

串列双索气弹模型的风洞试验研究

胡建华^{1,2}, 赵跃宇², 刘慕广², 陈政清²

(1. 湖南省交通规划勘察设计院, 长沙 410008; 2. 湖南大学风工程试验研究中心, 长沙 410082)

摘要 为研究斜拉桥串列拉索或悬索桥无吊杆串列主缆在风荷载作用下的相互干扰情况, 通过自行设计的拉索试验装置, 对两串列拉索进行了一系列的气弹模型风洞试验. 试验得到索间距 W/D 在 5.85~20 变化 (W 为拉索中心距, D 为拉索直径), 风偏角在 $-90^\circ \sim 90^\circ$ 范围内变化时上下游索的一些响应特性. 试验观测到了明显的尾流驰振现象, 且试验结果表明索间距与风偏角的变化对串列拉索是否出现尾流驰振都有明显的影响. 在发生尾流驰振时, 以下游索面外的振动为主, 且其临界风速随索间距 W/D 变小而降低; 在同一索间距下, 0° 风偏角为最不利状态, 且负风偏角比正风偏角更容易发生尾流驰振.

关键词 气弹模型, 风洞试验, 串列斜拉索, 相互干扰, 尾流驰振

引言

随着新技术与新材料的应用, 大跨度悬索桥与斜拉桥以其施工简便、造价经济和外形美观等优势得到了极大的发展. 随着跨径的增大, 风荷载已成为大跨桥梁的主要荷载之一. 拉索(主缆)作为斜拉桥(悬索桥)的主要构件之一, 由于其质量轻, 阻尼小, 所以在风的激励作用下, 易发生各种不同形式的有害振动^[1,2]. 如日本 Hikami 观测到直径 14 cm 的拉索在 14 m/s 的风速下振幅峰峰值达到 55 cm^[3]. 法国的布鲁东桥、泰国的 Rama IX 桥、日本的名港西大桥拉索的振幅甚至达到相邻拉索发生碰撞的程度^[4].

拉索的振动会引起索的疲劳, 破坏索的防腐蚀系统, 严重的还会引起索的失效. 索的大幅振动还会使行人产生不舒适感. 拉索的尾流驰振就是风致振动的一种. 当两索沿风向斜串列时, 来流方向的下游拉索会发生比上游拉索更强烈的一种风致振动. 众所周知, 处在另一根索尾流区中的斜拉索的振动完全不同于单根拉索的振动. 这主要是由于在上游拉索的尾流区中存在一个不稳定驰振区, 如果下游拉索正好位于这一不稳定区中, 其振幅就会不断加大, 直至达到一个稳定的大振幅的极限环. 当两索相距较远, 超出不稳定区时, 就不会发生尾流驰振.

两相邻拉索间因相互干扰引起的气动失稳, 对

其不稳定区范围及其气动失稳的主要振动形式的研究, 已有若干相关或相似研究结果发表. 比如, D. Brika 与 A. Laneville^[5,6]通过试验研究了间距在 $10D \sim 25D$ 变化的双圆柱, 认为上游圆柱在整个试验过程中与单个圆柱的特性相差不大, 但下游圆柱却表现出比较复杂的特性; H. Sockel & J. Watzinger^[7]通过理论分析与试验对比, 对并列圆柱也进行了研究; S. Tokoro 等^[8]通过对并列拉索节段模型进行风洞试验(索间距 $4.3D \sim 8.7D$), 认为索间距 $8.7D$ 为一个安全距离; A. M. Lored-Souza 和 A. G. Davenport^[9]通过对拉索模型的风洞试验, 得到了与理论分析相一致的结果, 且得出拉索中的张力随距离的增大而减小, 随风速的降低而降低; 另外, T. Yoshimura^[10]对节段拉索模型也做过类似的研究, 其试验索间距仅为 $0 \sim 2D$. 总的来说, 以上的研究, 由于其试验模型一般为刚性节段拉索(圆柱)模型, 与实际的三维连续体系的拉索有较大差别. 例如, 斜拉桥两斜拉索间相互干扰问题(顺桥向两拉索也可近似看作串列), 自锚式悬索桥无吊杆端的两主缆干扰问题. 特别是自锚式悬索桥, 由于其主缆跨径大, 垂度效应明显, 通常的节段模型试验结果与实际差别较大, 三维的气弹模型试验能更好的模拟垂度效应. 所以, 有必要进行三维全气弹模型的试验, 研究其不稳定区间及其相应的失稳形式, 以对实际设计施工提供参考.

