



风浪流作用下载货驳船码头前系泊研究*

扶晓林

(中交三航局第二工程有限公司, 上海 200122)

摘要: 为解决装载大型钢圆筒等高重心、大迎风面积货物的驳船, 在码头系泊作业时因风、浪、流耦合作用而面临的运动响应剧烈、缆绳张力过大等复杂动力学问题, 开展系统的数值模拟研究。采用“频域-时域”耦合的分析方法, 基于三维势流理论, 利用 OrcaWave 软件构建驳船的频域水动力模型, 计算获得其附加质量、波浪激励力等关键参数; 在 OrcaFlex 中建立包含驳船、钢筒货物、码头及系泊缆绳的全耦合时域动力学模型; 通过对不同波浪周期与风速组合的 4 种典型海况进行时域模拟。结果表明: 波浪周期是影响系泊系统安全的主导环境因素; 长周期波浪是诱发此类重载驳船产生大幅低频运动, 进而导致系泊系统出现极端张力的根本原因。

关键词: 码头; 船舶系泊; 驳船; 钢圆筒; 系泊系统耦合

中图分类号: U656.1; U653.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)04-0072-10

Mooring of loaded barge at quay under effects of wind, wave, and current

FU Xiaolin

(No. 2 Engineering Co., Ltd. of CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Shanghai 200122, China)

Abstract: To address the complex dynamic issues for barges loaded with heavy, high-center-of-gravity and large windward area cargo, such as large steel cylinders, during quayside mooring—including excessive motions, extreme mooring line tensions under effects of wind, wave, and current, a systematic numerical study is conducted. A coupled “frequency-domain and time-domain” approach is employed. A frequency-domain hydrodynamic model of barge is developed in OrcaWave using 3D potential flow theory to obtain key parameters like added mass and wave excitation forces. A fully-coupled time-domain model, integrating the barge, cargo, quay, and mooring lines, is built in OrcaFlex. Simulations are performed for four sea states with varying wave periods and wind speeds. The results quantitatively demonstrate that wave period is the dominant environmental factor governing mooring system safety. Long-period waves are the primary cause of the large-amplitude, low-frequency motions of heavy load barge that induce extreme loads in the mooring system.

Keywords: quay; ship mooring; barge; steel cylinder; mooring system coupling

码头边船舶运动分析需要综合考虑水文环境、港口设施及操控安全, 其中波浪、海流和风荷载是关键影响因素。强风可导致船舶停泊位置偏移或在靠泊时发生偏航; 而波浪则直接影响船舶稳定性, 在风浪较大时给靠泊与起航作业带来巨大挑战。此外, 船舶的靠泊与离港方式, 还必须依据码头结构、泊位空间及他船距离等现场因素做出最佳决策。

船舶系泊安全一直是港口与海洋工程领域的重点关注对象。码头系泊船在波浪、潮流、风等复杂环境因素的作用下, 会产生复杂的六自由度运动响应及缆绳受力。早期研究多集中于基础水动力特性及常规海况下的靠泊安全分析。例如, 于洋等^[1]开展码头系泊船水动力特性的研究; 吴林键等^[2]探讨外海固定式泊位船舶系缆力的评估方法; 刘青明等^[3]、李岸^[4]分别分析复杂水动力

收稿日期: 2025-08-13 录用日期: 2025-10-11

*基金项目: 中交三航局 A 类课题项目(2023-05)

作者简介: 扶晓林(1981—), 男, 高级工程师, 从事港口与航道工程项目管理工作。

条件下大型散货码头的泊稳条件以及不同潮位、浪高对船舶靠泊作业安全的影响;王龙^[5]则对船舶触碰码头的风险进行专项评估。这些研究为理解系泊系统的基本动态响应和安全边界奠定了基础。

在此基础上,随着航运业的大型化和专业化,国内学者的研究在特定船型、复杂作业场景及精细化分析方法上进一步深化。在研究对象上,已从传统散货船扩展至大型液化天然气(liquefied natural gas,LNG)船、超大型集装箱船、浮式生产储卸油装置(floating production storage and offloading,FPSO)及浮式储存及再气化装置(floating storage regasification unit,FSRU)等高附加值船舶的系泊、旁靠及双侧靠泊问题^[6-9]。在数值模拟方法方面,基于时域耦合动力学模型和高阶元法的分析已成为主流,例如肖力旗等^[10]基于AQWA软件对集装箱船装卸作业的系泊响应进行了精细模拟;徐华福^[11]采用高阶元法研究限制水域中的船-船水动力相互作用;李学东^[12]对浅水条件下船间作用力计算模型进行修正,极大提升了全系统耦合响应模拟的准确性。

近年来,为了应对日益复杂的运营环境,环境条件的研究重点从常规波浪逐渐扩展到威胁更大的特殊激振因素。一方面,长周期波浪对系泊船舶低频运动的激励作用引起了学术界的高度重视^[13-15];另一方面,港区内航行船舶引发的“船行波”(过船浪)对系泊船舶的冲击效应及船-船相互作用也成为热点研究方向^[16-17]。此外,为全面评估极端工况下的系统安全性,学者们针对台风期大型船舶防台系泊^[18-19]及深远海极端海况^[20]进行

了深入分析,并对缆绳意外破断条件下的FPSO瞬态动力学过程和失效响应进行了大量模拟计算^[21-22]。在系泊系统优化层面,相关研究还针对缆绳参数^[23]、缆尾应用^[24]及V形浮体码头等新型系泊方案^[25]进行了优化探讨,为进一步提升复杂海况下系泊系统的安全性提供了坚实的理论依据与工程指导。

