DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2018.05.005

深吃水对柱式半潜平台涡激运动数值模拟*

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, E-mail: weiwen.zhao@sjtu.edu.cn)

摘 要: 该文采用专门面向船舶与海洋工程问题自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU,基于不可压缩 Navier-Stokes 方程及延迟的分离涡模拟(Delayed Detached-Eddy Simulation, DDES)方法,模拟了新型的深吃水对柱式 半潜平台在不同折合速度下的涡激运动(Vortex-Induced Motions, VIM)响应。首先采用不同的湍流模型进行静水拖曳数 值模拟,并将结果与他人的模型试验比较。然后对静水中的平台进行横向运动及首摇的数值自由衰减测试,并将自由衰 减测试得到周期与模型试验比较,验证了该文采用的弹簧系统等效刚度与模型试验一致。在此基础上对平台在不同折合 速度下的涡激运动进行了数值模拟,将标称横荡响应、平均过零周期与模型试验比较,并分析了平台涡激运动响应幅值、 频率随折合速度的变化规律。

关 键 词: 深吃水半潜平台; 折合速度; 涡激运动; 分离涡模拟 **中图分类号:** 0357 **文献标志码:** A

Numerical simulation of vortex-induced motions of a deep-draft paired-column semi-submersible platform

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: In this paper, the VIM characteristics of a Paired-Column Semi-Submersible (PC Semi) platform was numerically investigated by the in-house CFD solver naoe-FOAM-SJTU using Delayed Detached-Eddy Simulation (DDES). Drag test were

Corresponding author: WAN De-cheng, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

^{*} 收稿日期: 2017-08-20(2018-07-13 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879159, 51490675, 11432009, 51579145), 长江学者奖励计划(T2014099)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.

通讯作者:万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: August 20, 2017 (Revised July 13, 2018)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51879159, 51490675, 11432009, 51579145), Chang Jiang Scholars Program(T2014099) 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.

carried out with different turbulence modeling methods first, and compared with experiment results. After that, sway and yaw free-decay tests were performed to verifying the stiffness of the current mooring configuration. Finally, the vortex-induced motions (VIM) of PC Semi were simulated at different reduced velocities. Nominal transverse response and mean zero-crossing period were compared with results obtained from model test. Further investigations on the influence of reduced velocities on motion amplitudes and frequencies were carried out.

Key words: deep-draft semi-submersible; reduced velocity; vortex-induced motions; detached-eddy simulation

引言

传统的半潜式平台对波浪激励的横荡和纵荡 响应小,但是垂荡响应大。一种改善大幅垂荡响应 的方法是降低平台重心,通常做法是增加平台吃水。 然而这种方法将形成深吃水的柱状结构,从而容易 引发涡激运动(Vortex-Induced Motions, VIM)。浮 式平台涡激运动是由流经柱状结构的流体在结构 物两侧产生的交替泻涡引发的脉动压力和系泊系 统的系泊力共同作用下产生的一种周期性运动。早 在2003年国外学者就已经对单柱式的Spar平台涡激 运动开展研究[1,2]。近年来随着半潜平台吃水的增加, 半潜式平台的涡激运动越来越明显,对半潜平台涡 激运动响应的研究也开始逐渐受到工业界的重视。 半潜平台涡激运动的研究手段目前集中在模型试 验[3-7]和CFD数值模拟[8-11]。和Spar平台只考虑横荡 和纵荡不同的是,对半潜平台的涡激运动研究还需 要额外考虑首摇自由度。

