

中文引用格式:秦庭荣,张小静,罗平平,等. 基于云模型的大雾中船舶靠泊作业风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2025, 35(9): 159–166.

英文引用格式:QIN Tingrong, ZHANG Xiaojing, LUO Pingping, et al. Risk assessment of ship berthing operations in heavy fog based on cloud model[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(9): 159–166.

基于云模型的大雾中船舶靠泊作业风险评估^{*}

秦庭荣¹ 讲师, 张小静¹, 罗平平¹, 吴志炫¹, 桂宇翔², 席永涛¹ 教授

(1 上海海事大学 商船学院, 上海 201306; 2 上海海事大学 海洋科学与工程学院, 上海 201306)

中图分类号: X913.4

文献标志码: A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.09.0178

基金项目: 国家自然科学基金资助(52372316)。

【摘要】 为减少雾中船舶靠泊事故的发生, 构建一套基于云模型的大雾中船舶靠泊作业风险可视化评估架构。在该评估架构中, 首先, 建立包含靠泊相关人员、船舶、泊位及环境 4 个维度的综合风险评估指标体系; 其次, 基于层次分析法(AHP)与决策试验和评价试验法(DEMATEL)相结合的方法计算各评估指标的综合影响权重; 然后, 针对靠泊过程中风险的不确定性, 引入云模型量化评估大雾中船舶靠泊的风险; 最后, 将该评估架构应用于上海港外高桥集装箱码头的 4 种靠泊作业场景。研究结果表明: 泊位的前后留挡距离指标、引航员雾中靠泊水平指标以及泊位导标或导灯的示位效果指标对大雾中船舶靠泊作业风险等级影响较大; 该风险评估模型可准确评估并可视化不同场景下的靠泊作业风险, 保障船舶的全天候靠泊作业, 提升港口的货物吞吐量。

【关键词】 云模型; 大雾中船舶; 靠泊作业; 风险评估; 层次分析法(AHP); 决策试验和评价试验(DEMATEL)方法

Risk assessment of ship berthing operations in heavy fog based on cloud model

QIN Tingrong¹, ZHANG Xiaojing¹, LUO Pingping¹, WU Zhixuan¹,
GUI Yuxiang², XI Yongtao¹

(1 Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2 College of Ocean Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To mitigate the occurrence of berthing accidents in fog, this study constructed a cloud model-based visual risk assessment framework for ship berthing operations under dense foggy conditions. Within this framework, a comprehensive risk assessment index system was first established, encompassing four dimensions: personnel involved in berthing, vessel characteristics, berth facilities, and environmental conditions. Subsequently, the combined AHP and DEMATEL method was employed to calculate the integrated influence weights of each assessment indicator. To address the uncertainty inherent in berthing risks, the cloud model was introduced to quantify the risks associated with foggy berthing operations. Finally, the proposed framework was applied to evaluate four typical berthing scenarios at the Waigaoqiao Container Terminal of Shanghai Port. The results demonstrate that the marine clearance (fore and aft distance) at the berth, the proficiency of pilots in foggy berthing operations, and the positioning effectiveness of berth leading marks or lights significantly influence the risk levels of ship berthing in fog.

This risk assessment model accurately evaluates and visually represents berthing risks across different scenarios. It thus holds substantial importance for ensuring all-weather berthing operations and enhancing port cargo throughput capacity.

Keywords: cloud model; ships in heavy fog; berthing operations; risk assessment; analytic hierarchy process (AHP); decision-making trial and evaluation laboratory (DEMATEL) method

0 引言

船舶靠泊过程是海上货物运输链的“最后一公里”,但也是船舶操纵技术中容错率相对较低且容易发生事故的环节。随着全球海运业的蓬勃发展,港口的运作日益繁忙,船舶在各种气象条件下安全靠泊作业的需求愈加突出。其中,大雾天气下进行靠泊作业,由于能见度极低,给船舶的导航、定位及安全靠泊操作带来了极大困难。根据国际海事组织的定义,大雾是指能见度低于 500 m 的天气条件,在这种极端环境下,船舶靠泊操作的容错率更低,带来的风险会显著增加,常会发生碰撞码头、机械、其他船舶,以及缆绳崩断、人员伤亡、货物损失、丢锚等事故,进一步导致火灾、爆炸等各类灾害^[1]。因此,深入分析大雾条件下船舶靠泊作业风险,以及制定有效的安全对策,对于保障港口安全、减少海上事故至关重要。

