

考虑客货船“双峰”会遇的内河受限水域 船舶横越方法

翁金贤¹, 段浩然¹, 廖诗管², 许墨³, 倪宝龙³

(1. 上海海事大学 交通运输学院, 上海 201306;

2. 深圳职业技术大学 管理学院, 广东 深圳 518055;

3. 中华人民共和国黄浦海事局, 上海 200023)

摘要:旅游业复苏使兼具旅游与航运功能的受限水域航道客货船舶交叉混行局面愈发频繁,传统客运船舶逐排连续横越航道造成水域通航风险激增,已无法适应复杂通航环境。考虑客运船发船高峰期和货运船乘潮期“双峰”叠加的复杂局面,在传统横越方法的基础上提出逐排跟船横越方法。基于交通冲突技术和动态船舶领域理论,分别构建大角度和小角度转向逐排跟船横越模型。利用黄浦江繁忙水域掉头区的船舶自动识别系统(AIS)数据,对客运船横越方法进行仿真验证。研究表明:当船舶间保持最紧迫距离时,客运船采用大角度和小角度转向逐排跟船横越方法可改善采用传统方法无法安全开航的情况;在不同船舶交通流密度下,相比大角度转向逐排跟船横越方法,采取小角度转向逐排跟船横越方法最大可提升客运船50%的横越效率。所提出的逐排跟船横越方法在保证通航安全的前提下可大幅提升客货船交叉通航效率,为海事管理部门协同提升内河受限水域航道通行效率和安全提供方法参考。

关键词:水路运输;船舶横越;动态船舶领域;交通冲突技术;AIS数据

中图分类号:U692.3+2

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.04.004

Ship crossing operation methods in restricted inland waters considering "double peaks" encounter of passenger and cargo ships

WENG Jinxian¹, DUAN Haoran¹, LIAO Shiguan², XU Mo³, NI Baolong³

(1. College of Transport and Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China;

2. School of Management, Shenzhen Polytechnic University, Shenzhen 518055, China;

3. Huangpu Maritime Safety Administration of the People's Republic of China, Shanghai 200023, China)

Abstract: The continuous increase in crisscross navigation between passenger and cargo ships poses a significant threat to navigation safety in restricted inland waters. Traditional row-by-row crossing operation methods are inadequate for ships navigating such complex environments, leading to a surge in navigational risks. This study proposes an enhanced row-by-row following ship crossing operation method, building upon traditional approaches to address the dual peak periods of passenger ship departures and tidal effects. Based on traffic conflict technology and dynamic ship domain theory, large-angle and small-angle row-by-row following ship crossing models were developed. The advantages of the proposed methods are validated using actual Automatic Identification System (AIS) data collected from the turnaround area of the busy Huangpu River. Results indicate that both the large-angle and small-angle row-by-row crossing methods effectively mitigate

收稿日期:2024-06-25

基金项目:国家自然科学基金(52372303);广东省基础与应用基础研究基金(2022A1515110776);上海市优秀学术/技术带头人项目(23XD1421500)资助

第一作者:翁金贤(1982—),男,教授,博士,研究方向为水陆交通安全规划与管理。E-mail:jxweng@shmtu.edu.cn

通信作者:廖诗管(1994—),男,讲师,博士,研究方向为航道安全规划与管理。E-mail:sgliao0113@szpu.edu.cn

引用格式:翁金贤,段浩然,廖诗管,等.考虑客货船“双峰”会遇的内河受限水域船舶横越方法[J].中国航海,2025,48(4):26-35.

WENG J X, DUAN H R, LIAO S G, et al. Ship crossing operation methods in restricted inland waters considering "double peaks" encounter of passenger and cargo ships[J]. Navigation of China, 2025, 48(4): 26-35. (in Chinese)

the safety limitations of traditional methods. Furthermore, the small-angle row-by-row crossing method improves passenger ship crossing efficiency by up to 50% compared to the large-angle method. The proposed row-by-row following vessel crossing operation method demonstrates significant potential for enhancing navigation efficiency and safety in restricted inland waterways, particularly in congested turnaround areas.

Key words: waterway transportation; ship crossing; dynamic ship domain; traffic conflict technique; AIS data

随着全国旅游市场复苏,具有旅游功能的内河水运客运迎来了新一轮增长。以黄浦江水上客运为例,2023年1月—7月,黄浦海事局辖区游览船舶人次达1.2万艘次,载客数约194万人次,基本恢复至新冠疫情防控前同期峰值水平。目前,黄浦江过境货运船舶存在明显的“逐潮性”,其与游览船营运高峰期形成“双峰”叠加现象^[1]。内河受限水域一般是指位于内陆、受地形或建筑物等限制的水域,通常包括河流、湖泊和运河等,因其水面相对狭窄,航行条件复杂以及航道资源受限的特征,相关的航行规则与操作规程也会更加严格^[2]。当前,《上海黄浦江通航安全管理规定》存在一定的滞后性,其部分条款难以全面应对当今复杂多变的通航环境。例如,在繁忙的内河受限水域中,客运船采用传统逐排连续横越的方式横越航道,易与货运船舶形成紧迫的会遇局面,使通航水域风险激增。此外,在“双峰”叠加局面下,为保障航道货运功能往往会造成客运船停运的后果,从而导致游客滞留产生安全隐患。因此,为协调内河受限水域旅游与货运功能,提升船舶通航安全和运营效率,亟须提出一种新的船舶横越方法以弥补传统逐排连续横越方法的不足,进而为海事相关管理部门制定政策提供理论支持。

