文章编号:1000-8608(2019)05-0501-08

两平台靠泊状态耦合运动响应分析

刘 $\mu^{1,2}$, 李 $焱^{*1,2}$, 王 $\overset{*1,2}{:}$, 唐友 $M^{1,2}$, 童 \dot{w}^{3}

(1. 天津大学 建筑工程学院, 天津 300072;

2. 天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072;

3. 中国船舶及海洋工程设计研究院,上海 200011)

摘要:研究两座半潜式平台靠泊状态耦合动力响应特性,确定安全作业条件.针对通过栈桥 连接的两座半潜式平台,考虑风浪流荷载作用,建立两座平台水动力分析模型.基于三维势流 理论,在频域内计算旁靠作业中两半潜平台多体耦合水动力性能,分析不同浪向角对平台所 受波浪荷载的影响.基于 Kalman 滤波控制算法,考虑不同海况条件分析靠泊系统的定位能 力,并根据位移上限条件得出了可进行靠泊作业的海况.结果表明,二阶波浪荷载对平台水动 力相互作用存在影响.斜浪可作业海况最高、横浪次之,纵浪时可进行靠泊作业的海况最低. 所得研究结果对于两平台安全靠泊具有参考意义.

0 引 言

半潜式生活平台与半潜式生产平台组合作业 是一种新型的油气田开发模式,两平台平行旁靠, 通过生活平台上装备的可伸缩栈桥实现两座平台 的横向连接.栈桥通过一转塔结构安装在半潜式 生活平台主甲板上右舷船舯的位置,活动端支点 搭接在生产平台主甲板左舷边缘的船舯位置.

两平台的靠泊运动特性涉及多浮体耦合动力 分析以及半潜式平台动力定位能力计算等诸多方 面.国内外学者对多浮体耦合动力响应分析已经 做过很多研究,其中彭景环^[1]研究了规则波中双 浮体耦合运动的响应,并分析了浮托法安装过程 双驳船间耦合的水动力和浮体运动响应.王晨征 等^[2]研究了 FPSO 串靠外输作业过程,穿梭油轮 和 FPSO 油轮的耦合运动响应,并分析了低频波 浪力对整个系统的影响.

目前关于多浮体耦合运动响应的研究工作, 其连接材料一般为缆绳,对于通过栈桥连接的多 浮体运动响应问题,研究工作较少. Morandini^[3] 对跨接在两艘串靠系泊船舶间的栈桥进行了初步 设计,并总结了针对船舶及栈桥耦合运动响应需 要研究的问题. BV 船级社的 Huang 等^[4-5]研究了 具有 DP(dynamic positioning)的生活船与 FPSO 油轮靠泊状态的耦合运动响应,分析了两船相对 运动引起的栈桥运动响应,并通过模型试验进行 了验证. Kunkvebe 等^[6]规划了具有 DP 的半潜式 生活平台与 FPSO 的靠泊模式,总结出平行旁靠、 对角旁靠和垂直旁靠3种浮体相对位置形式,计 算了不同海况条件和靠泊方式下跨接栈桥的行程 及倾斜角度,校核了推进器推力. Cong 等[7] 同样 研究了半潜式生活平台靠泊 FPSO 的情况,考虑 遮蔽效应,使用 CFD 方法计算了生活平台和 FPSO的流力系数,基于 PID 控制程序验证了半 潜式生活平台的动力定位能力,计算分析了栈桥 的伸缩行程,但其计算只考虑了迎流状态,没有分 析其他荷载方向的动力响应,综上所述,目前对于 半潜式生活平台与半潜式生产平台海上靠泊的研 究还不全面,其难点在于两平台频域水动力特性 相互干扰,以及时域动力定位能力计算等诸多方 面,还要兼顾栈桥伸缩行程和倾斜角度对两平台

基金项目:国家工业与信息化部项目(G014614002).

收稿日期: 2019-03-05; 修回日期: 2019-07-25.

