

· 信息技术 ·



# 内河典型单级单线船闸待闸时间预测模型 及优化调度策略<sup>\*</sup>

杨 港<sup>1</sup>, 邓 健<sup>1,2,3</sup>, 刘少勇<sup>1</sup>, 曾笑涵<sup>1</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;  
3. 国家水运安全工程研究中心, 湖北 武汉 430063)

**摘要:** 为了提高内河船闸调度水平、缓解船闸堵航情况, 以我国内河水运梯级开发中最为广泛的单级单线船闸为研究对象, 运用 Arena 仿真平台构建了船闸通航仿真模型, 以汉江兴隆船闸为例, 对单级单线船闸船舶过闸问题进行仿真。在此基础上, 为了评价相关要素对船舶待闸时间的影响, 开展了大量单因素和多因素影响下船舶过闸敏感性试验。采用数据拟合方法研究了单因素作用下船舶待闸时间变化规律和预测模型, 采用 BP 神经网络构建双因素作用下的船舶待闸时间预测模型。检验表明船舶待闸时间预测模型具有较好的预测精度。结合过闸预约制和预测模型提出了船闸优化调度策略, 可为管理部门开展船闸科学调度提供有效的参考方法。

**关键词:** 内河船闸; 待闸时间; 预测模型; Arena 仿真; 数据拟合; 神经网络; 优化调度

中图分类号: U 641.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0196-08

## Waiting time prediction model and optimal dispatching strategy of typical single-stage single-line ship locks in inland rivers

YANG Gang, DENG Jian<sup>1,2,3</sup>, LIU Shao-yong<sup>1</sup>, ZENG Xiao-han<sup>1</sup>

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

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

3. National Engineering Research Center for Water Transport Safety, Wuhan 430063, China)

**Abstract:** To improve the dispatching level of inland river ship locks and alleviate the blockage of ship locks, taking the single-stage single-line ship lock, which is the most widely used in the development of river water transport cascade in China, as the research object, the navigation simulation model of ship locks is constructed using Arena simulation platform, and the simulation is carried out for the problem of ship passing through the single-stage single-line ship lock using the Xinglong ship lock on the Han River as an example. On this basis, to evaluate the impact of relevant factors on ship waiting time, a large number of single-factor and multi-factor influences of ship's sensitivity experiments have been carried out. The data fitting method is used to study the change rule and the prediction model of ship waiting time under the action of single factor, and the BP neural network method is used to construct the prediction model of ship waiting time under the action of double factors. The inspection results show that the ship waiting time prediction model has good prediction accuracy. Combined with the lock reservation system and the prediction model, the optimal scheduling of the ship lock is proposed, which can provide an effective reference method for the management department to carry out the scientific scheduling of the ship lock.

**Keywords:** river lock; waiting time; prediction model; Arena simulation; data fitting; artificial neural network; optimized scheduling

收稿日期: 2022-04-06

<sup>\*</sup>基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400200)

作者简介: 杨港(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为水上交通安全与环境。

在水路运输中, 船闸是一类重要的通航设施, 目前我国已建设的各类船闸达 900 余座。近年来内河航运迅速发展, 而船闸因通过能力受限已成为内河航运拥堵的主要堵点, 在一定程度上影响了内河航运的高质量发展。如何有效缓解船闸堵航、减少船舶待闸时间成为发挥水运综合效益的重要课题。

目前研究船闸通航效率的研究主要集中于两个方面: 一是船舶待闸时间; 二是闸室利用率。在船舶待闸时间方面, 早期主要采用传统的排队理论研究船舶待闸时间<sup>[1-2]</sup>, 近年来元胞自动机<sup>[3]</sup>等计算机仿真理论<sup>[4-5]</sup>在此领域得到了广泛的应用, 另外对闸室排档进行优化也是减少船舶待闸时间的重要手段<sup>[6-8]</sup>, 从多因素角度研究影响待闸时间的不同要素并研究相关影响机理正成为重要趋势。

从目前我国研究内河船闸堵航的情况来看, 大部分围绕三峡船闸等大型船闸, 对普通的单级单线船闸研究较少。我国的众多内河航道中单级单线船闸居多, 例如汉江中下游 6 座船闸、湘江中下游 3 座船闸、赣江 6 座船闸等均为单级单线船闸。近年来航运快速发展导致支流航道船舶过闸需求大增, 小型船闸的船舶堵航问题突出, 针对应用更加广泛的单级单线船闸开展研究将具有良好的普适性意义。本文以中小型单级单线船闸为研究对象, 采用 Arena 仿真建模方法, 以汉江兴隆船闸为例, 建立船闸通航仿真模型, 研究不同要素对船舶待闸时间的影响; 基于敏感性试验结果, 分别运用数据拟合和神经网络建立单因素和双因素作用下的船舶待闸时间预测模型, 并结合过闸预约制和预测模型提出了船闸优化调度策略。

