

基于元胞自动机的内河顺直航段交通流建模与仿真研究

吴剑宇¹, 齐乐^{1,2,3}, 肖隽扬¹, 季园园⁴, BALLING Robert⁴

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063;

2. 武汉理工大学 国家水运安全工程技术研究中心, 湖北 武汉 430063;

3. 水路交通控制全国重点实验室, 湖北 武汉 430063;

4. 亚利桑那州立大学 地理科学与城市规划学院, 美国 坦佩 85287)

摘要:内河航运作为连接国内外市场的纽带对支撑国内国际双循环起着非常重要的作用,而内河可航水域有限,且随着运输需求的增加及对水上交通服务要求的提高,内河船舶交通安全和效率问题受到越来越多关注。有必要深入探究内河交通流的规律和特性,对交通效率与安全、航道通过能力等开展研究,而交通流仿真是重要的方法之一。通过对内河船舶航行行为特征进行调研和分析,在元胞自动机模型的基础上,考虑顺直航段中船舶的汇入、驶出等船舶微观行为,制定针对不同船舶微观行为的演化规则,建立适用于内河顺直航道的交通流仿真模型,并以长江航道中部分顺直航段为例开展仿真模拟试验。结果表明:该模型可较好地模拟船舶在航道中微观行为,且模拟得到的交通流特征与实际相符。研究成果可为长江航道交通流分析、水上交通监管、航道规划和交通流预测等提供理论和技术支持。

关键词:船舶交通流仿真;内河顺直航道;元胞自动机;航道规划

中图分类号:U692 文献标志码:A DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.009

Research on modeling and simulation of vessel traffic flow in straight segment of inland waterway based on cellular automaton

WU Jianyu¹, QI Le^{1,2,3}, XIAO Juanyang¹, JI Yuanyuan⁴, BALLING Robert⁴

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; 2. National Engineering

Research Center for Water Transport Safety, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;

3. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan 430063, China; 4. School of Geographical Sciences and Urban Planning, Arizona State University, Tempe 85287, America)

Abstract: Inland river navigation plays an important role in supporting the domestic and international dual circulation by connecting international and domestic markets. However, the navigable channels of inland waterways are limited. With the increased demand for inland vessel traffic and higher requirements for vessel traffic services, attention is increasingly being paid to the safety and efficiency of inland vessel traffic. It is necessary to rigorously explore the regularity and characteristics of inland vessel traffic flow and conduct research into traffic efficiency, safety and available channel capacity. Traffic flow simulation is one of the key methods employed in this type of research. By investigating and analysing the navigation behaviour characteristics of inland vessels, a cellular automata-based model of vessel traffic flow in inland waterways is

收稿日期:2024-04-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2023YFB4302300)

作者简介:吴剑宇(2000—),男,硕士研究生,研究方向为船舶交通流建模与仿真。E-mail: wjy3175659043@163.com

通信作者:齐乐(1984—),男,副教授,博士,研究方向为交通运输工程、船舶交通流建模与仿真等。E-mail: 1966418791@qq.com

引用格式:吴剑宇,齐乐,肖隽扬,等.基于元胞自动机的内河顺直航段交通流建模与仿真研究[J].中国航海,2025,48(2):62-71.

WU J Y, QI L, XIAO J Y, et al. Research on modeling and simulation of vessel traffic flow in straight segment of inland waterway based on cellular automaton[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 62-71. (in Chinese)

established, and a simulation experiment is carried out based on a straight segment of the Yangtze River. The simulation results demonstrate that the model can accurately predict vessel behaviour, such as overtaking, entering and leaving waterways. The simulated traffic flow characteristics in trajectory simulations and spatial-temporal diagrams align closely with the actual situation. These results can provide theoretical and technical support for analysing inland waterway traffic flow, supervising vessel traffic, planning waterways, and forecasting traffic flow.

Key words: vessel traffic flow simulation; inland straight waterways; cellular automaton; waterway planning

长江承担沟通我国东、中、西部经济运输的“黄金水道”责任,水运有低成本、运能大等优势,同时,我国不断增强集疏运体系的建设,提高长江经济带一体化通关水平,对长江水道的通航条件进行完善,全面推动多式联运发展,是建设交通强国的重要一环。随着水上经济活动的日益频繁,水上交通态势日趋复杂,船舶交通流呈现出通航密度大、交通流结构复杂和会让频繁等特点^[1]。在内河交通流中,船舶航行约束条件多、耦合作用明显^[2],如长江口南槽航道属于船舶交通流量较大的航道,该类航道顺直航段中船舶的减速跟随、追越和进出航道等行为对航道通行效率和船舶航行安全带来影响较大,因此对航道中的船舶微观行为进行分析势在必行,并开展航道交通流建模仿真研究。

元胞自动机作为经典微观交通流模型仿真方法,优点在于由系统的构成单元的相互作用来模拟复杂系统的整体行为,符合交通系统的形成规律,且仿真计算效率高,算法易实现,可很好地表现航道中的船舶微观行为,所以利用元胞自动机对内河顺直航段交通流进行建模与仿真研究。在交通领域的应用中,元胞自动机最早应用于研究道路交通,如WOLFRAM^[3]的184号规则,在此基础上NAGEL等^[4]改进的NASCH等模型。而对水上交通流的仿真研究起步较晚^[5],通过对交通流的建模仿真研究,可定量或形象地分析船舶的行为特征和规律^[6-7],为评价航道的通过能力、航行风险、组织和管理能力提供一种有力的手段和方法^[8]。

基于元胞自动机的船舶交通流模型常以港口水域与狭水道作为重点研究区域,与排队论、概率模型^[9]和多智能体^[10]等方法结合。研究内容如构建分段航道船舶运动规则^[11];基于港口交通流特征建立港口交通流仿真模型^[12];在元胞自动机基础上加入船舶智能体、航道智能体和泊位智能体^[13];研究不同交通组织方案下液化天然气(Liquefied Natural Gas, LNG)船舶在港区的通行能力等^[14]。在狭水道交通流研究方面,研究水域包括海峡或存在瓶颈的航道^[15]等。研究中考考虑船舶在航道狭窄位置的相互影响^[16];通过跟驰规则与穿越规则模拟船舶的操纵^[17];利用双车道元胞自动机模型研究狭窄水道

