

# 半主动调谐质量阻尼器对随机人群荷载振动控制

王梁坤<sup>1,2</sup>, 周颖<sup>1,2</sup>, 施卫星<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 同济大学土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 为提高人行桥的舒适度, 提出了一种可变质量与阻尼的半主动调谐质量阻尼器(STMD)。该 STMD 不但能通过水泵和电磁阀等驱动装置实时调节质量以重调频率来适应人行桥动力特性的变化, 而且能实时改变电涡流阻尼的磁导间距来调节阻尼系数以提高耗能效果。首先介绍了 STMD 变质量及变阻尼的算法及模型试验, 然后进行基于人群激励概率性随机模型的案例分析。对比研究了无控结构、优化设计的被动 TMD、变质量 STMD、变阻尼 STMD 及变质量变阻尼 STMD 在随机协同人群荷载下的 100 次加速度响应, 通过这 100 组加速度的最大值、均方根 (RMS) 值及最大 1-s RMS 值共 3 个舒适度评估指标的最大值、平均值和标准差, 分析了不同 TMD 的减振效果及鲁棒性。研究表明, 由于人群荷载和人体参数的随机性, 结构的动力响应有较大的差异。整体而言, 可同时变质量变阻尼的 STMD 具有最佳的减振效果, 且其标准差也最小, 即具有最好的鲁棒性。

**关键词:** 半主动调谐质量阻尼器; 随机人群激励; 人一结构相互作用; 可变质量; 可变阻尼

中图分类号: TU352; U441

文献标志码: A

## Semi-Active Tuned Mass Dampers for Vibration Control of Random Crowd Load

WANG Liangkun<sup>1,2</sup>, ZHOU Ying<sup>1,2</sup>, SHI Weixing<sup>1,2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** To improve the serviceability of footbridge, a semi-active tuned mass damper (STMD) with variable mass and damping is proposed, which can not only adjust its own mass and frequency in real time to adapt to the dynamic characteristics of the footbridge through the water pump and electromagnetic valve, but also adjust its own damping coefficient in real time to improve the effect

of energy dissipation through changing the air gap of eddy current damping. First, the variable mass and damping algorithm and model test of STMD are introduced. Then, a case study is conducted based on the probabilistic random model of crowd excitation. Afterwards, the 100 times acceleration response of the structure without control, with an optimized passive TMD, variable mass STMD, variable damping STMD and variable mass and damping STMD under random synergistic crowd is studied. Through the maximum, mean and standard deviation of the three comfort evaluation indexes of the 100 groups of acceleration, root mean square (RMS) value, and maximum 1-s RMS value, the control performance and robustness of different TMDs are analyzed. The results show that structural dynamic responses vary greatly due to the randomness of crowd and body parameters. In general, STMD with variable mass and damping has the best control performance, whose standard deviation is also the smallest, indicating the best robustness.

**Keywords:** semi-active tuned mass damper (STMD); stochastic crowd excitation; human-structure interaction (HSI); variable mass; variable damping

外形轻巧美观的钢结构人行桥在城镇中具有越来越广泛的应用。然而, 由于这类结构阻尼比较低, 且自振频率接近行人的步频, 当发生共振时, 会由于过大的振动而引起舒适度问题<sup>[1]</sup>。行人不但会给人行桥外部激励, 本身也是个动力系统。人一结构相互作用 (Human-Structure Interaction, HSI) 会对结构的动力特性及动力响应产生影响。

对于低密度随机人群激励, 可认为人群可以自由行走, 行人间没有相互影响。而当人群密度较大时, 就有必要考虑人群协同性<sup>[2]</sup>, 也即人一一人相互作用

收稿日期: 2022-10-16

基金项目: 国家自然科学基金 (52025083); 国家重点研发计划 (2022YFF0608903); 上海市浦江人才计划 (22PJ1413600); 中央高校基本科研业务费专项资金 (22120220573)

第一作者: 王梁坤, 工学博士, 助理教授, 主要研究方向为结构智能控制。E-mail: wangliangkun@tongji.edu.cn

通信作者: 周颖, 工学博士, 教授, 主要研究方向为高层防震韧性建筑与智能防灾。

E-mail: yingzhou@tongji.edu.cn



论文  
拓展  
介绍

用(Human-Human Interaction, HHI)。考虑HHI时,仅设行人间同步,但不一定是以人行桥的固有频率作为步频,更具随机性且更符合实际情况<sup>[3-4]</sup>。更加复杂的是,人群中行人的步频、步长、相位、到达桥梁的间隔时间等都是随机的,而且当考虑HSI时,人体的质量和频率等参数也都是随机的<sup>[5]</sup>,这都加大了舒适度问题的分析难度。

调谐质量阻尼器(Tuned Mass Damper, TMD)常被用于人行桥的竖向振动控制中<sup>[6]</sup>。TMD由质量块、弹簧和阻尼单元三部分组成<sup>[7]</sup>。TMD通过给行人桥反向的惯性力来控制结构的振动<sup>[8]</sup>。然而,考虑上述的HSI与HHI 2个效应中系列参数的随机性时,被动TMD(Passive TMD, PTMD)由于缺乏自适应性而难以确保良好的减振效果。同时,PTMD的减振作用取决于其预先设计的动力参数,参数失调的PTMD的控制性能会有大幅度的降低。HSI和HHI会改变人行桥的整体动力特性,进而引起PTMD的参数失谐与减振效果的下降。

为了提高PTMD的上述缺陷,可以通过附加作动器的方式提高其人致振动控制效果,即为主动TMD(Active TMD, ATMD)。Casado等<sup>[9]</sup>对比研究了PTMD与ATMD对人行桥的控制性能。Wang等<sup>[10]</sup>提出了一种基于速度反馈的ATMD,并研究了其对轻柔人行桥的减振效果。虽然ATMD比PTMD具有更优的控制性能,但其依赖于大量的电源供给,并且由于对工程结构有直接的能量输入,会存在控制系统稳定性的问题。半主动TMD(Semi-active TMD, STMD)能够实时调整自身参数以达到瞬时最优控制效果<sup>[11]</sup>。Wieczorek等<sup>[12]</sup>为轻质的人行桥研发了一种半主动变摩擦力的TMD。Moutinho等<sup>[13]</sup>对比研究了PTMD与半主动变阻尼TMD对人行桥的控制作用。然而,在人行桥结构的竖向振动控制中,还很少见半主动TMD的研究。

