

船闸非对称式下游引航道 通航水流条件优化*

董晞中1,王 蛟2,陈 亮3

(1. 甘肃省水运事业发展中心,甘肃兰州 730030;
2. 重庆交通大学,西南水利水运工程科学研究院,重庆 400074;
3. 重庆西科水运工程咨询有限公司,重庆 402247)

摘要:针对船闸下游引航道采用非对称式布置,引航道沿横向分流不均、停泊段船舶受力较大等问题,进行船闸输水非恒 定流过程下游引航道内的水位波动特性、表面流场结构和船舶受力特性研究。依托某典型船闸工程,采用比尺为1:30 的船闸 整体水工物理模型开展研究。试验成果表明,针对非对称式引航道整体布置,泄水口内消力槛的组合布置也应为非对称形 式,才能起到调节引航道内横向分流比的作用,且消力槛距离泄水口不可太近,以免产生阻流作用;在不产生回流的前提 下,适当减少停泊段侧流量,可以明显改善船舶泊稳条件。研究成果可为船闸引航道及泄水口消能工的设计研究提供参考。 关键词:船闸:非对称式引航道;水流条件;模型试验

中图分类号: U641.1 文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)05-0087-09

Optimization of navigable flow condition

in asymmetric downstream approach channel of ship lock

DONG Xizhong¹, WANG Jiao², CHEN Liang³

(1. Gansu Water Transport Business Development Center, Lanzhou 730030, China;

Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
 Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 402247, China)

Abstract: Aiming at the problems such as uneven distribution of the approach channel along the lateral and heavy load on ships in the berthing section when the downstream approach channel of ship lock is arranged asymmetrically, the water level fluctuation characteristics, surface flow field structure and ship stress characteristics in the downstream approach channel during the unsteady flow of ship lock are studied. Based on a typical ship lock project, the whole hydraulic physical model of ship lock with a scale of 1:30 is studied. The test results show that, in view of the overall layout of the asymmetric approach channel, the combined arrangement of the sill in the discharge channel should also be asymmetric, so as to adjust the transverse shunt ratio in the approach channel, and the sill should not be too close to the drainage outlet, so as to avoid the flow blocking effect. Under the premise of not producing backflow, appropriate reduction of the side flow of the berthing section can significantly improve the conditions of the ship's berthing stability. The research results can provide reference for the design and research of energy dissipator of ship lock approach channel and outlet.

Keywords: ship lock; asymmetric approach channel; flow condition; model test

收稿日期: 2024-08-03

^{*}基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206105)

作者简介:董晞中 (1968—),男,高级工程师,研究方向为航道工程安全管理。

船闸引航道的布置形式是确保船舶安全、高 效通过船闸的重要设计内容,如布置和运行控制 不当容易导致相关安全问题。船闸引航道通常由 导航调顺段、停泊段和制动段组成,有时还包括 连接段航道。引航道的布置形式一般根据地形、 地质、水流、泥沙及上、下游航道等条件确定。 根据规范要求[1],引航道和连接段的流速、流态 应满足船舶安全停泊、进出闸与正常航行的要求, 避免出现回流、泡漩、乱流等不良流态。常见的 船闸引航道布置形式包括对称形、不对称形和反 对称形。针对不同的引航道布置形式,需要对船 闸泄水口提出相应的分流调控措施,确保下引航 道内出流尽量均匀,避免出现不良流态。特别是 非对称式引航道布置,由于船闸下泄水流沿横向 的扩散角度及长度不同,对泄水口消能工的布置 形式要求较高,既不能使得水流激烈对冲而形成 "剪刀水"等不良流态,也不能过度消能而产生阻 水效应,影响船闸泄流能力,还要考虑下泄水流 沿横向的渐变式分流、因此、一般需通过物理模 型试验研究确定[2]。