1 构建船闸船舶通航仿真模型

1.1 兴隆船闸概况

兴隆水利枢纽位于汉江下游, 是汉江中下游

梯级开发的最末一个梯级。兴隆船闸为单级单线船闸, 闸室有效尺寸为 180 m×23 m×3.5 m, 通过兴隆船闸的代表船型为 500 吨级和 1 000 吨级货船<sup>[9]</sup>, 过闸流程见图 1。

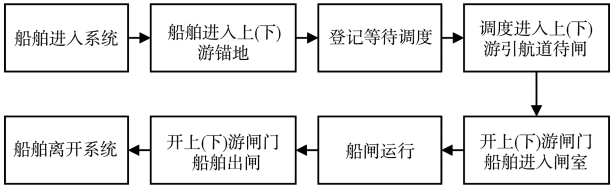


图 1 船舶过闸流程

1.2 模型建立

根据兴隆船闸实际运行情况及船舶过闸仿真模型构建需要, 做出以下假设: 1) 船舶到达是离散且相互独立的; 2) 船舶到达服从参数为  $\lambda$  ( $\lambda > 0$ ) 的泊松分布, 其中  $\lambda$  为平均到达率; 3) 按照船闸通航调度规律, 到达船闸系统的船舶一般按照先到先服务的规则接受服务。

为了尽可能提高闸室的面积利用率, 在 Arena 仿真模型中嵌套了 Bottom-Left 闸室排档算法。Bottom-Left 算法的闸室排档流程为: 从闸室的左下角开始, 按顺序依次放置船只进入闸室, 先使船只向下移动, 继而向左移动, 直到全部船只排布完毕或不能排入任何一条剩余船只。

根据船舶过闸流程分析, 将整个模型分为 4 个模块, 各模块及其功能分别为: 1) 船舶生成模块: 根据汉江下游实际船舶到达情况, 船舶生成模块生成船舶并赋予船舶尺寸和吨位等属性值。2) 锚地模块: 模型设置了上、下游锚地模块, 试验记录了待闸船舶数量、船舶待闸时间等数据。3) 船闸运行模块: 船闸模块分为上行和下行两个子模块, 等待过闸的待闸队列会在船闸运行模块通过 Bottom-Left 算法进行闸室排档, 然后通过船闸。4) 船舶离开模块: 船舶通过船闸后, 经由船舶离开模块离开模型。在模型运行时, 实时记录当前船闸系统内的船舶数量、通过船闸的船舶数量、通过的货运量、开闸次数、闸室面积利用率等数据。兴隆船闸上游锚地模块程序见图 2。

