

· 航道及通航建筑物 ·



复杂通航枢纽中间渠道会船段容量优化研究*

邓健^{1,2,3}, 孙学威¹, 刘玉龙⁴, 谢澄^{1,3}

(1. 武汉理工大学航运学院, 湖北武汉 430063; 2. 水路交通控制全国重点实验室, 湖北武汉 430063;
3. 内河航运技术湖北省重点实验室, 湖北武汉 430063; 4. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007)

摘要: 复杂通航枢纽是由船闸、升船机、通航隧洞和中间渠道等多个通航建筑物组成的复杂通航设施, 中间渠道作为连接不同通航设施的关键水域, 承担着船舶汇集、疏导和临时停泊的功能, 其会船段容量配置对于提升枢纽的整体通过能力具有重要的现实意义。针对复杂通航枢纽中间渠道会船段容量配置与枢纽通过能力不匹配的问题, 以乌江构皮滩通航枢纽为研究对象, 运用 Arena 仿真平台构建了复杂通航枢纽仿真模型, 通过模拟试验和数据分析, 探讨了在不同的枢纽日开放时间下, 中间渠道会船段容量对枢纽通过能力及船舶待闸时间的影响。结果表明, 根据枢纽开放运行时间合理调整中间渠道会船段容量, 可提高枢纽的通过能力并降低枢纽上下行船舶的待闸时间, 构皮滩通航枢纽经优化后最高可提升 13.9% 的货运通过量, 并使枢纽上下行船舶的平均待闸时间减少 13.6%。研究结果可为复杂通航枢纽中间渠道会船段容量的设计和运营提供理论技术支持。

关键词: 复杂通航枢纽; 会船段容量; 通过能力; 待闸时间

中图分类号: U642.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0112-09

Capacity optimization study of intermediate channel rendezvous section in complex navigation hubs

DENG Jian^{1,2,3}, SUN Xuewei¹, LIU Yulong⁴, XIE Cheng^{1,3}

(1. School of Navigation, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China;
2. State Key Laboratory of Maritime Technology and Safety, Wuhan 430063, China;
3. Hubei Key Laboratory of Inland Shipping Technology, Wuhan 430063, China;
4. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: Complex navigation hub is a complex navigation facility composed of multiple locks, ship lifts, navigation tunnels and intermediate channels and other navigation buildings, the intermediate channel, as a key water connecting different navigation facilities, undertakes the function of ship collection, channelization and temporary berthing, the capacity configuration of its intermediate channel rendezvous section is of great significance for enhancing the overall passing ability of the hub. In response to the problem of mismatch between the capacity configuration of the middle channel rendezvous section and the through capacity of the complex navigation hub, taking the Goupiyan navigation hub of Wujiang River as the research object, a simulation model of the complex navigation hub is constructed using Arena simulation platform. Through simulation experiments and data analysis, the influence of the capacity of the middle channel rendezvous section on the through capacity of the hub and the waiting time of ships is explored under different daily opening time of the hub. The results show that by reasonably adjusting the capacity of the middle channel rendezvous section based on the opening operation time of the hub, the throughput capacity of the hub can be improved and the waiting time of upstream

收稿日期: 2025-03-24 录用日期: 2025-04-10

*基金项目: 国家自然科学基金项目(52271368, 52471382); 湖北省自然科学基金项目(2023AFB148)

作者简介: 邓健(1977—), 男, 博士, 教授, 研究方向为水上交通安全与环境。

and downstream ships at the hub can be reduced. After optimization, Goupitan navigation hub can increase its freight throughput by up to 13.9% and reduce the average waiting time of upstream and downstream ships at the hub by 13.6%. The research results can provide theoretical and technical support for the design and operation of the middle channel rendezvous section capacity of complex navigation hubs.

Keywords: complex navigation hub; rendezvous section capacity; throughput capacity; waiting time

随着水路运输的快速发展,通航枢纽作为重要的水上交通节点,扮演着接续水路运输的重要角色。通航枢纽按其通航建筑物的不同构成形式,有普通、复杂之分,普通通航枢纽通常只包括1个船闸或1个升船机,复杂通航枢纽则由船闸、升船机、通航隧洞和中间渠道等多个通航建筑物通过串联或并联的方式形成,如贵州构皮滩枢纽就是由两级中间渠道串联起3个升船机和1个通航隧洞形成。近年来,通航枢纽通过能力不足引起的船舶滞航日益严重^[1-2],从而使之得到广泛的研究关注。而复杂通航枢纽数量较少,研究也较为缺乏,且其本身布置的复杂性使得其未来可能带来的通过能力不足的风险更加严峻。

