

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.10.015

新型对接棱台状 FPSO 的浮体参数和水动力分析

王 文 华,姚 宇 鑫,黄 一,叶 茂 生

(大连理工大学 船舶工程学院, 116024 辽宁 大连)

摘 要:为解决传统船型和棱柱筒状 FPSO 的性能局限,提出一种具有对接棱台状浮式主体的新概念 FPSO.根据所研发的新型对接棱台状浮体模型,确定了能够反映浮体几何形状、FPSO 基本功能和水动力性能的 5 个相互独立的外形参数.然后,采用基于频域势流理论的边界元数值模拟方法研究了新型对接棱台状浮体在波浪中的运动响应,并且定性分析了不同浮体外形参数(下倾角、水线面外接圆半径等)对浮体水动力性能的影响.最后,根据频域势流理论和工程近似方法,分析并概括出基于垂荡运动性能的新型浮体设计准则和方案.在此基础上,结合某棱柱型 FPSO 的基本功能(载重量、排水量、储油空间、上甲板面积的设计值),完成新型 FPSO 的主浮体设计.通过性能比较,证明了对接棱台状 FPSO 的水动力性能优势和设计方案有效合理性,以期能够为深水油气开发提供一种有效的新型工程装备和解决方案.

关键词:对接棱台状浮体模型;外形参数;下倾角;水线面外接圆半径;水动力性能

中图分类号: P 751 文献标志码: A 文章编号: 0367-6234(2015)10-0076-06

Influence of shape parameters of docking pyramidal floating body on hydrodynamic performance

WANG Wenhua, YAO Yuxin, HUANG Yi, YE Maosheng

(School of Naval Architecture, Dalian University of Technology, 116024 Dalian, Liaoning, China)

Abstract: In order to solve the performance limitations of traditional ship-type and prismatic FPSO, a novel concept of docking pyramidal FPSO is presented. For the new floating body, five independent shape parameters are presented to decide the geometry of floating body and also affect the basic functions and hydrodynamic performance of FPSO. Then boundary element method based on potential flow theory is applied to analyze the motion response of docking pyramidal floating body in wave. Furthermore, the effect of shape parameters on the hydrodynamic performance of FPSO is qualitatively studied, and the design guideline of the new floating body is also proposed to improve the heave motion performance based on wave potential flow theory and engineering approximate method. Finally, the new floating body can be designed according to the basic functions of an octagon FPSO, and the comparison results show the performance advantages of docking pyramidal FPSO and the rationality of design principle in this paper provide effective engineering equipment and solutions for deep-water oil and gas development.

Keywords: docking pyramidal floating body; shape parameters; inclination angle; circumcircle radius of water plane; hydrodynamic performance

随着海洋油气的开采逐渐向环境恶劣的深海发展,在深水油气田开发模式中,FPSO 以其储油量大、承载能力强、适应水深范围广等优点已经成为必不可少的重要环节.FPSO 作为一种集生产、储油、外

输、生活、动力于一体的多功能采油设施,有着广阔的应用前景^[1-3].但是,传统船型和棱柱状 FPSO 的性能存在以下不足^[4-5]:传统船型 FPSO 对波浪的作用方向非常敏感,在深海环境载荷和单点系泊系统的联合影响下,FPSO 经常会处于斜(横)向迎浪的状态,从而导致垂荡和横摇运动性能较差;船首长期暴露在波浪作用下,并且纵向尺度较大,因此甲板上浪现象比较普遍且危害很大;在深海环境载荷作用下,会产生频繁的首摇运动,从而严重磨损内转塔和

收稿日期: 2014-07-12.

基金项目: 国家自然科学基金创新研究群体科学基金(51221961);
大连理工大学引进人才科研启动基金(852011).

作者简介: 王 文 华(1964—),男,博士;
黄 一(1964—),男,教授,博士生导师.

通信作者: 黄 一,huangyi@dlut.edu.cn.

