

文章编号: 1000-8608(2020)01-0046-07

高阻尼高雷诺数下串列双圆柱尾流激振数值研究

李小超^{*1,2,3,4}, 罗旋⁵, 徐伟^{1,2}, 黄筱云^{1,3}, 陈龙^{1,4}

- (1. 长沙理工大学 水利工程学院, 湖南长沙 410114;
2. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114;
3. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 湖南长沙 410114;
4. 湖南省环境保护河湖污染控制工程技术中心, 湖南长沙 410114;
5. 深圳市深水水务咨询有限公司, 广东深圳 518003)

摘要: 流激振动水流动能转换装置多柱体阵列涉及复杂的尾流激振问题, 其运行时柱体振动具有高阻尼、高雷诺数特征。基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程, 结合 SST $k-\omega$ 端流模型和任意拉格朗日-欧拉流固耦合动网格控制方法建立串列双圆柱尾流激振数值模型, 重点考察小间距比(两圆柱中心距离与圆柱外径之比)、高阻尼、高雷诺数条件下串列双圆柱的尾流激振特性。计算时间距比分别为 1.5、2、3、4、20, 振动圆柱阻尼比为 0.12, 雷诺数范围为 17 000~98 000。结果表明, 不同间距条件下下游圆柱振动表现为驰振、分离的涡激振动-驰振、涡激振动等不同的振动特性, 振动特性的不同与上游圆柱后面的尾流形态及其剪切层重附于下游圆柱的方式密切相关, 间距比为 1.5、2 时上游圆柱分离出来的剪切层交互式地重附于下游圆柱, 使下游圆柱振动表现为驰振; 间距比为 3、4 时下游圆柱振动表现为分离的涡激振动-驰振振动形式, 此振动形式的出现与恒定式的剪切层重附方式或剪切层未发生卷曲有关。

关键词: 涡激振动; 驰振; 尾流结构; 高阻尼; 高雷诺数

中图分类号:P751

文献标识码:A

doi:10.7511/dllgxb202001007

0 引言

当流体流经钝体结构时, 容易产生流激振动现象, 如涡激振动、驰振、颤振、抖振等。这种振动在海洋工程、土木建筑工程、航空航天工程等领域通常被认为对结构或设备是有害的, 工程师们在进行结构设计时均设法使结构避免发生较大幅度的流激振动, 同时流激振动问题也一直为学术界所关注。与以往传统的研究目的不同, Bernitsas 等^[1] 基于涡激振动提出和设计了一种新概念水流动能转换装置, 称为 VIVACE, 该装置主要由柱体振子、传动结构和发电机 3 个部分组成, 柱体在水流作用下产生较大幅值的涡激振动, 柱体的振动带动发电机运转, 进而产生电能。

近些年, 基于涡激振动的水流动能转换装置因其可在低流速水流条件下有效提取水流动能,

得到了学术界和工程界的广泛关注, 其中绝大部分是针对单一柱体装置进行的研究。在实际工程中为了形成具有一定规模的发电场, 需要在水下布置多根柱体装置, 形成装置阵列, 这必然涉及柱体之间的相互作用问题, 其振动特性与单一柱体的振动相比更为复杂。在多柱体流激振动研究中, 双圆柱系统是最为简单的配置方式, 同时也是研究最多的情形, 其中下游柱体在上游柱体尾流影响下的振动特性一直是很多学者非常关心的问题, 考虑到问题的复杂性, 在研究过程中往往将上游柱体固定, 在此基础上研究下游柱体的振动特性。Zdravkovich^[2] 针对流体弹性不稳定性机理在风洞中开展了串列排列的两根相同圆柱流激振动实验, 实验中上游柱体固定, 下游柱体只在横流方向发生振动, 其实验组次较为有限, 实验结果显示

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2019-11-11。

基金项目: 湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2435); 湖南省教育厅科学研究项目(19B014); 国家自然科学基金资助项目(51309038, 51679015, 51809022)。

