

无损探伤技术在公路桥梁检测中的应用

张 浩

(安徽开源路桥有限责任公司, 安徽 合肥 230088)

摘 要 在交通基础设施建设不断推进的背景下, 公路桥梁作为关键交通节点, 其结构安全和服役性能对交通运输效率和公共安全产生直接影响。无损探伤技术凭借在不破坏结构完整性的前提下实现内部缺陷识别与性能评估的能力, 成为桥梁检测领域中的重要手段。本文系统阐述了无损检测技术的基本概念及其核心特征, 分析了该技术在公路桥梁检测过程中具备的多重优势, 并且重点探讨了超声波技术、光纤传感技术、机敏混凝土和电化学等具体检测方法的应用路径, 还对实施过程中需要关注的技术要点进行了说明, 以期为桥梁结构健康监测提供有益参考。

关键词 无损探伤; 公路桥梁; 超声波检测; 光纤传感
中图分类号: U446 **文献标志码**: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.03.031

0 引言

公路桥梁是国家交通网络当中的重要构成部分, 长期处于复杂环境与动态荷载的双重作用之下, 容易产生材料老化、裂缝扩展以及钢筋锈蚀等各类结构性问题。传统检测方法大多依靠人工进行近距离目测或者开展局部取样操作, 不仅检测效率低, 还可能由于破坏性操作对结构整体性能造成不利影响。无损探伤技术凭借其非侵入性、高精度以及可重复操作等突出特性, 被广泛引入桥梁检测体系当中加以应用。该技术借助物理或者化学相关手段获取结构内部的具体状态信息, 有效弥补了传统检测方法存在的诸多不足之处^[1]。当前, 无损探伤技术已经涵盖声学、光学、电磁以及电化学等多个不同的技术分支, 在桥梁混凝土强度评估、内部空洞识别以及钢筋分布检测等方面展现出显著的应用价值。

1 无损检测技术的概念及其特点

无损检测技术是在不造成被检对象物理损伤或功能损害的前提下, 利用特定物理场或化学反应对材料内部结构、成分分布及缺陷状态进行识别与评估。该技术的核心是通过外部激励信号与结构响应的关联关系, 推断材料内部异常区域或性能退化情况。在公路桥梁检测中, 无损检测技术依托声波、电磁波、光信号或电化学参数等媒介, 实现对混凝土密实度、钢筋位置、裂缝深度及腐蚀程度等关键指标量化分析。此类技术具有高度适应性, 可用于新建桥梁质量验收,

也能用于既有桥梁定期健康监测。其操作过程包含信号发射、信号接收、数据处理与结果判读四个环节, 各环节间有明确逻辑衔接与技术依赖。无损检测技术实施不依赖结构表面明显破损, 能在不影响桥梁正常通行前提下完成全面检测^[2]。该技术数据输出形式多是数字化信号或图像, 便于长期存储、比对与趋势分析, 为桥梁全生命周期管理提供可靠的数据基础。无损检测技术的标准化程度较高, 多数方法已形成行业规范或国家标准, 确保了检测结果的可比性与权威性。无损检测技术的发展与仪器设备的进步密切相关, 现代检测装置普遍具备小型化、智能化与高灵敏度等特点, 进一步提升了现场作业的便捷性与准确性^[3]。

2 道路桥梁检测过程中无损检测技术的优势

2.1 道路桥梁检测中无损检测技术的成熟技术支持

无损检测技术在道路桥梁领域的应用是建立在长期工程实践与技术积累的基础之上的。各类检测方法经历多轮优化与验证之后, 已经形成相对完善的操作规程与判读标准。例如: 超声波检测、雷达探测、红外热成像等主流技术都具备成熟的硬件平台与软件算法支持, 能够稳定输出符合工程需求的检测结果。相关设备制造商与科研机构不断推动技术迭代更新, 促使检测精度与适用范围持续提升。检测人员经过系统培训之后, 可依照标准流程完成从现场布置直至数据分析的全过程操作, 有效保障了检测工作的规范性与一致性。无损检测技术和其他监测手段如结构健康监

作者简介: 张浩(1993-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 公路工程、道路与桥梁。

测系统（SHM）的融合也日益紧密，形成了多源数据协同分析的新模式。这种集成化应用不但提高了检测效率，还增强了对复杂病害的综合诊断能力。如今，借助人工智能与大数据技术，无损检测技术如虎添翼。通过机器学习算法对海量检测数据深度挖掘，能更精准地识别病害特征与规律。同时，远程监控与实时传输技术让检测数据可即时回传分析，提升应急响应速度。此外，便携式、智能化检测设备的研发，进一步拓展了无损检测在偏远或复杂桥梁场景的应用，为道路桥梁安全提供更全面的保障。

