文章编号:1674-2974(2022)05-0074-08

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2022051

安装椭圆形灯具和矩形线盒的斜拉索驰振

安苗,李寿英*,陈政清

(风工程与桥梁工程湖南省重点实验室(湖南大学),湖南长沙410082)

摘要:针对亮化灯具引起的斜拉索振动问题,以某安装椭圆形灯具和矩形线盒的斜拉索为工程背景,研究了驰振特性及增加结构阻尼对驰振的抑制效果.首先,进行了节段模型测力风洞试验,测量了安装灯具斜拉索的三分力系数,通过驰振力系数初步预测了发生驰振的风攻角范围;然后,分别进行了二维和三维节段模型测振风洞试验,测量了安装灯具斜拉索风振响应随风攻角、风速等的变化规律,探讨了阻尼比对提高驰振临界风速的影响规律.结果表明:安装椭圆形灯具和矩形线盒的斜拉索的平均阻力和升力系数最大分别可达1.8和1.5,静风荷载比未安装灯具时可增大83%;局部凸起的点光源对安装灯具斜拉索的气动力影响很小;二维斜拉索的最不利风攻角为8°,驰振力系数低至-7.9,阻尼比为0.1%时驰振临界风速为21.8 m/s;三维斜拉索的起振风偏角范围为40°~56°、186°~196°,面内和面外都有较大振动;阻尼比为0.1%时起振风速低至4.7 m/s;起振后,随风速的增大,振幅线性增加,折减风速达到77时,无量纲位移可达到2D(D为斜拉索直径);增大阻尼在相同风速下可降低振动的幅度;阻尼比小于0.8%时,增加阻尼对驰振临界风速的提高作用有限;当阻尼比增大到1.0%时,能够有效抑制安装椭圆形灯具和矩形线盒的斜拉索驰振.

关键词:驰振;风洞试验;安装灯具斜拉索;阻尼比;亮化工程;椭圆形灯具 中图分类号:TU411.3 文献标志码:A

Galloping of Stay Cables Installed with Elliptical Lamp and Rectangular Box

AN Miao, LI Shouying[†], CHEN Zhengqing

(Key Laboratory for Wind and Bridge Engineering of Hunan Province (Hunan University), Changsha 410082, China)

Abstract: Aiming at the problem of stay-cable galloping caused by lighting lamps, the galloping vibration characteristics and the effect of increasing structural damping on galloping-vibration were studied based on the engineering background of a stay-cable installed with an elliptical lamp and a rectangular box. First, the aerodynamic coefficients of stay cable were measured by the force measurement wind tunnel tests. The wind attack angle range of cable vibration was predicted by using galloping force coefficient. Then, 2- dimensional and 3-dimensional vibration tests were carried out to measure the critical wind speed of galloping. The influence of damping ratio on vibration was also studied. The test results show that the maximum drag coefficient and lift coefficient of stay cables with elliptical lamp and rectangular box are 1.8 and 1.5, respectively. The static wind load on the stay cable can be increased by 83%. The influence of local bulge point light on the aerodynamic force of stay cable is small. For two-dimensional stay

 ^{*} 收稿日期:2021-10-11
 基金项目:国家自然科学基金资助项目(51578234), National Natural Science Foundation of China(51578234); 湖南省研究生科研创新项目(CX20210411), Postgraduate Scientific Research Innovation Project of Hunan Province (CX20210411)
 作者简介:安苗(1989—),女,河北保定人,湖南大学博士研究生
 * 通信联系人,E-mail: shyli@hnu.edu.cn

cables, the most dangerous wind attack angle is 8°. The minimum galloping force coefficient is -7.9 and the minimum critical wind velocity is 21.8 m/s. For three-dimensional stay cables, the yaw angle of vibration is $40^{\circ} \sim 56^{\circ}$ and $186^{\circ} \sim 196^{\circ}$. Both in-plane and out-of-plane vibrations occur. When ζ is 0.1%, the critical velocity is 4.7 m/s. The vibration amplitude increases linearly with the increase of wind velocity. When the reduced wind velocity is 77, the dimensionless displacement can reach 2D(D is the diameter of stay cable). Increasing the damping can reduce the amplitude of vibration at the same wind velocity. When the damping ratio is less than 0.8%, the effect of increasing damping on the critical wind velocity is limited. If the damping ratio is increased to 1.0%, the galloping vibration of stay cables installed with elliptical lamps and rectangular wire boxes can be effectively suppressed.

