
应用重叠网格方法的单点系泊 FPSO 在波浪下的运动响应

庄园, 赵伟文, 万德成*

(上海交通大学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

Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

摘要: 浮式生产储油装置 (FPSO) 系统在深海油气的开发与存储中有着重要应用。本文的工作是利用基于开源平台 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 在波浪中的运动响应进行模拟和分析。本文首先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。随后本文对 FPSO 在横向波浪下的运动响应进行了预报和模拟。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, 同时分析了在波浪下 FPSO 六自由度运动响应和锚链受力情况。

关键词: 单点系泊; FPSO; 重叠网格; naoe-FOAM-SJTU

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

Zhuang Yuan, Zhao Weiwen, Wan Decheng*

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, 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 Email: dcwan@sjtu.edu.cn)

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 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. Considering the large amplitude motion of FPSO, overset grids technology is used. The free decay test of heave motion is simulated first, and result was compared with those in experiments. The results well agreed with those in experiments, thus the numerical studies are reliable. Next, six degrees of freedom are released in regular wave to study the motion response of FPSO coupled with mooring system. To ignore the effects of seabed, stocks first deep water is chosen. Motion response in six degree of freedom is given to analysis FPSO motion in beam wave, and total forces of four mooring lines are discussed.

Key words: Single point mooring system; FPSO; overset grids; naoe-FOAM-SJTU

1. 引言

浮式生产储油装置 (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。

国内外有许多学者对于 FPSO 的运动响应做过研究。M. H. Kim 等人^[1]同时采用了实验和数值的方法模拟了 6000-ft 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。刘元丹等人^[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。李俊等人^[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。

本文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, 重叠网格模块以及锚链系统。FPSO 数值模型近似模拟 DeepStar 实验中的模型及数据。本文主要应用重叠网格模块及锚链系统, 首先对 FPSO 进行垂荡自由衰减数值模拟以验证数值方法的准确性, 随后进行波浪条件下的运动响应模拟。

2. 数值方法

2.1 控制方程

对于不可压、粘性流体, 本文采用的控制方程为 RANS 方程:

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

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

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} 、 ρ 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。

2.2 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。本文方法所使用的 DCI 数据是由 SUGGAR++^[4]程序来计算生成的。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 的过程通常需要四个步骤。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:

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

其中， 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（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：

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

2.3 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解躺底段的系泊模型。悬链线方程如下：

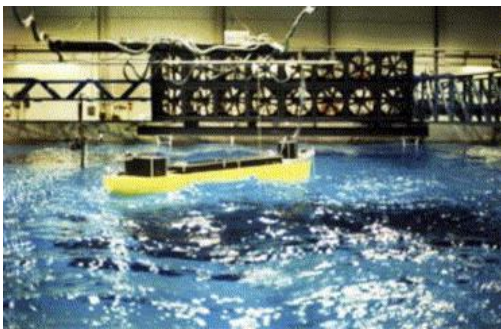
$$z = a(\cosh \frac{x}{a} - 1) \quad (5)$$

其中， $a = T_h/w$ 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(单位为 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。

3. 计算模型

3.1 模型及工况

本文采用 DeepStar CTR 4401A，水深为 300ft 的 FPSO^{[5][6]}进行实尺度数值模拟，与实验工况进行比较，以验证本文数值方法的可靠性。实验模型和数值模型如图 1 所示，模型参数如表 1 所示，锚链参数如表 2 所示，本文数值模拟所设锚链布置如图 2 所示。其中图 1 所示为 Ward 等人^[7]所做的 OTRC 实验，其实验模型与 DeepStar 实验所用模型一致。本文数值模型采用实尺度进行计算。



a) FPSO 实验模型



b) FPSO 数值模型

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	单位	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 (Kxx)	m	14.77
回转半径 (Kyy)	m	77.44
回转半径 (Kzz)	m	79.3
内转塔位置 (20.5%Lpp)	m	63.55
内转塔位置 (距基线)	m	1.52

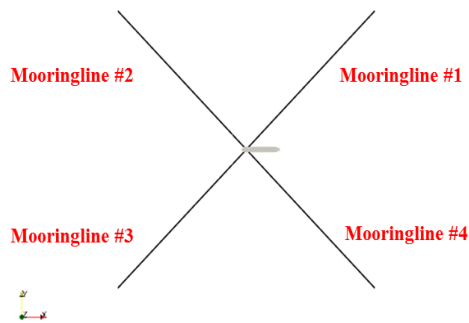


图 2 锚链计算模型

Fig.2 Numerical model mooring line system

表 2 锚链系统参数

Table 2. Particulars of mooring system

锚链参数	单位	数值
水深	m	914
预张力	kN	1201
锚链数量		4
锚链夹角	deg	90
锚链长度	m	2,088

本文首先计算 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;随后计算在横浪情况下 FPSO 与锚链的耦合运动情况,放开六个自由度,观察其运动响应。

