

基于 AIS 数据的复杂交汇水域船舶 航路优化方法研究

卢俊璋¹, 郭娅婷¹, 刘克中², 王伟强²

(1. 长江航道测量中心, 湖北 武汉 430010;

2. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063)

摘要:复杂交汇水域内船舶流量大、航路交汇频繁导致水域交通态势复杂以及船舶碰撞风险较高,对这类水域进行船舶航路优化具有重要意义。传统航路优化方法更多侧重交通规则制定和交通控制,虽有一定成效但大多依赖海事管理人员的主观经验,缺乏客观依据。针对这类问题,提出一种基于历史船舶轨迹数据的航路优化方法。通过轨迹聚类 and 图像处理等方法提取船舶交通网络,构建节点相似度模型运用聚类算法将整个网络划分为多个局部交通网络,对各网络社区通过合并节点以及网络重构实现水域船舶航路优化。试验结果表明:相较于优化前的水域状况,该航路优化方法使水域船舶交通复杂度下降 50% 的同时船舶碰撞风险降低 30%,大幅提升船舶航行安全以及降低海事部门水域监管压力,其优化结果可为船舶定线制规划提供参考。

关键词:复杂交汇水域; AIS 数据; 复杂网络; 航路优化; 社区划分

中图分类号: U675.7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2025.03.008

Research on ship route optimization method for complex intersecting waters based on AIS data

LU Junzhang¹, GUO Yating¹, LIU Kezhong², WANG Weiqiang²

(1. Changjiang Waterway Bureau Survey Center, Wuhan 430010, China;

2. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: Complex intersection waters, characterized by heavy ship traffic and frequent route crossings, exhibit complex traffic dynamics and a high risk of collisions, making route optimization in such areas highly important. Traditional route optimization methods tend to focus more on the formulation of traffic rules and traffic control measures. While effective, these approaches often rely on the subjective experience of maritime managers and lack an objective basis. To address these limitations, this paper proposes a route optimization method based on historical ship trajectory data. The ship traffic network is extracted through trajectory clustering and image processing techniques. A node similarity model is constructed, and a clustering algorithm is applied to partition the overall network into multiple local traffic networks. Route optimization is then achieved by merging nodes and reconstructing the network within each community. Experimental results demonstrate that the proposed method reduces the complexity of ship traffic by 50% and the risk of ship collisions by 30% compared to pre-optimized conditions. These improvements significantly enhance navigation safety, alleviate the regulatory burden on maritime authorities, and provide valuable insights for the planning of ship routing systems.

Key words: complex intersecting waters; AIS data; complex networks; route optimization; community detection

收稿日期: 2024-09-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(52031009)

作者简介: 卢俊璋(1996—),男,工程师,硕士,研究方向为海上 AIS 大数据挖掘。E-mail: 1194743619@qq.com

通信作者: 刘克中(1970—),男,教授,博士,研究方向为水上交通安全研究。E-mail: kzliu@whut.edu.cn

引用格式: 卢俊璋,郭娅婷,刘克中,等. 基于 AIS 数据的复杂交汇水域船舶航路优化方法研究[J]. 中国航海, 2025, 48(3): 65-72.

LU J Z, GUO Y T, LIU K Z, et al. Research on ship route optimization method for complex intersecting waters based on AIS data[J]. Navigation of China, 2025, 48(3): 65-72. (in Chinese)

伴随我国港口建设与海运能力的快速发展,沿海港口水域面临船舶流量攀升、交通流密度加大、船舶会遇频次升高和船舶航行风险逐年递增等问题。为提升船舶在港区航行安全与效率,并加强水域交通态势感知以便提升交通安全监管能力,水域管理者们常通过对水域进行航路优化从而提升交通效率和船舶航行安全^[1]。

传统的航路优化方法主要包括船舶交通信息发布、船舶交通组织调度和船舶定线制规划。例如:乔林^[2]在对影响水域船舶定线制的诸多因素进行分析的基础上,构建一套定线制方案的评估体系,运用层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, AHP) 给评估系统中的各个指标赋权,并运用可拓物元理论构建评价模型,评估所有定线制方案并择优;PIETRZYKOWSKI 等^[3]在分道通航研究中,通过结合船舶航行规则和实际船舶航行行为的分析,提出一种能将船舶纳入主要交通流中,以改善船舶的航行安全的决策辅助方法;为解决船舶定线制下各类船舶之间的碰撞风险评价问题,PARK 等^[4]通过问卷调查与仿真试验,结合船舶内外环境因素,探讨船舶在定线制度下的安全性评价方法;JENSENT 等^[5]以船舶的自由度为突破点,采用分道通航制来引导自由度较低的水域内的船舶航行,并以实例来评价分道通航制对于船舶的引导效果。

综上,传统的航路优化研究主要集中在船舶到达规律研究、船舶定线制设置和船舶交通组织等方面的研究。尽管这些方法在提升水域交通效率和降低船舶航行风险上具有一定功效,但很少有研究对于整个交汇水域船舶交通状况进行定量评价和分析,使水域监管人员在从宏观层面监控水域交通状况以及开展航路优化时缺乏定量依据和优化目标。针对这种问题,本文提出一种基于船舶自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS) 数据的航路优化方法,设计包含水域船舶交通网络提取、水域船舶交通网络划分和水域船舶航路优化等 3 部分内容,复杂交汇水域船舶航路优化框架见图 1。