黄伦超等[3]通过对双线船闸同时泄水、错开 泄水和不同旁侧泄水流量比例进行计算分析,得 出满足下游引航道通航水流条件的双线船闸错开 泄水相对时间要求和旁侧泄水流量比例要求。周 作茂等[4]依托长沙综合枢纽工程,采用三维数值 模拟方法,分析不同水流条件下共用引航道内的 波高、波速、水面比降以及系缆力等因素,提出 多种改善措施。齐庆辉等^[5]采用 MIKE21 水动力模 型对韩庄双线船闸下游引航道水力特性进行模拟, 研究引航道、靠船墩以及口门区的流速流态,提 出增加格栅和局部疏浚的工程措施。徐进超等[6] 建立1:100的贵港枢纽下游及船闸引航道物理模 型,研究贵港二线船闸的布置方案及其对引航道 和口门区水流条件的影响规律,结合贵港枢纽的 特点,提出适宜的引航道隔流墙布置方案。王勤 振等[7]认为由于狭窄空间内船闸扩容改造受诸多 因素的影响,其闸位平面布置方案的合理性尤为 重要,特别是共用引航道宽度和隔流堤形式,对 施工围堰布置及防洪要求均有明显影响,应进行

方案对比论证。李加浩^[8]采用数学模型与物理模 型相结合的方法,研究双线船闸共用引航道主、 辅导墙布置对引航道内通航水流条件的影响、提 出较优的布置形式。朱鹏^[9]针对双线船闸的运行 调控方式进行系统研究,认为采用集控调度运行 模式可以全面考虑船闸引航道的通航水流条件. 显著提升船闸的运行效率。王崇宇等[10]采用数值 模拟和物理模型试验相结合的方法,研究不同级 别船闸共用上、下游引航道的水流流态、流速分 布及船闸输水非恒定流特性。张震等^[11]通过1:30 物理模型试验, 对船闸输水过程水力特性、船舶 停泊条件和引航道水流条件开展研究,优化引航 道通航水流条件。杨嵚[12]通过物模试验对临涣船 闸引航道口门区水流条件进行研究,提出"河槽疏 浚+增加隔流潜堤"的综合措施,有效解决了口门 区回流强度较大、回流流速无法满足规范要求的 问题。张墨羽[13]分析了双线船闸共用引航道的水 流特性与尺度设计原则,基于引航道尺度以及布 局设计要点分析,提出可提升船闸运维效率的共用 引航道布置方法。周权[14]针对双线船闸不同运行方 式进行重点研究,分析双线船闸共用引航道的非恒 定流演变特性。李华勇等[15]采用数值模拟的方法对 万安纽枢二线船闸设计方案下的通航水流条件进行 研究,可为万安二线船闸的优化设计提供参考。

本文依托某拟建船闸工程,建立比尺1:30的 物理模型,研究船闸输水非恒定流过程下游引航 道内的水位波动特性、表面流场结构和船舶受力 特性等,探讨泄水口内不同消力槛组合布置方式 对下引航道内通航水流条件的影响规律,旨在为 类似工程提供参考。

1 物理模型设计

1.1 船闸下闸首及下引航道布置

拟建船闸下闸首泄水阀门段廊道采用平直形 式,宽度及高度沿程保持不变,阀门段断面尺寸 为3.8 m×4.0 m(宽×高)。泄水阀门后平底转弯至出 水口,出水口断面尺寸为7.6 m×4.0 m(宽×高), 为使出水口水流尽可能均匀,出口设中间导墙, 其起点略偏向弯段内侧。为保证出水口水流条件, 下闸首出水口采用顶支孔格栅消能室的布置形式, 格栅顶部高程与下游引航道底高程一致,出水格 栅支孔等宽布置,并在格栅消能室后布置消力池。 船闸下闸首布置见图1。



消力池

5 000

10 000

800 -fa1-fa1 800 -fa1-fa1 800 -fa1-fa1

船闸

中心线

 200





下游引航道采用非对称形式,左岸主导航墙 长186 m,右岸辅导航墙长53 m,停泊段长280 m; 下游引航道底宽62 m,船闸中心线与下游引航道 中心线间距11.6 m。下游停泊段按并列停靠2艘 1000吨级船布置,满足2个闸次船舶停靠要求, 共布置15个靠船墩,墩中心间距20 m;为改善 下游引航道的通航水流条件,引航道边墙均做斜 坡处理,坡比为1:0.4。下游引航道整体布置见 图 2。