这些研究为理解码头系泊系统的复杂动力学行为积累了经验,也为本文针对重载驳船的系泊安全分析提供了重要的理论基础和研究借鉴。

1 海洋环境荷载模拟

本文对驳船所处的海洋环境进行了模拟,主要包括风、浪、流3种环境荷载。海洋环境荷载的模拟方法主要依据挪威船级社(Det Norske Veritas,DNV)发布的推荐规程DNV-RP-C205 *Environmental Conditions and Environmental Loads*^[26]。船舶波浪荷载基于三维势流方法求解,风及流荷载均基于公开发表的船舶模型试验系数近似模拟。文中将会对相关方法进一步解释。

1.1 海况组合

为研究不同环境因素对系泊系统的影响,本文设计4种典型的组合海况用于时域耦合模拟分析。这4种工况主要考虑两种不同的波浪谱峰周期(6.0和8.0s)与两种平均风速(10和15m/s)的组合,其中海况SS1与SS2、SS3与SS4分别具有相同的波浪周期但风速不同。模拟中,所有波浪均采用JONSWAP谱,动态风荷载采用挪威石油理事会(Norwegian Petroleum Directorate,NPD)风谱,海流则设定为定常流。海况参数组合见表1。

表1 海况参数组合

Tab.1 Coupling of sea states

海况	浪向/(°)	波浪谱	有义波高/m	波浪谱峰周期/s	平均风速/(m·s ⁻¹)	流速/(m·s ⁻¹)
SS1	225		2.0	6.0	10	1.0
SS2	225	JONSWAP	2.0	6.0	15	1.0
SS3	225	谱峰因子为3.3	2.0	8.0	10	1.0
SS4	225		2.0	8.0	15	1.0

1.2 NPD风谱及JONSWAP波浪谱

动态风荷载采用NPD推荐的风谱进行模拟。海平面以上z处的NPD风谱定义为:

$$S(f, z) = 3.2u_{\text{ref}}^2 \left(\frac{z}{10} \right)^{0.45} [1 + \tilde{f}^n(z)]^{-5/(3n)} \quad (1)$$

式中: u_{ref} 为海平面以上10m高度处的参考平均

风速, m/s; n 为经验常数, 取 0.468; $\tilde{f}(z)$ 为一个与频率相关的无量纲参数, 其计算方式如下:

$$\tilde{f}(z) = 172f \left(\frac{z}{10} \right)^{2/3} \left(\frac{u_{ref}}{10} \right)^{-3/4} \quad (2)$$

式中: f 为风速波动的频率, Hz。

此外, 考虑到风速随高度变化的边界层效应, 任意高度 z 处的平均风速 $u_z(z)$ 可通过以下风剖面公式, 由 10 m 处的参考风速 u_{ref} 推算得出:

$$u_z(z) = u_{ref} \left[1 + 0.0573 \sqrt{1 + 0.15u_{ref} \ln \left(\frac{z}{10} \right)} \right] \quad (3)$$

根据公式生成的、本文所采用的风谱示例见图 1。

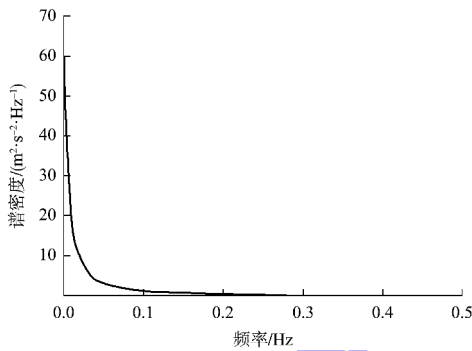


图 1 NPD 风谱
Fig. 1 NPD wind spectrum

JONSWAP 波浪谱定义为:

$$S_j(\omega) = \frac{5}{16} A_\gamma H_s^2 \omega_p^4 \omega^{-5} \exp \left[-\frac{5}{4} \left(\frac{\omega}{\omega_p} \right)^{-4} \right] \cdot \gamma^{\exp[-0.5(\omega - \omega_p)^2 / (\sigma \omega_p)^2]} \quad (4)$$

其中:

$$A_\gamma = 1 - 0.287 \ln \gamma \quad (5)$$

$$\omega_p = \frac{2\pi}{T_p} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \sigma = \sigma_a & (\omega \leq \omega_p) \\ \sigma = \sigma_b & (\omega > \omega_p) \end{cases} \quad (7)$$

式中: γ 为谱峰因子; ω 为圆频率; σ 为谱宽度因子; H_s 为波浪有义波高; ω_p 为谱峰圆频率; T_p 为波浪谱峰周期; σ_a 、 σ_b 为工程实践中采用的

谱宽度因子标准值, 分别取 0.07、0.09。

本文采用的波浪谱见图 2。

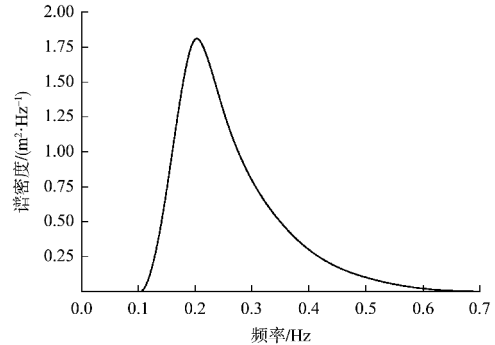


图 2 JONSWAP 波浪谱
Fig. 2 JONSWAP wave spectrum

2 驳船水动力频域计算

面元法是一种广泛应用于船舶、海洋结构物及水动力学问题中求解物体在水中流动时受到的水动力的数值方法。它基于势流理论, 利用面元法将物体表面离散为若干面元, 通过解势流方程求解水动力问题。水动力面元法的核心思想是将物体的表面离散化为若干小的面元, 通过计算每个面元上流体的流动与物体的相互作用, 求解水流场中的各个物理量。

