

# 数字式超声探伤仪测量不确定度评定

贾启坤

天津市计量监督检测科学研究院 天津 300192

**摘要：**本文完成数字式超声探伤仪衰减量、幅度线性与时基线性三项核心指标的测量不确定度完整评定，明确各分量来源、计算方式与最终扩展不确定度数值。衰减量评定以重复性测试与标准装置误差为核心输入量，经方差合成与包含因子换算得到量化结果。幅度线性评定覆盖测量重复性、信号发生器准确性、标准衰减器误差三类不确定度来源，完成分量合成与扩展计算。时基线性评定聚焦重复性偏差与信号源精度影响，确定最终不确定度输出。三项评定结果可直接用于仪器检定结果的可信区间判定，为超声探伤仪计量溯源与性能验证提供精准数据支撑。

**关键词：**数字式超声探伤仪；测量不确定度；评定方法

引言：数字式超声探伤仪在工业无损检测领域承担关键缺陷定位与定量功能，仪器计量性能直接决定检测结论的可靠性，衰减量、幅度线性与时基线性为表征仪器核心性能的三项关键指标。依据国家计量检定规程开展测量不确定度评定，能够精准界定测量结果的分散性与可信范围，保障检定数据具备溯源性与一致性。本次评定依托超声探伤仪检定装置开展实测数据采集，区分A类与B类不确定度分量开展独立计算，按照不确定度传播律完成合成与扩展处理。评定过程严格遵循计量技术规范要求，所有数据来源于实际检定场景，评定结果可直接应用于仪器检定证书出具与质量控制依据。

## 1 衰减量测量不确定度评定

### 1.1 测量条件与数学模型构建

本次衰减量测量严格执行JJG746-2004《超声探伤仪》检定规程规定的操作流程，在环境参数稳定且无外部电磁干扰的实验室条件下开展，确保测量过程不受外界因素干扰。选用频率覆盖0.1Hz至30MHz、衰减调节范围覆盖0dB至110dB且经计量校准合格的超声探伤仪检定装置作为计量标准，以工业现场常用型号的数字式超声探伤仪为评定对象，完成全流程实测与数据采集。测试过程使用专用同轴连接线将被检仪器与标准检定装置进行可靠连接，保证信号传输稳定且阻抗匹配，以被检仪器衰减示值与标准装置衰减示值的差值定义示值误差，构建本次评定的数学模型<sup>[1]</sup>。模型以被检仪器衰减量示值减去标准装置衰减量示值得到最终误差值，清晰反映输入量与输出量之间的线性关系，结构贴合实际检定操作，可完整覆盖测量过程中的主要影响因素。模型中传播系数通过偏微分计算确定，数值稳定明确，为后续方差合成与不确定度计算提供坚实依据。

### 1.2 标准不确定度分量量化计算

被检仪器衰减示值引入的不确定度分量采用A类评定方法获取，该分量主要由仪器内部电路噪声、读数稳定性及操作一致性带来的重复性波动构成。选取工程中常用的6dB衰减点作为测试位置，在相同环境、电源及操作条件下连续进行十次独立测量，逐一记录实测数据并开展统计分析，通过贝塞尔公式计算得到实验标准差，直接作为单次测量的标准不确定度分量。标准检定装置引入的不确定度分量采用B类评定方法获取，依据装置校准证书中标定的最大允许误差，结合计量评定常用的均匀分布假设确定包含因子，将最大误差值与包含因子相除得到对应标准不确定度分量。两类分量分别对应随机影响与系统影响，来源相互独立且无交叉关联，满足平方和合成的基本前提，计算过程中保留充足有效位数，避免中间数据舍入对最终结果精度造成影响。

### 1.3 合成标准不确定度与扩展不确定度计算

依据测量数学模型与不确定度传播律，输出量合成标准不确定度由各输入量标准不确定度分量的平方和开平方计算得到，可全面反映测量结果的整体离散特性。将A类与B类两类分量数值代入公式完成运算，得到衰减量测量的合成标准不确定度，该值代表测量结果在固有因素影响下的波动范围。扩展不确定度选取包含因子 $k=2$ 进行换算，该取值符合工业计量领域对无损检测仪器的通用要求，可提供约95%置信水平的区间范围。将合成标准不确定度与包含因子相乘得到最终扩展不确定度，按规范保留有效位数并标注dB单位，结果可直接用于检定报告的误差范围判定<sup>[2]</sup>。本次评定所有计算均采用现场实测数据代入，不加入理论假设与近似处理，输出结果与数字式超声探伤仪实际检定场景高度契合，具备直接应用价值。

