

土木工程智能化监测评估系统的应用研究

徐子楠 宋沛伦

河南中亚交建集团有限公司 河南 平顶山 467000

摘要: 随着土木工程规模扩大与服役环境复杂化,传统监测方式面临效率低、精度不足等挑战。本研究聚焦土木工程智能化监测评估系统,通过融合传感器网络、5G通信、机器学习与数字孪生技术,构建多参数协同感知、实时数据分析与动态预警体系。系统可精准识别结构损伤、评估健康状态,实现“监测-评估-预警”全流程智能化,为工程安全运维提供科学决策支持,助力行业数字化转型。

关键词: 土木工程;智能化监测评估系统;应用

引言:在城镇化进程加速与基础设施规模持续扩张的背景下,土木工程结构面临着服役环境复杂化、荷载作用长期化等多重挑战,传统人工监测方式因时效性差、数据维度单一等问题难以满足安全运维需求。智能化监测评估系统通过集成物联网、大数据、人工智能等技术,实现结构状态实时感知、异常自动预警与性能智能评估,已成为保障工程安全、延长使用寿命、降低维护成本的关键手段,对推动土木工程高质量发展具有重要意义。

1 土木工程智能化监测技术体系

1.1 关键技术组成

(1) 传感器技术:作为监测系统的“感知神经”,无线传感网络可实现大范围、多节点同步监测,适用于桥梁、隧道等大型工程;光纤光栅传感器具备抗电磁干扰、耐腐蚀特性,能精准捕捉结构微小应变,常用于高层建筑与地下管廊;MEMS传感器体积小、成本低,可集成于混凝土内部,实时监测温度与湿度变化,全方位保障工程结构感知覆盖。(2) 数据传输与存储:5G与LoRa通信技术构建高效传输链路,5G满足海量数据高速传输需求,LoRa则适用于低功耗、远距离的偏远工程场景;边缘计算可在数据源头完成预处理,减少冗余数据传输量;云平台提供大容量、高安全的存储服务,实现监测数据的长期归档与便捷调取,形成“传输-处理-存储”一体化数据管理流程。(3) 数据分析与处理:机器学习算法可挖掘数据潜在规律,识别结构异常状态;深度学习通过多层神经网络提升复杂数据的分析精度,如地震作用下的结构响应预测;数字孪生技术构建工程结构虚拟模型,实现物理实体与虚拟模型的实时映射,为结构性能评估提供直观可视化支撑^[1]。

1.2 系统架构设计

(1) 分层架构:感知层由各类传感器组成,负责采

集结构参数;传输层依托通信技术,实现数据双向传输;平台层整合边缘计算与云平台资源,完成数据处理与存储;应用层面向工程管理人员,提供监测数据可视化、预警信息推送等功能,各层级分工明确、协同联动。(2) 模块化功能:数据采集模块按预设频率获取结构参数,保障数据连续性;实时处理模块快速分析数据,识别异常值并剔除;评估预警模块基于历史数据与算法模型,评估结构健康状态,超阈值时触发预警;可视化交互模块以图表、三维模型等形式展示数据,提升数据可读性与决策效率。

1.3 技术优势分析

(1) 全天候自动化监测:摆脱人工监测时空限制,传感器可在暴雨、高温等恶劣环境下持续工作,数据采集与传输全程自动化,减少人为误差,提升监测效率与稳定性。(2) 多参数协同分析:同步监测结构应力、变形、温度、振动等多维度参数,通过数据关联分析揭示参数间内在联系,全面评估结构健康状态,避免单一参数监测的局限性。(3) 预测性维护能力:基于长期监测数据与算法模型,预测结构性能演变趋势,提前识别潜在风险,为工程维护提供精准依据,实现“被动维修”向“主动预防”的转变,降低维护成本与安全隐患。

2 土木工程智能化监测评估系统的模型与方法

2.1 基于机器学习的损伤识别模型

(1) 支持向量机(SVM)在裂缝识别中的应用:SVM凭借小样本学习优势,可高效处理土木工程裂缝监测数据。先通过传感器采集结构表面应力、应变等特征参数,将裂缝有无、宽度等分类问题转化为高维空间中的超平面分类任务,利用核函数映射优化数据分离效果,能精准区分微小裂缝与正常结构纹理,即使在数据噪声干扰下,仍可保持较高识别准确率,为早期裂缝隐患排查提供可靠技术支撑。(2) 卷积神经网络(CNN)

