

文章编号:1000-4653(2023)03-0059-06

基于 GIS 的核密度分析方法在海上浮标平台选址中的应用研究

韩玉祥, 陈亮

(上海海事大学 商船学院, 上海 201306)

摘要:为有效掌握海上浮标平台在选址过程中对海上交通流的影响,优化选址方案,提出一种利用船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)数据基于地理信息系统(Geographic Information System, GIS)核密度分析的海上浮标平台选址分析方法。通过建立海上交通流的核密度模型,形成选址水域的船舶交通流核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE),得到交通流的特征。设置核密度值范围与相对应的颜色,完成核密度值的图像显示。对得到的各月份核密度图进行处理,用以确定浮标平台的备选范围。结合选址水域通航环境的分析,为海上浮标平台的选址提供建议。实例分析表明,基于 GIS 的核密度分析方法能较好地为海上浮标平台选址提供参考依据。

关键词:核密度;地理信息系统;船舶自动识别系统;船舶交通流;选址

中图分类号:U656.6

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2023.03.009

Application of GIS-based kernel density estimation in location selection of offshore buoy platforms

HAN Yuxiang, CHEN Liang

(Merchant Marine College, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

Abstract: AIS (Automatic Identification System) data is used to improve the location selection of offshore buoy platforms through introduction of a GIS (Geographic Information System)-based kernel density estimation algorithm. A kernel density model of marine traffic flow is built to calculate the traffic density in candidate water areas and find the characteristics of the traffic flow in each area. The traffic flow is graded on density basis and displayed in different colors. The traffic density map of every candidate location is processed on monthly basis and the suitable buoy locations are picked up. Final location selection suggestion is made after examining the navigational environment of these locations. The effectiveness of the algorithm is demonstrated through a practical engineering case.

Key words: kernel density; GIS; AIS; ship traffic flow; location selection

海上浮标平台需长期安装在海洋上,用以获取海洋多要素长期、连续的数据,为海洋预报、海洋防灾减灾和保障海洋经济等方面服务^[1]。浮标平台的选址需综合考虑周边水域的通航环境,以尽可能避免或者减少对水域交通流产生的影响。对于海上浮标的选址问题,国内外对浮标站位选址论证均缺乏统一的指导文件,尚未形成相关标准。2020年,

国家海洋局南海调查技术中心开展浮标站位选址论证技术规范的起草工作,是标准制订的重大进展。

海上浮标平台选址应遵循在满足海洋环境监测需求的基础上,综合考虑影响浮标建设的条件^[2]。影响浮标建设的条件主要包括自然环境条件和通航环境条件。其中:自然环境条件符合性方面主要关注水深地形、海底底质条件需符合浮标建设和运营

收稿日期:2022-03-02

作者简介:韩玉祥(1998—),男,硕士生,研究方向为海上交通仿真。E-mail:hyx12306@qq.com

通信作者:陈亮(1987—),男,博士,研究方向为海上通信、海事搜救等。E-mail:chenliang@shmtu.edu.cn

引用格式:韩玉祥,陈亮.基于 GIS 的核密度分析方法在海上浮标平台选址中的应用研究[J].中国航海,2023,46(3):59-64.

HAN Y X, CHEN L. Application of GIS-based kernel density estimation in location selection of offshore buoy platforms[J]. Navigation of China, 2023, 46(3): 59-64. (in Chinese)

的要求;通航环境条件符合性方面需参考目标水域内的海上交通情况。庞仁松等^[3]提出浮标站位应尽量规避航道和锚地,保障设备安全。但船舶活动具有动态变化特性,参考航道和锚地等静态资料不能完全满足选址需求。李天深等^[4]指出浮标式监测设备的选址要避免船舶往来较多的区域,避免过往船舶碰撞,但并未对船舶活动密集区域的识别进行深入研究。探究目标水域的船舶交通流特征,减少选址对交通安全和通航效率的影响是重点研究的内容。目前,分析交通流特征与浮标平台选址之间影响的相关研究较少,参考较为成熟的海上风电场设计和建设,多从船舶速度^[5]、区域船舶密度和交通流量^[6]等方面对附近船舶交通流的特点进行分析,为选址提供参考。