3.2 自由衰减

自由衰减计算域设置如图 3 所示。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 $-100\text{m}<x<500\text{m}$, $-350\text{m}<y<350\text{m}$, $-250\text{m}<z<150\text{m}$ 。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。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。网格总量为 2.6M,如图 4 所示。重叠网格的布局及边界条件的设置如图 5 所示。本文设置 FPSO 初始有向上的 3m/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 所示,表 3 所示为由实验方法和本文 CFD 方法所得到的时历曲线算出的自然频率与阻尼率,可以看出,本文方法与实验方法相比较,自然频率与阻尼率的误差在可接受范围内。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。

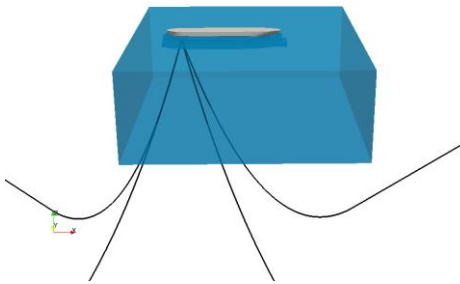


图 3 自由衰减计算域

Fig.3 Computational domain of free-decay test

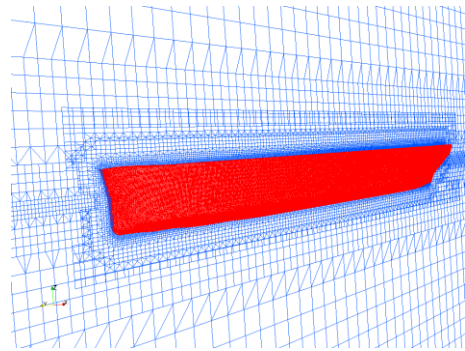


图 4 计算网格

Fig.4 Computational grids

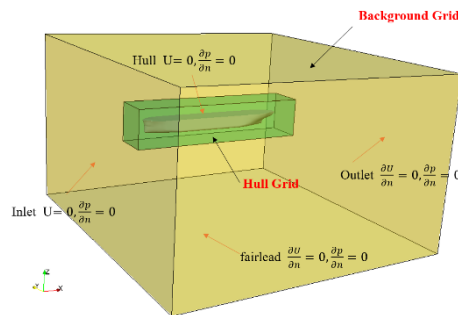


图 5 重叠网格布局与边界条件

Fig.4. Layout of overset grids and boundary condition

表 3 垂荡自由衰减结果对比

Table 3. Comparison of the free decay test results

	Experiment		CFD method	
	Periods (s)	Damping ratio (%)	Periods (s)	Damping ratio (%)
Heave	10.7	6.7	10.35	5.9

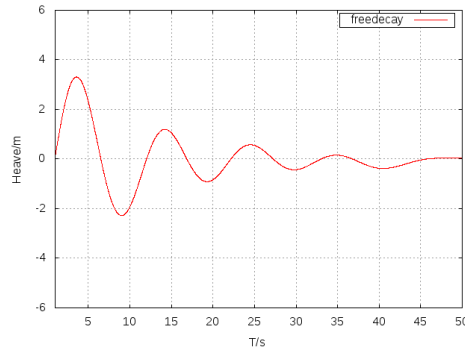


图 6 垂荡衰减曲线

Fig.6 heave free decay simulation results

3.3 波浪中的运动响应

为保证 FPSO 在深水中运动，因此波浪采用斯托克斯深水一阶波，波高为 12 米，波长为 310 米。为保证波浪在计算域内的质量守恒以及防止波浪反射回来影响运动，在波浪传播方向末尾设置消波区，计算域设置如图 7 所示。在此波浪下，FPSO 的六自由度运动曲线如图 8 所示。

由图 8 可以看出，在横浪的作用下，FPSO 的横摇、纵摇和垂荡会随着波浪的传播做较为规则的运动；横荡的运动幅度非常小，是在计算过程中存在的轻微扰动现象。而由于横向的波浪力的影响，FPSO 有向波浪传播方向漂移的趋势，即纵荡响应十分剧烈。与此同时，还伴有轻微的首摇运动。FPSO 在波浪上的运动响应如图 9 所示。

