

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2015.01.006

# 用大涡模拟方法数值模拟 Spar 平台涡激运动问题\*

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, Email: weiwenzhao@sjtu.edu.cn)

**摘要:** 该文采用基于开源代码计算流体力学工具包 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对一座 Spar 模型的硬舱部分进行了涡激运动的数值模拟。采用大涡模拟方法数值模拟了不同折合速度下 Spar 模型的涡激运动情况, 并与 Finnigan 等<sup>[1,2]</sup>的模型试验结果作了对比和分析, 证明了求解器 naoe-FOAM-SJTU 在模拟涡激运动方面的可靠性。

**关键词:** Spar 平台; 涡激运动; 折合速度; 大涡模拟; naoe-FOAM-SJTU 求解器

**中图分类号:** U661.1

**文献标识码:** A

## Numerical investigation of vortex-induced motions of Spar platform based on large eddy simulation

ZHAO Wei-wen, 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 200240, China)

**Abstract:** This paper applies a naoe-FOAM-SJTU solver for solution of ship and ocean engineering flows based on the open source CFD toolkit OpenFOAM to simulate the vortex-induced motions of the hard tank section of a Spar model. The spar VIM was simulated by using large-eddy simulation in naoe-FOAM-SJTU solver at different reduced velocities. The numerical results are compared with the results of model tests which were performed by Finnigan, et al (2007)<sup>[1,2]</sup> to evaluate the reliability of the naoe-FOAM-SJTU solver in VIM simulations.

**Key words:** spar platform; vortex-induced motions; reduced velocity; large-eddy simulation; naoe-FOAM-SJTU solver

\* **收稿日期:** 2014-07-25(2014-11-03 修改稿)

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51379125、51411130131 和 11432009)、国家重点基础研究发展计划(973 计划, 2013CB036103)和上海高校特聘教授岗位跟踪计划(2013022)

**作者简介:** 赵伟文(1990 - ), 男, 江西新余人, 博士研究生。

**通信作者:** 万德成, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

**Received:** July 25, 2014 (**Revised** November 3, 2014)

**Project supported by foundations:** Supported by the Nation Natural Science Foundation of China (51379125, 51411130131, 11432009), the Major State Basic Research Development Plan of China (973 Program, 2013CB036103) and Program for Professor of Special Appointment (Eastern Scholar) at Shanghai Institutions of Higher Learning (2013022)

**Biography:** ZHAO Wei-wen (1990-), Male, Ph. D. Candidate.

**Corresponding author:** WAN De-cheng, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

## 引言

涡激运动 (vortex-induced motions, VIM) 常见于海洋浮式结构物, 尤其是 Spar 平台。目前世界上使用最多的 Spar 平台有三类, 分别是: 经典式 (classic spar)、桁架式 (truss spar) 和多柱式 (cell spar)。由于这三类 Spar 平台的主体外观均为立柱形状, 使得其在一定速度的洋流中必然发生两侧交替旋涡脱落现象, 从而导致涡激运动。涡激运动的大幅度位移会使 Spar 平台的系泊锚链以及立管等结构超过极限应力, 影响其使用寿命, 并对平台上工作人员的作业造成不便。因此有必要从设计阶段严格调论证, 尽可能避免涡激运动的发生。

目前研究涡激运动的方法主要有: 模型试验、计算流体力学方法 (computational fluid dynamics, CFD) 数值模拟和实尺度观测。国外早在 2003 年就有相关方面的研究<sup>[3]</sup>, 美国 Chervon 公司做了不同缩尺比下的 Spar 涡激运动模型试验<sup>[4]</sup>, 系统地分析了不同缩尺比、不同折合速度、不同流向角以及主体附属物对 Spar 平台涡激运动的影响。而国内对 Spar 平台涡激运动的研究起步则相对较晚, 2008 年上海交通大学王颖等<sup>[5]</sup>对国际上 Spar 涡激运动的研究进展做了调研, 从涡激运动形成机理、响应特性、抑制方法以及预报方法等几个方面对其进行了详细分析。张蕙等<sup>[6,7]</sup>对均匀来流中的一座 Truss Spar 平台做了涡激运动的等效水深截断系统模型试验, 分析了不同折合速度和流向角对涡激运动的影响, 验证了螺旋减涡侧板对涡激运动抑制作用的有效性。

