



流域船闸群一体化调度系统设计与实践*

王新田¹, 马慧卿^{2,3}, 万军⁴, 姜兴良^{2,3}

(1. 江西省交通建设工程质量监督管理局, 江西 南昌 330000;

2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007; 3. 中交集团内河水运建设技术研发中心, 北京 100007;

4. 江西省界牌航电枢纽管理处, 江西 鹰潭 335000)

摘要: 流域船闸群的联合调度因其影响因素多、过程复杂, 一直采用人为调度和排档, 没有形成一体化智能调度系统。通过对船闸调度影响因素和调度策略进行研究, 将传统靠人为判断的多船闸调度决策抽象为时间上的时间表 (timetable) 问题和空间上的装箱 (bin packing) 问题的相互耦合问题, 进而给出具体的调度算法流程。并以此为基础, 设计信江流域的双港、八字嘴、界牌船闸三个梯级一体化调度方案, 利用智能算法自动生成流域多船闸一体化计划。结果表明, 本流域船闸群一体化调度系统在实践中取得良好的应用效果, 可以有效提高调度智能化水平和通航效率。

关键词: 多船闸; 调度策略; 一体化调度

中图分类号: U641.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)07-0210-07

Design and practice of integrated scheduling system for ship lock group in river basin

WANG Xintian¹, MA Huiqing^{2,3}, WAN jun⁴, JIANG Xingliang^{2,3}

(1. Jiangxi Province Traffic Construction Engineering Quality Supervision Administration, Nanchang 330000, China;

2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;

3. Research and Development Center on Inland Navigation Construction Technology, CCCC, Beijing 100007, China;

4. Jiangxi Jiepai Navigation and Electricity Hub Management Office, Yingtan 335000, China)

Abstract: The joint scheduling of ship lock groups in the river basin is used human dispatch and scheduling because of its many influencing factors and complex process, without forming an integrated intelligent scheduling system. We carry out the study on influencing factors of ship lock dispatch and scheduling strategy, abstract traditional multiple ship locks scheduling decision by human judgment into a mutual coupling problem of timetable problem and spatial bin packing problem, and give a specific scheduling algorithm process. Based on this, we design the integrated scheduling scheme for three gradients of Shuanggang, Bazizui and Jiepai ship locks in Xinjiang River Basin, and use the intelligent algorithm to automatically generate the integrated plan for multiple ship locks in the basin. The results show that this integrated scheduling system for ship lock group in the basin achieves good application results in practice, which can effectively improve the level of scheduling intelligence and increase the efficiency of navigation.

Keywords: multiple ship locks; dispatch strategy; integrated scheduling

目前, 我国各流域船闸已经在初步尝试形成区域或流域的船闸集中调度系统, 但由于内河尚

不具备专用的基础网络设施、各个船闸自动化设备情况也各不相同, 各地还处于统一网络平台或

收稿日期: 2023-11-13

*基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(2019C0007); 北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会科技服务品牌机构发展基金项目(20230467193)

作者简介: 王新田(1972—), 女, 正高级工程师, 从事公路、桥梁、港口和航道等工程的质量监督管理。

者管理系统的初步探索阶段。实际上仅从地理位置上解决了集中调度的问题,远未达到可学习、自适应的一体化调度管理系统水平。本文从一体化调度方案设计和调度算法研究两个角度,介绍在江西信江采用的多船闸一体化调度系统设计理念和实现方案。

1 流域船闸一体化调度的设计思路

多船闸一体化调度是一个非常复杂的系统工程^[1],需要从船舶过闸申报、过闸船舶类型、闸室排档、航道情况、水文情况和相邻船闸的船舶过闸情况等多方面进行考虑,应在满足船闸安全生产前提下,尽可能地提高船闸利用率,降低船舶过闸时间和船闸运行成本。因此,需要利用先进的信息集成技术和智能算法^[2],将船闸现在使用的自动控制系统^[3]、北斗或全球定位系统(GPS)报闸系统、船闸生产管理系统和资产管理系统有机地结合在一起,并通过智能算法制定出详细、准确的船舶过闸计划和闸室排档图。

