

· 航道及通航建筑物 ·



剑潭双线船闸泄水口及下引航道 通航水流条件模型试验*

王召兵¹, 倪自强¹, 陈亮², 王蛟¹, 谢春航¹

(1. 重庆交通大学, 西南水利水运工程科学研究院, 重庆 400016;

2. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 402247)

摘要: 针对剑潭双线船闸存在的平面尺度大、输水强度高, 下游共用引航道宽度有限、可能存在回流、斜流等水力学问题, 采用比尺 1:30 的物理模型, 对剑潭双线船闸泄水口及下引航道通航水流条件进行模型试验研究。结果表明, 剑潭双线船闸泄水口采用部分旁侧泄水形式布置是合理的; 增设透空分水墙可以减弱隔流堤头回流强度; 双线船闸同时泄水时, 共用引航道内流速较大, 采用错峰泄水或反向运行方式可以将流速降至规范限值以内。采取相应优化措施后, 在设计最不利水头组合工况下, 剑潭船闸输水系统泄水口及下引航道各项水力指标均能满足设计和规范要求。研究成果可供类似工程参考借鉴。

关键词: 剑潭船闸; 物理模型; 共用引航道; 水流条件

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)01-0076-09

Experimental study on navigable flow conditions at outlet and downstream approach channel of Jiantan double-line ship lock

WANG Zhaobing¹, NI Ziqiang¹, CHEN Liang², WANG Jiao¹, XIE Chunhang¹

(1. Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China;

2. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 402247, China)

Abstract: Aiming at the large plane scale, high water transfer intensity, limited width of downstream common approach channel, possible backflow, oblique flow and other hydraulic problems of Jiantan double-line ship lock, a physical model with a scale of 1:30 is used to study the navigable flow conditions at the outlet of Jiantan double-line ship lock and the downstream approach channel. The results show that it is reasonable to adopt partial lateral drainage arrangement at the sluice of Jiantan double-line ship lock. Adding a permeable water separation wall can weaken the backflow strength of the barrier head. When the double-line lock drains at the same time, the flow velocity in the common approach channel is large, and the flow velocity can be reduced to the standard limit by adopting the mode of cross-peak discharge or reverse operation. After taking the corresponding optimization measures, the hydraulic indexes of the drainage outlet and the lower approach channel of Jiantan Lock water delivery system can meet the design and specification requirements under the design of the most unfavorable head combination condition. The research results can be used as reference for similar projects.

Keywords: Jiantan ship lock; physical model; shared approach channel; flow condition

东江河源—石龙航道扩能升级工程是广东省“八通、两横、一网、三连、四线”航道新格局的重要组成部分, 剑潭枢纽为东江河源—石龙航道

扩能升级工程最下游的梯级工程, 剑潭船闸是东江扩能改造工程中平面尺度最大、设计水头最高的船闸。设计航道尺寸为 2.5 m × 60 m × 270 m

收稿日期: 2024-03-19

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206105)

作者简介: 王召兵(1972—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为船闸水力学。

(水深×航道宽度×最小弯曲半径), 船闸闸室有效尺寸为双线(280 m×34 m+280 m×16 m)(闸室长×闸室宽)×4.5 m(门槛水深), 设计最大水头为 11.18 m(上游 11.24 m、下游 0.06 m), 船闸上游引航道宽度为 105 m, 下游引航道宽度为 69 m。

根据《广东省航道发展规划(2020—2035 年)》要求, 拟改扩建剑潭船闸等级按Ⅲ级标准建设, 设计船型为 1 000 吨级。由于其船闸平面尺度大、水头高, 要求的充泄水时间短、强度大, 船闸引航道水域狭窄, 且双线船闸共用引航道可能会产生局部区域超出规范要求的纵、横向流速和回流流态、水面涌浪、往复流等水力学问题^[1]; 设计初选的船闸输水系统采用闸墙长廊道侧支孔形式+旁侧泄水^[2], 闸墙长廊道侧支孔输水系统结构简单、输水效率高、造价低廉, 被广泛应用于中低水头、大尺度船闸设计之中^[3]。