船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)数据记录周边水域船舶的航行状态,具有极高的利用价值。但通过统计方法对区域 AIS 数据点分布情况或船舶流量进行分析,缺少在选址布局方面的全局态势判断。核密度分析方法从数据样本本身出发,具有较强的适用性和较高的精准度,通过以局部到整体的分析过程,能建立全局的交通流态势判断,广泛应用于交通流相关特征分析、交通流密度分布等方面的研究。龙雪琴等^[7]基于核密度估计(Kernel Density Estimation, KDE)方法,研究车辆交通中网约车上下客热点在路段的分布。刘虎等^[8]运用 KDE 方法,探究船舶航迹的状态分布并描述交通流密度,取得了很好的效果。

本文借助近期的船舶 AIS 数据,利用基于 GIS 的船舶交通流核密度分析方法,分析目标水域的海上交通流,从浮标平台选址的通航环境条件符合性方面,对选址的参考依据加以补充和优化,以减少对船舶交通流的影响,保障区域的通航安全。

1 KDE 介绍

交通流具有较强的随机性,密度的分布情况变化较大。对于概率密度的研究主要有参数估计与非参数估计方法两种方式。其中:参数估计方法需通过假设以建立概率密度函数,结果是否准确在很大程度上依赖于假设的准确性,若假设存在错误,会导致估计的结果与真实情况存在较大差距;非参数估计的方法不需假定总体分布的特定形式,而是从样本本身进行估计,计算精准度相对较高。

KDE 是一种非参数估计方法,用平滑的峰值函数来拟合观察到的数据点,对真实的概率分布进行模拟^[9]。通过计算每一样本对周边区域的影响,并

叠加同一网格的影响值,可得到样本整体的特征分布。若 x_1, x_2, \dots, x_n 为变量 x 的独立同分布的 n 个样本,则 x 要服从的密度函数的 KDE^[10] 公式为

$$f(x) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{x - x_i}{h}\right) \quad (1)$$

式(1)中: $K(\cdot)$ 为核密度函数; h 为带宽。

常见的核函数有三角核函数、二次核函数、高斯核函数和余弦核函数等。 h 是核密度公式的关键,其大小直接影响整体 KDE 的结果^[11]。KDE 的主要流程为:计算 h ;建立网格系统;利用所选择的核函数与 h 计算核密度值;对于每个网格,叠加来自不同样本的核密度值,并将累加结果作为该网格核密度的最终值。

2 海上交通流的核密度模型

海上交通流的 KDE,即对船舶轨迹线要素的 KDE。船舶 AIS 数据中包含水上移动通信业务标识码(Maritime Mobile Service Identification, MMSI)、船名、船长、船宽、时间和与时间相对应的经纬度等数据,能提供研究所需的船舶交通流信息。以 AIS 数据作为 KDE 的数据因数,先需要对数据进行预处理。

2.1 AIS 数据预处理

对于 AIS 数据的预处理,分为数据质量的处理和用以提升计算效率的处理两个步骤, AIS 数据预处理的流程见图 1。

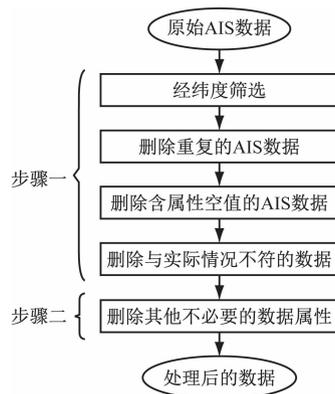


图 1 AIS 数据预处理流程

Fig. 1 AIS data preprocessing process

1) 步骤一中筛选出所需范围的 AIS 数据,利用 Python 编程语言,借助 Pandas 等 Python 第三方库,对 AIS 数据进行数据质量处理。对于重复的 AIS 数据,利用 Pandas 库中 `drop_duplicates()` 函数对重复部分进行删除。AIS 数据中偶有关键信息例如经纬度为空值的现象,此类数据不能使用,需要删除,利用 `dropna()` 函数,剔除关键信息为空值的整行数

