

船舶自动靠泊轨迹规划与控制研究进展

李诗杰^{1,4}, 杨有为^{1,4}, 刘佳仑^{1,2,3,5}, 董智霖^{1,4}

1. 武汉理工大学 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. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;
4. 武汉理工大学 交通与物流工程学院, 湖北 武汉 430063;
5. 湖北东湖实验室, 湖北 武汉 420202)

摘要: 船舶自动靠泊是智能航行的重要环节,但其高度场景依赖性使研究成果难以直接转化为通用系统。不同船型、推进配置以及复杂泊位条件,对轨迹规划与控制策略均提出差异化要求。同时,科学定义靠泊完成状态并建立评价体系,是确保系统实用性与安全性的关键。本文系统梳理了近年来船舶自动靠泊轨迹规划与控制的研究进展:首先介绍关键技术要素,包括轨迹规划与运动控制方法;其次重点分析了面向特定船型与推进系统的差异化靠泊策略;随后讨论了靠泊完成标准、性能评估及试验验证方法;最后总结了当前研究面临的主要挑战,展望了未来发展方向。

关键词: 自动靠泊; 轨迹规划; 运动控制; 智能船舶

中图分类号:U675 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.003

Survey on research status of trajectory planning and control methods for autonomous ship berthing

LI Shijie^{1,4}, YANG Youwei^{1,4}, LIU Jialun^{1,2,3,5}, DONG Zhilin^{1,4}

- (1. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. Intelligent Transportation Systems Research Center, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 4. School of Transportation and Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
5. East Lake Laboratory, Wuhan 420202, China)

Abstract: Autonomous berthing is a key element of intelligent navigation, yet its strong scenario dependence limits the application of theoretical research into actual implementations. Variations in ship type, propulsion configuration, and berth conditions impose distinct requirements on trajectory planning and control. At the same time, defining the completion criteria for autonomous berthing operation and establishing a comprehensive evaluation framework are essential for ensuring practicality and safety. This paper systematically reviews recent advances in trajectory planning and motion control for autonomous berthing. First, the key technical elements, including trajectory planning and motion control methods, are introduced. Second, different berthing strategies tailored to specific ship types and propulsion systems are analyzed in depth. Subsequently, berthing completion standards, performance evaluation metrics, and experimental validation

收稿日期:2025-10-11

基金项目:国家重点研发计划(2022YFB4301402);国家自然科学基金项目(52522220)资助

第一作者:李诗杰(1988—),女,博士,副教授,研究方向为船舶智能航行运动控制。E-mail:lishijie@whut.edu.cn

通信作者:刘佳仑(1987—),男,博士,研究员,研究方向为船舶智能驾驶系统研发与测试。E-mail:jialunliu@whut.edu.cn

引用格式:李诗杰,杨有为,刘佳仑,等.船舶自动靠泊轨迹规划与控制研究进展[J].中国航海,2025,48(4):13-25.

LI S J, YANG Y W, LIU J L, et al. Survey on research status of trajectory planning and control methods for autonomous ship berthing[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 13-25. (in Chinese)

approaches are discussed. Finally, the major challenges in the current research are summarized, and potential directions for future development are outlined.

Key words: autonomous berthing; trajectory planning; motion control; intelligent ship

在全球经济一体化进程中,航运业作为国际贸易的关键支柱,其安全、高效运营对于维护全球供应链的稳定至关重要。船舶智能化^[1]已成为行业发展的核心驱动力,国际海事组织对船舶自动化等级的明确划分,以及中国等航运大国将高技术船舶与船舶智能化纳入国家发展战略^[2],均预示着自动航行技术的广阔前景。在船舶航行的诸多环节中,靠泊作业因其操作环境复杂、所需控制精度高、受环境因素影响显著,历来被视为最具挑战性的一环。因此,实现船舶自动靠泊,不仅是衡量船舶智能化水平的核心指标之一,更是攻克全自动航行“最后一公里”的关键技术瓶颈^[3]。

为应对这一挑战,船舶自动靠泊技术已发展成为涉及环境感知、轨迹规划与运动控制的综合系统工程。在技术路线上,已形成了从经典的PID控制^[4],到现代控制理论中的模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)^[5]、滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)^[6],再到数据驱动的神经网络(Neural Network, NN)^[7]与强化学习^[8](Reinforcement Learning, RL)。将轨迹规划与运动控制进行一体化设计的趋势日益明显,旨在生成动力学可行且最优的靠泊方案^[9]。

尽管近年来船舶自动靠泊轨迹规划与控制方法方面取得了诸多进展,但将相关学术成果转化为能够适应多样化作业场景的工程系统,仍面临诸多挑战。核心难点在于船舶靠泊作业具有高度的场景依赖性:不同的船舶类型,如大型船舶、无人水面艇、欠驱动船舶和各异的推进系统配置,如单桨单舵、双桨、配备艏艉侧推器等,以及多变的泊位条件与靠泊模式,均对自动靠泊控制系统的设计提出差异化要求。此外,科学界定靠泊完成状态,并建立统一、客观的评价体系,是保障自动靠泊系统实用性和安全性的关键。

本文旨在系统梳理近年来船舶自动靠泊轨迹规划与控制研究进展,重点从特定船型与推进系统的角度,分析不同靠泊策略的适用性、优势与局限。为了确保综述的全面性和时效性,本文检索了Web of Science、Scopus、CNKI等中外主要数据库中近些年发表的相关文献,使用的主要关键词包括“船舶自动靠泊(autonomous ship berthing)”“轨迹规划(trajjectory planning)”“运动控制(motion control)”等。

近年来,已有多篇综述对船舶靠泊技术进行了

总结。CAI等^[2]从文献计量学角度出发,对感知技术、靠泊类型、控制方法和评估方法等多个方面进行了系统梳理;WU等^[3]则专门聚焦于无人水面艇的自主靠泊架构、关键技术与挑战。然而,这些综述或覆盖面较广,或聚焦于特定的船舶对象,对不同船型(尤其是欠驱动与全驱动船舶)在不同推进系统配置下,其规划与控制策略的差异化 and 适用性分析尚显不足。针对现有研究的不足,本文的主要贡献在于:1)系统性地对比分析了面向特定船型和推进系统的差异化轨迹规划与控制策略,深入探讨了其适用性、优势与工程挑战;2)重点梳理了如何科学界定靠泊完成状态,并对现有的性能评估指标和试验验证方法进行了归纳,强调了建立统一评价体系的重要性。

本文首先介绍靠泊轨迹规划以及运动控制在船舶自动靠泊系统设计中的关键作用;其次,围绕不同船型及推进配置,对靠泊方法进行总结归纳;然后,梳理现有研究采用的靠泊完成判据与评价方法,包括完成状态的定义、性能指标体系的构建以及试验验证手段;最后,总结当前研究所面临的主要挑战,并对未来发展趋势加以展望。

1 船舶自动靠泊关键技术

自动靠泊作为一项复杂的系统工程,其技术核心可被解构为两个紧密且逻辑递进的环节:轨迹规划与运动控制。轨迹规划作为上游决策环节,旨在解决船舶路径生成问题,需要综合考虑港口环境、船舶动力学约束及靠泊任务目标,以形成安全、平滑且可行的参考轨迹。运动控制作为下游执行环节,旨在设计鲁棒且高精度的控制器,通过驱动执行机构实现船舶沿规划轨迹精确航行。高质量的轨迹为控制提供基础,而高性能的控制器则保障轨迹的实现,二者共同构成自动靠泊技术体系的核心支柱。

