

超大跨悬索桥并置双主缆施工期风致失稳特征试验研究

李寿英¹ 李林玉¹ 邓羊晨^{1,2} 陈政清¹

1. 湖南大学, 湖南长沙 410082
2. 华东交通大学, 江西南昌 330013

摘要: 悬索桥并置双主缆的缆间间距小, 气动干扰效应显著, 尤其在无吊索约束的施工阶段, 主缆频率低、断面形状不断变化, 极易发生大幅有害风致振动。以主跨 2 180 m 的某超大跨径悬索桥的单侧并置双主缆方案为工程背景, 设计并制作双主缆施工阶段 5 种典型截面节段模型, 进行多工况下双主缆测振风洞试验, 研究单侧并置双主缆在施工期的风致振动特征, 并与典型振动工况同参数单主缆风致响应进行对比研究。结果表明: 5 种典型截面双主缆节段模型均发生大幅度风致振动, 最大振幅标准差值高达 $8.7H$; 不同风向角和风攻角下双主缆风致振动特征存在明显差异, 双主缆施工期风致失稳的可能机理主要包括: 主缆自身不稳定外形及缆间气动干扰耦合作用机理、缆间气动干扰单独作用机理、主缆自身不稳定外形单独作用机理; 双主缆在架设早期风致失稳问题最为严重, 随着双主缆架设的推进, 失稳最大振幅呈现减小趋势。

关键词: 并置双主缆; 施工期; 风致失稳; 气动干扰; 风洞试验

中图分类号: U448.25 文献标识码: A 文章编号: 1000-131X(2026)01-0051-10

DOI: 10.15951/j.tmgcxb.24060477

Experimental study on wind-induced instability characteristics of parallel dual main cables of very long-span suspension bridges in construction period

Li Shouying¹ Li Linyu¹ Deng Yangchen^{1,2} Chen Zhengqing¹

1. Hunan University, Changsha 410082, China
2. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China

Abstract: Suspension bridges with closely spaced parallel dual main cables may experience significant aerodynamic interference effects, and particularly are prone to significant wind-induced vibration due to the low frequency and rapidly varying cross-section shape of the main cable in the construction phases without the constraint of slings. In order to investigate the vibration characteristics of the parallel dual main cables in construction phases, five typical segmental models of dual main cables in the parallel configuration were designed for a very long-span suspension bridge with a main span of 2 180 m. Based on the wind tunnel tests, the wind-induced vibrations of the dual main cables on one side in construction phases were studied and then compared to those of the single main cable on one side with the same parameters. The results show that the wind-induced vibrations may occur for the five segmental models of dual main cables with the maximum standard deviation of the amplitude up to $8.7H$. Evident differences in the vibration characteristics of the dual main

基金项目: 国家自然科学基金(51578234)、江西省自然科学基金(20232BAB214080)和江西省教育厅资助项目(GJJ2200672)

作者简介: 李寿英, 博士, 教授 通信作者: 邓羊晨, 博士, 讲师 收稿日期: 2024-06-13

cable can be observed under different wind direction angles and wind attack angles. The possible mechanisms of wind-induced instability of the dual main cables in construction phases are summarized as follows: the coupling mechanism of unstable main cable shape and aerodynamic interference between cables, the single mechanism of aerodynamic interference between cables, and the single mechanism of unstable main cable shape. At the early stage of the erection of the dual main cables, the wind-induced vibration of the cables is the most problematic, but the maximum amplitude of the dual main cables caused by instability decreases with the erection process of the cables.

Keywords: dual main cable; construction period; wind-induced instability; aerodynamic interference; wind tunnel test

E-mail: 3412@ecjtu.edu.cn

0 引言

随着悬索桥跨径的不断突破,主缆直径需要不断增大以满足巨大的承载要求。将单侧单根大直径主缆设置成并置双主缆能有效解决主缆直径过大问题,但单侧双主缆方案中主缆间距小,在架设施工阶段长时间处于无吊杆约束的空缆状态,极易在常遇风速下发生大幅振动。

目前,已有研究人员关注悬索桥并置双主缆的风致稳定性。胡建华等^[1]研究了悬索桥无吊杆串列主缆在风荷载作用下的相互干扰效应,结果表明:缆间间距与风偏角的变化对串列主缆的风致稳定性存在显著影响。陈政清等^[2]进行气弹模型风洞试验研究了成缆后串列主缆间的气动干扰特性,在负风偏角、正风攻角工况下发现了明显的尾流驰振。颜旭^[3]以狮子洋通道的并置双主缆为研究对象,研究了风洞试验不同缩尺比的影响及强迫振动下的尾流干扰效应,结果表明:不同雷诺数区间开展的风洞试验不利中心距与振幅均存在极大的差异;串列圆柱间存在强、弱耦合模式。张太科等^[4]研究了成桥状态下单侧并置双主缆的中跨和边跨的风致振动效应,结果表明:中跨两主缆中心间距随来流风速增加而逐渐减小,但双主缆间不会接触;边跨主缆在特定风攻角下,背风侧主缆存在尾流驰振现象。上述研究均以成桥后的并置双主缆为研究对象,相比于成桥状态,悬索桥主缆在架设施工阶段长时间处于空缆状态,频率极低,并且随着架设的推进,主缆会呈现不同的截面形状,发生风致失稳的可能性更大,严重影响施工安全、进度及质量,制约了并置双主缆的推广应用。

然而,有关单侧双主缆施工期风致稳定性研究

尚未见报道。目前,仅部分学者针对传统单侧单主缆的施工期风致稳定性进行了研究。李永乐等^[5]通过数值模拟方法得到悬索桥施工期单主缆典型断面的气动力系数,并分别对二维和三维主缆模型进行了驰振时域分析。李胜利等^[6-11]、An等^[12]、王超群等^[13]利用节段模型风洞试验和数值模拟方法,对大跨径悬索桥施工期暂态主缆驰振进行了研究,发现大跨径悬索桥主缆的架设过程中有发生驰振失稳的可能性,须采取控制措施。Hua等^[14]采用数值模拟和风洞试验手段,对平顶型主缆施工期的振动特性进行了研究,结果表明:平顶型主缆在施工过程中有发生驰振的可能性,且随着施工的进行,发生驰振的概率增加。Wang等^[15]利用流固耦合方法结合风洞试验结果,从非线性气动阻尼和气动升力的角度研究了单根主缆非线性驰振的驱动机理。但是,相比于传统的单主缆,并置双主缆在施工期除了会受自身不稳定气动外形影响,还会受到缆间气动干扰,其风致失稳特征必定更为复杂多样。

