

物联网环境下工程结构在线监测检测系统构建

余卓

武汉中和工程技术有限公司, 湖北 武汉 430000

DOI:10.61369/ME.2026040019

摘 要 : 针对传统工程结构监测人工巡检效率低、数据滞后、监测覆盖面有限、风险预判能力薄弱等问题, 本文依托物联网、大数据与智能传感技术, 构建一套全覆盖、高精度、可智能化预警的工程结构在线监测检测系统。系统遵循可靠性、实时性、扩展性、安全性与实用性五大设计原则, 搭建感知、网络、数据、应用四级分层架构, 模块化实现多源数据采集、异构网络传输、数据智能处理、结构病害诊断与可视化运维管控。针对复杂工程监测场景, 融合 LoRa、4G/5G、以太网异构传输技术, 结合自适应小波算法完成监测数据降噪优化, 依托结构力学模型搭建四级智能预警体系, 有效解决复杂工况下数据传输不稳定、监测精度不足、风险识别滞后等痛点。经实验室集成测试验证, 系统传感器采集误差控制在 $\pm 0.5\%$ 以内, 数据丢包率低、预警响应速度快, 运行稳定性优异。系统有效提升了工程结构监测的智能化、精细化水平, 降低运维成本, 可为桥梁、隧道、边坡等各类土木工程结构的安全监测、风险防控与运维决策提供可靠的技术支撑。

关 键 词 : 物联网; 工程结构; 在线监测; 智能传感

Construction of Online Monitoring and Detection System for Engineering Structures in the Internet of Things Environment

Yu Zhuo

Wuhan Zhonghe Engineering Technology Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430000

Abstract : Addressing the issues of low efficiency in manual inspections, data lag, limited monitoring coverage, and weak risk prediction capabilities in traditional engineering structure monitoring, this paper constructs a comprehensive, high-precision, and intelligent early warning online monitoring and detection system for engineering structures based on the Internet of Things (IoT), big data, and intelligent sensing technologies. The system adheres to five design principles: reliability, real-time performance, scalability, security, and practicality, establishing a four-tier hierarchical architecture encompassing perception, network, data, and application layers. It modularly implements multi-source data acquisition, heterogeneous network transmission, intelligent data processing, structural defect diagnosis, and visualized operation and maintenance management. For complex engineering monitoring scenarios, the system integrates heterogeneous transmission technologies such as LoRa, 4G/5G, and Ethernet, employs adaptive wavelet algorithms for noise reduction and optimization of monitoring data, and establishes a four-tier intelligent early warning system based on structural mechanics models. This effectively addresses challenges such as unstable data transmission, insufficient monitoring accuracy, and delayed risk identification under complex working conditions. Laboratory integration tests confirm that the system maintains sensor acquisition errors within $\pm 0.5\%$, exhibits low data packet loss rates, rapid early warning response speeds, and excellent operational stability. The system effectively enhances the intelligence and precision of engineering structure monitoring, reduces operation and maintenance costs, and provides reliable technical support for safety monitoring, risk prevention and control, and operation and maintenance decision-making for various civil engineering structures such as bridges, tunnels, and slopes.

Keywords : Internet of Things; engineering structures; online monitoring; intelligent sensing

引言

传统工程结构监测多依赖人工定期巡检, 存在监测频次低、数据主观性强、滞后性显著、难以捕捉瞬时结构异常等弊端, 无法满足

现代化工程结构全天候、高精度、动态化的安全管控需求。物联网技术的快速发展为工程结构智能化监测提供了全新技术路径，通过智能传感、无线传输、大数据分析 with 智能预警技术的深度融合，可实现工程结构状态数据的自动化采集、实时化传输、智能化分析与精准化预警，彻底突破传统监测模式的技术瓶颈。基于此，本文立足各类工程结构复杂监测场景，设计分层化、模块化的在线监测检测系统，阐述系统总体架构、设计原则与核心功能模块，剖析各层级关键技术，并通过实验室测试与实际工程应用验证系统的稳定性、精准性与实用性，旨在为工程结构安全长效监测、风险主动防控提供高效可行的智能化解决方案。

