

连廊人致振动舒适度分析与机器视觉测试方法可行性研究

许庆剑¹, 张 杨¹, 金剑森², 齐兴军²

(1. 济南先投城市发展投资集团有限公司, 山东 济南 250000; 2. 山东建筑大学, 山东 济南 250000)

摘要: 针对复杂连廊结构在人激荷载作用下的振动舒适度问题, 以某学校教学楼的2座混凝土结构连廊为研究对象, 通过传统传感器法以及机器视觉法测试其多工况人行荷载激励下的横向以及竖向加速度时程, 并利用快速傅里叶变换得到两座连廊的1阶自振频率, 随后利用自振频率以及加速度时程数据分析其人致振动特性并评估振动响应。结果表明: 机器视觉法可以较好满足廊桥振动测试要求, 通过数据后处理得到的一阶自振频率以及各工况下加速度峰值与传统传感器法相比误差小于5%, 证明该方法的合理性; 同时, 试验连廊的一阶自振频率远大于正常人行荷载频率且各工况下的加速度峰值数据均在正常范围以内, 满足行人对于舒适度的要求, 现场实测和分析的结果对此类人致振动舒适度评价应用具有参考价值。

关键词: 连廊结构; 机器视觉; 人行荷载; 舒适度; 现场实测

中图分类号: U446.1; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)02-0052-05

Feasibility Study on Comfort Analysis of Human-induced Vibration in Corridors and Machine Vision Testing Methods

XU Qingjian¹, ZHANG Yang¹, JIN Jianmiao², QI Xingjun²

(1. Jinan Xiantou Urban Development and Investment Group Co., Ltd., Jinan 250000, China; 2. Shandong Jianzhu University, Jinan 250000, China)

Abstract: Aiming at the vibration comfort problem of complex corridor structures under human-induced loads, taking two concrete structural corridors in the teaching building of a certain school as the research objects, the transverse and vertical acceleration time courses under multi-condition pedestrian load excitation are tested by the traditional sensor method and the machine vision method, and the first-order natural vibration frequencies of the two corridors are obtained by using the fast Fourier transform. Subsequently, the natural vibration frequency and acceleration time-history data are used to analyze the human-induced vibration characteristics and evaluate the vibration response. The results show that the machine vision method can better meet the requirements of the vibration test of the covered bridge. The first-order natural frequency obtained through data post-processing and the peak acceleration under each working condition have an error of less than 5% compared with the traditional sensor method, which proves the rationality of this method. Meanwhile, the first-order natural vibration frequency of the test corridor is much higher than the normal pedestrian load frequency, and the peak acceleration data under each working condition are all within the normal range, meeting the comfort requirements of pedestrians. The results of on-site measurement and analysis have the reference value for the application of such human-induced vibration comfort evaluation.

Keywords: corridor structure; machine vision; pedestrian load; comfort level; on-site measurement

0 引言

现代公共建筑中, 连廊作为连接不同功能单元的重要交通空间, 其结构形式日益复杂, 跨度与轻盈度不断提升。这类结构在人群荷载作用下易诱发显

著振动, 尤其是当结构自振频率接近人行步频(1.6~2.4 Hz)时, 可能引发共振效应, 导致加速度响应超出人体舒适度阈值, 引起使用者不安甚至恐慌。学校、医院、车站等人流密集场所的连廊振动舒适性问题尤为突出, 不仅影响使用体验, 长期振动还可能引发结构疲劳损伤。因此, 准确评估人致振动响应并验证其舒适性, 对保障公共建筑的安全性与适用性具有重要工程意义。

收稿日期: 2025-08-29

作者简介: 许庆剑(1989—), 男, 学士, 工程师, 从事工程管理等相关工作。

当前,结构振动测试主要依赖传统接触式传感器(如加速度计、应变片)。这类方法虽精度较高,但在实际应用中存在明显局限:传感器布设需破坏结构表面或搭设支架,尤其在高空、大跨度连廊中实施难度大、成本高;测点数量受硬件限制,难以全面捕捉复杂结构的空模态;布线可能干扰建筑正常使用,且长期监测维护困难。近年来,机器视觉(machine vision, MV)测量技术凭借其非接触、全场测量、易于部署的优势,在结构健康监测领域展现出潜力。然而,其在人致振动舒适度评价中的应用仍处于探索阶段,特别是在精度验证、环境干扰抑制及工程适用性方面亟需实证研究。