1.1 靠泊轨迹规划

靠泊轨迹规划的核心任务是在包含静态与动态障碍物的复杂港口环境中,为船舶生成出一条从进港航道到目标泊位的安全、平滑且满足船舶动力学约束的参考路径。现有靠泊轨迹规划方法大致可分为以下几类:

基于搜索的规划方法通过对环境地图进行离散化处理,利用图搜索算法寻找最优路径^[10]。其中,A*算法及其改进形式应用较为广泛,ZHANG等^[11]

通过改进启发函数和搜索邻域的方式,生成折点更少、更适合船舶操纵的靠泊路径,并已通过无人船试验进行了验证。混合 A* (Hybrid A*) 算法直接在搜索中融入船舶的非完整约束,能够生成更贴合实际运动学的轨迹^[12]。这类方法的优势在于能够找到全局最优或近似最优解,但对地图的依赖性强,且在复杂动态环境下的实时重规划能力面临考验。

基于几何曲线的规划方法利用参数化曲线来生成连续平滑的靠泊路径,这类曲线具备良好的连续性和光滑性,便于控制器跟踪。SUN 等^[9]的研究将高阶贝塞尔曲线与最小二乘拟合相结合,为基于反步法的控制器提供了可微分的参考轨迹。但是纯粹的几何曲线方法在复杂港口环境中的避障能力有限,因此常与其他算法融合使用。胡智焕等^[13]的研究采用混合 A* 算法完成港内航行,并引入四阶贝塞尔曲线来生成最终平稳入泊光滑路径,这种做法能够确保最终的船舶姿态与泊位精确对齐,有效解决了高精度操纵问题。

基于最优控制的规划方法将轨迹规划问题构建为最优化问题,通过数值优化求解在一系列约束条件下的最优控制输入序列,从而得到最优轨迹。ZHANG 等^[14]将靠泊过程分为多个阶段,应用伪谱法等先进数值方法求解复杂港口环境下的最优路径。ZHANG 等^[15]则采用“空间重构”技术,该方法的核心思想在于将船舶运动的自变量由时间转化为距离泊位的距离,这种变换可以将总靠泊时间作为代价函数进行优化,从而生成时间最优的靠泊路径。

近年来,随着人工智能技术的发展,基于深度强化学习 (Deep Reinforcement Learning, DRL) 的端到

端规划方法也崭露头角^[16],该方法通过在大量仿真交互中学习从环境感知到路径决策的映射,展现出在未知和动态环境中的巨大潜力,并已在大型渡轮上得到实船验证^[17]。

船舶自动靠泊轨迹规划方法对比如表 1 所示。基于搜索的规划方法的核心优势在于能够在离散环境中找到全局最优或近似最优解,但其工程挑战在于对环境地图精度的依赖性强,且在障碍物密集的动态港口中,其计算量可能激增,导致实时规划能力面临考验。基于几何曲线的方法能够生成连续且光滑的路径,便于靠泊控制器跟踪,然而其主要局限在于处理复杂环境的避障能力有限,因此常需与其他算法融合,以兼顾轨迹的平滑性与安全性。基于最优控制的方法将轨迹规划构建为严格的约束优化问题,理论上能生成动力学可行的时间最优或能量最优轨迹,但其工程瓶颈在于计算负荷庞大,且对船舶动力学模型的精度要求极高,这在风、浪、流等时变扰动下难以保证。基于深度强化学习 (DRL) 的方法近年展现出应对未知和动态环境的潜力,并已有实船验证案例,但其工程实现仍面临严峻挑战。首先,“仿真—现实差异” (Sim-to-Real Gap) 问题突出,仿真环境难以精确复现近岸复杂水动力特性、传感器噪声、时变风浪流干扰以及执行器动态响应。DRL 模型的黑箱特性使其决策过程缺乏透明度,这给系统的安全验证、调试和认证带来了巨大障碍。训练数据的完备性难以保证,现有数据集往往无法覆盖所有可能的极端海况或罕见事件,导致模型在未见场景下的泛化能力受限。

表 1 船舶自动靠泊轨迹规划方法对比

Tab.1 Comparison of trajectory planning methods for autonomous ship berthing

方法类别	代表算法	核心思想	主要优势	局限性与工程挑战
基于搜索的规划	A*、混合 A*	将环境地图离散化,利用图搜索算法寻找最优路径	理论上可保证解的全局最优或近似最优	依赖高精度地图,在动态环境下实时规划困难
基于几何曲线的规划	贝塞尔曲线	利用参数化曲线生成数学上连续平滑的路径	路径连续光滑,易于控制器跟踪;算法计算量小,实时性高	在复杂环境中的避障能力有限,需与其他算法融合以保障安全
基于最优控制的规划	伪谱法、空间重构技术	将轨迹规划构建为非线性最优化问题,在满足动力学约束下求解最优控制序列	能生成满足船舶动力学约束的最优轨迹	高度依赖精确的船舶动力学模型,计算量较大
基于深度强化学习的规划	DRL	通过智能体与环境的大量交互,学习从环境感知到路径决策	不依赖精确模型,在未知和动态环境中展现出巨大潜力	训练成本高,收敛慢,决策黑箱可解释性差,安全性难验证

轨迹规划为船舶自动靠泊提供了基础,而在第2节中,将进一步深入分析,针对特定船型与推进系统,应如何选择和设计更为匹配的轨迹规划策略。

1.2 靠泊运动控制

靠泊运动控制是自动靠泊技术的核心环节,其目标是根据规划好的轨迹,实时计算出最优的桨舵控制指令,驱动船舶精确、安全地完成靠泊作业^[18]。船舶靠泊过程具有显著的强非线性和时变特性,同时受港内复杂水动力环境的叠加影响。近岸浅水效应会引发水动力系数随航速与水深剧烈变化,使船舶操纵响应迟滞,制动距离变长;岸壁效应则在船体与码头之间形成非对称流场,产生额外侧向力干扰,引起船体横移与艏向偏转,影响靠泊稳定性,这要求靠泊控制策略必须具备高的鲁棒性与抗干扰能力。目前,运动控制策略大体上可归为基于模型的控制、数据驱动的智能控制以及二者融合的混合控制三大类。

基于模型的控制方法依赖于船舶的数学模型。线性二次调节器(Linear Quadratic Regulator, LQR)作为最优控制的经典方法^[19],通过优化二次型性能指标函数来获得最优反馈增益,但其应用主要限于船舶线性化模型^[20]。针对船舶固有的非线性特性,反步法(Backstepping)提供了一种系统化的递推设计思路,能够为高阶非线性系统构建稳定的控制器^[9]。而模型预测控制(MPC)因其能明确处理多变量约束并具有前瞻性优化能力,成为当前研究的热点^[21]。滑模控制(SMC)则以其对模型不确定性和外部扰动的强鲁棒性著称,常被用于设计强鲁棒性的靠泊控制器,并与其他方法如反步法结合以提升性能^[22]。

数据驱动的智能控制方法不完全依赖精确的数学模型,而是通过挖掘数据规律与提取特征来进行控制。人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)能够通过学习专家驾驶员的操纵数据或仿真数据,提炼其中蕴含的操纵规律,从而形成高效的自动靠泊策略^[23]。为了提升神经网络控制器的泛化能力,IM等^[24]采用艏向上坐标系来训练控制器,该控制器以船首与泊位的相对距离、相对方位信息为系统状态,无需依赖于特定港口几何布局,使得控制器无需重新训练,便可直接迁移至新的作业场景。近年来,以深度强化学习(DRL)为代表的方法发展迅速,通过让船舶在海量试验交互中,学习最优靠泊策略,展现出强大的自学习和决策能力。为优化训练效率,SHIMIZU等^[25]提出了将监督学习与强化学习相结合的混合学习范式,利用监督学习对专家数

