

中文引用格式:付姗姗,吴宁及,蔡杜皆,等.面向智能航行船舶的触碰事故致因与防控对策研究[J].中国安全科学学报,2025,35(12):53-63.

英文引用格式:FU Shanshan, WU Ningji, CAI Dujie, et al. Study on causation of contact accidents and its prevention and control measures for autonomous ships[J]. China Safety Science Journal, 2025, 35(12):53-63.

面向智能航行船舶的触碰事故致因与防控对策研究^{*}

付姗姗¹教授,吴宁及¹,蔡杜皆¹,范存龙¹讲师,韩冰^{**2}研究员

(1 上海海事大学 交通运输学院,上海 201306;2 上海船舶运输科学研究所有限公司,上海 200135)

中图分类号:X951

文献标志码:A

DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2025.12.1201

基金项目:国家自然科学基金资助(52271363, 52301419);上海市优秀学术技术带头人项目(23XD1431000);上海市青年科技启明星计划(22QC1400600)。

【摘要】 为保障智能航行船舶的安全运行,基于触碰事故调查报告以及智能船舶国内外相关文献,采用系统理论过程分析(STPA)、决策试验与评价实验室法(DEMATEL)和模糊认知图(FCM)模型分析智能航行船舶触碰事故的风险成因,评估码头水域靠离泊和桥区水域通航2种情景的智能船舶触碰风险水平,并在此基础上提出防控对策。结果表明:在靠离泊过程中,智能航行船舶面临着感知不准确、信息传输中断等10类主要风险;在通过桥区过程中,存在感知盲区、决策失误等9类关键风险。沟通协作不足、风力/水流干扰显著等因素是智能航行船舶触碰事故的关键诱因,这些因素涉及船舶感知、决策、控制、通信等关键控制行为,不同因素间还存在复杂的耦合放大效应;防控对策包括完善船岸数据交换协议与联合演练、集成多源传感器与机器学习算法、制定人机权限切换预案、采用虚拟现实(VR)、增强现实(AR)技术开展沉浸式应急培训等。

【关键词】 智能航行船舶; 触碰事故致因; 系统理论过程分析(STPA); 决策试验与评价实验室法(DEMATEL); 模糊认知图(FCM)

Study on causation of contact accidents and its prevention and control measures for autonomous ships

FU Shanshan¹, WU Ningji¹, CAI Dujie¹, FAN Cunlong¹, HAN Bing²

(1 College of Transport and Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2 Shanghai Ship and Shipping Research Institute, Shanghai 200135, China)

Abstract: In order to ensure the safe operation of autonomous ships, it is necessary to deeply analyze the risk factors of contact accidents and formulate targeted safety prevention and control strategies. Based on the contact accident investigation reports and international literature on autonomous ships, this paper adopts systems theoretic process analysis, the decision-making trial and evaluation laboratory method and the fuzzy cognitive map model to analyze the risk causes of contact accidents for autonomous ships from multiple perspectives, and assess the risk level of two typical accident scenarios, namely, berthing/unberthing in port waters and navigating through bridge areas, and base on this, propose corresponding

* 文章编号:1003-3033(2025)12-0053-11; 收稿日期:2025-08-08; 修稿日期:2025-10-22

** 通信作者:韩冰(1981—),男,吉林吉林人,博士,研究员,主要从事船舶运动控制和安全风险辨识研究。E-mail: han.bing@coscoshipping.com。

prevention and control measures. The results show that during the port waters, autonomous ships face ten types of key risks such as inaccurate perception and interrupted information transmission and during the bridge areas, there are nine types of key risks such as perceptual blindness and decision-making errors. And insufficient communication and collaboration, significant wind/current interference and other factors are the key triggers of contact accidents for autonomous ships. These factors involve the key control behavior of perception, decision-making, control and communication of autonomous ships, and there is also a complex coupling and amplification effect among different factors. Finally, prevention and control measures are proposed, including improving the ship-shore data exchange protocol and joint exercise mechanism, integrating multi-source sensors and machine learning algorithms, developing a plan for human-machine permission switching, and using VR/AR technology to conduct immersive emergency training.

Keywords: autonomous ships; contact accidents; systems-theoretic process analysis (STPA); decision making trial and evaluation laboratory (DEMATEL); fuzzy cognitive map (FCM)

0 引言

全球航运在国际贸易和经济活动中起到了至关重要的作用,同时,其巨大的运输规模也带来不少安全风险,尤其是船舶触碰事故,该类事故在全球范围内对商业和经济活动构成潜在影响。如 2024 年 3 月 26 日,一艘名为“DALI”号的集装箱船在驶离美国巴尔的摩港后失去动力,撞上“弗朗西斯·斯科特·基”大桥并致使其坍塌,桥上的 8 名施工人员落水,其中,2 人获救,6 名失踪人员被推定死亡^[1]。

随着技术的快速发展,智能航行船舶逐渐进入人们的视野。2017 年,国际海事组织(International Maritime Organization, IMO)开始编写海上自主水面船舶(Maritime Autonomous Surface Ships, MASS)的相关条例,其先进的导航和操作系统理论上有望减少航行事故。然而,由于智能航行船舶和传统船舶在管理和操作上存在明显差异,如果不能妥善地进行风险管理和控制,新技术可能带来新的安全隐患。因此,研究智能航行船舶触碰事故致因并提出相应的防控对策,有助于为政府机构、航运公司和救援组织提供科学依据和决策支持,从而更有效地预防船舶触碰事故,确保人员安全,减少经济损失,并保护海洋环境,这对促进全球航运业的可持续发展,提高其安全性和效率具有重要意义。

近年来,国内外学者围绕船舶航行的事故风险开展了大量研究。一方面,部分学者专注于特定类型船舶的事故风险分析,如杂货船^[2]、成品油轮^[3]、原油油轮^[4]、散货船^[5]、客船^[6]、化学品油轮^[7]等。这些研究采用了贝叶斯网络、故障树分析(Fault

Tree Analysis, FTA)、人因分析等方法,细致描述了不同船型事故的风险要素。另一方面,部分学者侧重于从特定水域分析船舶事故时空特征,如渔船捕捞区的常见事故^[8]、长江流域的事故^[9]。区域尺度的事故数据分析有助于把握局部水域的风险态势,但难以揭示全球船舶整体的事故规律,尤其是对于发生频率较高的触碰事故。