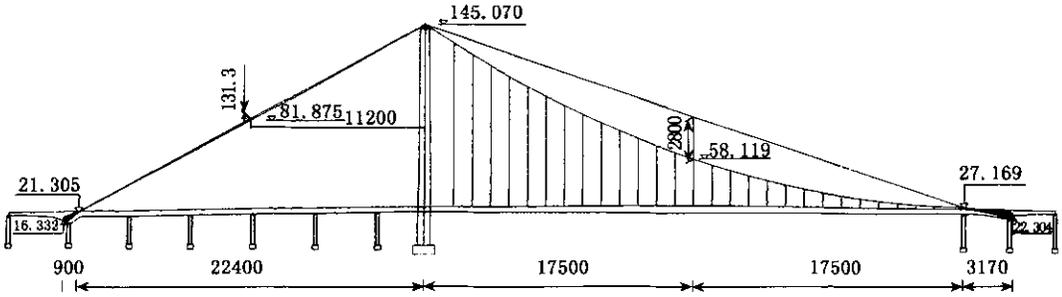


图1 平胜大桥总体布置图(单位: mm)

Fig. 1 General view of Pingsheng bridge (unit: mm)

本文以广东佛山市和顺至北 主干线工程中的平胜大桥无吊索两平行主缆为研究背景(图1),对两串列拉索气弹模型的风振特性进行了系统的研究.平胜大桥为独塔双桥面自锚式悬索桥,北端无吊杆主缆无应力长250.02 m,直径 $\varphi = 0.445$ m,由自重引起的垂度达1.31 m,且相邻两根主缆间的最小距离为5.5 m.(虽然悬索桥主缆的直径、跨度都比斜拉桥拉索大很多,但在试验中可以认为其对应模型的缩尺比不同).以此为研究对象,进行了大量的串列双索(缆)三维气弹模型试验,索间距 W/D 在(W 为两拉索中心距, D 为拉索直径)5.85~20变化,风偏角 β 在 $-90 \sim 90$ 度内变化(间隔为15度),试验工况见表1.

表1 串列拉索(主缆)试验工况

Table 1 Working conditions of tandem cables

spacing ratio W/D	wind yaw angle $\beta(^{\circ})$	spacing $(^{\circ})$	test wind velocity(m/s)
5.85	-90 ~ 90	15	
7.0	-90 ~ 90	15	
8.5	-90 ~ 90	15	
10.0	0	/	0 ~ 16 m/s
12.36(bridge)	-90 ~ 90	15	equal to bridge
14	0	/	0 ~ 146.64 m/s
17	0	/	
20	0	/	
one cable	-90 ~ 90	15	

1 试验介绍

1.1 气弹模型的设计与制作

为了研究两串列拉索(主缆)的特性,试验模型除保持几何相似外,还保持了惯性参数、弹性参数和重力参数的一致性.拉索试验的具体参数见表2所示.拉索模型是由一根直径 $\varphi = 0.5$ mm的弹簧钢丝附加模拟拉索外形与质量的钢圆柱块构成(圆柱块直径 $D = 5.3$ mm,长度 $L = 25$ mm),具体布置见图2.每根拉索模型包含109块圆柱块,为保证拉索模型的气动性能与质量连续分布的实际拉索相似,在两质量块振动时不相碰的前提下,尽量减小质量块间的间隔,两块质量块间的空隙取为2.8 mm.

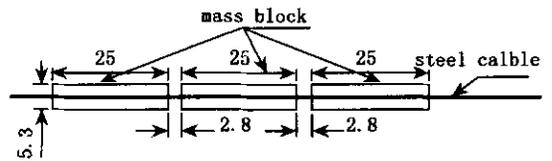


图2 圆柱块布置示意图(单位: mm)

Fig. 2 General view of cylindrical block (unit: mm)

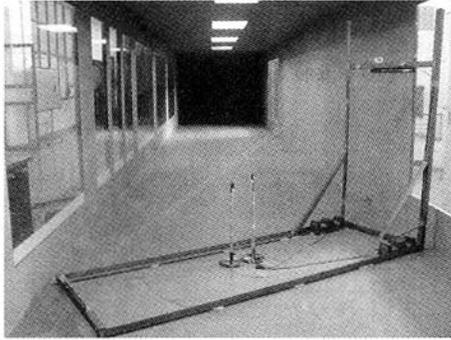
表2 拉索气弹模型参数($n = 84$)