据。AIS 数据中有时存在某些与实际情况不符的异常值,主要以船舶航速异常和位置异常为主,见图 2。数据中存在的某一航速异常情况如图 2a 所示,某艘船舶在时间 20:04 所对应的航速显然与实际不符,以某月为例,AIS 原始数据有 1 838 326 条,进行航速异常数据的删除,处理后剩余 1 829 092 条数据;AIS 数据中存在的某一船舶位置信息异常情况如图 2b 所示,某船舶位置数据存在 5 个远离轨迹的异常点,利用基于距离分布的 AIS 异常数据处理方法^[12],处理后见图 3。

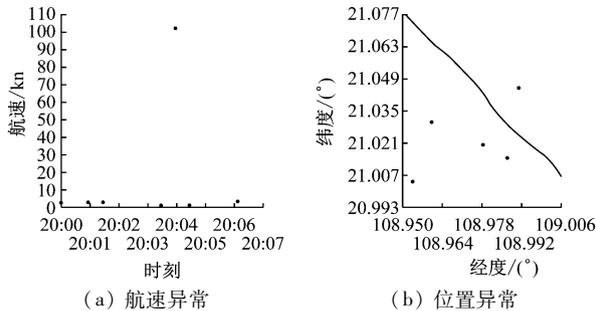


图 2 航速异常与位置异常示意图

Fig. 2 Diagram of abnormal speed and position

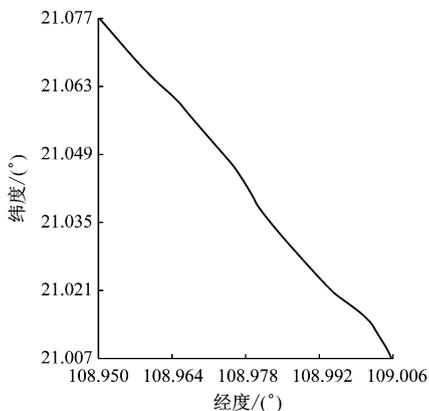


图 3 位置异常处理后的数据点

Fig. 3 Data points after processing

2) 在完成步骤一中 AIS 数据的质量处理后,为提高计算效率,仅保留 AIS 数据中 KDE 主要使用的 MMSI 信息、位置和时间信息,执行步骤二,删除 AIS 数据中的预计到港时间、艏向和转向率等冗余信息。经过数据质量的处理和用以提升计算效率的处理的两个步骤后,得到预处理后的 AIS 数据,标绘得到船舶轨迹线,用以 KDE。

2.2 核密度模型的建立

1) 根据输入的船舶轨迹线要素数据计算搜索半径。KDE 中搜索半径的计算方法为:计算船舶轨迹线要素质心的平均中心;计算线要素质心与平均中心之间的距离,并将此距离的中值记为 a ;通过式(2)计算标准距离 b ,其表示线要素质心在几何平均

中心周围的集中或分散程度;通过式(3)计算搜索半径 h 。

$$b = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{X})^2}{n} + \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{Y})^2}{n}} \quad (2)$$

$$h = 0.9 \times \min\left(b, \sqrt{\frac{1}{\ln 2}} \times a\right) \times n^{-0.2} \quad (3)$$

式(2)和式(3)中: x_i 和 y_i 为第 i 个船舶轨迹线要素质心的坐标; (\bar{X}, \bar{Y}) 为线要素质心的平均中心; n 为船舶轨迹线要素总数。

2) 对目标水域进行网格化处理,建立含有不同时间范围概率密度属性值的网格矩阵。通过利用固定间距、分别与经纬线平行的划分线对目标水域进行划分,以确定每一网格的边界。网格的划分在满足密度分析需求的同时,可忽略船舶航行中部分偏离主要交通流的细节,不仅可简化 KDE 过程,还能为海事部门根据网格经纬度对不同水域进行不同的监管提供帮助。划分线间距决定模型的效果与计算量的大小,若划分线间距过大,可降低计算量,但不能精准反映船舶密度情况;若划分线间距过小,可更好地显示密度分布,但将大幅度增加计算量。网格的划分需根据所在水域的交通流范围,并综合考虑可视化效果与计算量来确定。根据学者的研究分析^[13],一般取 h 的 1/10 作为网格长度。