据展开模仿学习,为强化学习构建合理的初始策略,有效规避从零起步的低效探索过程;通过强化学习对初始策略进行微调与优化,显著缩短模型收敛所需的时间。

混合控制策略融合基于模型方法和数据驱动方法。一种常见的思路是利用神经网络来辨识或逼近数学模型中的不确定部分,再由一个基于模型的鲁棒控制器进行控制,从而实现优势互补。焦建芳等^[26]将径向基函数(Radial Basis Function, RBF)神经网络与滑模控制(SMC)相结合,利用神经网络强大的逼近能力来处理模型不确定项和外部干扰。另一种思路则是将数据驱动模型作为核心预测器嵌入到模型控制框架中。WANG等^[27]利用长短期记忆(Long Short-Term Memory, LSTM)网络构建高精度船舶运动预测模型,并将其作为非线性模型预测控制(Nonlinear Model Predictive Control, NMPC)的核心,以提升预测精度和控制性能。

船舶自动靠泊运动控制方法对比如表2所示。基于模型的控制方法提供了清晰的控制框架,其中LQR等线性方法主要限于线性化船舶模型,反步法与滑模控制(SMC)等方法能有效处理非线性问题,模型预测控制(MPC)因具备处理多变量约束的优势而成为研究热点,但其在线优化计算量巨大,限制了实际应用效果。以上方法普遍面临的工程瓶颈在于控制性能对数学模型精度的高度依赖。数据驱动的智能控制方法为解决模型依赖问题提供了新途径。人工神经网络(ANN)能够通过学习专家或仿真数据来提炼控制策略,但其性能和泛化能力高度依赖训练数据的质量和覆盖范围。深度强化学习(DRL)展现出强大的自主学习与决策能力,但在工程应用中面临训练效率低下、决策过程不透明等挑战,导致其安全性和可靠性难以充分验证。若采用在线学习,智能体可能在探索过程中产生危险控制行为,引发系统不稳定或碰撞风险。为此,研究者们提出了安全强化学习(Safe-RL),通过引入约束优化或安全层等机制,确保智能体在学习和执行过程中始终维持安全状态。然而,目前Safe-RL在船舶靠泊的实际系统研究中仍处于初级阶段,在兼顾安全性、高性能与鲁棒性方面仍存在明显不足。混合控制策略融合上述两类方法的优势,无论是利用神经网络来近似模型不确定项,还是将其作为模型控制框架的预测模型,其核心挑战在于系统复杂度显著提升,同时控制性能受到模型精度与数据质量的双重制约,使得控制系统的设计与验证更加复杂化。

表 2 船舶自动靠泊运动控制方法对比

Tab. 2 Comparison of motion control methods for autonomous ship berthing

方法类别	代表算法	核心思想	主要优势	局限性与工程挑战
基于模型的控制	LQR、反步法、SMC、MPC	利用船舶的数学模型来设计控制器,通过求解最优指标或保证稳定性来实现轨迹跟踪	理论框架清晰,稳定性可证明,MPC 处理多变量约束,SMC 鲁棒性强	依赖数学模型的精度,MPC 在线计算负荷巨大,LQR 仅适用线性模型
数据驱动的智能控制	ANN,DRL	不依赖精确模型,通过模仿专家数据来构建从状态到控制的非线性映射	不依赖精确的数学模型,擅长处理强非线性问题,具备自学习和决策能力	ANN 性能依赖训练数据质量,泛化能力受限,DRL 训练效率低,决策黑箱安全性难验证
混合控制	RBF-SMC、LSTM-NMPC	利用 NN 逼近模型不确定项,或将 NN/LSTM 作为预测器	结合模型控制的鲁棒性、最优性与数据驱动的灵活性	系统复杂度显著增加,性能同时受限于模型和数据质量

综上所述,靠泊运动控制算法的发展呈现出由依赖精确模型向数据驱动方法演进,并逐步向两者深度融合的方向发展。各类方法各有侧重,其适用性与具体船型、推进系统及作业环境密切相关。

目前,船舶自动靠泊系统普遍采用轨迹规划与运动控制相分离的框架,如图 1 所示。上层轨迹规划模块根据环境信息、船舶约束及靠泊目标生成几何或时空参考轨迹;下层运动控制模块则负责设计控制器,驱动船舶精确跟踪该参考轨迹。这种分层解耦的设计有效降低了系统复杂度,便于工程实现。然而,分离式架构也存在固有局限,如信息传递延迟、轨迹规划结果可能超出底层动力学可实现范围等问题。为克服上述不足,规划与控制一体化设计逐渐成为研究热点,如图 2 所示,该框架直接建立从感知信息到控制指令的映射,现有研究包括基于非线性模型预测控制(NMPC)的集成优化、端到端深度学习(DRL)方法,以及引入可行性约束的在线优化策略等方向。该框架能够实现规划与控制的协同求解,缩短响应链路和降低规划与控制之间信息适配造成的性能损失。

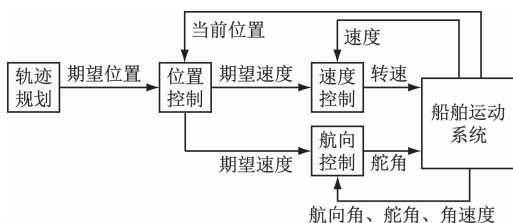


图 1 船舶自动靠泊轨迹规划与运动控制分离式框架示意

Fig. 1 Schematic diagram of the separated trajectory planning and motion control framework for autonomous ship berthing

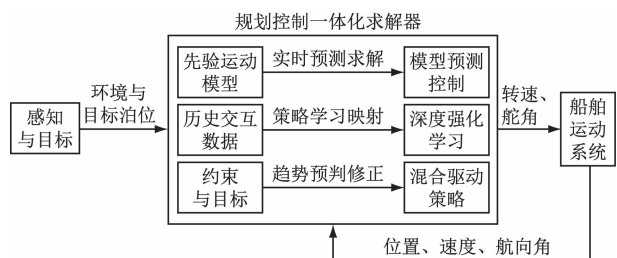


图 2 船舶自动靠泊规划与控制一体化框架示意图

Fig. 2 Schematic diagram of integrated planning and control framework for autonomous ship berthing

2 面向特定船型与推进系统的自动靠泊规划与控制

2.1 欠驱动船舶自动靠泊

欠驱动船舶通常指配备常规单桨单舵的船舶,其主要特征为响应缓慢、难以快速改变航行状态,且无法直接产生横向力。这一特性在低速近岸靠泊工况下尤为显著^[28]。针对欠驱动船舶的上述特点,研究者在轨迹规划、运动控制和靠泊模式选择三个层面提出了针对性的解决方案。

2.1.1 靠泊轨迹规划

由于欠驱动船舶无法实现任意横向运动,其规划的靠泊轨迹必须兼顾动力学可行性与可跟踪性,避免出现超出船舶操纵能力的急弯。针对这一特性,研究者提出了针对性的靠泊轨迹规划策略。

首先是分阶段的几何曲线规划方法,ZHANG 等^[29]提出采用分段贝塞尔曲线来生成平滑的靠泊路径,引入了流场匹配和速度匹配的概念,形成完整的时空耦合靠泊轨迹。QIANG 等^[30]将靠泊过程分为减速阶段和转向靠泊阶段,以预设路径为参考进行控制。ZHANG 等^[31]提出了基于逻辑规则的靠泊策略,船舶到达距泊位 9 倍和 3 倍船长的位置为决

策点,将航向调整和速度调整任务明确划分到不同的靠泊阶段中。这类基于规则和几何区域划分的策略,通过将连续靠泊过程离散化为阶段性目标,实现复杂航行工况下控制任务的分解,在工程实现上具有可行性。

