

DES 方法数值模拟带螺旋侧板 Spar 平台扰流问题

何佳伟, 赵伟文, 万德成

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

摘要: 随着离岸深水工程技术的不断发展, Spar 平台在深海油气开采中得到了越来越广泛的应用。Spar 平台特殊的深吃水立柱式结构容易引起来流作用下结构后方的旋涡脱落, 从而导致涡激运动。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影响。本文利用自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 基于 DES 方法在模型尺度下对带螺旋侧板的 Spar 平台涡激运动问题进行数值模拟。重点考察螺旋侧板高度变化对 Spar 平台扰流的影响, 侧板螺距固定 $Pitch=4.5D$, 侧板高度参数有五种分别为 $Height=0.1, 0.13, 0.2, 0.25, 0.3$, 其中 $Height=0.13$ 的情况与 K P Thiagarajan 的实验模型一致。通过对加侧板的不同方案进行 CFD 计算, 探讨螺旋侧板的减涡机理和效果, 并对比分析给出不同参数减涡侧板的减涡效应。

关键词: Spar 平台扰流; 减涡螺旋侧板; DES; naoe-FOAM-SJTU 求解器

随着海洋工程技术的发展, 离岸 Spar 平台被越来越广泛地使用于深水采油作业中。我国油气开采进军深海领域, 亟待先进的海洋开发技术来支持, Spar 平台这种深水和超深水海域中极具竞争力的平台类型, 必将在不久的将来成为我国深海开发的重要工具。海洋结构物涡激运动(Vortex-Induced Motion, VIM)这一热点问题越来越受到目前深海工程技术人员和研究人员的关注。Spar 平台其立柱截面形式为典型的圆形为主, 在来流作用下圆柱两侧会产生交替的旋涡, 尾流区的旋涡释放时会产生横向和流向的脉动力, 在 Spar 平台上所直接反映的就是升力和拖曳力。顺流脉动拖曳力和横向共振激励使得系泊缆张力增大, 长周期低频振荡增加了系泊系统疲劳损伤及结构的破坏。因此 Spar 平台设计时需要考虑涡激运动的影响。

对于 Spar 平台涡激运动的抑制方法目前已有屏蔽装置(Shroud)、扰流板(Fairings)、分隔板(Splitter)等多种减涡装置, 最常用的是螺旋侧板(Helical Strake)。螺旋侧板通过不断改变径向来流分离角度扰乱旋涡的空间相关长度, 削弱旋涡强度并达到减小横向力的目的, 起到抑制涡激运动的效果。在 Spar 平台上安装螺旋侧板, 能够很好地控制流动分离, 使分离点从光滑圆柱的柱面转移到螺旋侧板上, 引入三维特性, 破坏涡脱落的规律性, 从而抑制涡激运动的产生^[1]。

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, 国际上已有许多学者陆续展开对 Spar 平台涡激运动方面的研究。Charles Lefevre 等^[2]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, 用改进延迟分离涡模拟湍流模型(Improved Delayed Detached Eddy Simulation, IDDES), 预测了实型的涡激运动情况, 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 等^[3]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。Rho J B 等^[4]通过模型试验和数值模拟方法对 Spar 平台的垂荡和纵摇耦合运动进行研究对比, 现在经典 Spar 平台上附加螺旋侧板和垂荡板可有效降低平台发生垂荡共振时的幅值, 在考虑系泊效应时发现有无系泊缆对共振下的纵摇不稳定运动无明显抑制作用。John Halkyard 等^[5,6]对一座有四片减涡侧板的 Cell Spar 平台进行了一系列 CFD 涡激运动模拟, 着重研究来流方向、折合速度和侧板螺距比对涡激运动响应的影响。并且通过模型试验与 CFD 计算的对比进行基准研究。给出了 CFD 计算过程中在大雷诺数条件下湍流模式选取和网格划分相关问题的一些建议。王兴刚等^[7]采用源汇分布法求解经典 Spar 平台水动力特性时, 指出柱体外围的螺旋板可以有效减少涡旋, 显著改善平台在涡流中的运动性能, 加强平台结构强度; 螺旋板螺