本文以某超大跨悬索桥单侧并置双主缆方案为工程背景,设计并制作了多种典型截面并置双主缆施工阶段节段模型,进行了多参数测振风洞试验,研究了并置双主缆的风致失稳响应特征,并针对典型振动工况进行了同参数单主缆测振风洞试验,探究了并置双主缆的风致失稳机理。

1 试验概况

1.1 试验模型

悬索桥主缆在施工阶段,随着架设的推进,主缆会呈现不同的截面形状,在某些特定的截面形状情况下主缆可能会发生气动失稳。以主跨2180m的某超大跨悬索桥的并置双主缆方案为背景,参考已有相关

研究结果^[12-13]，选取了主缆施工期 5 种典型截面形状，制作了双主缆节段模型，其中，钢丝绳股数分别为 15、55、131、207 和 254，如图 1(a)所示。

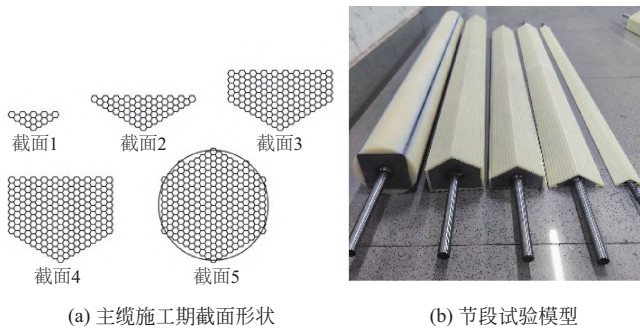


图 1 主缆施工期不同截面形状及其对应节段模型
Fig. 1 Segmental model of the main cable in different construction phases



图 2 双主缆节段模型测振风洞试验照片
Fig. 2 Segmental model of dual main cables in the wind tunnel test

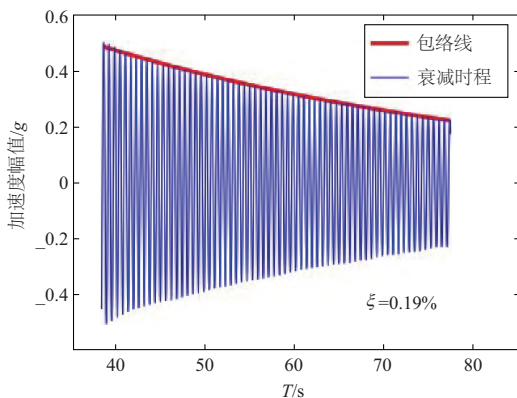


图 3 主缆模型阻尼比识别
Fig. 3 Identification of damping ratio of main cable model

主缆节段模型由钢制芯梁和 3D 打印的 ABS 外衣组成以模拟施工期主缆外形，如图 1(b)所示。其中，双主缆模型中的迎风主缆长 1.13 m、尾流主缆长 1 m，迎风主缆比尾流主缆略长以降低尾流主缆的端部效

应影响，计入支架面积的阻塞率约为 4.5%。主缆模型与原型参数对比如表 1 所示。试验前，通过自由衰减法测得主缆模型的阻尼比为 0.19%，如图 3 所示。

表 1 风洞试验参数

截面号	1	2	3	4	5
模型高度 H/mm	17.6	32.3	55.7	79.2	102
模型宽度 B/mm	47.0	97.5	97.5	97.5	97.5
模型质量 $M/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1})$	3.05	11.2	26.7	42.1	51.7
几何缩放比 λ_L				1 : 10	
质量比 λ_M				1 : 100	
频率比 λ_f				8.69 : 1	
风速比 λ_U				0.87 : 1	

1.2 试验工况

试验在湖南大学 HD-2 风洞实验室的高速试验段进行，该试验段长 17 m、宽 3 m、高 2.5 m。试验中，双主缆间中心间距固定为 3 倍成缆后的主缆直径 ($D=1.02 \text{ m}$)；考虑风向角 α 和风攻角 β 影响，测试范围分别为 $\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ ， $\beta=0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 5^\circ$ ，风向角和风攻角定义如图 4 所示。试验风速为 $U=2 \sim 30 \text{ m/s}$ ，间隔为 $\Delta U=2 \text{ m/s}$ 。对应的雷诺数范围为 $2.3 \times 10^3 \leq Re \leq 2.04 \times 10^5$ 。其中，为了保护试验模型，当试验模型出现过大幅度振动情况，即刻停止增加试验风速。此外，为对比分析双主缆施工期的气动干扰效应，试验针对双主缆典型振动工况，进行了同参数单主缆测振试验。试验工况如表 2 所示。

表 2 风洞试验工况

截面形式	截面号	风向角及风攻角	试验风速/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
双主缆	1	$\alpha=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ$ $\beta=0^\circ, \pm 3^\circ, \pm 5^\circ$	2~30, $\Delta U=2$
	2		
	3		
	4		
	5		
单主缆	1	$\alpha=0^\circ, \beta=5^\circ$	
	2	$\alpha=0^\circ, \beta=3^\circ$	
	3	$\alpha=0^\circ, \beta=-3^\circ$	
	4	$\alpha=0^\circ, \beta=3^\circ$	