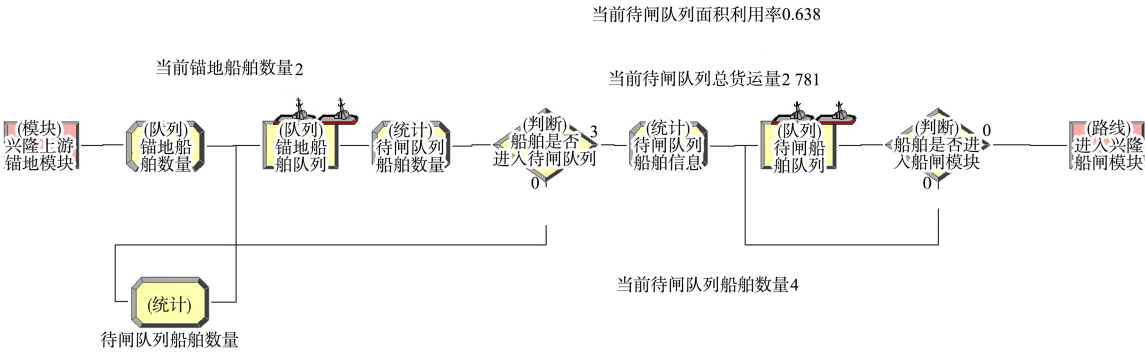


图 2 基于 Arena 程序的兴隆上游锚地模块

1.3 模型运行参数

仿真模型可以体现船闸系统的运行方式和流程，确定符合实际的船闸运行参数同样有助于保

证模型的准确性。根据近年来兴隆船闸的实际运行情况确定相关参数范围，见表 1。

表 1 模型输入参数

参数名称	参数描述	参数取值
日通航时间	船闸每日开放通航的时间	9~24 h
船闸单次运行时间	单艘船舶从进入到驶出船闸的平均时间	45~70 min
日到达船舶数量	每日到达船闸的船舶数量	20~45 艘
船舶移动时间参数	船舶在不同地点间移动消耗的时间,例:船舶从锚地移动到闸室所需的时间	tria(3,5,7) min
通航调度规律参数	到达船闸系统船舶按照一定规律接受服务,本研究使用先到先服务规则	queue type( FIFO)
船舶到达规律参数	船舶生成模块根据一定规律产生船舶进入系统,本研究使用泊松分布	pois( 2.46) h
船舶类别比例参数	各种船舶的比例,例:1 000 吨级船舶比例	60%
船舶尺寸参数	模型在该参数范围内随机生成船只的尺寸,例:500 吨级船舶宽度范围	unif( 10.8,11.6) m
闸室尺度参数	根据兴隆船闸闸室的实际长宽设定	180 m×23 m

本模型的船舶采用比较均衡的泊松分布生成，而实际情况中因为季节变化会产生不平衡的船舶生成率，所以不能在长时间内进行仿真，否则会与实际情况矛盾。因此，决定先采用 1 个月的时间作为模型“预热”，而后再模拟 1 个月的仿真时长。

2 模型检验及敏感性试验

2.1 模型检验

开展模型检验有利于完善模型的构建并保证模型运行的精确性。将兴隆船闸 2016 和 2017 年的实际船闸运行参数(表 2)输入仿真模型，对仿真结果与实际统计资料进行比较，从而检验模型的准确性，仿真结果与实际统计资料的对比见表 3。

表 2 模型验证实际运行参数

年份	日到达船舶数量/艘	1 000 吨级船舶占比/%	船闸日通航时间/h	船闸单次运行时间/min
2016	20.4	60	9.2	65
2017	31.3	60	9.2	65

表 3 模型仿真结果验证

年份	数据类型	月均过船数/艘	日均开闸次数	平均一次过闸船舶艘数/(艘·闸 <sup>-1</sup> )	单闸次平均载质量/t
2016	仿真结果	285	2.53	3.75	2 114
	实际情况	280	2.50	3.70	2 096
	误差/%	1.8	1.2	1.3	0.8
2017	仿真结果	407	4.10	3.34	2 453
	实际情况	423	4.30	3.60	2 621
	误差/%	3.8	4.7	7.2	6.4

表 3 给出了 2016 和 2017 年兴隆船闸的月均过船数、日均开闸次数、平均一次过闸船舶艘数和单闸次平均载质量的检验结果，可以看出这两年

的仿真结果与实际统计值基本相同, 模型整体模拟精度良好。其中月均过船数的误差最大为 3.8%; 日均开闸次数的误差最大为 4.7%; 平均一次过闸船舶艘数和单闸次平均载质量的误差在 2016 年较小, 仅为 1.3% 和 0.8%, 在 2017 年的误差稍大。综合问题的复杂性, 模型仿真结果的总体平均误差为 3.4%, 模型能够较好地反映船闸的通航运行状态。

2.2 船舶待闸时间敏感性试验

从船闸实际运行情况来看, 船舶待闸时间的影响因素较多, 实际运行统计和相关研究结果表明<sup>[10]</sup>: 日通航时间、船闸单次运行时间和日到达船舶数量 3 个要素对于船舶待闸时间的影响最为显著, 含义如下: 1) 日通航时间: 船闸每日开放通航的时间(h); 2) 船闸单次运行时间: 船舶过闸过程中, 从进入闸室到驶出闸室所需的时间(min); 3) 日到达船舶数量: 平均每日到达船闸的船舶数量(艘次)。

针对这 3 个要素的影响开展敏感性仿真试验, 并根据近年来兴隆船闸的实际运行情况确定试验的各输入参数变量的范围(表 4), 共记录敏感性试验数据 1 440 组。

表 4 敏感性试验输入参数值设定范围	
参数名称	参数值设定范围
船闸日通航时间	9~24 h, 每隔 1 h
船闸单次运行时间	45~70 min, 每隔 1 min
日到达船舶数量	20~45 艘, 每隔 1 艘

3 船舶待闸时间预测模型

3.1 单因素作用下的船舶待闸时间预测模型

3.1.1 目的及方法

研究单因素作用下船舶待闸时间的变化有利于分析船舶在单一因素影响下船舶待闸时间变化的规律, 并在此基础上提出船舶待闸时间预测模型, 从而为船闸通航管理机关开展船闸调度提供指导。本文采用数据拟合的方法, 分别研究 3 个输入参数变量(船闸单次运行时间、日到达船舶数量和日通航时间)中单个因素作用下的船舶待闸时间的影响, 在此基础上采用二次、对数、三次、对数、幂、指数、S 型和逆函数等多种模型对敏感性试验结果进行拟合, 选取拟合优度最佳的拟合

