

引用格式: 郭东东, 尹勇, 肖方兵. 智能船舶航线优化方法综述[J]. 中国舰船研究, 2023, 18(4): 151-161.

GUO D D, YIN Y, XIAO F B. Overview of intelligent ship route optimization methods[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2023, 18(4): 151-161.

智能船舶航线优化方法综述



扫码阅读全文

郭东东, 尹勇, 肖方兵*

大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026

摘要:智能船舶航线优化在学术界和工业界均受到越来越多的关注。针对智能船舶航线优化问题,从航线设计方法和航线优化算法这2个层面,分别阐述各种设计方法和优化算法的特点。结合近5年来的最新研究成果,在分析国内外智能船舶航线优化技术发展现状的基础上,将航线设计方法归纳为3种,即基于气象数据的航线优化、基于油耗模型的航线优化以及基于航线库或航路点库的航线优化,剖析其技术内涵及应用情况;深入分析改进的等时线法、动态规划法、图形搜索算法、智能算法、人工智能和机器学习算法的特性及不足,总结归纳将各类算法应用于智能船舶航线优化时存在的主要问题。最后,简要展望智能船舶航线优化的发展趋势,为未来在该领域的研究提供一定的思路。

关键词:智能船舶; 航线优化; 航速优化; 气象定线

中图分类号: U692.3¹; U675.79

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02911

Overview of intelligent ship route optimization methods

GUO Dongdong, YIN Yong, XIAO Fangbing*

Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract: In recent years, the route optimization of intelligent ships has attracted increasing attention in academic and industrial circles. Aiming at the problem of intelligent ship route optimization, this paper expounds upon the characteristics of various route design methods and route optimization algorithms. Combined with the latest research results over the past five years, the development status of intelligent ship route optimization technology at home and abroad is analyzed, and route optimization design methods are summarized into three kinds, namely those based on meteorological data, fuel consumption models and route/waypoint databases, and the technical connotations and applications are analyzed. The characteristics and shortcomings of the improved isochrony method, dynamic programming method, graph search algorithm, intelligent algorithm and artificial intelligence/machine learning algorithm are analyzed in depth, and the main problems existing in the application of various algorithms to intelligent ship route optimization are summarized. Finally, the development trend of intelligent ship route optimization is briefly predicted to provide ideas for future research in this field.

Key words: intelligent ship; route optimization; speed optimization; weather routing

0 引言

随着“交通强国”“海洋强国”等国家战略的提出,船舶智能化迎来新的发展机遇。船舶自主航行作为智能船舶的显著特征,日益受到工业与海事企业的关注^[1]。严新平等^[2]指出,船舶航线优

化是船舶自主航行技术中的关键一步。此外,燃料成本和碳排放政策也给船舶的智能化带来了诸多挑战。众所周知,油耗既是船舶营运的主要成本,也是污染气体排放的主要来源,而有关船舶航线优化的研究及应用是降低油耗的有效途径。

根据优化目标的不同,航线优化有不同的定

收稿日期: 2022-05-11 修回日期: 2022-08-15 网络首发时间: 2023-03-13 11:43

基金项目: 国家重点研发计划大连海事大学项目资助(2020YFC0826704); 辽宁省教育厅科学研究经费项目资助(LJKZ0045)

作者简介: 郭东东,男,1995年生,硕士生。研究方向: 智能船舶。E-mail: 932116697@qq.com

尹勇,男,1969年生,博士,教授。研究方向: 航海仿真,航海智能。E-mail: bushyyn@163.com

肖方兵,男,1982年生,博士,讲师。研究方向: 航海通信仿真,航海智能。E-mail: xfbdlmu@126.com

*通信作者: 肖方兵

义。Simonsen 等^[9]将航线优化定义为:根据气象数据和船舶自身的性能,针对某个航次的预期到达时间(expected time of arrival, ETA)、转向点和各航段航速等参数找到最佳航线的过程。其优化目标通常包括最短距离、最短时间、最低航行风险、最低油耗、最低营运成本等。若只考虑其中一种优化目标,被称为单目标优化,多目标优化则是考虑其中2种及以上的优化目标。船舶航线优化目标不同,得出的优化航线也不同,不同的优化航线会导致航行时间和营运成本的不同。目前,针对智能船舶的航线优化问题,国内外已经积累了大量理论成果。通过对国内外航线优化研究现状的分析可以看出,无论实现何种优化目标,航线优化研究大致可遵循2个基本步骤,即首先确定基本的船舶航线设计方法,然后在此基础上使用合适的优化算法以解决相应的优化问题。

基于此,本文拟根据研究思路的不同,将智能船舶航线设计方法分为基于气象数据的航线优化、基于油耗模型的航线优化以及基于航线库或航路点库的航线优化,并进行分类讨论,对比其研究方法的特性;然后,分析应用于航线优化的主要优化算法的特性及不足;最后,指出航线优化研究领域存在的主要难点问题,并对未来发展趋势进行展望。

1 智能船舶航线优化的航线设计方法

智能船舶的航线优化是根据船舶自身的技术条件和性能、特定的航行任务,并考虑风、浪、涌等因素,在保证船舶、人员和货物安全的条件下优化航线、航速,实现航次优化的目标,并在整个航行期间的不断优化^[4]。基于上述条件,本文将智能船舶航线设计方法分为基于气象数据的航线优化、基于油耗模型的航线优化和基于航线库或航路点库的航线优化3种,然后分析这3种方法的设计内容,并对比其特性。

1.1 基于气象数据的航线设计

基于气象数据的船舶航线设计方法是将风、浪、流、涌等气象数据通过结合经纬度网格来建立海洋环境动态模型,然后基于环境模型对特定的航线或历史航线进行优化。例如,图1所示为欧洲某海域洋流预测模型的显示效果。船舶航线的优化效果(时间或成本的减少)一定程度上取决于气象数据的质量。准确的天气预报可以显著降低航行风险,节省船舶航行时间和营运成本。天气预报包含波浪、洋流、风和海温等信息。短期天气预报可以提供长达1~2周的预测数据,随

着时间的推移,精确度会下降。长期预测则可以提供长达几年的气象数据预测,例如洋流就属于长期预测数据的范畴。Lo 等^[5]在墨西哥湾流域进行了最低油耗航线研究,其考虑了洋流的影响,模拟了96次最低油耗航线,结果显示在东行和西行航线分别可节省7.4%和4.5%的油耗。这说明与仅考虑风和浪的航线相比,考虑洋流预报的优化效果更好。