试验中，采用加速度计测量双主缆模型顺、横风向响应，试验数据采用 DH5920 动态信号测试分析系统采集，采样频率为 1 000 Hz。

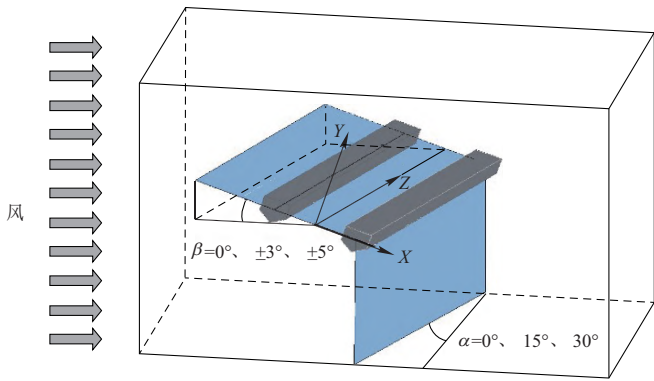


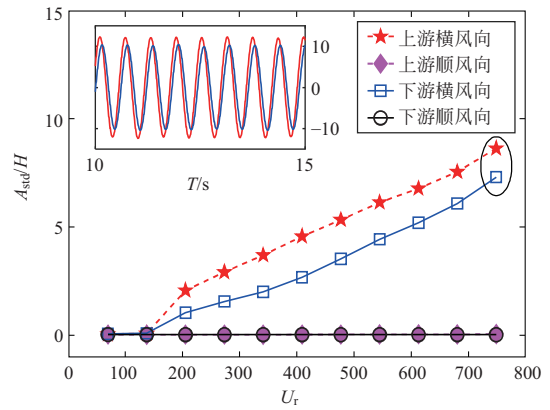
图4 模型风向角 α 和风向角 β 的定义

Fig.4 Definition of wind direction angles α and wind attack angles β of model

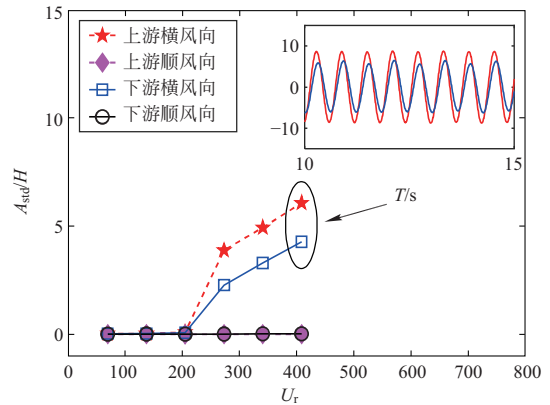
2 试验结果

2.1 双主缆响应

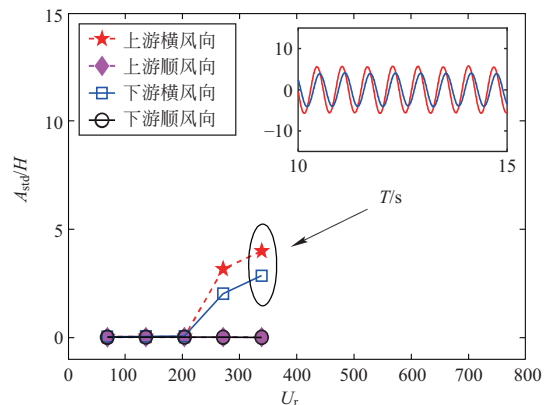
图5给出了截面1双主缆振动工况的振幅(A_{std}/H , A_{std} 为振幅标准差)随风速($U_r = U/fH$, f 为模型频率)的变化情况。由图5可知,在所有振动工况中,主缆振动均以横风向振动为主,且上、下游主缆横风向振动存在一定的相位差,但在最大试验风速下均不超过 $\pi/4$ 。整体上双主缆风致振动起振风速较小,最小起振风速仅为 $U_r = 204$ ($\alpha = 0^\circ$, $\beta = 3^\circ$)。但是,在 $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$ 工况中,上游主缆出现明显风致振动后,下游主缆先表现出小幅度的振动后逐渐趋于平稳,其不同折减风速下的振动时程如图6所示;而在 $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 3^\circ$ 、 $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 5^\circ$ 及 $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 5^\circ$ 工况中,上、下游主缆均发生了大幅度振动,且均随着折减风速 U_r 增大,振幅呈现增大趋势,但上游主缆横风向振幅均要大于下游主缆。上述不同工况中双主缆振动特征的差异表明,双主缆在不同风向角和风向角下极有可能存在不同的振动机理。



(b) $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 3^\circ$ 工况

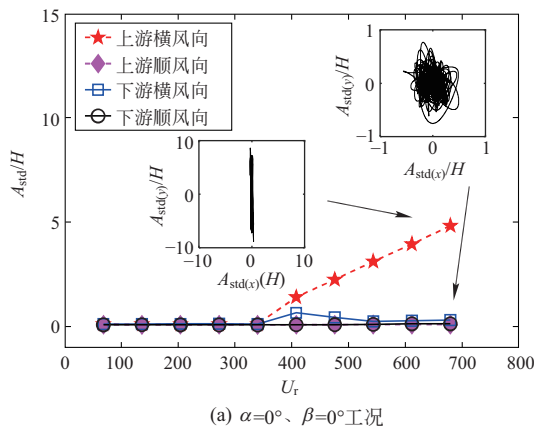


(c) $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 5^\circ$ 工况

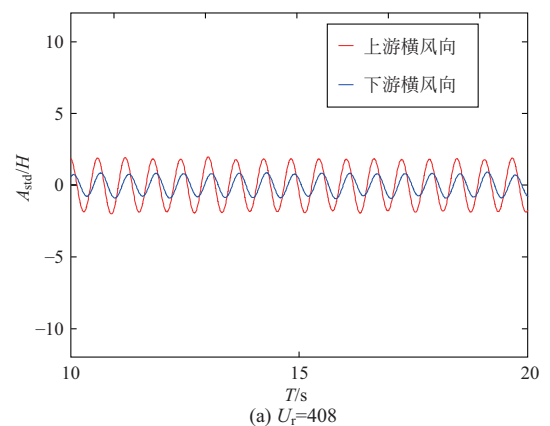


(d) $\alpha = 15^\circ$, $\beta = 5^\circ$ 工况

图5 截面1双主缆振幅随折减风速变化情况
Fig.5 Variation of the amplitude of the dual main cables in section 1 with the reduced wind speed



(a) $\alpha = 0^\circ$, $\beta = 0^\circ$ 工况



(a) $U_r = 408$

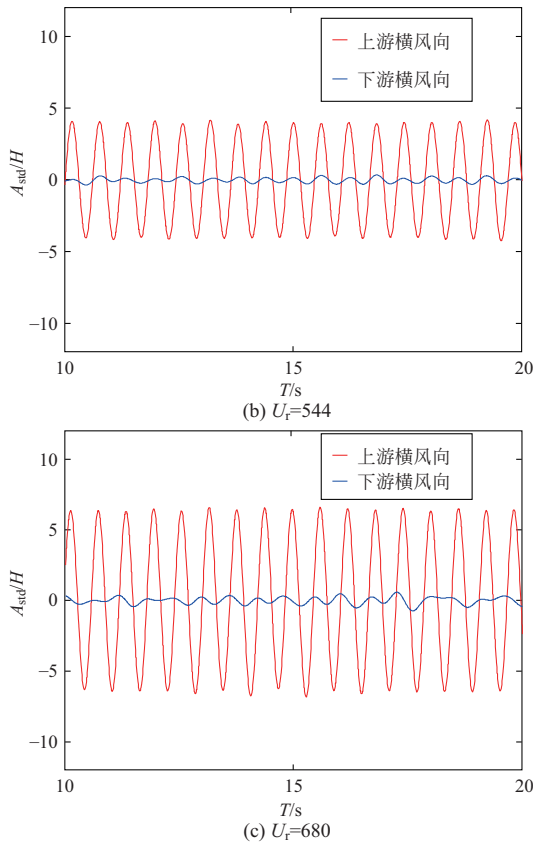


图6 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 工况中截面1双主缆不同折减风速下的振动时程

Fig. 6 Vibration time history of the dual main cables in section 1 at different reduced wind speeds in the case of $\alpha=0^\circ$ and $\beta=0^\circ$

