

# 智能传感技术在建筑结构健康监测中的应用

苏小杰

中大智能科技股份有限公司广东分公司 广东 广州 510000

**摘要:** 智能传感技术在建筑结构健康监测中发挥着关键作用。通过高精度传感器实时捕捉结构变形、应力、振动等物理参数,结合先进的数据处理与分析技术,实现对建筑结构健康状况的全面评估。该技术不仅提高了监测的实时性和准确性,还为结构的维护决策提供了科学依据。尽管面临耐久性和数据处理等挑战,但通过材料创新、算法优化和标准化工作,智能传感技术正不断突破限制,展现出广泛的应用前景。

**关键词:** 智能传感技术; 建筑结构; 健康监测

## 引言

随着建筑行业的快速发展,建筑结构健康监测成为确保建筑安全的重要手段。智能传感技术以其高精度、实时性和智能化特点,在建筑结构监测领域展现出巨大潜力。该技术通过集成多种传感器和数据分析算法,能够实时监测结构的物理状态,及时发现潜在的安全隐患。本文旨在探讨智能传感技术在建筑结构健康监测中的应用及其优势与挑战,为相关领域的研究和实践提供参考。

## 1 智能传感技术的基本原理

智能传感技术的核心在于传感器对物理量的感知与转换。传感器依据不同的物理效应将建筑结构的各类物理参数转化为可测量的电信号或光信号等。如温度传感器利用热敏电阻的电阻值随温度变化的特性,将温度变化转换为电阻值的改变,产生相应的电信号;压力传感器则基于压阻效应或压电效应,把压力作用转化为电信号输出。信息处理环节是智能传感技术的关键。在获取传感器原始数据后,信息处理系统运用滤波算法去除噪声干扰,如采用小波变换等方法精准分离信号与噪声,提高数据的信噪比。通过数据融合技术整合来自多个传感器的数据,增强数据的可靠性与完整性。利用特征提取算法挖掘数据中的关键特征,为后续的分析与决策奠定基础。通信技术保障了数据的传输与共享。无线通信技术如 ZigBee、蓝牙、Wi-Fi 及新兴的 5G 技术等,在智能传感中发挥重要作用。ZigBee 以其低功耗、自组网的特点适用于建筑结构中大规模传感器网络的数据传输;蓝牙则在短距离、低速率的数据传输场景下表现出色,方便移动设备与传感器的连接;5G 技术凭借高速率、低延迟的优势,能够实现海量监测数据的快速上传与远程设备的实时控制,确保监测信息的及时传递与处理,实现对建筑结构健康状态的远程、高效监测与管理。

## 2 智能传感技术在建筑结构健康监测中的应用

### 2.1 结构变形监测

在建筑结构健康监测中,结构变形监测是关键环节。智能传感技术通过采用如光纤传感器、激光测距传感器等先进设备实现高精度监测。光纤传感器利用光在光纤中的传输特性,当结构发生变形时,光纤的应变会引起光的波长或相位变化,通过解调技术可精确获取变形信息。其分布式测量能力可在长距离上布置多个测量点,实现对建筑结构整体变形的连续监测,如在大型桥梁结构中,沿桥身布置的光纤传感器能实时捕捉不同部位的变形情况,从桥墩的沉降到桥面的挠曲变形都能精准测量,为评估结构的整体稳定性提供全面的数据支持。激光测距传感器则基于激光的反射原理,发射激光束到目标表面并测量反射光的时间延迟或相位差,计算出传感器与目标之间的距离变化,实现对结构位移的精确监测。在高层建筑的风致变形监测中,将激光测距传感器安装在建筑顶部与底部等关键位置,可实时监测建筑在风力作用下的侧向位移,其高精度的测量能力能够检测到微小的变形量,及时发现结构存在的安全隐患,为建筑结构的安全评估与维护决策提供关键依据<sup>[1]</sup>。

### 2.2 应力与振动监测

(1) 建筑结构性能与健康状况评估阶段,应力与振动监测扮演着至关重要的角色。利用压电传感器,基于压电效应原理,实现对结构应力的精确测量。当压电传感器被安装于建筑框架结构的关键梁柱节点处时,它们能实时监测结构在竖向荷载和水平荷载作用下的应力变化,精准捕捉应力集中区域。这些数据对于评估结构的承载能力和识别潜在的疲劳损伤具有重要意义。(2) 磁致伸缩传感器在应力监测领域同样展现出显著优势。该传感器利用磁致伸缩效应,通过测量材料在磁场作用下的伸缩变形来反映结构所受应力。磁致伸缩传感器具有

