

基于航道-船闸系统模型的内河多线 船闸调度优化仿真

庄元^{a,b}, 黄惠欣^{a,b}, 汪秉义^{a,b}

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

摘要:为了缓解船舶过闸需求和船闸服务能力之间的矛盾,以内河多线船闸为研究对象,利用元胞自动机原理建立了包括顺直段和弯曲段的航道船舶交通流模型,在考虑闸室分配规则、BL排样算法和多闸室并行调度规则的基础上建立了多线船闸调度优化仿真模型,并利用内河航运系统船舶交通组织方法,将船闸与航道两个子模型看成系统模型中的节点和通道,建立了船闸-航道一体的多线船闸系统调度优化模型。以长洲水利枢纽四线船闸为研究对象,根据建立的船舶交通流模型和多线船闸系统调度优化仿真模型对航道船舶交通流时空分布特性、船闸调度优化指标等进行了仿真分析。试验结果表明:船舶上下行平均延误较实际分别降低了10.3%、8.8%,上下行闸室利用率分别提高了7.4%、7.1%。

关键词:多线船闸调度; BL排样算法; 闸室分配算法; 元胞自动机; 船舶交通流

中图分类号:U65;U611

文献标志码:A

DOI:10.3969/j.issn.1000-4653.2023.01.011

A navigation channel-ship lock system model for multi-line ship lock running simulation

ZHUANG Yuan^{a,b}, HUANG Huixin^{a,b}, WANG Bingyi^{a,b}

(a. School of Navigation; b. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

Abstract: A cellular automata-based multi-line ship lock traffic flow model is developed for optimizing the operation performance of the lock. The model is designed for both straight approaching channel and curved approaching channel and integrated with lock chamber allocation rule, BL layout algorithm and the rules for lock chamber parallel running. The ship lock part and the channel part of the model are defined as the node and the path in the system respectively. The model is used to investigate the four-line ship lock of Changzhou hydraulic complex. The spatiotemporal distribution and the index of ship lock running optimization level are calculated and analyzed. The simulation shows that the optimization can decrease the up-going and down-going delay by 10.3% and 8.8% respectively and raise the running efficiency of lock chamber by 7.4% and 7.1% respectively.

Key words: multi-line ship lock control; BL layout algorithm; lock chamber allocation algorithm; cellular automata; ship traffic flow

近年来,随着内河航运干线货运量不断攀升,过闸船舶逐渐向标准化、大型化和密集化方向发展,枢纽多线船闸成为运输船舶能否畅通航行的关键。但目前研究多以航道与泊位的联合调度^[1-2]以及船闸

与泊位的联合调度^[3-4]为主,在船闸调度上鲜少利用航道信息,尤其是内河航运系统没有建立起航道与船闸的系统调度体系,航道潜力未能充分发挥,因此将内河枢纽多线船闸的航运相关要素相互连为一

收稿日期:2021-11-15

基金项目:青年科学基金(51809206)

作者简介:庄元(1976—),男,副教授,硕导,博士,研究方向为水上交通安全工程。E-mail:543459667@qq.com

引用格式: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 Yuan, HUANG Huixin, WANG Bingyi. 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)

体,建立内河多线船闸系统调度模型,保证船舶安全高效通航,对指导内河枢纽船闸水运交通资源的优化与配置以及协调运输组织方式具有重要的科学与实践意义。

已有的研究往往将航道与船闸视为各自独立的系统分别进行定性分析,难以从微观层面上对船闸交通组织要素的运行机制进行定量分析。但在内河航运系统中,船闸与航道对船舶通航的影响却是不可分割的,牵一发而动全身,而船舶交通流能将航道与船闸从船舶航行的不同节点衔接起来。国内外学者针对不同的内河航道建立了许多船舶交通流模型,进行船舶交通流模拟仿真的主要理论包括但不限于排队论、多智能体、跟驰模型和元胞自动机等^[5-8]。柯姜岑^[9]首次提出了利用元胞自动机原理精确模拟船舶在内河水运枢纽区域中船闸和航道里的运输组织微观行为;LÜBBECKEE等^[10]针对基尔运河复杂的船舶交通问题,以船舶等待时间最少为目标函数建立了航道-船闸的联合调度模型。