图7给出了截面2双主缆振动工况的振幅随风速的变化情况。由图7可知在 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=3^\circ$ 工况中，上、下游主缆均发生了较大幅度振动，起振风速仅为 $U_r=105$ ，但上游主缆振幅远大于下游主缆振幅，且上、下游主缆振动存在一定的相位差，约为 $3\pi/4$ 。在 $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 及 $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=3^\circ$ 工况中，上、下游主缆同样均发生了明显振动，且振幅相近，振动近似同步，最大试验风速下相位差约为 $\pi/9$ 。这同样表明双主缆在不同风向角和风攻角下可能存在不同的振动机理。

图8给出了截面3双主缆振动工况的振幅随风速的变化情况。从图8中可以看出在所有振动工况中，上、下游主缆均发生了明显振动，振动以横风向为主，且上游主缆振幅明显大于下游主缆振幅。不同的是，在 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 工况中，双主缆起振后，上、下游主缆振幅随着风速增大呈现增大趋势。但在 $\alpha=15^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 和 $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 工况中，下游主缆起振后，随着风速的增大振幅并未呈现出增大趋势，振幅反而趋于

平稳，似乎表现出一定的限幅特征。从截面3双主缆各振动工况中最大风速下的上、下游主缆横风向振动时程可以看出，上游主缆与下游主缆振动存在相位差， $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 和 $\alpha=15^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 工况中约为 $\pi/3$ ， $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 工况中约为 $4\pi/9$ 。

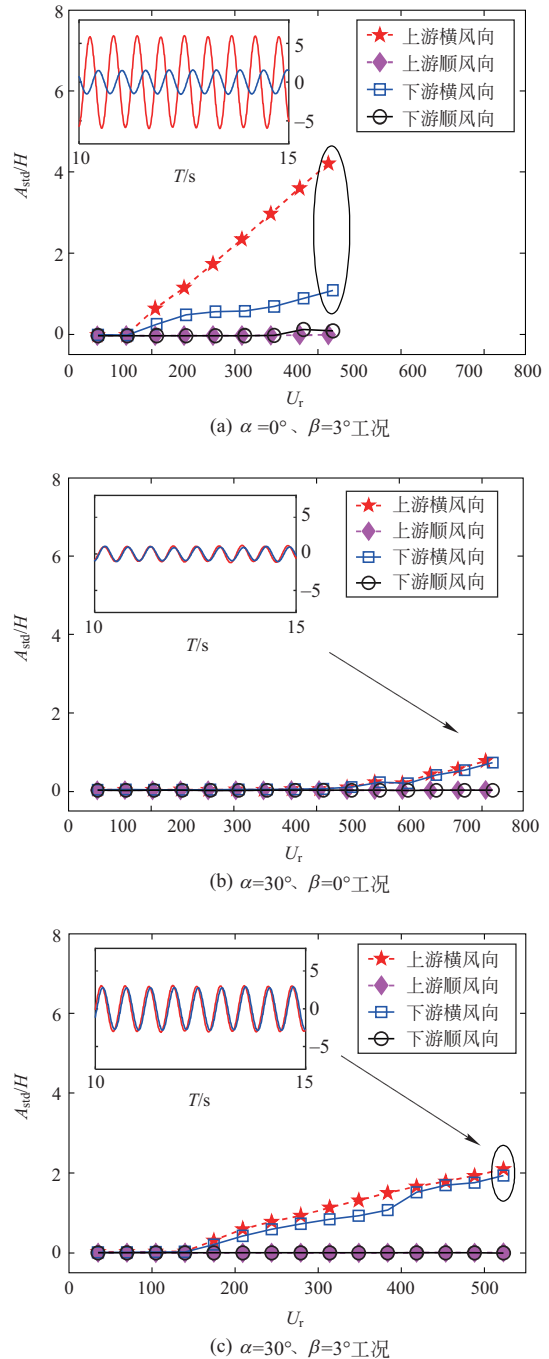
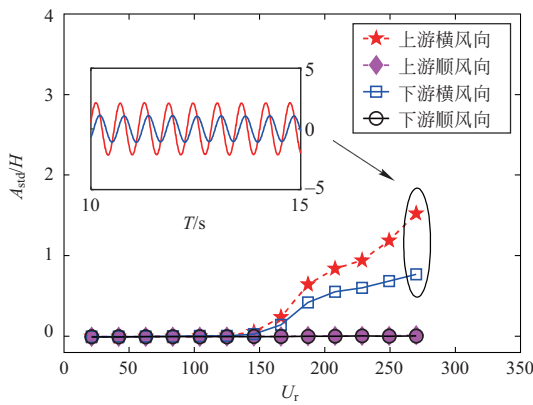


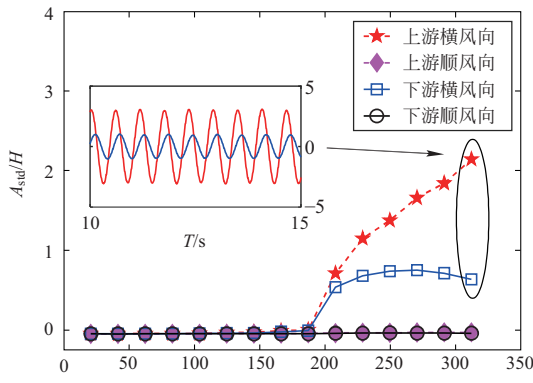
图7 截面2双主缆振幅随折减风速变化情况
Fig. 7 Variation of the amplitude of the dual main cables in section 2 with the reduced wind speed

图9为截面4双主缆振动工况中主缆振幅随风速的变化情况。从图9中可以看出，与前述截面双主缆振动特性不同的是，截面4双主缆在 $\alpha=0^\circ$ 、

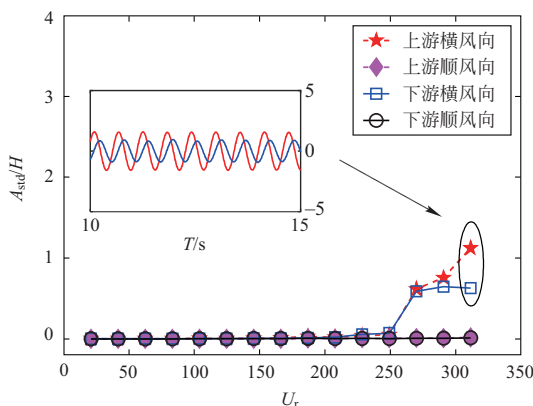
$\beta=3^\circ$ 和 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=5^\circ$ 振动工况中，出现仅下游主缆发生振动的情况，其振动也主要以横风向为主，该振动特性与尾流致振中的尾流驰振相似。而在 $\alpha=15^\circ$ 、 $\beta=-5^\circ$ 工况中，上、下游主缆同样均发生了横风向大幅度振动，这可能与单个主缆本身不稳定的气动外形和两缆间的气动干扰耦合作用有关。图10给出了振动工况中最大试验风速 $U_r=221$ 时的上、下游主缆振动时程，可以看出，在上、下游主缆均发生大幅振动时，两主缆近乎表现出同步振动，相位差约 $\pi/12$ 。



