

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2022.03.014

不同垂荡抑制结构对圆筒型FPSO阻尼和运动性能的影响研究

郝未南¹, 赵伟文¹, 万德成^{1*}, 邓石²

(1. 上海交通大学, 船海计算水动力学研究中心(CMHL), 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240,
E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn;
2. 中国海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

摘要: 设计和改进垂荡抑制结构是提升圆筒型浮式生产储卸油装置(FPSO)阻尼性能和改善运动情况的一种常用方法。该文利用自主开发的CFD求解器naoe-FOAM-SJTU, 对具有带锯齿垂荡抑制结构的圆筒型FPSO进行了计算分析。通过静水自由衰减数值模拟与模型试验对比平台固有周期进行验证, 结果表明, 二者吻合良好, 验证了本求解器对圆筒型FPSO问题进行模拟仿真的可行性。之后, 对带有不同垂荡抑制结构的FPSO进行模拟, 得到相应的固有周期和阻尼系数。通过分析垂荡抑制结构附近的涡量场与速度场, 探索了抑制结构对平台泄涡的影响。结果表明, 在垂荡抑制结构上设置锯齿会对阻尼性能和流场情况产生较大影响。

关键词: 圆筒型FPSO; naoe-FOAM-SJTU; CFD; 垂荡抑制结构; 阻尼系数

中图分类号: O359.1

文献标志码: A

Damping performance of anti-motion structures on cylindrical FPSO

Wei-nan Hao¹, Wei-wen Zhao¹, De-cheng Wan^{1*}, Shi Deng²

(1. Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. China Offshore Oil Engineering Company, Tianjin 300451, China)

Abstract: Designing and improving the anti-motion structures is a common method to improve the damping performance of the cylindrical floating production storage and offloading system (FPSO) and improve the movement. In this paper, the self-developed CFD solver naoe-FOAM-SJTU is used to calculate and analyze a cylindrical FPSO with a sawtooth anti-motion structure. It is verified by comparing the natural period of the static water free attenuation numerical experiment and the model test. The results show that the two are in good agreement, which verifies the feasibility of this solver to simulate the cylindrical

收稿日期: 2021-11-03(2022-01-08 修改稿)

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFB1704200)和国家自然科学基金(51879159、52131102)

作者简介: 郝未南(1997-), 男, 山西太原人, 硕士研究生。

Received: November 3, 2021 (**Revised** January 8, 2022)

Project supported by foundations: Supported by the National Key Research and Development Program of China (2019YFB1704200) and the National Natural Science Foundation of China(51879159, 52131102)

Biography: Wei-nan Hao(1997-), Male, Master Degree candidate.

FPSO problem. After that, the FPSO with different anti-motion structures are simulated, and the corresponding natural period and damping coefficient are obtained. By analyzing the vorticity field and velocity field near anti-motion structures, the influence of structures on vortex shedding performance is explored. The results show that the installation of sawtooth on the anti-motion structure will have a greater impact on the damping performance and the flow field.

Key words: Cylindrical FPSO; naoe-FOAM-SJTU; CFD; Anti-motion structures; Damping coefficients

引言

相对于由油轮改造的船型FPSO,圆筒型FPSO结构简单,便于建造和维修^[1]。此外,圆筒型FPSO还具有以下优势:运动性能优越^[2-3]、圆筒型的对称布置具有各向同性、产生无风标效应^[2]、同时减少了细长体船体结构的纵摇^[4]、移动灵活以及更适宜于我国边际油气田的开发作业^[5]等。

尽管圆筒型FPSO具有上述诸多优势,但是其垂荡运动性能相比船型FPSO较差^[6]。在目前的研究中,常通过设计和改进圆筒型FPSO的垂荡抑制结构来提升其阻尼性能,改善运动状况。白杰等^[6]对带有间隙和外板边锋垂荡抑制结构的FPSO分别进行了模型试验研究,二者均对固有周期提高有显著效果,且后者对阻尼的增加更为显著。

通过CFD数值模拟,可以有效分析圆筒型FPSO的运动响应和阻尼。童波等^[7]在传统垂荡板的基础上,以U型及倒U型两种阻尼结构的不同设计参数为变量,分析了不同情况下的阻尼性能。赵治民等^[8]对阻尼结构是否通海两种型式进行了研究,通海型FPSO在附加质量和阻尼两方面都会产生积极作用,大幅改善了垂荡运动性能。Avalos等^[9]对安装不同

舵龙骨的圆筒型FPSO进行了二维模拟,发现在横摇时,平台会产生不同的涡量场,造成压力的重新分布,进而影响横摇阻尼。Ji等^[1]对带有开孔垂荡板的圆筒型FPSO进行了研究,以垂荡板上边缘的斜度和开孔直径为变量,对不同情况下平台垂荡和纵摇阻尼进行了比较。此外, Ji等^[10]还对六种带有不同垂荡抑制结构的平台进行了阻尼和泄涡情况的分析。

