

研究论文

浅水中波浪载荷对半潜平台拖航运动响应和拖揽张力影响

张涛¹, 白旭^{1*}, 答英飞²

摘要 针对浅水航道水域较浅且环境条件复杂恶劣的现象,以浮筒宽高比过大的新型半潜平台为研究对象,基于时域分析理论和浅水波浪理论,通过数值模型对比分析不同有义波高、谱峰周期、浪向角、拖航速度和拖揽长度对浅水海域半潜平台拖航运动响应和拖揽张力的影响。结果表明:波浪高度越高,平台垂荡、缆绳张力越大;谱峰周期越长,纵摇、缆绳张力越小;浪向角对横纵摇影响较大,极值呈凹凸型分布;不同工况下的新型半潜平台横纵摇均 $\leq 5^\circ$,满足拖航规范要求;缆绳张力受航速和波高的影响较大,当波高达到5 m,拖揽张力超过安全范围,可以通过降低拖航速度、缩短缆绳长度等措施规避风险。

关键词 浅水海域;波浪载荷;半潜平台;运动响应;拖揽张力

21世纪以来,全球海洋油气勘探开发步伐加快,越来越多人将目光聚焦于潜在资源丰富的深水海域^[1-2]。位于中国深水海域的陵水17-2气田(水深1220~1560 m),是千亿立方米优质高产大气田,该气田的顺利开发将推动中国海洋油气勘探开发全面进入超深水时代。其中,“深海一号”半潜平台是该气田开发的关键设施。由于目前国内大多数船厂的船坞和出港航道水深均不超过9 m,这给空船质量达到5万t的“深海一号”出港之行设置了难题,这也是中国深水浮式生产平台建造不得不克服的技术难题^[3]。为解决这一问题,“深海一号”半潜平台突破浮筒宽高比不大于2的工业界常规做法,将浮筒的宽高比提

升为2.33,以保证该类型半潜平台顺利出航。但这一扁胖浮筒的设计,导致平台在拖航作业时受到了更大的波浪载荷作用,从而加剧了平台运动的幅度,对拖带系统产生更大的张力,严重影响了新型半潜平台拖航作业的稳定性和安全性^[4]。此外,半潜平台拖航航线中的台湾海峡,因为风高浪急且存在浅水航道,长期以来都是海洋工程界公认的拖航高难度海域,这也是“深海一号”航途中的“第二道门槛”。如何确保新型半潜平台安全通过这一航道,已成为不得不解决的重要挑战。

为保证拖航作业安全,国内外科研人员开展了大量研究。1958年,Strandhagen等^[5]基于线性理论对拖航系统稳定性影响因素进行研究。Desroches^[6]通过水池试验对拖航系统缆绳张力进行研究,结果表明拖航作业安全性需要同时考虑平均拖揽张力和峰

1. 江苏科技大学船舶与海洋工程学院,镇江 212003

2. 哈尔滨工程大学船舶工程学院,哈尔滨 150001

收稿日期:2023-12-18;修回日期:2024-03-27

基金项目:教育部产学合作协同育人项目(220805055253544);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX22-1959)

作者简介:张涛,硕士研究生,研究方向为船舶与海洋结构物安全性评估,电子信箱:211210101418@stu.just.edu.cn;白旭(通信作者),教授,研究方向为船舶与海洋结构物安全性评估,电子信箱:baixu@just.edu.cn

引用格式:张涛,白旭,答英飞. 浅水中波浪载荷对半潜平台拖航运动响应和拖揽张力影响[J]. 科技导报, 2025, 43(2): 97-107;

doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.01897

值动态张力。Park等^[7]通过进行一系列湿拖沉箱模型试验,评估沉箱在静水和顶海条件下的稳定性和有效动力需求。Chen等^[8]建立了考虑风、浪、流等复杂环境载荷下的拖船6自由度模型,通过数值模拟对平台拖航运动响应进行分析。Zhang等^[9]基于三维势流理论研究了吃水深度、拖航速度对浮式风力机运动响应的影响,表明减小吃水、增加航速都会降低拖航稳定性。Han等^[10]考虑多艘拖船、被拖船与浮冰的耦合运动,建立了破碎冰区拖船拖航过程中的数值模拟方法,通过数值算例讨论了冰厚、冰密度和浮冰大小等冰特性的影响。Paulauskas等^[11]通过数值模拟对近海港口海域的拖船缆绳张力进行研究,指出近海港口航道水深、宽度对拖带缆绳张力影响较大。Le等^[12]设计了质量相近、重心相同的3浮筒和4浮筒式浮式风力机,对比分析了两者在深海海域环境条件下不同波浪高度、波浪周期对平台运动响应的影响。Gu等^[13]通过模型试验和数值模拟相结合的方式,研究了南海海域环境条件下波浪高度、拖航速度对沉箱运动响应的影响,表明大型结构物垂荡运动受波浪高度及拖航速度的影响较大。

目前,海洋平台拖航研究中作业海域大多为沿海开阔海域,水深较深,而台湾海峡不仅环境复杂恶劣且水深较浅,导致平台存在触底风险,对拖航作业安全构成威胁。因此,以浮筒宽高比值较大的新型半潜平台为研究对象,在通过数值模拟得到波浪高度、谱峰周期及浪向角对平台拖航运动响应和拖揽张力影响的基础上,探究不同拖航速度、拖揽长度下平台运动响应和拖揽张力变化规律,旨在为超大型半潜平台湿拖过台湾海峡提供施工与避险参考。

1 半潜平台基本参数

以“深海一号”新型超深水半潜平台为研究对象,该平台上部是由4层甲板组成的桁架结构组块,下部由浮筒与立柱构成。其中,浮筒是由4个底部浮筒连接成的回字形箱体,立柱位于浮筒交叉处,其内部放置凝析油舱,拖航系统模型如图1所示,半潜平台主要参数如表1所示。基于参考文献[14]中平台的拖航阻力数值较大,拖航作业选用1主拖2辅拖的拖带方式,拖带系统共设置5根拖揽(表2)。