2.2 道路桥梁检测中无损检测技术的无损性特征

无损检测技术最显著的特征是不会对被检测的结构造成任何形式的物理破坏，这一特性让它和钻芯取样、凿除表层等传统检测手段有所区别。在公路桥梁检测过程当中，结构完整性是保障通行安全的必要前提，任何人为造成的损伤都可能引发新的安全隐患或者加速材料劣化。无损检测采用非接触或微扰动的方式来获取内部信息，能够完全避免对混凝土保护层、钢筋锚固区等关键部位产生干扰。检测操作通常只需在结构表面布置传感器或者探头，不需要进行切割、钻孔或者加载试验，这样就能最大限度保留桥梁原本的力学性能与耐久性。该技术的无损性还体现在对交通运行的低干扰方面，多数检测可以在桥梁正常通行状态下开展，不用封闭车道或者中断交通流，显著降低了检测工作的社会成本。因为不涉及材料移除或者结构改造，无损检测不会改变桥梁的原始状态，这使得多次重复检测成为可能，有利于建立长期性能演变数据库^[4]。

2.3 道路桥梁检测中无损检测技术的拓展空间

无损检测技术在公路桥梁领域当中的应用边界目前仍在持续不断地延伸。由于新材料以及新结构形式不断涌现出来，传统检测方法正面临着全新的适应性挑战，而无损技术依靠其灵活性与可调适性，呈现出了十分良好的拓展潜力。例如：对于高性能混凝土、纤维增强复合材料这类新型建材，研究人员已经开发出与之适配的声学阻抗匹配算法与电磁响应模型，从而确保检测精度能够得以维持。在多塔斜拉桥或大跨径悬索桥等复杂桥梁结构当中，无损检测能够借助分布式传感网络实现全域覆盖，进而突破单一检测点存在的空间局限。技术融合趋势也为拓展应用提供了全新的路径，比如把光纤传感和无人机平台相互结合，就能够实现高空或者难以接近区域的自动化检测。引入人工智能与大数据分析技术，让海量检测数据的智能解析成为可能，进一步提高了病害识别的自动化水平。

3 无损检测技术的应用及检测方法

3.1 超声波技术在桥梁检测中的应用

超声波技术通过向混凝土结构内部发射高频弹性波的方式，并且接收其反射或者透射的信号，依靠波速、衰减以及频谱特征来判断材料内部的状态。在公路桥梁检测工作当中，该技术主要用来评估混凝土的强度，识别内部空洞、裂缝以及分层等各类缺陷。超声波在均匀介质里传播时速度较为稳定，当遇到界面变化或者材料不连续区域的时候，会产生反射、折射或者散射的现象，这些信号的变化经过传感器捕获之后，能够反演出缺陷的位置与规模大小。在检测过程中，通常会采用对测、角测或者平测等方式来布置换能器，以此适应不同的结构形式以及检测目标。超声波技术对于浅层至中深层的缺陷具有较高的灵敏度，特别适合用于桥墩、盖梁、箱梁腹板等关键承重构件的内部质量评估。该方法操作起来比较简便，设备便于携带，可以在现场快速完成大面积的扫描工作。在数据处理环节能够结合时频分析与成像算法，生成直观的缺陷分布图，辅助技术人员进行精准的判读。超声波检测不会受到电磁干扰的影响，适用于钢筋密集的区域，而且对操作人员没有辐射危害，安全性较高^[5]。

3.2 光纤传感技术在桥梁检测中的应用

光纤传感技术依靠光在光纤传播时对外界物理量（如应变、温度、振动）的敏感性，实现对桥梁结构状态的实时感知。在公路桥梁检测工作中，该技术主要通过布设分布式光纤或者光纤光栅传感器，持续监测结构关键部位的应变场与温度场变化情况。光纤具备体积小、重量轻以及抗电磁干扰能力强等诸多优点，能够嵌入混凝土内部或者粘贴于结构表面，进而形成长期稳定的监测网络。分布式光纤系统能够实现数十公里范围内的连续性测量，其空间分辨率可达到厘米级别，适合应用于大跨径桥梁的整体性能评估工作。光纤光栅具备高精度以及多参量同步测量的能力，常被用于支座变形、伸缩缝位移等局部状态的监测工作。该技术的数据采集频率较高，能够捕捉瞬态荷载响应，为动力特性分析提供基础数据。光纤传感系统一旦完成安装，可长期服役且无需进行频繁维护，特别适合用于重要桥梁的健康监测工作。其信号传输是基于光信号，不会受到雷电、高压电场等环境因素的干扰，确保了数据的稳定性与可靠性。

