



动态电流微电阻测试方案

谷水泉

(北京海洋兴业科技股份有限公司 北京 100096)

摘要: 本文提出了一种动态电流微电阻测试方案,旨在解决传统测量设备(如微欧计和万用表)在小电阻测量中的限制。通过使用高精度万用表和高精度直流电源,可以实现对小电阻在不同电流下的阻值与变化的准确测试。

关键词: 可变电流、微欧计、万用表、高精度直流电源、热电势、引线电阻

1、引言

在众多领域中,小电阻的测量具有极其广泛的应用。举例来说,在光伏发电设备或汽车快充设备中,电流可能从数百安培开始。然而,即使取样电阻降至 $1\text{m}\Omega$,发热功率也可能达到数百瓦甚至上千瓦。此外,电动汽车充电头的接触电阻必须极低,需降至数 $\text{m}\Omega$ 或甚至 $\mu\Omega$ 的水平。这种情况下,传统测量设备(如微欧计和万用表)存在一些限制,例如固定激励电流和受限的测量范围。

通过本方案,我们能够满足现代实际应用中极小电阻测试的要求,为继电器开关、低电阻材料、连接器以及精密热量测定等领域的设计和优化提供支持。

2 引线电阻与四线法测量

2.1 引线电阻

电阻的测量常常使用下图所示的两线法来进行。当测试电阻时,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

引线电阻是在两线法电阻测量中常见的问题,它可以对测量结果产生显著的影响。引线电阻是由于测试引线自身的电阻而引起的。当电流通过引线时,引线电阻会引入额外的电压降,从而导致实际测量的电压值减小,进而影响计算出的电阻值。

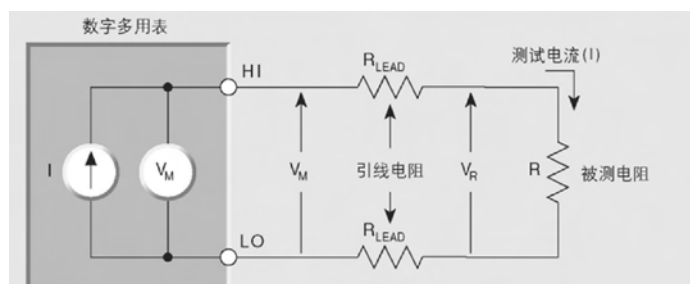


图1 两线法电阻测量

V_M : 由 DMM 测量的电压; V_R : 被测电阻两端的电压; R_{LEAD} : 引线电阻; 万用表显示阻值 $= V_M / I = R + (2 * R_{LEAD})$



典型引线电阻的范围在 $1\text{m}\Omega$ 到 $10\text{m}\Omega$ 之间，因此当被测电阻小于 10Ω 到 10Ω 时，使用两线测量方法很难获得准确的结果（取决于引线电阻的数值）。

2.2 四线法（开尔文）电阻测量

由上文可知，在低阻测试中，两线测量方法存在一个主要问题，即测量结果会受到引线电阻的影响。由于测试电流通过引线电阻时会产生一个虽小但重要的电压降，因此仪表测量的电压 V_M 与被测电阻上的电压 V_R 不完全相同，从而导致误差。

为了解决这个问题，推荐使用四线法（开尔文法）进行低阻测量。这种方法通过使用一组测试引线传递测试电流 I 并通过第二组取样引线测量被测电阻上的电压 V_R 。在四线法中，测试引线上的电压降可以忽略不计，使仪表测量的电压 V_M 与被测电阻上的电压 V_R 实际上是相同的。这样一来，可以比两线方法更高的准确性确定电阻的数值。需要注意的是，取样引线应尽可能短，以避免考虑测试线的电阻对测量结果的影响。

