

长度计量中测量不确定度的应用与研究

郭超 郭亮 于倩

内蒙古自治区计量测试研究院 内蒙古 呼和浩特 010000

摘要: 测量不确定度作为量化测量结果分散性的关键参数,在长度计量领域具有重要应用价值。本文系统阐述测量不确定度的基本概念,包括定义内涵、来源分类与评定方法。重点分析不确定度在长度计量中的具体应用场景,涵盖量值传递溯源、测量过程控制、结果评价与仪器性能评估。详细探讨A类与B类不确定度的评定步骤,以及合成与扩展不确定度的计算方法。最后论述不确定度对提升结果可信度、优化测量过程的积极影响,为长度计量工作的科学化与规范化提供理论依据。

关键词: 长度计量; 测量不确定度; 应用场景; 评定方法

引言: 长度计量在工业制造、科学研究等领域意义重大,测量结果的准确性至关重要。测量不确定度作为量化测量结果分散性的关键参数,能反映测量结果可信程度与可靠范围。与传统测量误差不同,不确定度不依赖真值概念,更适用于实际场景。深入研究长度计量中测量不确定度的应用,对提升测量质量、推动相关行业发展具有不可忽视的价值。

1 测量不确定度的基本概念

1.1 定义与内涵

测量不确定度是用于量化测量结果分散性的关键参数,直接反映测量结果的可信程度与可靠范围。在长度计量领域,任何测量过程均无法完全消除分散性,不确定度通过数值形式描述这种分散性的大小,为测量结果提供合理的置信区间^[1]。与测量误差存在本质区别,误差定义为测量结果与理论真值的差值,但由于真值通常无法精确获知,误差仅能定性分析而难以定量修正。不确定度则基于可获取的信息对分散性进行估计,不依赖真值概念,更适用于实际测量场景。例如,使用千分尺测量零件尺寸时,多次测量结果可能存在微小差异,这种差异的量化即为不确定度的体现,它能够为测量结果的可靠性提供客观依据,而误差需假设存在一个理论上的正确尺寸值,两者在概念上形成互补。

1.2 不确定度的来源

测量不确定度的来源可划分为两类。A类不确定度源于重复测量过程中的统计波动,例如对同一零件进行十次长度测量,各次结果间的差异反映了随机因素的影响,通过统计方法(如计算标准偏差)可量化这种分散性。此类不确定度与测量系统的重复性直接相关,可通过增加测量次数降低其影响。B类不确定度则基于非统计信息,涵盖仪器性能、环境条件、参考数据等非重复性

因素。例如,千分尺的校准证书可能标明其最大允许误差,该误差范围可作为B类不确定度的来源;测量时环境温度偏离标准值可能导致材料热胀冷缩,这种影响通过经验数据或理论模型转换为不确定度分量。两类来源并非独立存在,实际测量中往往同时包含统计波动与非统计因素,需综合评估以全面反映不确定度构成。

1.3 不确定度的分类

根据量化方式与用途,不确定度分为三类。标准不确定度以标准差形式表示单个分量的分散性,例如A类不确定度通过重复测量的标准偏差计算,B类不确定度通过非统计信息的分布假设(如均匀分布、正态分布)推导标准差。合成不确定度是A类与B类分量的综合结果,通过不确定度传播律将各分量按方差合成规则组合,反映测量系统的整体分散性。例如,长度测量中既包含重复测量的统计波动,也包含仪器误差与环境影响,合成不确定度将两者效应合并为一个综合参数。扩展不确定度通过引入包含因子将合成不确定度放大,提供更直观的置信区间。例如,包含因子取2时,扩展不确定度表示测量结果有较高概率落在该区间内,适用于需要明确置信范围的场景。三类不确定度共同构成完整的量化体系,为测量结果的可靠性评价提供分层依据。

2 长度计量中测量不确定度的应用场景

2.1 量值传递与溯源

在长度计量体系中,量值传递与溯源是确保各级测量标准一致性的核心环节。从计量基准到工作计量器具的传递过程中,测量不确定度作为量化指标,直接反映量值在传递链中的准确性衰减程度。长度基准通过激光干涉比对装置实现量值定义,其不确定度水平决定了后续各级标准的可溯源范围。工作计量器具如卡尺和千分尺在校准过程中,需将自身不确定度与上级标准进行比

对, 确保量值传递的连续性。若某级标准的不确定度过大, 可能导致下游器具的校准结果偏离真实值, 影响工业制造或科学研究的精度。不确定度在量值传递中不仅用于评价单次校准的可靠性, 更通过逐级控制确保整个计量体系的量值统一性。在航空制造领域, 飞机零部件的尺寸需严格追溯至基准, 任何环节的不确定度超差均可能引发装配误差, 这充分凸显了量值传递中不确定度管控的重要性。