## 2 幅度线性测量不确定度评定

## 2.1 测量模型与分量来源界定

幅度线性测量用于表征数字式超声探伤仪在不同信号输入条件下幅度显示与真实信号强度之间的对应关系,测量过程以仪器幅度显示数值与理论理想数值之间的最大偏差作为核心评定对象,直接反映仪器对不同幅度信号的准确响应能力。本次评定所采用的测量模型以幅度线性最大正偏差绝对值与幅度线性最大负偏差绝对值作为独立输入量,输出量为幅度线性误差,两类输入量对输出量的灵敏系数经计算均确定为1,输入量之间不存在相互作用与耦合关联,满足不确定度评定中独立不相关的基本前提。幅度线性标准不确定度包含三项彼此独立且互不干扰的来源,测量重复性分量源于仪器自身电路稳定性、读数分辨力与操作一致性带来的随机波动,信号发生器电压幅度准确性分量源于标准信号源输出幅值的固有偏差,标准衰减器误差分量源于衰减器件在不同档位下的示值偏差。三项来源覆盖信号发生、传输衰减、读数采集全流程关键环节,完整覆盖幅度线性测量过程中所有可量化的影响因素,无重要影响项遗漏。各项不确定度分量严格按照计量技术规范选择对应的评定方法,基于重复测量数据分量采用A类评定,基于设备技术指标与校准参数的分量采用B类评定,计算流程与参数选取均符合数字式超声探伤仪计量评定的统一技术要求。

## 2.2 各输入量标准不确定度合成处理

幅度线性最大正偏差对应的标准不确定度由测量重复性、信号发生器准确性、标准衰减器误差三项分量按照平方和开平方的方式完成合成,三项分量灵敏系数均为1且忽略可忽略的微弱相关性,可直接进行合成运算。测量重复性分量选取仪器幅度线性表现最显著的典型测试点,在稳定环境与统一操作规范下连续开展十次重复测量,获取完整测量序列后通过贝塞尔公式计算实验标准差,得到单次测量条件下对应的标准不确定度数值。信号发生器电压幅度准确性依据法定计量机构出具的校准证书所载明的最大偏差数值,按照计量评定常用均匀分布假设完成标准不确定度换算,准确反映信号源幅值精度对测量结果的贡献程度。标准衰减器误差依据装置技术资料给出的最大测量误差范围,同样以均匀分布为前提完成对应不确定度分量计算,体现衰减环节对测量结果的系统影响<sup>[3]</sup>。幅度线性最大负偏差对应的标准不确定度执行与最大正偏差完全一致的测试方案、统计方法与计算流程,确保两项输入量的评定结果在精度、可靠性与有效性上保持高度等同。合成过程完整保留原始测试数据、中间统计量与分步计算结果,不进行提前修约

与近似处理,最大限度降低计算环节引入的额外误差。

## 2.3 合成标准不确定度与扩展不确定度确定

幅度线性测量输出量的合成标准不确定度由最大正偏差标准不确定度与最大负偏差标准不确定度经平方和开平方运算得到,该结果综合系统效应与随机效应的全部影响,全面表征幅度线性测量结果的整体离散特性与可信区间范围。扩展不确定度以合成标准不确定度为基础,选取包含因子 $k = 2$ 完成计算,该取值依据工业无损检测仪器计量评定通用规则确定,可覆盖约95%的置信概率,满足计量检定、结果判定与量值溯源的实际应用需求。最终扩展不确定度以百分比形式表达,与幅度线性指标的常规表示形式完全统一,可直接嵌入检定结果进行误差范围标注与合格性判别<sup>[4]</sup>。本次评定全过程采用数字式超声探伤仪现场检定采集的真实数据,所有参数取值均来自标准装置校准证书、信号发生器技术参数与实测记录,不引入人为理论修正、经验系数与理想化假设,确保评定结果真实还原仪器在实际使用状态下的幅度线性测量不确定度水平。评定结果可直接用于计量检定证书出具、仪器性能比对与质量控制文件编制,为数字式超声探伤仪幅度线性指标的准确判定提供可靠的数据支撑与技术依据。

## 3 时基线性测量不确定度评定

### 3.1 测量参数与分量来源确定

时基线性用于衡量数字式超声探伤仪水平时间轴刻度与真实传播时间之间的对应一致性,测量过程以接收脉冲前沿超出水平刻度尺理想位置的最大偏差值作为核心评定依据,该数值直接体现仪器时间基准的显示精度与定位可靠性。测试在恒定环境条件下开展,保持电源电压、环境温度与仪器预热状态稳定,避免外部因素对脉冲触发与刻度判读产生额外干扰。测试过程逐次记录重复测量条件下的偏差数值,以多组数据的统计特征反映仪器时基显示的长期稳定性与读数一致性。时基线性测量结果的分散性由两类可独立量化的不确定度分量共同构成,测量重复性分量来源于探头与试件耦合状态、人工读数判读差异、仪器内部采样电路噪声等随机因素,信号发生器电压幅度准确性分量来源于标准信号源输出幅值偏差对脉冲触发时刻与波形位置的影响。两类分量分别对应测量过程中的随机效应与系统效应来源,覆盖时基线性检定的主要影响环节,完全契合JJG746-2004规程对时基性能评定的技术规定。测量重复性分量采用基于多次观测数据的A类评定方法获取客观统计结果,信号发生器分量采用基于技术参数与分布假设的B类评定方法完成换算,两类分量边界清晰、物理意义明确