作者简介: 李小超*(1981-), 男, 博士, 硕士生导师, E-mail: chao0735@qq.com。

在一定的条件下下游柱体在上游柱体湍流尾流的作用下会产生大振幅振动,Zdravkovich 将这一现象解释为类似于单一非圆形截面柱体产生的驰振,并称其为“尾流引起的驰振”,其最显著的特征是柱体振动时的平均位置和振动频率能够随来流速度的增加而变化.Bokaian 等^[3]进行了间距比为 1.09、1.5、2、2.5、3、4 和 5 的实验,其实验过程中上游柱体同样固定不动,实验结果表明依赖于柱体之间的距离和柱体结构阻尼的不同,下游圆柱振幅随流速变化的响应曲线呈现出涡激振动、驰振、涡激振动与驰振相结合、涡激振动与驰振分离等 4 种不同振动形式.Assi 等^[4-5]为了研究串列双圆柱的尾流激振机理,开展了一系列尾流激振实验,其实验关注于两柱体之间产生明显交互式涡街的较大间距时的振动特性,他们认为下游圆柱的尾激振动是柱体与非稳定涡流结构相互作用的结果,尾流激振不是共振现象,而是驰振,但这种驰振的激励机制不同于单一非圆形截面柱体在流体作用下产生的经典驰振现象.Chaplin 等^[6]针对海洋立管群的流激振动问题开展了串列双圆柱流激振动实验,实验中上游柱体固定,下游柱体可在顺流向和横流向两个方向振动,实验表明下游柱体两个方向均振动时特征不同于单一横流向振动,顺向振动的引入对于流固耦合具有重要的影响.以上研究均是以抑制流激振动为目的,针对流激振动能量转换装置,Nishi 等^[7]、Jung 等^[8]、Derakhshandeh 等^[9]基于尾流激振现象设计了不同的串列双圆柱流激振动能量转换装置,并开展了实验研究.

在数值模拟方面,Ding 等^[10]基于 Spalart-Allmaras 湍流模型对串列双圆柱流激振动进行了数值模拟,计算时上下游圆柱均做横流向振动,间距比范围为 2~6.Zhang 等^[11]基于 FLUENT 软件采用 SST $k-\omega$ 湍流模型对不同截面形状柱体在串列排列方式下的流激振动进行了数值模拟,其模拟的间距比范围较大,为 2~50.Nguyen 等^[12]采用分离涡方法对串列双圆柱在间距比为 4 时的尾流激振进行了数值模拟.崔维征等^[13]、胡锦鹏等^[14]开展了串列双圆柱绕流的数值模拟,模拟计算时两圆柱固定不动,对柱体周围流场变化进行了考察.陈威霖等^[15-16]对低雷诺数下串列双圆柱的振动特性进行了数值模拟研究.以上有关串列双圆柱流激振动的研究,均表明下游柱体的

振动形式随间距和流速的变化表现为涡激振动或者驰振,但对于 Bokaian 等^[3]的实验所呈现出的涡激振动与驰振分离的振动现象,目前还未见到相关数值模拟再现出来,不同振动形式的存在有待于通过更多的数值模拟工作对其产生机理进行研究.

目前串列圆柱中上游柱体尾流对下游柱体流场的影响方式以及下游柱体不同振动形式的产生机理尚未形成一致的结论.本文对串列双圆柱的尾流激振进行数值模拟,探讨流激振动水流动能转换装置中高阻尼、高雷诺数条件下不同间距时上下游圆柱之间的相互影响机制.

1 数值计算模型

涡旋脱落沿圆柱长度方向上的变化受圆柱长细比(圆柱长度与外径的比值)的影响比较大,沿柱体长度方向涡旋平行脱落(即流场可看作是二维的)的展宽范围称为相关长度,相关研究^[17-18]表明相关长度越长,升力越大,振动越强烈,因而流激振动能量转换装置在设计时,应使圆柱长细比在一个合适范围内,使涡旋沿整个柱体长度平行脱落^[1],这样有利于能量转换.同时考虑到三维模拟计算量非常大,本文采用不可压缩流体的二维连续方程和 Navier-Stokes 方程模拟柱体周围的流场变化:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + v \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} - \frac{\partial \bar{u}_i u'_j}{\partial x_j} \quad (2)$$

