

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20250430079

半主动变刚度颗粒惯容系统减振控制研究*

鲁正^{1,2}, 王志杰², 符俊冬²

(1. 同济大学土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程学院, 上海 200092)

摘要: 随着城市建筑功能与形态的日益多样化, 对阻尼器减振性能与适应性的要求不断提高。本研究提出了一种基于变刚度调频策略的半主动颗粒惯容系统(Semi-active Particle Inerter System, SAPIS), 通过对阻尼器刚度进行半主动调控, 有效拓宽减振频带, 增强系统的振动控制性能。研究采用希尔伯特黄变换识别主结构的瞬时振动频率, 并进一步提出趋势修正样条加权指数平均方法预测频率变化趋势。基于预测结果, 构建模糊控制策略, 将控制输出分为三个刚度挡位, 实现SAPIS刚度的动态调节, 以适应不同激励条件。分别以正弦信号和风荷载为数值模拟的外激励, 评估SAPIS对某一悬挑观景平台的减振性能。正弦激励的数值模拟结果表明, 所提方法能够准确跟踪主结构的瞬时频率, 并调整SAPIS的刚度, 使其保持与结构频率的最佳匹配, 从而提升减振稳定性。在风荷载激励条件下, SAPIS能显著降低结构的峰值和均方根加速度响应, 减振率分别达到51.79%和48.11%, 相较于传统调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)和颗粒惯容系统(Particle Inerter System, PIS), SAPIS展现出更优的减振效果。此外, 在阻尼器行程控制方面, SAPIS相较于TMD和PIS分别减少了60.86%和11.76%, 进一步提升了装置的适用性和工程可行性。

关键词: 振动控制; 半主动控制; 变刚度; 颗粒惯容系统; 减振效果

中图分类号: TU352 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2132(2025)06-1455-09

Study of Semi-active Variable Stiffness Particle Inerter System for Vibration Control

LU Zheng^{1,2}, WANG Zhijie², FU Jundong²

(1. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: With the increasing diversity of functions and forms in urban architecture, higher demands have been placed on the performance and adaptability of structural dampers. This study proposed a Semi-active Particle Inerter System (SAPIS) based on a variable stiffness tuning strategy. By semi-actively adjusting the damper's stiffness, SAPIS effectively broadened the vibration control bandwidth and enhanced its vibration control performance. The proposed approach employed the Hilbert - Huang transform to identify the instantaneous vibration frequency of the primary structure. A trend-corrected spline-weighted exponential moving average method was further developed to predict the frequency variation trend. Based on the prediction, a fuzzy control strategy was constructed, categorizing the

* 收稿日期: 2025-04-30; 修回日期: 2025-08-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(52178296)资助

作者简介: 鲁正(1982—), 男, 教授, 博导, 博士。主要从事结构振动控制研究。E-mail: luzheng111@tongji.edu.cn

通信作者: 符俊冬(1994—), 男, 博士后, 博士。主要从事结构振动控制研究。E-mail: 15720611711@163.com

control output into three stiffness levels and allowing dynamic stiffness adjustment of SAPIS in response to varying excitation conditions. Numerical simulations were conducted using both sinusoidal signals and wind loads as external excitations to evaluate the vibration control performance of SAPIS for a cantilevered viewing platform. Under sinusoidal excitation, the results demonstrated that the proposed method accurately tracked the instantaneous frequency of the primary structure and dynamically adjusted SAPIS stiffness to maintain optimal tuning, thereby improving vibration control stability. Under wind excitation, SAPIS significantly reduced the peak and root-mean-square acceleration responses of the structure, with reduction rates of 51.79% and 48.11%, respectively. Compared with conventional Tuned Mass Damper (TMD) and Particle Inerter Systems (PIS), SAPIS exhibited superior vibration control performance. In addition, SAPIS shortened the damper stroke by 60.86% and 11.76% compared to TMD and PIS, respectively, further enhancing its applicability and feasibility in engineering practice.

Keywords: vibration control; semi-active control; variable stiffness; particle inerter system; vibration damping effect

0 引言

城市建筑承载着商业、居住、文化展示及城市形象塑造等多重功能,由于建筑形态的日益多样化及人流密集程度的增加,其结构稳定性正面临更为严峻的挑战,建筑的振动问题日益突出^[1-3]。在多种结构振动控制装置中,调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)已在国内外实际工程中得到广泛应用^[4]。但是,相关研究表明,TMD的减振频带较窄、鲁棒性较差^[5]。在其服役过程中,工程结构的固有频率容易受材料自身强度退化及损伤、场地液化亦或是外载荷变化等影响而发生改变。这都会导致TMD减振失谐,影响其振动控制效果,限制了其在复杂环境下的适应性和工程应用的广泛性^[6]。

为增强TMD的减振效果及频带适应性,多种新型振动控制装置已在近年来被提出^[7-9]。其中,颗粒惯容系统(Particle Inerter System, PIS)将调谐质量阻尼器、颗粒阻尼器和惯容器相结合,旨在提高系统的减振性能和适应性^[10]。具体而言,颗粒材料的引入能够在一定程度上拓宽TMD的有效减振频带并增强其自身减振鲁棒性。惯容器作为一种具有轻质物理质量的惯性元件,其输出力与两端的相对加速度成正比,能够在质量不变的前提下实现数千倍的惯性放大效应,从而实现轻量化控制^[11-12]。相关研究中,Z. P. Zhao等^[10]提出了一种针对PIS的优化设计方法,在满足相同性能目标的前提下显著降低了系统的物理质量。鲁正等^[13]探讨了PIS在极

