



基于船舶模拟试验的泊稳条件影响分析

张奥博¹, 关宏旭², 徐言民³, 李龙浩⁴

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉理工大学 创业学院, 湖北 武汉 430063;
3. 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063; 4. 武汉理工大学 交通学院, 湖北 武汉 430063)

摘要: 随着中国“一带一路”倡议的推进, 船舶及港口的规模和数量不断增加, 泊稳条件的研究愈加重要。基于船舶模拟试验, 分析泊稳条件对船舶系统的影响。通过建立船舶运动、环境载荷模型, 模拟不同材质和直径的缆绳在复杂环境条件下的应力响应, 验证了船舶操纵模拟器的精度和可行性。结果显示: 系泊船的横摇运动是影响缆绳应力的关键因素; 在一定范围内增加缆绳预张力或使用伸长率较高的缆绳可以有效减缓缆绳应力; 浪高对缆绳应力的影响显著, 尤其在耦合波浪周期接近船舶横摇周期时。研究为港口设计和船舶靠泊提供了科学依据, 并提出提高系泊系统稳定性的建议。

关键词: 大型油船; 泊稳条件; 船舶操纵模拟器; 船舶运动; 数值模拟

中图分类号: U652; P753

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)04-0064-09

Influence of mooring stability conditions based on ship simulation experiments

ZHANG Aobo¹, GUAN Hongxu², XU Yanmin³, LI Longhao⁴

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063;

2. School of Entrepreneurship, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063;

3. Key Laboratory of Inland Navigation Technology in Hubei Province, Wuhan 430063;

4. School of Transportation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063)

Abstract: With the advancement of China's "Belt and Road" initiative, the scale and number of ships and ports have been increasing, and the study of mooring stability conditions is becoming increasingly important. This paper analyzes the impact of mooring stability conditions on ship mooring systems based on ship simulation experiments. By establishing ship motion and environmental load models, the stress response of cables with different materials and diameters under complex environmental conditions is simulated, verifying the accuracy and feasibility of the ship handling simulator. The results show that the roll motion of the moored vessel is a key factor affecting the stress of the mooring line. Increasing the pre tension of the cable within a certain range or using cables with higher elongation can effectively reduce cable stress. Wave height significantly affect rope stress, especially when the coupled wave period is close to the ship's roll period. The research provides scientific basis for port design and ship mooring, and proposes suggestions for improving the stability of mooring systems.

Keywords: large oil tanker; mooring stability conditions; ship handling simulator; ship motion; numerical simulation

随着我国“一带一路”倡议的推进, 大型船舶的规模和数量不断增加。为适应此趋势, 我国各地正加快码头建设的步伐^[1]以提升港口的吞吐能

力和服务水平。在开放码头系泊的船舶由于风、波浪、涌浪等因素影响, 缆绳应力发生剧烈变化, 不同属性缆绳在受力过程中展现出应力响应差异,

收稿日期: 2024-06-04

作者简介: 张奥博 (2001—), 男, 硕士研究生, 从事船舶控制研究。

严重情况会引发断缆事故。因此,研究复杂风流条件下缆绳属性对船舶泊稳的影响具有重要意义。

目前,泊稳研究主要采用系泊计算软件和物理模型试验两种方法。薛丁源等^[2]使用 OPTIMOOR 软件对钢缆与聚丙烯缆绳的应力及船舶运动量进行对比研究;王登辉等^[3]使用 MIKE 21 中的 Mooring Analysis 软件计算不同波浪周期下多组缆绳的系缆力,得出了船舶横移量、系缆力与缆绳刚度的关系。物理模型试验则通过缩小的船模在试验水池中模拟系缆。沈雨生等^[4]通过试验研究不同波浪周期对系泊船舶运动的影响,并进行定量分析;陈立家等^[5]基于 MMG(船舶操纵生成器, maneuvering motion generator)理论,使用船舶操纵模拟器分析风、浪、流载荷与船舶的耦合作用,较好地拟合出船舶泊稳时的动态变化。

通过以上研究发现,系泊计算软件和物理模型试验各有不完善之处。系泊软件只能在单一流速和流向条件下计算系缆力,无法反映潮汐和潮流变化带来的影响。而物理模型试验成本高且存在缩尺效应^[6],无法全面支持船舶停泊期间的系泊安全管理。因此,本研究基于船舶操纵模拟器,模拟船舶系缆的全生命周期,评估复杂环境条件和缆绳属性对系泊船缆绳应力的影响机理。

1 系泊系统

1.1 坐标系模型

为方便描述船舶在系泊期间六自由度方向上的运动,建立系泊船的运动坐标系。以系泊船初稳心为坐标轴原点,沿船长方向为 x 轴;垂直于船长方向为 y 轴;垂直指向地心方向为 z 轴,建立附体坐标系如图 1 所示。