上述两式均为张量表达式,下标 i, j 等于 1 和 2,分别表示来流方向和垂直于来流方向, ρ 为流体密度, p 为压力, u_1, u_2 分别为来流方向和垂直于来流方向的流体平均速度, u'_1, u'_2 分别为来流方向和垂直于来流方向的流体脉动速度,上横线表示取时间平均.考虑到数值模拟涉及双圆柱之间复杂的耦合作用,对柱体近壁边界、边界层及自由剪切层的处理要求较高,采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[19](剪切应力输运模型)对方程组进行封闭.SST $k-\omega$ 湍流模型是 Menter^[19]结合 $k-\omega$ 湍流模型和 $k-\epsilon$ 湍流模型开发而成,能够较好地处理近壁小尺度问题.

柱体振动采用二阶振动微分方程进行模拟:

$$m \ddot{y} + c \dot{y} + \lambda y = F_y \quad (3)$$

式中: m 为振动结构质量, c 为系统阻尼, λ 为弹簧刚度, y 、 \dot{y} 、 \ddot{y} 分别为结构振动的位移、速度和加速度, F_y 为作用在柱体上的流体升力.

计算域为 $45D(x$ 方向) $\times 20D(y$ 方向) 的方形区域, 其中 D 是圆柱直径. 考虑到是湍流环境, 入流边界在给定来流速度的同时, 还给定了湍流动能和耗散率; 出流边界设置为自由出流, 零压力梯度; 侧壁采用对称边界条件, 边界为滑移固壁边界, 柱体表面为无滑移的流固耦合边界, 即满足: 位移协调条件 $d_f - d_s = 0$, 力平衡条件 $\tau_f - \tau_s = 0$ 和无滑移的速度平衡条件 $u_f - u_s = 0$, 其中 d_f 、 d_s 分别为流体和固体位移量, τ_f 、 τ_s 分别为流体和固体的应力, u_f 、 u_s 分别为流体和固体的速度.

采用有限体积法对计算域进行离散, 流体域的网格划分采用结构化四边形网格. 考虑到模拟时雷诺数较高, 柱体表面边界层很薄, 以及小间距比时柱体间隙中的流场存在较大的流速梯度, 为了较好地模拟柱体周围和柱体间隙中的流场变化, 对柱体周围及柱体间隙区块等参数梯度变化较大的区域进行了网格加密处理. 在开始计算前, 对网格数量 $10\ 000 \sim 20\ 000$ 、 $20\ 000 \sim 50\ 000$ 、 $50\ 000 \sim 80\ 000$ 对应的低、中、高 3 种网格密度进行了试算, 试算结果表明 3 种网格密度范围内, 网格密度的变化对计算结果的影响非常小, 但采用低密度网格得到的流场变化不够清晰, 因此计算采用中等密度网格, 网格的数量为 35 800, 网格划分见图 1.

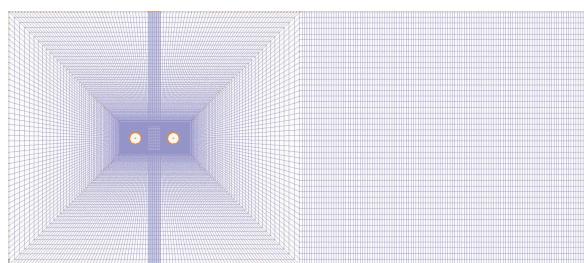


图 1 圆柱周围网格划分

Fig. 1 The grid around circular cylinders

流固耦合的求解采用双向迭代耦合求解方法, 为保证柱体在发生较大位移时流体计算域的网格质量, 采用任意拉格朗日-欧拉 (arbitrary Lagrange-Euler, ALE) 法, 根据流固耦合求解过程中边界或物体的运动和变形, 对每个时间步迭代之前的流体计算域网格进行更新和重构.