本文利用自主开发的CFD求解器naoe-FOAM-SJTU,对带锯齿垂荡抑制结构的圆筒型FPSO进行了数值模拟,并对具有不同垂荡抑制结构的圆筒型FPSO进行了对比分析。通过分析垂荡抑制结构附近的涡量场与速度场,探索了抑制结构对平台泄涡的影响。

1 数值方法

本文利用自主开发的CFD求解器naoe-FOAM-SJTU进行CFD计算。本节将从控制方程、自由面处理、数值消波理论和动态网格变形技术等方面对求解器进行简要介绍。

1.1 控制方程

对于非定常、不可压和黏性流体,流动的控制方程为N-S方程

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

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

式中: \mathbf{U} 为流场速度; \mathbf{g} 、 ρ 和 μ 分别为重力加速度、流体的密度和动力黏性系数; p_d 为流场动压力,等于总压力减去静水压力,定义如下

$$p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \quad (3)$$

1.2 自由面处理

在浮式结构物的两相流计算问题中,自由面的处理相当关键。求解器中考虑表面张力,采用流体体积法(VOF)来捕捉自由面,能较好地处理数值耗散,且精度较高^[11]。

1.3 数值消波理论

在数值计算中,当波浪传播至计算域出口边界时,会出现波浪反射现象。为防止反射波浪影响了自由面的波形,可在近出口处设置一个消波区,这一区域又可称作海绵消波层(Sponge Layer),如图1所示,在入射波浪到达出口边界前即将其消除,从而避免反射波浪生成。

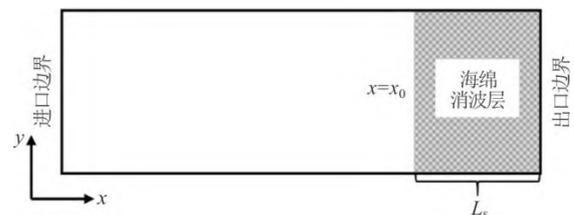


图1 海绵消波层^[11]
Fig.1 Sponge Layer^[11]

1.4 动态网格变形技术

当得到结构物的运动后,需要更新其在流场计算中的位置,同时其他网格单元的位置也应匹配结构物边界的运动。求解器采用了动态网格变形技术,当结构物作边界运动时,不改变计算域中网格的数量以及拓扑关系,而是通过移动网格节点的位置使网格单元形状发生变化。具体公式与计算过程可参考文献^[11]。

2 数值验证

2.1 几何模型

选取几何外型如图2所示的平台为研究对象, 作业水深为313 m, 试验模型缩尺比为1: 60。主要参数如表1所示。



图2 (网上彩图) 圆筒型 FPSO 平台模型
Fig.2 (Color online) The FPSO Model

表1 FPSO 主要状态参数实尺度及模型尺度
Table 1 Structure parameters of cylindrical FPSO

参数名称	单位	实尺度	模型尺度
平台水线处直径	m	72.00	1.200
阻尼板外径(不含锯齿)	m	110.00	1.330
主甲板直径	m	82.80	1.380
工艺甲板直径	m	90.00	1.500
主甲板高	m	33.00	0.550
工艺甲板高	m	39.00	0.650
满载吃水	m	22.80	0.380
排水重量	t	99 573	0.457
重心高(距基线)	m	19.86	0.331
横摇惯性半径	m	21.23	0.354
纵摇惯性半径	m	21.25	0.354

2.2 静水衰减数值模拟

以平台在水线面处的中心为原点建立笛卡尔坐标系, 坐标系遵循右手定则。在此坐标系下建立计算域, 计算域的划分如下: $-10\text{ m} \leq X \leq 10\text{ m}$, $-10\text{ m} \leq Y \leq 10\text{ m}$, $-5\text{ m} \leq Z \leq 1\text{ m}$, 如图3所示。

对计算域进行网格划分, 采用 blockMesh 和 snappyHexMesh 工具生成计算网格, 在平台周围设置两层加密区, 并在水线面和垂荡抑制结构附近进行加密, 如图4所示。同时为防止辐射波在传播到边界时导致波浪反射, 在计算域周围设置消波区, 如图3(b)所示。最终网格数为240万左右。

