**《交直流电流传感器校准规范》编制说明**

## 一、任务来源

根据文件《国家市场监督管理总局办公厅文件—市监计量发 [2023] 56号》，2023年06月13日，国家市场监督管理总局下达了《2023 年国家计量技术规范项目制定、修订计划》。按计划要求由福建省计量科学研究院、中国计量科学研究院、长沙天恒测控技术有限公司、国家高电压计量站等单位组成起草单位，组织制定国家计量校准规范《交直流电流传感器校准规范》，计划项目编号：MTC18-2023-08，报批时间：2024年第4季度。

## 必要性

交直流电流传感器（以下简称“传感器”）是电气测量线路中用于将一次交直流大电流变换为二次交直流小电流（或电压）的一类转换装置，可以实现一次输入大电流的隔离测量。其广泛应用于轨道交通、新能源发电、电池检测、MRI梯度放大器、高稳定性功率源、校准单元、功率分析仪表等。传感器按主要工作原理分为霍尔效应、磁通门（磁调制）和法拉第光磁效应；按测量电流方式分为直流式、交流式和交直流两用式；按输出信号形式分为电流输出型和电压输出型；按结构形式分为开环结构和闭环结构；按连接方式分为穿心式和连接式。

目前发布的关于“交直流电流传感器”的相关标准有《GB/T 18459-2001 传感器主要静态性能指标计算方法》、《GJB 8354-2015 电流电压传感器通用规范》、《SJ20790-2000 电流电压传感器总规范》、《JB/T 7490-2007 霍尔电流传感器》、《JB/T 11205-2011 直流漏电流传感器》，其中GB/T 18459-2001规定了一般**传感器的主要静态性能指标的定义和计算方法，用于传感器的研制、生产、使用过程中传感器静态性能指标的计算，或用于制订传感器的产品标准**。GJB 8354-2015和SJ20790-2000主要规定了**军用电流和电压传感器的通用要求、质量保证规定和试验方法**。JB/T 7490-2007规定了**霍尔电流传感器的分类、技术要求、试验方法、检验规则及其他**。JB/T 11205-2011针对的是正负馈线漏电流在1000mA以下的专用**直流漏电流传感器的行业标准**。

目前，军工和工信行业发布了行业内的计量技术规范有《JJF(军工)264-2020电流传感器校准规范》和《JJF(机械)1067-2021霍尔电流传感器校准规范》，其中JJF(军工)264-2020制定的校准项目包括**零点输出、交/直流变比和线性度**，JJF(机械)1067-2021仅针对霍尔电流传感器的**零点输出、基本误差限和上限截止频率**等项目。

综上所述，可见目前国内尚未发布统一的交直流电流传感器校准技术依据，为了规范和统一该类设备的校准，建立和完善量值溯源体系，根据交直流电流传感器的计量特性、工作原理和功能特点研究计量性能的评价方法，并制定对应的校准方法。

## 制定过程

起草组接到编制任务后按以下流程开展制定工作

**1 调研交直流电流传感器的生产和使用现状**（2023年11月~2024年12月）

交直流电流传感器种类繁多，包括霍尔电流传感器（开环、闭环）、磁通门电流传感器、罗氏线圈（含积分器）、光纤电流传感器和巨磁阻电流传感器。国内外知名的交直流电流传感器生产企业有DANISENSE、LEM、银河电气、武汉龙城、长沙天恒、南京中霍、深圳航智、HIOKI、YOKOGAWA等。交直流电流传感器广泛应用于轨道交通电气设施、光伏发电系统、新能源汽车驱动系统、变频调速装置、核磁共振MRI设备、电流校准单元等。