由于剑潭枢纽横向布置空间有限, 下游共用引航道底宽仅 69 m 且较为弯曲, 双线船闸泄水时易产生较大的纵、横向流速, 甚至是斜流、回流等不良流态。为解决双线船闸共用引航道内的水力学问题, 诸多学者开展了大量研究^[4-5], 张墨羽^[6]分析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, 提出了提升船闸运维效率的共用引航道布置方法。周权^[7]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。王崇宇等^[9]采用二维水流数学模型

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。针对双线船闸, 采用集控调度运行模式可以大大提升效率^[10-11]。周作茂等^[12]依托长沙综合枢纽工程, 采用三维数值模拟方法, 分析不利水流条件下的波高、波速、水面比降以及系缆力等因素对共用引航道内通航水流条件的影响, 提出多种改善措施。齐庆辉等^[13]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。黄伦超等^[14]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等工况的计算结果进行分析, 得出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。

本文依托剑潭双线船闸工程, 在船闸输水系统布置、水力计算分析和数学模型研究的基础上^[15], 针对下游共用引航道水域狭窄, 可能会产生局部区域超出规范要求的纵、横向流速和回流流态、水面涌浪、往复流等水力学等问题进一步开展物理模型试验研究, 旨在为船闸设计优化提供科学依据, 保障船闸及过闸船舶的安全。

1 船闸整体布置及物理模型设计

1.1 船闸整体布置

如图 1 所示, 新建船闸在原址改建, 两线船闸共用上引航道, 为利用原有船闸主体结构, 节约占地, 两线船闸错位布置。上引航道布置有主、辅导航墙与靠船墩, 两线船闸之间利用原有船闸结构作为中隔墩。

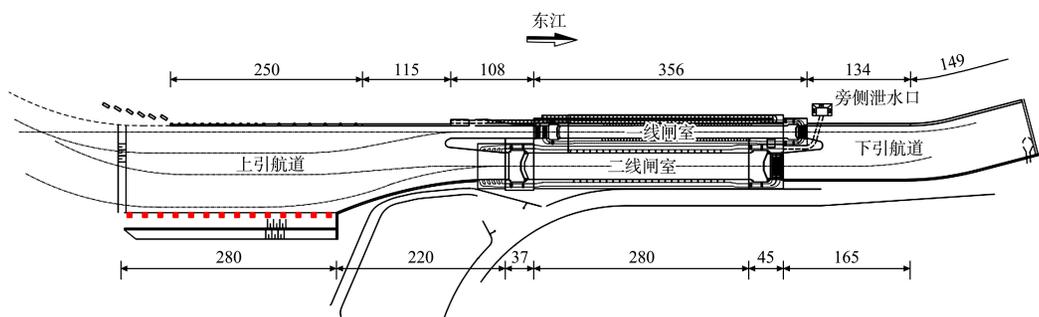


图 1 剑潭船闸总体布置 (单位: m)

Fig. 1 General layout of Jiantan ship lock (unit: m)

一线船闸闸室共长 280 m，闸室每侧共布置 49 个出水支孔，孔间距 4.0 m，两侧出水支孔错开布置；出水支孔总断面面积为 24 m²。二线船闸闸室共长 280 m，闸室每侧共布置 24 个出水支孔，孔间距 8.5 m，两侧出水支孔错开布置；出水支孔总断面面积为 51.84 m²。

二线船闸共用下游引航道，下游引航道布置有主、辅导航墙、中隔墩及靠船墩。上、下游共用引航道布置于右岸陆域，不影响河道行洪，并在下引航道采用隔水墙将引航道与右汊河道隔开，尽量减少泄水闸泄流及电站尾水对下游口门区通航水流条件的影响。

下游分水墙与导航墙衔接，采用直立式胸墙，

全长 149 m，含 53 m 弯段和 96 m 直段。二线船闸侧导航墙布置与一线船闸侧相同，后接 343 m 直线段过渡，然后布置 420 m 停泊段。

如图 2 所示，剑潭一线船闸下游泄水口采用顶部出水格栅式消能池。下闸首两侧廊道出水口均设置于垂直导航墙上，每侧布置 2 个，水流通过出水口的格栅消能后泄于下引航道内。消能格栅顶面格栅两侧均为对称式布置，采用渐缩式出水口。考虑到剑潭船闸下游引航道宽度不足，剑潭二线船闸采用格栅顶部出流+旁侧泄水的组合泄水方式，消能格栅顶面格栅为非对称式布置，采用渐缩式泄水口，旁侧泄水廊道泄水口设置于一线船闸外侧，通过分水墙与引航道隔开。