本文采用 Orcina 公司的 OrcaWave 软件作为三维势流求解器, 用以计算驳船的水动力系数, 包括附加质量、势流阻尼及波浪激振力。本文所采用的 OrcaWave 面元模型见图 3; 为计算上浪, 该频域模型中还模拟了自由面流体质点, 作为 OrcaFlex 耦合模型进一步分析中相对运动上浪分析的基本输入。

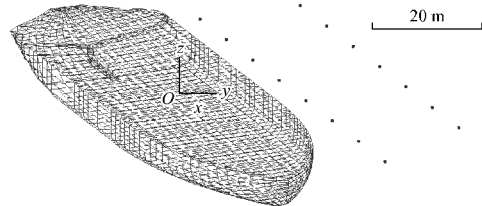


图 3 OrcaWave 软件计算面元模型
Fig. 3 OrcaWave software calculates panel model

驳船纵向、横向和垂向的附加质量计算结果见图 4, 135°波浪情况下相应 3 个自由度的波浪力计算结果见图 5。由于篇幅限制, 此处省略展示驳

船的其他水动力计算结果。OrcaWave 计算的所有结果可以直接导入 OrcaFlex，用于后续码头边系泊系统的耦合时域模型建立及计算。

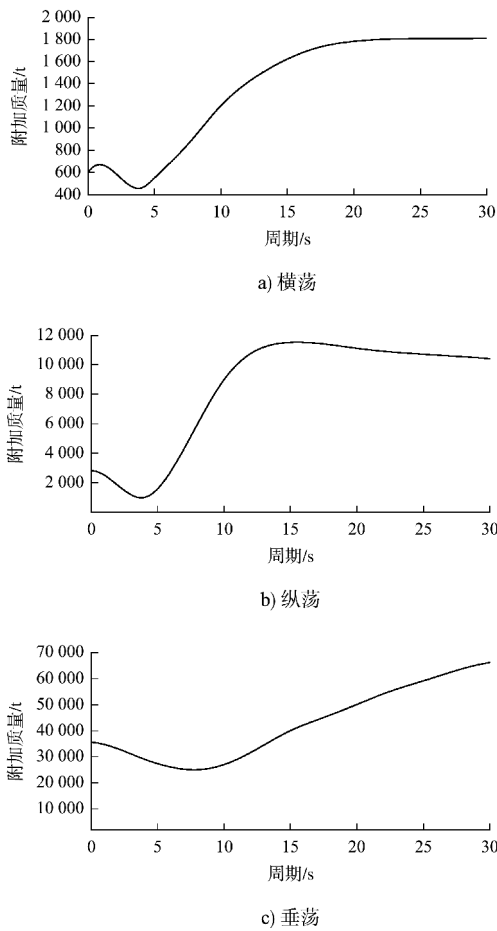


图 4 驳船附加质量计算结果

Fig. 4 Results of calculation of additional mass of barge

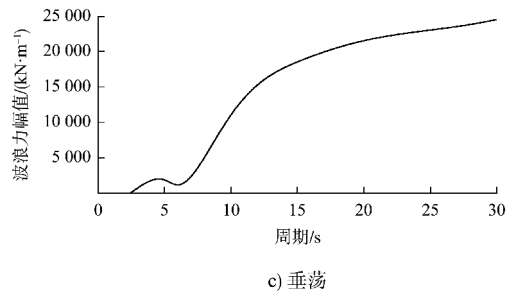
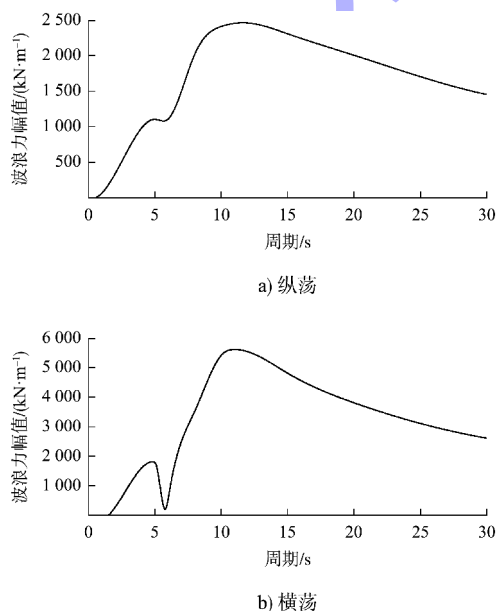


图 5 135°波浪下驳船线性波浪力计算结果

Fig. 5 Calculation results of linear wave force of barge under 135° wave

3 Orcaflex 时域耦合模型建模

Orcina 公司的 Orcaflex 是一种广泛应用于海洋工程、船舶、浮动结构物以及海洋设施动力学分析的商业软件。它能够模拟并分析复杂的海洋环境下，船舶、浮式平台、锚泊系统、海洋结构物等的运动和相互作用。Orcaflex 主要用于对系统的动态响应进行模拟，包括波浪、风、潮流等因素的影响，并预测结构物在这些复杂环境下的行为。Orcaflex 的强大功能和灵活性使其成为海洋工程、船舶设计、浮动平台、锚泊系统等领域不可或缺的分析工具。

为考虑船体水动力荷载，OrcaFlex 软件在时域分析中应用 Cummins 的方法。该方法在每个时间步长中使用浮体的冲击响应函数，通过卷积积分考虑过去运动的影响。冲击响应函数 $F_{IR}(\tau)$ 被定义为：

$$F_{IR}(\tau) = c(\tau) \int_0^{+\infty} 4\mathbf{B}(f) \cos(2\pi f\tau) df \quad (8)$$