流体接头。中海油公司设计的新概念八角棱柱状 FPSO 的性能虽然有所改善,但是还具有一些性能局限:浮体垂荡运动幅度较大;甲板面积较小,居住和工作空间太近,不利于危险区与非危险区分离;容易引发涡激振动。其中,垂荡是浮体非常重要的运动性能,直接影响到 FPSO 的甲板上浪和 FDPSO 的钻井功能。因此,以提高垂荡运动性能为主要目标,并且兼顾抑制涡激振动和增大甲板面积,本文提出一种具有对接棱台状浮式主体的新概念 FPSO。与钻采平台相比具有较大的储油空间,与船型和棱柱状 FPSO 相比又具有较好的运动性能、较强的极端海洋环境适应能力以及很高的作业有效性和安全性。能够广泛适用于深海和浅海的各种海洋环境,有利于实现各种海域大规模油气的多功能一体化,具有较好经济效益^[6-9]。此外,新概念采用了一种名为“一种浮式平台及其装卸载过程中保持浮态和稳性控制方法”的专利技术,使得新概念在装卸载过程中排水量和吃水恒定,始终具备最佳水动力性能^[10]。

为了能够给新型对接棱台状 FPSO 的主浮体外形设计提供参考依据和准则,本文根据所研发的新型对接棱台状浮体模型,确定了能够反映浮体几何形状、FPSO 基本功能和水动力性能的 5 个相互独立的外形参数。然后,采用基于频域势流理论的边界元数值模拟方法研究了新型对接棱台状浮体在波浪中的运动响应,并且定性分析了不同浮体外形参数(下倾角、水线面外接圆半径等)对浮体水动力性能的影响,并且进一步定量推导出基于垂荡运动性能的浮体外形设计准则,制定出新型 FPSO 的设计方案。在此基础上,结合某棱柱状 FPSO 的基本功能,完成新型对接棱台状 FPSO 的主浮体设计。此外,通过进行模型性能对比,分析了新型 FPSO 具有的水动力性能优势。

1 新型对接棱台状 FPSO 浮式主体外形参数的选取

新型 FPSO 的主浮体为对接棱台状结构,该浮体外形主要有如下参数:水线面外接圆半径 R_w ,上甲板外接圆半径 R_T ,下底面外接圆半径 R_B ,干舷 f ,吃水 d ,下倾角 α 、上倾角 β 、水线面以上体积 V_T ,水线面以下排水体积 V_B ,如图 1 所示。其中,根据参数间几何关系可以确定,对接棱台状浮体相互独立的参数共有 5 个。这里根据设计初期的需要选择参数 V_B 、 V_T 、 R_T 、 R_w 和 α 确定主浮体外形,从而决定 FPSO 的功用和性能。其中,首先根据 FPSO 的基本性能要求(设计储油量、排水量、储油空间和上甲板面积

等),选择合适的 V_B 、 V_T 和 R_T ;其次通过调整能够决定水下浮体形状的两个参数 R_w 和 α ,来实现对 FPSO 水动力性能的优化设计。因此,本文主要研究参数 R_w 和 α 的变化对 FPSO 水动力性能的影响。

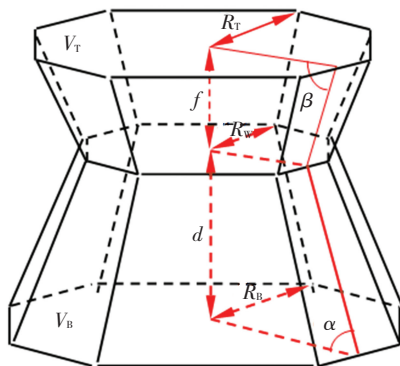


图 1 对接八角棱台式主浮体参数示意

2 外形参数 R_w 和 α 对新型 FPSO 水动力性能的影响

这里,以 PL19-3 油田的 30 万 t 超大型 FPSO 为参考,基于软件 AQWA 建立新型对接棱台状 FPSO 主浮体的网格模型图(如图 2 所示)。在此网格模型的基础上,分析外形参数对其水动力性能的影响^[11-12]。

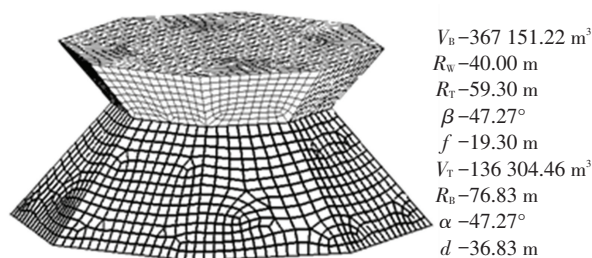


图 2 新型对接八角棱台状 FPSO 主浮体参数示意

2.1 不同 α 对新型浮体模型水动力性能的影响

首先,在水线面以上体积、上甲板外接圆半径、排水体积和水线面外接圆半径一定的情况下($V_T = 136\ 304.46\text{ m}^3$ 、 $R_T = 59.30\text{ m}$ 、 $V_B = 367\ 151.22\text{ m}^3$ 、 $R_w = 40.00\text{ m}$),建立不同下倾角 α ($40^\circ \sim 60^\circ$) 的浮体模型,将计算所得纵荡运动、纵摇运动、纵向平均波浪漂移力和垂荡运动性能分别展示如图 3 所示。