基金项目: 国家自然科学基金项目(51379125, 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)、上海市船舶工程重点实验室基金项目(K2015-11)、工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目课题(2016-23/09)

距的减小,和数量的增加会显著影响垂荡方向的水动力特性和二阶平均波浪力。魏泽等^[8]基于 CFD 软件 ANSYS fluent 计算模型缩尺比为 1:50 的 Spar 平台涡激运动,分析螺旋侧板对 Spar 平台运动性能的影响。着重从侧板片数、侧板螺距比、侧板高度、 Re 数等几个参数对平台 Cl 、 Cd 进行分析,得出结论:侧板条数为 4,螺距比 P/D 为 5,侧板高度为 $5\%D$ 为较优的侧板参数,该参数侧板可以较大地减小横向力,且阻力的增加值较小。

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。naoe-FOAM-SJTU 主要由三维数值造波与消波模块、六自由度运动模块、浮式结构物系泊系统模块组成。同时将 overset 重叠网格技术^[9]引入,破除了物体与网格之间的拓扑结构约束关系,能够实现多级物体间的无约束运动。分离涡模拟方法(Detached-Eddy Simulation, DES)^[10]也被陆续加入求解器中。目前求解器已经能够处理各种复杂的船舶与海洋工程水动力学问题。为分析螺旋侧板对 Spar 平台运动性能的影响,本文针对某 Spar 平台的圆柱体硬舱部分,基于剪切应力输运(Shear-Stress Transport, SST)模式的分离涡方法(Detached-Eddy Simulation, DES)数值模拟得到 Spar 平台硬舱主体的绕流场分布,以及阻力系数的变化规律。

1 数值方法

本研究采用 SST-DES 来模拟高雷诺数下带有大量分离的湍流流动问题。SST-DES 是一种混合雷诺平均和大涡模拟(LES)的方法,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它区域采用 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。SST 将 $k-\varepsilon$ 和 $k-\omega$ 模型相结合,用 $k-\omega$ 处理近壁面的边界层区域流动,而用 $k-\varepsilon$ 处理自由剪切流区域的流动。这样做既保留了 $k-\omega$ 模型对近壁面处边界条件的良好处理能力,同时避免了 $k-\omega$ 模型在自由剪切流区域对入口参数过于敏感的不足^[11]。

DES 方法采用涡黏性假设计算亚格子应力,黏性系数通过一个辅助标量的传输方程计算获得。该方法的关键之处在于辅助变量的传输方程中引入了一个长度尺度,该量由滤波宽度长度尺度和网格节点到壁面距离而决定,此通过在两种尺度间的选择自然实现的耦合。

对于不可压缩黏性流体,经过平均或过滤后的连续性方程和动量方程可以表示为。

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

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

式中: ν 为分子黏度, τ_{ij} 为亚格子应力张量。根据 Boussinesq 假设, τ_{ij} 可以表示为。

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k - 2\nu_t S_{ij} \quad (3)$$

$$\text{式中: } S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)。$$

对于不可压缩黏性流体,基于 SST 模型的 DES 方法将湍动能 k 方程中的耗散项乘以一系数 F_{DES} ,得到新的湍动能 k 方程,同原来 SST 模型的特定湍流耗散率 ω ,组成新的输运方程可以表示为如下形式。

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = G - \beta k \omega F_{DES} + \left[(\nu + \alpha_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \omega)}{\partial x_j} = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \alpha_\omega \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + (1 - F_1) C D_{k\omega} \quad (5)$$

F_{DES} 可定义为

$$F_{DES} = \max \left(\frac{L_t}{C_{DES} \Delta} (1 - F_s), 1 \right) \quad (6)$$

式中： $L_r = \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega}$ 为计算得到的湍流长度尺度； $\Delta = \sqrt[3]{\Delta V}$ 为亚格子长度尺度； C_{DES} 为 DES 常数，本文取 0.61； F_s 为混合函数，可以是 F_1 或 F_2 ，本文中取 F_2 。
 上式中所有涉及到的系数取值见文献[10]。

2 计算模型

2.1 平台几何模型

本文选取 Thiagarajan K P 等^[9]实验所用 Spar 平台为对象开展研究工作，考察了平台在不同参数螺旋侧板下的 Spar 平台减涡效应。Spar 平台的模型缩尺比为 1: 22.3，主要几何参数和物理参数见表 1。

