

# 环境因素对基桩检测结果影响的量化分析

文 / 王 杰 国检测控股集团安徽元正检测有限公司

**摘要：**本研究旨在探讨温度、湿度与土壤差异对基桩检测结果的影响规律，重点关注声波传播、桩侧摩阻力变化与数据修正方法。温度梯度与热应力会使材料弹性模量及声学路径产生偏移，湿度与地下水位波动则影响混凝土波速与摩擦特性。土壤异质性易导致波阻抗突变及传播路径畸变。多环境因素协同作用下，采用熵值分析与物理场耦合模型，可量化各干扰源的权重，构建误差传递的概率评估体系。研究结论围绕温度补偿参数、湿度修正方法、土壤波阻抗修正策略以及地质适应性评估展开，并指出多因子耦合作用下的检测数据误差呈非线性累积态势，期望为各类复杂环境下准确测定与方法优化提供支撑。该研究为制定环境适应性检测规范与提升已有监测精度提供全面全新思路。

**关键词：**基桩检测；环境干扰；量化分析；声波透射法；耦合作用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.16.047

## 引言

桩基础广泛应用于工业与民用建筑、水利工程、港口码头和石油勘探等各类结构工程。目前，我国每年的基桩消耗数量已十分庞大，尤其是在沿海地区和长三角、黄三角等软土地区。近年来，由于基桩承载力及桩身完整性缺陷而直接影响到建筑物结构功能，安全事例频频发生<sup>[1]</sup>。其中，环境要素在基桩检测领域扮演关键角色，多层次干扰效应为准确评估桩身完整性与力学特征带来较大挑战。温度与湿度会影响混凝土与土层的材料属性，并导致声波在桩体及周围介质中的传播路径产生动态偏移。地下水位变化与土壤组分差异也会干扰侧摩阻力与波速特征，引发数据误判风险。检测过程中如未对这些外界变量进行定量修正，可能出现结果误差累积，难以得出可靠判断。为此可采用多物理场耦合模型与熵值分析方法，把温度、湿度及土壤等因素纳入综合评估体系，并通过概率思路追踪误差传递链，为准确掌握桩基状况奠定理论基础。

### 一、温度变化对检测参数的干扰机制

#### （一）温度梯度对桩体材料弹性模量的影响

桩体材料面临不同热区时，内外部温差易引发微观结构排列出现变化。热贯穿导致胶结物质呈现分散态，使得整体弹性模量呈动态波动。热能渗透深度越大，材料颗粒间的分子力越易减弱，微裂缝萌生可能性也会提升。若有明显热梯度横亘于桩体轴线，局部应力集中现象或会加剧弹性系数的分层失衡。外界测温仪器若未监控桩体纵深处的热分布，就可能忽视那些潜在削弱效应。部分研究观察到，高温区域不仅改变混凝土内部的固相分布，还会促使胶凝组分的相态差异放大。温差越明显，内部孔隙中溶解离子的移动速度就会提升。此种迁移暗含离子浓度梯度，或会干扰原本稳定的分子键合力。弹性模量一旦偏离常温基准值，声波传输速度也面临突发波动，使后续检测数值的精确度面临挑战。

#### （二）热应力导致的声波传播路径畸变

热应力引发的内部张力与压缩效应，会在桩体横截面与纵向分布之间形成不均衡状态。声波在穿越此类区域时，其传播方向与速度或许瞬间偏折，乃至触发反射与折射效应。受热不均会强化局部强度差，导致路径重塑过程变得更加复杂。某些高应力部位甚至可能出现局部塑性变形，使原先的均质介质变为具有可变波阻抗的复合体。若观测装置未提前考虑多维应力场的影响，就可能将部分声学异常误判为材料缺陷。对混凝土而言，热胀冷缩往往并非瞬时完成，而是带有滞后性与累积特质，这会令声波路径出现阶段性扭曲<sup>[2]</sup>。当外界温度呈周期性上下波动，热应力的生灭亦随之反复。某些状况下，声学信号中会呈现跨时段的叠加畸变，给常规分析算法造成额外负担。在一些极端环境中，瞬态高温冲击更易使微结构产生扭曲，并与应力波场相互影响。