函数模型作为该影响因素影响下的船舶待闸时间预测模型。

3.1.2 试验结果分析

从仿真记录的模拟试验结果(图 3)看, 单因素作用下的船舶待闸时间整体变化趋势是: 日通航时间越长, 船舶待闸时间越短; 日到达船舶数量越多, 船舶待闸时间越长; 船闸单次运行时间越长, 船舶待闸时间越长。当某一单因素持续增加或减少到某一个值时船舶待闸时间将出现快速增长, 表明此时整个船闸系统的服务能力已经超负载、船舶积压态势将迅速恶化、严重影响船舶通航。

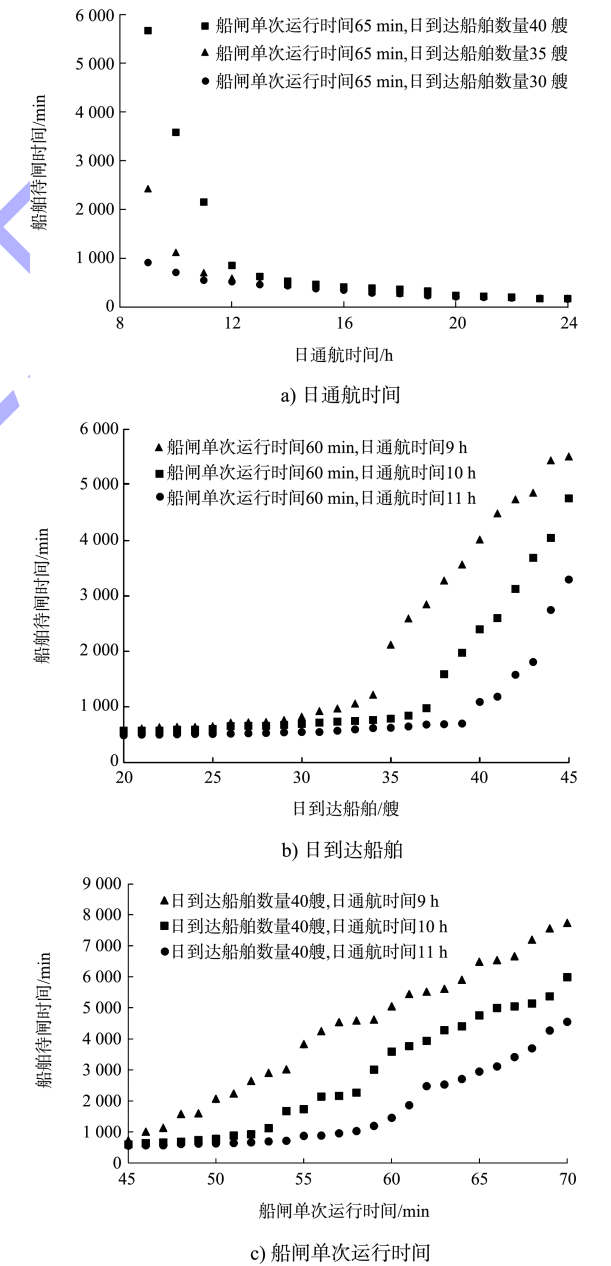


图 3 3 种单因素作用下的部分试验结果



3.1.3 预测模型构建

为了有效研究单因素作用下船舶待闸时间的变化规律,采用二次、对数、三次、对数、幂、指数、S 型和逆函数等多种模型对试验数据进行拟合分析,综合对比得到最优拟合函数模型。3 种单因素作用下的预测模型结果对比见图 4,预测结果与试验结果较为吻合,其中船闸日通航时间的最优拟合函数模型为 S 型函数模型、日到达船舶数量的最优拟合函数模型为三次函数模型、船闸单次运行时间的最优拟合函数模型为二次函数模型。

