

磁调制式直流电流比较仪精密测量 应用拓展的探索

周力任, 朱 力, 耿 骥

(上海市计量测试技术研究院, 上海市在线检测与控制技术重点实验室, 上海 201203)

摘要: 磁调制式直流电流比较仪依托调制解调技术实现直流电流的高准确度变换, 广泛应用于直流电阻、直流大电流及其比例的精密测量。为拓展直流电流比较仪在精密测量领域的应用, 提出一种非常规直流电流比例的校准方法, 通过二次电流的加减运算, 解决标准比例数量受限的问题。通过实际测试, 验证该方法的可行性。此外, 提出基于直流电流比较仪的直流电阻器电流系数测量方法, 通过比例调节的方式满足电流系数定义的同时, 还消除了标准电阻器引入的误差。该方法经过四步测量, 完成直流电阻值的自比较, 得到电流系数的准确数值, 具有不依赖上级标准器的特点。

关键词: 直流电流比较仪; 电流比例; 误差; 校准; 电流系数; 测量不确定度

Exploration on the application expansion of direct current comparator precision measurement

ZHOU Liren, ZHU Li, GENG Ji

(Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology, Shanghai Key Laboratory of On-line Testing and Control Technology, Shanghai 201203, China)

Abstract: Direct current comparator realizes high accuracy conversion of direct current based on the modulation and demodulation technology, widely used in the precision measurement of direct current resistance, large direct current and direct current ratio. To expand the application of direct current comparator in the field of precision measurement, a calibration method of unconventional direct current ratio was proposed, which solves the problem of limited standard ratio number through the addition and subtraction of secondary current. The feasibility was verified through practical test. Furthermore, a current coefficient measurement method of direct current resistor based on direct current comparator was presented. The definition of current coefficient was satisfied by the ratio adjustment, and the error introduced by the standard resistor was also eliminated. This method completed the self-comparison of direct current resistance value and obtained the accurate value of current coefficient after four steps measurement, characterized by the independence of superior standard device.

Key words: direct current comparator; current ratio; error; calibration; current coefficient; measurement uncertainty

0 引言

直流大电流测量涉及工业生产和科学研究中的诸多领域^[1-3]。例如,输配电产业和电动汽车产业的电量计量,医疗设备产业核磁共振设备的电流精密测量,粒子对撞机等大科学装置的高稳定大电流监测。为提高测量准确度,通常先将大电流按预期比例变换成小电流,经 I/V 转换后由商用仪表测量^[4]。

不同于交流电流的磁感应耦合,直流电流比例变换原理主要有霍尔式、光纤式和磁调制式等^[5-7]。其中,磁调制式直流电流比较仪(简称比较仪)为使铁心处于零磁通状态,其二次磁动势实时跟踪抵消一次磁动势,形成一个深度负反馈系统^[8]。

正是因为比较仪具有高准确度和高线性度的特点,国内外学者围绕其应用开展研究工作。文献[9]利用比较仪的高准确度特性,基于测量二次侧差值电流的原理,提出自校法、对校法和级联对校法,开展直流电流传感器的校准。可根据被校设备参数特点和需求,灵活选择和配置现有标准器和方法,完成直流电流比例的量值溯源。

文献[10]将比较仪技术运用到电阻电桥中,电桥固有比例误差从 $0.05 \times 10^{-6} - 0.02 \times 10^{-6}$ 降低到 $0.01 \times 10^{-6} - 0.005 \times 10^{-6}$ 。上述误差通过与低温比较仪进行验证确认。电桥的自动平衡技术有助于实现 $0.1 \Omega \sim 100 \text{ k}\Omega$ 范围内电阻值的更精确测量。

文献[11]设计了一套直流电流校准系统,核心设备包括直流电流比较仪、标准电阻器和数字电压表。不确定度分量来源于比例标准器的误差、数字电压表的短期稳定度、标准电阻器的误差、电流源的短期稳定度和测量重复性。电流达到300 A时,测量不确定度为 1.8×10^{-6} 。

对于直流电流比例的校准,采用测量二次侧差值电流的方法,通常是满足测量不确定度要求的有效途径,而前提条件是标准比例与被校比例标称值相同^[12]。在标准比例数量有限的情况下,如何满足非常规直流电流比例的量值溯源需求是

