

全球海洋气象导航业务和技术研究进展

黄萧霖^{1,2} 徐晶¹ 金铸钰^{1,2} 鲍瑞娟³ 朱建广⁴

(1 青岛海洋气象研究院, 青岛 266034; 2 青岛市气象台, 青岛 266003; 3 福建省灾害天气重点实验室/中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室, 福州 350028; 4 山东港口青岛科技集团有限公司, 青岛 266071)

摘要: 海洋气象导航是指为船舶从确定的出发点到目标点之间的海上航行规划出最佳航线的过程。该过程需根据船舶航行任务设定优化目标, 如时间最优化或能效最大化等, 结合船舶航行所在海域的特性、气象预报数据、船舶性能、技术条件和航行要求等约束条件, 为船舶规划从出发点到目标点间安全、省时、节能和经济的航线, 实现航行的最佳效果。本文对近年来国内外海洋气象导航业务及航线规划技术进行调研, 综合考虑了海洋水文气象要素和海上灾害性天气对船舶航线的影响, 以及在航线规划中规避风险的关键技术, 分析了国内外关于航线规划优选方法的研究现状, 并对存在的问题进行探讨, 对未来进行展望。

关键词: 海洋气象导航, 航线优选, 航速优化

中图分类号: P4

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2024.03.004

Research Progress in Global Marine Meteorological Navigation Operation and Technology

Huang Xiaolin^{1,2}, Xu Jing¹, Jin Zhuyu^{1,2}, Bao Ruijuan³, Zhu Jianguang⁴

(1 Qingdao Joint Institute of Marine Meteorology, Qingdao 266034; 2 Qingdao Meteorological Observatory, Qingdao 266003; 3 Fujian Key Laboratory of Severe Weather/Key Open Laboratory of Cross-Strait Severe Weather of China Meteorological Administration, Fuzhou 350028; 4 Shandong Port Qingdao Science and Technology Group Co., Ltd, Qingdao 266071)

Abstract: Marine meteorological navigation refers to the planning of best route for marine navigation from the initial departure point to the destination. This process requires setting an optimization goal according to the specific navigation task (such as optimizing the navigation time, or maximizing energy efficiency) and takes into account various constraints including the characteristics of maritime navigation area, meteorological forecast data, ship performance, technical conditions, and navigation requirements. The aim is to plan a route that is safe, time-efficient, energy-saving, and economical, thereby achieving the best navigation outcome. We investigate the operation of marine meteorological navigation and route planning technologies at home and abroad, and comprehensively examine the impact of marine hydrological and meteorological factors and marine severe weather on route planning. Key technologies in risk avoidance for route design is also discussed. Furthermore, we analyze the current state of research on optimal route design methods both domestically and internationally, discuss the existing issues, and look towards the future.

Keywords: marine meteorological navigation, route optimization, speed optimization

0 引言

海洋船舶航运具有运载量大、廉价和航道天然的优势, 日益成为国际间货物运输最主要的方式之一^[1]。最新统计结果表明, 2020年全球海运货物量占世界

商品贸易货物量的80%以上^[2-3]。海洋气象导航作为航运贸易的关键一环, 在经济全球化进程中起着重要作用。

随着世界航运贸易量的增加, 船舶燃油消耗产生的温室气体也随之增长。根据国际海事组织(IMO)预计, 到2050年, 航运业温室气体排放量将是2018年(10.76亿t)的1.5倍^[4-6]。在面临实现“碳减排”和“碳中和”的政策压力下, 再加上燃料价格的波动, 船舶运营商对运营成本具有最小化的迫切需求。一旦确定好航程, 船舶航行中船速和航线的选择就是决定海上运输效益的关键因素。当船舶航行速度和燃料价格较高时, 燃油费用成本可能超过运营成本的50%以

收稿日期: 2023年6月5日; 修回日期: 2024年2月26日
第一作者: 黄萧霖(1995—), Email: huangxl@cma.gov.cn
通信作者: 徐晶(1971—), Email: xujing@cma.gov.cn
资助信息: 国家重点研发计划(2022YFC3004200); 中国气象科学研究院基本科研业务费专项基金项目(2023Y023); 中国气象局远洋气象导航重点创新团队资助(CMA2023ZD07); 中国气象局创新发展专项青年项目(CXFZ2024Q009)

上^[7]，因此优化航线以减少燃油成本具有巨大的经济驱动力^[8]。

由于海上环境复杂多变和不可控性等因素诸多，如狂风、巨浪、岛岸、周围行船、水下暗礁、沉船、浅滩、暗流等，船舶在海上航行时不仅要考虑其自身航行安全，还要考虑船舶所有人的经济效益。相比其他运输方式，船舶航行花费时间长、受海况、天气等自然因素影响较大。根据欧洲海事安全局（EMSA）的不完全统计，2014—2019年，平均每年船舶海难发生次数高达2665次，造成死亡及失踪人数达563人，受伤总人数达5384人^[9]。另据世界海运理事会（WSC）的估计，2008—2013年，平均每年损失1679个集装箱^[10]，在2020年之后，平均每年海上损失的集装箱数量翻倍，多达3113个，均与海上恶劣天气密切相关^[11]。

航线规划问题通常是针对行驶在较大范围内的

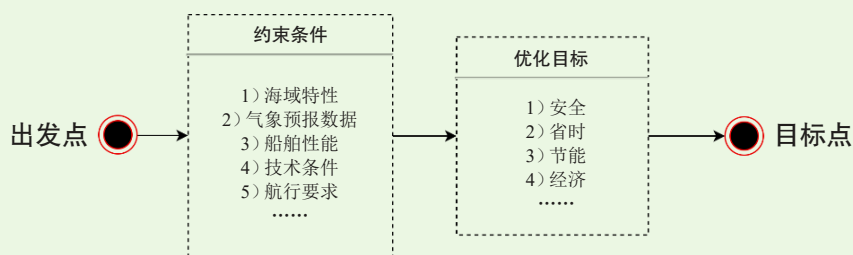


图1 航线规划流程

Fig. 1 The process of maritime route planning

海洋气象导航可以追溯到20世纪50年代初，美国海军为了适应当时远洋航行发展，在理论和方法上对船舶航线规划问题进行了研究，并建立了专门的研究机构。随后，德国、英国、前苏联、日本等也相继建立了海洋气象导航服务机构^[14]。20世纪80年代，中国建立第一个海洋气象导航中心，随后各地气象导航分中心及气象公司等相继发展，目前基本具备航路规划和气象服务能力，其中最权威的是中央气象台导航业务服务，经过多年发展现已形成具有自主知识产权的全方位气象导航系统，包括船端、岸端、移动应用和专业网站等平台，实现了远洋导航多源数据分析、航线模型与算法、岸基远洋气象导航决策支持、船舶信息预警及智能发布服务的一体化集成^[12]。Zis等^[15]整理了国外一些利用气象数据进行航线规划的商业软件，其中大多数是直接根据特定时空分辨率的预报信息实时提供航线选择，受限于预报的时效性，导致出现船舶油耗模型的构建准确性不高等问题。受益于中央气象台全球海洋天气预报技术和高时空分辨率的预报产品，我国气象导航业务虽起步晚但基本具备了现代化

