

# 防城港进出港船舶交通组织研究

刘志辉

北部湾港北海引航站, 广西 北海

收稿日期: 2021年9月18日; 录用日期: 2021年11月1日; 发布日期: 2021年11月9日

---

## 摘要

为保障防城港进出港船舶交通组织能够正常运营, 建立基于时空消耗理论的航道通过能力计算模型。该模型将航道的的时间资源和空间资源(面积)作为航道的总资源, 通过计算得到防城港各航道的通过能力及服务水平。并采用元胞自动机与多智能体结合的方式建立防城港通过能力仿真模型, 量化了近期、中期及远期的船舶通航能力。仿真实验表明, 防城港航道能够满足船舶进出港需求。

## 关键词

航道通过能力, 元胞自动机, 多智能体, 服务水平

---

# Study on the Traffic Management of Ships Entering and Leaving the Fangcheng Port

Zhihui Liu

Beihai Pilot Station, Beibu Gulf Port, Beihai Guangxi

Received: Sep. 18<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 1<sup>st</sup>, 2021; published: Nov. 9<sup>th</sup>, 2021

---

## Abstract

To ensure the normal operation of the traffic organization during ships entering and leaving port, a channel passing capacity estimation model is established based on the time-space consumption theory. The model considers the time resources and space resources (area) of the channel as the total resources of the channel. The passing capacity and service level of each channel of Fangcheng Port are obtained by calculation. The methods of combining cellular automata and multi-agents are used to establish a simulation model of Fangcheng Port's navigable capacity. Simulation experiments show that the Fangcheng Port channel can meet the requirements of ships entering and leaving the port.

## Keywords

Channel Passing Capacity, Cellular Automata, Multi-Agent System, Service Level

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

防城港是我国沿海主要港口之一和综合运输体系的重要枢纽。随着水上经济活动日益频繁以及港口吞吐量的增长,进出港口的船舶数量快速上升,港口之间的运输网络日趋复杂,船舶交通流的密度也随之增大,港口附近水域的船舶交通态势也愈显复杂。由此引发了交通安全风险增大、通航效率不高、交通冲突加剧等方面的问题,因此对防城港进出港船舶交通组织的研究迫在眉睫。

航道通过能力主要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[1][2]计算其静态通过能力,或者利用跟驰理论[3]和排队论等[4][5]计算其动态通过能力。以及利用 ARENA [6]、FLEXSIM [7]、WITNESS [8]、元胞自动机[9]等仿真软件或平台对航道通过能力进行研究。海上交通工程中,航道通过能力计算模型计算的是某一航道断面单位时间内的通过船舶的数量,并未考虑航道的长度等因素,即针对航道仅考虑了时间因素和空间上的航道宽度要素。

针对以上情况,建立基于时空消耗理论的航道通过能力计算模型并计算航道现阶段、近期、远期的通过能力,最后基于元胞自动机建立防城港通过能力仿真模型进行验证。

## 2. 航道通过能力计算模型建立

### 2.1. 基于时空消耗理论的航道通过能力计算模型

航道通过能力的时空消耗计算模型将航道的时空资源和空间资源(面积)作为航道的总资源,弥补了以往航道通过能力计算模型在航道长度上考虑的不足,其计算模型如下式所示。

$$C_{channel}^b = \frac{R}{R_{ship}} = \frac{AT}{R_{ship}} \quad (1)$$

$$C_{channel}^d = R_1 \times R_2 \times R_3 \times R_4 \times R_5 \times R_6 \times R_7 \times C_{channel}^b \quad (2)$$

式中:  $C_{channel}^b$  为基本通过能力,艘/h;  $R$  为航道时空总资源,  $\text{km}^2 \cdot \text{h}$ ;  $R_{ship}$  为船舶完成一次航行的平均时空消耗,  $\text{km}^2 \cdot \text{h}/\text{艘}$ ;  $A$  为航道有效面积,  $\text{km}^2$ ;  $T$  为航道有效营运时间, h;  $C_{channel}^d$  为实用通过能力,艘/h;  $R_1 \sim R_7$  为修正系数。

