

船舶航行安全主动控制技术研究及展望

张 笛^{1,2}, 万程鹏^{1,2}, 艾云飞³, 谢 磊^{1,2}, 张金奋^{1,2,4},
张 亮⁵, 严新平^{1,2}

1. 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
2. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063;
3. 中国交通通信信息中心, 北京 100011;
4. 广东省内河港航产业研究有限公司, 广东 韶关 512000;
5. 武汉中原电子信息有限公司, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 船舶航行安全是保障水路交通高质量发展的根本前提,但复杂多变的航行环境对保障船舶安全航行带来巨大挑战,船舶航行安全风险控制正从事发应急处置、事后事故分析等被动手段逐渐向事前决策、风险预警等主动风险防控的方向发展。分析了国内外船舶航行安全主动控制研究的发展现状和存在的难题,梳理了船舶航行信息感知、船端航行决策以及岸基风险预警三个方面的关键技术和工程应用实际,提出了船舶航行安全控制一体化、智能化、韧性化的发展方向,为提升船舶航行安全主动控制能力提供思路借鉴和技术参考。

关键词: 水路运输;船舶航行安全;信息感知;风险预警;安全主动控制

中图分类号:U675.96

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.001

Current research and prospects for the use of active control technologies to improve the safety of ship navigation

ZHANG Di^{1,2}, WAN Chengpeng^{1,2}, AI Yunfei³, XIE Lei^{1,2}, ZHANG Jinfen^{1,2,4},
ZHANG Liang⁵, YAN Xinping^{1,2}

1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan 430063, China;
2. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. China Transport Telecommunications and Information Center, Beijing 100011, China;
4. Inland Port and Shipping Industry Research Co., Ltd. of Guangdong Province, Shaoguan 512000, China;
5. Wuhan Zhongyuan Electronic Information Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: Ensuring the safety of ship navigation is fundamental to the high-quality development of waterway transportation. However, the complex and ever-changing nature of the navigation environment poses significant challenges to ensuring the safe passage of ships. The management of navigation safety risks is gradually shifting from passive measures, such as emergency response and post-accident analysis, to proactive risk prevention and decision-making. This paper analyses the current state of domestic and international research into the proactive control of ship navigation safety, as well as existing issues. It reviews key technologies and practical engineering applications in three areas: ship navigation information perception; ship-based navigation decision-making; and shore-based risk early warning. The paper proposes an integrated,

收稿日期:2024-12-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2024YFB4303600);国家自然科学基金项目(52425210;51920105014)

作者简介:张 笛(1983—),男,教授,博士,研究方向为船舶航行安全控制技术。E-mail:zhangdi@whut.edu.cn

通信作者:万程鹏(1990—),男,副研究员,博士,研究方向为水路交通系统韧性提升。E-mail:cpwan@whut.edu.cn

引用格式:张笛,万程鹏,艾云飞,等.船舶航行安全主动控制技术研究及展望[J].中国航海,2025,48(2):1-9.

ZHANG D, WAN C P, AI Y F, et al. Current research and prospects for the use of active control technologies to improve the safety of ship navigation[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 1-9. (in Chinese)

intelligent and resilient approach to developing ship navigation safety controls, providing insights and technical references to enhance proactive control capabilities.

Key words: waterway transportation; navigation safety; information perception; risk warning; safety control

水路交通作为综合运输系统的重要组成部分,具有运输量大、能耗低、对环境影响小等优势,为可持续性经济发展提供了有力支持。船舶航行安全是保障水路交通高质量发展的根本前提。长期以来,船舶航行安全控制以事故统计与分析、应急处置等被动手段为主,难以满足日益复杂环境下的船舶航行安全保障需求。因此,有必要分析船舶航行安全管控研究现状、梳理船舶航行安全主动控制技术需求与难点,探索未来水路交通安全发展方向,提升水路交通系统安全水平及安全保障能力。

1 船舶航行安全国内外研究现状

传统水路运输安全侧重于基于历史事故数据和经验的风险评估,这类方法虽然能够通过事故风险致因分析为船舶航行安全管控提供参考,但在事故预防方面存在较大局限,主要原因在于依赖已发生事故的难以提前识别和预防潜在的未知风险。通过对2012~2024年水上交通风险相关文献梳理发现,船舶航行安全控制正从被动逐渐转变为更加主动的模式(如图1所示),包括对环境信息的实时感知和分析,对潜在风险的主动预测、预警。这种思路转变有助于提高船舶航行安全性,是未来航运安全研究和实践的重点方向^[1]。船舶航行安全主动控制能力的核心主要包含环境信息的感知、船舶避碰决策、航行风险预警等方面。

