

DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2017.05.012

不同水深和锚链布置形式下的浮式储油罐 动力响应数值模拟

许 莲^{1,2}, 万德成^{1,2*}

(1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

(2. 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

摘 要: 随着海洋工程的飞速发展, 针对溢油回收的浮式储油罐的应用和分析越来越受到重视. 浮式储油罐在不同水深下的锚链布置形式对其运动和动力响应的影 响是设计者们尤为关心的问题. 文中首先对一浅水(水深 = 28 m)工况下的 3 种锚链布置形式的浮式储油罐动力响应进行了数值模拟, 然后对更大水深(水深 = 60, 100 m)的不同锚链布置形式分别进行了响应的数值模拟, 对计算结果做了分析, 并对未来的浮式储油罐系泊形式设计提出了建议. 文中采用自主开发的、基于 RANS 方程的粘性流体求解器 naoe - FOAM - SJTU 并利用集中质量法求解锚链力.

关键词: 浮式储油罐; 动力响应; 系泊系统; naoe - FOAM - SJTU 求解器

中图分类号: O35

文献标志码: A

文章编号: 1673 - 4807(2017)05 - 0629 - 06

Numerical simulation for oil buoy dynamic response with different water depth and anchor chain arrangement

XU Lian^{1,2}, WAN Decheng^{1,2*}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai, 200240, China)

(2. Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep - Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

Abstract: With the rapid development of ocean engineering, the application and analysis of floating oil storage tanks for oil spill recovery has been paid more and more attention. The influence of anchor chain arrangement at different water depths on its motion and dynamic response is the concerns. In this paper, the dynamic response of three types of floating oil storage tanks with shallow water (depth = 28 m) is simulated numerically. Then, the numerical simulation of the response form of the deeper water depth (water depth = 60, 100 m) is made respectively, and the calculation results are analyzed. The suggestions for the future design of the anchor chain arrangement of the floating oil storage tank are put forward. In this paper, a self-developed viscous fluid solver, naoe - FOAM - SJTU, based on the RANS equation, is used to solve the anchor force by the concentrated mass method.

Key words: oil buoy, dynamic response, mooring system, naoe - FOAM - SJTU solver

收稿日期: 2017 - 05 - 22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(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资助项目(K2015 - 11); 工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016 - 23/09)

作者简介: 许莲(1980 -), 女, 硕士研究生

* **通信作者:** 万德成(1967 -), 男, 教授, 研究方向为船舶与海洋工程水动力学与计算流体力学的基础理论及应用.

E-mail: dewan@sjtu.edu.cn

引文格式: 许莲, 万德成. 不同水深和锚链布置形式下的浮式储油罐动力响应数值模拟[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(5): 629 - 634. DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2017.05.012.

随着海上石油工业的发展,海洋溢油事故频繁发生.目前,海洋石油污染是海洋污染中最严重、最复杂的污染问题之一^[1-3].如何对溢油进行回收、储存是现今需广泛研究的课题.

溢油回收主要包括水上贮油、水面贮油和水下贮油3种方式.水上贮油方式容量有限,工程投资大,并不经济.水下贮油是将贮油罐置于海底或海面以下、海底以上,这种贮油方式安全、费用低、容量大,能够适应海上油田向远海、深海开发及水下生产系统的需要^[4-9];但是对于海上溢油回收储存装置来说,其系统较为复杂,设计制造安装周期相对较长,不能适应迅速响应的要求.水面储油方式是将储油罐置于海面,通过锚链将其固定在海底,同时通过输油软管将收集到的溢油外输,具有一次投资造价低,建造、安装周期短,可迅速投入使用等优点,因此,非常适用于溢油回收的储存.

文中针对浮式储油罐进行研究,分析了不同系泊方式对浮式储油罐运动响应的影响^[10-16].

1 数值方法

1.1 流体控制方程

对于不可压、粘性流体,其控制方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) \tag{2}$$

式中: \mathbf{U} 和 \mathbf{U}_g 分别为流场速度和网格节点速度; $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot x$,为流场动压力,等于总压力减去静水压力; \mathbf{g} 、 ρ 和 μ 分别为重力加速度、流体密度和动力粘性系数.