国内外许多专家学者针对该难点问题展开了研究,如戴厚兴等^[2]运用模糊综合评价法构建动态评估模型与风险矩阵,以提升海事监管能力、降低能见度不良事故风险。GAO Yuan 等^[3]根据威海港的实际情况及沿海其他港口的雾航措施,总结了威海港雾航的影响因素,并对雾航的影响因素提出针对性措施。SHEN Yongtian 等^[4]基于渤海海雾影响下的船舶自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS) 数据与日本 8 号卫星数据,运用地理加权回归模型等分析,研究了海雾对海上运输安全的影响。GOKSU 等^[5]基于模糊故障模式和影响分析提出海上安全分析方法,评估了船舶靠离泊作业风险。LUO Xiaofang 等^[6]提出结合动静贝叶斯网络模型的风险分析框架,解决海上自主水面船舶靠离泊风险问题。LIN Bowen 等^[7]提出环境干扰数据与 AIS 数据相结合的方法,结合改进 Bossel 模型算法评估船舶靠泊风险。KHAN 等^[8]基于有序 Logit 回归模型评估了危险品船靠泊事故的影响因素。通过梳理相关文献发现,大多数研究主要聚焦在 2 个方面:①大雾条件下的海上航行方法或风险特征等;②不同靠泊条件下的靠泊风险。鲜有将二者结合的

研究文献。此外,大雾中船舶靠泊作业涉及到的风险因素众多,且很多因素都具有随机性和模糊性,而云模型能可视化展示风险因素的模糊性,适用于大雾中船舶靠泊作业场景。

鉴于此,笔者拟从人员因素、船舶因素、泊位因素以及环境因素 4 个维度,构建科学系统的风险评估指标体系,采用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 与决策试验和评价试验法 (Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL),进行综合影响权重计算,并引入云模型理论,建立一套大雾中船舶靠泊作业的可视化风险评估架构,用于量化靠泊风险,以期减少雾中船舶靠泊事故的发生。

1 大雾中船舶靠泊作业风险可视化评估架构

1.1 大雾中靠泊作业问题分析

从系统的角度来看,大雾中靠泊作业风险源自于极端环境下人员、船舶、码头要素在系统中出现的不协调状态。这里的极端环境主要指能见度极低;人员指船员、引航员、码头工人、拖轮人员等;船舶指靠泊的商船和辅助靠泊的拖轮;码头指靠泊的泊位,包含泊位靠泊设施,泊位所在码头区域的各种生产机械。

在以往,受限于传统航行设施设备以及通航保障技术等方面的制约,港口遇到大雾时,不得不采用封航等行政管理手段进行风险干预,致使靠泊作业需求无法有效实施。然而,随着科技的发展,船舶、引航、海事、航海保障等设施设备均有了质的飞跃,包括出现透雾光学望远镜、雾区诱导安全航行装置、数字智慧航道、船舶航行视觉增强、多功能航标、红外透雾视觉感知设备、智能航保平台等各种具有去雾或雾中安全航行的新技术。另一方面,贸易的全球化加剧了港口运营压力,增效增能成为港口进一步提升竞争力的重要发展方向。以上海港为例,2023 年,因能见度不良 (主要是大雾天气) 封航天数为 49 天,集装箱码头每暂停生产 1 天,则平均减少约 14.3 万标准集装箱吞吐量,这对上海港航运资源配置能力,港口在全球供应链中的地位,以及港口综

合竞争力都会产生一定的影响。

由此可见:随着新技术发展和港口增能需求的内在驱动,开展大雾条件下靠泊作业已成为一些港口的迫切需求,而解决这一需求的重要一环就是系统分析和评估大雾中船舶靠泊作业的风险。

1.2 靠泊作业风险评估指标体系构建

靠泊作业风险与船舶靠泊方式息息相关,而船舶靠泊方式又包括静水靠泊、顶流靠泊、地中海式靠泊、船船并靠式靠泊、单点系泊等。以最通用的大型商船平行靠泊顺岸式码头过程为研究对象,即大雾中船舶在泊位前沿水域摆正位置后,在拖轮协助下

近似平行靠上泊位。船舶在靠泊的过程中可根据需要,使用车、舵、锚或侧推器,进行辅助靠泊。为评估该过程的风险,要辨识和分析影响大雾中船舶靠泊作业风险的因素,再进一步构建相应的评估指标体系。

参照文献[4-5,7,9-10]、事故案例和实地调研数据,并结合专家访谈数据(邀请资深引航员、船长等人员),识别出影响大雾中船舶靠泊作业的主要风险因素,包括人员因素、船舶因素、泊位因素以及环境因素 4 个维度。在此基础上,又扩展 19 个二级指标,从而构建大雾中船舶靠泊作业风险评估指标体系,如图 1 所示。

