

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2020.01.015

带液舱 FPSO 船内外流场耦合的数值分析*

庄园, 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 船海计算水动力学研究中心,
上海 200240, E-mail: zhuangyuan_sjtu@outlook.com)

摘要: 带液舱 FPSO 船舶运动时对液舱晃荡的影响明显, 而被影响的液舱晃荡会反过来改变 FPSO 船舶运动性能。该文采用基于开源代码 OpenFOAM 平台自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对带有液舱的 FPSO 进行内外流场耦合数值模拟, 对放开横荡自由度和不放开横荡自由度下的 FPSO 船舶运动和液舱晃荡进行了模拟研究; 并对这两种状态下的船舶运动曲线和液舱抨击压力进行了比较。

关键词: 液舱晃荡; FPSO; 内外流场耦合; naoe-FOAM-SJTU 求解器

中图分类号: O357

文献标志码: A

Fully coupled analysis of FPSO ship motion with partially filled sloshing tanks

ZHUANG Yuan, WAN De-cheng

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In this paper fully coupled analysis of ship motion and partially filled sloshing tanks are considered. The CFD method is applied to solve the external and inner field simultaneously through our in house solver naoe-FOAM-SJTU. Four degrees of freedom (sway, heave, roll and pitch) are considered in this paper and compared with three degrees of freedom (heave, roll and pitch), and then the ship motion and impact pressure on sloshing tank is discussed. With the sway motion set free, the roll motion of ship increases and shows phase difference with that in three degrees of freedom. The sloshing in tanks becomes more violent and the impact pressure is much higher.

Key words: Sloshing tanks; FPSO; coupled analysis of the external and inner field; naoe-FOAM-SJTU

* **收稿日期:** 2019-04-15(2019-11-30 修改稿)

基金项目: 国家自然科学基金项目(5187915), 长江学者奖励计划(T2014099), 国家重点研发计划项目(2019YFB1704204)

作者简介: 庄园(1993-), 女, 河北石家庄人, 博士研究生.

通信作者: 万德成, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

Received: April 15, 2019 (**Revised** November 30, 2019)

Project supported by foundations: Supported by the National Natural Science Foundation of China (5187915), Chang Jiang Scholars Program(T2014099), National Key Research and Development Program of China (2019YFB1704204)

Biography: ZHUANG Yuan (1993-), Female, Ph.D. Candidate..

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

引言

对于带有自由液面的LNG液舱的船舶, 在运动时会给予LNG液舱外部激励, LNG液舱受到激励产生晃荡, 晃荡的流体将会同样影响船舶的运动。因此, 研究船舶内外流场耦合现象既可以有效预报船舶的水动力性能, 又可以防止过于剧烈的舱内晃荡造成舱壁结构破坏。对于船舶在波浪中运动的内外流场耦合情况, 国内外许多研究者采用不同的方法进行了研究。KIM等^[1]采用实验方法对简化的FPSO模型进行了不同冲水率下的耦合效应研究, 并应用数值模拟的方法进行对比验证。随着计算机的发展, 数值方法逐渐成为应用研究的热点。而CFD方法因其可以模拟物体大幅度运动和流体的翻卷破碎等现象, 成为数值模拟中不可或缺的方法。近年来, 模拟船舶内外流场耦合现象的数值方法, 从应用势流理论转变为黏流方法与势流方法的结合, 即内流场采用CFD求解器进行求解, 再将获得的力和力矩传递给船体, 船体在波浪中的运动则采用势流方法求解。Lee等^[2], Li等^[3]和Jiang等^[4]均采用内流场(液舱)应用黏流方法求解, 外流场(船舶运动)采用势流理论预报。Shen等^[5]以及Zhuang等^[6]应用基于OpenFOAM的自主开发的CFD求解器naoe-FOAM-SJTU, 进行了船舶内外流场耦合数值模拟, 实现了内外流场同时求解的全耦合计算。然而以上研究对于船舶运动均只放开了三个自由度, 即垂荡、横摇和纵摇。Eswaran等^[7]仅对液舱进行了平面运动激励以观察液舱的液面情况; Seo等^[8]应用势流理论对带有液舱的船舶迎浪下放开纵荡自由度进行了模拟研究; Mitra等^[9]将船舶放开六个自由度, 并考虑了风和流的影响, 着重考虑了横摇运动响应。Rognebakke等^[10]进行了实验和数值模拟, 对只放开横荡自由度的船舶与液舱耦合晃荡进行了研究。Zhao等^[11]应用势流理论和实验模拟了二维FLNG和液舱晃荡在放开横荡自由度下的液舱的非线性自由面, Nasar等^[12]采用实验方法将液舱固定在驳船中, 放开横摇垂荡和横荡自由度, 观察其耦合现象。这些研究均表明, 水平面运动将会对液舱产生激励, 且会使液舱产生剧烈晃荡, 并改变船舶运动性能。