在基于最优控制的规划方法中,ZHANG 等^[14]采用伪谱法将整个靠泊过程的最优控制问题转化为非线性规划问题进行求解,该方法通过设立综合性能优化函数,将船舶的控制输入直接作为优化对象,能够一次性生成船舶动力学特性的最优轨迹。MWANGE 等^[32]采用了类似的研究思路,将轨迹规划建模为以时间最短为目标的最优化问题,并利用直接多重打靶法进行求解,将安全速度—距离关系图转化为数学约束,提升了规划轨迹的实用性和安全性。

在低速工况下,船舶无法直接产生横向力,必须依靠纵向速度和舵效的耦合作用来间接入泊。分阶段的几何曲线规划方法是一种工程上广泛应用的实用策略,其主要优势在于可将高度复杂的非线性操纵任务分解为“减速”“转向”等逻辑清晰、可控性强的子阶段,从而显著降低控制设计难度。然而,该方法高度依赖预先设定的规则与几何划分,对多变的港口环境或突发扰动的适应性与最优性有限。相比之下,基于最优控制的规划方法从根本上将轨迹规划建模为受动力学约束的优化问题,理论上能够生成动力学可行的最优路径。但此类方法对低速水动力模型的精度要求极高,且非线性规划(NLP)问题的求解计算量庞大,使其实时性与在线应用受到显著制约。

2.1.2 靠泊运动控制

在低速状态下欠驱动船舶难以产生有效横向推力,其控制器设计的核心在于解决控制耦合和模型不确定性两大难题,研究者们提出了以下控制策略:

基于模型的方法中,为实现时间最优控制,ZHANG 等^[15]设计了一种分层 NMPC 控制器,上层控制器通过空间重构技术将时间作为优化目标,从而规划出一条时间最短的靠泊路径;下层控制器则在常规的时间坐标系中,精确地跟踪这条最优轨迹,这种分层架构有效地将复杂的时空一体化最优控制问题分解,提高了求解效率。WU 等^[33]将 NMPC 与移动时域估计(Moving Horizon Estimation, MHE)相结合,以提升控制系统的鲁棒性。通过 MHE 融合多源传感器数据抑制噪声,为 NMPC 提供更为精确的状态估计,从而在一定程度上提高了靠泊轨迹控制精度。

反步法和滑模控制作为经典的非线性控制方法,常被用于解决欠驱动船舶的控制问题。SUN 等^[9]将反步法与模糊逻辑相结合,采用反步法构建控制器的基本框架,通过模糊逻辑系统补偿模型不确定性,增强控制系统对复杂环境的适应性和鲁棒性。ZHANG 等^[29]设计的双回路路径跟踪控制器中,外环负责根据船舶当前位置与期望轨迹的误差,通过视线法(Line-of-Sight, LOS)制导律计算出期望航向角;内环则采用了滑模控制,用以精确、鲁棒地跟踪期望航向指令。刘佳仑等^[22]提出了领导—跟随控制框架,通过构建虚拟领导者来提供状态参考与控制目标信息,将靠泊控制问题转化为一个对虚拟领导者的轨迹跟踪问题,并利用反步滑模控制器实现对目标靠泊轨迹的精确跟踪。

数据驱动与智能控制方法中,ZHANG 等^[29]设计基于紧凑形式动态线性化(Compact Form Dynamic Linearization, CFDL)的航向航速无模型自适应控制(Model-Free Adaptive Control, MFAC)控制器,该方法利用实时动态定位(Real-time Kinematic, RTK)等高精度传感器提供的实时数据直接驱动控制器,实现了对未知系统的自适应鲁棒控制。QIANG 等^[30]提出了一种分阶段的 ANN 控制器,将靠泊过程划分为减速阶段和转向靠泊阶段进行训练与控制,从而实现桨舵的协同控制。贾玉鹏等^[23]将 ANN 控制器输出从螺旋桨转速、舵角调整为车令与舵令,将训练数据由多初始状态简化为单一初始状态,以靠泊全过程信息为输入,提高了训练效率,降低了最终航向偏差。

各类运动控制策略的核心目标均在于应对欠驱动船舶在低速下控制耦合与模型不确定性两大难题。基于模型的方法中,非线性模型预测控制(NMPC)可显式处理动力学约束,理论上能够实现时间最优控制,但其对模型精度和计算资源要求较高。反步法和滑模控制(SMC)能有效地应对非线性与扰动,但在实现中面临复杂运动解耦问题,常需采用双回路或领导—跟随等分层设计。相较而言,数据驱动和智能控制方法摆脱了对精确模型的依赖,能够从数据中学习操纵规律,但其性能受数据质量限制,且黑箱特性使系统稳定性与安全性难以验证。

2.1.3 靠泊模式的选择

对于欠驱动船舶,选择适宜的靠泊模式是实现安全靠泊的关键策略。由于其横向运动能力有限,该策略不仅需要适应外部环境,还应综合考虑船舶初始状态及港口几何布局。

利用环境力是一种节能且安全的靠泊方式,在

有一定风流的情况下,选择顶风或顶流进行靠泊,可以利用环境力帮助船舶减速和稳定船身。ZHANG等^[29]提出的流场匹配策略就明确体现了这一点,该策略会根据水流方向与泊位的关系,自动决策采用顺流还是逆流靠泊,实现了基于环境因素的模式选择。

根据港池大小和靠泊任务需求,研究者们明确了多种靠泊模式,例如直接靠泊和回转靠泊,前者适用于开阔水域或无需大幅度调整航向的场景,而后者则常用于需要在泊位附近进行转舵的工况。此外,WU等^[33]研究了倒航模式下靠泊规划方法,规划方案,有效补充了现有靠泊模式,提升了靠泊策略的灵活性。

在确定基础靠泊模式后,还需根据船舶自身运动状态以及与泊位之间的相对状态进行更精细的决策。BAEK等^[34]提出了基于状态机的模式划分方法,他们将不同几何特征的靠泊任务定义为两类顶层模式,并在每类模式下将整个靠泊过程进一步细分。该方法将连续的靠泊过程离散化为一系列明确的、有逻辑顺序的状态节点,使控制策略的逻辑结构清晰,提升了系统对多样化靠泊场景的适应能力。

2.2 全驱动船舶自动靠泊

与欠驱动船舶不同,全驱动船舶通常配备全向推进系统或辅助推进装置,可在纵向、横向和艏摇三个自由度上独立产生力或力矩,从而实现高精度操纵与横向移动。由此,其自动靠泊控制的核心挑战由克服欠驱动约束转向如何最优协调与分配多个执行器的控制能力。

2.2.1 多推进器控制分配

对于配备多推进器的全驱动船舶,上层控制器所给出的期望合力和合力矩需通过多种执行器的组合来实现^[35]。控制分配作为衔接上层控制与底层执行的重要环节,其核心任务是在满足总体力矩指令的条件下,求解各执行器的最优控制量。这种分层控制结构是全驱动船舶控制体系的典型设计框架,不仅有助于实现控制功能的模块化,也便于全局性能的综合优化^[36]。依据控制策略的设计理念,现有方法主要分为基于最优、基于鲁棒性和数据驱动三类。

基于最优控制的自动靠泊通过优化求解执行器输入,实现上层控制指令的精确执行。苑守正等^[37]提出了事件触发的自适应时域模型预测控制(Event-triggered Adaptive Horizon Model Predictive Control, EAHMPC),该控制器仅在船舶状态误差超过预设阈值时才启动优化,并在系统稳定时动态缩

短预测时域,仿真结果显示该方法提升了运算效率。CHEN等^[38]采用协方差矩阵自适应进化策略CMA-ES来自主地搜索出最优的加权矩阵组合,使其能够自适应地应对不同的工况和环境干扰。