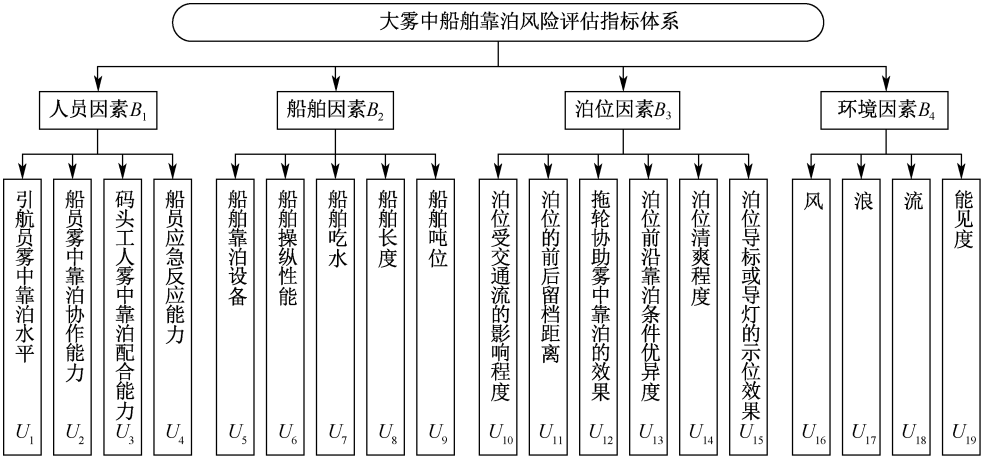


Fig. 1 Indicator system for risk assessment of ship berthing operations in fog

1.3 架构中的算法设计

指标体系是风险评估的关键,但其质量受权重、数据和方法影响。为确保权重可靠性,提出结合 AHP(主观重要性权重)与 DEMATEL(指标间影响度)计算综合影响权重^[14],并采用云模型处理评估中的模糊性和随机性,提升准确性及结果可视化效果。

1.3.1 AHP 法

AHP 法是一种定性与定量相结合的系统分析方法。该方法较为成熟,主要步骤为:①在确定指标层次结构后,使用两两相对重要程度比例 1~9 标度法^[11],通过各级指标的元素实现两两比较判断,建立判断矩阵;②运算矩阵,计算每一层指标的权重 W_{i1} ;③对判断矩阵分别计算一致性比率(Consistency Ratio, CR),如果 $CR < 0.1$,则说明权重分配合理;④如果一致性比率不在可接受的范围内,需要调整判断矩阵,重复上述计算步骤。

1.3.2 DEMATEL 法

DEMATEL 法是一种基于要素间逻辑关系和直

接影响矩阵的系统分析方法,用于确定要素间的因果关系及其在系统中的重要性^[12-13]。具体的计算步骤如下:①构建直接影响矩阵 N 。设定各因素之间的影响关系分为无影响、弱影响、一般影响、较强影响、强影响 5 个影响等级,其对应分值分别为 0、1、2、3、4。由相关领域专家对各因素间的影响关系进行评判与打分,形成 $n \times n$ 矩阵;②归一化处理直接影响矩阵 N ,得到直接影响矩阵 O 和总影响矩阵 T ;③通过计算各指标的影响程度与被影响程度,得出中心度 M_i 和原因度 R_i ;④确定指标权重 W_{i2} ,该权重由中心度归一化获得。

1.3.3 综合影响权重

AHP 法注重指标之间的相互重要度,DEMATEL 法注重指标之间相互影响度。将两者结合有利于提高指标权重的可靠性^[17]。综合影响权重 W_i 计算如下式:

$$W_i = \frac{W_{i1} W_{i2}}{\sum_{i=1}^n W_{i1} W_{i2}}$$

(1)

1.3.4 云模型综合评估

云模型是一种基于概率论和模糊数学的不确定性转换模型,其核心是通过期望 E_x 、熵 E_n 和超熵 H_e 。这3个数字特征,将定性概念与定量数据双向映射^[15-16]。综合评估步骤如下:

步骤1:建立标准云特征参数。采用常用的5级标定法划分船舶靠泊风险的评分区间 $[0, 10]$,分别为:高风险 $[0, 2]$,较高风险 $(2, 4]$,中风险 $(4, 6]$,较低风险 $(6, 8]$,低风险 $(8, 10]$,共计5个风险等级。评语值越大、风险越小。依据不同风险等级的区间 $[M_{\min}, M_{\max}]$,按下式计算各个风险等级对应的标准云的特征参数 $U_c(E_{xc}, E_{nc}, H_{ec})$ 。根据标准云的特征参数,利用Python编程生成标准云图。

$$\begin{cases} E_{xc} = \frac{M_{\min} + M_{\max}}{2} \\ E_{nc} = \frac{M_{\max} - M_{\min}}{6} \\ H_{ec} = \alpha \cdot E_{nc} \end{cases} \quad (2)$$