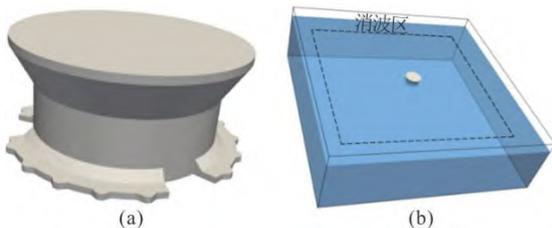


图3 (网上彩图) 数值计算模型图及计算域
Fig.3 (Color online) Numerical model and calculation domain

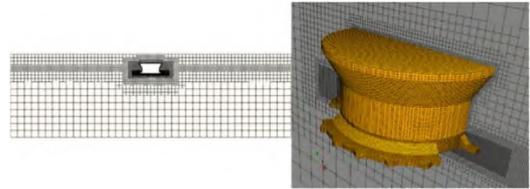


图4 (网上彩图) 中纵剖面网格划分及模型周围网格分布
Fig.4 (Color online) Grid of the mid-longitudinal section and grid distribution around the model

2.3 结果分析

数值模拟得到垂荡、纵摇衰减时历曲线以及经过快速傅里叶变换(FFT)之后的结果分别如图5和图6所示。

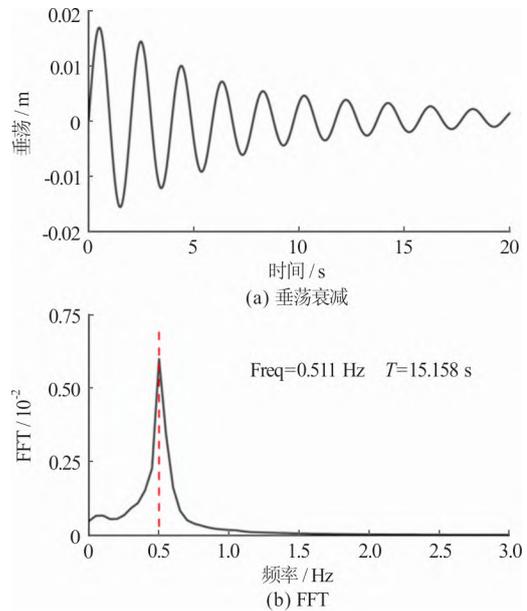


图5 (网上彩图) 垂荡自由衰减时历曲线及 FFT 结果
Fig.5 (Color online) Heave free decay curve and FFT result

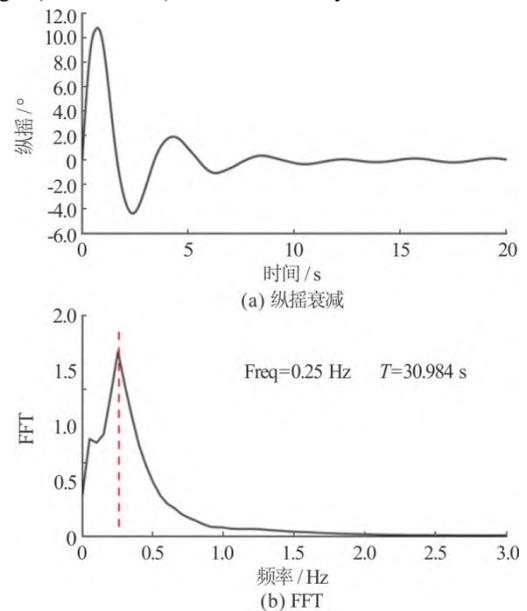


图6 (网上彩图) 纵摇自由衰减时历曲线及 FFT 结果
Fig.6 (Color online) Pitch free decay curve and FFT result

通过对平台进行静水衰减的数值模拟，根据缩尺比换算得到实尺度平台运动的固有周期，即满载吃水平台垂荡和纵摇固有周期分别为15.158 s和30.984 s。与试验结果对比，如表2所示。由表中可知，CFD模拟结果与试验结果吻合良好，证明了求解器对求解平台运动的可靠性。

表 2 固有周期对比表

Table 2 Natural periods of numerical and experimental results

	垂荡固有周期	纵摇固有周期
试验结果/s	15.096	30.015
CFD 计算结果/s	15.158	30.984
相对误差/%	0.410	3.230

3 带有不同垂荡抑制结构的圆筒型 FPSO数值模拟

为了探究不同垂荡抑制结构的影响作用，分别以无垂荡抑制结构与无锯齿垂荡抑制结构为对比，进行对比计算。保持试验模型与图7所示的两种模型主要几何参数一致，在静水衰减模拟中吃水和重心高度相同，通过计算排水量得到重量，并计算各自的纵摇惯性半径，如表3所示。在初始时刻施加相同的初速度，得到各个情况下垂荡和纵摇的固有周期如表4。为便于表述，三种模型依次简称为M1、M2和M3。图8和图9分别为M1和M2的垂荡及纵摇静水衰减时历曲线。