为了验证 CFD 方法在预报 Spar 平台涡激运动方面的有效性, 本文在 OpenFOAM 自带求解器 pimpleDyMFoam 的基础上<sup>[8-11]</sup>, 开发了六自由度运动求解模块<sup>[12]</sup>和弹簧模块<sup>[13]</sup>, 形成了船舶与海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU, 并用其中大涡模拟方法对一座 Spar 模型的硬舱部分进行了涡激运动的数值模拟, 并与文献的试验结果进行比较, 分析了螺旋侧板对涡激运动的抑制作用, 比较了不同折合速度下的涡激运动响应。

## 1 数值方法

### 1.1 流体控制方程

大涡模拟将包括脉动在内的湍流瞬时流动通过滤波方法分为大尺度涡和小尺度涡, 大尺度涡 (滤波后) 的不可压缩流体的基本控制方程可由连

续性方程和动量方程给出:

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

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

其中:  $\rho$  为流体密度,  $\nu$  为流体运动黏度,  $\bar{u}_i$  为滤波速度。

在此引入亚格子应力  $\tau_{ij}$ , 其定义为

$$\tau_{ij} = \rho (\bar{u}_i \bar{u}_j - \overline{u_i u_j}) \quad (3)$$

亚格子应力用来表示小尺度涡引起的大尺度上动量通量的变化, 本文采用 Smagorinsky 亚格子模型用来描述亚格子应力, 其表达式为

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \tau_{kk} \delta_{ij} = 2\mu_t \bar{S}_{ij} \quad (4)$$

式中:  $\mu_t$  为涡黏度,  $\bar{S}_{ij}$  为可接尺度变形率张量。涡黏系数可由  $\mu_t = C_s^2 \rho \Delta^2 |\bar{S}|$  给出, 其中  $\Delta$  是滤波尺寸,  $|\bar{S}| = (\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{1/2}$ 。对于外流而言, 通常取  $C_s \approx 0.2$ 。

### 1.2 离散格式

在求解方程时, 采用有限体积法离散, 时间项采用隐式欧拉格式离散, 压力与速度的耦合求解采用 PIMPLE 方法 (PISO<sup>[14]</sup>和 SIMPLE 结合)。PISO 方法通过先预估一步, 再校正两步的方法求解 Navier-Stokes 方程, 而 PIMPLE 方法则在 PISO 方法的基础上, 对同一时间步内进行多次循环校正, 取其中最后一次校正的结果作为下一时间步的初始值继续迭代。

### 1.3 动网格

OpenFOAM 中有两种处理网格运动的方式: 一种是拓扑关系保持不变, 通过单元拉伸和变形来处理网格运动; 另外一种则是改变网格拓扑关系, 通过生成网格来处理网格运动。本文选取前一种方式来处理 Spar 平台的运动, 网格运动通过求解基于有限元的网格运动 Laplacian 方程得到<sup>[15,16]</sup>:

$$\nabla \cdot (k \nabla u) = 0 \quad (5)$$

式中:  $k$  为控制单元变形和质量的扩散系数, 与网格单元中心与运动网格边界的距离  $r$  成反比关系或指数关系等, 本文取二次方 (quadratic) 形式<sup>[16]</sup>

$$k = \frac{1}{r^2} \quad (6)$$

$$St = \frac{f_s D}{U}$$

(3) 折合速度：

$$U_r = \frac{UT_n}{D}$$

(4) 无量纲振幅比：

$$A/D = \frac{(A_{\max} - A_{\min})}{2D}$$

其中： $U$  为来流速度， $D$  为 Spar 平台圆柱主体部分的直径， $f_s$  为泻涡频率， $T_n$  为 Spar 平台在静水中的横荡固有周期， $A$  为横荡运动的振幅。

## 2 计算模型及工况

### 2.1 计算模型

本文选取的计算模型为 Finnigan 等 (2007 年) 所做拖曳试验的模型<sup>[1]</sup>。Finnigan 等通过模型试验分析了不同折合速度、不同流向角以及主体附属物对 Spar 平台涡激运动的影响。本文取其中主体不包含附属物，只有螺旋侧板的模型作为基准，考察了 Spar 平台在流向角 90° 时不同折合速度下的涡激运动响应。

表 1 Spar 模型参数

Table 1. Parameters of the Spar model

参数	值
直径 ( $D$ )	1.75 m
吃水 ( $H$ )	2.95 m
螺旋侧板	3 片, 高度 13% $D$ (约 0.223 m)
质量 ( $M$ )	7088 kg
弹簧刚度 ( $K$ )	2111 N/m
弹簧阻尼 ( $B$ )	2.8 kg/s



