

DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2017.05.004

应用重叠网格方法的单点系泊 FPSO 数值模拟

庄 园^{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: 浮式生产储油装置系统在深海油气的开发与存储中有着重要应用. 其中, FPSO 的风标效应以及多浮体旁靠成为值得研究的内容. 为了更好地研究 FPSO 的风标效应及旁靠问题, 文中将锚链系统写入了重叠网格模块中. 利用基于开源平台 OpenFOAM 开发的具有重叠网格模块的船舶与海洋工程水动力 CFD 求解器——naoe-FOAM-SJTU, 对带有锚链的单点系泊 FPSO 的运动响应进行模拟和分析, 以验证锚链系统在重叠网格模块中的可靠性. 文中对只放开一个自由度的带锚链的 FPSO 进行垂荡衰减运动模拟, 并与模型试验进行对比, 以验证数值模拟的可行性和可靠性. 计算分析的结果验证了利用 CFD 技术和重叠网格方法对带有锚链的 FPSO 运动的有效性, 同时分析了锚链受力情况.

关键词: 单点系泊; FPSO; 重叠网格; 锚链系统; 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)04-0574-05

Numerical study of single point mooring system FPSO based on overset grids

ZHUANG Yuan^{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: The Floating Production Storage and Offloading (FPSO) system plays an important role in the exploration and storage of oil and gas in deep water. The study of phenomena of weathervane and side-by-side of FPSO has become popular these years. In order to investigate the phenomena of weathervane and side-by-side, we applied mooring system into overset module. The numerical study of FPSO coupled with mooring system is performed by our in-house RANS solver, naoe-FOAM-SJTU, which is developed based on the open source tool libraries of OpenFOAM. The aim of numerical simulation is to prove the reliability of our current method. The free decay test of heave motion is simulated, and the result was compared with those in experiments. The results agreed well with those in experiments, thus the numerical studies are reliable. The analyze of the FPSO motion and forces of the mooring system are shown and they validate the calculation of the mooring system in overset grids.

Key words: single point mooring system, FPSO, overset grids, mooring system, naoe-FOAM-SJTU solver

自浮式生产储油装置(floating production storage and offloading, FPSO)系统在深海油气的生产、

储存中有着重要应用. 因其不需要昂贵的外输运管, 不同方位的可回收性以及极端海况下的可移

收稿日期: 2017-05-24

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 资助项目(2016-23/09)

作者简介: 庄园(1993-), 女, 博士研究生

* 通信作者: 万德成(1967-), 男, 教授, 研究方向为船舶水动力学. E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

引文格式: 庄园, 万德成. 应用重叠网格方法的单点系泊 FPSO 数值模拟[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2017, 31(5): 574-578.

DOI:10.3969/j.issn.1673-4807.2017.05.004.

动性能, FPSO 的生产与安装得到了广泛的关注和青睐. 而对于单点系泊的 FPSO 来说, 研究其在波浪中与锚链耦合的运动响应, 在运动中哪根锚链受力最大, 以及受力是否在其最大承受压力范围之内, 可以为锚链设计布置提供参考. 而对于单点系泊的 FPSO 来说, 其随着波浪调整自身运动的运动性能, 以及在平面内的大幅度运动性能也值得研究. 尤其是对于单点系泊 FPSO 的风标效应而言, 其运动带有随机性和不稳定性, 更好地预报 FPSO 的风标效应对于船体和锚链的设计具有参考价值. 而对于在放开六个自由度的 FPSO 的运动来说, 锚链的存在是必不可少的一部分. 对于 FPSO 的运动来说, 纵荡、横荡和首摇这 3 个方向的运动, 是单点系泊 FPSO 运动的主要观察指标. 因此, 锚链为运动中的 FPSO 提供了水平方向的回复力, 使其不会在风浪流产生的激励力作用下漂走, 从而影响数值模拟的预期结果.

目前, 国内外有许多学者对于 FPSO 的运动响应做过研究. 研究基于实验和数值模拟, 而数值模拟基本采用基于势流理论的软件进行. 文献[1]同时采用实验和数值的方法模拟了 6000-ft 单点系泊的 FPSO 在百年不遇台风作用下的动态响应, 其中数值模拟采用 WAMIT 进行模拟. 文献[2]采用 AQWA 对内转塔系泊的 FPSO 进行了风、浪、流的数值模拟, 并校核了锚链的强度. 文献[3]采用实验与势流模拟软件对内转塔式 FPSO 的风标效应进行了研究, 并讨论了不同转塔位置对 FPSO 风标效应的影响.