Key words: galloping; wind tunnel tests; stay cables with installation of lamps; damping ratio; lighting projects; elliptical lamp

在斜拉索上安装亮化灯具,会改变斜拉索对称 稳定的圆形截面,容易引发驰振.2019年,重庆夔门 大桥的斜拉索在安装矩形灯具后发生了大幅驰振, An和Li等^[1]在实验室重现了该斜拉索的驰振现象, 发现其一阶模态驰振临界风速低至6.3 m/s;Li和 Chen等^[2]研究了广东鹤洞大桥"圆形抱箍"灯具对 斜拉索振动的影响,结果表明其驰振临界风速仅为 18 m/s,远低于设计风速,对该设计方案提出了改进 意见,有效地抑制了驰振的发生;Deng和Tang等^[3]采 用CFD和风洞试验手段研究了二维矩形灯具斜拉索 的三分力系数,预测了发生驰振的风攻角范围;周傲 秋和余海燕等^[4]研究了安装矩形灯具斜拉索的三维 气动特性.

人们常采用基于准定常假设的 Den Hartog 驰振 理论[5]预测驰振响应,并在干索驰振[6]、覆冰导线[7] 和钝体截面[8-9]的驰振研究中广泛应用.然而,已有 研究表明, Den Hartog驰振判据仅能预测驰振发生的 可能性,无法准确预测驰振临界风速的大小[10-11]. Hua和Wang等^[11]研究了施工过程中主缆的驰振,发 现试验测得的驰振临界风速和由 Den Hartog 驰振判 据计算得到的驰振临界风速差异可达70%. Bearman 等[12]认为,当驰振临界风速较低时,会受旋涡脱落的 影响,发生涡振和驰振的混合振动,是由非定常力引 起的振动,准稳态假设不再适用.因此一些学者试图 建立非定常驰振理论,例如Corless驰振模型^[13]、 Tamura-Shimada 驰振模型^[14]以及 Gao 和 Zhu^[15]采用 能量等效原理建立的驰振力模型. Mannini^[16]等以3: 2的矩形截面为研究对象,检验了Corless 驰振模型 和Tamura-Shimada 驰振模型的有效性,发现两种模 型都不能很好地预测驰振临界风速.这些理论模型 是针对具体的截面形式和横风向振动提出的,对其 他截面的适用性和对多自由度振动的有效预测还需 进一步研究.

斜拉索是一种细长构件,阻尼比很低,较易在风 荷载作用下发生各种类型的振动,如干索驰振^[6]、覆 冰斜拉索驰振[17]、涡激振动[18-19]和风雨振[20-21]等.干 索驰振和覆冰斜拉索驰振可能会引起大幅的发散振 动. 涡激振动和风雨振是一种限幅振动. 涡激振动 通常振幅较小,是由旋涡脱落引起的,发生涡激振动 的风速可用斯托罗哈数进行估算.风雨振和覆冰斜 拉索驰振是在特定条件(有雨或有冰)下发生的大幅 振动.干索驰振是斜拉索在无雨的条件下发生的大 幅振动,由于发生风速较高,发生条件敏感,在实验 室中很难重现干索驰振.目前,关于干索驰振有两种 解释,一种解释是Matsumoto等^[6]提出的非定常驰 振,是由于轴向流的存在使卡门涡街减弱引起的;另 外一种是可用三维经典准定常驰振理论解释.在斜 拉索端部安装阻尼器是一种常用的抑振措施.Liu和 Shen 等^[19]通过风洞试验发现 0.48% 的阻尼比可有效 抑制斜拉索的高阶涡振;Li等[21]发现阻尼比增大到 0.5% 时可有效抑制斜拉索的风雨振; Hua 和 Wang 等[11]发现阻尼比增大到 3.2% 也不能有效抑制施工 过程中主缆的驰振;An和Li等印研究了安装矩形灯 具斜拉索的驰振振动,发现阻尼比增大到0.6%时, 驰振临界风速仍远低于设计风速.

本文以某安装椭圆形灯具和矩形线盒的斜拉索 为工程背景,进行了节段模型测力风洞试验,测量了 安装灯具斜拉索的三分力系数,分析了安装灯具后 斜拉索静风荷载的变化,通过驰振力系数初步预测 了发生驰振的风攻角范围;然后,分别进行了二维和 三维节段模型测振风洞试验,测量了安装灯具斜拉 索风致响应随风攻角、风速等的变化规律,研究了驰 振临界风速的大小,探讨了阻尼比对提高驰振临界 风速的影响规律.

