

文章编号: 1007-7294(2025)09-1397-10

# FPSO 旁靠系统在双峰谱波浪下的运动响应研究

郭汶灵<sup>1</sup>, 王许洁<sup>1</sup>, 田哲<sup>1</sup>, 熊冶平<sup>2</sup>

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东青岛 266000; 2. 南安普顿大学工程与物理学系, 英国南安普顿 SO167QF)

**摘要:** 我国南海海域受西太平洋热带气旋和台风影响, 易出现双峰甚至多峰的混合浪形式波浪, 对海洋浮式结构物的作业安全形成潜在危害。为此本文基于势流理论, 同时考虑不同装载状态的影响, 对 FPSO 与穿梭油轮旁靠系统在双峰谱波浪、单峰谱波浪状态下的运动响应展开对比研究。分别计算两船体在风浪为主、风涌相当及涌浪为主的双峰谱波浪状态下和单峰谱风浪状态下运动响应。计算结果表明: 两船体在垂荡、横摇和纵摇方向上的运动幅值随低频能量占总能量比例的增加而增加, 涌浪为主时最大, 风涌相当时次之, 风浪为主时最小, 在总能量相同的前提下, 双峰谱波浪状态下两船体运动幅值均大于单峰谱风浪状态下的运动幅值。研究表明, 在 FPSO 作业系统的系泊设计和安全生产规划中, 需对双峰谱波浪的影响予以考虑。

**关键词:** FPSO 旁靠系统; 双峰谱波浪; 运动响应; 多点系泊

**中图分类号:** U674.38 U661.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2025.09.006

## Motion response of FPSO system under bimodal spectrum waves

GUO Wen-ling<sup>1</sup>, WANG Xu-jie<sup>1</sup>, TIAN Zhe<sup>1</sup>, XIONG Ye-ping<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China; 2. Faculty of Engineering and Physical Sciences, University of Southampton, Southampton SO167QF, UK)

**Abstract:** The South sea of China is affected by tropical cyclones and typhoons in the western Pacific Ocean, which are prone to double-peak or even multi-peak waves in the form of mixed waves, which are potentially hazardous to the operational safety of marine floating structures. Therefore, based on the potential flow theory and considering the influence of different loading states, a comparative study was conducted on the motion response of FPSO and shuttle tanker side-by-side system under double-peak spectral wave and single-peak spectral wave states. The motion responses of the two hulls in the double-peak spectral wave states of mainly wind waves, wind waves and surge are equal, and mainly surge and the single-peak spectral wind waves state are calculated respectively. The calculation results show that (1) the amplitude of the motion of the two hulls in vertical, horizontal and longitudinal directions increases with the increase of the ratio of the low-frequency energy to the total energy; (2) it is the largest when the surge is dominant, the second largest when the wind waves and surge are equal, and the smallest when the wind waves are dominant; (3) the motion amplitude of both hulls in the double-peak spectral waves is greater than that of the single-peak spectral wind waves under the premise that the total energy is the same, and (4) the motion amplitude of both hulls in the double-peak

收稿日期: 2025-03-14

基金项目: 国家留学基金资助项目(202406330126); 国家自然科学基金资助项目(52271296; 51709246); 山东高校青年创新团队项目(2023KJ036)

作者简介: 郭汶灵(2000-), 男, 硕士; 王许洁(1982-), 男, 博士, 副教授, 通讯作者, E-mail: wangxujie@ouc.edu.cn。

spectral waves is greater than that of the single-peak spectral wind waves. The study shows that the influence of double-peak spectral waves should be considered in the mooring design and safety planning of FPSO operation system.

**Key words:** side-by-side system of FPSO; double-peak spectral waves; motion response; multi-point mooring

## 0 引言

浮式生产储油船(FPSO)目前被广泛应用于海上石油生产和储存领域<sup>[1]</sup>,因采用海底管路将原油外输至陆地成本过高,海上原油外输的主要方式是利用穿梭油轮将经 FPSO 预处理后的原油运送至陆地。外输方式可分为串靠卸载和旁靠卸载<sup>[2]</sup>,根据穿梭油轮相对于 FPSO 的靠泊位置定义串靠或旁靠,串靠卸载方式即采用 FPSO 与穿梭油轮一前一后的串列式靠泊方式,旁靠卸载通常指穿梭油轮靠泊于 FPSO 左舷,两船之间旁靠距离为 4~10 m。对于有效波高小于 2.5 m 相对温和的海况,旁靠卸载所需系泊设施和原油运输软管更少,是一种更加经济可行的卸载方式<sup>[3]</sup>。

目前国内外针对 FPSO 旁靠外输开展了多浮体的水动力性能研究。周珂等<sup>[4]</sup>结合理论分析和模型实验,研究了实际海洋环境中斜浪对多浮体水动力性能的影响;王文华等<sup>[5]</sup>基于频域波浪势流理论讨论了旁靠外输系统单浮体水动力特性和双浮体的耦合作用;Zhao 等<sup>[6]</sup>采用三种典型的不规则波环境工况,得到了旁靠卸载过程双船之间的相对运动与连接系统所承载荷之间的关系;Xu 等<sup>[7]</sup>从频域和时域两方面全面研究了 FPSO 和穿梭油轮在旁靠卸载过程中对水动力特性的耦合效应;Yue 等<sup>[8]</sup>分析了旁靠系泊卸载系统在风、浪、流耦合作用下,对旁靠卸载作业安全影响较大的两船间垂荡、横摇和纵摇自由度的相对运动幅值。