图 2 泄水口布置形式 (单位: m)
Fig. 2 Drainage layout (unit: m)

1.2 物理模型设计

根据试验要求及试验场地规划，以重力相似准则建立比尺为 1:30 的整体水工物理模型，见图 3。模型模拟上/下游引航道、闸室及输水廊道等输水系统的主要结构，模拟上游引航道 600 m、船闸主体长度约 400 m、下游引航道 1 150 m。为使模型糙率尽可能接近于原型，达到阻力相似，同时便

于观察阀门廊道段流态，输水廊道主要采用有机玻璃和聚氯乙烯塑料板制作。其中廊道进(出)口、上/下游阀门段用有机玻璃制作，主廊道、支孔和出口消能格栅由塑料板制作，闸室两侧墙上部由玻璃框架、下部由钢板框架装配而成，试验船模由白铁皮制作，其体型、尺寸、吃水深度及排水量与原型设计船舶完全相似。



图 3 剑潭双线船闸物理模型
Fig. 3 Physical model of Jiantan double-line ship lock

2 试验结果分析

2.1 共用引航道流态

在最不利水位组合工况下(11.24 m-0.06 m 水位组合,最大设计水头 11.18 m),船闸下游采用原设计方案时,典型工况下(闸门开启时间 $T_v = 6$ min)双边泄水时下游引航道内水流流态见图 4。

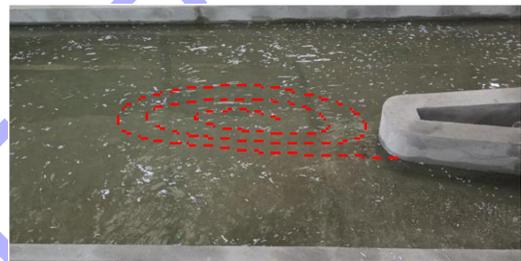
一线船闸单独泄水时,整个泄水过程中格栅消能室顶部出流呈现水面壅高现象,各格栅出流壅高差异不大,水历经下游引航道渐扩段逐步扩散,中后期二线船闸下游渐扩段附近形成动静水剪切区,进而发展成一个大型的回流区,但回流强度不大,水面有一定波浪,随水流不断下泄,水面波动不断减弱,符合规范要求。

二线船闸单独泄水时,整个泄水过程中格栅消能室顶部出流呈现水面壅高现象,各格栅出流壅高差异不大,水历经下游引航道渐扩段逐步扩散,在一线船闸下游渐扩段附近形成动静水剪切区,中后期发展成一个大型的回流区,随水流不断下泄,水面波动不断减弱。二线船闸引航道内为单边泄水,水流下泄均匀度较好,但由于下引航道宽度有限,对一线船闸侧冲击较强。旁侧泄水出水口水面壅高明显,水体向四侧翻滚出流,由于主河道侧地形起伏较为明显,水流下泄时水面波动较大,且在引航道分水墙末端形成一个回流区,但回流强度较弱,距离停泊段较远,对停

泊段泊稳条件影响不大。

两线船闸同时泄水时,引航道内两线船闸出流量相差不大,引航道内整体出流较为均匀,未形成回流区。二线船闸部分水体经旁侧泄水出流,受物理模型模拟边界影响,在分水墙末端开始向引航道内汇流,但停泊段未形成漩涡等不良流态。

设计方案下引航道内流态表明,一、二线船闸单独泄水时,受隔流墩堤头效应影响及动静水的剪切作用,容易形成回流,对船舶航行有较大影响。拟采用分水墙挂板分离表流以消减回流强度及范围,分水墙设计见图 5。



a) 一线船闸单独泄水



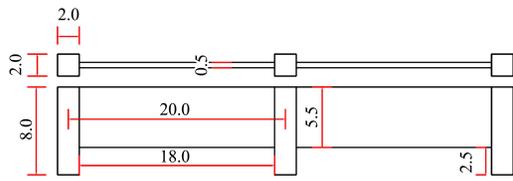
b) 二线船闸单独泄水



c) 一、二线船闸同时泄水

图 4 典型工况下双边泄水时下引航道流态

Fig. 4 Flow patterns of downstream approach channel under typical conditions of bilateral discharge



a) 尺寸(单位: m)



b) 实物照片

图5 分水墙设计

Fig. 5 Design of divider wall

试验后得到修改方案船闸流态如图6所示, 增添挂板后, 由隔流墩堤头引起的回流现象得到明显改善, 船闸泄水对另一侧船闸的斜向冲击明显减弱。回流强度明显减小, 回流流速小于 0.3 m/s, 满足规范要求; 回流范围在 40 m 内, 仅限于引航道调顺段, 对停泊段基本无影响。

