

建筑结构健康监测大数据分析 with 智能诊断方法

刘嘉诚

湖南建工集团有限公司 湖南长沙 410000

摘要: 建筑结构健康监测是保障工程结构安全服役的核心手段, 随着监测技术升级, 海量多源异构监测数据的涌现为结构状态诊断提供了丰富依据, 但也对数据处理与分析能力提出了更高要求。本文围绕建筑结构健康监测大数据的特征与处理技术, 阐述多源数据类型特点、预处理降噪方法及数据融合提取技术; 系统分析基于数据驱动、机器学习、深度学习的三类智能诊断方法的应用逻辑; 探讨智能诊断系统的功能模块构建、结果可解释性可视化及实际应用中的关键挑战。研究旨在通过大数据分析 with 智能技术的融合应用, 提升建筑结构健康诊断的精准性与时效性, 为结构安全运维提供科学支撑。

关键词: 建筑结构; 健康监测; 大数据分析; 智能诊断; 损伤识别

引言

建筑结构的城市基础设施核心, 其安全稳定关乎公众生命财产与社会经济。长期服役中, 结构受荷载、环境、材料老化等影响易损伤, 若不及时处理可能失效坍塌。结构健康监测通过在关键部位布设备采集数据, 为状态评估和故障诊断提供支撑, 是结构全生命周期安全运维重要手段。随着相关技术发展, 监测系统监测范围扩大、数据量激增、类型复杂, 形成多源异构大数据特征。传统诊断方法难处理海量数据, 导致诊断结果精准性和时效性不足。大数据分析技术结合智能算法, 为建筑结构健康智能诊断提供新路径。因此, 研究监测大数据处理方法与智能诊断技术、构建诊断体系, 对提升结构安全运维、降低灾害风险有重要工程实践和理论意义。

一、结构健康监测大数据的特征与处理

(一) 多源异构监测数据的类型与特点

建筑结构健康监测大数据来源于多种类型的监测设备与系统, 数据类型丰富, 呈现出显著的多源异构特征。按数据来源可分为结构响应数据、环境激励数据、材料性能数据三类核心数据。结构响应数据是监测系统的核心数据, 通过加速度传感器、应变传感器、位移传感器等设备采集, 包括结构在荷载作用下的加速度、应变、位移、振动频率等参数, 能够直接反映结构的受力状态与变形特征。这类数据具有实时性强、采样频率高、数据量大的特点, 是结构损伤识别与性能评估的重要依据。

环境激励数据由温湿度、风速、地震动等传感器采

集, 涵盖温度、湿度、风速、地震动等参数。环境因素显著影响结构响应, 如温度使结构热胀冷缩产生附加应力, 风速影响高层建筑振动。该数据能区分结构真实损伤与环境干扰, 其波动大, 与结构响应数据耦合复杂。材料性能数据由耐久性、腐蚀等传感器采集, 包含混凝土强度、钢筋锈蚀程度、钢结构疲劳损伤等参数, 反映结构材料老化与损伤, 具长期性、缓慢变化特点, 是评估结构长期性能退化的关键。此外, 监测数据还有结构设计图纸、施工记录、维护档案等静态数据, 为大数据分析提供背景支撑^[1]。

(二) 大数据的预处理与降噪方法

结构健康监测大数据在采集过程中, 受传感器精度、设备故障、传输干扰等因素影响, 不可避免地存在噪声、缺失值、异常值等问题, 若直接用于分析, 会严重影响诊断结果的准确性。因此, 数据预处理与降噪是大数据分析的基础环节, 其核心目标是提升数据质量, 为后续分析提供可靠数据支撑。

数据预处理主要包括数据清洗、补全、标准化操作。数据清洗用统计分析、异常检测等方法, 如 3σ 准则、箱线图, 识别并剔除异常值与噪声数据; 对于缺失值, 采用插值法、均值填充法、机器学习预测法等补全, 确保数据完整。数据标准化用归一化、标准化等方法, 将监测数据转换为统一尺度, 消除量纲影响, 为多源数据融合分析奠定基础。数据降噪针对结构响应数据的噪声干扰, 用信号处理技术提取有效信号。常用方法有小波变换、傅里叶变换、滤波技术等。小波变换能分离信号与噪声, 保留有效信息; 傅里叶变换将时域信号转频域,