实际海况中大部分波浪以混合浪形式出现<sup>[9]</sup>,混合浪波浪谱一般呈现双峰甚至多峰。DNV 规范<sup>[10]</sup>建议,设计过程中在计算大型海洋工程结构物所受的波浪荷载时,应当考虑双峰谱波浪。

本文对 FPSO 与穿梭油轮旁靠系统在双峰谱波浪、单峰谱波浪状态下的运动响应展开对比研究,所设定风、浪、流入射方向均为 180°。考虑到船体的对称性,主要对安全性能影响最大的垂荡、横摇和纵摇三自由度运动响应进行计算分析<sup>[8]</sup>。首先,基于三维势流理论,对各船舶水动力性能和系泊系统的安全性进行了计算校核<sup>[11-12]</sup>;然后,针对不同类型双峰谱混合浪状态,对旁靠外输作业状态下两船的垂荡、横摇和纵摇自由度的时域运动响应展开研究;最后,探讨在总能量相同状态下,双峰谱混合浪相对于单峰谱波浪对原油卸载作业的危害程度。本文研究可为旁靠卸载方案设计和安全生产提供一定的设计参考。

## 1 FPSO 及穿梭油轮旁靠系统

### 1.1 研究对象

本文以一艘作业于中国南海东部海域的 FPSO 为研究对象,FPSO 主要参数见表 1,穿梭油轮主要参数见表 2。

表 1 FPSO 主要参数

设计参数	总长/m	型宽/m	型深/m	吃水/m	排水量/t
压载	207	36	16	5.7	31 126
半载	207	36	16	8.7	49 444
满载	207	36	16	12	97 771

表 2 穿梭油轮主要参数

设计参数	总长/m	型宽/m	型深/m	吃水/m	排水量/t
压载	235.6	46	24.1	16	151 505.8
半载	235	46	24.1	11	104 748.4
满载	235.6	46	24.1	8.5	77 766.1

1.2 环境参数

根据高低频能量在双峰谱波浪中所占能量比例不同, 本文选用风浪为主(高频能量占主导成分)、风涌相当(高、低频能量均等)、涌浪为主(低频能量占主导成分)三种不同类型的双峰谱波浪<sup>[13]</sup>。为对比分析双峰谱波浪状态下的运动响应结果与单峰谱波浪状态下的差异, 试验过程中采用 JONSWAP 谱模拟单峰谱波浪, 双峰谱波浪频谱采用 Ochi-Hubble 六参数谱<sup>[14]</sup>, 其特征参数包含有效波高、谱峰周期及形状参数, 由低频和低频两部分的特征参数共同组成。试验过程中令双峰谱波浪与单峰谱波浪总能量相同, 有效波高均设定为 2.5 m, 调整双峰谱形状参数  $\lambda$  与单峰谱的谱峰升高因子  $\gamma=3.3$  保持一致。由于低频长周期波浪通常对海洋浮式结构物产生更为不利的影响<sup>[15]</sup>, 固定高频风浪的谱峰周期为 4.5 s 不变, 而低频谱峰周期在 8~16 s 范围内变化, 具体见表 3。

表 3 波浪计算工况

Tab.3 Wave calculation conditions

波浪类型	波浪谱		有效波高/m		谱峰周期/s			
风浪	JONSWAP谱		2.5		4.5			
涌浪	JONSWAP谱		2.5	8	10	12	14	16
风浪为主双峰谱波浪	Ochi-Hubble谱	高频部分	2.236		4.5			
		低频部分	1.118	8	10	12	14	16
风涌相当双峰谱波浪	Ochi-Hubble谱	高频部分	1.768		4.5			
		低频部分	1.768	8	10	12	14	16
涌浪为主双峰谱波浪	Ochi-Hubble谱	高频部分	1.118		4.5			
		低频部分	2.236	8	10	12	14	16

为更好地模拟旁靠外输过程的实际作业环境, 本文拟采用 NPD 谱模拟作业海域实际风况, 取海面以上高度 10 m 处的平均风速为 13 m/s; 海流采用表层流速进行模拟, 设定自由表面附近的流速为 0.55 m/s。风、浪、流在本文中入射方向均设定为 180°, 即船舶迎浪方向。

1.3 系泊系统

本文研究对象 FPSO 作业于 200 m 水深的南海海域, 采用多点系泊系统进行定位, 系泊系统由 12 根系泊缆组成, 每三根系泊缆为一组, 系泊缆相对于 FPSO 船体的中纵剖面呈对称布置, 同组三根系泊缆之间的夹角为 5°, 系泊缆自上(导缆孔)而下(海底锚)选用船链+钢缆+船链的组合形式, 图 1 所示为多点系泊系统示意图。

