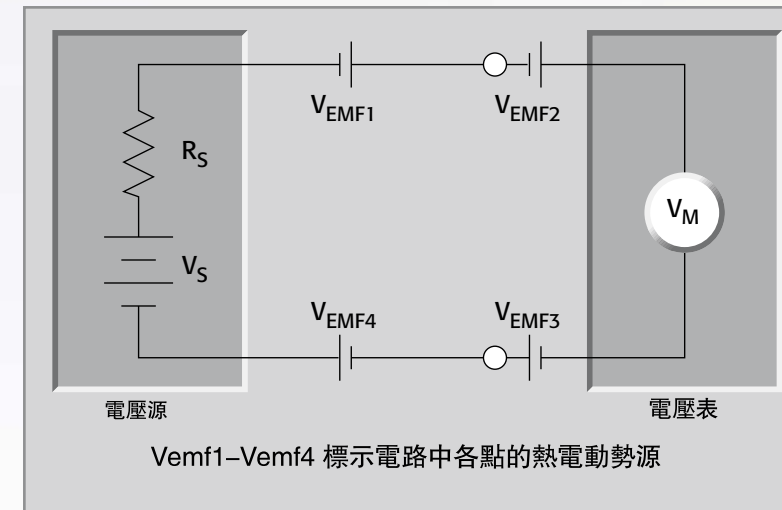


图3 电压源到电压表的连接

如果所有的连接都可以用单种金属来构成,则添加到测量结果上的那部分热电EMF将可以被忽略。不过,这并非始终能做到。测试夹具常常可以采用弹簧型触点,这些触点可以由磷青铜、铍铜或者其他具有较高Seebeck系数的材料。在这些情况中,较小的温度差所产生的热电电压,就足以影响到测量的精度。

如果无法避免采用不同的金属进行连接,应当通过采用热沉或者对电路进行屏蔽、使之免受热源影响等方法来努力减小整个测试电路上的温度梯度。

咨询工程师

低电压测量

对处于低温下的信号源进行测量,会带来特殊的问题,这是因为置于低温容器内的样品与电压计之间的连接常常是由热导率低于铜的金属(如钢)构成的,故电路中势必存在不同的金属。此外,由于信号源的温度接近于0 k,而测量仪表处于300K下,故温度梯度很大。让低温容器和电压表之间的连线组分保持已知,并让所有不同金属构成的连接对保持在同一温度下,就可以以很高的精度实现极低的电压测量。

通过信号源的对调来消除热电EMF

在测量很低的电压时,如两个标准电池或者两个背对背连接的热电偶之间的电压差时,由杂散的热电EMF所造成的误差可以通过如下方式来进行对消:完成一次测量,然后仔细地让两个信号源对调,并再次进行测量。这两次读数间的差异的平均值就是待求的电压差。

在图4中,电压源 V_a 和 V_b 代表了两个标准的原电池(或者两个热电偶)。图4a中测量到的电压是:

$$V_1 = V_{emf} + V_a - V_b$$

图4b中两个电池进行了对调,测量到的电压是:

$$V_2 = V_{emf} + V_b - V_a$$

这两次测量结果的差异的平均值为:

$$(V_1 - V_2)/2 = (V_{emf} + V_a - V_b - V_{emf} - V_b + V_a)/2 \text{ 或 } V_A - V_B$$

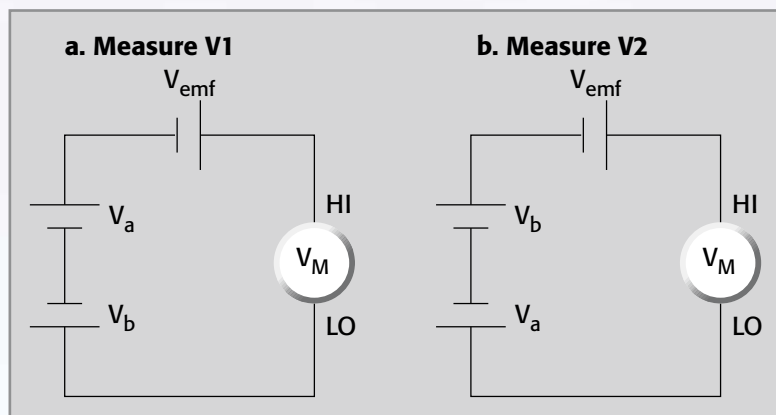


图4 通过对调信号源来对消热电EMF

请注意,这种测量方法可以有效地消除热电EMF项(V_{emf}),该项代表了电路中除了 V_a 和 V_b 之间的连接点之外所有的热电EMF效应的代数和。如果测量到的电压是电流从一个未知的电阻流过的电流造成的,则无论是电流逆反法或是失调补偿欧姆法,都可以用来消除热电EMF。

RFI/EMI

RFI(射频干扰)和EMI(电磁干扰)是用来描述覆盖了很宽频谱范围的电磁干扰的总称。RFI或EMI可以由TV或者音频广播信号所引起,或者,也可能由脉冲源所造成,如高压电弧的情形。无论何种情况,如果有害的信号足够强的话,则其对测量的影响也是可观的。

RFI/EMI干扰的影响可能表现为稳定的读数偏移,也可能造成高噪声的或者紊乱的读数。读数的偏移可能会由于输入放大器的过载或者输入端的DC整流所引起。

在进行敏感的测量时,如果采取若干预防手段,就可以最大限度减小RFI和EMI。最明显的防范措施是让所有的仪器、电缆和DUT尽可能远离干扰源。对测试引线和DUT进行屏蔽(图5)也常常可以将干扰的影响降低到可接受的水平。噪声屏蔽措施应该连接到输入LO端。在极端情况下,可能需要一个特殊构建的屏蔽室来对这一令人厌烦的信号进行足够的衰减。

如果无法防止输入端引入RF干扰,则需要从外部对器件输入通道进行滤波,正如图6所示的那样。在很多情况下,简单的单极点滤波器就够用了:在更难处理的情况中,往往需要多极点缺口或者带阻滤波器。特别的,可以并联多个具有不同量值的电容器,以提供在很宽频率范围上的低阻抗特性。不过,请注意,这样的滤波方法也可能会具有其他有害的效应,如测量响应时间的延长。

更多信息

咨询工程师

低电压量测

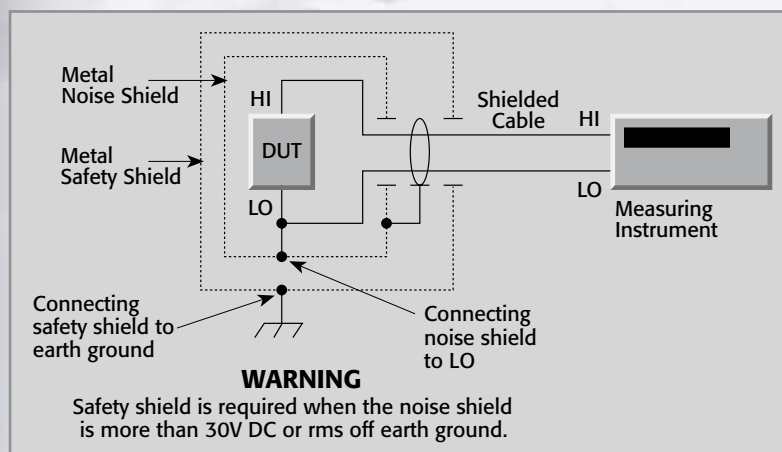


图5 利用屏蔽来衰减RFI/EMI干扰

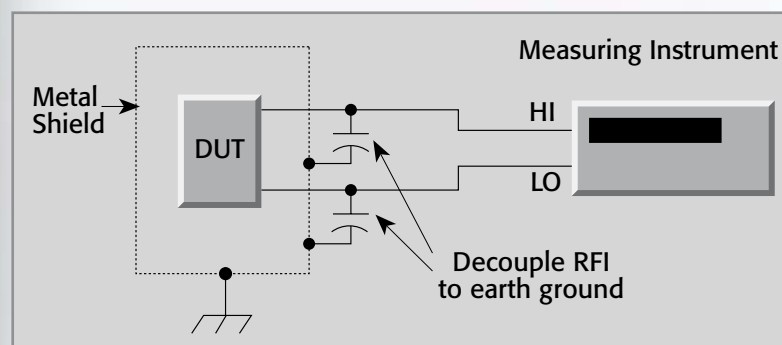


图6 对连接进行屏蔽,以降低感应的RFI/EMI

内部失调

纳伏计的输入端无输入电压时也很少能指示零电压,这是因为该仪表的输入端不可避免地存在电压失调。在输入端短接到一起的情况下,就对输出端进行归零操作,无论是通过前面板的归零控制器还是通过计算机的控制。如果短路电路的热电EMF很小,则这一方法可以用于确认输入噪声和零位漂移随时间的变化。干净、高纯的铜线往往是适用的连接线。然而,以这种方式建立的零位只适用于校验应用,在仪器的最终使用中并无价值。

如果仪器被用来测量流过电阻的电流所引起的微弱电压降,则如下的过程将建立一个恰当的零点。首先,仪器应当按规定的时间进行暖机,往往长达1~2小时。在这段时间内,在待测器件和仪器间应该建立电连接。不应当让电流流过待测器件,以便让温度梯度稳定到最小的、稳定的水平上。接下来,应该进行零位的调整。在某些仪器中,这是通过按下REL(代表相关)或者ZERO按钮来实现的。现在,仪器的读数应当为零。在施加测试电流时,仪器应当指示相应的电压降。在某些应用中,待测的电压始终存在,而采取前述的操作流程无法实施。例如,两个标准电池之间的电压差的观察,最好是通过将仪器与电池的连接对调、并对两次读数进行平均的方式来实现。同一方法可以用于对差分热电偶的输出进行测量时失调的互消操作。这就是热电EMF的对消时所采用的同一种方法。

零点漂移

零位漂移是指无输入信号(输入端短路)的情况下仪器读数在一定时期中的变化。一台仪器的零位漂移几乎完全由输入级决定。大多数纳伏计对输入信号进行了某种形式的斩波或者调制,以最大限度降低漂移。

零点时的读数还会随着环境温度变化而变化。这一效应往往被称为电压偏移的温度系数。此外,一台仪器可能会展现出某种瞬态温度效应。在环境温度发生阶跃变化时,电压偏移也会发生较大的变化,很可能超出所公布的技术指标。

随后偏移(失调)值将逐渐下降,并最终稳定到一个接近初始值的量值上。造成这一现象的原因是仪器中不同金属构成的结具有不同的热时间常数。虽然一个结的温度可以快速调节到新的环境温度,但另一个结的温度变化却可能慢得多,于是电压的偏移就会出现暂时的变化。为了最大限度减少金属结所处的环境的温度变化造成的电压偏移,可以在一个温度受控的环境中进行测量,并/或通过对电路进行热屏蔽的办法来减缓温度的变化。

更多信息

咨询工程师

低电压量测

噪声

噪声源可能会产生显著的误差，这些噪声源包括 Johnson 噪声、磁场和地线环。对这些噪声源以及降噪对策的理解，对于完成有意义的低压测量来说极为关键。

Johnson 噪声

电测量的分辨率的最终极限是由 Johnson 噪声或者热噪声来定义的。产生该噪声的原因在于：电子的温度势必高于绝对零度因而具有热能，而这种热运动势必将产生相应的电压。所有的电压源都有内阻，因此所有的电压源都会产生 Johnson 噪声。金属电阻的噪声电压可以由下式计算：

$$V = \sqrt{4kTBR}$$

其中：V = 源电阻上产生的rms噪声电压

K = 波兹曼常数, 1.38×10^{-23} 焦耳/ K

T = 讯号源的绝对温度(k)

B = 噪声频带宽(赫兹)

R = 讯号源阻抗值(欧姆)