式中 α 为熵和超熵的线性关系,一般取0.1。

步骤2:计算指标云特征参数。采用专家评分问卷获取数据,通过逆向云发生器将专家评分值 Z_{ki} 转换为各二级指标的云特征参数 $U_i(E_{xi}, E_{ni}, H_{ei})$ 。

$$\begin{cases} E_{xi} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m Z_{ki} \\ E_{ni} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m |Z_{ki} - E_{xi}| \\ H_{ei} = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{k=1}^m (Z_{ki} - E_{xi})^2 - E_{ni}^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中 Z_{ki} 为第 k 位专家对第 i 个指标的评分值, $k=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n$ 。

步骤3:计算综合云特征参数。基于二级指标云特征参数 U_i 按下式加权聚合逐级合成一级指标云特征参数和综合云特征参数 U 。

$$\begin{cases} E_x = \frac{\sum_{i=1}^n W_i \cdot E_{xi}}{\sum_{i=1}^n W_i} \\ E_n = \frac{\sum_{i=1}^n W_i^2 \cdot E_{ni}}{\sum_{i=1}^n W_i^2} \\ H_e = \frac{\sum_{i=1}^n W_i^2 \cdot H_{ei}}{\sum_{i=1}^n W_i^2} \end{cases} \quad (4)$$

步骤4:绘制云图及云图对比。根据标准云特征参数 U_c 和综合云特征参数 U ,利用正向云发生器生成云滴分布,并通过可视化分析云滴分布,结合风险评价标准,确定风险等级。

1.4 基于云模型的可视化评估架构

基于算法设计,给出大雾中船舶靠泊作业风险可视化评估架构,如图2所示。其中,评估指标赋分原则需要依据指标特征进行定义,以便获得不同场景下的指标值。

2 大雾中船舶靠泊外高桥集装箱码头风险评估

以上海港外高桥集装箱码头为例,使用可视化评估架构评估大雾中不同场景下的船舶靠泊风险。

2.1 综合影响权重计算

船舶靠泊过程中专业技术性很强,而大雾中靠泊则更需要有长期靠泊和大雾中航行经历。为此围绕4个一级指标19个二级指标分别从指标间相互重要度和相互影响度2个层面,邀请资深引航员和船长等人员进行打分,运用AHP和DEMAEL方法分别计算出2种方法下的指标权重,并通过计算结果实现相关性比较,如图3所示。

由图3可知:2种方法计算的权重具有良好相关性,趋势一致但考量角度不同。而基于AHP-DEMATEL确定的综合影响权重融合了层次重要性与因素间相互影响,兼具AHP和DEMATEL优势,结果更为可信准确。同时, U_{11} 、 U_1 、 U_{15} 和 U_{19} 的权重由大到小排名前4,说明这4个指标相对更为重要,应予以重视。

2.2 典型场景设定

受长江口北槽主航道12.5 m水深的限制,在外高桥集装箱码头靠泊的船舶多为中大型及以下的船舶,超大型集装箱船需要减载后乘潮进出。为此,选用船长分别为150、200、250和300 m的船舶为4种典型场景,通过邀请15位专家组成员(8名资深引航员、5名船长、1名码头带缆人员及1名拖轮船长)为各场景下19个指标评分。表1的前4列是一位专家对4种场景下19个指标的评分值,再将15位专家的评分值按照式(3)、式(4)得到各场景下的云模型参数。其中,场景3(船长250 m)设定的靠泊参数较差,包括引航员资质为2级引航员,雾中靠泊经验较少,泊位的前后留挡距离为平时正常距离,导标或导灯在能见度不良下难以识别等。以场