为了验证数值模型的正确性, 采用 Assi 等^[4] 的双圆柱模型实验结果进行比较, 实验中圆柱外径为 0.032 m, 振动系统质量比为 0.9, 系统阻尼比为 0.010 9, 两根圆柱串列排列, 上游柱体固定不动, 两圆柱之间的间距为 3 倍圆柱外径, 实验最大雷诺数为 13 000. 数值模拟结果与模型实验结果的比较见图 2, 图中 A 为响应幅值, U 为约化速度, $U = u/f_n D$, 其中 u 为来流速度, f_n 为柱体在水中的自振频率. 从图中可以看出, 数值模拟和模型实验结果吻合较好, 柱体振幅随流速的增加不断增大, 即柱体振动表现为驰振.

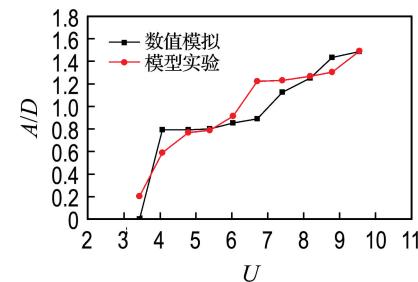


图 2 串列双圆柱中下游圆柱振动幅值数值模拟结果与 Assi 等^[4] 模型实验的比较

Fig. 2 Comparison between numerical simulation on displacement amplitude with experimental results of downstream cylinder in two cylinders in tandem arrangement by Assi, et al.^[4]

2 计算结果与分析

2.1 振动响应

为了考察高阻尼、高雷诺数条件下圆柱尾流激振特性, 开展了不同间距比情况下的尾流激振数值模拟. 圆柱直径为 0.088 9 m, 圆柱质量比为 1.927, 弹簧刚度 $\lambda = 400$ N/m, 系统阻尼为 0.12. 计算时, 两根相同直径的圆柱串列排列, 上游柱体固定、下游柱体在横流向自由振动, 间距比 S/D 为 1.5、2、3、4、20. 根据 Assi 等^[4] 的研究, 当间距比增大至 20 时, 上游柱体对下游柱体振动的影响已非常小. 本文选取间距比 20 作为参考对照. 计算流速 u 的范围为 0.2~1.1 m/s, 对应的雷诺数 Re 范围为 17 000~98 000.

图 3 给出了不同间距比情况下下游圆柱的振幅比 A/D 随约化速度的变化. 两柱体之间的间距对下游圆柱的振动特性具有非常重要的影响. 间距比 $S/D = 1.5$ 和 2 时, 柱体振动表现为驰振, 其

起振时的约化速度约为 3, 随着约化速度的增加, 振幅快速增加, 但其增加速率逐渐减小, 约化速度达到 14 左右时, 振幅似乎保持稳定。间距增加到 3D 和 4D 时, 下游圆柱的响应幅值曲线呈现出分离的涡激振动-驰振响应, 在约化速度小于 8 的范围内圆柱振动表现为涡激振动, 约化速度大于 10 时圆柱振动为驰振, 在 8 到 10 的范围内计算得到的振幅非常小, 圆柱几乎静止。随着间距比的增大, 最大涡激振动响应幅值增大, 而驰振的振幅逐渐减小, 并且发生驰振时的约化速度随间距比的增大逐渐增大。间距比为 20 时, 驰振消失, 圆柱振动完全为涡激振动。上述的模拟结果与 Bokaian 等^[3]实验结果非常相似, 不同之处在于, 他们的实验中, 在间距比 $S/D=2$ 时, 柱体振动响应呈现为分离的涡激振动-驰振响应。其原因可能是 Bokaian 等的实验使用了较高的质量比和较低的阻尼比, 其实验质量比约为 8.4, 阻尼比为 0.013。此外, 由于阻尼比较大, 本文数值模拟并未出现涡激振动与驰振相结合的振动形式, 而是随着间距的增大, 下游圆柱振动由驰振很快过渡到涡激振动与驰振分离的形式。