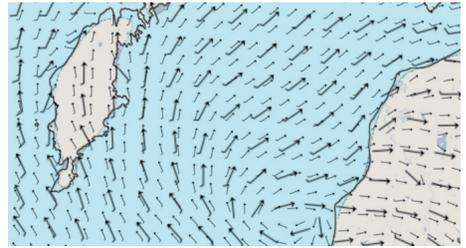


图1 欧洲某海域洋流预测

Fig. 1 Prediction of ocean currents in the sea area of Europe

Kim 等^[6]将气象预测数据按照时间序列分层叠加到经纬度网格,建立了海洋环境实数网格模型,经与传统的海洋环境模型相比,发现其动态优化性能得到了进一步提高。但该方法仅通过对航线中的转向点进行优化求解了最低油耗航线,并未考虑各个航段的航速。针对船舶航线优化过程中未考虑航速的问题, Ma 等^[7]建立了基于网格的海洋环境模型,并对船舶航线以及航速进行了优化,结果显示采用该方法能够有效降低船舶的油耗。

1.2 基于油耗模型的航线设计

常见的油耗预测模型主要有白盒模型、黑盒模型和灰盒模型3种,这3种模型在实际应用中各有其优、劣点^[8],表1所示为3种油耗模型的优缺点汇总。

表1 油耗模型优缺点比较

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of fuel consumption models

模型	模型可解释性	预测精确性	是否需要历史数据
白盒模型	较好	中等	否
黑盒模型	差	较好	是
灰盒模型	较好	较好	是

白盒模型一般是基于已知变量的函数关系建立的预测模型,因而其模型参数都是已知、可解释的。例如,根据船-机-桨能量传递关系可以求解船舶的油耗,其核心思想是利用主机额定功率、船舶有效推力和总阻力之间的关系来确定船舶的油耗,如式(1)所示。

$$P = F \cdot V \quad (1)$$

式中: P 为实际功率; F 为有效推力(总阻力); V 为船舶的航速。

根据船舶主机额定功率和有效推力间的传递关系,可推算出船舶在当前速度下的耗油量。采用白盒模型建模时可能会忽略部分与船舶自身特性有关的未知变量,故更适用于理论计算,且其求解待定系数的过程过于复杂繁琐。Cariou^[9]在考虑风、浪影响的情况下,给出了5 000~15 000 TEU 集装箱船在满载时对其总阻力和耗油率的简单分析以及半经验公式,实验表明,耗油率与总阻力成正比,可见在恶劣的海况下会显著增加船舶的油耗。

黑盒模型是指由输入和输出实验数据构成实验对象的神经网络模型。假设有足够的船舶导航数据,便可以建立精确的船舶油耗的黑盒模型。例如,Moreira等^[10]基于人工神经网络,通过主机输出转矩、推进轴转速、有效波高、波峰周期和波浪遭遇角的观测值估计了船舶航速与油耗。

灰盒模型结合了白盒模型与黑盒模型的优点,其基于相关领域的先进知识建立了模型结构,并训练历史数据以确定模型参数。

1.3 基于航线库或航路点库的航线设计

基于航线库或航路点库的航线优化方法其通用性和实用性较强,在航海航路和航空航路领域均有较多的应用,但优化效果受限于航路点的分布和完备性。根据不同的航线优化目标,采用这种设计方法可以解决不同的优化问题。潘杰等^[11]在充分考虑了气象数据、海况等因素的基础上,建立了推荐船舶航线数据库,通过输入出发港和

目的港即可快速在数据库中匹配推荐的航线。但采用这种机械的方法选择航线,所得到的航线优化效果并不理想。针对这一问题,Wang等^[12]提出了一种三维Dijkstra优化算法,即让船舶能够根据历史航线的航路点优化航线和航速,从而求解得到航线的全局最优解。Pennino等^[13]提出采用一种数据驱动的方法来建立航线库,考虑了船舶尺寸、船舶载态和季节性。该方法是首先将船舶自动识别系统(automatic identification system, AIS)的航迹轨迹简化为模式节点,然后利用K-means聚类算法对这些模式节点进行分类,同时,利用基于密度的聚类算法(density-based spatial clustering of applications with noise, DBSCAN)来识别船舶航线的转向点,从而可得到两个港口之间的优化航线。

这种基于推荐航线库或航路点库的航线设计方法所得的航线可靠,符合航海实践。但航线的优化效果依赖于航线数据库中历史航线的数量。若推荐航线库中航线非常完备,则按此方法生成的航线其优化效果较好;若构建的推荐航线数据库不全面,则有可能搜索不到航线或是搜索出来的航线与实际不符,且此种方法并不适用于军用船舶。

1.4 3种航线设计方法比较

综上所述,基于气象数据的船舶航线优化方法有利于避免遭遇恶劣的天气,保障船舶航行安全;基于油耗模型的航线优化有利于降低油耗,节省营运成本;基于航线库或航路点库的船舶航线优化方法能合理利用已有的历史航线,避免航行到未知水域时发生危险。表2所示为这3种航线设计方法的优缺点汇总。

表2 航线设计方法优缺点比较

Table 2 Comparison of advantages and disadvantages of route design methods

设计方法	优点	缺点	适用场景
基于气象数据的航线优化	<ol style="list-style-type: none"> 1) 能够合理规避恶劣海况,保障航行安全 2) 可移植性好,针对各种船舶、航线都有较好的实用性 3) 可以实现多种优化目标 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 气象数据的时效性可能不足以支持跨洋航行 2) 气象数据的空间分辨率不同,需插值计算而有损精度 3) 数据量大,降低了此方法的时间效率 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 适用于中、低纬度航行,在此区域,气象数据齐全且更新稳定 2) 由于气象数据空间尺度较大,此方法更适用于远洋航行 3) 不适用于内河航线
基于油耗模型的航线优化	<ol style="list-style-type: none"> 1) 能够预测并优化航线的油耗 2) 预测性能较好,建模方法多样 3) 能够结合多种优化算法优化航线 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 移植性差,针对不同类型的船舶需要重新建模 2) 优化效果单一,只能优化船舶的油耗 3) 黑盒模型和灰盒模型建模困难,需要大量的历史数据 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 适用于任何以燃油主机为推进器的船舶 2) 适用于沿海和远洋这类定速航行的航线 3) 适用于内河航线
基于航线库或航路点库的航线优化	<ol style="list-style-type: none"> 1) 可快速匹配并优化航线 2) 优化航线基于历史的航海数据,可用性好 3) 可移植性好,不依赖于船舶类型 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 需要大量的历史航行数据 2) 未能考虑最新的政策法规而剔除不合适的航线 3) 数据库需要耗费时间维护 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 适用于已航行过的海区 2) 适用于内河航线