经试验分析得出, 采用分水墙挂板分离表流以消减回流强度及范围是可行的, 工程建设可采用。虽然挂板分水墙能较好地解决引航道内回流问题, 但由于剑潭船闸下游引航道较窄, 增加分

水墙会进一步缩窄引航道, 增大船舶操纵难度, 利弊兼具。



a) 一线船闸



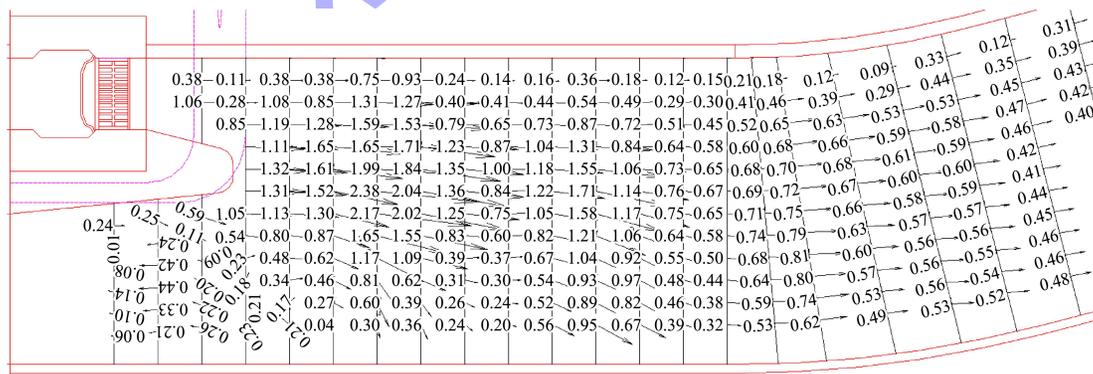
b) 二线船闸

图6 修改方案船闸流态

Fig. 6 Flow patterns in ship locks of modified scheme

2.2 表面流速

设计方案下引航道内典型工况下流速分布见图7。由图7可知, 一线船闸单独泄水时, 引航道渐扩段局部流速接近 2 m/s; 随着水流下泄不断扩散, 到达引航道转弯段时, 流速降至 0.5 ~ 0.8 m/s; 停泊段流速在 0.3 m/s 左右, 且基本无横向水流。