#### （三）温度补偿模型的动态阈值设定原则

温度补偿模型旨在对波速、幅度以及材料参数进行实时校正，让检测过程对环境扰动拥有更强的容忍度。动态阈值设定方法往往需要结合多组温度采样数据，运用非线性插值与分段拟合等手段，估测各阶段热场对于检测结果的修正量。若桩体处于局部高温带，阈值可适当上调，以抵消因热胀导致的波速偏移。若温度场分布相对均匀，则模型倾向于设定更贴近常温水平的阈值，以保留对微小异常的灵敏度。某些学者提出多维校正策略，通过耦合时间因子、材料龄期与区域性热场分布，确保阈值随环境与桩体状态的动态演进而及时调整。此方法有助于提升信号判断的准确性，使检测软件在面对瞬时热扰动时更容易识别真实缺陷与虚假偏差。阈值一旦过低，可能诱发漏判；阈值过高，则可能遮蔽微裂缝征兆。动态策略能在反复迭代中平衡此类冲突，以期得到更均衡的判定依据。

## 二、湿度渗透与地下水位波动的耦合效应

### (一) 含水率对混凝土波速衰减的非线性关系

混凝土结构在湿度渗透过程中所表现出的物理响应,呈现出高度非线性特征,尤其体现在超声波传播速度的变化机制上。含水率的微小提升往往引发孔隙内部介质状态的重组,游离水与毛细水的转化过程在不同尺度上引发声波能量耗散模式的突变。此种能量衰减既非均匀分布,亦非线性递减,而是随水分渗透层级的演变呈现间歇式的跃迁行为。在局部高含水区域,声波传播路径易受到极端扭曲,部分波前发生重叠、绕射或滞留,导致时域信号难以分辨。在不同养护龄期与暴露环境下,混凝土内部毛细孔隙结构对水分吸附与释放速率呈现变异性,使得相同外界湿度条件下的检测结果具备高度不可预测性<sup>[3]</sup>。水分所携带的离子团还可能诱发微观腐蚀反应,从而进一步影响材料弹性模量与波阻抗匹配关系。声波在这种动态含水状态中传播,其速度不再稳定,而是表现出波动性、多阶非线性折返及随机噪声特征,给检测精度带来显著挑战。

### (二) 地下水流动场对桩侧摩阻力的干扰机制

地下水流动系统的空间变异性、瞬时流速变化及水力梯度分布,皆可能对桩侧土体-结构界面的力学响应产生复杂干扰。渗透压力差的周期性波动引发土体颗粒松动,进而改变摩阻力的分布状态,使原本均匀接触界面出现应力集中、滑动界限模糊等现象。在地下水位上升阶段,土体中的孔隙水压力会迅速上升,造成桩侧土层临界状态频繁波动,剪切强度降低与有效应力失衡共振发生,摩阻力的测值随之发生瞬时偏移。水流扰动还可能使得某些结构区段周围的微型裂隙闭合或张开,改变局部剪切环节的形态,并使传感器采集到的信号带有非结构性伪波形。长期处于流动场干扰下的桩基,其侧壁混凝土表层还可能因化学侵蚀或碱硅反应产生力学性质退化,致使摩阻力随时间演化发生不规则下降。此类干扰机制不仅具备隐蔽性,还表现出方向性、累积性与延迟反馈,给摩阻数据的真实解读带来多维干扰。

### (三) 湿度-水位联合作用下的检测数据修正理论

在湿度渗透与地下水位联合作用背景下,传统单一补偿因子法已无法满足检测数据的校正需求。湿-水耦合系统表现出典型的非线性叠加特征,即两种环境变量之间不仅有相互放大机制,还存在时空错位影响路径。为应对这一挑战,应构建多维响应函数,对波速、幅度及信号形态进行多变量拟合,进而生成可动态响应的修正模型。该模型需嵌入相对湿度与地下水位时序曲线,对检测数据进行反向纠偏处理,使其接近于理想干燥与静水状态下的响应基线。某些新兴方法尝试将混凝土介质视作非稳态传热-传质耦合体系,