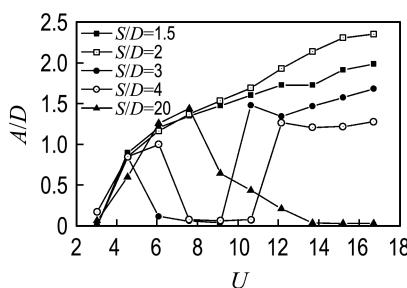


图 3 下游圆柱振幅比随约化速度的变化

Fig. 3 Variation of the amplitude ratio versus the reduced velocity for the downstream cylinder

图 4 为不同间距比情况下下游圆柱频率比随约化速度的变化。图中 f 为响应频率, 对于振幅非常小, 圆柱几乎静止的情况, 图中并未提取响应频率。从图中可以看出, 间距对下游圆柱频率的影响较小, 各间距比情况下频率比较接近, 且随约化速度的变化呈线性变化的趋势。

2.2 流体升力

柱体的振动是由于作用在柱体上的升力引起的, 升力系数 C_y 定义为

$$C_y = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho u^2 D L} \quad (4)$$

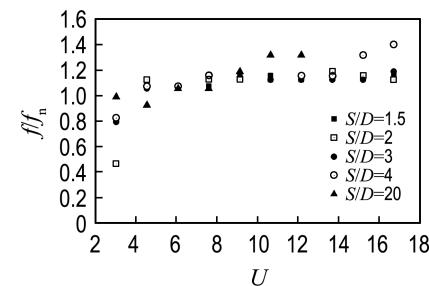


图 4 下游圆柱频率比随约化速度的变化

Fig. 4 Variation of the frequency ratio versus the reduced velocity for the downstream cylinder

其中 F_y 为升力, 随时间脉动。图 5 给出了不同间距比下, 柱体的升力系数幅值随约化速度 U 的变化曲线, 图中 $C_{y,\max}$ 为升力系数幅值。各柱体的升力系数幅值曲线形状较为相似, 均存在一个较大的峰值, 即随着约化速度的增加升力系数幅值先增大后减小。对于间距比 $S/D=3$ 和 4, 在振幅非常小的涡激振动与驰振分离的约化速度范围内, 升力系数幅值也接近于 0。

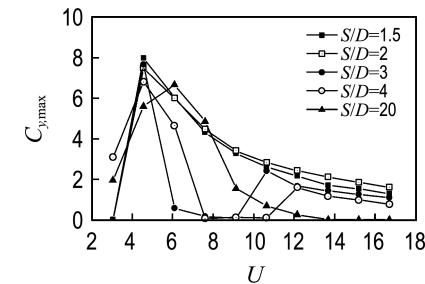


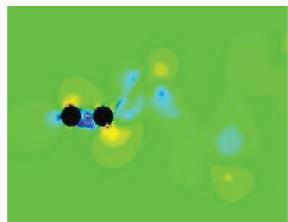
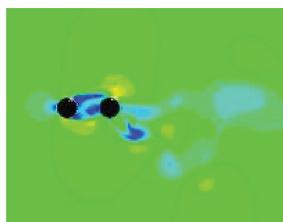
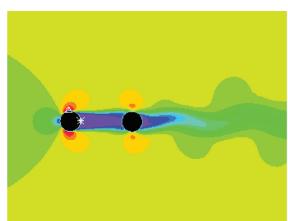
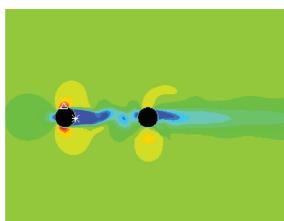
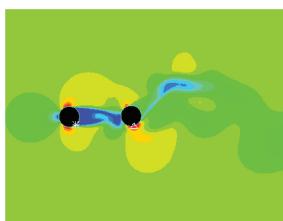
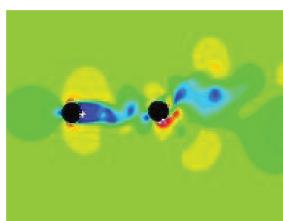
图 5 下游圆柱升力系数幅值随约化速度的变化

Fig. 5 Variation of the lift coefficient amplitude versus the reduced velocity for the downstream cylinder