在事故致因分析方面,MA Laihao 等^[10-11]使用一种基于数据驱动的方法对海事事故中的人为因素进行建模,该方法将决策试验与评价实验室法(Decision Making Trial and Evaluation Laboratory, DEMATEL)和基于人为因素分析和分类系统的模糊认知图(Fuzzy Cognitive Map, FCM)方法相结合,分析了人为因素对海事事故的影响因素。另外,还将 DEMATEL、解释结构模型和模糊贝叶斯网络相结合,评估危险品海上运输事故中影响因素及其层次关系。KUZU^[12]使用模糊 DEMATEL 方法分析了船舶断裂事故的风险。SONER^[13]使用模糊 DEMATEL 方法分析了船上密闭空间事故的原因。这些研究侧重从个案或小样本数据出发,定性或半定量推断风险因素间的关联逻辑,但定量分析因素权重、影响关系的研究相对薄弱。上述文献聚焦分析船员失误、设备故障等个体层面的直接致因,而忽视了从组织管理的系统视角审视事故的深层次原因。

鉴于此,笔者将综合运用系统理论过程分析(Systems-Theoretic Process Analysis, STPA)、DEMATEL、FCM 等方法,立足海事数据和典型事故案例,从功能设计和系统安全的视角,开展智能航行船舶触碰事故的风险因素辨识、典型情景构建、事故

致因分析等研究,在揭示事故规律的基础上,提出切实可行的防控对策建议。

1 智能航行船舶事故致因研究方法

为深入分析船舶触碰事故,笔者广泛收集了来自英国船舶事故调查局等国家和地区海事局的事故调查报告,这些报告以中英文为主,涵盖内河、近海等不同水域,以及客船、货船、工程船等不同船型,最终获得 308 份有效报告,并选取 184 份典型的船舶触碰事故调查报告作为分析对象,其中包括 127 份船舶触碰码头及其附属设施的报告和 57 份船舶触碰桥梁的报告。

由于缺乏真实的智能航行船舶事故数据,文中还选取了近年发表的 23 篇有关智能航行船舶风险分析的学术论文作为知识来源。这些论文大多采用系统安全分析方法,如 STPA、失效模式及效应分析(Failure Mode and Effect Analysis, FMEA)、FTA 等,从感知、决策、控制等不同角度分析了智能航行船舶可能面临的风险^[14-16]。

文中构建的智能航行船舶触碰事故分析框架如图 1 所示。具体步骤如下:

步骤 1:智能航行船舶触碰风险因素识别。对传统船舶的触碰事故调查报告进行编码分析,提取出触碰风险因素并归类。利用 STPA 方法构建智能航行船舶的安全控制结构,分析控制行为,识别出不安全控制及其原因,总结智能航行船舶特有的风险因素。

步骤 2:智能航行船舶触碰风险情景构建。针对智能航行船舶在码头水域靠离泊和桥区水域通航场景,从感知、决策、控制、执行等核心环节,全面分析智能航行船舶面临的触碰风险因素和应对策略。

步骤 3:智能航行船舶触碰事故致因分析和防控对策研究。基于触碰事故数据,利用 DEMATEL-FCM 模型,建立触碰风险因素的静态网络关系和动态演化模型。

1.1 STPA

STPA 是一种源于系统安全工程的事故分析方法^[17]。运用 STPA 进行事故分析,首先,界定研究对象的安全目标和约束条件。其次,在明确目标和边界的基础上,自顶向下地分解和细化系统内部组件以及它们与外部环境之间的层级控制关系。然后,系统考察控制结构中的每一个控制行为是否存在不安全状态,根据莱文森提出的 4 个危险类

别^[18],即控制行为未提供、控制行为提供但不正确、控制行为提供过晚或过早以及控制行为持续时间过长或过短,判断控制行为是否可能引发危害,由此形成“不安全控制行为(Unsafe Control Actions, UCAs)”清单。最后,通过关联分析和事故场景构建,探讨 UCAs 发生的原因和可能导致的后果,推理可能的故障模式和失效机制,识别出完整的事故情景,在确定关键的关联机制的基础上,提出预防事故的安全对策。智能航行船舶触碰风险因素识别流程如图 2 所示。

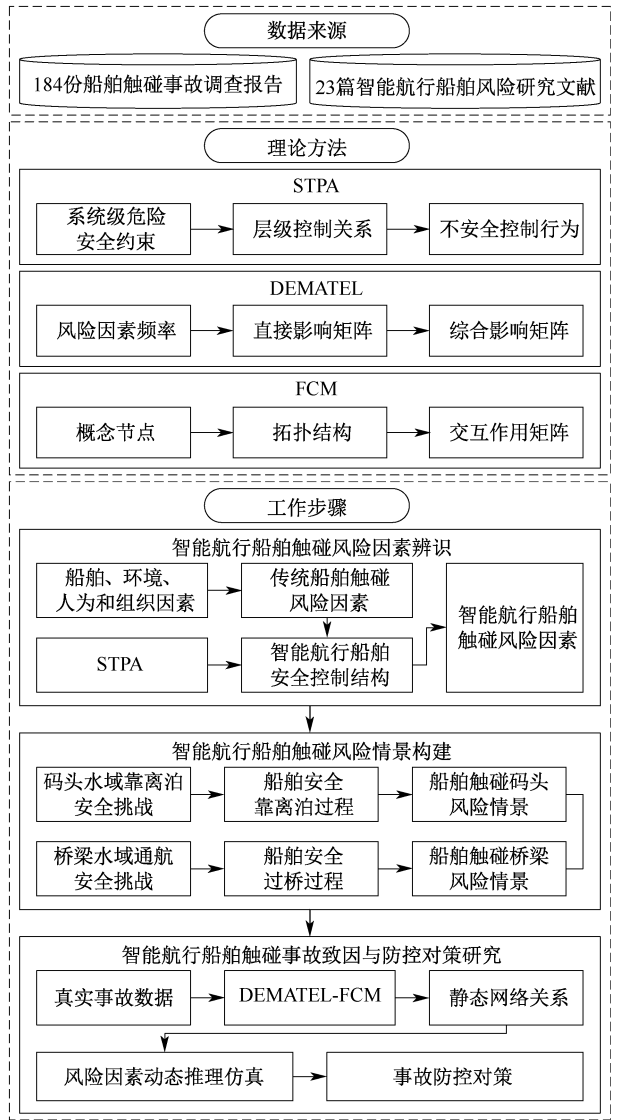


图 1 智能航行船舶触碰事故分析框架
Fig. 1 Analysis framework of contact accidents
for autonomous ships

