

# 多参数电气仪表的同步校准技术及不确定度评定

王红杰 刘宝林

河南安钢周口钢铁有限责任公司 河南 周口 466300

**摘要:** 多参数电气仪表集成多种测量功能,同步校准技术对其测量准确性至关重要。本文阐述其同步校准技术基础,包括工作原理、同步校准必要性与校准技术发展历程;介绍基于标准源、数字化及自动化校准系统构建等关键技术;探讨测量不确定度评定理论、影响因素及实例;最后分析校准技术与不确定度评定的关系。研究为提升多参数电气仪表校准精度与效率提供理论和实践指导。

**关键词:** 多参数电气仪表;同步校准;多通道协同;不确定度评定

## 1 多参数电气仪表同步校准技术基础

### 1.1 多参数电气仪表工作原理与结构

多参数电气仪表是集成电压、电流、电阻、频率等多种测量功能的综合检测设备,其工作原理基于电磁感应、欧姆定律等核心电气理论,通过前端传感模块将被测电气量转换为微弱电信号,经信号调理电路放大、滤波后,由A/D转换器转化为数字信号,最终通过微处理器运算处理并显示测量结果。结构上采用模块化设计,主要包含输入接口模块、信号处理模块、数据运算模块、显示输出模块及电源模块<sup>[1]</sup>。输入接口模块配备不同类型表笔和端子,适配不同参数测量需求;信号处理模块通过专用芯片实现多信号并行处理,确保各参数检测互不干扰;数据运算模块嵌入专用算法,提升多参数同步测量精度;显示输出模块采用高清液晶屏幕,支持多参数同时显示并具备数据存储功能,整体结构紧凑且兼顾扩展性。

### 1.2 同步校准的概念与必要性

同步校准是指采用专用校准设备和方法,对多参数电气仪表的所有测量参数同时进行性能校准的技术手段,核心是通过多通道同步激励与数据采集,实现各参数校准过程的时间同步与数据关联。其必要性体现在三个方面:一是多参数仪表各测量通道存在相互干扰,单独校准单参数时无法反映实际测量场景下的交叉影响,同步校准可模拟真实工作状态,确保校准结果贴合实际使用需求;二是工业生产中多参数同时监测需求日益增长,仪表各参数测量结果的一致性直接影响生产质量控制,同步校准能保障各参数测量精度的匹配性;三是提升校准效率,传统逐参数校准需重复连接设备、设置工况,同步校准可一次性完成多参数校准,大幅缩短校准时间,降低企业停机损失,尤其适用于批量仪表校准场景。

### 1.3 校准技术的发展历程与现状

多参数电气仪表校准技术历经三个发展阶段:20世纪80年代前是手动校准阶段,用单一标准器逐参数手动调节、读数记录,精度依赖人员技能,效率低;80年代至21世纪初为半自动校准阶段,专用多通道标准源出现,实现部分参数自动激励,但数据记录需人工干预,参数切换有时间差,无法真正同步;21世纪以来进入全自动化同步校准阶段,计算机与数字化测量技术发展,形成集标准源、数据采集、自动控制于一体的同步校准系统。当前,该技术校准精度大幅提升,基本参数校准误差可控制在 $\pm 0.001\%$ 以内;校准效率显著提高,单台仪表校准时间大幅缩短;数字化程度加深,可实时传输与存储数据;校准范围持续扩展,能满足多参数校准需求,部分高端系统还支持远程校准。

## 2 多参数电气仪表同步校准关键技术

### 2.1 基于标准源的校准方法

基于标准源的校准方法是多参数电气仪表同步校准的核心方法,通过高精度多通道标准源输出已知准确值的电气参数信号,同时输入至被校准仪表的对应测量通道,对比分析被校准仪表测量值与标准源输出值的差异,实现多参数同步校准。该方法的关键在于标准源的多通道同步输出性能,要求各通道输出信号的幅值、频率、相位等参数具备高稳定性和同步性,通常采用高精度D/A转换芯片和专用同步控制电路,确保各通道输出误差控制在 $\pm 0.0005\%$ 以内,通道间同步误差小于 $1\mu\text{s}$ 。校准过程中需根据被校准仪表的测量范围和精度等级,预设标准源的输出点,覆盖仪表全量程的关键节点;同时采用多点校准法,在每个量程范围内选取5-8个校准点,通过线性拟合或多项式拟合建立误差修正模型。另外,为消除环境因素影响,需在标准源和被校准仪表充分预热后进行校准,且校准环境温度控制在 $20\pm 2^\circ\text{C}$ ,湿度控制在45%-65%,确保校准结果的准确性和重复性。