图 1 Spar 硬舱部分模型示意图  
Fig.1 Spar geometry with helical strakes

Spar 平台的模型缩尺比为 1:22.3，主要的几何和物理参数见表 1，其硬舱部分的外观如图 1 所示。

### 2.2 计算工况

Spar 平台的涡激运动特征主要由雷诺数、斯特劳哈尔数、折合速度以及无量纲振幅比等参数决定<sup>[3]</sup>，分别定义如下：

(1) 雷诺数：

$$Re = \frac{UD}{\nu}$$

(2) 斯特劳哈尔数：

表 2 工况拖曳速度及雷诺数  
Table 2. Reynolds numbers at different reduced velocities

折合速度 ( $U_r$ )	拖曳速度/m·s <sup>-1</sup>	雷诺数 ( $Re$ )
5	0.533	0.95×10 <sup>6</sup>
6	0.640	1.14×10 <sup>6</sup>
7	0.746	1.33×10 <sup>6</sup>
8	0.853	1.52×10 <sup>6</sup>
9	0.960	1.71×10 <sup>6</sup>

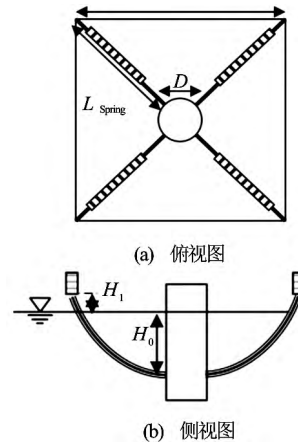


图 2 弹簧设置<sup>[1]</sup>  
Fig.2 Spring system configuration<sup>[1]</sup>

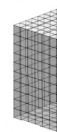
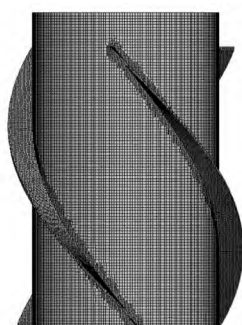
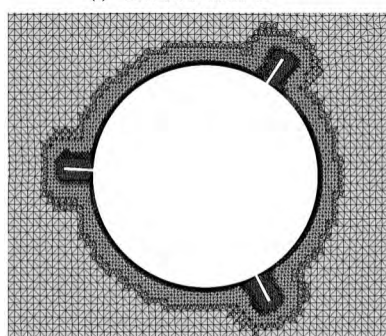


