

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021121923021995

文章编号: 1674-599X(2024)01-0068-11

引用格式: 胡绵远, 董新梅, 明德江, 等. 单索面曲线人行桥人致振动及减振控制[J]. 交通科学与工程, 2024, 40(1): 68-78.

Citation: HU Mianyuan, DONG Xinmei, MING Dejiang, et al. Study on vibration damping control of a single-cable curved footbridge induced by pedestrian[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2024, 40(1): 68-78.

## 单索面曲线人行桥人致振动及减振控制

胡绵远<sup>1,2</sup>, 董新梅<sup>3</sup>, 明德江<sup>3</sup>, 汪林<sup>3</sup>, 殷新锋<sup>1</sup>

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙, 410114;

2. 湖南省高速公路集团有限公司, 湖南长沙 410022;

3. 四川公路桥梁建设集团有限公司大桥分公司, 四川 成都, 610041)

**摘 要:** 单索面曲线人行桥自振频率若处在行人步频范围, 则人与桥梁容易发生共振。依据德国人行桥设计指南 EN03 规范, 考虑人群驻足效应, 对某人行桥进行人致振动及舒适度分析。研究表明: 人群驻足效应会使桥梁结构的自振频率减小, 该桥模态 5 与模态 6 的竖向频率为 1.25 ~ 2.30 Hz, 需进行竖向人致振动加速度响应分析; 考虑人群驻足效应前, 模态 5 与模态 6 对应的行人舒适度级别分别为 CL4 和 CL3, 需进行减振控制; 在设置 TMD 装置后, 模态 5 与模态 6 在各工况下的行人舒适度均满足能达到德国人行桥设计指南 EN03 规范舒适度 CL1 等级要求。

**关键词:** 单索面曲线人行桥; 人致振动; 行人舒适度; 减振控制; TMD 装置

中图分类号: U448.11

文献标志码: A

## Study on vibration damping control of a single-cable curved footbridge induced by pedestrian

HU Mianyuan<sup>1,2</sup>, DONG Xinmei<sup>3</sup>, MING Dejiang<sup>3</sup>, WANG Lin<sup>3</sup>, YIN Xinfeng<sup>1</sup>

(1. College of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Hunan Provincial Expressway Group Co., Ltd., Changsha 410022, China;

3. Sichuan Highway and Bridge Construction Group Co., Ltd., Chengdu 610041, China)

**Abstract:** The natural frequency of the single cable plane curved footbridge tends to be in the pedestrian step frequency range, and the resonance phenomenon between people and the bridge is prone to occur. According to the German Pedestrian Bridge Design Guide EN03, the pedestrian induced vibration and comfort analysis of a footbridge is carried out considering the stopping effect of the crowd. The results show that the crowd stopping effect will reduce the natural frequency of the bridge structure; The vertical frequencies of the bridge mode 5 and mode 6 are between 1.25 Hz and 2.30 Hz, so the vertical pedestrian induced vibration acceleration response analysis is required; Before and after considering the crowd stopping effect, the pedestrian comfort levels corresponding to mode 5 and mode 6 are CL4 and CL3 respectively, so vibration damping control is required; After the TMD device is installed, the comfort level requirements of CL1 are met under each working condition of mode 5 and mode 6.

**Key words:** single cable plane curved footbridge; pedestrian induced vibration; pedestrian comfort; vibration damping control; TMD device

投稿日期: 2021-12-19

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078057); 湖南省自然科学基金创新研究群体项目(2020JJ1006)

通讯作者: 胡绵远(1995—), 男, 长沙理工大学硕士生。E-mail: 799271599@qq.com

随着科学的发展和人们对桥梁景观要求的提高,人行桥跨度日益增大、结构造型日益个性化,使得采用钢结构的人行桥自振频率低、整体刚度小<sup>[1]</sup>。当人行桥自振频率接近甚至与行人步频相等时,桥梁会发生共振现象<sup>[2-3]</sup>,使行人感到不适。因此,应重视桥梁建设过程中给予桥梁人致振动分析。在英国伦敦市的千禧桥因人致振动被迫关闭事件后<sup>[4]</sup>,国内外学者对于桥梁人致振动问题及减振控制进行了大量研究。乔云强等<sup>[4-7]</sup>以位于重庆市合川区的一座主跨400 m的单主缆悬索桥为背景,采用等效人群荷载法与随机人群荷载法,计算了步行荷载和跑步荷载作用下的桥梁人致振动响应,并通过增设调谐质量阻尼器(tuned mass damper, TMD)减振系统,有效降低了人致振动加速度。罗晓群等<sup>[8-9]</sup>以单斜面索拱支承曲梁人行桥为研究背景,模拟计算了随机人群荷载作用下人行桥的振动响应,并分析了不同质量比下TMD的减振效果。王智丰等<sup>[10-11]</sup>以胶合木拱桥为研究对象,基于有限元分析和试验研究,对结构人致振动和减振控制进行了分析。周涛等<sup>[12]</sup>以斜腿刚构曲线连续梁为背景,分析了TMD质量比和频率偏差对减振效果的影响。

这些研究考虑的均是常规的人群过桥方式,未考虑当人群过桥时,一部分行人被景色吸引而选择在桥梁某片区域驻足、欣赏的情况,对人群驻足效应给桥梁动力特性、人致振动以及行人舒适度带来的影响研究鲜见。本研究以桥跨布置为20+125+130+25+30 m单索面曲线人行桥为背景,以响应面法修正后的有限元模型为基础,根据德国EN03规范,对有、无人驻足时的桥梁动力特性、人致振动以及行人舒适度进行分析,并通过设置合适的TMD,有效控制了该座桥梁的人致振动响应。