船舶航行环境信息感知已从单一数据源发展为基于多源数据融合的方式,通过对雷达、卫星、自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)等数据结构化关联和智能化处理,以提升环境感知的精度和速度。目前,相关研究侧重于通过多源数据融合优化算法提升对通航环境的全局感知能力,为船舶的路径规划、动态避碰以及环境预测等提供技术支撑^[2]。例如,基于深度学习(如卷积神经网络^[3]、长短时记忆网络^[4]、生成对抗网络^[5]等)的多源数据融合算法能够有效地处理多源异构数据,显著提高船舶目标检测与跟踪的准确性。针对恶劣天气等复杂场景,深度学习和强化学习算法结合传感器数据的实时分析,可以为船舶提供更加精准的导航决策,显著提升航行安全性与操作效率^[6]。

船舶自主避碰研究主要包含以下三类。一是基于解析模型的避碰方法。这类方法通过数学模型描述船舶的运动特性和周围环境,建立数量关系解决



注:强度(Strength)指数表示研究主题在不同时间段内的关注度或影响力,通常通过相关文献的引用次数或关键词频次进行量化。

图1 船舶航行安全控制研究主题涌现分析

Fig. 1 Analysis of the emergence of research themes on safety control of ship navigation

避碰问题。例如,模型预测控制方法通过实时预测船舶未来的轨迹并动态调整以规避碰撞,已被广泛应用于动态海上避碰决策^[7];速度障碍法通过分析船舶与障碍物之间的相对速度确定避碰的安全区间^[8];人工势场法将船舶运动视为在多重力场作用下的运动,利用虚拟力场模型指导船舶避开障碍物^[9-10]。上述方法虽然能够提供较为精确的避碰解决方案,但在实际应用中由于解析模型常面临环境复杂性和不确定性,而导致模型求解计算负荷过大的问题。二是基于模糊逻辑法^[11]、多目标优化法^[12]等算法。这类算法具备较强的适应性和灵活性,能够较好应对多变的海洋环境。三是基于机器学习方法。例如,基于对海量历史航行数据学习提取非线性特征,对船舶的避碰行为进行精确建模^[13],或者在不确定性和高动态的海洋环境下自主学习避碰策略,实现智能化的路径优化^[14]。与前两类方法相比,机器学习方法具有自适应性强、无需精确建模等优点。

船舶航行风险预警主要通过事件树^[15]、贝叶斯网络^[16]、模糊规则库^[17]等方法实现对船舶碰撞风险的定性或定量评估。在风险评估的基础上,基于聚类算法^[18]、卡尔曼滤波算法^[19]、孤立森林算法^[20]和核密度估计^[21]等方法可以进一步识别船舶异常行为以实现风险预警。通过这些方法可以在早期阶段识别并预警潜在航行风险。

总体而言,尽管国内外学者针对上述问题开展了一系列的积极探索,并取得了阶段性成果,但相关研究工作尚存在以下3个方面的不足。

1) 针对船舶航行环境感知,现有技术动态环境下的适应性和稳定性仍有较大提升空间,例如雷达在远距离小目标探测、抗杂波干扰以及慢速目标检测等方面的能力仍有待进一步提高。国外在基于多源数据融合和智能算法的通航环境感知方面技术相对成熟,尤其是在复杂海域和远洋航行^[22]中已有较为广泛的技术应用;而国内则侧重于内河和近海航行环境感知^[23]。此外,传感器性能和数据处理能力提升方面仍然面临挑战。

2) 尽管国内外在船舶避碰决策方面已取得一系列成果,但现有避碰决策技术在行为意图、避碰决策和路径规划等方面常常存在割裂,且缺乏对它们相互作用机理的深入分析,使得现有方法在面对行为意图变化时缺乏足够的适应性。针对船舶主动避碰决策,需要进一步提升算法融合与智能化决策能力。

3) 船舶异常行为检测和航行风险预警技术在实时性、准确性和鲁棒性等方面仍面临较大挑战。

现有船舶航行风险量化方法由于考虑因素多,实际应用中的可操作性受限。此外,也有研究采用贝叶斯网络等方法,基于动态数据提升风险评估的实时性^[24]。综合而言,航行风险预警智能化和准确性等方面仍存在较大提升空间。

2 船舶航行安全主动控制关键技术

船舶航行安全主动控制依赖于一系列先进理论和技术支撑,其核心环节包括通航环境全息主动感知、船舶主动避碰以及航行风险主动预警。

2.1 通航环境全息主动感知技术

通过多模态信息融合技术克服雷达识别精度及多源数据融合效率的限制,实现对通航环境的全面、主动感知。运用深度学习技术强化海事雷达图像处理能力,优化AIS与雷达、视觉图像数据的集成处理能力,提升数据处理精度与效能。通过上述技术的集成,进一步提升船舶监测和目标追踪能力。通航环境全息主动感知技术主要包括以下3个方面。

1) 远距离小目标识别技术

远距离小目标识别技术指的是利用雷达、监控等探测技术和设备,在较远的距离(通常是数米甚至数十米之外)对尺寸相对较小的船舶目标进行检测、分类和识别的技术。依托高性能雷达天线,低功耗、全固态航海调频连续波雷达,应用深度学习加强的海事雷达图像处理技术,提升远距离小目标的感知能力(如图2所示)。结合多传感器融合技术全面感知导航环境,开发实时环境监测系统,为智能航运提供信息感知技术支撑。

