

基于多源传感的城市桥梁运营状态实时评估方法

满建琳

徐州市市政设计院有限公司, 江苏 徐州 221002

DOI:10.61369/ME.2026010029

摘 要 : 城市桥梁的运营状态评估, 简单来讲就是给桥梁做“全身体检”, 确保安全、稳定地服务市民。本文将基于实测数据, 融合多源传感技术, 构建“数据采集 – 评估分析 – 综合管理 – 决策应用”四层架构的桥梁运营状态安全自动化评估系统, 实现桥梁实时监测、承载能力智能评定与全生命周期管理, 服务城市交通运行的日常化、制度化。

关 键 词 : 多源传感; 城市桥梁; 运营状态; 实施评估

Real-time Evaluation Method for Urban Bridge Operation Status Based on Multi-source Sensing

Man Jianlin

Xuzhou Municipal Design Institute Co., Ltd., Xuzhou, Jiangsu 221002

Abstract : The operation status assessment of urban bridges is essentially a "full-body examination" of the bridges to ensure their safety and stability in providing services to the public. This article will, based on measured data and integrating multi-source sensing technologies, construct a bridge operation status safety automated assessment system with a four-layer architecture of "data collection – assessment analysis – comprehensive management – decision application", achieving real-time monitoring of bridges, intelligent assessment of their bearing capacity, and full life cycle management, to serve the daily and institutionalized operation of urban transportation.

Keywords : multi-source sensing; urban bridges; operation status; implementation assessment

引言

城市桥梁运营状态实时评估对提高桥梁的运营水平、降低运用成本、延长使用寿命、确保行车安全等方面具有重要作用, 实现对城市桥梁的全面检测与预警, 可最大限度地提高桥梁的运营效率和安全性^[1]。为更好地开展城市桥梁运营状态实时评估, 应积极引入多源传感检测系统, 建立行之有效的桥梁运营维护诊断技术体系。有效为桥梁管理人员提供详实的数据支持, 加强对城市桥梁全生命周期的安全管控, 提高桥梁管理效率和决策科学性, 实现更加智能化的城市桥梁健康管理, 为桥梁安全运营筑牢坚实保障。

一、城市桥梁检测评估的核心目标

(一) 安全保障

城市桥梁检测与评估, 是确保桥梁安全运营、延长使用寿命的重要环节。城市桥梁检测核心目标是通过承载能力复核、耐久性衰变建模及剩余寿命预测, 为大中修工程、加固改造或报废重建等重大决策提供科学依据^[2]。桥梁检测安全保障需要识别裂缝、腐蚀、变形等隐患, 预防坍塌事故。更要及时掌握桥梁的基本情况, 并采取相应的养护措施。确保桥梁在设计使用年限内安全运营, 保障公众生命财产安全, 促进城市交通基础设施的稳定运行。

(二) 延长寿命

城市桥梁检测主要分为常规定期检测和结构定期检测。通过定期检测, 全面排查桥梁结构的裂缝、腐蚀、变形等损害问题, 为后续针对性维修提供依据, 避免小问题演变为重大结构损伤。同时, 管理人员应利用无损检测技术(超声波、红外热成像、钢筋锈蚀检测等)和力学模型分析, 系统评估桥梁材料性能的退化程度、承载能力以及剩余使用寿命。通过桥梁检测评估制定科学养护、加固以及改造计划, 延缓结构性能的衰减。

(三) 经济优化

“经济优化”层面城市桥梁检测评估, 需要准确掌握桥梁的病害程度与结构状况, 要制定针对性的养护措施, 避免盲目维修

或过度维修。管理人员更要根据检测结果进行分级管理，应优先对技术状况较差的桥梁进行养护与维修，确保有效的养护资金发挥最大效益^[3]。通过科学的检测评估手段，实现桥梁养护管理的精细化与智能化，保障桥梁的安全运营，降低全生命周期的成本，避免资源浪费，通过精检精修延长桥梁的服役年限。

（四）合规管理

城市桥梁检测需要满足《城市桥梁养护技术标准》（CJJ/T 233-2023）等法规要求，更要围绕安全底线、数据规范、责任落实、持续改进等，通过统一数据真实、准确、完整，制定符合法规政策的检测报告，为桥梁的养护决策提供实践依据。管理人员在桥梁检测中，应将责任具体到产权人、检测机构以及监管部门中，确保桥梁检测工作的有序开展，做到违规行为“可追溯、可问责”，以此实现桥梁安全与长效运营的双重目标。

二、将多源传感融入城市桥梁运营状态实时评估的价值

多源传感主要包括结构健康检测传感、环境检测传感、裂缝检测传感以及数据采集终端。将多源传感器引入城市桥梁运营状态实施评估中，可实时获取桥梁的应力、震动以及变形等关键参数，更能发现结构异常（裂缝扩展、构建损坏等方面）。利用5G、NB-IoT等无线通信技术，将数据实时传输到云端或本地服务器。相关管理人员便可通过多元传感器的分析数据，及时调整桥梁结构状态，避免因结构失效引发事故安全。城市桥梁运营状态评估环节中多元传感器的应用，不仅推动了传感器技术的创新与进步，更提高了桥梁检测的精准度与可靠性。促进了科技发展和交叉应用，为城市基础设施建设实施智能化管理提供技术支持。