1) 航道空间资源计算方法如下式所示。

$$A_{channel} = L_{channel} \times W \times N \quad (3)$$

式中:  $L_{channel}$  为航道长度, km;  $W$  为航道单个通道宽度, km;  $N$  为航道通道的数量, 个。

但在实际过程中,由于码头岸线距离航道较近及航道交叉等因素,船舶的穿越、汇入和旋回等需要占用航道的空间资源,因此航道的实际可用空间资源可通过下式表达。

$$A_d = L_{channel} \times W \times N - \sum_{i=1}^n P_i \times L_i \times W \times n_i \times M_i \quad (4)$$

式中： $P_i$ 为第*i*类船舶穿越、会遇、旋回等情景发生的概率； $L_i$ 为第*i*类船舶穿越、会遇、旋回等占用航道的长度； $n_i$ 为第*i*类船舶穿越、会遇、旋回等占用航道的通道数量； $M_i$ 为第*i*类情景的数量，个。

2) 航道时间资源

一个周期内，航道的实际可用时间为航道的固有时间(总时间)减去自然条件、港口条件和交通冲突等造成的航道不可通航的时间，其表达式如下所示。

$$\begin{cases} T_d = T - T_{nature} - T_{port} - T_{conflict} \\ T_{conflict} = \sum_{i=1}^n P_i \times Vt_i \times M_i \end{cases} \quad (5)$$

式中： $T_{nature}$ 为自然条件影响消耗的时间，h； $T_{port}$ 为港口作业条件影响消耗的时间，h； $T_{conflict}$ 为船舶冲突影响消耗的时间，h； $Vt_i$ 为第*i*类船舶穿越、会遇、旋回等情景消耗的时间，h； $M_i$ 为第*i*类情景的数量，个。

3) 单船消耗的航道总资源

船舶消耗的航道资源是船舶本身及保障自身安全所必须的航道范围与其在航道内航行时间的乘积，单船消耗航道的时空资源的计算方法如下式所示。

$$\begin{aligned} R_{ship} &= (L_{distance} + L_{ship}) \times W \times T_{ship} \\ &= (L_{distance} + L_{ship}) \times W \times \frac{L_{channel}}{V} \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $L_{distance}$ 为船舶间的安全距离，km； $L_{ship}$ 为船舶长度，km； $T_{ship}$ 为船舶平均占用航道时间，h； $V$ 为航道不同通道上的船舶航速，km/h。

4) 航道通过能力计算模型

根据航道总资源和船舶航行消耗航道的时空资源情况，可以得到基于时空消耗的航道通过能力计算模型如下式所示。

$$\begin{aligned} C_{channel}^d &= \sum_{l=1}^N \frac{R_d}{R_{ship}} = \sum_{l=1}^N \frac{A_d \times T_d}{R_{ship}} \\ &= \sum_{l=1}^N \left\{ \left( L_{channel} \times N - \sum_{i=1}^n P_i \times L_i \times n_i \times M_i \right) \right. \\ &\quad \left. \times \left( T - T_{nature} - T_{port} - \sum_{i=1}^n P_i \times Vt_i \times M_i \right) \right\} / \left\{ (L_{distance} + L_{ship}) \times \frac{L_{channel}}{V_l} \right\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中： $R_d$ 为航道的实际可用时空资源， $\text{km}^2 \cdot \text{h}$ ； $V_l$ 为( $l=1,2,3,\dots$ )分别表示通道1,2,3等的船舶航速，km/h。

**2.2. 船舶调度对航道通过能力的影响**

航道的建设应与泊位相匹配，即航道所允许通航的最大设计船型应为港口泊位设计的最大船型，由于航道宽度设计的不同，船舶在航道中的通航方式包括单向通航、双向通航和多线通航(复式航道)等多种。对于单向通航航道和混合通航航道存在船舶进港时禁止其他船舶出港及船舶出港禁止其他船舶进港的情景，此情景必然会导致航道时间资源的浪费，即港口调度导致的时间空耗。

