

文章编号: 1000-4750(2012)11-0257-09

水线-雷诺数效应-斜拉索振动关系的试验研究

刘庆宽, 王 毅, 郑云飞, 马文勇

(石家庄铁道大学风工程研究中心, 石家庄 050043)

摘 要: 通过对不同位置粘贴有水线的斜拉索模型进行测力和测振风洞试验, 分析了不同雷诺数下的阻力系数、升力系数和振幅等参数, 研究了水线影响雷诺数效应及通过影响雷诺数效应导致振动的机理, 研究结果表明: 水线能影响力系数随雷诺数的变化规律, 力系数的大小和变化规律与振动有着十分密切的关系; 在较低的水线位置, 随着雷诺数的上升, 伴随着阻力系数的减小, 升力系数大幅增大, 发生类似临界雷诺数的效应, 力系数随水线位置的变化规律导致驰振系数为负, 在这种情况下发生大幅振动, 用临界雷诺数效应和驰振均可解释; 在较高的雷诺数下, 伴随着阻力系数的减小, 升力系数大幅变化, 每个水线位置都发生了不同程度的振动, 该振动的机理可能与临界雷诺数效应导致的振动机理类似。

关键词: 斜拉索; 水线; 阻力系数; 升力系数; 风雨振; 驰振

中图分类号: U448.27; TU311.3 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2011.04.0227

EXPERIMENTAL STUDY ON THE RELATION OF WATER RIVULET-REYNOLDS NUMBER EFFECT-CABLE VIBRATION

LIU Qing-kuan, WANG Yi, ZHENG Yun-fei, MA Wen-yong

(Wind Engineering Research Center, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Taking drag coefficients, lift coefficients and vibration amplitudes in different Reynolds numbers as parameters, the influence of water rivulet on Reynolds number effect and mechanism of vibration caused by such influence were studied through force-measurement and vibration-measurement wind tunnel tests of stay-cable models with water rivulets attached in different positions. The study results show that the water rivulet has a great influence upon changing rules of force coefficients with different Reynolds numbers. The value and changing rule of force coefficients have a very close relationship with vibration. At low water rivulet positions, with the increase of Reynolds number, lift coefficient increases greatly and drag force coefficient decreases greatly, which is similar to critical Reynolds number effect. At the same time, galloping coefficient becomes minus due to the change of force coefficients. The large amplitude vibration under such circumstances can be explained by both the critical Reynolds number effect and galloping. In a high Reynolds number range, lift coefficient changes greatly along with the decrease of a drag coefficient and different amplitude vibrations happen for every water rivulet position. The mechanism of this vibration may be similar to that of the vibration induced by a critical Reynolds number effect.

Key words: stay-cables; water rivulet; drag force coefficient; lift force coefficient; rain-wind induced vibration; galloping

收稿日期: 2011-04-14; 修改日期: 2011-08-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(50878135); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-10-0130); 河北省自然科学基金项目(E2008000442); 河北省科技支撑计划项目(09215626D)

通讯作者: 刘庆宽(1971—), 男, 河北保定人, 教授, 博士, 从事桥梁与结构的风荷载、风致振动与控制研究(E-mail: lqk@stdu.edu.cn).

作者简介: 王 毅(1984—), 男, 河北景县人, 硕士生, 从事桥梁抗风方面的研究(E-mail: wangyiwts@126.com);

郑云飞(1985—), 男, 河北南和人, 硕士生, 从事桥梁抗风方面的研究(E-mail: 78397991@qq.com);

马文勇(1981—), 男, 陕西渭南人, 讲师, 博士, 从事结构抗风方面的研究(E-mail: ma@stdu.edu.cn).

风雨环境下斜拉索表面形成的水线被认为是斜拉索风雨振的关键因素之一。关于水线导致斜拉索发生大幅振动的机理,通过现场观测^[1-3]、风洞试验^[4-11]和计算分析^[12-13]等方法进行了研究,目前有水线驰振理论^[4,14]、高风速涡致振动理论^[5]、水线摆动理论^[6-7,9,15]等。通过人工降雨或粘贴人工水线的风洞试验或现场观测研究风雨振机理的过程中,发现在降雨量十分小(没有降雨或降雨已经停止)的情况下,斜拉索也可能发生大幅振动,现场观测^[1]、足尺模型观测^[2]、风洞试验^[16-18]等都有这方面的报道,据此进行的试验研究发现没有降雨时,在临界雷诺数区域,斜拉索会发生大幅振动,其振动机理与雷诺数效应有关^[19]。存在水线的情况下,斜拉索的雷诺数效应如何,其大幅振动是否与雷诺数效用有关,是值得深入研究的问题。

本文从雷诺数效应入手,通过对不同位置粘贴有水线的斜拉索模型进行测力和测振风洞试验,以不同雷诺数下的阻力系数、升力系数和振幅为参数,研究了水线影响雷诺数效应及通过影响雷诺数效应导致振动的机理,从一个新的角度分析了斜拉索风雨振的机理。