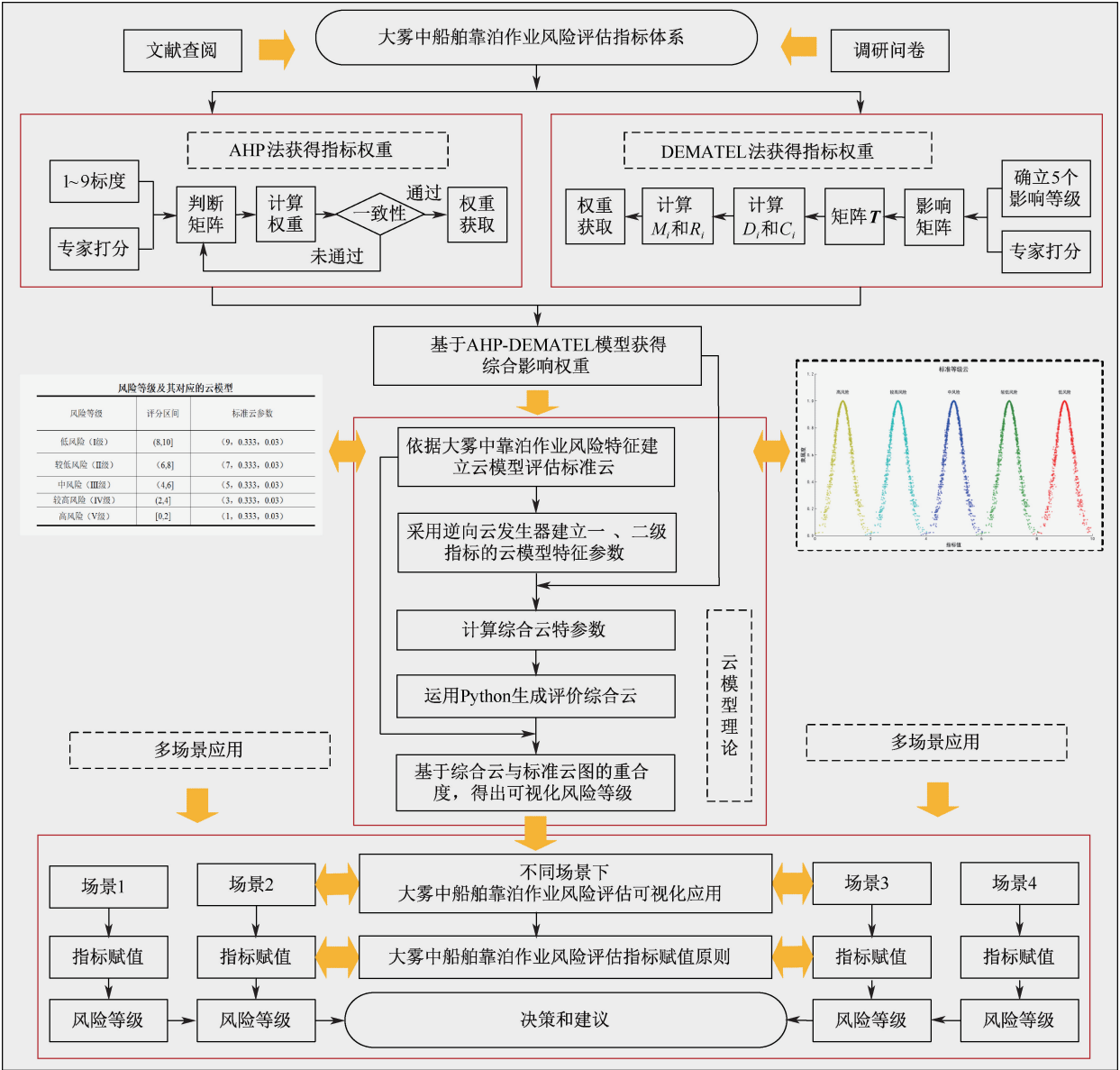


图 2 大雾中船舶靠泊作业风险可视化评估架构

Fig. 2 Visualised risk assessment framework for ship berthing operations in fog

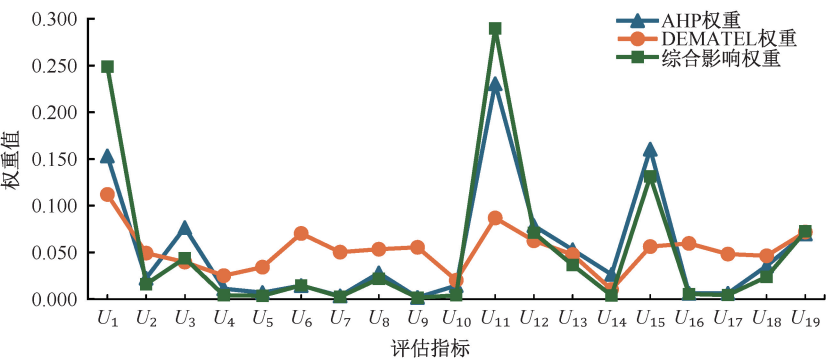


图 3 权重计算结果对比

Fig. 3 Comparison chart of weight calculation results

景3为例,将各专家评分值按式(3)通过逆向云发生器转换为各二级指标云特征参数 U_i ,二级指标云特征参数按式(4)加权聚合为一级指标云特征参数,结果见表1第5列—12列。