中的船舶交互作用^[18];设定不同航段通行规则^[19]等。

除港口水域与狭水道,研究水域还包括运河水道^[20]、运输枢纽^[21-22]和航道交叉口等繁忙水域。研究中通过定义不同的元胞状态与邻域,对航道交叉口交通流进行模拟^[23]。在交通流模拟与基本图分析^[24]的基础上,进一步考虑航行规则对交通流的影响^[25-26];分析流量、航速和船舶交通流占用率间的关系^[27],船舶速度分布、安全间距的影响^[28];利用标准船表示实际船舶长度和速度分布^[29],对元胞自动机模型的时空离散情况进行优化等。

此外,在基于元胞自动机的船舶交通流模型基础上构建新的模型,如利用航道网络建立基于元胞自动机的船舶调度模型^[30];利用经纬度坐标在水域划分正矩形网格,建立海上交通风险评估模型^[31];基于正六边形元胞自动机建立船舶避碰模型^[32]等。

目前,基于元胞自动机的船舶交通流研究包括对港口航道、狭水道等不同水域的交通流特征研究以及辅助水域交通风险评估、船舶通过能力估计和水上交通组织优化等方面,综合研究现状与内河航运现状及实际需求,研究中应考虑航行中船舶的具体微观行为表现与模型构建,因此,本文针对船舶汇入与驶出航道、跟随和追越等行为,增加船舶目的地参数与汇入驶出判定区域,制定相应的演化规则,建立内河顺直航段交通流模型,以长江三处航道中部分顺直航段为例进行仿真试验,将仿真模拟的船舶航行行为与实际船舶行为对比,并对该航道交通流特性进行分析。

1 交通流模型

1.1 航道模型

元胞自动机模型中交通流被看作由大量个体组成的多粒子系统可以以粒子之间相互作用即船舶间的影响,来表现交通流的性质^[33],通过定义不同的更新规则对元胞状态进行更新以实现交通系统的模拟。

本文建立的船舶交通流模型是多通道单向航道模型。与道路交通中的车道不同,航道中船舶没有特定的通道,且船舶通常受到在航道中的航行规则

的约束,通道的数量可通过观察平行的船舶的数量来确定。模型采用开放边界,并考虑航道附近可能存在的锚地、支流等,根据实际水域情况,增加汇入船舶的输入队列和中途驶出船舶的判定区域。

1.2 船舶模型

元胞是元胞自动机最基本的组成部分,模型中每一时刻每个元胞都有且只有一种确定的状态。由于不同的船舶船长不同,为使模拟过程符合实际,根据实际船长和选定的元胞大小来确定每艘船占用的元胞数量,同一艘船占据的元胞具有相同的属性,作为一个整体遵循元胞更新规则和相位变化。

考虑到航道中存在中途汇入或驶出航道的船舶,船舶模型参数除船舶长度、速度等基本参数,增加船舶目的地参数作为区分,并与航道模型中增加的汇入和驶出航道船舶的判定区域对应。所以对于被船舶 i 所占据的元胞,记船舶初始状态 S_i 为

$$S_i = \{F_i, L_i, d_{\text{safe}}, v_{\text{max}}, v_i\} \quad (1)$$

式(1)中: F_i 为船舶目的地,如航道出口处、支流和锚地等;船舶长度 $L_i = nl$, n 为正整数,代表船舶 i 将占据 n 格元胞; d_{safe} 为本船与其他船必须保持的安全距离,且由于船舶领域的动态特性,需要的安全距离随船舶长度与航速在不断变化,根据相关研究^[34],模型安全距离取值计算为

$$d_{\text{safe}} = 2L_i + 2v_i \quad (2)$$

1.3 演化规则

演化规则是用来描述元胞根据当前时刻本元胞和邻居元胞状态来确定下一时刻自身状态的一系列规则,是元胞自动机模型的核心。模型中演化规则需结合船舶实际的航行行为和地方航行规则确定,将针对内河顺直航道内船舶交通流制定相关演化规则。

1.3.1 加速规则

从运输效率和经济角度考虑,船舶通常希望保持在一个较高的速度航行。因此,在空间足够时,船舶会不断加速至理想航速。即当 t 时刻船舶 i 与前船之间的距离 d_i 大于 d_{safe} ,或者船舶 i 前方没有船舶时,船舶将逐步提高航速 v_i ,直到达到允许最大速度 v_{max} ,有

$$v_i(t+1) = \min[v_i(t) + 1, v_{\text{max}}] \quad (3)$$

1.3.2 减速规则

船舶可能无法保持与前船足够安全距离时,需进行减速以跟随前船,即 $t+1$ 时刻船间距可能小于 d_{safe} ,船舶改变速度 v_i 为

$$v_i(t+1) = \min[v_i(t), d_i(t) - d_{\text{safe}}] \quad (4)$$

1.3.3 追越规则

在船舶为保持足够安全距离,除减速更多倾向于换道以保持航速。船舶换道追越行为对应到模型中,需先判断是否满足换道动机和安全条件,有

$$\begin{cases} d_i - (v_i - v_j) < d_{\text{safe}} \\ d_{\text{sidefront}} > d_{\text{safe}} \\ d_{\text{sideback}} > d_{\text{safe}} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中:当船舶与前船之间的距离 d_i 小于 d_{safe} ,且船舶 i 与旁道前后船距离 $d_{\text{sidefront}}$ 和 d_{sideback} 足够,有概率换道追越。出于运输效率考虑,只要条件允许船舶就可能尝试追越,所以设置追越概率 $P_{\text{change}} = 0.9$ 。同时,地方航行规则通常会要求船舶在追越他船时,应尽可能从被追越船左舷追越,即左右通道追越条件均允许时,优先向左换道。

1.3.4 随机慢化

随机慢化与减速跟随不同,是由于水文、气象和驾驶员状态等多种因素共同影响而产生,减速幅度较小,且需保证航道要求最小航速 v_{min} ,模型中通过设置慢化概率 $P_{\text{sd}} = 0.1$ 来表示这种行为,减速公式为

$$v_i(t+1) = \max[v_{\text{min}}, v_i(t) - 1] \quad (6)$$

1.3.5 中途驶出规则

模型输入船舶时,每艘船舶初始化时设置参数 F_i ,记船舶目的地为出口边界时 $F_i = 1$,则当 $F_i \neq 1$ 时,即为中途驶出航道的船舶,此类船舶在满足换道条件时就会尽可能采取前往对应的目的地区域的行为,有

$$Y_i = \begin{cases} Y_i - 1, & F_i = 1; \text{rand}(1) < P_{\text{change}} \\ Y_i + 1, & F_i \neq 1; Y_i < Y_F \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中: Y_i 为船舶所在通道; Y_F 为驶出船舶目的地所在通道。当船舶满足追越条件时会优先选择向左侧换道,当驶出区域在右侧通道时,中途驶出船舶会优先向右侧换道,保证航行在目的地所在通道,当船舶到达对应驶出判定区域后,该船舶驶离。

