

基桩低应变检测中浅部缺陷反射信号误判的高频采样改进方法

薛衡宁

广东省有色工业建筑质量检测站有限公司 广东 广州 510725

【摘要】：基桩低应变检测中，浅部缺陷反射信号因高频特性显著、时域叠加明显，易因采样技术局限导致误判，影响工程质量评估。传统采样参数与浅部信号特征适配性不足，引发频率混叠、波形失真，难以精准识别缺陷信息。通过构建高频采样改进方法，动态匹配浅部信号的高频成分，结合降噪增强与时频域联合解译技术，可提升反射信号辨识度。实践表明，该方法能有效降低误判风险，为基桩浅部缺陷检测提供更可靠的技术支撑，保障工程基础安全。

【关键词】：基桩低应变检测；浅部缺陷；高频采样；信号误判；改进方法

DOI:10.12417/2811-0722.25.10.062

引言

基桩作为建筑结构的根基，其质量直接决定工程安全底线。低应变检测凭借便捷性成为基桩质量评估的主流手段，但浅部缺陷反射信号的复杂性常导致误判，埋下安全隐患。传统采样技术难以捕捉浅部信号的高频特征与瞬时变化，使得缺陷信息被掩盖或误读。破解这一难题，需从信号本质出发，通过高频采样技术创新突破传统局限，建立更精准的检测体系，这既是工程实践的迫切需求，也是提升基桩质量管控水平的关键路径。

1 基桩低应变检测中浅部缺陷反射信号的特征与误判表现

（1）浅部缺陷反射信号的固有特征

浅部缺陷反射信号具有显著的高频性与短时域特性。应力波在基桩浅部传播时，因缺陷距桩顶距离短，反射信号到达传感器的时间间隔极短，波形持续时间压缩，能量集中于高频频段，包含丰富的谐波成分。这种高频特性使得信号的幅值变化剧烈，波形前沿陡峭，与深部缺陷信号的平缓衰减特征形成明显差异。同时，浅部缺陷反射信号存在强烈的叠加效应。由于反射时间短，缺陷反射波与桩顶初始激振信号在时域上高度重叠，形成复杂的波形干涉。叠加后的信号往往呈现非对称形态，峰值与谷值的分布规律被打乱，难以直接提取反射波的特征参数。此外，不同类型浅部缺陷（如裂隙、空洞、夹泥）的反射信号存在细微差异：裂隙缺陷可能引发多次反射，形成多峰叠加；空洞缺陷则表现为单一强反射峰；夹泥缺陷因材料阻尼作用，反射信号的高频成分衰减更快，波形更为平缓。这些特征差异在叠加效应影响下易被掩盖，增加了信号解译的难度。

（2）浅部缺陷反射信号的误判表现形式

误判表现为“无缺陷误判为有缺陷”的假阳性结果。当桩顶存在浮浆或传感器安装不当时，会产生类似浅部缺陷的干扰反射，其高频特征与真实缺陷信号相似。传统检测中，若未能区分干扰信号与真实缺陷信号的频谱差异，易将正常桩身误判为存在浅部缺陷，导致不必要的工程处理，增加施工成本与工

期。另一种误判形式为“有缺陷漏判”的假阴性结果。对于规模较小的浅部缺陷，其反射信号能量较弱，在高频段易被环境噪声淹没。传统采样技术因分辨率不足，难以捕捉微弱的高频反射特征，导致缺陷信号被误判为正常的应力波衰减，使实际存在的隐患未被识别，给工程结构安全埋下风险。此外，还存在缺陷性质与规模的误判。浅部缺陷的反射信号特征受缺陷类型、分布形态影响显著，若仅凭经验对波形进行解读，可能将裂隙误判为空洞，或将小规模缺陷评估为严重缺陷。

2 浅部缺陷反射信号误判的技术成因解析

（1）信号采集环节的参数失配：采样参数与浅部缺陷信号特性的不匹配是误判的核心技术成因。传统低应变检测的采样频率设置以深部缺陷为基准，未能适配浅部信号的高频特征，导致信号在数字化转换中发生频率混叠。高频成分被错误映射为低频信号，使反射波形的相位关系畸变，原本陡峭的反射峰被平滑化，丢失可识别的特征标识。采样时间窗口的固定化设置进一步加剧信息失真。针对浅部缺陷的短反射路径，传统时间窗口包含过多冗余数据，而关键信号段因时间分辨率不足无法精细解析。触发阈值的设定缺乏动态调节机制，易导致信号采集起始点偏差，使浅部缺陷反射与初始激振的时间差被误读，直接放大定位误差。这种参数失配形成信息采集的系统性偏差，既无法完整保留缺陷特征，又难以区分有效信号与干扰成分。