表1 各场景的指标赋值及各指标云特征参数

				以场景3为例计算							
场景1	场景2	场景3	场景4	指标	E_x	E_n	H_e	指标	E_x	E_n	H_e
8	8	5	9	U_1	5.940	0.511	0.216	B_1	6.104	0.513	0.213
7	8	6	8	U_2	6.440	0.311	0.108				
8	9	6	8	U_3	6.927	0.604	0.121				
6	7	5	7	U_4	5.933	0.574	0.186				
7	7	6	7	U_5	6.540	0.304	0.076	B_2	5.154	0.493	0.102
6	7	6	6	U_6	5.980	0.565	0.146				
8	7	5	3	U_7	5.060	0.548	0.080				
8	6	4	2	U_8	4.487	0.465	0.083				
8	6	4	1	U_9	3.560	0.237	0.122	B_3	3.459	0.476	0.098
6	6	6	5	U_{10}	5.675	0.340	0.095				
8	6	3	8	U_{11}	3.080	0.458	0.096				
8.5	8	4	8	U_{12}	4.620	0.548	0.164				
8.5	8	5	6	U_{13}	5.013	0.588	0.134	B_4	2.487	0.372	0.113
8	8	5	8	U_{14}	5.447	0.254	0.118				
8	3	3	7	U_{15}	3.100	0.535	0.083				
8	8	7	9	U_{16}	6.980	0.481	0.076				
8	8	7	8	U_{17}	7.027	0.395	0.092	B_4	2.487	0.372	0.113
6	6	4	4	U_{18}	3.167	0.596	0.185				
1	1	1	1	U_{19}	1.653	0.346	0.106				

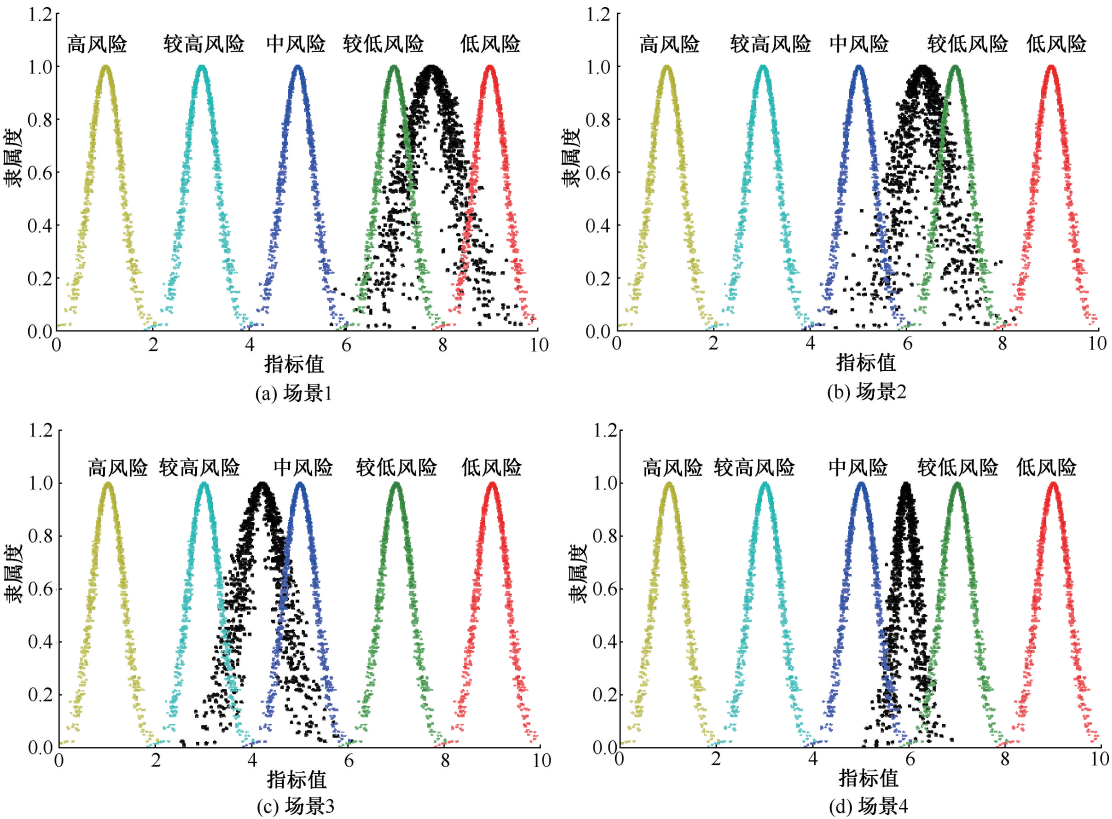


图4 各场景综合风险云图

Fig.4 Comprehensive risk cloud map for different scenarios

2.3 可视化评估结果

依据表 1 中的结果,一级指标云特征参数按式(4)进一步加权聚合成综合云特征参数 U ,计算得到场景 3 下的综合云特征参数 $U(4.209,0.475,0.123)$ 。将标准云特征参数和综合云特征参数输入正向云发生器,运用 Python 编程,得到综合评估结果的云图,如图 4c 所示。同理,计算出场景 1、2 和 4 的综合云特征参数,并绘制成综合风险云图,如图 4 所示。