1 工程背景

某大桥为双塔双索面斜拉桥,主梁为(5+180+400+180+5)m预应力混凝土箱梁,2个索面沿中跨 对称线对称布置,斜拉桥的立面布置图及斜拉索编 号详见图1.斜拉索直径共有8种规格,依次是80 mm、83 mm、89 mm、93 mm、105 mm、109 mm、115 mm、121 mm.斜拉索长度的变化范围为49~216 m; 倾角变化范围为24°~78°;基频变化范围为0.58~ 2.92 Hz. 每个索面为平行双索,2根平行索在面外方向上采用分隔架相连,分隔架对索结构的振动控制 是有利的^[22],斜拉索端部安装了阻尼器.

2018年大桥启动亮化工程后,除最外侧 C24'w 和 C24w 号索外,在斜拉索表面均安装了点光源,每 米 8 个点光源.斜拉索亮化灯具的布置和示意图分 别如图 2、图 3 所示.以编号为 C23'w 斜拉索为研究 对象,斜拉索横截面尺寸如图 4 所示.斜拉索直径为 121 mm,线质量为 59.191 kg/m,倾角为 26°,一阶频率 为 0.62 Hz. 一阶模态的驰振临界风速最低,在测振模 型参数设计中,主要针对斜拉索的一阶模态.



Fig.1 Elevation of the Bridge (unit: m)



图2 斜拉索亮化灯具布置现场图 Fig.2 Photos of stay cable attached with lamps



图3 斜杠索点光源布置示意图 Fig.3 Point lamp on stay cable



2 测力试验

2.1 测力试验概况

节段模型测力试验在湖南大学HD-3风洞实验 室中进行,该风洞为低速、直流的边界层风洞.风洞 试验段长24m、宽3m、高2.5m,试验风速0.5~20m/s 范围内连续可调.

测力模型的几何缩尺比为1:1,模型长度为 1000 mm.试验模型直立放在风洞的试验段,下端与 高频天平相连;为消除端部效应对试验结果的影响, 在模型上部设置端板,端板直径为500 mm.为避免 端板对模型产生附加的气动力,端板固定在从风洞 顶板伸出的钢管上,与模型上端面间距为3 mm.测力试验中,分别测了表面没有局部凸起点光源和有局部凸起点光源模型的三分力.试验模型在风洞中的安装图如图5、图6所示.



图5 无凸起点光源测力模型安装在风洞中的照片 Fig.5 Photos of the test model without bulge point light installed in the test section



图 6 有凸起点光源测力模型安装在风洞中的照片 Fig.6 Photos of the test model with bulge point light installed in the test section

试验在均匀流场中进行,试验风速为10 m/s.试 验在0°~360°风攻角范围内进行了三分力的测定,风 攻角间隔为2°.高频天平的采样频率为1000 Hz,采 样时间为30 s.风攻角采用α定义,方向如图7所示.



Fig.7 Definition of wind attack angle α

风轴和体轴之间平均气动力的转换由公式(1) 和(2)确定,平均升力系数、平均阻力系数和平均合 力系数由公式(3)~(5)确定.

$$F_{\rm D} = F_{\rm x} \sin\alpha - F_{\rm x} \cos\alpha, \qquad (1)$$

$$F_{\rm L} = -F_{\rm y} \cos\alpha - F_{\rm x} \sin\alpha, \qquad (2)$$

$$C_{\rm D} = \frac{F_{\rm D}}{0.5\rho U^2 DL},$$
 (3)

$$C_{\rm L} = \frac{F_{\rm L}}{0.5\rho U^2 DL},\tag{4}$$

$$C_{\rm F} = \sqrt{C_{\rm D}^{2} + C_{\rm L}^{2}}.$$
 (5)

式中: F_x 、 F_y 为节段模型在体轴方向的平均力; F_D 、 F_L 为节段模型在风轴坐标系下受到的平均阻力和平均 升力; C_D 为平均阻力系数; C_L 为平均升力系数; C_F 为 平均合力系数;U为来流的风速;L为模型的长度; ρ 为空气密度;D为斜拉索的直径.

