流体力学

# 不同控制角下附加圆柱对圆柱涡激振动影响

陈威霖 及春宁2) 许栋

(天津大学水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

**摘要** 在弹性支撑的圆柱周围布置直径更小圆柱会影响剪切层发展以及旋涡脱落,进而改变其涡激振动状态.通过不同的布置形式和附加小圆柱个数可以实现对圆柱涡激振动的促进或抑制.激励更大幅值的振动可以更好地将水流动能转化为可利用的机械能或电能,抑制其振动则可以实现对海洋平台等结构物的保护.采用基于迭代的嵌入式浸入边界法对前侧对称布置两个小圆柱的圆柱涡激振动进行数值模拟研究,系统仅做横向振动,其中基于主圆柱直径的雷诺数为 100,质量比为 2.0,折合流速为 3~11.小圆柱与主圆柱的直径比为 0.125,间隙比为 0.125.结果表明,在研究的控制角范围内 (30°~90°),附加小圆柱可以很大程度上改变圆柱涡激振动的状态.当控制角较小 (30°)时,附加小圆柱对主圆柱的振动起抑制作用;当控制角为 45°~60°时,圆柱的振动分为涡振和弛振两个阶段,在弛振阶段,圆柱振幅随折合流速增加而持续增加;当控制角较大 (75°~90°)时,附加小圆柱的促进作用随着控制角增加而减小.进一步地,结合一个周期内不同时刻旋涡脱落以及圆周压强分布,解释了附加小圆柱对主圆柱涡激振动的作用机制.应用能量系数对圆柱系统的进一步分析发现,弛振阶段由流体传递到主圆柱的能量系数随折合流速的增加逐渐下降,旋涡结构的改变是产生这种变化的直接原因.

关键词 涡激振动,浸入边界法,附加小圆柱,控制角,弛振

中图分类号: P751, TB531 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-18-208

# EFFECTS OF THE ADDED CYLINDERS WITH DIFFERENT CONTROL ANGLES ON THE VORTEX-INDUCED VIBRATIONS OF A CIRCULAR CYLINDER<sup>1</sup>

Chen Weilin Ji Chunning<sup>2)</sup> Xu Dong

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

**Abstract** Vortex-induced vibrations of an elastically mounted circular cylinder will be altered through influencing the development of the boundary layer of the surface and the vortex shedding by the added smaller cylinders. The excitation or suppression of vortex-induced vibrations can be obtained by changing the arrangement and number of the small cylinders. In the former, more fluid energy can be transformed into mechanical energy or electricity while the latter can be applied to protect the structures. Numerical simulations of a transversely vibrating cylinder with two small cylinders behind were conducted, where the Reynolds number is 100, based on the main cylinder, the mass ratio is 2.0 and the reduced velocity is  $3\sim11$ . The diameter ratio between the small and the main cylinder is 0.125 and the gap ratio is 0.125. Results indicate that the small cylinders can change the vibration of the main cylinder suppresses the vibration of the main cylinder. The

2) 及春宁, 教授, 主要研究方向: 流固耦合, 涡激振动, 泥沙运动. E-mail: cnji@tju.edu.cn

引用格式: 陈威霖,及春宁,许栋,不同控制角下附加圆柱对圆柱涡激振动影响. 力学学报, 2019, 51(2): 432-440 Chen Weilin, Ji Chunning, Xu Dong, Effects of the added cylinders with different control angles on the vortex-induced vibrations of an circular cylinder. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2019, 51(2): 432-440

<sup>2018-09-27</sup> 收稿, 2018-10-18 录用, 2018-10-19 网络版发表.

<sup>1))</sup> 国家自然科学基金 (51621092, 51579175, 51779172) 和 NSFC-广东联合基金 (第二期)(U1501501) 资助项目.

response can be divided into two branches, i.e. VIV- and galloping-branch, at the control angle of  $45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ . The vibration amplitude increases monotonically with the increasing reduced velocity in the galloping branch. When the control angle is large ( $75^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ), the promotion from the small cylinder decreases with the increase of the control angle. Furtherly, mechanisms of the small cylinders are explained by combining vortex shedding and pressure distribution around the cylinder of different instants in one period. Analysis of the energy coefficient indicates that the energy transferred from the fluid to the main cylinder decreases with the reduced velocity, which is caused by the variation of vortex structures.

Key words vortex-induced vibration, immersed boundary method, small cylinder, control angle, galloping

# 引 言

涡激振动作为经典的流固耦合问题,被国内外 学者广泛关注<sup>[1-4]</sup>.其常见于工程结构中,比如核 工程的热交换管、海洋工程的平台立管、石油工 程的输油管道等.近年来,在可再生能源开发利用 方面,基于柱体涡激振动的海流能利用技术渐趋成 熟<sup>[5]</sup>,可为全球能源结构转型提供一种新的解决方 案.总的来说,涡激振动研究的出发点可以分为两类, 一类出于结构物安全考虑,需要抑制涡激振动,避 免结构物疲劳破坏;另一类着眼于能量利用,需要 激发涡激振动,提高水流动能到振动机械能的转化 效率.两类研究都归结为如何对涡激振动进行控制.

