

建筑工程主体结构检测技术研究

高占祥

亳州市建设工程质量检测有限公司，安徽 亳州 236800

DOI:10.61369/ETQM.2026060039

摘 要： 建筑设计主体结构检测技术是保证建筑物的安全性和耐久性的有效方式之一。传统的检测方式在面对复杂的结构及大量的建筑物的情况下存在一定的不足之处，不能适应当前建筑领域对于快速精确的检测要求；新型感测器技术、无人机及机器人检测装置以及大数据和 AI 算法的应用使建筑结构健康检测有了新的突破点。智能仪器提升了检查的速度及准确性，在一些危险或者是不易进入的地方具有很大的优越性。大数据分析以及人工智能算法使得建筑结构损伤判断与警报有了更科学的参考。将来，在建筑结构监测中应用数字孪生及多元数据分析集成技术会起到更大的作用，使建筑工程安全监管迈入更为智能的时代。

关 键 词： 建筑主体结构；智能传感技术；大数据；人工智能；无人机检测

Research on Testing Technology for Main Structures of Building Engineering

Gao Zhanxiang

Bozhou Construction Engineering Quality Inspection Co., Ltd., Bozhou, Anhui 236800

Abstract： The testing technology for the main structures of building designs is one of the effective methods to ensure the safety and durability of buildings. Traditional testing methods exhibit certain deficiencies when confronted with complex structures and a large number of buildings, failing to meet the current demands in the construction field for rapid and precise testing. The application of novel sensor technologies, unmanned aerial vehicles (UAVs), robotic inspection devices, as well as big data and AI algorithms, has introduced new breakthroughs in the health monitoring of building structures. Intelligent instruments enhance the speed and accuracy of inspections, offering significant advantages in hazardous or hard-to-access areas. Big data analysis and artificial intelligence algorithms provide a more scientific basis for assessing structural damage and issuing warnings. In the future, the application of digital twin and integrated multivariate data analysis technologies in building structure monitoring will play a more significant role, ushering in a more intelligent era for construction engineering safety supervision.

Keywords： main building structures; intelligent sensing technology; big data; artificial intelligence; UAV inspection

引言

建筑物主体结构的安全与否直接影响着人们的生命和财产的安全，传统的检测手段存在着信息采集难，监测速度慢以及不全面等问题，在复杂多变的大楼建筑面前尤为明显，而近年来智能传感器技术以及无人机和机器人检测技术的应用打破了传统检测手段带来的瓶颈，从另外的角度对于建筑物结构安全的状态进行观察，既提升了检测准确性和速度，又减少了人力投入，降低了检验费用。大数据加人工智能的应用让建筑的安全状态可以随时查看，甚至提前预警危险情况的到来。而对这类技术的运用也将重塑建筑安全检查的明天，引领建筑业进入智能化，自动化的时代。

一、建筑主体结构检测技术现状

（一）传统检测技术的应用与局限性

传统的建筑物结构检测方法主要有非破损性和损害性的两类。常用的几种非破损性检测手段有超声波，射线探测，磁粉检测，渗透检测以及回弹法等应用于混凝土缺陷、钢筋状况、材料

密实性等方面的检测。混凝土回弹法测定混凝土的抗压强度的准确度与材料均匀度有关，其标准偏差通常会达到 10% 以上。超声波脉冲法利用声速推测内部缺陷信息，但由于存在界面反射现象以及噪声的影响，在粗骨料混凝土中的声速变化可高达 10%–15% 左右；传统钻芯法可以直接读出混凝土抗压强度数值，但是这种检测方式属于破坏性的取样方式，而且它的操作繁琐复杂又耗资

较大。尽管《建筑结构检测技术标准》GB/T50344-2019仍把它们作为一种常规检测方法,但是它们的准确性及适用范围都有一定的局限性^[1]。

(二) 新型结构检测方法的兴起

新型检测手段近年来发展迅速,在智能传感器以及非接触式测量方面尤为突出。分布式光纤传感器及无线传感网(WSN)监测装置可以通过获取结构物上的应变、温度、振动等参数来进行结构物长时间健康情况的实时监测;先进材料与纳米科学技术的应用提升着检测敏感度从而使得传感器可以更好地检测到微裂纹、腐蚀等早期病害;结构健康监测利用机器视觉、激光扫描仪、加速度计等多种传感器进行数据分析从而可以在不影响结构物的情况下自动发现裂缝、变形等缺陷特征;图像算法和深度学习的应用提升了裂缝判断能力让检测误报率和漏检概率明显减少。而对于先进的无损检测技术也有热成像,雷达探测技术来实现大面积结构外表缺陷的快速排查。