从图 3(a)中可以看出,在 $\omega < 0.2$ 的区间内,纵荡运动响应直线下降至 1.0 以下,变化趋势极为剧烈,并且不同下倾角模型对应的纵荡 RAO 基本相同;在 $0.2 < \omega < 0.8$ 的区间内纵荡运动 RAO 逐渐减小,直至 $\omega = 0.8$ 附近趋近于零。其中,在波浪能量集中频率段 ($0.35 < \omega < 0.60$) 中,下倾角越小的浮体模型纵荡运动响应 RAO 越大。在图 3(b)中,纵摇运动

响应在 $0 < \omega < 0.7$ 时呈抛物线变化,在 $\omega = 0.4 \sim 0.5$ 附近达到峰值,并且随下倾角的减小而增大;在 $\omega > 0.6$ 的区间,纵摇运动响应出现周期性振荡衰减变化趋势.在图 3(c)中,在 $\omega < 0.4$ 的区间内,纵荡平均波浪力几乎为零,然后在 $\omega = 0.4$ 附近直线上升,到最大值后开始振荡衰减.其中,最大的平均波浪漂移力随着浮体模型的下倾角变小而增大.从图 3 中可以看出,外形参数 α 对浮体纵向水动力性能的影响比较明显; α 越小,在波谱高能频带的纵摇运动、纵荡运动和平均漂移力的响应幅值越显著.此外,从图 3(d)中可以看出,只在固有频率附近才有非常窄的垂荡 RAO 峰值带宽,而在两侧 RAO 会急剧下降.在频率较小的一侧,垂荡运动响应变化比较平稳,约

为 1.0.然而,在频率较大的一侧,垂荡运动 RAO 由最小值快速增大到峰值后缓慢下降,此处峰值远远小于固有频率处的 RAO 最大值.因此,如果将浮体垂荡固有周期设计为远离波浪能量峰值区域,那么新型 FPSO 就会具有较好的垂荡运动性能.此外,浮体模型 α 越小,垂荡运动附加质量越大,则垂荡运动的固有频率越小,越可能远离波谱高能频带;但是,在固有频率已经远离波浪高能频带的前提下,继续减小 α ,则最小值右侧的峰值反而会变大,从而增大新型浮体在波浪中的垂荡运动幅值.因此,通过改变 α 可以控制浮体垂荡运动固有周期,将其设计为远离波浪能量峰值区域,可以达到提高垂荡运动性能的目的.