(a) $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 工况

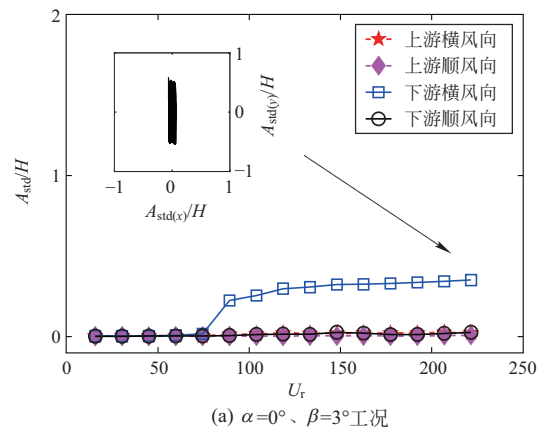


(b) $\alpha=15^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 工况

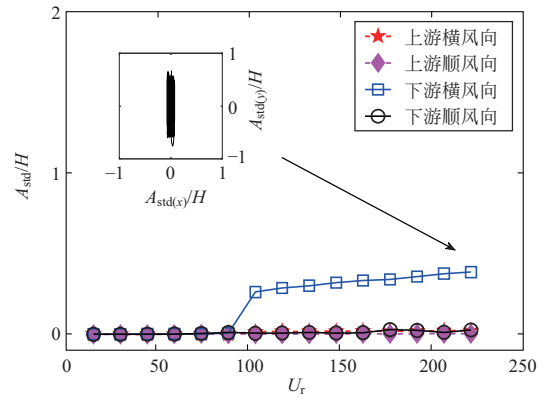


(c) $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 工况

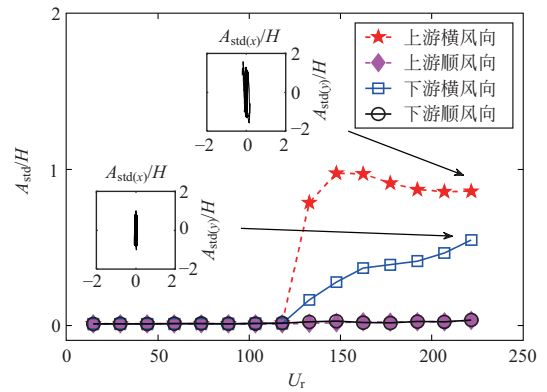
图8 截面3双主缆振幅随折减风速变化情况
Fig.8 Variation of the amplitude of the dual main cables in section 3 with the reduced wind speed



(a) $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=3^\circ$ 工况

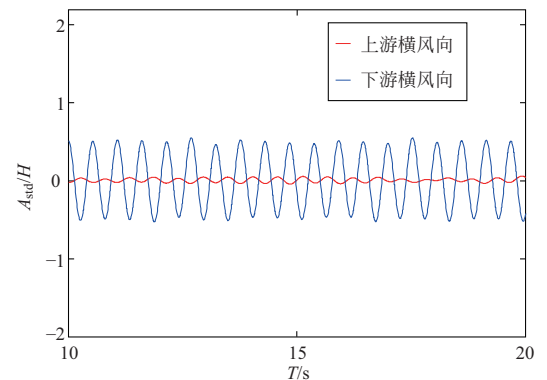


(b) $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=5^\circ$ 工况

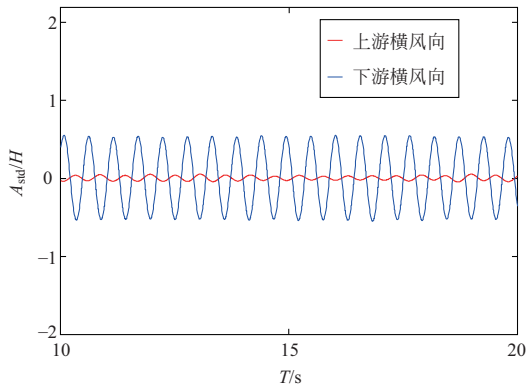


(c) $\alpha=15^\circ$ 、 $\beta=5^\circ$ 工况

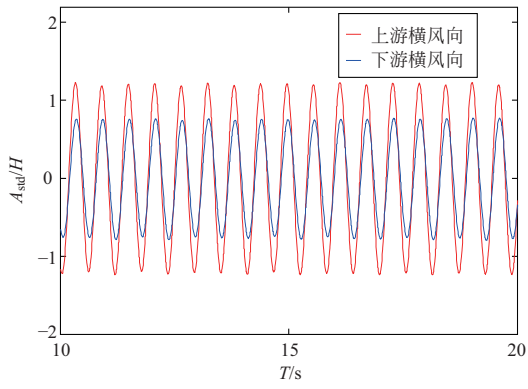
图9 截面4主缆振幅随折减风速变化情况
Fig.9 Variation of the amplitude of the dual main cables in section 4 with the reduced wind speed



(a) $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=3^\circ$ 工况



(b) $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=5^\circ$ 工况



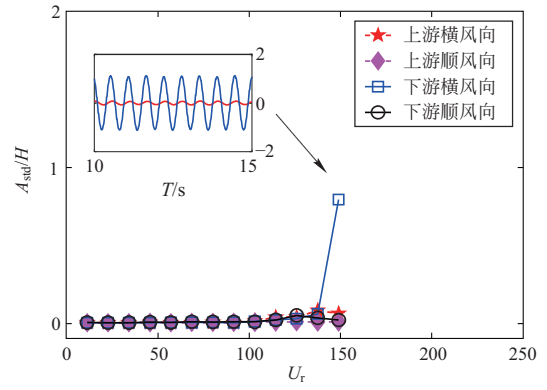
(c) $\alpha=15^\circ$ 、 $\beta=-5^\circ$ 工况

图 10 截面 4 振动工况中上、下游主缆横风向振动时程
Fig. 10 Cross-wind vibration time history of upstream and downstream main cables in vibration case of section 4

