

# 阶梯流中不同来流方向对柔性双立管涡激振动影响 CFD 分析

武磊, 邓迪, 万德成\*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

\*通信作者: [dcwan@situ.edu.cn](mailto:dcwan@situ.edu.cn)

**摘要:** 涡激振动是导致海洋立管疲劳损坏的重要因素之一, 已引起国内外学者的广泛研究。本研究使用基于开源 OpenFOAM 平台自主开发的 viv-FOAM-SJTU 求解器, 对不同方向阶梯来流下柔性双立管的横流向涡激振动进行了数值模拟。立管直径  $D = 0.028\text{m}$ , 长细比  $L / D = 469$ , 立管间距为  $4D$ 。立管下端 45% 长度处于均匀流中, 流速为  $0.6\text{m/s}$ , 剩余部分处于静水中。来流方向分别取与双立管轴线所在平面夹角  $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$  和  $90^\circ$ , 并与相同来流条件下的单立管涡激振动进行对比。数值计算结果表明, 由于双立管间的相互影响, 上游立管主振模态升高, 下游立管主振模态降低。来流方向的改变使得立管间的尾流影响发生变化, 上下游立管的振动模态也相应改变。

**关键词:** 柔性双立管; 涡激振动; 来流方向影响; viv-FOAM-SJTU 求解器

## 1 引言

涡激振动问题是海洋工程关注的焦点之一。随着深海油气资源的进一步开发, 立管的长细比逐渐增大。大长细比立管的振动模态与刚性圆柱振动有较大的区别。在平台立管数量增加的情况下, 多立管涡激振动更加普遍。相较于单立管情形, 立管间的相互影响使得多立管涡激振动响应更为复杂。

关于柔性多立管涡激振动的研究主要集中于双立管情形, 包括串列双立管、并列双立管以及错列双立管。相比于单立管情形, 双立管涡激振动的影响因素更多, 包括立管自身的结构参数, 如立管长细比、弯曲刚度、质量比、直径比等; 还受外界流场影响, 如流速大小、流速分布以及来流方向等; 同时, 立管间距也是一个重要影响因素。

目前关于柔性双立管多为实验研究, 而数值研究相对较少。Sanaati 和 Kato<sup>[9]</sup>通过实验研究均匀横流中距离干涉对并列双立管的水动力响应的影响, 对立管中心间距分别为 2.75

倍直径和 5.5 倍直径下双立管的横流向振幅响应、频率响应、立管相位同步以及升阻力系数进行分析比较; Huera-Huarte 和 Bearman<sup>[5]</sup>对串列双立管的涡激振动及尾流诱发振动进行实验研究, 考察了中心间距从 2 倍直径变化到 4 倍直径情况下对立管动力响应的影响; Huera-Huarte 和 Gharib<sup>[6]</sup>对尾流干涉情况下并列双立管的涡激振动进行实验, 结果表明, 当立管中心间距小于 3.5 倍直径时, 双立管均呈现出尾流耦合涡激振动(WCVIV), 而当间距增大则耦合十分微弱; Huera-Huarte 等人<sup>[7]</sup>实验研究了浸没在上游固定立管尾流中的下游立管的涡激振动响应, 分析了不同间距下下游立管的振幅及频率响应; Xu 等<sup>[11]</sup>利用实验方法对均匀流下并列双立管涡激振动进行研究, 比较了不同间距情况下立管的主振频率、主振模态、均方根振幅以及顺流向和横流向的运动轨迹; Deng<sup>[2]</sup>等利用自主开发的 viv-FOAM-SJTU 求解器对阶梯流下串列及并列双立管涡激振动进行数值模拟, 研究了立管间距对振动模态的影响。

上述研究均关心固定来流情况下立管间距对涡激振动的影响, 而对于实际工程而言, 来流方向对双立管涡激振动的影响也十分重要。本课题组基于 OpenFOAM 开源程序包, 结合切片理论, 自主开发了用于预报深海柔性立管涡激振动的 CFD 求解器 viv-FOAM-SJTU, 文献<sup>[3,4,12]</sup>对其有效性进行了验证。本文基于该求解器, 对固定立管间距情况下不同来流方向对双立管涡激振动的影响进行数值研究。

## 2 数值方法

### 2.1 流体动力学控制方程

流体域的求解采用 RANS 方程并结合  $k-\omega$  SST 湍流模型, 控制方程如下:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial (2\mu \bar{S}_{ij} - \rho \bar{u}'_i \bar{u}'_j)}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中:  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$  为时均应变率张量,  $\tau_{ij} = -\bar{u}'_i \bar{u}'_j$  为雷诺应力张量, 该项由脉动速度

产生, 代表湍流效应。

### 2.2 结构动力学控制方程

结构动力学计算采用 Bernoulli-Euler 弯曲梁模型。立管两端的边界条件设定为简支, 不考虑张力随时间变化。结构的运动方程为一组二阶常微分方程, 表示如下:

$$[M][\ddot{y}] + [C][\dot{y}] + [K][y] = [F] \quad (3)$$

式中： $[M]$ 为质量矩阵， $[C]$ 为阻尼矩阵， $[K]$ 为刚度矩阵， $[F]$ 为载荷矩阵， $[y]$ 、 $[\dot{y}]$ 、 $[\ddot{y}]$ 分别为结构横流向位移、速度和加速度向量。该控制方程采用 Newmark-beta 法<sup>[1]</sup>进行求解。

### 2.3 流固耦合切片法

深海柔性立管的长细比较大，要对其涡激振动响应实现全流场的三维时域求解十分困难。采用切片求解这种细长柔性立管的涡激振动响应，是数值求解该类超大计算域问题的一种简化处理。沿立管轴向等间距选取若干切片，在各切片上应用计算流体力学方法局部求解流体力，并假定立管间流体力渐变，则立管所受流体力可由各切片处的流体力插值计算得到。

在每个时间步开始时，将流场计算得到的流体力加载到结构模型的单元节点上，以此计算结构位移，同时在流体场中进行网格变形操作以获取新的流体场，从而实现时间步的推进(图 1)。