远洋船舶，考虑短期和中期气象因素，运用计算机技术以获取航时最短、燃油消耗最少和安全性最大的航线。海洋气象导航涉及到海洋科学、大气科学、计算机科学、数据科学与大数据技术、海洋经济学和运输工程等多个方面。本文对海洋气象导航业务和关键技术进行全面回顾，综合分析海洋水文气象要素对船舶航线规划的影响，探讨航线规划中的技术难点，并对未来的发展进行展望。

1 海洋气象导航业务和优化技术

船舶航线规划是指船舶从起始港口到目的港口之间的路径寻优过程，可从时间、航程、风险、油耗等多个方面进行考虑（图1）。海洋气象导航是根据船舶性能、海洋水文状况、航行任务和技术条件等，为航行船舶优选航线的技术，根据预测的风浪流状况与船舶约束条件，避开恶劣风浪流区，在保证船舶安全的情况下，降低航行时间，提高经济效益^[12-13]。

船舶气象导航业务的能力^[12]（表1）。

1988年，Motte等^[16]研究表明24 h天气预报在当时进行航线规划是足够的。随着数值预报的预报水平增强，预报时效增长，进行长时效的海上风浪流预报有助于构建精细化船舶油耗预测模型，Chu等^[17]研究对比发现最终可节省高达20%的燃料。目前天气预报数据仍存在较大的误差，Hinnenthal等^[18]指出确定性预报模式并没有提供关于预报不确定性的信息，为了增强规划航线的鲁棒性，建议增强集合预报模式以捕捉天气发生发展中的变率。Wang等^[19]考虑在航线设计中天气预报和停泊港时间的不确定性，在航线设计中调整船舶航行速度和港口之间的最大允许中转时间来优化模型。Du等^[20]考虑到天气条件引起的燃油消耗率的不确定性，使用鲁棒优化设计使船舶往返航程的总燃油消耗最小。Skoglund等^[21]比较了气象导航中的确定性预报和集合预报，认为后者可以降低未按时到达（ETA）的风险，强调如使用集合预报需要强大的计算能力，可基于预报进行分阶段多航段优化。

恶劣的天气会导致船舶寿命减少，所以最大限度

表1 利用气象及海洋水文数据进行航线规划的软件/服务^[15]
Table 1 Software or service for route planning using meteorological and marine hydrological data^[15]

| 软件/服务 | 国家 | 优化目标 | 船舶动力建模 | 是否有风速预报 | 是否有潮汐流预报 | 是否兼容 ECDIS | 预报时空信息(时间/空间) | 预报来源 |
|---|----|----------------|-----------|---------|----------|------------|---------------|---------------------|
| Optimum Ship Routing (OSR) | 日本 | ETA、安全性、时间、油耗等 | 具体到船舶和货物 | 有 | 有 | 有 | 未来20 d/1~2 km | Weathernews |
| BonVoyage System (BVS) | 挪威 | 时间、油耗 | 建模 | 有 | 有 | 有 | 未来2 d/0.125° | Stormgeo |
| Seaware enroute | 挪威 | ETA、安全性、成本 | 特定船舶动力学模型 | 有 | 有 | 有 | 变化/0.125° | Stormgeo |
| Sea planner | 英国 | 时间、油耗 | 拖曳水池试验 | 有 | 有 | 有 | 0.1 d/5° | 丹麦气象研究所 (DMI) |
| SPOS onboard (Ship Performance Optimization System) | 瑞士 | 油耗、ETA | 特定船舶特性 | 有 | 有 | 有 | 每天4次/(N/A) | 瑞士数据传输网络气象公司 (DTN) |
| VVOS (vessel and voyage optimization solution) | 美国 | ETA、油耗 | 特定船舶模型 | 有 | 有 | 有 | (N/A)/1° | 美国Ocean Weather预报中心 |
| SMHI (onboard solution) | 瑞典 | 油耗、ETA、 | 具体到船舶和货物 | 有 | 有 | 有 | 未来10 d/(N/A) | 瑞典气象水文研究所 (SMHI) |
| 中央气象台气象导航综合显示系统 | 中国 | ETA、安全性、时间、油耗等 | 具体到船舶和货物 | 有 | 有 | 有 | 未来10 d/0.1° | 中央气象台 |

注: ECDIS (Electronic Chart Display Information System) 为电子海图显示信息系统; ETA (Estimated Time of Arrival) 为预计到达时间; N/A表示文献或专业网站未标明。

地减少航行风险是航线研究的目标之一。不同研究对航行风险的定义不同, 最终取决于船舶运营商希望通过依赖天气信息来避免何种风险。例如, Szlapczynski等^[22]认为, 风是航行中的主要安全威胁, 并试图探究如何将航行风险或在大风区的航行时间减少到最低。Delitala等^[23]将船舶在海浪波高大于4 m的区域航行视为安全风险。James^[24]认为海浪是导致船舶失速的主要原因, 并利用海浪预报图建立以最小航行时间为目的的航线规划模型。Fabbri等^[25]按照IMO的航海员指南^[26], 根据船舶具体航行条件综合考虑航行风险, 指出不同航行条件受不同天气条件(波高和波浪周期、风等)影响的程度不同。

21世纪之前大多研究的优化模型的优化准则主要是单目标, 例如实现最短航行时间^[27]、固定时间内到达^[28]、最少燃油消耗^[29-30]以及规避风险^[28]等。近年来随着智能算法优化发展, 航线规划技术研发考虑建立多目标优化模型, 以同时满足成本最小化、托运人满意度最大化、风险最小化、排放最小化等多种优化目标, 开展多目标航速优化研究^[31-32], 根据不同的优化方法综合性的选取最佳航线。Szlapczynska^[33]的研究将船舶航速优化与航行时间优化、乘客舒适度结合起来, 取得了不错的优化效果。另外, 考虑不确定性因素的影响, 如燃油价格、港口滞留时间和冰载荷、运价、恶劣海况等的影响, 建立航速优化模型也是未来的研究方向^[8]。同时, 由于新能源船舶的数量日益增长, 针对新能源船舶建立航速优化模型, 开展航速优化研究也是近年来研究热点^[34]。

2 海洋水文气象要素对海洋气象导航的定量影响

洋面风、海浪、洋流及海雾、海冰、台风等海洋

水文气象要素或环境要素均对船舶航行有重要影响。其中风浪对航行影响最为直接, 洋流作用也不能被低估。此外, 船舶航行的阻力还受其自身航行速度、排水量和船体形状的影响。一旦为特定船舶的外部环境因素定量建立了船舶阻力模型, 并结合船舶受力和计算得到航速, 海洋气象导航软件就可以提供可靠、精准的航线。下面逐一分析各种海洋水文气象要素对海洋气象导航的影响。