3) 对于海上交通流的核密度计算,先需确定核密度函数 K 。KDE 对核函数的选择并不敏感^[14],高斯核函数无边界,可对所有值进行权重赋予,故选择高斯核函数用于海上交通流的 KDE。确定 h 与核函数后,进行网格的交通流 KDE 值的计算,海上交通流的 KDE 公式为

$$f(d_i) = \frac{1}{nh} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{d_i}{h}\right) \quad (4)$$

$$K(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2}}, u \in R \quad (5)$$

式(4)和式(5)中: f 为某网格的海上交通流 KDE 值; K 为高斯核函数; d_i 为第 i 个线要素到该网格中心的距离。

原理上,计算每个输出网格像元的线要素核密度,像元即代表着每条船舶轨迹线上方覆盖着一个平面,每一条船舶轨迹都会对附近的单元网格产生一定的密度影响,其中,船舶轨迹所经过的单元网格的密度影响最大,与船舶轨迹距离越远的单元网格的密度影响越小。船舶轨迹对密度的影响等价于网格单元属性值对密度的影响。即网格单元的密度属性值在轨迹线所在的位置处最大,随着与线的距离

的增大,密度属性值逐渐减小,在与线的距离等于指定的 h 的位置处,密度属性值为零。一条船舶轨迹上覆盖有灰色平面,黑色线段表示 h 见图4。

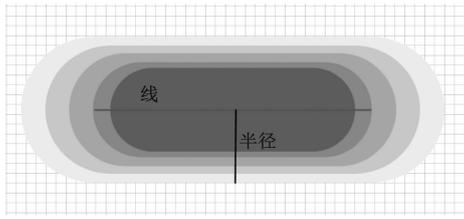


图4 船舶轨迹线与 h

Fig.4 Ship track line and h

完成每一条船舶轨迹密度值的计算后,即可得到含有不同时间范围概率密度属性值的网格矩阵。对目标水域的任一单元网格,遍历所有船舶轨迹对该网格单元产生的密度值,并进行叠加,得到网格矩阵的整体核密度值。

3 交通流核密度分析方法

利用上述模型得到核密度值,制作船舶交通流的核密度图,并对各月份核密度图像进行处理与分析,以确定海上浮标平台的备选范围。

3.1 核密度值的图像显示

将核密度值计算结果按相等间隔分为10组,为满足可视化需求,对核密度值范围的最小组做透明化处理,其余9组分别对应于不同的颜色深度,见表1,并通过GIS软件绘制出拟建浮标平台周边海域的船舶活动核密度图。表1中:颜色越浅表示核密度值越小,船舶活动稀疏;颜色越深表示核密度值越大,船舶活动密集。

表1 核密度等级对应的颜色

Tab.1 The color corresponding to the kernel density grade

密度等级	对应颜色
超低密度	
较低密度	
低密度	
中低密度	
中等密度	
中高密度	
高密度	
较高密度	
超高密度	

3.2 各月份核密度图的处理

在制作1—12月逐月的交通流核密度图过程中,为优化不同月份密度图的对比显示效果,便于后续浮标平台的选址分析,将所有月份的10组核密度值范围设置为相同值,其中范围最大值根据所有月份核密度的最大值设置。同样,将10组中核密度值范围的最小值做透明化处理,其余9组分别对应于表1所示的颜色。通过GIS软件绘制出各月份的船舶活动核密度图,提取核密度图层,进行叠加,得到船舶活动密度较低的区域,作为浮标平台选址的备选范围。

4 浮标平台选址实例分析

本文使用的船舶AIS数据来源于hifleet(船队在线, <https://www.hifleet.com>),数据的时间范围为2020年1月1日—2020年12月31日。本文所选择的目标水域海图见图5。

