

Optimization and Application Research of Nondestructive Testing Technology for Road Bridge Foundation

Lang He

Chengdu Engineering Testing Co., Ltd. China Railway Second Survey and Design Institute, Chengdu, Sichuan, 610051, China

Abstract

The safety of road and bridge foundations directly impacts the structural stability and service life of engineering projects. Traditional destructive testing methods have limitations during construction, often causing structural disturbances and data distortion. Non-destructive testing (NDT) technology, with its high precision, continuity, and traceability, has become a key development direction for foundation inspection. This study focuses on road and bridge engineering, conducting systematic analysis from three aspects: detection mechanisms, method optimization, and intelligent data application. Through comprehensive research on mainstream NDT methods including acoustic waves, geophones, and static cone penetration tests, a multi-source data fusion and error correction model was established, creating a dynamic detection system for complex geological conditions. The study demonstrates that employing multi-frequency signal analysis, artificial intelligence recognition, and real-time data inversion technologies can significantly enhance the accuracy and stability of inspection results. The proposed optimization approach holds significant importance for advancing standardized and intelligent applications of NDT technology in transportation infrastructure.

Keywords

road and bridge; foundation; non-destructive testing; data fusion; error control

道路桥梁地基基础无损检测技术的优化与应用研究

何浪

中铁二院成都工程检测有限责任公司, 中国·四川成都 610051

摘要

道路与桥梁地基基础的安全性直接关系到工程结构的整体稳定与使用寿命。传统破损式检测方法在施工中存在局限性, 易引起结构扰动和数据失真。无损检测技术(NDT)凭借其高精度、连续性和可追溯性, 成为地基基础检测的重要发展方向。本文以道路桥梁工程为研究对象, 从检测机理、方法优化与数据智能化应用三方面展开系统分析。通过对声波、地质雷达与静力触探等主流无损检测方法的综合研究, 建立多源数据融合与误差修正模型, 构建面向复杂地质条件的动态检测体系。研究表明, 采用多频信号分析、人工智能识别与实时数据反演技术, 可显著提升检测结果的精度与稳定性。本文提出的优化路径对推动无损检测技术在交通基础设施领域的标准化与智能化应用具有重要意义。

关键词

道路桥梁; 地基基础; 无损检测; 数据融合; 误差控制

1 引言

地基基础检测是道路与桥梁工程安全评估的关键环节。随着交通工程规模不断扩大, 地基结构复杂性与检测环境多样性显著增加, 传统破损式检测方法已难以满足现代工程对精度与效率的双重要求。无损检测技术以其非破坏性、高灵敏度及可重复性优势, 逐步成为基础检测的重要手段。然而, 在复杂地质条件下, 信号衰减、数据噪声与设备误差仍对检测结果的可靠性构成挑战。如何在保证检测效率的同时提高信号识别精度、降低环境干扰、实现多源数据的动态融合,

成为工程检测技术亟待突破的关键问题。本文基于无损检测理论体系与道路桥梁地基特征, 探讨不同检测技术的适用性与优化方向, 提出以信息融合、模型修正和智能算法为核心的综合优化方案, 为工程实践提供系统性参考。

2 无损检测技术的理论基础与发展现状

2.1 无损检测的物理原理与适用性

无损检测技术通过物理信号的传播与反射特征识别地基结构的完整性与力学性质。声波法依赖弹性波在介质中的传播规律, 通过波速变化判断土体密实度与缺陷分布; 地质雷达基于电磁波反射特征, 可对地下异质结构实现精细成像; 静力触探与波速测试结合则可量化承载力与变形模量。与传统开挖与钻孔检测相比, 无损检测可实现连续测量与高

【作者简介】何浪(1992-), 男, 中国四川阆中人, 本科, 工程师, 从事道路与桥梁研究。

时效反馈，避免了对结构的破坏。该方法适用于桩基完整性评估、地层界面识别及沉降变形监测，在桥梁基础加固与道路病害诊断中具有广泛应用潜力。

2.2 国内外研究进展与技术趋势

国外无损检测研究起步较早，已形成以声波反射、地震层析成像及电磁波检测为主的多维体系。近年来，结合人工智能与大数据分析的自动识别系统逐渐成熟，实现了检测信号的智能分类与异常定位。国内在桥梁桩基检测、地质雷达成像与低应变测试等方面取得显著成果，但在数据融合算法、设备标准化及结果可信度评估方面仍存在不足。未来趋势是构建以多物理场信号融合、智能算法识别与模型反演为核心的数字化检测体系，实现从“信号采集”向“信息认知”的转变。

2.3 无损检测在道路桥梁中的应用现状

在道路桥梁领域，无损检测已成为地基质量验收与病害评估的主要技术手段。桥梁桩基常采用低应变反射波与声透射综合检测，以识别桩身缺陷与灌注质量；道路地基检测则更多应用地质雷达与表面波法，实现对软弱夹层与空洞的识别。部分工程项目已引入移动式检测设备与自动采集系统，实现对大范围路基的快速扫描。然而，数据解释依赖经验模型，易受土层复杂性影响，导致识别结果存在不确定性，需进一步优化检测模型与算法结构。

