

不确定度理论在电测计量工作中的应用

王皓旻

包头东华热电有限公司 内蒙古 包头 014040

摘要：不确定度理论通过量化可靠性、支撑合规体系、优化过程控制及推动标准化，已成为电测计量质量保障的核心工具。量化测量结果可靠性，替代传统误差概念：不确定度以区间形式表征测量值的分散性，解决了真值不可知的局限性，更科学地反映测量结果的可靠性范围。参数多样化表达：通过标准偏差、置信区间半宽等多参数定量描述测量结果的分散程度，提升结果的可信度。

关键词：不确定度理论；电测计量工作；应用

电能计量与不确定度之间存在紧密的互构关系：不确定度既是计量结果可靠性的量化标尺，也是计量体系设计的核心约束。

1 不确定度理论基本概念

1.1 权威定义。根据国际标准ISO/IEC Guide 99:2007（VIM国际计量术语）及JJF 1001-2011（中国通用计量术语）：测量不确定度（Measurement Uncertainty），表征合理地赋予被测量之值的分散性，与测量结果相联系的参数，核心要点：“分散性”：反映测量值可能存在的分布范围（非单一误差值）；“合理赋予”：基于科学分析和统计方法评定；“相联系”：必须与具体测量结果绑定报告。

1.2 关键构成与分类。标准不确定度，单次测量或单分量评定的不确定度，分为：A类评定：基于统计方法（重复测量数据）→B类评定：基于先验信息（证书/经验数据）→如仪器允差 $\pm a$ ，则（依分布类型定）合成标准不确定度各独立分量合成结果。

1.3 实践意义。选型高精度电测设备时，比较U值比单纯比较“精度等级”更科学；国际互认：CNAS要求校准证书必须包含U，否则结果无效（ISO/IEC 17025:2017，6.4.7条款）。不确定度是测量科学的语言：它用数学工具（统计+概率）替代了“误差范围”的经验描述；在电测领域，它贯穿设备研发、量传溯源、现场应用的全生命周期质量管控；其本质是对人类认知局限性的量化坦诚——即使最精密的测量，也需声明“我们有多不确定”。

2 标准不确定度相对不确定度定义

在电测领域，标准不确定度和相对不确定度是量化测量可信度的核心参数，其定义与应用对规范表述和结果评价至关重要。

2.1 标准不确定度（Standard Uncertainty），定义基

于测量值概率分布，用标准差（ σ ）形式表征的测量结果分散性，记为 u 。反映单次测量的可信程度，单位与被测量相同（如V、A、 Ω 等）。

2.2 相对不确定度（Relative Uncertainty）。用于无量纲化比较不同量级测量的可靠性（常用百分数表示）。电测中的实用意义，设备选型依据，系统误差分配，设计电能计量系统时，报告规范化，依据JJF 1059.1-2012，电测报告必须同时声明测得值、标准不确定度及包含因子，标准不确定度是可信区间的绝对标尺，相对不确定度是跨量级精度的统一度量。二者共同构成电测结果可靠性的完整表述体系。

3 不确定度衡量标准

不确定度的衡量标准包含技术规范、行业准则及管理要求三个维度，其核心框架如下：

3.1 技术规范标准（依据GUM JJF 1059系列）。合成方法，标准不确定度分量需区分A类评定（实验标准差表征随机分散性）与B类评定（基于证书/经验的非统计分布）。合成公式：（独立分量）或引入协方差（相关分量），扩展不确定度，包含因子，

3.2 动态化发展趋势，链式传递模型（IEEE P3453），耦合传感器、仪表、传输链路的不确定度分量，提升系统级精度，实时不确定度，针对智能电网动态负荷，开发温度-误差响应函数在线修正算法，衡量本质，不确定度标准的核心是将“可信度”量化：管理层面：以1/3法则等阈值确保量传合法性；应用层面：用灰色区判据控制决策风险。

4 电学计量中测量不确定度评定的应用

4.1 电测计量不确定度评定方法。电测计量中的不确定度评定需严格遵循标准流程，结合电测特性（如电路干扰、动态响应等）进行系统分析。标准评定流程，建立测量模型，明确被测量与输入量的数学关系，识别不

确定度来源,设备固有误差,标准源精度(如电能校验仪 $\pm 0.3\%$)、传感器非线性。环境干扰,温度漂移(电化学氧传感器)、电磁噪声(电流互感器),操作因素,读数分辨力(电压表 0.01V)、重复性波动。量化不确定度分量,A类评定(重复性):对重复测量数据计算实验标准差,相关分量处理:需引入协方差项(如功率测量中电压与电流的耦合)。

