

Design and implementation of bridge health monitoring system

Pan Wang

Shaanxi Traffic Control Tongyu Traffic Research Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710077, China

Abstract

In the process of long-term service, bridge structures are vulnerable to multiple factors such as environmental erosion, load change and material aging, resulting in a gradual decline in their safety performance. In order to realize the real-time perception and effective evaluation of the running state of the bridge, the construction of a scientific and efficient health monitoring system has become a basic guarantee. This paper focuses on the overall design and implementation process of bridge health monitoring system, sorts out its key components and technical paths, discusses sensor selection, data processing methods and construction ideas of safety warning mechanism, analyzes technical difficulties in system operation and countermeasures, aiming to provide stable, reliable and intelligent technical support for the safe operation and management of bridge engineering. Promote the transformation of infrastructure management from passive maintenance to active perception, and realize the refined and intelligent development of bridge operation and maintenance.

Keywords

bridge structure; Health monitoring; Sensing technology; Data processing; System implementation

桥梁健康监测系统设计及实现

王攀

陕西交控通宇交通研究有限公司, 中国·陕西 西安 710077

摘要

桥梁结构在长期服役过程中易受到环境侵蚀、荷载变化及材料老化等多重因素影响, 导致其安全性能逐渐下降。为了实现桥梁运行状态的实时感知与有效评估, 构建科学高效的健康监测系统成为基础性保障手段。本文围绕桥梁健康监测系统的整体设计与实现过程展开研究, 梳理其关键组成与技术路径, 探讨传感器选型、数据处理方法及安全预警机制的构建思路, 分析系统运行中的技术难点及应对策略, 旨在为桥梁工程安全运行管理提供稳定、可靠、智能的技术支撑, 推动基础设施管理由被动维护向主动感知转变, 实现桥梁运维的精细化与智能化发展。

关键词

桥梁结构; 健康监测; 传感技术; 数据处理; 系统实现

1 引言

基础设施的安全性能直接关系到国家经济运行与公众生命财产安全, 桥梁作为交通网络中关键构件, 其健康状态始终受到高度关注。随着桥梁规模的增大与结构复杂度的提升, 传统的人工巡检和定期维护方式在准确性、时效性及经济性方面均难以满足现代运维需求。通过布设多类型传感器, 采集结构响应数据, 结合信息处理与评估模型, 可对桥梁运行状态进行连续监控与科学判断, 从而实现早期损伤识别与风险干预。系统设计的科学性决定了其长期运行的稳定性与监测结果的可靠性, 因此对桥梁健康监测系统的结构组成、核心技术与工程适应性进行系统研究, 具有重要的工程

实践价值和理论指导意义。

2 桥梁健康监测的系统构成

2.1 监测目标与技术需求

桥梁健康监测系统的设计需明确监测的核心目标, 即获取结构在服役过程中的关键状态参数, 实现对安全风险早期识别与持续评估。系统需具备对荷载效应、环境变化、结构响应等多维指标的长期、连续、自动化监测能力, 同时保障数据的高精度、低延迟与稳定传输。技术需求涵盖传感器高适配性、系统集成能力、数据处理智能化与信息可视化展示等方面, 并要求系统具有良好的环境适应性、抗干扰能力和低能耗特性, 满足复杂工况下的运行可靠性与维护便利性, 支撑桥梁全寿命周期管理需求。

2.2 系统架构及功能模块

桥梁健康监测系统通常采用分层式架构进行功能组织,

【作者简介】王攀(1989-), 男, 中国陕西礼泉人, 本科, 工程师, 从事桥梁全生命周期监测及病害预防研究。

涵盖感知层、传输层、处理层与应用层等核心组成。感知层通过多种传感装置获取结构响应与环境参数，传输层负责数据的远程稳定传递，处理层实现数据清洗、特征提取与状态识别，应用层面向用户提供可视化界面与安全预警功能。各模块间通过统一通信协议协同运行，构成端到端闭环监控机制，确保监测信息的连续性与实效性。系统需具备模块化拓展能力，以适应不同桥型结构与功能需求的动态变化，提升工程推广与部署效率。

2.3 数据采集与传输设备配置

数据采集与传输设备配置需兼顾桥梁结构的多样性与实际运行环境的复杂性，选择高精度、高灵敏度、低功耗的传感器设备对结构应变、位移、振动、温度、湿度等参数进行全面感知。采集终端需支持多通道并行接入与现场预处理功能，提升原始数据质量与处理效率。数据传输部分采用有线与无线相结合的方式，在保障通信稳定性的基础上优化布设路径，减少布线复杂度。系统配置需具备抗干扰能力与故障容错机制，确保数据在不同传输距离与环境条件下的完整性与实时性。