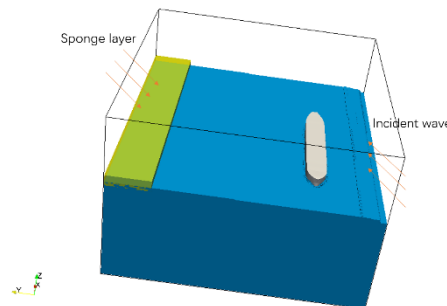


图 7 FPSO 在波浪中运动响应计算域

Fig. 7 Computational domain of FPSO motion in waves

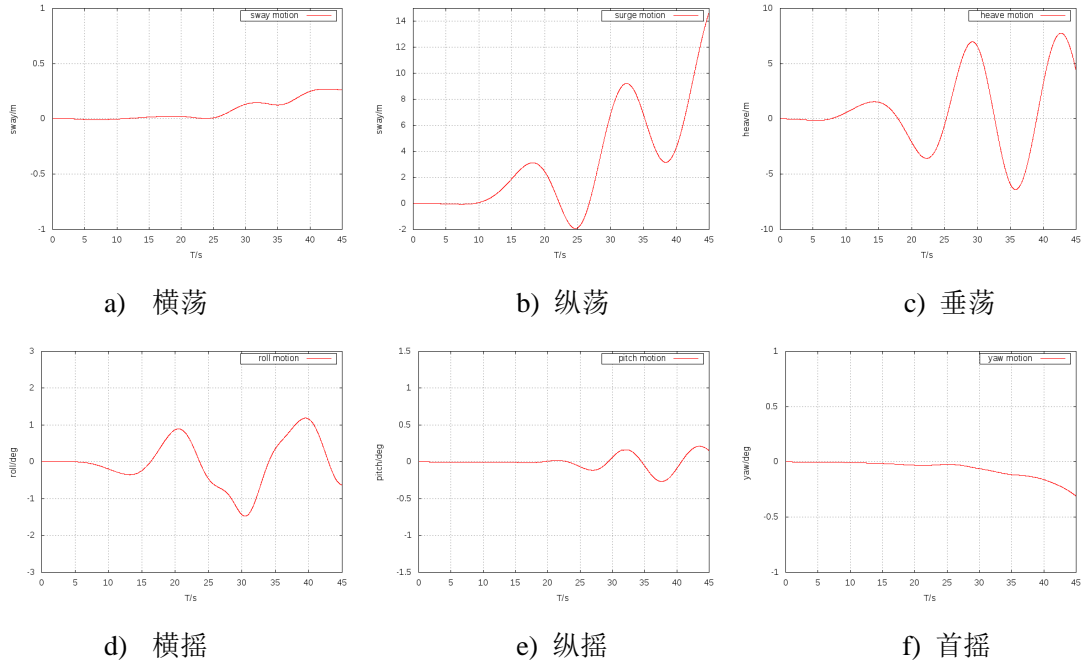


图 8 波浪下 FPSO 的六自由度运动响应

Fig.8 Six DOF motion of FPSO in wave

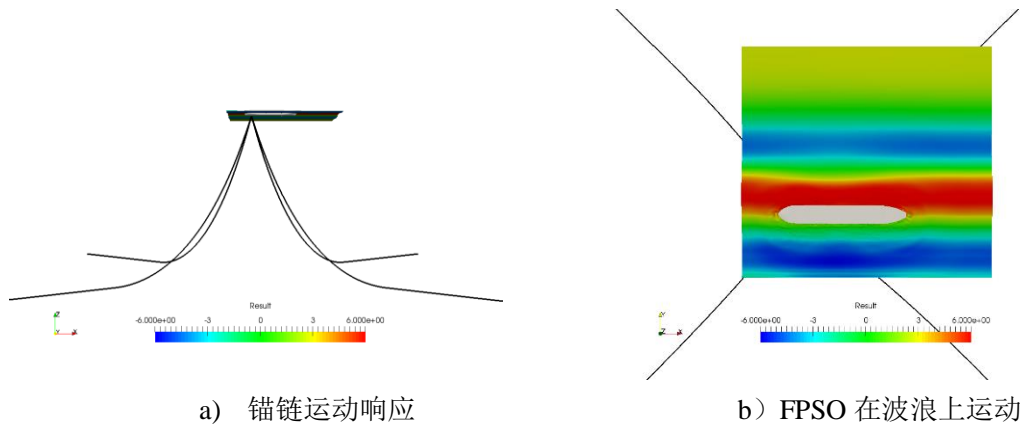


图 9 FPSO 在波浪上运动响应

Fig. 9 Motion response of FPSO in waves

同时，我们对四根锚链所受到的力进行了计算分析。四根锚链所受到的总的力如图 10 所示。可以看出，因为是对称分布，因此锚链#1 和锚链#2 所受力随时间变化曲线相同，锚链#3 和锚链#4 所受力随时间变化曲线相同。同时可以看出，在开始的几秒，锚链的力基本不变，保持在预张力大小附近。当物体随横浪运动时，FPSO 向锚链#1、锚链#2 方向有较大幅度移动，因此这两根锚链受力开始有减小趋势。同时，锚链#3、锚链#4 受力有增大趋势。因此在有向 y 轴正向方向传播的波浪时，锚链#3、锚链#4 的受力需要得到格外关注，避免因拉力过大而超出承受范围，造成锚链断裂。

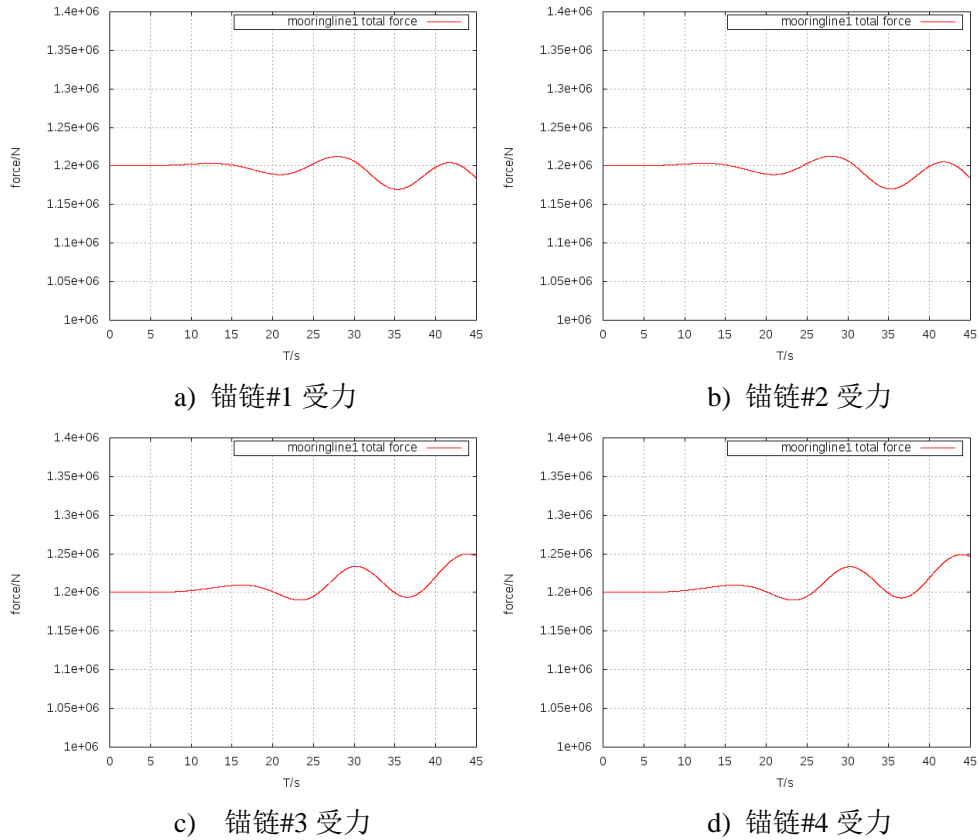


图 10 锚链受力示意图

Fig. 10 The total force of four mooring lines

4. 结论

本文应用基于开源平台 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。首先本文对带有锚链的 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。随后对横浪中带有锚链的 FPSO 进行了数值模拟，并分析了其六个自由度的运动，以及锚链所受到的力随时间的变化。

综上，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. Vessel/mooring/riser coupled dynamic analysis of a turret-moored FPSO compared with OTRC experiment[J]. *Ocean Engineering*, 2005, 32(14): 1780-1802.

-
- [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]. 航海工程, 2011, 40(6): 146-149.
- 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. (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.
- 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. (in Chinese)
- [4] Shen Z, Wan D. RANS Computations of Added Resistance and Motions of Ship in Head Waves.[C]//*Proceedings of the Twenty-second International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, 2012, 1096-1103.
- [5] 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.
- [6] Wichers J, Devlin P V. Benchmark model tests on the deepstar theme structures FPSO, SPAR and TLP[C]// *Offshore Technology Conference*, 2004,1-13.
- [7] Ward E G, Irani M B, Johnson R P. Responses of a tanker-based FPSO to hurricanes[C]//*Offshore Technology Conference*, 2001.