



起重船与运输船双船 T 形靠泊状态下 船舶运动响应分析

杜 宇

(中交第三航务工程局有限公司, 中交集团海上风电施工技术研发中心, 上海 200032)

摘要: 在近海施工领域, 起重船与运输船进行海上施工的过驳操作常会采用 T 形靠泊的双船布置形式。对双船 T 形靠泊状态下的船舶运动响应进行研究, 选取目前我国海上风电施工领域常见的两条施工船舶, 考虑它们运动的相互干扰, 采用频域方法对运输船运动响应有义值进行计算。结果表明, 与波浪首先经过起重船时相比, 波浪首先入射运输船时的船舶运动响应显著增大; 而运输船的存在对起重船的影响相对较小。同时, 运输船运动响应对两船的间隙值并不敏感。对于起吊点高度不同的货物, 起重船与运输船 T 形靠泊进行过驳挂钩操作时可以采用不同的迎浪策略。当起吊点较高时, 采用起重船迎浪可以有效降低吊钩和吊点的相对位移; 当起吊点位于运输船甲板附近时, 在短周期波浪条件下可考虑采用运输船迎浪进行施工, 此时运输船相当于起重船的浮式防波堤, 可以有效消减传播至起重船的波浪能量, 更加有效地降低吊钩和吊点的相对位移。

关键词: 双船靠泊; 船舶运动响应; 船舶间隙; 船舶迎浪策略; 起重船施工

中图分类号: U661.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0039-06

Vessel motion response analysis for crane vessel and transportation vessel under T-shaped berthing state

DU Yu

(CCCC Research and Development Center on Offshore Wind Power Construction Technology,
CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: In the nearshore construction, the crane vessel and the transportation vessel are normally under the ship to ship condition with a T-shaped berthing during the lightering operation at sea. The vessel motion response under such condition is studied. Two common construction ships in the field of offshore wind power construction in China are selected, and the frequency domain analysis method is carried out to calculate significant values of the transportation vessel motion response with the consideration of interactions between two ships. The results reveal that when the transportation vessel faces the waves, the transportation vessel motions are significantly greater than its motions when the crane vessel faces the sea. However, the disturbance on the crane vessel by the transportation vessel is subtle. In the meanwhile, the clearance between the two ships is ignorable to the motion response of the transportation vessel. For the cargo with different lifting point heights, different wave-facing strategies can be applied when the crane vessel and the transportation vessel are under the ship to ship condition with a T-shape configuration during the lightering and linking operation. For the higher lifting point case, the relative motion between the hook and the lifting point can be effectively curtailed when the crane vessel faces waves. When the lifting point is located near the deck of the transportation vessel, the transportation vessel facing waves may be preferable for short period wave conditions, the transportation vessel is a floating breakwater for the crane vessel in such a condition, effectively curtailing wave energy transmitted to the crane and relative motions between the hook and the lifting point.

Keywords: two-ship berthing; ship motion response; ship clearance; ship wave-facing strategy; crane vessel construction

收稿日期: 2024-06-24

作者简介: 杜宇 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事海洋工程和船舶工程领域的研究。

在以规模化施工为特点的海洋工程施工中,存在大量由运输船进行大型结构运输,之后在施工现场由大型起重船进行大型结构的吊装过驳作业,然后完成其海上安装。因此起重船与运输船之间的靠泊作业以及靠泊作业过程中的双船运动,对于施工的顺利进行有着重要的影响。

在船舶与海洋工程领域,两船之间靠泊问题的早期研究主要集中于浮式生产储卸油船(FPSO)和外输油轮之间的水动力相互干扰问题^[1-5],由于FPSO与外输油轮之间的作业特点,研究集中于双船并靠的布置形式。随着液化天然气使用的普及,双船并靠问题在液化天然气的海上补给与外输方面受到了较多的关注^[6-10]。海上施工过驳作业也可采用起重船和运输船的并靠布置形式,但大型全回转起重船的吊臂在作业时将移至起重船舷侧,此时起重能力通常会降低约30%(如振华30最大起重能力为1.2万t,但在舷侧起吊时的最大起重能力为7500t),同时在港口工程领域也存在大量的固定拔杆式起重船,无法进行双船并靠施工,因此采用双船并靠工艺进行起重船的过驳作业不利于海上施工和船舶选择,在大量的海上施工项目中依然会存在起重船尾吊姿态下完成过驳作业,以最大限度地利用起重船的起重能力,此时起重船和运输船在过驳过程中将保持T形的布置形式。