图1 拖航系统模型示意

表1 半潜平台主要参数

指标	参数	指标	参数
总长/m	91.5	浮筒长/m	49.5
吃水/m	15	浮筒宽/m	21
质量/t	65363	浮筒高/m	9
立柱高/m	59	惯性半径 R_{-xx} /m	38.69
立柱宽/m	21	惯性半径 R_{-yy} /m	41.42
立柱中心间距/m	70.5	惯性半径 R_{-zz} /m	42.55

表2 拖带系统主要参数

拖揽揽号	长度/m	直径/m	湿重/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}$)	破断张力/MN
主拖揽	603.8	0.104	37.4	6.36
主拖分揽	52.0	0.092	29.3	5.84
辅拖揽	650.0	0.082	23.3	4.63

运用水动力软件SESAM对不同环境工况下的拖航系统进行时域耦合分析,通过施加恒定的系柱拉力以保持4节拖航速度,设置模拟仿真时长3 h,结果分析去除仿真前1000 s数据以消除拖航启动阶段瞬态效应误差。

2 研究方法

2.1 耦合时域运动方程

波浪中的结构物通常被认为是刚性的浮体,拖航系统在风、浪、流联合作用下的时域运动方程为:

$$[(M + A)]x''(t) + Dx'(t) + Kx(t) = F(t) \quad (1)$$

式中, M 为平台质量; A 为附加质量; D 为阻尼; K 为刚度, F 为外载荷。

2.2 浅水波浪理论

当海域水深较浅、波长大于水深时, 波浪运动受到海底效应影响, 此时波浪适用于椭圆余弦波理论。

海底到波谷高度:

$$\zeta_d = \frac{16h^3}{3\lambda^2} K(k) [K(k) - E(k)] + h - H \quad (2)$$

海域到波峰距离:

$$\zeta = \zeta_d + Hcn^2 \left[2K(k) \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right), k \right] \quad (3)$$

式中, h 为水底到水面距离, H 为波峰至水面距离, cn 为椭圆余弦函数, λ 为波长, $K(k)$ 、 $E(k)$ 为线性波和孤立波完全椭圆积分, k 为椭圆积分模数, T 为波周期, t 、 x 为计算点的时间和位置坐标。

2.3 波浪载荷

进行水动力计算时, 平台浮筒及立柱采用三维

势流理论^[15]。海水介质被假定为均质、不可压缩、无旋势、非黏性的理想流体。利用三维势流理论计算波浪对拖航系统的耦合效应的关键点是求解流场中的速度势, 包括速度势的分解及其求解条件。流场中的总速度势 $\Phi(x, y, z, t)$ 由入射速度势、辐射速度势和衍射速度势组成:

$$\Phi(x, y, z, t) = \Phi_I(x, y, z, t) + \Phi_R(x, y, z, t) + \Phi_D(x, y, z, t) \quad (4)$$

式中, $\Phi_I(x, y, z, t)$ 为入射速度势, $\Phi_R(x, y, z, t)$ 为辐射速度势, $\Phi_D(x, y, z, t)$ 为衍射速度势。

2.4 模型验证

对“深海一号”半潜平台数值仿真模型进行3个自由度的自由衰减运动数值模拟, 通过对平台施加初始偏移值(垂荡、横摇、纵摇位移分别为 -1.26 m 、 -2.70° 、 2.10°), 将计算结果与文献[16]中的水池试验数据结果进行对比, 发现曲线吻合度较好, 模型准确度较高。自由衰减运动对比如图2所示, 具体参数如表3所示。

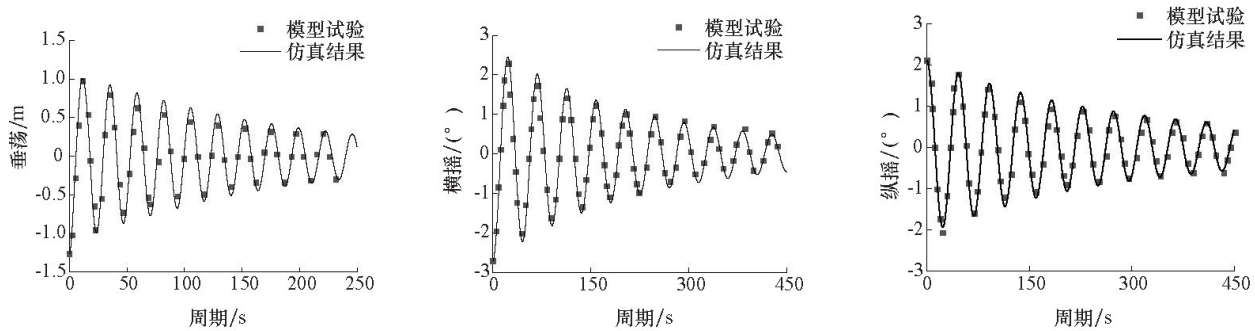


图2 平台自由衰减运动对比

表3 自由衰减结果对比

对比项	垂荡/m	横摇/(°)	纵摇/(°)
文献[16]模型试验	23.17	44.90	45.44
本研究数值模拟	23.00	45.70	45.90

2.5 运动性能分析

将“深海一号”半潜平台与文献[17]中的干树式半潜平台、单桩式深吃水立柱式(SPAR)平台进行垂荡运动响应曲线对比(图3)。虽然在波浪主要能量周期内, “深海一号”的运动幅值较低, 表现较为优秀, 但由于浮筒宽高比过高, 导致其小周期的垂荡