## 1 行人荷载模型及舒适度评价

### 1.1 单人荷载模型

人在行走过程中,身体重心会随着步伐上下起伏、左右移动,其行走的结构表面也会受到周期性的竖向动力荷载与侧向动力荷载。其中,竖向动力荷载的基频等于人的步频;由于行人双腿交替

运动,其重心呈现“Z”字形,左右移动,当行人双腿各迈进一步后,侧向动力荷载才完成一个循环,故侧向动力荷载的基频为步频的一半。此外,行人在行走的过程中还需克服结构表面的摩擦力,故这一过程还会产生纵向动力荷载<sup>[13]</sup>。行人行走时的重心轨迹如图1所示。

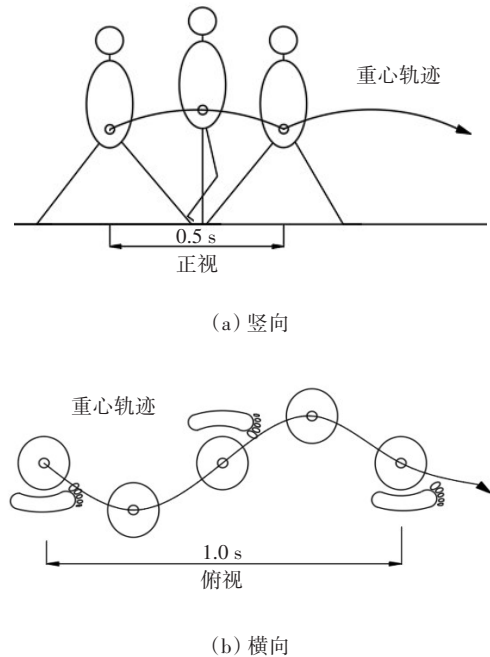


图1 行人行走时的重心轨迹

Fig. 1 Center of gravity trajectory of pedestrian walking

行人荷载具有周期性与窄带随机性的特点,其步行竖向力和侧向力常用傅里叶级数来表示,其表达式分别为

$$F_v(t) = G + \sum_{i=1}^n G\alpha_{v,i} \sin(2\pi ift + \varphi_{vi}) \quad (1)$$

$$F_l(t) = \sum_{i=1}^n G\alpha_{l,i} \sin(\pi ift + \varphi_{li}) \quad (2)$$

式中: $G$ 为人体质量;

$\alpha_{v,i}$ 和 $\alpha_{l,i}$ 分别为竖、侧向力的第 $i$ 阶动载系数;

$i$ 为第 $i$ 阶谐波编号;

$f$ 为步频;

$t$ 为时间;

$\varphi_{v,i}$ 和 $\varphi_{l,i}$ 分别为竖、侧向力的第 $i$ 阶动载初相位。

### 1.2 人群荷载模型

与单人荷载模型相比,由于人步行的随机性以及人与人、人与桥之间的相互影响,因此对人群荷载的研究十分困难。目前,人群荷载的研究模型不

多,人群荷载的模拟通常是在单人荷载叠加后,进行适当的折减。基于德国 EN03 规范,对桥梁进行行人致振动分析。行人谐波荷载模型<sup>[14]</sup>为

$$P(t) = P \times \cos(2\pi ft) \times n' \times \psi \quad (3)$$

式中: $f$ 为行人步频;

$t$ 为时间;

$P$ 为单人步频为 $f$ 时产生的荷载幅值;

$n'$ 为桥梁的等效人群密度,具体计算方法见式(4);

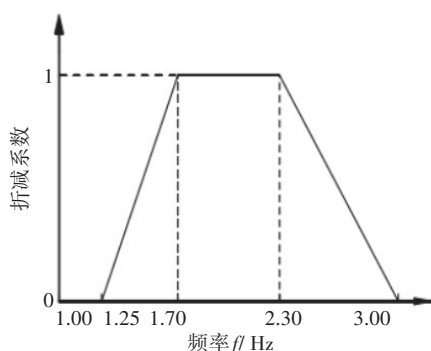
$\psi$ 为考虑步频接近固有频率变化范围临界值的概率的折减系数<sup>[14]</sup>,具体取值方法如图2所示。

$$n' = \begin{cases} \frac{10.80\sqrt{\xi N}}{S}, & d < 1 \\ \frac{1.85\sqrt{N}}{S}, & d \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

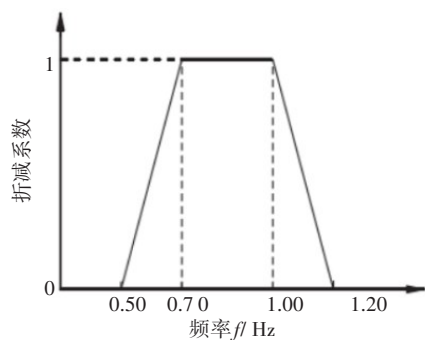
式中: $\xi$ 为结构阻尼比;

$S$ 为加载面积;

$N = S \times d$ ,为加载面积 $S$ 时的行人数量。



(a) 竖向折减系数



(b) 侧向折减系数

图2 折减系数

Fig. 2 Reduction coefficient

### 1.3 舒适度评价

目前,常用加速度来衡量行人的舒适度。德国 EN03 规范按照加速度的大小,把舒适度划分了不同的级别,具体见表1。

表1 德国 EN03 规范中舒适度划分标准

Table 1 Classification standard of comfort in German EN03 specification

舒适级别	舒适度	竖向加速度限值/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	侧向加速度限值/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )
CL1	最好	(0.0,0.5)	[0.0,0.1)
CL2	中等	[0.5,1.0)	[0.1,0.3)
CL3	差	[1.0,2.5)	[0.3,1.8)
CL4	不可接受	[2.5, $+\infty$ )	[0.8, $+\infty$ )

