

海上自主水面船舶避碰能力与可靠性测试的研究现状与展望

周立伟¹, 孙舒婷^{2*}, 徐嘉妮²

(1. 中国船级社 广州分社, 广州 510290; 2. 上海海事大学 商船学院, 上海 200136)

摘要: [目的]为客观和系统地了解海事自主水面船舶(MASS)可靠性测试的现状, [方法]从测试手段、测试技术和评价体系 3 个方面对研究现状进行剖析, 并对未来发展趋势进行探讨, 具体包括: 利用 CiteSpace 和 VOSviewer 对 134 篇相关文献进行可视化分析, 系统梳理船舶避碰能力测试领域的研究方向与发展趋势; 对实船测试、模型测试及虚拟仿真测试三大测试平台的用途、优缺点以及研究现状进行梳理; 深入探讨基于专家知识、随机采样及人工智能的 3 种主流测试场景生成技术的发展趋势、特征对比以及面临挑战; 从数据真实性、场景复杂度、风险性及生成效率 4 个维度归纳评估指标; 在此基础上, 展望未来的研究方向。[结果]结果表明: 虚拟仿真测试具有低成本高覆盖率的优点, 成为主要的测试手段, 基于人工智能的船舶避碰能力测试方法在高风险边缘场景、船舶交互博弈等方面具有发展潜力, 但目前研究仍存在运动模型理想化、缺乏多船动态博弈机制、评价指标单一以及虚实迁移困难等挑战。[结论]基于人工智能的测试场景生成与推演研究对推动 MASS 测试具有重要的研究价值与意义。

关键词: 自主水面船舶; 避碰测试; 场景生成; 虚拟仿真; 评估体系

中图分类号: U675.96; U676.1 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2026.03.05

Research Status and Prospect of Collision Avoidance Capability and Reliability Testing for Maritime Autonomous Surface Vessels

ZHOU Liwei¹, SUN Shuting^{2*}, XU Jiani²

(1. Guangzhou Branch of China Classification Society, Guangzhou 510290, China; 2. Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 200136, China)

Abstract: [Purpose] To objectively and systematically understand the current status of reliability testing of maritime autonomous surface ships (MASS), [Method] the current research status from three aspects: testing methods, testing technologies, and evaluation systems, and discusses the future development trends are analyzed. Specifically, it includes: conducting a visual analysis of 134 related papers using CiteSpace and VOSviewer to systematically sort out the research directions and development trends in the field of ship collision avoidance capability testing; sorting out the uses, advantages and disadvantages, and research status of the three major testing platforms: real ship testing, model testing, and virtual simulation testing; in-depth discussion on the development trends, feature comparisons, and challenges faced by the three mainstream testing scenario generation technologies based on expert knowledge, random sampling, and artificial intelligence; summarizing the evaluation indicators from four dimensions: data authenticity, scene complexity, risk, and generation efficiency; and on this basis, looking forward to future research directions.

收稿日期: 2025-12-11; 修回日期: 2026-01-15

作者简介: 周立伟(1970—), 男, 硕士、高级工程师。研究方向: 船舶检验和安全管理。

通信作者: 孙舒婷(2000—), 女, 硕士研究生。研究方向: 智能船舶虚拟测试场景生成。

E-mail: 202330110039@stu.shmtu.edu.cn

[Result] The results show that virtual simulation testing has the advantages of low cost and high coverage and has become the main testing method. The ship collision avoidance capability testing method based on artificial intelligence has development potential in high-risk edge scenarios and ship interaction games, but the current research still faces challenges such as idealized motion models, lack of multi-ship dynamic game mechanisms, single evaluation indicators, and difficulties in virtual-to-real migration. [Conclusion] The research on testing scenario generation and deduction based on artificial intelligence has important research value and significance for promoting the testing of MASS.

Key words: maritime autonomous surface ship (MASS); collision avoidance test; scene generation; virtual simulation; evaluation system

0 引言

近年来，随着海事自主水面船舶（Maritime Autonomous Surface Ships, MASS）技术的快速发展，国际海事组织（International Maritime Organization, IMO）近年来完成了MASS相关公约法规梳理^[1]，正在积极制订MASS相关规则，2025年已经完成了文本修改，按计划将于2026年上半年通过非强制性规则并进入经验积累期，2028年将开始制定强制性MASS规则，计划于2030年通过并于2032年正式生效实施。为顺应国际行业发展需要，中国船级社（China Classification Society, CCS）持续开展智能船舶技术及规范标准研究^[2]，其他国家也通过船舶项目加速推进自主航行技术发展^[3-4]。

MASS研发的关键技术是自主控制、态势感知和航行决策^[5]，如何准确测试和科学验证MASS避碰能力的安全性已经成为MASS发展的关键要素。

目前船舶避碰能力测试主要包括实船测试、模型测试与虚拟仿真测试3种类型^[6]；实船测试^[7]由于法律监管与高昂成本，仅用于关键试航测试，在测试应用中占比极小；模型测试^[8]可以提供真实的物理反馈，但场景简单，无法复现真实海上多样且复

杂的海况，在测试应用中占比约15%；虚拟仿真测试^[9]凭借低成本、可大规模重复开展且可覆盖极端工况等优势，在测试应用中占比超80%。在虚拟测试场景生成领域，船舶自动识别系统（Automatic Identification System, AIS）数据重构^[10]、随机采样方法^[11]、融合神经网络^[12]和搜索算法^[13]等方法应运而生，提高了测试场景的生成效率。由于目前还没有一种生成满足真实性、复杂性、风险性和高效率等多重特征要求的自主航行决策算法测试场景，因此，对自主航行船舶避碰能力测试平台、技术及评估体系进行研究具有重要意义。

本文研究框架见图1，在第1节通过文献数据集可视化分析船舶避碰能力测试方法的重要性；在第2节总结了场景测试平台的研究现状，对比不同测试方法的优劣势；在第3节重点探讨了虚拟仿真测试中实现船舶避碰能力场景生成需要的测试技术，包括专家知识库、随机采样及人工智能方法；在第4节梳理了评估自主航行避碰能力测试的四大指标维度；在第5节分析了当前面临的挑战以及未来发展趋势，为自主航行船舶避碰能力测试体系研究提供全新的视角和崭新的方向。