**2 梳理交直流电流传感器的相关国家标准、行业标准、部门规范**（2024年01月~2024年02月）

围绕交直流电流传感器的计量特性，梳理了相关国家标准、行业标准、部门规范，GB/T 18459-2001针对传感器的主要性能参数（静态特性、静态校准、量程、满量程输出、零点输出、使用特性、线性度、回差、重复性等参数的定义做出规定，并提供了静态性能指标计算方法和数据处理方法。GJB 8354-2015针对传感器的测量范围、激励电源、性能特性（零点输出、满量程输出、非线性、迟滞<回差>、重复性、准确度、零点漂移、响应时间）等参数规定了通用要求、质量保证方案和试验方法。JB/T 7490-2007 霍尔电流传感器针对传感器的基本参数（准确度等级、测量范围、辅助电源、输出信号、响应时间、工作频率）做出规定，并对外观、与准确度有关的技术指标及与准确度有关的试验方法做了规定。JB/T 11205-2011 直流漏电流传感器主要针对测量范围在1000mA以下的直流正负馈线漏电流测量用专用电流传感器，并对基本参数（测量范围、辅助电源电压、输出信号、输出信号限值、基本误差限）、试验方法等做出规定。JJF(军工)264-2020是军工部门首次制定的针对交直流电流传感器的部门使用校准规范，根据交直流电流传感器的计量性能制定了部分最主要的计量特性（零点输出、直流电流比、交流电流比、直流电流电压转换比、交流电流电压转换比、线性度），并编制了对应的校准方法。JJF(机械)1067-2021是工信部发布的针对霍尔电流传感器的行业内计量校准规范，根据霍尔传感器的计量性能制定了“准确度等级和基本误差限”、“上限截止频率特性”和“零点输出”三个项目的校准方法。此外，目前由全国电磁计量技术委员会组织起草的“光纤大电流测量仪校准规范”和“霍尔交直流大电流传感器在线校准规范”正在征求意见当中，其中“光纤大电流测量仪校准规范”针对的是直流5kA~300kA和工频5kA~60kA的电流范围，“霍尔交直流大电流传感器在线校准规范”针对的是直流和工频1kA~500kA的电流范围。为了统一各国家标准、行业标准和行业规范对交直流电流传感器校准（或试验）项目选取差异性，并根据校准用测量标准的性能现状，结合电流传感器厂家的技术手册，全面梳理了交直流电流传感器的主要计量特性。