例如，在室温 (290K) 下，10kΩ 的源电阻和 5kHz 的测量带宽将产生接近 1μV rms 的噪声。

可以通过降低源电阻的温度并缩小测量的带宽来降低 Johnson 噪声。将样品的温度从室温 (290K) 降低到液氮温度 (77K) 就可以将其

电压噪声降低 2 倍。

如果电压计具有可调节的滤波和积分功能，则可以通过增大滤波效应和/或者在多个电力线周期中对其进行积分的方法来减小其带宽。降低测量带宽等价于延长了仪器的响应时间，于是测量的时间要大大延长。不过，如果测量响应时间很长，电路中的温度梯度所产生的热电 EMF 的影响就更为重要。如果测量电路的热时间常数与响应时间处于同一量级，则无法实现灵敏的测量。如果出现这种情况，就无法将信号电压的变化与热电 EMF 的变化区分开来。

磁场

在两种情况下磁场会产生误差电压：1) 如果磁场随时间变化，2) 如果电路和磁场间有相对运动。导体中的电压可以由磁场中的运动导体而产生，由测试系统中的元件导致的局部 AC 电流所引起，或者由磁场有意的连续增强所产生，例如磁阻测量。即使相对微弱的地球磁场也会在摇摆的导线中产生纳伏级的电压，因此应当尽可能缩短导线并将其紧密地捆绑固定住。基本的物理原理表明，磁场在电路中感应出的电压的大小，与电路引线闭环的面积以及磁通密度的变化速率成正比，正如图 7 所示的那样。所感应的电压既与 A 和 B 的幅值成正比，也与 A 和 B 的变化速率成正比，因此，降低感应电压的方法有两种：

- 尽可能减少电路环路面积，同时，如果有可能，避免磁场的存在，以便尽可能降低 A 和 B 的量值。
- 尽可能减少振动和运动，让电路远离 AC 和 RF 场，从而尽可能保持 A 和 B 量值的恒定。

为了减小磁场感应的电压，则走线时必须让引线尽可能接近，而且对其进行磁屏蔽，应该将其捆绑固定住，最大限度降低其运动。Mu 金属是一种在低磁通密度和低频下具有高磁导率的特殊合金，是常用的一种磁屏蔽材料。

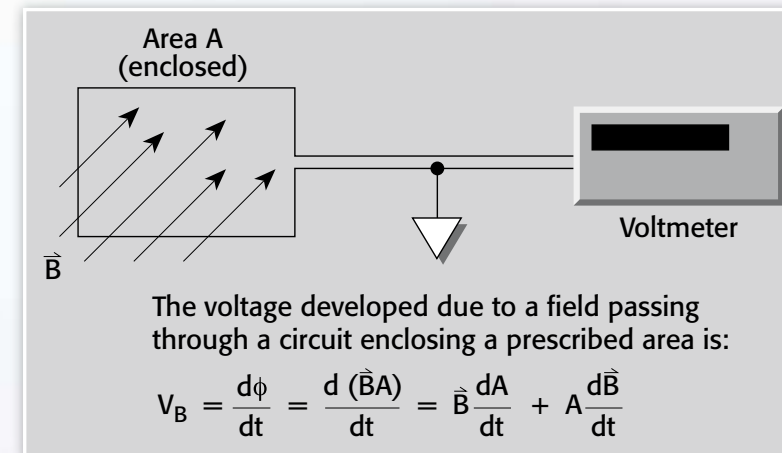


图7 磁场产生的低电压

更多信息

咨询工程师

低电压量测

图8示出了在源和电压计间排布引线位置两种方式。在图8a中，引线形成的闭环面积很大；于是就可能出现很高的电压。在图8b中，由于引线相互绞合在一起，其闭合面积大大缩小，于是所感应的电压大大降低。双绞线对也可以将磁场感应出的电压对消掉，因为每一个相邻的双绞线对之间耦合的电压量值小但极性交变(相等)。应当对承载大电流的导体进行屏蔽，或者将其组合成双绞线对，以避免所产生的磁场足以影响到附近的电路。除了这些技术外，还可以在仪器输入端对源于磁场的AC信号进行滤波。如果有可能，应当重新安排信号源和仪器的物理位置，使之更加远离干扰的磁场。

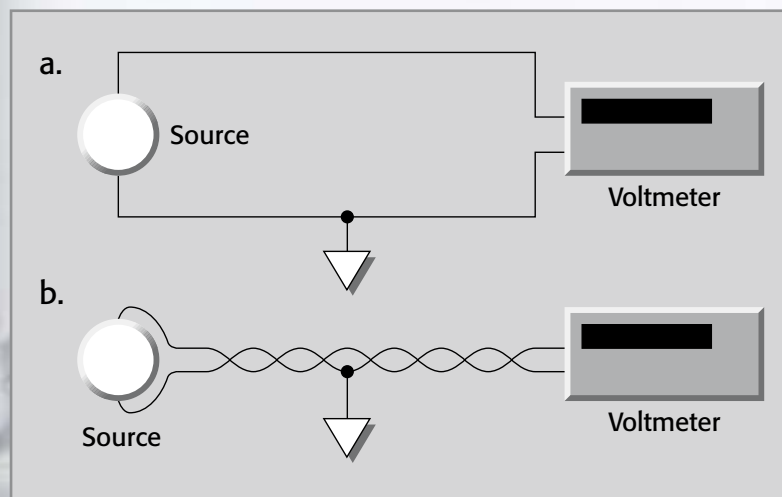


图8 如何最大限度减少磁场引起的干扰

地线环

噪声和误差电压也可能有地线环所产生。当同时存在两条与地线的连接线时，如信号源和测量仪器都连接到公共的地总线上时，就可能存在如图9a所示的环路。信号源和仪器地线之间存在的电压(V_G)将导致环路上出现一股环行电流(I)。该电流将造成一个与源电压串联的有害电压。根据欧姆定律： $V_G = IR$

式中 V_G = 地线环路干扰电压, R = 地线环路电流流经的信号通路中的电阻, I = 地线环电流。一个地线环的典型实例是多台仪器插入不同仪器架的电源条的情形。各接地点的电位之间常常存在少量的差异。该电位差会造成大的环行电流，并带来不希望出现的电压降。

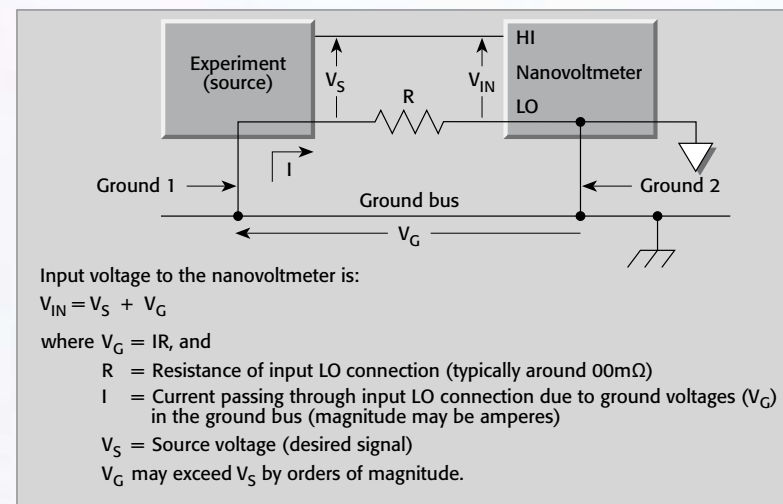


图9a 多点接地(地线环)

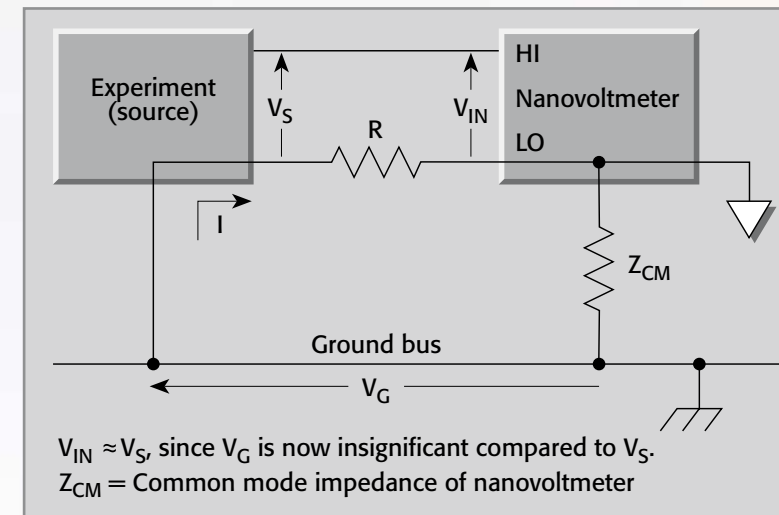


图9b 地线环效应的减轻

对这类地线环问题的解决方案是将所有的设备在单点接地。实现上述方法的最简单的方法是使用隔离的电源和仪器，并为整个系统找出单一的、特性良好的接地点。避免将灵敏的地线连接到其他仪器、机器或者大功率设备所使用的同一接地系统上。正如图9b所示的那样，地线环效应还可以通过采用具有高共模阻抗(Z_{CM})的电压计来削弱，这也称为共模隔离法。

更多信息

咨询工程师

低电压量测

低电压测量

过高的共模电流会显著地影响微弱电压的测量。虽然共模电流常常与噪声问题密不可分，但在某些情况下它们也会造成大的DC偏移。在如下的段落中，我们将简要地讨论共模电流造成的误差的基本原理以及如何避免引线扭转误差的方法。

共模电流

共模电流是在仪器的LO端和机柜或接地之间流过的电流。正如图10所示的那样，共模电流是由从电源线出发经由电力线变压器的电容耦合 ($C_{COUPLING}$) 效应所产生的。共模电流的幅值可以由下式确定：

$$I_{cm} = 2\pi f C_{coupling} (V_2 \pm V_1)$$

式中 f 是电力线频率。

请注意，共模电流流经阻抗 (Z_{CM})，该阻抗位于输入LO和机柜地线之间。于是，电压的幅值 (V_{CM}) 取决于的 Z_{CM} 幅度以及 I_{CM} 。

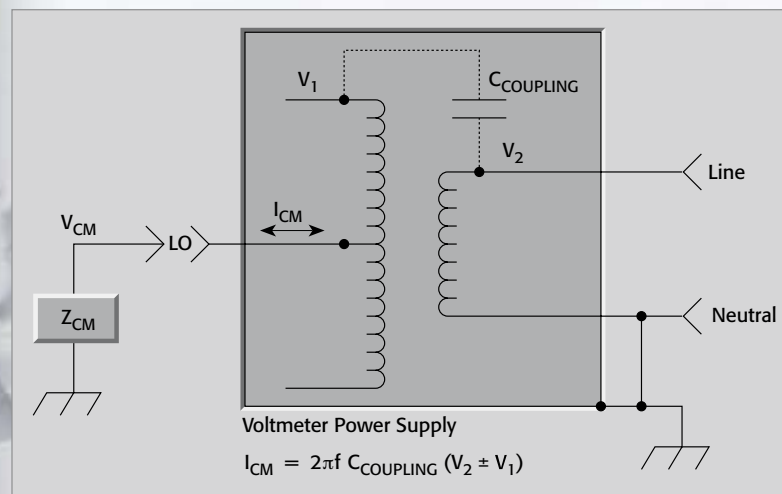


图10 电力线耦合所产生的共模电流

共模扭转误差

扭转的引线也会由于形成共模电流而带来误差。正如图11所示的那样，许多电压源都有内置的电阻分压器，这可以将内部的电压源输出衰减至所期望的水平。例如，信号源的输出电压可以由下式确定：

$$V_{OUTPUT} = V_S \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

采用图11a所示的正确连接方式时，电压源的LO或者机柜一端是与测量仪器的输入LO相连接的。任何共模电流 (I_{CM}) 都将从电压计的输入LO流至仪器机柜的公共端，流经大地地线而流入电压源的地线。请注意，如果采用这种连接方案，电压源的这两个分压器电阻中的任何一个都不会流过共模电流。

