

基桩完整性超声波无损检测的新算法

文 / 王 斌 国检测控股集团安徽元正检测有限公司

摘要：为了提升基桩完整性检测的准确度，运用自适应小波阈值降噪、时频域联合滤波以及非线性信号重构等方法，构建多维度声学特征融合框架，对波速、波幅与频谱数据进行协同分析，形成缺陷类型量化判别模型。研究重点在于掌握混凝土介质中波速衰减与缺陷界面声阻抗突变的耦合作用，以动态权重分配策略增强缺陷敏感特征，并建立概率图模型辨识缺陷几何参数及类型。所得结果展现了有效识别多缺陷的潜力，强化了对多路径反射波与噪声干扰的抑制，达到更稳定可靠的完整性评估效果。本研究的核心目标是融合波速、波幅与频谱三大指标，通过熵值筛选准则筛除冗余特征，并依托缺陷几何参数的声学响应映射，实现精细化定量判别。多维度数据的联动剖析有助于深化对内部损伤的理论认知。

关键词：基桩完整性；超声波检测；信号解析；特征融合；缺陷表征

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.16.041

引言

超声波无损检测在工程结构健康评估中占据关键地位，但混凝土等非均质材料中常见的声波衰减和反射干扰，对准确识别内部缺陷带来极大阻碍。为应对介质不均与多路径反射的耦合难题，需要在传播机理与信号处理环节同时发力。波速、波幅与频谱这三类核心声学特征可为缺陷定位与类型判别提供丰富信息，若能结合自适应降噪策略与时频域分析方法，就能大幅提升对多缺陷的识别精度。本研究意在构建更完备的理论框架，通过多维度特征融合与概率图模型技术，为复杂场景下的基桩完整性判别提供更全面的方案。与此同时，声阻抗突变所引发的反射与折射效应，也对后续数据解析提出更高要求，需要在缺陷敏感特征与噪声分离策略上不断优化。这将推动相关算法朝着更精细化方向演进。

一、超声波在非均匀介质中的传播机理

（一）混凝土介质中的波速衰减特性

超声波法是检测混凝土灌注桩桩身缺陷、评价其完整性的一种有效方法，当声波经混凝土传播后，它将携带有关混凝土材料性质、内部结构与组成的信息，准确测定声波经混凝土传播后各种声学参数的量值及变化，就可以推断混凝土的性能、内部结构与组成情况^[1]。

在非均匀介质中，超声波的传播行为呈现出高度复杂的动态特征，混凝土作为典型的非均质材料，其内部包含粗骨料、砂浆、微裂隙以及孔隙等多尺度不连续结构，形成强烈的波阻抗扰动场。当超声波入射其中，波速并非稳定恒定，而是随传播路径的局部微观结构变异而发生非线性波动。这一过程中，声波能量在界面间频繁折返，造成信号的频带迁移与波形扭曲，形成时域扩展效应与相位漂移现象，进而导致有效波速的显著衰减。另外，介质的含水率变化、碳化程度以及局部微裂缝的空间取向，也对波的传播路径产生扰动，在多维尺度上引发波能耗散。声波在传播过程中，其能量一部分被反射与散射，一部分在孔隙结构中发生粘滞损耗，形成高频信号成分的快速衰减。正是由于混凝土中各组分的

物理特性与几何形态在微尺度层面呈现非平稳性，使得超声波传播呈现出空间各向异性与频率依赖性双重特性，波速随路径与频段双重演变，构成对传统匀质传播模型的严重挑战。

（二）缺陷界面处的声阻抗突变效应

当超声波穿越介质结构中的缺陷区域，其传播行为将遭遇声阻抗突变界面所诱发的强烈扰动。声阻抗定义为介质密度与波速的乘积，而在缺陷界面处，如空洞、蜂窝、未振实区或夹杂体等内部异常结构，由于物质属性的不连续，导致声阻抗发生突跃式变化。在该界面处，部分入射波会产生强烈反射，其相位与幅度发生非线性扰动，产生逆传播信号，而另一部分穿透波则伴随强烈的衰减与波形畸变。此类声波行为在界面附近形成复杂的干涉结构，进而在原始接收信号中生成多时延、多强度的回波成分，使缺陷区域成为超声传播路径中的能量障壁。声阻抗突变不仅引发反射与透射系数的急剧变化，还可能因局部微结构的非连续性形成散射场，导致主反射波的信号强度被显著稀释，进而影响后续缺陷图像的分辨率与精度。在时频分析维度上，这类突变界面常常对应着高频瞬变特征的衰落区段，为信号解构与特征提取构建了多层次的识别维度。声阻抗梯度的不连续性还可能诱发非线性传播行为，使得传统的线性传播模型在缺陷区域近似失效，增加信号处理的复杂度与判别的不确定性。