一、系统总体架构设计

（一）系统设计原则

随着全国范围内基础设施建设的逐步开展，对于土木工程设施的维护称为重中之重，需要一套对土木工程进行监控的方案^[1]。为适配各类工程结构监测场景，保障系统长期稳定运行、可拓展、数据安全且监测精准，系统整体设计遵循五大核心原则^[2]。可靠性与稳定性原则，针对户外、高危等复杂恶劣工况，系统硬件具备防尘、防水、抗干扰、耐老化特性，软件搭载容错与异常处理机制，保障设备长效运行、数据真实有效、传输链路畅通。实时性与精准性原则，系统支持数据高频采集、实时传输与快速分析，可捕捉结构动态参数变化，依托高精度传感与数据校准算法，消除误差与干扰，提供精准数据支撑^[3]。扩展性与通用性原则，采用模块化分层架构，软硬件适配性强，可满足桥梁、隧道、边坡等多场景监测需求，支持点位、参数、功能模块灵活扩容迭代^[4]。安全性与保密性原则，搭建全流程数据安全机制，严控数据篡改、泄露、丢失风险，强化网络防护，抵御非法攻击与接入。实用性与易运维原则，系统操作简洁、可视化清晰，功能贴合运维需求，硬件安装便捷、运维成本低，支持远程调试与故障自检。

（二）基于物联网的层级架构模型

结合物联网技术体系与工程结构监测业务流程，搭建感知、网络、数据、应用四级分层架构模型，构建数据采集-传输交互-处理分析-应用服务全闭环监测体系。该架构逻辑清晰、耦合度低，便于各层级独立优化与迭代升级。感知层作为底层数据采集终端，通过各类智能传感器，实时采集结构应力应变、沉降位移、振动、裂缝及环境温湿度、风速等多源数据，实现工程状态与环境参数的全域自动化感知^[5]。网络层作为传输枢纽，融合 LoRa、4G/5G、以太网等异构传输网络，适配不同监测场景需求，解决复杂工况下数据传输卡顿、延迟、丢包等问题，保障数据高效稳定传输。数据层为系统核心中枢，依托大数据技术完成数据清洗、去噪、融合与存储，结合结构力学模型与智能算法分析结构状态，精准识别工程病害与安全隐患。应用层面向运维人员，集成监测预警、数据查询、报表统计、远程管控等功能，支持多终端可视化展示，实现工程结构安全智能化、精细化管控。

（三）系统功能模块划分

基于工程结构在线监测核心业务需求及四级架构模型，系统拆解为五大独立运行、协同联动的核心功能模块，全覆盖监测全流程业务^[6]。多源数据采集模块，支持应力、位移、振动等多类传感器数据采集，可自定义采集参数，实现全天候自动采集，兼具设备在线状态自检、故障监测功能。智能数据传输模块，兼容多类网络协议，支持异构网络自动切换，通过分包、加密传输及断点续传技术，保障复杂工况下数据传输稳定完整^[7]。数据处理

与存储模块，依托算法完成数据清洗、去噪与标准化处理，采用分布式数据库实现各类数据分类存储、备份与快速检索，确保数据可追溯。结构智能诊断与预警模块，依托规范标准构建评估模型，分析结构参数变化、识别潜在病害，设置四级预警机制，多渠道推送预警信息。可视化运维管理模块，集成数据可视化、曲线回溯、病害定位、报表生成、远程设备管控等功能，支持多终端访问，适配各类运维及应急业务场景。

二、系统关键技术与核心模块构建

（一）感知层：多源异构数据采集与传感器网络

感知层是工程结构在线监测的数据根基，核心打造高精度、全覆盖、可自组网的传感网络，完成多源异构数据精准采集。结合监测参数多样、现场环境复杂的特征，系统按需布设智能传感终端，搭建分布式监测网络^[8]。依据监测需求匹配对应设备，应变传感器适配混凝土、钢结构，实时捕捉受力变动；激光位移、倾角传感器可微米、毫米级监测沉降位移；高频振动传感器采集振动参数，判别结构异常状况；配套环境传感器，规避气象因素对监测数据的干扰。设备依照结构关键受力点、易损部位精准布点，兼顾全域监测与重点精细化管控^[9]。网络依托无线自组网技术搭建，节点可自动组网维护、隔离故障，单点故障不阻碍整体运转。配套统一采集协议，规范各类传感数据输出格式，破除数据互通壁垒。终端采用低功耗设计，辅以太阳能与蓄电池双供电，满足户外长期无人值守的全天候稳定监测需求。

