

某海域极端环境下 15 万吨级 FPSO 波浪荷载数值研究

刘中柏¹, 高宁波^{2*}, 唐鑫彤³, 徐业峻¹

(1. 中海油能源发展股份有限公司采油深圳分公司, 广东 深圳 518052;
2. 武汉船舶职业技术学院, 武汉 430050; 3. 中国船级社海工技术中心, 天津 300457)

摘要: 目的 评估在役 15 万吨级 FPSO 在某海域百年一遇极端波浪作用下典型横剖面的水动力特性, 进而得到 FPSO 的极值荷载, 作为 FPSO 返坞改造的关键控制参数。方法 基于国产自主三维频域线性势流软件 COMPASS-WALCS, 建立 15 万吨级 FPSO 湿表面网格模型, 根据三维绕射-辐射理论, 计算湿表面上的水动力荷载, 将每个绕射单元上的水动压力直接映射到结构模型上进行计算。采用谱分析方法对百年一遇海况进行分析, 得到短期运动极值响应。对响应幅值算子 (RAO) 和波能谱密度进行谱分析, 得到极端波浪下的响应谱, 进而得到浮体运动和波浪荷载短期预报各种统计值, 利用统计方法求得短期响应的最大值。结果 计算了船中部 Fr143 横剖面的载荷极值, 即垂向弯矩、垂向剪力、剖面型心加速度等, 发现船舶迎浪时弯矩值最大, 随着浪向角增大, 弯矩值逐渐减小, 剖面垂向剪力则随着浪向角增大逐渐增大。结论 FPSO 在极端波浪作用下, 其大迎浪角条件下荷载更加危险, 需要给予格外关注。

关键词: 浮式生产储卸油装置; 势流理论; 极端波浪; 响应幅值算子; 水平弯矩; 加速度

中图分类号: TG630 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9242(2024)04-0109-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.04.013

Wave Loads of a 150 000-ton FPSO in Extreme Environment of a Sea Area

LIU Zhongbai¹, GAO Ningbo^{2*}, TANG Xintong³, XU Yejun¹

(1. CNOOC Energy Technology & Service-Oil Production Services Co., Guangdong Shenzhen 518052, China;
2. Wuhan Institute of Shipbuilding Technology, Wuhan 430050, China; 3. China Classification Society
Ocean Engineering Technology Center, Tianjin 300457, China)

ABSTRACT: The work aims to evaluate the hydrodynamic characteristics of a typical cross section of a 150 000-ton FPSO under extreme wave conditions, occurring in a once-in-a-century wave climate in the South China Sea to obtain the extreme load imposed on the FPSO and use it as a critical control parameter for the FPSO's dry-dock retrofit. Based on the domestically developed 3D frequency-domain linear potential flow software COMPASS-WALCS, a wet surface grid model of the 150 000-ton FPSO was constructed. The three-dimensional diffraction-radiation theory was used to calculate the hydrodynamic loads on wet

收稿日期: 2024-03-05; 修订日期: 2024-04-01

Received: 2024-03-05; Revised: 2024-04-01

基金项目: 中国博士后科学基金 (2017M612541)

Fund: China Postdoctoral Science Foundation (2017M612541)

引文格式: 刘中柏, 高宁波, 唐鑫彤, 等. 某海域极端环境下 15w 吨级 FPSO 波浪荷载数值研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(4): 109-115.
LIU Zhongbai, GAO Ningbo, TANG Xintong, et al. Wave Loads of a 150,000-ton FPSO in Extreme Environment of a Sea Area[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(4): 109-115.

*通信作者 (Corresponding author)

surface and the water pressure results on each diffraction unit were directly mapped onto the structural model for computation. Spectral analysis was employed to analyze the once-in-a-century wave climate resulting in short-term extreme motion responses. By analyzing the response amplitude operator (RAO) and wave energy spectral density, the response spectrum under extreme waves was obtained to predict various statistical values for the short-term vessel motion and wave loads. Statistical method was used to determine the maximum short-term response. The extreme load values of Fr143 cross section in the middle of the ship, namely vertical bending moment, vertical shear force and profile center acceleration, were calculated. It was found that the bending moment of the ship was the largest when facing the wave, and the bending moment gradually decreased with the increase of the wave angle, while the vertical shear force of the cross section gradually increased with the increase of the wave angle. It can be concluded that the FPSO experiences more hazardous loads when facing extreme waves at large wave angles which require special attention and consideration.