2 航线优化算法分析

2.1 改进的等时线法

等时线法最初由 James 提出, 随后 Hagiwara^[14] 对原始方法进行了改进, 使得该方法可以应用于最短航行时间、最低油耗的航线优化问题。Hagiwara 表示, 考虑气象因素时等时线的长度会发生变化, 因此, 船舶在相同的时间内可以航行不同的距离。等时线法的缺点之一是“等时线环”, 由于在给定海况下船舶的非凸功率会引起等时线的不规则性, 因此随着等时线数量的增加, 这种不规则性的影响也会逐渐增大。针对这一问题, Roh^[15] 从欧洲中期天气预报中心获得海洋信息, 通过估计实时海况下船舶的附加阻力, 估算了船舶的油耗, 并利用改进的等时线法确定了经济航线。Lin 等^[16] 提出了三维等时线法, 该方法考虑了天气和水深的变化, 扩大了算法的适用场景。图 2 所示为三维等时线法示意图, 图中, S 和 G 分别代表航线的起点与终点。因每条等时线上的气象条件和水深都不同, 因此等时线的权值也不同, 船舶会沿着权重最大的航线航行直到终点。

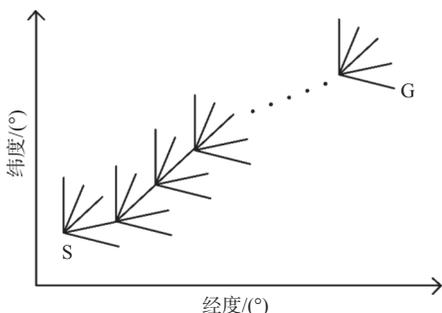


图 2 三维等时线法示意图

Fig. 2 Diagram of the three dimensional isochrone method

等时线法是从航海实践中演化而来的一种优化方法, 实用性较强, 易于实现, 且可解释性也较强, 但同时弊端也很明显, 即容易陷入局部最优解, 且总体优化效果不显著。

2.2 动态规划法

动态规划法常用于求解某种数学问题, 其基本思想是: 首先将问题分解为若干个阶段分段子以求解, 然后由每一阶段的解得到问题的解, 这中间涉及多级决策优化过程^[17]。张进峰等^[18] 基于动态规划算法提出了一种沿海航区避台场景下的航线优化模型, 其充分考虑了船舶在大风浪中的失速特征, 求解了台风移动过程中的船舶避台最短航线。图 3 所示的是采用逆序递推法进行求

解, 即其由状态 N 逆推至当前船位, 在当前船位至终点的航线达到最优时即全局航线达到最优解。Chen^[19] 运用随机动态规划法开发了航线优化系统, 并输入气象数据求解最小化航行成本。Shao 等^[20] 提出了一种正向三维动态规划方法, 该方法包括船舶功率设置和航向控制, 旨在将航程中的油耗降至最低。Zhang 等^[21] 采用一种基于近似动态规划的 Pareto 优化算法来解决动态和不确定环境中的船舶航线优化问题。Zacccone 等^[22] 提出了一种基于三维动态规划的船舶航次优化方法, 该方法考虑了气象条件、船舶运动特性和人员的舒适性, 可以用于求解船舶航次的最低油耗航线和航速剖面。

用动态规划法求解最优航线的精度, 取决于每个阶段中节点的数量和海洋环境预报的准确性。若船舶总的航行时间超出了预报信息的时效范围, 则使用此方法得到的最佳航线仅限于位于预报时限内的航段。因此, 在使用动态规划法优化航线时, 应动态更新航线附近的海洋环境信息, 以保证航线的优化效果。在碍航物较多的区域, 因航路点数量较多, 采用经典动态规划方法不能自动筛选出不适航的航段。随着网格节点数量的增加, 需要存储的航段数量会以几何数级递增, 因此该方法不适用于沿岸的航线优化。图 3 所示即体现了动态规划法的求解思想, 其中 ΔX 和 ΔY 分别为航线平行方向和垂直方向的网格节点之间的单位距离。

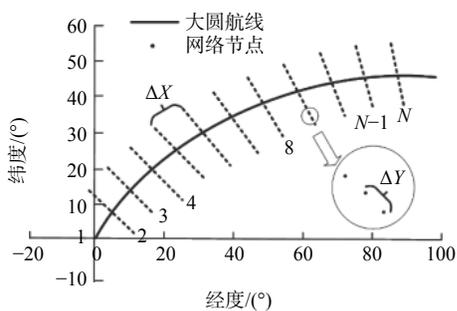


图 3 动态规划法求解最优航线

Fig. 3 Dynamic programming method for solving optimal route

2.3 图形搜索算法

Dijkstra 算法^[23] 和 A*算法^[24] 等图形搜索算法被应用于智能船舶的航线优化。Kurosawa 等^[25] 改进了传统 A*算法中的代价函数, 通过求解代价函数的最优值, 实现了最短距离、最短航行时间和最低油耗的最优航线。Mannarini 等^[26] 利用气象和海洋数据, 并使用改进的 Dijkstra 算法选择了最优航线。Pennino 等^[13] 提出了一种基于 Dijkstra

算法求解最短距离的自适应气象航线模型,该模型基于特定的船舶运动性能和气象数据,可在航线模型中选择船舶性能最优的航线。吴恭兴等^[27]结合气象条件,对传统A*算法中固有的代价函数进行了修改,通过引入不同的优化目标,求解了具有最短航行距离、最短航行时间和最低油耗的最优路径。Chen等^[28]也提出了一种改进的A*算法,其通过限制算法行进的方向,旨在减少算法在运行过程中需要搜索的节点数量。如图4所示,当前船位共有8个航行方向,根据航海实践,舍弃了第5,6,7这3个方向,保留了剩下的5个方向。仿真实验表明,采用改进的A*算法不仅能找到最优航线,且与传统算法相比还能减少29.25%的节点搜索次数。