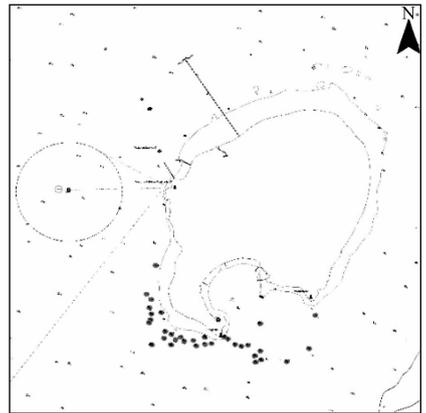


图5 目标水域海图

Fig.5 Chart of target water area

4.1 核密度图像的制作

2020全年的原始AIS数据为37 511 478条,预处理后的AIS数据为11 422 406条,数据文件大小减少约80%,处理前后各月份数据量对比见图6。

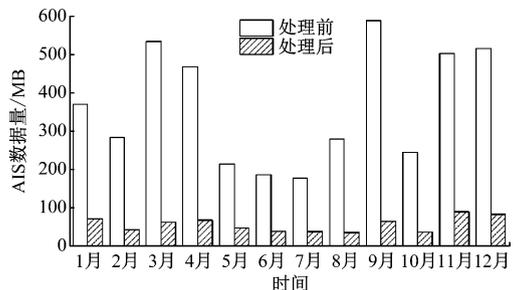


图6 处理前后数据量对比

Fig.6 Comparison of data volume before and after processing

利用预处理后的2020全年AIS数据,标绘得到船舶轨迹线,并利用式(3)计算,可得到 $h = 490$ m,

网格长度取 h 的 $1/10$, 即 49 m , 即将网格设置为 $49\text{ m} \times 49\text{ m}$ 的方形网格, 以满足周边水域船舶活动情况的可视化需要。根据海上交通流的核密度模型, 完成目标水域内任一单元网格的船舶轨迹线要素核密度值计算为建立网格矩阵。在网格中填充含有不同时间范围概率密度属性值, 根据核密度值的图像显示方法, 通过 GIS 软件绘制出拟建浮标平台周边海域的船舶活动核密度图, 全年交通流核密度图见图 7。图 7 中: 颜色的聚集特征可看出周边海域船舶活动的情况, 西北侧和南侧局部位置交通流核密度较大。

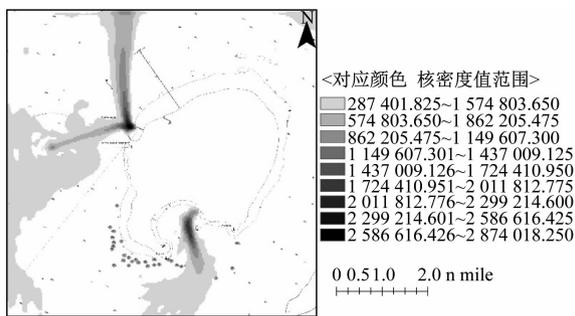


图 7 全年交通流核密度

Fig. 7 The kernel density map of traffic flow in one year

利用处理后的各月份 AIS 数据, 根据海上交通流核密度模型以及核密度值的图像显示方法, 进行各月份交通流核密度图的制作。每个月的核密度图像设置相同的等间隔核密度值范围, 其中, 范围的最大值根据所有月份核密度的最大值进行设置。经过计算得到核密度的最大值为 11 月的 $287\ 630$, 将此上限取整作为核密度值范围最大值, 并按相等间隔分为 10 组, 为优化显示效果, 对核密度值范围的最小值做透明化处理, 其余 9 组依据表 1 设置对应颜色, 通过 GIS 软件绘制出各月份交通流核密度图见图 8。

4.2 备选范围的确定

根据浮标平台在岛西侧选址的需求, 分析交通流核密度图, 以确定备选范围。

1) 提取各月份总计 12 张图中的核密度图层, 进行叠加, 见图 9。由图 9 可知: 岛的西北侧存在船舶活动密度较低的区域, 记为 1 号区域。

2) 考虑到船舶活动的季节、月份特性, 剔除岛屿西侧整体密度较大的 3—9 月的核密度图层, 对其余月份的核密度图层进行叠加, 见图 10。由图 10 可知: 岛屿西南侧存在一船舶活动密度较低的区域, 记为 2 号区域。