1.2 模型设计

根据重力相似准则建立比尺为1:30 的船闸整 体水工物理模型。模型模拟上、下游引航道、闸 室及输水廊道等输水系统主要结构,模拟上游段 约420 m,船闸主体段约310 m,下游段约460 m, 模型模拟原型总长约1190 m。为便于观察,输水 阀门段选用有机玻璃制作,输水廊道选用聚乙稀 塑料板制作,闸室边墙选用钢板制作,上、下游 引航道采用砖混结构,引航道内地形选用水泥沙 浆抹面。船闸泄水口及下引航道物理模型照片见 图3。



a) 船闸泄水口





2 试验成果与分析

由图 1 可知,原方案条件下,泄水口底部为 平直廊道,未设置消力坎。试验结果表明,由于 泄水口顶部格栅采用等宽形式,对泄水出流无分 流作用,船闸泄水过程中,泄水口中部壅高明显, 呈现明显的"剪刀水"现象,虽然泄水口下引航道 内设置消力池进一步整流,但下游引航道内水体 沿横向依然分布不均,中部出流明显较大。为改 善下游引航道内通航水流条件,有必要在泄水口 底部增设消力坎对下泄水体进行分流。为探讨泄 水口内消力坎不同组合布置形式对下泄水体的分 流规律,进行多方案试验研究,方案说明见表 1。

表 1 泄水口消力坎试验方案 Tab. 1 Test schemes for energy dissipation weir curb

试验方案	方案内容	备注
原方案	泄水口内无消力坎	分流效果较差
1	3 道消力坎,坎厚 0.6 m,从左岸到右岸 分别高 1.0、2.5 和 1.0 m,间距 5.25 m	采用对称式 消能工布置
2	3 道消力坎,坎厚 0.6 m,从左岸到右岸 分别高 1.5、2.5 和 1.0 m,间距 5.25 m	采用非对称式 消能工布置
3	2 道消力坎,坎厚 0.6 m,从左岸到右 岸分别高 1.5 和 1.0 m,间距 10.5 m	简化消力坎 组合形式
4	2 道消力坎,坎厚 0.6 m,从左岸到右 岸分别高 1.5 和 1.0 m,间距 7.4 m	调整消力坎 间距

2.1 下游引航道流态

在相同试验工况条件下,对泄水口内消力坎 不同组合布置形式的下游引航道内流态进行观测, 通过下泄水体的演进过程对各方案的分流效果进 行粗判。

方案1:在原方案的基础上,方案1在泄水口 底部加设3道消力坎调整下泄水流分流比,消力 坎采用对称式布置。试验结果表明,相对于原方 案,方案1的下游引航道流态得到明显改善,泄 水口中部壅高明显降低,未形成"剪刀水"等不良 流态,但从横向分流来看,左岸(停泊段侧)流量 略大于右岸,对船舶泊稳条件不利。

方案 2: 在方案 1 的基础上,方案 2 泄水口消 力坎采用非对称式布置,将右岸低坎高度由 1.0 m 增加至 1.5 m。试验结果与消能工设计初衷相反, 从横向分流来看,左岸(停泊段侧)流量反而进一 步增大,说明右岸低坎高度过高,对右侧出流已 形成阻流效应,近似于增大了左岸流量。

方案 3:为了消除阻流效应,方案 3 简化泄水 口消力坎组合方案,取消中部的高坎。试验结果 表明,下游引航道中部出流量略有增大,但仍未 改变左岸流量比右岸流量大的横向分布规律,说 明右岸矮坎依然存在一定的阻流作用。

方案 4:为了进一步改善整流效果,方案 4 缩 减消力坎的间距,增大泄水口的横向扩散距离。 试验结果表明,下游引航道泄流的横向分流比基 本均匀,左岸侧出流量略小,未对下泄主流流场 结构造成不利影响。

综合对比各方案下引航道内的流场结构及局 部流态可知,方案4的整体效果最优,后续试验 将方案4作为推荐方案进行定量试验研究。原方 案和推荐方案的下游引航道流态对比见图4,推荐 方案泄水口消能工布置见图5。