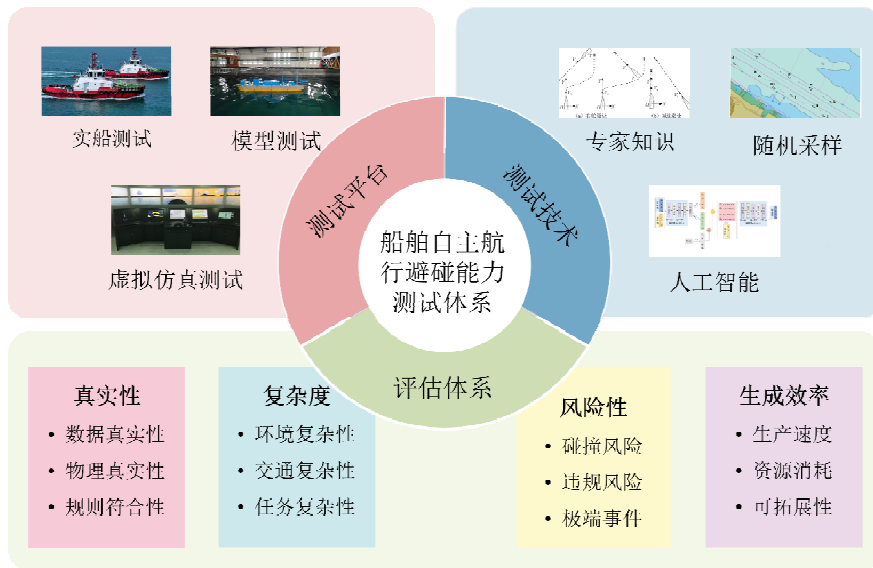


图1 研究框架图

Fig. 1 Research Framework Diagram

1 文献数据收集

通过文献可视化分析, 可以快速准确地把握一个研究领域的整体概况, 了解其发展轨迹、相关问题、研究主题和方法论取向, 从而直观地理解和解读相关信息^[14]。借助科学文献可视化与分析软件CiteSpace和VOSviewer, 通过对134篇文献进行可视化分析, 以科学知识图谱形式呈现过往研究轨迹与当前科研热点, 通过整合有效文献信息, 从而发现研究机会与趋势。

CiteSpace, v. 6.4.R1 (64-bit) Advanced
February 10, 2026, 8:23:11 PM CST
WoS: C:\citespace\data
Timespan: 2018-2026 (Slice Length=1)
Selection Criteria: g-index (k=25), LRF=2.5, L/N=10, LBY=5, e=1.0
Network: N=195, E=638 (Density=0.0337)
Largest CCs: 177 (90%)
Nodes Labeled: 1.0%
Pruning: None
Modularity Q=0.6385
Weighted Mean Silhouette S=0.8409
Harmonic Mean(Q, S)=0.7258
Excluded:

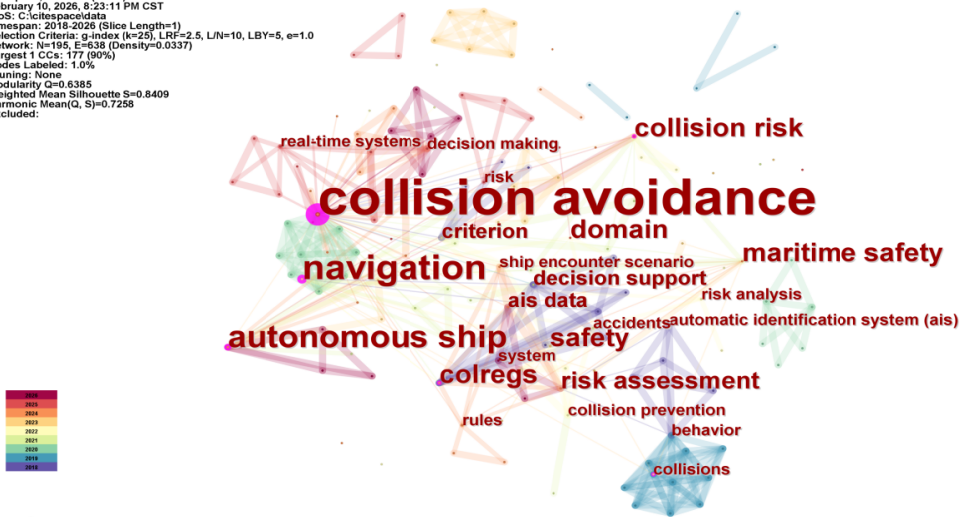


图2 英文文献关键词可视化

Fig. 2 Visualization of English Literature Keywords

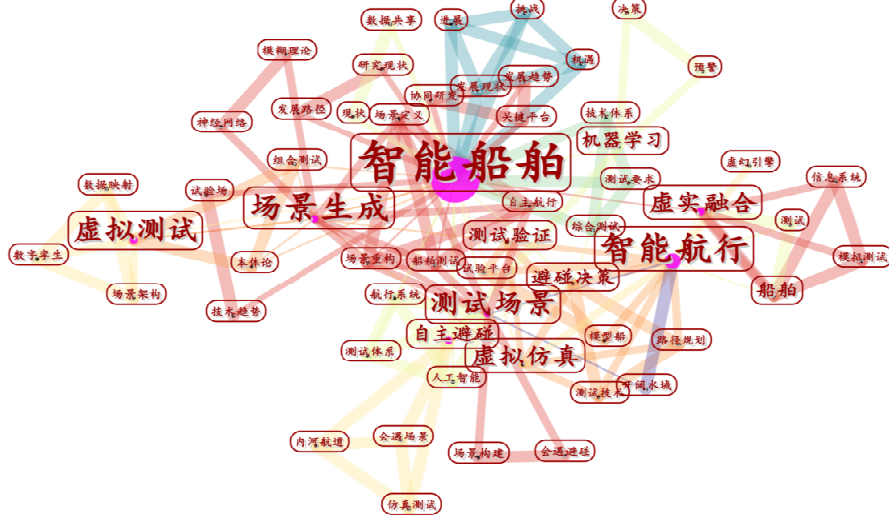


图3 中文文献关键词可视化

Fig. 3 Visualization of Chinese Literature Keywords

2019—2021年, 早期国外研究关键词集中在“碰撞(collisions)”“行为(behavior)”以及“船舶自动识别系统数据(AIS Data)”, 国内研究关键词则侧重“发展现状”与“测试要求”, 可见这一阶段的测试重点在于验证船舶避碰能力是否符合《国际海上避碰规则》(International Regulations for

1.1 关键词演变

利用CiteSpace从文献数据集中提取关键词, 梳理出自主航行船舶避碰能力测试领域研究的发展历史、现状与趋势, 通过节点颜色随时间变化见图2和图3, 总体而言可发现相关研究从静态规则验证向动态场景生成整体演进的清晰态势, 而构建船舶避碰能力测试场景始终是推动MASS走向现实的重要因素。