在涡激振动控制方面,通过附加小圆柱改变主 圆柱周围流场进而控制其振动,是近年来较为成熟 的方法之一.下文根据附加圆柱数量的不同对已有 研究进行分述.

在主圆柱 (直径为 *D*) 下游附加一个控制小圆柱 (直径为 *d*) 时,小圆柱通过影响主圆柱表面的边界 层或者剪切层两种方式使主圆柱流体力减小<sup>[6]</sup>,脱 落旋涡的强度降低<sup>[7]</sup>.间隙比 (*G*/*D*,*G* 为圆柱之间 的间隙) 较小时,小圆柱的存在对主圆柱涡激振动有 较大的影响,而随着间隙比的增加,其作用逐渐减 弱<sup>[8]</sup>.

对于主圆柱下游对称布置两个控制圆柱的情况, 内向反转小圆柱 (小圆柱外侧线速度与来流速度同 向) 使主圆柱表面分离的剪切层重新附着于主圆柱 的后侧,使主圆柱的升阻力显著下降,涡激振动得 到显著抑制<sup>[9-10]</sup>.相反,外向反转小圆柱增大了剪切 层的剪切率和泄涡强度,主圆柱的升阻力增大,涡 激振动加强<sup>[11]</sup>.

Muddapa 和 Patnaik<sup>[12]</sup>研究发现, 在参数组合 (雷 诺数 *Re* = 100、直径比 d/D = 0.1、控制角  $\theta$  = 120°, 无量纲转速 α = 2.0) 条件下, 主圆柱的脱涡受到完 全抑制. 李椿萱等<sup>[13]</sup> 对附属小圆柱对主圆柱绕流的

研究发现,不论小圆柱个数如何,总是存在一个最 优的抑制区域.此时,涡街被完全抑制,阻力显著下 降. Jiménez-González 和 Huera-Huarte<sup>[14]</sup> 的实验结果 表明 (雷诺数 Re = 9.2×103 ~2.6×104、直径比 d/D = 0.12、质量比 m\* = 1.94、阻尼比 ζ = 0.011 7,参数定 义见 1.2 节), 当  $\theta$  = 160° 和 G/D = 0.045 时, 涡激 振动抑制效果最佳,圆柱振幅下降了 66%; 而当  $\theta$ = 90°时,控制圆柱对主圆柱的振动有促进作用.此 外,与振幅不同,脱涡频率对小圆柱的位置并不敏感. Zhu 和 Gao<sup>[11]</sup> 的数值结果表明 (雷诺数 Re = 3484、 直径比 d/D = 0.06、控制角为  $\theta = 135^{\circ}$ 、间隙比为 G/D = 0.09),内向反转小圆柱向主圆柱边界层输入 动量, 使边界层分离延迟, 分离点后移, 抑制主圆 柱振动;相反地,外向反转小圆柱使主圆柱的振幅 增加. Korkischko 和 Meneghini<sup>[15]</sup> 实验研究了雷诺数 Re = 1.6×10<sup>3</sup>~7.5×10<sup>4</sup> 下两个小圆柱对主圆柱涡激振 动的影响情况.其中,质量比 $m^* = 1.8$ 、阻尼比 $\zeta =$ 0.01、直径比 d/D = 0.06、间隙比 G/D = 0.07、控制角  $\theta = 90^{\circ}$ 、无量纲转速  $\alpha = 5 \sim 10$ . 研究结果表明, 与无 附加小圆柱工况相比, 当 $\alpha = 5 \sim 10$ 时, 圆柱的振幅 下降超过了 57%, 且抑制出现在较大的折合流速范 围内.

对于多个控制圆柱的情况,由于参数较多,布置 形式多样,已有的研究结果<sup>[16-20]</sup>较为零散.总的来 说,特定参数范围内,附加小圆柱可以达到减阻抑振 的效果.吴皓<sup>[21]</sup>通过水池实验研究了多根控制杆对 柔性立管涡激振动的抑制作用,结果表明在合适的 位置下,附属控制杆可以很好地抑制柔性圆柱的涡 激振动,使其流向和横向的振动下降超过90%.宋吉 宁等<sup>[22]</sup>实验研究了等分布置的三根附属杆对立管 涡激振动的抑制作用发现,立管的横向振幅会显著 下降,但振动频率几乎不受影响.娄敏等<sup>[23]</sup>研究了 三根附属杆对串列双圆柱涡激振动的抑制情况,结 果表明当间距比为5~6倍直径时,可以达到最好的 抑制效果. 综上可知,已有文献多关注涡激振动抑制问题, 控制圆柱位于主圆柱下游,而将控制圆柱置于主圆 柱上游以促进涡激振动的研究较少.基于此,本文对 在主圆柱上游对称布置两个控制小圆柱以增大涡激 振动振幅进行数值模拟,并探讨其作用机理.

# 1 数值方法

## 1.1 控制方程

流固耦合的数值模拟采用浸入边界法<sup>[24]</sup>,控制 方程如下

$$\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} = -\left(\boldsymbol{u}\cdot\nabla\right)\boldsymbol{u} - \nabla \boldsymbol{p} + \boldsymbol{v}\nabla^{2}\boldsymbol{u} + \boldsymbol{f}$$
(1)

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0 \tag{2}$$

其中, u 为速度, t 为时间, p 为压强, v 为运动黏滞 系数,  $\nabla$  为梯度算子, f 为附加体积力矢量, 代表流 固耦合边界条件.

