

# 缆索承重桥并列索尾流致气弹失稳研究

杜晓庆<sup>1,2</sup> 吴葛菲<sup>1</sup> 林伟群<sup>1</sup> 代 钦<sup>2,3</sup>

(1. 上海大学土木工程系, 上海 200444; 2. 上海大学风工程和气动控制研究中心, 上海 200444;  
3. 上海大学上海市应用数学和力学研究所, 上海 200072)

**摘要:** 为了研究表面粗糙度和雷诺数对并列索尾流致气弹失稳的影响规律, 以圆心间距为  $4D$  ( $D$  为圆柱直径) 的双圆柱为研究对象, 通过风洞试验, 在风向角  $\alpha=0^\circ\sim 20^\circ$ 、雷诺数  $Re=18000\sim 168800$ , 研究下游圆柱发生尾流失稳的起振条件、振动幅度及运动轨迹等振动特性, 分析增大阻尼比对尾流失稳的减振效果, 探讨了圆柱表面粗糙度和雷诺数对尾流失稳的作用效应。研究表明, 下游圆柱在不同的风向角及风速条件下会出现尾流驰振和尾流颤振 2 种气弹失稳形式; 增大阻尼比对尾流驰振有明显的减振效果, 但对尾流颤振的影响较小。尾流致气弹失稳有明显的雷诺数效应, 随着雷诺数的增大, 下游圆柱的振动形式会由尾流驰振转变为尾流颤振。增加上游圆柱表面粗糙度对下游圆柱气弹失稳的影响较小; 而增大下游圆柱表面粗糙度, 则会明显降低下游圆柱出现尾流失稳的可能性, 并会使发散性振动转变为“限幅限速”振动。

**关键词:** 缆索承重桥; 并列索; 风洞试验; 气弹失稳; 粗糙圆柱; 雷诺数效应

**中图分类号:** U448.25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-131X(2020)08-0057-07

## Study on wake-induced aeroelastic instabilities of parallel cables in cable-supported bridges

Du Xiaoping<sup>1,2</sup> Wu Gefei<sup>1</sup> Lin Weiqun<sup>1</sup> Dai Qin<sup>2,3</sup>

(1. Department of Civil Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China;  
2. Aerodynamic Flow Control Research Center, Shanghai University, Shanghai 200444, China;  
3. Shanghai Institute of Applied Mathematics and Mechanics, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**Abstract:** To investigate the effects of the surface roughness and the Reynolds number on the wake-induced aeroelastic instabilities of parallel cables, two staggered circular cylinders with a center-to-center distance of 4 were studied by wind tunnel tests. The incidence angle  $\alpha$  varied from  $0^\circ$  to  $20^\circ$ , and the Reynolds number  $Re$  ranged from 18000 to 168800. The vibration conditions, maximum amplitudes, and vibration trajectories of the downstream cylinder were discussed. The effects of surface roughness, Reynolds numbers, and damping ratios on wake-induced instabilities were analyzed. The results show that two types of aeroelastic instabilities, namely, the wake-induced galloping and the wake-induced flutter, can be found; an increased damping ratio has an obvious suppression effect on wake-induced galloping but has little effect on wake-induced flutter. The Reynolds number effects are observed, differently with the transition from the wake-induced galloping to wake-induced flutter at certain conditions. Besides, the larger surface roughness of the upstream cylinder has limited influence on the wake-induced aeroelastic instabilities. While for larger surface roughness of the downstream cylinder, the possibilities for the wake-induced aeroelastic instabilities decrease obviously; the phenomenon of divergent aeroelastic instability transforms into a “limited-amplitude and limited-velocity” vibration.

**Keywords:** cable-supported bridge; parallel cables; wind tunnel test; aeroelastic instabilities; circular cylinder with a rough surface; Reynolds number effect

**E-mail:** dxq@shu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(51578330, 51978392)

作者简介: 杜晓庆, 博士, 教授

收稿日期: 2019-05-31

## 引 言

并列索在大跨缆索承重桥中广泛应用。当多根索邻近布置时,下游索在上游索尾流作用下易产生大幅振动,即出现尾流致气弹失稳现象<sup>[1-3]</sup>。Fujino 等<sup>[4]</sup>根据控制机理和振动特性的不同,将并列索的尾流致气弹失稳分为尾流驰振和尾流颤振;认为双圆柱间距  $P=1.5D\sim 6D$  时(其中  $P$  为双圆柱圆心间距,  $D$  为圆柱直径),下游圆柱会发生以横流向振动为主的单自由度尾流驰振,气动阻尼为负值;  $P=8D\sim 20D$  时,下游圆柱发生两自由度(横风向和顺风向)发散性振动,运动轨迹呈椭圆形,为气动负刚度驱动机制,并称之为尾流颤振。