信江流域采用的系统尝试突破以往对环境和船舶数据进行简单汇集的调度系统,在其中增加更多的自主学习和辅助决策方案,为船闸通航调度最终实现无人化做了有益的尝试。本文以双港、八字嘴、界牌3个梯级实时采集的各类调度数据为例进行研究,利用算法对倒闸船舶进行预判。根据船舶过闸申报及登记情况,同时参考上、下游船闸的运行情况,利用智能算法自动生成流域多船闸一体化计划。

2 多船闸一体化调度算法设计

2.1 多船闸一体化影响因素分析

所谓流域性船闸群一体化调度规则是指为锚地等待过闸的船舶指派闸室和为船闸排档编队的规则,该规则直接影响船闸的运营情况,并受到许多因素的影响和制约,比如锚地中待闸船舶的属性、船闸的等级与闸室的尺寸、上下游水位变化、远调站的设置、船闸的运行状态以及船闸管理设置的特殊约束规则等。

2.1.1 船型标准化程度

内河航运船型标准化程度较低,信江水运以矿建材料和煤炭散货为主,近年来集装箱运量增长较快。信江船舶偏宽、吃水偏深、散货船外伸距过长、船型分布复杂。

2.1.2 船闸等级

多船闸一体化调度的一个目标就是最大限度地增加闸室的利用效率,尽可能地增加每闸次的船舶数量和总吨位。但是3个梯级的船闸等级不同,船闸尺寸也不尽相同,界牌仅1座1000吨级船闸,八字嘴包含东河的虎山嘴和西河的貂皮岭两座船闸的并行船闸,双港仅1座1000吨级船闸,见表1。多船闸的一体化调度是在考虑船舶等级与闸室尺寸相匹配的前提下提高闸室利用率,这增加了联合排档和派船的难度。

表1 信江高等级航道梯级情况

梯级	船闸名称	位置	正常蓄水位/m	吨级	尺寸/m		
					长	宽	门槛水深
1	界牌	鹰潭下游12 km	26.0	1 000	182	14	3.5
2	貂皮岭	八字嘴下游2 km	19.5	500	120	12	3.0
	虎山嘴		19.5	1 000	180	16	3.5
3	双港	鄱阳下游8 km	13.0	1 000	180	16	3.5

2.1.3 水位影响

洪水期、枯水期和正常情况都对应不同的下游水位,同时还影响闸室内的水位情况。不同的过闸水位又影响过闸吨级的变化,增加了过闸船型、水位、船闸门槛水深三者间适配的复杂性。

2.1.4 远调站的设置和状态

远调站的设置是为了减少船舶进入的时间,以提高船闸的运行效率,但是3个梯级的船闸各有不同的远调站位置,在多船闸统筹调度船舶过闸时,应综合考虑远调站、靠船墩、无远调站和合用远调站的使用和调度问题。

2.1.5 船闸的运行状态

船闸的运行状态分为上行空闲、下行空闲、上行运行和下行运行等4个状态,安排下行船舶排档时优先安排下行空闲状态的闸室可以提高效率、节约水源和能耗。

2.1.6 权重及约束

对过闸船舶须根据具体情况给予不同的计算权重，如先到先行、闸室利用率最大化、特殊种类船舶计算法则等这种类型的情况，均需要在模型中考虑。同时还要考虑：由于双港、八字嘴双线、界牌船闸的大小差异和对通航条件要求不一致产生的差异性要求；为提高水资源利用，各船闸应交替运行，但上、下行船舶数量不均衡导致空间不平衡问题；对客户的服务承诺及鲜蔬菜、抢险船舶的优先因素等问题。

2.2 一体化调度策略

为提高通航管理效率而实施的一体化调度有两大衡量指标，即闸室利用率和船舶平均等待时间^[4]。

制定信江流域船闸一体化调度策略，需要受到客观因素的限制，如上下游水位差的影响和各枢纽下游水位的影响；调度人员可以控制的因素，包括船舶排队方式、船闸选择规则和单闸室排档规则，以减少个别大型船只出现需要较长时间等待船闸调度的情况。

考虑双港单线船闸、八字嘴双线船闸和界牌单线船闸。从船闸的分布来看，4座船闸构成一类网络结构，这类网络系统之间通过过闸船舶流连接。在本文中，通过引入3个不同地区的面积缓冲和待闸时间参数，通过设定闸室面积利用率和整体待闸时间为目标函数，构建数学模型描述调度策略。在模型中给出相应的调度算法，并采用集中调度结合分地实施的调度策略。

