

11-30-2023

A Cellular Automata Model for Simulating Ships Passing Through Waterways with Alternating Wide and Narrow Sections

Yulong Sun

Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China,
ylsun0124@dlnu.edu.cn

Jianfeng Zheng

Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China,
jfzheng@dlnu.edu.cn

Jiaxuan Han

Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Chao Li

Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation. For more information, please contact xtfzxb@126.com.

A Cellular Automata Model for Simulating Ships Passing Through Waterways with Alternating Wide and Narrow Sections

Abstract

Abstract: For improving the traffic efficiency of wide and narrow alternating waterways, considering Kiel Canal as an example, according to the structural characteristics of Kiel Canal with alternating width and narrow sections, a two-way ship traffic flow cellular automata model is established, and the simulation of ships passing through Kiel Canal is studied. Cellular space is set up according to the actual structure of Kiel Canal, and the evolution rules are set up based on the fixed block theory and moving block theory. In particular, due to the structure of Kiel Canal, large ships cannot pass simultaneously in the narrow section. Therefore, appropriate waiting rules are established in the cellular automata model. In the simulation and analysis, the influence of different ship inflow rates, proportions of large and small ships, and safety distance between ships is mainly discussed. Based on the simulation results, the bottleneck identification and improvement strategy are further studied for improving ships passing through Kiel Canal. The results show that the bottleneck lies in the long narrow section of Kiel Canal, which makes a large number of ships waiting in the canal.

Keywords

waterway transportation, Kiel Canal, cellular automata model, ship traffic flows, bottleneck identification

Recommended Citation

Sun Yulong, Zheng Jianfeng, Han Jiaxuan, et al. A Cellular Automata Model for Simulating Ships Passing Through Waterways with Alternating Wide and Narrow Sections[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2419-2428.

面向宽窄交替航道的船舶交通元胞自动机模型

孙瑀隆, 郑建风*, 韩佳轩, 李超

(大连海事大学 交通运输工程学院, 辽宁 大连 116026)

摘要: 为了提高宽窄交通航道的通行效率, 针对宽窄交替的结构特点, 以基尔运河为例, 根据其航道宽窄段交替结构的特点, 建立了双向船舶交通流元胞自动机模型, 研究基尔运河的船舶交通流仿真。根据基尔运河的实际结构建立元胞空间, 并基于固定闭塞理论和移动闭塞理论建立演化规则。基尔运河的结构导致大型船舶无法在狭窄的区间内同时通过, 为了描述该现象, 在元胞自动机模型中建立了合适的等待规则。在仿真分析中, 主要讨论了不同船舶入流率、大小船舶比例、船舶间安全距离的影响。在仿真结果的基础上, 进一步研究了基尔运河船舶交通流改善的瓶颈识别和改进策略。结果表明, 基尔运河窄段长度过长是瓶颈所在, 其使得运河内船舶大量停泊等待。

关键词: 水路运输; 基尔运河; 元胞自动机模型; 船舶交通流; 瓶颈识别

中图分类号: U612.3; TP391.9 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2023)11-2419-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.22-0599

引用格式: 孙瑀隆, 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, 2023, 35(11): 2419-2428.

Reference format: Sun Yulong, Zheng Jianfeng, Han Jiaxuan, et al. A Cellular Automata Model for Simulating Ships Passing Through Waterways with Alternating Wide and Narrow Sections[J]. Journal of System Simulation, 2023, 35(11): 2419-2428.

A Cellular Automata Model for Simulating Ships Passing Through Waterways with Alternating Wide and Narrow Sections

Sun Yulong, Zheng Jianfeng*, Han Jiaxuan, Li Chao

(Transportation Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China)

Abstract: For improving the traffic efficiency of wide and narrow alternating waterways, considering Kiel Canal as an example, according to the structural characteristics of Kiel Canal with alternating width and narrow sections, a two-way ship traffic flow cellular automata model is established, and the simulation of ships passing through Kiel Canal is studied. Cellular space is set up according to the actual structure of Kiel Canal, and the evolution rules are set up based on the fixed block theory and moving block theory. In particular, due to the structure of Kiel Canal, large ships cannot pass simultaneously in the narrow section. Therefore, appropriate waiting rules are established in the cellular automata model. In the simulation and analysis, the influence of different ship inflow rates, proportions of large and small ships, and safety distance between ships is mainly discussed. Based on the simulation results, the bottleneck identification and improvement strategy are further studied for improving ships passing through Kiel Canal. The results show that the bottleneck lies in the long narrow section of Kiel Canal, which makes a large number of ships waiting in the canal.

Keywords: waterway transportation; Kiel Canal; cellular automata model; ship traffic flows; bottleneck identification

收稿日期: 2022-06-01 修回日期: 2022-06-24

基金项目: 国家自然科学基金(71871036, 72031005, 71831002)

