



笏洲船闸输水系统水力学模型试验研究

王蛟¹, 许灿亮¹, 陈亮², 王召兵¹, 李秋林²

(1. 重庆交通大学, 西南水利水电工程科学研究院, 重庆 400074;

2. 重庆西科水运工程咨询有限公司, 重庆 402247)

摘要: 笏洲船闸平面尺寸大、瞬时流量大、输水强度高, 闸室内无消能工, 闸室停泊条件有待检验, 引航道采用非对称布置, 易形成回流、斜流等水力学问题。通过比尺 1:30 的整体水工物理模型试验, 对船闸输水过程水力特性、输水廊道压力特性、船舶停泊条件、进出水口及引航道水流条件等展开研究。结果表明, 在闸室及出水口增设消力槛并优化其布置形式后, 闸室内停泊条件和下游引航道通航水流条件明显改善。在推荐的阀门运行方式下, 各项水力指标均满足规范及设计要求。研究成果可为类似工程提供参考。

关键词: 笏洲船闸; 模型试验; 输水系统; 消力槛

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)12-0115-09

Experimental study on hydraulic characteristics for filling and emptying system of Huzhou ship lock

WANG Jiao¹, XU Canliang¹, CHEN Liang², WANG Zhaobing¹, LI Qiulin²

(1. Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

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

Abstract: Huzhou ship lock has a large plane size, large instantaneous flow, high water delivery intensity, no energy dissipation workers in the lock chamber, berth conditions in the lock chamber to be tested, and asymmetric layout of the approach channel, which is prone to reflux, oblique flow and other hydraulic problems. Through the hydraulic physical model test with a scale of 1:30, the hydraulic characteristics of the water conveyance process of the lock, the pressure characteristics of the water conveyance gallery, the berth conditions of the ship, the flow conditions of the inlet and outlet and the approach channel are studied. The research results show that the berthing conditions in the lock chamber and the navigable flow conditions in the downstream approach channel are obviously improved after adding the sill and optimizing its layout. Under the recommended valve operation mode, all the hydraulic indexes meet the specifications and design requirements. The research results can provide reference for similar projects.

Keywords: Huzhou ship lock; model test; filling and emptying system; baffle sill

为促进江西腹地资源开发, 完善腹地运输结构, 降低运输成本, 促进区域经济社会全面、协调、可持续发展, 江西省提出以“两横一纵十支”及淦水高等级航道为骨架、其他航道为补充、通江

达海的全省内河航道体系。袁河为十支中的重要一支, 根据规划, 拟自上而下建设石洲-笏洲-龙尾洲 3 级枢纽, 使之达到 II 级及以上航道通航标准。其中, 笏洲枢纽水头最大, 笏洲船闸水力学要求较

收稿日期: 2024-03-15

作者简介: 王蛟 (1989—), 男, 助理研究员, 从事通航水力学及其安全保障技术研究。

高,故对笏洲船闸进行输水系统水力学模型试验,评价笏洲船闸设计合理性。笏洲船闸等级为Ⅱ级,船闸闸室有效尺寸为230 m×34 m×5.0 m(有效长度×有效宽度×槛上水深),设计代表船型为1 000和2 000吨级散货船,船闸设计水头为7.5 m。

鉴于输水系统水动力学的复杂性,目前研究手段仍以物理模型试验为主,如卜美飞等^[1]、袁浩等^[2]建立物理模型试验,分析某两个船闸输水系统水力特性、廊道压力及闸室停泊条件,认为船闸输水系统布置均合理。宁武等^[3]、张震等^[4]通过物理模型试验,对某两个船闸输水系统的水力特性、船舶停泊条件以及进出口水流条件开展研究,提出较为合理的优化布置方式。通过经济、技术合理性对比分析,笏洲船闸设计采用闸墙长廊道侧支孔输水系统,该类分散式输水系统已在多座中低水头船闸中得到应用,阚延炬等^[5]探究水头高达17.26 m的蜀山船闸采用闸墙长廊道侧支孔输水系统的可行性,结合船闸结构设计并利用闸室初始消能水体空间较大的特点,最终确定蜀山船闸可采用闸墙长廊道侧支孔输水形式。周俊等^[6]通过增设4倍侧支孔孔高的消力槛、改变阀门后廊道体型、廊道通气等方式使中高水头船闸使用闸墙长廊道侧支孔输水系统成为可能。