表4数据表明，设置垂荡抑制结构使平台垂荡和纵摇运动的固有周期明显提高。在目前吃水和重心一致的工况设置下，在垂荡抑制结构上添加锯齿会使固有周期有提高，但提高并不显著。

表 3 不同 FPSO 模型计算工况

Table 3 The calculation conditions of different FPSO models

参数	单位	无垂荡抑	无锯齿垂荡	带锯齿垂荡
		制结构	抑制结构	抑制结构
		(M1)	(M2)	(M3)
吃水	m	0.380	0.380	0.380
排水重量	kg	429.548	455.311	456.717
重心高(距基线)	m	0.331	0.331	0.331
纵摇惯性半径	m	0.344	0.353	0.354

表 4 不同 FPSO 模型的固有周期

Table 4 Natural periods of different FPSO models

结构型式	垂荡固有周期/s	纵摇固有周期/s
M1	12.9	19.365
M2	14.58	29.048
M3	15.17	30.984

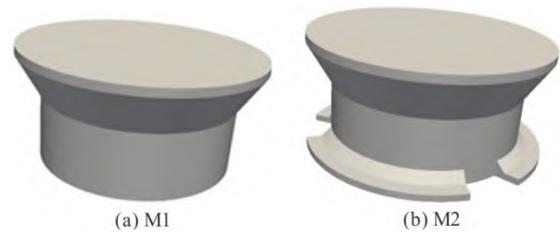
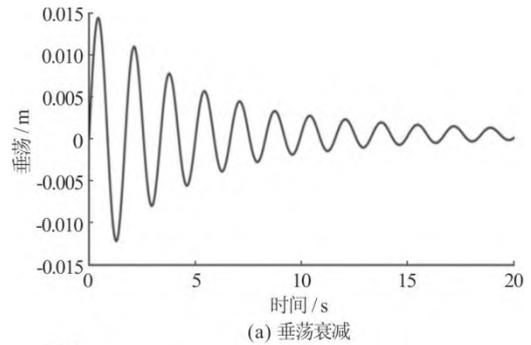
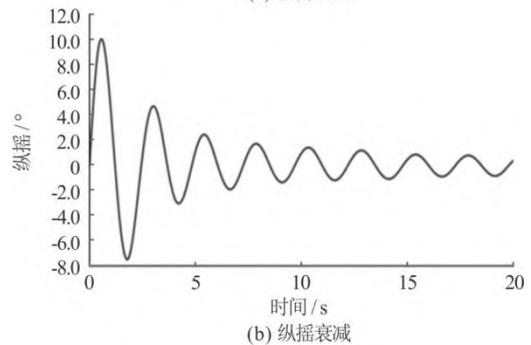


图 7(网上彩图) 对比计算数值模型

Fig.7 (Color online) Comparing computational numerical models



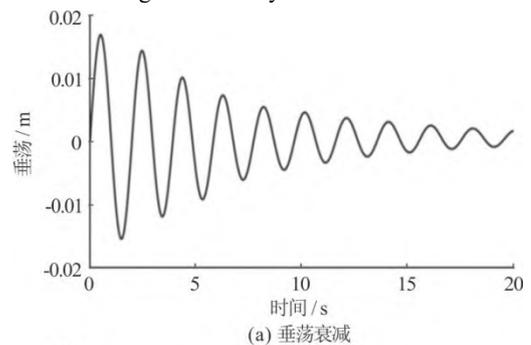
(a) 垂荡衰减



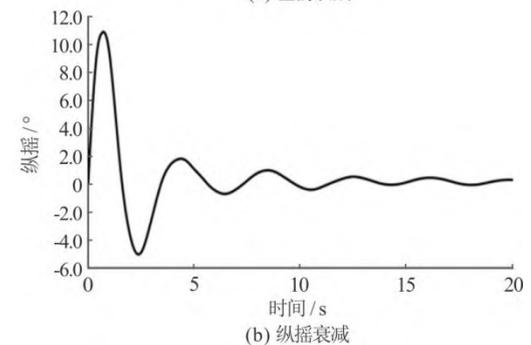
(b) 纵摇衰减

图 8 M1 自由衰减时历曲线

Fig.8 Free decay curves of M1



(a) 垂荡衰减



(b) 纵摇衰减

图 9 M2 自由衰减时历曲线

Fig.9 Free decay curves of M2

4 阻尼系数

4.1 消灭曲线法

结构物在水中运动时, 由于结构物和水之间存在相对运动, 必然受到阻力。对于船舶, 阻尼主要由三部分原因产生: 由水的黏性引起的摩擦阻尼; 由船的运动在水表面形成的波浪消耗船体本身能量形成的兴波阻尼; 由于在船体弯曲或突出物附近形成旋涡而损失能量的旋涡阻尼^[12]。

