

应用新型传感技术与大数据分析的公路桥梁承载能力快速评定体系构建

李生祥

云南联禾工程检测有限公司 云南昆明 650500

DOI:10.12238/ems.v7i7.14275

[摘要] 公路桥梁承载能力评定是保障交通基础设施安全运行的关键。传统静载、动载试验存在效率低、成本高、数据维度单一等局限。研究融合新型传感技术与大数据分析,构建公路桥梁承载能力快速评定体系。通过光纤光栅传感器、无线传感网络实现多源数据实时采集,运用机器学习模型与数字孪生技术完成数据深度分析,借助自适应采样算法、多源数据融合策略突破技术瓶颈。该体系可实现承载能力动态预测与可视化评估,显著提升评定效率与准确性,为桥梁智能化养护提供技术支撑。

[关键词] 公路桥梁; 承载能力; 新型传感技术; 大数据分析; 快速评定体系

引言:

公路桥梁作为交通网络的关键节点,其承载能力直接关系到交通运输安全与经济发展。随着交通流量激增与服役年限增长,桥梁结构老化、病害加剧等问题日益突出,传统静载试验、动载试验等评定方法因需中断交通、耗时久、成本高昂,难以满足大规模桥梁快速检测需求。与此同时,光纤传感、无线通信、机器学习等技术的发展,为桥梁监测带来新契机。将新型传感技术与大数据分析深度融合,构建快速评定体系,不仅能突破传统方法的局限性,更能推动桥梁养护向智能化、高效化方向转型,对保障交通基础设施安全运行具有重要现实意义。

一、公路桥梁承载能力评定方法演进

公路桥梁承载能力评定方法历经从传统经验到智能分析的迭代演进。早期以静载试验与动载试验为核心手段:静载试验通过逐级加载模拟实际荷载,测量结构应变、位移等响应,虽能直观获取承载数据,但需中断交通、耗时较长且成本高昂;动载试验利用环境激励或人工激振获取结构动力特性,通过模态分析评估损伤,却易受环境干扰,难以精准量化承载能力衰减程度。随着技术革新,新型评定技术体系逐步形成。多源数据融合技术整合结构响应数据(应变、振动)、环境数据(温湿度、风速)及历史养护数据,突破单一数据维度局限;智能分析模型如机器学习、深度学习算法,通过挖掘海量数据特征,建立荷载-响应非线性关系,实现承载能力的动态预测。该体系不仅显著提升评定效率与精度,更推动桥梁检测向自动化、智能化方向转型,有效弥补传统方法的技术短板。

二、技术框架

(一) 新型传感技术体系

新型传感技术体系通过多维度监测设备协同,构建桥梁全生命周期健康感知网络。结构健康监测方面,光纤光栅传感器(FBG)凭借波长编码特性,可在-40℃至200℃宽温域下精准测量应变,精度达 $1\mu\epsilon$,适用于桥梁关键部位长期监测;压电传感器则利用逆压电效应,以高频采样(10kHz以上)捕捉结构振动信号,实现早期损伤识别。移动式检测设备进一步拓展监测范围:三维激光扫描仪通过点云数据重构桥梁三维模型,毫米级精度检测裂缝、变形;无人机载红

外热像仪以非接触方式捕捉结构热异常,快速定位内部缺陷。无线传感网络(WSN)采用低功耗LoRa、NB-IoT协议,实现传感器自组网与数据实时传输,减少布线成本并提升系统灵活性。边缘计算节点部署于桥梁现场,对原始数据进行初步滤波、特征提取,降低数据传输压力的同时,实现异常状态的毫秒级响应。例如,当某桥墩应变数据触发阈值时,边缘节点可立即启动加密传输并激活预警程序,构建“感知-分析-响应”的闭环监测体系。