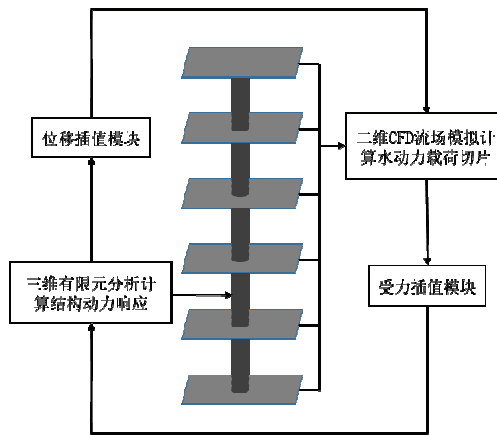


图 1 流固耦合切片法

## 3 计算模型

本研究基于 F.J.Huera Huarte<sup>[8]</sup>的标准实验建立计算模型。立管直径为 0.028m,长度为 13.12m,相应的长细比为  $L/D = 469$ 。立管处于阶梯流中,下端 45%长度部分处于均匀流中,流速为 0.6m/s,剩余部分处于静水中。立管两端简支,顶端施加预张力  $T = 1610$  N。有关立管的主要参数列于表 1。

表 1 立管模型的主要参数

参数	符号	数值	单位
直径	$D$	0.028	m
管长	$L$	13.12	m
长细比	$L/D$	469	—
质量比	$m^*$	2.4	—
弯曲刚度	$EI$	29.88	$N \cdot m^2$
顶张力	$T_t$	1610	N
流速	$U$	0.6	m/s
雷诺数	$Re$	16800	—

立管的结构场被均分为 80 个单元，共 81 个节点，其中 36 个单元处于立管下端的均匀流场中。均匀流场区域被均分成 20 个切片，立管切片划分的模型如图 2(a)。图 2(b)给出了串联双立管各切片的流场计算域网格分布。其中入口（左）距离上游立管（左）截面圆心 10 倍直径，出口（右）距离下游立管（右）截面圆心 20 倍直径，横流向两侧距离立管截面圆心 10 倍直径。以立管截面圆心为圆心，1.5 倍直径为半径形成外圆，立管截面与外圆之间网格划分较为密集，以精确捕捉流场信息；外圆以外区域网格划分相对稀疏，以提高计算效率。

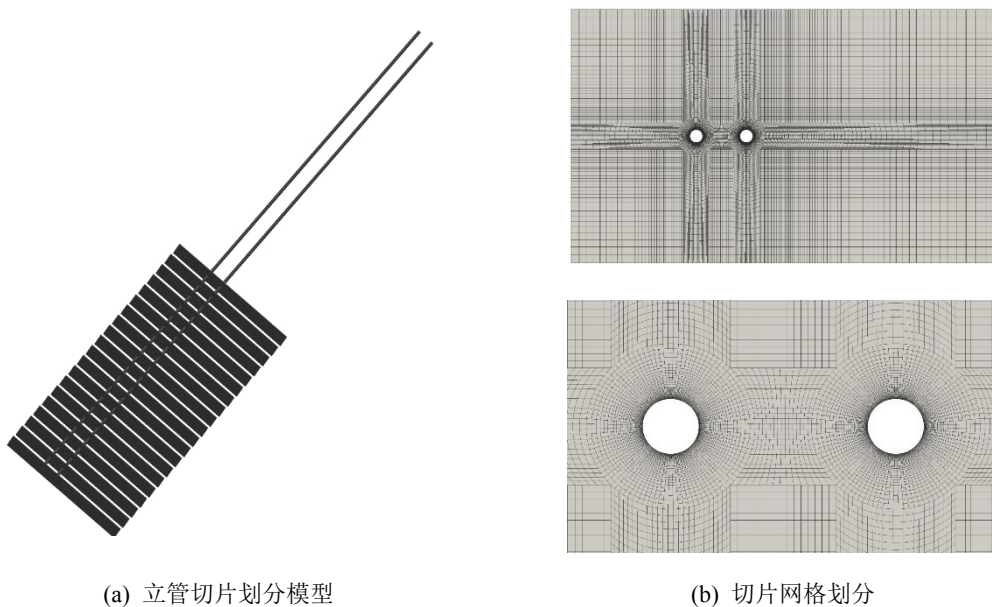


图 2 立管切片划分模型及切片网格划分

## 4 计算结果及分析

考虑来流方向与双立管轴线所在平面夹角  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ ，如图 3 所示。其中， $0^\circ$ 代表串联布置， $90^\circ$ 代表并列布置。

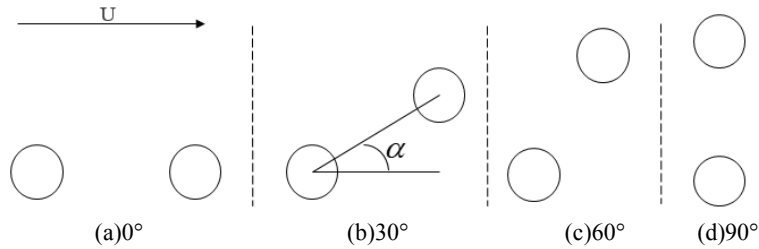


图 3 来流方向示意图

### 4.1 单立管

作为对比，首先给出单立管涡激振动响应的计算结果。图 4 为横流向振动包络线及功率谱密度。可以看出，在计算模型给定工况下，单立管横流向振动基本表现为单一的四阶振动模态，且主振频率为 3.9Hz。

