

Evaluation Methods for Uncertainty in Metrological Testing Results and Exploration of Quality Enhancement Pathways

Na Shen

Anyang Product Quality Inspection and Testing Center, Henan Province, Anyang, Henan, 455000, China

Abstract

The evaluation of uncertainty in metrological testing results is a critical step in ensuring the scientific validity and traceability of test data, as well as a key indicator for assessing technical capabilities in laboratory quality management. Scientific evaluation of uncertainty not only affects the credibility and fairness of results but also determines their acceptability in international comparisons. This paper systematically explores the identification of uncertainty sources, quantitative evaluation, and composite/extended calculation methods from a theoretical foundation, proposing a comprehensive evaluation framework based on statistical modeling, standardized calculations, and risk-oriented approaches. Additionally, it constructs quality enhancement pathways for uncertainty evaluation from the perspectives of quality management, technological innovation, and information support. The study concludes that improving data traceability systems, optimizing experimental environments, and standardizing technical criteria can significantly enhance the accuracy, stability, and international comparability of test results, providing scientific basis and technical support for capability enhancement and international mutual recognition of testing institutions.

Keywords

metrological inspection and testing; uncertainty evaluation; quality control; data traceability; standardized management

计量检验检测结果的不确定度评定方法及质量提升路径探索

沈娜

河南省安阳市产品质量检验检测中心, 中国·河南 安阳 455000

摘要

计量检验检测结果的不确定度评定是保证检测数据科学性与可溯源性的关键环节,也是实验室质量管理中衡量技术能力的重要指标。科学评定不确定度不仅影响结果的可信度和公正性,还决定其在国际比对中的可接受程度。本文从理论基础出发,系统探讨不确定度的来源识别、量化评定、合成与扩展计算方法,提出基于统计建模、标准化计算与风险导向的综合评定框架。同时,从质量管理、技术创新与信息化支撑角度构建不确定度评定质量提升路径。研究认为,通过完善数据溯源体系、优化实验环境与统一技术标准,可显著提升检测结果的准确性、稳定性与国际可比性,为检验检测机构的能力提升和结果国际互认提供科学依据与技术支持。

关键词

计量检验检测; 不确定度评定; 质量控制; 数据溯源; 标准化管理

1 引言

计量检验检测结果的不确定度评定是检测机构质量保证体系的核心组成部分。随着国家质量基础设施(NQI)建设的推进,检测结果的准确性和可溯源性受到前所未有的重视。不确定度评定不仅反映检测过程的测量能力,也体现实验室对测量风险的认知与控制水平。然而,在实际工作中,不确定度的评定往往存在计算模型简化、评定因素遗漏及数据溯源不足等问题,导致结果可信度受限。为了确保检测结果具备科学性与国际可比性,必须从理论与实践层面系统研

究不确定度的来源分析、量化方法与控制策略。本文以计量检验检测机构的技术实践为背景,探讨不确定度评定的理论基础、评定方法体系及质量提升路径,旨在为行业标准化建设与检测能力提升提供可行参考。

2 不确定度评定的理论基础与内涵

2.1 不确定度的概念与作用

不确定度是衡量检测结果可信度的定量指标,用以描述测量过程中受多种随机与系统因素影响而导致结果分散的程度。它反映了测量值与真实值之间可能偏离的范围,为检测结果赋予统计意义与置信度。不确定度并非单纯的误差值,而是对所有潜在误差源影响的综合概率描述,能够揭示结果的可靠区间与可重复性。通过科学评定不确定度,检测

【作者简介】沈娜(1979-),女,中国山东临沂人,本科,工程师,从事质量和计量检验检测研究。

结果可获得统计学意义上的置信区间,为不同实验室、不同测量手段之间的结果比对提供统一的评估标准。不确定度的提出使测量从“单值判断”走向“区间判断”,强化了检测数据的可追溯性与科学性,在工程测量、环境监测、生物检测等领域被广泛应用,是实验室能力验证及 ISO/IEC 17025 等国际认可体系的重要组成部分。

2.2 不确定度的分类与组成要素

不确定度的评定通常分为 A 类与 B 类两种类型。A 类评定基于统计方法,通过重复测量结果计算标准偏差来描述随机波动的影响;B 类评定则依托文献数据、仪器技术指标、校准报告及经验资料等非统计信息估算确定。两类不确定度相互独立又共同作用,其平方和的平方根构成测量结果的合成不确定度,代表所有影响因素的综合效应。在复杂检测过程中,仪器性能漂移、标准物质稳定性、样品制备误差、操作差异及环境扰动等因素均会对不确定度产生贡献。为保证评定结果的准确性与完整性,应建立系统的影响因素模型,合理划分各不确定度分量,确保测量结果的可追溯性和评定过程的科学化。