船舶调度问题的实质是将不同航向的船舶按照相应的申报过闸时间和一定优先级顺序排入各船闸，从而生成相应的4座船闸的上、下行运行时间表(包括闸次数量和各闸次运行的时间)，相应船舶提供过闸时间、安排的闸室和在闸室中的具体位置。求解调度模型就是根据船舶流序列生成各个船闸的开闸时间表序列，从这个意义上看，这是个时间表(timetable)问题。由于船舶需要编排到船闸之中，根据时间表序列对二维空间(船闸闸室)进行排档，即空间上的装箱(bin packing)问题。调度问题是时间上的timetable问题和空间上的bin packing问题的相互耦合^[5]。

信江多船闸一体化调度优化技术需要综合

多船闸一体化调度的策略流程见图1。

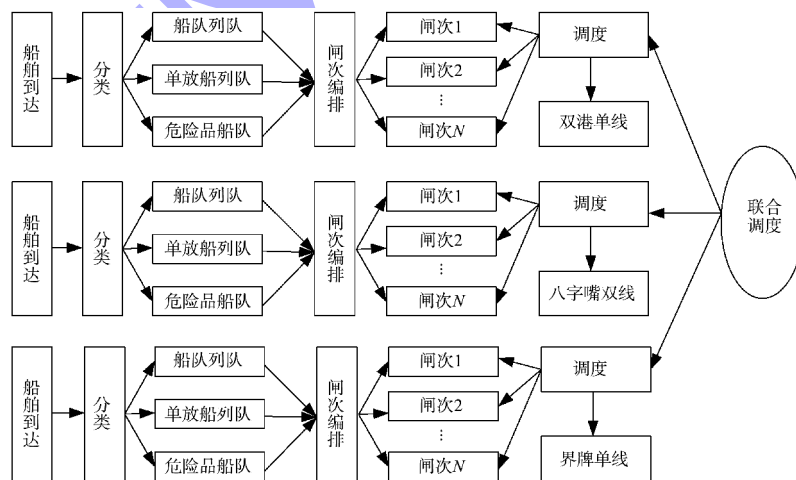


图1 信江流域多船闸一体化调度策略流程

2.3 一体化调度算法流程

在优化闸次时间框架、合理安排闸次流的循环中，相应的算法流程见图2。例如船舶在双港进行第一次申报，根据船舶航行申报情况和联合调

度系统预测分析结果，得出为该船舶制定的过闸排序，结合将要通过的各个船闸开闸时间间隔确定闸次计划，推送给相应船舶，提早进行安排。调度计划制定的原则是在保证优先级最高船舶权

