

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2017.04.13

微小电阻测量方法的研究

陈广来, 李琴

(天津理工大学机械工程学院天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384)

摘要: 通过对多种微小电阻测量方法的研究, 测量时, 面对的问题、受到的干扰以及方法的不足入手进行改进。采用四线测量法设计的微小电阻测量装置, 避免了测量馈线、温升、辅助元件等对测量精度的影响, 进而实现了精准地测量微小电阻的目的。经过试验, 从实验数据中可直观地看到测量误差减小, 证明做出的改进对精确测试微小电阻, 有实用意义。

关键词: 恒流源; 四线测量法; 微小电阻

中图分类号: TM971

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2017)04-0053-04

Study on Measuring Method of Small Resistances

CHEN Guanglai, LI Qin

(Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology, Advanced Electromechanical Systems Design and Intelligent Control Laboratory in Tianjin, Tianjin 300384, China)

Abstract: A variety of small resistance measurement methods are studied in this paper and improvement suggestions are proposed to solve the problems and interferences in measurement, and the lack of methods. A small resistance measurement device based on the four-line method is adopted to avoid the effects of the feeding line, the temperature and the auxiliary elements on the measurement precision, so as to improve the measurement accuracy of the small resistances. According to the experimental data, it can be directly found that the measurement errors are reduced, and it is verified that the improvement has practical significance on accurate testing of small resistances.

Key words: constant current source; four-line measurement method; small resistance

1 测量小电阻的方法原理及分析

传统上, 有两种常用方法用于电阻测量: 一种是电桥平衡法; 另一种是欧姆定理法。对于阻值较小的电阻来说, 一般的测量方法是采用欧姆定律法^[1]。

1.1 欧姆定理法

根据测量所使用电源电流的不同, 微小电阻进行测量的方法有三种: 大脉冲电流、直流恒流、低频交流电流。这三种方法都存在各自的特点优势, 当然, 也都存在着一些问题。

大脉冲电流测量法即是运用大电流流过微小电阻产生压降信号, 通过得到的电压反映电阻的阻值。一方面, 在测量过程中随着输入电流值的增大, 被测电阻的温度也随之升高, 其阻值因为温度变化而改变; 另一方面, 温度高和输入电流的时间是正比关系, 当

电流输入时间变长时, 电阻的温度会升高。总体来说, 该方法的优点是降低对后续处理电路及程序的要求; 不足之处是随着输入电流增大电阻发热造成电阻的阻值会产生变化, 产生误差, 对测量结果会造成影响。另外, 当输入电流数值过高时, 需相应提高测量装置的性能, 运用大电流测量电阻数值难度加大。

直流恒流测量法采用恒定电流输入待测电阻。输入的电流数值是稳定的, 电阻数值是定值, 则电阻两端的电压信号是稳定的电压值。由于电阻值小, 致使压降信号较小, 为避免噪声信号淹没较小的被测电压信号, 应先用放大电路对被测电阻的两端电压信号进行信号放大。运用欧姆定律能够从采集到的数据计算出待测值。放大后的电压信号除以电流值再除以放大倍数得到的数据即是待测电阻的阻值。在采用直流恒流测量过程中, 不仅需要关注恒流源和放大器的性能, 还需要对信号进行滤波, 以减小测量误差。

运用低频交流电流能够进行微小电阻精确测量是以信号相关的理论为基础的。首先, 在测量电路上流

收稿日期: 2017-03-27; 修回日期: 2017-06-09

作者简介: 陈广来(1961-), 男, 副教授, 研究方向为检测与控制技术。

入低频交流电流, 得到两低频信号, 这两个信号频率相同, 但相位不同。其次, 依照噪声和参考电压没有关联的特点, 将这两个低频信号先相乘然后进行积分运算, 得到的数值也就是输出的电压数值。输出信号被影响的相关因素有待测信号幅度、参考信号幅度以及上述两者的相位差值, 而噪声是无法影响输出值的。但若要提高测量的重复性就需将测量时间 T 加长, 而测量时间延长将导致实时测量较难实现^[2-3]。

1.2 电桥测量法

在微小电阻测量情况下, 采用直流双电桥方法实现测量, 测量原理如图 1 所示^[4]。该方法可以用来检测非常小的电阻, 数值甚至可小于 $10^{-3} \Omega$ 。这种方法在更多时候应用于电机直流电阻和分流器电阻的测量。直流双电桥测量方法的最大特点是能够降低引线部分电阻对待测器件带来的影响。

