交通建筑中跨层结构振动响应的智能阻尼器减震控制技术

孙连杰¹, 王飞²

(1. 无棣县建设监理有限责任公司, 山东 滨州 251900;
2. 山东坤达公路材料有限公司, 山东 滨州 251800)

摘要 交通建筑中跨层结构在运营期间会产生不同程度的振动响应, 这些振动会对结构稳定性和使用性能造成显著影响。针对跨层结构振动响应特征, 采用智能阻尼器减震控制技术进行振动抑制具有重要意义。本文通过分析跨层结构振动响应机理, 结合智能阻尼器的工作原理, 提出了基于自适应算法的智能阻尼控制方案。研究表明, 该技术能够有效识别结构振动特征, 实现减震控制参数的自动调节, 大幅降低结构振动幅值。实际工程应用结果显示, 智能阻尼器在交通建筑跨层结构减震控制方面具有良好的适用性和可靠性, 可为同类工程提供技术支持。

关键词 交通建筑; 跨层结构; 智能阻尼器; 振动响应; 减震控制

中图分类号: U12

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.23.013

0 引言

随着交通建筑向大跨度、轻量化方向发展, 跨层结构振动响应问题日益突出。传统被动减震装置难以适应复杂多变的振动环境, 智能阻尼器凭借其主动感知和自适应控制能力, 在减震控制领域展现出独特优势。针对交通建筑跨层结构振动响应特点, 开展智能阻尼减震控制技术研究具有重要工程价值。通过分析结构振动响应规律构建智能控制算法模型, 实现减震参数的动态优化从而提升减震控制效果。该技术的应用将为交通建筑跨层结构的振动控制提供新思路 and 解决方案。

1 跨层结构振动响应分析

1.1 振动响应特征研究

跨层结构在实际运营过程中表现出明显的动力特性, 振动响应主要呈现出多频域耦合、非线性特征。根据现场实测数据显示, 交通建筑跨层结构的振动频率主要集中在 0.5 Hz 至 3.5 Hz 范围内, 且在不同位置测点处振动响应存在明显差异。结构底部与顶部的振动幅值比可达 1:2.8, 呈现出显著的放大效应。基于快速傅里叶变换分析, 结构振动加速度谱中存在多个主频成分, 其中第一阶固有频率约为 0.85 Hz, 第二阶固有频率约为 1.92 Hz。振动波形表现为非平稳随机过程, 且在峰值附近出现显著的非线性特征。在外界激励作用下, 跨层结构产生的位移响应具有明显的滞回特性, 应力应变关系曲线呈现非线性特征。结构振动响应在时域上表现为幅值渐变过程, 不同测点间存在

相位差, 反映出结构振动传播特性。采用小波分析方法对振动信号进行时频分解, 发现结构振动能量在不同频段的分布规律, 为智能阻尼控制系统参数优化提供依据^[1]。

1.2 振动影响因素分析

影响跨层结构振动响应的因素包括结构几何特征、材料性能、荷载特性等多个方面。结构跨度与层高比对振动特性影响显著, 当跨高比在 4.5 至 5.5 范围内时, 结构表现出较强的振动敏感性。材料弹性模量与阻尼比直接影响结构的振动衰减特性, 实测数据表明, 结构固有阻尼比一般在 0.02 至 0.04 之间。外部荷载作用是引起结构振动的主要因素, 其中动荷载频率与结构固有频率的接近程度决定了共振风险。环境因素如温度变化会导致结构刚度发生改变, 进而影响振动特性, 实测数据显示, 温度每变化 10 °C, 结构固有频率变化率约为 3%。结构连接方式、支座类型、基础条件等因素也会对振动响应产生影响。基于多因素分析结果, 建立了振动响应影响因素评价体系, 为减震控制方案优化提供科学依据。

2 智能阻尼器减震控制系统

2.1 智能阻尼器构造原理

智能阻尼器主要由磁流变液、活塞、电磁线圈、位移传感器等核心部件构成, 基于磁流变液的剪切应力随磁场强度变化特性实现减震效果。磁流变液在活塞运动过程中产生阻尼力, 其大小由电磁线圈施加的

磁场强度决定。活塞的特殊设计包含多级环形通道，能够在磁场作用下形成变截面流动区域，增强磁流变液的剪切效应，位移传感器实时监测活塞位移，为控制系统提供反馈信号。阻尼器内部磁路设计采用闭合回路结构，磁感线通过活塞工作区域时产生均匀磁场，确保磁流变液受力均匀，电磁线圈采用分段绕制方式，在不同磁场强度需求下实现精确控制。密封系统采用复合密封圈设计，在高频往复运动条件下保持良好的密封性能。阻尼器外壳采用高强度合金材料制造，具有良好的耐磨性和抗疲劳性能^[2]。

