

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.03.013

基于元胞自动机的航道交通流仿真

屠 强, 郑中义, 靳 彪

(大连海事大学 航海学院, 辽宁 大连 116026)

摘 要:文章基于自动识别系统(automatic identification system, AIS)数据,将汇入主航道的分支交通流对航道整体交通状况的影响进行研究,该种情况类似于城市交通中匝道入口的汇入情形。鉴于航道内的该种情况,以元胞自动机进行建模仿真;并通过分析可超越条件下两船之间的速度关系,发现其中规律与三相交通流理论中的速度适应机制相契合,于是将基本图理论与三相交通流理论中的合理部分相结合,构建一个既符合实际又便于模拟的单向双通道航道内的交通流模型,并通过图像和时间序列相关分析对该模型进行说明和验证。此外还利用该模型对带有汇入主航道内的交通流出现的一些交通现象进行仿真和说明。

关键词:交通工程;交通流仿真;元胞自动机;自动识别系统(AIS)数据;三相交通流理论

中图分类号:U491.112

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2023)03-0364-07

Simulation of traffic flow in channel based on cellular automaton

TU Qiang, ZHENG Zhongyi, JIN Biao

(Navigation College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: This paper simulated the traffic flow in channel with similar ramp entrance compared with road traffic engineering through cellular automaton(CA) method, taking into consideration the automatic identification system(AIS) data. And the speed relationship between the two ships under the condition of overtaking was analyzed. It is found that the rule of the speed of ships during overtaking is similar to the law of speed adaptation mechanism in the three-phase traffic flow theory, so it is full of necessity to integrate the reasonable parts of the fundamental diagram and three-phase traffic flow theories to build a new traffic flow model by deploying CA method in one-way dual channel, which is not only in line with the reality, but also easy to simulate. The model was illustrated and verified by the images and correlation analysis of time series. In addition, the model could be used to simulate and explain some traffic phenomenon which has a similar ramp entrance in marine traffic.

Key words: traffic engineering; traffic flow simulation; cellular automaton(CA); automatic identification system(AIS) data; three-phase traffic flow theory

0 引 言

基于自动识别系统(automatic identification system, AIS)数据包含船舶航行中的所有必要信息,是目前海上交通研究的重要工具。文献[1]基于 AIS 数据对 NaSch 模型规则进行改写,从而分

析航道内交通流三相变化;文献[2]通过分析新加坡海峡的特征,并根据驾驶员主观决策,提出一种离散模型;文献[3]在对狭窄水道进行研究时,发现存在“伪换道”可能,从而提出一种基于空间-逻辑的元胞自动机模型。以上研究都是通过对 AIS 数据进行分析,发现研究区域内船舶或者航道的

收稿日期:2021-01-05;修回日期:2021-02-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52171345)

作者简介:屠 强(1989—),男,辽宁丹东人,大连海事大学硕士生;

郑中义(1964—),男,河北定县人,博士,大连海事大学教授,博士生导师。

特征,从而建立起模型。由此可见,AIS数据在海上交通工程,尤其是交通流方面的研究中起着重要的作用。

由于航道是一个开放性通道,尽管大多数船舶会遵循在主航道航行的原则,但依然存在从航道边界进入主航道的船舶,这一点类似于城市交通中的匝道入口。因此本文为了研究这些从边界进入的船舶对整体航道交通流的影响,基于元胞自动机对此进行了建模仿真。

1 速度适应机制

在基本图理论下,交通状态分为自由流和阻塞2种。但是三相交通流理论框架下,交通状态被分为自由流、同步流和阻塞3种状态^[4]。三相交通流理论中的同步流可以看成是自由流和阻塞的中间态,而“同步流”中“同步”反映在道路交通中为:如果交通流处于同步流状态下,不同车道上的不同车辆的速度或者同一车道的不同车辆的速度有趋于同步的倾向^[5-6],那么这就是速度适应机制产生的原因。在同一理论基础下,海上交通是否也会出现这样的状态,可以通过AIS数据分析追越前后两船速度变化,发现该理论在船舶交通流中也是适用的。

