

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.04.015

双船联合举升多体协同作业系统横摇稳性评估

李德江^{1,2}, 邓兴旗¹, 赵树杰¹, 孟 珣¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 烟台中集来福士海洋工程有限公司, 山东 烟台 264035)

摘要: 基于 ADAMS 平台, 构建特定场景双船联合举升多体协同作业系统虚拟样机, 对新型一体化拆解作业双船联合举升过程中待拆除组块横摇稳性进行预测与评估。构建了该系统拓扑模型, 使用几何参数描述系统中上部组块横摇运动特征; 通过虚拟样机仿真探究了双船不同耦合运动情况下上部组块最危险失稳状态, 并分析了上部组块重心至连接点连线垂直距离与水平距离比值对横摇角度的影响规律。结果表明: 物理模型试验数据驱动的虚拟样机技术可以有效评估该系统运动特征, 与几何拓扑模型得到的上部组块横摇失稳角度理论公式计算结果吻合; 双船同相位横摇与反相位垂荡耦合运动时对上上部组块横摇稳性影响最大; 待拆除上部组块横摇失稳时的极限纵横比可以作为复杂多体系统横摇稳性评估参数, 为实际工程方案选择提供参考。

关键词: 双船举升作业; 多体耦合; 横摇稳性; 几何拓扑; 虚拟样机

中图分类号: P75

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2023)04-0115-08

Rolling stability evaluation of multi-body collaborative operation system for the twin-ship joint lifting

LI Dejiang^{1,2}, DENG Xingqi¹, ZHAO Shujie¹, MENG Xun¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. CIMC Raffles Offshore Limited, Yantai 264035, China)

Abstract: Based on the automatic dynamic analysis of mechanical systems (ADAMS), a virtual prototype of a multi-body collaborative operation system for the twin-ship joint lifting in specific scenarios is constructed to predict and evaluate the roll stability of the blocks to be removed during the new integrated dismantling operation of twin-ship joint lifting. The topological model of the system is constructed, and geometric parameters are used to describe the rolling motion characteristics of the topside in the system. Through the virtual prototype simulation, the most dangerous instability state of topside under different coupling motions of two vessels is explored, and the influence law of the ratio of vertical distance and horizontal distance from the center of gravity of topside to the connection point on the rolling angle is given. The results show that the test data-driven virtual prototype technology can effectively evaluate the motion characteristics of the topside in the complex multi-body system, which is consistent with the theoretical formula of the rolling instability angle of the topside obtained from the geometric topology model. The coupling motion of the two vessels at the same phase rolling and anti-phase heave has the greatest influence on the rolling stability of the topside. The ultimate aspect ratio of the topside obtained by the virtual prototype simulation can be used as the rolling stability evaluation parameters of the multi-body system, and provide a reference for the selection of engineering schemes.

Key words: twin-ship lifting operation; multi-body coupling; rolling stability; geometric topology; virtual prototype

海洋平台上部组块的安装/拆除作业是海洋资源开发全生命周期的重要环节, 其中海上吊装和海上浮托作业技术被广泛应用于上部组块施工过程。相比于吊装, 浮托作业具有举升容量大、成本低的优势, 是万吨级上部组块一体化安装/拆除作业的首选方案^[1]。为了满足不同作业需求, 多类浮托技术应运而生, 根据涉及的驳船类型可分为 3 类: 单驳船浮托^[2]、双体船浮托^[3]和双驳船浮托^[4]。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52071307); 国家自然科学基金基础科学中心项目(52088102); 山东省重点研发计划项目(2020CXGC010702)

作者简介: 李德江(1981—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋工程结构设计研究。E-mail: dejiang.li@cimc-raffles.com

通信作者: 孟珣(1973—), 女, 副教授, 博士, 主要从事海工装备浮式多体系统动力特性研究。E-mail: mengxun@ouc.edu.cn

引用本文: 李德江, 邓兴旗, 赵树杰, 等. 双船联合举升多体协同作业系统横摇稳性评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 115-122.

LI Dejiang, DENG Xingqi, ZHAO Shujie, et al. Rolling stability evaluation of multi-body collaborative operation system for the twin-ship joint lifting[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4): 115-122.