基于鲁棒与安全约束的靠泊控制旨在保证系统在外部扰动和模型不确定性下的稳定性与安全性。杨凌等^[39]提出了基于零空间的自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)分配方法,该方法利用神经网络扩张状态观测器实时估计外部扰动,控制分配则引入零空间概念,在满足主任务的同时,利用冗余自由度进行二次优化,仿真结果表明,该分配方法具有较高的精度与效率。LIU等^[40]提出了安全认证的ADRC方法,通过设计高阶控制屏障函数,将与障碍物和岸线的安全约束转化为控制输入的线性不等式,然后通过二次规划求解出最优控制指令。FENG等^[41]提出了基于权重最优回路成形的 H_∞ 鲁棒控制方法,通过优化加权函数来最大化系统的鲁棒稳定裕度。XUE等^[42]结合非对称屏障Lyapunov函数与固定时间滑模控制,从时域稳定性和状态约束的角度出发,解决船舶靠泊中常见的非对称状态约束问题。

基于数据驱动的自动靠泊控制通过学习历史数据或强化学习直接生成控制指令。MIZUNO等^[43]利用基于模型的强化学习算法,构建直接输出舵角和桨角指令的非线性最优反馈控制器,验证了强化学习在解决复杂非线性控制问题中的潜力。HIGO等^[17]则在大型渡轮上应用了双深Q网络(Double Deep Q-Network, DDQN),将船员采取的舵角与转速组合操纵指令映射为离散动作空间,通过离线训练,实现真实风流干扰下的精确轨迹跟踪,并完成实船靠泊试验。为增强控制器的泛化能力,NGUYEN等^[44]提出了集成ANN控制器,在艏向坐标系的基础上建立多层感知神经网络,设计了对横荡、艏摇速度及舵角取反的靠泊控制参考坐标系,以适应不同港口和左右舷靠泊,提升了ANN在实际应用中的灵活性与效率。

基于最优控制的策略旨在实现全局性能最优,但在工程上面临多推进器协同优化计算复杂、对水动力模型精度敏感等挑战。基于鲁棒与安全约束的方法更侧重于应对港内外部扰动和安全边界约束,但往往增加控制器设计复杂度,在保障安全与鲁棒性的同时难以兼顾控制的最优性与平滑性。数据驱动方法通过学习绕过复杂的分配逻辑,但受制于仿真与现实差异、不同船舶与港口间的泛化能力不足,以及多执行器协同控制中的安全性与可解释性问

题。因此,如何在计算成本、鲁棒安全与控制最优性之间取得平衡,仍是全驱动船舶靠泊控制实现工程化的关键。

2.2.2 靠泊轨迹规划

全驱动能力显著降低了轨迹规划的约束,使船舶能够执行横向移动、原地回转等高精度操纵。理论上,全驱动船舶可跟踪任意平滑的几何路径。因此,轨迹规划的研究重点逐渐转向路径优化,研究者通常将其建模为最优控制问题进行求解。MIYAUCHI等^[45]在真实港口环境中,将轨迹规划建模为包含复杂港口几何约束和动态安全距离的非线性优化问题,采用协方差矩阵自适应进化策略(Covariance Matrix Adaptation Evolution Strategy, CMA-ES)优化算法,直接求解考虑风力干扰与执行器能力限制的时间最优靠泊轨迹,解决复杂几何环境中难以找到可行解的问题。

得益于全驱动船舶的高精度操纵能力,其靠泊模式选择具备更高的灵活性。在靠泊过程中,船舶不再过度依赖环境力辅助,而是能够主动规划最短

或最安全的靠泊路径;也可先航行至泊位附近,通过原地回转调整姿态后,再利用侧推器或主推进器差动实现纯横移靠泊。YIN等^[46]提出了基于几何空间分析的自适应靠泊策略决策模型,能够根据风、流方向与泊位的几何关系,自动决策采用直接靠泊还是U形回转靠泊方式,实现了更高层级的自动决策。

欠驱动船与全驱动船自动靠泊策略对比如表3所示。全驱动能力虽然显著放宽了轨迹规划的运动学约束,但并未降低规划问题的复杂度,反而将挑战从动力学可行性转向全局最优性与策略自适应。基于最优控制的规划方法旨在在复杂港口几何约束和动力学限制下求解时间或能量最优轨迹,但其工程挑战在于非线性优化计算量巨大,且对风流等扰动的精确建模要求较高。相比之下,基于几何空间分析的自适应决策模型更关注上层靠泊模式决策,具有逻辑清晰、实现简便等优势,但由于依赖预设规则,其决策的最优性与对突发情况的灵活性相对不足。

表3 欠驱动船与全驱动船自动靠泊策略对比

Tab.3 Comparative strategies for autonomous berthing of underactuated and fully actuated ships

船型	靠泊方式	轨迹规划	运动控制
欠驱动船	利用纵荡速度和舵效间接产生横向运动,并借助风流等环境力辅助完成靠泊	强调在运动学约束条件下生成平滑且可行的轨迹,通常采用分阶段曲线方法	克服非线性耦合与环境扰动,实现受限条件下的横向控制能力
全驱动船	具备多自由度操纵能力,通过多推进器协作实现高效精确的靠泊操纵	具备精确跟踪任意平滑轨迹的能力,规划重点侧重全局最优性与多推进器协同效率	通过多推进器的最优分配与鲁棒控制,实现高精度操纵响应

3 自动靠泊性能评估与试验验证

对自动靠泊方法进行科学、统一的评估是推动其技术发展与实际应用的关键。目前,学术界通常从两个维度评价靠泊性能:一是任务完成情况,即是否成功完成靠泊;二是过程性能,即靠泊过程的优劣表现。此外,算法的有效性需通过不同层级的试验验证方法加以检验。

3.1 自动靠泊的评价准则

判定一次靠泊任务是否成功的核心在于船舶终端状态是否满足一组严格约束条件,包括位置、姿态及动态状态的精度要求。具体而言,船舶最终位置应收敛至目标泊位点的允许误差范围内。XIONG等^[47]规定靠泊完成时,船舶中心与泊位中心的距离必须小于位置误差阈值上限,船体边界到岸线的最

小距离大于安全距离阈值下限,且船舶艏向与泊位平行或处于预设角度,同时艏摇角速度收敛,否则视为靠泊未完成。QI等^[48]提出的两层控制与分配结构能够实现靠泊过程中艏向与泊位方向的对齐,同时保证姿态平稳收敛。靠泊完成后,船舶应达到动态稳定状态,其中纵向速度、横向速度及艏摇角速度均衰减至零附近。WANG等^[27]提出的优化模型要求靠泊终端状态纵荡速度、横荡速度与艏摇角速度收敛至零,并在靠泊全过程中保证安全,确保船舶在任意时刻均不得与码头或障碍物碰撞。SHIMIZU等^[25]在强化学习的框架下,将港池几何约束纳入训练与仿真环境,其安全判断准则内嵌于奖励函数中:一旦发生碰撞,将受到巨大的负奖励,使得在训练过程中自动形成无碰撞的靠泊策略,最终通过成功率与安全风险指标验证了空间约束对靠泊安全性的提

升。PARK 等^[49]提出了基于可达性分析的安全判定方法,区别于传统的单点误差判断,该方法利用带形多面体来计算船舶在有界干扰下、未来有限时间内的全状态集合。明确定义了靠泊失败的物理边界:即船舶动态可达集与码头区域发生几何重叠导致碰撞,或船舶在规定时间内未能收敛至最终目标位置。通过蒙特卡洛模拟验证,该判定机制从概率与几何空间角度同时刻画靠泊过程的安全裕度。