根据 Den Hartog 驰振判据,由平均三分力系数 可以得到驰振力系数 C_g:

$$C_{\rm g} = C_{\rm D} + \frac{\mathrm{d}C_{\rm L}}{\mathrm{d}\alpha}.$$
 (6)

2.2 测力试验结果

图 8、图 9 分别给出了无局部凸起点光源模型和 有局部凸起点光源模型的平均阻力系数、平均升力 系数和驰振力系数随风攻角的变化曲线.从图 8、 图 9 中可看出,有凸起点光源的模型和无凸起点光 源的模型的平均气动力系数和驰振力系数差别很 小,局部凸起点光源对斜拉索的气动力影响很小,因 此在后续测振试验中忽略了表面凸起的点光源.



未安装灯具的斜拉索为圆形截面,在亚临界区的平均阻力系数为1.2,平均升力系数为0.安装灯具

后斜拉索的最大平均阻力和升力系数分别可达1.8 和1.5. 当α=224°时,平均合力系数可达2.2,这说明 静风荷载最大增加了83%.



平均升力系数在4个风攻角区间呈现突降趋势,包括α=0°~22°、156°~168°、196°~234°、344°~ 360°.当α=8°时,驰振力系数最小,为-7.9,如表1 所示.

表1 最小驰振力系数及对应的风攻角 Tab.1 Minimum galloping force coefficient and its corresponding wind attack angle

驰振力系数 <i>C_g<0 对应</i>	最小驰振力	最小驰振力系数
的风攻角范围α/(°)	系数 <i>C</i> g	对应的风攻角α/(°)
0~22, 92,156~168, 196~234,344~360	-7.9	8

3 测振试验

3.1 测振试验概况

节段模型测振试验在湖南大学风工程实验研究 中心 HD-2 大气边界层风洞的高速试验段进行,该 试验段长 17 m、宽 3.0 m、高 2.5 m,风速区间为 0~60 m/s,紊流度小于 0.5%.

测振系统采用两个自由度的弹性悬挂系统.模型设计需满足3个相似比:弹性参数(UlfD)、惯性参数(mlpD²)和阻尼比.由测力试验结果可知,局部凸起点光源对模型的气动力影响较小,因此测振模型忽略了表面局部凸起点光源的影响.模型的几何缩尺比为1:2.69,模型直径45 mm,模型长度1600 mm,

测振模型的相似参数详见表2.为研究阻尼比对斜拉 索驰振临界风速的影响,通过在弹簧上粘贴胶带,调 节得到了模型的4种阻尼比水平(0.1%、0.4%、0.8% 和1.0%).

表 2 测振试验模型的相似比 Tab.2 Similarity scales of the elastic test model

参数	模型	实桥	相似比
直径 D/mm	45	121	1:2.69
频率f/Hz	1.97	0.62	3.18:1
风速 <i>U</i> /(m·s ⁻¹)	6.0~32.0	5.1~27.1	1.18:1
线质量 <i>m/</i> (kg·m ⁻¹)	8.2	59.191	$1:2.69^{2}$
阻尼比ζ/%	0.1,0.4,0.8,1.0	—	1:1

根据测力试验结果,在最不利攻角8°下,对二维 斜拉索进行了测振试验.试验装置布置示意图如图 10所示.试验参数设置详见表3工况1.



图 10 二维测振装置示意图 Fig.10 Two-dimensional vibration measuring device

三维测振系统中采用3个角度来定义斜拉索的 空间姿态:斜拉索倾角θ;来流风向与斜拉索竖平面 的夹角β,称为风偏角;表述斜拉索与铝合金支架位 置关系的φ,定义如图11所示.为方便调整图11所 示斜拉索倾角θ和风偏角β,专门设计了测振支架系 统,如图12所示,支架固定在HD-2风洞高速试验段 的转盘上,通过转动转盘来调节风偏角β.

三维测振试验中,首先在试验风速9m/s下,0°~ 360°风偏角范围内,间隔2°测量了斜拉索的面内和 面外加速度,从而确定了发生振动的风偏角范围.试 验中倾角为26°,阻尼比为0.1%.在由工况2确定的 最不利的风偏角188°下,测量了在不同阻尼比 0.1%、0.4%、0.6%、0.8%和1.0%时,位移随风速的变 化,确定了临界驰振风速.测振试验工况参数设置详 见表3.



