

无损检测技术在桥梁工程中的应用研究

张洪管, 孟凡会, 王启玲

济南工程职业技术学院, 山东 济南 250200

DOI: 10.61369/TACS.2026020044

摘 要 : 目前,我国桥梁数量大,桥梁的老龄化问题比较突出,需要新的技术用于桥梁工程的检测,无损检测优点突出,对于保障桥梁的结构安全、延长桥梁的服役年限具有重要的作用。本文从无损检测技术的基本原理及桥梁常见病害类型,以及各类技术的具体应用进行了阐述。还探讨了三维激光扫描、无人机检测等新兴无损检测技术的发展和应

关 键 词 : 无损检测; 桥梁工程; 智能化检测; 病害诊断

Application Research of Nondestructive Testing Technology in Bridge Engineering

Zhang Hongguan, Meng Fanhui, Wang Qiling

Jinan Engineering Vocational and Technical College, Jinan, Shandong 250200

Abstract : At present, China has a large number of bridges, and the aging problem of bridges is quite prominent. New technologies are needed for the inspection of bridge engineering. Nondestructive testing has outstanding advantages and plays an important role in ensuring the structural safety of bridges and extending their service life. This paper expounds the basic principles of nondestructive testing technologies, common types of bridge defects, and the specific applications of various technologies. It also discusses the development and applications of emerging nondestructive testing technologies such as 3D laser scanning and unmanned aerial vehicle inspection. Finally, corresponding development suggestions are put forward.

Keywords : non-destructive testing; bridge engineering; intelligent inspection; damage diagnosis

引言

当前,我国桥梁数量已超过300万座,数量规模位居世界第一。随着桥梁服役年限的增长,大量的桥梁需要维修和养护,桥梁的结构安全和耐久性问题逐渐显现。

传统的检测方法已难以满足对桥梁检测的需求,需要新的技术体系完成桥梁的检测。而无损检测技术优势明显,它具有不破坏结构、可重复检测、长期监测等多重优势。能够对桥梁进行定期检查、特殊检查,还能用于施工质量控制,构建桥梁健康监测系统,进而实现对桥梁的全寿命周期管理。深入研究无损检测技术具有重要的意义^[1]。

一、无损检测技术体系

(一) 无损检测技术基本原理

1. 超声波检测技术,是指利用高频声波在材料中的传播,当遇到缺陷时,声波会反射、折射等。用超声波检测技术可以检测混凝土内部的缺陷、裂缝深度和钢结构焊缝质量等。

2. 射线检测技术,是指使用X或 γ 射线穿透物体,通过用胶片或者数字化探测器来成像。射线检测技术能够直观的显示钢结构内部缺陷的形状与大小,但对检测过程中的安全防护要求较高。

3. 磁粉检测技术,是指先将铁磁性材料磁化,材料的表面或近表面缺陷处会产生漏磁场,漏磁场吸附磁粉后显示缺陷。磁粉

检测技术主要用于检测构件表面的裂纹^[2]。

4. 渗透检测技术,是指在非多孔性材料表面施加渗透液,渗透液渗入到开口缺陷中,经显像后便于观察从而完成检测。渗透检测技术通常适用于检测钢结构表面的开口缺陷。

5. 红外热成像技术,是指通过探测存在混凝土脱空、渗水或钢结构内部缺陷的物体表面红外辐射产生的差异,识别缺陷引起的温度场异常,实现对构件的无损检测。

6. 声发射技术,是利用监测材料在受力过程中会因缺陷扩展释放瞬态弹性波的技术。声发射技术可以用来评估结构的活性损伤与完整,并实现动态的监测。

7. 地质雷达技术,是指向介质中发射高频电磁波,根据反射波信号的特征,来检测桥面铺装层厚度、内部缺陷以及混凝土内

部钢筋分布情况等。

8. 光纤传感技术,是指将作为传感元件的光纤植入或粘贴于结构表面完成检测。这种技术可以实完成长期的、分布式的检测应变以及对温度、振动等多种参数的检测,灵敏度高、抗干扰性强点。

