剑潭双线船闸水力学特性物理模型试验研究*

吴锋箭[1]，陈　亮[2]，王　蛟[3]，吴新月[3]，袁　浩[3]
（1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司，湖南 长沙 410200；
2. 重庆西科水运工程咨询有限公司，重庆 402247；3. 重庆交通大学，重庆 400074）

摘要：针对空间受限条件下尺度差异显著的双线船闸共用引航道所引发的复杂水力学问题，依托剑潭航运枢纽双线船闸工程，采用几何比尺为 1∶30 的整体物理模型开展系统研究。结果表明，闸室宽度对船舶停泊条件具有控制作用，窄闸室在单边充水时因射流冲击剧烈导致横向系缆力易超出规范限值，而宽闸室则为水流扩散提供了充足空间；双线船闸同时充泄水时的水流叠加效应，对上、下游引航道停泊段水流条件有显著影响。采用不小于阀门开启时间的错峰调度的优化措施，可将上、下游引航道停泊段水位变幅有效控制在 20 cm 以内，系缆力也满足规范要求。

关键词：双线船闸；共用引航道；物理模型试验；水力特性；系缆力；水位波动
中图分类号：U641.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0104-09

Study on hydraulic characteristics of Jiantan double-line ship lock using physical model tests

WU Fengjian[1], CHEN Liang[2], WANG Jiao[3], WU Xinyue[3], YUAN Hao[3]
(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China;
2. Chongqing Xike Consulting Co., Ltd. for Water Transport Engineering, Chongqing 402247, China;
3. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Aiming at the complex hydraulic issues arising from shared approach channels of double-line ship locks with significant scale differences under space-constrained conditions, we conduct a systematic study using a comprehensive physical model with a geometric scale of 1∶30, on the basis of the double-line ship lock project of the Jiantan navigation hub. The results show that the ship lock chamber width has the controlling role on ship mooring conditions, revealing that narrow ship lock chambers experience intense jet impact during unilateral filling, leading to transverse mooring forces prone to exceeding code limits, whereas wide lock chambers provide ample space for water flow diffusion. The flow superposition effect during simultaneous filling and emptying of the double-line ship lock, which significantly influences the flow conditions in the mooring sections of both upstream and downstream approach channels. By implementing an optimized measure that staggered scheduling is not shorter than the valve opening time, water level fluctuations in the mooring sections of the upstream and downstream approach channels can be effectively controlled within 20 cm, while mooring forces also comply with code requirements.

Keywords: double-line ship lock; shared approach channel; physical model test; hydraulic characteristics; mooring force; water level fluctuation

东江是珠江水系三大河流之一，其航运能力对区域经济发展至关重要。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，位于东江下游惠州城区与博罗县城之间的东江河

收稿日期：2025-11-11　　**录用日期：**2025-12-29
***基金项目：**国家重点研发计划项目(2023YFC3206104)；安徽省引江济淮工程有限责任公司科技项目(YJJH-ZX-20220906500)
作者简介：吴锋箭(1982—)，男，高级工程师，从事水运工程设计及咨询工作。

段。因船舶大型化、水运需求激增导致的通行能力瓶颈[1]，改扩建船闸可以有效解决船舶严重拥堵、待闸时间长、安全隐患突出以及制约航道网络整体效能和区域经济发展等问题。剑潭双线船闸设计水头最高、闸室有效尺度最大，其通过能力直接影响东江的航运规模，通航地位十分重要。

在船闸改扩建工程中，受既有枢纽布局、地形及通航建筑物的严格限制，布置空间往往十分局促。为此，采用双线船闸并共用引航道的集约化布置方案(如马道枢纽一次建成双线[2]、桂平枢纽二线船闸不对称布置[3]、新夏港船闸闸首错开布置[4])，已成为节约土地资源、减少开挖工程量并改善引航道整体水流条件的有效工程实践。然而，该布置形式也带来了显著的水力学挑战：双线船闸在灌水与泄水过程中，水流的叠加效应极易在共用引航道内引发超过 JTS 305—2025《船闸总体设计规范》[5](简称规范)允许的纵向与横向流速、回流、水面涌浪及往复流等复杂流态，直接威胁船舶的航行与停泊安全[6]。针对此问题，既有研究通过数学模型、实船观测[7]、物理模型试验[8]及数值模拟[9-10]等多种手段，在揭示水流叠加规律的基础上，提出诸如错开灌泄水时间、优化口门宽度与引航道尺度等调控措施。另一方面，作为实现船闸高效运行的核心，输水系统的性能至关重要。闸墙长廊道侧支孔输水系统因其结构简单、造价经济、施工便捷，被广泛应用于中低水头船闸[11-12]。但该系统的固有缺陷在于，侧支孔出流相对集中，易导致闸室内水流分布不均、紊动剧烈，从而恶化了船舶的停泊条件[1-14]。为改善出流均匀性与消能效果，学者们从优化支孔面积分配[15]、在闸室及出水口增设消力槛等消能工[16]等方面进行了有益探索。