2.2 表面流速分布

相同试验工况下,泄水口原方案和推荐方案 条件下的船闸下游引航道内表面流场流速分布如 图6所示。可见,由于下游引航道较为顺直,且 泄水口后设有消力池进一步消能整流,下游引航 道内水流整体分布较为均匀,未出现回流、漩涡 等不良流态,但流速在横向分布上有较大差异。 原方案条件下,引航道中部流速明显较两侧更大, 沿横向分布不够均匀,停泊段首部断面的中部流速 接近 0.9 m/s, 而该断面两岸流速在 0.5 m/s 左右。 推荐方案条件下, 引航道沿横向的流速分布差异明 显改善, 停泊段首部断面的中部流速为 0.6 m/s, 较原方案有明显降低, 且呈现左岸(停泊段侧) 略小、右岸略大的分布规律。说明泄水口底部采 用推荐方案的消力坎组合布置形式可以在不改变 下泄主流流场结构的前提下, 适当减少停泊段侧 流量, 有利于改善船舶泊稳条件。

$\begin{array}{c} 0.76 = 0.69 = 0.57 = 0.47 = 0.64 = 0.53 = 0.50 = 0.42 \\ 0.76 = 0.69 = 0.57 = 0.47 = 0.64 = 0.53 = 0.50 = 0.52 \\ 1.22 = 0.89 = 0.86 = 0.71 = 0.69 = 0.76 = 0.80 = 0.80 \\ 1.31 = 0.94 = 0.87 = 0.80 = 0.74 = 0.97 = 0.81 = 0.72 \\ 0.78 = 0.69 = 0.81 = 1.00 = 0.89 = 0.86 = 0.65 = 0.71 \\ 0.78 = 0.69 = 0.55 = 0.71 = 0.66 = 0.43 = 0.56 \\ 0.43 = 0.55 = 0.55 = 0.71 = 0.66 = 0.43 = 0.56 \\ 0.43 = 0.56 = 0.56 = 0.71 \\ 0.43 = 0.56 = 0.71 \\ 0.43 = 0.56 = 0.71 \\ 0.43 = 0.56 = 0.71 \\ 0.43 = 0.56 = 0.71 \\ 0.43 = 0.56 \\ 0.43 = 0.$	$\begin{array}{c} 0.44 & 0.27 & 0.24 & 0.38 & 0.16 & 0.26 & 0.31 & 0.18 & 0.26 & 0.22 & 0.19 \\ \hline 0.74 & 0.58 & 0.65 & 0.61 & 0.52 & 0.59 & 0.62 & 0.58 & 0.72 & 0.71 & 0.68 \\ \hline 0.89 & 0.72 & 0.70 & 0.61 & 0.70 & 0.61 & 0.64 & 0.55 & 0.78 & 0.72 & 0.83 \\ \hline 0.85 & 0.73 & 0.57 & 0.66 & 0.58 & 0.56 & 0.37 & 0.78 & 0.77 & 0.87 \\ \hline 0.66 & 0.72 & 0.79 & 0.55 & 0.43 & 0.61 & 0.56 & 0.35 & 0.78 & 0.83 & 0.78 \\ \hline 0.55 & 0.59 & 0.66 & 0.47 & 0.39 & 0.61 & 0.44 & 0.46 & 0.76 & 0.82 & 0.61 \\ \hline \end{array}$
0.67 - 0.69 - 0.75 - 0.60 - 0.52	a) 原方案
$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$

b) 推荐方案



2.3 船舶受力特性

为定量分析优化下游引航道横向分流比对停 泊段泊稳条件的影响,开展下游引航道停泊段船 舶系缆力试验研究,采用2000吨级代表船型作为 测试船舶,船舶尺寸为 72 m×15.6 m×3.6 m (总长×型宽×型深)。泄水阀门双边开启,开启时 间 T_v =3~7 min,船舶停于下游引航道停泊段首 部。实测系缆力见表 2。

