

10-18-2021

## Modeling and Simulation of Channel Passage Capacity Based on Cellular Automata

Zongyang Liu

*1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; ;2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China;*

Chunhui Zhou

*1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; ;2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China;*

Junnan Zhao

*1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; ;2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China;*

Jinli Xiao

*1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China; ;2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China;*

*See next page for additional authors*

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.

---

# Modeling and Simulation of Channel Passage Capacity Based on Cellular Automata

## Abstract

**Abstract:** In order to study the passage capacity of the seaport and explore the service level of the channel, the cellular automata theory is used to discretize and model the main channel of the seaport, and the movement rules of the cell in the channel are processed in sections. *In addition, this study focuses on the existence of a traffic "warning zone" in the curved channel section. The ship motion rules of the straight channel section and the curved channel section are respectively constrained,* through simulation experiments, the vessel traffic flow of the channel and the maximum ship passing capacity of the channel are obtained, the saturation of the channel is calculated and the service level of the channel is evaluated. The simulation results show that the model can accurately reflect the ship operation in the channel and evaluate the current and long-term service level of the channel.

## Keywords

waterway engineering, channel passing capacity, cellular automata, service Level, segment constraint

## Authors

Zongyang Liu, Chunhui Zhou, Junnan Zhao, Jinli Xiao, and Langxiong Gan

## Recommended Citation

Liu Zongyang, Zhou Chunhui, Zhao Junnan, Xiao Jinli, Gan Langxiong. Modeling and Simulation of Channel Passage Capacity Based on Cellular Automata[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(10): 2478-2487.

# 基于元胞自动机的航道通过能力建模与仿真

刘宗杨<sup>1,2</sup>, 周春辉<sup>1,2\*</sup>, 赵俊男<sup>1,2</sup>, 肖进丽<sup>1,2</sup>, 甘浪雄<sup>1,2</sup>

(1. 武汉理工大学 航运学院, 湖北 武汉 430063; 2. 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 为研究海港进出港航道的通过能力, 探究航道服务水平, 采用元胞自动机理论对海港进出港主航道进行离散化建模, 对船舶在航道中的运动规则采用分段处理, 重点考虑弯曲航段存在交通“警惕区”, 分别对顺直航段和弯曲航段的船舶运动规则进行条件约束, 通过仿真实验得到航道的船舶流量和航道的最大船舶通过能力, 计算出航道的饱和度并对航道服务水平进行评价。仿真实验结果验证了模型能够较为准确地反映航道船舶运行情况, 并对目前和远期的航道服务水平进行了评价。

**关键词:** 航道工程; 航道通过能力; 元胞自动机; 服务水平; 分段约束

中图分类号: U612.3;TP391 文献标志码: A 文章编号: 1004-731X(2021)10-2478-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0587

## Modeling and Simulation of Channel Passage Capacity Based on Cellular Automata

Liu Zongyang<sup>1,2</sup>, Zhou Chunhui<sup>1,2\*</sup>, Zhao Junnan<sup>1,2</sup>, Xiao Jinli<sup>1,2</sup>, Gan Langxiong<sup>1,2</sup>

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

2. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** In order to study the passage capacity of the seaport and explore the service level of the channel, the cellular automata theory is used to discretize and model the main channel of the seaport, and the movement rules of the cell in the channel are processed in sections. *In addition, this study focuses on the existence of a traffic "warning zone" in the curved channel section. The ship motion rules of the straight channel section and the curved channel section are respectively constrained,* through simulation experiments, the vessel traffic flow of the channel and the maximum ship passing capacity of the channel are obtained, the saturation of the channel is calculated and the service level of the channel is evaluated. The simulation results show that the model can accurately reflect the ship operation in the channel and evaluate the current and long-term service level of the channel.

**Keywords:** waterway engineering; channel passing capacity; cellular automata; service Level; segment constraint

## 引言

航道是水上交通资源的基础组成部分, 航道通过能力是指一个水道处理船舶交通的能力, 通常以单位时间内能够通过的最大船舶数量表示<sup>[1]</sup>, 其反映了特定前提下航道能够承担在其中运行船舶的极限值。航道服务水平是指特定时间段内船舶在航道中的运行质量<sup>[2]</sup>。随着全球贸易的不断发展, 港

口规模大型化和到港船舶大型化趋势越发明显, 部分港口航道由于自然条件和其他因素限制, 不能满足当前和未来一定时期的港口发展需要, 成为制约港口规模的短板因素。对航道通过能力进行定量分析, 并对航道服务水平进行测度和评价, 对于提升航道资源规划、管理能力, 以及优化港口交通资源配置具有重要意义。