杨崧^[7]研究七星墩船闸整体及输水系统布置形式,提出采用降低泄水段高程、优化进水口格栅布置、调整出水口消力槛等措施改善输水系统布置。徐进超等^[8]、张星星等^[9]通过试验研究,提出在侧支孔出口处布置一道消力槛的方案,该方案相当于在一系列出水支孔前形成纵向单明沟,从而达到改善水流条件的目的。

本文依托笏洲船闸工程,建立比尺为1:30的物理模型,针对其设计要求的充泄水时间短、瞬时流量大、输水强度高;闸室内无消能工,闸室停泊条件有待检验;引航道采用非对称布置,易形成回流、斜流等水力学问题,进行了不同阀门运行方式下船闸输水过程的水力特性、输水廊道压力特性、船舶停泊条件、进出口及引航道水流条件等研究。

1 输水系统布置

根据JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[10](简称“规范”)、数模计算以及相关文献^[11-12]中通过统计国内不同规模船闸输水系统的选型指标建立的输水系统选型模型,本船闸的输水系统采用闸墙长廊道侧支孔分散输水系统,设计方案输水系统各部位特征尺寸见表1,输水系统布置见图1。

表1 船闸输水系统特征尺寸

部位	特征	面积/m ²	与输水阀门面积比
输水阀门段廊道	两侧主廊道	45.00	1.00
进水口	导墙上设垂直4支孔进水口	180.00	4.00
充水主廊道	充水阀门后廊道通过水平转弯调整廊道宽度,通过垂直转弯调整廊道高程	55.00	1.22
闸室出水段主廊道	通过水平和垂直转弯,上与充水主廊道、下与闸室出水段主廊道相连接	55.00	1.22
闸室出水支孔	自上游向下游分3组,共20孔,孔口尺寸分别为1.31 m×1.1 m×7 m、1.20 m×1.1 m×6 m、1.16 m×1.1 m×7 m,间隔8.5 m,总长165.75 m,占闸室有效长度的72.1%	3.88	1.20
闸室消能工	设计方案闸室内无消能工	-	-
泄水主廊道	上与闸室出水段主廊道相连接,以水平转弯调整廊道宽度,以垂直转弯调整廊道高程	55.00	1.22
出水口	将出水口面积放大2.0倍,并设中间导墙;消能室内设3道挑流槛,顶部设置24个等面积出水孔	90.00	2.00

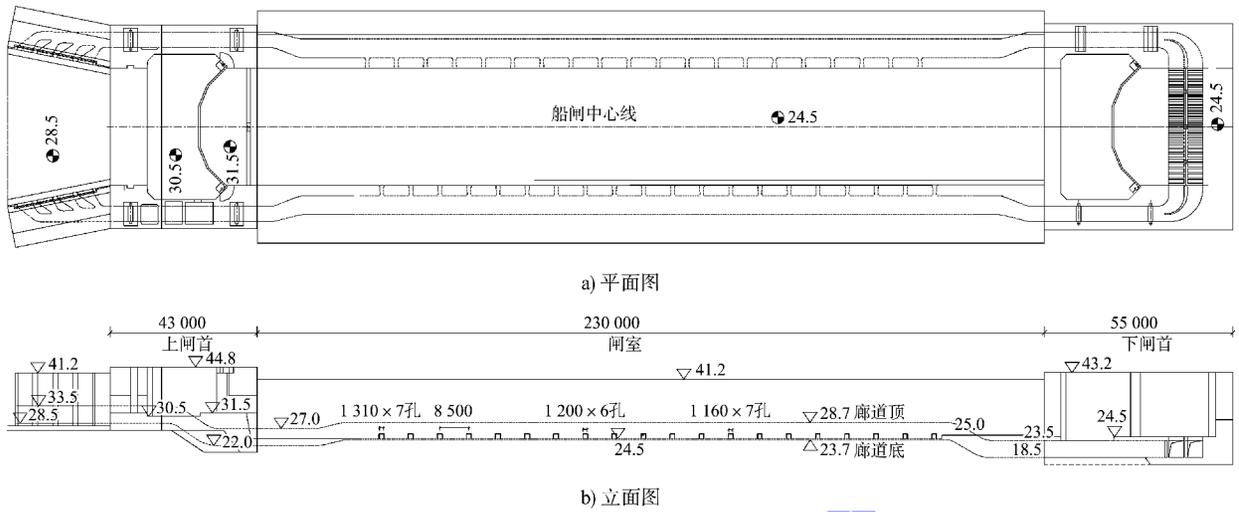


图 1 船闸输水系统总体布置 (高程: m; 尺寸: mm)