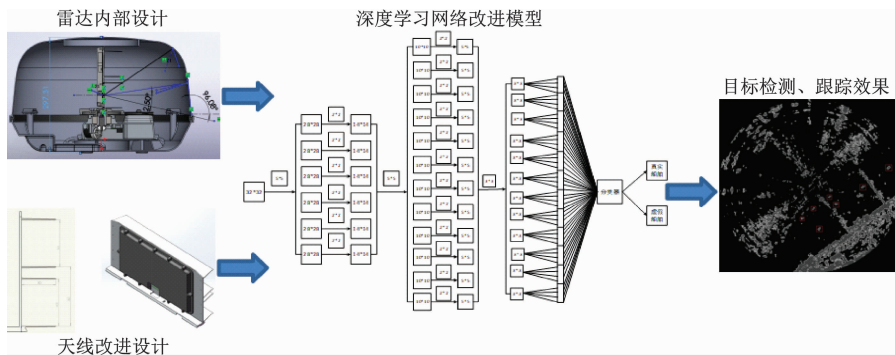


图2 调频连续波雷达和天线系统设计及雷达图像目标检测、跟踪效果^[2]

Fig. 2 FM continuous wave radar and antenna system design and radar image target detection and tracking effect

2) 高精度航迹识别及跟踪技术

采用多源数据融合技术,提升水路交通环境中小型船舶的检测能力和跟踪准确性,优化船舶动态定位和行为分析,增强对复杂海域情况的应对能力。结合机器学习和模式识别,改进海事监控系统,提高水上安全监管的效率和准确度,为船舶追踪和海事

安全提供更为精确的数据支持(如图3所示)。

3) 水路交通场景全息感知技术

水路交通场景全息感知指的是通过多种传感器和数据采集设备,对水路交通场景中的船舶、航道、港口设施、水文气象等各种要素进行全方位、全时段、高精度的信息获取和感知,能从多个角度和维度

记录和了解水路交通场景全貌。结合无人机倾斜摄影测量技术和水面及水下一体化航道场景三维建模方法,构建全天候动态感知的三维全息场景图。通过先进的图像处理算法,提升场景重建的精度和实

时性,通过多维数据融合加强对水域环境的综合感知和分析能力,实现更精准的航道和障碍物识别(如图4所示)。



图3 长短期记忆网络改进模型及航迹感知数据融合效果^[4]

Fig. 3 Improved LSTM model and fusion effect of trajectory sensing data

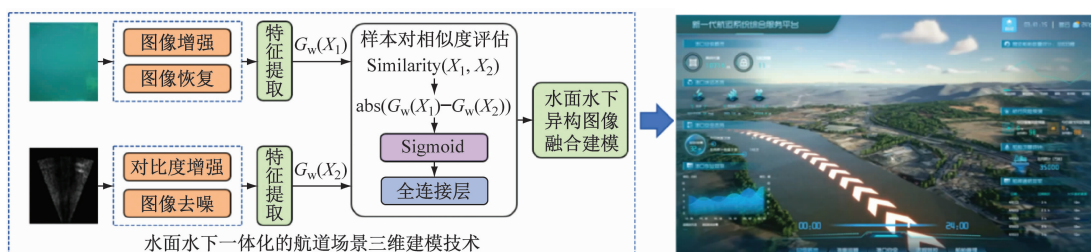


图4 水路交通场景全息感知核心技术及效果

Fig. 4 Core technology and effect of holographic perception of waterway traffic scene

技术瓶颈与挑战:尽管多源数据融合技术在提升通航环境感知能力方面取得了一定进展,但数据适配性问题还有待深入研究。不同数据源在时空分辨率、格式和精度上的差异使融合算法面临较大挑战。特别是在动态环境下,传感器数据的延时和精度不一致将影响融合的准确性。例如,雷达在低信噪比和恶劣天气条件下目标识别精度不高,增加了数据融合的难度。此外,将深度学习与多源数据融合相结合时,异构数据的处理、融合,以及算法的实时性、可解释性,仍是亟待解决的问题。

2.2 船舶主动避碰决策及路径规划技术

船舶主动避碰决策指的是船舶通过自身的探测系统获取周围障碍物信息,并运用一定的规则、算法和航海经验,主动制定并实施避免碰撞策略的行为。基于船舶避让行为解析与序贯避碰决策,构建意图

推测、决策优化、协同校正一体化的分布式控制方法体系。针对复杂水域条件,通过船舶路径规划算法提升避让效率与路径选择的智能化程度。相关技术整合将有助于提高水路交通管理的智能化水平,确保航运安全的同时,优化航道资源的利用效率。

1) 基于深度学习的船舶避让意图预测技术

实现船舶行为意图和轨迹的多维预测,集成水域交通流特性与单船行为数据,提升预测模型的准确度和泛化能力(如图5所示)。通过船舶避让意图预测方法,支持航行策略制定和风险评估。