（2）信号处理技术的适配性不足：传统信号处理算法对浅部缺陷信号的适应性存在局限。低通滤波环节为抑制噪声常过度衰减高频成分，导致浅部缺陷的特征信号被同步滤除；小波降噪算法若阈值设置不当，会误将高频缺陷信号判定为噪声予以剔除。这些处理过程虽能降低背景干扰，却破坏了浅部缺陷信号的完整性，造成特征信息丢失。信号重构技术的滞后性同样影响解析精度。浅部缺陷信号的叠加效应使波形形态复杂，传统时域分解方法难以分离反射波与入射波，导致缺陷特征被掩盖。频域分析中，傅里叶变换的时间分辨率不足，无法捕捉高频信号的瞬时变化，使缺陷类型与规模的判定缺乏可靠依据。

(3) 解译方法与认知偏差的叠加影响：解译方法的经验依赖性放大了误判风险。传统判读以波形形态对比为核心，依赖预设的缺陷信号模板，但浅部缺陷的叠加波形常呈现非典型特征，难以与模板匹配。量化分析工具的缺失使判定标准模糊，不同检测人员对同一信号的解读易产生分歧，导致结果一致性不足。检测人员的认知偏差进一步加剧误判。对浅部缺陷信号的高频特性认识不足，易将桩顶正常反射误判为缺陷；或因过度关注波形整体形态，忽略微弱的高频反射特征，导致实际缺陷被漏判。这种经验主导的解译模式，在信号质量不佳时难以保证判定的客观性，形成系统性认知偏差。

(4) 现场环境与桩体条件的干扰：现场环境的多源性干扰破坏信号完整性。机械振动产生的低频噪声与浅部缺陷的高频信号耦合，电磁辐射引发随机干扰，导致信噪比下降。复杂地质条件下，桩周土阻力变化会改变应力波传播路径，使反射信号特征偏离预期，增加解译难度。桩体自身条件的影响同样不可忽视。桩顶浮浆未清理彻底会产生虚假反射，混凝土强度不均导致应力波传播速度波动，传感器安装不规范引发接触噪声。

3 基于高频采样的浅部缺陷反射信号改进方法构建

(1) 高频采样参数的动态适配体系：高频采样参数的设定需建立与浅部缺陷信号特征的动态关联机制，突破传统固定参数的局限。核心在于依据桩身结构参数与缺陷预估深度，构建采样频率的自适应调节模型。针对浅部缺陷信号的高频特性，采样频率需覆盖信号中最高谐波成分，确保应力波反射的瞬时特征被完整捕捉，避免频率混叠导致的波形失真。通过预设不同桩径、桩长对应的基准采样频率，结合现场实测的应力波传播速度进行实时校准，形成“基准值+动态修正”的参数调节逻辑，既保证高频信号的采集精度，又避免过度采样造成的数据冗余。采样时间窗口的设置需与缺陷深度形成联动，通过预估缺陷可能出现的深度范围划定有效采集时段，聚焦反射信号与入射波叠加的关键区间，提升时域分辨率。触发阈值的调节采用自适应算法，根据锤击能量的实时监测结果动态调整，在避免初始信号饱和的同时，确保微弱反射波的有效捕获。这种动态适配体系使采样参数与浅部缺陷信号特征形成精准匹配，为后续信号处理奠定数据基础。

(2) 高频信号的降噪与特征增强技术：高频采样获取的信号包含丰富缺陷信息，但也易受环境噪声干扰，需通过多维度处理技术实现信号提纯。采用小波包分解算法对信号进行分层降噪，针对浅部缺陷信号集中的高频频段，通过阈值量化识别并剔除随机噪声，保留与缺陷特征相关的脉冲成分；对于桩顶机械振动产生的低频干扰，采用自适应高通滤波技术进行频段隔离，确保缺陷反射的陡峭前沿不被衰减。在降噪基础上，通过时频域特征增强技术提升缺陷信号的辨识度。利用希尔伯特-黄变换对信号进行分解，提取瞬时频率与幅值的变化规律，