FPSO 与穿梭油轮两船体间通过由 10 根旁靠缆和 6 个橡胶材质护舷所组成的旁靠系统连接, 该连接方式可最大程度避免旁靠作业过程中发生碰撞或脱离。旁靠缆与护舷具体布置见图 2。系泊缆各段具体参数、旁靠缆参数以及护舷参数见表 4。

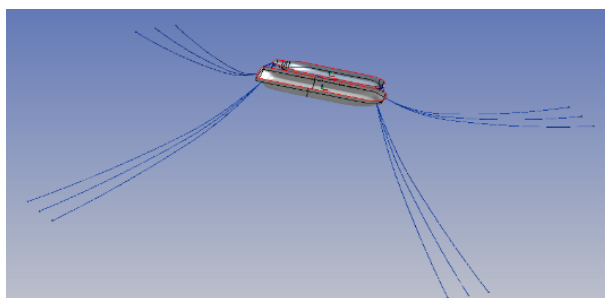


图 1 多点系泊系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-point mooring system

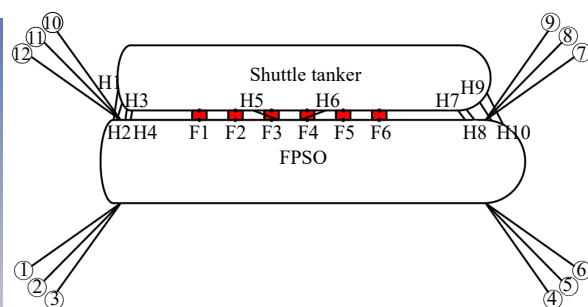


图 2 连接系统布置示意图

Fig.2 Schematic layout of the connection system

表4 多点系泊及旁靠系统具体参数

Tab.4 Specific parameters of multi-point mooring and side-by-side connecting system

名称	长度/m	直径/m	湿重/(kg·m <sup>-1</sup> )	破断强度/N	刚度/N
船链	200	0.147	380	1.900E7	1.627E9
钢缆	300	0.128	79.5	1.589E7	1.505E9
旁靠缆	—	0.12	—	1.03E7	3.18E8
护舷	—	4	—	—	1.786E6

## 2 数值计算理论

海洋结构物以自由面为基准时,速度势满足如下 Laplace 方程:

$$\nabla^2 \phi(x, y, z, t) = 0 \quad (1)$$

Laplace 方程和描述物体运动的速度势都需要进行线性化处理。流体中流体总的速度势定义为

$$\phi(x, y, z, t) = \phi(x, y, z) e^{-i\omega t} \quad (2)$$

总速度势是由入射波、辐射波和绕射波叠加而成<sup>[16]</sup>,因此总速度势可以分解为

$$\phi(x, y, z, t) = \phi^I(x, y, z, t) + \phi^D(x, y, z, t) + \phi^R(x, y, z, t) \quad (3)$$

式中,  $\phi^I$  为入射波速度势,表明流场中速度分布的情况;  $\phi^D$  为绕射势,表明结构物对流场内的速度产生的影响;  $\phi^R$  为辐射势,表明结构物 6 个自由度的运动及振荡对流场的影响;  $\omega$  为入射波的频率。

船舶在规则波作用下的运动微分方程为

$$[M_s(\omega) + M_a(\omega)] \ddot{X} + C(\omega) \dot{X} + K_s(\omega) X = F(\omega) \quad (4)$$

式中,  $M_s$  为结构质量矩阵,  $M_a$  为水动力附加质量矩阵,  $C$  为系统线性阻尼矩阵,  $K_s$  为系统总刚度矩阵,  $F$  为系统所受的波浪力,  $X$  为幅值响应算子(RAOs),  $\omega$  为入射波的频率。

## 3 时域分析

### 3.1 计算模型

两船体三维模型采用实尺度进行建模,图3为FPSO与穿梭油轮面元模型,采用AQWA进行分析计算时,由于网格划分尺寸越小,能够模拟的波浪频率越高,但网格划分尺寸过小会影响计算速度,在考虑波浪谱能量范围、计算机计算速度和模型精度的因素下,网格单元边长尺寸取为2m<sup>[17]</sup>,由网格单元尺寸决定的波浪频率范围为0.1~2.50 rad/s,对于本文计算海域南海的海浪谱频率而言,该频率范围已能够涵盖大部分能量,符合计算要求。由于FPSO与穿梭油轮在旁靠外输作业时不同装载状态的吃水深度会发生实时变化,进行网格划分时面元模型湿表面面元数也将随之发生变化,各装载状态下湿面元数统计见表5。

