

# 数字多用表比率测量功能在标准电阻器校准中的应用

刘霞美 乔玉娥 翟玉卫 吴爱华 梁法国

(中国电子科技集团公司第十三研究所 石家庄 050051)

**摘要:** 为克服传统复杂测量标准电阻器方法的不足,保证快速、准确地对标准电阻器进行校准,提出了一种基于数字多用表 8508A 真欧姆比率测量功能测量标准电阻的方法,采用直接四线比率测量功能与真欧姆比率测量功能两种方法对标准电阻器进行校准。校准结果表明,采用真欧姆比率测量能够更好地消除热电势、电路失调的影响,且相对于传统复杂的测量方法,更快捷、方便,在试验的基础上对校准值进行了测量不确定度的分析与评定,更加验证了本校准方法的准确性和可靠性。

**关键词:** 标准电阻器;真欧姆比率测量;测量不确定度

**中图分类号:** TB971 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3510

## Application of the ratio method function in calibrating the DC resistance

Liu Xiamei Qiao Yu'e Zhai Yuwei Wu Aihua Liang Faguo

(The 13<sup>th</sup> Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Shijiazhuang 050051, China)

**Abstract:** In order to overcome the shortcoming of complex and traditional methods in measuring standard resistor, and to calibrate the standard resistor fast and accurately, this article has proposed a new method of measuring the standard resistor based on the digital multimeter—8508A's function of true Ohm ratio method. In this article, both the direct four-wire ratio measuring method and true ohm ratio measuring method were adopted to calibrate the standard resistor, and we find that true Ohm ratio method can eliminate the influence of thermoelectric power and circuit disorders better. Compared with the traditional and complex measuring method, this method is more convenient and efficient. Finally, the measuring uncertainty of calibration values has been also analyzed and assessed in order to verify the accuracy and reliability of this calibration method.

**Keywords:** standard resistor; true Ohm ratio measurement; measuring uncertainty

## 1 引言

标准电阻器广泛应用于测量领域,在 JJG166-1993《直流电阻器检定规程》中,有多种检定标准电阻器的方法,包括电桥法、伏安法、数字多用表法等<sup>[1]</sup>,这些方法各有其特点和适用范围<sup>[2]</sup>。通常对全套标准电阻的检定,一般采用 XQJ 型标准电阻比较仪或者电流比较仪式电桥等。这些传统的比较仪器测量精度高,技术成熟,很难用其他方法代替,也因此发展相对滞后<sup>[3-5]</sup>。为了克服传统方法的不足,利用现有仪器的特定功能来实现对标准电阻器的校准。

随着数字多用表技术水平的提高和功能的不断完善,数字多用表的比率测量功能得到了越来越广泛的应用,配

合高精度且稳定性好的标准电阻器,利用数字多用表的比率测量功能可以方便快捷、准确可靠地校准标准电阻。

关于数字多用表比率测量功能,2009年南通市计量检定测试所张帆<sup>[6]</sup>用 8508A 数字多用表欧姆档对 ZX54 直流电阻箱的检定进行探讨;2012年安阳市质量技术监督检验试验中心宋好琦<sup>[2]</sup>利用数字多用表的比率测量功能对直流电阻箱进行检定,其中采用 7071 数字多用表的比率测量功能直接对标准电阻箱进行校准;2013年新疆计量测试研究院刘伟<sup>[7]</sup>用数字表 8846A 检定直流电阻箱,简单介绍了利用 8846A 比率测量功能相对传统测量方法的优势;同年,北京无线电计量测试研究所的张建永等人<sup>[8]</sup>利用 8508A 的比率测量功能通过减小电阻测量中的引线电阻、

热电势等的影响来对一等标准电阻进行检定。然而利用真欧姆功能下的比率测量功能对标准电阻器进行校准的方法,且与直接利用四线电阻功能下的比率测量功能相比相差多少,未见相关介绍。