收稿日期: 2020-08-11

修回日期: 2020-09-29

第一作者: 刘宗杨(1995-), 男, 硕士生, 研究方向为水上交通系统建模与仿真。E-mail: 1710290596@qq.com

通讯作者: 周春辉(1978-), 男, 博士, 副教授, 博导, 研究方向为海上交通系统仿真。E-mail: 24003482@qq.com

针对航道通过能力的研究主要分为三类, 一类是通过经验公式进行计算, 诸如西德公式、长江公式、川江公式、苏南运河公式和王宏达公式等<sup>[3-4]</sup>, 以上公式主要用于针对内河或运河的航道通过能力计算, 且计算结果多为静态, 不能准确反映海港航道的交通运行状态。另一类是利用理论模型求解, 基于船舶交通流特征的航道通航能力理论模型研究主要集中在利用排队论<sup>[5-7]</sup>、跟驰理论<sup>[8-9]</sup>等理论方法对航道交通运行状态进行建模。还有一类伴随着计算机技术的高速发展, 部分学者利用 MTALAB<sup>[10]</sup>, ARENA<sup>[11-12]</sup>, FLEXSIM<sup>[13]</sup>, WITNESS<sup>[14]</sup>等仿真软件或平台, 通过计算机仿真的方法对航道通过能力进行研究。目前对于航道通过能力的研究多数针对特定航道全程无差别对待进行建模仿真或者公式计算, 没有考虑在局部航段可能存在不同的交通状态, 如局部重点航段存在事故多发区、弯曲航段可能存在警戒区或与渔船航路交叉等复杂交通态势, 应在建模和仿真过程中对航道普通航段与特殊航段或节点的船舶航行条件分别进行考虑, 并根据实际情况予以条件约束或调整, 才能得出更加精确且更加符合实际的航道通过能力。

元胞自动机广泛应用于道路交通和水上交通的交通流研究过程中, 基于元胞自动机的航道交通流模型作为一种基于空间-逻辑映射规则的航道离散微观交通流模型<sup>[15]</sup>, 能够准确模拟船舶交通流在航道中的演化过程以及船舶运动行为的实际特征, 是目前研究时空离散时的理想物理模型<sup>[16]</sup>, 且易于实现大规模、长时间的海上交通仿真。本文拟采用元胞自动机方法针对港口进出港航道中不同航段实际情况进行分段建模, 并分别对不同的情况设定规则约束, 通过仿真实验得到航道的通过能力, 并通过对航道饱和度进行测算, 从而对港口复杂航道的服务水平进行分级评价, 为港口规划和运行管理提供决策依据。

## 1 航道通过能力模型构建

建立基于元胞自动机的航道通过能力模型, 首先需要对船舶航行的航道进行空间离散化从而确定元胞空间。在此基础上对船舶运动规则进行模型设定, 海港进出港航道一般由多个航段组成, 相邻航段连接处多为一段弯曲航道, 多存在交通流汇入汇出和与小型船舶习惯航路交叉等情况, 因此多为警戒区设置处。相对于顺直航道, 此处的船舶碰撞风险较高, 交通态势也相对较为复杂, 因此需要在模型中对海港进出港航道分段考虑并对弯曲航段设立“警惕区”, 并对“警惕区”内的船舶运动重新进行条件约束和调整。通过构建分段航道船舶运动规则, 开展基于元胞自动机的航道通过能力仿真实验, 得到航道不同截面的交通流量, 进而得到航道的最大船舶通过能力, 在此基础上对航道服务水平进行测度和评价。

### 1.1 基于元胞自动机的双向航道离散化建模

根据港口深水航道实际情况和《海港总体设计规范》(JTS165-2013)对航道尺度的要求, 可以计算出吃水小于一定阈值的船舶可以在航道宽度允许的情况下双向通航<sup>[17]</sup>。一般情况下海港的进出港航道均为双向通航航道, 根据船舶交通流将航道设置为两条航向相反的交通流 I(Input)和 O(Output), 每条交通流看作由多个一维离散元胞组成, 对每一个元胞的运动规则进行设定, 其中每个元胞都仅存在两种状态的其中一种: 无船或者被一艘船所占据, 由于各类船舶的长度并不相同, 大型船舶和小型船舶的长度差异可达到数倍, 因此对不同长度的船舶不能等同的视作仅占据一个元胞空间, 根据其长度而离散化从而设定占据不同数量的元胞空间, 如图 1 所示, 其中进港方向 I(Input)的入口为 C 点, 出口为 A 点, 出港方向交通流 O(Output)的入口为 B 点, 出口为 D 点。

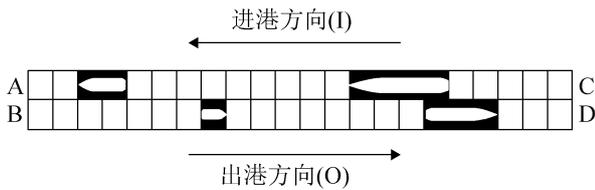


图1 航道空间离散化示意图

Fig. 1 Schematic diagram of channel space discretization

### (1) 船舶输入

根据船舶到达规律，可以确定模型内船舶的生成规律。文献[18]研究发现我国沿海港口的中小型船舶到达规律基本上服从泊松分布，大型船舶略有不同，其船舶到达规律更加贴合正态分布。据此确定10万吨级及以上大型船舶按照正态分布到港，10万吨级以下船舶到达港口进行货物装卸，并在结束后离港的过程符合泊松分布，其概率密度函数为：

$$P_{x_i}(t) = \frac{(\lambda t)^{x_i}}{x_i!} e^{-\lambda t}, t > 0, x_i = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中： $P_{x_i}(t)$ 为在计数时间间隔 $t$ 内到达 $x_i$ 艘船舶的概率，其中 $\lambda$ 为单位时间内的平均到达率， $t$ 为每个计数间隔的持续时间。由此可以推出10万吨级以下船舶进入航道的船舶间时距服从负指数分布。船舶分别从B点和C点输入，从D点和A点输出。