罕遇地震条件下的减震机制与效果,发现PIS具有良好的减震效果。J. W. Zhang等^[14]开发的增强型颗粒惯容装置也通过振动台试验证明了其优越的减震性能。然而,也有部分研究指出,惯容器的应用可能会缩短TMD的有效带宽^[15],这指出在追求轻量化和高增益的同时,需兼顾系统的带宽性能。

半主动控制策略作为提升TMD适应性和减振性能的另一有效途径,通过调节质量、刚度和阻尼等参数,使TMD能够动态适应结构频率的变化,从而保持最佳调谐状态。C. Sun等^[16]设计的半主动变阻尼变刚度TMD在地震激励下表现出优于传统被动TMD的减震效果。王梁坤等^[17-18]针对可变质量、可变刚度和可变阻尼的TMD展开了一系列研究,结果表明半主动控制技术在结构地震响应控制和人致振动控制方面均有效。实现半主动控制的关键在于准确识别结构参数,C. Sun等^[16]曾在研究中采用短时傅里叶变换算法,而M. Yan等^[19]则利用经验小波变换算法进行参数识别,这些研究为半主动控制策略提供了重要的理论和技术支撑,但仍面临在复杂环境下的参数识别精度、控制响应速度及工程可行性等方面的挑战。

为进一步拓宽颗粒惯容系统的减振频带和稳定性,本研究提出了一种半主动颗粒惯容系统(Semi-active Particle Inerter System, SAPIS),结合变刚度调频策略,实现对阻尼器频率的半主动调控。首先基于正弦激励条件验证所提出控制算法的准确性和有效性,并进一步在风荷载时程激励下评估SAPIS的减振性能,以探讨其在实际工程应用中的适用性。

1 SAPIS 力学模型

阻尼器的固有频率取决于其刚度和质量,本研究采用变刚度方法实现阻尼器调频。SAPIS 的力学模型如图 1 所示,其刚度由主弹簧和由悬臂簧片及副弹簧组成的刚度可调体系并联共同提供,主弹簧提供基础刚度 k_c ,悬臂簧片与副弹簧串联提供可变刚度 k_v 。图 2 具体展示了这种可变刚度装置,通过步进电机驱动左右旋滚珠丝杠转动,使一对可移动夹具双向对称移动,实现对悬臂簧片刚度的调节,进而改变可变刚度 k_v 。

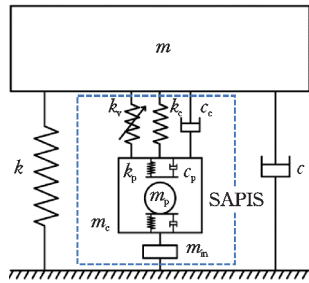


图 1 主结构附加 SAPIS 的力学模型

Fig.1 Mechanical model of structure with SAPIS

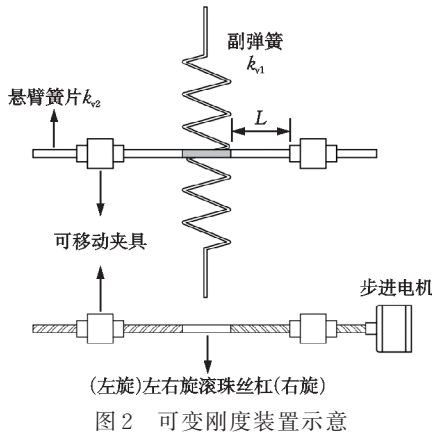


图 2 可变刚度装置示意

Fig.2 Schematic diagram of variable stiffness device

该装置刚度的计算如公式(1)、(2)所示。

$$k_{PIS} = k_c + k_v = k_c + \frac{k_{v1} \cdot k_{v2}}{k_{v1} + k_{v2}} \quad (1)$$

$$k_{v2} = 2 \times \frac{3Ebh^3}{12L^3} \quad (2)$$

式中, k_{PIS} 为阻尼器总刚度; k_{v1} 为副弹簧的刚度; k_{v2} 为悬臂簧片的刚度; L 为可移动夹具到副弹簧的距离; E 、 b 和 h 分别是悬臂簧片弹性模量、截面宽度和截面高度。

公式(3)为 SAPIS 附加在单自由度结构上,受到外力作用下的动力学方程。

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c\dot{x} + kx + (k_c + k_v)(x - x_c) + \\ c_c(\dot{x} - \dot{x}_c) - m_{in}x_c = P \\ m_c\ddot{x}_c + (k_c + k_v)(x_c - x) + c_c(\dot{x}_c - \dot{x}) + m_{in}x_c = \\ k_p G(x_p - x_c) + c_p H(x_p - x_c, \dot{x}_p - \dot{x}_c) \\ m_p\ddot{x}_p + k_p G(x_p - x_c) + c_p H(x_p - x_c, \dot{x}_p - \dot{x}_c) = \\ -m_p g \end{cases} \quad (3)$$

