

土木工程中智能化监测评估系统的应用探析

崔二伟

(蚌埠城投建工有限公司)

【摘要】文章提出基于“感知—传输—分析—应用”四层架构的智能化监测评估系统。通过融合多源传感技术、边缘计算与MSVM-MPGA智能反演模型,实现结构响应的毫米级精准解析;结合立交桥“下隧上桥”工程验证,系统成功预警盾构施工扰动,沉降监测精度达 $\pm 2\text{mm}$,人工成本降低70%。研究成果为复杂工程结构全周期安全管控提供了可推广的技术范式。

【关键词】土木工程;智能化监测评估系统;结构健康监测;数据感知技术;施工期监测

中图分类号: TU317

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2026.07.039

Analysis on the Application of Intelligent Monitoring and Evaluation System in Civil Engineering

CUI Er-wei

(Bengbu Urban Investment Construction Co., Ltd.)

【Abstract】This paper proposes an intelligent monitoring and evaluation system based on a four-layer architecture of "perception-transmission-analysis-application". By integrating multi-source sensing technology, edge computing, and the MSVM-MPGA intelligent inversion model, millimeter-level precise analysis of structural responses is achieved. Verified through the overpass project with the "tunnel below and bridge above" structure, the system successfully warns the shield construction disturbances, with a settlement monitoring accuracy of $\pm 2\text{mm}$ and a 70% reduction in labor costs. The research results provide a promotable technical paradigm for the full-cycle safety management and control of complex engineering structures.

【Keywords】civil engineering; intelligent monitoring and evaluation system; structural health monitoring; data perception technology; construction period monitoring

1 引言

当前土木工程结构规模日趋复杂,传统监测手段难以满足高精度、实时化评估需求^[1]。随着物联网与人工智能技术的发展^[2],智能化监测评估系统成为保障工程安全的关键路径^[3]。本文聚焦桥梁、隧道等典型结构,旨在构建集多源感知、智能传输、力学反演与三维预警于一体的闭环监测体系。通过攻克噪声抑制、非线性反演等技术瓶颈,结合实际工程案例,验证系统在邻近施工扰动场景下的应用价值,为行业数字化转型提供理论支撑与实践参考。

2 智能化监测评估系统架构设计

2.1 系统整体架构

智能化监测评估系统采用“感知—传输—分析—应用”四层架构设计(见图1),以满足土木工程多场景监测的全流程需求。感知层针对桥梁、隧道等典型土木工程结构,通过布设GNSS接收机、倾角计等智能传感设备实现数据采集,可实时捕捉结构关键

部位的物理参数变化;传输层采用LoRa无线传输协议,其低功耗、抗干扰特性能够适应工程现场复杂电磁环境,保障监测数据的稳定传输;分析层集成数据清洗模块与AI算法模型,通过多源数据融合与智能计算实现结构响应的精准解析;应用层开发三维可视化平台,动态展示结构健康状态与演化趋势,形成从数据采集到决策支持的闭环管理体系。

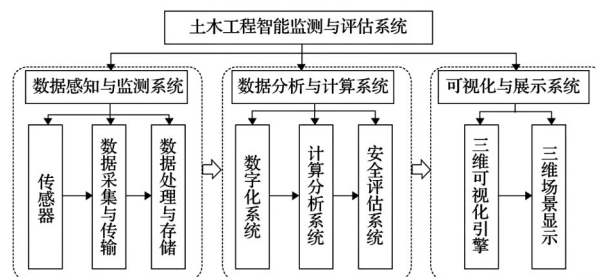


图1 土木工程智能监测评估系统框架

2.2 核心模块功能设计

核心模块功能需针对土木工程结构监测的特性进行定制化开发,以解决工程实践中“参数多样、分

析复杂、决策需直观”的核心痛点^[4]。数据感知模块针对土木工程结构多物理参数监测需求,支持应变、裂缝、温度等关键指标的同步采集,通过多传感器协同工作实现结构状态的全面感知。数据分析模块深度融合结构力学理论与智能算法,嵌入结构力学反演算法,将原始监测数据转化为可直接表征结构物理状态的力学参数,实现从数据到信息的解析。可视化模块基于BIM(建筑信息模型)技术构建三维结构模型,通过实时叠加监测数据与模型几何信息,动态展示结构变形趋势及关键部位受力状态,为工程决策提供直观的可视化支撑。

