

带螺旋侧板 Spar 平台涡激运动数值模拟分析

何佳伟, 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@sjtu.edu.cn)

摘 要: Spar 平台特殊的深吃水立柱式结构, 从而容易引起来流作用下结构后方的旋涡脱落导致涡激运动。长时间持续的涡激运动可能引起锚泊系统疲劳甚至平台结构损坏, 因此必须充分考虑到涡激运动的不利影响。本文利用自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 及动网格方法对 Spar 平台的涡激运动流场特性进行了数值模拟。采用延时分离涡方法 (DDES) 湍流模式模拟对带螺旋侧板的 Spar 平台的三维精细尾涡结构, 研究带螺旋侧板的 Spar 平台在不同折合速度下的纵向、横向以及艏摇运动响应以及运动轨迹。平台系泊系统以水平线性弹簧系统替代模拟, 研究中考虑了平台不同自由度之间耦合作用对平台涡激运动的影响, 并将数值模拟和模型试验结果进行对比, 分析了带螺旋侧板的 Spar 平台流向和横向涡激运动时间历程、频谱特性、锁定现象等以揭示其涡激运动的内在机理。从计算结果可知, 加装螺旋侧板可有效减小 Spar 平台涡激运动响应幅值。本文计算也印证了自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 对于海洋平台涡激运动问题计算模拟具有良好的精度和可靠性。

关键词: Spar 平台; 减涡螺旋侧板; 涡激运动; 延时分离涡模拟 (DDES)

Numerical Simulation of Vortex Induced Motion for Spar Platform with Helical Strakes

He Jia-wei, WAN De-cheng*

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

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: The special deep draught and column structure of the Spar platform can cause vortex shedding in the rear of the structure and lead to vortex induced motion. The vortex induced motion may cause the mooring systems and falling into fatigue and even the structures getting to be damaged. Therefore, the adverse effects of vortex induced motion of offshore platforms must be fully taken into account. In this paper, the CFD solver naoe-FOAM-SJTU and dynamic grid method developed by ourselves are used to simulate the characteristics of the vortex induced flow field in the Spar platform. The time Delayed Detached-Eddy Simulation, (DDES) turbulence model is used to simulate the three-dimensional fine wake structure of the Spar platform with helical strake plates. The sway, surge and trajectories of the Spar platform with helical strake plates at different reduced velocity are studied. The platform mooring system is stimulated by the linear spring system. The present research also considered the effects of platform between different degrees of freedom coupling in VIM. The calculation results show that the helical strake plates can effectively reduce the response amplitude of Spar platform's VIM. This paper also proves that the solver of naoe-FOAM-SJTU has good accuracy and reliability for the calculation and simulation of the offshore platforms' VIM.

Key words: Spar platform; helical strakes vortex-induced motion(VIM); Delayed Detached-Eddy Simulation

0 引言

目前世界上常用的深水生产装备有 FPSO、半潜式生产平台、Spar、TLP 等, Spar 平台相对于其它深水浮式生产平台, 具有稳性好、运动性能更优的特点, Spar 平台成为当今世界深海石油开采的有力工具。Spar 平台主要有三种类型: 传统型 (Classic Spar)、桁架型 (Truss Spar) 和蜂巢型 (Cell Spar)。当海流经过时, 深水 Spar 平台由于其特殊的深吃水立柱式结构, 圆柱体后方产生周期性涡旋脱离, 致使结构受到沿流向的拖曳力以及垂直于流向的升力^[1]。在周期性的流体力作用下, 平台发生周期性运动, 运动平台又反过来影响周围流场, 这种流固耦合问题称之为涡激运动 (Vortex Induced Motions, VIM)。

Spar 平台涡激运动问题自从在墨西哥湾中被发现, 工程上已经引起了很多关注, 已有多许多学者陆续展开对 Spar 平台涡激运动方面的研究。关于单柱及 Spar 平台的涡激运动发生机理, 影响因素, 性能预报等方面, 许多研究者^[1-6]进行了大量的数值和实验研究。对于 Spar 平台的涡激运动抑制研究, 也有一些学者进行了一些尝试。成欣, 丁勤卫等 (2016)^[12]研究螺旋侧板对漂浮式风力机动态响应的影响, 利用有限元软件进行水动力计算, 通过与不附加螺旋侧板情况下的动态特性参数对比, 研究发现: 附加螺旋侧板后, 结构的垂荡和纵摇的运动幅值和所受波浪力均得到显著抑制; 与纵荡和纵摇相比, 垂荡运动的幅值和所受波浪力均受到较大影响; 螺旋侧板对缆索张力无明显抑制作用。张楠和李春等 (2017)^[13]采用大涡模拟 (LES) 方法, 通过对水动力系数、漩涡发放频率及尾涡形态的分析来研究三种不同截面形状 (矩形、三角形和圆形) 螺旋侧板对涡激运动的影响。孙洪源, 黄维平等 (2017)^[14]研究浮式圆柱体在均匀流下涡激运动响应, 对其进行了水槽模型实验研究。测试了约化速度自 1.3-10.2 范围内的有无螺旋侧板圆柱的运动响应, 从响应幅值、涡泄频率等多个角度出发, 分析了其涡激运动的关键特征。研究表明: 裸圆柱在约化速度 6-8 之间发生锁定现象, 增加螺旋侧板后抑制涡激运动效果显著, 且无明显锁定现象; 流固耦合作用下, 涡激运动横荡频率不再符合斯托哈尔频率变化规律。Charles Lefevre(2013)等^[4]数值模拟不同折合速度下的带螺旋侧板的 Spar 平台涡激运动, 比较了小缩尺比下模型试验和数值模拟结果, 其工作对采用 CFD 手段进行涡激运动研究具有指导性意义。Radbound Van Dijk(2003) 等^[7]对 Truss Spar 的 VIM 试验方法进行了阐述, 比较了有无螺旋侧板 (Strake) 的 VIM 运动情况, 试验结果表明螺旋侧板可以明显降低 Truss Spar VIM 幅值。

本文结合以往Spar平台的涡激运动研究经验, 由于模型试验成本较高, 因此采用基于开源OpenFOAM开发的naoe-FOAM-SJTU求解器进行螺旋侧板对Spar平台运动性能的影响研究。

1 数值方法

1.1 运动方程

Spar 平台横向和纵向的运动方程可以分别表示为以下形式:

$$m\ddot{x}(t) + C_x\dot{x}(t) + k_x x(t) = F_x(t) \quad (1)$$

$$m\ddot{y}(t) + C_y\dot{y}(t) + k_y y(t) = F_y(t) \quad (2)$$

其中 m , C 和 k 分别为平台的质量、结构阻尼和弹簧的刚度系数。 $F_x(t)$ 和 $F_y(t)$ 分别为作用在平台上的流体动力在 x 和 y 方向的分量。