1.3.6 中途汇入规则

除中途驶出的船舶,航道附近存在的锚地、支流中还会存在可能中途汇入的船舶。船舶汇入航道时,会在保证与航道中来船方向船舶有足够距离的情况下,以接近平行于交通流方向的角度汇入航道,可视为通过换道行为进入航道,需满足汇入条件:

$$\begin{cases} d_{F_i, \text{front}} > d_{\text{safe}} \\ d_{F_i, \text{back}} + L_i > d_{\text{safe}} \end{cases} \quad (8)$$

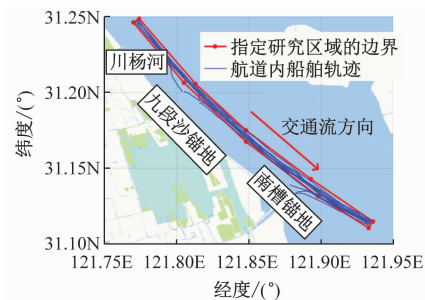
式(8)中:船舶汇入时需考虑航道汇入处所在元胞与前后船的距离 $d_{F_i, \text{front}}$ 和 $d_{F_i, \text{back}}$ 是否足够,再汇入航

道,并按演化规则更新。同时,通常地方航行规则会规定航道外的船舶不应妨碍在航道内正常航行的船舶,因此,若同时有驶出船和汇入船时,优先执行驶出船舶的更新规则,汇入船舶则等待下一轮循环再判断是否符合汇入条件。

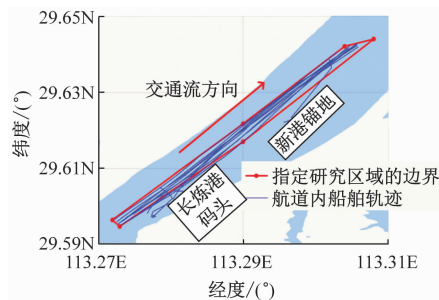
1.3.7 状态更新

经过上述规则更新速度和位置后,最后应该更新船舶的状态。主要更新的参数为 $d_{\text{safe},i}(t)$ 和船舶位置 $X_i(t)$,有

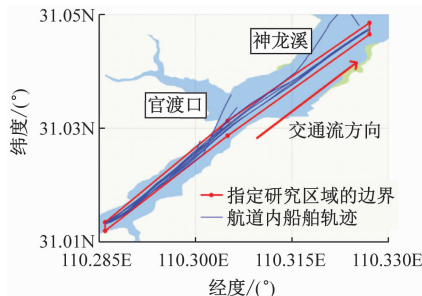
$$\begin{cases} d_{\text{safe},i}(t+1) = 2L_i + 2v_i(t+1) \\ X_i(t+1) = X_i(t) + v_i(t+1) \end{cases} \quad (9)$$



(a) 南槽航道部分顺直航段



(b) 螺山水道部分顺直航段



(c) 巴东水道部分顺直航段

图1 长江水道部分顺直航段

Fig. 1 Straight segments of the Yangtze River

根据对所选南槽航道航段的船舶自动识别系统 (Automatic Identification System, AIS) 数据的统计分析见图 2a,发现船舶到达时间间隔分布服从指数分布,因此,通过蒙特卡洛法按指数分布随机生成船舶到达时间间隔,形成船舶到达队列,系统仿真到达对应的时间步,生成对应船舶,此时船舶目的地参数 F_i 默认为 1,即航道出口。根据 AIS 数据统计,航道内平均每约 50 艘船存在 1 艘船汇入或驶出,将船舶到达队列中每间隔约 50 艘船的目的地参数 F_i 修改为 2、3 或 4,分别表示船舶在支流与 2 个锚地处驶出,同时以生成 50 艘船作为时间间隔生成汇入船舶队列,在支流与 2 个锚地处随机生成汇入船舶等待汇入,汇入船舶目的地参数 F_i 默认为 1,即航道出口。船舶长度与速度分布服从正态分布分别见图 2b 和图 2c,约 100 m 船长占比最大。同时,当地航

2 仿真试验及结果分析

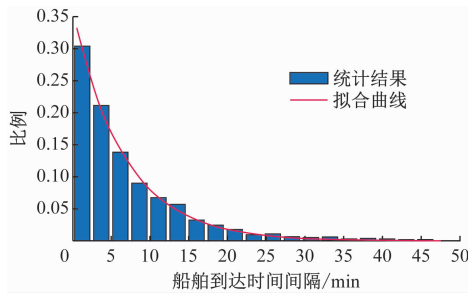
2.1 航道仿真试验设置

2.1.1 航道统计数据

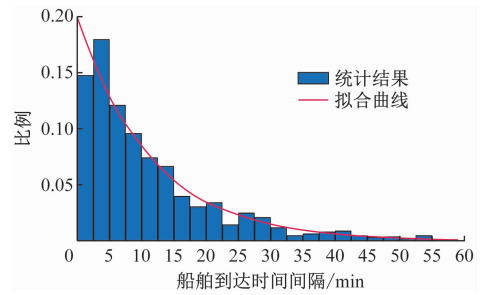
为验证模型针对在内河顺直航道的适用性和泛化能力,分别选取长江下、中、上游的南槽航道、螺山水道和巴东水道,对 3 处典型航道中的部分顺直航段进行仿真试验。长江水道部分顺直航段见图 1,航道附近存在支流或锚地,其中的船舶可按规定汇入航道,行驶于该段航道中的船舶也可从航道内驶出进入支流或锚地。

行规定要求:长江口深水航道航速不得超过 15 kn,平均航速一般应不低于 10 kn。结合实际仿真需求,本文设置仿真过程中的时间步长为 1 min,选择 1 min 内船舶以 1 kn 速度通过的距离作为元胞的单位尺寸,为便于计算和仿真,将元胞尺寸设置为 30 m,此时,每时间步前进 1 格元胞的船舶速度约为 1 kn。为表现航道中船舶长度与航行速度的差异,设定模型中以船舶占用元胞数量均值为 4,船舶最大速度均值为 10,按正态分布随机生成船舶占用的元胞数量与最大速度。

