

新型试验检测技术在公路桥梁检测中的应用

韦 涵

(四川川桥工程试验检测有限责任公司, 四川 成都 610200)

摘 要 随着公路桥梁使用年限不断增长, 传统检测手段难以满足公路桥梁结构健康评估要求。新型试验检测技术具备高精度以及实时性强等特点, 能有效提升检测精度、降低检测成本, 并提高桥梁质量保障水平。本文系统梳理了毫米波雷达、声呐、敲击扫描、承载能力快速评估以及 PS-INSAR 五项新型试验检测技术的原理及应用, 以期为公路桥梁全寿命周期管理提供技术参考。

关键词 公路桥梁检测; 新型试验检测技术; 全寿命周期管理

中图分类号: U445

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.28.016

0 引言

公路桥梁是交通网络中的基础设施, 其结构安全性直接影响道路系统的运行效率。同时, 公路桥梁在长期服役过程中易受到荷载作用、环境腐蚀等多因素综合影响, 结构性能逐渐退化。传统检测手段在精度、效率与覆盖范围等方面存在一定的局限性, 难以满足桥梁运行状态评估的高时效要求。新型试验检测技术具有多源数据融合、非接触测量等特征, 可推动检测向精细化与常态化转型, 为桥梁全生命周期的结构健康监测奠定技术基础。

1 新型试验检测技术概述

随着交通量不断增加与桥梁结构复杂性提升, 传统公路桥梁检测技术逐渐暴露出一定的局限性, 无法全面地反映桥梁实际状况^[1]。新型试验检测技术能为桥梁维护管理提供更科学、更准确的检测方法。其中毫米波雷达技术能在不破坏桥梁公路结构的情况下, 成像检测桥梁内部裂缝等早期病害。声呐检测技术则可利用声波在水中的传播, 检测水下桥梁基础完整性, 适用于定期检测水下结构。这些新型试验检测技术既有助于提高检测准确性, 还能缩短检测周期, 降低人工成本, 为公路桥梁长期安全运营提供有力保障。

2 新型试验检测技术在公路桥梁检测中的作用

2.1 提升桥梁检测精度

新型试验检测技术在公路桥梁检测中的应用, 正在逐步改变传统检测方式, 提高检测精度。新型试验检测技术不依赖单一设备, 而是集成多种先进手段优化检测过程^[2]。与传统技术相比, 新型实验检测技术能深入桥梁结构难以接触的区域, 实时监控桥梁健康状况, 降低人为误差影响, 进而为桥梁管理养护

提供科学、有效的依据, 提升检测精度。除此之外, 新型试验检测技术的不断进步也使得桥梁检测不再依赖人工, 减少人为干扰因素, 且具备长时间、高频率连续监测能力, 使得桥梁检测精细化、系统化, 为桥梁安全评估与后期维护提供可靠支持。

2.2 提供实时数据反馈

新型试验检测技术能够实时监控公路桥梁的各项性能指标, 精准评估公路桥梁健康状态, 进而提高监测效率, 有效监控公路桥梁实际使用情况。这样也有助于工程人员在桥梁发生异常时, 及时发出预警信号, 从而采取快速响应措施, 防止事故蔓延。除此之外, 实时数据还有利于管理人员分析公路桥梁健康趋势, 提前预测桥梁潜在问题, 做出科学合理的决策, 延长桥梁使用寿命。

2.3 发现潜在结构隐患

传统检测方法依赖人工检查, 存在一定的盲区, 特别是识别桥梁结构中的微小裂缝、腐蚀与其他细微损伤的能力有限^[3]。新型试验检测技术为桥梁检测提供了更加全面精准的检测手段。这些新型试验检测技术具有高度集成化与数据驱动等特点, 能大范围连续监测桥梁, 及时发现桥梁结构隐患。通过分析新型检测技术数据, 还可以有效预测结构问题的发展趋势, 进一步提升桥梁管理前瞻性。

2.4 优化检测周期成本

在公路桥梁检测中, 传统检测方法依赖现场检查, 过程繁琐且耗时, 既会增加检测周期, 还具有高昂的人工费用及设备投入。新型试验检测技术能自动记录并上传数据, 减少人工检查的频率, 大幅度提高检测效率, 能更高效且全面地检查公路桥梁, 缩短整体检测周期。此外, 新技术还有助于降低重复检测以及错

误诊断的可能性,避免由传统检测方法带来的误判、漏检问题,减少后续维修成本,提升检测工作的经济性。

2.5 提升公路桥梁安全性

在公路桥梁检测中应用新型试验检测技术,能够有效发现细微的结构缺陷与潜在风险。例如:毫米波雷达技术能够穿透桥梁结构,精确检测出隐藏的裂纹情况,而声呐技术则能有效评估水下结构的完整性^[4]。新型试验检测技术具有持续性监测能力,有利于在桥梁使用过程中精确评估桥梁状态,及时揭示可能影响结构安全的变化,持续保证建筑质量,有效避免传统方法中可能存在的监测盲区,为公路桥梁安全性提供更强有力的支撑。