2.3 不确定度评定的国际标准框架

国际标准化组织 (ISO) 颁布的《测量不确定度表示指南》(GUM) 奠定了现代不确定度评定的理论基础,为全球计量检测提供了统一的技术语言。GUM 体系以概率统计理论为核心,提出通过输入量的不确定度传播来计算测量结果合成不确定度的方法,常采用灵敏度系数法或蒙特卡罗仿真进行评估。我国依据 GUM 并结合检测行业特点,制定了 JJF 1059 系列计量技术规范,使不确定度评定更加符合国内检测实践。标准明确要求检测机构记录评定过程、溯源路径及输入数据来源,确保结果的透明性与可验证性。该标准体系的推广,不仅促进了我国检验检测数据的国际互认,也提升了计量技术服务的科学化与标准化水平,为检测结果的全球比对提供了坚实的质量基础。

3 不确定度来源的分析与识别

3.1 测量设备与标准物质的不确定度贡献

测量设备的性能水平和溯源链完整性对不确定度评定起决定性作用。仪器的精度等级、稳定性、分辨率以及长期漂移都会对结果可靠性产生直接影响。设备若缺乏周期性校准或存在量程非线性问题,易导致系统性偏差积累。标准物质的不确定度作为量值传递的重要环节,其标称值的准确性与可追溯性直接决定测量结果的可信度。为降低设备因素的不确定度贡献,应严格执行溯源体系要求,定期校准并进行比对验证,确保测量链各环节处于受控状态。对关键设备应实施性能趋势分析和稳定性监测,利用历史数据识别漂移规律并进行动态修正,以实现设备状态的可预测性与可控性,确保测量数据在时空维度上的一致性与可靠性。

3.2 样品处理与环境条件的影响分析

样品的制备与保存过程对检测结果的不确定度具有显

著影响。制样过程中若存在稀释比例不准确、混合不均或样品挥发损失,均可能引入系统误差。检测环境条件的波动,如温度、湿度、气压变化及静电干扰,也会影响仪器读数的稳定性,进而影响测量结果的一致性。为实现对环境影响的量化控制,应建立实时环境监测系统,对关键参数进行自动记录与修正,并通过数学模型将其转化为不确定度分量纳入计算。对于要求高精度的实验,应采用恒温恒湿系统和环境补偿算法,减少环境因素带来的波动。此外,应在样品制备与检测全过程中推行标准化操作规范,确保每个环节的可重复性和可追溯性,从源头上降低外界环境对不确定度的干扰。

3.3 人员操作与方法学不确定度

人员操作差异与检测方法特性是影响不确定度的重要人为因素。操作人员在仪器使用、样品处理及数据读取中的主观偏差,容易造成结果重复性差异。尤其在化学分析、手工测量等环节,操作习惯与技能水平的差异可能引发随机波动。为评估此类影响,可采用多人员交叉比对、盲样测试及能力验证等方式获取操作误差的统计分布。方法学方面,不同检测技术的灵敏度、线性区间、响应时间及样品适应性差异,会改变不确定度传播路径。建立科学的标准操作程序 (SOP) 与方法确认制度,能够在操作流程与计算模型上实现统一,减少主观判断带来的偏差。通过持续培训与能力考核,强化人员的量化意识与标准执行力,可有效降低人为与方法学不确定度,提升检测数据的稳定性与可重复性。

4 不确定度的量化与计算方法

4.1 标准不确定度与合成不确定度计算

标准不确定度是表征单一测量因素对结果不确定性影响程度的基本量,通常以重复测量数据的标准偏差表示。其计算目标在于量化各独立变量的随机波动,为总体评定提供基础。合成不确定度则是在多种影响因素共同作用下,对整体测量不确定性的综合表征。根据误差传播定律,若输入量相互独立,合成不确定度可通过各标准不确定度平方和的平方根求得;若存在相关性,则需引入协方差矩阵进行修正。灵敏度系数法可定量描述各输入量变化对结果的影响程度,帮助识别主要不确定度来源。通过建立输入量模型与影响路径矩阵,能更准确地评估系统整体不确定性,为检测方案的优化与测量过程改进提供科学依据。

4.2 扩展不确定度与置信区间评定

为实现测量结果的可解释性与风险控制,合成不确定度需经覆盖因子放大形成扩展不确定度,从而在特定置信水平下描述测量值可能的真实区间。通常情况下,当覆盖因子 k 取 2 时,对置信概率约为 95%,即测量结果有 95% 的概率包含真实值。扩展不确定度在检测报告中起到科学声明作用,使用户能够合理理解结果的可信范围,并据此进行风险决策。对不同领域而言,覆盖因子可根据安全等级与技术要求灵活调整。合理的置信区间设置,不仅反映测量系统的

