

船舶与海上风电场安全距离的综合评估方法

滕进平, 熊振南, 姚 治, 陈金海, 常思亨

(集美大学航海学院, 船舶辅助导航技术国家地方联合工程研究中心, 福建 厦门 361021)

[摘要] 为了降低船舶在风电场水域附近的通航风险和规范海上风电场的选址, 需要对船舶与风电场之间安全距离进行量化研究。首先, 基于停船视距理论, 构建海上风电场船舶失控漂移模型和紧急停船制动模型, 通过选取的杂散货船舶及油船, 分别计算在两种模型下的理论安全距离。接着, 提出一个评估海上风电场附近船舶 AIS 交通流的系统框架, 通过核密度分析得到船舶与海上风电场之间的距离。最后, 比较不同模型下的理论安全距离值、AIS 交通流核密度分析下的安全距离值, 以及国外机构关于海上风电场安全距离的建议, 综合后给出船舶在海上风电场附近航行的推荐安全距离。以长乐外海 A 区风电场为例, 实验结果表明, 把安全距离控制在 2000 m 左右即可满足船舶在海上风电场的安全航行。

[关键词] 海上风电场; 安全距离; AIS; 停船视距

[中图分类号] U 676.1

Comprehensive Evaluation Method for Safety Distance Between Ships and Offshore Wind Farms

TENG Jinping, XIONG Zhennan, YAO Zhi, CHEN Jinhai, CHANG Siheng

(Navigation College & National-local Joint Engineering Research Center for Marine Navigation Aids Services,
Jimei University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to reduce the navigation risk of ships near the water of the wind farms and standardize the location of offshore wind farms, it is necessary to make a quantitative research on the safety distance between ships and wind farms. First of all, a ship out-of-control drift model and an emergency stopping model were constructed based on the stopping sight distance theory. The theoretical safety distances under the two models are calculated by selecting bulk carriers, and oil tankers. Then a system framework for assessing the AIS traffic flow of ships near offshore wind farms is proposed, and the distance between ships and OWFs is obtained by nuclear density analysis. Finally, by comparing the theoretical safety distance values under different models, the safety distance values under the analysis of the nuclear density of AIS traffic flows and the recommendations of foreign institutions on the safety distance of OWFs, the recommended safety distances for ships sailing near offshore wind farms are comprehensively obtained. In this paper, the wind farm in Zone A off the Coast of Changle is taken as an example. The experimental results show that the safety distance can be kept at about 2000 m to satisfy the safety navigation of ships in the offshore wind farm.

Keywords: offshore wind farms; safety distance; automatic identification system; stopping sight distance

[收稿日期] 2022-03-12

[基金项目] 福建省自然科学基金面上项目(2020J01659); 国家自然科学基金项目(51879119)

[作者简介] 滕进平(1997—), 男, 硕士生, 从事交通信息工程及控制方向研究。通信作者: 陈金海(1980—), 男, 博士, 副教授, 从事地理信息系统、交通运输工程方向研究。E-mail: chenjh@Ireis.ac.cn

<http://xuebaobangong.jmu.edu.cn/zkb>

0 引言

建设海上风电场 (offshore wind farms, OWFs) 能有效利用风能资源, 对于缓解环境污染、改善电源结构等具有积极的意义^[1]。海上风电场的近岸化、规模化和集群化的效应会引起船舶交通流的改变, 严重加剧了船舶的通航环境压力^[2]。为了降低船舶在风电场水域附近航行的通航风险, 保证海上风电场附近水域船舶的航行安全, 必须考虑船舶交通与海上风电场之间的相互作用^[3], 定量分析风电场与船舶航路之间的安全距离。