4.2 电测特殊场景的评定技术。动态测量(如瞬态骚扰),需修正有限带宽引起的波形失真(上升时间/峰值误差),采用时域-频域混合模型评估脉冲磁场不确定度,整体装置级评定(如电能计量系统),耦合电能表、互感器、导线压降的误差链:典型配置扩展不确定度需 $\leq 0.2\%$ (贸易结算场景)。电化学传感器(如氧分析仪),气体标准物质定值误差(B类主导),仪器分辨力与重复性合成(占比 $\leq 30\%$)。核心原则:电测不确定度评定需贯穿“模型准确性 $\rightarrow$ 来源完整性 $\rightarrow$ 分量量化严谨性”全流程,并符合JJF 1059.1与ISO/IEC 17025的合规性要求。对于动态或复杂系统,宜采用信息化工具(如蒙特卡洛仿真)提升评估效率。

4.3 电能计量与不确定度关系。电能计量与不确定度的关系本质上是测量质量控制的核心耦合,具体体现在以下维度:技术基础:不确定度是电能计量结果的可靠性标尺,误差量化依据,电能表测量误差(如示值误差)必须通过不确定度表达其可信范围,例如0.5级电能表的误差 $\pm 0.5\%$ 需附带扩展不确定度,否则无法判定计量结果有效性。误差源的系统解析,通过A/B类评定分解计量过程中的不确定度分量:A类:重复性波动B类:标准装置允差、温度漂移等。合规性控制:满足法规与标准的强制要求。系统优化:指导计量装置设计与故障诊断应用场景,不确定度的指导作用,典型案例,装置选型,对比不同互感器/电能表的合成不确定度。经济决策:支撑贸易结算与风险管控,电费争议仲裁依据,当用户电能表误差接近阈值(如 $+0.48\%$)时,计量方案可靠性验证,三相电能计量系统需耦合电能表、互感器、线路压降的不确定度:技术演进:驱动动态计量与智能评估,新能源场景适配,风电场谐波计量需引入动态不确定度模型,实时评估功率波动可信度。国际标准迭代,IEC Guide 115:2021推动电能计量从“误差限管理”转向“不确定度风险置信评估”。核心关联,电能计量本质是量值传递过程,不确定度则是其可信度的数学表征——两者共同构成“测量结果可信区间”的技术闭环,贯穿设备制造、周期检定、现场应用的完整链条。

4.4 电测传感器如何结合评定不确定度。电测传感

器的不确定度评定需结合其工作原理、测量特性及环境因素进行综合分析,具体流程与技术要点如下:标准评定流程,建立传感器测量模型,明确输出量(如电压、电流)与输入被测量的数学关系:识别关键不确定度来源,传感器固有误差,非线性(位移传感器线性度 0.1%)、灵敏度漂移。标准器具误差,标准测力仪 0.1 级允差(B类分量)、数字多用表示值误差($\pm 0.06\%$)。电磁噪声(电流互感器)。测量重复性,多次测量标准差(A类分量主导)。量化不确定度分量,A类评定:对重复测量数据计算实验标准差B类评定:仪器允差 $\rightarrow$ 均匀分布转换标准证书信息。电流互感器相位误差与负载需引入协方差项。电测传感器特殊场景评定,动态测量(瞬态响应),电流传感器抗雷击冲击需评估瞬态失真引入的不确定度分量(波形上升时间影响)。采用时域仿真模型量化动态误差。多环节耦合系统,电能计量系统:电流互感器、电压互感器、线路压降误差链式合成。高压电力互感器不停电诊断需考虑现场电磁干扰分量。温度依赖型传感器,带传感器的温度变送器需叠加两项不确定度:电测传感器不确定度评定需紧扣“模型精准性-环境适应性-动态响应特性”三维度,遵循JJF 1059.1流程,并依托智能化工具提升高压、瞬态等复杂场景的评估效率。对于贸易结算场景(如智能电能表),系统级扩展不确定度需 $\leq 0.2\%$ 。

5 不确定度在电测中的重要性

5.1 量化测量结果的可靠性。可信范围界定,电测结果(如电压、电流值)必须附带不确定度,以明确其真实值可能分布的区间。例如电能表校准声明“误差 $\pm 0.1\%$ ($k=2$)”,表明误差以95%概率落在 $\pm 0.1\%$ 范围内,直接反映结果的可信程度。误差范围的科学表达,区别于传统误差概念(真值不可知),不确定度通过统计学方法量化测量值的分散性,更适应电测复杂环境(如电磁干扰、温度波动)。

5.2 支撑合规性与国际互认。强制标准要求,国际标准ISO/IEC 17025规定,电测报告未包含不确定度评定则不具备法律效力,无法实现全球实验室互认。量值传递合法性前提,依据JJF 1033等规范,电测标准装置的扩展不确定度必须小于被检设备允许误差的 $1/3$ 。例:电能质量监测设备需满足GB/T 39853.2-2021不确定度限值,否则判定不合格。