3) 岛屿西北侧存在另一船舶活动密度较低的区域, 记为 3 号区域。

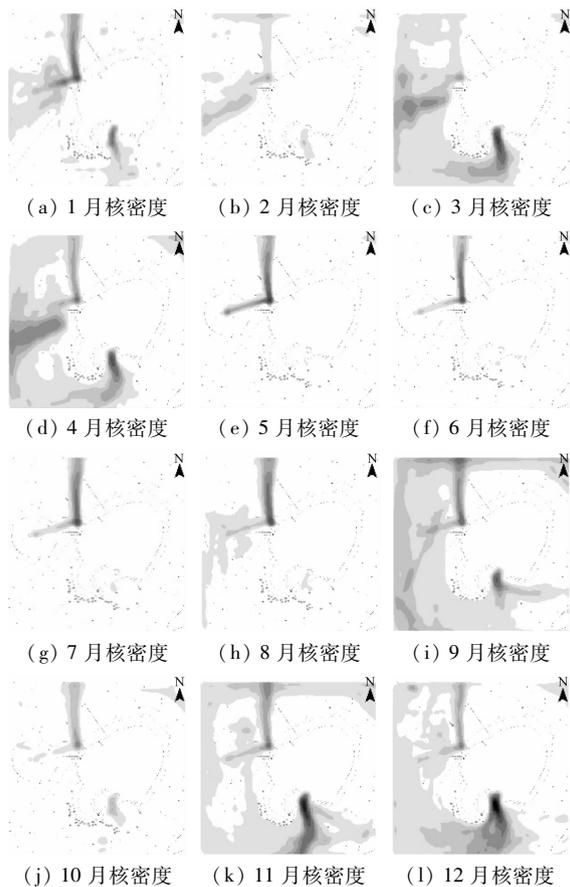


图 8 各月份交通流核密度

Fig. 8 The kernel density map of traffic flow in each month

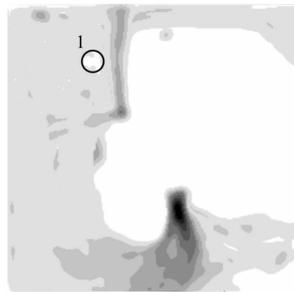


图 9 各个月份密度叠加

Fig. 9 The kernel density map after overlaid layers of each month

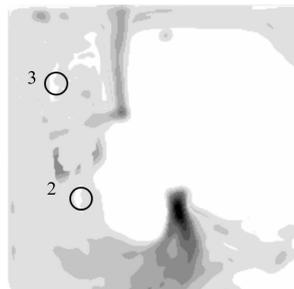


图 10 其余月份密度叠加

Fig. 10 The kernel density map after overlaid layers of other months

上述 3 个区域船舶活动密度较低, 将其作为浮

标平台选址的备选范围。本文将根据备选范围与周边航路的距离对3个备选范围做进一步分析。

4.3 浮标平台选址建议

平台的选址应充分考虑与航路的距离,留有足够的安全距离。根据广西海事局公布的北部湾广西沿海船舶习惯航路^[15],与选址位置较为接近的有3条,简称为航路1、航路2和航路3,见图11。由图11可知:2号区域与航路1、航路2和航路3的距离分别为2.63 n mile、1.62 n mile和0.93 n mile,而1号和3号区域与航路1基本相邻。

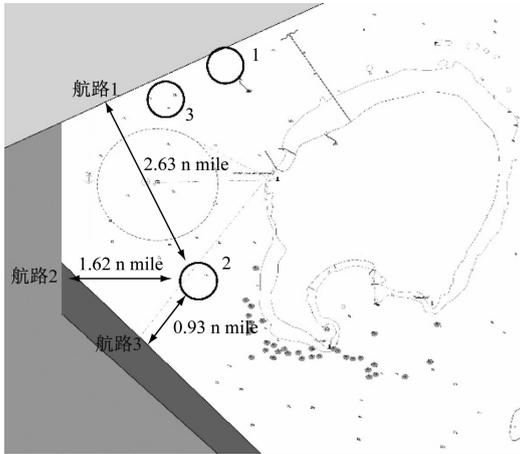


图11 备选范围与航路的距离

Fig. 11 The distance between alternative ranges and ship routes

综上所述,结合选址区域船舶活动密度以及周边航路距离的考虑,将2号区域作为浮标平台的建议选址范围。此范围能减少对水域交通流产生的影响,符合浮标平台选址的通航环境条件要求。