重的前提下, 使船闸通过能力达到最大。每一闸次的时间确定须根据船主申请和船闸控制系统前一次动作时间推算确定。根据上行已过双港并且

申报过闸方式为连过两闸的上行船舶与仅过八字嘴的船舶作为八字嘴的上行船舶流, 八字嘴的上行船舶流可以在两闸间的缓冲区进行汇总。

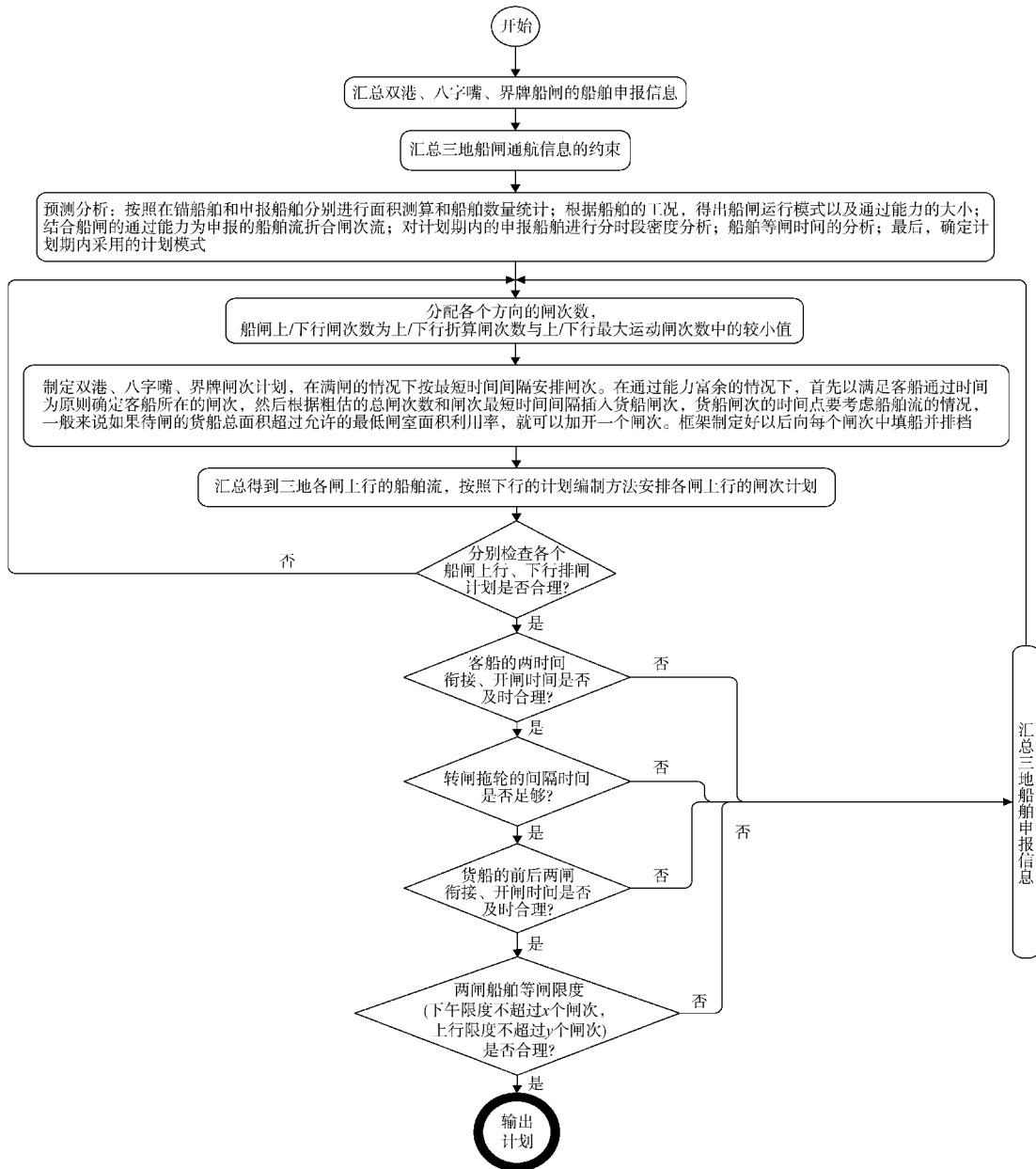


图 2 信江流域多船闸一体化调度算法流程

同理, 八字嘴的下行船舶调度计划数量也来自单独过闸的申报以及双港连过两闸的船舶数量。同时, 需要考虑八字嘴双线船闸两闸运行应尽量相向而行保证上、下行船舶均衡, 这是由于省水原则和航行安全原则决定的。

在循序以上算法原则的基础上, 可以展开系统的设计与实现。

3 一体化调度方案设计

3.1 一体化调度管理平台总体架构

一体化调度平台部署并运行在信江流域云平台上, 对外向船员提供访问 APP 等多种移动终端的访问服务, 对内提供调度管理功能并与流域内各船闸进行数据与信息的传输系统访问服务, 实现平台与船闸、平台与移动应用信息和数据的交

