

# FPSO 运动与液舱晃荡全耦合的数值模拟

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  
高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

\*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

**摘要:** 带有液舱的船舶运动时不同自由度对液舱晃荡的影响不同, 而被影响的液舱晃荡会反过来改变船舶运动性能。本研究采用 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 对带有液舱的 FPSO 进行全耦合数值模拟, 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; 全耦合; naoe-FOAM-SJTU 求解器; 横荡运动

## 1 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。Nam 等<sup>[1]</sup>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、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 和 Kim<sup>[2]</sup>, Li 和 Zhu<sup>[3]</sup>, Jiang 等<sup>[4]</sup>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 和 Wan<sup>[5]</sup>以及 Zhuang 和 Wan<sup>[6]</sup>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<sup>[7]</sup>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<sup>[8]</sup>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<sup>[9]</sup>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 和 Faltinsen<sup>[10]</sup>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 等人<sup>[11]</sup>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 等人<sup>[11]</sup>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。

本研究基于 Zhuang 和 Wan<sup>[6]</sup>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。

## 2 数值方法

为了充分考虑流体的黏性效应，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， $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ ； $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$  为动力黏度系数。 $\nu$  和  $\nu_t$  分别为运动黏性和涡黏性。 $\nu_t$  由  $k-\omega$  SST 湍流模型<sup>[13]</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。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：

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

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。

捕捉外流场自由面（波面）和内流场自由面（晃荡液面），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：

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

### 3 横荡运动对船舶运动的影响

数值模型采用 Nam 等进行实验的简化的 LNG FPSO 模型，如图 1 (a) 所示。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。网格划分情况如图 1 (b) (c) 所示。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 度，波高 0.1m，波频与液舱内流体自由面自然频率相近。放开横荡、横摇和垂荡自由度，前后舱充水率相同，均为 20%。

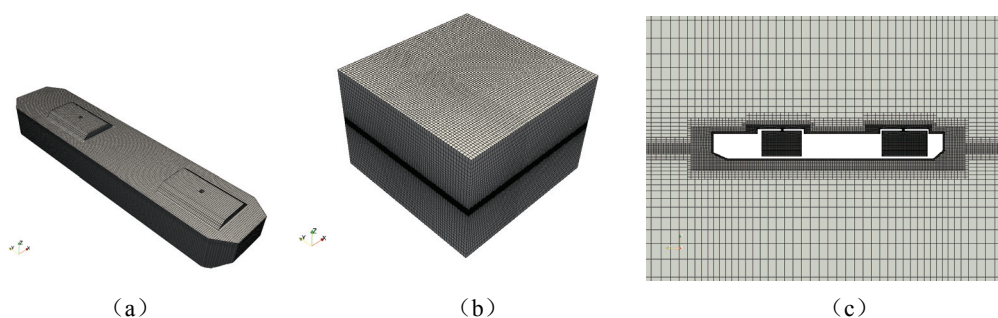


图 1 模型与计算域及船体网格划分

船舶运动时历曲线如图 2 所示。左图为船舶垂荡运动，右图为船舶横摇运动。实线为零充水率固定横荡自由度船舶运动曲线；虚线为零充水率放开横荡自由度船舶运动曲线；点线为充水率 20%固定横荡自由度船舶运动曲线；点虚线为 20%充液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，有无充液率的船舶垂荡运动相位一致，而放开横荡自由度的有无充液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。

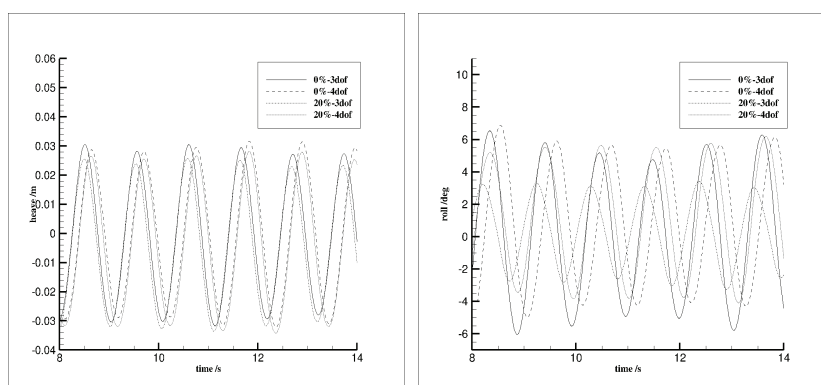


图2 船舶运动时历曲线，垂荡（左）横摇（右）

观察横荡放开下液舱晃荡情况，如图 3 所示。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的更为剧烈。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 4 为在舱壁上设置的测压点和压力时历曲线。本研究对放开横荡自由度和固定横荡自由度下的抨击压力进行了对比，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。