针对共用引航道及输水系统的研究已形成较为丰富的成果，尤其在水流特性识别与改善措施方面成效显著，但对于共用引航道且尺度差较大的双线船闸，现有成果仍难以完全满足其布置需求。本文依托剑潭双线船闸工程，建立比尺为 1∶30 的船闸输水系统水力学整体物理模型，重点研究船闸整体布置、输水系统水力特性以及引航道水位波动。成果可为船闸整体布置和设计优化提供科学依据，保障船闸及过闸船舶的安全，为类似工程建设提供依据或参考。

1　船闸整体布置及模型设计

1.1　船闸整体布置

新建船闸在原址改建，剑潭航运枢纽受多种因素制约，双线船闸布置空间有限，现有船闸闸室作为上游引航道的一部分，两线船闸错位布置并共用引航道。船闸闸室有效尺度为双线 280 m×34 m×4.5 m(长×宽×门槛水深)+280 m×16 m×4.5 m，上游引航道 16 m 宽船闸采用直进曲出，34 m 宽船闸采用曲进直出，下游引航道采用曲进直出方案。上、下游共用引航道，船闸上游引航道宽度为 105 m，下游引航道宽度为 69 m。剑潭船闸总体布置见图 1，输水系统主要尺寸见表 1、2。

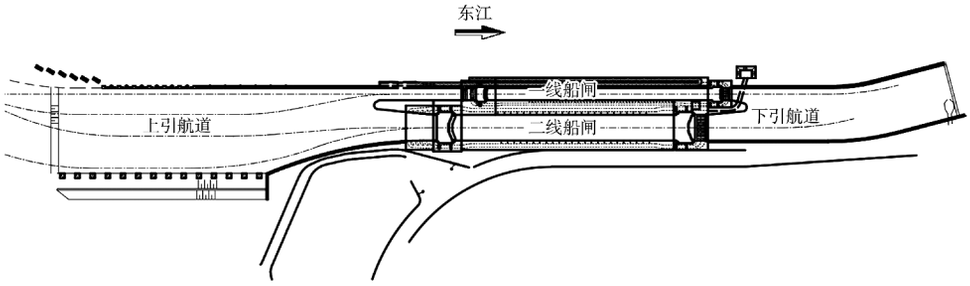


图 1　剑潭船闸总体布置

Fig. 1　General layout of Jiantan ship lock

表 1 一线船闸输水系统特征尺寸

Tab. 1 Characteristic dimensions of filling and emptying system for first line ship lock

部位	描述	宽/m	高/m	数量/个	面积/m²	与阀门面积比
进水口	进水口采用槛下输水布置,进水口顶高程 1.34 m,淹没水深 5.50 m	9.5	5.0	2	95	4.5
上闸首工作阀门段廊道	顶高程 1.34 m,淹没水深 5.50 m	3.0	3.5	2	21	1.0
上闸首充水主廊道	工作阀门后廊道为平直廊道,高 3.5 m	3.0	3.5	2	21	1.0
闸室主廊道	采用闸墙长廊道,共 2 条	3.0	4.0	2	24	1.14
闸室出水支孔	每侧 49 个,分 4 组布置	–	–	–	24	1.14
支孔组 1	每侧 13 个支孔	0.44	0.6	26	6.864	–
支孔组 2	每侧 12 个支孔	0.42	0.6	24	6.048	–
支孔组 3	每侧 12 个支孔	0.40	0.6	24	5.760	–
支孔组 4	每侧 12 个支孔	0.37	0.6	24	5.328	–
下闸首工作阀门段廊道	廊道顶高程-5.44 m,淹没水深 5.5 m	3.0	3.5	2	21	1.0
下闸首泄水主廊道	工作阀门后廊道为平直廊道,高 3.5 m	3.0	3.5	2	21	1.0
出水口	采用格栅出流,出水口顶高程-5.44 m	9.2	3.0	2	55.2	2.6

表 2 二线船闸输水系统特征尺寸

Tab. 2 Characteristic dimensions of filling and emptying system for second line ship lock

