

· 信息技术 ·



“航道—船闸”通航系统中的 多线船闸运行规则仿真研究*

李 薇, 王 翠, 刘春泽, 唐 颖, 张佰望, 王效远

(中交水运规划设计院有限公司, 中交集团综合交通虚拟仿真应用技术研发中心(港口与城市), 北京 100007)

摘要: 国内某五线船闸工程各船闸闸室尺度、运行参数差异较大, 锚地数量多且功能各异, 靠近锚地和船闸的水域船舶航线交织, 在此条件下分析比选五线船闸运行规则缺少合适方法。从船舶进出闸优先级规则和过闸排档规则两个维度对五线船闸运行规则进行分析, 在多线船闸仿真模型基础上, 提出考虑船舶航行并引入航道网络初始化算法、航道航行判断算法的仿真建模方法。结果表明: 与“进闸船舶优先”规则相比, 采用“出闸船舶优先”规则通过能力高出约 20%, 采用“1 号闸限过宽度 12 m 以上船舶, 2 号闸限过宽度 15 m 以下船舶, 3、4、5 号闸限过宽度 10 m 以上船舶”略优于其他排档规则。

关键词: 多线船闸; 船闸通过能力; 系统仿真; 船舶过闸排档; 船舶航行冲突判断

中图分类号: U641.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)10-0179-09

Simulation research on operation rules of multi-line ship locks in “waterway-lock” navigation system

LI Wei, WANG Cui, LIU Chunze, TANG Ying, ZHANG Baiwang, WANG Xiaoyuan

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., CCCC Comprehensive Transportation Virtual Simulation

Application Technology Research and Development Center (Port and City), Beijing 100007, China)

Abstract: In a domestic five-line ship lock project, the dimensions and operational parameters of each ship lock vary significantly. There are a large number of anchorages with different functions, and the ship navigation routes near the anchorages and locks are intertwined. Under the complex conditions, there is a lack of proper methods to analyze the operation rules of five-line ship lock. This article analyzes the operation rules of the five-line ship lock from two dimensions: the priority rules for ship entering and leaving the locks and the lock arrangement rules. Based on the simulation model of multi-line ship locks, a simulation modeling method considering ship navigation and introducing channel network initialization algorithm and channel navigation judgment algorithm is proposed. The results show that compared with the rule of “priority for incoming ships”, the passing capacity of the rule of “priority for outgoing ships” is about 20% higher. The adoption of “Lock No. 1 is limited to ships with a width of more than 12 m, Lock No. 2 is limited to ships with a width of less than 15m, and Locks No. 3, 4, and 5 are limited to ships with a width of more than 10m” is slightly better than other scheduling rules.

Keywords: multi-line ship lock; ship lock throughput capacity; system simulation; ship arrangement in lock chamber; judgment of ship navigation conflict

随着国内内河水运货物运输需求的持续、快速增长, 船闸作为内河货运通过能力瓶颈的特点

越发明显, 同一内河断面上新船闸建设的需求愈发旺盛, 以多线船闸尤为突出, 如西江干线航道、

收稿日期: 2025-01-04

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206101); 广西科技重大专项(桂科 AA23062023)

作者简介: 李薇(1987—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事水运工程系统仿真研究工作。

京杭运河等。以国内某五线船闸为例,多线船闸的突出特点是:各线船闸建设时间不同且跨度较大,各闸平面布置、闸室尺度、运行条件各不相同;位于同一枢纽断面,各线船闸需要联合运行;多个船闸共用主航道、引航道,进出锚地、船闸的船舶交通流有交叉,影响通航效率和通航安全;一般有多个锚地,需根据水文情况(洪水期、枯水期)、是否为危险品船舶指定专门的待闸锚地。因此对多线船闸开展研究和设计工作,需要考虑更多的实际且复杂的条件。