技术能力,也体现检测机构对不确定度控制水平的专业性。通过统计方法优化置信度设定,可有效平衡检测风险、经济成本与决策精度,为质量控制与标准比对提供统一尺度。

4.3 基于统计与仿真的综合评定方法

面对非线性测量模型和复杂输入参数间的相关关系,传统线性传播法往往难以准确反映不确定度的真实分布特征。蒙特卡罗仿真方法通过对输入量进行随机抽样与迭代运算,获取输出量的概率分布,从而以统计方式评定不确定度。这种方法能够全面考虑输入量的概率特征、相关性以及系统噪声的综合影响,适用于复杂测量链与非正态分布条件下的分析。结合现代计算技术,可利用大样本模拟实现结果的稳定收敛,提高评定精度。近年来,大数据与机器学习算法被引入不确定度分析中,通过对历史检测数据的建模,动态评估测量能力与误差趋势,实现从静态计算向智能化预测的转变。该方法的推广应用为计量检验检测领域的质量提升与技术革新提供了新的发展方向。

5 不确定度评定的质量提升路径

5.1 建立数据溯源与标准化管理体系

健全的数据溯源体系是保障不确定度评定科学性与可比性的基础环节。检测机构应确保所有测量数据均可追溯至国家或国际计量基准,形成覆盖标准物质、计量仪器及检测结果的完整溯源链条。应在机构内部建立统一的检测方法与管理规范,明确结果记录、修约及报告格式,减少人为差异带来的评定偏差。通过标准化管理制度,使不确定度计算过程符合技术规范与统计原则。为保证评定结果的权威性,应建立内部审核与外部比对双重机制,对不确定度评定过程进行持续监督与校核,确保结果的技术一致性与法定效力。通过制度化溯源与标准化管理,检测机构能够实现不确定度评定的规范化与可追溯性,从根本上提高数据质量与结果可信度。

5.2 优化实验条件与过程控制机制

实验环境与过程控制是影响不确定度水平的重要变量。检测机构应建立实验室环境参数自动监测系统,对温度、湿度、气压、振动、电磁干扰等关键因素进行实时监控,并将环境波动数据纳入不确定度评定模型。通过引入环境修正因子,可有效消除外部扰动带来的测量偏差。在检测过程中,应推行“检测—分析—反馈—改进”的闭环质量控制机制,

对异常数据开展溯源分析和再验证,确保测量系统长期稳定。完善设备维护与校准周期管理制度,定期开展性能验证与比对试验,使仪器在最优工作状态下运行。通过精细化过程控制与动态环境管理,可显著降低随机波动对测量结果的影响,从而提升不确定度评定的可靠性与稳定性。

5.3 提升人员能力与信息化支持水平

人员能力是决定不确定度评定质量的关键因素。检测机构应建立多层次培训体系,针对不同岗位实施分类指导,重点强化操作人员对不确定度理论、统计分析及测量模型构建的理解与应用能力。通过技术研讨、案例复盘与能力验证,提升人员的实证分析与数据解释水平。同时,应构建信息化支撑平台,开发不确定度计算与过程管理软件,实现数据采集、处理、分析与报告输出的一体化操作。借助人工智能与大数据分析技术,可自动识别异常模式与系统偏差,提高评定的智能化与精确度。通过人才能力建设与信息化赋能的协同推进,检测机构能够实现不确定度评定从经验型向数据驱动型转变,推动评定质量与管理水平的系统提升。

6 结语

不确定度评定是计量检验检测质量管理的核心环节,其科学性直接关系到检测结果的可靠性与国际认可度。通过系统分析影响因素、优化评定模型与完善管理体系,能够有效提升检测结果的准确性与溯源性。未来,应在国家标准化体系与信息化审计平台建设的支撑下,推动不确定度评定向智能化、可视化和动态化方向发展。检测机构应以数据质量为核心,以风险管理为导向,不断完善评定机制与技术规范,构建“可追溯、可验证、可持续改进”的质量管理体系,为我国计量检测领域的高质量发展提供坚实技术支撑。

参考文献

- [1] 林雪丽,李明君,苏继琨,等.使用标准物质配制系列标准溶液的不确定度评定[J].中国测试,2025,51(S1):132-136.
- [2] 卓银杰.质量法低温流量标准装置及其不确定度评定研究[D].中国计量大学,2024.
- [3] 王国华.建设领域典型检验检测设备量值溯源及其不确定度应用研究.北京市,中国合格评定国家认可委员会,2018-08-30.
- [4] 王景阳.临床实验室部分检验项目测量不确定度评定的研究.河北省,沧州市中心医院,2011-04-16.
- [5] 李晓东.测量不确定度评定方法的研究与应用.黑龙江省,黑龙江省农业机械试验鉴定站,2008-10-10.