以横摇运动为例, 摩擦阻尼一般认为和角速度 $\dot{\phi}$ 平方成比例; 兴波阻尼比例于角速度 $\dot{\phi}$ 的一次方; 旋涡阻尼比例于角速度 $\dot{\phi}$ 的平方。因此, 横摇阻尼力矩可以表示为

$$M(\dot{\phi}) = -2N\dot{\phi} - W|\dot{\phi}|\dot{\phi} \quad (4)$$

式中: N 和 W 为横摇阻尼力矩系数。

在静水衰减的时历曲线中, 第 n 次幅值为 ϕ_n , 相隔半周期的下一个幅值为 $\phi_{(n+1)}$, 相邻两次幅值之差如下

$$\Delta\phi = \phi_{(n+1)} - \phi_n \quad (5)$$

相邻两次平均幅值为

$$\phi_m = \frac{1}{2}(\phi_n + \phi_{(n+1)}) \quad (6)$$

以 ϕ_m 为横坐标, $\Delta\phi$ 为纵坐标, 绘制成曲线, 称为消灭曲线。消灭曲线具有非线性的特征^[12-13]。一般情况下, 消灭曲线可以表示为以下函数形式

$$\Delta\phi = a\phi_m + b\phi_m^2 \quad (7)$$

同时, 系数 a 和 b 与系数 N 和 W 之间存在如下关系

$$a = \frac{T_\phi}{2I_{xx}} N \quad (8)$$

$$b = \frac{4}{3} \frac{W}{I_{xx}} \quad (9)$$

式中: I_{xx} 为船体本身惯性矩和附加惯性矩之和, 称为总惯性矩。

在线性阻尼假设下, 无量纲阻尼系数 d 可以由下式求得

$$d = \frac{a}{\pi} \quad (10)$$

在平台运动中, 阻尼也存在相似的构成规律。由于摩擦阻尼比重较小, 同时旋涡阻尼表现为速度的二次方, 因此, 可以消灭曲线中的二次项系数大小表征垂荡抑制结构脱涡的能力^[10]。

4.2 结果分析

图10为无垂荡抑制结构FPSO(M1)垂荡运动静水衰减时历曲线及相应的消灭曲线。表5为各垂荡抑制结构下的FPSO在垂荡和纵摇情况下的阻尼系数。

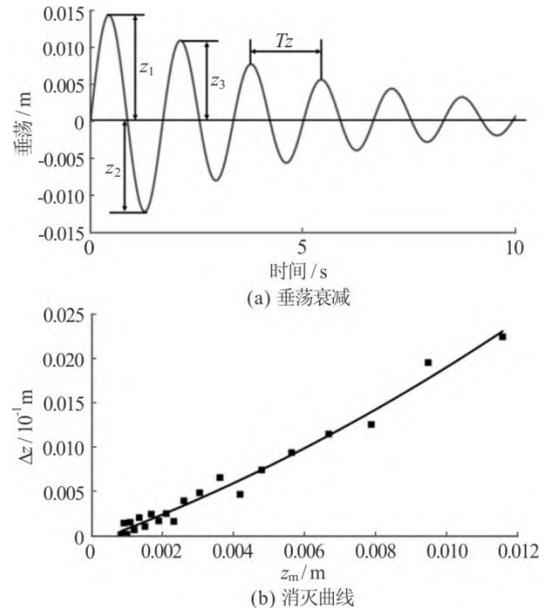


图 10 M1 垂荡自由衰减时历曲线及消灭曲线
Fig.10 Heave free decay curve and curve of extinction of M1

表 5 不同 FPSO 模型的阻尼系数

结构型式	垂荡阻尼系数			纵摇阻尼系数		
	a	d	b	a	d	b
M1	0.145	0.046	5.132	0.295	0.094	0.002
M2	0.194	0.062	6.879	0.517	0.165	0.024
M3	0.209	0.066	10.211	0.679	0.216	0.035

由表 5 和图 11 中可以看到, 随着垂荡抑制结构的设置和改进, 相应的阻尼系数均有提高。相比于 M1, 其余两种结构的垂荡运动消灭曲线一次项系数 a 分别增加 33.8%和 43.7%, 纵摇系数 a 分别增加 75.5%和 130%。由于 a 可以表征兴波阻尼的大小, 垂荡结构的增加和锯齿结构的改进会给自由面带来更显著的兴波扰动, 达到改善运动的效果。

