

基于无损检测技术在公路桥梁裂缝判定中的应用

●马松华



[摘要] 无损检测技术在公路桥梁裂缝检测中的应用已成为现代桥梁维护和安全管理的的重要手段。桥梁裂缝是影响结构性能和耐久性的重要问题,传统检测方法存在效率低下、精度不足的限制,难以满足复杂桥梁结构的检测需求。无损检测技术通过超声波、地质雷达、红外热成像等方法,可高效、非破坏性地评估桥梁的裂缝情况及材料性能。然而,实际应用中该技术面临环境复杂性、数据处理精度不足等挑战。本研究通过综合分析当前常用的无损检测技术,探讨其在桥梁裂缝检测中的适用性和局限性,并引入智能化数据处理与自动化检测设备,以提升检测效率与准确性。

[关键词] 无损检测技术;公路桥梁;桥梁检测

公路桥梁作为交通运输系统的关键基础设施,其长期承受着车流量、超载、环境变化等多重因素的影响,容易产生各类病害,尤其是裂缝问题,严重威胁桥梁的结构安全和使用寿命。裂缝不仅削弱了混凝土的力学性能,还增加了腐蚀介质的渗透通道,导致钢筋腐蚀和混凝土劣化,加速桥梁的老化和失效。因此,精确检测桥梁裂缝并进行有效维护,已成为保障桥梁运营安全的首要任务。传统裂缝检测方法主要有目视检查和破坏性检测,其局限性明显,尤其在对内部裂缝的检测方面,无法提供全面准确的信息。无损检测技术凭借其高效、可靠的特点,成为近年来桥梁检测领域的研究热点。其技术原理是通过声波、超声波、地质雷达等手段,实时监测裂缝的产生与扩展,从而有效评估混凝土的密实度与力学性能。

Q 无损检测技术的现状与应用

(一)公路桥梁裂缝类型与成因

公路桥梁的裂缝类型多样,常见的裂缝主要包括表面裂缝、结构裂缝和温度裂缝。表面裂缝通常是由于混凝土的干缩或施工不当造成的,其特征是裂缝宽度较小,主要出现在桥梁的表面层。结构裂缝则是由于荷载应力集中、材料疲劳或地基不均匀沉降引起的,通常贯穿于整个构件,影响桥梁的承载能力和安全性。温度裂缝则是由于温度变化引发的,混凝土内部的温度梯度导致内外部产生不同的应力,易诱发温差较大的桥梁产生裂缝。

裂缝的形成原因复杂且多样,主要归因于外部荷载、环境条件及施工工艺等因素。荷载作用是桥梁裂缝形成的关键因素,尤其是车辆的超载和长期反复荷载会导致桥梁内部应力积累,最终出现结构性裂缝。此外,桥梁所处环境的温度变化及湿度条件也对裂缝的产生有显著影响,混凝土的收缩与膨胀过程若未得到有效控制,易引发温度裂缝。施工质量问题是导致裂缝的主要原因之一,如混凝土浇筑时振捣不充分或预应力张拉不均匀,会直接影响混凝土的密实度及承载能力,进而产生裂缝。

(二)无损检测技术简介

当前应用的无损检测技术种类繁多。传统技术包括超声波检测、地质雷达和红外热成像等,这些技术主要通过声波、雷达或热成像等手段,评估混凝土结构的内部状况。超声波检测依靠声波在材料中的传播特性,能有效发现桥梁内部的裂缝及空隙;地质雷达可快速扫描桥梁表面下方,识别潜在的裂缝和材料分层问题;红外热成像则通过探测温度差异,定位材料表面或浅层的裂缝。近年来,一些新型技术如声发射检测和光纤传感技术逐渐应用于桥梁裂缝监测。其中声发射技术能够实时监测材料在荷载作用下的微裂纹扩展过程,而光纤传感技术通过嵌入式传感器精确检测桥梁的应力变化和裂缝发展情况。尽管此类技术在提高裂缝检测精度和实时监测方面具有显著优势,但仍存在一定局限性。如检测设备昂贵、检测环境复杂度高影响检测效果等问题。因此在桥梁复杂结构或大面积区域中,综合应用多种技术往

往是必要的。

Q 公路桥梁裂缝检测中的主要问题

(一)传统检测技术的不足

传统的桥梁裂缝检测多以人工检测为主，依赖于现场目视检查和手工测量。此类方法通常效率较低，尤其是对于大面积桥梁结构的检测，往往需要较长的时间和大量的人力投入，导致时间和人力成本较高。此外，人工检测在高空作业或恶劣环境下执行时，存在一定的安全隐患，对检测人员的技术水平要求也较高。

在精确性方面，人工检测主要依赖于检测人员的经验，容易忽视微小的裂缝或深层结构中的缺陷，无法获得全面、准确的检测结果。面对复杂的桥梁结构和难以直接观测的内部裂缝，人工检测往往无法发现内部裂缝，无法提供可靠的裂缝扩展监测和预测信息。因此，人工检测的低效和安全风险使其难以满足现代桥梁检测的需求。