综合前述研究可以看出,现有自动靠泊评价准则在适用场景与安全保障能力上呈现出显著差异。基于几何距离与终端状态阈值的判断准则计算简单、结果直观,适用于常规工况下的靠泊精度评估与控制性能对比,因此成为主流方法。然而,这类准则只能反映最终偏差,不能表征靠泊过程中的潜在风险。基于可达性分析或碰撞代价的动态判据虽然计算成本较高,但能界定系统可达域与安全边界。在强风浪干扰的极端场景下,动态准则具备更高的适用价值,也体现了自动靠泊评价从结果导向向过程安全转向的趋势。

3.2 自动靠泊的性能评估指标

在满足基本完成准则的前提下,研究者通常会从多个维度对自动靠泊过程的性能进行量化评估。

轨迹跟踪精度是衡量自动靠泊控制器性能的核心指标,常用的量化方式主要包括误差幅值、误差累积以及误差稳定性三类。均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)通过计算参考轨迹与实际轨迹偏差平方均值的算术平方根反映了靠泊全过程的整体跟踪精度。VU^[50]在容错控制策略验证中分别计算了位置误差与艏向误差的RMSE值,在执行器故障及输入饱和工况下对不同算法的进行对比,证明了其方法在整体跟踪性能方面的优越性;绝对误差积分(Integral of Absolute Error, IAE)或积分平方误差(Integral of Squared Error, ISE)关注误差在时域上的累积量,能够反映控制器收敛速度与长期偏差情况;统计离散度(Interquartile Range, IQR)侧重于描述误差随时间的波动范围与一致性。BAEK等^[34]在验证抗风扰动靠泊试验中采用航向误差的IQR值进行对比,从统计分布角度量化控制器抑制振荡和限制误差扩散的能力。这类指标能够在强随机扰动环境下提供对控制稳定性与鲁棒性的有效衡量。

效率指标用于评价系统的实用性,主要包括时间效率和能量效率两方面。时间效率以完成靠泊任务的总耗时为衡量标准,是时间最优控制方法的核心

优化目标^[51]。能量效率通常通过对控制输入的二次型积分进行量化,旨在实现更平滑、经济的控制策略。

鲁棒性指标用于检验控制系统在复杂、不确定环境下的性能。该指标通常通过在仿真中引入风、流、浪等时变环境扰动、模型参数不确定性^[52],乃至执行器故障等极端情况,来量化系统性能指标如航迹跟踪误差、靠泊时间的变化,从而考察控制策略的稳定性与适应能力。

3.3 试验与验证方法

为了全面、科学地评估自动靠泊算法的有效性与可靠性,必须建立一套涵盖从算法设计到工程落地的完整验证体系。图3展示了典型的船舶自动靠泊控制系统架构及其对应的分级验证流程。上层基于环境感知、船舶运动模型与多源数据,形成轨迹规划、运动控制与推力分配等核心模块的决策控制链路;下层则围绕该链路设计层级递进的验证手段。总体而言,现有研究的验证流程呈现出由虚拟向现实、由低成本向高可信度逐级推进的特点。数值仿真是最基础且最常用的方法^[53]。研究者通过仿真软件建立船舶数学模型,对控制算法性能进行测试^[54]。随着技术进步,为了更逼真地模拟复杂的港口环境以及传感器特性,越来越多的研究开始采用高保真的仿真平台,如机器人操作系统(Robot Operating System, ROS)与Gazebo物理引擎相结合的环境,能够提供接近真实的测试场景^[55]。数值仿真的优势在于成本低、效率高、可重复性强,能够安全地对算法进行全面的参数调试和性能评估。

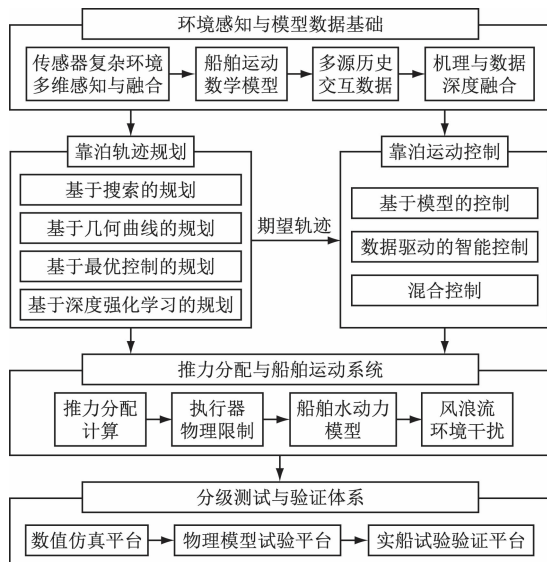


图3 船舶自动靠泊控制系统架构与分级验证体系

Fig. 3 System architecture and multi-level validation framework for autonomous ship berthing

物理模型试验是连接数值仿真与实船试验的关键桥梁。通过在水池中对按比例缩小的船模进行试验,可以更真实地检验算法在复杂水动力环境下的表现。Cybership II 等知名船模就被广泛用于验证各类控制算法在靠泊场景下的性能^[12]。

实船试验是验证自动靠泊技术最终可行性的有力手段,也是最具挑战性的环节。由于涉及高昂的成本、安全风险以及复杂的后勤保障,目前能够开展实船试验的研究相对较少,但其成果也具有较强的说服力和工程价值。近年来,实船验证的成功案例逐渐增多,标志着自动靠泊技术正从理论走向应用。ZHANG 等^[11]研究在小型无人艇上,通过搭载高精度实时动态定位(RTK)系统,验证了其自动靠泊控制架构的有效性。HIGO 等^[17]在大型渡轮上,部署并验证了基于深度强化学习的轨迹跟踪系统,在真实风浪干扰下完成了自动靠泊作业。

4 总结及展望

4.1 总结

自动靠泊是船舶航行任务的最终环节,其复杂的作业环境、高度非线性的动力学特性以及对控制精度的严苛要求,使其成为智能船舶技术发展的关键瓶颈^[56]。通过对相关研究的系统梳理可以发现,自动靠泊技术已从以单一算法优化为主的局部研究,发展为涵盖轨迹规划、运动控制、系统验证与性能评估的系统化研究,形成了从经典控制理论到智能优化算法的多层次技术体系。当前研究趋势正从通用控制方法转向面向特定船型与推进系统的差异化策略设计,表明自动靠泊技术正稳步迈向工程应用阶段。

4.2 未来展望

尽管自动靠泊技术已取得显著进展,其大规模、高可靠性商业化应用仍面临挑战。结合本文分析,未来研究可重点关注以下方向。

1) 规划与控制的一体化:当前分离式架构存在信息传递延迟和次级优化问题。发展规划与控制深度融合的决策方法,甚至端到端智能控制,将是重要趋势。

2) 高可靠性控制:现有研究多在正常工况下验证,极端海况及执行器故障下的适应性研究不足。未来需发展在恶劣条件下稳定工作的鲁棒控制,以及具备故障诊断与自适应重构能力的容错控制

3) 评估与验证体系标准化:建立可量化、国际公认的性能评估指标体系,为不同技术方案提供科学比较依据。同时构建从仿真、模型船到实船的标

准化、可追溯验证流程,以加速技术落地。

4) 智能算法泛化与在线自适应:现有学习型算法易受限于特定训练环境。发展具备强泛化能力和在线自适应的控制器,适应不同港口环境、码头条件及突发干扰;强化人工智能方法的可解释性与人机协同研究,为实现完全自主靠泊奠定基础。