研究海上风电场与船舶航行的安全距离主要从三个方面开展: 微观上基于船舶的操纵性能, 宏观上基于 AIS 的船舶交通流分布和船舶与风电场碰撞风险建模。在船舶交通流方面, 由于 AIS (automatic identification system) 包含了丰富的交通流信息, 且通过 GIS (geographic information system) 软件可以从宏观上分析船舶在风电场水域的交通流特征^[4], 研究人员通过分析交通流的特征分布, 可得到船舶的安全距离分布。如: 余庆等^[5]采用 AIS 数据过滤、交通流统计分析模型等框架, 分析福建平海湾 OWFs 建设前后的船舶交通流变化, 提出 OWFs 建成后船舶最小通过距离为 1~2 n mile。在碰撞风险建模方面, 评价一个系统的安全可以通过风险评估等方法来侧面衡量, 因此船舶航行在风电场水域时的安全可通过碰撞风险建模来体现。Wawruch 等^[6]对比分析了 MARIN 模型、GL 模型及 DNV 模型下船舶与风电场之间可能发生的碰撞风险概率, 为 OWFs 的选址提供了参考意见。聂园园等^[7]通过蒙特卡洛模拟计算出船舶的碰撞概率, 结合碰撞概率的可接受标准, 定量获得了 OWFs 与船舶航路的安全距离范围。李国帅等^[8]结合船舶所在领域建立数学模型, 得到固定式平台与习惯航路的安全距离。除此之外, 道路交通中的停车视距理论也被研究人员用在海上交通中。一些学者^[9]借鉴道路交通中的停车视距理论, 定量分析船舶与海上设施之间的相互关系。刘金龙等^[10]基于停船视距理论建模, 得到海上两艘船舶之间避免碰撞发生的安全距离。

船舶与海上风电场之间的安全距离的定量研究, 尽管已经取得了很好的研究进展, 但就风流对船舶安全距离的影响考虑较少, 且研究中基本仅考虑漂流或紧急制动单个特定情况下的运动模型, 很少有全面考虑船舶的紧急情况。因此, 本文通过构建船舶失控漂移模型和船舶紧急制动模型, 结合船舶的实际 AIS 交通流, 提出一个综合的船舶与海上风电场的安全距离评估方法, 综合获取不同水域风电场与船舶航路之间的安全距离值。这对于海上风电场选址建设运营、降低海上风电场附近水域船舶的通航风险及相关标准的修订具有重要意义。

1 安全距离模型

1.1 船舶失控漂移模型

船舶失控运动过程包括两个阶段: 一是船舶在惯性力的作用下沿原方向运动的惯性减速阶段, 二是船舶在惯性力消失后在风流平衡作用下的漂移阶段。船舶在失去惯性力冲量后, 船舶将在风和流的作用下一直处于漂移状态。由于船舶质量很大, 风流作用在船舶上的漂移速度很小, 相较于惯性减速阶段, 漂移产生的危害性相对较小, 因此, 本文根据船舶失控后的惯性减速阶段来考虑安全距离。

船舶失控漂移模型的最小安全距离 $S = S_0 + S_1$ 。其中: S_0 为风电场的安全地带距离, 根据《国际海洋公约》, S_0 一般取 500 m; S_1 指在冲程时间 T 内, 船舶沿原速度方向移动的距离, $S_1 = v \cdot c \cdot \frac{1}{\ln 2} (1 - 2^{-\frac{T}{c}}) + U \cdot T \cdot \cos(\beta - \alpha)$, U 为水流速度, β 为水流与船舶艏线的夹角, α 为船舶的偏航角, c 为减速时间常数。

1.2 船舶紧急停船制动模型

在航行中发现自己的领域被进入时, 船舶驾驶员会采取紧急制动的方式来降低碰撞的发生。

船舶在制动过程中的影响因素包括螺旋桨的反推力、风荷载及水动力。由于风荷载系数小于水动力系数的 0.001%^[8], 因此可忽略风荷载对船舶制动的影响。水流的航向与船舶的航向有一定的夹角, 垂直于艏艉线方向的水流, 可能会使船舶产生小角度的偏转。区别于船舶失控模型, 船舶紧急制动中驾驶员可以采取手工操舵的方式来保持船舶一直航行在正常航线上, 故船舶在动水中的安全距离公式为: $L_1 = mv^3 / (2(P + kv(v + v_2 \cos \beta)^2))$ 。其中: P 是船舶的功率; m 为船舶质量; v 为船舶的初始速度; v_2 为水流的相对速度; k 为水荷载系数, 取值参考《港口工程荷载规范》。由此, 船舶紧急制动模型下的海上风电场最小安全距离计算公式为: $S = S_0 + L_1$ 。

2 实验结果与分析

2.1 参数选取

影响船舶与海上风电场之间安全距离的主要因素为船舶的尺度、船舶的速度和所在海域的水文气象条件。本文以长乐外海海上风电场 A 区平台为例进行参数选取。由 AIS 交通流数据可得, 该水域航行的船舶主要为散货船、杂货船和油船。依拟分析范围内的船舶 AIS 数据, 用“向上累加法”按船舶长度从小到大累计交通流量, 当累计交通流量达到总流量的 90% 时, 以其中最大船舶长度为代表船船长, 得到代表船船长为 141 m。该海域风向为 ENE, 风速为 6 m/s, 水流方向为 NNE, 流速为 0.2 m/s, 航行水域的水温为 20 °C。假设船舶的初始速度为 8 kn, 船舶航行时的偏航角 α 为 5°, 流向角 β 为 65°。据《海港总体设计规范》, 结合长乐外海海上风电场 A 区的船舶船型分布, 选择合适的代表船舶进行实验。实验船型相关参数的选取见表 1。