2 水力学模型设计

笏洲船闸输水系统采用正态 1:30 水工物理模型(图 2)进行试验研究, 遵循重力相似准则并按照几何相似进行模型设计。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, 模型模拟原型总长 1 130 m, 其中上游 400 m、船闸主体段 330 m、下游 400 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用塑料板制作, 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。



b) 闸室



c) 下引航道



a) 上引航道

图 2 物理模型试验布置

3 模型试验成果分析

3.1 闸室充、泄水水力特性

在最不利水位组合下(上游正常蓄水位 37.50 m、下游最低通航水位 30.00 m), 船闸阀门双边开启时间 $T_v = 3 \sim 7 \text{ min}$ 和阀门单边开启时间 $T_v = 5 \sim 7 \text{ min}$ 运行的充泄水主要水力特征参数见表 2。

表 2 闸室输水水力特征值

阀门开启方式	开启时间/min	闸室充(泄)水时间 T/min	最大流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	主廊道最大断面流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	水位瞬时最大变幅/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
充水	双边	3	309	5.62	0.035
		4	288	5.24	0.032
		5	270	4.91	0.030
		6	251	4.56	0.028
	单边	7	232	4.22	0.026
		5	180	8.00	0.020
		6	171	7.60	0.019
泄水	双边	7	160	7.11	0.018
		3	301	5.47	0.034
		4	283	5.15	0.032
		5	265	4.82	0.030
	单边	6	247	4.49	0.028
		7	229	4.16	0.026
		5	171	6.22	0.019
	单边	6	159	5.78	0.018
		7	149	5.42	0.017

模型试验成果表明, 笏洲船闸充、泄水阀门均采用 $T_v = 3 \sim 7 \text{ min}$ 双边匀速开启时, 闸室平均输水时间为 6.8 min 以内, 输水效率较高, 输水时间均可满足 $\leq 8 \text{ min}$ 的设计要求; 相应输水主廊道的最大断面流速为 5.62、5.47 m/s。船闸双边阀门充、泄水工况下, 水力特征值均符合规范要求, 说明输水系统各部分尺寸布置基本合理。船闸单边阀门充、泄水为非正常工况时, 除输水时间较长外, 其余各水流特性指标均满足规范要求。

3.2 廊道压力特性

为了解输水廊道典型部位非恒定流压力特性, 利用水压力传感器测定了在最不利水位组合条件下的阀门 $T_v = 3 \sim 7 \text{ min}$ 双边开启和阀门 $T_v = 5 \sim 7 \text{ min}$ 单边开启充、泄水时各测点压力变化过程。非恒定流压力测点布置见图 3, 各测点最低压力见表 3。

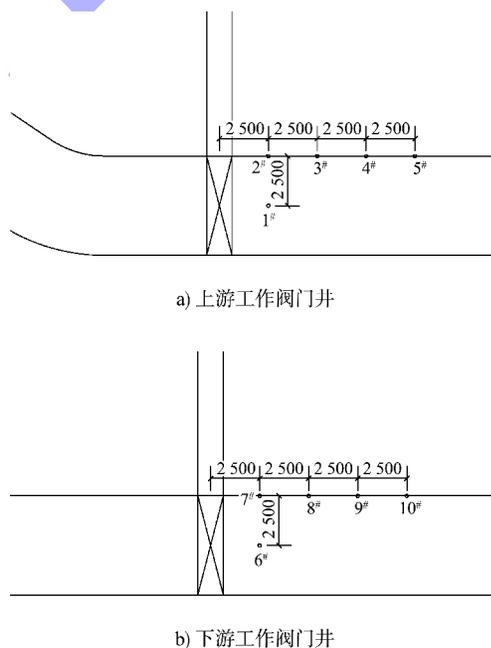


图 3 非恒定流压力测点布置 (单位: mm)