对于多线船闸的研究,Dai 等^[1]应用数值计算方法对 G/G/1 排队模型进行求解,研究单向或双向运营时的船闸通过能力和延误时间;Verstichel 等^[2]采用元启发式算法求解;Zhan 等^[3]采用混合遗传算法,配合使用近似局部搜索算法和最适宜降速算法(BFD),建立了针对船闸调度优化问题的数学模型,并采用数值近似方法求解;Kim 等^[4]通过构建神经网络模型对船闸服务时间进行估计,并配合使用系统性移除异常值的方法,用于估计闸室尺寸不同的两线船闸的服务时间;杜经农等^[5]使用动态规划理论建立数学模型,提出了一种基于滑动窗口方法的算法;齐俊麟等^[6]研究大型船闸通过能力多维分析建模与仿真,攻克了在复杂多变条件下,船闸中间航道通航、新标准船型与船闸协同下快速过闸等船闸通过能力提升关键技术;孔庄^[7]考虑平衡交通负荷与服务质量的约束条件,基于专家规则的启发式方法,设计了“单队列多服务台-贪婪分配-负载均衡”的闸室分配算法和运行调度算法;廖鹏等^[8]考虑平衡船闸交通负荷与服务质量的约束,设计了船舶过闸交通模型的整体框架以及闸室分配、闸室编排、运行调度等 3 个耦合子模块的启发式求解算法,分析了不同条件下船闸的运行状态和最大通过能力等;商剑平等^[9]针对长洲水利枢纽四线船闸的复杂航运系统,构建了四线船闸联合调度排档仿真模型,

对不同联合调度方案下的船闸通过能力等指标进行对比;柯姜岑等^[10]结合道路交通的三线轨道交通模型,基于元胞自动机理论构建了水利枢纽区域过闸组织模型,对双线船闸和升船机进行模拟;张玮等^[11]构建了多节点(船闸和瓶颈河段)航运调度仿真模型并采用启发式调度优化方法,研究盐邵线扬州段的航道通航情况。

上述学者均从学术角度对多线船闸通过能力、调度优化进行研究和分析,但是未考虑多线船闸在实际设计工作中面临的闸室条件不同、多线船闸联合运行、船舶在航道内航行冲突以及锚地指定等复杂条件。因此,本文提出考虑船舶航行影响的多线船闸仿真建模方法,在多线船闸仿真模型基础上,引入航道网络初始化算法、船舶航行判断算法等,并在模型中考虑上述复杂条件,对多线船闸不同的运行规则进行分析。

1 多线船闸仿真模型

1.1 模型边界和范围

模型边界分别为上下游引航道以及与其相连的待闸锚地。模型范围包括上下游待闸锚地、引航道、待闸段靠船墩、闸首和闸室。

1.2 船舶生成

船舶随机到达,到达间隔时间满足负指数分布,船舶参数根据输入的船型信息和比例随机确定。为了分析船闸能力,上下游边界的待闸锚地中始终有足够船舶以保证船闸饱和运行。

1.3 多线船闸运行方式

多线船闸最常见的为单级,并以双向运行为主,见图 1。采用双向运行的方式比单向运行的方式效率更高,每一闸次均有船舶通过,不存在空闸室灌泄水的情况。若过闸货运需求上下行不平衡,或某些船闸待闸段距离闸室较远,为了提高船舶过闸效率、减少船舶等待时间,也可采用单向运行的方式。