5 结束语

针对浮标平台选址的问题,本文依据附近海域船舶的AIS数据,采用核密度分析的方法,建立海上交通流的核密度模型,针对具体水域环境和交通流特征,合理设置网格参数,获得较好的计算精度和可视化效果。相比于其他方法,本方法从浮标平台选址对船舶交通流影响的角度,在选址的通航环境条件符合性方面,对选址的参考依据加以补充和优化。本文通过对实例的具体应用分析,获得全年以及各月份的交通流核密度图,直观地显示目标水域的船舶活动情况,结合备选范围周边航路之间距离的辅助考量,提出浮标平台的选址范围建议。本文提出的基于GIS核密度分析的海上浮标平台选址分析方法,为海上浮标平台选址提供参考依据。

参 考 文 献

[1] 王波,李民,刘世萱,等. 海洋资料浮标观测技术应

用现状及发展趋势[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11):2401-2414.

WANG B, LI M, LIU S X, et al. Current status and trend of ocean data buoy observation technology applications[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11):2401-2414. (in Chinese)

[2] 国家市场监督管理总局. 海洋观测规范: GB/T 14914.3—2021[S]. 北京:中国标准出版社, 2021. State Administration for Market Regulation. The specification for marine observation: GB/T 14914.3—2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021. (in Chinese)

[3] 庞仁松,周凯,冷科明,等. 深圳市海域浮标监测网的站位设计和数据应用[J]. 海洋开发与管理, 2018, 35(2):49-53.

PANG R S, ZHOU K, LENG K M, et al. The station design and data application of buoy monitoring network in Shenzhen sea area[J]. Ocean Development and Management, 2018, 35(2):49-53. (in Chinese)

[4] 李天深,刘方,庄马展,等. 近岸海域水质自动监测系统站位的布设[J]. 中国环境监测, 2014, 30(2):182-185.

LI T S, LIU F, ZHUANG M Z, et al. The site layout of the automatic monitoring system in coastal areas[J]. Environmental Monitoring in China, 2014, 30(2):182-185. (in Chinese)

[5] 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.

NIE Y Y, LIU K Z, YANG X, et al. Safety distance between offshore wind farms and ship routes[J]. Navigation of China, 2019, 42(4):12-17. (in Chinese)

[6] 查振昊. 基于船舶通航安全的海上风电场选址研究[D]. 厦门:集美大学, 2021.

ZHA Z H. Research on location selection of offshore wind farm based on ship navigation safety[D]. Xiamen: Jimei University, 2021. (in Chinese)

[7] 龙雪琴,周萌,赵欢,等. 基于网络核密度的网约车上下客热点识别[J]. 交通运输系统工程与信息, 2021, 21(3):86-93.

LONG X Q, ZHOU M, ZHAO H, et al. Passengers' hot spots identification of online car-hailing based on network kernel density[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2021, 21(3):86-93. (in Chinese)

[8] 刘虎,李伟峰. 基于AIS数据的海上交通流区域自动识别[J]. 中国航海, 2016, 39(4):87-90.

LIU H, LI W F. Automatic recognition of marine traffic flow with AIS data[J]. Navigation of China, 2016, 39(4):87-90. (in Chinese)

(下转第71页)