## 2.2 数字化校准技术

数字化校准技术依托数字信号处理和通信技术,实现校准过程的数字化传输与精准控制,核心是将传统模拟校准信号转化为数字信号,通过数字接口实现标准源与被校准仪表间的双向通信。该技术采用数字标准源输出数字化校准信号,经数字接口直接输入被校准仪表的数字处理模块,避免模拟信号传输过程中的衰减、干扰等问题,大幅提升校准精度<sup>[2]</sup>。关键技术包括数字信号编码解码技术、高精度时间同步技术和数据校验技术:数字信号编码采用差分编码方式,增强抗干扰能力;高精度时间同步通过GPS或北斗授时模块实现,确保标准源与被校准仪表的时钟同步误差小于10ns;数据校验采用循环冗余校验算法,实时验证传输数据的完整性。数字化校准技术还支持校准数据的自动记录与追溯,校准过程中所有数据实时存储至数据库,生成包含校准参数、误差值、环境条件等信息的校准报告,同时可通过区块链技术实现校准数据的不可篡改,满足计量溯源要求,目前已广泛应用于智能多参数电气仪表的校准场景。

## 2.3 自动化校准系统构建

自动化校准系统构建以计算机为控制核心,集成多通道标准源、数据采集模块、接口适配模块和校准软件,实现多参数电气仪表从连接、校准到报告生成的全流程自动化。系统硬件架构采用模块化设计,多通道标准源根据校准需求配置不同量程的输出通道,支持电压、电流、电阻等多参数同步输出;数据采集模块采用高精度数据采集卡,实时采集被校准仪表的测量数据,采样率可达1MHz;接口适配模块配备通用接口面板,兼容香蕉头、BNC、接线柱等多种仪表接口,通过自动换接装置实现不同类型仪表的快速连接。软件系统采用分层架构,底层为硬件驱动层,实现对标准源、数据采集模块的控制;中层为校准执行层,嵌入校准算法和流程,自动完成参数设置、数据采集、误差计算;上层为数据管理层,实现校准数据的存储、查询、报告生成。系统还具备自校准功能,定期对标准源进行校准,确保系统自身精度,可适配不同型号、规格的多参数电气仪表,提升校准的通用性和效率。

## 3 多参数电气仪表测量不确定度评定

### 3.1 不确定度评定的基本理论

多参数电气仪表测量不确定度评定依据JJF 1059.1-2012《测量不确定度评定与表示》标准,核心是量化表征测量结果的分散性,为测量结果的可靠性提供科学依据。评定过程遵循“识别不确定度来源—量化各分量—合成标准不确定度—扩展不确定度”的流程。基本概

念包括标准不确定度、合成标准不确定度和扩展不确定度:标准不确定度是用标准差表示的不确定度分量,分为A类评定和B类评定,A类评定通过对同一被测量进行多次重复测量,利用统计方法计算标准差;B类评定通过查阅标准物质证书、仪器说明书等信息,结合经验或理论估算标准差<sup>[3]</sup>。合成标准不确定度是将各标准不确定度分量按方差合成定理合成得到的不确定度,考虑各分量间的相关性,当各分量相互独立时,直接通过平方和开方计算。扩展不确定度是在合成标准不确定度基础上,乘以包含因子得到,通常取包含因子 $k=2$ ,对应置信水平约95%,用于直接表示测量结果的可信区间,确保测量结果的使用方能够清晰判断测量数据的可靠性。

### 3.2 影响不确定度的因素分析

多参数电气仪表测量不确定度受多种因素综合影响,可分为设备因素、环境因素、操作因素和方法因素四类。设备因素包括标准源精度、被校准仪表自身性能和辅助设备误差:标准源的输出稳定性和通道间干扰会直接影响校准信号的准确性,其不确定度通常占总不确定度的30%-50%;被校准仪表的非线性误差、温漂和零漂会导致测量值偏离真实值;数据采集卡、连接导线等辅助设备的误差会引入额外不确定度分量。环境因素主要包括温度、湿度、电磁场干扰和电源波动:温度变化会影响仪表内部元器件参数,如电阻值、电容值变化,导致测量误差;湿度超过规定范围会降低绝缘性能,引入泄漏电流误差;强电磁场会干扰信号传输,尤其对低频参数测量影响显著;电源波动会影响标准源和仪表的工作稳定性。操作因素包括操作人员的校准经验、读数误差和连接方式:经验不足可能导致校准流程不规范,如预热时间不足;读数误差在手动校准中较为明显,自动化校准可大幅降低该影响;连接导线的接触电阻、接线方式会影响信号传输质量。方法因素包括校准方法的合理性和校准点选取数量,不当的校准方法无法充分反映仪表性能,校准点数量不足会导致误差修正模型不准确。