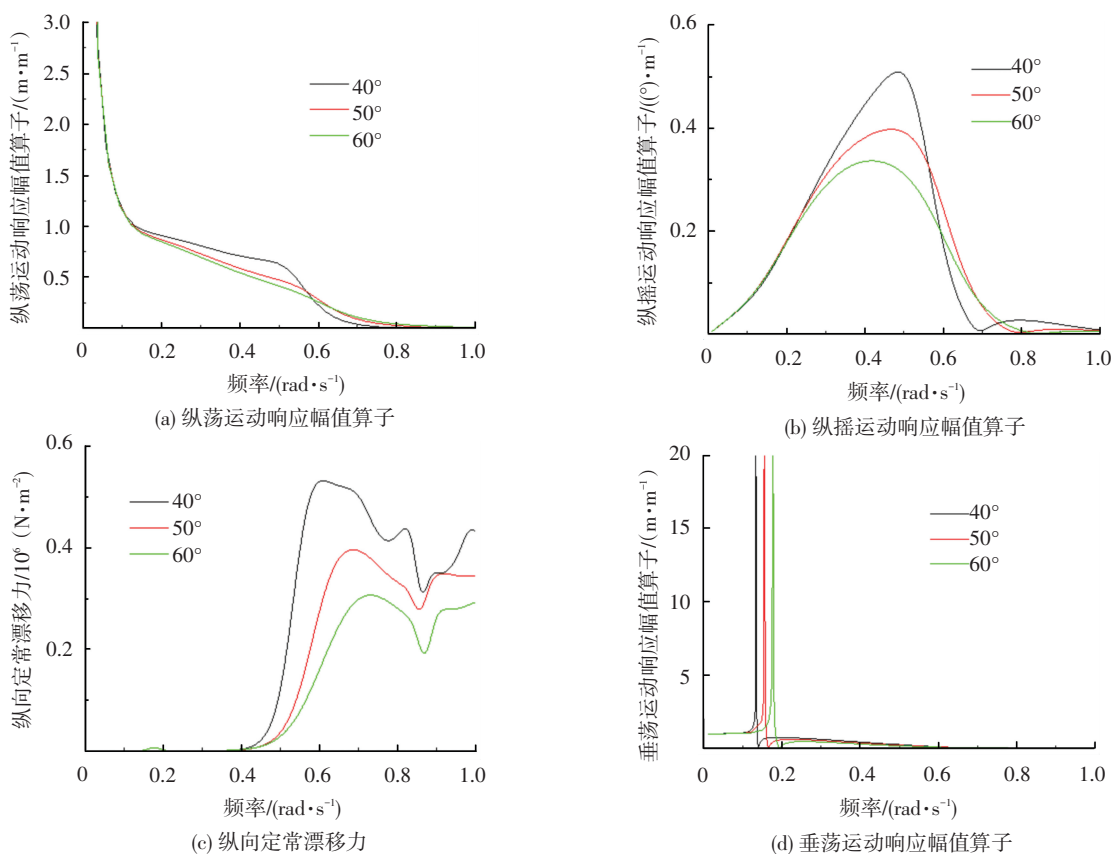


图 3 不同下倾角的浮体模型纵荡、纵摇运动响应、纵荡平均漂移力和垂荡响应

2.2 不同 R_w 对新型浮体模型水动力性能的影响

在水线面以上体积 V_T 、上甲板外接圆半径 R_T 、排水体积 V_B 和水线面外接圆半径 R_w 一定的情况下 ($V_T = 136\ 304.46 \text{ m}^3$ 、 $R_T = 59.30 \text{ m}$ 、 $V_B = 367\ 151.22 \text{ m}^3$ 、 $\alpha = 47.27^\circ$),建立不同水线面半径 R_w (30~50 m) 的浮体模型,将计算所得纵荡运动、纵摇运动、纵向平均波浪漂移力和垂荡运动性能分别展示如图 4 所示.

如图 4(a)~(c) 所示,浮体模型的纵荡和纵摇运动响应,以及纵荡平均漂移力会受到水线面半径

的影响,但是影响程度各不相同.其中,水线面半径越小,纵荡和纵摇运动响应越小,但是彼此相差不是很明显,因此在设计中可以不予考虑.但是水线面半径对纵荡平均漂移力的作用效果比较显著,水线面半径越小,则对应的平均漂移力幅值越小.此外,从图 4(d)中可以看出,随着浮体模型的水线面半径逐渐增加,垂荡运动的固有频率越大,越可能靠近波浪能量峰值区域.所以,同样可以通过改变水线面半径,来控制浮体垂荡运动固有频率,进而达到提高垂荡运动性能的目的.