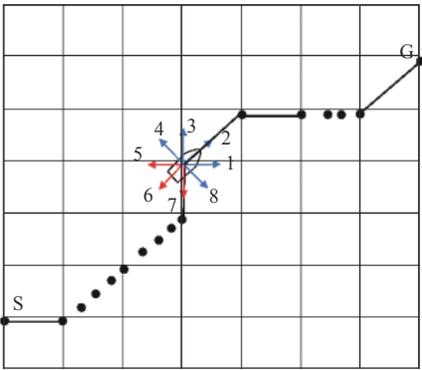


图4 改进A*算法的搜索方向

Fig. 4 The search direction of improved A* algorithm

Dijkstra算法和A*算法均是基于网格图形来进行路径搜索。其中,Dijkstra算法属于广度优先算法,即算法将搜索起点和终点之间的所有节点,因此该算法适用于动态目的地的场景,例如海上遇难搜救场景、避台场景等。但Dijkstra算法广度优先的特点也会导致该算法的空间复杂度较高,从而降低算法的实时性。针对这一问题,A*算法加入了启发函数,使空间复杂度大大降低,且启发函数的扩展性较好,易于在经典A*算法的基础上进行改进,适用于智能船舶所面临的各种航行场景。因此,A*算法在智能船舶航线优化领域的应用更加广泛。

2.4 智能算法

随着信息技术的快速发展,智能优化算法在航线优化领域的应用逐渐增多。基于遗传算法、蚁群算法、模拟退火算法、粒子群算法、多目标优化算法等群智能算法,研究人员进行了改进并形成了许多适用于海上航行的航线优化算法。

Lin^[29]在综合考虑航行安全、油耗和航行时间的基础上,提出了一种基于改进蚁群算法的多目

标船舶气象航线优化方法。针对求解多目标问题时产生的Pareto非支配解较少的情况,在改进的蚁群算法中引入了遗传算法中的交叉、重组、变异等相关操作,仿真结果表明,改进算法能有效拓展多目标天气航线的优化解。李鹏飞^[30]从航行安全、油耗以及航行时间这3个方面出发,基于蚁群算法提出了一种求解多目标船舶气象航线的优化方法。蚁群算法在求解多约束条件下的航线优化方面往往能获得较好的优化效果,但大量的全局优化解会使得算法计算量较大,求解效率低下。陈立家等^[31]为解决上述问题,使用网格模型对蚁群算法进行了改进,通过对信息素浓度加以控制,在实现航行总成本优化的基础上提高了算法的求解效率。

为使优化算法适应远洋航线,Zhang等^[32]改进了粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法,并引入了新的控制因子以使航线更加平滑。其通过借鉴遗传算法中交叉、重组和变异的思想来丰富解的空间,并求解油耗和航行时间多目标优化的最优航线。在此基础上,Zhao等^[33]提出了一种基于PSO和遗传算法的混合多准则船舶航线优化方法,以实现船舶的航行安全、油耗和航行时间这3种目标的优化航线。该算法不仅具有粒子群算法的快速收敛性,而且通过应用遗传算法的交叉、选择和组合来改进Pareto最优边界分布,还提高了解的多样性。上述2种混合优化算法通过结合其他算法的特性,避免了PSO算法早熟收敛的问题。冯辉等^[34]混合使用了全局和局部PSO算法,实验表明也能避免传统PSO算法的过早收敛问题。

崔康靖等^[35]在考虑风、浪双重气象因素的情况下,以航程和航行时间为优化目标,提出了一种结合人工势场法和模拟退火算法的船舶航线优化方法,但该混合算法并不能较好地解决人工势场法的固有缺陷,也即存在局部极小值点和振荡特性。Wu等^[36]通过在障碍物的周围添加新的势场项,避免了算法陷入极小值点。范云生等^[37]则是通过改进引力场函数和斥力场函数,避免了局部极小值问题。以上2种改进可以在一定程度上提高人工势场法在航海领域的适用性。路春晖等^[38]提出了一种基于2D扫描思想的搜索扫描算法,即通过扫描获取当前位置周围的障碍物信息以确定子节点,然后通过比较代价函数值来获取最优子节点,经不断迭代直到终点,从而确定规划路线。结果表明,搜索扫描算法可以减少传统算法结果为非最优解的问题。

李明峰等^[39]以航线转向点和各航段的航速为

优化对象,以最短时间和最低油耗为优化目标,以遗传算法为理论基础,构建了基于气象海况的适应度评估模型,通过优化解的选择空间,来实现对最优航线的求解。优化方法如图5所示。图中,白球所在的转向点为待优化转向点,黑球所在的转向点为固定转向点。此时,船舶航线优化问题的变量为待优化转向点的位置和新航段的航速,得到上述变量之后,连接各个转向点即可得到一条优化的航线。Kuhlemann等^[40]采用遗传算法来最小化船舶的油耗,该算法考虑了气象因素、避险和预期到达时间。Wang等^[41]提出了一种求解动态环境中最小航行时间的实数编码遗传算法,使用了一种基于个体在排序总体中位置的适应度赋值方法,显著简化了适应度值的计算。Pan等^[42]在遗传算法的基础上,引入了三角函数选择算子,其通过改进变异算子,能在算法初始阶段增大搜索范围,在算法的中、后期逐步缩小搜索范围,加快了算法的收敛速度,缩短了算法的运行时间。Lee等^[43]应用非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm, NSGA)-II全局优化算法,动态求解了船舶航线优化问题,从而克服了现有算法容易陷入局部最优的局限性。耿旭^[44]提出了一种结合遗传算法和滚动时域控制(receding horizon control, RHC)策略的混合算法,该算法针对航行中的“避台场景”,可以实现实时的航线优化。也即应用自适应遗传算法提高算法的实时性,同时利用RHC策略依据气象预报信息及时调整航线,从而保证航线的安全性和时效性。

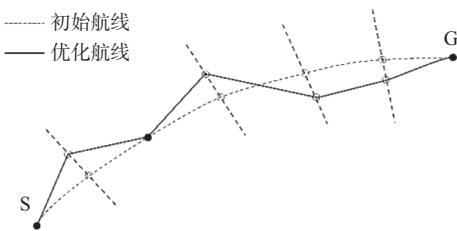


图5 优化航线示意图

Fig. 5 Schematic diagram of optimized route

智能算法在许多优化问题上都具有较好的优化效果,但其运算量大,在复杂约束条件(例如,考虑风、浪、洋流等气象数据)下难以保证优化的实时性。智能船舶的航线优化问题比较复杂,单一优化算法大多适用于小范围、单一约束的优化问题。在航海领域,有关智能船舶航线优化问题的研究理论成果丰富,但在工程转化过程中遇到困难。综合多种算法的优点,应用混合优化算法可以提高算法的综合性能。综上所述,尝试融

