

《光纤大电流测量仪校准规范》

编制说明

编制工作组

2022年05月

国家计量规范《光纤大电流测量仪校准规范》

编制说明

一、 任务来源

国家计量校准规范《光纤直流大电流测量仪校准规范》的制定任务来源于“关于国家计量技术规范制定、修订及宣贯计划有关事项的通知”（市监量函[2018]540号）、“关于下达2018年国家计量技术规范制定修订工作任务的通知”（高压计量[2018]19号）、“关于成立《工频电压比例计量器具检定系统表》等九项国家计量技术规范编制工作组的通知”（高压计量[2018]29号）文件，由全国电磁计量技术委员会高压计量分技术委员会归口组织规范制定工作。

本规范为首次制定。

二、 工作过程

2018年8月，编制工作组成立。

2019年~2021年，工作组开展了光纤大电流测量仪的校准及溯源方法研究。

2021年11月15日，召开第一次工作组会议，指导专家及工作组成员对校准规范初稿进行了详细讨论，提出修改意见。会后，工作组成员对校准规范初稿进行修改完善，形成征求意见稿初稿。

2022年2月22日，召开第二次工作组会议，指导专家及工作组成员对校准规范征求意见稿初稿进行了详细讨论，提出修改意见。会后，工作组成员对校准规范进行修改完善，形成征求意见稿。

三、 编写目的及要解决的问题

大电流技术在冶金、电力、国防军工以及大科学装置研究等领域应用广泛。

在这些应用中，实际运行电流通常高达几十到数百 kA，准确的电流计量与节能增效、安全生产以及重大科学研究密切相关。借助等安匝法，大电流传感器可以在计量实验室精确校准。但是，工业现场的大电流设备往往体积、重量庞大，拆装、运输不便，很难到计量实验室校准，实验室的计量标准也无法下沉至工业现场。因此，迫切需要一种准确、便携的量值传递标准解决超大电流的在线计量难题。

基于 Faraday 磁光效应的光纤大电流测量仪具有测量精度高、动态范围大、安装方便、便携性好等特点。借助多圈柔性光纤敏感环对 Faraday 效应的倍增作用，等效增大测试电流，可校准测量仪的线性度，结合较小电流下的定值，即可实现量程扩展。鉴于光纤电流测量仪在超大电流在线计量方面的优势，主张将其作为量值传递标准，解决超大电流在线计量溯源难题。

近年来，光纤电流传感技术日臻成熟，作为电子式电流互感器，其测量准确度可以满足电力系统测控和保护的应用需求。但应用于超大电流测量时，光纤电流测量仪出现了非常明显的非线性误差，需要通过校准保证其在动态范围内的测量准确度，以适应交变、动态超大电流的测量需求。为了弥补光纤大电流测量仪的校准溯源在手段和规范上的不足，保证量值溯源的科学性和严谨性，有必要制定相应的校准规范，以指导光纤大电流测量仪的校准工作。

四、 主要试验验证情况及预期达到的效果

开展了校准规范可行性试验验证和扩展电流非线性附加误差的直流、交流验证试验。

(1) 选取了两台光纤大电流测量仪作为校准对象，按照校准规范中规定的校准条件和方法对校准项目：直流大电流示值误差、工频大电流示值误差、扩展

电流非线性附加误差进行了校准试验验证和测量不确定的评定。验证结果表明本规范的校准项目合理，校准方法正确，可操作性较强。

(2) 对某光纤大电流测量仪在直流大电流下测试了扩展电流非线性附加误差，并进行了非线性误差的修正，然后在工频大电流下进行测试，结果表明：经非线性误差修正的光纤大电流测量仪对工频大电流可以线性响应。

五、采用国际标准和国外先进标准情况，与国际、国外同类标准水平的对比情况

本规范引用的标准如下：

GB/T 20840.8—2007 互感器 第 8 部分：电子式电流互感器

国内外尚未有光纤大电流测量仪的校准规范。

六、与现行法律、法规、政策及相关标准的协调性

光纤大电流测量仪在原理上与光纤电子式电流互感器相同，在测量范围上有所差异，主要用于超大电流的测量。光纤大电流测量仪的校准与电子式互感器有相同之处可以借鉴，也有特有的计量特性需要特别关注。

在本规范编写的过程中，在直流、工频电流标准器及误差测量装置、工频电流误差计算方法、等安匝线圈干扰磁场影响的控制等方面注意与 JJG 1157—2018 直流电流互感器检定规程、JJF 1617—2017 电子式互感器校准规范、JJG 313—2010 测量用电流互感器检定规程、GB/T 20840.8—2007 互感器 第 8 部分：电子式电流互感器等相关的检定规程、校准规范及国家标准相协调。