(二) 桥梁工程主要病害类型与检测需求

1. 混凝土结构病害:包括碳化、氯离子侵蚀、钢筋锈蚀、裂缝、蜂窝麻面、孔洞、剥落、碱骨料反应等病害。这类病害需要检测强度、内部缺陷、钢筋状况、保护层厚度以及裂缝等多种参数^[9]。

2. 钢结构病害:包括焊缝缺陷、母材与连接处的疲劳裂纹、腐蚀、高强螺栓松动、涂层劣化等钢结构病害。这类病害需要检测构件的内部与表面缺陷、裂纹、涂层性能以及连接状态等参数。

3. 预应力体系病害:包括孔道压浆不密实、预应力筋锈蚀断裂、锚具夹片滑移或锈蚀、预应力损失过大等病害。这类病害需要检测压浆饱满度、钢束锈蚀与断丝状况以及锚固系统的可靠性等参数。

3. 基础与墩台病害:包括桩断裂、缩颈、离析;基础不均匀沉降;墩台裂缝、倾斜、冲刷掏空等病害。这类病害需要检测桩基完整性、沉降变形以及裂缝的发展等参数。

4. 桥面系病害:包括桥面铺装层病害和伸缩缝病害等。桥面层出现开裂、车辙、拥包、脱空等;伸缩缝出现损坏、卡死、漏水;排水系统堵塞等病害。这类病害需要检测铺装层内部状况、伸缩缝功能以及排水的通畅性^[4]。

(三) 无损检测技术选用的原则

首先,无损检测技术的选用要有针对性与适用性,根据被检材料、疑似病害类型及可接近性,选择最直接有效的技术。

其次,无损检测技术的选用要保证经济性 with 效率性,综合考虑设备成本、检测速度、数据处理复杂度及对交通的影响。在满足要求的前提下,追求最优性价比。

第三,无损检测技术的选用要有互补性与综合性,单一技术通常有局限性,采用多种技术可以做到相互验证和补充。例如结合超声法与冲击回波法检测混凝土缺陷,结合超声与磁粉技术检测焊缝^[5]。

二、无损检测技术在桥梁各部位的应用

(一) 混凝土结构物的检测

运用回弹法检测混凝土结构物强度便捷快速,适合大面积普查,但是受砧结构物表面状态的影响较大。运用超声回弹综合法检测砧强度则是同时利用声速与回弹值,能够更准确地推定混凝土的强度,减少碳化等因素对检测的干扰^[6]。

运用超声波法进行缺陷检测,可探测砧结构物内部空洞、不密实区。运用冲击回波法检测砧结构物缺陷则是通过分析应力波反射,识别裂缝深度、板厚及内部缺陷,尤其适合单面接触的检测。

运用半电池电位法进行钢筋锈蚀检测是通过测量钢筋与标准电极之间的电位差,来定性评估钢筋锈蚀概率,是锈蚀普查的常用手段。

运用基于电磁感应原理的钢筋扫描仪进行保护层厚度检测:,可非破损测定钢筋位置、走向及保护层厚度,进而评估结

构耐久性^[7]。

采用超声波平测法或辅以钻孔取芯校准检测裂缝深度与走向,可以定量测量裂缝的深度;应用裂缝观测仪和三维成像技术可以记录裂缝的形态与发展。

(二) 钢结构的检测

采用超声波探伤进行焊缝缺陷检测是检测厚板焊缝内部缺陷的主要方法。应用射线探伤能提供直观的缺陷图像,常常用于重要焊缝的质量检验。

在应力集中区域,可以定期采用磁粉或渗透检测检查表面裂纹进行疲劳裂纹检测。采用声发射技术可以用于监测钢结构疲劳裂纹的萌生与扩展活动。

应用磁性测厚仪可以测量非磁性涂层在钢铁基体上的厚度。采用附着力测试仪可以通过拉拔或划格法,来评估涂层粘结强度。

扭矩扳手检查是高强螺栓预紧力检测的常用方法,但精度受多种因素影响。超声波螺栓应力测量仪通过测量拧紧前后超声波传播时间的变化,可以更精确地计算轴向应力。

(三) 预应力体系的检测

冲击回波法能够有效检测预应力体系孔道内压浆的空洞缺陷,基于探地雷达的专用系统能够纵向扫描孔道,通过成像的方式对压浆饱满程度进行显示,实现预应力孔道压浆密实度检测。