表 2 带螺旋侧板 Spar 平台模型尺度参数

参数	数值
Spar 圆柱直径 D	0.741 m
Spar 平台吃水 H	1.387 m
螺旋侧板高度 Helical strakes	13 % D height
螺旋侧板螺距 Strake pitch	3.36 m
侧板顶端离自由面距离 Strake starting depth (from free surface)	0.268 m
侧板底端离自由面距离 Strake ending depth (from free surface)	1.387 m
螺旋侧板叶片数 No. of strakes	3
固有周期 Natural peroid T_n	16.4 s
缩尺比 Scale ratio	1: 22.3

2.2 螺旋侧板的几何参数

螺旋侧板是海洋工程中抑制涡激运动的典型装置。螺旋侧板的设计初心是为破坏沿圆柱周期性的漩涡脱落，以达到减小生成漩涡强度，降低其沿升力方向振幅的目的。影响螺旋侧板抑制效率的因素有很多，比如螺旋侧板的形状、覆盖率、海洋生物附着率、表面粗糙度、螺旋侧板的曳力性能等。但是其中最主要的是螺旋侧板形状。



图 1 螺旋侧板几何形状

螺旋侧板形状选择需遵循的原则如下，1) 侧板高度应足够大，保证其能够控制边界层的分离且能阻挡交替漩涡的形成；2) 螺距大小应合适，需保证侧板能够有效改变分离层的位置，而扰乱沿 Spar 平台长度方向的轴向关联；3) 高度和螺距的组合应使升阻力系数协调达到最佳^[12]。此外，工程实际中考虑到安装工艺和经济性的问题，侧板覆盖率也是不可忽视的影响因素之一，本文研究中未考虑侧板螺距和覆盖率的影响，直接选取 Thiagarajan K P 实验中采用的螺距和覆盖率^[13]。关于侧板螺距和覆盖率的问题作者将作进一步研究。

螺旋侧板的几何尺寸主要包括螺距 (Pitch)、侧板高 (Height) 和侧板个数 (Start Number) 三个参数。其中，螺旋侧板的螺距是指侧板绕 Spar 平台旋转一周 360° 沿 Spar 平台轴向上的长度；侧板高指的是侧板沿 Spar 平台径向的高度，本文选取侧板截面形状为矩形，侧板高为 $H=0.1D, 0.13D, 0.2D, 0.25D, 0.3D$ ，侧板厚度为常数 1 mm；侧板个数表示一个圆周上的侧板数，较为常见的有三片式和四片式。BRAZA^[14] 研究指出，多片或四片对抑制效果影响并不明显，因此本文设置螺旋侧板抑制装置侧板个数为三片式。根据侧板高度不同设置工况的详细信息如图 2 所示。

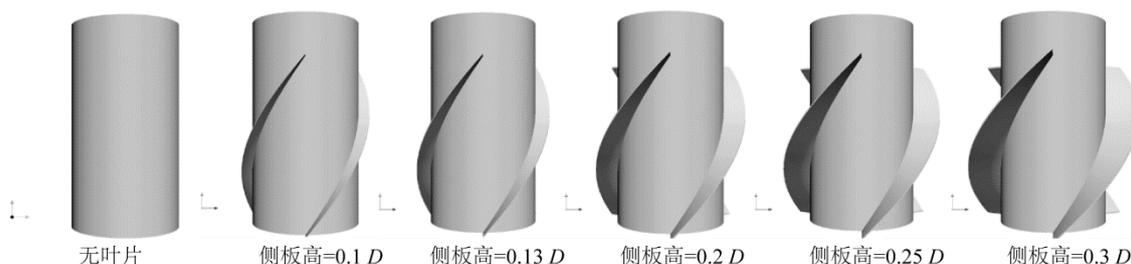


图2 螺旋侧板的不同高度示意图 (Pitch=4.5D)

2.3 计算网格

图3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4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 $y^+ \approx 1$ ，模型的网格总量约为450万。雷诺数 $Re = 1.5 \times 10^5$ ，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%。