Preventing Collisions at Sea, COLREGs), 而测试多处于理想化阶段; 2022—2024年随着研究不断深入, 国内外研究关键词开始向“智能船舶”“自主避碰”“风险评估”聚拢, 单一的规则验证已无法满足自主船舶航行测试的需求; 2025年以来国内外研究趋向一致, 国外研究关键词多聚集“实时系统

（Real-Time Systems）”“船舶会遇场景（Ship Encounter Scenario）”以及“船舶避碰（Collision Avoidance）”，国内研究关键词聚集“场景生成”“会遇避碰”以及“神经网络”，表明传统的场景测试难以覆盖长尾危险场景，利用机器学习、深度强化学习等人工智能前沿算法动态生成多样化、高风险、高仿真的边缘场景已成为目前和未来的研究热点。

1.2 相关技术演化

利用VOSviewer工具将自主航行船舶避碰能力测试相关技术按时序进行可视化叠加，图4中展示了不同技术随时间的发展脉络。近年来，“计算机模拟”“航行安全”“多船会遇”等关键词日益突出，表明测试场景生成领域正从传统的数值模拟向数据驱动与实时智能计算系统转变。早期阶段“AIS数据”保障了船舶基础运动特征的构建；中期阶段“贝叶斯网络”表明研究技术从数值建模向概率统计模型转变；近期阶段基于人工智能算法对海事场景中的智能体进行交互演化建模，以提升测试精度和效率。“交叉验证”“评判标准”则是实现避碰算法从理论走向实际的关键验证技术。

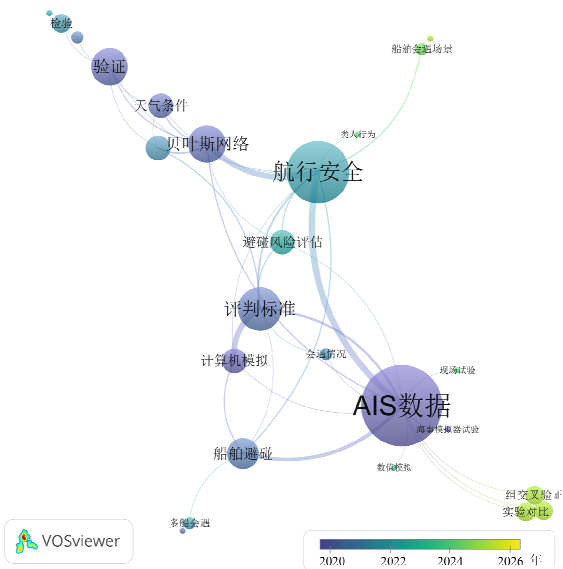


图4 关键技术聚类图

Fig. 4 Key Technology Clustering Diagram

综上，自主航行船舶测试场景生成相关领域的研究自2019年开始，2024年快速发展，2025年达到了高峰，研究重点从早期的静态场景规则符合性验证，逐渐跨越到避碰能力动态场景生成；而测试场景生成技术正从传统的数值模拟向数据驱动以及智能计算系统转变；目前，研究内容高度集中，MASS的航行决策测试以船舶避碰能力测试为主，而利用人工智能算法动态生成多样且真实的高风险场景已经成为该领域未来发展的趋势。为了更客观、系统

地回应文献数据分析揭示的发展趋势，本文分别从测试平台分类(第2节)、核心场景生成测试技术(第3节)以及测试场景评估体系(第4节)进行深入探讨，以期推进MASS避碰能力测试领域的研究发展。

2 测试平台分类

由于实船试验实施、监管和协调管理的难度大、成本高且难以覆盖长尾危险场景，IMO MASS规定智能船舶测试采用“由虚到实、逐级递进”分阶段开展。现有的船舶测试平台主要包括3种类型：1) 实船测试在真实海况环境下进行试验，验证智能船舶感知、决策、控制系统的综合能力；2) 模型测试则利用物理船舶模型，通过物体在真实或近真实的条件下航行，评估船舶避碰策略的安全性、可靠性和适应性；3) 虚拟仿真测试主要结合虚拟仿真、数字孪生等技术构建虚拟测试场景，针对船舶避碰算法实现功能验证。

2.1 实船测试

实船测试阶段，包括实船操纵性能测试、航线自主规划、智能决策避碰、自动靠离泊和硬件可靠性测试等。

为证明避碰系统在替代驾驶员进行避碰决策的可靠性，WANG等^[7]提出了一种新型海上自主航行决策系统，并采用300TEU集装箱船进行实船试验；韩国现代重工集团建造的18万m³超大型LNG运输船，在2022年6月首次应用自主技术完成跨洋航行，其搭载的HiNAS 2.0智能系统可以辅助船舶自行应对速度控制和避碰等多种突发情况^[3]。LOU等^[15]在小型无人艇（Unmanned Surface Vessel, USV）上验证了避碰模型的泛化能力。WU等^[16]通过实船测试，证明了VFILOS控制器在高速目标跟踪中的稳定性，为高动态环境下的避碰提供了控制基础。

与此同时，实船测试的面向对象应用正从商船向特种工程船转变。日本Soleil号渡轮实现的240 km自主航行及自动靠泊，提高了自主航行技术在长途运输中的发展能力^[4]；在特种作业场景下，LIU等^[17]面向ASD拖轮，设计智能护航控制系统，并通过实船测试，验证了无模型自适应控制在复杂港口工况下的安全性。韩国三星重工业株式会社利用300吨级拖船SAMSUNG T-8，完成了远程自主避碰实验，增加了自主船舶的作业边界^[3]。

由于实船测试环境较为单一，且目前大多数实船测试局限于低密度的单船会遇场景，缺乏多船交互的复杂性，因此，未来实船测试研究应聚焦多智能体协同决策机制，推动船舶自主避碰技术从实验性海试向常态化、规模化应用转变。

2.2 模型测试

模型测试作为一种较低成本、高效率且具备真

实水动力特性的测试方法,可在相对可控的环境下评估操纵性与控制执行性能,适合验证浅水效应、受限水域水动力影响等仿真难以精确覆盖物理问题。

在自主船舶避碰能力测试系统的研发中,模型测试需要将复杂的算法转移到物理硬件并处理实时响应,PERERA等^[8]通过缩尺船舶模型在受控水域进行双船会遇实验,成功验证了智能引导逻辑在物理模型上的可行性,算法在处理符合COLREGs的避碰操作。物理模型测试的另一核心是可以实现仿真测试难以模拟的非线性动力学与传感器感应。HAN等^[18]通过ARAGON无人艇物理平台,进行了多传感器融合实测,指出物理传感器的原始数据质量决定避碰的安全性。PIETRZYKOWSKI等^[19]引入无人机感知扩展船舶的物理视野,采用自动协商机制减少船舶避碰风险,强调自动通信模块在避碰系统中的物理实现。SHEN等^[20]通过1.0:5.8等比列缩尺物理模型试验,验证了基于深度强化学习的船舶多船复杂场景避碰算法。