图 3 计算区域整体网格分布  
Fig.3 Computational grid overall domain

这里选取均匀来流, 折合速度  $U_r = 5, 6, 7, 8, 9$  五组试验工况, 如表 2 所示。



(a) 主体表面网格分布



(b)  $z = -2$  截面处的局部网格分布

图 4 局部网格分布

Fig.4 Local mesh near Spar hull

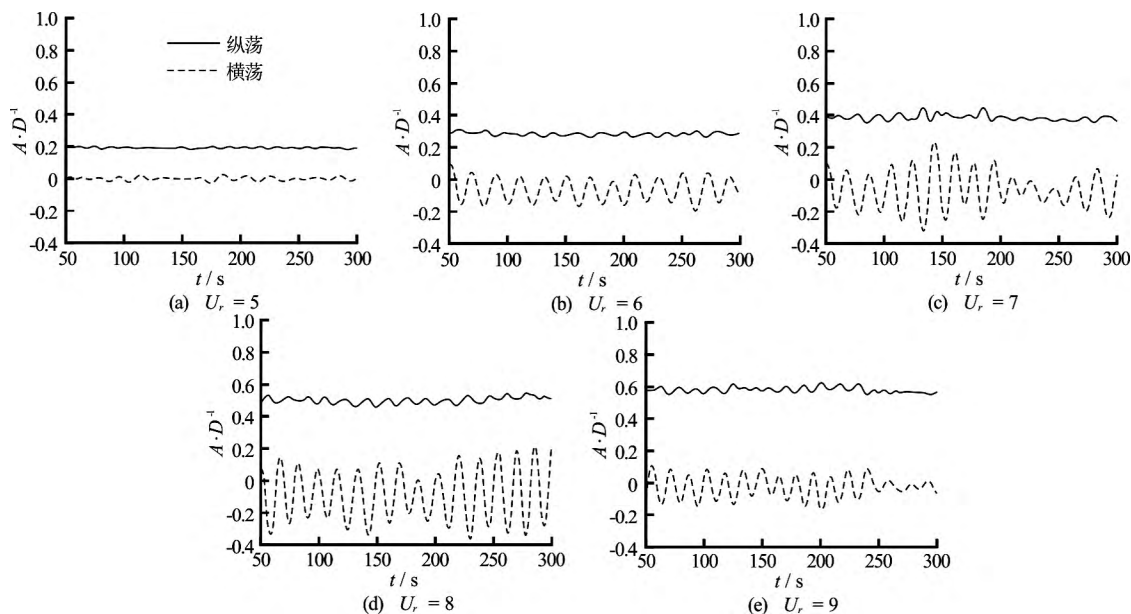


图 5 不同折合速度下的涡激运动响应时历曲线

Fig.5 VIM response at different reduced velocities

通常情况下 Spar 平台在锚泊系统的约束下做六自由度运动: 横荡、纵荡、垂荡、横摇、纵摇及艏摇。而模型试验和实尺度观测都表明, 水平面内的平动即横荡和纵荡为涡激运动的主导运动, 这里的横荡是指垂直来流方向, 纵荡是指沿着来流方

向。为了简化起见, 本文将模型的运动约束在水平面内, 即只考虑模型的横荡和纵荡。在模型周围沿  $45^\circ$  角方向布置四个弹簧, 如图 2 所示。弹簧模型的控制方程可由以下方程给出:

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_{hx} \quad (7)$$

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F_{hy} \quad (8)$$

其中:  $M$  为 Spar 平台的质量,  $C$  为弹簧阻尼,  $K$  为弹簧刚度,  $F_{hx}$  和  $F_{hy}$  分别为横向和纵向的流体动力。本文中不考虑弹簧系统的阻尼, 即取  $B = 0$ 。

### 2.3 计算区域、网格划分以及边界条件

计算区域及网格划分如图 3 所示。整个计算域的长度为  $27D$ , 宽度为  $10D$ , 高度为  $3H$ 。其中 Spar 平台中心点距离上游入口处为  $10D$ , 距离下游出口处为  $17D$ , 距离两侧分别为  $5D$ 。对 Spar 平台尾部区域进行网格局部加密, 并且在 Spar 平台主体表面增加边界层网格, 最后整个计算区域的总网格数量为 220 万。图 4 给出了 Spar 主体表面的局部网格分布及  $z = -2$  截面处的局部网格分布。

