

基桩声波透射法检测的深度学习模型构建

文 / 王 杰 国检测控股集团安徽元正检测有限公司

摘要：研究目的在于挖掘声波信号中深层次关联特征，采用卷积与循环结构相结合的方法，对关键参数开展多维度融合，实现对缺陷位置与类型的预测。为提升基桩声波透射法在缺陷识别与质量评估中的可靠性，本研究围绕声速、波幅衰减与频率畸变等声学参数展开理论探讨。文章提出深度学习理念，融合时域与频域特征，构建多任务网络，关注多模态参数的联合表达，以精准刻画各类缺陷特征。研究过程聚焦噪声抑制与数据增强策略，采用多角度数据重组方法，强化异构信息交互，提升特征提取的全面性。多模态声学参数在缺陷定位与类别判别方面展现出良好潜力，模型通过多任务学习机制实现多层次预测。

关键词：基桩检测；声波透射法；深度学习；特征融合；信号处理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.13.037

引言

基桩声波透射法在工程检测中以声学信号为媒介，为评估混凝土内部缺陷提供可行思路。声学参数的时域与频域表现暗含了材料密实度与能量衰减机理，对缺陷类型和深度的判断颇具参考意义。现代工程对检测精度与效率提出更高要求，需要探索更加智能化的方法来挖掘信号潜在信息。深度学习通过多层网络结构，可从大量数据中自动获取关键特征，扩展了声波透射法的应用边界，并为复杂环境下的缺陷识别与评估带来新思路。通过分析声速、振幅衰减与频率畸变等要素，可揭示混凝土结构中波能量的传递规律，这为多层网络的特征提取提供了良好基础。模型依托多任务学习与特征融合理念，不仅提升了对缺陷类型的判别精度，为工程实践的质量管控带来全面的理论依据。

一、基桩声波透射法的声学参数特性与检测挑战

（一）声速对混凝土密实度的敏感性分析

声波透射法的基本原理是用人工方法在混凝土介质中激发一定频率的弹性波，该弹性波在介质中传播时，遇到缺陷会发生反射、透射、绕射，由接收换能器的波形，对波的声速、波幅、频率和波形的特征进行观测和分析判断混凝土桩的完整性及缺陷的位置、范围及程度^[1]。声速作为声波透射法中的核心参数，其在混凝土介质中的传播特性高度依赖于材料的内部结构状态。混凝土的密实度变化直接影响声波在介质中的传播路径与速度，这种影响并非线性关系，而表现为由微观孔隙率、骨料分布均匀性与水灰比波动引发的多尺度声波干扰。在结构连续性遭遇微裂隙干扰或夹杂物质异质性增强的背景下，声波传播速率会出现突变，这种突变不易通过表面检测手段捕捉，却可在波速微差中呈现。更复杂的是，声速在三维空间中呈现出方向相关性，横波与纵波的传播路径在存在密度梯度时将出现反射与折射的多重叠加效应，这加剧了检测结果的空间非均质性问题。

（二）波幅衰减与能量耗散的关联机制

声波在混凝土介质中传播时，其波幅的衰减不仅受传播距离的影响，还深度关联于材料内部的微观结构耗散机制。能量在传播过程中通过界面反射、孔隙散射及骨料分离等过程不断转化为热能与其他形式的非可逆耗散，从而表现为波幅的非线性衰减。这种衰减现象并非稳定过程，而常呈现周期性扰动与幅度跳跃，揭示出结构内应力场与波场耦合的动态不平衡特性。尤其在缺陷边界附近，由于界面阻抗不匹配，声波能量发生局部集中与多次反射，形成高频能量团簇与低频耗散带交替共存的复杂波场分布。声波在空洞、疏松区等异常区域的传播路径极不稳定，能量损失的同时还伴随相位漂移现象，导致接收信号存在难以辨识的混叠效应。