作者简介: 刘 峥(1994-),男,硕士生,E-mail:liuzheng_liuzh@163.com;李 焱*(1990-),男,博士,讲师,E-mail:liyan_0323@tju. edu.cn.

相对位移的限制,进而找出准许靠泊作业的海况 条件.本文重点研究两平台间隙水动力荷载特性, 以及该水动力荷载对于平台运动的影响机理,并基 于分析结果,确定平台安全作业的海洋环境参数.

1 计算理论与方法

1.1 动力定位推力模型

本文动力定位时域分析计算采用 Kalman 滤 波控制器,基于 Kalman 滤波状态估计理论和 LQ 最优控制算法,通过 Kalman 滤波增益来更新浮 体高频运动、低频运动和环境扰动力的状态估计 变量,进而完成自适应控制.浮体受到的环境扰动 力包括平均波浪漂移力和海流力.

以浮体纵荡自由度的运动控制为例,通过低 频运动变量得到的推力值为

$$F_{tx}^{l} = G_{11}\delta_{x} + G_{12}\delta_{x}$$
(1)

式中: F_{tx}^{1} 表示推进器有效推力; δ_{x} 和 $\dot{\delta}_{x}$ 分别表示 位移和速度与目标值的偏差; G_{11} 和 G_{12} 分别为控 制器增益矩阵内的元素,控制器增益矩阵为G[3, 2],行向量分别表示纵荡、横荡和艏摇3个自由 度,列向量分别表示刚度系数和阻尼系数.

在正常情况下,推进器推力在修正位置偏差 的同时,还要抵消外部的环境荷载,所以有

$$F_{tx} = F_{tx}^{l} + F_{bx} + F_{wx}$$
 (2)
式中: F_{tx} 表示推进器输出总推力, F_{bx} 表示环境扰
动荷载, F_{wx} 表示风前馈荷载.

1.2 两浮体耦合运动方程

考虑两浮体间水动力相互作用的时域运动方 程为

$$\begin{pmatrix} \boldsymbol{M}_{a} + \boldsymbol{A}_{aa}(\infty) & \boldsymbol{A}_{ba}(\infty) \\ \boldsymbol{A}_{ab}(\infty) & \boldsymbol{M}_{b} + \boldsymbol{A}_{bb}(\infty) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\ddot{x}}_{a}(t) \\ \boldsymbol{\ddot{x}}_{b}(t) \end{pmatrix} + \\ \begin{pmatrix} \boldsymbol{C}_{aa} + \boldsymbol{D}_{a} & \boldsymbol{C}_{ba} \\ \boldsymbol{C}_{ab} & \boldsymbol{C}_{bb} + \boldsymbol{D}_{b}(\infty) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\dot{x}}_{a}(t) \\ \boldsymbol{\dot{x}}_{b}(t) \end{pmatrix} + \\ \int_{0}^{t} \begin{pmatrix} \boldsymbol{h}_{aa}(t-\tau) & \boldsymbol{h}_{ba}(t-\tau) \\ \boldsymbol{h}_{ab}(t-\tau) & \boldsymbol{h}_{bb}(t-\tau) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{\dot{x}}_{a}(\tau) \\ \boldsymbol{\dot{x}}_{b}(\tau) \end{pmatrix} d\tau + \\ \begin{pmatrix} \boldsymbol{K}_{a} & \boldsymbol{0} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{K}_{b} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \boldsymbol{x}_{a}(t) \\ \boldsymbol{x}_{b}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \boldsymbol{f}_{a}(t) \\ \boldsymbol{f}_{b}(t) \end{pmatrix}$$
(3)

式中: $A(\infty)$ 为频率趋近于无穷大时的附加质量; C 为辐射阻尼矩阵;D 为线性化的阻尼矩阵;K 为 回复刚度矩阵;f(t)为一阶波浪力、二阶波浪力、流 荷载、风荷载、系泊系统回复力、推进器推力等外部 荷载的和; $h(\tau)$ 为迟滞函数矩阵,与流场自由表面记 忆效应相关;下标 a、b 分别表示浮体 A 和浮体 B.