2.2 测量过程控制

测量过程控制以目标不确定度为导向, 通过量化分散性指导测量方案设计。例如在精密加工中, 若目标不确定度设定为微米级, 则需选择分辨力更高的测量仪器如激光干涉仪, 并严格控制环境条件如使用恒温车间^[2]。温度波动对金属材料热胀冷缩的影响可通过不确定度分析进行量化, 进而指导测量时间的调整或温度补偿算法的应用。压力变化对气动量仪测量结果的影响同样需纳入不确定度评估, 通过稳定供气压力或选择抗干扰能力更强的传感器来降低分散性。此外测量步骤的简化或优化也依赖不确定度分析。例如减少人工读数环节可降低操作误差, 但需验证新方法的不确定度是否满足要求。通过动态监控测量过程中的不确定度分量, 可及时发现异常波动并采取纠正措施, 确保测量结果始终处于可控范围。

2.3 测量结果评价

测量结果评价依赖不确定度范围判断多次测量的一致性。例如, 对同一零件进行十次长度测量, 若各次结果均落在合成不确定度定义的区间内, 则可认为测量过程稳定可靠; 若出现偏离区间的情况, 则需排查仪器故障或环境干扰。不同实验室或测量方法的比较同样以不确定度为基准。例如, 国际关键比对中, 各实验室提交的测量结果需附带不确定度报告, 通过统计方法评估结果的一致性。若某实验室的不确定度显著大于其他参与者, 可能表明其测量方法或仪器性能存在缺陷。在科研合作中, 不确定度为跨团队数据共享提供统一标准, 有效避免因精度差异导致的数据误读, 确保不同实验条件下的结果具有可比性。

2.4 仪器性能评估

测量仪器的分辨力、稳定性等性能指标直接影响不确定度水平。例如, 分辨力不足的仪器无法捕捉微小尺寸变化, 导致A类不确定度增大; 稳定性差的仪器在重复测量中产生较大波动, 同样恶化不确定度。通过长期跟踪仪器的不确定度变化趋势, 可确定合理的校准周期。例如, 若某千分尺的不确定度在六个月内未显著增加,

则可延长校准间隔; 若不确定度快速恶化, 则需缩短周期或检修仪器。仪器选型时需根据目标不确定度匹配性能参数。例如, 高精度制造需选择不确定度更小的坐标测量机, 而普通车间检测可选用成本更低的卡尺。不确定度分析为仪器全生命周期管理提供量化依据, 平衡精度需求与经济成本。

3 测量不确定度的评定方法

3.1 A类不确定度评定

A类不确定度评定基于重复性试验与复现性试验的统计结果。重复性试验要求在相同测量条件下对同一被测对象进行多次独立测量, 通过计算测量列的标准偏差量化随机误差的影响。例如使用千分尺对标准块进行二十次长度测量, 记录每次结果并计算标准偏差, 该值直接反映测量系统的重复性水平。复现性试验则通过改变测量条件评估系统性误差的分散性, 例如在不同时间段或不同实验室对同一零件进行测量, 分析结果差异的统计特性, 识别环境因素或操作习惯对不确定度的贡献。重复性试验聚焦随机效应, 复现性试验揭示潜在的系统性偏差, 二者结合为测量过程的稳定性提供量化依据, 确保A类不确定度来源的完整性。

3.2 B类不确定度评定

B类不确定度评定依赖非统计信息, 涵盖仪器校准数据与经验数据两类来源。仪器校准数据通过校准证书传递, 例如激光干涉仪的校准报告明确标示其最大允许误差范围, 该范围经概率分布假设转换为标准不确定度分量。假设误差服从均匀分布时, 将误差范围除以根号三得到标准不确定度; 若服从正态分布, 则根据置信水平确定分位数。经验数据基于历史测量结果的统计分析或专家判断, 例如长期使用某型号卡尺的测量记录显示其误差波动范围, 或根据材料热膨胀系数推算温度变化对长度测量的影响。此类信息的量化需结合具体场景选择合理的分布模型, 关键测量设备需采用更严格的分布假设, 辅助参数可适当简化处理, 确保B类评定的合理性与可靠性。

3.3 合成不确定度计算

合成不确定度通过方和根法将A类与B类分量综合为单一参数。方和根法基于各分量相互独立的假设, 将各标准不确定度平方后求和, 再对结果开方得到合成值。例如长度测量中重复性试验的标准偏差为0.5微米, 仪器校准引入的不确定度为0.3微米, 则合成不确定度为两者平方和的平方根。若分量间存在相关性, 例如环境温度同时影响仪器读数与被测对象尺寸, 需引入协方差项修正合成公式。协方差处理需明确相关性的来源与程度,