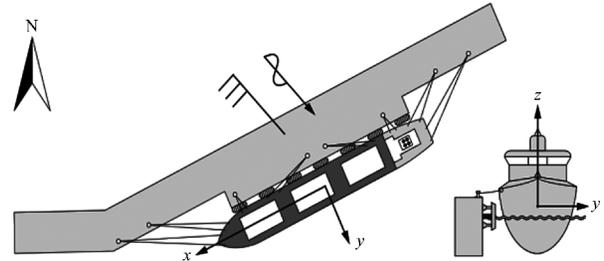


图 1 码头作用力坐标系

Fig. 1 Coordinate system of forces acting on wharf

1.2 船舶运动模型

在对船舶运动模型进行建模时,需要充分考虑数学模型的对象——可控的船舶系统,数学模型表示船舶在当前有限水域中的运动情况。基于 MMG 分离型建模思想,可以将船体、舵和螺旋桨分离,构建船舶运动模型。将船舶所受的环境外力、力矩和附加力矩作用于六自由度运动模型中,建立系泊船运动模型:

$$\begin{cases} (m + \lambda_{11}) \frac{dv_x}{dt} - (m + \lambda_{22}) v_y \omega_z + (m + \lambda_{33}) v_z \omega_y = \sum F_x + \sum F_x(M) \\ (m + \lambda_{22}) \frac{dv_y}{dt} - (m + \lambda_{11}) v_z \omega_x + (m + \lambda_{33}) v_x \omega_z = \sum F_y + \sum F_y(M) \\ (m + \lambda_{33}) \frac{dv_z}{dt} - (m + \lambda_{11}) v_x \omega_y + (m + \lambda_{33}) v_y \omega_x = \sum F_z + \sum F_z(M) \\ (J_x + \lambda_{44}) \frac{d\omega_x}{dt} + [(J_z + \lambda_{66}) - (J_y + \lambda_{55})] \omega_y \omega_z + (\lambda_{33} - \lambda_{22}) v_y v_z = \sum M_x + \sum M_x(M) \\ (J_y + \lambda_{55}) \frac{d\omega_y}{dt} + [(J_x + \lambda_{66}) - (J_z + \lambda_{66})] \omega_x \omega_z + (\lambda_{11} - \lambda_{33}) v_x v_z = \sum M_y + \sum M_y(M) \\ (J_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega_z}{dt} + [(J_y + \lambda_{55}) - (J_x + \lambda_{44})] \omega_x \omega_y + (\lambda_{22} - \lambda_{11}) v_x v_y = \sum M_z + \sum M_z(M) \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 为船舶质量; J_x 、 J_y 、 J_z 为随船坐标系的船舶沿 x 、 y 、 z 轴上的转动惯量; λ_{11} 、 λ_{22} 、 \dots 、 λ_{66} 为附加质量; v_x 、 v_y 、 v_z 为随船体坐标系的速度分量; ω_x 、 ω_y 、 ω_z 为随船体坐标系的旋转角速

度; $\sum F_x$ 、 $\sum F_y$ 、 $\sum F_z$ 、 $\sum M_x$ 、 $\sum M_y$ 、 $\sum M_z$ 为由水和风产生的总力和总力矩的分量; $\sum F_x(M)$ 、 $\sum F_y(M)$ 、 $\sum F_z(M)$ 、 $\sum M_x(M)$ 、 $\sum M_y(M)$ 、 $\sum M_z(M)$ 为总机械力和总机械力矩的分量。

1.3 环境载荷模型

作用于系泊船的计算风压力垂直于码头前沿线的横向分力和平行于码头前沿线的纵向分力可按式计算：

$$\begin{cases} F_{w,横} = 73.6 \times 10^{-5} A_{横} v_{横}^2 \delta_1 \delta_2 \\ F_{w,纵} = 49.0 \times 10^{-5} A_{纵} v_{纵}^2 \delta_1 \delta_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中： $F_{w,横}$ 、 $F_{w,纵}$ 分别为作用在船舶上的计算风压力的横向和纵向分力, kN； $A_{横}$ 、 $A_{纵}$ 分别为船体水面以上横向和纵向受风面积, m^2 ； $v_{横}$ 、 $v_{纵}$ 分别为设计风速的横向和纵向分量, m/s； δ_1 为风压不均匀修正系数, 取 0.65； δ_2 为风压高度变化修正系数, 取 1.39。

作用于系泊船的计算流压力垂直于码头前沿线的横向分力和平行于码头前沿线的纵向分力可按式计算：

$$\begin{cases} F_{f,横} = C_{横} 0.5 \rho v^2 S_{横} \\ F_{f,纵} = C_{纵} 0.5 \rho v^2 S_{纵} \end{cases} \quad (3)$$

式中： $F_{f,横}$ 、 $F_{f,纵}$ 分别为作用在船舶上的计算流压力的横向和纵向分力, kN； $S_{横}$ 、 $S_{纵}$ 分别为横向、纵向船舶吃水线以下的表面积, m^2 ； v 为水速度, m/s； $C_{纵}$ 、 $C_{横}$ 分别为水流力纵向和横向分力系数。