1.2 DEMATEL

DEMATEL 是一种常用于分析系统内部因素复杂关系的结构建模方法^[10]。传统 DEMATEL 方法

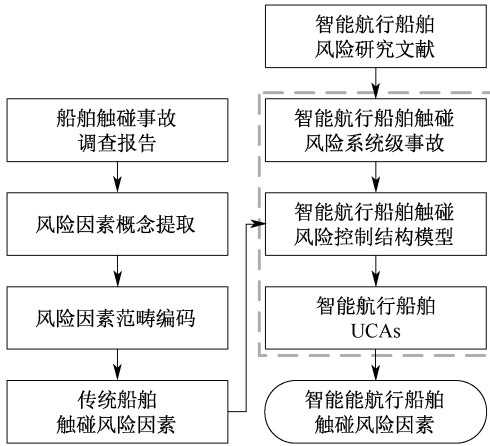


图2 智能航行船舶碰撞风险因素识别流程
Fig. 2 Flowchart of contact risk factor identification for autonomous ships

是依据专家打分获得的直接影响矩阵,由于专家打分可能易受主观因素影响,真实事故数据更能客观反映实际情况,文中将基于风险因素频率统计的方法来量化风险因素之间的直接影响程度,其计算如下:

$$D_{ij} = \frac{f_{x_i \cap x_j}}{f_{x_i}} \quad (1)$$

式中: D_{ij} 为风险因素的影响程度; x_i, x_j 为风险因素; $f_{x_i \cap x_j}$ 为共现频率; f_{x_i} 为风险因素 x_i 的边缘频率。 D_{ij} 是直接影响矩阵 A 的元素,反映了风险因素之间的直接影响关系。

然而, A 忽略因素之间可能存在的间接影响。为揭示风险因素的完整影响网络,需要在直接影响矩阵的基础上,通过归一化直接影响矩阵并计算综合影响矩阵的方式实现:

$$A^* = (D_{ij}^*) = \frac{A}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_j D_{ij}} \quad (2)$$

$$T = A^* (E - A^*)^{-1} \quad (3)$$

式中: A^* 为归一化直接影响矩阵; D_{ij}^* 为归一化直接影响程度; T 为综合影响矩阵; E 为单位矩阵。

为定量分析风险因素在网络中的地位和作用,DEMATEL方法引入影响度、受影响度和中心度3个指标。根据 T 计算触碰风险因素的影响程度 B_i ;计算受影响程度 C_i :

$$B_i = \sum_{j=1}^n T_{ij} \quad (4)$$

$$C_i = \sum_{j=1}^n T_{ji} \quad (5)$$

式中: B_i 为因素 x_i 对所有因素的综合影响; C_i 为因素 x_i 受所有因素的综合影响。

将 B 与 C 相加,得到中心度 $B+C$ 。 $B+C$ 为综合影响矩阵 T 第 i 行和第 i 列的和,表示风险因素 x_i 在船舶触碰事故中的作用大小, $B+C$ 越大,风险因素对事故的影响越大。将 $B+C$ 除以总中心度之和,得到风险因素 x_i 的权重,能够更直观地反映各风险因素在事故中的相对重要性。

1.3 FCM

FCM 是一种用于表示复杂系统中概念之间因果关系的建模工具^[19]。在船舶触碰事故风险分析中,每个风险因素即为 FCM 中的一个概念节点。用 $S_i^{(t)}$ 表示风险因素 x_i 在某一时刻的状态值,反映了该风险因素的严重程度。在输入方面,各个风险因素 x_i 的状态值 $S_i^{(0)}$ 在初始时刻的状态值是基于历史数据给出的,这些状态值作为计算的起始输入,代表了风险因素的初始严重程度,在船舶触碰事故风险分析中,可根据以往类似事故中该风险因素出现的频率、影响程度等历史数据来确定初始状态值。

随着时间的推移,每个风险因素的状态值会受到其他风险因素的影响而动态变化。这种影响关系可以用 FCM 的交互作用矩阵 W 来描述^[20],其中 W_{ji} 表示风险因素 x_j 对风险因素 x_i 的影响强度和因果关系,当 $W_j > 0$ 时, x_j 与 x_i 之间呈正因果关系; $W_j = 0$ 时, x_j 与 x_i 之间无因果关系; $W_j < 0$ 时, x_j 与 x_i 之间呈负因果关系。

同时,DEMATEL方法计算所得到的综合影响矩阵 T 中的元素确定了 FCM 的交互作用矩阵 W 的权重。因此,在 $t+1$ 时刻,风险因素 x_i 的状态值可以通过下式进行更新:

$$S_i^{(t+1)} = f(S_i^{(t)} + \sum_{j=1, j \neq i}^n W_{ji} S_j^{(t)}) \quad (6)$$

式中 f 为一个 Sigmoid 形式的阈值函数,通过下式将概念状态值映射到 $[0, 1]$ 的区间内:

$$f = \frac{1}{1 + \exp(-x)} \quad (7)$$

$$R = \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n S_i^m \quad (8)$$

在输出方面,通过迭代计算上述状态更新式(6)和式(7),直到 $S_i^{(t+1)}$ 达到稳定为止,即可得到风险演化的最终结果。这一过程可以形象地理解为:初始的风险状态通过风险因素之间的相互影响而逐步传播、放大,最终达到一个动态平衡,最终的风险稳态值 R 如式(8)所示,风险稳态值用于衡量

风险大小,其值越大,风险越大。

综上,在船舶触碰事故风险的 FCM 模型中,风险因素的状态值表示该风险的大小,风险因素之间的边权重描述了它们之间的相互影响和关联关系。通过计算得到的风险状态演化曲线,可以定量评估风险因素的重要程度及其动态变化规律,为制定有针对性的安全管理策略提供依据。基于 DEMATEL-FCM 的船舶触碰事故致因分析流程如图 3 所示。