图11b示出了电压计的输入引线出现扭转的情形。现在共模电流 (I_{CM}) 流过了 R_2 ，于是带来了电压降，该电压降叠加到待测电压上。这一新增的电压信号主要由具有电力线频率的分量所构成，它对电压计读数的影响主要取决于仪器的共模信号抑制能力。读数可能是高噪声的，也有可能具有恒定的偏移。在某些情况下，仪表的灵敏度会由此而降低，因为输入级出现了过载。为了降低共模扭转误差，请选择一种共模电流尽可能低的仪器。如果可能的话，待测的电压源应该与地线隔离。

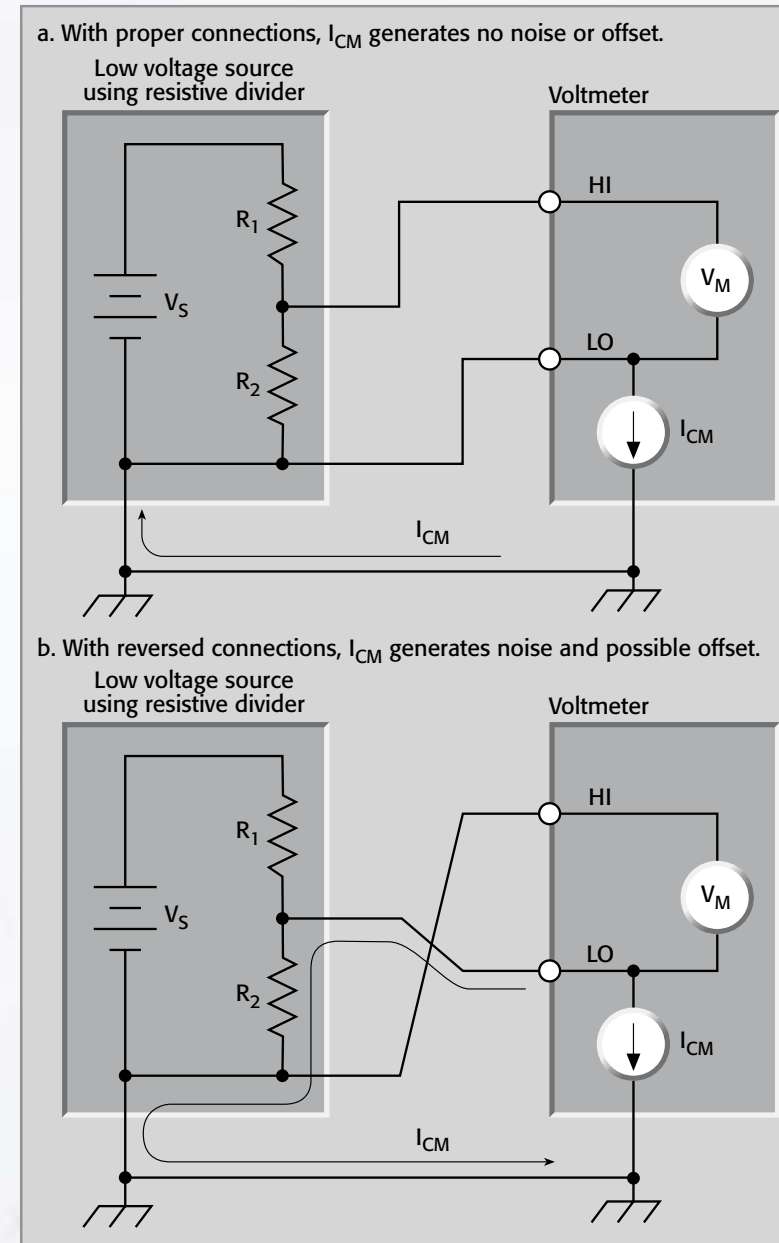


图11 扭转的引线对共模误差的影响

特色资源

- 低功率纳米技术和其他高灵敏度器件的AC与DC测量方法之对比
- 对纳米级材料的电测量



更多资源

- 低电压测量方法
- 可能将lock-in解锁的新仪器

咨询工程师

低电阻测量

引线电阻和四线法

电阻测量常常是用图12所示的二线法来进行的。测试电流必须流过测量引线和待测电阻 (R)。电阻计于是测量同一组测试引线上的电压, 并相应计算电阻值。二线法用于测量低电阻时的一个主要问题是, 总的引线电阻 (R_{LEAD}) 会叠加到测量结果上。由于测试电流会造成引线电阻上存在一个量值虽小但不可忽略的电压降, 于是仪表所测量到的电压 (V_M) 并不一定恰好等于待测电阻 (R) 两端的电压 (V_R), 于是便出现了显著的误差。引线电阻的典型范围是 $1m\Omega \sim 10m\Omega$, 因此当待测电阻低于 $1\Omega \sim 10\Omega$ 时, 要用二线法获取准确的测量结果就变得非常困难 (具体情况取决于引线电阻)。

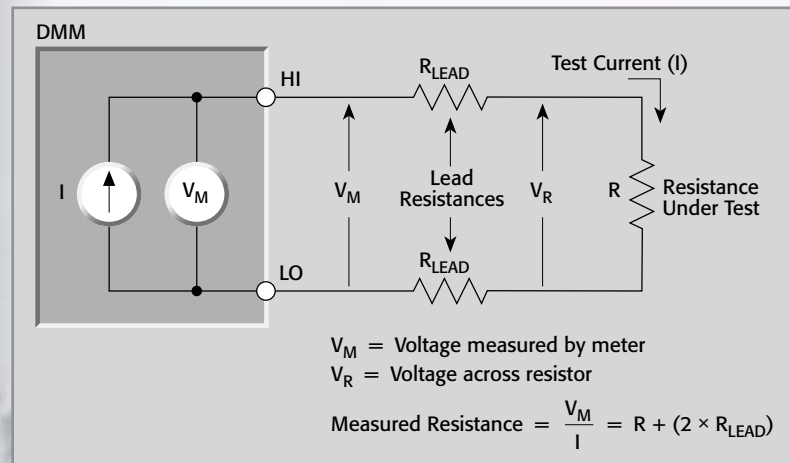


图12 二线式电阻测量

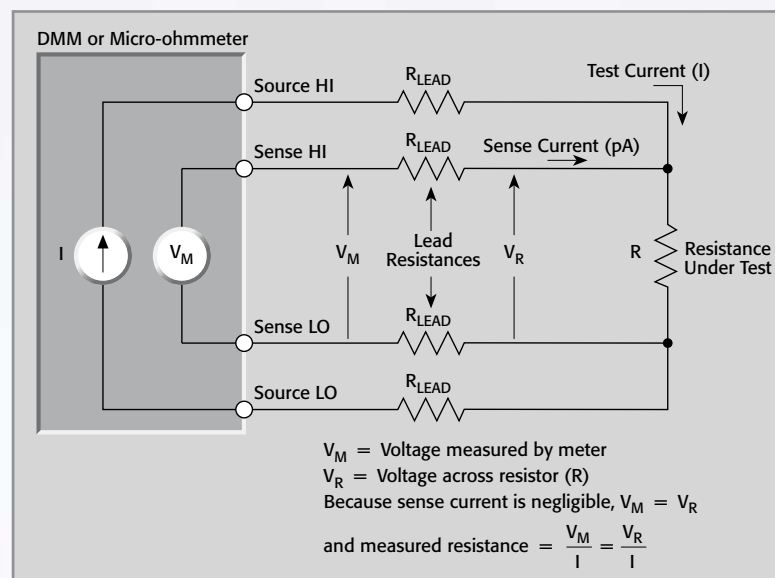


图13 四线式电阻测量

由于二线法存在局限, 于是人们在进行低电阻测量时一般更愿意采用图13所示的四线式 (Kelvin) 连接法。该测量可以利用DMM、微欧计或者分立的电流源及电压计来实现。采用这种结构时, 测试电流 (I) 被迫由一组测试引线流过待测电阻 (R), 而DUT两端的电压 (V_M) 则通过另一组称为敏感引线的引线来测量。虽然敏感引线上流过一定的弱电流, 但它往往是可以忽略的, 而在实际实践中通常也的确被略去。敏感引线两端的电压降也是可以忽略的, 因此电压计测到的电压 (V_M) 实际上等于电阻 (R) 两端的电压 (V_R)。请注意, 电压敏感引线应该连接到尽可能接近待测电阻的地方,

以避免测量结果中包含测试引线的电阻。

热电EMF和相应偏移量的补偿方法

热电电压会严重地影响低电阻测量精度。电流反转法、 Δ 法和偏移补偿欧姆法是克服这一有害偏移时常用的三种方法。

电流反转法

如图14所示的那样, 用两股极性相反的电流进行测量, 可以将热电EMF对消掉。在该图中, 使用了分立的双极性的电流源和电压计。当正极性电流如图14a那样施加时, 所测量到的电压是:

$$V_{M+} = V_{EMF} + IR$$

图14b那样让电流极性进行反转后, 可以得到如下的测量结果:

$$V_{M-} = V_{EMF} - IR$$

将两个测量结果组合起来后可以对消热电EMF:

$$V_M = \frac{V_{M+} - V_{M-}}{2} = \frac{(V_{EMF} + IR) - (V_{EMF} - IR)}{2} = IR$$

测量到的电阻可以用如下的通常采用的方式计算出:

$$R = \frac{V_M}{I}$$

请注意通过上式的计算, 可以将热电电压 (V_{EMF}) 完全对消。

特色资源和更多资源

咨询工程师

低电压量测

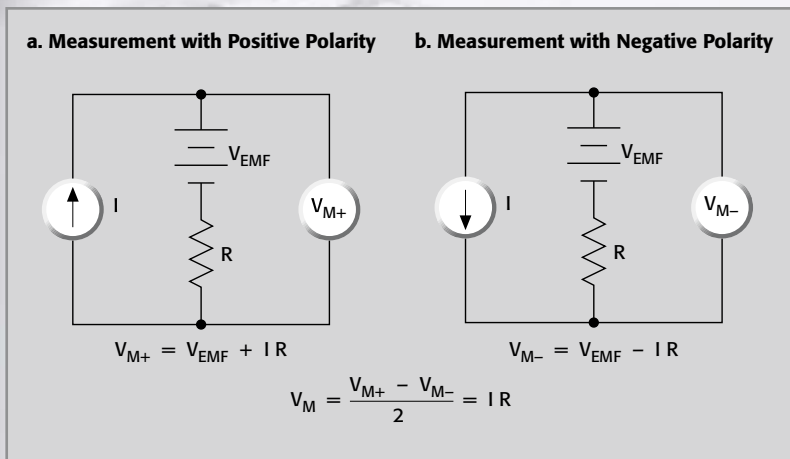


图14 利用电流反转法来对消热电EMF

要让电流反转法真正起作用，就应该采用一个低噪声的电压计，其响应速度相对于待测电路的热时间常数而言应该足够快。如果其响应速度过慢，则测量循环中电路温度的任何变化都会造成无法被完全对消的那部分热电EMF的变化，于是便造成一定的误差。

Delta方法

当热电电压相对于测量循环而言保持恒定时，电流反转方法将可以成功地补偿这些偏移。不过，如果是变化的热电电压造成结果的不精确性，则应该采用Δ法。Δ法类似于电流反转法之处在于也要改变电流源的输出极性，但不同点在于它采用3次电压测量结果来计算每种电阻。通过下面的插图和数学计算可以很好地解释这种测试方法的原理。

图15示出了在施加一个极性可变的电流时，DUT的电压降随时间变化的函数关系。极性每次改变时都测量相应的电压($V_{M1}, V_{M2}, V_{M3}, \dots$)。每个电压测量结果都包括了一个恒定的热电电压偏移(V_{EMF})和一个线性变化的电压偏移(δV)。热电电压漂移可以由一个在很短时间内线性变化的函数来近似表示，因此电压随时间变化的速率(δV)也可以视为一个常数。前三个电压测量结果包含如下的电压：

$$V_{M1} = V_1 + V_{EMF}$$

$$V_{M2} = V_2 + V_{EMF} + \delta V$$

$$V_{M3} = V_3 + V_{EMF} + 2\delta V$$

其中： V_{M1}, V_{M2}, V_{M3} 是电压测量结果

V_{M1} 假定是在时间零点测量到的

V_1, V_2 和 V_3 是由于外加电流流经DUT的压降

V_{EMF} 是当时量测 V_{M1} 时的恒定热电电压偏移量

δV 为热电电压的变化量

基于这三次电压测量结果进行数学运算，就可以对热电电压偏移(V_{EMF})项和热电电压变化(δV)项同时进行对消。首先，求出头两次电压测量的差值的一半，将其称为 V_A ：

$$V_A = \frac{V_{M1} - V_{M2}}{2} = \frac{(V_1 + V_{EMF}) - (V_2 + V_{EMF} + \delta V)}{2} = \frac{(V_1 - V_2) - \delta V}{2}$$

