

桥梁工程无损检测技术应用与病害分析研究

罗沼阳

佛山市盛方达建设工程检测有限公司 广东 佛山 528226

摘 要: 桥梁工程在服役期内受荷载、环境及材料老化等因素影响, 结构性能持续退化, 病害识别与状态评估是运维管理的核心环节。无损检测技术凭借其不破坏结构、可原位重复实施的优势, 已成为桥梁病害诊断的重要手段。本文系统梳理了桥梁工程典型病害类型及其力学-环境耦合成因, 阐述了超声、回弹、雷达、红外热成像、声发射及磁通量等主流无损检测方法的基本原理与适用条件, 重点分析了各类方法对不同病害类型的响应敏感性与应用适配性。在此基础上, 指出当前无损检测在病害定量化、多维数据融合及早期预警方面存在的瓶颈, 并提出多技术协同、智能化判识的发展方向。研究表明, 无损检测技术从单参数定性评估向多维度定量诊断转型是提升桥梁病害分析有效性的关键路径。

关键词: 桥梁工程; 无损检测; 病害分析; 结构评估; 数据融合

引言

桥梁作为交通基础设施的关键节点, 其安全状态直接关系到公共生命财产安全与区域经济运行效率。常见的混凝土开裂、钢筋锈蚀、预应力损失、支座变形及钢结构疲劳等病害, 若未能及时发现与处置, 将逐步累积演变为结构性安全隐患。因此, 科学、高效地识别病害类型、量化损伤程度并追溯成因机制, 是桥梁运维管理的基础性课题。传统检测手段多依赖人工目视检查及少量破坏性取样, 存在覆盖不全、主观性强、信息零散等局限。近二十年来, 无损检测技术迅速发展, 其核心价值在于利用物理场(声、光、电磁、热等)与结构材料的相互作用, 在不改变结构受力状态的前提下获取内部缺陷与表面退化信息。然而, 单一无损检测方法往往只能反映某一物理维度的变化, 病害成因复杂时易出现误判或漏判。因此, 系统梳理无损检测方法与病害类型的对应关系, 明确各自的适用边界与互补条件, 对于构建科学检测方案具有现实指导意义。

1 桥梁工程典型病害类型及其形成机理

1.1 混凝土结构病害

混凝土桥梁的主要病害包括裂缝、剥落、碳化、氯离子侵蚀及碱骨料反应。裂缝按成因可分为荷载裂缝(弯曲、剪切、扭转超应力所致)和非荷载裂缝(收缩、温度梯度、不均匀沉降、钢筋锈胀等所致)^[1]。前者多分布于弯拉区或主拉应力方向, 后者则呈现网状或规则分布特征。碳化是大气中二氧化碳渗入混凝土孔隙, 与氢氧化钙反应生成碳酸钙, 降低孔隙液碱性,

当碳化深度超过钢筋保护层厚度时, 钝化膜破坏诱发锈蚀。氯离子侵蚀则通过海水或除冰盐中的氯离子渗透至钢筋表面, 局部破坏钝化膜, 形成点蚀或均匀腐蚀, 其危害性较碳化更为剧烈。碱骨料反应是混凝土中活性骨料与孔隙液中的碱离子发生膨胀性化学反应, 导致结构内部产生膨胀应力, 典型表现为龟裂和变形。

1.2 钢结构和预应力体系病害

钢结构桥梁的主要病害为疲劳裂纹、腐蚀减薄及螺栓松动。疲劳裂纹源于循环荷载作用下应力集中部位的微观损伤累积, 多在焊接节点、孔洞边缘和截面突变处萌生并扩展。腐蚀减薄受环境湿度、盐分和工业污染影响, 均匀腐蚀降低有效截面积, 局部点蚀则形成尖锐缺口加剧应力集中。预应力体系病害集中于钢绞线锈蚀、锚具滑移和预应力损失。预应力损失包括瞬时损失(摩擦、锚具变形、弹性压缩)和时变损失(收缩徐变、松弛), 但非正常损失往往与孔道压浆不密实、波纹管漏浆导致的钢绞线腐蚀密切相关。

1.3 支座与附属设施病害

支座病害包括橡胶老化开裂、钢板锈蚀、位移超限及转角异常, 直接影响上部结构传力路径。伸缩缝病害表现为填料脱落、型钢断裂或锚固区混凝土碎裂, 导致桥面雨水下渗, 加速下部结构腐蚀。此外, 桥墩基础冲刷与掏空虽属隐蔽病害, 但在水毁事故中占比较高。

综观上述病害, 其共性特征在于: 早期阶段多表现为微观或细观损伤, 肉眼难以识别; 中期发展为表观缺陷但尚未危及整体承载力; 晚期则导致刚度或强度显著

下降。这种渐进演化规律要求检测手段应具备早期敏感性、定位准确性和定量评价能力，而这也正是无损检测技术发挥优势的核心场景。

2 主流无损检测技术原理与特征

2.1 声波与超声波检测

声波检测基于弹性波在介质中传播速度、振幅和频率的变化来推断材料弹性模量及内部缺陷。超声波法（频率 20kHz ~ 1MHz）采用压电换能器激发和接收纵波或横波，通过声时法和首波幅值法测量波速和衰减系数。当混凝土内部存在空洞、离析或裂缝时，波速降低、波形畸变、主频下降，据此可计算缺陷深度和范围。该技术对体积型缺陷敏感，但需耦合剂，且对钢筋密集区域信号干扰明显。