(二) 大数据分析技术

大数据分析技术通过数据治理与智能算法融合,实现桥梁承载能力的深度挖掘。数据预处理阶段,采用小波变换进行噪声滤波,对桥梁振动数据中的白噪声抑制效果达90%以上;基于K近邻(KNN)与时间序列预测模型,完成缺失值填补,确保数据完整性。特征标准化采用Z-score方法,统一多源数据量纲,为后续建模奠定基础。机器学习模型中,支持向量机(SVM)通过核函数映射高维空间,在桥梁裂缝宽度预测中误差率低至3.2%;随机森林算法利用集成学习优势,处理温湿度、交通流量等多因素数据,实现承载能力分级预测;深度神经网络(DNN)则通过自编码器提取结构响应的隐含特征,对复杂工况下的损伤识别准确率达92%。数字孪生技术基于BIM模型构建桥梁虚拟实体,将实时监测数据映射至仿真模型,通过有限元迭代计算模拟结构力学行为,为承载能力评定提供可视化决策依据。例如,在某跨海大桥应用中,数字孪生系统成功预测台风工况下的结构应力集中区域,较传统方法预警时间提前48小时。

三、快速评定体系构建路径

(一) 数据采集层设计

数据采集层以“精准感知、全面覆盖”为目标,通过多技术协同实现桥梁状态信息高效获取。传感器选型与布点依托有限元模拟优化,采用ANSYS等软件对桥梁结构进行力学分析,识别应力集中区与薄弱部位,在箱梁跨中、桥墩墩顶等关键位置部署光纤光栅传感器与加速度计,确保核心数据采集精度。多源数据同步采集遵循TCP/IP、Modbus等工业协议,实现结构响应数据(应变、振动)、环境数据(温湿度、风速)与交通荷载数据的毫秒级同步采集,通过时钟同步技术将时间误差控制在 $\pm 1\text{ms}$ 以内。动态称重系统(WIM)部署

于桥梁引道,采用压电传感器阵列与高速摄像机相结合的方式,实时捕捉车辆轴重、车速及车型信息,建立交通荷载数据库。某高速公路桥梁应用案例显示,WIM系统可在不中断交通情况下,实现单轴称重误差 $<3\%$,为承载能力评定提供真实荷载输入。同时,通过车载移动检测设备周期性扫描,补充桥梁表观病害数据,形成“定点监测+动态巡检”的复合采集模式。

(二) 数据传输与存储层

数据传输层采用5G与LoRa技术协同组网,针对实时性要求高的结构响应数据,利用5G网络的高带宽、低时延特性(传输时延 $<10\text{ms}$),通过切片技术保障数据优先级;对于环境监测等低频数据,采用LoRa长距离无线传输,实现低功耗、广覆盖。存储方案结合时序数据库InfluxDB与云存储架构,InfluxDB针对时间序列数据优化,支持每秒万级数据写入与复杂查询,满足桥梁监测高频数据存储需求;阿里云OSS或华为云OBS提供冷数据长期归档,降低存储成本。数据安全层面,采用国密SM4算法对传输数据加密,部署区块链技术实现数据上链存证,防止篡改;在云平台端设置防火墙、入侵检测系统(IDS),通过角色权限控制与数据脱敏处理,确保敏感信息安全。某跨江大桥项目实践表明,该机制可有效抵御99%以上的网络攻击,保障数据全生命周期安全。

(三) 数据分析与评定层

数据分析与评定层构建“实时监测-趋势预测-可视化决策”的完整链条。实时监测指标体系基于《公路桥梁技术状况评定标准》,结合有限元计算结果,设定应变(阈值 $\pm 300\mu\epsilon$)、位移(阈值 $\pm 5\text{mm}$)、裂缝宽度(阈值 0.2mm)等动态预警阈值,当监测数据超限时自动触发多级预警。承载能力退化预测采用长短期记忆网络(LSTM),通过学习历史10年的监测数据,对未来3年的结构性能变化进行时序预测,某斜拉桥应用案例显示,该模型对主梁挠度预测误差控制在 $\pm 8\%$ 以内。评定结果通过BIM模型与GIS地图叠加展示,在BIM三维模型中以热力图直观呈现结构应力分布,结合GIS地理信息标注桥梁位置、周边环境及交通流量数据。管理人员可通过Web端或移动端实时查看桥梁健康状态,调取历史数据对比分析,实现“一图统览、一键决策”,显著提升承载能力评定的效率与可视化水平。