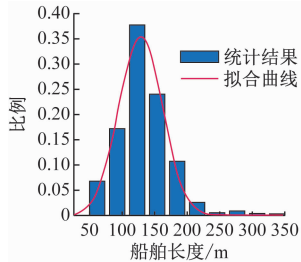
同样的,分别统计螺山水道与巴东水道中选取航段的船舶数据,确定对应船舶统计数据结果见图 3 和图 4。图 3 和图 4 中:确定的船舶间到达时间间隔,船长分布与速度分布参数,作为仿真模型中的船舶参数输入依据。



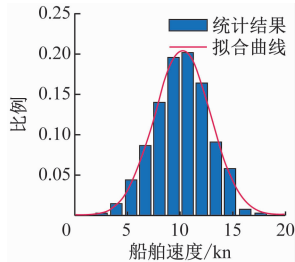
(a) 船舶间到达时间间隔分布



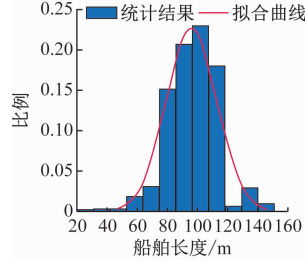
(a) 船舶间到达时间间隔分布



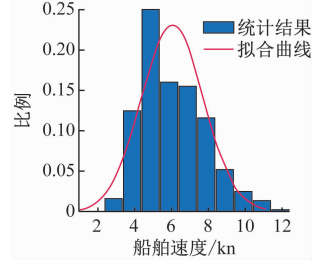
(b) 船舶长度分布



(c) 船舶速度分布



(b) 船舶长度分布



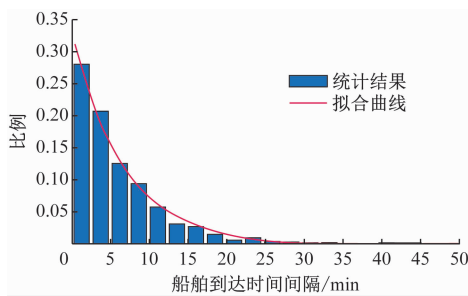
(c) 船舶速度分布

图2 南槽航道船舶统计数据结果

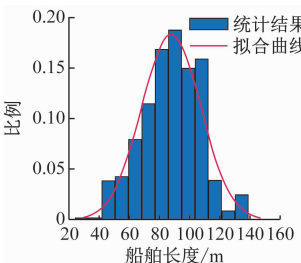
图4 巴东水道船舶统计数据结果

Fig.2 Statistical results of the Nancao waterway

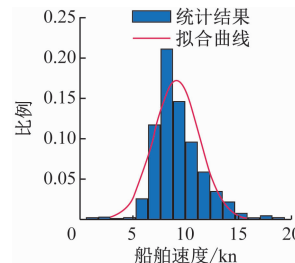
Fig.4 Statistical results of the Badong waterway



(a) 船舶间到达时间间隔分布



(b) 船舶长度分布



(c) 船舶速度分布

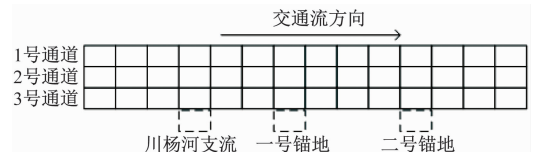
图3 螺山水道船舶统计数据结果

Fig.3 Statistical results of the Luoshan waterway

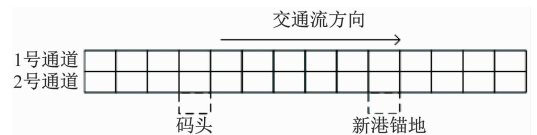
2.1.2 元胞空间设置

南槽航道选取航段全长约8.0 n mile,航道宽度约为0.4 n mile,形状为近似长直矩形,根据选取时段内的AIS数据,通过观察同一时间航道内平行的船舶的数量,确定该航段可同时容纳3艘船舶并排航行,为方便研究,可为该航道元胞空间设置3条通道;同时,根据元胞单位长度为30 m,长度约为8 n mile的航道对应到元胞空间中约为480个元胞。且由于航道的南侧存在着1条支流和2个锚

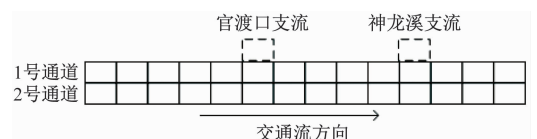
地,为模拟船舶进出航道,确定航道与支流和2个锚地连接位置并对应至设置的元胞空间中,分别为第80号、150号和380号元胞,作为中途汇入与驶出船舶的判定区域,南槽航道元胞空间简图见图5a。长江中游的螺山水道和长江上游的巴东水道与长江下游南槽航道相比,更多地受到地形的限制,选取的顺直航段较短,且航道宽度受限,结合选取航段的AIS数据,选择在对元胞空间中设置2条通道。其中,结合图1中选取航道简图,长江中游螺山水道选取航段约为4.5 n mile,对应元胞空间长度约270个元胞,航道附近有长炼港码头及新港锚地,螺山水道元胞空间简图见图5b;长江上游巴东水道选取航段约



(a) 南槽航道元胞空间简图



(b) 螺山水道元胞空间简图



(c) 巴东水道元胞空间简图

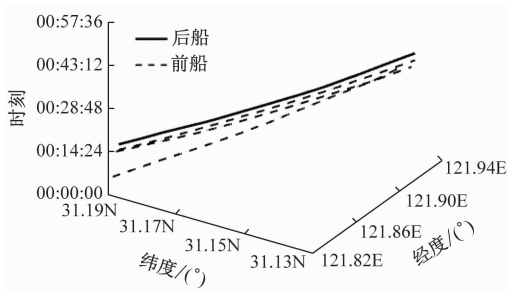
图5 元胞空间设置示意图

Fig.5 Construction of the cellular space

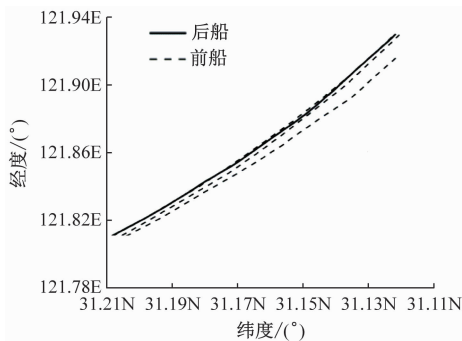
3.5 n mile, 对应元胞空间长度约 210 个元胞, 航道附近有神龙溪与官渡口两条支流, 巴东水道元胞空间简图见图 5c。在确定元胞空间基础上, 分别在对应支流或锚地等位置设定中途汇入与驶出船舶的判定区域。