合多种算法并改进各种算法以追求最佳航线优化效果,是未来智能船舶航线优化的研究热点。

2.5 人工智能和机器学习算法

目前,一个新兴的研究趋势是使用人工智能和机器学习方法提高船舶燃油效率、时间效率和优化性能。研究人员通常使用人工神经网络和机器学习方法来预测不同海况下的油耗,以控制船舶的燃油消耗和预期到达时间。Wang等^[45]在利用小波神经网络的基础上,开发出了实时能效优化模型,用以确定不同工况下的最佳主机转速。Mao等^[46]考虑了气象信息和集装箱船主机转速数据,通过采用3种不同的统计模型(自回归、最小二乘估计、最大似然法),预测了航速。该模型有助于监测船舶的速度,确保准时到达目的地。

Coraddu等^[47]考虑了影响船舶纵倾的气象条件,其利用船舶历史数据及时消除了因油耗引起的纵倾,通过预测油轮的油耗,优化船舶纵倾,从而降低了油耗。Du等^[48]在考虑船舶运动特性的基础上建立了航速优化模型,并利用2个人工神经网络模型预测了油耗,实验表明,两艘9 000 TEU集装箱船的油耗降低了约5%~8%。Zheng等^[49]使用人工神经网络模型预测船舶的油耗,并在挪威附近水域进行了航行试验,结果显示可节省约11%的燃料。Gkerekos等^[50]使用人工神经网络模型预测了船舶的油耗,随后又使用Dijkstra算法求解了最佳航线。祝亢等^[51]考虑了船舶的操纵特性,并使用视线算法和深度确定性策略梯度算法设计了一种深度强化学习控制器,实验证明这种控制器具有快速收敛、跟踪迅速、偏航误差小、舵角变化频率小等优点。Chen等^[52]提出了一种基于Q-learning的航线优化与操作方法,使用该方法可以使船舶能够在不需要任何航海经验的情况下自主航行。经过足够多轮的训练,很有可能会产生令人信服的航线和操纵策略。经与现有的快速探索随机树(rapid-exploring random tree, RRT)和A*算法的比较,表明该方法在自学习和持续优化方面更有效,并且更接近于人类操纵。

虽然基于人工智能和机器学习的优化方法所需参数少、探索性强,但同时也存在以下局限性:应用机器学习算法的智能船舶在复杂未知环境下航行时,由于初期探索策略存在盲目性,导致算法收敛速度慢,在算法训练过程中需要花费大量的时间。针对此问题,可借鉴启发式思想,对某一训练环节进行趋势性启发以提高学习效率。此外,机器学习的可移植性和通用性差,训练过的算法无法直接应用于新的场景。可结合机器学习

方法与传统优化方法形成新的混合优化方法, 然后针对各种场景中的共性和差异性分别予以考虑。每种优化方法在实际应用中都存在自身的局限性, 通过不同方法之间的相互结合, 可以得到性能更好的方法。

综上所述, 从优化的步骤上看, 航线优化方法主要分 2 类。第 1 类优化算法是从起始点开始分步骤优化, 最终实现对整个航线的优化, 例如改进的等时线法、动态规划法以及图形搜索算法(包括 Dijkstra 算法和 A* 算法)等。该类优化算法的优化示意图如图 6 所示。图中, 从起始点 S 开始, 经过 1, 2, ..., N 个步骤的累计优化后, 得到了符合优化目标的最优航线 S-A-B-C-D-G。第 2 类优化算法是通过扩大优化航线的解集, 然后从优化航线的解集中寻求最优解, 例如智能算法(包括遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等), 同

时, 机器学习和人工智能的应用也有所上升, 各种优化方法的特点以及优、劣势对比结果如表 3 所示。第 2 类优化算法的优化示意图如图 7。图中, 橙色线为初始航线, 大部分优化算法是先在初始航线的基础上增加航路点从而扩大解的范围, 然后再对每一个解进行评估, 求出最优解。

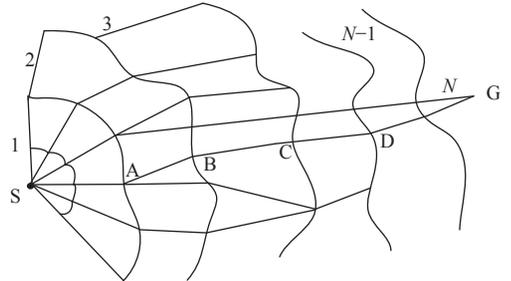


图 6 第 1 类优化算法的分步优化示意图
Fig. 6 Step optimization diagram of the first kind of optimization algorithm

表 3 各种优化方法的代表方法及其优劣势

Table 3 The representative methods and their advantages and disadvantages of various optimization methods

优化方法	代表方法	优势	劣势
改进的等时线法	修正等时线法 三维等时线法	1) 实用性强 2) 可解释性好	1) 优化效果不显著; 误差传播现象
动态规划法	改进的动态规划法 三维动态规划法	1) 动态性能较好 2) 鲁棒性强	1) 求解全局最优较困难 2) 适用场景较少
图形搜索算法	Dijkstra 算法 A* 算法	1) 执行效率高 2) 可扩展性好 3) 描述简单, 易于实现	1) 建模较复杂 2) 对启发函数要求较高 3) 有时需要一些理想化的条件, 影响求解精度
智能算法	遗传算法 人工势场法	1) 鲁棒性强 2) 可扩展性好	1) 参数较多 2) 迭代步数多, 搜索速度慢
机器学习算法	人工神经网络 Q-Learning	1) 所需参数少 2) 搜索性能强大, 易于求解全局最优 3) 采用贪心策略, 可保证收敛性	1) 可解释性较差 2) 收敛速度慢 3) 可能会导致维数灾难

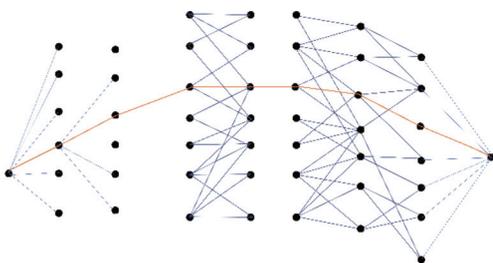


图 7 第 2 类优化算法优化示意图
Fig. 7 Optimization diagram of the second kind of optimization algorithm

由航线优化领域内的众多理论研究成果可以看出, 智能航线优化中航线设计方法和优化算法的选择可以随机组合, 即不同的航线设计方法和优化算法可以结合使用。然而, 各优化算法均有其独特的优势和算法本身的局限性, 结合研究目标选定航线设计方法和与之匹配的优化算法才能达到较好的优化效果。

3 存在的问题及难点分析

通过总结船舶航线优化的技术路线, 梳理近年来国内外船舶航线优化算法的研究现状, 发现船舶航线优化研究主要存在以下问题:

1) 在基于气象数据的航线优化领域, 由于跨洋航线的航行时间往往大于气象预报的时效性, 导致船舶在出发时无法预测整个航次的气象数据, 因此针对没有预测数据的航段的优化是一个亟待解决的问题。一些研究人员基于初始航线, 采取先优化预测数据时间范围内的航段, 然后随着船舶的航行获得新的气象信息后, 再动态优化之后的航段。这类解决办法一定程度上增加了优化航线的实用性, 但所谓的最优, 也仅仅是在气象数据有效期内的最优, 而从整个航次来看航线的优化仍有提升空间。

2) 在基于油耗模型的航线优化领域, 目前比

较流行的是黑盒模型和灰盒模型,此类模型的建模需要大量历史数据,只有足够多的历史数据才能训练出高精度的预测模型。并且,在建模时因忽略了部分船舶自身特性,故模型泛化能力较差。

3) 基于航线库和航路点库的航线优化能够充分利用海量的船舶历史航行数据,但仅限于在有历史航行数据的海区,且其对于最新的政策法规(例如限制排放区)以及海图的改正等欠缺考虑。在使用这类优化方法时,应对其固有的缺陷给予足够的考虑。

4) 目前,用于航线优化的算法大多是从其他研究领域(例如航空交通运输、公路交通运输、轨道交通等)移植而来,故应考虑海洋和船舶这两方面的特殊硬性因素,包括海洋环境的不确定性、波浪对船舶航行的影响和船舶自身所具有的大惯性、迟滞性等运动特性。对智能船舶而言,优化算法在解算精度和实时性方面还有待提高。

5) 目前提出的航线优化算法还停留在模拟实验阶段,实船试验较少,没有用于衡量各种优化算法优化性能的统一的基准实验,这种情况极大地限制了理论成果应用于实际的进程。

6) 现阶段的大多研究仅考虑了气象海况及船舶自身的运动特性,对于航行规则(例如分道通航制)和实际的助航设备仍考虑不足。

4 技术发展趋势及展望

4.1 探索基于大数据和云计算的航线优化规则

自从推出船舶 AIS,大量关于船舶航行的信息被保存下来,包括船舶的航速、位置等。如果能够充分地分析、挖掘这些信息,从历史轨迹数据中提取出航线相关信息,便可以为分析船舶因恶劣天气偏离传统航线而提供重要的借鉴和参考。另外,通过分析 AIS 数据,还可以拟合出航线的油耗、航速、各航段的航行时间等信息。在交通运输领域,采用机器学习技术分析这种大数据,可为短期交通预测提供更准确的服务。李晋等^[53]使用 AIS 数据构建基因算法优化基于神经网络的船舶交通流量预测模型,对船舶交通流量数据进行统计,分析得到了进出天津港的航线特性。尽管天气预报的精度正在提升,但始终存在不确定性。目前,鲁棒优化模型已被用于处理因天气不确定性导致的油耗预测的不确定性。Lee 等^[54]使用数据挖掘技术来识别天气对特定航线的影响。Yoo 等^[55]提出了一种使用机器学习的航线优化算法,可有效提高船行的时间效率。Wen 等^[56]

利用 DBSCAN 算法识别出关键区域,并通过聚类相似度度量将这些区域自动连接起来,然后利用人工神经网络学习转弯区域之间的关系,生成了不同船型的合理航线。

4.2 评估各种优化方法的优化性能

尽管计算能力和气象数据的可用性已得到不断提高,但船舶航线优化领域使用的主要方法并未发生显著变化。对于大多数已发表的研究,其优化目标是最低油耗或最短航行时间。可以发现,不同文献中所提的优化方法经实验论证均表现出了很好的优化效果。读者和其他研究人员可能很难比较不同方法的性能,但如果提出一个可以量化不同方法的优化效果的基准实验,将会使学术界和工业界受益良多。例如,在一些文献中,实际的油耗要么没有报告,要么是以百分比的形式呈现,而未说明对比的基准是什么。这也是为何在一些文献中显示燃油可节省 15% 以上,而大多数文献中显示的是节省范围在 3%~5% 内的原因。理想情况下,可以产生一些基准实例,以方便本领域研究人员快速找到适合的优化方法。例如,在已知气象信息的航线中,提供特定船舶的数据(各项船舶参数、航行数据等),研究人员可以将由自己所提方法得出的实验结果与在实际航行报告中得出的结果进行比较。

4.3 建立智能航路模型

在无人驾驶汽车领域,“单车智能”和“车路协同”逐渐成为智能交通的研究主流。所谓车路协同,就是建立数字化的公路系统。本文综述的大部分文献几乎都未考虑分道通航制和交通流方向等国际海事组织规定的航行规则,从而给理论成果的工程转化带来了困难。例如,Xue 等^[57]创新性地提出以航标为树的节点,以相邻航标的连线为树路径,以相邻浮标的距离为路径代价,用改进的 Dijkstra 算法寻找最短路径,为船舶设计出符合经济效益的优化航线,从而避免恶劣天气,减少不必要的弯路,缩短航行时间,并达到安全、省油、准时到达的目的。在航海领域,综合考虑宏观交通流特征、船舶运动参数和船舶的运行特性,建立符合船舶实际航行的航路模型将成为未来研究的一个方向。电子海图显示与信息系统(electronic chart display and information system, ECDIS)中蕴含有丰富的海图数据,可为全球智能航路模型的建立提供有利条件。因此,将智能航路模型与 ECDIS 相结合的智能船舶导航系统在智能航行领域将有着广泛的应用前景。

4.4 考虑国际法规限制的航线优化

预计在未来几年,各国政府将加大力度减少航运对海洋环境的影响,如果出台了新的法规,那么就会出现新的研究问题。例如,在国际海事组织划定了排放控制区域(emission control area, ECA)之后, Ma 等^[58]在考虑 ECA 法规和气象条件的情况下,采用 NSGA-II 设计一种能同时降低航行成本和时间的航线及航速优化方法。

船舶的智能化会带来运载效力的提升和运营效率的提高,这将极大地促进能效政策的实施^[59]。智能船舶作为智能航运发展范畴中的重要组成部分,将革新传统船舶的驾驶和运载方式,使传统船舶的载运变得更为灵活,进而借助技术升级使船舶在运载过程中减少船员配备,增加运载效力,降低污染排放,最终巩固海运在运输领域的地位,满足航运业安全、节能、增效等方面的需求。