本文对双船T形靠泊状态下的运输船运动响应进行研究,选取目前我国海上施工领域常见的两条施工船舶,采用频域方法对运输船运动响应有义值进行计算,研究两船运动的相互干扰,并结合过驳大型结构吊点高度的不同,探讨作业海况的迎浪策略。

1 双船工作原理

1.1 计算模型

选择海上施工较为常用的起重船“秦航工2300”为研究对象,简称“起重船”,其主尺度为:船长136.20 m,型宽44.60 m,型深9.60 m,吃水5.70 m。该船为固定双拔杆式起重船,共有2个1150 t安全工作荷载的主钩,当主钩并钩联动可进行最大2300 t的起重作业。另选择“华标海洋”号甲板运输船,简称“运输船”,其主尺度为:

船长129.20 m,型宽28.00 m,型深7.00 m,吃水5.00 m。起重船与运输船的T形靠泊状态见图1。

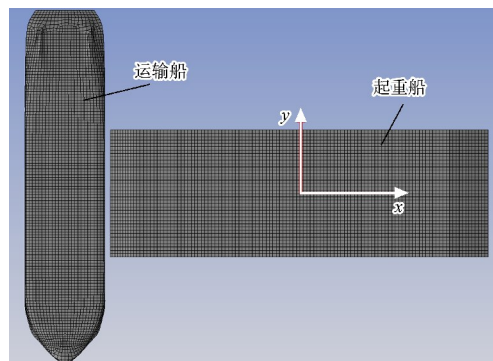


图1 起重船与运输船T形靠泊

Fig. 1 Crane vessel and transportation vessel berthing in T-shape

1.2 船舶运动方程

以两船重心为原点的坐标系下,起重船和运输船两船的运动方程可以分别表示为:

$$(M_1 + m_1)x_1'' + B_1x_1' + C_1x_1'^2 + K_1x_1 = F_{11} + F_{1D} + F_{1C} + F_{1W} \quad (1)$$

$$(M_2 + m_2)x_2'' + B_2x_2' + C_2x_2'^2 + K_2x_2 = F_{21} + F_{2D} + F_{2C} + F_{2W} \quad (2)$$

式中: M_1 和 M_2 分别为起重船和运输船的广义质量矩阵, x_1'' 和 x_2'' 分别为起重船和运输船的加速度矩阵, x_1' 和 x_2' 分别为起重船和运输船的速度矩阵, x_1 和 x_2 分别为起重船和运输船的运动位移矩阵, m_1 和 m_2 分别为起重船和运输船的附加质量矩阵, B_1 和 B_2 分别为起重船和运输船的辐射阻尼矩阵, C_1 和 C_2 分别为起重船和运输船的黏性阻尼矩阵, K_1 和 K_2 分别为起重船和运输船的恢复力矩阵, F_{11} 和 F_{21} 分别为起重船和运输船的人射波浪力向量, F_{1D} 和 F_{2D} 分别为起重船和运输船所受辐射波浪力向量, F_{1C} 和 F_{2C} 分别为起重船和运输船所受水流力向量, F_{1W} 和 F_{2W} 分别为起重船和运输船所受风力向量。在运动计算中,若忽略低频运动和平均漂移,则风力、水流力以及波浪二阶差频力可忽略,运动方程可在频域下求解。在频域下求解首先需要保证方程线性,需要对二次型的阻尼进行线性化。对于船舶的六自由度运动来说,黏性阻尼的作用较小,仅在横摇运动上存在较大