5.3 优化电测系统性能。关键误差源定位,通过A/B类评定分解不确定度分量,可识别系统薄弱环节:若环境温度温漂占主导 $\rightarrow$ 需加强温度补偿或屏蔽措施,若设备固有误差超限 $\rightarrow$ 更换高精度传感器或标准器,动态工况适应性提

升,针对新能源并网谐波、负荷突变等场景,基于不确定度模型开发实时修正算法(如电压暂降补偿)。

5.4 驱动技术创新与标准迭代。新型评估模型应用,链式传递模型:耦合电能表、互感器、线路压降的不确定度,优化系统级精度;动态不确定度:实时评估风电场功率波动的可信度。国际标准演进,IEC Guide 115:2021推动电测从“误差限管理”转向“不确定度风险置信评估”。本质价值,不确定度是电测领域的质量基石——将抽象的“准确性”转化为可量化、可控制、可溯源的工程技术参数,贯穿研发、检测、应用的完整链条。缺乏不确定度评定的电测结果,其工程价值与法律效力均存疑。

6 不确定度实际应用方法

6.1 建立测量模型与识别分量。定义测量函数,识别不确定度来源,设备因素:标准器误差、仪器分辨率(如数字万用表末位跳变),环境因素:温度漂移、电磁干扰。方法因素:接线端子接触电阻、互感器相移角误差。

6.2 标准不确定度评定。A类评定(统计分析法),对重复测量数据,例如电能表校准中10次重复读数的标准偏差。B类评定(非统计方法),基于先验信息量化:设备证书:技术指标:数字示波器分辨率,合成标准不确定度计算,灵敏度系数计算,忽略相关性时简化为分量平方和开方。案例:直流电压测量(量程10V),扩展不确定度确定,包含因子选择,按置信概率P选取k值:完整信息:包含测量模型、分量清单、置信概率等;有效位数:不确定度保留1-2位有效数字(如0.006V),测量结果末位对齐不确定度。合格判定规则,动态电测场景特殊处理,时变信号(如风电功率波动),采用滑动窗口统计:每5分钟计算一组,链式系统不确定度,电能计量系统合成:操作要点总结,模型精准性:非线性系统(如谐波分析)需高阶项修正;相关性处理:使用并联标准电阻校准多通道时,需计算相关系数。

7 不确定度评定技术未来趋势

7.1 量子化与人工智能融合。量子传感驱动精度跃升:金刚石NV色心传感器实现纳米级磁场测量,推动微电子器件缺陷检测的不确定度降至亚微米级。深度学习不确定性建模:面向目标定位、医学影像分析等场景,开发符合GUM规范的AI不确定度评定框架,解决算法黑箱可靠性问题。

7.2 动态与实时评定技术突破。复杂信号处理革新:基于贝叶斯滤波器的动态不确定度实时传播模型,满足电力电子设备宽频(0.1Hz-10kHz)校准需求。多源数据融合评定:整合物联网传感器集群数据,建立环境温湿度、设备老化等干扰因素的动态补偿模型,降低现场测量不确定度。

7.3 自动化与标准化升级。全链自动化评定平台:实验室信息管理系统(LIMS)集成蒙特卡洛法(MCM)算法,实现从数据采集到不确定度报告的自动生成。

7.4 新兴应用场景拓展。电碳计量深度融合:电碳表同步评定电能与碳排放不确定度,动态碳因子模型提升企业碳核算可信度。芯片级量子计量:基于原子干涉原理的微型重力传感器,为地质勘探提供微伽级(μGal)不确定度动态监测方案。

7.5 政策与产业协同推进。计量强基工程加速:2025年前完成量子标准装置、宽频校准技术等100项核心攻关,支撑国产高端仪器替代。设备智能化升级:2030年实现50%工业计量设备嵌入自诊断与不确定度实时反馈功能,提升过程可控性。

7.6 电测计量技术新发展。量子化与智能化升级,量子传感技术突破:金刚石NV色心传感器实现纳米级磁场测量,推动微电子器件缺陷检测精度进入亚微米级,显著提升芯片级量子计量性能。AI驱动计量革新:南方电网电鸿物联操作系统整合智能电表数据,实现设备互联与故障精准定位,用户停电时间缩短超30分钟;深度学习模型优化三坐标测量机空间误差补偿,精度提升至 $<0.1\mu\text{m/m}$ 。宽频动态测量技术,宽频电流传感:基于隧穿磁阻(TMR)的新型电流传感器突破传统频带限制,覆盖0.1Hz-10kHz动态范围,支撑新能源并网高频谐波监测需求。实时干扰补偿:物联网传感器集群动态融合环境温湿度、设备老化等多源数据,构建实时补偿模型降低现场测量不确定度。

总之,未来不确定度评定将向量子基准化、动态实时化、全链自动化演进,政策与技术创新协同加速测量可靠性革命。

参考文献

- [1]王安.浅谈不确定度理论在电测计量工作中的应用.2022.
- [2]张宇.不确定度理论在电测计量工作中的应用探讨.2023.