**3 研究交直流电流传感器工作原理、功能特点和计量性能**（2024年03月）

通过研究交直流电流传感器工作原理、功能特点和计量性能制定了交直流电流传感器的计量特性：

1. 一次电流测量范围

交流电流：1mA~100A（10Hz~1kHz），100A~2kA（40Hz~1kHz）；

直流电流：1mA~10kA

1. 零点输出
2. 基本误差
3. 线性度
4. 回差
5. 重复性
6. 阶跃响应时间
7. 频率附加误差

**4 研究交直流电流传感器计量性能的评价方法**（2024年04月）

包括：校准条件、测量标准及配套设备、校准项目和校准方法

1 ）校准用测量标准

根据目前校准用测量标准的能力及溯源现状，对校准用测量标准做出如下规定：

表1校准用测量标准设备

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| 序号 | 设备名称 | 参数 | 测量范围 | 最大允许误差 |
| 1 | 交直流标准电流源 | 交流电流 | 10 mA~100 A，（10 Hz~10 kHz） | 土（0.05%〜0.5%） |
| 100 A~1kA，（45 Hz~1 kHz） |
| 1 kA~2 kA，（45Hz~400 Hz） |
| 直流电流 | 10 mA~10 kA | 士（0.01%〜0.5%） |
| 2 | 交直流稳流源 | 交流电流 | 10 mA~100 A，（10 Hz~10 kHz） | / |
| 100 A~1kA，（45 Hz~1 kHz） | / |
| 1 kA~2 kA，（45 Hz~400 Hz） | / |
| 直流电流 | 10 mA~10 kA | / |
| 3 | 交直流电流比例标准 | 交流电流 | 10 mA~100 A，（10 Hz~10 kHz） | 士（0.001%〜0.5%） |
| 100 A~1kA，（45 Hz~1 kHz） |
| 1 kA~2 kA，（45 Hz~400 Hz） |
| 直流电流 | 10 mA~10 kA | 土（0.001%〜0.5%） |
| 4 | 交直流标准表 | 交流电流 | 1mA~2A，（10Hz~10kHz） | 土（0.05%〜0.5%） |
| 直流电流 | ±（1mA~2A） | 士（0.002%〜0.5%） |
| 交流电压 | （0.1~10）V，（10Hz~10kHz） | 土（0.003%〜0.5%） |
| 直流电压 | ±（0.1~10）V | 土（0.001%〜0.5%） |
| 5 | 适配单元 | 辅助电源供电电压 | ±5 V、±12 V、±15 V、±24 V | ±5% |
| 辅助电源带载能力 | 1 mA~2.5 A | / |
| 交流电流 | 1 mA~2 A，（10 Hz~10 kHz） | 土（0.05%〜0.5%） |
| 直流电流 | ±（1 mA~2 A） | 士（0.002%〜0.5%） |
| 交流电压 | （0.1~10）V，（10 Hz~10 kHz） | 土（0.003%〜0.5%） |
| 直流电压 | ±（0.1~10）V | 土（0.001%〜0.5%） |
| 6 | 标准同步采集装置 | 交流电压 | （0.1~10）V，（10 Hz~10 kHz） | 土（0.003%〜0.5%） |
| 直流电压 | ±（0.1~10）V | 土（0.001%〜0.5%） |
| 7 | 示波器 | 扫描时间 | 100 ns~1 s | 时基：±0.1% |
| 8 | 宽频相位表 | 交流电压 | （0.1~10）V，（10 Hz~10 kHz） | 土（0.003%〜0.5%） |
| 相位 | 0°~359.999° | ±（0.01~0.5）° |
| 9 | 标准分流器 | 交流电流 | 1 mA~100 A，（10 Hz~10 kHz） | 土（0.05%〜0.5%） |
| 直流电流 | ±（1 mA~100 A） | 士（0.002%〜0.5%） |
| 10 | 阶跃电流源 | 幅度 | 1 A~1000 A | ±5% |
| 上升沿时间 | <1μs | 大于等于100A/μs |
| 脉冲测量电压 | 10 mV~10 V | ±5% |
| 注：交（直）流标准电流源、交（直）流稳流源的稳定度应优于被校传感器基本误差绝对值的1/10。 |

1. 校准项目

根据制定的计量特性要求，选取如下校准项目：

表2 校准项目

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 序号 | 校准项目 | 校准方法条款 |
| 1 | 零点输出误差 | 7.2.2 |
| 2 | 基本误差 | 7.2.3 |
| 3 | 线性度 | 7.2.4 |
| 4 | 回差 | 7.2.5 |
| 5 | 重复性 | 7.2.6 |
| 6 | 响应时间 | 7.2.7 |
| 7 | 频率特性 | 7.2.8 |

1. 校准方法

根据选定的校准项目分别编制对应的校准方法，详见《交直流电流传感器校准规范》（征求意见稿）相关条款。

**5 开展试验工作（2024年01~05月）**

选取各种型号的交直流电流传感器开展了项目实验验证，详见《交直流电流传感器校准试验报告）

**6 起草《交直流电流传感器校准规范》（征求意见稿）**，发至全国各省级计量技术机构、本省内地市计量所和传感器的生产企业征求意见，并根据征求意见反馈情况，对征求意见稿进行修改，形成《交直流电流传感器校准规范》（送审稿）（2024年06月~2024年08月）。

**7 规范审定（预计2024年09月）**

**8 规范报批（预计2024年11月）**

## 制定依据

本规范依据JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》编制。连同JJF1001-2011《通用计量术语及定义》和JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本校准规范制定工作的基础性系列规范。本规范还参考和引用了GB/T 18459-2001 传感器主要静态性能指标计算方法、GJB 8354-2015 电流电压传感器通用规范、SJ20790-2000 电流电压传感器总规范、TB/T 2763-2009 机车车辆用电流传感器和电压传感器、JB/T 7490-2007 霍尔电流传感器、JB/T 11205-2011 直流漏电流传感器、JJF(军工)264-2020《电流传感器校准规范》和JJF(机械)1067-2021《霍尔电流传感器校准规范》等文件。

