

8-15-2024

Research on Virtual Simulation Testing Technology for Intelligent Navigation Collision Avoidance Decision-making and Planning

Jialun Liu

Hubei Longzhong Laboratory, Wuhan University of Technology Xiangyang Demonstration Zone, Xiangyang 441000, China; State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Fan Yang

School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

Lingli Xie

Hong Feng Control Company Limited of San Jiang Astronautics, Xiaogan 432000, China

Shijie Li

State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China

See next page for additional authors

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Special Column: Digital Twin and Intelligent Simulation of Marine and Maritime is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

Research on Virtual Simulation Testing Technology for Intelligent Navigation Collision Avoidance Decision-making and Planning

Abstract

Abstract: This paper studies virtual simulation testing technology for intelligent navigation collision avoidance decision-making and planning. The application requirements of intelligent navigation in cargo ships are introduced, and the current research status of collision avoidance decision-making strategies, path planning algorithms and decision-making planning testing technology are analyzed. For the intelligent navigation collision avoidance decision-making and planning capabilities of cargo ships, an intelligent navigation collision avoidance decision-making and planning algorithm is proposed based on the encounter situation division in the collision avoidance rules, combined with the quaternary ship field and Bezier curve interpolation theory. A simulation testing method for decision-making planning algorithms based on virtual simulation environment was constructed. The AIS (automatic identification system) simulator is used to simulate the status data of the target ship, and combined with the shipboard INS (integrated navigation system), the decision-making planning algorithm is tested. The effectiveness and feasibility of the proposed algorithm are verified through complex water simulation tests, which provides an important reference for the development and practice of intelligent navigation functions for cargo ships.

Keywords

intelligent navigation, collision avoidance decision-making, path planning, virtual simulation, testing technology

Authors

Jialun Liu, Fan Yang, Lingli Xie, Shijie Li, and Tengfei Wang

Recommended Citation

Liu Jialun, Yang Fan, Xie Lingli, 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.

面向智能航行避碰决策与规划的虚拟仿真测试技术研究

刘佳仑^{1,2,4}, 杨帆^{3,4}, 谢玲利⁵, 李诗杰^{2,3*}, 王腾飞^{3,4}

(1. 湖北隆中实验室 武汉理工大学襄阳示范区, 湖北 襄阳, 441000; 2. 武汉理工大学 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;
3. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063; 4. 武汉理工大学 智能交通系统研究中心, 湖北 武汉 430063;
5. 湖北三江航天红峰控制有限公司, 湖北 孝感 432000)

摘要: 研究了面向智能航行避碰决策与规划的虚拟仿真测试技术。介绍了智能航行在货运船舶中的应用需求, 分析了当下避碰决策策略、路径规划算法以及避碰决策与规划测试技术的研究现状。面向货运船舶智能航行避碰决策与规划能力, 基于避碰规则中的会遇态势划分, 结合四元船舶领域和贝塞尔曲线插值理论, 提出了一种智能航行避碰决策与规划算法。构建了一种基于虚拟仿真环境的避碰决策与规划算法仿真测试方法, 通过AIS(automatic identification system)模拟器模拟目标船的状态数据, 结合船载综合导航系统(integrated navigation system, INS)实现了避碰决策与规划算法的测试。通过复杂水域仿真测试验证了所提算法的有效性和可行性, 为货运船舶智能航行功能的开发与实践提供了参考。

关键词: 智能航行; 避碰决策; 路径规划; 虚拟仿真; 测试技术

中图分类号: TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2024)08-1780-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.24-0412

引用格式: 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.

Reference format: Liu Jialun, Yang Fan, Xie Lingli, 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.

Research on Virtual Simulation Testing Technology for Intelligent Navigation Collision Avoidance Decision-making and Planning

Liu Jialun^{1,2,4}, Yang Fan^{3,4}, Xie Lingli⁵, Li Shijie^{2,3*}, Wang Tengfei^{3,4}

(1. Hubei Longzhong Laboratory, Wuhan University of Technology Xiangyang Demonstration Zone, Xiangyang 441000, China;
2. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
3. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
4. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
5. Hong Feng Control Company Limited of San Jiang Astronautics, Xiaogan 432000, China)

Abstract: This paper studies virtual simulation testing technology for intelligent navigation collision avoidance decision-making and planning. The application requirements of intelligent navigation in cargo ships are introduced, and the current research status of collision avoidance decision-making strategies, path planning algorithms and decision-making planning testing technology are analyzed. For the intelligent navigation collision avoidance decision-making and planning capabilities of cargo ships, an intelligent navigation collision avoidance decision-making and planning algorithm is proposed based on the encounter situation division in the collision avoidance rules, combined with the quaternary ship field

收稿日期: 2024-03-26 修回日期: 2024-07-03

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB4301402); 国家自然科学基金(52272425); 海洋工程全国重点实验室(上海交通大学)开放基金(GKZD010089)

第一作者: 刘佳仑(1987-), 男, 研究员, 博士, 研究方向为船舶自动驾驶与测试。

通讯作者: 李诗杰(1988-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为基于机器学习与数据驱动的船舶航行控制和智能船舶测试验证评估。

and Bezier curve interpolation theory. A simulation testing method for decision-making planning algorithms based on virtual simulation environment was constructed. The AIS (automatic identification system) simulator is used to simulate the status data of the target ship, and combined with the shipboard INS (integrated navigation system), the decision-making planning algorithm is tested. The effectiveness and feasibility of the proposed algorithm are verified through complex water simulation tests, which provides an important reference for the development and practice of intelligent navigation functions for cargo ships.