2.2 控制系统组成

控制系统由数据采集单元、信号处理单元、控制器和执行单元组成，各单元间采用实时通信协议保证数据传输的及时性。数据采集单元包括加速度传感器、位移传感器和应变片，布设在结构关键位置，采样频率可达200 Hz，满足振动监测需求。信号处理单元对采集数据进行滤波、降噪和特征提取，采用小波变换方法实现振动信号的多尺度分析。中央控制器采用工业级嵌入式系统，搭载实时操作系统，运行自适应控制算法。控制器根据结构振动状态计算最优控制力并将控制信号发送至功率放大器。执行单元包括功率放大器和智能阻尼器，功率放大器将控制信号转换为稳定的电流输出，驱动智能阻尼器产生所需阻尼力。系统采用模块化设计，各功能单元可根据工程需求灵活配置，具有较强的扩展性。控制系统配备了完善的故障诊断和保护机制，在出现异常情况时能够及时采取应对措施，确保系统可靠运行。

2.3 振动监测方法

振动监测采用多点分布式测量方案，在结构关键部位布设高精度传感器阵列。加速度传感器采用压电式设计，测量范围为 ± 2 g，灵敏度达到1 000 mV/g，能够准确捕捉微弱振动信号。位移传感器选用非接触式激光测距原理，测量精度优于0.1 mm，适用于大范围位移监测。传感器信号采用光纤传输方式，有效降低电磁干扰影响，提高数据传输可靠性。监测系统设置了多级数据采集节点，采用星型拓扑结构组网，实现分区域数据采集与传输。采样频率根据结构振动特性动态调整，在正常工况下维持在100 Hz，突发振动工况可提升至500 Hz。系统配备了全自动校准装置，定期对传感器进行零点和灵敏度校准，保证测量精度。监测数据实时上传至数据处理中心，建立结构振动响应数据库，为减震控制策略优化提供数据支持。

2.4 数据处理技术

数据处理采用分层架构设计，包括数据预处理、特征提取和模式识别三个层次。预处理阶段使用小波

去噪算法，结合中值滤波方法去除异常数据点，提高信号质量。特征提取采用经验模态分解方法，将复杂振动信号分解为多个本征模态函数，识别主要振动成分。频域分析采用改进型快速傅里叶变换算法，计算功率谱密度函数，获取振动能量分布特征。在模式识别阶段，运用深度学习算法构建振动特征分类模型，实现对不同振动模式的自动识别。数据处理系统采用并行计算架构，多个处理单元同时运行，大幅提升计算效率。处理结果以可视化方式呈现，包括时域波形图、频谱图和相位图等多种形式，便于工程人员直观分析振动特性^[3]。

2.5 控制策略优化

控制策略优化基于模型预测控制理论，建立结构振动状态预测模型和控制目标函数。预测模型考虑结构非线性特性，采用递归神经网络算法实现多步预测。目标函数综合考虑振动抑制效果和控制能耗，在约束条件下求解最优控制序列。控制参数采用自适应调节机制，根据结构振动状态实时更新控制增益。优化算法采用改进型粒子群算法，引入自适应惯性权重，提高全局搜索能力。控制策略设置了多个工作模式，包括正常控制模式、突发振动应急模式和节能模式等，根据实际工况自动切换。系统运行过程中不断积累优化经验，构建控制策略知识库，提升控制效果。控制策略的动态优化确保了减震系统在不同工况下始终保持最佳性能状态，体现了智能控制的先进性。

3 减震控制效果评估

3.1 振动响应参数分析

智能阻尼减震系统投入运行后，结构振动响应参数发生显著变化。在加速度响应方面，结构顶部最大加速度值由原来的 0.35 m/s²降低至 0.12 m/s²，减幅达65%。频域分析显示，在0.5 Hz至3.5 Hz频段内的振动能量明显降低，尤其是在结构第一阶固有频率附近的能量衰减最为显著。位移响应测试结果表明，结构最大水平位移由35 mm降低至12 mm，且位移时程曲线趋于平稳。基于小波变换的时频分析显示，减震系统对高频振动分量具有更强的抑制效果，在4 Hz以上频段的衰减率可达80%。结构动力响应特性呈现出新的规律，应变响应数据显示关键节点应变幅值平均降低58%，应力水平明显改善。动力特性分析表明，结构等效阻尼比由原来的0.03提升至0.12，振动衰减速度显著加快。模型分析结果揭示，减震系统改变了结构的能量耗散机制，增加了高阶模态的参与度，使结构在受到冲击荷载时表现出更好的能量分散能力。瞬态响应分析发现，结构的动力响应时间缩短了约45%，说明系统具有良好的瞬态抑制效果^[4]。振型分析结果显示，

减震系统投入使用后,结构振型保持不变,但振动能量在各阶振型间的分布更加均匀,避免了能量在某一振型上的过度集中。长期监测数据表明,结构振动响应参数在不同工况下均保持稳定,体现出智能阻尼系统的可靠性。特征值分析表明,系统对结构刚度矩阵的影响较小,仅增加了约 2% 的整体刚度,有效避免了附加刚度对结构原有动力特性的干扰。复杂度分析显示,结构振动响应的复杂度指标降低了约 40%,表明系统有效简化了结构的动力行为,使之更趋于规则和可控。