KEY WORDS: FPSO; potential theory; extreme wave; RAO; horizontal bending moment; acceleration

海上油气开采是海洋经济的重要组成部分，其依赖于各种海洋平台完成油气钻探和生产作业。为满足不同水深环境下海洋油气作业活动，人类发明了包括重力式、漂浮式等各种各样的海洋平台，如导管架平台、浮式生产储卸油轮（FPSO）、半潜式平台（SEMI）、张力腿式平台（TLP）等。

FPSO 是集海上油气生产、储存、外输、生活、动力于一体的海洋结构物，是我国海上油气作业的主要平台结构。FPSO 主要采用单点系泊系统进行定位，具有特别突出的风标效应，使得 FPSO 始终保持迎浪方向，处于最小受力状态。FPSO 主要特点是建造周期短、投资低，具有良好的经济效益；甲板面积宽阔，承重能力与抗风浪环境能力强，便于生产设备布置；储油能力大，船上原油可定期、安全、快速地通过穿梭油轮运输到岸上；应用灵活，移动方便，可重复使用，适合于远离海岸的深海、浅海及边际油田的开发^[1-3]。

国内外学者针对 FPSO 运动性能进行了大量的研究工作。马延德等^[4]应用 FPSO 作业海域波浪短期统计特征长期分布计算法、黏性阻力和风浪中阻力增加计算以及运动与荷载的频域 Green 函数计算方法，提供了 FPSO 迁移作业过程中波浪荷载预报方法。陈曦^[5]基于高阶面元法，研究了考虑甲板上浪情况下的 FPSO 运动响应。张若瑜等^[6]针对浅水油气田作业的软刚臂单点系泊 FPSO 二阶波浪力的浅水效应现象进行了研究。Tang 等^[7]研究了极端波浪作用下单点系泊 FPSO 受到的一阶与二阶波浪力。Sanchez-Mondragon 等^[8]基于试验与数值方法研究了单点系泊 FPSO 在波浪慢漂作用下的艘摇。李辉等^[9]研究了中国某海域深水环境下 FPSO 波浪碎击荷载，提出 FPSO 船体受到波浪碎击荷载最大值出现在水面附近，位于船体中线，且波浪碎击峰值荷载增加幅度小于波高增加幅度。张之阳等^[10]基于时域方法，研究了系泊缆水动力系数和波浪参数对 FPSO 运动的影响。韩熠等^[11]研究了浅水条件下 15 万吨级 FPSO 波浪荷载与常规水深

条件下的异同，发现浅水条件下，波长与 FPSO 船长比较相近时，船舶的运动响应最大。季林帅等^[12]基于势流软件 AQWA 研究了 FPSO 在不同装载工况与不同入射角下的水动力性能。杨玥^[13]针对西非涌浪环境下多点系泊 30 万吨级 FPSO 受到的波浪荷载与运动响应特性开展了研究，重点关注涌浪方向对 FPSO 运动加速度、幅值、波浪弯矩及剪力等的影响。袁洪涛等^[14]研究了 500 年一遇极端恶劣海况下，15 万吨级深水单点系泊 FPSO 运动响应特性和系泊缆受力情况，考虑到 FPSO 需长时间驻点作业，有更大概率遭到极端波浪。邓建伟等^[15]实验研究了大波陡条件下 FPSO 甲板上浪的水流动及上浪荷载特性，大波陡下的甲板上浪往往呈典型的“翻卷式”形态，能够引起上部结构强烈的冲击荷载。Sun 等^[16]研究了不同波浪谱条件下 FPSO 的运动响应。Hu 等^[17]采用 CFD 求解器研究了极端波浪对单点系泊 FPSO 的影响。Park 等^[18]试验研究了 FPSO 在迎浪作用下受到的波浪碎击压力。Ha 等^[19]研究了随机波作用下 FPSO 甲板上浪问题。Gustavo 等^[20]基于神经网络算法，研究了不同吃水深度下 FPSO 的运动响应特性。项宇琪等^[21]基于三维势流软件 Wadam 开展了 FPSO 船型优化，发现减小艉柱倾角能够一定程度上降低 FPSO 纵摇和垂荡运动。谷家杨等^[22]研究了 FPSO 典型舱段在垂向弯矩和 30°艏斜浪下的极限承载能力。唐宇等^[23]研究了环境烈度因子在 FPSO 船体梁强度评估中的应用。青兆熹等^[24]研究了迎浪状态下 FPSO 的运动性能和结构强度，计算得到了规则波作用下压载、半载、满载等 3 种工况下的响应幅值算子，并对加速度及剖面荷载进行了短期预报。