### (2) 船舶安全领域

船舶为保证航行安全，前后船舶应保持一定的安全距离，此处船舶的安全领域结合藤井船舶领域模型<sup>[19]</sup>和实际交通流观测数据，设置船舶领域在船舶前方的长度为3倍船长，在船舶后方的长度为2倍船长，且前后船舶之间的船舶领域不重叠。

### (3) 船速离散化处理

不同船舶的航速不同，在元胞内的运动速度也不同，在此将根据实测数据将船速离散化处理，使得每艘船的速度 $v_i \in \{0, 1, 2, \dots, v_m\}$ ， $v_m$ 为船舶的最大航速，若前方元胞已有船舶占据，则后船在计数时间间隔 $t$ 内停止。若前方元胞为空，则按照航速前进相应距离的元胞。

### (4) 模型假设

建立的航道通过能力模型为相对理想状态，不考虑航道中风浪流等相关自然因素影响；模型采用开放边界，即船舶生成后输入模型，行驶到元胞末端即退出模型仿真，记录船舶在元胞中的运动数据。

## 1.2 分段航道船舶运动规则构建

海港进出港主航道通常由多个航段组成，不同航段的交通态势不完全相同，部分航段面临航道弯曲处存在与渔船习惯航路交叉、存在警戒区、事故多发区、交通流汇入汇出多种情况，因此需要对航道不同航段进行分段考虑并进行规则约束。

### (1) 顺直航道船舶运动规则

针对船舶在顺直航道中的运动特征，接下来将基于元胞自动机模型对顺直航道处的船舶运动模型化。

假设元胞内的船舶只能按照航道规定的方向行驶，在计数时间间隔 $t$ 内根据离散化后的船速在元胞内移动，由于海港进出港航道内一般存在谨慎驾驶和安全航速的要求，且航道宽度有限，因此在模型中不考虑追越的现象，如果后船航速大于前船，如图2所示，此处假设航道I内后船 $i$ 航速 $v_i$ 为18，前船 $j$ 航速 $v_j$ 为2， $t_1$ 时刻两船之间的距离 $S_{ij}$ 为14，在一个计数时间间隔 $t$ 后，后船 $i$ 行驶距离应为18，前船 $j$ 行驶距离为2，此处不可避免产生追越情况，因此设置一种规则，即：

$$\begin{cases} 3L_i + 2L_j = S_{ij}(t_1) - (v_j - v_i) \cdot |t_2 - t_1| \\ S_{ij}(t_2) = 3L_i + 2L_j \end{cases} \quad (2)$$

式中： $S_{ij}(t_1)$ 为前船 $j$ 与后船 $i$ 在 $t_1$ 时刻的距离； $S_{ij}(t_2)$ 为前船 $j$ 与后船 $i$ 在 $t_2$ 时刻的距离； $L_i$ 为 $i$ 船的船长离散数据； $L_j$ 为 $j$ 船的船长离散数据，上式表示在一个时间间隔内后船行驶将追超前船时，则后船不进行追越动作，如图3所示。

在此不考虑横越航道的船舶以及与航道交叉会遇的船舶对于航道正常通航的影响，并假设存在

一定的随机慢化概率  $P_r$ , 随机慢化概率  $P_r$  将根据实际交通流情况设定数值。

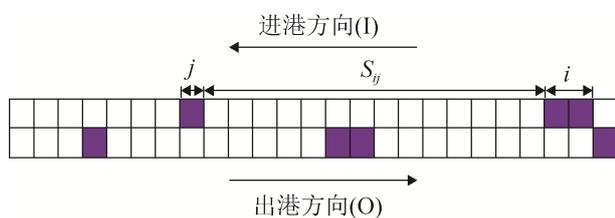


图 2  $t_1$  时刻航道内船舶运动示意图

Fig. 2 Schematic diagram of ship movement in channel at  $t_1$

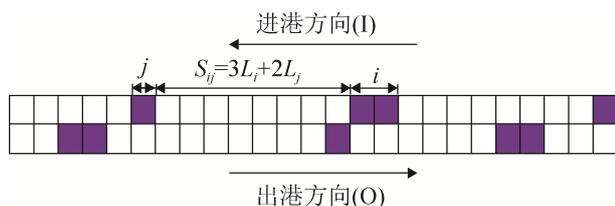


图 3  $t_2$  时刻航道内船舶运动示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ship movement in channel at  $t_2$

(2) 过弯航段船舶运动规则

两段顺直航道之间一般为一段弯曲航道, 由于海港航道弯折处多存在渔船等小型船舶穿插横越航道、船舶汇入汇出、事故多发等情况, 过弯处也多设置警戒区。为保证航行安全, 船舶在航经航道弯折航段时在实际观测中, 航速多微有下降, 因而需要对此区域航段进行单独考虑。

