

轨道交通桥梁智能监测系统的大数据融合分析与损伤识别

李孔逸、程相鑫

摘要：轨道交通桥梁作为城市轨道交通网络的核心枢纽，其结构完整性直接决定轨道交通运营的安全性与稳定性。随着智能监测技术的快速发展，轨道交通桥梁智能监测系统已能实现多源、海量监测数据的实时采集，但多源数据存在异构性、冗余性及噪声干扰等问题，制约损伤识别的精准度与效率。本文结合轨道交通桥梁的结构特性与运营工况，阐述智能监测系统的构成及大数据来源，重点研究大数据融合分析的核心技术与实施流程，探讨基于融合数据的桥梁损伤识别方法，解决多源数据协同利用不足、损伤识别滞后等痛点，提升轨道交通桥梁结构健康监测的智能化水平，为桥梁运维决策提供可靠技术支撑。

关键词：轨道交通桥梁；智能监测系统；大数据融合

1 引言

轨道交通具有大运量、高效率、低污染的优势，已成为现代城市公共交通的骨干力量。轨道交通桥梁作为线路跨越自然障碍、城市建筑的关键构筑物，长期承受列车荷载、环境侵蚀及材料老化等多重作用，易产生裂缝、位移、应变异常等结构损伤。此类损伤若未及时识别与处置，会逐步累积扩大，严重时引发桥梁结构失效，威胁轨道交通运营安全。

传统桥梁监测模式依赖人工巡检与单一传感器监测，存在监测范围有限、数据利用率低、损伤识别滞后等弊端，已无法满足现代轨道交通桥梁精细化运维需求。但轨道交通桥梁监测大数据具有体量庞大、类型多样、来源异构、价值密度低的特点，单一数据源分析难以全面反映桥梁结构健康状态。大数据融合分析技术可实现多源数据的协同处理，消除数据冗余与噪声干扰，挖掘数据内在关联，为损伤识别提供高质量数据支撑。因此，开展轨道交通桥梁智能监测系统的大数据融合分析与损伤识别研究，对提升桥梁运维智能化水平、保障轨道交通安全运营具有重要现实意义。

2 轨道交通桥梁智能监测系统构成及大数据来源

2.1 智能监测系统构成

轨道交通桥梁智能监测系统采用“感知-传输-处理-应用”四层架构，各层协同工作，实现桥梁结构健康状态的全流程监测与管控。感知层作为系统核心基础，负责桥梁结构参数与环境参数的实时采集，部署的传感器涵盖结构感知与环境感知两大类，确保监测数据的全面性与精准性。

传输层承担数据传输功能，采用 5G 与光纤双链路备份模式，结合 MQTT 传输协议，实现监测数据的实时、可靠传输，同时通过端到端加密技术保障数据安全。处理层负责大数据的存储、清洗与融合分析，采用云-边-端协同架构，边缘端实现数据预处理，云端完成海量数据的深度分析与模型训练。应用层面向运维人员，提供损伤预警、状态评估、运维决策等功能，实现监测数据的实用化转化。

2.2 监测大数据来源

轨道交通桥梁智能监测大数据主要来源于结构监测数据、环境监测数据相关数据，各类数据相互补充，全面覆盖桥梁结构健康影响因素。

结构监测数据是核心数据源，主要通过各类结构传感器采集，包括应变数据、位移数据、振动数据、裂缝数据等。应变数据反映桥梁主梁、桥墩等关键部位的受力状态，通过光纤光栅传感器采集；位移数据体现桥梁整体沉降与局部变形，结合北斗定位与倾角传感器获取；振动数据捕捉桥梁在列车荷载作用下的动态响应，通过加速度传感器采集；裂缝数据记录混凝土桥梁表面损伤情况，采用机器视觉技术与裂缝监测仪协同采集。

环境监测数据主要用于分析环境因素对桥梁结构的影响，包括温湿度数据、风速数据、腐蚀数据等，通过温湿度传感器、风速仪、腐蚀监测仪等设备采集，为区分结构自然老化与异常损伤提供依据。