		☆ 川 台:		系缆力/kN					
工机		山口	$T_v = 3 \min$	$T_v = 4 \min$	$T_v = 5 \min$	$T_v = 6 \min$	$T_v = 7 \min$		
	亩如	上游(+)	23	18	11	12	7		
	时功	下游(-)	-50	-34	-24	-24	-20		
百古安		右岸(+)	16	10	5	5	5		
尿刀杀 -	則供	左岸(-)	-11	-6	-5	-4	-3		
	戶樓	右岸(+)	10	10	7	8	5		
	 加	左岸(-)	-2	-5	-1	-1	-8		
- 推荐方案 -	前纵	上游(+)	16	14	7	7	7		
		下游(-)	-23	-17	-15	-15	-12		
		右岸(+)	4	1	3	1	1		
	則惧	左岸(-)	-6	-5	-4	-3	-2		
	后横	右岸(+)	3	7	4	4	4		
		左岸(-)	-3	-3	-4	-4	-2		

	表 2	停泊段船舶 ^諿	最大平均系	缆力	
Гab. 2	Maximum avera	age mooring	force of sh	nips at berthin	g section

注: 2 000 吨级船舶系缆力允许值为纵向 40 kN、横向 20 kN。

泄水口消能工原方案条件下,船舶最大平均 纵向系缆力分别为50、34、24、24和20kN,船舶 最大平均横向系缆力分别为16、10、7、8和8kN。 可见, *T_v*=3 min 时,船舶纵向系缆力达到50kN, 超过规范限值; *T_v*=4~7 min 时,船舶所受纵向系 缆力均满足规范要求,但富余度不大;试验工况 条件下,船舶所受横向系缆力均满足规范要求。

推荐方案条件下,船舶最大平均纵向系缆力 分别为23、17、15、15和12kN,船舶最大平均 横向系缆力分别为6、7、4、4和4kN。与原方 案对比,优化泄水口出流分流比后,船舶纵向力 明显减小,部分工况减幅超 50%,说明在不改变 下游引航道内横向出流分流比的前提下,适当减 小停泊段岸侧流量有利于改善停泊段船舶泊稳 条件。

2.4 水位波动特性

为定量分析泄水口消能工布置形式对下游引 航道内水位波动特性的影响,针对原方案和推荐 方案,试验观测船闸泄水过程中停泊段至下闸首 泄水口的沿程水位变化。如图7所示,下游引航 道共布置5个水位测点:引航道停泊段(1倍船长 范围内布置2个测点)、导航段中部、消力池中部 及泄水口顶部。

试验结果表明,不同布置方案条件下的引航 道内水位波动特性存在一定共性规律:泄水口顶 部壅高最为明显、水位跌落最少,消力池中部水

T 1 **A**

位跌落最为明显,而后距离泄水口越远,水位的 变幅越小。试验工况条件下,优化泄水口消力坎 组合布置形式后,泄水口顶部壅高现象得到明显 改善,最大壅高值由 0.95 m 降至 0.78 m,停泊段 水位变幅也下降约 0.1 m。可见,合理调整下泄水 流在引航道内横向的分流比,可以明显改善泄水 口附近的水位壅高问题,降低停泊段的水位变幅, 从而显著改善船舶泊稳条件。



Tab. 3 Characteristic values of water level fluctuation in downstream approach channel								
泄水口	工况		水位变化/m					
方案			泄水口顶部	消力池中部	调顺段中部	下游引航道停泊段断面1	下游引航道停泊段断面 2	
	3 min 双泄	壅高	0.95	0. 34	0. 38	0.33	0. 29	
		跌落	-0.14	-0. 48	-0. 39	-0.35	-0.30	
	4	壅高	0. 79	0. 29	0. 32	0. 27	0. 23	
	4 min 从他	跌落	-0.11	-0.37	-0.31	-0.27	-0.23	
-	न ः स्टार अप	壅高	0.64	0.25	0. 27	0. 23	0. 20	
尿刀杀	5 min 众他	跌落	-0.09	-0.28	-0.21	-0.17	-0.15	
	6 min 双泄	壅高	0. 53	0. 22	0. 22	0. 20	0. 17	
		跌落	-0.08	-0.21	-0.15	-0.12	-0.10	
	7 min 双泄	壅高	0.46	0. 20	0. 19	0. 17	0. 15	
		跌落	-0.07	-0.14	-0.10	-0.09	-0.07	
	3 min 双泄	壅高	0.78	0. 23	0. 29	0.26	0. 23	
		跌落	-0.10	-0.35	-0.28	-0.24	-0.20	
推荐 方案		壅高	0.61	0. 22	0. 24	0.21	0. 19	
	4 min 双泄	跌落	-0.11	-0.26	-0.22	-0.19	下游引航道停泊段断面 2 0.29 -0.30 0.23 -0.23 0.20 -0.15 0.17 -0.10 0.15 -0.07 0.23 -0.07 0.13 -0.10 0.12 -0.07	
	<u>雍高</u>	壅高	0.49	0. 19	0. 20	0.18	0.16	
	5 min 双袒	ain 双泄 跌落 -0.11 -0.18 -0.15 -0.13	-0.13	-0.10				
		壅高	0.41	0.16	0.17	0.15	0. 13	
	6 min 双泄	跌落	-0.10	-0.17	-0.11	-0.09	-0.07	
	न ः जनभाष	壅高	0.34	0.14	0.15	0.13	0.12	
	7 min 双泄 跌ź	跌落	-0.10	-0.13	-0.08	-0.07	-0.05	

