

单点系泊FPSO在波浪中水动力性能CFD数值分析

李 奇, 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)

摘要: 基于开源平台OpenFOAM,应用课题组自主开发的船舶与海洋工程CFD求解器naoe-FOAM-SJTU,对单点系泊工况下的FPSO水动力性能进行了数值模拟。首先进行了空场造波模拟,生成了符合要求的波浪条件。随后对该FPSO的自由衰减运动进行数值模拟,并与相关文献提供的势流结果比对,验证求解器与数值模拟设置的准确性。随后本文对该FPSO在首迎浪波浪条件下的运动响应进行时域观察与分析,给出运动曲线以及同海况下锚链受力等情况。最后还展示了强非线性极端波浪下的FPSO首甲板上浪模拟仿真情况。本文的研究说明naoe-FOAM-SJTU求解器能很好地对FPSO水动力性能进行预报,结果相对准确,同时还可以对强非线性的现象进行仿真。

关键词: FPSO; naoe-FOAM-SJTU求解器; 单点系泊; 甲板上浪

自海洋石油能源被发现之后,人类开始致力于海洋资源的开发。海上浮式生产储卸油轮 FPSO 逐渐成为船舶领域关注的热点,它可以对原油进行初步加工与储存,并具有经济、可靠、可适应大部分海域的能力,在海洋工程领域应用广泛。目前,近一半的 FPSO 都属于内转塔类型^[1],因此内转塔式 FPSO 所涉及的单点系泊问题具有很重要的研究意义。同时,对于单点系泊 FPSO 特殊运动效应的研究,对于工程实践有很高的参考价值,可大大增加 FPSO 在作业中的安全系数。对于此问题,船舶领域以往普遍采用的方法是用势流软件计算求解 FPSO 的运动响应问题,也取得了不错的成果。M.H.Kim 等^[2]模拟了约 182.88 m (6000 英尺)水深,百年一遇海况,非定常风条件下,内转塔系泊 FPSO 的船体、锚链、立管之间的耦合作用,并将时域结果与在 OTRC 水池所做实验结果相对比,发现数值预报与实验吻合良好。袁洪涛、曾骥等^[3]应用 AQWA 和 OCRAFLEX 软件,通过动态耦合分析,对 15 万吨深水单点系泊 FPSO 在 500 年一遇海况风浪流各主控环境下的运动响应以及系泊力进行了时域与频域分析,并研究了压载与满载两种情况对 FPSO 运动幅值以及锚链力的影响,具有一定参考价值。Soares C G 等^[4]针对一系列迎浪规则波情况下转塔系泊的 FPSO 进行了实验模拟以及势流方法数值模拟,将实验数据、WAMIT 计算结果与格林函数平板法以及板条理论结果进行了对比,发现结果吻合良好,给本文研究提供了较好的参考。

现阶段,随着计算机技术的快速发展,计算流体力学 CFD 方法在研究波浪中浮式结构物的研究中越来越凸显出其优势。相对于势流方法,在波浪中单点系泊 FPSO 的相关问题研究上,CFD 方法考虑流体黏性,精细展示流场信息,对于时域内 FPSO 的大波浪强非线性问题、绕射问题、波浪爬升问题、甲板上浪问题等都有着很大的优势,数值实验更加接近真实的物理环境,因此,CFD 方法存在着很重要的研究价值和空间。庄园、赵伟文^[5]应用 overset 网格技术,对单点系泊的 FPSO 自由衰减以及横浪中 FPSO 的水动力运动响应和锚链力做了模拟分析,本文在 CFD 方法的选用上和该文献相同,基于 OpenFOAM 开源平台,应用实验室自由开发的求解器 naoe-FOAM-SJTU^[6]对规则波浪条件下单点系泊 FPSO 的相关问题进行了研究,数值实验结果与以往文献中的势流结果进行比对,并对计算结果进行展示,说明求解器可以很好地处理该问题,在对于上浪现象的模拟上,也展示了该研究方法的优势。