为了提高对考虑HSI及HHI时随机人群激励的减振作用,提出了一种可变质量和阻尼的STMD(Variable Mass and Damping STMD, VMD-STMD),并以一种人群密度和协同率为例,对比了无控结构、PTMD、变质量STMD(VM-STMD)、变阻尼STMD(VD-STMD)及VMD-STMD在随机协同人群荷载考虑HSI下的100次加速度响应,通过这100组数据的最大值、均方根(Root Mean Square, RMS)及最大1-s RMS值共3个舒适度评估指标的最大值、平均值和标准差,验证并对比分析了不同TMD的减振效果及鲁棒性。

## 1 装置介绍与动力分析

### 1.1 半主动变质量变阻尼TMD

提出的VMD-STMD的概念设计图如图1所示。图1中TMD弹簧顶部的质量块为一长方体的箱体,作为其可变质量部分;下部底座也为一长方体箱体,作为可变质量的供调节部分。试验模型中可变质量为水,实际工程中亦可为沙子或者砂石等形式,并可通过改变可变质量的种类(即密度)和箱体的体积来改变其可变质量(即频率)的调节范围<sup>[14]</sup>。图1中驱动系统为一个放置于底部箱体中的水泵,用来将底部箱体中的水泵入顶部水箱,即增加TMD的质量以减小其频率;一个插于顶部水箱底部孔洞中的电磁阀,用来将顶部水箱中的水放入底部箱体,即减少TMD的质量以增大其频率。

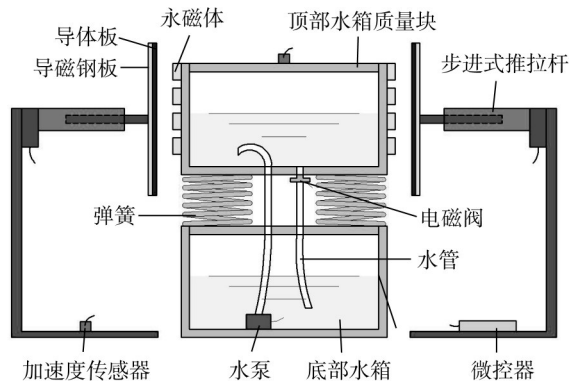


图1 VMD-STMD模型设计图

Fig. 1 Design model of VMD-STMD

图1中STMD的变阻尼功能由可调电涡流阻尼实现。电涡流阻尼是基于电磁感应原理,通过永磁体和导体板间的相对运动产生电涡流阻尼力,因此具有无附加刚度、阻尼力易于计算与调节和耐久性好等优点。TMD质量块两侧壁上均对称吸附有永磁体,左右两侧各有一步进式推拉杆。在微控器的控制下,步进式推拉杆通过伸缩运动改变导体板与永磁体间的磁导间距以实现阻尼力可调。导体板后附着的导磁钢板用于增强磁场及电涡流阻尼力。

因此,图1中的VMD-STMD既可通过调节质量以实时调节频率,又可通过实时调节磁导间距以调节阻尼系数。由于TMD是种频率依赖型的动力吸振器,所以所提出的VMD-STMD能够通过实时调节频率与阻尼以最大限度地吸收结构的动能并耗散。为了对比说明不同控制策略的减振效果及鲁棒性,将仅可变质量的称为VM-STMD,仅可变阻尼的称为VD-STMD。

### 1.2 动力分析

对于一阶振型占主导的简支人行桥, 可将其简化为等截面的欧拉-伯努利梁, 在人群荷载激励下及 VMD-STMD 控制下, 动力分析简图如图 2 所示。图中,  $EI$  为抗弯刚度;  $i$  为行人的序号;  $x$  为沿桥长度方向的坐标,  $x_i$  为第  $i$  个行人位置;  $L$  为桥的长度;  $m_s(t)$  和  $m_{hi}$  分别为 VMD-STMD 和第  $i$  个行人的质量;  $c_s(t)$  和  $c_{hi}$  分别为 VMD-STMD 和第  $i$  个行人的

阻尼系数;  $k_s$  和  $k_{hi}$  分别为 VMD-STMD 和第  $i$  个行人的刚度系数;  $y_p(x, t)$ ,  $y_s(L/2, t)$  和  $y_{hi}(x, t)$  分别为人行桥、VMD-STMD 和第  $i$  个行人的相对位移, 行人和 TMD 的响应坐标均相对于桥梁;  $F_{hi}(x, t)$  为第  $i$  个行人的动力荷载;  $v_i$  为第  $i$  个行人的行走速率。

当忽略 HSI 时, 无 TMD 的简支人行桥在若干步行激励作用下的动力方程如式(1)所示:

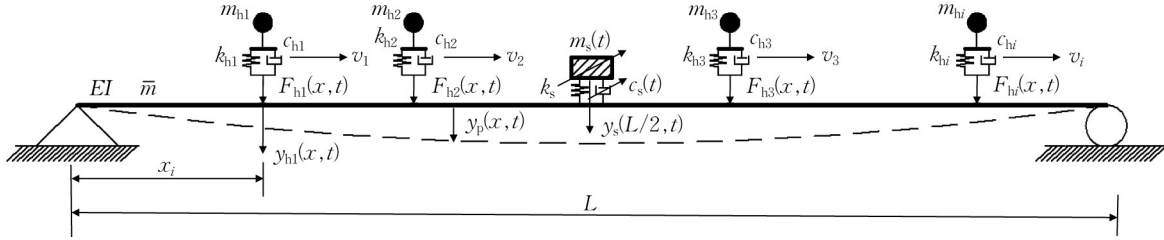


图 2 考虑人-结构相互作用人行桥随机人群激励动力分析简图

Fig. 2 Dynamic analysis diagram of footbridge under stochastic crowd excitations considering HSI

$$EI \frac{\partial^4 y_p(x, t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 y_p(x, t)}{\partial t^2} + C \frac{\partial y_p(x, t)}{\partial t} = \sum_{i=1}^{I_p} F_{hi}(x, t) \quad (1)$$