Keywords: intelligent navigation; collision avoidance decision-making; path planning; virtual simulation; testing technology

0 引言

船舶作为水路交通运输的重要载体,其智能化发展已成为当下世界各国的研究热点。智能航行是船舶智能化发展的核心功能,受到了国内外学者的广泛关注。智能航行系统可以提供独立于人以外的感知、决策、规划和控制能力,对于提升船舶航行安全、降低事故风险具有重要意义。

智能航行系统的核心功能之一是其决策与规划能力,尤其对于货运船舶而言,决策与规划直接影响航行安全和交通效率。在避碰决策与规划领域中,研究人员致力于研究避碰决策策略和路径规划算法,以确保船舶的避碰过程满足避碰规则,且希望运动过程符合船舶的运动特性^[1]。目前,船舶智能航行的避碰决策与规划技术研究主要集中在避碰决策、规划算法以及决策与规划测试^[2]。

在船舶避碰决策方面,部分研究人员通过综合考虑船舶领域、碰撞风险度、规则遵从性,以及船舶操纵性等方面来定量分析制定避碰决策策略;部分研究人员主要基于避碰规则行动要求、专家经验、驾驶人员思维模式,以及深度强化学习^[3],研究类人决策的智能系统^[4]。此外也有少数研究人员综合考虑上述两种方法来制定应对更多场景和需求的避碰决策模型^[5]。

在避碰决策结果下,规划算法旨在提供安全可行的航行路径/轨迹,或推荐航向和航速。通常情况下,船舶避碰领域的规划算法可以分为基于

搜索的算法^[6-8]、基于位置空间采样的算法^[9]、基于速度空间采样的方法^[10-11]、基于优化的方法^[12-13]、基于多项式插值的算法^[14-15]和基于机器学习的算法^[16]。这些方法都有适用的船舶对象和应用场景,但是对于海上航行的货运船舶而言,一方面,符合避碰规则是基本前提,另一方面,需要尽可能避免对航向和航速作连续的小变动。

由于船舶的高附加值属性和其运行环境的高风险性,船舶智能航行系统从系统架构到工程应用需经过功能性和系统性的测试,以检验其各项功能的安全性、可靠性和完整性^[17-19]。Pedersen等^[20]提出了一种自主航行系统的综合测试原型系统,包括测试管理系统、数字孪生、虚拟世界模拟、测试场景生成和测试结果评价等功能模块。金建海等^[21]针对无人艇开展了复杂场景模拟、智能感知、运动仿真、环境效应建模等关键仿真技术研究。Johansen等^[22]提出了一种设计和测试基于风险决策能力控制系统的方法,以提高其智能性并增强自主系统的安全运行。由于开展物理实验风险高、经济性差、周期长、环境条件不可控,应以虚拟仿真为先导开展相关的测试验证研究,船舶操纵仿真平台为决策与规划算法开发和测试提供了良好的研究基础^[23]。此外,考虑到避碰规则的约束,让避碰过程的复杂度进一步增加,如何针对船舶避碰决策与规划算法进行安全性和可靠性的测试与验证成为了一项重要的研究工作。因此,开发基于虚拟仿真的智能航行决策与规划测试方法具有重要的理论意义和实践价值。

本文基于避碰规则中的会遇态势划分，结合四元船舶领域和贝塞尔曲线插值理论，通过计算避碰路径点，采用曲线插值方法，提出了一种船舶智能航行避碰决策与规划算法。在此基础上利用 AIS(automatic identification system) 模拟器和 Redis 数据库，以 INS(integrated navigation system) 平台为基础，构建了虚拟仿真测试环境，设计了仿真实验，模拟复杂水域场景下决策与规划过程，测试智能航行过程中的决策与规划能力，验证了本文避碰决策与规划算法的有效性和可行性。

1 避碰决策与规划算法设计

1.1 算法总体设计

对于货运船舶在实际航行过程中，本船除了要到达航程的终点，船员通常会设定一些航行过程中期望路过的位置，因此本文引入了牵引点 P_T 的概念，牵引点通常是人为设定的中间点或终点。算法总体流程图如图 1 所示。

