

# 错列拉索尾流驰振响应特征及辅助索抑振效果试验研究

王琼<sup>1</sup>, 汪长青<sup>1</sup>, 张甲振<sup>2</sup>, 敬海泉<sup>3\*</sup>, 唐文峰<sup>1</sup>

(1. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056; 2. 河北交投物流有限公司; 3. 中南大学 土木工程学院)

**摘要:**为研究错列斜拉索尾流驰振响应特征以及辅助索的控制效果,设计并制作两对柔性张拉斜拉索模型,开展风洞试验研究;模型中心间距为 $4D$ ( $D$ 为拉索直径),入射角为 $5^\circ$ ,试验风速为 $5\sim 30$  m/s,雷诺数范围为 $2.35\times 10^5\sim 1.41\times 10^6$ 。通过风洞试验首先模拟下游拉索模型尾流驰振现象,并详细研究振动幅值、频谱特性以及运动轨迹等响应特征;之后在原有模型上增加辅助索,通过重复试验,检验辅助索对尾流驰振的控制效果。试验结果表明:当来流风速高于 $14$  m/s时下游模型发生大幅尾流驰振,振动幅值和频率随风速的增大而增大,振动形式以面内面外耦合振动为主,运动轨迹近似于圆形;辅助索能够有效抑制拉索尾流驰振,成功降低振幅 $72.4\%$ 以上,是控制拉索尾流驰振的方案之一。

**关键词:** 错列斜拉索; 风致振动; 尾流驰振; 辅助索; 振动控制

## 1 引言

随着桥梁设计建造技术的不断发展,斜拉桥跨度和承载能力越来越大,为减小拉索直径及便于更换拉索,越来越多大跨度斜拉索采用双排拉索布置形式。由于双排索的间距较小,往往只有几倍拉索直径,在大风作用下下游拉索极易发生尾流驰振。拉索尾流驰振响应剧烈、风速范围宽,对拉索使用寿命构成威胁。

拉索尾流驰振的本质是双圆柱流固耦合问题。针对双圆柱流致振动的研究最早可以追溯到20世纪上半叶。Sumner和Bearman对2010年之前取得的研究成果进行了全面回顾。近10年来,尾流驰振依然是土木工程领域的研究热点之一。

Assi等通过水槽试验模拟了错列双圆柱尾流驰振,试验过程中上游圆柱固定、下游圆柱在横向自由振动,观测了下游圆柱尾流驰振响应特性。发现来流中非定常涡流消失后,下游圆柱尾流驰振不会出现。陈政清、李永乐、杜晓庆、李寿英、Wen、Wu等利用风洞试验和数值模拟对串列主缆气动干扰进行了研究,并探讨了尾流驰振发生的起振风速、振幅、频率、运动轨迹、

风荷载以及绕流流场等;杜晓庆等研究了雷诺数对振动响应的影响,发现雷诺数对尾流驰振的振幅、频率、起振条件和运动轨迹影响显著;李永乐等针对远距失稳区拉索尾流驰振现象,研究了尾流驰振振幅、致振风速范围、振动频率等响应特性,讨论了尾流驰振轨迹的特点;李寿英等研究了结构阻尼比、来流风速等对尾流吊索风致振动的影响;Huera-Huarte等、Xu等研究了高阶多模态振动响应及其对应的风速范围,研究了间距比对振动响应振幅和频率的影响;Chen等、Li等总结了桥塔后多股吊索的风致振动响应特征;蔡畅等通过风洞试验研究了连接杆和阻尼对拉索尾流驰振的控制效果。由此可见,已有大量学者针对尾流驰振现象展开了细致的研究工作。然而,到目前为止针对尾流驰振控制方法的研究还相对较少。

在过去的10年中,越来越多的学者开始关注辅助索对斜拉索风致振动的控制效果。Caracoglia和Zuo通过现场测量数据证实了辅助索控制拉索风致振动的有效性。然而,弹性辅助索对尾流驰振的抑振效果尚未得到证实。因此,该文制作4个柔性斜拉索模型,模型可在面内和面外多模态耦合振动,在风洞试验室内模拟尾流驰振,系统研究尾流驰振的响应特征和弹性