（二）网络层：异构网络融合与可靠传输机制

工程结构监测覆盖城区、山区、水域等复杂场景，单一传输网络难以适配全域需求，系统融合 LoRa 窄带物联网、4G/5G 移动通信、以太网搭建异构复合传输体系，保障数据高效可靠流转。野外低功耗、小体量近距离传感数据，依托 LoRa 技术传输，该方式抗干扰性佳、组网灵活、能耗低廉，可规避户外环境干扰，稳固偏远区域数据通信。高频海量、时效性严苛的远距离动态监测数据，借助 4G/5G 网络传输，凭借高带宽、低时延特性，满足结构振动、瞬时形变等参数实时上传要求。机房站内固定设备数据，则采用以太网有线传输，实现核心数据低丢包稳定输送。系统配备智能调度机制，依据网络状态、数据规模与优先级自动择优切换链路。同步搭载分包加密、断点续传、超时重传功能，防护数据安全，规避网络波动造成的数据缺失。平台实时监测各链路运行工况，故障即刻上报，助力运维人员快速完成检修工作。

（三）数据层：海量数据处理与结构智能诊断

数据层是智能监测系统核心，负责海量多源监测数据预处理、融合存储与智能诊断，可改善传统监测数据杂乱、误差偏高、分析滞后、诊断主观化等弊端。数据预处理阶段，针对原始

数据存在异常、缺失、冗余及噪声干扰等问题,运用自适应小波算法滤除高频噪声,留存真实形变与受力信息;借助插值补齐缺失数据,依托阈值判定与趋势筛查剔除突变异常数据,同时统一异构数据的单位、采样频率与存储格式,夯实数据分析基础。存储采用云端与本地分布式双库模式,本地缓存短期数据保障快速调用,云端归档海量长期数据,支持远程访问、溯源查询与分类管理,筑牢数据安全防线。系统结合结构力学理论、行业规范与大数据算法搭建智能诊断模型,分析应力、形变、沉降等参数变化规律,对照限值标准辨识各类结构病害,剥离环境因素干扰,有效提升诊断精度,完成从数据采集到状态智能研判的进阶转变。

（四）应用层：监测平台开发与多级预警机制

平台面向工程运维管理人员打造可视化智能监测平台,整合实时监测、数据分析、状态评估、多级预警、运维管理等功能,搭建精准高效的分级安全预警体系,达成结构风险早发现、早预警、早处置目标^[10]。采用B/S架构开发网页管理端,适配电脑、手机、平板多终端,免安装即可便捷访问,兼容性优异。界面搭载工程三维可视化模型,清晰标注传感器点位,实时更新监测数据、动态曲线与设备工况;可查询比对历史数据,支持数据导出、报表自动生成,直观呈现结构健康时序变化,还能远程调控采集频次、重启及复位设备,有效缩减现场运维开销。参照工程结构相关设计规范,将预警划分为正常、蓝色提醒、黄色预警、红色告警四档,依据参数偏离幅度判定风险级别。系统触发预警后,通过平台弹窗、短信、移动端、邮件多渠道推送告警信息,同步留存预警与处置台账,形成闭环管控,为工程检修加固、运维优化提供数据依据。

三、系统集成测试与工程应用案例

（一）系统实验室测试与标定

为核验系统数据采集、传输、预警及整体运行性能,适配工程应用标准,实验室搭建模拟工程结构监测环境,完成系统集成测试与设备标定工作。传感器精度标定测试中,针对应力、位移、振动、倾角四类核心传感器,依托标准设备开展梯度参数比对测试,同时模拟高低温、湿热复杂环境验证稳定性。结果显示,传感器采集误差均控制在±0.5%以内,符合行业监测规范,且复杂环境下无数据漂移、设备故障问题,环境适应性优良。数据传输测试模拟野外弱网、信号干扰等场景,对LoRa、4G/5G、以太网传输模式开展专项检测。系统异构网络切换响应时间≤1s,常规工况丢包率<0.1%,复杂工况丢包率<0.3%,断点续传、数据加密功能正常,传输实时性、完整性与安全性达标。通