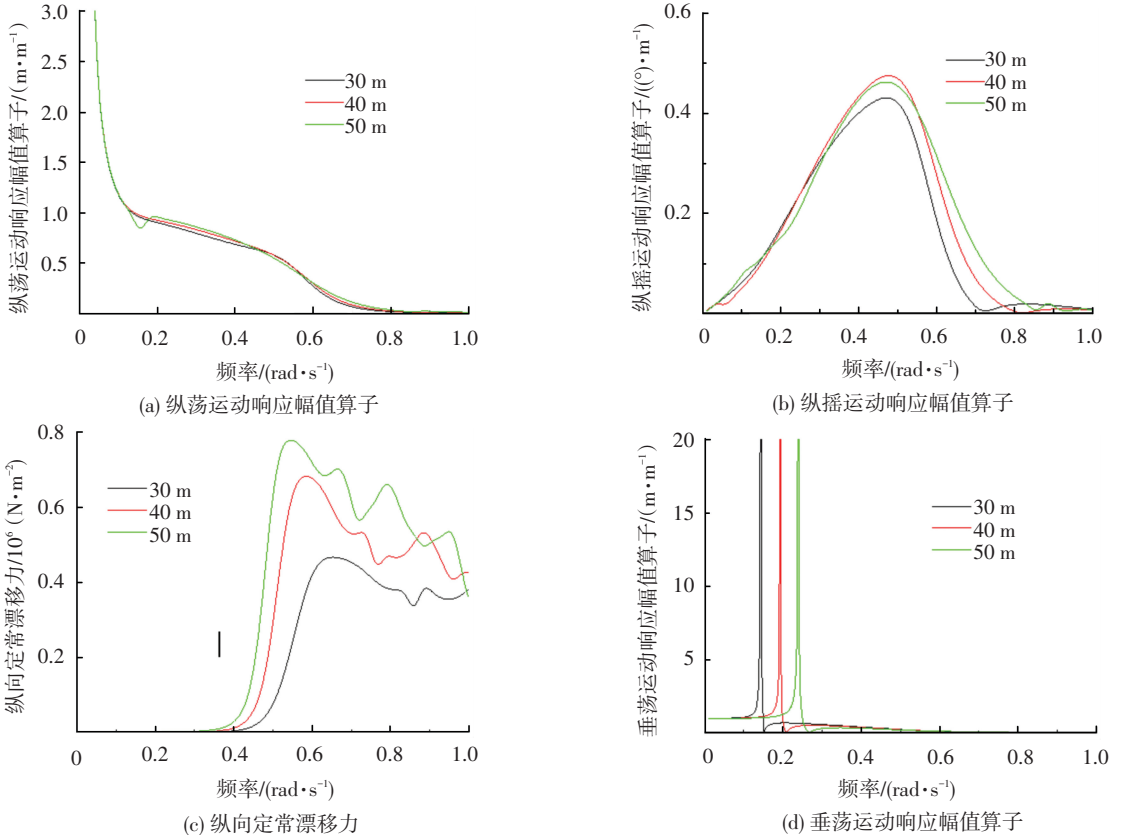


图 4 不同水线面半径的浮体模型纵荡、纵摇运动响应、纵荡平均漂移力和垂荡响应

3 新型对接棱台状 FPSO 浮体的设计方案和性能对比分析

3.1 新型对接棱台状浮体的垂荡运动响应

为了进一步定量地分析 α 、 R_w 与浮体垂荡运动响应的影响, 这里采用频域势流理论, 参考文献 [13–15], 对新型浮体所受波浪入射和绕射力进行推导, 得到工程近似估算公式为:

$$F_1 = \rho g A_w \xi e^{i\omega t} \left[1 - \frac{(kr_0)^2}{4} \right] e^{-kd(1+\delta)}, \quad (1)$$

$$F_D = -\xi e^{i\omega t} \left[1 - \frac{(kr_0)^2}{4} \right] e^{-kd} (\omega^2 A_{33} - i\omega B_{33}). \quad (2)$$

式中: $\delta = (R_B - R_w)/R_w$, $r_0 = (R_B + R_w)/2$; ω 为波浪频率; ξ 为波浪波幅; k 为波数; A_{33} 为垂荡附加质量; B_{33} 为垂荡阻尼; A_w 为浮体水线面面积. 此外, 针对新型浮体模型, 将由棱台底面和侧面产生的附加质量采用圆柱竖向附加质量理论值^[13]进行估算, 并且将外扩倾角引入可以得到用于工程的垂荡附加质量的估算公式为

$$A_{33} = \frac{1}{3} \rho A_B R_B + \left(\frac{1}{3} \rho A_B R_B - \frac{1}{3} \rho A_w R_w \right) \max(\cot \alpha, 1). \quad (3)$$

式中: A_B 为下底面面积; α 为浮体下倾角. 在此基础

上, 可以推得浮体垂荡运动响应 RAO 为

$$\frac{x_3}{\xi} = \frac{\left[1 - \frac{(kr_0)^2}{4} \right] e^{-kd} \sqrt{(\rho g A_w - \rho \omega^2 A_w z_0 - \omega^2 A_{33})^2 + (\omega B_{33})^2}}{\sqrt{(K_{33} - (M + A_{33}) \omega^2)^2 + (B_{33} \omega)^2}}. \quad (4)$$

式中: x_3 为浮体垂荡运动位移; K_{33} 为浮体垂荡静水回复刚度; $z_0 = d\delta$. 通过分析新型浮体的垂荡运动幅值响应 RAO 的估算式 (3), 可以求得垂荡运动 RAO 最小值对应的频率 $\omega_{\min}$ 为