1 数值模拟方法

1.1 数值计算方法控制方程

采用不可压、黏性流体,其控制方程为

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho (\mathbf{U} - \mathbf{U}_g) \mathbf{U}] = -\nabla P_d - g \mathbf{x} \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) \quad (2)$$

基金项目: 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),工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目课题(2016-23/09)

式中： U 表示流场速度， U_g 表示网格节点速度；流场动压力 $p_d = p - \rho g \cdot x$ 即总压减去静水压； g 、 ρ 和 μ 分别为重力加速度、流体的密度和动力黏性系数。

计算采用有限体积法 (FVM) 对控制方程进行离散；应用动网格技术处理物体小幅度运动问题，利用 PISO 算法对于速度压力方程进行解耦求解。同时，由于 FPSO 在纯波浪问题中的雷诺数较低，因此计算中用 DNS 的层流模型替代湍流模型，并采用 VOF 方法对自由面进行捕捉。

1.2 造波方法

造波方法采用基于 OpenFOAM 开发的 waves2foam^[7] 源代码包进行造波模拟。模拟水深为深水环境，经过计算查表，波浪采用斯托克斯二阶波波形。在生成波浪时，通过在入口端设置松弛区进行数值造波，使波浪达到实验所设定的波浪高度。在计算域末端，也设置松弛区，通过该松弛区将波浪减小到零，起到消波的作用。松弛区的控制方程如式 (3)，式中 α_R 为松弛因子，是一个值随距离 x_R 变化而变化的量，变化趋势如图 1 所示。 α_R 的变化在式 (4) 中对 ϕ 值的变化起着直接影响作用。这里的 ϕ 主要为自由面速度 u 或流体相位参数 γ 。

由图 1 可以看出，波浪会在松弛区里从 0 增大或者减小到 0。在 wave inlet 松弛区中，波浪会逐渐增强并趋于稳定。在 wave outlet 松弛区中，波浪会逐渐减小并逐渐趋于 0，功能与消波区类似，因此此处的松弛区就可以起到造波与消波功能。

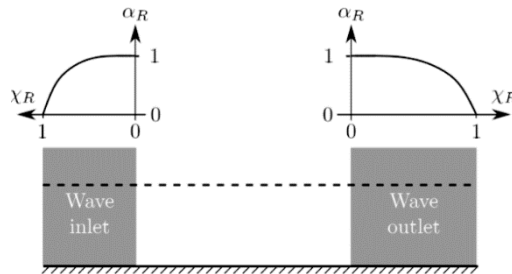


图 1 变量 α_R 在入口和出口松弛区中的变化图

$$\alpha_R(x_R) = 1 - \frac{\exp(x_R^{3.5}) - 1}{\exp(1) - 1} \quad \text{for } x_R \in [0, 1] \quad (3)$$

$$\phi = \alpha_R \phi_{computed} + (1 - \alpha_R) \phi_{target} \quad (4)$$

在主要实验模拟之前，为了保证所划分网格能够保证波浪的稳定传播，首先进行空场造波实验，造波方法如上文所述，波浪参数见表 1。监测到入口处位置波浪高度以及传播一个波长后的波浪高度时历如图 2 所示。