无量纲的折合速度*U_r*和斯特劳哈尔数*St*是和 涡激运动特性相关的两个重要参数,它们的定义如 下:

$$U_r = \frac{U}{f_n D} \tag{1}$$

$$St = \frac{f_s D}{U} \tag{2}$$

其中, *U* 是来流速度, *f*_n是系统的固有频率, 通常取横荡固有频率, *f*_s为泻涡频率, *D* 为特征长度。不难看出, *U*_r和*St*存在如下关系:

$$U_r \cdot St \equiv \frac{f_s}{f_n} \tag{3}$$

当泻涡频率与固有频率接近时, U_r 与 St 成接 近倒数的关系,此时系统将发生共振,引发强烈的 涡激运动。对于固定柱体而言,在很大雷诺数范围 内的斯特劳哈尔数可以认为不变,因此泻涡频率同 来流速度成正比关系。而对于悬挂于弹簧系统的立柱而言,泻涡频率在一定范围内不随速度变化而变化,而是锁定在固有频率附近,这一现象被称为频率锁定或锁频现象,与之对应的速度范围被称为频率锁定区间。在锁定区间内的系统运动剧烈,会严重加速平台立管和系泊系统的疲劳破坏。Norberg^[12-14]等人的试验表明,圆柱绕流的St数在0.21左右,0°和45°方柱的St数分别为0.13和0.17左右。对于采用圆形或方形作为立柱界面形状的半潜式平台而言,发生频率锁定现象时,U_r一般在St的倒数附近, 其值通常为5-8。

对柱式半潜平台是Houston Offshore Engineering (HOE) 公司设计的用于替代Spar的一种干式采油 树平台。它和Spar平台相比能够提供更大的可变载 荷,具有更小的涡激运动响应。和传统的半潜平台 相比,对柱式半潜平台的吃水更深,将发生更强烈 的涡激运动。而对柱式的设计将使得平台具有独特 的涡激运动响应特性。目前针对该平台已经有研究 人员公开发表了大量的模型试验和数值模拟结果 数据^[6-9, 11, 15]。因此本研究采用该平台为对象,对其 涡激运动响应特性进行研究。

本文采用基于开源代码平台OpenFOAM自主 开发的CFD求解器naoe-FOAM-SJTU,研究了对柱 式半潜平台在锁定区间内的涡激运动响应特性。首 先介绍了数值模拟中采用数值方法,包括湍流模拟 方法、动态重叠网格方法以及弹簧系统模拟方法等; 然后给出了对柱式半潜平台的几何参数和物理参 数,以及计算域和网格,边界条件等;接着给出了 静水拖曳、自由衰减和涡激运动数值模拟结果,讨 论了湍流模型对模拟结果的影响,并对涡激运动特 性进行分析;最后得出全文结论。

1 数值方法

1.1 延迟的分离涡方法

众所周知,RANS方法在模拟包含大分离流动 的问题时,会过高地估计涡黏性,抹去重要的涡结 构,因此无法精确地模拟带有精细涡结构的流动问 题,如带有大量分离的钝体绕流流动,以及涡激运 动产生时平台周围的流动问题等。为了弥补RANS 方法的不足之处,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) 来处理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-大涡模拟(hybrid RANS-LES)方法。它在远离壁面的自由剪切流动 区域采用LES方法的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方法 中的SST模型求解流动。这样既能够保证流体在发 生流动分离后的求解精度,又可以通过减少近壁面 处的边界层网格来降低计算量。

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:

$$\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_i} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \overline{u}_j \overline{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \overline{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\nu \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (5)$$

其中, ν 为分子黏度, τ_{ij} 为雷诺应力或亚格子应力 张量。根据Boussinesq假设, τ_{ij} 可以表示为

$$\tau_{ij} = \frac{2}{3} \delta_{ij} k - \nu_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right)$$
(6)

上式中的 δ_{ij} 为克罗内克函数,k为湍动能。 SST-DDES假设湍流黏度 v_i 可表示为湍动能k,特定 湍流耗散率 ω 和速度应变S的函数^[16]

$$v_t = \frac{a_1 k}{\max(a_1 \omega, SF_2)} \tag{7}$$

其中*a*₁为模型常数。这里,*k*和ω通过求解其相应的输运方程得到

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial (u_j k)}{\partial x_j} = \tilde{G} - \frac{k^{3/2}}{l_{DDES}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \alpha_k \nu_t) \frac{\partial k}{\partial k_j} \right]$$
(8)