目前,学者们已对船舶横越行为及方法开展了大量研究。张金奋等^[3]根据渡船航行轨迹识别会遇场景,并利用模糊综合评价法构建船舶碰撞风险评价模型以合理规划船舶横越路径。在受限水域场景下,程志友等^[4]基于交通冲突技术构建长江干线客渡船横越模型。刘成勇等^[5]基于遗传算法对客渡船横越航道的路径进行优化。KOZYCHENKO等^[6]提出数值优化算法并基于C++构建仿真框架构建船舶非线性动态模型,用于测试船舶在危险海域横越行为下的避碰决策。MA等^[7]提出一种基于速度障碍的内河渡轮区域碰撞预警算法,用于确认碰撞风险并规划避碰路径。张赫等^[8]考虑从船型与会遇角度设计一种计算船舶交叉混行时可穿越间隙的方法。窦伟等^[9]定量分析长江江苏段船舶横越航道过程中与顺航道行驶船舶存在碰撞危险的角度以及避让的最佳时机。CHENG等^[10]基于模糊逻辑方法和交通冲突技术,提出受约束横越场景下船舶连续穿越航道的碰撞风险评价方法。在无约束场

景下,SHI等^[11]考虑船舶交叉角和航行环境的影响,提出多船会遇局面的船舶横越方法。为深入理解船舶在不同等级水域下的会遇情况,ZHANG等^[12]从时空角度系统地分析2艘船在交会时的相对运动。胡元伦等^[13]根据船舶横越行为的难易程度提出对应的操纵方案。刘钊等^[14]提出一种考虑时空紧迫度的船舶碰撞风险计算方法,该方法能在复杂受限水域中反映船舶碰撞风险的变化,从而为船舶在横越过程中的避碰决策提供参考。然而,现有研究通常采用传统逐排连续横越方法,或以通航效率为目标,或侧重于通航安全,鲜少考虑效率与安全协同问题。综上,传统逐排连续横越方法无法适用于兼顾旅游与货运功能的内河受限水域。

本文采用动态船舶领域刻画船舶通航安全距离,根据交通冲突技术构建大角度逐排跟船横越和小角度逐排跟船横越2种船舶横越模型,以提升内河受限水域船舶横越效率,降低客货船舶交叉混行风险,从而提出兼顾船舶通航安全与运营效率的有效策略。最后,以黄浦江十六铺受限水域为例,进行仿真验证。

1 船舶横越方法

1) 考虑客运船发船高峰期和货运船乘潮期,以传统逐排连续横越方法为基础,提出逐排跟船横越方法以适应复杂的通航环境。

2) 考虑船舶类型、会遇态势和相对速度等多因素构建动态船舶领域以刻画船舶间安全距离。

3) 根据交通冲突技术构建船舶逐排跟船横越模型。

基于交通冲突技术的船舶横越模型构建见图1。

1.1 船舶横越基本原理

客运船舶包括客渡船、游览船、邮轮和游艇等载人运输船舶。传统逐排连续横越轨迹为一段式横越,即通过一次判断是否满足横越所有航道的条件见图2a。

1) 若满足穿越条件,则保持较大航向角连续穿越航道;若不满足穿越条件,则在待发区或安全水域滞航等待,直至存在穿越条件。为快速通航,航向角通常近似为直角。

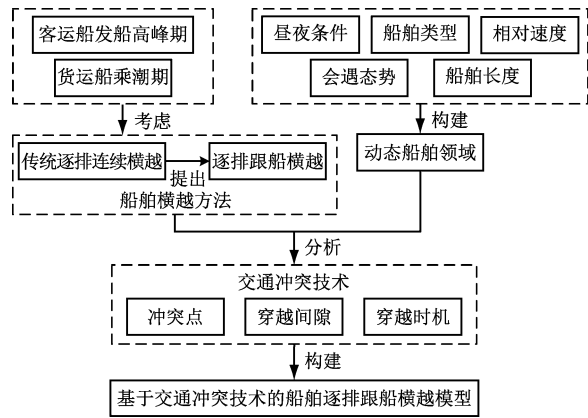
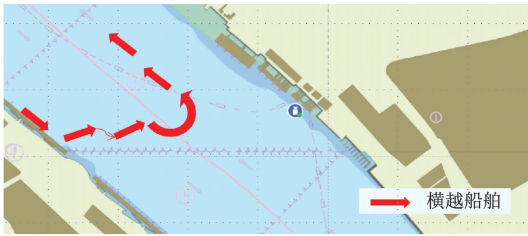


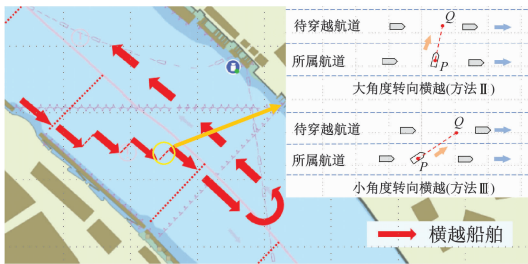
图1 基于交通冲突技术的船舶横越模型构建

Fig. 1 Ship crossing model construction based on traffic conflict technology

2) 本文提出逐排跟船横越方法的表述与之对应见图2b, 逐排跟船横越轨迹为分段式横越, 即穿越一个航道后继续判断下一个航道的穿越可能性。若不满足穿越条件, 则进行跟船航行, 直至满足安全通航条件后进行穿越。根据客运船横越航道时的转向角, 逐排跟船横越方法可分为大角度转向逐排跟船横越方法和小角度转向逐排跟船横越方法。



(a) 传统逐排连续横越方法



(b) 逐排跟船横越方法

图2 客运船横越方法示意

Fig. 2 Schematic diagram of passenger ship crossing method

根据船舶横越航道的基本原理对3种横越方法进一步研究, 以方法I、方法II、方法III分别表示传统逐排连续横越方法、大角度转向逐排跟船横越方法和小角度转向逐排跟船横越方法。

1.2 动态船舶领域

船舶领域是指为保障本船航行安全, 禁止其他船舶或障碍物进入本船周围一定范围的水域^[15]。考虑船舶自身条件和外部因素影响, 船舶领域的大小并非定值, 而是动态变化的。为便于内河船舶通