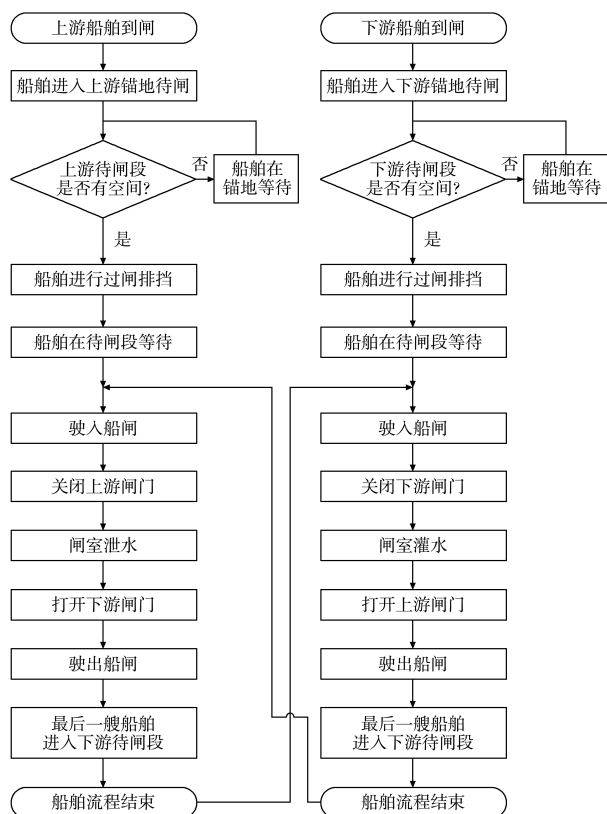


图 1 多线船闸双向运行过程

Fig. 1 Two-way operation process of multi-line ship locks

1.4 船舶调度算法及过闸排档算法

多线船闸的船舶调度算法分两级实现, 见图 2。在第一级中, 首先按照船闸对船舶要求将船舶划分到不同的待排档队列, 考虑两方面的要求: 1) 船闸运行的要求, 如过闸船舶需满足船闸门槛水深、闸室长度和宽度、危险品船过闸的安全性要求等。2) 运行优化的要求, 例如按照“局部贪婪”的规则, 即考虑各线船闸闸室的实时运行状态以及上下游船舶待闸情况, 船舶选择尽快能实现过闸的船闸。然后根据船舶排队规则对队列中船舶进行排序, 一般情况下考虑到船闸公共服务的属性, 为了体现公平、减少先到船舶的待闸时间, 采用“先到先服务”的规则, 船舶到达时间越早过闸越早; 此外综合考虑管理因素, 也可叠加采用“大船优先”或其他优先级规则。

在第二级中, 首先按照船舶过闸排档算法, 对可进行排档的船闸, 从待排档队列中选取通过船舶并确定船舶在闸室的位置; 然后对各船闸排档结果进行评价, 选择最优排档方案及船闸, 并按此结果执行。船舶过闸排档算法参考文献[9]。

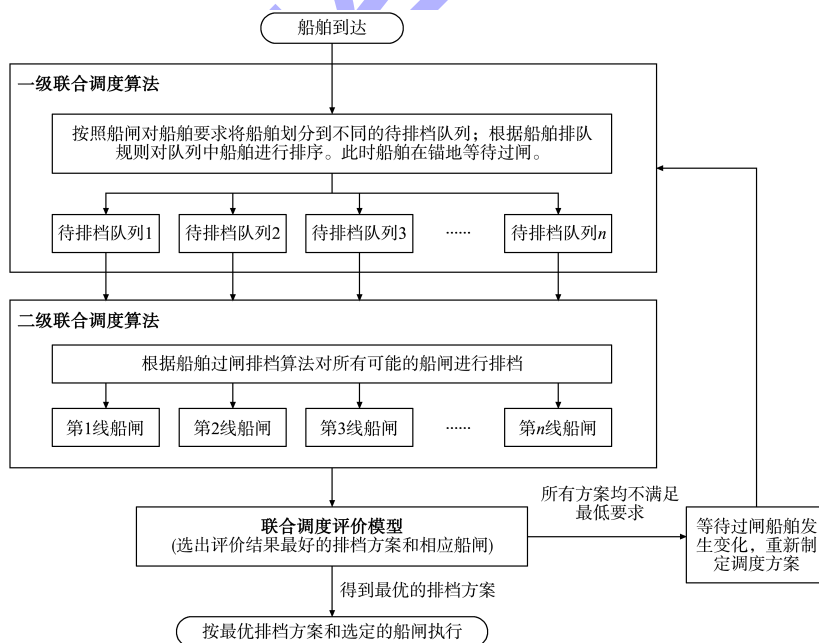


图 2 多线船闸的船舶调度算法

Fig. 2 Ship scheduling algorithm for multi-line ship locks

1.5 船闸运行条件判断

各船闸根据自身情况分别输入年可作业天数和日可作业小时数。各船闸根据输入的年可作业天数随机判断该船闸当日是否可作业,根据输入的日可作业小时数判断船闸是否处在当日可作业时段内。

2 考虑船舶航行影响的多线船闸仿真建模方法

2.1 船舶航行影响分析及仿真模拟

多线船闸上下游航道呈网络结构,特别在锚地附近和主航道与引航道交界水域,不同流向船舶的航线存在交叉。如下游待闸锚地若位于左岸,则进出锚地的船舶与同为进闸方向的船舶的航线有交叉,若位于右岸则进出锚地的船舶与进出闸方向的船舶的航线均有交叉。在主航道与引航道交界水域,进闸方向船舶的航线由主航道分散到各船闸的引航道,出闸方向船舶的航线由各船闸汇聚到主航道,进出闸船舶航线在比较小的水域范围内出现较多的航线交叉。