2) 船舶分布式控制方法体系

船舶避碰分布式控制指在船舶面临碰撞危险时,将每一艘船舶视为一个独立的决策单元,依据预先设定的规则、算法和船舶自身的性能特点,独立进行避碰决策和实施相应操纵行为的一种控制方式。

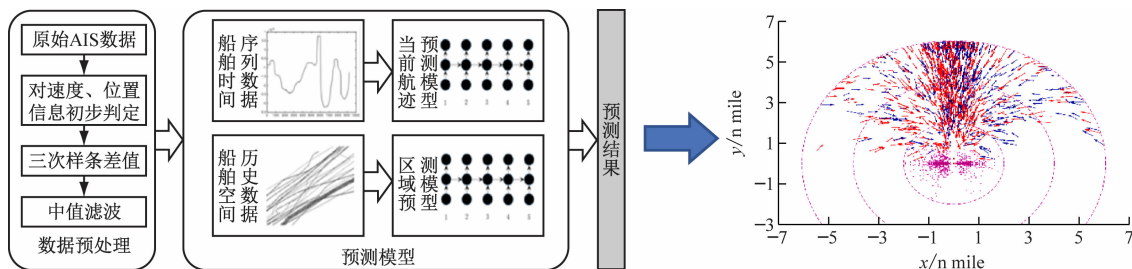


图5 行为意图预测流程和模型应用效果^[25,26]

Fig. 5 Behavioural intent prediction process and model application effectiveness

依托类人避碰决策逻辑,推测预测轨迹,实现避碰决策,优化避碰意图的推测和决策。融合船舶动态数据与环境变量,增强多条件下的航行决策适应性。

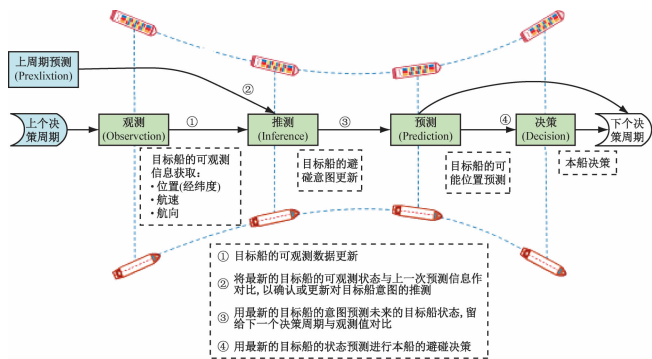
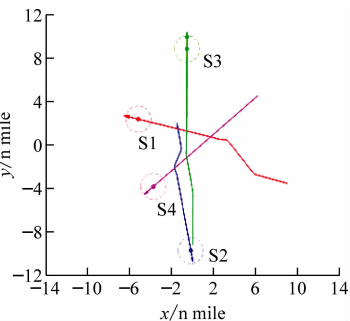


图6 船舶避碰的 OIPD 决策框架和模型应用效果^[27]

Fig.6 Effectiveness of OIPD decision-making framework and model application for collision avoidance by ships

发展复合型决策支持系统,提升在多变航行条件下的避碰策略精确度。通过实时数据流的分析和模拟航行场景的演练不断优化决策模型(如图6所示)。



3) 复杂水域船舶路径规划技术

针对船舶在复杂作业水域(如风电场、桥区水域等)的路径规划问题,提出改进多向 A* 路径规划

算法(如图7),在控制施工作业船与风机碰撞风险的前提下缩短了航行路径长度,提升运维效率。

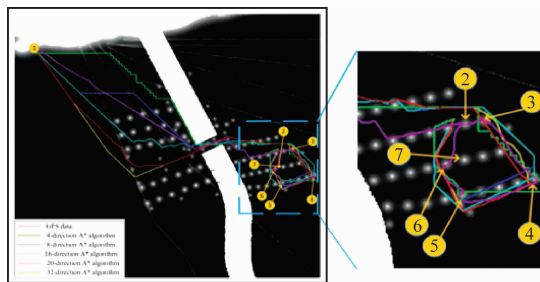
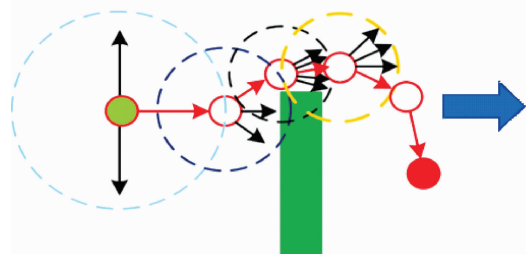


图7 改进多向 A* 模型和模型应用效果^[28]

Fig.7 Improved multidirectional A* model and model application effects

技术瓶颈与挑战:基于深度学习的避碰意图预测技术往往存在泛化能力不足的问题,尤其是不同场景下的避碰意图预测准确性。船舶分布式控制方法及紧急避让决策在多船交互和高交通密度复杂场景下,面临计算速度、决策精度和稳定性方面的挑战。因此,未来研究应聚焦于提升复杂场景下船舶避碰决策系统的实时性与精度。

