

# 基于 CFD 方法的深海 FLNG 数值模拟

庄园, 万德成

(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, 高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240, Email: [dcwan@sjtu.edu.cn](mailto:dcwan@sjtu.edu.cn))

## 摘要

浮式液化天然气设施 (FLNG) 是近年来新型的深海能源开发与运输的海上装置, 因其具有液舱而使得船舶运动的特性与普通船舶不同。近年来, 对于 FLNG 的研究亦取得了飞速的进展。本文采用基于开源软件 OpenFOAM, 组内自主研发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU, 对一深海 FLNG 进行了数值模拟, 研究了在横浪情况下的运动特性, 以及具有双并列液舱时的运动性能。本文将 FLNG 模型进行了衰减试验模拟, 并与实验结果进行了比较; 同时考虑带有锚链且放开六个自由度的 FLNG 在横浪下的运动响应, 与实验结果进行了对比。对比结果较好, 因此我们对这个模型增加了并排布置的两个矩形液舱来观察液舱对 FLNG 运动的影响。

**关键词:** FLNG; naoe-FOAM-SJTU; 六自由度; 内外流场耦合

## 0 引言

近年来, 由于深海能源开采的日益发展, 作为油类开采的副产品, 液化天然气开始广泛应用于生产生活中, 因此, 浮式液化天然气设施 (FLNG) 逐渐兴起。对于 FLNG 来说, 一方面作为浮式平台, 在波浪中将受到波浪力与锚链力的相互作用; 同时, 带有液舱的特性使得它在风浪中的运动变得与其他开采平台不同。尤其是对于非满舱状态下的液舱, 因其在舱内形成了一个自由面, 在 FLNG 运动时, 外界激励 (如风、浪、流等) 使得船舶运动, 这种运动同样激励舱内的自由液面进行运动; 与此同时, 舱内的流体的运动也会反过来影响船舶的运动, 使内外流场相互耦合作用于 FLNG。因此, 由于舱内流体的存在, FLNG 的运动变得难以预报; 同时, 当外界激励使得物体产生共振, 或 FLNG 进行大幅度运动时, 舱内的流体会对舱壁产生抨击压力, 过大的抨击压力会导致舱壁结构造成破坏。

国内外学者对于 FLNG 船舶的运动性能进行了研究。赵文华等人<sup>[1]</sup>于 2011 年对 FLNG 的研究进行了汇总, 主要研究方向为与 LNG 船的旁靠<sup>[2,3]</sup>, 液舱内流体晃动对船舶运动的影响<sup>[4~10]</sup>, 以及 FLNG 在波浪中运动的研究<sup>[11]</sup>。其中, 对于舱内流体晃动与船舶运动耦合多采用外部势流理论求解, 内部粘性理论求解的方法进行研究; 而 FLNG 在波浪中运动均采用势流理论方法进行研究。本文作者曾采用全 CFD 方法进行了对带有液舱的 FPSO 船在横浪工况下的数值模拟, 主要模拟了前后两液舱均为低冲水率 (20%) 的情况<sup>[12]</sup>。

本文应用基于开源软件 OpenFOAM 自主开发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 对 FLNG 船舶<sup>[4,13]</sup>进行数值模拟。首先对不带液舱的 FLNG 船进行了自由衰减数值模拟, 并和

实验进行了对比。随后对在横浪情况下，放开六自由度的带有锚链的 FLNG 进行了数值模拟，其中 FLNG 带有并列布置的矩形液舱。

## 1 数值方法

为了充分考虑流体的粘性效应，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：

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

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

其中  $\mathbf{U}$  是流场速度， $\mathbf{U}_g$  是网格点速度； $p_d$  是动压力， $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ ； $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$ ； $\nu$  为动力粘度系数。 $\nu$  和  $\nu_t$  分别为运动粘性和涡粘性。由 SST 湍流模型<sup>[14]</sup>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。

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 ( $\mathbf{X}, \mathbf{Y}, \mathbf{Z}$ ) 和船体坐标系 ( $\mathbf{X}', \mathbf{Y}', \mathbf{Z}'$ )。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：

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

其中  $\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2$  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。其中，为了得出舱内流体对船的作用力，将船舶分成内外两块，分别进行积分求得受力（内部块求得舱内流体作用力，外部块求得外部波浪激励力），而两块受力总和加成得到船体所受的力及力矩。