表 3 阀门段特征部位非恒定流压力统计

工况		充水					泄水				
		1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]	9 [#]	10 [#]
3 min 双边	平均	3.90	1.70	1.60	1.70	1.60	5.80	4.10	4.00	4.10	4.00
	瞬时	2.92	1.25	1.03	1.33	1.05	4.71	4.05	3.76	3.34	3.11
4 min 双边	平均	4.10	1.80	1.70	1.80	1.70	5.90	4.20	4.10	4.30	4.20
	瞬时	2.91	1.50	1.11	1.23	1.19	4.40	3.92	3.71	4.02	3.91
5 min 双边	平均	4.30	1.90	1.85	1.90	1.80	6.10	4.40	4.30	4.40	4.40
	瞬时	3.17	1.72	1.56	1.44	1.58	3.69	4.06	3.83	3.80	3.70
6 min 双边	平均	4.50	2.00	1.95	1.90	1.85	6.40	4.50	4.40	4.50	4.30
	瞬时	3.99	1.69	1.80	1.57	1.82	4.82	3.90	4.14	3.79	3.74
7 min 双边	平均	5.00	2.10	2.05	2.00	2.05	6.70	4.70	4.50	4.70	4.80
	瞬时	4.50	1.89	1.88	1.67	1.90	4.93	4.02	3.82	3.93	3.65
5 min 单边	平均	3.90	1.50	1.60	1.70	1.60	5.00	3.60	3.65	3.60	3.55
	瞬时	2.83	0.86	0.54	0.98	0.16	3.05	3.12	2.59	3.08	3.10
6 min 单边	平均	4.10	1.70	1.80	1.80	1.70	5.20	3.70	3.75	3.60	3.70
	瞬时	3.15	0.95	1.14	1.11	0.95	2.29	3.09	3.23	2.79	3.46
7 min 单边	平均	4.20	1.80	1.95	1.85	1.80	5.50	3.80	3.85	3.90	3.90
	瞬时	3.74	1.42	1.29	1.10	0.94	2.43	2.72	2.71	2.99	2.73

由表 3 可知, 最大设计水头工况下, 非恒定流充水阀门开启时最低平均和瞬时压力分别为 1.50 mH₂O (充水 2[#], 单边 $T_v=5$ min)、0.16 mH₂O (充水 5[#], 单边 $T_v=5$ min); 泄水阀门开启时最低平均和瞬时压力分别为 3.55 mH₂O (泄水 10[#], 单边 $T_v=5$ min)、2.59 mH₂O (泄水 8[#], 单边 $T_v=5$ min)。由此可知, 船闸充、泄水门槽后廊道侧面最低压力为 0.16 m, 未出现负压, 说明设计布置基本合理, 不会出现空化现象。充、泄水阀门段廊道最低压力均出现在阀门后廊道顶部, 阀门单边开启较双边开启压力低。从阀门后廊道压力的沿程分布来看, 充水阀门后最低压力出现在 1.0~1.5 倍阀门高度位置; 泄水阀门最低压力则出现在 1.5~2.0 倍阀门高度位置, 并均随阀门开度而变化, 符合门后水流收缩断面的变化规律。

3.3 闸室船舶停泊条件

设计方案条件下, 由于笏洲船闸闸室内未设置消能工, 进入闸室的水体能量大, 耗散慢, 闸室内流态较紊乱, 水体出流均匀性欠佳。为改善闸室内充水水流条件, 须在闸室底增设消能工。根

据规范, 当船底富余水深小于支孔间距的 1/2 时, 应在支孔出口外设置消力槛。多座船闸的试验研究表明, 出水侧支孔出口设置消力槛对调整闸室水流条件作用明显, 尤其对船闸单侧输水情况效果更佳^[13]。结合与本工程船闸规模接近的相关船闸的试验成果, 笏洲船闸闸室消能工优化方案见表 4。优化方案在消力槛高度(0.4~0.6 m)及与支孔距离(0.9~1.5 m)等关键影响因素方面做了系列尝试, 考虑到消力槛高度及与支孔距离的叠加效应, 还增加了距离较远、槛高较大的优化方案(距离 1.5 m, 槛高 0.7 m)。2 000 吨级代表船舶停靠闸室中段侧部时各方案船舶最大平均系缆力见表 5。

