

# 智能预警系统在建筑工程结构安全运维中的应用

陈华良

(核工业华东建设工程集团有限公司)

【摘要】文章针对建筑结构在长期服役过程中存在的风险识别滞后与响应低效问题,提出智能预警系统的系统化构建方案。文章构建了分层感知架构,论述了核心技术路径,完善了平台联动机制,并结合实际案例开展效果评估。此研究成果可提升建筑结构运维的主动性和精度,对推动建筑安全管理的智能化转型具有重要现实意义与理论价值。

【关键词】结构安全;智能预警;建筑运维;数据监测;系统联动

中图分类号: TU317

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2026.04.037

## The Application of Intelligent Early Warning System in the Safe Operation and Maintenance of Building Engineering Structures

CHEN Hua-liang

(Nuclear Industry East China Construction Engineering Group Co., Ltd.)

【Abstract】This paper proposes a systematic construction scheme for an intelligent early warning system in response to the problems of lagging risk identification and inefficient response of building structures during their long-term service. The article constructs a hierarchical perception architecture, discusses the core technical path, improves the platform linkage mechanism, and conducts effect evaluation in combination with cases. The research results can enhance the initiative and accuracy of the operation and maintenance of building structures, and have significant practical significance and theoretical value for promoting the intelligent transformation of building safety management.

【Keywords】structural safety; intelligent early warning; building operation and maintenance; data monitoring; system linkage

### 1 引言

建筑结构在长期服役中易受荷载变化与材料老化影响,存在多源风险隐患,传统依赖人工巡检的方式难以实现高效识别与及时响应。当前的研究正朝着智能感知与数据驱动方向发展,聚焦于传感网络布局、状态识别算法与平台联动机制等方面。焦柯等提出全生命周期运维模型,强调实时感知与分布处理能力<sup>[1]</sup>;张智明等验证多变量融合方法在裂缝扩展识别中的有效性,但现有系统多为局部部署,缺乏闭环响应逻辑与平台集成能力,难以支撑复杂结构的长期稳定运行<sup>[2]</sup>。构建一体化的智能预警系统已成为提升结构安全运维水平的关键方向。

### 2 系统功能结构设计

#### 2.1 传感器网络与数据感知体系

建筑智能预警系统通过多类传感器实时监测关键构件,构建核心力学监测网络。传感器布局依据结构受力分析,并与构件信息绑定,形成标准化监测体系。感知节点根据建筑荷载路径与变形敏感区域的分布密度,构建差异化布控方案,系统对剪力墙、

转换层桁架与柱梁节点区域进行高密度设点,在外围次要构件区域设置常规监测频率的节点,形成由核心到边界的监测梯度。

系统选用抗干扰强、稳定性好的传感器,编号与构件对应。主要配置应变计、位移传感器、温湿度模块及加速度计,实时监测关键构件动态。平台在现场以点位密度控制为核心指标制定布设策略,高应力区间布点间距控制在1.5m至2.5m,普通区域以4m至8m布点为准。节点信号在本地边缘分析器中完成初步滤波处理后接入通信网络,进入中心平台进行融合分析。传感器空间分布结构如图1所示。

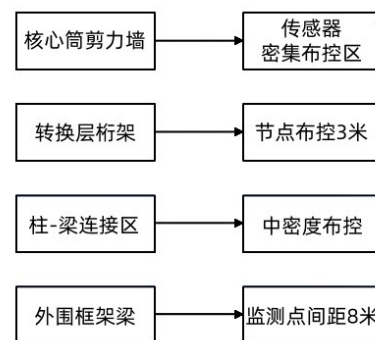


图1 结构关键部位传感器部署示意图

传感器接入边缘模块,按设定频率采样并本地缓存,关键构件采样周期为10s至30s,普通构件为3min至5min,节点具备初判与异常上报功能。通信链路基于低功耗广域网(Low Power Wide Area Network, LPWAN),在复杂环境下仍具备高稳定性,系统内部采用循环冗余结构设计,防止链路中断导致数据缺失。

系统接收标准化监测数据,包括时间戳、构件编号、测量类型、数值和状态码,经解析后实现多源数据融合和状态分析。系统整体数据流转逻辑如图2所示,展示了从原始数据采集到风险信息下发的完整路径。