对于单点系泊 FPSO 来说, 所受到的力大致分为外界激励力, 阻尼力和自身惯性力. 而在低频范围内, 阻尼变成了由粘性决定的很重要的部分^[4], 因此, 采用粘流来求解 FPSO 成为新的研究方向. 随着计算机技术和数值方法的不断发展, 计算流体力学 (computational fluid dynamics, CFD) 得到了发展和应用. 对于 FPSO 来说, CFD 方法可模拟实尺度工况, 这是实验无法做到的; 同时考虑了粘性, 在 FPSO 产生低频慢漂运动时, 波浪给予船体和系泊的阻尼在大波浪情况下无法忽略, 若忽略阻尼则无法正确进行数值模拟, 而应用 CFD 方法可以准确模拟得到船体运动情况; 在将来进行旁靠、立管涡激振动耦合模拟时, 应用 CFD 方法可使模拟更为简单和接近真实情况. 文献[5]将锚链系统写入了开源 CFD 软件 OpenFOAM 求解器 naoe-FOAM-SJTU 中, 并应用悬链线系统模拟浮式码头在波浪下的运动, 并对悬链

线锚链进行了受力分析.

文中采用组内自主开发的基于开源 CFD 软件 OpenFOAM 求解器 naoeFOAM-SJTU, 进行对 FPSO 的数值模拟. 求解器 naoeFOAM-SJTU 包括六自由度运动模块, 造波消波模块^[6], 重叠网格模块以及锚链系统. 锚链系统已可在动网格中实现^[5,7], 而为了 FPSO 将来可以更好地模拟风标效应以及旁靠, 文中将锚链系统中的悬链线模型写入了重叠网格. FPSO 数值模型近似模拟 DeepStar 实验中的模型及数据. 采用对单点系泊 FPSO 的数值模拟, 即对 FPSO 进行垂荡自由衰减数值模拟, 以验证重叠网格模块中锚链系统的可靠性.

1 数学模型

1.1 控制方程

对于不可压、粘性流体, 文中采用的控制方程为 RANS 方程

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

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

式中: \mathbf{u} 和 \mathbf{u}_g 分别表示流场速度和网格节点速度; $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$ 为流场动压力, 等于总压力减去静水压力; $\mathbf{g} \mathbf{u} \cdot \mathbf{x}$ 和 μ 分别为重力加速度、流体的密度和动力粘性系数. 计算中, 采用有限体积法 (FVM) 对控制方程进行离散; 应用 PISO 算法处理速度、压力耦合; 对于运动物体的大幅度运动与位移, 采用重叠网格方法进行模拟计算.

1.2 重叠网格

重叠网格之间插值关系的建立是通过 DCI 数据的计算来实现的. 文中方法所使用的 DCI 数据是由 SUGGAR++^[8] 程序计算生成. SUGGAR++ 不仅支持结构化网格, 还能处理非结构网格. SUGGAR++ 同时能支持以单元顶点 (Node-centered) 和单元中心 (Cell-centered) 为存储位置的两种流场信息存储方式. 因此, 它不仅能适用于传统的有限差分法求解器, 还能处理现在主流的有限体积法求解器.

求解 DCI 的过程通常需要 4 个步骤: 第一步是洞单元的搜寻, 或称为挖洞; 第二步是给插值边界单元从另外一套网格中寻找足够数量的贡献单元, 为插值边界单元提供插值信息; 第三步是根据插值边界单元和贡献单元的相互位置关系求得插值系数; 最后一步是重叠区域的优化过

程. 在计算开始之前, 首先调用 SUGGAR++ 计算重叠网格之间插值所需的 DCI. 在求得所有重叠网格信息 (DCI) 以后, 通过对所有贡献单元的流场值和对应插值系数进行加权求和, 最终完成插值:

$$\phi_i = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot \phi_i \quad (3)$$

