

基于测差原理的直流电流传感器 校准技术研究

周力任, 耿 骥, 秦 毅, 朱 力, 潘 洋

(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: 直流电流传感器将输入电流按比例转换为输出电流, 比例误差是其重要的技术指标, 误差值的确定是直流电流传感器合理使用的关键环节之一。传统的源表法所用商业仪器技术指标无法满足高准确度直流电流传感器(最大允许误差 10^{-5} 量级及以上)的校准要求。提出一种基于测量二次侧差值电流的原理, 根据不同的被校比例参数特点, 运用自校法、对校法和级联对校法, 以标准直流电流比例值为参考, 得到被校直流电流比例的实际值和误差。该测差原理降低了测量仪器的指标限定, 同时减小了不确定度, 满足直流电流比例类仪器的校准要求。

关键词: 直流电流传感器; 电流比例; 校准; 误差; 测量不确定度; 测差原理

Research on the calibration technology of direct current sensor based on the difference measurement principle

ZHOU Liren, GENG Ji, QIN Yi, ZHU Li, PAN Yang

(Shanghai Institute of Measurement and Testing Technology,

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

Abstract: Direct current sensor converts the input current into a proportional output current. The ratio error is an essential specification, the error value determination is one of the key links in the rational use of direct current sensor. The specification of commercial instruments employed in the traditional source meter method fails to meet the calibration requirements of high accuracy direct current sensor (maximum permissible error 10^{-5} magnitude and above). A principle based on the measurement of secondary side difference current is proposed. According to the characteristics of the calibrated ratio parameters, taking the standard direct current ratio value as the reference, the actual value and error of direct current ratio are obtained by employing self-calibration method, equal-ratio calibration method and stage-connection equal-ratio calibration method. This measurement principle reduces the index limit of instrument and the uncertainty at the same time; satisfies the calibration requirements of direct current ratio instruments.

Key words: direct current sensor; current ratio; calibration; error; measurement uncertainty; difference measurement principle

0 引言

直流大电流的测量技术广泛应用于先进制造业和科学研究领域^[1-3]。例如：七大“新基建”中，特高压直流输电和电动汽车直流充电的电量计量；医疗核磁共振设备中的电流精密测量；粒子对撞机、同步辐射光源等大型科学装置中的高性能电流源监测。

直流电流传感器是直流大电流的常用测量设备，包含霍尔式、光纤式和磁调制式等多种原理^[4-6]。霍尔式传感器利用霍尔元件作为检测元件，将直流电流在铁心气隙中产生的磁场强度转换成霍尔电压，再进一步按比例变换成电流或电压，适用于工业生产中的常规测量。光纤式传感器基于法拉第效应，构建光振动方向偏转角度与磁场强度的对应关系，从而间接测量直流大电流，适合超大电流的测量，具有抗干扰能力强的优点，但测量准确度难以突破 10^{-4} 量级。磁调制式传感器通过调制解调技术，让铁心工作在“零磁通”状态，实现电流比例的高准确度变换，具备高线性度和高灵敏度的特点^[7]。直流电流传感器将输入大电流按比例转换成输出小电流，通过电流/电压转换器后，根据终端测量仪的读数计算得到输入电流的数值^[8]。

国内外学者通过试验测量和理论分析等手段对直流电流传感器开展研究工作。文献[9]设计了一套直流电流传感器校准系统，该系统基于直流比较仪测量电阻原理，由高精密电桥、两级量程扩展器、精密电流源和换向开关构成。校准系统的电流上限为400 A，整个校准范围内的相对不确定度优于 1.1×10^{-6} 。

文献[10]搭建了由自动电流量程扩展器（比例1 000/1）和电流比较仪电桥组成的直流电流传感器校准装置，解析了装置运行原理、偏置补偿方法以及误差定义，以一台900 A直流电流传感器为例进行了全量程校准。一次电流小于100 A时，测量不确定度优于 3×10^{-7} 。

为满足以高能物理科研为代表的精密测量需求^[11]，直流电流传感器技术指标不断提升，比例

数量众多，测量范围从几安培到数万安培，最大允许误差优于 1×10^{-5} ，线性度达到 10^{-6} 量级。针对直流电流传感器的校准，传统的源表法具有直观的特点，但对于高性能传感器，现有商业仪器的稳定性和准确度等技术指标无法满足要求。所提出的基于测差原理的校准方法降低了电流源和电流表技术指标，同时可以满足测量不确定度的要求。

