

# 半潜平台涡激运动位移与力迟滞现象数值分析

李思明, 赵伟文, 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 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@sjtu.edu.cn

**摘要:** 半潜式平台涡激运动中力与位移的迟滞现象是指随折合速度增大, 升力系数先于横荡运动响应达到峰值。本研究采用自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器, 利用 SST-DDES 方法, 对两种不同立柱形状的半潜式平台的涡激运动进行了数值模拟, 结果证明了在  $45^\circ$  来流角工况下, 半潜式平台涡激运动中存在力与位移的迟滞现象。利用 CFD 研究方法的优点, 从上游立柱漩涡脱落对两侧立柱漩涡脱落干扰的角度分析了迟滞现象产生的原因, 并通过立柱表面压力系数分布的角度进行了佐证。

**关键词:** 半潜式平台; 涡激运动; 分离涡模拟; 迟滞现象; naoe-FOAM-SJTU

## 1 引言

伴随着海洋油气开采深度的增加, 半潜式平台作为一种浮式平台在海洋工程领域得到了广泛的应用。深吃水半潜式平台通过增大平台吃水显著改善了传统半潜式平台较差的垂荡运动性能, 然而随之而来的问题则是立柱有效激励长度的增大导致的由漩涡脱落引起的脉动压力的增大使得深吃水半潜式平台可能发生明显的涡激运动 (Vortex-Induced Motion, VIM) 现象。半潜式平台的涡激运动不仅可能干扰平台的正常作业, 而且会影响立管以及系泊系统的疲劳寿命。因此, 近年来众多学者对半潜式平台的涡激运动问题进行了研究<sup>[1-2]</sup>。相较于单柱式浮式平台如 Spar 平台, 半潜式平台的多立柱之间的漩涡脱落的相互干扰使得其涡激运动问题更加复杂。由于涡激运动现象的产生是由于结构两侧交替性的漩涡脱落引起的脉动压力所导致的, 因此, 在涡激运动中, 位移与力之间存在着紧密的联系。然而, 研究表明, 不同于单立柱式浮体涡激运动中升力与横荡运动幅值之间随折合速度相同的变化趋势, 半潜式平台在  $45^\circ$  来流角工况下的涡激运动升力系数峰值对应的折合速度要稍早于横荡运动响应峰值, 即存在着一个升力系数下降而横向运动幅值上升的区间, 这种现象

被定义为涡激运动中力与位移的迟滞现象<sup>[3]</sup>。

本研究的目的在于通过 CFD 研究方法解释造成半潜式平台涡激运动力与位移之间迟滞效应的产生原因。因此,基于自主研发的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU,对两种不同立柱形状的半潜式平台在 45° 来流角工况下,折合速度 4~20 范围之间的涡激运动进行了数值模拟。利用 CFD 研究方法的优点,从流场的角度包括上游立柱漩涡脱落对两侧立柱漩涡脱落干扰的角度分析了迟滞现象产生的原因,并通过立柱表面压力系数分布的角度进行了佐证。

## 2 数值方法

### 2.1 naoe-FOAM-SJTU 求解器

CFD 求解器采用基于开源平台 OpenFOAM 自主开发的 naoe-FOAM-SJTU<sup>[4]</sup>,该求解器采用有限体积法,引入分离涡模拟方法处理高雷诺数下的流动分离问题,采用成熟的六自由度运动理论求解平台运动,利用弹簧变形网格处理运动带来的动边界问题,采用静态分析模型模拟系泊系统,该求解器可以实现半潜式平台的涡激运动数值模拟。

### 2.2 湍流模型

对于不可压缩黏性流体的控制方程为:

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

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u}_j \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \nu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

其中,  $\nu$  代表分子黏度,  $\tau_{ij}$  代表雷诺应力或亚格子应力张量。根据 Boussinesq 假设,  $\tau_{ij}$  可以表示为:

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k - \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (3)$$

本研究中的湍流模型采用基于剪切应力运输 SST 模型的延迟分离涡模拟 DDES 方法,分离涡 DES 方法<sup>[5]</sup>作为一种混合雷诺平均 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 和大涡模拟 (Large-Eddy Simulation, LES) 的方法,在近壁面的流动区域采用 SST 模型,而在其他区域采用亚格子模型求解流场,因此其具有既能保证求解精度,又能通过减少近壁面处的边界层网格节省计算资源的优点。