单驳船浮托技术是最早应用、也是最常用的海洋平台浮托施工作业技术,但需要基础支撑结构有足够大的顶部开口以允许驳船驶入,因此会受到既有平台结构形式的限制。与单驳船浮托技术相比,双体船浮托作业具有更大的举升能力,其船体在船首或船尾设置 U 形开口槽,船体能从平台结构两侧进入。最具代表性双体作业船为 Allseas 的“Pioneering Spirit”^[5],该船于 2016 年 8 月完成了北海海域 Yme-MOPU 导管架基础的拆除作业^[3]。相比于前两者,双驳船浮托具有更高的灵活性,每艘作业船舶可在非一体化浮托作业期开展运输、吊装等其他独立作业,从而提高船舶利用率。当两艘独立驳船协同作业时,双船与上部组块间以有运动补偿的连接方式组成一个复杂的多体系统,双船运动的不同步性使其横摇稳性与单驳船浮托技术和双体船浮托技术明显不同。海上浮托作业对海洋环境条件敏感^[6-8],波高和波浪周期的变化会使上部组块和船舶的运动变得显著^[9],从而增加失稳风险。为了减少操作中横摇失稳风险,大多数单驳船与双体船浮托作业工程中^[4,10],驳船和上部组块之间都采用刚性连接构件连接以限制其相对运动。虽然刚性连接可以保证系统的横摇稳性,但需要对上部组块进行加强设计,以满足加强件和结构核心受力区域在安装时的强度要求。Koo 等^[11-12]对 Spar 平台的浮托作业进行了数值分析和试验分析,发现上部组块承受了较大的波浪动力荷载,从而影响了结构的强度设计。Dessi 等^[13]使用刚性模型和弹性连接模型对上部组块响应进行了试验分析,发现结构间的弹性连接会导致系统产生较大的横摇运动。近年来,有学者开始对典型工况下双船的运动特性进行分析^[14-19],但这些研究多基于举升系统和组块间的刚性连接假定。

对于举升系统与上部组块间采用柔性连接形式的双驳船浮托作业多体系统,Zhao 等^[20-21]指出该类型系统横摇耦合响应对举升作业状态具有重要影响。本文采用数值模拟和模型试验结合的方式,研究柔性连接形式的双船联合举升多体协同作业系统在不确定海况中的多体横摇稳性问题,并给出该系统上部组块横摇稳定性极限准则的快速分析方法与预测手段。

1 双船联合举升多体协同作业系统及作业过程

超大型海上油田设施拆解作业是一项涉及多领域的系统性工程,技术含量高、作业风险大,需要充分考虑拆解作业的安全和环保等要素要求。本文研究的多功能起重船是全球首制的超大型海上油气设施一体化拆解和安装、海上风电装置安装等多功能装备,主要由 2 艘起重船组成,配备 DP3 动力定位系统,可选择配置带运动补偿的举升臂系统,总起重能力最高可达 3 万 t。双船联合进行一体化拆解和安装的作业模式具有操作灵活、高效的特点,但其可调的举升系统外沿臂以及举升头和甲板支撑配备运动补偿使得作业过程中上部组块和船体多体耦合运动机制复杂,明显不同于传统浮托作业中采用刚性连接假定的单刚体稳性概念。针对待拆解模块不同尺度特征,举升点之间距离的选择对横摇稳性影响为本文关注重点。

1.1 双船联合举升多体协同作业系统

双船联合举升系统示意图及其关键结构装备如图 1 所示,在整体坐标系中, x_0 轴沿船舶纵荡方向, y_0 轴沿船舶横荡方向, z_0 轴沿船舶垂荡方向。每艘作业船均配备先进的动力定位系统,可限制船体在水平面内的漂移运动;快速举升装备设置于船体上甲板,根据举升要求选择举升臂组队数目。单个举升臂系统结构如图 2 所示,局部坐标系与整体坐标系方向一致,其可根据作业需求调整其外沿臂长度,举升头和甲板支撑配备

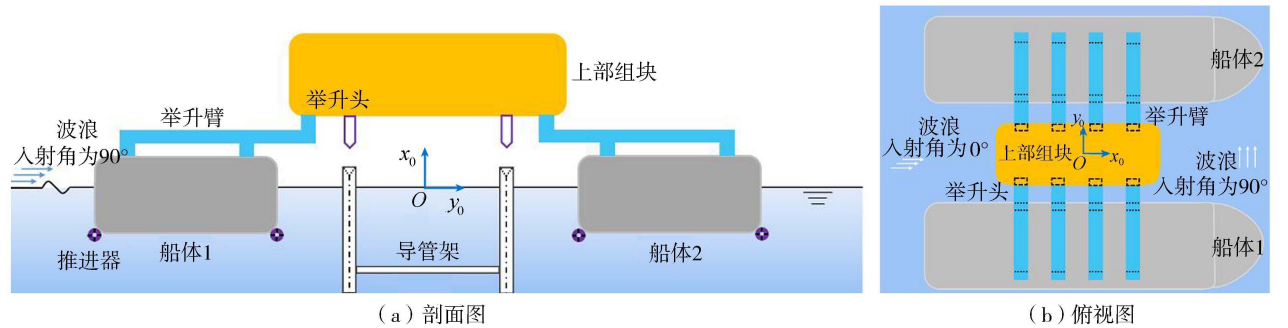


图 1 双船联合举升多体协同作业系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of multi-body collaborative operation system for twin-ship joint lifting