2.1 洋面风

洋面风对船舶运动的影响最为直接, 是海上航行者最为关心的气象要素之一。洋面风不仅直接影响船舶航行, 还通过影响海浪和洋流对船舶航行造成间接影响。风会使船舶向下风向漂移, 还会使船舶产生偏转。船舶因风压产生的横向漂移速度与风速、风舷角、船速、船舶水上受风面积和船舶形状等因素有关^[35]。风主要包括风速和风向两个特征数据, 都是提升船舶航行运输安全性能的重要考虑因素。一般情况下, 顺风会增加船速, 逆风会使船速减小。当风速 $< 20 \text{ kt}$ ($1 \text{ kt} \approx 1.852 \text{ km/h}$)时, 顺风约使船速增加2%, 顶风约减速5%, 其他舷角介于两者之间^[36]。当风速较大时, 风引起的浪对船速影响很大, 无论顺、逆风均使船速减小^[37]。当船速与风速相当时, 既影响航速又影响航向, 导致船舶发生偏荡运动。航行过程中船舶迎风或背风面的表面积相对较大的时候, 顺风相较于逆风气象状况下燃料燃烧和能量消耗都有较为明显的降低, 如若遇到强度较大的侧风, 将会造成船舶整体横向的剧烈摇摆晃动^[38]。因此, 考虑实况气象条件, 对风这一因素进行实时监测与科学分析, 可以显著提升船舶航行路线设计的能力和水平, 保障船舶航行全过程的安全性。

近年来,随着国际航运减排行动的紧密开展,促进了风力助航技术和新能源船舶的蓬勃发展,在促进节约能源、减少排放的同时,有利于提高船舶航行运输的经济效益。研究表明,将风力助航技术与气象导航技术相结合具有协同效益^[39]。Mason^[40]研究表明,在特定的某些有利航线上,利用气象导航借助风帆助航可使巴拿马型散货船的碳排放节省30%以上。Yoshimura等^[41]研究了预报不确定性如何影响洋面风助力船舶航行,通过使用21个集合预报成员对太平洋进行个例研究,证明由于洋面风预报具有很大的不确定性,节省燃料预测值在32%~92%的较大范围。Vettor等^[42]研究表明,在实测中利用先验知识的最优路径航行时,产生的不确定性会抵消气象导航的优势。在全球不同海域的航线上以及不同航线的具体位置上洋面风况(风速、风向)都是变化的,然而,鲜少研究将航线与风况预报的随机不确定性联系起来,以确定哪些航线受预报不确定性的影响最大及其对应原因^[43]。

2.2 海浪

海浪是一种表面波动,同时也是影响船舶航行速度的重要因素之一。船舶在波浪作用下可以导致摇摆、偏荡、砰击、上浪和失速等现象^[44]。船舶失速取决于船舶吃水、吨位和船型等性能参数,还与风浪的大小和范围及浪舷角等因素有关。当浪较小时,顶浪航行可使船速降低,顺浪可稍微增加船速;当达到中至大浪或以上时,无论顺浪还是顶浪航行都会减小船速。如果船舶的横摇周期与波浪周期相同时趋向共振,可产生谐摇导致船舶倾覆^[45-46]。这些危及船舶安全的不利因素会大大降低船速,为了减少不利影响,必要时船长会主动降低船速或改变航向,从而延长航时或航程^[47]。据统计,船舶因风的阻碍作用引起的失速占全部失速率的1/3,而海浪引起的附加阻力作用产生的失速占全部失速率的2/3^[48]。由此可见,海浪是使船舶失速和危及船舶航行安全的最主要的因素。

Jiao等^[49]利用真实海洋环境水池(Actual Sea Model Basin, ASMB)进行了船模航行性能研究,对航行中受到的风浪影响进行了分析。国际海洋研究所^[50](NMRI)利用受风载荷模拟装置和水池造波机构模拟了海风和不规则波,研究了船舶在真实海洋环境中的航行性能。Simonsen等^[13]利用基于计算流体力学(CFD)方法对船舶在规则波中产生的自由面兴波、尾部流场进行了模拟和分析,为研究船舶在长波、短波中的工况提供了基础。Tang等^[51]模拟规则波和不规则波中船舶的前进速度,用13500 TEU集装箱船来验证,分析了顶浪航行时不规则剧烈波中的强非线性状态。

海浪对船舶航行的影响不仅仅是航速上的变化,更重要的是对船舶安全性的挑战。

2.3 洋流

洋流是海水的水平流动,可分为表面流、深层流,它们对船舶航行有不同的影响。船舶在洋流作用下的运动速度是流速与船速的矢量合成(图2),其作用大小因洋流的大小和不同舷角而异。顺流增大船速,逆流降低船速。

洋流可以通过增加或减少船舶的速度来影响航行的总燃料消耗,在航线规划中要充分考虑到洋流的影响。Chen等^[52]研究发现与黑潮顺流的航线能节省1.8%的运输时间,逆流避开黑潮主轴可以节省5.7%的航行时间,进而可以节省船舶燃料。Cai等^[53]对包括洋流在内的所有环境因素的船舶阻力进行分解计算,利用一个船体固定的坐标系计算洋流,并使用洋流的经验阻力系数来估计施加在船上的力。洋流对船速的影响,一般是以投影到船首尾线上的流速矢量大小为准,若此方向上流速分量 >0.5 kt时,就要考虑洋流对船舶运动的影响。海洋气象导航中经常利用有利的顺流条件以达到增加船速的目的,提高预报洋流流速和方向的准确性也是精准规划船舶线路和海洋气象导航的重要条件。

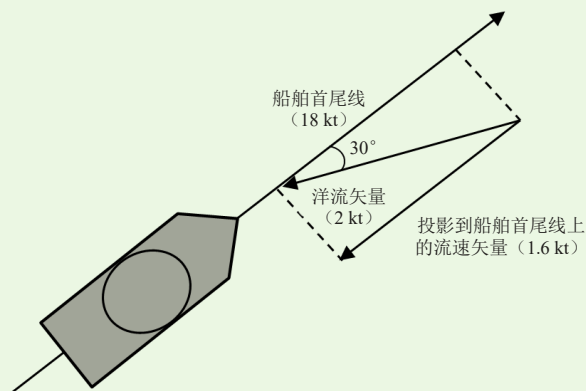


图2 洋流对船速的影响示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the influence of oceanic currents on ship speed

3 海上灾害性天气对航线的影响

随着科学技术的进步,船舶抗大风浪的能力和稳定性不断提升。但无论多先进的船舶,恶劣的海洋气象环境都会对其造成严重影响,有效规避海上灾害性天气对船舶航行的影响不容忽视。

3.1 台风和爆发性气旋

在各种气象因素中,以台风破坏力最强,给船舶航行安全带来的风险最大。造成强风的天气系统还包括温带爆发性气旋、强对流大风等。台风作为发生在

洋面上的强大风暴的一种,影响范围广、风力与浪高强度大、持续时间长,并且台风的来袭还会伴随着暴雨等危险天气。台风会导致船舶航速降低而导致延迟到港、散货船船舱进水、集装箱船货箱落水等情况,造成巨额经济损失。船舶处于复杂的大风浪状况下可能会产生船舶横摇、谐摇、骑浪等危险情况,一些严重的情况下甚至还会致使船舶发生倾覆,造成人货俱损的结果^[54]。爆发性气旋是指快速发展的温带气旋,也被称为“气象炸弹”,其定义为24 h内气旋中心气压下降超过24 hPa。由于其中心气压迅速降低,可在极短时间内造成异常恶劣天气。