船舶航线交叉对船舶航行过程有影响,进而可能影响船舶过闸效率,因此有必要对船舶在航道中的航行过程进行模拟,对航行冲突进行判断。在模型中将航道网络抽象为由航道段作为连线,锚地和航道交叉处作为节点组成的网络。在对典型多线船闸仿真模拟的基础上,将对船舶在航道内航行过程的模拟与对船舶过闸过程的模拟相结合。因此船舶的作业过程总体上分为船舶在航道内抵闸航行、过闸、离闸航行 3 个阶段,其中抵闸航行阶段主要涉及航道网络初始化算法、航道航行判断算法,船舶过闸阶段主要涉及船舶调度算法及过闸排档算法。模型整体运行逻辑见图 3。

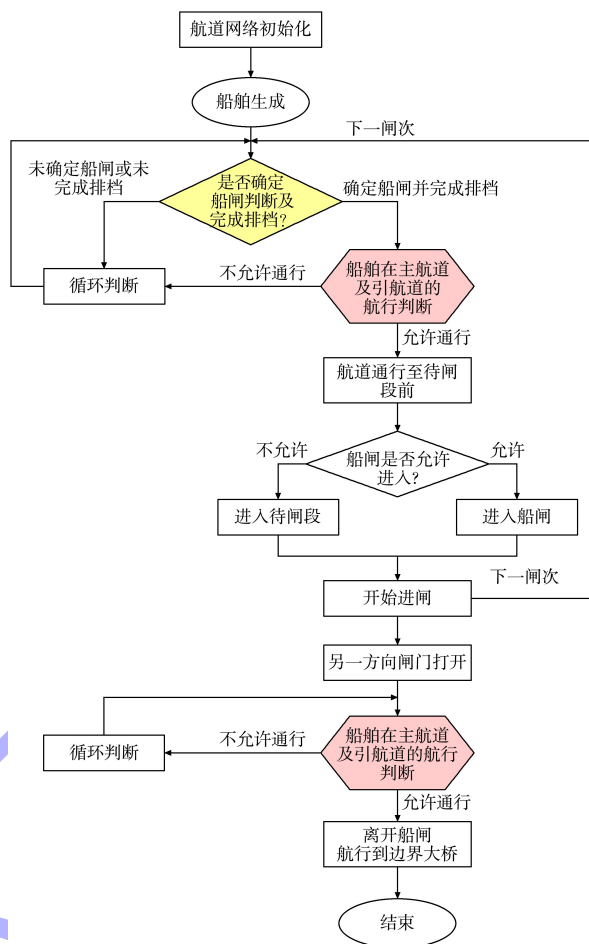


图 3 考虑船舶航行影响的多线船闸仿真模型运行逻辑
Fig. 3 Operational logic of simulation model for multi-line ship locks considering influence of ship navigation

2.2 模块设计

2.2.1 流动实体

船舶对象为模拟航行及过闸的船舶。

2.2.2 航道航行部分

1) 航道段对象: 模拟航道段; 2) 交汇处对象: 模拟多个航道段的交汇处; 3) 初始锚地对象: 模型边界, 生成的船舶首先放在此处(也为船舶航行的终点); 4) 普通锚地对象: 模拟各种不同功能的锚地, 如报到锚地、待闸锚地等, 以及相应的逻辑判断; 5) 航行模块: 对船舶在 2 个端点(包括锚地和交叉口)之间的航行过程进行模拟; 6) 航行管理模块: 储存航道网络信息, 以及不同起点和终点之间连接的航道段信息。

2.2.3 船闸运行部分

1) 待闸段对象: 模拟船闸待闸段, 以及船舶进闸逻辑判断过程; 2) 输水系统对象: 模拟闸室的灌泄水过程; 3) 闸门对象: 模拟闸门及开关过程; 4) 船舶过闸对象: 对船舶过闸过程进行模拟; 5) 船闸对象: 包括待闸段对象、输水系统对象、闸门对象、船舶过闸对象, 以及其他描述船闸特性的属性等, 还储存船闸运行过程中的各项统计指标。