一个亟待解决的问题。

另外,直流电流比较仪式电阻电桥已将电阻器阻值测量不确定度提升至较高的水平^[13]。测量过程中,流过被测电阻器与标准电阻器的电流同比例增大或减小,即两者阻值的比值所对应的电流始终处于同一比例关系,显然这对于电流系数的测量存在瑕疵。因为标准电阻器的电流系数客观存在,遇到高准确度测量要求时不能忽略。如果只是与高等级的标准器进行比较,无疑陷入了循环,且没有从本质上解决电流系数的测量问题。

1 非常规直流电流比例的校准

通常直流电流比例的校准原理是以标准比例作为参考值,被校比例的实际值通过二次侧的差值电流测量后获得^[14]。当被校比例较为特殊,且现有标准比例无法满足标称值相同的条件,即自校法、对校法和级联对校法都不适用时,可以通过一次侧正向、反向串联,形成二次电流的加减运算,破解上述困境。线路如图1和图2所示。

图1和图2中, L_1 、 L_2 为比较仪一次侧的对应端子,即输入端,其中 L_1 为极性端; K_1 、 K_2 为比较仪二次侧的对应端子,即输出端,其中 K_1 为极性端。比较仪双向工作,电流如果从一次侧的极性端流入,则从二次侧的极性端流出;反之,电流如果从一次侧的极性端流出,则从二次侧的极性端流入。

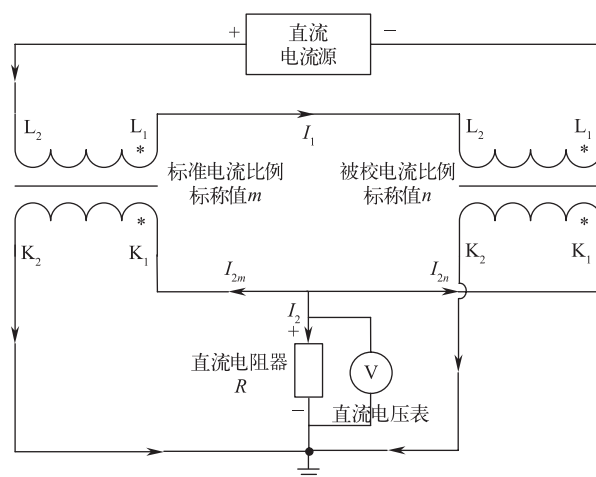


图1 二次电流加法线路

Fig. 1 Addition circuit of secondary current

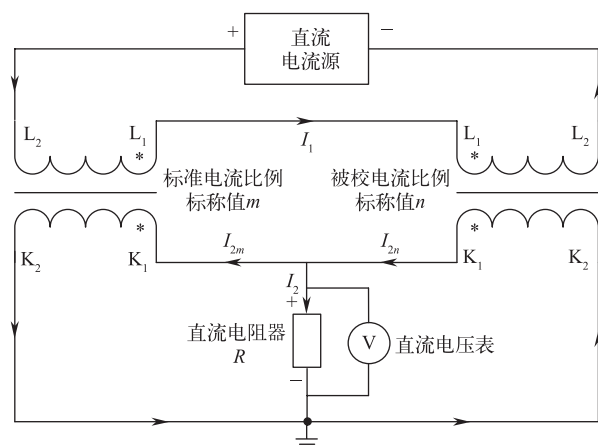


图2 二次电流减法线路

Fig. 2 Subtraction circuit of secondary current

选择一台比例标称值 m 与被校比较仪比例标称值 n 尽可能接近的标准比较仪，并要求标准比较仪额定一次电流不小于被校比较仪额定一次电流。按图1进行接线，直流电流源正向串联标准比较仪与被校比较仪的一次侧，一次电流为 I_1 ；标准比较仪的二次电流 I_{2m} 与被校比较仪的二次电流 I_{2n} 同方向流入直流电阻器 R ，形成二次电流的加法运算， I_2 为流过直流电阻器 R 的电流，直流电压表测量直流电阻器的电压值为 U_1 。可得