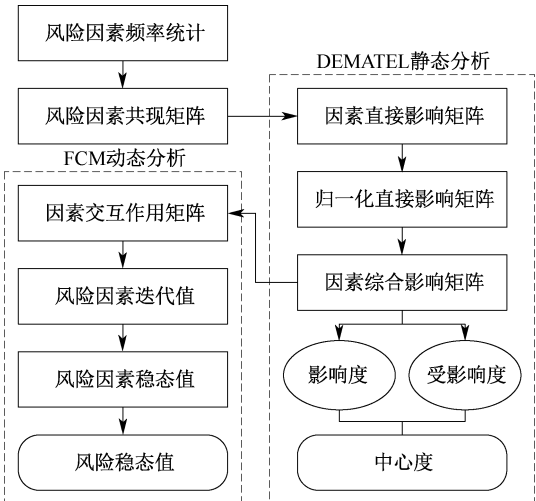


图 3 船舶触碰事故致因分析流程

Fig. 3 Flowchart of analyzing the causes of contact accidents for ships

2 船舶碰撞事故致因风险因素识别

基于 STPA 方法,通过 4 个步骤识别智能航行

船舶的风险因素:定义分析目的,构建控制结构模型,识别不安全控制行为和识别损失情景。

智能航行船舶触碰事故可能导致人员伤亡、船体受损、码头及其设施结构受损、桥梁损毁、环境污染等严重后果,文中将其定义为系统级事故。首先,确定合理的分析边界,主要包括智能航行船舶及其船载子系统(如船桥系统、推进和操舵系统、船载传感器等)、岸基控制中心、船舶交互的外部对象(如港口码头、助航设施等)、通信导航设施以及船舶管理和监管部门等,这些要素通过控制和反馈关系构成智能航行船舶运行的安全控制结构,是触碰风险分析需要重点关注的对象。其次,基于智能航行船舶的技术特点和运行模式,结合收集到的船舶触碰事故调查报告和智能航行船舶风险研究文献,构建智能航行船舶的安全控制结构模型,如图 4 所示。该模型包括监管层、公司层、岸基控制层、船舶层和物理过程层,涵盖了管理、控制和执行等不同职能。然后,系统考虑每项控制行为在不同失效模式下(如未提供、提供但不正确、提供的时间不当和持续时间不当等)可能引发的后果,据此归纳出 28 项智能航行船舶触碰事故的关键不安全控制行为,见表 1。这些不安全控制行为涵盖了人员操作、设备状态、环境适应和组织管理等方面。最后,基于智能航行船舶触碰事故的不安全控制行为,进一步识别典型事故情景,如在靠离码头时由于未能正确感知码头位置和距离而发生触碰,或者在通过桥区时

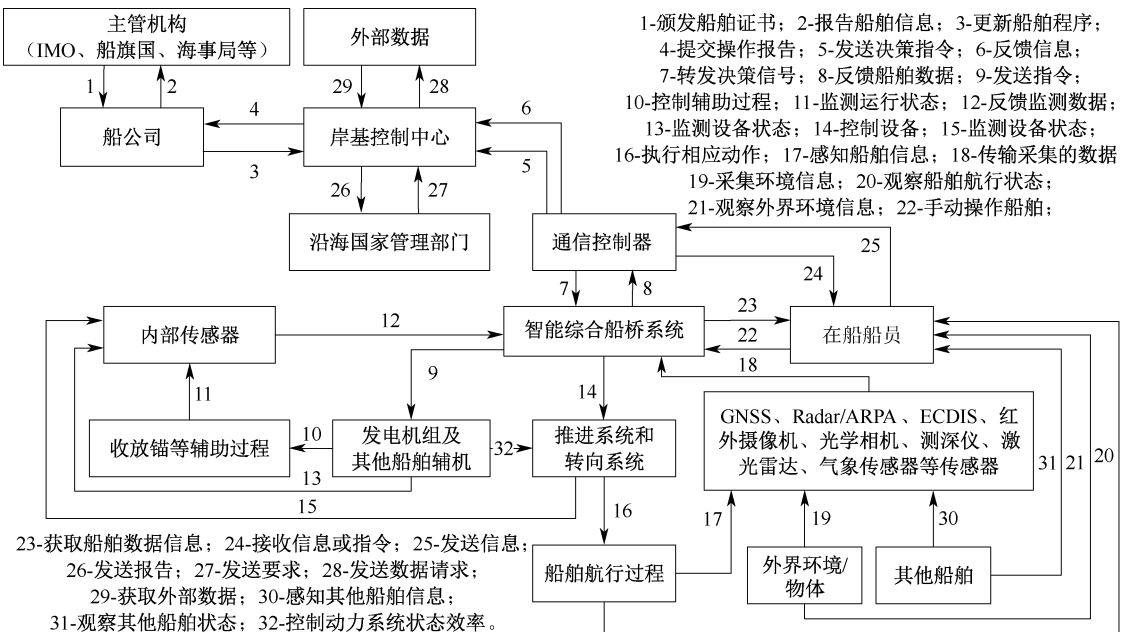


图 4 智能航行船舶触碰安全控制结构

Fig. 4 Structure diagram of contact safety control for autonomous ships

表 1 智能航行船舶触碰不安全控制行为

Table 1 Unsafe control behavior of contact accidents for autonomous ships

编号	控制行为	是否提供	提供但不正确	提供过早或过晚	时间过长或过短
X_1	采用安全航速	未采用	无	无	无
X_2	引航员引航	未引航	引航不正确	无	无
X_3	正确切换驾驶模式	未切换	切换不正确	无	无
X_4	使用拖轮辅助	未使用	辅助不当	辅助太晚	辅助停止太早
X_5	避免偏离计划航线	无	偏离航线	无	无
X_6	执行适当的应急措施	未执行	执行不足	执行太晚	执行停止太早
X_7	瞭望	未瞭望	瞭望不足	瞭望太晚	瞭望停止太早
X_8	充分估计危险情况	未评估	评估不足	评估太晚	评估停止太早
X_9	采取适当的避碰措施	未采取	措施不当	采取措施太晚	措施停止太早
X_{10}	利用导航辅助设备	未利用	利用不当	无	无
X_{11}	使用锚	未使用	使用不当	使用太早/太晚	无
X_{12}	船只检查与维护	未维护	维护不当	无	无
X_{13}	提供培训/确保船员具备必要能力	未培训	培训不足	无	无
X_{14}	制定充分的进出港和靠离泊计划	未制定	制定不正确	无	无
X_{15}	确保船上设备符合人机工程学	无	不符合	无	无
X_{16}	遵守规章制度	未遵守	无	无	无
X_{17}	有效管理驾驶台资源	未管理	管理不当	无	无
X_{18}	加强沟通协作	未沟通	沟通不当	无	无
X_{19}	完善航运公司的安全管理体系	缺乏安全管理	安全管理不当	无	无
X_{20}	确保推进控制系统和设备正常运行	设备故障	无	无	无
X_{21}	维护电力设备的稳定运行	设备故障	无	无	无
X_{22}	确保转向控制系统和设备的有效运行	设备故障	无	无	无
X_{23}	适应狭窄航道的航行	无	不适应	无	无
X_{24}	抵消潮汐的不利影响	没有抵消措施	抵消不充分	无	无
X_{25}	抵消风的不利影响	没有抵消措施	抵消不充分	无	无
X_{26}	抵消海浪的不利影响	没有抵消措施	抵消不充分	无	无
X_{27}	抵消水流的不利影响	没有抵消措施	抵消不充分	无	无
X_{28}	操纵船舶	无	操纵不当	操纵太晚	操纵停止太早