式中, P 是外部激励; x 、 \dot{x} 和 \ddot{x} 是主结构的位移、速度和加速度; x_c 、 \dot{x}_c 和 \ddot{x}_c 是阻尼系统腔体的位移、速度和加速度; x_p 、 \dot{x}_p 和 \ddot{x}_p 是颗粒的位移、速度和加速度; m 、 c 、 k 是主结构的质量、阻尼系数和刚度系数; m_c 、 c_c 、 k_c 和 k_v 是腔体的质量、阻尼系数、基础刚度系数和可变刚度系数; m_p 、 c_p 、 k_p 是颗粒的质量、颗粒阻尼系数和颗粒碰撞弹簧刚度; c_p 和 k_p 用于模拟颗粒与腔体间的相互作用; $G(x_p - x_c)$ 和 $H(x_p - x_c, \dot{x}_p - \dot{x}_c)$ 分别为颗粒和腔体碰撞的非线性刚度与非线性阻尼函数^[20]; m_{in} 为惯容器的惯质系数; g 为重力加速度。

2 半主动控制算法

半主动变刚度控制的实现主要包括三个关键环节:主结构频率识别、频率变化趋势预测和半主动变刚度参数确定。

实现阻尼器变刚度设计的基础在于准确识别主结构的振动频率。为此,本研究采用希尔伯特黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)对主结构进行频率识别。该方法针对非线性与非平稳信号分析的数据处理具有显著优势,该方法主要包括两个阶段,其操作流程如图 3 所示。

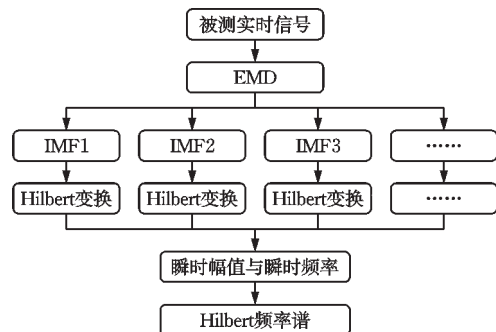


图 3 HHT 频率识别流程

Fig.3 HHT frequency recognition flowchart

1. 经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD): EMD 利用自适应算法将原始信号分解为一系列本征模态函数 (Intrinsic Mode Functions, IMF)。每个 IMF 代表信号在局部时域内的单一振荡模态, 涵盖不同的频率成分与尺度信息, 从而有效揭示信号的内在特性。

2. Hilbert 谱分析: 在完成 EMD 后, 对各 IMF 施行 Hilbert 谱分析, 提取出信号的瞬时频率和瞬时幅值, 并构建其时频分布图。

在获得主结构瞬时频率信息后, 需要对频率变化趋势进行预测以补偿系统传递过程中的时滞效应。为此, 本研究提出了一种趋势修正样条加权指数平均方法。传统三次样条插值在数据趋势较为平稳时能够提供良好的平滑效果, 但在趋势突变或转折点处往往会导致过度平滑, 进而削弱关键特征的表达。因此, 首先通过拐点检测识别数据的趋势变化, 使插值方法能够自适应地调整拟合局部特征。在趋势修正基础上, 采用三次样条插值实现频率预测, 但仅依赖插值方法难以兼顾短期波动与长期趋势, 因此进一步引入指数加权平均 (Exponentially Weighted Moving Average, EWMA) 方法。EWMA 通过赋予近期观测值更高的权重, 有效突出最新数据的影响, 同时抑制远期数据的干扰, 其基本计算如式(4)所示:

$$EWMA(t) = \alpha y_t + (1 - \alpha) y_{t-1} \quad (4)$$

式中, $EWMA(t)$ 为时间 t 的指数加权移动平均值; y 为当前时刻的观测值; α 为平滑系数, 取值越接近 1, 表示对最近数据的重视程度越高。经过三次样条插值与 EWMA 加权平滑后, 系统能够较准确地预测下一时刻的频率。

需要指出的是, 瞬时频率的输入存在一定的不确定性, 受采集扰动及传感器误差影响, 可能导致数据偏离真实值。同时, 半主动控制输出的挡位是基于主结构当前振动频率的经验确定, 因此本质上带有一定的主观性。为此, 本研究使用模糊控制算法进一步确定半主动控制输出。该算法将输出划分为低、中、高三个频段挡位, 通过计算各频段的隶属度函数值, 并依据最大隶属度原理选择对应的离散输出值, 从而实现对控制策略的自适应调节。隶属度函数如图 4 所示。