第一作者: 孙瑀隆(1996-), 男, 博士生, 研究方向为物流系统建模与仿真、物流信息管理。E-mail: ylsun0124@dlmu.edu.cn

通讯作者: 郑建风(1981-), 男, 教授, 博士, 研究方向为物流系统建模与仿真、物流信息管理。E-mail: jfzheng@dlmu.edu.cn

0 引言

海运承担了全球超过 70% 的国际贸易运输量，而运河作为海运中重要的运输通道，其船舶通行效率与海运的运输效率和经济效益息息相关^[1]。本文以基尔运河为例，研究基尔运河的船舶通行效率。基尔运河是连接北海和波罗的海，长约 100 km 的人工水道。作为世界上最繁忙的双向航道之一，每年都会有 3~4 万艘船舶通过该运河。由于运河包含多个狭窄段，具有宽窄交替结构，大型船舶在狭窄段无法同步通过，因此需要确定哪些船舶必须在运河宽段处等待，以确保所有船舶快速安全通过，进而提高运河的通行效率^[2]。同时，由于宽窄段的交替出现，导致部分船舶在等待时带来了后续船舶的拥堵，当船舶数量过多时尤为明显，因此合理地制定船舶等待规则对缓解运河的拥堵情况，提高运河的通行能力，同时对减少船舶的总通行时间、系统的总等待时间有着重要的意义。

在已有关于基尔运河的相关研究中，文献[3]提出了以最小化船舶运输时间为目标的基尔运河双向船舶调度优化模型，包括可变船速、侧线段容量和船舶等待时间限制，并提出了一种启发式算法以求解模型。文献[4]以基尔运河为研究对象，讨论了由单轨网络列车调度问题扩展而来的船舶交通控制问题。以上研究主要从建立数学规划模型并设计求解算法的角度研究了基尔运河的船舶通行效率。本文通过微观仿真的方法，提出基于元胞自动机的船舶交通流模型，模拟了不同场景下的基尔运河船舶通行情况。

元胞自动机是一种广泛应用于道路交通流、轨道交通流仿真的动力学模型^[5-9]。近年来，部分学者已将元胞自动机模型应用于海运领域。文献[10]提出了一种双车道元胞自动机模型来研究狭窄水道内的交通流模式，研究表明船舶相互作用对流量有明显的抑制作用。文献[11]基于空间逻辑映射，提出了船舶交通流元胞自动机模型以解决水道的空间离散化规则和船舶运动规则的更新问题。

类似地，文献[12]提出了一种元胞自动机模型用来解决交通流建模中时空离散化、安全距离和避碰计时 3 个因素难以确定的建模问题，并以长江某航道为算例验证了该模型的有效性。文献[13]在 NaSch 模型的基础上考虑了船舶超越与对遇，建立了双向航道的船舶交通流元胞自动机模型。文献[14]基于元胞自动机模型，设置了船舶在航道中的分段运动规则以探究航道通过能力。

元胞自动机模型在交通领域主要应用于道路交通流仿真，海运领域中的相关研究较少，特别是鲜有关于特殊结构水道中船舶通行的研究。为了研究基尔运河的船舶通行规律与通行效率的影响因素，本文提出双向船舶交通流元胞自动机模型来研究基尔运河船舶交通流仿真，同时基于仿真结果，进一步研究基尔运河船舶交通流系统的瓶颈识别与改进策略。

本文的主要贡献体现在以下方面。第一，以基尔运河为例，提出了面向宽窄交替航道的船舶交通流元胞自动机模型。第二，根据基尔运河的运河结构与实际运营情况设置元胞空间，并基于固定闭塞理论和移动闭塞理论建立演化规则。第三，在仿真分析中讨论了不同船舶入流率、大小船舶比例、船舶间安全距离的影响，并基于仿真结果进行了瓶颈识别。最后，针对运河瓶颈提出了优化策略并验证了其有效性。

1 模型建立

根据基尔运河的结构特点，本节建立双向船舶交通流元胞自动机模型。模型的建立主要包括元胞空间和演化规则。

1.1 元胞空间

基尔运河中的宽段与窄段结构是交替出现的，根据运河的先天结构导致长度不一，可分为 12 个较宽段和 11 个较窄段。在较窄段，小型船舶之间可以在虚线两侧相向而行、相互通过，而大型船舶无法相互通过，需要其中一艘船舶在较宽段等

待另一艘船舶通过后再进入到较窄段并通过。在较宽段, 所有型号的船舶都可以相向而行、相互通过, 并且可以在保证安全的情况下, 超越前方的船舶。

基尔运河航道长度约 100 km, 需要将整个运河划分为合理长度的元胞空间, 设定合理的元胞长度以便模型和仿真系统的建立。元胞长度的设定参考文献[2-4], 设每个元胞的长度为 30 m, 其元胞状态包括船型、该元胞是否被占据、该元胞是否头部元胞、速度、方向、位置、等待状态以及通行优先级。此外, 本文假设整个航道是由 3 350 个元胞组成, 总长度为 100.5 km, 与基尔运河的实际长度基本符合。同时, 3 350 个元胞会根据基尔运河的实际轮廓结构划分为 23 个区间段, 区间段的长度、宽度都是不同的, 其中包含宽段 12 个, 窄段 11 个, 宽段和窄段交替出现。每个区间段的长度也需要根据实际数据进行设定。参考文献[4]的研究, 本文基于基尔运河的轮廓结构, 将 23 个宽窄段的长度分别用不同的元胞数量来表示, 每个区间段的具体长度已在表 1 中给出。宽段的长度从 30~200 个元胞不等, 窄段从 70~420 个元胞不等, 其中窄段的长度占整个运河长度的比重要比宽段大很多。

除了航道长度和宽窄段长度的设定, 还需要设定每个区间段的宽度。基尔运河是双向可通行的航道, 同时存在宽窄交替区间段, 因此在设定模型中元胞空间的宽度时, 假定航道中宽段的宽

度为 4 个元胞, 窄段的宽度为 2 个元胞。当船舶处于窄段时, 小型船舶可以相互通过, 大船与其他船舶无法相互通过; 当船舶处于宽段时, 任何船舶都可以相互通过。综上, 本文设置的基尔运河结构与元胞空间的平面布置关系如图 1 所示。