a) 一线船闸单泄

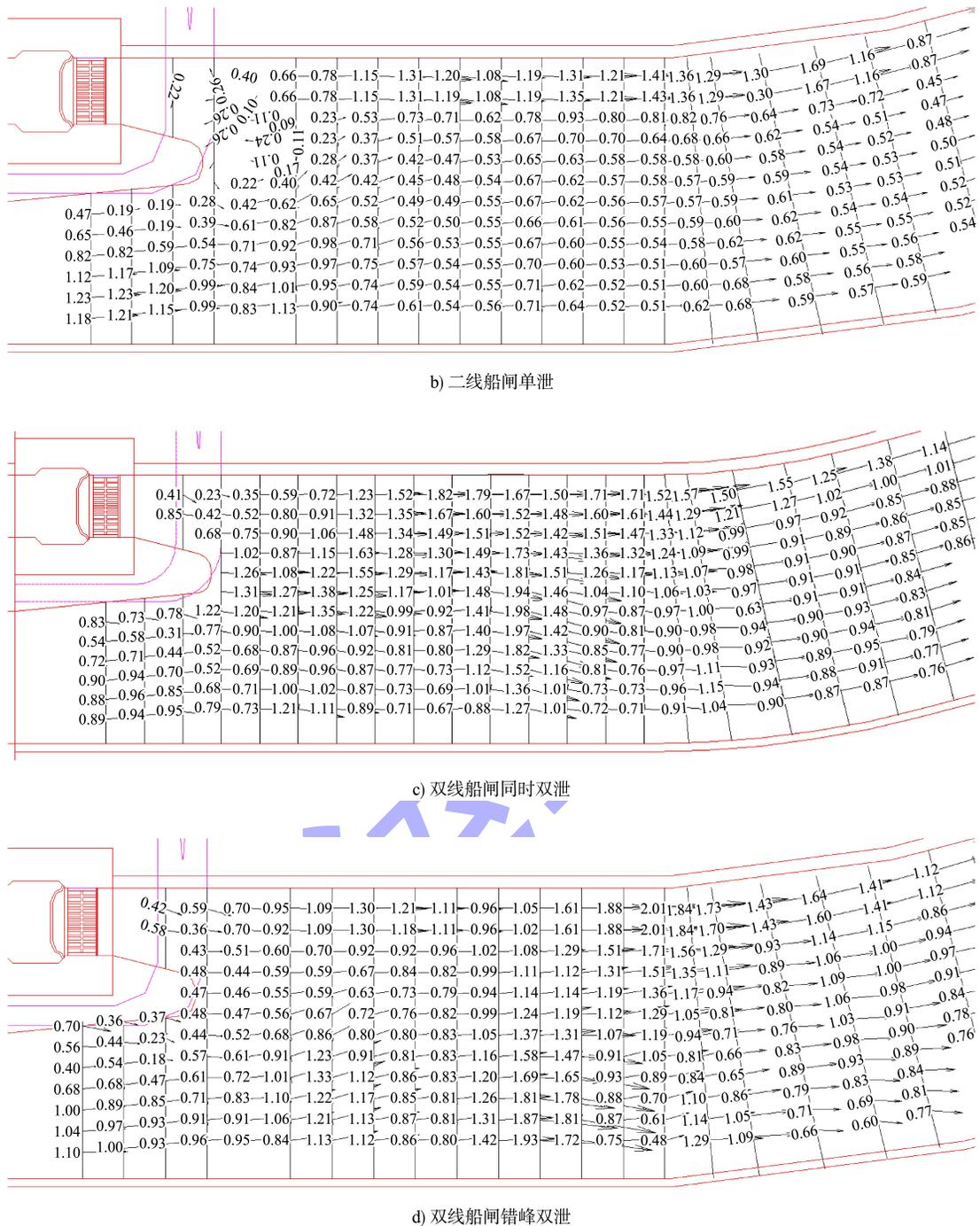


图 7 原方案 $T_v = 5 \text{ min}$ 时下引航道内流速分布 (单位: m/s)

Fig. 7 Velocity distribution in downstream approach channel in original scheme when $T_v = 5 \text{ min}$ (unit: m/s)

二线船闸单独泄水时, 引航道渐扩段局部流速在 1 m/s 左右; 随着水流下泄不断扩散, 到达引航道转弯段时, 流速降至 0.8 m/s 以内; 停泊段流速在 $0.3 \sim 0.6 \text{ m/s}$, 且横向流速较小。一线船闸下游渐扩段宽度较二线船闸缩减一半, 因此渐扩段流速更大。二线船闸单独泄水时, 虽然停泊段部

分区域流速超过 0.5 m/s , 为波动自然传播所致, 作用时间及范围均有限, 且流速略大于 0.5 m/s 的区域距离靠船墩超过 2 倍船宽, 对停泊段泊稳条件影响不大, 因此不影响船舶停靠, 满足规范要求。

双线船闸同时泄水时 ($T_v = 5 \text{ min}$ 双泄), 引航

道渐扩段局部流速接近 2 m/s；随着水流下泄不断扩散，到达引航道转弯段时，流速仍在 1 m/s 以上；停泊段整体流速在 0.6 m/s 以上，说明剑潭船闸受布置条件影响，下游引航道宽度较窄，双线船闸同时泄水时，下引航道内整体流速较大，停泊段整体流速超过规范限值，对停泊段泊稳条件影响较大。

双线船闸采用错峰泄水时 ($T_v = 5 \text{ min}$ ，错峰时间 5 min)，不论是一线还是二线船闸先泄水，另一线船闸采用错峰泄水后，引航道内流速可降至 1 m/s 以内，停泊段流速可降至 0.5 m/s 以内，满足规范要求。

