

基于互联网的中小跨径桥梁安全运营监测系统研究

郅修明 李 阳

陕西高速公路工程试验检测有限公司 陕西 西安 710086

摘 要：本文针对中小跨径桥梁安全运营需求，提出基于互联网的监测系统架构。通过分析桥梁结构特点与病害特征，构建多维度监测指标体系，并设计分层式系统架构，实现数据采集、传输、存储、分析与预警的闭环管理。系统融合物联网、云计算与AI技术，具备实时监测、智能预警与决策支持功能，为桥梁全生命周期管理提供技术支撑。

关键词：中小跨径桥梁；互联网+；监测系统；智能预警；决策支持

引言：中小跨径桥梁作为交通网络的关键节点，其安全运营直接关系到交通系统的整体效能。然而，受结构特点、环境因素与运营条件影响，中小跨径桥梁易产生结构性、环境性与运营性病害。传统监测手段存在数据采集不全面、预警不及时、决策缺乏依据等问题。互联网技术的发展为桥梁监测提供了新的解决方案，通过物联网、云计算与人工智能技术的融合，可实现桥梁健康状态的实时感知与科学管控。

1 中小跨径桥梁监测需求分析

1.1 桥梁结构特点与病害特征

中小跨径桥梁是交通网络关键节点，结构形式以简支梁桥与连续梁桥为主。简支梁桥单跨或多跨独立，荷载传递路径明确，但支座区域易因反复受荷产生应力集中，长期运营下可能致支座脱空或梁体开裂。连续梁桥通过连续结构优化荷载分布，整体刚度较大，但跨中弯矩峰值显著，易引发混凝土疲劳损伤与钢筋锈蚀。病害特征可归纳为三类：结构性病害、环境性病害及运营性病害。结构性病害以裂缝、锈蚀与沉降为主，裂缝多源于混凝土收缩、温度应力或超载作用，锈蚀由钢筋暴露于潮湿环境或氯离子侵蚀引发，沉降因地基不均或冲刷导致。环境性病害如冻融循环、碳化作用，加速混凝土表面剥落与内部结构劣化。运营性病害如超载车辆反复作用引发疲劳损伤，长期积累或诱发突发破坏。病害成因与桥梁结构特点密切相关，简支梁桥支座区域因反复受荷易产生局部疲劳，连续梁桥跨中截面因弯矩集中更易开裂^[1]。环境因素如湿度、温度波动加速混凝土碳化与钢筋锈蚀，交通荷载的随机性与复杂性增加病害演化不确定性。

1.2 监测指标体系构建

监测指标体系需覆盖结构响应、环境参数与运营参数，实现多维度安全评估。结构响应参数为核心指标，包括应变、位移与振动频率。应变反映结构受力状态，

通过埋入式或表面式传感器实时采集；位移监测关注桥墩沉降与梁体挠度，采用激光测距或全站仪技术实现高精度测量；振动频率表征结构刚度变化，通过加速度传感器与频谱分析提取特征参数。环境参数对桥梁性能影响显著，需纳入监测范围。温度与湿度直接影响混凝土收缩徐变及钢筋锈蚀速率，通过分布式温湿度传感器网络实现区域化监测；风速与风向参数评估风致振动风险，在宽桥或高墩结构中需重点关注。运营参数反映桥梁实际受力状况，包括交通荷载与车辆速度。交通荷载通过动态称重系统实时采集，为疲劳损伤评估提供基础数据；车辆速度与密度影响冲击效应与荷载分布，需结合视频监控与雷达测速技术动态监测。

2 互联网+桥梁监测系统架构设计

2.1 系统总体架构

互联网+桥梁监测系统采用分层设计理念，划分为感知层、传输层、平台层与应用层，各层级间通过标准化接口实现数据交互与功能协同。感知层负责原始数据采集，传输层保障数据高效传输，平台层实现数据存储与分析，应用层提供业务化服务。模块化功能划分贯穿各层级，涵盖数据采集、传输、存储、分析与预警五大核心环节，形成从数据感知到决策支持的完整闭环。感知层以传感器网络为核心，通过多类型传感器协同工作，实现对桥梁结构响应与环境参数（如温湿度、风速）的全面覆盖。传输层依托无线通信技术，构建低功耗、广覆盖的数据传输通道，确保海量监测数据实时、可靠地传输至云端。平台层采用云计算与边缘计算融合架构，利用时序数据库与分布式存储技术，实现数据的高效管理与快速查询。应用层则通过三维可视化平台与智能预警系统，将抽象数据转化为直观的桥梁健康状态评估结果，为运维人员提供决策支持。