计算域的边界条件具体设置如下: 上游入口处采用速度入口, 下游出口边界条件采用压力积分为零, 上表面采用对称边界条件, 下表面和两侧则采用可滑移壁面边界条件。

## 3 结果分析

### 3.1 “锁定”现象

图 5 给出了不同折合速度下的 Spar 平台涡激运

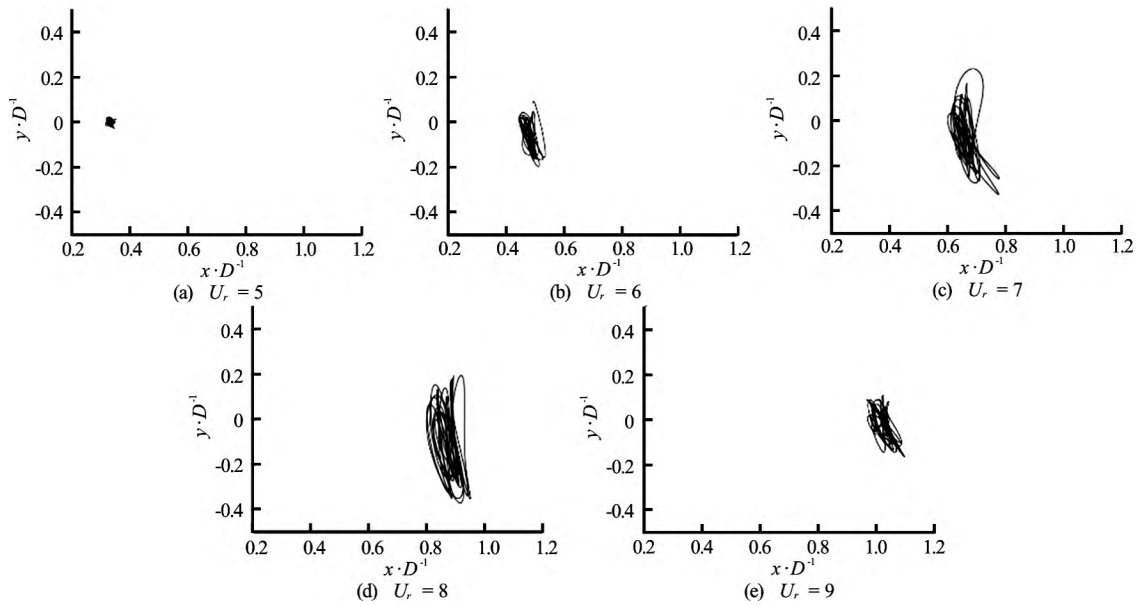


图 6 不同折合速度下的平台运动轨迹  
Fig.6 Spar trajectories at different reduced velocities

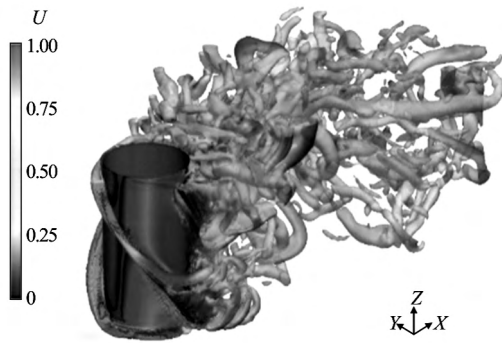


图 7 某时刻的尾部流场涡量图 (Q 准则),  $U_r = 7$   
Fig.7 Vorticity contour (Q-criterion),  $U_r = 7$

动中横荡和纵荡的时历曲线。

对比图 5 (a) —图 5 (e) 发现, 纵荡偏移随着折合速度的增加而增大, 这主要是由于折合速度的增大导致平台在纵向方向所受的流体拖曳力增大, 使得平台的整体平衡位置随来流向后移动。从图 5 (a) 中可以看出, 当折合速度  $U_r = 5$  时, 在来流的作用下, Spar 平台相对初始位置有  $0.2 D$  的纵荡偏移, 但其横荡和纵荡的幅度均很小, 这是由于涡激频率相比固有频率较小, 不足以引起共振。从图 5 (b) —图 5 (d) 可以看出, 当折合速度  $U_r = 6$  8 时, 可以看到涡激运动的横荡幅度显著增加, 在  $U_r = 8$  时, 涡激运动幅度最大, 其最大横向无量纲

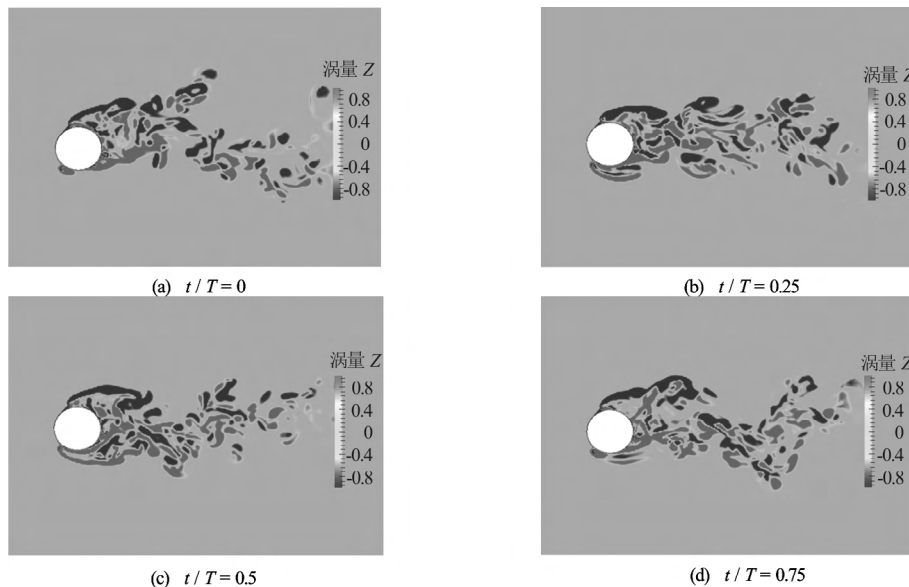


图 8 一个周期内  $z = -2$  处界面的尾部涡量演化,  $U_r = 6$   
Fig.8 Evolution of wake vorticity  $Z$  at slice  $z = -2$  in one period,  $U_r = 6$