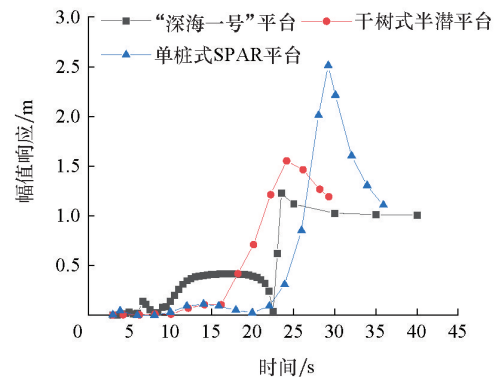


图3 “深海一号”平台与新型半潜式平台、常规单桩式平台垂荡运动响应曲线对比

运动浮体运动幅值响应算子(RAO)达到0.4,影响了拖航作业的稳定性和安全性。

3 工况设定

浅水是个相对概念,同一水深对于小船可能是深水,对于大船则是浅水,其定义与船舶吃水深度相关。国际上采用水深吃水比(水深/吃水)对此定义,其中浅水海域为 $1.2 < \text{水深}/\text{吃水} \leq 1.5$ 。本研究海域为中国南海台湾海峡附近海域。根据文献[18],考虑到平台吃水15 m且台湾海峡最浅水深为20.8 m,初步

设计的环境水深为22 m。另外,通过设定相同风、流环境条件下不同的有义波高、谱峰周期和浪向角,研究浅水海域不规则波浪载荷对浮筒宽高比过大的新型半潜平台拖航运动响应及拖揽张力的影响。考虑到台湾海峡风急浪高^[19],初步设计的环境条件:波浪载荷选择JONSWAP谱,设置有义波高为3、4、5 m,谱峰周期为9.4、10.5、11.6 s,浪向角为 $0^\circ \sim 180^\circ$,每隔 45° 取一个工况进行计算;风载荷选择API风谱(平均风速20 m/s),流载荷设置为表面流速1.0 m/s,风载荷、流载荷方向相同均取为 180° (顶风、顶流),环境载荷方向与台湾海峡浅水航道拖航作业如图4所示。

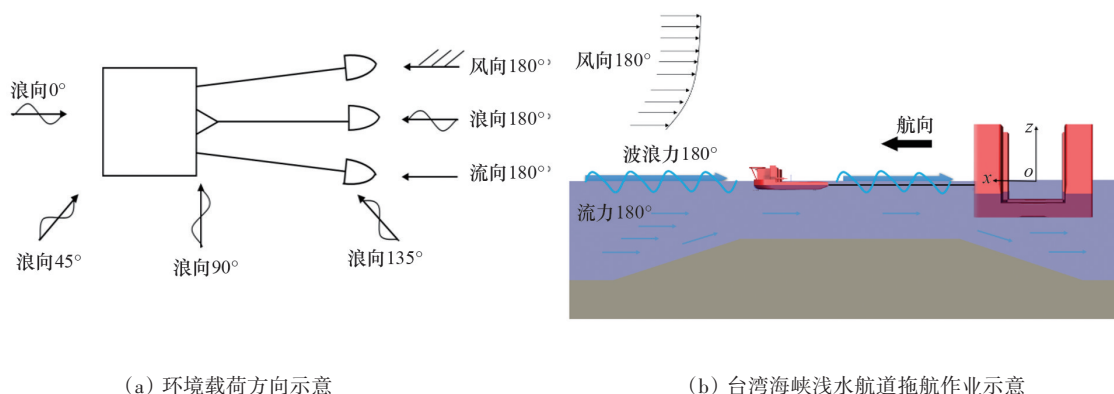


图4 环境载荷方向与台湾海峡浅水航道拖航作业示意

4 数值结果分析

4.1 波浪高度影响分析

通过设置不同的有义波高,研究波浪高度对半潜平台湿拖作业运动响应和拖揽张力的影响规律。由于平台处于拖航状态,运动响应主要分析垂荡、横摇和纵摇,拖揽张力以主拖揽张力为代表。环境工程设置如表4所示。

表4 环境工况参数

工况	有义波高/m	谱峰周期/s	浪向角/(°)
C1	3.0	9.4	0.0
C2	4.0	9.4	0.0
C3	5.0	9.4	0.0

如图5和图6所示,波高对平台拖航运动垂荡、纵摇和拖揽张力影响较大,三者均随着波高增大而

增大。当波高为5 m时,平台的垂荡极值为1.42 m,纵摇极值为 4.01° ,满足拖航过程规定的结构物倾角位移 $\leq 5^\circ$ 的要求^[20]。

波浪高度的大小象征着海浪能量的大小,更大的波浪会引起更大的波浪力矩,导致平台受到更强的波浪冲击和推动,进而增大了平台垂荡和纵摇的运动幅值。另外,主拖揽张力幅值增幅较为微弱是因为平台在顺浪拖航的情况下,波浪的传播方向与航向一致,波浪对平台产生助推力,从而减小了拖揽张力的波动。横摇幅值变化极小是因为半潜平台质量较高且主体结构为对称设计, 0° 浪向角下的波浪对平台的侧向力相对均匀地作用在两侧,从而不会引起明显的横摇运动。