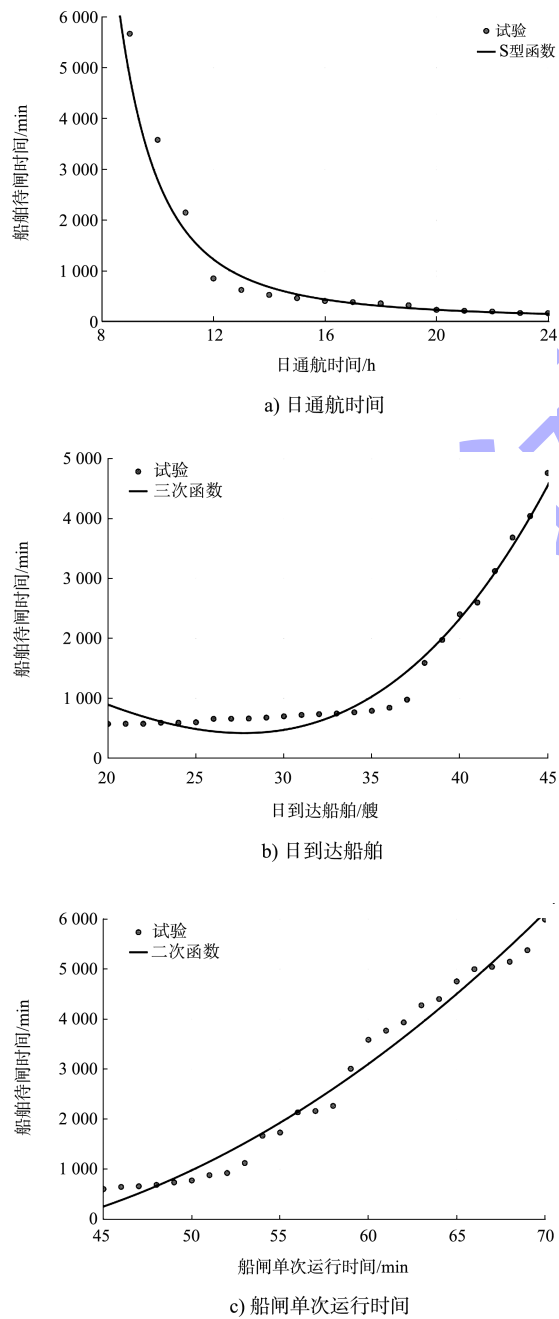


图 4 3 种单因素作用下的预测模型结果对比

综合对比得到最优拟合函数模型后,便可以任意一种情况下的试验数据代入函数模型进行数据拟合,从而得到任意一种情况下预测模型。使用以上方法对多种情况下试验数据进行拟合分析,得到 3 种单因素作用部分情况下的船舶待闸时间预测模型,见表 5~7。从目前我国内河航运的发展规划可以看出,大量的支流河道上都采用类似于兴隆枢纽的船闸通航模式,所以本文所提出的单因素作用下的船舶待闸时间预测模型可以直接适用于这类单级单线船闸。

表 5 部分情况下日通航时间单因素影响下船舶待闸时间预测模型

船闸单次运行时间/min	日到达船舶数量/艘	日通航时间/h	R <sup>2</sup>	预测模型
65	40	9~24	0.967	$Y=e^{3.024+\frac{0.12}{x}}$
60	35	9~24	0.960	$Y=e^{3.688+\frac{31.88}{x}}$
50	40	9~24	0.965	$Y=e^{3.559+\frac{31.88}{x}}$

表 6 部分情况下日到达船舶数量单因素影响下船舶待闸时间预测模型

船闸单次运行时间/min	日通航时间/h	日到达船舶数量/艘	R <sup>2</sup>	预测模型
60	10	20~45	0.973	$Y=3\,923-9.782\,X^2+0.235\,X^3$
55	12	20~45	0.981	$Y=481.3-0.136\,X^2+0.005\,X^3$
50	9	20~45	0.956	$Y=3\,331-9.883\,X^2+0.224\,X^3$

表 7 部分情况下船闸单次运行时间单因素影响下船舶待闸时间预测模型

日到达船舶数量/艘	日通航时间/h	船闸单次运行时间/min	R <sup>2</sup>	预测模型
40	10	45~70	0.977	$Y=3\,869-282.96X+4.503\,X^2$
30	12	45~70	0.999	$Y=-1\,380+60.24X-0.476\,X^2$
25	9	45~70	0.995	$Y=1\,200-26.24X+0.282\,X^2$

3.2 双因素作用下的船舶待闸时间预测模型

3.2.1 方法

为了进一步研究双因素对船舶待闸时间的综合影响,开展了 3 个输入参数变量(船闸单次运行时间、日到达船舶数量和日通航时间)中单因素确定、其余两个因素共同作用下船舶待闸时间的预测机理研究,并在此基础上建立船舶待闸时间预测模型。在预测模型研究中发现,传统的数据拟合方式已难以有效表达双因素影响的规律。神经网络作为一种仿生物神经网络的结构和功能的数学模型,近年来在交通领域开始得到广泛的研究,

在驾驶员行为模拟<sup>[11]</sup>、交通模式分析<sup>[12]</sup>、交通流量预测<sup>[13]</sup>等领域已经取得了很好的效果。目前神经网络在船闸通航预测方面的相关研究还较少, 笔者在此领域进行了初步的探索, 采用较为成熟的 BP 神经网络构建双因素预测模型, 结构上包含输入层、隐含层和输出层。