针对船舶规避台风和爆发性气旋等天气系统导致强风的方案设计中,以船舶航行过程中的水文状况、气象状况和船舶本身的性能为基础,把握风、浪、涌、流动态的变化趋势与方向,从而获取一条可行的船舶避台风/避险航线方案。这种方案使船舶在强风影响下,能保证自身安全且尽可能降低成本,实现提高船舶航行经济效益的目标。但台风引起的大规模风浪分布会随着其移动而动态变化,客观上增加了船舶避台的难度。

顾明章^[55]指出,根据不同航行海域的船舶,结合此海域爆发性气旋多年发生、活动特点,应采取各自相宜的措施,如对于冬季向东行驶往美国西部的船舶,应抢在气旋前在其北侧驶过抵达,则不会对船期造成较大影响,但在制定撤离措施时须充分估算低压北侧的顶风浪所造成的船舶失速。Imazu等^[56]和Tamaru等^[57]将其设计的专家系统部署到船舶避碰、避台的问题中,以期实现自动化避碰、避台的效果。张晓兔等^[58]提到了利用各类算法来解决在较为复杂场景下的避台、避碰问题,包括人工势场法、神经网络、模糊控制法等。张立华等^[59]采用多级决策方法设计了避台航线。Wisniewski等^[60]分析了船长在躲避台风过程中的各种决策,如降低航速、改变航向(台风前/后变向)、滞航等。也有研究提出基于动态风浪环境的船舶避台航线优化方案,选取一个对我国/全球船舶造成严重影响的台风天气作为研究对象,应用仿真实验进行可行性验证^[61-62]。此外,基于船舶运动控制和台风路径信息设计高效稳定的避台航线优化算法也是船舶安全科学避台的关键^[63-65];通过对船舶规避台风的航线进行效益评估,可以为航运公司规避台风提供参考,提高企业的经济效益^[66];通过绘制未来时刻船舶与台风的相对运动轨迹,提供给船长用于制定新的航线以规避台风^[67]。

随着台风和海浪数值模式预报精度的不断提高,

基于不同大气和海浪耦合模式的台风预报,规划船舶避台航线的研究日益增多且精细化,如增加风浪对船舶运动三/六自由度的分析^[52,68]。Panigrahi等^[69]和Padhy等^[70]基于第三代海浪模型(WAM)进行船舶航线优化,综合考虑了船舶在波浪中的运动,降低规划航线的风险。张立华等^[59]利用动态规划方法设计了基于普林斯顿海洋模型(POM)的最短时间航线规划算法,通过动态分析航路的可导航性,规划时间最短的航线。Soda等^[71]基于MMG(Maneuvering Modeling Group)模型,利用高分辨率的模型风浪数据研究了风浪对船舶操纵的影响。在上述航线规划中首要的是准确的台风/爆发性气旋路径和强度预测,但目前的预测技术仍存在一定的不确定性。

3.2 海雾

海雾是影响海上大气水平能见度(简称大气能见度)的主要因素之一。在雾中航行,稍有不慎,就会发生偏航、触礁、搁浅或碰撞的危险^[72]。据统计,日本在1953—1978年共发生了910次海损事故,其中60%~70%发生在浓雾并伴有低压的恶劣天气中。因此,跨洋航线的选择,雾是主要的考量因素之一^[73]。大多数海上交通事故都是在大气能见度不良的情况下发生的。受海雾的影响,船舶在航行时很难观察清楚航标或其他船舶等,导致驾驶员判断失误,极容易发生与它船碰撞、追尾或驶出航道、搁浅、触礁等海上安全交通事故^[74]。此外,考量海雾的航线规划更利于省时。Song等^[75]研究表明在设计跨北极航线时,没有很好地考虑海冰退缩引起的海雾加剧的影响,特别是由于能见度低而导致事故的潜在风险,且沿先前的建议航线的航行时间将增加10%~30%。在研究雾对船舶航行的影响时应重点关注船舶雾航中的几个问题,如雷达问题、安全航速问题、船舶自动识别系统(AIS)、大气能见度不良时的避让问题等,提出相应预防船舶雾航碰撞事件的对策^[76]。

3.3 海冰

船舶在高纬度海域航行时,常常会在结冰季节受到海冰和冰山的影响。由于冰山在水下的体积远大于水面上的体积,对船舶航行的威胁很大,严重时会造成船舶的倾覆。北极航道是穿过北冰洋,连接大西洋和太平洋的重要海上通道^[77],中欧间贸易航行东北航道相比于传统航线可节省15%~50%的航程^[78],其开通和利用大大缩短了东北亚和欧洲之间的海上航程,减少了海上运输成本。北极地区受恶劣天气影响尤为严重,Ghosh等^[79]研究表明与其他航线相比,北极航线虽能够缩短航行时间从而极大程度减少燃料消耗,

但极易受天气和海况的影响，所以海冰的预报在此地区尤为重要。

北极海域特殊的地理、环境和气候特征造成冰情复杂，近年来关于北极航道的冰情一直是国内外许多学者关注的重点。对于北极航道冰情的研究，主要从海冰的密集度范围变化、海冰的厚度体积变化、海冰的运动趋势以及海冰影响下北极航道的通航能力等方面开展。付珊珊等^[80]使用基于蒙特卡罗仿真的模糊层次分析法识别北极水域船舶航行重要环境风险因素，发现海冰密集度、风和大气能见度是影响北极水域船舶航行安全的首要因素。Sahin等^[81]利用冰密集度、风速、大气能见度、气温和高程等数据构建风险指标体系，开展东北航道自然环境危险性风险评估，敏感性分析表明海冰在航道风险因素中贡献率最大。然而，目前大部分研究仅考量海冰密集度阈值，作为航道通航的判断标准，缺乏对于海冰厚度以及船舶破冰能力等重要因素的考量。

4 船舶失速及航线设计方法

4.1 船舶在风浪中航行的速度损失计算

在海上航行的船舶受风、海浪和洋流等因素的影响所产生的船速下降现象被称为船舶的失速现象，即船舶的自然失速^[82]。在海洋气象导航的过程中，计算船舶的自然失速对于航线的规划至关重要。引起自然失速的具体原因有以下几点：1) 由波浪反射作用引起的阻力增加；2) 风所带来的附加阻力，其对船体吃水线之上的部分形成阻力，可以采用风洞实验来模拟自然风对于航行中的不同类型的船舶造成的风阻力；3) 洋流，主要是大洋环流的影响；4) 风浪的表面流导致阻力增加；5) 船体摇荡引起的阻力增加，纵摇和垂荡导致阻力较大，而横摇引起的阻力较小；6) 推进效率的降低；7) 保向操舵和首摇导致的阻力增加。