互。船闸调度业务流程见图3。

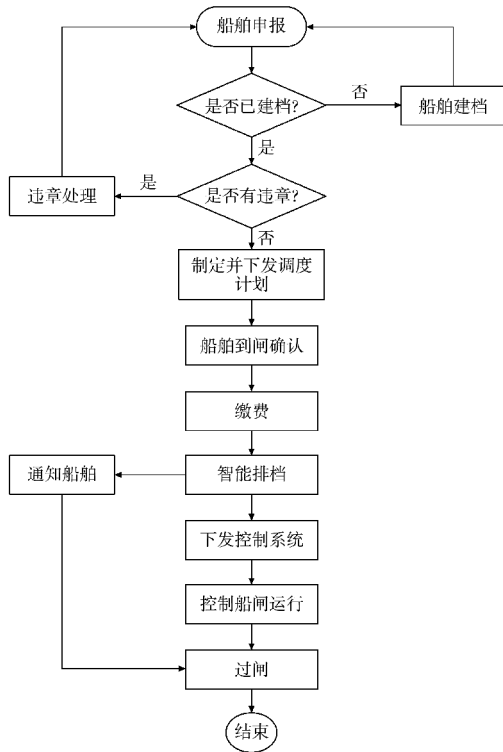


图3 船闸报到过闸调度流程

3.2 一体化调度闸室排档模型

一体化调度进行闸室排档处理时，根据通航设施闸室有效尺寸，将船舶以最大限度放入闸室中，保证闸室的利用率最高。同时，为得到每个闸次的通航时间序列，需要对每个闸次中最后进入闸室的预约通航时间进行记录，作为闸次优化的基础^[6]。

一体化调度闸室船舶排档类似于经典的运筹学二维装箱，二维装箱是典型的 NP-hard 多项式问题，NP-hard 是指所有 NP 都能在多项式时间复杂度内归约到的问题。其中，NP 的含义是非确定性多项式。而其中提到的所谓的非确定性的含义，是指用一定数量的运算去解决 NP 多项式时间内可解决的问题。

通航设施闸室分配问题可以近似地看作是二维装箱问题(the two-dimensional bin packing problem, 2BP)，在 2BP 中，待装物体可以是规则的几何图形，也可以是不规则的多边形。会给定的 n 个大

小不等矩形物体排成和若干大小相等的矩形箱体，以摆放占用的箱子总数最小为目的，物体的摆放在箱子中应满足的约束条件：1) 物体不超出箱子边界，且物体边缘须平行于箱体边缘；2) 箱中物体两两互不重叠。

在满足约束条件的要求下，使箱子的使用数量尽可能达到最少，二维装箱见图4。

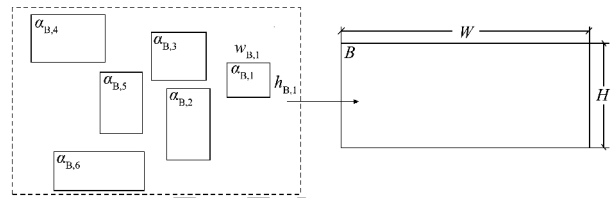


图4 二维装箱

在 2BP 中，给定的 i 个矩形物体记为 $a_{B,i}$ ，其长和宽为 $w_{B,i}$ 和 $h_{B,i}$ ，将所有给定矩形物品计入集合 $A_B, A_B = \{a_{B,1}, a_{B,2}, \dots, a_{B,i}\}$ 。将若干大小相同的箱子记为 B ，箱子宽度和高度定义为 W 和 H ，将箱子的信息定义为 $B(W, H)$ ，目标函数为满足所有物体填装的最少使用箱数 $\min F = n$ 。

通过上述规则，对 2BP 建立最优化约束，以箱子左下角为原点的笛卡尔坐标系，箱子的右下角、左上角、右上角坐标分别为 $(W, 0)$ 、 $(0, H)$ 、 (W, H) ，对 2BP 进行建立满足要求的约束函数，将放入第 n 箱子的第 j 矩形物体的左下角坐标为 $(x_{L,n,j}, y_{L,n,j})$ ，右上角坐标为 $(x_{R,n,j}, y_{R,n,j})$ 。对应建立 2BP 的约束条件：1) $0 \leq x_{L,n,j} \leq W | H, 0 \leq x_{R,n,j} \leq W | H$ ；2) $0 \leq y_{L,n,j} \leq W | H, 0 \leq y_{R,n,j} \leq W | H$ ；3) $(x_{R,n,j} - x_{L,n,j}, y_{R,n,j} - y_{L,n,j}) \in \{(W, H), (H, W)\}$ ；4) $(x_{L,n,m} - x_{R,n,j}, x_{L,n,m} - x_{R,n,i}, y_{L,n,m} - y_{R,n,j}, y_{L,n,j} - y_{R,n,m}) \geq 0$ 。条件 1、2 表示矩形物体不能超出箱子边界；条件 3 表示矩形物体应与箱子正交，即矩形的四条边都与箱子平行；条件 4 表示放入箱子的矩形物体不能重叠。