通过实验设计或理论分析确定分量间的线性相关系数，将其纳入合成计算以提高准确性。合成不确定度反映测量系统的整体分散性，为后续扩展不确定度计算提供基础，确保量化结果的全面性。

3.4 扩展不确定度确定

扩展不确定度通过引入包含因子将合成不确定度放大，提供更直观的置信区间。包含因子通常取 k 等于2，对应近似正态分布下测量结果落在区间内的较高概率。例如合成不确定度为0.6微米时，扩展不确定度为1.2微米，表示测量结果有较大把握处于该范围内^[3]。若测量结果不服从正态分布，例如仪器误差为均匀分布，需根据具体分布类型调整包含因子。矩形分布下 k 取根号三，三角分布下 k 取根号六，确保扩展不确定度与实际分布特性匹配。扩展不确定度的选择需兼顾精度需求与实用性，关键测量场景可能要求更小的包含因子以缩小置信区间，一般工业检测可采用 k 等于2的通用值，如图1所示；通过扩展不确定度，测量结果的可信范围得以明确，为决策提供量化依据，增强结果的可解释性。

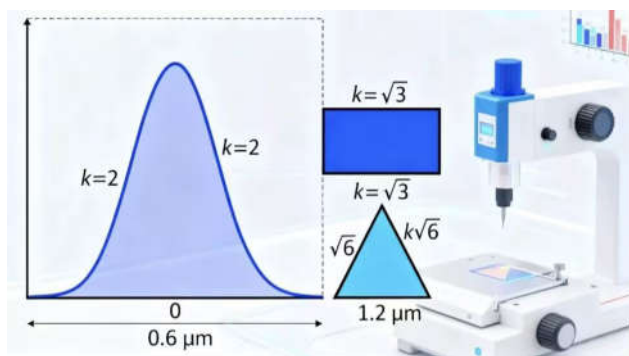


图1

4 测量不确定度对长度计量的影响

4.1 提升结果可信度

测量不确定度的量化避免了“绝对准确”这类误导性表述，为测量结果赋予了更科学的可信度。传统测量常以单一数值作为最终结果，易使人误认为测量不存在误差。引入不确定度后，结果以“测量值±扩展不确定度”的形式呈现，明确界定了测量结果的可能范围。例如，某零件长度测量值为10.002毫米，扩展不确定度为

0.003毫米，表明真实值有较大把握落在10.002毫米至10.005毫米之间。这种表述方式不仅符合测量规律，更为后续决策提供了更可靠的依据。在精密制造领域，不确定度帮助工程师判断零件是否满足设计公差，避免因过度依赖单一数值导致的质量风险。在科研实验中，不确定度则成为验证理论模型的重要参数，确保实验数据与理论预测的可比性。

4.2 优化测量过程

不确定度分析能够精准识别测量系统中的薄弱环节，为过程优化提供方向。例如，若某次长度测量的不确定度主要由仪器漂移贡献，则需缩短校准周期或更换稳定性更高的设备；若环境温度波动是主要因素，则需加强恒温控制或引入温度补偿算法。通过分解不确定度分量，可定位影响精度的关键因素，避免盲目改进造成的资源浪费。例如，在坐标测量机校准中，发现重复性试验的不确定度显著大于复现性试验，表明仪器本身的随机误差较大，此时增加测量次数或优化机械结构比调整环境条件更有效。不确定度分析还能指导测量方法的选择，例如对高精度需求场景，可采用多次测量取平均或交叉验证法降低随机误差；对稳定性要求高的场景，则需优先控制环境干扰或选用抗振仪器。

结束语

测量不确定度在长度计量领域发挥着关键作用。通过对其基本概念、应用场景、评定方法的研究，可提升测量结果可信度，优化测量过程。随着科技发展，长度计量精度要求不断提高，需持续深入研究测量不确定度，完善评定体系，为高精度制造、科研创新等提供更精准可靠的计量支持，推动相关领域持续进步。

参考文献

- [1]高斌.长度计量技术标准化管理与应用的提升[J].大众标准化,2024(4):181-183.
- [2]孙彦锋,蒋远林,王鹏,等.基于大长度比长装置的液位计校准研究[J].计量科学与技术,2025,69(2):3-8,15.
- [3]蒋宇航,黄树东.关于计量标准考核中测量不确定度的分析[J].铁道技术监督,2024,52(11):10-14.