2.4 结果分析

1) 总体来看,场景 3 的综合风险云图位于中风险和较高风险之间,表明船舶在此场景下靠泊作业风险较高,而场景 1、场景 2 和场景 4 风险相对较低。进一步分析可知:场景 3 中 U_{11} 和 U_{15} 指标变差,直接导致该场景下的靠泊风险迅速上升。

2) 场景 1、场景 2 和场景 4 中,船舶尺度参数逐渐增大,靠泊风险也相应增大,说明大吨位的船舶在操控灵活性上较差,在有限的泊位空间和复杂的雾

天环境中,调整航向和位置的难度更大,且更易受到风流等环境因素的影响。

3) 除船舶自身属性对靠泊风险存在影响外,与场景 1 相比,场景 2 中 U_{15} 指标变差,表明导标或导灯的示位效果难以有效识别,这一变化使得场景 2 的靠泊风险有所上升,成为导致场景 2 风险偏高的主要原因。

4) 与场景 3 相比,场景 4 的风险显著降低。该结果表明:在 U_1 、 U_{11} 以及 U_{15} 指标变好后,大雾中大型船舶靠泊作业的风险仍然处于可控范围。

2.5 措施及技术支持

通过多场景风险评估研究结果表明:泊位的前后留挡距离、引航员雾中靠泊水平、泊位导标或导灯的示位效果、拖轮协助雾中靠泊的效果以及码头工人雾中靠泊配合能力 5 项指标下降后,船舶靠泊作业风险迅速增加。因此,提出在大雾条件下靠泊作业时的控制措施,见表 2。由表 2 可知:技术支持是控制措施得以实施的有效保障。

表 2 风险因素控制措施及技术支持

Table 2 Risk factor control measures and technical support

序号	风险因素	控制措施	技术支持
1	泊位的前后留挡距离	在《海港总体设计规范》中规定泊位富裕长度的基础上再增大约 20%作为泊位前后留挡距离	通过船舶模拟器大雾场景技术结合模拟靠泊实践,测算出前后留档距离
2	引航员雾中靠泊水平	雾中靠泊的引航员需在船舶模拟器中进行大雾场景下模拟和培训。培训合格后,仍需积累雾中实船航行经验	通过船舶模拟器大雾场景技术模拟积累引航员雾中靠泊技能
3	泊位导标或导灯的示位效果	目前,引航员建议在驾驶台的靠泊位置(N 旗位置)停放 1 台岸吊,通过雷达进行识别,同时,结合透雾光学望远镜进行确认。长远来看,泊位要有清晰的示位技术,提供关键的靠泊位置参照点	①当前,通过雷达结合透雾光学望远镜新技术;②未来,需要研究具有透雾功能的泊位导标或导灯技术
4	拖轮协助雾中靠泊的效果	拖轮在雾中靠泊前就需要伴航,直到靠泊结束	建议拖轮配备红外透雾视觉感知设备,以增加靠泊过程中与大船的协同效果
5	码头工人雾中靠泊配合能力	前后带缆的工人均需要配备甚高频通信装备或透雾光学望远镜,确保彼此之间以及与船方的协作。前后带缆工人确保不能同时有交叉缆	配备甚高频通信装备或透雾光学望远镜,增加带缆人员之间的信息交流

3 结 论

1) 构建涵盖人员、船舶、泊位及环境 4 个维度共 19 项指标的大雾条件下船舶靠泊作业风险评价指标体系,为系统识别和定量评估风险因素提供了理论依据。

2) 提出一种融合 AHP 与 DEMATEL 方法的综合影响权重计算模型,既考虑了因素在层次结构中的相对重要性,又反映多因素交互影响的综合效应,

显著提升了权重确定的科学性与可靠性。

3) 建立基于云模型的大雾中船舶靠泊作业风险可视化评估框架,有效处理风险评估过程中的模糊性与随机性问题,实现了风险分布及其影响的可视化表达,为作业安全决策提供了直观支持。