针对传统浸入边界法施加边界条件精度不高的 情况,及春宁等<sup>[24]</sup>提出了基于嵌入式迭代的浸入 边界法,将浸入边界法嵌入到压强泊松方程的迭代 求解中,利用压强的中间解比初始值更接近真实值 的特点,迭代修正附加体积力,在不显著增加计算 耗时的前提下,提高了整个算法的求解精度.有关 浸入边界法的细节,请参考文献 [24-25],此处不再 赘述.

对仅做横流向运动的刚性圆柱,其运动方程可 以用下述方程来描述

$$m\frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} + c\frac{\mathrm{d}y}{\mathrm{d}t} + ky = F_y \tag{3}$$

其中, m 为圆柱质量, c 为结构阻尼, k 为弹簧刚度 系数,  $F_y$  为圆柱受到的横流向流体力. 方程采用标 准的 Newmark- $\beta$  法求解.

# 1.2 参数取值

不同控制角下附加小圆柱对主圆柱涡激振动影 响数值模拟参数如下.基于主圆柱直径的雷诺数为 Re = UD/v = 100,质量比为  $m^* = m/m_f = 2.0$ ,其 中 m 为圆柱质量, $m_f$  为等体积流体质量.附加小圆 柱对称布置于主圆柱的上游,选定的控制角范围为  $\theta = 30^\circ ~ 90^\circ$ ,为圆柱圆心连线与来流方向的夹角, 前驻点处, $\theta = 0^\circ$ .上、下侧小圆柱分别以逆时针和 顺时针旋转 (外向反转)为正.附加小圆柱与主圆柱 的直径比为 d/D = 0.125,间隙比为 G/D = 0.125.为 使圆柱响应最大,将阻尼比设为  $\zeta = 0$ . 三圆柱刚性 连接,仅作横向振动.计算域大小为 100*D*×100*D*, 如图 1 所示.为保证数值精度,在圆柱周围采用加 密网格,加密区域为 8*D*×8*D*,无量纲网格尺寸为  $\Delta x/D = \Delta y/D = 1/64.$ 

边界条件设置如下.入口为 Dirichlet 型边界 (u = U, v = 0),出口为 Neumann 型边界 ( $\partial u/\partial x = 0, \partial v/\partial x = 0$ ),上下为可滑移边界 ( $\partial u/\partial y = 0, v = 0$ ).此外,为保 证数值收敛,需满足 CFL 条件,即  $U_{max}\Delta t/\Delta x \leq 0.5$ ,其中  $U_{max}$  为流场中的最大流速.



Fig. 1 The computational domain and boundary conditions

## 2 程序验证

表 1 给出了单圆柱涡激振动下最大振幅、平均 阻力系数、最大升力系数和脱涡频率 *St* 与 Bourguet 等 <sup>[26]</sup>和 Shiels 等 <sup>[27]</sup>的结果对比,其中雷诺 数 *Re* = 100,质量比  $m^*$  = 1.25,阻尼比  $\zeta$  = 0,折合 流速  $U_r$  = 4.46.两者吻合良好,验证了本文数值方 法和程序的正确性.更多的验证算例包括单圆柱涡 激振动、并列双圆柱绕流、串列双圆柱绕流和涡激 振动等参见文献 [25, 28-32].

### 表1 单圆柱涡激振动结果对比

Table 1 Comparison of vortex-induced vibrations of

an isolated	cylinder
-------------	----------

	$Y_{\rm max}/D$	$\overline{C}_{\mathrm{D}}$	$C_{L,max}$	St
Ref.[26]	0.57	2.08	0.88	0.188
Ref.[27]	0.58	2.22	0.77	0.196
present	0.57	2.09	0.75	0.185

# 3 结果和讨论

#### 3.1 振动响应

为准确衡量主圆柱振动的平均振幅,涡激振动的无量纲振幅定义为  $A^* = A/D = \sqrt{2}Y_{rms}^{[33]}$ ,其中 $Y_{rms}$ 为横向振动位移的均方根值.

如图 2 所示,随着控制角的变化,圆柱响应呈

现明显不同的规律. 当  $\theta = 30^{\circ}$  时, 主圆柱振动与 单圆柱 (无控制圆柱) 情况相似,呈现出明显的初 始分支和下端分支. 但是, 主圆柱振动的锁定区间 (3.5 ≤ U<sub>r</sub> < 7.0) 要小于单圆柱的 (3.5 ≤ U<sub>r</sub> < 8.5). 此 时,主圆柱的最大振幅 (A\* = 0.51) 也要比单圆柱的 最大值 (A\* = 0.56) 小. 当 θ = 45° ~ 60° 时,圆柱的 振动呈现为初始分支和弛振分支, 在初始分支, 圆柱 的振动由圆柱表面交替泄涡引起;在驰振分支,圆 柱的振动由结构相对于来流的不对称性 (考虑振动 圆柱和来流的合速度)导致.驰振最显著的特点为圆 柱振幅较大, 目随着折合流速的增大而单调递增, 两 分支的临界折合流速随着控制角的增大而略有减小.  $\theta = 45^{\circ}$ 时临界折合流速为  $U_r = 5.5$ ,而  $\theta = 60^{\circ}$ 时, 为  $U_r = 5.0.$  当  $\theta = 75^{\circ} \sim 90^{\circ}$  时,主圆柱的响应由初 始分支和下降分支构成.在下降分支,振幅随着折合 流速的增加而缓慢下降,且随着控制角的增大,振幅 随着折合流速的下降趋势更加明显. 值得注意的是, 虽然圆柱振幅在折合流速较大时会出现下降,但是 振幅仍明显大于单圆柱的情况.