为了保证建模的客观性和准确性,本文从禁渔期老铁山水道的交通流数据中整理出部分后船追越前船的航迹,追越轨迹样本如图1所示。

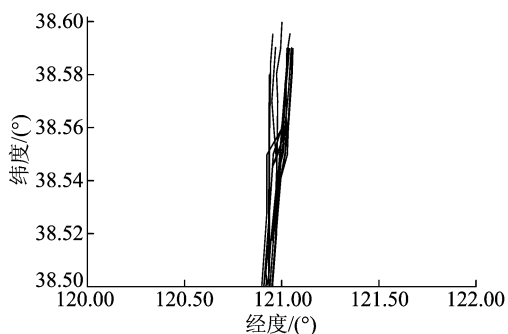


图1 追越轨迹样本

基于实际追越行为进行航迹提取,并对其进行分析,追越轨迹如图2所示。从图2可以看出,追越船在进行追越行为时,首先要转向来增大横距,保证两船均可以安全驶过;然后以合适的速度超过前船。通过连接图2中两船轨迹相同时刻的时间点,可以看出追越过程中两船间相对距离的变化。在本文中,后船无论从哪一侧进行追越,追越前船时的安全横距一般保持在0.5~

0.8 n mile之间。

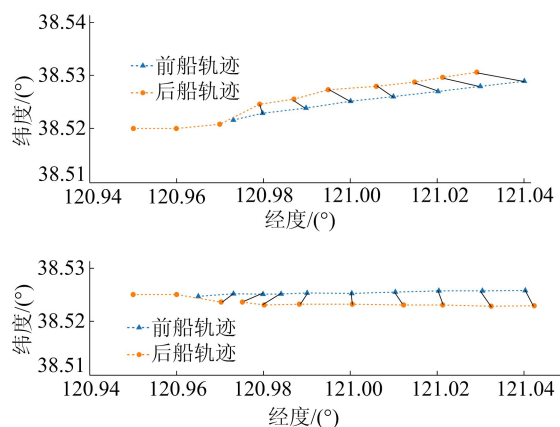


图2 追越轨迹

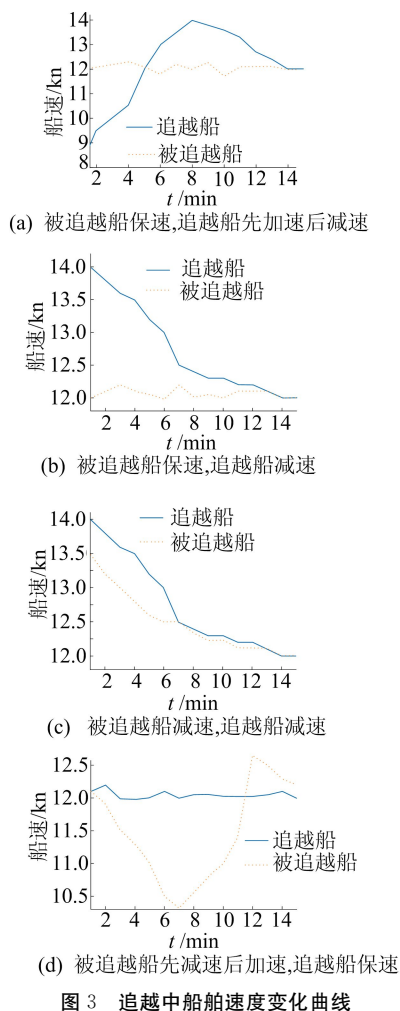
为了便于研究,从样本中各提取一条从左侧和右侧追越的船舶进行具体分析(见图2),从图2还可以看出,在追越过程中,追越船率首先要转向以增加横向距离。如果转向范围足够大,那么会迫使被追越船减速慢行。当追越船能保证与被追越船间有足够的横向安全距离时,追越船航向不变,航速逐渐恢复至转向前,并根据转向结束之后被追越船的速度进行本船速度的调整,在追越完成后的一段时间内,两船的速度一般还是趋向一致,安全驶过后再进行变化。提取、总结出4种类型的速度变化曲线如图3所示。

从图3可以看出速度的“同步”趋势,也体现了追越船为了达到预期速度进而采取换道行为。通过分析追越中前后船的速度变化可知速度适应机制在追越过程中的存在,即不同通道上的船舶在同步流状态作用下,速度有趋于一致的倾向。