(三) 国内外建筑结构检测技术的对比研究

国内外的结构检查技术体系都相对完善,在欧美等先进国家,精确无损检测及长期健康管理平台大量应用于大型公共建筑中,比如使用光纤布拉格光栅(FBG)测应变并与BIM平台融合起来形成虚拟数字化结构管理系统。国际上的ACI,EN系列标准对检验流程、数据获取与分析判断都有具体的技术规定。而国内近年虽然也有一定进展,颁布了一些关于GB/T50344-2019等标准来逐步建立和完善现场试验程序,但是传统的检查方式仍旧为主流,智能化监控设备的应用范围以及覆盖面还不够全面深入。国内外对数据采集分析,在传感器网络布设以及实时监控方面,全寿命跟踪管理方面都各有侧重,国外更加注重多种技术手段结合以及连续监测,国内则侧重于施工质量检查以及阶段性的检测规范化^[2]。

二、智能传感技术在建筑结构检测中的应用

(一) 无线传感技术的应用研究

无线感知技术应用于建筑结构健康监测(SHM)实时获取结构应变、振动及温度等重要指标,并由无线结点网络(ZigBee、LoRa、Wi-Fi)完成信息的传递,传感器节点融合加速度传感器、应变片以及温度检测器可以灵活部署在建筑结构重要位置提高覆盖面,采样率可以根据被监测对象的不同灵活调节,适用于模态研究及固有频率的测量,了解刚度变化情况以及损伤位置,在此基础上相比传统的有线方案具有更强的扩展性和节约布线成本的优点并且可以利用云计算远程维护管理,但是节点能量消耗以及信号遮挡等问题有待进一步解决才能实现长期稳定的监测应用。

(二) 自诊断与自修复传感器的开发与应用

自诊断及自修复型传感器内部集成微处理器以及相应处理程序实现对自身的实时监控来保证长时间内进行持续性的检测。该类型传感器含有自我诊断检测和自我校正功能,在定期进行灵敏度校准的同时也可以在失效情况下发送报警信号降低检修率和人工干预程度。一些新型智能材料融合了微电子机械系统(MEMS)和纳米技术为传感结构增加自我认识、行动和微小恢复的能力,当其产生细微裂缝甚至是断路等问题时能依靠物质反应特性来进行局部的自行修理从而恢复其检测效果,自诊断型感

器能够在恶劣气候条件下依然维持较高的稳定水平大大增强了整个检测系统鲁棒性能。自修复技术目前还处在试验及工程应用阶段,在增加传感器寿命,减少维修费用方面有着很大优势^[3]。

(三) 基于传感数据的结构健康监测系统

以传感数据为基础的结构健康监测系统的整体流程包含四个部分:数据获取,数据预处理,特征提取及状态判断。传感器得到的应力、应变、振动这些高维信号经由边缘计算单元或者云端服务器进行滤波、降噪、变量筛选从而得到反映结构状态的重要特征信息,在此基础上应用机器学习以及模式识别的方法可以从大量监测数据中发现结构性能的变化规律,达到对损伤位置以及程度的判断。当代SHM系统可以融合物联网的技术使得监测数据能够及时上传至云端数据库并且能够在各类终端上查看并做出比较分析,有利于管理人员做出正确的决策。多传感器融合数据处理技术让检测设备能够兼顾环境变化因素(例如气温、湿度)等对结构的响应所产生的影响来提升损伤检测精度。