我国现行大量 FPSO 均服役相对较长时间，部分 FPSO 需返坞升级改造，同时考虑到未来 FPSO 作业环境的改变，需要对返坞 FPSO 进行相应水动力方面的研究工作，以确保升级改造后 FPSO 的性能满足入级及作业要求。本研究以“海洋石油 111”FPSO 为研究对象，重点研究升级改造后其在某海域极端

海况环境下的波浪荷载及运动响应特性, 计算不同控制荷载(包括弯矩、剪力、加速度等)的环境烈度因子, 为后续类似在役 FPSO 升级改造提供参考借鉴。

1 “海洋石油 111”号 FPSO 基本参数及环境条件

“海洋石油 111” FPSO 是一座 15 万吨级单底双壳结构浮式生产储卸油装置, 采用单点系泊方式, 船舶总长 262.2 m, 型宽 46 m, 设计吃水 17.0 m, 如图 1 所示。改造前服务于中国南海东部番禺油田, 其具体主尺度见表 1。本研究主要针对 FPSO 满载工况开展研究工作, 满载工况下的参数见表 2, 沿船长的质量分布情况如图 2 所示。



图 1 “海洋石油 111”号 FPSO 实船
Fig.1 "Marine Petroleum 111" FPSO

表 1 “海洋石油 111”号 FPSO 主尺度

Tab.1 Main scale of "Marine Petroleum 111" FPSO

总长/m	垂线间长/m	型宽/m	型深/m	设计吃水/m	方形系数 C_b
262.0	250.0	46.0	24.6	17.0	0.932

表 2 FPSO 满载工况参数
Tab.2 Full load condition parameter of FPSO

参数	平台质量/(10 ⁴ t)	平均吃水/m	艘倾/m	艉吃水/m	艘吃水/m	重心位置/m			回转半径/m		
						X_{cg}	Y_{cg}	Z_{cg}	R_{xx}	R_{yy}	R_{zz}
LC01	18.24	17.1	-1.13	17.65	16.52	123.4	0.006	14.034	13.56	63.79	64.95

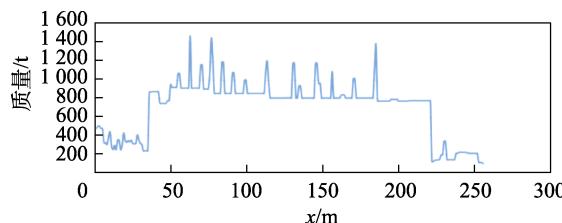


图 2 满载工况 LC01 条件下 FPSO 质量分布
Fig.2 Mass distribution of FPSO under full load condition LC01

“海洋石油 111”号 FPSO 升级改造后, 拟作业区域水深为 105 m, 采用百年一遇环境条件对作业区 FPSO 进行荷载极值预报。短期预报分析中采用 JONSWAP 谱, 其表达式为:

$$S(f) = \alpha H_{1/3}^2 \frac{1}{T_p^4 f^5} \exp\left[-\frac{5}{4}\left(\frac{1}{T_p f}\right)^4\right] \gamma \exp\left[-\frac{(f/f_p - 1)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

式中: $\alpha=0.0624/[0.23+0.0336\gamma-0.185(1.9+\gamma)^{-1}]$; $H_{1/3}$ 与 T_p 分别为有义波高和谱峰周期; γ 为谱峰因子, 此处取值为 3.3; σ 为谱形参数, $f \leq f_p$ 时, $\sigma=0.07$, $f > f_p$ 时, $\sigma=0.00$ 。百年一遇波浪的要素中, 波高的最大值和有义值分别为 22、13.1 m, 周期的最大值和有义值分别为 16.6、14.2 s。

2 数值研究

2.1 数值模型

本研究采用中国船级社自主研发的三维频域线性势流软件 COMPASS-WALCS 进行数值模拟计算。

根据三维绕射-辐射理论, 计算了湿表面上的水动力荷载, 每个绕射单元上的水动压力结果可直接映射到结构模型上进行计算。采用谱分析方法对一系列不规则海况进行了分析, 得到运动 3 h 短期响应的极值。对响应幅值算子 RAO(w) 和波能谱密度 $S_w(w)$ 采用谱分析的方法计算得到不规则波中波浪荷载的响应谱, 进而可以得到浮体运动和波浪荷载短期预报的各种统计值, 最终得到短期响应的最大值。COMPASS-WALCS 计算采用如图 3a 所示六自由度坐标系, 波浪作用方向见图 3b。计算频率为 0.05~2.0 rad/s, 间隔为 0.05 rad/s; 浪向角为 0°~360°, 间隔为 15°; 横摇阻尼系数取值为 0.08。“海洋石油 111”号 FPSO 数值计算湿表面网格模型如图 4 所示, 在艘部进行了局部加密。