数值计算中，边界条件的具体设置如下。

- 1) 在入口边界上，采用均匀来流，据来流速度定入口流动速度；
- 2) 出口边界压力梯度为零；
- 3) 在模型表面，采用无滑移固壁；
- 4) 在对称面上，满足对称条件。

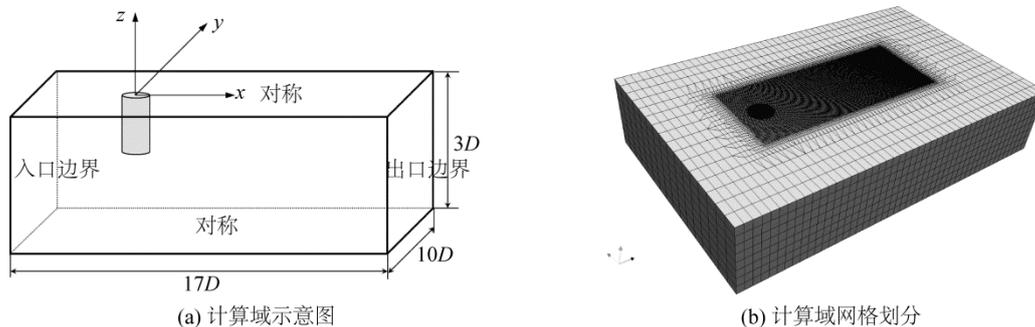


图3 计算域示意和网格划分

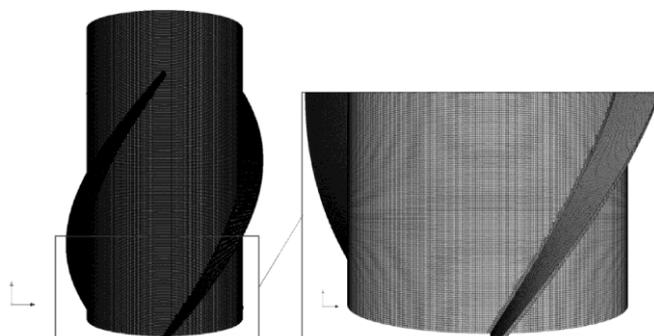


图4 螺旋侧板周围网格分布

3 计算结果与分析

3.1 不同侧板高度下平台阻力系数

表3为螺距固定在 $Pitch = 4.5D$ 时，不同高度的螺旋侧板下计算所得到的 Spar 平台阻力系数均值。螺旋

侧板在一定程度上改变了平台硬舱主体的结构特征，使平台整体在流体中的阻尼发生了变化，可以发现随着侧板高度的增大，Spar所受到的阻力值也随之增大，当侧板高度 $height=0.3D$ 时，侧板阻力系增长达 33%。然而侧板过高会导致阻力明显增加，容易造成列板后方流场压力突降较多，将引起结构流向位移增加，导致流向运动幅度增大，因此应结合工程实际来考量选取侧板高度。

表 3 不同侧板高度下阻力系数 (Pitch=4.5D)

侧边高度 Height	0	0.10D	0.13D	0.2D	0.25D	0.3D
平均阻力系数 C_d	0.97	1.054	1.108	1.193	1.271	1.292
		+8.66%	+14.23%	+22.98%	+31.03%	+33.20%

3.2 光滑圆柱和不同高度螺旋侧板速度云图

图 5 为光滑圆柱和不同高度螺旋侧板的速度云图，从图 5 可以看出，Spar 平台在不安装螺旋侧板的情况下，其后方速度具有相当规则的旋涡一致性，带有明显的对称性，光滑圆柱尾流部分很规则，具有明显的二维流动特性；而对于安装了螺旋侧板的方案，平台后方的速度较为杂乱而无规律，这是由于螺旋侧板的存在没有连续的涡街发放，体现了明显的三维流动特性，可以清楚地观察到涡在侧板边缘破碎，致尾流涡街完全被打乱，形成大量不规则的碎涡。从图中还可以看出侧板高度增加有利于破坏旋涡，发放更不规律，有效地抑制了涡激形成的周期性。在有螺旋侧板情况下，速度较大的区域都出现在迎流区的侧板边缘，而且对比发现随着侧板高度提高，侧板上的高速区变多。速度较大区域也意味着压力较大，因此在侧板的设计安装中要对这些高压区给予谨慎的考虑，侧板上适当加装支撑杆件及加强筋，须保证侧板本身及其与主体的连接处具有足够的结构强度，在长期的复杂来流作用下保持稳定性和有效性。