2.3 系统适配性设计

为确保系统在复杂土木工程场景中的稳定运行,需通过多维度优化实现施工环境的深度适配^[5]。传感器防护模块采用IP68防水外壳设计,可直接适应露天施工的恶劣环境条件,有效抵御雨水、粉尘及机械振动对监测设备的影响;算力部署采用边缘计算节点与云端协同架构,通过边缘节点完成数据预处理与实时分析,降低原始数据传输带宽需求,云端则聚焦深度计算与长期趋势预测,在保障监测实时性的同时显著降低算力成本;兼容性设计方面,系统预留标准化数据接口,支持与工程管理平台及BIM模型的无缝对接,实现监测数据与施工进度、结构设计信息的跨平台互通,为工程全周期协同管理提供数据支撑。

3 智能化监测评估系统核心技术

3.1 多源数据感知技术

多源数据感知技术的核心在于传感器选型与布设方案,需精准匹配土木工程结构的力学特性与监测目标。接触式传感器,如应变计、静力水准仪,凭借与结构表面的直接耦合特性,适用于桥梁基础、墩柱等关键部位的应力应变监测,可实现局部力学行为的高精度捕捉;非接触式技术,如GNSS接收机、三维激光扫描,则通过远距离非接触测量方式,适用于大跨度桥梁、高墩结构的整体变形监测,有效规避结构复杂区域的布设限制。在性能层面,GNSS技术可实现毫米级变形监测精度,无线倾角计功耗控制在10mA以下以满足长期监测需求,而接触式传感器的布设成本相对较低,但需考虑安装对结构的扰动。三者通过性能参数的差异化适配,形成覆盖不

同监测场景的技术选型体系,为工程实践中传感器的科学配置提供依据(见表1)。

表1 土木工程常用传感器技术参数对比表

传感器类型	具体设备	适用场景	精度	功耗
接触式传感器	应变计	桥梁基础、墩柱等关键部位应力应变监测	$\pm 1\mu\epsilon$ (微应变)	极低 (需供电)
	静力水准仪	桥梁基础、墩柱沉降监测	$\pm 0.1\text{mm}$	低 ($< 5\text{mA}$)
	无线倾角计	桥梁墩柱倾斜角度监测	0.01°	$< 10\text{mA}$
非接触式传感器	GNSS接收机	大跨度桥梁、高墩结构整体变形监测	$\pm 2\text{mm}$ (平面)	较高 ($15\text{mA} \sim 50\text{mA}$)
	三维激光扫描	大跨度桥梁、高墩结构整体变形监测	$\pm 1\text{mm}/\text{m}$	高 (外接电源)

3.2 数据处理与分析算法

本文通过多阶段算法协同优化,实现监测数据高精度解析。数据预处理环节采用滑动平均滤波算法滤除施工振动引发的高频噪声,见公式(1)。

$$y(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} x(t-i) \quad (1)$$

式(1)中: $y(t)$ 为 t 时刻的滤波后数据,量纲与原始采集数据保持一致(应变单位为 $\mu\epsilon$,位移单位为 mm), N 为滑动窗口大小,根据监测频率取5-10, $x(t-i)$ 为 $t-i$ 时刻的原始监测数据。针对结构力学参数的非线性反演难题,引入MSVM-MPGA耦合模型,构建以最小化预测误差为目标的优化函数公式(2)。

$$\min J(\theta) = \sum_{i=1}^n (y_i - f(x_i, \theta))^2 + \lambda \|\theta\|^2 \quad (2)$$

式(2)中: $J(\theta)$ 为目标函数值; y_i 为实测力学参数(单位为 MPa); $f(x_i, \theta)$ 为模型预测值(单位同 y_i); n 为样本数量; λ 为正则化惩罚因子,采用交叉验证法择优确定,工程有效寻优区间取0.01~0.1; θ 为待优化参数向量(弹性模量单位为 GPa)。算法采用云边协同分布式计算架构:滑动平均滤波等轻量化预处理任务部署于边缘计算节点,实现现场实时降噪;MSVM-MPGA耦合模型参数反演等大规模迭代计算在云端服务器完成,保障复杂非线性求解的计算深度与求解精度。