2.3 尾流结构

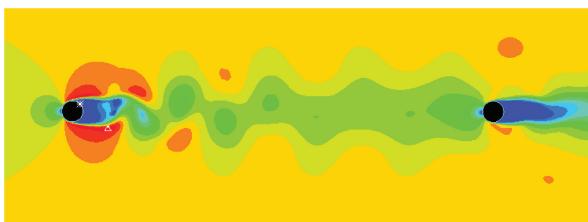
上、下游圆柱周围的尾流结构随间距和雷诺数(或约化速度)的变化而变化。为分析上、下游圆柱水动力之间的相互影响, 图 6、7 分别给出了雷诺数为 44 450 ($U=7.6$) 和 88 900 ($U=15.2$) 时不同间距比下圆柱周围的流场图。从图中可以看出, 在同一雷诺数下, 上、下游圆柱周围尾流场均随间距比的变化而变化。

雷诺数为 44 450, 间距比 $S/D=1.5, 2$ 时, 上游圆柱上下两端分离出来的流体剪切层交互式地重附于下游圆柱上, 使下游圆柱周围的涡旋脱落增强。间距比 $S/D=3$ 时, 上游圆柱上下两端分离

(a) $S/D=1.5$ (b) $S/D=2$ (a) $S/D=1.5$ (b) $S/D=2$ (c) $S/D=3$ (d) $S/D=4$ (c) $S/D=3$ (d) $S/D=4$ (e) $S/D=20$ 图 6 $Re=44\ 450$ 时串列双圆柱尾流结构Fig. 6 Wake structures for two cylinders in tandem arrangement at $Re=44\ 450$

出来的流体剪切层未发生卷曲，并且非常稳定地重附于下游圆柱上，表现为恒定式重附，此时上游圆柱像一个尾流稳定装置一样，抑制了下游圆柱的振动。间距比 $S/D=4$ 时，与 $S/D=3$ 时较为类似，上游圆柱上下两端分离出来的流体剪切层未发生卷曲，但由于距离相对较远，分离出来的流体剪切层没有重附于下游圆柱上，下游圆柱后面未产生明显的涡旋脱落，因而未能引起柱体的振动。随着间距的增大，上、下游圆柱之间的影响减弱，间距比 $S/D=20$ 时，上、下游圆柱后面均呈现出周期性的涡旋脱落，下游圆柱振动表现为完全的涡激振动。

雷诺数为 88 900，间距比 $S/D=1.5, 2$ 时，上游圆柱上下两端分离出来的流体剪切层交互式地重附于下游圆柱上，使下游圆柱周围的涡旋脱落增强。间距比 $S/D=3$ 时，上游圆柱分离出来的剪切层在下游圆柱上游表面发生卷曲，下游圆柱后面涡旋脱落较为强烈；间距比 $S/D=4$ 时，上游圆柱分离出来的剪切层在两圆柱之间发生卷曲，在

(e) $S/D=20$ 图 7 $Re=88\ 900$ 时串列双圆柱尾流结构Fig. 7 Wake structures for two cylinders in tandem arrangement at $Re=88\ 900$

两圆柱之间形成明显的涡街，下游圆柱后面涡旋脱落较为强烈。间距比 $S/D=20$ 时，下游圆柱后面未产生明显的涡旋脱落，因而未能引起柱体明显的振动。

3 结语

基于雷诺平均 Navier-Stokes 方程和 SST 湍流模型，建立串列双圆柱流激振动数值模型，其中上游柱体固定，下游柱体自由振动，对间距比 S/D 为 1.5、2、3、4、20 条件下振动特性进行了研究。柱体具有高阻尼-低质量比特征，系统阻尼比为 0.12，计算雷诺数范围为 17 000~98 000，最大雷诺数与 10^5 较为接近。本文数值模型能够较好地模拟串列双圆柱尾流激振，成功捕捉到驰振、分离的涡激振动-驰振、涡激振动等不同特性的振动现象。