表 1 基尔运河各区间段元胞个数
Table 1 Cell number in each section of Kiel Canal

区间段	宽段	窄段
1	100	/
2	/	70
3	40	/
4	/	210
5	60	/
6	/	140
7	30	/
8	/	250
9	200	/
10	/	280
11	60	/
12	/	270
13	50	/
14	/	250
15	35	/
16	/	170
17	35	/
18	/	420
19	40	/
20	/	385
21	35/	/
22	/	120
23	100	/

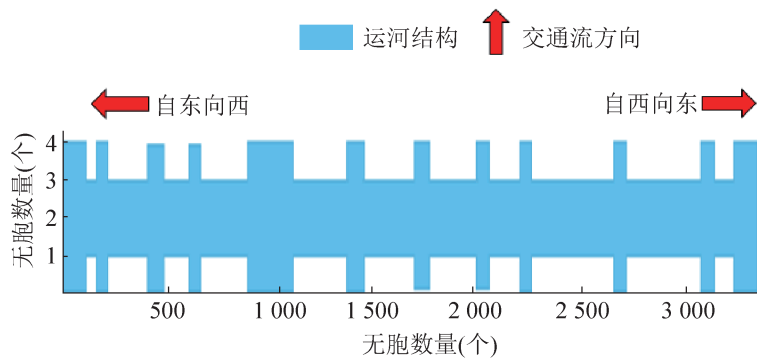


图 1 基尔运河元胞空间结构图
Fig. 1 Cellular space structure of Kiel Canal

1.2 演化规则

为了研究基尔运河船舶交通流仿真, 本文将建立的双向船舶交通流元胞自动机模型采用开放型边界条件, 当船舶从西侧进入航道往前行驶到东侧边界后离开系统, 不再重新出现在系统里。在模型中, 元胞空间存在宽窄交替的特殊空间结构, 虽然船舶可以在宽段 j 进行等待或者相互并行通过, 但是对于宽段 j 是有容量限制 C_j 的, 如果后续船舶无限制进入宽段, 宽段等待的船舶数量 N_j 过多, 会导致船舶追尾或者堵塞。为避免船舶碰撞以及航道堵塞的发生, 本文基于移动闭塞理论与固定闭塞理论^[15-16], 将整个基尔运河划分为 23 个闭塞区间。当 $C_j > N_j$ 时, 元胞状态的演化借鉴移动闭塞理论, 即采用目标—距离控制模式, 以前方船舶的尾部来确定当前元胞在下一时间步长的转化, 以此保证与前方船舶之间存在足够的安全距离。当 $C_j = N_j$ 时, 元胞状态的演化借鉴固定闭塞理论, 即当容量满了之后, 将元胞空间第 $j, j+1, j+2$ 段划分为固定闭塞区间, 每个区间最多容纳 5 艘船舶, 将这 5 艘船舶所占据的整体元胞空间看作一个整体, 即一个固定闭塞区间。基于以上的理论, 所有的船舶按照定义的速度更新规则、位置更新规则、行驶规则和停泊等待规则进行更新。考虑了船舶碰撞与航道堵塞现象与引入船舶流入规则后, 具体演化规则如下:

船舶从进入侧进入系统前需要确保有足够的空间容纳第 n 艘船舶, 如遇到前方堵塞导致无空间, 则第 n 艘船舶无法进入系统, 需要在系统外等待前方第 $n+1$ 艘船舶向前行驶后才可进入: 当船舶处于窄段时, 借鉴 NaSch 模型设置的演化规则为

$$x_{(n+1)_head}(t) + v_{n+1}(t+1) - d_{n+1} - x_{n_head}(t+1) - d_{safe} - d_n \geq 0 \quad (1)$$

式中: $x_{(n+1)_head}$ 为在 t 时刻第 $n+1$ 艘船舶的头部位置; $v_{n+1}(t+1)$ 为在 $t+1$ 时刻第 $n+1$ 艘船舶的速度; d_{n+1} 为第 $n+1$ 艘船舶的船身长度; d_{safe} 为船舶

之间的安全距离。

(1) 速度更新规则

船舶期望获得最大的行驶速度为

$$v_n(t+1) = \min(v_{max}, x_{(n+1)_head} + v_{n+1}(t+1) - d_{n+1} - d_{safe} - x_{n_head}) \quad (2)$$

(2) 位置更新规则

船舶现在的位置加上下一时间步长的位移便是下一时刻船舶应该所在的位置:

$$x_{n_head}(t+1) = x_{n_head}(t) + v_n(t+1) \quad (3)$$

(3) 占用对向航道行驶规则

船舶在宽段行驶时同时满足以下条件时则可以产生占用对向航道行驶:

$$x_{(n+1)_head} - d_{n+1} - x_{n_head} \leq d_{safe} \quad (4)$$

$$v_n(t) \geq v_{n+1}(t) \quad (5)$$

$$v_n(t) < v_{n_max} \quad (6)$$

占用对向航道行驶一般发生在前方大型船舶因窄道无法前行, 但后面的船舶是小型船舶可以进入窄道通行的情况下, 所以小型船舶可以占用对向航道超过大型船舶并进入窄道。

(4) 占用对向航道行驶安全规则

第 n 艘船舶在 T_1 时间步长内超越第 $n+1$ 艘船舶并回到原来的航道需要满足两船之间仍保证存在足够的安全距离:

$$T_1 v_{n_max}(t) - T_1 v_{n+1}(t) - 2d_{safe} - d_n \geq 0 \quad (7)$$

船舶占用对向航道行驶并超越前方船舶需要发生在宽段内, 即需要确保超越行为完成在第 n 艘船舶离开宽段前:

$$Seg_{n_head} - (x_{n_head} + T_1 v_{n_max}(t)) \geq 0 \quad (8)$$

式中: T_1 为占用对向航道行驶超过前方的船舶所需要的时间步长; Seg_{n_head} 为第 n 艘船舶所在宽段的头尾位置。

(5) 停泊等待规则

船舶在由宽段行驶到窄段时可能需要停泊等待对向船舶通过, 此时船舶的等待规则可描述为如下步骤:

step 1: 判断船舶类型。如果满足 $ship_type =$

small 则转到 step 2; 如果满足 $ship_type = big$ 则转到 step 3。

step 2: 如果满足以下任一条件: ① $C_j = N_j$; ② $Seg_{j+2} exist ship_{priority} > ship_priority_n$; ③ $Seg_{j+1} exist ship_type = big$, 则船舶速度更新为 $v_n(t+1) = Seg_{j_head} - x_{n_head}(t)$ 。否则, 进行令船舶速度等于 v_{max} 和 $x_{(n+1)head} + v_{n+1}(t+1) - d_{n+1} - x_{n_head} - d_{safe}$ 中的最小值。

step 3: 如果满足以下任一条件: ① $C_j = N_j$; ② $Seg_{j+1} exist ship$; ③ $Seg_{j+2} exist ship_{priority} > ship_n$; 则船舶速度更新为 $v_n(t+1) = Seg_{j_head} - x_{n_head}(t)$ 。否则, 进行令船舶速度等于 v_{max} 和 $x_{(n+1)head} + v_{n+1}(t+1) - d_{n+1} - x_{n_head} - d_{safe}$ 中的最小值。

如果满足以上 3 种情况则按照新的速度演化规则进行停泊。如果不满足以上 3 种情况则按照正常的速度演化规则向行驶。当船舶满足其中任意一个停泊等待规则时, 船舶需要靠边停泊。

2 数值模拟与分析

2.1 仿真参数

数值模拟中, 元胞空间的设定已经在第 1.1 节说明, 此处不再赘述。元胞状态分为大型船舶与小型船舶两类, 考虑大型船舶速度过快会带来较大的水波, 冲击力过强的水波会导致两边运河河岸逐渐损坏, 同时基于基尔运河的运营政策, 本文假设大型船舶的最大速度为 15 节, 小型船舶最大速度为 10 节。每一次模拟迭代 1×10^4 步, 步长为 1 s, 统计时, 取后 0.5×10^4 步以消除暂态的影响。通过改变基尔运河东西两侧船舶流入率、不同船型数量占比与船舶安全距离来模拟不同情况下的基尔运河双向通过状况。

2.2 时空特征分析

2.2.1 对照组设置

为了讨论不同因素对基尔运河通行效率的影响, 本文基于已有研究中的数据^[3], 设置了数值分析中的对照组。取西侧船舶流入率 $P_1 = 0.05$, 东

侧船舶流入率 $P_2 = 0.05$ 。大小船舶数量占比为 2:8, 船舶间安全距离为 3。图 2 为基于对照组参数仿真的时空图, 纵轴为时间, 横轴为空间位移。通过模拟得出船舶流量为 135 艘/天。

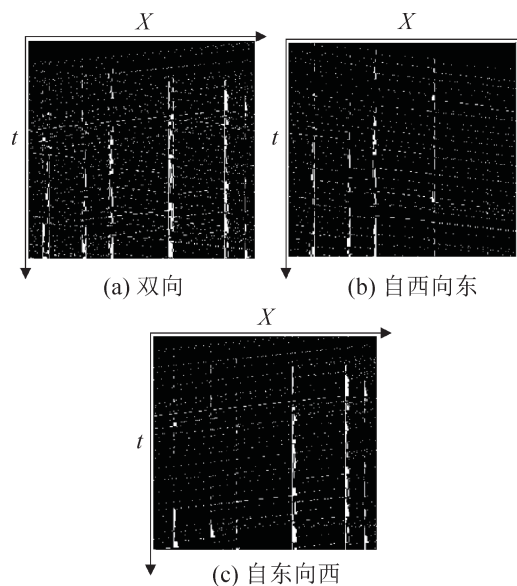


图 2 对照组时空图

Fig. 2 Time-space graph for comparison

2.2.2 不同船舶流入率的影响

图 3~5 为不同船舶流入率 P_1 和 P_2 下对双向通行与单向通行的时空图。大小船舶数量占比为 2:8, 船舶间安全距离为 3, 场景对应的船舶流量依次为 143, 110 和 99。通过对比对照组与 3 种场景发现, 船舶流入率越大, 进入基尔运河的船舶越多, 运河的流量和密度越大, 越容易引发船舶在宽段等待排队的现象, 从而造成运河的拥堵。

如图 3 所示, 当西侧船舶的流入率 P_2 调整到 0.07, 可以发现运河中的等待现象变得尤为突出, 造成了大量船舶在宽段停泊等待的现象, 但此时整个运河的流量有了提高, 从平均每天 135 艘(对照组结果)上升到 143 艘。然而船舶流量提高, 会导致部分船舶在运河中的总等待时间也随之提高。