1 水域船舶交通网络提取

本文船舶交通网络是以航路交汇点为节点、交汇点间交通流为连边构成的图结构。该网络通过节点间的拓扑连接关系,映射复杂交汇水域中航路间的交通联系和交通态势复杂度,为水域航路优化奠定基础。其构建过程包括船舶航路网提取和船舶交通网络构建 2 个步骤。

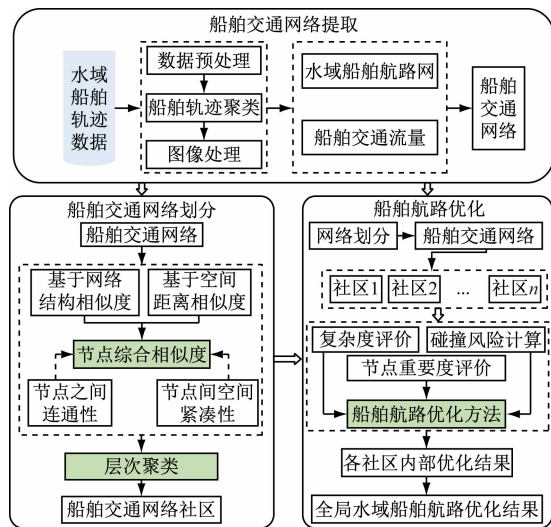


图 1 复杂交汇水域船舶航路优化框架

Fig. 1 Optimization framework for ship routing in complex intersecting waters

1.1 船舶航路网提取

鉴于复杂交汇水域船舶会遇频发且主要交汇点难以辨识,本研究利用轨迹聚类提取船舶交通流^[6],并利用图像骨架提取方法挖掘船舶航路和交汇点。同时,轨迹聚类结果所得的各航路船舶流量,为后续交通网络构建打下基础。完整的提取流程包括轨迹聚类、航路提取和航路网提取,具体提取过程见图 2。

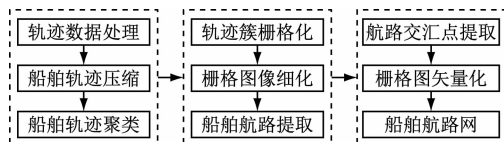


图 2 船舶航路网提取过程

Fig. 2 Ship route network extraction process

1) 进行轨迹数据处理、船舶轨迹压缩,随后基于改进的 SSPD (Symmetrized Segment-Path Distance) 轨迹相似度模型^[7]和层次 DBSCAN (Density-Based Spatial Clustering of Application with Noise) 聚类算法^[8]进行轨迹聚类,挖掘主要船舶轨迹簇。

2) 利用图像栅格化将船舶轨迹簇从矢量数据转化为栅格数据,利用改进的 Zhang-Suen 图像细化算法^[9]提取表征各船舶轨迹簇的航路。

3) 借鉴栅格数据矢量化中的追踪算法原理,提出一种航路交汇点的识别方法,提取航路交汇点。基于船舶航路和交汇点构建船舶航路网,具体过程参考文献^[9]。

1.2 船舶交通网络构建

参照船舶航路网构建对应的船舶交通网络。船舶航路网的交汇点即为交通网络的节点 V , 交汇点

间的交通流量则构成网络节点间的连边 E 。

交通网络表示为 $G = (V, E, W)$, 其中, $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为节点集合; $E = \{(u, v) \mid u, v \in V\}$ 为边的集合; $W = \{w_{uv} \mid (u, v) \in E\}$ 为网络内各节点之间边的权重集合。

2 水域船舶交通网络划分

复杂交汇水域存在航行船舶流量大、船舶会遇态势复杂、水域内航路交汇处多和不同局部水域风险差异性明显等特征。因此, 本文航路优化旨在挖掘交汇点密集区域, 通过合并交汇点的方式减少交汇点数量, 降低水域交通态势复杂度和船舶航行风险。然而, 若对整个交通网络依次优化所有交汇点, 每次优化都将导致网络结构改变, 而下一次优化又将对整个网络节点进行一次遍历计算, 最终导致整个优化过程计算量巨大。但在真实情况下, 单一交汇点的优化通常仅影响局部交通网络拓扑关系, 这种全局遍历策略必然引入大量冗余计算。针对此问题, 可依据节点间的关联性和相互影响程度将其分组, 再对组内节点进行优化, 从而大幅降低计算负荷。

因此, 需要一种高效的方法对水域内所有航路交汇点进行分组, 以达到获取高关联度的航路交汇点集群, 在此基础上进行船舶航路优化。

2.1 交通网络节点相似性度量

网络社区划分作为常用节点分组方法研究众多, 大致上可分为基于网络拓扑、基于节点内容和基于网络拓扑与节点内容融合等 3 个方面^[10]。而船舶交通网络中既有网络拓扑属性也有节点自身属性, 故提出一种综合考虑网络拓扑与节点内容的网络节点相似性模型。

2.1.1 基于网络结构的节点相似性

1) 基于相同邻接节点数量的相似性 R_{ij} 为

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ \frac{|L_i \cap L_j|}{\sqrt{|L_i| \times |L_j|}}, & i \neq j \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: L_i 和 L_j 分别为对应节点 i 和 j 邻接节点的数量; $|L_i \cap L_j|$ 为节点 i 和 j 之间相同邻接节点数量, 数量越大, 2 个节点相似性越高。

2) 基于节点之间边权重的相似性 W_{ij} 为

$$W_{ij} = \left(\frac{w_{ij}}{w_i - w_{ij}} + \frac{w_{ij}}{w_j - w_{ij}} \right) / 2 \quad (2)$$