由于决策系统失效而撞击桥墩等。这些事故情景可能造成人员伤亡、船舶损坏和码头桥梁损毁等后果。

3 风险情景构建

采用风险情景构建方法,聚焦智能航行船舶在码头水域靠离泊和桥区水域通航 2 类典型工况,开展触碰风险的情景分析。根据所识别的不安全控制行为,分别设置与感知、决策、控制和执行等核心船舶自主运行机制相关的极端工况,分析在码头水域和桥区水域可能导致船舶发生触碰事故的风险模式,如图 5 所示。

1) 针对码头水域靠离泊过程,通过系统分析大量船舶触碰码头事故的调查报告,结合智能航行船舶的设计运行特点,识别出 10 类主要的 UCA 为及其引发的码头触碰风险情景,涵盖环境感知、通信传输、决策规划、动力控制和人机协同等,见表 2。由

于智能航行船舶技术尚不成熟,缺乏完善的技术标准和充分的运行经验,其感知、决策、执行等系统存在一定的不确定性和脆弱性,在复杂的靠泊环境中可能面临感知不准确、信息传输中断、决策不合理、动力失控和人机协同不畅等风险,进而导致船舶触碰码头。

2) 针对桥区水域通航过程,基于对桥区船舶触碰事故调查报告的深入分析,并考虑智能航行船舶的设计运行特点,识别出 9 类主要的不安全控制行为及其引发的桥梁触碰风险情景,涉及桥梁和航道环境感知、船舶运动感知、航迹规划与避碰决策、动力控制响应、通信中断和人工接管等方面,见表 3。由于桥区结构复杂、通航安全裕度小,对智能航行船舶的感知能力、智能决策和操纵控制提出了更高要求。一旦发生感知盲区、决策失误或控制失灵等故障,极易酿成触碰桥梁或航道障碍物的事故。

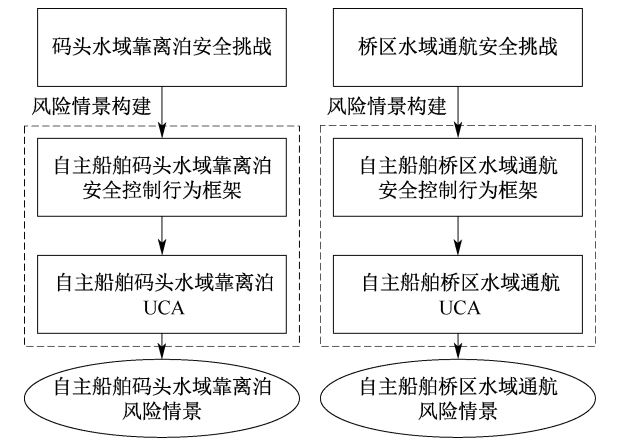


图 5 智能航行船舶触碰风险情景

Fig. 5 Contact risk for autonomous ships

表 2 智能航行船舶触碰码头风险情景

Table 2 Risk scenarios of contact in port waters for autonomous ships

UCA	风险情景
UCA28,29:岸基控制中心未能准确获取码头区域的气象、海况等环境信息	无法制定合理的靠离泊作业方案,增加船舶触碰码头的风险
UCA5,6,7,8: 船岸通信中断或不稳定,未能及时传递操作指令	岸基控制中心无法实时监控和干预靠离泊过程
UCA19: 船载感知系统未能准确识别码头结构、障碍物等关键信息	船舶对码头距离判断错误,未能及时减速或转向,导致触碰
UCA17,18,30:船载感知系统对船舶位置估计不准,数据融合存在偏差	船舶对本船与码头的相对位置关系判断失误,采取错误的避碰策略,引发触碰事故
UCA11,12,13,15:推进、舵等关键设备状态监测不到位	设备故障无法及时发现和处置,船舶失去动力或操控能力,失控撞击码头
UCA12,14,18:自主船桥的感知数据处理、决策算法存在缺陷	船舶对码头距离、船位等情况判断错误,生成不合理的运动控制指令,触碰码头
UCA9,32:发电机组、泵等辅机未能响应控制指令,影响推进、操舵性能	辅机系统故障或控制不当,导致推进、操舵系统供电不足或动力不稳,船舶无法及时调整速度和航向
UCA16:推进、操舵系统未能正确执行控制指令,或响应延迟	船舶未能按照规划的航线和速度运动,偏离预期航迹,可能失控撞击码头
UCA20,21,23,31: 船员未及时观察本船与目标物的运动关系,发现异常	船员疏于瞭望,未能及时发现船舶逼近码头等危险情况并采取应对措施,酿成事故

续表 2

UCA	风险情景
UCA22:紧急情况下,岸基控制中心、船员未能及时切换人工操控模式	在恶劣天气、设备故障等意外情况下,自动控制系统应对不及时,人工接管太晚,错过最佳干预时机

表 3 智能航行船舶触碰桥梁风险情景
Table 3 Risk scenarios of contact through bridge areas for autonomous ships