一体化调度管理平台通过该模型结合流程内船闸运行状况、水位、气象等信息，实现对流域内申报过闸的船舶进行调度排档和流量调控。调度展示界面见图5。



图 5 虎山嘴调度界面

3.3 建设内容

3.3.1 通航调度移动应用-远程报闸、待闸、接收调度信息

向船主/船员提供访问 APP 等多种终端的移动应用访问服务, 主要内容为: 1) 通过 APP 等多种终端对船主/船员提供报港服务; 2) 通过 APP 等多种终端对船主/船员提供过闸服务信息的推送, 如调度信息、过闸信息等; 3) 通过 APP 等多种终端对船主/船员提供电子缴费和电子发票业务; 4) 通过 APP 等多种终端对船主/船员提供信江流域通航信息及通航相应政策法规文件。

3.3.2 远程联合调度

多船闸联合调度依据多船闸一体化调度算法设计, 实现梯级船闸的船舶过闸申报、免停靠报到登记、自动排队、自动编制闸次计划、自动调度船舶并记录工作台账; 该调度针对未来一天内或者未来一段时间内的船舶, 进行有限数量的船舶调度, 从而大幅降低过闸管理的工作量, 提升船闸服务水平, 提高过闸安全性。主要内容为: 1) 调度管理。对船员申报的过闸信息进行审核, 同时根据当前流域船舶所通过船闸的申报数据、流域内船闸过闸数据、船闸运行状况、水位、气象及调度规则等信息, 提供船舶过闸调度方案, 调度和调控流域内船舶的流量和过闸服务。2) 调度规则。按交通运输部规定, 抢险救灾船、军事运输船、客运班轮、重点急运物资船、执行任务的公务船等优先过闸。设置调度规则权重, 权重大的船舶将优先过闸, 同等权重船舶根据先到先排的规则过闸。3) 运调查询。分类查询展示船舶

申报、过闸信息、过闸状态及闸次等信息。

3.3.3 大数据统计

通过流域统一管理形成标准化的流程和机制, 建成船闸大数据资源池, 建立具有唯一准确性的动态船舶基础信息数据库。系统包含数据存储, 数据可视化展示, 基于船舶位置数据、船闸调度数据、水文气象数据建立模型进行预测性分析, 提供关于过闸、票据、货物、船舶等因素的统计分析报表。同时, 大数据平台可与海事、船检、港口进出港数据预留接通比对、共享; 同时与上、下游省市的数据互通也奠定了信息化建设基础。

4 结论

1) 流域船闸群一体化调度管理平台已应用于界牌航电枢纽、双港航运枢纽工程、八字嘴航电枢纽工程 3 个梯级, 在使用过程中, 实现了船闸管理系统、调度系统、控制系统之间的数据和流程透明, 建立具有唯一准确性的动态船舶基础信息数据库。

2) 多船闸一体化调度的核心目的是实现流域船舶通过能力总量最大化, 平台可以根据航段条件、锚地位置、船闸通过能力、水位等约束条件自动发出辅助决策指令, 相较于原有的单船登记模式提高了过闸的效率。对操作人员而言, 同一个班次处理过闸船舶的数量从原来的 20 闸次提高至 30 闸次, 每个闸次减少了管理统计和控制操作的时间 10 min 左右。

3) 将智能化的一体化调度平台应用于多梯级多线船闸的管理中, 能够更好地兼顾安全、公平、

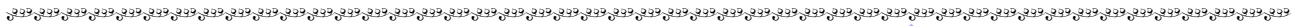
效率等多衡量因素。下一步,平台将推广到赣江,甚至袁河、昌江等流域,根据各流域航道不同的自然条件、不同的船闸通过能力,进一步将综环境条件、船员航行习惯、运输体系货物流等更多的因素纳入到调度算法的综合分析之中,通过条件设计和机器学习进一步提高系统的适用性。

参考文献:

[1] 陈明辉,盛黎.苏北运河船闸智能排档调度研究及应用[J].中国水运(下半月),2016,16(4):75-77.