Table 2 The parameters of cable aeroelastic modeling ($n = 84$)

parameters	bridge	similarity ratio	design model	actual model	error
length(m)	255.02	$1/n$	3.04	3.09	+ 1.64 %
diameter D (m)	0.445	$1/n$	0.0053	0.00536	+ 1.13 %
line density(Kg/m)	1026.38	$1/n^2$	0.1455(0.451 Kg/per)	(0.45 Kg/per)	- 0.22 %
cable tensor(N)	6.25×107	$1/n^3$	107.7	105.6	- 1.94 %
1 st frequency(Hz)	0.485	$n^{1/2}$	4.445	4.297	- 3.33 %
damping ratio ζ	—	1	—	0.0035	—

1.2 试验方法及装置

拉索(主缆)模型试验在湖南大学风工程试验研究中心 HD-2 风洞进行. 该风洞气动轮廓全长 53 m、宽 18 m, 为低速、单回流、并列双试验段的中型边界层风洞. 第一试验段(高速试验段)长 17 m, 模型试验区横截面宽 3 m、高 2.5 m, 试验段风速 0 ~ 58 m/s 连续可调. 第二试验段(低速试验段)长 15 m, 模型试验区横截面宽 5.5 m、高 4.4 m, 最大



照片 1 试验装置及拉索模型

Pic. 1 Experimental apparatus and cable model

风速 16 m/s. 拉索模型安装在风洞的高速试验段, 试验仅在均匀流场中进行. 试验模型安装在固定于高速段后转盘的支架上, 通过转盘转动, 来调整拉索模型的风偏角(逆时针为正, 且来流垂直于两拉索时为 0°, 桥塔端在上游时为 90° (见图 3)). 拉索模型的试验风速为 0 ~ 16 m/s, 相应的 $Re = UD/\nu$ 为 0 ~ 5600.

风速 16 m/s.

拉索模型安装在风洞的高速试验段, 试验仅在均匀流场中进行. 试验模型安装在固定于高速段后转盘的支架上, 通过转盘转动, 来调整拉索模型的风偏角(逆时针为正, 且来流垂直于两拉索时为 0°, 桥塔端在上游时为 90° (见图 3)). 拉索模型的试验风速为 0 ~ 16 m/s, 相应的 $Re = UD/\nu$ 为 0 ~ 5600.

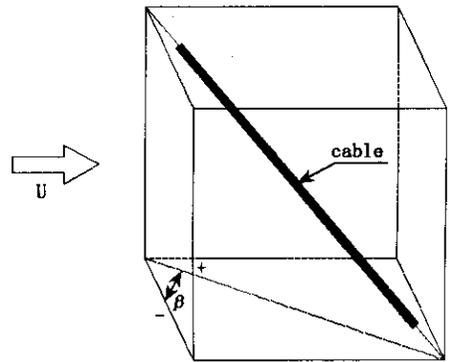


图 3 试验装置示意图

Fig. 3 General view of experimental apparatus

2 试验结果

试验中, 在每根拉索模型的中部, 分别安装了两个质量为 0.6 g 的微型加速度传感器, 来获取拉索随风速变化的面内面外加速度时程响应. 拉索的桥塔端相应的安装了两个力传感器, 来得到拉索张力随风速变化的情况.

试验中, 在每根拉索模型的中部, 分别安装了两个质量为 0.6 g 的微型加速度传感器, 来获取拉索随风速变化的面内面外加速度时程响应. 拉索的桥塔端相应的安装了两个力传感器, 来得到拉索张力随风速变化的情况.

2.1 索间距对拉索振动特性的影响

图 5 为索间距变化时(风偏角 $\beta = 0^\circ$), 上下游拉索随风速 U (实桥风速) 的变化, 拉索跨中处面内面外的加速度响应均方差 σ_a . 试验中, 索间距为 $W/D = 5.85$ 、 $W/D = 7$ 、 $W/D = 8.5$ 时, 拉索均出现了明显的一阶模态的尾流驰振; 且下游拉索首先起振, 然后带动上游拉索振动. 从图 5 中可以看出, 拉索驰振以下游拉索面外振动为主, 下游拉索面内振动及上游拉索面内、面外振动都不明显; 在试验风速段内, 随着拉索间距 W/D 的减小, 下游索发生尾流驰振的临界风速在逐渐降低.