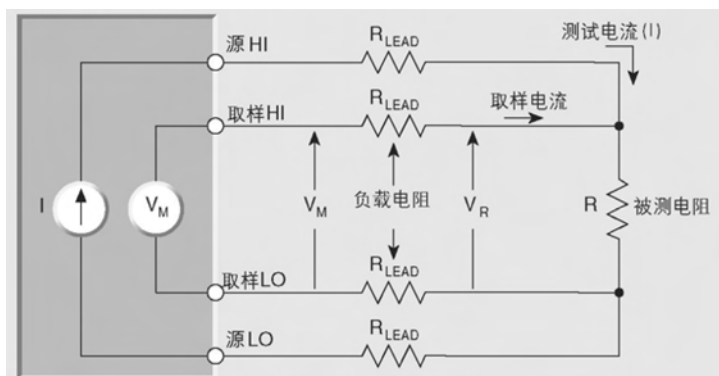


图2 四线法测量电阻

V_M : 由仪表测量的电压值; V_R : 被测电阻两端的电压, 由于取样电流可以忽略不计 $V_M=V_R$, 故被测电阻 $=V_M/I=V_R/I$

通过采用四线连接方法, 可以克服两线测量方法的局限性, 提高低阻测量的准确性。这种方法可以使用数字多用表、微欧计或分离的电流源和电压表来实施。

3 热电动势

热电动势是指由于温度梯度在导体中产生的电势差。它的产生基于两个主要原理: 热电效应和温差效应。

热电效应: 热电效应是指当两种不同材料的接触点存在温度差异时, 会产生电势差。这包括塞贝克 (Seebeck) 效应、珀尔帖 (Peltier) 效应和汤姆逊 (Thomson) 效应等。其中, 塞贝克 (Seebeck) 效应是最常见的热电效应, 其原理是在两种不同材料的接触点处, 由于温度差异而引起自由电子在材料之间产生漂移, 从而形成电势差。



成对的材料*	赛贝克系数 (Q_{AB})
Cu - Cu	$\leq 0.2\mu\text{V}/\text{C}$
Cu - Ag	$0.3\mu\text{V}/\text{C}$
Cu - Au	$0.3\mu\text{V}/\text{C}$
Cu - Pb/Sn	$1-3\mu\text{V}/\text{C}$
Cu - Si	$400\mu\text{V}/\text{C}$
Cu - Kovar	$\sim 40 - 75\mu\text{V}/\text{C}$
Cu - CuO	$\sim 1000\mu\text{V}/\text{C}$

* Ag = 银 Au = 金 Cu = 铜 CuO = 氧化铜 Pb = 铅 Si = 硅 Sn = 锡

图3 各种材料对于铜的塞贝克系数

使用相同材料的导体来构建电路可以将产生的热电动势降至最低。例如，使用铜制套筒或接线片来连接铜导线，也就是形成铜-铜的连接，将会产生最小的热电动势。而且，连接处还必须保持清洁、没有氧化物。铜制套筒与铜压制在一起的连接（又称为“冷焊接”）不会出现氧化层，这时可达到 $\leq 0.2\mu\text{V}/\text{C}$ 的赛贝克系数，而铜与氧化铜的连接则可能产生高达 $1\text{mV}/\text{C}$ 的赛贝克系数。

温差效应：温差效应是指热电动势随着导体内部温度差异的变化而改变。当电流通过电阻时，电阻体中不同部分的温度可能存在微小的差异。这种温差会导致材料表面的热电动势发生变化，并在测量中引入误差，如图4所示。

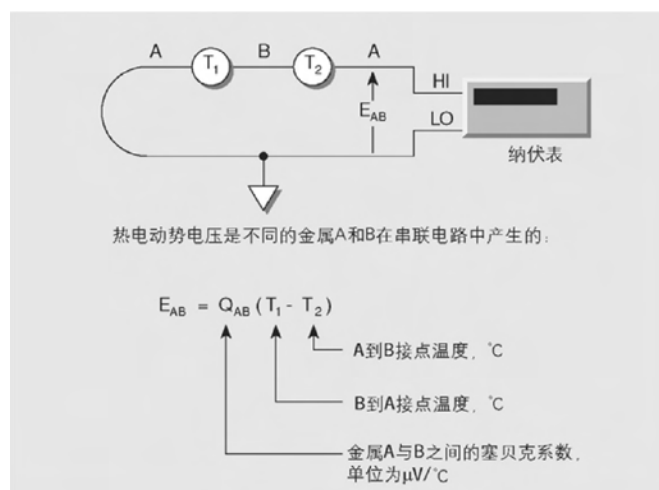


图4 热电动势

使温度梯度降至最小的一种方法是将相应的结点对放置在互相接近的地方，并与个公共的、大的散热器实现很好的热接触。必须使用高导热系数的绝缘体，因为大多数绝缘体都不能很好地传导热量，所以必须使用硬质阳极氧化铝、氧化铍、特别填充的环氧树脂、蓝宝石或者金刚石等类的特殊绝缘材料来实现与散热器的接触。