2.2 船舶行为仿真

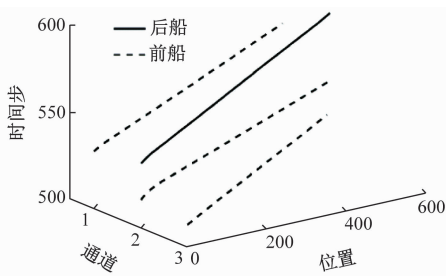
2.2.1 船舶减速跟随行为



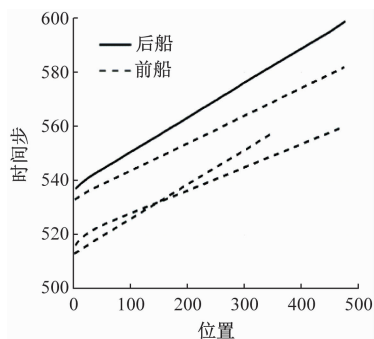
(a) 实际船舶减速跟随时空轨迹



(b) 实际船舶减速跟随轨迹俯视图



(c) 仿真船舶时空轨迹



(d) 仿真轨迹位置-时间步投影

图 6 船舶跟随实际轨迹与仿真轨迹图

Fig. 6 Actual trajectory and simulation trajectory of the following vessels

2.2.2 船舶追越行为

基于所选航段 AIS 数据与仿真结果, 绘制船舶追越实际轨迹与仿真轨迹图见图 7。船舶轨迹的斜率可表现船舶速度大小, 可见在实际情况与仿真中, 后船速度明显快于前船, 于是船舶可能采取追越行为为如图 7a 和图 7d 所示。实际情况中, 即船舶轨迹前部分两船航线重叠, 于是明显地看到追越船舶向右侧换道进行追越如图 7b 所示, 在 09:36 后船轨迹表现后船已完成追越如图 7a 所示, 而在仿真中, 即两船航线重叠表现为 2 船均在 2 号通道出现, 由于当地航行规则推荐在被追越船左舷追越, 因此, 模型仿真过程中后船在约 440 时间步选择向左侧换道进行追越如图 7c 和图 7d 所示, 在约 460 时间步后船已完成追越, 仿真轨迹与实际船舶追越行为相符。

2.2.3 船舶中途驶出与汇入航道

为分析模型中存在的船舶汇入航道和船舶驶出航道的现象, 绘制南槽航道仿真结果见图 8a, 存在

以 AIS 数据与仿真结果绘制船舶减速跟随实际轨迹与仿真轨迹图见图 6, 实际船舶减速跟随轨迹图如图 6a 和图 6b 所示, 船舶减速跟随仿真模拟图如图 6c 和图 6d 所示。由于前船挡住后船空间, 没有追越的条件, 只能在保持安全距离的条件下, 一直跟随前船。仿真轨迹与实际船舶减速跟随行为相符。

中途消失及出现的轨迹, 除去追越换道行为, 即船舶进出航道的表现。驶出与汇入位置与图 5a 元胞空间中设定的判定处相符, 同时, 驶出船和汇入船产生的位置大多与附近船舶的轨迹线距离较远, 特别是汇入船产生的位置一般与相邻后船保持相当的安全距离, 所以在船舶密度较大时, 少有汇入船出现, 符合进出航道的船舶不应妨碍航道内正常航行船舶的规定, 与南槽航道进出航道船舶行为特征相符。对螺山水道与巴东水道船舶的汇入驶出情况的仿真情况见图 8b 和图 8c, 与图 5 中对应的支流、锚地等位置分布相符。同时, 由于图 4 中统计巴山水道的船舶到达时间间隔相较于其他两航道更大, 图 8 中可明显看出长江上游的巴东水道中船舶密度明显小于长江下游的南槽航道与长江中游的螺山水道。