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{\rho g A_w}{(\rho A_w z_0 + A_{33})}}. \quad (5)$$

进一步, 以 P-M 波浪谱为例, 如果在新型浮体设计过程中控制 $\omega_{\min}$ 略小于波浪谱的起始频率 ω_L , 那么可以保证垂荡运动 RAO 峰值频率远离波浪高能频带, 从而达到提高沙漏型浮体垂荡运动性能的目的.

$$\omega_{\min} = \sqrt{\frac{\rho g A_w}{(\rho A_w z_0 + A_{33})}} \approx \omega_L = \left(-\frac{1}{\pi T_z^4} \frac{(2\pi)^4}{\ln \mu} \right)^{\frac{1}{4}}. \quad (6)$$

3.2 新型对接棱台状浮体外形的设计准则

在设计初期, 首先, 需要根据业主要求可以确定 FPSO 的储油量、载重量、排水量、储油空间和上甲板面积, 从而可以确定新型浮体载重量 DWT、排

水量 Δ 、水线面以下排水体积 V_B 、总体积、水线面以上体积 V_T 和上甲板外接圆半径 R_T ; 其次, 结合上述分析结论, 通过调整水下浮体形状的两个参数水线面外接圆半径 R_W 和下倾角 α , 来实现对 FPSO 水动力性能的优化设计, 需要遵循的设计准则可以概括如下:

- 1) 遵循式 (6) 确定浮体外形参数, 从而保证垂荡运动响应极大值频率 (固有频率) 远离波浪能量峰值区域, 达到提高浮体垂荡运动性能的目的。
- 2) 根据浮体外形参数计算浮体初稳性高, 从而保证浮体初稳性满足稳性衡量标准。
- 3) 在满足上述 1) 和 2) 设计准则的基础上, 尽量设计具有较大下倾角的浮体外形, 从而保证在波谱高能频带范围内浮体具有较好的纵摇和纵荡运动性能以及遭受较小的波浪平均漂移力。
- 4) 在满足上述 1) 和 2) 设计准则的基础上, 尽量设计具有较小水线面半径的浮体外形, 从而保证在波谱高能频带范围内浮体遭受较小的波浪平均漂移力。

最后, 将整个分析流程概述如下: 根据 FPSO 的功用和性能, 确定新型浮体的 DWT、 Δ 、 V_B 、 V_T 和 R_T . 然后, 选择初始浮体下倾角 α 和初始水线面半径 R_W , 根据几何关系计算新型浮体所有外形参数. 根据初稳性浮体外形, 获得浮体初稳性高 GM, 判断是否满足稳性衡准. 如果“否”的话, 增大 R_W 进行循环计算, 直至稳性能够满足要求. 然后通过求解式 (5) 得到垂荡运动 RAO 最小值对应的频率 $\omega_{\min}$, 进一步计算波浪谱的起始频率 ω_L , 判断 $\omega_{\min}$ 是否略小于 ω_L . 如果“否”的话, 减小 α 重新循环计算. 直至满足稳性和垂荡运动性能要求, 此时设计完成, 可以得到新型浮体外形参数.

3.3 对接八角棱台状浮体的性能分析

以某八角棱柱状 FPSO 的主浮体模型的主尺度信息为参考, 以保证稳性和提高水动力性能为目标, 根据提出的设计准则和方案, 进行新型对接八角棱台状浮体的外形设计, 如图 5 所示.

通过势流边界元方法数值模拟得到的各浮体模型垂荡运动响应 RAO 如图 6 所示. 其中, 八角棱柱状 FPSO 为八角棱柱状 FPSO 的主浮体, 新型对接八角棱台状 FPSO 为新型对接八角棱台状浮体模型. 进一步, 通过谱分析法计算各种海况下两种模型的垂荡和纵摇运动平均值, 将其展示如表 1 所示.

从图 6 和表 1 中可以看出, 在波浪能量峰值频率段内, 八角棱柱状浮体模型的垂荡运动 RAO 具有

较大的峰值变化, 然而新型对接八角棱台状浮体模型的极大峰值位置则在波浪高能频率之外. 因此, 相比八角棱柱状浮体模型而言, 新型浮体模型在满载状态下, 遭遇任何海况都具有较好的垂荡运动性能. 八角棱柱状浮体模型在频率段 $0.2 < \omega < 0.4$ 内具有极大的纵摇 RAO 峰值, 所以在任何海况下新型浮体模型的纵摇性能都要优于八角棱柱状浮体模型.