总的来说, 在初始分支, 有、无附加小圆柱工况 下圆柱的振幅几乎相等, 圆柱的振动由交替泄涡控 制. 附加小圆柱对主圆柱涡激振动的影响主要出现 在下端分支. 当 $\theta$  = 30°时, 附加小圆柱对主圆柱振 动起到抑制作用. 当 $\theta$  = 45° ~ 60°时, 附加小圆柱 对主圆柱振动起到促进作用, 下端分支转变为弛振 分支, 圆柱的最大振幅分别为  $A^*$  = 1.08 ( $\theta$  = 45°) 和  $A^*$  = 1.22 ( $\theta$  = 60°), 比单圆柱工况分别大了 93% 和 118%. 当 $\theta$  = 75° ~ 90°时, 下端分支变为下降分支, 振幅仍较大, 介于驰振分支和下端分支之间. 为细致地确定最优控制角,本文采用较小的控制角增量,模拟了 $\theta = 60^{\circ}$ 附近圆柱振幅随控制角的变化情况.如图3所示,圆柱的最大振幅随着控制角的增加呈现出先增后减的趋势,最大振幅在 $\theta = 60^{\circ}$ 时获得.



Fig. 3 Vibration amplitude varies with the control angle at  $U_r = 11$ 

## 3.2 流体力

为考察附加小圆柱对主圆柱涡激振动流体力的 影响,图4给出了不同控制角下主圆柱流体力随折 合流速变化情况.

如图 4(a) 所示,在有、无附加小圆柱的工况下,主圆柱受到的阻力均值均呈现出先增后减的趋势.总体来看,无附加圆柱工况下主圆柱的阻力均值 要大于  $\theta$  = 30° 的情况.主圆柱的阻力均值随着控制 角的增大而增大,在  $\theta$  = 75° 时达到最大,而在  $\theta$  = 90° 略有下降.圆柱的阻力受两方面因素影响,一方 面圆柱的大幅振动降低了圆柱的基底压强,提高了 圆柱的阻力;另一方面,控制角较大时,控制圆柱增 大了垂直来流方向的迎流面积,导致阻力增大.综合 两个因素,主圆柱的阻力均值在 $\theta$  = 75° 时达到最大, 而非在主圆柱振幅最大的 $\theta$  = 60°.

如图 4(b) 所示, 当  $\theta$  = 30° 时主圆柱受到的阻 力均方根与无附加小圆柱的情况类似,均表现为先 增后减的趋势,最大值也均在  $U_r$  = 4.5 时取得. 当  $\theta$  = 45° ~ 90° 时,主圆柱的阻力均方根呈现出"双 峰"特征. 在  $U_r$  = 4.0 附近出现第一个较小峰值,而 在  $U_r$  = 6.0 附近出现第二个较大峰值.与无附加圆柱 的情况相比,  $\theta$  = 45° ~ 90° 工况的阻力均方根在较 大折合流速时明显较大.

如图 4(c) 所示,有、无附加小圆柱的工况下,主 圆柱受到的升力均方根较为相近,均呈现为先增后 减的趋势,仅在 $\theta$  = 75° ~ 90° 时,升力均方根在大折 合流速时缓慢增加.各工况下,升力均方根的最大值 均在  $U_r$  = 4.0 ~ 5.0内取得.与主圆柱振幅相似,圆 柱升力的均方根在 $\theta$  = 45° ~ 75°工况下较大.







### 3.3 旋涡脱落频率

为确定附加小圆柱对主圆柱旋涡脱落的影响,

进一步研究不同控制角下旋涡脱落频率随折合流速 变化的情况. 如图 5 所示, 当 $\theta$  = 30°时, 主圆柱的脱 涡频率随折合流速变化较小, 在 *St* = 0.13 ~ 0.16 范 围内, 其最小值 (*St* = 0.13) 在 *U*<sub>r</sub> = 6.5 时取得.



对于  $\theta$  = 45° ~ 90° 的工况,在折合流速较小时 ( $U_r$  < 6.0),脱涡频率随折合流速变化不规律.在折合 流速较大时 ( $U_r$  > 6.0),脱涡频率随折合流速增大而 减小.大控制角的工况,下降的幅度明显较小.

对于无附加小圆柱的工况,在锁定区间内,旋 涡脱落频率接近结构的自然频率 f<sub>N</sub>,在锁定区间外, 旋涡脱落频率与固定圆柱绕流的几乎相等.但在 θ = 45°~60°工况下,大折合流速时,旋涡脱落频率一直 与圆柱自然频率接近.也就是说,圆柱振动一直处于 锁定状态,锁定区间没有上限.