（三）多路径反射波的叠加干扰机制

在非均匀结构中，超声波传播不再遵循单一路径线性传播模式，介质内的微观不连续性以及复杂几何结构引导声波在多条路径间进行频繁折返、反射与散射，形成多路径干涉机制。不同路径的回波信号在接收端以不同的时延、相位、能量形式叠加出现，构成典型的信号叠加扰动场。由于混凝土结构中的骨料分布、界面粘结状态及裂隙取向具有高度随机性，各路径间的传播距离与介质阻抗存在显著差异，导致回波信号的相干性下降，形成干涉斑图与波形抖动。此类多路径叠加干扰在时域

表现为回波包络的拉伸、波峰漂移与主波难以定位，频域上则表现为频谱能量的非平稳性扩散，信噪比快速降低^[2]。在多路径信号中，主反射波极易被次级反射波遮蔽，使得对有效信息的提取面临严重挑战。另外，路径交叉引发的相位畸变还可能在波形中形成伪影，与真实缺陷信号难以区分，从而大幅提升误判风险。多路径效应所引发的信号模糊性与不确定性，其扰动强度与介质内部结构的复杂度呈非线性耦合关系，成为当前声学成像中不可忽视的核心挑战。

二、信号降噪与特征增强理论

(一) 自适应小波阈值降噪原理

在超声信号处理领域，原始波形常受到多源噪声污染，呈现出幅度随机性强、频谱扩散广的特性，尤其在复杂结构介质中，干扰信号与有效信息高度耦合，使传统线性滤波法面临失效风险。自适应小波阈值降噪机制在多尺度分解框架下，具备分层提取、局部拟合、细节保留等能力。其核心思想是将原始信号投影至小波域后，针对不同尺度下的系数动态调整阈值，而非统一剪除。通过构建基于局部统计特性的自适应函数，阈值可依据小波系数的概率分布与噪声标准差自调更新，实现对微弱缺陷信号的保护机制。小波基函数的选取与分解层数设定在降噪效果中起决定性作用，选型需兼顾紧支性、

正交性与平滑性，才能避免能量泄漏^[3]。此方法在处理高密度微结构干扰时展现出极强的解析能力，有效提升信号的瞬时响应精度，为后续特征提取奠定高保真基础。

(二) 时频域联合滤波的噪声分离策略

信号在非平稳环境下频率特性随时间动态变化，单一域处理方法难以同时兼顾时域突变与频域聚焦，导致降噪操作或丢失瞬时有效信息或引入伪频干扰。构建基于时频域联合滤波的分离策略，可在二维投影空间内实现对干扰成分与目标信息的解耦操作。其方法借助短时傅里叶变换与希尔伯特-黄变换等自适应时频分析手段，识别瞬时频率扰动的局部轨迹，并结合形态滤波、经验模态分解等算法，以特定能量准则构造时频窗口，实现干扰能量剔除与主信息保留的协同调节。如图1所示，在联合滤波框架中，时间解析侧重识别结构性脉冲噪声与叠加失真，而频率域处理则注重剔除高频虚假成分与低频漂移。此策略打破传统固定带宽滤波结构，转而引入滑动窗参数自适应调节机制，使得滤波器的中心频率与带宽随局部信号状态动态调整，在非平稳环境下维持对目标信号的跟踪能力。频谱边缘模糊带与非线性扰动带的识别，为极端条件下的超声波信号增强构建了更加精准的控制维度。