表 4 闸室消能工优化方案

优化方案	出水支孔高度/m	闸室宽度/m	消力槛距支孔出口距离/m	消力槛高度/m	出水孔高度与消力槛高度比值
1			0.9	0.5	2.20
2			1.2	0.5	2.20
3			1.5	0.5	2.20
4	1.1	34	1.2	0.4	2.75
5			1.2	0.6	1.83
6			1.5	0.7	1.57

表5 不同消能工方案下闸室船舶最大平均系缆力对比

方案	系缆力类型	最大平均系缆力/kN				
		$T_v=3 \text{ min}$	$T_v=4 \text{ min}$	$T_v=5 \text{ min}$	$T_v=6 \text{ min}$	$T_v=7 \text{ min}$
设计方案(无消能工)	前纵	24	20	17	10	12
	前横	-55	-32	-27	-25	-19
	后横	-76	-55	-42	-44	-31
优化方案1(槛高0.5 m, 距离支孔0.9 m)	前纵	-23	-20	-14	-14	-16
	前横	37	24	24	19	12
	后横	44	31	27	25	16
优化方案2(槛高0.5 m, 距离支孔1.2 m)	前纵	-25	-20	-15	-15	-14
	前横	29	18	14	16	15
	后横	39	27	19	19	18
优化方案3(槛高0.5 m, 距离支孔1.5 m)	前纵	-26	-21	-23	-16	-9
	前横	34	33	29	19	18
	后横	54	47	42	26	25
优化方案4(槛高0.4 m, 距离支孔1.2 m)	前纵	25	15	14	11	12
	前横	31	28	28	19	17
	后横	50	46	31	29	23
优化方案5(槛高0.6 m, 距离支孔1.2 m)	前纵	-24	-22	-21	-17	-18
	前横	34	27	17	21	20
	后横	51	35	26	26	20
优化方案6(槛高0.7 m, 距离支孔1.5 m)	前纵	21	23	17	13	11
	前横	40	38	28	23	25
	后横	51	47	35	28	28

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

由表5数据可知: 在2 000吨级散货船系缆力试验中, 原设计方案下, 阀门双边开启 $T_v=5 \text{ min}$ 时, 最大横向平均系缆力为42 kN, 超规范允许系缆力110%。为解决输水过程中船舶横向系缆力超标问题, 经6组优化方案试验对比分析后, 采用优化方案2对模型进行优化。优化后, $T_v=5 \text{ min}$ 时, 最大后横平均系缆力即可达到规范要求。试验结果表明: 采取优化方案2后, 闸室内无明显纵向、横向水流, 水流紊动较小, 水面平稳, 船舶最大平均系缆力较小。

综合各优化方案试验成果, 结合笏洲船闸水力特性可知, 采用优化方案2, 阀门按 $T_v=5\sim 7 \text{ min}$ 双边充水时, 闸室内停泊条件满足规范要求, 且输水时间满足设计要求。

3.4 进水口及上引航道水流条件

船闸上闸首廊道进水口采用垂直多支孔布置, 淹没水深3.5 m。由于笏洲船闸上游引航道导航墙与取水口段衔接较为自然, 船闸充水时, 水流整体流态分布较为均匀, 无不良流态。

为观察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, 上游引航道共布置3个水位测点: 引航道停泊段末端、引航道停泊段首部及进水口顶部。笏洲船闸 $T_v=5 \text{ min}$ 双边充水过程中, 上引航道波高如图4所示, 进水口附近水位变化最大, 最大跌水0.39 m, 最大壅高0.18 m。上引航道停泊段纵向比降过程线如图5所示, 停泊段水位变化相对较小, 最大跌水0.34 m, 最大壅高0.13 m。停泊段最大纵向比降在0.6‰以内。