综上所述，剑潭船闸采用 $T_v \geq 5 \text{ min}$ 单线双边泄水时，下引航道及靠泊段流速均能满足规范要

求，结合流态分析可知，由于引航道宽度有限，单线船闸泄水中后期会形成一定范围的回流区，对另一线船闸船舶进闸有一定影响但不影响船舶停靠，因此靠泊段流速满足规范要求。双线船闸同时泄水时，引航道及停泊段流速均超过规范限值，不宜采用；双线船闸同向运行时采用错峰泄水的运行方式可以将流速降至规范限值以内。

修改方案推荐工况下引航道内流速分布如图 7 所示。剑潭船闸单线双边泄水时 ($T_v = 5 \text{ min}$)，引航道及停泊段整体流速极值差别不大，但引航道渐扩段的流场结构有所改善，受分水墙分流影响，隔流堤下游的回流区范围及强度均明显降低，一线船闸单独泄水进入另一线船闸侧引航道的斜流得到较好控制。

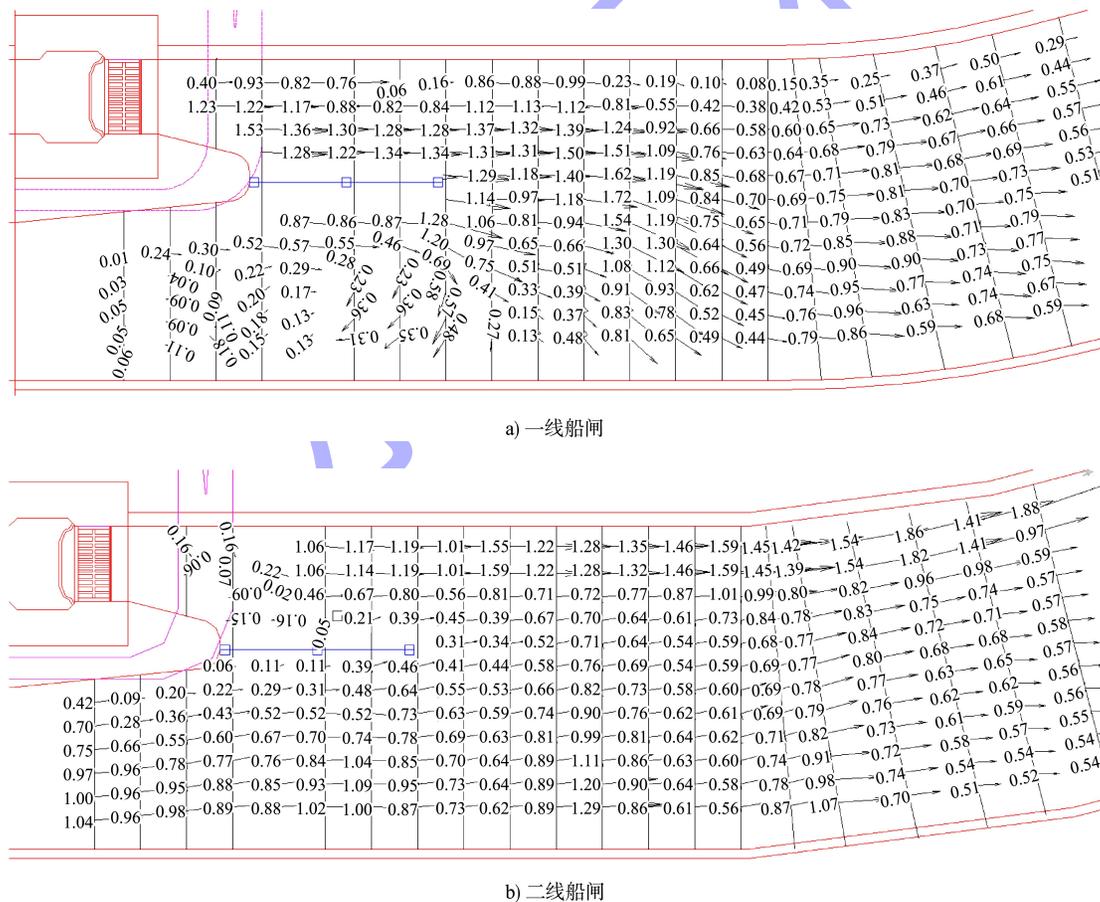


图 8 修改方案 $T_v = 5 \text{ min}$ 时双泄工况流场 (单位: m/s)