收稿日期:2021-06-08(修改稿)

基金项目:湖南省自然科学基金资助项目(编号:2019JJ50819)

作者简介:王琼,男,硕士,高级工程师。E-mail:279878710@qq.com

\*通信作者:敬海泉,男,博士,副教授。E-mail:hq.jing@csu.edu.cn

辅助索对拉索尾流驰振的抑振效果。

## 2 风洞试验

该试验以某斜拉桥拉索为原型,总共制作了4个相同参数的斜拉索模型。模型从内向外由钢丝绳内芯、配重块、海绵填充物及聚乙烯外衣组成,模型参数如表1所示。其中: $\xi$ 为结构阻尼比, $S_c = m\xi/(\rho D^2)$ , $\rho$ 为空气密度。试验模型质量缩尺比为1:100,小于几何缩尺比1:4.4,因此模型的 $S_c$ 小于原型结构,模型风致振动更容易发生,试验结果更保守。

表1 模型和原型的结构参数

项目	直径 $D$ / mm	长度 $L$ / m	线质量 $m$ / ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ )	长细比 $L/D$	$\xi$ / %	$S_c$
原型	210.0	320.0	175.00	1 524.0	0.1	3.20
模型	47.5	2.81	1.75	59.1	0.1	0.63

不考虑紊流的影响,试验段长15.0 m,宽3.0 m,高3.0 m,来流湍流强度小于0.5%。8个单向加速度传感器分别安装于模型1/4跨和1/3跨位置,测量模型面内和面外加速度。拉索模型的位置定义如图1所示,迎风侧拉索分别为上游索1和2、尾流中的拉索为下游索1和2, $l=4D$ 为双排拉索中心间距, $h=8.4D$ 为相邻索的垂直距离, $\alpha$ 为来流入射角。

在尾流驰振测试之前,首先在风速为5 m/s的情况下测量4根拉索的加速度,通过功率谱密度(PSD)

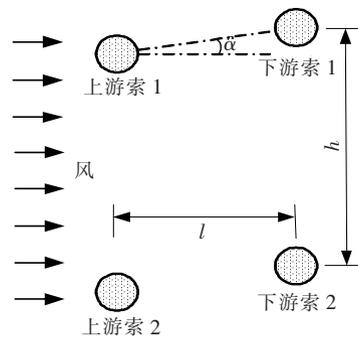


图1 拉索位置定义

分析识别得到上游索1和下游索1的基频为4.7 Hz,上游索2和下游索2的基频为5.4 Hz。根据半功率带宽法识别模型的阻尼比约为0.1%。

## 3 拉索尾流驰振响应特征

将来流风速由5.0 m/s逐渐升高至30 m/s(雷诺数 $R_e = 2.35 \times 10^5 \sim 1.41 \times 10^6$ ),测量各风速下拉索模型面内、面外加速度。由于上游模型没有观测到明显的振动现象而且下游索1和索2的振动形式十分相似,故仅展示下游索1的部分测量结果,如图2所示。图2显示:当风速不超过12 m/s时,模型相对稳定,在面内和面外均未出现明显的振动现象,当风速高于12 m/s时,开始出现明显的有规律的振动,而且面内面外同时发生,振幅随着风速的升高而增大。当风速为26 m/s时,面内、面外加速度峰值均超过200  $\text{m/s}^2$ 。

