基于BIM技术的多维度桥梁健康监测方法研究

邓旺旺
华虔建设集团有限公司 江西 赣州 341000

摘 要 针对传统桥梁健康监测系统存在数据整合不足，实时性得不到保证，可视化表现差的问题，这项研究给出了依靠BIM技术的多维度桥梁状态评价方案，此法凭借综合起来考虑几何参数、力学性能、环境因素和材料特性这组指标体系展开工作，并且对视觉感知部分、振动监测部分、温湿度收集部分以及应力形变测定等主要方面实施改进更新，采用拉依达准则来剔除掉那些异常数值，然后再用小波变换来进行降噪处理；利用BIM平台自身集成度非常高并且能够动态互动的特点，创建起传感器运作维护管理系统和在线故障预报引擎，在三维虚拟空间里直观地显示整个桥的反应情形，模仿汽车重量施加的压力效果进行模拟运算，以此加快决策的速度并提升准确率；采取多元映射算法改善不同模态之间的联系机制，把平时常规运行赋予精确预测的支持，在危急时刻也能够帮忙调配应急调度指挥任务。该方法利用多源数据融合技术，极大地提高了桥梁健康监测的系统性、精准度和智能化程度，为达成桥梁全生命周期的安全管理给予了可信的理论支持与实际参照。

关键词 BIM技术；桥梁健康监测；多源数据融合

Multidimensional Bridge Health Monitoring Method Based on BIM Technology

Deng Wang-wang
Huaqian Construction Group Co., Ltd., Ganzhou 341000, Jiangxi Province, China

Abstract To address insufficient data integration, poor real-time performance, and inadequate visualization in traditional bridge health monitoring, this study proposes a BIM-based multidimensional evaluation scheme. The method integrates geometric parameters, mechanical properties, environmental factors, and material characteristics, with improvements in visual perception, vibration monitoring, temperature-humidity collection, and stress-strain measurement. Anomalies are removed using the Pauta criterion, followed by wavelet transform for noise reduction. Leveraging BIM's high integration and dynamic interactivity, a sensor maintenance system and online fault prediction engine are established to visualize bridge responses in 3D and simulate vehicle load effects, accelerating decision-making. A multivariate mapping algorithm enhances cross-modal interaction, providing predictive support for routine operations and emergency dispatch. This multi-source data fusion approach significantly improves monitoring systematization, precision, and intelligence, offering reliable theoretical support for full-lifecycle bridge safety management.

Key words BIM Technology; Bridge Health Monitoring; Multi-Source Data Fusion

桥梁结构的完整性是交通安全与区域发展的关键基础。随着使用年限增长、荷载增加及自然侵蚀，桥梁常出现裂缝扩展、几何变形和材料退化等病害。若缺乏系统监测与维护，极易引发安全隐患。传统健康评估方法存在数据分散、信息孤立和反馈滞后等问题，难以适应当前的精细化管理需求[1]。

BIM技术作为一种数字化集成管理手段，通过构建包含几何、属性、时间及成本等多维信息的三维模型，可实现工程全生命周期的信息共享与协同。将BIM引入桥梁健康监测领域，能够突破传统单一检测的技术局限，有效整合并深入挖掘跨源异构数据，从而为精确评估桥梁运行状态提供创新解决方案[2]。

1 BIM技术的基本内容与特征

1.1 BIM技术的基本内容

BIM技术作为21世纪信息化的重要成果，通过数字化手段构建完整的系统化信息模型。在桥梁养护应用中，它可将传统二维设计转化为三维可视化表达，为质量监督与进度管理提供直观支持。其核心功能在于整合工程数据，并借助参数化算法实现成本预估与预算控制，对提升养护单位经济效益具有关键战略意义[3]。

1.2 BIM技术的特征

1.可视性。可视性是BIM技术的突出优势，它通过三维建模打破传统监测与养护模式的限制，依托信息化平台实现数据搜

集、整合、分析与模型创建的一体化操作，显著降低施工安全风险，并极大提升工程项目的总体运行效率。

2.动态性。BIM技术在桥梁养护管理中的应用具有动态性优势。在维护环节出现异常时，传统人工数据采集、处理和统计耗时费力，容易降低效率。BIM技术能实现信息的实时更新与自动保存，为后续工作提供有力数据支持，并大幅提高整个流程的运行速度与效率。

3.模拟性。BIM技术具备显著的模拟性特征，其核心是构建三维空间模型。传统养护中，技术人员分析桥梁结构数据时仍难以完全排除潜在风险。BIM技术不仅能提升建筑物的安全稳定性，还能借助虚拟仿真功能辅助完成危险作业的风险评估任务，并依据设计方案优化安全防范措施和维护办法，从而保障工作人员生命财产安全[4]。