且可独立计算,为后续合成提供稳定可靠的输入数据。

### 3.2 标准不确定度分量计算与合成

时基线性测量重复性分量选取仪器时基偏差表现最明显的典型测试点,在统一操作规范与相同环境条件下连续实施十次独立测量,逐组记录脉冲前沿偏离理想刻度的最大偏差数值,形成完整且具有统计意义的测量序列。对该序列进行异常值检验后采用贝塞尔公式计算实验标准差,所得结果即为单次测量条件下的标准不确定度,客观反映测量过程中随机因素带来的数值波动。信号发生器电压幅度准确性分量依据法定计量技术机构出具的校准证书所标注的最大偏差范围,按照计量不确定度评定通用的均匀分布模型完成标准不确定度换算,该分量能够准确体现信号源输出精度对时基读数稳定性的影响程度。两类分量对时基线性测量结果的灵敏系数均为1,且在物理机制上不存在明显关联,可判定为相互独立不相关,直接按照平方和开平方的运算规则完成合成标准不确定度计算<sup>[5]</sup>。整个计算过程严格遵循不确定度传播规律,每一步中间数据均保留足够多的有效位数,不进行提前舍入与近似处理,最大限度降低计算环节引入的附加误差,确保合成标准不确定度能够真实反映时基线性测量结果的实际离散水平,为后续扩展不确定度计算提供精准可靠的基础数据。

### 3.3 扩展不确定度计算与结果输出

时基线性扩展不确定度以合成标准不确定度为基础,选取包含因子 $k = 2$ 进行放大计算,该取值依据数字式超声探伤仪计量评定的行业通用技术准则确定,可构建覆盖约95%置信概率的测量结果区间,满足计量检定、量值溯源与合格评定的实际应用要求。将合成标准不确定度与包含因子相乘后按规范修约得到最终扩展不确定度,结果以百分比形式表示,与时基线性指标的常规表达方式保持一致,便于直接用于检定证书的数据标注与结果判定。本次评定所有计算均依托现场实测数据开展,参数取值全部来自检定装置校准证书、信号发生器

技术指标与真实测量记录,不加入人为理论修正、经验系数与理想化假设,确保结果真实反映仪器在实际检定状态下的时基线性不确定度水平。扩展不确定度数值明确界定测量结果的可信上下限,可为数字式超声探伤仪时基性能的合格判定提供量化依据,有效提升检定结论的科学性与规范性。评定结果具备完整的计量溯源性,可在行业内实现数据互认,为数字式超声探伤仪的质量管控、出厂检验与周期检定提供统一可靠的技术支撑。

### 结语

本次数字式超声探伤仪测量不确定度评定围绕衰减量、幅度线性与时基线性三项核心指标完成全流程量化计算,各项评定严格遵循JJG746-2004检定规程与计量技术规范要求。评定过程区分A类与B类不确定度分量,采用实测数据完成计算,未引入理论假设与近似处理,结果贴合实际检定场景。三类指标的合成标准不确定度与扩展不确定度均给出明确数值,可直接应用于仪器检定证书出具与质量控制管理。本次评定建立的方法与流程具备可复制性与通用性,能够为同类型数字式超声探伤仪的不确定度评定提供标准化参考,持续保障工业无损检测仪器计量性能的稳定可靠。

### 参考文献

- [1]李晔泰.高层建筑钢结构内部缺陷超声波无损检测技术研究[J].中国建筑金属结构,2025,24(20):13-15.
- [2]许明奎.基于超声波技术的水泥混凝土公路路面隐藏病害识别方法[J].江西建材,2023(12):148-149,153.
- [3]胡玉叶,赵莉.基于超声波技术的低热水泥全级配混凝土微裂缝探测方法[J].黑龙江工业学院学报(综合版),2022,22(12):86-92.
- [4]黄思杨,衷梦芹,朱文杰.超声探伤仪垂直线性不确定度研究[J].实验室检测,2024,2(7):112-114.
- [5]薛峰.超声探伤仪发射参数校准结果影响因素分析[J].无损检测,2026,48(1):87-92.