风浪的大小和速降的大小成正比，风浪越大，船的失速现象就越严重。船舶航行顺风的情况下，船速会稍有增加，逆风则会产生速度损失。一般来说，船舶在顶浪航行的情况下，如果波高 < 2 m，船速与静水航速相当；波高 > 2 m时，阻力会随波高增大而增大，船速也随之减小。粗略估计，由风浪阻力引起的船舶失速，约有1/3来自于风阻力，2/3来自于浪阻力。船舶在风浪中航行的速度损失计算主要有3种方法：1) 通过系统能量平衡进行理论推导。计算船舶所受的波浪阻力、风阻力和螺旋桨在波浪中的水动力性能，并估算洋流的影响，从系统能量平衡的角度去计算船舶实际速度。这种方法计算准确但由于程序繁琐、计算困难等原因，难以满足海上实践的现有需求。2) 试

验法。借助水池和风洞等设备对船舶进行模拟试验，测得一些关键因素从而确定其速度损失的情况。这种方法总体适用性较差，在复杂情况下很难进行实时的速度转换。3) 数理统计法。通过大量的实际观测数据并在统计分析后得到用于估计失速的经验公式或失速计算图表，即可通过输入船舶参数（吨位、主机功率、排水量、吃水差等）以及波浪参数（波向、波高、相对波高等）利用数理统计等传统方法计算^[83-88]。如大连海事大学的刘烽^[85]通过输入风速、航向与风向之间的夹角、船舶载重吨位等，利用统计公式预测船舶航行速度，但其适用船舶吨位仅在5000~25000 t，约束船速在9~20 kt。其他经验公式也是针对特定船舶吨位和船型，以及一些特定海洋气象环境下求解，存在适用范围小的不足。

近年来人工智能方法被更多地用于建立航速预测模型，即通过不同船舶类型和海洋气象属性来预测航速。首先，需要考虑船舶本身的静水航速，能够反映出船舶设定行驶航速的变量，例如，主机转速、推进轴转速等。其次，需要考虑船舶所受的环境影响因素，如风速、风向、海浪等。通过输入这两方面的变量，然后构建数据集、进行数据清洗、特征选择、模型训练、参数调节等以达到预测航速的目的。王胜正等^[89]研究表明，基于交替稀疏自编码（Alternating Sparse Auto-Encoders, ASAE）网络模型的预测结果更符合实际海况，通过预测的航速影响值来推算实际航速可为海洋气象导航优化船舶运输过程起到辅助作用，在进行航线规划、航速推荐等航行优化策略时能准确考虑海洋气象条件所产生的复杂影响。Bassam等^[90]基于树模型的机器学习方法，能在真实运行条件下准确预测船舶航速，有助于优化船舶运行参数。Moreira等^[91]实现了一种基于神经网络预测船舶航速和油耗的方法，证明了仅使用海况的信息作为输入数据来预测船速和油耗切实可行。基于机器学习的航速预测方法模拟预测精度较好，但存在可解释性较差的问题，所以需进一步探究预测模型中所包含的物理意义。

4.2 单目标优化航线目标方法

船舶航线规划流程（图3）主要包括根据航行安全、船舶性能限制、气象条件等设置约束条件，将整体航线数字化分解，然后构建考虑船舶性能、气象数据、海洋条件等的失速方程，结合设定的单/多目标优化，通过路径规划算法求解最优航线。在上述流程中除失速方程的构建方式方法不同外，针对单/多目标优化的方法以及航线路径规划算法的选择也差异很大且

各有利弊。

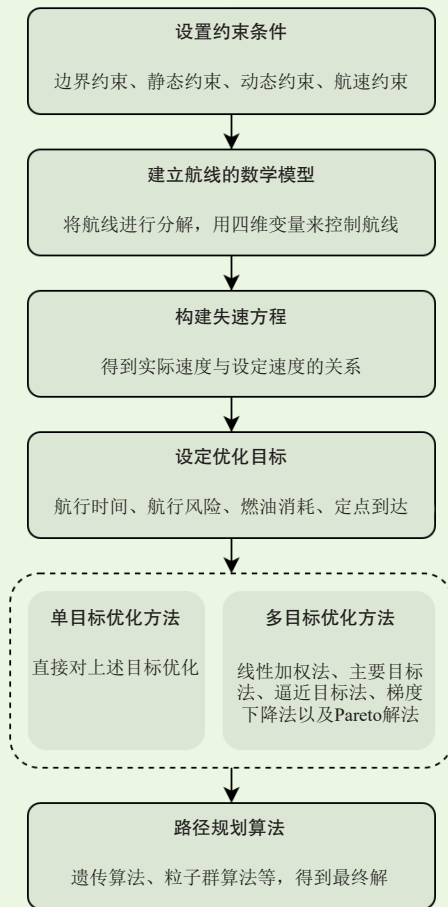


图3 气象导航航线规划流程图

Fig. 3 Diagram of meteorological navigation for route design

单目标最佳航线优化问题就是在保证航线可通行且航行过程安全的前提下，使优化目标达到最佳效果的航线，即选择最短航行时间、最低航行风险、最小燃油消耗以及固定时间到达等^[92]，包括：1) 航行时间模型，通过不同算法对在每段航路消耗的最短时间求和得到船舶沿航线航行的总时间^[93]。2) 航行风险模型，通过有效规避海上的静态与动态障碍物和航行区域的危险气象环境来建立船舶航线的风险评估公式^[20]。3) 燃油消耗模型，基于航速和恶劣海况能耗来估算船舶燃油消耗总量以优化航线。4) 固定时间到达模型，通过根据船舶自身结构参数和设定参数，在船舶可经历的最高风浪等级，以及不可航行的、危险海域和预计到达时间等限制条件约束下，使实际到达时间符合固定时间要求。

4.3 多目标优化航线目标方法

船舶航线的多目标优化问题是在考虑约束条件的情况下，根据需求从最小航程距离、最小航行时间、最低燃油消耗、最低航行风险、最高舒适度及固定时

间到达等优化目标中选择几个目标进行综合考虑。虽然实际应用中总是希望实现所有目标都能同时达到最优，但想要使所有目标都满足最优值是不现实的。最简单来看，地球上两点之间的大圆航线是船舶航行距离最短的航线，但沿大圆航线航行不仅要频繁调整船舶航向，而且航行风险并不一定最小；若选择了两港口之间最安全的航线，虽然可以避免高风险的恶劣风浪区域，但航程可能会增加，同时也会带来油耗的增加。多目标优化方法可以有效地解决这一问题。优化方法包括线性加权法、主要目标法、逼近目标法、梯度下降法以及Pareto解法等^[94]。前4种方法主要通过将多目标优化问题简化为单目标优化问题，通过寻找单目标问题中的最优极值来确定解的优劣性。Pareto解法是根据解之间的非支配关系来得到一组最优解集，在最优解集中随机确定最优值。