响应速度快、精度高的特点，特别适用于大型钢结构建筑的应力分布监测。如在大型体育场馆的钢结构屋架监测中，磁致伸缩传感器能够准确测量各杆件在不同工况下的应力状态，确保结构在各种复杂荷载条件下的安全性。（3）对于振动监测，加速度传感器是不可或缺的设备。它通过测量结构的加速度响应来获取振动信息，分析结构的动力响应特性。在地震频发地区，加速度传感器能够记录建筑在地震波作用下的振动过程，并通过分析振动频率、幅值和持续时间等参数，进行模态识别。利用模态分析方法，如特征值分解算法，准确提取结构的固有频率、振型等模态参数，揭示结构的动力特性变化。这些信息对于判断结构是否存在损伤或刚度退化等问题，以及为结构的抗震性能评估和加固改造提供科学依据具有重要意义。

### 2.3 损伤识别与评估

智能传感技术在建筑结构损伤识别与评估方面具有显著优势。通过长期监测结构的损伤敏感指标，如应变、位移、振动频率等，结合先进的信号处理技术和机器学习算法，实现对损伤的精准识别与评估。在信号处理方面，采用小波分析技术对监测信号进行多分辨率分解，能够突出信号中的局部特征和突变信息，有效提取损伤引起的微弱信号变化。如建筑基础沉降导致的结构损伤监测中，小波分析清晰地从应变信号中分辨出因沉降引起的异常变化，为损伤识别提供关键线索。机器学习算法在损伤评估中发挥着核心作用。基于神经网络的方法，如多层感知器（MLP），通过大量的样本数据训练，学习结构在不同损伤状态下的特征模式。将监测到的结构参数作为输入，神经网络能够输出结构的损伤程度和位置的预测结果。支持向量机（SVM）则利用其强大的分类能力，区分结构的健康与损伤状态，并对损伤类型进行分类。通过对历史监测数据的学习和不断更新训练模型，这些机器学习算法能够适应不同建筑结构和环境条件下的损伤识别需求，提高损伤评估的准确性，降低人工检测的成本和风险，为建筑结构的维护管理提供科学、可靠的决策依据<sup>[2]</sup>。

### 2.4 数据集成与可视化

（1）建筑结构监测的数据集成方面，面临着多源异构数据的整合挑战。由于监测系统中包含温度、应力、位移等多种类型的传感器，它们产生的数据格式、时间尺度和采集频率各不相同。为了有效整合这些数据，需要采用统一的数据接口标准和先进的数据融合算法。具体而言，利用传感器网络技术构建数据采集平台，通过标准化的数据传输协议（如Modbus、OPC等）实现数据

的汇聚。在数据融合过程中，运用贝叶斯估计、卡尔曼滤波等算法，综合考虑不同传感器数据的可靠性、相关性和时间同步性，以提高数据的准确性和完整性，为后续分析提供可靠的数据基础。（2）在数据可视化方面，建筑信息建模（BIM）技术和虚拟现实（VR/AR）技术展现出了巨大的潜力。BIM技术通过创建建筑结构的三维数字化模型，将监测数据与模型进行关联，实现了数据的直观展示。在BIM模型中，利用不同颜色、动态图表等形式，直观地展示结构的变形、应力分布等健康状况信息，使工程师快速了解结构的整体状况。而VR/AR技术提升了可视化的效果，用户通过虚拟现实设备或增强现实应用，沉浸式地查看建筑结构的内部和外部状况，更加直观地感受结构的健康状态变化，加深对结构状态的理解<sup>[3]</sup>。

### 2.5 智能决策支持

智能传感技术为建筑结构健康监测提供了强大的智能决策支持能力。借助智能算法和数据分析技术，对海量的监测数据进行深度挖掘和分析。如采用时间序列分析方法对结构的长期监测数据进行建模和预测，如自回归移动平均模型（ARIMA），预测结构参数的未来变化趋势，提前发现潜在的安全隐患。通过关联规则挖掘算法，分析不同结构部位的监测数据之间的关联关系，找出影响结构整体健康的关键因素组合。如发现某区域的应力变化与相邻部位的温度波动存在强关联，当这种关联出现异常时，可及时预警可能的结构问题。在结构剩余寿命预测方面，基于可靠性理论和损伤累积模型，结合监测数据中的应力循环次数、材料性能退化等信息，利用马尔可夫链蒙特卡洛（MCMC）方法等进行概率分析，预测结构在不同工况下的剩余使用寿命。如对于一座服役多年的桥梁，通过持续监测其关键部位的应力和疲劳裂纹扩展情况，结合材料的疲劳特性和环境因素，智能决策系统能够给出较为准确的剩余寿命区间，为桥梁的维护和更换决策提供关键参考；智能决策支持系统还可根据不同的结构健康状况自动生成维护建议和管理策略。当监测到结构出现轻微损伤时，系统可推荐定期巡检和局部修复方案；当损伤达到一定程度时，系统会提示进行全面检测和加固设计，确保建筑结构始终处于安全可靠的运行状态，实现建筑结构全生命周期的科学管理与维护。