以往学者通过风洞试验对下游圆柱的尾流致气弹失稳进行了不少研究。Tokoro 等<sup>[5]</sup>基于足尺气弹模型试验,分析了不同折减风速下尾流驰振的振动响应特性。Li 等<sup>[6]</sup>基于缩尺气弹模型试验,得到了尾流驰振的发生条件,并讨论了不同振动控制措施的抑振效果。Yagi 等<sup>[7]</sup>基于弹性悬挂双圆柱节段模型试验,根据双圆柱间的相对位置对尾流驰振和尾流颤振进行了分类,并从气动力的角度解释了尾流驰振及尾流颤振的控制机制。Du 等<sup>[8]</sup>基于双圆柱刚性节段模型,研究了来流风速、风向角和阻尼比等参数对尾流失稳的影响。吴其林等<sup>[9]</sup>采用强迫振动装置重现了尾流驰振,指出尾流驰振与双圆柱间的相对位置密切相关。Deng 等<sup>[10]</sup>采用风洞试验和非定常气动力理论对拉索的尾流驰振进行了分析,给出了下游圆柱的尾流失稳区间。陈政清等<sup>[11]</sup>通过环境激励法得出吊索动力特性,基于理论分析和风洞试验研究了分隔器的减振效果。

以往关于吊索气动干扰的研究主要集中于光滑圆柱,然而,在实际工程中桥索表面并不是完全光滑的。已有研究表明,表面粗糙度会影响圆柱边界层的转捩,粗糙圆柱的绕流场特性与光滑圆柱有明显差异<sup>[12-16]</sup>。Li 等<sup>[17]</sup>采用光滑双圆柱和表面呈螺旋状的粗糙双圆柱模型,研究了 2 种类型圆柱在不同间距布置下的气动性能及下游圆柱的振动响应特性,发现光滑圆柱失稳的可能性更大。Buresi<sup>[15]</sup>指出增大圆柱表面粗糙度会使单圆柱在较低雷诺数下进入临界和超临界状态。在临界和超临界状态,单圆柱剪切层的分离点会明显后移,导致圆柱尾流宽度变窄;而剪切层的湍流分离则会提高圆柱的尾流湍流度<sup>[16]</sup>。Wardlaw 等<sup>[18]</sup>研究也表明,绕流场的湍流度对圆柱的振动特性有很大影响。此外,静止双圆柱的气动性能也有明显的雷诺数效应<sup>[12-14]</sup>,但目前研究双圆柱尾流激振雷诺数效应的成果非常少, Tokoro 等<sup>[5]</sup>曾指出双圆柱的振动特性会受

到雷诺数的影响,但并未进行更深入的研究。

以往研究指出<sup>[12]</sup>,静止双圆柱的绕流流态和气动性能会在间距  $P=3.5D\sim 5.0D$  发生突变,绕流场由剪切层再附流态变为双涡脱流态,随之双圆柱的气动力也会发生突变。针对双圆柱尾流激振的研究<sup>[6-8]</sup>也表明,在该间距范围内下游索的振动特性复杂,存在不同机理的振动。此外,在实际工程中,桥梁并列索的间距也常布置在  $3.5D\sim 5D$ ,如厄勒海峡大桥(斜拉桥)的并列索间距为  $2.68D$ ,我国西堠门大桥(悬索桥)及矮寨大桥(悬索桥)的吊索间距分别为  $3.4D\sim 10D$  和  $4.8D\sim 9.6D$ 。

本文通过风洞试验,针对圆心间距为  $4D$ ( $D$  为圆柱直径)的光滑和粗糙双圆柱,研究了阻尼比、不同表面粗糙度布置形式及雷诺数对下游圆柱尾流致气弹失稳的影响规律。首先,在风向角  $\alpha=0^\circ\sim 20^\circ$  时,讨论了上、下游圆柱均光滑时,下游圆柱尾流失稳的振动特性随折减风速的变化情况;接着,研究了增大阻尼比对下游圆柱尾流失稳的影响;最后,分析了不同表面粗糙度布置形式对下游圆柱尾流失稳的影响规律,探讨了下游圆柱的雷诺数效应。

## 1 试验模型和试验装置

风洞试验采用有机玻璃制成的刚性圆柱节段模型模拟并列索,圆柱表面光滑或用砂纸包裹,用砂纸包裹的圆柱表面粗糙度  $K/D$ ( $K$  是圆柱表面粗糙源的平均高度)为  $0.234\%$ 。上游圆柱固定在支架上,下游圆柱采用 4 根相互垂直的弹簧支撑,可作横风向和顺风向振动。通过自由振动试验获得的位移时程曲线做功率谱分析,得出下游圆柱横风向和顺风向振动频率基本一致,均约为  $1.73\text{Hz}$ 。

两圆柱中心间距  $P$  为  $4D$ ,风向角  $\alpha$  为  $0^\circ$ 、 $5^\circ$ 、 $10^\circ$ 、 $15^\circ$  和  $20^\circ$ ,来流风速  $V=1.5\sim 14\text{m/s}$ ,折减风速  $V_r=V/fD=4.8\sim 44.9$ ( $V$  为来流风速,  $f$  为圆柱的自振频率),相应的雷诺数约为  $18000\sim 168800$ 。双圆柱不同粗糙度布置形式分别为上、下游圆柱均光滑(SS),上游圆柱光滑、下游圆柱粗糙(SR),上游圆柱粗糙、下游圆柱光滑(RS)及上、下游圆柱均粗糙(RR)4 种,试验示意图见图 1,试验参数见表 1。