UCA	风险情景
UCA28,29:岸基控制中心未能准确获取桥区水文气象数据,桥梁结构参数	无法评估恶劣天气和水文条件对船舶操纵性能影响,以及桥梁通航尺度对路线优化的影响
UCA5,6,7,8: 船岸通信不稳定,未能及时传递桥区信息和远程控制指令	无法将桥区特殊情况告知船舶,无法对船舶有效监管和控制,船舶有可能误入危险水域
UCA19: 船载感知系统未能准确识别桥梁结构、障碍物等关键信息	由于传感器盲区,船舶对桥墩位置、桥孔尺寸判断错误,从而与桥体发生碰撞
UCA30: 船载感知系统未能可靠跟踪和预警来往船只等动态目标	AIS 目标跟踪、雷达测距等功能失效,未及时发现桥区其他船舶,无法准确预判避碰形势
UCA18: 船载感知数据融合处理和状态估计功能欠佳	由于传感器精度差,船舶自身运动参数估计不准,进而影响航迹规划和轨迹控制的精度
UCA17: 船载导航定位系统失效,位置、航速、航向等测量失真	由于导航设备故障或外部干扰,船舶无法获得连续、可靠的定位信息,难以精确控制船舶沿规划路径通过桥孔
UCA14: 自主船桥系统的航线规划、避碰决策算法存在缺陷	生成的航线计划未充分考虑桥区地形、水文条件的约束,误判他船的运动趋势,未能及时规划合理的避碰轨迹
UCA16: 推进、操舵系统动作响应延迟,未能精确执行航向、航速控制指令	船舶未能快速、准确地改变航向、航速以避开桥墩,与预定航线偏离较大,最终撞上桥梁
UCA22: 岸基控制中心或船长未能及时切换人工操控,实施有效干预	当桥区水流湍急、能见度低等特殊情况出现时,自动驾驶系统难以适应,若此时人工接管不及时,错失规避时机,船舶将有可能撞向桥梁或桥墩

4 事故致因分析

以船舶触碰码头和触碰桥梁这 2 个具体的风险情景展开分析,根据历史事故统计数据,得到船舶触碰风险因素的频率统计结果。

采用 DEMATEL 方法得到船舶触碰码头风险因素静态的重要性程度,见表 4。由表 4 可以看出,沟通协作不足 X_{q18} 、风力影响 X_{q25} 、采取应急措施不当 X_{q6} 、船舶操纵不当 X_{q28} 和拖轮辅助不足 X_{q4} 是船舶触碰码头的最重要风险因素,中心度分别为 9.308、5.729、5.669、5.465 和 5.444。

表 4 船舶触碰码头风险因素权重值

Table 4 Risk factors of contact in port waters for autonomous ships					
编号	风险因素	影响度值	被影响度值	中心度值	权重/%
X_{q1}	不安全航速	1.944	2.345	4.289	3.96
X_{q2}	引航员引航失误	2.268	1.240	3.507	3.24
X_{q3}	驾驶模式切换失误	2.139	0.346	2.485	2.30
X_{q4}	拖轮辅助不足	2.094	3.350	5.444	5.03
X_{q5}	偏离计划航线	2.216	0.541	2.756	2.55
X_{q6}	采取应急措施不当	1.598	4.071	5.669	5.24
X_{q7}	疏忽瞭望	1.138	0.585	1.723	1.59
X_{q8}	未充分评估危险	2.022	2.208	4.230	3.91
X_{q9}	采取避碰措施不当	2.250	1.996	4.246	3.92
X_{q10}	未充分利用导助航设备	1.800	1.437	3.237	2.99
X_{q11}	锚的操作不当	2.492	0.957	3.449	3.19
X_{q12}	船舶检查和维护不足	1.352	0.519	1.871	1.73
X_{q13}	培训不足/经验不足	1.677	3.612	5.289	4.89
X_{q14}	进出港和靠离泊计划不充分	2.747	1.171	3.917	3.62
X_{q15}	船舶设备不符合人机工程学	1.684	1.026	2.710	2.50
X_{q16}	未遵守规章制度	2.875	0.598	3.473	3.21
X_{q17}	未有效管理驾驶台资源	1.607	1.948	3.555	3.28
X_{q18}	沟通协作不足	1.924	7.385	9.308	8.60
X_{q19}	船公司安全管理体系不完善	1.898	1.840	3.738	3.45

续表 4					
编号	风险因素	影响度值	被影响度值	中心度值	权重/%
X_{q20}	推进控制系统或设备故障	1.338	2.413	3.751	3.47
X_{q21}	电力系统故障	1.073	0.114	1.187	1.10
X_{q22}	转向控制系统或设备故障	1.240	1.230	2.471	2.28
X_{q23}	航道狭窄	2.174	0.406	2.579	2.38
X_{q24}	潮汐影响	2.255	1.804	4.060	3.75
X_{q25}	风力影响	2.081	3.648	5.729	5.29
X_{q26}	海浪影响	2.206	0.461	2.667	2.46
X_{q27}	水流影响	2.236	3.186	5.422	5.01
X_{q28}	船舶操纵不当	1.787	3.677	5.465	5.05

同理,得到船舶触碰桥梁风险因素静态的重要性程度,见表 5。由表 5 可以看出,水流影响 X_{b19} 、沟通协作不足 X_{b12} 、未充分评估危险 X_{b6} 、培训不足/经验不足 X_{b10} 和采取避碰措施不当 X_{b7} 是船舶触碰桥梁的最重要风险因素,中心度分别为 8.064、7.728、7.241、7.028 和 5.851。

表 5 船舶触碰桥梁风险因素权重值

Table 5 Risk factors of contact through bridge areas for autonomous ships					
编号	风险因素	影响度值	被影响度值	中心度值	权重/%
X_{b1}	不安全航速	2.188	1.404	3.592	3.83
X_{b2}	拖轮辅助不足	3.069	0.977	4.046	4.31
X_{b3}	避免偏离计划航线	2.523	1.363	3.886	4.14
X_{b4}	采取应急措施不当	1.818	2.419	4.237	4.52
X_{b5}	疏忽瞭望	1.826	1.980	3.805	4.06
X_{b6}	未充分评估危险	2.263	4.977	7.241	7.72
X_{b7}	采取避碰措施不当	2.578	3.274	5.851	6.24
X_{b8}	未充分利用导助航设备	2.872	1.700	4.572	4.87
X_{b9}	锚的操作不当	3.259	1.409	4.667	4.98
X_{b10}	培训不足/经验不足	2.254	4.775	7.028	7.49
X_{b11}	未遵守规章制度	2.755	1.304	4.060	4.33
X_{b12}	沟通协作不足	2.458	5.270	7.728	8.24
X_{b13}	船公司安全管理体系不完善	2.135	2.145	4.281	4.56
X_{b14}	推进控制系统或设备故障	1.651	0.736	2.386	2.54