用直流双电桥测量时, 工作电压通常用 1.5 V, 而工作电流的要求相对较大, 可达到 2 A。如此大的电流经过待测器件时, 会造成发热现象, 导致测量结果不准确, 出现误差, 测量时间不同测量值也不同; 一些待测器件是不允许通过大电流的, 否则会出现损坏, 这种情况便无法用电桥测量法进行测量; 对于一些分布电容较大或者感性器件, 电桥测量方法也完全不能使用。该方法电桥各个桥臂的电阻值和电桥内附或者外附标准电阻的准确度决定了待测电阻的测量精度。在直流双电桥测量电路的回路中有很多的电阻, 各个电阻的准确度不可能完全一致, 这样使得待测电阻的测量误差无法确定。

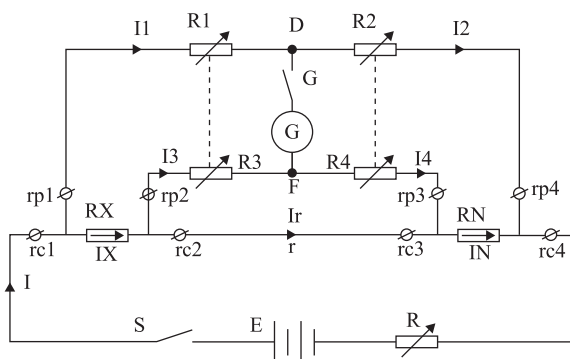


图1 双电桥测量原理

2 四线测量法的研究与实现

通过了解几种测量微小电阻方法的不足之处, 深入研究了四线测量法的原理, 本文着重在两方面进行了改进, 分别是减小测量电流(减小温升问题)和减少

测量元件(排除外围元件误差对测量准确度的影响), 设计了微小电阻测量装置。其系统框图见图2^[5-7]。

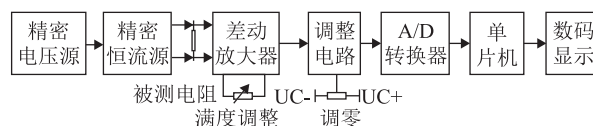


图2 四线测量法的系统框图

2.1 四线测量法原理

四线测量法的原理图如图3所示, 该方法的不同之处是电流流入的两条电流线不再与测量端的两条电压线有直接关联, 这样, 使测量端的电压和原来的电压有了改变, 测试得到的信号不是恒流源两端的直接电压, 电路输入恒流源电流。

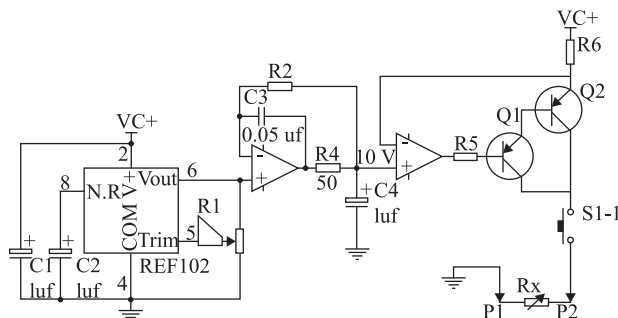


图3 四引线法

从图3可以直观地看到, 相比其他的测量方法, 四线测量法做出的改变是添加了两条馈线, 并且将电压测量端和恒流源隔开。此方法使得它们不再连接使得其形成新回路由恒流源与待测器件和两根馈线构成。

两根馈线的电压并没有传到测量端, 又由于放大器的输入阻抗($M\Omega$ 级)与馈线电阻(Ω 级)相差甚远, 致使馈线电阻对测量结果造成的影响几乎可以忽略, 所以, 测量端的电压就是待测电阻 R_x 两端的电压。运用此法测量可以达到很高的准确度。在进行测量试验时, 恒流源电流的误差大小是影响结果是否准确的重要因素之一。

2.2 恒流源

在微小电阻测量中, 恒流源电路(见图4)是一项重要环节, 它的准确度和稳定性影响了整个测量系统的准确度。为提高测量精确度, 本设计采用了由精密电压变换而成电流源的方法得到精密电流源。

REF102 是一种集成电路, 它具备高精度电压基准。该电路是经过激光调校之后形成的, 而且温漂未超出工业允许范围, 最低可以达到 $2.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。因

此没有必要额外增加恒温设备，所以，运用该电路有很多优势如功耗较低、迅速升温、稳定性好、噪声小等。另外，电路的输出几乎不会因为电源的数值改变和负载的变化而随之产生波动。调试变化外接电阻的数值可以使输出信号的稳定性和温度漂移减小至最低程度。