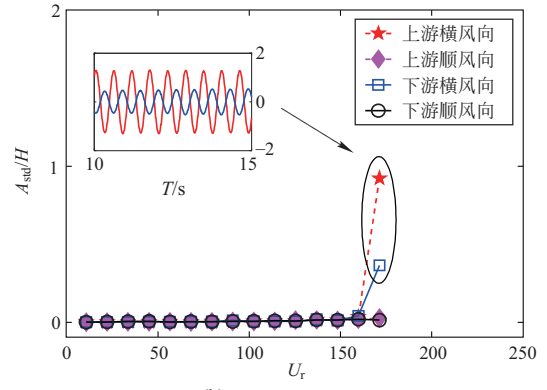
图 11 为截面 5 双主缆振动工况中主缆振幅随风速的变化情况。从图 11 中可以看出，在 $\alpha=15^\circ$ 、 $\beta=5^\circ$ 工况中，同样出现下游主缆大幅振动，上游主缆几乎不动的现象，由于 5 截面为圆形截面，出现此类特征振动倒是与传统中认为多结构体间气动干扰引发的尾流致振特性相吻合。然而，在 $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 、 $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=3^\circ$ 及 $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=5^\circ$ 工况中，均出现了上、下游主缆同时发生大幅度振动的现象，这与传统认为尾流致振中上游圆柱不发生振动，仅下游圆柱发生振动的特性不符，类似特性的振动也曾在相关研究中有过报道^[3,16]，但也未给出机理解释。结合相关研究结果，作者认为双圆柱体在特定间距情况下，在上游柱体对下游柱体产生气动干扰的同时，下游柱体也会对上流柱体产生反向气动干扰，进而造成上、下游柱体均发生振动。因此，传统中对尾流致振仅下游柱体振动，上游柱体不发生振动的特性定义可能并不准确。

图 12 给出了各截面双主缆在不同风向角、风攻角下的最大振幅。从图 12 中可以看出，5 种截面双主缆均发生了大幅度振动，最大无量纲振幅达到了 8.7。随着主缆架设施工进程的推进，双主缆截面最

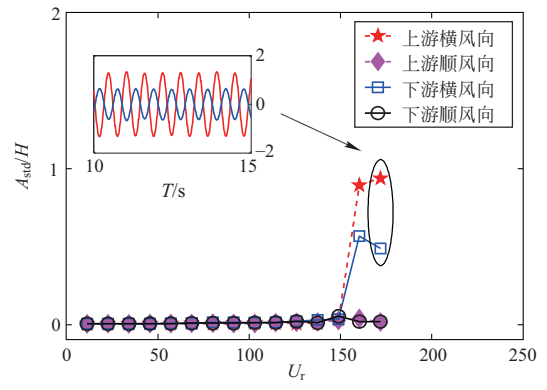
大振幅呈现出减小趋势，这表明在架设早期双主缆的风致振动问题最为严重。



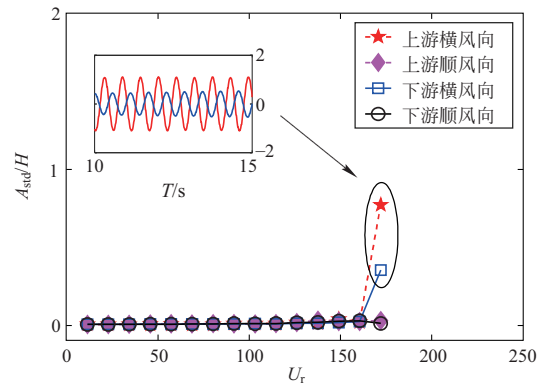
(a) $\alpha=15^\circ$ 、 $\beta=5^\circ$ 工况



(b) $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=0^\circ$ 工况



(c) $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=3^\circ$ 工况



(d) $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=5^\circ$ 工况

图 11 截面 5 主缆振幅随折减风速变化情况
Fig. 11 Variation of the amplitude of the dual main cables in section 5 with the reduced wind speed

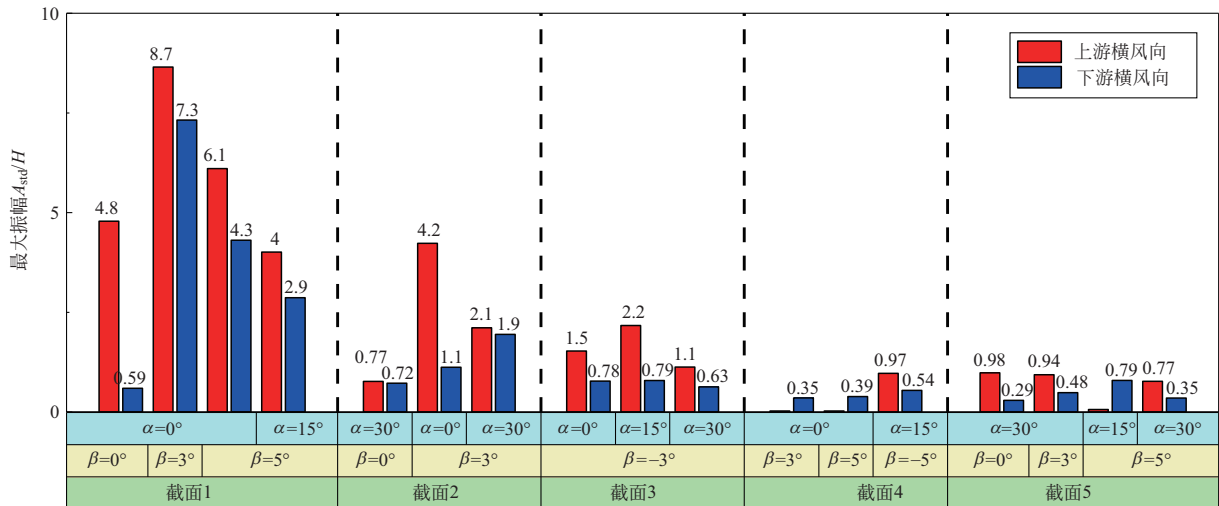


图 12 试验风速下最大无量纲振幅

Fig. 12 Maximum dimensionless amplitude at test wind speed

2.2 单、双主缆响应对比

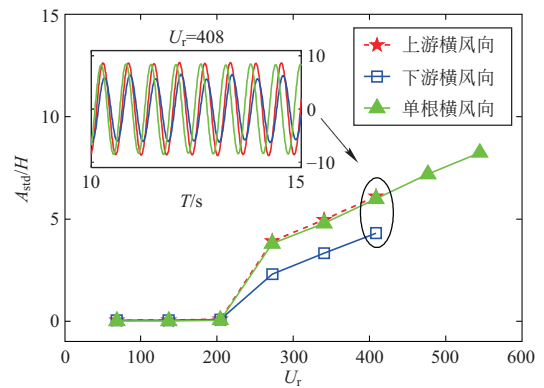
为更好地分析双主缆施工期的气动干扰效应，针对双主缆典型振动工况，进行了同参数单主缆测振试验，试验结果如图 13 所示。