1 风洞试验

为了研究斜拉索的雷诺数效应和气动稳定性的关系,共进行了两大类的风洞试验:其一是两端固定刚性斜拉索模型的测力试验;其二是两端弹簧支撑刚性模型的测振试验。

试验对象分别是表面光滑、在不同圆心角位置处沿纵向贴有人工水线的斜拉索模型。模型的材质为有机玻璃,原型为表面光滑的圆柱,两端设置端板,由中间贯穿的刚性圆管通过测力天平或弹簧支撑在风洞两侧的支架上。测力试验模型端部固定在美国 ATI 公司 DELTA 系列六分量高频天平上,天平的另一侧固定连接在洞壁外面的固定支架上,试验时改变风速,利用高频天平记录各风速下模型受到的气动力时程;测振试验模型各端分别通过 4 条弹簧竖向悬挂支撑(与风向垂直)在洞壁外侧的固定支架上,模型可沿竖向振动,顺风向的位移利用细钢丝进行约束,试验时用激光位移计记录各风速下模型的振动位移时程。在无风状态下测得结构的阻尼比为 1.75‰(振幅为 20cm 时)。

人工水线是利用有机塑料加工而成,外形为圆弧形,粘贴在斜拉索的表面。水线的位置用角度 θ 表示,该角度是从前驻点到水线中心顺时针转过

的圆心角。斜拉索模型照片、水线形状和位置如图 1 所示。

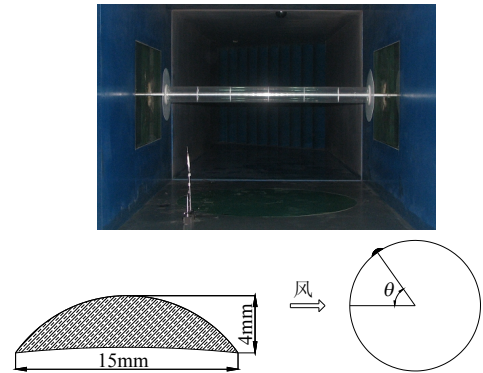


图 1 斜拉索模型、水线位置和形状

Fig.1 Cable model, water rivulet position and shape

试验在石家庄铁道大学风工程研究中心的双试验段回/直流大气边界层风洞的高速段内进行,该试验段宽 2.2m、高 2.0m、长 5.0m,最大风速大于 80.0m/s,背景湍流度 $I \leq 0.2\%$ 。试验时的流场为均匀流场(风洞背景流场)。

模型直径 $D=150\text{mm}$,质量 $m=7.125\text{kg/m}$,长度 $L=1.910\text{m}$ 。测力和测振模型的空间位置为:竖直倾斜角 $\alpha=0^\circ$,水平倾斜角 $\beta=0^\circ$,即斜拉索模型在水平面内,与来流风向垂直。

试验中的控制风速由安装在试验段入口的传感器与控制台组成的稳风速控制系统控制,需要的控制风速通过雷诺数算得。模型处的来流风速由澳大利亚 Turbulent Flow Instrumentation 公司生产的 4 孔眼镜蛇探头(4-hole Cobra Probe)测试,安装位置为模型中心上游 1.05m、下方 0.47m 处,采样频率 2000Hz,测力的采样时间 60s,测振的记录时间为整个振动观察的时间范围。

水线位置从 10° 开始,以 2.5° 步长增加到 70° 。这里为了从机理上进行研究,采用的水线位置比实际可能形成水线的位置范围要大。并且为了准确反应力系数的变化情况,针对各个模型的临界雷诺数区域分别加密了测试工况。试验工况如表 1 所示。

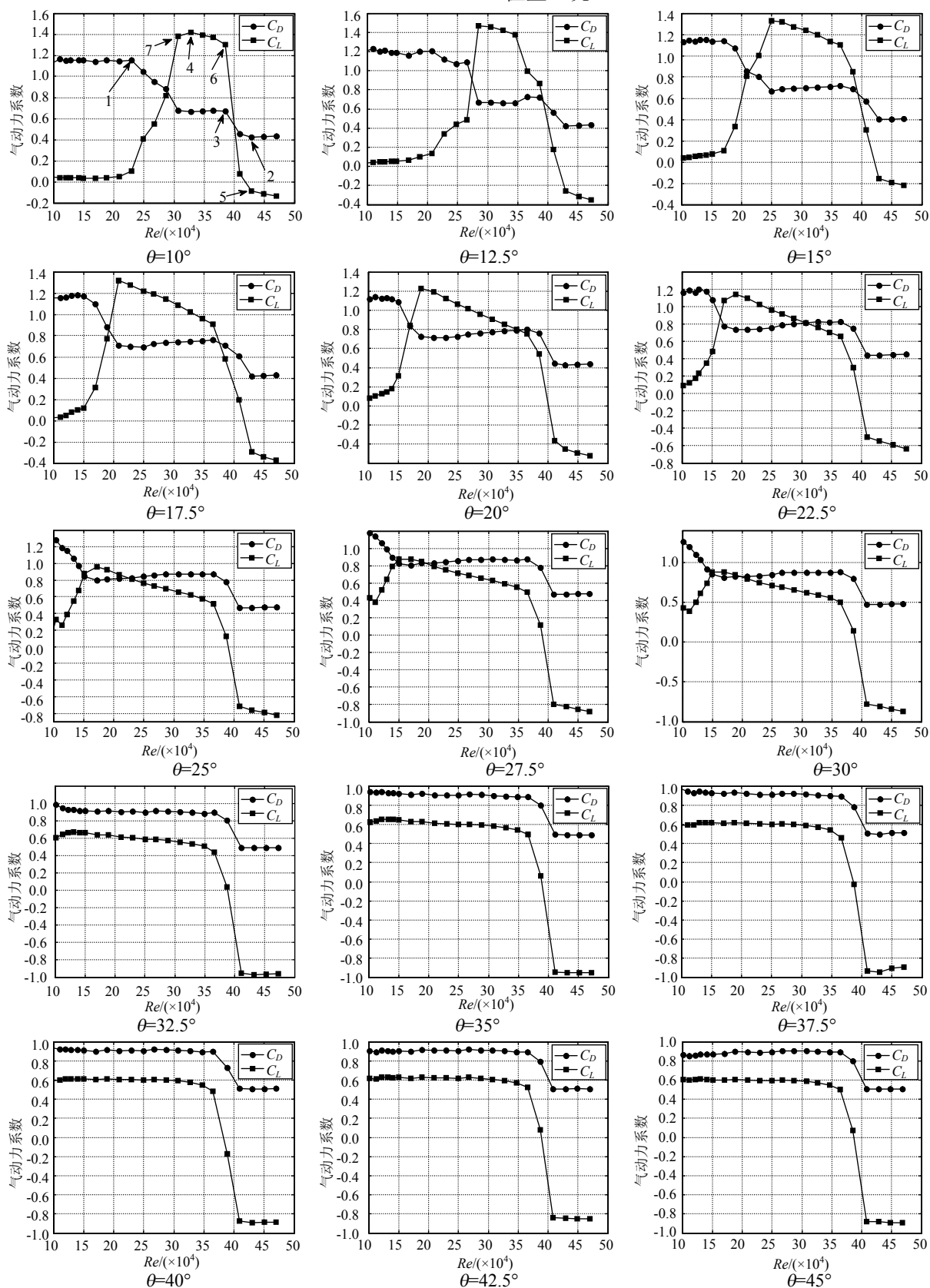
表 1 有水线模型(M4)测力和测振试验工况
Table 1 Test cases of force and vibration measurement of model (M4) with water rivulet