若考虑艏摇运动, 则需要求解额外的艏摇运动方程:

$$m\ddot{\psi}(t) + C_\psi\dot{\psi}(t) + k_\psi \psi(t) = M_z(t) \quad (3)$$

其中 J , C_ψ 和 k_ψ 分别为平台的惯性矩、转动结构阻尼和弹簧的转动刚度系数。 $M_z(t)$ 表示作用在平台上的水动力矩在 z 方向的分量。

1.2 涡激运动主要参数

涡激运动研究中的几个关键无因次参数如下：

- ① 雷诺数： $Re = \frac{UD}{\nu}$ ；
- ② 无量纲的折合速度： $U_r = \frac{U}{f_n D}$ ；
- ③ Strouhal 数： $St = \frac{f_s D}{U}$ ；
- ④ 无量纲振幅比： $A/D = \frac{(A_{max}-A_{min})}{2D}$ ；
- ⑤ 质量比 $m_r = \frac{mass}{\Delta}$

其中， U 为流体速度， D 为特征长度（对 Spar 而言，特征长度通常取为直径）， ν 为流体的运动粘度。 f_s 为平台的泻涡频率， f_n 为平台在静水中的横荡频率， A 为平台的横荡运动幅值。平台的质量为 $mass$ 和排水量为 Δ 。对于半潜和 Spar 平台来说，一般质量比近似为 $m_r = 1$ 。

1.3 动网格和水平弹簧

为了求解物体运动，计算中需要采用动网格技术。本文采用OpenFOAM中的动态变形网格技术处理Spar涡激运动时的网格运动，这种动态变形网格方式保持拓扑关系不变，通过网格单元拉伸和变形来处理网格运动，网格的运动通过求解基于有限元的网格运动Laplacian方程得到。本文的动网格方法，赵伟文^[9]已采用其对一座Spar平台标模进行模拟，并证明了其对于此类问题模拟的可靠性。Spar平台的系泊系统对平台起到限制位移的作用。在进行平台涡激运动模型试验时，通常将其运动限制在水平面内，仅考虑三个主导运动（横荡、纵荡及艏摇）。因此，平台系泊系统以水平线性弹簧替代模拟。

2 数值计算设置

2.1 几何模型和计算网格

本文选取 K P Thiagarajan 等^[9]实验所用 Spar 平台为对象开展研究工作，圆柱可视为一座 Truss Spar 平台硬舱的缩尺比模型，考察了平台在螺旋侧板下的减涡效应。Spar 平台的模型缩尺比为 1：22.3，主要参数如表 1 所示。抑制装置采用由三根螺旋侧板组成的减涡侧板。三根侧板之间的相互间隔为 120°，单根覆盖率为 90%，侧板高度为 13%D（D 为圆柱直径）。

表 1 对柱式半潜平台原型的主体参数

参数	实际尺度	模型尺度
Spar 圆柱直径， D	16.5m	0.741 m
Spar 平台吃水， H	30.9m	1.387m
螺旋侧板高度 Helical strakes	13 % D height	13 % D height
螺旋侧板螺距 Strake pitch	75m	3.36 m
侧板顶端离自由面距离	6m	0.268m
侧板底端离自由面距离	75m	1.387m
螺旋侧板叶片数 No. of strakes	3	3
缩尺比 Scale ratio	1: 1	1: 22.3

图 1 是整个计算域网格划分情况，计算域划分为： $-5D < x < 12D$ 、 $-5D < y < 5D$ 和 $-3D < z < 0$ 。网格划分的基本原则为：在近壁面螺旋侧板和尾流区域网格做特殊细化处理，离圆柱较远的计算区域，流动比较稳定，流场参数的变化不大，网格较稀。图3(d)是螺旋侧板周围网格细化情况，加密的矩形区域大小为 $-D < x < 8D$ 、 $-2D < y < 2D$ 和 $-2D < z < 0$ ，近壁第一层的网格厚度控制在 $y^+ \approx 1$ ，。雷诺数为 $Re=1.5 \times 10^5$ ，计算模型以均匀流

场作为数值计算的初始条件, 未考虑自由液面的影响。为便于分析比较, 考虑到尽量减小因模型网格划分不同带来的误差影响, 各工况算例网格在一个量级, 差异度不超过 5%。对于不安装侧板的圆柱, 其几何结构相对比较规则, 流场的网格单元以棱柱和六面体为主, 模型的网格总量约为400万个单元。而对于安装侧板的圆柱来说, 结构比较复杂, 尤其是圆柱体与侧板相连接的边缘, 需要更精细的网格单元以达到足够的分辨率, 网格总量约为480万个单元。