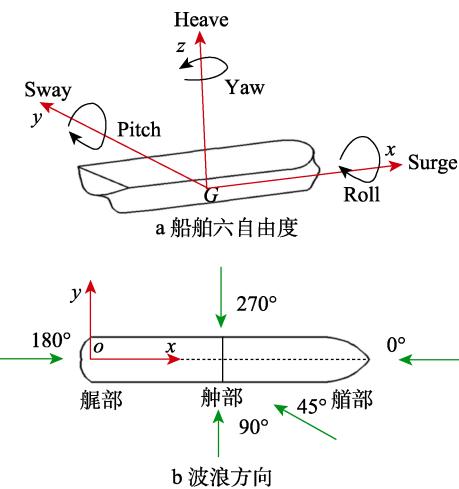


图 3 船舶六自由度运动与波浪方向
Fig.3 Ship's 6 DoF motion and wave direction: a) six degrees of freedom for ships; b) wave direction

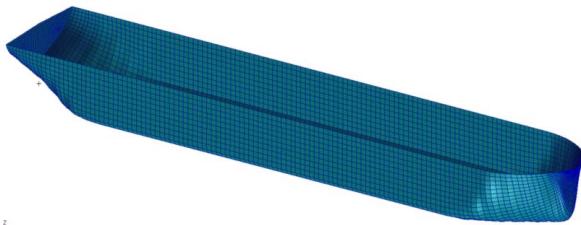


图 4 FPSO 湿表面网格
Fig.4 Wet surface grid of FPSO

2.2 环境烈度因子

根据中国船级社《海上浮动设施入级规范》^[25], 为合理反映浮式结构物在不同海域和不同操作模式下的动荷载分量, 引入环境烈度因子, 以体现浮式结构物的设计环境条件相比于北大西洋无限航区的恶劣程度。环境烈度因子根据浮式结构物波浪响应的直接预报结果计算得到, 如式(2)所示。

$$\beta = \frac{L_s}{L_u} \quad (2)$$

式中: L_s 为不同操作模式下的波浪响应包络值, 其计算式根据浮式结构物的海况资料选取合适的海浪谱, 之后根据响应 RAO 进行极值预报; L_u 是基于北大西洋无限航区海况条件下的波浪响应包络值, 对应重现期为 25 a。根据我国规范要求, 环境烈度因子不能低于 0.5。

2.3 计算工况

本次计算选取船中附近 Fr143 (距船尾 143 m) 处横剖面作为动荷载评估位置, 压力计算点和加速度计算点根据《海上浮动设施入级规范》^[25]进行选取。作业状态下, 船中区域用于构件尺寸评估的动荷载工况见表 3。

表 3 作业状态下船中区域用于构件尺寸评估的动荷载工况

Tab.3 Dynamic load conditions for evaluating dimensions of components in ship's midship section during operational status

动荷载工况	控制荷载	波浪方向
1	M_{wv+}	迎浪/随浪
	M_{wv-}	
2	$a_{v\pm}$	由水动力分析直接得到
3	$a_{l\pm}$	由水动力分析直接得到
4a	$M_{WV-h\pm}$	由水动力分析直接得到
4b	$M_{WV-h\pm}$	由水动力分析直接得到
5a	$a_{t\pm}$	由水动力分析直接得到
5b	$a_{t\pm}$	由水动力分析直接得到
6a	$P_{ctr\pm}$	由水动力分析直接得到
6b	$P_{ctr\pm}$	由水动力分析直接得到
7a	$P_{wl\pm}$	由水动力分析直接得到
7b	$P_{wl\pm}$	由水动力分析直接得到