续表 5					
编号	风险因素	影响度值	被影响度值	中心度值	权重/%
X_{b15}	转向控制系统或设备故障	1.497	1.037	2.534	2.70
X_{b16}	航道狭窄	1.942	0.634	2.575	2.75
X_{b17}	潮汐影响	3.052	1.333	4.384	4.67
X_{b18}	风力影响	1.883	1.739	3.622	3.86
X_{b19}	水流影响	2.399	5.665	8.064	8.60
X_{b20}	船舶操纵不当	2.476	2.757	5.232	5.58

通过 FCM 分析要素间的影响关系,分析诊断系统现状,找出导致当前状态的原因和影响因素。在确定风险因素的初始概念值(频率值)和阈值函数后,根据 T 确定 W ,并经过 8 次迭代计算后,各因素的最终值达到稳态。

在船舶触碰码头的因素中,沟通协作不足 X_{q18} 对船舶触碰码头的影响最大,其次是采取应急措施不当 X_{q6} 、船舶操纵不当 X_{q28} 、风力影响 X_{q25} 和培训不足/经验不足 X_{q13} , 风险因素的稳态值分别为 0.999 3、0.988 4、0.984 6、0.983 6 和 0.983 4,如图 6 所示。

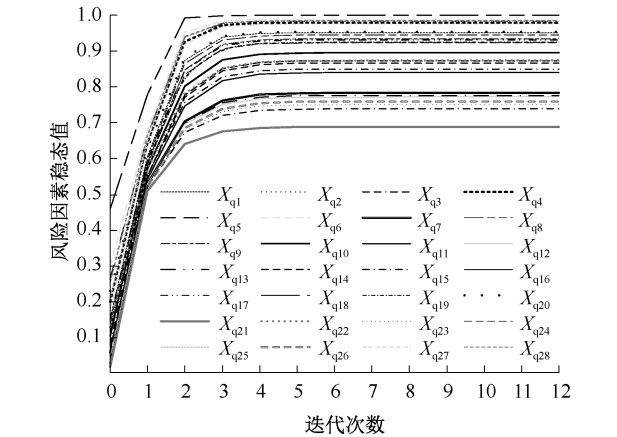


图 6 船舶触碰码头风险因素耦合的动态演化过程
Fig. 6 Dynamic evolution diagram of risk factor coupling of contact in port waters for autonomous ships

在船舶触碰桥梁的因素中,水流影响 X_{b19} 、沟通协作不足 X_{b12} 、未充分评估危险 X_{b6} 、培训不足/经验不足 X_{b10} 和采取避碰措施不当 X_{b7} 是对船舶触碰桥梁影响较大的前 5 个因素,风险因素的稳态值分别为 0.997 4、0.996 4、0.995 5、0.994 5 和 0.979 0,如图 7 所示。

5 防控对策及建议

5.1 码头水域靠离泊场景

根据图 6 所示的智能航行船舶触碰桥梁风险因

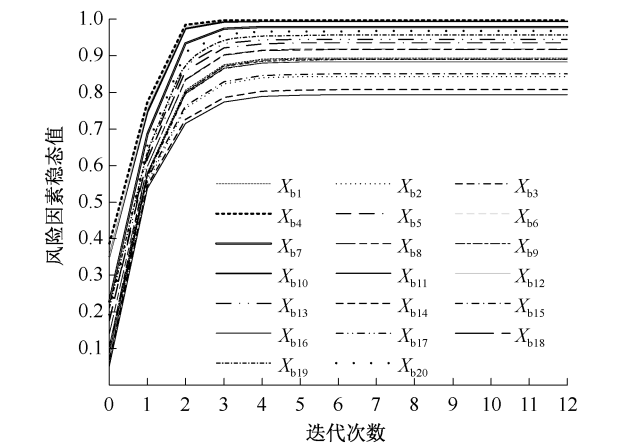


图 7 船舶触碰桥梁风险因素耦合的动态演化过程
Fig. 7 Dynamic evolution diagram of risk factor coupling of contact through bridge areas for autonomous ships

素分析结果,沟通协作不足、采取应急措施不当、船舶操纵不当、风力影响和培训不足/经验不足,导致码头水域航行风险上升的主要诱因。

首先,完善船岸数据交换协议与远程协助流程,畅通信息共享渠道,并通过软硬件升级、船岸联合演练等方式,提升靠离泊作业各参与方在恶劣天气等极端工况下的协同应对能力。其次,集成气象、测流、测深等多源异构传感器,提升船舶的全维感知能力;升级智能算法,深度融合船岸静、动态数据,自主分析码头水域地形特征、外力干扰特性及拖轮助力情况,动态调整靠离泊作业方案,提高船舶在复杂环境中的自适应能力与抗干扰水平。最后,制定触碰风险防控预案,明确人机权限切换的时机、流程和风险阈值,并采用虚拟现实(Virtual Reality, VR)、增强现实(Augmented Reality, AR)等技术手段开展沉浸式训练,使船员和岸基人员充分了解智能航行船舶靠离泊作业的流程规则约束和异常处置方法,提升人机协同水平。

5.2 桥区水域通航场景

根据图 7 所示的智能航行船舶触碰桥梁风险因素分析结果,水流干扰、沟通协作不足、危险评估欠缺等因素的耦合是导致桥区水域航行风险上升的主要诱因。

首先,完善信息共享机制,保障水文、通航等关键信息的实时交互,为动态评估水流形势、优化航行决策提供必要前提。其次,升级桥区感知与辅助决策系统,通过先进探测设备获取精细化的桥区地形、水文、障碍物信息,结合电子海图等外部数据,构建

桥区虚拟环境模型,引入机器学习算法,整合先验知识和实时数据,自主分析通航风险,动态规划最优航线。然后,改进人员培训模式,采用VR、AR等技术营造桥区智能航行场景,使船员通过反复演练掌握复杂工况下的设备操控、应急处置等关键流程,做到险情发生时从容应对。最后,还需完善岸基监管规范和应急预案,明确恶劣环境下的沟通机制、监管重点和响应措施,提升风险预警和应急反应能力。