文中采用有限体积法(FVM)对控制方程进行离散,标准输运方程如下:

$$a_p \phi_p = a_w \phi_w + a_e \phi_e + a_s \phi_s + a_n \phi_n + b \tag{3}$$

文中应用PISO算法处理速度、压力耦合,其计算流程如图1.

对于自由面的捕捉则采用了流体体积法(VOF)^[17];为模拟物体的运动,求解器还采用了动网格变形技术^[18-19].

1.2 浮式储油罐动力分析方法

系泊系统的数值研究方法有很多,文中求解器naoe-FOAM-SJTU^[20-26]采用动力分析方法中的集中质量法(lumped mass method, LMM)进行浮式储油罐的动力响应分析.在集中质量法中(图2)一条系泊链被离散为一组共 $N + 1$ 个节

点,整条链锁的质量集中分布在这些节点上,相邻节点之间由无质量的弹簧即链锁元连接,共 N 段,因此,也称此离散模型为弹簧-质点模型(spring-mass model).

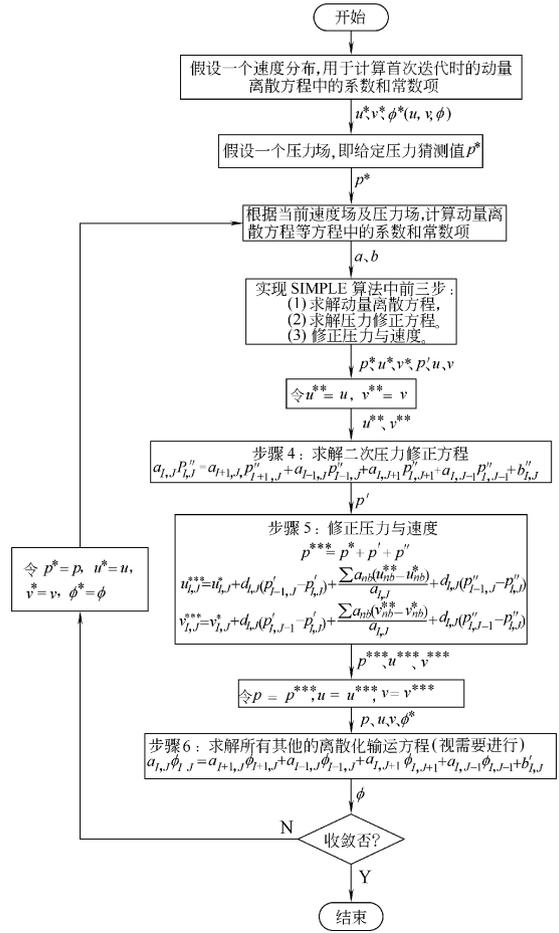


图1 PISO算法计算流程
Fig.1 Calculation flow chart of PISO algorithm

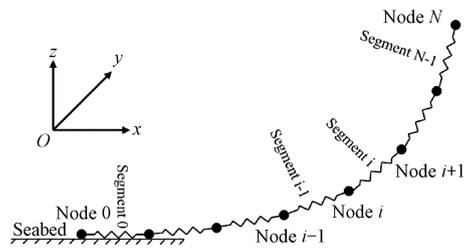


图2 集中质量法链锁离散示意
Fig.2 Chain discrete diagram for concentrated mass method

集中质量法具有以下优点:

(1) 该模型可用于大位移情况,而不仅仅局限于系缆在平衡位置附近的微小运动的计算.因为在建模过程中没有采用任何建立在小位移运动的假设前提下的线性化措施.