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：

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

其中  $\alpha$  为体积分数，代表每个网格中流体所占的比例。其值从 0 到 1 变化：

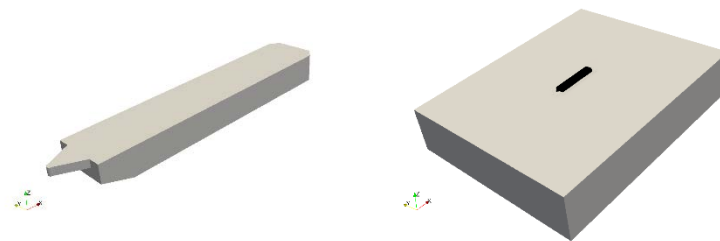
$$\begin{cases} \alpha = 0 & \text{air} \\ \alpha = 1 & \text{water} \\ 0 < \alpha < 1 & \text{interface} \end{cases} \quad (5)$$

## 2 数值计算设置

数值模型采用 FLNG 船<sup>[4,13]</sup>进行数值模拟，船模参数如表 1 所示。我们依据参数建立数值模型和计算域，如图 1 所示。其中，图 1(a)是本文中要进行的衰减试验模拟，图 1(b)是横浪模拟，因此计算域不同。而因在横浪中，FLNG 具有两个并排布置的液舱，为了观察液舱内流体作用力，我们将带有液舱的 FLNG 模型划分为三部分。对于衰减试验来说，为了防止物体运动时产生的辐射波遇到壁面引起反射，计算域的大小为 $-2L_{pp}<x<3L_{pp}$ ,  $-2L_{pp}<y<2L_{pp}$ ,  $-L_{pp}<z<L_{pp}$ 。而在做波浪下船体运动时，我们选择波长与船长相等的波浪进行模拟，因此计算域的大小为 $-1L_{pp}<x<2L_{pp}$ ,  $-L_{pp}<y<2L_{pp}$ ,  $-L_{pp}<z<L_{pp}$ 。衰减算例的网格总量为 50 万；横浪算例的网格总量为 186 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晃动，舱内加密了 50 万网格。网格划分情况如图 3(b)(c)所示。其中，图 3(c)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。横浪算例下船舶放开六个自由度，前后有两根锚链连接，两根锚链穿过船体中心，在模型尺度下总刚度为 48cm/kg<sup>[13]</sup>。

表 1 FLNG 模型参数

名称	符号	单位	实尺度	模型尺度
全长	$Loa$	m	392.00	4.840
垂线间长	$L_{pp}$	m	356.00	4.395
船宽	$B$	m	69.00	0.852
船深	$D$	m	35.70	0.441
吃水	$T$	m	13.20	0.163
排水量		ton.	307,642	0.565
重心距底线高度	$KG$	m	20.305	0.251
重心距船尾距离	$LCG$	m	169.213	2.089
横摇旋转半径	$K_{xx}$	m	27.3	0.337
纵摇旋转半径	$K_{yy}$	m	96.50	1.191
首摇旋转半径	$K_{zz}$	m	98.60	1.217