## 2 减振措施

当行人引起的桥梁加速度响应超过舒适度限值时,可采用增大桥梁结构自振频率和增大阻尼的方法。采用增大自振频率来控制桥梁加速度响应,意味着要提高结构刚度或减小结构质量。在实际工程中,常采用增大梁高与截面尺寸来提高结构刚度,但这两种措施均会增加结构质量,难以将结构自振频率控制在理想范围内<sup>[15]</sup>。目前,在桥梁结构上增加阻尼系统是最有效的减振措施。本研究采用设置合适的TMD来增加桥梁结构的阻尼,降低桥梁的人致振动响应。

TMD由质量块、弹簧以及阻尼器三部分构成,一般采用支撑或者悬挂的方式。当TMD系统的自振频率接近桥梁结构振动频率时,在外荷载激励作用下,由于TMD的振动相位与桥梁结构的振动相位不同,故桥梁结构会受到一个反向作用力,能量从桥梁结构向TMD系统转移,从而达到减振的目的<sup>[16-18]</sup>。

TMD的设计参数包括模态质量、阻尼比和频率比。DEN HARTOG提出了在简谐激励作用下,以主结构稳定状态为目标的无阻尼结构TMD参数优化

方法。其中,最优频率比与最优阻尼比的计算公式为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} \alpha_{\text{opt}} = \frac{1}{1 + \mu} \\ \xi_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{3\mu}{8(1 + \mu)}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\mu$ 为TMD的质量与桥梁结构的质量比;

$\alpha_{\text{opt}}$ 为TMD的频率与桥梁结构频率之比的最优值;

$\xi_{\text{opt}}$ 为TMD的最优阻尼比。

### 3 单索面曲线人行桥

本研究以某单索面曲线人行桥为研究对象,其主梁桥跨布置为20 m+125 m+130 m+25 m+30 m。该桥梁平面和立面如图3所示,索塔构造和主梁截面构造如图4所示。

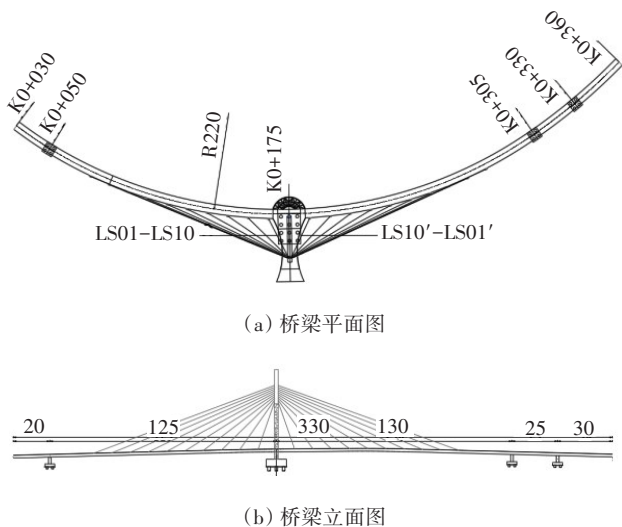
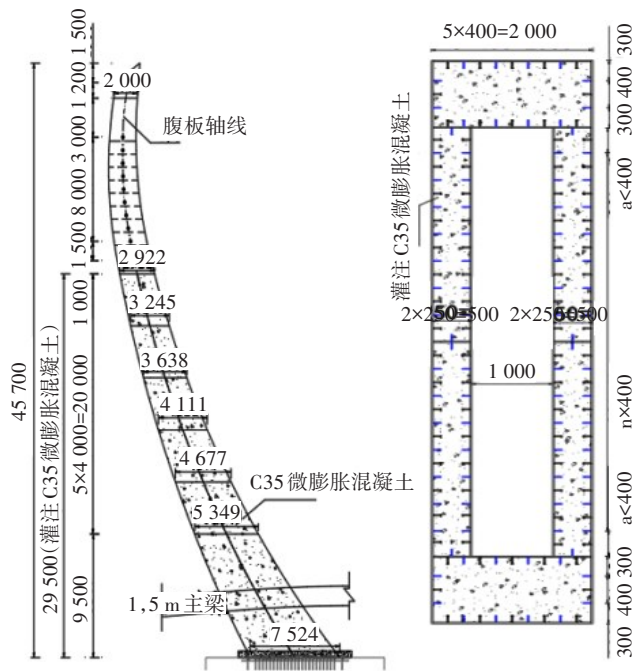


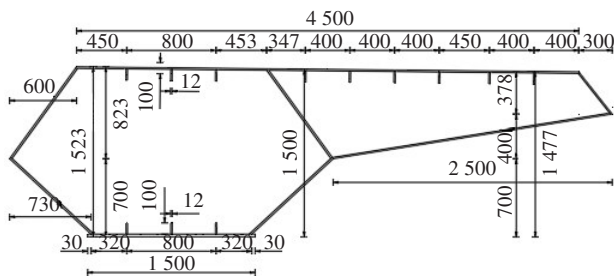
图3 桥梁布置图(单位:m)

Fig. 3 Bridge layout (unit: m)

主梁采用Q345单箱单室连续钢箱梁结构,高为1.5 m,宽为4.5 m。主梁平面为半径220.0 m的圆,圆外侧朝向索塔,并在与索塔相交位置形成观景平台,圆内侧连接悬挑平台。索塔轴线由多段曲线构成,采用矩形截面钢箱结构,其内部灌有部分C35混凝土,高为45.7 m。斜拉索采用标准强度为1 860 MPa的钢绞线,共20根。桥墩采用圆柱形钢桥墩,内部灌有C35混凝土,直径为1.5 m。



(a) 索塔构造图



(b) 主梁截面构造图

图4 索塔、主梁构造图(单位:mm)