对于弯曲航段的元胞模型, 在此划分出警惕区, 如图 4 深色区域所示, 其占弯道前后各 10 个元胞的长度。警惕区之外的航道区域执行顺直航道的船舶运动规则, 在船舶运动至警惕区内时, 船舶会转舵调整航向, 船体斜航存在  $\beta$  角, 舵面阻力增加, 离心力分力消耗螺旋桨推力, 导致船舶产生微减速现象, 加上此处风险较高, 船舶减速, 航速降低量在不同水域环境下不同, 应根据实际设定。船舶在运动出警惕区后恢复进入警惕区前的航速。警惕区内不设定随机慢化概率。即:

$$\begin{cases} v_a = v_b - k \\ v_c = v_b \\ P_r = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $v_a$  为船舶进入警惕区内的航速;  $v_b$  为船舶进入警惕区前的航速;  $v_c$  为船舶运动出警惕区后的航速;  $k$  为船舶减速数值, 此处的航速和减速数值均为数据离散化后的数值。

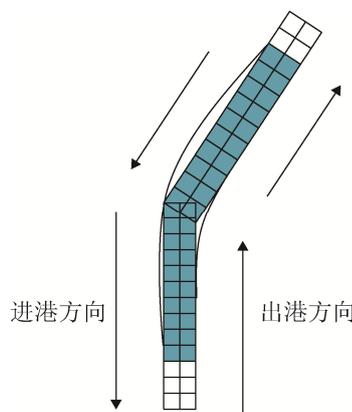


图 4 弯曲航道处的元胞划分与警惕区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of cell division at curved channel

1.3 航道运行仿真与服务水平测度

在对双向航道进行离散化建模和分段航道船舶运动规则构建后, 通过对航道进行模型仿真实验, 得到双向航道理论上能够通过的最大船舶流量数据作为航道的最大通过能力, 并通过对航道区域 AIS 数据处理得到航道目前实际通过的船舶流量数据, 从而计算航道饱和度以表征航道的运行服务水平。

航道饱和度作为评价航道营运水平的重要指标之一, 常用于测度和评估航道的运行服务水平。根据交通运输工程学的相关概念, 一般定义航道饱和度  $S$  为在保证航道安全运作的前提下, 航道上实际通过的船舶流量与航道最大通过能力的比值, 即:

$$S = Q/C \quad (4)$$

式中:  $Q$  为单位时间内航道实际通过的船舶流量;  $C$  为航道最大通过能力。

参考国内外对于航道服务水平的研究<sup>[20-22]</sup>, 根据航道饱和度对航道服务水平进行等级划分。航道服务水平划分标准如表 1 所示。

表1 航道服务水平划分标准

Tab. 1 Criteria for classification of channel service levels

饱和度	航道服务水平等级
<0.20	优
0.20~0.45	良
0.45~0.9	中
>0.9	差

## 2 仿真实验与结果分析

### 2.1 研究实例

为验证模型的可用性和准确性,本文以盐城大丰港深水航道作为研究实例,采集2020年5、6月的船舶AIS数据,开展实例验证。江苏盐城大丰港是苏北沿海3大深水海港之一,是江苏中部重要的出海大通道。大丰港区深水航道走线如图5所示,盐城港大丰港区深水航道为从M点到N点之间区域内航道,深水航道的分段情况如表2所示。

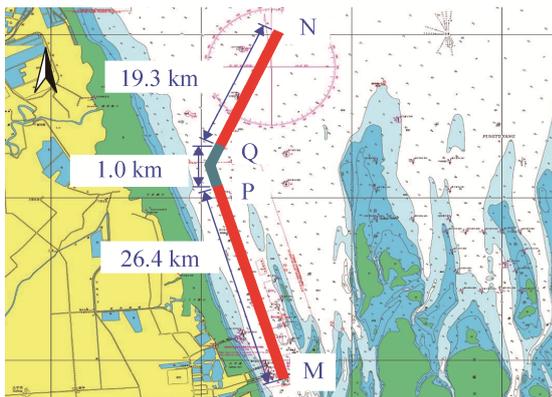


图5 大丰港区深水航道示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Dafeng Port channel

表2 目标航道分段情况

Tab. 2 Segmentations of target channel

航道分段	分段长度/km	分段宽度/m	目标航道总长/km
MP段	26.4	210	46.7
PQ段	1.0	210, 223	
QN段	19.3	223	

实验研究对象航段为MP、PQ和QN区域内航道,其中2个航段连接处为一段弯曲航段,与顺直航道不同,根据2019年AIS数据进行处理和实际交通流观测发现,此处存在多条习惯航路,包括连

云港—滨海—射阳—大丰沿岸航路、大丰港区—南北航路等习惯航路,水上交通运动态势复杂。

根据大丰港航道的交通流特征以及演化构建元胞自动机模型,即通过将航道交通流元胞化,构建航道通过能力模型,通过调节参数进行计算机仿真并得到大丰港航道的船舶交通模拟运行结果。