本文利用数字多用表 8508A 的比率测量功能,采用真欧姆比率测量实现对标准电阻器的校准,且与直接利用四线电阻比率测量功能进行比较,选出最优方案,并对其进行了不确定度评定。以下将阐述真欧姆比率测量的原理、方法、校准结果、不确定度分析和结论。

## 2 真欧姆比率测量功能的基本原理及介绍

### 2.1 比率测量

高精度数字多用表 8508A 具有双通道比率测量功能,可以简单而快速的传递测量能力,且能够自动地进行切换来完成比率测量工作,大大提高校准质量,减少测量不确定度<sup>[9]</sup>。

比率测量功能利用的是仪器的短期稳定性,而直接测量法利用的是仪器的年稳定性指标,对于数字多用表 8508A 来说,比率测量功能利用的是 20 min 的短期稳定性指标,比年稳定性指标低 8 ppm,很明显,比率测量能够提高我们测量装置整体的指标。在比率测量模式下,有 3 种模式可供选择:F-R;F/R 和(F-R)/R。前面板通道和后面板通道可以是相同的电量信号,也可以是不相同的电量信号。例如前面板通道输入 10 V 直流电压,后面板通道输入 1 V 直流电压。这一功能可以用来进行电压、电阻比率测量等<sup>[10]</sup>。

### 2.2 真欧姆测量(TruΩ)

在小电阻测量时,通常采用四线电阻测量模式来消除引线电阻和热电势的影响,在测试时间足够充足的条件下,能够消除电路中热电势的影响,但能否消除所有的热电势的影响并不清楚,也没有相应的数据。而数字多用表 8508A 的真欧姆测量功能解决了这样的问题。在电路测量中,连续测量 2 个读数,第 1 次用正向电流测量,第 2 次用反向电流测量,用第 1 次测量结果减去第 2 次测量结果得到 2 次测量绝对值的和,将此绝对值的和除以 2。即得到一个消除了所有热电势和电路失调的影响的电阻值,即真正的欧姆值<sup>[11]</sup>。单次测量和真欧姆测量公式如下。

单次测量:

$$\text{测量值} = \frac{I \cdot R + V_{OS}}{I} = R + \frac{V_{OS}}{I} \quad (1)$$

真欧姆测量:

$$\text{测量值} = \frac{(I \cdot R + V_{OS}) - (-I \cdot R + V_{OS})}{2I} = R \quad (2)$$

数字多用表 8508A 电阻测量量程为 2 Ω~20 GΩ、分辨率达 10 nΩ,真欧姆(TruΩ)功能是专门用于测量 20 kΩ 以下的电阻,能够消除测量电路中的热电势<sup>[12]</sup>。

为了更准确的测得标准电阻的值,在测量 20 kΩ 以下

的电阻时,本文利用真欧姆比率测量功能测量电阻,消除了热电势的影响,其线性度也不会随时间发生很大变化,且测量过程是自动化的,花费的时间较少,保证了测量不确定度变得最小。

下面利用数字多用表 8508A 的真欧姆比率测量和四线电阻比率测量分别对被测标准电阻 742A 进行测量。

## 3 校准试验方案及校准结果

### 3.1 校准框图

将经上级检定的一等标准电阻 BZ3C 作为参考标准,连接到数字多用表 8508A 的后面板,为了充分验证我们的试验,本文选取精度较高,稳定性较好的 742A 标准电阻作为被测量,连接到数字多用表 8508A 的前面板<sup>[7]</sup>,校准框图如图 1 所示。

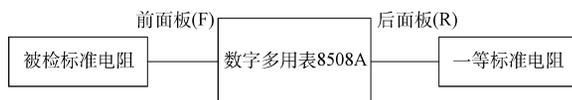


图 1 直流电阻器校准框图

### 3.2 校准实验方案

#### 3.2.1 方案一,真欧姆比率测量

以校准直流电阻器 1 Ω 为例,数字多用表 8508A 预热足够时间,将经上级校准的一等标准电阻 BZ3C 的 1 Ω 浸泡油槽中并连接到数字多用表 8508A 的后面板。由于 FLUKE 的 742A 可以在空气中使用,其优异的温度稳定性使之可以工作在 18 ℃~28 ℃ 的范围内,因此可以将被校准标准电阻器 742A-1Ω 直接连接到数字多用表 8508A 的前面板,首先选择高精度数字多用表 8508A 真欧姆测量功能,按 Tru(键进入真欧姆功能菜单,如图 2 所示,菜单显示出量程状态,选择 2 Ω 量程。