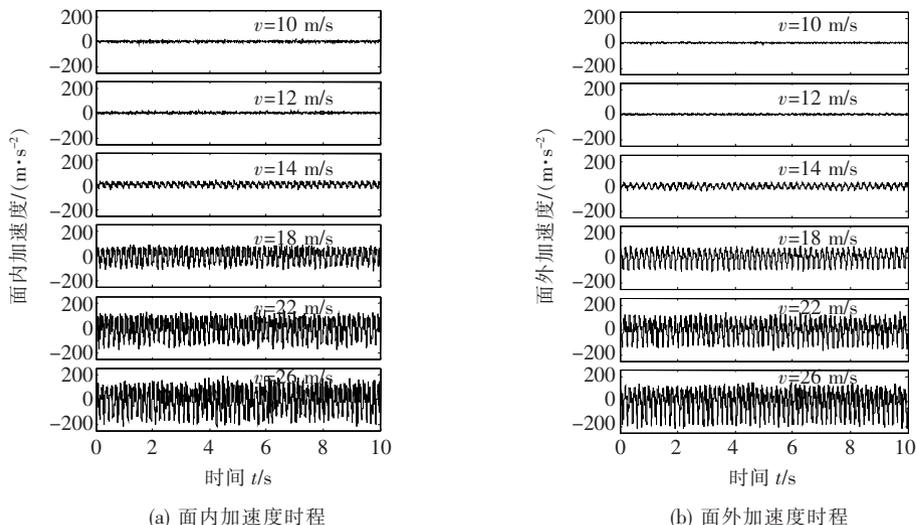


图2 下游索1加速度时程

为了获得尾流驰振的振动频率和模态,对图2的加速时程进行频谱分析,结果如图3所示。由图3可

得,当风速不超过12 m/s时,面内面外振动均包含前5阶模态信息,但是每阶模态的功率均很低;当风速高

于 12 m/s 时,振动能量开始向第 1 阶模态汇聚,而且随着风速的持续增加,第 1 阶模态开始起主导作用,说明尾流驰振以低阶模态为主。此外,当风速从 14 m/s 增加到 26 m/s 时,第一振型的振动频率线性增加,这一趋势与 Assi 等研究结论一致。Assi 等还提出“尾流刚度”试图解释这一现象。

图 4 为所有测量的加速度均方根值随风速的变化

规律。图 4 显示:上游拉索始终相对稳定,没有发生大幅风致振动;下游拉索在风速超过临界风速时(12 m/s)面内、面外均发生大幅风致振动,面内振动与面外振动的幅值几乎相等,且随风速的增高而增大。