作用于系泊船的波浪力计算可将波浪视为由

一系列与真实波浪相类似的、具有固定频谱特性的规则波叠加所合成。波浪表面则是一组波的总和，具体计算可通过下式获得：

$$\zeta(x_g, y_g, t) = \sum_{i=1}^N \zeta(x, y, t) = A_i \cdot \cos(k_{x,i}x + k_{y,i}y - \omega_i t + \varphi_i) \quad (4)$$

式中： x_g 、 y_g 为船舶重心在全局坐标系中的坐标； x 、 y 为船舶在随船坐标系中的位置坐标； i 为谐波个数； ζ 为 Z 坐标轴上的波面； N 为谐波总数； A_i 为第 i 个波的振幅； k_i 为波浪数； ω_i 为第 i 个谐波的频率； φ_i 为第 i 个谐波的相位。

2 系泊系统仿真模型

2.1 系泊模型参数

依托东营港某油品化工泊位码头项目进行仿真试验，研究对象为满载的 10 万吨级油船，其水动力参数经挪威船级社 (DNV) 认证。主要参数为：总长 246 m、型宽 43 m、型深 21.4 m、满载吃水 14.8 m、排水量 14.8 万 t、横摇周期 14.36 s、纵摇周期 8.49 s。码头平面布置为一字形，前沿走向 65° ，总长度 315 m。船舶采用右舷顺靠方式进行靠泊作业，系泊采用 4-2-2 系缆方式，即船首尾各 4 根头缆、2 根倒缆和 2 根横缆，如图 2 所示。

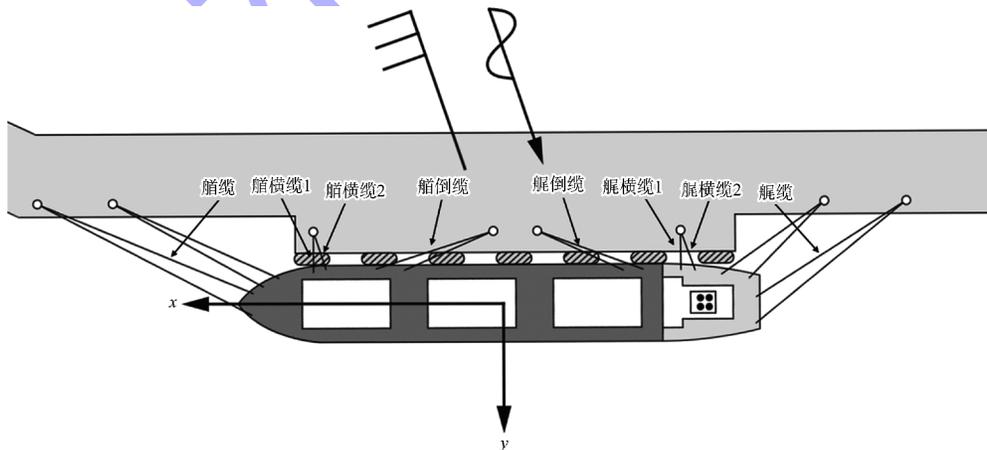


图 2 靠泊方式

Fig. 2 Mooring method

2.2 缆绳参数

为验证缆绳材质和直径的关系，选取码头常用的 4 种材料：钢缆、迪尼玛、丙纶和尼龙。缆

绳材质的选择依据现行港口工程荷载规范^[7]和相关缆绳厂家的出厂数据见表 1。

表 1 缆绳参数

Tab. 1 Mooring line parameters

材质	编号	直径/mm	破断力/kN	伸长率/%
钢缆	1	40	890	2
	2	48	1 260	2
	3	56	1 690	2
迪尼玛	1	36	1 030	5
	2	40	1 360	5
	3	44	1 650	5
丙纶	1	80	800	8
	2	88	920	8
	3	96	1 160	8
尼龙	1	72	740	22
	2	80	900	22
	3	88	1 080	22

2.3 环境参数

在船舶系泊作业中, 环境载荷条件和缆绳属性的差异会显著影响缆绳应力, 但决定性的环境因素尚未明确。此前研究多集中于不同环境载荷下的极限工况, 设置不够系统、全面。为了评估极端环境对缆绳应力的影响, 选取风流同向、大潮落等工况。在这种工况下, 缆绳的松弛-张紧变化速度最快, 受力变化最显著。结合码头的设计走向, 设计基础工况见表 2, 并设计多组对照试验, 以研究应力的关键影响因素。

表 2 工况设计

Tab. 2 Operating condition design

风、浪方向/(°)	风速/(m·s ⁻¹)	流速/(m·s ⁻¹)	流向/(°)	波浪高度/m	波浪周期/s	涌浪高度/m	涌浪周期/s
335	20.7	0.8	112.5	2	4.78	0.5	8