并利用变形张量场捕捉信号中的湿渗应力反映,以重构真实声速剖面图像<sup>[4]</sup>。

## 三、土壤异质性和应力波传播的路径影响

### (一) 分层土壤中的波阻抗突变效应

在多层异质土壤结构中,波阻抗的不连续分布对应应力波的传播路径形成剧烈扰动。当应力波自一层低密度土体进入高密度夹层,波前瞬间遭遇反射、透射及散射的复合作用,传播方向随之发生偏折,局部能量密度出现非均匀扩散。波阻抗的突变并非仅由密度与弹性模量的简单乘积决定,还与层间界面粗糙度、粘结程度、孔隙率分布等多重因素构成复杂响应体系。部分界面甚至在微尺度上呈现周期性不规则波纹,这一结构在高频波激励下易引发布拉格反射效应,使原始信号衰减加剧<sup>[5]</sup>。低阻抗层中的波速提升往往伴随频率漂移现象,而高阻抗带则容易滞留部分能量形成反复震荡。此类局部震荡会在传感器中表现为周期性异常信号,误导检测判断。更为复杂的是,多层交错结构中若存在夹砂带或饱和层,其吸能机制甚至可能激发波形形态突变。传统的一维传播模型在此背景下失去适用性,需引入多维非平衡动态解耦方法对波阻抗跳跃进行反演与修正。

### (二) 土体密实度差异引起的波幅衰减规律

土壤密实度的不一致性直接影响应力波在传播过程中的能量衰减程度。密实区域具有较高的颗粒接触强度与较小的孔隙率,波在此区域传播时速度较快、损耗较低,而松散区则表现为多散射、多吸收特征,导致波幅呈指数级减弱。密实度的非连续分布不仅作用于波幅,而且在频率成分上也展现出差异性过滤现象,高频成分在疏松带中更易被耗散,从而引发波形失真。多点传感实验中经常出现相同频率信号在不同深度响应截然不同的情形,其背后核心原因在于密实度引导下的能量传输路径重构。在某些特殊场地,密实度呈斑块状分布,会诱导出斑点状衰减图谱,使整体信号呈现碎片化趋势。常规波幅定标方法在面对非均质密实结构时无法有效校正,必须引入局部密实映射函数对每一传播路径实施个性化修正。

### (三) 复杂地质条件下的传播路径重构方法

在多种介质交错、属性突变频繁的复杂地质环境中,应力波路径的真实走向极难通过常规几何模型加以准确描绘。波在此类介质中传播时,其速度、方向、相位与能量分布均受限于微观构造的不规则性与宏观结构的非均质性。如图1所示,传播路径重构不应再局限于平面或轴对称假设,而需转向基于地质分层数据与物理反演算法的多维空间模型构建。一种有效方式是采用多传感协同定位系统,通过各点波到时差构建初步传播轨迹,再引入人工神经网络或图优化算法,对轨迹进行非线性

拟合与异常纠偏。在高波阻抗梯度区段，引入高分辨率全波列反演算法可还原真实传播形态；而在地质缺陷带，如断裂、软弱夹层存在区，则需叠加张量分析技术，分离出局部异常成分并反馈至整体路径建模中。更复杂的情境下，还需融合地质雷达影像与声波数据，构建声-电联合反演框架，以实现传播路径的动态适配调整。