	表 3	ト 游り 加迫り	K 12 波 37 符 位 2	且	
	1 0	• • • • •			

3 结论

 船闸下游引航道采用非对称式布置时,泄 水口消能工也应采用相对应的非对称形式,以便 合理调整下游引航道沿横向的分流比。但应注意, 消能工不应对泄水口出流造成明显的阻流作用, 否则反而会加剧分流的不均匀性。

2)通过优化泄水口内消力槛的组合布置形式,可以有效调整下游引航道横向分流比,在不改变下泄主流流场结构的前提下,适当减少停泊段侧流量,有利于改善船舶泊稳条件。

3)综合对比泄水口布置方案优化前后下游引 航道内的表面流速分布、船舶受力特性和水位波 动特性可知,合理的泄水口消能工形式可以使得 船闸下泄水体更快均匀化,引航道水位波动更小, 船舶纵向受力显著减小。

参考文献:

- 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通 出版社, 2002.
 Code for master design ofshiplocks: JTJ 305-2001[S].
 Beijing: China Communications Press, 2002.
- [2] 陈明,段黎明,王多银,等.融江麻石船闸改扩建工程下引航道通航水流条件模型试验[J].水运工程,2020(7): 175-180,193.

CHEN M, DUAN L M, WANG D Y, et al. Model experiment of navigable flow conditions of low approach channel for expansion project of Mashi lock in Rongjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2020 (7): 175-180, 193.

[3] 黄伦超,李珊,游涛,等.双线船闸共用下游引航道水流
 特性及其影响[J].交通科学与工程,2012,28(4):
 37-44.

HUANG L C, LI S, YOU T, et al. Flow characteristics and effects on the approach channel during the co-operation of the double-laneshiplock [J]. Journal of transport science and engineering, 2012, 28(4): 37-44.

[4] 周作茂,陈野鹰,杨忠超.双线船闸引航道水力特性数

值模拟[J]. 水利水运工程学报, 2013(4): 67-72.

ZHOU Z M, CHEN Y Y, YANG Z C. Numerical simulation of hydraulic characteristics of a double-line locks approach channel [J]. Hydro-science and engineering, 2013(4): 67-72.

- [5] 齐庆辉,曲红玲,东培华,等.韩庄双线船闸下游引航道 水力特性模拟研究[J].水运工程,2015(9):117-122.
 QIQH,QUHL,DONGPH, et al. Flow characteristics simulation of double-paralleling-lane locks' lower approach channel [J]. Port & waterway engineering, 2015(9): 117-122.
- [6] 徐进超, 宣国祥, 刘本芹, 等. 贵港二线船闸下引航道物 理模型试验研究[J]. 水利水运工程学报, 2017(6):
 9-13.

XU J C, XUAN G X, LIU B Q, et al. Model test study of low approach channel of Guigang second line shiplock [J]. Hydro-science and engineering, 2017(6): 9-13.

 [7] 王勤振,邹永超,汤建宏.某扩容改造船闸工程闸位平 面布置[J].水运工程,2017(12):179-184.