2 平台主尺度及环境参数

2.1 主尺度参数

靠泊初始时刻,两平台间的间距与栈桥原始 长度相同,栈桥基本与海平面平行,靠泊时两座半 潜式平台都采用动力定位.由于生产平台底部有 立管等设备与海底相连,不能产生大的位移,且生 活平台主尺度较小,机动性能好于生产平台,所以 两平台靠泊时将生产平台设置为主动平台,其目 标位置为钻井、采油作业的最佳位置;将生活平台 设置为被动平台,由于生产平台位移小,与之连接 的生活平台的位移也会被生产平台限制,生活平台 随生产平台的运动而运动,从而使跨接在两平台中 间的栈桥保持在一定的伸缩行程内,两座平台之 间不需要额外布置系泊缆索和橡胶护舷材进行位 置保持.两平台靠泊时的相对位置如图1所示.



图1 靠泊时两座半潜式平台的相对位置

Fig. 1 Relative position of two semi-submersible platforms when berthing

生活平台在作业条件下与生产平台靠泊来输 送工作人员,所以本文只研究作业工况下两平台 靠泊运动.两平台主尺度、排水量和重心位置等信 息如表1所示.

如图 2 所示,本文计算采用的生活平台以及 生产平台湿表面关于 x 轴和 y 轴对称,0°方向为 平台艉部指向艏部,90°方向时,生产平台迎浪,生 活平台被遮蔽,两平台中心连线与 y 坐标轴重 合,两平台初始间距 38.5 m.

推进器的性能及布置方式对平台的动力定位 能力影响显著.本文中两座半潜式平台都采用了 DP3级动力定位系统,生产平台和生活平台分别 配备 8、4 台全回转推进器,推进器最大功率

Tab. 1 Parameters of two semi-submersible platforms

表 1

两半潜平台参数

平台	下浮体 长度/m	下浮体 宽度/m	下浮体 间距/m	主甲板 长度/m	主甲板 宽度/m	作业 吃水/m	排水量/t	重心距基 线高度/m
生产平台	109.44	17.92	42.16	80.64	78	19.0	52 509	25.84
生活平台	98.00	14.00	39.00	66.00	67	20.0	32 637	19.29



图 2 坐标系定义及环境荷载方向



3 600 kW,最大推力 712 kN.考虑到推进器尾流 受到干扰等原因造成的推力损失,以及保留一定 的推力余量,本文取有效推力为最大推力的 80%.坐标系定义、环境荷载方向α。及推进器位 置如图2所示.

2.2 环境参数

表 2 是根据 API 规范建议^[8],确定不同风速 条件下,波高、波浪周期等环境参数.流速统一设 定为 1 m/s,风速为 1 h 平均风速.

表 2	M,	浪、	流	圿	垷	杀	件
-----	----	----	---	---	---	---	---

Tab. 2 Wind, wave and current condition

海况 编号	风速/ (m・s ⁻¹)	有义 波高/m	谱峰 周期∕s	流速/ (m・s ⁻¹)	不超过 概率/%
Case1	2.17	1.28	5.30	1	14.3
Case2	4.35	1.78	6.26	1	35.7
Case3	6.52	2.44	7.32	1	56.9
Case4	8.70	3.21	8.41	1	73.3
Case5	10.90	4.09	9.49	1	85.2
Case6	13.04	5.07	10.56	1	92.5
Case7	15.22	6.12	11.61	1	96.6
Case8	17.39	7.26	12.64	1	98.4

3 频域计算结果分析

由于两半潜式平台组成的靠泊系统具有对称 性,本文在计算时分别考虑 90°、135°、180°、225°、 270°等 5 个浪向角条件,对计算得出的一阶波浪 力曲线和平均波浪漂移力曲线进行研究分析.因 为半潜式生活平台和生产平台湿表面形状相似, 波浪荷载随浪向角变化的趋势也类似,所以本文 只给出生产平台的计算结果.建立的水动力分析 模型如图 3 所示.