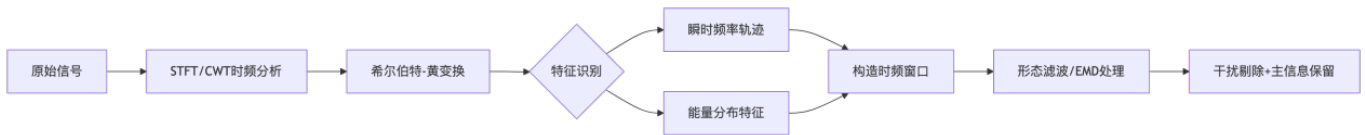


图1 复杂地质波传播特性流程图

(三) 非线性信号重构的能量补偿方法

降噪过程中不可避免存在有效信息的部分损耗，尤其在小信噪比场景下，目标信号可能被误判为噪声成分遭到削弱甚至剔除，造成特征表达能力下降。为恢复被滤除的潜在结构性信息，可引入非线性信号重构策略，通过能量补偿机制对失真段进行重塑。该方法利用稀疏表示、压缩感知与重建网络等非线性建模工具，将已知主成分作为约束，引导重构过程向目标模式逼近。信号在高维空间中的稀疏特征构成了重构函数的约束核，通过最小能量损失准则调节重构权重分布，在压制冗余噪声同时还原真实波形的能量包络结构。补偿算法引入结构保留因子，将波形的主模态曲率与局部峰值关系进行拟合，以保护超声信号中的微弱回波信号^[4]。非线性重构的动态性与可逆性使其具备在多源混叠环境下自我调节的能力，尤其在处理被压缩、被剪裁、被畸变的信号段时具有较高的适应性。

三、多维度声学特征融合框架

(一) 波速-波幅-频谱的关联建模

多维度声学参数中，波速反映介质内部传播延迟，波幅体现信号能量衰减，频谱则揭示其时变频率结构。三者虽源于同一信号，却分别映射出缺陷环境的时间、

空间及频率响应特征，具备互补性与协同性。在关联建模过程中，需打破各特征维度间孤立解读的局限性，构建耦合关系函数，将不同物理层面的特征变量纳入统一评估体系。此过程可借助张量分解技术、多元协方差映射与联合主成分投影，将三维数据空间内的相关性结构转化为可调节的多参数响应面。信号时序波动引发波速不稳定，波幅震荡受反射与吸收干扰，频谱非线性扩散由结构复杂度主导，三者存在缺陷区交叠变化，常呈现同步突变或异步偏移。若能精准提取其协变点，即可形成对缺陷边界、类型与尺度的多维识别通道。

(二) 缺陷敏感特征的熵值筛选准则

在多维声学特征中，非所有参数对缺陷响应均具高辨识度。多数特征含有冗余信息或噪声扰动，需要通过特征选择机制剔除干扰项，提取具有结构性贡献的敏感指标。熵值筛选准则提供一种基于信息不确定性度量的判别方式，以每个特征对系统混乱度的影响程度为权重，构建特征有效性排序。信息熵越高的维度，越倾向于描述信号中非随机波动，易在缺陷边界附近产生断裂式响应。筛选过程不依赖标签信息，可在无监督条件下完成变量重构，增强算法的通用性。熵值计算通过嵌入维度的扩展实现对长短期结构变化的自适应捕捉，在复杂信

号背景中仍可保持高分辨率判断能力。最终输出的敏感特征集构成声学特征融合框架的核心信息层，对缺陷响应曲面的建模具有基础性支撑作用。

(三) 动态权重分配的特征融合机制

多特征并行处理在维度空间内极易出现信息冲突与表征不一致的问题，必须通过动态权重机制调节各特征在决策中的参与强度。动态分配策略常由多维注意力模型、模糊推理网络或贝叶斯更新系统驱动，对特征间的协同与冗余程度进行实时判别，并赋予高贡献维度以更大决策权。权重演化不仅受特征本身的数据分布影响，还融合历史检测数据中的响应轨迹，通过变权优化算法调整当前融合方向^[5]。

四、缺陷类型量化判别模型

(一) 缺陷几何参数的声学响应映射

结构性缺陷在超声检测中呈现出多样化的几何特征，包含尺度、形状、取向及分布等因素，这些几何参数与超声波的传播行为构成复杂交互。缺陷的长度变化会改变回波信号的持续时间，宽度影响能量反射比，而其形状则会重构频谱分布及相位扰动轨迹。建立几何参数与声学响应之间的映射关系，是实现类型量化判别的基础环节。此过程需依托声传播路径的重建与波动理论的动态模拟，将各类几何特征投影至声场参数空间中，提取对应的响应矩阵。响应矩阵不仅包含幅值衰减与波速变化，还囊括频率漂移、主模态跃迁与散射分布特征，通过多参数协同建模，形成可解析的函数映射体。要想提升映射稳定性与区分度，需引入形状识别因子与尺度归一策略，使非线性几何扰动在多维声学空间中具备唯一映射路径。