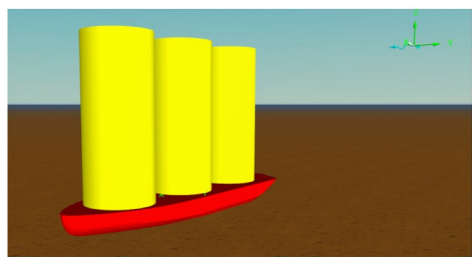
式中： $\mathbf{B}(f)$ 为频率 f 下势流阻尼矩阵； $c(\tau)$ 为截断函数； τ 为时间迟滞积分变量。

Orcaflex 的求解步骤包括模型创建、输入数据设置、求解和后处理。Orcaflex 中通过多自由度的系统描述各部分的运动。建模时需要为每个部分设置相应的自由度、连接关系以及约束条件。本文的模拟对象装载实况见图 6。根据相关资料建立的，包含驳船、系泊缆索及系泊码头的 OrcaFlex 耦合分析模型见图 7。

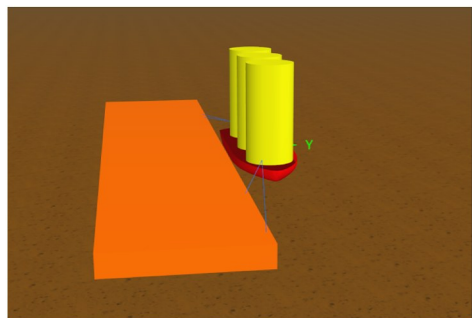


图 6 装载实况

Fig. 6 Loading condition of barge



a) 驳船



b) 系泊缆索及系泊码头

图 7 OrcaFlex 耦合分析模型

Fig. 7 OrcaFlex coupled analysis model

4 时域分析结果及讨论

OrcaFlex 时域分析模拟能追踪缆绳和船舶随时间的运动和受力变化。通过分析时域结果，可以

评估系泊系统的最大张力、运动幅值以及其他关键性能指标。这些数据对于验证设计是否符合安全标准、优化系统性能以及预测疲劳寿命至关重要。本节对表 1 的 4 种海况下码头边系泊船舶的缆绳受力及船舶运动进行分析。

4.1 驳船运动时间历程比较

4 种海况下驳船的横荡时历曲线见图 8。可以看出，海况 SS3、SS4 下船舶容易产生较大横荡运动。这说明波浪周期对该运动具有重大影响。风速则在 4 种海况下并未表现出明显的重要影响。必须要说明的是，对于不同运动模态及参数，不同海况条件的重要性有区别，具体工程中应该根据实际情况进行分析。

在系泊系统分析中，时域模拟提供一种评估结构动态响应的有效方法。然而，直接从有限时间的时域结果中推断系统全寿命周期内的最大响应并非易事。本文采用基于 3 h 时域模拟，估算最可能最大值。该方法依赖于以下假设：在所考察的时间范围内，系泊系统的响应过程是平稳的，并且极大值（例如缆绳张力峰值）可以近似服从 Rayleigh 分布。在这种情况下，极大值的累积分布函数可以表示为：

$$F(x) = 1 - \exp[-x^2/(2\sigma'^2)] \quad (9)$$

式中： x 为极大值； σ' 为 Rayleigh 分布的尺度参数，需要根据时域结果进行估计，通常可以使用极大似然估计等方法从模拟数据中确定 σ' 值。最可能最大值 M_{PM} 可以通过下式估算：

$$M_{PM} \approx \sigma' \sqrt{2 \ln N} \quad (10)$$

式中： N 为在系统预期的整个寿命周期内发生的极大值总数。由于时域模拟的持续时间仅为 3 h，因此需要根据实际海况和系统运行环境，合理外推 N 值。

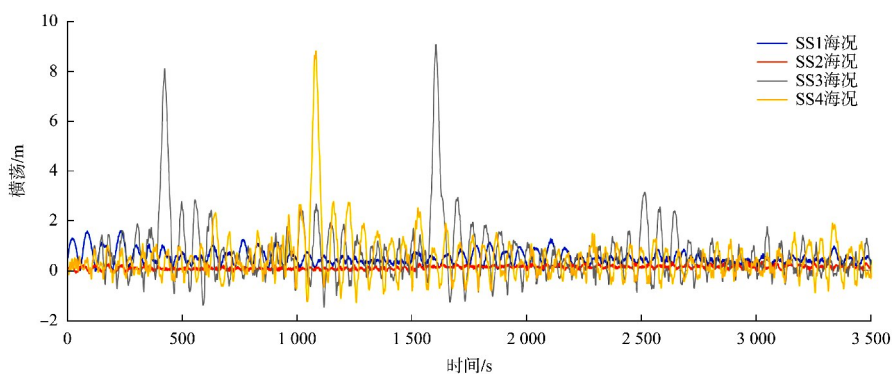


图 8 4 种海况下驳船的横荡时历曲线

Fig. 8 Time-history curves of barge's sway for four sea states

需要强调的是, 这种基于短期时域结果的最可能最大值估算方法具有一定的局限性。其准确性严重依赖于上述平稳过程假设的有效性, 以及对 N 值的准确估计。在实际应用中, 应结合更多的数据和分析方法, 例如长期统计分析和环境轮廓法等, 以更可靠地评估系泊系统的安全性。