针对上述问题,本文以某学校教学楼两座典型混凝土连廊为研究对象,聚焦于复杂连廊结构在人行荷载激励下的振动舒适度评价。核心研究目标为:系统验证机器视觉法在连廊振动测试中的可行性与精度,建立其与传统传感器法的可比性基准;通过多工况现场实测,获取连廊在真实人行荷载下的动力响应特性(重点关注横向与竖向加速度);基于实测数据评估结构振动舒适度,为同类工程提供设计优化与评估依据。研究采用双方法并行验证策略:同步运用传统加速度传感器与机器视觉系统,采集多种人行工况(单人行走、多人并行、人群随机行走)激励下的结构加速度时程;通过快速傅里叶变换提取结构一阶自振频率,结合时域峰值加速度分析振动响应规律;最终依据国际通用舒适度标准进行舒适性评价。

本文的创新性体现在:首次在实尺度混凝土连廊人致振动测试中,对机器视觉法进行系统性工程验证,量化其与传统方法的误差边界;同时,通过详实的现场数据揭示了该类型连廊的振动特性与舒适性表现。研究成果不仅为机器视觉法在土木工程振动测试中的推广应用提供了实证支撑,也为学校等敏感场所的连廊振动控制设计与评估提供了直接参考。

1 连廊人致振动测试理论

1.1 舒适度指标

在人群等振动荷载作用下,连廊有可能出现大幅振动,从而给行人带来不适的心理反应,因此,分析连廊振动幅度、评价行人的舒适性十分必要。大量研究表明^[7-9],人的舒适度感受可以采用建筑物振动加速度响应来进行评估。本项目采用峰值加速度

以及自振频率来对连廊进行舒适度评价。依据 ISO 10137:2007 和 AISC DG11 (2020) 中的相关表述,连廊振动时程中满足舒适状态时最大瞬时加速度绝对值应小于 0.15 m/s^2 ,满足较舒适状态时加速度绝对值应小于 0.25 m/s^2 且连廊基频发 f_1 应避让行人步频范围 ($1.6 \sim 2.4 \text{ Hz}$) 避免发生共振导致舒适度下降。本文舒适度判定原理图如图 1 所示。

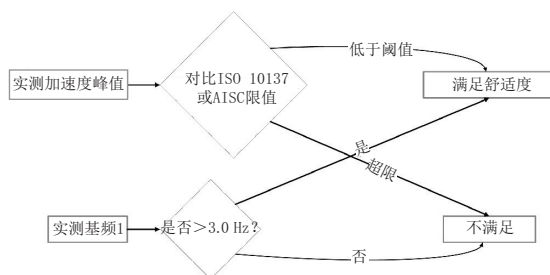


图 1 舒适度判定原理图

1.2 测试方法

1.2.1 传统传感器法

传统传感器法(接触式测量法)作为结构动力响应测试的经典方法,其核心理论基于牛顿第二定律与机电信号转换原理。该方法通过将惯性式加速度计(如压电式或压阻式)刚性固定于结构表面,直接捕获结构在外部激励(如人行荷载)作用下的绝对加速度响应。传感器内部的核心为质量-弹簧-阻尼系统:当结构振动时,惯性质量块产生相对位移;该位移通过机电转换元件(压电晶体对应压电式,应变片对应压阻式)转化为电信号,最终输出与输入加速度成正比的电压信号(灵敏度单位为 $\text{mV}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$)。此方法广泛应用于各类工程结构的动力响应直接测量。

1.2.2 机器视觉法

本文机器视觉振动测试的核心在于通过视频运动放大算法捕捉结构表面的微振动。该方法首先采集高速视频流,对序列中每个像素的时域亮度变化进行带通滤波,提取特定频段的相位信号。随后利用拉普拉斯金字塔分解将图像分解为多尺度空间层,在每一层中对相位变化进行线性放大,重构出人眼不可辨的微位移。最后通过光流场分析追踪放大后视频中的特征点运动轨迹,实现亚毫米级振动测量。视频运动放大算法流程可以分为 3 阶段。

1.2.2.1 高速视频采集

采用 kHz 级高速相机采集结构表面视频流,辅以结构光照明增强纹理对比度。

1.2.2.2 时-空信号处理

时域滤波:提取像素亮度时序信号,通过带通滤

波器分离目标频段(如人行荷载 1~3 Hz)的振动分量。空间分解:利用拉普拉斯金字塔将每帧图像分解为多尺度空间层,保留不同频带的纹理特征。相位放大:在各空间层对滤波后的相位信号进行线性放大,显著增强人眼不可辨的微位移(原理:相位变化正比于物理位移)。