2.4 结果与讨论

动荷载响应传递函数 RAO 在 0°~180°浪向角的结果如图 5~9 所示, 包括垂向弯矩、水平弯矩、垂向剪力、剖面纵向加速度、剖面横向加速度、剖面垂向

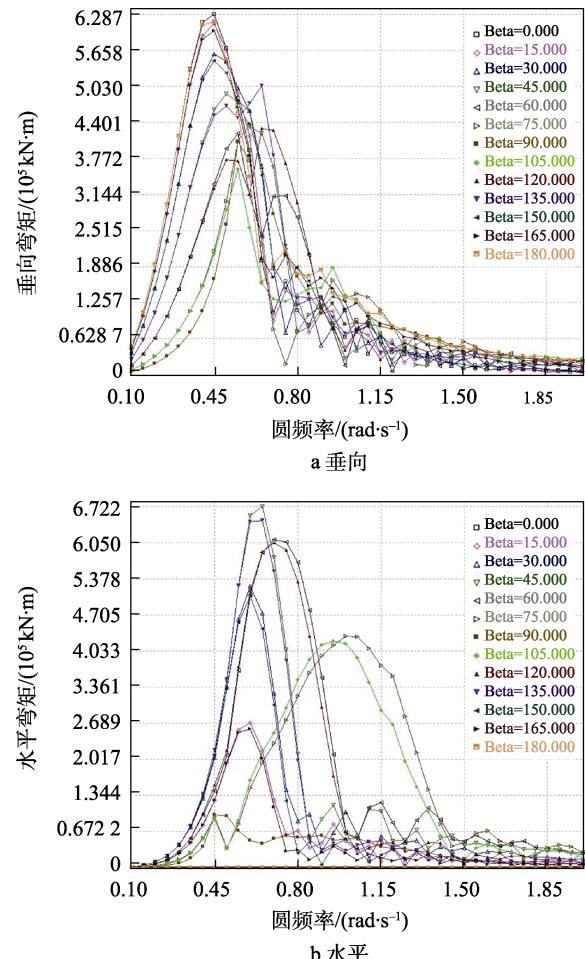


图 5 LC01 工况下横剖面 Fr143 处弯矩 RAO
Fig.5 Bending moment RAO at cross section Fr143 under LC01 condition: a) vertical; b) horizontal

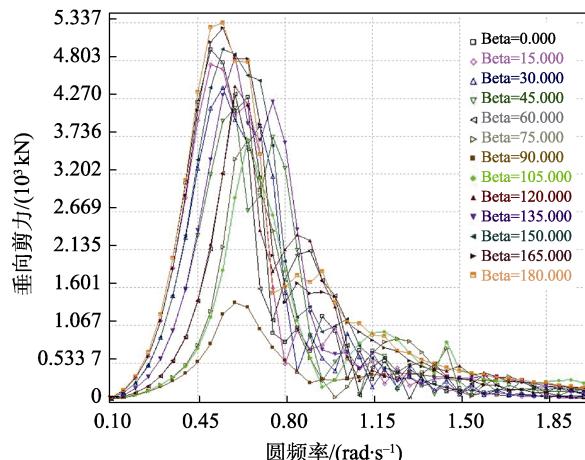


图 6 LC01 工况下横剖面 Fr143 处垂向剪力 RAO
Fig.6 Vertical shear force RAO at cross section Fr143 under LC01 condition