尽管缩尺模型能模拟水动力特性,但在极端浪涌和风载荷下的动力响应与全尺寸实船之间仍存在物理差异,易导致测试结果存在偏差。未来随着大量模型数据与实船数据的比照和智能学习,这种差异会大幅度减少,亦即模型测试方法的可靠性将大幅提升。

2.3 虚拟仿真测试

因其低成本与高覆盖的优势,虚拟仿真测试作为智能避碰算法开发与验证平台,已成为自主船舶避碰能力评估的重要技术手段,该领域研究目前主要致力于提高仿真的保真度、处理复杂多因子的能力以及智能化水平。

PEDERSEN等^[9]基于数字孪生的系统化验证框架,使用贝叶斯优化与高斯过程回归进行建模,找到船舶避碰系统的薄弱点。TEITGEN等^[21]引入了碰撞网格与近端策略优化(Proximal Policy Optimization, PPO)强化学习算法,解决了密集交通流下的路径规划问题,平衡了避碰安全性与航行效率。为了提升船舶避碰能力测试的现实应用,研究者们构建高保真的测试场景,郑茂等^[22]提出了一种基于AIS-雷达多源数据融合的内河航道避碰会遇场景参数化建模方法,通过实测数据提取交通流密度、航迹、航速最近会遇距离(Distance of Closest Point of Approaching, DCPA)与最近会遇时间(Time of Closest Point of Approaching, TCPA)等关键特征要素,构建了能够自动生成符合内河实际航行特征的船舶对遇、追越与交叉相遇等测试场景的算法;刘佳仑等^[23]通过划分多种船舶会遇局面,验证了避碰决策在《国际海上避碰规则》下的合规性。DAI等^[24]则融合AIS历史数据与数字孪生技术,构建了

覆盖环境感知、运动控制、规则合规及系统耦合等多方面的虚实融合的测试场景,并覆盖环境感知、运动控制、规则合规及系统耦合等多方面。

虚拟仿真测试的研究取得显著进展,但现有仿真对极端海况下的水动力模拟不够精准,且传感器噪声模型过于理想,在复杂场景下,深度强化学习算法与仿真环境的同步性仍需优化。未来,虚拟仿真测试应能动态生成多样性测试场景,实现船舶避碰能力的自适应、对抗性验证。

3 核心场景生成测试技术

如表1所示,目前,自主航行船舶避碰测试场景生成的研究技术分为三大方面^[25]:1)基于专家知识的场景生成方法,将场景相关特征量化为约束,根据避碰规则中的会遇态势描述构建场景库,使用场景见表1;2)基于随机采样的场景生成方法,无法控制场景中参与船舶航行行为,适用于非自定义场景,根据数据分布生成自主航行测试场景的初始状态;3)基于人工智能的场景生成方法,采用人工智能技术生成具有相同特征的船舶航行行为,可大大泛化场景多样性,增加高风险场景。

表1 3种避碰能力测试技术对比

Tab. 1 Comparison of Three Collision Avoidance Capability Testing Technologies

方法	对标特征	适用场景
基于专家知识的场景生成	保真度、可控性	真实场景库
基于随机采样的场景生成	多样性	非自定义场景
基于人工智能的场景生成	可转移性、效率	已知场景规则,增加场景泛化性

3.1 专家知识

基于专家知识的避碰能力测试场景生成方法主要基于对场景系统内部变化规律和专业规则,通过机理建模与专家经验构建典型场景。

COLREGs定义了船舶航行过程中面对的对遇、交叉、追越等会遇态势局面。COCKCROFT等^[26]构建了专家知识库,为场景生成提供了船舶转向和DCPA的阈值设定。JOHANSEN等^[27]构建船舶数量、环境参数与航行规则间的映射关系,形成避碰场景库。孙峰等^[28]通过计算船舶态势关系,将抽象的避碰规则转化为可量化的行动准则。NAKAMURA等^[10]通过对比自动避碰系统的决策轨迹与实际操纵数据,利用人类专家经验校准测试场景,使生成的测试场景更具有客观真实性。

基于专家知识的避碰能力测试场景生成方法受限于人工经验,主观性强且鲁棒性低,无法覆盖长

尾风险、多船交互、狭窄水道复杂航区的测试要求。

3.2 随机采样

基于随机采样的避碰能力测试场景生成方法将复杂的船舶会遇态势场景抽象为多维参数空间，利用AIS历史数据的概率分布，通过随机采样算法在参数空间中采样，构建大量真实性的测试用例。

早期的研究者主要依赖于船舶历史航行数据，通过随机性提高场景生成的丰富度。ZHU等^[29]提出了一种基于AIS统计特征的随机采样方法，通过提取老铁山水道通行船舶的航速、航向及DCPA分布，利用蒙特卡罗方法随机生成虚拟场景，该方法虽然保证生成的场景符合客观规律，但由于随机采样的效率低下，产生大量冗余的安全场景。为解决随机采样的盲目性，BOLBOT等^[30]提出一种结合Sobol序列采样、规则过滤、多维风险向量建模与k-means聚类的船舶避碰系统高危测试场景自动生成技术，既保证场景覆盖率，又减少了测试场景的总数，提高场景生成的效率。为增加多船会遇场景生成的准确率，CHEN等^[31]提出了一种基于组合测试的场景生成框架，结合时空复杂度优化，确保可以全面覆盖多船行为参数交互。

船舶避碰能力测试场景不仅要追求全覆盖率高，更要注重高风险场景生成的效率。SHI等^[11]提出了NASE模型，在自然采样的基础上对船舶行为进行对抗性调整，主动微调船舶操纵增加碰撞风险，提升高风险场景生成效率。陈立家等^[32]提出了一种基

于高斯混合模型的重要性采样方法，增强高风险参数生成，结合成对独立组合测试（Pairwise Independent Combinatorial Testing, PICT）组合测试与模糊综合评价，实现了对高风险避碰测试场景的高效生成与风险分级。为确保高风险测试场景生成的真实性，ZHOU等^[33]建立AIS与雷达多源信息融合的数据采集系统，基于概率分布生成随机数，构建航道狭窄、弯曲且船舶密度大的内河航道测试场景。WANG等^[34]提出基于AIS数据驱动、融合动态拓扑演化建模与TOPSIS-EWM多指标综合评价的船舶会遇场景生成与复杂度量化分析框架，提高多船交互的复杂度。