4.2 波浪周期影响分析

通过设置不同的谱峰周期,研究其影响规律。环境工程设置如表5所示。

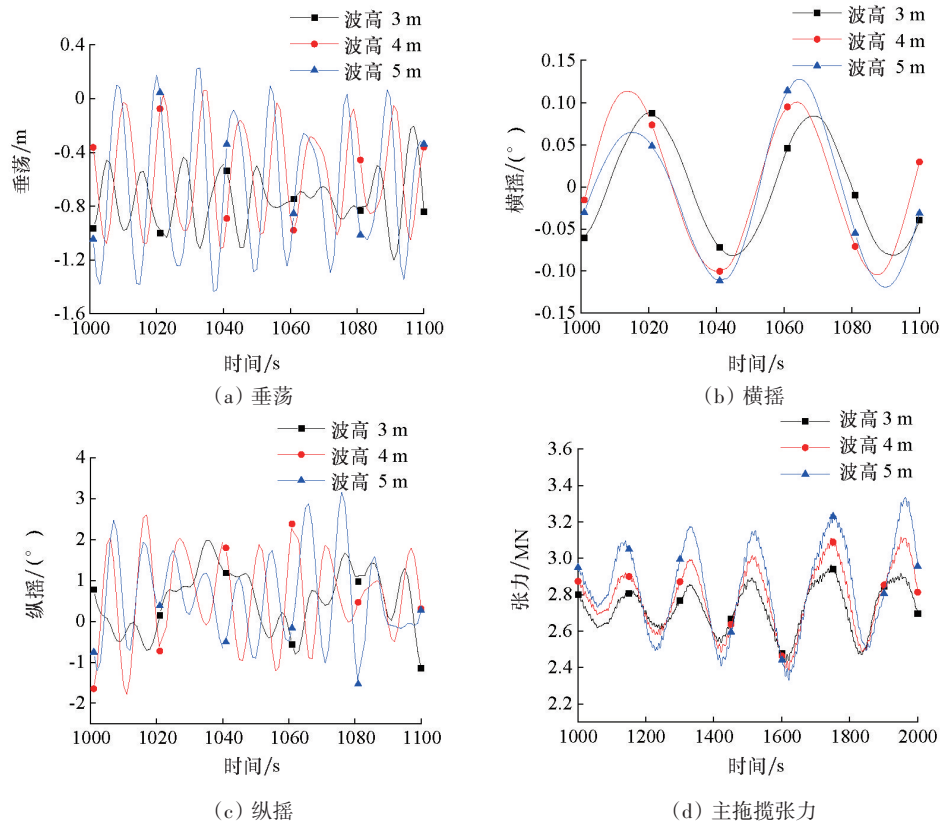


图5 不同波浪高度下半潜平台拖航运动及主拖揽张力时历曲线示意

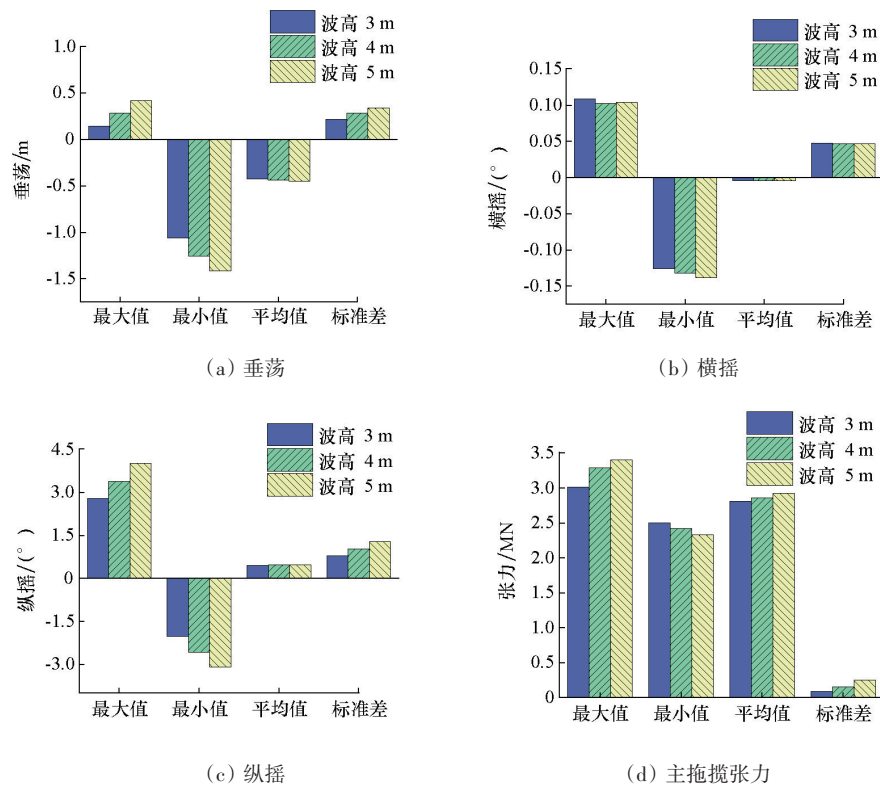


图6 不同波浪高度下半潜平台拖航运动及主拖揽张力特征值

表5 环境工况参数

工况	有义波高/m	谱峰周期/s	浪向角/(°)
C3	5.0	9.4	0.0
C4	5.0	10.5	0.0
C5	5.0	11.6	0.0

如图7、图8所示,谱峰周期对平台拖航运动垂荡、纵摇响应和拖揽张力影响较大。平台垂荡幅值随着周期增大而增大,极值为2.16 m;纵摇则随周期

增大而下降,极值分别为4.01°;主拖揽张力幅值也随周期增大而下降;横摇幅值在整个周期中变化极小。

当波浪周期与平台自身固有周期接近时,结构会在相应的自由度产生共振,所以当谱峰周期逐渐增大,逐渐接近平台固有周期时,平台垂荡会不断增大。另一方面,随着波浪谱峰周期的增大,波浪力矩对平台的运动影响减小,因此纵摇和主拖揽张力幅值均逐渐减小。