$$U_1 = I_2 R \quad (1)$$

$$I_2 = -(I_{2m} + I_{2n}) \quad (2)$$

$$m = I_1 / I_{2m} \quad (3)$$

$$n = I_1 / I_{2n} \quad (4)$$

$$\Rightarrow U_1 = -\left(\frac{1}{m} + \frac{1}{n}\right) I_1 R \quad (5)$$

按图2进行接线，直流电流源反向串联标准比较仪与被校比较仪的一次侧，输出值不变，一次电流仍为 I_1 ；标准比较仪的二次电流 I_{2m} 与被校比较仪的二次电流 I_{2n} 反方向流入直流电阻器 R ，形成二次电流的减法运算，直流电压表测量直流电阻器的电压值为 U_2 。可得

$$U_2 = I_2 R \quad (6)$$

$$I_2 = I_{2n} - I_{2m} \quad (7)$$

$$\Rightarrow U_2 = \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{m}\right) I_1 R \quad (8)$$

式(5)与式(8)相除，可得被校电流比例的表达式为

$$n = \frac{U_1 + U_2}{U_1 - U_2} m \quad (9)$$

启动直流电流源，平稳升降电流至各校准点，稳定后记录直流电压表的读数，根据式(9)计算得到被校比例的实际值。此外，由式(9)可知，被校比例的测量不确定度主要由标准比例的参考值及电压测量值的误差引入，直流电流源和直流电阻器的计量性能对测量结果的影响较小。可见，该校准方法有助于降低对于辅助测量设备性能的要求。

2 直流电阻器电流系数的测量

由于直流电阻器材料、结构和设计等方面的因素，电阻值随着通入电流的变化而变化，两者的相关性称为电流系数。在精密测量领域，电流系数不但不能忽略，而且应准确测量该数值，以此修正测量结果^[15]。通常以额定电流1/10时的电阻值作为起始点和参考点，其余电流量程内的电阻值与该点比较，得到该直流电阻器的电流系数。

设计了一套电流系数测量装置，由直流电流源、直流电流比较仪、可调直流电流比较仪、标准直流电阻器、电压表和指零仪构成，形成两组测量系统。第一组测量系统包括直流电流源、直流电流比较仪、标准直流电阻器和电压表，得到被测电阻器流过不同电流时两端电压相对于不同标准电阻器两端电压的差值。第二组测量系统包括直流电流源、直流电流比较仪、可调直流电流比较仪、标准直流电阻器和指零仪，得到被测直流电阻器阻值与标准直流电阻器阻值的比值。

测量步骤：

第一步，线路连接如图3所示，直流电流源连接两台比较仪的一次侧，两台比较仪的二次侧分别连接被测直流电阻器和标准直流电阻器，被测直流电阻器与标准直流电阻器的低电位端对接、高电位端间连入直流电压表。

假设直流电流源输出电流 I_1 ，两台电流比例分别为 k_3 和 k_2 的直流电流比较仪将电流 I_1 分别变

换为电流 I_3 和 I_2 ，直流电压表记录被测直流电阻器 R_3 相对于标准直流电阻器 R_2 的电压差 U_1 。可得

$$\frac{I_1}{k_3} R_{3(I_3)} - \frac{I_1}{k_2} R_{2(I_2)} = U_1 \quad (10)$$

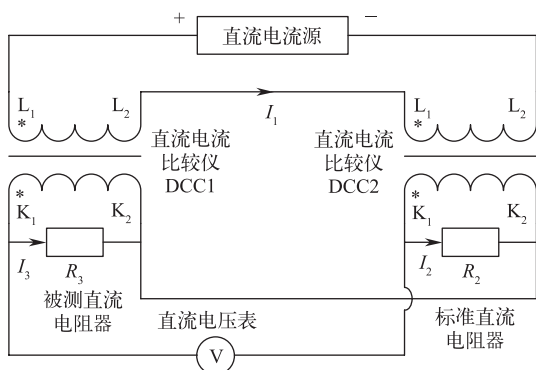


图3 第一步测量线路

Fig. 3 Circuit of step 1

第二步，线路连接如图4所示，直流电流源连接直流电流比较仪的一次侧和两台标准直流电阻器，直流电流比较仪的二次侧连接被测直流电阻器，被测直流电阻器与标准直流电阻器的最低电位端对接，最高电位端间连入直流电压表。