假定在航段营运时间段*T*内，船舶编队进出港次数为*k*，则完成*k*次编队进出港需要清空航道*k-1*次，*k-1*次航道清空的时间则为航道未利用的时间。从最后一条船舶完全进入航道到驶出航道一定的安全距离后计为航道的清空时间，则航道情况过程如图1所示。

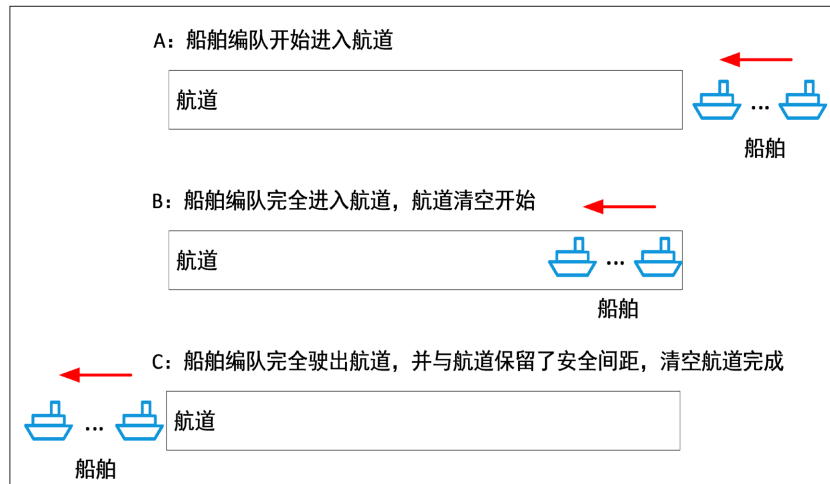


Figure 1. Schematic diagram of channel clearing process  
图 1. 航道清空过程示意图

每次清空航道时间及船舶完全填充航道时间为每次调度导致的航道利用浪费时间, 可通过下式计算。

$$t_{clean} = \frac{L_{channel} + L_{distance}}{V} \quad (8)$$

式中:  $t_{clean}$  为每次清空航道所需时间, h。

在营运时间内  $T$  内, 船舶有  $k$  次编队时, 则此时间段内港口导致的不可通航的时间可表示为下式所示。

$$T_{port} = (k - 1) \times t_{clean} = (k - 1) \times \frac{L_{channel} + L_{distance}}{V} \quad (9)$$

式中:  $T_{port}$  为港口调度导致的不可使用时间, h;  $k$  为  $T$  时间内船舶编队次数, 次。

显然, 式(9)是针对单向通航的航道计算港口调度对航道的时空耗, 但对于混合通航航道由于单向进港和单向出港仅分别影响单向出港和单向进港的通道, 其影响时间包括航道清空时间及每次单向通航的时间两部分, 假定在时间  $T$  内共发生  $m$  次单向进港和  $n$  次单向出港(多数情况下  $m = n$ ), 则针对进港通道和出港通道的港口调度时空耗如下式所示。

$$\begin{cases} T_{in-port} = m \times t_{clean-in} + T_{out} = m \times \frac{L_{channel} + L_{distance}}{V_{in}} + T_{out} \\ T_{out-port} = n \times t_{clean-out} + T_{in} = n \times \frac{L_{channel} + L_{distance}}{V_{out}} + T_{in} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $T_{in-port}$  为港口进港调度导致进港通道不可使用的时间, h;  $m$  为单向进港次数, 次;  $t_{clean-in}$  为每次清空进港通道所需时间, h;  $T_{out}$  为出港航行总时间, h;  $V_{in}$  为船舶进港航速, km/h;  $n$  为单向出港次数, 次;  $T_{in}$  为进港航行总时间, h;  $V_{out}$  为船舶出港航速, km/h。