同时,若两船之间的横距在30~50 m之间,则会产生无法避免的碰撞^[7]。因为船舶之间的相互作用力及力矩与船速平方成正比,所以在追越时,降低速度对两船而言是非常有利的。但是追越过程中速度过快降低,不但不利于缩短两船之间的作用时间,且过快降速会使操纵效率快速降低甚至使操纵能力丧失。假设被追越船将速度降低到保持操纵效果的最低值,不仅会减小作用力,还会增加两船之间的相对速度,缩短作用时间,大大缓解船舶相互作用的负面影响,因此被追越船进行减速相对高效而安全。该理论对于之后规则中加速和减速的制定也有着很大的帮助。

通过图像分析可以看出后船的速度受到前船影响,这与三相交通流理论中速度适应机制是吻合的。无论从能耗还是驾驶员心理角度出发,速

度适应机制中的“同步”有其合理性,因为跟随前船航行,所以既能保证本船的安全,使前后船舶处于一种相对静止的稳定状态,也对后续跟随船的行为起到限定作用。



2 不与他船产生紧迫局面的行为

2.1 主航道内的追越行为

在本模型中,航道按要求被离散成 2 条通道,船舶追越行为分为 2 个过程^[8],在模型中分别为单通道内航行和换道。显而易见,换道是航行中研究的关键,其中包括追越条件、追越时机、追越过程对船舶速度的影响以及后船追越前船时的冲突问题等。从追越轨迹分析来看,无论多复杂的情形,必须遵循不与他船产生紧迫局面的原则:

- ① 前船提供的可供追越的横向距离是否足够;
- ② 增大横距换道后,他船与后船是否产生了新的紧迫局面。

从样本中提取出航道内的 4 艘船舶的航行轨迹如图 4 所示,可以按要求分布于 2 条通道中。

在追越过程中,最为重要的是不与他船发生新的危险局面。从图 4 可以看出,追越要视情况而定,既可以从前船左侧也可以从右侧追越,要分会遇情况具体分析。

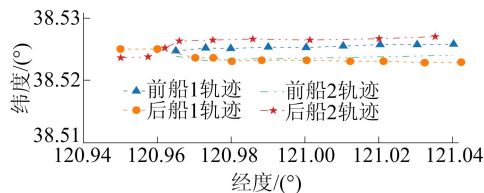


图 4 中,后船 2 与前船 2 之间的会遇距离接近安全距离,后船 2 的速度大于前船 2,且此时横向距离满足转向追越条件,因此后船 2 通过增大横距,采取转向追越的方式换道,且不与后船 1 产生紧迫局面,移动到前船 1 所在的航道,并在后船 1 的前方行驶,此时通过航行轨迹可以看出,此后后船 2 跟随前船 1 航行;而此时后船 1 在目前的航道内的航行受到前船 1 和后船 2 的牵制,无法维持期望航速。为了保证不与他船产生紧迫局面,后船 1 在后船 2 的追越行为结束后,也采取了换道行为,进入到前船 2 所在航道,此后在前船 2 的后方航行。

简而言之,设定后船为 A,前船为 B,若前船速度小于后船速度(即 $V_A < V_B$),则后船到达会遇点时,在保证安全距离的前提下,并在航道宽度允许的情况下,可以进行追越前船。在追越前船的转向中,驾驶员会在最大程度上保证转向时增大横距,不与他船发生新的危险局面,而在追越过程中,作为追越船的 B 船是重点参考对象,在其后的船舶为了保证安全,一般以追越船舶 B 的行动为参考,等待追越完成或判断没有与追越船产生任何紧迫局面的情况下,本船才会采取可能与追越船舶发生紧迫局面的行为。

2.2 追越过程中的冲突

将图 4 中的情况用元胞的形式来表示,如图 5 所示。图 5 中:实线框代表 t 时刻的船舶位置;虚线框代表 $t+1$ 时刻船的位置。当有 2 艘距离位置较近的船同时追越前方船舶时,可能会产生理论位置的矛盾冲突;当进行追越的 2 艘船舶的目标航道重合时,且两船同时采取转向换道行为,可能发生碰撞。