为了获得较高的雷诺数,上、下游圆柱直径  $D$  均为  $0.180\text{m}$ 。为了减小上游圆柱端部效应对下游圆柱的影响,上游圆柱长  $1.260\text{m}$ ( $7D$ ),下游圆柱长  $1.088\text{m}$ ( $6D$ )。此外,为了模拟二维流,在上、下圆柱的两端均安装了直径为  $3D$  的圆形端板。计入试验支架和端板影响后,上游圆柱的面积阻塞率约为

11%，下游圆柱约为 10%。与两圆柱间强烈的流场干扰相比，阻塞率对流场影响较小<sup>[19]</sup>。

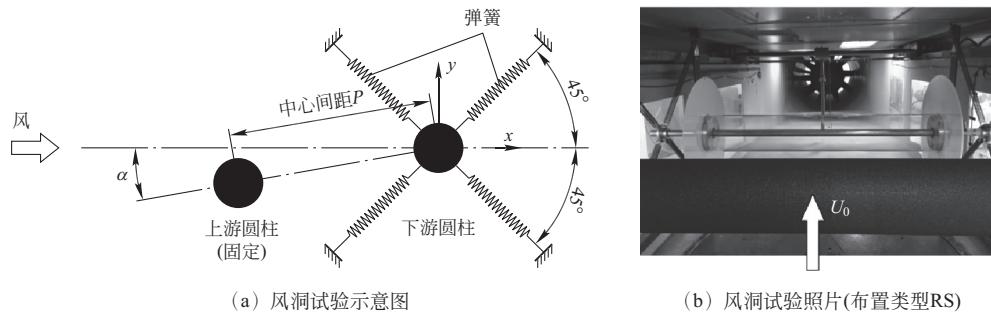


图 1 风洞试验示意图及风洞试验照片

Fig. 1 Schematic Diagram of the wind tunnel tests and parallel circular cylinders in wind tunnel

表 1 风洞试验相关参数

Table 1 Parameters of wind tunnel tests

试验参数	参数值
圆柱直径 $D$ (m)	0.180
下游圆柱质量 $m$ (kg/m)	12.6(光滑圆柱), 13.2(粗糙圆柱)
下游圆柱振动自由度	2(顺风向和横风向)
振动频率 (Hz)	$f_x = f_y = 1.73$
风向角 $\alpha$	$0^\circ, 5^\circ, 10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$
阻尼比 $\zeta$ (%)	0.10, 0.34, 0.55, 0.87
风洞试验来流风速 (m/s)	1.5~14
折减风速	4.8~44.9
雷诺数 $Re$	18000~168840
不同表面粗糙度布置形式	上、下游圆柱均光滑(SS)
	上游圆柱光滑、下游圆柱粗糙(SR)
	上游圆柱粗糙、下游圆柱光滑(RS)
	上、下游圆柱均粗糙(RR)

试验在上海大学上海市应用数学和力学研究所风洞实验室进行。该风洞为直流边界层风洞，风洞试验段长 18m、宽 1.8m、高 1.4m，风速范围为 0.2~30m/s。在下游圆柱端部安装了顺风向和横风向加速度传感器，采样频率为 100Hz。通过对测得的振动加速度时程作 2 次积分得到顺风向和横风向的振动位移时程。

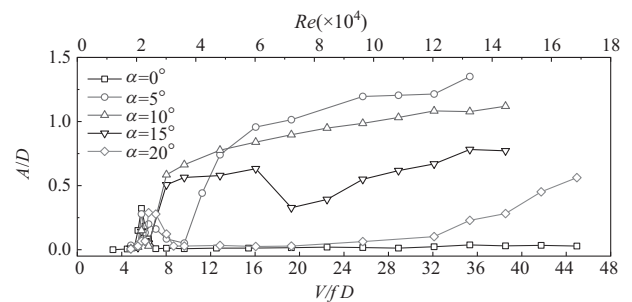
## 2 结果与讨论

### 2.1 振动响应特性

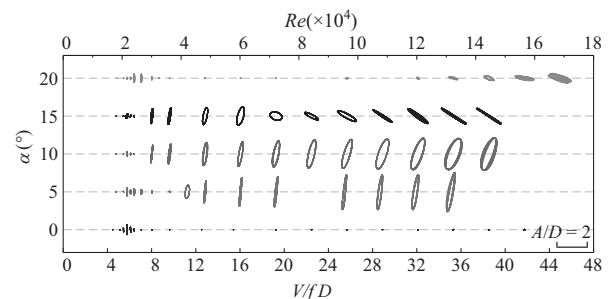
针对上、下游圆柱均光滑时，讨论了下游圆柱的最大振幅及运动轨迹随折减风速  $V/fD$  的变化情况，见图 2(a) 和图 2(b)，其中最大振幅比  $A/D$  圆柱最大振幅 ( $A$  为圆柱偏离平衡点的最大距离) 与圆柱直径 ( $D$ ) 的比值，图中(下同)的运动轨迹真实反映下游圆柱横流向与顺流向振幅的相对关系，相应的振幅与圆柱直径的比例关系如图所示。

由图 2 可知，当  $\alpha=0^\circ$  时，下游圆柱只在较低的折减风速下发生尾流致涡激振动，没有出现大幅尾

流失稳现象；在其他风向角下，下游圆柱在全风速范围内既发生了尾流致涡激振动，也出现了大幅的气弹失稳。当  $\alpha=5^\circ$  和  $10^\circ$  时，下游圆柱的振幅随折减风速的增大而增大；结合图 2(b) 可知下游圆柱的振动以横风向为主，表现为以横风向振动为主的尾流驰振的振动形态。



