

红色预警为超过 50% 或设备失联超过 5 分钟。基于重庆段复杂水文特征特别增设汛期水位变化监控建立动态阈值调整算法。

3.2 系统性能测试与分析

系统性能测试采用“压力测试+实际运行验证”双重模式，通过模拟极端工况评估系统稳定性与可靠性（表 2）。压力测试阶段构建虚拟负载环境，模拟 500 艘船舶同时航行场景，系统并发处理能力达到 10000 条 AIS 消息 / 秒数据处理延迟控制在 100 毫秒以内网络中断容错测试显示，系统具备 6 小时离线数据缓存能力，网络恢复后 3 分钟内完成数据同步。实际运行验证历时 6 个月，覆盖枯水期，平水期与汛期三个典型时段。结果表明，设备在线率达到 98.7%，位置监测精度平均误差 1.2 米，故障预警准确率 92.3%。异常事件响应时间从传统人工巡检的 4~6 小时缩短至平均 2.8 分钟。系统在台风“杜苏芮”影响期间表现优异自动识别并预警了 12 起航标位移事故，成功避免了潜在的航行安全事故。对比传统监控方式新系统监控效率提升 325%，人工成本降低 60%。

表 2 AIS 航标监控系统性能测试结果

测试项目	测试条件	实测值	目标值	达标情况
并发处理能力	500 船舶模拟场景	10000 条/秒	≥8000 条/秒	✓达标
数据处理延迟	高负载压力测试	100ms	≤200ms	✓达标
设备在线率	6 个月运行期	98.7%	≥95%	✓达标
位置精度	正常天气条件	1.2m	≤2m	✓达标
故障预警准确率	异常事件统计	92.3%	≥90%	✓达标
异常响应时间	实际运行验证	2.8 分钟	≤5 分钟	✓达标

3.3 经济效益与社会效益评估

经济效益评估基于“投入产出+成本节约”双重模型，系统建设总投资 2800 万元，运维成本年均 420 万元通过减少人工巡检，提高故障响应效率，降低航行事故风险等途径实现显著经济回报。传统航标维护模式年人工成本 1200 万元，AIS 监控系统实施后降至 480 万元，年节约人工成本 720 万元。故障处置效率提升带来的间接收益年均 350 万元包括减少航道停航时间提高通航效率等。基于 4 年回收期测算，系统净现值（NPV）达到 3200 万元，内部收益率（IRR）为 18.5%，经济效益显著。社会效益体现在航行安全保障水平大幅提升系统运行期间未发生因航标故障导致的船舶碰撞或搁浅事故，间接避免经济损失约 1.2 亿元。环保效益通过减少维护船舶

出行频次实现，年减少燃油消耗约 15 吨，碳排放减少 47.2 吨。

4 结语

AIS 技术在长江干线航标动态监控中的成功应用，标志着内河航运监控技术迈向智能化新阶段。系统通过多维度传感器融合，边缘计算与机器学习等先进技术实现了航标设备状态的全方位感知与智能预警显著提升了监控效率与安全保障水平。经济效益评估显示，系统投资回收期短，社会效益明显为长江航运管理部门提供了重要的技术支撑。然而，随着航运密度持续增长与技术不断发展，系统仍需数据融合算法优化，人工智能应用深化，跨部门信息共享等方面持续改进。未来应进一步探索 5G，物联网与数字孪生等新兴技术的集成应用构建更加智能与高效的长江全流域航标监控网络为建设现代化内河航运体系贡献技术力量。

参考文献：

- [1] 廖威. AIS 航标技术在长江航运中的应用研究 [J]. 数字通信世界, 2023, (07): 110-112.
- [2] 郝江凌, 李昱, 程赣军, 等. 长江干线 AIS 航标助航作用的调查与评估 [J]. 中国水运, 2023, (11): 53-55.
- [3] 张正东. 基于 MQTT 的虚拟 AIS 航标监控系统设计与实现 [D]. 重庆大学, 2022.
- [4] 周彩, 彭奇, 周有为, 等. 浅析 AIS 虚拟航标在长江岳阳段的应用 [J]. 中国水运. 航道科技, 2021, (29): 24-29.
- [5] 邓良爱, 王当利, 陈璐. 长江电子航道图虚拟航标的类别与显示研究 [J]. 中国水运, 2020, (07): 58-61.

