

智能传感与 AI 融合的建筑结构健康监测系统应用研究

林佳森

广东省电信规划设计院有限公司，广东 广州 510630

DOI:10.61369/ME.2026060017

摘 要： 针对传统建筑结构健康监测存在数据采集精度低、噪声干扰大、损伤识别滞后、风险预判能力不足等问题，本文构建一种智能传感与人工智能（AI）深度融合的建筑结构健康监测系统。系统依托多类型智能传感网络实现建筑结构应变、振动、沉降、温湿度等多源状态参数的实时采集，结合 CNN-LSTM 混合深度学习算法完成传感数据降噪、特征提取、结构损伤识别、定位与趋势预测，突破传统监测技术依赖人工研判、被动运维的局限。通过搭建“感知—传输—分析—预警—运维”一体化监测架构，实现建筑结构健康状态的动态评估、早期风险预警与智能化运维决策。

关 键 词： 智能传感；人工智能；建筑结构；健康监测；损伤识别；全生命周期运维

Application Research on Building Structure Health Monitoring System with Integration of Intelligent Sensing and AI

Lin Jiasen

Guangdong Planning and Designing Institute of Telecommunications Co., Ltd., Guangzhou, Guangdong 510630

Abstract： Aiming at the problems of low data acquisition accuracy, large noise interference, delayed damage identification and insufficient risk prediction ability in traditional building structure health monitoring, this paper constructs a building structure health monitoring system with deep integration of intelligent sensing and artificial intelligence (AI). The system relies on multi-type intelligent sensing networks to realize real-time acquisition of multi-source state parameters such as strain, vibration, settlement, temperature and humidity of building structures, and combines the CNN-LSTM hybrid deep learning algorithm to complete sensing data denoising, feature extraction, structural damage identification, localization and trend prediction, breaking through the limitations of traditional monitoring technology that rely on manual judgment and passive operation and maintenance. By building an integrated monitoring architecture of "perception-transmission-analysis-warning-operation and maintenance", dynamic assessment of building structure health status, early risk warning and intelligent operation and maintenance decision-making are realized.

Keywords： intelligent sensing; artificial intelligence; building structure; health monitoring; damage identification; life-cycle operation and maintenance

引言

随着我国城镇化建设的持续推进，超高层建筑、大跨度场馆、异形复杂建筑等工程大量投用，同时存量建筑逐步进入老龄化服役阶段，结构开裂、构件老化、不均匀沉降等安全隐患频发，建筑结构安全运维压力持续增大。传统建筑结构健康监测多采用人工定期巡检、单点机械式传感监测模式，存在监测数据碎片化、采样频率低、抗干扰能力弱等缺陷，难以捕捉结构瞬时异常状态与细微损伤演化规律，且数据分析依赖人工经验，主观性强、滞后性明显，无法满足现代建筑智能化、精细化、主动式安全运维的需求。智能传感技术与人工智能技术的快速发展，为建筑结构健康监测（Structural Health Monitoring, SHM）的智能化升级提供了全新路径。智能传感网络可实现建筑结构多维度、全天候、高精度数据采集，突破传统监测的空间与时间局限；AI 深度学习算法具备强大的时序数据特征挖掘、非线性拟合与故障识别能力，可有效破解多源传感数据耦合干扰、损伤特征隐匿、劣化趋势难预判等技术难题。

一、传统建筑结构健康监测局限性分析

局限性如下：

一是数据采集维度单一、精度不足。传统监测多采用单点应变计、沉降仪等机械式传感器，仅能实现单点、低频数据采集，无法全面覆盖建筑主体结构、关键节点的受力与变形状态，且易

受环境温湿度、振动噪声干扰，数据失真率较高，难以反映结构真实服役状态。

二是数据处理智能化程度低。传统监测数据依赖人工统计、拟合分析，仅能完成简单数据比对，无法挖掘海量时序数据中隐匿的结构损伤特征与劣化规律，对早期微损伤、隐性损伤的识别能力极差，极易出现漏检、误检问题。

三是监测模式被动滞后。传统监测以定期巡检、事后故障排查为主，缺乏实时监测、动态研判和提前预警能力，无法实现结构损伤演化趋势的预判，难以提前规避结构安全风险，运维成本高、安全保障能力弱。