为量化对比各海况下的运动响应, 本文采用式(10)统计驳船在码头边系泊的 3 h 最可能最大值 M_{PM} , 结果见表 2。可以看出, 海况对驳船的运动响应具有显著影响。纵荡运动方面, 海况 SS3 对应的 M_{PM} 为 2.05 m, 明显高于 SS1 和 SS2 海况, 表明在该工况下驳船的纵向运动幅度更大。类似地, 横荡运动在 SS3 海况下的 M_{PM} 为 12.37 m, 远高于其他海况, 表明驳船的横向运动幅度也显著增加。垂荡运动的 M_{PM} 值则相对稳定, 在 0.40~0.74 m, 表明不同海况对驳船垂直方向的运动影响较小。

对于转动, 横摇运动和艏摇运动的 M_{PM} 值在不同海况下差异较大。在 SS4 海况下, 横摇运动的 M_{PM} 值达到 8.03° , 而在 SS3 海况下, 艏摇运动的 M_{PM} 值高达 11.10° 。这些结果表明, 海况对驳船的转动具有明显的影响, 需要特别关注。

驳船的运动响应在不同海况下存在显著差异, 其主要原因在于海况条件的不同, 这从表 2 的数据可以清晰看出。更高的海况通常会导致更大的运动幅值, 尤其是在纵荡、横荡以及旋转运动方面。这些信息对于评估系泊系统的安全性和优化设计至关重要, 有助于确保驳船在各种海洋环境下的稳定性和安全性。需要注意的是, 这些 M_{PM} 值是基于 3 h 时域模拟数据估算的, 需要结合更长期的海况统计信息进行综合评估。

表 2 驳船在码头边系泊的 3 h 最可能最大值 M_{PM} 结果

Tab. 2 Three-hour most probable maximum M_{PM} results for barge berthing at wharf

海况	纵荡/ m	横荡/ m	垂荡/ m	横摇/ ($^\circ$)	纵摇/ ($^\circ$)	艏摇/ ($^\circ$)
SS1	0.30	1.40	0.43	0.69	0.68	2.88
SS2	0.13	0.49	0.40	0.13	0.80	2.14
SS3	2.05	12.37	0.71	6.35	1.85	11.10
SS4	1.22	3.59	0.74	8.03	1.78	7.33

4.2 系泊缆绳时间历程比较

在评估系泊系统安全性时, 缆绳张力是至关重要的衡量指标。驳船的运动响应将直接转化为系泊缆绳的动态荷载。为从统计学上量化不同海况对系泊系统的荷载影响, 由 OrcaFlex 计算得出的在 3h 模拟时间内各海况对应的最大受力缆绳的张力最可能最大值 M_{PM} 见表 3。

表 3 3 h 模拟时间内各海况对应的最大受力缆绳的张力 M_{PM} 值

Tab. 3 Most probable maximum M_{PM} results of cables subjected to maximum force corresponding to each sea state within three-hour simulation period

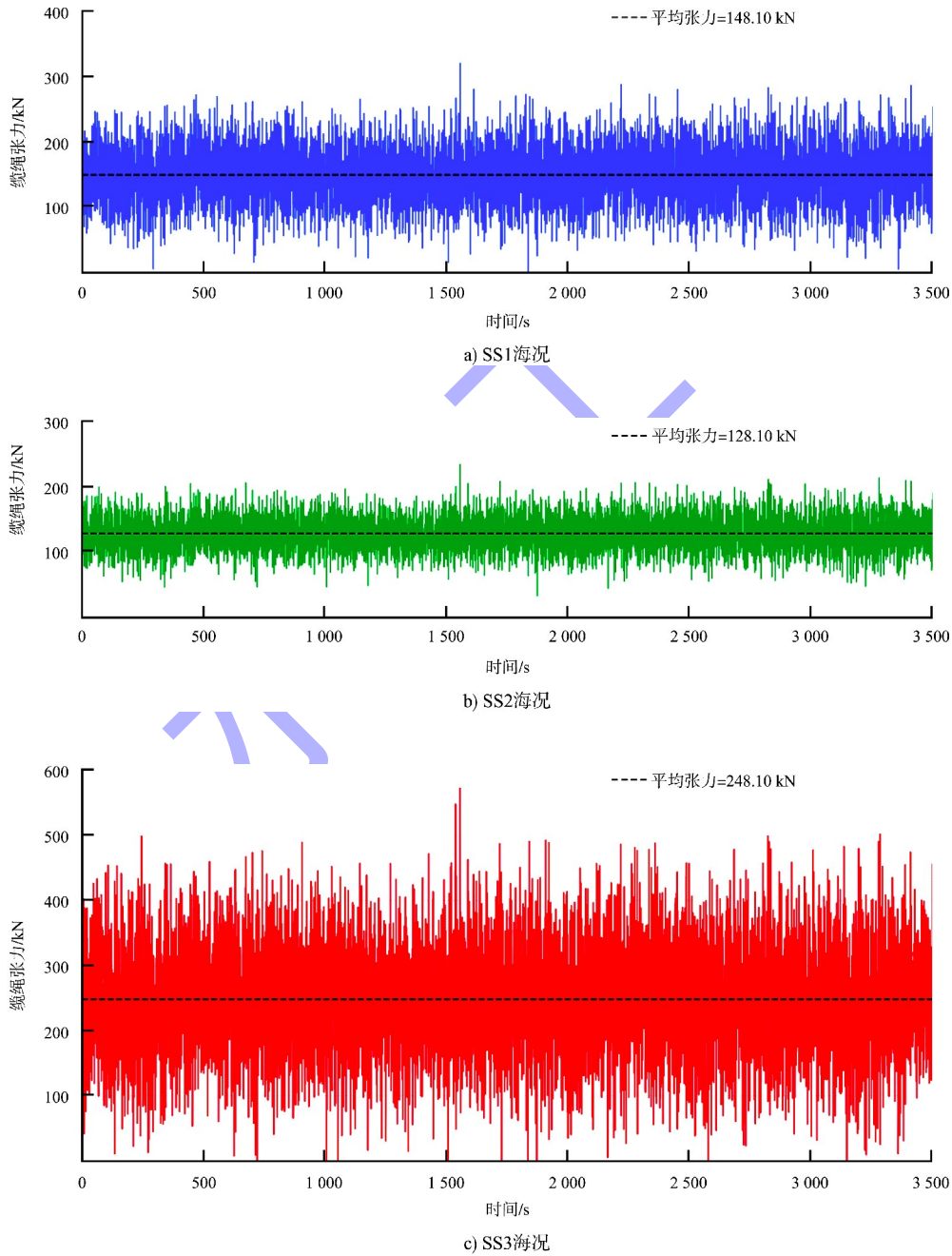
海况	平均张力/ kN	张力标准差/ kN	最小张力/ kN	最大张力 M_{PM} 值/kN
SS1	148.1	18.2	99.5	245.3
SS2	128.1	8.5	102.1	168.7
SS3	248.1	165.4	0.0	861.3
SS4	218.1	110.7	5.2	625.8