图 5 中,A 船、C 船在无法达到自身期望速度时,进行追越换道。可以发现,若此时两船都想抢

占自认为比较好的对方通道,则会产生碰撞。为了避免这类冲突的发生,本文参考海上避碰规则进行状态更新,即考虑船舶更新顺序和他船的下一步的状态进行规则迭代,即在 t 时刻对船舶进行状态更新时,按照避碰规则,以从前到后、从右到左的顺序,依次产生 $t+1$ 时刻各船的新的状态。在满足追越条件时,还充分考虑前侧和右侧船在 $t+1$ 时刻与本船的相对关系。由于在制定规则时,换道是由几率进行的,如果确实有他船采取行动,而本船不采取追越行动时,那么一切应以不与他船产生紧迫局面为首要前提条件。

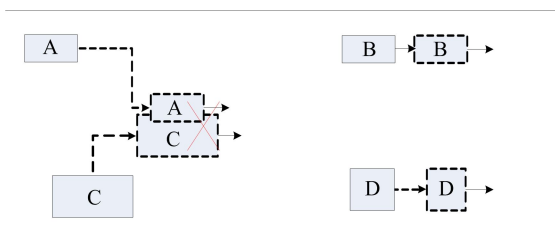


图5 追越冲突示意图

2.3 追越行为对速度的影响

船舶在追越过程中最初要转向以增大安全横距,如果这一行为为足够明显,那么会迫使后船速度受到影响进而减速。当后船能够保证足够的安全横距时,后船航向保持不变且速度逐渐恢复,并根据转向后进入的通道调整速度去超越原通道内的前船。在元胞自动机中,换道是瞬间完成的,为了模拟转向对速度的影响,假设在 t 时刻船舶进行转向,等到达目标通道后船舶速度下降 ΔV ,然后在单通道内追越受限条件下的速度适应机制作用下,逐渐加速并恢复到追越前的原速度。速度下降程度 ΔV 与追越时的前后船距离、前后船速度差、转向幅度有关。因为本文在仿真离散通道时,对横向距离进行了安全距离处理,所以在制定规则时,速度下降程度 ΔV 只与前后船之间的距离和速度差有关,这与本文引入的速度适应机制密切关联,即减速幅度的大小与前后船的速度差密切相关。

规则中,在本船换道减速恢复至原速度后,根据规则在保持最小安全距离前提下,如果下一时刻发现前船的速度比本船的速度小,那么本船将要大幅度减速至小于前船速度,并在规则作用下速度逐渐趋于前船;如果发现前船的速度比本船的速度大,那么本船减速的幅度将变小,并根据规则在后续的行为中逐渐加速至趋于前船速度,直

到其他跟随或追越行为发生。通过这些规则,前船的影响被添加到本模型的规则中。

2.4 追越时机和减速幅度

在后船追越中,若满足追越条件,则需要确定追越时机。根据研究统计显示,追越中的避碰行动有89.3%是在距离被追越船4 n mile以内采取的^[3]。这体现出驾驶员认为前后两船只有在一定距离内的换道行为才构成追越局面。其中,基于模糊理论确定船舶碰撞危险度来确定避碰时机的方法得到最为广泛的应用。而在仿真中,为了便于模拟,通常可以根据实际仿真需求和统计规律确定追越时机。

通过对上文中航道内的轨迹进行分析以及对样本中的减速行为进行统计,绘制减速与距离关系曲线,如图6所示。从图6可以看出,最小距离保持在0.8 n mile处,接近于 $\Delta V=2$ kn这条曲线,另外2条分别是前后船相对速度为 $\Delta V=4$ kn和 $\Delta V=6$ kn时的曲线。

从动力学角度和散点分布来看,船舶采取减速行为的最佳时机是在曲率最大值处,也就是曲线最弯曲处。图6曲线不但可以确定船舶采取减速的时机,还可以确定减速的幅度,后文规则中速度变化量 $E_{(i,t)}$ 制定的标准就是基于图6中的曲线进行确定的。