(2) 载荷包括系泊缆的自重、浮力、流体拖曳力和惯性力,在分段外推法中并没有考虑惯性力,

这是静力分析与动力分析的最重要的区别。

(3) 该模型可以计算非均匀系缆的动力响应,包括任何具有子系统的情况,如在缆上某点处附有悬挂物或浮体。

(4) 该模型考虑了系缆在交替的张紧—松弛状态下的轴向双线性刚度。

1.3 系泊链流场力求解

系泊链受力主要受到流场力的外部载荷,在求解器 naoe - FOAM - SJTU 中,计算系泊链所受流场力会运用到 Morison 公式。在该公式中,立柱在流场中所受力被分解为两部分,即拖曳力项与惯性力项,拖曳力为立柱由于流场流动速度所受到的力,惯性力为流场加速度所造成的力。

拖曳力项为

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho A U |U| \quad (4)$$

其中: C_D 为阻力系数; ρ 为流体密度; A 为单位柱高垂直于波向的投影面积; U 为波速,因为所受流场力来回往复有正负,所以在式中添加绝对值加以区分。

惯性力与单位柱高的体积与波速加速度乘积成正比,即

$$F_A = C_M \rho V_0 \frac{du}{dt} \quad (5)$$

其中: C_M 为惯性系数; V_0 为单位柱高体积,可令 $m_0 = C_M \rho V_0$, m_0 为附加质量。

流体阻力项即拖曳力项 f_{D1} 通常被分为切向与法向两部分,在计算过程中,三维情况下,流体首先计算出沿切向即坐标系中 ξ 方向的流体阻力,再分别沿法向 η 和 ζ 分解,3 个分量计算公式如下

$$\begin{cases} (f_{D1})_{\xi} = \frac{1}{2} \rho_w C_{DT} \pi d_i |(\mathbf{u}_1)_{\xi}| (\mathbf{u}_1)_{\xi} \\ (f_{D1})_{\eta} = \frac{1}{2} \rho_w C_{DT} d_i \sqrt{|(\mathbf{u}_1)_{\eta}|^2 + |(\mathbf{u}_1)_{\zeta}|^2} (\mathbf{u}_1)_{\eta} \\ (f_{D1})_{\zeta} = \frac{1}{2} \rho_w C_{DT} d_i \sqrt{|(\mathbf{u}_1)_{\eta}|^2 + |(\mathbf{u}_1)_{\zeta}|^2} (\mathbf{u}_1)_{\zeta} \end{cases} \quad (6)$$

在实际计算过程中,数值模拟开始的数个时间步长内,首先通过调用求解器中分段外推法求得这几个时刻的系泊链形状与张力,再使用集中质量法计算。

2 计算模型

2.1 模型及计算域

实际海况下的浮式储油罐如图 3。文中对该

浮式储油系统进行了简化,不考虑外输船舶、收集罩等设备,仅考虑浮式储油罐及锚泊系统。

文中的计算模型由浮式储油罐和锚链组成,其计算模型如图 4,计算域设置如图 5, $-30 \text{ m} \leq x \leq 30 \text{ m}$, $-37.5 \text{ m} \leq y \leq 37.5 \text{ m}$, $-25 \text{ m} \leq z \leq 10 \text{ m}$ 。浮式储油罐置于数值水池中心,波浪由水池左侧入射,右侧有 10 m 长的海绵层消波区,其中储油罐位于水平面以上高度为 1.8 m,位于水平面以下高度为 3.2 m。