3 主要无损检测方法的原理与特征分析

3.1 声波检测技术的传播机理与局限

声波检测技术以弹性波在地基介质中的传播特性为基础，通过分析声速变化、波形衰减与频谱特征反映土体的密实程度、分层结构及缺陷位置。纵波主要用于识别密实度与完整性，横波则敏感于剪切特性与裂隙分布。声速与介质弹性模量、密度及孔隙率密切相关，因此可间接评价地基承载力。该技术具有快速、高效、非破坏性强的优势，适用于桩基完整性检测及地层分层识别。然而，在高饱和度、非均质性强或含水量大的土体中，声波能量衰减显著，信号传播路径受散射与折射影响，导致波形畸变与识别困难。针对这一问题，可采用多频信号叠加、时频分析与自适应滤波技术提升信噪比；结合三维声波层析成像方法，通过多路径反演实现地下结构的空重建，从而提高检测分辨率与缺陷定位精度，为复杂地基条件下的结构诊断提供技术支撑。

3.2 地质雷达检测的信号识别与数据处理

地质雷达检测技术（GPR）基于电磁波在不同介质中传播与反射特征，通过测量回波时延和反射强度变化识别地下结构差异。该方法对浅层地基空洞、分层界面及埋藏物探测具有显著优势，且分辨率高、成像直观。随着信号处理技术的发展，超宽带雷达与时频分析方法的应用显著提升了成像精度。自适应去噪与多维滤波算法的引入有效消除了电磁干扰与环境噪声，使反射界面识别更加清晰。结合深度学习

的目标识别技术，可实现雷达图像的自动分类与边界提取。进一步将雷达数据与地震波速信息融合，通过多物理场反演构建更精确的地下介质模型。该综合方法在湿润、复杂或电导率高的地层中仍能保持稳定性能，为道路与桥梁地基的结构诊断提供了高精度的技术手段。

3.3 静力触探与波速综合检测

静力触探（CPT）技术通过测量探头贯入阻力、侧摩阻力与孔隙水压力，获取地基土体的密实度与力学参数，是地基承载力定量评估的重要手段。其检测深度大、分辨率高，可反映地层分布与强度变化。将静力触探与波速测试结合，可进一步提升检测精度与地层判别能力。通过同时测得纵波（P波）与横波（S波）传播特征，建立声学参数模型，可反演地基的剪切模量、泊松比及应力分布，实现对承载性能的动态评价。该联合检测方法能够有效弥补单一手段的局限，在软土、杂填土及分层地基中表现出较高的适应性。结合数据融合与反演算法，可实现地基参数的多维定量计算，使检测结果更具物理意义与工程指导价值，为深厚复杂地层的地基安全评估提供了科学依据。

4 检测数据的融合分析与误差控制机制

4.1 多源数据融合模型构建

地基基础无损检测数据来源多样，包括声波检测、地质雷达、电磁波测量、静力触探与变形监测等多种手段，数据格式、时空分辨率及物理含义差异显著。为实现不同检测方法间的信息互补与结果统一，可建立基于统计与智能算法的多源数据融合模型。加权平均与协同反演机制是融合的核心方法之一。通过贝叶斯理论可根据信噪比、方差及检测精度确定各检测手段的权重，实现数据的最优组合。多源融合不仅能减少单一方法导致的偏差积累，还能增强结果的稳定性与抗干扰能力。引入机器学习算法后，系统可自动识别异常数据点并优化权重分配，实现模型参数的自适应调整。利用主成分分析（PCA）与聚类分析，可提取多维检测数据的关键特征，降低维度冗余并提升信息利用率。通过融合模型的动态训练与实时更新，检测数据可从单一结果扩展为综合性信息体系，为地基基础完整性评估与安全决策提供科学支撑。

4.2 误差传播与修正机制

无损检测过程中的误差来源复杂，既包括仪器系统误差、信号测量误差，也涵盖环境因素与人为操作误差。为定量描述误差对检测结果的影响，可建立误差传播模型，对各环节的不确定性进行层级追踪。通过误差传播方程，可将原始测量误差转化为最终结果的不确定性表达式，从而揭示影响结果精度的主导因素。在声波检测中，耦合介质状态、传感器灵敏度及信号放大器非线性响应是主要误差源；在地质雷达检测中，电磁波速度假设与折射模型简化会导致界面位置偏差。为减少误差累积，可采用动态校正算法与蒙特卡洛

模拟方法,对不同输入变量进行随机扰动分析,计算误差传播区间及概率分布。通过结果统计修正与置信区间计算,可实现检测结果的定量修正与可靠性评估。设备层面应定期开展标定与比对实验,以消除长期漂移;数据层面可采用差分校正与趋势补偿,确保多次检测结果的一致性与连续性,从而构建稳健的误差控制体系。