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \omega)}{\partial x_j} = \gamma S^2 - \beta \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \alpha_{\omega} \nu_t) \frac{\partial \omega}{\partial k_j} \right] + (1 - F_1) C D_{k\omega}$$
(9)

k方程中的 l_{DDES} 为混合长度,是控制LES或

RANS求解的开关。其定义如下:

$$l_{DDES} = l_{RANS} - f_d \max(0, l_{RANS} - C_{DES}\Delta)$$
(10)

这里 l_{RANS} 是RANS方法求解得到的湍流尺度,

 $C_{DES}\Delta$ 为类似亚格子特征尺度的滤波尺度, f_d 是 混合函数,起到延迟分离的效果。各参数的具体定 义可参考文献[17]。

1.2 动态重叠网格技术

本研究采用动态重叠网格技术来避免由于物体运动带来的网格变形质量下降问题。重叠网格最初是用于处理复杂物体结构网格划分的一种技术,通过给物体不同部分单独划分网格,将复杂的流动区域分成多个几何边界比较简单的子区域,各子区域中的计算网格独立生成,彼此存在着重叠、嵌套或覆盖关系,不同网格之间通过重叠区边界单元插值传递流场信息。而近年来发展的非结构动态重叠网格技术则更多用于处理物体的复杂运动问题。动态重叠网格技术对各活动物体或物体的各活动单元单独划分网格,不同网格可以无约束地相对移动,从而在物体大幅运动过程中保证网格质量。

naoe-FOAM-SJTU求解器采用重叠网格程序 Suggar++^[18]来计算域连接信息(Domain Connectivity Information, DCI)。DCI信息主要包括单元信息(洞 单元、插值单元、贡献单元、孤点单元)及插值权 重系数。求解器通过在不同进程中分别运行 OpenFOAM和Suggar++实现全并行化的流场求解 和重叠网格挖洞插值计算。不同进程之间的网格运 动和DCI信息交换通过消息传递接口(Message Passing Interface, MPI)实现。关于OpenFOAM和 Suggar++耦合的详细方法可参考文献[19]。

1.3 系泊系统

系泊系统是影响涡激运动特性的一个重要因 素。模型试验中通常采用空气轴承和水平系泊系统 来限制模型运动。空气轴承可以保证平台在水平面 内做自由运动。系泊系统则通常由四根等夹角分布 的软弹簧构成,从而保证系泊系统全局刚度在各个 方向上都是相等的。采用这种系泊系统布置,模型 将只能在水平面内做三自由度的运动,即横荡、纵 荡和首摇。将平台和弹簧组成的整个系统视为弹簧 质量系统,其横荡和首摇固有频率可以表示为

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m+M}} \tag{11}$$

$$f_{nt} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_t}{J + J_a}} \tag{12}$$

其中 *K* 和 *K*_{*i*} 为有效平移刚度和有效扭转(旋转)刚度。*m* 和 *J* 分别为平台的质量和惯性矩, *M* 和 *J*_{*i*} 为平台在水中的附加质量和附加惯性矩。

在传统的涡激运动CFD数值模拟中,通常将系 泊系统提供的力施加到三个非耦合自由度横荡、纵 荡和首摇的运动方程中,通过求解以下方程得到平 台的运动

$$M\ddot{x}(t) + C_{x}\dot{x}(t) + K_{x}x(t) = F_{x}(t)$$
(13)

$$M\ddot{y}(t) + C_{v}\dot{y}(t) + K_{v}y(t) = F_{v}(t)$$
(14)

$$J\ddot{\theta}(t) + C_t\dot{\theta}(t) + K_t\theta(t) = M_z(t)$$
(15)

其中, C_x , C_y 和 C_t 为结构阻尼系数, $F_x(t)$, $F_y(t)$ 和 $M_z(t)$ 分别为施加在平台上X,Y轴的水动 力和Z轴的水动力矩。