1 校准原理和线路

选择一台与被校直流电流传感器（简称被校仪器）比例名义值相同的标准直流电流比例器（简称标准器），直流电流源反向串联两者的输入端，测量两者输出端的差值电流。可见，测差原理使得测量仪引入的不确定度是差值的误差，有效降低对于测量仪技术指标的要求和绝对误差的数值；同时，电流源的稳定性对于测量结果的影响也显著减弱。测差原理使用的前提条件及优势的体现在于被测对象数值尽可能相近，这就是选择两台比例名义值相同的原因。

为便于指导实际测量与接线，以及公式推导和数据处理，作如下统一规定^[12]：标准直流电流比例器一次绕组的极性端和被校直流电流传感器一次绕组的极性端对接，标准直流电流比例器二次绕组的极性端和被校直流电流传感器二次绕组的极性端对接；被校直流电流传感器二次电流流出端与差值电流测量仪“+”端相连，标准直流电流比例器二次电流流出端与差值电流测量仪“-”端相连，从而测得被校直流电流传感器二次电流相对于标准直流电流比例器二次电流的差值电流。

根据测差原理和接线规定，可得校准点直流电流比例的实际值为

$$f_2 = \frac{f_1 I_2}{I_2 + \Delta I} \quad (1)$$

式中， f_2 为直流电流比例实际值，A/A； f_1 为标准直流电流比例器比例名义值/实际值，A/A； I_2 为标准直流电流比例器二次电流值，A； ΔI 为被校直流电流传感器二次电流相对于标准直流电流比

例器二次电流的差值, A。

对校准结果要求较高时, 式(1)中 f_1 的数值可取标准器比例实际值, 从而进一步减小测量不确定度。

直流电流传感器校准点比例误差表达式为

$$\varepsilon = \frac{f_1 - f_2}{f_2} \times 100\% \quad (2)$$

式中, ε 为直流电流比例相对误差。

直流电流传感器的直流电流比例从1 A/1 A到1 kA/1 A, 测差原理在实际应用中可根据不同的被校比例参数特点, 采用自校法、对校法和级联对校法开展校准工作。校准装置由直流电流源、标准直流电流比例器和差值电流测量仪组成。

1.1 自校法

当直流电流传感器一次电流和二次电流名义值相等时, 可采用自校法, 即以一次电流为标准校准二次电流。自校法的优点是不用借助于其他标准器, 从而不会将标准器的误差引入至校准结果, 实现误差的绝对校准。自校法适用于设备的期间核查和测量结果验证等, 具有实时复现比例值的特点。自校线路如图1所示。图中, L_1 、 L_2 为直流电流传感器一次绕组的对应端子, 其中 L_1 为极性端; K_1 、 K_2 为直流电流传感器二次绕组的对应端子, 其中 K_1 为极性端。

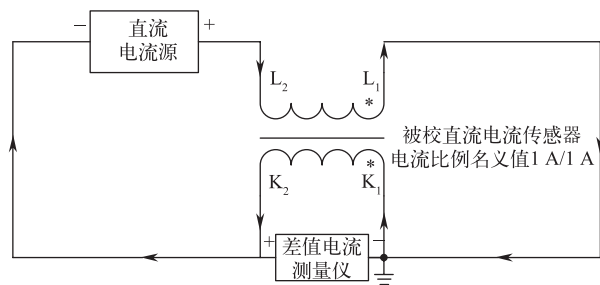


图1 自校线路

Fig. 1 Self-calibration circuit

1.2 对校法

当标准直流电流比例器与被校直流电流传感器比例名义值相等时, 可采用对校法, 即以标准器的名义值或实际值作为参考值, 校准仪器。对校法适用于量值比对和溯源等计量活动, 便于建