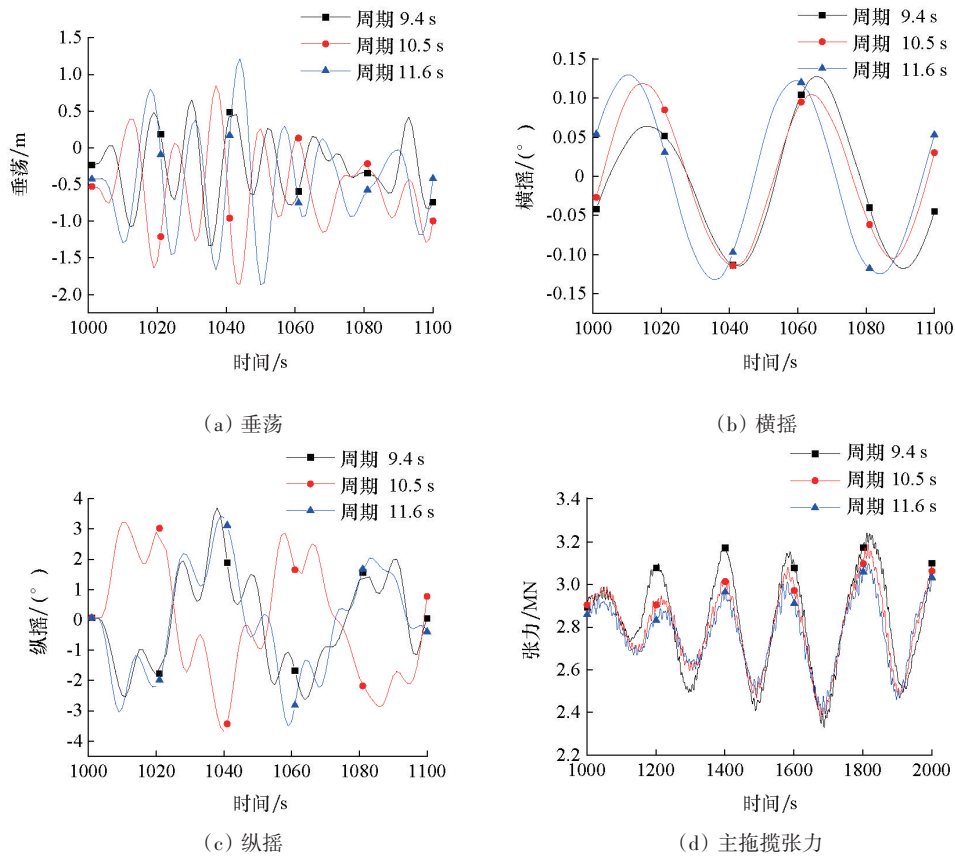


图7 不同谱峰周期下半潜平台拖航运动及主拖揽张力时历曲线示意

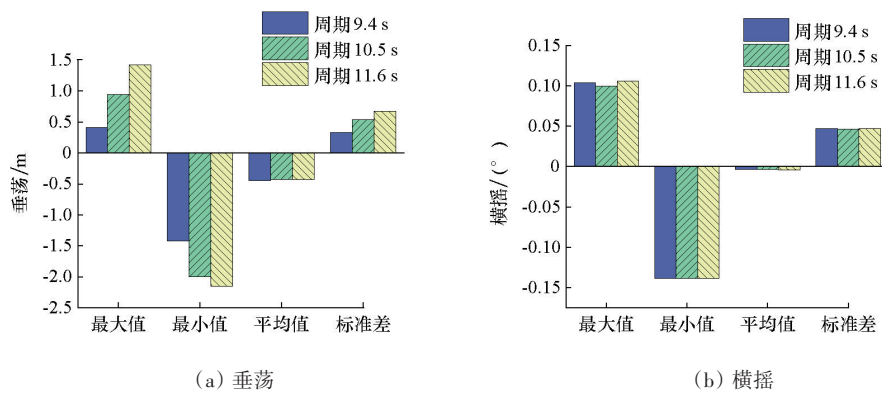


图8 不同谱峰周期下半潜平台拖航运动及主拖揽张力特征值

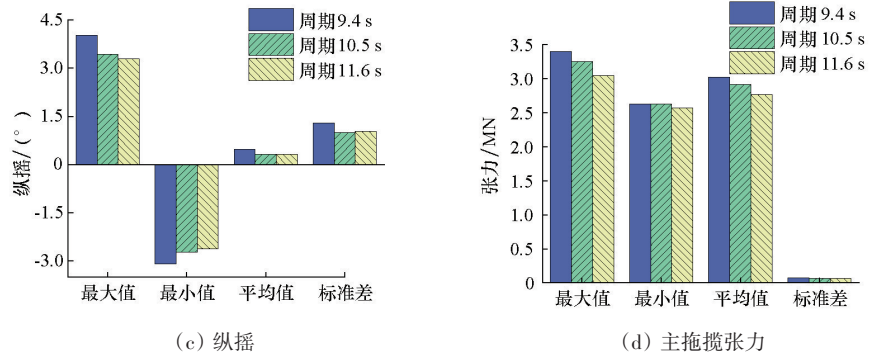


图8 不同谱峰周期下半潜平台拖航运动及主拖揽张力特征值(续)

4.3 浪向角影响分析

通过设置不同的浪向角,研究其影响规律。环境工程设置如表6所示。

表6 环境工况参数

工况	有义波高/m	谱峰周期/s	浪向角/(°)			
C5	5.0	11.6	0			
C6	5.0	11.6	45.0			
C7	5.0	11.6	90.0			
C8	5.0	11.6 </tr <tr> <td>C9</td> <td>5.0</td> <td>11.6</td> <td>180.0</td> </tr>	C9	5.0	11.6	180.0
C9	5.0	11.6	180.0			

如图9、图10所示,浪向角对平台拖航运动响应和拖揽张力均有较大影响。浪向角变化对平台拖航垂荡影响较小,垂荡极值为2.27 m(浪向角180°);由于平台为对称设计,波浪对平台的侧向力相对均匀地作用在两侧,从而纵摇与横摇运动幅值规律相反,分别在浪向角0°和90°下取得极值,纵摇为4.27°,横摇为4.07°;主拖揽张力幅值呈凸字型分布,在浪向角90°海况下取得极值为3.13 MN。这是因为当湿拖作业遭遇恶劣海况以及横向载荷作用时,被拖物会产生类似鱼类游动时的摆动现象,导致运动幅值和拖