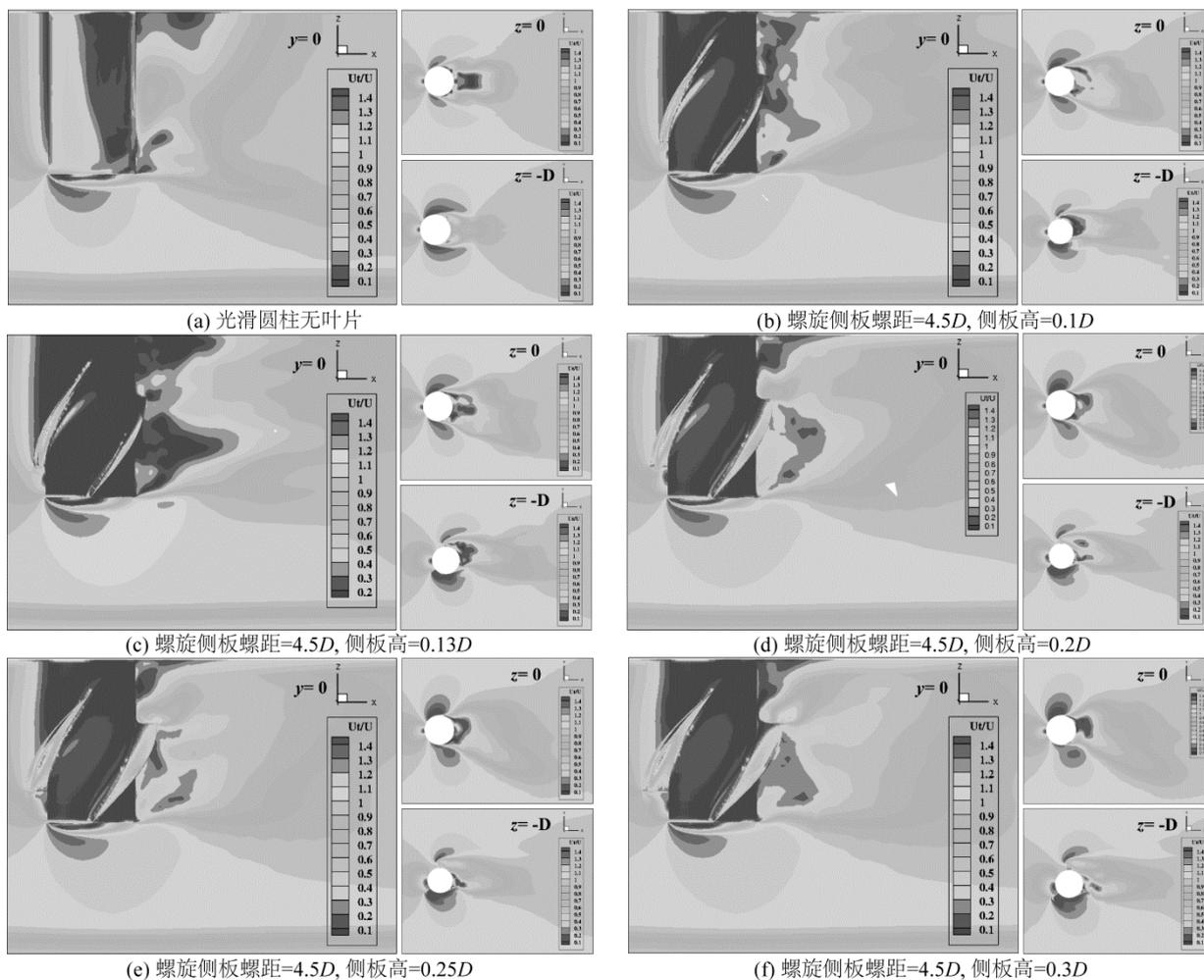


图 5 光滑圆柱和不同高度螺旋侧板的速度云图

4 结 语

利用自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 在模型尺度下对带螺旋侧板 Spar 平台的扰流进行数值模拟。通过对光滑圆柱和加侧板的不同方案进行 CFD 计算, 并对比分析得出由于螺旋侧板对流场的破坏使, 分离点从光滑圆柱的柱面转移到螺旋侧板上, 螺旋侧板的存在也使 Spar 尾部的漩涡传播距离减小, 验证了螺旋侧板的减涡效应。通过 Spar 平台上螺旋侧板的研究, 主要形成如下结论, 1) Spar 平台上安装螺旋侧板, 能够很好地控制流动分离, 使分离点从光滑圆柱的柱面上转移到螺旋侧板上, 抑制了漩涡发放; 2) 对光滑圆柱和加侧板的不同方案进行 CFD 计算, 探讨螺旋侧板的减涡机理和效果。结果表明, 螺旋侧板高度对硬舱主体运动性能具有较强的影响。从产生的阻力系数来看, 侧板宽度越大, 阻力系数越大, 涡激抑制效果越优, 但在工程中需结合实际来考量选取侧板高度。

综上, 本文验证了本求解器对带螺旋侧板 Spar 平台的扰流问题进行模拟仿真的可信性, 结果可以对实际工程设计 Spar 平台螺旋侧板起一定指导作用。考虑螺旋侧板螺距对涡激抑制效果的影响, 以及基于动网格技术分析 Spar 平台的涡激运动响应等问题, 将是作者下一步的研究重点。

参考文献:

- [1] 杨烁, 缪泉明, 匡晓峰. Spar 平台螺旋侧板绕流场的 CFD 分析[C]//水动力学研究与进展, 上海: 海洋出版社, 2008: 728-734.
- [2] Lefevre C, Constantinides Y, Kim J W, et al. Guidelines for CFD Simulations of Spar VIM[C]//Volume 7: CFD and VIV. ASME, 2013: V007T08A019.
- [3] Dijk R, Magee A, Perryman S, et al. Model test experience on vortex induced vibrations of truss spars[J]. Offshore Technology Conference, 2003.
- [4] Rho J B, Choi H S. Heave and pitch motions of a spar platform with damping plate[J]. Proceedings of The Twelfth (2002) International Offshore and Polar Engineering Conference, 2002, 3: 198-201.