2.3 航道网络初始化算法

在模型运行前, 需对航道网络关系进行初始化, 确定不同起点、终点之间所有可能的航线 (即航道段的组合), 以便在模型运行中基于给定

起点、终点快速获取船舶需要经过的航道段和节点并进行冲突判断, 提升模型运行效率, 避免重复计算。算法总体上类似于树搜索, 为了确定某一个给定起点、终点之间所有可能的航道段组合, 需从给定的起点出发, 遍历所有与之连接的、“向外”的航道段, 然后移步到航道段末端作为新的起点, 再遍历所有与新起点相连接的、“向外”的航道段, 并以此类推, 直到遍历所有可能的航道段和交汇处并到达最末端; 然后需要判断此末端是否为给定的终点, 若是则将途径的航道段、交汇处作为一个航线方案保存。最后将各航线方案按照“最短路径优先”原则, 放入结果列表中, 见图 4。

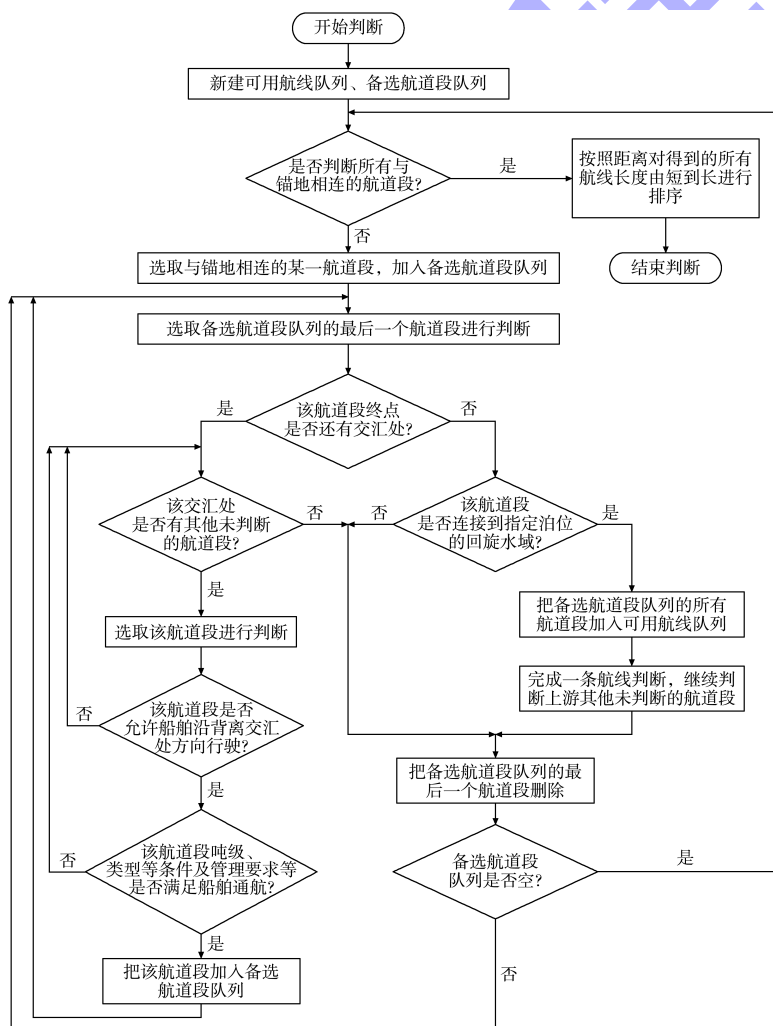
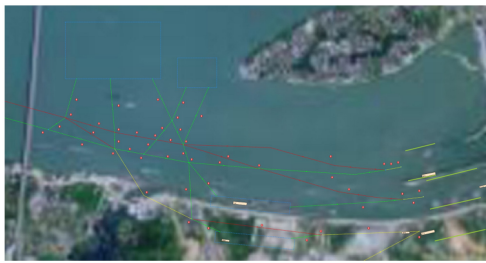


图 4 航道网络初始化算法

Fig. 4 Channel network initialization algorithm



b) 五线船闸模型局部



c) 上游近闸水域航道网络

图 6 仿真模型平面展示

Fig. 6 Plan presentation of simulation model

3.1 模型边界和范围

模型以船闸上游和下游最远端锚泊区为边界, 研究范围包括上下游边界内的锚泊区、主航道、口门、引航道、待闸段靠船墩、闸室、闸门、输水系统、过闸船舶等。本案例船闸的上下游锚泊区布置分散, 位于上游 22 km 和下游 4 km 范围内, 且锚泊区功能划分细致, 分为枯水期、洪水期以及危险品船专用锚泊区, 均包含在模型范围内。