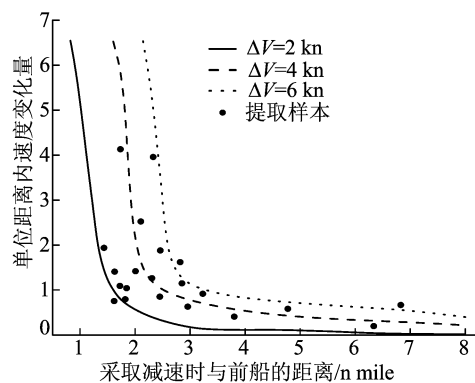


图6 不同速度差下船间距离与减速幅度关系

2.5 汇入处航行行为

船舶E在主航道按3.1节规则演化时,准备汇入到主航道的情形如图7所示。从图7可以看出,此处以不影响主航道航行行为为前提,船舶E加入自己的判断条件,如果邻近入口处满足进入条件,即进入后与前后船之间可以保证安全,那么可以驶入主航道,且进入2条航道的概率相同(图7a);如果不满足进入条件,那么减速等待进入(图7b)。

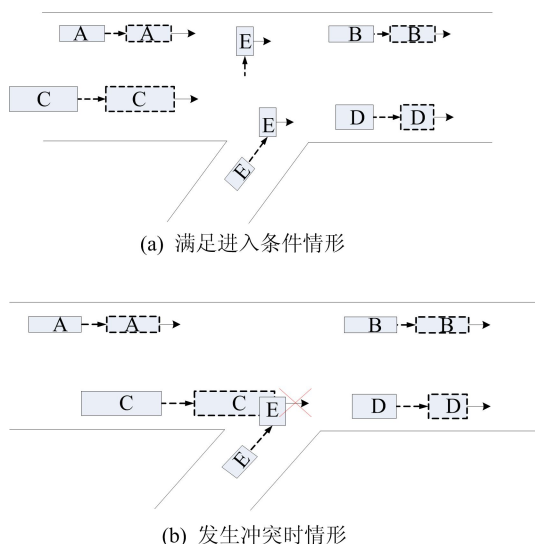


图 7 不同情形时的追越冲突示意图

3 仿真规则

3.1 航道内的追越规则

为了便于模拟,本文将航道离散成 2 条通道,采取周期边界条件,且只设一条汇入航道入口。设 t 为当前时刻; N 为航道内的船舶数量; $d_{f(i,j)}$ 为 t 时刻船 i 和船 j 之间的距离; $V_{(i,t)}$ 为 t 时刻船 i 的速度; $V'_{(i+1,t+1)}$ 为 $t+1$ 时刻 i 船自身前进时能达到的预期速度; D_{safe} 为安全距离; 各船的航行状态和所处位置均为已知。可以根据下述规则获取各船在 $t+1$ 时刻的状态及位置。在航道中,首先确定本船舶所处的航道; 然后按照从前到后、从右到左的顺序依次遍历整个航道内的船舶, 遍历顺序^[9]依次从 1 ~ N 。设当前遍历到第 i 船, 单向通道内可追越条件下的船舶追越行为对应的演化规则如下。

(1) 加速与减速。由于在元胞自动机中换道是瞬间完成的, 因此加速和减速都是在追越受限的单通道中完成, 换道是在单通道的规则下, 加入换道条件来进行^[10]。

加速公式为:

$$V_{(i,t+1)} = \min(V_{(i,t)} + 1, V_{\text{max}}) \quad (1)$$

减速公式为:

$$V_{(i,t+1)} = \min(V_{(i,t+1)} + 1, d_{f(i,j)} + V'_{(i+1,t+1)}) \quad (2)$$

其中

$$V'_{(i+1,t+1)} = \min[V_{\text{max}} - 1, V_{(i+1,t)}, \max(D_{\text{safe}}, d_{f(i+1,j)} - 1)] \quad (3)$$