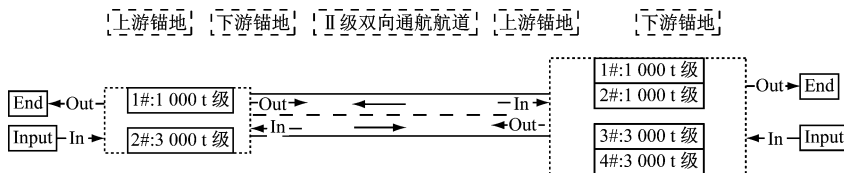


图1 两级船闸间船舶航行过程示意图

Fig. 1 Diagram of ship navigation process between two locks

如船舶上行通过两级船闸的航行过程为:船舶进入下游船闸的上行待泊锚地,报到审核通过后形成待闸队列,经过闸室分配和船舶编排后进入相应闸室,最后调度完成驶出闸室进入航道,并根据航道条件及其他船航行情况动态调节本船航行行为,最后到达上游船闸上行待泊锚地,并重复过闸流程,最后离开系统。

2 航道船舶交通流模型

2.1 航道船舶交通流建模

船舶经过船闸调度后驶出闸室进入锚地缓冲等待,若此时航道边界为开放状态则进入航道,根据航道通航情况和其他船航行状态跟驰或追越航行,最后驶出航道。由于船舶跟驰航行与道路车辆跟驰行驶一样,都具有延迟性和传递性,因此根据元胞自动机原理,仿照道路上的车辆行驶元胞自动机模型建立航道船舶交通流模型,如图2所示,利用元胞状态及元胞更新演化规则体现船舶航行状态和航行规则^[11]。

航道船舶交通流模型由通航方向相反的两个并

纵观国内外现状,船闸调度优化的研究对象主要以单线船闸、二线船闸以及由它们组成的多级船闸为主,四线船闸调度研究较少。针对以上问题,本文从航道与船闸整体的角度出发,针对长洲水利枢纽四线船闸实际运行情况,考虑西江干线中的船舶特性和航行规则,利用元胞自动机原理模拟航道船舶交通流,构建长洲水利枢纽四线船闸系统调度优化模型。

1 模型总体框架

梯级多线船闸调度优化模型由船闸调度优化系统和航道船舶交通流仿真两部分组成,并按照船舶的航行过程将船闸和航道纳入此系统中,待闸锚地为两部分的连接点,船舶驶出航道进入锚地即作为航道的输出(OUTPUT)以及船闸的输入(INPUT),反之从锚地驶出进入航道则作为船闸的输出(OUTPUT)及航道的输入(INPUT),如图1所示。

列通航航道组成,单个通航航道可看作是由多个元胞组成的一维元胞空间。每个元胞的状态有两种,即元胞为空(没有船舶),或元胞被占用(有船舶),船舶航速 v_i 则用一个时间步长 t 内占用的元胞数度量,占用的元胞数表示的是船舶安全领域长轴。本文基于停船视距^[12]计算船舶领域长轴,船舶领域长轴 L 取值由停船视距 S 和船长 l 组成,而停船视距 S 由反应距离 S_1 、制动距离 S_2 及最小安全距离 S_0 这三部分组成,如图3所示。

船舶领域长轴计算式如下:

$$L = S + l \quad (1)$$

$$S = S_0 + S_1 + S_2 \quad (2)$$

$$\begin{cases} S_0 = \frac{1}{4}l \\ S_1 = 42\% S \\ S_2 = \frac{v^2}{2((p/v + kv^2)/M)} \cdot \frac{1}{1 - 42\%} \end{cases} \quad (3)$$

$$k = (0.046R^{-0.134} + b) \cdot \frac{\rho}{2} \cdot (1.71D + C_b l B) \quad (4)$$

$$v_i(t+1) = \max\{0, v_i(t) - a_{\text{decelerate}}\} \quad (10)$$

⑤ 当船舶在弯曲航段航行时,以一定概率 $P_{\text{decelerate}2}$ 减速至安全航速 12 km/h 航行 $P_{\text{decelerate}2}$ 为弯曲航段船舶减速概率:

$$\text{rand}(1) \leq P_{\text{decelerate}2},$$

$$v_i(t+1) = \max\{12, v_i(t) - a_{\text{decelerate}}\} \quad (11)$$

2) 加速航行

若船舶不需要减速,不处于限制航段,且船舶速度小于预期速度时,船舶趋向于以概率 $P_{\text{accelerate}}$ 加速至期望航速 V_{expect} 。 $P_{\text{accelerate}}$ 为船舶加速概率。若此时本船与前船距离大于最大安全距离,则船舶加速到 $\min(v_i(t) + 1, V_{\text{expect}})$, 如果与前船距离小于最大安全距离,则船舶加速到 $\min\{(v_i(t) + 1), \min(v_{i, \text{front}}, V_{\text{expect}})\}$ 。另外,当本船正在被追越,即后船不在原航道上且后船速度大于本船速度时,本船不允许加速航行,否则追越船无法回到原航道。

3) 匀速前进

当船舶无需加速或减速,则保持以上一时刻的速度 $v_i(t)$ 匀速前进:

$$v_i(t+1) = v_i(t) \quad (12)$$

2.2.2 追越

追越行为的发生首先要有追越动机,其次要满足追越行为发生的安全条件,包括航道空间条件和其他船航行动态等。追越行为由换道追越和换道回归两部分组成。

1) 换道追越

① 追越动机

船舶受到前方慢船阻塞,水域空间不能满足其以期望的速度航行。即 $v_i(t) > v_{i, \text{front}}(t)$, $d_{i, \text{front}} < L_{i, \text{front}}$, $L_{i, \text{front}}$ 为船舶与前船间的富余安全距离。

② 安全条件

第一,对向航道前方、后方航段的交通条件较好,有足够的空间供其以期望航速安全航行。即 $v_i(t) > v_{i, \text{front}}(t)$, $d_{i, \text{front}} < L_{i, \text{front}}$, $d_{i, \text{opp}}$ 、 $d_{i, \text{rear}}$ 分别为船舶 i 与对向航道前船、后船间的距离, $L_{i, \text{opp}}$ 、 $L_{i, \text{rear}}$ 分别为船舶追越时对向航道前方和后方应保证的最小富余距离。

第二,船舶在完成追越后,前方有足够的空间使其返回原航道,即 $d_{i, \text{front}} > L_{\text{back}}$, L_{back} 为被追越船前方所需的最小安全。

第三,为避免船舶追越的过程中进入航道限制区域,规定当 $\frac{d_{i, \text{front}}}{v_i(t) - v_{i, \text{front}}(t)} < \frac{L_{\text{limit}}}{v_{i, \text{front}}(t)}$ 时,可在不许追越航段前追越, L_{limit} 为被追越船至限制航段的距离。

③ 发生概率

考虑到仅部分驾驶员实际航行过程中有追越倾向,因此当追越动机和安全条件同时满足时,追越行为也只能按船舶追越行为发生的概率 P_{overtake} 发生。

2) 换道回归

换道追越中的船舶应该在满足安全条件的情况下尽快回归至原航道,更新规则为 $v_i(t+1) = \min\left\{v_i(t) + a_{\text{accelerate}}, \frac{d_{i, \text{front}}}{2}, v_{\text{max}}\right\}$ 。 v_{max} 为船舶最大航速, $a_{\text{accelerate}}$ 为船舶加速的加速度安全条件如下:

第一,原航道被追越船前方航段空间能够满足追越船以正常航速返回行驶,并保证在返回后保持安全距离。即 $d_{i, \text{opp}} > L_{i, \text{front}}$, $d_{i, \text{rear}} > L_{\text{rear}}$ 。

第二,船舶在换道追越过程中对遇对向航道船舶,且距离已小于安全距离时,只要原航道上具备返回的空间条件,即 $d_{i, \text{front}} \leq L_{i, \text{front}}$, $d_{i, \text{opp}} > 0$, $L_{i, \text{rear}} > 0$,船舶立即返回原航道。

2.3 航道弯曲段

以“桂平飞达 1098”船舶在西江干线桂平船闸至长洲水利枢纽四线船闸的典型航线为例,如图 4 所示,航程 147.6 km,航行时间 13.5 h,通过 AIS 获得船舶的 GPS 位置数据 316 个,并根据高斯-克吕格投影(Gauss-Kruger projection)下的坐标变换将其转化为平面直角坐标系数据。