(a) 下游圆柱振幅极值随折减风速的变化情况



(b) 下游圆柱运动轨迹随折减风速的变化情况

图 2 不同风向角下游圆柱的振动特性

Fig. 2 Vibration characteristics of the downstream cylinders at different incidence angles

当  $\alpha=15^\circ$  时：  $6 < V_r < 16$ ，下游圆柱的振幅随折减风速的增大而逐渐增大，下游圆柱的振动形态为尾流驰振；当  $V_r > 16$ ，随着折减风速的增大，下游圆柱的振幅先减小后增大，且下游圆柱出现较大的顺风向振幅，呈两自由度尾流颤振的振动形态。当  $\alpha=20^\circ$  时，下游圆柱在较大的折减风速下也出现了尾流颤振，但振幅相对较小。

此外，图 3 还给出了不同风向角下，下游圆柱发

生尾流失稳时,其振动频率随折减风速的变化情况。由图3可知,在较小的风向角下( $\alpha \leq 15^\circ$ ),下游圆柱的振动频率小于其自振频率,而在较大的风向角下( $\alpha \geq 15^\circ$ )则大于其自振频率,也说明下游圆柱存在2种不同的失稳形式。结合图2(b)可知,当下游圆柱发生尾流驰振时,下游圆柱的振动频率小于圆柱的自振频率,而发生尾流颤振时则大于圆柱的自振频率。

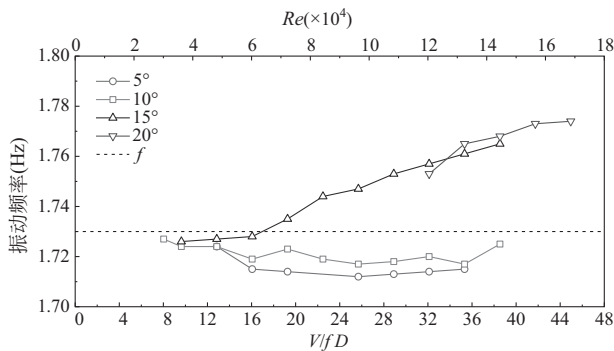


图3 不同风向角下游圆柱气弹失稳时的振动频率

Fig. 3 Vibration frequency of the downstream cylinder for aeroelastic instabilities at different incidence angles

值得指出的是,对于静止双圆柱而言, $\alpha = 15^\circ$ 是其发生流态转换的临界风向角<sup>[20]</sup>;在该风向角下,对于可做两自由度振动的下游圆柱而言,在不同雷诺数下,双圆柱绕流场很有可能出现2种不同的流态,一定程度上改变了下游圆柱与上游圆柱脱落的涡之间的相互作用,进而导致下游圆柱的气弹失稳由尾流驰振转变为尾流颤振。

## 2.2 阻尼比影响

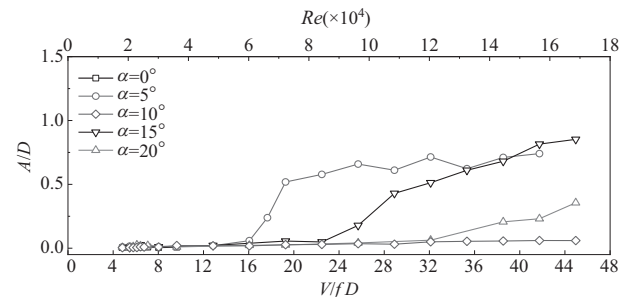
由2.1节分析可知,当双圆柱表面均光滑时,下游圆柱存在2种不同的尾流失稳振动形式,即尾流驰振和尾流颤振。为了研究阻尼比对这2种振动的影响,分别讨论了不同阻尼比下,下游圆柱振幅、运动轨迹及振动位移时程随折减风速的变化情况。

### 2.2.1 对尾流驰振的影响

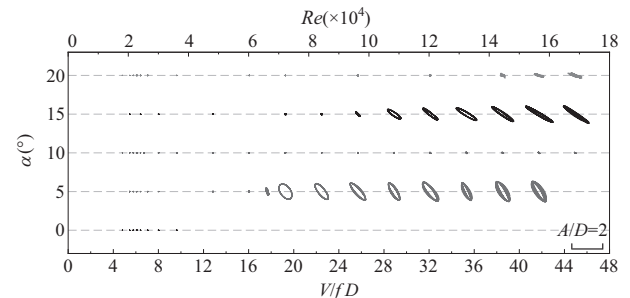
图4给出了阻尼比 $\zeta = 0.34\%$ 时,下游圆柱振幅及运动轨迹随折减风速的变化情况。由图4可知,当 $\alpha = 10^\circ$ 时,下游圆柱的尾流驰振几乎被完全抑制。当 $\alpha = 5^\circ$ 时,提高了下游圆柱的起振风速,减小了下游圆柱的振幅极值,且下游圆柱由单自由度振动转变为斜向两自由度振动,该风向角下尾流驰振并没有完全被抑制。