航安全间距的计算, 本文采用圆形船舶领域对不同会遇场景下船舶所保持的最小安全距离进行量化分析。

两船会遇场景中, 以 t 时刻船舶 i 位置点 (x_i, y_i) 与船舶 j 位置点 (x_j, y_j) 的连线与相对速度 \vec{v}_{ij} 之间的夹角 α_{ij} 作为判定两船之间会遇态势的依据, 见图3。根据 WENG 等^[16] 的研究, 两船会遇态势 S 可划分为4种, 分别用1、2、3、4表示追越 (α_{ij} 处在 $(0^\circ, 22.5^\circ)$ 或 $(337.5^\circ, 360^\circ)$)、小角度交叉会遇 (α_{ij} 在 $(22.5^\circ, 67.5^\circ)$ 或 $(292.5^\circ, 337.5^\circ)$)、大角度交叉会遇 (α_{ij} 在 $(67.5^\circ, 157.5^\circ)$ 或 $(202.5^\circ, 292.5^\circ)$) 和对遇 (α_{ij} 处在 $(157.5^\circ, 202.5^\circ)$)。考虑航速、船型、船长和昼夜条件的影响, 不同会遇态势的动态船舶领域半径为

$$R_r = (\beta_0 + \beta_1 S_0 + \beta_2 S_B + \beta_3 T_D + \beta_4 v_N + \beta_5 v_M) l_{ij} \quad (1)$$

式(1)中: R_r 为会遇态势 S 下的船舶领域半径; l_{ij} 为船舶 i 和船舶 j 的平均长度^[17]; β_0 为常数; β_1 、 β_2 、 β_3 、 β_4 和 β_5 为回归系数, 在不同会遇态势下, 其数值也会有所变化; T_D 为昼夜情况; v_N 和 v_M 分别为两船相对速度较小和中等的情况。

$$S_0 = \begin{cases} 1, & \text{船舶 } i \text{ 或船舶 } j \text{ 为油船} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$S_B = \begin{cases} 1, & \text{船舶 } i \text{ 或船舶 } j \text{ 为货船} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

$$T_D = \begin{cases} 1, & \text{通航时间为白天} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$v_N = \begin{cases} \Gamma = 1, & |\vec{v}_{ij}| \in (0, 1) \\ \Gamma = 2, & |\vec{v}_{ij}| \in (0, 12) \\ \Gamma = 3, & |\vec{v}_{ij}| \in (0, 8) \\ \Gamma = 4, & |\vec{v}_{ij}| \in (0, 15) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

$$v_M = \begin{cases} \Gamma = 1, & |\vec{v}_{ij}| \in (1, 3) \\ \Gamma = 2, & |\vec{v}_{ij}| \in (12, 20) \\ \Gamma = 3, & |\vec{v}_{ij}| \in (8, 15) \\ \Gamma = 4, & |\vec{v}_{ij}| \in (15, 25) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

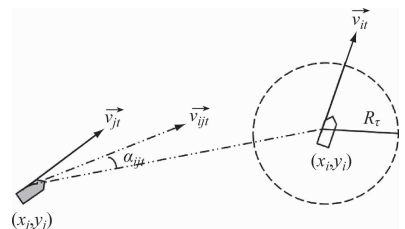


图3 船舶会遇态势

Fig. 3 Ship encounter dynamics

1.3 基于交通冲突技术的船舶逐排跟船横越模型

交通冲突技术是一种广泛应用于交通安全评估的非事故指标,常与各种理论相结合,用于不同研究场景的安全分析^[18]。水上交通冲突是指在可观测的条件下,由于他船在时间和空间上逼近导致某船无法采取相应的避险反应,存在发生碰撞风险的现象。冲突点是指由于船舶相互影响和干扰而导致交通冲突的位置。在繁忙的通航水域中,横越船舶通航过程中形成的冲突点构成横越船舶的通航轨迹,通过分析各个冲突点与前后船舶的间隙是否满足当前会遇态势下的最小安全距离来决策横越船舶的行为。由于船舶间的会遇态势受横越方法的直接影

响,因此,本文基于交通冲突技术刻画不同横越方法下的船舶横越运动轨迹,从而判断不同横越方法的通航效率。

双向通航受限水域船舶逐排横越示意图4。图4中:以双向通航受限水域为例,顺航道船舶(即过境船)以 v_1 匀速沿航道中心线航行,每条航道宽为 W 。横越船舶(即客运船)由待发区内 O 点发船,以速度 v_0 横越航道。首先,客运船需在 O 点处观察第1航道的船舶流状况,判断安全方可通航。然后,横越至第1航道处的冲突点,经后续航道上的冲突点的决策判断形成客运船的通航轨迹,本文在动态船舶领域同时考虑了过境船和客运船。

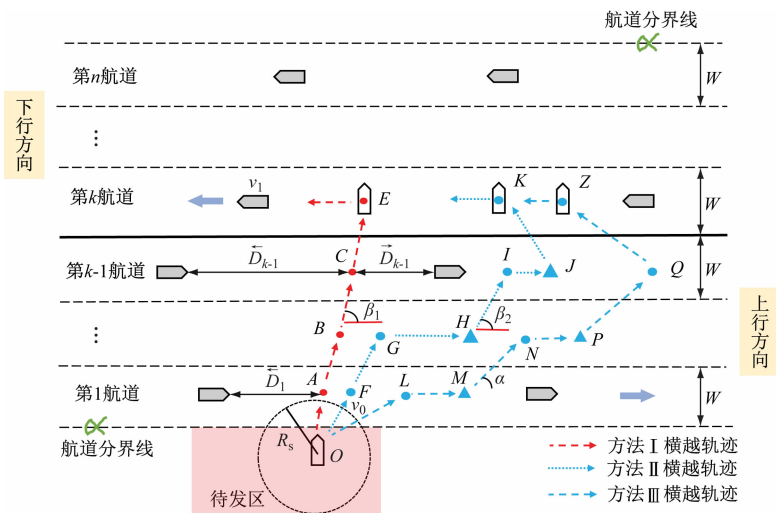


图4 双向通航受限水域船舶逐排横越示意

Fig.4 Schematic diagram of the row-by-row crossing of ships in restricted bi-directional navigable waters