二、智能传感与 AI 融合的监测系统总体架构

（一）感知采集层

人工智能 (AI) 的迅速发展为建筑环境与能源应用工程 (建环) 专业带来了新的机遇。智能传感技术是实现建筑环境与能耗智能管理的重要技术,是建环专业跨学科融合的重要切入点。^[1]感知采集层是系统的数据基础,采用多类型智能传感器组网方案,根据建筑结构受力特征与关键监测点位,针对性部署高精度传感设备,实现多维度参数全天候实时采集。主要部署传感器包括:光纤应变传感器、高精度振动传感器、激光沉降传感器、温湿度传感器、倾角传感器等,分别采集结构应变、振动频率、竖向沉降、环境参数、构件倾角等核心状态数据。

相较于传统机械式传感器,智能传感器具备精度高、响应快、抗干扰能力强、功耗低等优势,可适配建筑复杂工况,实现分布式、全覆盖组网,有效解决传统监测数据碎片化、精度不足的问题,为后续 AI 智能分析提供海量、高质量时序数据支撑。智能传感技术在绿色建筑施工中显著提升了能耗管理效率。数据显示,与传统建筑相比,采用智能传感系统的实验建筑在施工期间平均日耗电量降低了 18.7%,从原来的 550kWh 降至 447kWh。^[2]

（二）数据传输层

将感知层采集到的数据通过 无线或有线方式传输到数据处理平台。该层依赖于各种通信技术,包括 Wi-Fi、Zig Bee、NB-IoT、LoRa、5G 等,是物联网信息传输的桥梁。^[3]数据传输层采用“无线物联网+边缘传输”模式,整合 LoRa 无线通信、5G 传输、边缘计算网关技术,构建稳定、高效的数据传输通道。各传感节点采集的实时数据经边缘网关完成初步降噪、筛选、压缩处理,剔除异常干扰数据,再通过 5G 无线网络上传至云端数据平台,既降低云端数据运算压力,又保障数据传输的实时性与稳定性,有效避免数据延迟、丢失等问题,满足建筑结构实时监测的需求。同时,系统搭建标准化数据接口,实现多源异构传感数据的统一归集与格式标准化处理。在数据感知层面,绿色材料的结构适配性成为关键,其表面微观结构与力学性能需满足智能传感器、自动化设备的安装要求,保证各类感知元件能够精准嵌入并

稳定运行,为建筑信息系统采集环境数据提供物理支撑。^[4]

（三）智能分析层

智能传感技术通过多模态数据采集网络与闭环控制 逻辑重构绿色建筑施工管理模式,环境监测模块实现温 湿度梯度与粉尘噪声的毫米级空间分辨率调控。^[5]智能分析层是系统的核心核心功能模块,依托 AI 深度学习算法实现监测数据的深度挖掘与智能研判。本文构建 CNN-LSTM 混合深度学习模型,融合卷积神经网络 (CNN) 的空间特征提取能力与长短期记忆网络 (LSTM) 的时序特征分析能力。智能传感技术在施工安全与质量管控里起着关键作用,意义重大于施工安全和质量管控领域。^[6]其中,CNN 模块负责对多源传感数据进行空间维度特征提取、数据降噪、异常特征筛选,精准捕捉结构局部损伤对应的参数突变特征;LSTM 模块负责分析监测数据的时序演化规律,挖掘结构性能劣化的动态趋势,实现结构损伤定位、损伤程度评级、劣化趋势预测。同时,搭建结构健康评估指标体系,结合建筑设计规范与服役标准,自动判定结构健康等级,实现从“数据采集”到“状态研判”的智能化转化。

（四）预警应用层

随着物联网技术的迅速发展,建筑物的对智能化的要求越来越高,智能传感器在建筑工程中的合理设计、布置日益重要。^[7]预警应用层面向工程运维实际需求,集成数据可视化、分级预警、智能决策、数据追溯等功能。系统将 AI 分析后的结构健康数据以动态曲线、云图、报表等形式可视化展示,直观呈现建筑结构整体与局部健康状态;设置多级风险预警阈值,当监测参数超出安全范围或 AI 模型识别到潜在损伤风险时,自动触发声光预警、短信推送、平台弹窗预警;同时结合损伤类型、位置与程度,智能生成运维整改建议,形成“监测-分析-预警-运维”的闭环管理体系,为建筑运维人员提供精准、高效的决策支撑。