三、大数据与人工智能在建筑结构检测中的融合

(一) 大数据技术在结构监测中的应用

大数据技术作为建筑结构健康监测(SHM)的重要组成部分,在其中主要发挥着数据处理以及数据分析的功能作用。结构监测体系通过部署大量传感器来收集应力、加速度、温度等多种类型的实时数据,这类数据流量一般能达到每秒几十到几百MB量级,然后持续进行长时间观测积累下来就达到TB级的数量级,如此之大的数据体量就需要有强大的数据库以及分布式集群才能做到高效的检索以及运算。大数据处理的方式有统计学模型法、多元时间序列分析法以及特征选择等方法,可以很好的对高维度数据、杂音和外界影响因素进行过滤,从而提升对结构现状判断准确率和可靠性。统计模式识别方法可以从大量的振动数据里筛选出损伤相关的特征量来供后面对于损伤进行判断使用。而数据挖掘技术也具有异常数据发现以及缺少数据插补的功能,增强桥梁监测数据的一致性和数据质量管理。大数据应用于桥梁结构健康监测领域可以做到千万级别的样本数据并行计算和重要模式的挖掘,给不同层次的结构物的性能分析提供支持。

(二) 人工智能算法在数据分析中的创新应用

人工智能(AI)算法在结构健康监测的数据分析中进一步提高了对于损伤识别、定位以及预警的能力。常见的算法有机器学习(支持向量机、随机森林)和深度学习(卷积神经网络、递归神经网络)等用以从大量的数据里自动抽取结构的状态指标,深度学习模型可以利用多层次网络来学习更加复杂的非线性映射关系,人工智能算法在振动响应数据模式识别上已经达到了90%以上识别精度的水平,远远超出传统的阈值法。深度学习加上传感器信息能够使得对于裂纹、界面脱粘这类细小损伤进行灵敏的探测,降低误报概率。人工智能的应用也用来构建结构性性能预测模型,以实时监测数据以及环境因子(风荷载、温度等)为输入,模型可以输出结构未来的概率分布,从而作为风险警报的数量指标^[4]。

(三) 大数据与人工智能结合的检测平台设计与实现

基于大数据以及AI的监控系统一般使用分布式系统,由数据采集层、存储层、计算层、展示层组成。其中数据采集层使用物

联网网关将传感器数据及时传送到中心服务器中；存储层通过分布式数据库及时间序列数据库存放大量监测信息并可实现高效的查询以及跨越周期比较；数据分析层融合了机器学习及深度学习算法，根据不同结构形式进行特征提取、故障识别、损伤判定以及健康评估等工作；展示层以图表形式展示结构病害演变情况以

及警报提示等。平台的设计一般采取 GPU 并行加速运算来适应大数据量实时性要求如多层神经网络训练计算耗时由几小时变为几分钟等。系统构建也要考虑到数据质量监控手段和模型迭代更新模式以及外界因素干扰分离措施以便保证体系结构状况判断的有效性和合理性^[9]。如表1所示。

表1 大数据与 AI 在 SHM 中的关键技术比较

技术类别	核心功能	典型算法 / 方法	主要优势
大数据分析	数据清洗、特征提取	统计模式识别、多变量分析	支持海量数据处理与噪声抑制
机器学习	模式识别、分类预测	SVM、随机森林	泛化能力强、适合中等数据量
深度学习	特征自动提取、预测	CNN、RNN	自动学习复杂模式、适应大数据
平台架构	实时分析、结果展示	分布式存储、GPU 加速	支持实时监测与可视化

四、创新技术对建筑主体结构检测的推动作用

（一）智能化检测设备的研发与应用

智能监测仪器有三维激光扫描仪、光电式应变计与地层折射雷达（GPR），用来提高结构监测准确性以及自动化程度。三维激光扫描仪可以在大跨度结构上做到毫米级几何变形测量，误差相较传统的测量降低了60%以上；光电式应变计使用的是光纤布拉格光栅（FBG），可以达到1cm的空间解析度，可以屏蔽掉电磁干扰，并且在受拉应力区精度优于传统的应变片；地层折射雷达对混凝土进行测厚以及裂缝探测分辨率达到10cm 适合大面积测量；配有惯性测量单元（IMU）的仪器可以实时记录振动信息，可以得到高信噪比的数据对后续的结构动力特性研究有好处。这些智能化装备提升了检测速度，促进了由点式化采样向面式乃至体式化数据收集方式的发展。