枢纽通过能力研究早期主要采用排队论等理论建立数学模型来开展。Wilson等^[3]提出使用M/M/1排队模型预测船舶延误时间不够准确,M/G/1排队模型结果与实际吻合程度更高。Dai等^[4]提出一种数值方法求解G/G/1排队模型,得出通航枢纽单双向运行时船舶到达、锚泊、离开的时间分布。钟鸣等^[5]将三峡坝上锚地作为研究对象,利用排队论相关理论分析锚地服务系统,构建了相应的M/M/C排队模型,并基于该模型开展不同参数影响下锚地排队时间及排队长度的敏感性分析。随着技术进步,近年来的研究趋向于仿真方法,结合计算机模拟和数据驱动以优化通航枢纽的调度、提升运输效率。李松龙等^[6]采用动态和静态模型相结合方式构建了船闸运行系统,实现了船舶纵向、横向编队全过程三维实时动态仿真。Zheng等^[7]围绕升船机及船闸绿色协同调度问题,建立了以船闸平均利用率、船舶平均等待时间和船舶总能耗

为目标的升船机-船闸绿色协同调度数学模型(GCP-SL&SL)。Zhang等^[8]为解决三峡大坝进水航道与船闸协同调度问题,提出同时优化船闸利用率、船舶平均等待时间和船舶总能耗的数学模型。杨锦等^[9]为提高内河水运枢纽的通过能力,提出一种用于“船闸+升船机”协同控制的基于滑动时间窗的船舶调度两阶段双目标整数规划优化模型。高攀等^[10]为提升三峡水域的整体通航效益,构建了考虑船舶优先级的多维非线性规划模型(MDNP)并验证了该模型可有效提升枢纽的通过能力。

目前对复杂通航枢纽通过能力研究还相对缺乏。复杂通航枢纽的建设与运营不仅涉及渠道、升船机等多重基础设施的合理布局与协调运行^[11],还需考虑到船舶通过能力的优化问题,如何在保证通航安全的前提下最大化枢纽的通行效率,已成为学术界和工程实践中的重要研究课题。在复杂通航枢纽运行中,中间渠道是连接多个通航建筑物的重要通道^[12]。而中间渠道又是复杂枢纽中可以较低成本布置为双向通行的水域,因此其布置成为影响复杂枢纽通过能力的关键。中间渠道的会船段容量过大会增加建设成本,而容量过小则会影响枢纽整体的通过能力,因此如何合理配置船舶容量、平衡上下游船舶的交互流量是确保复杂枢纽畅通的核心问题之一。

本文旨在通过数值仿真的方法,深入探讨复杂通航枢纽中间渠道会船段的容量优化问题。研究基于典型复杂通航枢纽的布局特征,构建复杂枢纽通航仿真模型,开展多要素耦合影响下的通航仿真试验,通过对试验数据的处理,系统分析中间渠道会船段容量对枢纽运行效率的影响,以

期为复杂通航枢纽的中间渠道会船段优化设计与
管理提供科学依据。

1 典型复杂通航枢纽仿真模型的构建

1.1 乌江构皮滩枢纽概况

贵州乌江构皮滩枢纽是全世界目前通航水头
最高、第二级单级提升高度最大、第一级和第三

级主提升设备规模最为庞大的通航工程。构皮滩
枢纽整体自上游至下游依次为：上游引航道、一
级升船机、一级中间渠道、二级升船机、二级中
间渠道、三级升船机以及下游引航道，见图 1^[13]。
设计通航船型为 500 吨级机动驳，船型尺寸为
55 m×10.8 m×1.6 m（长×宽×吃水）^[14]。

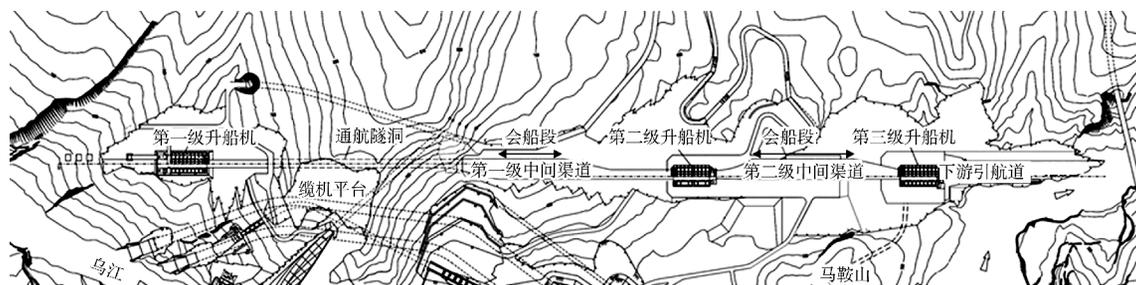


图 1 乌江构皮滩通航建筑物平面布置

Fig. 1 Layout plan of navigable buildings in Goupitan

第一、二级升船机之间采用第一级中间渠道
连接，渠道长 979.6 m，由渡槽、隧洞和明渠 3 种
形式组成。该中间渠道两边窄、中间宽，上游窄
长段为单线航道，长 470.7 m，宽 12 m；中间为
会船段，长 334.4 m，最宽处为 37.8 m，容量为
最多同时停靠 4 艘 500 吨级货船；下游单线航道
长 165 m，宽 12 m。上游单线航道段由渡槽、明
渠和长 412 m 的隧道组成，中间会船段由明渠、
渡槽、再明渠及部分渡槽组成，下游单线航道段
为单一渡槽。