式(2)中: w_{ij} 为节点 i 和 j 之间的边权重; w_i 和 w_j 为对应节点的强度。边权重在节点强度中的占比越高则 2 个节点的相似性越大。

3) 综合基于邻接节点数量相似性和基于边权

重相似性得到基于网络结构的节点相似性 S_{ij} 为

$$S_{ij} = \begin{cases} a \times R_{ij} + b \times W_{ij}, & |L_i \cap L_j| \neq 0 \\ W_{ij}, & |L_i \cap L_j| = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中: $a + b = 1$ 。经重复试验验证, 当节点 i 与 j 之间有共同邻接节点且取值为 0.4 时, 社区划分效果最佳。当节点 i 与 j 之间无共同邻接节点时, 边权重相似性即为网络结构相似性。

2.1.2 基于空间距离的节点相似性

相比传统复杂网络, 船舶交通网络中节点不仅具有网络结构属性, 各个节点均在实际水域中拥有各自的地理位置。若仅依据网络链接关系进行社区划分和航路优化, 可能导致拓扑紧密但空间距离遥远的节点被归为一类, 从而增加航路优化难度。因此, 节点空间距离也与相似性相关, 基于此通过节点之间的空间距离得到基于空间距离的相似性 D_{ij} 为

$$D_{ij} = \frac{d_{ij} - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} \quad (4)$$

式(4)中: d_{ij} 为节点 i 与 j 之间的时空距离; d_{\min} 和 d_{\max} 分别为网络节点间时空距离的最小值和最大值。

2.1.3 节点综合相似性

1) 基于网络结构关系节点相似性计算模型, 通过聚类算法进行初次社区划分。

2) 基于初次社区划分结果, 在节点网络结构关系上补充空间距离关系, 构建节点间的特征表达向量为

$$D_{sim-ij} = (D'_{ij}, S'_{ij}, K_i, K_j)$$

式(5)中: D'_{ij} 表示节点 i 和 j 之间距离相似性, S'_{ij} 表示节点 i 与 j 的归一化网络结构相似性, K_i 和 K_j 分别表示初次社区划分时节点 i 与 j 所归属的社区编号。

3) 构建节点综合相似性模型, 如式(6)。

$$Z_{ij} = \begin{cases} c * D'_{ij} + d * S'_{ij}, & K_i = K_j \\ \left(\frac{c}{3} \right) * D'_{ij} + d * S'_{ij}, & K_i \neq K_j \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中: Z_{ij} 表示节点 i 和 j 之间综合相似性, c 与 d 分别为 D'_{ij} 和 S'_{ij} 的加权系数, $c + d = 1$ 。

2.2 船舶交通网络划分

2.2.1 层次聚类算法

聚类算法作为当前复杂网络划分的主流方法之一得到了广泛运用^[11]。考虑到第 2.2 节计算节点相似性时既考虑节点之间连边属性又考虑节点的自身属性, 故本文选用层次聚类算法^[12] 搭配相似性模型对网络进行划分。

2.2.2 网络划分评价指标

模块度是衡量网络划分成为子社区的强度指标^[13], 为使社区划分依据更符合实际情况, 将节点相

似度融入网络模块度评价函数中见式(7)。

$$Q' = \frac{1}{2A} \sum_{i,j} \left[S_{sim-ij} - \frac{S_i * S_j}{2A} \right] \vartheta(C_i, C_j) \quad (7)$$

式(7)中: Q' 表示网络模块度; S_{sim-ij} 表示节点*i*与*j*的相似度; S_i 表示节点*i*与所有邻接节点相似度之和; A 为网络内所有节点两两之间相似度和; C_i 为节点*i*的社区编号,若 $\vartheta(C_i, C_j) = 1$ 则节点*i*与*j*同属一社区,反之则属不同社区。

2.2.3 船舶交通网络划分流程

整个划分方法包含以下步骤。

1) 构建有*n*个节点的初始交通网络,构建节点之间的邻接矩阵、节点之间流量矩阵和节点之间距离矩阵。

2) 基于节点之间邻接矩阵、流量矩阵,构建基于网络结构的节点相似矩阵,采用层次聚类进行初次社区划分,选取最优社区数目。

3) 基于初次社区划分结果和节点的空间距离相似,计算节点综合相似。

4) 基于初次划分最优社区数目和船舶交通流分布情况确定最终社区数目,利用层次聚类完成二次社区划分。

3 水域船舶航路优化

对船舶交通网络划分后的各个社区进行航路优化,其本质就是通过减少航路交汇点来简化交通网络结构。但网络内航路交汇点可删除,交汇点连接的航路交通流却无法消除。故船舶交通网络优化主要通过合并网络内交汇点的方式来实现。

3.1 船舶航路优化指标

3.1.1 船舶交通网络复杂度评价

基于船舶交通网络结构复杂的现状,本文采用现有的复杂网络拓扑指标构建出船舶交通网络复杂度评价指标体系,其中包括网络节点度分布、网络平均路径、网络聚类系数和网络效率等4个指标。

3.1.2 船舶碰撞风险评价

本文船舶碰撞风险主要考虑2条航路交汇处的船舶交叉碰撞风险, Pedersen 模型适用于评价2条航路交汇处的船舶碰撞风险^[14],其主要考虑包括船舶流量、航路夹角和船舶长度等因素。故本文运用其中的相应模型计算航路交汇处船舶碰撞风险。

3.2 船舶交通网络节点重要度指标

船舶交通网络优化中节点之间的合并需遵循一定规则。故提出基于节点重要性评估的合并规则:通过构建节点重要性排序指标体系,在进行节点之间合并操作时,优先保留重要性较高的节点。