图 3 两平台频域计算模型

Fig. 3 Two platforms frequency domain calculation model

3.1 波浪方向对浮体一阶波浪力影响

波浪方向对浮体一阶波浪力影响如图 4 所 示.从中可以看出,对称浪向条件下纵荡、横荡与 艏摇 3 个自由度的一阶波浪力区别很小,这是因 为两个平台间距为 38.5 m,距离较远,平台之间 的遮蔽效应未产生作用效果.此外,在 90°、270°两 个垂直方向的浪向下,平台的纵荡和艏摇荷载很 小,但 180°水平浪向下的波浪能够使平台具有较 大的纵荡和艏摇波浪力,与平均波浪漂移力规律 类似.导致这一现象的原因主要为以下两点: (1)两平台在纵浪条件下的水动力比横浪条件下 的水动力更大;(2)两平台之间的间隙水体对横荡 和艏摇方向上的波浪荷载影响较大,对纵荡方向 上的波浪荷载影响较小.

这一现象是由两浮式平台在靠泊作业时采用 旁靠方式,并且两平台沿纵向以平行方式布置导 致,第一个平台会对波浪产生散射作用,这会让第 二个平台受到横向的波浪荷载作用.在两平台之 间 38.5 m 的间隙空间内,波浪的入射波、绕射波 与辐射波互相叠加在一起,引起波浪在平台的长 度方向上波浪分布的不均匀,也会导致两个平台 各自所受的波浪力不均匀,这会产生一个作用在 平台上的艏摇力矩.此外这两个平台的尺寸与下 浮体布置方式不同,整个系统关于本文设置的坐 标系的 y 轴对称,然而系统在坐标系的 x 轴方向





Fig. 4 First-order wave force transfer function curve of different wave direction of production platforms

上不对称,这种平台尺寸与布置方式的不对称特 性也会对平台产生艏摇波浪力矩和横向的波浪 力.由平台的艏摇和横荡产生的波浪辐射能量会 在两平台的 38.5 m 的间隙内互相传递,并作用 到第二个平台之上,但是纵荡方向上的辐射能量 对第二个平台的作用效果却微乎其微.在波浪沿 横向方向入射时,因为系统沿 y 轴对称,波浪荷 载的对称性与系统相同,在此方向上只会产生横 向的波浪荷载,纵荡和艏摇荷载也会很小.

3.2 波浪方向对浮体平均波浪漂移力的影响

不同波浪方向下生产平台平均波浪漂移力曲 线如图 5 所示.从中可以看出,在不同方向的波浪 作用下,平台所受的平均波浪漂移力曲线的差别要 更大,所以平均波浪漂移力比一阶波浪力更容易受 到两平台水动力相互作用的影响.同时由于平均波 浪漂移力所显示的方向性,垂线浪向 90°和 270°以及 斜向浪向 135°和 225°两组浪向作用下,平台受到的 平均波浪漂移力在横荡和艏摇方向上更接近对称.



图 5 不同浪向下生产平台平均波浪漂移力曲线

Fig. 5 Average wave drift force curve of different wave direction of production platforms

4 时域计算结果分析

在 SIMO 中建立两平台时域计算模型. 连接两个平台的栈桥具有伸缩接头,调节两个平台之间的间距,本次建模中,用一根弹簧模拟栈桥的伸缩运动,其中设置弹簧初始长度为两平台初始间距 38.5 m. 因为栈桥不能承受荷载,在模拟中取弹簧的刚度为小量 *K*=1.0 N/m,以便保持栈桥的自由伸缩状态. 栈桥的两个端点为弹簧端点,用固定伸长耦合模块中的弹簧模型连接两点,通过输出弹簧上的荷载换算后得到栈桥运动时的伸缩量.