本文基于Zhuang等^[6]的研究基础上, 放开横荡自由度, 并与之前所做三自由度运动情况进行对比, 观察横荡与横摇、垂荡和纵摇耦合情况下FPSO船舶内外流场的耦合情况。同时检测了舱内的抨击压力, 并与三自由度下的液舱抨击压力进行对比, 分析舱内流体晃荡情况。最后通过比较船舶运动与抨击压力的相位差, 分析液舱晃荡对于船舶的减摇作用。

1 数值方法

为了充分考虑流体的黏性效应, 本文采用求解不可压Navier-Stocks方程进行数值模拟, 控制方程如下

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla \mathbf{U}) + (\nabla \mathbf{U}) \cdot \nabla \mu_{eff} + \mathbf{f}_\sigma + \mathbf{f}_s \quad (2)$$

式中: \mathbf{U} 为流场速度, \mathbf{U}_g 为网格点速度; p_d 为动压力, $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$; $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$ 为动力黏度系数。 ν 和 ν_t 分别为运动黏性和涡黏性。 ν_t 由 $k-\omega$ SST湍流模型^[13]得到。计算中, 采用有限体积法(FVM)对控制方程进行离散; 应用压力半隐式分解(PISO)算法求解动量方程和连续性方程。其中舱壁上压力的得出亦由PISO算法求得, 处理速度和压力耦合。

为了模拟船舶在波浪中的运动, 采用六自由度模块计算船舶的运动位移和受力情况。计算时采用两个坐标系, 即大地坐标系(X, Y, Z)和船体坐标系(X', Y', Z')。大地坐标系中的船体位移为 $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = (x, y, z, \varphi, \theta, \psi)$, 分别代表船舶的线性位移和旋转角度, 即纵荡、横荡、垂荡、横摇、纵摇和首摇。大地坐标系中的船体速度为 $(\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2) = (u, v, w, p, q, r)$ 。因此, 大地坐标系中求得的力和力矩投射到船体坐标系上

$$\mathbf{F}_s = \mathbf{J}_1^{-1} \cdot \mathbf{F}_e; \mathbf{M}_s = \mathbf{J}_1^{-1} \cdot \mathbf{M}_e \quad (3)$$

式中: \mathbf{J}_1 和 \mathbf{J}_2 为基于欧拉角的转换矩阵, \mathbf{M}_s 和 \mathbf{F}_s 分别为船体坐标系下的力矩和力; \mathbf{M}_e 和 \mathbf{F}_e 分别为大地坐标系下的力矩和力。

捕捉外流场自由面(波面)和内流场自由面(晃荡液面), 本文采用VOF方法来捕捉两相流界面。VOF运输方程如下

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \alpha] = 0 \quad (4)$$

式中 α 为体积分, 代表每个网格中流体所占的比例。其值从0到1变化

$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{气体} \\ \alpha = 1 & \text{水体} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{分界面} \end{cases} \quad (5)$$

2 横荡运动对船舶运动的影响

图1 (a) 所示为采用Nam等进行实验的简化的LNG FPSO模型。计算域x方向和y方向均为3倍船长, z方向为2倍船长。网格划分情况如图1 (b) 和图1 (c) 所示。网格总量为210万, 其中为捕捉波浪, 防止波浪衰减, 自由面进行了加密处理。同时为了捕捉到舱内流体的剧烈晃动, 舱内加密了50万网格。其中, 在船舱上方开有一个小孔道, 连接内外流场, 使舱内压力与舱外压力相同, 这样在初始化的时候, 内外流场成为一体, 实现全耦合。波浪与船首呈90°, 波高0.1 m, 波频为6.03 rad/s。放开横荡、横摇和垂荡自由度, 前后舱充水率相同, 均为20%。