4 动态电流微电阻测试方案



本方案的一个关键特点是使用动态电流进行测试。在测试过程中，通过改变测试电流的大小和方向，可以获得被测件不同电流下的阻值与变化情况。这有助于了解被测件的电阻特性，并提供更全面的测试数据。

本方案通过使用万用表与电源组合来实现动态电流测试的目的。在测量大电阻时，通常加电压来测量电流；而在测量小电阻时，通常加电流来测量电压。所以我们测试小电阻在电源的恒流模式下做为激励源，通过万用表测试待测件流过的电压根据欧姆定律算出其在不同电流下的阻值。

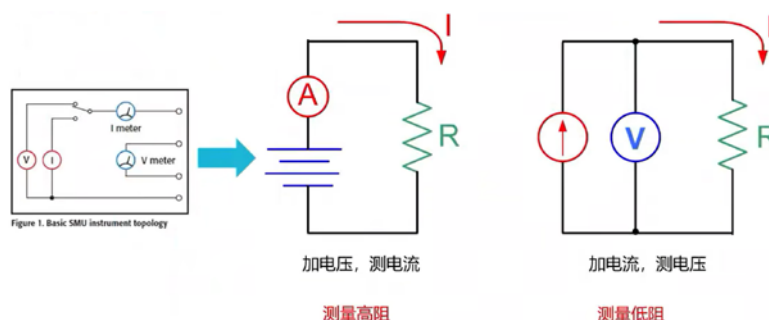


图 5 高阻/低阻测试模型

如下图 6 所示，通过将电源和万用表分别引线连接到被测件上，通过这种四线制连接方式消除了引线电阻的影响，提高测量结果的准确性，通过固纬的 GDM-906X 系列台式万用表，其 DVC 基本测量精度可达 0.0035% 搭配 R&S 编程分辨率 0.1mA，编程精度 < 0.1% 的 HMP 系列电源，可实现小电阻的精确测量，图 8 与表 1 为连接图与实测结果对比。



图 6 动态电流微电阻测试系统连接框图



图 7 动态电流微电阻测试系统与微欧计测试结果对比


表 1 动态电流微电阻测试系统与微欧计测试结果对比

设备	精度	档位	读数		
固纬 GOM805 微欧计	0.1% 读值+0.2% 档位	激励电流 1A, 档位: 5mΩ	0.2916m Ω	测试误差	0.0102916m Ω
R&S HMP4040 电源	≤0.1%+5mA	输出电流 1A	0.2907m V	计算电阻	0.2907mΩ
固纬 GDM9061 万用表	0.005% 读数+0.0035% 量程	测试档位 100mV			

对于测试中的热电动势干扰, 本方案选用了低热电势的夹具, 并在测试过程中采用反向电流法来最大程度地消除热电动势。

同时, 为了获得更准确和可靠的结果, 可以进行多次测量并取平均值。这样可以减少随机误差, 并提高测试的准确性, 然后根据测量结果进行数据分析和处理。可以绘制电阻与电流之间的曲线图, 以及计算出被测件的相关参数, 如温度系数、线性度等。

通过采用以上方法, 动态电流微电阻测试方案能够克服传统测量设备在小电阻测量中的限制。它可以提供更准确、可靠的测量结果, 并满足现代实际应用对小电阻测试的要求。

综上所述, 本方案结合了四线测量法、低热电势夹具和反向电流法等技术, 旨在消除引线电阻和热电动势对小电阻测试结果的影响, 从而提高测量的准确性和可靠性。

5 结论

根据北京某高校提出的测试需求, 北京海洋兴业科技股份有限公司的工程师提出了一种微电阻动态电流测试方案, 成功解决了传统测量设备在小电阻测量中的限制问题。通过对小电阻在不同电流下的阻值与变化进行准确测试, 我们能够满足现代实际应用中极小电阻测试的要求。

在本方案中, 我们重点讨论了低热电势和引线电阻等常见问题, 并给出了相应的解决方法, 以提高测量精确性。通过减小热电势和引线电阻的影响, 我们能够更准确地测量小电阻的数值, 从而提高测试的可靠性和准确性。

本文提出的动态电流微电阻测试方案具有重要的理论意义和实际应用价值, 为解决传统测量设备在小电阻测量中的限制问题提供了有效的解决方案。通过该方案, 我们能够准确地测量小电阻的数值, 并为相关领域的设计和优化提供支持, 推动小电阻测试技术的发展和应