不同的间距条件下下游圆柱振动表现出不同的振动特性，振动特性的不同与上游圆柱后面的尾流形态及其剪切层重附于下游圆柱的方式密切

相关,其变化是两圆柱周围尾流与下游圆柱振动相互耦合作用的结果。对于 $S/D=1.5, 2$ 的小间距情形,剪切层交互式地重附于下游圆柱,使下游圆柱涡旋脱落增强,其振动表现为驰振。 $S/D=3$ 时,恒定式的剪切层重附抑制了下游圆柱的振动,导致分离的涡激振动-驰振形式的出现。 $S/D=4$ 时在涡激振动与驰振分离的流速范围内,上、下游圆柱分离出来的流体剪切层均未发生卷曲,没有形成明显的涡街。 $S/D=20$ 时,上游圆柱的影响非常小,下游圆柱振动完全为涡激振动。

参考文献:

- [1] BERNITSAS M M, 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 [J]. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, 2008, **130**(4): 619-637.
- [2] ZDRAVKOVICH M M. Flow-induced vibration of two cylinders in tandem arrangements, and their suppression [C] // **Proceedings of the International Symposium of Flow Induced Structural Vibrations**. Berlin: Springer, 1974: 631-639.
- [3] BOKAIAN A, GEOOLA F. Wake-induced galloping of two interfering circular cylinders [J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2006, **146**: 383-415.
- [4] ASSI G R S, MENEGHINI J R, ARANHA J A P, *et al.* Experimental investigation of flow-induced vibration interference between two circular cylinders [J]. **Journal of Fluids and Structures**, 2006, **22**(6/7): 819-827.
- [5] ASSI G R S, BEARMAN P W, MENEGHINI J R. On the wake-induced vibration of tandem circular cylinders: the vortex interaction excitation mechanism [J]. **Journal of Fluid Mechanics**, 2010, **661**(4): 365-401.
- [6] CHAPLIN J R, BATTEN W M J. Simultaneous wake- and vortex-induced vibrations of a cylinder with two degrees of freedom in each direction [J]. **Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering**, 2014, **136**(3): 031101.
- [7] NISHI Y, UENO Y, NISHIO M, *et al.* Power extraction using flow-induced vibration of a circular cylinder placed near another fixed cylinder [J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2014, **333**(10): 2863-2880.
- [8] JUNG H-J, LEE S-W. The experimental validation of a new energy harvesting system based on the wake galloping phenomenon [J]. **Smart Materials and Structures**, 2011, **20**(5): 055022.
- [9] DERAKHSHANDEH J F, ARJOMANDI M, CAZZOLATO B S, *et al.* Harnessing hydro-kinetic energy from wake induced vibration using virtual mass spring damper system [J]. **Ocean Engineering**, 2015, **108**: 115-128.
- [10] DING Lin, ZHANG Li, WU Chunmei, *et al.* Numerical study on the effect of tandem spacing on flow induced motions of two cylinders with passive turbulence control [C] // **ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE 2015**. New York: ASME, 2015: OMAE2015-42301.
- [11] ZHANG Baoshou, SONG Baowei, MAO Zhao Yong, *et al.* Numerical investigation on VIV energy harvesting of bluff bodies with different cross sections in tandem arrangement [J]. **Energy**, 2017, **133**: 723-736.
- [12] NGUYEN V T, CHAN W H R, NGUYEN H H. Numerical investigation of wake induced vibrations of cylinders in tandem arrangement at subcritical Reynolds numbers [J]. **Ocean Engineering**, 2018, **154**: 341-356.
- [13] 崔维征,秦文彬,张宪堂,等. 高雷诺数下串列双圆柱绕流的影响因素研究 [J]. 水利水电技术, 2018, **49**(2): 92-98.
- [14] CUI Weizheng, QIN Wenbin, ZHANG Xiantang, *et al.* Study on influence factors of flow around twin tandem-circular cylinders under high Reynolds number [J]. **Water Resources and Hydropower Engineering**, 2018, **49**(2): 92-98. (in Chinese)
- [15] 胡锦鹏,罗森. 基于 FLUENT 的并列双圆柱绕流二维数值模拟分析 [J]. 科学技术创新, 2019(2): 46-47.
- [16] HU Jinpeng, LUO Sen. Two dimensional numerical simulation of flow around two side-by-side cylinders using FLUENT [J]. **Scientific and Technological Innovation**, 2019(2): 46-47. (in Chinese)
- [17] 陈威霖,及春宁,许栋. 小间距比下串列双圆柱涡激振动数值模拟研究: 振动响应和流体力 [J]. 振动与冲击, 2018, **37**(23): 261-269.
- [18] CHEN Weilin, JI Chunning, XU Dong. Numerical simulations for VIVs of two tandem cylinders with small spacing ratios: vibration responses and hydrodynamic forces [J]. **Journal of Vibration and Shock**, 2018, **37**(23): 261-269. (in Chinese)