4.1 两平台位移上限条件

为了满足钻井生产平台作业的要求,半潜式 生产平台水平位移一般限制在水深的5%以内, 艏摇最大值一般在10°以内^[9].连接两座平台栈桥 的运动响应对于保证人员和物资安全输送十分重 要,实际工程与栈桥运动响应相关的控制参数超 过10项^[2].本文针对靠泊状态,考虑其中最为关 键的两项:栈桥伸缩行程以及垂直平面内栈桥与 栈桥转塔上表面之间的夹角 a₂ 进行研究.栈桥伸 缩行程允许的最大值为±8 m,与栈桥转塔上表 面之间的夹角最大允许为±12°,其主要受两平台 纵荡和横荡相对运动的影响,而这两个自由度的 运动不能受动力定位系统控制,只能依靠平台自 身的重力和浮力来产生回复刚度.夹角 α₂ 的定义 及计算方法如图 6 所示.



图 6 夹角 α, 的定义及计算方法

Fig. 6 The definition and calculation method of the angle α_z

图 6 中 L₀ 为栈桥长度,Z_r 为栈桥活动端与 铰接端的高度差,β_z 为栈桥与水平面夹角,φ_z 表 示栈桥与塔柱的夹角,γ_z 表示生活平台横荡角, 根据位置关系有

$$\beta_{\rm z} = \arcsin(Z_{\rm r}/L_0) \tag{4}$$

$$\varphi_z = 90^\circ - \gamma_z + \beta_z \tag{5}$$

$$\alpha_z = 90^\circ - \varphi_z \tag{6}$$

本文计算水深为 300 m,分别按照各项限制 因素的最大允许位移的 2/3 以及最大允许位移设 计了两种位移上限条件,如表 3 所示,以此来搜索 可进行靠泊作业的海况.其中位移上限条件 1 比 位移上限条件 2 更加偏于安全.

表 3 位移上限条件

Tab. 3	Upper	displacement	condition
--------	-------	--------------	-----------

位移上 限条件	生产平台 水平位移/m	生产平台 艏摇/(°)	栈桥伸缩 行程/m	夹角 α _z /(°)
1	10	7	5	8
2	15	10	8	12

4.2 风、流力系数的选取

两平台风、流力系数按照 API 规范计算^[8], 生产平台的流力系数 C_f 、风力系数 C_w 如图 7、8 所示.时域计算时,根据规范建议,取风、浪、流同 向,并从 $\alpha_e = 0^\circ \sim 360^\circ$ 方向以 15°为间隔入射.



Fig. 7 Production platform current coefficient





4.3 平台运动历时曲线

由于 Case1~Case3 海况较低,不会导致两座 平台产生大幅度的运动,本文将研究重点放在 Case4~Case8 海况.此处给出在 Case4 环境条件 下生产平台运动历时曲线,如图 9 所示,其中生活 平台运动结果与生产平台类似,此处不给出.由历 时曲线看出,平台在动力定位系统的作用下运动 位移不大,平台运动性能良好.



图 9 Case4 海况下生产平台运动历时曲线 Fig. 9 Production platform motion time history curve in Case4

4.4 可进行靠泊作业的海况

对不同海况和不同环境荷载方向 α_e,基于生 产平台水平位移 u_h、艏摇 Y、栈桥伸缩行程 u_z 以 及栈桥与塔柱上表面夹角 α_z 的历程响应计算结 果,取绝对值并统计最大值.根据给定的位移上限 搜索出可以进行靠泊作业的海况条件.根据统计 结果中的数据作图如图 10~13 所示.

图中横轴为环境荷载方向,纵轴为运动响应 最大值,图中各条曲线分别对应不同海况条件下 的计算结果.由图 10 和图 11 可知,Case8 海况下 生产平台运动响应和栈桥伸缩行程的最大值约为 Case4 海况下运动响应最大值的 10 倍,而 Case8 海况只是 Case4 海况风速的 2 倍,所以海况条件 的改变对浮体系统的运动有非常大的影响.纵向 荷载使生产平台产生的水平位移以及栈桥伸缩行 程要大于横向和斜向荷载.以 Case6 海况为界限 来划分高海况和低海况,高海况时,0°和 180°方向 的环境荷载会使生产平台产生大幅度的水平漂 移,这是由于纵浪引起的平均波浪漂移力大于横 浪,同时在高海况条件下,风、浪、流纵向入射时