第二、三级升船机之间采用第二级中间渠道
连接，渠道长 386.4 m，由通航明渠和渡槽组成。
明渠段为会船段，宽 38.0 m，长 284.4 m，容量
也为最多同时停靠 4 艘 500 吨级货船，渡槽段宽
12.0~29.2 m，长 102 m。

1.2 复杂枢纽通航模型建立

为了研究复杂枢纽的通过能力，本文根据构
皮滩枢纽实际运行情况，利用 Arena 仿真平台构
建船舶通航仿真模型。由于模型构建的需要，做
出以下假设：1) 船舶到达是离散且相互独立的；
2) 船舶到达间隔服从负指数分布；3) 按照枢纽

通航调度规律，到达枢纽的船舶一般按照先到先
服务的规则接受服务；4) 到达的船舶会在锚地等
待，锚地有足够的容纳能力可以容纳所有等待的
船舶。

根据目前构皮滩枢纽通航的情况，船舶通航
流程见图 2。船舶通航模型分为 4 个模块：1) 船舶
生成模块。构皮滩枢纽系统中的一个关键组成部
分，类似于船舶的“生成器”。它根据实际情况生成
船舶，使其能够进入枢纽进行仿真模拟，并根据预
设的参数为每艘船舶分配相应的属性值。2) 锚地排
队模块。模拟船舶抵达锚地并等待调度安排的全
过程。3) 枢纽通航模块。由 3 个主要组成部分构
成，包括第一级、第二级和第三级升船机模块，
中间渠道通航模块包含在升船机模块中。这些模块
的集成形成了一个动态模拟系统，用于模拟和观察
船舶在构皮滩复杂通航枢纽中的全过程。4) 船舶离
开模块。船舶通过枢纽后，经由船舶离开模块离
开模型。在模型运行时，实时记录当前通过枢纽
的船舶数量、通过的货运量、升船机空载次数等
数据。枢纽通航模块中的第二级升船机模块见
图 3。