3 公路桥梁新型试验检测技术的具体应用

3.1 毫米波雷达技术的应用

毫米波(mmWave)是一类使用短波长电磁波的特殊雷达技术。雷达系统发射的电磁波信号被其发射路径上的物体阻挡继而发生反射。通过捕捉反射的信号,雷达系统可以确定物体的距离、速度和角度。毫米波雷达技术的工作原理是利用毫米波雷达信号对比桥梁表面与内部结构的反射波,以准确判断公路桥梁结构健康状态,为监测公路桥梁结构健康提供全新的解决方案。由于毫米波信号高频特性,该技术可以提供更高分辨率的图像,适合检测桥梁结构中位置较为隐蔽部位的质量。除此之外,毫米波雷达技术具有不受天气等外部因素影响的优点,可以长时间在复杂环境下工作。

在实际应用中,毫米波雷达技术已经广泛用于定期检测公路桥梁。在部分老旧桥梁检测中,检测人员使用毫米波雷达可以深入桥梁内层,探测混凝土空洞等传统检测方法难以发现的问题。同时,检测人员部署毫米波雷达探测设备,也能实现无接触桥梁表面即获得高分辨率结构数据,提高检测效率。除此之外,在悬索桥或立交桥等部分较为复杂的桥梁结构中,检测人员可以使用毫米波雷达有效覆盖桥梁各个部位,及时检测每一部分的结构健康状况,避免检测盲区。在这些应用中,毫米波雷达技术不仅能提高结构检测精准度,还能加快检测周期,降低人工操作的成本。在长期监测中,相关人员对比不同时期的雷达反射数据变化,还可识别桥梁内部材料劣化的演化过程,提升动态掌握结构性能退化的能力。该技术正逐步向自动化、车载化方向发展,助力构建高效的公路桥梁检测新模式。

3.2 声呐检测技术的应用

声呐检测技术主要是利用声波传播原理,借助声波反射与折射特性,精准探测桥梁的水下结构。这项

技术可以使用声波能在水中传播的特性,有效检测桥墩、桩基等桥梁水下部位,并依据接收到的回波信息判断其结构完整性^[5]。同时声呐设备可以在不同的水域环境中稳定工作,不受光线、天气等外界条件影响,能提供清晰的数据反馈。该技术优点是非接触式检测,且大面积覆盖水下结构检查区域。在此基础上,检测人员分析高频声波回波,有助于识别出结构表面的裂纹,并深入发现潜藏在水下的其他桥梁缺陷,全面健康监测公路桥梁水下结构。

在实际应用中,声呐检测技术已广泛应用于公路桥梁的水下结构检测。其中,在公路桥梁水下结构检测中,检测人员可部署三维实时多波束声呐设备,全面扫描桥墩与桩基的水下部分并生成三维图像,清晰显示桥墩结构轮廓、水下表面可能存在的空洞等问题。借助这种实时多波束声呐的立体图像,公路桥梁检测人员可迅速定位问题区域,并进一步分析、修复损伤部分。与传统检测方法相比,声呐检测技术既能缩短检测周期,还能避免人工检查中的误差,全面、精准地评估桥梁水下结构。在公路桥梁定期检查中,声呐技术能为水下结构提供详细的诊断图像,帮助公路桥梁管理部门及早发现隐蔽结构问题,延长公路桥梁使用寿命。

3.3 敲击扫描技术的应用

敲击扫描技术是利用声波传播原理进行无损检测的方法,广泛应用检测桥梁结构健康。该技术是轻微敲击桥梁结构表面,并利用传感器收集该过程产生的声波脉冲信号反射波,再依据反射波的时间、频率以及幅度变化,有效分析桥梁结构健康状况。与其他检测技术相比,敲击扫描具有较强敏感性,适合检测混凝土结构中的裂缝、空洞等问题。该技术优势在于非破坏性,不会损害公路桥梁结构,并且能在短时间内完成大范围检测。

在具体应用中,敲击扫描技术已用于部分高速公路桥梁常规检测。在桥梁健康监测中,技术人员可使用敲击扫描技术检测桥面、支撑梁以及桥墩等多个部位。同时,布设多个传感器,敲击桥梁局部,获取反射声波数据,以揭示桥面缺陷,准确定位并评估缺陷影响程度,进而及时修复处理。类似地,敲击扫描技术也能揭示传统检测方法难以发现的桥墩等部位空洞。虽然敲击扫描技术在桥梁检测中具有较高的可靠性,但在复杂环境下,也会限制其效果。在极端天气条件下,敲击声波的传播可能会受到干扰,影响检测结果的精度。因此,尽管敲击扫描技术在大多数情况下表现出色,但在实施过程中,仍需结合其他检测方法,以更全面

地评估公路桥梁工程。具体而言,敲击扫描技术在桥梁检测中具有明显的优势,特别在发现隐蔽性问题方面表现突出。但应用在复杂环境时,仍需综合考虑其他技术手段,以保证检测结果的准确性。