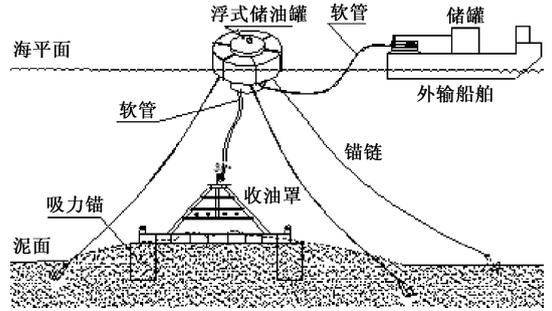


图 3 溢油回收系统示意图
Fig. 3 Leaked oil recovery system

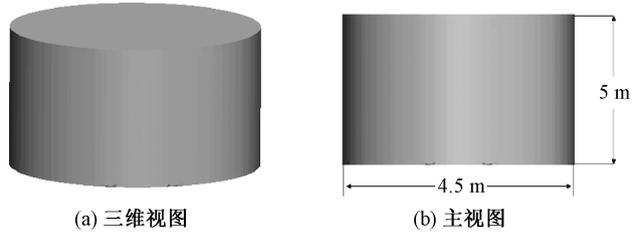


图 4 浮式储油罐模型
Fig. 4 Oil storage buoy model

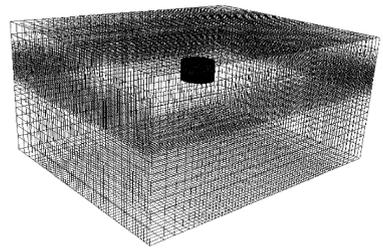


图 5 计算域
Fig. 5 Computational domain

2.2 锚泊系统布置

文中共计算了 3 种锚泊系统布置方式,锚泊系统分别由 4、6、8 根锚链组成,锚泊系统计算域与布置图分别见图 6~8。每两根锚链为一组,第一种锚泊系统每组锚链之间夹角为 90° ,第二种锚泊系统每组锚链之间夹角为 60° ,第三种锚泊系统每组锚链之间夹角为 45° 。每根锚链的布置半径为 300 m,锚链由两段不同结构链锁组成,其中 165 m 长的悬垂段为 4 级链锁,空气中单位长度质量为 52 kg/m ,

140m 长的海底段为 3 级链锁,单位长度质量为 128 kg/m. 需要说明的是,由于锚泊系统的存在,浮式储油罐的浮力并不等于其重力,而是通过重力和锚泊力来平衡.

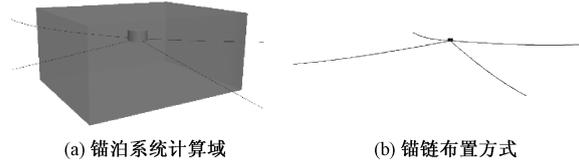


图 6 四链锚泊系统示意图
Fig. 6 Four chains mooring model

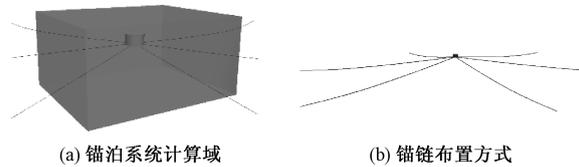


图 7 六链锚泊系统示意图
Fig. 7 Six chains mooring model

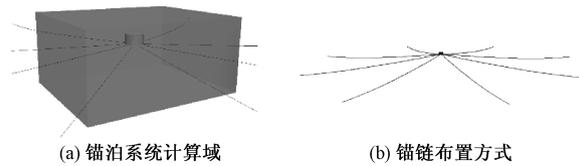


图 8 八链锚泊系统示意图
Fig. 8 Eight chains mooring model

2.3 数值造波和消波

计算浮式储油罐在运动过程中的锚泊力,需要数值水池造出波浪,以模拟实际海况. 文中求解器采用给定入口边界速度的造波方式^[27],要求入射波为规则波:波高 3 m,周期 6 s,波长 56.2 m. 所造规则波如图 9.

同时,为了消除数值模拟中边界对波浪的反射作用,文中利用 naoe - FOAM - SJTU 求解器中的数值消波模块,有效地解决了波浪反射问题.



图 9 规则波示意图
Fig. 9 Regular wave

2.4 不同水深下浮式储油罐动力响应模拟

为了研究不同水深条件下各种系泊锚链形式对浮式储油罐动力响应的影响,文中将上述 3 种系泊形式分别应用到 60 m 和 100 m 水深的工况中,浮式储油罐模型和波浪条件不变,悬垂段锚链长度分别延长 35 m 和 78 m. 上述计算工况整理后如表 1.