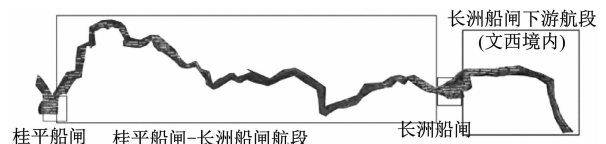


图 4 桂平船闸至长洲船闸航段图

Fig. 4 Route map from Guiping ship lock to Changzhou ship lock

航线可看成是由多个直线段拼接而成,利用均值滤波算法对航迹数据进行平滑处理,并采用二阶差分法计算拼接处的夹角角度,若角度超过 45° 则视为急弯,计算得出急弯点共 166 个,从而计算出 11 段弯曲航段的长度,见表 1。

3 多线船闸调度优化模型

多线船闸调度优化问题可看成船舶编排、闸室分配和多闸室并行调度三个子问题组成的多目标不确定性组合优化问题。

3.1 船舶编排

为使闸室利用率最大,引用“可排点”概念的 BL 算法(Bottom-Left 算法)进行船舶编排。可排点

表1 航道分段情况
Tab.1 Channel section condition

航段编号	航道类型	航程/km
1	急弯	5.04
2	急弯	8.35
3	急弯	2.99
4	急弯	0.69
5	急弯	2.31
6	急弯	18.61
7	急弯	0.86
8	急弯	1.89
9	急弯	2.70
10	急弯	0.23
11	急弯	1.25

即由闸室中已排船舶计算出的能够为下一艘船舶安排的位置,当存在多个可排点则形成可排点队列,队列排序原则为:对于任意可排点 P_i 和 P_j ,若 P_i 横坐标小于 P_j 横坐标,则 P_i 排在 P_j 的前面,若两点横坐标相同,则纵坐标小的排在前面。将船闸的闸室视为一个大的矩形,以其左下角为原点建立坐标系,船只则视为小矩形,将船只放入闸室的过程可以看作是用小矩形填充大矩形的过程。

如图5所示,船舶 c 长为 l_{abc} ,宽为 w_{abc} ,面积为 s_{abc} ;闸室长为 L_a ,宽为 W_a ,直角坐标系 x 轴为闸室长, y 轴为闸室宽,船舶在闸室内的坐标点为 (l_{abc-x}, w_{abc-y}) , $l_{abc-x} \geq 0, w_{abc-y} \geq 0$,船舶排样的约束如下:

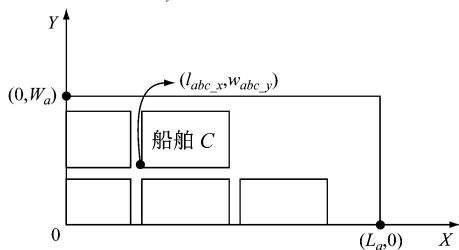


图5 船舶排样直角坐标系

Fig.5 Cartesian coordinate system of ship layout

(1) 船舶长宽不能超过闸室有效面积长宽:

$$\begin{cases} l_{abc-x} + l_{abc} \leq L_a \\ w_{abc-y} + w_{abc} \leq W_a \end{cases} \quad (13)$$

(2) 船舶间不能重叠,船舶间长宽距离1 m。

其中, l_{abr} 是船舶 r 的长度, w_{abr} 是船舶 r 的宽度。

$$\begin{cases} (l_{abr-x} + l_{abr} + 1 - l_{abc}) \times (l_{abc-x} + l_{abc} + 1 - l_{abr}) \leq 0 \\ (w_{abr-y} + w_{abr} + 1 - w_{abc}) \times (w_{abc-y} + w_{abc} + 1 - w_{abr}) \leq 0 \end{cases} \quad (14)$$

3.2 闸室分配

闸室分配即为待闸船舶分配过闸闸室,闸室分配规则由船闸的类型及运行方式确定,图6为闸室分配算法流程图, B_a 表示第 a 闸室的状态, B_1, B_2, B_3, B_4 依次代表下行空闲、正在上行、正在下行、上行空闲。 S_a 表示闸室面积, S_1 是1号闸室面积, S_2 是2号闸室面积。