部位	描述	宽/m	高/m	数量/个	面积/m²	与阀门面积比
进水口	侧墙垂直多支孔输水,顶高程 1.34 m,淹没水深 5.50 m	4.2	5.0	10	210	4.67
上闸首工作阀门段廊道	顶高程 1.34 m,淹没水深 5.50 m	4.5	5.0	2	45	1.0
上闸首充水主廊道	平直廊道,高 5 m	4.5	5.0	2	45	1.0
闸室主廊道	闸墙长廊道,共 2 条	4.5	5.8	2	52.2	1.16
闸室出水支孔	每侧 24 个,分 3 组	–	–	–	51.84	1.15
支孔组 1	每侧 8 个支孔	1.0	1.2	16	19.20	–
支孔组 2	每侧 8 个支孔	0.9	1.2	16	17.28	–
支孔组 3	每侧 8 个支孔	0.8	1.2	16	15.36	–
下闸首工作阀门段廊道	顶高程-5.44 m,淹没水深 5.5 m	4.5	5.0	2	45	1.0
下闸首泄水主廊道	平直廊道,高 5 m	4.5	5.0	2	45	1.0
出水口	格栅出流,顶高程-5.44 m	22	5.0	2	220	4.88

1.2 模型整体设计

根据试验要求及实际试验场地规划，选择模型几何比尺 $\lambda_L = 30$，按重力相似准则，可推导出其他相关要素比尺与几何比尺的关系，见表 3。剑潭船闸模型布置见图 2。模型模拟了上、下游引航道、闸室及输水廊道等输水系统主要结构，模拟上游约 600 m、船闸主体段约 400 m、下游约 1 150 m，模拟原型总长约 2 150 m。

表 3 模型比尺

Tab. 3 Model scale ratios

名称	比尺关系	比尺值
几何比尺	λ_L	30
流速比尺	$\lambda_v = \lambda_L^{0.5}$	5.48
流量比尺	$\lambda_Q = \lambda_L^{2.5}$	4 929.5
时间比尺	$\lambda_t = \lambda_L^{0.5}$	5.48
压力比尺	$\lambda_p = \lambda_L$	30
重力比尺	$\lambda_W = \lambda_L^3$	27 000
糙率比尺	$\lambda_n = \lambda_L^{1/6}$	1.763

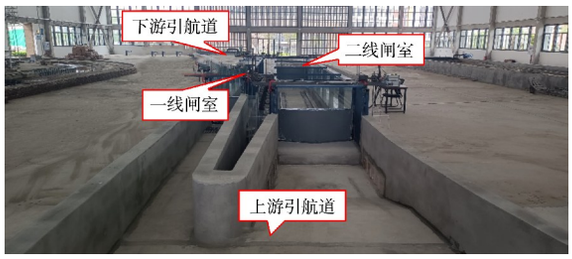


图 2 剑潭船闸物理模型布置

Fig. 2 Layout of physical model for Jiantan ship lock

水运工程

2　输水系统水力特性

为确定原型合理的阀门开启时间，在上游最高通航水位 11.24 m-下游最低通航水位 0.06 m 最不利水位组合下，对阀门双边开启时间 t_v 为 4~7 min 和阀门单边开启时间 t_v 为 7、8 min 的船闸充泄水过程进行试验研究，输水主要特征值见表 4、5。

表 4　一线船闸非恒定流水力特性参数

Tab. 4　Hydraulic characteristic parameters of first line ship lock under unsteady flow conditions

过程	阀门开启方式	开启时间/min	闸室充(泄)水时间/min	最大流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	水位瞬时最大变幅/($m \cdot s^{-1}$)
充水	双边	4	9.8	167	0.033
		5	10.2	157	0.031
		6	10.6	148	0.029
		7	11.2	140	0.028
	单边	7	20.0	85	0.017
		8	20.9	80	0.016
泄水	双边	4	10.4	160	0.031
		5	10.8	147	0.029
		6	11.3	139	0.027
		7	12.0	132	0.026
	单边	7	21.0	80	0.016
		8	21.8	75	0.015

表 5　二线船闸非恒定流水力特性参数

Tab. 5　Hydraulic characteristic parameters of second line ship lock under unsteady flow conditions

过程	阀门开启方式	开启时间/min	闸室充(泄)水时间/min	最大流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	水位瞬时最大变幅/($m \cdot s^{-1}$)
充水	双边	4	9.2	365	0.033
		5	9.8	340	0.031
		6	10.6	321	0.029
		7	11.6	305	0.028
	单边	7	18.3	195	0.018
		8	19.3	188	0.017
泄水	双边	4	9.9	342	0.031
		5	10.7	320	0.029
		6	11.5	306	0.028
		7	12.4	294	0.027
	单边	7	19.3	179	0.016
		8	20.4	170	0.016
		7(旁泄)	20.3	170	0.016
		8(旁泄)	21.4	161	0.015