3.3 三维可视化与预警机制

三维可视化与预警机制通过多维度技术融合实现监测数据向决策信息的高效转化。在三维场景构

建层面,系统集成激光扫描点云数据与BIM模型,通过几何精度配准技术还原桥梁、隧道等结构的复杂节点,实现毫米级精度的数字化映射。动态预警模块基于结构安全阈值体系,采用三级预警机制,通过红—黄—绿三色编码在三维模型中实时标注风险区域,直观呈现结构异常部位的空间分布特征。决策支持环节通过API接口与施工管理平台无缝对接,将预警信息与盾构推进参数联动分析,自动生成参数调整建议并推送至工程指挥终端,形成“监测数据—风险预警—施工调控”的实时响应闭环。

4 某立交桥施工期监测

4.1 工程背景与监测需求

该立交桥为城市快速路关键节点工程,其结构体系具有“下隧上桥”的复合特征。下部新建双向四车道盾构隧道,直径6.2m,上部包含4条曲线匝道桥与主线桥,最大跨径35m,匝道桥与主线桥通过钢混叠合梁连接形成复杂空间交汇节点。由于隧道盾构施工区域与桥梁基础最小水平距离仅8.5m,盾构机推进过程中刀盘扭矩、土舱压力变化可能引发地层扰动,导致桥梁基础产生不均匀沉降,进而威胁上部结构的整体稳定性。基于上述工程风险,监测系统需重点捕捉两类关键指标:一是桥梁墩柱的三维坐标变化即X、Y轴平面位移及Z轴沉降,二是桥墩倾斜角度其精度需达 0.01° ,通过实时监测数据反映结构动态响应特征,为施工过程中的风险预警与参数优化提供数据支撑,这对监测系统的实时性与测量精度提出了更高要求。

4.2 智能化监测方案设计

基于“感知—传输—分析—应用”四层架构,该立交桥施工期监测方案通过定制化设计,实现全流程数据可靠性保障。

在监测点布设环节,针对“下隧上桥”结构特征,于主线桥及匝道桥面混凝土防护墙布设4处GNSS变形监测点,平面精度达 $\pm 2\text{mm}$;在桥墩承台顶部安装4处无线倾角计,量程为 $\pm 5^\circ$,形成覆盖关键受力部位的监测网络。数据采集流程遵循“高频采样—边缘预处理—云端深度分析”模式,传感器以1Hz频率同步采集三维坐标与倾斜角度原始数据,通过5G工业网关实时传输至边缘计算节点,经异常值剔除与公式(1)滑动平均滤波 $N=8$ 预处理后,再上传至

云端数据库。应用层平台功能模块实现监测数据的多维度可视化,支持集成百度地图API的测点地图定位、时间粒度为1min的三维坐标时程曲线回放,及采样间隔设为5min的变形轨迹动画展示,通过与BIM模型的关联,直观呈现结构变形的空间演化特征,完整构建“感知层数据采集—传输层实时传输—分析层智能处理—应用层决策支持”的技术闭环。

4.3 监测结果分析

监测结果表明,立交桥施工期间应用智能化监测评估系统,盾构施工引发的桥梁墩柱最大沉降量为 0.28mm ,倾斜角度变化 0.015° ,两项关键指标均远低于预设安全阈值,有效验证了“感知—传输—分析—应用”四层架构在复杂工程场景中的可靠性。在盾构推进参数异常波动时段,系统监测到邻近桥墩沉降速率达 0.25mm/d ,触发黄色预警机制,基于公式(2)MSVM-MPGA反演模型的数据分析结果,将推进速度从 30mm/min 动态调整至 25mm/min ,成功避免了地层扰动对上部桥梁结构的潜在损伤。对比传统人工监测模式,该系统实现1min级数据采集频率,数据密度较每周1次的人工测量大幅提升,同时减少70%的人工成本投入。

5 结语

综上,某立交桥案例表明,系统可实时捕捉盾构施工引发的毫米级沉降 0.28mm ,驱动施工参数优化,显著降低安全风险与经济成本。未来需进一步探索全生命周期监测数据与BIM、数字孪生技术的深度融合,并拓展系统在超高层建筑、跨海大桥等复杂场景的适应性。

参考文献

- [1] 林军. 土木工程智能化监测评估系统的应用研究[J]. 智能城市, 2025, 11 (1): 100-102.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 伍伟斌. 基于大数据的桥梁健康监测系统智能化评估研究与应用. 江西省, 江西省交通运输科学研究院有限公司, 2022-12-12.
- [5] 张兴斌, 杨昕光, 潘蓉, 等. 土木工程智能化监测评估系统的理论研究及应用[J]. 工业建筑, 2021, 51 (12): 102-106.