3.3 机敏混凝土检测方法的应用

机敏混凝土是在普通混凝土里掺入导电相或者多孔相等功能组分后所形成的智能材料，其电学、热学

或者力学性能会随着内部应力状态或者损伤程度发生规律性变化。在桥梁检测工作当中,机敏混凝土能够作为自感知材料,通过监测其电阻率、介电常数或者压电响应等相关参数,间接反映出结构内部的微裂缝发展、荷载分布以及疲劳累积情况。该方法把检测功能内置于结构材料之中,实现了“材料即传感器”理念。在进行检测时,只需要在混凝土表面布置电极或者引出信号线,就可以通过外接仪器读取内部状态信息。机敏混凝土对于早期微损伤具备较高敏感性,能够在宏观裂缝出现之前预警潜在风险。它响应速度快,信号稳定,并且与主体结构有良好的相容性,不会引入额外的界面薄弱层^[6]。该方法特别适用于新建桥梁的关键受力区域,如主梁底板、墩柱根部等位置,可为结构安全提供前置性保障。

3.4 电化学检测方法的应用

电化学检测方法借助测量混凝土里钢筋的电位、电流或者阻抗等电化学参数,来评估钢筋的腐蚀状态以及防护性能。在公路桥梁检测工作当中,此方法主要用于识别钢筋锈蚀的起始位置、发展速率以及严重程度。钢筋在碱性的混凝土环境中一般处于钝化状态,不过当氯离子侵入或者碳化深度达到钢筋表面时,钝化膜会遭到破坏,进而引发腐蚀反应。电化学检测采用半电池电位法、线性极化法或者交流阻抗谱法等手段,对腐蚀活性区域和腐蚀电流密度进行量化。检测过程只需在混凝土表面布置参比电极与工作电极,不用破坏保护层,操作较为简便且结果直观清晰。半电池电位法能够快速筛查大面积区域的腐蚀风险,而交流阻抗谱法则可以提供更为详细的界面反应动力学信息。电化学方法对湿度、温度等环境因素存在一定的依赖性,但是通过标准化测试条件能够有效控制误差。该方法适用于沿海、融雪剂使用频繁等高腐蚀风险区域的桥梁检测,可为防腐维护决策提供科学依据。

4 无损检测技术的实施要点

无损检测技术在公路桥梁中的有效应用,依靠严谨实施流程和规范操作控制。检测开始前要依据桥梁类型、使用年限、环境条件以及历史病害记录,制定出具有针对性的检测方案,明确检测目标、方法选择和测区布置。传感器或者探头的安装位置需覆盖关键受力区域与容易受损的部位,以此确保数据具有代表性。检测环境应当尽量避开强电磁干扰、剧烈振动或者极端温湿度条件,从而减少外部噪声对信号质量产生的影响。操作人员必须严格按照设备操作规程执行,校准仪器参数,保证发射信号与接收信号的同步性和

准确性。数据采集过程中要使结构处于静止或者稳定荷载状态,防止车辆通行或风振引发的动态干扰。原始数据需要及时备份并且标注时间、位置、环境参数等元信息,为后续分析提供完整的依据。数据处理阶段应采用经过验证的算法模型,避免主观臆断或者过度滤波造成信息失真。检测报告要包含方法说明、数据图表、缺陷定位以及等级评定等内容,表述要清晰、逻辑要严密。不同检测方法的结果应相互印证,必要时结合目视检查或其他辅助手段进行综合判断。对于检测中发现的疑似缺陷部位,需进行复测与详细分析,确定其性质、程度及发展趋势。若存在严重安全隐患,要及时通知相关部门并采取应急措施。同时,建立桥梁无损检测档案,记录历次检测情况,为后续养护维修提供依据。定期对无损检测技术进行评估与改进,以适应桥梁结构变化和新技术发展,保障公路桥梁长期安全运行。

5 结束语

无损探伤技术在公路桥梁检测中的应用已形成较为完整的体系,涵盖了从信号采集到结果判读的全过程。其非破坏性、高适应性与技术成熟度使其成为保障桥梁结构安全的重要工具。超声波、光纤传感、机敏混凝土及电化学等方法各具特点,可针对不同检测需求提供有效解决方案。技术实施过程中需注重流程规范与数据质量控制,以确保检测结果的可靠性与工程适用性。无损探伤技术的深入应用有助于提升桥梁养护的科学化水平,为基础设施长效服役提供坚实的支撑。

参考文献:

- [1] 赵亮.公路桥梁检测中的无损探伤技术应用[J].中华建设,2025(23):145-147.
- [2] 向延华.公路桥梁项目检测中的无损检测技术应用[J].中阿科技论坛(中英文),2021(03):49-51.
- [3] 张永红.无损检测技术在公路桥梁检测中的应用[J].交通世界,2024(Z1):229-231.
- [4] 洪阳,李和志,张远军.探地雷达与超声波技术在道路无损检测中的融合应用[J].凿岩机械气动工具,2025,51(10):135-137.
- [5] 贾沛源,赵静,贺静.交通毫米波雷达路侧感知关键技术与应用探讨[J].中国交通信息化,2025(S1):180-183.
- [6] 朱宏强.道路桥梁检测中的无损检测技术探讨[J].智能建筑与智慧城市,2023(10):174-177.