(a) 衰减试验模拟模型及计算域布置

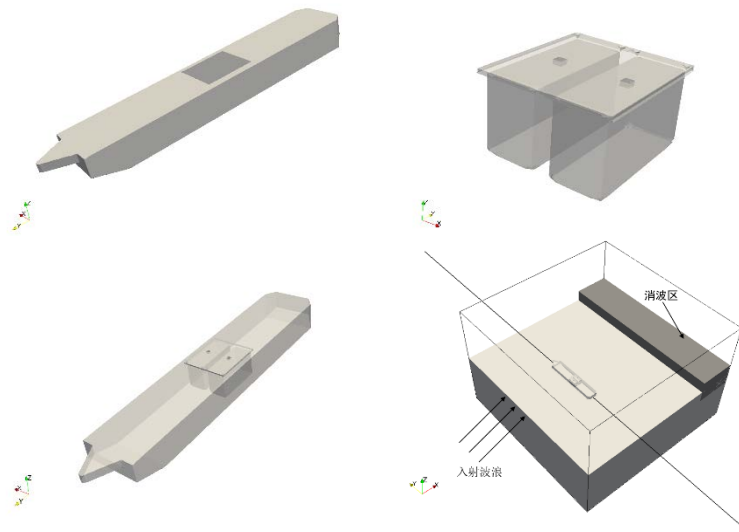


图2 数值模型及计算域

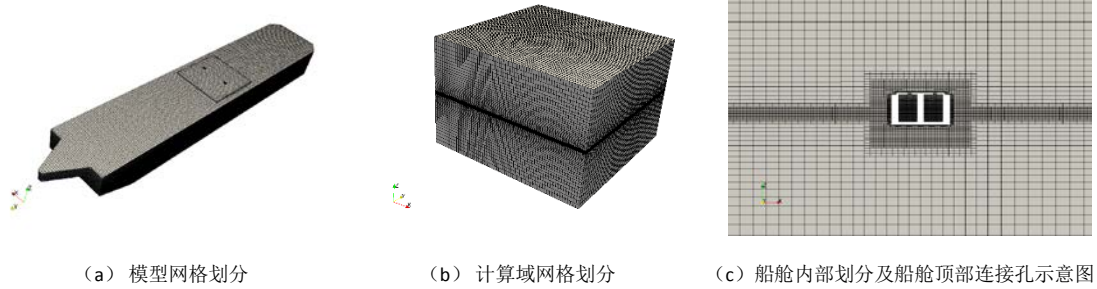


图3 模型与计算域及船体网格划分

### 3 计算结果

#### 3.1 衰减试验

图4所示本文计算的FLNG三个自由度（垂荡、横摇和纵摇）的衰减时历曲线。将本文计算得的三个自由度下的自然周期与实验结果<sup>[4,13]</sup>相比较，如表2所示。可以看出，三个自由度的自然周期与实验结果的误差在10%以内，其中垂荡和纵摇衰减运动的自然周期与实验结果较为相近，而横摇的自然周期误差较大。这可能是因为横摇旋转半径较小，周期相对于垂荡和纵摇要长，因此产生的数值误差较大。

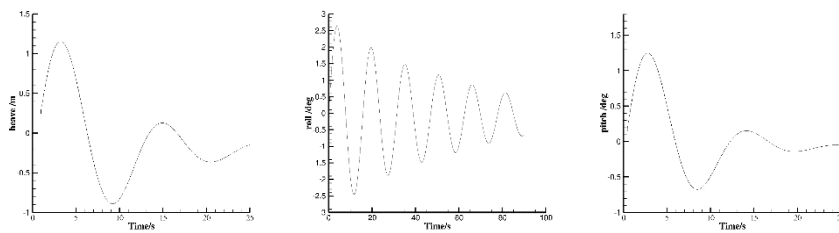


图4 垂荡、横摇及纵摇衰减曲线

表2 本文模拟衰减实验结果与实验衰减结果对比

运动	周期 (s)
----	--------

	实验	本文结果	误差
垂荡	12.07	11.67	3.3%
横摇	13.79	15.10	9.5%
纵摇	12.02	11.32	5.8%

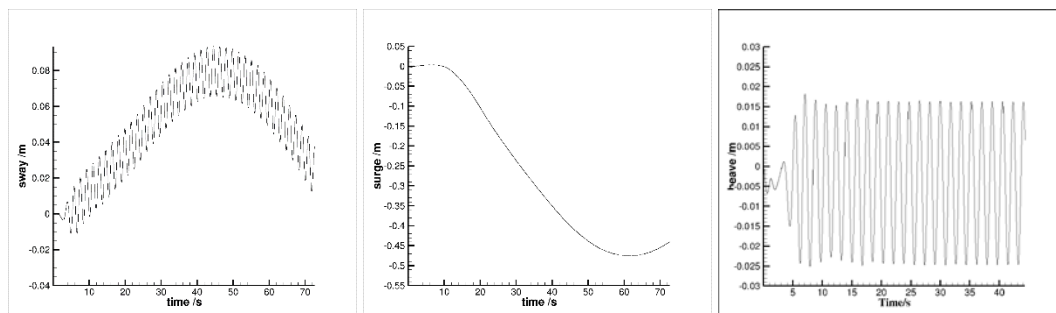
### 3.2 波浪中 FLNG 的运动

为了验证本方法用于模拟 FLNG 在波浪中运动的准确性，采用不带有液舱的 FLNG 船在横浪中进行了模拟，并与实验结果<sup>[4,13]</sup>进行了比较，如表 3 所示。波长取 4.84 米，波高为 0.04 米。算例放开六个自由度，由于实验只给出了横浪情况下的横荡、垂荡和横摇三个自由度，因此只与这三个自由度进行比较。本文计算结果与实验对比误差在可接受范围内，因此可以就此模型进行带有液舱的数值模拟。