式中:  $C$  为人行桥的阻尼系数;  $I_p$  为行人数量;  $\bar{m}$  为人行桥的单位长度质量。基于模态函数的正交性, 采用模态分解方法对式(1)进行简化, 可计算人行桥的位移响应为

$$y_p(x, t) = \sum_{n=1}^N q_n(t) \phi_n(x) \quad (2)$$

则式(1)可简化为

$$\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) = F_n(t) \quad (3)$$

式中:  $q_n(t)$ ,  $\zeta_n$  和  $F_n(t)$  分别为第  $n$  阶的广义坐标、广义模态阻尼比、广义模态力。  $F_n(t)$ 、广义模态质量  $M_n$  和广义振动模态  $\phi_n(x)$  如式(4)~(6)所示:

$$F_n(t) = \sum_{i=1}^{I_p} \int_0^L \frac{F_{hi}(t)}{M_n} \phi_n(x) dx \quad (4)$$

$$M_n = \int_0^L \bar{m} [\phi_n(x)]^2 dx \quad (5)$$

$$\phi_n(x) = \phi_n(x) / \sqrt{M_n} \quad (6)$$

为了表示多个行人在桥梁上的运动, 每个行人对桥梁的作用力  $f_{hi}(x, t)$  使用 Heaviside 阶函数  $H$  和狄拉克函数  $\delta$  进行表达, 为

$$f_{hi}(x, t) = F_{hi}(t) \delta[x_i(t) - v_i(t - \tau_i)] \left[ H(t - \tau_i) - H\left(t - \frac{L}{v_i} - \tau_i\right) \right] \quad (7)$$

式中:  $x_i(t)$  和  $\tau_i$  分别为第  $i$  个行人的位置和到达时间。当考虑 HSI 时, 式(8)给出了具有 VMD-STMD 和若干行人的简支人行桥的动力方程。

$$\begin{aligned} &\ddot{q}_n(t) + 2\zeta_n \omega_n \dot{q}_n(t) + \omega_n^2 q_n(t) + \\ &\sum_{i=1}^{I_p} m_{hi} \ddot{y}_{hi}[x_i(t), t] \phi_n[x_i(t)] + \\ &m_s(t) \ddot{y}_s(L/2, t) \phi_n(L/2) = \\ &\frac{1}{M_n} \sum_{i=1}^{I_p} f_{hi}(x, t) \phi_n[x_i(t)] \end{aligned} \quad (8)$$

当仅考虑图 2 中人行桥的第 1 阶竖向模态时, 可通过求解式(9)~(13)得到数值模拟的结果。

$$M\ddot{q} + C\dot{q} + Kq = F \quad (9)$$

$$M = \begin{pmatrix} 1 & m_{h1}\phi_1 x_1 & \cdots & m_{hi}\phi_1 x_i & m_s(t)\phi_{1,L/2} \\ & m_{h1} & \cdots & \cdots & \cdots \\ & & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & m_{hi} & \cdots \\ & & & & m_s(t) \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$C = \begin{pmatrix} 2\zeta_1 \omega_1 & & & & \\ -c_{h1}\phi_1 x_1 / M_1 & c_{h1} & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \\ -c_{hi}\phi_1 x_i / M_1 & \cdots & \cdots & c_{hi} & \\ -c_s(t)\phi_{1,L/2} / M_1 & \cdots & \cdots & \cdots & c_s(t) \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$q = [q_1, y_{h1}, \cdots, y_{hi}, y_s] \quad (12)$$

$$F = \left[ \left( \sum_{i=1}^{I_p} f_{hi}(x, t) \phi_1[x_i(t)] \right) / M_1, 0, \cdots, 0, 0 \right] \quad (13)$$



刚度矩阵  $K$  的形式与式(11)相似。对于没有 TMD 的情况,可以通过降低上述方程的维数得到。

## 2 变质量变阻尼控制算法

### 2.1 变质量控制算法

为实时捕捉人行桥瞬时振动频率,使用小波变换(Wavelet Transform, WT)。WT 广泛应用于非平稳信号的处理,具有多分辨率分析的特点。在高频和低频部分均能获得较好的时间分辨率和频率分辨率<sup>[15]</sup>。对于一个给定的函数  $\Psi(t)$ ,它被定义为

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (14)$$

式中:  $a$  为尺度因子;  $b$  为时移因子。  $\Psi_{a,b}(t)$  称为小波基函数,可以通过移位和拉伸得到  $\Psi(t)$ 。

然后,对信号  $x(t)$  进行小波变换的求解,过程为

$$W_x(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \Psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt = \frac{1}{\sqrt{a}} \int x(t) \Psi_{a,b}^*(t) dt \quad (15)$$

式中:  $\Psi_{a,b}^*(t)$  是  $\Psi_{a,b}(t)$  的共轭函数。信号的瞬时频率  $\omega_x(a,b)$  为

$$\omega_x(a,b) = -j(W_x(a,b))^{-1} \frac{\partial}{\partial b} W_x(a,b) \quad (16)$$

式中:  $j$  为虚数单位。时间和频率分辨率可以根据小波基函数的变化来调整,小波基函数可以根据尺度因子  $b$  来改变。利用基于 WT 的自适应多重 TMD 进行楼板的人致振动控制研究可参见文献[15]。

