·港　口·

港口船舶系泊高风险环境要素预警分析*

潘新颖[1,2]，薛小宇[1]，董晓晨[1,2]，史璐铭[1,2]，赵梓豪[1]
（1. 中国海洋大学 工程学院，山东 青岛 266000；
2. 中国海洋大学，海岸与海洋工程全国重点实验室，山东 青岛 266100）

摘要：针对全球港口船舶系泊断缆事故频发、既有研究多聚焦单一水动力要素或依赖数值模拟而难以揭示多水文要素耦合致张力变化规律等问题，开展缆绳张力敏感因子识别与环境风险预报研究。运用正交试验设计结合极差分析与方差分析，筛选对缆绳张力变化较为敏感的环境要素；利用 MATLAB 软件构建多项式响应模型，对缆绳张力与关键环境要素之间的数理关系进行拟合，进而构建环境风险预报模型。结果表明，波浪要素对缆绳张力变化的敏感度高于海流及风要素；同时揭示 100 a 一遇极端流速叠加最不利流向条件下，风浪联合作用对系泊缆绳最大张力的影响规律，据此构建基于临界张力阈值的预警机制，该风险预报模型预测的缆绳张力值与数值模型模拟的缆绳张力值误差不超过 10%。

关键词：港口；船舶系泊；风险预警；正交试验；多项式拟合
中图分类号：U653.2　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0044-14

Early warning analysis of high-risk environmental factors for ship mooring in ports

PAN Xinying[1,2], XUE Xiaoyu[1], DONG Xiaochen[1,2], SHI Luming[1,2], ZHAO Zihao[1]
(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266000, China;
2. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: In response to the frequent occurrences of mooring line breakage accidents at global ports and the fact that existing research often focuses on single hydrodynamic factors or relies on numerical simulations, making it difficult to reveal the coupling effects of multiple hydrological factors on tension variation, a study is conducted on the identification of sensitive factors for cable tension and environmental risk forecasting. The orthogonal experimental design combined with range analysis and variance analysis is employed to screen environmental factors highly sensitive to cable tension changes. A polynomial response model is constructed using MATLAB software to fit the mathematical relationship between cable tension and key environmental factors, thereby establishing an environmental risk forecasting model. The results indicate that wave factors exhibit higher sensitivity to cable tension changes compared to current and wind conditions. The revealed influence laws of combining wind and wave actions on the maximum tension of mooring lines under extreme once-in-a-century current velocities superimpose with the most unfavorable flow directions. On the basis of this, an early warning mechanism using critical tension thresholds is developed. The cable tension values predicted by this risk forecasting model show an error within 10% compared to those simulated by the numerical model.

Keywords: port; ship mooring; risk early warning; orthogonal experiment; polynomial fitting

船舶稳定系泊是保障港口作业安全高效进行的重要前提。然而，复杂多变的港口水文气象环境（如风、浪、流、水位骤变等）常诱发系泊荷载剧增，导致船舶稳泊失效，甚至导致缆绳断裂事

收稿日期：2025-11-26　　**录用日期：**2026-01-19
***基金项目：**国家重点研发计划项目（2022YFB2602301）
作者简介：潘新颖（1976—），女，博士，副教授，硕士生导师，从事近海工程的教学与科研工作。

水运工程

故[1]。此类事故不仅严重威胁作业人员生命安全，造成重大财产损失，更对港口安全运营构成挑战，全球诸多大型港口均有相关事故记录[2]，见表 1。

表 1　全球港口险情及其原因

Tab. 1　Global port incidents and causes

港口(水域)	险情	原因
厦门港	3 条艏缆断裂	阵风风力大,潮差大
罗萨里奥港[3]	靠泊作业时断缆,导致船舶缆绳码头缆桩破断	船舶兴波
珠江口水域[4]	船舶断缆漂移泊位,阻塞航道	水流流速大,急落潮
鹿特丹港[5]	开放式海港缺乏建筑物,船舶稳泊受到影响	强风
莱绍斯港[6]	停泊游轮漂流	极端海况

由表 1 可知，环境动态荷载的不可预测性与极端性往往是断缆事故的关键致因。为分析环境因素与船舶稳泊之间的关系，李明振[7]利用专家分析法结合模糊层次法分析曹妃甸港矿石码头大型船舶稳泊安全性；Izaguirre 等[8]通过聚类分析结合评分对受气候变化影响较为严重的港口进行分析，结果显示由海平面上升导致的沿海洪水和越浪现象是影响港口安全运营的首要因素；陈伟丰[9]则通过设计、使用等方面系统地分析超大型船舶断缆事故发生的原因；忻永恩等[10]以人、船、环境三者构成的封闭系统分析扰动系泊船舶安全的主要因素；Redondo 等[11]通过基于作用于线性弹簧的旋转执行器系统，分析考虑风效应后环境要素对系泊船舶产生的影响；Li 等[12]、肖力旗等[13]采用 ANSYS-AQWA 软件研究船舶运动响应规律以及系泊缆力变化特征，得出横浪是影响船舶作业安全性的主要风险源；Torre 等[14]以风洞试验模拟风对大型油轮的影响，探究周边遮蔽环境对船舶气动系数的影响以提升系泊安全；张奥博等[15]基于船舶操纵模拟器，对船舶系缆作业的全流程进行动态仿真，通过系统探究复杂环境参数及缆绳参数对系泊缆绳受力的影响机制，从而定量评估稳泊系统中缆绳应力的变化规律与关键影响因素；戴江山等[16]、林在彬等[17]以系泊船舶的运动与受力响应为核心，聚焦波浪条件与系缆方式等关键因素，通过开展系统的船舶系泊物理模型试验，深入探究不同波浪参数及系缆布置配置对系泊船舶运动响应和缆绳受力的影响机制，从而揭示其内在规律。

目前关于高风险环境要素下港口码头系泊船只的缆绳张力响应研究，主要聚焦于单一因素或部分因素对缆绳张力响应的影响，众多学者通过工程管理方面的知识理论、数值建模仿真以及物理模型试验等方法分析大型船舶系泊安全问题，但未给出港口水文要素与系泊缆绳张力间的数理关系，且未对多环境要素共同作用下影响因素的敏感性分析做深入分析。因此，深入辨识船舶系泊系统对环境风险要素(特别是风、浪、流及其组合工况)的敏感性，并定量界定各类环境参数触发缆绳失效的临界阈值，对于构建基于环境实时监测的系泊安全预警机制，有效预防断缆事故，提升港口系泊安全水平具有重要的理论与应用价值。

本文针对港口系泊船舶在复杂水文条件下缆绳张力难以准确获取的问题，创新性地提出一种基于多项式拟合的缆绳张力计算方法。为识别不同环境要素对张力的影响程度，创新性地采用正交试验设计结合极差分析与方差分析，对各要素进行敏感性排序，并固定相对不敏感因素；在此基础上，重点针对敏感性较高的环境要素，利用多项式分析法系统揭示缆绳张力随其变化的规律。该方法旨在通过数据驱动的拟合模型，实现对复杂水文条件下缆绳张力的高效、可靠估算，为系泊安全预警提供新思路。研究路线见图 1。