运动补偿系统,主要包含3种运动补偿模式:①举升臂可沿着 x_0 方向的滑轨水平移动,从而补偿船体产生的纵荡运动;②举升臂可沿着 y_0 方向的甲板支撑滑轨水平移动,从而补偿船体产生的横荡运动;③举升头可沿着 z_0 方向垂向移动,从而补偿船体产生的垂荡运动。

1.2 双船联合举升作业过程

双船联合举升作业过程主要步骤包括:①进船。双船体从两侧分别靠近导管架基础,就位后举升系统连接上部组块底部,此时上部组块全部重量仍位于导管架支撑上,运动补偿系统开始作业,减少举升臂和上部结构的碰撞;采用动力定位系统限制船体的水平位移。②压载荷载转移。通过排压载作业,将部分上部组块重量转移到双船体。③快速举升。在上部组块转移重量达到目标百分比后,快速举升系统开始作业,液压杆快速抬升,可实现基础与上部组块的快速分离;该过程系统稳性为本文关注重点。④退船。载有上部组块的双安装驳船,从基础结构正侧驶出。⑤荷载转移。采用压载系统和快速举升系统联合作业,完成上部组块从作业驳船到运输驳船的上部组块转移。⑥单船运输。为减少双船长距离运输作业风险,采用运输驳船,将上部组块运送到作业码头。

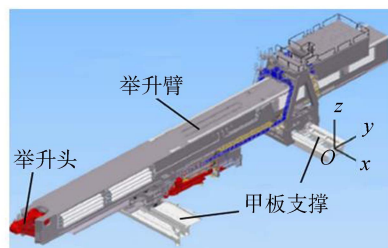


图2 举升臂系统结构

Fig.2 Structure diagram of lifting arm system

2 虚拟样机的建立与验证

本文主要采用虚拟样机方法对双船联合举升多体协同作业系统的横摇稳性进行研究。由于各机械结构和液压系统参数对该系统响应有较大影响,因而首先采用物理模型试验数据验证数值模型的准确性与可靠性,得到一致性结果后根据试验中船体运动响应,采用数值外推方法模拟系统多体横摇稳性规律;最后建立系统简化几何拓扑模型,实现系统横摇稳性的快速分析与预测。

2.1 多刚体系统动力学方程

举升作业船和上部组块的运动可认为是刚体的非线性运动,基于牛顿第二定律,重心的刚体动力学方程为

$$m\ddot{\mathbf{x}}_g = \mathbf{F}_g \quad (1)$$

$$\mathbf{I}_g \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I}_g \boldsymbol{\omega} = \mathbf{M}_g \quad (2)$$

式中: m 为刚体的质量; $\ddot{\mathbf{x}}_g$ 为重心的加速度矩阵; $\mathbf{I}_g$ 为关于重心的惯性矩矩阵; $\boldsymbol{\omega}$ 为角速度向量; $\mathbf{F}_g$ 为刚体受到的外力矩阵; $\mathbf{M}_g$ 为关于重心的外力矩矩阵。

式(1)和式(2)仅适用于局部坐标系原点与重心重合的情况,更一般的动力学方程为

$$m\ddot{\mathbf{x}} + m\mathbf{C}^T \left(\frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} \times \mathbf{r}_g \right) + m\mathbf{C}^T [\boldsymbol{\omega} \times (\boldsymbol{\omega} \times \mathbf{r}_g)] = \mathbf{F} \quad (3)$$

$$\mathbf{I} \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{I} \boldsymbol{\omega} + m\mathbf{r}_g \times (\mathbf{C}\ddot{\mathbf{x}}) = \mathbf{M} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{I}$ 为惯性矩矩阵; $\mathbf{F}$ 为外力矩阵; $\mathbf{M}$ 为相对于原点的外力矩矩阵; $\mathbf{r}_g = (x_g, y_g, z_g)^T$ 为重心向量; $\ddot{\mathbf{x}}$ 为加速度矩阵; $\mathbf{C}$ 为地固坐标系和局部坐标系之间的传递矩阵。

2.2 双船联合举升多体协同作业系统虚拟样机

基于ADAMS(automatic dynamic analysis of mechanical systems)平台建立描述双船协同举升过程中运动特征的虚拟样机,探讨船体运动和快速举升系统引起的上部组块的横摇稳性运动规律。实际作业船举升系统都配备运动补偿装置,通过液压驱动实现举升臂系统沿纵荡方向、横荡方向和垂荡方向的运动补偿,用以释放举升作业过程中多体耦合运动而产生的巨大载荷。本文基于原型及物理模型试验参数将运动补偿装置等效为横荡方向和垂荡方向弹簧阻尼系统,忽略纵荡方向运动补偿对系统横摇稳性的影响,整体系统虚拟样机如图3所示。