测力试验			测振试验		
水线位置 $\theta/^\circ$	Re 范围/ ($\times 10^4$)	Re 步长/ ($\times 10^4$)	水线位置 $\theta/^\circ$	Re 范围/ ($\times 10^4$)	Re 步长/ ($\times 10^4$)
10~70	8~15	1.0	10~50	8~15	1.0
				17~47	2.0
	17~47	2.0	52.5~70	8~21	1.0
				23~47	2.0

2 水线位置与雷诺数效应的关系

水线位置 $\theta=10^\circ\sim 70^\circ$ 各工况阻力系数、升力系数随雷诺数的变化如图2所示。

从阻力系数和升力系数随雷诺数的变化规律上,可以将图2中的结果分成两大类:第一类是从水线位置 $\theta=10^\circ$ 到 $\theta=30^\circ$;第二类是其后的各个水线位置工况。



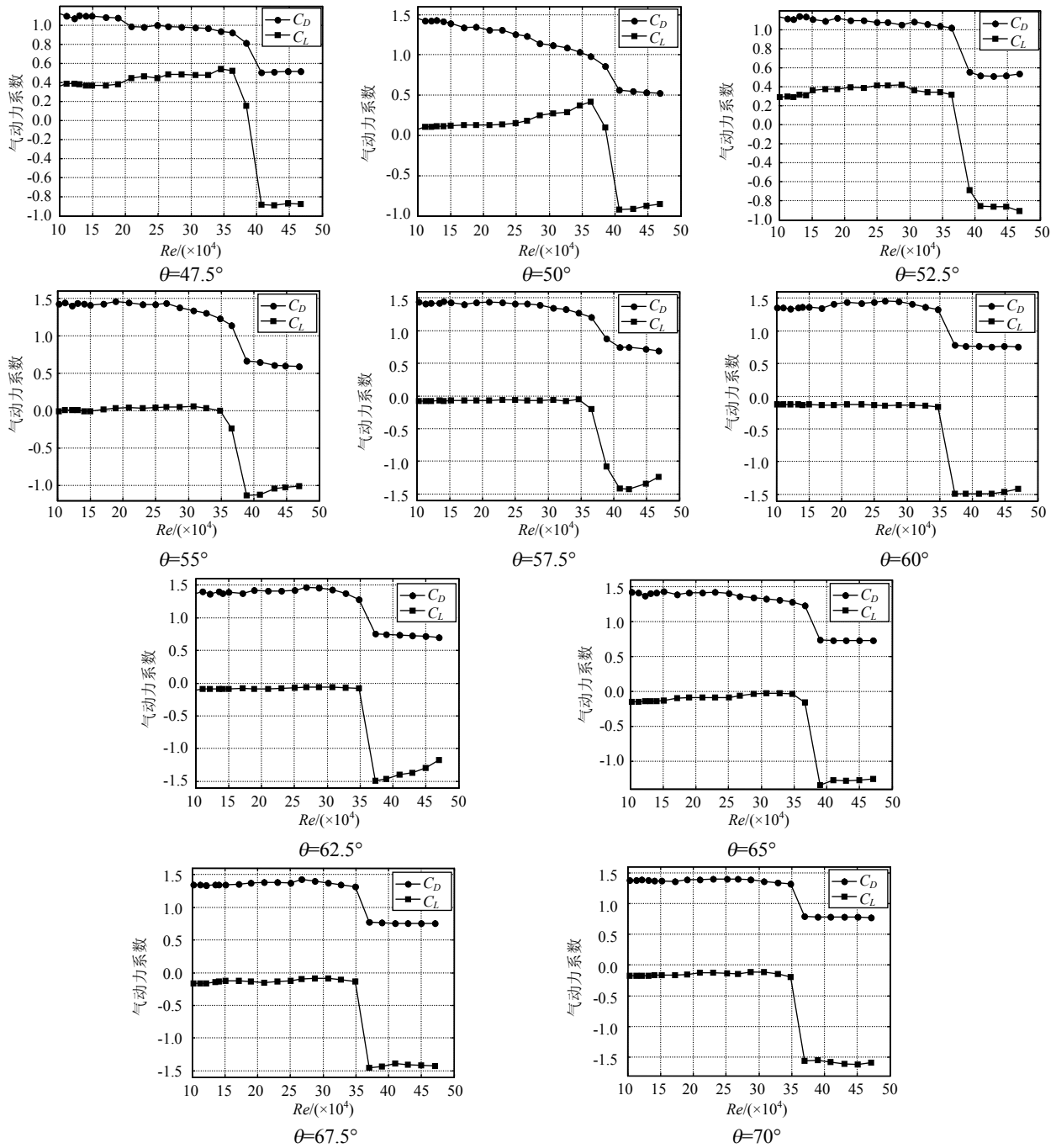


图2 各水线位置对应的阻力系数和升力系数

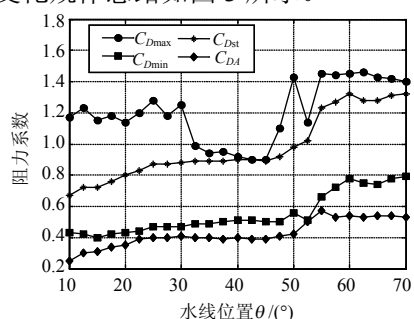
Fig.2 Drag and lift force coefficients of each water rivulet position

在第一类各工况中,阻力系数随雷诺数升高的变化规律为平稳-下降-平稳-下降-平稳,升力系数对应的变化规律为平稳-上升-平稳-下降-平稳。参考光滑表面圆柱体力系数的变化规律,可以判断2个力系数的第一个平稳段为亚临界雷诺数区域,随着阻力系数的下降和升力系数上升,进入临界雷诺数区域,阻力系数的下降-平稳-下降和升力系数的上升-平稳-下降为临界雷诺数区域,到最后2个力系数的平稳状态为超临界雷诺数区域。

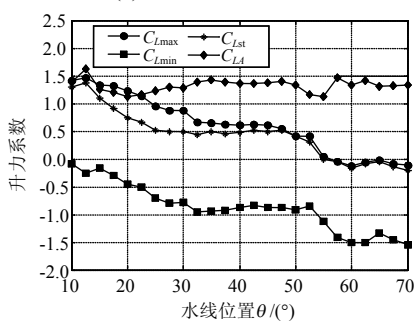
在第二类各工况中,从图示的雷诺数范围内,已经看不出2个力系数的第一个阶段(即阻力系数下降和升力系数上升),2个力系数均为平稳-下降-平稳的过程。平稳阶段和下降阶段是否可以视为临界雷诺数区域,还是将雷诺数 $Re=35 \times 10^4 \sim Re=40 \times 10^4$ 左右的2个力系数的下降阶段视为临界雷诺数区域,尚需要模型周围流场的测试和分析。

把各个工况下整个雷诺数范围内的最大阻力系数(C_{Dmax} ,如图2的 $\theta=10^\circ$ 中1点对应的阻力系数