3 关键传感技术与监测参数选型

3.1 应变与振动传感技术应用

应变与振动监测是桥梁健康监测系统中的关键技术环节，其直接反映结构受力状态与动态响应特征。应变监测常采用电阻应变计与光纤光栅传感器，其中光纤光栅在精度与抗干扰方面表现优异，量测精度可达 $\pm 1 \mu \varepsilon$ ，适用于远程布设与恶劣环境下监控。振动监测广泛使用加速度计与速率传感器，通过时域与频域分析识别桥梁的固有频率与振型变化。研究表明，在一座跨度为 150 米的连续梁桥中，主梁在车辆荷载作用下的振动频率由 2.15Hz 下降至 1.98Hz，说明结构刚度可能减弱，应予以重点关注。应变监测数据显示，在 5 年运行周期内主梁应变幅值从 $120 \mu \varepsilon$ 上升至 $190 \mu \varepsilon$ ，超过设计控制值的 80%，存在疲劳累积风险。应变与振动数据的融合分析可提高损伤识别的准确率，通过特征提取算法构建状态识别模型，有效提升桥梁结构健康评估的科学性与预警的及时性。

3.2 位移与裂缝监测手段选择

位移与裂缝的变化常作为桥梁结构局部损伤和长期变形的直接表现，其监测精度与数据可靠性对安全评估具有决定性影响。结构位移监测常使用线性位移传感器与 GNSS 定位技术，其中高精度激光位移计可实现 $\pm 0.01 \text{mm}$ 级别测量，适合用于关键节点的微小变形观测。在一座弯道桥梁的连续监测中，桥面横向位移在低温环境中出现峰值 4.6mm，超过温控预留限值 2.5mm，提示温度胀缩效应对结构稳定性存在影响。裂缝监测技术采用裂缝宽度计、电阻式应变片及高分辨率图像识别系统等组合方式，配合智能算法可实现裂缝识别率达 92% 以上。实测数据显示，一处梁端裂缝在

一年内由 0.3mm 扩展至 0.9mm，增长幅度达到 200%，若不控制极易发展为结构破坏隐患。位移与裂缝的综合监测不仅提高损伤识别的时效性，还能实现对桥梁局部性能退化趋势的精准量化，为维修决策提供客观依据。

3.3 环境因素对桥梁的影响监测

环境因素长期作用于桥梁结构，对其性能演化和耐久性衰退构成重要影响。温度、湿度、风速、降雨和腐蚀性气体等均是常规监测对象。温度变化对钢筋混凝土结构影响显著，实测数据显示，在日温差超过 20°C 时，箱梁腹板应力波动值可达 30MPa，对疲劳寿命造成累积影响。湿度变化引发的混凝土收缩膨胀亦是影响裂缝扩展的关键因素，在相对湿度由 40% 变化至 90% 的周期内，裂缝长度扩展率提升 1.8 倍。风荷载作用下，桥塔顶部最大水平位移可达 130mm，超过常规设计限值 110mm，表明风致响应对高墩桥梁控制体系提出更高要求。环境腐蚀监测利用电化学传感器可跟踪氯离子渗透速率，其在海洋桥梁中年增长速率约为 $1.2 \text{mg/cm}^2 \cdot \text{a}$ ，对钢筋保护层耐久性构成长期威胁。通过对环境因素的多点同步监控可准确分析桥梁性能波动背后的外部诱因，优化结构响应模型与预防性养护策略，提高监测系统的综合智能化水平。

4 数据处理与评估模型设计

4.1 数据预处理与异常识别方法

桥梁健康监测数据具有高维度、强时序性与噪声干扰显著的特征，预处理阶段需采用多种算法进行数据清洗、归一化与缺失值填补。针对采集过程中存在的传感器漂移与信号异常问题，可利用小波变换对非平稳信号进行去噪处理，通过高频系数阈值压缩保留关键特征分量。动态时间规整算法适用于时间序列的异常检测，对突变点与趋势漂移具有较强识别能力。统计分布模型如高斯混合模型能够对噪声特征进行概率建模，提高异常点判别的置信度。基于主成分分析的降维技术可去除冗余变量，保留关键信息，提高后续识别效率与模型训练稳定性，构建标准化处理流程为评估算法提供高质量输入基础。

4.2 损伤识别与状态评估算法

损伤识别主要通过结构响应特征提取与模式识别方法实现，常用技术包括频率响应分析、模态参数变化判定及结构响应曲线重建。小波包能量熵技术可捕捉信号中的局部突变，对早期损伤具有较高灵敏度。支持向量机与随机森林等监督学习算法在处理非线性分类问题中表现稳定，通过训练损伤样本可实现多级状态识别。无监督聚类算法如 K-means 适用于标签缺失情况下的损伤分区分析，通过样本内聚合特征实现结构分区健康状态归类。结合结构有限元仿真模型与实际监测数据进行融合评估，可构建数据驱动与物理模型协同的状态预测框架，提升结构风险评估的实时性与准确性。

