第59卷第4期
2019年7月

大连理工大学学报
Journal of Dalian University of Technology

Vol. 59, No. 4
July 2019

文章编号：1000-8608(2019)04-0379-06

亮化灯具安装后斜拉索三维气动性能试验研究

周傲秋， 余海燕， 许福友*

（大连理工大学 建设工程学部，辽宁 大连 116024）

摘要： 安装亮化灯具后，斜拉索的气动外形发生明显改变，可能诱发不稳定振动，从而威胁结构的安全，因此有必要对安装亮化灯具后斜拉索的气动性能进行研究. 以某大跨斜拉桥为研究背景，选取3种直径的斜拉索设计三维模型，通过风洞试验得到两种灯具安装方案的阻力系数、升力系数、Strouhal数和驰振系数，据此研究安装亮化灯具后斜拉索的驰振特性及旋涡脱落特点. 研究结果表明：由于方案一中铝槽的存在，发生驰振的概率较大；将灯具直接固定于拉索表面的方案二产生驰振的概率较低，但旋涡脱落强度与频率并无明显区别；风偏角对旋涡脱落频率与强度产生较大影响. 研究结果可为同类型工程提供参考.

关键词： 亮化灯具；斜拉索；气动参数；Strouhal数；驰振；旋涡脱落

中图分类号： U443.1　　**文献标识码：** A　　**doi：** 10.7511/dllgxb201904008

0 引 言

超长斜拉索属于柔性低阻尼构件，易发生涡激振动[1]、参数振动、风雨激振[2]以及驰振[3]. Den Hartog于1932年首次提出了横风向驰振理论[3]，揭示了驰振是发散的、不稳定的，是细长物体因气流作用发生的自激纯弯曲大幅振动. 李寿英等[4-5]对不同气动外形斜拉索的气动特性进行了风洞试验及数值模拟研究，研究结果表明：斜拉索在改变气动外形后，其气动特性会发生较大改变. 董国朝等[6]对安装亮化灯具斜拉索的振动响应进行了CFD研究，较好地解释了驰振力的形成过程. 王凯丽等[7]对多种气动外形斜拉索的气动特性进行了风洞试验，结果表明：风攻角及断面外形都对气动特性有较大影响. 但已往研究大多采用的是二维节段模型，难以真实模拟实桥的布置形态和风环境，试验结果相对来说精度不足，且较少关注改变斜拉索气动外形后的旋涡脱落特点与风偏角对驰振的影响.

本文以某大跨度斜拉桥为研究背景，选取3种直径的斜拉索，提出两种亮化灯具安装方案，且分别制作其三维刚性节段模型. 通过风洞试验，详细研究安装亮化灯具后斜拉索的气动特性.

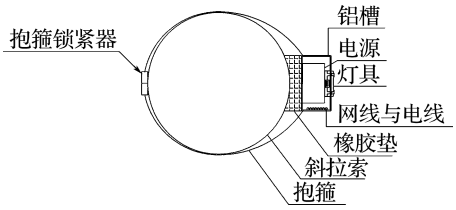
1 工程背景

某桥斜拉索长度(L)范围为107～325 m，斜拉索倾角(α)范围为28°～81°，斜拉索外径(D)分别为103、113、128、137、148 mm. 拉索缠绕螺旋线以降低斜拉索风雨激振，螺旋线为螺距1.4～1.9 m、截面宽5 mm、高2 mm的近似半圆.

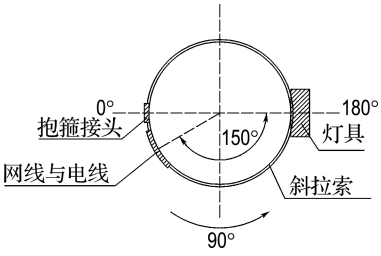
方案一如图1(a)所示，灯具、电源、电线及网线均安置在铝槽内，铝槽由304不锈钢抱箍固定于斜拉索上，抱箍间距为0.5 m，为便于固定铝槽和改善气动外形，铝槽与斜拉索之间设置橡胶垫.

方案二如图1(b)所示，LED灯直接安装于斜拉索180°位置，LED灯直径约5 cm，厚约2 cm，沿斜拉索轴向间距为37 cm，每个灯具上下各由2个抱箍固定于斜拉索上. 抱箍接头位置位于LED灯对侧(0°位置)，网线与电线并列平铺于抱箍接头旁. LED灯中心线与网线夹角为150°.