方法 I、方法 II 和方法 III 的船舶横越轨迹可依据冲突点分别描述为: $O-A-B-C-E$ 、 $O-F-G-H-I-J-K$ 和 $O-L-M-N-P-Q-Z$ 。此外,方法 I (航向角为 β_1) 和方法 II (航向角为 β_2) 的船舶领域半径表示为大角度交叉会遇下的船舶领域半径 R_3 。方法 III (航向角为 α) 的船舶领域半径表示为小角度交叉会遇下的船舶领域半径 R_2 ,跟船航行过程中的船舶领域半径表示为追越会遇下的船舶领域半径 R_1 。

船舶在现实内河环境中横越航道的过程十分复杂,为简化横越模型,进行如下假设:

1) 假设船舶在采取某一种方法横越的整个过程中,其与每个航道上船舶流保持的会遇态势均不变。

2) 考虑到具备内河横越需求的船舶,大多配备有侧推装置或者其自身回旋性能较好,暂不考虑船舶转向的时间。

待穿越航道满足穿越条件。考虑到客运船应主动避让过境船,客运船在进行穿越过程中应与正常

通航的过境船保持一定的安全距离。当待穿越航道上、下行方向的船舶离冲突点的距离(\bar{D} , \bar{D})大于当前会遇态势下所需最小安全距离时, \bar{D} , \bar{D} 则转化为距离冲突点两端的穿越间隙。3种横越方法的船舶横越判断条件一致,以方法 I 为例,客运船从上行方向第 $k-2$ 航道穿越至第 $k-1$ 航道上冲突点 C 的穿越间隙应满足:

$$\begin{cases} \bar{D}_{k-1} - v_1 t_h \geq R_T \\ \bar{D}_{k-1} + v_1 t_h \geq R_T \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: \bar{D}_{k-1} 和 \bar{D}_{k-1} 分别为第 $k-1$ 航道上上行和下行方向的过境船离冲突点的距离。

从第 $k-1$ 航道穿越至对向第 k 航道上冲突点 E 的穿越间隙应满足:

$$\begin{cases} \bar{D}_k + v_1 t_h \geq R_T \\ \bar{D}_k - v_1 t_h \geq R_T \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: t_h 为横越一个航道的的时间,其计算公式为

$$t_h = \frac{W}{v_0 \sin \theta} \quad (9)$$

式(9)中: θ 为客运船横越航道时的航向角。

待穿越航道存在穿越间隙的时刻为穿越时机,上行和下行方向的航道穿越时机区间长分别为

$$\min \left\{ \frac{\bar{D}_{k-1} - v_1 t_h - R_S}{v_0}, \frac{\bar{D}_{k-1} + v_1 t_h - R_T}{v_0} \right\} \quad (10)$$

$$\min \left\{ \frac{\bar{D}_k + v_1 t_h - R_S}{v_0}, \frac{\bar{D}_k - v_1 t_h - R_T}{v_0} \right\} \quad (11)$$

通过设置客运船穿越至对向航道冲突点 E 、 K 、 Z 时与对向船舶保持相对安全的船舶间距,且考虑到具备内河横越需求的船舶大多配备有侧推装置或

者其自身回旋性能较好的实际情况,可认为客运船的操纵性能可满足回正航向的时间需求。因此,当客运船穿越至冲突点 E 、 K 、 Z 时,表明客运船已横越完成。

待穿越航道不满足穿越条件。若客运船处在待发区,则在点 O 处滞航等待;特别地,当船舶逐排跟船横越时,客运船跟船航行时与过境船形成追越会遇态势。为提高船舶逐排跟船横越效率,客运船跟船横越航道操作见图5,图5中: v_{\min} 和 v_{\max} 分别为受限水域船舶通航所要求的最小和最大航速。船舶逐排跟船横越方法下,客运船发现待穿越航道存在穿越间隙的位置点如图4三角形标记所示。

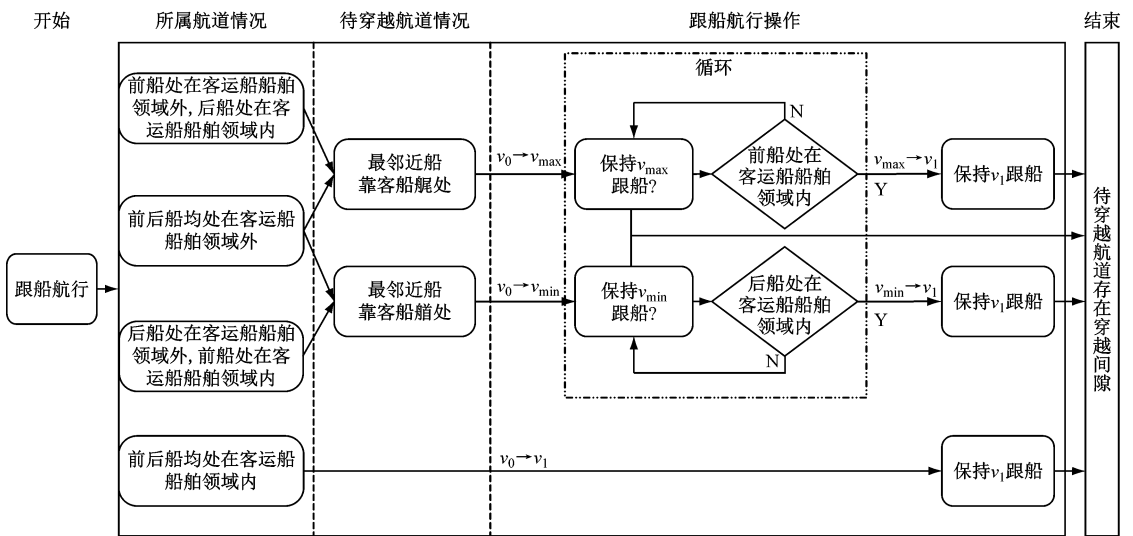


图5 客运船跟船横越航道操作

Fig. 5 Passenger ship following ship crossing operation

2 黄浦江通航环境分析

2.1 黄浦江十六铺掉头区通航环境

以黄浦江高峰期最为繁忙的十六铺掉头区所在水域见图6,该水域实行双向4航道通航。十六铺码头附近水域为典型的内河受限水域,水面狭窄,内河两岸最窄处不足300 m,并且周围有许多重要的港口设施以及码头,船舶靠离泊活动频繁,使该水域航行条件复杂。当游览营运高峰期与逐潮而入的过境船形成“双峰”叠加现象时,受限于航道资源易造成船舶交会紧张局面,通航风险激增。十六铺码头坐落于浦西一侧,码头附近设有掉头区,该区域可供游览船、游艇等客运船进行掉头操作。以掉头区上行方向双航道和下行方向靠航道中心的单航道水域为研究对象,掉头区可通航宽度为280 m,单航道宽度为70 m,长为556 m。