3 系泊试验结果及验证

3.1 泊稳指标

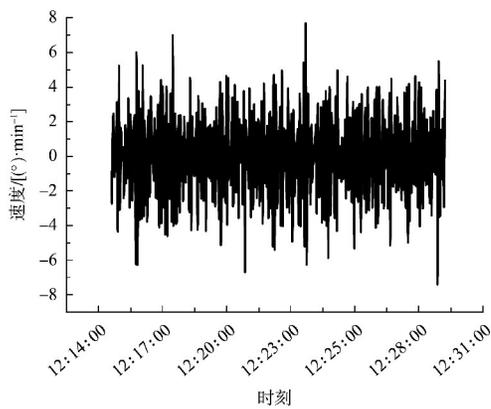
关于船舶泊稳指标的选取, 国内外尚无统一意见。文献[8]限制了系泊期间船舶在六自由度方向上的运动。文献[9]提出以缆绳受力是否超出许用载荷作为系泊稳定性的判断标准, 具体规定钢丝绳负荷不得超过其破断强度的 55%; 除尼龙绳外, 其他化纤绳不得超过破断强度的 50%; 尼龙绳不得超过破断强度的 45%。

3.2 基础工况

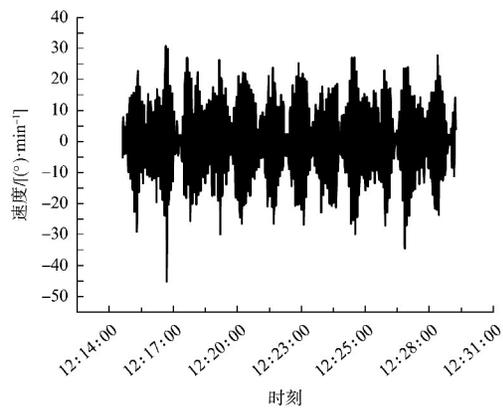
为评估上述泊稳指标在基础工况下的适用性,

进行运动数据采集与分析, 见图 3~5。

数据显示, 船舶在四自由度上的运动均符合泊稳标准, 各自由度的振动呈现振幅调制规律, 横摇、纵摇和垂荡周期分别为 14、8 和 7 s, 表现出复杂的多态耦合现象(图 3)。进一步分析运动速度和缆绳受力之间的关系(图 4、5), 发现横摇运动对缆绳应力影响最大。频域分析显示, 横摇运动的振幅和频率最强烈, 约达到 18 Hz, 导致船首尾横缆动态张力频繁突变。相比之下, 纵摇、垂荡和转艏运动对缆绳受力的影响较小, 几乎可以忽略不计。