以航道安全营运为前提, 将航道饱和度定义为通行航道的实际船舶流量  $Q$  和航道通过能力  $C$  的比值, 从而确定航道的安全及服务等级。

$$\text{饱和度} = \frac{Q}{C} \quad (11)$$

根据航道饱和度对航道等级进行了划分, 具体航道运营水平划分标准见表 1。

**Table 1.** Standards for dividing waterway operation levels  
**表 1.** 航道运营水平划分标准

饱和度	<0.35	0.35~0.6	0.6~0.9	>0.9
等级	优	良	中	差

### 2.3. 航道通过能力计算

利用 AIS 数据对防城港水域船舶进行统计分析, 统计内容包括船舶长度、速度分布及交通流量, 防城港及附近水域通过船舶长度、速度分布如表 2。

**Table 2.** Ship traffic flow ship length, speed distribution  
**表 2.** 船舶交通流船舶长度、速度分布表

船长	L ≤ 60	60 < L ≤ 100	100 < L ≤ 120	120 < L ≤ 170	170 < L ≤ 285	L > 285
比例	5.37%	34.53%	8.44%	15.35%	30.18%	6.14%
平均速度/节	8.45	7.18	6.96	7.07	7.20	6.42
进港平均速度/节	8.12	6.77	6.56	6.75	6.82	6.25
出港平均速度/节	8.66	7.32	7.54	7.46	7.45	6.55

#### 2.3.1. 现阶段通过能力

##### 1) 实际船舶流量计算

利用 AIS 数据对防城港水域船舶进行统计分析, 得到 2019 年各航道船舶密度见表 3。

以 2019 年防城港市泊位情况一览表中的实际年通过能力和各泊位靠泊能力为依据, 假设所有船舶均满载, 计算得到各航道泊位船舶需求量。船舶完成一次作业需要在进港与出港过程中两次占用航道, 因此各航道实际船舶流量是泊位船舶需求量的两倍。在实际情况中, 绝大多数船舶往往难以到达满载, 采用船舶装载系数 0.5 对基于泊位服务能力的交通流量进行校正, 则现阶段各航道实际船舶流量见表 3, 与各航道船舶密度值基本吻合。

##### 2) 航道通过能力计算

防城港包含三牙航道、西贤航道、西湾航道及企沙航道。按照国内惯例做法结合船舶领域以 6 倍船长的 1800 米为航道内安全距离。根据 AIS 数据船舶的靠泊时间及航行速度, 利用时空消耗模型分段计算航道通过能力。

目前东湾航道以及西湾航道都为单向航道并且无相应的调度规则, 按照通航效率最低的调度方式即每次清空航道后只有一艘船舶驶出或驶入航道。

**Table 3.** Calculation results of passing capacity at this stage  
**表 3.** 现阶段通过能力计算结果

航道	船舶密度	实际船舶流量	航道通过能力	饱和度	服务等级
三牙航道	51	52	182	0.29	优
西湾航道	32	32	37	0.86	中等
东湾航道	19	20	38	0.53	良

### 2.3.2. 近期通过能力

根据近期规划以及设计通过能力计算按照载重系数 0.5 得到近期各航道实际船舶流量；运用航道时空资源计算模型得到各个航道通过能力见表 4。

**Table 4.** Result of recent passing capacity calculation

**表 4.** 近期通过能力计算结果

航道	实际船舶流量	航道通过能力	饱和度	服务等级
三牙航道	124	175	0.71	中等
西湾航道	33	37	0.89	中等
东湾航道	94	36	-	-

东湾航道的通过能力将不能满足船舶进出港需求。因此对港区船舶调度模式进行优化，将船舶调度规则设置为 2 小时、4 小时、6 小时调度一次，则航道通过能力计算见表 5。

**Table 5.** Channel passing ability under different dispatching rules

**表 5.** 不同调度规则下航道通过能力

	2 小时	4 小时	6 小时
东湾航道	119	130	135
西湾航道	118	130	134

集中调度不需要频繁清空航道，可有效提升航道通过能力。但进出港调度规则的变化，由于船舶到港的不均衡性会增加对锚地的需求，因此调度规则也不易设置过长。因此在近期工程建设期间，建议对东湾航道与西湾航道的现有调度规则进行一定调整，可采用 2 小时调度一次(2 小时一进 2 小时一出)的进港规则。