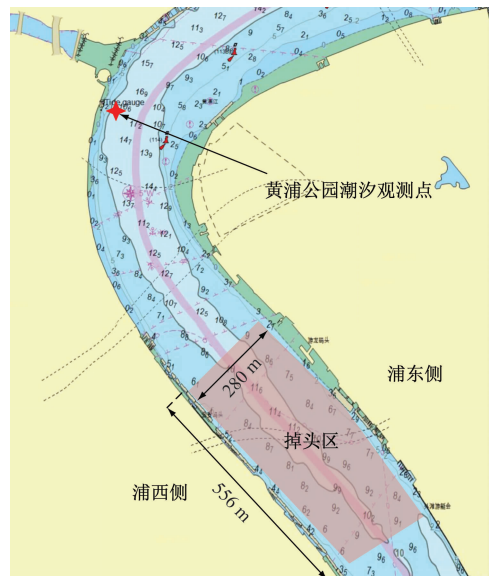


图6 十六铺掉头区所在水域

Fig. 6 The waters of the Shiliupu Turnaround Area

2.1.1 游览船信息

根据黄浦海事局提供的游览船运营数据统计,游览船现有 36 艘,最小船长为 27.90 m,最大船长为 62.30 m,平均船长为 46.08 m。考虑大型游览船与小型游览船操纵性能与船舶领域不同,以平均值为基准将游览船分为大型游览船(船长 ≥ 46.08 m,共 19 艘)与小型游览船(船长 < 46.08 m,共 17 艘)。大型游览船平均船长取 55 m,小型游览船平均船长取 36 m。

2.1.2 过境船信息

根据游览船公司发船情况得知每日的发船班次主要集中于游览高峰时段(17:00—22:00)。收集 2023 年 4 月 29 日—5 月 7 日的游览高峰时段 AIS 数据,剔除异常值后共有 102 292 条有效数据。十六铺掉头区船舶到达艘次统计结果见图 7,船舶到达掉头区情况在部分时刻超过 120 艘/h,最高到达艘次为 134 艘/h,游览高峰时段平均到达艘次为 82 艘/h。

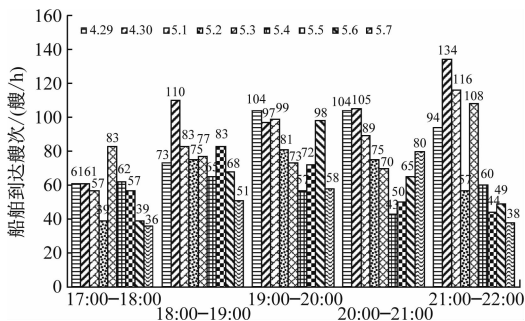


图 7 十六铺掉头区船舶到达艘次统计结果

Fig. 7 Statistics on arrival of ship in Shiliupu Turnaround Area

根据黄浦公园潮位站观测点(如图 6 所示)数据可知:2023 年 4 月 29 日—5 月 2 日的低潮时间点在 15:50—19:30,高潮时间点在 21:50—23:50。涨潮时段与游览高峰时段存在重叠,大量小型货运船乘潮入江,部分大型货运船在满足水深条件后同样乘潮入江,客货船“双峰”叠加现象显著。因此,以 2023 年 4 月 29 日—5 月 2 日的 17:00—22:00 作为“双峰”叠加时段进行后续的研究。

“双峰”叠加时段下,统计通航过境船共 1 208 艘,船舶长度 13 159 m。根据初秀民等^[19]提出的内河船舶大小分类标准,将所收集的数据进行分类见表 1,5 类过境船的平均船长分别为 36 m、47 m、60 m、102 m 和 128 m,其中,50 < l_j ≤ 90 的船舶占比最高,达到 47.6%。

2.1.3 船舶类型及航速信息

进一步对“双峰”叠加时段下的船舶类型以及航速进行统计。经过掉头区的船舶大部分为货船,

表 1 黄浦江过境船分类

Tab. 1 Huangpu River transit ships classification

船长/m	数量/艘	平均船长/m	船舶占比/%
$l_j \leq 40$	184	36.10	15.23
$40 < l_j \leq 50$	358	47.01	29.63
$50 < l_j \leq 90$	575	60.66	47.60
$90 < l_j \leq 115$	49	102.10	4.06
$115 < l_j$	42	128.48	3.48

占 86.89%, 客运船仅占 2.15% 见图 8a, 大部分船舶在掉头区以 4~8 kn 的航速航行见图 8b。具体而言,以 4~6 kn 航速航行的船舶占 43%,以 6~8 kn 航速航行的船舶占 41%。为满足《上海黄浦江通航安全管理规定》限速 8 kn 的安全通航规定,剔除掉航速超过 8 kn 以及航速低于 1 kn 的数据后,过境船平均航速为 5.82 kn,游览船通航平均航速为 4.90 kn。

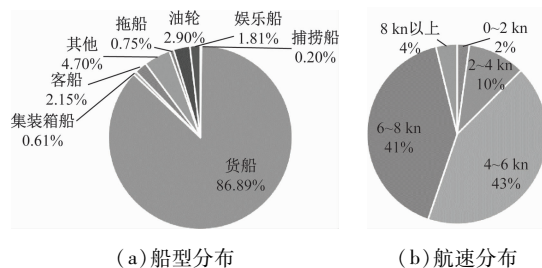


图 8 掉头区船舶类型及航速分布情况

Fig. 8 Distribution of ship types and speeds in the turnaround area

2.2 游览船横越航道情况

根据第 1.3 节所述,游览船采取方法 I 与方法 II 横越航道的会遇态势定义为大角度交叉会遇,游览船采取方法 III 横越航道的会遇态势定义为小角度交叉会遇,跟船航行下的会遇态势定义为追越。根据 WENG 等^[16]的研究成果,结合海事部门管理人员和专家经验知识,得到游览船与过境船不同会遇态势下游览船应保持的船舶领域半径见表 2。