a) 纵摇



b) 横摇

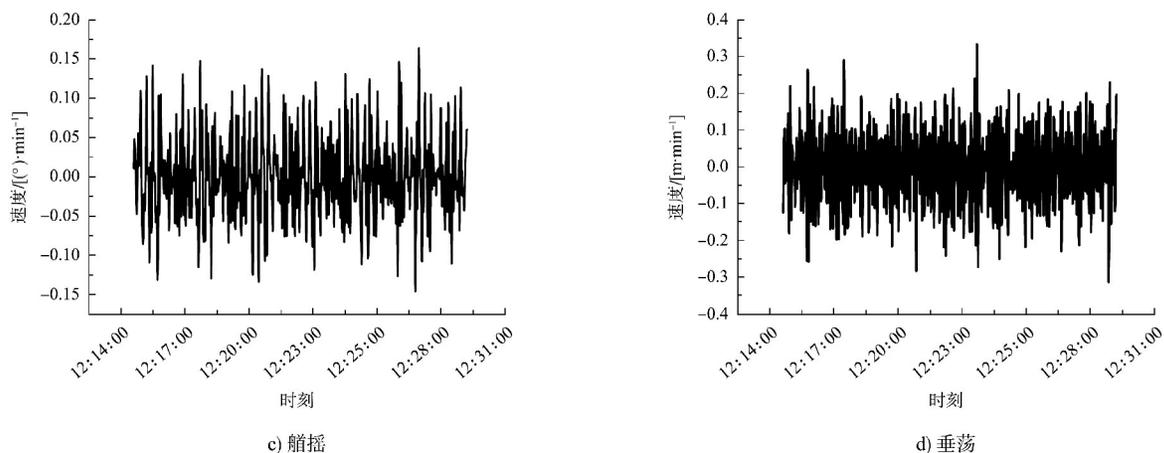


图 3 船舶四自由度上速度分析
Fig. 3 Velocity analysis of ship in four degrees of freedom

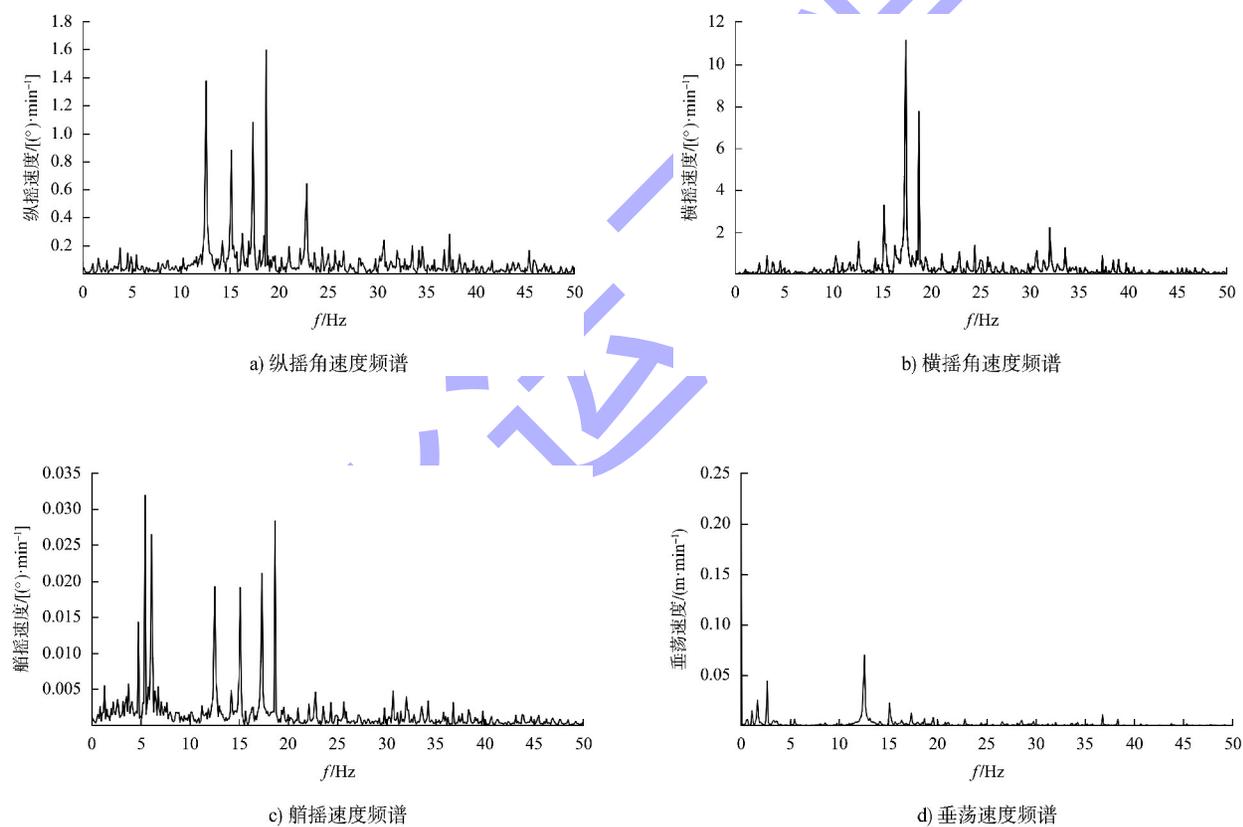


图 4 船舶四自由度上运动频域分析
Fig. 4 Frequency domain analysis of ship motion in four degrees of freedom