同时, 对比M1, 其余两种结构垂荡阻尼系数 b 分别增加了34%和99.0%, 纵摇阻尼系数 b 分别增加了12.7倍和19.0倍。由此可知, 抑制结构的增加, 极大提升了纵摇运动的旋涡阻尼。而对于锯齿结构的设置, 在垂荡运动中旋涡阻尼的增加要比纵摇运动显著。

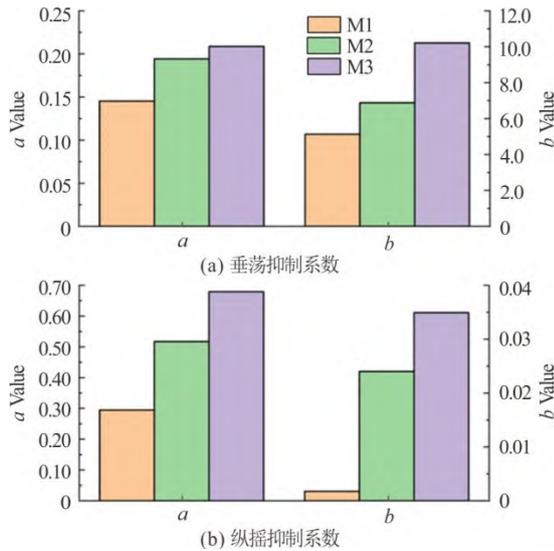


图 11 (网上彩图) 不同 FPSO 模型阻尼系数
Fig.11 (Color online) Damping coefficients of different models

5 流场分析

5.1 垂荡运动

从相同周期开始, 通过比较三种结构垂荡运动下的涡量和速度变化, 分析引起旋涡阻尼变化的主要原因。

图12表明, 无垂荡抑制结构时, 涡脱现象并不明显, 且由图例色带可知, 周期内涡量强度最大在2左右。当增加了垂荡抑制结构后, Y方向的涡量增加明显, 且最大涡量强度在8左右。如图14(a)所示, 中纵剖面的左下角为通过锯齿中央的截面, 右下角没有通过锯齿。通过比较两处截面附近的涡量分布和流线变化, 可以看到在Y方向涡量强度和分布变化并无显著不同。比较M2和M3两种结构在一个周期内垂荡抑制结构中部水平剖面的最大涡量分布可知, 在预留通缆的开口处, 两者涡量变化几乎一致, 如图15所示。同时, 锯齿的增加会引起Z向涡量在各锯齿之间的大幅增加, 而这一涡量强度已与无垂荡抑制结构FPSO(M1)垂荡运动时的最大涡量持平, 甚至超出。因此, 增加锯齿结构, 主要通过引起Z向涡量增加, 从而增大旋涡阻尼。

5.2 纵摇运动

图16图例色带的最大绝对值为20, 设置垂荡抑制结构后最大值为30, 对比图17和图18可知: 垂荡抑制结构和锯齿结构的增加主要引起旋涡分布范围和涡量强度的增大。对比图18中截面左右角处的涡量分布和强度可知, 锯齿截面附近的涡量强度较无锯齿截面处的较小。观察无锯齿截面附近在一个纵摇周期内的涡量和流线, 可以发现, 在垂荡

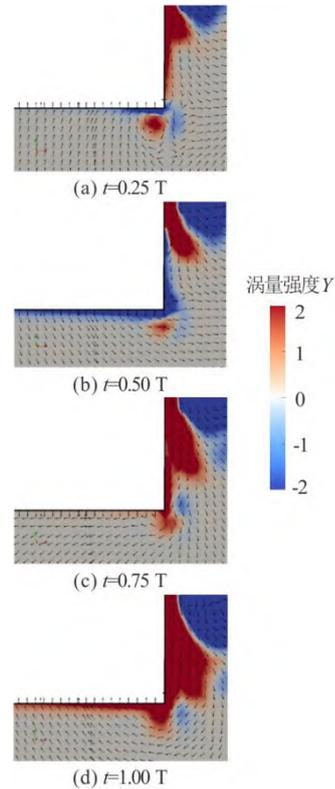


图 12 (网上彩图) 一个运动周期内, M1 在底部的涡量及流速方向
Fig.12 (Color online) The vorticity and velocity direction of M1 at the bottom in a motion period

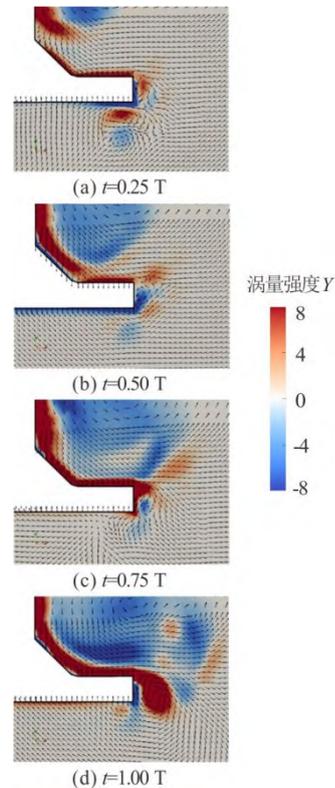


图 13 (网上彩图) 一个运动周期内, M2 在底部的涡量及流速方向
Fig.13 (Color online) The vorticity and velocity direction of M2 at the bottom in a motion period