Fig. 8 Flow field under double drainage condition in modified scheme when $T_v = 5 \text{ min}$ (unit: m/s)

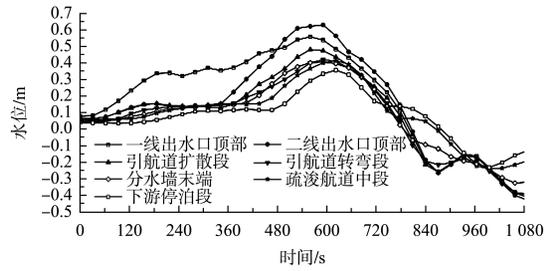
2.3 水位波动

如图 9 所示，一线船闸单独双边泄水过程中，

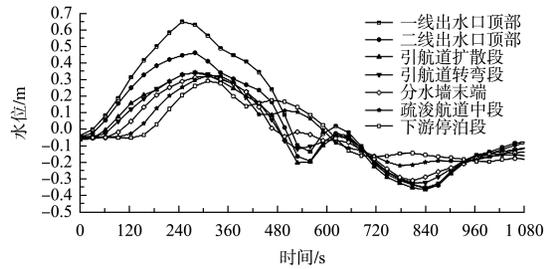
除一线船闸泄水口壅高较大外，引航道其他区域水面波动不大，水位下跌、壅高值都在 20 cm 以

内, 二线船闸单独双边泄水过程中, 水面波动较大, 跌水、壅高值均在 40 cm 左右, 停泊段跌水、壅高值在 25~30 cm。双线船闸阀门双边开启 $T_v = 4 \sim 6$ min 同时泄水过程中, 引航道水位变幅较大, 对船舶停泊安全影响较明显, 实测最大壅高值接近 1 m, 形成了明显的反向作用水头, 对人字门的安全影响较大。双线船闸阀门双边开启 $T_v = 4 \sim 6$ min 错峰泄水过程中(错峰时间为阀门开启时间, 一线船闸先泄水), 引航道内水位波动明显降低, 水面下跌基本控制在 40 cm 以内, 壅水基本控制在 50 cm 以内, 虽然试验人字门前壅水较高, 但此时闸室内有一定水深, 不会形成反向水头, 对人字门结构无不利影响, 对停泊段泊稳影响明显降低。

综上, 剑潭双线船闸单独泄水时, 下游引航道内水位变幅基本可控, 对停泊段泊稳条件的影响较小; 双线船闸同时泄水时, 由于下引航道过流面积有限, 引航道内水位变幅较大, 对停靠船舶安全不利, 不应采用该工况; 同向运行时可通过错峰泄水的方式来改善, 错峰时间应不小于阀门开启时间。



c) 双线船闸同时双泄

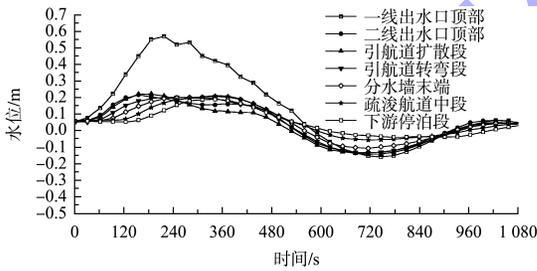


d) 双线船闸错峰双泄

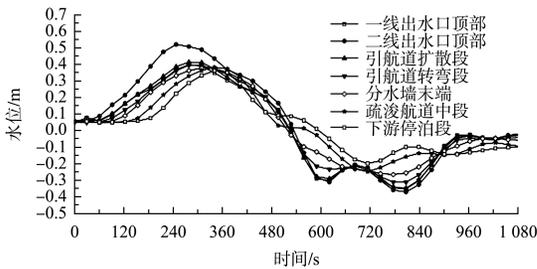
图 9 不同工况下 $T_v = 5$ min 时船闸泄水水位波动
 Fig. 9 Fluctuation of lock discharge water level under different conditions when $T_v = 5$ min