原始 SST 模型中的湍流长度尺度定义如下:

$$l_{k-\omega} = \sqrt{k} / (\beta^* \omega) \quad (4)$$

而 SST-DDES 模型中将湍流长度尺度进行如下修改:

$$l_{DDES} = l_{k-\omega} - f_d \max(0, l_{k-\omega} - C_{DES}\Delta) \quad (5)$$

其中,  $C_{DES} = (1 - F_1)C_{DES}^{k-\epsilon} + F_1C_{DES}^{k-\omega}$ ,  $f_d = 1 - \tanh\left[\left(C_{d1}r_d\right)^{C_{d2}}\right]$ ,  $r_d = \frac{V_t + \nu}{\sqrt{0.5 \cdot (S^2 + \Omega^2)}\kappa^2 d^2}$

SST-DDES 模型通过修改后的湍流长度尺度  $l_{DDES}$  控制 RANS 和 LES 方法的自动切换, 并且利用  $f_d$  函数在边界层内部靠近壁面的位置包括对数层取 0 的特点, 保证了在此区域内湍流模型退化成雷诺平均模型, 延迟了 DES 模型转换为 LES 模型, 避免了传统 DES 方法可能发生的模型应力损失问题<sup>[6]</sup>, 上述方程中的常数参考文献<sup>[7]</sup>。

### 2.3 离散格式

本文在求解控制方程时采用有限体积法离散, 时间项采用二阶隐式格式离散, 对流项采用二阶线性迎风稳定化运输(LUST)格式离散, 扩散项采用高斯线性守恒格式离散。本文压力与速度耦合求解采用 PIMPLE (混合 PISO<sup>[10]</sup>和 SIMPLE) 算法。

## 3 数值模拟

### 3.1 计算模型

为了排除半潜式平台涡激运动中出现迟滞现象的偶然性, 本文选取两种立柱形状的半潜式平台作为计算模型, 计算模型选取 Waals 等<sup>[8]</sup>所采用的半潜式平台涡激运动试验模型, 模型缩尺比为 1:70, 主要特征尺度如表 1 所示。

表 1 计算模型参数

参数	实尺度	模型尺度
缩尺比 ( $\lambda$ )	1:1	1:70
吃水( $T$ )	35 m	0.5 m
立柱间距 ( $S$ )	56 m	0.8 m
立柱宽度 ( $L$ )	14m	0.2m
立柱高度 ( $H$ )	24.5 m	0.35 m
浮筒宽度 ( $B$ )	14m	0.2m
浮筒高度 ( $H_{pon}$ )	10.5m	0.15m

该计算模型立柱截面为方形结构, 另一计算模型唯一的区别在于立柱边缘经过圆角处理, 即立柱倒角半径为  $R=0.031\text{m}$ <sup>[9]</sup>。最终形成的两种计算模型如图 1 所示。

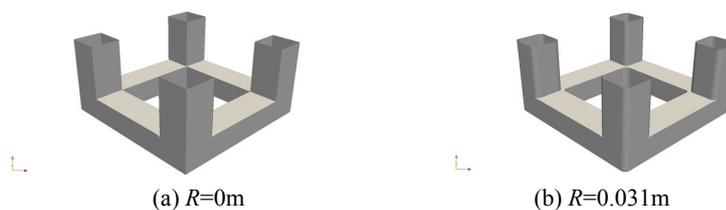


图1 计算模型

### 3.2 计算工况

由于迟滞现象可能发生在来流角度  $45^\circ$  的半潜式平台涡激运动中, 因此计算工况选取来流角度为  $45^\circ$ 。折合速度 ( $U_r$ ) 是描述涡激运动重要的无量纲参数, 其定义如下:

$$U_r = U / (f_n D) \quad (6)$$

其中,  $U$  代表来流速度,  $f_n$  代表平台在静水中横荡运动的固有频率,  $D$  代表结构垂直于来流方向的特征长度。折合速度范围选取从 4~20。每个计算工况下的计算总时长均为 600s, 计算时间步长间隔 0.01s。

### 3.3 计算域与网格划分

计算域范围如图 2 所示, 选取平台顶部中心作为计算域原点, 计算域范围为:  $-15L \leq x \leq 40L$ ,  $-15L \leq y \leq 15L$ ,  $-9L \leq z \leq 0$ , 其中  $L$  代表立柱宽度。