本文船舶交通网络是一个加权有向网络,其中权值表示节点之间交通流大小,方向则为节点之间船舶交通流方向。传统基于节点中心性^[15]的重要性评价模型只适用于加权网络。因此,本文将节点度划分为入强度和出强度,构建双向权重综合度量模型见式(8)。

$$C_{DC}(v_i) = \sqrt[3]{C_{Dout}(v_i) \times C_{Din}(v_i) \times \frac{1}{2}(C_{Dout}(v_i) + C_{Din}(v_i))} \quad (8)$$

式(8)中: $C_{Dout}(v_i)$ 为节点*i*出强度; $C_{Din}(v_i)$ 为节点*i*入强度; $C_{DC}(v_i)$ 为节点重要度。

3.3 船舶交通网络航路优化方法

各船舶交通网络社区优化流程如下:

1) 对各个社区内节点进行重要度排序,选择其中重要度最小节点*i*。

2) 寻找重要度最小节点的最邻近节点*j*,判断节点*i*是否为不可动节点。如果是可动节点,则跳过该节点选择其他节点中重要度最小的节点;此处不可动节点由海事部门判定,若节点所在位置航路必定产生交汇则视为不可动节点,与其他节点合并时予以保留。

3) 将节点*i*合并入节点*j*,改变网络结构并计算网络复杂度和碰撞风险,如风险相较于优化前有降低,则进入下一次迭代,反之则结束优化。航路优化流程图见图3。

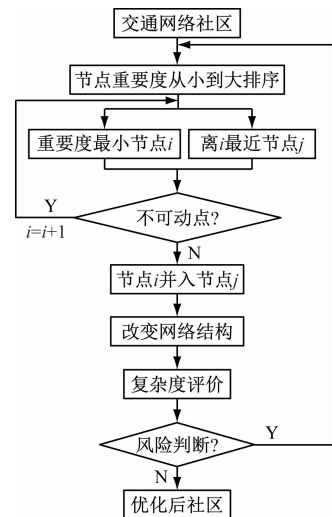


图3 航路优化流程

Fig. 3 Flowchart of route optimization

4 航路优化实例及应用

4.1 研究水域

舟山鱼腥脑水域位于鱼山岛西侧见图4,是舟

山沿海重要交通枢纽,航路交错,通航密度高,通航环境复杂。选取该水域 2020 年 1 月上旬 AIS 数据作为数据集,选取范围为 (30°06'.000N ~ 30°30'.000N;121°36'.000E ~ 122°00'.000E)。

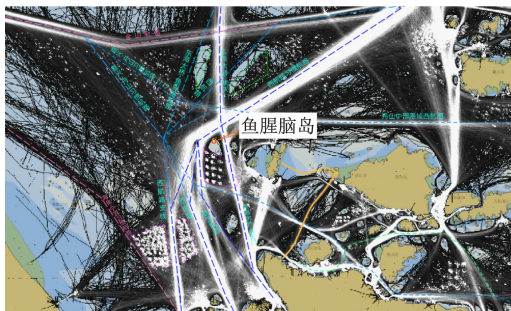
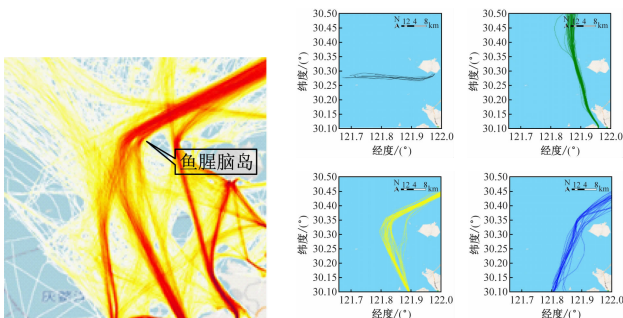


图 4 水域船舶交通流分布情况

Fig. 4 Distribution of ship traffic flows

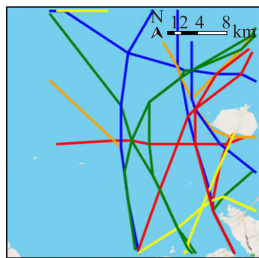
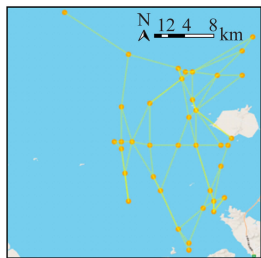
4.2 船舶交通网络构建

通过处理船舶轨迹数据和进行轨迹聚类分析,得到主要船舶交通流分布分别见图 5a 和图 5b,并据此提取船舶航路网见图 5d,进而构建船舶交通网络见图 5c,经统计分析整个网络包含节点 38 个连边 64 条。



(a) 水域交通流分布

(b) 水域主要船舶交通流



(c) 水域船舶交通网络

(d) 水域船舶航路网

图 5 船舶交通网络构建

Fig. 5 Ship traffic network construction

4.3 船舶交通网络划分

4.3.1 船舶交通网络社区初次划分

分别利用基于共同邻接点数量、连边权重和网络结构这 3 种相似性划分网络社区。其中,网络结构相似性模型作为试验组,其他二者作为对照组,采用第 2.2.2 节的模块度函数评估效果。