图2 智能预警系统感知—处理—反馈流程图

系统构建“感知—处理—反馈”闭环架构,节点间数据链路稳定可扩展,保障异常识别与平台联动的连续性与容错性。

## 2.2 异常识别与预警算法逻辑

结构状态异常识别是智能预警系统的核心模块,负责对多源监测数据进行标准化分析并输出分级预警信息。该模块的设计需具备多变量融合能力、阈值灵敏度调节能力与误报控制能力,确保系统在不同工况下保持稳定的判断精度。平台端对原始数据完成预处理后,统一变量量纲并计算结构响应评分,评分函数如式(1)所示。

$$S = \sum_{i=1}^n w_i \cdot \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i} \quad (1)$$

式(1)中: $x_i$ 表示第*i*个实时监测变量, $\mu_i$ 、 $\sigma_i$ 分别为其历史均值与标准差, $w_i$ 为对应变量的权重系数,由历史运行数据与专家经验双重设定。最终评分值SSS与平台设定的动态阈值 $\theta$ 比较,一旦越界即触发预警流程并分配等级标签。

系统预设三级预警等级,对应不同响应策略。异常识别模块内部集成滑动窗口机制,用于实时更新统计参数并调节判定灵敏度,窗口长度依据结构工作周期与数据采样频率灵活设定。为减少环境扰动带来的误报,平台引入预警延时确认机制,仅在评分持续异常达一定周期后方进行最终触发,增强系统在高波动场景下的稳定性。

综合评分机制与预警等级分类共同构成智能预警系统的核心判断逻辑,支持构件级、构造层级多尺

度输出方式,提升了异常识别的精度与应用适配性。

## 2.3 平台联动机制与响应路径

智能预警系统的联动机制不仅承载异常识别后的任务调度与响应路径生成,更是构建建筑结构安全运维闭环的重要逻辑支撑。平台响应系统通过构件定位、等级判断、任务匹配与现场反馈等一系列自动化流程,形成可溯源、可量化、可评估的全流程管理体系。

当异常识别模块输出高于阈值的风险评分后,系统自动触发响应模块的预设逻辑链。首先,预警信息被绑定至具体结构构件,平台调用建筑信息模型(BIM)数据库,实现空间位置精准映射与结构类型识别。构件标签匹配后,系统依据内部风险响应等级规则生成任务类型,并完成人员、工单、设备资源的自动调度<sup>[3]</sup>。

任务生成后同步推送至运维人员移动端终端,运维人员根据任务信息中的构件编号、风险类型与操作建议执行现场处理,过程中可实时上传文本记录与现场照片,系统自动识别任务状态并更新执行进度。任务结束后,平台进入归档评估环节,对响应时效、现场准确性与闭环状态进行综合判定,录入日志数据库作为后续系统学习与策略调整依据。

## 3 应用场景与效能验证

### 3.1 工程部署案例与监测配置

本项目选取南京市雨花台区软件谷片区一座大型交通枢纽综合体作为系统落地实施场景。建筑长期处于人员密集、高频荷载扰动环境,结构安全管控要求极高。运营方在建成初期主要依靠周期性人工巡检及结构沉降点位抽样检测开展结构状态研判,存在结构响应数据缺失、风险事件响应滞后、关键节点识别模糊等管理短板<sup>[2]</sup>。

项目部署的智能预警系统由核心感知层、边缘分析层与平台联动层构成。传感器布设以结构施工阶段有限元分析结果与BIM构件模型为依据,对核心筒、转换层、支撑带及柱梁节点进行高密度布设,构建覆盖主体荷载传递路径的实时感知网络。传感器类型包含电阻应变计、位移计、温湿度传感器与数字加速度计,监测节点编号与构件编号一一对应。传感器选型综合考量安装精度、抗干扰能力与传输稳定性,以高精度分布式数据采集终端为基础单元

完成布设。核心筒墙体布点间距2.0m,转换桁架区布点间距1.5m,柱梁节点区按4.0m间距布设,系统共计布设应力应变类节点212组、位移类传感器88组、环境类节点34组,全部节点编号统一纳入结构空间映射数据库。