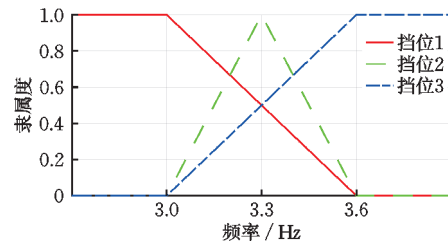


图4 模糊控制隶属度函数

Fig.4 Diagram of fuzzy control membership function

3 SAPIS 减振性能分析

上海市某一钢结构观景平台位于主体建筑屋面上, 主体建筑地上 7 层, 平台顶部标高为 60.25 m, 屋面标高为 54.68 m。经模态分析显示, 其第二模态为竖向局部振动, 如图 5 所示。该结构的第二阶自振频率为 3.34 Hz, 有效质量为 17.5 t, 平台两端悬挑部分对风致振动较为敏感。然而, 受建筑空间限制及建筑立面美观要求的约束, 无法在平台下方布置大质量、大行程的 TMD。同时, 结构振动频率可能随使用荷载、温度或运营状态发生漂移, 单一固定参数 TMD 难以保证在不同激励工况下持续有效地控制结构振动。针对上述需求, 本节分析了 SAPIS 在该类结构中的应用潜力, 利用惯容器实现有效的惯性放大, 在有限质量条件下提高阻尼器减振性能, 并结合颗粒阻尼元件增强宽频能量耗散。此外, 通过半主动刚度调节进一步拓宽装置的减振频带, 以适应不同荷载激励下的频率波动, 从而在有限空间和行程条件下实现高效、可调、轻量化的振动控制。

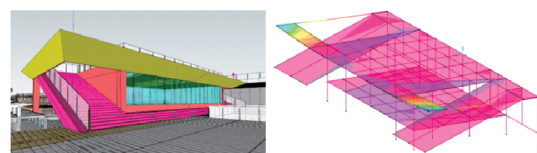


图5 观景平台示意

Fig.5 Schematic diagram of viewing platform

基于结构自振频率数据, 建立了单自由度数值模型, 并针对 TMD、PIS 和 SAPIS 三种阻尼器进行减振效果对比分析。其中, TMD 的质量设置为 150 kg, 刚度系数为 65.27 kN/m, 阻尼系数为 0.35 kN·s/m, 其参数依据 J. P. Den Hartog^[21] 的相关研究确定。SAPIS 系统设置三个挡位, 其对应的阻

尼器调谐频率分别为 3.20、3.34、3.50 Hz, SAPIS 的参数详见表 1, PIS 的参数取自挡位 2 的数据, 其数值依据以往相关研究确定^[22]。综合考虑步进电机性能和 SAPIS 系统的实际应用要求, 设置挡位变换频率不高于 10 Hz, 与此同时, 采用频率预测算法预估下一控制周期内结构的瞬时频率, 以实现更加精准的半主动调节。

表 1 SAPIS 参数
Table 1 SAPIS parameters

参数	取值	参数	取值
m_c/kg	90	$k_c/(\text{kN}\cdot\text{m}^{-1})$	351.51
m_p/kg	10	挡位 1	0
m_m/kg	900	挡位 2	31.43
$c_c/(\text{kN}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1})$	4.58	挡位 3	68.99

3.1 正弦激励下减振优化效果

为评估 SAPIS 在频域内的减振特性, 绘制了结构在无控、TMD、PIS 和 SAPIS 控制下的加速度频响函数, 如图 6 所示。可以看出, 在结构固有频率附近, 无控时加速度响应显著放大, TMD 能够在设计频率处有效抑制响应, 但其有效减振频带较窄。PIS 使用惯容器实现惯性放大, 进一步提高了减振效率, 并在一定范围内拓宽了减振频带, SAPIS 则在此基础上通过半主动刚度调节, 进一步提升了非共振频率下的减振性能, 实现了在不同激励频率下稳定且有效的振动控制效果。

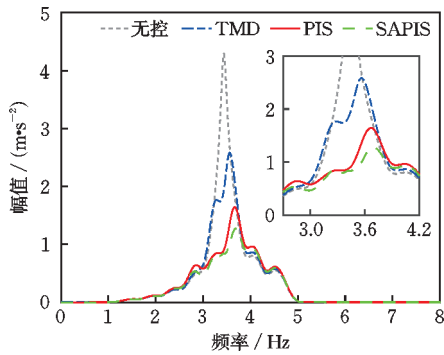


图 6 加速度频响函数

Fig.6 Frequency response function of acceleration

此外, 在相同激励下, TMD 与 PIS 的减振效果差距明显, 主要来源于惯容器惯性放大导致的调谐能力不同。将半主动变刚度策略应用于调谐质量阻尼器 (SATMD) 虽然能够在一定范围内调整调谐

频率, 以适应激励频率的变化或非线性效应, 但其可调刚度范围有限, 难以弥补惯容器带来的减振性能差距。因此, 在本研究中, 不再对 SATMD 和 SAPIS 进一步对比分析, 而是集中关注在结构空间和附加质量受限条件下 SAPIS 提升减振性能的优势。

针对主结构的固有频率 (3.34 Hz), 选取 3.00、3.34、3.60 Hz 的正弦激励进行分析, 所得结构加速度响应如图 7 所示。为量化阻尼器的减振效果, 采用下式定义减振率:

$$\eta = \frac{a_u - a_c}{a_u} \times 100\% \quad (5)$$

式中, a_u 为无控时结构加速度峰值; a_c 为控制状态下的加速度峰值; η 为减振率 (%)。

从图 7 可以看出, 在共振激励作用下, 三种阻尼器均表现出较好的控制效果。得益于惯容器的惯性放大作用, PIS 与 SAPIS 展现出更优越的振动控制能力。当激励频率偏离主结构固有频率时, 由于共振放大效应减弱, TMD 及 PIS 的减振效果下降, 其中 TMD 因其窄带调谐特性而表现出失谐, 导致在局部频率范围内的响应略高于无控工况。这是因为 TMD 在降低主峰幅值的同时, 可能在调谐频