(1) 规则1:根据过闸船舶的吨级选择不同类型的闸室。 T_{abc} 为第 a 闸室第 b 闸次第 c 艘船的吨级。

$$\begin{cases} 1 \leq a \leq 4, T_{abc} \leq 1\,000 \\ a \neq 2, 1\,000 < T_{abc} \leq 2\,000 \\ a \neq 1 \text{ 且 } a \neq 2, 2\,000 < T_{abc} \leq 4\,000 \end{cases} \quad (15)$$

(2) 规则2:考虑到危险品船舶单独过闸的特性,为不浪费闸室资源,危险品船舶过闸时优选靠近危险品船舶锚地以及闸室与船舶尺寸相差较小的闸室过闸。 K_{abc} 表示第 a 闸室第 b 闸次第 c 艘船的类型, $K_{abc} = 1$ 为危险品船,否则为非危险品船。

(3) 规则3:整体均衡。整体均衡是指船舶选择闸室时,同样吨级的闸室按照闸室总开闸次数

N_a 、总过闸艘数 $\sum_{b=1}^{N_a} n_{ab}$ 以及总过闸吨数 $\sum_{b=1}^{N_a} \sum_{c=1}^{N_{ab}} n_{abc} \cdot T_{abc}$ 进行排列,考虑闸室运行协调性和平衡性,选择合适的闸室。 N_{ab} 是第 a 闸室第 b 闸次的船舶艘数, N_{abc} 是第 a 闸室第 b 闸次第 c 艘船的吨数。

3.3 多闸室并行调度

船闸调度考虑船舶过闸的流程以及闸室的运行方式,而船闸闸室通常采用上下行交替的运行方式,当一方坝下积压船舶明显大于另一方时,则采用单向运行方式(倒闸),图7为船闸调度优化模型框架示意图。

4 模型仿真验证与分析

4.1 航道船舶交通流模型验证

选择2020年8月1日00:00:00至2020年8月12日08:32:29期间桂平—长洲船闸航道的船舶进行验证,表2、图8和图9给出了流量和速度平均值的验证结果,可知仿真结果与实际统计值误差在0.2%~4.0%,验证情况良好。具体而言,上、下行流量均值误差均未超过3.0%,说明模型较好地反映了交通流量的时空特性,上行平均速度误差最大,绝对值为0.34 km/h。