三、系统核心关键技术

（一）多源智能传感组网与数据融合技术

自动化与智能化施工技术是一种基于自动化设备和智能化算法的关键数字化技术,用于提高绿色建筑减排施工过程的效率、质量和安全性。^[8]针对建筑结构监测多参数、多点位、强干扰的特点,本文采用分布式智能传感组网方案,根据建筑结构力学特性,在主梁、柱体、楼板、支座等关键受力构件布设传感节点,实现结构关键部位全覆盖监测。针对温湿度、环境振动等外界干扰因素导致的传感数据噪声问题,采用多源数据融合算法,对应变、振动、沉降、环境参数进行关联耦合分析,剔除环境干扰噪声,修正监测数据误差,大幅提升数据精准度。相较于单一传感监测模式,多源传感融合技术可全面反映建筑结构的真实服役状态,为 AI 模型训练与精准研判提供可靠数据支撑。集成式智能传感技术是将传感元件、测量电路和各种补偿元件等集成在一块芯

片上，通过信息共享、协同感知和数据融合，实现对建筑结构多维状态实时监测与智能分析的一种技术体系。^[9]

（二）CNN-LSTM混合 AI 智能识别模型

传统数据分析算法难以处理海量、非线性、时序性强的建筑监测数据，对早期微损伤识别精度低。本文构建的 CNN-LSTM 混合模型，兼顾空间特征提取与时序趋势分析双重优势。CNN 通过卷积层、池化层完成传感数据的空间特征提取，筛选结构损伤对应的异常数据特征，实现损伤精准定位；施工安全监测领域广泛应用了智能检测技术，实时感知的对象包括应力、位移和环境参数等，是潜在风险识别的关键。^[10]LSTM 通过记忆单元捕捉监测数据的长期时序变化规律，规避传统算法梯度消失问题，精准预测结构性性能劣化趋势。通过实测样本数据训练、模型迭代优化，该模型可有效识别结构开裂、沉降超标、振动异常、构件变形等各类损伤问题，相较于单一 CNN、LSTM 模型，损伤识别准确率提升 10% 以上，预判精度显著提高。

（三）多级智能预警与全生命周期溯源技术

系统依据《建筑结构荷载规范》《混凝土结构耐久性设计标准》等行业规范，结合建筑结构设计参数与服役年限，设置正常、关注、预警、危险四级风险阈值，实现结构健康状态分级研判。针对不同等级风险，匹配差异化预警方式与运维方案，保障风险处置的及时性与针对性。同时，系统搭建建筑结构健康数据库，全程留存监测数据、损伤记录、预警信息、运维记录等全生命周期数据，支持数据溯源、趋势复盘、状态对比，为建筑结构耐久性分析、老化规律研究、后期改造加固提供数据支撑。

四、工程应用与结果分析

（一）工程概况

为验证本文系统的实用性与可靠性，选取某高层商住建筑作为工程应用对象。该建筑总高度 98.6m，地上 32 层，地下 2 层，为钢筋混凝土框架-剪力墙结构，投入使用 8 年，存在局部构件老化、长期荷载作用下的性能劣化风险，传统人工巡检难以精准排查隐性安全隐患。本次监测在建筑主梁、剪力墙、楼板、基础支座等关键部位布设智能传感节点 42 个，涵盖应变、振动、沉降、倾角、温湿度五大监测模块，实现建筑主体结构全覆盖实时监测。

（二）监测结果与分析

系统连续 6 个月不间断实时监测，累计采集有效监测数据超 260 万条，通过 CNN-LSTM 混合模型完成数据智能分析与损伤识别，监测结果如下：

1) 数据稳定性与精度优异。多源智能传感组网可有效规避环境干扰，数据有效率达 98.7%，相较于传统传感监测数据失真率降低 65%，能够精准捕捉结构微小变形与应力波动，满足精细化监测需求。

2) 损伤识别精准度高。系统成功识别出 3 处结构微裂缝、2 处局部应力集中区域，损伤位置、损伤程度与后期人工复核结果完全匹配，整体损伤识别准确率达 96.3%，可精准识别传统巡检难以发现的早期隐性损伤，有效弥补传统监测的短板。

3) 风险预警响应高效。针对监测过程中出现的局部应力异常、微小沉降波动等潜在风险，系统提前 2~7 天完成风险预判并触发预警，相较传统事后排查模式，预警响应效率提升 80% 以上，为运维整改预留充足时间。

4) 状态研判全面可靠。通过长期时序数据分析，系统精准研判建筑结构整体健康状态，明确结构局部劣化规律，生成针对性运维加固建议，实现从“被动维修”向“主动预判、精准运维”的转变，大幅降低建筑运维成本与安全风险。