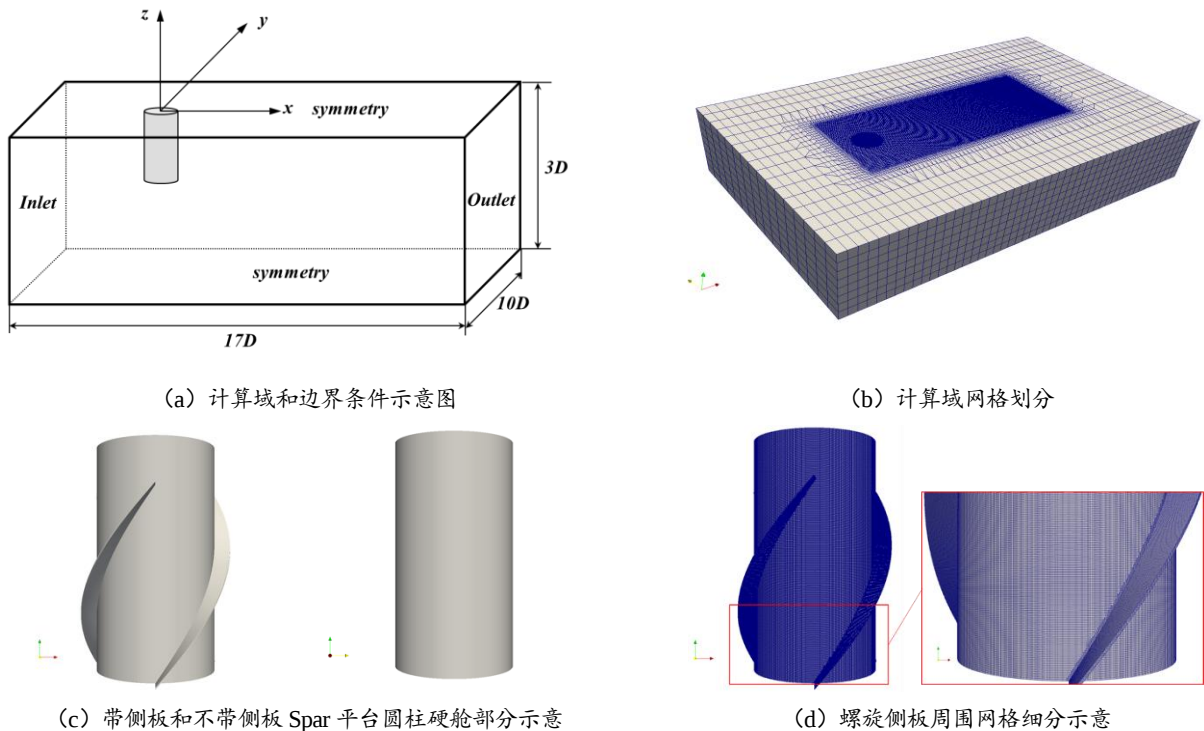


图 1 计算域示意图和网格划分

2.2 边界条件及数值离散

上游入口处的边界条件为速度入口; 下游出口处的边界条件为压力出口; 顶部设置为对称边界条件; 在模型表面, 采用无滑移固壁; 其余边界设置为可滑移条件。

本文采用压力与速度耦合的PIMPLE (PISO和SIMPLE) 算法求解。PISO方法是通过先预估一步, 再修正两步的方法求解N-S方程。计算中, 采用有限体积法 (FVM) 对控制方程进行离散; 利用PISO算法对于速度压力方程进行解耦求解; 计算时间步长取0.01 s。

2.3 分离涡方法

本研究采用基于剪切应力输运 (Shear-Stress Transport, SST) 模式的延迟的分离涡方法 (Delayed Detached-Eddy Simulation, DDES) 模拟高雷诺数下带有大量分离的湍流流动问题。SST-DDES 是一种混合雷诺平均 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) -大涡模拟 (Large-Eddy Simulation, LES) 方法。它在远离壁面的自由剪切流动区域采用 LES 亚格子模型求解流动, 而在靠近壁面的边界层区域内及其他区域采用 RANS 的 SST 模型求解流动。这样既可以保证 LES 的求解精度, 又可以通过减少近壁面处的边界层网格来降低计算量。关于分离涡方法的细节和验证工作在赵伟文和万德成 (2016) 中有详细介绍^[10]。

3 结果与分析

3.1 自由衰减试验

图2是对带螺旋侧板的自由衰减试验，计算得到的横荡自由衰减周期为27.0s，和Atluri, Sampath（2005）计算结果25.7s相差5%左右。

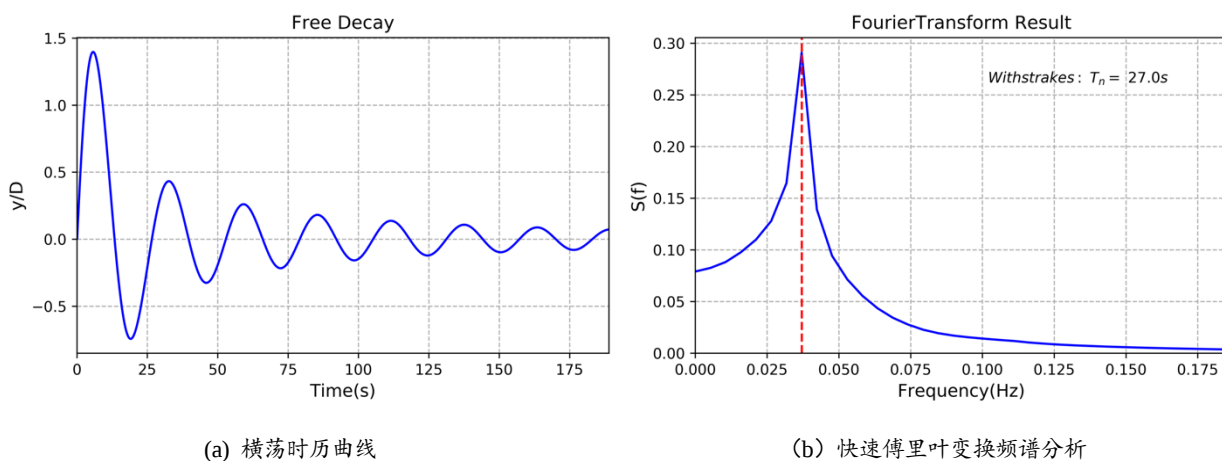
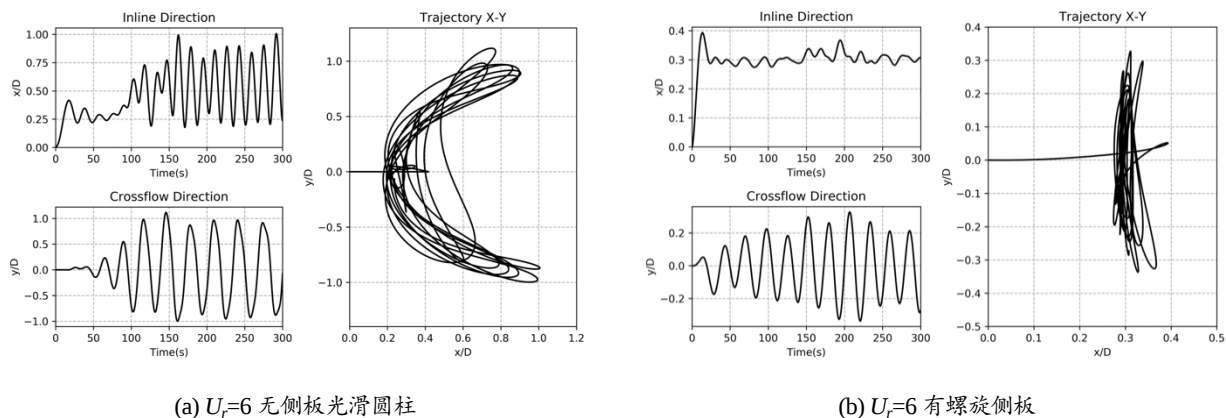
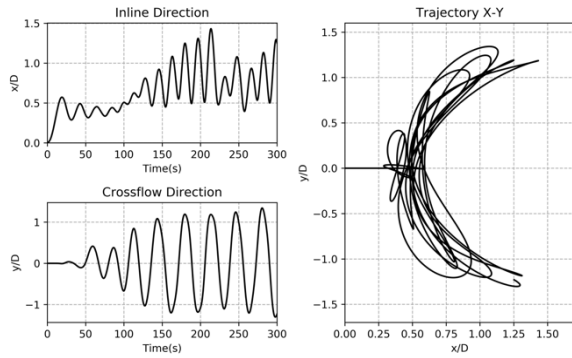