Fig. 4 Structural diagram of bridge tower and main beam (unit: mm)

## 4 有限元模型修正及计算分析

### 4.1 有限元模型

本研究采用Midas Civil有限元软件对桥梁进行仿真模拟,采用板单元模拟钢箱梁和索塔,采用实体单元模拟索塔中的C35混凝土,采用桁架单元模拟拉索,采用梁单元模拟悬挑平台的钢桁架,采用梁单元中的钢混管型模拟桥墩。其中,桥梁钢材采用Q345,混凝土采用C35,钢绞线采用Strand 1860,拉索在主梁和索塔上均采用共用节点的形式进行连接。索塔和桥墩底部均采用固结进行约束,其他支座位置处均采用弹性支承。该有限元模型如图5所示。

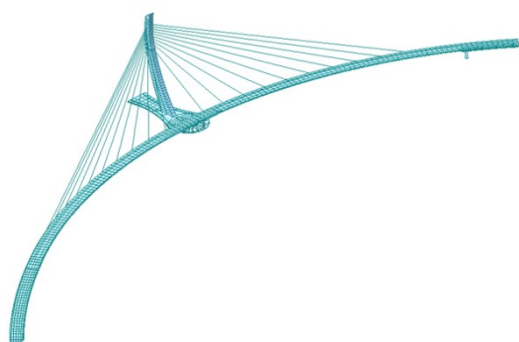


图5 桥梁有限元模型

Fig. 5 Finite element model of bridge

## 4.2 有限元模型修正

在依据桥梁设计图纸建立有限元模型的过程中,各种简化、假设与各种实际施工时产生的误差,都会使该模型计算结果与实际结果存在一定偏差。有限元模型能准确模拟桥梁结构是后续工作开展的前提,自振频率的准确性影响着后续人致振动分析以及调谐质量阻尼器的参数设计。因此,在对桥梁结构进行动力特性分析前,需对桥梁有限元模型进行修正。

对桥梁结构的有限元模型进行子结构划分,以各子结构的弹性模量和材料容重以及桥墩连接刚度作为初始待修正参数,以恒载作用下的位移、应力以及结构前四阶频率为目标函数。基于灵敏度参数分析选取对目标函数影响显著的最终6个待修正参数,即拉索的弹性模量 $E_1$ 、顶板的弹性模量 $E_2$ 、材料容重 $\gamma_2$ 、外腹板的弹性模量 $E_6$ 、塔中C35混凝土的弹性模量 $E_8$ 与全桥桥墩竖向连接刚度 $K_5$ 。在参数摄动范围内对6个待修正参数进行中心复合试验设计,生成了共86组样本对。基于F检验法,对参数进行显著性分析,决定相关参数的取舍。用提前选择的函数形式拟合相应的响应面模型,并对响应面模型进行精度检验,保证其能代替有限元模型来描述输入参数与输出目标函数之间的关系。把现场实测的位移、应力与桥梁结构前四阶频率代入到拟合好的响应面模型中,通过优化迭代求解出修正参数值。修正后的有限元模型计算值与现场实测数据最大误差仅为1.226%,模型修正效果较好。修正前、后的参数值见表2。

表2 待修正参数初始值与最终修正值

Table 2 Initial and final correction values of parameters to be corrected

参数	$E_1/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	$E_2/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	$E_6/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	$E_8/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-2})$	$\gamma_2/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-3})$	$K_5/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$
参数初始值	$1.950\ 0\times 10^5$	$2.060\ 0\times 10^5$	$2.060\ 0\times 10^5$	$3.133\ 3\times 10^4$	$7.698\ 0\times 10^{-5}$	1 990
修正后参数值	$2.012\ 0\times 10^5$	$1.855\ 1\times 10^5$	$2.100\ 9\times 10^5$	$3.251\ 5\times 10^4$	$6.543\ 0\times 10^{-5}$	3 857

## 4.3 模态分析

该人行桥的斜拉索采用单索面布置在主梁外弧侧。其主梁内侧视野更好,故人群很可能停留在桥梁内侧,人群停留区域位置如图6所示。由于在停留观景或拍照的人群可视作驻足人群,故可将驻足人群的质量看作主梁质量的一部分,分析驻足人群对人行桥动力特性以及人致振动的影响。

该桥长为330.0 m,桥面宽为4.5 m,假设人群密度 $d$ 为1人/ $\text{m}^2$ ,单人均重为70 kg,人群驻足区的面积分别取100  $\text{m}^2$ 和200  $\text{m}^2$ 两种情况,计算得到结构相应的前10阶模态频率及振型,结果见表3,部分未考虑人群驻足时的桥梁振动模态如图7所示。

表3 考虑人群驻足前后的人行桥前10阶频率

Table 3 Considers the first 10 frequencies of the footbridge before and after the crowd stop

模态号	频率/Hz			振型描述
	未考虑人群驻足	人群驻足 100 $\text{m}^2$	人群驻足 200 $\text{m}^2$	
1	0.69	0.68	0.68	主梁竖弯

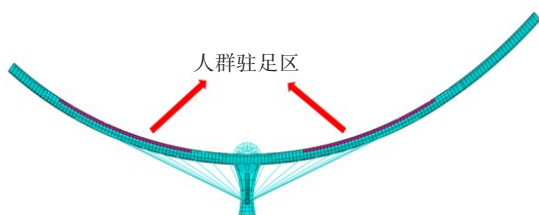


图6 人群驻足区

Fig. 6 Crowd stop area

续表 3

模态号	频率/ Hz			振型描述
	未考虑人 群驻足	人群驻足 100 m <sup>2</sup>	人群驻足 200 m <sup>2</sup>	
2	1.06	1.05	1.04	主梁竖弯
3	1.26	1.25	1.24	主梁侧弯
4	1.47	1.450	1.44	主梁侧弯
5	1.94	1.93	1.91	主梁竖弯
6	2.15	2.14	2.11	主梁竖弯
7	2.89	2.88	2.86	主梁竖弯
8	3.06	3.05	3.03	主梁竖弯
9	3.39	3.38	3.35	主梁侧弯
10	3.48	3.47	3.45	主梁侧弯