2.4 停泊段系缆力

系缆力试验以 67.50、49.98 m 长船型为例, 下引航道停泊段船舶最大平均系缆力见表 1。由表可知, 剑潭船闸单线双边泄水时 ($T_v = 4 \sim 6$ min), 下游停泊段系缆力均满足规范限值(2 000 t 纵向系缆力 40 kN, 横向系缆力 20 kN; 1 000 t 纵向系缆力 32 kN, 横向系缆力 16 kN), 双线船闸同时泄水时 ($T_v = 4 \sim 6$ min), 部分工况纵向系缆力超过规范限值, 横向系缆力虽未超过规范限值, 但已十分接近。采用错峰泄水的调控方法, 停泊段系缆力可以得到较大改善, 满足规范要求并具有一定富余度。对比不同船型相同工况下系缆力可知, “宽短”船型(49.98 m×12.8 m×2.2 m)实测系缆力较标准船型(67.50 m×10.8 m×2.0 m)偏大, 增幅在 10%~30%。



a) 一线船闸双泄



b) 二线船闸双泄

表1 下引航道停泊段船舶平均最大系缆力

Tab.1 Average maximum mooring force in berthing section of downstream approach channel

船型尺寸 (长×宽× 吃水深度)	工况 泄水方式	系缆力 部位	平均最大系缆力/kN		
			$T_v =$ 4 min	$T_v =$ 5 min	$T_v =$ 6 min
67.50 m× 10.8 m× 2.0 m	一线船闸双泄	前纵	15.8	15.2	13.6
		前横	7.5	7.0	6.2
		后横	8.9	8.5	7.3
	二线船闸双泄	前纵	20.5	19.2	17.9
		前横	8.6	7.7	8.0
		后横	11.6	10.5	9.2
	双线同时双泄	前纵	32.6	24.8	21.8
		前横	15.8	10.6	8.9
		后横	11.6	9.4	10.7
	双线错峰双泄 (一线船闸先泄)	前纵	16.1	14.9	13.8
		前横	8.8	7.6	6.5
		后横	9.5	11.2	6.2
双线错峰双泄 (二线船闸先泄)	前纵	22.0	19.1	21.5	
	前横	10.8	9.3	8.8	
	后横	11.9	10.6	11.3	
49.98 m× 12.8 m× 2.2 m	一线船闸双泄	前纵	24.1	23.6	22.2
		前横	9.9	8.2	8.5
		后横	14.5	11.8	11.1
	二线船闸双泄	前纵	26.5	18.1	18.6
		前横	8.6	9.2	10.9
		后横	10.1	11.3	10.5
双线同时双泄	前纵	38.0	35.4	31.5	
	前横	13.6	14.2	12.5	
	后横	15.2	15.4	14.8	

3 结论

1) 剑潭一线船闸采用“顶部格栅式消能室”出水形式、二线船闸采用“格栅顶部流出+旁侧泄水”的整体布置形式是合理的。

2) 通过在下游引航道隔流堤头增设分水墙,可以有效消减回流强度及范围,优化通航水流条件。

3) 由于剑潭船闸下引航道过流面积有限,双线船闸同时泄水时,流速较大,通过双线船闸错峰泄水或反向运行可将下泄水流流速调控至规范限值以内,错峰时间应不小于阀门开启时间。

4) 通过系列优化试验,在推荐运行方式下,

剑潭双线船闸下引航道内的波动、流速及停泊段系缆力等均满足设计规范要求。

参考文献:

- [1] 王召兵,陈亮,周家俞,等.共用引航道船闸下游引航道的平面布置[J].水运工程,2018(1):117-122.
- [2] 齐春风,冯小香,李君涛,等.闸墙长廊道输水系统侧支孔均匀布置的水力特性[J].水运工程,2019(5):102-108.
- [3] 张星星,许光祥,陈明栋,等.船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统水力学研究综述[J].水运工程,2018(12):110-118.
- [4] 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.
- [5] 杨钦.临涣船闸下游引航道优化设计[J].水运工程,2023(11):153-157.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [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.
- [9] 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.
- [10] 朱鹏.沿江口门船闸调度运行模式思考[J].中国水运(上半月),2018(11):44-45.
- [11] 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.
- [12] 周作茂,杨忠超,陈野鹰.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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [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.

(本文编辑 王传瑜)