收稿日期： 2019-01-23；　**修回日期：** 2019-05-18.
基金项目： 国家自然科学基金资助项目(51678115).
作者简介： 周傲秋(1995-)，男，硕士生，E-mail：1326388802@mail.dlut.edu.cn；余海燕(1992-)，女，博士生，E-mail：yuhaiyan92@mail.dlut.edu.cn；许福友*(1976-)，男，博士，教授，博士生导师，E-mail：fuyouxu@hotmail.com.



(a) 方案一



(b) 方案二

图 1 亮化灯具安装示意图

Fig. 1 Installation sketch of lighting lamp

2 风洞试验

2.1 试验条件与模型

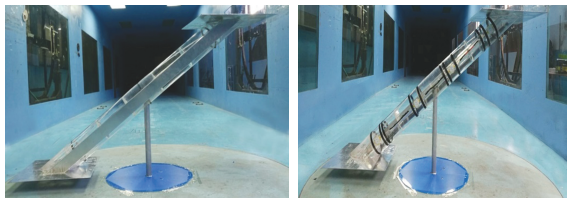
试验在大连理工大学风洞实验室(DUT-1)进行. 试验段长 18 m,横断面宽 3 m,高 2.5 m,空风洞最大设计风速 50 m/s,流场性能良好,试验区流场的速度不均匀性小于 1%、湍流度小于 0.2%、平均气流偏角小于 0.5°.

斜拉索静三分力系数测试试验在均匀流场中进行. 试验通过转动转盘改变风偏角. 模型支撑在位于风洞底板下、转盘机构上的日本 Nitta 公司生产的六分量应变天平(型号:IFS-75E20A-100I-125EX),作用在模型上的气动力由该六分量应变天平测量. 采样频率为 100 Hz,采样时间为 30 s. 斜拉索上、下端部设水平端板,以保证二元流动. 本试验不考虑雷诺数效应,因此测力试验风速仅选取 15 m/s.

模型缩尺比 $\lambda_L=1:1$,采用有机玻璃圆管模拟斜拉索气动外形,圆管尺寸分别为 $D=15$ cm, $L=150$ cm, $\alpha=30°$; $D=12.6$ cm, $L=150$ cm, $\alpha=45°$; $D=10$ cm, $L=125$ cm, $\alpha=74°$. 螺旋线采用有机玻璃板雕刻、打磨,然后粘贴在圆管表面. LED 灯及配套设施均与实桥一致, $D=15$ cm 斜拉索试验模型示意图如图 2 所示.

2.2 试验工况

方案一中考虑了更改橡胶垫高度 h 和是否封闭铝槽槽口的影响. 15 cm 直径斜拉索是所有斜拉索中刚度最小、阻风面积最大的斜拉索,故先以 15 cm 直径斜拉索为研究对象,分析方案一的可行性. 通过方案一($D=15$ cm、$h=2$ cm、不封槽)可知最不利风偏角 $\beta=155°\sim200°$. 在方案一后续的试验中集中分析该区域的驰振稳定性,在此范围内每 0.5°进行一次三分力测量,详细试验工况见表 1.



(a) 方案一 (b) 方案二

图 2 风洞中的斜拉索测力模型($D=15$ cm)

Fig. 2 Force measurement model of stay cable in wind tunnel ($D=15$ cm)

表 1 方案一试验工况

Tab. 1 Test cases of the first scheme

直径 D/cm	橡胶垫高度 h/cm	封槽	风偏角 β/(°)	风速 U/(m·s^{-1})
15	2	否	0～360	15
15	0、1、3	否	155～200	15
15	1、2、3	是	155～200	15

方案二中,3 种直径斜拉索均在 0°～360°范围内进行试验,试验间隔 2°,详细试验工况见表 2.

表 2 方案二试验工况

Tab. 2 Test cases of the second scheme

直径 D/cm	风偏角 β/(°)	风速 U/(m·s^{-1})
15	0～360	15
12.6	0～360	15
10	0～360	15

3 参数定义

(1)气动参数

风轴作用下的阻力系数和升力系数分别定义如下[8]:

$$C_d=\frac{2F_d}{\rho U^2 DL} \tag{1}$$

$$C_l=\frac{2F_l}{\rho U^2 DL} \tag{2}$$

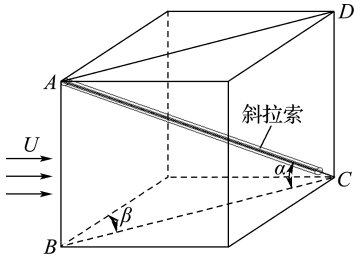
这里 F_d、F_l 分别为风轴作用下的平均阻力和平均升力. U 为试验风速,空气密度 $\rho=1.225$ kg/m^3.