在截面 1 主缆 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=5^\circ$ 工况中，单根主缆起振风速同双主缆起振风速相同，单根主缆振幅随风速变化情况与双主缆中上游主缆相近，大于双主缆中下游主缆振幅如图 13(a) 所示。这表明双主缆在该工况中仅上游主缆会对下游主缆产生气动干扰，因此，下游主缆振动可能由自身不稳定气动外形和上游主缆气动干扰耦合作用引发，而上游主缆振动可能仅与自身不稳定的气动外形有关。

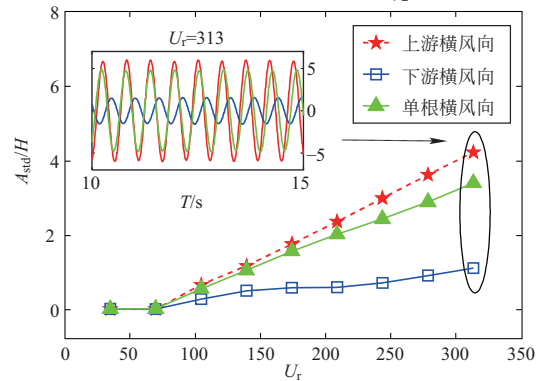
在截面 2 主缆 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=3^\circ$ 工况中，单根主缆起振风速同样与双主缆起振风速相同，单主缆振幅随风速变化规律与双主缆中上游主缆相似，振幅介于双主缆中上、下游主缆振幅之间，如图 13(b) 所示。这表明该工况中双主缆的上、下游主缆间彼此互有气动干扰，其振动可能是自身不稳定外形及缆间气动干扰耦合导致。

在截面 3 主缆 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 工况中，单根主缆并未发生明显振动，如图 13(c) 所示，这表明此工况下双主缆的上、下游主缆振动可能仅与缆间气动干扰有关。

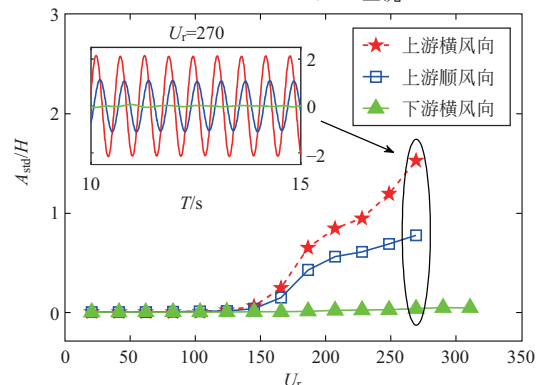
在截面 4 主缆 $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=3^\circ$ 工况中，单根主缆同样并未发生明显振动，如图 13(d) 所示，说明此工况下双主缆振动同样可能仅与缆间气动干扰有关，但不同的是，由于仅下游主缆发生了振动，表明仅上游主缆对下游主缆存在气动干扰。



(a) 截面1- $\alpha=30^\circ$ 、 $\beta=5^\circ$ 工况



(b) 截面2- $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=3^\circ$ 工况



(c) 截面3- $\alpha=0^\circ$ 、 $\beta=-3^\circ$ 工况

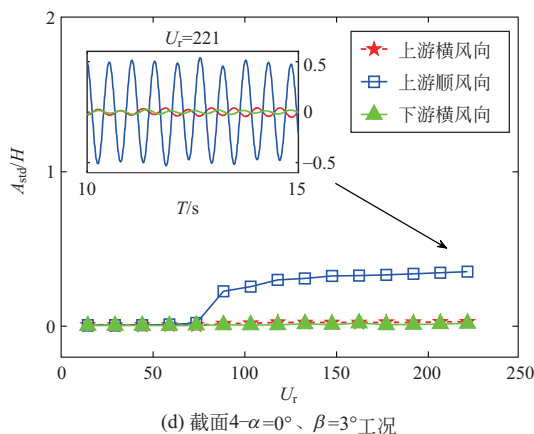


图 13 双主缆和单主缆无量纲振幅随折减风速的变化
Fig. 13 Variation of dimensionless amplitude of dual main cables and single main cable with reduced wind speed

3 结 论

本文以某超大跨悬索桥备选的单侧并置双主缆方案为背景,制作了 5 种典型截面双主缆施工阶段阶段模型,进行了双主缆测振风洞试验,并针对典型振动工况进行了同参数单主缆测振对比试验,得到以下主要结论:

(1) 5 种截面双主缆均观测到了大幅度振动,均主要以横风向振动为主,在不同的风向角、风攻角工况下呈现出截然不同的振动特征,其中,既有上、下主缆同时振动,也有仅上游或下游主缆发生振动。

(2) 双主缆施工期最大振幅标准差值可达 $8.7H$,其中,在架设早期双主缆风致振动问题最为严重,随着主缆架设施工进程的推进,双主缆截面最大振幅呈现出减小趋势,这可能与截面高宽比的增大有关。

(3) 双主缆在施工期的风致失稳可能存在多种机理,主要包括:自身不稳定外形及缆间气动干扰耦合作用机理(上、下游主缆同时发生振动)、缆间气动干扰单独作用机理(仅上/下游主缆发生振动等)、自身不稳定外形单独作用机理(仅上/下游主缆发生振动)。

参 考 文 献

[1] 胡建华,赵跃宇,刘慕广,等. 串列双索气弹模型的风洞试验研究[J]. 动力学与控制学报, 2006, 4(2): 179-186.(HU Jianhua, ZHAO Yueyu, LIU Muguang, et al. Wind tunnel studies on the behaviour of aeroelastic twin cable model[J]. Journal of Dynamics and Control, 2006, 4(2): 179-186.(in Chinese))

[2] 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, 27(8): 7-11, 173.(CHEN Zhengqing, LIU Muguang, LIU Zhiwen.

Experiment study on aerodynamic interference of tandem cables based on aeroelastic model[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(8): 7-11, 173.(in Chinese))

[3] 颜旭. 串列双缆索尾流干扰效应及气动减振控制[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.(YAN Xu. Wake interference effect and aerodynamic measures of tandem double cable [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.(in Chinese))

[4] 张太科,陈上有,刘高,等. 均匀流作用下悬索桥单侧并置双主缆振动特性分析[J]. 振动与冲击, 2023, 42(18): 123-129.(ZHANG Taike, CHEN Shangyou, LIU Gao, et al. Analysis of the vibration characteristics of a suspension bridge with single-side juxtaposition dual main cables under the effect of uniform flow [J]. Journal of Vibration and Shock, 2023, 42(18): 123-129.(in Chinese))

[5] 李永乐,易仁彦,王东绪,等. 悬索桥主缆架设过程驰振性能时域分析[J]. 西南交通大学学报, 2013, 48(1): 21-28.(LI Yongle, YI Renyan, WANG Dongxu, et al. Time-domain analysis of galloping of main cables of suspension bridge during erection process [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2013, 48(1): 21-28.(in Chinese))