索间距 $W/D > 8.5$ 时, 在试验段风速内, 没有出现尾流驰振现象; 当 $W/D = 8.5$ 时, 虽然在试验风速段内下游索出现了明显的尾流驰振现象, 但拉索驰振的临界风速 $U = 100$ m/s 左右, 实际中这已是一个很高的风速, 可以认为这一间距为一安全距离. 这与文献 [6] 中提到的 $W/D = 8.7$ 为一安全距离相当. 索间距为 $W/D = 7$ 时, 拉索发生尾流驰振的临界风速降低到 $U = 60$ m/s 左右, 并且当索

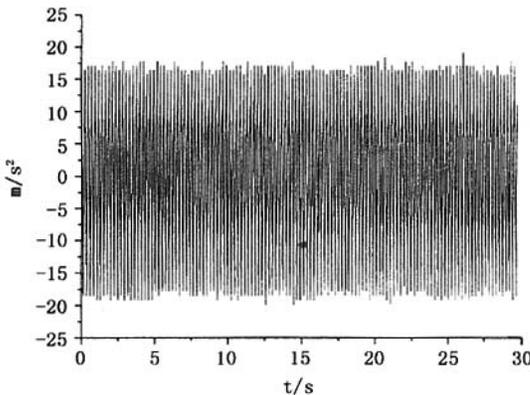
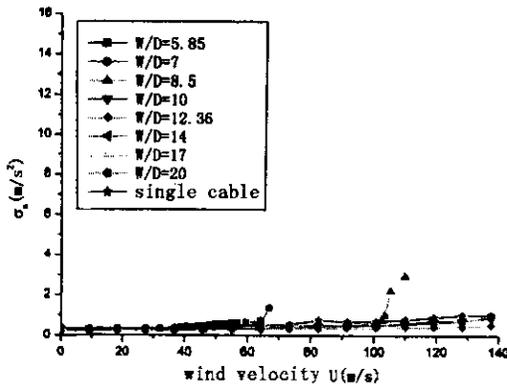


图 4 尾流驰振加速度过程

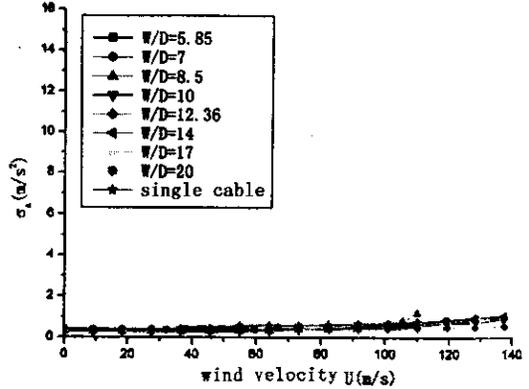
Fig. 4 Acceleration histogram of wake galloping

间距 $W/D = 5.85$ 时,下游索出现尾流驰振的临界风速仅在 $U = 36 \text{ m/s}$ 左右,这一临界风速已基本

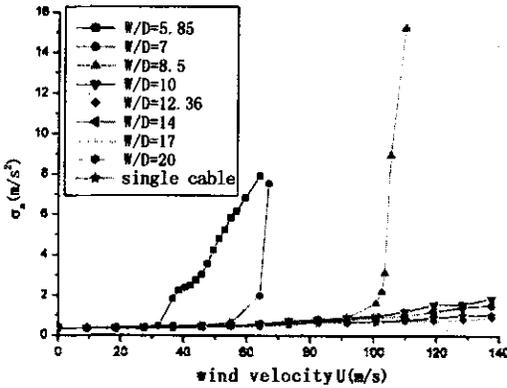
不能满足大跨桥梁的安全要求.



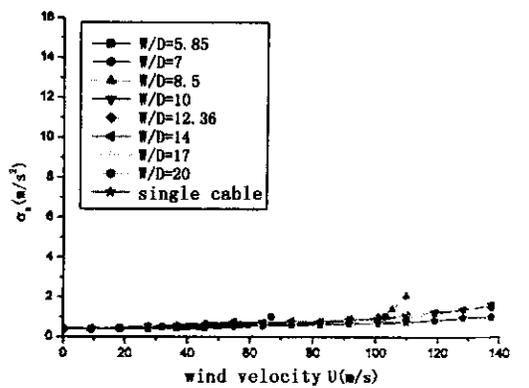
(a) 上游索面外 (a) Out-plane response of upstream cable



(b) 上游索面内 (b) In-plane response of upstream cable



(c) 下游索面外 (c) Out-plane response of downstream cable



(d) 下游索面内 (d) In-plane response of downstream cable

图5 索间距变化时上下游索跨中响应均方差

Fig.5 Upstream and downstream cables response mean square difference of Variable W/D

另外,在图5中可以看出,上游拉索跨中处的面内面外振动都不明显,只是在下游索发生尾流驰振的情形下,随着下游索振动的加剧,而跟随下游索产生小幅的振动.并且在下游索没有发生尾流驰

振的距离与风速区段内,上游索的响应跟单根拉索的响应很接近,可见两串列拉索的相互干扰情形,只对处在上游索尾流区中的下游索有明显影响,而对上游索影响较小.