人行桥上的加速度传感器用于获取人行桥的加速度响应,微控器计算其瞬时频率。考虑到机电装置的功能限制和 TMD 的控制效果,总是将 VMD-STMD 的频率调整到识别的瞬时频率  $f_i$  可能是不合理和不必要的,因此,首先要在微控器中设置一个频率调节范围( $f_{\min}, f_{\max}$ )。如果  $f_i$  大于预设的最大频率  $f_{\max}$  或小于预设的最小频率  $f_{\min}$ ,驱动装置将把 VMD-STMD 的频率  $f_s(t)$  重新调整为  $f_{\max}$  或  $f_{\min}$ ; 否则,微控器会将其调整为  $f_i$ 。最后,驱动装置根据式(17)调节 TMD 的质量  $m_s(t)$  (即自振频率)。

$$m_s(t) = \frac{k_s}{4\pi^2 f_s(t)^2} \quad (17)$$

### 2.2 变阻尼控制算法

考虑到 HHI 与 HSI 中系列参数的随机性,为了提高半主动变阻尼控制算法的鲁棒性,使其能够独立于结构信息和激励信息,可以仅凭可直接测得的

输出信号进行辨别和控制,首先介绍一种基于加速度和速度信号的半主动变阻尼调算法,然后将其应用于简支人行桥案例分析中。

基于人行桥的速度、加速度信号及 TMD 的速度信号的半主动变阻尼算法见式(18)所示:

$$\begin{cases} (\dot{x}_s - \dot{x}_p)\ddot{x}_p \leq 0 \Rightarrow \zeta_s(t) = 0 \\ (\dot{x}_s - \dot{x}_p)\ddot{x}_p > 0 \Rightarrow \zeta_s(t) = \zeta_{\max} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\dot{x}_s$  和  $\dot{x}_p$  分别为 TMD 和人行桥的速度;  $\ddot{x}_p$  为人行桥的加速度;  $\zeta_s(t)$  和  $\zeta_{\max}$  分别表示半主动 TMD 的瞬时阻尼比和预设的最大阻尼比。

从式(18)可见,该阻尼调算法的优势在于仅需要可直接通过传感器实时测得的信号进行判断和改变 TMD 的阻尼,无需知道结构和外部激励的参数信息,因此具有更好的鲁棒性和适用性。

综上,得到 VMD-STMD 的变质量变阻尼调节算法流程框图如图 3 所示。其不但能通过水泵和电磁阀等驱动装置实时调节质量以重调频率来适应人行桥动力特性的变化,而且能实时改变电涡流阻尼的磁导间距来调节阻尼系数以提高耗能效果。

文献[9]指出,对于半主动控制的阻尼器,目前的设备已能达到接近瞬时的效果,可不考虑时滞效应带来的影响,也没有控制系统稳定性的问题。因此,在下文数值模拟中不考虑时滞效应。

## 3 模型试验

本文提出的 VMD-STMD 的特点为可通过实时调节质量以调谐频率,又可实时改变磁导间距以调节电涡流阻尼。文献[14-15]研究调节质量的模型试验,本节重点进行可调电涡流阻尼的模型试验。

图 1 的 VMD-STMD 模型中,顶部质量块水箱由一块底板和四边钢板组成,底板为 300 mm × 300 mm × 10 mm 的钢板,四边钢板尺寸均为 300 mm × 50 mm × 10 mm。左右两侧钢板上分别吸附有 16 个 40 mm × 16 mm × 4 mm 的永磁铁。因此,该顶部水箱无水时,质量为 14.24 kg,可装满 4.50 kg 水,即最大质量为 18.75 kg。对于电涡流阻尼组成部分的导体板,本模型试验使用尺寸为 400 mm × 400 mm × 4 mm 的铜板。当在装满水的 VMD-STMD 底下附加 4 个总刚度为 5516.8 N·m<sup>-1</sup> 的弹簧后,其自振频率为 2.73 Hz。永磁铁与铜板间的磁导间距在 (0.4, 2.4) cm 区间内可变,每次参数讨论试验调整的间距为 0.2 cm,因此共有 11 个试验工况。

通过往下按质量块 2 cm 然后突然释放的方法,

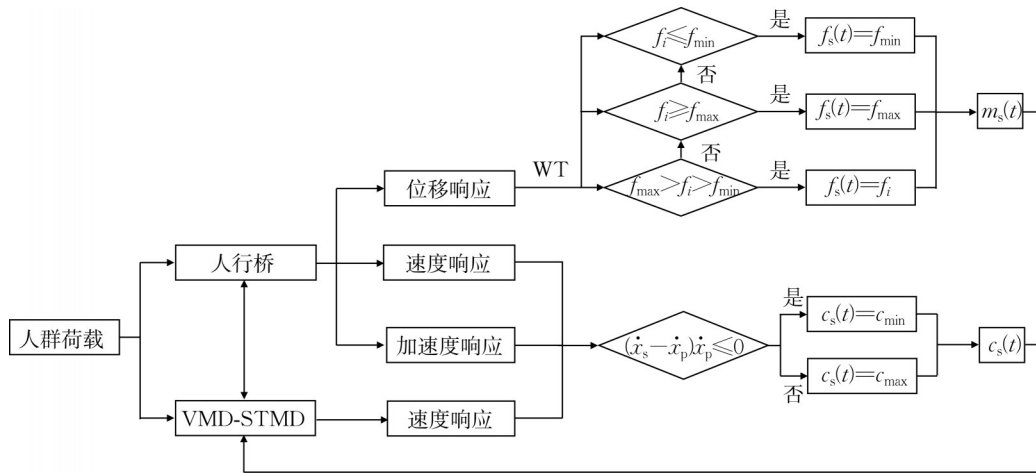


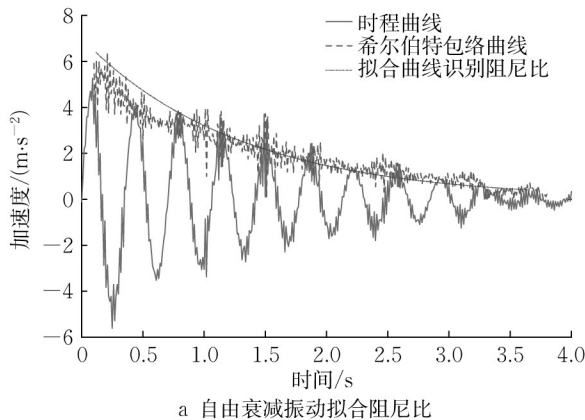
图3 VMD-STMD变质量变阻尼控制算法流程框图

Fig. 3 Flowchart of variable mass and variable damping control algorithm of VMD-STMD