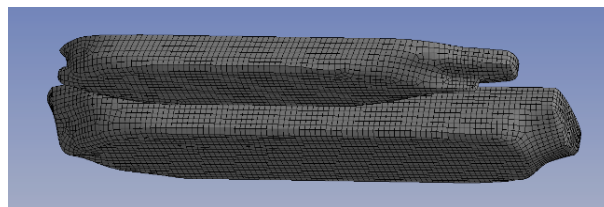


图3 FPSO及穿梭油轮耦合面元模型

Fig.3 Coupled surface element modeling of FPSO and shuttle tanker

表5 船体湿表面面元数

Tab.5 Surface elements number of hull wet surface

船体	FPSO满载-穿梭油轮压载面元数	FPSO半载-穿梭油轮半载面元数	FPSO压载-穿梭油轮满载面元数
FPSO	11 781	9913	8950
穿梭油轮	5100	6301	7283

本文采用在两船体间的自由液面上设置阻尼盖的方式以抑制驻波现象,使间隙自由液面运动更加接近真实工况,降低间隙共振效应带来的数据误差,阻尼系数取值为 0.2。

### 3.2 数值仿真计算验证

为验证本文数值仿真计算的准确性,将其与章柯等<sup>[18]</sup>在江苏科技大学综合水池进行的不规则波试验结果进行对比,数值计算采用相同的实验环境和模型,时域计算时长为 3 小时,通过 JONSWAP 谱模拟不规则波海浪,特征参数依照真实海况环境具体设定如下:有效波高为 2.5 m,谱峰周期为 10 s,谱峰升高因子为 3。由于横荡、纵荡和艏摇自由度上的运动具有低频特性,需要进行长时间的波浪实验,短时间的水池实验结果存在较大误差<sup>[19]</sup>,因此仅对后续计算分析所需的垂荡、横摇和纵摇三个自由度的运动响应结果进行对比,结果见表 6。

表 6 FPSO 六自由度运动量对比  
Tab.6 Comparison of 6-DOF motion responses of FPSO

		垂荡/m	横摇/(°)	纵摇/(°)
水池实验数据	最大值	0.32	0.61	0.48
	最小值	-0.50	-0.64	-0.47
数值模拟数据	最大值	0.77	0.41	0.56
	最小值	-0.88	-0.70	-0.52

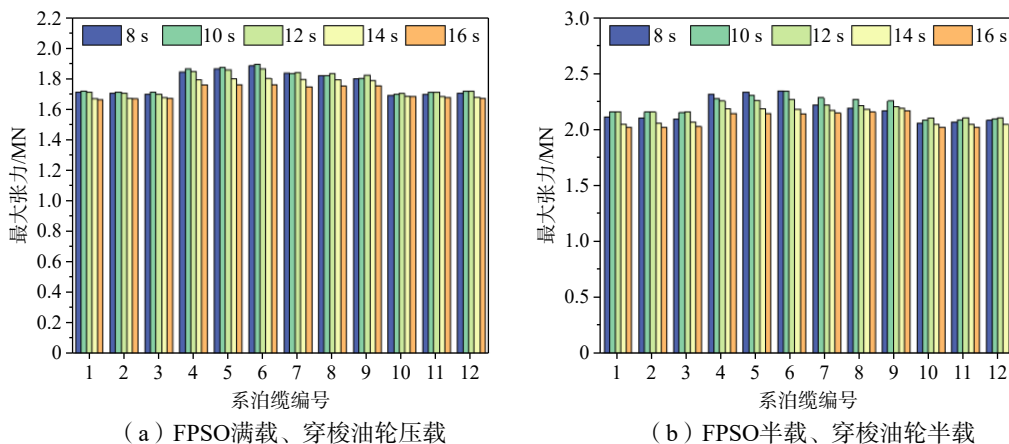
通过结果对比可知,在这三个自由度上的运动具有波频特性,实验结果与模拟结果吻合程度较好,本文采用数值仿真分析研究旁靠外输系统在垂荡、横摇和纵摇自由度的时域运动响应能够满足计算要求。

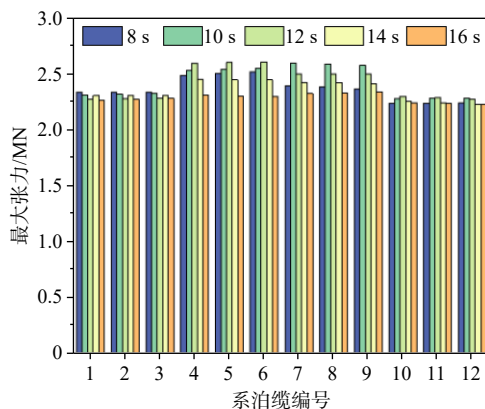
### 3.3 时域分析结果

#### 3.3.1 缆绳张力分析

利用 AQWA 软件,开展 FPSO 与穿梭油轮组成的旁靠外输系统三小时内的时域运动响应分析,通过时域分析结果对比 FPSO 及穿梭油轮在三种不同类型双峰谱波浪状态下的运动幅值可知,涌浪为主的双峰谱波浪对旁靠外输作业的危害性更为显著,因此本小节以涌浪为主的双峰谱波浪作为环境工况,开展数据统计分析以验证系泊系统设计布置的合理性。