设计中，精密恒压源输出 10 V 的基准电压，经转换后变为输出 50 mA 的电流源，用来流过被测电阻以完成测量。

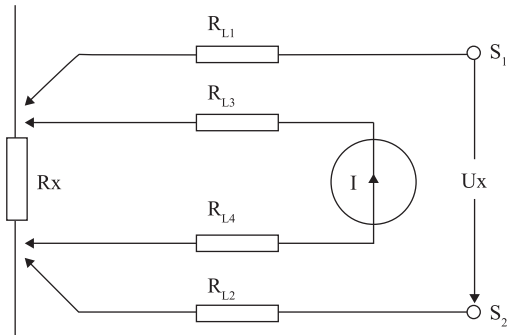


图 4 恒流源电路

2.3 放大器

在微小电阻测量时，由于阻值很小导致测量困难，进而对放大器的要求相应增大。它要求放大器的一系列性能（例如分辨力、线性度、输入阻抗、漂移、抑制噪声和抗干扰能力等）提高，以满足测量要求。另外，测量过程中还需要采取一些额外措施，例如：运用屏蔽措施，有效地避免噪声等干扰；采用电池供电，避免电网的干扰；采用双层屏蔽放大器以防止受到空间电磁的影响等，确保测量几乎不受外界干扰。

AD620 仪表放大器，它的优势有两方面：一是成本低廉；二是具有较高的精度。使用该放大器时，除了需要一个外部电阻改变设置增益大小以外，没有必要增加额外的外部器件。增益范围为 1 ~ 10000。此外，AD620 具有低功耗、高精度、低噪声、低失调电压、低漂移的特性，非常适合于作为前置放大器（见图 5）及使用电池供电和便携式应用^[7]。

2.4 A/D 转换器

A/D 转换器的位数选定是整个过程中重要的步骤之一。因为，位数是影响电压分辨力的重要因素，选定适合的位数关系到提高测量准确度的可能性，整个测量系统的误差决定电路应该采用的形式，系统的误差主要是量化误差和模拟误差组成的^[1]。由图 2 可以得出测试系统的误差构成，其中造成量化误差的因素

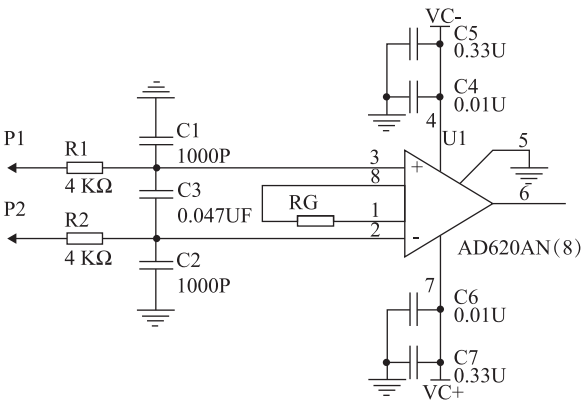


图 5 前置放大器 AD620

有 A/D 转换和放大器等非线性影响，而模拟误差是由恒流源的准确度、温漂及增益造成。当然，噪声和外部干扰对测量造成的影响是不可忽视的。为了得到与实际相差更小的待测器件数据，应对收集到的信号进行滤波处理。一方面应该先通过有源低通滤波器来滤掉所有交流干扰，再进行 A/D 转换环节，另一方面用软件进行数字滤波，将信号中被干扰及噪声的成分过滤掉。依照双电源 A/D 转换器的最小转换电压公式 $\Delta U = U_{\max}/2^n$ ，当电流流过待测电阻时，需要满足其两端的电压与阻值的数量级是大小相等的。因此，测量过程时，对于 A/D 转换器的位数要求会因为待测器件的阻值变小而相对提高。

2.5 参数设计

本设计中，恒流源电流为 50 mA，测量范围 0.001 ~ 2 Ω，最小测量电压 0.05 mV；使用 16 位 A/D 转换器，要求最小输入电压为 0.15 mV（按照测量量程，实际最小输入电压为 0.5 mV），故放大器放大倍数为 100。

2.6 仪器设计及使用方法

为消除因时间、环境等因素对仪器测量误差的影响，仪器中配有 2 Ω 标准电阻，测量时先将测量表笔短路调零，再用 2 Ω 标准电阻进行满度调整。应在使用前 3 ~ 5 min 开机，使得内部加热元件输出稳定，进而保证测量的准确性。

3 实验结果

为了检验测量电路的精确度，采用标准电阻进行检测，选用 0.01 级直流标准电阻，标称值分别为 1.5，1，0.1，0.01，0.001 Ω，共 5 种。表 1 为针对每个直流标准电阻进行 10 次测量的平均值（真值），其测量值与平均值的最大偏差不大于 0.000013 Ω。