的影响,而横摇黏性阻尼也相对较为复杂,因此在实际工程领域往往采用一定比例的临界阻尼进行近似。本次分析中其他自由度运动的黏性阻尼忽略,线性化的横摇黏性阻尼取8%的横摇临界阻尼。根据运动方程,可在频域计算得到不同激励频率下的船舶运动响应幅值响应算子 $R_{AO}(\omega)$,之后在任意随机波浪作用下,可计算得到船舶运动响应谱密度函数 $S_{motion}(\omega)$,公式为:

$$S_{motion}(\omega) = S_w(\omega) \cdot R_{AO}(\omega)^2 \quad (3)$$

式中: $S_w(\omega)$ 为随机波浪的谱密度函数, ω 为波浪角频率。由于作业时的海况一般较好(通常有义波高小于2.5 m),因此根据海洋工程领域的一般经验,可采用皮尔逊-莫斯科维茨谱进行随机海况的描述:

$$S_w(\omega) = \frac{1}{4\pi} H_s^2 \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-5} e^{-\frac{1}{\pi} \left(\frac{2\pi}{T_z} \right)^4 \omega^{-4}} \quad (4)$$

式中: H_s 为随机波浪的有义波高, T_z 为随机波浪的平均跨零周期。在计算得到船舶运动响应谱密度函数 $S_{motion}(\omega)$ 后可采用船舶运动的有义值度量船舶运动强烈的程度,根据船舶运动的统计学规律有:

$$x_{1/3} = \sqrt{4 \int S_{motion}(\omega) d\omega} \quad (5)$$

式中: $x_{1/3}$ 为船舶随机运动的有义值。

2 船舶运动响应分析

两船的运动响应进行采用商用边界元软件ANSYS AQWA计算,网格为边长2 m的四边形,两船的横摇和纵摇惯性半径分别估算为型宽的34%和船长的25%。入射波的有义波高为1 m,平均跨零周期为3~12 s。根据海上的一般施工习惯,起重船的船长方向平行于波浪入射方向,因此考虑波浪的入射方向为沿图1的x轴正向(浪向1,波浪首先经过运输船)和负向(浪向2,波浪首先经过起重船)入射。由于波浪入射方向与船舶的相对关系,对于运输船来说,主要影响基础过驳作业的运动为其横摇和垂荡运动,而对于起重船来说,主要影响的是纵摇和垂荡运动。

2.1 起重船对运输船运动响应的干扰

有义波高为1 m,不同平均跨零周期海况条件下的运输船横摇和垂荡运动响应有义值的对比见图2。可以看出,当无起重船干扰时,由于双拔杆式起重船的船艏线型基本一致,在两个浪向条件下运输船的横摇和垂荡运动基本一致。与无起重船干扰状态相比,当起重船存在时,两个浪向条件下的运输船横摇运动响应均较小。同时,当波浪沿浪向1传播时,运输船横摇有义值显著高于浪向2条件下的运输船横摇有义值,这主要是由于波浪沿浪向2入射时,波浪首先经过起重船引起波浪的反射和绕射,最终作用于运输船的波浪能量明显降低。