七、贯彻标准的要求和措施建议

本规范作为一种推荐性标准，提出了光纤大电流测量仪的计量特性、校准项目及校准方法，规范了光纤大电流测量仪的量值传递方法。

在规范的贯彻过程中，应组织各省市、自治区计量机构从事大电流计量技术工作的人员和仪器生产企业相关人员学习，对标准进行宣讲，组织经验交流，保证光纤大电流测量仪的规范使用和校准，保证量值准确可靠。

八、 标准名称与计划项目名称相比发生变化的主要原因

本标准计划项目的名称为《光纤直流大电流测量仪校准规范》，发生变化的主要原因如下：

项目立项之初，光纤大电流测量仪在直流超大电流测量领域(如金属电解)有着较为广泛的应用，校准规范主要瞄准直流应用，名称为：“光纤直流大电流测量仪校准规范”。近年来，随着研究的深入，光纤大电流测量仪工频大电流的校准及溯源方法已经成熟。电力设备动热稳定性试验、大型交流电焊都对工频大电流的现场校准提出了迫切的需求。光纤大电流测量仪可同时测量直流和交流电流，测量准确度满足校准需求，作为一种理想的大电流现场校准标准器，需要校准规范提供支撑。

因此，将标准名称修改为：《光纤大电流测量仪校准规范》，同时补充工频大电流校准方法。

九、 重要条文内容的解释

(1) 适用范围

限于目前的试验条件，本规范适用于额定电流直流 5kA~300kA、工频 5kA~60kA，采用柔性光纤敏感环的光纤大电流测量仪的校准。对于额定电流大于直流 300kA、工频 60kA 的光纤大电流测量仪，可在 Faraday 磁光效应等效的前提下，通过增加柔性光纤敏感环的匝数校准测量仪的线性度，并在单匝或较少匝数下采用较小电流校准至少一个参考点，实现全量程的校准。

(2) 术语“扩展量程”、“扩展电流”

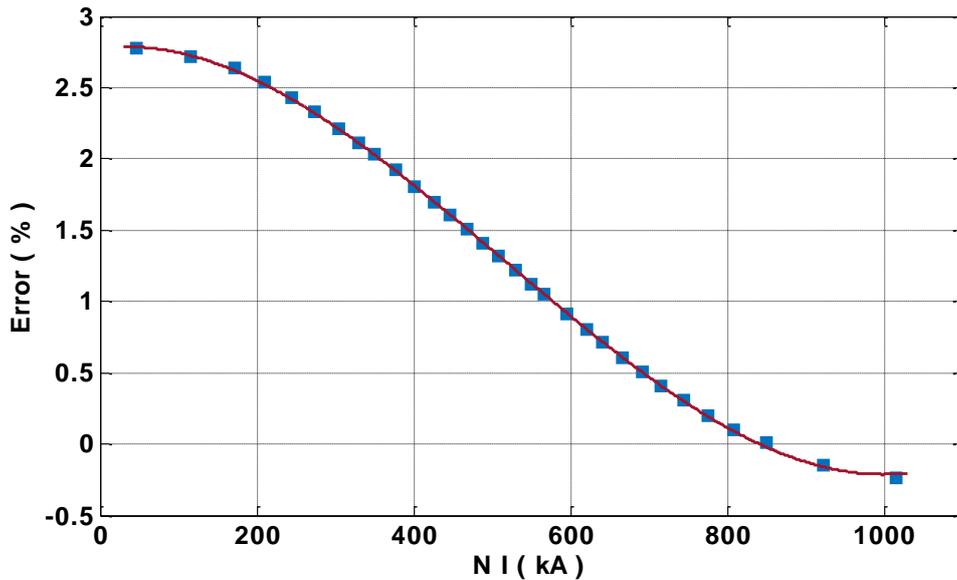
根据光纤大电流测量仪的原理，Faraday 相移可表示为： $F = VNI$ ，其中 V 为传感光纤的 Verdet 常数， N 为柔性光纤敏感环的匝数， I 为被测电流。光纤大电流测量仪通过测量 Faraday 相移 F 得到被测电流。