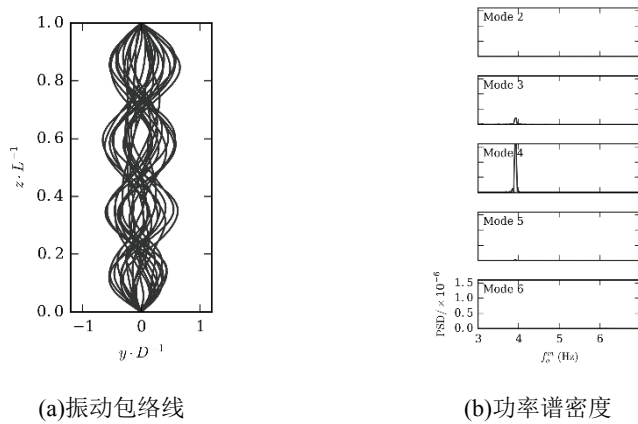


图 4 横流向振动包络线及功率谱密度

### 4.2 $\alpha = 0^\circ$

$\alpha = 0^\circ$ 的工况即为双立管串联布置，图 5 和图 6 分别给出了上游及下游立管的横流向振动包络线、位移时空云图、各阶模态权重及其功率谱密度。

由图 5 可以看出，上游立管横流向的主振模态为五阶，并且四阶振动模态的权重也较大，表现出明显的多模态振动特性。其中，五阶振动模态的频率集中在 5.2Hz，四阶振动

模态的频率集中在 4.8Hz。由图 5(c)可以看出, 各阶模态的频率覆盖范围较单立管更广, 且相邻模态的频率范围存在部分重叠, 这与模态间的转换有关。图 5(d)清晰地反映出主振模态在四阶与五阶之间的频繁转变, 图 5(b)呈现了四阶模态到五阶模态的转变过程。图 6 则反映出, 下游立管横流向振动基本表现为单一的三阶主振模态, 且主振频率基本锁定在 3.8Hz。可以看出, 当双立管串联布置, 上下游立管的振动模态与单立管情形均有不同。这可能是由于立管间存在尾流影响, 即上游立管的尾流改变了下游立管的来流条件, 同时下游立管干扰了上游立管的尾流与旋涡生成<sup>[10]</sup>。

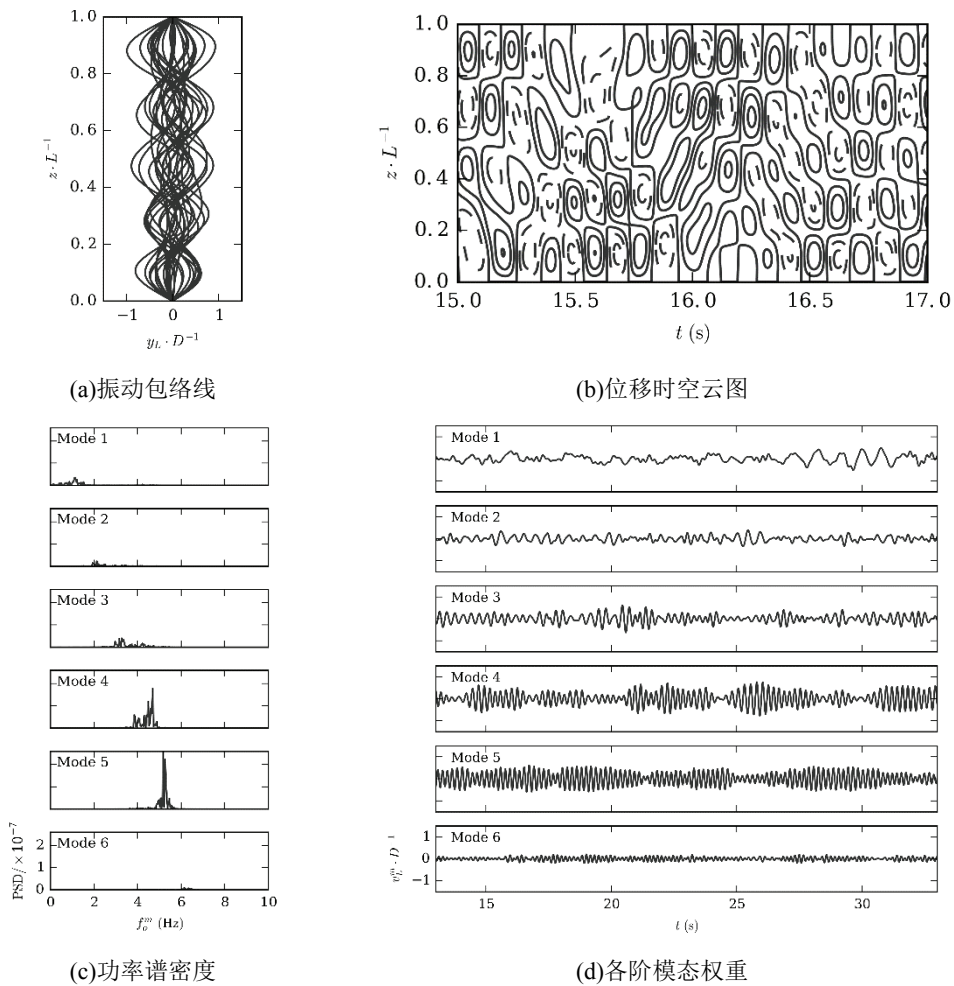


图 5 上游立管横流向振动包络线、位移时空云图、功率谱密度及各阶模态权重( $\alpha = 0^\circ$ )