立量传体系。对校线路如图2所示。

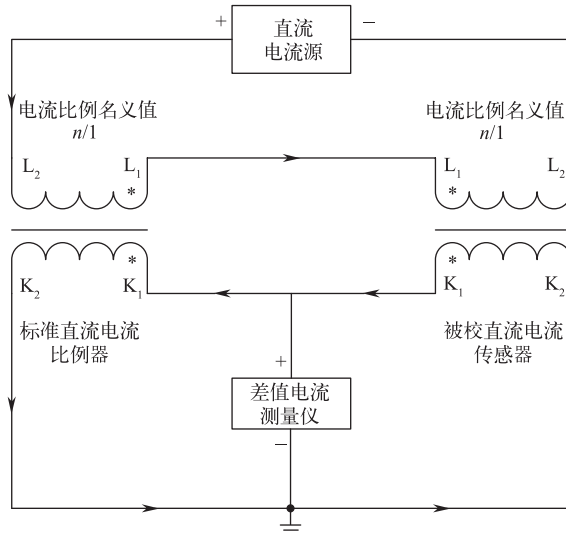


图2 对校线路

Fig. 2 Equal-ratio calibration circuit

1.3 级联对校法

级联对校法原理同对校法, 是后者的特殊接线方式, 常用于特殊电流比例的校准, 即当现有标准器与被校仪器的比值名义值不相等时, 可在标准器的输出端再接入一台标准器, 形成新的比例, 调节至与被校仪器比例名义值相等, 满足测差原理的使用条件。级联对校线路如图3所示。

级联就是将第一级标准器的输出端接第二级标准器的输入端, 由第一级的输入端与第二级的输出端组成新的级联标准直流电流比例器。

假设第一级标准器的电流比例为 n , 比例误差为 ε_1 ; 第二级标准器的电流比例为 m , 比例误差为 ε_2 ; 新的电流比例为 X , 误差为 ε_0 , 可得

$$n = \frac{I_1}{I_{12}}(1 + \varepsilon_1) \quad (3)$$

式中, I_1 为第一级标准器的输入电流; I_{12} 为第一级标准器的输出电流。

$$m = \frac{I_{12}}{I_2}(1 + \varepsilon_2) \quad (4)$$

式中, I_2 为第二级标准器的输出电流。

$$X = \frac{I_1}{I_2}(1 + \varepsilon_0) \quad (5)$$

式(3)乘式(4)的结果与式(5)比较,

可得

$$X = nm \quad (6)$$

$$\begin{aligned} 1 + \varepsilon_0 &= 1 + \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_1 \varepsilon_2 \\ \Rightarrow \varepsilon_0 &\approx \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (7)$$

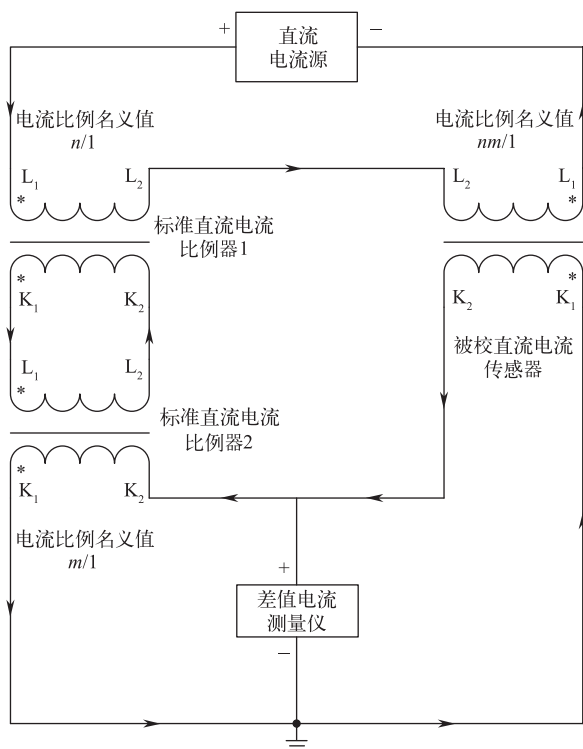


图3 级联对校线路

Fig. 3 Stage-connection equal-ratio calibration circuit

上述推导从理论上证明了级联方式的可行性。可见，级联后的直流电流比例为第一级比例与第二级比例的乘积，误差为两者的代数和。因此，利用这两个特性，级联后依然符合测差原理的使用条件。

2 校准过程

直流电流传感器在不同输入电流下所显现的电流比例值不尽相同，有必要选取多个电流点进行测量，综合考虑全量程和线性度评估等因素，推荐校准点如下：被校仪器额定输入电流的10%、20%、40%、60%、80%和100%，或以上校准点的附近（偏差 $\pm 1\%$ 以内）。

确定接线无误后，启动直流电流源，平稳升电流至各校准点，稳定后记录差值电流测量仪的各点读数和标准器二次电流实际值；电流达到被

校仪器量程上限后，再平稳降电流至各校准点，稳定后记录差值电流测量仪的各点读数，取电流上升和下降的算术平均数作为二次电流差值的最终测量结果。将测量值代入式（1）和式（2），计算直流电流比例实际值和比例误差。图4为校准流程图。