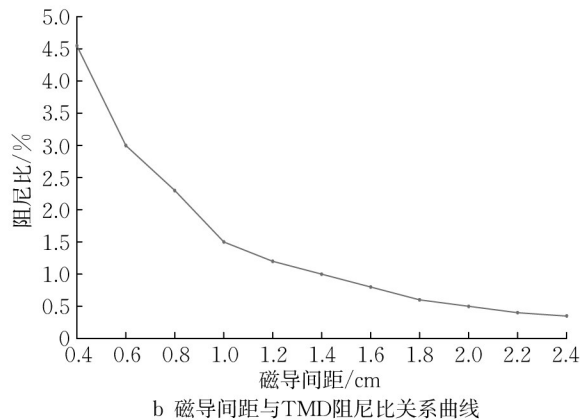
由其自由衰减曲线通过指数函数拟合识别其阻尼比。为验证拟合精度,作了衰减曲线的希尔伯特包络线。其中当磁导间距为0.4 cm时,试验结果见图4a,磁导间距与TMD阻尼比拟合关系曲线见图4b。

由图4可知,指数函数与希尔伯特包络曲线吻

合良好;磁导间距与阻尼比呈现单调递减关系,且减幅先大后小。因此,仅通过步进式推拉杆较小的伸缩运动行程就可实现TMD阻尼比在较大范围内的变化。此外,电涡流阻尼可以通过增加永磁铁数量、扩大铜板尺寸和厚度及增设导磁钢板增大。



a 自由衰减振动拟合阻尼比



b 磁导间距与TMD阻尼比关系曲线

图4 VMD-STMD自由衰减振动识别阻尼比及与磁导间距关系拟合

Fig.4 Identification of damping ratio and fitting of relationship between air gap fitting function of VMD-STMD

## 4 案例分析

### 4.1 案例简介

以文献[16]中的人行桥案例进行数值模拟研究。研究的桥梁是50 m长的简支梁,其线质量为 $500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}$ ,宽为2 m;梁的弹性模量为 $200 \times 10^{11} \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$ ;一阶自振频率为2 Hz,阻尼比为0.5%。

为了考虑步行激励的随机性,将行人视为健康的成年人。行人体重为对数正态分布,均值为73.85 kg,标准差为15.68 kg。这里取步长为正态分布,均值为0.66 m,假设变异系数为10%,即标准差

为0.066 m。步行频率为正态分布,平均值为1.96 Hz,标准差为0.209 Hz。行人竖向谐波力的相位角设为 $0 \sim 2\pi$ 区间内的均匀分布。

以一个初始长度为100 m、宽度为2 m的人群荷载为例进行分析。行人到达桥梁的过程视为泊松过程,相邻行人到达桥梁的间隔时间用指数分布来模拟。平均间隔距离是人群密度的函数。考虑 $0.44 \text{ 人}\cdot\text{m}^{-2}$ 的人群密度,其平均间隔距离为0.568 m。

行人协同率(即同频同相行走)取在 $0 \sim 1$ 之间。考虑的同步比例为0.5,发生协同的行人的步频和相位相等。这些参数都根据之前给出的概率模型随机

产生。此外,同步的行人在人群中假设为均匀分布。因此,在多次生成上述各项随机数组中,有些会出现同步的行人集群现象,有些没有。

在数值模拟中,每个行人的步行力 $F_p(t)$ 按式(19)生成,为

$$F_p(t) = G[1 + \alpha \sin(2\pi f_p t)] \quad (19)$$

式中: $G$ 为每个行人的体重,为对数正态分布; $f_p$ 为行人的步频,为正态分布; $\alpha$ 为与步频相关的傅里叶系数。

$$\alpha = 0.25f_p - 0.1 \quad (20)$$

数值模拟中考虑了无控结构、加设PTMD、VM-STMD、VD-STMD及VMD-STMD共5种情况,计算了 $0.44 \text{人}\cdot\text{m}^{-2}$ 的人群密度,对每个人群密度均考虑0.5的同步比例。计算中考虑了HSI,人体刚度服从数学期望为 $22.5 \text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 、标准差为 $2.25 \text{kN}\cdot\text{m}^{-1}$ 的正态分布。人体的阻尼比均设为0.3。

#### 4.2 对比工况设计

仅考虑上述人行桥的一阶振型,模态质量为

$12\,500 \text{ kg}$ 。TMD的质量比取为2%,即质量为 $250 \text{ kg}$ 。根据经典优化公式,PTMD频率为 $1.96 \text{ Hz}$ ,阻尼比为8.57%。VM-STMD的刚度系数与PTMD相同,频率可调范围为人行桥基频的 $\pm 10\%$ ,当其质量发生变化时,人行桥的质量也会相应变化;VD-STMD的可调最大阻尼比为PTMD优化阻尼比的2倍;VMD-STMD是上述2种STMD的整合。

对步行激励各项参数及人体参数的随机分布均进行100次计算,对每次计算均求取人行桥加速度响应的最大值、RMS值及最大1-s RMS值,然后以这100组加速度最大值、RMS值及最大1-s RMS值的最大值、平均值和标准差为指标评估上述4种TMD对人行桥振动控制效果及减振性能的鲁棒性。

#### 4.3 数值模拟结果

考虑HHI及HSI参数随机性的100次计算中,以无控结构和VMD-STMD这2种工况为例,其人行桥加速度最大值见图5所示。

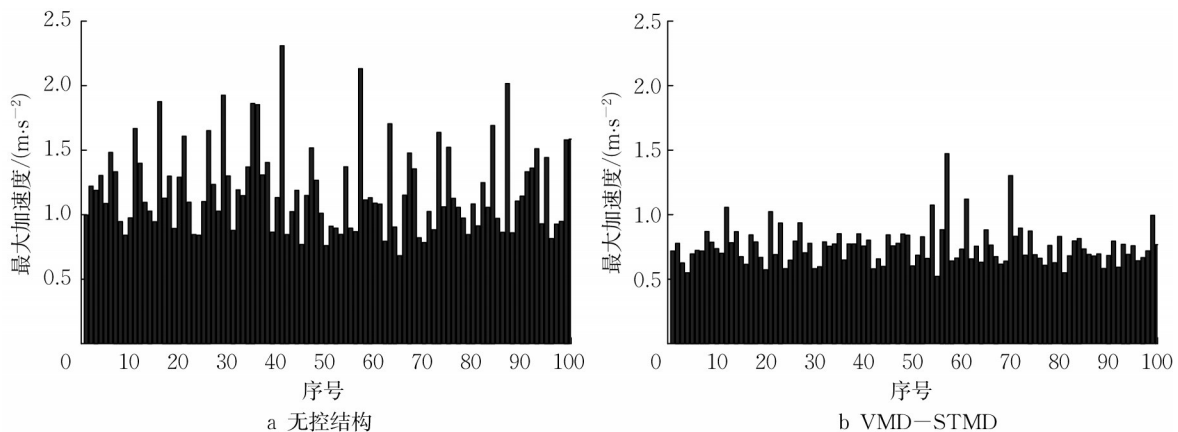


图5 不同工况下100次计算人行桥加速度最大值

Fig. 5 Calculation of maximum accelerations of 100 times of footbridge under different working conditions