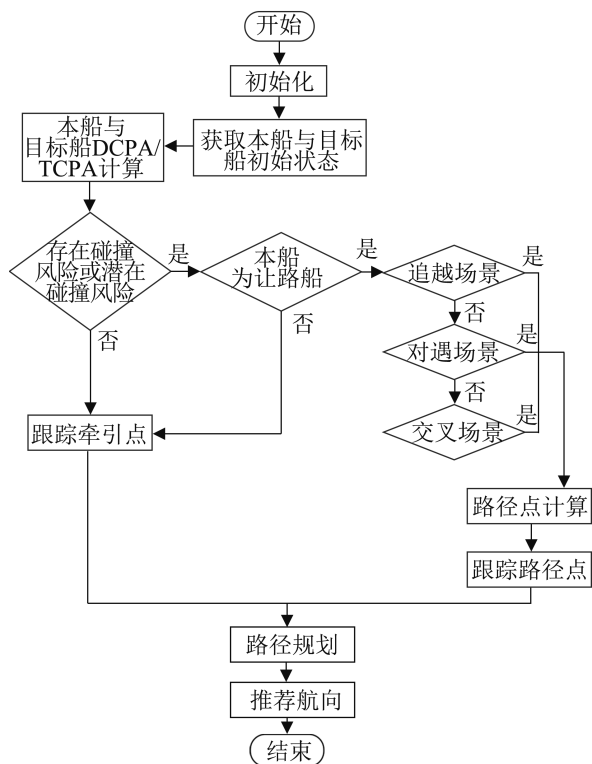


图 1 算法总体设计流程图

Fig. 1 Overall design flowchart of the algorithm

1.2 基于避碰规则的会遇态势解析

根据 1972 年国际海上避碰规则，可以将两船会遇态势分为对遇、交叉和追越，其中追越有着明确的角度描述，正横后方大于 22.5° 的某一方向。此外考虑到让路船和直航船有着不同的行动准则，本文将两船之间可能存在碰撞风险的会遇态势分为 5 种情况，如图 2 所示。其中，第 I 种情况为本船和目标船对遇或本船追越目标船，第 II、III、IV 种情况为本船和目标船交叉相遇，第 V 种情况为本船被目标船追越。

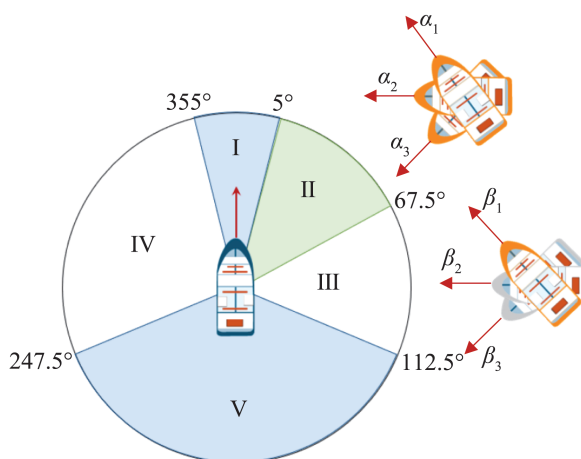


图 2 会遇态势解析

Fig. 2 Encounter situation analysis

对于第 IV 种情况，本船为直航船，目标船应主动避让本船；对于第 V 种情况，本船正在被目标船追越，为直航船，他船应主动避让本船；对于第 I 种情况，当本船和目标船对遇时，本船应向右侧转向，从目标船的左舷驶过，当本船追越目标船时，应以避免碰撞为前提进行绕行。对于第 II 种情况，考虑到目标船的航向，可以将会遇态势细分为 α_1 、 α_2 、 α_3 三种情况，三种情况下均存在碰撞风险，本船都应右转避让。对于第 III 种情况，考虑到目标船的航向，可以将会遇态势细分为 β_1 、 β_2 、 β_3 三种情况，只有 β_1 存在碰撞风险，且此时目标船的速度应当大于本船，因此，经过一段时间的航行后会遇态势会转变为第 II 种情况。

1.3 两船会遇态势识别

本文中会遇态势识别主要基于两船相遇的最近会遇距离和最短会遇时间。如图3所示, 其中, v_o 为本船速度, v_t 为目标船速度, P 为本船位置到相对速度矢量的垂足, D_{DCPA} (distance to closest point of approach, DCPA) 为 OP 两点之间的距离, D_{TCPA} (time to closest point of approach, TCPA) 为 AP 两点之间的距离除以两船相对速度矢量的模长, 计算公式为

$$\begin{cases} D_{DCPA} = D \cdot \sin \varphi \\ D_{TCPA} = D \cdot \cos \varphi / v_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: D 为两船之间的距离; v_r 为两船的相对速度矢量; φ 为相对速度的方向和两船之间连线的夹角。本文本船和目标船之间的 D_{DCPA}/D_{TCPA} 与其风险阈值进行比较以判断会遇态势。

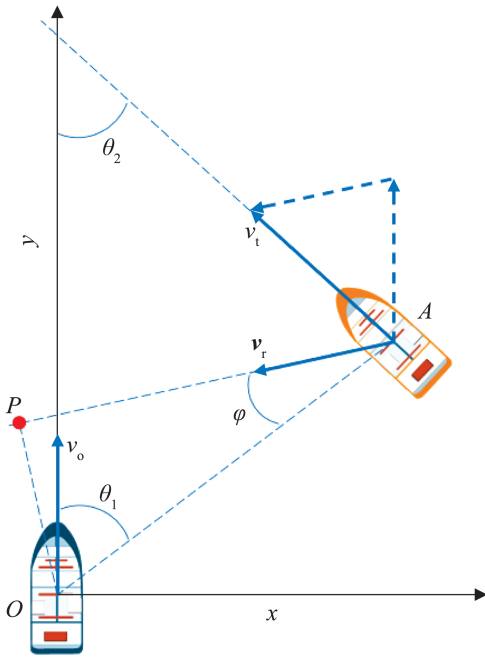


图3 两船会遇态势识别

Fig. 3 Identification of encounter situation between two ships

1.4 避碰路径点计算

如图3所示, 假设本船航向为 h_o , 目标船航向为 h_t , D_{DCPA} 的风险阈值为 D_{DCPA_lim} , D_{TCPA} 的风险阈值为 D_{TCPA_lim} 。若 $(0 \leq D_{DCPA} < D_{DCPA_lim}) \cap$