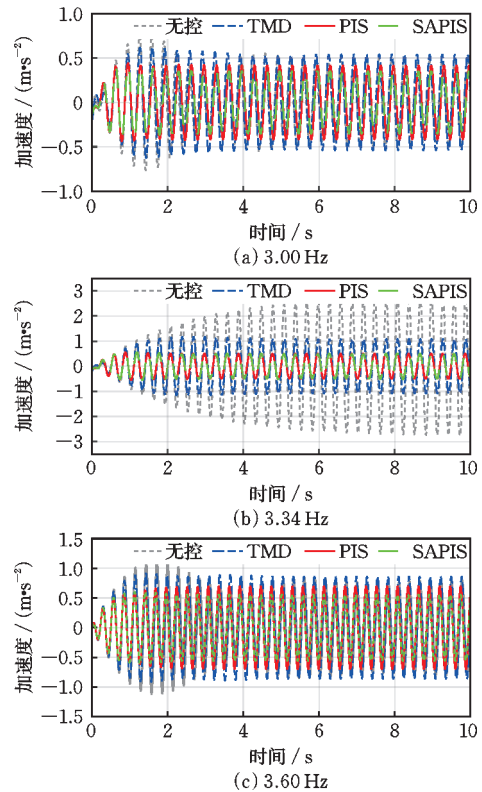


图 7 正弦激励下结构加速度响应

Fig.7 Structural acceleration response under sinusoidal excitation

率两侧产生次峰,是被动调谐装置窄带特性和失谐影响下的常见现象,图6中的局部放大图具体展示了这一现象。以3.00 Hz激励为例,主结构在无控、TMD控制、PIS控制和SAPIS控制条件下的稳态响应分别为0.465、0.538、0.415、0.351 m/s²。对应的减振率分别为-15.70%、10.75%、24.52%。可以看到,TMD在该频率下未能有效减振,SAPIS则保持了良好的控制效果。3.60 Hz激励下也具有类似的减振效果。因此,通过动态调整SAPIS的刚度,可以在不同激励下实现更稳定的控制效果。

图8进一步展示了在3.0 Hz正弦激励作用下,算法识别得到的结构瞬时频率。从图中可以看出,在激励作用初始阶段(前2 s),由于结构处于瞬态放大响应阶段,其频响不稳定,识别出的结构瞬时频率存在一定波动。随后,结构振动趋于稳定,进入稳态响应阶段,识别频率逐渐收敛并稳定在外部激励频率附近。此外,为了验证预测频率的准确性,采用0.1 s后的结构瞬时频率作为预测目标,并将预测曲线向右平移0.1 s,以便直观比较预测频率与未来时刻识别频率的一致性。从图8可以看出,预测频率曲线与实际识别结果吻合良好,能够有效捕捉结构的瞬时频率变化趋势。此外,在3.34 Hz和3.60 Hz正弦激励作用下,识别频率的变化趋势与3.0 Hz激励情形类似,即初始阶段存在一定波动,而后稳定于相应的激励频率。因此,为了避免激励初始阶段剧烈振动导致刚度调节错误的风险,后续设置在0~1 s内阻尼器刚度保持不变。

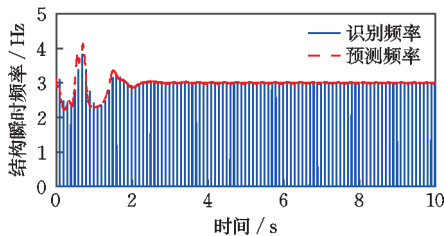


图8 3.0 Hz正弦激励下结构瞬时频率

Fig.8 Instantaneous frequency of structure under 3.0 Hz sinusoidal excitation

准确识别结构瞬时频率是实现半主动变刚度调节的前提。为进一步验证所提出频率识别算法的可靠性,本研究采用1.0~5.0 Hz的正弦扫频激励对附加阻尼器的主结构进行测试,持续时长为200 s。图9展示了附加SAPIS的主结构所受激励

频率与算法识别所得主结构瞬时频率的对应关系。从图中可以看出,识别频率与施加的激励频率基本保持一致,仅在主结构固有频率附近出现轻微波动。这种波动主要来源于SAPIS的变刚度调节作用,使得主结构瞬时振动频率发生突变。该结果表明,所设计的频率识别算法能够提供准确的结构瞬时频率信息,为后续模糊控制策略的实施奠定了基础。

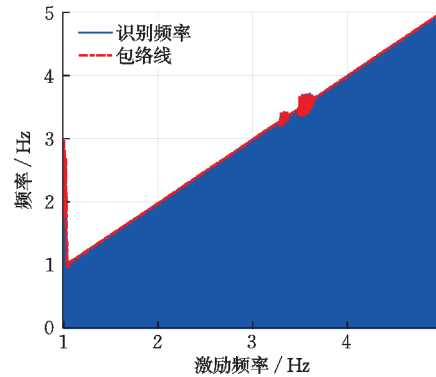


图9 扫频激励下识别频率

Fig.9 Identification of frequency under sweep excitation

图10展示了SAPIS在该过程中刚度挡位的变化情况。当激励频率远离主结构固有频率时,SAPIS能够稳定维持在相应的低挡位或高挡位。当激励频率接近主结构固有频率时,由于结构瞬时振动频率在激励频率附近波动,并且挡位调整进一步影响了频率变化,刚度挡位在设定值附近变化,以提供更合适的阻尼器刚度。