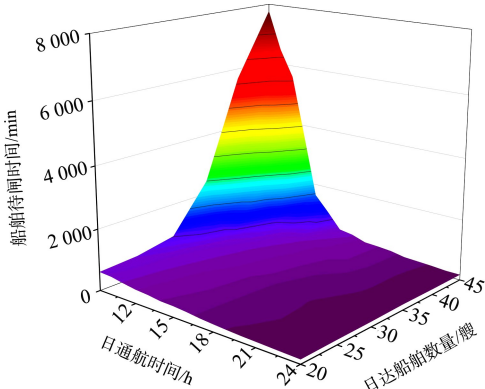
3.2.2 结构参数设定

双变量预测模型是指在两个变量同时变化的情况下预测船舶待闸时间。运用控制变量法, 在 3 个输入参数中选取两个输入参数作为变量并设置为神经网络输入层, 剩余的一个参数固定不变, 将船舶待闸时间设置为神经网络输出层。

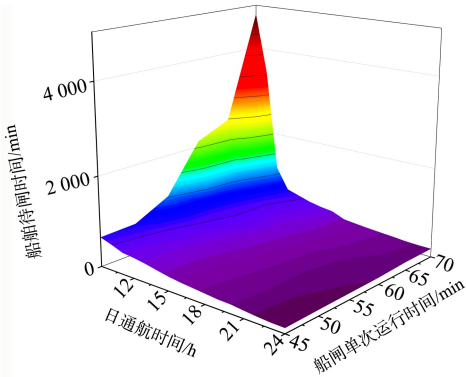
模型采用单隐含层的网络结构, 并通过经验公式确定隐含层神经元节点的初始值, 然后利用增长法反复试验确定隐含层神经元节点数目为 12。通过反复试验对比后, 选取收敛速度较快的 *traingdm* 算法作为训练函数, 设定学习速率为 0.01、训练目标最小误差为 0.001、训练迭代次数为 10 万次。设定好所有结构参数后, 即通过敏感性试验数据对神经网络进行训练, 从而得到双因素作用下的船舶待闸时间预测模型。

3.2.3 试验结果分析

设计两组试验, 第 1 组选择日到达船舶数量和日通航时间作为输入层神经元, 第 2 组选择日通航时间和船闸单次运行时间作为输入层神经元, 两组试验均将船舶待闸时间设置为神经网络输出层。1 440 组模拟试验中, 当日到达船舶数量或船闸单次运行时间 1 个参数固定不变的情况下有 375 组试验数据, 将试验数据绘成曲面图(图 5)可以直观地看出在双因素作用下的船舶待闸时间的变化趋势。



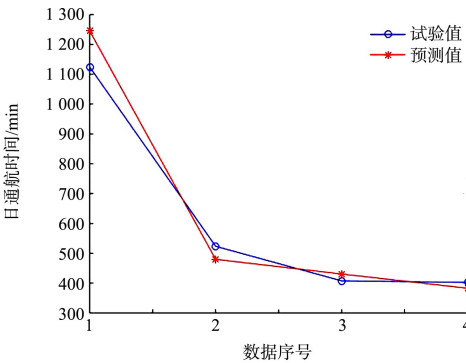
a) 日到达船舶数量和日通航时间



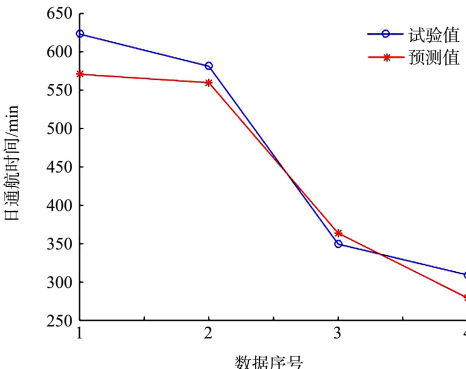
b) 日通航时间和船闸单次运行时间

图 5 双因素试验结果

试验使用 375 组数据中的 371 组对神经网络进行训练, 然后使用其余 4 组数据进行验证, 将模型预测得到的船舶待闸时间与试验得到的船舶待闸时间进行对比并计算误差, 结果见图 6。从图 6 可以看出, 日到达船舶数量和日通航时间双因素作用下的神经网络预测模型得出的 4 个预测结果与试验数据的误差最大为 10.76%, 平均误差为 7.4%; 日通航时间和船闸单次运行时间双因素作用下的神经网络预测模型得出的 4 个结果与试验数据的误差最大为 9.7%, 平均误差为 6.46%。说明该预测模型具有较好的预测精度。



a) 日到达船舶数量和日通航时间



b) 日通航时间和船闸单次运行时间

图 6 其余 4 组数据双因素结果对比

4 船闸优化调度策略

预测船舶待闸时间能够有效指导科学的船闸调度，从目前的船闸调度技术方案来看，大多数船闸均采取了信息化手段获取过闸需求信息，如通过过闸申报进行预约制登记，或通过船舶报港数据或 AIS 等信息判断船舶过闸需求。结合本研究的相关成果，对船舶调度方案进行优化，提出图 7 所示的优化调度策略。