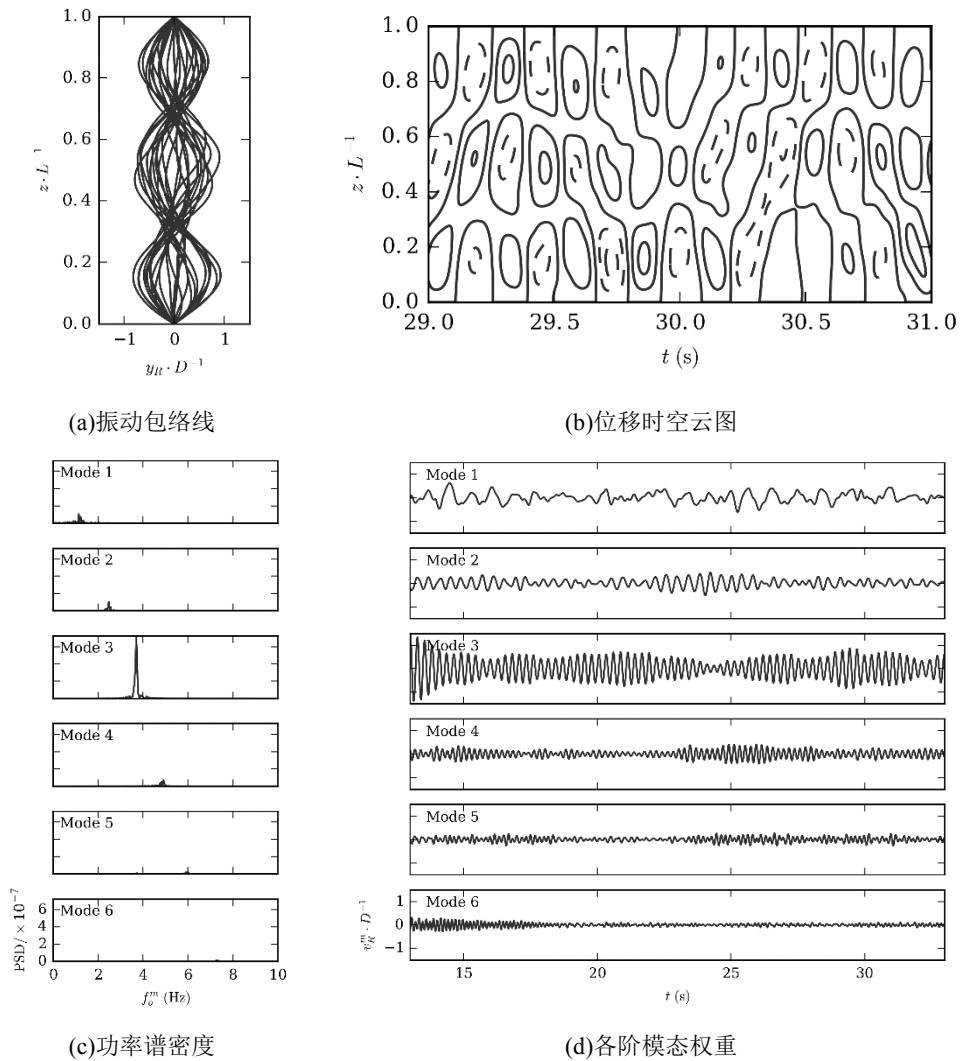


图6 下游立管横流向振动包络线、位移时空云图、功率谱密度及各阶模态权重( $\alpha = 0^\circ$ )

### 4.3 $\alpha = 30^\circ$

来流方向与立管轴线所在平面夹角为 $\alpha = 30^\circ$ 的情形如图3(b)所示。图7和图8分别为该工况下上下游立管的振动包络线、位移时空云图、各阶模态权重及功率谱密度。

与 $\alpha = 0^\circ$ 的情形相似， $\alpha = 30^\circ$ 时，上游立管的主振模态为五阶，且表现出明显的多模态振动。其中，五阶与四阶模态的权重较大，二者存在频繁的相互转换。与 $\alpha = 0^\circ$ 情形不同的是，四阶振动模态的频率有所下降，约为4.1Hz。由图8可知，下游立管仍表现出单一的三阶振动模态，且振动频率锁定在3.8Hz。

$\alpha = 30^\circ$ 时，上下游立管属于错列布置，二者间既存在尾流影响，也存在横流向距离影

响<sup>[10]</sup>。上下游立管的振动模态与  $\alpha = 0^\circ$  的情形基本一致，仅上游立管四阶振动模态的频率有所降低，这可能是因为尾流影响的减弱，也可能是因为立管间横流向的距离影响，这有待于进一步研究。

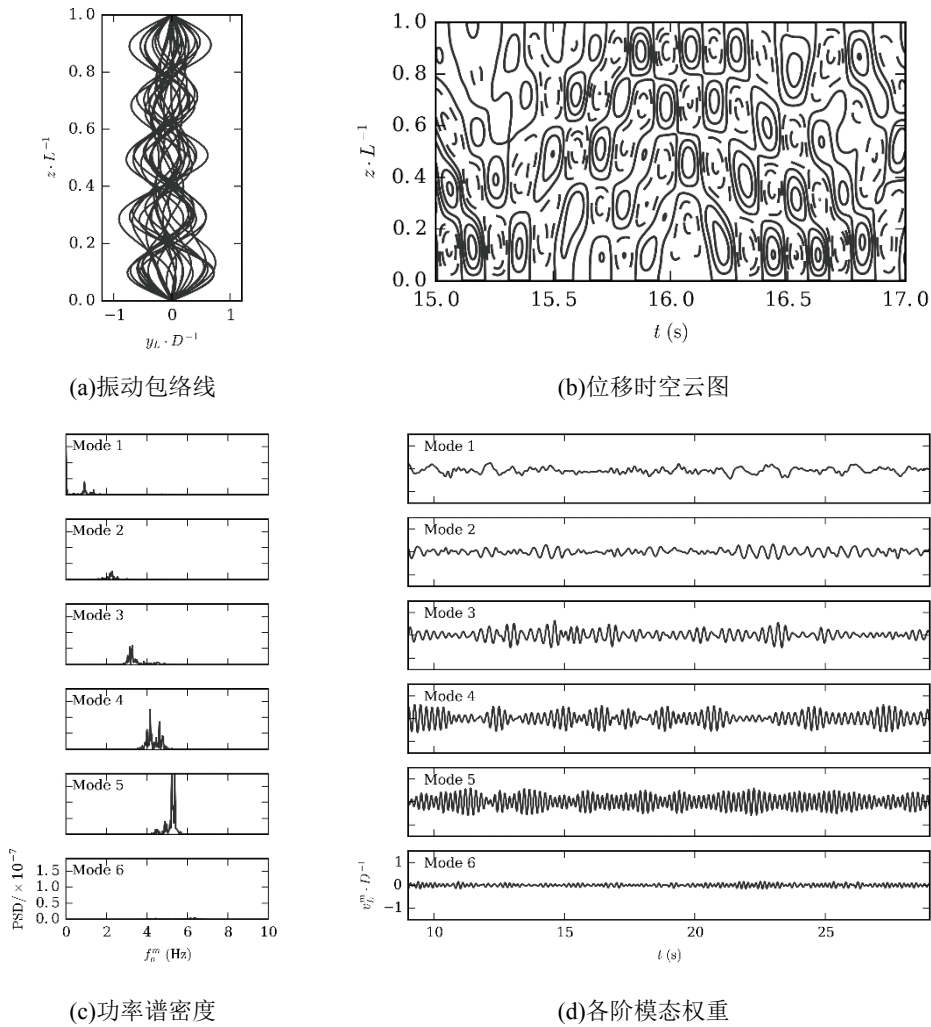


图 7 上游立管横流向振动包络线、位移时空云图、功率谱密度及各阶模态权重 ( $\alpha = 30^\circ$ )