2.3 船舶异常行为岸基智能预警技术

航行风险主动预警指的是在船舶航行过程中通过主动监测、分析和评估各种潜在的风险因素,在风险事件发生之前,预先向航行人员或航行管理系统发出警告信息,以便及时采取措施避免或减轻风险危害的过程。针对船舶异常行为识别精度不足、实时性和鲁棒性较差的问题,综合考虑船舶类型、海域特征、船舶航行时空特征等影响因素,从船舶航行风险演化机理和航行大数据分析两个方面优化船舶异常行为监测和预警模型,细化异常行为检测结果的类型,提高船舶异常行为的准确性和实时性。

1) 典型航行场景下水上交通事故风险量化

研究船舶尺寸、航速和航道条件对船舶安全领域边界的影响,分析船舶与碍航物的几何关系,研究船舶位置预测、危险水域分布和船舶航行行为特征分布模型(如图8所示),实现根据船舶航速、航向、碍航物位置等易获取的基本信息对航行风险的数值化。

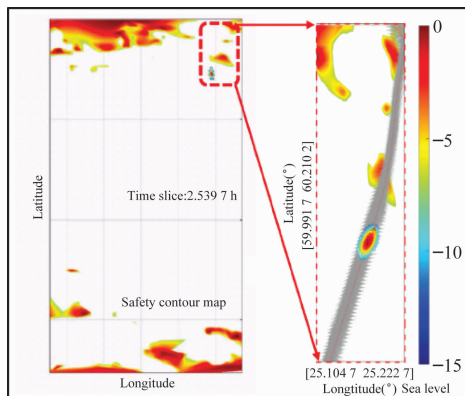


图8 船舶航行风险量化^[29]

Fig.8 Quantification of navigational risks of ships

2) 航运大数据驱动下的船舶异常行为识别技术

研究船舶异常行为自学习模型,基于专家经验进行水上复杂事件识别,提高船舶异常行为监控的准确性和实时性(如图9所示)。

3) 机理-数据双驱动的船舶航行风险预警模型结合物理机理与数据模型实现航行风险精确量化^[30],对船舶异常行为、水上交通安全风险信息进行综合可视化(如图10所示),实现与电子海图、三维实体模型之间的联动,在岸端实现对在航船舶航行风险快速自适应预警。

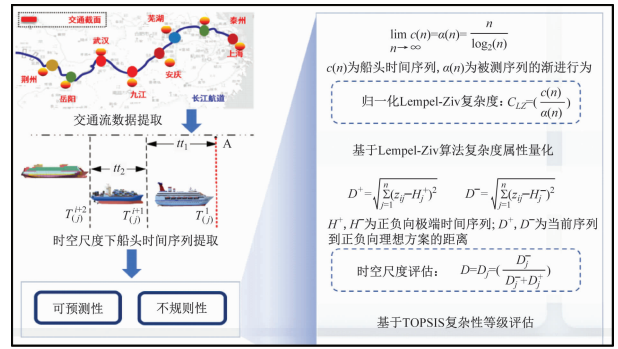


图9 数据驱动的船舶交通流复杂度评估技术^[30]

Fig. 9 Data-driven ship traffic flow complexity assessment technology

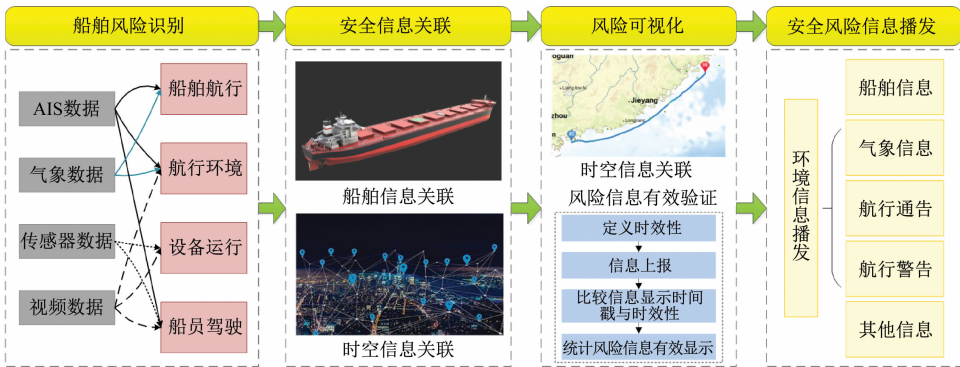


图10 在航船舶安全信息可视化

Fig. 10 Visualisation of safety information on ships underway

技术瓶颈与挑战:首先,由于船舶与障碍物的几何关系、环境变化以及船舶动态行为的预测存在较大不确定性,难免影响船舶航行风险量化模型在复杂水域应用的可靠性。其次,船舶航行异常行为识别由于高度依赖专家经验和历史数据,在处理新场景或复杂航行行为时准确性可能受限。未来研究应着重提升风险预警模型的自适应能力,并加强对突发事件的实时响应能力,以确保船舶航行安全风险预警的高效性与准确性。