系泊系统采用悬链式多点系泊,系泊缆预张力设定为系泊缆最大破断强度的 10%。图 4 为不同谱峰周期的双峰谱波浪状态下 FPSO 1#~12#系泊缆的张力值。结果表明,三种装载状态下 4#~9#系泊缆均大于系泊于船尾部位的其余缆绳。在 FPSO 满载、穿梭油轮压载情况下,系泊缆最大张力值随谱峰周期的增大而减小,其余两种装载状态下,4#~6#系泊缆张力随谱峰周期的增大呈减小趋势,7#~9#系泊缆张力在谱峰周期 12 s 附近达到最大值,其最大张力值随谱峰周期的增长呈现先增大后减小的趋势。三种装载状态下的安全系数分别为 9.45、7.66 及 6.72,均满足设计规范要求。



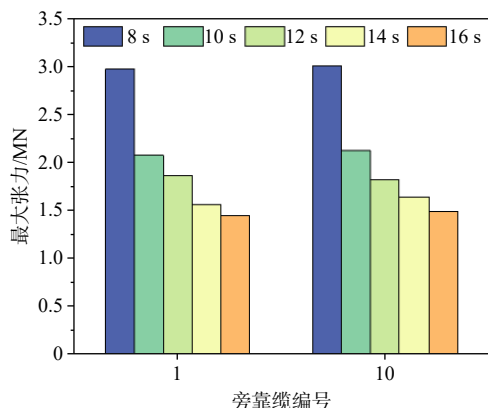


(c) FPSO压载、穿梭油轮满载

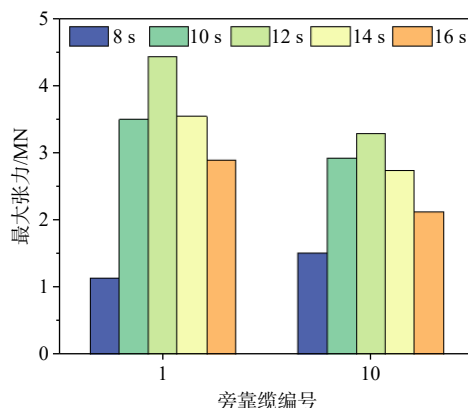
图4 FPSO系泊缆绳最大张力值

Fig.4 Maximum tension of mooring cables of FPSO

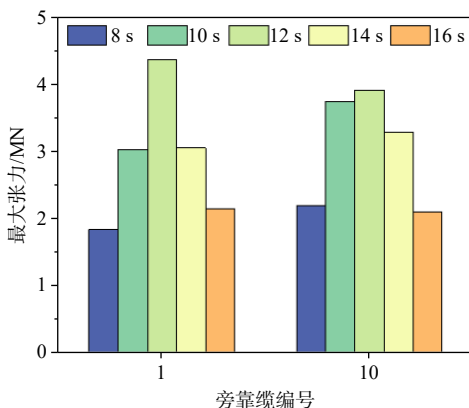
图5为不同低频谱峰周期涌浪为主的双峰谱波浪状态下连接FPSO及穿梭油轮的旁靠缆张力值,选取H1和H10作为研究对象。可知,在FPSO满载、穿梭油轮压载情况下,H1和H10的最大张力值均随谱峰周期的增加而减小;其余两种状态下,旁靠缆最大张力值随谱峰周期的增长,呈现先增加后减小趋势,并在谱峰周期12s附近达到最大值。三种装载状态下安全系数分别为3.43、2.23及2.36,均满足设计规范要求。



(a) FPSO满载、穿梭油轮压载



(b) FPSO半载、穿梭油轮半载



(c) FPSO压载、穿梭油轮满载

图5 旁靠缆最大张力值

Fig.5 Maximum tension of side-by-side cables

3.3.2 运动响应分析

由于旁靠外输作业过程中两船体在垂荡、横摇及纵摇方向上的运动响应对作业安全影响较大,本小节时域分析重点针对 FPSO 及穿梭油轮在该三个方向上的运动响应幅值进行统计分析,FPSO 半载、穿梭油轮半载的两船体在不同谱峰周期的双峰谱波浪状态下,垂荡、横摇和纵摇方向上的运动幅值结果分析分别见图 6-8。