图 2 自由衰减试验 (a) 横荡时历曲线; (b)快速傅里叶变换频谱分析

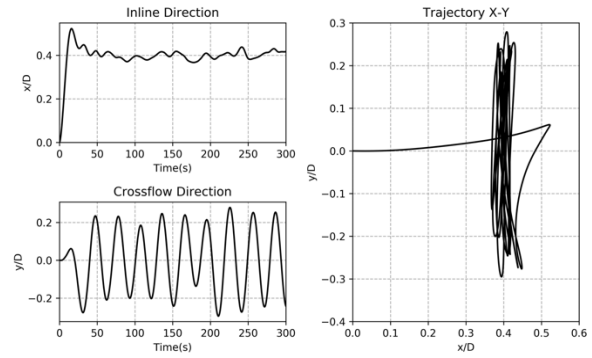
3.2 VIM 试验

我们选取了五个不同的折合速度 $U_r = 6/7/8/10/12$ 进行VIM试验。

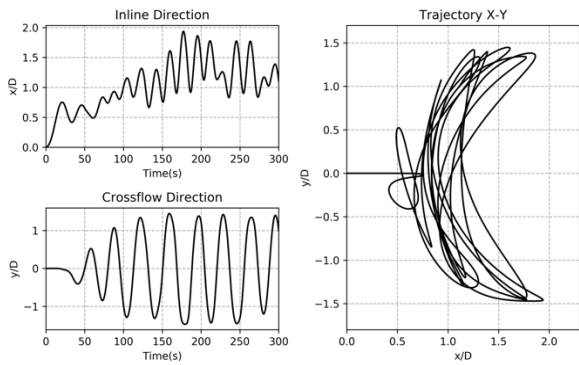




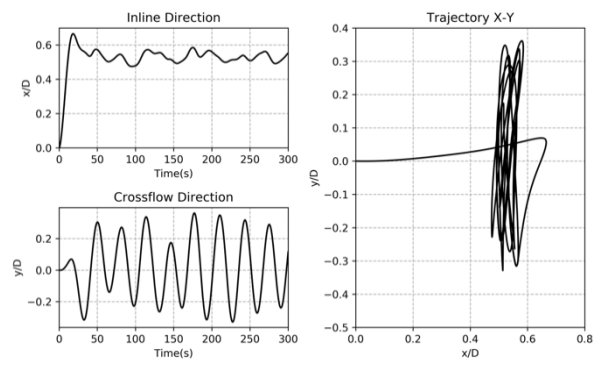
(c) $U_r=7$ 无侧板光滑圆柱



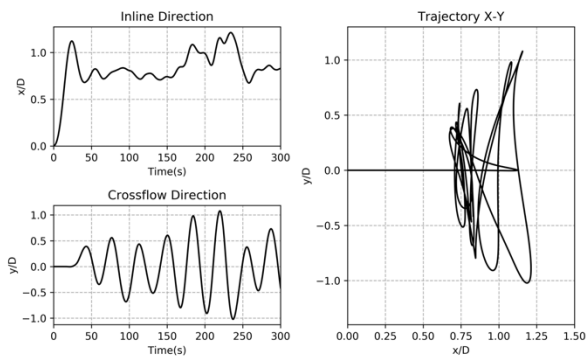
(d) $U_r=7$ 有螺旋侧板



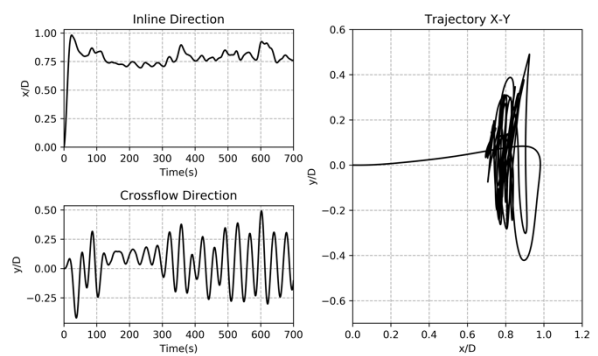
(e) $U_r=8$ 无侧板光滑圆柱



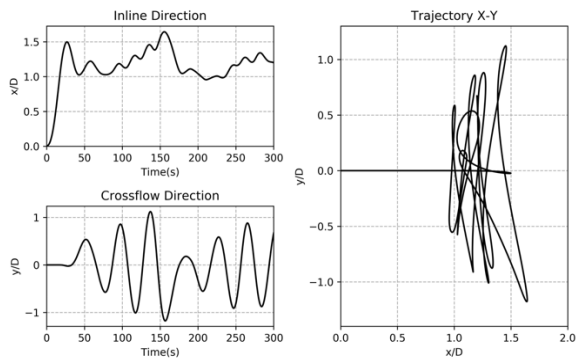
(f) $U_r=8$ 有螺旋侧板



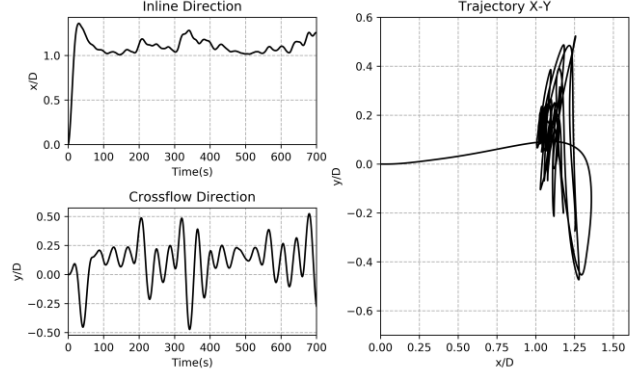
(g) $U_r=10$ 无侧板光滑圆柱



(h) $U_r=10$ 有螺旋侧板



(i) $U_r=12$ 无侧板光滑圆柱



(j) $U_r=12$ 有螺旋侧板

图 3 不同折合速度下的横荡和纵荡时历曲线和对应运动轨迹

从图3 可以看出,不同折合速度下的变化对平台运动的横向和流向运动的影响很大。无论是否带螺旋侧板情况,随着折合速度的增大,圆柱在流向运动的响应幅值增大。然而,横向运动响应幅值并不呈现这种情况。在无螺旋侧板光滑圆柱下,随着折合速度改变,横向运动的响应幅值呈现先增大后减小的情况;在有螺旋侧板下,横向运动的响应幅值稍有增加。