### 2.2 仿真实验

#### 2.2.1 仿真实验环境搭建

基于模型以及运动规则的设定,利用Python编程语言和Spyder编译环境对盐城港大丰港区深水航道进行仿真实验。在仿真程序中主要引入Pandas, Numpy, Scipy, Matplotlib等Python第三方库,通过设定集合 $S_i\{SHX, DIR, SPD, TIME, LEN\}$ 用以模拟船舶作为在元胞中运动的基本单元,其中SHX为判断船舶是否处于仿真运动状态的参数,其为1代表船舶 $S_i$ 正在元胞空间中运动,其为0则代表船舶已经离开航道仿真;DIR为船舶在元胞空间的运动方向;SPD为离散化后的船速;TIME为仿真的时间;LEN为船舶 $S_i$ 根据其船长而占据元胞空间的个数。除此之外,利用程序设计出船舶生成模块、航道运动控制模块、航道元胞空间离散化模块、数据更新模块,根据模型设定搭建出仿真实验环境,仿真实验框架如图6所示。

#### 2.2.2 模型参数确定

##### (1) 元胞空间

对于元胞尺寸确定,大丰港区深水航道MP、PQ和QN航段总长度为46.7 km,在统筹兼顾计算量和计算精度的基础上,本次研究以50 m作为元胞长度,则航道被划分为934个元胞。元胞宽度则由疏浚后的航道有效宽度确定,MP和QN航段的航道有效宽度分别为210 m和223 m,则MP段单个元胞空间的宽度则为105 m,QN段单个元胞空间的宽度则为111.5 m, PQ段以转折点为分界线,其两端的元胞宽度与其相连接的顺直航段单个元胞宽度一致。

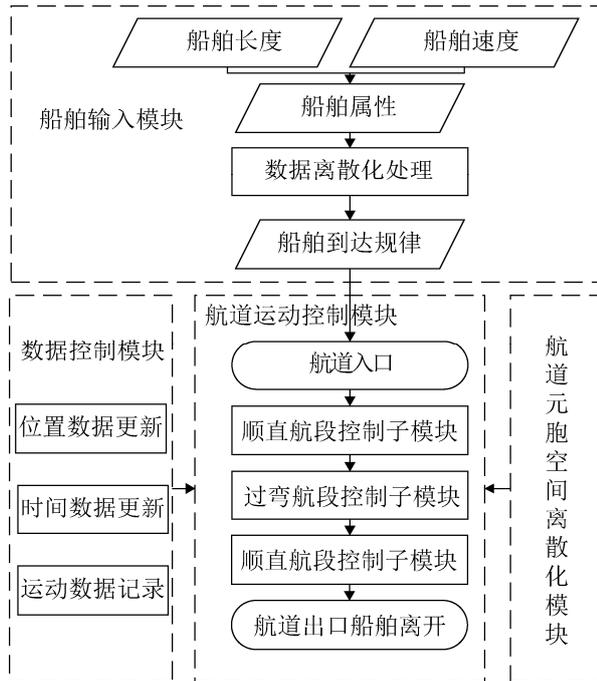


图 6 仿真实验框架示意图

Fig. 6 Schematic diagram of simulation experiment framework

## (2) 仿真时间

根据实际情况, 将计数时间间隔  $t$  设定为 30 min, 仿真模拟 30 天内的大丰港进出港航道通航情况。

## (3) 大型船舶乘潮进港参数

由于在大丰港深水航道疏浚工程竣工后 10 万吨级船舶可全潮进港、15 万吨船舶乘潮可单向通航, 且大丰港区所在区域为规则半日潮, 4 小时乘潮累积频率 90% 的潮位为 3.54 m, 因此在仿真过程设置每天有 4 个小时 10 万吨级及以上吨位的船舶乘潮进出港, 其余时间无 10 万吨级及以上吨位船舶进出港。

## (4) 不同船舶长度离散化

根据《海港总体设计规范》中代表船型的长度对不同船型占据的元胞数进行设定, 海港代表船型特征值和不同船型占据的元胞个数如表 3 所示。

## (5) 船舶减速数值和随机慢化概率

根据对大丰港 5—6 月的 AIS 数据分析, 确定船舶在“警惕区”内的船舶减速数值  $k$  为 1.2, 仿真过程中顺直航道的随机慢化概率  $P_r$  设置为 0.07。

## 2.2.3 仿真实验设定

单次仿真实验的结果具有偶然性, 因此本次研究在相同实验环境下进行 10 次实验, 去除其中的平均值最高和最低的 2 次实验结果, 取其余 8 次仿真实验结果的平均值作为有效仿真结果, 从而避免偶然性误差对于实验结果造成影响。

表 3 代表船型尺度与占据元胞数量

Tab. 3 Representative ship size and the number of occupied cells in Dafeng Port

载重吨/t	船型主尺度/m			占据元胞数(个)
	总长	总宽	满载吃水	
150 000	289	45.0	17.9	6
100 000	250	43.0	14.5	5
50 000	223	32.3	12.8	5
10 000	135	20.5	8.5	3
5 000	115	18.8	7.0	2
3 000	96	16.6	5.8	2