漏磁检测技术和声发射技术可以检测预应力筋锈蚀与断丝,漏磁检测技术是通过检测预应力筋周围磁场的变化来评估钢构件截面积的损失和断丝的情况,而声发射技术可以监测锈蚀断裂过程中的声发射事件^[8]。

检测时将光纤传感器粘贴在锚具或者锚垫板上,能够对锚具区域的应变和温度的变化进行实时监测,从而对预应力体系的工作状态和预应力损失进行评估,实现对锚具工作状态的监测。

(四) 基础与墩台的检测

1. 桩身完整性检测:低应变反射波法用来检测桩身完整性其原理是通过分析桩顶激振产生的应力波反射信号来判断桩身的完整性,进而实现对桩基完整性的检测。高应变法除了可以检测桩身完整性,还能评估单桩承载力。

2. 地基、基础沉降监测:通过采用精密水准测量、静力水准仪或分布式光纤传感技术,对桥墩、桥台及基础进行长期、连续的沉降检测和差异沉降监测,实现地基与基础的沉降监测。

3. 墩台裂缝与位移检测:采用裂缝仪、位移计对墩台进行定期观测,其原理是运用三维激光扫描技术获取墩台整体的点云模型,通过对不同时期检测数据的对比分析墩台裂缝的发展和变形。

(五) 桥面系的检测

运用探地雷达可快速、连续地检测沥青或水泥混凝土铺装层的厚度,并能够识别层间的脱空、松散等病害,从而实现铺装层厚度的检测和脱空检测^[9]。

伸缩缝外观损坏检测可以综合运用卡尺测量、数码成像技术来记录,并评估伸缩缝的伸缩自由度;采用动态应变测试方法可以监测伸缩缝在车辆荷载下的实际工作状态,进而实现伸缩缝工作状态的评估。

针对排水系统功能性检测,可以采用内窥镜用于检查排水管

内部堵塞情况，采用水流试验法对排水效率进行评估。

三、新兴无损检测技术及其发展

（一）新型检测技术的应用

三维激光扫描技术是指通过快速获取桥梁结构高精度点云数据，建立“数字孪生”模型。这种技术可以用于形态测量、变形分析、病害标注与工程量统计，可以极大的提升检测的全面性和数据的可追溯性^[10]。

无人机搭载检测系统指的是利用无人机搭载设备对检测标的进行的检测。无人机通过搭载高清相机、红外热像仪、激光雷达等传感器，可以安全、高效地接近桥梁的底部、索塔、拱肋等危险的区域或难以到达区域，实现大范围快速的巡检和重点检查。

机器人检测技术是指通过爬壁机器人、缆索检测机器人等在复杂表面的自主移动实现对构件的检测，机器人可以携带多种传感器来执行近距离的精细化的检测，从而降低人工高空作业的风险，降低人工作业风险和成本。

分布式光纤传感技术是指将光纤作为神经感知网络沿待检测结构布置，可以实现对温度、应变、振动等参数的测量。分布式光纤传感技术可以实现长距离、连续、分布式的测量，特别适用于大跨径桥梁的整体状态监测与局部损伤定位。

（二）智能化检测系统

1. 数据处理与人工智能分析系统：本系统应用机器学习对检测图像进行自动识别、分类。本系统通过利用深度学习算法从海量数据中挖掘损伤特征，进而实现工程病害的智能诊断。