将加速度频域积分,获得模型的振动位移时程;将位移时程除以模型直径,获得无量纲位移。图 5 为几个典型风速下游拉索 1 的无量纲运动轨迹。

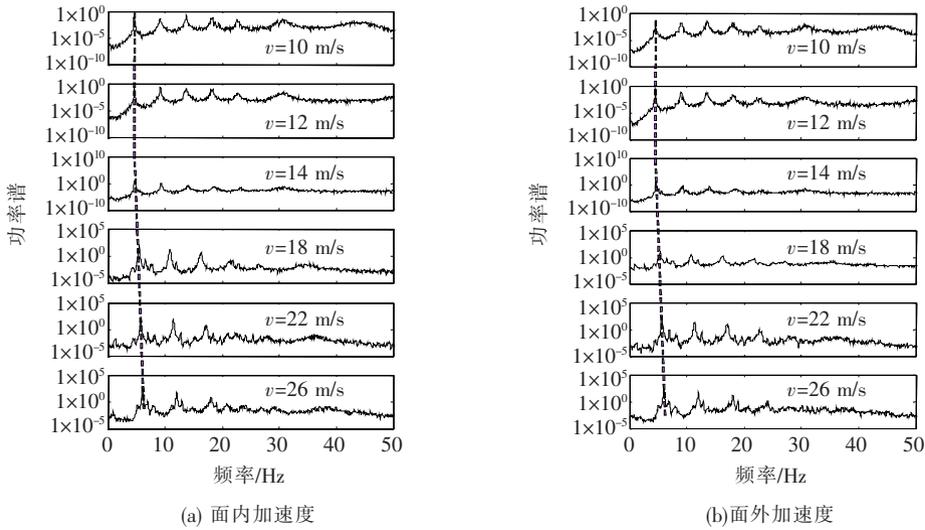


图 3 下游索 1 加速度的功率谱

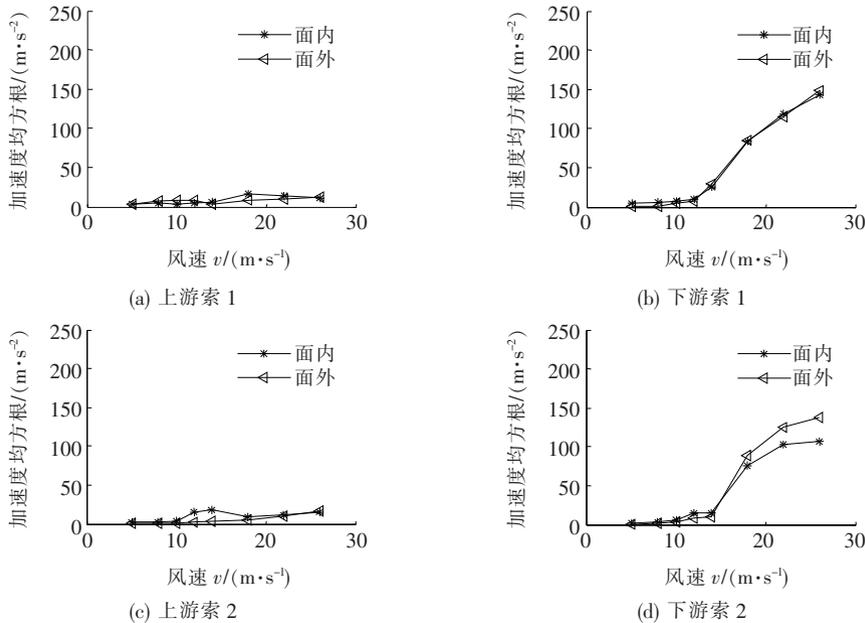


图 4 不同风速下加速度均方根值对比

由图 5 可知:当风速小于或者等于临界风速时,振幅很小、运动轨迹不清;当风速超过临界风速时,模型开始周期性地振动,运动轨迹接近圆形,与文献[8—11, 19]报告的结果十分吻合。

#### 4 辅助索对尾流驰振的抑振效果

以上试验结果表明:尾流驰振振幅大、风速范围

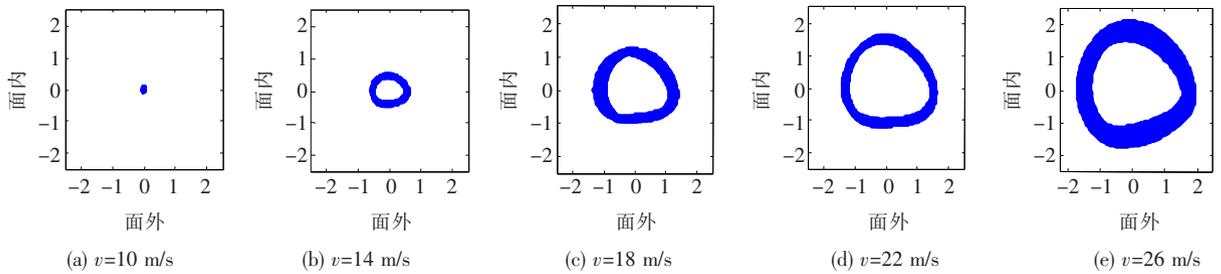


图5 下游拉索1的无量纲轨迹

宽,对斜拉索的结构安全构成威胁,需采取合理的控制措施抑制尾流驰振。分别在上、下游模型跨中位置安装了弹性辅助索模型(采用弹簧模拟),辅助索刚度设置为 519 N/m,对应无量纲刚度  $T/(KL)=1.0$ ,式中  $K$  为辅助索系的刚度, $T$  为斜拉索的水平张力。由于增加辅助索将改变原模型的动力特性,风洞试验之前对新索网系统重新开展了自由振动测试,通过频谱分析获得了新结构体系的自振频率,如表 2 所示;辅助索对面外自振频率影响较小,对面内自振频率影响显著。重复上述风洞试验,通过对比试验数据,检验辅助