如图 4~5 所示, 当西东两侧的船舶流入率 P_1 和 P_2 逐步调整至 0.025, 可以发现基尔运河中的船舶等待现象有明显减少, 偶尔会因为大船的存在产生等待现象。该情况下, 运河中船舶流量小于

对照组结果，运河的通行能力是完全满足船舶的通行需求的。另外，通过对拥堵等待位置的分析，可以发现当船舶流入率较大时，船舶等待现象会发生在所有宽段，靠近西侧的第 9 段宽段尤为明显；而船舶流入率较小时，船舶等待现象发生在靠近东侧的第 17, 19, 21 段宽段处。产生这种现象的主要原因是运河结构的不对称，宽窄长度不一且宽窄出现的位置无规律。西侧第 9 段宽段是

所有宽段中最长的，长度达到 200，是其他宽段的 3~6 倍，因此该段的船舶容量限制较大，会有较多的船舶进入该段并在该段停泊等待。由于当前方排队等待的船舶过多时，后面的船舶优先级较低，需要等待前方排队船舶和对向宽段中优先级较高的船舶通过窄段后才可以进入窄段，导致了等待时间的延长。

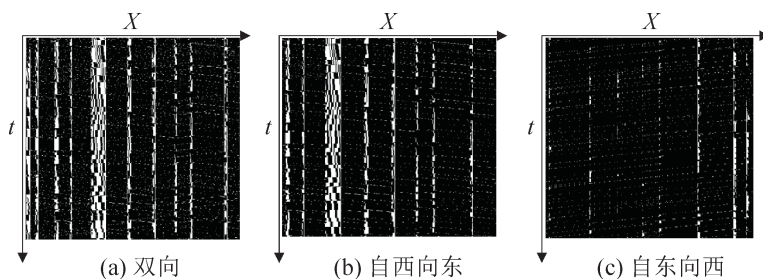


图 3 $P_1=0.07, P_2=0.05$ 下的时空图
Fig. 3 Time-space graph for $P_1=0.07, P_2=0.05$

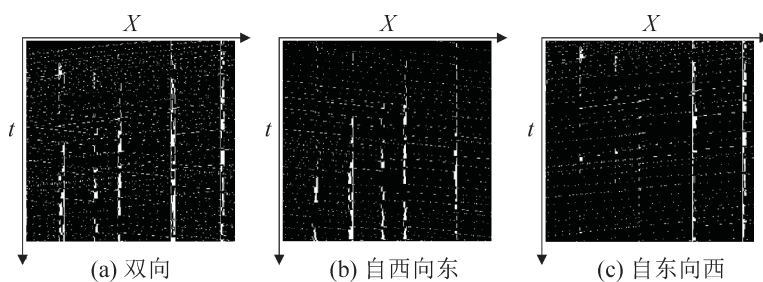


图 4 $P_1=0.05, P_2=0.025$ 下的时空图
Fig. 4 Time-space graph for $P_1=0.05, P_2=0.025$

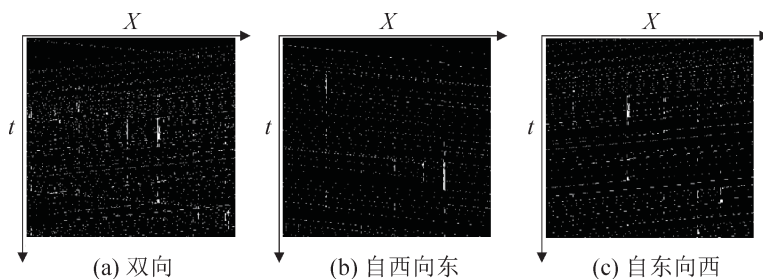


图 5 $P_1=0.025, P_2=0.05$ 下的时空图
Fig. 5 Time-space graph for $P_1=0.025, P_2=0.05$

2.2.3 不同船舶类型占比的影响

图 6~8 为不同船舶类型占比下双向通行与单向通行的时空图。船舶间安全距离为 3，取西侧船舶流入率 $P_1=0.05$ ，东侧船舶流入率 $P_2=0.05$ ，场景对应的船舶流量依次为 300、380 和 155。

通过对比上述不同船型占比场景的船舶流量可以发现，基尔运河内发生船舶停泊等待的主要因素是大型船舶的出现。随着大型船舶占比的逐渐降低，基尔运河中的停泊等待现象逐渐减少，同时运河的流量逐步提升，在既定规则下，船舶

的流量可以达到 380 艘/天, 是对照组的 2~3 倍。如图 6, 当小型船舶的占比逐渐提高, 可以看到明显变化趋势, 当小船占比达到 100% 的时候, 基尔运河内基本没有停泊等待现象, 在流入率较小的情

况下这是合理的。如图 8, 小型船舶的占比降低到 70%, 此时基尔运河中大船数量增加, 造成了更多的船舶停泊等待现象。

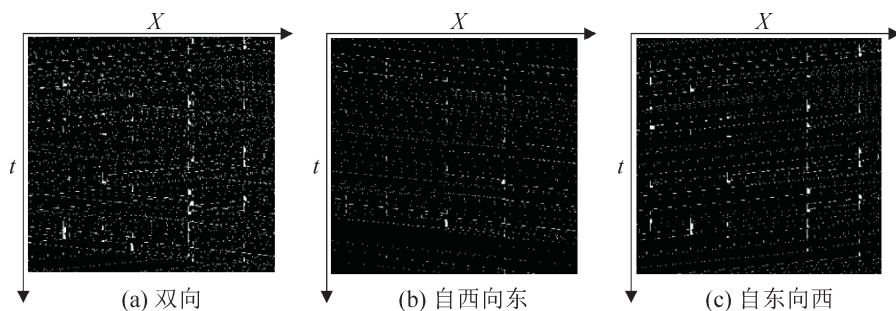


图 6 大小船舶占比=1:9 下的时空图

Fig. 6 Time-space graph for proportions of large and small ships: ratio of large and small ships=1:9