2.3 数值模拟试验验证

选用模型水池试验中3种典型作业海况进行横摇稳性研究。模型水池试验如图4所示,模型缩尺比为1:50,该模型中每艘船配备了动力定位系统,使用弹簧和阻尼系统对举升臂的主动补偿系统进行等效简化,

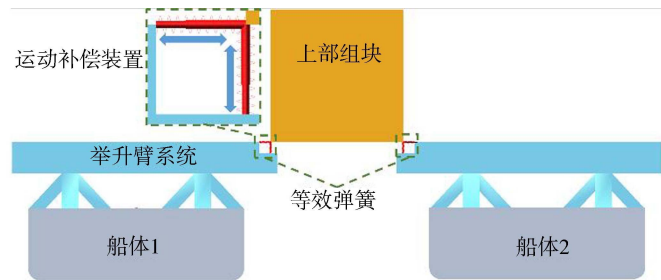


图 3 双船联合举升多体协同作业系统虚拟样机

Fig.3 Virtual prototype of multi-body collaborative operation system for twin-ship joint lifting



图 4 双船举升作业模型试验

Fig.4 Model test of twin-ship lifting operation

环境条件设置见表 1。在水池试验中,波浪采用 JONSWAP 海浪谱。选取海况 I 和海况 II 下的双船时域运动,将双船的垂荡和横摇运动作为虚拟样机的驱动,得到上部组块横摇运动的仿真数值,并与试验结果进行对比,如图 5 所示。表 2 对比了在海况 I 和海况 II 下试验和仿真得到的上部组块横摇幅值。

表 1 模型试验的海况

Table 1 Sea states of the model test

海况	波浪			风速/(m/s)	流速/(m/s)
	有义波高/m	谱峰周期/s	浪向/(°)		
I	1	8	90	10	1
II	1	12	90	10	1
III	2.5	12	180	10	1

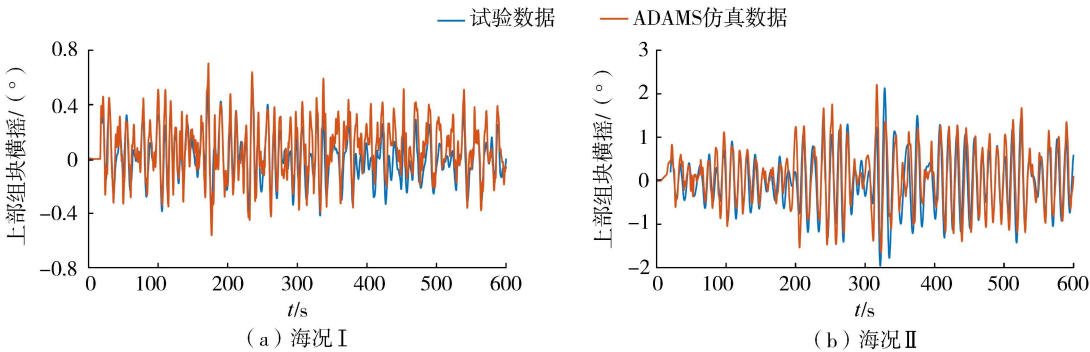


图 5 上部组块横摇运动仿真结果与试验结果对比

Fig.5 Comparison between simulation results and test results of topside rolling motion

表 2 上部组块横摇幅值对比

Table 2 Comparison of magnitude of topside rolling motion

海况	最大值			最小值		
	试验结果/(°)	仿真结果/(°)	误差/%	试验结果/(°)	仿真结果/(°)	误差/%
I	0.56	0.71	26.23	-0.47	-0.56	18.97
II	2.13	2.21	3.62	-1.96	-1.65	-15.61

由图 5 可见试验结果与仿真结果相吻合,说明本文建立的数值模型可实现上部组块横摇运动的准确仿真模拟。由表 2 可知,模型试验与数值仿真的结果存在一定误差,这是由于试验结果是 2 个船体在 6 个自由度真实耦合运动下的响应,而仿真结果是施加 2 个船体横摇和垂荡最危险组合运动驱动。

3 系统横摇稳性评估

双船与上部组块之间通过等效的弹簧阻尼连接形成了复杂的多体系统,在作业过程中,双船的相对独立运动增加了多体系统横摇稳态的不确定性。举升船与上部组块之间柔性连接,使得系统具有复杂的运动状态。通过建立系统横摇稳性的几何拓扑模型,可更容易描述双船与上部组块在耦合运动下的位置关系;并可由该模型推导上部组块的横摇角度计算公式,完成危险工况下系统横摇稳性的理论计算与仿真结果对比。

3.1 横摇稳性几何拓扑模型

以上部组块左倾状态为例,系统内多体之间位置关系如图6所示。图6中, O_1 为船1的重心, O_2 为船2的重心; A 为船1与上部组块的连接点, B 为船2与上部组块的连接点; r_2 为连接点到船体重心的水平距离, h_2 为连接点到船体中心的垂向距离; θ_1 为船1的横倾角, θ_2 为船2的横倾角, θ 为上部组块的横倾角; Δh 为双船之间的垂荡距离。