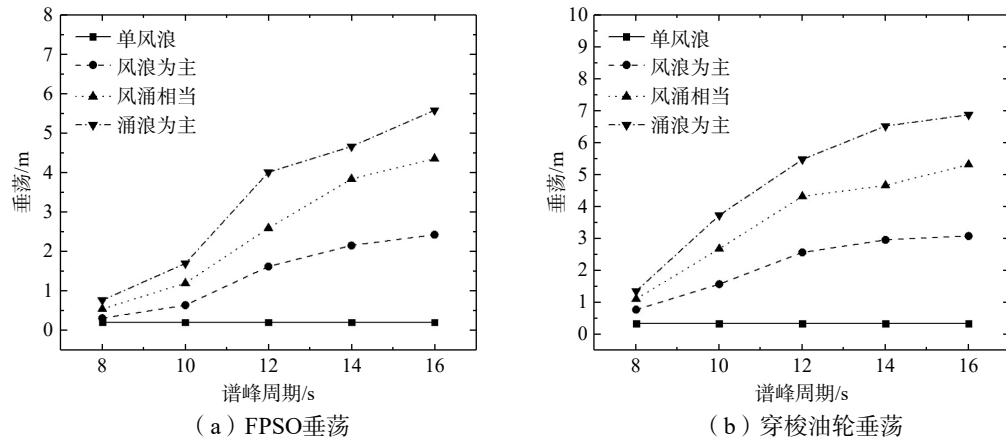


图 6 FPSO 及穿梭油轮垂荡运动幅值

Fig.6 Motion amplitudes of heave of FPSO and shuttle tanker

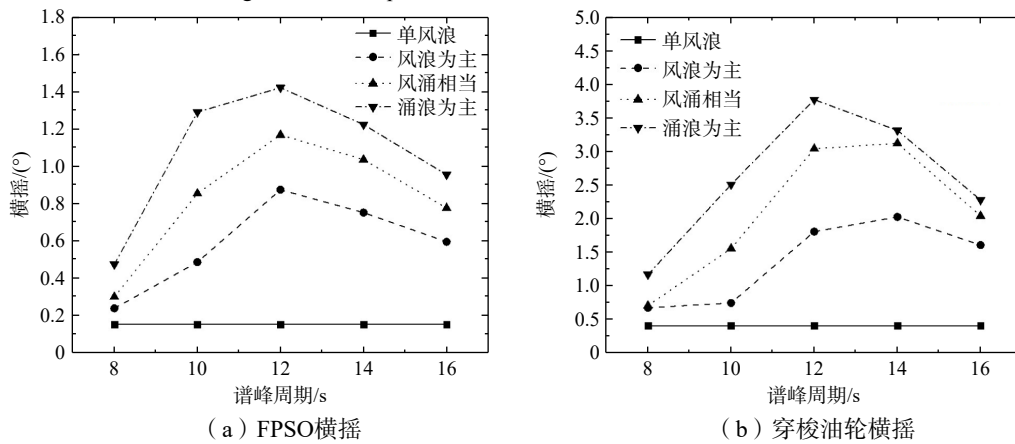


图 7 FPSO 及穿梭油轮横摇运动幅值

Fig.7 Motion amplitudes of roll of FPSO and shuttle tanker

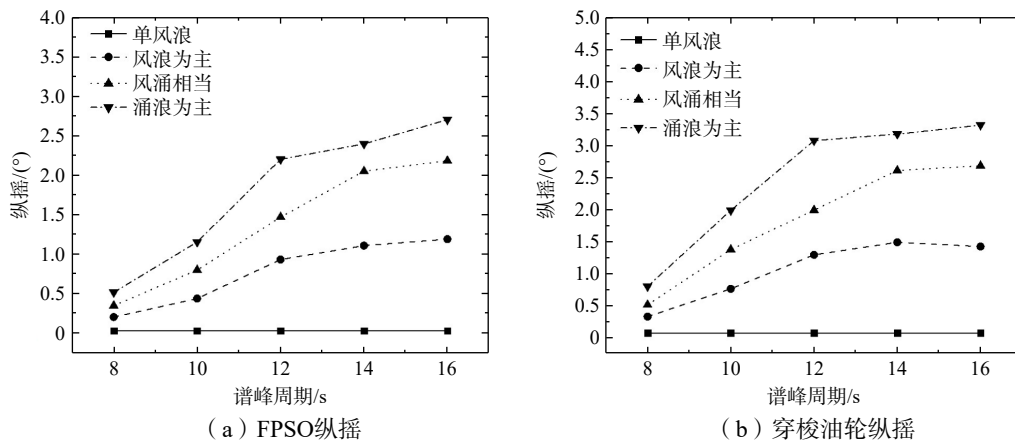


图 8 FPSO 及穿梭油轮纵摇运动幅值

Fig.8 Motion amplitudes of pitch of FPSO and shuttle tanker

从图 6 可知,对于垂荡运动幅值,随低频谱峰周期增大,垂荡幅值逐渐增大,且运动幅值与低频能量占总能量的比重呈正相关,即两船体在涌浪为主的双峰谱波浪状态下的垂荡幅值最为显著,且与其他类型波浪差异明显。最大值出现在低频谱峰周期 16 s 时,两船体垂荡幅值分别为 5.591 m 和 6.865 m,约为风浪状态下垂荡幅值的 26.49 倍和 21.45 倍。

从图 7 可知,对于横摇运动幅值,随着低频谱峰周期的增大,横摇幅值在 8~16 s 范围内呈现先增加后减少趋势,在低频谱峰周期 12 s 时,横摇幅值达到最大值,其原因是谱峰周期在此时接近船体固有周期,导致两船体运动响应更加剧烈。FPSO 与穿梭油轮的横摇幅值分别为 1.42°和 3.77°,约为风浪状态下横摇幅值的 9.47 倍和 9.49 倍。

从图 8 可知,纵摇运动幅值的变化规律与垂荡幅值随谱峰周期的变化规律相似,纵摇幅值随低频谱峰周期的增长而增加,在低频谱峰周期 12 s 之后,穿梭油轮纵摇幅值的增长趋势有所放缓。在低频谱峰周期 16 s 时,不同类型波浪状态下的两船体纵摇幅值的差异最为显著,FPSO 与穿梭油轮纵摇幅值最大值分别为 2.7°和 3.327°,约为风浪状态下纵摇幅值的 87.09 倍和 48.22 倍。