水运工程

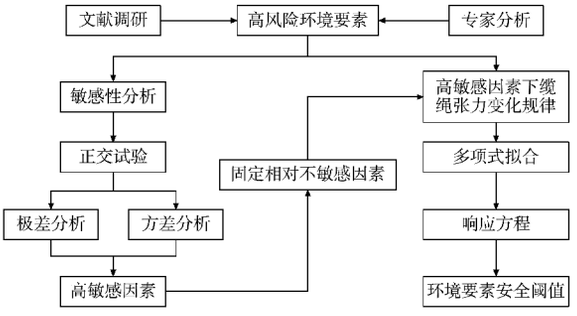


图 1　研究路线

Fig. 1　Research pathway

1　研究区域以及所用船型概况

本文选取渤海海域某典型港口水文要素条件[18]，通过查阅文献与专家分析，结合示范港口风险事件记录、气象数据，整理获得港口高风险环境要素集，其上下限水平见表 2。

表 2　环境参数上下限水平

Tab. 2　Upper and lower limit values of environmental parameters

类型	有效波高/m	波浪周期/s	风速/(m·s^{-1})	流速/(m·s^{-1})
下限	0.3	3.0	4	0.1
上限	5.4	8.4	40	1.4

以一艘配备 12 根尼龙缆绳、载质量 3 万 t 的散货船为例，其系泊系统布置见图 2。采用悬链线理论构建分析模型，通过给定缆绳端点边界条件，利用数值求解求得均布荷载作用下悬链线平衡微分方程初值问题，精确解析系泊缆索的空间构型与张力分布特性[19]。在此模型仿真数据支持下进一步结合正交试验设计与多项式分析法，系统探究风、浪、流多环境参数耦合作用下系泊缆绳张力的非线性响应规律。以 JTS 144-1—2010《港口工程荷载规范》[20] 规定的同类型船舶尼龙缆绳系缆力标准值(550 kN)为安全阈值，建立基于环境荷载参数的系泊安全域量化评估模型，进而确定保障船舶安全作业的环境参数临界值。

系泊系统缆绳为对称布置，故角度的上下限水平选取见表 3。

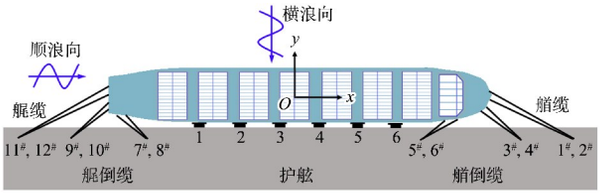


图 2　系泊系统布置

Fig. 2　Layout of mooring system

表 3　角度参数上下限水平

Tab. 3　Upper and lower limit values of angle parameters

类型	波向角/(°)	风向角/(°)	流向角/(°)
下限	270	270	0
上限	360	360	180

2　敏感性分析

2.1　正交试验

正交试验法因其在数学分析中的高效性与严密的逻辑性，在学术研究中被广泛使用，为研究试验中多个环境变量对缆绳张力响应值的敏感程度，本文基于正交试验法，研究港口多水文要素对系泊船只缆绳张力的敏感性，以少量代表性仿真结果代替全面仿真试验，从而减少试验次数、节省资源，快速识别对缆绳张力影响显著的水文要素[21]。

2.2　极差分析与方差分析

采用极差分析与方差分析[22]对正交试验结果进行分析，以快速识别影响缆绳张力的主要环境因素，并严格检验各个水文要素以及要素间的交互作用对缆绳张力的影响是否具有统计显著性。

极差分析的公式为：

$$K_j = \sum_{i=1}^{n} X_{ij} \tag{1}$$

$$k_j = \frac{K_j}{n} \tag{2}$$

$$R_j = \max k_j - \min k_j \tag{3}$$

式中：$j = 1, 2, \cdots, m$，代表对结果有影响的各个因素；$i = 1, 2, \cdots, n$，代表因素的各个水平；X_{ij} 为在 j 因素 i 水平时的试验值；K_j 为 j 因素的指标

和；k_j 为 j 因素的试验值均值；R_j 为 j 因素对应的极差，若某环境要素在不同水平下的极差越大，意味着该要素的变化对缆绳张力产生的影响越大。

方差分析的公式为：

$$T = \sum X_{ij} \tag{4}$$

$$S_{j,\mathrm{S}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(K_j^2 - \frac{T^2}{n}\right) \tag{5}$$

$$f_j = n - 1 \tag{6}$$

$$S_{j,\mathrm{M}} = \frac{S_{j,\mathrm{S}}}{f_j} \tag{7}$$

$$F = \frac{S_{j,\mathrm{M}}}{S_{\mathrm{e,M}}} \tag{8}$$

式中：T 为仿真值总和；X_{ij} 为正交试验所得的指标值；$S_{j,\mathrm{S}}$ 为相应的偏差平方和；f_j 为因素 j 自由度，通常等于该因素水平数减 1；$S_{j,\mathrm{M}}$ 为在 j 因素下的均方；$S_{\mathrm{e,M}}$ 为误差均方，若在设计正交试验时没有设置空列，可以采用对应的最小均方作为误差均方计算 F 值，将计算得到的 F 值与 F 检验临界值表进行对比可判断因素影响的显著性。

2.3　港区正交试验实例

根据港区自然资源条件及环境变量参数，正交试验设计见表 4。

表 4　正交试验设计

Tab. 4　Orthogonal experiment design

试验组	风速/(m·s^{-1})	风向/(°)	流速/(m·s^{-1})	流向/(°)	波高/m	波浪周期/s	波向角/(°)	缆绳张力极值/kN
1	4	0	0.1	0	0.3	3.0	0	100.092 6
2	4	330	0.5	0	2.0	4.8	330	103.359 7
3	4	300	1.0	0	3.7	6.6	300	512.248 7
4	4	270	1.4	0	5.4	8.4	270	1 371.468 9
5	16	0	0.1	0	2.0	4.8	300	124.115 1
6	16	330	0.5	0	0.3	3.0	270	107.884 5
7	16	300	1.4	0	5.4	8.4	0	375.621 5
8	16	270	1.4	0	3.7	6.6	330	184.269 6
9	28	0	0.5	0	3.7	8.4	0	274.514 5
10	28	330	0.1	0	5.4	6.6	330	286.715 4
11	28	300	1.4	0	0.3	4.8	300	126.192 9
12	28	270	1.0	0	2.0	3.0	270	108.504 3
13	40	0	0.5	0	5.4	6.6	300	886.860 1
14	40	330	0.1	0	3.7	8.4	270	994.634 2
15	40	300	1.4	0	2.0	3.0	0	152.570 8
16	40	270	1.0	0	0.3	4.8	330	115.656 3
17	4	0	1.4	180	0.3	8.4	330	116.479 7
18	4	330	1.0	180	2.0	6.6	0	131.911 1
19	4	300	0.5	180	3.7	4.8	270	298.470 3
20	4	270	0.1	180	5.4	3.0	300	100.092 8
21	16	0	1.4	180	2.0	6.6	270	368.757 9
22	16	330	1.0	180	0.3	8.4	300	158.032 8
23	16	300	0.5	180	5.4	3.0	330	102.820 3
24	16	270	0.1	180	3.7	4.8	0	123.158 7