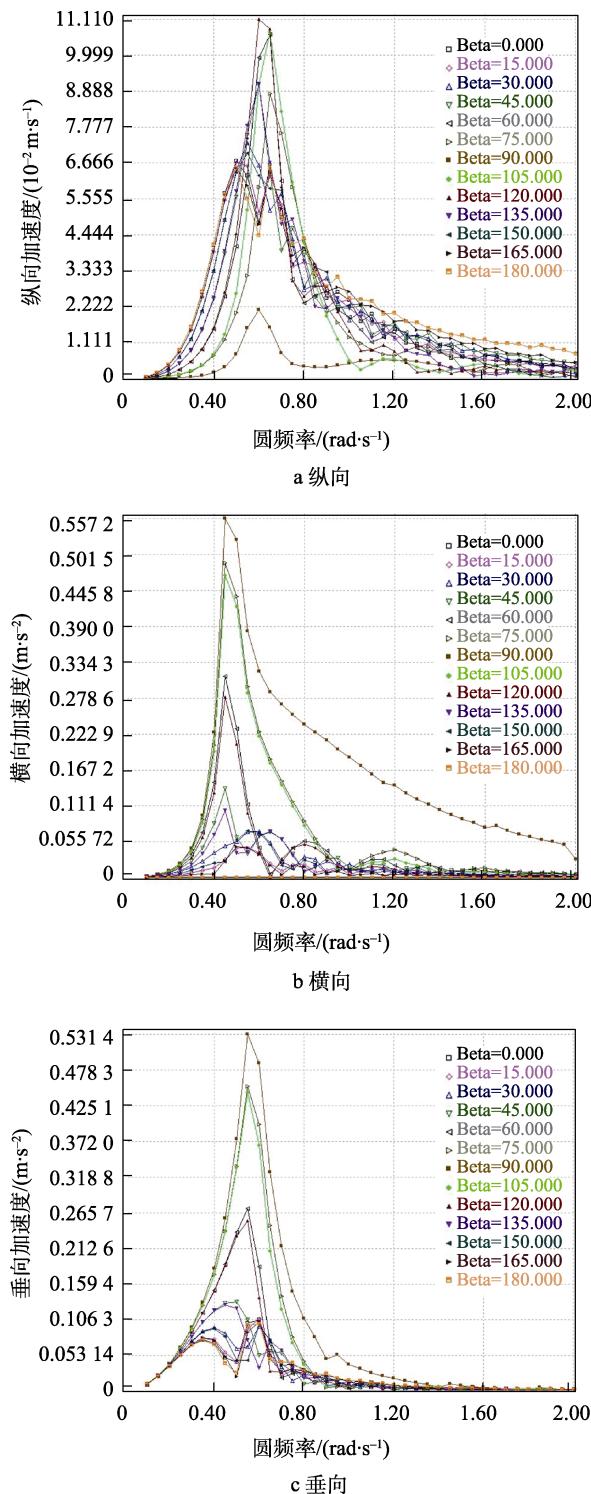


图 7 LC01 工况下横剖面 Fr143 处加速度 RAO
Fig.7 Acceleration RAO at cross section Fr143 under LC01 condition: a) longitudinal; b) lateral; c) vertical

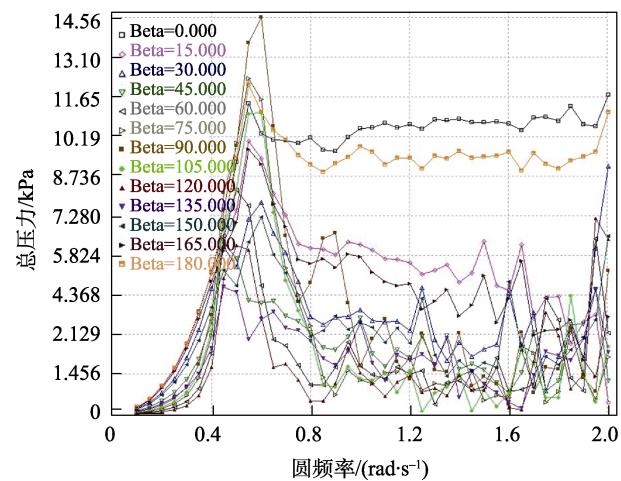


图 8 LC01 工况下 Fr143 处左水线处压力 RAO
Fig.8 Pressure at left waterline RAO at cross section Fr143 under LC01 condition

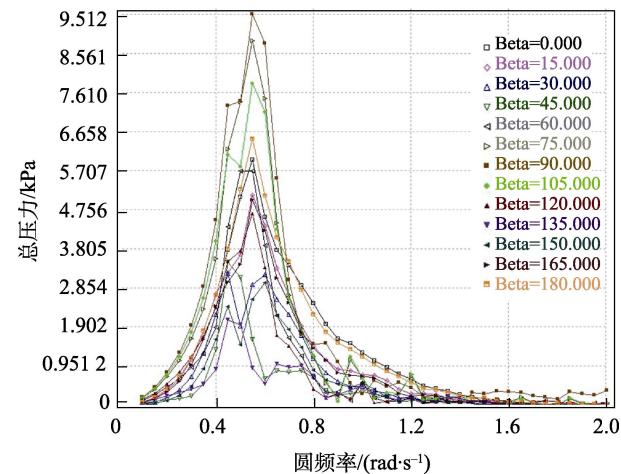


图 9 LC01 工况下 Fr143 处左舷侧垂向与底面水平线交汇处压力 RAO
Fig.9 Pressure at intersection of left vertical direction with bottom horizontal line RAO at cross section Fr143 under LC01 condition

加速度、左水线处压力、左舷侧垂向与底面水平线交汇处压力等。

根据长短期预报结果, 求解得到剖面 Fr143 处 LC01 工况下烈度因子, 见表 4。

通过环境烈度因子和规范荷载, 求解动荷载包络值, 进而根据荷载 RAO 得到设计波波幅、相位、频率及对应的浪向角, 在 COMPASS-WALCS-BASIC 中输入设计波参数, 得到荷载极值 (荷载极值不能大于动荷载包络值), 见表 5。

表 4 环境烈度因子
Tab.4 Environmental severity factor

动荷载工况	剖面整体响应					剖面型心加速度		
	M_{V+}	M_{V-}	Q_{V+}	Q_{V-}	M_h	A_l	A_t	A_v
Fr143	1.332	1.332	1.382	1.382	1.084	1.212	1.202	0.949