针对其余两种装载状态下两船体的运动响应结果分析,统计其在垂荡、横摇和纵摇三个方向上的运动幅值在波浪周期 8~16 s 范围内的最大值,以便直观对比双峰谱波浪相比单峰谱波浪对于旁靠卸载作业的危害性,统计结果见表 7。

表 7 FPSO 及穿梭油轮运动幅值统计

Tab.7 Statistical values of motion amplitude of FPSO and shuttle tanker

压载状态	波浪类型	运动幅值					
		垂荡/m		横摇/(°)		纵摇/(°)	
		FPSO	穿梭油轮	FPSO	穿梭油轮	FPSO	穿梭油轮
FPSO满载、穿梭油轮压载	单风浪	0.203	0.138	0.044	0.152	0.026	0.058
	风浪为主	2.423	3.608	0.166	0.557	1.137	1.629
	风涌相当	4.393	6.557	0.272	0.844	2.147	2.598
	涌浪为主	5.428	8.396	0.400	1.227	2.560	3.792
FPSO压载、穿梭油轮满载	单风浪	0.231	0.450	0.196	0.567	0.032	0.036
	风浪为主	2.503	2.977	0.790	1.059	1.193	1.369
	风涌相当	4.597	5.351	1.043	1.478	2.248	2.643
	涌浪为主	5.883	6.712	1.536	2.213	2.763	3.242

从表中可知,FPSO 及穿梭油轮在三个方向上运动幅值的最大值出现在以涌浪为主的双峰谱波浪状态下,垂荡幅值最大值分别为 5.883 m 和 8.396 m,约为风浪状态下的 26.74 倍和 60.84 倍;横摇幅值最大值分别为 1.536°和 2.213°,约为风浪状态下的 9.09 倍和 8.07 倍;纵摇幅值最大值分别为 2.763°和 3.792°,约为风浪状态下的 98.46 倍和 90.06 倍;同 FPSO 半载、穿梭油轮半载状态具有相似规律,两船体运动幅值均随低频能量占总能量比重的增加而增加。对比不同装载阶段 FPSO 及穿梭油轮在涌浪为主双峰谱波浪状态下的运动幅值可知,FPSO 满载、穿梭油轮压载状态时,穿梭油轮的垂荡和纵摇幅值均大于其余装载阶段的运动幅值,最大值分别为 8.396 m 和 3.792°。FPSO 压载、穿梭油轮满载状态时,FPSO 的垂荡、横摇及纵摇幅值均大于其余装载阶段的运动幅值,最大值分别为 5.883 m、1.536°和 2.763°。垂荡和纵摇幅值最大值均出现在两船体分别处于压载状态时,运动幅值随原油装载量的减小而增大。因此,在实际进行旁靠外输作业过程中,应重点关注低频谱峰周期接近船舶固有周期的以涌浪为主的双峰谱波浪,同时尽量缩短旁靠外输前期和后期作业时间,以确保旁靠外输作业的安全。

## 4 结 论

本文通过数值模拟方法研究了三种不同类型双峰谱波浪对 FPSO 旁靠系统的运动响应,对比分析

了与之总能量相同的单峰谱风浪状态下的运动响应差异。主要结论如下:

(1)对于进行旁靠外输作业的 FPSO 与穿梭油轮,垂荡、横摇和纵摇幅值随低频能量占总能量比重的增大而增大,涌浪为主时最大,风涌相当时次之,风浪为主时最小;在总能量相同时,两船体在三种不同类型的双峰谱波浪状态下的垂荡、横摇和纵摇幅值均大于风浪状态下的运动幅值。因此,在实际原油外输作业中,应对作业海域涌浪为主的双峰谱波浪重点关注。

(2)对比三种装载状态 FPSO 与穿梭油轮在涌浪为主的双峰谱波浪状态下的运动幅值,发现两船体均处于压载状态时其垂荡和纵摇运动幅值最大,且运动幅值随原油装载量的减小而增大。因此,在旁靠卸载作业过程中 FPSO 满载、穿梭油轮压载和 FPSO 压载、穿梭油轮满载两种装载状态下的原油输送时间应尽量缩短。

(3)在低频谱峰周期为 12 s 时,系泊缆张力和旁靠缆张力均达到最大值,旁靠缆张力随低频谱峰周期增加的变化最为显著,最大可达低频谱峰周期 8 s 时的 3.89 倍。因此,在进行原油旁靠外输作业时,应重点关注低频谱峰周期接近船舶固有周期的双峰谱波浪。