表 1 研究船型设计尺度表

Tab.1 Scale of study ship type design

船舶类型 Type	船舶吨位/t Ship tonnage	船长/m Ship length	型宽/m Molded breadth	型深/m Molded depth	满载吃水/m Loaded draft	倒车功率/kW Astern power
散货船 Bulk-cargo ship	10 067	140	19.8	10.7	8.3	3300
杂货船 Generalcargo ship	11 000	135	20.5	11.4	8.5	3417
油船 Oil tanker	11 500	141	22.0	13.9	9.8	7208

2.2 结果分析

2.2.1 船舶失控漂移模型

图 1 是船舶在失控漂移中不同船舶吨位影响海上风电场安全距离的变化图。由图 1 可知, 在设置的参数下, 以散货船为例, 在船舶初速度为 4.12 m/s 时, 1 万 t 散货船的减速时间常数为 240 s, 船舶冲程时间为 2089 s, 失控漂移下船舶最小安全距离为 2132 m; 10 万 t 散货船的减速时间常数为 840 s, 船舶的冲程时间为 3993 s, 船舶的最小安全距离达到 5712 m。在失控状态下, 船舶与风电场之间的最小安全距离与船舶载重量近似成线性关系, 且 R^2 为 0.96, 拟合效果很好。一般来说, 船舶的吨位越大, 航行在风电场周围的船舶所需的安全距离就越大, 线性关系式为: $y = 0.0261 + 0.0322x$ 。

船舶的航行速度也是影响船舶失控状态下安全距离的一个因素。图 2 是船舶失控漂移模型中最小安全距离与船舶速度和载重量的关系。由图 2 可知, 船舶速度对安全距离的影响程度要大于船舶吨位。当船舶速度在 2.52 m/s, 船舶载重量在 2 万 t 时, 船舶与海上风电场的安全距离为 2109 m; 在船舶速度大于 2.52 m/s, 载重量大于 2 万 t 时, 船舶与风电场的安全距离随速度和载重量的变化较为明显, 几乎呈线性关系。

2.2.2 船舶紧急制动模型

图 3 是不同类型船舶在遇到紧急情况时, 紧急制动下安全距离与船舶航行速度的变化关系图。水流载系数受船舶的船长和船宽的影响, 但是在船舶吨位相差不大的情况下, 水流载系数的变化对船舶安全距离的影响基本不大。根据图 3 可知, 随着船舶速度的增加, 安全距离也在逐渐变大, 且在船舶速度为 5.14 m/s 左右时, 船舶安全距离增加速率达到最大, 此后, 船舶速度的增加对安全距离增加的敏感性降低; 在速度为 4.12 m/s 时, 散货船的最小安全距离最大为 1265 m, 杂货船所需的最小安全距离为 1320 m, 而油船的最小安全距离则为 1029 m, 这可能与油船的倒车功率较大有关。

图 4 是在设置的参数下, 紧急制动时货船与风电场的安全距离和船舶航速及船舶载重量的关系。图 4 表明在船舶遇到紧急情况刹车制动时, 船舶的吨位和速度越大, 船舶与风电场所要保持的安全距离就越大。在船舶吨位不变、船舶速度增加的情况下, 安全距离的增加幅度, 要大于船舶在速度不变、船舶吨位增加的情况。这说明虽然船舶吨位可以减少发生碰撞的风险, 但是效果并不大。考虑到风电场的水域资源有限, 因此建议船舶在通过风电场时适当降低速度。

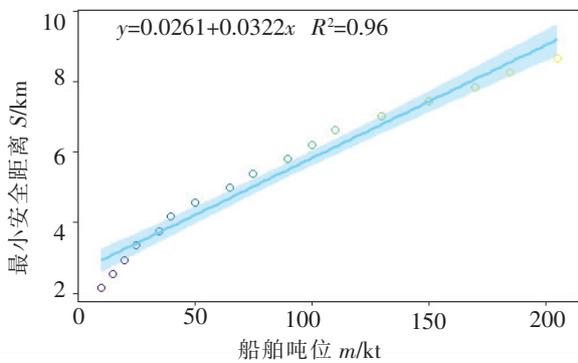


图 1 失控漂移模型中不同吨位船舶的安全距离

Fig.1 Safety distances of different ship tonnage under the out-of-control drift model