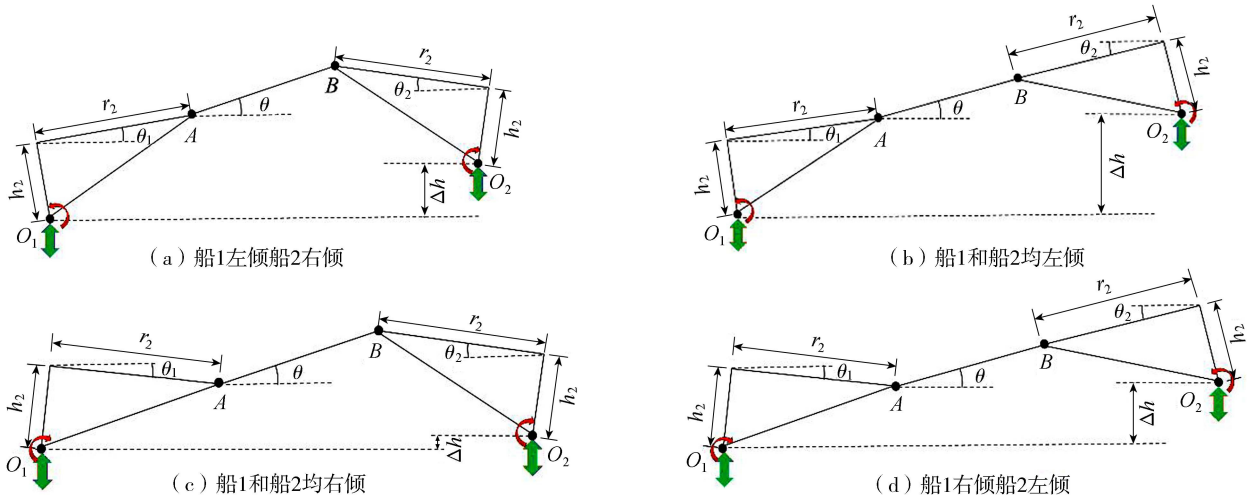


图6 上部组块与双船之间的位置关系

Fig.6 Positional relationships between topside and twin vessel

根据图6所示的4种情况,上部组块和双船的横摇角以及船2相对于船1的垂荡距离之间的关系可以表示为

$$h_2\cos\theta_1 + r_2\sin\theta_1 + 2r_1\sin\theta = \Delta h + r_2\sin\theta_2 + h_2\cos\theta_2 \tag{5}$$

$$h_2\cos\theta_1 + r_2\sin\theta_1 + 2r_1\sin\theta = \Delta h + h_2\cos\theta_2 - r_2\sin\theta_2 \tag{6}$$

$$h_2\cos\theta_1 - r_2\sin\theta_1 + 2r_1\sin\theta = \Delta h + r_2\sin\theta_2 + h_2\cos\theta_2 \tag{7}$$

$$h_2\cos\theta_1 - r_2\sin\theta_1 + 2r_1\sin\theta = \Delta h + h_2\cos\theta_2 - r_2\sin\theta_2 \tag{8}$$

在举升作业过程中,双船的相对运动导致上部组块产生横倾角 θ 。根据 θ 所处的不同区间,上部组块的状态可以分为图7所示的3种状态。图7中, O 为上部组块的重心, r_1 为连接点到上部组块重心的水平距离, h_1 为上部组块重心到连接点连线 AB 的距离, F_A 为连接点 A 处的受力, F_B 为连接点 B 处的受力, m_1g 为上部组块的重力, l_a 和 l_b 为力臂, α 为 F_B 与 AB 之间的夹角, β 为 F_A 与 AB 之间的夹角。