接下来，求出第二次和第三次电压测量结果的差值的一半，将其称为 V_B ：

$$V_B = \frac{V_{M3} - V_{M2}}{2} = \frac{(V_3 + V_{EMF} + 2\delta V) - (V_2 + V_{EMF} + \delta V)}{2} = \frac{(V_3 - V_2) + \delta V}{2}$$

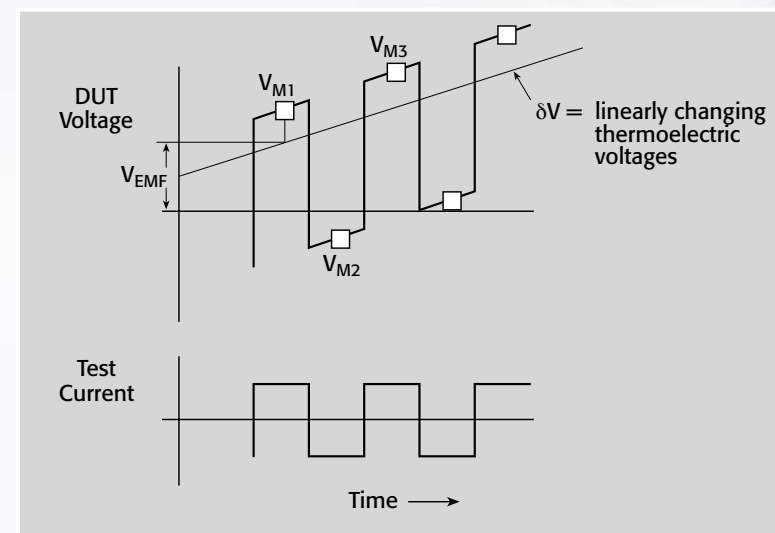


图15 运用Δ方法对热电EMF进行对消

V_A 和 V_B 都受到热电EMF的漂移的影响，但对 V_A 和 V_B 的影响是相反的。最终的电压读数是 V_A 和 V_B 的平均，可以计算为：

$$V_{FINAL} = \frac{V_A + V_B}{2} = \frac{(V_1 - V_2) - \delta V + (V_3 - V_2) + \delta V}{4} = \frac{V_1 + V_3 - 2V_2}{4}$$

请注意，最终计算出的电压中， V_{EMF} 和 δV 项都被消除了。

更多信息

咨询工程师

低电阻测量

在 Δ 方法中, 每个数据点是三个电压读数的可移动的平均值。对电压测量结果的进一步平均意味着 Δ 方法所产生的数据的噪声要低于电流反转法进行计算时所导出的数据, 即使两组数据是在同一时间段内测量得到的。

Δ 方法能否成功, 取决于热漂移是否可以近似为线性, 这一近似关系事实上只在很短的时间内成立。要成功地对变化的热电电压进行补偿, 测量循环时间就必须快于DUT的热时间常数。于是, 要让 Δ 方法取得成功, 就必须使用一个速度足够快的电流源和电压计。

偏移补偿欧姆法

微欧计和许多DMM采用的另一种偏移对消法, 是偏移补偿欧姆法。这种方法类似于电流逆转方法, 区别在于测量是在固定的源电流和零电流之间切换。正如图16a所示的那样, 源电流只是测试循环的部分时段施加到待测电阻上。当源电流接通时, 由仪器测量得到的总电压 (图16b) 包含了电阻两端的电压降, 以及任何热电EMF, 可由下式确定: $V_{M1} = V_{EMF} + IR$

在测量循环的后半部分, 源电流被切断, 仪表测量到的唯一的电压 (图16c) 是电路中存在的任何热电EMF:

$$V_{M2} = V_{EMF}$$

假设在测量循环的后半部分可以精确的测量到 V_{EMF} , 则可以从循环的前半部分所获得的电压测量结果中将其消去, 于是偏移补偿的电压测量结果就变为:

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

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

$$V_M = IR$$

并且,

$$R = \frac{V_M}{I}$$

同样的, 请注意测量过程可以将热电EMF (V_{EMF}) 项消除。

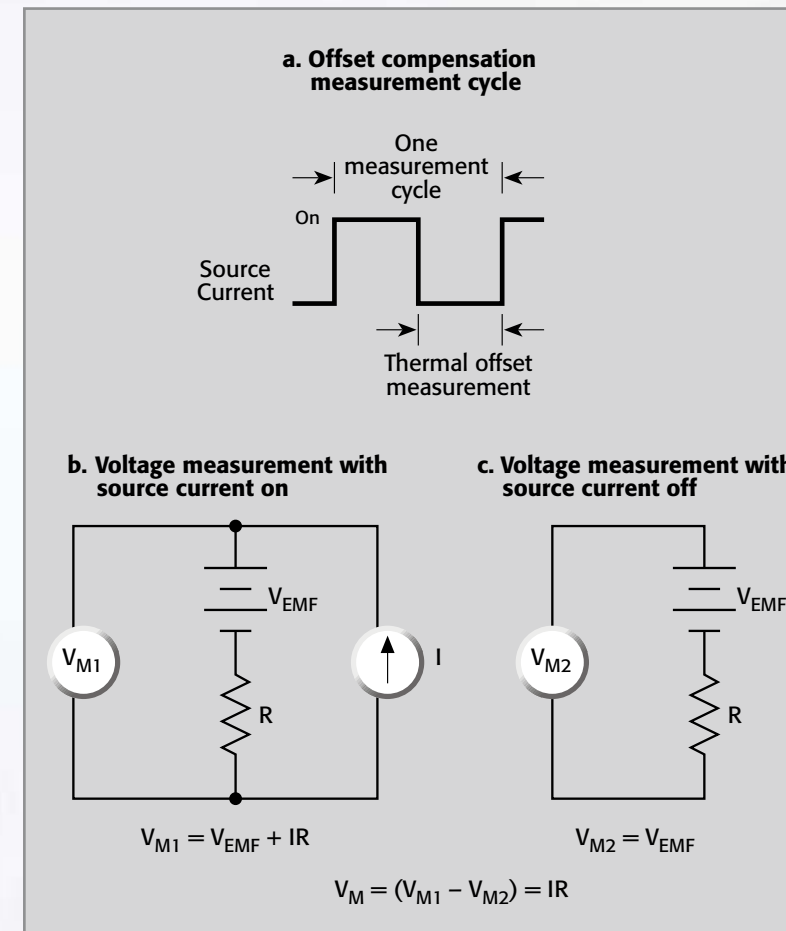


图16 偏移补偿欧姆测量

更多信息

咨询工程师

低电阻测量

非欧姆接触

当接触点两端的电位差与流经触点的电流间不存在线性正比关系时，则非欧姆接触效应就显现出来。在低电压电路中，氧化物膜或者其他非线性连接会造成非欧姆接触。非欧姆连接对任何射频能量 (RFI) 都可能进行整流，使得电路中出现一个失调 (偏移) 电压。非欧姆接触的检查方法以及相应的消除方法有若干种。

如果使用一个微欧计或者DMM来进行低电阻测量，请改变量程来检查是否存在非欧姆接触。改变测量范围往往也会改变测量电流。通常条件下测量往往给出相同的读数，但分辨率可以更高或者更低，具体取决于仪器的量程升高还是降低。如果读数出现显著的差异，则这就表明存在一个非欧姆接触。

如果使用一个分立的电流源和电压计来进行低电阻测量，则应对每台仪器进行校验，以查明是否存在非欧姆接触。如果电流源的接触是非欧姆的，当源的极性反转时，调适电压 (compliance voltage) 中将存在显著误差。如果电压计的接触是非欧姆式的，它们会对感应到的任何AC信号进行整流，并造成DC偏移误差。如果存在这种情况，则就偏移 (失调) 的对消而言，则偏移补偿欧姆法更为合理。

为了防止非欧姆接触的出现，应选用一种恰当的触点材料，如钢或者金。请确保调适电压足够高，以避免由于信号源接触的非线性造成的问题。为了降低电压计的非欧姆接触所造成的误差，请使用屏蔽和恰当的接地方法来减少所感应的AC信号。

器件发热

在对温度敏感的器件 (如热敏电阻) 进行电阻值测量时，器件的发热可能是一个需要考虑的问题。用于低电阻测量的测试电流常常要远远高于用于高电阻测量时所用的电流，因此，若器件的功率耗散足以造成器件的电阻值发生变化时，则必须认真考虑这一因素。

请记住，电阻中的功率耗散可以由如下的公式给出：

$$P = I^2R$$

根据该关系，我们可以看出每当电流倍增时，器件耗散的功率增加4倍。于是，减少器件发热的影响的一种方法是采用尽可能低的电流，同时将待测器件的电压维持在所期望的水平上。如果电流无法降低，则使用一个窄的电流脉冲，以及一个可以快速响应的电压计。

大多数微欧计和DMM并未提供测试电流的设定功能。这往往是由量程所决定的。在那些情况下，必须找到替代的方法来最大限度降低器件的发热。一种简单但有效的方法是，在测量中使用仪器

的单射 (脉冲) 触发模式。在这种模式下，仪器在测量循环中将只向DUT提供单个窄电流脉冲，从而可以最大限度减小器件发热造成的误差。

干电路测试

许多低电阻测量是对开关、连接器和继电器触点之类的器件来进行的。如果这些器件在“干电路”条件下使用，即在一个低于20mV的开路电压和小于100mA的短路电流下进行，则器件的测量方法应该不至于击穿触点上可能出现的任何氧化物薄膜。如果膜被穿透，则所测量到的接触电阻将低于薄膜完整时的电阻，这会降低测试结果的有效性。

为了避免氧化物的穿透，人们往往采用干电路测试方法，这种测试一般可以将DUT两端的电压压缩在20mV甚至更低的水平上。有些微欧计和DMM内置了这一功能，正如图17所示的那样。在这类微欧计中，源端子上跨接了一个精密的旁路电阻 (R_{SH})，以便将DUT两端的电压钳制或者限制在低于20mV的水平上。电路结构的其余方面则非常类似于常规的四线测量方法： V 和 R_{REF} 构成了电流源，迫使电流流经未知的电阻 (R)。该电流应该不高于100mA。未知电阻的量值可以从敏感电压 (V_M)、钳位电阻 (V_{SH})、已知的RSH值和源电流计算出来。

更多信息

咨询工程师

低电阻测量

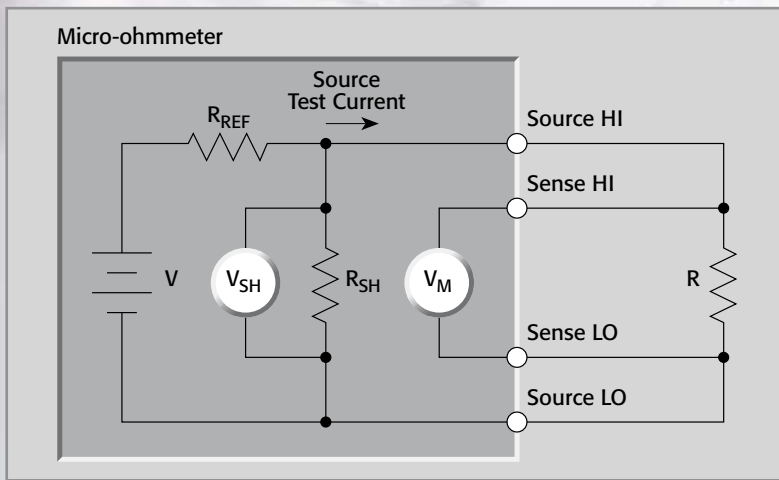


图17 干电路测试

如果干电路测试要用分立的电流源和电压计来进行的话，则电流源上的调适电压必须限制在20mV甚至更低的水平上。如果无法将调适电压限制在这一水平上，则应当使用一个调适限流电阻，正如图18所示的那样。在该电路中， R_C 是用于将电流限制为20mV的电阻，而 R 是未知的电阻。