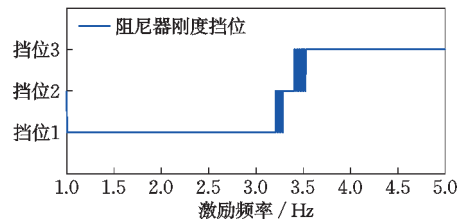


图10 扫频激励下阻尼器刚度挡位

Fig.10 Damper stiffness levels under sweep excitation

为了进一步分析PIS和SAPIS的振动控制效果,本研究对两者的主结构加速度信号进行了小波变换分析,结果如图11所示。小波变换是一种时频分析方法,能够有效揭示信号的瞬态特征和局部振动能量分布。从图中可以看出,PIS和SAPIS系统的加速度小波变换均呈现明显的斜直线特征,其中

明亮区域代表结构振动瞬时频率随时间的连续变化轨迹。PIS系统的能量密度峰值达到 $3\ 116.3\ \text{m}^2/\text{s}^4$,而SAPIS系统的峰值显著降低,仅为 $2\ 373.9\ \text{m}^2/\text{s}^4$ 。这表明SAPIS系统的加速度信号能量更小,即其振动抑制效果更优。整体而言,该分析进一步验证了SAPIS在振动控制方面的优越性。

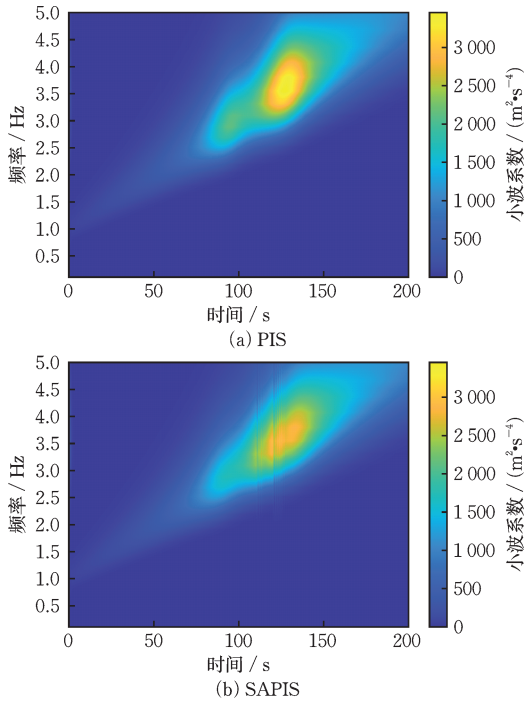


图11 扫频激励下结构加速度小波时频变化
Fig.11 Wavelet time-frequency diagram of acceleration under sweep excitation

3.2 风荷载激励下减振优化效果

根据建筑所在地50年一遇基本风压 $0.55\ \text{kN}/\text{m}^2$ 及平台所在高度,基于Davenport谱生成脉动风时程,如图12所示。脉动风时程谱与理论谱对比结果表明,生成的脉动风与理论频谱特性一致,可以有效反映实际风致激励特性。

风荷载激励下结构加速度响应如图13所示,其中峰值加速度所在区间的放大图清晰地反映了SAPIS的减振效果。表2给出了不同阻尼器配置下的减振率。结果表明,在无控、TMD、PIS和SAPIS控制四种情况下,SAPIS展现出最佳的控制性能,其峰值加速度相较于无控结构降低达到51.79%,高于TMD的31.46%和PIS的44.29%的减振效果。进一步地,计算SAPIS相较于PIS的峰值加速度减

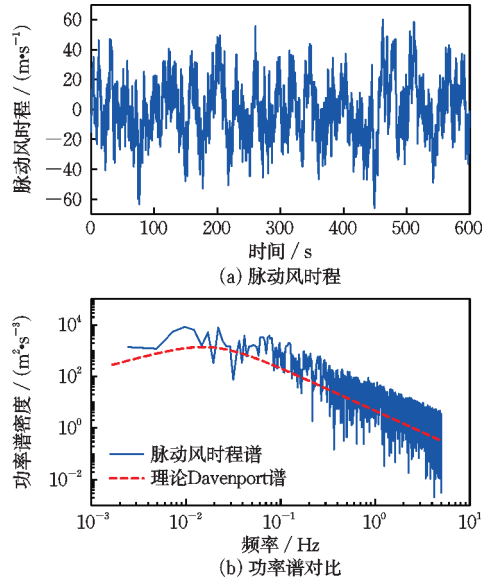


图12 脉动风时程和功率谱对比
Fig.12 Comparison of time history and power spectrum of fluctuating wind