2 多维度桥梁健康监测数据采集技术

2.1 监测指标体系构建

桥梁健康监测需覆盖结构安全性、适用性及耐久性等核心维度，结合桥梁结构特性与服役环境，确定以下关键监测指标：①结构几何参数，如裂缝宽度、挠度、沉降、转角等；②力学性能参数，如应力、应变、振动频率、阻尼比等；③环境影响参数，如温度、湿度、风速、降雨量等；④材料性能参数，如混凝土碳化深度、钢筋锈蚀程度等。通过层次分析法确定各指标权重，其中结构几何参数与力学性能参数权重占比分别为35%和40%，为健康评估提供量化依据。

2.2 多维度数据采集方法优化

1.视觉监测技术。利用高清工业摄像设备加上无人机协作巡检技术，实现对桥梁表面所有缺陷的全面信息采集，在裂缝检测阶段，改良图像处理算法流程步骤，依靠灰度阈值分割手段以及边缘提取办法，明显改进宽度测量精确程度，误差幅度限定在0.02 mm之内，针对桥墩、梁体等关键结构部分，则采取定时拍照再即时传送策略，保证缺陷数据具有高效性和可靠性的特性[5]。

2.振动监测技术。选择高精度的加速度传感器，放置在桥梁跨中部位以及支座等关键区域，收集结构振动数据。利用无线传感网络技术改进通信协议设计，减小信号传输期间可能产生的干扰风险，经由功率谱密度分析法来确定结构固有频率的具体数值，其计算公式如式（1）所示：

$$f_n = \frac{1}{2\pi}\sqrt{k/m} \tag{1}$$

式中，k—结构刚度；m—结构质量。通过连续监测振动频率变化，识别结构刚度衰减情况。

3.温度与湿度监测。采用分布式光纤传感技术来对桥梁结构的温度场展开持续观测，布置时要保证间隔距离不超过5 m，这样做的目的在于维持所获得的数据准确可靠，在此过程中还必须结合温湿度一体传感器一同工作，以此同步获取环境参数信息，并且深入探讨外界因素改变给外部变形特性带来影响的具体机理情况，整个系统的测温范围应当覆盖从 – 40 ℃到80 ℃之间的区间，而且它的测量精度要求达到 ± 0.5 ℃[6]。

4.结构变形与应力监测。采用光纤光栅应变计和位移传感器采集桥梁关键截面的应变及挠度数据，应变计布设遵循“重点覆盖、均匀分布”原则，在梁体跨中、支座附近等应力集中处加密布置。挠度测量使用激光位移计，利用三角测距原理进行非接触式测量，量程为0 ~ 500 mm，精度为 ± 0.1 mm。

2.3 数据预处理方法

采集的原始数据需经过清洗、降噪与标准化处理：①数据清洗，采用拉依达准则剔除异常值，确保数据可靠性；②数据降噪，对振动、应变等信号采用小波变换降噪处理，去除环境干扰；③数据标准化，将不同维度数据转换至[0,1]区间，采用式（2）：

$$x' = \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \tag{2}$$

式中，x—原始数据；$x_{\min}$—该指标的最小值；$x_{\max}$—该指标的最大值。

3 基于BIM技术的桥梁健康监测数据分析与管理方法

3.1 监测数据自诊断和在线处理

桥梁健康监测系统中的数据失真主要源于传感器设备。研究表明，超过40%的系统误报警由传感器自身故障引发。传感器寿命常与桥梁服役周期不匹配，一旦损坏，将导致信息失真，严重影响安全预警与评估。

为此，本研究首次基于BIM技术开发传感器运维模块。通过建立含传感器实体的BIM模型，可精确掌握其空间分布与数量信息。结合多角度剖切分析，能直观呈现传感器布局与运行状态，并以颜色区分正常/异常设备。对故障装置，系统详细记录维修过程，便于后续维护参考[7]。针对监测数据中常见的缺失、异常、漂移及噪声等问题，研究构建了一套自诊断与预处理技术体系，并基于BIM数据库开发数据清洗工具。该工具可自动识别潜在数据偏离，在保持数据完整性的同时进行精准修正。其算法融合了支持向量机、神经网络、遗传算法、小波变换等多种智能分析方法，实现多维度综合评估与高效修复。