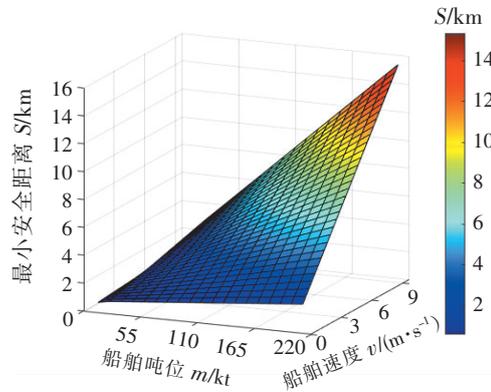


图 2 失控漂移模型中安全距离与航速和吨位的关系

Fig.2 Distribution of the safety distance with speed and tonnage under the out-of-control drift model

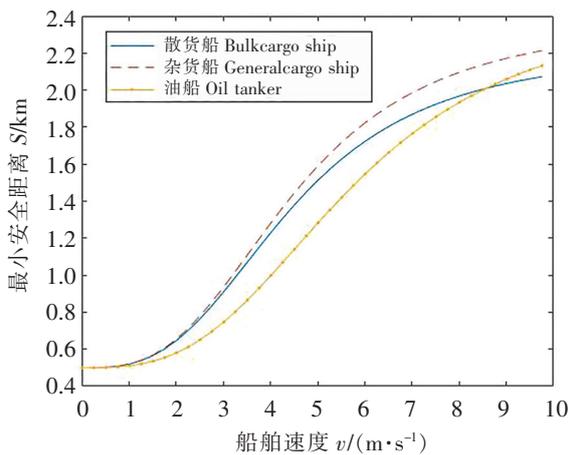


图 3 紧急制动模型中船舶速度与安全距离分布图

Fig.3 Distribution of ship speed and safety distance in the emergency braking model

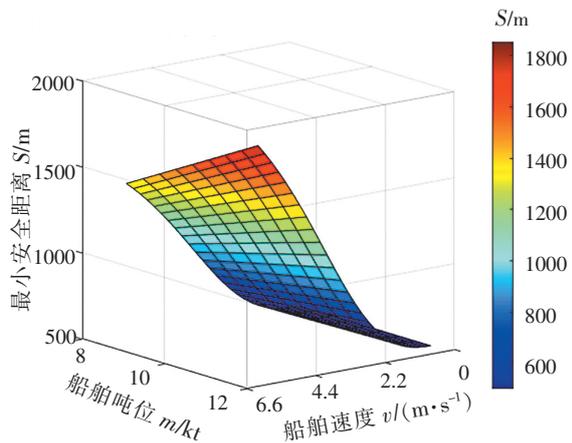


图 4 货船紧急制动时安全距离、速度和吨位分布图

Fig.4 Distribution of safety distance, speed and tonnage in the emergency braking model

3 长乐外海海上风电场 A 区实例分析

3.1 研究区域概况

长乐外海海上风电场 A 区位于福建省长乐区东部海域、闽江口南岸, 设计场址距离长乐海岸线 31 ~ 45 km 处, 理论水深 40 ~ 42 m, 总装机容量 290 MW, 布置风力发电机组 40 台。其中单机容量

8 MW 的风力发电机组为 25 台, 6 MW 的风力发电机组 15 台。

3.2 研究数据及方法

研究使用的数据范围为长乐 A 区风电场附近 2019 年 5 月至 2020 年 11 月船舶 AIS 轨迹数据。本文先将清洗后的 AIS 数据根据船舶水上移动通信业务标识码 (maritime mobile service identity, MMSI) 编号绘成船舶轨迹图; 然后, 将船舶轨迹折线进行栅格化并进行概率密度属性赋值运算, 建立含有不同时间范围概率密度属性值的栅格矩阵, 通过专业的 GIS 软件绘制出研究水域附近船舶活动的核密度图; 最后, 把栅格矩阵的概率密度属性值转化为累积概率分布属性值, 考察数据样本中空间利用强度对应航迹带面积变化情况, 建立累积概率分布的数学模型, 得到回归函数的待定系数, 并将船舶交通流量累积到 90% 时定义为主航迹带。同时在船舶航行的关键水域作门线截面分析, 了解门线上船舶的交通流要素情况, 测算船舶航迹与 OWFs 边界的距离, 并将其作为讨论穿越 OWFs 场址交通流被安全引导的可行性依据。图 5 是 AIS 数据驱动框架流程图。