4) 建议进一步研发高精度雾航监测与智能辅助靠泊系统,以提升恶劣气象条件下船舶靠泊作业的安全性及可控性,同时需加强复杂环境下人-船-环境协同机制的实证研究。

参考文献

- [1] MOLINA-SANCHEZ R, CAMPOS Á, ALFONSO M, et al. Assessing operability on berthed ships. common approaches, present and future lines[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(4): DOI:10.3390/jmse8040255.
- [2] 戴厚兴,吴兆麟.能见度不良条件下海上交通风险动态预评估[J]. *中国航海*, 2017, 40(2): 65-68, 82.
DAI Houxing, WU Zhaolin. Dynamic pre-assessment of maritime traffic risk under poor visibility conditions[J]. *China Navigation*, 2017, 40(2): 65-68, 82.
- [3] GAO Yuan, JIANG Guoyou. Research on influencing factors and countermeasures of fog navigation in Weihai Harbour[C]. *Proceedings of 2018 the 5th International Conference on Education, Management, Arts, Economics and Social Science (ICEMAESS 2018)*, 2018: 1 112-1 114.
- [4] SHEN Yongtian, ZENG Zhe, LIU Dan, et al. Exploring spatial non-stationarity of near-miss ship collisions from AIS data under the influence of sea fog using geographically weighted regression: a case study in the Bohai Sea, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2024, 42(12): 77-89.
- [5] GOKSU S, OZCAN A. A quantitative dynamic risk assessment for ship operation using the fuzzy FMEA: the case of ship berthing/unberthing operation[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: DOI:10.1016/J.OCEANENG.2023.115548.
- [6] LUO Xiaofang, LING Hao, XING Mengxia, et al. A dynamic-static combination risk analysis framework for berthing/unberthing operations of maritime autonomous surface ships considering temporal correlation[J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2024, 245: DOI:10.1016/J.RESS.2024.110015.
- [7] LIN Bowen, ZHENG Mao, CHU Xiumin, et al. A novel method for the evaluation of ship berthing risk using AIS data[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 293: DOI:10.1016/J.OCEANENG.2023.116595.
- [8] KHAN R U, YIN Jingbo, SHAIR M F, et al. Factor assessment of hazardous cargo ship berthing accidents using an ordered logit regression model[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 284: DOI:10.1016/J.OCEANENG.2023.115211.
- [9] 李壮,胡甚平,高郭平,等.不同潮流时段船舶靠泊作业风险贝叶斯决策模型[J]. *上海海事大学学报*, 2020, 41(1): 57-63.
LI Zhuang, HU Shenping, GAO Guoping, et al. A Bayesian decision model for the risk of ship berthing operations during different tides[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2020, 41(1): 57-63.
- [10] LI Chunxu, ZHAO Jun, DING Gege, et al. The study of risk assessment method for ship berthing based on the "Human-Ship-Environment" synergy[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(11): DOI:10.3390/JMSE12112022.
- [11] KALITA N, BORA K A, SARMAH R, et al. Comparative flood hazard assessment in Assam's Belsiri River basin using AHP and MaxEnt models[J]. *Revue Internationale de Géomatique*, 2025, 34(1): 37-51.
- [12] HE Peng, LU Fei, SUN Ruishan, et al. Examining influencing factors and their hierarchical relationships in flight crew resilient behavior through a hybrid ISM-DEMATEL approach[J]. *Scientific Reports*, 2025, 15(1): DOI:10.1038/S41598-025-85990-4.
- [13] SHI Jiahui, LIU Zhengjiang, FENG Yinwei, et al. Evolutionary model and risk analysis of ship collision accidents based on complex networks and DEMATEL[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 305: DOI:10.1016/J.OCEANENG.2024.117965.
- [14] 薛彦卓,周莹,鲁阳,等.基于模糊 AHP-DEMATEL 的北极冰区船舶冰困风险评价[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2022, 43(7): 944-949, 992.
XUE Yanzhuo, ZHOU Ying, LU Yang, et al. Risk evaluation of ice entrapment of ships in Arctic ice area based on fuzzy AHP-DEMATEL[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2022, 43(7): 944-949, 992.
- [15] 陈娜,胡毅彤,袁英峰,等.基于博弈论组合赋权-云模型的消防员训练损伤风险评估[J]. *中国安全科学学报*, 2024, 34(4): 232-238.
CHEN Na, HU Yitong, YUAN Yingfeng, et al. Firefighter training injury risk assessment based on game-theoretic combinatorial empowerment-cloud model[J]. *China Safety Science Journal*, 2024, 34(4): 232-238.
- [16] HU Jiageng, WANG Fuqiang, LIU Peiheng, et al. Evaluation of urban water cycle health status based on DPSIRM framework and AHP-FCE-cloud model[J]. *Ecological Indicators*, 2025, 170: DOI:10.1016/J.ECOLIND.2024.112935.
- [17] JIANG Yuanqi, YUAN Dongsheng. Risk hierarchical management and control model based on AHP-DEMATEL-cloud model[J]. *Financial Engineering and Risk Management*, 2024, 7(2): DOI:10.23977/FERM.2024.070214.

作者简介: 秦庭荣 (1976—),男,安徽和县人,博士,讲师,主要从事船舶风险评估、智能船舶、航运大数据等方面的研究。E-mail:trqin@shmtu.edu.cn。