(a) 模态 5 模态振型



(b) 模态 6 模态振型

图 7 部分振动模态

Fig. 7 Some of vibration modes

由表 3 可知,人行桥的主梁振动类型在人群驻足前后没有改变,但同一模态在其他条件不变的情况下,相比未考虑人群驻足,人群驻足时的桥梁结构自振频率均偏小。其中,在人群驻足 200 m<sup>2</sup>工况下,模态 6 的自振频率相比未考虑人群驻足的自振频率降低了 1.9%。

目前,尚无行人二阶谐波荷载引起实体桥大幅振动的范例,本文仅考虑行人一阶谐波。模态 5、6 的竖弯频率均为一阶敏感频率,为 1.25 ~ 2.30 Hz,各模态侧弯频率均超出了 0.50 ~ 1.20 Hz,故只需对模态 5、6 进行竖向人致振动加速度响应进行分析。

4.4 人致振动响应分析

基于德国 EN03 规范中人群荷载模型的定义,根据式(4)和图 2,可得行人谐波荷载的等效人数密度和折减系数,具体见表 4。

表 4 行人荷载计算参数

Table 4 Calculation parameters of pedestrian load

模型参数	模态 5			模态 6		
	未考虑人 群驻足	人群驻 足 100 m <sup>2</sup>	人群驻足 200 m <sup>2</sup>	未考虑人 群驻足	人群驻足 100 m <sup>2</sup>	人群驻足 200 m <sup>2</sup>
频率/ Hz	1.94	1.93	1.91	2.15	2.14	2.11
等效人群 密度 $n'$ / (人·m <sup>-2</sup> )	0.048 0	0.049 7	0.051 6	0.048 0	0.049 7	0.051 6
折减系数 $\psi$	1.00	1.00	1.00	0.74	0.81	0.94

单人产生的荷载幅值  $P$  取 280 N,将模态 5、6 的结构自振频率当作行人步频,通过式(3)计算模态 5、6 在各个工况下的行人谐波荷载。基于德国 EN03 规范中谐波荷载施加准则,将行人谐波荷载分别施加到有限元模型中进行时程分析,采用直接积分法进行分析计算。其中,钢结构材料阻尼比取 0.004,混凝土材料阻尼比取 0.013。分别选取左、右跨有代表性的 1/4 截面、1/2 截面和 3/4 截面进行分析,计算得到的人致振动加速度分别见表 5 ~ 6。

表5 模态5各工况下对应的截面竖向加速度

Table 5 Corresponding section vertical acceleration under each working condition of mode 5

工况	加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )					
	左 1/4 截面	左 1/2 截面	左 3/4 截面	右 1/4 截面	右 1/2 截面	右 3/4 截面
未考虑人 群驻足	1.923	0.474	1.621	3.413	1.710	2.563
人群驻足 100 $\text{m}^2$	1.779	0.453	1.501	3.216	1.612	2.394
人群驻足 200 $\text{m}^2$	1.594	0.402	1.332	2.838	1.442	2.127

表6 模态6各工况下对应的截面竖向加速度

Table 6 Corresponding section vertical acceleration under each working condition of mode 6

工况	加速度/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )					
	左 1/4 截面	左 1/2 截面	左 3/4 截面	右 1/4 截面	右 1/2 截面	右 3/4 截面
未考虑人 群驻足	2.115	1.433	1.900	1.080	1.133	0.864
人群驻足 100 $\text{m}^2$	2.182	1.473	1.940	1.117	1.154	0.867
人群驻足 200 $\text{m}^2$	2.238	1.524	2.004	1.136	1.191	0.903

由表5~6可知,人群驻足对桥梁结构竖向加速度的影响较大。对模态5而言,随着人群驻足面积的增大,行人谐波荷载引起的主梁各截面的竖向加速度是降低的。这是由于行人谐波荷载的折减系数在各工况下没变,而加载面积变小,等效同步人数所带来的同步效应降低,故主梁竖向加速度减小。对模态6而言,随着人群驻足面积的增大,由于其自振频率减小,折减系数增大,行人谐波荷载幅值相应增大,故主梁各截面竖向加速度增大。

#### 4.5 行人舒适度评价

根据行人谐波荷载作用下的桥梁结构加速度响应计算结果与德国EN03规范对于人行桥舒适度的评价标准,得到此桥模型人致振动舒适度的判别结果,见表7。

表7 人致振动舒适度判别结果

Table 7 Discriminant results of pedestrian induced vibration comfort

模态	工况	频率/ Hz	主梁竖向最大 加速度 $a_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	竖向加速度 限值 $a_{\lim}/$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ )	舒适度
模态5	未考虑人 群驻足	1.942	3.413	(2.5, + $\infty$ )	不可 接受
	人群驻足 100 $\text{m}^2$	1.931	3.216	(2.5, + $\infty$ )	不可 接受
	人群驻足 200 $\text{m}^2$	1.908	2.838	(2.5, + $\infty$ )	不可 接受
模态6	未考虑人 群驻足	2.153	2.115	(1.0, 2.5]	差
	人群驻足 100 $\text{m}^2$	2.138	2.182	(1.0, 2.5]	差
	人群驻足 200 $\text{m}^2$	2.112	2.238	(1.0, 2.5]	差