3.2 模型输入参数

1) 船闸平面布置和运行天数。1、2 号船闸共用引航道, 上下游均采用直线进闸曲线出闸布置方式, 其中 1 号船闸有效尺度为 200 m×34 m×4.5 m(长度×宽度×门槛水深), 2 号船闸有效尺度

为 185 m×23 m×3.5 m, 在河流枯水期运行严重受限, 因此考虑年平均停航天数 117 d。3、4 号船闸上下游采用曲进直出的布置方式, 在上下游增设待闸停泊段, 闸室有效尺度为 340 m×34 m×5.8 m, 年通航天数 340 d。新建 5 号船闸闸室有效长度 340 m, 有效宽度 34 m, 上下游分别布置可供一闸次船舶待闸的专用待闸锚地, 年通航天数 340 d。各船闸采用双向运行方式, 每日工作 21 h。

2) 锚地。船闸上游航道 22 km 范围内布置 6 块共用锚地: 枯水期 1[#]锚地、枯水期 2[#]锚地(同为上游洪水期 1[#]锚地)、枯水期危险品锚地、洪水期 2[#]锚地、洪水期危险品锚地、5 号船闸规划上游锚地。下游航道 4 km 范围内布置 5 块共用锚地: 枯水期 1[#]锚地(同为下游洪水期 1[#]锚地)、枯水期 2[#]锚地(同为下游洪水期 2[#]锚地)、洪水期 3[#]锚地、危险品锚地、5 号船闸规划下游锚地。共用锚地用于各船舶报到和待闸, 模型中生成船舶后先指定共用锚地, 需判断当时水文情况(洪水期还是枯水期)、锚地空间是否充足、是否为危险品船舶。因此在模型中需对水文条件变化进行模拟, 且假设出闸及离开的船舶不进入锚地等待。

3) 船型组合见表 1。

4) 过闸时间见表 2, 模型中假设船舶匀速航行。

表 1 过闸船型及比例

Tab. 1 Ship types and proportions for passing through locks

船舶吨级	核载/t	船型长/m	船型宽/m	装载率	艘次比/%
1 000	1 100	50	11.0	0.85	20
2 000	2 000	74	14.0	0.80	20
3 000	3 300	90	15.8	0.75	15
5 000	5 250	90	15.8	0.65	45

表 2 船舶过闸时间有关参数

Tab. 2 Relevant parameters of ship passing time

船闸	下行		上行		船舶安全间隔 时间/min	开、关闸门 时间/min	灌、泄水 时间/min
	进闸速度/(m·s ⁻¹)	出闸速度/(m·s ⁻¹)	进闸速度/(m·s ⁻¹)	出闸速度/(m·s ⁻¹)			
1 号船闸	0.7	1.1	0.7	1.1	2	4.5、4.5	8.5、8.5
2 号船闸	0.7	1.1	0.7	1.1	2	3.0、3.0	9.0、9.0
3 号、4 号船闸	0.7	1.1	0.7	1.1	2	4.5、4.5	12.0、12.0
新建 5 号船闸	0.7	1.2	0.7	1.2	2	4.5、4.5	12.0、12.0

3.3 仿真试验设计

船闸运行规则从船舶进出闸优先级规则和过闸排档规则两个维度进行分析。将“船舶进闸优先”作为船舶进出闸优先级规则的基准，以“船舶出闸优先”作为比选规则。“船舶进闸优先”指对于已经满足其他条件且只需要判断进闸航行条件的、从锚地驶向船闸待闸段的船舶，以及已经满足其他条件且只需判断进闸航行条件的、在闸室内等待的船舶，前者优先级更大。“船舶出闸优先”则反之。过闸排档规则以“闸室最适配船舶的尺度”作为基准(即规则 1)，增加通过 2~5 号船闸的船型范围形成规则 2，仅增加通过 2~4 号船闸的船型范围形成规则 3。工况设计见表 3，其中工况 1 为基准工况，工况 2~6 为比选工况。模型模拟船闸运行 1 a，此外考虑预热时间 10 d，因此共模拟运行 375 d。