1.2.2.3 运动重构与量化

合成放大后的视频序列,结合稠密光流算法与亚像素跟踪技术(如 SIFT 特征匹配)解析特征点运动轨迹;通过标定参数将像素位移转换为物理位移,实现全场振动响应测量。

相较于传统图像识别算法,该方法技术优势在于突破传感器附加质量限制,适用于轻质柔性结构;单次测量获取数万点位移场,空间分辨率远超点式传感器;相位放大机制可检测微米级振动,灵敏度达传统设备量程下限。

2 连廊实例测试

2.1 连廊概况与测点布置

试验连廊位于某高校教学楼 A 栋与 B 栋之间,垂直分布于二、三层标高,连廊整体图见图 2。单层连廊长 22.3 m、宽 5.0 m,结构关于纵轴对称;中部设半径 2.5 m 的半圆形钢筋混凝土悬挑平台,兼具交通与观光功能。主体为 C30 混凝土现浇梁板体系,两侧砌石护栏高 1.2 m。经现场勘察,连廊两端简支于教学楼剪力墙(支座高度 8.5 m),无中间支柱。该轻质长跨结构在人行荷载下具有显著的振动敏感性,尤其平台区域为舒适度控制关键部位。

分别在连廊跨中以及四分点各布置一个测点,每一个测点布置一个横向传感器一个竖向传感器用来测试其横竖向加速度时程。测点布置图如图 2 所示。将每座连廊的试验分为 4 个工况进行,分别是单人行走、多人行走、单人奔跑以及多人奔跑,试验时每个工况的测试时间为 2 min。

2.2 传感器法测试

本试验采用泰斯特 3828E 采集仪,将传感器通过

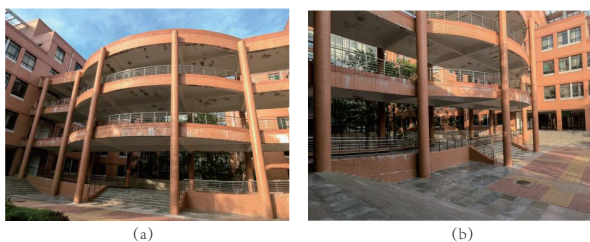


图2 连廊整体图

胶泥放置在连廊的测点位置,保证传感器与连廊的充分接触,随后利用导线对传感器以及采集仪进行连接,设定采样频率 200 Hz,将采集档位设置到加速度档,输入正确的传感器灵敏度,设置采样模式为连续采集,进行加速度时程采集,采集时间 20 min。

通过试验得到 4 个工况下 4 个测点的加速度时程数据如图 3 所示。

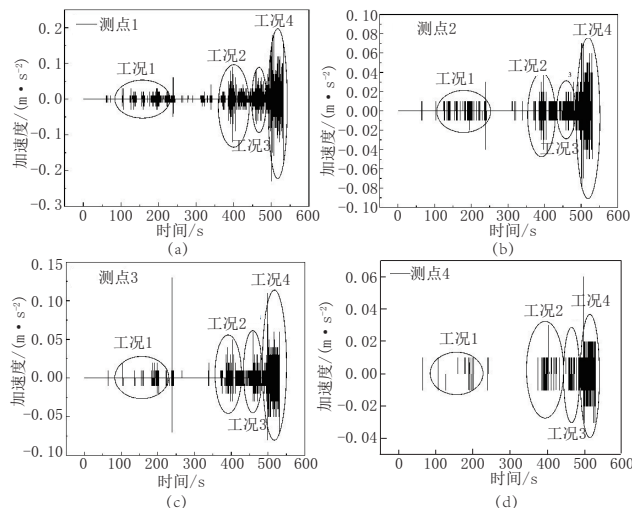


图3 4个工况下测点加速度时程数据

将加速度时程数据通过 origin 软件进行处理,利用快速傅里叶变换将其转变频谱图,得到连廊四个测点下的一阶、二阶频率均为 12.25、23.57 Hz,对应的频谱图如图 4 所示。