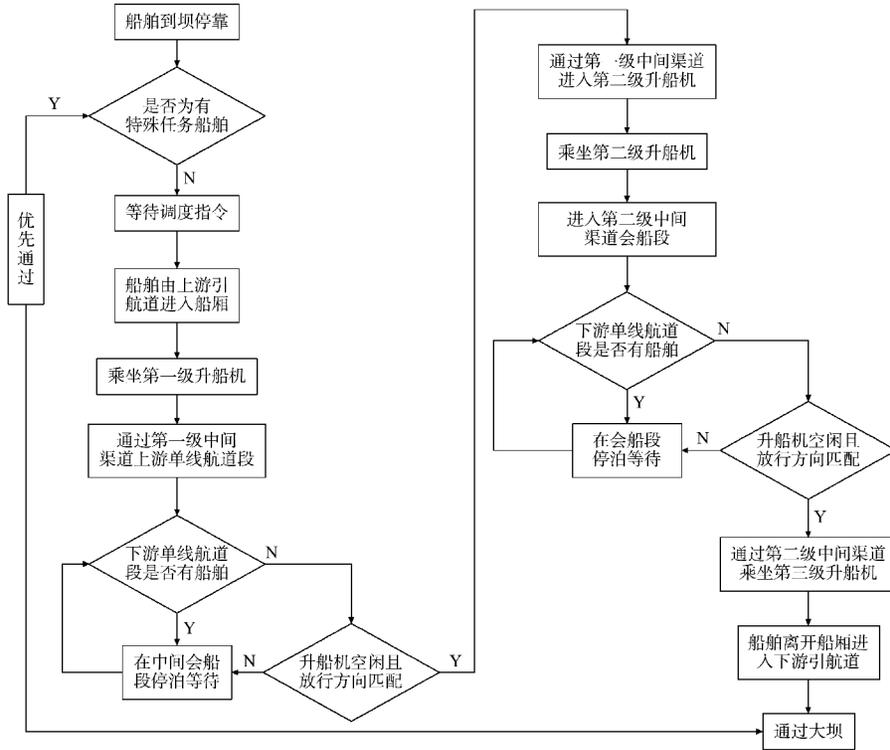


图 2 构皮滩复杂枢纽船舶下行过坝流程

Fig. 2 Flow of ship downstream crossing the dam at Goupitan complex hub

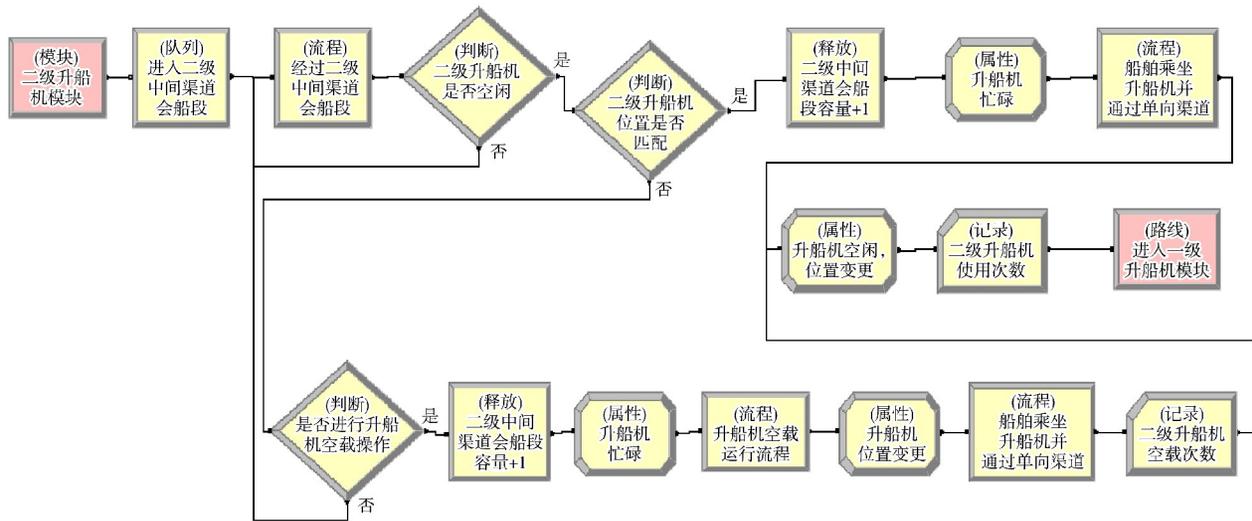


图 3 枢纽通航模型逻辑(二级升船机)

Fig. 3 Logic of the hub navigation model(secondary boat lift)

1.3 模型运行参数

模型试验中, 枢纽的年通航天数按设计取 325 d, 船舶单次过坝平均吨位取设计船型满载载货量 500 t。船舶到达间隔服从负指数分布, 率参数为 3 h。船舶通过枢纽的时间由升船机运行时间和中间渠道

的通行时间组成。升船机运行时间包括船舶进出船厢所需时间和升船机设备本身的运行时间; 中间渠道的通行时间则根据中间渠道的平均速度 1 m/s 进行计算。由此, 计算得到中间渠道、升船机空载和满载状态下的通行时间, 作为模型参数, 见表 1。

表1 典型复杂通航枢纽船舶通航模型输入参数
Tab.1 Input parameters of ship navigation model for typical complex navigation hubs

通航建筑物	长度/m	高度/m	通行时间/min
第一级升船机	-	47	15/25
第一级中间渠道上游单线航道	470.7	-	9
第一级中间渠道会船段	334.4	-	6
第一级中间渠道下游单线航道	165.0	-	3
第二级升船机	-	127	30/40
第二级中间渠道会船段	284.4	-	5
第二级中间渠道单线航道	102.0	-	2
第三级升船机	-	79	20/30

1.4 模型验证

按照构皮滩枢纽的总体布置及设计参数，构建船舶通航动画，见图4。运行仿真模型，观察仿真动画，发现锚泊船舶的调度规则、过坝船舶在会船段的排队规则及各通航建筑物的服务规则等均符合系统设定。根据构皮滩枢纽实际运行情况调研，普通货运船舶完成一次构皮滩枢纽的完整通航，全程为2 306 m，所需时长最短约2 h；研究模型仿真结果单船最短过闸时间为122 min，与实际符合度良好。

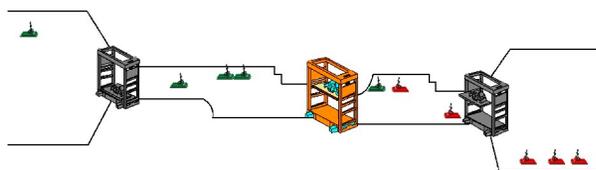


图4 模型仿真过程

Fig.4 Model simulation process

2 复杂通航枢纽仿真模型会船段容量试验及分析

2.1 试验方案设计

通航枢纽实际通过能力受到多种因素的影响，大致可分为自然因素、枢纽因素、船舶因素、管理因素。

本文聚焦于在固定枢纽日开放时间条件下，中间渠道会船段容量对枢纽通过能力的边际影响效应，旨在通过定量分析揭示两者之间的内在关联及其作用机制。研究采用多因素敏感性分析方法，系统探究枢纽运行时间与中间渠道会船段容