## 2.3 结果分析

通过参数设置对 2020 年的船舶在航道中的运行情况进行仿真, 与实际 AIS 数据进行比对验证模型的可行性与准确性。首先截取 2020 年 6 月的大丰港区船舶 AIS 数据并对航道的船舶实际日流量进行记录, 然后对其进行 3 次多项式拟合, 并观察以目前工况下 8 次仿真实验得出的船舶日流量数据平均值与拟合曲线之间的关联性, 如图 7 所示。

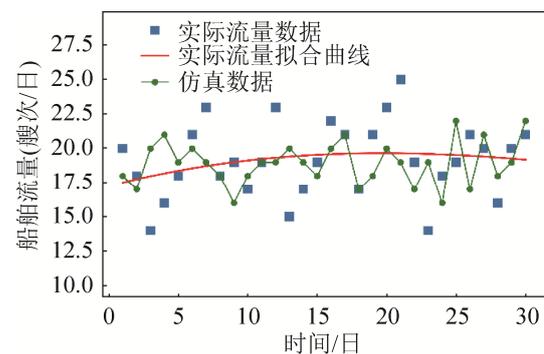


图 7 航道仿真数据与实际数据拟合情况

Fig. 7 Simulation data and actual data fitting

从图 7 可以看出, 航道实际船舶流量的拟合曲线处于每日 17~20 艘次之间, 通过仿真实验得到的

船舶流量数据围绕拟合曲线上下浮动, 与实际情况较为吻合, 从而验证模型与仿真实验可行且可以精确模拟航道的实际船舶通过情况。

在利用仿真实验确定航道的最大交通流量过程中, 通过设置船舶生成相关参数从而逐渐增大输入船舶的流量, 以观察航道输出的船舶流量变化。在航道发生拥堵后, 必将影响后续输入船舶的运动, 在不断增大输入船舶流量下, 航道输出流量不再明显增加, 可以认为目前的航道船舶流量已经达到了航道所能容纳的极限, 即航道的最大通过能力。

由于双向航道中进港航道和出港航道中交通流的运动方向、“警惕区”在航道总长所占据的位置不同等情况, 导致二者的最大航道通过能力会略有不同, 图 8 为大丰港双向航道在不同船舶输入流量的情况下航道船舶流量的变化情况。图 9 为双向航道的船舶流量随船舶输入流量变化的情况。

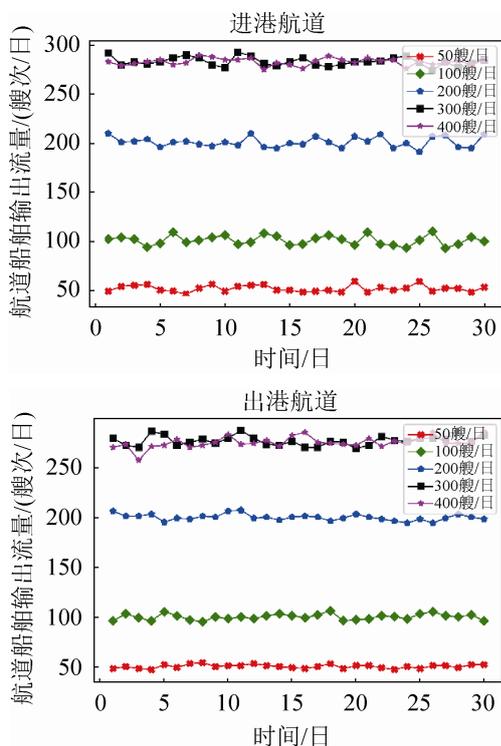


图 8 双向航道在不同船舶流量输入情况下的日通过能力随时间变化情况

Fig. 8 Daily passing capacity of two-way channel under different input flows over time

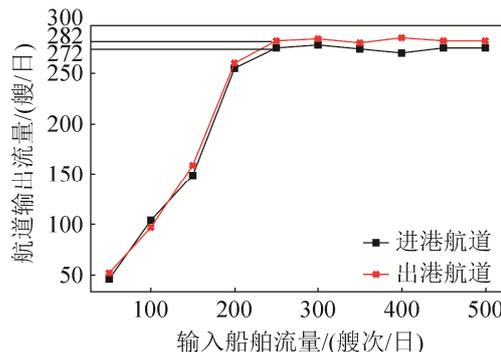


图 9 双向航道的船舶流量随船舶输入流量变化的情况  
Fig. 9 Flow of ships in two-way channel changes with change of input flow of the ships

从图 8, 9 可以看出随着输入船舶流量的逐渐增加, 进港航道和出港航道的输出流量逐渐增加, 直到输入流量超过一定值, 航道的输出流量达到相对稳定, 此时的船舶输出流量可看作航道的最大通过能力, 其中进港航道的最大通过能力为 272 艘/日, 出港航道的最大通过能力为 282 艘/日, 即航道综合最大船舶通过能力为 554 艘/日, 此时的航道处于完全饱和状态, 已经不能容纳更多的船舶进入航道。