本研究采用能够考虑多自由度耦合的方法求 解平台运动。如图1所示,四根带有预张力的弹簧 将导缆孔和锚泊点连接起来。在数值模拟过程中, 导缆孔附在平台上随着平台一起运动,锚泊点则在 惯性坐标系中固定不动。每根弹簧在平台运动的整 个过程中均需保持张紧状态。弹簧力的求解过程如 下:

(1)根据每根弹簧的导缆孔、锚泊点的初始 位置、刚度及预张力,求解松弛状态下的弹簧长度;

(2)根据平台当前时刻的运动状态,求解当 前时刻的导缆孔位置;

(3) 求解弹簧伸长量,并以此求出每根弹簧 施加在平台上的弹簧力。

在得到所有弹簧的弹簧力及力矩后,将其作为 一个整体的外力施加到平台的六自由度运动方程 中^[20],并求解运动微分方程,得到平台在六个自由 度上的运动和位移。本研究将平台限制为水平面内 的三自由度运动,即横荡、纵荡和首摇。





由于整个系泊系统的有效刚度由四根线性刚 度的弹簧提供,因此必须通过调整单根弹簧的参数 来调节有效刚度,并使之与模型试验提供的有效刚 度一致。我们通过静态位移试验和自由衰减试验来 验证系泊系统的有效刚度。静态位移试验是指将平 台向某个方向平移或旋转,测量其回复力或力矩, 以此计算出系统的有效刚度。自由衰减试验则是对 平台施加一个初始位移或速度,让其在没有来流的 情况下做振荡衰减运动,并计算自由衰减运动周期。

2 几何模型和计算设置

2.1 对柱式半潜平台几何模型

对柱式半潜平台由八根立柱组成,分为外侧的 四根和内侧的四根。表1和图2列出对柱式半潜平台 的主体参数。对于实尺度的平台而言,其总体高度 和宽度分别为82.6 m和113.4 m,立柱和浮筒的高度 分别为74.4 m和8.2 m,设计吃水为53.3 m,即表示 立柱的浸没长度H为45.1 m。立柱采用倒圆角设计, 倒圆角的半径为2.4 m。该平台在模型试验时采用的 缩尺比为1:54。我们采用外侧立柱的有效直径D= 19.4 m (模型尺度下为0.36 m)作为半潜平台的特征 尺度,折合速度也基于D计算,这与Antony等人^[9] 的模型试验研究定义一致。

表1 对柱式半潜平台的主体参数

Table 1. Frinciple Dimensions of FC Semi					
参数名称	模型尺度	实尺度			
缩尺比	1:54	1:1			
吃水	0.987 m	53.3 m			
宽度	2.1 m	113.4 m			
立柱中心间距 (外侧/内侧)	1.78 m/0.93 m	90.6 m/50.3 m			
立柱截面尺寸	0.248 x 0.259 m/	13.4 x 14 m/			
(外侧/内侧)	0.192 x 0.259 m	10.4 x 14 m			
立柱高度	1.38 m	74.4 m			
浮筒宽度	0.24 m	12.8 m			
浮筒高度	0.16 m	8.2 m			

表2列出了半潜式平台实尺度和模型尺度的质量、回转半径、有效刚度及固有周期等参数。

表 2 质量和刚度相关参数[11]					
Table 2. Mass and Spring Stiffness Properties ^[11]					
参数名称	模型尺度	实尺度			
缩尺比	1:54	1:1			
质量	490.2 kg	79097 t			
回转半径	0.77593 m	41.88 m			
横荡/纵荡	0.17209 l M/m	520 I-NI/m			
有效刚度	0.1/398 KIN/III	520 KIN/III			
首摇有效刚度	0.00523 kN·m/deg	55260 kN·m/deg			
固有横荡周期	15.45 s	113.5 s			
固有首摇周期	9.32 s	68.5 s			