表 1 造波参数设置

波长/m	波高/m	周期/s	造波理论
310	6.2	14.1	Stokes 二阶波

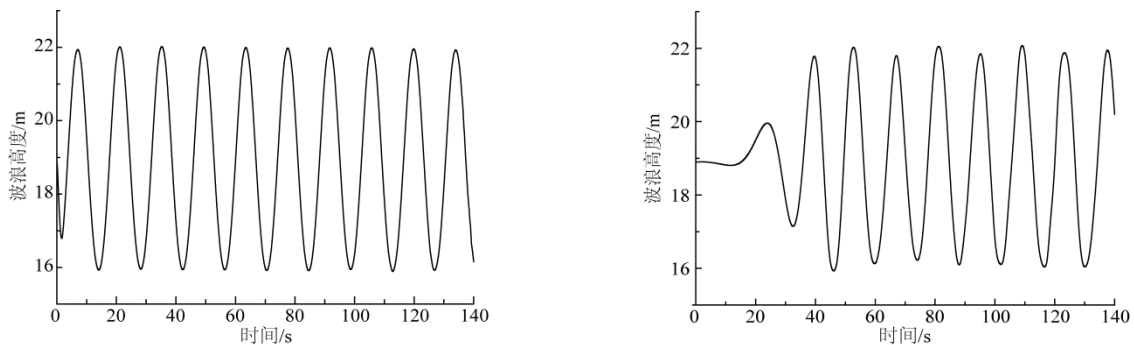


图 2 入口处与距离一个波长位置处的波浪高度时历

由图可见，该造波方法可以较好地制造实验所需波浪，为后续计算提供良好的波浪环境基础。

2 数值模型以及模拟方法

2.1 计算模型

实验主要模拟 12 根锚链单点系泊下的 FPSO 在规则波浪模拟下的运动情况，计算所用的 FPSO 模型是按照 DeepStar FPSO^[2]提供的模型参数建立的。经单位换算，主尺度参数如表 2 所示。

表 2 FPSO 计算船模主尺度

主要参数	数值
装载量（载重吨）	200 000
垂线间长/m	310
水线宽/m	47.17
满载吃水/m	18.9
重心在龙骨之上高度位置/m	13.32
重心在 Lpp/2 之前的水平位置/m	6.83
排水量（千克）	2.380 56×10 ⁸
横摇回转半径/m	14.77
纵摇回转半径/m	77.47
首摇回转半径/m	79.30
转塔在艏垂线后方距离/m	63.55
转塔在龙骨下方延伸距离/m	1.52

实验设置水深参照文献，为 3 000 英尺深，换算为 914.4 m。模拟采用的锚链由两种材质分三段组成。在分布上，共设置四组锚链，相邻锚链组间隔 90°，每组由 3 根锚链间隔 5°组成，共有 12 根锚链。表 3 给出了锚链参数配置，生成的锚链设置可视化图像见图 3。由锚链可视化图像可以看出，锚链设置准确，并且存在一部分拖底段。本文求解器的系泊系统计算模块应用分段外推法，考虑系泊链锁重力和拉伸变形影响，可以对悬链线拖底段进行处理。

表 3 锚链设置参数

主要参数	底部铁链	聚酯材料	顶部铁链
长度/m	914.4	1 127.80	45.70
在空气中质量/(kg m ⁻¹)	164.9	41.80	164.9
在水中质量/(kg m ⁻¹)	143.4	35.65	143.4
等效直径/m	0.164	0.089	0.164
等效横截面积/m ²	0.021	0.006	0.021
Cd	1.0	1.0	1.0
Ca	1.0	1.0	1.0
抗拉压刚度 EA/N	7.944 8×10 ⁸	6.898 6×10 ⁸	7.944 8×10 ⁸
预张力/N		1.244×10 ⁶	

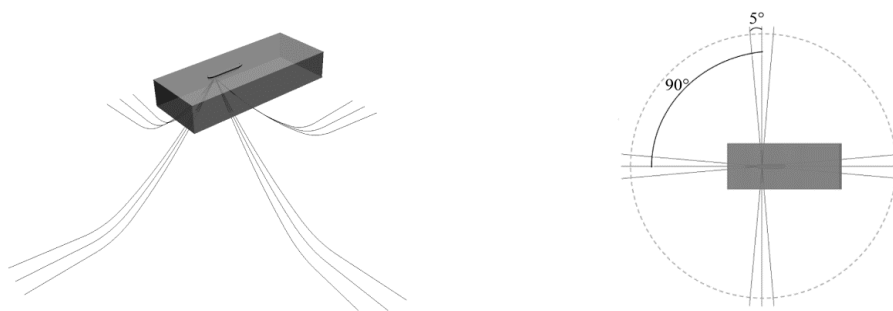


图 3 锚链配置可视化

2.2 计算域设置与网格划分

计算域的设置参数由图4所示，计算域入口距离船首的距离为一个船长。船体两侧距边界距离各有一个船长。船尾距末端边界的距离设置为两个船长，其中最后一个船长距离设置为消波区。