WANG Q Z, ZOU Y C, TANG J H. General layout of lock position of a ship lock expansion and renovation engineering[J]. Port & waterway engineering, 2017(12): 179-184.

[8] 李加浩.双线船闸共用引航道非恒定流特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.

LI J H. Study on the characteristics of unsteady flow of the approach in double line lock [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.

[9] 朱鹏.沿江口门船闸调度运行模式思考[J].中国水运,2018(11):44-45.

ZHU P. Thinking on the operation mode of ship lock dispatch along the river estuary[J]. China water transport, 2018(11):44-45.

[10] 王崇宇,周丁,唐玉元.不同级别船闸共用引航道的水 流条件研究[J].水运工程,2019(3):110-115.
WANG C Y, ZHOU D, TANG Y Y. Study on flow conditions of approach channel shared by different levels of ship locks[J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 110-115.

- [11] 张震,王勤振.某枢纽船闸输水系统水力学模型试验[J].水运工程,2022(4):111-115,132.
 ZHANG Z, WANG Q Z. Hydraulic model tests for water delivery system of junction lock [J]. Port & waterway engineering, 2022(4):111-115, 132.
- [12] 杨嵚. 临涣船闸下游引航道优化设计[J]. 水运工程, 2023(11):153-157.

YANG Q. Optimal design of downstream approach channel of Linhuan ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2023(11): 153-157.

 [13] 张墨羽.双线船闸共用引航道的尺度设计研究[J].产 业创新研究,2023(6):114-116.
 ZHANG M Y. Study on scale design of shared approach channel for double-lineshiplock[J]. Industrial innovation, 2023(6): 114-116.

- [14] 周权. 白石窑双线船闸共用下引航道通航水流条件研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
 ZHOU Q. Study on navigation flow condition in common lower approach channel of baishiyao double-line ship lock[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [15] 李华勇, 严秀俊, 徐进超, 等. 万安枢纽二线船闸通航 水流条件数值模拟研究[J]. 中国水运, 2023, 23(8): 36-37, 40.

LI H Y, YAN X J, XU J C, et al. Study on numerical simulation of navigable flow conditions in Wanan second-line ship lock [J]. China water transport, 2023, 23(8): 36-37, 40.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第86页)

- [10] 赵丽梅, 王路, 聂锐华. 非恒定流作用下淹没式矮堰浑水冲刷机理研究[J]. 四川水利, 2023, 44 (4): 1-4.
 ZHAO L M, WANG L, NIE R H. Study on the scour mechanism of submerged low weirs under unsteady flow[J]. Sichuan water resources, 2023, 44(4): 1-4.
- [11] 钟亮,姜利,姜彤,等.非恒定流作用下的阶梯形丁坝
 局部冲刷特性 [J].长江科学院院报,2022,39 (4):
 91-98.

ZHONG L, JIANG L, JIANG T, et al. Local scour characteristics of step-shaped spur dike under unsteady flow [J]. Journal of Yangtze River scientific research institute, 2022, 39(4):91-98.

[12] 苏伟, 王平义, 胡宝月. 丁坝周围水流紊动特性与地形 冲刷的关系[J]. 水运工程, 2016(4): 129-135.
SU W, WANG P Y, HU B Y. Relationship between terrain erosion and flow turbulence characteristics around spur dike [J]. Port & waterway engineering, 2016(4): 129-135.

[13] 喻涛, 王平义, 陈里, 等. 非恒定流作用下丁坝局部冲刷研究 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2014, 46(3): 31-36.

YU T, WANG P, CHEN L, et al. Local scour of spur dike in unsteady flow [J]. Journal of Sichuan University (engineering science edition), 2014, 46(3): 31-36.

- [14] 温致宇.水流非恒定性对丁坝稳定性的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2023.
 WEN Z Y. Study on the influence of unsteady flow characteristics on the stability of spur dike [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [15] 喻涛.非恒定流条件下丁坝水力特性及冲刷机理研 究[D].重庆:重庆交通大学, 2013.
 YU T. Study on the hydraulic characteristics and scour mechanism of spur dike in unsteady flow [D].
 Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.

(本文编辑 赵娟)