5 结 语

航线优化技术在智能船舶自主航行的研究过程中尤为重要,其发展的目的是保障船舶的安全性和可靠性,推进船舶的智能化发展进程,使未来的航运趋于绿色和经济。本文对近年来在智能船舶航线优化方面的研究进行了分类概括,并深入剖析了各类优化算法。研究显示,在优化算法层面,基于机器学习和混合优化方法的航线优化方法因其在智能船舶导航系统中的出色表现,逐渐成为主流的优化方法。基于对近年来智能船舶航线优化研究的分析与概括,针对领域内面临的主要问题,提出了几种可能的发展方向,可为相关研究提供参考。

参考文献:

- [1] 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 (in Chinese).
- [2] 严新平,王树武,马枫.智能货运船舶研究现状与发展思考[J].*中国舰船研究*,2021,16(1):1-6.
YAN X P, WANG S W, MA F. Review and prospect for intelligent cargo ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 1-6 (in Chinese).
- [3] SIMONSEN M H, LARSSON E, MAO W G, et al. State-of-the-art within ship weather routing[C]//Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. St. John's: American Society of Mechanical Engineers, 2015.
- [4] 中国船级社.智能船舶规范[S/OL].(2020-03-01)[2022-03-12].<http://www.ccs.org.cn>.
Chinese Classification Society. Smart ship specifications[S/OL]. (2020-03-01)[2022-03-12]. <http://www.ccs.org.cn> (in Chinese).
- [5] LO H K, MCCORD M R. Routing through dynamic ocean currents: general heuristics and empirical results in the gulf stream region[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 1995, 29(2): 109-124.
- [6] KIM S W, JANG H K, CHA Y J, et al. Development of a ship route decision-making algorithm based on a real number grid method[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 101: 102230.
- [7] MA D F, MA W H, JIN S, et al. Method for simultaneously optimizing ship route and speed with emission control areas[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 202: 107170.
- [8] 袁裕鹏,王康豫,尹奇志,等.船舶航速优化综述[J].*交通运输工程学报*,2020,20(6):18-34.
YUAN Y P, WANG K Y, YIN Q Z, et al. Review on ship speed optimization[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2020, 20(6): 18-34 (in Chinese).
- [9] CARIOU P. Is slow steaming a sustainable means of reducing CO₂ emissions from container shipping?[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2011, 16(3): 260-264.
- [10] MOREIRA L, VETTOR R, SOARES C G. Neural network approach for predicting ship speed and fuel consumption[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(2): 119.
- [11] 潘杰,党莹.基于电子海图的大洋航线自动选择优化[J].*计算机辅助工程*,2006,15(2):64-66,70.
PAN J, DANG Y. Optimization for automatic selection of ocean course based on electronic chart[J]. *Computer Aided Engineering*, 2006, 15(2): 64-66, 70 (in Chinese).
- [12] WANG H L, MAO W G, ERIKSSON L. A Three-dimensional Dijkstra's algorithm for multi-objective ship voyage optimization[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 186: 106131.
- [13] PENNINO S, GAGLIONE S, INNAC A, et al. Development of a new ship adaptive weather routing model based on seakeeping analysis and optimization[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020, 8(4): 270.
- [14] HAGIWARA H. Weather routing of (sail-assisted) motor vessels[D]. Delft: Delft University of Technology, 1989.
- [15] ROH M I. Determination of an economical shipping route considering the effects of sea state for lower fuel consumption[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2013, 5(2): 246-262.
- [16] LIN Y H, FANG M C, YEUNG R W. The optimization of ship weather-routing algorithm based on the composite influence of multi-dynamic elements[J]. *Ap-*

- plied Ocean Research, 2013, 43: 184–194.
- [17] BELLMAN R. On the theory of dynamic programming [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 1952, 38(8): 716–719.
- [18] 张进峰, 王晓鸥, 刘永森. 基于动态风浪环境的我国近海船舶避台航线优化 [J]. *中国航海*, 2016, 39(2): 45–49. ZHANG J F, WANG X O, LIU Y S. Dynamic optimization of ship typhoon avoidance routeing in china offshore waters[J]. *Navigation of China*, 2016, 39(2): 45–49 (in Chinese).
- [19] CHEN H T. A dynamic program for minimum cost ship routing under uncertainty[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1978.
- [20] SHAO W, ZHOU P L, THONG S K. Development of a novel forward dynamic programming method for weather routing[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2012, 17(2): 239–251.
- [21] ZHANG L Y, BIENKOWSKI A, MACESKER M, et al. Many-objective maritime path planning for dynamic and uncertain environments[C]//2021 IEEE Aerospace Conference (50100). Big Sky: IEEE, 2021: 1–10.
- [22] ZACCONE R, OTTAVIANI E, FIGARI M, et al. Ship voyage optimization for safe and energy-efficient navigation: a dynamic programming approach[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 153: 215–224.
- [23] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. *Numerische Mathematik*, 1959, 1(1): 269–271.
- [24] DECHTER R, PEARL J. Generalized best-first search strategies and the optimality of A*[J]. *Journal of the ACM*, 1985, 32(3): 505–536.
- [25] KUROSAWA K, UCHIYAMA Y, KOSAKO T. Development of a numerical marine weather routing system for coastal and marginal seas using regional oceanic and atmospheric simulations[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 195: 106706.
- [26] MANNARINI G, COPPINI G, ODDO P, et al. A prototype of ship routing decision support system for an operational oceanographic service[J]. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2013, 7(1): 53–59.
- [27] 吴恭兴, 王凌超, 郑剑, 等. 考虑复杂气象变化的智能船舶动态航线规划方法 [J]. *上海海事大学学报*, 2021, 42(1): 1–6, 12. WU G X, WANG L C, ZHENG J, et al. Dynamic route planning method for intelligent ships considering complex meteorological changes[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2021, 42(1): 1–6, 12 (in Chinese).
- [28] CHEN G, WU T, ZHOU Z. Research on ship meteorological route based on A-star algorithm[J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021: 9989731.
- [29] LIN Y H. The simulation of east-bound transoceanic voyages according to ocean-current sailing based on particle swarm optimization in the weather routing system[J]. *Marine Structures*, 2018, 59: 219–236.
- [30] 李鹏飞. 多目标船舶气象航线优化算法的研究与仿真 [D]. 长春: 吉林大学, 2019. LI P F. Research and simulation of multi-objective ship weather optimization algorithm[D]. Changchun: Jilin University, 2019 (in Chinese).
- [31] 陈立家, 黄立文, 崔梅. 基于改进蚁群算法的船舶多约束最优航线设计 [J]. *上海海事大学学报*, 2017, 38(4): 11–15. CHEN L J, HUANG L W, CUI M. Optimal ship route planning with multiple constraints based on improved ant colony algorithm[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2017, 38(4): 11–15 (in Chinese).
- [32] ZHANG G H, WANG H B, ZHAO W, et al. Application of improved multi-objective ant colony optimization algorithm in ship weather routing[J]. *Journal of Ocean University of China*, 2021, 20(1): 45–55.
- [33] ZHAO W, WANG Y, ZHANG Z S, et al. Multicriteria ship route planning method based on improved particle swarm optimization –genetic algorithm[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(4): 357.
- [34] 冯辉, 刘梦佳, 徐海祥. 基于 AHPSO 算法的无人艇多目标路径规划 [J]. *华中科技大学学报 (自然科学版)*, 2018, 46(6): 59–64. FENG H, LIU M J, XU H X. Multi-target path planning for unmanned surface vessel based on adaptive hybrid particle swarm optimization[J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2018, 46(6): 59–64 (in Chinese).
- [35] 崔康靖, 郑元洲, 陈国成, 等. 大风浪环境下的船舶气象航线优化设计 [J]. *武汉理工大学学报 (交通科学与工程版)*, 2022, 46(2): 356–360. CUI K J, ZHENG Y Z, CHEN G C, et al. Optimization design of ship meteorological route under heavy wind and waves[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2022, 46(2): 356–360 (in Chinese).
- [36] WU Z Y, HU G, FENG L, et al. Collision avoidance for mobile robots based on artificial potential field and obstacle envelope modelling[J]. *Assembly Automation*, 2016, 36(3): 318–332.
- [37] 范云生, 柳健, 王国峰, 等. 基于异源信息融合的无人水面艇动态路径规划 [J]. *大连海事大学学报*, 2018, 44(1): 9–16. FAN Y S, LIU J, WANG G F, et al. Dynamic path planning for unmanned surface vehicle based on heterogeneous information fusion[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2018, 44(1): 9–16 (in Chinese).
- [38] 路春晖, 张博, 付振楷, 等. 搜索算法在无人艇航迹规划中的应用 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 83–88.