三、多源传感在城市桥梁运营状态实时评估中的应用

多源传感能实现对桥梁结构响应、环境参数等多源数据的实时采集，并借助网络通信技术将数据传输至处理中心，管理人员可利用数据分析算法，对城市桥梁健康状况进行实时评估，为交通安全预警提供数据支持^[4]。实时监测层面，管理人员可通过数据采集、评估分析、精准防控、决策应用四维结构，加强多源传感在城市桥梁运营状态实时评估中的应用效果，构建桥梁的数字孪生模型，直观呈现桥梁状态，保障城市桥梁通行安全。

（一）核心定位：数据采集，基础支撑

“数据采集层面”需要通过多源传感结合“在线检测”以及“人工检测”解决传统检测中“碎片化”的痛点。更要通过传感器网络实时采集桥梁变形、环境湿度等数据，通过定期巡检，解决不同场景下的高精度感知与决策难题。围绕数据采集提供桥梁运营状态的基础支撑，实现桥梁结构全生命周期状况的评估、预测以及预警功能建设。

1. 在线检测

《“十四五”交通领域科技创新规划》明确要求突破基础设施服役状态智能感知与结构无损检测关键技术，为桥梁检测技术

创新提供了政策指引。在线检测可通过多源传感（加速度传感器、螺旋仪、压力传感器、温度传感器、湿度传感器等），实时检测桥梁的结构变形、应力分布以及环境等问题，为桥梁健康状况提供全面的数据支持。管理人员也可搭在高分辨率摄像头、红色热成像设备以及激光雷达等传感器，利用无人机实现对桥梁表面状态的快速采集。结合多源传感实现桥梁的数据收集，可保证检测的精准度。也可进一步提升数据采集的全面性，实现桥梁结构状态信息的多层级呈现^[5]。

2. 人工检测

除了“在线检测”，城市桥梁管理人员也需要定期补充视觉巡检（裂缝观测、锈蚀评估）、专项检测（如超声探伤）等自动化监测难以覆盖的细节数据。在多源传感器技术广泛应用背景下，人工智能仍具有不可替代的作用。首先，从复杂场景处理分析。对于传感器难以覆盖的特殊区域（桥梁内部复杂结构），管理人员可通过人工检测，借助专业工具（爬壁机器人）进行桥梁近距离的勘测，从人工视角分析桥梁的安全性。其次，从数据验证与校准分析。人工干预可及时发现传感器数据是否准确，确保数据准确性。尤其是在传感器出现工作故障或数据异常时，人工测验可替代传感器工作。未来，人机协同将成为桥梁检测的主流模式，可进一步推动城市基础设施管理向着智能化、精细化的方向发展^[6]。

（二）桥梁评估：评估分析，提供支持

城市桥梁评估阶段需要融合多源传感呈现的数据，并搭建仿真模型构建可视化展示评估结果。实时评估桥梁承载能力、外部负荷等，推动评估从“定期人工”转向“持续自动”。通过深度学习算法，融合数据实现虚拟与现实的互动，系统展示桥梁检测数据、健康状态以及预警信息，提前发现桥梁潜在的结构问题、养护问题，提供科学的维护建议。

1. 数据融合

数据采集后 AI 智能分析技术，是实现传感器融入城市桥梁检测智能化的核心环节。多源传感器数据融合，是将不同传感器采集到的数据进行整合，消除数据之间的误差与干扰。城市桥梁检测中，常用的数据融合方法主要包括（卡尔曼滤波、粒子滤波、神经网络等）。通过对多源传感器数据的融合，可综合反映桥梁的实时状态，实现桥梁检测数据的高效、安全存储管理，为桥梁健康状态提供数据支撑。总之，多源数据融合分析技术，提升了对桥梁整体状态的评估能力，更增强了桥梁结构损伤特征的提取能力，提高实时监测准确性^[7]。

2. 仿真分析

香港理工大学研发的“智慧桥面高效检测模型”，通过 AI 处理无人机采集的数据，即使在恶劣的天气环境中，也可达到优于传统方法的检测准确度。城市桥梁检测中应借助模型实现外部荷载分析（车辆荷载、温度荷载等方面）、桥梁实时评估、承载能力等方面评定。有效将“理论规范”与“实测数据”结合，提供多维度的可视化工具，为维护决策提供依据^[8]。相关研究表明结合测量软件与 AI 能力，可生成高质量的3D桥梁模型，更能实现准确的桥梁评估，提高实时监测的准确性，形成数据采集、传