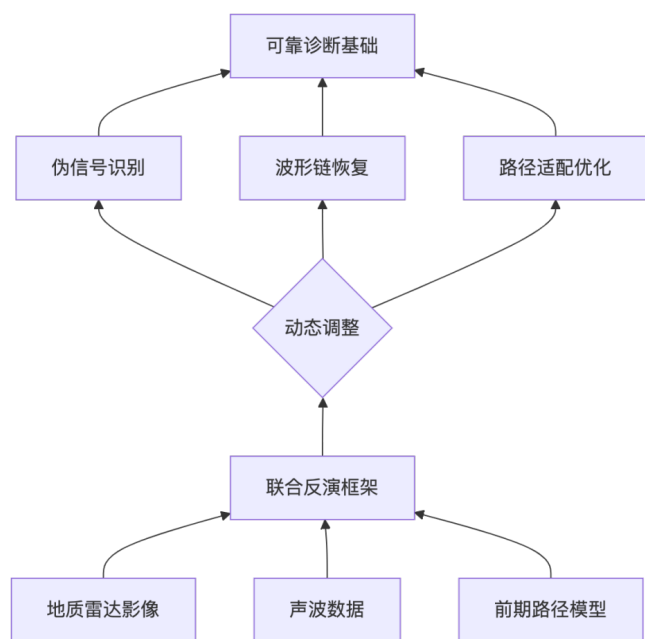


图1 路径重构技术流程图

#### 四、多环境因素协同作用的量化评估体系

##### (一) 环境参数权重分配的熵值分析法

在多因素交织的检测环境中，不同环境变量对检测结果所产生的干扰程度存在巨大差异，若无针对性识别与量化，将导致评估体系精度骤降。熵值分析法通过计算各环境因子的信息熵指标，衡量其对系统稳定性的扰动贡献，是构建动态权重模型的重要支撑机制。环境变量数据一旦进入信息熵矩阵，经由归一化处理与变异系数计算，可获取变量内在离散程度，并由此判断其主导性。在多源异步数据融合背景下，熵值方法能够避免人为主观干预，通过客观数据结构提取变量波动趋势。信息冗余性亦在该体系中得以剔除，使不具辨识价值的扰动因子在权重分配中逐步边缘化<sup>[6]</sup>。某些研究采用带时间权重的动态熵更新策略，令权重随检测周期、季节变换、区域地质属性等多维特征自适应演化。

##### (二) 物理场耦合模型的降维求解策略

多环境因素共同作用下，声学、热学、水力、力学等多个物理场之间的动态交互构成高度复杂的多耦合系统。此类系统维度高、参数冗余、变量相关性强，使常规解算方法陷入计算瓶颈。降维求解策略由此应运而生，其目标是保留系统主导特征的同时剔除冗余变量。主成分分析（PCA）、流形学习及张量分解等方法可对高维耦

合矩阵进行映射变换，在保留物理意义基础上压缩数据结构。耦合模型内部多源数据需进行协同解构，提取各物理场间的相互驱动关系，通过变换域对变量的扰动响应特性进行局部保留。空间层级上，耦合界面应根据热湿渗透性进行再划分，以实现单元响应单元的最优耦合边界表达。在求解过程中，需引入多目标函数体系对路径偏移、波速变化与温度梯度扰动进行同步优化，保证解算结果不仅数学稳定，更具工程适应性。最终形成的降维模型具备结构轻量、响应高效与泛化能力强等优势，在面对复杂场耦合时展现出更强的解决能力。

#### 结语

本研究围绕温度、湿度与土壤差异等外界变量对基桩检测过程的多重干扰展开归纳。关注湿度渗透与地下水位起伏对摩擦特性和波阻抗的共同影响，提出在监测数据中引入非线性修正系数，以应对含水率变化带来的测量偏差。探究土壤分层和密实度差异对应力波传递路径的复杂折射机制，并应用物理场耦合模型对多因素作用下的误差进行量化。结合熵值分析法分配不同环境因素的权重，构建整体干扰评估框架。研究认为，通过温度补偿与湿度校正策略可缓解材料参数变动带来的声速失真，并借助概率方法实现误差累积的合理控制。土壤异质性造成的波阻抗突变可经适宜的路径重构算法加以修正，并将可观测物理量转化为可比较的定量指标。多因素协同分析对提升基桩检测的准确度与稳定性具有重大意义。围绕温度与湿度干扰，提出动态阈值设定与声速迭代更新的控制方法，避免在气候周期波动下误读缺陷信号。针对湿度与地下水位联合作用，建议利用多阶段修正因子平滑波速演化曲线。面向土壤介质复杂性，运用波阻抗匹配理论解析能量损耗环节。进而以概率统计手段评估检测结果的不确定范围，使可观测变量与环境参数间的耦合关系更加清晰。将前述发现纳入统一框架，可为后续研究者提供更宝贵理论支点与启示。

#### 参考文献

- [1] 张学军. 基桩检测技术在建筑工程中的应用[J]. 建筑技术开发, 2020, 47(16): 103-104.
- [2] 亚胜东, 陈华为, 李国庆. 建筑地基基桩检测方法分析[J]. 四川水泥, 2018, (09): 317.
- [3] 李水江, 齐添. 既有建筑物基桩检测技术应用现状及案例分析[J]. 广州建筑, 2019, 47(04): 17-21.
- [4] 王强. 在役基桩完整性检测技术影响因素分析[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2016, 29(05): 73-77.
- [5] 朱海涛, 李玉伟. 影响基桩动力检测质量的几个因素分析[J]. 门窗, 2014, (08): 315.
- [6] 岑建武. 超声波透射法在基桩检测中的应用[J]. 绿色环保建材, 2018, (10): 187+190.