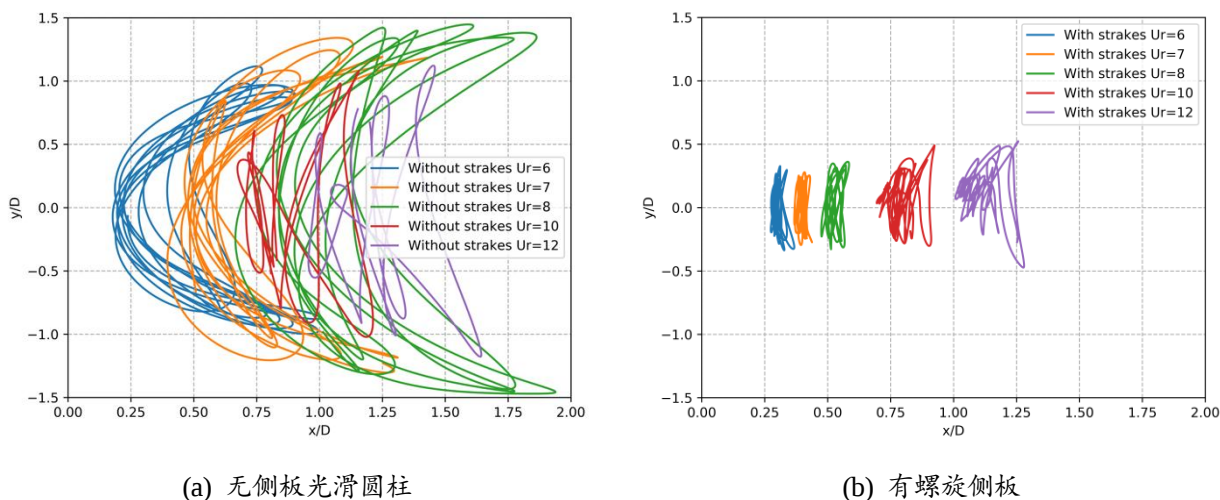
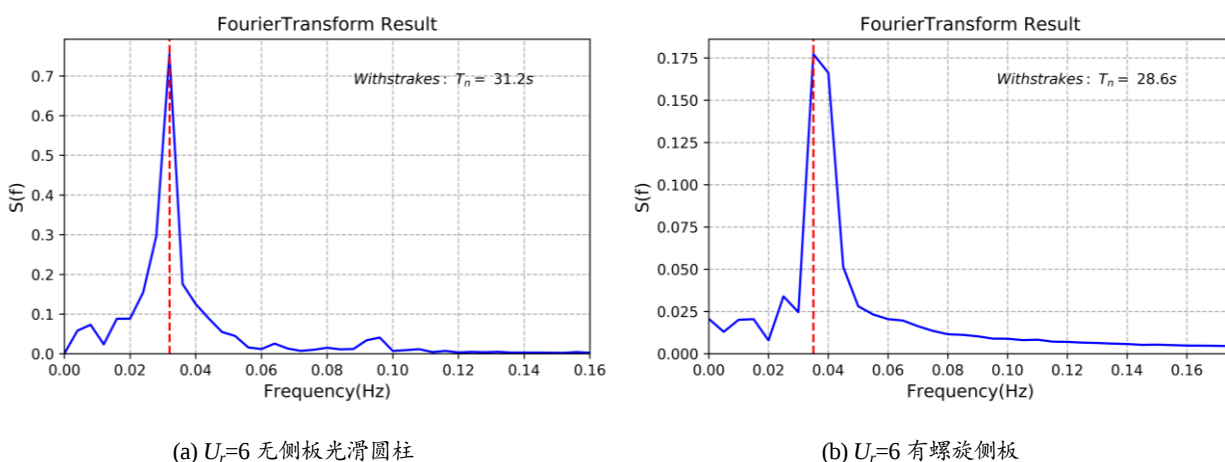
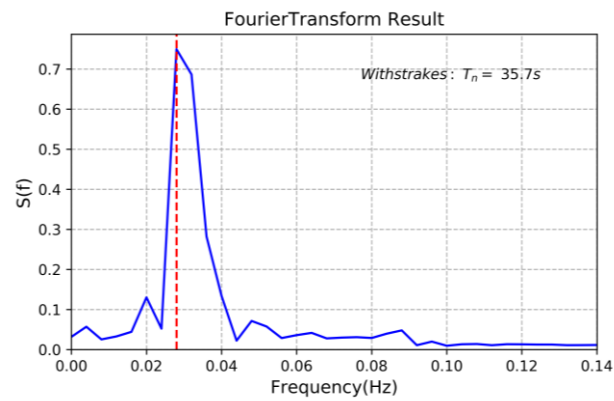


图 4 不同折合速度下的 Spar 平台运动轨迹

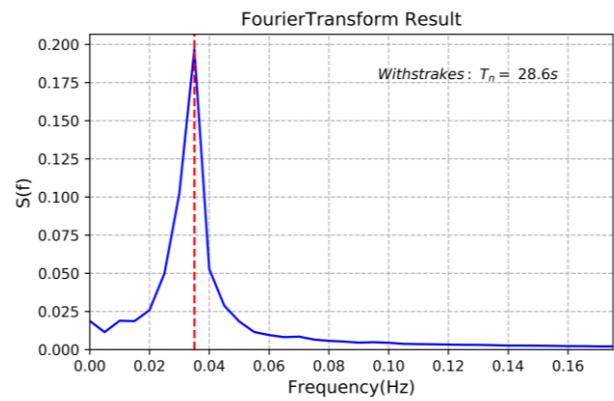
图4 给出了不同折合速度下的 Spar 平台的运动轨迹。从图4中可以看出,无螺旋侧板情况下,当折合速度 $Ur=8$ 时此时 Spar 平台的横向运动幅值明显最大,其后随着折合 $Ur=10/12$ 时,横向运动幅值明显减小,系统逐渐脱离“锁定”区域,这一过程被称为“解锁”。这是由于发生所谓的“锁定”现象,即此时横向涡流频率接近其横荡固有频率,产生共振现象,进入“锁定”区域 (Lock-in range)。涡激运动幅度较“锁定”区域减小,系统逐渐脱离“锁定”区域,这一过程被称为“解锁”。