3.2 健康监测数据的BIM可视化

针对传统健康监测系统数据呈现单一、解读困难的问题，本研究基于BIM可视化技术，开发了集成温度、挠度、振动及加速度等关键参数的动态显示模块。为解决常规监测中传感器布点有限、难以反映结构整体状态的问题，模块引入基于有限采样点的数据拟合算法，通过插值方法推估全桥关键指标，并将预测结果存入扩展数据库。这些信息经整合后上传至BIM平台，结合构件关联生成交互式三维视图，实现精准、高效的桥梁运维管理。面对桥梁运营车辆多、超载现象频发的情况，研究进一步开发了基于车辆荷载效应的识别技术。该技术通过分析车辆过桥时监测系统采集的静动力响应数据，与预存的不同车型响应特征进行大数据匹配，识别车辆类型，并推算出全桥构件的荷载效应。最终结果在BIM模型中进行可视化展示，为荷载监控与安全评估提供直观支持。

3.3 日常运营下统计分析与实时预警

桥梁结构安全预警系统以多元神经网络为核心，建立了风速、温度与车辆荷载对频率响应、应变及形变等多参数之间的映射关系。考虑到环境荷载与结构状态间关联强弱不均，系统采用贝叶斯正则化技术优化荷载权重分配，并结合统计均值控制图理论，构建了面向常规工况的“标准化环境因素”实时监测与预警框架。基于上述方法，本研究融合BIM技术开展全桥构件性能动态监测与实时预警，成功开发并应用了“BIM碰撞关联预警”算法。以竖向位移为例，通过建立精确几何模型并设定变形阈值，结合运营期实际数据插值生成形态数据集，系统在执行空间交叉验证时可自动识别冲突区域并发出警报。如图1所示，该方法突破了传统节点定位的局限，能快速识别超限异常点并进行可视化呈现。

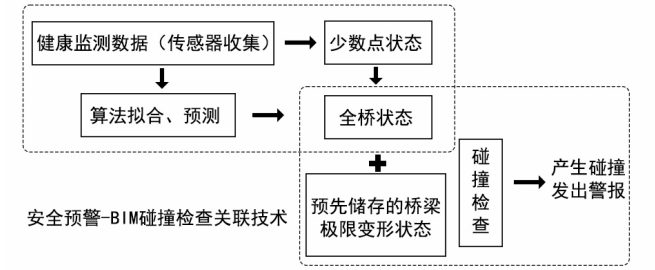

图1 基于BIM碰撞检查的实时预警流程图

3.4 极端事件下联动分析与安全评估

船撞、火灾等突发事件情况下，桥梁性能分析及安全运营管理是桥梁管养单位关注的重点问题。BIM技术独有的模拟、可视化等功能特点，在突发事件情况下的桥梁安全运营管理中得到了充分的挖掘和应用。利用BIM的4D技术对船撞、地震等突发事件情况进行桥梁安全评估，将突发事件发生后的桥梁各种传感器监测数据与正常情况下监测的数据进行对比分析，判断出当前桥梁的工作状态。利用BIM的疏散模拟技术实现突发交通事故情况下的交通安全管制方案可视化，对桥梁上车辆以及行人进行疏散模拟，确保其安全运营。

4 结束语

本研究聚焦BIM技术在桥梁健康监测中的应用，重点构建了多维度监测指标体系，并将数据采集与预处理环节纳入技术创新范畴。依托BIM平台的可视化、动态化与仿真特性，设计了一套涵盖传感器运维管理、智能故障诊断、实时信息展示、即时预警推送及突发事件联动分析在内的全过程监控框架。该方案突破了传统数据分散存储所导致的报警滞后、设备状态不直观等局限，实现了跨源异构数据的有效整合，为桥梁综合性能评价提供了更准确的依据，有助于推动BIM技术在桥梁全生命周期管理中的深入应用，未来发展前景广阔。

参考文献

[1]贾伟.基于“互联网+BIM”的桥梁实时健康状态监测系统设计[J].石家庄铁路职业技术学院学报,2024,23(4):66-70.

[2]赵江山.基于BIM技术的多维度桥梁健康监测数据分析与管理[J].石材,2024(7):153-155.

[3]郑淦亢,何越磊,万乐山.基于数字孪生的特大跨径铁路桥梁健康监测数据可视化及预警研究[J].土木建筑工程信息技术,2024,16(4):65-69.

[4]童光旭,谢艳,宋华,等.基于BIM技术的拱桥运营状况可视化研究[J].中外公路,2023,43(5):129-134.

[5]杨迪,张宇峰,徐一超,等.BIM技术在桥梁健康监测中的应用分析[J].运输经理世界,2023(23):85-87.

[6]赵峰,杨则英,孙英琳.BIM技术在桥梁健康监测中的应用研究[J].建筑技术开发,2023,50(4):136-139.

[7]李苏生,朱学军,王媛青,等.BIM建模与健康监测预警相融合的桥梁运营管养一体化研究[J].交通与运输,2022,38(4):52-57.

（本文编辑 吴文博）