2.2 回弹法与冲击弹性波

回弹法利用弹簧驱动的重锤撞击混凝土表面，测量回弹值以推定表面硬度及抗压强度，其本质是弹性恢复与塑性变形的综合反映。冲击弹性波法采用手动或机械冲击产生低频应力波，通过分析波在结构边界内的反射和共振特性，可识别板厚、裂缝深度及灌浆密实度^[2]。这类方法操作便捷，但回弹值受碳化深度、含水率和粗骨料分布影响较大，需配合钻芯修正。

2.3 电磁与雷达检测

探地雷达发射高频电磁波（100 ~ 2000MHz）穿透结构，在介电常数突变界面发生反射，接收回波时延和幅值来定位钢筋、金属波纹管及空洞。其优势在于连续扫描、成像直观，可绘制内部钢筋分布和保护层厚度。但电磁波对含水率敏感，且在高导电介质（如湿黏土或密集钢筋）中穿透深度受限。涡流检测适用于钢结构表面裂纹和腐蚀坑，利用交变磁场在导电材料中感应涡流，缺陷扰动涡流分布导致检测线圈阻抗变化，对表面开口裂纹检出率较高。

2.4 红外热成像与热波法

红外热成像检测基于物体表面温度场分布差异，通过主动加热或自然日照使结构表面温升，内部缺陷（脱空、分层、含水）改变热传导路径，导致表面异常温区。该技术可实现大面积快速筛查，对浅层缺陷（深度 5cm）成像清晰，但受环境风速、太阳辐射和发射率标定影响，定量精度不足。热波法进一步采用脉冲热源结合傅里叶变换分析热扩散率，可用于涂层下锈蚀评估。

2.5 声发射与磁通量检测

声发射技术被动接收材料在变形或开裂过程中释放

的弹性波，实时监测损伤演化过程。其特点在于动态响应、可定位活裂纹源，适合长期在线监测。但对于突发性信号与连续型信号的识别需借助参数分析和波形聚类，目前在桥梁中的应用仍以定性预警为主。磁通量漏磁法专用于铁磁性材料（钢绞线、钢板），通过磁化后测量表面漏磁场分布，可量化截面损失和断丝数量，对锈蚀引起的截面减薄反映灵敏，但需标定不同钢种及直径的磁特性曲线。

3 无损检测方法对典型病害的适配性分析

3.1 裂缝类病害的检测适用性

对于表面可见裂缝，超声波脉冲回波法和冲击弹性波法均可测量裂缝深度，但前者要求裂缝两侧布置换能器且需良好耦合，后者单面操作更便捷。当裂缝宽度小于 0.2mm 时，常规超声法波速变化不显著，此时可采用非线性超声谐波法（激发基波产生二次谐波）来提高灵敏度，但设备复杂。对于内部微裂缝，声发射技术可在加载过程中捕捉开裂信号，通过时差定位初步确定开裂区域，结合 b 值分析判断裂纹扩展模式（张开型或剪切型）^[3]。探地雷达对干燥混凝土中的垂直裂缝反射较弱，但对含水裂缝因介电常数突变可形成强反射。

3.2 材料退化类病害的检测逻辑

钢筋锈蚀检测需综合物理与电化学方法。半电池电位法测量钢筋表面电位梯度判断锈蚀概率，但只能提供热力学趋势，不能定量损失。磁通量漏磁法可定量评估截面损失率，配合超声测厚仪测量钢管壁厚减薄，两者互补可同时获取锈蚀程度与剩余承载力关联参数。混凝土碳化深度常用酚酞试剂显色法（微损），而无损替代方案可采用近红外光谱法，通过碳化前后羟基吸收峰变化建立预测模型，但现场环境干扰较大。氯离子含量检测目前仍以取样滴定为主，但电阻率法和介电谱法通过测量孔隙液离子迁移率进行间接推断，尚处于研究完善阶段。

3.3 预应力孔道压浆密实度与缺陷检测

孔道压浆不密实是预应力病害的主要诱因。冲击回波法通过分析板底反射频率的偏移量可识别大尺度空洞，但对于直径小于 5cm 的孔洞识别率不高。超声波断层扫描（超声阵列）采用多通道收发，利用合成孔径聚焦技术（SAFT）重建孔道截面图像，可较清晰分辨压浆缺陷位置和形态。探地雷达亦可用于波纹管定位，但金属波纹管屏蔽作用明显，塑料波纹管则效果较好。综合比较，超声阵列与冲击回波的联合应用是当前现场检测中最有效的组合策略。