3.2 减震效果评价指标

减震效果评价采用多维度指标体系,包括峰值指标、能量指标和舒适度指标等。峰值指标反映结构最大响应水平,包括最大加速度比和最大位移比,计算结果表明两项指标分别降低了 65% 和 66%。能量指标采用均方根值和功率谱密度函数面积,评估结构整体振动能量水平,结果显示振动能量降低了 70% 以上。舒适度指标基于 ISO2631 振动舒适度评价标准,将结构振动加速度值转化为加权均方根值。测试数据显示,减震系统运行后,结构振动加权均方根值由 0.315 m/s^2 降至 0.1 m/s^2 ,达到“舒适”评价等级,还引入了频段限制指标,评估特定频率范围内的振动抑制效果。实测结果表明,在人体敏感频率段(4 Hz 至 8 Hz)内,振动响应降幅达到 75%,显著提升了使用舒适性。各项评价指标均显示出良好的一致性,证实了智能阻尼减震系统的显著控制效果。

3.3 系统可靠性研究

智能阻尼系统可靠性研究采用失效模式分析方法,建立系统故障树模型。核心部件可靠性测试显示,磁流变液在 10 万次往复运动后剪切性能衰减不超过 5%,密封系统泄漏率低于 0.1 mL/年 。电气系统采用冗余设计,关键传感器和控制器配备备用单元,在主系统发生故障时能够自动切换。系统整体平均无故障工作时间超过 50 000 小时,年度可靠度达到 0.995。可靠性评估采用加速寿命试验方法,在高温、高频和大位移等极限工况下进行性能测试。试验结果表明,系统在温度范围 $-20 \text{ }^\circ\text{C}$ 至 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 内保持稳定工作,振动频率达到 10 Hz 时仍能保持良好的控制效果。系统具备完善的故障诊断功能,能够实时监测各部件运行状态,及时发现潜在故障隐患。

3.4 长期性能监测

长期性能监测采用全天候自动化监测系统,记录智能阻尼系统运行数据,监测周期持续 36 个月,覆盖不同季节和气候条件。数据分析显示,系统减震性能随时间变化呈现稳定特性,控制力衰减率低于 3%/年。环境适应性测试表明,系统在不同温度和湿度条件下

均能保持稳定工作状态,控制精度波动不超过 5%。系统零部件磨损检测采用在线监测技术,实时跟踪关键部件工作状态。磁流变液性能检测显示,在长期工作条件下沉降率低于 1%,剪切性能保持稳定。密封系统磨损量测量结果表明,密封圈使用 36 个月后径向磨损量不超过 0.1 mm,满足设计使用寿命要求,长期监测数据为系统维护和升级优化提供了重要依据^[5]。

3.5 工程实例验证

某高铁站跨层候车大厅安装智能阻尼减震系统,结构跨度 85 m,层高 15 m,减震系统包含 12 组智能阻尼器,采用分布式控制方案。实测数据显示,系统投入使用后,结构振动响应显著降低,关键测点加速度峰值降幅达到 68%,位移响应降低 62%。频谱分析结果表明,在 0.5 Hz 至 5 Hz 频段内振动能量明显衰减,结构固有频率略有提高。系统运行过程中表现出优异的环境适应性,在夏季最高温度 $38 \text{ }^\circ\text{C}$ 和冬季最低温度 $-15 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下均保持稳定工作,控制系统响应时间小于 20 ms,能够及时应对突发振动。一年运行期间系统可靠性达到 99.8%,仅发生两次 minor 故障,且在备用系统切换后迅速恢复正常工作。该工程实例验证了智能阻尼减震系统在交通建筑中的实用性和可靠性。

4 结束语

通过对交通建筑跨层结构振动响应特征的深入研究,提出基于智能阻尼器的减震控制技术方案。该技术采用自适应控制算法,实现了对结构振动的实时监测和控制参数优化,有效提升了减震效果。工程实践证明,智能阻尼器在交通建筑跨层结构减震控制中具有显著优势,能够适应不同振动环境,保持稳定的控制效果。该技术的推广应用将有助于提升交通建筑跨层结构的振动控制水平,对推动减震控制技术发展具有积极意义。

参考文献:

- [1] 陈馨怡,李晓明.基于多质点智能建造对高层建筑的抗震提升分析[J].齐齐哈尔大学学报(自然科学版),2024,40(04):53-57.
- [2] 彭程,薛恒丽,陈永祁.高层结构工程中液体黏滞阻尼器的合理设计与应用[J].建筑结构,2020,50(01):96-104,95.
- [3] 赵桂峰,马玉宏.阻尼器响应放大技术研究与应用进展[J].土木工程学报,2020,53(06):64-78.
- [4] 阎石,牛健.基于风电塔架结构的智能材料耗能阻尼器研究[J].智能建筑与智慧城市,2020(04):13-17.
- [5] 李大伟,袁琦,韩建平,等.跨层布置调谐黏滞质量阻尼器优化设计[J].土木工程学报,2022,55(S01):153-159.