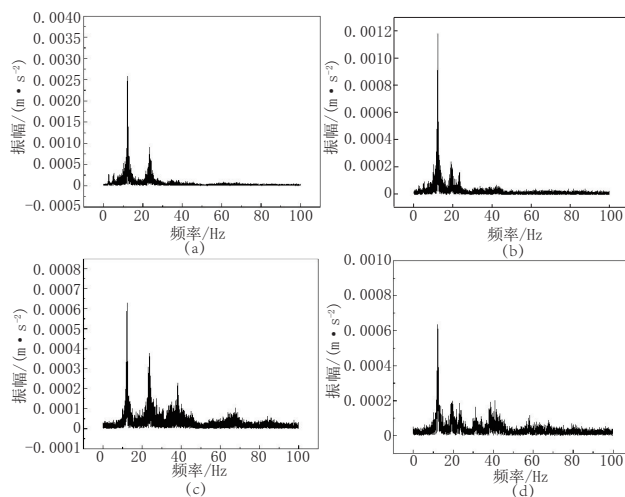


图4 不同工况下测点频谱图

从频谱图中可以发现无论是采用水平向传感器亦或是竖向传感器,测试得到的一阶基频均非常卓越,证明了传统方法下连廊基频测试的稳定性。

2.3 机器视觉法

机器视觉法主要采用图像识别的方式,测试前将不规则靶标粘贴在连廊侧面,本次试验放置两个靶标用于测量需要,靶标放置位置如图所示,本次拍

摄设备位置设在距测点5 m左右,相机以及支架如图5所示。

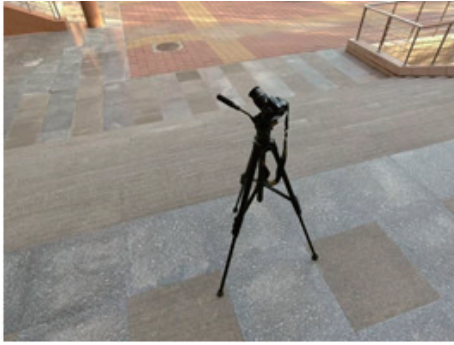


图5 机器视觉法测试设备

机器视觉测试过程中主要采用 Nikon D3400 相机,选取的采样频率为 60fps,视频画质的分辨率为 1920 像素×1080 像素,采集时间 2 min。试验开始前将相机架设在固定不动的水平地面上,保持相机稳定,调整镜头对准连廊测点标志物,测点图像如图5所示。