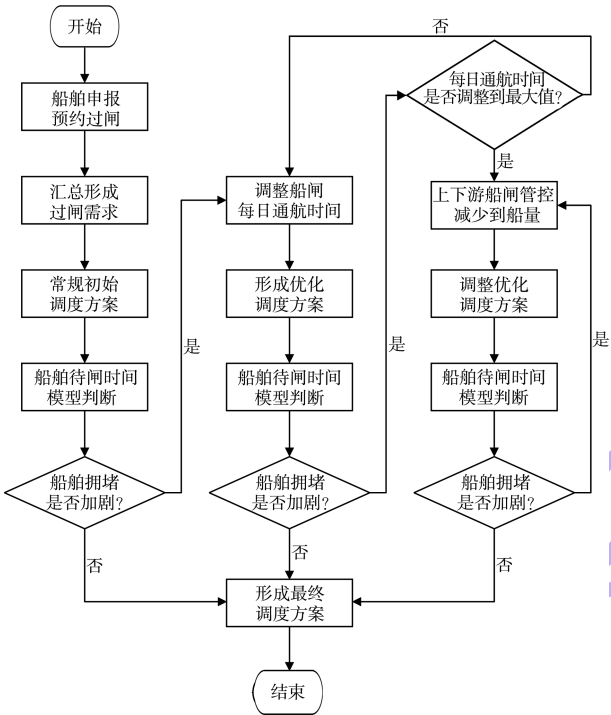


图 7 优化调度策略

步骤 1：根据船舶申报的预约过闸信息，汇总得到次日的船舶过闸需求，再根据次日的船舶过闸需求编制出常规初始调度方案，并将调度方案导入船舶待闸时间预测模型，对船舶拥堵程度进行判断，如果使用常规初始调度方案不会使船舶拥堵加剧(船舶待闸时间可以接受)则形成最终调度方案，否则，进入步骤 2。

步骤 2：对船闸的次日通航时间进行调整，形成优化调度方案，将调度方案导入模型并对船舶拥堵程度进行判断，如果船舶拥堵不再加剧(船舶待闸时间可以接受)则形成最终调度方案，如果船舶拥堵持续加剧(船舶待闸时间不可接受)则重复步骤 2 直到船闸每日通航时间调整到船舶不再拥堵为止，如果船闸每日通航时间调整到最大值也

无法解决拥堵问题则进入步骤 3。

步骤 3：若通过单独调整船闸次日通航时间无法解决拥堵问题，则对船闸的上下游进行联合调度，减少从上下游到达船闸的船舶数量，并根据新的到船量调整调度方案，并代入模型进行判断，如果船舶拥堵不再加剧(船舶待闸时间可接受)则成最终调度方案，否则继续循环、减少到船量，直到船舶拥堵不再加剧，形成最终优化调度方案。

5 结论

1) 采用 Arena 仿真平台建立了兴隆船闸仿真模型，仿真结果与实际运行情况对比表明该模型较好地模拟了船舶在船闸中的过程。运用敏感性分析方法，针对日通航时间、船闸单次运行时间和日到达船舶数量 3 个影响要素，开展船舶待闸时间敏感性试验，通过 1 440 组试验数据，探讨船舶待闸时间随日通航时间、船闸单次运行时间和日到达船舶数量的变化规律。

2) 运用数据拟合的方法，分别构建了 3 种参数单因素作用下的兴隆船闸船舶待闸时间预测模型，均具有较好的预测精度。采用 BP 神经网络模型，通过对样本试验数据的学习，分别构建了两组双因素作用下的船舶待闸时间预测模型，两组预测模型得出的预测结果也具有较好的精度，与试验数据的平均误差在 10% 以内。由于我国目前众多的河流(如长江主要支流汉江、湘江、赣江等)都是相同的航道等级，所建设的通航船闸多为此规模的单级单线船闸，因此本文所建立的单因素和双因素预测模型可以直接适用于这类船闸，本文所提出的研究方法也可以适用于其他不同类型和规模的船闸以建立对应的预测模型。

3) 随着航运技术的发展，目前越来越多的船闸实行船舶过闸预约制，船闸通航管理部门可以提前获知未来船舶过闸需求，根据船舶过闸需求，结合本文所建立的船舶待闸时间预测模型及优化调度策略得出最优调度方案，从而提高航运整体效益。本文所建立的预测模型为船闸通航管理部门开展船闸调度提供了科学、易行的技术方法。

参考文献:

[1] 谢守俊,周春辉,黄立文,等.船闸扩容仿真评价系统[J].系统仿真学报,2014,26(8):1863-1868.