### 3.3 不确定度评定实例

以XMT-8000型多参数电气仪表的直流电压测量通道(量程0-10V)为例进行不确定度评定。首先识别不确定度来源:标准源输出误差、重复测量误差、环境温度变化影响、连接导线接触电阻误差。第一步进行A类评定,对10V标准电压进行10次重复测量,测量值分别为9.9992V、9.9995V、9.9993V、9.9994V、9.9996V、9.9993V、9.9995V、9.9994V、9.9992V、9.9995V,计算平均值为9.9994V,实验标准差为0.00013V,标准不确定度A类分量 $u_1=0.00013/\sqrt{10}\approx 0.000041V$ 。第二步进行B类

评定：采用的FLUKE5720A标准源证书标明10V输出不确定度为 $\pm 0.0001V$  ( $k=2$ )，则 $u_2 = 0.0001/2 = 0.00005V$ ；实验室环境温度在 $20\pm 2^\circ C$ 波动，根据XMT-8000仪表说明书，温度每变化 $1^\circ C$ 引入 $0.00005V$ 误差，按均匀分布计算 $u_3 = (2 \times 0.00005) / \sqrt{3} \approx 0.000058V$ ；采用RVV2 $\times$ 0.75mm<sup>2</sup>连接导线，接触电阻引入的误差经估算为 $0.00003V$ ，按均匀分布计算 $u_4 = 0.00003 / \sqrt{3} \approx 0.000017V$ 。第三步合成标准不确定度，各分量相互独立， $u_c = \sqrt{(0.000041^2 + 0.00005^2 + 0.000058^2 + 0.000017^2)} \approx 0.00009V$ 。第四步取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度 $U = 2 \times 0.00009 = 0.00018V$ ，最终测量结果表示为 $10.0000V \pm 0.00018V$  ( $k=2$ )。

#### 4 校准技术与不确定度评定的关系探讨

##### 4.1 校准技术对不确定度的影响

校准技术的先进性与规范性决定测量不确定度大小，影响其分量构成与量化结果。基于标准源的校准方法中，标准源精度等级是核心因素，高精度标准源可大幅降低B类标准不确定度分量，如0.0001级比0.001级能降低一个数量级；多通道同步性能影响通道间干扰引入的不确定度，同步精度达微秒级可有效抑制交叉干扰。数字化校准技术消除模拟信号传输干扰，降低信号衰减、失真引入的不确定度，较传统模拟校准技术可使合成标准不确定度降低20%-30%，且数字信号编码与校验机制提升数据可靠性。自动化校准系统避免人工操作误差，消除人为不确定度分量，自校准功能可修正标准源误差，稳定不确定度。另外，规范校准流程，严格进行预热、环境控制等，可避免不确定度增大。

##### 4.2 不确定度评定在校准中的应用

不确定度评定是校准工作的重要组成部分，其结果为校准技术的选择、校准流程的优化和校准结果的判定提供关键依据。在校准技术选择阶段，通过预评定不同

校准技术下的不确定度，可科学选取适配被校准仪表精度要求的技术方案，在校准流程优化中，不确定度评定可定位主要不确定度来源，针对占比超过30%的分量采取改进措施，如发现环境温度是主要影响因素，可增设恒温恒湿装置，降低温度波动引入的不确定度；若重复测量误差过大，可优化校准算法或更换稳定性更好的被校准仪表<sup>[4]</sup>。在校准结果判定中，不确定度评定结果是判断仪表是否合格的核心依据，将仪表的示值误差与扩展不确定度进行比较，若示值误差的绝对值小于等于扩展不确定度与仪表最大允许误差的差值，则判定仪表合格；同时，不确定度评定结果需纳入校准报告，为仪表使用方提供测量结果可靠性的量化依据，帮助使用方合理判断仪表在实际测量中的适用性。

#### 结束语

多参数电气仪表同步校准技术与不确定度评定紧密相连、相互影响。先进的校准技术是降低不确定度的关键，而不确定度评定又为校准技术选择、流程优化和结果判定提供依据。随着技术发展，需持续探索更精准的校准方法和更科学的不确定度评定体系，以适应多参数电气仪表在各领域的广泛应用，保障测量结果的准确可靠，推动行业高质量发展。

#### 参考文献

- [1]宋政辉,赵立芬,范文.发射场电气仪表在线校准方法[J].中国计量, 2022(05): 128-132.
- [2]郑勇彬.电气仪表计量检定及自动化分析研究[J].中国设备工程, 2021(16): 168-169.
- [3]刘志刚.高精度电气仪表校准技术现状与发展[J].仪表技术与传感器, 2023, 45(6): 45-48
- [4]陈晓峰.基于大数据的电气仪表智能校准方法研究[J].电气自动化, 2024, 46(3): 56-60