4.4 航线规划设计算法

国外学者对航线规划问题研究起步早。1957年，美国学者James^[24]就将变分法应用到航线规划问题，一些路径规划算法被借鉴用于解决航线规划问题。路径规划是指从起点到终点，按照特定的规则或目标，规划出一条满足要求的特定航路/路径。路径规划的设计方式有两种：局部路径规划和全局路径规划。局部路径规划针对全局中的某个局部区域进行规划，计算量小，速度快，相比于全局路径规划更加适用于快速变化的动态环境，也适用于未知环境下的规划任务。但局部路径规划仅能进行区域内的路径规划，无法获得全局范围内最优路径规划。全局路径规划是对整体而言，路径规划前需要将全局的环境信息提前掌握，综合全面的数据信息后进行路径的规划。由于全局路径规划的涉及面比较广，所以整个遍历路径比较广、时间也比较长。不同的规划算法根据不同特点，往往应用于不同领域。近年来，国内外学者针对不同求解问题，根据不同算法搜索能力选择合适的搜索算法进行最佳路径设计，并在不同优化方向上进行了大量改进与调整工作。传统的主要有等时线法、变分法、动态规划法、Dijkstra法等算法^[94-97]。

近年来，随着现代科学技术和人工智能的发展，航线优化问题的计算量不断增长。传统的精确算法可对小规模航线优化问题进行精确求解，但对于大规模优化问题求解困难。机器学习算法被更多地应用于航线优化问题求解。Wang等^[98]使用小波神经网络并开发实时能效优化模型，以确定不同工况下的最佳发动机转速，在船舶能源效率模型中考虑了环境因素，包括尾流系数、风速和水深，在理想状况下，每单位距

离可节省19%的燃油消耗。Mao等^[99]利用波高、波周期、风速等信息和集装箱船主发动机的转速数据,通过3种不同的统计模型(自回归、最小二乘估计、最大似然法)预测航行速度,提高规划航线准确性,以确保船舶准时到达。Bal Beşikçi等^[100]使用人工神经网络方法,设计节能船舶运营决策支持系统,利用相关数据预测燃料消耗,结果表明航行800 n mile (1 n mile \approx 1.852 km)可节省165 t、10470美元的燃料,人工神经网络方法优于多元回归分析方法。Du等^[101]优化了航行中的船速和纵倾问题,并利用两个人工神经网络模型来预测特定船舶技术规格和环境因素(洋流、风、海浪)的燃料消耗,通过优化可使两艘9000标准箱船舶的燃料消耗节省5%~8%。Zheng等^[102]使用人工神经网络模型预测游轮的燃料消耗,在假设不会发生恶劣天气的情况下,在挪威水域航行中最小化燃料消耗,其决策变量本质上是每个航段的航行速度,同时也考量了每个航段的船舶负载,优化方法能够节省11 t 燃料,相当于原来的11%。Gkerekos等^[103]使用人工神经网络模型来预测船舶的燃油消耗,随后使用基于Dijkstra算法的启发式算法,使用不同点的燃油消耗预测来规划最优航线。这些研究表明,机器学习算法在航线优化问题中具有潜力,并为航运业提供了更好的决策支持和节能减排的机会。

5 问题与展望

本文通过对海洋气象导航相关业务和关键技术研究的综述,对近年来的研究现状进行分析总结,并提出展望,以推动该领域的发展和创新发展。

1) 海上各类海洋水文气象要素或环境要素以及灾害性天气对航速预测和航线规划均有重要影响,预报的准确性和时效性直接影响航线优化的准确性和效益,但海上气象观测资料稀少,海洋区域缺乏原位观测及岸-海-空-天联合观测能力不足制约了精准监测和预报能力提升。未来海洋气象导航的发展亟需提高天气预报准确性,考虑不确定因素的影响,通过研发全球云解析分辨率多圈层耦合模式技术,提高海洋气象灾害的模拟和预报能力,以优化航速预测/航线优选模型。

2) 船速预测和航线优选建模中的灰箱和黑箱模型需要大量的历史数据,并且在建模时易忽略部分船舶自身特性,不同类型的船舶(如集装箱船、油轮)往往模型不能通用。后续发展需建立多目标多阶段混合整数优化模型,使优化模型更符合实际情况,如针对具体的航线、船舶类型、船舶吨位和优化结果等建立标准,并将航速优化理论研究成果标准化。对天

气极端状况下和平均状况下的航行成本、能源消耗进行评估,同时也可作为法律法规(排放控制区域划分(ECA)/排放量)制定的客观依据。

3) 航线设计建模的计算量不断增长,对大规模优化问题求解困难,大数据、云计算等信息化技术支撑不足;海洋气象导航特色化、智能化水平不高。自从推出船舶自动识别系统,有大量关于船舶航行的信息被保存下来,需充分地分析、挖掘这些信息,以及利用这些数据实时进行云计算以优化预设航线等,可为分析船舶因恶劣天气偏离传统航线提供重要的借鉴和参考。此外,随着海上航行器的种类越来越多,学科交叉的特色越来越明显,海洋气象导航的特色化要求越来越高,不同类型的船舶有各具特色的需求,如针对无人驾驶的自主船舶和风力助航的新能源船舶的航线规划需要更精细化、高时空分辨率的海洋气象数值预报产品,亟需利用人工智能驱动的航线设计模型来规划燃油效率高、安全和最短的路线。此外,为风力助航的新能源船舶建立能耗预测模型,考虑将能耗转化为相应的费用和排放,反馈于航速优化模型。

此外,在航线设计的环境建模中针对最新海事法规考虑不足(如ECA),以及对海图的更新不及时同时制约着此领域的发展。未来需对航行规则(分道通航制)和助航设备(翼帆等)加强考量,从而建立智能化航路模型。

参考文献

- [1] 杨良华. 船舶气象导航的安全性及经济效益[J]. 海洋通报, 1988, 7(1): 107-114.
- [2] UN. Review of maritime transport 2019[R]. Geneva: United Nations, 2019.
- [3] UN. Review of maritime transport 2022: navigating stormy waters[R]. Geneva: United Nations, 2022.
- [4] IMO. UN body adopts climate change strategy for shipping[EB/OL]. (2018-04-13) [2023-11-16]. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGInitialStrategy.aspx>.
- [5] IMO. IMO 2020: cutting sulphur oxide emissions[EB/OL]. [2023-11-16]. <https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx>.
- [6] IMO. 2023 IMO strategy on reduction of GHG emissions from ships[EB/OL]. [2023-11-16]. <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx>
- [7] Alizadeh A H, Kavussanos M G, Menachof D A. Hedging against bunker price fluctuations using petroleum futures contracts: constant versus time-varying hedge ratios[J]. Applied Economics, 2004, 36(12): 1337-1353.
- [8] Ronen D. The effect of oil price on containership speed and fleet size[J]. Journal of the Operational Research Society, 2011, 62(1): 211-216.
- [9] EMSA. Annual overview of marine casualties and incidents 2022[R]. Lisbon: European Maritime Safety Agency, 2022.
- [10] WSC. Survey results for containers lost at sea-2014 update[R]. Washington: World Shipping Council, 2014.
- [11] WSC. Containers lost at sea-2023 update[R]. Washington: World Shipping Council, 2023.