水运工程

续表4

试验组	风速/(m·s^{-1})	风向/(°)	流速/(m·s^{-1})	流向/(°)	波高/m	波浪周期/s	波向角/(°)	缆绳张力极值/kN
25	28	0	1.0	180	3.7	3.0	330	122.070 2
26	28	330	1.4	180	5.4	4.8	0	176.427 5
27	28	300	0.1	180	0.3	6.6	270	134.900 3
28	28	270	0.5	180	2.0	8.4	300	416.481 1
29	40	0	1.0	180	5.4	4.8	270	605.724 1
30	40	330	1.4	180	3.7	3.0	300	167.740 6
31	40	300	0.1	180	2.0	8.4	330	261.957 3
32	40	270	0.5	180	0.3	6.6	0	113.375 8

对上述拟水平正交试验进行极差分析与方差分析，各风险因素分析结果见表5、6。可以看出，波浪的3个要素(波高、波浪周期和波向角)对缆绳张力的影响最大，风速的影响仅次于波浪的3个要素，风向角、流速和流向角对缆绳张力的影响较小。

表5　正交试验极差分析结果

Tab. 5　Range analysis results of orthogonal experiment

水平	各风险因素下的缆绳张力极值的平均值/kN						
	风速	风向	流速	流向	波高	波浪周期	波向角
1	341.765 5	324.826 80	265.708 3	364.044 3	121.576 9	120.222 0	180.959 1
2	193.082 6	265.838 20	287.970 8	212.400 0	208.457 2	209.138 1	161.666 1
3	205.725 8	245.597 80	219.268 4	–	334.638 3	327.379 9	311.470 5
4	412.314 9	316.626 00	379.941 2	–	488.216 3	496.148 8	498.793 1
R	219.232 3	79.229 03	160.672 7	151.644 3	366.639 4	375.926 8	337.127 0

注：水平1~4分别对应各风险因素的4个取值，例如，风速的水平1、2、3、4分别代表4、16、28、40 m/s；风向和波向角的水平1、2、3、4分别代表0°、330°、300°、270°；流速的水平1、2、3、4分别代表0.1、0.5、1.0、1.4m/s；流向因仅有0°和180°两种工况，故只列出水平1和水平2；波高的水平1、2、3、4分别代表0.3、2.0、3.7、5.4 m；波浪周期的水平1、2、3、4分别代表3.0、4.8、6.6、8.4 s。*R*为极差，*R*值越大，表示其敏感程度越高。

表6　正交试验方差分析结果

Tab. 6　Variance analysis for orthogonal experiments

风险因素	Ⅲ类平方和/kN^2	自由度	均方/kN^2	*F* 值	*p* 值
风速	276 129.512 523 338	3	92 043.170 841 113	2.687	0.094
流速	9 297.458 882 788	3	3 099.152 960 929	0.090	0.964
风向	37 805.700 671 710	3	12 601.900 223 904	0.368	0.778
流向	177 776.384 184 264	1	177 776.384 184 264	5.190	0.042
波高	587 217.062 432 945	3	195 739.020 810 982	5.714	0.011
波浪周期	609 511.098 636 552	3	203 170.366 212 184	5.931	0.010
波向角	582 385.795 238 733	3	194 128.598 412 911	5.667	0.012

注：显著性*p*值为在零假设(该因子无影响)成立的前提下，观察到当前*F*值或更极端结果的概率，$p<0.05$则显著，$p\geqslant0.05$则不显著。

为验证上述敏感性分析结果的准确性，在常风况、常波况（试验组1~4）及极端风况、极端波况（试验组5~8）下验证海流流速与流向对缆绳张力的影响，结果见表7。可以看出，在港区常见海况下，海流流速与流向的改变对缆绳张力的影响均小于5%(5%的来源为在风况和波况相同时，改变流速和流向，所得到的缆绳张力最小值和最大值的差别，即$(T_{Max}-T_{Min})/T_{min}\times100\%$)；

但在 100 a 一遇极端海况（试验组 5～8）出现时，流向角为 0°时的缆绳张力最大，经分析是由于高流速水流的同向推力与极端风、浪载荷形成合力，推动船体向远离系泊固定点的方向运动。因此在后续分析过程中，将流速 1.4 m/s、流向角 0°确定为最不利流况，开展后续计算分析。

表 7　港区海流变化对缆绳张力影响的验证结果

Tab. 7　Influence verification results of flow current fluctuations within port areas on cable tension forces

试验组	风速/(m·s^{-1})	风向/(°)	流速/(m·s^{-1})	流向/(°)	波高/m	波浪周期/s	波向角/(°)	缆绳张力极值/kN
1	6	75	0.1	180	0.3	3.5	330	100.092 7
2	6	75	0.1	0	0.3	3.5	330	100.092 7
3	6	75	1.4	180	0.3	3.5	330	101.200 0
4	6	75	1.4	0	0.3	3.5	330	104.290 2
5	40	75	0.1	180	5.4	8.4	330	790.957 0
6	40	75	0.1	0	5.4	8.4	330	791.046 7
7	40	75	1.4	180	5.4	8.4	330	785.201 1
8	40	75	1.4	0	5.4	8.4	330	797.417 4

通过以上分析可知，针对该港区的水文要素情况，系泊船舶的缆绳张力对波浪三要素，即有效波高、波浪周期以及波向角的影响更敏感，缆绳张力对流速和流向角的变化反而不敏感，因此对船舶缆绳最大张力在风浪联合作用下的变化规律展开进一步分析。

3　风浪联合作用下缆绳最大张力的变化规律

3.1　多项式回归分析

为探究多环境要素与缆绳张力响应间的复杂关联机制，本文利用多元回归模型获得两者之间的数理关系，其中多项式回归模型通过引入自变量的高阶幂函数项及交互效应项构建描述非线性关系的参数化模型[23]。这种方法在系泊船只缆绳张力仿真结果样本有限的条件下，所得模型具备良好的泛化能力，可实现对不同海况下最大缆绳张力的可靠预测，为预测致使系泊船只断缆海况分析提供科学依据[24]。本文采用的多项式拟合目标函数为：

$$y = \sum_{i=0}^{n} c_i x^i \tag{9}$$

式中：y 为缆绳张力，单位为 N；c_i 为多项式系数；x 为环境参数；i 为多项式次数。

本文所选用环境、角度参数见表 2、3。通过均匀设计试验方案，即环境要素取值从港区常见情况到 100 a 一遇极端海况范围均匀分布，利用仿真程序得出港区载质量为 3 万 t 的散货船在港口波况和风况联合作用下缆绳张力的最大值，并利用 Matlab 进行数据拟合，在缆绳张力最大值超过系缆力标准值时发出预报。

以常波况下风况变化对缆绳张力的影响为例，数值模型计算结果与拟合模型计算结果对比见表 8。可以看出，多项式拟合方法能够精确表征缆绳张力变化规律与环境要素之间的数学关系，因此可用于构建基于该方法的风险预警模型。

表 8　数值模型计算结果与拟合模型计算结果对比

Tab. 8　Comparison of calculation results between numerical model and fitting model

风速/(m·s^{-1})	风向/(°)	模拟值/kN	拟合值/kN	差别/%
4.00	360.00	104.009 388 5	104.809 656 3	0.76
4.00	330.00	104.128 174 6	104.720 609 3	0.57
4.00	300.00	103.893 729 0	100.170 568 3	3.72
4.00	270.00	103.645 413 0	105.949 971 3	2.18
13.00	360.00	109.180 989 4	108.024 151 9	1.07
13.00	330.00	110.362 045 2	112.709 800 3	2.08
13.00	300.00	107.868 023 9	106.800 324 7	1.00
13.00	270.00	105.192 066 3	105.086 163 0	0.10