使浅部缺陷特有的高频脉冲在时频图中形成显著能量聚集区；针对反射波与入射波叠加形成的复杂波形，采用盲源分离算法实现信号分离，精准提取缺陷反射的独立特征。通过信号重构技术强化反射峰的幅值差异，使原本微弱的缺陷信号在波形中呈现可解译的规律性，为后续解译提供清晰的特征依据。

(3) 时频域联合解译模型的搭建：在时域分析中，借助高频采样的高分辨率优势，精确捕捉反射波的到达时刻与幅值变化，结合应力波传播速度计算缺陷深度，通过反射波与入射波的幅值比初步判断缺陷严重程度。对于浅部缺陷特有的波形叠加现象，采用波形反演技术还原应力波在缺陷处的传播路径，明确叠加段中缺陷反射的独立贡献。频域分析聚焦信号的频谱特征差异，通过傅里叶变换获取不同频率成分的能量分布，建立缺陷类型与频谱特征的关联模型：裂隙类缺陷表现为特定高频段的能量衰减，空洞类缺陷则呈现宽频带内的能量突变，材料松散缺陷对应频谱的整体平缓衰减。时频域特征的交叉验证可有效排除单一域分析的误判风险，通过波形形态与频谱特征的双重匹配，实现对浅部缺陷性质、位置及规模的综合判定，提升解译结果的可靠性。

(4) 检测流程的标准化与设备适配改造：检测前需对桩顶进行预处理，清除浮浆并确保传感器安装面平整，减少桩顶条件对信号传播的干扰；根据桩身参数预设采样频率与时间窗口，通过设备自检程序验证参数适配性。检测中采用多点锤击法，在桩顶不同位置激发应力波，通过信号叠加增强浅部缺陷反射的一致性特征，避免单点锤击的偶然误差。检测后引入数据质量评估环节，通过波形完整性、信噪比等指标判断采样效果，对不合格数据进行重测补测。为支撑高频采样技术的实施，需对现有检测设备进行硬件升级。传感器选用宽频带压电加速度传感器，确保在高频段仍能保持线性响应；数据采集模块提升采样率与模数转换精度，扩大动态范围以适应浅部缺陷反射信号的幅值波动；优化设备抗干扰性能，采用屏蔽线缆与接地处理减少电磁干扰，通过机械阻尼设计降低环境振动的影响。硬件与软件的协同优化，为高频采样改进方法的工程应用提供可靠的技术支撑，确保方法在复杂现场环境中的稳定效能。

4 高频采样改进方法的效能验证与应用规范

(1) 室内模型桩试验验证：通过构建标准化室内模型桩试验系统，对高频采样改进方法的基础效能进行验证。模型桩采用与实际工程一致的混凝土配比，在桩顶以下预设不同类型的浅部缺陷，包括规则性空洞、贯通性裂隙及局部松散区，缺陷参数通过三维建模精确控制。试验过程中，同步采用传统采样方法与高频采样改进方法进行对比检测，重点分析两类方法对缺陷反射信号的捕捉能力与特征提取精度。高频采样改进方法在模型桩试验中表现出显著优势：对于浅部空洞缺陷，其反射信号的高频成分被完整保留，波形中陡峭的反射峰与入射波

的时间间隔清晰可辨,通过时频域分析可精准定位缺陷边界;而传统方法采集的信号因高频成分丢失,反射峰被平滑化,难以与桩顶初始振动信号区分。针对裂隙类缺陷,高频采样捕捉到的信号包含多次反射谐波,通过频谱分析可识别裂隙的扩展方向,而传统方法仅能识别单次反射,无法反映缺陷的复杂形态。试验数据表明,该方法对浅部缺陷的识别准确率较传统方法提升明显,尤其在缺陷深度较小时,误判率大幅降低,验证了高频采样参数与信号特征的适配性。

(2) 工程现场实证分析:选取不同地质条件与桩型的实际工程项目,开展高频采样改进方法的现场效能验证。在软土地基中的钻孔灌注桩检测中,针对桩顶以下常见的缩径与夹泥缺陷,高频采样方法采集的信号能够清晰区分两种缺陷的反射特征:缩径缺陷表现为高频段能量集中的单次反射,而夹泥缺陷因材料阻抗较大,反射信号呈现多频段能量衰减。通过与钻芯法检测结果的对比分析,高频采样方法对浅部缺陷的定位误差控制在较小范围,远优于传统低应变检测的精度。在岩石地基中的挖孔桩检测中,高频采样改进方法有效解决了桩顶与岩层界面反射信号的误判问题。传统方法常将岩层界面的正常反射误判为浅部缺陷,而高频采样通过分析反射信号的频谱特征,发现岩层界面反射的高频成分占比显著低于缺陷反射,结合地质勘察数据可实现两者的准确区分。现场应用同时验证了该方法在复杂环境中的适应性:在存在强电磁干扰的施工现场,配套的降噪算法能有效剔除噪声,确保缺陷信号的辨识度;在桩顶条件较差的情况下,通过信号增强处理仍能提取有效的缺陷反射特征,证明了方法的工程实用性。