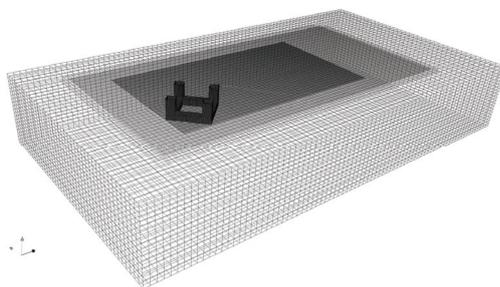


图2 计算域范围

利用 SnappyHexMesh 对半潜式平台尾部区域进行网格局部加密以及平台表面边界层网格的添加, 边界层网格数量为 8, 最终形成的网格数量大约为 330 万。图 3 和图 4 分布展示了  $z/H=-0.5$  截面的计算网格俯视图以及平台模型物面网格。

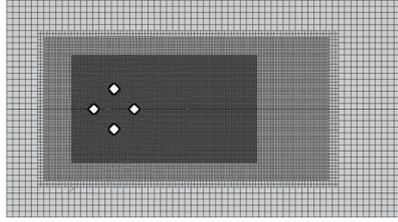
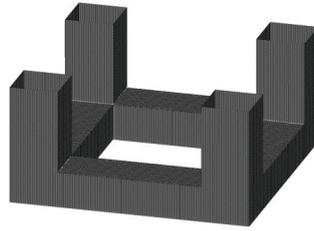
图3  $z/H=-0.5$  截面计算网格俯视

图4 物面网格

计算域的边界条件具体设置如下：上游入口采用均匀来流速度入口，下游出口采用压力积分为零，平台模型表面边界采用无滑移固壁边界，其余边界均采用对称边界条件，由于佛汝德 ( $Fr$ ) 数很低，因此自由表面效应可以忽略，因此顶部边界也同样采取对称边界条件。

## 4 结果与讨论

### 4.1 自由衰减试验

自由衰减试验的目的是为了验证当前采用的系泊系统能够提供与模型试验相同的有效刚度。模型试验的系泊系统通常采用水平四点系泊系统限制模型运动，CFD 研究中采用能够考虑三自由度耦合（包括横荡、纵荡和艏摇）的方法求解平台运动，采用四根带有预张力的线性刚度弹簧将随平台运动的导缆孔与固定的锚泊点连接起来，通过调整单根弹簧的参数，使之与模型试验的有效刚度相一致<sup>[10]</sup>。弹簧刚度参考 Chen。通过在各自自由度分别施加一个初始速度，使平台在静水中做自由衰减运动，可以得到半潜式平台各自自由度的运动固有周期。图 5 展示了计算模型在横向运动方向的自由衰减时历曲线与频率幅值图像。表 2 展示的 3 个自由度的自由衰减固有周期结果与试验吻合良好。

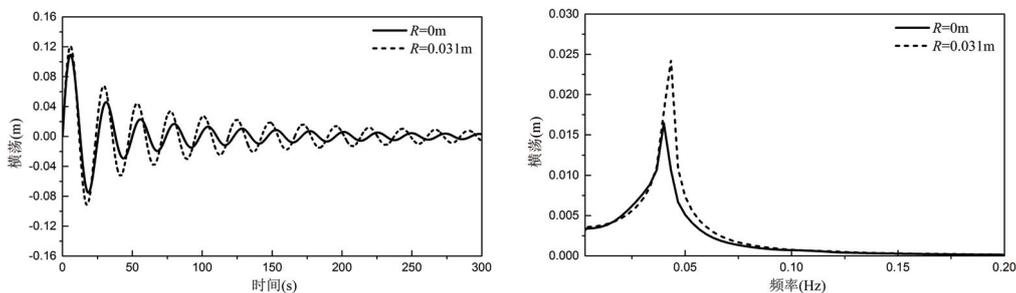


图5 横荡自由衰减结果

表 2 固有周期

固有周期 (s)		纵荡	横荡	艏摇
R=0m	Experiment(2007)	15.77	24.50	5.85
	naoe-FOAM-SJTU(2018)	15.78	24.99	6.25
	误差(%)	0.05	1.97	6.20
R=0.031m	CFD (2012)	14.82	23.30	5.50
	naoe-FOAM-SJTU(2018)	14.99	23.06	5.92
	误差(%)	1.16	1.04	7.12