尽管基于随机采样的避碰能力测试场景生成方法在测试效率与场景覆盖率方面有所提升，但仍存在以下不足：1) 由于高风险或极端的船舶碰撞危险场景的数据集较少，而大多数方法依赖于AIS历史数据来确定采样分布，测试集存在盲区；2) 目前随机采样的方法多集中于生成船舶的初始运动参数，未考虑船舶运动过程中的动态风险博弈。

3.3 人工智能

基于人工智能的避碰能力测试场景生成方法是利用机器学习、深度学习等人工智能技术，从海量自然航行数据或规则约束中，提取、重构或演化出具有特定时空特征、动态交互行为及碰撞风险梯度等的虚拟测试场景，表2为现有文献中避碰测试场景生成方法的特征对比。

表 2 现有文献中避碰测试场景生成方法的特征对比

Tab. 2 A Comparative Analysis of the Characteristics of the Methods for Generating Collision Avoidance Test Scenarios in the Existing Literature

年份	文献	场景来源 真实性	高风险场景 生成能力	会遇态势 覆盖度	场景生成 效率	场景动态 交互特性	多船场景 建模能力	COLREGs 规则一致性
2023	[11]	√	√	△	√	√	√	△
2024	[34]	√	√	√	√	×	√	√
2025	[32]	√	√	△	√	△	×	√
2025	[37]	√	√	×	√	√	×	√
2025	[13]	√	√	△	√	×	√	×
2025	[39]	√	√	√	√	×	×	√
2026	[12]	√	√	√	√	√	√	√

注：√为该文献对该指标有明确实现；△为部分实现；×为未涉及。

在场景提取方面，目前研究人员主要从AIS数据中提取动态时空特征向量，并对船舶的运动轨迹进行数字量化。XIN等^[35]结合动态时间规整的轨迹距离度量与OPTICS聚类算法，构建船舶动态航行的海事交通场景库。WANG等^[12]在此基础上，按复杂度与风险等级筛选场景，优先选择高风险场景进行算法测试，动态、完整地反映船舶间的时空交互与运动特征，为船舶避碰算法提供高保真测试环境。

近年来，越来越多的研究者将生成式模型应用于智能船舶自主避碰测试场景当中。刘佳仑等^[36]通过构建基于反向传播神经网络的场景库压缩模型，实现输入风险等级与会遇态势即可自动生成多样化、风险可区分的船舶测试场景。蒋晨星等^[37]提出了一种融合自注意力序列生成对抗网络与安全距离约束的船舶追越场景泛化生成方法，提高目标船操纵行为的真实性。为了解决高风险场景数据稀缺等问题，

ZHU等^[25]提出一种基于强化学习的高风险测试场景自适应生成算法, 最大化寻找高风险边缘场景。此外, 研究者们利用鲸鱼优化算法^[13], 将碰撞危险度和场景重要度作为适应度函数进行优化, 实现船舶避碰的高风险边缘测试场景的高效生成。

与此同时, 测试场景的生成更注重船舶行为、航行环境与规则约束的内在联系。HE等^[38]根据COLREGs手动划分为16碰撞场景, 引入模型预测控制 (Model Predictive Control, MPC) 框架, 并进行了静态障碍物和动态障碍物的避碰测试。孙舒婷等^[39]提出一种基于条件变分自编码器 (Conditional Variational Autoencoder, CVAE) 的船舶碰撞风险测试场景生成方法, 结合到COLREGs和模糊规则库划分船舶会遇态势局面和船舶碰撞风险等级, 提高可控碰撞风险会遇态势场景出现的概率。LOU等^[15]提出了一种基于深度确定性策略梯度 (Deep Deterministic Policy Gradient, DDPG) 的“预测-决策”避碰模型, 采用了随机障碍物的环境进行强化学习训练, 并通过实船测试验证鲁棒性。SANDVIK等^[40]通过航向决策和遗传算法速度优化动态生成符合COLREGs约束的高现实性船舶测试场景。

与传统的专家知识和随机采样的场景生成方法相比, 人工智能方法在生成效率、场景真实性、边缘场景搜索等方面有所提升。当前, 场景生成中的动态交互成为避碰能力测试场景生成的关键, 这要求多智能体能够在环境扰动下的实时博弈, 因此, 使用强化学习等相关算法是基于人工智能的场景生成方法的研究热点, 但这种类型的方法尚未在海事领域得到广泛应用。

4 测试场景评估指标体系

在航海领域, 评估常见于对航行安全的研究, 针对自主避碰算法测试结果的评估研究仍处于初步发展过程中。建立评估方法的基础之一是建立评估指标体系, 目前, 自主船舶碰撞能力测试场景生成的评估指标体系主要分为数据真实性、场景复杂度、场景风险性和场景生成效率4类。

1) 数据真实性是指生成数据在视觉、几何结构、物理属性等方面与现实世界的高度一致性。在自主船舶航行领域, 生成的测试场景数据需符合客观世界物理运动规律以及船舶航行COLREGs要求见表3。为提升虚拟环境的真实性, ZHOU等^[41]提出结合泰森多边形与泊松圆盘采样的地图生成算法, 以模拟高度真实的海岸线和地理约束。此外, COLREGs规则作为防止、避免船舶之间碰撞的海上交通规则, 虚拟场景也应具备规则符合性。CHANG等^[42]将现代船舶的避碰能力与COLREGs要求建立量化映射, 用于评估MASS在特定场景下的规则符合性。

表3 数据真实性

Tab. 3 Data Authenticity

子维度	指标定义与计算方法
数据真实性	生成场景与历史数据的分布一致性, 通过KL散度衡量
物理真实性	船舶动力学与物理模型的误差, 计算位置、航速、航向的均方根误差
规则符合性	符合COLREGs规则的比例, 通过形式化验证计算合规率

2) 场景复杂度是指场景中客观存在的道路拓扑结构、交互影响及交通规则与约束等场景的静态复杂程度, 是区分安全测试场景与高风险边缘场景的关键评估指标见表4。周正宇等^[43]从船舶数量、岸线分布以及可航水域分布方面量化测试场景的复杂度。王天魁等^[44]针对场景要素组合复杂度及场景发生危险概率, 将智能船舶航行测试场景分为一般场景、典型场景和极端场景。

表4 场景复杂度

Tab. 4 Complexity of the Scene

子维度	指标定义与计算方法
环境复杂性	综合气象、能见度、障碍物密度的加权评分
交通复杂性	基于船舶密度、速度差异、航向冲突角的熵值度量
任务复杂性	多目标协同 (避碰、路径跟踪、节能) 的帕累托前沿距离