## 五、制定说明

《交直流电流传感器校准规范》包括封面、扉页、目录、引言、范围、引用文件、术语和计量单位、概述、计量特性、校准条件、校准项目和校准方法、校准结果表达、复校时间间隔和附录几个部分。

1 引言

本规范根据JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF1001-2011《通用计量术语及定义》和JJF1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》编写，并参考了GB/T 18459-2001 传感器主要静态性能指标计算方法、GJB 8354-2015 电流电压传感器通用规范、SJ20790-2000 电流电压传感器总规范、TB/T 2763-2009 机车车辆用电流传感器和电压传感器、JB/T 7490-2007 霍尔电流传感器、JB/T 11205-2011 直流漏电流传感器、JJF(军工)264-2020《电流传感器校准规范》和JJF(机械)1067-2021《霍尔电流传感器校准规范》等文件，申明本规范为福建省内首次制定。

2 范围

参考JJF（军工）264-2020，扩展了测量范围的上限和下限，并结合市面上的交直流电流传感器的实际测量性能，将交流电流的频率下限调整为10Hz。另外，本规范适用于需要辅助工作电源的传感器，普通的电磁式电流互感器和变送器已经发布各自的国家检定规程，且一般互感器无需辅助供电，排除在传感器的范畴之外；电量变送器包含多种电量参数，且其输出具有统一规格（0~±10V；4mA~20mA），属于工业过程控制仪器表，区别于一般的电流传感器；脉冲电流传感器和高频电流探头部分基于电磁感应原理，不能用于直流电流测量，过量程会产生磁饱和，还有部分是基于电阻分流原理，脉冲电流传感器和高频电流探头的工作频率从10Hz~3GHz，属于高频电流测量的范畴，校准需要使用标准冲击电流源或宽带电流源，不属于本规范覆盖的范围。故申明本规范不适用于电磁式电流互感器、脉冲电流传感器、高频电流探头和电流变送器的校准。

3 概述

介绍交直流电流传感器的用途、工作原理和分类

4 术语和计量单位

引用术语部分是用于校准方法条款的更好理解，新制定和改写的术语包括“静态模型”、“变换比”、“参比直线”、“同步标准采集装置”和“适配单元”。

1. 关于“静态模型”，国标虽然提及“静态特性”，但与高端电流传感器（如零磁通传感器）有所区别，“静态模型”是根据部分高端电流传感器的技术手册直译而来，描述了传感器的一次电流和二次输出之间的数学模型，由于其不唯一，不同的传感器静态模型可能不同，校准时可以依据传感器的手册采用不同的误差分析方法和不确定度评估方法。
2. 关于“变换比”，传感器的一次为电流，二次可以是电流或电压，为了用二次输出表征一次电流需要将二次输出参量乘以一个比例系数。当二次为电流时称之为“变比”，量纲为A/A；当二次为电压时，称之为“比例因子”，量纲为A/V。为了统一表述，并出于本规范采用一次电流来表征误差，制定一个统一的比例系数表述方法，故制定了“变换比”。
3. 关于“参比直线”，依据国标，传感器采用不同的工作直线时，线性度也不同，取决于工作直线的形式。根据高端传感器的参数定义方法，采用校准数据的最小二乘拟合直线的情况较多，故本规范也采用最小二乘直线作为参比直线。对应的线性度也可称之为“最小二乘线性度”。
4. 关于“同步标准采集装置”，“同步标准采集装置”是一类装置的统称，可以是多路标准表外加同步装置构成，也可以是具有同步采集通道的数据采集器构成，满足传感器校准时，参考通道和比较通道的同步数据采集，减小电流测量的系统误差。
5. 关于“适配单元”，电流传感器一般都有辅助电源供电的要求，部分传感器的二次输出需要进行信号调理，供电和信号调理功能可以部分或全部包含在“适配单元”中。同时，“适配单元”可以集成在被校传感器中，也可以集成在测量标准设备中，或独立于二者。通过引入“适配单元”与前述的“变换比”可以方便灵活地选择不同的校准方法。“适配单元”的不同组合方式决定了不同的不确定度评估方法。