（二）基于无人机和机器人检测技术的研究

无人机（UAV）以及机器人监控装置对于那些无法触及或者有风险环境下的构件检测有着重要意义。装载高分辨率摄像机、多波段探测器以及激光雷达（LiDAR）的无人机可以在短时间内完成高楼外墙、悬挑梁底面等地点的扫描工作，它的定位误差能控制在 $\pm 2\text{ cm}$ ，图像分辨率达到到 0.5 mm/pixel ，适合裂缝、掉落等问题的表面损伤自动辨认；而地上机器人可以在沟道、管道等密闭场所实现持续观察并应用超声波 / 红外热像仪得到内部损害状况，借助自主航行策略以及导航方案，机器人可以大大降低人员进出此类场所的频次，保证检查覆盖面以及再现性。部分先进的机器人系统已经可以完成对于混凝土结构裂缝宽度检测自动化的任务了，它的检测误差保持在了 $\pm 0.1\text{ mm}$ 左右^[10]。

（三）未来建筑结构检测技术的发展趋势

未来的技术发展趋势主要是数字孪生技术、区块链监测数据证据固定技术和多源异构监测数据融合检测平台的广泛使用。数字孪生技术把实时监测数值与结构物理模型结合起来来进行结构状态的实时模拟报警，实时响应速度可以做到1s内报警，适用于超载工况

下的实时监测。区块链技术把监测数据不可被修改特性应用于项目的全过程管理过程中来提高数据的真实可靠程度以及审计效率。多源异构监测数据融合技术综合运用了视觉，激光扫描，声波等监测信息，结合贝叶斯推理和深度学习的方法，提高了对损伤识别的准确性，可以使假阳性率降到5%以下。智能、互通、智慧将是未来建筑主体结构检测技术发展的主流趋势。如图1所示。

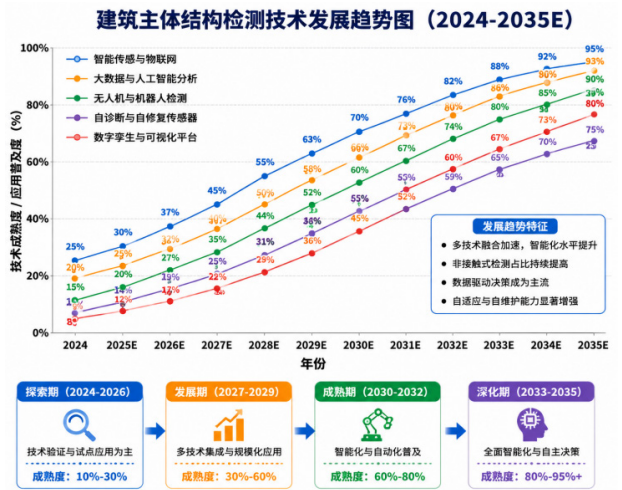


图1 建筑主体结构检测技术发展趋势（2024-2035）

五、结语

伴随着建筑工程主体结构检测技术的进步，智能化、无人化以及大数据的应用大大的提高了其检测效率及精确度。智能仪器、无人机和机器人等各种新事物的应用也带动了检测方式的变革，在一些不易到达的地方有着非常明显的优势。在未来数字孪生和多源信息融合将会使建筑主体结构检测更加智能化从而为建筑的安全保驾护航。

参考文献

[1] 范美红. 建筑工程主体结构检测内容与方法研究 [J]. 安徽建筑, 2024, 31 (06) : 180-181.
[2] 骆源. 房建工程主体结构检测技术研究 [J]. 中国建筑装饰装修, 2025, (11) : 114-116.
[3] 孟凡友. 主体结构检测方法在建筑工程质量检测中的应用 [J]. 建材发展导向, 2025, 23 (24) : 112-114.
[4] 张钟钦. 建筑工程质量检测中主体结构检测重点与方法探索 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024, (05) : 126-128.
[5] 徐博文. 建筑工程质量检测中主体结构检测重点及方法 [J]. 建材发展导向, 2023, 21 (08) : 22-24. DOI:10.16673/j.cnki.jcfzdx.2023.0111.
[6] 张鹏. 房建工程主体结构检测技术研究 [J]. 房地产世界, 2023, (23): 142-144.