（三）频率畸变对缺陷类型的指示作用

频率畸变是声波信号通过非连续结构时产生的频谱重构现象，其根源在于混凝土内部非均匀介质对不同频率成分选择性吸收与散射的结果。缺陷的几何形态与尺度决定了频率畸变的分布特征，窄缝状裂缝往往诱发高频成分削弱，空洞类缺陷则更多表现为低频成分拖尾的现象。频谱畸变在时间窗内展现为频率重心漂移与频带压缩，同时伴随高频噪声增强与低频泄漏加剧的现象，使得时频谱图像呈现出非对称结构^[2]。在理论层面，频率畸变受介质非线性特性影响显著，结构内部的材料衰变、化学反应、微观裂隙演化等过程均会引发频率响应的不可逆转移。

二、深度学习驱动的声学特征提取与融合

（一）声波信号的时频域特征表征方法

声波信号在复杂结构介质中的传播行为充满非线性扰动与多尺度演化特征，使得传统单维度的时间或频率分析手段难以捕捉信息的完整结构。如图1所示，为了更精准地表征混凝土结构中声波信号的内部规律，深度学习在时频联合表征领域提供了创新路径。短时傅里叶变换（STFT）与连续小波变换（CWT）等方法构建了从时

域跃迁到频域的中介桥梁，但这些转换在高密度噪声与低信噪比背景下常出现特征稀释现象。深度神经网络借助卷积核在局部感受野中的高维拟合能力，能够自动提取多层次的时频特征图谱，通过对幅度谱、相位谱与谱斜率等结构性特征进行聚合表达，呈现出信号强度、频

率分布与时间分布之间的复杂互动机制。另外，卷积神经网络在堆叠层数与跳跃连接结构的加持下，能有效整合局部微特征与全局宏特征，使得表征不仅局限于信号强弱，还覆盖周期变化、能量聚合与边界模糊度等关键维度，重塑了声学信号的表达语言体系。

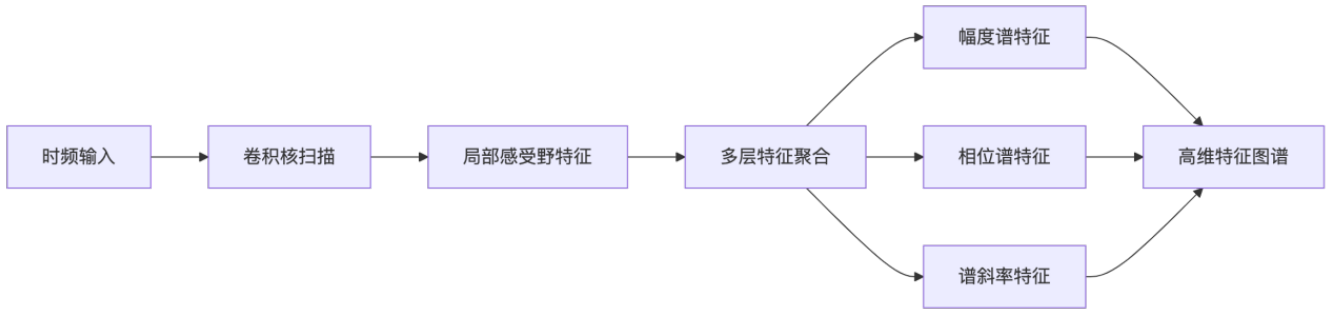


图1 传统时频分析方法流程图

（二）多模态声学参数融合机制设计

声速、波幅、频谱密度与相位结构等属于不同模态的物理表征，各自在反映混凝土结构异常行为方面扮演着不可替代的角色。将这些参数孤立使用常导致特征表征不完整，无法支撑模型对复杂缺陷的全面识别。多模态特征融合机制尝试打破参数间的维度隔阂，通过交叉注意力机制与门控控制结构实现异构信息的深度重组^[3]。在网络结构中引入自适应权重分配机制，使不同模态的特征向量在动态环境下自动调节其表达权重，从而凸显缺陷特征的主导因子。双通道并行卷积路径与多尺度特征级联模块进一步增强融合效果，使系统具备对多维特征关系建模的能力。

（三）噪声抑制与数据增强理论策略

实际工程环境下，声波信号易受到多源噪声污染，包括传感器背景噪声、机械干扰、结构反射回波与电磁扰动等。为应对复杂噪声环境下的建模挑战，理论上需构建鲁棒性更强的特征过滤体系。时域降噪技术如经验模态分解（EMD）与频域滤波器虽具一定缓冲效果，但在多频耦合环境下存在边界泄漏与失真问题。深度学习模型在引入残差连接与注意力模块后可对干扰信号进行层级过滤，并利用判别性损失函数强化对目标频段特征的敏感度。