式中: ϕ 是任意流场信息, 如速度、压力等; ω_i 是第 i 个贡献单元的插值系数 (即权重系数); ϕ_i 是第 i 个贡献单元的流场信息值; ϕ_l 是插值边界单元的值. 此外所有的插值系数均需要无因次化, 并满足以下条件:

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (4)$$

1.3 锚泊系统

求解器 naoeFOAM-SJTU 中包含锚链系统模块, 包括弹簧模型、悬链线模型和分段外推模型. 本文采用悬链线模型来计算锚链系统. 悬链线模型采用求解悬链线方程的方法求带解躺底段的系泊模型. 悬链线方程如下:

$$z = a \left(\cosh \frac{x}{a} - 1 \right) \quad (5)$$

式中: $a = T_h/w$ 被称为悬链线参数, T_h 为任意截面处水平力, w 为链锁在水中的线密度, N/m; x 和 z 分别为链锁某点在链锁坐标系中的横纵坐标值.

2 计算模型

2.1 模型及工况

采用 DeepStar CTR 4401A, 水深为 300ft 的 FPSO^[9-10] 进行实尺度数值模拟, 与实验工况进行比较, 以验证文中数值方法的可靠性. 实验模型和数值模型如图 1, 模型参数如表 1, 锚链参数如表 2, 数值模拟所设锚链布置如图 2. 其中图 1 为文献 [11] 所做的 OTRC 实验, 其实验模型与 DeepStar 实验所用模型一致. 文中数值模型采用实尺度进行计算.



图 1 FPSO 实验模型与数值模型

Fig.1 Experimental model and numerical model of FPSO

表 1 FPSO 模型参数
Table 1 Particulars of the FPSO tanker

船型参数	数值
垂线间长/m	310
船宽/m	47.17
船深/m	28.04
吃水/m	18.9
排水量/mt	240 869
浮心位置 (在 10 站前)/m	6.6
重心位置 (在基线上)/m	13.32
回转半径 (K_{xx})/m	14.77
回转半径 (K_{yy})/m	77.44
回转半径 (K_{zz})/m	79.3
内转塔位置 (20.5% L_{pp})/m	63.55
内转塔位置 (距基线)/m	1.52

表 2 锚链系统参数

Table 2 Particulars of mooring system

锚链参数	数值
水深/m	914
预张力/kN	1 201
锚链数量	4
锚链夹角/(°)	90
锚链长度/m	2 088

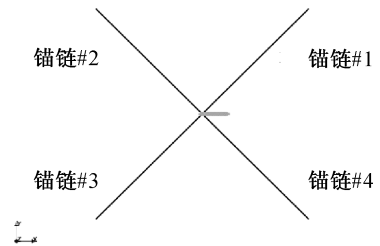


图 2 锚链计算模型

Fig.2 Numerical model mooring line system

文中计算了在重叠网格方法和非重叠网格方法下 FPSO 在锚链作用下垂荡衰减运动, 得到垂荡衰减周期, 与实验进行比对, 以验证数值方法的准确性.

2.2 自由衰减

自由衰减计算域设置如图 3. 为了保证 FPSO 垂荡产生的波动不会反过来影响 FPSO 的运动, 计算域设置为 $-300 \text{ m} < x < 700 \text{ m}$, $-400 \text{ m} < y < 400 \text{ m}$, $-250 \text{ m} < z < 150 \text{ m}$. 计算背景网格和船体网格由 OppenFOAM 自带的网格生成工具 blockMesh 及 snappyHexMesh 生成. 重叠网格算例与非重叠网格算例计算区域相同, 但是对于重叠网格算例来说, 在生成背景网格与船体网格之后, 将两套网格合并为一体, 再经过 SUGGAR++ 程序挖去洞点单元, 剩余的网格参与计算. 非重叠网格算例网格总量为

129M,如图 4(a);重叠网格算例网格总量为 58M,如图 4(b).在图 4(b)中浅灰色的网格表示背景网格,稍深的网格表示船体网格.重叠网格可以保证相对网格间的无约束运动,而普通网格需要保证船体周围网格的质量,因此非重叠网格需要的网格量相对要多.

重叠网格及动网格的布局及边界条件的设置如图 5.其中,5(a)为动网格布局及边界条件;5(b)为重叠网格的布局及边界条件.