表 1 计算工况

Table 1 Calculation conditions

工况	水深/m	系泊锚链数	悬垂段长度/m	海底段长度/m
1	28	4	165	140
2	28	6	165	140
3	28	8	165	140
4	60	4	200	140
5	60	6	200	140
6	60	8	200	140
7	100	4	243	140
8	100	6	243	140
9	100	8	243	140

3 结果与讨论

3.1 浅水下浮式储油罐系泊锚链力计算结果

浮式储油罐受到波浪作用时,锚链力随之发生变化,为了保证锚泊系统的安全性,需要对 3 种不同布置方式的总的锚链受力进行研究. 由于波浪作用下锚链力的周期变化,文中的锚链张力结果均为对应工况下的同一周期内的平均值. 3 种布置方式的锚泊系统受力如表 2.

表 2 浅水工况下的锚链张力

Table 2 Anchor chain tension force for shallow water condition

系泊锚链数	锚链张力/kN
4	105.4
6	92.5
8	80.3

为了分析该工况下不同锚链形式对浮式储油罐运动和动力响应的影响,浮式储油罐在纵向和垂向的受力情况及垂向运动情况随时间变化的曲线如图 10,其对应自由面情况如图 11. 从图中可以看出,naoe - FOAM - SJTU 求解器的造波消波功能都是有效的.

从图 10 可以看出,不论是纵向力还是垂向力,四链锚泊系统下的浮式储油罐受力的时历变化曲线波动最大,而八链锚泊下则最小,相对而言,八链锚泊下波峰值的变化更小,所以对锚链的拉扯作用也更小. 从垂荡运动来看,八链锚泊下的浮式储油罐运动情况更平缓,而四链锚泊下的运动情况则最为剧烈.

不同锚链形式的锚链张力值表明,随着锚链数量的增加,锚链张力有所降低,即八链锚泊布置情况下锚链张力最小,这与一般的静力计算趋势相吻合. 然而,出于对成本和布置难度的考虑,应更深入地分析四链锚泊等的布置情况.

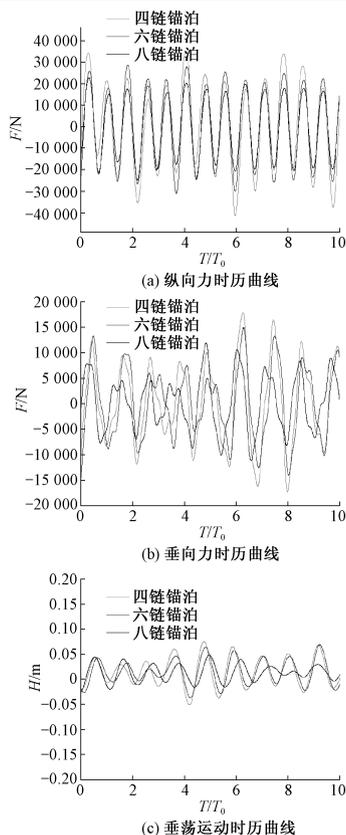


图 10 水下浮式储油罐受力和运动时历曲线
Fig. 10 Time history curve for tension force and buoy motion

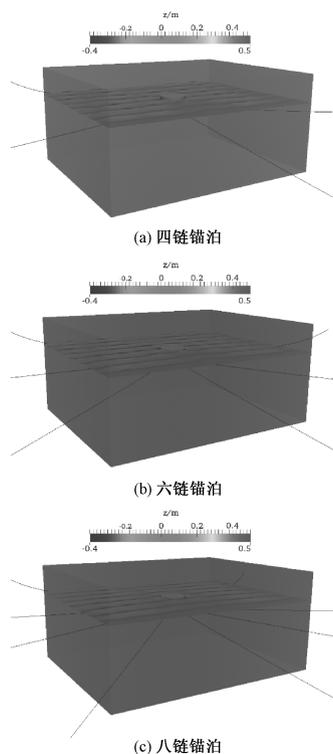


图 11 3 种锚泊情况下的自由面波形
Fig. 11 Wave contour for free surface

3.2 不同水深对浮式储油罐动力响应的影响

为了分析更大水深下浮式储油罐的动力响应

问题及不同水深对其动力响应的影响,文中对上述浅水情况下的浮式储油罐及锚链模型做了进一步修改,并设计了 60 m 和 100 m 两种水深情况,数值模拟的计算结果如表 3.