续表8

风速/（m·s^{-1}）	风向/（°）	模拟值/kN	拟合值/kN	差别/%
22.00	360.00	120.315 144 6	118.603 260 0	1.44
22.00	330.00	124.254 168 9	126.409 118 8	1.70
22.00	300.00	116.418 329 8	117.485 723 6	0.91
22.00	270.00	108.206 183 7	106.623 512 5	1.48
31.00	360.00	138.034 186 0	137.223 502 8	0.59
31.00	330.00	146.735 497 9	146.495 087 1	0.16
31.00	300.00	130.514 809 4	132.903 287 4	1.80
31.00	270.00	112.560 661 0	111.238 541 8	1.19
40.00	360.00	161.683 433 6	164.561 402 5	1.75
40.00	330.00	178.515 165 7	173.644 227 4	2.81
40.00	300.00	152.425 906 7	153.729 538 3	0.85
40.00	270.00	118.948 419 8	119.607 773 2	0.55

3.2　风况变化对缆绳张力的影响

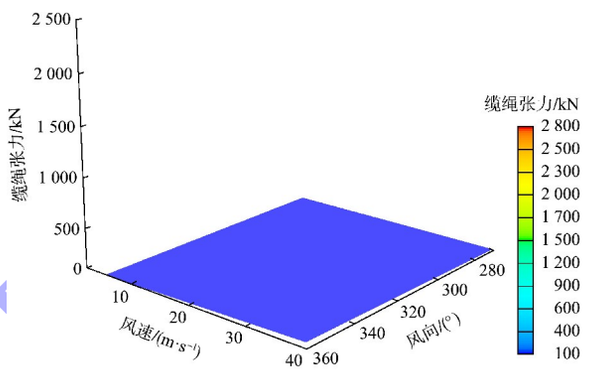
本文研究风参数变化对缆绳张力的影响，在常波况与极端波况下，缆绳张力极值的多项式系数见表9，其中 C 为常数项，S_W 为风速，D_W 为风向角，D'_W为 360°−D_W。

表 9　常波况下缆绳张力极值随风参数变化的多项式系数

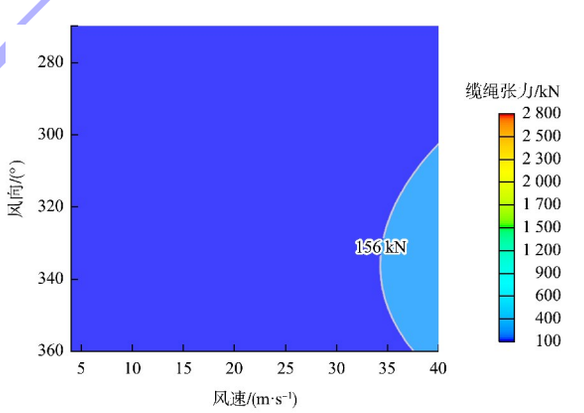
Tab. 9　Polynomial coefficients for mooring line tension limited value varying with wind parameters under different wave conditions

多项式各项	项前系数	
	常波况	极端波况
C	1.055 68×10^5	1.947 42×10^6
S_W	−349.745 38	−28 299.993 16
D'_W	101.943 33	−817.877 03
$S_W D'_W$	34.830 85	1 755.112 87
S_W^2	39.428 48	114.373 23
D'^2_W	−9.180 64	7.896 05
$S_W^2 D'_W$	−0.340 429	−
$S_W D'^2_W$	−0.378 650	−
S_W^3	0.154 669	−
D'^3_W	0.091 299	−
$S_W^2 D'^2_W$	−	4.842 38
$S_W D'^3_W$	−	−0.123 932
$S_W^2 D'^3_W$	−	−0.089 471
$S_W^3 D'^3_W$	−	0.002 192
$S_W^4 D'^2_W$	−	−0.003 362
$S_W^5 D'_W$	−	0.002 075
S_W^6	−	−0.000 870

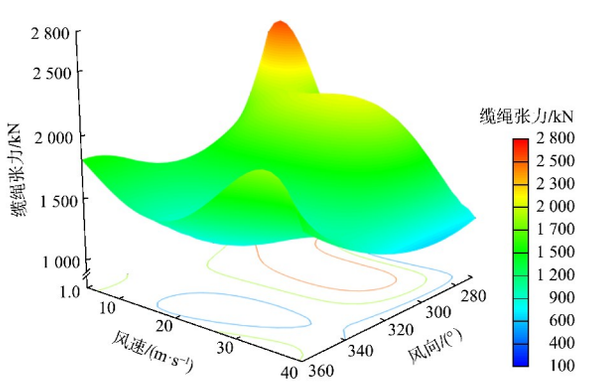
常波况及极端波况下缆绳张力随风况变化响应曲面及等值线图见图3。可以看出，在常波况下，不论风况如何变化，缆绳张力均未超过系缆力标准值，缆绳最大张力变化较为平缓；而在极端波况下，缆绳最大张力变化较为剧烈，且缆绳张力均超过系缆力标准值，为高风险区域，这表明波浪条件对缆绳张力的影响比风的条件变化更大。



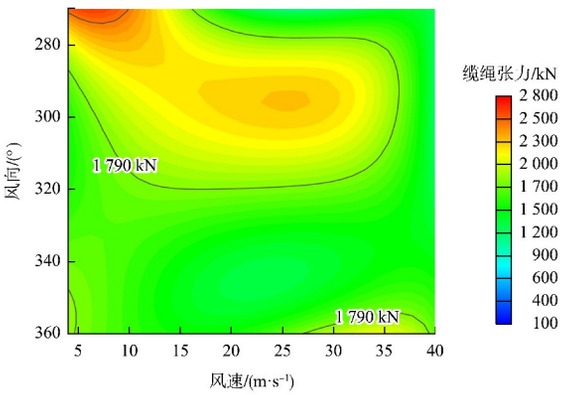
a) 常波况的曲面图



b) 常波况的等值线图



c) 极端波况的曲面图



d) 极端波况的等值线图

图 3　常波况与极端波况下缆绳张力响应曲面及等值线图

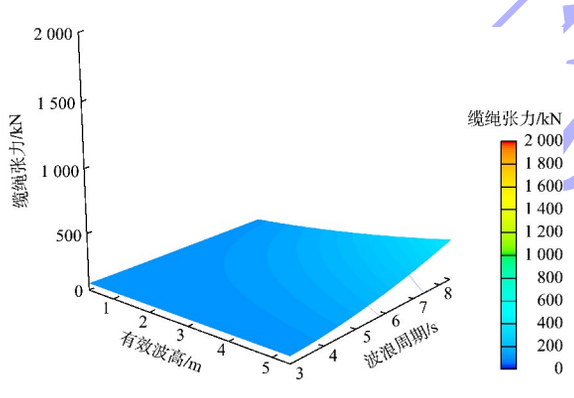
Fig. 3　Response surface and contour maps of cable tension under regular and extreme wave conditions