由图5可见,考虑HSI和HHI的系列参数随机性时,不同数组下的结构响应和不同控制策略TMD的减振效果有较大的差异。这是因为对于线性的人行桥结构,激励频率接近共振频率时,响应急剧增大;而远离共振频率时,响应急剧减小。每次计算步频处于共振区间的人数不同,其响应也会有较大差

异。同时,4种TMD相对于无控结构均具有良好的减振效果,且VMD-STMD具有最好的控制作用。

在舒适度评估指标中,最大值和平均值评估的是TMD的减振效果,标准差评估的是减振鲁棒性,其具体概率统计值分别见表1—3。VMD-STMD相较于前4个对比工况的最大加速度减振率见图6。

表1 人行桥100组加速度最大值概率统计

Tab. 1 Probability statistics of maximum acceleration of 100 groups of footbridge

对比工况	无控	PTMD	VM-STMD	VD-STMD	VMD-STMD
最大值	2.308	1.767	1.607	1.656	1.472
平均值	1.189	0.881	0.809	0.800	0.752
标准差	0.334	0.221	0.176	0.204	0.149

单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

表 2 人行桥 100 组加速度 RMS 值概率统计

Tab. 2 Probability statistics of RMS acceleration of 100 groups of footbridges

单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

对比工况	无控	PTMD	VM-ST-MD	VD-ST-MD	VMD-STMD
最大值	0.574	0.518	0.443	0.500	0.414
平均值	0.315	0.232	0.205	0.205	0.181
标准差	0.083	0.068	0.045	0.065	0.039

表 3 人行桥 100 组加速度最大 1-s RMS 值概率统计

Tab. 3 Probability statistics of maximum 1-s RMS acceleration of 100 groups of footbridges

单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$

对比工况	无控	PTMD	VM-ST-MD	VD-ST-MD	VMD-STMD
最大值	1.636	1.205	1.053	1.178	0.989
平均值	0.814	0.585	0.526	0.521	0.479
标准差	0.247	0.160	0.121	0.147	0.101

由表 1—3、图 6 可见,优化设计的 PTMD 具有良好的减振效果,而 3 种 STMD 均具有更好的控制作用与鲁棒性;VM-STMD 和 VD-STMD 的减振效果

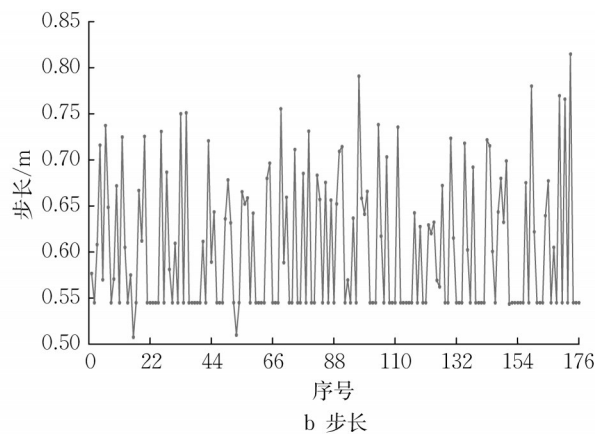
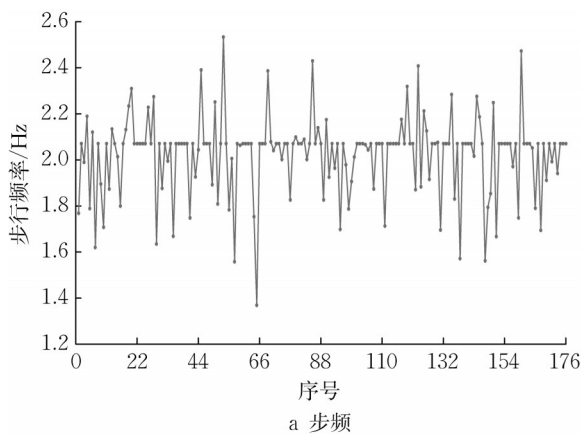


图 7 考虑 HSI 协同率为 0.5 的人群激励参数随机分布

Fig. 7 Random distribution of crowd excitation parameters considering HSI at a 0.5 synchronization rate

从图 7 可见,部分行人的步长、步频和相位是相同的,这是因为随机指定人群中的这些行人发生了协同。本节中协同率取 0.5,即有一半的行人发生了协同。在该人群激励下,无控结构和 VMD-STMD 这 2 个工况的加速度时程见图 8 所示,具体舒适度评估指标的数值列于表 4 中。VMD-STMD 相对于前面 4 种工况的减振率见图 9。

由图 8、表 4 和图 9 可见,在该组随机人群激励作用下,2 种可变单一参数的 STMD 的控制效果均比

较为相似,而 VM-STMD 的标准差更小即鲁棒性更佳;VMD-STMD 具有最小的最大值、平均值和标准差,即其减振作用与鲁棒性均最好。

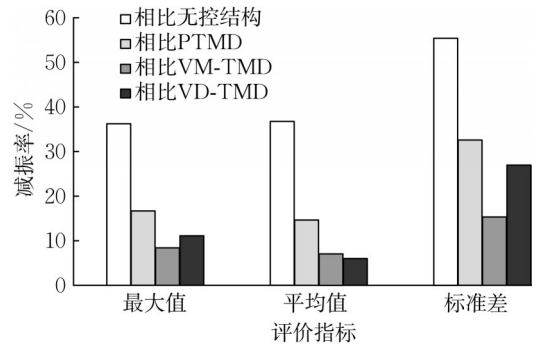


图 6 VMD-STMD 对于不同工况最大加速度的减振率

Fig. 6 Vibration reduction rate of VMD-STMD for maximum acceleration under different operating conditions