#### 4.2 迟滞现象

描述随折合速度变化的半潜式平台涡激运动横向运动幅值可以用无量纲标称横荡响应来表示，其定义如下：

$$\text{Nominal } A_y / L = \sqrt{2} \sigma(Y(t)) / L \quad (7)$$

其中， $\sigma(Y(t))$ 代表横荡位移时历的标准差。而升力系数  $C_L$  的定义如下：

$$C_L(t) = 2F_y(t) / (\rho U^2 A) \quad (8)$$

其中， $F_y(t)$ 代表升力时历信息， $\rho$ 代表流体密度， $A$ 代表平台垂直于来流的浸没面积。

图 6 展示了两种立柱形状的半潜式平台涡激运动标称横荡响应随折合速度的变化曲线以及其与试验的对比。由图 6 可知，本研究数值模拟计算结果与试验数据吻合良好，证明了本文数值模拟方法计算半潜式平台涡激运动的可靠性。图 7 展示了两种立柱形状的半潜式平台升力系数随折合速度的变化曲线。结合图 6 和图 7 来看，在  $45^\circ$  来流角工况下，半潜式平台涡激运动横荡响应在折合速度 5 到 8 范围内存在明显的锁定区间，在锁定区间内，横荡响应幅值与升力系数均显著增大。具体来看，两种立柱形状的平台的最大横荡响应幅值以及升力系数最大值对应的折合速度有所区别，表现在方柱式半潜式平台的最大横荡响应幅值和升力系数最大值对应的折合速度  $Ur$  分别为 7 和 6，而圆角立柱式半潜式平台的二者对应的折合速度  $Ur$  分别为 6 和 5。但无论何种立柱形状，最大升力系数对应的折合速度均早于横荡响应幅值达到最大值。因此，本文数值模拟结果证明了半潜式平台涡激运动中升力与横荡运动迟滞现象的存在。

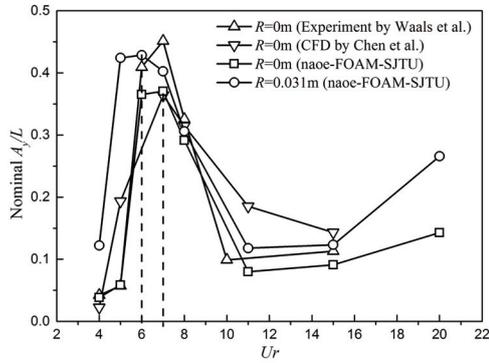


图6 标称横荡响应

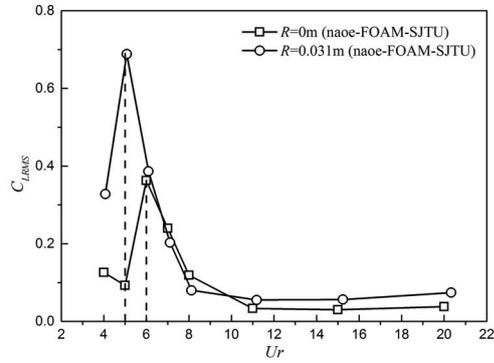
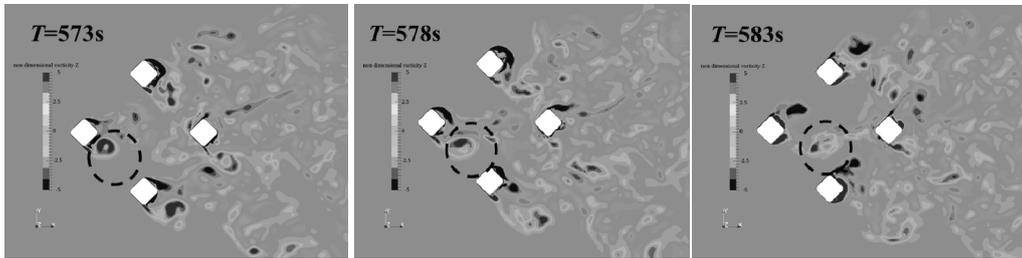