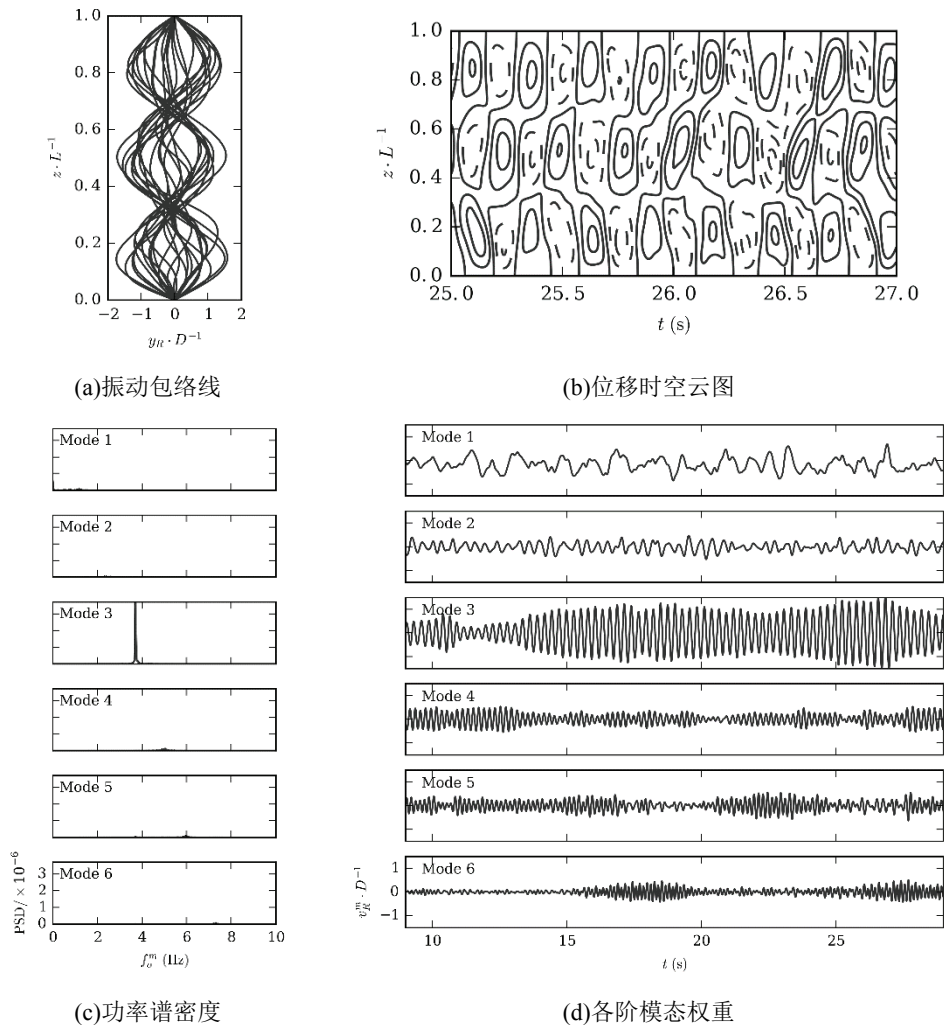


图 8 下游立管横流向振动包络线、位移时空云图、功率谱密度及各阶模态权重( $\alpha = 30^\circ$ )

#### 4.4 $\alpha = 60^\circ$

$\alpha = 60^\circ$ 的情形如图 3(c)所示, 图 9 和图 10 分别呈现了该工况下上下游立管的振动包络线、位移时空云图、各阶模态权重及功率谱密度。

从图 9 可以看出, 与  $\alpha = 0^\circ$ 和  $\alpha = 30^\circ$ 的工况不同,  $\alpha = 60^\circ$ 时上游立管四阶振动模态占主导, 频率约为 4.4Hz。同时呈现出明显的多模态振动特性, 大部分时刻至少有 3 个模态参与振动, 且主振模态存在相互转换。从图 10 可以看出, 下游立管的主振模态为四阶, 并且多模态振动的特性较为明显, 这与前述两种工况的下游立管振动响应有较大区别。

$\alpha = 60^\circ$ 时, 双立管属于错列布置, 二者间同时存在尾流影响与距离影响<sup>[10]</sup>。由于此时立管间的横向间距较  $\alpha = 30^\circ$ 更大, 因此尾流影响相对更弱。