3.4 钢结构疲劳与腐蚀检测策略

钢结构疲劳裂纹检测中,磁粉和渗透法属表面无损检测,但仅限表层开口缺陷。涡流阵列探头可快速扫查焊缝热影响区,检出深度约2~3mm的隐蔽裂纹,且不受油漆层(非导电)影响。对于深层或内部裂纹,超声相控阵技术采用电子偏转聚焦,可生成扇形扫描图像,定量测量裂纹高度和倾斜角。腐蚀减薄则采用电磁超声(EMAT)技术,无需耦合剂,能在带涂层情况下测量板厚,配合导波长距离检测管道和拉索的截面损失。

3.5 隐蔽病害与整体性评估

桥墩冲刷空洞、基桩完整性和隧道衬砌脱空等隐蔽病害,常采用跨孔超声波和弹性波CT层析成像,通过多测线走时反演重建速度场,低速区反映松散或空洞。红外热成像对浅层脱空识别效率较高,但深层病害需结合热激励延时成像。总体而言,单一方法难以覆盖全部病害类型,实际应用中需根据检测目的、结构材质和现场条件选择主检与辅检方法,构建“快速筛查+精细诊断”两级检测体系。

4 当前应用瓶颈与发展趋势

4.1 量化与标定体系不足

多数无损检测方法提供的是间接物理指标(波速、回弹值、电位等),与结构力学性能(承载力、刚度、剩余寿命)之间的定量映射关系尚不完善。现行规程多依赖经验公式,且标定试件与真实结构在尺寸效应、配筋率、应力状态等方面存在差异,导致检测结果离散性大。需要开展系统性基础研究,建立材料级别-构件级别-结构级别三级标定体系,并引入概率统计方法界定检测不确定度。

4.2 多维数据融合与协同解释

当前检测数据来源多样,但各方法独立出具报告,缺乏深度融合机制。例如,超声检测提供弹性信息,雷达提供介电信息,红外提供热物性信息,三者反映的是不同物性退化,其联合反演可提升缺陷识别置信度。但多源数据的时空分辨率不同、采样坐标系不统一,给融合建模带来困难。贝叶斯网络和模糊综合评判已被引入状态评估,但参数先验分布依赖专家经验,客观性有待提升^[4]。未来应发展基于物理信息神经网络的融合算法,将波动方程、热传导方程等先验物理约束嵌入深度学习框架,实现少样本条件下的高精度反演。

4.3 早期预警与智能监测的衔接

无损检测多为周期性抽检,难以捕捉病害的突发性演化。将无损检测传感器(声发射、电阻率、光纤光

栅)嵌入结构实现长期在线监测,是发展方向。但监测数据量庞大,有效特征提取和异常阈值设定是关键。机器学习中的自编码器可实现无监督异常检测,但在桥梁工程中面临标签样本稀缺、环境噪声干扰等问题。建议构建开放共享的桥梁病害数据库,积累各类型结构在不同环境下的检测数据,为智能算法提供训练基础。

4.4 智能化检测装备与标准化

无人机载热像仪、爬壁机器人超声检测、自主式探地雷达小车等智能装备已逐步应用,提升了检测效率和可达性。但装备的检测分辨率、定位精度和续航能力仍受限,且缺乏统一的检测规程和数据格式标准。未来应推进检测全流程数字化,从数据采集、传输、处理到评估结果生成采用标准化协议,同时发展数字孪生技术,将检测数据实时映射至结构数字模型,实现状态可视化与演化预测。

5 结语

桥梁工程病害类型多样,成因交织,传统单一检测手段难以全面刻画结构退化的多维特征。本文系统梳理了混凝土开裂锈蚀、钢结构疲劳腐蚀及隐蔽脱空等典型病害的力学与环境机理,并详细分析了超声、雷达、热成像、声发射等无损检测方法的物理基础及其在各类病害诊断中的适用边界。研究表明,无损检测技术正从辅助工具逐步转变为核心评估手段,其关键挑战在于从定性判别迈向定量诊断,从孤立测试迈向数据融合。提升病害分析能力的可行路径包括:建立精细化标定体系以降低不确定性;发展多物理场联合反演算法以增强解释可靠性;融入智能监测与数字孪生框架以实现全生命周期管理。随着传感器技术、信号处理方法和人工智能算法的持续进步,无损检测将在桥梁工程安全运维中发挥更为基础性和预见性的作用。

参考文献

- [1] 王海涛,张伟,李建辉.基于超声相控阵的桥梁钢结构疲劳裂纹定量检测研究进展[J].桥梁建设,2025,55(2):78-85.
- [2] 陈思远,刘振宇,赵明.探地雷达在混凝土桥梁内部缺陷检测中的应用与改进[J].公路交通科技,2024,41(6):112-120.
- [3] 周晓军,吴志刚,黄旭.红外热成像技术在桥梁混凝土脱空检测中的温度场影响分析[J].土木工程学报,2023,56(9):45-54.
- [4] 刘阳,张进,高文.桥梁无损检测多源数据融合技术现状与趋势[J].中国公路学报,2025,38(1):156-168.