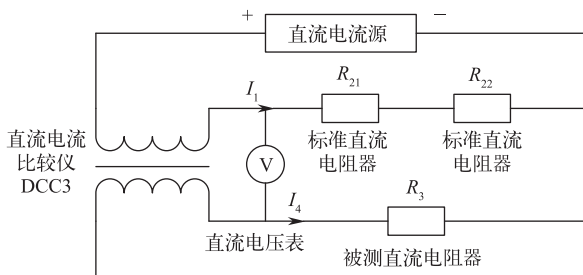


图4 第二步测量线路

Fig. 4 Circuit of step 2

直流电流源输出电流保持不变，电流比例为 k_4 的直流电流比较仪将电流 I_1 变换为 I_4 ，直流电压表记录被测直流电阻器 R_3 相对于标准直流电阻器 R_{21} 和 R_{22} 的电压差 U_2 。可得

$$I_1(R_{21(I_1)} + R_{22(I_1)}) - \frac{I_1}{k_4} R_{3(I_4)} = U_2 \quad (11)$$

第三步，线路连接如图5所示，直流电流源连接第一步中所述的直流电流比较仪的一次侧和第二步中所述的两台标准直流电阻器，一次只连

接一台，分两次完成，直流电流比较仪的二次侧连接被测直流电阻器，被测直流电阻器与标准直流电阻器的低电位端对接，高电位端间连入直流电压表。

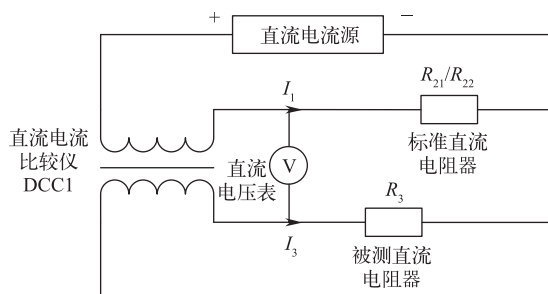


图5 第三步测量线路

Fig. 5 Circuit of step 3

直流电流源输出电流保持不变，电流比例为 k_3 的直流电流比较仪将电流 I_1 变换为 I_3 ，直流电压表记录被测直流电阻器 R_3 相对于标准直流电阻器 R_{21} 和 R_{22} 的电压差 U_3 和 U_4 。可得

$$I_1 R_{21(I_1)} - \frac{I_1}{k_3} R_{3(I_3)} = U_3 \quad (12)$$

$$I_1 R_{22(I_1)} - \frac{I_1}{k_3} R_{3(I_3)} = U_4 \quad (13)$$

第四步，线路连接如图6所示，直流电流源连接第一步中所述的直流电流比较仪的一次侧，其二次侧连接可调直流电流比较仪的一次侧和第一步中所述的标准直流电阻器，可调直流电流比较仪的二次侧连接被测直流电阻器，被测直流电阻器与标准直流电阻器的低电位端对接，高电位端间连入指零仪，调节可调直流电流比较仪一次绕组匝数，使被测直流电阻器与标准直流电阻器电压相等。

直流电流源输出电流保持不变，电流比例为 k_2 的直流电流比较仪将电流 I_1 变换为 I_2 ，调节可调直流电流比较仪一次绕组匝数，记录指零仪指零时匝数数值，计算此时该标准器的比例 k_5 。可得

$$\frac{R_{2(I_2)}}{R_{3(I_3)}} = \frac{1}{k_5} \quad (14)$$

式(12)与式(13)相加，得

$$I_1 R_{21(I_1)} + I_1 R_{22(I_1)} = U_3 + U_4 + \frac{2I_1}{k_3} R_{3(I_3)} \quad (15)$$

式(11)与式(15)相减,得

$$U_2 + \frac{I_1}{k_4} R_{3(I_4)} = U_3 + U_4 + \frac{2I_1}{k_3} R_{3(I_3)} \quad (16)$$

式(10)与式(16)相乘,得

$$\begin{aligned} & \left(\frac{R_{3(I_3)}}{k_3} - \frac{R_{2(I_2)}}{k_2} \right) \times (U_3 + U_4 - U_2) \\ &= \frac{U_1}{k_4} R_{3(I_4)} - \frac{2U_1}{k_3} R_{3(I_3)} \end{aligned} \quad (17)$$

式(14)代入式(17),得

$$\frac{R_{3(I_4)}}{R_{3(I_3)}} = \left(\frac{k_4}{U_1 k_3} - \frac{k_4}{U_1 k_2 k_5} \right) (U_3 + U_4 - U_2) + \frac{2k_4}{k_3} \quad (18)$$