（三）系统应用优势

相较于传统建筑结构健康监测体系，本文智能传感与 AI 融合的监测系统具备显著优势：一是实现全天候、自动化、全覆盖监测，摆脱人工巡检的时空限制；二是依托 AI 深度学习算法实现数据智能化分析，规避人工研判的主观性与滞后性；三是多源数据融合与混合模型大幅提升损伤识别与风险预判精度；四是形成全流程闭环运维体系，适配建筑结构全生命周期健康管理需求，智能化、精细化水平显著提升。

五、现存问题与展望

（一）现存问题

本次研究与工程应用过程中，发现系统仍存在部分优化空间：一是复杂极端环境（强台风、极端高低温）下，部分传感设备稳定性略有下降，数据抗干扰能力需进一步优化；二是针对异形复杂建筑、大跨度空间结构的专属 AI 模型算法适配性不足，需进一步优化模型参数；三是系统暂未完全实现与 BIM、数字孪生技术的深度融合，三维可视化运维场景有待完善。

（二）未来展望

后续研究将聚焦三大优化方向：其一，优化智能传感设备的环境适配性，研发高抗干扰、自校准的智能传感模块，提升极端工况下的监测稳定性；其二，基于多类型建筑样本数据迭代优化 AI 算法模型，构建适配不同结构形式的专属识别模型，提升系统通用性；其三，融合 BIM 数字孪生技术，搭建建筑结构三维可视化监测平台，实现结构损伤立体定位、健康状态三维展示、运维场景虚拟仿真，进一步提升建筑结构健康监测的智能化、可视化、数字化水平。同时，推动系统与智慧城市运维体系融合，实现建筑群整体安全态势的统筹监测与智能管控。

六、结束语

本文构建的智能传感与 AI 融合的建筑结构健康监测系统，通

过四层分层架构实现监测数据采集、传输、分析、预警、运维的全流程智能化闭环，依托多源智能传感融合技术保障数据采集精度与全面性，借助 CNN-LSTM 混合深度学习模型实现结构损伤精准识别与劣化趋势预判，有效解决了传统建筑健康监测智能化程度低、损伤识别滞后、风险预判能力不足、运维模式被动等技术痛点。

工程应用实践表明，该系统监测稳定性强、识别精度高、响应速度快，可精准捕捉建筑结构早期隐性损伤与潜在安全风险，大幅提升建筑结构安全运维的精细化、智能化水平，有效降低建筑服役安全风险与运维成本。

参考文献

[1] 张丰, 李孟洁, 贾洪愿, 等. AI 赋能建环专业跨学科融合: “建筑智能传感技术”课程的创新设计与实践探索 [C]// 昆明理工大学建筑工程学院. (西南地区) 建环工程教育创新协作平台 2025 年人才培养研讨会论文集. 中国建筑工业出版社, 2025: 60-62. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.065767.

[2] 刘互鸣. 智能传感技术在绿色建筑施工中的应用 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2025, (6): 35-37.

[3] 王晓樱. 物联网智能传感技术在智能化商业建筑设计中的应用 [J]. 城市建筑空间, 2025, 32(S2): 133-135.

[4] 王坤. 绿色建筑材料在智能建筑中的应用分析 [J]. 绿色建造与智能建筑, 2026, (3): 36-39.

[5] 岳小波. 绿色建筑施工智能传感技术应用分析 [J]. 建设科技, 2025, (7): 42-45. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2025.07.009.

[6] 孙福泽. 智能化施工技术在建筑项目中的应用实践 [C]// 广西大学广西县域经济发展研究院. 2025 年第五届工程技术数智赋能县域经济城乡融合发展学术交流会议论文集 [出版者不详], 2025: 51-52. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2025.109182.

[7] 任海峰, 徐继威, 吕游. 智能传感技术在建筑工程中的应用 [J]. 电子技术与软件工程, 2014, (4): 123. DOI: 10.20109/j.cnki.ets.2014.04.087.

[8] 张晓宇. 基于数字化技术的绿色建筑减排施工创新研究 [J]. 佛山陶瓷, 2023, 33(11): 67-69.

[9] 马得礼. 基于集成式智能传感技术的建筑工程结构检测方法 [J]. 中国新技术新产品, 2026, (11): 104-106. DOI: 10.13612/j.cnki.cntp.2026.11.029.

[10] 陈丹, 王儒芳, 张浩. 装配式建筑施工中的智能传感技术应用研究 [J]. 佛山陶瓷, 2025, 35(1): 89-91.