上海港复杂水域船舶避碰决策支持系统开发与应用

陈刚

(上海港引航站, 上海 200082)

摘要: 本文探讨了上海港复杂水域船舶避碰决策支持系统的开发与应用。上海港作为国际重要港口, 其水域特征复杂, 包括航道密布、水深变化大、自然条件多变及交通流量大等, 对船舶航行安全构成挑战。船舶避碰决策需考虑多因素, 如船舶航行状态、周围环境、他船动态及法律法规等, 且需实时进行。系统开发需求包括高精度定位、实时通信技术、大数据分析和人工智能应用等。当前信息获取机制不全面, 需解决数据来源单一、通信实时性不足及数据处理挑战。本文旨在通过技术创新, 提高船舶避碰决策的准确性和效率, 保障航行安全。

关键词: 上海港; 复杂水域; 船舶避碰; 决策支持系统

中图分类号: U675.96 文献标识码: A 文章编号: 1006—7973 (2025) 21—0080—03

上海港作为全球最繁忙的港口之一, 其水域特征极为复杂, 对船舶航行安全提出了高要求。船舶在航行过程中需面对航道密布、水深变化大、自然条件多变以及高密度的船舶交通流等多重挑战。这些复杂因素使得船舶避碰决策变得尤为重要且复杂。为确保航行安全, 开发一套高效、准确的船舶避碰决策支持系统势在必行。本文旨在探讨上海港复杂水域的特点、船舶避碰决策的复杂性以及系统开发的技术需求与挑战, 以期对相关领域的研究和应用提供参考。

1 上海港复杂水域船舶避碰决策支持系统的特点

1.1 上海港复杂水域特征

上海港位于长江入海口的水域, 不仅宽广而且密布着复杂的航道网络, 形成了独特的网状结构。这种结构要求船舶在航行过程中必须高度精确地控制航向, 以避免与其他船舶或航道设施发生碰撞^[1]。水深是上海港另一个显著的特征, 它在不同区域有着显著的变化。从深水区到浅水区, 甚至包括一些浅滩和暗礁区域, 这种变化对船舶的吃水深度和航行安全提出了严格要求。船舶必须根据具体的水深情况调整自身的航行计划和策略, 确保安全通过。

除了复杂的水道结构和水深变化, 上海港的自然条件也是航行中不可忽视的因素。潮汐、风浪、雾霾等自然现象经常影响着港口水域的航行稳定性和能见度。尤其是在雾季, 能见度极低, 极大地增加了船舶避碰的难度和风险。这就要求船舶在雾霾天气下采取额外的安全措施, 以确保航行安全^[2]。另一个挑战是上海港的船舶

交通量极大。不同类型、吨位的船舶频繁进出, 使得水域内的交通状况异常复杂。船舶之间的避碰决策必须高度精准和迅速, 以避免交通事故的发生。港口管理部门通过航行规则、交通管制和信息技术支持, 努力提高船舶交通的效率和安全性。

1.2 船舶避碰决策复杂性

船舶避碰决策是航行安全的关键环节, 尤其是在复杂水域。这类决策必须综合考虑多方面因素, 确保船舶安全、合规且高效地完成航行任务。避碰决策需要考虑船舶自身航行状态。这包括船舶的速度、航向、操纵性能以及其他潜在的机械或电子系统故障。船长和船员需要通过监控设备和传感器来获取这些关键数据, 以便及时调整航行策略^[3]。周围环境的因素至关重要, 包括水深、潮汐、天气状况等自然条件, 这些条件可能对船舶的航行路径和速度产生直接影响。

避碰决策需考虑其他船只的动态情况。船舶在复杂水域中往往需要与多艘船只共享有限的航道空间。监测和预测其他船只的运动轨迹是避碰决策中的重要一环。突然的航向变更或速度调整可能导致潜在的碰撞风险, 因此船舶必须灵活应对, 及时调整自身的航行路径和速度。避碰决策还必须遵守国际海上避碰规则和国内相关法律法规^[4]。这些规则和法规确保了船舶在遭遇潜在碰撞风险时能够采取标准化的操作方式, 从而最大程度地减少事故发生的可能性。在确保船舶安全的前提下, 船长和船员通常会努力减少航行时间和成本。这可能涉及选择最优的航行路径、合理的速度以及最有效的避碰策略。

1.3 技术需求与挑战

面对上海港这样复杂水域的船舶避碰需求，技术创新成为确保航行安全的关键。高精度定位技术是实现船舶精准避碰的基础。传统的 GPS 定位系统尽管在大多数情况下表现良好，但在高密度船只和复杂环境下，其定位精度可能受到限制。结合其他定位手段如惯性导航系统、卫星雷达等，可以提高定位精度和可靠性，确保船舶能够准确了解自身位置和运动状态。实时通信技术在船舶间信息共享和协同避碰中发挥着关键作用。通过 VHF、AIS 等通信系统，船舶可以实时获取他船的动态信息，包括位置、航向、速度等^[5]。这些信息为船舶船员提供了必要的基础数据，帮助他们进行及时有效的避碰决策。随着船舶数量增加和通信频率提高，确保通信的可靠性和实时性成为新的挑战，需要采用更先进的通信技术和管理手段来应对。