4 计量特性

1. 电流测量范围的确定原则

目前被校交直流电流传感器的测量范围普遍超过了校准用测量标准设备的测量范围，根据溯源性要求和测量标准设备性能对测量范围做了如下规定：

交流电流

10mA~100A（10Hz~10kHz），

100A~2kA（40Hz~1kHz）。

直流电流

10mA~10kA

1. 关于“零点输出误差”

参考相关标准及产品手册，不同等级的被校电流传感器零点输出误差差异较大，与基本误差的关系给出的是一个区间（1/10~1），并且零点输出误差仅适用于直流电流传感器或交直流两用电流传感器的直流功能。仅具有交流功能的电流传感器无需测量零点输出。

1. 关于“基本误差”

交流电流

a）电流范围：

10mA~100A（10Hz~10kHz），

100A~2kA（40Hz~1kHz）。

b ）最大允许误差：

±（0.05~5）%

直流电流

a）电流范围：

10mA~10kA

b ）最大允许误差：

±（0.01~5）%

1. 关于线性度

参考相关标准及产品手册，不同等级的被校电流传感器的线性度差异角差，与基本误差的关系给出的是一个区间（1/100~1/5），极限是不超过基本误差的1/5。

1. 关于回差

回差是正、反行程平均值之差的绝对值的极值，参考JB/T7490-2007，规定为不超过基本误差的绝对值。

1. 关于重复性

电流传感器的重复性分成两个流派，以GB/T18459-2001和JB/T 7490-2007为代表。其中GB/T18459-2001表征的是多次重复测量结果的分散程度，JB/T 7490-2007表征的是多次重复测量的结果之间的最大差值。GB/T18459-2001定义的重复性更符合JJF 1001-2011。分别计算正、反行程的标准偏差估计值，然后选取较大者作为在校准点处的重复性。重复性计算方法以额定电流的百分比表示，其极限值不超过基本误差的绝对值。高等级的电流传感器重复性实验结果普遍优于1/10的基本误差绝对值，本规范规定了重复性的区间（1/10~1）。

1. 关于响应时间

查阅了电流传感器的有关标准，制定响应时间的范围（1μs~400ms）

1. 关于频率附加误差

频率特性包括了±3dB带宽、幅值频率附加误差（幅频特性，又称频率减额特性）、相位频率附加误差（相频特性，又称相移），根据目前的校准用标准设备情况及被校电流传感器的性能，暂无法开展-3dB带宽项目的校准，仅根据制定的电流测量范围，开展幅值频率误差项目和相位频率误差误差项目的校准。这里需要阐明开展校准的必要性，当被校电流传感器作为测量配件时，例如配合功率分析仪使用，传感器的幅值和相位指标会直接影响测量系统整体的准确度指标，可以通过对电流传感器开展校准，获得幅值和相位的频率特性，进而对整个测量系统进行修正。

5 校准条件

1. 关于环境条件

高等级电流传感器对温度比较敏感，影响零点输出误差、基本误差、线性度、测量范围等，按等级进行划分，0.1级及以上时，要求实验室环境温度与参比温度的偏差为±3℃，0.1级以下时，实验室环境温度与参比温度的偏差为±5℃。

1. 关于校准用测量标准设备

为提高本规范的适用性，校准用测量标准设备不采用专用设备的名称，采用通用名称，以输出（或测量）的参数和测量范围来进行划分。选择具体校准项目的校准方法选择合适的测量标准。具体表格见表1。