表5 工况 LC01 下 Fr143 剖面部分荷载极值
Tab.5 Extreme load value of cross section Fr143 under operating condition LC01

浪向角/(°)	剖面整体响应		剖面型心加速度		
	$M_{ww}/(10^6 \text{ kN}\cdot\text{m})$	$Q_{ww}/(10^3 \text{ kN})$	$A_l/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$A_t/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	$A_v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$
0	6.4	1.3	0.104	0	-0.477
0	-6.5	-1.3	-0.106	0	0.484
75	-2.7	12	0.035	1.523	3.044
0	2.6	54	0.998	0	-0.642
75	-1.8	4.8	-0.024	4.239	2.12
0	-6.5	-54	0.998	0	3.044

3 结论

本文采用三维势流软件 COMPASS-WALCS-BASIC 软件, 基于频域方法得到了在役 FPSO 返坞升级改造过程中满载工况、不同浪向角下船中位置处剖面荷载 RAO, 结合作业海况资料, 对 FPSO 动荷载工况进行长期极值预报, 主要结论如下:

- 1) 迎浪时, 船中横剖面垂向弯矩最大, 且随着浪向角的增大呈逐渐减小趋势。
- 2) 船中横剖面垂向剪力与浪向角正相关, 在进行改造结构分析时需要重点考虑大浪向角工况下垂向剪力诱发的局部强度不足问题。
- 3) 在役 FPSO 进行升级改造需要进行水动力相关分析, 以大浪向角(超过 75°)下预报极值荷载作为结构分析控制荷载是合适的。

参考文献:

- [1] 吴晓源. 大型 FPSO 船舶结构疲劳寿命预报方法研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.
WU X Y. Study on the Fatigue Life Prediction Methods for FPSO Structures[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [2] 魏跃峰. 浮式钻井生产储油轮(FDPSO)水动力性能及概念设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2012.
WEI Y F. Study on the Hydrodynamics Performance and Concept Design of FDPSO[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2012.
- [3] 钱佳煜. 深水 FPSO 及其外输系统耦合水动力性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
QIAN J Y. Study on the Coupled Hydrodynamic Performance of Deepwater FPSO Offloading System[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [4] 马延德, 关伟姝, 孙德壮, 等. 浮式生产储油船(FPSO)迁航性能计算[J]. 中国海洋平台, 2005, 20(5): 35-38.
MA Y D, GUAN W S, SUN D Z, et al. Calculation of Transition Performance for a Fpsos[J]. China Offshore Platform, 2005, 20(5): 35-38.
- [5] 陈曦. FPSO 在波浪中的运动响应的时域模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [6] CHEN X. Time Domain Simulation of FPSO Motion in Waves[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013.
- [7] 张若瑜, 唐友刚, 刘成义, 等. 考虑波浪荷载浅水效应的 FPSO 水深吃水比临界值[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(1): 74-79.
ZHANG R Y, TANG Y G, LIU C Y, et al. FPSO Critical Values of Water Depth Draft Ratio under Wave Force Considering the Shallow Water Effect[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2017, 38(1): 74-79.
- [8] TANG Y G, LI Y, WANG B, et al. Dynamic Analysis of Turret-Moored FPSO System in Freak Wave[J]. China Ocean Engineering, 2016, 30(4): 521-534.
- [9] SANCHEZ-MONDRAGON J, VÁZQUEZ-HERNÁNDEZ A O, CHO S K, et al. Yaw Motion Analysis of a FPSO Turret Mooring System under Wave Drift Forces[J]. Applied Ocean Research, 2018, 74: 170-187.
- [10] 李辉, 谢文会, 吕柏呈, 等. 中国南海深水环境 FPSO 波浪砰击荷载研究[J]. 中国海上油气, 2023, 35(6): 155-161.
LI H, XIE W H, LYU B C, et al. Research on Wave Slamming Load on FPSO in Deep-Water Environment of the South China Sea[J]. China Offshore Oil and Gas, 2023, 35(6): 155-161.
- [11] 张之阳, 陈祥宇, 吴林艳, 等. 系泊缆水动力系数和波浪参数对 FPSO 运动的影响[J]. 浙江海洋大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 524-533.
ZHANG Z Y, CHEN X Y, WU L Y, et al. Effects of Mooring Line Hydrodynamic Coefficients and Wave Parameters on the Floating Production Storage and Offloading Motions[J]. Journal of Zhejiang Ocean University (Natural Science), 2023, 42(6): 524-533.
- [12] 韩熠, 杨辉, 刘波, 等. 浅水条件下 15 万吨级 FPSO 波浪载荷与运动预报分析[J]. 船舶标准化工程师, 2019, 52(2): 21-26.
HAN Y, YANG H, LIU B, et al. Wave Load and Motion Prediction Analysis of 150 000 t FPSO in Shallow Water[J]. Ship Standardization Engineer, 2019, 52(2): 21-26.
- [13] 季林帅, 嵇春艳, 季丽华. 规则波中 FPSO 的水动力性能分析[J]. 中国海洋平台, 2017, 32(5): 75-81.
JI L S, JI C Y, JI L H. Analysis of FPSO Hydrodynamic Performance in Regular Wave[J]. China Offshore Platform, 2017, 32(5): 75-81.