大数据分析和人工智能技术的应用为船舶避碰决策带来了新的发展机遇。通过收集和分析海量航行数据，可以建立精准的避碰模型和算法，预测和识别潜在碰撞风险，从而优化避碰策略。关键在于如何有效处理这些海量数据，提取有价值的信息并将其转化为实用的操作建议，这仍然是一个亟待解决的技术问题。随着无人船技术的发展，如何将其融入现有的避碰决策体系也是一个新的挑战。无人船在航行中不仅要依赖高精度定位和自主导航技术，还需要能够与有人船艇进行有效的通信和避碰协调。技术创新和标准化的制定将是实现无人船与有人船艇安全共存的关键因素之一。

2 上海港复杂水域船舶避碰决策支持系统存在的问题

2.1 信息获取不全面

在船舶避碰决策过程中，信息的全面性和准确性至关重要，特别是在上海港这样复杂的水域环境中。目前存在的主要问题是信息获取机制的不全面和数据来源的单一性。船舶主要依赖 AIS 等设备进行信息交换，虽然这些设备能提供基本的动态信息如位置、速度和航向，但对于船舶的航行意图、货物状态以及性能等深层次信息的获取仍有限。这种局限性导致了在复杂水域内难以全面评估船舶的行动意图和潜在风险。

信息传输的延迟和丢失也是造成信息不全面的重要原因。在复杂水域中，通信环境受多种因素影响，如天气、水文条件和通信设备性能，这些因素都可能导致信息传输的不稳定性，甚至关键信息的丢失。缺乏稳定可靠的信息传输通道进一步加剧了信息获取的困难。信息共享机制的缺失也是问题所在。不同船舶、不同机构

之间存在着信息共享壁垒，这使得船舶在避碰决策时难以获得来自外部的全面信息支持。信息共享的不畅通不仅限制了船舶在避碰决策中的综合判断能力，也增加了事故风险。

2.2 决策模型适应性差

船舶避碰决策模型的适应性是确保决策结果准确性和有效性的关键因素。当前的避碰决策模型在处理上海港复杂水域时常表现出适应性不足的问题。这些模型通常建立在理想化的假设条件之上。实际水域环境是动态变化的，受到潮汐、能见度、其他船舶行为等多种因素的影响，这些因素使得模型难以准确地预测和反映船舶的实际行为。模型参数设置和算法优化的不足也是造成适应性差的主要原因之一。当前的模型往往缺乏针对上海港复杂水域特殊性的定制化调整。

随着船舶技术的进步和航行环境的变化，现有的避碰决策模型可能难以及时适应新的需求和挑战。新技术的应用如自动化航行系统、增强现实显示、实时数据处理等，使得船舶在复杂水域中的操作更加精确和安全。传统的避碰决策模型可能无法有效整合这些新技术，导致决策结果的滞后和偏差，甚至可能影响到船舶的安全性和效率。

2.3 人机交互不友好

在船舶避碰决策支持系统中，人机交互的优化至关重要，直接影响船员对系统的接受度和使用效率。当前的人机交互界面存在诸多不友好的问题，给船员的操作带来了诸多不便。界面设计常常缺乏直观性和易理解性，这使得船员在紧急情况下难以快速找到所需的功能和信息，进而影响了决策的即时性和准确性。

操作流程的复杂性和繁琐性进一步增加了船员的认知负担和操作时间，降低了整体决策效率。现有系统往往缺乏智能化的辅助功能，无法即时有效地为船员提供支持。在快速变化的海上环境中，这种不足可能对航行安全构成潜在威胁，因为船员需要依赖系统来做出关键决策，尤其是在避碰和应急情况下。优化人机交互界面、简化操作流程并提升系统的智能化水平迫在眉睫。

3 上海港复杂水域船舶避碰决策支持系统的优化对策

3.1 强化信息集成与共享

针对信息获取不全面的问题，提出强化信息集成与共享的优化对策。建立多元化的信息来源渠道是至关重要的。除了传统的 AIS 系统，还可以引入雷达、卫星图像、气象数据等多种数据源。这些数据源能够为船舶和环境提供更全面、更精准的信息，从而改善船舶避碰决

策的基础。通过整合这些多样化的数据来源,可以有效弥补单一信息源可能存在的局限性,提升决策的准确性和及时性。加强与相关机构如海事局、港口管理部门的合作非常关键。建立起信息的互联互通和共享机制,有助于打破信息孤岛现象,避免因信息不对称而导致的潜在安全风险。通过与各方建立紧密的合作关系,能够实现信息资源的最大化利用,确保船舶运行和管理的高效性和安全性。