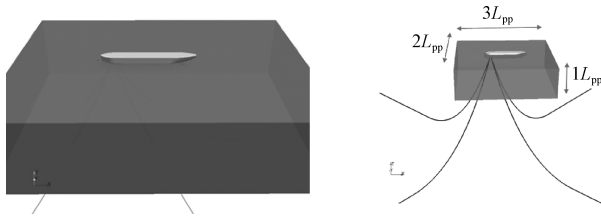


图 3 自由衰减计算域

Fig. 3 Computational domain of free-decay test

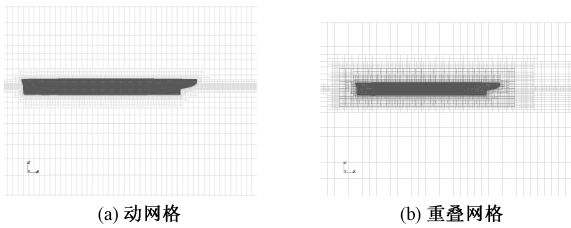


图 4 计算网格

Fig. 4 Computational grid

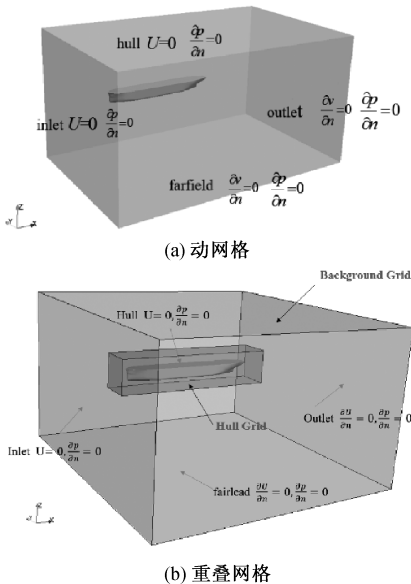


图 5 重叠网格与非重叠网格的布局与边界条件
Fig. 5 Layouts of overset and non-overset grids and boundary conditions

3 算例

文中设置 FPSO 初始有向上的 3 m/s 的速度,

只放开垂荡自由度,将获得的垂荡曲线得出的自然频率与实验进行比较.垂荡曲线如图 6,表 3 为实验方法和文中 CFD 方法所得到的时历曲线算出的自然频率,可以看出,本文方法与实验方法相比较,自然频率的误差在可接受范围内.而通过非重叠网格算例与重叠网格算例的对比,可以看出重叠网格算例所得到的结果更接近实验数值.一方面来说,这是因为非重叠网格的网格划分较为稀疏,另一方面,重叠网格用较少的网格获得较为准确的结果,从而可以证实在使用重叠网格时,FPSO 与锚链的耦合运动算法是基本可靠的.

表 3 垂荡自由衰减结果对比
Table 3 Comparison of the free decay test results

方法	实验值	CFD (non-overset)	CFD (overset)
垂荡衰减 周期/s	10.7	11.3	10.6

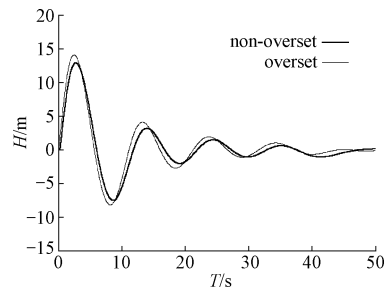


图 6 垂荡衰减曲线对比

Fig. 6 Comparison of heave free decay simulation results in two methods

同时,对两种方法的锚链力总力进行研究比较.因为实验中并未给出垂荡自由衰减时的锚链力,因此只对两种方法得出的锚链力进行比较,如图 7.因为运动曲线有些微差异,锚链力时历曲线亦有些微差异.由于对称布置的缘故,且运动在 xz 平面内,故 4 根锚链提供力的大小是一致的,因此图中只给出了锚链 1 和锚链 3 的总力的时间历程曲线示意图,可以看出,随着运动曲线逐渐趋于零,锚链力也逐渐趋于初始值.