表 2 不同会遇态势下游览船应保持的船舶领域半径

Tab. 2 Radius of the ship's domain to be maintained by excursion ships in different encounter situations

会遇态势	船舶领域半径	
	相对速度 < 1 kn	相对速度 ≥ 1 kn
追越	1.58l _{ij}	1.69l _{ij}
	相对速度 < 8 kn	相对速度 ≥ 8 kn
大角度交叉会遇	1.41l _{ij}	/
	相对速度 < 12 kn	相对速度 ≥ 12 kn
小角度交叉会遇	1.02l _{ij}	/

注:/为无值。

3 仿真设计与分析

为评价3种船舶横越方法下船舶横越航道的效

率,设计仿真程序计算游览船完成横越目的艘数和平均完成横越目的的时间,船舶横越方法效率仿真验证流程见图9。

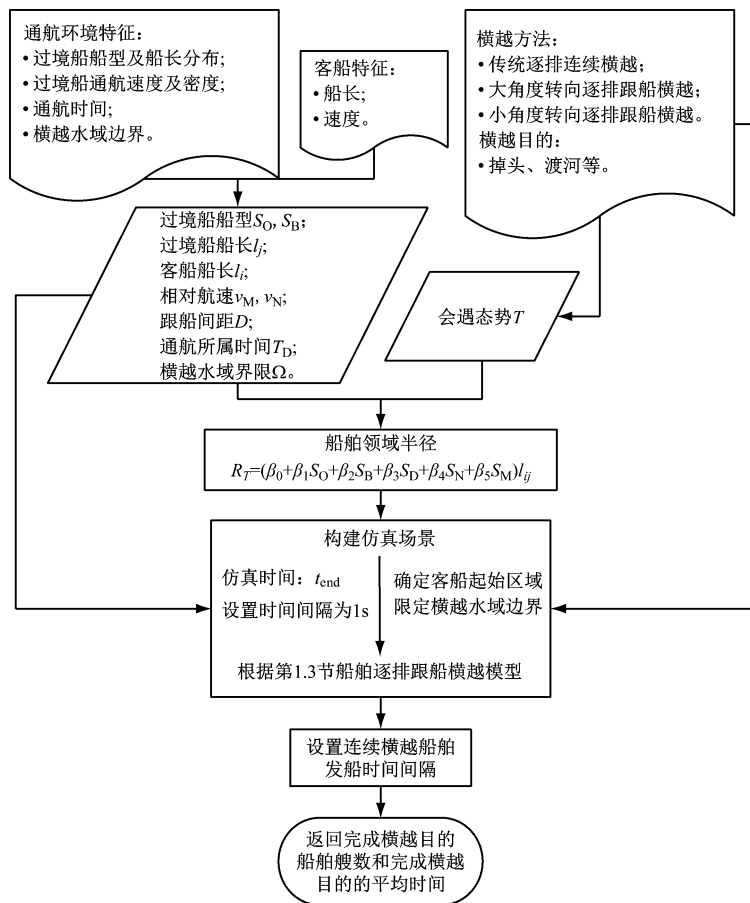


图9 船舶横越方法效率仿真验证流程

Fig. 9 Simulation validation process for the efficiency of ship crossing method

1) 收集过境船舶流信息以及横越水域的边界范围以搭建基本通航场景,收集横越船舶特征、横越方法和横越目的形成通航主体对象。

2) 提取特征数据并设置仿真初始化输入参数。

3) 根据第1.3节船舶逐排跟船横越模型下的横越判定条件进行运作。

4) 根据连续发船时间间隔,输出仿真时间内3种横越方法下船舶完成横越目的的艘数和平均完成横越目的的时间。

3.1 参数设置

3.1.1 航道交通流设置

为模拟十六铺掉头区“双峰”叠加下船舶交通流,根据文献[19]通过能力的计算方法,以第2.1节所述过境船舶船长和航速计算得出,当设置船舶跟船间距 $D_j = 3l_j$ (即过境船按自身船长的3倍作为跟船间距)时,船舶交通流量达到“双峰”叠加下最高船舶到达艘次134艘/h。此外,分别设置船舶间距

$D_j = 4l_j$ 和 $D_j = 5l_j$ 的不同交通流量以验证所提出方法的有效性。过境船舶流速取“双峰”叠加下的平均航速 $v_1 = 5.82$ kn。设置游览船初始航速为 $v_0 = 4.9$ kn,在跟船横越航道操作下,设置 $v_{\min} = 1.0$ kn, $v_{\max} = 8.0$ kn。

3.1.2 过境船类型设置

模型中随机生成的过境船舶按照船长分为5类如表1所示,每类船舶的生成概率根据历史过境船舶统计结果确定分别为15%、39%、48%、4%和3%。

3.1.3 游览船类型设置

为表征不同游览船穿越航道能力的差异,分别研究小型游览船(船长36 m)和大型游览船(船长55 m)在仿真场景中的横越情况。

3.1.4 游览船通航设置

方法I和方法II下游览船穿越航道时:取 $R_3 = 1.41l_i$;方法III下游览船穿越航道时:取 $R_2 = 1.02l_i$;

方法 II 与方法 III 下游览船跟船航行时,当相对速度小于 1 kn 时,取 $R_1 = 1.58l_i$;当相对速度大于等于 1 kn 时,取 $R_1 = 1.69l_i$ 。根据《上海黄浦江通航安全管理规定》文件表明,游览船采用方法 I 时其航向角基本保持在约 90° 区间,因此,设置 $\beta_1 = 90^\circ$ 。此外,为和方法 I 进行比较,体现所提出的方法 II 逐排行为的有效性,设置 $\beta_2 = 90^\circ$ 。为使方法 III 应对最紧迫船舶流,航向角不宜过小,取该会遇态势下的最大航向角,设置 $\alpha = 67.5^\circ$ 。