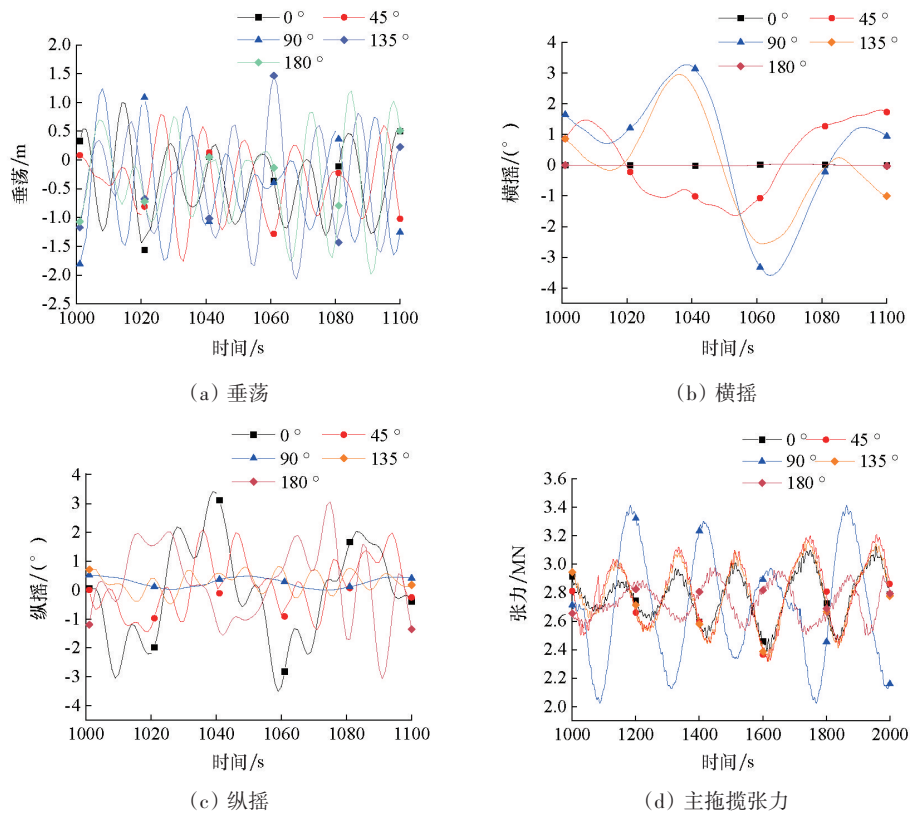


图9 不同浪向角下半潜平台拖航运动及主拖揽张力时历曲线示意

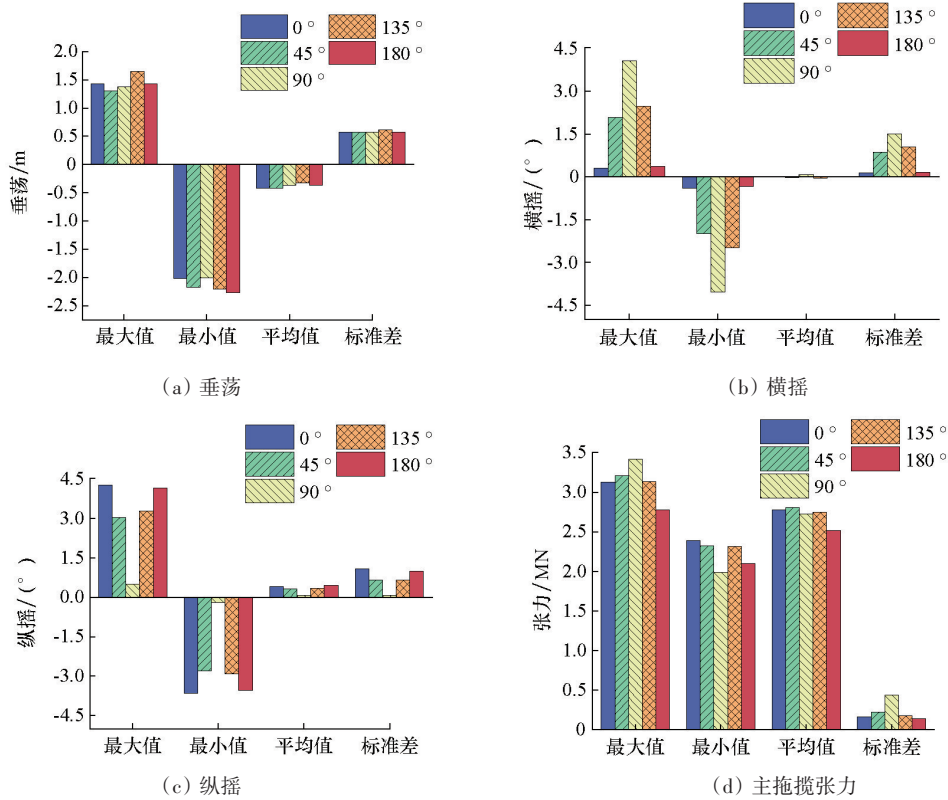


图10 不同浪向角下半潜平台拖航运动及主拖缆张力特征值

缆张力增大,这种现象被称为鱼尾效应。

需要注意的是,虽然纵、横摇运动幅值满足拖航过程规定的结构物倾角位移 $\leq 5^\circ$ 的要求,然而由于平台垂荡较大,计算得到平台最大吃水约为20.6 m,临近台湾海峡最浅水深20.8 m,因此在实际拖航作业中平台存在触底风险。另外,拖缆在拖航作业中受到的载荷响应应不超过其破断载荷的50%^[21]。而在浪向角为 90° 海况下,主拖缆张力极值已经超过50%拖缆破断力(6.36 MN),因此存在作业安全隐患。

4.4 拖航速度、拖缆长度影响分析

基于以上研究,发现当半潜平台拖航系统以4节航速在波高5 m时的台湾海峡浅水航道拖航时,存在触底风险和缆绳断裂安全隐患。因此,需要采取有效措施来规避风险,例如控制拖航速度、拖缆长度等。以工况C7为对照组,研究降低拖航速度为3节、2节和延长、缩短拖缆长度1/3对平台运动响应和拖缆张力的影响(表7)。

如图11、图12所示,随着拖航速度的下降,平台拖航运动响应幅值均明显下降,经过计算得出3节航速下平台最大吃水深度约为18.7 m,2节航速下约为

表7 工况参数

工况	有义波高/m	谱峰周期/s	浪向角/ $^\circ$	拖航速度/节	主拖缆长度/m
C7	5.0	11.6	90.0	4.0	603.8
C10	5.0	11.6	90.0	3.0	603.8
C11	5.0	11.6	90.0	2.0	603.8
C12	5.0	11.6	90.0	4.0	805.0
C13	5.0	11.6	90.0	4.0	402.5