三、深度学习模型架构的设计原则

（一）网络结构适配性与特征捕捉能力

深度神经网络在面对声学信号这类高复杂度非线性数据时，其结构的适配性成为决定特征提取质量的关键变量。模型的输入层需具备多通道感知能力，以支持多模态参数并行读取，卷积核在空间维度的排布必须契合声波信号中波动性与周期性的物理属性。浅层网络侧重于边缘特征与局部扰动的识别，而深层结构则需承担跨时间窗的全局特征抽象任务，这种任务分配需依赖合理

的网络深度控制策略与层间梯度传播机制的优化。网络中的感受野设置若与特征分布的实际尺度失配，将产生模糊边缘现象，进而干扰缺陷边界的提取准确性^[4]。结构跳跃连接与注意力模块的引入，既可缓解信息在深层传递中发生的梯度消散，也能提升模型对异常频率分布的关注权重。

（二）多任务学习框架下的联合损失设计

在多任务场景中，单一损失函数的目标驱动往往难以涵盖所有预测维度的特性差异，尤其在声学数据的检测任务中，定位精度与分类准确性存在明显的优化张力。联合损失函数的设计不只是多目标加权求和的线性叠加，更是一种对任务间耦合关系的策略化重构。在具体实现上，需构建动态权重调整机制，使任务间的学习速率与梯度贡献得以按需平衡，从而防止某一子任务主导模型参数的全局调整。联合损失的构成元素应考虑时频特征差异的统计属性、空间分布的聚合度、缺陷类型的混淆度等多维度指标，以提升模型对复杂目标函数曲面收敛路径的控制能力。损失函数还需引入结构稀疏性惩罚项与边缘敏感性调节因子，以缓解声波信号在边界处频繁出现的模糊梯度区域问题。

（三）模型可解释性与工程适配性优化

深度学习模型作为高维度非线性映射体系，其“黑箱”属性在工程实际中常引发结果信任度不足的问题。提升模型可解释性并非仅靠输出可视化手段实现，更需从结构设计阶段就引入语义对齐机制与参数显著性追踪路径。在声学检测领域，可解释性的构建应立足于声波物理规律的数学映射，通过可导性分析追溯模型每一次预测输出背后的特征激活路径，明确特征维度与结构缺陷之间的因果关联。集成类归因算法、特征贡献热图与异常点响应分析可揭示模型决策边界的变化轨迹，辅助工程人员对模型预测结果进行干预与调参。另外，工程

适配性的考量还需覆盖模型部署的资源约束环境,包括运算效率、存储成本与兼容性拓展等方面^[5]。为降低模型在边缘设备或低功耗芯片上的部署压力,结构中应嵌入参数量可控的轻量化模块,或采用分层剪枝策略剔除低效节点。

四、模型验证与工程化理论路径

(一) 声学参数仿真与泛化能力验证

声学信号在非均质混凝土介质中的传播过程本质上呈现出高度动态的非线性特征,其传播路径、速度及能量分布受结构微缺陷、材料界面反射以及介质连续性扰动等因素多重重叠影响。所以,针对模型训练过程中所涉及的声学特征表达,需通过物理仿真环境对多种典型结构状态下的声波参数演化进行再现性建模。仿真体系中应引入多尺度材料属性设定、结构缺陷形态控制及边界条件扰动因素,以构成多样性声学反应路径,从而检验深度学习模型在未见数据分布上的泛化响应能力^[6]。

(二) 现场噪声与实时检测的适配理论

工程现场的声波信号采集常处于极端干扰环境之中,外部背景噪声、设备运转震动与多路径信号重叠交织形成复杂干扰矩阵,使得原始信号出现畸变、缺失与时延等非理想特征。在此情境下,模型不仅需具备高度稳健的特征识别能力,还必须对实时信号流具备低延迟处理与高频率响应能力。适配理论的核心在于构建一套面向动态环境的信号变换认知机制,通过时变特征重构与扰动抑制结构,使模型输入阶段具备自动校正与特征强化功能。在深度网络结构中,需嵌入具有时序理解能力的单元模块,如门控循环单元或多头注意力机制,以捕捉短时波动与长期趋势之间的微妙关系。另外,实时性要求对模型推理速度与资源调度机制提出挑战,需结合硬件条件设计轻量化运算路径,并在信号入口端建立前置降噪通道与特征稳定化缓存结构,使得原始输入即具备抗干扰能力。