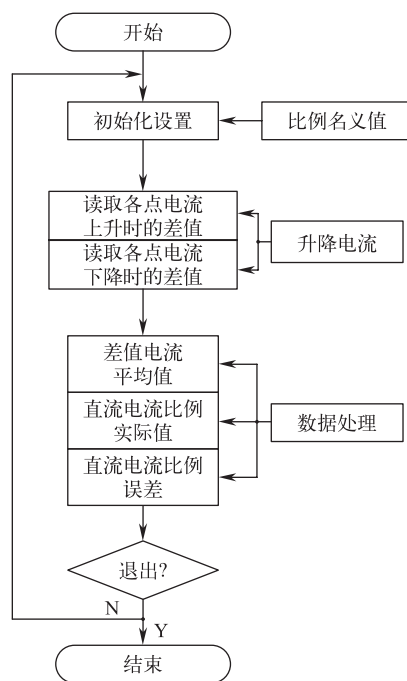


图4 校准流程图

Fig. 4 Calibration flow-process diagram

校准过程中的注意事项：差值电流测量仪的量程先置于最大档，避免超量程导致损伤仪器，待所显示的数值稳定后再调至合理量程；如无紧急情况，勿急升急降电流，避免被校仪器受到冲击和产生剩磁现象；如输入电流接线方式为穿心式，则尽量将母线置于中心位置，使得磁场分布均匀。

3 校准结果

3.1 测量数据

选取三台不同参数的直流电流传感器，直流电流比例分别为1 A/ 1 A、1000 A/ 1 A和700 A/ 0.4 A，对应采用上述自校法、对校法和级联对校法开展校准。校准结果如表1～表3所示。

以1 A/ 1 A实际校准线路为例，如图5所示。

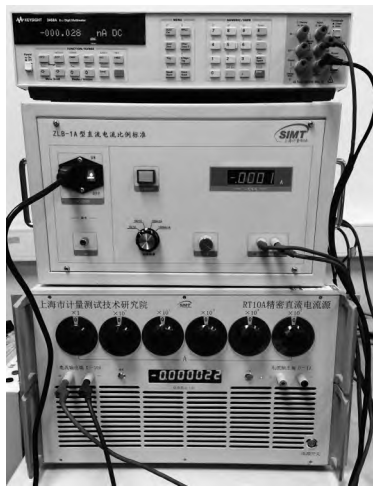


图 5 校准线路照片
Fig. 5 Photograph of calibration circuit

表 1 自校数据 (1 A/ 1 A)

Tab. 1 Self-calibration results

二次电流 / A	差值电流 / μA	比例实际值 / (A/A)	比例误差 (%)
0.1	13	0.999 999 87	1.3×10^{-5}
0.2	24	0.999 999 88	1.2×10^{-5}
0.4	44	0.999 999 89	1.1×10^{-5}
0.6	48	0.999 999 92	8.0×10^{-6}
0.8	48	0.999 999 94	6.0×10^{-6}
1.0	60	0.999 999 94	6.0×10^{-6}

从表1可见，该直流电流传感器比例误差达到 10^{-7} 数量级。该被校仪器一次绕组和二次绕组匝数名义值相同，实现了高准确度的电流传递。

表 2 对校数据 (1 000 A/ 1 A)

Tab. 2 Equal-ratio calibration results

二次电流 /A	差值电流 /μA	比例实际值 / (A/A)	比例误差 (%)
0.1	150	999.998 5	1.5×10^{-4}
0.2	300	999.998 5	1.5×10^{-4}
0.4	560	999.998 6	1.4×10^{-4}
0.6	720	999.998 8	1.2×10^{-4}
0.8	800	999.999 0	1.0×10^{-4}
1.0	1 000	999.999 0	1.0×10^{-4}

由表2可见，该直流电流传感器比例误差达到 10^{-6} 数量级。之所以比例误差较1 A/ 1 A的传感器增大1个数量级，主要原因是磁屏蔽效能没有完全匹配输入电流的变大，无法有效阻断干扰磁通和杂散磁通进入主铁心。

表 3 级联对校数据 (700 A/ 0.4 A)

Tab. 3 Stage-connection equal-ratio calibration results

二次电流 /A	差值电流 /μA	比例实际值 / (A/A)	比例误差 (%)
0.04	1.1	1 749.952	2.7×10^{-3}
0.08	1.9	1 749.958	2.4×10^{-3}
0.16	3.7	1 749.960	2.3×10^{-3}
0.24	7.1	1 749.948	3.0×10^{-3}
0.32	8.5	1 749.954	2.6×10^{-3}
0.40	9.8	1 749.957	2.5×10^{-3}