有螺旋侧板情况下,平台的运动横向运动响应幅值没有出现明显的锁定现象。但是有一点很明显的是,横向运动响应最大值从无侧板的 $1.5D$ 降到只有 $0.5D$;与此同时,折合速度 $Ur=8$ 无螺旋侧板“锁定”现象发生情况下,相比有螺旋侧板,流向运动振荡幅值从 $1.25D$ 上下波动 $0.5D$ 降到在 $0.5D$ 附近上下波动 $0.1D$ 。可以看出螺旋侧板对于抑制 Spar 平台横向运动(横荡)和流向运动(纵荡)效果明显。

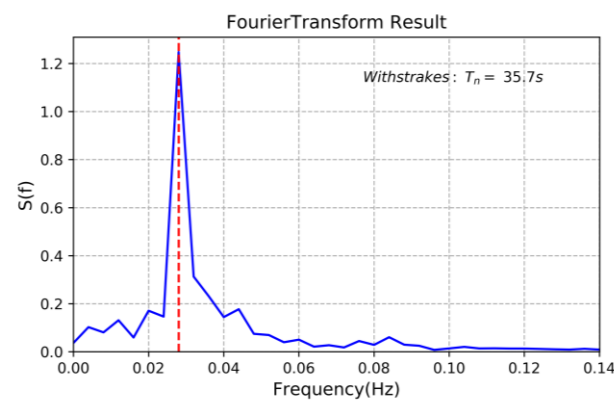




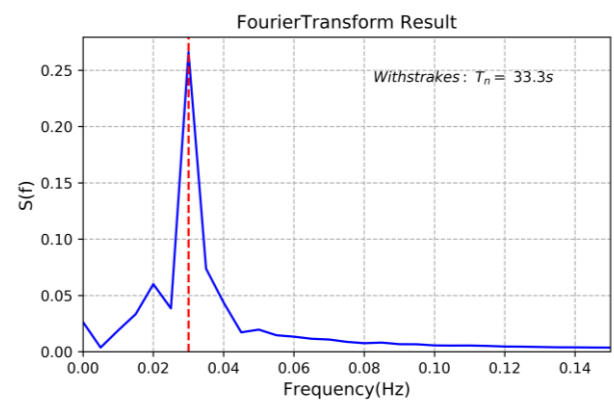
(a) $U_r=7$ 无侧板光滑圆柱



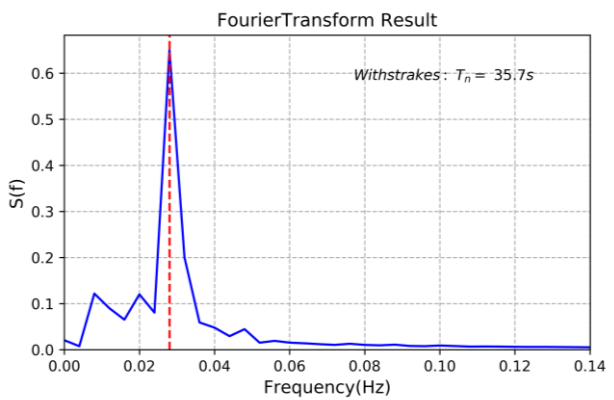
(b) $U_r=7$ 有螺旋侧板



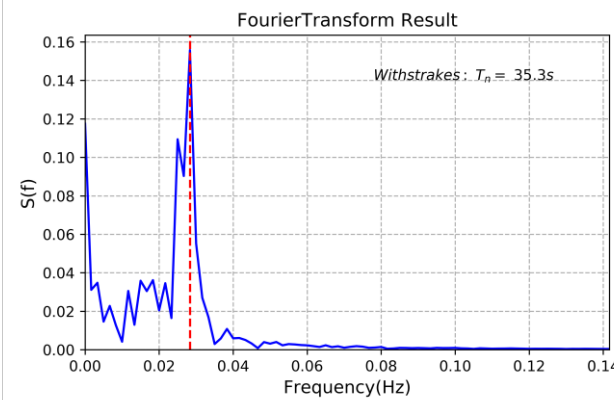
(a) $U_r=8$ 无侧板光滑圆柱



(b) $U_r=8$ 有螺旋侧板



(a) $U_r=10$ 无侧板光滑圆柱



(b) $U_r=10$ 有螺旋侧板

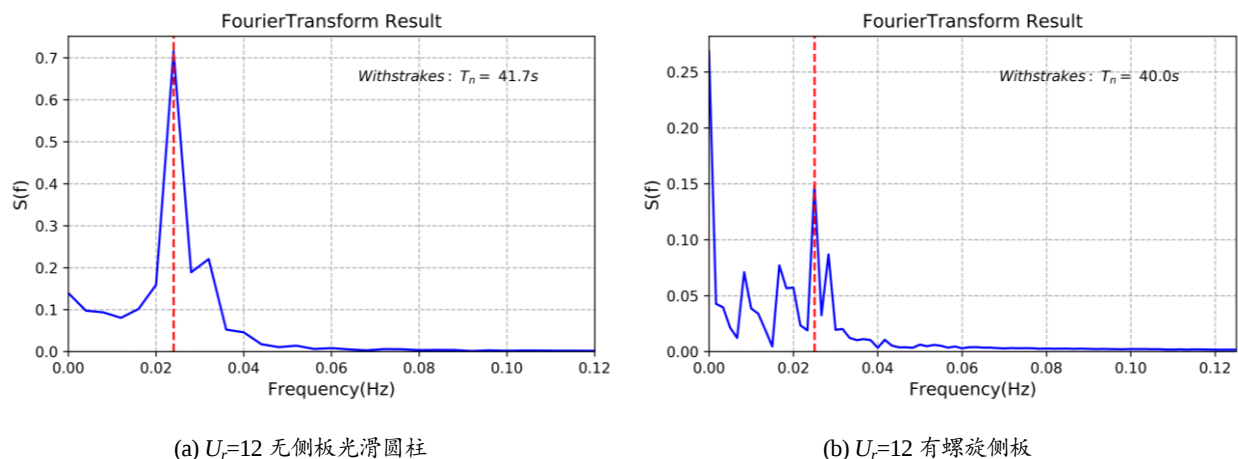


图5 不同折合速度下的横荡时间历程曲线傅里叶频谱分析

图5 为不同折合速度下的横荡时间历程曲线傅里叶频谱分析,对其分析可得到三维流动下不同折合速度对尾涡脱落频率的影响。峰值代表旋涡以此频率从平台脱落。可以看到整体上,不管有无螺旋侧板情况下,漩涡脱落频率随着来流速度增加而降低(漩涡脱落周期变大,脱落频率降低)。对比相同折合速度情况,可以发现,加装螺旋侧板之后,漩涡脱落频率降低。分离点转移到侧板顶端,使旋涡沿侧板进行分离,涡旋的形态也随之发生改变。同时,加装螺旋侧板后,随着来流速度增加,从 $U_r=10$ 开始,主频 $T_n=35.3s$ 附近出现多个较明显的峰值,在 $U_r=12$ 时更明显,在主频 $T_n=40.0s$ 附近也出现多个峰值。螺旋侧板的存在随着来流速度增加彻底破坏了流场尾涡的单一发放频率。