[2] 陈国仁,王小峰,李炳源.数字船闸建设相关技术研究[J].制造业自动化,2016,38(5):170-172.
 [3] 刘祖伟,胡航,熊锦玲,等.三峡船闸智能自动化运行方式的可行性研究[J].水运工程,2021(3):164-167.
 [4] 汤毅,黄树平,郑贻双.北江船闸联合调度系统设计与应用[J].珠江水运,2021(20):74-76.
 [5] 肖恒辉.三峡-葛洲坝联合通航调度问题的研究[D].武汉:华中科技大学,2008.
 [6] 伊梦杰.多闸室协调调度的船闸优化问题研究[D].大连:大连海事大学,2015.

(本文编辑 王璁)



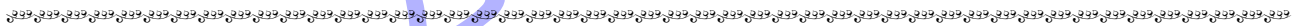
(上接第 178 页)

参考文献:

[1] 张涛,洪波,罗唯嘉.政策护航有力度,水运发展有速度[N].中国水运报,2023-10-01(3).
 [2] 李跃卿,李维.山区河流船闸支墩浮式导航墙浮围潜水渡洪[J].水利水运工程学报,2012(4):98-102.
 [3] 何飞飞,王晓刚,王彪,等.基于等面积法的透空式隔流墙二维水流数值模拟研究[J].中国农村水利水电,2021(10):86-91.
 [4] 何贞俊,王斌,邢方亮,等.排桩整流技术内涵及应用[J].水运工程,2017(12):159-164.
 [5] 胡亮亮,谭家万,袁浩.基于隔流堤的下游引航道通航水流条件优化[J].水运工程,2022(5):72-77.
 [6] 韩康,余凯文,赵建钧,等.常山江阁底枢纽通航水流条件及方案优化试验研究[J].水运工程,2021(8):139-144.

[7] 普晓刚,王能,彭伟.新型桩基导流屏改善船闸下游口门区通航条件效果分析[J].水运工程,2018(1):147-151,170.
 [8] 吴琼琳,高清洋,普晓刚.桩基透空式导流屏结构对船闸下游口门区通航的影响[J].水运工程,2018(4):98-103.
 [9] 李华勇,严秀俊,徐进超,等.万安枢纽二线船闸上游通航水流条件优化试验研究[J].水运工程,2023(6):120-124,130.
 [10] 长江航道局.内河通航标准:GB 50139—2014[S].北京:中国计划出版社,2014.
 [11] 中交水运规划设计院.船闸总体设计规范:JTJ 305—2001[S].北京:人民交通出版社,2001.

(文本编辑 赵娟)



(上接第 184 页)

2) 通过船闸阀门运行和泄水工艺优化,将泄水时的惯性超降控制约 0.1 m,必要时增加靠泊船舶的系缆数量,可将船舶系缆力控制在设计允许值以内,确保船舶靠泊及系缆设施安全。

参考文献:

[1] 杨秋平,宁涛,杜立达,等.船舶大型化极限问题研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2020,39(7):40-46.
 [2] 李文杰,杨宁,杜洪波,等.长江上游船舶大型化对典型污染排放的影响[J].水运工程,2022(2):100-105.
 [3] 唐冠军,赵洪祥,甘明玉.关于长江干线船型标准化的思考[J].水运工程,2005(1):38-44.
 [4] 郭子坚,侯坤超,王文渊,等.船型标准化率对三峡船闸

实际通过能力的影响[J].水运工程,2017(5):109-112.
 [5] 齐俊麟.三峡—葛洲坝船闸通过能力分析 & 扩能工程对策[J].船海工程,2019,48(3):169-174.
 [6] 蔡述忠,兰毓峰.三峡船闸一闸室待闸船舶进闸时机选择[J].水运工程,2008(2):101-103.
 [7] 胡亚安,王新,李中华.三峡船闸 4.5 m 吃水大长宽比船舶同步移船过闸实船试验[J].水运工程,2020(11):26-33.
 [8] 齐俊麟,向化雄,闫晓青,等.一种船舶通过船闸同步移泊的运行调度方法:CN201910318978.5[P].2020-09-08.
 [9] 黄建九,刘建军,靳杰,等.葛洲坝 2 号、3 号船闸充水过程中上游流速流向原型观测成果分析[J].水运工程,2001,328(5):73-77.

(本文编辑 赵娟)