从测量结果可以看出，最大绝对误差为 0.000183 Ω；最大测量误差为 ±0.0013% Rx + 0.000183 Ω。

表 1 针对标准电阻的测量数据

标准电阻标称值/Ω	测量值/Ω	相对误差/%
1.500	1.500030	0.0
1.000	1.000183	0.02
0.100	0.100039	0.04
0.010	0.010009	0.09
0.001	0.001003	0.30

4 结论

运用四线测量法对微小电阻进行测量，使测量馈线带来的影响降低到较小。
本设计的突出特点：①使用小电流作为激励，避免了由于激励电流过大或测量时间过长带来的温升问题；②测量回路中没有添加过多的辅助元件，使得测量准确度得到提高；③再者测量电路中配合标准电阻

的使用，进一步提升了测量试验的准确性；④电路简单、操作方便、制作成本低。

参 考 文 献

[1] 吴文全，叶晓慧. μΩ 级小电阻测量方法研究[J]. 电测与仪表，2003，40(11)：26-28.
[2] 朱恒余，吴文全. 小电阻测量技术[J]. 电子测量技术，2004(4)：52-53.
[3] 刘志存. 微小电阻测量方法及关键技术[J]. 物理测试，2005，23(1)：34-36.
[4] 徐加勤，曾天海. 双电桥测低电阻研究[J]. 北京理工大学学报，1997，17(4)：511-513.
[5] 何希才，张明莉. 新型稳压电源及应用实例[M]. 北京：电子工业出版社，2004.
[6] Ghausi M S. Principles and design of linear Active circuits. New York McGraw-Hill, 1995, Chap. 4
[7] Horenstein M N. Microelectronic Circuits and Devices [M] McGraw-Hill. 1996.
[8] 钱巨玺，张荣华. 电工测量[M]. 天津：天津大学出版社，1991.
[9] Brown B. Corporation Product Data book[Z]. 2000.

(上接第 48 页)

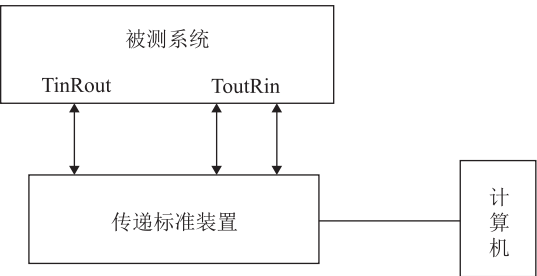


图 4 测量系统测试框图

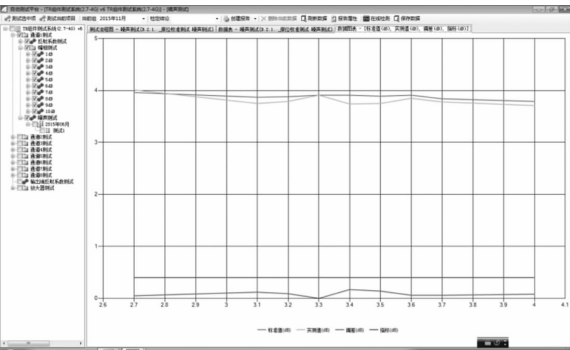


图 5 测试系统测量结果的图表界面

准件，实现了原位不停机整机校准，减少了测试系统

停产时间，提高了生产效率；提供了测试系统的快速故障诊断手段，提高了计量效率和仪表利用率；保证了测试系统的性能可靠。整套系统工作稳定可靠，操作简便，而且节约了开支，提高了工作效率，避免了集成测试系统搬运和拆卸过程中可能出现的问题，同时节省了人力、物力，解决了雷达射频自动测试系统的现场整体计量保证的问题。对推进射频与微波测量生产线开展工程调试、测试的自动化工作具有深远的意义，对射频与微波测量生产线其他集成系统^[6]的校准技术研究具有普遍的指导意义。为国防事业和雷达制造业提供了技术保障，填补了国内在该领域的空白。

参 考 文 献

[1] 秦红磊，路辉，郎荣玲. 自动测试系统硬件及软件技术[M]. 北京：高等教育出版社，2007：1-3.
[2] 李为玉. TR 组件 S 参数自动测试软件的设计和应用[J]. 现代电子技术，2012，35(13)：123-125.
[3] Dunsmore J P. 微波器件测量手册[M]. 陈新，译. 北京：电子工业出版社，2014.
[4] 卢晨. T/R 组件自动测试技术研究[J]. 电子工程师，2003，29(9)：35-36.
[5] 李宗扬. 计量基础知识[M]. 北京：原子能出版社，2002：6.
[6] 梁志国，吕华溢，张大治. 专用测试系统计量校准问题讨论[J]. 计测技术，2017，37(2)：1-5.