试验结果表明，一线船闸双边充泄水各水力特征值均满足规范要求，推荐阀门双边连续开启 t_v=5 min 方式相应的一线船闸充水时间为 10.2 min，泄水时间为 10.8 min，充、泄水平均时间为 10.5 min，满足船闸设计通过能力要求；二线船闸双边充泄水各水力特征值均满足规范要求，推荐充、泄水阀门均采用 6 min 及以内双边匀速开启，输水时间即可满足设计要求的 11 min 以内。一、二线船闸单边阀门充、泄水为非正常工况，除输水时间较长外，其余各水流特性指标均满足规范要求。

二线船闸因输水系统关键断面过流能力显著大于一线船闸，导致其水力特性存在明显差异。在相同阀门开启时间下，二线船闸充水时间较一线船闸更短，且最大流量远超一线船闸，二线船闸主廊道面积及出水支孔总面积约为一线船闸的两倍，使其具备更强的输水能力。此外，两线船闸进水方式的不同，一线为槛下进水，二线为侧墙多支孔进水；出水支孔布置形式也存在差异，一线采用渐变尺寸以优化均匀性，二线采用等尺寸，影响了下游流速分布与能量集中特性，因此两线船闸在充、泄水效率与流量峰值上有区别，但水位瞬时变幅相近的结果表明两种布置均能有效控制非恒定流的不利影响。

3　闸室系缆力分析

本文对典型工况下的闸室船舶系缆力进行对比分析。本阶段采用一种船型进行系缆力试验研究，船舶尺度为：1 000 吨级散货船，67.5 m×10.8 m×2.0 m(长×宽×吃水)。试验水位采用最水利水位组合，阀门开启方式为双边 t_v 为 5~7 min 开启和单边 t_v 为 7~8 min 开启，由于剑潭双线船闸闸室均较长，因此进行船舶停于闸室中、下部系缆力试验，实测系缆力见表 6。

水运工程

表 6 船舶系缆力

Tab. 6 Ship mooring force kN

船闸	消能工	船舶位置	系缆力部位	阀门双边开启			阀门单边开启	
				5 min	6 min	7 min	7 min	8 min
一线	一道连续消力槛	闸室中部	前纵	9.5	8.5	8.1	6.4	6.0
			前横	4.5	4.0	3.9	17.2	16.8
			后横	3.5	3.0	3.0	18.1	17.5
		闸室下部	前纵	10.2	9.0	7.0	6.2	5.0
			前横	6.0	4.2	4.5	17.5	15.2
			后横	2.2	3.5	2.0	7.3	1.8
二线	一道连续消力槛	闸室中部	前纵	11.5	10.3	8.7	8.1	6.7
			前横	7.1	7.5	7.4	12.6	8.9
			后横	6.8	6.5	7.0	11.5	12.0
		闸室下部	前纵	13.2	12.8	10.9	8.5	8.0
			前横	10.6	11.5	6.7	15.8	13.8
			后横	4.1	4.5	4.2	6.1	4.0

在双边充水工况下，一线(16 m 宽)与二线(34 m 宽)船闸的纵、横向系缆力均能满足规范要求。但在单边开启工况下，一线船闸因闸室相对狭窄，单侧支孔出流形成的射流更易直接冲击对侧闸墙并产生强烈反射涌浪，导致横向系缆力显著增大并超出允许值；而二线船闸凭借其宽阔的闸室为水流提供了充分的扩散空间，有效削弱了水流冲击与反射强度，故所有工况下系缆力虽数值较大但均能满足规范要求。可见，闸室宽度通过制约射流的发展空间与能量耗散路径，直接决定了闸室内的水流结构及系缆力特性。考虑到单边充水为非控制工况，在正常充水工况下闸室内水流条件较好的前提下，认为进一步优化一线船闸闸室内消能工的必要性不大，单边输水非正常运行工况下可采用阀门间歇开启的方式解决闸室停泊条件问题。

4 引航道水位波动分析

4.1 充水过程上引航道水位变化

本文观测了船闸充水过程中停泊段至上闸首进水口的沿程水面跌落情况，监测点布置见图 3，上游引航道共布置 6 个水位测点：一线船闸进水口顶部、二线船闸进水口顶部、一线船闸限制性航道中段、一线船闸限制性航道堤头、上游引航道渐扩段以及停泊段。t_v=4 min 工况进水口水位变化过程线见图 4，上引航道充水过程水位最大变幅见表 7。