(2)横向驰振原理[3]

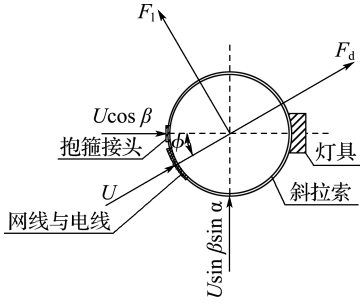
$$\frac{dC_f}{d\phi}=\frac{dC_l}{d\phi}+C_d \tag{3}$$

其中 $dC_f/d\phi$ 为驰振系数，ϕ 为攻角. 斜拉索与平均来流风速的相对关系如图 3(a)所示，其中 α 为斜拉索的倾角，β 为斜拉索的风偏角，$ABCD$ 形成的平面为拉索平面，平均来流风速为 U. 不考虑拉索在 $ABCD$ 面外的振动，可将来流风速 U 分解为拉索平面内分量 $U\sin\beta$ 和垂直于拉索平面的分量 $U\cos\beta$，在拉索平面内，风速分量 $U\sin\beta$ 又可以分解为垂直于拉索的分量 $U\sin\beta\sin\alpha$ 和沿拉索轴线方向的分量 $U\sin\beta\cos\alpha$. 忽略轴向流的影响，则拉索所受的有效来流风速如图 3(b)所示，其攻角 ϕ 可表示为

$$\phi=\arcsin\left(\frac{\sin\alpha\sin\beta}{\sqrt{\cos^2\beta+\sin^2\alpha\sin^2\beta}}\right) \tag{4}$$



(a) 侧视图



(b) 断面图

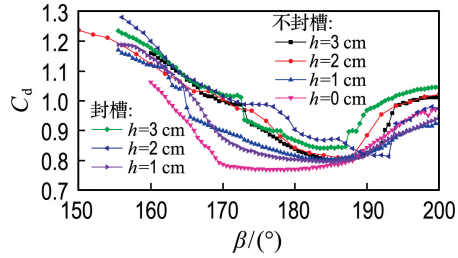
图 3　攻角定义

Fig. 3　Definition of attack angle

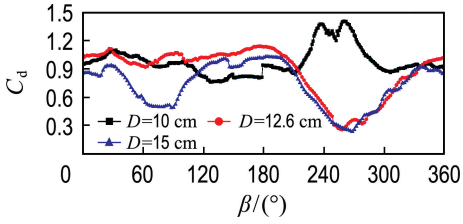
4　结果分析

4.1　阻力系数

图 4 给出了两种方案拉索安装灯具节段模型的阻力系数 C_d 随风偏角的变化关系. 从图中可以看出，两种方案的拉索和灯具节段模型的阻力系数随风偏角变化明显，方案一中阻力系数在试验区间内呈现先减小后增大的趋势，方案二在 0°～360°风偏角范围内有不同程度的突降区，尤其在 β=30°～90°与 β=210°～300°突降明显.



(a) 方案一



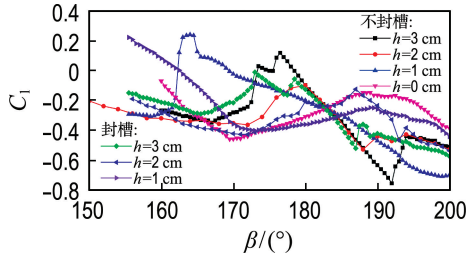
(b) 方案二

图 4　阻力系数

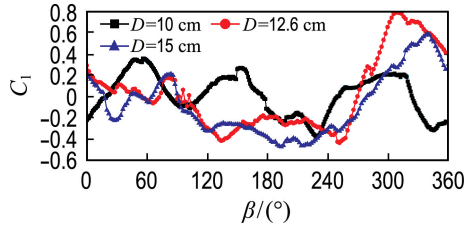
Fig. 4　Drag coefficient

4.2　升力系数

图 5 给出了两种方案拉索安装灯具节段模型的升力系数 C_l 随风偏角的变化关系. 从图中可以看出，方案一的升力系数随风偏角的变化不一，改变橡胶垫高度和封槽会影响升力系数的极值和升降位置及范围. 方案二的升力系数也没有规律变化，改变直径和倾角会影响升力系数的极值和升降位置及范围.