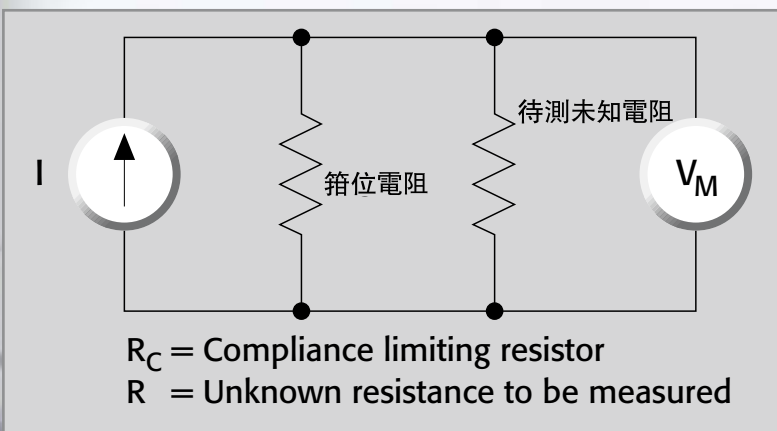


图18 利用电流源和电压计进行干电路测试

选择 R_C 的量值时，应该基于给定的测试电流来对电压进行限制。例如，如果电压限为20mV，测试电流为200 μ A， R_C 可以计算为

$$R_C = 20\text{mV} / 200\mu\text{A} = 100\Omega$$

如果未知的电阻 (R) 是250m Ω ，则 R_C 所造成的测量误差将占所测量电阻值的0.25%。未知电阻 (R) 的确切阻值可以由如下公式计算出来：

$$R = \frac{(R_{\text{MEASURED}} \times R_C)}{(R_C - R_{\text{MEASURED}})}$$

式中， R_{MEASURED} 是从电压测量值 (V_M) 和源电流测量值 (I) 所计算出的电阻测量结果。

电感器件的测试

电感器件除了电感值外，往往具有很低的电阻值。这一很低的电阻通常是用DMM或者微欧计测量到的。不过，由于电感和测量仪器之间的交互作用，测量过程常常很难进行。当 L/R 比很高的时候，尤其如此。

有些可能出现的问题包括振荡、负读数值和一般说来不稳定的读数。图19的示波器截图是对一个200nH电容器进行的、不稳定的测量结果。

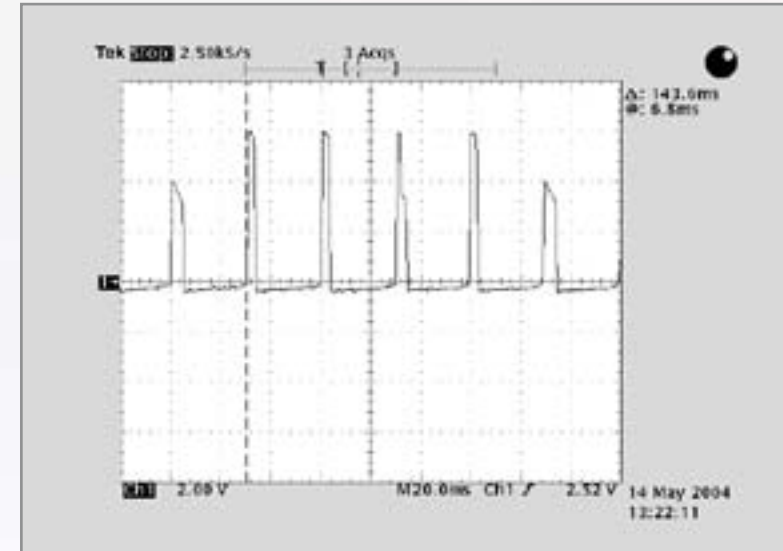


图19 对200H电感器进行的不稳定测量，由示波器获得

问题出现时，试图以一个以上的量程进行测量，并检查量值是否能相互符合。

如果可能的话，不要使用偏置补偿（脉冲电流）法，因为电感的感抗对电流脉冲的响应将导致不稳定的测量结果，或者让自动量程调整变得极为困难。在可能时请试图使用一个更大的电阻量程。

将示波器与器件和仪表并联，检查是否存在振荡现象。有时，跨接到电感上的二极管可能会通过减小电感尖峰（inductive kick），从而让振荡消失。

特色资源

- 如何避免纳米器件的自加热效应
- 如何在低功率和低电压测量中实现精确和可靠的电阻测量
- 对高温超导进行的自动电阻测量



更多资源

- 降低电阻测量不确定性的技术：DC电流反转与经典的偏移补偿的方法的对比
- 碳纳米管和低功耗纳米级材料的电性能测量的诀窍
- 问题：低电阻测量中的高噪声读数
- 问题：低电阻测量中的读数漂移现象

咨询工程师

低电压应用：霍尔效应测量

自从Edwin Hall于1879年发现该现象以来，霍尔效应测量一直是材料特性测量方面有价值的工具。本质上，当磁场穿过样品而且沿着样品的长度方向流动的电流产生一个同时垂直于磁场和样品电流的电压时，就会出现霍尔效应现象，这一现象相应会产生一个同时垂直于磁场和电流的横向电压（图20）。



图20 霍尔效应的原理图

如今，霍尔效应测量用于电子行业的很多方面，从基本材料的研究和器件开发一直到器件的制造。一个霍尔效应测量系统对于多种多样材料参数的测定来说极为有用，但主要测定的一个材料参数是霍尔电压（ V_H ）。其他重要的参数，如载流子迁移

率、载流子浓度（ n ）、霍尔系数（ R_H ），电阻率，磁阻（ R_B ）和导电类型（N或者P）都可以从霍尔电压测量结果中导出。

霍尔效应测量对于半导体制造行业中几乎每种材料的特性测量来说都极为有用，如硅（Si）和锗（Ge），以及大多数化合物半导体材料，包括锗硅（SiGe）、碳化硅（SiC）、砷化镓（GaAs）、砷镓铝（AlGaAs）、砷化铟（InAs）、铟镓砷（InGaAs）、磷化铟（InP）、碲化镉、碲化镉汞（HgCdTe）。它们常常用于测量在太阳能电池/光伏电池中使用的这些材料的薄膜，以及有机半导体和石墨烯等纳米材料。它们对于低电阻材料（金属、透明氧化物、高掺杂的半导体材料、高温超导、稀释磁半导体和硬盘驱动器中使用的GMR/TMR材料）和高阻半导体材料[包括半绝缘的GaAs、氮化镓（GaN）和碲化镉]的测试都很有用。

在二十多年以前，霍尔效应的测量最先成为半导体行业的常规测量，那时科学家和 researcher 需要能对体硅材料进行测量的工具。不过，一旦硅的体迁移率被精确测定后，霍尔效应的测量不再被认为是一种关键测量技术。但今天的半导体材料不仅仅局限于硅——制造商们常常在硅应变晶格中添加锗，以实现更高的迁移率。此外，当代的半导体材料不再是体材料——它们常常以薄膜形式应用，例如那些在联二硒化铟镓铜（copper indium gallium diselenide, CIGS）和碲化镉太阳能电池中使用的

材料。于是，IC制造商们现在不得不回头来分别测定载流子浓度和载流子迁移率，而霍尔效应测量正是理想的选择。

运用霍尔效应方法测量迁移率

确定载流子迁移率的第一步是让磁场垂直于样品，并让电流流过样品，然后测量霍尔电压（ V_H ）。电流（ I ）和磁场（ B ）的组合会产生横向的电流。相应测量器件两端的电位（ V_H ）。同样还需要对样品厚度（ t ）和电阻率（ ρ ）进行精确的测量。电阻率可以用四点探针或者van der Pauw测量方法来测定。只需获得这五个参数的测量值（ B, I, V_H, t, ρ ），就可以用该式计算出霍尔迁移率：

$$\mu_H = \frac{|V_H t|}{BI\rho}$$

因为霍尔电压一般都很小（毫伏甚至更低），测量到的van der Pauw电阻率也很低，故在使用上式进行测量时，正确的测量和平均化方法对于能否对迁移率实现精确测量极为关键。

更多信息

咨询工程师

低电压应用：霍尔效应测量

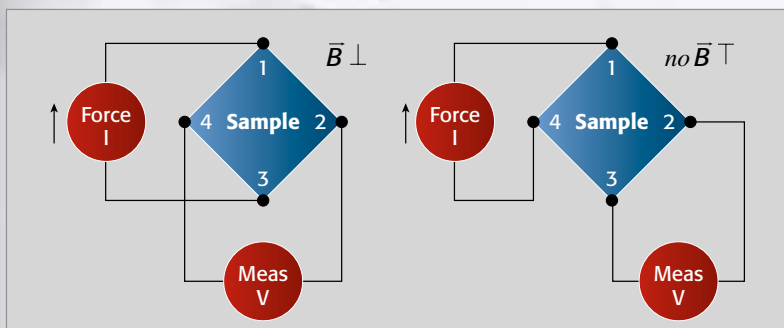


图21 霍尔效应电压与van der Pauw电阻测量结构的比较

图21示出了霍尔效应电压和van der Pauw电阻测量的测量结构。虽然这两种测量构型很相似，都采用了四点接触，而且都需要控制电流输出而测量电压，但是在霍尔效应测量中，电流是在样品的某两个相对节点间流动，电压则是在另外两个相对的节点上测量，因此强迫输入电流（激励）和进行测量的触点是相互交织的，而半导体的电压一般约为 KT/q ，其量值大约为25mV。该量值也可能更低得多。相比之下，Van der Pauw电阻测量中，电流在相邻节点间流动，而电压则是在与之相对的另外两个相邻节点上测量，因此信号输出和测量结果都是在最近的引脚上获得的；在这种情况下，电流可以远远超过20mV。其量值范围从低电阻率材料的毫伏量级一直到高阻的绝缘材料的上百V。另外一个主要的不同点在于van der Pauw测量中不施加磁场，而霍尔效应测量则需要施加一个横向的磁场。

为了获得让人放心的结果，所推荐的方法包括电源电流极性的反转、对更多端子进行信号激励，并让磁场方向反转。执行8次霍尔效应（图22）和8次

van der Pauw（图23）测量。如果每次测量的电压读数之间都存在较大差异，则建议对测试结构进行重新检查，以找出潜在的误差源。

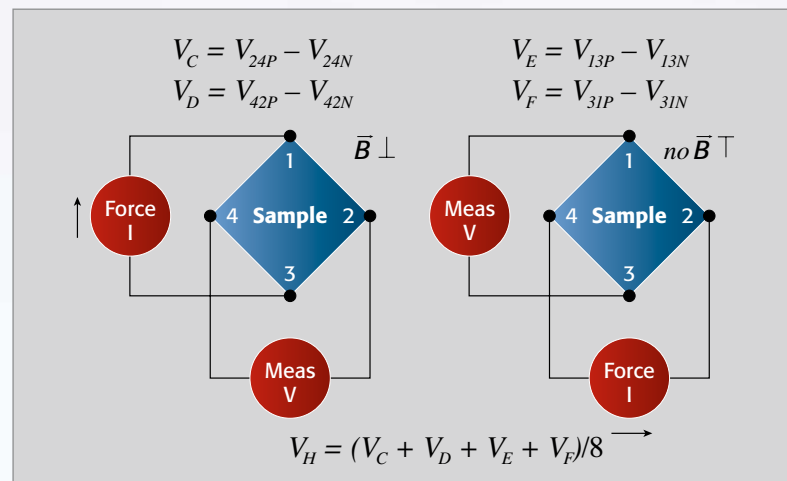
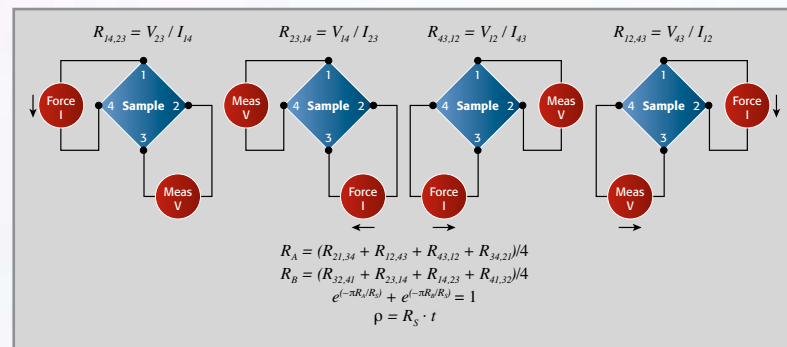