2.1 计算网格

本研究采用多块非结构式嵌套重叠网格。图3 和图4分别展示了本研究所采用的计算域和计算网 格。计算网格包含两块独立的网格:平台网格和背 景网格。平台网格可以依据平台的横荡、纵荡和首 摇做平移和旋转运动,背景网格则在计算过程中保 持静止不动。整个计算域的大小为-14D ≤ x ≤ 28D, -11D ≤ y ≤ 11D和 -10D ≤ z ≤ 0。背景网格为均一 尺寸的网格,大小为0.45D。平台网格的边缘网格 尺寸与背景网格一致,以避免挖洞过程中产生孤点 单元(在其他网格中找不到插值贡献单元)。尾涡 区域的网格以八叉树形式加密了三级,因此该区域 的网格尺寸为0.05625D。边界层网格数量为4层, 离壁面最近一层的网格高度为0.0024 m,这样边界 层网格尺寸可以保证y+<5。最终的背景网格数和平 台网格数分别为9万和243万。



Fig.3 Computational domain and overset block



图 4 重叠网格局部图 Fig.4 Local view of overset mesh

上游入口处(x=-14D)的边界条件为速度入口, 即速度为Neumann边界条件,压力为Dirichlet边界 条件。下游出口处(x=28D)的边界条件为压力出 口,即速度为Dirichlet边界条件,压力为Neumann 边界条件。顶部设置为对称边界条件,底部和两侧 为可滑移条件,物体表面为不可滑移条件。

计算域采用有限体积单元离散,时间项使用二 阶欧拉隐式格式,动量方程对流项采用LUST格式, 湍流输运方程对流项采用limitedLinear格式,时间 步长取0.02 s。速度和压力的解耦采用PIMPLE算法。

3 计算结果与分析

3.1 静水拖曳

首先进行静水拖曳试验。该试验保持平台固定不动,给定来流速度0.272 m/s (对应实尺度下的2.0 m/s)。 选取了SST-DDES和SST-URANS两种湍流模拟方法,研究不同湍流模型对静水拖曳试验的影响。表3给 出了两种方法获得的阻力系数,用 $F_x/(\rho U^2)$ 来表示。从表中可以看出SST-URANS计算得到的阻力比 试验值大6.7%,这与我们之前对固定圆柱绕流数值 模拟得到的结果趋势一致^[21]。

表 3 两种湍流模拟方法获得的阻力系数 Table 3. Drag parameters predicted by two turbulence modeling methods

modeling methods				
	模型试验	SST-DDES	SST-URANS	
$F_x/(\rho U^2)$	0.91 (±3.0%)	0.913	0.971	
误差	-	0.3%	6.7%	

图5展示了两种方法得到的三维涡量图和二维 切面湍流黏度云图。其中三维涡量图用Q准则表示, 取Q=0.2,用速度的流向分量着色。二维切面湍流 黏度云图取z=-0.5H处的水平切面。从SST-DDES得 到的涡量图中,可以在立柱后方的尾流区域观察到 明显的拟序结构,这种湍流特有的结构特征无法被 SST-URANS捕捉到。与之相反,SST-URANS得到的涡结构在垂直方向呈现出强烈的同步性和相关性。对比湍流黏度云图可以看出,SST-URANS计算得到的湍流黏度要大于SST-DDES,其过高的估计了黏性力,导致得到的阻力结果偏大。显然,SST-URANS不适用于模拟带有大量分离流动的涡激运动,因此接下来的自由衰减和涡激运动数值模拟均采用SST-DDES进行。



3.2 自由衰减

自由衰减试验包含两部分:横荡自由衰减试验 和首摇自由衰减试验。横荡自由衰减试验给平台一 个Y方向上的初始速度或位移,让平台在无来流的 情况下做横荡衰减振荡运动。首摇自由衰减类似, 只不过给平台的为在Z方向上的初始旋转角度或旋 转速度。图6给出了横荡和首摇自由衰减运动的结 果,衰减运动的快速傅里叶变换得到的频率峰值与 实验值非常接近,误差在1%以内,说明当前所采用 的弹簧系统能够提供和模型试验相同的有效平移 刚度和旋转刚度。