Fig.11 Angle definition of three-dimensional





图 12 节段模型测振系统试验照片 Fig.12 Photo of the support system in the test section

表 3 测振试验工况参数设置 Tab.3 Test cases in the vibration measurement

工况	$\theta/(^{\circ})$	$\alpha/(^{\circ})$	$\varphi/(°)$	β/ (°)	ζ/%	试验风速/ (m·s ⁻¹)
工况1	0	8	_	—	0.1	6~22
工况2	26	_	0	0~360, 2 (Δβ)	0.1	9
工况3	26	_	0	188	0.1, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0	6.5~33.5

3.2 二维测振试验结果

图 13 给出了最不利攻角 8°下,二维安装灯具斜 拉索的振动位移幅值随风速的变化规律.从图 13 可 知,在 8°攻角下,阻尼比为 0.1% 时驰振临界风速为 21.8 m/s(对应折减风速为 242).图 14 给出了驰振发 生时的斜拉索面内和面外振动时程,从图 14 中可以 看出,振动位移还有进一步增大的趋势.



wind velocity at attack angle 8°

3.3 三维测振试验结果

图 15 给出了斜拉索在倾角 26°、阻尼比 0.1%、试 验风速 9 m/s 下,发生驰振的风偏角范围.从图 15 中

可以看出,发生振动的风偏角范围为40°~56°、186°~ 196°;面内和面外都存在较大振动;在风偏角40°~ 56°范围内,面外位移幅值大于面内位移幅值;在风 偏角186°~196°范围内,面内位移大于面外位移;风 偏角 β =188°时,无量纲振幅最大为2.06.图16给出了 阻尼比为0.1%时、不同风偏角下模型振动幅值随折 减风速的变化. β =188°时,在折减风速53时起振(风 速4.7 m/s),远小于二维测振试验的驰振临界风速 (21.8 m/s); β =40°时,在折减风速67时起振(风速为 6.03 m/s). β =40°时,振动幅值随风速缓慢增大,但 β = 188°时,振动幅值在起振风速处急剧增大,这一差异 有待于进一步的研究.







图 17 给出了不同阻尼比时位移幅值随风速的 变化规律.从图 17 中可以看出,随着阻尼比的增大, 相同风速下的斜拉索振幅会大幅减小.当阻尼比低 于 0.8% 时,增大阻尼对驰振临界风速的提高作用有 限;当阻尼比增大到 1% 时,可有效抑制安装灯具斜 拉索的驰振.



Fig.17 Variation of displacement amplitude with reduced wind speed under different damping

4 结 论

以某座安装亮化灯具的斜拉索为研究对象,首 先采用二维节段模型测力试验,分析了安装的亮化 灯具对斜拉索上的静风荷载产生的影响,预测了发 生驰振的可能;然后,采用二维和三维测振试验,测 量了驰振临界风速,同时研究了增加阻尼对驰振的 抑制效果,试验结果表明:

1)斜拉索上安装亮化灯具后,阻力系数和升力 系数均有所增大,最大阻力系数为1.8,最大升力系 数为1.5,斜拉索上的风荷载最大可增大83%.表面 局部凸起点光源对斜拉索的气动特性影响较小.

2)对于三维斜拉索而言,发生振动的风偏角范 围为40°~56°、186°~196°.面内和面外振动都较大;ζ =0.1%时,在常遇风速4.7 m/s下,可发生驰振.超过 驰振临界风速后,随着风速的增加,振幅呈线性 增大.

3)从试验结果看,驰振临界风速和阻尼呈非线 性关系.当阻尼比小于0.6%时,增大阻尼对临界风 速的提高作用有限;阻尼比增大到1%时,整个测振 区间位移很小,能够抑制斜拉索的振动.

4) 安装亮化灯具后,会引起斜拉索的驰振,驰 振临界风速较低.虽然1%的阻尼比能够抑制斜拉索 的振动,但是抑制效果依赖于阻尼器的性能.建议在 安装亮化灯具前,进行专门的气动性能优化.

5)目前通过试验测得了驰振临界风速,并研究 了增加阻尼对安装亮化灯具斜拉索振动的抑制作 用.至于驰振发生机理及如何采用理论方法准确预 测驰振临界风速,还有待进一步研究.另外在试验

81

中,并未考虑分隔架及来流湍流的影响,还需要进一步研究.