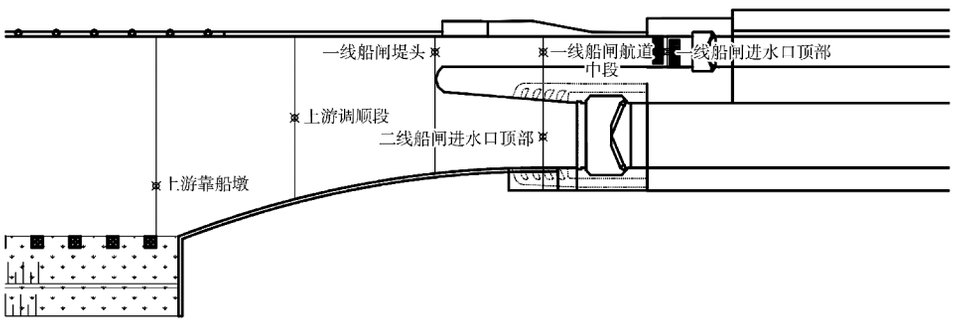
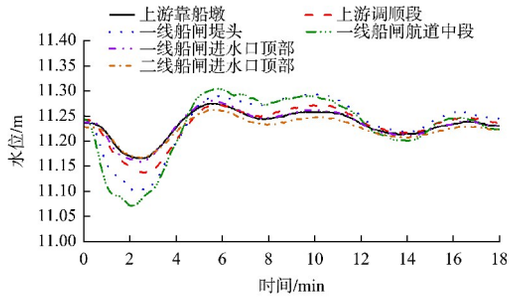
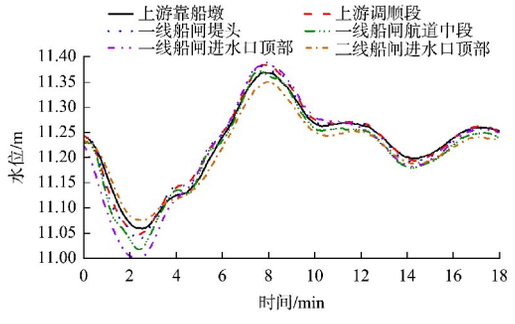


图 3 上游引航道水位测点布置

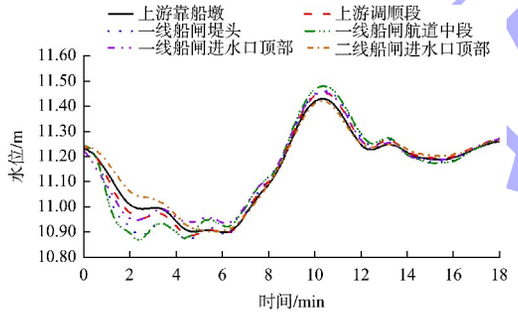
Fig. 3 Layout of water level monitoring points in upstream approach channel



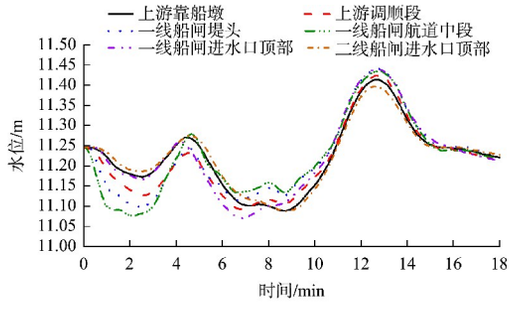
a) 一线船闸双边充水



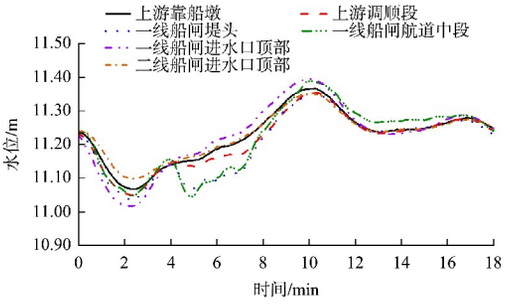
b) 二线船闸双边充水



c) 两线船闸同时双边充水



d) 两线船闸错峰双边充水(一线船闸先充水)



e) 两线船闸错峰双边充水(二线船闸先充水)

图 4　t_v=4 min 工况进水口水位变化过程线

Fig. 4　Water level variation hydrograph at intake under t_v=4 min valve opening condition

表 7　上引航道充水过程水位最大变幅

Tab. 7　Maximum water level fluctuations in upstream approach channel during filling