3 关键技术工程应用

在上述核心技术集成攻关的基础上,形成了全固态调频连续波雷达、智慧航道全息感知系统、水运安全主动防控系统等成果,并在长江、珠江等水域开

展了工程应用。

3.1 全固态调频连续波雷达系统

全固态调频连续波雷达系统采用高度集成的硬件设计和先进的信号处理算法,系统架构主要包括收发单元和显示单元,天线采用高性能阵列天线,具备复杂环境下的目标探测能力。该雷达系统的一个显著特点是实现了全固态低功耗设计,具有较强的抗干扰能力和全天候工作特性。通过 AIS 数据和视觉图像融合(如图11所示),该雷达系统不仅能够提供船舶精确的轨迹跟踪,还能支持航行状态实时监控和目标识别,有效提高了海上交通管理的精度和效率,为复杂环境下的船舶安全作业提供了重要的技术支持。



图11 全固态调频连续波雷达

Fig. 11 All-solid-state FM continuous wave radar

3.2 韶关智慧航道全息感知系统

基于通航环境全息主动感知技术研发了智慧航道全息感知系统。该系统实现了通航环境的三维实景展示,并在广东韶关港水域示范进行应用(如图12所示),为海事监管、应急救援、港航运输等提供了有力支持。该系统能够在航道三维场景中实时动态展示船舶航向、航速、船位等信息,为船舶雾天、夜

间等复杂环境下的航行安全提供全面、精准、直观的信息支撑,辅助驾驶人员进行航行决策,显著提升工作人员信息处理和分发的效率。同时,通过港口实景视频监控数据,实现了重点区域电子围栏、作业人员佩戴安全帽的无接触式监管,减轻了监管人员工作负担,保障了港口作业安全。



图12 三维展示平台界面示意

Fig. 12 Schematic diagram of the interface of the 3D display platform

3.3 内河水运安全主动防控系统

内河水运安全主动防控系统融合实时船舶AIS数据、气象数据、传感器数据、视频数据等信息,通过空间位置判断、阈值判定、图像识别、目标检测等技术检测船舶、船员、工况、环境等风险要素。联动风险信息、船舶位置、航行轨迹和船舶三维模型,并在电子海图上进行可视化展示。对各类安全风险信息有效显示,并根据需要进行播发(如图13所示)。该系统的船舶碰撞风险定量分析与可视化功能已成

功嵌入长江三峡通航管理局三峡通航综合监管系统,自2020年6月开始在长江三峡坝区进行示范应用。示范应用以来,水域没有发生等级以上事故,有效保障了水道安全通畅,提升了该水域的通航风险主动防控能力。此外,该系统通过船舶信息可视化,能够实时预测单个船舶的碰撞、搁浅风险,以及示范水域的整体航行风险。从实际应用经验判断,系统预警结果与主观判断的吻合度达到90%以上。

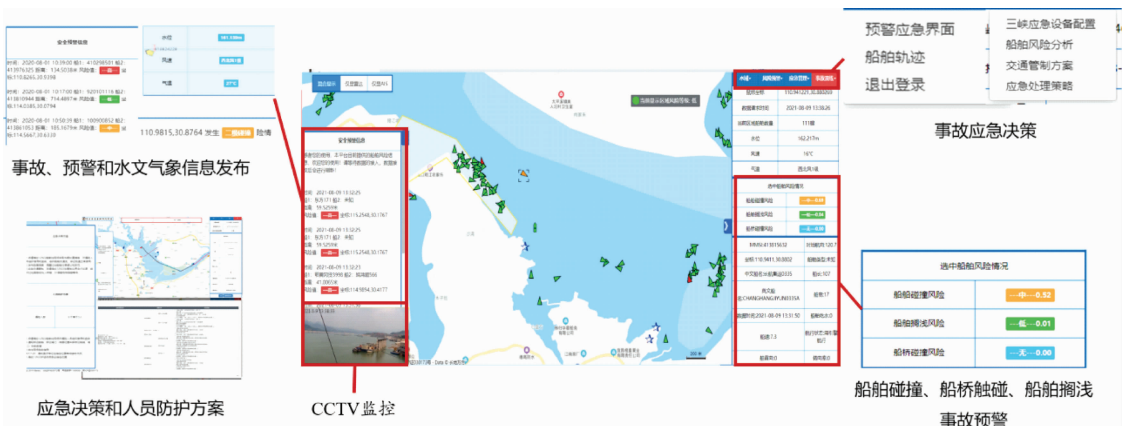


图13 水运安全主动防控系统

Fig. 13 Active prevention and control system for water transport safety

4 发展趋势与展望

随着人工智能、深度学习、物联网等技术的深入应用,船舶将具备更强的环境感知和自主决策能力,

能够实时根据海洋环境的动态变化自动调整航行路径、避碰策略和行为。此外,船岸、船舶之间的协同将实现更高效的信息共享与任务分配,进一步提高航行管理效率,减少船员依赖并降低运营成本。同