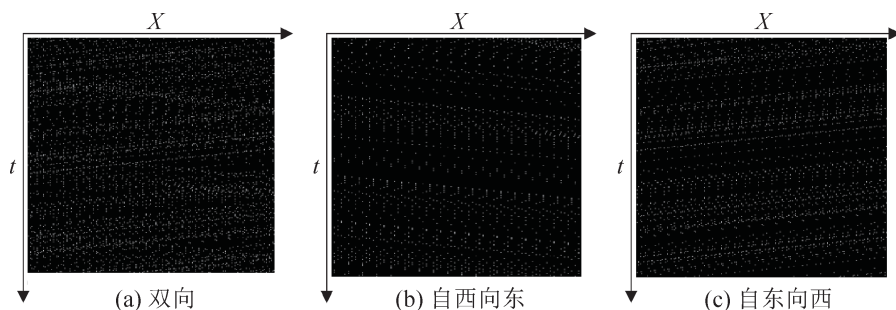


图 7 大小船舶占比=0:10 下的时空图

Fig. 7 Time-space graph for proportions of large and small ships: ratio of large and small ships=0:10

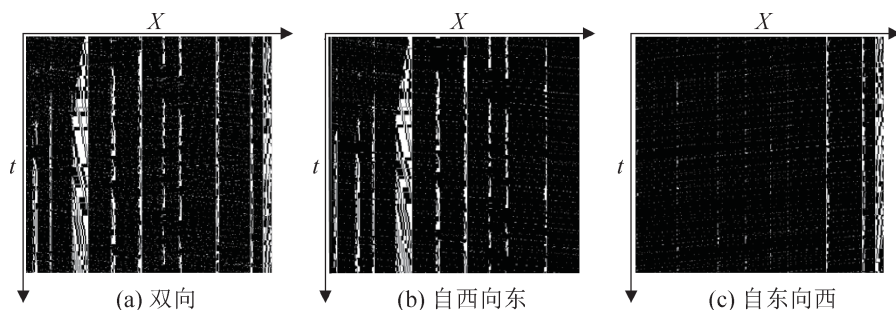


图 8 大小船舶占比=3:7 下的时空图

Fig. 8 Time-space graph for proportions of large and small ships: ratio of large and small ships=3:7

2.2.4 不同船舶安全距离的影响

图 9~11 为不同船舶安全距离下双向通行与单向通行的时空图。大小船舶占比=2:8, 取西侧船舶流入率 $P_1=0.05$, 东侧船舶流入率 $P_2=0.05$, 图 9 场景对应的船舶流量依次为 146, 114 和 103。

通过图 9~11 三种场景仿真结果与对照组的对比可以看出, 在其他参数保持不变的情况下, 随着船舶间安全距离的不断增大, 基尔运河中船舶停泊等待现象越来越明显, 船舶流量也受到了限制。当船舶安全距离逐渐增大后, 基尔运河宽段所容纳的船舶数量上限也随之降低。从图 9~11 中