(a) 方案一



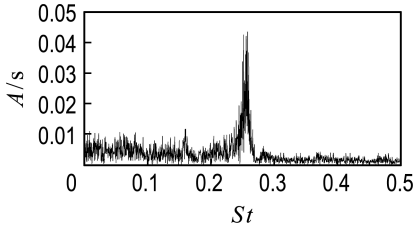
(b) 方案二

图 5　升力系数

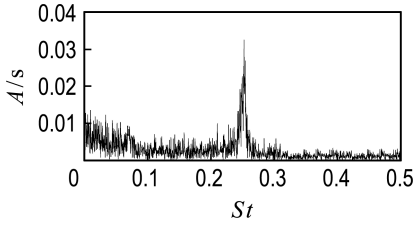
Fig. 5　Lift coefficient

4.3 脉动升力系数的功率谱

为了理解风偏角变化对圆柱体升力系数的影响，对模型的升力系数时程进行频域分析. 图 6 给出了 15 cm 直径斜拉索两种方案在 $\beta=2°$时的升力系数功率谱，从图中可以看出两种情况均存在明显的峰值，方案二的峰值比方案一的峰值偏小，初步判断为方案二的旋涡脱落频率比方案一偏小，而所对应的 St 均在 0.25 左右.



(a) 方案一



(b) 方案二

图 6 升力系数功率谱($D=15$ cm)

Fig. 6 Power spectrum of lift coefficient ($D=15$ cm)

图 7 给出了两种方案升力系数谱的 St 随风偏角的变化规律. 从图中可以看出，3 种直径斜拉索升力系数谱的 St 均呈规律性变化，10 cm 直径斜拉索峰值对应的 St 在 0.19 和 0.21 左右呈阶跃变化；12.6 cm 直径斜拉索峰值对应的 St 在 0.17 和 0.22 左右呈阶跃变化；15 cm 直径斜拉索峰值对应的 St 在 0.17 和 0.25 左右呈阶跃变化. 可以看出，随着风偏角的变化，升力系数谱的量纲一频率的能量分布也会随之变化，且能量集中的

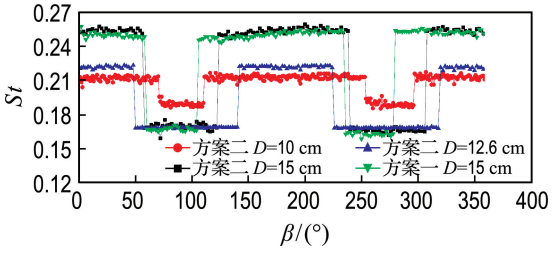


图 7 St 随风偏角的变化

Fig. 7 Strouhal number versus wind yaw angle

位置仅在两个点处呈规律波动. 通过对比 15 cm 直径斜拉索的两种灯具安装方案的 St 可知，方案二升力系数谱在低频位置的集中点相对较多，但波动幅度几乎一致；另外，随着模型直径减小，St 的波动幅度也逐渐减小. 综上可知，试验 St 在 0.16～0.25 变化，其结果与经典圆柱绕流的理论分析结果(0.2)及类似试验及数值模拟结果[7,9-10](0.16～0.23)基本吻合.

图 8 给出了两种方案升力系数谱峰值随风偏角的变化图，从图中可以看出，峰值 P 均在 0°～90°、180°～270°逐渐减小，90°～180°、270°～360°逐渐增大，即在 $\beta=0°$，180°处峰值能量最大，这两处分别为灯具正对来流方向和灯具背对来流方向；通过对比方案二 3 种直径斜拉索峰值可以看出，随着直径的变大，峰值能量随之减小，证明直径变化会对斜拉索的旋涡脱落强度产生较大影响，直径越大，旋涡脱落强度越小；通过对比 15 cm直径斜拉索的两种灯具安装方案的峰值可以看出，两种方案的升力系数谱峰值并无明显区别，即改变安装方案对旋涡脱落强度影响较小.