(二)无损检测技术面临的挑战

无损检测技术在实际应用中面临诸多挑战。首先，检测环境复杂。桥梁结构通常具有多层次、不同材质的特点，外界因素如温度、湿度变化会对检测信号产生干扰，影响检测结果的准确性。其次，不同无损检测技术的适用范围和灵敏度各有差异，单一技术难以全面覆盖桥梁裂缝的所有特征，往往需要多种技术组合使用，这增加了操作的复杂性和成本。

在数据解读方面，裂缝检测的数据往往包含大量噪声，尤其在声发射和超声波检测中，信号的衰减和反射可能导致误差累积。精确识别有效信号并排除无关干扰是保证检测精度的关键。此外，检测过程中设备的校准和信号处理方法的差异也会影响结果的一致性，进而增加数据分析的难度。

Q 无损检测技术在公路桥梁裂缝判定中的策略

(一)技术选择与组合

在桥梁裂缝检测中，选择合适的检测技术需根据桥梁的结构特点和裂缝类型进行合理判断。对于表面裂缝，红外热成像技术可以有效地通过温差变化快速定位裂缝，而对混凝土内部的深层裂缝，超声波检测能够通过声波的传播特性探测内部缺陷。此外，地质雷达能够扫描大面积的桥梁结构，识别裂缝和材料分层问题，适用于桥梁整体健康状况的评估。

考虑到不同技术的局限性，多种检测技术的结合应用具有显著优势。如在裂缝扩展的实时监测中，声发射技术可以提供裂缝发展的动态信息，超声波检测则可以补充对深层裂缝的详细评估。通过多种技术相结合，既能提高检测的

覆盖范围，又能提升数据的精度和可靠性，组合式检测策略，不仅能全面评估桥梁的裂缝情况，还能在多维度上提供更准确的分析结果，从而为桥梁的维护和修复提供科学依据。

(二)数据处理与分析策略

在桥梁裂缝的无损检测中，智能化的数据处理方法极大提升了检测的效率和精度。通过引入机器学习和人工智能算法，检测系统能够自动化分析大量采集到的数据，并且识别复杂环境中的裂缝特征，特别是在声发射、超声波等无损检测技术中，算法可以通过模式识别、数据挖掘等手段，从海量噪声信号中提取有效数据，减少人为干预带来的误差。

图像处理技术在裂缝检测中发挥了重要作用，尤其是基于深度学习的图像识别算法能够通过高分辨率图像检测细小裂缝，通过图像处理软件自动识别裂缝的位置、形状和大小，系统能够实现裂缝的精确量化。此外，三维建模技术还能通过多视角成像技术，生成桥梁裂缝的三维图像，帮助更全面地评估结构损伤情况，从而显著提高检测的准确性和精确度。

(三)设备的优化与自动化

在桥梁裂缝检测中，无人机和机器人等自动化设备的应用逐渐成为提升效率和安全性的重要手段。其中无人机能够对桥梁的难以触及区域进行精细的高空拍摄和实时数据采集，避免了人工检测中的高空作业风险，同时其搭载的高分辨率摄像头与红外传感器能够快速发现表面裂缝。而机器人则通过爬行或悬挂方式深入桥梁复杂结构内部，利用搭载的检测设备进行近距离探测，尤其在恶劣环境下表现出更大的灵活性和精准性。

为了进一步优化设备的检测效率，自动化系统的集成化与智能化是未来的发展方向。通过搭载先进的人工智能和机器学习算法，自动化设备能够实时分析和处理采集到的图像及声波数据，减少人为干预，提高裂缝识别精度。此外，改进设备的续航能力、运动灵活性及数据传输速度，也将显著提升其在大规模桥梁检测中的应用前景，使得设备能够更广泛且高效地服务于桥梁健康监测与维护。

Q 桥梁维护与管理的优化

(一)基于检测结果的桥梁维护策略

在桥梁裂缝判定结果的基础上，合理制定维护与加固策略。根据裂缝的类型和严重程度，可以采用针对性的修复措施。对于表面裂缝，通常采用裂缝封闭法，通过压力灌浆或涂覆保护层防止裂缝进一步扩展并阻止水分或腐蚀性物质渗入。对于深层结构裂缝，尤其是影响到桥梁承载力的裂缝，可以通过加固技术如碳纤维增强复合材料(CFRP)粘贴或钢板加固，增强受损区域的结构强度，避免进一步

损坏。

无损检测技术提供了详尽的裂缝分布及演化数据，为桥梁的定期检查与预防性维护提供了科学依据。通过定期进行无损检测，桥梁管理者能够实时掌握桥梁的健康状态，及时发现裂缝的早期形成并进行针对性处理，避免裂缝扩展对桥梁整体结构造成严重影响。此外，长期积累和分析的数据还可以用于建立桥梁的健康监测档案，帮助预测裂缝的发展趋势，从而提前制定预防性维护计划，减少突发性维修带来的高昂成本和交通中断风险。