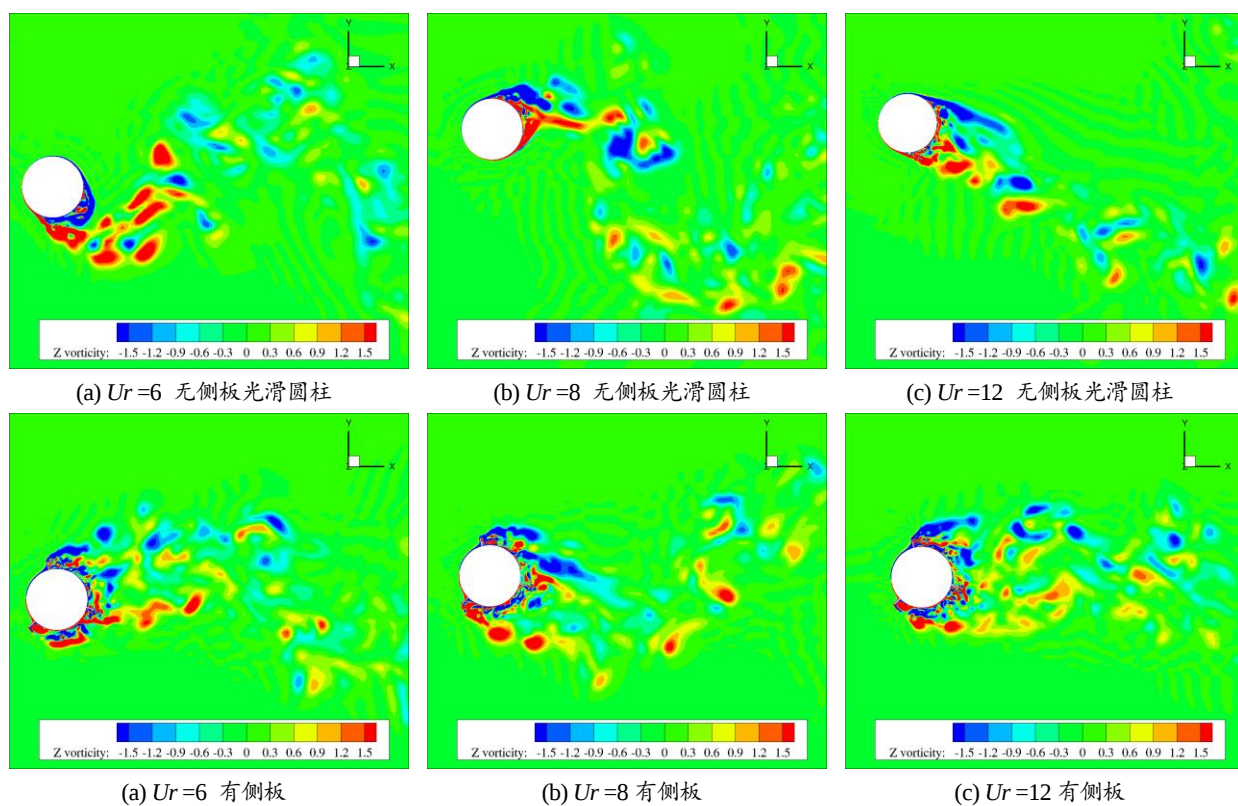


图6 不同折合速度水平截面漩涡分离 Vorticity 云图

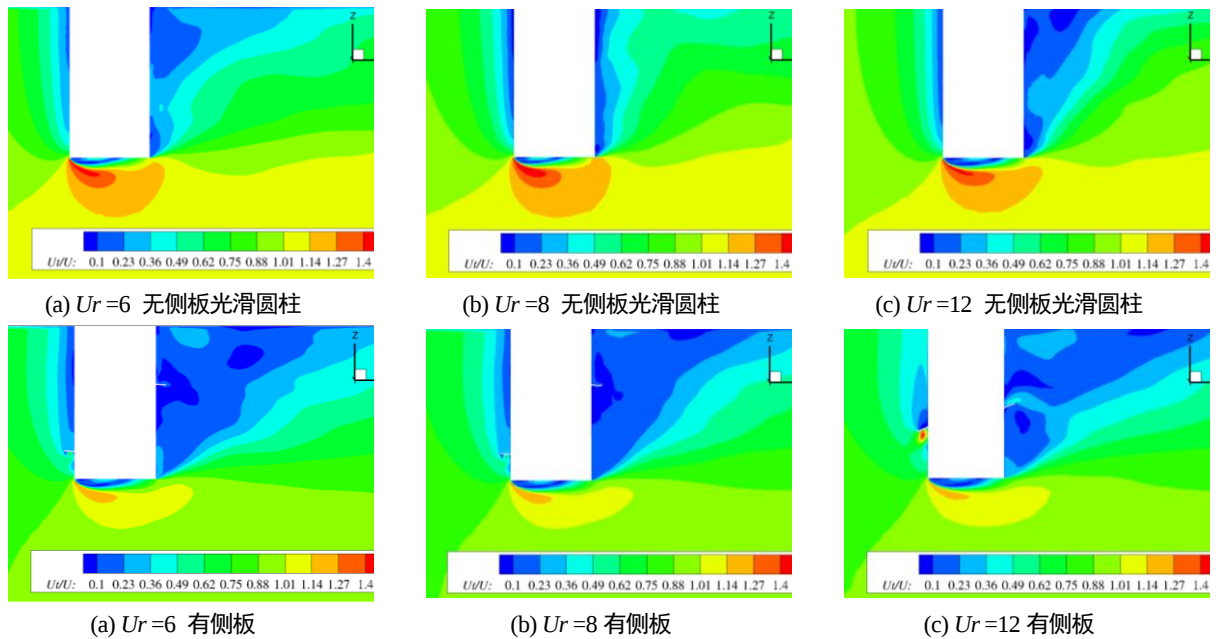


图7 不同折合速度垂直截面漩涡速度云图

图6和图7, 分别是图6不同折合速度水平截面漩涡分离 Vorticity 云图和垂直截面漩涡速度云图。可以看出螺旋侧板能够控制流动的分离, 不同折合速度的几个截面的流动分离都是从侧板边缘开始, 其边界层分离点变为螺旋侧板的顶端, 使漩涡沿螺旋侧板进行分离。而光滑圆柱的流动分离都是从柱体表面开始。可看出在增加侧板之后, 柱体后面形成了紊乱的尾流, 从而使柱后为尾流的涡街发放得到改变, 从而抑制了涡激振动, 体现了明显的三维流动特性, 与光滑圆柱尾流形成对比, 光滑圆柱尾流部分很规则, 分离点都在圆柱表面从而产生了连续的涡街发放。从图7也可以看出, 加上螺旋侧板后, 在自由端的告诉流动区变小, 在圆柱后端尾涡区, 低速流动区明显比无螺旋侧板的低速流动区长且多, 这也就导致了运动幅值的降低, 体现了螺旋侧板对涡激运动的抑制效果很好。

4 结论

本文基于CFD方法, 利用SST-DDES模拟对光滑圆柱及附加螺旋侧板Spar平台进行了研究, 比较分析有无螺旋侧板对Spar平台涡激运动的影响, 得出结论:

(1) 无螺旋侧板情况下, 观察到了“锁定”现象, 而在有螺旋侧板情况下, 平台的运动横向运动响应幅值没有出现明显的锁定现象。横向运动响应最大值从无侧板的1.5D降到只有0.5D; 与此同时, 折合速度 $Ur=8$ 无螺旋侧板“锁定”现象发生情况下, 相比有螺旋侧板, 流向运动振荡幅值从1.25D上下波动0.5D降到在0.5D附近上下波动0.1D。可以看出螺旋侧板对于抑制Spar平台横向运动(横荡)和流向运动(纵荡)效果明显。

(2) 不管有无螺旋侧板情况下, 漩涡脱落频率随着来流速度增加而降低(漩涡脱落周期变大, 脱落频率降低)。对比相同折合速度情况, 可以发现, 加装螺旋侧板之后, 漩涡脱落频率降低。分离点转移到侧板顶端, 使漩涡沿侧板进行分离, 漩涡的形态也随之发生改变。随着来流速度增加, 在主频附近出现多个峰率峰值, 这说明, 螺旋侧板的存在随着来流速度增加彻底破坏了流场尾流的单一发放频率。

(3) 本文的模拟和计算很好地验证自主开发的CFD求解器naoe-FOAM-SJTU对于海洋平台涡激运动问题计算模拟具有良好的可靠性。

本文目前只对不同折合速度下有无螺旋侧板的涡激运动特性的进行了研究和分析。实际上不同来流夹角也是影响Spar平台涡激运动的另一个重要因素。此外, 尺度效应也是VIM研究的热点, 这些将作为后续工作的重点研究方向。

致谢

本文工作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] FINNIGAN T等. Truss Spar VIM in Waves and Currents[C]//24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: Volume 2. ASME, 2005(Omae): 475 - 482.
- [2] FINNIGAN T, RODDIER D. Spar VIM Model Tests at Supercritical Reynolds Numbers[C]//Volume 3: Pipeline and Riser Technology; CFD and VIV. ASME, 2007: 731-740.
- [3] ZHAO W-W, WAN D-C. Numerical investigation of vortex-induced motions of Spar platform based on large eddy simulation[J]. Shuidonglixue Yanjiu yu Jinzhan/Chinese Journal of Hydrodynamics Ser. A, 2015, 30(1).
