

高精度直流大电流标准源的计量测试方法研究

陈习权^{1,2,3}, 林 婷¹, 刘 珂¹

¹浙江省计量科学研究院, 浙江 杭州

²浙江省声学振动精密测量技术研究重点实验室, 浙江 杭州

³浙江省能源与环境保护计量检测重点实验室, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年3月23日; 录用日期: 2023年5月29日; 发布日期: 2023年6月6日

摘 要

针对当前100 A以上高精度直流大电流标准源国家计量技术规范缺失的现状, 本文提出了一种以精密电流转换标准、数字多用表和高精度直流大电流标准表作为测量标准进行计量校准的方法, 通过配套高精度交流电流标准表、数字示波器、直流电流纹波测试仪等辅助设备, 实现对直流大电流标准源电流示值误差、短期稳定性和纹波含量三参数的校准。详细阐述了直流大电流标准源校准用的测量标准、计量特性参数的校准方法和校准点的选取原则等, 并给出了校准注意事项。实验验证表明, 所列校准项目参数能较全面、科学地反映高精度直流大电流标准源的计量特性, 该校准方法合理可行、准确可靠, 具有良好的参考价值。

关键词

直流大电流标准源, 精密电流转换标准, 电流示值误差, 短期稳定性, 纹波含量

Abstract

In view of the current situation of the absence of national metrological technical specifications for

文章引用: 陈习权, 林婷, 刘珂. 高精度直流大电流标准源的计量测试方法研究[J]. 电气工程, 2023, 11(2): 46-52.

DOI: 10.12677/jee.2023.112006

1. 引言

高精度直流大电流标准源作为数字显示的可提供稳定、准确的标准电流发生装置，是一种具有一定输出功率的高稳定性、高准确度和宽测量范围的直流电流标准，通常用于校准直流电流表、直流电流传感器和直流电流比较仪等[1] [2] [3]。随着新能源汽车与轨道交通、航空航天、兵器船舶等行业的快速崛起，其科研、试验和测试等技术环节中的高精度直流大电流设备不断更新换代，但目前“JJF 1284-2011 交直流电表校验仪校准规范”、“JJF 1638-2017 多功能标准源校准规范”和“JJF 1923-2022 电测量仪表校验装置校准规范”等国家计量技术规范中针对直流电流的计量能力无论是电流量值范围，还是校准方法都不能满足其计量特性的需求；同时直流大电流标准源的计量技术规范国内一直没有出台，计量部门将面临如何紧跟形势、快速解决对测量范围从数安培扩展到数千安培的直流大电流源的量值溯源问题，因此亟需对 100 A 以上高精度直流大电流标准源的计量校准方法进行研究[4] [5] [6]。

目前国内外直流大电流标准源的校准方法主要有[7] [8] [9]：基于分流器原理，通过测量被测电流回路中串联的标准电阻上的电压来测量电流，该方法结构简单、准确可靠，但体积庞大笨重；基于直流互感器原理，以交流磁势平衡被测直流磁势为基础，利用被测直流改变带有铁芯扼制线圈的感抗，间接地改变辅助交流激磁电流的电流以反映被测直流电流的大小，该方法能承受较大负载，但线性度较差；基于霍尔效应原理，分磁平衡式(闭环)和直放式(开环)，其准确度较高、温漂较小，但成本较高、耗电量大、体积大。在综合上述方法的基础上，本文结合当前国内最新的计量校准设备，提出了针对高精度直流大电流标准源的合理的计量特性考核指标与可行的计量校准方法。

考虑到 100 A 以上高精度直流大电流标准源的主要功能是输出具有一定功率的高准确度、高稳定性、高纯净度的直流大电流信号，其校准项目应包括直流电流的示值误差、短期稳定性和纹波含量三参数，其中示值误差主要是衡量电流示值的准确度，短期稳定性主要衡量在规定的时间内直流电流随时间

的变化情况,纹波含量主要是衡量输出直流电流信号中的交流成分多少[10][11][12]。文中将详细介绍对直流大电流标准源上述各项目参数的校准方法。

2. 直流电流示值误差校准

直流电流示值误差的校准方法主要有电流电压转换法(I/V)和标准电流表法。

2.1. 电流电压转换法

电流电压转换法(I/V)由精密电流转换标准、数字多用表作为测量标准,校准原理如图1所示。精密电流转换标准采用精密直流电流比较仪技术,可将直流电流按一定比例转换成电压或电流小信号输出,并保持较高的比例不确定度;二次输出量配接相应的测量仪器,可实现丰富的测量应用。