4.2 船闸调度优化模型仿真结果分析

选择2020年8月1日00:00:00至2020年8月12日08:32:29期间由长洲枢纽四线船闸过闸

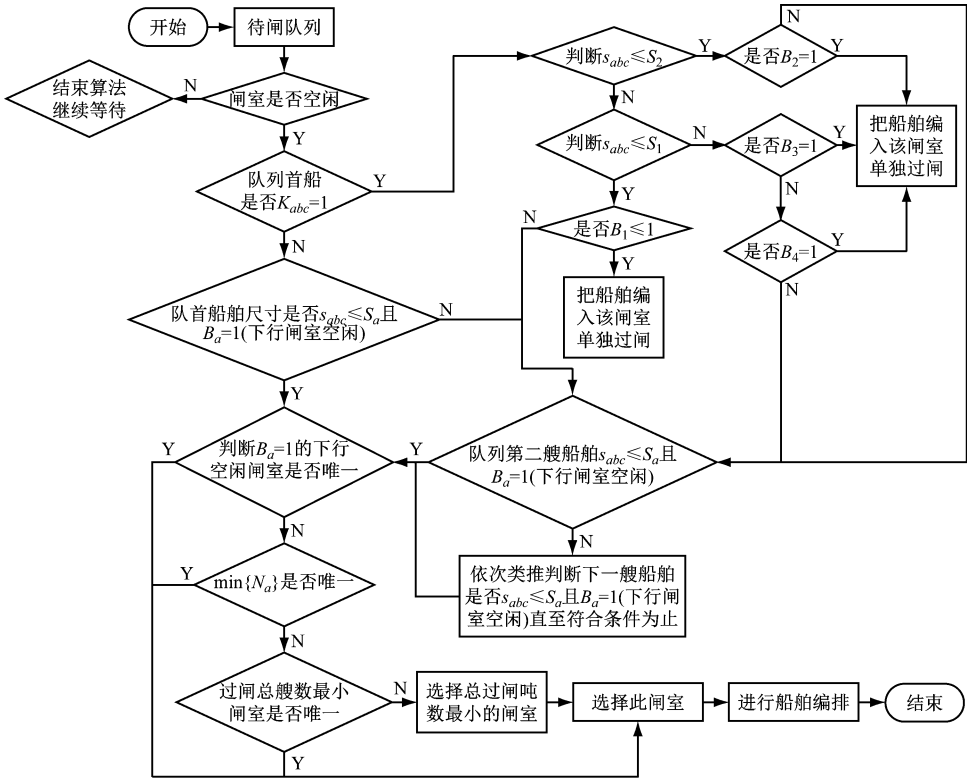


图6 闸室分配算法流程

Fig. 6 Flow chart of lock chamber distribution algorithm

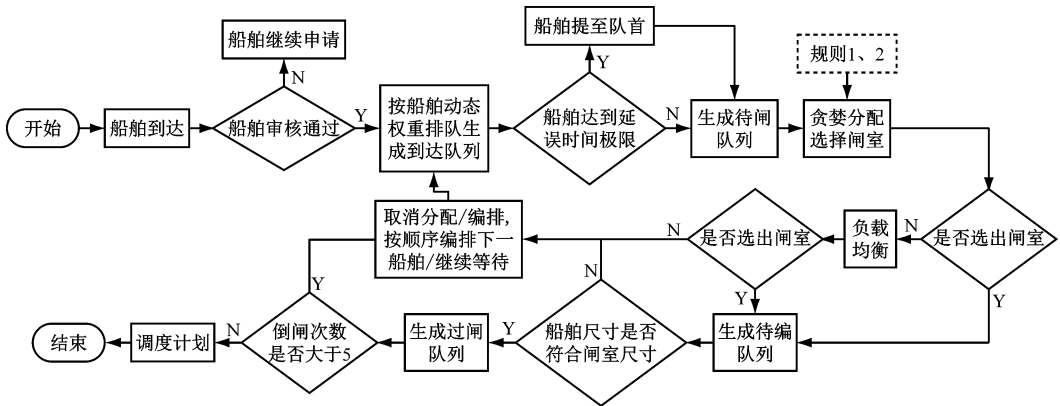


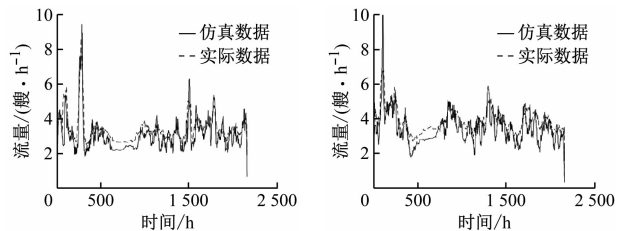
图7 船闸调度优化模型框架图

Fig. 7 Frame diagram of ship lock dispatching optimization model

表2 流量和速度平均值检验结果

Tab.2 Inspection results of average value of flow and velocity

验证参数	上行			下行		
	实际	仿真	误差	实际	仿真	误差
流量/(艘/h)	4.10	4.21	2.7%	4.25	4.28	0.7%
速度/(km/h)	8.56	8.90	4.0%	10.96	10.94	0.2%