表 2 增设辅助索后拉索模型自振频率 Hz

项目	上游拉索 1	下游拉索 1	上游拉索 2	下游拉索 2
面内	5.0	4.6	5.0	4.6
面外	4.7	4.7	5.5	4.3

索对尾流驰振的控制效果。图 6 为下游索 1 增设辅助索前后的加速度时程曲线。由图 6 可知:增设辅助索之后,加速度幅值显著降低,尽管风速超过了原临界风速,下游模型并未发生大幅风致振动。图 7 为加速度功率谱曲线对比。

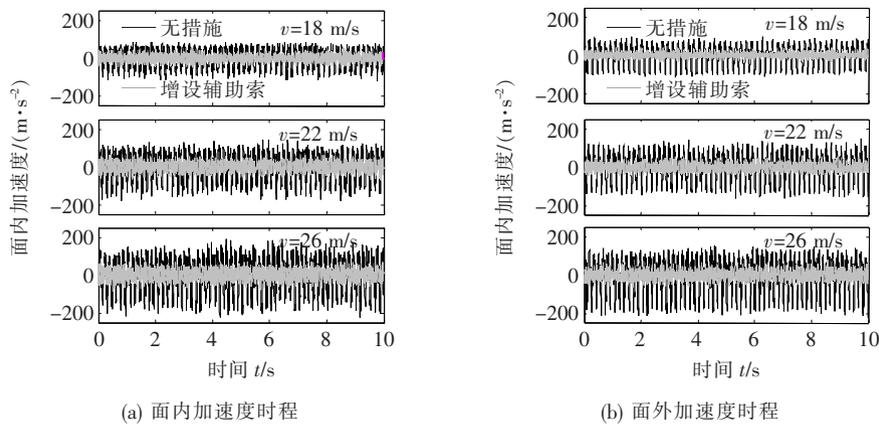


图 6 增设辅助索前后下游索 1 加速度时程对比

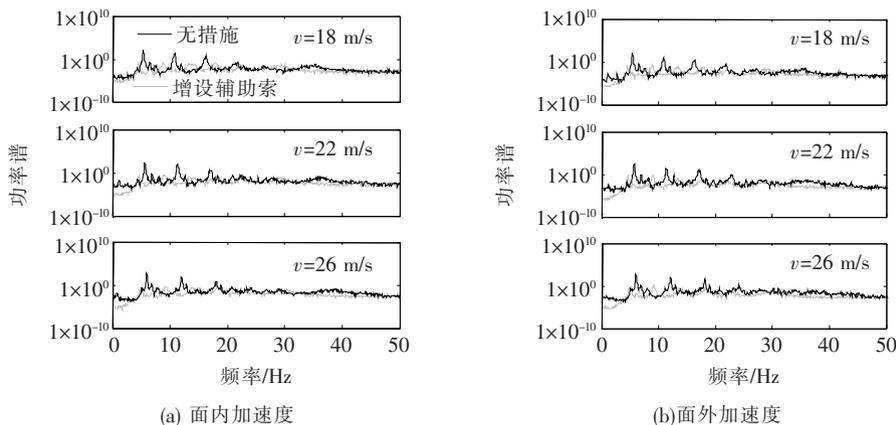


图 7 增设辅助索前后下游索 1 加速度功率谱对比

图 7 显示:增设辅助索后,各阶模态的振动能量均降低,尤其是第 1 阶模态的振动能量降低最明显,而且增设辅助索之后振动频率不再随风速的增加而增大;由于振动频率随风速增加是尾流驰振的主要特点之一,据此可判断辅助索成功抑制了尾流驰振。图 8 为加速度均方根随风速变化曲线的对比,图 8 显示:增设

辅助索以后,上游模型影响较低、振动幅值依然很小;下游模型影响显著、振动幅值大幅降低,在 26 m/s 风速下,下游拉索 1 面内、面外加速度均方根值分别降低 72.8% 和 76.7%,下游索 2 面内、面外加速度均方根值分别降低 80.4% 和 90.8%,进一步证实了辅助索对尾流驰振的控制效果。