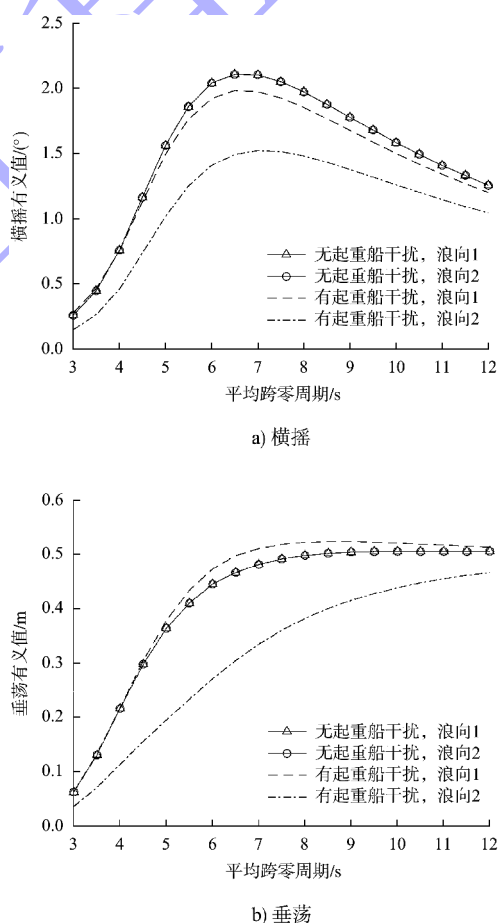


图2 不同海况条件下的运输船横摇和垂荡运动响应有义值
Fig. 2 Significant values of roll and heave motion response of transport vessel under various sea conditions

对于垂荡运动来说,当波浪沿浪向1传播时,运输船的垂荡运动在起重船存在的情况下反而会大于没有起重船情况下的垂荡运动响应,且同样

显著高于波浪沿浪向 2 传播时的运输船垂荡运动。根据一阶斯托克斯波浪理论中的波浪力的定义, 无论波浪沿浪向 1 还是浪向 2 传播, 单位波幅的入射波浪力 (Froude-Krylov 力) 和辐射波浪力 (以附加质量和辐射阻尼表征) 并无区别, 因此浪向 1 和 2 所引起的运输船垂荡运动显著差异可归结为与两种状态下的运输船绕射波浪力的差异。起重船存在时, 波浪沿浪向 1 和 2 入射时的运输船 Froude-Krylov 力、绕射波浪力以及两者的合力 (图中以波浪力表示) 的 z 向分力对比见图 3。可以看出, 当入射波浪频率小于 1 rad/s 时, Froude-Krylov 力与绕射波浪力总是小于 Froude-Krylov 力, 这说明绕射波浪力总是在降低合力的幅值。当波浪沿浪向 2 入射时运输船绕射波浪力要大于浪向 1 入射时的绕射波浪力, 从而造成波浪沿浪向 2 入射时更小的 Froude-Krylov 力与绕射波浪力的合力 (即波浪力)。

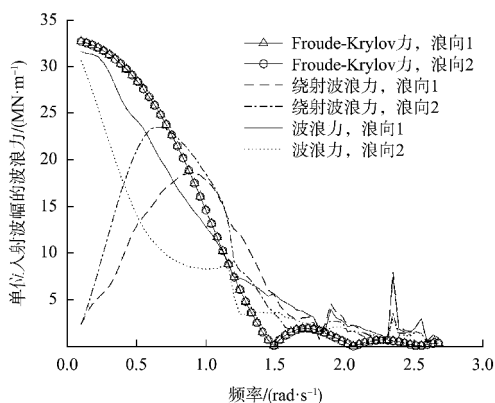


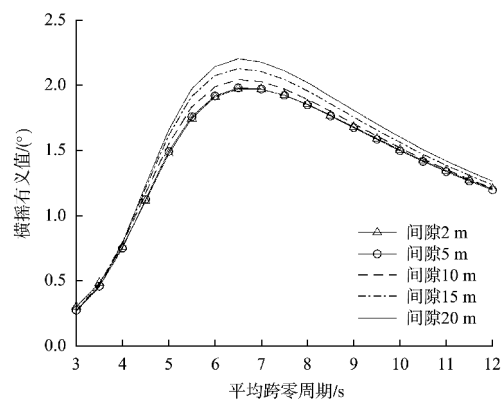
图 3 单位入射波幅条件下不同浪向下波浪力 z 向分力

Fig. 3 Wave force of z -direction

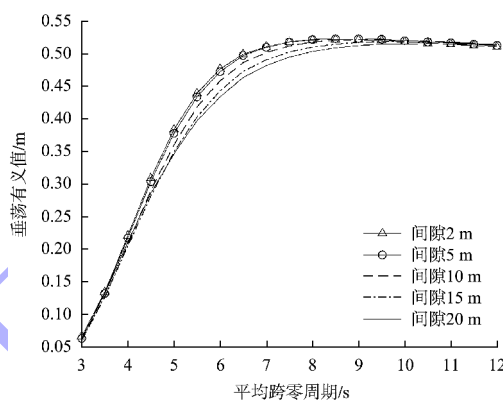
under different directional incident wave with unit amplitude