量的耦合作用机制。研究设计了7个枢纽日开放时间水平(8、10、12、14、16、18、20 h)，通过控制变量法，在保持枢纽日开放时间恒定的条件下，系统调整中间渠道会船段容量参数，记录并分析枢纽年通过艘次及货运量的变化规律。枢纽第一级中间渠道会船段容量目前为4艘，由于构皮滩通航枢纽中间渠道长度限制，在不考虑平面布置的相关技术要求情况下，会船段长度最大可设置容量为7艘；第二级中间渠道会船段容量目前为4艘，最大可设计为5艘。由此得到模型参数范围，见表2。通过将第一级和第二级中间渠道会船段容量进行组合，构建8种不同的工况组合，见表3，共开展敏感性试验56组(7种枢纽日开放时间、4种第一级中间渠道会船段容量、2种第二级中间渠道会船段容量)。从未来航运发展出发，仿真模型中船舶的日均到达艘次设置为48艘，即上下行各24艘，以确保不同参数条件下，船舶到达量都是充足的。为得到稳态仿真结果，设置预热时间为30 d，每个工况重复模拟的次数为10次。

表2 仿真试验运行参数

Tab.2 Operation parameters for simulation experiment

枢纽日开放时间/h	第一级中间渠道会船段容量/艘	第二级中间渠道会船段容量/艘
8、10、12、14、16、18、20	4、5、6、7	4、5

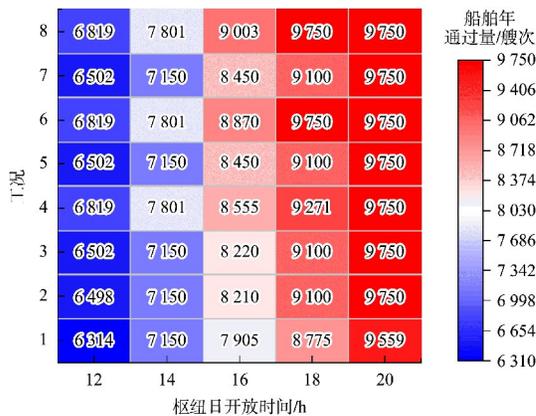
表3 第一级与第二级中间渠道会船段容量组合工况
Tab.3 Combined working conditions for the capacity of the intermediate channel rendezvous section of first and second stage

工况	中间渠道会船段容量/艘	
	第一级	第二级
1(原始设计工况)	4	4
2	4	5
3	5	4
4	5	5
5	6	4
6	6	5
7	7	4
8	7	5

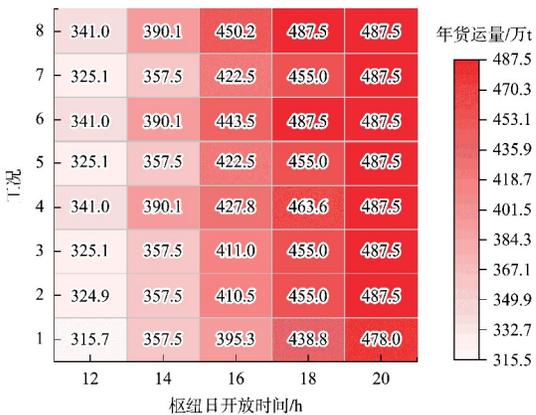
2.2 试验结果分析

2.2.1 枢纽年通过艘次及货运量

试验研究结果表明, 枢纽日开放 8 h 情况下, 构皮滩枢纽船舶年通过量为 4 209 艘次, 年货运量为 210.4 万 t; 枢纽日开放 10 h 情况下, 枢纽年船舶通过量为 5 200 艘次, 年货运量为 260.0 万 t。在这两个开放时间条件下, 通过能力受工况变化影响不大。而在枢纽日开放时间为 12~20 h 的条件下, 不同工况对构皮滩枢纽通过能力的影响显著, 变化趋势见图 5。



a) 不同工况与枢纽日开放时间对船舶年过坝艘次的影响



b) 不同工况与枢纽日开放时间对年货运量的影响

图 5 不同工况与枢纽日开放时间对枢纽通过能力的影响

Fig. 5 Impact of different operating conditions and hub daily opening time on hub throughput capacity

由图 5 可知, 随着枢纽开放时间的增加, 年过坝船舶数量和货运量整体呈增长趋势, 但随着枢纽日开放时间大于 18 h, 在两级会船段容量充足的情况下, 枢纽通过量基本趋于稳定。这表明,