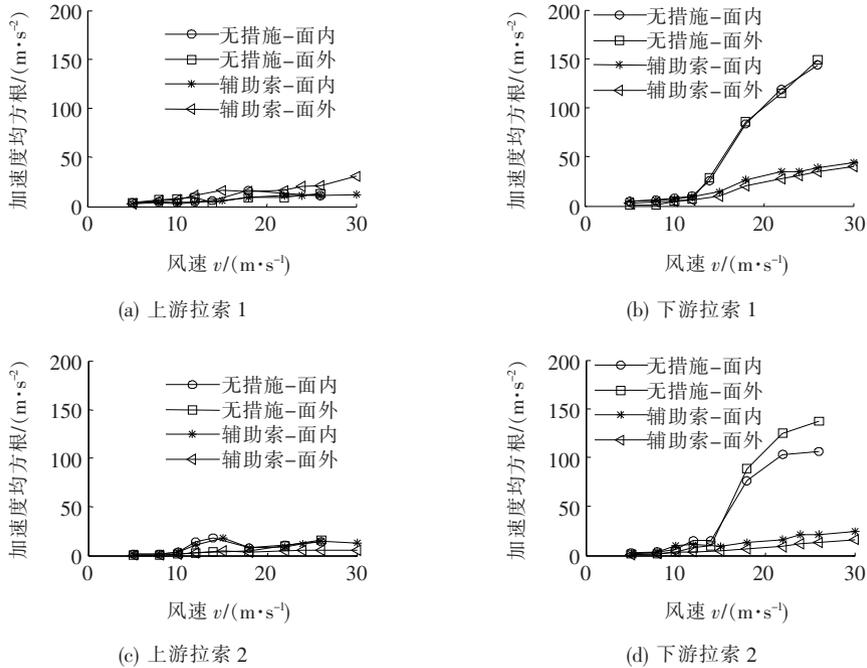


图 8 增设辅助索前后模型加速度均方根对比

## 5 结论

采用柔性张拉模型开展风洞试验,研究了错列拉索模型的尾流驰振响应特征,重点分析了尾流驰振振幅、频率以及运动轨迹随风速的变化关系;通过风洞试验验证了辅助索对尾流驰振的控制效果。得到以下主要结论:

(1) 当双排拉索以中心间距  $4D$ 、入射角  $5^\circ$  错列布置时,下游拉索模型容易发生尾流驰振;当风速高于起振风速 12 m/s 时,下游索振动幅值随风速的增高持续增大,类似于经典驰振现象;上游拉索一直保持相对稳定,未发生明显振动。

(2) 尾流驰振以第 1 模态为主,而且振动频率随风速线性增高,运动轨迹近似圆形。

(3) 增设弹性辅助索对上游拉索模型风致振动影响很小,对下游拉索模型尾流驰振影响显著;增设弹性

辅助索以后,下游拉索模型加速度均方根值降低了 72.8% 以上。

(4) 增设辅助索将第 1 模态为主的尾流驰振转变为多模态参与的混合振动,振动频率也不再随风速而改变,证明弹性辅助索成功抑制了拉索尾流驰振。

## 参考文献:

- [1] He X H, Wu T, Zou Y F, et al. Recent Developments of High-Speed Railway Bridges in China[J]. Structure & Infrastructure Engineering, 2017, 13(12): 1584-1595.
- [2] Carmo, S. B.. On Wake Interference in the Flow Around Two Circular Cylinders: Direct Stability Analysis and Flow-Induced Vibrations[D]. Phd Thesis, Imperial College London, 2009.
- [3] Sumner, D. Two Circular Cylinders in Cross-Flow: A Review[J]. Journal of Fluids & Structures, 2010, 26: 849-899.
- [4] Bearman, P. W.. Circular Cylinder Wakes and Vortex-