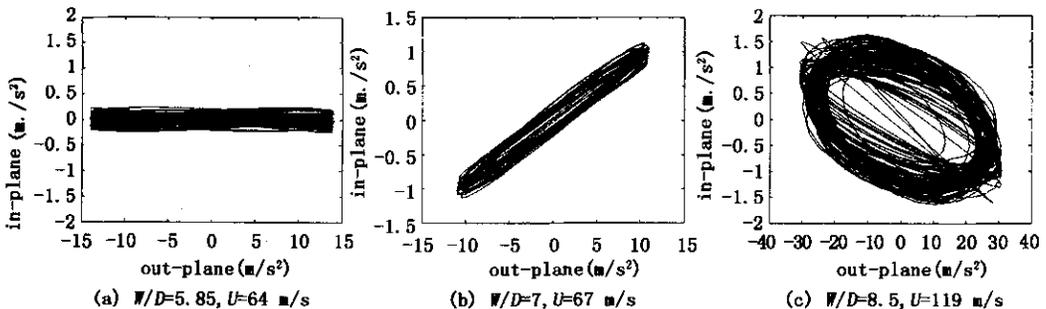


图6 下游拉索振动的轨迹图($\beta = 0^\circ$, U 为实桥风速)

Fig.6 Vibration orbit of downstream cable ($\beta = 0^\circ$, U is wind velocity)

图6为索间距 $W/D = 5.85$ 、 $W/D = 7$ 、 $W/D = 8.5$ (风偏角 $\beta = 0^\circ$, U 为实桥风速),发生尾流

弛振时下游拉索的加速度轨迹图. 从图中也可以看出, 拉索的面外振动远大于拉索面内的振动; 且随着索间距 W/D 的减小, 拉索振动的椭圆轨迹包络面逐渐收缩, 形成单一方向的振动轨迹.