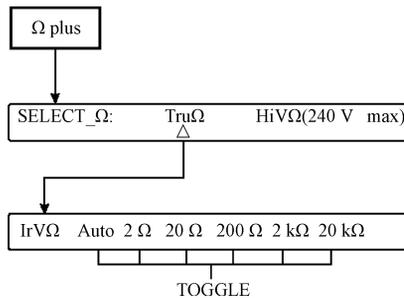


图 2 真欧姆功能菜单

选择高精度数字多用表 8508A 比率测量功能,按 Input(输入)键,显示如图 3 所示。选择 Scan: 比率测量,选择 F÷R,此时高精度数字多用表对前后面板输入采用两通道进行真欧姆比率测量,待比率值趋于稳定读数。

#### 3.2.2 方案二,四线电阻比率测量

在方案一的基础上,在选择功能时直接选择四线电阻

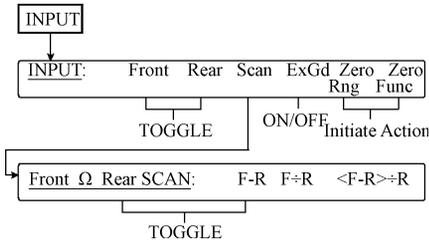


图 3 比率功能菜单

的测量模式,进而同方案一选择比率测量,待比率值趋于稳定读数。

3.3 校准结果

利用数字多用表 8508A 的真欧姆比率测量和四线电阻比率测量的结果如表 1 所示。

该被测 1 Ω 电阻经上级溯源的值为 1.000 007 8 Ω,利用真欧姆比率测量得到的值为 1.000 008 6,而直接利用四线欧姆比率测量为 1.000 011 2,很明显,利用真欧姆比率测量能更好的消除热电势,使得测量数据更准确,采用真欧

表 1 真欧姆比率测量与四线电阻比率测量结果

模式数据	比率值(四线欧姆比率测量)	比率值(真欧姆比率测量)	电阻值(四线电阻值(真欧姆比率测量)/Ω)	电阻值(真欧姆比率测量)/Ω
	1.000 022 5	1.000 019 9	1.000 011 2	1.000 008 6
	1.000 022 6	1.000 020 1	1.000 011 3	1.000 008 8
	1.000 022 5	1.000 02	1.000 011 2	1.000 008 7
	1.000 022 4	1.000 019 8	1.000 011 1	1.000 008 5
测量值	1.000 022 6	1.000 019 9	1.000 011 3	1.000 008 6
	1.000 022 5	1.000 019 9	1.000 011 2	1.000 008 6
	1.000 022 3	1.000 019 7	1.000 011	1.000 008 4
	1.000 022 3	1.000 019 8	1.000 011	1.000 008 5
	1.000 022 6	1.000 02	1.000 011 3	1.000 008 7
	1.000 022 5	1.000 020 1	1.000 011 2	1.000 008 8
平均值	1.000 022 5	1.000 019 9	1.000 011 2	1.000 008 6

姆比率测量功能,对其它数值电阻也进行相应的校准,测量结果如表 2 所示。

表 2 标准电阻测量结果

标称值/Ω	产品号	型号	R <sub>20</sub> /Ω		BZ3C 上级校	
			上级证书数据	实验数据	准值	k 值
1	163 904	742A	1.000 007	1.000 008 6	0.999 988 7	1.000 067 2
10	160 211	742	10.000 047	10.000 052	9.999 999	1.000 005 3
100	1 639 002	742	100.000 37	100.000 56	100.002 34	0.999 982 2
1 000	1 639 013	742	1 000.0044	1 000.007 9	1 000.0037	1.000 004 2
10 000	1 602 012	742	10 000.006	10 000.097	9 999.163	1.000 093 4