(三) 检测规范与模型输出的标准化对接

模型输出结果的表达维度、数值精度及异常阈值需与现有的检测判据体系实现高一致性,以确保其结果可被工程技术人员接受并转化为执行性决策。标准化对接的首要任务在于定义模型输出的语义边界,即如何将卷积网络中提取的高维特征映射关系转译为具有工程意义的缺陷等级、位置坐标或响应等级指标。这一过程需嵌入逻辑判断模块或后处理规则体系,使模型输出不仅具备数值维度,还兼容现有技术报告书写格式与数据呈现要求。另一方面,不同检测规范之间在参数阈值、响应精度及异常分类标签上存在较大差异,模型必须具备可调节性结构,以实现多类标准体系的灵活适配^[7]。为实现高等级标准匹配,模型需内置多通道接口结构,与检测设备、数据平台及工程管理系统之间实现信号协议

对接与数据格式统一,构建自适应的模型-规范耦合机制,使输出结果具备转化效能与落地能力,真正嵌入工程全流程质量控制体系。

结语

本研究围绕基桩声波透射法的声学特性,构建了融合时频域信息的深度学习模型。多任务学习机制在捕捉声速、波幅衰减与频率畸变等差异化特征时发挥了关键作用,促使模型能够兼顾缺陷位置判定与类型识别。多模态信号的联合表达在理论层面体现了优越性,各项参数之间的互补性强化了对波形细节的解析,对高噪声环境保持一定适应能力。噪声抑制与数据增强策略为模型的鲁棒性提供了技术支撑,时频域融合手段则为缺陷信息的准确提炼创造了更广阔空间^[8]。深度网络结构在处理大规模数据时具备较高效率,可为实时检测与快速分析奠定基础。多角度融合思路不止关注单一指标,而是从多重声学维度出发,实现了对缺陷特征的立体呈现。多任务学习框架下的联合损失设计,使波形时域与频域的细微差异得到充分量化,也使模型在面对不同缺陷尺寸或深度时具备较高识别率。特征可解释性层面,模型对声学参数间的交互关系进行了深层挖掘,为后续结构优化与网络调参提供了可行指引。模型在多种复杂场景下依旧保持稳定预测能力,说明深度学习与声波透射理论的结合具备推广潜力。成果可为基桩工程检测提供新的思路,并在完善检测规范与优化工程方案方面带来帮助。为工程实践中的自动化与智能化检测带来启示。

参考文献

- [1] 罗剑. 基桩声波透射法检测重难点分析[J]. 广东建材, 2023, 39(11): 40-43.
- [2] 黄健锋. 关于基桩声波透射检测中判定桩身缺陷方法的探讨[J]. 建筑监督检测与造价, 2023, 16(02): 28-32.
- [3] 夏栋良. 基桩完整性检测技术的当前应用与前景探讨[J]. 大众标准化, 2025, (02): 169-171.
- [4] 黄怀林. 建筑工程基桩综合检测方法分析[J]. 工程技术研究, 2024, 9(21): 18-20.
- [5] 林润. 声波透射法在基桩检测中的应用分析[J]. 江西建材, 2023, (05): 101-102+105.
- [6] 金超. 声波透射法检测桥梁基桩盲区危害性分析[J]. 建筑工人, 2023, 44(05): 50-52.
- [7] 邢立辉, 黄澧, 何成, 等. 基桩完整性检测常用方法的应用及对比分析[J]. 四川建材, 2023, 49(05): 108-110.
- [8] 负宝革, 於嘉旺. 基桩完整性检测方法应用分析[J]. 中国建筑金属结构, 2023, (02): 87-89.
- [9] 余察军. 声波透射法现场检测相关问题研究[J]. 工程技术研究, 2021, 6(23): 20-23.
- [10] 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.