参考文献

- [1] AN M, LI S Y, LIU Z W, et al. Galloping vibration of stay cable installed with a rectangular lamp: field observations and wind tunnel tests[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2021, 215: 104685.
- [2] LI S Y, CHEN Z Q, DONG G C, et al. Aerodynamic stability of stay cables incorporated with lamps: a case study [J]. Wind and Structures, 2014, 18(1): 83-101.
- [3] DENG Z Q, TANG H J, HU B, et al. Aerodynamic instability of stay cables with lighting fixtures [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2021, 25(7):2508-2521.
- [4] 周傲秋,余海燕,许福友.亮化灯具安装后斜拉索三维气动性 能试验研究[J].大连理工大学学报,2019,59(4):379-384.
 ZHOU A Q, YU H Y, XU F Y. Experimental study of aerodynamic performance of 3D stay cables with lighting lamp[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019, 59(4): 379-384. (In Chinese)
- [5] DEN HARTOG J P. Mechanical vibrations [M]. 4th ed. New York: McGraw-Hill Book Company, Inc, 1956.
- [6] MATSUMOTO M, YAGI T, HATSUDA H, et al. Dry galloping characteristics and its mechanism of inclined/yawed cables [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2010, 98(6):317-327.
- [7] CHABART O, LILIEN J L. Galloping of electrical lines in wind tunnel facilities [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998, 74/75/76:967-976.
- [8] PAÏDOUSSIS M P, PRICE S J, LANGRE E D. Fluid-structure interactions: cross-flow-induced instabilities [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2010.
- [9] ZUO D L, WU L, SMITH D A, et al. Experimental and analytical study of galloping of a slender tower [J]. Engineering Structures, 2017,132:44-60.
- [10] NGUYEN C H, FREDA A, SOLARI G, et al. Experimental investigation of the aeroelastic behavior of a complex prismatic element [J]. Wind and Structures, 2015, 20(5):683–699.
- [11] 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.

- [12] BEARMAN P W, GARTSHORE I S, MAULL D J, et al. Experiments on flow-induced vibration of a square-section cylinder [J]. Journal of Fluids and Structures, 1987, 1(1): 19–34.
- [13] CORLESS R M, PARKINSON G V. Mathematical modelling of the combined effects of vortex-induced vibration and galloping. Part II [J]. Journal of Fluids and Structures, 1993,7(8):825-848.
- [14] TAMURA Y. A mathematical model for the transverse oscillations of square cylinder[C]//Proceedings of the 1st International Conference on Flow Induced Vibrations, Bowness on Windermere, England. Berlin:Springer, 1987: 267-275.
- [15] GAO G Z, ZHU L D. Nonlinear mathematical model of unsteady galloping force on a rectangular 2 : 1 cylinder[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 70:47-71.
- [16] MANNINI C, MASSAI T, MARRA A M. Modeling the interference of vortex-induced vibration and galloping for a slender rectangular prism [J]. Journal of Sound & Vibration, 2018, 419: 493-509.
- [17] LI S Y, WU T, HUANG T, et al. Aerodynamic stability of iced stay cables on cable-stayed bridge [J]. Wind and Structures, 2016, 23 (3):253-273.
- [18] CHEN W L, ZHANG Q Q, LI H, et al. An experimental investigation on vortex induced vibration of a flexible inclined cable under a shear flow [J]. Journal of Fluids and Structures, 2015, 54: 297-311.
- [19] LIU Z W, SHEN J S, LI S Q, et al. Experimental study on highmode vortex-induced vibration of stay cable and its aerodynamic countermeasures[J]. Journal of Fluids and Structures, 2021, 100: 103195.
- [20] JING H Q, XIA Y, LI H, et al. Excitation mechanism of rain-wind induced cable vibration in a wind tunnel[J]. Journal of Fluids and Structures, 2017, 68: 32-47.
- [21] LI S Y, WU T, LI S K, et al. Numerical study on the mitigation of rain-wind induced vibrations of stay cables with dampers [J].
 Wind and Structures, 2016, 23(6):615-639.
- [22] 陈政清,雷旭,华旭刚,等.大跨度悬索桥吊索减振技术研究与应用[J]. 湖南大学学报(自然科学版),2016,43(1):1-10.
 CHEN Z Q, LEI X, HUA X G, et al. Research and application of vibration control method for hanger cables in long-span suspension bridge[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016,43(1):1-10.(In Chinese)