图 6 自由衰减的时历曲线(a), (b)和快速傅里叶变换(c), (d) Fig.6 Time history (a) (b) and Fast Fourier Transform (c) (d) of sway and yaw in free-decay

3.3 涡激运动

本研究选取了五个不同的折合速度U_r=

5/6/7/8/9进行涡激运动试验。折合速度基于外侧立 柱的有效直径D=0.36 m计算。本文只研究了0°来 流夹角时的工况,注意对柱式半潜平台的来流夹角 和一般固定方柱绕流的来流夹角定义不同,对柱式 半潜平台的0°夹角实际上对应方柱的45°夹角。

除了U_r=5和6这两个工况之外,其余工况的模 拟时长为300 s。不同折合速度下的横荡时历曲线见 图7。对于U_r=5和6,平台在经历一段长时间的过渡 后(分别为200 s和150 s),发生锁定。而对于其他 工况,过渡时间较短,平台很快发生锁定。基于此, 我们将U_r=5和6的模拟时长增加到400 s。用于涡激





运动响应统计计算的时间区间将剔除初始的过渡时间,包含至少18个横荡周期(对于U_r=5为14个周期)。

图8给出了不同折合速度下平台的标称横荡响 应 和 跨 零 周 期 。 标 称 横 荡 响 应 的 定 义 为 $A^* = \sqrt{2} RMS(y/D)$ 。在模型试验 $U_r = 5$ 的工况中,重 复拖曳得到的 A^* 值变化较大,从最小的0.10到最大的0.37。对这个工况下的横荡运动响应做统计分析 时进行特别处理:分别对初始过渡时间区段和稳定 后的锁定区段做统计分析,得到的两个值呈现出与 模型试验一致的分布,见图8(a)。这表明在此折合 速度下,存在锁定与非锁定两种不同的涡激运动响 应特性,是涡激运动锁定现象发生的临界点。



图 8 不同折合速度下的标称横荡响应和跨零周期 Fig.8 Nominal sway responses and zero-crossing periods at different reduced velocities

图9给出了不同折合速度下无量纲横向位移和 首摇响应的快速傅里叶变换频谱分析结果。快速傅 里叶变换去掉了所有工况的过渡区间。对比横向位 移和首摇可以看出,横向运动频率的峰值和首摇频 率的峰值一致,说明除了横向运动外,首摇也是由 交替泻涡所导致。*U*_r=5工况下,运动响应频率和平 台固有频率几乎相等。随着折合速度增加,频率峰 值逐渐增大并远离固有频率。注意到*U*_r=8和9时, 首摇出现两个频率峰值,高频峰值是由于横向运动 受首摇固有频率的影响所导致。

4 结论

本文选取了一种新型的深吃水对柱式半潜平台



图 9 横向位移和首摇响应的快速傅里叶变换 Fig.9 Fast Fourier transforms for sway and yaw responses

进行了涡激运动的数值模拟。所有的数值模拟均采 用自主开发的CFD求解器naoe-FOAM-SJTU完成, 湍流模拟采用SST-DDES方法,平台运动则采用六 自由度运动模型和动态重叠网格技术处理,系泊系 统的模拟考虑了不同自由度下的耦合运动。

对模型尺度的深吃水对柱式半潜平台分别进 行了静水拖曳,自由衰减及涡激运动的数值模拟, 得到以下结论:

1、静水拖曳试验采用了两种不同的湍流模拟 方法:SST-DDES和SST-URANS。结果表明SST-DDES能够更精确地预测拖曳力和尾涡结构。

2、横向运动和首摇的自由衰减测试表明当前 数值模拟采用的系泊系统设置能够提供与模型试 验相等的有效刚度。

3、涡激运动试验结果表明U,=5为锁定现象的 临界区域,在此折合速度下存在两种不同的涡激运 动响应特性。首摇运动同横向运动一样,也是由两 侧周期性泻涡引起的。由于平台的固有首摇周期比 固有横向运动周期短,在折合速度增加时,泻涡频 率接近首摇固有频率,因此会逐渐出现首摇频率峰 值。