时,面对极端天气、自然灾害和其他突发事件,航运系统将具备更强的韧性,能够快速响应并进行动态调整,确保航行的安全性和稳定性。整体而言,船舶航行安全主动控制将变得更加智能、协同、韧性^[31],以应对日益复杂的航行环境。

1) 智能化——基于深度学习的在线优化模型开发

通过基于深度学习的在线优化模型实现对船舶历史、实时航行数据的处理,动态调整船舶的航行路径、避碰策略以及船舶行为,提高决策准确性。通过深度学习提升船舶对复杂环境状况和变化趋势的识别、预测能力,优化自主决策效果。潜在的技术突破点包括高效的多源数据融合算法、面向动态环境变化的强化学习自适应决策算法,以及深度学习算法的计算性能优化。

2) 协同化——基于船岸协同的船舶航行安全控制技术

通过信息共享和任务分配,提升船舶航行的管理效率,实现船岸、船舶之间的高效协同。通过船岸协同系统,实现船舶远程控制和航行安全决策优化,在确保航行安全的同时,减少船员数量,降低运营成本。潜在的技术突破点包括解决船舶与岸基之间的通信延时问题、数据传输的可靠性问题,以及船舶在动态环境下的协同控制策略设计。

3) 韧性化——面向突发事件与极端天气的动态调整机制

增强航运系统应对诸如极端天气、自然灾害或公共卫生事件等不确定扰动时维持系统稳定运行的能力,从突发事件的识别和研判、应急保障能力提升、应急机制建设等方面构建面向极端天气与突发事件的安全管控动态调整机制。未来研究重点包括面向航行风险动态评估的大模型训练,结合大数据分析 and 人工智能技术实现对潜在风险的预判。此外,应急响应机制和动态调整算法的设计与优化,也将进一步增强航运系统在极端事件下的响应能力和速度。

5 结束语

围绕船舶航行安全控制在环境信息感知、船端航行决策以及岸基风险预警等方面的关键技术、发展趋势和工程应用需求,需要深刻理解水路交通系统各要素间的关系和变化趋势,积极探究水路交通安全保障在智能化、协同化、韧性化等方面的发展目标、技术突破点及可能的实现方法,为未来新一代水路运输系统的安全管控和应急保障能力提升提供参考思路。

参 考 文 献

- [1] 严新平,李晨,刘佳伦,等. 新一代航运系统体系架构与关键技术研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021,21(5):22-29.
YAN X P, LI C, LIU J, et al. Architecture and key technologies for new generation of waterborne transportation system [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(5):22-29.
- [2] WANG S, XIE L, MA F, et al. Research of obstacle recognition method for USV based on laser radar [C]. 2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). IEEE, 2017: 343-348.
- [3] 常吉亮,谢磊,魏志威,等. 基于深度卷积神经网络的船舶轨迹分类研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2022,46(1):160-165.
CHANG J L, XIE L, WEI Z W, et al. Research on ship trajectory classification based on deep convolutional neural network [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2022,46(1):160-165.
- [4] 常吉亮,谢磊,赵建伟,等. 基于VAE-LSTM模型的航迹异常检测算法[J]. 交通信息与安全,2020,38(6):1-8.
CHANG J L, XIE L, ZHAO J W, et al. An anomaly detection algorithm for ship trajectory data based on VAE-LSTM model[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020,38(6):1-8.
- [5] 刘遵雄,蒋中慧,任行乐. 多尺度生成对抗网络的图像超分辨率算法[J]. 科学技术与工程,2020,20(13):5217-5223.
LIU Z X, JIANG Z H, REN X L. Image super-resolution algorithm of multi-scale generative adversarial networks [J]. Science Technology and Engineering, 2020,20(13):5217-5223.
- [6] 王程博,张新宇,张加伟,等. 未知环境中无人驾驶船舶智能避碰决策方法[J]. 中国舰船研究,2018,13(6):72-77.
WANG C B, ZHANG X Y, ZHANG J W, et al. Method for intelligent obstacle avoidance decision-making of unmanned vessel in unknown waters [J]. Chinese Journal of Ship Research, 2018,13(6):72-77.
- [7] DU Z, NEGENBORN R R, REPPA V. COLREGS-Compliant collision avoidance for physically coupled multi-vessel systems with distributed MPC [J]. Ocean Engineering, 2022, 260: 111917.
- [8] WANG S, ZHANG Y, LI L. A collision avoidance decision-making system for autonomous ship based on modified velocity obstacle method [J]. Ocean Engineering, 2020, 215:1.
- [9] LIAO W, WU Y, ZHOU P, et al. Dynamic navigation: integrating GL-STGCNN and MPC for collision avoidance