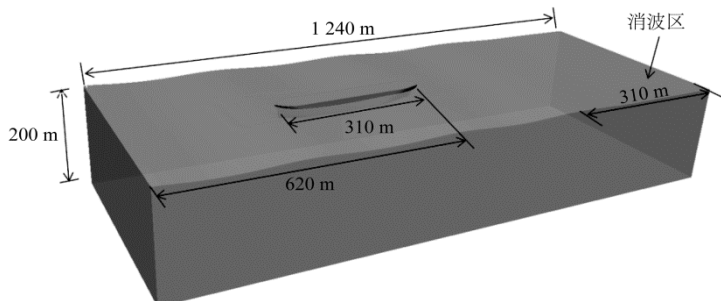
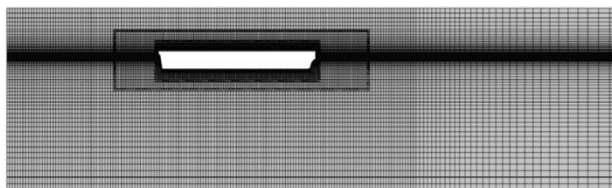


图4 计算域设置主尺度

在网格划分上模拟计算域的背景网格由 OpenFOAM 下的 blockMesh 功能生成，再经网格求解器 snappyHexMesh 进行背景网格加密。网格总量在 200 万左右，计算时间步长取 0.01s。船体表面捕捉网格如图 5(a)所示，由图可以看出网格在船体表面捕捉十分精细光滑，为数值计算提供了良好的网格基础。为了详细对船体附近流场进行准确计算与捕捉，要求船体附近要有较为致密的网格。而阻尼区主要进行消波作用，可以适当将网格密度向稀疏过渡，减少网格总量。网格划分纵剖面截面如图 5(b)所示。



(a) 表面网格



(b) 网格加密剖面图

图5 FPSO 船体

2.3 边界条件设置

在边界条件的设置上，入口边界设置是 inlet，主要涉及到造波，速度条件采用波浪入口，压力条件采用 Neumann 边界条件，压力梯度为零。出口边界设置为 outlet。速度条件采用第三类混合边界条件 (inletOutlet)，压力条件设定为 Dirichlet 边界条件。对于计算域的上下边界 top 和 bottom，上边界压力与速度条件采用第一类边界条件，下边界速度压力条件采用的都是可滑移的边界条件。对于计算域的两个侧壁 sidewall，边界条件定义为 symmetry，其含义即垂直于边界的方向导数为零。对于 FPSO 表面，采用固壁面不可穿透边界条件。计算域的边界条件如图 6 所示。

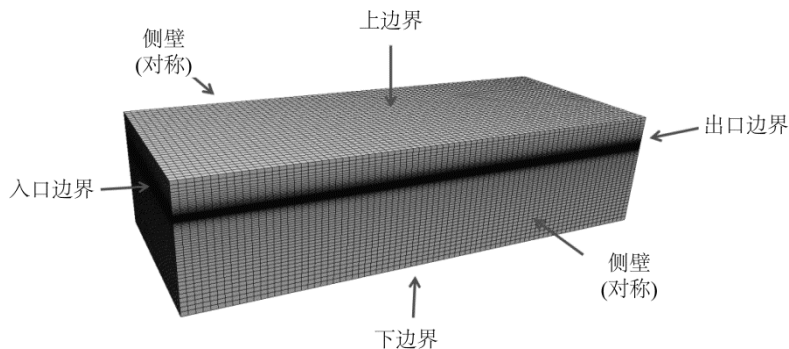


图6 计算域边界条件设置

3 数值模拟及结果

3.1 自由衰减验证

实验前首先对 FPSO 进行自由衰减验证, 验证参数设置以及求解器的准确性。计算结果与 Kim M H 等人^[8]用 Winpost-FPSO 软件的计算结果进行了对比。本文主要将迎浪条件下主要的运动响应, 即升沉与纵摇的运动情况进行对比分析, 结果如图 7 所示。