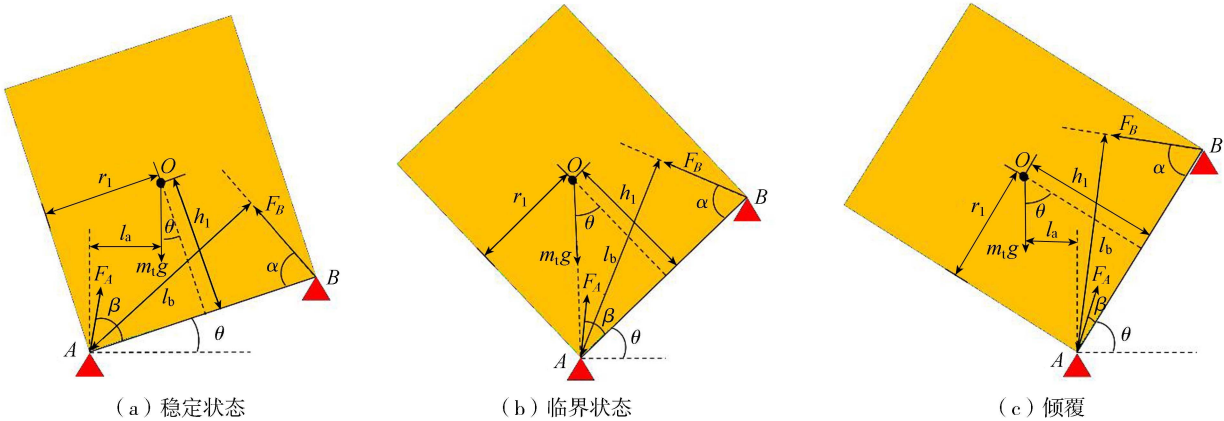


图7 不同横倾角时上部组块的状态

Fig.7 Status of topside at different heeling angles

根据力矩平衡原理,给出力矩平衡方程:

$$\sum M_A = 0 \tag{9}$$

在该几何拓扑模型中,上部组块的重力与连接点 B 处的力的合力力矩等于 0,所以

$$m_1g(r_1\cos\theta - h_1\sin\theta) - F_B2r_1\sin\alpha = 0$$

(10)

或者表示为

$$m_1gl_a - F_Bl_b = 0$$

(11)

其中

$$l_a = r_1\cos\theta - h_1\sin\theta \quad l_b = 2r_1\sin\alpha$$

当上部组块处于临界状态时,如图 7(b)所示,力臂 $l_a=0$;如果上部组块的横倾角度继续增加,则将发展为倾覆状态,如图 7(c)所示,此时力臂 l_a 为

$$l_a = h_1\sin\theta - r_1\cos\theta$$

(12)

3.2 耦合运动参数化分析

将表 1 中海况Ⅲ条件下模型试验测得的双船时域运动响应作为驱动施加给虚拟样机,分析典型假设条件下上部组块横摇的耦合响应特性,表 3 给出了双船在不同运动特性下的 5 个仿真工况。

由图 8 可知,双船的同相位横摇运动会使上部组块产生较大的横摇,横摇幅值为 6.45° ;而双船的反相位横摇运动对上部组块的影响很小。

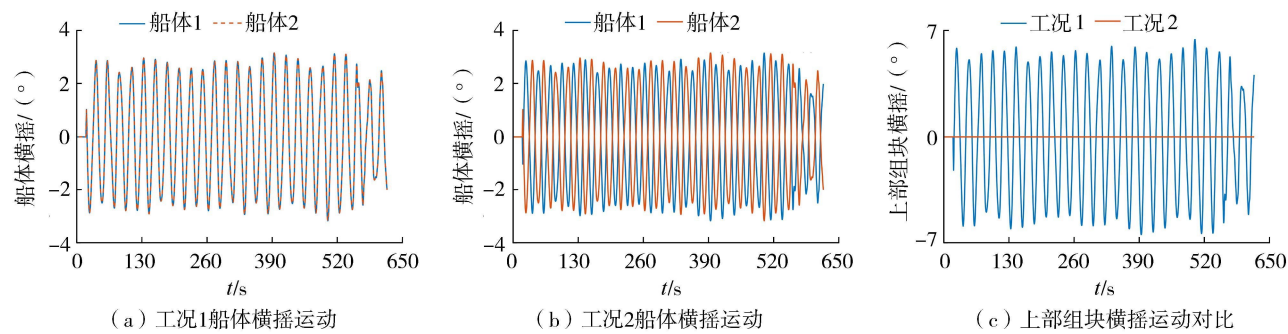


图 8 工况 1、工况 2 船体横摇运动与上部组块横摇运动时程曲线
Fig. 8 Rolling motion of vessels and topside under case 1 and case 2

由图 9 可知,双船的同相位垂荡运动对上部组块的横摇运动影响很小,而双船的反相位垂荡运动会使上部组块产生较大的横摇。

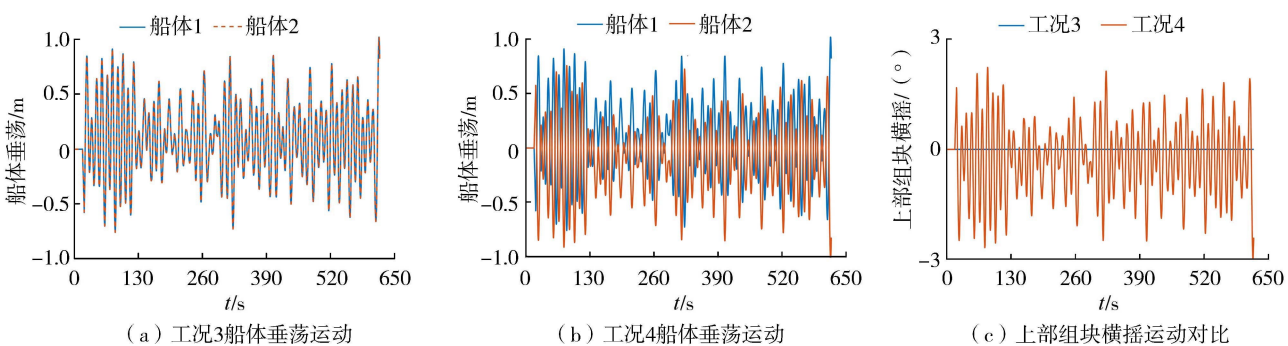


图 9 工况 3、工况 4 船体垂荡运动与上部组块横摇运动时程曲线
Fig. 9 Heaving motion of vessels and rolling motion of topside under case 3 and case 4