- 题中的应用[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2017,41(3):479-483.
- WANG Y Y, CHENG S H. Application of multi-objective ant colony algorithm in container allocation problem[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science and Engineering Edition), 2017,41(3):479-483. (in Chinese)
- [12] 汪圆圆,陈顺怀. 集装箱船舶配载的粒子群算法[J]. 船舶工程,2017,39(S1):249-252.
- WANG Y Y, CHENG S H. Particle swarm algorithm for container ship allocation [J]. Marine Engineering, 2017,39(S1):249-252. (in Chinese)
- [13] 王雅芬. 集装箱船舶配载智能决策研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.
- WANG Y F. Research on intelligent decision making of container ship allotment [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [14] 王志超,丁一. 考虑箱区作业均衡的自动化码头集装箱船舶配载计划[J]. 计算机应用,2021,41(S2):299-303.
- WANG Z C, DING Y. Container vessel allocation plan for automated terminals considering the balance of operations in the container area [J]. Computer Application, 2021,41(S2):299-303. (in Chinese)
- [15] 丁一,王聪. 以自动化码头为中心的船舶配载优化[J]. 计算机应用,2021,41(11):3385-3393.
- DING Y, WANG C. Ship allocation optimization centered on automated terminals [J]. Computer Application, 2021,41(11):3385-3393. (in Chinese)
- [16] CHEUNG N J, SHEN H. Hierarchical particle swarm optimizer for minimizing the non-convex potential energy of molecular structure [J]. Journal of Molecular Graphics and Modelling, 2014,54:114-122.
- [17] 屈迟文,何伟. 一种基于改进布谷鸟算法的物流配送车辆路径优化方法[P]. 广西壮族自治区: CN105260785B, 2020-06-23.
- QU C W, HE W. A Path Optimization method for logistics and distribution vehicles based on improved cuckoo algorithm [P]. Guangxi Zhuang Autonomous Region; CN105260785B, 2020-06-23. (in Chinese)
- [18] 申经伟. 基于改进布谷鸟算法的港口群海铁联运网络优化[D]. 大连:大连海事大学, 2020.
- SHENG J W. Optimization of sea-rail intermodal transport network of port cluster based on improved cuckoo algorithm [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2020. (in Chinese)
- [19] 俞宙,许冬敏,张琼,等. 基于禁忌搜索算法的自动化集装箱码头船舶配载研究[J]. 港工技术, 2019,56(1):6-12.
- YU Z, XU D M, ZHANG Q, et al. Research on ship allocation in automated container terminal based on taboo search algorithm[J]. Port Technology, 2019,56(1):6-12. (in Chinese)
- ~~~~~
- (上接第 64 页)
- [9] 尹章才,康自强. 时间地理支持下的核密度估计研究进展[J]. 地理科学进展, 2022,41(1):64-72.
- YIN Z C, KANG Z Q. Advances in kernel density estimation supported by time geography[J]. Progress in Geography, 2022,41(1):64-72. (in Chinese)
- [10] 孙志华. 非参数与半参数统计[M]. 北京:清华大学出版社, 2016:9-10.
- SUN Z H. Nonparametric and semiparametric statistics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2016:9-10. (in Chinese)
- [11] 王颖志,王立君. 基于网络时空核密度的交通事故多发点鉴别方法[J]. 地理科学, 2019,39(8):1238-1245.
- WANG Y Z, WANG L J. An identification method of traffic accident black point based on street-network spatial-temporal kernel density estimation[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019,39(8):1238-1245. (in Chinese)
- [12] 冯宏祥, ANNA M C, 杨忠振. 基于距离分布的 AIS 异常数据处理方法[J]. 中国航海, 2021,44(4):26-31.
- FENG H X, ANNA M C, YANG Z Z. Outlier processing of AIS data according to distance distribution [J]. Navigation of China, 2021,44(4):26-31. (in Chinese)
- [13] OKABE A, SATOH T, SUGIHARA K. A kernel density estimation method for networks, its computational method and a GIS-based tool [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2009,23(1):7-32.
- [14] 马梦知,范厚明,黄菡森,等. 基于非参数核密度估计的集装箱码头交通需求预测模型[J]. 大连海事大学学报, 2019,45(1):74-81.
- MA M Z, FAN H M, HUANG J S, et al. Traffic demand forecasting model for container terminal based on non-parametric kernel density estimation[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2019,45(1):74-81. (in Chinese)
- [15] 南海航海保障中心. 北部湾广西水域船舶航行指南[M]. 北京:人民交通出版社, 2017.
- Southern Navigation Service Center. Navigation guide for ships in Guangxi waters of the Beibu Gulf[M]. Beijing: China Communications Press, 2017. (in Chinese)