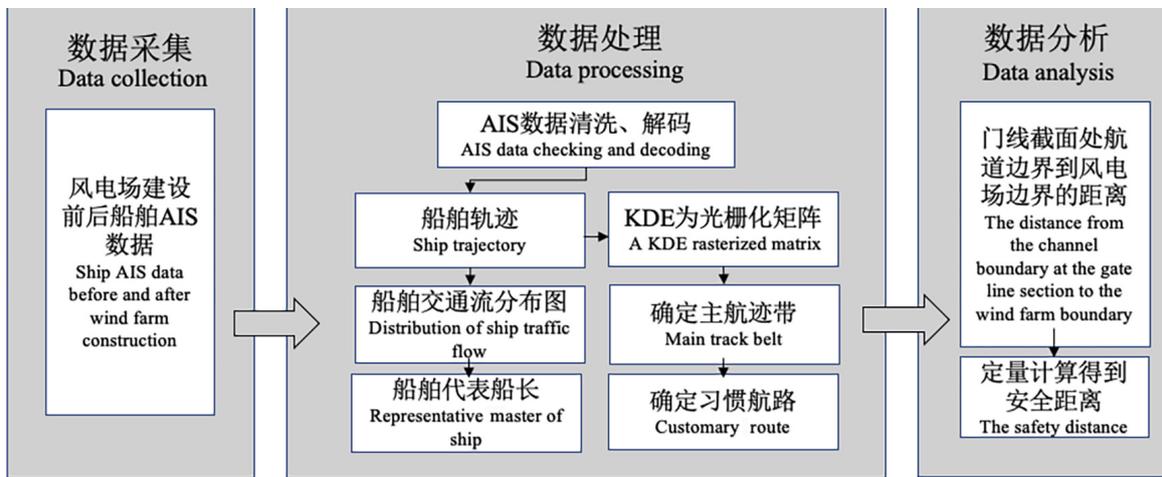


图 5 AIS 数据驱动框架流程图

Fig.5 The flow of AIS data-driven framework

通过 AIS 数据驱动框架得到长乐 A 区风电场水域船舶交通流核密度分布图 (见图 6)。由图 6 知: 边界点 D 到截面 1 对应航迹带边界是 1940 m; 边界点 C 到截面 2 对应航迹带边界是 2027 m; 边界点 A₁ 到截面 3 对应航迹带边界是 2021 m; 边界点 A₃ 到截面 4 对应航迹带边界是 1676 m。本文计算采用的是风电场西侧航路, 因此, 选择 A₁ 与截面 3 的间距作为船舶航路与风电场实际安全距离, 通过取月平均值可得其安全距离为 2178 m。

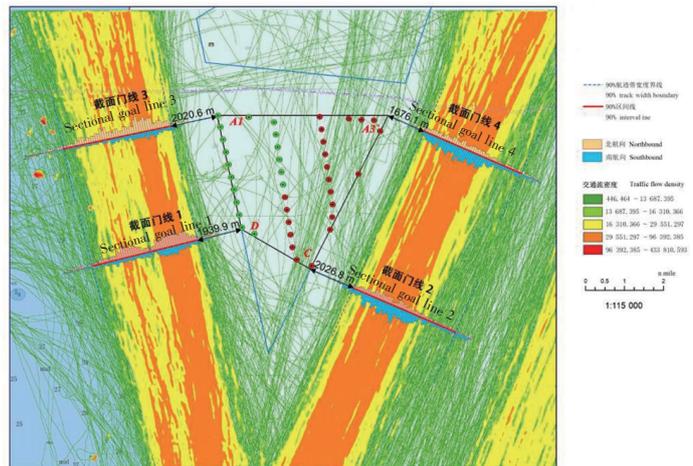


图 6 长乐 A 区风电场水域船舶交通流核密度分布图

Fig.6 Density distribution of ship traffic nuclear density in Changle Zone A wind farm

4 模型和实例比较

统计长乐外海风电场 AIS 数据, 把得到的代表船型数据代入船舶失控模型和船舶紧急制动模型中进行计算, 将得到的结果与国外一些安全距离建议和船舶实际航行的距离进行比较 (见图 7)。从图 7 可以看出, 国际航运协会 (PIANC) 建