$(0 < D_{TCPA} < D_{TCPA_lim})$, 则认为本船与目标船存在碰撞风险或潜在碰撞风险。定义本船航向与目标船和本船位置连线的夹角为 θ_1 , 本船航向与目标船航向的夹角为 θ_2 , 以本船航向的方向向量顺时针转动为正, 逆时针转动为负。在此基础上, 结合会遇态势识别结果, 进而计算避碰路径点。

1.4.1 追越场景

当 $(-90^\circ < \theta_1 < 90^\circ) \cap (-5^\circ < \theta_2 < 5^\circ) \cap (v_t < v_o)$, 判定当前会遇态势为本船追越目标船。

当 $\theta_1 \leq 0$ 时, 路径点 P_w 的计算方法为

$$P_w = [(L - 2D_{DCPA}) \cdot \sin(h_o + \phi), (L - 2D_{DCPA}) \cdot \cos(h_o + \phi)] \quad (2)$$

当 $\theta_1 > 0$ 时, 路径点的计算方法为

$$P_w = [(L + 2D_{DCPA}) \cdot \sin(h_o + \phi), (L + 2D_{DCPA}) \cdot \cos(h_o + \phi)] \quad (3)$$

式中: L 通常取 1 nm, ϕ 取 30° 。

1.4.2 对遇场景

当 $(-90^\circ < \theta_1 < 90^\circ) \cap [(-180^\circ \leq \theta_2 \leq -175^\circ) \cup (175^\circ \leq \theta_2 \leq 180^\circ)]$, 判定当前会遇态势为本船与目标船对遇。路径点计算方法与追越场景相同。

1.4.3 交叉相遇场景

对于交叉相遇场景, 首先需要判定本船为直航船还是让路船。若 $-5^\circ < \theta_1 < 112.5^\circ$, 判定本船为让路船, 执行让路操作, 从目标船船尾经过; 若 θ_1 在其他范围内, 判定本船为直航船, 本船执行直航操作, 从目标船船头经过。当本船为让路船时, 需要计算避碰路径点。

当 $(-5^\circ < \theta_1 < 0^\circ) \cap (0^\circ \leq \theta_2 < 180^\circ)$ 或 $(0^\circ < \theta_1 < 67.5^\circ) \cap (-180^\circ \leq \theta_2 < 0^\circ)$ 时, 路径点的计算方法为

$$P_w = [x_{CPA} - R \cdot \sin(h_T), y_{CPA} - R \cdot \cos(h_T)] \quad (4)$$

式中: x_{CPA} 、 y_{CPA} 分别为目标船与本船的最近会遇点的横坐标和纵坐标; R 为目标船四元船舶领域的 R_{aft} , 如图4所示。

当 $(67.5^\circ < \theta_1 < 112.5^\circ) \cap (-180^\circ \leq \theta_2 < 0^\circ)$ 时, 路径点的计算方法为

$$P_w = [\sin(h_o), \cos(h_o)] \quad (5)$$

除了上述3种会遇情况以外，本船将始终以牵引点 T_p 为跟踪目标。

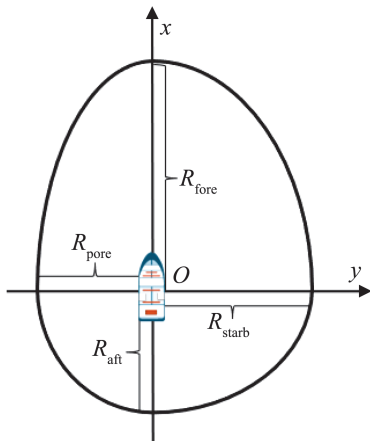


图4 四元船舶领域
Fig. 4 Quaternion ship domain

1.5 路径规划

本文通过在本船位置与路径点/牵引点之间利用样条插值实现路径规划。输入为本船当前的位置和航向、路径点/牵引点的位置和期望航向 h_E ，输出为路径，其中路径点/牵引点的期望航向为本船当前航向，牵引点的航向可以人为设置。采用3阶贝塞尔曲线进行插值，贝塞尔曲线的形状由所有控制点的位置和数量共同决定。3阶贝塞尔曲线的控制点，依次记作 P_0 、 P_1 、 P_2 、 P_3 。以本船位置和路径点/牵引点分别为第一个和最后一个控制点，计算中间两个控制点的公式为

$$\begin{aligned} P_1 &= [x_{P_0} + H \cdot \cos(h_o), y_{P_0} + H \cdot \sin(h_o)] \\ P_2 &= [x_{P_3} + H \cdot \cos(h_E), y_{P_3} + H \cdot \sin(h_E)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中： H 为贝塞尔曲线插值的控制点之间的距离。

$$H = \frac{(x_{P_0} - x_{P_3})^2 + (y_{P_0} - y_{P_3})^2}{3} \quad (7)$$

贝塞尔曲线的一般表达形式为

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_{i,n}(t) P_i, t \in [0, 1] \quad (8)$$