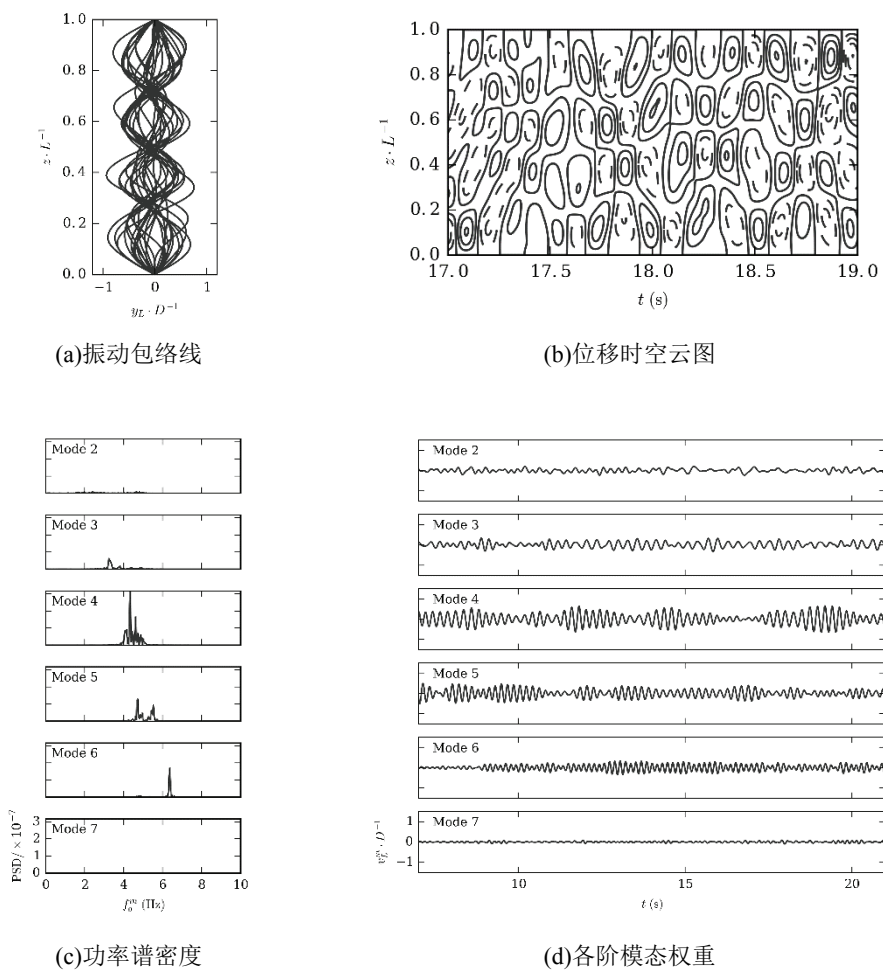


图9 上游立管横流向振动包络线、位移时空云图、功率谱密度及各阶模态权重( $\alpha = 60^\circ$ )

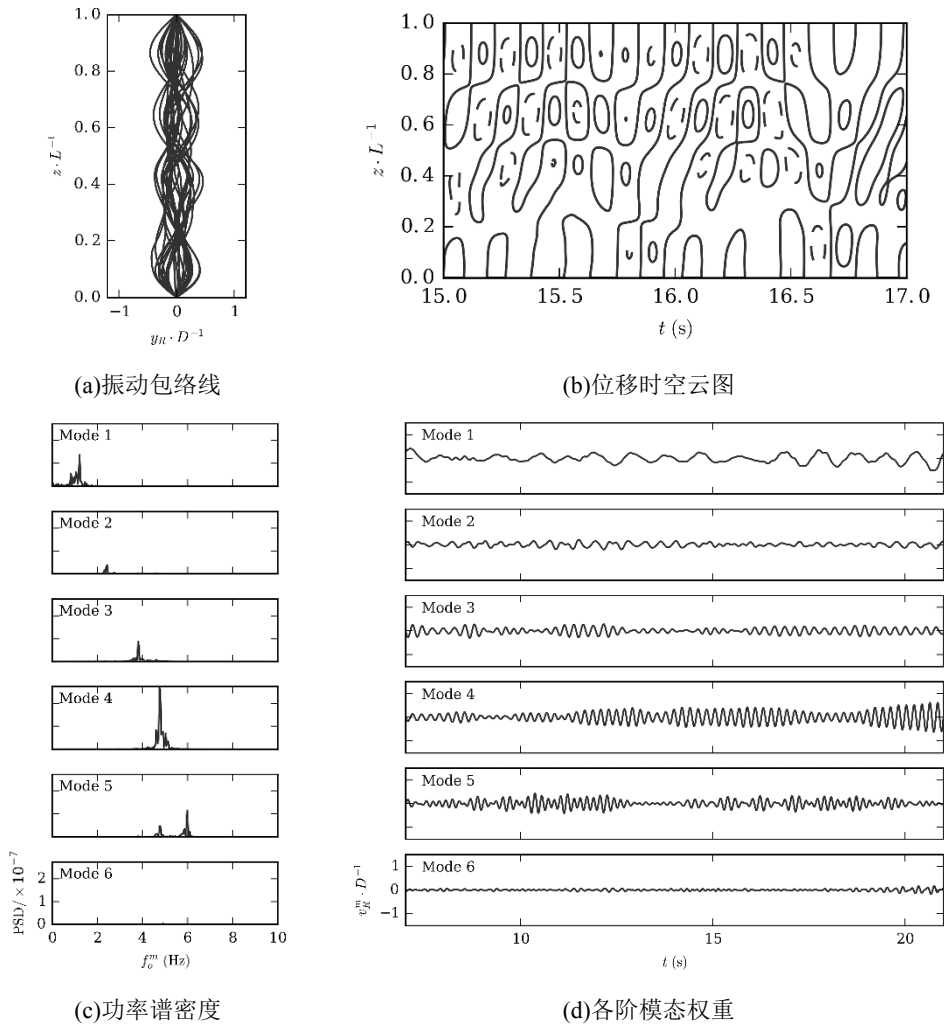


图 10 下游立管横流向振动包络线、位移时空云图、功率谱密度及各阶模态权重( $\alpha = 60^\circ$ )

#### 4.5 $\alpha = 90^\circ$

$\alpha = 90^\circ$ 属于并列布置，如图 3(d)所示。图 11 和图 12 分别给出了该工况下上侧及下侧立管的振动包络线、位移时空云图、各阶模态权重及功率谱密度。

图 11 显示，上侧立管的主振模态为四阶，频率为 4.8Hz，三阶模态占有一定的比重，频率约为 3.8Hz，其余模态成分比重较小。从图 12 可以看出，下侧立管五阶模态占主导，并与四阶模态存在相互转换。