16.6 m。根据参考文献[22],当水深/吃水 ≥ 1.5 时,可以认为浮体运动响应受水深影响较为微弱。因此,可认为2节航速下半潜平台拖航安全水深为25 m,3节为28 m,4节为31 m。随着拖缆长度的增大,拖船对被拖平台的遮蔽作用减弱,因此运动幅值增大;同时随着缆绳的增长、自重的增加,导致缆绳拉力也在增大。当缆绳长度缩短为原长的2/3时或航速降低为3节时,缆绳张力极值下降到安全范围。

综上所述,在新型半潜平台拖航作业遭遇浅水航道和危险海况时,可以通过降低拖航速度和缩短拖缆长度的方式提高平台稳定性,保障作业安全。

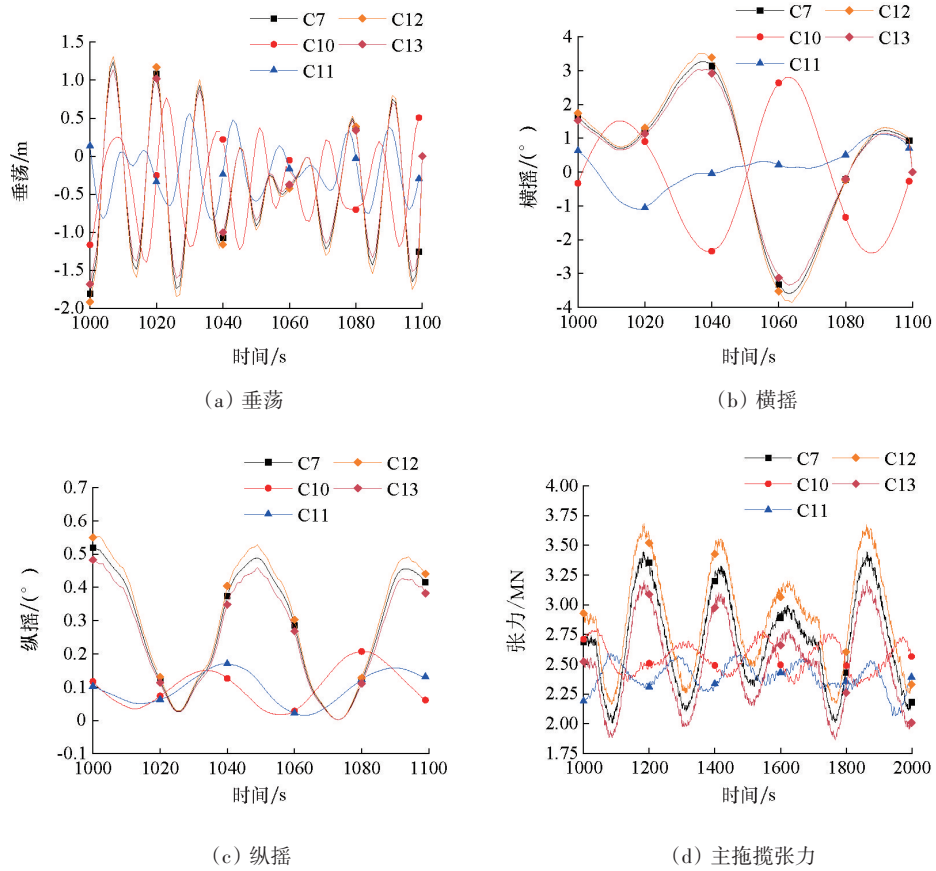


图 11 不同拖航速度、拖揽长度下半潜平台拖航运动及主拖揽张力时历曲线示意

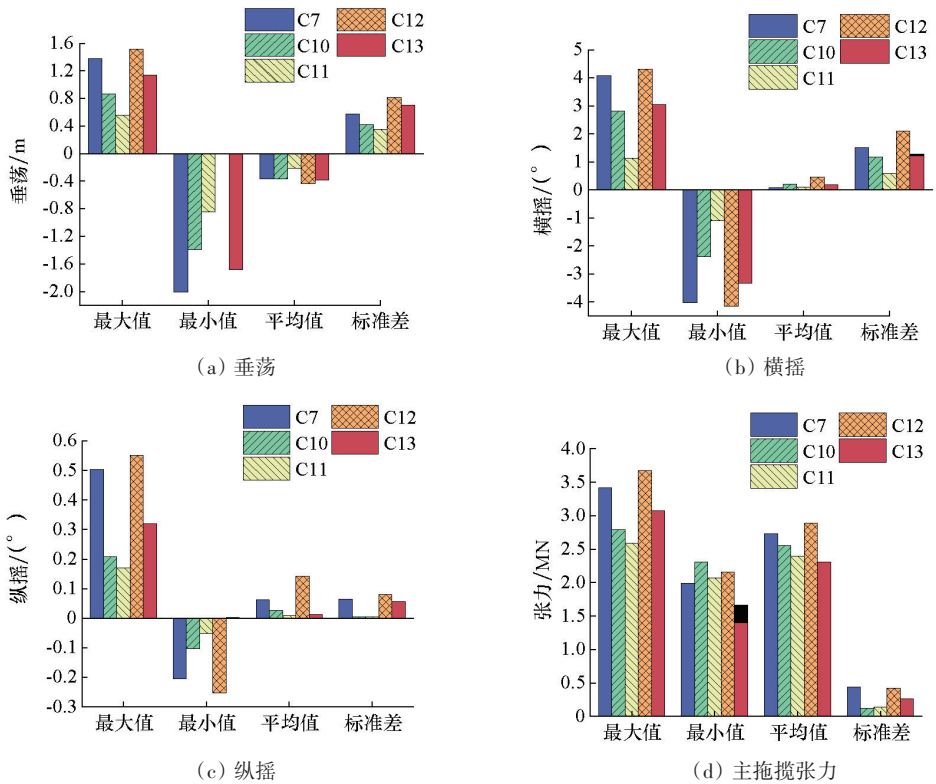


图 12 不同拖航速度、拖揽长度下半潜平台拖航运动及主拖揽张力特征值

5 结论

为保障新型半潜平台在台湾海峡拖航作业的安全性,基于时域分析理论、浅水波浪理论和三维势流理论,构建拖航系统数值仿真模型,研究了浅水中不同波浪条件对平台拖航运动响应和拖揽张力的影响,主要结论如下。(1)波浪载荷因素中,波浪高度和谱峰周期对平台垂荡、纵摇和拖揽张力影响较大,浪向角对横纵摇和拖揽张力均有较大影响。波浪高度越高,平台垂荡、缆绳张力越大;谱峰周期越长,平台纵摇、缆绳张力越小;不同浪向角下运动响应极值变化呈凹凸型分布。(2)在平台拖航过程中,不同工况下的半潜平台横纵摇均 $\leq 5^\circ$,满足拖航规范对大型海洋结构物的拖航要求,然而在台湾海峡浅水航道拖航时平台存在触底风险;通过分析不同航速下平台最大吃水,得出台湾海峡极端海况下半潜平台拖航速度为2、3、4节时,安全水深分别为25、28、31 m。(3)在 90° 浪向角下,半潜平台拖带缆绳载荷极值超过缆绳拖带作业安全范围,存在断裂隐患,可以通过降低拖航速度、缩短拖揽长度等方式规避风险,保障作业安全。

参考文献(References)

- [1] 高德利, 张广瑞, 王宴滨. 中国海洋深水油气工程技术与装备创新需求预见及风险分析[J]. 科技导报, 2022, 40(13): 6-16.
- [2] 洪术华, 宋雍, 叶景波, 等. 海洋工程发展现状与跨越发展战略[J]. 船舶工程, 2019, 41(增刊 2): 264-268.
- [3] 朱海山, 李达. 陵水17-2气田“深海一号”能源站总体设计及关键技术研究[J]. 中国海上油气, 2021, 33(3): 160-169.
- [4] 张元博. 波浪对半潜式平台稳性的影响研究[D]. 天津: 天津大学建筑工程学院, 2019.
- [5] Strandhagen A G, Schoenherr K, Kobayashi F M. The dynamic stability on course of towed ships[J]. SNAME, 1958(58): 32-66.
- [6] Desroches A S. Calculation of extreme towline tension during open ocean towing[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1997.
- [7] Park C W, Seo J, Hyung R S. Model tests of a caisson in wet towing for assessing resistance and stability in calm water and waves[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 2018, 140(5): 051301.
- [8] Chen S T, Zou H, Qi G C, et al. Study of two ships approaching process and towing motion under wave action[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(9): 1209.
- [9] Zhang P Y, Liang D S, Ding H Y, et al. Floating state of a one-step integrated transportation vessel with two composite bucket foundations and offshore wind turbines[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2019, 7(8): 263.
- [10] Han Y, Zhu X, Zhou L. Numerical simulation of multi-tug towing of a gravity-based structure in broken sea ice[J]. Ocean Engineering, 2022, 261: 112070.
- [11] Paulauskas V, Simutis M, Plačiene B, et al. The influence of port tugs on improving the navigational safety of the port [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(3): 342.
- [12] Le C H, Ren J Y, Wang K, et al. Towing performance of the submerged floating offshore wind turbine under different wave conditions[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(6): 633.