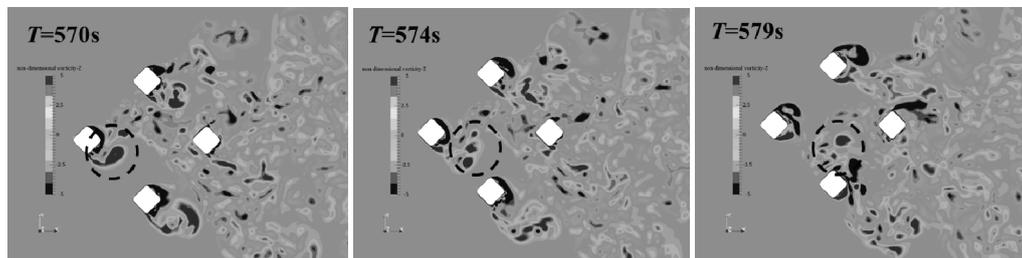
图7 升力系数

### 4.3 流场分析

由于迟滞现象并不存在于单立柱式浮体的涡激运动中，因此造成半潜式平台迟滞现象产生的原因可能是由于多立柱之间旋涡脱落的相互干扰。以圆角立柱式半潜式平台为例，图8展示了迟滞现象发生，即折合速度  $Ur$  为5和6时的  $z/H=-0.5$  截面位置的无量纲涡量 ( $\omega_z D/U$ ) 时历图像。在这一时间段内的两种折合速度的横荡运动以及升力系数时历曲线对比如图9所示，由图9可知由于选取时间段内两个工况的运动方式相类似，因此流场具有一定的可比性。



(a)  $Ur=5$



(b)  $Ur=6$

图8 无量纲涡量 ( $\omega_z D/U$ ) 时历图像

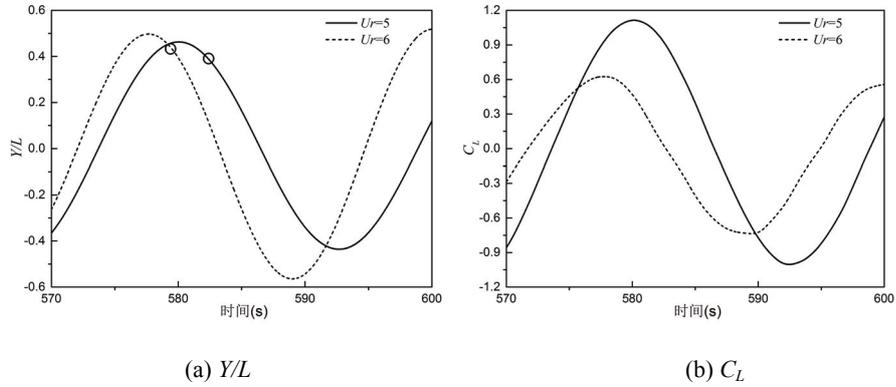


图9 横荡运动与升力系数时历曲线

通过跟踪上游立柱脱落旋涡的方式研究了立柱泻涡之间的相互干扰，被跟踪的旋涡被标注在黑色虚线圆圈内。结合图 8 和图 9 可以看出当折合速度  $Ur=5$  时，由于平台的横向运动幅值相对较低，因此上游立柱尾部的旋涡脱落顺利向下游发展；而当折合速度  $Ur=6$ ，随着横荡运动幅度的进一步增大，上游立柱尾部泻涡在向下游运动的过程中，有可能碰撞两侧立柱，与对侧立柱的泻涡产生相互干扰作用，两个旋转方向相反的涡量相互起到了抵消的作用，在碰撞的过程中会对立柱表面压力分布造成影响，间接对立柱乃至平台的升力造成影响。

#### 4.4 立柱表面压力系数

为了研究向下游运动的旋涡与对侧立柱泻涡碰撞的干扰作用对立柱表面压力分布的影响，图 11 展示了碰撞一侧立柱的表面压力系数周向分布图像。从图 11 中可以看出，由于平台在对比时刻的运动形式类似，因此立柱表面压力系数分布大体形式相同，但受上游立柱泻涡的影响，被干扰区域的立柱表面压力系数会有明显的下降，尾部立柱两侧的压力系数差将会降低。

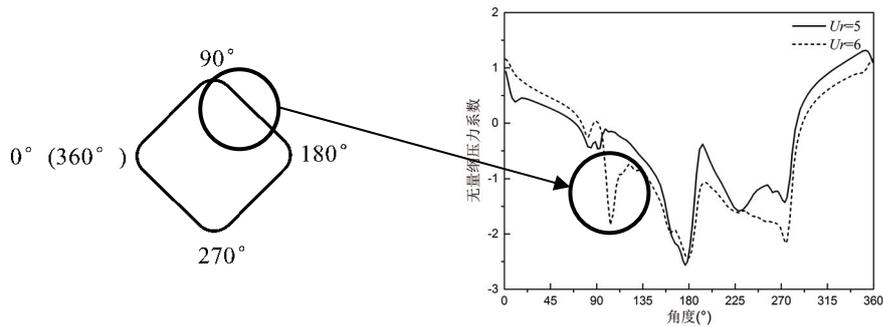


图10 立柱表面压力系数周向分布

## 5 结论

采用基于开源平台 OpenFOAM 自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器, 利用基于 SST 模型的 DDES 延迟分离涡模拟方法, 对两种不同立柱形状的半潜式平台在  $45^\circ$  来流角工况, 折合速度从 4~20 范围之间的涡激运动进行了数值模拟。研究目的在于利用 CFD 研究方法对半潜式平台涡激运动中升力与横荡之间的迟滞现象做出解释, 研究结论包括:

(1) 数值模拟结果发现了半潜式平台在  $45^\circ$  来流角工况下的涡激运动存在升力与横荡之间的迟滞现象。两种立柱形状的半潜式平台涡激运动随着折合速度的增大, 升力系数均先于标称横荡响应达到最大值。

(2) 通过流场分析, 利用跟踪上游立柱漩涡脱落的手段, 造成升力与横荡之间迟滞现象的原因是由于半潜式平台多立柱之间漩涡的相互干扰, 其中主要是由于当平台横荡运动上升到一定程度时, 上游立柱漩涡脱落在向下游运动时可能会碰撞两侧立柱, 与两侧立柱的漩涡相互影响, 从而显著降低碰撞一侧立柱的表面压力系数, 进一步降低立柱乃至平台整体的升力。

根据本研究结论, 半潜式平台涡激运动中力与位移的迟滞现象是由于多立柱之间漩涡脱落相互干扰造成的, 因此预测这种迟滞现象的产生可能与立柱间距比存在联系, 当立柱间距比加大, 立柱之间相互干扰的可能降低, 各立柱的漩涡脱落情况与单立柱相类似, 因此在此种情况下, 迟滞现象可能不会出现, 具体的工作有待于进一步的验证。

### 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 Kim J W, Magee A, Guan K Y H. CFD Simulation of Flow-Induced Motions of a Multi-Column Floating Platform. Proceedings of the ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Rotterdam, The Netherlands, 2011.
- 2 Liu M Y, Xiao L F, Lu H N, et al. Experimental Study on Vortex-Induced Motions of a Semi-submersible with Square Columns and pontoons at Different Draft Conditions and Current Incidences. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering. 2016, 9(3): 326-338.
- 3 Liang Y, Tao L. Interaction of Vortex Shedding Processes on Flow over a Deep-draft Semi-submersible. Ocean Engineering. 2017, 141: 427-449.

- 4 Shen Z, Cao H, Ye H, et al. The Manual of CFD Solver for Ship and Ocean Engineering Flows: naoe-FOAM-SJTU. Shanghai, China, Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- 5 Spalart P R, Jou W H, Strelets M et al. Comments on the Feasibility of LES for Wings, and on A Hybrid RANS/LES Approach, Advances in DNS/LES, 1997, 1, 4~8.
- 6 Spalart P R, Deck S, Shur M, et al. A New Version of Detached-Eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2006, 20: 181-195.
- 7 Zhao W W, Wan D C. Detached-Eddy Simulation of Flow Past Tandem Cylinders. Applied Mathematics and Mechanics. 2016, 37(12): 1272-1281.
- 8 Waals O J, Phadke A C, Bultema S. Flow Induced Motions of Multi Column Floaters. Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. California, USA, 2007.
- 9 Chen C R, Chen H C. Simulation of Vortex-Induced Motions of a Deep Draft Semi-submersible in Current. Ocean Engineering, 2016, 118: 107-116.
- 10 赵伟文, 万德成. 不同折合速度下深吃水半潜平台涡激运动的数值模拟, 首届“高新船舶与深海开发装备”创新论坛论文集, 2017, 上海, pp. 133-142.

## **The hysteresis phenomenon between force and motion in vortex-induced motion of semi-submersible platform**

LI Si-ming, ZHAO Wei-wen, 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, China, Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

**Abstract:** The hysteresis phenomenon refers to the peak lift force coefficient occurs earlier than the peak transverse motion as the reduced velocity increases in VIM of semi-submersible platform. Numerical simulations of VIM of platform with two different column shape were performed with naoe-FOAM-SJTU, which is developed on the open source platform OpenFOAM. SST-DDES model is used to simulate the three-dimensional flow separation. The numerical simulation results verify that the hysteresis phenomenon will occur in VIM of semi-submersible platform under 45° current heading. Based on the advantages of CFD method, the causes of the hysteresis phenomenon are analyzed from the interaction of vortex shedding between the upstream and side columns, and it is verified by the surface pressure coefficient distribution of the column.

**Key words:** Semi-submersible; Vortex-induced motion; Hysteresis phenomenon; naoe-FOAM-SJTU solver