[6] 李胜利,欧进萍. 大跨径悬索桥施工期暂态主缆驰振分析[J]. 土木工程学报, 2009, 42(9): 74-81.(LI Shengli, OU Jinping. Galloping analysis for the transient main cables of long-span suspension bridges during construction [J]. China Civil Engineering Journal, 2009, 42(9): 74-81.(in Chinese))

[7] 李胜利,欧进萍. 大跨径悬索桥施工期暂态主缆驰振控制[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 137-143, 215, 255-256.(LI Shengli, OU Jinping. Galloping vibration control for transient main cables of a long-span suspension bridge at construction stage [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(10): 137-143, 215, 255-256.(in Chinese))

[8] 李胜利,王超群,王东炜,等. 大跨径悬索桥施工期尖顶型主缆驰振性能分析[J]. 振动与冲击, 2015, 34(22): 154-160.(LI Shengli, WANG Chaoqun, WANG Dongwei, et al. Galloping performance of large scale spire type main cable of suspension bridge during construction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(22): 154-160.(in Chinese))

[9] 李胜利,王超群,许福友,等. 猫道对大尺寸主缆气动干扰效应风洞试验研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(6): 79-84.(LI Shengli, WANG Chaoqun, XU Fuyou, et al. Aerodynamic influence of catwalk on main cables of suspension bridges based on wind tunnel test [J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(6): 79-84.(in Chinese))

[10] 李胜利,王超群,宁佐强,等. 悬索桥施工期大尺寸主缆驰振分析方法研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(24): 51-57.(LI Shengli, WANG Chaoqun, NING Zuoqiang, et al. Galloping analysis methods for large scale spire type main cable of a suspension bridge during construction [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(24): 51-57.(in Chinese))

[11] LI S L, AN Y H, WANG C Q, et al. Experimental and

numerical studies on galloping of the flat-topped main cables for the long span suspension bridge during construction [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2017, 163: 24-32.

- [12] AN Y H, WANG C Q, LI S L, et al. Galloping of steeped main cables in long-span suspension bridges during construction[J]. Wind and Structures, 2016, 23 (6): 595-613.
- [13] 王超群. 大跨桥梁钝体断面非线性气弹失稳后状态及自激力特性研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2023. (WANG Chaoqun. Study on nonlinear post-critical aeroelastic instability aself-excited forces of bluff bodies of long-span bridges [D]. Changsha: Hunan University, 2023. (in

Chinese))

- [14] HUA X G, WANG C Q, LI S L, et al. Experimental investigation of wind-induced vibrations of main cables for suspension bridges in construction phases [J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 93: 102846.
- [15] WANG C Q, HUA X G, HUANG Z W, et al. Post-critical behavior of galloping for main cables of suspension bridges in construction phases [J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 101: 103205.
- [16] DENG Y C, LI S Y, CHEN Z Q. Experimental investigation on wake-induced vibrations of the hangers of suspension bridges based on three-dimensional elastic test model[J]. Engineering Structures, 2021, 234: 111985.

李寿英(1977—),男,博士,教授。主要从事大跨桥梁抗风和结构减震控制方面的研究。

李林玉(2000—),女,硕士研究生。主要从事大跨桥梁抗风方面的研究。

邓羊晨(1991—),男,博士,讲师。主要从事大跨桥梁抗风方面的研究。

陈政清(1947—),男,博士,教授。主要从事桥梁的风致振动和控制方法研究。

(上接第 36 页)

- [13] VAN NIMMEN K, LOMBAERT G, DE ROECK G, Et al. The impact of vertical human-structure interaction on the response of footbridges to pedestrian excitation[J]. Journal of Sound and Vibration, 2017, 402: 104-121.
- [14] CAPRANI C C, AHMADI E. Formulation of human-structure interaction system models for vertical vibration [J]. Journal of Sound and Vibration, 2016, 377: 346-367.
- [15] 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): 99-108. (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): 99-108. (in Chinese))
- [16] 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. (CAO Lilin, LÜ 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. (in Chinese))
- [17] DOUGILL J W, WRIGHT J R, PARKHOUSE J G, et al. Human structure interaction during rhythmic bobbing [J]. The Structural Engineer, 2006, 84(22): 32-39.
- [18] WANG H Q, CHEN J, NAGAYAMA T. Parameter identification of spring-mass-damper model for bouncing people[J]. Journal of Sound and Vibration, 2019, 456: 13-29.
- [19] SHAHABPOOR E, PAVIC A, RACIC V. Structural vibration serviceability: New design framework featuring

human-structure interaction [J]. Engineering Structures, 2017, 136: 295-311.

- [20] ALMEIDA REZENDE F, BRUNET O JR, CARVALHO E M L, et al. Vibration-based sensitivity analysis of a flexible steel footbridge using probabilistic walking models [J]. Engineering Structures, 2024, 302: 117343.
- [21] 操礼林, 王念康, 李爱群. 随机行走人群-大跨楼盖耦合振动及 MTMD 减振分析[J]. 东南大学学报: 自然科学版, 2023, 53(3): 463-470. (CAO Lilin, WANG Niankang, LI Aiqun. Analysis on coupled vibration of random walking crowd-large span floor and MTMD vibration control [J]. Journal of Southeast University: Natural Science Edition, 2023, 53(3): 463-470. (in Chinese))
- [22] 熊杰程, 陈隽. 人群跳跃荷载的互功率谱模型[J]. 土木工程学报, 2019, 52(10): 83-92. (XIONG Jiecheng, CHEN Jun. Cross-power spectral density modelling for crowd jumping loads[J]. China Civil Engineering Journal, 2019, 52(10): 83-92. (in Chinese))
- [23] 王晋平, 熊杰程, 陈隽. 人群步行荷载的互谱模型及应用[J]. 土木工程学报, 2020, 53(7): 12-20. (WANG Jinping, XIONG Jiecheng, CHEN Jun. Cross-spectral model for crowd walking load and its application[J]. China Civil Engineering Journal, 2020, 53(7): 12-20. (in Chinese))
- [24] XIONG J C, CHEN J. A random field model of multipoint bouncing loads and its applications [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2024, 2024(1): 2715182.
- [25] 建筑楼盖结构振动舒适度技术标准: JGJ/T 441—2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020. (Technical standard for human comfort of the floor vibration: JGJ/T 441—2019 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2020. (in Chinese))

熊杰程(1991—),男,博士,副教授。主要从事人致振动方面的研究。

刘志豪(2000—),男,硕士研究生。主要从事人致振动方面的研究。

段淑倩(1991—),女,博士,教授。主要从事工程防灾方面的研究