3) 场景风险性主要是指船舶航行风险, 复杂多变的海上航行环境是导致航行危险发生的主要因素之一, 包括碰撞风险、违规风险以及极端事件, 具体见表5。

表5 场景风险性

Tab. 5 Riskiness of the Scene

子维度	指标定义与计算方法
碰撞风险	基于DCPA (最近会遇距离)、TCPA (最近会遇时间) 的概率模型
违规风险	规则违反频率与严重性加权评分
极端事件	生成场景中包含极端条件的比例

对船舶碰撞风险进行评估是构建船舶避碰能力测试场景的关键。LI等^[45]考虑船舶距离因素, 基于D-S证据理论对船舶碰撞风险进行评估。GANG等^[46]考虑船速比因素, 利用支持向量机计算 (Support Vector Machine, SVM) 船舶碰撞风险指数。ZHAO等^[47]综合考虑距离、船速和相对方位等因素, 基于实体关系模型 (Entity-Relationship Model, ERM) 与层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 方法

对碰撞风险进行精确评估。MARINO等^[48]考虑TCPA、DCPA、船舶密度、会遇类型和其他环境因素，计算评估船舶碰撞风险。

4) 场景生成效率是指在有限的计算资源和时间成本下，最大化生成高风险边缘场景的能力。包括生成速度、资源消耗以及可扩展性，见表6。传统的穷举法或盲目随机采样易导致“维度爆炸”，生成大量无测试价值的安全场景。陈立家等^[32]通过数据驱动与重要性采样结合，生成高风险区间的虚拟测试场景占比较大。

表 6 场景生成效率

Tab. 6 Generation Efficiency of the Scene

子维度	指标定义与计算方法
生成速度	单位时间生成的合规场景数量 (场景/秒)
资源消耗	CPU/GPU 内存占用率与计算时间占比
可扩展性	分布式集群下的加速比(多节点效率)

5 结论

本文首先从自主船舶航行功能测试出发，系统地分析智能船舶避碰能力测试方法，对各类测试场景生成技术、研究进展和目前不足进行了归纳、分析与对比，同时对避碰能力测试场景的评估指标体系进行了总结。从前文对场景生成的研究现状综述可知，尽管当前自主船舶避碰能力测试方法研究已经取得了一定进展，但在仍存在4个不足。

1) 船舶操纵性建模过于简单。大多数场景未融入船舶运动控制的不确定性，船舶航行过程中，如果不考虑船舶受到的水动力干扰，导致测试结果对控制误差较为敏感，难以反映实际操纵过程中的安全性。现有测试场景的气象水文条件过于理想，假定的流动参数多保持不变，大多数没有考虑风浪流的干扰。

2) 测试场景与实际存在差异。现实中船舶操纵决策存在延迟，而目前研究中目标船大多为匀速直航，测试场景无法真实全面反映船实船之间的真实博弈与交互，难以复现极端海况。尽管基于人工智能的测试场景生成方法发展迅速，但现有模型中多智能体协同与对抗机制不足，极少考虑策略演化与协同。

3) 评价指标过于单一，缺乏统一的测试标准。测试场景生成系统的效能评价指标体系是保证MASS决策系统测试有效性和安全性的重要依据，目前，国内外虽然已经开展了一些面向MASS的测试体系与平台设计方案的评价探讨，但是在评价指标选取与测试流程设定上缺乏统一规范，导致不同方法之间的测试结果难以横向对比。

4) 虚拟仿真向现实迁移阻碍较大。由于航行与

感知模型过于理想化，忽略了现实环境中存在传感器噪声与通信延迟问题，仿真环境下的测试性能难以迁移到真实船舶上。

针对以上不足，结合现有研究进展与发展趋势，实现高覆盖性、高真实性的动态场景生成，并构建闭环验证平台，有望成为研究热点，未来的自主船舶避碰能力测试场景生成研究还应关注以下5个方面内容。

1) 提升测试场景的多样性与高保真度。基于雷达、AIS、气象海况、电子海图/航道图等数据，研究多源异构数据的特征提取方法；以多船航行轨迹为研究对象，研究融合COLREGs和航行环境的场景解构方法，抽取场景语义与时空信息；异构特征时空融合机制与交互建模。深入研究多源异构特征信息的空间同步和时间同步技术，提高智能系统在复杂环境下的感知与测试精度。

2) 基于多智能体博弈的全局态势推演模型。针对航行场景船与船之间、船与环境之间的动态交互问题，研究基于混合博弈框架，将船舶建模为独立智能体，环境要素作为动态背景智能体，构建博弈框架下的多智能体交互模型，研究开发深度强化学习驱动的场景动态推演算法，构建规则约束优化与多智能体协同对抗训练机制，实现船舶、环境与规则要素之间的时空耦合交互，促使智能体在规则遵守与避碰决策中涌现类人决策行为。

3) 构建多维度的场景效能量化指标体系。从数据真实性、场景复杂度、场景风险性、场景生成效率等多维度量化指标体系，定量评估测试场景的复杂程度，评估生成的避碰能力测试场景在不同航行条件下的全方位表现，评估极限情况、事故模拟及故障响应能力，量化场景生成速度、更新频率等生成效率，确保场景能够及时响应变化并适应大规模测试需求。

4) 研究搭建集成虚拟仿真、自动化测试与验证功能的“避碰能力场景生成原型系统”，其主要任务包括集成船舶动力学、气象海况模拟、船舶行为预测、交通流模拟等多种仿真技术，通过全面引入现实扰动因素，缩小仿真与现实之间的数据误差，实时优化场景的配置与参数，设计场景效能评估方法，结合量化指标体系与场景生成系统，试验验证不同场景生成方式的优缺点，并优化生成算法、系统参数及测试流程。

5) 积极推动IMO有关MASS规则下实施细则的出台。IMO已经开展工作主要集中在提出性能标准要求，而各国的研究还处于百家争鸣百花齐放的局面，亟须在推动规则落地方面出台统一的、细化的具有高度操作性的指南，才能统一要求和做法，实现不同的场景构建策略、测试验证方法、评价指标

体系的一致性, 才能实现最终结果的全球互认。

总而言之, 目前自主水面船舶避碰能力与可靠性测试以虚拟仿真测试作为主要平台, 基于人工智能的测试场景生成方法在高风险边缘场景、船舶交互博弈等方面具有发展潜力, 尽管现阶段面临船舶操纵性建模简单、未考虑多船动态博弈机制、缺乏统一的测试标准以及虚拟仿真向现实迁移阻碍较大等难题, 但随着多源异构数据时空同步融合、基于多智能体博弈全局态势推演等技术深入, 以上难题将在未来逐步攻克。因此, 基于人工智能的测试场景生成与推演研究的推动MASS测试具有重要的研究价值与意义。

参考文献:

- [1] 刘晨虹, 王义雯. 现行国际海事规则对 MASS 的适用性研究[J]. 世界海运, 2025, 48(5): 14-26.
LIU C H, WANG Y W. Research on the Applicability of Current International Maritime Rules to MASS[J]. World Shipping, 2025, 48(5): 14-26.
- [2] 施文煜, 顾一清, 程陈, 等. 智能船舶测试验证研究现状与展望[J]. 船舶工程, 2025, 47(12): 52-61.
SHI W Y, GU Y Q, CHENG C, et al. Research Status and Prospects of Intelligent Ship Testing and Verification[J]. Ship Engineering, 2025, 47(12): 52-61.
- [3] 王思佳. 韩国智能船舶发展路线图[J]. 中国船检, 2024(10): 48-53.
WANG S J. Roadmap for the Development of Smart Ships in South Korea[J]. China Ship Survey, 2024(10): 48-53.
- [4] 王思佳. 日本智能船舶发展路线图[J]. 中国船检, 2024(9): 50-53.
WANG S J. Roadmap for the Development of Intelligent Ships in Japan[J]. China Ship Survey, 2024(9): 50-53.
- [5] 李永杰, 张瑞, 魏慕恒, 等. 船舶自主航行关键技术研究现状与展望[J]. 中国舰船研究, 2021, 16(1): 32-44.
LI Y J, ZHANG R, WEI M H, et al. State-of-the-Art Research and Prospects of Key Technologies for Ship Autonomous Navigation[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2021, 16(1): 32-44.
- [6] CAO X, WANG Z, ZHU Y, et al. A Review of Research on Autonomous Collision Avoidance Performance Testing and an Evaluation of Intelligent Vessels[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(8): 1570.
- [7] WANG S, ZHANG Y, ZHANG X, et al. A Novel Maritime Autonomous Navigation Decision-Making System: Modeling, Integration, and Real Ship Trial[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 222: 119825.
- [8] PERERA L P, FERRARI V, SANTOS F P, et al. Experimental Evaluations on Ship Autonomous Navigation and Collision Avoidance by Intelligent Guidance[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2015, 40(2): 374-387.
- [9] PEDERSEN T A, GLOMSRUD J A, RUUD E-L, et al. Towards Simulation-Based Verification of Autonomous Navigation Systems[J]. Safety Science, 2020, 129: 104799.
- [10] NAKAMURA S, OKADA N. Development of Automatic Collision Avoidance System and Quantitative Evaluation of the Manoeuvring Results[J]. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2019, 13(1): 133-141.
- [11] SHI J, WANG S, YUAN Q, et al. Generation of Naturalistic and Adversarial Sailing Environment (NASE) for Intelligent Test of Autonomous Ships[J]. Ocean Engineering, 2023, 285: 115438.
- [12] WANG W, LIU K, CHEN L, et al. Dynamic Traffic Encountering Scenario Generation for Testing of Ship Collision Avoidance Algorithm[J]. Ocean Engineering, 2026, 345: 123691.
- [13] 李诗杰, 李佳林, 刘佳仑, 等. 基于启发式搜索的船舶会遇测试场景生成优化方法[J]. 中国造船, 2025, 66(1): 134-145.
LI S J, LI J L, LIU J L, et al. Optimisation Method for Ship Encounter Test Scenario Generation Based on Heuristic Search[J]. Shipbuilding of China, 2025, 66(1): 134-145.
- [14] HAN D, CHEN H, SONG G, et al. Mapping the Landscape of Ship Berthing Research: a Bibliometric Analysis and Literature Review over Two Decades[J]. Ocean & Coastal Management, 2023, 242: 106730.
- [15] LOU M, YANG X, HU J, et al. Design and Field Test of Collision Avoidance Method With Prediction for USVs: a Deep Deterministic Policy Gradient Approach[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2025, 12(3): 3363-3672.
- [16] WU N, FAN Y, WANG R, et al. Development and Field Testing of an Unmanned Surface Vehicle System for Guidance Control and Target Tracking[J]. Ocean Engineering, 2025, 316: 119924.
- [17] LIU J, XU C, LI S, et al. Towards Future Autonomous Tugs: Design and Implementation of an Intelligent Escort Control System Validated by Sea Trials[J].

- Advanced Engineering Informatics, 2025, 65: 103116.
- [18] HAN J, CHO Y, KIM J, et al. Autonomous Collision Detection and Avoidance for ARAGON USV: Development and Field Tests[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(6): 987-1002.
- [19] PIETRZYKOWSKI Z, WOLEJSZA P, NOZDRZYKOWSKI L, et al. The Autonomous Navigation System of a Sea-Going Vessel[J]. Ocean Engineering, 2022, 261: 112104.
- [20] SHEN H, HASHIMOTO H, MATSUDA A, et al. Automatic Collision Avoidance of Multiple Ships Based on Deep Q-Learning[J]. Applied Ocean Research, 2019, 86: 268-288.
- [21] TEITGEN R, MONSUEZ B, KUKLA R, et al. Dynamic Trajectory Planning for Ships in Dense Environment Using Collision Grid with Deep Reinforcement Learning[J]. Ocean Engineering, 2023, 281: 114807.
- [22] 郑茂, 丁世淦, 兰加芬, 等. 内河航道避碰测试会遇场景建模方法研究[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(5): 121-32.
- ZHENG M, DING S G, LAN J F, et al. Study on Scenario Modeling Method for Collision Avoidance Test in Inland Waterway[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(5): 121-32.
- [23] 刘佳仑, 杨帆, 谢玲利, 等. 面向智能航行避碰决策与规划的虚拟仿真测试技术研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(8): 1780-1789.
- LIU J L, YANG F, XIE L L, et al. Research on Virtual Simulation Testing Technology for Intelligent Navigation Collision Avoidance Decision-Making and Planning[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(8): 1780-1789.
- [24] DAI Y, HE Y, ZHAO X, et al. Testing Method of Autonomous Navigation Systems for Ships Based on Virtual-Reality Integration Scenarios[J]. Ocean Engineering, 2024, 309: 118597.
- [25] ZHU F, NIU Y, WEI M, et al. A high-Risk Test Scenario Adaptive Generation Algorithm for Ship Autonomous Collision Avoidance Decision-Making Based on Reinforcement Learning[J]. Ocean Engineering, 2025, 320: 120344.
- [26] COCKCROFT A N, LAMEIJER J N F. Guide to the Collision Avoidance Rules[M]. London: Elsevier, 2003.
- [27] JOHANSEN T A, PEREZ T, CRISTOFARO A. Ship Collision Avoidance and COLREGS Compliance Using Simulation-Based Control Behavior Selection With Predictive Hazard Assessment[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2016, 17(12): 3407-3422.
- [28] 孙峰, 蔡玉良, 马吉林. 船舶智能避碰策略测试方法与指标研究[J]. 交通信息与安全, 2019, 37(5): 84-93.
- SUN F, CAI Y L, MA J L. A Study of Test Methods and Indicators for Marine Intelligent Anti-Collision Strategy[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2019, 37(5): 84-93.
- [29] ZHU F, ZHOU Z, LU H. Randomly Testing an Autonomous Collision Avoidance System with Real-World Ship Encounter Scenario from AIS Data[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(11): 1588.
- [30] BOLBOT V, GKEREKOS C, THEOTOKATOS G, et al. Automatic Traffic Scenarios Generation for Autonomous Ships Collision Avoidance System Testing[J]. Ocean Engineering, 2022, 254: 111309.
- [31] CHEN L, WANG K, LIU K, et al. Combinatorial-Testing-Based Multi-Ship Encounter Scenario Generation for Collision Avoidance Algorithm Evaluation[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2025, 13(2): 338.
- [32] 陈立家, 刘岩植, 许毅, 等. AIS数据驱动的船舶智能避碰测试场景构建方法[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2025, 49(1): 195-202.
- CHEN L J, LIU Y Z, XU Y, et al. Construction Method of Intelligent Collision Avoidance Test Scene for Ships Based on AIS Data-Driven[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2025, 49(1): 195-202.
- [33] ZHOU H M, ZHENG M, CHU X M, et al. Scenario Modeling Method for Collision Avoidance Testing in Inland Waterway[J]. Ocean Engineering, 2024, 298: 117192.
- [34] WANG W, LIU K, HUANG L, et al. Generation and Complexity Analysis of Ship Encounter Scenarios Using AIS Data for Collision Avoidance Algorithm Testing[J]. Ocean Engineering, 2024, 312.
- [35] XIN X, LIU K, YU Y, et al. Developing Robust Traffic Navigation Scenarios for Autonomous Ship Testing: an Integrated Approach to Scenario Extraction, Characterization, and Sampling in Complex Waters[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2025, 178: 105246.
- [36] 刘佳仑, 刘东豪, 李诗杰, 等. 面向智能航行测试的船舶会遇场景案例生成方法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2025, 53(4): 15-21.
- LIU J L, LIU D H, LI S J, et al. Ship Encounter Scenario Case Generation Method for Intelligent