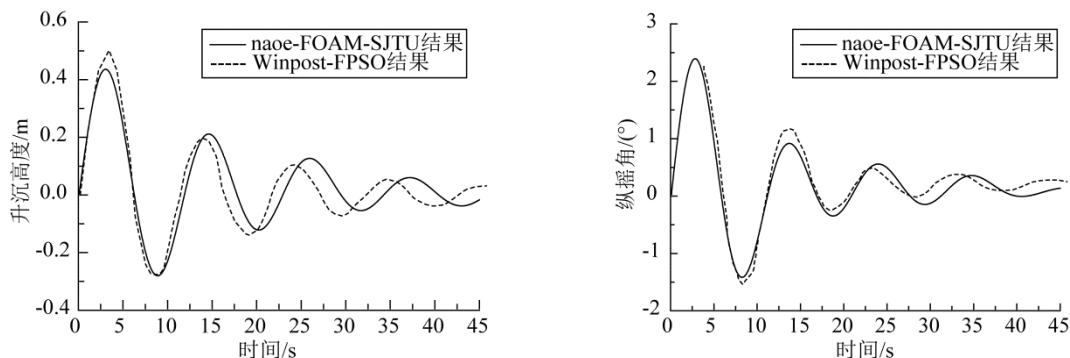


图 7 升沉与纵摇自由衰减对比结果

表 4 升沉、纵摇衰减周期对比结果

自由度	衰减周期/s			误差
	naoe-FOAM-SJTU 结果	Winpost FPSO 结果	OTRC 实验结果	
升沉	11.40	10.8	10.7	5.56%
纵摇	10.96	10.8	10.5	1.48%

从对比结果表 4 中发现, naoe-FOAM-SJTU 求解器结果所得到的衰减周期较文献以及实验周期略大, 考虑误差的主要原因应该与锚链力有关, OTRC 实验中由于实验水池的限制, 应用的锚链为等效截断锚链^[8], 因此文献中的 Winpost 计算结果较之偏高, 而本文应用求解器在求解锚链力的时候, 相对于前者方法不同, 将锚链的拖地段加进了考虑范畴。因此所得周期会较文献结果偏大。但从总体上来看, 该自由衰减实验验证了本文求解器的准确性。

3.2 主要计算工况模拟

实验主要研究在首迎浪规则波情况下, 单点系泊 FPSO 锚链与船体的耦合运动响应特性以及锚链受力情况。波浪周期为 14.1 s, 波长为 310 m, 波长船长比为 1, 波幅为 3.1 m, 即波陡为 2%。

由于在艏迎浪情况下, FPSO 在横荡、艏摇、横摇三个自由度下的运动幅度几乎为 0, 因此, 实验结果只给出纵荡、垂荡、纵摇三个自由度下的 FPSO 运动情况曲线。图 8 给出了 FPSO 在所要求的三个自由度下的运动响应情况。

观察图 8 的纵荡曲线可发现, 大型浮式结构物 FPSO 受艏迎浪的作用, 存在着慢漂运动, 又在锚链的作用下, 体现出大周期低频纵荡运动。图中主要体现了以下几点内容:

1) 在大周期低频纵荡慢漂运动中, 又包含着受波浪影响的小周期波频运动, 可见求解器可以准确模拟这一现象。

2) 在本次试验中, 对比纵摇与升沉运动曲线, 可以发现 FPSO 在波浪中的纵荡运动对于升沉运动幅值的影响明显大于对纵摇运动的影响, 这一现象有待后续实验观察。