适当延长枢纽开放时间可以有效提高通航能力, 缓解通航瓶颈, 但在到达某一阈值后, 单纯延长开放时间的优化效果不佳。

在相同的枢纽开放时间和第二级会船段容量条件下, 增加第一级会船段容量能够显著提升通航能力。以开放时间为 16 h 为例, 工况 1(第一级和第二级会船段容量均为 4 艘)与工况 5(第一级和第二级会船段容量分别为 6 和 4 艘)相比, 第一级会船段容量从 4 艘增加至 6 艘, 年过坝船舶数量从 7 905 艘次增长至 8 450 艘次, 货运量从 395.3 万 t 提升至 422.5 万 t。类似地, 在相同的枢纽开放时间和第一级会船段容量条件下, 增加第二级会船段的容量同样能够有效提高年过坝船舶数量及货运量。以开放时间为 18 h 为例, 工况 5(第一级和第二级会船段容量分别为 6 和 4 艘)与工况 6(第一级和第二级会船段容量分别为 6 和 5 艘)相比, 第二级会船段容量从 4 艘增加至 5 艘, 年过坝数量由 9 100 艘次增长至 9 750 艘次, 货运量由 455.0 万 t 提升至 487.5 万 t。第一级和第二级渠道会船段容量的增加对年通过艘次均产生了正向影响, 但年过坝数量和货运量增幅逐渐减小, 尤其是在达到某一容量阈值后。这表明, 在较高容量配置下, 枢纽的通航能力受其他因素(如设施负荷、船舶调度等)限制, 会船段船舶容量的进一步提升对通过量的提升作用有限。

2.2.2 枢纽上下行船舶平均待闸时间

枢纽上下行船舶平均待闸时间能直观反映枢纽的服务质量^[15]。根据 2.1 节的设计方案进行仿真, 仿真时长为 2 个月, 前一个月为仿真预热时间, 记录后一个月枢纽上下行船舶的平均待闸时间。与枢纽年通过艘次及货运量一样, 在枢纽日开放 8 和 10 h 的情况下, 得到工况 1~8 构皮滩枢纽船舶平均待闸时间为定值, 分别为 818 和 729 h。在枢纽日开放时间为 12~20 h 的条件下, 不同工况对船舶的平均待闸时间的影响显著, 变化趋势见图 6。

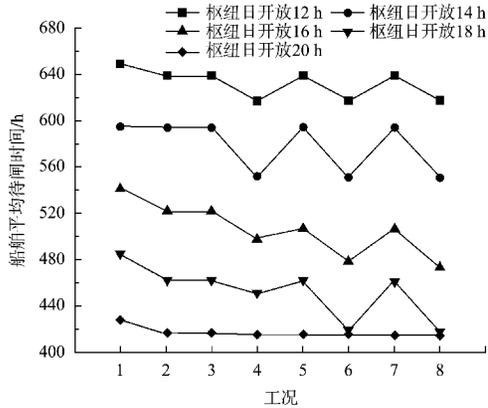


图6 不同工况与枢纽日开放时间对船舶平均待闸时间的影响
 Fig. 6 Impact of different working conditions and daily opening hours of the hub on the average waiting time of ships

在相同的枢纽日开放时间下，工况 1(第一级和二级会船段容量均为 4 艘)与工况 3(第一级和二级会船段容量分别为 5 和 4 艘)相比，随着第一级渠道会船段容量的增加，船舶的平均待闸时间呈现下降趋势。类似地，在相同的枢纽开放时间和第一级会船段容量条件下，增加第二级会船段的容量同样能够有效减少船舶的平均待闸时间。这表明，适当增大会船段容量有助于提升通航效率，减少船舶等待时间。但是，以工况 3(第一级和二级会船段容量分别为 5 和 4 艘)与工况 5(第一级和二级会船段容量分别为 6 和 4 艘)为

例，随着第一级渠道会船段容量的进一步增加，待闸时间的下降幅度逐渐趋缓。这表明，在一定容量范围内，增大会船段容量对待闸时间的改善作用较为显著，但超过某一阈值后，其边际收益逐渐降低。对比不同开放时间条件下的待闸时间，可以发现枢纽日开放时间越长，船舶的平均待闸时间整体上越短。

综上，在枢纽设计时，结合区域航运发展需求，在确定了枢纽可能的最大日运行时间后，适当增大会船段容量可以有效降低船舶的待闸时间，提高通航效率，但其边际效益呈递减趋势，需在基础设施投资和通航效率之间寻求最优平衡点。

3 复杂通航枢纽会船段容量优化建议

枢纽通航能力的提升可以通过增加会船段容量来实现，会船段的建设、维护及运营均涉及较高成本。若盲目扩大会船段容量，可能导致资源浪费。因此，枢纽设计时，在确定枢纽最可能的最大运行时间前提下确定最佳会船段容量，有助于在保证通航效率的同时降低不必要的资源占用，提高中间渠道的利用率。本文通过仿真试验得到构皮滩枢纽在不同枢纽日开放时间下，通过能力最大时的最优工况及该工况与原始设计工况相比船舶年通过艘次与货运量的提升效果，见表 4。