2. 损伤识别与预警算法系统：本系统基于模态分析、小波变换以及贝叶斯更新等方法开发结构损伤识别和状态评估算法，再进一步结合设定阈值实现标的检测。

3. BIM 技术融合应用系统：本系统将无损检测数据和桥梁 BIM 模型关联，可视化集成管理相关信息。为桥梁工程的养护、维修、决策提供比较直观的三维数字化平台。

（三）检测数据的集成与管理

1. 桥梁健康监测系統：本系统综合运用传感技术，对桥梁环境、桥梁荷载与响应进行长期监测，是获取桥梁结构性能演变数据的重要手段。

2. 检测数据云平台：基于云计算桥梁检测数据建立的管理平台，本平台可以集中存储检测报告、图像、视频、点云等多源异构数据，并实现共享与协同分析。

3. 全生命周期数据管理：把从设计、施工到运营、养护各阶段的无损检测数据整合，形成完整的桥梁数字化档案。为全生命周期性能的预测和优化提供决策。

四、无损检测技术存在的问题与建议

（一）无损检测当前存在的问题

新兴的无损检测技术，例如无人机搭载检测、三维扫描数据处理等，缺乏统一的标准，检测结果的判读存在差异，影响检测

评估的一致性和权威性。

检测人员专业水平存在差异，无损检测技术对操作人员的要求比较高，检测人员专业水平将会直接影响检测的质量和可靠性。

智能化设备、自动化检测设备的初期投入成本较高，新技术推广应用存在障碍。部分桥梁管养单位接受新技术的过程比较慢，制约了无损检测技术的大规模应用。

检测数据与结构力学状态评估、剩余承载力计算以及寿命预测之间的模型衔接紧密度不足，检测与评估过程衔接不畅，检测数据的价值还有待挖掘。

（二）无损检测技术的发展对策和建议

首先，要加快制定和修订无损检测新标准、新规程等文件。把新技术、新方法涵盖进去。建立从检测数据的采集、处理到结果判读的全流程标准体系，推动无损检测技术的标准化与规范化。

其次，建立健全无损检测人员的职业培训和资格认证体系。从多个层次、分专业对检测人员的理论教学和工程实践进一步加强，提高人员整体从业水平

第三、鼓励高校、科研机构以及工程管养单位等进行深度合作，共同研发更实用、更高效、更经济的检测技术和装备，加快产学研用协同创新。

第四、大力推进基于物联网、大数据、人工智能的智能化检测监测系统研发与应用，向智能化、网络化的方向发展。

第五、政府部门应加大对桥梁预防性养护、定期检测与健康监测的财政投入，同时出台政策鼓励大家采用先进的无损检测技术。

五、结语

针对老旧桥梁安全维护等问题，无损检测技术应用广、技术新、方法活，是一种有效的关键检测技术。工程实践证明该技术对精准识别病害、评估结构状态、支持科学决策都具有重要的作用。随着传感器、物联网、人工智能等技术的深度融合，桥梁无损检测技术的应用价值也将进一步提升。

参考文献

- [1] 李凯. 钢结构无损检测技术在桥梁工程中的应用 [J]. 江西建材, 2024, (04): 5-7.
- [2] 陆方平. 超声波技术在桥梁检测工程中的应用 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6 (14): 130-132.
- [3] 刘勇, 任东华. 无损检测技术在桥梁养护管理中的应用 [J]. 运输经理世界, 2025, (19): 133-135.
- [4] 高龙飞. 新型试验检测技术在公路桥梁工程检测中的应用研究 [J]. 南国博览, 2025, (03): 56-59.
- [5] 杨友震, 闫国庆. 新型无人机检测技术在桥梁检测工程中的应用策略 [J]. 智能建筑与智慧城市, 2024, (05): 27-29.
- [6] 桂永旺, 吉建军. 无损检测技术在道路桥梁检测中的应用研究 [J]. 建筑与装饰, 2023(4): 86-88.
- [7] 刘景祥. 桥梁工程质量控制中无损检测技术的运用研究 [J]. 安防科技, 2020, 000(025): P.173-173.
- [8] 孙红兵. 无损检测技术在道路桥梁工程中的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2025(16).
- [9] 张登峰. 无损检测技术在道路桥梁工程中的应用研究 [J]. 工程研究与实用, 2022. DOI:10.37155/2717-5316-0317-58.
- [10] 陈兵. 无损检测技术在桥梁工程质量检测中的应用研究 [J]. 运输经理世界, 2021(034): 000.