新模型的框架是在基本图理论下, 根据前后船距离和前船速度变化的概率 p 进行随机

慢化, 即

$$V_{(i,t+1)} = \max(V_{(i,t+1)} - 1, V_{(i,t)} - E_{(i,t)}) \quad (4)$$

其中, $E_{(i,t)}$ 为受到随机慢化影响而发生的速度变化量, 根据 2.4 节中仿真需求和统计设定, 使其发生减速后的船速更符合实际。 p 的计算公式为:

$$p = \begin{cases} p_1, & d_{f(i,j)} + V'_{(i+1,t+1)} > D_{\text{safe}}; \\ p_2, & d_{f(i,j)} + V'_{(i+1,t+1)} < D_{\text{safe}} \end{cases} \quad (5)$$

以上分析表明, 速度适应机制在 2 条航道中得到体现, 使 2 种理论的合理部分结合起来, 形成一个处于基本图方法和三相交通流理论之间的模型。

(2) 如果 i 船与前船 j 的距离小于 D_{safe} , 即 $d_{f(i,j)} < D_{\text{safe}}$, 那么判断航道内是否满足 i 船的追越条件, 并确定相邻航道内的航行情况。当 $i > 2$ 时, 前面船 1 至船 $i-1$ 在 $t+1$ 时刻的状态和位置均可知。根据 3.1 节中方法进行判断时, 首先判断在 t 时刻船 j 可能对船 i 产生的影响; 然后判断船 1 至船 $i-1$ 在 $t+1$ 时刻对船 i 的影响。如果无法满足船 i 换道条件, 那么船 i 需要减速跟随^[11], 并保持 $d_{f(i,j)} \geq D_{\text{safe}}$ 。

(3) t 时刻在汇入处的船舶设为 l , 应判断 $t+1$ 时刻主航道的船舶航行情况, 如果 $t+1$ 时刻, 前方 2 条航道近入口处有船舶存在, 则船 l 应减速航行, 等待空位。如果 $t+1$ 时刻近入口处没有船舶存在, 且远入口处也没有船舶存在, 那么此时入口处船舶有相同几率选择 2 条航道的任意一条航行^[12]; 入口处的船舶属于带有几率的干扰型存在, 对于主航道交通流波动起着一定干扰作用。

(4) 当船舶不进行追越, 按照跟随前船航行规则, 且需按照规则(1)中速度适应机制, 在单通道内进行加速和减速, 并获取船 i 在 $t+1$ 时刻的状态及位置, 进行航道内 N 艘船状态的更新。

(5) 进行追越。在可追越前提下, 判断船 i 是否要采取换道行为。当船 i 速度大于前船 j , 在不减速的条件下, 原通道中两船间距无法满足下一时刻的安全距离, 即

$$\min\{V_{(i,t)} + 1, V_{\text{max}}\} > \max\{d_{f(i,j)}, D_{\text{safe}}\} + V'_{(i+1,t+1)} \quad (6)$$

如果相邻通道有空余位置, 那么采取换道行为, 即

$$d_{(i,t)}^{\text{front}} > d_{f(i,j)} + V'_{(i+1,t+1)} \quad (7)$$

且当船 i 换道进入新通道时, 不与新通道内的前后船产生新的紧迫局面, 则换道行为完成, 即

$$d_{(i,t)}^{\text{back}} > D_{\text{safe}} \quad (8)$$

其中: $d_{(i,t)}^{\text{front}}$ 为船 i 在 t 时刻与相邻航道的前船的空

间间距; $d_{(i,t)}^{back}$ 为船 i 在 t 时刻与相邻航道的后船的空间间距。换道完成后,在本通道内进行速度规则的改变,直到进行下一次换道行为。

由于海上换道和道路上一样,有着不确定性,本模型中换道规则只将前后船之间的空间距离以及速度变化作为参考。但经过一定时间步的数值模拟仍然可以获得有价值的结论。

(6) 通过上述规则,可以获得船 i 及其他船舶在 $t+1$ 时刻的位置和航行状态。然后进行下一艘船舶的位置和状态的更新,最后全部 N 艘船舶进行完规则更新,再进行下一时刻的更新。

3.2 安全距离及船舶尺寸

船舶速度相对于车辆的速度较低,单纯借鉴道路上的安全距离无法体现船舶间的安全距离,这时需要引入船舶领域这一概念。

根据文献[1,7],并考虑进行建模、计算的难易和便捷,本文最终选取藤井的船舶领域,即最小的船舶领域为6倍的本船船长,以本船为中心,向前后各延伸 2.5 倍船长作为与后船之间的最小安全距离。