针对 $\alpha = 5^\circ$ 、 $\zeta = 0.34\%$ 时出现的两自由度振动,图5进一步给出了 $\alpha = 5^\circ$ ,阻尼比分别为0.1%和0.34%时,下游圆柱的位移时程曲线及典型时刻下游

圆柱的运动轨迹。由图5(a)可知,在 $\zeta = 0.1\%$ 时,下游圆柱较易起振,且振幅始终较为稳定,下游圆柱横风向振幅明显大于顺风向振幅;而当 $\zeta = 0.34\%$ 时,由图5(b)可知,下游圆柱起振较慢,起振后下游圆柱振动不稳定,且顺风向振幅明显增大,下游圆柱由原先稳定的尾流驰振转变为不稳定的两自由度振动。



(a) 下游圆柱振幅极值随折减风速的变化情况



(b) 下游圆柱运动轨迹随折减风速的变化情况

图4 阻尼比为0.34%对下游圆柱振动特性的影响

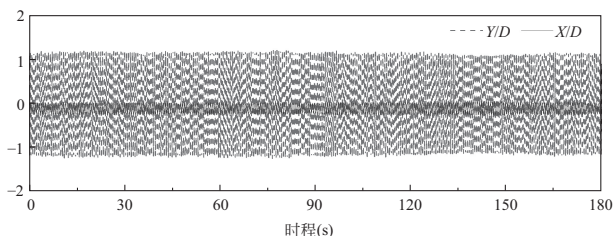
Fig. 4 Vibration characteristics of the downstream cylinders with the damping ratio of 0.34%

### 2.2.2 对尾流颤振的影响

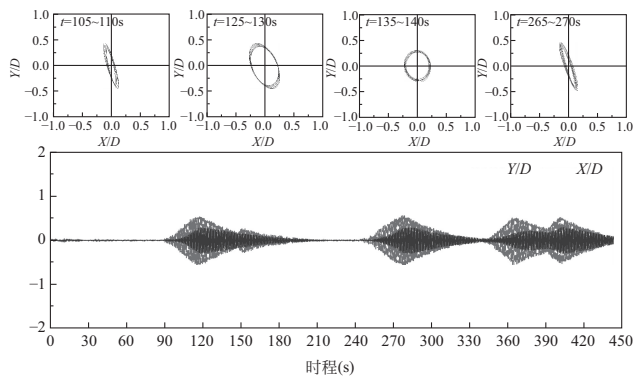
由2.1节的分析可知,当 $\alpha = 15^\circ$ 时,在不同的折减风速下,下游圆柱呈2种不同的尾流失稳振动形态,即较低风速下的尾流驰振和较高风速的尾流颤振。

由图4可知,当 $\alpha = 15^\circ$ 时,0.34%的阻尼比抑制了较小折减风速下的尾流驰振,提高了较大折减风速下,下游圆柱尾流颤振的起振风速;而下游圆柱一旦起振,振幅随着折减风速的增大迅速增大,尾流颤振并没有被抑制,减振效果较差。

图6则给出了 $\alpha = 15^\circ$ 时,不同阻尼比下,下游圆柱振动特性随折减风速的变化情况。由图6可知,增大阻尼比会继续提高下游圆柱尾流颤振的起振风速;而下游圆柱一旦起振,振幅仍随着折减风速的增大迅速增大,即使在较大的阻尼比下,下游圆柱的尾流颤振仍没有得到控制。Li等<sup>[17]</sup>在 $P = 4D$ 、 $\alpha = 17^\circ$ 附近,也观察到类似现象。由图4~图6可知,下游圆柱的尾流驰振和尾流颤振对阻尼比的敏感度呈明显差异。



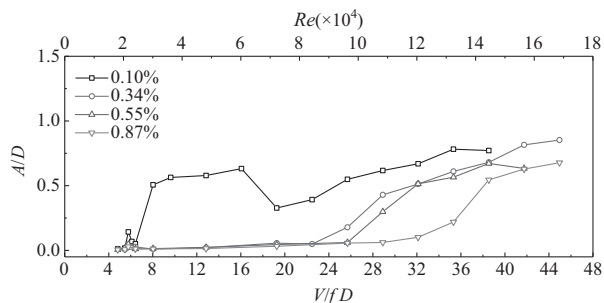
(a) 阻尼比为0.10%时下游圆柱的位移时程曲线



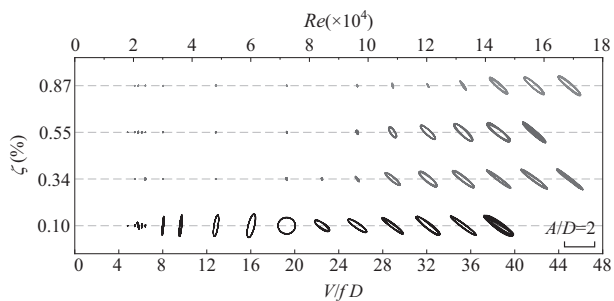
(b) 阻尼比为0.34%时下游圆柱的位移时程曲线及典型时刻运动轨迹

图 5 阻尼比对下游圆柱尾流驰振的影响 ( $\alpha=5^\circ, V_r=28.9$ )