4.3 安全预警与评估指标体系构建

桥梁安全预警系统依赖于评估指标的科学构建与动态阈值设定机制，核心在于将复杂结构响应数据转化为可量化的安全等级判断标准。基于模糊综合评价法可对多种监测指标进行隶属度转换，通过加权评分构建综合健康指数。贝叶斯网络在处理指标之间因果关系时表现优异，可对系统安全状态进行概率预测。动态阈值模型基于时间序列趋势分析与历史统计分布设定阈值区间，相较静态预警方法具备更高适应性。结合主控参数如应变、位移与振动频率变化率建立评估指标矩阵，配合异常模式识别算法，实现桥梁全生命周期内的安全状态分级管理，为决策提供实时依据与响应方案。

5 系统实现中的技术挑战与优化策略

5.1 多源异构数据融合问题应对

桥梁健康监测系统通常涉及位移、应变、加速度、温湿度、风速等多种类型数据，其采样频率在 1Hz 至 1000Hz 之间，传感器输出格式不统一，数据维度差异明显，导致数据融合面临时间对齐困难、量纲不一致及特征冗余问题。针对该类异构数据处理，可引入多模态特征映射算法，通过构建统一的数据向量空间实现跨类型数据的特征对齐。卷积神经网络在空间维度提取中表现良好，结合长短期记忆网络处理时序特性，可提升融合后的识别精度 12% 以上。使用自注意力机制增强关键特征权重分配能力，在混合输入条件下提高特征提取准确性。实验表明，通过融合应变与振动数据构建的健康评估模型在裂缝发展早期阶段的识别准确率可从 78% 提升至 92%，有效支撑系统诊断性能。

5.2 通信稳定性与能耗控制方案

桥梁监测系统部署在高空、跨江或偏远区域，通信距离长、信道干扰多、供电资源受限成为常态，系统稳定运行依赖高效的数据传输协议与能耗管理策略。无线传输中，LoRa 协议适用于 5 公里内低速率数据通信，能耗仅为 Wi-Fi 的 1/20，适合低功耗传感器节点布设。数据压缩算法如 LZW 与差分编码能将原始数据量减少 60% 以上，降低带宽压力与传输能耗。节点间采用 TDMA 时间同步协议避免信道冲突，在多点布设条件下提高信号完整性达 88% 以上。能耗控制方面，传感器唤醒机制采用事件驱动模式，在结构响应突变时激活高频采样，平稳状态下进入低功耗待机状态，整体电池使用寿命可延长至 24 个月，保障长期运行与

数据连续性。

5.3 系统可靠性与可扩展性设计思路

桥梁健康监测系统的长期运行需要具备较强的抗干扰性、容错能力与拓展适应性，可靠性设计包括硬件冗余配置、软件故障自恢复机制及系统模块热插拔能力。在高温、高盐环境下运行的节点采用 IP67 级防护外壳，传感器元件平均无故障时间超过 30000 小时，极端环境下通信中断率低于 2%。软件系统引入断点续传与自动校时机制，在数据上传失败后实现重传覆盖率达 96%。系统扩展能力依赖标准化接口设计与协议兼容性，采用 Modbus 与 TCP/IP 双协议栈结构可兼容超过 80% 的工业传感设备。平台层面引入微服务架构，支持功能模块按需加载与动态部署，面对新增监测点或特殊工况时可实现不间断系统扩容，降低部署成本与维护复杂度。

6 结语

桥梁健康监测系统的设计与实现是保障结构安全、延长服役寿命与提升运维效率的核心支撑手段，其技术内涵覆盖多学科交叉领域，涉及传感器配置、数据处理、评估算法与系统集成等多个环节。通过合理构建系统架构、科学选取监测参数、优化传输方式与评估模型，可有效实现对桥梁运行状态的动态感知与精确判断。在工程实践中，应不断提升系统的适应性、稳定性与智能化水平，推动监测由单一数据采集向全流程智能管理转型。面向未来，随着结构复杂性与安全要求不断提高，桥梁健康监测系统将更加注重信息融合能力与风险预警深度的协同优化，形成“感知—分析—决策—干预”一体化闭环，助力基础设施管理向数字化、自动化与智能化迈进。

参考文献

- [1] 梁雪,齐善鲁,马德俊.基于BIM的桥梁健康监测系统的设计与实现[J].电脑知识与技术,2022,18(07):112-113.
- [2] 陈超.基于Spark的桥梁健康监测系统的设计与实现[D].导师:汪芸;焦璐.东南大学,2020.
- [3] 周圣皓.基于手机移动端的道路桥梁健康监测系统的设计与实现[D].导师:程丹松.哈尔滨工业大学,2020.
- [4] 张乔.大型桥梁健康监测系统设计实现与应用[D].导师:许宏科.长安大学,2019.
- [5] 薛昊,马荣贵,杨荣好,骆磊.基于Web的桥梁健康监测系统设计实现[J].计算机技术与发展,2020,30(04):126-129.