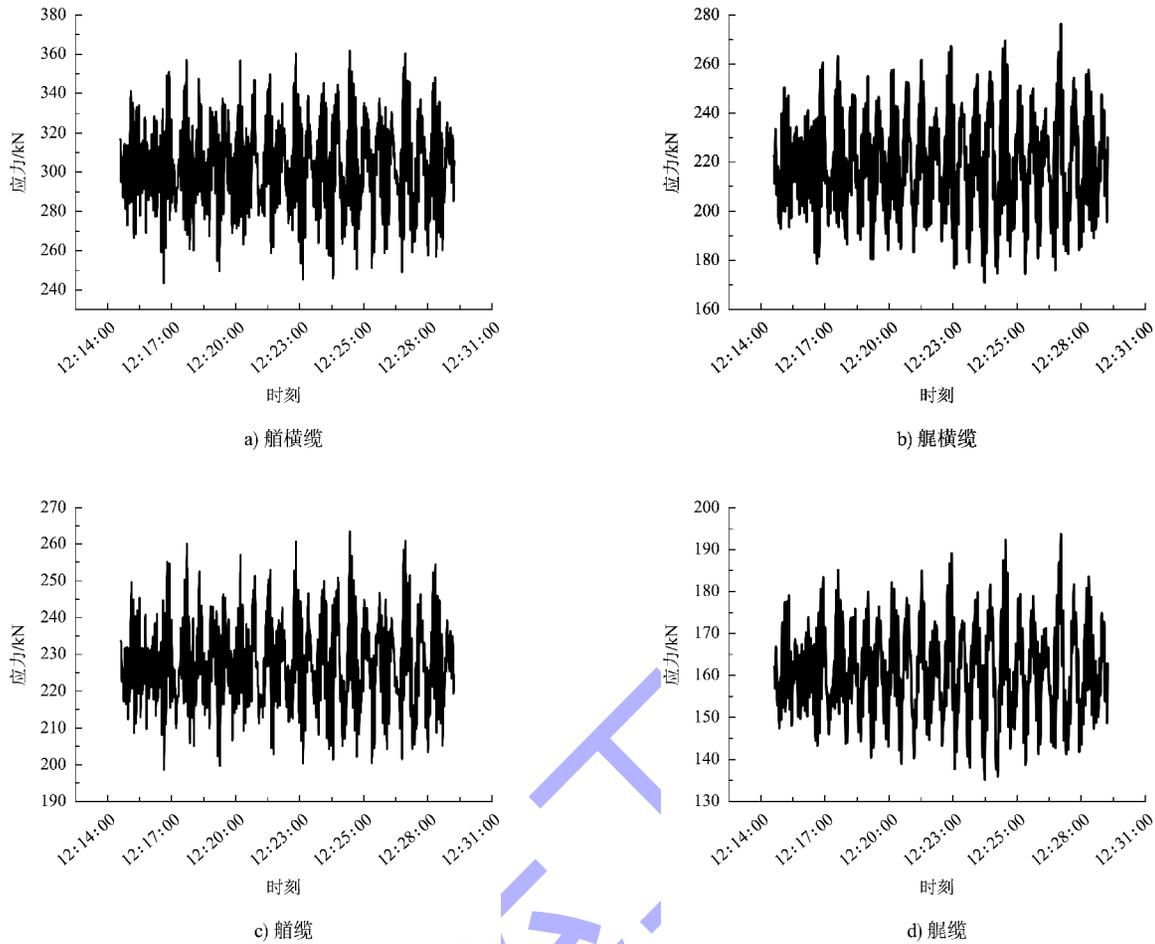


图 5 缆绳应力变化分析

Fig. 5 Stress changes analysis of mooring line

综上,可以看出船舶在基础工况下的四自由度运动和缆绳受力均符合泊稳指标,横摇运动对缆绳应力的影响尤为显著。在实际系泊操作中,需要特别关注横摇运动对系泊缆绳的冲击张力,以避免缆绳断裂事故的发生。

3.3 缆绳材质对泊稳系统的影响

为验证船舶操纵模拟器的精度,并避免同种软件的验证误差,采用 OPTIMOOR 软件对比计算。根据基础工况选用编号 1 钢缆,施加不同预张力以得到多组系泊船最大缆绳应力。多次试验数据取平均值,见表 3。

根据表 3 可以看出,在不同预张力下,船舶操纵模拟器结果比 OPTIMOOR 仿真结果约大 30 kN,这是因为 OPTIMOOR 软件是将风、浪、流等影响看作为类静态效果,而船舶操纵模拟器则实时反馈外界环境下对系泊船的影响。两者缆绳受力随

预张力变化趋势一致,验证了船舶操纵模拟器在模拟缆绳配置下系泊作业的可行性和准确性,模拟结果具有较高可信度。

表 3 缆绳受力对比

Tab. 3 Comparison of forces on mooring lines

预张力大小/kN	模拟器/kN	OPTIMOOR/kN
50	383.82	348.63
75	371.64	334.68
100	361.87	329.64
120	351.43	323.52
150	339.23	316.68

图 6 为基础工况下采用 4 种材质缆绳时(缆绳编号均为 1 号),系泊船最大缆绳应力的变化情况。最大缆绳应力峰值均满足现行港口工程荷载规范的许用标准,系泊处于稳定状态。图 7 为不同直径缆绳情况下,系泊船最大缆绳应力的变化情况。

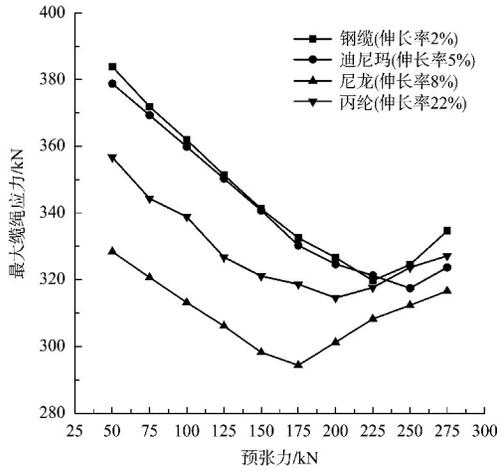


图 6 缆绳最大应力-预张力

Fig. 6 Maximum stress and pre-tension on mooring line

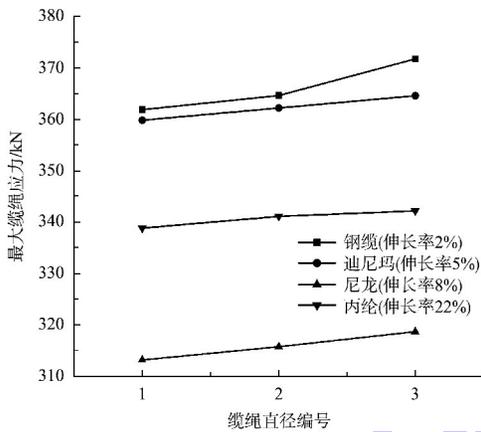


图 7 最大缆绳应力-缆绳直径

Fig. 7 Maximum stress and diameter on mooring line

图 6、7 数据表明，伸长率较高缆绳所对应缆绳最大应力较小，增加伸长率会降低最大应力的谷值。不同材质的缆绳因破断力不同，谷值出现的预张力也不同。例如，钢缆的应力谷值出现在预张力 225 kN 附近，丙纶缆绳应力谷值出现在 200 kN 附近。迪尼玛和尼龙缆绳的最优预张力相近，约在破断力的 25% 范围内。当预张力超过破断力的 30% 时，最大缆绳应力会随之增加。