- with future Awareness [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 309: 118416.
- [10] LI H, WANG X, GUEDES S, et al. A collision-avoidance decision-making scheme based on artificial potential fields and event-triggered control [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 306: 118101.
- [11] KORUPOJU A, KAPADIA V, VILWATHILAKAM A, et al. Ship collision risk evaluation using AIS and weather data through fuzzy logic and deep learning [J]. *Ocean Engineering*, 2025, 318: 120116.
- [12] LIU K, WU X, ZHOU Y, et al. Coordinated multi-stage and multi-objective optimization approach for ship collision avoidance decision-making [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115888.
- [13] GAO M, LIANG M, ZHANG A, et al. Multi-ship encounter situation graph structure learning for ship collision avoidance based on AIS big data with spatio-temporal edge and node attention graph convolutional networks [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 301: 117605.
- [14] XIE L, XUE S, ZHANG J, et al. A path planning approach based on multi-direction A* algorithm for ships navigating within wind farm waters [J]. *Ocean Engineering*, 2019: 311-322.
- [15] AKYUZ E, ARSLAN O, TURAN O. Application of fuzzy logic to fault tree and event tree analysis of the risk for cargo liquefaction on board ship [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101: 102238.
- [16] LIU Y, XUE Y, LU Y, et al. A dynamic bayesian network model for ship navigation risk in the Arctic Northeast Passage [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 312: 119024.
- [17] SHI Z, ZHEN R, LIU J. Fuzzy logic-based modeling method for regional multi-ship collision risk assessment considering impacts of ship crossing angle and navigational environment [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 259: 111847.
- [18] XIN X, LIU K, LOUGHNEY S, et al. Maritime traffic clustering to capture high-risk multi-ship encounters in complex waters [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 230: 108936.
- [19] CHEN X, XU X, YANG Y, et al. Visual ship tracking via a hybrid kernelized correlation filter and anomaly cleansing framework [J]. *Applied Ocean Research*, 2021, 106: 102455.
- [20] 王臻睿,赵坤宇,蔡川,等. 基于 DBSCAN 和 iForest 算法的船舶异常行为分析 [J]. *舰船电子工程*, 2021, 41 (4): 89-94.
- WANG Z R, ZHAO K Y, CAI C, et al. Analysis of vessel abnormal behavior based on DBSCAN and iForest algorithms [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2021, 41 (4): 89-94.
- [21] 李高才,张新宇,蒋晨星,等. 海港航道水域船舶异常行为检测 [J/OL]. *大连海事大学学报*, 1-10 [2025-01-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1360.u.20241227.1303.002.html>.
- LI G C, ZHANG X Y, JIANG C X, et al. Detecting abnormal ship behavior in harbor waterways [J/OL]. *Journal of Dalian Maritime University*, 1-10 [2025-01-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/21.1360.u.20241227.1303.002.html>.
- [22] WANG C M, FAN B Y, LI Y A, et al. Study on the classification perception and visibility enhancement of ship navigation environments in foggy conditions [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2023, 11 (7): 1298.
- [23] 马枫,陈晨,刘佳仑,等. 船岸协同支持下的内河船舶远程驾控系统关键技术研究 [J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(5): 125-133.
- MA F, CHEN C, LIU J L, et al. Key technologies of ship remote control system in inland waterways under ship-shore cooperation conditions [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2022, 17(5): 125-133.
- [24] 陈晶磊,李廷文,张金奋,等. 基于共轭贝叶斯模型的长江干线江苏段碰撞事故定量分析 [J]. *交通信息与安全*, 2019, 37(4): 52-58.
- CHEN J L, LI T W, ZHANG J F, et al. A collision risk assessment of Jiangsu Section in the Yangtze River based on conjugate Bayesian method [J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2019, 37(4): 52-58.
- [25] CAI M, ZHANG J, ZHANG D, et al. Collision risk analysis on ferry ships in Jiangsu Section of the Yangtze River based on AIS data [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 215: 107901.
- [26] ZHANG J, LIU J, HIRDARIS S, et al. An interpretable knowledge-based decision support method for ship collision avoidance using AIS data [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 230: 108919.
- [27] YUAN X, ZHANG D, ZHANG J, et al. A two-stage collision avoidance path planning approach for inland ferries under dynamic channel crossing risk conditions [J]. *Ocean & Coastal Management*, 2023, 242(2): 106692.
- [28] XIE L, XUE S, ZHANG J, et al. A path planning approach based on multi-direction A* algorithm for ships navigating within wind farm waters [J]. *Ocean Engineering*, 2019: 311-322.
- [29] ZHANG C, ZHANG D, ZHANG M, et al. An integrated risk assessment model for safe Arctic navigation [J]. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2020, 142: 101-114.
- [30] ZHANG M, ZHANG D, FU S, et al. A predictive analytics method for maritime traffic flow complexity estimation in inland waterways [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2022, 220(1): 108317.
- [31] 严新平,韩亚,吴兵,等. 水路交通系统的发展现状与未来展望 [J]. *中国航海*, 2024, 47(2): 145-152.
- YAN X P, HAN Y, WU B, et al. Current development and future prospects of waterborne transportation systems [J]. *Navigation of China*, 2024, 47(2): 145 - 152. (in Chinese)