4 不确定度分析

下面对 1 Ω 点为例进行测量不确定度的分析和评定<sup>[13-15]</sup>。

4.1 数学模型

$$R_F = kR_R \quad (3)$$

式中: R<sub>F</sub> 是被测标准电阻的实际值; R<sub>R</sub> 是标准电阻的实际值; k 是数字多用表 8508A 比率测量时的示值。

4.2 标准不确定度的来源

1) 测量结果的重复性引入的标准不确定度分量 u<sub>1</sub>

主要由测量结果离散性引起的,可通过连续测量得到,采用 A 类方法进行评定。各种干扰因素对测量结果的影响也包括在连续测量中的离散型,故不再分析其影响。重复测量 10 次所得数据如表 3 所示。

依据重复性试验结果得:

$$u_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)} = 1.3 \times 10^{-7} \Omega \quad (4)$$

2) 标准电阻 1 Ω 年变化引入的不确定度分量 u<sub>2</sub>

表 3 标准电阻 1 Ω 重复 10 次测量结果

测量次数	测量结果(k)
1	1.000 019 9
2	1.000 0199
3	1.000 02
4	1.000 020 1
5	1.000 02
6	1.000 019 8
7	1.000 019 7
8	1.000 019 9
9	1.000 019 7
10	1.000 019 8

查看直流电阻器检定规程,1 Ω 一等标准电阻技术指标为 1×10<sup>-6</sup>,认为该项符合均匀分布,取包含因子 k = √3,则标准不确定度 u<sub>2</sub> 为:

$$u_2 = 1 \times 10^{-6} / \sqrt{3} = 0.58 \times 10^{-6} \Omega \quad (5)$$

3) 标准电阻  $1\Omega$  传递不确定度  $u_3$

查 BZ3C 检定证书, 该项为  $0.5 \times 10^{-6}$ , 认为其服从正态分布, 取包含因子  $k = 3$ , 则标准不确定度  $u_3$  为:

$$u_3 = 0.5 \times 10^{-6} / 3 = 0.17 \times 10^{-6} \Omega \quad (6)$$

4) 数字多用表 8508A 比率测量引入的标准不确定

$$u_B = \frac{a_N}{k_N} = \frac{\sqrt{\left(2.0 \times 10^{-6} + 2.0 \times 10^{-6} \times \frac{2}{1\Omega}\right)^2 + \left(2.0 \times 10^{-6} + 2.0 \times 10^{-6} \times \frac{2}{1\Omega}\right)^2}}{\sqrt{3}} = 4.9 \times 10^{-6} \Omega \quad (7)$$

#### 4.3 合成标准不确定度

输入量彼此独立不相关, 所以合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = \sqrt{(1.3 \times 10^{-7})^2 + (0.58 \times 10^{-6})^2 + (0.17 \times 10^{-6})^2 + (4.9 \times 10^{-6})^2} = 4.9 \times 10^{-6} \Omega \quad (8)$$

#### 4.4 扩展不确定度

取置信因子 3, 则扩展不确定度为:

$$U = ku_c = 3 \times 4.9 \times 10^{-6} = 1.5 \times 10^{-5} \Omega \quad (9)$$

#### 4.5 验证

根据计量标准不确定度验证中的传递比较法, 上级证书  $1\Omega$  标准不确定度  $0.5 \times 10^{-6}$ , 满足, 当  $0.5 \times 10^{-6} \leq 1.5 \times 10^{-5} / 3$ ,  $|1.000\ 008\ 6 - 1.000\ 007\ 0| \leq 1.5 \times 10^{-5}$ , 则认为校准方法可行。