图22 采用所示的两种构型，基于正和负极性电流并让磁场上升和下降的方法对霍尔电压进行测量。然后对所有电压测量结果进行平均



对多个van der Pauw测量结果进行平均，计算平均的电阻率(ρ)。在所示的每种构型中，让电路极性反转后再进行另外四次电阻测量。如果 $R_A = R_B$ ，则 R 可以简化为 $\rho R_A / \ln(2)$ 。

请参考http://www.nist.gov/eel/semiconductor/hall_algorithm.cfm

基本的霍尔效应测量构型将包括如下的元件和附加选项：

- 恒流源，其幅值取决于样品电阻。对于低电阻率材料样品而言，信号源必须能输出毫安至安培的电流。对于电阻率约为 $10^7 \text{ ohm} \cdot \text{cm}$ 的半绝缘的GaAs等样品，还需要输出低至1nA的信号源。对于高电阻率样品（例如本征态的半导体），恒流源可能需要能够输出低至1nA的电流，不过一个能够输出10微安至100毫安的电流源也就够用了。
- 具有高输入阻抗的电压计。根据待测材料的电阻率水平的不同，所采用的电压计能够进行精确测量的范围也可以不同，从1微伏一直到100V。高电阻率材料可能需要具有超高的输入阻抗或者差分测量能力。
- 一个永磁体或者电磁铁。一般可用的磁场感应强度范围是500~5000高斯。
- 样品夹具。
- 备选设备。常常可以包含一个开关矩阵，以消除手工连接/断开探针触点的必要性；它也使得对多个样品的同时测量成为现实。若样品保持在液氮杜瓦瓶中进行温度相关特性测量时，开关矩阵是绝对必须的。

更多信息

咨询工程师

低电压量测应用: 霍尔效应量测

霍尔迁移率与样品温度密切相关, 因此人们常常希望对该温度进行监测, 特别是每次对样品的温度进行调节后都需要重复进行测量的应用。许多测试构型包括温度测量探头; 对于高精度测量而言, 则探头的分辨率应该达到 0.1°C 。需要进行温度相关特性的片上 (on-wafer) 测量来说, 测试探针台的样品台应当具有对样品进行加热或者冷却的能力以及一个温度控制器。在低温研究中, 需要采用低温保持器, 以便将样品保持在液氮浴中。

要对多个器件进行片上测量, 可能必须采用一个具有操纵器和多个探针针尖的探针台。

对于特定应用来说, 最恰当的霍尔效应测量构型, 在很大程度上都应当基于电测量设备所测量出的样品的总电阻来确定。该总电阻是样品电阻和接触电阻 (即样品和其上的电触点间的电接触) 的总和。样品电阻取决于样品固有的电阻率 (以欧姆·厘米为单位) 及其厚度。

每个电阻量程都有不同的测量要求, 用于测量它们的系统的元器件的类型和数量也存在很大差别。为了演示配置的过程, 下面给出了一个可适用于很宽样品电阻值范围的测试构型, 其使用的阻值范围从1微欧到1太欧姆。这种类型的构型将非常适合于对薄膜光伏材料的特性测量、对本征半导体的掺杂浓度效应的研究或者对数量日益增多的、以碳纳米管对聚合物进行掺杂的研究。

图24所示出的系统构型适合于最宽的样品阻

值范围, 从1微欧至1太欧姆。它采用了吉时利面向霍尔效应测量而专门优化的7065型矩阵开关卡, 安装在一个7001型开关主机中。该卡可以对来自样品至测量仪器的测试信号进行缓冲, 并对电流源到样品的电流进行开关切换。7065卡的优点是提供了单位增益的缓冲器, 可以切入或者切出, 从而容许通过对仪表的样品电阻进行缓冲, 使之不影响仪表, 从而实现对高电阻的测量。

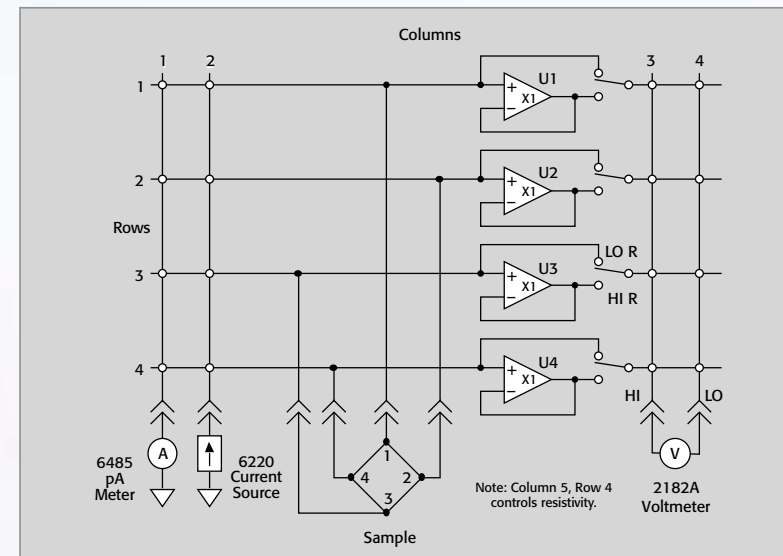


图24 针对具有很宽样品电阻范围的材料特性进行测量的测试构型示例 (1微欧至1太欧姆)

该测试设置还包含了吉时利6485型皮安计、6220型 DC电流源以及2182A型 纳伏计。其中6485型皮安计的用途是测量漏电流, 从而可以将其从测量结果中减去, 或者对其进行监测, 以确保其不至于影响高电阻的测量结果。6220型和2182A型仪器的设计可以保证其能无缝地共同运行, 利用 Δ 模式来对它们的工作进行同步化, 并优化其性

能。本质上, Δ 模式可以自动地触发电流源, 让信号极性交变, 然后在每次出现信号极性交变时触发纳伏计的读数, 同时将恒定的和漂移的热电偏移对消, 并确保其结果能反映电压的真实值。一旦6220型和2182A实现恰当连接, 启动测试所需的动作就是按下电流源的 Δ 按钮, 并接着按下Trigger按钮。2182A型还提供了另一个具有电压测量能力的通道, 这对于样品的温度的监测来说十分有用。虽然6220型在所示的构型中用作恒流源, 用于取代具有内置任意波形发生器的6221型AC+DC电流源, 但它也具有让用户进行AC霍尔效应测量的优势。对于那些可以降低系统的低电阻测量能力以降低系统成本的方法 (例如仅提供中等范围至高电阻测量) 也可以接受的应用来说, 可以用吉时利的2000数字多用表来替代2182A型纳伏计。

特色资源

- 材料特性测量中的霍尔效应测量
- 霍尔效应测量基础网络课程



更多资源

- 用于测量测试和特性测量的精密弱电流信号源
- 用吉时利6221/2182A组合完成弱信号脉冲电性能测试

咨询工程师

低电阻应用：超导体电阻测量

在极端低温的条件下，有些金属和合金对电流的阻碍特性消失而呈现超导性。超导体的转变温度和临界电流密度是两种通常需要测量的参数。超导体的转变温度是指材料的电阻从有限值降低为零的温度。临界电流密度是材料在特定温度和磁场条件下变为电阻性材料前可以承载的最大电流密度。这两个参数越高，则超导体的特性越好。对这两种参数的测定需要对非常小的电阻进行测量，因此对于精密测量来说，纳伏计和可编程的电流源非常重要。

图25示出了一个基于2182A 纳伏计和6200型电流源的组合来测量电阻的超导体电阻测量测试系统的基本结构图。电压测量引线应该由相对于样品而言具有低Seebeck系数的材料制成。2182A纳伏计的灵敏度对于精密测量结果的获取的极为关键，因为该应用要求具备对超低电压进行测量的能力。

对于转变温度测量来说，电流信号源输出必须保持在样品的临界电流下。如果电流变得过高，则所耗散的功率可能会造成样品和低温保持器的损坏。然而，对于临界电流测量来说，电流源必须能超出样品的临界电流。如果这意味着需要超过100mA的电流（6220型电流源可以提供的最大电流），则一个2440 5A的电流源是要一个恰当的解决方案。所用的电流源应该具有可编程的极性，这样测试就可以利用电流反转法来进行。

电阻用与低电压和低电阻测量所用的同样技

术来测量。使用四线测量方法也很关键，因为它可以通过一对引线让电流流过样品而同时用另外一对引线来测量电压，从而消除了引线电阻的影响。此外， Δ 方法对于变化的热电EMF的影响的消除而言也很关键，该参数可能会干扰测量的精度。

Δ 方法是先在一个方向上的电流驱动下对材料两端的电压降进行测量，然后对电流源的极性进行反转，并进行下一次电压测量。为了计算每个电阻的量值，需要进行三次电压测量。对于存在滞回特性、非线性或者非对称的情况，电流源从一个量值变为具有相同极性的另一个量值。这样在这两个电流间可以对阻值进行平均。

2182A型纳伏计和6220型电流源协同工作，以自动实现 Δ 测量。在这种模式下，6220型自动改变其极性，并对应每个极性触发纳伏计进行一次读数。然后，6220型显示“经过补偿的”电阻值。正如图26所示的那样，随着样品的温度的变化，可以绘制出电阻与温度间的关系曲线。