在并列工况下，立管间距为 4D 时，二者仅存在横流向距离影响，而上下侧立管振动模态的差异可能与由距离影响导致的振动相位差有关<sup>[10]</sup>。

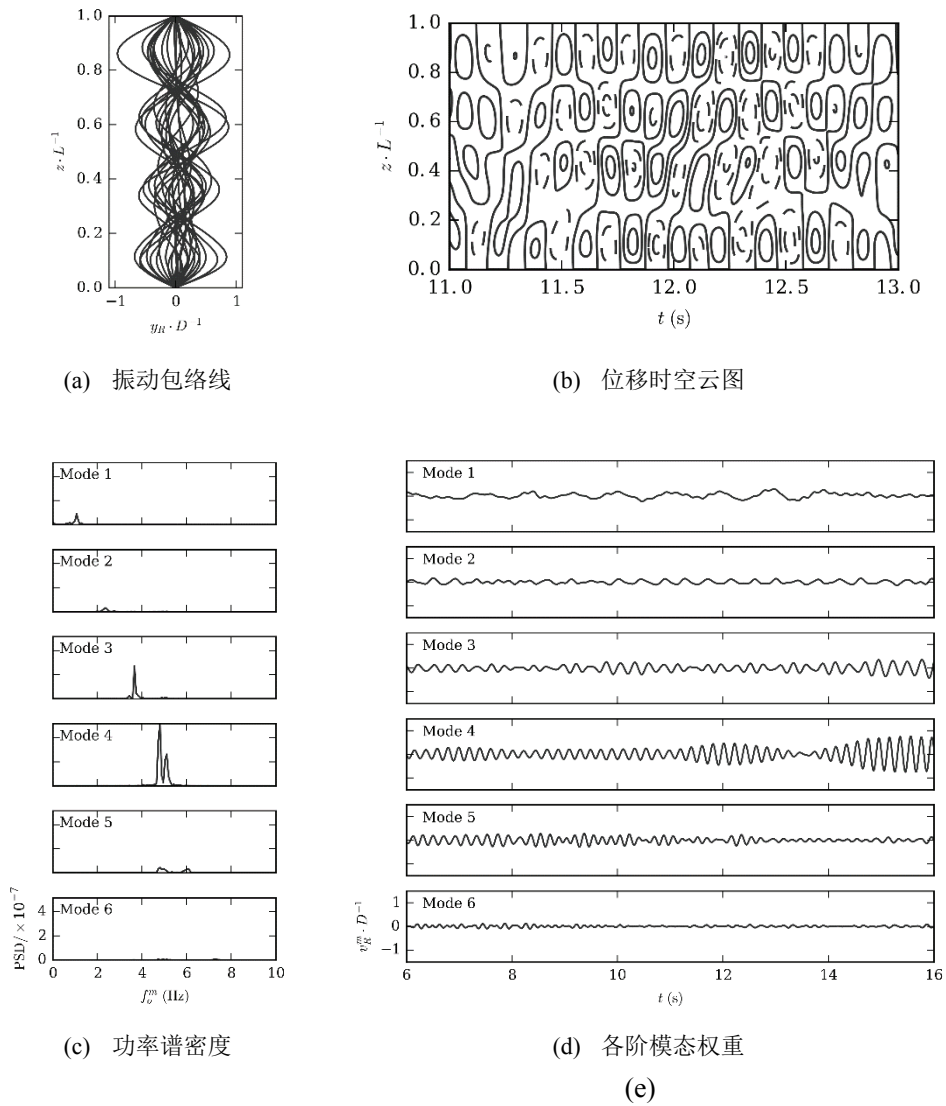


图 11 上侧立管横流向振动包络线、位移时空云图、功率谱密度及各阶模态权重( $\alpha = 90^\circ$ )

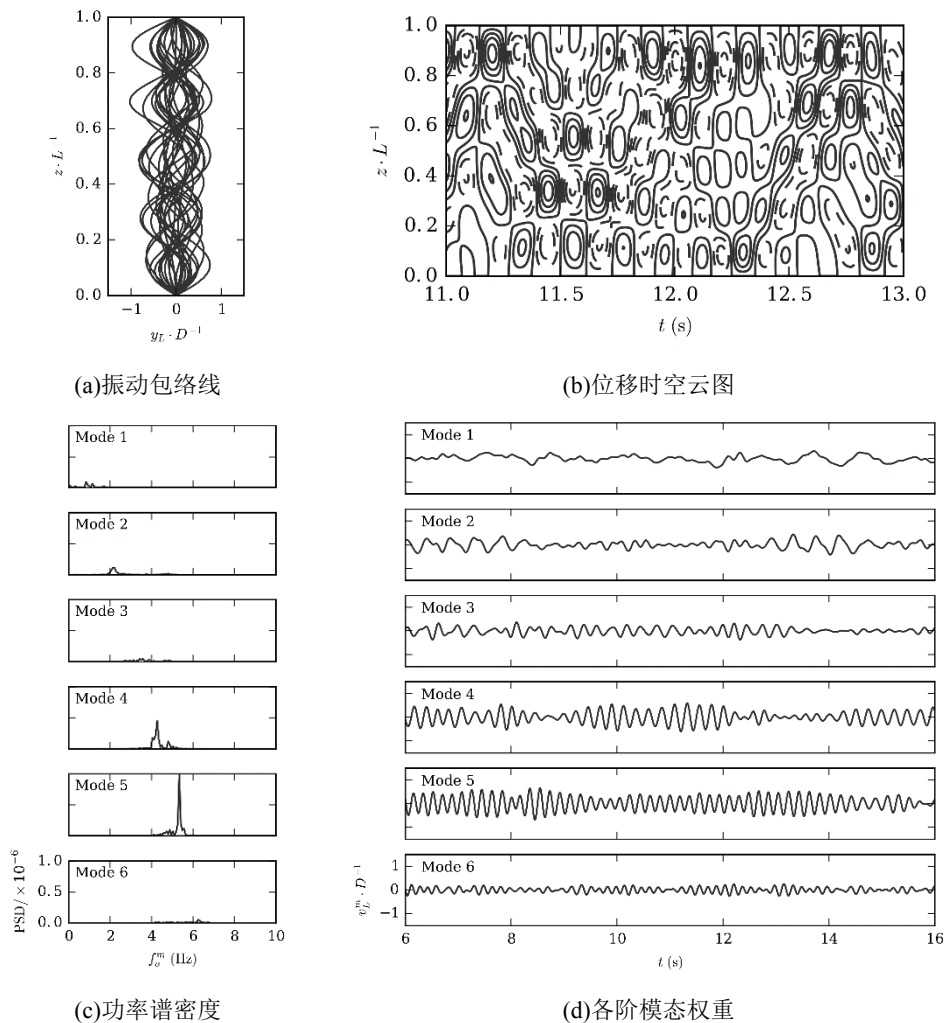


图 12 下侧立管横流向振动包络线、位移时空云图、功率谱密度及各阶模态权重( $\alpha = 90^\circ$ )