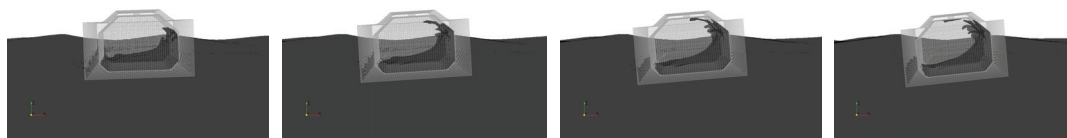


图3 释放横荡自由度下液舱自由面情况

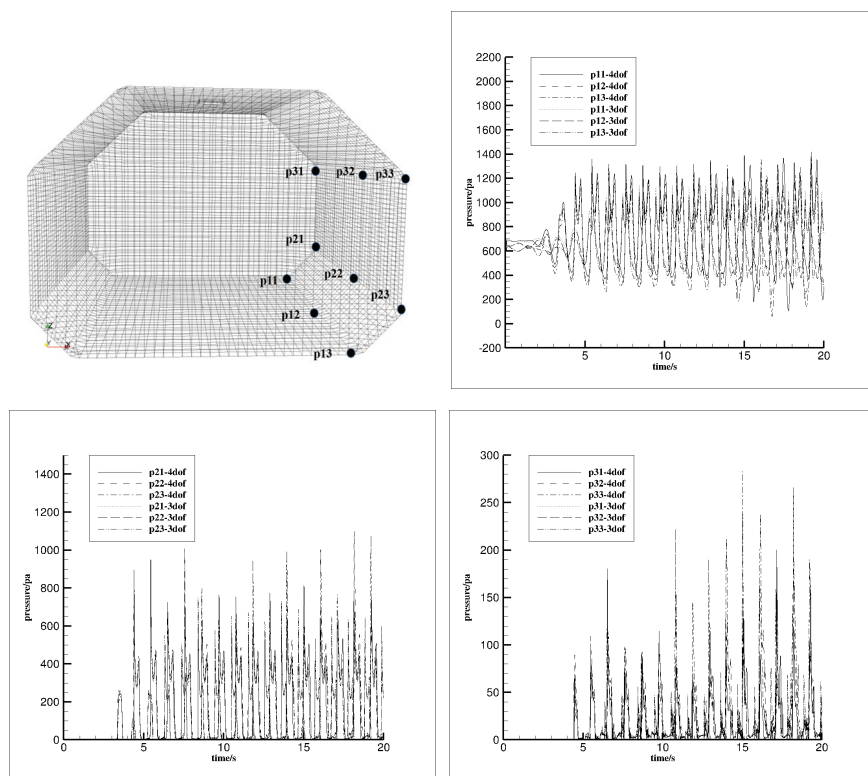


图4 液舱壁抨击压力点布置及压力时历曲线

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5右侧所示。图5中横摇力矩数值均放大了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，因此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。如图5左侧所示，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。

而由图2可以看出，放开横荡后船舶横摇幅值增大，因此，我们观察船舶所受横摇力矩与液舱压力的时历曲线，如图6所示。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6左所示，第二组舱壁抨击压力对横摇力矩有明显的影响作用，且出现在与横摇力矩方向相反的地方，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6右所示，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。

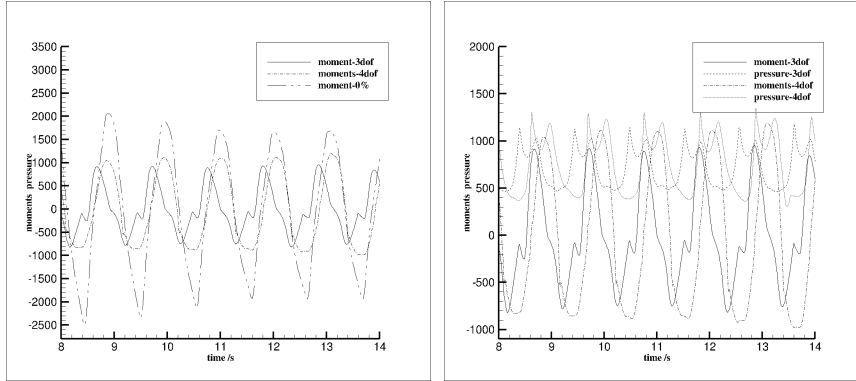


图5 三种工况下力矩时历曲线与舱壁所受压力时历曲线，力矩（左），力矩与舱壁压力（右）

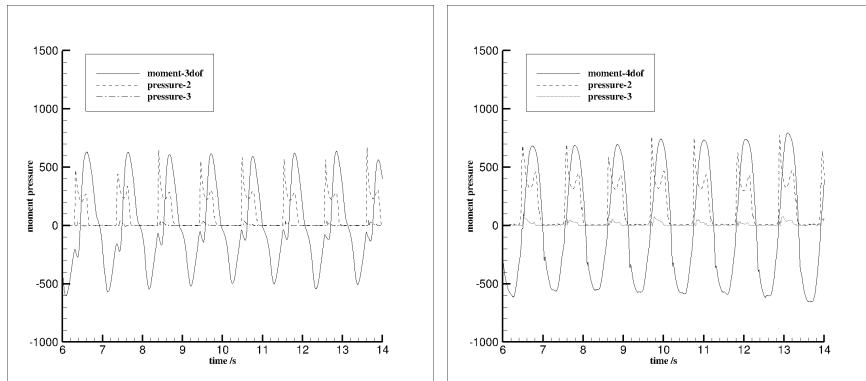


图6 20%冲水率时横摇力矩与两组舱壁压力时历曲线，三自由度（左），四自由度（右）

## 4 结论

本研究应用 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU 模拟了 FPSO 与液舱晃荡全耦合现象。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，在波频与液舱内部自然频率相近的情况下，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。

## 致谢

本工作得到国家自然科学基金项目(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项目(K2015-11), 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

- 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 Yulong, Zhu Renchuan, Miao Guoping, 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 Shengchao, Teng Bin, Bai Wei, 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, Zhirong, Wan, Decheng. Numerical Simulations of Large-Amplitude Motions of KVLCC2 with Tank Liquid Sloshing in Waves. In Proc 2nd Int Conf Violent Flows. Ecole Centrale Nantes, Nantes, France, 2012.
- 6 Zhuang Yuan, Wan Decheng. 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 Wenhua, Yang Jianmin, Hu Zhiqiang, 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. ASME 2009 Fluids Engineering Division Summer Meeting. American Society of Mechanical Engineers, 2009, 2221-2229.

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

ZHUANG Yuan, WAN De-cheng<sup>\*</sup>

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

<sup>\*</sup>Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

**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; Fully analysis; naoe-FOAM-SJTU; Sway motion.