表 3 的结果清晰地揭示了以下规律: 1) 不同海况下的平均张力有显著差异, 这反映了不同风、流条件下作用于船体的平均环境力不同, 导致驳船产生不同的平均偏移位置。SS3 海况下的平均张力最高, 达到了 248.1 kN。2) 张力标准差是衡量张力动态波动剧烈程度的关键指标。其变化趋势与驳船的运动响应(表 2)高度一致, 在 SS3 和 SS4 海况下数值巨大, 说明由波浪引起的动态荷载是缆绳受力的主要组成部分。3) 在较为平稳的 SS1 和 SS2 海况下, 最小张力远高于 0 kN, 表明缆绳始终保持有效张紧。但在最恶劣的 SS3 海况下, 最小张力为 0.0 kN, 这说明缆绳在该海况下出现了瞬间松弛的现象, 这可能对缆绳造成冲击荷载和疲劳损伤。4) 最大张力 M_{PM} 值是系泊安全校核的最终依据。SS3 海况下的最大张力高达 861.3 kN, 是所有海况中的极端值, 明确了该海况为系泊系统设计的关键控制工况。

为进一步探究缆绳张力的动态变化过程并验证上述统计结论, 各海况下最大受力缆绳的张力时历曲线见图 9。对这些结果进行深入分析, 可以得出: 1) 张力与运动响应的强一致性。图 9 清晰地表明, 缆绳张力的动态特性与图 8 表现出极强

的一致性。运动的峰值与张力的峰值在时间上精确对应，这从动力学过程上揭示了由船舶运动直接导致缆绳受拉的物理机制。2)长周期波浪引发的极端峰值。图9c)、d)的时历曲线形态与图9a)、b)存在本质区别。在SS3和SS4这两个长周期波浪工况下，张力曲线不再是围绕平均值的小幅平稳波动，而是出现了多个剧烈、尖锐且持续时间

很短的瞬时张力峰值。这些极端峰值正是对系泊系统安全构成最大威胁的荷载，也是导致表3的最大张力 M_{PM} 值远超平均张力的根本原因。3)缆绳松弛现象的可视化确认。由图9c)可知，缆绳张力在某些时刻确实会下降到零值，这直观地印证了表3中最小张力为0.0 kN的统计结果，确认了缆绳在最恶劣工况下会发生瞬间松弛。



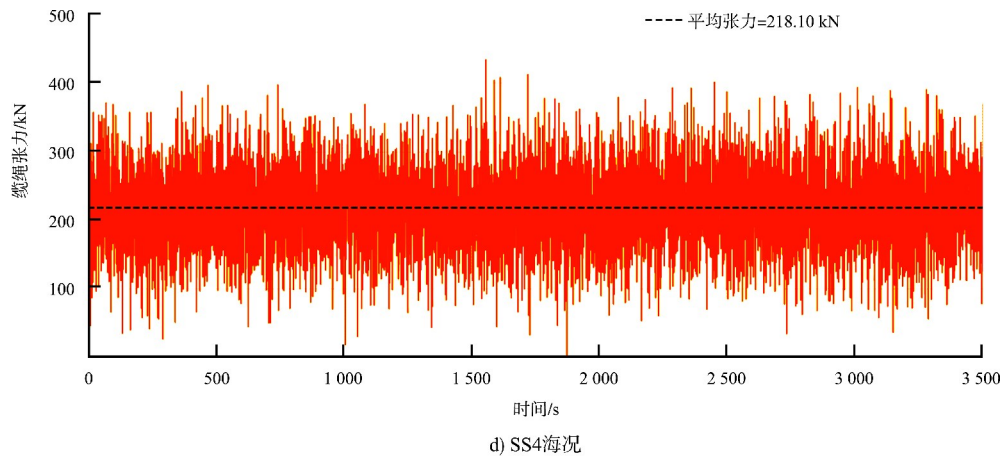


图9 各海况下最大受力缆绳的张力时历曲线

Fig. 9 Time history of tension in most loaded mooring line under each sea state

综上所述,时历曲线分析不仅验证了统计结果的正确性,更从动态过程的角度揭示长周期波浪是诱发驳船产生大幅低频运动,并进而导致系泊系统出现极端张力和松弛现象的主导环境因素。