2.2 两船间隙大小的影响

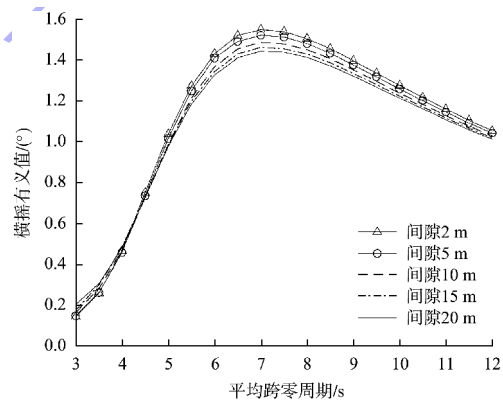
由于需要满足起重船上起重机的吊装负荷与工作半径的要求, 因此运输船和起重船之间将可能存在不同的间隙值。波浪沿浪向 1 和 2 入射时, 运输船和起重船在不同间隙 (2~20 m) 条件下的运输船横摇和垂荡运动响应的对比见图 4。当波浪沿浪向 1 入射时 (即波浪首先经过运输船), 随着运输船和起重船间隙的减小运输船的横摇运动随之减小; 但当波浪沿浪向 2 入射时, 随着波浪间隙的减小, 运输船的横摇运动反而会增大。



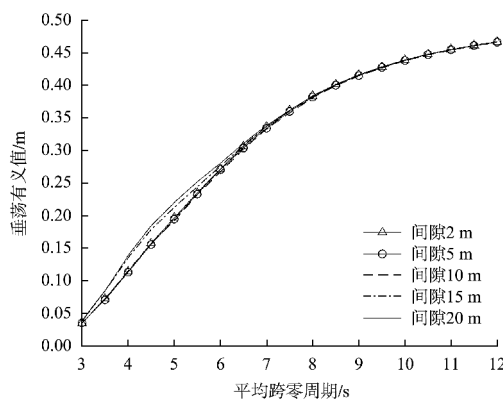
a) 浪向1-横摇



b) 浪向1-垂荡



c) 浪向2-横摇



d) 浪向2-垂荡

图 4 不同船舶间隙条件下的运输船运动响应

Fig. 4 Transportation vessel motions under various ship clearances

2.3 运输船对起重船运动的影响

不同海况条件下有无运输船干扰的起重船垂荡和纵摇运动响应对比见图5。与图2相比,可以明显地看出运输船对起重船运动的干扰显著低于起重船对运输船运动的干扰,特别是对于起重船垂荡运动来说,当存在运输船时,浪向1和2两种工况下的起重船垂荡运动响应均与无运输船干扰情况下的起重船垂荡运动响应接近。对于起重船纵摇运动响应来说,当波浪沿浪向1入射时(即起重船首先迎浪),受运输船干扰的起重船的纵摇运动响应与无运输船干扰的起重船纵摇运动响应几乎一致,仅当波浪沿浪向2入射时,受运输船干扰的起重船纵摇运动响应在低周期波浪条件下会低于无运输船干扰的起重船纵摇运动响应。