在桥梁全生命周期的维护管理中，无损检测技术为检测结果的可视化和数据化提供了极大的便利。尤其是在大型桥梁结构中，通过对检测数据的智能化分析，能够迅速识别潜在的结构性问题，为桥梁的动态维护和管理决策提供可靠依据，有效延长桥梁的使用寿命，提升运营安全性。

（二）桥梁管理系统的完善

在桥梁全生命周期管理中，结合无损检测技术可以显著优化管理系统的运行效率，通过长期的监测数据积累，桥梁管理者能够对桥梁结构进行动态分析，及时调整维护策略，从而延长桥梁的使用寿命。无损检测技术所提供的高精度数据能够帮助识别潜在的结构问题，进而对桥梁健康状态进行全面评估，并为制定长期管理和维护计划提供科学依据。为了更好地实现这一目标，需将桥梁健康监测数据系统化，逐步引入大数据和人工智能技术，实现桥梁全生命周期的智能化管理。

同时，数据共享和跨部门合作是进一步完善桥梁管理系统的重要方向。通过将监测数据与设计、施工和维护等多部门共享，管理者能够综合分析各阶段的桥梁信息，提升整体决策效率。此外，不同区域的交通管理部门、工程建设部门以及应急响应部门应加强合作，共享桥梁的健康状态数据。通过建立统一的桥梁健康监测数据库，各方可以协同工作，及时响应桥梁的检测结果，优化资源配置，从而提高桥梁的运营安全性和维护效果。

Q 无损检测技术在桥梁检测中的未来发展趋势

随着技术的不断进步，无损检测技术在桥梁裂缝检测中的未来发展将更加注重技术集成与智能化分析。多种检测手段的集成应用，如超声波、红外热成像和声发射技术的联合，将进一步提升检测的覆盖率与精度。通过多源数据融合，检测结果可以更为准确地反映桥梁的健康状况，实现对结构的全方位评估，而智能化数据处理将在未来发挥更加重要的作用，特别是大数据分析、人工智能和机器学习技术的引入，将使得裂缝监测过程中的信号处理和数据解读更加精准、高效。

新兴技术如量子传感器与5G通信技术也将给桥梁检测技术带来显著的创新和突破。量子传感器因其超高的灵敏度和精度，将极大地提高对细微裂缝和早期损伤的探测能力。5G通信技术的应用可显著增强数据传输的实时性和稳定性，促进远程监控与实时反馈系统的应用，使得桥梁健康监测系统具备更强的自动化能力。尽管相关新技术带来了巨大的潜力，但其应用仍面临数据量剧增、设备成本高昂及数据安全等问题，这将对桥梁检测技术的升级和应用推广提出更高要求。

Q 结束语

无损检测技术在桥梁裂缝判定中的核心作用，在于能够提供对桥梁结构完整性的精确评估，而不对其造成任何损害，并且解决了传统检测方法的局限性问题。在实际应用中，单一检测技术难以完全覆盖复杂桥梁结构的各类裂缝特征，因此多种检测技术的融合显得尤为重要。通过将声发射、超声波、图像识别等技术相结合，能够在不同层次和区域实现裂缝的全面监控。此外，智能化的数据处理技术，如机器学习和深度学习的引入，进一步提升了检测系统的自动化和精确度。结合无人机、机器人等自动化设备的使用，检测效率和安全性得到了进一步提高。多技术协同与智能化的发展趋势，将推动桥梁全生命周期管理的进一步优化，为桥梁的安全运营和维护提供持续支持和可靠保障。

Q 参考文献

- [1] 孙彬彬. 无损检测方法在桥梁引道诊断中的应用[J]. 建筑机械, 2023(01): 46-49.
- [2] 赵佳楠. 无损检测技术在隧道工程测量施工中的应用[J]. 中国设备工程, 2020(22): 157-158.
- [3] 秦德威. 运营隧道衬砌开裂无损检测综合技术应用分析[J]. 运输经理世界, 2022(27): 101-103.
- [4] 王宇新. 运营状态下特大悬索桥无损检测及承载能力评估[J]. 交通科技, 2021(03): 16-20.
- [5] 高凡, 贺春光, 王鹏章, 等. 数字图像处理在混凝土路面裂缝中的应用[J]. 中外公路, 2023, 43(01): 44-51.
- [6] 黄胜勇. 桥梁检测中的无损检测技术分析[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2023(04): 107-109.
- [7] 钱锋. 无损检测技术在公路桥梁裂缝判定中的应用研究[J]. 建筑技术开发, 2023, 50(01): 117-120.

作者简介:

马松华(1987—), 男, 汉族, 北京人, 本科, 工程师, 交科院检测技术(北京)有限公司, 研究方向: 桥梁检测。