#### 3.4 作用机制

在附加小圆柱的影响下,主圆柱涡激振动出现 明显的变化.其中,当控制角较小(θ = 30°)时,附 加小圆柱对主圆柱振动呈现出明显的抑制作用;当 控制角中等(θ = 45° ~ 60°)时,附加小圆柱对主圆柱 振动则有显著的促进作用,此时主圆柱在折合流速 较大时表现为弛振;之后,随控制角增加(θ = 75° ~ 90°),促进作用逐渐下降.为全面理解附加小圆柱的 影响,本节结合主圆柱升力谱、升力与位移相位差、 旋涡脱落时机、分离点变化、能量系数等,深入分析 附加小圆柱的作用机制.

如图 6 所示,当 θ = 30° 时,由于附加小圆柱的存 在,使得剪切层会从附加小圆柱上分离,之后,由于 圆柱的振动,剪切层会重新附着于主圆柱的后半侧, 最终分离并形成旋涡,最终分离的剪切层几乎是在 平行于来流方向. 当主圆柱从下向上运动(i)→(ii)时, 主圆柱的上侧产生一个低压区,对圆柱向上的运动 起到一定的促进作用,但是由于两侧压差很小,使 得主圆柱的振幅很小. 相同地,当主圆柱从上向下运 动(iii)→(iv)时,两侧压差较小,主圆柱的振幅很小. 需要指出的是,图 6、图 7 和图 9 中的无量纲涡量和 压强系数的取值范围和等值线增量均相同,以方便 对比分析.



图 6 当  $U_r = 11.0$  和  $\theta = 30^{\circ}$  时,不同时刻下圆柱周围的涡量场 (左) 和压强场 (右)

Fig. 6 Vorticity fields (left) and pressure fields (right) around the circular cylinder at  $U_r = 11.0$  and  $\theta = 30^{\circ}$ 

当 θ = 60° 时,如图 7 所示,主圆柱从下向上运动 (i)→(ii) 的半个周期中,由于受到下侧剪切层的推挤,上侧剪切层堆积于主圆柱的上侧,此时一个明显的低压区形成于主圆柱的上侧,因此会对主圆柱的振动起到较大的促进作用.相同地,当主圆柱从上向下运动 (iii)→(iv) 的半个周期时,由于受到上侧剪切层的影响,下侧剪切层堆积于下半圆柱上,并形成一个明显的低压区,相应地也会对主圆柱的振动起到显著的促进作用.准稳态理论<sup>[35]</sup>指出弛振现象的出现来源于柱体两侧的不对称压力分布.压差越大,柱体振幅也就越大.对比图 6 可以看出,此时在主圆柱振动方向上产生的低压区范围更大,且压差更明显,相应地振幅也就更大.

值得注意的是,当主圆柱从上向下运动 (i)→ (ii) 的半个周期时,会从圆柱上侧脱落两个同向旋涡 (蓝色); 当从圆柱从下向上运动 (iii)→(iv) 时,从下 侧脱落一个逆时针旋涡 (红色).根据 Williamson 和 Roshko<sup>[34]</sup> 对尾涡模式的定义,该模式应为 P+S 模式. 与 Williamson 和 Roshko<sup>[34]</sup> 在高雷诺数的单圆柱涡激 振动中发现的 P+S 模式不同 (P 由一个反向旋转的涡 对组成),本文中的 P 由一个同向旋转涡对构成.



图 7 当 U<sub>r</sub> = 11.0 和 θ = 60° 时,不同时刻下圆柱周围涡量场(左) 和压强场(右)

# Fig. 7 Vorticity fields (left) and pressure fields (right) around the circular cylinder at $U_r = 11.0$ and $\theta = 60^{\circ}$

为进一步解释主圆柱产生弛振的原因,本文从 频率变化、主圆柱位移与升力相位差以及能量系数 等角度展开如下分析.如图8所示,在整个折合流速 范围内,主圆柱的升力均由基频主导,3倍频开始 于 *U*<sub>r</sub> = 6.0 时,对应弛振开始的折合流速.随着折 合流速的增大,倍频的能量逐渐增大.但是由于倍频 对应的成分远低于基频,因此,倍频的出现对主圆 柱振幅增大的作用有限.如图9所示,在涡振阶段 (*U*<sub>r</sub> = 3.0~5.0),主圆柱升力与位移的相位差接近于 零,从流体传递到振动主圆柱的能量也很小;而在弛 振阶段(*U*<sub>r</sub> ≥ 5.5),虽然主圆柱的升力均方根随折合 流速有一定的下降,但升力与位移的相位差由接近 0°迅速增加至 55°附近.由于升力对主圆柱做功的功 率跟升力和振动速度有关,当两者同相位(升力与振 动位移的相位差为 90°)时,流体输入到振动圆柱的 功率最大. 此外, 采用 Navrose 和 Mittal<sup>[36]</sup> 建议的公 式  $E_c = \int_0^T C_L(t)y'(t)dt = \pi |C_L||y'| \sin \phi$  ( $\phi$  为升力与 位移的相位差) 得到了一个周期内由流体输入到柱 体的能量系数, 如图 9 所示, 其中  $E_{c1}, E_{c2}, E_c$  分别为 主圆柱、两附加小圆柱以及系统的能量系数. 由于本 文模拟中阻尼比为零, 因此, 在一个完整的周期内, 系统的能量系数 ( $E_c$ ) 应为零. 也就是说, 在圆柱系统 运动的过程中, 由流体向主圆柱传递的能量会在消 耗在带动附加小圆柱的运动上. 如图 9 所示, 当折合 流速较小时, 主圆柱的能量系数较小, 相应地附加小