式中： P_i 为控制点； $B_{i,n}(t)$ 为伯恩斯坦多项式。

$$B_{i,n}(t) = C_{i,n} (1-t)^{n-i} t^i, i = 0, 1, \dots, n \quad (9)$$

三阶贝塞尔曲线的的表达式为

$$P(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + t^3 P_3 \quad (10)$$

将 t 在 $[0, 1]$ 之间进行离散，可以得到3阶贝塞尔曲线插值路径。

2 基于分布式架构的仿真测试系统

基于分布式架构的避碰决策与规划算法虚拟仿真测试方法，如图5所示。其中，AIS模拟器、避碰决策与规划算法、航向控制算法部署在一台主机上，船舶模拟器和INS软件分别部署在另外两台主机上。避碰决策与规划算法基本流程基于Python语言进行开发，程序运行在一台具有八核、3.60GHz主频的Intel Core i7-9700K处理器上。

首先AIS模拟器向数据库中发送目标船状态数据，算法主体从数据库中获取目标船状态数据进行预处理，并分别执行态势识别、路径点计算、路径规划，再通过LOS (line of sight) 实现制导，得到建议航向。接着通过航向控制算法计算出控制指令并发送至船舶模拟器，通过船舶模拟器的实时仿真计算将本船状态数据反馈给程序，程序会将需要展示的数据发送至数据库，最终显示单元从数据库中获取相关数据并显示。

2.1 AIS模拟器

AIS模拟器可以通过配置目标船参数实现特定航行场景的仿真，模拟器会根据初始状态推算后续时刻目标船的状态。其中目标船可以设置的状态和参数主要包括经纬度、航向、航速、转向率、船长、船宽。AIS模拟器向数据库中发送所有目标船状态和参数的推演数值的频率为1s。

2.2 数据库

本文在研究中使用Redis数据库。Redis数据库是一个开源的内存数据结构存储系统，可以用作数据库、缓存、键值存储和消息队列中间件，适用于构建实时通信系统，且具有高性能、高可用性、可扩展性和灵活性等优势。

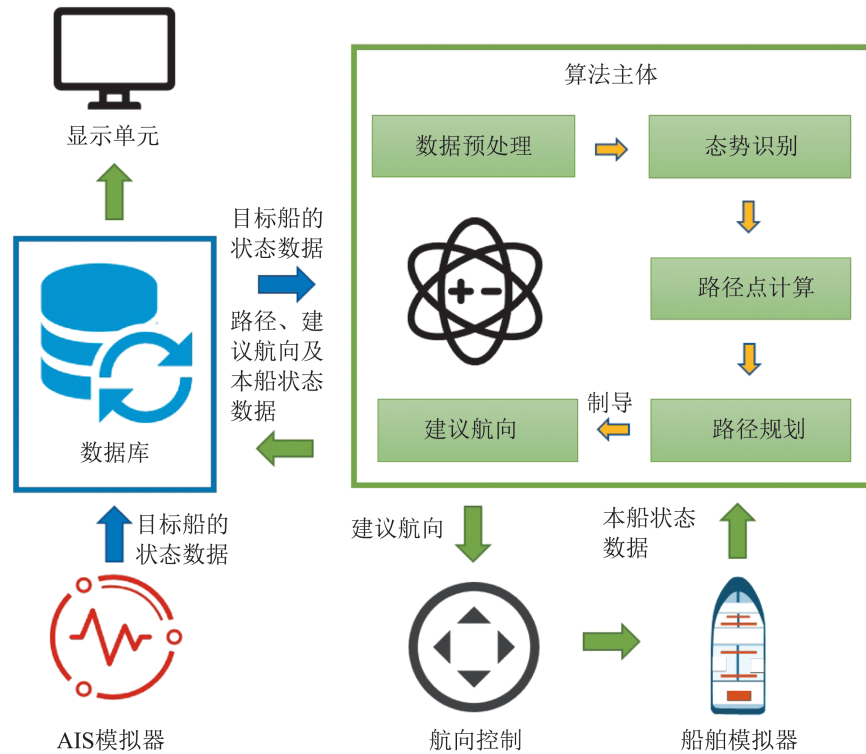


图5 仿真测试流程

Fig. 5 Simulation testing process

2.3 船舶模拟器

船舶模拟器拥有丰富的船舶模型数据库、高精度的船舶操纵运动模型,可以模拟风浪流等多种自然环境,为智能航行功能和算法开发提供了安全、经济、高效的仿真测试环境。

本文基于NTPRO-5000型全任务大型船舶操纵模拟器中提供的VLCC 8船型,其船长333 m、船宽60 m,最大航速16.4 kn,单桨单舵,如图6所示。算法主体与模拟器之间使用MQTT客户端发布和订阅的模式以UHI(universal hardware interface)通信方式实现数据传输。



图6 船舶模拟器中的VLCC 8船型

Fig. 6 VLCC 8 ship models in ship simulator

2.4 INS软件

INS软件是一种基于电子海图并集成了多种导航设备信息和功能于一体的综合导航系统,可以为船舶驾驶提供全面综合的导航决策支持,如图7所示。

3 仿真实验与结果

3.1 仿真测试流程

避碰决策与规划仿真测试流程如下:

(1) 在AIS模拟器中预设目标船的初始状态信息并运行,AIS模拟器推算1 s之后所有船的状态信息,并向Redis数据库中发送所有船舶的状态数据。

(2) 程序通过MQTT客户端订阅船舶模拟器中的本船当前状态,同时从Redis数据库中获取目标船状态数据。在对数据进行预处理之后,程序会先对本船与周围6 nm范围内的所有目标船分别计算 D_{DCPA} 和 D_{TCPA} ,将其与 D_{DCPA} 和 D_{TCPA} 阈值进行比较分析,并通过算法判定会遇态势,计算出避