社区划分效果评价见图 6。由图 6 可知:基于

网络结构相似性的社区划分效果最优,且确定最佳社区数量为 4。

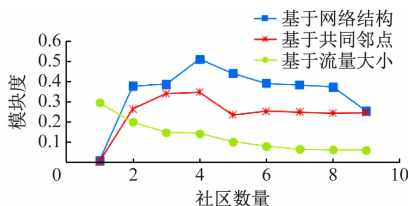
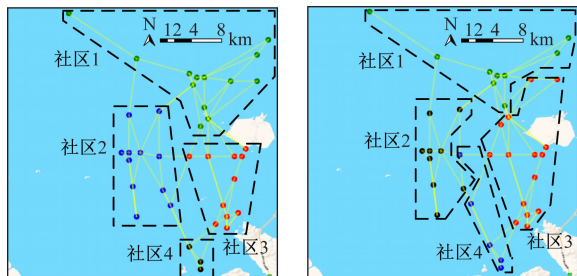


图 6 社区划分效果评价

Fig. 6 Evaluation of community detection performance

4.3.2 船舶交通网络社区二次划分

基于最优社区数量 4,利用节点结构相似度和节点综合相似性模型划分船舶交通网络,结果见图 7。



(a) 综合相似度

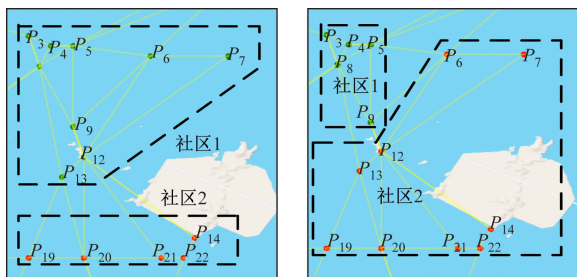
(b) 网络结构相似度

图 7 2 种算法交通网络社区划分结果

Fig. 7 Community detection results of two algorithms on a traffic networks

对比 2 类相似性模型划分结果,可发现整体上基于网络结构相似性模型和节点综合相似性模型的最终社区划分结果整体接近,但局部节点因增加时空距离的约束导致社区归属发生改变。

2 种算法社区划分结果局部图见图 8。图 8a、图 8b 分别对应图 7a、图 7b 社区 1 和社区 3 的划分情况。基于网络结构相似性模型的社区划分下 P_6 、 P_7 、 P_{12} 、 P_{13} 距离其归属的社区 3 距离较远而贴近社区 1。



(a) 综合相似度

(b) 网络结构相似度

图 8 2 种算法社区划分结果局部

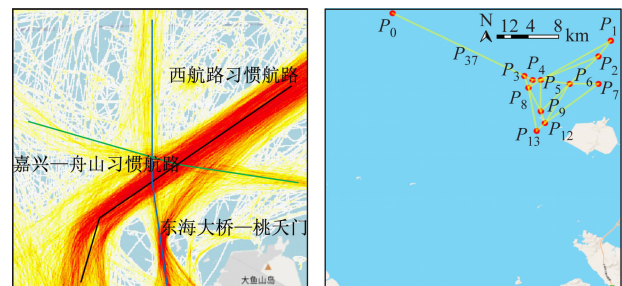
Fig. 8 Comparison of local community structures detected two algorithms

节点综合相似性模型引入时空距离度量后,以上 4 个节点划归入社区 1,显著提升社区内部空间紧凑性,增强相邻航路交汇点的合并优化可行性。

4.4 船舶航路优化

通过船舶交通网络划分算法,将水域船舶交通网络划分为4个社区结构。依据海事主管部门需求,本文主要对社区1和社区2进行航路优化。

例如,社区1位于鱼腥脑北部水域,主要船舶习惯航路有嘉兴—舟山习惯航路、西航路习惯航路、东海大桥—桃夭门航路和舟山中部港域西航道等一系列船舶习惯航路见图9。



(a) 航路分布 (b) 船舶交通网络

图9 社区1航路分布和船舶交通网络

Fig. 9 Community 1 traffic flow and ship traffic network

近邻节点 P_3 ;第2次迭代, P_7 并入 P_6 。以此类推,经9次迭代,整体上社区内部从原有的12个节点18条连边通过不断合并节点,最终优化为4节点4连边,网络结构大幅简化。

通过上述方法对2个社区进行航路优化后,水域交通状况显著改善,具体为以下3个方面。

1) 社区1船舶航路优化前后对比见图11。水域船舶会遇频率大幅降低如图11a和图11c所示,社区1航路交汇点从13个减少至4个(缩减率69.2%),水域内船舶会遇频率大幅减少。

2) 优化过程复杂度与风险变化见图12。水域船舶交通态势简化和航行安全提高如图12a和图12b所示,对比优化前,优化后网络节点平均度、网络半径和平均路径长度下降50%,网络效率和聚类系数则增大40%,网络内余下的节点之间的链接关系更加紧密,单一节点与邻接节点之间存在链接关系的可能性逐渐变高,水域内交汇点之间船舶的航行路径较为固定,船舶交通流集中在几条主要航路,水域整体交通态势良好。同时,优化后的船舶碰撞风险相对于初始时刻有一定程度的下降。