测量仪的校准可以通过单匝标准电流进行，大电流可以通过安匝数等效，但对于数百 kA 的超大电流，等安匝法也存在困难。从表达式中可以看到：Faraday 相移除与被测电流 I 有关外，还与光纤敏感环的匝数 N 有关，它与二者的乘积 NI 成正比，增加光纤匝数可以等效地起到增大电流的作用，即 $I_{\text{eff}} = NI$ 。通过增加敏感环的匝数也可对测量仪进行等效校准，但需要“多圈校准，单圈或少圈使用”。例如，测量仪在安匝数 100kA，光纤敏感环 4 匝条件下校准，校准后可以用 4 匝测量 100kA，可以用 2 匝测量 200kA，也可以用 1 匝测量 400kA。

光纤大电流测量仪具有量程自扩展特性，通过改变柔性光纤敏感环的匝数实现不同的测量范围（多圈校，少圈用），扩展量程的上限等于其额定电流与额定匝数的乘积。柔性光纤敏感环的匝数与被测电流的乘积 NI 称为“扩展电流”。

(3) 术语“扩展电流非线性附加误差”

下图是利用多匝光纤敏感环倍增 Faraday 磁光效应，在等效 1000kA 范围内光纤大电流测量仪对扩展电流 NI 的响应曲线的实测结果，可以看到：随着等效电流的增大，测量仪出现了明显的非线性（在 10kA 以内，非线性不显著，基本可忽略）。光纤大电流测量仪超大电流非线性误差由 1/4 波片及传感光纤特性参数不理想造成，普遍存在，图示曲线具备一定的典型性（取决于制造工艺，非线性误差可能更大）。非线性误差是影响光纤电流测量仪大电流基本测量准确度的主要因素，也会造成交变电流测量波形的失真，应是重要的计量特性。



规范中定义了“扩展电流非线性附加误差”，其意义在于校准光纤大电流测量仪对 NI 的响应特性，实际上也反映了对 Faraday 磁光效应的响应特性 ($F = VNI$, V 为常数)。在扩展量程内，按 10% 的间隔，逐点给出测量仪对扩展电流的示值与参考值之间的偏差。光纤大电流测量仪应在扩展量程内具有线性响应特性，校准客户可根据这项校准结果对测量仪的非线性误差进行软件补偿，以保证在大动态范围内具有良好的线性度。

由于柔性光纤敏感环路存在闭合误差，在多次重复拆装测量过程中，光纤大电流测量仪的比例因子会发生变化（该误差也是最主要的不确定度来源）。闭合误差影响测量仪的比例因子，但不影响线性。所以，在“扩展电流非线性附加误差”的校准过程中，需要先在某个参考点下校准示值误差，相当于将环路闭合误差的影响扣除，剩下的示值误差反映的是非线性。参考点选取在被校光纤大电流测量仪扩展量程的上限。

(4) 5 计量性能要求

光纤大电流测量仪的柔性光纤敏感环无法做到首尾精确闭合，不能满足安培环路定律提出的理想闭合条件，多次重复拆装测量过程中比例因子会发生变

化，是主要的不确定来源。敏感环闭合误差的影响随光纤匝数的增加而减小，不同匝数下测量不确定度不同，需要根据需要分别校准评价。

对于工频大电流，实际应用中更多的关注的是电流值的准确程度，如动热稳定试验电流的峰值和有效值，而对于相位误差则关注很少，因此规范未将相位误差作为校准项目，也没有提出计量性能要求。如果需要校准相位误差，校准方法可参照 JJF 1617—2017 电子式互感器校准规范。

(5) 6.1 环境条件

在 $(22\pm 3)^{\circ}\text{C}$ 范围内，不同温度下光纤大电流测量仪校准结果的差异一般小于其误差限值的 1/10。

(6) 6.2 测量标准及其他设备

直流电流标准器及误差测量装置最大允许误差的要求参考了 JJG 1157—2018 直流电流互感器检定规程；工频电流标准器及误差测量装置最大允许误差的要求参考了 JJF 1617—2017 电子式互感器校准规范；等安匝线圈干扰磁场影响的限值参考了 JJG 313—2010 测量用互感器检定规程。

(7) 7.3 校准方法

光纤大电流测量仪采用等安匝法校准。在可满足校准需求的情况下，也可采用单匝标准电流进行校准。单匝标准电流校准相当于等安匝线圈为 1 匝的特殊情况。

(8) 7.2.4 扩展电流非线性附加误差

光纤大电流测量仪的非线性表现为不同电流下比例因子不同，严重的非线性会导致交流电流波形的畸变，因此，线性度的校准需要在直流大电流下进行，经非线性误差修正后也能保证工频大电流的测量准确度。

编制工作组
2022年05月