Fig. 5 Influence of the damping ratio on wake-induced galloping at  $\alpha=5^\circ$  and  $V_r=28.9$



(a) 下游圆柱振幅极值随折减风速的变化情况



(b) 下游圆柱运动轨迹随折减风速的变化情况

图 6 阻尼比对下游圆柱振动特性的影响 ( $\alpha=15^\circ$ )

Fig. 6 Influence of the damping ratio on vibration characteristics of the downstream cylinders ( $\alpha=15^\circ$ )

### 2.3 表面粗糙度影响

结合 Buresti<sup>[15]</sup> 的研究结果, 图 7<sup>[15]</sup> 给出了单圆柱雷诺数临界区域划分随表面粗糙度的变化曲线, 可知在本试验雷诺数为  $1.8 \times 10^4 \sim 1.68 \times 10^5$ , 粗糙圆

柱 ( $K/D=0.234\%$ ) 将分别处于亚临界、临界及超临界状态。为了研究不同表面粗糙度及雷诺数对下游圆柱尾流失稳的影响规律, 图 8~图 10 则给出了不同表面粗糙度布置形式下, 下游圆柱的振幅及运动轨迹随折减风速的变化情况。

由图 8 可知, 在 RS 布置情况下, 当  $\alpha=0^\circ$  和  $20^\circ$  时, 下游圆柱没有出现大幅的气弹失稳现象; 当  $\alpha=5^\circ$  时, 下游圆柱尾流失稳的起振风速增大, 起振后失稳形式仍为尾流驰振; 当  $\alpha=10^\circ$  和  $15^\circ$  时, 下游圆柱在不同的折减风速下, 均出现了尾流驰振和尾流颤振 2 种失稳形态。与 SS 布置情况相比, 增大上游圆柱表面粗糙度, 增大了下游圆柱的来流湍流度, 进而提高了下游圆柱的起振风速<sup>[18]</sup>; 此外, 较大的表面粗糙度使上游圆柱在较低的折减风速下进入临界或超临界状态, 上游圆柱分离点后移, 尾流宽度变窄<sup>[16]</sup>, 故下游圆柱在  $\alpha=10^\circ$  时就出现了尾流颤振。

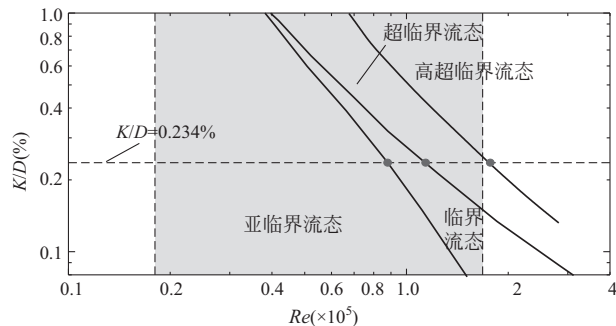
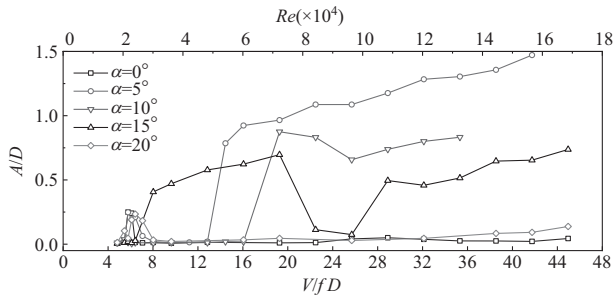


图 7 圆柱表面粗糙度对流态划分的影响曲线

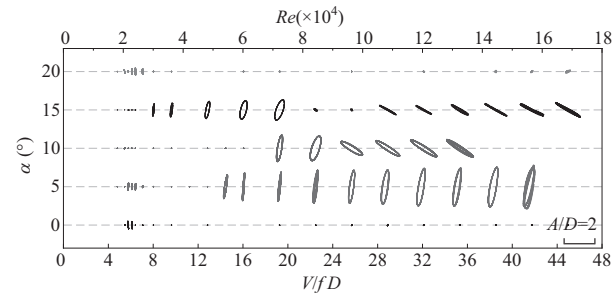
Fig. 7 Boundaries between the flow regimes of a circular cylinder with various surface roughness

图 9 和图 10 则分别给出了 SR 和 RR 布置形式下, 下游圆柱的振幅及运动轨迹随折减风速的变化情况。由图 9 和图 10 可知, 在 SR 布置情况下, 下游圆柱仅在  $\alpha=5^\circ$  和  $20^\circ$  时出现了振幅较小的振动; 在 RR 布置情况下, 下游圆柱的振动也表现为有限风速范围内的限幅振动。与 SS 布置情况相比, 增大下游圆柱表面粗糙度, 使下游圆柱较早出现了剪切层的湍流分离, 下游圆柱尾流中旋涡脱落的规律性减弱, 进而明显降低了下游圆柱出现尾流失稳的可能性<sup>[16]</sup>。

为了更直观地展示不同表面粗糙度布置形式对下游圆柱振动特性的影响, 图 11 进一步给出了  $\alpha=5^\circ$  时, 4 种不同表面粗糙度布置形式下, 下游圆柱振幅及运动轨迹随折减风速的变化情况。由图 11 可知, 增大上游圆柱表面粗糙度, 提高了下游圆柱的起振风速, 但对下游圆柱振动特性影响较小; 而增大下游圆柱表面粗糙度则使原先发散性的振动转变为“限幅限速”振动, 大大降低了下游圆柱发生尾流致气弹失稳的可能性。