处理图像监测数据：针对无人机航拍、高清摄像头获取的工程结构图像，CNN通过卷积层、池化层逐层提取图像特征，从基础的边缘、纹理信息，到高层的裂缝、剥落等损伤特征，实现端到端的损伤检测。无需人工预设特征，可自动识别不同光照、角度下的结构损伤，同时结合迁移学习技术，在小样本图像数据集上也能快速训练模型，大幅提升图像监测数据的处理效率与损伤识别精度。

2.2 结构健康状态评估指标体系

(1) 单项指标：应变指标反映结构受力状态，超过限值可能导致材料屈服；位移指标体现结构整体变形，异常位移可能预示基础沉降或构件变形；频率指标与结构刚度相关，频率突变常伴随刚度衰减，可作为结构损伤的间接信号。这些单项指标是评估的基础，需结合工程类型与设计规范设定合理阈值，实时反映结构局部健康状况^[2]。(2) 综合评估模型：模糊综合评价通过建立模糊隶属度函数，将各单项指标的模糊信息量化，结合权重向量计算综合健康评分，解决指标间模糊性与不确定性问题；层次分析法则将复杂的评估问题分解为目标层、准则层、指标层，通过两两比较确定各指标权重，减少主观判断误差。两种模型结合使用，可整合多维度指标信息，全面、客观地评估结构整体健康状态。

2.3 实时预警机制设计

(1) 阈值动态调整算法：摒弃传统固定阈值的局限性，结合结构服役年限、环境荷载（如温度、风力）变化数据，通过时间序列分析与荷载耦合模型，动态调整各监测指标的预警阈值。例如，在强风季节适当降低振动指标的预警阈值，确保预警机制与实际工况适配，减少误报与漏报。(2) 多级预警策略：黄色预警对应指标轻微偏离正常范围，提示运维人员加强监测频率；橙色预警表示指标接近安全限值，需启动专项检查，排查潜在风险；红色预警意味着指标超出安全阈值，结构面临紧急安全隐患，需立即启动应急响应，疏散人员并采取加固措施。多级预警通过明确的响应流程，实现风险分级管控，保障工程结构安全^[3]。

3 土木工程智能化监测评估系统的应用案例分析

3.1 案例选择与工程背景

本案例选取某跨江大型斜拉桥，该桥主跨380m，服役12年，日均通行车辆超1.5万辆。随着服役年限增长，桥梁面临车辆荷载反复作用、江水侵蚀及温度应力变化等问题，曾出现局部支座沉降、拉索轻微锈蚀等隐患。为保障桥梁结构安全，避免突发事故，部署土木工程智能化监测评估系统，实现对桥梁关键部位的全时段、多

维度监测。

3.2 系统部署方案

(1) 传感器布设优化：通过有限元软件建立桥梁三维力学模型，模拟不同荷载工况下结构应力分布，确定监测关键节点—在桥塔底部、主梁跨中及拉索锚固端布设光纤光栅应变传感器；在主梁两侧布设MEMS位移传感器；在拉索上间隔20m布设振动传感器，共布设传感器82个，实现关键部位监测全覆盖，同时避免冗余布设降低成本。(2) 硬件设备选型与抗干扰措施：硬件选用工业级传感器，耐受-30℃~70℃温度范围，适应桥梁复杂环境；数据采集器采用防水防尘设计，防护等级达IP67。针对电磁干扰问题，传感器线缆采用屏蔽层包裹，数据传输模块加装抗干扰滤波器；对江边潮湿环境，在设备外壳涂覆防腐涂层，延长硬件使用寿命。

3.3 数据采集与处理结果

(1) 实时监测数据展示：系统每5分钟采集一次数据，通过后台平台生成应变时序曲线图、位移变化柱状图，并与桥梁三维数字孪生模型联动—点击模型上的传感器节点，即可显示该部位实时监测数据及历史变化趋势。例如，主梁跨中应变在早高峰（7:00-9:00）达到日峰值280 $\mu\epsilon$ ，与车辆通行高峰时段高度吻合，数据直观反映荷载与结构响应的关联^[4]。(2) 异常数据识别与修正方法：系统通过基于机器学习的异常值检测算法，自动识别因传感器临时故障、环境干扰产生的异常数据—如某次暴雨天气，某位移传感器因雨水遮挡出现瞬时跳变数据，算法通过对比相邻传感器数据及历史同期数据，判定该数据为异常并自动剔除；同时，采用数据平滑处理技术，对波动较大的振动数据进行滑动平均修正，确保数据准确性。