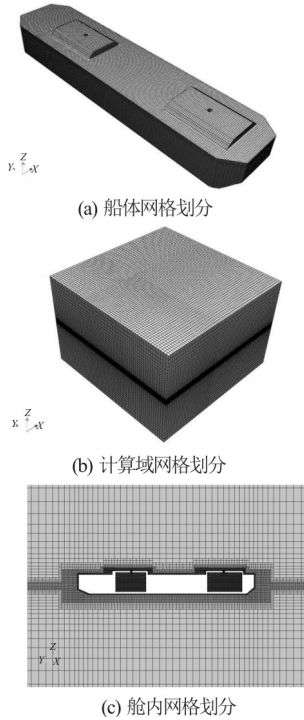
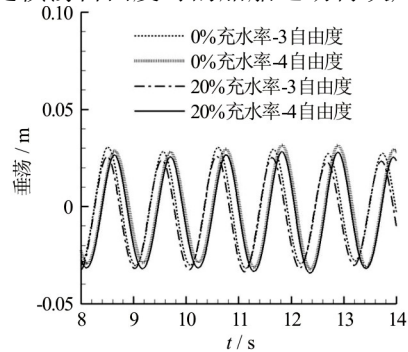


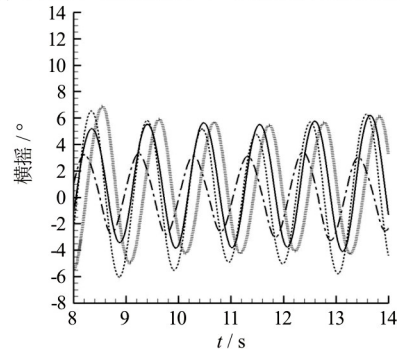
图1 模型与计算域及船体网格划分
Fig.1 Physical model and computational domain with mesh generation

图2所示为船舶运动时历曲线。图2 (a) 为船舶垂荡运动, 图2 (b) 为船舶横摇运动。虚线为零充水率固定横荡自由度船舶运动曲线; 点线为零充水率放开横荡自由度船舶运动曲线; 点虚线为充水率20%固定横荡自由度船舶运动曲线; 实线为20%充水率放开横荡自由度的船舶运动时历曲线。可以看出, 在释放横荡自由度后, 垂荡运动与不释放横荡自由度出现了相位差, 幅值也有略微增加, 且由图可以看出, 在固定横荡自由度时, 有无充水率的船舶垂荡运动相位一致, 而放开横荡自由度的有无充水率船舶垂荡运动相位一致, 因此垂荡运动的相位差是由横荡运动耦合引起; 而横摇运动则不仅出

现了相位差, 幅值也有所增大。在与0冲水率下船舶运动进行比较时可以发现, 同样在放开三个自由度的情况下, 有冲水率的船舶运动与零冲水率的船舶运动出现了相位差。这是因为在未放开横荡自由度的情况下, 外界波浪频率与液舱内液体横摇自然频率相近, 产生共振, 因此船舶运动时会与0冲水率下船舶运动产生相位差。而当放开横荡运动时, 横荡运动与横摇运动产生耦合, 使得船舶运动改变, 与固定横荡自由度时的船舶运动再次产生相位差。



(a) 零冲水率与20%充水率下三自由度和四自由度的垂荡运动



(b) 零冲水率与20%充水率下三自由度和四自由度的横摇运动

图2 船舶运动时历曲线(垂荡与横摇)
Fig.2 Time history of ship motion (heave motion and roll motion)

如图3所示为横荡放开下的液舱晃荡情况。四幅图分别展示了从流体接触液舱壁开始到爬升至最大高度产生翻卷的四个时刻。可以看出, 在放开横荡情况下, 船舶的横荡运动给予液舱水平激励, 使得液舱比不放开横荡自由度的情况晃荡得更为剧烈。舱内流体在舱内产生爬高现象, 高度达到了舱壁顶端, 在顶端产生破碎翻卷。