表 3 深水工况下的锚链张力
Table 3 Anchor chain tension force for deep water condition

水深/m	锚链张力/kN		
	四链锚泊	六链锚泊	八链锚泊
60	116.0	99.4	93.8
100	138.6	106.5	98.7

在深水情况下,不同锚链形式同样对浮式储油罐的运动和动力响应有一定影响,其影响效果同浅水情况类似.从表 3 可以看出,在不同水深情况下,锚链数的增加有利于减小浮式储油罐的动力和运动响应.而随着水深增加,锚链力的减小也更为明显,但是水深增加同样意味着多锚链情况的成本更高.

4 结论

所得结果表明 naoe - FOAM - SJTU 数值模拟浮式海洋工程结构物运动响应的巨大潜力,可以为将来浮式储油罐设计提供参考;但由于实验数据的缺乏,未来应进行适当试验验证.同时,出于工程实际考虑,还应当更多地关注临界情况下的问题.

从系泊方式设计来看,增加锚链数量并不能大幅度降低系泊链本身受力;另一方面,由于系泊链数量的增加,将造成系泊链材料和安装成本的大幅提高.因此,在工程实际中,应尽量采用较少数量的系泊形式,以获得最优的经济性能.

参考文献 (References)

[1] 王耀华. 海上溢油的归宿和形态研究[D]. 大连: 大连海事大学,2010.

[2] 赵文芳. 海上溢油污染的危害与防治措施[J]. 安全、健康和环境, 2006,6 (9): 25 - 26. DOI:10.3969/j. issn. 1672 - 7932. 2006. 09. 014.

ZHAO Wenfang. Hazards and control measures of oil spill pollution in the offshore[J]. Safety Health & Environment,2006,6 (9): 25 - 26. DOI:10.3969/j. issn. 1672 - 7932. 2006. 09. 014. (in Chinese)

[3] 潘航波,孙永明. 浮筒式浮油回收装置[J]. 科技传播, 2012,19 (10): 130 - 131.

[4] 余萍,冯玉华. 水下储油方式[J]. 油气田地面工程, 2007, 26 (3):18 - 19. DOI:10.3969/j. issn. 1006 - 6896. 2007. 03. 012.

[5] 韩长青. 水下储油罐设计[D]. 青岛: 中国石油大学,2011.