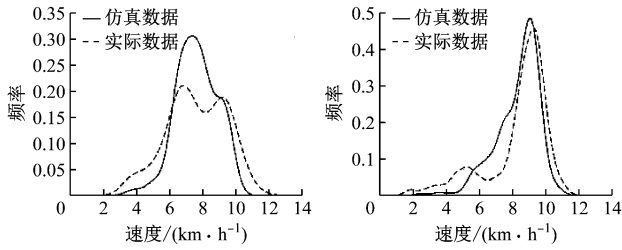


(a) 上行船舶流量

(b) 下行船舶流量

图8 航道船舶流量验证

Fig. 8 Verification of channel vessel flow



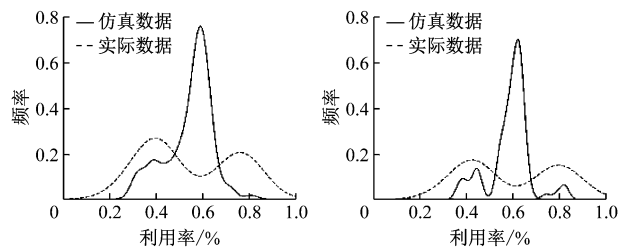
(a) 上行船舶速度 (b) 下行船舶速度
图9 航道船舶速度验证

Fig.9 Verification of ship speed in channel

表3 长洲四线船闸仿真运行结果

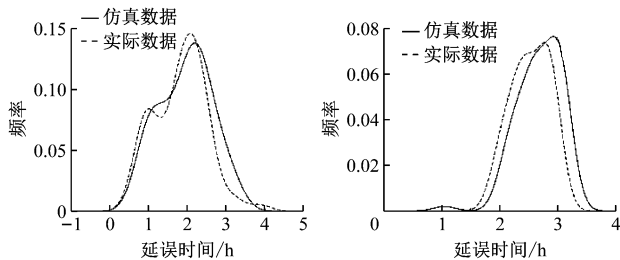
Tab.3 Simulation operation results of the four-lane ship lock of Changzhou

航向	闸室	一次过闸平均吨位/t		一次过闸平均艘数/艘		平均闸室利用率/%		平均延误/h	
		仿真	实际	仿真	实际	仿真	实际	仿真	实际
上行	一闸室	5 821.7	5 509.1	6.98	6.81	0.57	0.55	2.09	2.33
	二闸室	3 423.0	2 495.0	5.11	3.90	0.71	0.68		
	三闸室	10 740.7	10 583.7	10.86	9.20	0.67	0.60		
	四闸室	10 893.7	10 401.9	10.82	9.04	0.68	0.62		
下行	一闸室	5 539.1	5 111.2	7.39	7.04	0.55	0.53	2.80	3.07
	二闸室	3 405.4	2 376.3	5.26	3.97	0.76	0.68		
	三闸室	10 999.2	10 631.2	10.52	8.87	0.67	0.62		
	四闸室	11 077.4	10 597.6	10.72	8.90	0.66	0.63		



(a) 上行闸室利用率 (b) 下行闸室利用率
图10 长洲船闸闸室利用率

Fig.10 Utilization rate of lock chamber of Changzhou ship lock



(a) 上行船舶延误 (b) 下行船舶延误
图11 长洲船闸船舶延误

Fig.11 Delay of ship at Changzhou ship lock

的船舶进行验证,根据延误积累分布取极限延误时间阈值,取最大倒闸次数为6次。选择平均闸室利用率和平均船舶延误作为指标进行仿真模型验证,仿真运行结果见表3、图10和图11。由结果可知,各闸室的一次过闸平均吨位、一次过闸平均船数、平均闸室利用率和平均延误等参数都比实际统计数据有所优化,其中,船舶上下行平均延误较实际分别降低了10.3%、8.8%,上下行平均闸室利用率分别提高了7.4%、7.1%。

参数以及航道船舶交通流等因素,构建了航道-船闸一体的内河多线船闸调度优化模型,并利用实际船舶交通流及船闸过闸数据对航道船舶交通流时空分布特性、船闸调度优化指标等进行了仿真验证与分析。各闸室的一次过闸平均吨位、一次过闸平均船数、平均闸室利用率和平均延误等参数都比实际统计数据有所优化。其中,船舶上下行平均延误较实际分别降低了10.3%、8.8%,上下行闸室利用率分别提高了7.4%、7.1%。

本文建立的模型只考虑了两级船闸的系统调度优化问题,且模型未考虑沿线港口对船舶交通组织的影响。未来的研究可在本模型的基础上根据航运干线中的船闸实际情况增加船闸级数,并将沿线港口的船舶交通组织状况考虑到航道船舶交通流模型中。

参考文献

- [1] ZHANG X Y. Vessel transportation scheduling optimization based on channel-berth coordination [J]. Ocean Engineering, 2016, 112: 145-152.
 - [2] 郑红星,刘保利,张润,等.考虑减载移泊的散货港口船舶调度优化[J].交通运输工程学报,2018,18(5): 152-164.
- ZHENG H X, LIU B L, ZHANG R, et al. Ship