社区1交通网络船舶航路优化过程见图10。图10中:第1次迭代,重要度最小节点 P_{37} ,并入最

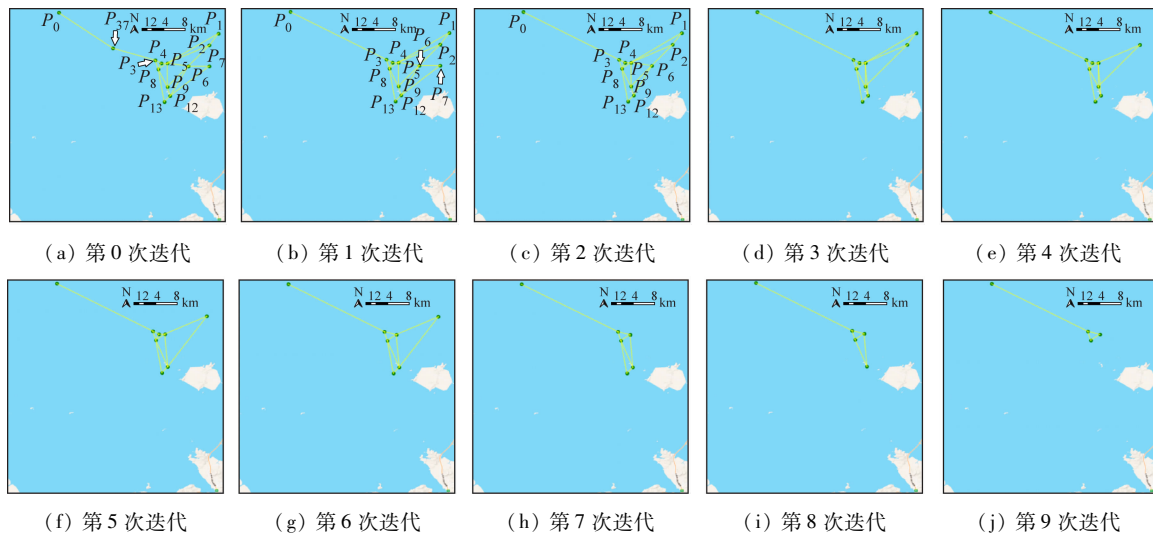


图10 社区1交通网络船舶航路优化过程

Fig. 10 Optimization process of ship routing in the Community 1 traffic network

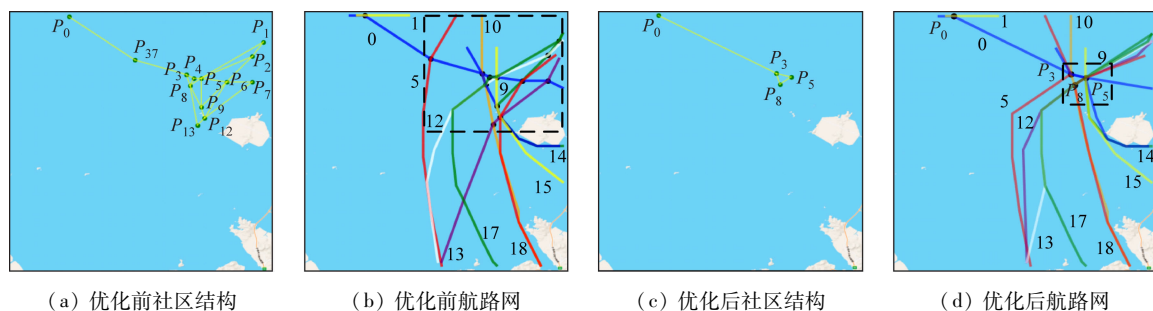
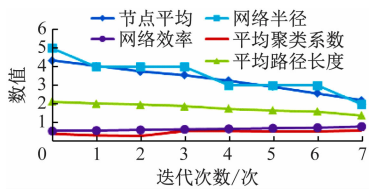
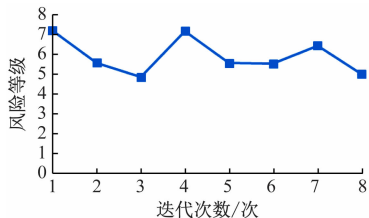


图11 社区1船舶航路优化前后对比

Fig. 11 Comparison of ship routes before and after optimization in Community 1



(a) 社区 1 复杂度变化



(b) 社区 1 船舶碰撞风险变化

图 12 优化过程复杂度与风险变化

Fig. 12 Complexity and risk variation during the optimization process

线框标示的是交汇点密集区。可看出优化后交会点密集区域覆盖范围明显缩小,直接减轻了海事部门的动态监控负荷。

4.5 航路优化方法对比分析

船舶航路优化种类繁多且各方法优化目标不尽相同,故选取当下主流航路优化方法与本文研究方法进行定性分析和对比,其中包括基于路径规划的船舶路径规划^[16]、基于专家经验的船舶定线制规划^[17]和基于最优化理论的船舶航线设计^[18]等 3 类方法。

航路优化方法对比见表 1。由表 1 可知:本文基于社区划分的航路优化方法相较于其他主流方法的主要特点在于,考虑全局水域的船舶交通态势以及风险,而非局限于单一航路的优化,同时,通过定性、定量相结合的方式弥补了定性和定量方法中的不足。

3) 水域监管压力减小如图 11b 和图 11d 中虚

表 1 航路优化方法对比

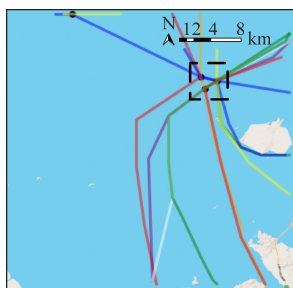
Tab. 1 Comparison of route optimization methods

优化方法	研究范围	考虑因素	常用算法	方法类型
基于路径规划	单一航路	航行路径、航行风险	A*、Dijkstra	定量
基于最优化	单一航路	船舶油耗、航行风险	遗传算法、模拟退火算法	定量
基于专家经验	全局水域	航行风险、专家经验	模糊综合评价	定性
基于社区划分(本文)	全局水域	航行风险、交通态势	相似度建模、层次聚类	定量/定性