(二) 多缺陷耦合作用的特征解耦理论

在真实工程体中，缺陷形态往往非孤立存在，其间的相互叠加、交叉、连通现象构成多缺陷耦合结构，严重扰乱声波在介质中的传播规律。耦合态下的信号包含多个干涉分量，特征间存在高度重叠、模糊与交错，其波形表现为幅度突变点频发、相位切换混乱及频谱结构错位。单一缺陷模型已难以涵盖该类复杂情境，必须引入具备解耦能力的识别机制，完成各缺陷单元的分离描述。解耦理论构建需结合统计独立性分析、时频分离算法与形态分解结构，将整体信号分解为若干具有独立结构特性的特征簇。每一特征簇对应特定几何构型的声学响应，通过构建局部独立子空间与约束激活函数，将多个响应源在不损失完整性前提下还原为原生单元^[6]。最终输出的特征解耦结果为分类模型提供具象的结构特征向量，打破传统模型对纯净信号的依赖，拓展了缺陷识别算法的鲁棒边界。

(三) 基于概率图模型的缺陷分类框架

声学特征与缺陷类型之间的映射关系高度复杂，呈现非线性、多变量、非确定性的状态，常规判别模型难以精准捕捉其多元逻辑路径。概率图模型通过构建节点一

边结构表达变量间的条件依赖，具备不完全信息建模、隐变量推理与贝叶斯更新等优势，适用于高度不确定的缺陷分类任务。在此框架中，各类声学特征被建模为观测节点，缺陷类型作为隐状态节点，由条件概率分布函数连接构建联合概率图谱^[7]。图模型通过边权学习机制自动调整变量间依赖强度，筛除冗余路径，强化高置信度特征的表达权重。

结语

本研究对超声波在非均匀介质中的传播机理、信号降噪与特征增强方法、多维度声学特征融合策略以及缺陷类型量化判别模型展开系统探讨。所提出的多路径反射波叠加干扰分析思路，使得反演内部缺陷分布时具备更强鲁棒性与稳定性。利用自适应小波阈值降噪和时频域联合滤波，减弱了混凝土结构中的复杂噪声干扰，并通过非线性信号重构机制实现能量补偿，展现出在弱目标信息保留方面的长处。多维度声学特征融合框架，将波速、波幅与频谱指标集成至同一分析体系，并辅以熵值筛选准则定位最具敏感度的缺陷表征维度。缺陷几何参数的声学响应映射结合概率图模型，不仅能够精确区分多种缺陷类型，还可以对多缺陷耦合作用进行有效解耦，进而使基桩完整性评价取得更灵活与高效的表现。以上各环节的有机衔接，形成了可扩展的统一技术路线，为今后的超声波无损检测研究奠定了坚实基础，也为复杂工程环境下的缺陷检测与可靠性评估带来了更加精细化的理论支持。针对波速衰减特性与声阻抗突变的复合作用，本研究构建了面向多缺陷情况的判别思路，引入动态权重分配与非线性重构手段，使特征融合更具灵活性与深度。通过能量补偿方式提炼弱信号特征，对混凝土介质中多路径反射的相位重叠问题也有了更细致的刻画。

参考文献

- [1] 陈继岳. 超声波法在基桩无损检测中的应用[J]. 黑龙江交通科技, 2021, 44(07): 247-248.
- [2] 薛倬昆, 乔菲, 黄伟韬. 超声波法在公路基桩完整性检测中的应用研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2018, 14(03): 60-64.
- [3] 吴林林. 超声波透射法基桩完整性检测技术应用分析[J]. 公路与汽运, 2015, (04): 235-238.
- [4] 柴国平. 超声波透射法在桥梁基桩完整性检测中的研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2014, 50(12): 52-54+58.
- [5] 宋会川, 赵艺坡. 超声波法检测基桩完整性、特殊缺陷的判定[J]. 黑龙江科技信息, 2012, (14): 276.
- [6] 叶时禄. 基桩完整性检测技术在公路工程中的应用研究[J]. 运输经理世界, 2022, (34): 22-24.
- [7] 任梓琦. 超声波透射法在公路桥梁基桩检测中的运用研究[J]. 价值工程, 2024, 43(14): 109-111.