(a) 下游圆柱振幅极值随折减风速的变化情况



(b) 下游圆柱运动轨迹随折减风速的变化情况

图8 上游圆柱粗糙、下游圆柱光滑(RS)布置情况

下游圆柱振动特性随折减风速的变化曲线

Fig. 8 Vibration characteristics of the downstream cylinder under RS condition

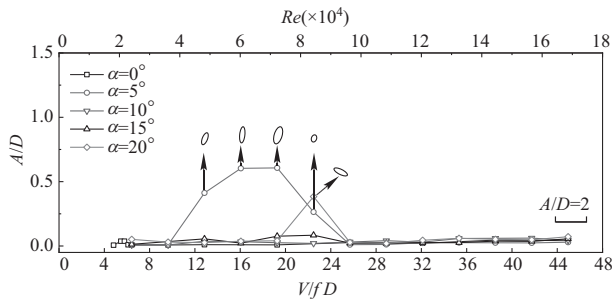


图9 上游圆柱光滑、下游圆柱粗糙(SR)时对下游圆柱振动特性影响

Fig. 9 Vibration characteristics of the downstream cylinder under SR condition

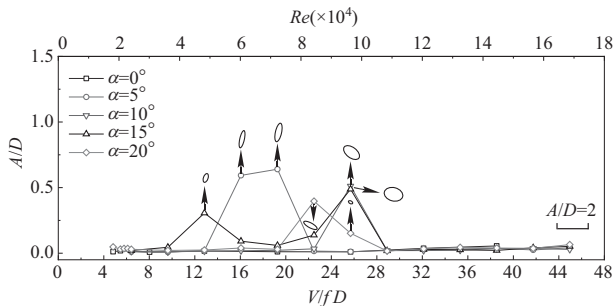
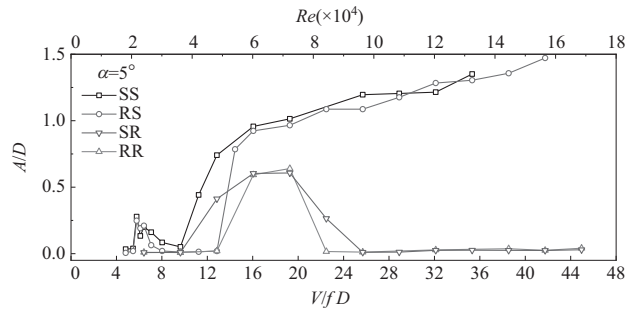
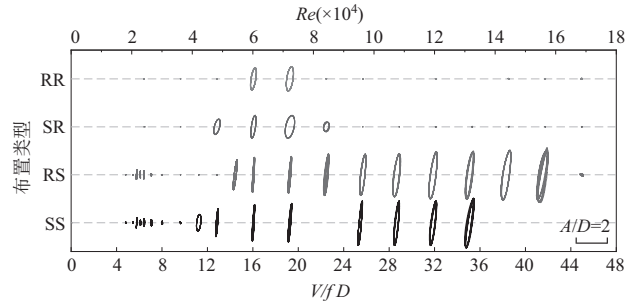


图10 上、下游圆柱均粗糙(RR)时对下游圆柱振动特性影响

Fig. 10 Vibration characteristics of the downstream cylinder under RR condition



(a) 下游圆柱振幅极值随折减风速的变化情况



(b) 下游圆柱运动轨迹随折减风速的变化情况

图11 表面粗糙度布置形式对下游圆柱振动特性的影响(alpha=5度)

Fig. 11 Effects of different combinations of surface roughness on the vibration characteristics of the downstream cylinder (alpha=5度)

### 3 结 论

本文通过风洞试验,针对圆心间距为4D(D为圆柱直径)的光滑和粗糙双圆柱,在风向角alpha=0度、5度、10度、15度、20度下,研究了阻尼比、表面粗糙度及雷诺数对下游圆柱尾流致气弹失稳的影响规律,得到如下主要结论。

(1) 下游圆柱在不同风向角及折减风速下,存在2种不同的尾流致气弹失稳现象,即尾流驰振和尾流颤振。尾流驰振发生在较小风向角和较低的折减风速下,振动频率小于自振频率;尾流颤振则发生在较大风向角和较高的折减风速下,振动频率大于自振频率。

(2) 增大阻尼比对下游圆柱尾流颤振的减振效果较差,但可以有效地抑制较大风向角下(alpha >= 10度)的尾流驰振;而在风向角较小时(alpha < 10度),增大阻尼比则会使稳定的尾流驰振转变为不稳定的两自由度振动。

(3) 双圆柱的尾流致气弹失稳有明显的雷诺数效应。对于表面光滑双圆柱,在alpha=15度时,随着雷诺数的增大,双圆柱间绕流场的干扰形态改变,下游圆柱在不同折减风速下出现尾流驰振到尾流颤振的转变;当下游圆柱表面粗糙时,圆柱会在较低雷诺