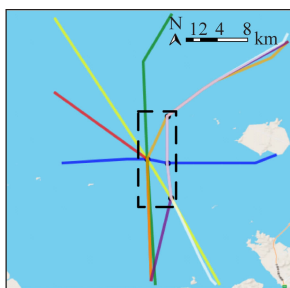
4.6 航路优化方法实际应用

通过整合各社区航路优化结果见图 13a 和图 13b,可得到水域整体航路优化后布局见图 13c。而优化后的航路布局可为水域内船舶航行提供大致路

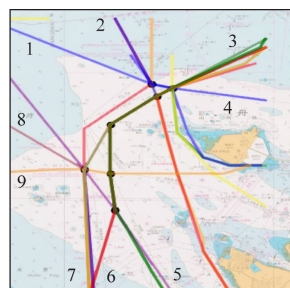
径引导,同时也可作为水域监管人员船舶定线制规划的依据。依据优化后整个水域航路布局观察可知,船舶进出鱼腥脑水域其进出口主要有 8 个,具体情况见表 2。



(a) 社区 1 航路优化后布局



(b) 社区 2 航路优化后布局



(c) 水域整体航路优化后布局

图 13 优化后水域船舶航路布局

Fig. 13 Optimized ship route layout in the waterway

由表 2 可知:船舶进出鱼腥脑水域方式可分为 3 类:自嘉兴港的船舶从水域西北方向进入(包括 1、8、9);自长江口南下的船舶从水域东北方向进入(包括 2、3、4);来自舟山核心港区船舶分别通过金塘大桥、西堠门大桥和桃夭门大桥进入(包括 5、6、

7)。基于航路优化结果进行船舶定线制规划结果见图 14。

由图 14、图 13a 和图 13b 可知:定线制中 2 个船舶交汇区划定分别参考两个社区优化后的交汇点分布情况。交汇区 1 主要连接船舶通航分道 E、F、G、

表2 水域船舶进出口分布情况

Tab.2 Distribution of ships arrivals and departures

进出口 序号	船舶航行方位
1	船舶从嘉兴港驶出,沿嘉兴舟山习惯航路进入水域
2	长江口南下航行船舶,沿东海大桥桃夭门航路进入水域
3	长江口南下航行船舶,沿西航路习惯航路进入水域
4	长江口南下航行船舶,沿舟山中部港区西航路进入水域
5	船舶从桃夭门大桥驶出,沿菰茨航道进入水域
6	船舶从西墩门大桥驶出,沿西航路进入水域
7	船舶从金塘大桥驶出,沿西航路支线进入水域
8	船舶从嘉兴港驶出,沿嘉兴舟山习惯航路Ⅱ进入水域
9	船舶从鱼山南部作业区驶出,横向穿越水域

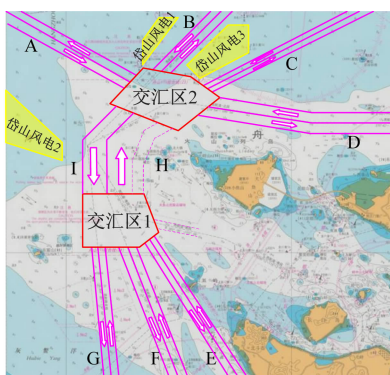


图14 鱼腥脑水域船舶定线制规划

Fig. 14 Ship routing plan for Yuxingnao waters

I、H,分别用于图13c中从进出口5、6、7进出水域的船舶航行。交汇区2主要连接船舶通航分道A、B、C、D、I、H,分别用于图13c中从进出口1、2、3、4、8进入水域的船舶。其中,通航分道I用于连接交汇区1和交汇区2,而考虑到水域内的鱼山南部作业区船舶吨位的特殊性,单独设置航道H用于鱼山作业区2万吨级及以上重载船舶出港航行。

5 结束语

针对水域船舶交通态势复杂、现有航路优化方法偏主观的问题,设计并实现了复杂交汇水域船舶航路优化方法。从船舶轨迹数据挖掘、船舶航路网提取等方面对水域船舶交通特性表征进行研究。并从船舶航路网中抽取船舶交通网络结构,进而提出通过交通网络社区划分和合并航路交汇点梳理船舶交通流的船舶航路优化方法。实例结果表明:采用

航路优化方法后,水域在复杂度和船舶碰撞风险都有明显下降,交通态势逐渐明晰。研究成果不仅可为水域船舶交通组织和船舶定线制设计提供理论和技术支持,在实际应用中亦可减轻主管部门水域监管压力。