振幅比接近 0.38, 此时 Spar 平台的横向涡激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)。从图 5 (e) 中可以看出, 当折合速度  $U_r = 9$  时, 涡激运动幅度较“锁定”区域更小, 系统逐渐脱离“锁定”区域, 这一过程被称为“解锁”。

图 6 给出了不同折合速度下的 Spar 平台的运动轨迹。从图中可以看出, 在“锁定”区域时, 由于螺旋侧板的存在, Spar 平台的运动轨迹呈“香蕉”形。

### 3.2 减涡侧板

图 7 给出了  $U_r = 7$  时, 某时刻 Spar 平台尾部流场量图。从图中可以看出, Spar 平台两侧的大量的流动分离都发生在螺旋侧板的顶部, 而不是发生在主体表面, 呈现出强烈的三维效应, 说明螺旋侧板能够打乱 Spar 平台主体周围规则旋涡脱落的过程, 从而达到抑制涡激运动的目的。

图 8 给出了  $U_r = 6$  时, 一个周期内  $z = -2$  处截面的涡量演化图。从这个截面图中, 可以更明显地观察到螺旋侧板顶部的流动分离现象。螺旋侧板的存在阻碍了规则泻涡的过程, 同时也打乱了 Spar 平台周围的流线, 如图 9 所示。

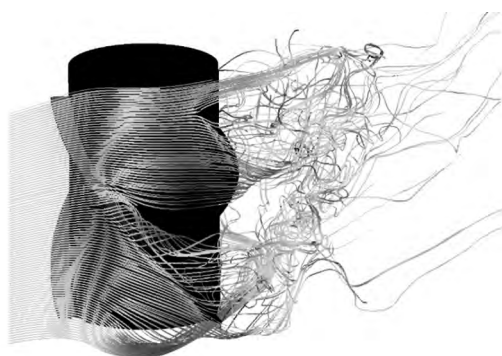


图 9 Spar 主体附近的流线,  $U_r = 6$

Fig.9 Streamwise near hull,  $U_r = 6$

表 3 模型试验和 CFD 数值模拟的  $A^*$  结果 (流向角  $90^\circ$ )

Table 3.  $A^*$  for model test and CFD simulation (heading degree  $90^\circ$ )

折合速 ( $U_r$ )	模型试验	文献[2]结果	本文数值模拟结果
6	0.099	0.119	0.132
7	0.174	0.216	0.185
8	0.223	0.299	0.242

### 3.3 无量纲振幅比

Oakley 等<sup>[2]</sup>指出, 由于涡激运动呈现出强烈的调制性, 因此采用更为合理的无量纲参数  $A^*$  来评估

涡激运动性能, 其定义为  $y/D$  标准差的  $\sqrt{2}$  倍, 即

$$A^* = \sqrt{2} \frac{1}{D} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y(t) - \bar{y}]^2} \quad (9)$$

表 3 给出了模型试验及本文 CFD 数值模拟的结果, 同时给出了 Oakley 等<sup>[2]</sup>的 CFD 数值结果。从表中可以看到, 总体而言, 本文数值计算的结果同模型试验相比较吻合较好, 证明了 CFD 方法在预报 Spar 平台涡激运动方面的潜力。但本文数值计算的结果对比模型试验的结果都有不同程度的偏差, 这可能是由于 CFD 数值模拟中没有考虑模型试验弹簧系统的阻尼。

## 4 结论

本文基于 OpenFOAM 开发的船舶与海洋工程水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU, 采用其中的大涡模拟方法, 模拟了一座典型 Spar 平台硬舱部分的涡激运动问题。所选的计算模型为 Finnigan 等<sup>[1]</sup>所做拖曳试验的模型, 分别计算了折合速度  $U_r = 5$  9 时 Spar 平台的涡激运动响应, 并和模型试验结果进行了对比和分析, 得出以下结论:

(1) 通过对 Spar 平台运动轨迹的研究, 可以观察到平台的运动轨迹和一般涡激振动的“8”字形轨迹不同, 呈现出类似“香蕉”的形状。

(2) 平台的纵荡平衡位移随着流速的增加而增大, 而其振幅保持在很小的范围内。这是由于螺旋侧板的存在, 使得流动分离发生在螺旋侧板的顶部, 而不是在圆柱形主体的后方, 因此圆柱主体后方与前方的压差不大, 其纵荡幅值不大。