2.3 船舶交通流特征

2.3.1 交通流特征参数计算

为研究航道的交通流特征, 通过改变边界条件

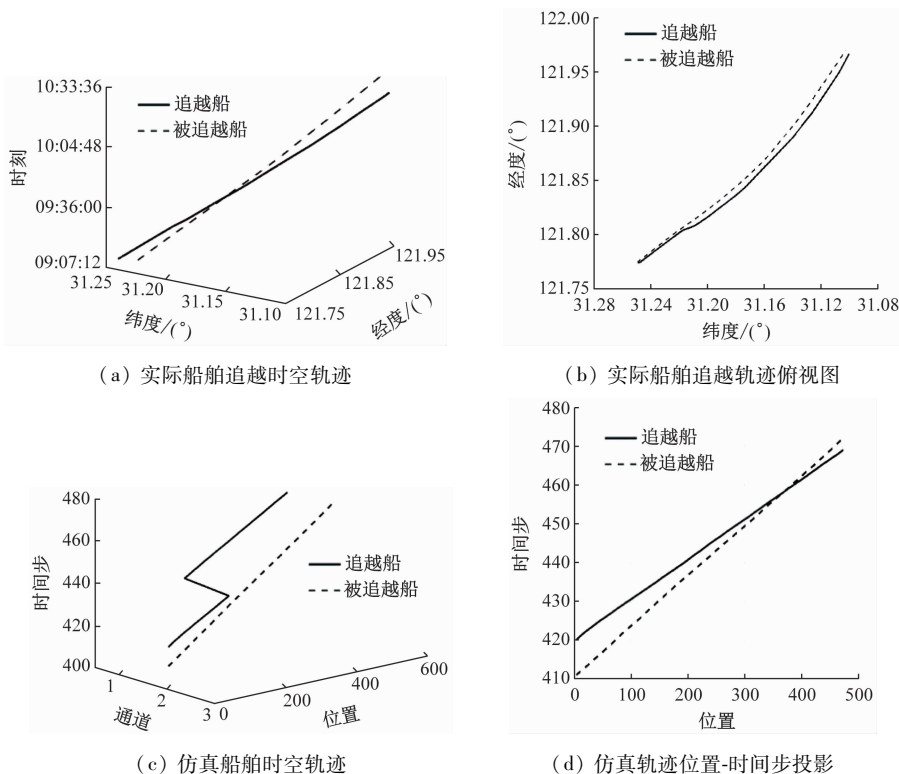


图7 船舶追越实际轨迹与仿真轨迹图

Fig. 7 Actual trajectory and simulation trajectory of the overtaking vessels

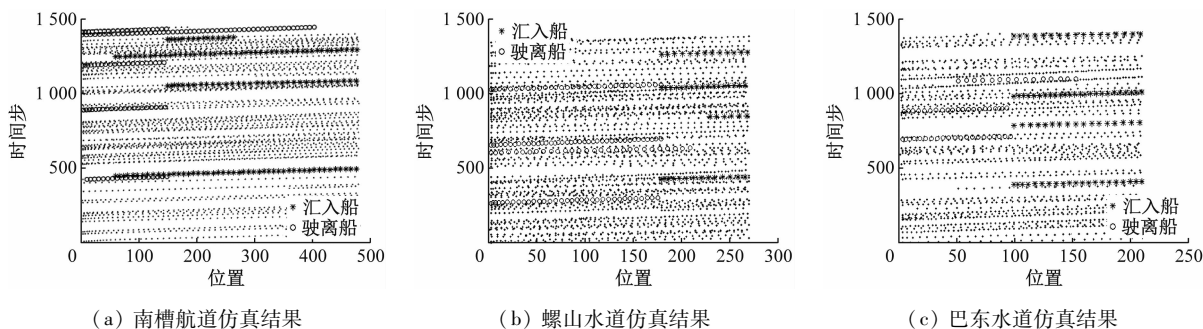


图8 船舶进出航道仿真时空图

Fig. 8 Spatial-temporal diagrams of vessels traffic flow

与船舶输入,计算并统计交通流特征相关参数,包括密度 K ,即航道平均每海里的船舶数量,速度 v 即船舶的平均速度,计算公式为

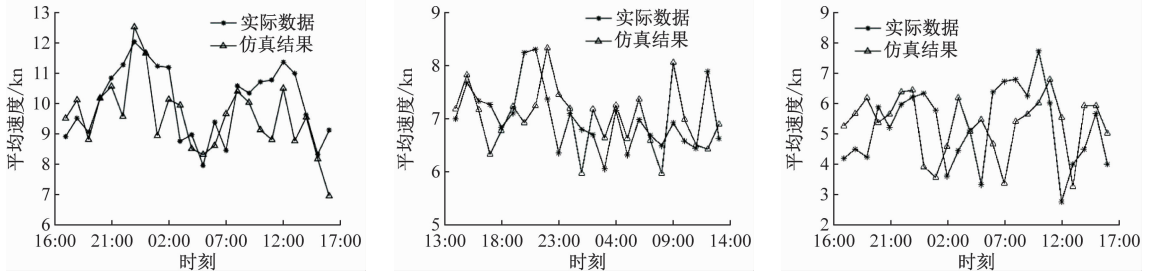
$$\begin{cases} K = \text{ship_num}/\text{lane_length} \\ v = \sum_{i=1}^{\text{ship_num}} v_i/\text{ship_num} \end{cases} \quad (10)$$

2.3.2 船舶交通流规律

1) 分别根据图2~图4中对应航道的船舶统计数据,参考实际船舶到达情况以及对应船舶长度与船舶速度分布作为仿真参数输入,并选取24h船舶内平均速度变化进行对比。南槽航道、螺山水道和巴东水道的仿真结果与实际数据对比图分别见图9a、图9b和图9c。图9中:仿真结果中船舶速度的分布及变化趋势与实际数据基本相符,符合在对应

船舶输入情况下的相应航道顺直航段的实际交通特征。

2) 在周期边界条件下,绘制不同船舶输入下的交通流密度与流量关系图,并分别基于 Greenshields 模型与 Greenberg 模型拟合曲线分别见图10a和图10b,2种拟合曲线分别在密度较小和较大时与仿真数据较为吻合。图10中:交通流量随密度的增大而增大,近似于正比关系,船舶大部分时间能保持较高速度航行;密度达到4艘/n mile后,交通流量开始下降,说明航道内开始出现局部堵塞现象,航道内交通流速度下降。同时,在其他相同条件下,禁止船舶的换道行为,出现船舶流量低于允许船舶换道行为时的情况,表明当允许船舶换道时,船舶通行能力大于禁止换道的情况,即当后船被禁止通过换道追



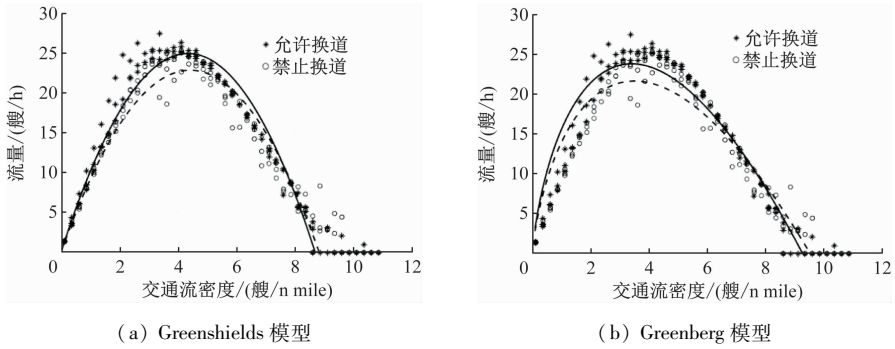
(a) 南槽航道仿真情况对比

(b) 螺山水道仿真情况对比

(c) 巴东水道仿真情况对比

图9 平均速度变化图

Fig. 9 The simulation results of average speed



(a) Greenshields 模型

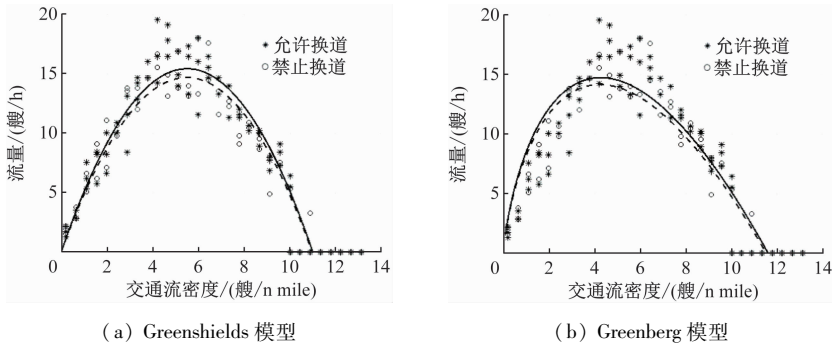
(b) Greenberg 模型

图10 南槽航道交通流密度、流量关系图

Fig. 10 The simulation results of vessels traffic flow at different ship densities in Nancao waterway