[2] 钟鸣,李晨辉,刘少博.基于 M/M/C 排队模型的三峡大坝船舶待闸时长预测研究[J].交通信息与安全,2017,35(4):84-91.

[3] 余燕平. 基于元胞自动机的三峡坝前船舶积压态势仿真研究[D].武汉: 武汉理工大学,2017.

[4] 穆森,吕小龙.平陆运河船闸通过能力研究[J].水运工程,2021(3):145-150.

[5] 周伟,吴善刚,肖英杰,等.基于 Arena 软件的 LNG 船舶通航组织仿真[J].上海海事大学学报,2014,35(2):6-10.

[6] 侯坤超. 基于船型标准化的船闸调度仿真优化研究[D].大连: 大连理工大学,2017.

[7] 王伟,黄涛.基于随机排挡的船闸通过能力研究[J].水运工程,2021(1):162-167.

(上接第 139 页)

2)南坝田挡沙堤加高完善工程实施后,南导堤涨潮越堤水沙进一步大幅减少,基本完全阻断了南导堤段的泥沙补给,北槽中下段含沙量也有所减小;北槽涨落潮流方向更加归顺,改善了航道回淤条件,进一步降低了航道回淤量;与 2017—2019 年平均常态回淤量相比,降幅约 5.6%,叠加先期工程减淤幅度 17.4%,超过了长江口深水航道减淤工程预期的 15.6%减淤效果。

3)长江口深水航道减淤工程南坝田挡沙堤加高工程达到了预期的航道减淤目标,工程方案经实践证明较为合理,整治效果总体符合预期。

参考文献:

[1] 刘杰,程海峰,赵德招,等.长江口 12.5 m 深水航道悬沙分布特征[J].水运工程,2013(11):49-54.

[2] 刘杰,王元叶,赵德招,等.长江口北槽悬沙来源的观测与分析[J].泥沙研究,2015(5):19-23.

[3] 应铭,季岚,周海.长江口北槽 12.5 m 深水航道回淤的物理过程[J].水运工程,2017(11):77-85.

[4] 赵德招.长江口深水航道治理工程的实践与思考[J].长江技术经济,2018,2(3):51-57.

[8] 卢帅旗.在预约机制下考虑公平性与优先级的船闸调度模型研究[D].广州: 华南理工大学,2018.

[9] 胡克斌,朱乔航,叶铮.提高兴隆船闸和汉江综合通过能力的对策分析[J].水利技术监督,2019(1):57-59,250.

[10] 廖鹏.繁忙船闸的船舶待闸时间分析与估算[J].东南大学学报(自然科学版),2009,39(2):408-412.

[11] DWIVEDI N, SINGH D K, KUSHWAHA D S. Weapon classification using deep convolutional neural network[C]// IEEE Conference on Information and Communication Technology. New York: IEEE, 2019: 9099227.

[12] KIM E Y. MRF model based real-time traffic flow prediction with support vector regression [J]. Electronics letters (S0013-5194), 2017, 53(4): 243-245.

[13] 赵阳阳,夏亮,江欣国.基于经验模态分解与长短时记忆神经网络的短时地铁客流预测模型[J].交通运输工程学报,2020,20(4):194-204. (本文编辑 武亚庆)

[5] 刘杰,程海峰,韩露,等.长江口 12.5 m 深水航道回淤年际变化及成因[J].水科学进展,2019,30(1):65-75.

[6] 中交上海航道勘察设计研究院有限公司.长江口 12.5 m 深水航道减淤工程南坝田挡沙堤加高工程初步设计[R].上海: 中交上海航道勘察设计研究院有限公司,2014.

[7] 应铭,季岚,曹慧江,等.长江口 12.5 m 深水航道南坝田挡沙堤加高工程总平面方案研究[J].海洋工程,2020,38(04):19-28.

[8] 交通运输部长江口航道管理局.长江口 12.5 m 深水航道回淤机理及减淤工程关键技术研究与应用[R].上海: 交通运输部长江口航道管理局,2019.

[9] 交通运输部天津水运工程科学研究所.长江口 12.5 m 深水航道减淤工程南坝田挡沙堤加高工程减淤效果分析报告[R].天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所,2018.

[10] 交通运输部天津水运工程科学研究所.长江口 12.5 m 深水航道减淤工程南坝田挡沙堤加高完善工程实施效果评价报告[R].天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所,2022.

[11] 中国河流泥沙公报.中华人民共和国水利部网[EB/OL]. (2021-07-04) [2022-04-02]. <http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zghlnsgb>.

[12] 张赛赛.长江口潮差的时空变化及其环境意义[D].上海: 华东师范大学,2019. (本文编辑 王传瑜)