Fig. 8 Lift spectra of the main cylinder versus the reduced



图 9 当 θ = 60° 时,主圆柱升力与位移的相位差 (φ<sub>b</sub>)、升力均方根
(C<sub>L</sub>)、振幅 (A\*) 以及能量系数 (E<sub>c1</sub>, E<sub>c2</sub>, E<sub>c</sub> 分别为主圆柱、两附加
小圆柱以及总能量系数) 随折合流速变化情况

Fig. 9 The phase difference between the lift and displacement  $(\varphi_{ly})$ , the r.m.s. lift coefficient  $(C'_{\rm L})$ , the vibration amplitude  $(A^*)$  of the main cylinder, and energy transfer coefficient  $(E_{c1}, E_{c2}, E_c$  denote the energy coefficients of the main, two small, and the sum of three cylinders, respectively.) in one period versus the reduced velocity at  $\theta = 60^{\circ}$ 

圆柱消耗的能量也较小;当进入弛振阶段后,主圆 柱的能量系数则一直维持在较大值上,但当U<sub>r</sub> > 6.5 以后,由流体传递到主圆柱的能量系数下降,相应 地附加小圆柱消耗的能量系数也减小.造成这种能 量系数的下降可能与旋涡结构的变化有关,如图 7 所示,当系统处于弛振状态时,圆柱系统两侧的剪 切层会直接从小圆柱上分离并最终形成旋涡.在此 过程中,剪切层与附加小圆柱系统的相互作用较弱, 能量消耗也就减小.相反,在涡振阶段,如图 6 所 示,圆柱系统两侧的剪切层形成并从附加小圆柱上 分离,但分离的剪切层会重附着于主圆柱上,产生 二次相互作用,相应地使消耗的能量系数增加.

随着控制角的增大 ( $\theta$  = 75° ~ 90°),附加小圆柱 会使得剪切层的分离更加靠近圆柱的上下顶端,剪 切层重附着区域也更加靠近主圆柱的底部,造成阻 力增大,升力减小,与 $\theta$  = 60°的工况相比,减弱了 对主圆柱振动的促进作用.如图 10 所示,当 $\theta$  = 90° 时,由于附加小圆柱的存在,剪切层的分离出现在主 圆柱正上和正下侧;当主圆柱从下向上运动 (i)→(ii) 时,由于下侧剪切层排挤,使得上侧仅在很小的范围 内附着于主圆柱的上半侧,更多的低压区产生于主 圆柱的底部,因此,与 $\theta$  = 60°时相比,低压区产生的



图 10 当 U<sub>r</sub> = 11.0 和 θ = 90° 时,不同时刻下圆柱周围涡量场(左) 和压强场(右)

Fig. 10 Vorticity fields (left) and pressure fields (right) around the circular cylinder at  $U_r = 11.0$  and  $\theta = 90^{\circ}$ 

升力明显变小,对主圆柱的振动促进作用会显著下降.相同地,当主圆柱从上向下运动(iii)→(iv)时,受到上侧剪切层作用而堆积于主圆柱下半侧的低压区也要小一些,更多的低压区集中于圆柱的底部,因此,产生的促进作用也会较低.

总结起来,附加小圆柱的存在改变了主圆柱剪 切层的分离点,影响了旋涡的形成和发展过程,起 到了或促进或抑制主圆柱涡激振动的作用.

#### 3.5 控制圆柱旋转速度的影响

本文进一步研究附加小圆柱的旋转速度对主圆 柱涡激振动的影响.取无量纲转速为 α = -2.0 ~ 2.0, 负值代表内向反转 (IC),正值表示外向反转 (OC).如 图 11 所示,旋转的小圆柱无论内向反转还是外向反 转均使主圆柱的振幅下降,其中内向反转时主圆柱 振幅下降的幅度要大于外向反转的情况.这就是说, 附加圆柱不旋转时对促进主圆柱振动更优.此外,旋 涡的脱落频率几乎不受旋转速度的影响.



Fig. 11 Vibration amplitude and vortex shedding frequency versus the nondimensional rotation speed ( $\alpha$ ) with  $\theta = 60^{\circ}$  and  $U_r = 11.0$ 

# 4 结 论

通过在主圆柱上游对称布置两个控制小圆柱, 并改变小圆柱的控制角和转速,研究其对主圆柱涡 激振动的影响.相关参数为:雷诺数为 Re = 100、质 量比为  $m^* = 2.0$ 、折合流速  $U_r = 3 ~ 11$ ;附加小 圆柱与主圆柱的直径比为 d/D = 0.125、间隙比为 G/D = 0.125.为实现圆柱的大振幅振动,将阻尼比 设为  $\zeta = 0$ .研究结果表明,附加小圆柱的存在对主 圆柱涡激振动有显著的影响.主要结论如下.