在保持缆绳伸长率不变的情况下，增加预张力可以扩大缆绳的张紧区域，减少冲击载荷的可能性。然而，当预张力超过破断力的 30% 时，张紧区域受限，导致最大应力增加。此外，在伸长率不变时，增加缆绳直径对张紧区域的影响不显著，系缆力变化效果有限，相比之下，采用伸长率更高缆绳或提高预张力更有效。

3.4 环境载荷对泊稳系统的影响

为验证环境载荷对泊稳系统的影响，采用 OPTIMOOR 软件对船舶操纵模拟器进行对比计算。为保障在极端环境工况下最大缆绳应力不超过缆绳许用载荷，选取破断力较大的 2 号钢缆进行试验。参考国内外学者对泊稳条件的相关研究^[10-11]，仅选取风速和波浪高度 2 个关键参数进行对照。多次试验数据取平均值，见表 4。

表 4 缆绳受力对比

Tab. 4 Comparison of force on mooring lines

工况	模拟器缆绳受力/kN	OPTIMOOR 缆绳受力/kN	
风力等级/级	6	291.85	263.24
	7	321.86	287.53
	8	361.91	337.27
	9	410.51	388.66
	10	471.92	452.39
波浪高度/m	1.0	291.85	268.36
	1.5	321.86	292.13
	2.0	361.91	341.36
	2.5	423.28	394.57
	3.0	495.21	463.79

由表 4 可知，船舶操纵模拟器与 OPTIMOOR 仿真结果差距较小约为 30 kN，且单调性一致。证明了船舶操纵模拟器在极端风浪环境工况下模拟系泊作业的可行性，模拟结果可信度较高。

由表 5~9 数据可以看出，风浪方向、风速、波高、涌浪高度和涌浪周期对缆绳应力的影响各有不同。在风波向为吹开风时，最大缆绳应力最强；波高对最大缆绳应力的影响更为显著；而涌浪高度增加对缆绳应力影响不明显；涌浪周期的增加对缆绳最大应力影响显著；风速增大引起的缆绳应力变化幅度较小；而波高及涌浪周期的增加导致耦合波浪周期增加；在长周期波浪影响下，系泊船横摇运动加剧，缆绳动态张力突变频繁发生。

表 5 风、浪方向对最大缆绳应力影响

Tab. 5 Influence of wind-wave direction on maximum mooring line stress

风、浪方向/(°)	65	155	245	335
最大缆绳应力/kN	222.27	139.86	204.29	361.91

表6 风速对最大缆绳应力影响

Tab. 6 Influence of wind speed on maximum mooring line stress

风速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	13.8(6级风)	17.1(7级风)	20.7(8级风)	24.4(9级风)	28.4(10级风)
最大缆绳应力/kN	291.85	321.86	361.91	410.51	471.92

表7 波高对最大缆绳应力影响

Tab. 7 Influence of wave height on maximum mooring line stress

波高/m	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
最大缆绳应力/kN	309.09	310.06	361.92	423.28	495.21

表8 涌浪高度对最大缆绳应力影响

Tab. 8 Influence of swell height on maximum mooring line stress

涌浪高度/m	0.3	0.5	0.7	0.9
最大缆绳应力/kN	364.11	361.91	361.09	356.87

表9 涌浪周期对最大缆绳应力影响

Tab. 9 Influence of swell period on maximum mooring line stress

涌浪周期/s	6	8	10	12	14
最大缆绳应力/kN	366.64	361.91	365.28	394.72	424.72

试验结果表明,系泊船固有横摇周期 T_R 与波浪遭遇周期 T_E 的比值是影响系泊船横摇运动的关键因素,当 $T_R/T_E \leq 0.7$ 时,船舶不处于谐摇区,但由于 T_R 相对较小,船舶横摇频率较快,遇到风浪后会急剧摇摆,横摇运动幅值和频率增加,导致缆绳冲击张力^[12]增大,尤其对于较短缆绳,在严重情况下将产生断缆事故。

4 结论

1) 同一材质缆绳直径差异对缆绳应力影响不明显,在一定范围内增加预张力或使用伸长率较高的缆绳(如迪尼玛和尼龙)可以有效减缓缆绳应力,提升系泊稳定性。然而,当预张力超过破断力的30%时,缆绳应力会反之增加。因此,合理选择缆绳材质和预张力设置是确保系泊安全的关键。

2) 风速、波高和涌浪周期等环境因素对缆绳应力影响显著,尤其在耦合波浪周期接近船舶横摇周期时。模拟结果显示,当风速和波高增大时,缆绳应力随之增加,建议在极端环境下采取必要的防护措施以保障系泊安全。

3) 船舶横摇、纵摇和垂荡运动对缆绳应力的影响存在差异。横摇运动对缆绳应力的影响最大,尤其是在波浪周期接近船舶横摇周期时,缆绳应力波动最为剧烈。因此,在实际系泊操作中,应重点关注横摇运动对缆绳应力的影响,采取措施减缓其冲击张力。