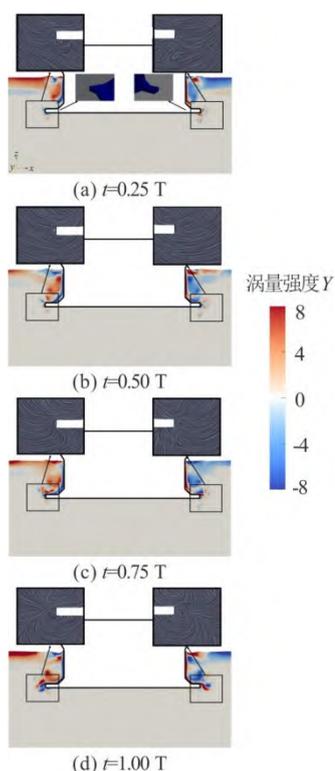


图 14 (网上彩图) 一个运动周期内, M3 在底部的涡量及局部流线分布
Fig.14 (Color online) The vorticity and local streamline of M3 at the bottom in a motion period

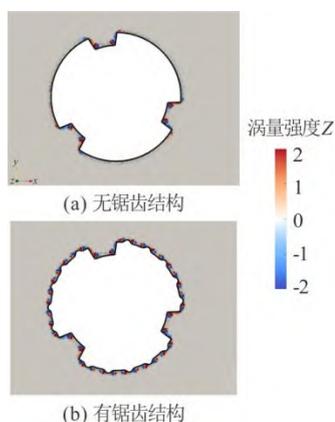


图 15 (网上彩图) 垂荡抑制结构中中部水平剖面的涡量分布
Fig.15 (Color online) Vorticity distribution of horizontal section in the middle of the anti-motion structure

抑制结构上表面始终有强度较大的旋涡产生。引起这一现象的原因可能是由于垂荡结构的增加会带动更多的附连水质量, 并且在纵摇运动中表现得更突出。由图 17 可知, 平台截面壁面附近流体的流速方向, 一直沿着壁面运动, 从自由面到垂荡抑制结构水平末端的路径长度越短, 形成的旋涡强度越强。通过图 18 中自由面下平台壁面附近的涡量变化, 可以得出以下结论: 本文所研究的圆筒型 FPSO 作为浅吃水结构, 在泄涡等方面极易受到自由面的影响。

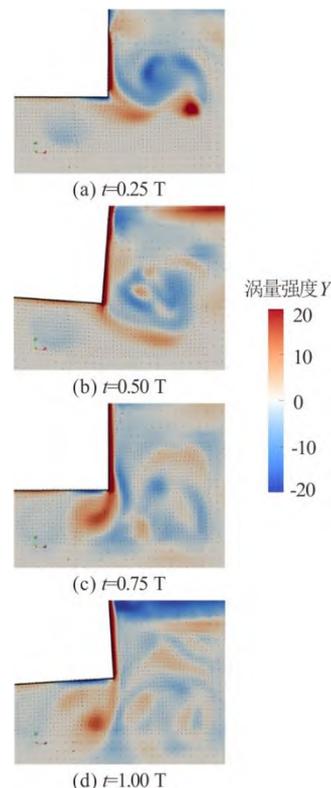


图 16 (网上彩图) 一个运动周期内, M1 在底部的涡量及流速方向
Fig.16 (Color online) The vorticity and velocity direction of M1 at the bottom in a motion period

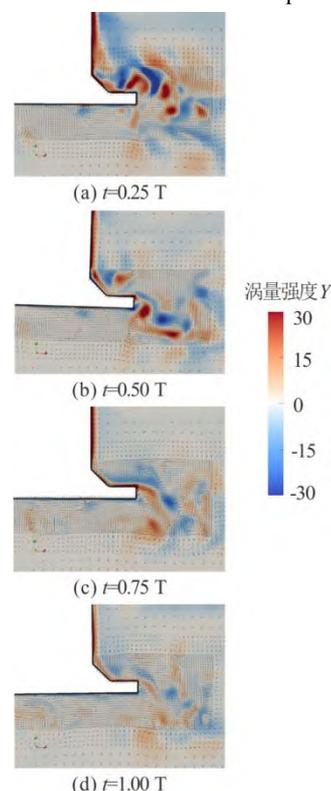


图 17 (网上彩图) 一个运动周期内, M2 在底部的涡量及流速方向
Fig.17 (Color online) The vorticity and velocity direction of M2 at the bottom in a motion period