6 校准项目

1. 关于校准前的准备

校准前的准备工作包括了（1）外观及通电检查，（2）工作正常性检查，（3）预热。只有完成这些工作，方能保证顺利完成整个校准过程。对于有专用接口的被校传感器，应确保所有端子的接线正确，特别是供电端子，正、负极接反极易烧毁传感器的内部电路模块。开环传感器的闭合接触面应整洁且可完全贴合。被校传感器应按说明书规定进行通电预热。

1. 关于“零点输出误差”

“零点输出误差”项目的校准仅适用于直流电流传感器或交直流两用电流传感器的直流功能部分。校准过程应在参比温度条件下进行，不同标准对于零点输出误差的读数时间的规定不同，不好明确规定。并且不同被校传感器零点输出的稳定时间差异较大，本规范建议参考被校传感器的说明书规定或者以观察到零点输出趋于稳定为准。校准零点输出误差时，采用的直流标准表应事先开路清零。

1. 关于“基本误差”

参考相关国家和行业标准，基本误差的校准采用多次循环，循环次数不少于3次，对于低等级的电流传感器此规定是合适的，对于高等级的电流传感器，重复性极好，此规定则不符合测量实际，极大增加了校准工作量，考虑到电流源的稳定性一般在0.01%以上，按1/10的选取原则，规定0.1级及以上的电流传感器（包括开环和闭环传感器）只需进行一次循环。为了使规范的条款更简洁易懂，统一描述了交流电流、直流电流的校准过程，针对交流电流的不同测量频率，只是附加了测量步骤，大幅简化了校准条款。

1. 关于“线性度”和“回差”

“线性度”和“回差”校准项目包含在“基本误差”校准项目中，可以采用基本误差的校准结果进行计算直接得到。本规范采用最小二次线性度，以基本误差的校准结果（测得值）进行最小二次线性拟合，获得的拟合直线作为参比工作直线，从而计算“线性度”。“回差”则以“基本误差”校准得到的正行程平均特性和反行程平均特性在各个校准点的最大偏差的绝对值与额定一次电流的百分比表示。

5）关于“重复性”

改写了GB/T 18459-2001，并参考了JB/T 7490-2007，相对于GB/T 18459-2001，本规范的重复性只选取其中一个校准点进行，不需要进行多次多校准点循环，可以比较容易实现多次的重复性测量。相对于JB/T 7490-2007，本规范的重复性计算采用实验标准差。“重复性”应体现当次校准时测量结果的分散程度，与不确定度的A类评定相对应。

6）关于“响应时间”

按有关国家标准、行业标准，电流传感器的响应时间校准时有两个基本要求：（1）电流的速率（*d*i/*d*t）应足够快，（2）一次电流为被校传感器的额定值。根据目前能查到的标准设备（阶跃电流源）性能，最高的指标为（1kA，*d*i/*d*t：100A/μs），无法覆盖各种测量范围的电流传感器。因此，对于一次输入电流的输入幅度要求不做硬性规定，仅声明尽可能设置为额定值。另外，响应时间考核的是被校电流传感器的带宽特性（也可以理解为传感器的二次输出相对于一次输入的延迟），根据制定的电流测量范围，最高频率为1kHz，基本上都在带宽以内，对响应时间的要求较低，对电流上升速度的要求也相应降低。可以通过观察响应波形，如果波形满足要求，可以适当降低电流速率要求，增加测量标准设备的可选择性。

7）关于“频率特性”

被校传感器的带宽特性目前尚不具备设备条件，根据部分高端电流传感器的技术手册，某些型号传感器的模拟信号带宽达到1MHz以上，对于校准用信号源的要求较高，也不存在溯源途径，本规范将不制定“带宽”校准项目。然而，由于电流传感器通常会作为测试设备附件使用，其幅值和相位的指标会影响测量系统的整体指标，有必要针对其幅值和相位的频率特性进行校准，因此制定了幅值频率附加误差（幅频特性）和相位频率附加误差（相频特性）两个校准项目。

7 附录

为了加强对规范条款的理解，附录部分给出了“交（直）流电流传感器的静态模型及参数说明”和“最小二乘参比工作直线拟合方法及计算示例”。

 起草小组

 2024年04 月05 日