- [16] 陈威霖, 及春宁, 许栋. 小间距比下串列双圆柱涡激振动数值模拟研究: 尾流和耦合机制 [J]. 振动与冲击, 2018, 37(23): 270-277, 298.
- CHEN Weilin, JI Chunning, XU Dong. Numerical simulations for VIV of two tandem cylinders with small spacing ratios: wake flow and interaction mechanism [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(23): 270-277, 298. (in Chinese)
- [17] SZEPESSY S, BEARMAN P W. Aspect ratio and end plate effects on vortex shedding from a circular cylinder [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1992, 234: 191-217.
- [18] NORBERG C. An experimental investigation of the flow around a circular cylinder: influence of aspect ratio [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1994, 258: 287-316.
- [19] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering application [J]. *Journal of American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1994, 32(8): 1598-1605.

Numerical investigation on high damping, high Reynolds numbers wake-induced vibrations of cylinders in tandem arrangement

LI Xiaochao^{*1,2,3,4}, LUO Xuan⁵, XU Wei^{1,2}, HUANG Xiaoyun^{1,3}, CHEN Long^{1,4}

- (1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province,
 Changsha 410114, China;
 3. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province,
 Changsha 410114, China;
 4. Engineering and Technical Center of Hunan Provincial Environmental Protection for River-Lake Dredging
 Pollution Control, Changsha 410114, China;
 5. Shenzhen Shenshui Water Resources Consulting Co., Ltd., Shenzhen 518003, China)

Abstract: The flow-induced vibrations (FIVs) based hydrokinetic energy converter consists of cylinder array. High Reynolds numbers and high damping are required to operate the cylinders of the energy converter. Wake-induced vibration is a complex flow-structure interaction problem which is concerned in flow-induced vibrations of cylinders. An extensive study of wake-induced vibrations of two closely spaced circular cylinders in tandem arrangement at high Reynolds numbers and high damping conditions is presented using a computational fluid dynamics approach. The fluid flow is modeled using Reynolds-averaged Navier-Stokes equations in conjunction with the SST $k-\omega$ turbulence model. An arbitrary Lagrange-Euler (ALE) fluid-field model is used to simulate the fluid-structure interactions. Five spacing ratios are examined, i.e., $S/D=1.5, 2, 3, 4$ and 20 (S is the gap spacing between the centers of the two cylinders; D is the diameter of cylinder). The damping ratio is kept a constant of 0.12 , and the Reynolds number is from $17\,000$ to $98\,000$. Depending on the cylinders' separation, the cylinder exhibits a galloping, or a separated vortex-resonance and galloping, or a vortex-resonance. It is found that the wake pattern of the upstream cylinder and the reattachment of shear layers that separate from the upstream cylinder have strong influence in changing vortex shedding behind the downstream one, and then affects the vibration characteristics of the downstream one. For $S/D=1.5$ and 2 , the shear layers reattach alternately to the surface of the downstream cylinder and the downstream cylinder shows a galloping response; for $S/D=3$ or 4 , the downstream cylinder exhibits a separated vortex-resonance and galloping due to the steady reattachment of the shear layers or no roll-up shear layer.

Key words: vortex-induced vibration; galloping; wake structure; high damping; high Reynolds numbers