运行工况	监测位置	最大跌水值/cm	最大壅水值/cm
一线船闸单独充水（t_v 为 4~7 min）	一线船闸上闸首进水口	4~8	3~5
	停泊段	10~14	4~5
	一线船闸航道中段	12~17	4~7
	二线船闸进水口	≤7	≤2
二线船闸单独充水（t_v 为 4~7 min）	二线船闸上闸首进水口	7~16	9~11
	停泊段	7~16	9~11
	一线船闸进水口	13~24	13~15
双线船闸同时充水（t_v 为 4~6 min）	一线船闸上闸首进水口	20~30	20~22
	二线船闸上闸首进水口	18~34	15~18
	停泊段	17~34	15~18
	一线船闸闸前限制性航道	24~37	20~24
双线船闸错峰充水（一线船闸先充水）（t_v 为 4~6 min）	一线船闸上闸首进水口	11~17	15~20
	二线船闸上闸首进水口	15~20	10~15
	停泊段	8~11	10~11
双线船闸错峰充水（二线船闸先充水）（t_v 为 4~6 min）	一线船闸上闸首进水口	14~22	9~15
	二线船闸上闸首进水口	9~14	6~11
	停泊段	9~14	6~11

单线船闸充水时，引航道整体水位变幅可控，泊稳条件受影响较小，但一线船闸因进水口位于狭窄的限制性航道内，其水位波动略大于二线船闸。双线船闸同时充水为不利工况，由于引航道

过水断面有限，集中补水导致水位剧烈波动，停泊段水位变幅超过 50 cm，严重威胁船舶停泊安全。结果分析表明，采用错峰充水(错峰时间等于阀门开启时间)可有效抑制水位波动，将停泊段水位变幅控制在 20 cm 以内，显著提升泊稳条件，实际运行中采用错峰充水方案。

4.2　泄水过程下引航道水位变化

为研究剑潭双线船闸泄水时下引航道内水位波动特性，本文实测了典型工况下引航道内水位变化过程。水位组合为最不利工况(上游最高通航水位 11.24 m−下游最低通航水位 0.06 m)，阀门开启速率：t_v 为 4~7 min 阀门双边开启(单边泄水为非控制工况)。水位监测点布置见图 5，下游引航道内总共设置了 7 个水位监测点，分别布置于一线船闸出水格栅顶部、二线船闸出水格栅顶部、下引航道扩散段、转弯段、分水墙末端、疏浚航道中段和停泊段。下引航道泄水过程水位最大变幅见表 8，t_v = 4 min 工况出水口水位变化过程线见图 6。

单线船闸泄水时，一线船闸运行除其出水口局部壅高较大外，引航道其他区域波动较小；而二线船闸泄水因流量大、下游引航道狭窄，整体波动更为显著，停泊段水位变幅增大，并致使一线船闸人字门前壅高值明显抬升。双线船闸同时泄水为最不利工况，闸首出水口附近最大壅高值接近 1.0 m，形成显著反向作用水头，严重威胁人字门运行安全，同时停泊段水位剧烈波动。优化结果分析表明，采用错峰泄水可有效抑制水位波动，使出水口壅高值降至 55 cm 以下，停泊段变幅也得到有效控制，为推荐运行方式。

表 8　下引航道充水过程水位最大变幅

Tab. 8　Maximum water level fluctuations in downstream approach channel during emptying

运行工况	监测位置	最大跌水值/cm	最大壅水值/cm
一线船闸单独泄水（t_v 为 4~7 min）	一线船闸泄水口	16~20	47~58
	二线船闸泄水口	17~20	12~19
	停泊段	8~10	10~14
二线船闸单独泄水（t_v 为 4~7 min）	一线船闸泄水口	37~42	31~38
	二线船闸泄水口	38~42	38~42
	停泊段	22~25	27~36
双线船闸同时泄水（t_v 为 4~6 min）	一线船闸泄水口	34~37	55~95
	二线船闸泄水口	55~95	56~68
	停泊段	17~19	35~49
双线船闸错峰泄水（一线船闸先泄水）（t_v 为 4~6 min）	一线船闸泄水口	39~42	35~48
	二线船闸泄水口	42~43	42~55
	停泊段	19~20	22~34
双线船闸错峰泄水（二线船闸先充水）（t_v 为 4~6 min）	一线船闸泄水口	25~33	33~38
	二线船闸泄水口	37~38	47~51
	停泊段	19~20	28~34