由图 8(c)和图 9(c)可知,工况 1 和工况 4 会使上部组块产生较大的横摇,这 2 种工况的组合工况(工况 5)下上部组块的横摇运动时程曲线如图 10 所示,上部组块的横摇幅值为 7.14° 。双船同相位横摇和反相位垂荡耦合运动对上部组块的横摇运动影响最大,其中工况 5 双船同相位横摇和反相位垂荡耦合运动是上部组块发生横摇失稳的最危险工况。

3.3 横摇稳性与极限作业能力分析预测

基于参数化数值仿真模拟结果,选择最危险的工况 5,改变 h_1/r_1 ,通过 ADAMS 虚拟仿真得到上部组块

不同的 h_1/r_1 值对应的最大横倾角(图 11),并且对比本文建立的横摇稳性快速分析几何拓扑模型,探讨双船举升系统的极限作业能力。

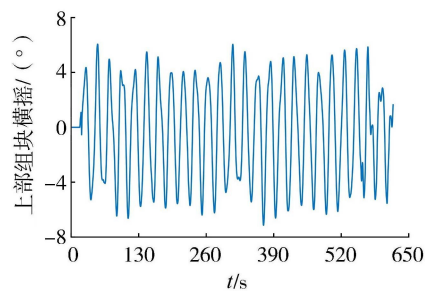


图 10 工况 5 上部组块横摇运动时程曲线
Fig.10 Time series of rolling motion of topside under case 5

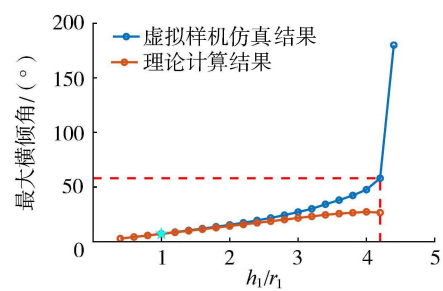


图 11 上部组块最大横倾角仿真与理论数值
Fig.11 Simulated and theoretical results of maximum heeling angles of topside

图 11 为 ADAMS 数值仿真结果和理论模型结果的对比,可见在一定范围内($h_1/r_1 \leq 2$),虚拟样机仿真结果与本文建立的几何拓扑模型实现上部组块最大横倾角的估计值规律一致。由于本文理论模型没有计入运动补偿系统的影响和系统的动态响应过程,在上部组块大纵横比情况下,理论模型低估了上部组块最大横倾角度。初始 h_1/r_1 的值为 1 时,上部组块的最大横倾角为 7.23° ;随着 h_1/r_1 的不断增大,上部组块的最大横倾角不断增大;当 $h_1/r_1 > 4.2$ 时,上部组块会发生倾覆而失稳。

4 结 论

- a. 以物理模型试验和虚拟样机交叉驱动方式可以高效准确得到上部组块横摇运动的时域响应规律,验证举升系统中的主动补偿装置简化合理性。
- b. 双船的同相位横摇与反相位垂荡耦合运动对上部组块的横摇运动影响最大。
- c. h_1/r_1 一定范围内($h_1/r_1 \leq 2$)本文建立的几何拓扑模型可实现上部组块横倾角的准确估计。
- d. 上部组块横摇失稳时极限纵横比 h_1/r_1 可以作为多体系统横摇稳性评估参数。
- e. 由于本文理论模型没有计入运动补偿系统的影响和系统的动态响应过程,所以在上部组块纵横比较大的情况下,理论模型低估了上部组块横倾角度,需进一步修正完善。

参考文献:

[1] LIU G S, LI H J. Offshore platform integration and float over technology[M]. Singapore:Springer,2017.

[2] YANG Y,WANG A M,YUAN R H,et al. Design considerations for challenging floatover installation of Liwan 3-1 mega topsides with a T-shaped barge [C]//In the twenty-fourth International Ocean and Polar Engineering Conference. Busan: Company Management Offshore Oil,2014:689-699.

[3] CASTRO B A,BIRKENES T,OOSTERVELD H. Removal of topside units in a single lift;therepsolyme field case study[C]// ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Madrid: The American Society of Mechanical Engineers,2018:77825.