2.2 感知层设计

感知层设计需兼顾数据采集精度与系统部署成本。

传感器选型遵循低成本、低功耗原则,优先采用MEMS(微机电系统)传感器与光纤传感器,前者以体积小、能耗低、易集成优势适用于分布式监测,后者则凭借抗电磁干扰、长距离传输特性,适用于关键构件的长期监测。传感器布局需结合桥梁结构特征与病害易发区域,例如在简支梁桥支座处加密应变传感器,在连续梁桥跨中截面布置振动传感器,同时通过多源数据融合技术,实现结构数据与环境数据的协同采集^[2]。多源数据融合技术通过传感器网络的时间同步与空间校准,将结构响应数据(如应力、应变)与环境参数(如温度、湿度)进行关联分析。例如,结合混凝土温度与湿度数据,可修正温度应力引起的应变测量误差;通过风速与风向数据,可评估风致振动对桥梁结构的影响。引入边缘计算节点对原始数据进行初步处理,例如通过滤波算法去除噪声信号,通过特征提取算法识别异常数据,从而降低传输层与平台层的计算压力。

2.3 传输层设计

传输层需解决桥梁监测场景下的通信覆盖、功耗控制与数据安全三大挑战。无线通信技术对比显示,LoRa技术适用于远距离、低功耗的广域覆盖场景,但传输速率较低;NB-IoT技术依托运营商网络,具备高可靠性与低时延特性,但部署成本较高;5G技术则以高速率、低时延、大容量优势,适用于高密度传感器网络的数据回传。实际部署中,可结合桥梁规模与监测需求,采用混合组网方案:例如,在偏远地区桥梁采用LoRa技术实现基础数据采集,在城市核心区域桥梁部署5G基站保障实时性要求。数据传输协议需兼顾兼容性与安全性。MQTT(消息队列遥测传输)协议以轻量级、低带宽占用特性,适用于传感器节点与网关间的数据传输;TCP/IP协议则保障网关与云端平台间的稳定通信。安全机制方面,采用端到端加密技术(如AES加密算法)对传输数据进行加密,通过数字签名与访问控制策略防止数据篡改与非法访问。引入数据完整性校验机制(如CRC校验),确保传输过程中数据未发生丢失或损坏。

2.4 平台层设计

平台层采用云计算与边缘计算结合的架构,以平衡计算资源与实时性需求。云计算负责全局数据分析与模型训练,边缘计算则承担本地数据预处理与快速响应任务。例如,边缘节点可实时计算桥梁振动频率,识别异常模态,并将预警信息推送至应用层;云端则基于历史数据训练深度学习模型,预测结构疲劳寿命与剩余承载力。时序数据库是平台层存储的核心。InfluxDB与TDengine是主流开源方案,支持毫秒级数据写入与高效

查询,满足振动、应变等高频数据的存储需求。分布式存储方案则用于存储桥梁三维模型、视频监控等非结构化数据,通过HDFS或Ceph实现数据的冗余备份与弹性扩展。平台层需具备弹性扩展能力。通过容器化技术(如Docker)与微服务架构,可将数据采集、存储、分析等功能解耦为独立服务,实现按需部署与动态伸缩。例如,当桥梁监测节点数量增加时,可自动扩容数据采集服务,无需中断系统运行。

2.5 应用层设计

应用层以用户需求为导向,构建实时监测与可视化平台、智能预警与决策支持系统两大核心模块。实时监测平台通过三维模型动态展示桥梁健康状态,例如以不同颜色标注构件应力分布,以动画形式呈现结构变形过程。平台支持多维度数据查询与对比分析,例如按时间序列展示裂缝宽度变化曲线,或按空间维度对比不同桥墩的沉降速率。智能预警系统基于多级阈值机制与异常检测算法,实现病害的早期预警与风险评估。例如,当梁体应变超过设计阈值时,系统自动触发黄色预警,并通过短信/邮件通知运维人员;当裂缝扩展速率超过历史均值两倍时,系统升级为红色预警,并生成应急处置建议^[3]。决策支持系统则通过知识图谱与专家系统,将监测数据与桥梁设计规范、历史病害案例进行关联分析,为维修加固方案提供优化建议。例如,系统可推荐最优的碳纤维布加固位置与粘贴参数,或评估不同维修策略对桥梁剩余寿命的影响。互联网+桥梁监测系统架构设计需以技术融合为驱动,以业务需求为导向,构建从数据感知到决策支持的完整链条。通过分层设计、模块化功能划分与多层级协同优化,实现桥梁健康状态的精准评估与科学管控,为交通基础设施的智能化运维提供技术支撑。