3.3　波浪变化对缆绳张力的影响

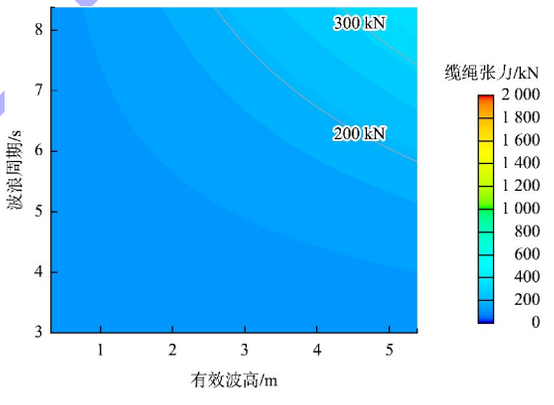
3.3.1　在常风况下波浪变化对缆绳张力的影响

波向角为 360°、330°、300°、270°时最大缆绳张力响应面及等值线图见图 4。在不同波向角下，缆绳张力极值多项式系数见表 10，其中 H_s 为有效波高，T_p 为波浪周期。

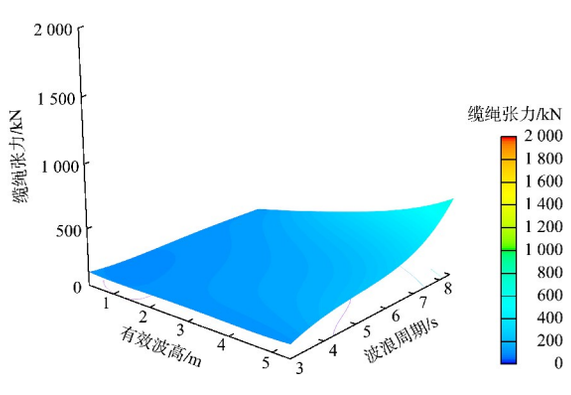
由图 4 可以看出，在常风况下，当有效波高和波浪周期不变，若波向角增大，缆绳张力的最大值整体随之增大；当波向角相同时，随着有效波高和波浪周期的增大，缆绳张力的最大值也随之增大，由此可得，缆绳张力受波向角、有效波高和波浪周期三者共同影响，均随之增大而增大；特别地，在常风况下，缆绳张力最大值出现在当波向角为 300°时，经分析与船舶船型、系泊布置、波浪周期和水深等因素综合作用相关。当波向角范围在 270°～330°时，均出现缆绳张力大于系缆力标准值的情况，当有效波高和波浪周期超过一定范围时，需要引起特别重视。



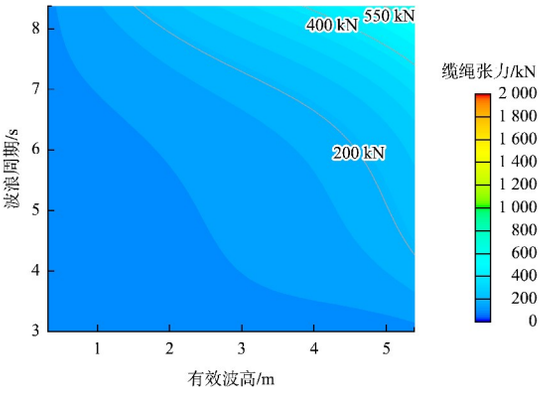
a) 波向角为360° 的曲面图



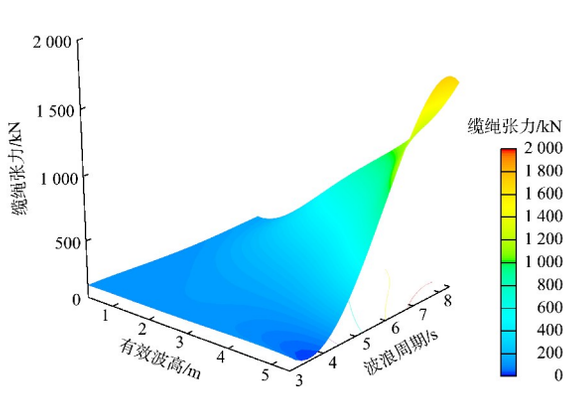
b) 波向角为360° 的等值线图



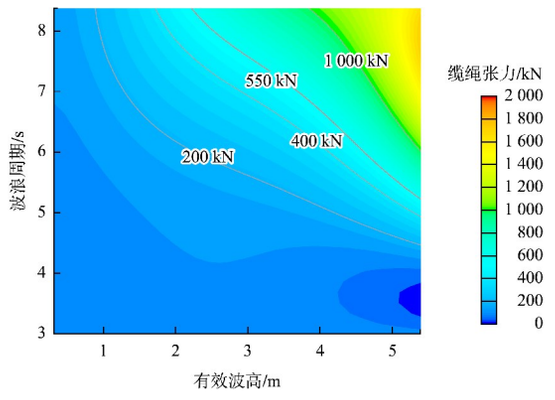
c) 波向角为330° 的曲面图



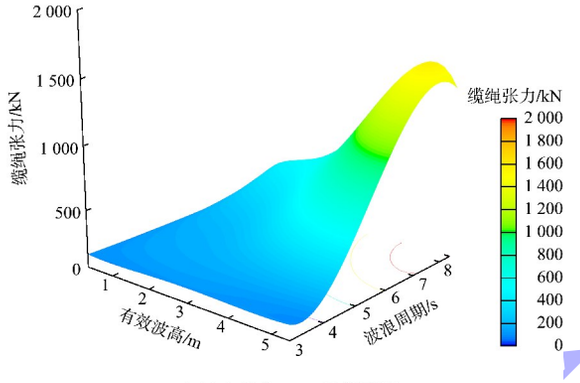
d) 波向角为330° 的等值线图



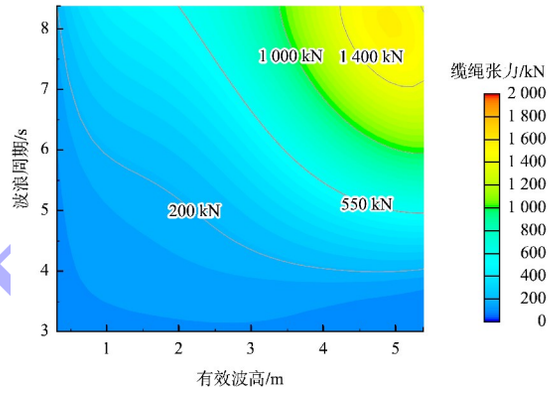
e) 波向角为300° 的曲面图



f) 波向角为300° 的等值线图



g) 波向角为270° 的曲面图



h) 波向角为270° 的等值线图

图 4　常风况时不同波向角下最大缆绳张力响应面及等值线图

Fig. 4　Surface and contour map of maximum mooring line tension under different wave direction angles in regular wind conditions

表 10　常风况下不同波向角时缆绳张力极值随有效波高与波浪周期变化的多项式系数

Tab. 10　Polynomial coefficients for mooring line tension limited value varying with significant wave height and wave period under different wave direction angles under regular wind condition