过人工模拟各类结构异常场景,验证系统预警性能,其可精准捕捉参数异常、完成数据分析,预警延迟≤2s,分级清晰、推送及时,无漏警、误警问题。72小时不间断连续运行测试表明,系统各模块运行稳定,设备在线率100%,数据存储完整,具备工程常态化长期运行能力。

（二）典型工程应用案例

为验证物联网在线监测系统的工程实用价值,将其应用于城市核心枢纽大型市政桥梁的健康监测工作。该桥梁服役超10年,长期受车辆荷载、风雨侵蚀、温度形变等因素影响,存在梁体形变、支座老化、裂缝扩展等安全隐患,亟需开展常态化在线监测。结合桥梁结构受力特点与监测需求,本次在主梁、支座、桥墩、桥面等关键位置,布设86个应变、位移、振动、温湿度传感器,构建全覆盖传感监测网络。系统采用5G+LoRa异构网络实现数据实时传输,依托云端平台完成智能分析与可视化管控,可对桥梁结构应力、沉降、位移、振动及环境参数开展24小时不间断监测。工程应用结果表明,系统运行稳定,设备在线率稳定在99.5%以上,监测数据连续精准。日常监测中可有效捕捉桥梁温度形变、车辆荷载形变等常规状态变化;在强降雨、大风极端天气下,可精准识别振动参数异常并触发预警,辅助运维人员现场排查,规避风险漏判问题。同时,系统积累的时序监测数据,可清晰呈现桥梁服役状态变化规律,为桥梁检测、加固及运维决策提供数据支撑。相较于传统人工巡检模式,该系统显著提升了桥梁监测的实时性、全面性与智能化水平,降低运维成本,强化了桥梁安全风险防控能力。

四、结束语

本文基于物联网技术构建了一套完整的工程结构在线监测检测系统,通过四级分层架构与模块化功能设计,实现了工程结构多源数据自动化采集、可靠传输、智能分析与分级预警。系统有效攻克了传统工程监测模式数据精度低、实时性差、风险预判滞后、运维效率低等技术难题,凭借优异的环境适应性、数据处理能力与智能管控水平,可适配桥梁、隧道、边坡等多种土木工程监测场景。实验室测试与实际工程应用验证,该系统运行稳定、监测精准、预警可靠,能够全天候动态把控工程结构健康状态,及时识别潜在安全风险,大幅提升了工程结构安全运维的智能化、精细化程度。未来可进一步优化智能诊断算法,融合人工智能、数字孪生技术,提升结构病害预判与寿命评估精度,拓展系统的场景适配性与功能维度,为基础设施长效安全运维提供更完善的技术支撑。

参考文献

[1]李争,李伟.土木工程结构安全性在线评估及监测技术研究[J].粘接,2022,49(6):138-142
[2]卢剑华.实时在线监测系统在水利水电工程金属结构设备的应用[J].红水河,2020,39(5):41-4347
[3]姜德生,梁磊,周雪芳,南秋明.FBG传感技术在工程结构监测中的应用[J].传感器技术,2003,22(6):33-3538
[4]胡柏学,曾威,于德介,钟珍云,郭建文,谢海秋.洞庭湖大桥结构状态在线监测系统[J].公路交通科技,2006,23(7):73-77
[5]李林.水工金属结构设备实时在线监测系统运用及智能管控研究[J].水力发电,2019,45(3):95-99
[6]张兵,汤秀丽,熊荣刚.实时在线监测技术在水工金属结构中的应用[J].起重运输机械,2017(12):136-139
[7]金亚兵,劳丽燕,刘川炜.工程结构安全自动化监测预警平台开发与应用[J].土木工程与管理学报,2021,38(6):38-44
[8]王小达.水工金属结构设备实时在线监测系统运用及智能管控研究[J].中国科技期刊数据库.工业A,2021(1):085-085
[9]严跃成,马希龄,张陵.土木结构在线监控技术述评[J].建筑结构,2000,30(9):65-67
[10]贾云龙,委玉奇.基于智能传感技术的结构健康监测[J].钢结构,2010,25(8):73-75