越前船时,快船在航道中的速度会受到慢船的限制,影响交通流量。与南槽航道相比,对长江中游的螺山水道与长江上游的巴东水道进行仿真试验,得到

的对应航道的船舶交通流量明显更小,螺山航道和巴东航道交通流密度、流量关系图分别见图11和图12。这是由于螺山水道和巴东水道受到内河地

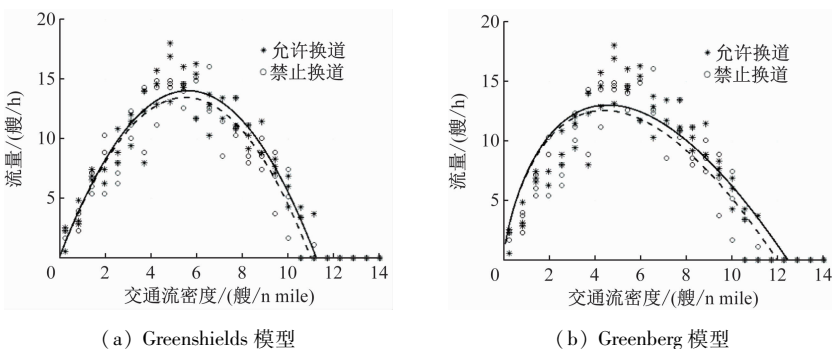


(a) Greenshields 模型

(b) Greenberg 模型

图11 螺山航道交通流密度、流量关系图

Fig. 11 The simulation results of vessels traffic flow at different ship densities in Luoshan waterway



(a) Greenshields 模型

(b) Greenberg 模型

图12 巴东航道交通流密度、流量关系图

Fig. 12 The simulation results of vessel traffic flow at different vessels densities in Badong waterway

形的影响,元胞空间的通道数受到限制,且输入船舶的平均速度较小。模型的仿真结果较好地表现出不同航道的顺直航段的交通流特征的不同。

随着近年长江口南槽航道治理工程不断推进,沿南槽航道进出长江的船舶数量日益增多,通航密度越来越大。随着通航环境的改变,水域航行规则等也会变化,同时,由于船舶可航行水域增加,船舶输入的不断增多,模型中元胞空间通道数量的选择将对船舶流量产生较大的影响。而随着通航环境的不断改善,通道数目可能会增加,对应通过能力也会相应增加,在实际应用中可根据情况进行优化。

3 结束语

本文建立基于元胞自动机的内河顺直航段交通流模型,并选取长江水道中3处航道的部分顺直航段进行仿真试验,将实际船舶航行轨迹与仿真模拟的船舶轨迹对比,分析不同条件下仿真交通流密度、流量关系,可确认该模型能较好地反映实际的船舶航行行为的时空变化以及航道船舶交通流特征情况,证明本文计算模型的可靠性。模型创新性在于通过对具体船舶行为的分析,考虑顺直航道中可能存在的船舶汇入与驶出现象,在船舶模型中增加目的地属性,在元胞空间中确定汇入驶出判定区域,并结合内河航道的安全航行规定和AIS数据,制定针对各类船舶行为的演化规则,可较好地模拟出现实中的船舶行为,表现航道交通流特征。在实际应用中该内河顺直航段交通流模型可直观表现航道中的船舶行为,并分析航道交通流特征,为水上交通管理、航道规划等提供理论和技术支持。同时,新模型的建立可帮助推进元胞自动机模型在水上交通领域的应用,拓展船舶交通流仿真的方法。

本文模型在仿真中对不同的交通情景的表现为对应元胞空间建立与船舶参数变化,具体航道条件的影响,通过根据实际情况建立对应的元胞空间表现,船舶所受到的不同环境影响,通过统计实际AIS数据,并调整船舶输入属性,包括船舶到达时间间隔、船长和船速分布等参数来表现。考虑到在内河航运中,天气条件对船舶的安全航行的影响,主要表现在雾天、雨天等恶劣的天气条件造成航道内能见度大幅下降,在未来研究中会进一步细化考虑不同天气条件对船舶输入的影响,结合船舶智能化发展、通航环境和交通规则等变化的影响,建立针对动态环境变化的仿真模型。

参 考 文 献

[1] 罗肖霞. 基于AIS的繁忙水域船舶交通流时空特征

度量研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.