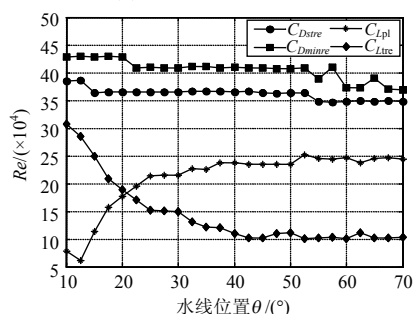
值)、最小阻力系数(C_{Dmin} , 2 点对应的阻力系数值)、阻力系数后一个下降阶段开始下降时的值(C_{Dst} , 3 点对应的阻力系数值)、阻力系数后一个下降阶段下降的幅度(C_{DA} , 3 点与 2 点的阻力系数差)、最大升力系数(C_{Lmax} , 4 点对应的升力系数值)、最小升力系数(C_{Lmin} , 5 点对应的升力系数值)、下降阶段开始下降时的值(C_{Lst} , 6 点对应的升力系数值)、升力系数后一个下降阶段下降的幅度(C_{LA} , 6 点与 5 点对应的升力系数差)、阻力系数后一个下降阶段开始下降时的雷诺数(C_{Dstre} , 3 点对应的雷诺数)、阻力系数取得最小值的雷诺数(C_{Dminre} , 2 点对应的雷诺数)、升力系数中间平稳段的雷诺数范围(C_{Lpl} , 6 点与 7 点对应的雷诺数差)、升力系数上升到最大后对应的雷诺数(C_{Ltre} , 7 点对应的雷诺数)等参数随水线位置的变化规律总结如图 3 所示。



(a) 阻力系数的参数



(b) 升力系数的参数



(c) 力系数变化点的雷诺数

图 3 力系数的参数随水线位置变化规律

Fig.3 Variation of force coefficient parameters with rivulet positions

综合图 2 和图 3 可以发现,水线位置变化能引起阻力系数和升力系数的较大变化,且每一个水线位置工况下力系数的大小及关键变化点参数都不同。

阻力系数的最大值 C_{Dmax} 在 $\theta=30^\circ$ 之前基本保持在 1.2 左右,同没有水线的工况基本一致;在 $\theta=32.5^\circ\sim45^\circ$ 之间均小于 1.0,在 $\theta=47.5^\circ\sim55^\circ$ 之间有波动,在 $\theta=55^\circ$ 之后基本在 1.4 左右。与阻力系数最大值相比,最小值 C_{Dmin} 在 $\theta=50^\circ$ 之前基本呈缓慢增长的趋势,在 $\theta=52.5^\circ$ 之后快速增大。阻力系数后一个下降阶段开始下降时的值 C_{Dst} 和该下降段的下降幅度 C_{DA} 变化规律类似,在 $\theta=25^\circ$ 之前缓慢增大,在 $\theta=25^\circ\sim47.5^\circ$ 之间基本保持不变,之后增大。