数下进入临界和超临界状态,双圆柱绕流场的湍流强度增大,下游圆柱振动特性呈明显差异。

(4) 圆柱表面粗糙度对尾流致气弹失稳现象有很大影响。增大上游圆柱的表面粗糙度,会增大下游圆柱尾流失稳的起振风速,减小下游圆柱发生尾流颤振的风向角;而增大下游圆柱表面粗糙度会明显降低下游圆柱出现尾流失稳的可能性,使发散性振动转变为“限幅限速”振动,即下游圆柱仅在一定风速范围内发生幅度较小的振动。

#### 参 考 文 献

- [1] Laursen E, Bitsch N, Andersen J E. Analysis and mitigation of large amplitude cable vibrations at the great belt east bridge [R]. Copenhagen: International Association for Bridge and Structural Engineering Symposium Report, 2006
- [2] 赵林,葛耀君,郭增伟,等.大跨度缆索承重桥梁风振控制回顾与思考——主梁被动控制效果与主动控制策略[J].土木工程学报,2015,48(12):91-100 (Zhao Lin, Ge Yaojun, Guo Zhengwei, et al. Reconsideration of wind-induced vibration mitigation of long-span cable supported bridges: effects of passive control and strategy of active control[J]. China Civil Engineering Journal, 2015, 48(12): 91-100 (in Chinese))
- [3] 刘庆宽,李聪辉,郑云飞,等.缠绕螺旋线的斜拉桥斜拉索平均气动阻力特性的试验研究[J].土木工程学报,2017,50(5):97-104 (Liu Qingkuan, Li Conghui, Zheng Yunfei, et al. Experimental study on mean drag force coefficients of stay cables with helical lines[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(5): 97-104 (in Chinese))
- [4] Fujino Y, Siringoringo D. Vibration mechanisms and controls of long-span bridges: a review[J]. Structural Engineering International, 2013, 23(3): 248-268
- [5] Tokoro S, Komatsu H, Nakasu M, et al. A study on wake-galloping employing full aeroelastic twin cable model[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2000, 88(2/3): 247-261
- [6] Li Y L, Wu M X, Chen X Z, et al. Wind-tunnel study of wake galloping of parallel cables on cable-stayed bridges and its suppression[J]. Wind and Structures, 2013, 16(3): 249-261
- [7] Yagi T, Arima M, Araki S, et al. Investigation on wake-induced instabilities of parallel circular cylinders based on unsteady aerodynamic forces [C]//Proceedings of the 14th International Conference on Wind Engineering. Porto Alegre: International Associations for Wind Engineering, 2015
- [8] Du X Q, Jiang B J, Dai C, et al. Experimental study on wake-induced vibrations of two circular cylinders with two degrees of freedom[J]. Wind and Structures, 2018, 26(2): 57-68
- [9] 吴其林,华旭刚,胡腾飞.基于能量方法的拉索尾流驰振风洞试验研究[J].振动与冲击,2017,36(4):218-225 (Wu Qilin, Hua Xugang, Hu Tengfei. Investigation on wake galloping of parallel cables by wind tunnel test based on an energy method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(4): 218-225 (in Chinese))
- [10] Deng Y C, Li S Y, Chen Z Q. Unsteady theoretical analysis on the wake-induced vibration of suspension bridge hangers[J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(2): 04018113-1-04018113-14
- [11] 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[J].湖南大学学报:自然科学版,2016,43(1):1-10 (Chen Zhengqing, Lei Xu, Hua Xugang, 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))
- [12] Sumner D. Two circular cylinders in cross-flow: a review [J]. Journal of Fluids and Structures, 2010, 26(6): 849-899
- [13] Zhou Y, Alam M M. Wake of two interacting circular cylinders: a review [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2016, 62: 510-537
- [14] Zdravkovich M M. Conceptual overview of laminar and turbulent flows past smooth and rough circular cylinders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1990, 33(1/2): 53-62
- [15] Buresti G. The effect of surface roughness on the flow regime around circular cylinders [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1981, 8(1/2): 105-114
- [16] Zdravkovich M M. Flow around circular cylinders volume 1: fundamentals[M]. Oxford: Oxford University Press, 1997
- [17] Li S Y, Deng Y C, Huang J, et al. Experimental investigation on aerodynamic interference of two kinds of suspension bridge hangers [J]. Journal of Fluids and Structures, 2019, 90: 57-70
- [18] Wardlaw R L, Cooper K R, Ko R G, et al. Wind tunnel and analytical investigations into the aeroelastic behaviour of bundled conductors [J]. Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2): 642-654
- [19] Gu Z F, Sun T F. On interference between two circular cylinders in staggered arrangement at high subcritical Reynolds numbers [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80(3): 287-309
- [20] Alam M M, Meyer J P. Global aerodynamic instability of twin cylinders in cross flow [J]. Journal of Fluids and Structures, 2013, 41(8): 135-145

杜晓庆(1973—),男,博士,教授。主要从事结构风工程、计算风工程及新型桥梁结构方面的研究。

吴葛菲(1995—),女,博士研究生。主要从事结构风工程方面的研究。

林伟群(1990—),男,硕士研究生。主要从事结构风工程方面的研究。

代钦(1966—),男,博士,研究员。主要从事建筑和桥梁抗风方面的研究。