### 2.3.3. 中期通过能力

根据中期规划各作业区船舶需求表计算中期各航道实际船舶流量。运用航道时空资源计算模型得到在 2 小时、4 小时、6 小时不同调度方式下各航道通过能力见表 6。

**Table 6.** Calculation results of mid-term passing capacity under different scheduling rules

**表 6.** 不同调度规则下中期通过能力计算结果

航道	调度规则	实际船舶流量	航道通过能力	饱和度	服务等级
三牙航道	/	165	195	0.85	中等
	2 小时		93	0.36	中等
西湾航道	4 小时	34	120	0.28	优
	6 小时		126	0.27	优
东湾航道	2 小时	112	120	0.93	差
	4 小时		139	0.80	中等
	6 小时		142	0.79	中等

在中期规划，除了在港口航道调度模式要进行调整采用(2小时一进，2小时一出)的调度模式外，建议要对西湾航道进行疏浚作业加深航道，以减少需要乘潮船舶进入航道的等待时间，从而提高港口运行效率和降低港口锚地压力。

### 2.3.4. 远期通过能力

根据远期各作业区船舶需求表计算出远期各航道实际船舶流量；根据《防城港港口总体规划(2016~2030)》和航道时空资源计算模型得到各个航道通过能力见表7。

**Table 7.** Long-term passing capacity calculation result  
**表 7.** 远期通过能力计算结果

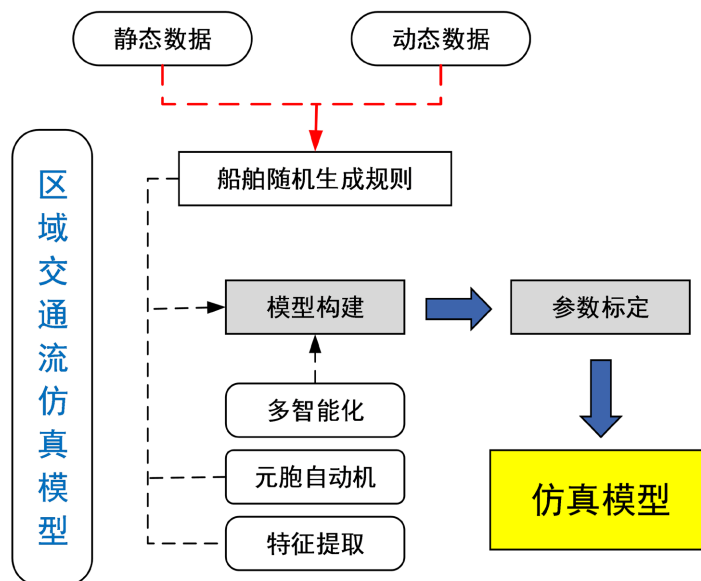
航道	实际船舶流量	航道通过能力	饱和度	服务等级
三牙航道	171	206	0.83	中等
西湾航道	38	102	0.37	优
东湾航道	113	180	0.63	中等

## 3. 仿真验证与分析

### 3.1. 防城港通过能力仿真模型构建

#### 3.1.1. 建模方法

采用元胞自动机与多智能体结合的方式进行建模，以 Python3.7 win64 为平台，元胞自动机为主体，加入多智能体仿真模块对船舶进行特殊化处理，通过对目标水域船舶交通流静态数据、动态数据的处理与分析，确定仿真模型中船舶随机生成规则，在完成模型参数的标定后，确定仿真模型。具体模型结构如图2所示。



**Figure 2.** Model structure  
**图 2.** 模型结构图



### 3.1.2. 模型实现

构建船舶运动空间的步骤如下：

- 1) 根据元胞自动机的规则，将航道进行离散化，并确定航道边界；
- 2) 将时间进行离散化为可被主程序识别的模块；
- 3) 根据各目标水域航道、定线制的具体情况，构建对应的航道多智能体模块；
- 4) 根据泊位的地理位置、尺度信息等，构建泊位多智能体模型。