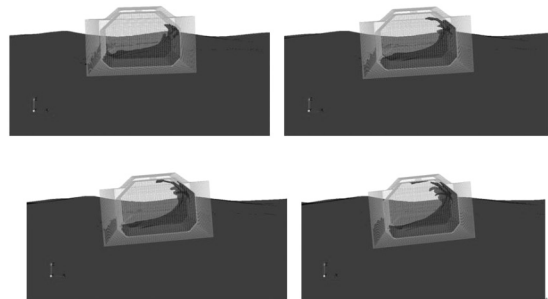


图3 释放横荡自由度下液舱自由面情况
Fig.3 The free surface in tanks when set sway motion free

图4为在舱壁上设置的测压点和压力时历曲线。图5为三自由度下三组压力监测点的时历曲线, 图6为四自由度下三组相同压力测压点的时历曲线。通过对比放开横荡自由度和固定横荡自由度下的抨击压力可以看出, 因为前者液舱晃荡极为剧烈, 因此产生了峰值较大的抨击压力, 甚至在液舱上部拐角处亦产生较大的抨击压力。另一方面也可以看出, 相比较固定横荡自由度, 放开横荡自由度下液舱晃荡的三维效应更为明显。固定横荡自由度时同一水平线下的三个测压点时历曲线大致相同; 而放开横荡自由度后的时历曲线则产生了较大差异, 尤其在最高点处的三个压力时历曲线, 在峰值处出现了较大差异。

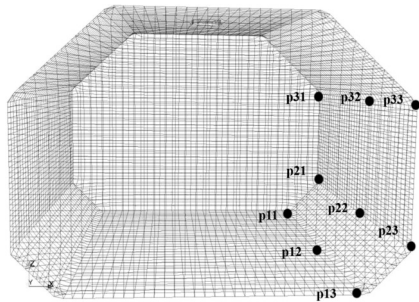
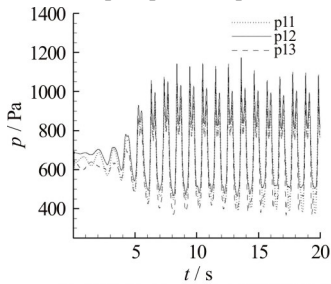
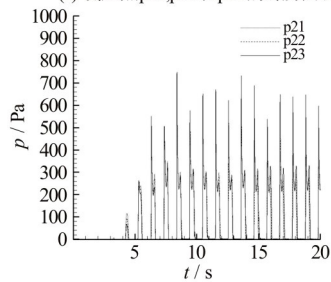


图4 液舱壁抨击压力点布置

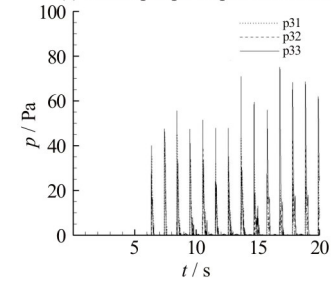
Fig.4 The setup of pressure probes in tank



(a) 测压点p11,p12和p13的时历曲线



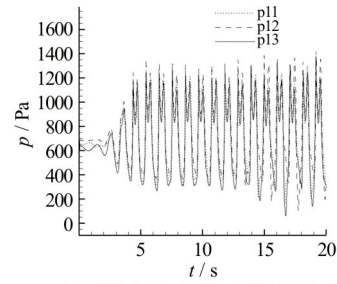
(b) 测压点p21,p22和p23的时历曲线



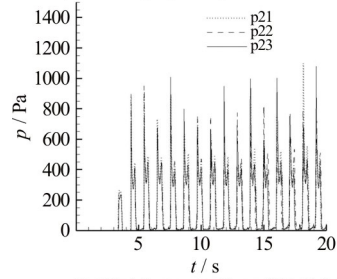
(c) 测压点p31,p32和p33的时历曲线

图5 三自由度下液舱抨击压力时历曲线

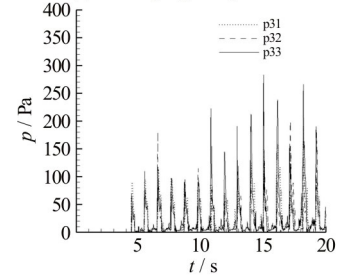
Fig.5 Time history of impulsive pressure on bulkhead in 3 DOF