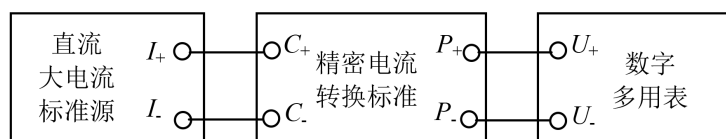


Figure 1. Calibration schematic of I/V conversion

图1. 电流电压转换法校准原理图

在采用该方法进行校准时,将直流大电流标准源的输出端连接精密电流转换标准的电流端(或者通过穿心式方法连接),数字多用表的电压输入端连接精密电流转换标准的电位端。注意精密电流转换标准的阻值选择,以减小直流大电流标准源的负载效应。同时在使用穿心式测量标准时,应尽量使电缆线置于内孔近似几何中心位置。针对直流大电流标准源的不同电流量程,需选择与之匹配的精密电流转换标准。

根据校准点调节直流大电流标准源,分别记录直流大电流标准源的输出示值 I_x 、电流电压转换器的标称比例值 K_N 、数字多用表的直流电压示值 V_N ,则直流大电流标准源的直流电流示值误差 ΔI 按式(1)计算。

$$\Delta I = I_x - K_N V_N \quad (1)$$

2.2. 标准电流表法

标准电流表法是以高精度直流大电流标准表作为测量标准的校准方法,校准原理如图2所示。

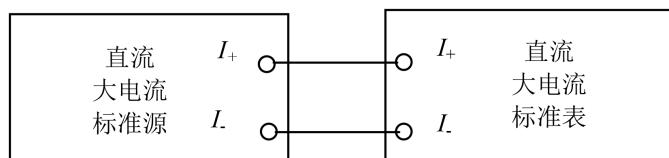


Figure 2. Calibration schematic of standard ammeter

图2. 标准电流表法校准原理图

根据直流大电流标准源的电流量程,选择与之匹配的高精度直流大电流标准表。将大电流标准源的输出端直接连接直流大电流标准表的输入端(或者通过穿心式方法连接),根据校准点调节直流大电流标准源,分别记录直流大电流标准源的输出示值 I_x 和直流大电流标准表的示值 I_s ,则大电流源的直流电流示值误差 ΔI 按式(2)计算。

$$\Delta I = I_x - I_s \quad (2)$$

3. 短期稳定性校准

短期稳定性主要衡量在规定的时间内直流电流随时间的变化情况,按照图1或者图2连线。校准点一般选取基本量程的90%~100%满量程值,可与直流电流校准项目同时进行。在校准条件下,直流大电流标准源输出直流电流至校准点 I_0 ,记录校准点在规定的时间内(一般为1 min~3 min,或者被检仪器说明书规定的稳定时间)输出示值的最大值 I_{\max} 和最小值 I_{\min} ,则直流大电流标准源输出直流电流的短期稳定性 S 按式(3)计算。

$$S = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_0} \times 100\% \quad (3)$$

在规定的时间内,直流大电流标准源输出直流电流的短期稳定性最大变化量一般不超过量程最大允许误差绝对值的1/10;对于最大允许误差优于 $\pm 0.05\%$ 的大电流源,允许其最大变化量不超过量程最大允许误差绝对值的1/5。也可参照仪器说明书要求。

4. 纹波含量校准

直流电流纹波含量的校准测量在最大量程上进行,选择90%~100%满量程值输出值进行测量。可采用以下两种方法进行校准:

a) 采用具有直流纹波含量测量功能的交流电流标准表直接对被校准的直流大电流标准源进行纹波含量测量。将直流大电流标准源的输出端直接连接至交流电流标准表的输入端(或者通过穿心式方法连接),如下图3所示。

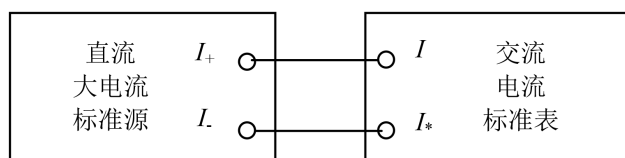


Figure 3. Calibration schematic of ripple content
图3. 纹波含量校准原理图

则纹波含量按式(4)计算:

$$D_1 = \frac{I_{\text{rms}}}{I_-} \times 100\% \quad (4)$$

式(4)中, D_1 为大电流源的直流电流纹波含量,%; I_{rms} 为交流电流标准表示值,A; I_- 为直流大电流标准源输出直流电流示值,A。

b) 按图1连接,将具有交流耦合功能的数字多用表或者数字示波器的电压输入端与精密电流转换标准或者直流纹波测试仪的电位端相连,在直流大电流标准源输出直流电流时读取数字多用表或者数字示波器端的交流电压分量有效值[13][14][15]。直流电流纹波含量按式(5)计算。

$$D_1 = \frac{K_1 \cdot U_{\text{rms}}}{I_-} \times 100\% \quad (5)$$

式(5)中, D_1 为直流大电流标准源的直流电流纹波含量,%; U_{rms} 为数字多用表或者数字示波器的交流电压有效值,V; K_1 为精密电流转换标准电流电压转换的标称比例,A/V; I_- 为直流大电流标准源输出直流电流示值,A。