- [13] 杨玥, 王璞. 西非海域环境条件下 FPSO 运动及载荷响应特性研究[J]. 船舶, 2015, 26(3): 21-27.
YANG Y, WANG P. Investigation on Wave-Induced Motion and Load Response Performance of FPSO in Offshore West Africa[J]. Ship & Boat, 2015, 26(3): 21-27.
- [14] 袁洪涛, 曾骥, 莫建, 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, 29(2): 108-113.
YUAN H T, ZENG J, MO J, et al. Single-Point Mooring FPSO Responses Analysis in Extreme Sea Conditions[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 29(2): 108-113.
- [15] 邓建伟, 郭孝先, 杨建民, 等. 大波陡条件下 FPSO 上浪及其载荷特征的试验[J]. 船舶工程, 2021, 43(6): 128-134.
DENG J W, GUO X X, YANG J M, et al. Experimental Investigation on Flow and Load Characteristics of Green Water Onto FPSO under Large Wave Steepness[J]. Ship Engineering, 2021, 43(6): 128-134.
- [16] SUN L, YANG X Q, BU S X, et al. Analysis of FPSO Motion Response under Different Wave Spectra[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(7): 1467.
- [17] HU Z Z, YAN S Q, GREAVES D, et al. Investigation of Interaction between Extreme Waves and a Moored FPSO Using FNPT and CFD Solvers[J]. Ocean Engineering, 2020, 206: 107353.
- [18] PARK D M, KWON Y J, NAM H S, et al. An Experimental Study of Wave Impact Pressure on an FPSO Bow under Head Sea Conditions[J]. Ocean Engineering, 2022, 249: 110993.
- [19] HA Y J, KIM K H, NAM B W, et al. Experimental Study of Characteristics of Sidewall Green Water Event for a Ship-Type FPSO under Irregular Wave Conditions[J]. Ocean Engineering, 2024, 296: 116876.
- [20] BISINOTTO G A, SPARANO J V, SIMOS A N, et al. Sea State Estimation Based on the Motion Data of a Moored FPSO Using Neural Networks: An Evaluation with Multiple Draft Conditions[J]. Ocean Engineering, 2023, 276: 114235.
- [21] 项宇琪, 刘亚东, 陈超. 适应南海海况的 FPSO 系泊系统设计与运动响应[J]. 中国海洋平台, 2023, 38(2): 50-56.
XIANG Y Q, LIU Y D, CHEN C. Mooring System Design and Motion Response of FPSO Suitable for the South China Sea Conditions[J]. China Offshore Platform, 2023, 38(2): 50-56.
- [22] 谷家扬, 冯湖川, 渠基顺, 等. FPSO 典型舱段极限强度[J]. 中国海洋平台, 2021, 36(6): 20-25.
GU J Y, FENG H C, QU J S, et al. Ultimate Strength of Typical Tank of FPSO[J]. China Offshore Platform, 2021, 36(6): 20-25.
- [23] 唐宇, 任慧龙, 邱伟强, 等. 环境烈度因子在 FPSO 船体梁强度评估中的应用[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(19): 34-39.
TANG Y, REN H L, QIU W Q, et al. The Application of Environmental Severity Factor on Hull Girder Strength Evaluation of FPSO[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(19): 34-39.
- [24] 青兆熹, 卜佳, 陈武华. 迎浪状态下内转塔式 FPSO 船舶运动的短期预报[J]. 中国海洋平台, 2017, 32(2): 88-94.
QING Z X, BU J, CHEN W H. Short-Term Prediction of Internal Turret FPSO Motion in Head Waves[J]. China Offshore Platform, 2017, 32(2): 88-94.
- [25] 中国船级社. 海上浮动设施入级规范[K]. 北京: 中国船级社, 2023.
China Classification Society. Specification for Classification of Floating Facilities at Sea[K]. Beijing: China Classification Society, 2023.