[4] VERNES N,DONIA S,GINKEL A V,et al. Aasta hansteen hull-topsides dry transport and dual barge mating operations[C]// Offshore Technology Conference. Houston:OnePetro,2019:OTC-29410-MS.

[5] KHALED A G,YOUSRI M A W,HEBA W L,et al. The hydrodynamic performance of a novel float-over installation[J]. Ocean Engineering,2017,133:116-132.

[6] TAHAR A,HALKYARD J,STEEN A,et al. Float over installation method:comprehensive comparison between numerical and model test results[J]. Journal of Offshore Mechanics & Arctic Engineering,2006,128(3):256-262.

[7] TIAN X L,WANG P,LI X,et al. Design and application of a monitoring system for the floatover installation[J]. Ocean Engineering, 2018,150:194-208.

[8] 许鑫,杨建民,吕海宁. 导管架平台浮托法安装的数值模拟与模型试验[J]. 上海交通大学学报,2011,45(4):439-445. (XU Xin, YANG Jianmin,LYU Haining. Experimental and numerical analysis for floatover installation on jacket[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University,2011,45(4):439-445. (in Chinese))

- [9] 傅健,毛程亮,张广磊,等.波高及波浪周期对浮托关键设备作业影响的计算分析[J].船海工程,2019,48(6):109-112. (FU Jian, MAO Chengliang, ZHANG Guanglei, et al. Analysis of the influence of wave height and wave period on float-over key equipment [J]. Ship & Ocean Engineering, 2019, 48(6): 109-112. (in Chinese))
- [10] EDELSON D, LUO M, HALKYARD J, et al. Kikeh development: spar topside floatover installation-naval [C]//Offshore Technology Conference. Houston: OnePetro, 2008: OTC-19639-MS.
- [11] KOO B, MAGEE A, LAMBRAKOS K, et al. Prediction of motions and loads for float over installation of spar topsides [C]//Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai: The American Society of Mechanical Engineers, 2010: 373-386.
- [12] KOO B, MAGEE A, LAMBRAKOS K, et al. Model tests for floatover installation of spar topsides [C]//Proceedings of the ASME 2010 29th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Shanghai: The American Society of Mechanical Engineers, 2010: 363-371.
- [13] DESSI D, FAIELLA E, PIGNA C, et al. Experimental analysis of topside transportation with a double-barge float-over system [C]//The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference. San Francisco: Journal of Marine Science and Application, 2017: ISOPE-I-17-573.
- [14] DESSI D, FAIELLA E, SALTARI F, et al. Experimental analysis of the station keeping response of a double-barge float-over system with an elastically scaled physical model [C]//The 27th International Ocean and Polar Engineering Conference, San Francisco: Journal of Marine Science and Application, 2017: ISOPE-I-17-574.
- [15] 阮志豪,张万里,李怀亮.双船浮托法数值模拟[J].中国海洋平台,2018,33(1):40-50. (RUAN Zhihao, ZHANG Wanli, LI Huailiang. Numerical simulation of two barge floatover method [J]. China Offshore Platform, 2018, 33(1): 40-50. (in Chinese))
- [16] 刘旭平,董宝辉,毛程亮,等.大型组块双船浮托拆除分析[J].中国石油和化工标准与质量,2020,40(19):107-109. (LIU Xuping, DONG Baohui, MAO Chengliang, et al. Analysis on removal of large-scale modular double ship floating [J]. China Petroleum and Chemical Standard and Quality, 2020, 40(19): 107-109. (in Chinese))
- [17] 李新超.导管架平台双船浮托法安装的数值模拟与水池试验[J].船海工程,2021,50(6):102-107. (LI Xinchao. Numerical simulation and basin test of twin-vessel floatover installation of a jacket platform [J]. Ship & Ocean Engineering, 2021, 50(6): 102-107. (in Chinese))
- [18] 李健行.导管架平台上部组块双船拆除方法研究[D].上海:上海交通大学,2020.
- [19] 杜尊峰,李鑫,吴俊凌.双船浮托拆解海洋平台动态稳性[J].中国海洋平台,2020,35(4):38-43. (DU Zunfeng, LI Xin, WU Junling. Dynamic stability of offshore platform dismantling with two-barge floatover method [J]. China Offshore Platform, 2020, 35(4): 38-43. (in Chinese))
- [20] ZHAO Shujie, GAO Zhen, MENG Xun, et al. Multibody coupled dynamic response analysis of a dual barge float-over operation system with motion compensation equipment under a passive operational mode [J]. Ocean Engineering, 2023, 269(1): 113499.
- [21] ZHAO Shujie, MENG Xun, LI Huajun, et al. Continuous multi-body dynamic analysis of float-over deck installation with rapid load transfer technique in open waters [J]. Ocean Engineering, 2021, 224(1): 108729.

(收稿日期:2022-07-14 编辑:刘晓艳)