采集结束后,利用 MATLAB 编写的视频运动放大算法识别程序对视频进行水平向,竖向加速度时程识别,得到四个工况下测点的加速度时程曲线如图6、图7所示。

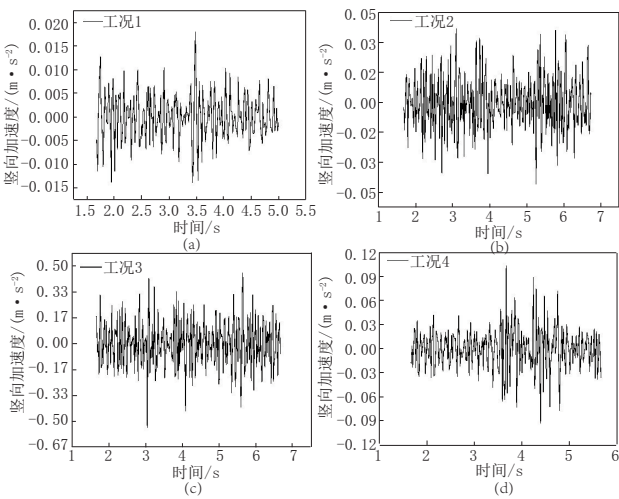


图6 4个工况下竖向加速度时程曲线

测试完成后通向采用快速傅里叶变换将加速度时程图转化为频谱图得到前3阶频率分别为 12.13, 23.28 Hz,对应平频谱图展示如图8所示。

3 舒适度分析

3.1 频率分析

测试得到的一阶基频如图1所示。从图中可以看出两种测试方法所得的该连廊一阶基频均远大于行人步频范围(1.6~2.4 Hz),没有发生共振的风险。

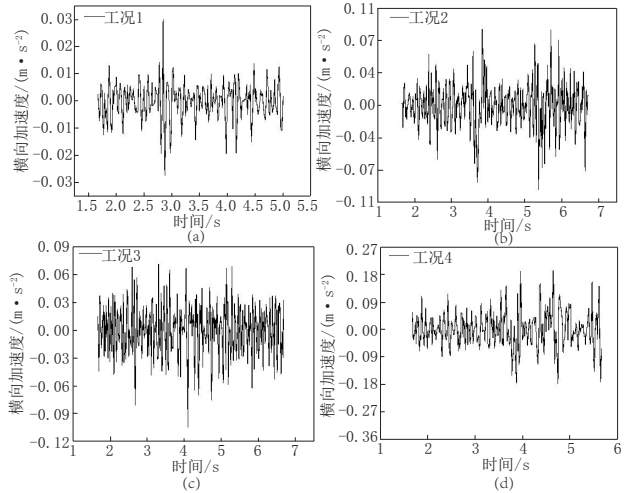


图7 4个工况下横向加速度时程曲线

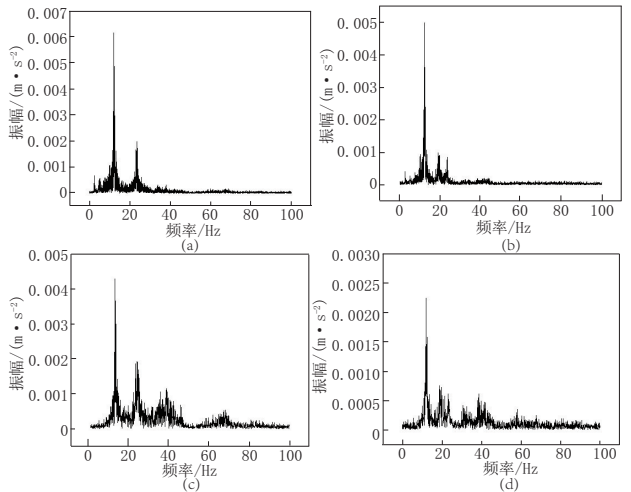


图8 机器视觉法不同工况下测点测试频谱图

表1 两种方法下一阶基频及其舒适度要求

指标	传感器法	机器视觉法
一阶基频/Hz	12.25	12.13
舒适度要求	舒适	舒适

3.2 加速度峰值分析

通过对连廊结构开展人行激励测试试验,分别利用传统传感器法以及机器视觉法测试了单人和多人行走、单人和多人奔跑4种高于人行荷载所产生的典型横、竖向激振频率,得到该连廊各工况下横竖向加速度时程峰值见表2、表3。

试验数据表明:在全部受控工况中,该连廊结构的振动响应均满足人行舒适度规范要求,横向振动的

表2 传感器法下各工况加速度峰值及其舒适度

工况	横向加速度峰值/(m·s ⁻²)	舒适度要求	纵向加速度峰值/(m·s ⁻²)	舒适度要求
单人行走	0.02	舒适	0.02	舒适
单人奔跑	0.05	舒适	0.09	舒适
多人行走	0.06	舒适	0.1	舒适
多人奔跑	0.11	舒适	0.19	较舒适

表3 机器视觉法下各工况加速度峰值及其舒适度

工况	横向加速度 峰值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	舒适度 要求	纵向加速度 峰值/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	舒适度 要求
单人行走	0.018	舒适	0.03	舒适
单人奔跑	0.04	舒适	0.09	舒适
多人行走	0.05	舒适	0.11	舒适
多人奔跑	0.10	舒适	0.178	较舒适

始终处于“舒适”等级(加速度峰值范围:传感器法 $0.02\sim 0.11\text{ m/s}^2$, 机器视觉法 $0.018\sim 0.10\text{ m/s}^2$), 纵向振动在低强度激励下(单人行走/奔跑、多人行走)同样保持“舒适”状态(传感器法峰值 $0.02\sim 0.11\text{ m/s}^2$, 机器视觉法峰值 $0.03\sim 0.11\text{ m/s}^2$)。值得注意的是, 在高强度激励工况(多人奔跑)中, 纵向加速度呈现临界响应特征: 传感器法测得峰值为 0.19 m/s^2 , 机器视觉法测得 0.178 m/s^2 , 两者均接近舒适度阈值上限, 评价等级降至“较舒适”。

4 结 语

本研究通过现场实测与对比分析, 对两座混凝土连廊结构的人致振动特性及机器视觉测试方法可行性进行了系统研究, 主要结论如下。

(1) 机器视觉法的工程适用性得到验证。基于视频运动放大算法的机器视觉法成功实现了连廊微振动($0.018\sim 0.178\text{ m/s}^2$)的非接触式测量, 其加速度时程曲线与传统传感器法具有高度一致性。一阶自振频率测量误差仅 0.98% ($12.13/12.25$), 各工况加速度峰值偏差均 $<5\%$ (最大偏差 4.7% 见于单人行走纵向加速度)。该精度满足 ISO 10137:2007 对振动舒适度测试的要求, 证实机器视觉法可作为传统传感器监测的有效补充。