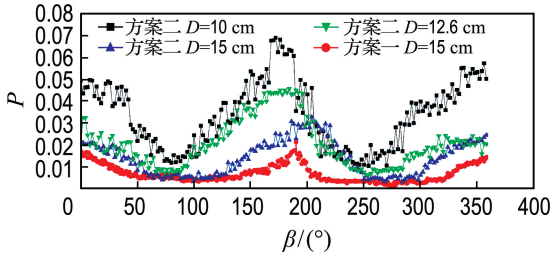


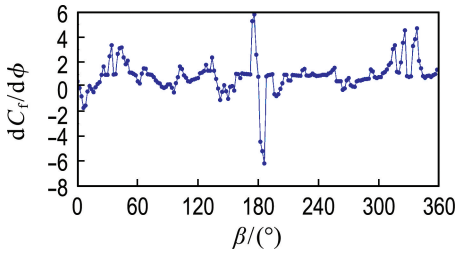
图 8 升力系数谱峰值随风偏角的变化

Fig. 8 Peak value of lift coefficient spectrum versus wind yaw angle

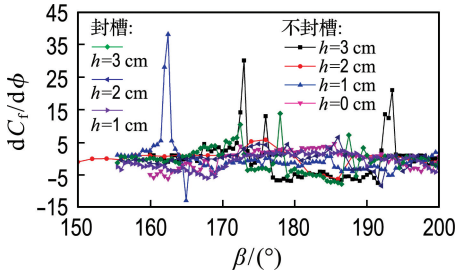
4.4 驰振系数

图 9 分别给出了方案一的理论最危险工况和风偏角加密的驰振系数随风偏角的变化关系，对应最不利驰振系数及其风偏角见表 3. 由图 9(a)可知，最不利的风偏角范围 $\beta=155°$～200°，由于此工况为理论最危险工况，故方案一的其余工况均只在此区间进行试验. 由图 9(b)、表 3 可知，即使方案一试验了开槽和不开槽两种方式，橡胶垫采用了 4 种不同高度，其驰振系数都在很宽风偏角范围为负值，且绝对值较大，因此发生驰振的概率较大.

图 10 给出了方案二的模型驰振系数随风偏角的变化关系，对应最不利驰振系数及其风偏



(a) 方案一(D=15 cm、h=2 cm、不封槽)



(b) 方案一加密(D=15 cm)

图 9　方案一的驰振系数

Fig. 9　Galloping coefficient of the first scheme

表 3　方案一最不利驰振系数及其对应的风偏角(D=15 cm)

Tab. 3　The smallest galloping coefficient of the first scheme and the corresponding wind yaw angle (D = 15 cm)

橡胶垫高度 h/cm	封槽	最不利驰振系数	对应的风偏角/(°)	负驰振系数对应的风偏角范围/(°)
3	否	−7.4	191.5	22
2	否	−6.2	186.0	46
1	否	−12.8	165.0	30
0	否	−6.2	162.5	15
3	是	−7.8	186.5	23
2	是	−8.3	192.0	19
1	是	−6.0	168.0	23

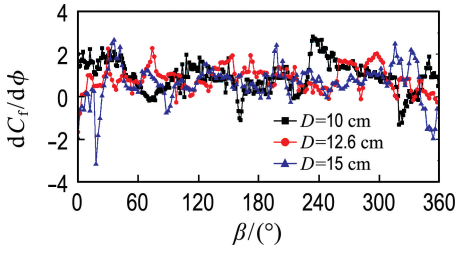


图 10　方案二的驰振系数

Fig. 10　Galloping coefficient of the second scheme

角见表 4. 结合图表可知，10 cm 斜拉索负驰振系数区间主要为 70°～77°、159°～164°和 320°～328°，且最小驰振系数为−1.3；12.6 cm 斜拉索负驰振系数区间主要为 358°～2°，且最小驰振系数为−1.7；15 cm 斜拉索负驰振系数区间主要为 342°～6°、18°～22°和 88°～92°，且最小驰振系数为−3.2. 根据 Den Hartog 提出的驰振发生必要条件可知，相对方案一，方案二的驰振系数小于零的风偏角范围较窄，且绝对值较小，发生驰振的概率较小，强度较低，在可接受范围内.

表 4　方案二最不利驰振系数及其对应的风偏角

Tab. 4　The smallest galloping coefficient of the second scheme and the corresponding wind yaw angle

斜拉索直径 D/cm	最不利驰振系数	对应的风偏角/(°)
15	−3.2	18
12.6	−1.7	0
10	−1.3	320

5　结　论

(1)风偏角变化会对不同直径斜拉索的旋涡脱落频率及强度产生不同的影响，但总体来说 St 均在 0.2 左右浮动，峰值能量在 β=0°，180°处最大，即分别在灯具正对来流方向和灯具背对来流方向时旋涡脱落强度最大，且直径越大，斜拉索的旋涡脱落强度随风偏角变化越敏感.