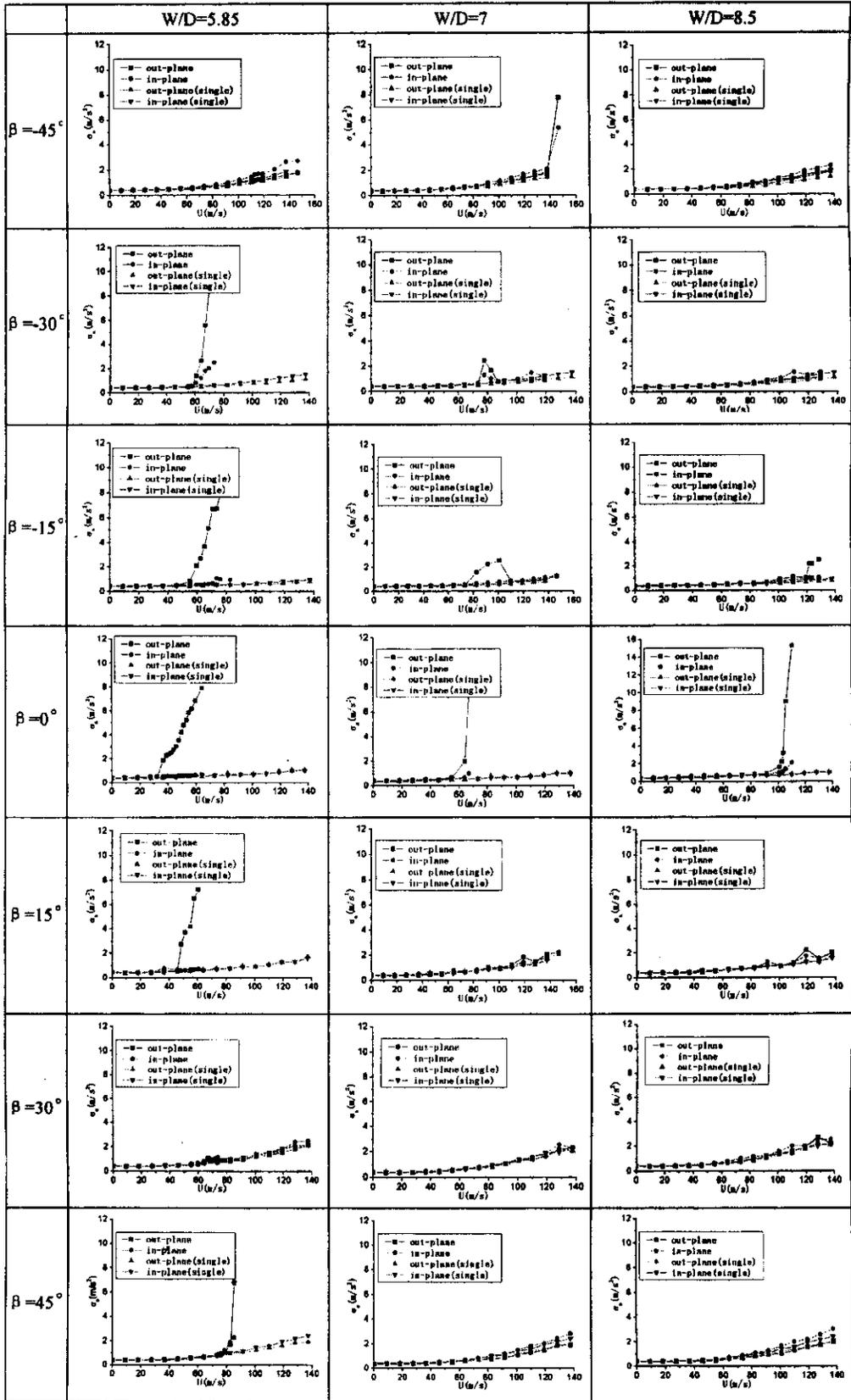


图 7 风偏角变化时下游索跨中响应

Fig. 7 Downstream cables response of variable wind yaw angle

2.2 风偏角对拉索振动特性的影响

图7绘出了索间距 $W/D = 5.85$ 、 $W/D = 7$ 、 $W/D = 8.5$ 三种距离下,拉索中部的加速度均方差特性随风偏角的变化情形(图中 U 为实桥风速).图7中相应的绘出了单根拉索随风偏角变化时的加速度均方差特性.基于上游索的振动不明显,及下游索在风偏角 $\beta > \pm 45^\circ$ 时振动轻微,所以图中仅绘出下游拉索在 $\beta \in [-45^\circ, +45^\circ]$ 时随风偏角变化时的数据.试验中随着风偏角的变化,不仅出现了明显的一阶驰振,而且在某些工况的较高风速也观测到了二阶驰振.从图7中可以看出,风偏角 $-45^\circ \sim 0^\circ$ 区间,在三种索间距下均不同程度的出现了尾流驰振,且随着风偏角的增加,发生尾流驰振的临界风速在降低,在 $\beta = 0^\circ$ 时达到极小值;在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 区间, $W/D = 7$, $W/D = 8.5$ 两索间距下,正风偏角没有出现尾流驰振,而在索间距 $W/D = 5.85$ 时,随风偏角的增加,出现了明显尾流驰振,且随着风偏角的增大,相应的临界风速在增加.由此可以看出,在相同的索间距下, $\beta = 0^\circ$ 为最不利的风偏角,即最容易产生尾流驰振.从

图中还可以看出,在同一风偏角下,随索间距的减小,下游索发生尾流驰振的临界风速也相应的降低,并且在不易发生尾流驰振的正偏角,在 $W/D = 5.85$ 也出现了明显的驰振现象.此外,试验中还观测到,在 $W/D = 7$, $\beta = -30^\circ$, $\beta = -15^\circ$; $W/D = 8.5$, $\beta = -30^\circ$ 工况中,在一个较低的风速区间内,会出现小幅的一阶驰振,随着风速的提高,其振幅达到最大值,但继续增加风速后,振动逐渐变小,最后趋于稳定.再相应的继续提高风速,拉索就出现了二阶驰振现象.

图8为随风偏角改变时下游拉索运动轨迹图($W/D = 5.85$, U 为实桥风速).从图中可以看出,风偏角的变化明显影响下游拉索的运动形式.风偏角 $\beta = 0^\circ$ 时(图6a),下游拉索基本平行于风速方向振动;正风偏角时,拉索的振动主轴主要在二、四两个象限;在负风偏角时,随着风偏角的减小,拉索振动主轴与水平方向的夹角明显以逆时针方向转动变化,且负风偏角的振动主轴方向主要在一、三两个象限.