因为安全距离与船长密切相关,所以通过 AIS 数据的分析对船舶尺寸进行统计,见表 1 所列,并将这些比例纳入到船长设定中,即元胞代表的船舶尺寸并不相同,这样计算出的安全距离也更为符合实际。

为了便于模拟和计算,本文对船长采取近似取值,即 60~90 m 长度船舶统一取值 90 m,大于 300 m 的大型船舶,统一取值 300 m。

表 1 船舶尺寸

船长/m	比例/%	船长/m	比例/%
60~90	5	211~240	5
91~120	15	241~270	5
121~150	40	271~300	5
151~180	15	>300	5
181~210	5		

3.3 仿真结果

根据 3.1 节、3.2 节的内容,并根据航道中限速原则设定 $V_{max}=16$ kn,并设定类匝道入口处进入船舶的概率为 0.1,时间步长设定为 2 800 个时间步。船速度、流量与密度的关系如图 8 所示。

从图 8 可以看出,仿真速度最后整体趋向于稳定,符合速度适应机制,说明 2 种理论结合具有

合理性。当入口处进入船舶的概率增大时(对比组概率设定为 0.3,见图 8a),对航道的扰动性也随即增强,会出现平均速度下降,导致航道内船舶密度增大、整体流量下降等,追越、减速等微观现象不断涌现,拥堵等现象在上述微观行为不断加剧后可能会发生。

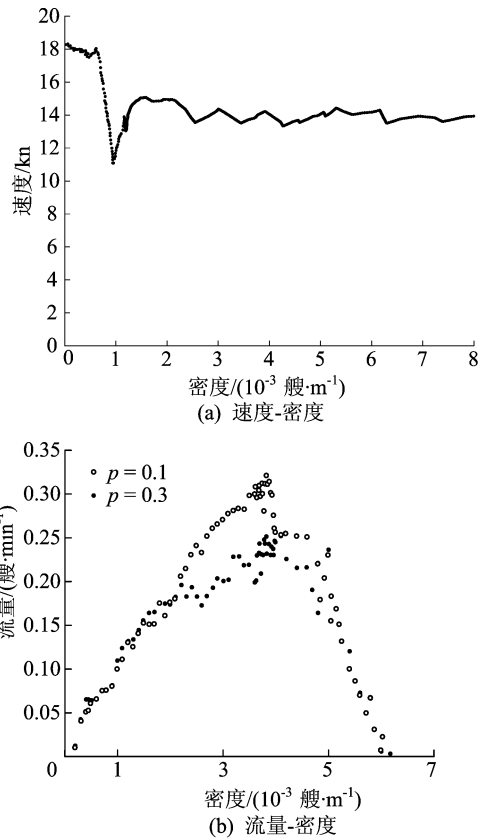


图 8 船速度、流量与密度的关系

3.4 时间序列检测

文献[13]指出,在同步流下,随着延迟时间 λ 的增加,平均速度、流量、密度的时间序列的自相关函数以及流量与密度的时间序列的互相关函数全部趋向于 0。仿真数据的自相关和互相关函数分析如图 9 所示。

从图 9 可以看出,这些相关函数^[5,13]趋向于 0,仿真数据表现出同步流的特征。

自相关函数公式为:

$$a_x(\lambda) = \frac{x(t)x(t+\lambda) - x(t)^2}{x^2(t) - x(t)^2} \quad (9)$$

互相关函数公式为:

$$c_{x,y}(\lambda) = \frac{x(t)y(t+\lambda) - x(t)y(t)}{\sqrt{x^2(t) - x(t)^2} \sqrt{y^2(t) - y(t)^2}} \quad (10)$$