5 结束语

本文考虑锚地与船闸位置关系、闸室实际运行

- scheduling optimization on bulk cargo port considering ship lightening and berth shifting[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2018,18(5):152-164. (in Chinese)
- [3] BIN J. Exact and heuristic methods for optimizing lock-quay system in inland waterway[J]. *European Journal of Operational Research*,2019,277(2):740-755.
- [4] YUAN X H. Co-scheduling of lock and water-land transshipment for ships passing the dam[J]. *Applied Soft Computing*,2016,45:150-162.
- [5] 王展,刘克中,杨星,等. 面向单向航道通航能力的船舶减速概率[J]. *中国航海*,2018,41(4):42-46.
WANG Z, LIU K Z, YANG X, et al. Probability of ship speed reducing in one-way channel[J]. *Navigation of China*,2018,41(4):42-46. (in Chinese)
- [6] 冯宏祥,孔凡邗,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.
FENG H X, KONG F, XIAO Y J, et al. Parameters characteristics analysis of ships traffic flow with cellular automata model on AIS-based[J]. *Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering*, 2014,38(2):324-328. (in Chinese)
- [7] XIN X R. A simulation model for ship navigation in the “Xiazhimen” waterway based on statistical analysis of AIS data[J]. *Ocean Engineering*,2019,180:279-289.
- [8] 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. Modeling and simulation of channel passage capacity based on cellular automata[J]. *Journal of System Simulation*, 2021, 33(10):2478-2487. (in Chinese)
- [9] 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 C J. Study on navigable hydro-junction organization mode with cellular automata [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology,2012. (in Chinese)
- [10] LÜBBECKE E, LÜBBECKE M E, MÖHRING R H. Ship traffic optimization for the Kiel canal [J]. *Operations Research*,2019,67(3):791-803.
- [11] 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 [J]. *Journal of Shanghai Maritime University*, 2019,40(1):27-31. (in Chinese)
- [12] 李瀛,张玮. 基于停船视距的船舶领域模型研究[J]. *水运工程*,2014(1):36-40.
LI Y, ZHANG W. On model about ship domain based on stopping sight distance [J]. *Port & Waterway Engineering*, 2014(1):36-40. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 79 页)

- [6] 乔剑华,郭丽锦,武守元,等. 浅析港口液体化工码头的装卸工艺设计[J]. *港工技术*,2013,50(1):16-18.  
QIAO J H, GUO L J, WU S Y, et al. Analysis of the loading and unloading process design of the port liquid chemical terminal [J]. *Port Engineering Technology*, 2013, 50(1):16-18. (in Chinese)
- [7] 宋剑伟. 青岛港液体化工码头风险评估与应急措施研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2011.  
SONG J W. Research on risk assessment and emergency measures of liquid chemical terminal in Qingdao port [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2011. (in Chinese)
- [8] 信桂新,杨朝现,杨庆媛,等. 用熵权法和改进 TOPSIS 模型评价高标准基本农田建设后效应[J]. *农业工程学报*,2017,33(1):238-249.  
XIN G X, YANG C X, YANG Q Y, et al. Evaluation of post-construction effects of high-standard basic farmland using entropy weight method and improved TOPSIS model [J]. *Journal of Agricultural Engineering*, 2017, 33(1):238-249. (in Chinese)
- [9] 雷勋平,邱广华. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域资源环境承载力评价实证研究[J]. *环境科学学报*,2016,36(1):314-323.
- LEI X P, QIU G H. Empirical study on evaluation of regional resources and environmental carrying capacity based on entropy weight TOPSIS model [J]. *Journal of Environmental Science*, 2016, 36(1):314-323. (in Chinese)
- [10] PENG M, ZHANG L. Analysis of human risks due to dam-break floods—part 1: a new model based on Bayesian networks[J]. *Natural Hazards*, 2012,64(1):903-933.
- [11] KHAKZAD N. Modeling wildfire spread in wildland-industrial interfaces using dynamic Bayesian network [J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2019, 189:165-176.
- [12] 李江飞. 基于贝叶斯网络的地铁项目施工风险评价研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.  
LI J F. Research on metro project construction risk assessment based on Bayesian network [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [13] 周旺. 交通项目社会稳定风险等级评判指标体系研究[J]. *西部交通科技*, 2016(5):82-84.  
ZHOU W. Research on the evaluation index system of social stability risk level of transportation projects [J]. *Western Transportation Science and Technology*, 2016(5):82-84. (in Chinese)