3) 对比纵摇, 升沉与纵荡之间的关系, 可以发现, 在 300 s 处, 随着纵荡运动方向的改变, 纵摇与升沉运动受到了影响, 运动幅值都有所减小。

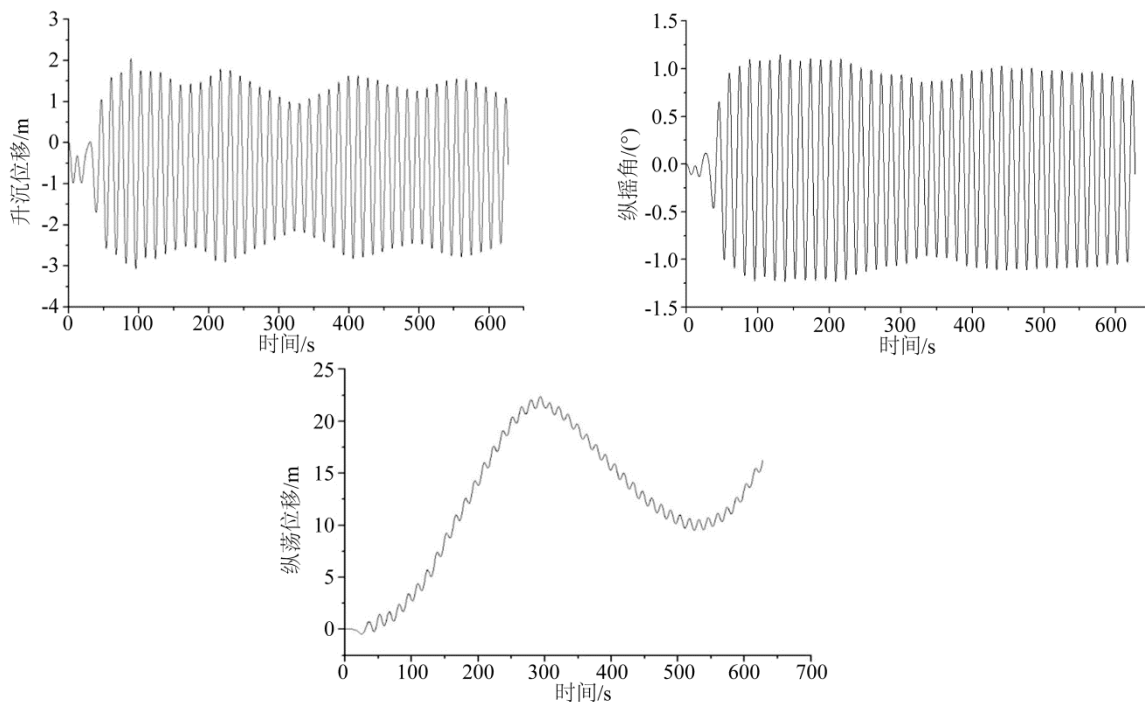


图8 升沉、纵摇以及纵荡运动曲线

图9给出了位于0度以及180度方向上两根锚链的锚链力情况。

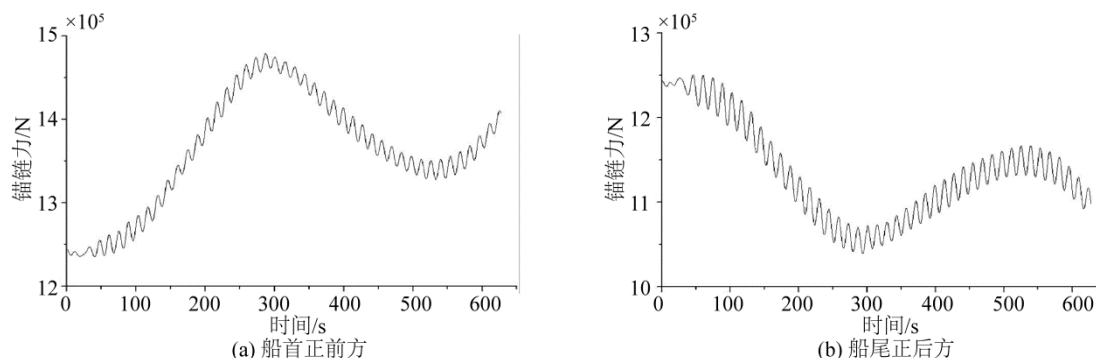


图9 两根锚链锚链力。

从图9可以看出，两根锚链一开始受力相同，随着船体纵荡影响，以及波浪力的作用，锚链力发生了变化，锚链受力周期的低频变化与船体纵荡运动周期紧密相关，同时，受力曲线中的高频变化，与波浪周期紧密相关。