- [5] Halkyard J, Sirmivas S, Holmes S, et al. Benchmarking of truss spar vortex induced motions derived from CFD with experiments[C]//24th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering: Volume 3. ASME, 2005(Omae): 895-902.
- [6] Halkyard J, Atluri S, Sirmivas S. Truss spar vortex induced motions: Benchmarking of CFD and Model Tests[C]//Volume 4: Terry Jones Pipeline Technology; Ocean Space Utilization; CFD and VIV Symposium. ASME, 2006, 2006: 883-892.
- [7] 王兴刚, 孙昭晨, 梁书秀, 等. 水深和螺旋板对 Classic Spar 水动力特性的影响[J]. 中国海洋平台, 2011, v.26; No.145(1): 23-30.
- [8] 魏泽, 邱耿耀, 匡晓峰, 等. 基于 CFD 计算的 spar 平台螺旋侧板水动力优化设计研究[C]//中国力学学会, 北京: 海洋出版社, 2012: 320-326.
- [9] Shen Z, Wan DC, Carrica P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 287-306.
- [10] Zhao W, Wan DC. Detached-eddy simulation of flow past tandem cylinders[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1 272-1 281.
- [11] 赵伟文, 万德成. 用 SST-DES 和 SST-URANS 方法数值模拟亚临界雷诺数下三维圆柱绕流问题[J]. 水动力学研究与进展 A 辑, 2016, 31(1): 1-8.
- [12] 杨加栋, 张晓灵, 杜宝银, 等. 螺旋列板——深水立管涡激振动抑制装置[J]. 海洋技术, 2010, v.29; No.116(4): 88-92, 116.
- [13] Thiagarajan K P, Constantinides Y, Finn L. 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.
- [14] Braza M, Chassaing P, Minh H. Numerical study and physical analysis of the pressure and velocity fields in the near wake of a circular cylinder[J]. Journal of fluid mechanics, 1986, 165(November 2015): 79.