图 10 不同海况下生产平台水平位移最大值

Fig. 10 Maximum horizontal displacement of production platforms in different sea conditions



- 图 11 不同海况下栈桥伸缩行程最大值
- Fig. 11 Maximum trestle bridge travel distance in different sea conditions



图 12 生产平台艏摇最大值





图 13 栈桥与转塔上表面夹角最大值 Fig. 13 Maximum angle between the trestle bridge and the upper surface of the turret

两平台之间水动力相互作用产生的荷载及其方向 复杂多变,推进器不能提供抵消环境荷载和平台 位置改变所需的推力,导致推力不足,使两平台产 生较大幅度的漂移和相对运动.

从图 12 中可以看出,生产平台艏摇运动最大 值随环境荷载方向的变化波动明显,斜浪向时引 起的艏摇运动幅度最大,不过总体来看生产平台 的艏摇运动并不显著,即使在 Case8 海况条件下 生产平台艏摇运动最大值也保持在 10°以内,说 明动力定位系统对艏摇运动的控制能力良好.

从图 13 可以看出,栈桥与转塔上表面夹角主 要受两平台横荡和纵荡相对运动的影响,所以横 向荷载产生的夹角最大值要大于纵向荷载.由于 栈桥与转塔上表面夹角的位移极限较小,同时两 平台纵荡和横荡自由度相对运动较为明显,容易 使栈桥与转塔上表面的夹角达到上限,从而影响 可靠泊作业的海况条件.

根据历时统计数据,分别依照表 3 中设计的两种位移上限条件来搜索安全靠泊的海况,得到结果如图 14 所示.图 14 中最外侧圆环外围数值表示风、浪、流入射角度,径向网格表示每 min 平均风速,从 0 到 20 m/s,分别对应 Casel 到 Case8 海况,闭合曲线内部都为可以进行靠泊作业的海况条件.



图 14 可靠泊作业海况风玫瑰图



从图 14 中可以看出,斜浪时可进行靠泊作业 的海况要高于横浪和纵浪,其中纵浪下可进行靠 泊作业的海况最低.采用位移上限条件 2 搜索得 到的可靠泊作业海况要明显高于采用位移上限条 件1搜索得到的结果.对于位移上限条件1,风、 浪、流纵向和横向入射时,可进行靠泊作业的最高 海况为 Case4,此时每 min 平均风速为8.70 m/s, 不超过概率为73.3%;环境荷载斜向入射时,可进 行靠泊作业最高海况为 Case6,风速13.04 m/s, 不超过概率为92.5%.对于位移上限条件2,风、 浪、流纵向入射时,可进行靠泊作业的最高海况为 Case5,风速10.90 m/s,不超过概率为85.2%; 风、浪、流横向入射时,可进行靠泊作业的最高海 况为 Case6;风、浪、流斜向入射时,可进行靠泊作 业的最高海况为 Case7,风速15.22 m/s,不超过 概率为96.6%.通过以上结果可知:本文研究的 两平台海上靠泊系统具有良好的运动性能,能够 满足大多数海况条件下的靠泊作业要求.

5 结 论

(1)由于两平台靠泊时初始间距较大,第一个 生产平台对第二个较小的生活平台的遮蔽效应不 明显;两平台间隙水体之间的水动力相互作用对 平均波浪漂移力的影响要更大,对一阶波浪力的 影响要小于对平均波浪漂移力的影响;由于两平 台旁靠位置关于坐标系 y 轴对称,并且也由于两 平台各自的对称性,间隙水体的水动力相互作用 在纵浪条件下更显著,此外水动力的相互作用对 两平台的艏摇与横荡方向的作用比纵荡方向上的 作用要更大.

(2)纵向环境荷载作用产生的生产平台水平 位移和栈桥伸缩行程要大于横向和斜向荷载.海 况条件恶劣时,推进器提供的推力不足以控制平 台定位,使两平台产生较大幅度的漂移和相对运动.动力定位系统对艏摇运动的控制良好,生产平 台艏摇运动不明显.横向环境荷载作用时产生的 栈桥与转塔上表面夹角要大于纵向环境荷载.