总体而言, 距离上游进水口越远, 受船闸灌泄水影响越小, 水位变化越小。可见, 试验工况下, 笏洲船闸上游引航道内水位最大变幅基本可控, 停泊段泊稳条件良好。

由于笏洲船闸输水效率较高, $T_v = 3 \text{ min}$ 双边充水时, 充水最大瞬时流量超过 $300 \text{ m}^3/\text{s}$, 而上引航道宽度有限(70 m), 因此, 在较快启门工况下, 引航道内局部流速较高, 停泊段内流速基本在 $0.50 \sim 0.75 \text{ m/s}$ 。但 $T_v = 4 \text{ min}$ 双边充水时, 停泊段内只有部分水域流速超过 0.50 m/s , 这主要是水流波动推进引起的, 高流速区范围不大且不断沿引航道推进, 因此对停泊段的影响有限。 $T_v \geq 5 \text{ min}$ 双边充水时, 停泊段内流速即可控制在 0.50 m/s 以下, 满足规范要求。 $t = 300 \text{ s}$ 、 $T_v = 5 \text{ min}$ 双边充水上引航道流速分布见图 6。

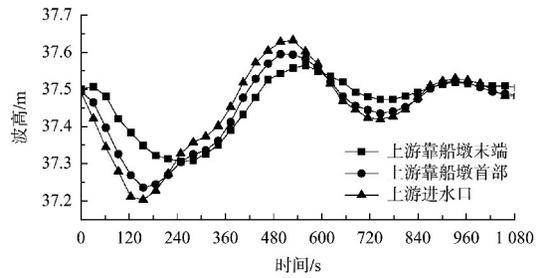


图 4 $T_v = 5 \text{ min}$ 上引航道波高

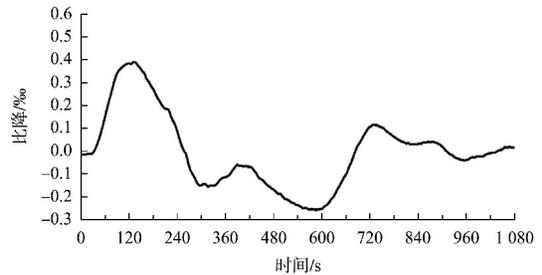


图 5 $T_v = 5 \text{ min}$ 停泊段纵向比降

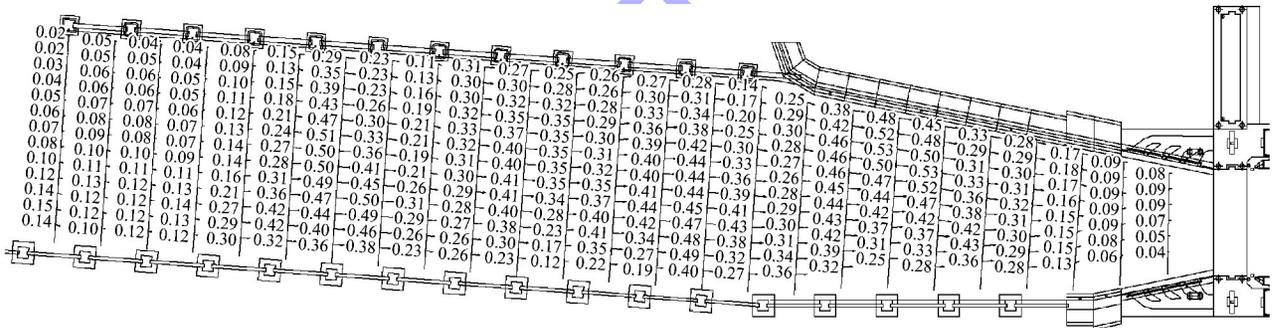


图 6 $t = 300 \text{ s}$ 、 $T_v = 5 \text{ min}$ 双充上引航道流速分布 (单位: m/s)

3.5 出水口及下引航道水流条件

在原出水口布置条件的最不利水位组合下, 泄水阀门双边开启时, 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, 水流经下游引航道渐扩段逐步扩散。由于下引航道采用非对称布置形式, 向左侧(停泊段)扩展范围更大, 虽然水体经格栅消能出流较为均匀, 但经扩散段分流后出现右侧流速偏大、左侧流速偏小现象(图 7), 需对出水口进一步优化。在原布置基础上, 在泄水格栅廊道中增加 2 道消力梁, 增加格栅向左岸的出流量。消力梁设计见图 8。在优化方案布置条件下, 原本偏向右岸的不均匀流