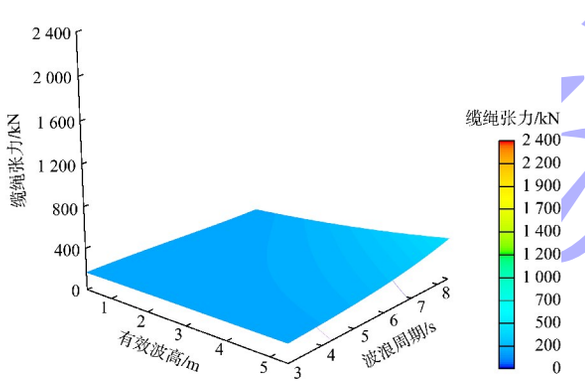
多项式各项	项前系数			
	波向角 360°	波向角 330°	波向角 300°	波向角 270°
C	151 098	679 693	−399 194	954 166
H_s	3 435. 120 59	−268 869	837 691	−268 797 0
T_p	−32 548. 825 42	−401 409	367 762	−630 713
H_sT_p	−5 129. 130 63	14 192 0	−499 961	191 453 0
H_s^2	1 549. 816 44	35 599. 438 59	−751 747	842 686
T_p^2	8 145. 6432 2	−98 692. 149 68	−92 478. 531 60	171 056
$H_s^2T_p$	−305. 315 62	−1 520. 349 21	4. 636 46	−503 430
$H_sT_p^2$	1 128. 564 06	−27 743. 648 47	87 477. 784 92	−498 454
H_s^3	−353. 480 35	−9 458. 114 46	165 554	−59 940. 686 03
T_p^3	−875. 718 84	−10 085. 307 64	9 447. 473 45	−20 522. 722 16
$H_s^2T_p^2$	93. 479 39	−43. 928 81	−90 395. 097 51	112 375
$H_s^3T_p$	7. 443 20	447. 235 45	−95 597. 401 40	9 069. 939 04

续表10

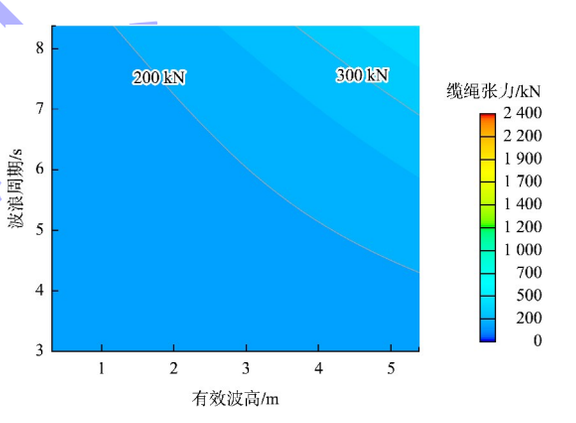
多项式各项	项前系数			
	波向角 360°	波向角 330°	波向角 300°	波向角 270°
$H_s T_p^3$	−25. 749 60	1 822. 433 45	−3 607. 662 91	57 823. 953 99
H_s^4	26. 693 17	715. 166 95	−4 718. 788 33	3 428. 348 48
T_p^4	34. 183 84	363. 192 88	−312. 272 91	885. 152 30
$H_s^3 T_p^2$	–	–	17 266. 720 64	1 947. 249 48
$H_s^2 T_p^3$	–	–	6 007. 983 42	−12 636. 455 79
$H_s^4 T_p$	–	–	1 443. 420 58	357. 693 34
$H_s T_p^4$	–	–	−183. 223 89	−2 320. 692 62
$H_s^3 T_p^3$	–	–	−1 119. 924 99	89. 923 43
$H_s^4 T_p^2$	–	–	–	−375. 862 91
$H_s^2 T_p^4$	–	–	–	446. 851 51

3. 3. 2　在极端风况下波浪变化对缆绳张力的影响

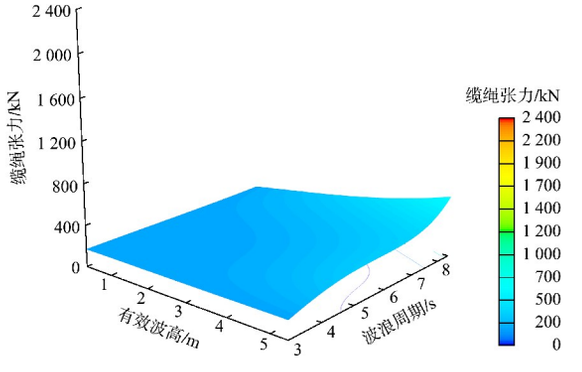
波向角为 360°、330°、300°、270° 时最大缆绳张力响应面及等值线图见图 5。不同波向角下，缆绳张力极值多项式系数见表 11。