输、处理到决策支持的全链条技术体系。

（三）投入功能：综合管理，精准防控

多源传感器融合技术历经军事雏形、理论构建、工程落地、智能升级阶段，现已形成智慧城市赋能的分布式协同新范式。城市桥梁管理人员需要结合多源传感器特点，实现对桥梁的综合性管理。并搭建“WEB+GIS+BIM”管理平台，从环境变化、车辆统计、桥梁安全度评定、桥梁性能退化情况入手，快速做出桥梁管理决策，实现高效率分析。

1.搭建 WEB+GIS+BIM的综合管理平台

将多源传感器融入桥梁检测中，需要将桥梁数据与空间位置关联，方便定位桥梁空间位置以及周边环境，就此实现区域化桥梁群管理与可视化展示。其次，管理人员可通过桥梁 BIM模型集成构件属性与检测数据，并与评估层的 CAE仿真模型联动，形成全生命周期信息集成及展示。更要结合“Web”端提供网页端访问入口、支持多终端访问，构建统一的桥梁数据管理与展示平台，实现对桥梁管理平台的系统化建设，让人工智能桥梁检测技术从“理论研究”走向“工程实践”，提高检测精度与效率^[9]。

2.城市桥梁管理

整合多源传感数据进行城市桥梁管理，需要通过养护管理决策（根据桥梁性能退化情况制定养护计划，通过维修或者加固保障桥梁的安全性）；车辆通行管理（管理人员应通过车流量、超载统计等方面，结合限载或者限行优化交通管制措施）；应急事件管理（需要针对交通事故、桥梁结构损伤等方面，快速制定出应急预案）；预防性评估与处置（应通过桥梁性能退化及时预测未来风险，并采取预防措施）。通过综合数据提出桥梁管理方案，保障评估结果的实践应用，提前采取桥梁养护管理措施，搭建智能化管理场景。

（四）对接平台：决策应用，破解难题

综合多源传感数据分析，需要将决策落实到桥梁管理实践

中。管理人员需从养护管理、车辆通行、应急事件、预防性评估与处置等方面入手，形成“数据采集→分析评估→综合管理→决策支持”的闭环。通过实时掌握城市桥梁的安全状态、性能等，提出精准预测、养护决策等，提升桥梁运营管理效率与安全性，实现预测性维护^[10]。

为提高多源传感器融合后数据的可用性，需要对数据进行预处理，提高数据的可解释性和实用性，实现桥梁病害的精细化采集和三维可视化。在城市桥梁检测环节中，管理人员需要融合检测数据和检测数据，加强对桥梁承载能力进行科学评估，并结合桥梁的使用年限以及交通流量、环境因素等方面，及时发现桥梁结构的微小变化和潜在隐患，提高巡检的效率和准确性，系统分析桥梁的性能退化趋势，预测未来可能会出现的问题，为决策建设结构化的数据支撑，进一步为城市桥梁养护计划提供科学依据。

四、结论

结合以上研究表明，新形势下通过自动化、智能化的检测管理手段，实现科学化、高效率城市桥梁运营状态实时评估，达成保证民众出行通常安全目标已经成为必然选择。将多源传感应用于城市桥梁运营状态实时评估中，能通过系统化检测与智能化分析，为建设“韧性安全城市”提供核心保障。未来发展中，城市桥梁管理正从“被动维修”转向“主动预防”，催生“发现—分析—处置”全自动闭环能力，推动城市桥梁健康管理迈入“智慧时代”。

参考文献

[1]赵小龙,刘健,韩旭.某市运营期城市桥梁安全风险评估方法研究[J].武汉理工大学学报(信息与管理工程版),2024,46(05):695-699.
[2]唐葆森.运营阶段城市桥梁附属设施常见病害原因分析及改进措施[J].四川水泥,2024,(06):263-265.
[3]刘健.基于模糊 AHP-DEMATEL的城市桥梁运营期安全风险评估研究[D].安徽建筑大学,2024.
[4]刘蓉,吴霜.基于五元联系数的城市桥梁运营期风险态势评估[J].安徽工业大学学报(自然科学版),2023,40(04):434-441.
[5]唐安雷,周貽港.分布式光纤光栅传感技术在桥梁自动化监测中的应用[J].工程设计与设计,2025,(17):128-130.DOI:10.13616/j.cnki.gcjsysj.2025.09.037.
[6]郑燕红.多源协同传感机制与数据融合驱动的桥梁结构诊断系统研究[J].科技视界,2025,15(15):54-56.
[7]徐伟昌,谭社会,杨兴旺,等.基于多源传感数据的千米级公铁两用桥梁线形自动化监测技术[J].铁道建筑,2024,64(03):66-71.
[8]李高堂.城市桥梁施工和运营阶段智能监测研究现状分析[J].广州建筑,2021,49(04):52-55.
[9]冯源.城市桥梁定期检测技术研究[J].工程技术研究,2020,5(19):73-74.
[10]林铭.新型传感技术在桥梁检测智能化监测中的应用探索[J].张江科技评论,2025,(06):87-89.