碰路径点。

(3) 基于本船当前位置、航向和路径点/牵引点位置、航向，利用贝塞尔曲线进行插值计算出路径。在此基础上，采用LOS算法，由贝塞尔曲线插值的路径计算建议航向。基于贝塞尔曲线插值的路径具有较强的可跟踪性，可以实现船舶运动控制过程的平滑过渡。

(4) 航向控制算法基于建议航向计算出控制指令，并将控制指令通过MQTT客户端发布给船舶模拟器。

(5) 程序将单次循环的路径、建议航向以及本船状态数据存储至Redis数据库，通过主从复制的方式，可以在显示单元的主机上同步数据，进而实现INS软件的状态数据展示。



图7 INS软件界面

Fig. 7 INS software interface

3.2 算法逻辑仿真验证

为验证避碰决策与规划算法逻辑的有效性，分别设计不同会遇态势下两船避碰场景。根据会遇态势解析，第IV种和第V种情况下，本船为直航船，无需进行决策，对于第III种情况可以演变为第II种情况考虑。因此本文设计了第I种情况下的追越场景和对遇场景，以及第II种情况下的交叉场景，共3种典型会遇场景仿真实验，如图8所示。

可以看出，在3种典型会遇场景下，本船均能够得到合适的避碰路径点并规划出平滑的路径。在追越和对遇场景中，通过会遇态势分析可以计算出本船右前方1 nm处的避碰路径点；在交叉场景中，

可以计算出目标船在最近会遇点后方 R_{aft} 处的避碰路径点。仿真结果验证了所提出的决策与规划算法的有效性，与理论分析的结果一致。

3.3 仿真测试系统实验结果与分析

仿真测试中，通过AIS模拟器在开阔水域中构建了20艘目标船，如图9所示，图中绿色三角形表示目标船，橙色圆圈是人为设置的牵引点，黄色曲线为贝塞尔曲线插值生成的路径。当本船与目标船之间存在碰撞风险时，会以路径点为规划的目标点；当本船与目标船之间无风险时，会以牵引点为规划的目标点。可以看出，本船与右前方的目标船之间存在碰撞风险，此时会遇场景