- [12] 张增海, 刘涛, 曹越男, 等. 船舶海洋气象导航的业务概况与发展现状[J]. 海洋气象学报, 2020, 40(3): 11-16.
- [13] Simonsen M H, Larsson E, Mao W G, et al. State-of-the-art within ship weather routing[C]//Proceedings of the 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. St. John's: ASME, 2015.
- [14] 冯国柱. 我国气象导航发展综述[J]. 南海研究与开发, 1996(1): 51-53.
- [15] Zis T P V, Psaraftis H N, Ding L. Ship weather routing: a taxonomy and survey[J]. Ocean Engineering, 2020, 213: 107697.
- [16] Motte R, Burns R S, Calvert S. An overview of current methods used in weather routing[J]. The Journal of Navigation, 1988, 41(1): 101-114.
- [17] Chu P C, Miller S E, Hansen J A. Fuel-saving ship route using the Navy's ensemble meteorological and oceanic forecasts[J]. The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology, 2015, 12(1): 41-56.
- [18] Hinnenthal J, Clauss G. Robust Pareto-optimum routing of ships utilising deterministic and ensemble weather forecasts[J]. Ships and Offshore Structures, 2010, 5(2): 105-114.
- [19] Wang S A, Meng Q. Liner ship route schedule design with sea contingency time and port time uncertainty[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(5): 615-633.
- [20] Du W, Li Y J, Zhang G L, et al. Estimation of ship routes considering weather and constraints[J]. Ocean Engineering, 2021, 228: 108695.
- [21] Skoglund L, Kuttenukeuler J, Rosén A, et al. A comparative study of deterministic and ensemble weather forecasts for weather routing[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2015, 20(3): 429-441.
- [22] Szlapczynski R, Szlapczynska J. On evolutionary computing in multi-ship trajectory planning[J]. Applied Intelligence, 2012, 37(2): 155-174.
- [23] Delitala A M S, Gallino S, Villa L, et al. Weather routing in long-distance Mediterranean routes[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 102(1/2): 125-137.
- [24] James R W. Application of wave forecasts to marine navigation[R]. Washington: U.S. Naval Oceanographic Office, 1957.
- [25] Fabbri T, Vicen-Bueno R, Hunter A. Multi-criteria weather routing optimization based on ship navigation resistance, risk and travel time[C]//Proceedings of 2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence. Las Vegas: IEEE, 2018: 135-140.
- [26] Chen E. IMO 2012 solution notes[R]. IMO, 2024.
- [27] Kepaptsoglou K, Fountas G, Karlaftis M G. Weather impact on containership routing in closed seas: a chance-constraint optimization approach[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 55: 139-155.
- [28] Perera L P, Soares C G. Weather routing and safe ship handling in the future of shipping[J]. Ocean Engineering, 2017, 130: 684-695.
- [29] Armstrong V N. Vessel optimisation for low carbon shipping[J]. Ocean Engineering, 2013, 73: 195-207.
- [30] Bentin M, Zastrau D, Schlaak M, et al. A new routing optimization tool-influence of wind and waves on fuel consumption of ships with and without wind assisted ship propulsion systems[J]. Transportation Research Procedia, 2016, 14: 153-162.
- [31] Krata P, Szlapczynska J. Ship weather routing optimization with dynamic constraints based on reliable synchronous roll prediction[J]. Ocean Engineering, 2018, 150: 124-137.
- [32] 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.
- [33] Szlapczynska J. Multi-objective weather routing with customised criteria and constraints[J]. Journal of Navigation, 2015, 68(2): 338-354.
- [34] Li X H, Yang J S, Wang J K, et al. Tropical cyclone winds retrieval algorithm for the cyclone global navigation satellite system mission[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2023, 20: 4501105.
- [35] 任洪莹. 风翼助航船舶主动力装置特性研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2012.
- [36] 席永涛, 方泉根. 船舶航行风险形成原因重要度分析与计算[J]. 中国航海, 2007(2): 39-43.
- [37] 刘大刚, 王德强. 大风浪中航行船舶非事故性损失的定量分析[J]. 大连海事大学学报, 2004, 30(3): 1-4.
- [38] 金世国, 闫冰. 风力助航在船舶航行中的优化建模研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(12): 46-48.
- [39] Marie S, Courteille E. Sail-assisted motor vessels weather routing using a fuzzy logic model[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2014, 19(3): 265-279.
- [40] Mason J. Quantifying voyage optimisation with wind-assisted ship propulsion: a new climate mitigation strategy for shipping[D]. Manchester: The University of Manchester, 2021.
- [41] Yoshimura Y, Ouchi K, Waseda T. Contributions to EEOI and EEDI by wind challenger ships[C]//Proceedings of the 7th PAAMES and AMEC2016. Hong Kong, China, 2016.
- [42] Vettor R, Bergamini G, Guedes Soares C. A comprehensive approach to account for weather uncertainties in ship route optimization[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(12): 1434.
- [43] Mason J, Larkin A, Gallego-Schmid A. Mitigating stochastic uncertainty from weather routing for ships with wind propulsion[J]. Ocean Engineering, 2023, 281: 114674.
- [44] 周启学, 张伟, 毛奇志. 风浪流变化对船舶航行阻力的影响仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(12): 39-42.
- [45] Waskito K T, Sasa K, Chen C, et al. Comparative study of realistic ship motion simulation for optimal ship routing of a bulk carrier in rough seas[J]. Ocean Engineering, 2022, 260: 111731.
- [46] Chen C, Sasa K, Prpić-Oršić J, et al. Statistical analysis of waves' effects on ship navigation using high-resolution numerical wave simulation and shipboard measurements[J]. Ocean Engineering, 2021, 229: 108757.
- [47] 罗意. 多因素耦合影响下的船舶运动建模与仿真研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
- [48] 李成海, 王建涛, 胡基平. 船舶航行失速算法分析[J]. 航海, 2023(2): 40-43.
- [49] Jiao J L, Sun S Z, Ren H L. Predictions of wave induced ship motions and loads by large-scale model measurement at sea and numerical analysis[J]. Brodogradnja: An International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering for Research and Development, 2016, 67(2): 81-100.
- [50] Tsukada Y, Suzuki R, Ueno M. Wind loads simulator for free-running model ship test[C]//Proceedings of the 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Trondheim: ASME, 2017.
- [51] Tang Y, Sun S L, Ren H L. Numerical investigation on a container ship navigating in irregular waves by a fully nonlinear time domain method[J]. Ocean Engineering, 2021, 223: 108705.
- [52] Chen C, Shiotani S, Sasa K. Numerical ship navigation based on weather and ocean simulation[J]. Ocean Engineering, 2013, 69: 44-53.
- [53] Cai Y, Wen Y Q. Ship route design for avoiding heavy weather and sea conditions[J]. TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation, 2014, 8(4): 551-556.
- [54] 王军, 朱芳颐, 王冠卓, 等. 气象不确定下的船舶避台路径优化[J]. 大连海事大学学报, 2021, 47(2): 56-62, 70.
- [55] 顾明章. 爆发性气旋的气候特征及船舶规避要点[C]//1995—2009航海技术论文选集(第2集). 中国航海学会, 2010.
- [56] Imazu H, Fujisaka T, Shouji R, et al. The crossing maneuver characteristic seen from obstacle zone by target[J]. The Journal of Japan Institute of Navigation, 2003, 108: 259-265.
- [57] Tamaru H, Nishizaki C, Fukuda G, et al. Fundamental study about collision avoidance algorithm-features of OZT distribution from Tokyo Bay entrance to Sagami wan[J]. The Journal of Japan Institute of Navigation, 2020, 142: 112-119.
- [58] 张晓兔, 刘祖源, 张乐文. 船舶避碰系统的智能化研究综述[J]. 船舶工程, 2000(1): 45-48.