上述对策的落地实施,还需要海事主管部门牵头制定政策法规和技术标准,明确在环境感知、智能决策、风险评估和人员培训等方面要求,加强对智能航行船舶的全过程安全监管。

6 结 论

1) 在靠离泊过程中,智能航行船舶面临着感知不准确、信息传输中断、决策不合理、动力失控等10类主要风险,可能导致船舶触碰码头;在桥区通航过

程中,存在感知盲区、决策失误、控制失灵、通信中断、人工接管不及时等9类关键风险,极易引发触碰桥梁或航道障碍物事故。

2) 沟通协作不足、风力/水流干扰显著、应急处置不当、危险评估不充分等因素是引发智能航行船舶触碰事故的关键诱因,这些因素涉及智能航行船舶感知、决策、控制、通信等关键控制行为,不同因素间还存在复杂的耦合放大效应。任何风险因素的作用都可能通过级联效应放大其他因素的影响,导致触碰事故。因此,有必要从体系化视角制定全面的事故防控策略。

3) 受限于缺乏真实的智能航行船舶事故数据,文中研究在风险评估、不确定性分析、防控措施优化等方面的工作还有待深化。未来,随着智能航行船舶逐步投入实际应用,可持续跟踪事故数据,优化完善风险分析模型,开展跨学科、多情景的综合评估。

参 考 文 献

- [1] GUCMA L, BATISTA M, PERKOVIĆ M. A probabilistic framework for assessing vessel impact on bridges considering technical failures: insights from the Baltimore accident case study[J]. *Marine Structures*, 2026, 105: DOI: 10.1016/j.marstruc. 2025. 103906.
- [2] WANG Jinhui, ZHOU Yu, ZHANG Shaogang, et al. Societal risk acceptance criteria of the global general cargo ships[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 261: DOI: 10.1016/j.oceaneng. 2022. 112162.
- [3] GOERLANDT F, MONTEWKA J. A probabilistic model for accidental cargo oil outflow from product tankers in a ship-ship collision[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2014, 79(1/2): 130–144.
- [4] WANG Jinhui, ZHOU Yu, ZHUANG Lei, et al. Study on the critical factors and hot spots of crude oil tanker accidents[J]. *Ocean and Coastal Management*, 2022, 217: DOI: 10.1016/j.ocecoaman. 2021. 106010.
- [5] TUNCCEL A L, BESIKCI E B, AKYUZ E, et al. Safety analysis of fire and explosion (F and E) accidents risk in bulk carrier ships under fuzzy fault tree approach[J]. *Safety Science*, 2023, 158: DOI: 10.1016/j.ssci. 2022. 105972.
- [6] UGURLU Ö, YILDLZ S, LOUGHNEY S, et al. Modified human factor analysis and classification system for passenger vessel accidents (HFACS-PV)[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 161: 47–61.
- [7] AYDIN M, ARICI S S, AKYUZ E, et al. A probabilistic risk assessment for asphyxiation during gas inerting process in chemical tanker ship[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 155: 532–542.
- [8] WANG J, PILLAY A, KWON Y S, et al. An analysis of fishing vessel accidents[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2005, 37(6): 1 019–1 024.
- [9] SUI Zhongyi, WEN Yuanqiao, HUANG Yamin, et al. Maritime accidents in the Yangtze river: a time series analysis for 2011–2020[J]. *Accident Analysis & Prevention*, 2023, 180: DOI: 10.1016/j.aap. 2022. 106901.
- [10] MA Laihao, MA Xiaoxue, LAN He, et al. A data-driven method for modeling human factors in maritime accidents by integrating DEMATEL and FCM based on HFACS: a case of ship collisions[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: DOI: 10.1016/j.oceaneng. 2022. 112699.
- [11] MA Laihao, MA Xiaoxue, LAN He, et al. A methodology to assess the interrelationships between contributory factors to maritime transport accidents of dangerous goods in China[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: DOI: 10.1016/j.oceaneng. 2022. 112769.

- [12] KUZU A C. Risk analysis of break-in-two accident of ships using fuzzy DEMATEL method[J]. Ocean Engineering, 2021, 235: DOI: 10. 1016/ j. oceaneng. 2021. 109410.
- [13] SONER O. Application of fuzzy DEMATEL method for analysing of accidents in enclosed spaces onboard ships[J]. Ocean Engineering, 2021, 220: DOI: 10. 1016/ j. oceaneng. 2020. 108507.
- [14] WROBEL K, GIL M, MONTEWKA J. Identifying research directions of a remotely-controlled merchant ship by revisiting her system-theoretic safety control structure[J]. Safety Science, 2020, 129: DOI: 10. 1016/ j. ssci. 2020. 104797.
- [15] FAN Cunlong, MONTEWKA J, ZHANG Di. A risk comparison framework for autonomous ships navigation[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 226: DOI: 10. 1016/ j. ress. 2022. 108709.
- [16] FAN Cunlong, WOBEL K, MONTEWKA J, et al. A framework to identify factors influencing navigational risk for maritime autonomous surface ships[J]. Ocean Engineering, 2020, 202: DOI: 10. 1016/ j. oceaneng. 2020. 107188.
- [17] 秦庭荣, 周歆捷, 何荣杰, 等. 基于 STPA-FCM 模型的自主航行船舶功能系统分析[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(8): 8-14.
- QIN Tingrong, ZHOU Xinjie, HE Xingjie, et al. Analysis of functional systems of MASS based on STPA-FCM model[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(8): 8-14.
- [18] 南希·莱文森[美]. 基于系统思维构筑安全系统[M]. 唐涛, 牛儒, 译. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- LEVESON N. Engineering a safer world: systems thinking applied to safety[M]. TANG Tao, NIU Ru, Translated. Beijing: National Defense Industry Press, 2015.
- [19] 杨佳宇, 段文杰, 李廷文, 等. 基于模糊认知图的水上交通事故涌现分析[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(4): 19-26.
- YANG Jiayu, DUAN Wenjie, LI Tingwen, et al. An analysis of emergence of water traffic accidents based on fuzzy cognitive map[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(4): 19-26.
- [20] 王梦雨, 郭国平, 吴兵. 基于 FCM 的内河一类船长实操考试效能评估[J]. 交通信息与安全, 2017, 35(4): 92-99, 126.
- WANG Mengyu, GUO Guoping, WU Bing. A performance evaluation of practice examination for inland first-grade captains based on fuzzy cognitive maps[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2017, 35(4): 92-99, 126.

作者简介: 付姗姗 (1987—), 女, 湖北武汉人, 博士, 教授, 主要从事水上交通风险防控与韧性提升、极地水域船舶航行安全等方面的研究。E-mail: ssfu@shmtu.edu.cn。