(3) 应用参数配置规范:基于效能验证结果,制定高频采样改进方法的参数配置规范,确保方法在不同工程场景中稳定应用。采样频率的设置需依据桩身材料特性与缺陷预估深度动态调整:对于 C30 以下的低强度混凝土桩,因应力波传播速度较低,浅部缺陷反射信号的主频相对较低,可适当降低采样频率以减少数据冗余;对于高强度混凝土桩或钢桩,需提高采样频率以匹配其高频反射特征。通过建立“桩型-强度-采样频率”关联模型,实现参数的精准适配,避免盲目提升采样频率导致的资源浪费。采样时间窗口与锤击能量的配置同样需要规范化:浅部缺陷检测的时间窗口应覆盖桩顶至预估缺

陷深度的应力波往返时间,通过预设缺陷深度区间自动匹配最优时长,既保证信号完整性,又避免冗余噪声录入。锤击能量需根据桩径进行分级调整,小直径桩采用轻锤击激发高频信号,大直径桩适当增加锤击能量以确保应力波穿透桩顶干扰层,形成标准化的能量调节机制。

(4) 操作流程与质量控制标准:构建高频采样改进方法的标准化操作流程,规范从前期准备到数据解译的全流程操作。检测前需对桩顶进行严格预处理,清除浮浆并确保传感器安装面平整,安装时采用专用耦合剂保证传感器与桩顶的紧密贴合,减少接触噪声。设备调试阶段,需根据桩身参数预设采样频率、时间窗口等核心参数,并通过试锤击验证参数适配性,确保设备处于最优工作状态。检测过程中推行多点锤击与信号叠加技术,在桩顶不同位置进行多次锤击,通过信号叠加增强浅部缺陷反射的一致性特征,降低单次锤击的偶然误差。数据采集完成后,需进行严格的质量筛查,通过波形完整性、信噪比等指标判断数据有效性,对不合格数据进行重测补测。

(5) 应用推广与技术迭代方向:基于效能验证与规范制定,构建高频采样改进方法的分层推广体系。对专业检测机构,重点培训高频信号的解译技巧与参数优化方法,通过典型案例提升其对复杂缺陷的识别能力;对施工单位,编制简明操作手册,明确现场采样的关键控制点与质量检查要求;对监管部门,提供方法效能的实证报告,推动将该方法纳入行业标准体系。技术迭代方面,需进一步优化参数自适应调节算法,提升方法对复杂地质条件的适应性;开发集成化信号处理软件,实现从原始信号到缺陷判定结果的自动化分析,降低人工解译的难度。

5 结语

基桩浅部缺陷的精准检测是工程安全防控的重要环节,高频采样改进方法通过适配信号特性、优化技术路径,有效破解了传统检测的误判难题。该方法不仅提升了信号识别的精准度,更完善了低应变检测技术体系,为基桩质量评估提供了可靠支撑。未来需进一步优化参数适配机制,推动与智能解译算法的融合,持续提升工程适用性,为建筑基础安全筑牢技术防线,助力工程质量管控水平的整体提升。

参考文献:

- [1] 陈明,赵伟.基桩低应变检测中高频采样技术的模型试验验证[J].建筑结构学报,2023,44(5):178-185.
- [2] 王丽,刘强.高频采样改进方法在软土地基桩基检测中的应用研究[J].岩土工程学报,2024,46(2):312-319.
- [3] 李刚,张晓.岩石地基挖孔桩浅部缺陷检测的频谱特征分析[J].土木工程学报,2023,56(8):98-105.
- [4] 周健,吴敏.基桩检测高频采样参数的动态适配机制研究[J].工程力学,2024,41(3):201-208.
- [5] 刘芳,张伟.基桩低应变检测的操作流程标准化与质量控制[J].施工技术,2023,52(12):76-82.
- [6] 黄亮,马琳.高频采样技术与人工智能在基桩缺陷识别中的融合应用[J].建筑科学,2024,40(6):112-119.