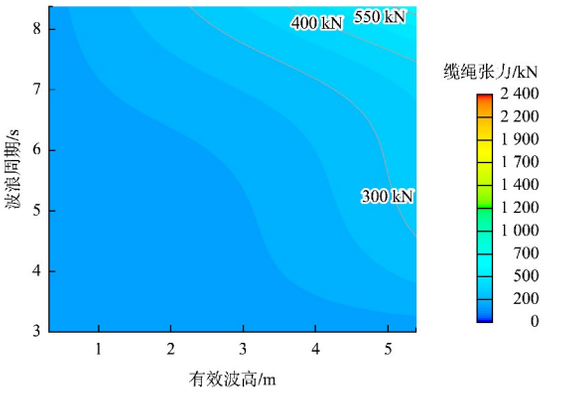
a) 波向角为360° 的曲面图



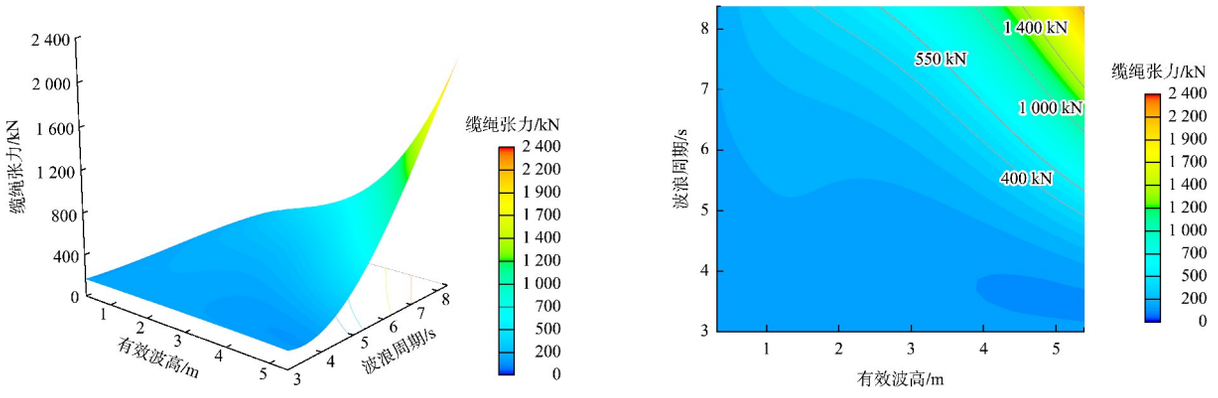
b) 波向角为360° 的等值线图



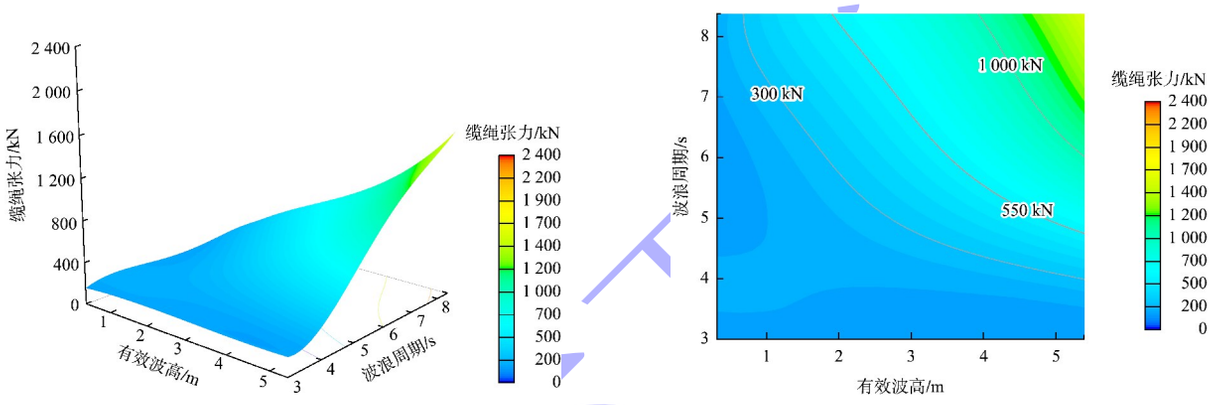
c) 波向角为330° 的曲面图



d) 波向角为330° 的等值线图



c) 波向角为300° 的曲面图　　f) 波向角为300° 的等值线图



g) 波向角为270° 的曲面图　　h) 波向角为270° 的等值线图

图 5　极端风况时不同波向角下最大缆绳张力响应面及等值线图

Fig. 5　Surface and contour plots of the maximum mooring line tension under different wave direction angles during extreme wind conditions

表 11　极端风况下不同波向角时缆绳张力极值随有效波高与波浪周期变化的多项式系数

Tab. 11　Polynomial coefficients for mooring line tension limited value varying with significant wave height and wave period under different wave direction angels under extreme wind candition

多项式各项	项前系数			
	波向角 360°	波向角 330°	波向角 300°	波向角 270°
C	55 273.451 41	251 480	628 649	−298 114
H_s	29 038.505 78	−370 462	−878 352	176 681
T_p	65 856.379 32	−85 519.621 85	−290 092	243 976
H_sT_p	−11 536.373 27	355 849	537 872	−128 087
H_s^2	−4 536.916 03	60 294.823 21	280 301	−97 894.831 34
T_p^2	−11 769.348 71	30 204.472 42	55 684.867 16	−672 173
$H_s^2T_p$	946.149 05	−71 586.957 84	−155 673	31 306.265 95
$H_sT_p^2$	1 249.459 56	−117 592	−99 968.462 07	335 544
H_s^3	167.049 23	1 604.413 45	−12 080.974 74	7 925.718 99
T_p^3	664.500 89	−4 316.448 88	−3 389.887 46	78 817.142 12
$H_s^2T_p^2$	–	26 183.796 80	24 897.788 66	−1 367.213 49

续表11

多项式各项	项前系数			
	波向角 360°	波向角 330°	波向角 300°	波向角 270°
$H_s^3T_p$	–	−122.669 98	3 996.152 44	−2 313.889 92
$H_sT_p^3$	–	15 931.343 55	6 229.917 48	−38 090.654 65
H_s^4	–	120.625 98	–	–
T_p^4	–	212.220 22	–	−3 349.355 8
$H_s^3T_p^2$	–	31.036 65	–	–
$H_s^2T_p^3$	–	−3 798.993 16	−1 392.397 97	–
$H_s^4T_p$	–	–	–	–
$H_sT_p^4$	–	−741.914 56	–	1 644.551 91
$H_s^3T_p^3$	–	–	–	34.760 70
$H_s^2T_p^4$	–	187.929 43	–	−24.525 06

由图 5 可见，在极端风况下，当有效波高和波浪周期不变，若波向角增大，缆绳张力的最大值整体随之增大；当波向角相同时，随着有效波高和波浪周期的增大，缆绳张力的最大值也随之增大，由此可得，缆绳张力受波向角、有效波高和波浪周期三者共同影响，均随之增大而增大；特别地，在极端风况下，缆绳张力最大值出现在当波向角为 300°时，经分析与船舶船型、系泊布置、波浪周期和水深等因素有关。当波向角范围在 270°~330°时，均出现缆绳张力大于系缆力标准值的情况，当有效波高和波浪周期超过一定范围时，需要引起特别重视。此外，当波浪条件相同时，极端风况下的缆绳张力整体比常风况下缆绳张力大，这说明风条件变化也会对缆绳张力造成一定影响。

4　结论

1）波浪要素是缆绳张力的主要影响因素，其对张力的变化表现出较高的敏感性；而风与海流对缆绳张力的影响相对不显著。同时，经研究识别出海流流速为 100 a 一遇极端条件下对应的最不利流向角为 0°。

2）当波浪条件为港区常见波况时，即使风况由常见风况增强至 100 a 一遇极端情况，缆绳张力变化幅度仍较小；然而，在 100 a 一遇极端波况下，无论风况如何变化，缆绳张力均超过现行规范规定的系缆力标准值，存在显著安全风险，需要予以高度关注。

3）分别针对常见风况与极端风况，建立了缆绳张力随波浪参数变化的拟合方程，结果均显示，在波向角为 360°时，缆绳张力最大值均未超出系缆力标准值；当波向角增大到 330°时，随着有效波高和波浪周期的增大，缆绳张力最大值均有超出系缆力标准值的情况，应引起高度重视。

4）多项式拟合方法在模拟不同波向角下缆绳张力随有效波高与波浪周期的变化规律时表现出较高的精度，然而在刻画不同风向角及风速对缆绳张力的影响时则存在一定局限。为提高缆绳张力预测的整体准确性，后续研究将引入机器学习方法，如采用随机森林法对复杂非线性关系进行自适应学习，以增强模型在多种气象与海况条件下的泛化能力，从而更准确地反映风向、风速与缆绳张力之间的动态耦合关系。

5）本文为该类船舶在系泊安全预警与防断缆事故方面提供了定量依据，研究成果也可为渤海海域相同载质量船舶的系泊作业提供科学依据与实用参考，助力港口安全运营管理水平的提升。

参考文献：

[1]　李文强, 涂铁昆. 厦门港海沧港区船舶系泊断缆原因分析及对策[J]. 航海技术, 2024(2): 10-13.

水运工程

LI W Q, TU T K. Analysis and countermeasures of ship berthing cable disconnection in Haicang port area of Xiamen Port[J]. Marine technology, 2024(2): 10-13.

[2] 高峰, 樊栩, 胡克, 等. 从频发的缆绳事故谈船舶系泊作业的码头安全保障研究[J]. 中国水运, 2021, 21(24): 9-11.
GAO F, FAN X, HU K, et al. Research on port safety assurance for ship mooring operations from the perspective of frequent mooring line accidents [J]. China water transport, 2021, 21(24): 9-11.

[3] 谢继祥. 罗萨里奥港 J 码头船舶断缆事故分析[J]. 天津航海, 2019(3): 9-12.
XIE J X. The analysis of a cable breaking accident at Wharf J, Puerto del Rosario [J]. Tianjin hanghai, 2019(3): 9-12.

[4] 王维, 谷尚巍, 丁春吉, 等. 预防船舶系泊断缆举措研究[J]. 中国海事, 2025(3): 36-40.
WANG W, GU S W, DING C J, et al. Study on measures to prevent the breakage of ship mooring ropes[J]. China maritime safety, 2025(3): 36-40.