(a) 测压点p11,p12和p13的时历曲线



(b) 测压点p21,p22和p23的时历曲线



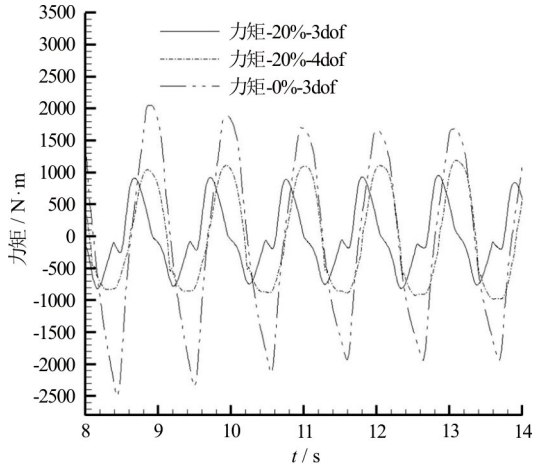
(c) 测压点p31,p32和p33的时历曲线

图6 四自由度下液舱抨击压力时历曲线

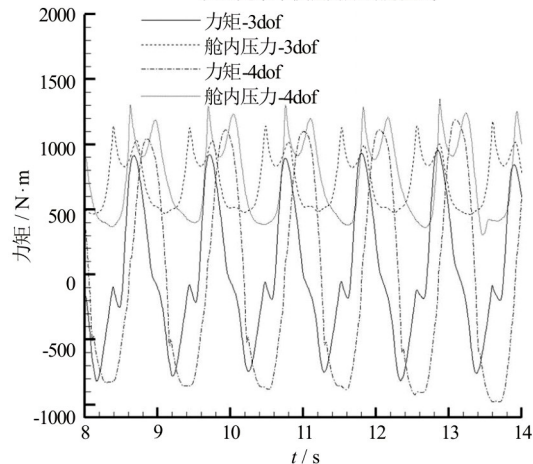
Fig.6 Time history of impulsive pressure on bulkhead in 4 DOF

图7(a)为对零充水率下船舶所受的横摇力矩以及20%充水率时三自由度和四自由度下的横摇力矩的比较示意图。其中横摇力矩数值放大了50倍。通过对比可以看出, 零冲水率下的船舶所受的横摇力矩最大, 因为没有液舱中流体的存在给予减摇; 其次是放开横荡自由度下的横摇力矩, 固定横荡自由度的横摇力矩最小。这也和图2中横摇运动幅值相吻合。同时为了分析液舱的减摇效应, 我们考虑船舶所受力矩与液舱壁上的压力的时历曲线, 如图7(b)所示。其中横摇力矩数值同样放大了50倍。可以看出, 作用在舱壁法向为坐标轴正向的力出现在力矩使得船舶向坐标轴负向旋转的时刻, 在一定程度上使得船舶横摇的角加速度减小, 从而减少了横摇。因为液舱中孔道的存在, 液舱内部与船体表面为一个整体, 因此船体所得到的力矩考虑到了液舱内流体对舱壁的压力而产生的力矩。

而由图2可以看出, 放开横荡后船舶横摇幅值增大, 因此, 如图8所示, 我们观察船舶所受横摇力矩与液舱压力的时历曲线, 其中横摇力矩数值放大33倍。可以看出, 在固定横荡运动时, 如图8(a)所示, 第二组舱壁抨击压力对横摇力矩有明显的影晌作用, 且出现在与横摇力矩方向相反的地



(a) 三自由度及四自由度下20%充水率横摇力矩与0%充水率横摇力矩时历曲线



(a) 20%充水率三自由度与四自由度横摇力矩与舱壁压力时历曲线

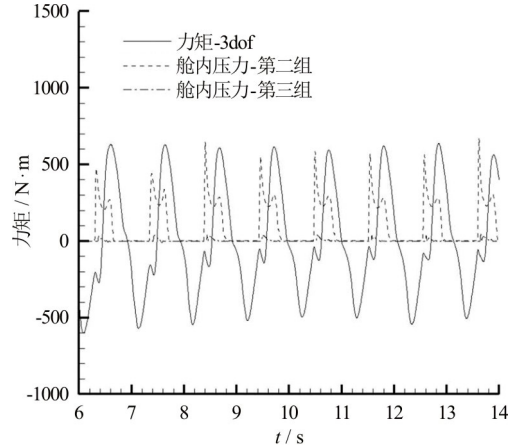
图7 横摇力矩时历曲线与舱壁所受压力时历曲线
Fig.7 Time history of roll moments and pressure on bulkhead

方，阻碍横摇进一步增大；而第三组舱壁抨击压力亦出现在与横摇力矩方向相反的地方，虽然数值没有第二组抨击压力大，但依然有阻碍横摇的作用；而当放开横荡运动时，如图8（b）所示，第二组和第三组舱壁抨击压力均出现在与横摇力矩方向相同的地方，即与固定横荡自由度相比，加剧了船体的横摇运动。