可以看到，单向的时空图中停泊等待的线条变得更加细长，排队等待通过窄段的船舶密度变小，这就是安全距离增大、宽段容量上限下降导致的。

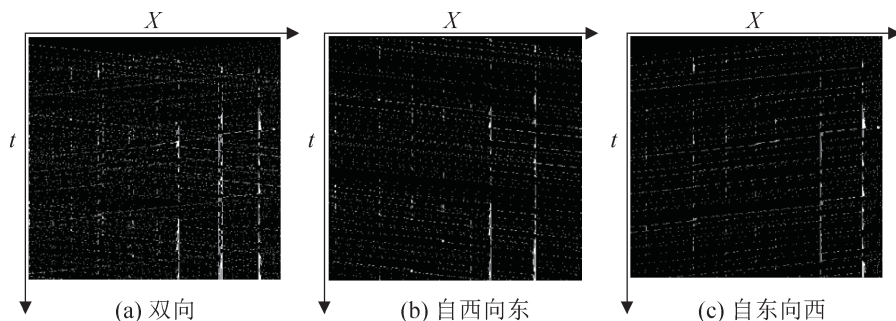


图 9 $d_{safe}=0$ 下的时空图
Fig. 9 Time-space graph with $d_{safe}=0$

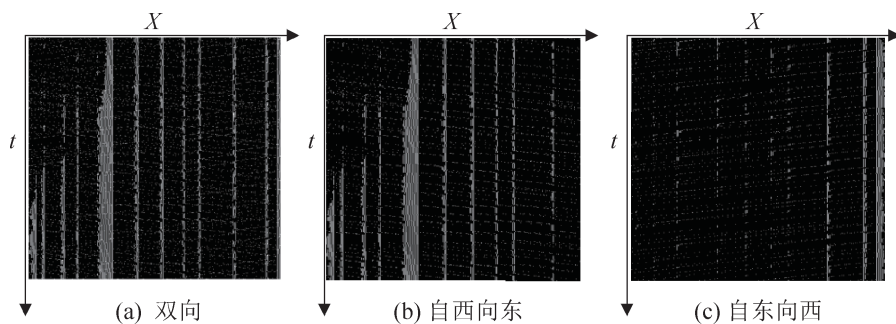


图 10 $d_{safe}=6$ 下的时空图
Fig. 10 Time-space graph with $d_{safe}=6$

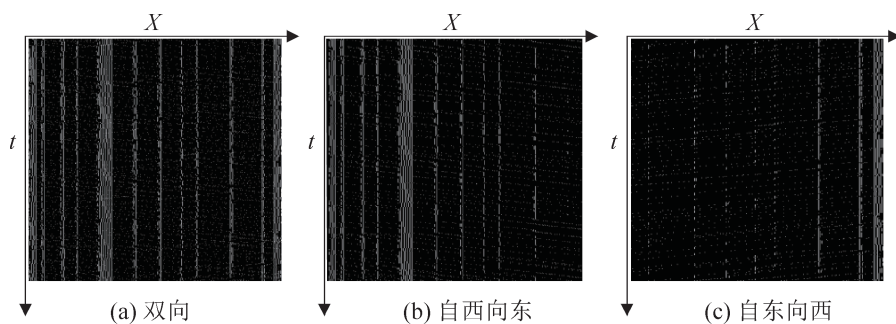


图 11 $d_{safe}=12$ 下的时空图
Fig. 11 Time-space graph with $d_{safe}=12$

2.3 瓶颈识别与改进

2.3.1 基尔运河的瓶颈效应

在基尔运河交通流元胞自动机模型仿真过程中，发现基尔运河的航道存在瓶颈效应，并且船舶的停泊等待也出现了类似蝴蝶效应的现象，其影响范围只局限于整个基尔运河内。

仿真中出现的瓶颈效应主要体现在图 3，8，10 中，由图可知，第 18，20 段窄段的长度是比较长的，且在该段中任何时刻大概率是有船舶在通行的，这就导致两个方向大型船舶想要通过该窄段就需要停泊等待优先级较高的船舶通过，而窄段距离过长导致了船舶停泊等待时间过长，船舶

等待时间过长就导致了后续船舶在宽段逐渐开始排队等待, 从而逐渐导致了整个基尔运河航道都出现了大量船舶等待现象。针对上述问题, 本文在仿真系统中对瓶颈位置做了优化, 以便研究基尔运河去除瓶颈前后的交通流情况的差异。

2.3.2 策略优化

策略优化主要体现在元胞自动机仿真模型的调整上。在前文的仿真实验中发现了基尔运河的瓶颈效应发生在 18, 20 段窄段, 因此在这里将 17~21 宽窄段的长度进行重新划分, 以此来检验通过航道结构优化来消除瓶颈效应的可行性。在此优化中主要的调整是将 17, 19, 21 宽段的长度增加, 而将 18, 20 的长度减少, 5 个区间段的总长度不变, 调整后的区间段长度如表 2 所示。其他仿真参数在优化前后保持不变。

表 2 基尔运河区间段长度优化

Table 2 Section length optimization of Kiel Canal		
序号	宽段	窄段
17	75(+40)	/
18	/	180(-240)
19	200(+160)	/
20	/	210(-170)
21	205(+170)	/

根据上述的调整以及仿真参数的设定, 重新对基尔运河进行了多次仿真实验, 得到了不同元胞空间结构情况下的时空图以及两种情况下的单位时间通过运河的船舶流量, 通过对比时空图和流量数据可以分析仿真优化的效果, 如图 12 所示。

图 6 中船舶拥堵等待现象明显比图 2(对照组) 中有所降低, 同样参数下改进后的船舶等待现象明显减少, 这也证明了研究中发现的瓶颈问题是真实存在的。此外, 通过分析对比同一时间段内的船舶流量, 可以发现在对瓶颈进行优化后航道的流量从 135 艘/天提升到 164 艘/天, 船舶通行效率在元胞空间结构优化后得到了明显提高。