- [13] Gu H Y, Wang H K, Zhai Q, et al. Study on the dynamic responses of a large caisson during wet-towing transportation[J]. Water, 2021, 13(2): 126.
- [14] 郭浩, 谢维维, 刘顺庆, 等. “深海一号”能源站跨海区湿拖技术[J]. 中国海洋平台, 2023, 38(3): 79-85.
- [15] DNV-GL. Marine operations and marine warranty: DNV-ST-N001[S]. Oslo: Det Norske Veritas, 2020.
- [16] 祝港, 刘培林, 黄福祥, 等. 半潜式平台自由衰减时域运动数值仿真[J]. 中国海洋平台, 2021, 36(6): 1-5.
- [17] 韩旭亮, 谢文会, 邓小康, 等. 新型干树半潜式平台运动性能研究[J]. 中国海上油气, 2021, 33(5): 189-194.
- [18] 俞慕耕. 中国近海水文气象资料[M]. 北京: 海洋出版社, 1987.
- [19] 郑祥靖, 李雪丁, 徐啸, 等. 台湾海峡海浪数值模拟和特征分析[J]. 海洋预报, 2021, 38(5): 31-39.
- [20] 中国船级社. 海上拖航指南: GD 02-2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [21] 船舶检验局. 海上拖航法定检验技术规则: SZMSA-213-2010-5604[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
- [22] Chen C Y, Delefortrie G, Lataire E. Effects of water depth and speed on ship motion control from medium deep to very shallow water[J]. Ocean Engineering, 2021, 231: 109102.

Influence of wave load on the dynamic response and towing tension of semi-submersible platform in shallow waters

ZHANG Tao¹, BAI Xu^{1*}, ZAN Yingfei²

1. School of Naval Architecture and Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China

2. College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China

Abstract Aiming at the complex and harsh environmental conditions of shallow waters around of Taiwan Strait, in this paper, new semi-submersible platform with a large aspect ratio of the buoy is taken as the research object. Based on the time domain analysis theory and the shallow water wave theory, the numerical model is used to compare and analyze the influence of different significant wave heights, spectral peak periods, wave direction angles, towing speed and towing length on the towing dynamic response and towing tension of the semi-submersible platform in shallow waters. The results show that the higher of the wave height, the greater of the platform heave and the cable tension; the longer of the spectral peak period, the smaller of the pitch and cable tension; the wave direction angle has a significant influence on the roll and pitch, and the extreme value presents concave-convex distribution. The roll and pitch of the new semi-submersible platform under different working conditions are $\leq 5^\circ$, which meets the requirements of the towing specification. The cable tension is greatly affected by the speed and wave height. When the wave height reaches 5 m, the towing tension exceeds the safe range, and the risk can be avoided by reducing towing speed and cable length.

Keywords shallow waters; wave load; semi-submersible platform; motion response; pulling tension ●



(责任编辑 傅雪)