由表7可知,模态5在各工况下对应的主梁竖向最大加速度值均超过了行人所能忍受的范围,行人舒适度等级均为CL4(不可接受),模态6各工况下对应的行人舒适度等级均为CL3(差),两者均不能满足舒适度要求,需采取减振措施。

## 5 减振设计

由以往的减振经验可知,TMD的质量比越大,减振效果越好。但当其质量比达到一定程度时,减振效率会趋于平缓。而如果TMD质量过大,则会对结构挠度产生不利影响,并将给现场安装带来困难,故需合理设计TMD。

在进行TMD参数设计时,本研究模态质量取为280 596 kg。为进行减震控制,对模态5、6,各设置3个质量比为0.2%的TMD。由式(5)求得最优频率比为0.998,最优阻尼比为0.027。模态5的单个TMD质量为561.19 kg,频率为1.938 Hz;模态6的单个TMD质量为561.19 kg,频率为2.148 Hz。

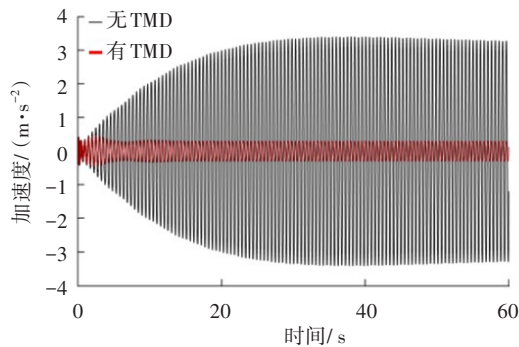
为达到最佳减振效果,模态5的3个TMD均沿横桥向设置在桥梁右跨1/4截面箱梁内,模态6的3个TMD均沿横桥向设置在桥梁左跨1/4截面的箱梁内。设置TMD后,重新计算模态5、6在各工况下桥梁稳定后的最大竖向加速度响应,计算结果见表8。

表8 设置TMD后人致振动响应

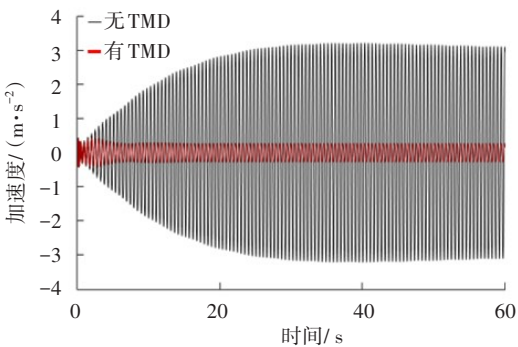
Table 9 Pedestrian induced vibration response after setting TMD

模态	工况	竖向最大加速度/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	舒适度
模态5	未考虑人群驻足	0.339	最好
	人群驻足 $100\text{ m}^2$	0.300	最好
	人群驻足 $200\text{ m}^2$	0.231	最好
模态6	未考虑人群驻足	0.238	最好
	人群驻足 $100\text{ m}^2$	0.279	最好
	人群驻足 $200\text{ m}^2$	0.295	最好

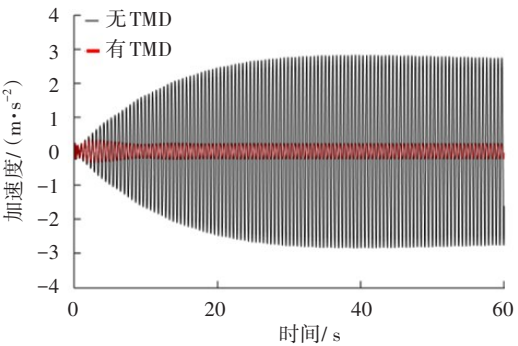
由表8可知,在设置TMD后,减振效果明显,桥梁在模态5、6各工况下对应的竖向最大加速度均小于 $0.5\text{ m/s}^2$ ,均满足舒适度CL1等级要求。图9~10给出了模态5各工况下桥梁右跨1/4截面以及模态6各工况下桥梁左跨1/4截面在有、无TMD时加速度响应时程曲线。



(a) 模态5在未考虑人群驻足时右1/4截面在有、无TMD条件下的加速度响应时程



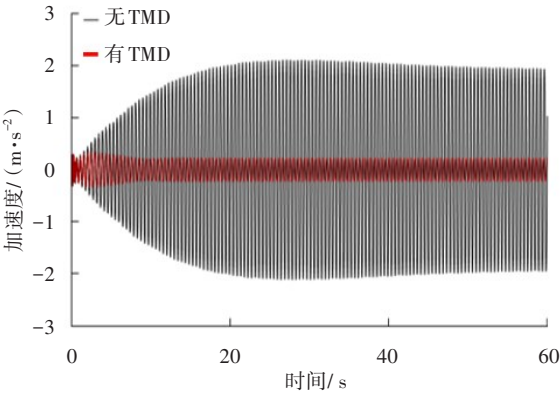
(b) 模态5在人群驻足  $100\text{ m}^2$  时,右1/4截面在有、无TMD条件下的加速度响应时程



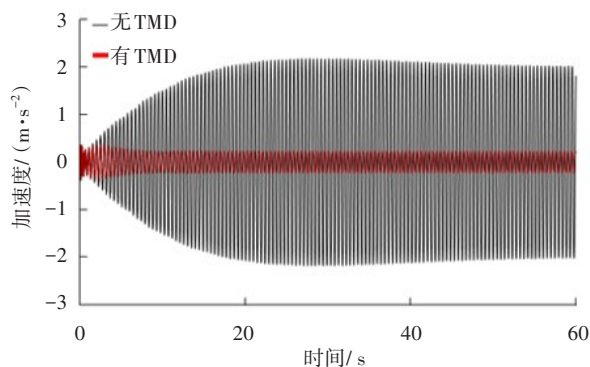
(c) 模态5当人群驻足  $200\text{ m}^2$  时,右1/4截面在有、无TMD条件下的加速度响应时程