在信息传输方面,选择高可靠性、低延迟的通信技术至关重要。这些技术不仅能够确保信息的实时传输和稳定接收,还能在关键时刻提供即时响应。针对关键信息,可以采用冗余传输和确认机制,以增强信息传输的可靠性和完整性,进一步保障船舶避碰决策的有效性。建立统一的信息管理平台是优化信息集成与共享的重要步骤。这样的平台可以对收集到的各类信息进行统一的整合、处理和分析,形成全面的船舶动态信息库。通过对数据的深度分析和挖掘,能够为船舶管理者和决策者提供更精准的信息支持,从而有效提升船舶避碰决策的水平和安全性保障能力。

3.2 优化决策模型与算法

针对决策模型适应性差的问题,需要采取一系列系统性的优化对策,以应对上海港复杂水域的特点和规律,并结合船舶避碰的实际需求,设计更加符合实际的决策模型。为了提高决策模型的适应性和准确性,需要深入分析上海港复杂水域的特点和规律。考虑到航道交叉、船舶密集、气象多变等因素对避碰决策的影响,可以设计一个综合考虑多种变量的决策模型。这种模型应该能够动态调整,以应对不同情况下的航行挑战。引入先进的算法和技术是提升决策模型效能的关键步骤。机器学习和深度学习技术可以通过大规模航行数据的分析和学习,不断优化模型的参数设置和算法逻辑。这种数据驱动的方法可以显著提高模型的预测能力和决策效率,使其在实时应用中更加灵活和响应迅速。

在优化过程中,建立有效的模型验证和评估机制至关重要。定期评估模型的准确性和可靠性,通过模拟和实地测试验证其在真实航行场景中的表现。这些评估不仅可以帮助发现和修正模型中的潜在问题,还能确保决策模型在实际应用中的有效性和稳定性。除了技术层面的优化,还应重视人机交互的设计。决策模型的结果需要以直观且易于理解的方式呈现给操作人员,以便需要时能够及时做出反应或调整。用户界面的友好性和操作流程的优化,能够有效提升决策模型的实际应用价值。

3.3 改善人机交互体验

针对人机交互不友好的问题,需要采取一系列优化

措施,以改善船舶避碰决策支持系统的用户体验,从而提升系统的实际应用价值和船员的操作效率。界面设计的优化至关重要。应确保界面设计直观易懂、美观大方,以便船员在紧急情况下能够快速找到必要的功能和信息。合理有序的布局和清晰的信息展示是关键,可以通过色彩、图标和文本的组合来突出显示重要信息,减少混淆和误解。考虑到船员的操作习惯,设计元素和交互方式应与他们的认知匹配,从而降低操作难度和认知负担,使操作更为流畅和自然。

简化操作流程是优化人机交互体验的重要策略之一。减少不必要的步骤和点击次数,优化任务流程和操作逻辑,能够显著提高船员完成避碰决策任务的效率。通过用户体验设计的方法,可以识别并消除操作流程中的瓶颈和不必要的复杂性,从而使整个操作过程更加高效和直观。引入智能化的辅助功能也是改善人机交互体验的重要手段。自动预警功能则可以根据实时数据和系统状态进行智能判断,及时警示船员可能的危险或决策需求,进一步提升决策的及时性和准确性。

4 总结

本文通过对上海港复杂水域船舶避碰决策支持系统开发与应用的探讨,分析了该系统的开发背景、技术需求及面临的挑战。针对上海港水域的复杂性,系统须具备高精度定位、实时通信技术、大数据分析和人工智能等先进技术,以提高船舶避碰决策的准确性和效率。当前信息获取机制不全面、通信实时性不足及数据处理挑战等问题仍需解决。随着技术的不断进步和应用场景的拓展,船舶避碰决策支持系统将在保障航行安全、提升港口运营效率等方面发挥更加重要的作用。

参考文献:

- [1] 董那睿,陆悦铭,李丽娜,等.上海港水域船舶避让决策知识库的构建[J].集美大学学报:自然科学版,2022,27(02):138-145.
- [2] 蒋苹,孙楚.一种复杂水域的船舶自主避碰方法:CN202310908029.9[P].CN116700295A[2024-07-30].
- [3] 杨琪森,王慎执,桑金楠,等.复杂开放水域下智能船舶路径规划与避障方法[J].计算机集成制造系统,2022,28(07):11.
- [4] 张金奋,王伦巍,吴达,等.基于自适应步长快速搜索随机树算法的船舶避碰路径规划[J].中国航海,2023,46(04):147-153.
- [5] 张英俊,翟鹏宇.海运船舶自主避碰技术研究进展与趋势[J].大连海事大学学报,2022.