4.3 质量控制与可靠性验证

地基基础无损检测的质量控制与可靠性验证是保障检测数据可信度的关键环节。质量控制体系应贯穿检测的全生命周期,包括方案设计、现场实施、数据采集、信号处理与结果分析等各阶段。现场检测中,通过自动化数据采集系统与标准化操作流程,可有效降低人为误差和操作偏差。建立实时监测机制,对加载速率、信号强度、噪声水平等关键参数进行动态记录,实现检测过程的过程化监督。检测完成后,结果需经过多次重复测量与交叉验证,以判断数据的稳定性与重复性。可靠性验证环节可利用统计分析方法,如标准差比值分析、相关系数法及偏差比检验,对检测结果的一致性进行量化评估。通过建立检测信息数据库与质量追溯机制,可对历史数据进行对比验证,实现长期趋势分析与异常值识别。将质量控制体系与信息化平台结合,形成检测全过程的数字化管理模式,不仅提升了检测效率与可追溯性,也为道路桥梁地基基础的健康监测与维护决策提供了可靠依据。

5 无损检测技术的优化方向与工程应用

5.1 信号处理与智能识别技术优化

在道路与桥梁地基基础无损检测中,信号衰减、环境噪声与多路径干扰是影响结果精度的主要因素。为解决复杂条件下信号失真问题,应引入人工智能算法提升信号识别能力。卷积神经网络(CNN)可对声波、雷达及电磁信号的波形特征进行深度提取,识别潜在结构异常并实现缺陷类型分类;自编码器模型通过特征压缩与重构可自动剔除噪声成分,保留关键特征信息。结合时频分析、小波变换与自适应滤波技术,可在信号域与频率域双层优化下提高分辨率与检测准确度。利用深度学习的模式识别能力实现波形自动标注与特征比对,不仅提升了数据处理效率,也为实时缺陷识别与智能诊断提供技术支撑,推动检测技术由人工判读向智能识别转变。

5.2 集成化与实时监测系统构建

集成化检测系统是无损检测技术发展的重要方向。通过融合声波、地质雷达、静力触探及振动监测等设备,可实现多物理量同步采集与协同分析,形成多维度数据体系。基

于物联网(IoT)架构的检测网络,将传感器节点与监测终端连接,实现数据的远程传输与动态可视化。云计算平台可对大规模检测数据进行实时分析、异常识别与趋势预测,为道路桥梁基础的健康监测与寿命评估提供支撑。该系统可实现自动化采集、异常预警与数据共享,降低人工依赖并提升响应速度。通过“现场感知—云端分析—反馈决策”的闭环机制,集成化检测平台不仅提高了检测效率与精度,也为长期结构健康监测与工程运维提供了可靠技术基础。

5.3 标准化与智能化发展趋势

无损检测技术的未来发展趋势是标准化、数字化与智能化的深度融合。标准化体系的建立能够统一检测流程、参数规范与数据格式,实现不同检测机构和项目间结果的互认与对比。数字化技术的引入使检测数据实现全过程记录与追溯,为后期质量审查与工程评估提供可靠依据。智能化发展方面,人工智能与专家系统可通过自学习与模式识别实现检测策略的自适应优化,使检测过程从经验判断走向数据驱动的科学决策。通过“标准—算法—平台”协同框架,可构建覆盖勘测、设计、施工、运行与养护全生命周期的地基基础检测体系,促进无损检测由单一方法应用向系统化、智能化管理转变,为交通基础设施安全提供长期支撑。

6 结语

无损检测技术为道路与桥梁地基基础检测提供了非破坏性、高精度与高效率的解决方案。本文从理论原理、方法特征、数据融合及优化方向四个方面进行了系统研究,提出了以智能算法与标准化体系为核心的优化思路。研究表明,多源信息融合、误差修正与智能识别的结合,是提升检测结果可靠性与实用性的关键路径。未来,随着人工智能与传感技术的深入融合,道路桥梁地基检测将实现由传统人工分析向智能诊断的转变,为交通基础设施的安全运行提供持续、精准的数据支持。

参考文献

- [1] 刘永伟.道路桥梁工程中无损检测技术应用研究[J].运输经理世界,2024,(05):94-96.
- [2] 钱永祥.交通道路桥梁无损检测技术的应用[J].汽车画刊,2025,(01):95-97.
- [3] 夏月.道路桥梁无损检测技术应用中的常见问题及解决措施[J].建材与装饰,2018,(51):251-252.
- [4] 汪子.软土地基上道路桥梁基础处理方法及效果分析[J].汽车周刊,2025,(08):137-139.
- [5] 周锋.关于道路桥梁路基工程的试验检测方法及其特征的研究与分析[J].运输经理世界,2020,(17):56-57.