离散化的航道空间、时间模块、航道多智能体模块、泊位多智能体模型共同构成了船舶运动空间。根据港口船舶航行作业系统的特点、系统状态以及独立事件的触发条件建立系统逻辑模型如图 3 所示。

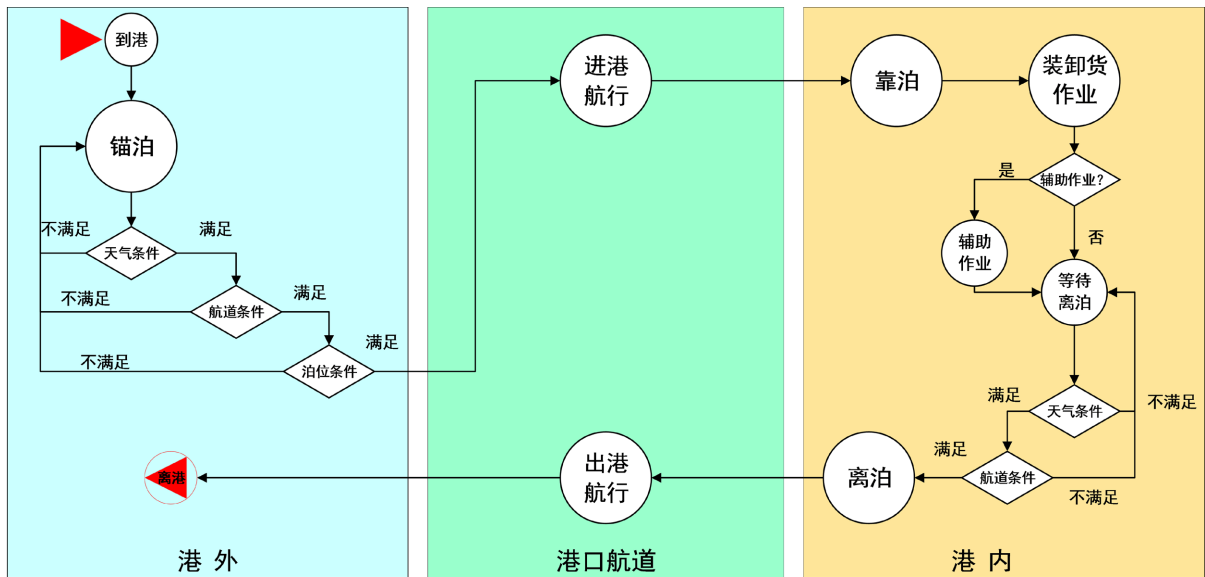


Figure 3. Simulation system logic model  
图 3. 仿真系统逻辑模型

#### 船舶生成模块

一般情况下，船舶到达服从泊松分布，两船相继到达的时间间隔服从负指数分布，其概率函数为：

$$P(t) = 1 - e^{-t/\lambda}$$

在仿真模拟中，可利用[0, 1]均匀分布随机数求得参数为 $\lambda$ 的服从负指数分布的随机数 $R$ ，即两艘船到达的间隔时间。若以 $T_k$ 表示第 $k$ 艘船的到港时刻，则第 $k+1$ 艘船舶的到港时间可表示为：

$$T_{k+1} = T_k + R$$

#### 航路模型：

航路模型由港口航道走向和港口航行规则共同决定，如图 4 所示。

#### 船舶行为特征模型：

在仿真模拟中，船舶行为的表达通过计算船舶队列特征来决定。具体来说：

假设  $Q_{in} = \{S_{in}^1, S_{in}^2, \dots, S_{in}^n\}$  ( $n \geq 0$  且  $n \in N$ ) 为进港船舶组成的有序队列(船舶按照进港的先后次序排队)， $Q_{out} = \{S_{out}^1, S_{out}^2, \dots, S_{out}^m\}$  ( $m \geq 0$  且  $m \in N$ ) 为进港船舶组成的有序队列(船舶按照出港的先后次序排队)。则：