5) 人机交互与在环操作的工程挑战:将船舶自动靠泊技术从仿真推广至工程应用,必须解决操作员在环控制与人机协同的关键问题。这包括设计可靠的自动与人工切换机制、完善多层次报警和权限管理,并确保在紧急情况下操作员能够迅速、安全地接管系统。未来研究需进一步探索高效的人机协作策略,以保障港口作业的安全与可控性。

参 考 文 献

- [1] 严新平, 刘佳仑, 胡欣珏, 等. 新一代航运系统的未来船舶技术展望[J]. 船海工程, 2024, 53(5): 1-4. YAN X P, LIU J L, HU X J, et al. Future ship technology prospects for next generation shipping systems [J]. Ship & Ocean Engineering, 2024, 53(5): 1-4. (in Chinese)
- [2] CAI J, CHEN G, YIN J, et al. A review of autonomous berthing technology for ships [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2024, 12(7): 1137.
- [3] WU G, LI D, DING H, et al. An overview of developments and challenges for unmanned surface vehicle autonomous berthing [J]. Complex & Intelligent Systems, 2024, 10(1): 981-1003.
- [4] 赵璐, 姜琳, 李永正, 等. 基于改进 ILOS 与双闭环 PID 的欠驱动船舶循迹控制 [J]. 中国造船, 2025, 66(1): 122-133. ZHAO L, JIANG L, LI Y Z, et al. Trajectory tracking control of underactuated ships based on improved ILOS and double closed loop PID [J]. Shipbuilding of China, 2025, 66(1): 122-133. (in Chinese)
- [5] 李诗杰, 刘泰序, 刘佳仑, 等. 基于 GRU-MPC 的双全回转推进拖轮轨迹跟踪控制 [J/OL]. 上海交通大学学报, 1-19. [2025-10-07]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.146>. LI S J, LIU T X, LIU J L, et al. Trajectory tracking control of ASD tugs based on GRU-MPC [J/OL]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1-19. [2025-10-07]. <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.146>. (in Chinese)
- [6] 辛博鹏, 刘顺, YUTAKA W. 基于非线性反馈积分滑模控制的船舶航向自动舵设计 [J]. 中国航海, 2022, 45(1): 63-65. XIN B P, LIU S, YUTAKA W. Design of steering pilot

- featuring integral sliding mode control with nonlinear feedback[J]. *Navigation of China*, 2022, 45(1): 63-65. (in Chinese)
- [7] 朱大奇. 人工神经网络研究现状及其展望[J]. *江南大学学报*, 2004, 3(1): 103-110.
ZHU D Q. The research progress and prospects of artificial neural networks [J]. *Journal of Southern Yangtze University*, 2004, 3(1): 103-110. (in Chinese)
- [8] GREEP J, BAYEZIT A B, MAK B, et al. Ship course-keeping in waves using sample-efficient reinforcement learning [J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2025, 141:109848.
- [9] SUN T, YIN Y, LIU C. Integrated trajectory planning into automatic berthing control of underactuated ship based on fuzzy-backstepping method [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 291: 116336.
- [10] 张策, 刘钊, 张明阳, 等. 考虑交通轨迹密度的船舶路径规划方法[J]. *中国航海*, 2025, 48(增刊1):72-79.
ZHANG C, LIU Z, ZHANG M Y, et al. A ship route planning method considering traffic trajectory density [J]. *Navigation of China*, 2025, 48(Suppl. 1):72-79. (in Chinese)
- [11] ZHANG H, ZHANG Y, LU H, et al. Research on the decision-making and control system architecture for autonomous berthing of MASS [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2024, 12(12):2293.
- [12] HAN S, YAN L, SUN J, et al. Hybrid trajectory planning and tracking for automatic berthing: a grid-search and optimal control integration approach [J]. *Ocean Engineering*, 2025, 317: 120002.
- [13] 胡智焕, 杨子恒, 张卫东. 基于混合 A* 搜索和贝塞尔曲线的船舶进港和靠泊路径规划算法[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(1): 220-229.
HU Z H, YANG Z H, ZHANG W D. Path planning for auto docking of underactuated ships based on Bezier curve and hybrid A* search algorithm [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(1): 220-229. (in Chinese)
- [14] ZHANG Y, ZHAO H, WANG J, et al. Optimal path planning for autonomous berthing of unmanned ships in complex port environments [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 303:117641.
- [15] ZHANG M, YU S R, CHUNG K S, et al. Time-optimal path planning and tracking based on nonlinear model predictive control and its application on automatic berthing[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 286: 115228.
- [16] 欧昌奎, 谢磊, 查天奇, 等. 基于深度强化学习和历史轨迹的船舶路径规划[J]. *中国航海*, 2024, 47(1): 36-44.
OU C K, XIE L, ZHA T Q, et al. Ship path planning based on deep reinforcement learning and historical trajectories [J]. *Navigation of China*, 2024, 47(1): 36-44. (in Chinese)
- [17] HIGO Y, NOBE H, HASHIMOTO H, et al. Development of trajectory-tracking maneuvering system for automatic berthing/unberthing based on double deep Q-network and experimental validation with an actual large ferry [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 287: 115750.
- [18] 张笛, 万程鹏, 艾云飞, 等. 船舶航行安全主动控制技术研究与展望[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)
- [19] 殷键, 陈国权. 基于 LQR 的船舶自动靠泊策略研究[J]. *仪器仪表学报*, 2024, 45(9):227-236.
YIN J, CHEN G Q. Autonomous berthing strategy based on LQR [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2024, 45(9):227-236. (in Chinese)
- [20] 杨鑫, 吴军, 卢秋铸, 等. 基于 ARX 模型的船舶航向保持 LQR 控制[J]. *控制工程*, 2020, 27(6): 984-991.
YANG X, WU J, LU Q Z, et al. Ship course keeping LQR control based on ARX model [J]. *Control Engineering of China*, 2020, 27(6): 984-991. (in Chinese)
- [21] 叶树祥, 丁江明, 刘凤龙. 基于船舶运动学与动力学的级联 MPC 轨迹跟踪控制分析[J/OL]. *中国舰船研究*, 1-11. [2025-10-09]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04141>
YE S X, DING J M, LIU F L. Research on trajectory tracking control of cascade MPC based on ship kinematics and dynamics [J/OL]. *Chinese Journal of Ship Research*, 1-11. [2025-10-09]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04141> (in Chinese)
- [22] 刘佳仑, 董智霖, 李诗杰, 等. 基于改进反步滑模控制算法的拖轮自动靠泊控制[J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(1):119-127
LIU J L, DONG Z L, LI S J, et al. Autonomous berthing control of tugboat based on improved backstepping sliding mode control algorithm [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(1): 119-127. (in Chinese)
- [23] 贾玉鹏, 神和龙, 尹勇, 等. 基于神经网络的无人船自动靠泊模拟研究[J]. *中国航海*, 2021, 44(4):