态得到了改善, 水流下泄至停泊段时, 左右岸水流扩散基本持平, 下泄水体基本均匀(图 9)。



图 7 设计方案

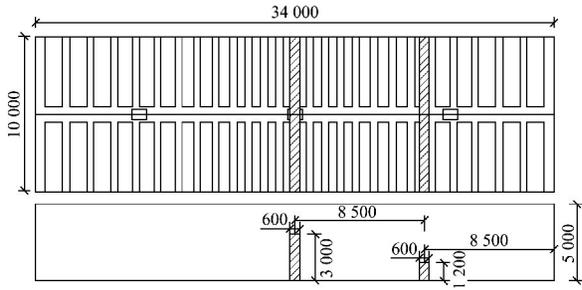


图8 消力梁布置 (单位: mm)



图9 优化方案

为观察船闸泄水过程中下闸首进水口至停泊段的沿程水面跌落情况,下游引航道共布置3个水位测点:出水口顶部、引航道停泊段首部及尾部。如图10所示,测量数据表明,笏洲船闸泄水过程中,泄水口附近水位变化最大,最大跌水0.20 m,最大壅高0.37 m;停泊段水位变化相对较小,最大跌水0.17 m,最大壅高0.24 m。如图11所示,停泊段最大纵向比降在0.6‰以内。

总体而言,距离下游泄水口越远,受船闸泄水影响越小,水位变化越小。可见,试验工况下,笏洲船闸下游引航道内水位变化不大,对船舶停泊影响较小。

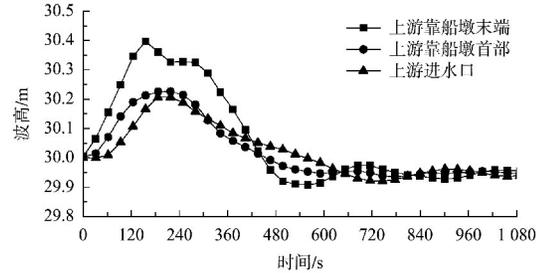


图10 $T_v = 5 \text{ min}$ 下引航道波高

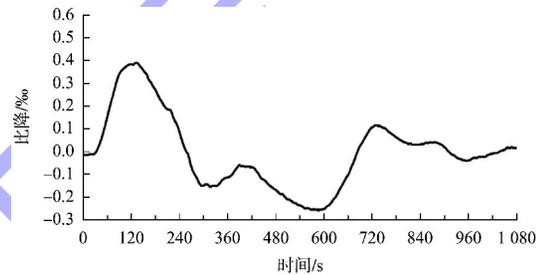


图11 $T_v = 5 \text{ min}$ 停泊段纵向比降

优化方案下笏洲船闸双边泄水时($T_v = 3 \sim 7 \text{ min}$),由于下游引航道较为顺直,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。但由于笏洲船闸泄水效率较高, $T_v = 3 \text{ min}$ 双边泄水时,泄水最大瞬时流量超过 $300 \text{ m}^3/\text{s}$,而下引航道宽度有限(70 m),因此,在较快启门工况下,引航道内局部流速较高,停泊段内流速基本在 $0.50 \sim 0.75 \text{ m/s}$ 。 $T_v \geq 4 \text{ min}$ 双边泄水时,停泊段内流速即可控制在 0.5 m/s 以下,如图12所示。