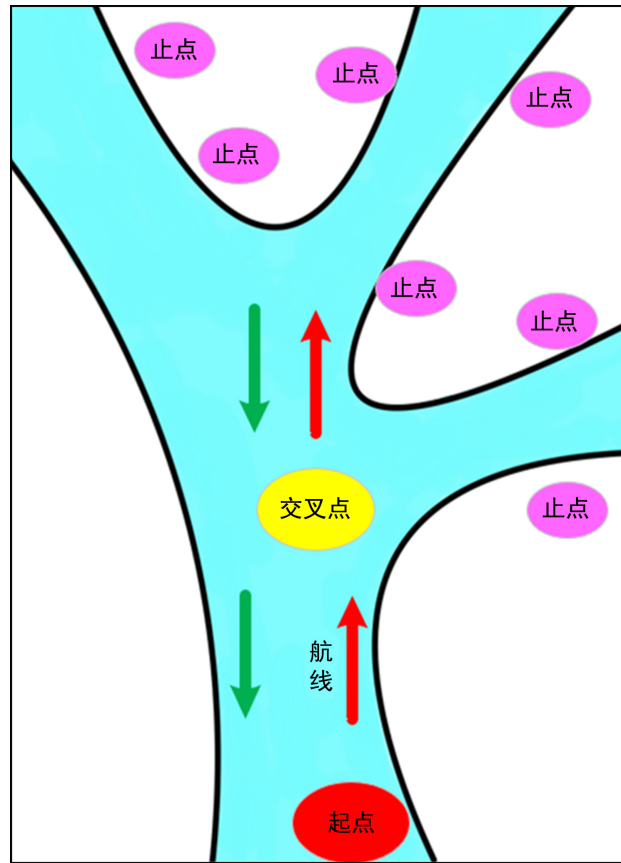


Figure 4. Airway model  
图 4. 航路模型

1) 到港船舶能否加入进港队列进港，需满足条件：

$$D_{S-S_{in}^n} \geq D_{saf}。$$

其中  $D_{S-S_{in}^n}$  为拟进港船舶与进港队列中的最后一艘进港船舶之间的距离； $D_{saf}$  为任意两艘船舶之间的最小安全距离。

2) 船舶能汇出，需满足条件：

船舶可以根据需要，随时同侧汇出。但对于异侧汇出，应该满足：

$$D_s^{out} \geq D_{saf}^{cross}。$$

$D_s^{out}$  表示汇出船舶拟穿越的出港队列中的两船之间的距离； $D_{saf}^{cross}$  为允许穿越的最小安全距离。

3) 船舶能否汇入，需满足条件：

对于异侧汇入：

$$D_{os}^{in} \geq D_{saf}^{cross}，且 D_{os}^{out} \geq D_{saf}^{in}。$$

$D_{os}^{in}$  表示汇入船舶拟穿越的进港队列中的两船之间的距离； $D_{os}^{out}$  表示汇入船舶拟汇入的出港队列中的两船之间的距离； $D_{saf}^{in}$  表示允许汇入的最小安全距离。

对于同侧汇入，只需满足  $D_{os}^{out} \geq D_{saf}^{in}。$

### 3.2. 基于仿真方法的目标水域通过能力分析

#### 3.2.1. 仿真工况

针对港口近期和远期规划情况,设置仿真工况,仿真过程中,以 AIS 速度作为船舶运行速度,船舶安全间距以 1800 m 计,开展仿真模拟试验,验证港口航道是否满足船舶进出港需求。2 小时进出港(1 小时调度一次,即 1 小时一进和 1 小时一出)要求、4 小时进出港(2 小时调度一次,即 2 小时一进 2 小时一出)要求、6 小时进出港(3 小时调度一次,即 3 小时一进 3 小时一出)情况下船舶进出港的情况。