## 3 智能传感技术的优势与挑战

### 3.1 智能传感技术的优势

（1）高精度与高灵敏度，其传感器能够精确捕捉结构微小的物理变化。如在监测古建筑的结构变形时，

光纤传感器检测到毫米级甚至微米级的位移变化，能在早期发现结构的细微损伤，为及时采取保护措施提供依据。（2）实时性强，能持续不间断地监测建筑结构的状况，并即时传输数据。在大型商业建筑中，通过无线传感器网络，可将结构的振动、温度等数据实时传送到监控中心，出现异常情况，如地震引起的振动超标或火灾导致的温度急剧上升，管理人员能迅速做出反应，有效降低损失。（3）智能传感技术具有良好的适应性和可扩展性。它根据不同建筑结构和监测需求进行灵活配置和扩展。对于复杂的高层建筑群，可逐步增加传感器数量和种类，从基础的位移、应力监测扩展到环境因素如风力、湿度等的综合监测，实现对建筑结构全方位、多层次的健康监测，满足不同建筑在不同阶段的监测要求。智能传感技术的另一个明显优势在于其数据处理和分析能力。通过先进的算法和大数据技术，传感器收集到的海量数据可以被迅速处理和分析，提供更为精准的结构健康评估。如桥梁监测中，智能传感器可以分析交通负荷对桥梁结构的影响，预测潜在的疲劳损伤，并给出维护建议。智能传感技术还能够通过长期积累的数据，识别出结构的使用模式和潜在风险，为未来的建筑设计和维护提供宝贵的信息<sup>[4]</sup>。

### 3.2 智能传感技术的挑战

尽管智能传感技术优势明显，但在应用中也面临诸多挑战。传感器的耐久性问题较为突出，建筑环境复杂多变，如高温、高湿、强电磁干扰等，会影响传感器的性能和寿命。在海边的建筑结构监测中，盐雾侵蚀可能导致传感器外壳腐蚀、内部电路短路，降低传感器的可靠性。数据处理与分析的复杂性也是一大挑战。建筑结构健康监测产生大量的数据，如何高效存储、快速处理和准确分析这些数据是关键问题。采用大数据技术处理海量监测数据时，需要解决数据存储架构的优化、数据分析算法的效率提升等问题，以确保能够从海量数据中及时提取有价值的信息，实现对结构健康状况的准确判断，不同传感器之间的兼容性和协同工作问题也亟待解

决。在一个建筑结构健康监测系统中，涉及多种品牌和类型的传感器，它们的数据格式、通信协议和测量精度各不相同，如何实现这些传感器的无缝集成和协同工作，确保数据的一致性和准确性，是智能传感技术在建筑结构健康监测应用中需要克服的重要障碍。尽管如此，智能传感技术在建筑结构监测领域仍展现出巨大潜力。为了应对耐久性问题，研究人员正在开发新型材料和涂层技术，以增强传感器的抗腐蚀和抗干扰能力。在数据处理方面，人工智能和机器学习算法的应用正逐步提高数据处理的智能化水平，使得从复杂数据中提取有用信息变得更加高效；标准化工作也在推进，旨在统一不同传感器的数据格式和通信协议，简化集成过程，确保监测系统的整体性能。通过这些努力，智能传感技术将能够更好地服务于建筑结构的长期健康监测，为维护建筑物的安全稳定提供强有力的技术支持。

### 结束语

综上所述，智能传感技术在建筑结构健康监测中的应用前景广阔。通过不断的技术创新和优化，该技术将能够更好地服务于建筑结构的长期监测与维护。未来，随着传感器材料、数据处理算法和标准化工作的不断进步，智能传感技术将在保障建筑安全、提高维护效率方面发挥更加重要的作用。同时，我们也应关注其面临的挑战，并积极探索解决方案，以实现智能传感技术的可持续发展。

### 参考文献

- [1]王叶绵.结构健康监测技术在工程中的应用[C]//2024智慧施工与规划设计学术交流会议论文集.2024:1-3.
- [2]杨宝红,丁民,刘明宇.既有建筑结构健康监测的自动化技术应用研究[J].城镇建设,2024(19):40-42.
- [3]徐德志,沈杰,徐衍,等.智慧诊断技术在结构健康监测中的应用研究——以常州市北环路小学教学楼为例[J].四川建筑科学研究,2023,49(3):60-66.
- [4]潘瑛.智能传感技术在桥梁工程质量监测中的应用研究[J].电脑爱好者(电子刊),2020(9):2735-2736.