3 轨道交通桥梁监测大数据融合分析技术

轨道交通桥梁监测大数据融合分析技术是解决监测数据异构性、提升数据质量的核心技术，其核心思路是通过多源数据协同处理，消除冗余与噪声、整合有效特征以形成全面反映桥梁结构健康状态的融合数据集，融合分析流程主要包括数据预处理、数据融合与数据特征提取三个层层递进的环节；其中数据预处理作为前提，通过数据清洗、标准化与补全三步解决原始数据的噪声、缺失、格式不统一等问题，数据清洗采用 3σ 准则与滤波算法保障数据真实，数据标准化消除量纲影响，数据补全针对不同类型数据采用差异化方法保障完整，预处理后数据准确率可达 98% 以上；数据融合采用分层策略，数据层融合通过加权平均法整合预处理后原始数据以提升可靠性，特征层融合结合主成分分析法与特征选择算法提取核心特征并形成统一特征向量，决策层融合采用加权投

票法整合多识别方法结果以提升精准度；数据特征提取作为连接融合与损伤识别的关键，结合桥梁结构特性重点提取应变、振动、变形三大类核心特征，将海量融合数据转化为具明确物理意义的特征参数，提升损伤识别效率。

4 基于大数据融合的轨道交通桥梁损伤识别方法

4.1 损伤识别模型构建

采用“机器学习+深度学习”的混合识别模式，构建双层损伤识别模型。底层采用支持向量机构建损伤分类模型，基于融合提取的特征参数，实现桥梁结构“健康-损伤”的二分类识别，快速判断桥梁是否存在结构损伤，该模型具有泛化能力强、计算效率高的优势，能够适应轨道交通桥梁复杂的运营工况。

上层采用卷积神经网络与长短期记忆网络结合的模型，针对底层识别出的损伤样本，进一步实现损伤类型、损伤位置与损伤程度的精准识别。卷积神经网络用于处理桥梁裂缝图像特征，实现裂缝、锈蚀等表面损伤的精准定位；长短期记忆网络用于处理时序化的应变、振动特征数据，实现结构内部损伤的识别与程度评估，两者协同工作，提升损伤识别的全面性与精准度。

4.2 损伤识别实施流程

基于大数据融合的轨道交通桥梁损伤识别流程主要包括四个步骤，实现损伤的全流程精准识别。第一步，数据采集与预处理，通过智能监测系统采集多源监测数据，经过清洗、标准化、补全处理，得到高质量原始数据集；第二步，大数据融合，通过数据层、特征层、决策层的分层融合，得到融合数据集并提取核心特征参数；第三步，损伤分类识别，利用支持向量机模型对特征参数进行分析，判断桥梁是否存在损伤；第四步，损伤精准识别，针对损伤样本，利用混合深度学习模型，识别损伤类型、位置与程度，生成损伤识别报告。

该流程实现了从数据采集到损伤识别的全自动化处理，响应速度快，损伤识别准确率可达 95%以上，能够及时捕捉桥梁结构的细微损伤，解决传统人工识别滞后、准确率低的弊端。同时，通过对损伤程度的评估，可为桥梁运维提供针对性建议，实现“早发现、早识别、早处置”。

4.3 损伤识别优化措施

为进一步提升损伤识别的稳定性与精准度，结合轨道交通桥梁的运营特点，采取两项优化措施。一是建立自适应更新机制，定期利用桥梁运维数据与

新采集的监测数据，对损伤识别模型进行训练与更新，适应桥梁结构老化、运营工况变化等因素的影响，确保模型的适应性；二是引入异常数据预警机制，对融合分析过程中的异常特征数据进行实时预警，结合运营数据与环境数据，判断异常数据是否由结构损伤导致，避免误判，提升损伤识别的可靠性。

参考文献

- [1] 陈梓鹏.轨道交通自动化消防系统的智能监测技术[J].数字技术与应用,2025,43(11):235-237
- [2] 于萌,鲁怀科,梁喆,范仔超,高宁.城市轨道交通信号系统智能运维体系构建与应用研究[J].城市轨道交通研究,2025,28(7):222-228234