## 5 结论

基于 viv-FOAM-SJTU 求解器对阶梯流中来流方向对双立管横流向涡激振动的影响进行了数值研究，立管中心间距取  $4D$ ，分别计算了  $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  四个工况，并与单立管横流向振动进行对比。

研究发现，由于立管间的相互影响，双立管涡激振动与单立管情形存在较大差异，并且不同的来流方向会导致立管振动模态的变化。对于  $\alpha = 0^\circ$ ，即串联情形，上游立管的主振模态表现为五阶，具有多模态振动特性，且与四阶模态存在相互转换。而在上游立管的

尾流及来流共同作用下,下游立管则表现出较为单一的三阶振动模态;  $\alpha = 30^\circ$ 时,上游立管仍具有多模态振动特性,且五阶模态占主导,仅四阶模态的频率相对  $\alpha = 0^\circ$ 有所降低。此时上游立管的尾流影响依然存在,下游立管仍为单一的三阶振动模态;对于  $\alpha = 60^\circ$ 的情形,立管间横流向距离进一步增大,上游立管的尾流影响已经较小。此时上游立管与下游立管均呈现出多模态振动特性,且主振模态均为四阶;  $\alpha = 90^\circ$ ,即并列情形,此时尾流影响已不存在,而受立管横流向间距影响。双立管均表现为多模态振动,上侧立管主振模态为四阶,而下侧立管则表现为更高的五阶主振模态。对于固定间距的双立管而言,不同的来流方向会导致立管间的相互影响发生改变,进而导致立管振动模态的变化。关于立管间的尾流影响及横流向距离影响的机制有待于进一步研究。

### 致谢

本工作获得国家自然科学基金项目(51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099),上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022),上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300),以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)资助。在此一并表示衷心感谢。

### 参 考 文 献

- 1 Clough RW, Penzien J. Dynamics of Structures[J]. Journal of Applied Mechanics, 2001, 44(2): 366.
- 2 Deng D, Fu B W, Wan D C. Modal Vibrations of Side-by-Side and Tandem Vertical Riser Pipes Experiencing a Stepped Current[C]//The twenty-seventh (2017) International Ocean and Polar Engineering Conference. San Francisco, America. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2017: 1213-1220.
- 3 DuanMu Y, Wan D C, Xue H X. Prediction of Response for Vortex-Induced Vibrations of a Flexible Riser Pipe by using Multi-Strip Method[C]//The twenty-sixth (2016) International Ocean and Polar Engineering Conference. Rhodes, Greece. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2016: 1065-1073.
- 4 DuanMu Y, Fu B W, Wan D C. The effect of top tension on VIV modal analysis of a vertical flexible risers[C]//The second conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics. Wuxi, China: 2016: 455-460.
- 5 Huera-Huarte F J, Bearman P W. Vortex- and wake-induced vibrations of a tandem arrangement of two flexible circular cylinders with near wake interference[J]. Journal of Fluids & Structures, 2011, 27(2):193-211.
- 6 Huera-Huarte F J, Gharib M. Flow-induced vibrations of a side-by-side arrangement of two flexible circular cylinders[J]. Journal of Fluids & Structures, 2011, 27(3):354-366.
- 7 Huera-Huarte F J, Bangash Z A, González L M. Multi-mode vortex and wake-induced vibrations of a flexible

- cylinder in tandem arrangement[J]. Journal of Fluids & Structures, 2016, 66:571-588.
- 8 Huarte F J H. Multi-mode vortex-induced vibrations of a flexible circular cylinder[D]. Imperial College London, 2006.
- 9 Sanaati B, Kato N. A study on the proximity interference and synchronization between two side-by-side flexible cylinders[J]. Ocean Engineering, 2014, 85(4):65-79.
- 10 Sumner D. Two circular cylinders in cross-flow: A review[J]. Journal of Fluids & Structures, 2010, 26(6):849-899.
- 11 Xu W, Cheng A, Ma Y, et al. Multi-mode flow-induced vibrations of two side-by-side slender flexible cylinders in a uniform flow[J]. Marine Structures, 2018, 57:219-236.
- 12 端木玉, 万德成. 不同长细比圆柱绕流的大涡模拟[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(3):295-302.

## **Effect analysis of different directions of flow on vortex-induced vibrations of two flexible risers in step flow**

WU Lei, DENG Di, WAN De-cheng\*

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

\*Corresponding author: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn)

**Abstract:** Vortex-induced vibration is one of the important factors leading to the fatigue damage of marine risers and has caused extensive research by scholars at home and abroad. In this article, numerical simulations are carried out for the cross-flow vortex-induced vibration of two flexible risers in step flow coming from different directions, using the the viv-FOAM-SJTU solver developed by the open-source OpenFOAM platform. The riser diameter  $D$  is 0.028m, aspect ratio  $L/D$  is 469, the riser spacing is  $4D$ . The 45% length of the lower part of the riser is in the uniform flow, the velocity of flow is 0.6m/s, and the rest is in still water. The angle between the incoming flow direction and the plane of the two risers' axis varies from  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  to  $90^\circ$ , and compared with vortex-induced vibration of single riser under the same flow conditions. The numerical results show that, due to the mutual influence between the two risers, the dominant vibration mode of the upstream riser rises, and the downstream riser decreases. The change of the direction of the incoming flow will cause the wake influence of the risers to change, and the vibration modes of both risers change accordingly.

**Key words:** Two flexible risers; Vortex-induced vibration; Effect of flow direction; viv-FOAM-SJTU solver