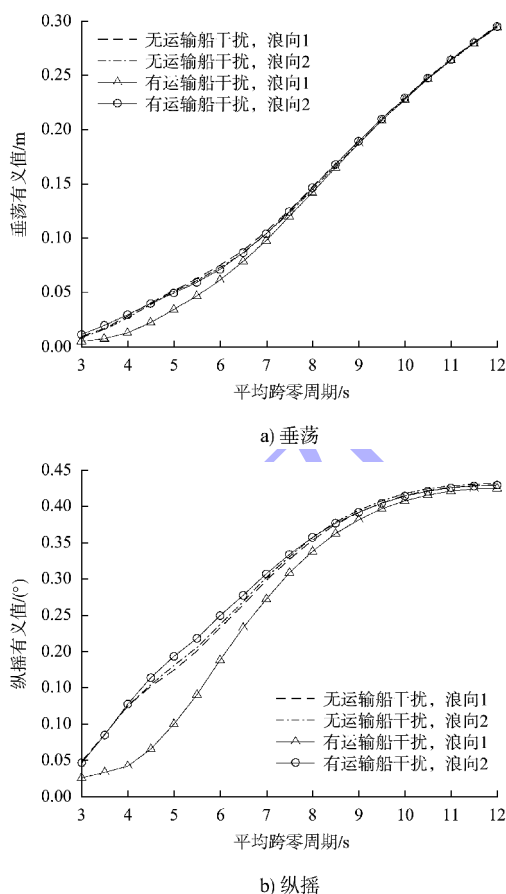


图5 不同海况条件下起重船垂荡和纵摇运动响应

Fig. 5 Crane vessel heave and pitch motions under various ship clearances

3 基于运动响应分析的双船靠泊迎浪策略

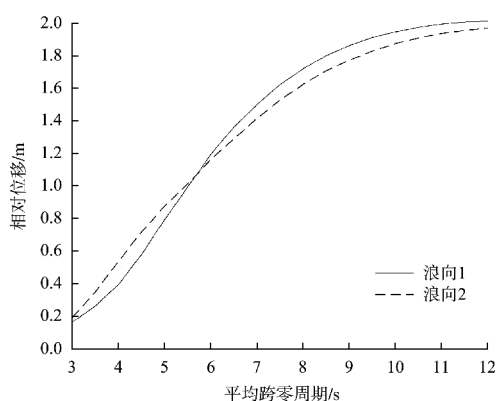
海上被施工物结构种类繁多,当水深较深时一些钢结构采用立式运输较为高耸,而一些桩基

础结构则会“躺”在运输船上。这些结构的过驳操作都可以采用双船T形靠泊形式,但其施工特点又有所区别。对于立式运输高耸结构的过驳操作,双船靠泊时的挂钩需要在主甲板以上数米高度位置处进行,一些高耸结构的吊点可能位于运输船主甲板以上数十米甚至百米以上的高度。此时,挂钩操作对于运输船的横摇运动更加敏感,运输驳船小角度的横摇运动也可能会造成挂钩位置处较大的线位移。与此同时,对于挂钩点在甲板附近的海上过驳操作来说,起重船运动所引起的吊钩晃动可能是影响施工的重要因素。

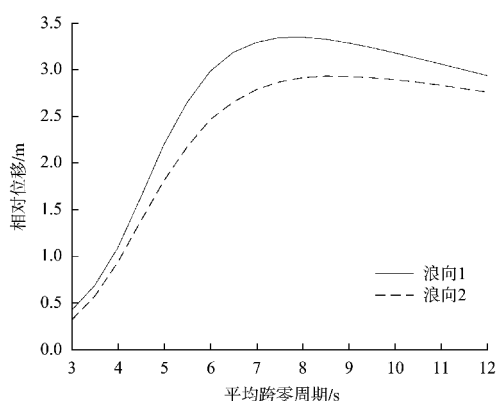
基于运动响应分析手段,通过吊钩与被吊物挂点的相对运动量计算研究双船靠泊的迎浪策略,计算同样采用了有义波高为1 m、不同平均跨零周期的海况条件,分别计算低吊点工况(吊耳中心位于运输船甲板以上5 m)和高吊点工况(吊耳中心位于运输船甲板以上70 m)。