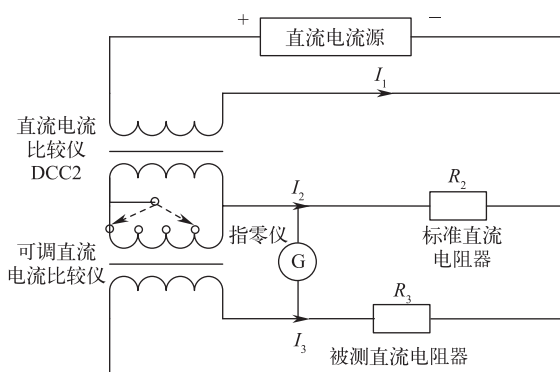


图6 第四步测量线路

Fig. 6 Circuit of step 4

根据电流系数的定义,设定电流 I_3 数值为量程上限的10%(起始点),电流 I_4 数值为起始点与量程上限内的任意值,则被测直流电阻器的电流系数 α 为

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{R_{3(xI)}}{R_{3(10\%I)}} - 1 \\ &= \left(\frac{k_4}{U_1 k_3} - \frac{k_4}{U_1 k_2 k_5} \right) (U_3 + U_4 - U_2) + \frac{2k_4}{k_3} - 1 \end{aligned} \quad (19)$$

式中, I 为被测直流电阻器的额定电流; x 取值范围为10%~100%。

取一台直流电阻器作为被测对象,其电阻值1 Ω ,额定电流1 A,标称电流系数 5×10^{-5} 。按上述测量步骤,将电流分成四段,逐段测量电流系数,范围分别为0.1~0.2 A、0.2~0.4 A、0.4~0.8 A和0.5~1 A,标准器参数及电流系数测量结果见表1~表4。

表1 电流系数测量结果(电流0.1~0.2 A)

Tab. 1 Current coefficient measurement result (0.1 ~ 0.2 A)

直流电流源输出值 /A	直流电流比例标准器比例值	可调直流电流比例标准器比例值	电压表读数 / μ V	标准直流电阻器阻值 / Ω
1	$k_2=5$	$k_3=2.000\ 700\ 2$	$U_1=34$	$R_2=0.499\ 87$
-	$k_3=10$	-	$U_2=77$	$R_{21}=0.100\ 03$
-	$k_4=5$	-	$U_3=22$	$R_{22}=0.100\ 06$
-	-	-	$U_4=52$	-
电流系数: -1.5×10^{-5}				

表2 电流系数测量结果(电流0.2~0.4 A)

Tab. 2 Current coefficient measurement result (0.2 ~ 0.4 A)

直流电流源输出值 /A	直流电流比例标准器比例值	可调直流电流比例标准器比例值	电压表读数 / μ V	标准直流电阻器阻值 / Ω
1	$k_2=2.5$	$k_3=2.000\ 719\ 7$	$U_1=73$	$R_2=0.499\ 85$
-	$k_3=5$	-	$U_2=68$	$R_{21}=0.200\ 06$
-	$k_4=2.5$	-	$U_3=47$	$R_{22}=0.200\ 03$
-	-	-	$U_4=17$	-
电流系数: -9.9×10^{-6}				

表3 电流系数测量结果(电流0.4~0.8 A)

Tab. 3 Current coefficient measurement result (0.4 ~ 0.8 A)

直流电流源输出值 /A	直流电流比例标准器比例值	可调直流电流比例标准器比例值	电压表读数 / μ V	标准直流电阻器阻值 / Ω
1	$k_2=1.25$	$k_3=2.000\ 721\ 6$	$U_1=150$	$R_2=0.499\ 84$
-	$k_3=2.5$	-	$U_2=13$	$R_{21}=0.400\ 08$
-	$k_4=1.25$	-	$U_3=58$	$R_{22}=0.399\ 96$
-	-	-	$U_4=-62$	-
电流系数: -2.0×10^{-5}				

表4 电流系数测量结果(电流0.5~1 A)

Tab. 4 Current coefficient measurement result (0.5 ~ 1 A)