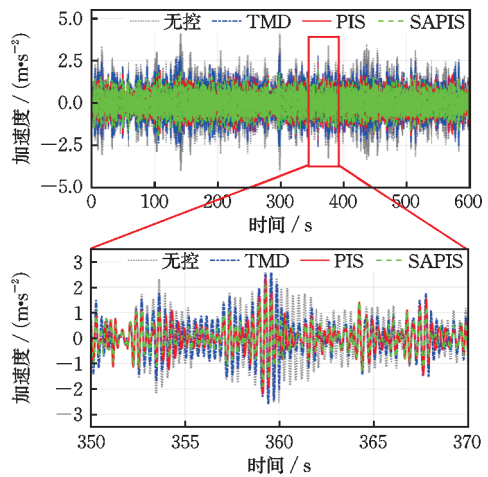


图13 风荷载激励下结构加速度响应
Fig.13 Structural acceleration response under wind load excitation

表2 结构加速度响应

Table 2 Structural acceleration response				
加速度响应	无控	TMD	PIS	SAPIS
峰值/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	4.294	2.935	2.392	2.070
减振率/%	/	31.64	44.29	51.79
均方根/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	1.026	0.737	0.536	0.532
减振率/%	/	28.16	47.71	48.11

振效果提升率为13.46%,证明了半主动控制策略在改善PIS对结构加速度峰值控制方面的有效性。在均方根加速度控制方面,SAPIS也保持了良好的减振效果。

图 14 展示了结构在风荷载激励下的瞬时频率识别结果,可以看出,结构的瞬时响应频率主要集中在 2~3 Hz,明显低于结构的固有频率,符合风荷载激励的低频特性。图 14(b)进一步对比了下一时刻的预测频率与当前时刻的识别频率。为便于直观观察预测精度,预测频率曲线向左平移一个时步,从结果来看,除个别突变峰值外,预测频率能够较好地捕捉结构的瞬时频率变化趋势,证明了预测算法的有效性。

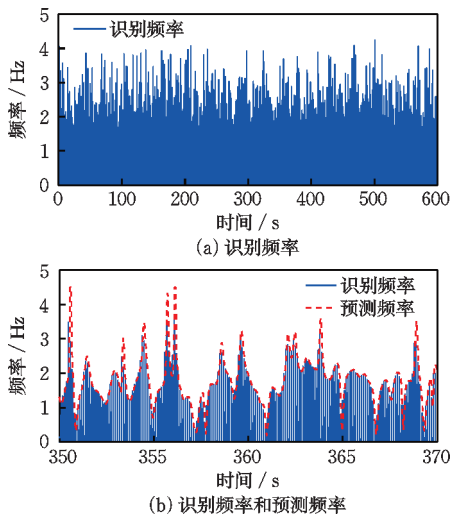


图 14 风荷载激励下结构瞬时频率

Fig.14 Instantaneous frequency of structure under wind excitation

在此基础上,通过模糊规则结合历史识别频率与频率变化趋势预测,最终确定 SAPIS 的刚度挡位,如图 15 所示。结果表明,在风荷载作用下,SAPIS 的大部分时间处于低频挡位 1,仅在特定时刻调整至挡位 2 或 3,以适应瞬时频率的变化并优化控制效果。

阻尼器的行程同样是工程应用中的关键约束因素之一。因此除了研究阻尼器的减振性能外,其行程范围同样是重要的考量指标。图 16 对比了不

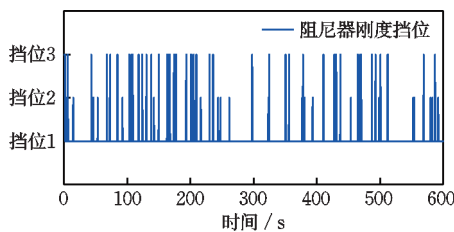


图 15 风荷载激励下阻尼器刚度挡位

Fig.15 Damper stiffness levels under wind excitation

同阻尼器的行程响应情况,结果表明,SAPIS 在保持良好减振效果的同时,能够有效控制阻尼器的行程幅度。TMD、PIS、SAPIS 的最大行程分别是 37.995、16.851、14.870 mm。相较于 TMD,SAPIS 的行程缩短了 60.86%,相较于 PIS,SAPIS 的行程仍有 11.76% 的缩短效果。这一特性进一步凸显了 SAPIS 在风荷载作用下的综合控制优势。

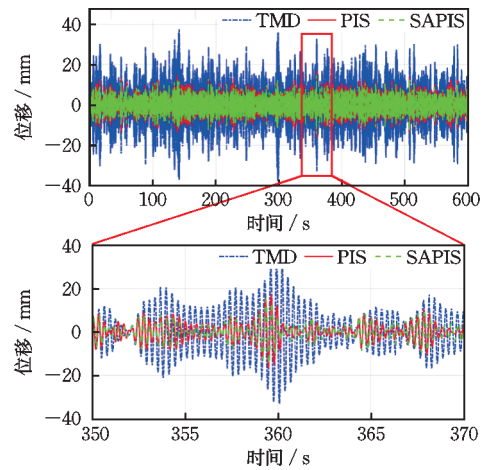


图 16 风荷载激励下阻尼器行程

Fig.16 Working stroke of damper under wind excitation

4 结 论

本研究提出并验证了一种基于半主动变刚度控制的颗粒惯容系统(Semi-active Particle Inerter System, SAPIS),并以一观景平台结构为研究对象,探讨其在正弦激励与风荷载作用下的减振性能。研究主要结论如下:

(1) 半主动变刚度控制算法结合了希尔伯特黄变换、趋势修正样条加权指数平均方法和模糊控制策略,能够有效实现结构瞬时频率的识别与频率变化趋势的预测。在正弦激励条件下的数值分析结果表明,该算法可根据激励特性动态调节 SAPIS 刚度,从而实现更加稳定可靠的振动控制效果。