图9 桥梁模态5在有或无TMD时右跨1/4截面加速度响应时程

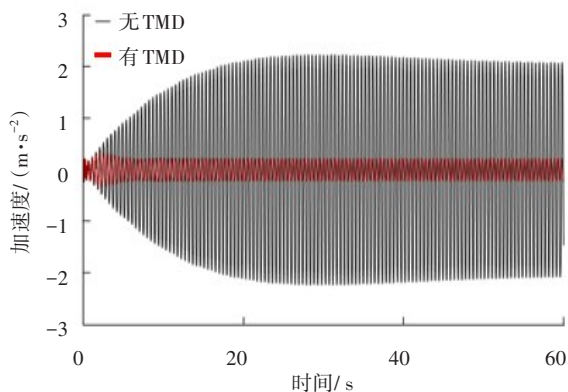
Fig. 9 Acceleration response time history of right span 1/4 section of bridge mode 5 with and without TMD



(a) 模态6在未考虑人群驻足时左1/4截面在有、无TMD条件下的加速度响应时程



(b) 模式6在人群驻足100 m<sup>2</sup>时左1/4截面在有或无TMD条件下的加速度响应时程



(c) 模式6在人群驻足200 m<sup>2</sup>时左1/4截面在有或无TMD条件下的加速度响应时程

图10 桥梁模式6在有或无TMD时左跨1/4截面加速度响应时程

Fig. 10 Acceleration response time history of left span 1/4 section of bridge mode 6 with and without TMD

## 6 结论

本研究以基于响应面法修正后的有限元模型为基础,对桥跨布置为20 m+125 m+130 m+25 m+30 m的某单索面曲线人行桥在有、无人群驻足情况下进行动力特性、人致振动与减振控制分析,得到结论:

1) 自振频率分析表明:对同一模态,在人群驻足100 m<sup>2</sup>和200 m<sup>2</sup>的工况下,结构自振频率相比未考虑人群驻足工况的自振频率均偏小;其中,在人群驻足200 m<sup>2</sup>工况下,桥梁模式6的自振频率相比未考虑人群驻足工况的自振频率降低了1.9%;当桥梁侧弯模态频率均超出0.50~1.20 Hz范围时,仅模式5、6的竖向频率为1.25~2.30 Hz,只需对模式5、

6进行竖向人致振动加速度响应分析。

2) 人致振动分析表明:人群驻足对桥梁结构的加速度影响较大;对模式5,在行人荷载作用下,随着人群驻足,主梁各截面的加速度是降低的;其中,在人群驻足200 m<sup>2</sup>工况下,右1/4截面的加速度响应从未考虑人群驻足工况的3.413 m/s<sup>2</sup>降低到了考虑人群驻足工况的2.838 m/s<sup>2</sup>;而对于模式6,随着人群驻足效应的显现,主梁各截面的加速度增大,在人群驻足200 m<sup>2</sup>工况下,其左1/4截面的加速度响应从未考虑人群驻足工况的2.115 m/s<sup>2</sup>增大到了考虑人群驻足工况的2.238 m/s<sup>2</sup>。

3) 行人舒适度分析表明:模式5各工况下的主梁竖向最大加速度值均超出行人所能忍受的范围,行人舒适度等级均为CL4;模式6在各工况下行人舒适度等级均为CL3,均不满足行人舒适度的等级要求。

4) 通过设置谐调质量阻尼器,在模式5和模式6两种工况下,其对应的主梁竖向最大加速度显著降低其值且均小于0.5 m/s<sup>2</sup>,均达到了德国EN03规范中CL1舒适度要求。

## 参考文献(References):

- [1] 操礼林, 吕亚兵, 曹栋, 等. 行人动力学参数对大跨简支人行桥人致振动的影响分析[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(2): 260-266. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.02.008.
- CAO Lilin, LYU Yabing, CAO Dong, et al. Influence analysis of pedestrian dynamic parameters on human-induced vibration of long span simply supported footbridge[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2020, 50(2): 260-266. DOI: 10.3969/j.issn.1001-0505.2020.02.008.
- [2] 许立言, 陶慕轩, 樊健生, 等. 大跨度钢-混凝土组合人行天桥舒适度分析[J]. 建筑结构学报, 2016, 37(5): 138-145. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.05.015.
- XU Liyan, TAO Muxuan, FAN Jiansheng, et al. Vibration comfort analysis on large-span steel-concrete composite pedestrian[J]. Journal of Building Structures, 2016, 37(5): 138-145. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2016.05.015.
- [3] 惠晓丽, 朱前坤, 张琼, 等. 基于人群-结构耦合振动大跨连廊人致振动舒适度评估[J]. 建筑结构, 2020, 50