3.3 FPSO 甲板上浪现象数值模拟展示

相对于势流方法，CFD方法可以精细化流场，可以捕捉十分复杂的甲板上浪现象。是目前对于FPSO上浪相关研究的热门方法。本文应用的求解器naoe-FOAM-SJTU也对上浪现象进行了模拟试验。图10展示了大波陡波浪中运动的FPSO发生的甲板上浪现象数值模拟可视化图像。

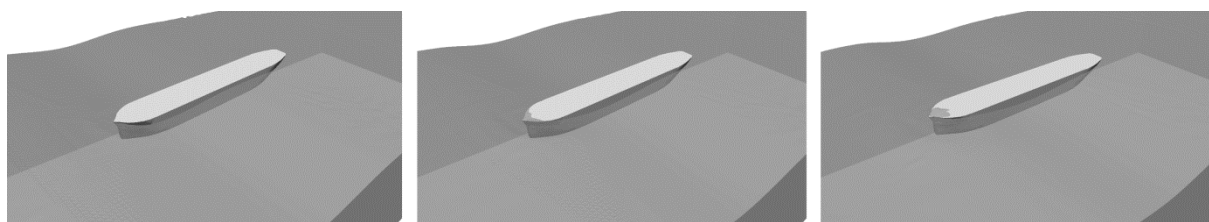


图10 FPSO 甲板上浪模拟可视化图像

通过增大波浪的波陡,模拟出现了甲板上浪现象,随着船体运动幅度的增大,甲板上浪现象也愈加明显,最终趋于稳定。本实验模拟虽不够完整,但是证明了 CFD 研究该问题的可行性,在未来的研究领域中,有着很大的研究空间,

4 结 语

基于 OpenFOAM 开源平台,利用本实验室针对船舶与海洋工程自主开发的 naoe-FOAM-SJTU 求解器,对规则波情况下的单点系泊 FPSO 与锚链的耦合运动响应进行数值模拟与分析。首先进行空场造波,证明了所划分的网格可以保证波浪的稳定传播并达到实验要求波幅。随后将带锚链的 FPSO 自由衰减模拟结果与相关文献进行对比,可以发现该求解器的计算结果与文献数据对比良好,验证了求解器以及算例设置的准确性。随后,引入单点系泊的 FPSO,给出其在预定波浪环境下的运动响应以及锚链受力情况,并进行分析。最后本文展示了 FPSO 甲板上浪现象。在后续的研究中,可以对不同波浪参数、斜浪情况以及波浪爬升现象对 FPSO 水动力影响做更加深入的研究。

该模拟展示了 naoe-FOAM-SJTU 求解器对于该问题研究的可行性,对未来的深入研究打下基础,同时,相对于势流方法,甲板上浪现象展示出了 CFD 方法的优势。

参考文献:

- [1] 刘晓健. FPSO 单点系泊系统运动响应分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2013.
- [2] Kim Y B, Kim M H. Hull/mooring/riser coupled dynamic analysis of a tanker-based turret-moored FPSO in deep water[C]// The Twelfth International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2002.
- [3] 袁洪涛, 曾骥, 等. 极端海况下深水单点系泊系统FPSO运动响应分析[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2015.
- [4] Soares C G, Fonseca N, Pascoal R. Experimental and numerical study of the motions of a turret moored FPSO in waves[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2005.
- [5] 庄园, 赵伟文, 万德成. 应用重叠网格方法的单点系泊FPSO在波浪下的运动响应[C]//第四届全国船舶与海洋工程CFD专题研讨会论文集. 镇江, 2016.
- [6] Shen Z R, Zhao W W, Wang J H, et al. Manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU [R]. Technical Report for Solver Manual, Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [7] OpenFOAM. Mesh generation with the snappyHexMeshutility. 2013. Available from: <http://www.openfoam.org/docs/user/snappyHexMesh.php#x26-1510005.4>.
- [8] Kim M H, Koo B J, Mercier R M, et al. Vessel/mooring/riser coupled dynamic analysis of a turret-moored FPSO compared with OTRC experiment[J]. Ocean Engineering, 2005.