表 3 FLNG 在横浪中运动响应(RAO)结果与实验结果对比

运动	实验数据	本文结果	误差
横荡	1.0	0.9	10%
垂荡	1.3	1.2	7.7%
横摇	2.7	2.5	7.4%

为了研究液舱在并列布置情况下对船舶运动的影响，本文将 FLNG 船型中布置了两个并列的矩形液舱。如图 2 所示，为了讨论外界激励波浪力和液舱晃荡力之间的关系，本文将 FLNG 模型分成内部和外部两块进行建模。矩形舱的长、宽和高分别为 0.692 米, 0.297 米以及 0.42 米. 两个液舱的中心距离 FLNG 船首 2.56 米，在横向距离彼此 0.39 米。液舱充水率均为 40%。波浪长度为 4.84 米，波高为 0.04 米，放开六个自由度。运动时历曲线如图 5 所示。由图 5 可以看出，由于锚链力与波浪力相互作用，FLNG 船的运动带有小周期与大周期混合的特征。小周期为波频运动，大周期为低频慢漂运动。为了研究船内液舱的作用，图 6 展示了左右两个液舱的作用力与外界激励力的比较。可以看出，液舱内流体作用力与外界激励力有近 180 度的相位差，且左右两舱内的流体作用力大小相同，相位一致。这使得带有液舱的 FLNG 的横摇运动（RAO 响应为 0.75）略小于不带有液舱的 FLNG 的横摇运动。然而，当我们观察液舱内的流体流动情况时，如图 7 所示，舱内的自由液面波动很小，且舱内流体的速度矢量同船体附近的流体速度矢量方向一致。这是由于外界激励较小，且船舱宽度较小的原因，此时的舱内流体接近于固体状态，相当于为船体添加了负重块。



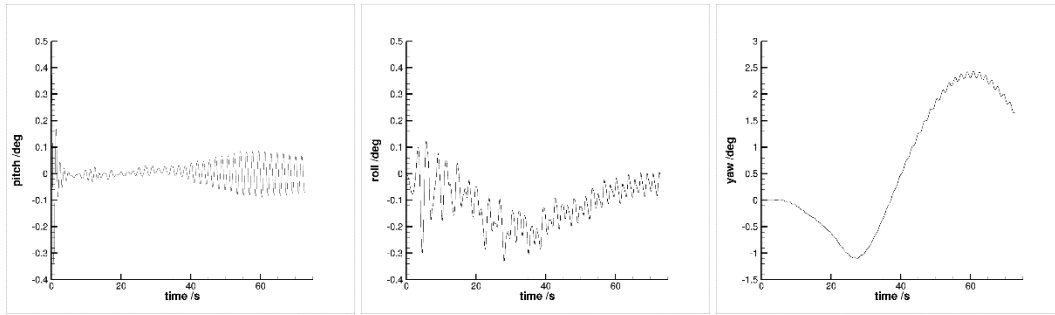


图 5 带液舱 FLNG 六自由度运动时历曲线（从左至右依次为横荡、纵荡、垂荡，纵摇、横摇和首摇运动）

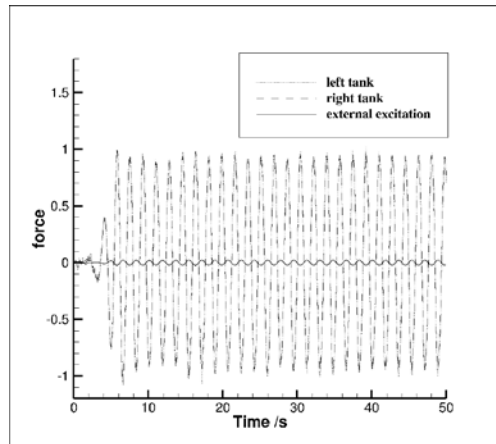


图 6 液舱内流体作用力与外界激励力对比图

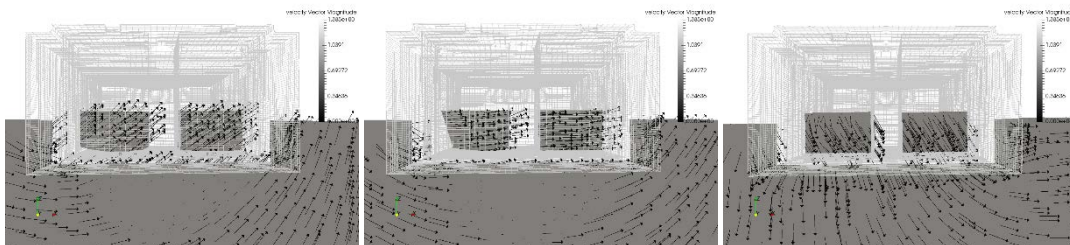


图 7 液舱内流体速度矢量图

## 4 结论

本文应用组内自主研发的 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 对带有锚链的深海 FLNG 进行了研究，主要进行了模型的三个自由度的衰减试验模拟，以及在横浪下放开六自由度运动模拟。同时，对并排布置的双液舱 FLNG 在横浪下的运动响应进行了研究。衰减试验及不带液舱情况下的六自由度运动与实验进行了比较，结果较为符合，因此应用本文方法对深海 FLNG 进行数值模拟是较为可靠的。