本文对深吃水半潜平台的涡激运动特性展开 了初步研究,目前只研究了折合速度对涡激运动特 性的影响。实际上由于不同来流夹角下的方柱绕流 具有不同的Strouhal数,来流夹角也是影响半潜平台 涡激运动的另一个重要因素。此外,尺度效应也是 涡激运动研究的热点,这些将作为后续工作的重点 研究方向。 致谢

本文工作得到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)的资助。在此一并表示 衷心感谢。

参考文献:

- VAN DIJK R R T, MAGEE A, PERRYMAN S, et al. Model test experience on vortex induced vibrations of truss spars[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2003.
- [2] VAN DIJK R R T, FOURCHY P, VOOGT A, et al. The effect of mooring system and sheared currents on vortex induced motions of truss spars[C]. Proceedings of the 22nd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Cancun, Mexico, 2003.
- [3] WAALS O J, PHADKE A C, BULTEMA S. Flow induced motions of multi column floaters[C]. Proceedings of the 26th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, San Diego, California, USA, 2007.
- [4] GONÇALVES R T, NISHIMOTO K, ROSETTI G F, et al. Experimental study on vortex-induced motions (VIM) of a large-volume semi-submersible platform[C]. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, 2011.
- [5] MAGEE A, SHEIKH R, GUAN K Y H, et al. Model tests for VIM of multi-column floating platforms[C]. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, 2011.
- [6] ZOU J, POLL P, RODDIER D, et al. VIM testing of a paired column semi submersible[C]. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Nantes, France, 2013.
- [7] ANTONY A, VINAYAN V, HOLMES S, et al. VIM study for deep draft column stabilized floaters[C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2015.
- [8] KIM J-W, MAGEE A, GUAN K Y H. CFD simulation of flow-induced motions of a multi-column floating platform[C]. Proceedings of the International Confe-

rence on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, 2011.

- [9] ANTONY A, VINAYAN V, HALKYARD J, et al. A CFD based analysis of the Vortex Induced Motion of deep-draft semisubmersibles[C]. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, Kona, Big Island, Hawaii, USA, 2015.
- [10] CHEN C-R, CHEN H-C. Simulation of vortex-induced motions of a deep draft semi-submersible in current[J]. Ocean Engineering, 2016, 118: 107-116.
- KARA M, KAUFMANN J, GORDON R, et al. Application of CFD for computing VIM of floating structures
 [C]. Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2016.
- [12] NORBERG C, SUNDEN B. Turbulence and Reynolds number effects on the flow and fluid forces on a single cylinder in cross flow[J]. Journal of Fluids and Structures, 1987, 1(3): 337-357.
- [13] NORBERG C. An experimental investigation of the flow around a circular cylinder: influence of aspect ratio[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1994, 258: 287-316.
- [14] NORBERG C. Flow around rectangular cylinders: Pressure forces and wake frequencies[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1993, 49(1-3): 187-196.
- [15] VINAYAN V, ANTONY A, HALKYARD J, et al. Vortex-induced motion of deep-draft semisubmersibles: A CFD-based parametric study[C]. Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, St. John's, Newfoundland, Canada, 2015.

- [16] MENTER F R, KUNTZ M, LANGTRY R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model[J]. Turbulence, Heat and Mass Transfer, 2003, 4(1): 625-632.
- [17] ZHAO W W, WAN D C. Detached-Eddy Simulation of flow past tandem cylinders[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1272-1281.
- [18] NOACK R W, BOGER D A, KUNZ R F, et al. Suggar++: An improved general overset grid assembly capability[C]. 19th AIAA Computational Fluid Dynamics Conference, San Antonio, Texas, USA, 2009.
- [19] SHEN Z R, WAN D, CARRICA P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 287-306.
- [20] SHEN Z R, WAN D. 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.
- [21] 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. ZHAO Wei-wen, WAN De-cheng. Numerical study of 3D flow past a circular cylinder at subcritical Reynolds number using SST-DES and SST-URANS[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics. 2016, 31(1): 1-8.