4) 通过 OPTIMOOR 软件对比验证了船舶操纵模拟器的仿真结果,证明模拟器在极端风浪环境下的系泊作业模拟具有较高的可信度。模拟结果与 OPTIMOOR 仿真结果一致性较高,差距约为 30 kN,说明船舶操纵模拟器能够较为准确地反映系泊条件下的缆绳受力情况。

5) 根据研究结果,建议在系泊作业中合理选择缆绳材质和预张力设置,特别是在极端风浪条件下,采取必要的防护措施以保障系泊安全。此外,基于船舶操纵模拟器的仿真结果,可为港口设计和系泊操作提供可靠的数据支持,提升系泊的整体安全性和稳定性。

参考文献:

- [1] 朱善庆,薛晓晓,耿志鑫. 2023年沿海港口基本建设回顾与2024年展望[J]. 中国港口, 2024(2): 21-24.
ZHU S Q, XUE X X, GENG Z X. Review of basic construction of coastal ports in 2023 and prospects for 2024 [J]. China ports, 2024 (2): 21-24.
- [2] 薛丁源,邵昌浩,杨婷. 长周期涌浪作用下码头船舶系缆稳定性研究[J]. 水运工程, 2017(3): 80-83.
XUE D Y, SHAO C H, YANG T. Movement and mooring force of mooring system in long period wave [J]. Port & waterway engineering, 2017 (3): 80-83.
- [3] 王登辉,柳淑学,李金宣,等. 缆绳材质及直径对系泊船舶运动影响的数值模拟[J]. 水运工程, 2022(11): 43-49.
WANG D H, LIU S X, LI J X, et al. Numerical simulation of influence of rope material and diameter on motion of moored ship [J]. Port & waterway engineering, 2022 (11): 43-49.

- [4] 沈雨生, 刘堃, 杜齐鲁, 等. 波浪周期对系泊船舶运动影响试验研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2016, 31(2): 220-224.
SHEN Y S, LIU K, DU Q L, et al. Experimental investigation on the influence of wave period on the motion of a moored ship [J]. Chinese journal of hydrodynamics (series A), 2016, 31 (2): 220-224.
- [5] 陈立家, 王冰, 魏天明, 等. 基于船舶操纵模拟器的大型滚装船泊稳条件试验方法[J]. 上海海事大学学报, 2023, 44(4): 8-16.
CHEN L J, WANG B, WEI T M, et al. A test method for mooring stability conditions of large Ro-Ro ships based on ship maneuvering simulators [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2023, 44 (4): 8-16.
- [6] 闫涛, 乾东岳, 栗克国, 等. 实验室小尺度自航船模发展现状及智能化趋势[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2021, 30(1): 65-71.
YAN T, QIAN D Y, LI K G, et al. Development status and intelligent trend of small-scale self-propelled ship model in laboratory [J]. Journal of Jiangsu Ocean University (natural science edition), 2021, 30 (1): 65-71.
- [7] 港口工程荷载规范: JTS 144-1—2010[S]. 北京: 人民交通出版社, 2010.
Load code for harbour engineering: JTS 144-1-2010 [S]. Beijing: China Communications Press, 2010.
- [8] Maritime works: part 1-1: general: code of practice for planning and design for operations: BS 6349-1-1: 2013 [S]. London: British Standards Institution, 2013.
- [9] Oil Companies International Marine Forum. Mooring equipment guidelines [M]. 3rd ed. London: Witherbys, 2008: 14-17.
- [10] 高峰, 季飞, 沈文君, 等. 双体高速客船码头泊稳条件分析研究[J]. 港工技术, 2019, 56(4): 1-4.
GAO F, JI F, SHEN W J, et al. Analysis and study on mooring stability conditions of high-speed passenger catamarans [J]. Port engineering technology, 2019, 56(4): 1-4.
- [11] HA C S, MOON S, LEE J W. Basic analysis for improvement of mooring stability under long wave impact[J]. Journal of navigation and port research, 2017, 41(5): 329-336.
- [12] 张素侠, 唐友刚, 张若瑜, 等. 水下缆绳松弛—张紧过程的冲击张力影响因素实验研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(10): 1102-1107.
ZHANG S X, TANG Y G, ZHANG R Y, et al. Experimental investigation into factors affecting marine cable snap tension in taut-slack conditions [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(10): 1102-1107.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 22 页)

- [10] OGILVIE T F. First- and second-order forces on a cylinder submerged under a free surface [J]. Journal of fluid mechanics, 1963, 16(3): 451-472.
- [11] VADA T. A numerical solution of the second-order wave-diffraction problem for a submerged cylinder of arbitrary shape [J]. Journal of fluid mechanics, 1987, 174(1): 23-37.
- [12] MA K T, LUO Y, KWAN T, et al. Mooring system engineering for offshore structures [M]. Amsterdam: Elsevier Inc., 2019.
- [13] 王树青, 梁丙臣. 海洋工程波浪力学[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2013.
WANG S Q, LIANG B C. Wave mechanics for ocean engineering [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2013.
- [14] Design and analysis of station keeping systems for floating structures [S]. Washington: API Publishing Services, 2010.

(本文编辑 赵娟)