船舶在泊位的服务时间按照正态分布随机选取。具体根据船长进行定义。不同长度船舶泊位服务时间分布参数及分布如表 8 所示。

**Table 8.** Distribution parameters of berth service time for ships of different lengths

**表 8.** 不同长度船舶泊位服务时间分布参数

参数	$L \leq 60$	$60 < L \leq 100$	$100 < L \leq 120$	$120 < L \leq 170$	$170 < L \leq 285$	$L > 285$
均值 $\mu$	10	20	25	30	35	40
方差 $\sigma^2$	2	2	2	2	2	2

仿真满足以下具体要求:

- 1) 在锚地生成船舶。
- 2) 由于航道的差异,船舶在不同航道中的通航能力是不同的,当任何一段航道达到饱和,即为港口船舶服务能力。
- 3) 锚地生成船舶的数量不断增加,直到船舶不能按照管理规定实现船舶进出港作业。
- 4) 满足任意一段航道的通航能力,船舶锚泊所需锚地,被定义为所需要锚地。

#### 3.2.2. 仿真结果

通过仿真得到 2 小时、4 小时、6 小时进出港限制条件下服务船舶与锚位需求数量情况,见表 9。将服务船舶数量与船舶进出港需求量相比,基本吻合,船舶进出港需求为实际船舶流量的一半。

**Table 9.** Entry and exit conditions under different restrictions

**表 9.** 不同限制条件下进出港情况

进出港限制条件	时期	船舶进出港需求	服务船舶数量	所需锚位数量
2 小时	近期	62	63	105
	远期	86	85	156
4 小时	近期	62	67	96
	远期	86	93	147
6 小时	近期	62	66	103
	远期	86	90	158

根据仿真结果,通过对比服务船舶数量和锚位需求两个指标,认为防城港在 4 小时进出港限制条件下服务船舶数量最大,锚地锚位需求最小。因此,综合考虑船舶等待时间,建议防城港采取 4 小时进出

港的船舶调度模式，并注意近期同步落实规划锚地的建设。

#### 4. 结论

现阶段航道通过能力基本满足船舶进出港需求，为了缓解西湾航道压力，可适当对进出西湾航道的船舶进行集中调度；近期和中期，由于东湾航道通过船舶将大量增加，若要东湾航道的通过能力满足进出港船舶需求，需要对进出港船舶进行集中调度，建议采用4小时进出港(2小时调度一次，即2小时一进和2小时一出)的船舶调度模式，同时落实规划锚地的建设。远期规划航道能够较好地满足船舶进出港的需求，但是三牙航道饱和度相对较大，可通过单向通航的大型船舶集中进出港来缓解航道压力。

#### 参考文献

- [1] Uğurlu, Ö., Yüksekıldız, E. and Köse, E. (2014) Simulation Model on Determining of Port Capacity and Queue Size: A Case Study for BOTAS Ceyhan Marine Terminal. *The International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*, **8**, 143-150.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Kumaran, S.K., Dogra, D.P. and Roy, P.P. (2019) Queuing Theory Guided Intelligent Traffic Scheduling through Video Analysis Using Dirichlet Process Mixture Model. *Expert Systems with Applications*, **118**, 169-181. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.09.057>
- [5] 李文杰, 龙浩, 戴佳伶, 杨胜发, 杨威, 张先炳. 基于排队理论的单线控制河段航道通过能力研究[J]. 水运工程, 2020(1): 97-102.
- [6] Dragovic, B., Tzannatos, E. and Park, N. (2017) Simulation Modelling in Ports and Container Terminals: Literature Overview and Analysis by Research Field, Application Area and Tool. *Flexible Services & Manufacturing Journal*, **29**, 4-34. <https://doi.org/10.1007/s10696-016-9239-5>
- [7] 王更, 许才广. 基于 Flexsim 的深圳港铜鼓航道通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2019(9): 181-185+195.
- [8] 孟宁, 陈燕, 王军. 多浅段航道设计通过能力仿真[J]. 大连海事大学学报, 2011, 37(1): 63-67+86.
- [9] 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.