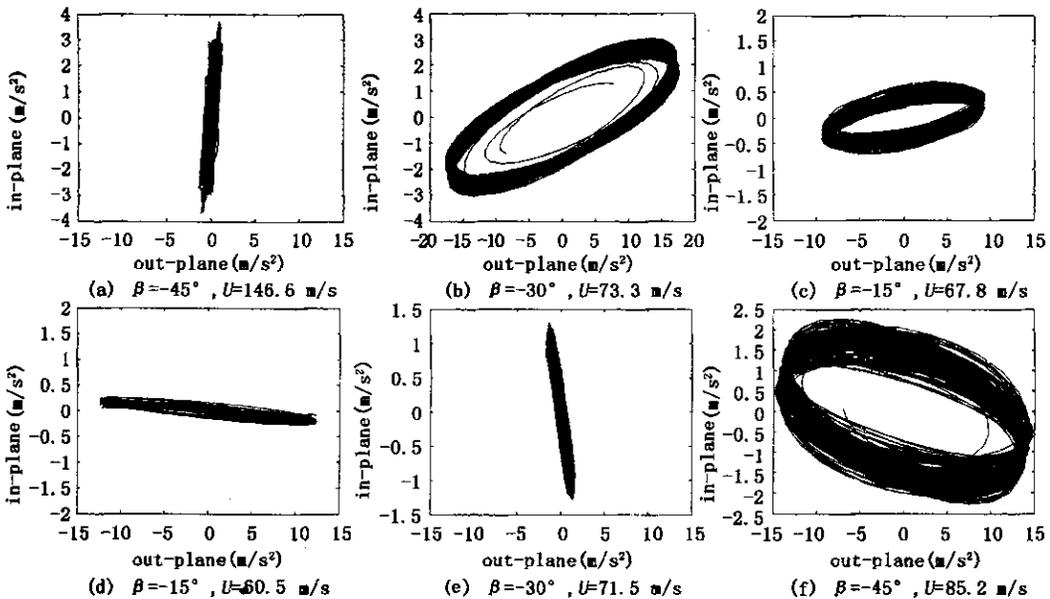


图8 风偏角改变时加速度轨迹的变化($W/D = 5.85$, U 为实桥风速)

Fig.8 Acceleration orbits of variable wind yaw angle($W/D = 5.85$, U is wind velocity)

2.3 拉索张力变化

表3为下游拉索发生尾流驰振时,拉索中张力变化的数据. F 为拉索发生尾流驰振时索中张力变

化的最大值(在试验风速范围内), F_c 为拉索初始张力.由表中可以看出,在试验段风速内,拉索张力没有明显的变化,只在 $W/D = 8.5$, $\beta = 0^\circ$, 风

速 $U = 110 \text{ m/s}$ 时, F/F_c 达到了 3.73 %.

表 3 拉索张力变化

Table 3 Variation of cable tension

spacing ratio W/D	wind yaw angl(degree)	wind velocity (m/s)	F/F_c (%)
$W/D = 5.85$	- 45	146.6	0.43
	- 30	73.3	1.00
	- 15	82.5	1.00
	0	64.2	0.72
	15	60.5	0.57
	30	128.3	1.00
$W/D = 7$	45	85.2	0.72
	- 45	146.6	1.58
	- 30	119.1	0.29
	- 15	146.6	0.97
$W/D = 8.5$	0	66.9	1.15
	- 30	128.3	0.57
	- 15	128.3	0.43
	0	110	3.73

3 结论

通过对拉索气弹模型进行的一系列风洞试验, 研究了串列拉索的相互干扰下的风振特性, 得到了一些有意义的结论:

1. 由于串列拉索的相互气动干扰, 下游索的振动明显强于上游索的振动, 且下游索面外振动幅值远大于面内振动幅值;

2. 试验中观测到, 下游索出现的尾流驰振中, 主要是一阶模态的振动, 且下游索出现一阶或二阶模态的振动时, 上游索会出现相应模态的振动形式;

3. 在 $W/D = 7$, $\beta = -30^\circ$, $\beta = -15^\circ$; $W/D = 8.5$, $\beta = -30^\circ$ 工况中, 拉索在一个较低风速区间内会出现一阶模态的尾流驰振, 但随风速的增加, 一阶驰振逐渐趋于稳定, 再继续提高风速, 拉索就会出现二阶模态的驰振现象;