- LUO X X. Research on spatio-temporal feature metrics of ship traffic flow in busy waters based on AIS [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018. (in Chinese)
- [2] 杨星, 李键, 陈巍博, 等. 内河船舶交通流建模与仿真研究[J]. 中国航海, 2013, 36(3): 80-85.
- YANG X, LI J, CHEN W B, et al. Research on modelling and simulation of inland ship traffic flow[J]. Navigation of China, 2013, 36(3): 80-85. (in Chinese)
- [3] WOLFRAM S. Statistical mechanics of cellular automata [J]. Reviews of Modern Physics, 1983, 55: 601-644.
- [4] NAGEL K, SCHRECKENBERG M. A cellular automaton model for freeway traffic [J]. Journal De Physique I, 1992, 2(12): 2221-2229.
- [5] 齐乐. 基于元胞自动机的海上航道内船舶交通流研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- QI L. Research on ship traffic flow in waterway based on cellular automata [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. (in Chinese)
- [6] TU Q, ZHENG Z. The research of traffic flow in LaoTieshan channel based on AIS data [C]. MATEC Web of Conferences. Paris: EDP Sciences, 2020, 325: 02002.
- [7] XIONG J, XIE H. Research prospects of ship traffic flow simulation technology [C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Bristol: IOP Publishing, 2018, 189(6): 062031.
- [8] 徐武雄, 初秀民, 刘兴龙. 船舶交通流建模与仿真研究进展[J]. 水利水运工程学报. 2014(6): 91-99.
- XU W X, CHU X M, LIU X L. Advances in modelling and simulation of ship traffic flow [J]. Hydro-Science and Engineering. 2014(6): 91-99. (in Chinese)
- [9] 孙志宏. 基于元胞机和概率模型的港口水域交通流预测[D]. 厦门: 集美大学, 2020.
- SUN Z H. Prediction of traffic flow in port waters based on cellular automaton and probability model [D]. Xiamen: Jimei University, 2020. (in Chinese)
- [10] 朱永超. 基于多智能体的海港受限航道通过能力仿真研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
- ZHU Y C. Study on passing capacity in restricted channel based on multi-agent simulation [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022. (in Chinese)
- [11] 刘宗杨, 周春辉, 赵俊男, 等. 基于元胞自动机的航道通过能力建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(10): 2478-2487.
- LIU Z Y, ZHOU C H, ZHAO J N, et al. Modelling and simulation of channel passage capacity based on cellular automata [J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(10): 2478-2487. (in Chinese)
- [12] 何鑫. 基于Agent和元胞自动机的港口交通流建模与仿真[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.

- HE X. Port traffic modeling and simulation based on agent and cellular automata [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017. (in Chinese)
- [13] JIANG L, HUANG G, HUANG C, et al. Data mining and optimization of a port vessel behavior behavioral model under the internet of things[J]. IEEE Access, 2019, 7: 139970-139983.
- [14] LIU J, LIU Y, QI L. Modelling liquefied natural gas ship traffic in port based on cellular automaton and multi-agent system[J]. Journal of Navigation, 2021, 74(3): 533-548.
- [15] CHEN L, QI J S, SHI J. A cellular automata ship traffic flow model considering navigation rules in narrowing channel[J]. Alexandria Engineering Journal, 2023, 69: 715-726.
- [16] XIN X, LIU K, YANG X, et al. A simulation model for ship navigation in the "Xiazhimen" waterway based on statistical analysis of AIS data[J]. Ocean Engineering, 2019, 180: 279-289.
- [17] QU X B, MENG Q. Development and applications of a simulation model for vessels in the Singapore straits[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(9): 8430-8438.
- [18] SUN Z, CHEN Z, HU H, et al. Ship interaction in narrow water channels; a two-lane cellular automata approach[J]. Physical A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015, 431: 46-51.
- [19] 孙瑞隆, 郑建风, 韩佳轩, 等. 面向宽窄交替航道的船舶交通元胞自动机模型[J]. 系统仿真学报, 2022;1-10.
- SUN Y L, ZHENG J F, Han J X, et al. A cellular automata model for simulating ships passing through waterways with alternating width and narrow sections [J]. Journal of System Simulation, 2022; 1-10. (in Chinese)
- [20] 李超. 基于元胞自动机的基尔运河船舶通行效率研究[D]. 大连:大连海事大学,2021.
- LI C. Research on ship transportation efficiency of Kiel Canal based on cellular automata [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021. (in Chinese)
- [21] 庄元, 黄惠欣, 汪秉义. 基于航道-船闸系统模型的内河多线船闸调度优化仿真[J]. 中国航海, 2023, 46(1):80-87.
- ZHUANG Y, HUANG H X, WANG B Y. A navigation channel-ship lock system model for multi-line ship lock running simulation [J]. Navigation of China, 2023, 46(1):80-87. (in Chinese)
- [22] 单聪聪. 基于反脆弱的三峡大坝船舶积压疏导策略仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学,2019.
- SHAN C C. Simulation Research on ship's backlog grooming strategy for Three Gorges Dam based on anti-fragile[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [23] BLOKUS A, SMOLAREK L. Application of simulation methods for evaluating the sea waterways traffic organization [J]. International Scholarly Research Notices, 2013, 9: 1541-1548.
- [24] HUANG Y, YIP T L, WEN Y. Comparative analysis of marine traffic flow in classical models [J]. Ocean Engineering, 2019, 187: 106195.
- [25] 戴林伟. 双向航道船舶交通流元胞自动机模型及仿真[J]. 上海海事大学学报,2019,40(1):27-31.
- DAI L W. Cellular automaton model and simulation of ship traffic flow in two-way waterway [D]. Journal of Shanghai Maritime University,2019,40(1):27-31. (in Chinese)
- [26] 屠强. 基于元胞自动机的老铁山水道内交通流仿真研究[D]. 大连: 大连海事大学,2021.
- TU Q. Research on ship traffic flow simulation in LaoTieshan Channel based on cellular automaton [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021. (in Chinese)
- [27] LIAO P, HOU M, CHU M, et al. Simulation of vessel traffic flow in inland waterway based on cellular automata [C]//CICTP 2019. Nanjing: American Society of Civil Engineers, 2019: 1-10.
- [28] 侯梦琳. 航道顺直段船舶交通流仿真分析[D]. 南京:东南大学, 2019.
- HOU M L. Simulation of vessel traffic flow in straight section of navigation waterway [D]. Nanjing: Southeast University, 2019. (in Chinese)
- [29] QI L, JI Y, BALLING R, et al. A cellular automaton-based model of ship traffic flow in busy waterways [J]. Journal of Navigation, 2021, 74(3): 605-618.
- [30] GENG X. Ship scheduling in inland waterway networks based on cellular automata graph [C]//2016 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC). Chengdu: IEEE, 2016: 450-453.
- [31] SUO Y, SUN Z, CLARAMUNT C, et al. A dynamic risk appraisal model and its application in VTS based on a cellular automata simulation prediction [J]. Sensors, 2021, 21(14): 4741.
- [32] 马鹏森. 基于正六边形元胞自动机的互见中船舶避碰行为仿真研究[D]. 大连: 大连海事大学,2021.
- MA P S. Research on simulation of ship collision avoidance behavior in sight of one another based on regular hexagonal cellular automata [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2021. (in Chinese)
- [33] CHOWDHURY D. Statistical physics of vehicular traffic and some related systems [J]. Physics Reports, 2000, 329(4-6): 199-329.
- [34] QI L, ZHENG Z, GANG L. A cellular automaton model for ship traffic flow in waterways [J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2017, 471: 705-717.