- LU C H, ZHANG B, FU Z K, et al. Application of search algorithms in unmanned surface vehicle track planning[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 83–88 (in Chinese).
- [39] 李明峰, 王胜正, 谢宗轩. 恶劣气象海况下船舶航线的多变量多目标优化建模 [J]. *中国航海*, 2020, 43(2): 14–19, 30.
- LI M F, WANG S Z, XIE Z X. Multi-variable-multi-objective optimization of ship routes under rough weather condition[J]. *Navigation of China*, 2020, 43(2): 14–19, 30 (in Chinese).
- [40] KUHLEMANN S, TIERNEY K. A genetic algorithm for finding realistic sea routes considering the weather[J]. *Journal of Heuristics*, 2020, 26(6): 801–825.
- [41] WANG H B, LI X G, LI P F, et al. Application of real-coded genetic algorithm in ship weather routing[J]. *The Journal of Navigation*, 2018, 71(4): 989–1010.
- [42] PAN C, ZHANG Z S, SUN W K, et al. Development of ship weather routing system with higher accuracy using SPSS and an improved genetic algorithm[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2021, 26(4): 1324–1339.
- [43] LEE S M, ROH M I, KIM K S, et al. Method for a simultaneous determination of the path and the speed for ship route planning problems[J]. *Ocean Engineering*, 2018, 157: 301–312.
- [44] 耿旭. 基于气象要素的船舶精细化航迹规划的方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2019.
- GENG X. Research on the method of ship accurate track planning based on meteorological elements[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2019 (in Chinese).
- [45] WANG K, YAN X P, YUAN Y P, et al. Real-time optimization of ship energy efficiency based on the prediction technology of working condition[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2016, 46: 81–93.
- [46] MAO W G, RYCHLIK I, WALLIN J, et al. Statistical models for the speed prediction of a container ship[J]. *Ocean engineering*, 2016, 126: 152–162.
- [47] CORADDU A, ONETO L, BALDI F, et al. Vessels fuel consumption forecast and trim optimisation: a data analytics perspective[J]. *Ocean Engineering*, 2017, 130: 351–370.
- [48] DU Y Q, MENG Q, WANG S A, et al. Two-phase optimal solutions for ship speed and trim optimization over a voyage using voyage report data[J]. *Transportation Research Part B: Methodological*, 2019, 122: 88–114.
- [49] ZHENG J Q, ZHANG H R, YIN L, et al. A voyage with minimal fuel consumption for cruise ships[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 215: 144–153.
- [50] GKEREKOS C, LAZAKIS I. A novel, data-driven heuristic framework for vessel weather routing[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106887.
- [51] 祝亢, 黄珍, 王绪明. 基于深度强化学习的智能船舶航迹跟踪控制 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 105–113.
- ZHU K, HUANG Z, WANG X M. Tracking control of intelligent ship based on deep reinforcement learning[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 105–113 (in Chinese).
- [52] CHEN C, CHEN X Q, MA F, et al. A knowledge-free path planning approach for smart ships based on reinforcement learning[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 189: 106299.
- [53] 李晋, 钟鸣, 李扬威. 基于 AIS 船舶数据的港口交通流量预测模型研究 [J]. *交通信息与安全*, 2018, 36(3): 72–78.
- LI J, ZHONG M, LI Y W. A forecasting model of marine traffic flows at ports based on AIS data[J]. *Journal of Transport Information and Safety*, 2018, 36(3): 72–78 (in Chinese).
- [54] LEE H, AYDIN N, CHOI Y, et al. A decision support system for vessel speed decision in maritime logistics using weather archive big data[J]. *Computers & Operations Research*, 2018, 98: 330–342.
- [55] YOO B, KIM J. Path optimization for marine vehicles in ocean currents using reinforcement learning[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2016, 21(2): 334–343.
- [56] WEN Y Q, SUI Z Y, ZHOU C H, et al. Automatic ship route design between two ports: a data-driven method[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 96: 102049.
- [57] XUE H, CHAI T. Path optimization along buoys based on the shortest path tree with uncertain atmospheric and oceanographic data[J]. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2021, 2021: 6663446.
- [58] MA W H, LU T F, MA D F, et al. Ship route and speed multi-objective optimization considering weather conditions and emission control area regulations[J]. *Maritime Policy & Management*, 2021, 48(8): 1053–1068.
- [59] 王远渊, 刘佳仑, 马枫, 等. 智能船舶远程驾驶控制技术研究现状与趋势 [J]. *中国舰船研究*, 2021, 16(1): 18–31.
- WANG Y Y, LIU J L, MA F, et al. Review and prospect of remote control intelligent ships[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2021, 16(1): 18–31 (in Chinese).