由表3可见，差值电流处于微安量级，被校仪器的比例误差则是 10^{-5} 数量级。级联对校700 A/ 0.4 A的电流传感器，第一级标准器的比例为1 000 A/ 1 A，第二级标准器的比例为1 A/ 0.571 428 6 A。级联时注意第一级标准器的输入电流和第二级标准器的输出电流额定值应不小于被校仪器输入电流和输出电流的额定值，这样才能全量程校准；第二级标准器作为第一级标准器的负荷，应满足其额定负荷要求，否则会影响级联后标准器的性能。

3.2 不确定度评定

依据JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》中规定的方法^[13]，对直流电流传感器的电流比例进行测量不确定度评定。

测量模型如式(1)所示，不确定度来源主要有测量重复性、标准直流电流比例器的误差(自校法除外)、差值电流的测量误差和二次电流的测量误差。

上述各分量引入的不确定度在区间内服从均匀分布，且各分量间相互独立，灵敏系数计算如下

$$C_1 = \frac{\partial f_2}{\partial \Delta I} = -\frac{f_1 I_2}{(I_2 + \Delta I)^2}$$
 (8)

式中， C_1 为差值电流的灵敏系数。

$$C_2 = \frac{\partial f_2}{\partial I_2} = -\frac{f_1 \Delta I}{(I_2 + \Delta I)^2}$$
 (8)

式中， C_2 为二次电流的灵敏系数。

$$C_3 = \frac{\partial f_2}{\partial f_1} = \frac{I_2}{I_2 + \Delta I}$$
 (10)

式中， C_3 为标准器电流比例的灵敏系数。

取包含概率为95%，包含因子 $k=2$ ，则直流电流比例测量结果的相对扩展不确定度如表4所示。

表4 测量不确定度汇总

Tab. 4 Summary of measurement uncertainty

直流电流比例 / (A/A)	额定输入电流百分比 (%)	不确定度 (k=2)
1/1	10 ~ 100	$(1.7 \sim 3.6) \times 10^{-8}$
1 000/1	10 ~ 100	$(1.2 \sim 1.4) \times 10^{-6}$
700/0.4	10 ~ 100	$(4.1 \sim 7.9) \times 10^{-6}$

4 结束语

在国际电磁咨询委员会“电磁校准与测量能力分类”中，“高电压和大电流”是重点领域之一。直流大电流的测量原理主要是将大电流转换成小电流，便于通用电测量仪器测量。因此，转换比例的准确度至关重要。

随着直流大电流精密测量需求的不断提升，高性能直流电流传感器应运而生，但其量值溯源问题也随之而来。提出一种基于测差原理的校准技术，解决传统源表法及相关商业仪器不确定度过大的问题；根据被校直流电流传感器参数特点和需求，选择和配置现有标准直流电流比例器，灵活使用自校法、对校法和级联对校法。反向串联被校仪器与标准器的输入端，依据同比例名义值的特性，测量上述两者输出端的差值电流，降低测量仪器的指标限定及引入的不确定度分量。

以三台不同参数的直流电流传感器为例，开展实际测量校准，电流比例误差分别处于 10^{-7} 、 10^{-6} 和 10^{-5} 数量级，相对扩展不确定度为 $1.7 \times 10^{-8} \sim 7.9 \times 10^{-6}$ 。

参考文献

- [1] 童悦, 邓小聘, 刘翔. 高压直流电流互感器阶跃响应试验技术研究[J]. 电气应用, 2020, 39(2): 36-41.
- [2] CHRISTIAN L A. Accurate high direct current measurements for industry [C]. Paris: Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 2018.
- [3] 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.

- [4] 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.
- [5] 李奇, 李传生, 梁波, 等. 光纤直流大电流传感器非线性机理及校准技术[J]. 计量学报, 2021, 42(4): 409-414.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] ZHOU Liren, PAN Yang, LAI Lei. Research and verification of DC current ratio self-calibration method[C]. Denver: Conference on Precision Electromagnetic Measurements, 2020.
- [9] 韩超, 龙锋利, 程健, 等. 直流电流传感器高精度校准系统设计[J]. 原子能科学技术, 2020, 54(1): 166-171.
- [10] CALLEGARO L, CASSIAGO C, G E. On the calibration of direct-current current transformers (DCCT) [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2015, 64(3): 723-727.
- [11] 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.
- [12] 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].
- [13] 国家质量监督检验检疫总局. 测量不确定度评定与表示: JJF 1059. 1—2012[S].

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。

(收稿日期: 2021-09-13)