### 参 考 文 献:

- [1] 周 魏, 韦 涛. FPSO 外输作业研究[J]. 资源节约与环保, 2012, 130(5): 77-82.  
Zhou W, Wei T. External transport operation study of FPSO[J]. Resource Conservation and Environmental Protection, 2012, 130(5): 77-82. (in Chinese)
- [2] 施兴华, 于泽群, 章 柯. FPSO 与穿梭油轮的旁靠时域分析及系统优化[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(1): 127-135.  
Shi X H, Yu Z Q, Zhang K. Time domain analysis and system optimization of side-by-side mooring for FPSO and shuttle tanker[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(1): 127-135. (in Chinese)
- [3] Xu X, Gaidai O, Yakimov V, et al. FPSO offloading operational safety study by a multi-dimensional reliability method[J]. Ocean Engineering, 2023, 281: 114652.
- [4] 周 珂, 胡志强, 赵东亚. 不同浪向下 LNGC 旁靠 FLNG 作业时水动力干扰分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(8): 114-123.  
Zhou K, Hu Z Q, Zhao D Y. Hydrodynamic interference analysis during LNGC side-by-side FLNG operation in different wave directions[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(8): 114-123. (in Chinese)
- [5] 王文华, 邸晓宁, 齐月才, 等. FLNG-LNGC 并靠外输系统参数对双体水动力性能的影响[J]. 船舶力学, 2021, 25(1): 52-64.  
Wang W H, Qiu X N, Qi Y C, et al. Influence of FLNG-LNGC parameters on the hydrodynamic performance of twin bodies by parallel external transportation system[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(1): 52-64. (in Chinese)
- [6] Zhao D, Hu Z, Chen G. Experimental investigation on dynamic responses of FLNG connection system during side-by-side offloading operation[J]. Ocean Engineering, 2017, 136: 283-293.
- [7] Xu X, Sahoo P, Evans J. Hydrodynamic performances of FPSO and shuttle tanker during side-by-side offloading operation[J]. Ships and Offshore Structures, 2019, 14(sup1): S292-S299.
- [8] Yue J, Kang W, Mao W. Prediction of dynamic responses of FSRU-LNGC side-by-side mooring system[J]. Ocean Engineering, 2020, 195: 106731.
- [9] 陈雪英, 胡泽建. 双峰谱型海浪波高与周期的联合分布[J]. 黄渤海海洋, 1997, 4: 8-13.  
Chen X Y, Hu Z J. Joint distribution of wave height and period in bimodal spectral type waves[J]. Journal of Oceanography of Huanghai & BoHai Seas, 1997, 4: 8-13. (in Chinese)
- [10] Veritas D N. Recommended Practice: Environmental conditions and environmental loads[R]. DNV-GL: Oslo, Norway, 2010.
- [11] Wang X, Zhang R, Zhao J, et al. Study on wave added resistance of ships in oblique waves based on panel method[J]. Journal of Ocean University of China, 2022, 21(3): 773-781.
- [12] Wang X, Zhao J, Zhang H, et al. Study on wave added resistance of a deep-V hybrid monohull based on panel method[J]. Journal of Ocean University of China, 2020, 19: 601-608.

- [13] 蔡 烽, 石爱国, 缪泉明. 双峰谱海浪模型及其数值模拟[C]//2008 船舶安全管理论文集, 中国航海学会海洋船舶驾驶专业委员会, 中国航海学会, 广州, 2008.  
Cai F, Shi A G, Miao Q M. Bimodal spectral wave model and numerical analysis[C]//Proceedings of Ship Safety Management 2008, Marine Ship Piloting Committee of China Nautical Society, China Nautical Society, Guangzhou, 2008.
- [14] Ochi M K, Hubble E N. Six-parameter wave spectra[J]. Coastal Engineering, 1976, 1976: 301–328.
- [15] 王科华, 任赵飞, 周智鹏, 等. 工程海域波浪特征分析方法比较[J]. 海洋工程, 2022, 40(3): 149–158.  
Wang K H, Ren Z F, Zhou Z P, et al. Comparison of wave characterization methods in engineering waters[J]. Ocean Engineering, 2022, 40(3): 149–158. (in Chinese)
- [16] 计 淞, 陈徐均, 黄 恒, 等. 规则波条件下的多液舱浮体动力响应特性研究[J]. 船舶力学, 2023, 27(7): 1006–1018.  
Ji S, Chen X J, Huang H, et. al. Dynamic responses of a floating body with multiple sloshing tanks under regular waves[J]. Journal of Ship Mechanics, 2023, 27(7): 1006–1018. (in Chinese)
- [17] 李克恒. 极端波群作用下单点系泊 FPSO 运动响应的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2022.  
Li K H. Numerical simulation on the response of single point moored FPSO under the extreme wave group[J]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [18] 章 柯. 多点系泊 FPSO 旁靠外输多浮体系统水动力研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2017.  
Zhang K. Hydrodynamic study on multi-body system of side-by-side transmission of a multi-point moored FPSO[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2017.
- [19] 王晨征, 范 菊, 缪国平. FPSO 串靠外输系统动力分析[J]. 水动力学研究与进展, 2016, 31(6): 730–738.  
Wang C Z, Fan J, Miu G P. Dynamic analysis of FPSO tandem offloading system[J]. Chinese Journal of Hydraulics, 2016, 31(6): 730–738. (in Chinese)