3 系统功能实现与关键技术

3.1 实时监测与动态展示功能

实时监测功能是系统对桥梁健康状态连续跟踪的核心环节。通过感知层传感器网络,系统实时采集结构响应数据与环境参数,传输层高效回传数据至平台层存储分析。应用层借助三维可视化平台,将抽象数据转化为直观桥梁健康状态展示。如以热力图呈现梁体应力分布,颜色渐变反映应力大小,助力运维人员快速识别高风险区域。动态展示功能以动画呈现桥梁结构变形过程,如连续梁桥在车辆荷载作用下的挠度变化。通过时间序列数据动态渲染,直观展示结构响应随荷载变化规律。多维度数据融合技术提升监测全面性,将结构响应数据与环境参数关联分析。例如结合环境温湿度修正混凝土收缩引起的应变测量误差,通过风速风向数据评估

风致振动影响。这种融合分析提高监测精度,为病害成因诊断提供依据。当监测到梁体应变异常时,系统联动环境参数判断是否由温度应力或超载作用引发,辅助制定针对性处置措施。动态展示功能支持历史数据回溯与对比分析。运维人员可按时间维度查看桥梁健康状态演变过程,如对比不同季节应力分布差异,或按空间维度对比同类型桥梁监测结果。这种对比分析有助于发现潜在风险,如某桥梁特定季节出现异常振动,系统可追溯历史数据并关联环境参数,判断是否与冻融循环或温度波动相关,为预防性养护提供决策支持。

3.2 智能预警与风险评估功能

智能预警功能基于多级阈值机制与异常检测算法,实现病害早期预警与分级管理。系统通过机器学习模型分析历史数据,动态调整预警阈值,如根据桥梁服役年限与病害演化规律,优化应变、裂缝宽度等参数预警阈值。当监测数据超过阈值时,系统自动触发预警,并根据风险等级采用不同通知方式。风险评估功能结合监测数据与桥梁设计规范,量化病害对结构安全影响。如通过有限元模型分析裂缝扩展对梁体承载力削弱程度,或通过振动频率变化评估结构刚度退化情况。评估结果以风险指数形式呈现,直观反映桥梁当前安全状态。系统还支持多桥梁风险对比,辅助管理部门制定差异化养护策略^[4]。预警与评估功能具备自适应学习能力。系统通过深度学习模型分析病害演化趋势,如预测裂缝扩展速率或结构疲劳寿命,提前调整监测重点。当模型预测某桥梁未来裂缝扩展速率将超过阈值时,系统自动增加该区域监测点位,提升预警精度。这种自适应机制使系统动态适应桥梁健康状态变化,实现精准管控。

3.3 决策支持与运维管理功能

决策支持功能通过知识图谱与专家系统,将监测数据与桥梁设计规范、历史病害案例关联分析。如推荐最优碳纤维布加固位置与粘贴参数,或评估不同维修策

略对桥梁剩余寿命影响。决策建议以可视化形式呈现,如通过三维模型展示加固后应力分布,或通过成本效益分析对比不同维修方案优劣,辅助制定科学决策。运维管理功能实现桥梁全生命周期信息化管理。系统记录桥梁设计、施工、监测、维修等全流程数据,形成数字化档案。运维人员可通过平台查询桥梁历史病害记录、维修方案及效果评估,为后续养护提供参考。系统还支持养护计划制定与进度跟踪,如根据监测结果自动生成年度维修计划,并通过任务分配功能将任务下发至具体责任人,实现养护工作闭环管理。系统具备移动端应用能力,运维人员可通过手机或平板电脑实时查看桥梁健康状态,接收预警信息并上传现场巡检数据。移动端应用与PC端平台数据同步,支持离线模式下的数据采集与任务处理,提升运维效率。如巡检人员在现场发现病害时,可通过移动端拍照上传并记录病害位置,系统自动关联监测数据生成维修建议,实现现场问题与后台决策的无缝衔接。

结束语

基于互联网的中小跨径桥梁安全运营监测系统,通过分层架构与多层级协同优化,实现了桥梁健康状态的精准评估与科学管控。未来,系统将进一步融合物联网、大数据与AI技术,提升监测精度与决策科学性,为交通基础设施的智能化运维提供技术支撑。

参考文献

- [1]杨小彪.中小跨径桥梁设计的质量控制要点探讨[J].江西建材,2022(08):71-72+75.
- [2]毛莹莹.中小跨径公路桥梁抗震设计理念研究[J].黑龙江交通科技,2021,40(07):129-130.
- [3]李帅.山区公路中小跨桥梁设计关键问题分析[J].四川水泥,2021(05):295-296.
- [4]周锐.山区公路中小跨径桥梁设计问题探讨[J].工程建设与设计,2020(23):97-99.