表 3 仿真工况设计		
Tab. 3 Simulation condition design		
试验 工况	进出闸 优先级规则	过闸排档规则
1	进闸优先	规则 1:1 号船闸:船宽 12 m 以上;2 号船闸:船宽 12 m 以下;3 号船闸:船宽 12 m 以上;4 号船闸:船宽 12 m 以上;5 号船闸:船宽 12 m 以上
2	出闸优先	规则 1
3	进闸优先	规则 2:1 号船闸:船宽 12 m 以上;2 号船闸:船宽 15 m 以下;3 号船闸:船宽 10 m 以上;4 号船闸:船宽 10 m 以上;5 号船闸:船宽 10 m 以上
4	出闸优先	规则 2
5	进闸优先	规则 3:1 号船闸:船宽 12 m 以上;2 号船闸:船宽 15 m 以下;3 号船闸:船宽 10 m 以上;4 号船闸:船宽 10 m 以上;5 号船闸:船宽 12 m 以上
6	出闸优先	规则 3

3.4 仿真结果分析

以模型统计得到的各工况下船闸下行方向货运量(货运量更大方向)作为船闸单向通过能力，并统计一次过闸平均吨位、一闸次平均船舶数、闸室平均利用率等，见表 4。

表 4 不同运行规则下各线船闸仿真结果
Tab. 4 Simulation results of each line of ship locks under different operation rules

进出闸 优先规则	船舶	单向过闸 货运量/ 万 t	一次过闸 平均吨位/ 万 t	一闸次平均 船舶数/ 艘	闸室平均 利用率/ %
规则 1	1 号	1 902	1. 657 1	4. 0	88. 2
	2 号	833	0. 637 8	5. 6	82. 1
	3 号	4 097	2. 468 8	6. 5	77. 0
	4 号	4 108	2. 469 4	6. 5	76. 9
	5 号	4 219	2. 487 5	6. 5	77. 2
	合计	15 159	—	—	—
	规则 2	1 号	1 957	1. 765 5	4. 0
2 号		634	0. 410 1	2. 3	55. 0
3 号		4 221	2. 713 0	7. 8	85. 1
4 号		4 257	2. 718 2	7. 7	85. 1
5 号		4 331	2. 727 5	7. 8	85. 4
合计		15 400	—	—	—
规则 3		1 号	1 841	1. 748 4	4. 0
	2 号	629	0. 431 2	2. 8	57. 5
	3 号	4 028	2. 634 2	8. 0	83. 9
	4 号	4 050	2. 639 2	8. 0	84. 0
	5 号	4 244	2. 555 4	6. 2	77. 6
	合计	14 792	—	—	—
	规则 1	1 号	2 348	1. 645 5	4. 0
2 号		1 039	0. 615 2	5. 2	77. 9
3 号		4 932	2. 473 6	6. 5	77. 0
4 号		4 862	2. 472 9	6. 5	77. 0
5 号		5 033	2. 479 7	6. 5	77. 0
合计		18 214	—	—	—
规则 2		1 号	2 597	1. 766 9	4. 0
	2 号	862	0. 420 3	2. 4	55. 3
	3 号	4 912	2. 690 3	7. 6	84. 3
	4 号	4 91	2. 691 3	7. 6	84. 2
	5 号	5 102	2. 692 9	7. 7	84. 3
	合计	18 389	—	—	—
	规则 3	1 号	2 511	1. 746 5	4. 0
2 号		856	0. 434 6	2. 8	57. 2
3 号		4 809	2. 619 0	7. 9	83. 3
4 号		4 783	2. 619 8	7. 9	83. 3
5 号		5 053	2. 569 9	6. 2	77. 9
合计		18 012	—	—	—

在进闸优先的前提下，与规则 1 相比，采用规则 2 后五线船闸通过能力提高 1.6%，采用规则 3 后五线船闸通过能力降低 2.4%。在出闸优先的前提下，与规则 1 相比，采用规则 2 后五线船闸通过能力提高 1.0%，采用规则 3 后五线船闸通过能力

降低1.1%。可见上述规则调整对通过能力的影响并不显著。受多线船闸联合运行的影响,各线船闸的指标变化趋势与五线船闸总体通过能力的变化趋势并不一致,例如与规则1相比,采用规则2能够增加五线船闸总体通过能力,且1号和3~5号船闸的单向过闸货运量、一次过闸平均吨位、一闸次平均船舶数、闸室平均利用率均优于方案1,但会牺牲闸室平面尺度较小的2号船闸的通过能力、一次过闸平均吨位、一闸次平均船舶数和闸室平均利用率。