#### 4.6 其他点的测量不确定度

其他总的相关参数及测量不确定度如表 4 所示。

表 4 各标准电阻测量不确定度

标称值	产品号	型号	实验数据	$U$
$1\Omega$	163 901 4	742A	1.000 008 6	$1.5 \times 10^{-3}$
$10\Omega$	160 201 1	742A	10.000 052	$1.6 \times 10^{-3}$
$100\Omega$	163 900 2	742A	100.0005 6	$5.4 \times 10^{-3}$
$1\ 000\Omega$	163 901 3	742A	1 000.007 9	$5.4 \times 10^{-4}$
$10\ 000\Omega$	160 201 2	742A	10 000.097	$1.0 \times 10^{-4}$
$100\ 000\Omega$	160 201 5	742A	100 000.95	$1.0 \times 10^{-4}$
$1\ M\Omega$	160 200 8	743A	1.000 002 7	$2.3 \times 10^{-4}$

## 5 结 论

本文介绍了一种利用数字多用表 8508A 的真欧姆比率测量功能, 与四线欧姆比率测量法相比, 真欧姆比率测量能更好的消除热电势、电路失调的影响, 且这种方法方便、速度快、测量准确度高。

## 参考文献

- [1] 何晓敏. 用比率法测量直流电阻器的探讨[J]. 中国计量, 2013(1):98-100.
- [2] 宋好琦. 数字多用表的比率测量功能在直流电阻箱检定中的应用[J]. 中国新技术新产品, 2012(20):240.
- [3] 陈文华, 余水宝, 张艳艳, 等. 高精度宽量程电阻测量方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(S1):452-453.

度  $u_4$

测量  $1\Omega$  标准电阻, 查数字多用表 8508A 说明书技术指标为:  $\pm(0.2 \times 10^{-6} \text{Reading} + 0.15 \times 10^{-6} \text{Range})$ , 认为其服从均匀分布, 取包含因子  $k = \sqrt{3}$ , 则标准不确定度  $u_4$  为:

- [4] 薛燕, 刘玉波, 于梦娇. QJ55KZ 型直流比较仪电桥测量标准电阻的一种简便方法[C]. 2014 国防计量与测试学术交流会, 2014:424-427.
- [5] 余学峰, 曹素珍. 标准电阻校准[J]. 电子测量技术, 2005, 28(1):41-43.
- [6] 张帆. 用 8508A 数字多用表欧姆档开展对 ZX54 直流电阻箱检定的探讨[J]. 计量与测试技术, 2009, 36(11):33-36.
- [7] 刘伟. 用数字表 8846A 检定直流电阻箱[J]. 工业计量, 2013, 23(2):80.
- [8] 张建永, 岳伟, 贾涛. 一种数字表检定标准电阻的方法[J]. 电子测量技术, 2013, 36(5):41-44.
- [9] 夏春燕, 汪小婷. 比率测量法校准直流标准电压源的研究[C]. 2014 国防计量与测试学术交流会, 2014:407-408.
- [10] 曹胜刚, 赵晓晶. 数字多用表电压比率测量功能的应用与探讨[J]. 工业计量, 2015, 25(1):43-44.
- [11] 庄双勇, 陈怀艳. 同等级固态电压标准的校准方法的实现[C]. 2010 国防计量于测试学术交流会, 2010:215-221.
- [12] 张露妍, 冯亮. 数字多用表测量直流高值电阻测量结果的不确定度评定[J]. 仪器仪表标准化与计量, 2013(3):41-43.
- [13] 陈明亮, 古建平. 3458A 测量直流源启动上升时间的探讨[J]. 国外电子测量技术, 2014, 33(6):54-56.
- [14] 宋明顺, 方兴华, 黄佳, 等. 校准和检测中微小样本测量不确定度评定方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(2):421-426.
- [15] 冯登超. 测量不确定度在多元数据处理的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 23(Z1):46-50.

## 作者简介

刘霞美, 本科, 技术员, 研究方向为电学计量和半导体器件测试。

E-mail: liuxiami89@126.com