5 结论

1) 波浪周期是系泊安全的主导因素。长周期波浪(本文中 $T_p=8.0$ s)是激发装载高重心货物的驳船产生大幅低频运动的根本原因,对系泊系统构成最直接的威胁。

2) 大幅运动是极端缆力的直接诱因。本文量化了从大幅运动到缆绳极端张力的因果传导关系,有效抑制由长周期波浪引起的低频运动,是保障此类重载驳船系泊安全的核心。

3) 本文识别了决定安全窗口的关键海况。在本文的系泊布置下,长波周期与中等风速组合的海况(SS3)被识别为设计限制条件。该结论为工程实践制定操作窗口提供了科学依据,并指出在特定条件下波浪周期的重要性可能超过风速。

4) 风荷载对高重心货物驳船的影响具有特殊性。尽管风速在本文特定浪向下非主导因素,但其对横摇运动的贡献依然显著,凸显了对此类特殊货物驳船进行风、浪、流全耦合分析的必要性。

5) 为进一步提升预报精度与应用范围,建议后续开展物理模型试验与实船监测,以验证和校准数值模型。同时,将分析维度拓展至系泊系统

疲劳寿命评估及突发断缆等故障工况,可为重大件海上作业安全提供更全面的技术支持。

参考文献:

- [1] 于洋,洪碧光. 码头系泊船水动力特性的研究[J]. 大连海事大学学报, 1999, 25(3): 36-39.
YU Y, HONG B G. A study on hydrodynamics characteristics of the ship mooring to wharf[J]. Journal of Dalian Maritime University, 1999 (3): 36-39.
- [2] 吴林键,吴丙贵,舒丹,等. 外海固定式泊位船舶系缆力评估方法论述[J]. 水道港口, 2014, 35(5): 489-496.
WU L J, WU B G, SHU D, et al. Study of evaluation methods of ship mooring force in stationary berth of open sea[J]. Journal of waterway and harbor, 2014, 35(5): 489-496.
- [3] 刘青明,黄河,张银苗. 复杂水动力条件下开敞式大型散货码头泊稳条件分析[J]. 水运工程, 2018(6): 154-157.
LIU Q M, HUANG H, ZHANG Y M. Mooring stability condition analysis of open-type large offshore bulk cargo terminal under complex hydrodynamic conditions[J]. Port & waterway engineering, 2018(6): 154-157.
- [4] 李岸. 不同潮位和浪高条件对30万吨级油船靠泊作业安全的影响[J]. 港口科技, 2019(11): 23-28.
LI A. Effect of different tide levels and wave heights on berthing safety of 300,000 DWT oil tankers[J]. Science & technology of ports, 2019(11): 23-28.
- [5] 王龙. 船舶触碰码头风险评估[D]. 大连: 大连海事大

- 学, 2009.
- WANG L. Risk assessment of collisions between ships and berths[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2009.
- [6] 黄河, 陈谦. 缅甸 LNG 码头船舶并靠和双侧靠泊动态系泊分析[J]. 水运工程, 2020(5): 82-85, 92.
- HUANG H, CHEN Q. Dynamic mooring analysis of ships berthing in alongside-banking model and double-side banking model of Myanmar LNG jetty [J]. Port & waterway engineering, 2020(5): 82-85, 92.
- [7] 欧勇, 单鼎隆. LNG 船舶码头系泊动力响应模型试验研究[J]. 港口航道与近海工程, 2024, 61(2): 1-5.
- OU Y, SHAN D L. Experimental study on dynamic response of LNG ship on berth by using physics model[J]. Port, waterway and offshore engineering, 2024, 61(2): 1-5.
- [8] 李永福, 梁圣茨, 矫珊珊, 等. 大型 LNG 船系泊安全分析[J]. 船舶与海洋工程, 2020, 36(3): 5-11.
- LI Y F, LIANG S Y, JIAO S S, et al. Large LNG carrier mooring safety evaluation [J]. Naval architecture and ocean engineering, 2020, 36(3): 5-11.
- [9] 周宏康. FSRU 码头系泊研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- ZHOU H K. Investigation on a dock mooring FSRU[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [10] 肖力旗, 曹民, 张柳明. 基于 AQWA 的集装箱船舶装卸作业系泊响应分析[J]. 水运工程, 2021(11): 26-31.
- XIAO L Q, CAO M, ZHANG L M. Mooring response analysis of ship stevedoring operations based on AQWA[J]. Port & waterway engineering, 2021(11): 26-31.
- [11] 徐华福. 基于高阶面元法的限制水域中船-船水动力相互作用数值研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- XU H F. Numerical study of ship-to-ship hydrodynamic interaction in restricted waters based on high-order panel method [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [12] 李学东. 系泊时船间作用力计算模型的浅水修正[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2010, 15(2): 119-123.
- LI X D. Perfect the generic interaction effects model of moored ships in shallow waters [J]. Journal of Jimei University (natural science), 2010, 15(2): 119-123.
- [13] 詹广才, 耿颖, 朱峰, 等. 港池内中长周期波浪作用下船舶系缆动力响应[J]. 水运工程, 2019(9): 108-112.
- ZHAN G C, GENG Y, ZHU F, et al. Dynamic response of mooring ship under medium and long period wave in harbor basin[J]. Port & waterway engineering, 2019(9): 108-112.
- [14] 史宪莹. 双峰谱和长周期波浪对系泊船舶作用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- SHI X Y. Study on effects of bimodal spectral and long-period waves upon mooring ships [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [15] 刘擎波, 梁婷. 长周期波作用下开敞式码头船舶系泊条件研究[J]. 港口航道与近海工程, 2025, 62(1): 18-23.
- LIU Q B, LIANG T. Study on ship mooring conditions at open terminal under the action of long period waves[J]. Port, waterway and coastal engineering, 2025, 62(1): 18-23.
- [16] 周利兰, 杜伟娜, 秦江涛. 船行波对系泊船舶影响的数值计算[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(10): 63-68.
- ZHOU L L, DU W N, QIN J T. Numerical calculation of effect of ship-generated waves on moored ship [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition), 2019, 47(10): 63-68.
- [17] 刘晓艳. 限制水域船-船相互作用水动力数值计算[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- LIU X Y. Numerical calculation of the ship-ship hydrodynamic interaction forces in restricted waters[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [18] 刘全余. 大型船舶台风期港口系泊分析[J]. 中国水运, 2024(24): 8-10.
- LIU Q Y. Port mooring analysis of large ships during typhoon period [J]. China water transport, 2024(24): 8-10.
- [19] 高誉溶, 王斌弘, 马小舟. 超大型舾装集装箱船抗台风系泊响应特性分析[J]. 水运工程, 2026(2): 45-55.
- GAO Y R, WANG B H, MA X Z. Characterization of typhoon mooring response of ultra-large outfitted container ship[J]. Port & waterway engineering, 2026(2): 45-55.
- [20] 郝帅, 张栩宁, 薄兴道, 等. 极端海况下深远海浮式风机锚泊系统动力可靠性及失效响应研究[J]. 中国造