#### 4.4 时程响应分析

为了从时域的角度更清晰直观地进行认识,以按 4.1 节的概率分布模型随机生成的一组数据为进行分析,其步频和步长这 2 个随机参数生成的数据如图 7 所示。

PTMD 好,而 VMD-STMD 在 3 个舒适度评估指标上均具有最好的减振作用。

VMD-STMD 捕捉的人行桥瞬时振动频率如图 10a 所示,瞬时阻尼系数变化如图 10b 所示。VMD-STMD 既可根据图 10a 调节频率以适应人行桥自振特性的变化,又可根据图 10b 调节阻尼以提高耗能效果,因此其减振效果与鲁棒性均优于做对比的 3 种 TMD。



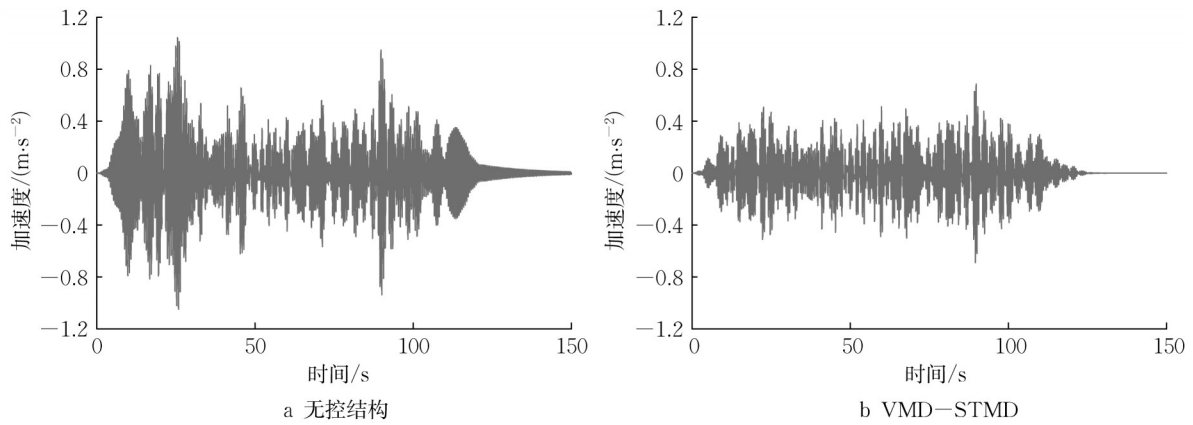


图8 不同工况下人行桥加速度对比

Fig. 8 Comparison of acceleration of footbridge under different operating conditions

表4 人行桥振动加速度响应对比

Tab. 4 Comparison of acceleration response of footbridge

单位:  $m \cdot s^{-2}$

对比工况	无控	PTMD	VM-STMD	VD-STMD	VMD-STMD
最大值	1.047	0.797	0.776	0.755	0.690
RMS	0.251	0.194	0.180	0.185	0.164
最大1-s RMS	0.701	0.505	0.495	0.487	0.451

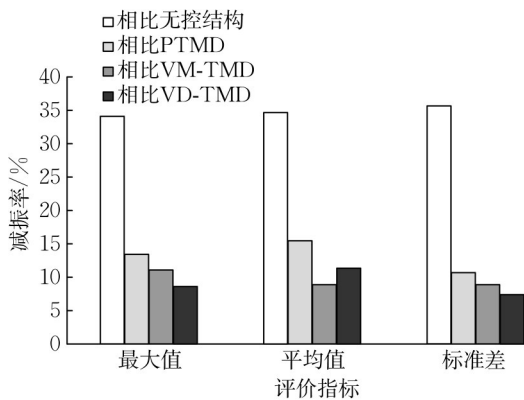


图9 VMD-STMD对于不同工况的减振率

Fig. 9 Reduction rate of VMD-STMD under different working conditions

## 5 结论

为了提高对考虑HSI及HHI时人行桥在随机人群激励下的减振作用,研究了可变质量和阻尼的半主动TMD(VMD-STMD)。该STMD不但能通过水泵和电磁阀等驱动装置实时调节质量以重调频率来适应人行桥动力特性的变化,而且能实时改变电涡流阻尼的磁导间距来调节阻尼系数以提高耗能效果。由于TMD是种频率依赖型的动力吸振器,所提出的STMD能够通过实时调节频率与阻尼以最大

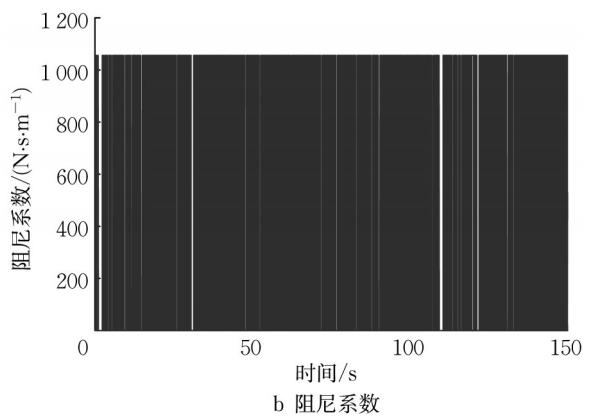
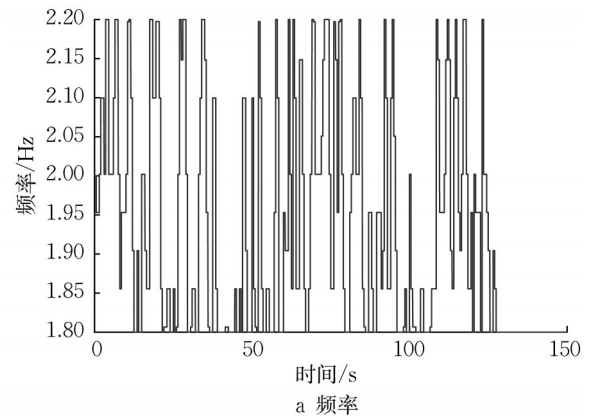