(2) 在风荷载激励条件下,SAPIS 相较于传统调谐质量阻尼器和颗粒惯容系统展现出更优的振动控制性能。数值模拟结果显示,SAPIS 能够使结构的峰值加速度和均方根加速度分别降低 51.79% 和 48.11%。相较于颗粒惯容系统,其峰值加速度的控制效果进一步提升 13.46%。

(3) 在阻尼器行程方面, SAPIS 相较于传统调谐质量阻尼器和颗粒惯容系统分别减少了 60.86% 和 11.76%, 降低了对安装空间的要求。

参考文献:

- [1] 肖迪, 段旭, 刘武超, 等. 地铁振动作用下上部正交综合管廊动力响应试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1151-1159.
Xiao D, Duan X, Liu W C, et al. Experimental study on dynamic response of upper orthogonal comprehensive utility tunnel under subway vibration[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 1151-1159. (in Chinese)
- [2] 胡涛, 阳富强, 张一夫. 两类不同结构高层建筑风振安全特性数值模拟[J]. 防灾减灾工程学报, 2023, 43(5): 1067-1075.
Hu T, Yang F Q, Zhang Y F. Numerical simulation of wind-induced vibration safety characteristics of two high-rise buildings with different structures[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2023, 43(5): 1067-1075. (in Chinese)
- [3] 朱唯丰, 涂田刚, 陈天麒. 某带有悬臂梁多层钢连廊竖向 TMD 振动控制[J]. 建筑结构, 2018, 48(11): 94-96.
Zhu W F, Tu T G, Chen T Q. Vertical TMD vibration control of a multi-story steel structure corridor with cantilever beam[J]. Building Structure, 2018, 48(11): 94-96. (in Chinese)
- [4] Elias S, Matsagar V. Research developments in vibration control of structures using passive tuned mass dampers[J]. Annual Reviews in Control, 2017, 44: 129-156.
- [5] 朱亚光, 徐培葵, 张厚建, 等. 影响调谐质量阻尼器减振效果的因素分析[J]. 四川建筑科学研究, 2015, 41(4): 58-61, 158.
Zhu Y G, Xu P Z, Zhang H J, et al. Impact parameters analysis on damping effect of tuned mass damper[J]. Sichuan Building Science, 2015, 41(4): 58-61, 158. (in Chinese)
- [6] Mikael A, Gueguen P, Bard P Y, et al. The analysis of long-term frequency and damping wandering in buildings using the random decrement technique[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2013, 103(1): 236-246.
- [7] Cao L Y, Li C X. Tuned tandem mass dampers-inert-

- ers with broadband high effectiveness for structures under white noise base excitations[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2019, 26(4): e2319.
- [8] Lu Z, Wang Z X, Zhou Y, et al. Nonlinear dissipative devices in structural vibration control: A review[J]. Journal of Sound and Vibration, 2018, 423: 18-49.
- [9] 鲁正, 周梦瑶, 马乃寅. 分布式多重调谐冲击阻尼器减震控制研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2022, 42(6): 1228-1232.
Lu Z, Zhou M Y, Ma N Y. Study on vibration reduction control of distributed multi-tuned impact dampers[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2022, 42(6): 1228-1232. (in Chinese)
- [10] Zhao Z P, Zhang R F, Lu Z. A particle inerter system for structural seismic response mitigation[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(14): 7669-7688.
- [11] 张瑞甫, 曹嫣如, 潘超. 惯容减震(振)系统及其研究进展[J]. 工程力学, 2019, 36(10): 8-27.
Zhang R F, Cao Y R, Pan C. Inerter system and its state-of-the-art[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(10): 8-27. (in Chinese)
- [12] 张瑞甫, 曹嫣如, 潘超, 等. 典型激励下调谐质量惯容系统 TMIS 的轻量化结构控制[J]. 工程力学, 2022, 39(9): 58-71.
Zhang R F, Cao Y R, Pan C, et al. Lightweight structural control based on tuned mass inerter system (tmis) under typical excitation[J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(9): 58-71. (in Chinese)
- [13] 鲁正, 高士凯, 周超杰, 等. 极罕遇地震作用下颗粒惯容系统的减震机制及其减震效果[J]. 建筑结构学报, 2023, 44(增2): 51-59.
Lu Z, Gao S K, Zhou C J, et al. Shock absorption mechanism and effect of particle inertial volume system under extremely rare earthquake[J]. Journal of Building Structures, 2023, 44(Sup2): 51-59. (in Chinese)
- [14] Zhang J W, Gao S K, Lu Z, et al. Seismic control performance of multi-story structures with an enhanced particle inerter device (EPID)[J]. Engineering Structures, 2024, 306: 117849.
- [15] 封周权, 吴强强, 陈智, 等. 基于 TMDI 的大跨度桥梁颤振控制理论研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2023, 50(11): 45-52.
Feng Z Q, Wu Q Q, Chen Z, et al. Flutter control for long-span bridges with TMDI: A theoretical study[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2023, 50(11): 45-52. (in Chinese)

(本文编辑: 池莹莹)

(下转第 1514 页)