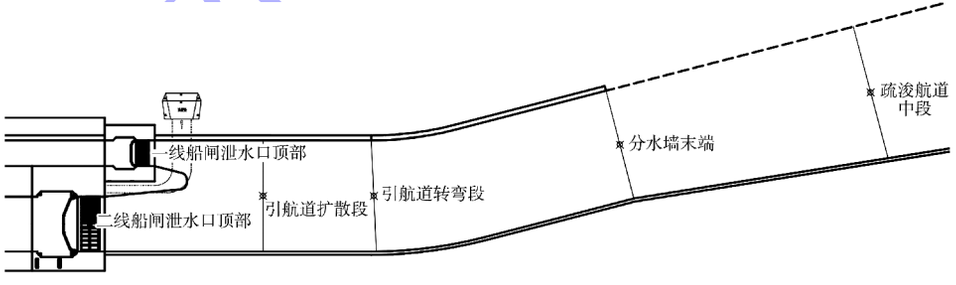
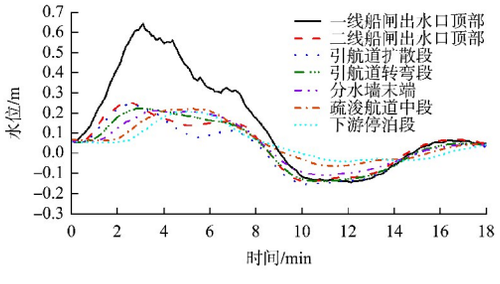
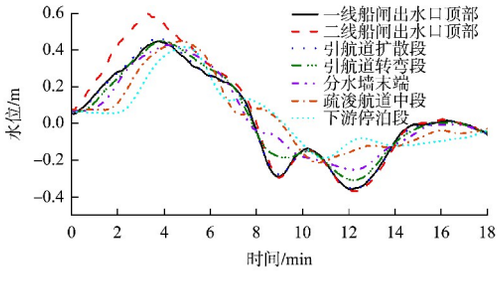


图 5　下游引航道水位测点布置

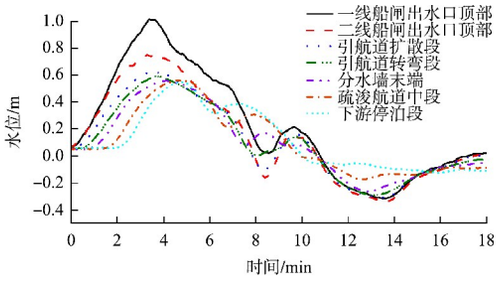
Fig. 5　Layout of water level monitoring points in downstream approach channel



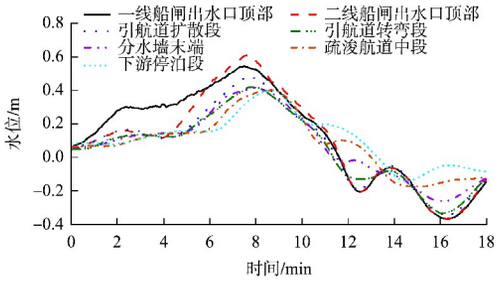
a) 一线船闸双边泄水



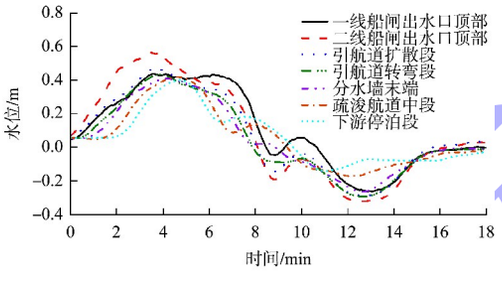
b) 二线船闸双边泄水



c) 双线船闸同时双边泄水



d) 双线船闸错峰双边泄水(一线船闸先泄水)



e) 双线船闸错峰双边泄水(二线船闸先泄水)

图 6　t_v=4 min 各工况出水口水位变化过程线

Fig. 6　Water level variation hydrographs at outlet under various t_v=4 min operating conditions

5　结论

1）设计最不利水头组合工况下，剑潭双线船闸输水系统水力学特性、各项水力指标均能满足设计和规范要求，说明输水系统布置方案是合理的。

2）闸室尺度差异对停泊条件具有决定性影响。在单边充水工况下，一线船闸闸室因射流冲击导致的横向系缆力最大值超过规范限值 20%以上，二线船闸闸室因水流扩散空间充足，系缆力全程满足规范要求。

3）“错峰运行”是抑制水力叠加效应的关键措施。双线同时充泄水时，引航道内水位剧烈叠加，停泊段最大水位变幅超过 50 cm，闸首出水口最大壅高近 1.0 m。采用时间不小于阀门开启时间的错峰调度后，上述指标可分别有效控制在 20 与 55 cm 以内，为解决同类工程水力干扰问题提供了量化、可操作的运行方案。

4）本文主要针对设计水位与单一船型，建议后续结合数值模拟开展多船型、多水位组合及船舶动态响应的精细化研究；在实际运行中，可进一步开发基于实时监测的智能错峰调度系统，动态优化运行时序，在保障安全的同时提升整体通航效率。

参考文献：

[1] 任启江, 叶雅思. 旁海枢纽工程船闸输水系统布置及试验研究[J]. 水运工程, 2018(12): 129-133.
REN Q J, YE Y S. Experimental research on layout of filling and emptying system of Panghai ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2018(12): 129-133.