- Navigation Testing[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2025, 53(4): 15-21.
- [37] 蒋晨星, 张新宇, 郑康洁, 等. 面向自主避碰测试的船舶追越场景泛化生成方法[J/OL]. [2025-06-03]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04271>.
- JIANG C X, ZHANG X Y, ZHENG K J, et al. Generalization Generation of Ship Overtaking Scenarios for Autonomous Collision Avoidance Testing[J/OL]. [2025-06-03]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04271>.
- [38] HE H, ROSALES J V, VAN ZWIJNSVOORDE T, et al. COLREGs-Compliant Model Predictive Collision Avoidance for Autonomous Ships in Restricted Environments[J]. Ocean Engineering, 2025, 338: 121966.
- [39] 孙舒婷, 王胜正, 施杰. 基于条件变分自编码器的船舶碰撞风险测试场景生成方法[J/OL]. [2025-10-27]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04610>.
- SUN S T, WANG S Z, SHI J. A Method for Generating Ship Collision Risk Test Scenarios Based on Conditional Variational Autoencoders[J/OL]. [2025-10-27]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04610>.
- [40] SANDVIK E, NIELSEN J B, ASBJØRNSLETT B E, et al. Operational Sea Passage Scenario Generation for Virtual Testing of Ships Using an Optimization for Simulation Approach[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2020, 26(3): 896-916.
- [41] ZHOU Z, ZHANG Y. A System for the Validation of Collision Avoidance Algorithm Performance of Autonomous Ships[J]. Ocean Engineering, 2023, 280: 114600.
- [42] CHANG C H, WIJERATNE I B, KONTOVAS C, et al. COLREG and MASS: Analytical Review to Identify Research Trends and Gaps in the Development of Autonomous Collision Avoidance[J]. Ocean Engineering, 2024, 302: 117652.
- [43] 周正宇. 智能船舶自主避碰性能测试方法与评估指标体系研究[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2024.
- ZHOU Z Y. Research on Test Methods and Evaluation Metrics for Autonomous Collision Avoidance Performance of Intelligent Ships[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2024.
- [44] 王天魁, 徐言民, 刘佳仑, 等. 船舶会遇虚拟测试场景生成方法[J]. 船海工程, 2026, 55(1): 91-97.
- WANG T K, XU Y M, LIU J L, et al. Methods for Generating Virtual Testing Scenarios for Ship Encounters[J]. Ship & Ocean Engineering, 2026, 55(1): 91-97.
- [45] LI B, PANG F W. An Approach of Vessel Collision Risk Assessment Based on the D-S Evidence Theory[J]. Ocean Engineering, 2013, 74: 16-21.
- [46] GANG L, WANG Y, SUN Y, et al. Estimation of Vessel Collision Risk Index Based on Support Vector Machine[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2016, 8(11): 1687814016671250.
- [47] ZHAO Y, LI W, SHI P. A Real-Time Collision Avoidance Learning System for Unmanned Surface Vessels [J]. Neurocomputing, 2016, 182: 255-266.
- [48] MARINO M, CAVALLARO L, CASTRO E, et al. New Frontiers in the Risk Assessment of Ship Collision[J]. Ocean Engineering, 2023, 274: 113999.

(上接第 38 页)

- [6] 胡甲秋, 卓毅鑫, 唐健, 等. 基于多目标优化和深度学习的短期风功率组合预测[J]. 太阳能学报, 2025, 46(2): 615-622.
- HU J Q, ZHUO Y X, TANG J, et al. Short Term Wind Power Combination Prediction Based on Multi-Objective Optimization and Deep Learning[J]. Journal of Solar Energy, 2025, 46(2): 615-622.
- [7] 缪希仁, 刘煜寒, 王铭海, 等. 基于域对抗迁移网络的短期电力负荷预测方法[J]. 电网技术, 2025, 49(9): 1-10.
- MIAO X R, LIU Y H, WANG M H, et al. Short Term Power Load Forecasting Method Based on Domain Adversarial Transfer Network[J]. Grid Technology, 2025, 49(9): 1-10.
- [8] 胡国胜. 基于加权支持向量机与集成的预测模型研究[J]. 计算机应用与软件, 2012, 29(12): 280-281.
- HU G S. Research on Prediction Model Based on Weighted Support Vector Machine and Ensemble[J]. Computer Applications and Software, 2012, 29(12): 280-281.