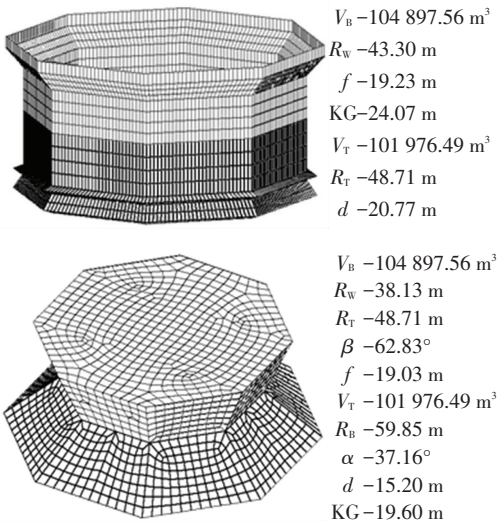


图 5 八角棱柱状和新型对接八角棱台状 FPSO 浮体模型和主尺度信息

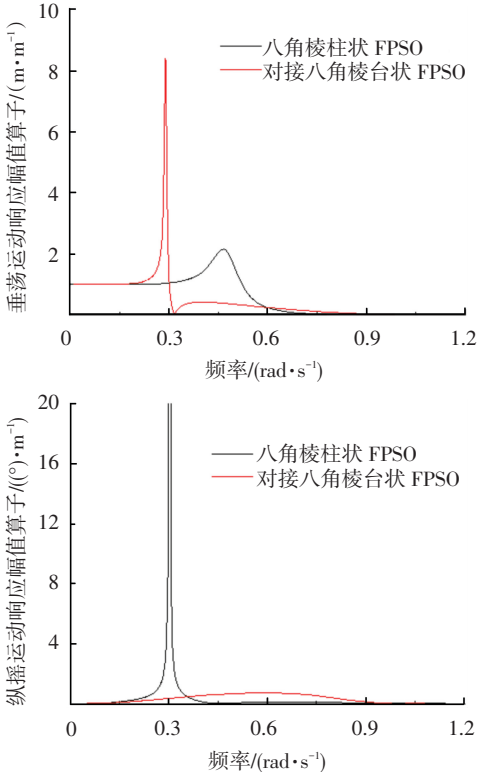


图 6 棱柱状和对接棱台状浮体模型的垂荡和纵摇运动 RAO

表 1 棱柱状和对接棱台状浮体模型在各海况作用下的垂荡和纵摇运动响应

浮体模型	工作海况的垂荡 运动平均值/m	工作海况的纵摇 运动平均值/(°)	自存海况垂荡 运动平均值/m	自存海况纵摇 运动平均值/(°)
八角棱柱型	2.658	1.660	5.913	17.873
新型对接棱台状	0.715	0.735	2.294	2.866

最后,将计算得到的完整大倾角静稳性曲线和稳性特征参数展示如图 7、表 2 所示。从图 7 可看出,与八角棱柱状浮体模型相比,新型浮体模型的初稳性高在满足 IMO 稳性规定的前提下相对较小。随着倾角增大,新型浮体模型的回复力矩迅速增加,最大复原力矩和稳性消失角都明显大于八角棱柱状浮体模型。此外,根据静稳性曲线的形状,可以得出新型浮体模型具有较大的曲线面积,并且能够承受相对更大的极限风倾力矩。这说明新型浮体模型在具有较大纵(横)摇固有周期的前提下,同样具有较大的极限回复力矩,能够抵御更大的极限风倾力矩。因此,可以认为新型浮体模型的静稳性曲线形状较为