所有数据采集节点通过边缘处理器接入中心传输通道,搭建环形通信网络,采用LPWAN协议实现低功耗数据传输。各节点支持数据本地缓存与滤波算法处理,具备基础异常识别与断点续传、远程上传能力。中心平台搭载结构状态评分模块,可对各类监测变量开展周期性评估与动态赋权处理。关键构件数据采集频率设定为20s/次,非关键构件为2min/次,边缘节点数据存储周期为7日,中心平台数据存储周期为3a。

系统于2024年10月投入运行,调试周期14天,正式上线后数据上传率稳定维持在98.6%,累计触发9次有效预警,预警类型涵盖转换层节点应力异常、结构沉降超限、边界墙体应力集中等工况。全部预警事件在系统识别后2h内完成异常初判与工单闭环响应。平台完整记录预警响应路径与处置执行轨迹,为风险类型归类及识别阈值优化提供支撑。

### 3.2 运维成效与响应效率对比

系统正式投运后,平台持续监测并归集传感数据总量超2.3亿组,数据上传完整性稳定保持在98%以上。平台在运行首月内成功识别三起结构响应超限事件:其中两起发生于转换层桁架与核心筒连接节点区域,异常表现为应力跃迁及跨周期变形残差异常上升;另一起为基坑周边墙体侧向变形趋势显著偏离历史预测模型。异常事件识别后,系统完成空间定位、工单生成与任务推送全流程不超过15min,运维人员通过移动端接收指令后,1.2h内完成现场复核与处置反馈<sup>[4]</sup>。

与项目初期人工巡检模式相比,智能系统投用后,构件级响应时长由均值18h缩短至3.4h,风险事件从发现至闭环处置的平均周期由原有2天压缩至当日办结,系统误报率控制在3%以内。运维人工干预占比由100%降至24%,绝大多数异常由系统自主完成初判,并通过标准化任务流完成指令推送。系统连续运行六个月内,累计节约人工巡检工时842h,单构件维护成本较系统部署前下降41.2%。

运维工单与风险事件绑定匹配率达93.6%,运行期间未发生任何人工漏判、漏检情况。系统部署

前后关键运维指标对比如表1所示。

表1 项目部署前后关键运维指标对比表

指标项	部署前 人工模式	智能系统 运行状态	指标变化/%
平均异常事件响应时长/h	18	3.4	↓81.1
工单闭环周期/d	2.1	0.8	↓61.9
运维人工干预占比/%	100	24	↓76.0
构件维护单次成本/元	168	99	↓41.2
巡检工时节约(6个月,h)	无	842	—
工单—事件匹配率/%	无	93.6	—
异常识别误报率/%	无	2.9	—

系统部署后,预警评分函数与动态调度算法持续迭代优化,平台已完成两轮参数重训练与权重自适应修正,部分次要构件采用低频巡检策略,运维资源配置持续优化并趋于最优状态。平台运行日志表明,边缘节点对低阶扰动趋势的前置识别,有效降低了中心平台的数据处理压力,平台运行稳定性显著提升,实现96h无中断稳定运行。系统日志支持按构件类型、风险等级与任务执行状态进行三维交叉分析,相关数据已作为相关部门优化与排程的依据。

## 4 结语

智能预警系统在结构安全运维场景中,实现了传感器布设精度、异常识别算法适配性与平台联动机制的有机融合,可依托高频数据流完成关键构件微小响应的连续感知与量化评分,构建起识别、定位、调度、闭环反馈的全流程响应链。系统运行具备风险事件高响应效率与精准调度能力,有效提升了结构健康管理的数字化、主动化水平,功能体系可满足建筑结构长期服役的安全运维技术要求。

### 参考文献

- [1] 焦柯, 赖鸿立, 彭子祥, 等. 基于物联网的既有建筑全生命周期安全运维服务系统关键技术研究[J]. 工业建筑, 2021, 51 (10): 201-210+8.
- [2] 张智明, 叶英. 基于“链”结构的隧道智能监测与安全预警系统[J]. 现代隧道技术, 2019, 56 (S02): 73-79.
- [3] 陈广宇. 上盖预留超高层办公建筑设计研究与应用[J]. 山西建筑, 2024, 50 (8): 25-28+43.
- [4] 赵红英, 张建伟, 冯媛, 等. 基于物联网技术的智慧健康监测系统设计与实现[J]. 现代电子技术, 2024, 47 (15): 157-162.