其中: $x(t)$ 、 $y(t)$ 为平均速度、流量、密度的时间序

列; λ 为延迟时间。

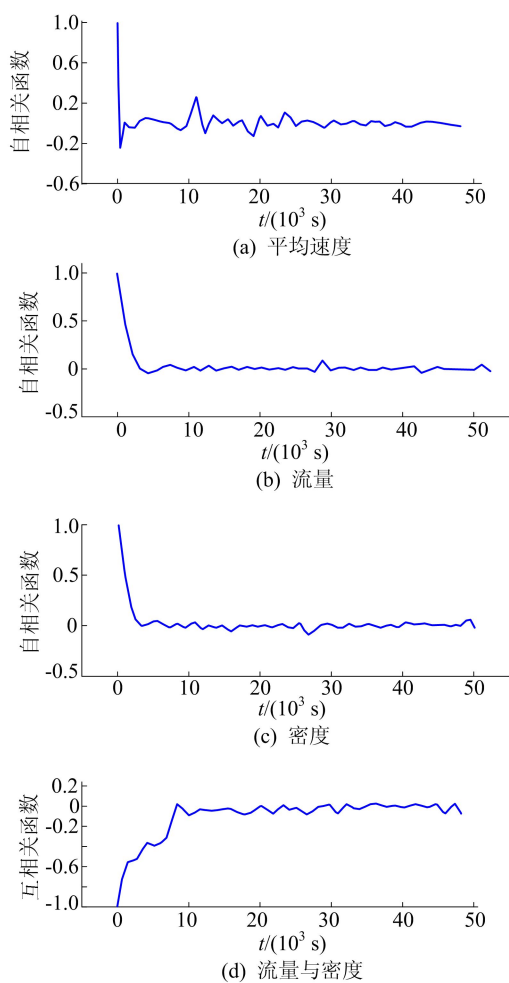


图 9 相关函数分析

4 结 论

通过本文分析可以看出,仿真整体表现出的性质是属于基本图理论框架下的,并没有出现三相交通流中二维散点区域的明显特征,但从时间序列检测来看,该仿真模型出现了同步流的一些特征。说明该仿真结合了 2 种理论的合理部分,是一个介于基本图理论和三相交通流理论的过渡模型。通过该仿真模型,还可以进一步研究航道汇入处入口的船舶进入概率,以及主航道内船舶尺寸的所占比例变化对于整条航道交通流的影响,参考结合具体航道内的 AIS 数据,可以形成对应航道内的仿真研究,对目前主要基于传统基

本图理论下模型的研究提供了一个新的思路。

[参 考 文 献]

- [1] 冯宏祥,孔凡邮,肖英杰,等. 基于 AIS 的元胞自动机模型的船舶交通流特征参数分析[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2014,38(2):324-328.
- [2] QU X, 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.
- [3] QI L, ZHENG Z Y, GANG L H. A cellular automaton model for ship traffic flow in waterways[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,2017,471:705-717.
- [4] 高坤. 从基本图方法到三相交通流理论[D]. 合肥: 中国科学技术大学,2008.
- [5] 夏运达. 基于元胞自动机模型的道路交通流复杂特性的研究[D]. 长沙: 湖南大学,2018.
- [6] BORIS S K, SERGEY L K, DIETRICH E W. Cellular automata approach to three-phase traffic theory[J]. Journal of Physics A: Mathematical and General,2002,35(47):9971.
- [7] 吴兆麟,朱军. 海上交通工程[M]. 大连: 大连海事大学出版社,2004.
- [8] LIU J X, ZHOU F, WANG M Q. Simulation of waterway traffic flow at harbor based on the ship behavior and cellular automaton, 2010 [C]//2010 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence. [S. l. : s. n.],2010:23-24.
- [9] QIAN Y S, FENG X, ZENG J W. A Cellular automata traffic flow model for three-phase theory[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2017, 479 (1): 509-526.
- [10] SUN Z, CHEN Z L, HU H T, et al. Ship interaction in narrow water channels: a two-lane cellular automata approach[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,2015,431:46-51.
- [11] 柯姜岑. 基于元胞自动机的水运枢纽运输组织研究[D]. 武汉: 武汉理工大学,2012.
- [12] LI X G, GAO Z Y, JIA B, et al Deceleration in advance in the Nagel-Schreckenberg traffic flow model [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2009, 388(10):2051-2060.
- [13] NEUBERT L, SANTEN L, SCHADSCHNEIDER A, et al. Single-vehicle data of highway traffic: a statistical analysis [J]. Physical Review E,1999,60(6):6480-6490.

(责任编辑 张 镛)