滤除非结构振动频率成分；滤波技术依噪声频率选合适滤波器抑制噪声。

（三）数据融合与特征提取技术

数据融合与特征提取是从海量监测数据中提取有价值信息的关键环节，为结构健康智能诊断提供核心输入。数据融合技术通过整合多源异构数据，消除数据冗余与歧义，提升信息的完整性与可靠性。根据融合层次的不同，可分为数据级融合、特征级融合与决策级融合。数据级融合直接整合原始监测数据，通过对齐时间序列、统一格式实现多源数据互补；特征级融合先提取各类数据特征，再融合特征向量形成更全面表示；决策级融合基于不同数据源诊断结果，用投票、加权平均等方法综合决策，提升可信度。特征提取从处理后数据中提取反映结构健康状态的关键特征，需具备敏感性、稳定性与可区分性。针对结构响应数据，常用方法有时域、频域、时频域特征提取。时域特征含均值、方差等统计参数，反映信号时域分布；频域特征含功率谱密度等参数，分析频率分布识别结构振动特性变化；时频域特征结合时频域优势，用小波包变换等方法提取不同时间与频率范围特征，适用于非平稳信号分析。通过数据融合与特征提取，将海量原始数据转为表征结构健康状态的特征向量，为后续智能诊断提供支持^[2]。

二、基于大数据分析的智能诊断方法

（一）基于数据驱动的损伤识别方法

基于数据驱动的损伤识别方法摆脱了对结构精确数学模型的依赖，直接通过分析监测大数据中的隐含规律，实现结构损伤的识别与定位。该方法以海量监测数据为基础，通过挖掘结构健康状态与监测数据之间的映射关系，建立损伤识别模型。常用的方法包括基于统计分析的方法、基于信号处理的方法与基于模式识别的方法。

基于统计分析的方法通过分析结构响应数据的统计特征变化，判断结构是否存在损伤。例如，对比结构健康与疑似损伤状态下振动频率、振型、阻尼比等模态参数的统计差异识别损伤；采用假设检验、方差分析等统计方法，判断监测数据统计特征是否显著变化以确定损伤是否发生。基于信号处理的方法，通过分析监测信号时频特征变化实现损伤识别，如用小波变换分析结构振动信号奇异点，分析信号功率谱密度变化识别结构刚度变化。基于模式识别的方法将损伤识别转化为模式分类问题，提取健康与损伤状态数据特征建立分类模型，对未知状态结构分类识别，该方法无需预设损伤模式，能自适应识别不同类型损伤，适用于复杂结构损伤诊断。

（二）基于机器学习的性能退化评估方法

基于机器学习的性能退化评估方法通过构建机器学习模型，分析监测数据与结构性能之间的关系，实现对结构性能退化过程的量化评估与趋势预测。该方法能够自动学习监测数据中的复杂规律，适应结构性能的动态变化，提升评估的精准性与时效性。常用的机器学习算法包括支持向量机、决策树、随机森林、人工神经网络等。

支持向量机构建最优分类超平面分类结构性能状态，还可通过回归分析量化性能退化程度；决策树与随机森林算法特征处理能力强，能处理高维监测数据，通过构建决策规则或集成决策树识别与评估结构性能退化阶段；人工神经网络模拟人脑信息处理机制，训练模型拟合监测数据与结构性能指标的非线性映射关系，实现结构性能定量评估与预测。实际应用时，先以结构健康监测数据训练模型确定参数，再将实时监测数据输入模型输出当前性能指标，最后分析指标变化趋势评估退化速度、预测剩余寿命。该方法能捕捉结构性能退化的非线性与不确定性，为结构维护决策提供科学依据^[3]。

（三）基于深度学习的异常状态预警方法

基于深度学习的异常状态预警方法利用深度学习模型强大的特征学习与非线性拟合能力，从海量监测数据中自动挖掘结构异常状态的特征模式，实现对结构异常的早期预警。深度学习模型能够处理高维、非线性、非平稳的监测数据，无需人工设计特征，直接从原始数据中提取深层特征，显著提升异常识别的精准度。常用的深度学习模型包括卷积神经网络、循环神经网络、自编码器等。

卷积神经网络擅长提取数据的空间特征，通过卷积层、池化层等结构，自动提取监测信号中的局部特征与全局特征，适用于处理结构振动信号、图像监测数据等；循环神经网络具有记忆功能，能够捕捉监测数据的时间序列依赖关系，适用于分析结构性能随时间变化的动态数据，预测结构状态的演化趋势；自编码器通过无监督学习方式，学习结构健康状态下的数据分布特征，构建正常状态的重构模型，当输入异常状态数据时，重构误差会显著增大，据此实现异常状态的识别与预警。

三、智能诊断系统的实现与挑战

（一）智能诊断系统的功能模块构建

智能诊断系统的功能模块构建需围绕数据处理、智能诊断、结果输出、决策支持等核心需求，实现从监测数据采集到诊断决策的全流程自动化与智能化。系统主要包括数据采集模块、数据处理模块、智能诊断模块、