直流电流源输出值 /A	直流电流比例标准器比例值	可调直流电流比例标准器比例值	电压表读数 / μ V	标准直流电阻器阻值 / Ω
1	$k_2=1$	$k_3=2.000\ 725\ 3$	$U_1=181$	$R_2=0.499\ 84$
-	$k_3=2$	-	$U_2=35$	$R_{21}=0.500\ 08$
-	$k_4=1$	-	$U_3=59$	$R_{22}=0.499\ 97$
-	-	-	$U_4=-51$	-
电流系数: -2.7×10^{-5}				

如前文所述,测量时直流电流源输出值固定,始终为1 A。直流电流比例标准器的比例值根据实际要求进行调整,得到直流电阻器所需电流值。标准直流电阻器阻值的选择原则是标准与被测电阻器输出电压标称值相等。

从测量结果可知,四段电流范围内的电流系数均为负值,且基本处于 10^{-5} 量级。电流系数的测量不确定度来源主要有直流电流比例标准器的比例误差、可调直流电流比例标准器的比例误差、电压表的读数误差、指零仪的灵敏度以及测量重复性。

3 结束语

作为直流大电流主要测量设备的磁调制式直流电流比较仪以高准确度和高线性度著称,随着精密测量需求的不断提升,拓展其应用领域显得尤为重要。

提出一种非常规直流电流比例的校准方法,经过两次测量完成二次电流的加减运算,得到被校比例的实际值。测量不确定度与标准比例的参考值及电压测量值的误差相关,相较于传统校准方法,可解决标准比例数量受限的问题。

还提出一种基于直流电流比较仪的直流电阻器电流系数测量方法,优势在于直流电流源、标准直流电阻器的性能均不会对测量结果造成影响,该方法经过四步测量,完成直流电阻值的自比较,得到电流系数的准确数值,具有不依赖上级标准器的特点。

参考文献

- [1] CHRISTIAN L A. Accurate high direct current measurements for industry [C]. Paris: Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 2018.
- [2] 王东兴,朱燕燕,李瑞,等.磁调制DCCT调制噪声及测量方法研究[J].原子能科学技术,2021,55(1):178-184.
- [3] ZHOU Liren, GENG Ji, ZHU Li. Self-calibration method of ratio adjustable direct current comparator [C]. Wellington: Conference on Precision Electromagnetic Measurements 2022.
- [4] 王农.精密测量直流大电流的自激振荡磁通门法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [5] 王冰,蒋磊,宋福明,等.30 kA闭环式集成霍尔电流传感器设计[J].电子测量与仪器学报,2020,34(11):188-193.
- [6] 周峰,李鹤,李文婷,等.大电流测量传感技术综述[J].高电压技术,2021,47(6):1905-1920.
- [7] 王东兴,朱燕燕,李瑞,等.基于开环增益的DCCT线性误差测量方法[J].西北大学学报(自然科学版),2018,48(3):343-348.
- [8] 周力任,朱力,潘洋.直流电流比较仪闭环传递特性的理论与试验验证[J].电气应用,2021,40(7):30-36.
- [9] 周力任,耿骥,秦毅,等.基于测差原理的直流电流传感器校准技术研究[J].电气应用,2022,41(2):46-51.
- [10] DUANE BROWN, ANDREW WACHOWICZ, HUANG Shiping. The enhanced performance of the DCC current comparator using AccuBridge® technology [C]. Ottawa: Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 2016.
- [11] SONG Jiayun, PAN Pan, HUANG Xiaoding, et al. Research on current calibration system with high stability [C]. Ottawa: Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 2016.
- [12] 周力任,朱力,耿骥.高分辨率连续可调的直流电流比例变换装置[J].仪器仪表学报,2022,43(6):46-54.
- [13] YE Yichu, FU Yaqiong, QIAN Lushuai, et al. Modeling and control strategy simulation of automated DCC bridge [C]. Hangzhou: International Conference on Intelligent Control, Measurement and Signal Processing, 2022.
- [14] 上海市市场监督管理局.直流电流比较仪校准规范:JJF(沪)62—2021[S].2021.
- [15] WANG Kai, FU Yaqiong, LI Zhengkun, et al. A resistor load coefficient measurement system [C]. Auckland: Conference on Industrial Electronics and Applications, 2015:1208-1211.

作者简介

周力任(1985—),男,硕士,高级工程师,研究方向为高压大电流计量技术研究。

(收稿日期:2023-02-15)