(1) 当控制角较小 (θ = 30°) 时,附加小圆柱对主圆柱的振动起到抑制作用,涡激振动的锁定区间从

无附加圆柱的 3.5 ≤ *U*<sub>r</sub> < 8.5 缩短为 3.5 ≤ *U*<sub>r</sub> < 7.0, 主圆柱的最大振幅从 *A*<sup>\*</sup> = 0.56 下降到 *A*<sup>\*</sup> = 0.51.

(2) 当控制角为 $\theta$  = 45° ~ 60° 时,附加小圆柱对 主圆柱涡激振动的促进作用最明显.此时主圆柱振 动分为两个分支,分别为初始分支和弛振分支.在 弛振分支,主圆柱的脱涡频率与自然频率相接近, 主圆柱的振幅随着折合流速的增大而持续增大.在  $U_{\rm r}$  = 11.0 时,最大振幅分别为 $A^*$  = 1.08 ( $\theta$  = 45°)和 $A^*$  = 1.22 ( $\theta$  = 60°),比无附加圆柱工况的最大振幅 ( $A^*$  = 0.56)分别大了 93% 和 118%.

(3) 当控制角较大 (θ = 75° ~ 90°) 时,附加小圆 柱对主圆柱涡激振动的促进作用下降.此时主圆柱 振动分为两个分支,分别为初始分支和下降分支.在 下降分支,主圆柱的振幅随着折合流速的增加而减 小,但仍比无附加圆柱工况的较大.

(4) 在弛振阶段,随着折合流速的增大,主圆柱 升力与位移的相位差快速增大,流体为振动圆柱输 入了更多的能量,主圆柱振幅得以随着折合流速持 续增加.此外,升力在弛振分支出现了3倍频分量, 但由于其强度相对于基频分量较弱,因此对主圆柱 振动的促进作用有限.

(5) 在弛振阶段, 尾涡模式为 P+S 模式, 其中 P 为同向旋转的涡对, S 为单个漩涡. 这与高雷诺数单 圆柱涡激振动 P+S 模式中的反向涡对有差别.

(6)控制圆柱的旋转速度对主圆柱的涡激振动振 幅影响较小,当控制圆柱旋转时,无论旋转速度正 负,均使主圆柱的振幅降低,但内向旋转时,振幅降 低幅度更大.控制圆柱的旋转速度对旋涡的脱落频 率几乎没有影响.

#### 参考文献

- Sarpkaya T. A critical review of the intrinsic nature of vortexinduced vibrations. *Journal of Fluids and Structures*, 2004, 19: 389-447
- 2 Wu X, Ge F, Hong Y. A review of recent studies on vortex-induced vibrations of long slender cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 2012, 28: 292-308
- 3 Williamson CHK, Govardhan R. Vortex-induced vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2004, 36: 413-455
- 4 Blevins RD. Flow-Induced Vibrations. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990
- 5 Bernitsas MM, Raghavan K, Ben-Simon Y, et al. VIVACE (vortex induced vibration aquatic clean energy): A new concept in generation of clean and renewable energy from fluid flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME Transactions*, 2008, 130(4): 041101-041115

- 6 Sakamoto H, Haniu H. Optimum suppression of fluid forces acting in a circular cylinder. *Journal of Fluids Engineering*, 1994, 116: 221-227
- 7 Strykowski PJ, Sreenivasan KR. On the formation and suppression of vortex 'shedding' at low Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics*, 1990, 218: 71-107
- 8 Wu W, Wang J. Numerical simulation of VIV for a circular cylinder with a downstream control rod at low Reynolds number. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2018, 68: 153-166
- 9 Schulmeister JC, Dahl JM, Weymouth GD, et al. Flow control with rotating cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 825: 743-763
- 10 Zhu H, Yao J, Ma Y, et al. Simultaneous CFD evaluation of VIV suppression using smaller control cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, 57: 66-80
- 11 Zhu H, Gao Y. Vortex-induced vibration suppression of a main circular cylinder with two rotating control rods in its near wake: Effect of the rotation direction. *Journal of Fluids and Structures*, 2017, 74: 469-491
- 12 Muddada S, Patnaik BSV. An active flow control strategy for the suppression of vortex structures behind a circular cylinder. *European Journal of Mechanics-B/Fluids*, 2010, 29: 93-104
- 13 李椿萱, 彭少波, 吴子牛. 附属小圆柱对主圆柱绕流影响的数值 模拟. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(11): 951-958 (Lee Chunhian, Peng Shaobo, Wu Ziniu. Numerical study of flow around a main cylinder by controlled satellite cylinders. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2003, 29(11): 951-958 (in Chinese))
- 14 Jiménez-González JI, Huera-Huarte FJ. Experimental sensitivity of vortex-induced vibrations to localized wake perturbations. *Journal* of Fluids and Structures, 2017, 74: 53-63
- 15 Korkischko I, Meneghini JR. Suppression of vortex-induced vibration using moving surface boundary-layer control. *Journal of Fluids* and Structures, 2012, 34: 259-270
- 16 Silva-Ortega M, Assi GRS. Hydrodynamic loads on a circular cylinder surrounded by two, four and eight wake-control cylinders. *Ocean Engineering*, 2018, 153: 345-352
- 17 Lou M, Chen P, Chen Z. Experimental investigation on the suppression of vortex-induced vibration of two interfering risers by control rods. *Ships and Offshore Structures*, 2017, 12(8): 1117-1126
- 18 Zhu H, Yao J. Numerical evaluation of passive control of VIV by small control rods. *Applied Ocean Research*, 2015, 51: 93-116
- 19 Silva-Ortega M, Assi GRS. Suppression of the vortex-induced vibration of a circular cylinder surrounded by eight rotating wake-control cylinders. *Journal of Fluids and Structures*, 2017, 74: 401-412
- 20 Song Z, Duan M, Gu J. Numerical investigation on the suppression of VIV for a circular cylinder by three small control rods. *Applied Ocean Research*, 2017, 64: 169-183
- 21 吴皓. 多根控制杆对细长柔性立管涡激振动抑制作用的实验及数 值研究. [博士论文]. 大连:大连理工大学, 2013 (Wu Hao. Experimental and numerical studies on the suppression of vortex induced vibration of long flexible riser by multiple control rods. [PhD Thesis]. Da Lian: Dalian University of Technology, 2013 (in Chinese))
- 22 宋吉宁, 吕林, 张建侨等. 三根附属控制杆对海洋立管涡激振动抑制作用实验研究. 海洋工程, 2009, 27(3): 23-29 (Song Jining, Lü