议的船舶与海上风电场之间的安全距离比较大, 虽然在一定程度上能保证航行安全, 但是对海洋资源的浪费比较大。不管是散货船、杂货船、油船, 它们在紧急制动下的距离远小于实际交通流的安全距离, 而船舶在失控阶段下漂移的距离和实际交通流距离相差并不明显。因此, 运用综合评估方法得出的安全距离值, 既能满足船舶在海上风电场附近的航行安全, 又使水域资源在空间分布上有着更好的优化配置。此外, 风电场建设对原有船舶交通流压缩造成的通航压力也将得到一定程度的缓解, 也有利于保护近岸水域的海底生态环境资源的多样性。

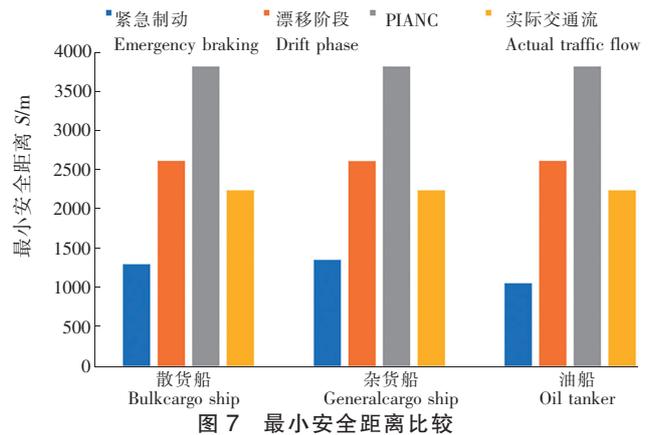


Fig.7 Comparison of minimum safety distances

5 结论

本文提出了一种船舶在风电场水域航行的安全距离的评估方法。基于停船视距理论建立了船舶在失控阶段的漂移模型和船舶紧急制动模型, 并利用船舶和海上风电场相关信息对安全距离进行定量计算。在此基础上提出一种基于 AIS 的船舶交通流驱动模型。将船舶失控模型和船舶紧急制动模型相结合得出的船舶与风电场之间的安全距离, 和实际交通流统计的安全距离进行对比研究, 综合分析船舶在风电场水域航行时的安全距离, 认为: 当船舶航行在受限水域区间时, 安全距离可以参考船舶紧急停船制动模型的结果; 当水域区间开阔时, 安全距离可以参考船舶失控漂移模型和实际交通流距离中较小值。不同风电场水域船舶航行的安全距离要根据水域船舶的实际交通流情况和水文环境情况进行定量计算。本研究为海上风电场的建设提供了一种风电场选址综合评估方法, 为通航专家对风电场建设方案的评估和相关标准的修订提供了参考依据和数据支撑。

[参 考 文 献]

[1] 吴益新. 基于 AIS 数据的中广核大练海上风电场交通流分析[J]. 福建交通科技, 2019(6):149-152.
 [2] 梁帅. 浙江海上风电场通航风险及安全防范策略研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.
 [3] YU Q, LIU K, CHANG C, et al. Realising advanced risk assessment of vessel traffic flows near offshore wind farms[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2020, 203:107086.
 [4] 杨星, 杨旭刚, 王展, 等. 基于蒙特卡洛方法的受限航道船舶交通拥塞仿真[J]. 中国航海, 2016, 39(2):40-44.
 [5] YU Q, LIU K, TEIXEIRA A, et al. Assessment of the influence of offshore wind farms on ship traffic flow based on AIS data [J]. The Journal of Navigation, 2020, 73(1):131-148.
 [6] WAWRUCH R, STUPAK T. Modelling of safety distance between ships' route and wind farm[J]. Archives of Transport, 2011, 23(3):413-420.
 [7] 聂园园, 刘克中, 杨星, 等. 海上风电场与航路安全距离[J]. 中国航海, 2019, 42(4):12-17.
 [8] 李国帅, 章文俊, 尹建川. 固定式平台与习惯航线安全距离确定[J]. 船海工程, 2016, 45(1):186-190.
 [9] 陆志材. 船舶操纵[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2000:34-36.
 [10] 刘金龙, 张玮, 刘曙明. 基于停船视距和积分运算的船舶领域计算方法[J]. 中国港湾建设, 2014(9):1-4.

(责任编辑 朱雪莲 英文审校 周云龙)