向航道逐渐增加输入船舶的流量会造成的航道运行状态的改变, 如图 10, 11 所示。图 10 为航道尚未饱和时的交通流时空图, 船舶按照泊松分布输入仿真元胞空间运动, 航道较为顺畅, 仅在“警惕区”有弱减速现象出现, 但未构成航道拥堵和排队现象。但逐渐增加输入船舶流量, 直到航道满负荷运行, 就会达到航道相对饱和的状态, 通过观察图 11 可以发现, 饱和状态下的船舶输入已经不能满足设定的船舶到达规律, 呈现出持续的排队进入航道现象。

通过设定不同的船舶减速数值  $k$  以及随机慢化概率  $P_r$  值观察航道在饱和状态下二者对于交通流量的影响, 仿真实验结果表明:  $k$  值越大, 则会在“警惕区”造成在超过一定阈值后则会产生“警惕区”和“警惕区”之前的船舶排队现象,  $k$  值越小, 则“警惕区”内的交通情况则逐渐和顺直航道内船舶运行状态类似; 在对不同  $P_r$  值的探究中,  $P_r$  值越

大, 则会引起顺直航段的船舶随机减速概率增大从而导致航道拥堵情况,  $P_r$  值越小, 船舶交通流运行越平稳。

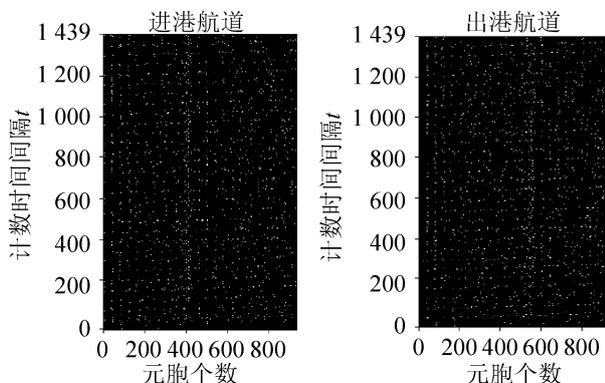


图 10 尚未饱和时的进港航道和出港航道时空图  
Fig. 10 Spatiotemporal diagram of inbound and outbound channel before saturation

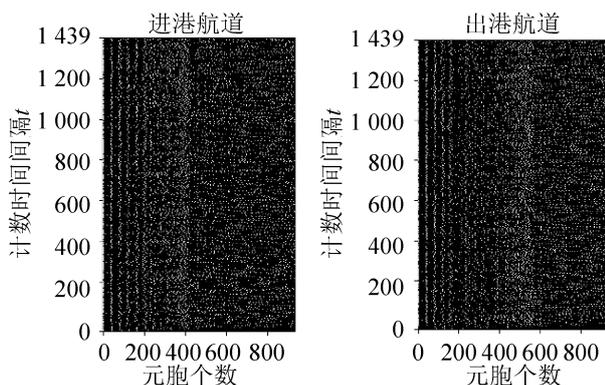


图 11 饱和状态时的进港航道和出港航道的时空图  
Fig. 11 Spatiotemporal diagram of inbound and outbound channels at saturation state

经过上述仿真实验得到了双向航道的最大船舶通过能力, 考虑大丰港正在实施的深水航道相关工程建设和规划, 接下来计算两种工况下的大丰港深水航道水平, 如表 4 所示。

表 4 工况一览表  
Tab. 4 List of working conditions

工况	船舶流量/(艘/日)
2020 年(目前水平)	18
2030 年(预测水平)	271

从上述两种工况下分别计算大丰港区 2020 年和 2030 年的航道饱和度并对其分别进行航道服务

水平评价, 以判断航道是否是制约港口发展的关键短板因素, 是否适应和满足港口的中远期发展。其中 2020 年是目前航道水平, 采用 2020 年 6 月实际平均船舶流量数据进行数值计算; 2030 年为预测水平, 根据盐城港相关规划采用预测船舶流量进行航道饱和度计算。经过计算得到航道的饱和度和服务水平等级, 如表 5 所示。

表 5 航道在不同时期的服务水平等级  
Tab. 5 Service levels of the channel in different periods

工况	航道饱和度/%	航道服务水平
2020 年(目前)	3.2	优
2030 年(远期)	48.9	中

可以看出, 大丰港区进出港航道无论目前还是远期都处于较为健康的服务水平, 大丰港航道将会在未来较长一段时期内满足港口的发展需求。

### 3 结论

本文利用元胞自动机原理通过对航道采取分段约束并建模仿真, 对航段连接处的弯曲航段内的船舶运动行为予以了重点关注, 通过设立“警惕区”并对警惕区内的船舶运动规则进行了设定, 从而在此基础上通过仿真实验确定盐城大丰港的航道通过能力以及航道的服务水平, 并对不同输入流量下的航道输出流量进行了观测和分析。面对海港日益复杂的水上交通环境, 对于进出港航道的通过能力目前尚无标准的计算方法, 通过采用元胞自动机对航道进行计算机仿真, 对不同航段进行分段考虑并设置条件约束可以得到更为精确的船舶流量数据, 从而为航道的通过能力的确定和服务水平的等级评定提供了更为可靠的依据。航道是保障船舶安全航行的水上通道, 本文的研究成果可以为探求港口水上交通资源短板因素提供理论和数据支撑, 对港口航道的管理运营、助航标志配布、港口未来规划具有重要的参考意义。