Lin, Zhang Jianqiao, et al. Experimental investigation of suppression of vortex-induced vibration of marine risers by three control rods. *The Ocean Engineering*, 2009, 27(3): 23-29 (in Chinese))

- 23 娄敏, 朱岩. 三控制杆对申联立管涡激振动抑制的试验分析. 船 海工程, 2018, 47(1): 124-128 (Lou Min, Zhu Yan. Experimental study on vortex-induced vibration suppression of tandem risers with three-control-rods. *Ship & Ocean Engineering*, 2018, 47(1): 124-128 (in Chinese))
- 24 Ji C, Munjiza A, Williams JJR. A novel iterative direct-forcing immersed boundary method and its finite volume applications. *Journal* of Computational Physics, 2012, 231: 1797-1821
- 25 Chen W, Ji C, Xu W, et al. Response and wake patterns of two sideby-side elastically supported circular cylinders in uniform laminar cross-flow. *Journal of Fluids and Structures*, 2015, 55: 218-236
- 26 Bourguet R, Jacono DL. Flow-induced vibrations of a rotating cylinder. Journal of Fluid Mechanics, 2014, 740: 342-380
- 27 Shiels D, Leonard A, Roshko A. Flow-induced vibration of a circular cylinder at limiting structural parameters. *Journal of Fluids and Structures*, 2001, 15: 3-21
- 28 Chen W, Ji C, Wang R, et al. Flow-induced vibrations of two sideby-side circular cylinders: Asymmetric vibration, symmetry hysteresis and near-wake patterns. *Ocean Engineering*, 2015, 110: 244-257
- 29 Chen W, Ji C, Williams J, et al. Vortex-induced vibrations of three tandem cylinders in laminar cross-flow: vibration response and galloping mechanism. *Journal of Fluids and Structures*, 2018, 78: 215-238
- 30 陈威霖,及春宁,许栋.低雷诺数下串列三圆柱涡激振动中的弛振 现象及其影响因素.力学学报,2018,50(4):766-775 (Chen Weilin, Ji Chunning, Xu Dong. Galloping in vortex-induced vibration of three tandem cylinders at low Reynolds numbers and its influencing factors. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(4): 766-775 (in Chinese))
- 31 及春宁,花阳,许栋等.不同剪切率来流作用下柔性圆柱涡激振动 数值模拟.力学学报,2018,50(1):21-31(Ji Chunning, Hua Yang, Xu Dong, et al. Numerical simulation of vortex-induced vibration of a flexible cylinder exposed to shear flow at different shear rates. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2018, 50(1): 21-31 (in Chinese))
- 32 陈威霖,及春宁,徐万海.并列双圆柱流致振动的不对称振动和 对称性迟滞研究.力学学报,2015,47(5):731-739 (Chen Weilin, Ji Chunning, Xu Wanhai. Numerical investigation on the asymmetric vibration and symmetry hysteresis of flow-induced vibration of two side-by-side cylinders. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2015, 47(5): 731-739 (in Chinese))
- 33 Qin B, Alam MM, Zhou Y. Two tandem cylinders of different diameters in cross-flow: Flow-induced vibration. *Journal of Fluid Mechanics*, 2017, 829: 621-658
- 34 Williamson CHK, Roshko A. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures*, 1988, 2: 355-381
- 35 Paidoussis, MP, Price SJ, et al. Fluid-Structure Interactions: Cross-Flow-Induced Instabilities. Cambridge University Press. 2010
- 36 Navrose N, Mittal S. Lock-in in vortex-induced vibration. Journal of Fluid Mechanics, 2016, 794: 565-594