理想,具有良好的完整大倾角稳性。

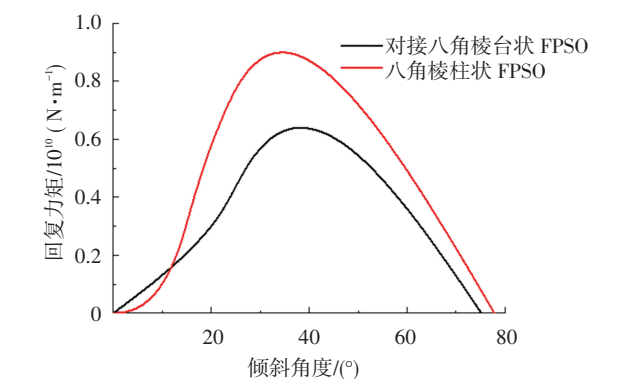


图 7 棱柱状和对接棱台状浮体模型的静稳性曲线和特征参数

表 2 棱柱状和对接棱台状浮体模型的特征参数

模型	初稳性高/m	最大复原力矩/ 10 ⁹ (N·m ⁻¹)	极限静倾 角/(°)	稳性消失 角/(°)	曲线面积/ 10 ¹¹ (N·m ⁻¹)	极限风倾力矩/ 10 ⁹ (N·m ⁻¹)
棱柱型模型	7.70	6.40	38.00	75.15	2.67	2.81
新型模型	0.30	9.00	34.00	77.82	3.86	4.02

4 结 语

本文针对新型对接棱台状 FPSO 外形特点,建立浮体水动力模型.采用势流边界元方法研究了不同下倾角和水线面外接圆半径对浮体运动性能的影响,制定出基于垂荡运动性能的浮体外形设计准则和方案,进一步将新概念与传统模型进行性能对比分析.通过研究发现:新型对接棱台状浮体外形设计可以使得垂荡运动 RAO 峰值远离波谱高能频带,并且能够大幅度地增大纵摇附加质量和阻尼,从而有效地提高 FPSO 的垂荡和纵摇运动性能.尤其,在波浪作用下新型浮体模型垂荡运动幅值至少降为 1/2 以下.此外,新型浮体模型在具有较大纵摇固有周期的前提下,具有较大的极限回复力矩,能够抵御更大的极限风倾力矩。

因此,本文提出的新型浮式主体设计方案是有效合理的,能够显著地提高 FPSO 的垂荡、纵摇(横)运动性能和稳性,从而可以大幅度地提高 FPSO 在工作工况下的作业效率和自存工况下的安全性,为深水油气开发提供一种有效的新型工程装备和解决方案。

参考文献

[1] SHIMAMURA Y. FPSO/FSO: state of the art [J]. Journal of Marine Science and Technology, 2002, 7 (2): 59-70.
[2] MA Yu, HU Zhiqiang, QU Yan, et al. Research on the characteristics and fundamental mechanism of a newly discovered phenomenon of a single moored FPSO in the South China Sea [J]. Ocean Engineering, 2013, 59 (1): 274-284.

[3] 马延德. 新型 FPSO 发展趋势及设计[C]//中国海洋油气国际峰会 2010 论文集.北京:中国石化工程研究会:2010: 1-30.
[4] 王天英, 冯永训. 新概念 FPSO 最新研究进展[J]. 船海工程, 2011, 40(5): 184-188.
[5] 吴家鸣. FPSO 的特点与现状[J]. 船舶工程, 2012, 34(Z2): 1-4.
[6] 黄一, 王文华, 姚宇鑫, 等. 沙漏型海洋工程浮式结构物:ZL201220526277.4 [P]. 2013-05-08.
[7] 黄一, 王文华, 姚宇鑫, 等. 对接圆台式浮式生产储油系统:ZL201220526712.3 [P]. 2013-04-10.
[8] 黄一, 王文华, 姚宇鑫, 等. 对接八角棱台式浮式生产储油系统:ZL201220526306.7 [P]. 2013-04-03.
[9] 姚宇鑫, 王文华, 黄一. 新型沙漏式浮式生产储油系统的概念设计分析[J]. 上海交通大学学报. 2014, 48(4): 558-564.
[10] 黄一, 王文华, 姚宇鑫, 等. 一种浮式平台及其装卸过程中保持浮态和稳性控制方法:ZL201410106561.X [P]. 2014-06-04.
[11] 李彬彬. 新型深吃水多立柱平台的水动力与运动响应研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
[12] 刘应中, 缪国平. 船舶在波浪上的运动理论[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
[13] SALVESEN N, TUCK E O, FALTINSEN O M. Ship motions and sea loads [J]. Trans. SNAME, 1970, 78(8): 250-287.
[14] BANERJEE K, BUTTERFIELD R. Boundary element methods in engineering science [M]. London: McGraw Hill, 1981.
[15] FALTINSEN O M. Sea loads on ships and offshore structures [M]. UK: Cambridge University Press, 1990.

(编辑 张 红)