表 4 不同枢纽日开放时间下最优会船段容量及其提升效果

Tab. 4 Optimal rendezvous section capacity and its enhancement effect under different hub daily opening time

枢纽日开放时间/h	最优工况			原始设计工况下枢纽船舶年通过量/艘次	最优工况下枢纽船舶年通过量/艘次	原始设计工况下枢纽年过坝货运量/万 t	最优工况下枢纽年过坝货运量/万 t	通过量提升率/%
	工况编号	第一级中间渠道会船段容量/艘	第二级中间渠道会船段容量/艘					
8	1	4	4	4 209	4 209	210.4	210.4	0
10	1	4	4	5 200	5 200	260.0	260.0	0
12	4	5	5	6 314	6 819	315.7	341.0	8.0
14	4	5	5	7 151	7 801	357.6	390.1	9.1
16	8	7	5	7 905	9 003	395.3	450.2	13.9
18	6	6	5	8 775	9 750	438.8	487.5	11.1
20	3	5	4	9 559	9 750	478.0	487.5	2.0

通过对仿真试验结果数据进行分析可知，枢纽的船舶通过艘次和货运量对会船段容量具有敏感性。目前构皮滩枢纽第一级和二级中间渠道

会船段设计容量均为 4 艘船舶，在枢纽日开放 8 和 10 h 的情况下，该容量是最优方案。但当枢纽日开放时间延长至 12 和 14 h 时，第一级和第二

级中间渠道会船段容量均达到5艘时将是最优方案,枢纽的年通过船舶艘次和货运量将分别达到6 819艘次与341.0万t、7 801艘次与390.1万t,优于原设计方案。在枢纽日开放时间为16 h的条件下,第一级和第二级中间渠道会船段容量分别为7和5艘是最优方案,枢纽的年通过船舶艘次和货运量将分别达到9 003艘次和450.2万t。而在枢纽日开放时间为18 h的条件下,第一级和第二级中间渠道会船段容量分别为6和5艘是最优方案,枢纽的年通过船舶艘次和货运量将分别达到9 750艘次和487.5万t。然而,当枢纽日开放时间进一步延长至20 h时,第一级和第二级中间渠道会船段容量仅需分别达到5和4艘为最优方案,枢纽的年通过艘次和货运量分别达到9 750艘次和487.5万t。

上述研究结果表明,通航枢纽的通过能力与会船段容量及开放时间之间存在显著的非线性耦合效应。随着枢纽日开放时间的延长,会船段容量对通过能力的边际提升效应逐渐减弱。例如,当开放时间由16 h增至20 h时,达到饱和状态所需的第一级会船段容量由7艘降至5艘,第二级容量由5艘降至4艘。这一现象表明,时间资源与空间资源存在替代效应,开放时间的持续增加可部分补偿会船段容量的不足。会船段容量的饱和阈值随开放时间呈现非单调变化,在12~18 h区间内,饱和容量需求随开放时间增加而上升,但当开放时间超过18 h后,因船舶调度效率接近系统极限,饱和容量需求反而降低。这种阈值演化反映了船舶通航瓶颈的动态迁移机制。

为了避免资源浪费,应在较小投入的情况下实现最佳通航效益,提高枢纽的经济可行性。对未来复杂通航枢纽的设计而言,可以根据枢纽区域航运未来发展需求,在确定枢纽最大日运行时间情况后确定会船段的船舶容量,当然还需要结合平面布置的可行性。就构皮滩枢纽而言,在枢

纽日开放8和10 h的情况下,现有的两级中间渠道会船段容量已是最优;在未来需求显著增长的背景下,随着枢纽日开放时间延长,其会船段容量有优化空间,经优化后最高提升13.9%的货运通过量,并使枢纽上下行船舶的平均待闸时间减少13.6%。

4 结论

1) 基于Arena仿真平台构建了构皮滩复杂通航枢纽交通仿真模型,采用敏感性分析方法,以枢纽日开放时间、第一级中间渠道会船段容量和第二级中间渠道会船段容量为关键变量,开展了枢纽通过能力敏感性试验。通过试验数据的定量分析,揭示了枢纽年通过量和上下行船舶平均待闸时间随上述变量的变化规律,为优化设计提供了数据支撑。

2) 通过增加会船段容量可有效提升枢纽的通过能力,第一级和第二级渠道会船段容量的增加对年通过艘次及货运量均产生了正向影响,但在达到某一容量阈值后,这一影响将达到饱和。