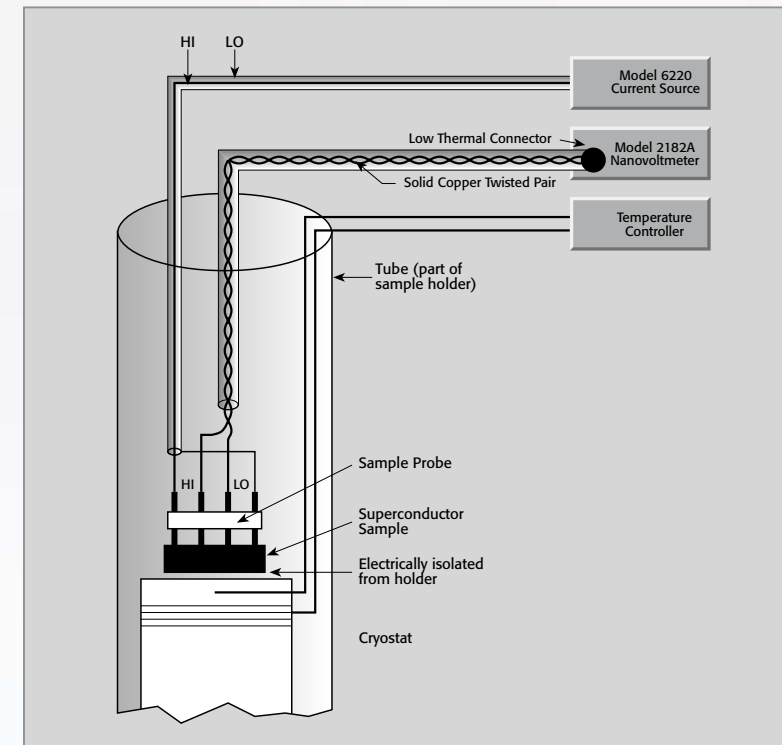


图25 超导电阻测试系统

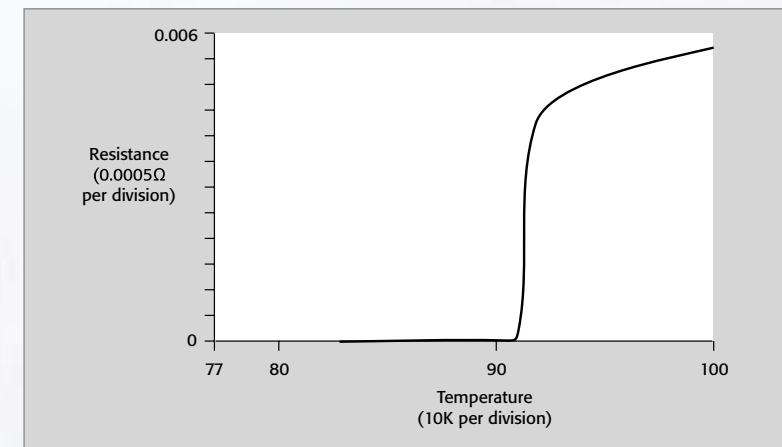


图26 超导体的电阻随温度变化的曲线

为了测定临界电流，可以让2182A和6220型电流源协同工作以绘制出在一定的电流变化范围上的精确的I-V特性曲线。

特色资源

■ 高温超导体的自动电阻测量

■ 用四点共线探针和6221型电流源测定电阻率和导电类型



咨询工程师

选购指南: 低电压/低电阻电表



型号	2182A	6220/6221	3706	2750	2010	2002
电压文件位(满刻度)						
从	10 mV	N/A	100 mV	100 mV	100 mV	200 mV
到	100 V	N/A	300 V	1000 V	1000 V	1000 V
输入电压噪声	1.2 nV rms	N/A	100 nV rms	<1.5 μ V rms	100 nV rms	150 nV rms
电流档位						
From	N/A	100 fA DC (峰值2pA交流电流,限6221)	N/A	N/A	N/A	N/A
To	N/A	\pm 105 mA DC (峰值100mA交流电流,限6221)	N/A	N/A	N/A	N/A
电阻档位						
From ¹	10 n Ω ³	10 n Ω (when used with 2182A)	0.9 m Ω	0.4 m Ω	0.9 m Ω	1.2 m Ω
To ²	100 M Ω ³	100 M Ω ((搭配2182A)	100 M Ω	100 M Ω	100 M Ω	1 G Ω
热电偶温度						
From	-200 $^{\circ}$ C	N/A	-150 $^{\circ}$ C	-200 $^{\circ}$ C	-200 $^{\circ}$ C	-200 $^{\circ}$ C
To	1820 $^{\circ}$ C	N/A	1820 $^{\circ}$ C	1820 $^{\circ}$ C	1372 $^{\circ}$ C	1820 $^{\circ}$ C
特点						
IEEE-488	.	.	.	.	.	.
RS-232	.	.	.	.	.	.
CE	.	.	.	.	.	.
输入连接	特殊低热电铜接头	触发联机界面 数位I/O界面 以太网网络	背板15接脚D-SUB 选配项目: 3706-BAN, 3706-BKPL, 3706-TLK	香蕉接头 (4)	Banana jacks (4)	Banana jacks (4)
特色	搭配型号6220或6221 进行Delta模式和差动电导运作。搭配型 号6221执行脉冲I-V量测。具有模拟输 出、IEEE-488、RS-232	搭配型号2182A进行低功率电阻和I-V量测	干电路测试机制 偏移补偿 插卡式开关/继电器模块USB界面 LXI Class/以太 网络界面 数位I/O界面	干电路测试机制偏移补偿 数字多功能电表、IEEE-488界面 RS-232界面、数位I/O界面、插卡式模块	干电路测试机制偏移补偿 数字多功能电表 IEEE-488界面 RS-232界面 数位I/O界面 插卡式扫描卡	八位半数字多功能电表 插卡式扫描卡

注记:
 1. 具有比10%准确度更佳的可量测最小电阻值
 2. 具有比10%准确度更佳的可量测最大电阻值
 3. 搭配外部电流源进行Delta模式、偏移电压补偿。使用型号2440的5A测试电流可达到10奈欧姆值

咨询工程师

名词解释

绝对精度: 用于衡量仪器读数与原始标准量的接近程度, 该原始标准应可以追溯到得到人们认可的标准化组织所批准的一个标准。精度常常可以分解为增益和偏移项。也参见相对精度。

A/D (模拟—数字) 转换器: 用于将模拟输入信号转换为数字信息的电路。所有数字化仪表都使用A/D变换器来将输入信号变换为数字化信息。

模拟输出: 与输入信号成正比的输出信号。

组装器: 一种可以通过定位分子来引导化学反应的分子制造器件。组装器可以编程设定为以简单的化学基本构件制造出几乎任何一种分子结构或者器件。

量程自动设定: 仪器自动在各量程中自动切换、以确定能提供最高分辨率的量程的能力。这些量程往往以十倍程为步进。

量程自动设定时间: 对于具有量程自动设定能力的仪器, 施加一个阶跃的输入信号与其显示之间的时间间隔, 包括了确定并切换至恰当的量程的时间。

带宽: 可以在某些极限值之间对信号进行传导或者放大的频率范围。带宽往往由-3dB (半功率) 点来定义。

偏置电压: 在测试过程中, 施加到电路或者器件以建立基准水平或者工作点的电压。

电容: 在一个导体和电介质构成的电容器或者系统中, 导体间存在电势差时, 结构存储极性不同电荷的特性。电容与电荷和电压间的关系如下: $C = Q/V$, 式中C是以farad为单位的电容值, Q是以库仑为单位的电荷量, V是以伏特为单位的电压。

碳纳米管: 用一层单层碳原子构成的管状纳米器件, 它具有新颖的电和拉伸特性。这些纤维的电导率可以与铜相当, 热导率可以与金刚石相当, 而拉伸强度则比钢大100倍, 重量则只有钢的1/6, 并具有高的失效应变。它们可以具有超导特性、绝缘特性、半导体特性或者导体性(金属性)。非碳的纳米管, 常常称为纳米线, 常常是从BN或者Si生成的。

通道 (开关): 在一个开关卡上的多个信号通道中的一个。对于扫描仪或者复用器卡来说, 通道用来在测量电路中作为一个可切换的输入, 或者在信号源电路中用作可切换的输出。对于开关卡而言, 每个通道的

信号通路都独立于其他通道。对于矩阵卡而言, 通道是由行/列的交叉点上的继电器的动作来建立的。

共轴电缆: 由相互绝缘的两个或更多共轴的圆柱形导体构成的电缆。最外层的导体常常接大地地线。

共模抑制比 (CMRR): 仪器抑制输入端共同输入的相对于地的电压所造成的干扰的能力。往往以在某个给定频率上的分贝数。

共模电流: 在仪器的输入低电平 (LO) 端子和机柜地线之间流过的电流。

共模电压: 输入低电平和仪器大地接地点之间的电压。

接触电阻: 继电器或者连接器的触点间闭合或者接触上时, 触点间以欧姆为单位的电阻。

沾污: 一般用来描述不希望出现的、会给半导体或者绝缘材料的物理、化学或者电特性带来不利影响的材料。

D/A (数字—模拟) 转换器: 用于将数字信息转换为模拟信号的电路。在很多仪器中, D/A转换器被用来提供一个隔离的模拟输出。

介质吸收: 原来充电的电容短暂放电后残余存储电荷所产生的影响。

数字多用表 (DMM): 用来测量电压、电流、电阻或者其他参数的电子仪器, 它可以将模拟信号转换为数字信息, 并进行显示。典型的五种功能的DMM可以测量DC电压、DC电流、AC电压、AC电流和电阻。

漂移: 在输入信号或者工作条件不变的情况下, 仪器读数的渐变过程。

干电路测试: 为防止氧化物的干扰或其他因素使得待测器件出现性能下降, 在让器件两端的电压保持在某一水平之下 (如<20mV) 的同时, 对器件进行测量。

电化学效应: 由沾污和湿度所形成的化学原电池所产生的电流现象。

静电计: 高度精细化的DC多用表。与数字多用表相比, 静电计的特点是输入电阻更高而且对电流的灵敏度更高。它还具有DMM一般所不具备的功能 (例如对电荷的测量能力、电压信号的输出能力)。

EMF: 电动势或者电压。EMF一般用于描述电磁场、电化学或者热效应引起的电压差。

静电耦合: 描述由于导体附近存在一个可变的或者移动的电压源而产生电流的现象。

误差: 测量结果偏离其真值的程度 (差值或者比例)。真值本质上是不确定的。也参见随机误差和系统误差。

下降时间: 信号从其峰—峰值的较高的百分比 (通常是90%) 变化到较低的百分比 (往往是10%) 所需要的时间。也参见上升时间。

Faraday杯: Faraday杯 (有时也称为Faraday笼或者冰桶) 是一种用金属片或者网笼制成的封闭结构。它由两个电极组成, 一个套着另一个, 中间隔以绝缘体。内电极与静电计相连, 而外电极与地线连接。当一个带电体放置在内电极内部后, 所有的电荷将流入测量仪器。在一个封闭的、中空的导体内部的电场为零, 因此法拉第杯可以对放置在其内部的物体起到屏蔽作用, 使之免受任何大气或者杂散电场的影响。这就使得人们能够对该物体进行精确的测量。

反馈式皮安计: 一种使用了一个运放反馈构型的、灵敏的电流计, 该电路结构可以将输入电流变换为电压, 从而实现测量。

浮置: 当大地地线和仪器或者所关心的电路间存在共模电压的情形。(电路低电平段并未与大地电位连接。)

四点探针: 四点共线探针的电阻率测量方法, 是将四个等间距的探针与阻值待测的材料相接触。该阵列放置在材料的中央。其中两个外侧的探针流过已知的电流, 而以两根内侧的探针测量电压。电阻率可以用下式计算出:

$$\rho = \frac{V}{I} \times \frac{\pi}{\ln 2} \times t \times k$$

其中: V =量测电压, 单位伏特、I =电流源, 单位安培、t =晶圆厚度, 单位厘米、k =依据探头对芯片直径比例和晶圆厚度对探测分离比例的修正系数。

四端电阻测量: 一种测量方法, 即用两根导线向未知的电阻提供电流, 而用两根不同的导线来敏感电阻两端的电压。在测量低电阻时, 该四端构型可以提供最大的好处。

咨询工程师

名词解释

富勒烯: 也称为C60, 一种近似球形的、中空的碳分子, 其中包含了60个C原子, 相互间构成互锁的六边形和五边形, 该称谓用于纪念网格状穹顶式结构的创造者建筑师R. Buckminster Fuller。有时也称为“Buckminsterfullerence烯”或者“巴基球”

地线环: 当两种或更多的仪器连接到地总线、大地接地线或者电力线地线的不同点上时, 所出现的情形。地线环会产生不希望出现的偏移(失调)电压或者噪声。

防护: 一种可以降低漏电误差、缩短响应时间的技术。防护包括一个由低阻抗源驱动的、环绕着高阻抗信号引线的导体。防护层电压保持在信号电压的电平上, 或者接近于该电平。