(3)根据生产平台水平位移、栈桥伸缩行程、 生产平台艏摇、栈桥与转塔上表面夹角四点位移 限制因素,设计了两种位移上限条件.斜浪时可进 行靠泊作业的海况最高,横浪次之,纵浪时最低.

参考文献:

[1] 彭景环.海上浮托安装中多浮体水动力耦合作用研究[D].上海:上海交通大学,2011.
 PENG Jinghuan. Hydrodynamic interaction of multi-body for offshore float-over installation [D].
 Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.

(in Chinese)

 [2] 王晨征,范 菊,缪国平,等. 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 Chenzheng, FAN Ju, MIAO Guoping, et al. Dynamic analysis of FPSO tandem offloading system [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2016, **31**(6): 730-738. (in Chinese)

- [3] MORANDINI C. Design issues for connecting two floating structures [C] // Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering — OMAE. Halkidiki: ASME, 2005.
- [4] HUANG Wei, LI Binbin, CHEN Xiaobo, et al. Numerical and experimental studies on dynamic gangway response between monohull flotel and FPSO in non-parallel side-by-side configuration [J]. Ocean Engineering, 2018, 149: 341-357.
- [5] LI Binbin, HUANG Wei, ARAUJO R. Gangway motion evaluation of an accommodation vessel operating along a turret moored FPSO [C] // Proceedings of the 25th International Ocean and Polar Engineering Conference, ISOPE 2015.

Hawaii: ISOPE, 2015.

- [6] KUNKYEBE S, GEORGIEV Y. Optimal working conditions of a floatel along an FPSO [D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2015.
- [7] CONG P W, MAGEE A R, JAIMAN R, et al. Hydrodynamic analysis including shielding effects and advanced DP controls for improved uptime of a floatel connected to an FPSO by a gangway [C] // Offshore Technology Conference Asia 2018, OTCA 2018. Kuala Lumpur: Offshore Technology Conference, 2018.
- [8] API. Design and Analysis of Stationkeeping Systems for Floating Structures: API 2SK Ed. 3 (2005) [S]. America: API, 2005.
- [9] 王 磊,孙 攀,王 亮. 深水半潜平台动力定位时 域模拟研究 [J]. 中国科学:物理学 力学 天文 学, 2011, 41(2): 123-131.
 WANG Lei, SUN Pan, WANG Liang. Research on time domain simulation of dynamic positioning for a deep water semi-submersible platform [J]. Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica, 2011, 41(2): 123-131. (in Chinese)

Analysis of coupled motion response for two platforms during berthing

LIU Zheng^{1,2}, LI Yan^{*1,2}, WANG Hao^{1,2}, TANG Yougang^{1,2}, TONG Bo³

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. National Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China $\)$

Abstract: The coupling dynamic response characteristics of two semi-submersible platforms in berthing state are studied to determine the safe working conditions. For the two semi-submersible platforms connected through the trestle bridge, the hydrodynamic analysis models of the two platforms are established considering the action of wind, wave and current loads. Based on the threedimensional potential flow theory, the multi-body coupling hydrodynamic performance of two semi-submersible platforms during berthing is calculated in the frequency domain, and the effects of different wave directions on the wave loads of the platform are analyzed. Based on the Kalman filter control algorithm, the positioning capability of the berthing system is analyzed in view of different sea conditions. Besides, the sea conditions under which berthing operations can be safely conducted are obtained according to the upper limit conditions of displacement. According to the results, the second order wave loads will influence the coupling hydrodynamic performance. Moreover, the available operational sea conditions under the oblique seas are the highest, while those under beam seas are lower. The available berthing operational sea conditions under longitudinal seas are the most critical. The results have reference function for safe berthing of two platforms.

Key words: semi-submersible platform; two platforms berthing; dynamic positioning; coupled motion response