3.4 承载能力快速评估技术的应用

承载能力快速评估技术是一种融合分析检算与试验验证手段,能高效、安全评定桥梁结构。该技术能识别桥梁结构在使用过程中因荷载、老化与病害等因素造成的荷载效应变化,并结合数据反演分析,判断公路桥梁结构是否满足当前通行需求。与传统设计阶段的承载评估相比,该方法更强调把握实际服役状态,体现“保守设计,非保守评定”的原则。该快速评估技术主要包括验证荷载试验、诊断荷载试验及分析检算等方法。

在具体应用中,相关人员在采用承载能力快速评估技术时,可选择以诊断荷载试验为主,辅以分析检算的评估方案。试验阶段,项目组应模拟车速通过,并在道路桥梁上安装无线应变传感器、加速度计及位移计同步采集响应数据,且结合 GNSS-RTK 系统精准定位车辆,提取关键跨径的弯矩与剪力影响线。同时,采用 VMD 分解、奇异值分析等信号处理技术去噪、提取响应信号,获得公路桥梁结构的真实动力特性,再基于有限元建模,建立贴近实况的计算模型,逐段分析结构剩余承载能力。这种评估过程耗时较少,能有效压缩检测工期,且在未对桥梁造成额外结构风险的前提下,全面评判承载能力。评估结果分析阶段,检测人员还可结合实测响应对比有限元模拟结果,借助误差反演优化模型参数,进一步提高承载评定的精度。针对关键截面,检测人员也能引入承载储备系数以及疲劳寿命分析等指标,综合判断公路桥梁结构是否具备持续服役能力。使用该技术的整个评估过程也无需长时间封闭桥梁,对交通干扰较小,且结果具备较强的结构物理依据,能为决策部门提供科学、高效的技术支撑。

3.5 PS-INSAR 技术的应用

PS-INSAR(永久散射体合成孔径雷达干涉测量)技术是一种高精度、长周期与大范围的地表形变监测方法,能依托卫星遥感平台,利用多时相雷达图像干涉分析地面永久散射体,并提取毫米级垂直位移信息。其基本原理即在 N 景 SAR 影像中选择一景时空相干性最好的影像为参考影像,其他作为副影像,形成 N-1 幅差分干涉图,然后选择时间序列上保持高相位质量的点并建立函数模型,对模型进行分析求解以获得地表形变值。在桥梁工程中,该技术适用于评估桥梁所

在区域的地基沉降、地质变形。相比传统地面测点方式,PS-INSAR 具备非接触、高密度以及高覆盖率等优势,适用于桥梁群、城市干道及无法布设监测设备区域的远程监测。

该技术应用包括四个阶段:数据采集、识别永久散射点、时间序列干涉处理以及沉降速率场反演。其先是借助 TerraSAR-X、Sentinel-1 等多景雷达影像覆盖桥梁及周边区域,并利用永久散射体识别算法选取稳定散射点。随后采用干涉处理技术计算公路桥梁每个点的相位变化,反演桥梁所在区域的地表沉降量。在桥梁健康监测中,检测人员还要整合 PS-INSAR 提取的沉降场与桥梁结构模型,使用有限元分析评估构件变形或支座不均匀位移等现象。除此之外,PS-INSAR 技术支持集成地理信息系统(GIS)、建筑信息模型(BIM),有助于工程单位构建多维时空监测平台,实现动态评估区域桥梁群。针对新建桥梁,该技术可用于监控施工期间沉降变化;至于既有桥梁,则定期提取沉降速率趋势,判断是否存在地基活跃变形区域。整体而言,PS-INSAR 有效拓展检测技术的时空边界,不依赖人工作业,极大地提升了桥梁群体的监测覆盖率,在桥梁长期运营安全管理中具有广阔的应用前景。

4 结束语

新型试验检测技术的持续进步,正推动桥梁检测体系从经验判断逐步转为数据驱动。这种检测技术的深入发展既拓展了公路桥梁结构监测的时空维度,也重塑了公路桥梁状态评估的框架。在此背景下,公路桥梁检测已成为支撑公路桥梁结构可靠性管理与全生命周期的重要环节。面对公路桥梁服役状态复杂化的现实挑战,急需以多技术协同为支撑,构建开放、动态的检测技术体系,为基础设施安全治理提供更具前瞻性的工程策略。

参考文献:

- [1] 李彪.公路桥梁质量检测中新型试验检测技术的应用分析[J].工程建设与设计,2025(12):193-195.
- [2] 吕虎.新型试验检测技术在公路检测中的应用[J].运输经理世界,2025(06):43-45.
- [3] 王涛.新型试验检测技术在道路桥梁检测中的应用[J].散装水泥,2024(02):29-31,34.
- [4] 李国栋.公路桥梁质量检测中新型试验检测技术的应用分析[J].运输经理世界,2024(04):112-114.
- [5] 许海峰.新型试验检测技术在公路桥梁检测中的应用分析[J].运输经理世界,2023(25):116-118.