- (14): 120-125, 109. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.14.021.
- HUI Xiaoli, ZHU Qiankun, ZHANG Qiong, et al. Evaluation on human-induced vibration comfort of large-span corridors based on population-structure coupled vibration[J]. Building Structure, 2020, 50(14): 120-125, 109. DOI: 10.19701/j.jzjg.2020.14.021.
- [4] 贾布裕, 颜全胜, 余晓琳, 等. 考虑行人随机性的人行桥人致横向振动稳定性分析[J]. 工程力学, 2019, 36(1): 155-164. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.11.0822.
- JIA Buyu, YAN Quansheng, YU Xiaolin, et al. Stability analysis on pedestrian-induced lateral vibration of foot bridges considering pedestrian stochastic excitation[J]. Engineering Mechanics, 2019, 36(1): 155-164. DOI: 10.6052/j.issn.1000-4750.2017.11.0822.
- [5] 陈杰, 艾辉林, 王声云. 连续多跨曲线人行桥的人致振动研究[J]. 公路, 2021, 66(2): 119-124.
- CHEN Jie, AI Huilin, WANG Shengyun. Study on human-induced vibration of continuous multi-span curved footbridge[J]. Highway, 2021, 66(2): 119-124.
- [4] 乔云强, 吴桂楠. 单主缆悬索桥人致振动研究及减振控制[J]. 世界桥梁, 2018, 46(2): 68-73. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2018.02.014.
- QIAO Yunqiang, WU Guinan. Study of human-induced vibration on suspension bridge with one main cable and vibration mitigation control[J]. World Bridges, 2018, 46(2): 68-73. DOI: 10.3969/j.issn.1671-7767.2018.02.014.
- [5] 郭宏超, 王凯励, 王德法, 等. 大跨度钢连廊舒适度分析及减振控制[J]. 西安理工大学学报, 2021, 37(2): 269-277. DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.02.017.
- GUO Hongchao, WANG Kaili, WANG Defa, et al. Vibration comfort analysis and control of large-span steel corridor[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2021, 37(2): 269-277. DOI: 10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.02.017.
- [6] 张彦玲, 张建林, 李运生. 柔性人行悬索桥在不同人流量下人致振动分析[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2020, 52(6): 779-787. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2020.06.002.
- ZHANG Yanling, ZHANG Jianlin, LI Yunsheng. Analysis of human-induced vibration for flexible suspension footbridge under different pedestrian flow [J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2020, 52(6): 779-787. DOI: 10.15986/j.1006-7930.2020.06.002.
- [7] 谭岩斌, 张哲, 王会利, 等. 基于随机振动理论的桥梁舒适度研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(4): 585-592. DOI: 10.11717/j.issn: 2095-1922.2020.04.02.
- TAN Yanbin, ZHANG Zhe, WANG Huili, et al. Research on bridge comfort based on random vibration theory [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science), 2020, 36(4): 585-592. DOI: 10.11717/j.issn: 2095-1922.2020.04.02.
- [8] 罗晓群, 张晋, 沈昭, 等. 单斜面索拱支承曲梁人行桥人致振动控制研究[J]. 振动与冲击, 2020, 39(11): 83-92. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.11.011.
- LUO Xiaoqun, ZHANG Jin, SHEN Zhao, et al. Human-induced vibration control of curved beam footbridge with single inclined cable arch [J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(11): 83-92. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.11.011.
- [9] 温金龙. 考虑人-桥竖向相互作用的人行桥TMD减振优化设计方法研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2023. DOI: 10.27144/d.cnki.ghbse.2022.000356.
- WEN Jinlong. Optimum design method of TMD for footbridge vibration control considering vertical human-bridge interaction [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2023. DOI: 10.27144/d.cnki.ghbse.2022.000356.
- [10] 王智丰, 李贤军, 易锦, 等. 大跨胶合木拱桥人致振动及其优化控制[J]. 土木工程学报, 2021, 54(4): 79-94. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2021.04.009.
- WANG Zhifeng, LI Xianjun, YI Jin, et al. Human-induced vibration and optimal control of long-span glulam arch bridges [J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(4): 79-94. DOI: 10.15951/j.tmgcxb.2021.04.009.
- [11] 张相勇, 滕起, 苗峰, 等. 大跨双向悬索结构屋盖MTMD减振控制分析[J]. 空间结构, 2021, 27(3): 32-40. DOI: 10.13849/j.issn.1006-6578.2021.03.032.
- ZHANG Xiangyong, TENG Qi, MIAO Feng, et al. Vibration control of a bidirectional large-span cable supported roof structure with MTMD [J]. Spatial Structures, 2021, 27(3): 32-40. DOI: 10.13849/j.

- issn.1006-6578.2021.03.032.
- [12] 周涛, 陈谨林, 牛华伟, 等. 斜腿刚构曲线连续梁人行桥人致振动风险研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(9): 2358-2365. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20210454.
- ZHOU Tao, CHEN Jinlin, NIU Huawei, et al. Risk estimation of pedestrian induced vibration of curved continuous beam footbridge with inclined leg[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(9): 2358-2365. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.t20210454.
- [13] 赵军杰. 人行桥风致与人致振动响应及减振TMD方案研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- ZHAO Junjie. Study on Wind-induced and Human-induced vibration Response and vibration Reduction TMD Scheme of Footbridge [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [14] 高道文. 钢桁架结构人行桥人致振动分析与研究[D]. 南京: 东南大学, 2020. DOI: 10.27014/d.cnki.gdnau.2020.003946.
- GAO Daowen. Analysis and research on pedestrian vibration of steel truss pedestrian bridge [D]. Nanjing: Southeast University, 2020.
- [15] 徐真. 大跨异型钢结构人行桥模态参数识别与人致振动控制[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- XU Zhen. Modal parameter identification and human-induced vibration control of long-span special-shaped steel footbridge [D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [16] 刘梦渝. 基于TMD的人行桥多振型减振控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2019.004165.
- LIU Mengyu. Research on multi-mode vibration control of footbridge based on TMD [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2019.
- [17] 邹卓, 宋旭明, 李璋, 等. 基于TMD的自锚式人行悬索桥人致振动控制研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(10): 2574-2582. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2018.10.017.
- ZOU Zhuo, SONG Xuming, LI Zhang, et al. Study of pedestrian-induced vibration of self-anchored suspension footbridge based on TMD [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(10): 2574-2582. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.2018.10.017.
- [18] 曹张. 大跨人行桥-TMD系统的动力参数识别与振动舒适性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
- CAO Zhang. Research on dynamic parameter identification and vibration comfort of TMD system of long-span footbridge [D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- (责任编辑: 李脉; 校对: 罗容; 英文编辑: 李岳林)