升力系数的最大值 C_{Lmax} 、最小值 C_{Lmin} 、下降阶段开始下降时的值 C_{Lst} 变化规律类似,在 $\theta=32.5^\circ$ 之前呈下降趋势,在 $\theta=32.5^\circ\sim47.5^\circ$ 之间基本保持不变,之后呈下降趋势至 $\theta=60^\circ$,之后基本保持不变。从 $\theta=40^\circ$ 开始,升力系数最大值 C_{Lmax} 与后一个下降阶段开始下降时的值 C_{Lst} 基本一致,即在高雷诺数区域升力系数下降前的值为最大值。在下降阶段下降的幅度 C_{LA} 随水线位置升高变化规律不明显,大部分水线位置下该下降幅度为 1.4 左右。

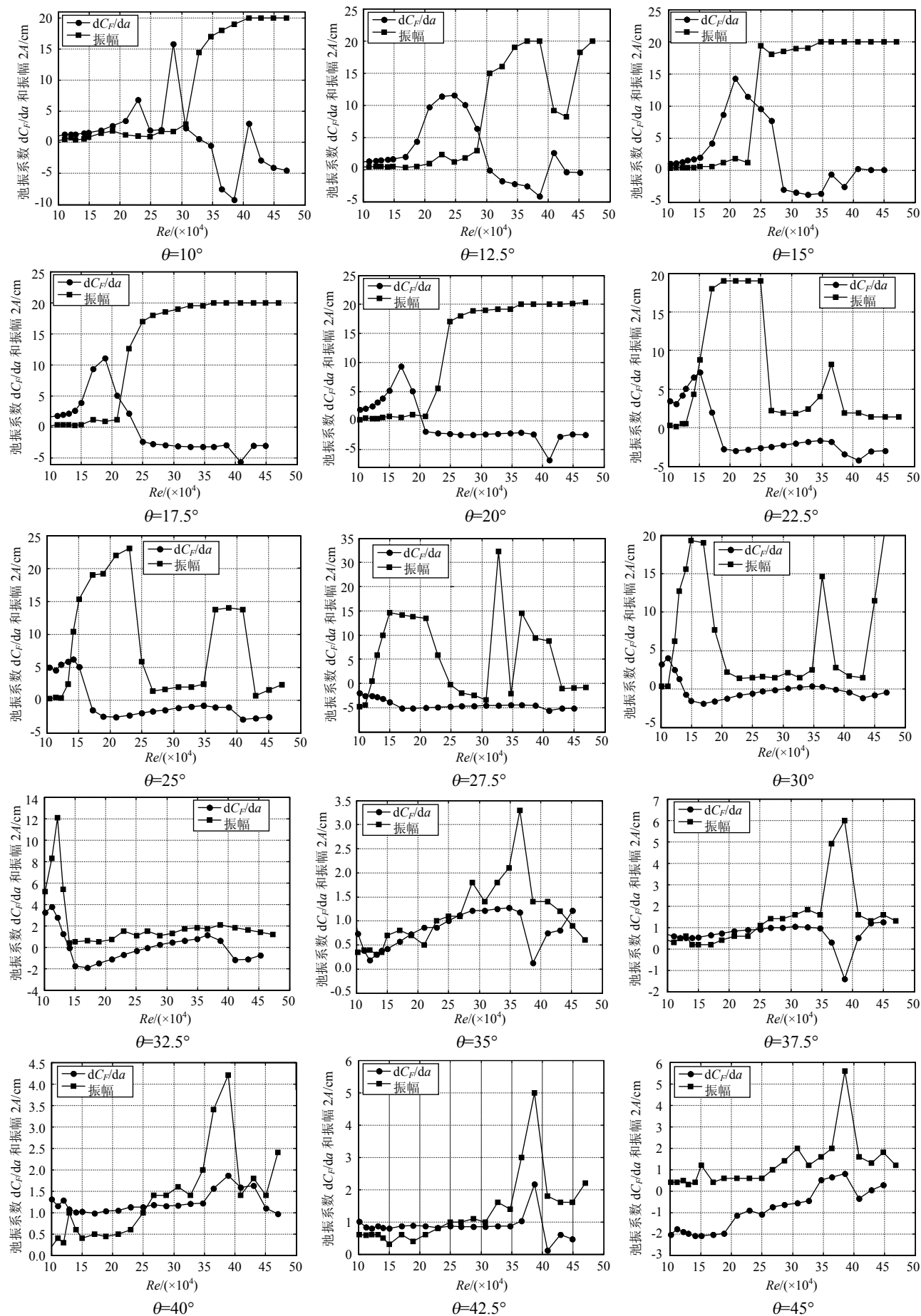
阻力系数后一个下降阶段开始下降时的雷诺数 C_{Dstre} 、阻力系数取得最小值的雷诺数 C_{Dminre} 呈基本类似平稳-下降-平稳-下降-平稳的变化规律,升力系数中间平稳段的雷诺数范围 C_{Lpl} 随水线位置的升高逐渐增大,到 $\theta=40^\circ$ 之后基本保持不变。升力系数上升至最大值时对应的雷诺数 C_{Ltre} 随水线位置升高逐渐减小,到 $\theta=40^\circ$ 时图 2 中的横坐标最小值已经不能反应出升力系数的上升,因此用横坐标中最小测点对应的雷诺数表示此值。