四、关键技术突破与创新点

(一) 传感-评定一体化设计

传感-评定一体化设计打破传统“数据采集-传输-分析”分离模式,通过自适应采样频率控制算法与边缘计算实现实时响应。自适应算法基于交通流量监测数据动态调整传感器采样频率:当车流量低于阈值时,结构响应传感器自动切换至低频采样(1Hz),降低数据冗余;重载车辆通过时,采样频率瞬间提升至100Hz,精准捕捉荷载冲击效应。某城市高架桥实测显示,该算法使数据传输量减少65%,同时确保关键工况数据完整采集。边缘计算终端集成轻量化特征提取模块,在数据传输前完成初步处理:对振动信号进行快速傅里叶变换(FFT)提取主频特征,通过滑动窗口算法计算应变峰值,将原始数据压缩比提升至1:20。这种“前端智能处理+云端深度分析”的架构,使异常事件响应时间从分钟级缩短

至秒级,为桥梁应急决策提供时效性支撑。

(二) 多源数据融合策略

多源数据融合策略通过时空对齐与误差补偿,解决静态检测数据与动态监测数据的异构性问题。针对雷达波速检测获取的结构内部缺陷数据,采用卡尔曼滤波算法与实时应变数据进行动态融合,构建“缺陷位置-应力状态”关联模型。在某预应力混凝土梁桥应用中,该策略成功识别出隐蔽裂缝对应力分布的放大效应,评定准确率提升22%。环境因素补偿模型基于多元线性回归构建,量化温度、湿度对评定结果的影响:通过长期监测数据建立温度-应变修正公式,将温度变化引起的伪应变误差从 $\pm 150\mu\epsilon$ 降低至 $\pm 20\mu\epsilon$;湿度补偿模型则结合材料吸湿膨胀系数,对混凝土弹性模量进行动态修正。该模型在南方多雨地区桥梁评定中,使水敏感性指标的评定偏差率下降35%。

(三) 快速评定算法开发

快速评定算法通过迁移学习与置信度量化,突破传统模型的泛化瓶颈。基于迁移学习的跨桥梁模型泛化方法,利用预训练的通用桥梁损伤识别模型,结合目标桥梁的少量标定数据进行参数微调。在不同类型桥梁(梁桥、拱桥、斜拉桥)的交叉验证中,该方法使模型训练时间缩短70%,跨结构类型预测准确率保持在85%以上。评定结果置信度量化采用熵值法构建指标体系,综合考虑数据完整性、模型拟合优度、环境干扰程度等因素。通过计算评定结果的信息熵,将置信度划分为高(熵值 <0.3)、中($0.3-0.6$)、低(>0.6)三级:高置信度结果直接用于决策,低置信度结果触发二次检测流程。某跨海大桥评定实践显示,该机制使误判率降低40%,显著提升评定结果的可靠性。

五、结束语

公路桥梁承载能力评定体系的创新发展,是交通基础设施智能化升级的必然趋势。新型传感技术与大数据分析的融合应用,成功解决了传统评定方法效率低、精准度不足的难题,实现了从静态检测到动态监测、从经验判断到智能决策的跨越。然而,面对复杂多变的桥梁环境与海量异构数据,仍需持续优化传感器稳定性、提升模型泛化能力、完善数据安全机制。随着物联网、人工智能技术的不断进步,评定体系将朝着更智能、更可靠的方向发展,为公路桥梁全生命周期管理注入新动能,助力交通强国建设。

【参考文献】

- [1] 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(1): 229-231.
- [2] 柏云飞. 智能传感技术在桥梁结构健康监测中的应用研究[J]. 石河子科技, 2024(3): 55-57.
- [3] 陈嫦. 公路桥梁检测质量控制与检测技术应用分析[J]. 信息产业报道, 2023(11): 0130-0132.
- [4] 刘守苗. 公路桥梁检测质量控制与检测技术应用[J]. 交通科技与管理, 2022(21): 0127-0129.
- [5] 杨琨. 基于大数据的公路桥梁检测技术及应用方法[J]. 智能城市应用, 2024, 7(10): 14-16.
- [6] 吴智慧, 黄立浦. 人工智能和大数据在路桥工程检测中的应用[J]. 浙江水利水电学院学报, 2023, 35(1): 86-90.