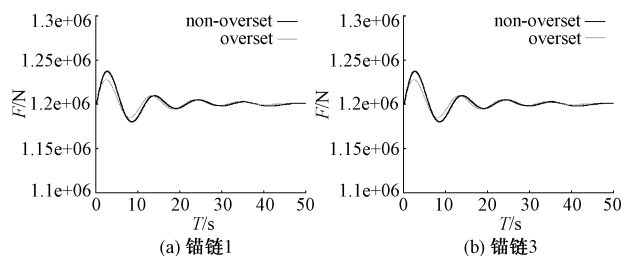


图 7 锚链力对比

Fig. 7 Comparison of forces of mooring lines in two methods

4 结论

应用基于开源平台 OpenFOAM 开发的具有重叠网格模块的船舶与海洋工程 CFD 求解器 naoe-FOAM-SJTU,对波浪中带有锚链的 FPSO 运动响应进行了模拟.首先文中对带有锚链的 FPSO 进行了垂荡自由衰减模拟,并通过与模型实验的结果进行对比,验证了本文算法的可靠性.计算结果验证了利用 CFD 求解器——naoe-FOAM-SJTU 对重叠网格中带有锚链的 FPSO 的运动预报的可靠性和可行性.这对将来模拟 FPSO 的风标效应、旁靠以及与立管耦合运动有着重要的参考价值.

参考文献(References)

- [1] KIM M H, KOO B J, MERCIER R M, et al. Vesel/mooring/riser coupled dynamic analysis of a turret-moored FPSO compared with OTRC experiment [J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(14): 1780 - 1802. DOI:10.1016/j.oceaneng.2004.12.013.
- [2] 刘元丹,刘敬喜,谭安全.单点系泊 FPSO 风浪流载荷下运动及其系泊力研究[J].*船海工程*, 2011, 40(6): 146 - 149. DOI:10.3963/j.issn.1671-7953.2011.06.038.
LIU Yuandan, LIU Jingxi, TAN Anquan. The motion and mooring forces of a turret moored fpso with the wind, waves and currents loads [J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2011, 40(6): 146 - 149. DOI:10.3963/j.issn.1671-7953.2011.06.038. (in Chinese)
- [3] 李俊,杨建民,肖龙飞.转塔位置对 FPSO 水动力性能的影响[J].*海洋工程*, 2005, 23(4): 9 - 14. DOI:10.3969/j.issn.1005-9865.2005.04.002.
LI Jun, YANG Jianmin, XIAO Longfei. Effect of turret location on the hydrodynamic performance of turret moored FPSO [J]. *The Ocean Engineering*, 2005, 23(4): 9 - 14. DOI:10.3969/j.issn.1005-9865.2005.04.002. (in Chinese)
- [4] WICHERS J E W. A simulation model for a single point moored tanker [J]. *Electrical Engineering Mathematics & Computer Science*, 1988, 797:1 - 243.
- [5] 刘远传,万德成.锚泊浮式码头在波浪上的运动响应计算 [C] // 第二十五届全国水动力学研讨会暨第十二届全国水动力学学术会议,浙江,舟山, 2013.
- [6] 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.
ZHA Jingjing, WAN Decheng. Numerical wave generation and absorption based on OpenFOAM [J]. *The Ocean Engineering*, 2011, 29(3): 1 - 12. (in Chinese)
- [7] 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: A 辑*, 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, A*, 2015, 30(2): 180 - 186. DOI:10.16076/j.cnki.cjhd.2015.02.009. (in Chinese)
- [8] YE H X, SHEN Z, WAN D H. Numerical prediction of added resistance and vertical ship motions in regular head waves [J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2012(4): 410 - 416. DOI:10.1007/s11804-012-1150-1.
- [9] WICHERS J E W, DEVLIN P V. Effect of coupling of mooring lines and risers on the design values for a turret moored FPSO in deep water of the Gulf of Mexico [C] // The Eleventh International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2001:480 - 487.
- [10] WICHERS J, DEVLIN P V. Benchmark Model Tests on the DeepStar Theme Structures FPSO, SPAR and TLP [J]. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, 2004;107(B9): ETG4 - 1 - ETG4 - 11. DOI:10.4043/16582 - MS.
- [11] WARD E G, IRANI M B, JOHNSON R P. Responses of a tanker-based FPSO to hurricanes [C] // Offshore Technology Conference, 30 April - 3, May, 2001, Houston, Texas. DOI:10.4043/13214 - MS.

(责任编辑:顾琳)