为交叉相遇, 因此应当以避碰路径点为跟踪目标。 引点为跟踪目标。
在本船右转并且与目标船无碰撞风险后继续以牵

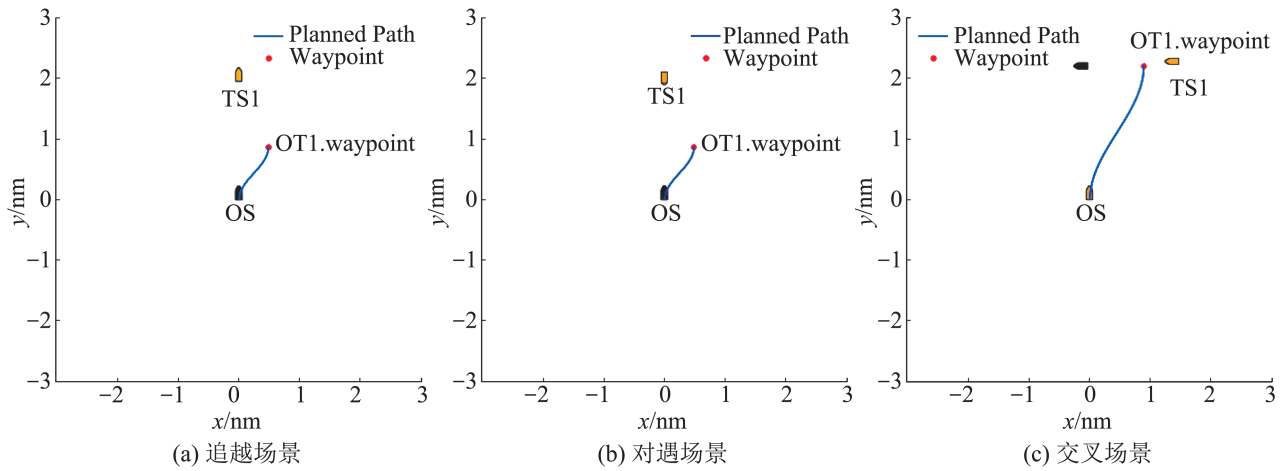


图 8 典型会遇场景算法验证
Fig. 8 Typical encounter scenario algorithm verification

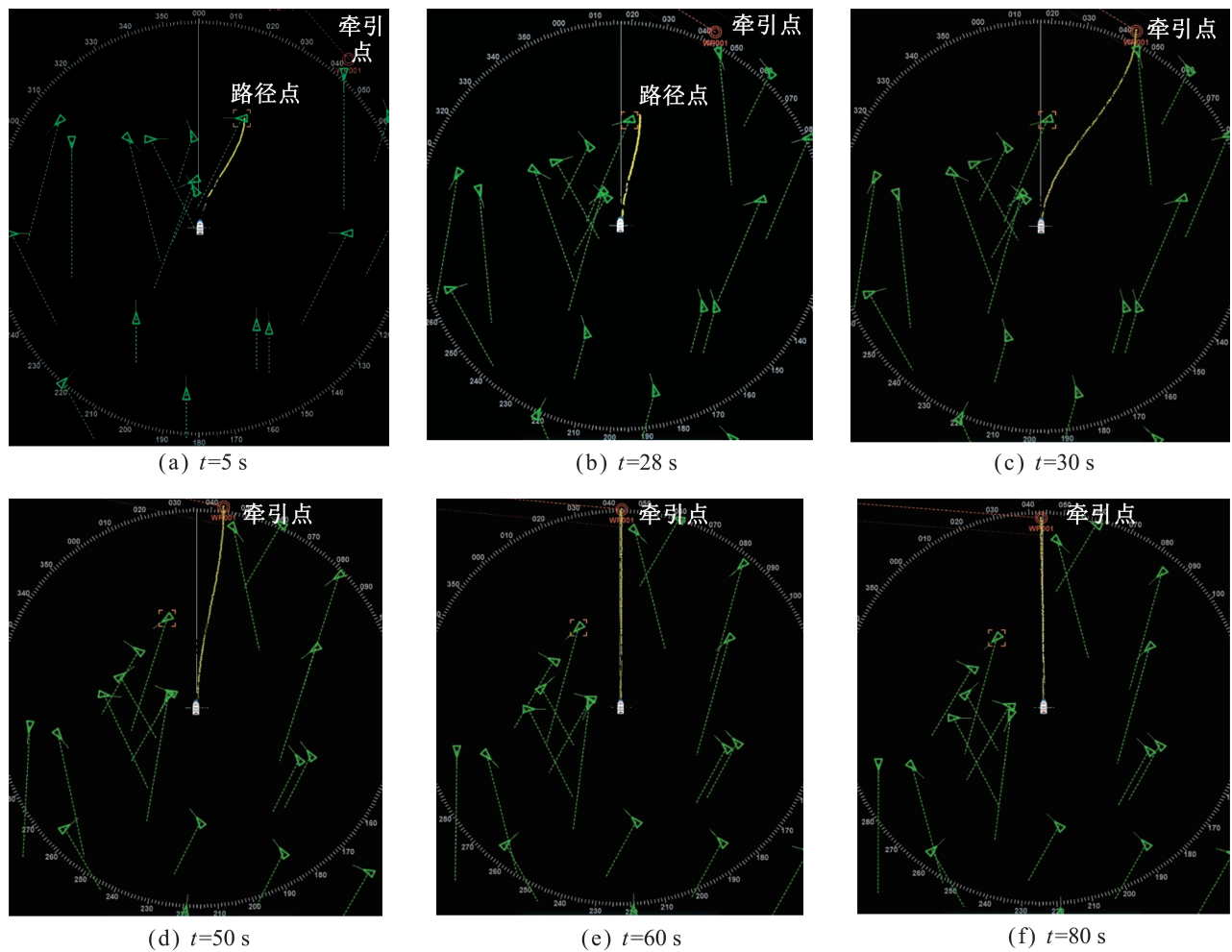


图 9 复杂水域仿真测试
Fig. 9 Complex water simulation

<http://www.china-simulation.com>

仿真过程中的建议航向、本船航向和目标船航向变化曲线如图10所示,本船初始航向为 0° ,随着本船缓慢转向,建议航向从 21.4° 逐步增加至 26.2° ,在第30s时,本船与目标船之间的碰撞风险解除,转而以牵引点为跟踪目标,建议航向由 42.7° 逐步增加并稳定在 43.1° 。可以看到,在避让目标船的过程中,建议航向的变化较为平缓,在碰撞风险解除后,跟踪目标由路径点切换至牵引点,因此建议航向发生了一次突变,整个过程中,本船实际航向变化较为平缓。在实际应用过程中,倘若航行水域较为拥挤,本船在成功避让一艘目标船后,可能会与其他船舶形成新的碰撞风险。

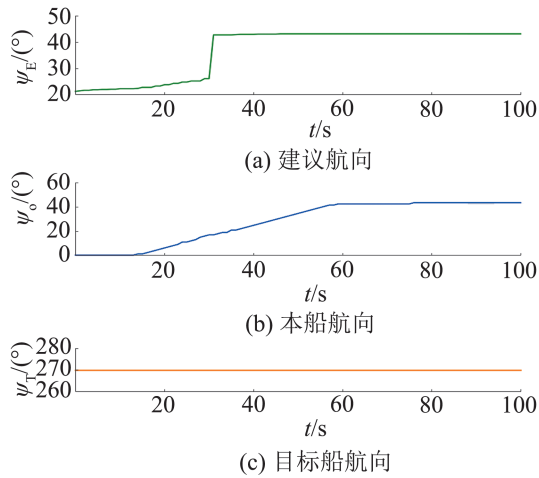


图10 建议航向、本船航向和目标船航向变化曲线
Fig. 10 Change curves of suggested heading, own ship's heading and target ship's heading

4 结论

本文提出了一种船舶智能航行避碰决策与规划算法,通过模拟AIS数据,基于船舶模拟器平台,使用Redis数据库作数据中转,基于车载INS软件实现了避碰决策与规划算法的虚拟仿真测试,验证了所提出的避碰决策与规划方法和虚拟仿真测试技术的有效性和可行性,初步构建了船舶智能航行避碰决策与规划虚拟仿真测试能力。

参考文献:

[1] Huang Yamin, Chen Linying, Chen Pengfei, et al. Ship

Collision Avoidance Methods: State-of-the-art[J]. Safety Science, 2020, 121: 451-473.