结果可视化模块与决策支持模块。

数据采集模块通过与结构健康监测系统的传感器网络、数据采集设备对接,实现多源监测数据的实时采集与传输,支持多种数据格式的接入,确保数据采集的全面性与实时性;数据处理模块集成数据预处理、降噪、融合与特征提取功能,对采集的原始数据进行自动化处理,输出高质量的特征数据;智能诊断模块嵌入数据驱动、机器学习、深度学习等诊断算法,根据不同的诊断需求选择合适的算法模型,实现结构损伤识别、性能退化评估与异常状态预警;结果可视化模块采用图表、曲线、三维模型等可视化方式,直观展示结构健康状态、损伤位置、性能退化趋势等诊断结果,便于管理人员快速掌握结构状态;决策支持模块基于诊断结果,结合结构设计标准、维护规范等信息,自动生成维护建议与决策方案,为结构维护管理提供科学支撑^[4]。

(二) 诊断结果的可解释性与可视化

诊断结果的可解释性与可视化是智能诊断系统实际应用的关键,直接影响管理人员对诊断结果的理解与决策的有效性。当前,许多智能诊断算法尤其是深度学习算法,被称为“黑箱”模型,其诊断过程与决策逻辑难以解释,导致管理人员对诊断结果的信任度不足,制约了系统的推广应用。因此,提升诊断结果的可解释性至关重要。通过引入注意力机制、特征可视化技术、模型蒸馏等方法,揭示算法模型的决策依据,使诊断结果的生成过程透明化。

诊断结果的可视化需满足直观性、全面性与交互性的要求。采用结构三维可视化模型,将损伤位置、损伤程度直观标注在模型上,使管理人员快速定位问题;通过趋势曲线图展示结构性指标随时间的变化,清晰展现性能退化趋势;采用仪表盘、预警指示灯等形式,实时展示结构健康状态等级、异常预警信息等关键内容。同时,提供交互功能,管理人员可通过点击、查询等操作,获取详细的诊断数据与分析报告,实现对诊断结果的深度探索。

(三) 面向实际应用的关键技术挑战

智能诊断系统在实际应用中面临诸多关键技术挑战,制约了其推广与深化应用。数据质量与可靠性问题突出,实际工程中监测设备易受环境干扰、老化失效等影响,导致监测数据存在噪声、缺失、异常等问题,即使经过预处理,仍可能残留部分无效信息,影响诊断结果的准确性;不同结构的类型、规模、服役环境存在差异,监

测数据的特征也各不相同,导致基于某一结构训练的诊断模型难以直接应用于其他结构,模型的通用性与适应性不足;结构损伤的复杂性与不确定性,结构损伤可能存在多种类型、不同程度的组合,且损伤演化过程受多种因素影响,难以通过单一模型全面准确捕捉;实时性要求与计算成本的矛盾,大规模结构的监测数据量巨大,智能诊断算法尤其是深度学习算法的计算复杂度高,对硬件设备的算力要求较高,在实时诊断场景中可能面临计算延迟问题^[5]。

结语

建筑结构健康监测大数据分析 with 智能诊断方法应用,为结构安全运维提供新技术路径,提升诊断精准性、时效性与智能化水平。对多源异构监测数据预处理、融合与特征提取,为智能诊断提供数据基础;基于数据驱动、机器学习、深度学习的智能诊断方法,实现结构损伤识别、性能退化评估与异常状态预警,构建诊断体系;智能诊断系统功能模块构建与结果可视化,保障诊断结果应用。但智能诊断技术应用面临数据质量、模型通用性等挑战,需推进技术创新。未来,应加强多学科交叉融合,结合多领域先进技术优化算法,提升模型通用性与适应性;加强工程实践验证,积累监测数据与诊断经验,推动工程化应用;注重诊断结果可解释性与实用性,提升易用性。突破技术瓶颈,发挥大数据分析 with 智能诊断技术优势,保障建筑结构安全稳定运行,推动结构健康监测领域高质量发展。

参考文献

- [1] 张科学, 徐兰欣, 李旭, 等. 透明工作面智能化开采大数据分析决策方法及系统研究[J]. 煤炭科学技术, 2022(002): 050.
- [2] 项贻强, 白兵, 杨云深. 悬浮隧道智能化健康监测体系研究[C]// 第六届全国桥梁结构健康与安全技术大会. 2020.
- [3] 李秉超. 基于油藏和井筒监测数据的油井生产问题智能诊断方法研究[D]. 常州大学, 2022.
- [4] 于兴中. 基于大数据分析的风机电机组健康状态智能评估及诊断措施[J]. 中文科技期刊数据库(全文版)工程技术, 2021(12): 2.
- [5] 龙卓. 基于多维信息融合与视觉知识的电机故障智能诊断与预测技术研究[D]. 湖南大学, 2021.