同时，我们将两个矩形液舱放置进 FLNG 中，进行了横浪下的数值模拟。由于并排布置的液舱宽度较小，因此在横浪情况下自由面晃动微小，在这种情况下，尽管液舱内的流体提供了与外界激励力方向相反的力，但是对于船舶运动的影响相当于在船舶中布置了重块，舱内流体于外界流体耦合效应较小。因此 FLNG 常采用液舱并排布置方式来减小液舱晃动的非线性性对于船舶运动的影响。

然而本文的矩形舱舱壁过厚，在 FLNG 建造过程中，舱容将会比本文算例中液舱大，因此接下来会减小舱壁厚度，研究当液舱内流体产生强非线性性能时的运动响应。

## 参 考 文 献

- [1] Zhao W H, Yang J M, Hu Z Q, etc. Recent developments on the hydrodynamics of floating liquid natural gas (FLNG).[J]. Ocean engineering, 2011, 38(14): 1555-1567.
- [2] Zhao W, Yang J, Hu Z, et al. Prediction of hydrodynamic performance of an FLNG system in side-by-side offloading operation[J]. Journal of Fluids and Structures, 2014, 46: 89-110.
- [3] Sun L, Taylor R E, Taylor P H. Wave driven free surface motion in the gap between a tanker and an FLNG barge[J]. Applied Ocean Research, 2015, 51: 331-349.
- [4] ZHAO W H, YANG J M, HU Z Q etc. Numerical and experimental investigation on hydrodynamic characteristics of FLNG with account of the inner-tank sloshing. [C] In: Proceedings of the ASME 2011 30<sup>th</sup> International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherland, 2011, OMAE2011-49244
- [5] NASAR T, SANNASIRAJ S A, SUNDAR V. Motion response of barge carrying liquid tank [J] Ocean Engineering, 2010, 37:935-946.
- [6] GOU Y, KIM Y, KIM T Y. A numerical study on coupling between ship motions and sloshing in frequency and time domain [C]. Proceedings of the 21th International Offshore and Polar Engineering Conference, Maui, Hawaii, USA, 2011, 158-164.
- [7] 骆阳,朱仁庆,刘永涛. 波浪中 FPSO 液舱晃荡与船体运动耦合时域分析[J]. 船舶工程,2016,(07):21-26.
- [8] 操戈,李旭,张咏鸥,王康. FPSO 液舱晃荡与船舶时域耦合运动数值模拟[J]. 中国舰船研究,2015,(01):88-96.
- [9] 李裕龙. 液舱晃荡与船舶时域运动全耦合的势粘流组合数值模拟[D].上海交通大学,2014.
- [10] 姜胜超. 波浪作用下船舶运动与液舱内流体晃荡的耦合数值分析[D].大连理工大学,2013.
- [11] FONSECA N, PESSOA J, SOARES C G. Calculation of second order drift forces on a FLNG accounting for difference frequency components[C]//Proceedings of the 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Estoril, ASME Paper No. OMAE2008-57942. 2008.
- [12] ZHUANG Y, WAN D C, Numerical study on coupling effects of FPSO ship motion and LNG tank sloshing in low-filling condition [J] Applied Mathematics and Mechanics, 2016, 37(12): 1378-1393.
- [13] ZHAO, W H, YANG J M, HU Z Q. Investigation on sloshing effects of tank liquid on the FLNG vessel responses in frequency domain [J] Journal of ship mechanics, 2011, 3: 227-237.
- [14] 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, 2009, 2221-2229

## Numerical Simulation of Deep sea FLNG in CFD Method

ZHUANG Yuan, WAN Decheng

(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

FLNG is a new type of floating platform in deep sea used for transporting and storing natural gas. The studies of FLNG have developed these years, for its special hydrodynamic performances. In this paper, we applied our in house CFD solver naoe-FOAM-SJTU to simulate the hydrodynamic performance of FLNG. The simulations of decay tests were carried out and compared with existing experimental data, and then FLNG in beam wave is simulated. With two spring moored on FLNG, the six degree of freedom were released and three of them were compared with the experimental results. Later on, we applied array-arranged rectangular tanks into FLNG to discuss the coupling effects between the tanks and ship motion.

**Key words:** FLNG; naoe-FOAM-SJTU; six DOF motion; coupling effects of inner and outer fields