[2] Öztürk Ü, Akdağ M, Ayabakan T. A Review of Path Planning Algorithms in Maritime Autonomous Surface Ships: Navigation Safety Perspective[J]. Ocean Engineering, 2022, 251: 111010.

[3] Cui Zhewen, Guan Wei, Zhang Xianku. Collision Avoidance Decision-making Strategy for Multiple USVs Based on Deep Reinforcement Learning Algorithm[J]. Ocean Engineering, 2024, 308: 118323.

[4] Wang C, Zhang X, Cong L, et al. Research on Intelligent Collision Avoidance Decision-making of Unmanned Ship in Unknown Environments[J]. Evolving Systems, 2019, 10(4): 649-658.

[5] Liu J, Zhang J, Yan X, et al. Multi-ship Collision Avoidance Decision-making and Coordination Mechanism in Mixed Navigation Scenarios[J]. Ocean Engineering, 2022: 111666.

[6] 杜哲,文元桥,黄亮,等.基于动态复杂度地图的船舶航迹规划[J].系统仿真学报,2018,30(6):2390-2397,2404.

Du Zhe, Wen Yuanqiao, Huang Liang, et al. Route Planning for Vessel Based on Dynamic Complexity Map [J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2390-2397, 2404.

[7] 宋大雷,干文浩,许嚶枝,等.无人船实时路径规划与编队控制仿真研究[J].系统仿真学报,2023,35(5):957-970.

Song Dalei, Gan Wenhao, Xu Yingzhi, et al. Simulation of Real-time Path Planning and Formation Control for Unmanned Surface Vessel[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(5): 957-970.

[8] Wu M, Zhang A, Gao M, et al. Ship Motion Planning for Mass Based on a Multi-objective Optimization Ha* Algorithm in Complex Navigation Conditions[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(10): 1126.

[9] Chiang H T L, Tapia L. COLREG-RRT: An RRT-based COLREGS-compliant Motion Planner for Surface Vehicle Navigation[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2018, 3(3): 2024-2031.

[10] Huang Y, Chen L, Van G P. Generalized Velocity Obstacle Algorithm for Preventing Ship Collisions at Sea [J]. Ocean Engineering, 2019, 173: 142-156.

[11] Yuan X, Tong C, He G, et al. Unmanned Vessel Collision Avoidance Algorithm by Dynamic Window Approach Based on COLREGS Considering the Effects of the Wind and Wave[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(9): 1831.

[12] Ma Yong, Hu Mengqi, Yan Xinping. Multi-objective Path

- Planning for Unmanned Surface Vehicle With Currents Effects[J]. *ISA Transactions*, 2018, 75: 137-156.
- [13] Chen H, Ma Y, Hu W, et al. Time and Risk Optimal Path Planning for Surface Vehicle via Level Set in Dynamic Environment[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(6): 8639-8649.
- [14] Lande S V. Path Planning for Marine Vehicles Using Bézier Curves[D]. NTNU, 2018.
- [15] Yang Fan, Zhu Yaping, Liu Jialun, et al. Trajectory Generation for Autonomous Surface Vessels Based on Bézier Curves[C]//2023 7th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS). [S. l.]: IEEE, 2023: 651-656.
- [16] Gao M, Shi Gy. Ship-collision Avoidance Decision-making Learning of Unmanned Surface Vehicles with Automatic Identification System Data Based on Encoder-decoder Automatic-response Neural Networks[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(10): 754.
- [17] 刘佳仑, 杨帆, 马枫, 等. 智能船舶航行功能测试验证的方法体系[J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 45-50.
Liu Jialun, Yang Fan, Ma Feng, et al. Method System of Navigation Function Test and Verification for Intelligent Ship[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 45-50.
- [18] 杨帆, 刘佳仑, 于淳, 等. 虚实融合的船舶智能航行测试技术[J]. *中国航海*, 2022, 45(3): 113-122.
- Yang Fan, Liu Jialun, Yu Chun, et al. Test Technology for Intelligent Navigation with Mix of Virtual and Actual Reality[J]. *Navigation of China*, 2022, 45(3): 113-122.
- [19] Liu Jialun, Yang Fan, Li Shijie, et al. Testing and Evaluation for Intelligent Navigation of Ships: Current Status, Possible Solutions, and Challenges[J]. *Ocean Engineering*, 2024, 295: 116969.
- [20] 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.
- [21] 金建海, 周则兴, 张波, 等. 无人艇航行仿真关键技术研究[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(12): 2846-2853.
Jin Jianhai, Zhou Zexing, Zhang Bo, et al. Research on USV Navigation Simulation Key Technologies[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(12): 2846-2853.
- [22] Johansen T, Blindheim S, Torben T R, et al. Development and Testing of a Risk-based Control System for Autonomous Ships[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 234: 109195.
- [23] 孙佳文, 任鸿翔, 肖方兵, 等. 基于虚拟现实的整船仿真训练平台[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(9): 2243-2251.
Sun Jiawen, Ren Hongxiang, Xiao Fangbing, et al. Whole Ship Simulation Training Platform Based on Virtual Reality[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(9): 2243-2251.