(3) 在“锁定”区域内, 横荡幅值显著增加, 最大可达  $0.38 D$ , 这是由于泻涡频率接近固有频率, 平台受到的横向周期力频率和固有频率相当, 产生了共振。

综上所述, 对 Spar 的涡激运动数值模拟表明, CFD 方法可以很好地捕捉到“锁定”现象, 在预报 Spar 平台涡激运动领域具有一定的准确性和可靠性, 可以为 Spar 平台的初期螺旋侧板的优化设计提供有效的参考。

## 致谢

本文工作得到了工信部高技术船舶科研项目以及上海交通大学高性能计算中心的资助, 在此一并表示衷心感谢。

## 参 考 文 献:

- [1] FINNIGAN T, RODDIER D. Spar VIM model tests at supercritical reynolds numbers[C]. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE, San Diego, California, USA, 2007.
- [2] OAKLEY O H, CONSTANTINIDES Y. CFD truss spar hull benchmarking study[C]. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE, San Diego, California, USA, 2007.
- [3] DIJK R, MAGEE A, PERRYMAN S, et al. Model test experience on vortex induced vibrations of truss spars[C]. The Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2003.
- [4] LEFEVRE C, CONSTANTINIDES Y, KIM J W, et al. Guidelines for CFD simulations of spar VIM[C]. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering-OMAE, Nantes, France, 2013.
- [5] 王颖, 杨建民, 杨晨俊. Spar平台涡激运动关键特性研究进展[J]. 中国海洋平台, 2008, 23(3): 1-10.  
WANG Yin, YANG Jian-min, YANG Chen-jun. Review on the study of Spar vortex-induced motions key characteristic[J]. China Offshore Platform, 2008, 23(3): 1-10.
- [6] 张蕙, 杨建民, 肖龙飞, 等. 均匀流中深水系泊Truss Spar平台涡激运动试验研究[J]. 海洋工程, 2011, 29(4): 14-20.  
ZHANG Hui, YANG Jian-min, XIAO Long-fei, et al. Experimental study of vortex-induced motions of truss spar in uniform currents[J]. The Ocean Engineering, 2011, 29(4): 14-20.
- [7] 沈志荣, 叶海轩, 万德成. 船舶在迎浪中运动响应和波浪增阻的RANS数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 2012, 27(6): 621-633.  
SHEN Zhi-rong, YE Hai-xuan, WAN De-cheng. Motion response and added resistance of ship in head waves based on RANS simulations[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2012, 27(6): 621-633.
- [8] 马娟, 万德成. 典型标准水面船型阻力和黏性流场的计算[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2011, 41(2): 178-193.  
MA Juan, WAN De-cheng. A numerical study of resistance and viscous flow around typical benchmark surface ship hull[J]. Science Chinese Physica, Mechanics & Astronomy, 2011, 41(2): 178-193.
- [9] 曹洪建, 万德成, 杨驰. 三维溃坝波绕方柱剧烈流动的数值模拟[J]. 水动力学研究与进展, A辑, 2013, 28(4): 414-422.  
CAO Hong-jian, WAN De-cheng, YANG Chi. Numerical simulation of violent flow of 3-D dam-breaking wave around square cylinder[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2013, 28(4): 414-422.
- [10] CAO H J, WAN D C. Development of multidirectional nonlinear numerical wave tank by naoe-FOAM-SJTU Solver[J]. International Journal of Ocean System Engineering, 2014, 4(1): 52-59.
- [11] SHEN Z R, WAN D C. RANS computations of added resistance and motions of a ship in head waves[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 2013, 23(4): 263-271.
- [12] LIU Y C, WAN D C. Numerical simulation of motion response of an offshore observation platform in waves[J]. Journal of Marine Science and Application, 2013, 12(1): 89-97.
- [13] ISSA R I. Solution of the implicitly discretised fluid flow equations by operator-splitting[J]. Journal of Computational Physics, 1986, 62(1): 40-65.
- [14] JASAK H, TUKOVIC Z. Automatic mesh motion for the unstructured finite volume method[J]. Transactions of FAMENA, 2006, 30(2): 1-20.
- [15] JASAK H, RUSCHE H. Dynamic mesh handling in OpenFOAM[C]. Proceeding of the 47th Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, USA, 2009.