3.2 仿真试验

由于 Python 语言简洁并且具有丰富的第三方库,其仿真可不依赖例如 ARENA、MATLAB 等软件中模块化的工具,灵活程度更高,调试也更加便捷^[20]。因此,本文选用 Python 语言构建仿真平台,将航道、过境船和游览船对象化,并通过类属性与类方法建立 3 者的联系,使仿真平台运作。

为研究 3 种交通流量下横越方法的通航效率,现设计不同通航特征的组合方案。针对 3 种横越方法(方法 I、方法 II 和方法 III,编号分别为 I、II 和 III)、游览船的 2 种船型大小(36 m 和 55 m,编号分

别为 1 和 2)以及过境船舶流的 3 种跟船间距 ($D_j = 3l_j, D_j = 4l_j, D_j = 5l_j$,编号分别为 1,2,3),仿真试验共计 18 种方案。仿真试验区域设置为 3 个航道,其中,第 1、第 2 航道为同向航道,第 3 航道与第 1、第 2 航道航向相反,单航道宽 70 m。仿真场景全长 1 112 m,设置游览船待发点位于仿真场景水平中心且靠近第 1 航道边界下沿 35 m 处。设置供游览船横越并掉头的掉头区长为 556 m,宽为 210 m,规定游览船越过掉头区范围则表示横越失败。仿真时间为 4 200 s。其中,前 600 s 初始化过境船舶流,后 3 600 s 进行 18 种试验方案仿真测试。根据现有游览船运营公司高峰期发船情况,十六铺码头高峰期游览船最小连续发船时间间隔为 300 s,平均时间间隔为 450 s,分别以 2 种时间间隔连续发船,根据图 9 仿真验证流程得到各方案下船舶可成功掉头的总艘数和平均完成掉头的时间。

3.3 结果讨论

船舶横越试验结果见表 3。成功掉头艘数反映各个试验方案在 3 600 s 的仿真测试环境中船舶连续横越航道并完成掉头的效率。因此,当成功掉头

表 3 船舶横越试验结果
Tab. 3 Results of ship crossing experiments

编号	成功掉头/(艘数·h ⁻¹) (时间间隔 300 s)	平均掉头时间/s (时间间隔 300 s)	成功掉头/(艘数·h ⁻¹) (时间间隔 450 s)	平均掉头时间/s (时间间隔 450 s)
I. 1. 1	0	/	0	/
I. 1. 2	8	90.88	5	95.00
I. 1. 3	11	98.73	8	95.25
I. 2. 1	0	/	0	/
I. 2. 2	7	102.43	5	109.80
I. 2. 3	10	105.00	7	98.00
II. 1. 1	6	161.33	5	157.20
II. 1. 2	12	160.50	8	166.50
II. 1. 3	12	127.92	8	133.75
II. 2. 1	5	271.00	4	271.00
II. 2. 2	11	151.18	8	158.75
II. 2. 3	12	150.58	8	174.25
III. 1. 1	12	124.67	8	118.50
III. 1. 2	12	112.42	8	112.88
III. 1. 3	12	101.83	8	106.13
III. 2. 1	11	137.73	8	143.25
III. 2. 2	12	127.25	8	131.00
III. 2. 3	12	107.92	8	117.13

注:/为无值。

艘数越多,即可说明该方案下的船舶横越效率越高。在相同横越方法下,同种船型成功掉头艘数以及平均掉头时间与船舶流量总体成反比;在相同横越方法和船舶流量下,小型游览船成功掉头艘数以及平均掉头时间均优于大型游览船,该结果与实际经验相符。当发船时间间隔为 300 s 时,游览船采用方法 II 与方法 III 较方法 I 的横越效率分别提升 37.93%、49.30%。当发船时间间隔为 450 s 时,游览船采用方法 II 与方法 III 较方法 I 的横越效率分别提升 43.90%、52.08%。特别地,研究发现游览船采取方法 I 难以在 3 倍船舶跟船间距下开航,而采取逐排跟船横越方法可在保证安全的前提下成功开航。

针对 2 种船舶逐排跟船横越方法,当发船时间间隔为 300 s 时,游览船采用方法 III 较方法 II 的横越效率提升 18.31%。当发船时间间隔为 450 s 时,游览船采用方法 III 较方法 II 的横越效率提升 14.58%。尤其对于大型游览船在 3 倍船舶跟船间距下,采用方法 III 较方法 II 的横越效率提升约 50%。此外,研究发现方法 III 比方法 II 所需的平均掉头时间更短。这可能是由于小角度转向保持的船舶领域更小,船舶穿越间隙更大,从而使穿越的时机更多,横越过程中跟船航行的时间更短。

4 结束语

为提升客货船交叉混行的内河受限水域的通航效率与安全,本文在传统的逐排连续横越方法基础上,提出大、小角度转向逐排跟船横越方法,采用动态船舶领域刻画船舶通航安全距离,并根据交通冲突技术构建船舶逐排跟船横越模型。以黄浦江十六铺掉头区为案例,对高峰期客运船横越行为进行仿真验证。研究表明:逐排跟船横越方法能有效地提升客运船通航效率,其中,小角度转向逐排跟船横越方法相比大角度转向逐排跟船横越方法的效率提升更高,为协调内河受限水域的旅游与航运功能,根据试验结果给海事相关管理部门提出如下建议:

1) 建议客运船舶横越航道时统一采取小角度转向逐排跟船横越方法。

2) 当船舶流量较大时,如必须发船,建议优先发小船舶班。

3) 建议延长掉头区水域,以缓解因航道资源紧缺,交通流密集通航环境下船舶交叉混行造成的水域拥堵问题。

4) 当处在“双峰”叠加下,建议客运船舶从码头开航直接顺航道航行一段距离后再采取小角度转

向逐排跟船横越方法横越航道。

参 考 文 献

- [1] 翁金贤,廖诗管,付珊珊,等. 考虑游览船运营特征的航道通过能力评价方法[J]. 交通运输系统工程与信息, 2020, 20(5): 199-204.
WENG J X, LIAO S G, FU S S, et al. A capacity estimation approach for waterway traffic considering operational characteristics of cruise ships[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2020, 20(5): 199-204. (in Chinese)
- [2] LIU J X, ZHOU F, LI Z Z, et al. Dynamic ship domain models for capacity analysis of restricted water channels [J]. The Journal of Navigation, 2016, 69 (3): 481-503.
- [3] 张金奋,游斌,蔡明佑,等. AIS 数据驱动下的渡船横越场景识别与碰撞风险建模[J]. 中国航海, 2023, 46(2): 46-59.
ZHANG J F, YOU B, CAI M Y, et al. Identification of behavior of ferry boat crossing channel and modeling of collision risk[J]. Navigation of China, 2023, 46(2): 46-59. (in Chinese)
- [4] 程志友,廉天翔,周昔东,等. 基于交通冲突技术的长江干线客渡船横越模型与应用[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(24).
CHENG Z Y, LIAN T X, ZHOU X D, et al. Motion model of passenger-ferry crossing waterway based on traffic conflict technique on the trunk line of the Yangtze River and application [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(24): 165-171. (in Chinese)
- [5] 刘成勇,万一,王新,等. 基于遗传算法的渡轮横越航道动态路径规划研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2022, 46(2): 361-365.
LIU C Y, WAN Y, WANG X, et al. Research on dynamic path planning of ferry crossing channel based on genetic algorithm [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2022, 46(2): 361-365. (in Chinese)
- [6] KOZYNCHEIKO A I, KOZYNCHEIKO S A. Applying the dynamic predictive guidance to ship collision avoidance: crossing case study simulation [J]. Ocean Engineering, 2018, 164: 640-649.
- [7] MA C C, HAO J L, MA Y F, et al. A collision warning algorithm for area of inland ferry based on velocity obstacle [C]//2015 Ninth International Conference on Frontier of Computer Science and Technology. New York:IEEE, 2015: 191-195.
- [8] 张赫,秦鲁莹,邢江豪. 基于穿越角度的船舶航道间隙计算方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7928-7933.

- ZHANG H, QIN L Y, XING J H. Calculation method of ship crossing clearance based on crossing angle [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(19): 7928-7933. (in Chinese)
- [9] 窦伟, 付彦超. 长江江苏段船舶横越的安全风险及操纵要点分析[J]. 交通企业管理, 2021, 36(6): 72-74.
- DOU W, FU Y C. Safety risk assessment on vessels crossing the Jiangsu section of the Yangtze River and analysis of key points of maneuver [J]. Transportation Enterprise Management, 2021, 36(6): 72-74. (in Chinese)
- [10] CHENG Z Y, ZHANG Y H, WU B, et al. Traffic-conflict and fuzzy-logic-based collision risk assessment for constrained crossing scenarios of a ship [J]. Ocean Engineering, 2023, 274: 1-24.
- [11] SHI Z Q, ZHEN R, LIU J L. Fuzzy logic-based modeling method for regional multi-ship collision risk assessment considering impacts of ship crossing angle and navigational environment [J]. Ocean Engineering, 2022, 259: 111847.
- [12] ZHANG L Y, GU K W, MA Z C, et al. A spatiotemporal pattern analysis of cross encounter behaviour of ships based on automatic identification system data and a nearest point approach [J]. Ocean & Coastal Management, 2024, 254: 107194.
- [13] 胡元伦, 郭颜斌, 王英辰. 基于船舶横越行为分析的船舶避让方案研究 [J]. 中国水运, 2023(2): 127-129.
- HU Y L, GUO Y B, WANG Y C. Research on ship avoidance scheme based on ship crossing behavior analysis [J]. China Water Transport, 2023(2): 127-129. (in Chinese)
- [14] 刘钊, 陈阳, 张明阳. 考虑时空紧迫度的船舶碰撞动态风险估计方法 [J]. 交通信息与安全, 2021, 39(6): 11-18.
- LIU Z, CHEN Y, ZHANG M Y. Factors affecting red-light running behaviors of takeaway delivery riders considering heterogeneity in the means and variances [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2021, 39(6): 11-18. (in Chinese)
- [15] 张金奋, 王伦巍, 吴达, 等. 基于自适应步长快速搜索随机树算法的船舶避碰路径规划 [J]. 中国航海, 2023, 46(4): 147-153.
- ZHANG J F, WANG L W, WU D, et al. An Ada-RRT-based ship collision avoidance path planning algorithm [J]. Navigation of China, 2023, 46(4): 147-153. (in Chinese)
- [16] WENG J X, DU J X, SHI K, et al. Effects of ship domain shapes on ship collision risk estimates considering collision frequency and severity [J]. Ocean Engineering, 2023, 283: 1-13.
- [17] MONTEWKA J, HINZ T, KUJALA P, et al. Probability modelling of vessel collisions [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2010, 95(5): 573-589.
- [18] 葛慧敏, 周礼军, 薄云钰, 等. 基于交通冲突理论的道路安全评价技术研究综述 [J]. 交通信息与安全, 2022, 40(6): 12-21.
- GE H M, ZHOU L J, BO Y Y, et al. A review of road safety evaluation techniques based on traffic conflict theories [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2022, 40(6): 12-21. (in Chinese)
- [19] 初秀民, 李祎承, 余玉欢. 长江中下游航道通过能力计算方法 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(2): 213-219.
- CHU X M, LI Y C, YU Y H. Calculation method for traffic capacity in the midstream-downstream of Yangtze River [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(2): 213-219. (in Chinese)
- [20] 封学军, 王苏阳, 许博, 等. 原油接卸港区单线航道避让区选址与规模仿真研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2023, 23(3): 253-264.
- FENG X J, WANG S Y, XU B, et al. Simulation and study of location and size of one-way channel buffers for large marine crude oil terminals [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2023, 23(3): 253-264. (in Chinese)