在规则1条件下将进闸优先调整为出闸优先后,五线船闸通过能力提升20.2%,在规则2条件下将进闸优先调整为出闸优先后,五线船闸通过能力提升19.4%,在规则3条件下将进闸优先调整为出闸优先后,五线船闸通过能力提升21.8%,可见,与进闸优先规则相比,出闸优先规则通过能力提升效果显著。

综上,采用“出闸优先”及规则2的通过能力指标最好。

4 结论

1) 相较于“进闸优先”规则,采用“出闸优先”规则下五线船闸通过能力提升约20%。以“闸室最适配船舶尺度”作为过闸排档规则的基准,在其基础上增加通过2~5号船闸的船型范围形成规则2,仅增加通过2~4号船闸的船型范围形成规则3;与基准相比,采用规则2后五线船闸通过能力提高1%~2%,采用规则3后五线船闸通过能力降低1%~3%,总体上过闸排档规则对通过能力的影响并不显著,其中规则2最优。综合上述两项规则分析结果,采用“出闸优先”及规则2的效果最佳。

2) 本文方法可应用于在多项复杂条件下,统计分析多线船闸通过能力、一次过闸平均吨位、一闸次平均船舶数、闸室平均利用率等指标,进而为船闸闸室平面尺度的确定、锚地布置方案选择、多线船闸运行规则比选提供支撑。

参考文献:

- [1] DAI M D M, SCHONFELD P. Metamodels for estimating waterway delays through series of queues[J]. Transportation research part B: methodological, 1998, 32(1): 1-19.
- [2] VERSTICHEL J, DE CAUSMAECKER P, VANDEN BERGHE G. Scheduling algorithms for the lock scheduling

problem [J]. Procedia-social and behavioral sciences, 2011, 20: 806-815.

- [3] ZHAN X M, YANG H F, WU Z. Study on improving the capacity of locks based on a united scheduling strategy[C]// ICCTP 2011. American Society of Civil Engineers. Berkeley: [s. n.], 2011: 3917-3927.
- [4] KIM Y M, SCHONFELD P. Neural network estimation of waterway lock service times [J]. Transportation research record. 1995: 36-43.
- [5] 杜经农,余绍明. 三峡工程船舶智能调度系统的动态规划建模与算法[J]. 计算机与数字工程, 2003, 31(3): 47-50.
- DU J N, YU S M. Dynamic programming model and algorithm of shiplock scheduling problem [J]. Computer & digital engineering, 2003, 31(3): 47-50.
- [6] 齐俊麟,陈冬元,吴澎,等. 长江和西江大型船闸通航运行关键技术研究展望[J]. 水运工程, 2024(1): 137-143.
- QI J L, CHEN D Y, WU P, et al. Key technology research and outlook for large ship lock navigation in Xijiang River and the Yangtze River [J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 137-143.
- [7] 孔庄. 内河梯级多线船闸交通建模与仿真分析[D]. 南京: 东南大学, 2017.
- KONG Z. Traffic simulation of interdependent shiplocks on the grand canal [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [8] 廖鹏,孔庄,杨春红. 内河单级多线船闸交通建模与仿真[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(3): 414-421.
- LIAO P, KONG Z, YANG C H. Traffic modeling and simulation of single-stage multilane lock in inland waterway [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(3): 414-421.
- [9] 商剑平,吴澎,唐颖. 基于计算机仿真的船闸联合调度方案研究[J]. 水运工程, 2011(9): 199-204.
- SHANG J P, WU P, TANG Y. On multiple-lane lock's joint scheduling plan based on computer simulation [J]. Port & waterway engineering, 2011(9): 199-204.
- [10] 柯姜岑,甘露,程超. 基于元胞自动机的船舶过闸运输组织仿真[J]. 水运工程, 2013(1): 124-129, 134.
- KE J C, GAN L, CHENG C. Simulation of ship lock organization mode with cellular automata [J]. Port & waterway engineering, 2013(1): 124-129, 134.
- [11] 张玮,顾丹平,王启明. 盐邵线扬州段通航分析与仿真研究[J]. 水运工程, 2015(5): 122-127.
- ZHANG W, GU D P, WANG Q M. Analysis and simulation of navigation in Yangzhou segment of Yanshao waterway [J]. Port & waterway engineering, 2015(5): 122-127.

(本文编辑 赵娟)