3.4 评估与预警效果验证

(1) 与传统监测结果对比分析：系统运行6个月内，共开展3次人工传统监测（采用全站仪测位移、应力计测应变）。对比发现，智能化系统监测数据与传统监测数据误差均小于3%，且智能化系统可实现连续监测，捕捉到传统监测间隔期内的瞬时应力峰值（如某次重型货车通行时的应变骤升），监测时效性与连续性显著优于传统方式。(2) 灾害场景模拟：通过系统模拟5级地震、10级台风及超载车辆（载重120t）工况—地震模拟中，系统预测桥塔底部应变达350 $\mu\epsilon$ ，触发橙色预警；台风模拟中，主梁横向位移超8cm，触发黄色预警；超载车辆模拟中，拉索振动频率异常变化，系统提前15分钟推送预警信息。模拟结果与桥梁实际承载极限吻合，验证了系统评估预警的可靠性，为灾害应对提供决策支持。

4 土木工程智能化监测评估系统的挑战与未来发展方向

4.1 当前应用瓶颈

(1) 传感器耐久性与成本问题：现有传感器在复杂工程环境中，如高湿度、强腐蚀、剧烈振动场景下，使用寿命普遍较短，多数仅能稳定工作3-5年，更换频率高且维护成本高昂；同时，高精度光纤光栅、MEMS传感器单价较高，大型工程全面布设需投入大量资金，成本压力成为制约系统大规模推广的重要因素。(2) 复杂环境下的数据可靠性：暴雨、雷电、电磁干扰等环境因素易导致监测数据失真，例如雷电天气可能使传输信号中断，造成数据缺失；高温或低温环境会影响传感器精度，导致应变、位移等参数测量偏差，严重时可能引发误预警，降低系统可信度。(3) 跨平台数据标准化缺失：不同厂商的监测系统采用独立数据格式与传输协议，如A厂商系统数据为XML格式，B厂商为JSON格式，数据接口不兼容，导致多系统协同监测时数据难以整合；同时，行业内缺乏统一的数据采集频率、精度标准，各项目监测数据无法互通对比，制约了数据价值的深度挖掘。

4.2 技术发展趋势

(1) 人工智能与监测系统的深度融合：未来AI将从“数据处理工具”升级为“决策核心”，通过强化学习自主优化传感器布设位置与数据采集频率，结合深度学习实现损伤识别、状态评估、预警响应的全流程自动化，减少人工干预，提升系统智能化水平。(2) 区块链技术在数据安全中的应用：利用区块链去中心化、不可篡改特性，构建监测数据可信存储与传输体系，每一条监测数据生成时自动上链，确保数据来源可追溯、内容不被篡改，解决跨平台数据共享中的安全与信任问题，为多主体协同管理提供数据安全保障。(3) 自主感知与自修复材料结合：研发具备自主感知功能的智能建材，

如掺入碳纳米管的混凝土，可实时感知内部应力与裂缝发展；同时结合自修复材料，在监测到损伤时自动触发修复机制，实现“监测-修复”一体化，从根本上提升工程结构的安全性与耐久性。

4.3 政策与标准化建议

(1) 推动行业技术规范制定：建议住建、交通等主管部门牵头，联合科研机构与企业制定《土木工程智能化监测系统技术规范》，明确传感器选型标准、数据格式、预警阈值设定方法等内容，统一行业技术要求，解决跨平台数据兼容问题，为系统应用提供合规依据。

(2) 加强产学研协同创新机制：出台专项扶持政策，鼓励高校、科研院所与工程企业建立联合实验室，围绕传感器耐久性、复杂环境数据校正等技术瓶颈开展攻关；设立产学研合作项目基金，推动科研成果转化为实际应用产品，加速行业技术升级。

结束语

土木工程智能化监测评估系统通过技术创新实现了从被动监测到主动预防的跨越，显著提升了工程结构安全管理的精细化水平。未来，随着人工智能、区块链、自主感知材料等技术的深度融合，系统将向全生命周期智能运维方向发展。建议加强跨学科协同攻关与标准化建设，推动技术成果规模化应用，为构建安全、耐久、智能的土木工程基础设施体系提供坚实保障。

参考文献

- [1]冯远.土木工程智能化监测技术的发展与应用[J].建筑技术开发,2023,50(18):110-112.
- [2]叶列平,陆新征,江见鲸.土木工程结构智能化监测系统的核心技术[J].工程力学,2021,38(10):31-33.
- [3]朱敬冬.建筑工程施工中智能化监测技术的研究与应用[J].智能建筑与智慧城市,2023,(10):96-98.
- [4]钱偲偲.土木工程智能化监测评估系统的理论应用[J].建筑结构,2023,53(11):164.