参考文献

- [1] 杨帆,王健宇,杨柯,等.基于Memetic混合算法的桥区复杂水域船舶航路规划[J].上海海事大学学报,2018,39(2):7-11.
YANG F, WANG J Y, YANG K, et al. Ship route planning in complex multi-bridge waters based on Memetic hybrid algorithm [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2018, 39(2): 7-11. (In Chinese)
- [2] 乔林.罗源湾附近水域船舶定线制规划及评价研究[D].大连:大连海事大学,2018.
QIAO L. Research on the planning and appraise of the schemes to near Luoyuan Bay Ship's routing [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2018. (In Chinese)
- [3] PIETRZYKOWSKI Z, WOLEJSZA P, MAGAJ J. Navigators' behavior in traffic separation scheme [J]. TransNav the International Journal on Marine Navigation & Safety of Sea Transportation, 2015, 9(1): 121-126.
- [4] PARK L S, PARK J, SHIN D, et al. Application of potential assessment of risk (PARK) model in Korea waterways [J]. Journal of International Maritime Safety, Environmental Affairs, and Shipping, 2017, 1(1): 1-10.
- [5] JENSENT K, HANSEN M G, LEHN-SCHIOLER T, et al. Free flow-efficiency of a one-way traffic lane between two pylons [J]. Journal of Navigation, 2013, 66(6): 941-951.
- [6] 胡昕源,谢磊,常吉亮,等.改进QuickBundles算法在船舶轨迹聚类中的应用[J].中国航海,2023,46(3): 145-152.
HU X Y, XIE L, CHANG J L, et al. Application of improved QuickBundles algorithm in ship trajectory clustering [J]. China Navigation, 2023, 46(3): 145-152. (In Chinese)
- [7] ZHANG Y, SHI G. Trajectory similarity measure design for ship trajectory clustering [C] // 2021 IEEE 6th International Conference on , Big Data Analytics (ICBDA). New York: IEEE, 2021: 181-187.
- [8] WANG L, CHEN P, CHEN L, et al. Ship AIS trajectory clustering: an HDBSCAN-based approach [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(6): 1-20.
- [9] 卢俊璋,杨星,刘克中,等.复杂交汇水域船舶航路网提取方法研究[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2024,48(5):1017-1022.

- 2213-2228.
- [9] BASSAM A M, PHILLIPS A B, TURNOCK S R, et al. Development of a multi-scheme energy management strategy for a hybrid fuel cell driven passenger ship[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(1): 623-635.
- [10] 张泽辉,陈辉,高海波,等. 基于实时小波变换的燃料电池混合动力船舶能量管理策略[J]. 中国舰船研究,2020,15(2):127-136.
- ZHANG Z H, CHEN H, GAO H B, et al. Energy management strategies for fuel cell hybrid ships based on real-time wavelet transform [J]. Chinese Journal of Ship Research,2020,15(2):127-136. (in Chinese)
- [11] 洪志湖,李奇,陈维荣. 基于 PMP 的机车用燃料电池混合动力系统能量管理策略[J]. 中国电机工程学报,2019,39(13): 3867-3879.
- HONG Z H, LI Q, CHEN W R. An energy management strategy based on PMP for the fuel cell hybrid system for locomotive [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(13):3867-3879. (in Chinese)
- [12] NGUYEN B H, VO-DUY T, TA M C, et al. Optimal energy management of hybrid storage systems using an alternative approach of Pontryagin's minimum principle [J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(4): 2224-2237.
- [13] 张泽辉. 混合动力船舶复合电源能量管理策略及容量配置研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2020.
- ZHANG Z H. Study on sizing and energy management strategy of hybrid energy storage system for hybrid ship [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2020. (in Chinese)
- [14] HAN J G, CHARPENTIER J F, TANG T H. An energy management system of a fuel cell/battery hybrid boat [J]. Energies, 2014, 7(5): 2799-2820.
- [15] ABEYWARDANA D B W, HREDZAK B, AGELIDIS V G, et al. Supercapacitor sizing method for energy-controlled filter-based hybrid energy storage systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 32(2): 1626-1637.

(上接第 72 页)

- LU J Z, YANG X, LIU K Z, et al. Research on the extraction method of ship route network in complex intersecting waters[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2024,48(5):1017-1022.
- [10] 曹金鑫,许伟忠,金弟,等. 复杂网络社团发现综述[J]. 计算机科学,2023,50(增刊2):402-412.
- CAO J X, XU W Z, JIN D, et al. Survey of community discovery in complex networks[J]. Computer Science, 2023,50(Suppl. 2):402-412. (In Chinese)
- [11] 张书博,任淑霞,吴涛. 结合概率矩阵的改进谱聚类社区发现算法[J]. 西安电子科技大学学报,2019,46(3):167-172.
- ZHANG S B, REN S X, WU T. Improved spectral clustering community detection algorithm by combining the probability matrix [J]. Journal of Xi'an Electronic Science and Technology University, 2019, 46(3):167-172. (In Chinese)
- [12] XIE W B, LIU Z, DAS D, et al. Scalable clustering by aggregating representatives in hierarchical groups [J]. Pattern Recognition, 2023, 136: 109230.
- [13] 蒋云,杨文东. 改进 Louvain 算法的多层航线网络社区划分[J]. 北京交通大学学报,2022,46(2):89-97.
- JIANG Y, YANG W D. Community detection of multi-layer air transport network with improved Louvain algorithm[J]. Journal of Beijing Jiao tong University, 2022,46(2):89-97. (In Chinese)
- [14] 余庆,刘克中,袁志涛,等. 海上风电水域船舶航行风险量化研究现状综述[J]. 中国航海,2022,45(3): 21-25.
- YU Q, LIU K Z, YUAN Z T, et al. A survey of quantitative risk evaluation for ships navigating in area of offshore wind farm [J]. China of Navigation, 2022, 45(3):21-25. (In Chinese)
- [15] WEN X, TU C, WU M, et al. Fast ranking nodes importance in complex networks based on LS-SVM method [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,2018,506:11-23.
- [16] 周正. 基于数据驱动的内河水域航路规划算法研究[D]. 吉林:吉林大学,2024.
- ZHOU Z. Research on data-driven route planning algorithm for inland waters [D]. Jilin: Jilin University, 2024. (In Chinese)
- [17] 张锡海. 曹妃甸港及其附近水域航路优研究[D]. 大连:大连海事大学,2007.
- ZHANG X H. Studies on optimization of sea-route in Caofeidian port and nearby waters [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007. (In Chinese)
- [18] 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 and Engineering), 2022, 46(2):356-360. (In Chinese)