- 船, 2025, 66(4): 170-186.
- HAO S, ZHANG X N, BO X D, et al. Study on dynamic reliability and failure response of mooring systems for deepwater floating wind turbines under extreme sea states [J]. Shipbuilding of China, 2025, 66(4): 170-186.
- [21] 梁明霄, 樊世达, 许璧雯, 等. 缆绳破断条件下 FPSO 码头系泊系统安全性分析 [J]. 船舶标准化工程师, 2024, 57(S1): 55-61.
- LIANG M X, FAN S D, XU B W, et al. Analysis of safety of FPSO quay mooring system under line breakage condition [J]. Ship standardization engineer, 2024, 57(S1): 55-61.
- [22] 朱本瑞, 高小川, 王慧磊, 等. 断缆条件下 FPSO 运动响应及系泊性能分析 [J]. 振动与冲击, 2025, 44(18): 70-77, 130.
- ZHU B R, GAO X C, WANG H L, et al. Analysis of the FPSO motion response and mooring performance under cable breakage conditions [J]. Journal of vibration and shock, 2025, 44(18): 70-77, 130.
- [23] 杨华东, 周峻名, 袁治巍. 缆绳参数对 LNG 船系缆力的影响分析 [J]. 港口航道与近海工程, 2026, 63(1): 6-10.
- YANG H D, ZHOU J M, YUAN Z W. Analysis for influence of mooring cable parameters on mooring force acting on LNG carriers [J]. Port, waterway and offshore engineering, 2026, 63(1): 6-10.
- [24] 袁海平, 黄达望. 缆尾在系泊设计中的应用 [J]. 水运管理, 2024, 46(7): 23-26.
- YUAN H P, HUANG D W. Application of mooring tail in mooring design [J]. Shipping management, 2024, 46(7): 23-26.
- [25] 张帅, 李楷, 麻云平, 等. V 形浮体码头系泊方案研究 [J]. 大连理工大学学报, 2023, 63(6): 621-629.
- ZHANG S, LI K, MA Y P, et al. Research on dock mooring plan of V-shaped floating body [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2023, 63(6): 621-629.
- [26] Environmental conditions and environmental loads: DNV-RP-C205 [S]. Oslo: DNV, 2010.
- (本文编辑 王璁)
- ~~~~~
- (上接第 59 页)
- [7] 熊智, 官志鑫, 丁琼, 等. 基于自然地理格局的内河港口总体规划研究: 以湖南省益阳市益阳港总体规划为例 [J]. 《规划师》论丛, 2024(1): 214-220.
- XIONG Z, GUAN Z X, DING Q, et al. Study on master plan of inland port based on natural geographical pattern: taking master plan of Yiyang Port in Yiyang City, Hunan Province as an example [J]. Planners' collected papers, 2024(1): 214-220.
- [8] 邢虎松, 陈茜, 杜利楠. 内河港口城市港物产城融合协调发展研究 [J]. 中国航海, 2024, 47(4): 79-86.
- XING H S, CHEN Q, DU L N. Research on the integration and coordinated relationship between port logistics and urban industrial economy in inland river port cities [J]. Navigation of China, 2024, 47(4): 79-86.
- [9] 李佳阳. 内河港口的城市经济与港口航运耦合协调发展评价 [J]. 水运管理, 2025, 47(1): 22-26, 57.
- LI J Y. Evaluation on coupling and coordinated development of urban economy and port shipping in inland ports [J]. Shipping management, 2025, 47(1): 22-26, 57.
- [10] 陈逸群. 苏州内河港口高质量发展思考 [J]. 中国港口, 2025(4): 25-28.
- CHEN Y Q. Thoughts on high-quality development of Suzhou inland port [J]. China ports, 2025(4): 25-28.
- [11] 王天旻, 李照宇, 陈乾阳, 等. 内河港口集疏运体系发展经验借鉴 [J]. 中国水运, 2024, 24(16): 16-18.
- WANG T M, LI Z Y, CHEN Q Y, et al. Development experience of inland port collection and distribution system for reference [J]. China water transport, 2024, 24(16): 16-18.
- [12] 郭子坚. 港口规划与布置 [M]. 3 版. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- GUO Z J. Port planning and layout [M]. 3rd ed. Beijing: China Communications Press, 2011.
- (本文编辑 王传瑜)