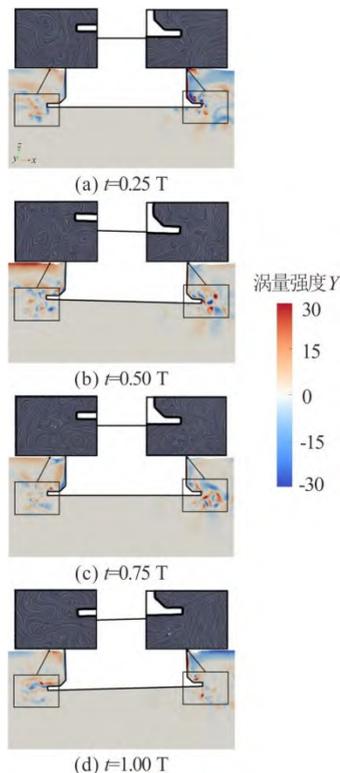


图 18(网上彩图) 一个运动周期内 M3 在底部的涡量及局部流线分布

Fig.18 (Color online) The vorticity and local streamline of M3 at the bottom in a motion period

6 结论

本文利用自主开发的CFD求解器对模型尺度下三种圆筒型FPSO进行了数值模拟,对比分析了三种结构的阻尼性能和泄涡等流场情况,得出以下主要结论:

(1) 设置垂荡抑制结构能够显著增加模型的垂荡阻尼和纵摇阻尼,达到改善运动的效果。

(2) 由于改进后,平台质量增大,同时垂荡抑制结构的外径使平台主尺度增加,进而导致附加质量增加,提高了平台垂荡和纵摇运动的固有周期。

(3) 垂荡抑制结构的增加,极大提升了纵摇运动的旋涡阻尼。而对于锯齿结构的设置,在垂荡运动中,旋涡阻尼的增大要比纵摇运动显著。

(4) 增加锯齿结构主要通过引起锯齿间Z向涡量增加,从而增大旋涡阻尼。

(5) 本文所研究的圆筒型FPSO作为浅吃水结构,在泄涡等方面极易受到自由面的影响。

参 考 文 献:

- [1] Ji X, Li Y, Tang Y, et al. Viscous damping effect and vortex shedding performance of the novel anti-motion structures on a cylindrical FPSO [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 190: 106430.
- [2] 童波. 圆筒形 FPSO 尺度规划和运动性能研究 [J]. *海洋工程*, 2017, 35(4): 94-99.
- [3] 刘波. 圆筒形 FWPSO 在中国南海环境条件的适应性分析 [J]. *中国海上油气*, 2019, 31(4): 154-158.
- [4] 谭家翔. 深水 FPSO 发展现状与趋势 [J]. *船海工程*, 2016, 45(5): 65-69, 75.
- [5] 黄佳, 王忠畅, 赵战华. 圆筒形 FWPSO 水动力性能模型试验研究 [J]. *海洋工程*, 2017, 35(6): 119-124.
- [6] 白杰, 李焱, 曲志森, 等. 新型圆筒型 FPSO 垂荡抑制结构优化设计 [J]. *海洋工程*, 2020, 38(1): 20-29.
- [7] 童波, 季欣洁, 王浩, 等. 圆筒型 FPSO 阻尼结构的阻尼性能研究 [J]. *海洋工程*, 2018, 36(5): 22-29.
- [8] 赵治民, 李焱, 唐友刚, 等. 圆筒型 FPSO 优化设计与水动力性能分析 [J]. *海洋工程*, 2020, 38(1): 11-19+29.
- [9] Avalos G O G, Wanderley J B V. Numerical study of forced roll oscillation of FPSO with bilge keel [J]. *Ocean Engineering*, 2018, 147: 304-317.
- [10] Ji X, Li Y, Tang Y, et al. Damping performance of annular anti-motion structures on a cylindrical floating drilling production storage and offloading system [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 192: 1-11.
- [11] 刘远传. 浮式结构物系泊系统数值分析模块 naoeFOAM-ms 开发 [M]. 上海, 中国: 上海交通大学出版社, 2014.
- [12] 盛振邦, 刘应中. 船舶原理(下) [M]. 上海, 中国: 上海交通大学出版社, 2004.
- [13] Igbadumhe J F, Sallam O, Furth M, et al. Experimental determination of non-linear roll damping of an FPSO pure roll coupled with liquid sloshing in two-row tanks [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(8): 582.