4. 索间距的变化对下游索发生尾流驰振的临界风速有明显的影响, 下游拉索发生尾流驰振的临界风速随着索间距的减小而降低. 索间距 $W/D = 8.5$ 时, 可以认为是串列拉索的安全距离;

5. 风偏角的变化, 是影响串列拉索发生尾流驰振的另一个重要因素. 气流垂直于拉索即风偏角 $\beta = 0^\circ$ 时出现尾流驰振的风速最低, 是同一索间距下的最不利情形. 并且串列拉索在负风偏角比正

风偏角更容易发生尾流驰振;

6. 拉索发生尾流驰振时的拉索张力变化极小.

参 考 文 献

- 顾明, 刘慈军, 罗国强, 林志兴, 项海帆, 等. 斜拉桥拉索的风雨激振及控制. 上海力学, 1998, 19(4): 281~288 (Gu Ming, Liu Zhijun, Luo Guoqiang, Lin Zhixing, Xiang Haifan. Rain-wind Induced Vibration of Cable-stayed bridges and Its Control. *Shanghai Journal of Mechanics*, 1998, 19(4) 281~288 in Chinese))
- 覃虹. 斜拉索风致振动分析及抑振措施的研究现状. 工程结构, 2004, 24(1) 34~35 (Tan Hong. Current Study of Rain-wind Induced Vibration of Cable-stayed bridges analysis and Control measure. *Architectural Journal of Sichan* 2004 24(1) 34~35 in Chinese))
- Hikami Y. Rain vibrations of cables in cable-stayed bridge. *J of Wind Eng & Industr Aerody*, 1986, 27: 17~28
- 李国豪. 桥梁结构稳定与振动(修订版). 北京: 中国铁道出版社, 1996 (LI Guohao. Stability and Vibration of Bridge Structures. Beijing: China Railway Publishing House, 1996 in Chinese))
- Brika D, Laneville A. Wake interference between two circular cylinders. *J of Wind Eng & Industr Aerody*, 1997, 72: 61~70
- Brika D, Laneville A. Vortex-induced oscillation of two flexible circular cylinders coupled mechanically. *J of Wind Eng & Industr Aerody*, 1997, 69: 293~302
- Socket H, Watzinger J. Vibrations of two circular cylinders due to wing-excited interference effects. *J of Wind Eng & Industr Aerody*, 1998, 74: 1029~1036
- Tokoro S, Komatsu H, Nakasu M, Mizuguchi K, Kasuga A. A study on wake-galloping employing full aeroelastic twin cable model. *J of Wind Eng & Industr Aerody*, 2000, 88: 247~261
- Loredo-Souza AM, Davenport AG. Wind tunnel aeroelastic studies on the behaviour of two parallel cables. *J of Wind Eng & Industr Aerody*, 2002, 90: A07~414
- Yoshimura T, Savage MG, Tanaka H, Urano D. Wind-induced oscillations of groups of bridge stay-cables. *J of Wind Eng & Industr Aerody*, 1995, 54/55: 251~262

WIND TUNNEL STUDIES ON THE BEHAVIOUR OF AEROELASTIC TWIN CABLE MODEL

Hu Jianhua¹ Zhao Yaoyu² Liu Muguang² Chen Zhengqing²

(1. *Hunan provincial communications planning survey and design institute , Changsha 410082 ,China*)

(2. *China Wind engineering research center of the Hunan University , Changsha 410082 ,China*)

Abstract In order to investigate the wake interference of the stay-cables or the cables of suspension bridges without suspension rod , aerodynamic characteristic of two parallel cables were examined through a series of wind tunnel tests employing aeroelastic cable models. Cables with different spacing ratio W/D (where W is the spacing of centers of cables , D is the diameter of the cable) , varying from 5.85 to 20 , and different wind yaw angle β , changing from -90° to 90° , were tested at uniform flow . Consequently , obvious wake galloping was observed in the experiment , and the results indicated that there was an prominent influence for wake galloping with the change of spacing ratio and wind yaw angle. The critical wind of wake galloping reduced with decreasing values of the spacing between the cable , and the out-plane response of downstream cable was most dominant. The results also indicated that the yaw angle of 0° was the most disadvantage angle at same spacing , and it was easier for negative yaw angle to appear wake galloping than positive yaw angle.

Key words aeroelastic modeling , wind tunnel testing , tandem cables , mutual interference , wake galloping