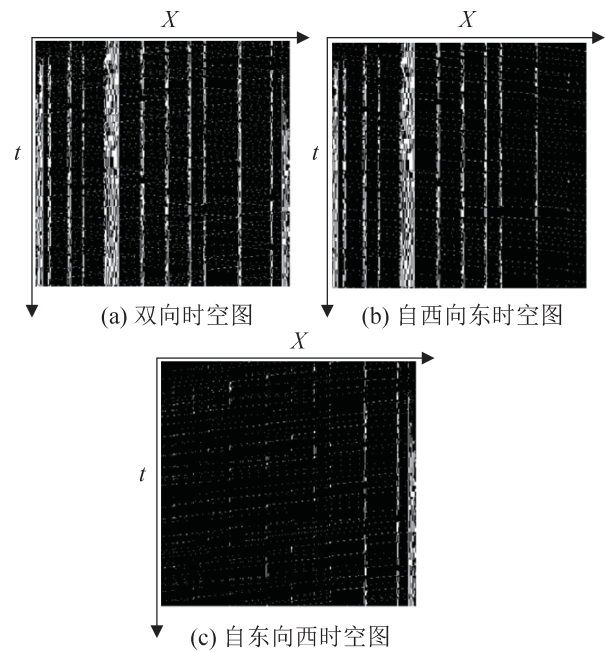


图 12 改进前后对比的时空图
Fig. 12 Optimized time-space graph

3 结论

本文基于基尔运河的宽窄交替的特殊运河结构, 利用元胞自动机模型对基尔运河船舶交通流进行建模仿真。根据基尔运河的结构设置元胞空间, 并结合运河实际运营情况设置演化规则。提出的基尔运河船舶交通仿真模型及其在不同场景下的实验结果表明: 船舶的流入率的增加, 会导致船舶在宽段停泊等待现象随之增加。大型船舶占比的增加会导致船舶停泊等待现象增加, 航道通行能力下降, 从而导致船舶流量的下降。在船舶距离方面, 随着船舶间的安全距离的增大会导致宽段的船舶容量上限下降, 从而导致后续船舶即便在窄段为空时也无法往前行驶, 从而带来了更多的停泊等待现象。在仿真结果的基础上, 本文进一步对基尔运河进行了瓶颈识别与策略优化。结果表明, 基尔运河是存在通行瓶颈的, 该瓶颈导致的运河瓶颈效应影响了运河的通行效率。受基尔运河双向非对称航道的影响, 西东两侧方向的瓶颈出现在不同位置。基尔运河 18, 20 段窄段长度过长, 是整个航道的瓶颈所在, 是导致大面

积停泊等待的主要因素。

参考文献:

- [1] Zheng Jianfeng, Zhang Wenlong, Qi Jingwen, et al. Canal Effects on a Liner Hub Location Problem[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2019, 130: 230-247.
- [2] Andersen T, Joakim Høgset Hove, Fagerholt K, et al. Scheduling Ships with Uncertain Arrival Times Through the Kiel Canal[J]. *Maritime Transport Research*, 2021, 2: 100008.
- [3] Meisel F, Fagerholt K. Scheduling Two-way Ship Traffic for the Kiel Canal: Model, Extensions and a Matheuristic [J]. *Computers & Operations Research*, 2019, 106: 119-132.
- [4] Elisabeth Lübbecke, Marco E Lübbecke, Rolf H Möhring. Ship Traffic Optimization for the Kiel Canal[J]. *Operations Research*, 2019, 67(3): 791-812.
- [5] 张琦, 肖文锦, 潘刚. 基于元胞自动机的轨道交通客流拥堵传播研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(4): 83-89.
Zhang Qi, Xiao Wenjin, Pan Gang. A CA-based Simulation Model of Urban Railway Large Passenger Flow Congestion Transmission[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(4): 83-89.
- [6] 邱小平, 于丹, 孙若晓, 等. 基于安全距离的元胞自动机交通流模型研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2015, 15(2): 54-60.
Qiu Xiaoping, Yu Dan, Sun Ruoxiao, et al. Cellular Automata Model Based on Safety Distance[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2015, 15(2): 54-60.
- [7] 张海, 倪少权, 吕苗苗. 基于元胞自动机模型的地铁列车折返间隔分析[J]. *交通运输工程与信息学报*, 2021, 19(2): 37-45.
Zhang Hai, Ni Shaoquan, Lü Miaomiao. Analysis of Subway Trains' Turn-back Headway Based on the Cellular Automaton Model[J]. *Journal of Transportation Engineering and Information*, 2021, 19(2): 37-45.
- [8] 施俊庆, 李志强, 李素兰, 等. 考虑双向交通的城市路网交通流元胞自动机模型[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2017, 17(2): 90-96.
Shi Junqing, Li Zhiqiang, Li Sulan, et al. A Cellular Automaton Model of Urban Road Network Considering Bidirectional Traffic[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2017, 17(2): 90-96.
- [9] 刘展宏, 杨秀建, 吴相稷, 等. 基于元胞自动机的雾天车辆跟驰建模与仿真[J]. *系统仿真学报*, 2021, 33(10): 2399-2410.
Liu Zhanhong, Yang Xiujian, Wu Xiangji, et al. Modeling and Simulation of Car Following in Fog Based on Cellular Automata[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(10): 2399-2410.
- [10] Sun Zhuo, Chen Zhonglong, Hu Hongtao, 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] Qi Le, Zheng Zhongyi, Gang Longhui. Marine Traffic Model Based on Cellular Automaton: Considering the Change of the Ship's Velocity Under the Influence of the Weather and Sea[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2017, 483: 480-494.
- [12] Qi Le, Ji Yuanyuan, Balling R, et al. A Cellular Automaton-based Model of Ship Traffic Flow in Busy Waterways[J]. *The Journal of Navigation*, 2021, 74(3): 605-618.
- [13] 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, 64.
Dai Linwei. Cellular Automaton Model and Simulation of Ship Traffic Flow in Two-way Waterway[J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2019, 40(1): 27-31, 64.
- [14] 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 Zongyang, Zhou Chunhui, Zhao Junnan, et al. Modeling and Simulation of Channel Passage Capacity Based on Cellular Automata[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(10): 2478-2487.
- [15] 周华亮, 高自友, 李克平. 准移动闭塞系统的元胞自动机模型及列车延迟传播规律的研究[J]. *物理学报*, 2006, 55(4): 1706-1710.
Zhou Hualiang, Gao Ziyou, Li Keping. Cellular Automaton Model for Moving-like Block System and Study of Train's Delay Propagation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(4): 1706-1710.
- [16] 李峰, 高自友, 李克平. 固定闭塞系统中列车流的特性分析[J]. *物理学报*, 2007, 56(6): 3158-3165.
Li Feng, Gao Ziyou, Li Keping. Analysis of the Property of Train Flow in the Fixed Autoblock Systems[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56(6): 3158-3165.