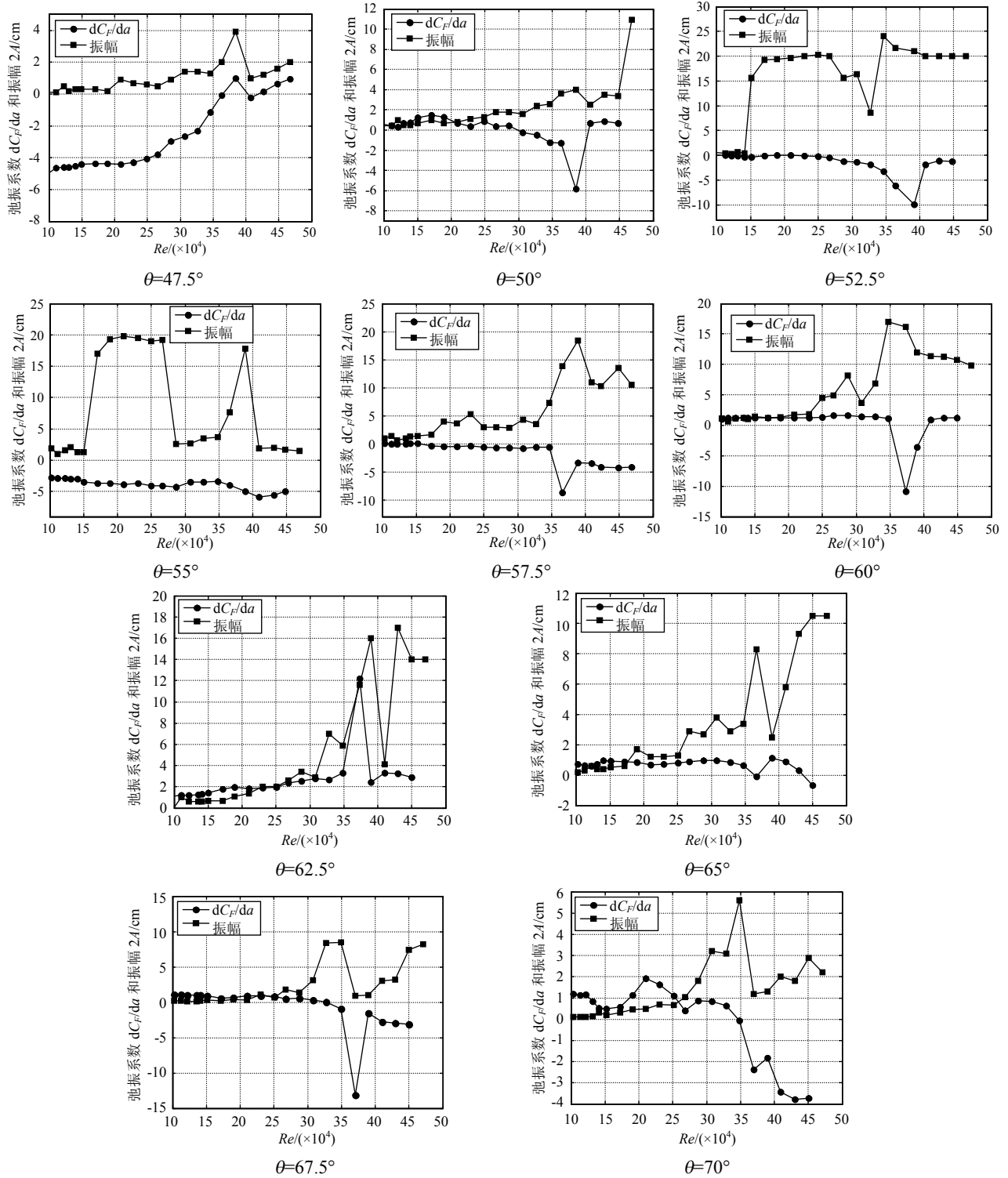
3 水线位置气动稳定性的关系

根据 Den Hartog 驰振理论,当驰振系数:

$$\frac{dC_F}{d\alpha} = \frac{dC_L}{d\alpha} + C_D \quad (1)$$

的值为负时,结构有可能发生驰振。根据第 2 节的分析可知,水线位置能明显改变力系数的大小和随雷诺数的变化趋势。特定的雷诺数和水线位置,有可能导致驰振系数为负。通过力系数计算出驰振系数的大小,并将自由振动试验测得的振幅同时比较,水线位置 $\theta=10^\circ\sim70^\circ$ 各工况的 Den Hartog 驰振系数和自由振动的振幅如图 4 所示。



图4 各水线位置对应的弛振系数 $dC_F/d\alpha$ 和振幅Fig.4 $dC_F/d\alpha$ and vibration amplitude of each water rivulet position

比较 $dC_F/d\alpha$ 的正负号和振动振幅可以发现, 振幅较大的区域, 基本对应 $dC_F/d\alpha$ 负值。但是 $dC_F/d\alpha$ 为负值并不直接导致大幅振动, 其中 $dC_F/d\alpha$ 为负值说明结构的气动阻尼为负, 只有气动阻尼与结构阻尼的总阻尼为负时, 结构才发生振动。

考察各水线位置振幅随雷诺数的变化规律, 可以发现以下几点特征:

1) 在 $\theta=10^\circ\sim 30^\circ$ 之间, 模型开始发生大幅振动的雷诺数, 与升力系数上升到最大值对应的雷诺数 (C_{Ltre} , 图 3(c)一致。例如, $\theta=10^\circ$ 工况 $Re=31\times 10^4$ 之后开始大幅振动, 该工况图 3(c)中 C_{Ltre} 的值约为

31×10^4 (对应图 2 中 $\theta=10^\circ$ 的 7 点); $\theta=15^\circ$ 工况 $Re=25 \times 10^4$ 之后开始大幅振动, 该工况图 3(c) 中 C_{Lre} 的值约为 25×10^4 。

2) $\theta=10^\circ \sim 20^\circ$ 时, 在低雷诺数时模型基本不振动, 达到一定雷诺数后, 模型开始振动, 一致持续到测试范围的雷诺数数值。

3) $\theta=22.5^\circ \sim 30^\circ$ 时, 分别在低雷诺数、高雷诺数两个区域发生振动。

4) $\theta=35^\circ \sim 50^\circ$ 、 $\theta=57.5^\circ \sim 70^\circ$ 时, 仅在 $Re=35 \times 10^4 \sim Re=40 \times 10^4$ 之间发生小振幅的振动。

5) $\theta=52.5^\circ \sim 55^\circ$ 时 分 别 在 $Re=17 \times 10^4 \sim Re=25 \times 10^4$ 、 $Re=35 \times 10^4 \sim Re=40 \times 10^4$ 的大范围雷诺数区域发生大幅振动。

在总结上述特征的基础上, 对照图 2 的力系数变化规律, 可以将上述振动分为三种类型:

第一种是当升力系数随雷诺数的升高突然增大到一个较大的值, 并随雷诺数的增大维持该值一定范围, 同时对应的阻力系数减小, 由于各水线在该雷诺数范围内升力系数、阻力系数的大小不同, 按照驰振判定准则, $dC_F / d\alpha$ 取得负值, 发生大幅振动。当雷诺数增大到一定数值, 力系数的变化使得 $dC_F / d\alpha$ 不再保持负值, 或虽然 $dC_F / d\alpha$ 保持负值但是由于结构阻尼等原因使得体系的阻尼不再为负, 振动消失 (例如 $\theta=30^\circ$ 时的 $Re=25 \times 10^4 \sim 35 \times 10^4$)。

由于在发生振动的雷诺数区域, 力系数的变化与无水线光滑圆柱的临界雷诺数区域的力系数变化规律类似, 可以用临界雷诺数效应导致的振动^[19]解释这种振动发生的原因; 同时由于 $dC_F / d\alpha$ 为负, 也可以用驰振解释, 关于确切的机理, 这里尚无法作出明确的判断。

第二种是大约在 $Re=35 \times 10^4 \sim 45 \times 10^4$ 之间, 对应图 3(c) 中的 C_{Dstre} 和 C_{Dminre} 的范围, 阻力系数大幅减小, 升力系数大幅变化, 与无水线的光滑表面圆柱体的临界雷诺数区域的力系数变化规律类似, 在这个雷诺数区域里, 无论 $dC_F / d\alpha$ 的值是否为负, 都发生了较明显的振动。这种振动的机理, 与文^[19]中提出的临界雷诺数区域发生振动的机理类似。

在较低的水线位置, 如 $\theta=10^\circ \sim 20^\circ$, 由于第一种振动发生雷诺数较高且持续的范围大, 与第二种振动连在了一起。在中等水线位置, 如 $\theta=22.5^\circ \sim 30^\circ$, 由于第一种振动发生雷诺数较低且持续的范围小, 与第二种振动是分开的, 有一段雷诺数区域没有振

动发生。在较高的水线位置 ($\theta=35^\circ$ 之后), 由于测试从雷诺数 10×10^4 左右开始, 无法判定第一种振动是否在雷诺数低于 10×10^4 的范围内发生, 图中只能发现第二种振动。

第三种是 $\theta=52.5^\circ$ 和 $\theta=55^\circ$ 两个工况, 在较大的范围内发生了大幅振动, 从图 3(a) 和图 3(b) 两幅图可以发现在这两个水线位置处, 力系数的变化较大, 具体的机理, 需要通过流场分析等进一步研究。

4 结论

本文从雷诺数效应入手, 研究了水线对雷诺数效应的影响, 以及水线影响斜拉索发生振动的机理, 从一个新的角度分析了斜拉索发生风雨振的原因, 得到了如下的结论:

(1) 水线能明显影响力系数随雷诺数的变化规律, 力系数的大小和变化规律与振动有着十分密切的关系。

(2) 在较低的水线位置, 随着雷诺数的上升, 伴随着阻力系数的减小, 升力系数大幅增大, 发生类似临界雷诺数的效应, 力系数随水线位置的变化规律导致驰振系数为负, 在这种情况下发生大幅振动, 用临界雷诺数效应和驰振均可解释。

(3) 在较高的雷诺数下, 伴随着阻力系数的减小, 升力系数大幅变化, 每个水线位置都发生了不同程度的振动, 该振动的机理可能与临界雷诺数效应导致的振动类似。

参考文献:

- [1] Irwin P A, Nedim A, Telang N. Wind induced stay cable vibrations-a case study [C]. Proceeding of the 3rd International Symposium on Cable Aerodynamics, Trondheim, 1999: 171-176.
- [2] Matsumoto M, Shirato H, Yagi T, Goto M, Sakai S, Ohya, J. Field observation of the full-scale wind-induced cable vibration [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003, 91(1/2): 13-26.
- [3] 陈政清, 柳成荫, 倪一清, 王修勇, 伏晓宁. 洞庭湖大桥拉索风雨激振中风场参数[J]. 铁道科学与工程学报, 2004, 1(1): 52-57.
Chen Zhengqing, Liu Chenyin, Ni Yiqing, Wang Xiuyong, Fu Xiaoning. Wind parameters in wind-rain induced stay cable vibration on Dongting Lake Bridge [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2004, 1(1): 52-57. (in Chinese)
- [4] Matsumoto M, Yagi T, Sakai S, Ohya J, Okada T. Steady wind force coefficients of inclined stay cables with water

- rivulet and their application to aerodynamics [J]. *Wind & Structures*, 2005, 8(2): 107—120.
- [5] Matsumoto M, Yagi T, Goto M, Sakai S. Rain-wind-induced vibration of inclined cables at limited high reduced wind velocity region [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2003, 91: 1—12.
- [6] Cosentino N, Flamaned O, Ceccoli C. Rain-wind-induced vibration of induced stay cables. Part I: Experimental investigation and physical explanation [J]. *Wind and Structure*, 2003, 6(6): 471—484.
- [7] Gu Ming, Du Xiaoqing. Experimental-investigation of rain-wind-induced vibration of cables in cable-stayed bridges and its mitigation [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2005, 93: 79—95.
- [8] 李永乐, 卢伟, 陶齐宇, 熊文斌. 斜拉桥拉索风-雨致振动特性风洞试验研究[J]. *实验流体力学*, 2007, 21(4): 36—40.
- Li Yongle, Lu Wei, Tao Qiyu, Xiong Wenbin. Study on rain-wind induced vibration of cables in cable-stayed bridges by wind tunnel test [J]. *Experiments and Measure in Fluid Mechanics*, 2007, 21(4): 36—40. (in Chinese)
- [9] 刘庆宽. 斜拉桥斜拉索风雨振时索表面水线摆动作用及规律的试验研究[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(7): 62—67.
- Liu Qingkuan. Experimental study on movement of water rivulet on cable surface in rain-wind induced vibration of stay-cables [J]. *China Civil Engineering Journal*. 2007, 40(7): 62—67. (in Chinese)
- [10] 陈文礼, 李惠, 李凤臣. 斜拉索风雨激振水线的超声波测试研究[J]. *地震工程与工程振动*, 2009, 29(1): 139—145.
- Chen Wenli, Li Hui, Li Fengchen. An ultrasonic transmission thickness measurement system for rivulet on the stay cable under rain-wind induced vibration [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*. 2009, 29(1): 139—145. (in Chinese)
- [11] 杜晓庆, 顾明, 全涌. 斜拉桥拉索风雨激振控制的试验研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(11): 1266—1269.
- Du Xiaoqing, Gu Ming, Quan Yong. Testing study on controlling rain-wind induced vibration of cables of cable-stayed bridges [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2003, 31(11): 1266—1269. (in Chinese)
- [12] 李寿英, 顾明, 陈政清. 运动水线三维连续弹性拉索风雨激振理论模型[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2009, 36(2): 1—7.
- Li Shouying, Gu Ming, Chen Zhengqing. An analytical model of rain-wind-induced vibration of three-dimensional continuous stay cable with actual moving rivulet [J]. *Journal of Hunan University (Natural Science)*, 2009, 36(2): 1—7. (in Chinese)
- [13] 刘庆宽. 用 LES 方法对斜拉桥斜拉索风雨振的机理的研究[J]. *工程力学*, 2007, 24(9): 134—139.
- Liu Qingkuan. Study on the mechanism of rain-wind induced vibration of cables on cable-stayed bridge using LES [J]. *Engineering Mechanics*, 2007, 24(9): 134—139. (in Chinese)
- [14] Hikami Y, Shiraishi N. Rain-wind induced vibrations of cables in cable stayed bridge [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1988, 29: 409—418.
- [15] 刘庆宽, 乔富贵, 张峰. 斜拉索表面水线多相复杂摆动对索气动稳定性的影响[J]. *工程力学*, 2008, 25(6): 234—240.
- Liu Qingkuan, Qiao Fugui, Zhang Feng. Effect of non-uniform rivulet movement on rain-wind induced vibration of stay-cables [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(6): 234—240. (in Chinese)
- [16] Miyata T, Yamada H, Hojo Y. Aerodynamic response of PE stay cables with pattern-indented surface [C]. *Proceedings of International Conference on Cable-Stayed and Suspension Bridges (AFPC)*, Deauville, France, 1994: 515—522.
- [17] Honda A, Yamanaka T, Fujiwara T, Saito T. Wind tunnel test on rain-induced vibration of the stay-cable [C]. *Proceedings of International Symposium on Cable Dynamics*, Liege, Belgium, 1995: 255—262.
- [18] Cheng S, Larose G L, Savage M G, Tanaka H, Irwin P A. Experimental study on the wind-induced vibration of a dry inclined cable—Part I: Phenomena [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(12): 2231—2253.
- [19] 刘庆宽, 张峰, 马文勇, 王毅. 斜拉索雷诺数效应与风致振动的试验研究[J]. *振动与冲击*, 2011, 30(12): 114—119.
- Liu Qingkuan, Zhang Feng, Ma Wenrong, Wang Yi. Experimental study on reynolds number effect and wind-induced vibration of stay cables [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2011, 30(12): 114—119. (in Chinese)