- [4] LEFEVRE C等. Guidelines for CFD Simulations of Spar VIM[C]//Volume 7: CFD and VIV. ASME, 2013: V007T08A019.
- [5] RODDIER D等. Influence of the Reynolds Number on Spar Vortex Induced Motions (VIM): Multiple Scale Model Test Comparisons[C]//Volume 5: Polar and Arctic Sciences and Technology; CFD and VIV. ASME, 2009(December): 797 - 806.
- [6] BEATTIE M等. Truss Spar VIM Correlation Between Model Test and Field Measurement[J]. Offshore Technology Conference, Offshore Technology Conference, 2013: 1 - 16.
- [7] DIJK R等. Model Test Experience on Vortex Induced Vibrations of Truss Spars[J]. Offshore Technology Conference, 2003.
- [8] 赵伟文, 万德成. 用大涡模拟方法数值模拟Spar平台涡激运动问题[J]. 水动力学研究与进展A辑, 2015(1): 40 - 46.
- [9] THIAGARAJAN K P等. CFD Analysis of Vortex-Induced Motions of Bare and Straked Cylinders in Currents[C]//24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: Volume 3. ASME, 2005(Omae 2005): 903 - 908.
- [10] ZHAO W, WAN D. Detached-Eddy Simulation of Flow Past Tandem Cylinders[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1272-1281.
- [11] 张辉, 王慧琴, 王宝毅. 国外SPAR平台现状与发展趋势[J]. 石油工程建设, 2011(s1):1-7.
- [12] 成欣, 叶舟, 丁勤卫,等. 螺旋侧板对漂浮式风力机动态响应的影响研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5):1139-1147.
- [13] 张楠, 李春, 丁勤卫,等. 螺旋侧板截面形状对Spar平台涡激运动的影响研究[J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(3):105-109.
- [14] 孙洪源, 黄维平, 李磊, 等. 基于实验的浮式圆柱体涡激运动研究[J]. 振动与冲击, 2017, 36(3):93-97.

作者简介:

何佳伟, 男, 1990 年 11 月, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 博士生, 主要从事海洋工程涡激运动问题数值模拟研究。

通讯地址: 上海交通大学木兰船建大楼 A708, 邮编: 200240

联系电话: 021-34206199

Email: jiaweihe@sjtu.edu.cn

万德成, 男, 1967 年 9 月, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 长江学者特聘教授, 上海交通大学特聘教授, 博士生导师, 主要从事计算船舶水动力学、无网格粒子法、船型优化、浮式风机、流固耦合、涡激振动/运动等方面的研究。

通讯地址: 上海市闵行区东川路 800 号上海交通大学木兰船建大楼, 邮编: 200240, 电话: 021-34205697

Email: dcwan@sjtu.edu.cn