[5] PAULAUSKAS V, PAULAUSKAS D, WIJFFELS J. Ship safety in open ports [J]. Transport, 2009, 24(2): 113-120.

[6] VELOSO-GOMES F, TAVEIRA-PINTO F, ROSA-SANTOS P, et al. Berthing characteristics and the behaviour of the oil terminal of Leixões harbour [M]. //BARBE R M I, BREBBIA C A, OLIVELLA J. Maritime heritage and modern ports. Southampton: WIT Press, 2005: 481-492.

[7] 李明振. 开敞式码头大型船舶稳泊安全评价研究: 以曹妃甸港矿石码头为例[D]. 唐山: 华北理工大学, 2024.
LI M Z. Study on safety assessment of large ships berthing at open piers: take the Caofeidian ore terminal as an example [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2024.

[8] IZAGUIRRE C, LOSADA I J, CAMUS P, et al. Climate change risk to global port operations[J]. Nature climate change, 2021, 11: 14-20.

[9] 陈伟丰. 超大型船舶的稳泊安全研究[J]. 船舶物资与市场, 2020(8): 72-74.
CHEN W F. Research on mooring safety of ultra large vessels [J]. Marine equipment/materials & marketing, 2020(8): 72-74.

[10] 忻永恩, 戴冉, 郝庆龙. 超大型船舶在泊安全细节问题分析及建议[J]. 世界海运, 2019, 42(8): 40-44.
QI Y N, DAI R, HAO Q L. Analysis and recommendations on safety details for ultra large vessels at berth [J]. World shipping, 2019, 42(8): 40-44.

[11] REDONDO L, MÉNDEZ R, PÉREZ-ROJAS L. An indirect method implementing effect of the wind on moored ship experimental tests[J]. Ocean engineering, 2016, 121: 341-355.

[12] LI J C, YAN M Y, LYU F, et al. Numerical analysis of hydrodynamic response and operability of large moored LNG ships in swell waves [J]. Ocean engineering, 2025, 329: 121162.

[13] 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.

[14] TORRE S, BURLANDO M, RUSCELLI D, et al. Wind tunnel experimental investigation of the aerodynamic coefficients reduction due to sheltering surroundings on a cruise ship moored in port[J]. Journal of wind engineering and industrial aerodynamics, 2021, 218: 104731.

[15] 张奥博, 关宏旭, 徐言民, 等. 基于船舶模拟试验的泊稳条件影响分析[J]. 水运工程, 2025(4): 64-72.
ZHANG A B, GUAN H X, XU Y M, et al. Influence of mooring stability conditions based on ship simulation experiments[J]. Port & waterway engineering, 2025(4): 64-72.

[16] 戴江山, 张雷. 波浪与系缆方式对系泊船舶响应的影响研究[J]. 水运工程, 2024(6): 51-57.
DAI J S, ZHANG L. Influence of wave and mooring methods on responses of moored ships [J]. Port & waterway engineering, 2024(6): 51-57.

[17] 林在彬, 陈国平, 张志明, 等. 开敞式油气码头泊位长度优化[J]. 水运工程, 2012(11): 63-67, 78.
LIN Z B, CHEN G P, ZHANG Z M, et al. Optimization on berth length of open oil terminal [J]. Port & waterway engineering, 2012(11): 63-67, 78.

[18] 李翔云, 肖辉, 程霖, 等. 50 年与 100 年一遇极端环境荷载对渤海导管架平台结构设计的影响分析[J]. 船

水运工程

海工程, 2020, 49(5): 116-118.
LI X Y, XIAO H, CHENG L, et al. Influence of extreme environmental loads occur once in 50 and 100 years upon design of offshore platform in Bohai[J]. Ship & ocean engineering, 2020, 49(5): 116-118.

[19] WANG J R, ZHAO Z H, HE K, et al. Numerical investigation of a coupled "ship-fender-mooring" system at berth under complex sea conditions[J]. Ocean engineering, 2025, 341(3): 122679.

[20] 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 engineening: JTS 144-1-2010[S]. Beijing: China Communications Press, 2010.

[21] 陈魁. 试验设计与分析[M]. 2 版. 北京: 清华大学出版社, 2005.
CHEN K. Experimental design and analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.

[22] 张其一, 肖明凤. 基于正交试验的波浪作用下大直径深埋桩水平位移分析[J]. 中国海洋平台, 2025, 40(2): 45-51, 108.
ZHANG Q Y, XIAO M F. Horizontal displacement analysis of large-diameter deep-buried piles under wave action based on orthogonal test[J]. China offshore platform, 2025, 40(2): 45-51, 108.

[23] 何晓群, 刘文卿. 应用回归分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2001.
HE X Q, LIU W Q. Applied regr ession analysis[M]. Beijing: China Renmin University Press, 2001.

[24] 曲俊华, 倪家明. 多元回归模型分析与设计实现[J]. 中国电力教育, 2007(S2): 140-142.
QU J H, NI J M. Analysis and Implementation of multiple regression model[J]. China electric power education, 2007(S2): 140-142.

（本文编辑　王璁）

（上接第 33 页）

[5] 杨小龙. 一种新型单层人工块体 Crablock 的工程应用[J]. 水运工程, 2020(11): 53-56.
YANG X L. Engineering application of new monolayer concrete armor unit Crablock[J]. Port & waterway engineering, 2020(11): 53-56.

[6] 耿光宏, 王美茹, 沈超. 新型双联块体在印度洋长周期波海况下应用技术研究[C/OL]//中国交通建设股份有限公司 2014 年现场技术交流会论文集, 2014: 3-7. https://d.wanfangdata.com.cn/conference/ChxDb25mZXJlbmNlTmV3UzIwMjYwNDMwMDEwNzQ0Egc4NDQ5Mzk5Ggg5cXpvOWpxdQ%3D%3D.
GENG G H, WANG M R, SHENG C. Research on the application technology of new double-block bodies in Indian Ocean long-period wave sea conditions[C/OL]// Proceedings of the 2014 On-site Technical Exchange Conference of China Communications Construction Company Limited, 2014: 3-7. https://d.wanfangdata.com.cn/conference/ChxDb25mZXJlbmNlTmV3UzIwMjYwNDMwMDEwNzQ0Egc4NDQ5Mzk5Ggg5cXpvOWpxdQ%3D%3D.

[7] 戈龙仔, 高峰. 新型消浪块体在防波堤断面上坡度确定的试验研究[J]. 水道港口, 2015, 36(6): 486-489, 509.
GE L Z, GAO F. Experimental study of new dissipation block to determine slope on breakwater sections[J]. Journal of waterway and harbor, 2015, 36(6): 486-489, 509.

[8] PENG C, WANG H, ZHANG H Q, et al. Parametric design and numerical investigation of hydrodynamic characteristics of a new type of armour block TB-CUBE based on SPH method[J]. Journal of marine science and engineering, 2022, 10(8): 1116.

[9] 彭程, 王昊, 娄雅冬, 等. 斜坡堤新型人工块体 TB-CUBE 的波浪爬高和反射试验研究[J]. 水运工程, 2022(9): 1-7.
PENG C, WANG H, LOU Y D, et al. Experiment investigation on wave run-up and reflection of a new artificial block TB-CUBE for sloping breakwater[J]. Port & waterway engineering, 2022(9): 1-7.

[10] 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231-2021[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

（本文编辑　王璁）

水运工程