- [6] 徐松森. 油水隔离置换水下储油技术探讨[J]. 航海工程, 2008, 37(4): 62 - 64. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7953.2008.04.020.
XU Songsen. Discussion about technology of underwater oil storage with separate replacement of oil and water[J]. Ship & Ocean Engineering, 2008, 37(4): 62 - 64. DOI: 10.3963/j.issn.1671-7953.2008.04.020. (in Chinese)
- [7] 初新杰, 董胜, 孙东昌, 等. 水下漏油收集与暂存装置: 201220040337.1[P]. 2012-02-08.
- [8] 初新杰, 李连江, 高慧, 等. 一种水下漏油软体收集罩: 201220040339.0[P]. 2012-02-08.
- [9] 初新杰, 沈琪, 丁善福, 等. 自吸式水下漏油集储装置: 201220040344.1[P]. 2012-02-08.
- [10] CAO Hongjian, WANG Xuyang, LIU Yuanchuan, et al. Numerical prediction of wave loading on a floating platform coupled with a mooring system[C]//Proceedings of the Twenty-third (2013) International Offshore and Polar Engineering, Anchorage, Alaska, USA, June 30 - July 5, 2013: 582 - 589.
- [11] LIU Yuanchuan, WAN Decheng. Motion response analysis of a semi-submersible platform with catenary mooring systems[C]//Proceedings of the Eighth International Workshop on Ship Hydrodynamics, September 23 - 25, 2013, Seoul, Korea, IWSH2013 - P3B - 2.
- [12] 王建华, 万德成. 南海浮式码头与系泊系统动力耦合分析[J]. 水动力学研究与进展, 2015, 30(2): 180 - 186. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2015.02.009.
WANG Jianhua, WAN Decheng. Dynamic coupling analysis of the mooring system and floating pier in the South China Sea[J]. Journal of Hydrodynamics, 2015, 30(2): 180 - 186. DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2015.02.009. (in Chinese)
- [13] LIU Yuanchuan, WAN Decheng. Numerical simulation of motion response of an offshore observation platform in waves [J]. Journal of Marine Science and Application, 2013, 12(1): 89 - 97. DOI: 10.1007/s11804-013-1171-z.
- [14] LIU Yuanchuan, YAO Peng, WAN Decheng. Numerical investigation on interaction between a semi-submersible platform and its mooring system [C]//Proceedings of the ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, OMAE2015, May 31 - June 5, 2015, St. John's, Newfoundland, Canada, OMAE2015: 41294. DOI: 10.1115/OMA2015-41294
- [15] YAO Peng, WAN Decheng. Numerical study of two different types of semi-submersible platforms with mooring systems in the sea[C]//Proceedings of the 12th International Conference on Hydrodynamics (ICHD2016), September 18 - 23, 2016, Egmond aan Zee, the Netherlands, ICHD2016 Tracking Number 81.
- [16] ZHANG Xiaotong, YAO Peng, WAN Decheng. Coupling response of a semi-submersible platform with its mooring system[C]//Proceedings of the Second Conference of Global Chinese Scholars on Hydrodynamics, Nov. 11 - 14, 2016, Wuxi, China: 461 - 468.
- [17] CAO Hongjian, WAN Decheng. RANS - VOF solver for solitary wave run-up on a circular cylinder [J]. China Ocean Engineering, 2015, 29(2): 183 - 196. DOI: 10.1007/s13344-015-0014-2, ISSN0890-5487.
- [18] SHEN Zhirong, WAN Decheng, CARRICA P M. Dynamic overset grids in Open FOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering [J]. Ocean Engineering, 2015, 108(7): 287 - 306. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.035.
- [19] XIA Kelin, ZHAN Meng, WAN Decheng, et al. Adaptively deformed mesh based interface method for elliptic equations with discontinuous coefficients [J]. Journal of Computational Physics, 2012, 231(4): 1440 - 1461. DOI: 10.1016/j.jcp.2011.10.026.
- [20] 沈志荣, 万德成. CFD求解器naoe-FOAM-SJTU使用手册[M]. 上海: 上海交通大学, 2012.
- [21] 刘远传, 万德成. 系泊系统计算模块naoeFoam-ms使用手册[M]. 上海: 上海交通大学, 2013.
- [22] 万德成. 计算机软件著作权登记证书: 船舶与海洋工程水动力学求解器软件 [简称: naoe-FOAM-SJTU]. 2012, 中国, 2012SR118110.
- [23] 万德成. 计算机软件著作权登记证书: 系泊系统计算模块naoeFOAM-ms软件 [简称: naoeFOAM-ms]. 2013, 中国, 2013SR162864.
- [24] 万德成. 计算机软件著作权登记证书: 基于重叠网格技术船舶与海洋工程水动力学求解器软件 [简称: naoeFOAM-os-SJTU]. 2015, 中国, 2015SR012974.
- [25] CAO Hongjian, WAN Decheng. Development of multi-directional nonlinear numerical wave tank by naoe-FOAM-SJTU solver [J]. International Journal of Ocean System Engineering, 2014, 4(1): 52 - 59. DOI: 10.5574/IJOSE.2014.4.1.049
- [26] SHEN Zhirong, WAN Decheng. An irregular wave generating approach based on naoe-FOAM-SJTU solver [J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(2): 177 - 192. DOI: 10.1007/s13344-016-0010-1.
- [27] 查晶晶, 万德成. 用OpenFOAM实现数值水池造波和消波[J]. 海洋工程, 2011, 29(3): 1 - 12. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9865.2011.03.001.
CHA Jingjing, WAN Decheng. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM [J]. The Ocean Engineering, 2011, 9(3): 1 - 12. DOI: 10.3969/j.issn.1005-9865.2011.03.001. (in Chinese)