霍尔效应: 将导体放入磁场中并对导体两端的横向电压进行测量的方法。采用该测量方法时, 可以确定硅中载流子的类型、浓度和迁移率。

高阻抗端接: 指这样一种端子, 其源电阻乘以预期的杂散电流(例如1 μ A)的乘积超出了所要求的电压测量灵敏度。

输入偏置电流: 由于内部的仪器电路和偏置电压的存在, 仪器输入端所流过的电流。

输入阻抗: 在输入端子处测量到的旁路电阻和电容(或者电感), 不包括输入偏置或者失调电流。

输入失调电流: 必须输入一个差分仪器的输入测量端子, 以使得输出读数为零的两路输入电流间的差值(零输入电压和零偏置电压)。有时也被非正式地用于称谓输入偏置电流。

输入失调电压: 为了将输出指示降低为零而必须直接在输入测量端子之间施加的电压, 其偏置电流由一个电阻通路来提供。

输入电阻: 输入阻抗的电阻分量

绝缘层的欧姆电阻。绝缘电阻随着湿度的增加而迅速降低。

Johnson噪声: 电阻中电荷载流子的热运动所引入的噪声。具有白噪声频谱, 由温度、带宽和电阻值所决定。

漏电流: 施加电压时流过(漏电)绝缘电阻的误差电流。即使在低电流导体和附近的电压源之间存在的高电阻的通路也可以产生显著的漏电流。

长期精: 在90天或者更长的时间段中误差无法超过的极限。它可以表示为读数(或者信号源量值)的一定百分比, 外加在特定温度范围内的一系列计数。

所容许的最大输入: 在不造成仪器损伤的前提下, 在高和低输入测量端子间可以施加的最大的DC外加AC峰值(电压或者电流)。

MEMS: 微机电系统。用于描述一类尺寸为微米量级、可以对激励作出响应或者产生物理力(传感器和执行器)的系统。它们一般是利用与硅基IC制造工艺相同的光刻技术来制造的。

微欧计: 一种针对低电阻测量而优化的欧姆计。典型的微欧计使用4端测量方法, 具有可保证弱信号下的测量精度的特殊功能。

分子电子学: 任何由具有原子级精度和纳米级尺寸的电子器件所构成的系统, 特别是当它由分立的分子部件而非当前半导体器件中的连续材料所构成时。

分子操纵器: 一种具有近距探针机构、可以以原子级精度进行定位的器件, 其探针针尖上有分子结合点位; 可以作为一种通过位置合成来构建复杂结构的基础。

分子制造: 利用分子机械进行的制造, 可以借助定位式的化学合成机制对产物和副产物进行逐个分子式的控制。

分子纳米技术: 基于对产物和副产物进行的逐个分子式的控制, 从而对物质的结构进行彻底、廉价的控制; 亦指分子制造的产物、工艺, 包括分子机器。

MOSFET: 金属氧化物场效应晶体管。一种输入电阻极高的单极型器件。

Nano-: 一个词头, 意味着十亿分之一。

纳米电子学: 纳米尺度上的电子学。包括分子电子学和类似于目前的半导体器件的纳米尺度器件。

纳米技术: 用原子级或者分子级精度进行的器件制造。纳米技术的产物是最小特性尺寸小于100纳米(nm)的器件。纳米[一米的十亿分之一(10⁻⁹m)]是描述单个分子大小的最恰当的长度单位。

纳伏计: 可以提供纳伏级灵敏度、经过专门优化的电压计(一般采用

低热电EMF连接, 具有偏移补偿等)。

噪声: 叠加到所需信号上的任何有害信号。

差模抑制比: 仪器抑制施加到各输入端之间的干扰信号的能力。常常用特定频率下的分贝数来表述, 例如AC电源频率。

差模电压: 仪器的高电平(high)和低电平(Low)输入段之间所施加的电压。

失调电流: 即使未施加信号, 电路也会产生的电流。失调电流是由于电路中的摩擦生电、压电或者电化学反应所引起的。

过载保护: 保护仪器不至于受到输入端处过高的电流或者电压影响的电路。

皮安计: 一种专门针对小电流的精密测量进行优化的电流计。一般是一种反馈式的电流计。

压电效应: 当某些绝缘体承受机械应力时产生电流的现象。

精密度: 指测量中的不确定性的自由度。往往用于指可重复性和可重现性, 不应与精度混用。也参见不确定度

量子点: 一种可以局限单个电子(或者少量几个电子)的纳米观物体(往往是半导体岛), 其中电子只能占据分离的能态, 正如它们在原子中那样。量子点也被称为“人工原子”。

随机误差: 大量受到随机误差影响的测量值的平均值与真值一致。也参见系统误差。

量程: 可以测量或者输出的连续的一条信号值。在双极型仪器中, 量程包括正值和负值。

读数: 代表输入信号特性的显示数值。

读取频率: 读数刷新的频率。读取频率是读数间时间间隔的倒数。

相对精度: 测量仪器相对于一个二级标准的精度。也参见绝对精度。

咨询工程师

名词解释

重复性: 在相同条件下进行的连续测量所获取的结果间的一致性。

可复现性: 在测量条件发生指定的变化时对相同量进行的多次测量的结果之间的接近程度。

分辨率: 可以测量到(或者输出)并显示的输入(或者输出)信号的最小部分。

响应时间: 对于测量仪器而言,是指施加阶跃输入信号并在额定的精度范围内指示其幅值的时间。对于一个输出信号的仪器,是指编程设定一个变化至输出端处获得其量值的时间间隔。也称为稳定时间。

上升时间: 信号从其峰—峰值的较低百分比上升至较大百分比(往往是90%)时的时间。也参见下降时间。

灵敏度: 可以测量和显示的最小量值。

稳定时间: 对于测量仪器而言,是指施加阶跃输入信号并获得其在额定精度范围内的幅值指示的时间间隔。对于一个信号源仪器而言,是指编程设定一个变化后至输出端处获得其量值的时间间隔。也称为响应时间。

屏蔽: 待测电路周围的金属外罩,或者包绕线状导体(共轴或者3轴电缆)的金属衬套,用以降低干扰、互作用或者漏电。屏蔽往往接地或者与输入LO连接。

旁路电流计: 通过旁路电阻将输入电流变换为电压信号从而测量电流信号的一种电流计。与反馈电流计相比,旁路电流计的电压负荷较高,而灵敏度较低。

旁路电容负载: 横跨输入端的电容(如电缆或者夹具)对测量的影响。旁路电容将使得上升时间和稳定时间延长。

短期精度: 在指定的短时间(如24小时)内连续工作时,误差不至于超过的特定极限。除非特别规定,不容许进行任何形式的归零或者调整。它可以表述为读数(或者信号源)的百分比外加在规定温度范围内的大量计数。

单电子晶体管: 利用受控的电子隧道效应来放大电流的一种开关器件。SET由两个隧道结构成,它们共享一个电极。隧道结由两片金属及金属间放置的极薄(1nm)的绝缘体构成。电子从一个电极运动到另一个电极的

唯一路径是通过绝缘体的隧穿效应。隧穿效应是分立的过程,因此流过隧道结的电荷的电量是单个电子电量 e 的整数倍。

信号源阻抗: 信号源呈现在一个测量仪器的输入端的电阻和感性或容性电抗的组合。

信号源—测量仪—体单元(SMU): 一种可以输出DC电压和电流信号并进行测量的电子仪器。一般说来,SMU有两种工作模式:输出电压信号而测量电流信号,或者输出电流信号而测量电压性能。也称为信号源—监测器—体单元或者激励源—测量仪—体单元。

信号源—测量仪: 信号源—测量仪型仪器在很多方面非常类似于信号源—测量仪—体单元,包括其能同时输出电流和电压并执行扫描的能力。此外,信号源—测量仪—体化仪器可以直接将测量结果以电阻值、电压和电流等形式显示。它是针对通用型、高速化的生产测试应用而设计的。它还可以用作中等到弱信号测量的信号源,也可以用于研究型应用。

源电阻: 信号源阻抗的电阻分量。也参见Thevenin等效电路。

自旋电子学: 以某种方式利用电子的自旋特性而非仅仅利用其电荷的电子学。

标准电池: 在实验室中用作电压基准的化学原电池。

超导体: 具有零电阻的导体。这些材料往往仅在非常低的温度下变为超导态。

开关卡: 附带多个独立的和隔离的继电器的板卡,用于切换每个通道的输入和输出。

开关主机: 一种开关型仪器,可以在信号源、测量仪器和待测器件间连通信号。主机也指扫描仪、复用器、矩阵或者可编程的开关。

系统误差: 在系统误差影响下进行的大量测量,其结果的平均值偏离真值。也参见随机误差。

温度系数: 衡量读数(或者信号源输出量值)随着温度变化而变化的程度。它表示为读数(或者信号源输出量值)的百分比,外加对应每摄氏度的温度变化内的计数的多少。

电阻温度系数: 每单位温度变化所对应的材料或者器件电阻的变化,往往以 $\text{ppm}/^\circ\text{C}$ 为单位表示。

热电EMF: 测量电路内部温度差所造成的电压,或者不同材料导体连接到一起时造成的电压。

等效电路: 用于简化复杂的双端线性网络的分析而提出的电路模型。Thevenin等效电压是开路电压,Thevenin等效电阻则等于开路电压除以短路电流。

传输精度: 在有限温度范围内对两个近乎相等的测量值的比较。它以 ppm 为单位。也参见相对精度、短期精度。

摩擦生电效应: 导体和绝缘体间的摩擦产生的电荷所导致的电流现象。

触发: 能够启动一项或者更多仪器功能的外部激励。可以用作触发的激励包括:输入信号、前面板、外部触发脉冲和IEEE—488总线X、交谈和GET触发信号等。

双端电阻测量: 通过同一组测试导线输出电流信号并敏感电压输出的测量方式。

不确定度: 对测量中可能的误差进行的估计;换言之,偏离其真值的程度的估计值。

van der Pauw测量: 用于测量任意形状样品的电阻率的测量技术。

电压负荷: 电流计的输入端子两端的电压降。

电压系数: 施加电压时电阻值的变化。往往以百分比/V或者 ppm/V 。

暖机时间: 仪器通电至仪器在基准条件下达到额定精度的时间。

零点偏移: 当测量仪器的输入端短路(电压计)或者开路(电流计)时出现的测量读数。

咨询工程师

联系我们

吉时利（北京）测量仪器有限公司

www.keithley.com.cn

全国免费电话: 800-810-1334 400-650-1334

电话: 86-10-8447 5556

传真: 86-10-8447 5018

Email: china@keithley.com

Specifications are subject to change without notice.
All Keithley trademarks and trade names are the property of Keithley Instruments, Inc.
All other trademarks and trade names are the property of their respective companies.

A GREATER MEASURE OF CONFIDENCE

KEITHLEY

KEITHLEY INSTRUMENTS, INC. • 28775 AURORA RD. • CLEVELAND, OH 44139-1891 • 440-248-0400 • Fax: 440-248-6168 • 1-888-KEITHLEY • www.keithley.com

BELGIUM
Sint-Pieters-Leeuw
Ph: 02-3630040
Fax: 02-3630064
info@keithley.nl
www.keithley.nl

CHINA
Beijing
Ph: 86-10-8447-5556
Fax: 86-10-8225-5018
china@keithley.com
www.keithley.com.cn

FRANCE
Saint-Aubin
Ph: 01-64532020
Fax: 01-60117726
info@keithley.fr
www.keithley.fr

GERMANY
Germering
Ph: 089-84930740
Fax: 089-84930734
info@keithley.de
www.keithley.de

INDIA
Bangalore
Ph: 080-26771071, -72, -73
Fax: 080-26771076
support_india@keithley.com
www.keithley.com

ITALY
Peschiera Borromeo (Mi)
Ph: 02-5538421
Fax: 02-55384228
info@keithley.it
www.keithley.it

JAPAN
Tokyo
Ph: 81-3-5733-7555
Fax: 81-3-5733-7556
info.jp@keithley.com
www.keithley.jp

KOREA
Seoul
Ph: 82-2-574-7778
Fax: 82-2-574-7838
keithley@keithley.co.kr
www.keithley.co.kr

MALAYSIA
Penang
Ph: 60-4-643-9679
Fax: 60-4-643-3794
sea@keithley.com
www.keithley.com

NETHERLANDS
Son
Ph: 0183-635333
Fax: 0183-630821
info@keithley.nl
www.keithley.nl

SINGAPORE
Singapore
Ph: 65-6747-9077
Fax: 65-6747-2991
sea@keithley.com
www.keithley.com

SWITZERLAND
Zürich
Ph: 044-8219444
Fax: 044-8203081
info@keithley.ch
www.keithley.ch

TAIWAN
Hsinchu
Ph: 886-3-572-9077
Fax: 886-3-572-9031
info_tw@keithley.com
www.keithley.com.tw

UNITED KINGDOM
Theale
Ph: 0118-9297500
Fax: 0118-9297519
info@keithley.co.uk
www.keithley.co.uk