5. 实验验证

分别选取长沙某公司、武汉某公司和上海某研究所生产的 0.01 级到 0.02 级等不同准确度等级以及 1000 A 到 5000 A 等不同测量范围的直流大电流标准源进行实验验证。校准现场实验图如图 4 所示。



Figure 4. Field experiment picture of calibration
图 4. 校准现场实验图

实验验证的校准结果如下表 1 所示。

Table 1. List of experimental validation data
表 1. 实验验证数据一览表

校准项目		长沙某公司 直流大电流源	武汉某公司 直流大电流源	上海某研究所 直流大电流源
直 流 电 流 示 值	100 A	100.012 A	/	100.003 A
	300 A	300.029 A	/	300.011 A
	500 A	500.051 A	499.959 A	500.018 A
	800 A	800.084 A	799.945 A	800.030 A
	1000 A	1000.12 A	999.91 A	1000.04 A
	2000 A	2000.23 A	1999.85 A	/
	3000 A	/	2999.75 A	
	5000 A	/	4999.50 A	/
	技术要求	0.02 级	0.01 级	0.02 级
短期 稳定性	实测值	0.002%/1min	0.006%/2min	0.010%/1min
	技术要求	0.005%/1min	$\leq 1 \times 10^{-4}/2\text{min}$	$\leq 5 \times 10^{-4}/1\text{min}$
纹波 含量	实测值	0.2%	0.3%	0.3%
	技术要求	<0.5%	/	/
校准方法		标准电流表法	I/V 转换法	I/V 转换法

由上实验验证数据一览表可知,采用文中所阐述的校准方法能较好地实现对直流大电流标准源直流电流示值误差、短期稳定性和纹波含量三项目的计量校准。

同时为验证校准数据的可靠性,以前述上海某研究所生产的 1000 A 的直流大电流标准源为例,分别采用电流电压转换法、标准电流表法进行多点直流电流示值校准,并结合华东国家计量测试中心的溯源校准结果进行判定。若被验证实验室的测量结果为 X_{lab} , 不确定度为 U_{lab} , 被测设备参考实验室测量结果为 X_{ref} , 不确定度为 U_{ref} , 根据 E_n 值计算公式计算:

$$E_n = \frac{X_{\text{lab}} - X_{\text{ref}}}{\sqrt{U_{\text{lab}}^2 + U_{\text{ref}}^2}} \quad (6)$$

当 $|E_n| \leq 1$ 时验证结果满意, $|E_n| > 1$ 时验证结果不满意。实验验证数据如下表 2 所示。

Table 2. Data reliability validation table

表 2. 数据可靠性验证表

校准方法		直流电流校准点		
		100 A	500 A	1000 A
电流电压转换法(1)	实测值/(A)	100.003	500.018	1000.039
	不确定度 $U_{\text{rel}}(k=2)$	0.004%	0.003%	0.003%
标准电流表法(2)	实测值/(A)	100.005	500.023	1000.042
	不确定度 $U_{\text{rel}}(k=2)$	0.016%	0.006%	0.006%
华东国家计量中心(3)	实测值/(A)	100.002	500.016	1000.038
	不确定度 $U_{\text{rel}}(k=2)$	0.002%	0.002%	0.002%
验证结果 E_n	E_{31}	0.22	0.13	0.03
	E_{32}	0.19	0.22	0.07

由上表可知验证结果均满足 $|E_n| \leq 1$, 证明两种校准方法均准确、可靠。

6. 结论

在当前电气设备的计量测试中,电流、电压等参数的测量技术相对成熟,可测相对误差达 10^{-8} 以上,但上述参数的测量范围有限,超过 100 A 的直流大电流的计量测试仍然是当前研究的重要课题。国家已发布的有关计量技术规范均仅适用于 100 A 以下的直流电流源测量,对于测量范围大于 100 A 的直流大电流标准源,计量特性指标如何考核衡量,校准方法是否科学、合理、可行等,国家尚无统一的计量技术规范。为了加强计量装置的监督管理,适应技术发展需要,提高与相关技术法规协调性,开展直流大电流源的计量方法研究,对确保直流大电流标准源测量量值的准确性、溯源性和一致性非常必要。

本文提出了一种以精密电流转换标准、数字多用表和高精度直流大电流标准表等设备作为测量标准进行计量校准的方法,通过对直流大电流标准源的电流示值误差、短期稳定性和纹波含量三项目参数的校准,能较全面地反映高精度直流大电流标准源的计量特性,可有效弥补当前 100 A 以上高精度直流大电流标准源国家计量技术规范缺失而无法开展工作的现状。该校准方法的主要创新性及优势如下:

1) 明确了直流大电流标准源校准点的选取原则。校准点应覆盖所有量程并兼顾各量程之间的覆盖性及量程内的均匀性,同时参考被校直流大电流源使用说明书中对校准点的建议,也可根据实际情况或送校单位的要求进行选取。选取准确度最高量程为基本量程,其它量程为非基本量程。

2) 明确了直流大电流标准源计量特性参数校准方法。本文提出了两种校准方法,即“电流电压转换

法”和“标准电流表法”。建议优先采用“电流电压转换法”，因电流电压转换标准的准确度目前国内可达 10^{-6} 数量级，其测量范围大于10 kA。校准时，连接导线应使用横截面积不小于 $25\text{ mm}^2/100\text{ A}$ 的铜线，并确保接触良好、接地良好；注意电流电压转换器的阻值选择，以减小直流大电流源的负载效应；使用穿心式测量标准时，应尽量使导线置于内孔近似几何中心位置，以降低磁场均匀性对测量准确度的影响及避免因导线发热影响铁心的性能。

3) 明确了直流大电流标准源校准用的测量标准。对于文中列举的两种校准方法，一般应选取各量程的10%、100%作为校准点，校准装置满足其扩展不确定度($k=2$)不大于被校直流大电流源的最大允许误差绝对值的 $1/3$ ，测量范围覆盖被校直流大电流源的测量范围，均可采用。本文提出常用的测量标准及其他设备包括电流电压转换器(含精密同轴分流器、标准电阻器)、直流电流比例标准、数字多用表、直流大电流表等。除上述规定的标准设备外，也可以使用其他符合要求的计量器具作为测量设备。

通过大量的实验验证，该方法对直流大电流标准源的校准合理可行、结果准确可靠，具有良好的参考价值，可作为相关单位对直流大电流标准源校准的方法依据，对建立直流大电流标准源的量值溯源体系具有较为深远的现实意义[16][17]。

基金项目

浙江省市场监督管理局科研计划项目(ZC2021A012)；浙江省地方计量技术规范制(修)订项目(FYZC2019-DY080)。

参考文献

- [1] 周力任, 潘洋, 朱力, 等. 直流电流比较仪双铁芯磁性能一致性的研究[J]. 计量学报, 2017, 38(3): 336-339.
- [2] 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.
- [3] 王逸洲, 段长生, 吴康, 等. 高精度穿心电流表设计[J]. 计量学报, 2019, 40(6A): 56-59.
- [4] Ren, S.Y., Liu, Q.X. and Liu, X.J. (2014) Heavy DC Current Calibration Method Based on High-Precision Current Adder. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **63**, 3039-3044. <https://doi.org/10.1109/TIM.2014.2326768>
- [5] Ripka, P., Draxler, K. and Styblikova, R. (2013) Measurement of DC Currents in the Power Grid by Current Transformer. *IEEE Transactions on Magnetics*, **49**, 73-76. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2216862>
- [6] Chan, H.K. and Chung, S.H. (2010) A Low-Cost Voltage-to-Current Calibration Technique for Multiple-Sensor Systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **59**, 73-77. <https://doi.org/10.1109/TIM.2009.2021644>
- [7] 欧阳海滨, 万钢勇, 武和雷, 等. 大功率高精度程控直流电流源的设计与实现[J]. 电测与仪表, 2017, 54(21): 96-104.
- [8] 刘国琨, 孙洪恩, 王彦玲. 新一代多功能标准源的技术发展[J]. 电测与仪表, 1995(4): 3-6.
- [9] 陈万才, 朱自科, 曾舒帆, 等. 精密交直流电表校验装置研制[J]. 电测与仪表, 2008(8): 26-32.
- [10] 赵晓俊, 张秀增, 赵洪刚, 等. 直流电源校准方法研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(11A): 34-36, 46.
- [11] 赵晓俊, 李玮, 于斌. 直流标准电流源校准方法研究[J]. 中国计量, 2016(1): 108-109, 115.
- [12] 何修刚. 高精度直流大电流源校准方法的研究[J]. 商品与质量, 2020(20): 100, 260.
- [13] 陈滢錡. 高稳定性宽量程直流电流源的研究[J]. 计量技术, 2013(12): 7-9.
- [14] 胡吕龙, 任民. 6kA 高稳定度直流电流源技术研究[J]. 山东工业技术, 2018(21): 179.
- [15] 张自长, 朱自科, 曾舒帆. 高精度交直流电流校准源研制[J]. 电测与仪表, 2010, 47(1): 15-17, 29.
- [16] 才滢. 零磁通检测技术在 100A 直流电流源中的应用[J]. 仪表技术, 2010(12): 62-63, 67.
- [17] 范林涛, 陈海清. 直流大电流现场测量的研究[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(10): 67-69.