- Induced Vibrations[J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2011,27:648-658.
- [5] Assi, G. R. S., Bearman, P. W., Meneghini, J. R.. On the Wake-Induced Vibration of Tandem Circular Cylinders: The Vortex Interaction Excitation Mechanism[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2010,661:365-401.
- [6] Assi, G. R. S., Bearman, P. W., Carmo, B. S., et al. The Role of Wake Stiffness on the Wake-Induced Vibration of the Downstream Cylinder of a Tandem Pair[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2013,718:210-245.
- [7] 陈政清,刘慕广,刘志文. 基于气弹模型的串列主缆气动干扰试验研究[J]. *振动与冲击*, 2008(8).
- [8] 李永乐,王涛,廖海黎. 斜拉桥并列拉索尾流驰振风洞试验研究[J]. *工程力学*, 2010(S1)
- [9] 杜晓庆,蒋本建,代钦,等. 大跨度缆索承重桥并列索尾流激振研究[J]. *振动工程学报*, 2016(5).
- [10] 李寿英,黄君,邓羊晨,等. 悬索桥吊索尾流致振的气弹模型测振试验[J]. *振动工程学报*, 2019(1).
- [11] Wen Q., Hua X. G., Lei X., et al. Experimental Study of Wake-Induced Instability of Coupled Parallel Hanger Ropes for Suspension Bridges[J]. *Engineering Structures*, 2018,167:175-187.
- [12] Wu Gefei, Du Xiaoqing, Wang Yuliang. LES of Flow around Two Staggered Circular Cylinders at a High Subcritical Reynolds Number of  $1.4 \times 10^5$  [J]. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 2020, 196:104044.
- [13] Li Y L, Wu M X, Chen X Z, et al. Wind Tunnel Study on Wake Galloping of Parallel Cables in Cable-Stayed Bridges and its Suppression Measures[J]. *Wind & Structures an International Journal*, 2013,16(3):249-261.
- [14] Huera-Huarte FJ, Gharib M. Vortex- and Wake-Induced Vibrations of a Tandem Arrangement of Two Flexible Circular Cylinders with Far Wake Interference [J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2011,27(3): 824-828.
- [15] Xu, W., Ma, Y., Cheng, A., et al. Experimental Investigation on Multi-Mode Flow-Induced Vibrations of Two Long Flexible Cylinders in a Tandem Arrangement [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2018, 135:261-278.
- [16] Chen Wenli, Gao Donglai, Li Hui, et al. Wake-Flow-Induced Vibrations of Vertical Hangers behind the Tower of a Long-Span Suspension Bridge[J]. *Engineering Structures*, 2018,169: 188-200.
- [17] Chen Wen-Li, Yang Wen-Han, Xu Feng, et al. Complex Wake-Induced Vibration of Aligned Hangers Behind Tower of Long-Span Suspension Bridge[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2020,92: 102829.
- [18] Yongle Li, Haojun Tang, Qiaoman Lin, et al. Vortex-Induced Vibration of Suspenders in the Wake of Bridge Tower by Numerical Simulation and Wind Tunnel Test [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2017,164: 164-173.
- [19] 蔡畅,何旭辉,敬海泉,等. 错列斜拉索尾流驰振及其抑振措施研究[J]. *振动与冲击*, 2020(6).
- [20] Caracoglia, L., Zuo, D. Effectiveness of Cable Networks of Various Configurations in Suppressing Stay-Cable Vibration[J]. *Engineering Structures*, 2009, 31(12): 2 851-2 864.
- [21] Haijun Zhou, Xia Yang, Limin Sun, et al. Free Vibrations of a Two-Cable Network with Near-Support Dampers and a Cross-Link[J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2015,22(9):1 173-1 192.
- [22] Haijun Zhou, Xia Yang, Yanrong Peng, et al. Damping and Frequency of Twin Cables with a Crosslink and a Viscous Damper [J]. *Smart Structures and Systems*, 2019,23(6): 669-682.
- [23] Haijun Zhou, Yuhuan Wu, Lixiao Li, et al. Free Vibrations of a Two-Cable Network Inter-Supported by Cross-Links Extended to Ground [J]. *Smart Structures and Systems*, 2019,23(6):653-667.
- [24] Jing, H. Q., He, X. H., Zou, Y. F., et al. In-Plane Modal Frequencies and Mode Shapes of Two Stay Cables Interconnected by Uniformly Distributed Crosssties[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2018,417:38-55.