低吊点和高吊点工况下施工吊钩(起重船诱导运动)与吊点处(运输船上的被吊物)的相对位移见图6。可以看出,浪向1和2下吊钩和吊点处的相对位移较为接近。对于低吊点工况施工来说,当作业海域波浪周期较短时,采用运输驳船迎浪对施工可能更有利,这主要是由于单桩基础施工挂钩处距离运输船旋转中心较近,对于运输驳船的横摇运动敏感度较低,而另一方面可运输船迎浪可有效降低起重船的纵摇运动,此时运输驳船的作用可看作是起重船的浮式防波堤,有效消减了作用于起重船的波浪能量。而当波浪周期较长时,运输船的消浪效果不明显,此时采用起重船迎浪对施工更为有利。对于高吊点工况施工来说,无论波浪周期长短,采用起重船迎浪都会得到更小的相对运动位移,这主要是高吊点工况施工的吊点高于主甲板数十米处,此时吊点处的线位移运动对运输船的横摇运动极为敏感,因此尽量降低运输船的横摇运动对施工更为有利。此外,可以明显地观察到,在同样的海况条件下高吊点工况挂钩时吊钩与吊点处的相对位移要远大于低吊点工况施工的相对位移,若考虑高吊点工况挂钩操

作时吊点高度更高,人员的操作风险和难度更大,因此有必要在高吊点施工时安装自动挂钩装备,从而保障人员操作安全,并提高施工效率。



a) 低吊点工况(单桩基础施工)



b) 高吊点工况(导管架基础施工)

图6 不同浪向下吊钩与吊点处的相对位移

Fig. 6 Relative displacement between hook and lifting point under different wave directions

4 结论

1) 运输船与起重船 T 形靠泊状态下,波浪沿浪向 1 传播时,运输船横摇和垂荡运动响应有义值显著高于其在浪向 2 条件下的运动响应有义值,特别是运输船的垂荡运动在起重船存在的情况下反而会大于没有起重船情况下的垂荡运动响应。

2) 运输船和起重船之间的间隙大小对运输船横摇和垂荡运动响应影响不大。

3) 运输船与起重船 T 形靠泊状态下,运输船对起重船运动的影响相对较小。

4) 对于低吊点和高吊点工况施工,起重船与运输船 T 形靠泊进行过驳挂钩操作时可以采用不

同的迎浪策略。对于高吊点挂钩施工来说,采用起重船迎浪可以有效降低吊钩和吊点的相对位移;而对于低吊点挂钩来说,在短周期波浪条件下可考虑采用运输船迎浪进行施工,此时运输船相当于起重船的浮式防波堤,可以有效消减传播至起重船的波浪能量,更加有效地降低吊钩和吊点的相对位移。

参考文献:

- [1] YEUNG R W. On the interactions of slender ships in shallow water [J]. Journal of fluid mechanics, 1978, 85(1): 143-159.
- [2] FANG M C, KIM C H. Hydrodynamically coupled motions of two ships advancing in oblique waves [J]. Journal of ship research, 1986, 30(3): 159-171.
- [3] CHEN G R, FANG M C. Hydrodynamic interactions between two ships advancing in waves [J]. Ocean engineering, 2001, 28(8): 1053-1078.
- [4] HONG S Y, KIM J H, CHO S K, et al. Numerical and experimental study on hydrodynamic interaction of side-by-side moored multiple vessels [J]. Ocean engineering, 2005, 32(7): 783-801.
- [5] KOO B J, KIM M H. Hydrodynamic interactions and relative motions of two floating platforms with mooring lines in side-by-side offloading operation [J]. Applied ocean research, 2005, 27(6): 292-310.
- [6] ZHAO W, MILNE I A, EFTHYMIU M, et al. Current practice and research directions in hydrodynamics for FLNG-side-by-side offloading [J]. Ocean engineering, 2018, 158(15): 99-110.
- [7] 蒙学昊, 李萌, 周毅, 等. LNG 运输船和浮式转接驳间吸附力数值模拟分析[J]. 船海工程, 2022, 51(2): 117-121, 126.
MENG X H, LI M, ZHOU Y, et al. Numerical simulation of adsorption force between LNG carrier and floating transfer barge [J]. Ship & ocean engineering, 2022, 51(2): 117-121, 126.
- [8] JIN Y T, CHAI S H, DUFFY J. Hydrodynamics of a conceptual FLNG system in side-by-side offloading operation[J]. Ships and offshore structures, 2019, 14(1): 104-124.