- 107-111.
- JIA Y P, SHEN H L, YIN Y, et al. A Neural Network-based Unmanned Ship Autonomously Berthing Controller [J]. *Navigation of China*, 2021, 44(4): 107-111. (in Chinese)
- [24] IM N K, NGUYEN V S. Artificial neural network controller for automatic ship berthing using head-up coordinate system [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2018, 10(3): 235-249.
- [25] SHIMIZU S, NISHIHARA K, MIYAUCHI Y, et al. Automatic berthing using supervised learning and reinforcement learning [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 265:112553.
- [26] 焦建芳, 包端华, 胡正中. 基于神经网络滑模控制的船舶事件触发预设性能跟踪控制 [J]. *控制工程*, 2025, 32(2): 193-200.
- JIAO J F, BAO D H, HU Z Z. Event-triggered prescribed performance trajectory tracking for marine surface vessel based on neural network sliding mode control [J]. *Control Engineering of China*, 2025, 32(2): 193-200. (in Chinese)
- [27] WANG S, SUN Z, YUAN Q, et al. Autonomous piloting and berthing based on Long Short Time Memory neural networks and nonlinear model predictive control algorithm [J]. *Ocean Engineering*, 2022, 264: 112269.
- [28] 王全胜, 刘志全, 高妍南. 基于RMPC和横摇约束的欠驱动船路径跟踪控制 [J]. *控制与决策*, 2025, 40(4): 1303-1311.
- WANG Q S, LIU Z Q, GAO Y N. Underactuated ship path following control based on RMPC and roll constraints [J]. *Control and Decision*, 2025, 40(4): 1303-1311. (in Chinese)
- [29] ZHANG Y, ZHAO H, ZHANG Z, et al. Research on ship automatic berthing algorithm based on flow matching and velocity matching [J]. *Journal of Marine Science & Engineering*, 2024, 12(3):511.
- [30] QIANG L, BI-GUANG H. Artificial neural network controller for automatic ship berthing using separate route [J]. *Journal of Web Engineering*, 2020, 19(7-8): 1089-1116.
- [31] ZHANG H, ZHANG Y, ZHOU Z, et al. Research on autonomous berthing control of MASS based on real time kinematic [J]. *Ocean Engineering*, 2024, 330:118635.
- [32] MWANGE A N, RACHMAN D M, SUYAMA R, et al. A practical and online trajectory planner for autonomous ships' berthing, incorporating speed control [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2025, 30(1):238254.
- [33] WU Z, ZHAO B, HAN X, et al. Berthing trajectory tracking of underactuated surface vehicle based on NMPC and position estimation [J]. *IEEE Access*, 2024, 12:48951-48959.
- [34] BAEK S, WOO J. Model reference adaptive control-based autonomous berthing of an unmanned surface vehicle under environmental disturbance [J]. *Machines*, 2022, 10(4):244.
- [35] ARGHA A, SU S W, CELLER B G. Control allocation-based fault tolerant control [J]. *Automatica*, 2019, 103:408-417
- [36] TOHIDI S S, YILDIZ Y, KOLMANOVSKY I. Adaptive control allocation for constrained systems [J]. *Automatica*, 2020, 121:109161.
- [37] 苑守正, 刘志林, 郑林焯, 等. 基于事件触发自适应时域MPC的船舶靠泊方法 [J]. *控制与决策*, 2024, 39(1):336-344.
- YUAN S Z, LIU Z L, ZHENG L H, et al. Ship berthing based on event-triggered adaptive horizon MPC [J]. *Control and Decision*, 2024, 39(1): 336-344. (in Chinese)
- [38] CHEN G, YIN J, YANG S. Ship autonomous berthing simulation based on covariance matrix adaptation evolution strategy [J]. *Journal of Marine Science & Engineering*, 2023, 11(7):1400.
- [39] 杨凌, 徐海祥, 余文墨. 基于零空间的船舶自动靠泊自抗扰控制分配 [J]. *中国舰船研究*, 2024, 19(1): 128-136.
- YANG L, XU H X, YU W Z. Null-space-based active disturbance rejection control allocation for ship autonomous berthing [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2024, 19(1):128-136. (in Chinese)
- [40] LIU H, PENG Z, GU N, et al. Collision-free automatic berthing of maritime autonomous surface ships via safety-certified active disturbance rejection control [J]. *ISA Transactions*, 2024, 148: 24-31.
- [41] FENG K, WANG X, WANG J, et al. Robust control method for automatic berthing of unmanned ships based on weight optimal loop shaping [J]. *Applied Ocean Research*, 2025, 160:104601.
- [42] XUE H, OU Y B. A novel asymmetric barrier Lyapunov function-based fixed-time ship berthing control under multiple state constraints [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 281:114756.
- [43] MIZUNO N, KOIDE T. Application of reinforcement learning to generate nonlinear optimal feedback controller for ship's automatic berthing system [J]. *IFAC Papers online*, 2023, 56(1):162168.
- [44] NGUYEN V S. Investigation of a multitasking system for

- automatic ship berthing in marine practice based on an integrated neural controller[J]. *Mathematics*, 2020, 8(7):1167.
- [45] MIYAUCHI Y, SAWADA R, UMEDA N, et al. Optimization on planning of trajectory and control of autonomous berthing and unberthing for the realistic port geometry[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245:110390.
- [46] YIN J, CHEN G, YANG S, et al. Ship autonomous berthing strategy based on improved linear-quadratic regulator[J]. *Journal of Marine Science & Engineering*, 2024, 12(8):1245.
- [47] XIONG Y, YU J, TU Y, et al. Research on data driven adaptive berthing method and technology [J]. *Ocean Engineering*, 2021, 222(24):108620.
- [48] QI J T, LIANG W C, XIE W B, et al. Robust sliding mode model predictive control and thrust allocation methods for autonomous berthing of water-jet propulsion unmanned surface vehicles [J]. *Ocean Engineering*, 2025, 331: 121280.
- [49] PARK J, LEE C, KIM J. Robust ship berthing control with wind disturbance compensation using reachability analysis [J]. *IFAC Papers online*, 2023, 56(2): 4358-4363.
- [50] VU S T, NGUYEN T D, DANG H V, et al. Adaptive neural network fault-tolerant sliding mode control for ship berthing with actuator faults and input saturation [J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2025, 17:100644.
- [51] 王磊, 纪侃宏, 於鑫. 基于快速有限时间扰动观测器的欠驱动船舶轨迹跟踪控制[J]. *控制工程*, 2025, 32(5):845-854.
- WANG L, JI K H, YU X. Trajectory tracking control for underactuated ships based on fast finite-time disturbance observer[J]. *Control Engineering of China*, 2025, 32(5):845-854.
- [52] 梁宇峰, 冯凯, 王全政, 等. 基于二自由度回路成型的船舶自动靠泊控制方法[J]. *舰船科学技术*, 2025, 47(15):58-64.
- LIANG Y F, FENG K, WANG Q Z, et al. Automatic berthing control method for ships based on 2 DOF loop-shaping[J]. *Ship Science and Technology*, 2025, 47(15):58-64. (in Chinese)
- [53] SONG C Y, GUO X M, SUI J H. Improved model predictive control algorithm for the path tracking control of ship autonomous berthing [J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2025, 13(7):1273.
- [54] 李纯, 祝贵兵, 张强. 恶意网络攻击下基于事件采样的欠驱动船舶自适应神经自动靠泊控制[J/OL]. *中国舰船研究*, 1-10. [2025-12-16]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04248>.
- LI C, ZHU G B, ZHANG Q. Event-sampled adaptive neural automatic berthing control of underactuated vessels under malicious attacks[J/OL]. *Chinese Journal of Ship Research*, 1-10. [2025-12-16]. <https://doi.org/10.19693/j.issn.1673-3185.04248>. (in Chinese)
- [55] 韩成浩, 马吉林, 刘佳仑, 等. 基于虚拟仿真测试平台的船舶智能航行系统设计及应用[J]. *中国航海*, 2023, 46(1):148-154.
- HAN C H, MA J L, LIU J L, et al. Virtual test platform in design and application of intelligent navigation system [J]. *Navigation of China*, 2023, 46(1):148-154. (in Chinese)
- [56] 严新平, 刘佳仑, 范爱龙, 等. 智能船舶技术发展与趋势简述[J]. *船舶工程*, 2020, 42(3): 15-20.
- YAN X P, LIU J L, FAN A L, et al. Brief introduction to the development and trends of intelligent ship technology [J]. *Ship Engineering*, 2020, 42(3): 15-20. (in Chinese)