- [59] 张立华, 苏奋振, 彭认灿, 等. 基于瞬时水深模型的最短时间航线自动生成算法[J]. 测绘学报, 2010, 39(5): 516-521.
- [60] Wisniewski B, Kaczmarek P. Elements of tropical cyclones avoidance procedure[J]. *TransNav, the International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, 2012, 6(1): 119-122.
- [61] 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.
- [62] 张浩, 饶玉昆, 刘涛, 等. 远洋船舶避台航线设计方案——以台风“杜苏芮”(2305)为例[J]. 海洋气象学报, 2023, 43(4): 32-39.
- [63] 郭裕芳, 马闯关, 刘翔飞, 等. 灾害性天气规避及航行方案优选系统[J]. 大连海事大学学报, 2009, 35(4): 21-24, 29.
- [64] 汤清慧, 陈戈, 刘艳艳. 一种智能化的避台航线设计方法[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(6): 104-108.
- [65] 高宗江, 张英俊, 朱飞翔, 等. 远洋船舶避台航线设计算法[J]. 大连海事大学学报, 2013, 39(1): 39-42.
- [66] 吴金龙, 马轲馨, 范中洲, 等. 船舶绕避热带气旋方案效益评估[J]. 大连海事大学学报, 2010, 36(2): 31-34, 38.
- [67] Huang Y X, Ding X Y, Zhang Y N, et al. T-GRASP: optimization algorithm of ship avoiding typhoon route[J]. *Journal of Quantum Computing*, 2022, 4(2): 85-95.
- [68] Chen C, Sasa K, Ohsawa T, et al. Comparative study on WRF model simulations from the viewpoint of optimum ship routing[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 207: 107379.
- [69] Panigrahi J K, Padhy C P, Sen D, et al. Optimal ship tracking on a navigation route between two ports: a hydrodynamics approach[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2012, 17(1): 59-67.
- [70] Padhy C P, Sen D, Bhaskaran P K. Application of wave model for weather routing of ships in the North Indian Ocean[J]. *Natural Hazards*, 2008, 44(3): 373-385.
- [71] Soda T, Shiotani S, Makino H, et al. Simulation of weather and ocean for numerical ship navigation[C]//*Proceedings of the 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering*. Rotterdam: ASME, 2011: 159-166.
- [72] 宋汉邦. 基于模糊综合评判的通道水域交通安全评价[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [73] 姜国友. 威海港雾航影响因素探析及对策研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- [74] Hu S P, Fang Q G, Xia H B, et al. Formal safety assessment based on relative risks model in ship navigation[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2007, 92(3): 369-377.
- [75] Song S T, Chen Y, Chen X Y, et al. Adapting to a foggy future along trans-arctic shipping routes[J]. *Geophysical Research Letters*, 2023, 50(8): e2022GL102395.
- [76] Sibul G, Yang P H, Muravev D, et al. Revealing the true navigability of the Northern Sea Route from ice conditions and weather observations[J]. *Maritime Policy & Management*, 2023, 50(7): 924-940.
- [77] 赵晖. 中欧北冰洋航线集装箱班轮运输规划研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- [78] 贺书锋, 平瑛, 张伟华. 北极航道对中国贸易潜力的影响——基于随机前沿引力模型的实证研究[J]. *国际贸易问题*, 2013(8): 3-12.
- [79] Ghosh S, Rubly C. The emergence of Arctic shipping: issues, threats, costs, and risk-mitigating strategies of the Polar Code[J]. *Australian Journal of Maritime & Ocean Affairs*, 2015, 7(3): 171-182.
- [80] 付姗姗, 张笛, 张明阳, 等. 北极水域船舶航行环境风险影响因素识别[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2017, 38(11): 1682-1688.
- [81] Sahin B, Kum S. Risk assessment of arctic navigation by using improved fuzzy-AHP approach[J]. *The International Journal of Maritime Engineering*, 2015, 157(4): 241.
- [82] 余鹤书, 谷美荣, 许小峰. 在风浪场中船舶运动失速特征[J]. 应用气象学报, 1990, 1(3): 293-297.
- [83] 韩忠南. 船舶在波浪中航行失速问题探讨[J]. 海洋预报, 1986, 3(2): 10-14.
- [84] 杨振忠, 刘世歧. 船舶在风浪中航行的失速计算[J]. 中国航海, 1990(2): 35-40.
- [85] 刘烽. 船舶在风浪中航行失速问题的研究[J]. 大连海运学院学报, 1992, 18(4): 347-351.
- [86] 张永胜, 陆冬青, 蔡烽, 等. 几种失速计算方法的比较[J]. 航海技术, 2005(1): 7-9.
- [87] 李超, 杨波, 张永胜. 舰船风浪航行失速的估算方法[J]. 舰船科学技术, 2011, 33(3): 27-30.
- [88] James R W. Application of wave forecasts to marine navigation[D]. New York: New York University, 1957.
- [89] 王胜正, 申心泉, 赵建森, 等. 基于ASAE深度学习预测海洋气象对船舶航速的影响[J]. 交通运输工程学报, 2018, 18(2): 139-147.
- [90] Bassam A M, Phillips A B, Turnock S R, et al. Ship speed prediction based on machine learning for efficient shipping operation[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 245: 110449.
- [91] Moreira L, Vettor R, Guedes Soares C. Neural network approach for predicting ship speed and fuel consumption[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(2): 119.
- [92] 孙季红. 基于改进粒子群算法的远洋气象航线规划研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
- [93] Fagerholt K, Heimdal S I, Loktu A. Shortest path in the presence of obstacles: an application to ocean shipping[J]. *Journal of the Operational Research Society*, 2000, 51(6): 683-688.
- [94] Li X G, Wang H B, Wu Q. Multi-objective optimization in ship weather routing[C]//*Proceedings of 2017 Constructive Nonsmooth Analysis and Related Topics*. St. Petersburg: IEEE, 2017.
- [95] Wang Y, Zhang Y, Zhao H C, et al. Assessment method based on AIS data combining the velocity obstacle method and Pareto selection for the collision risk of inland ships[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(11): 1723.
- [96] Zhang G Y, Wang Y, Liu J, et al. Collision-avoidance decision system for inland ships based on velocity obstacle algorithms[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2022, 10(6): 814.
- [97] 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.
- [98] 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.
- [99] 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.
- [100] Bal Beşikçi E, Arslan O, Turan O, et al. An artificial neural network based decision support system for energy efficient ship operations[J]. *Computers & Operations Research*, 2016, 66: 393-401.
- [101] 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.
- [102] 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.
- [103] Gkerekos C, Lazakis I. A novel, data-driven heuristic framework for vessel weather routing[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 197: 106887.

(编辑: 郑秋红)