图10 VMD-STMD瞬时参数变化

Fig. 10 Instantaneous parameter variation of VMD-STMD

限度地吸收结构的动能并耗散。

通过模型试验和数值模拟研究,得出结论如下:

(1)由VD-STMD的模型参数讨论试验可知,电涡流阻尼系数是磁导间距的单调递减函数,通过该单调函数及变阻尼控制算法,可高效便捷地进行磁导间距的调节与阻尼系数的实时调换。

(2)不同HSI及HHI参数组合下的结构响应有较大的差异,不同TMD的控制性能也有所不同。优



化设计的 PTMD 具有良好的减振效果,而 3 种 STMD 的减振作用与鲁棒性均优于 PTMD。

(3) VM-STMD 和 VD-STMD 的减振效果较为相似,而 VM-STMD 的标准差更小即鲁棒性更佳。

(4) VMD-STMD 可同时实时调节自身的质量(频率)与阻尼,因此其减振效果与鲁棒性均最优。

#### 作者贡献声明:

王梁坤:模型试验,数值模拟,数据收集与处理,分析与论文撰写。

周颖:提出研究思路,指导研究方案和论文撰写,审阅及修订论文。

施卫星:提出研究思路,指导研究方案和论文撰写,审阅及修订论文。

#### 参考文献:

- [1] 操礼林,曹栋,张志强,等.随机人群行走下人行桥动力特性参数及加速度响应[J].东南大学学报(自然科学版),2018,48(6):1028.  
CAO Lilin, CAO Dong, ZHANG Zhiqiang, *et al.* Dynamic characteristic parameter and acceleration response of footbridge under random crowd walking [J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2018, 48(6): 1028.
- [2] 操礼林,曹栋,于国军,等.考虑行人同步率的随机行走人群模型[J].西南交通大学学报,2020,55(3):495.  
CAO Lilin, CAO Dong, YU Guojun, *et al.* Random walking crowd model considering pedestrian synchronization rate [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2020, 55(3): 495.
- [3] 朱前坤,刘路路,杜永峰,等.考虑行人—结构相互作用的悬挑钢筋桁架楼承板振动控制研究[J].建筑结构学报,2018,39(1):99.  
ZHU Qiankun, LIU Lulu, DU Yongfeng, *et al.* Human-induced vibration and control for cantilever steel bar truss deck slab based on pedestrain-structure interaction [J]. Journal of building structures, 2018, 39(1): 99.
- [4] 朱前坤,马法荣,张琼,等.行人—结构竖向动力耦合效应试验研究[J].建筑结构学报,2020,41(11):125.  
ZHU Qiankun, MA Farong, ZHANG Qiong, *et al.* Experimental study on vertical dynamic coupling effect of pedestrian-structure [J]. Journal of Building Structures, 2020, 41(11): 125.
- [5] 郭瑞,任宇,王双旭.基于人群密度的随机人群荷载模型研究[J].振动与冲击,2021,40(20):255.  
GUO Rui, REN Yu, WANG Shuangxu. A study on stochastic crowd load model based on crowd density [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(20): 255.
- [6] 赵昕,王立林,郑毅敏.超高层建筑结构组合调谐风振控制系统[J].同济大学学报(自然科学版),2016,44(4):550.  
ZHAO Xin, WANG Lilin, ZHENG Yimin. Combined tuned damper-based wind-induced vibration control for super tall

- buildings [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2016, 44(4): 550.
- [7] 王宝顺,何浩祥,闫维明.质量调谐—颗粒阻尼器复合减振体系的力学解析及优化分析[J].工程力学,2021,38(6):191.  
WANG Baoshun, HE Haoxiang, YAN Weiming. Analytical model and optimization analysis of combined damping system with TMD and particle damper [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(6): 191.
- [8] 刘纲,雷振博,杨微,等.风机塔架 PS-TMD 被动控制装置机理分析及参数调谐优化研究[J].工程力学,2021,38(12):137.  
LIU Gang, LEI Zhenbo, YANG Wei, *et al.* Mechanism analysis and parameter tuning optimization for wind turbine towers with PS-TMD passive control devices [J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(12): 137.
- [9] CASADO C, DIAZ I, SEBASTIAN J, *et al.* Implementation of passive and active vibration control on an in-service footbridge [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2013, 20(1): 70.
- [10] WANG X, PEREIRA E, DIAZ I, *et al.* Velocity feedback for controlling vertical vibrations of pedestrian-bridge crossing. Practical guidelines [J]. Smart Structures and Systems, 2018, 22(1): 95.
- [11] NAGARAJAIAH S. Adaptive passive, semi-active, smart tuned mass dampers: identification and control using empirical mode decomposition, Hilbert transform, and short-term Fourier transform [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2009, 16(7/8): 800.
- [12] WIECZOREK N, GERASCH W, ROLFES R, *et al.* Semiactive friction damper for lightweight pedestrian bridges [J]. Journal of Structural Engineering, 2014, 140(4): 04013102.
- [13] MOUTINHO C, CUNHA Á, CAETANO E, *et al.* Vibration control of a slender footbridge using passive and semiactive tuned mass dampers [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2018, 25(9): e2208.
- [14] 施卫星,王梁坤,王洪涛,等.自调频调谐质量阻尼器及其减振性能试验[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(6):751.  
SHI Weixing, WANG Liangkun, WANG Hongtao, *et al.* Experimental study of the effect on controlling vibration on the self-adjustable tuned mass damper [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2018, 46(6): 751.
- [15] 王梁坤,施卫星,张全伍,等.自适应多重 TMD 在大跨楼板结构减振中的应用[J].振动、测试与诊断,2020,40(3):578.  
WANG Liangkun, SHI Weixing, ZHANG Quanwu, *et al.* Adaptive-passive multiple tuned mass damper on large-span floor structure [J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2020, 40(3): 578.
- [16] CAPRANI C, KEOGH J, ARCHBOLD P, *et al.* Enhancement factors for the vertical response of footbridges subjected to stochastic crowd loading [J]. Computers and Structures, 2012, 102/103: 87.