### 参考文献:

[1] 吴兆麟, 朱军. 海上交通工程[M]. 大连: 大连海事

- 大学出版社, 2004: 102-103.
- Wu Zhaolin, Zhu Jun. Marine Traffic Engineering[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2004: 102-103.
- [2] 赵景丽. 基于排队论的沿海港口航道通过能力及服务水平研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- Zhao Jingli. Research on Channel Transit Capacity and Service Level of Sea Port Based on Queuing Theory[D]. Tsingtao: Ocean University of China, 2010.
- [3] Uğurlu Ö, Yüksekıldız E, Köse E. Simulation Model on Determining of Port Capacity and Queue Size: A Case Study for BOTAS Ceyhan Marine Terminal[J]. The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation (S2083-6473), 2014, 8(1): 143-150.
- [4] 丁涛, 徐湘文. 基于 OD 结构网络模型的长江干线航道通过能力研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2015, 39(4): 751-754.
- Ding Tao, Xu Xiangwen. Main Channel Capacity of the Yangtze River Based on OD Network Model[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2015, 39(4): 751-754.
- [5] 张行健. 复杂约束条件下河口段港区通过能力研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
- Zhang Xingjian. Study on Traffic Capacity of Estuarine Port Area Under the Complex Constraints[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [6] 苏华伟. 提高航道船舶进出港效率方法的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2019.
- Su Huawei. Study on the Method to Improve the Efficiency of Ships Entering and Leaving Port[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2019.
- [7] Kumaran S K, Dogra D P, Roy P P. Queuing Theory Guided Intelligent Traffic Scheduling Through Video Analysis Using Dirichlet Process Mixture Model[J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2019, 118(4): 169-181.
- [8] Chen J, Lin L, Jiang R. Assigning On-ramp Flows to Maximize Capacity of Highway with Two On-ramps and One Off-ramp in Between[J]. Physica A-Statistical Mechanics and its Applications (S0378-4371), 2016, 465(1): 347-357.
- [9] 朱俊, 张玮. 基于跟驰理论的内河航道通过能力计算模型[J]. 交通运输工程学报, 2009, 9(5): 83-87.
- Zhu Jun, Zhang Wei. Calculation Model of Inland Waterway Transit Capacity based on Ship-following Theory[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2009, 9(5): 83-87.
- [10] 鲁雷. 港口航道通过能力建模仿真研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(9): 67-68.
- Lu Lei. Research on Modeling and Simulation of Port Channel Through Capacity[J]. China Water Transport, 2019, 19(9): 67-68.
- [11] 史殿中. 超大型船舶通航对航道通过能力影响的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2017.
- Shi Dianzhong. The Study of the Influence on Channel Traffic Capacity by Navigation Very Large Ship[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [12] Dragovic B, Tzannatos E, Park N. Simulation Modelling in Ports and Container Terminals: Literature Overview and Analysis by Research Field, Application Area and Tool[J]. Flexible Services & Manufacturing Journal (S1936-6582), 2017, 29(1): 4-34.
- [13] Dulebenets M, Golias M, Mishra S, et al. Evaluation of the Floater Concept at Marine Container Terminals via Simulation[J]. Simulation Modelling Practice and theory (S1569-190X), 2015, 54(5): 19-35.
- [14] Parola F, Sciomachen A. Intermodal Container Flows in a Port System Network: Analysis of Possible Growths via Simulation Models[J]. International Journal of Production Economics (S0925-5273), 2005, 97(1): 75-88.
- [15] 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 Le. Research on Ship Traffic Flow in Waterway Based on Cellular Automata[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2017.
- [16] 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.
- Ke Jiangcen. Study on Navigable Hydro-junction Organization Mode with Cellular Automata[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 海港总体设计规范: JTS165-2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Design Code of General Layout for Sea Ports: JTS165-2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [18] 朱翔宇. 基于 AIS 的船舶交通流的预测与仿真研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2016.
- Zhu Xiangyu. Study on Vessel Traffic Flow Prediction

- and Simulation Based on AIS Data[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2016.
- [19] Szlapczynski R, Szlapczynska J. Review of Ship Safety Domains: Models and Applications[J]. Ocean Engineering (S0029-8018), 2017, 145(17): 277-289.
- [20] 许忠厚, 何良德, 尹亚军, 等. 内河港区段航道服务水平评价[J]. 华东交通大学学报, 2016, 33(1): 55-60. Xu Zhonghou, He Liangde, Yin Yajun, et al. Evaluation of the Waterway Service Level of the Inland Port Section[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2016, 33(1): 55-60.
- [21] 刘帅臣. 沿海航道乘潮通航饱和度研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2019. Liu Shuaichen. Study on the Tidal Navigation Saturation of Coastal Waterway[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2019.
- [22] 张则浩, 于祖杰, 刘强, 等. 龙口港航道饱和度研究[J]. 大连海事大学学报, 2014, 40(1): 33-36. Zhang Zehao, Yu Zujie, Liu Qiang, et al. Study on the Channel Saturation of Longkou Port[J]. Journal of Dalian Maritime University, 2014, 40(1): 33-36.