[2] 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.

[3] 刘俊涛. 桂平航运枢纽二线船闸平面布置研究[J]. 水道港口, 2013, 34(2): 150-156.
LIU J T. Study on plane layout of the second line ship lock of Guiping navigation junction [J]. Journal of waterway and harbor, 2013, 34(2): 150-156.

[4] 陈恩旺, 吴立志, 李社平. 江阴新夏港船闸平面布置及结构优化[J]. 水运工程, 2018(8): 65-70, 75.
CHEN E W, WU L Z, LI S P. Plane layout and structure optimization of Xinxia Port ship lock in Jiangyin [J]. Port & waterway engineering, 2018(8): 65-70, 75.

[5] 船闸总体设计规范: JTS 305—2025 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2025.

Code for overall design of navigation locks: JTS 305-2025[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2025.

[6] 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-lane shiplock[J]. Journal of transport science and engineering, 2012, 28(4): 37-44.

[7] 孔增增, 夏艺, 汪彦, 等. 钱塘江涌潮条件下八堡船闸引航道通航水流条件观测[J]. 中国水运, 2025(8): 79-81.
KONG Z Z, XIA Y, WANG Y, et al. Observation of navigable flow conditions in the approach channel of Babaodu shiplocks under tidal bore action in Qiantang River[J]. China water transport, 2025(8): 79-81.

[8] 胡天娅, 严秀俊, 李海健, 等. 八堡双线船闸引航道通航水流条件观测研究[J]. 水运工程, 2025(1): 122-128.
HU T Y, YAN X J, LI H J, et al. Observational study on navigational water flow conditions in approach channel of Babao double-lane ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2025(1): 122-128.

[9] 陈端, 王跃根, 魏红艳, 等. 葛洲坝船闸共用引航道内水流叠加规律研究[J]. 长江科学院院报, 2026, 43(3): 110-118.
CHEN D, WANG Y G, WEI H Y, et al. Superposition pattern of water flow in shared approach channel of Gezhouba ship locks[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2026, 43(3): 110-118.

[10] 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 dimension design of shared approach channel for double-lane shiplocks[J]. Industrial innovation, 2023(6): 114-116.

[11] 刘本芹, 宣国祥. 嘉陵江沙溪船闸输水系统布置研究[J]. 水道港口, 2009, 30(5): 352-356.
LIU B Q, XUAN G X. Layout of filling and emptying system of Shaxi shiplock in Jialing River[J]. Journal of waterway and harbor, 2009, 30(5): 352-356.

[12] 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Design code for filling and emptying system of shiplocks: JTJ 306-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.

[13] 吴英卓, 姜伯乐, 李静, 等. 船闸水力学研究方法论[J]. 人民长江, 2017, 48(13): 54-57, 80.
WU Y Z, JIANG B L, LI J, et al. Research methodology of ship lock hydraulics[J]. Yangtze River, 2017, 48(13): 54-57, 80.

[14] 王蛟, 杨斌, 陈明. 不同侧支孔布置形式下的船舶系缆力数值模拟[J]. 水运工程, 2016(4): 94-99.
WANG J, YANG B, CHEN M. Numerical simulation of mooring force under different arrangements of collateral holes[J]. Port & waterway engineering, 2016(4): 94-99.

[15] 丁乐雨, 李中华, 安建峰, 等. 闸墙长廊道侧支孔输水系统出流均匀性分析与布置优化[J]. 水运工程, 2024(5): 130-135, 199.
DING L Y, LI Z H, AN J F, et al. Flow uniformity and arrangement optimization for side-branch discharge holes in dam wall long corridor channel water conveyance system[J]. Port & waterway engineering, 2024(5): 130-135, 199.

[16] 王蛟, 许灿亮, 陈亮, 等. 笏洲船闸输水系统水力学模型试验研究[J]. 水运工程, 2024(12): 115-123.
WANG J, XU C L, CHEN L, et al. Experimental study on hydraulic characteristics for filling and emptying system of Huzhou ship lock[J]. Port & waterway engineering, 2024(12): 115-123.

(本文编辑 王璁)