(2) 连廊振动舒适性综合评价共振风险排除。其实测一阶基频($12.13\sim 12.25\text{ Hz}$)远超行人步频范围($1.6\sim 2.4\text{ Hz}$), 频率比下限达 5.04 ($12.13/2.4$), 符合 EN1990“基频 >3 倍步频”的共振规避准则。

(3) 连廊测试所有工况下横向加速度峰值 $\leq 0.11\text{ m/s}^2$, 纵向峰值 $\leq 0.19\text{ m/s}^2$, 满足 AISC DG11 (2020) 舒适度限值 (0.15 m/s^2 为“舒适”临界值, 0.20 m/s^2 为“较舒适”阈值)。多人奔跑时纵向加速度趋近规范上限(传感器法 0.19 m/s^2 , 机器视觉法 0.178 m/s^2), 表明极端荷载下舒适性裕度降低, 需在

运维中关注此类工况。

(4) 该连廊结构因基频远高人行步频, 振动能量衰减迅速, 整体具备优良的人致振动适应性。针对纵向振动响应敏感性, 建议在高人流密度场所设置“禁止奔跑”标识以优化使用体验。机器视觉法凭借非接触、全场测量的优势, 特别适用于既有结构振动评估(如历史建筑、高空连廊等传感器难以布设的场景), 为土木工程健康监测提供了创新技术路径。

参考文献:

- [1] 程卫红, 吴祥, 陈才华, 等. 基于规范激励输入的大跨度连廊结构舒适度快速评估算法研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2025, 47(3): 164-169.
- [2] 钟维浩. 某会展中心室内大跨度钢结构连廊结构设计与分析[J]. 广州建筑, 2024, 52(8): 34-38.
- [3] 樊亭, 张春文, 胡显昊, 等. 大跨连廊结构的人致振动效应及 TMD 减振控制[J]. 结构工程师, 2024, 40(5): 28-35.
- [4] 刘骥, 杨晓峰, 汤静, 等. 大跨度连廊柔性连接设计与人致振动舒适度分析[C]//2024 年建筑结构技术交流会议论文集(第一册). 北京: 中国建设科技集团股份有限公司, 中国建筑第八工程局有限公司, 中国建筑第四工程局有限公司, 亚太建设科技信息研究院有限公司, 《建筑结构》杂志社, 扬州市建筑设计研究院有限公司, 2024: 281-287.
- [5] 丁海峰, 张金明, 蔡建国, 等. 某工程连廊及不规则悬挑结构振动舒适度分析与控制[J]. 建筑结构, 2024, 54(13): 99-104.
- [6] 陈明雪. 浅析大跨度钢连廊的提升与舒适度[J]. 建材发展导向, 2024, 22(8): 79-81.
- [7] 丁海峰, 张金明, 蔡建国, 等. 某工程连廊及不规则悬挑结构振动舒适度分析与控制[J]. 建筑结构, 2024, 54(13): 99-104.
- [8] 张帅. 施工安装方式对钢结构连廊弱连接支座结构稳定性的影响分析[J]. 四川水泥, 2024(4): 58-60.
- [9] 吴金保, 徐斌, 许一相. 箱形截面简支弧形钢连廊静力和振动舒适度分析与设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊1): 814-818.
- [10] 瓮文芳. 多层建筑间的钢连廊结构设计[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊1): 1388-1390.
- [11] 巩同川, 刘金栓, 张伯英. 异形钢箱梁人行连廊振动舒适度分析控制[J]. 建筑结构, 2023, 53(14): 132-136; 152.
- [12] 褚冬亭. 基于高速视觉的振动测量算法研究[D]. 芜湖: 安徽工程大学, 2024.
- [13] 米悦丰. 基于视频图像的微小运动放大算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2020.
- [14] 张大山. 基于高速视觉的结构运动测量算法研究与应用[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2017.
- [15] 袁艺宸, 孙威, 方程. 大跨度钢结构连廊整体提升施工技术研究[J]. 土木工程与管理学报, 2025, 42(3): 48-53.
- [16] 王立强, 邵振, 栾文君, 等. 施工方式对钢结构连廊弱连接支座稳定性的影响[J]. 建筑机械化, 2025, 46(4): 75-77.