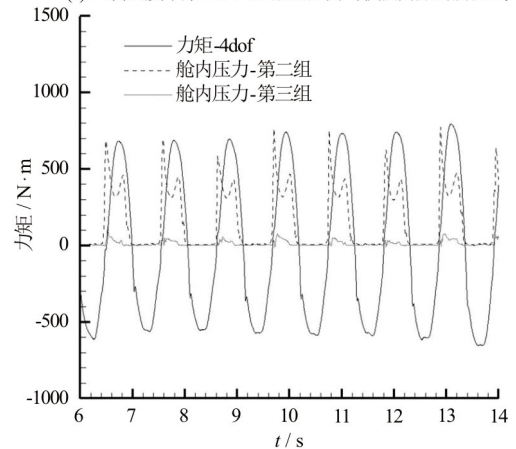
3 结论

本文应用CFD求解器naoe-FOAM-SJTU模拟了FPSO与液舱晃荡的内外流场耦合现象。其中就放开横荡情况下的运动和固定横荡情况的运动进行了比较，分析了横荡运动对带液舱的船舶性能和液舱的影响。

经过计算比较可以看出，在某一特定频率的情况下，放开横荡运动使得船舶的横摇运动增大，且与固定横摇运动的船舶比较，垂荡和横摇均出现了



(a) 三自由度下第二、三组舱壁压力与横摇力矩时历曲线



(a) 四自由度下第二、三组舱壁压力与横摇力矩时历曲线

图8 20%冲水率时不同自由度横摇力矩与两组舱壁压力时历曲线

Fig.8 Time history of roll moment and two groups of pressure on bulkhead under different DOF in 20% filling ratios

明显的相位差。放开横荡自由度后，液舱的晃荡更为剧烈，舱内液体在爬高的过程中接触到了液舱顶端，并产生了强烈的冲击压力。最后，通过分析力矩与舱壁压力的时历曲线，分析了液舱晃荡对船舶横摇运动的影响。

4 致谢

本文工作还得到了上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)和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:

[1] KIM Y, NAM B W, KIM D W, et al. Study on coupling effects of ship motion and sloshing[J]. Ocean

- Engineering, 2007, 34(16): 2176-2187.
- [2] LEE S J, KIM M H. The effects of inner-liquid motion on LNG vessel responses[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2010, 132(2): 021101.
- [3] LI Y L, ZHU R C, M G P, et al. Simulation of tank sloshing based on OpenFOAM and coupling with ship motions in time domain[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2012, 24(3): 450-457.
- [4] JIANG S C, TENG B, BAI W, et al. Numerical simulation of coupling effect between ship motion and liquid sloshing under wave action[J]. Ocean Engineering, 2015, 108: 140-154.
- [5] SHEN Z R, WAN D C. Numerical simulations of large-amplitude motions of KVLCC2 with tank liquid sloshing in waves[C]. In Proc 2nd Int Conf Violent Flows. Ecole Centrale Nantes, Nantes, France, 2012.
- [6] ZHUANG Y, WAN D C. Numerical study on coupling effects of fpso ship motion and LNG tank sloshing in low-filling conditions[J]. Applied Mathematics & Mechanics, 2016, 37(12): 1378-1393.
- [7] ESWARAN M, SINGH A, SAHA U K. Experimental measurement of the surface velocity field in an externally induced sloshing tank[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2011, 225(2): 133-148.
- [8] SEO M G, KIM Y, PARK D M. Effect of internal sloshing on added resistance of ship[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2017, 29(1): 13-26.
- [9] MITRA S, WANG C Z, REDDY J N, et al. A 3D fully coupled analysis of nonlinear sloshing and ship motion[J]. Ocean Engineering, 2012, 39: 1-13.
- [10] ROGNEBAKKE O F, FALTINSEN O M. Coupling of sloshing and ship motions[J]. Journal of Ship Research, 2003, 47(3): 208-221.
- [11] ZHAO W H, YANG J M, HH Z Q, et al. Coupled analysis of nonlinear sloshing and ship motions[J]. Applied Ocean Research, 2014, 47: 85-97.
- [12] NASAR T, SANNASIRAJ S A, SUNDAR V. Motion responses of barge carrying liquid tank[J]. Ocean Engineering, 2010, 37(10): 935-946.
- [13] DHAKAL T P, WALTERS D K. Curvature and rotation sensitive variants of the K-Omega SST turbulence model[C]. ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting. American Society of Mechanical Engineers, Colorado, USA, 2009.