(2)改变断面外形不会对旋涡脱落强度产生较大影响，两种方案的旋涡脱落强度与频率并无明显区别.

(3)方案一驰振系数小于零的风偏角范围较宽，且绝对值较大，故发生驰振概率较大. 方案二驰振系数小于零的风偏角范围较窄，且绝对值较小，故发生驰振概率较小，建议采用.

参考文献：

[1] MATSUMOTO M, YAGI T, SHIGEMURA Y, *et al*. Vortex-induced cable vibration of cable-stayed bridges at high reduced wind velocity [J]. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, 2001, **89**(7/8): 633-647.

[2] 李　薇. 斜拉索风雨激振试验与数值模拟研究 [D]. 西安：长安大学，2012.
LI Wei. Wind-rain induced vibration test and numerical simulation of stay cables [D]. Xi′an: Chang′an University, 2012. (in Chinese)

[3] DEN HARTOG J P. Transmission line vibration due to sleet [J]. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, 1932, **51**(4): 1074-

1076.

[4] 李寿英,曾庆宇,温晓光,等. 斜拉索干索驰振机理的数值模拟与试验研究 [J]. 振动与冲击, 2017, **36**(11):100-105.
LI Shouying, ZENG Qingyu, WEN Xiaoguang, *et al*. Numerical simulations and tests for dry galloping mechanism of stay cables [J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2017, **36**(11):100-105. (in Chinese)

[5] 李寿英,陈政清. 斜拉桥拉索安装亮化灯具的风致稳定性研究 [J]. 工程力学, 2008(S1):94-98.
LI Shouying, CHEN Zhengqing. Aerodynamic stability of cables with lamps of cable-stayed bridge [J]. **Engineering Mechanics**, 2008(S1):94-98. (in Chinese)

[6] 董国朝,陈政清,罗建辉,等. 安装亮化灯具导致的斜拉桥拉索风致驰振流固耦合分析 [J]. 中国公路学报, 2012, **25**(1):67-75.
DONG Guochao, CHEN Zhengqing, LUO Jianhui, *et al*. Fluid-structure interaction analysis of wind-induced galloping cables with lamps of cable-stayed bridge [J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2012, **25**(1):67-75. (in Chinese)

[7] 王凯丽,谭冬梅,瞿伟廉,等. 两种典型覆冰斜拉索气动特性及驰振分析 [J]. 噪声与振动控制, 2017, **37**(4):126-131,149.
WANG Kaili, TAN Dongmei, QU Weilian, *et al*. Analysis of aerodynamic characteristics and galloping performance for two typical iced stay cables [J]. **Noise and Vibration Control**, 2017, **37**(4):126-131,149. (in Chinese)

[8] SIMIU E, SCANLAN R H. **Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design** [M]. 3rd ed. New York: John Wiley, 1996.

[9] 李寿英,钟 卫. 缠绕螺旋线斜拉索气动性能的试验研究 [J]. 土木工程学报, 2013(7):108-115.
LI Shouying, ZHONG Wei. Experimental study on the aerodynamic characteristics of stay cables with helical lines [J]. **China Civil Engineering Journal**, 2013(7):108-115. (in Chinese)

[10] ZHAO Ming, CHENG Liang, ZHOU Tongming. Direct numerical simulation of three-dimensional flow past a yawed circular cylinder of infinite length [J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2009, **25**(5):831-847.

Experimental study of aerodynamic performance of 3D stay cables with lighting lamp

ZHOU Aoqiu, YU Haiyan, XU Fuyou*

(Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: The aerodynamic shape of stay cable changes obviously after installing lighting lamp, which may induce unstable vibration and threaten the safety of structure. Therefore, it is necessary to study the aerodynamic performance of stay cable with lighting lamp. Based on the research background of a long-span cable-stayed bridge, the three-dimensional models of stay cables with three kinds of diameters are designed. Drag coefficient, lift coefficient, Strouhal number and galloping coefficient of two installation schemes are obtained by wind tunnel tests. Galloping performance and vortex shedding characteristics of stay cables with lighting lamp are studied. The results show that due to the existence of aluminum groove the first scheme has a higher probability of galloping; the second scheme, which fixes lamps directly on the surface of cables, has a lower probability of galloping, but there is no obvious difference in the intensity and frequency of vortex shedding. The wind yaw angle has a great influence on the frequency and intensity of vortex shedding. The results can provide reference for similar projects.

Key words: lighting lamp; stay cable; aerodynamic parameter; Strouhal number; galloping; vortex shedding