3) 基于当前构皮滩通航枢纽的设计运营参数,其会船段容量在现有枢纽日开放时间框架下已达到最优配置。随着未来枢纽日开放时间的延长,其会船段容量方案存在优化空间,优化后最高可提升13.9%的货运通过量,并使枢纽上下行船舶的平均待闸时间减少13.6%。

4) 在不同枢纽日开放时间下,最优会船段容量存在显著差异。因此,对未来复杂通航枢纽的设计而言,可结合枢纽区域航运未来发展,确定枢纽可能的日最大开放时间,并以此确定会船段的船舶容量最佳配置。研究成果为复杂通航枢纽的规划设计提供了理论依据和方法支撑,对提升枢纽通航效率、优化资源配置具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 商剑平, 刘春泽, 唐颖, 等. 船闸通过能力研究综述[J]. 水运工程, 2018(7): 103-108.
SHANG J P, LIU C Z, TANG Y, et al. Overview of researches on lock throughput capacity [J]. Port & waterway engineering, 2018(7): 103-108.
- [2] 王勇. 基于动态二叉树的西江航运干线多梯级船闸链调度[J]. 水运工程, 2021(3): 159-163, 190.
WANG Y. Multi-step ship locks chain scheduling of the Xijiang River shipping line based on dynamic binary tree[J]. Port & waterway engineering, 2021(3): 159-163, 190.
- [3] WILSON H G. On the applicability of queueing theory to lock capacity analysis [J]. Transportation research, 1978, 12(3): 175-180.
- [4] 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.
- [5] 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.
ZHONG M, LI C H, LIU S B. A study on prediction of waiting time of ships crossing Three Gorges locks based on M/M/C queueing models [J]. Journal of transport information and safety, 2017, 35(4): 84-91.
- [6] 李松龙, 柳晨光, 初秀民, 等. 船舶编队过闸航行三维实时仿真[J]. 中国航海, 2022, 45(3): 129-136.
LI S L, LIU C G, CHU X M, et al. Real time 3D simulation of lockage of ship formation [J]. Navigation of China, 2022, 45(3): 129-136.
- [7] ZHENG Q Q, ZHANG Y, HE L J, et al. Discrete multi-objective artificial bee colony algorithm for green co-scheduling problem of ship lift and ship lock [J]. Advanced engineering informatics, 2023, 55: 101897.
- [8] ZHANG Y, ZHENG Q Q, HE L J, et al. Ship traffic optimization method for solving the approach channel and lock co-scheduling problem of the Three Gorges Dam on the Yangzi River [J]. Ocean engineering, 2023, 276: 114196.
- [9] 杨锦, 李一博, 杨俊毅, 等. “船闸+升船机”协同控制下的船舶调度优化[J]. 上海海事大学学报, 2024, 45(1): 16-22.
YANG J, LI Y B, YANG J Y, et al. Optimization of ship scheduling under cooperative control of “ship lock+ship elevator” [J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2024, 45(1): 16-22.
- [10] 高攀, 方志伟, 赵旭. “碳减排”视域下内河流域梯级枢纽联合通航调度优化[J]. 西南交通大学学报, 2025, 60(2): 308-316.
GAO P, FANG Z W, ZHAO X. Optimization of joint navigation scheduling of cascade hubs in inland river basin from perspective of carbon emission reduction [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2025, 60(2): 308-316.
- [11] 董霞, 赵凯, 吕小龙, 等. 多种通航建筑物组合布置的通过时间研究[J]. 水运工程, 2024(1): 97-104.
DONG X, ZHAO K, LYU X L, et al. Transit time of multiple navigation building combination arrangements [J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 97-104.
- [12] MA X Q, LIU Z H, FENG W, et al. A comparative study on 10, 000-DWT ship squat in an intermediate channel via numerical simulations: self-propelled versus towing [J]. Ocean engineering, 2025, 323: 120665.
- [13] 谢颖涵, 汪亚超, 吴经干, 等. 构皮滩水电站通航建筑物第一级中间渠道布置与设计优化[J]. 水利水电快报, 2023, 44(9): 62-67.
XIE Y H, WANG Y C, WU J G, et al. Layout and design optimization of first intermediate channel of navigation construction of Goupitan Hydropower Station [J]. Express water resources & hydropower information, 2023, 44(9): 62-67.
- [14] 王可, 赵斌, 唐雪景, 等. 构皮滩水利枢纽垂直升船机设计中的关键问题研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(S2): 163-169.
WANG K, ZHAO B, TANG X J, et al. Research on key issues in the design of vertical ship lift for Goupitan water conservancy hub [J]. Water resources and hydropower engineering, 2023, 54(S2): 163-169.
- [15] 张卿茹. 芜申线高淳段船闸运行调度策略研究[D]. 南京: 东南大学, 2022.
- [16] ZHANG Q R. Operation scheduling strategy of waterway locks at Gaochun section of Wushen canal [D]. Nanjing: Southeast University, 2022.