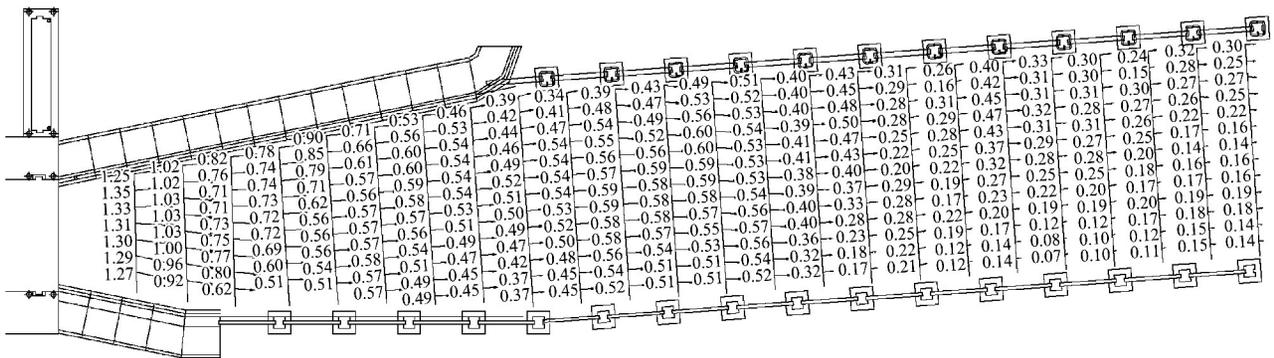


图12 $t = 300 \text{ s}$ 、 $T_v = 5 \text{ min}$ 双泄下引航道流速分布 (单位: m/s)

4 结论

1) 笏洲船闸整体物理模型试验成果表明, 采用闸墙长廊道侧支孔分散输水系统整体布置设计合理。

2) 笏洲船闸输水效率较高, 双边充水工况下闸室平均输水时间在 6.8 min 以内, 均可满足 ≤ 8 min 的设计要求。

3) 充、泄水最低压力均出现在阀门后廊道顶部, 阀门单边开启较双边开启压力低。非恒定流充、泄水阀门开启时最低平均和瞬时压力分别为 1.50 mH₂O (充水 2[#], 单边 $T_v = 5$ min)、0.16 mH₂O (充水 5[#], 单边 $T_v = 5$ min), 未出现负值, 不会出现空化现象。

4) 原设计方案没有采取消能工措施, 系缆力超规范值较大, 通过系列优化试验, 在闸室底部两侧增设槛高 0.5 m、距离支孔 1.2 m 的连续消力槛后, 阀门双边开启时间 $T_v \geq 5$ min 所有试验工况的船闸系缆力均满足规范要求。

5) 笏洲船闸下引航道采用非对称布置形式, 下泄水体经出水口及导航段扩散后出现右侧流速偏大、左侧流速偏小现象。通过在出水格栅左侧增加 2 道消力梁后, 下泄水流均匀度明显增加, 下游引航道通航水流条件得到有效改善。

参考文献:

[1] 卜美飞, 孙保虎, 胡峰军, 等. 碾盘山船闸输水系统设计与试验研究[J]. 水运工程, 2022(5): 104-109, 138.

- [2] 袁浩, 邹翼遥, 林晶晶. 闸墙长廊道侧支孔船闸阀门运行方式优化试验研究[J]. 水运工程, 2024(2): 101-106.
- [3] 宁武, 李君, 宣国祥, 等. 柳江红花二线船闸输水系统布置与水力学模型试验研究[J]. 水运工程, 2017(10): 154-159.
- [4] 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.
- [5] 阚延炬, 李君, 宣国祥, 等. 蜀山泵站枢纽船闸输水系统水力学模型试验[J]. 水运工程, 2017(9): 126-130, 143.
- [6] 周俊, 匡涛, 王能. 中高水头船闸输水系统选型布置及试验研究[J]. 水运工程, 2021(6): 121-127.
- [7] 杨崧. 七星墩船闸输水系统布置及优化[J]. 水运工程, 2023(12): 145-150.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 南京水利科学研究所, 天津水运工程科学研究所. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [11] 黄瑶, 曹凤帅. 船闸输水系统选择标准研究[J]. 中国水运(下半月), 2019, 19(5): 114-116.
- [12] 李中华, 宣国祥. 基于多因素的船闸输水系统选型方法[J]. 水运工程, 2020(10): 1-6.
- [13] 孙倩, 陈亮, 王召兵, 等. 船闸单侧闸墙廊道输水系统布置及试验研究[J]. 人民长江, 2019, 50(12): 182-186, 191.

(本文编辑 王传瑜)

(上接第 27 页)

- [12] 兰波, 周德才, 胡定健. 波浪水池圆弧斜坡式消波装置改型试验研究[C]//第二十九届全国水动力学研讨会论文集, 镇江: 《水动力学研究与进展》编委会, 2018: 395-401.
- [13] 彭程, 张华庆, 张慈珩, 等. 实验水池弧形消波装置孔隙率优化试验研究[J]. 水道港口, 2020, 41(1): 37-43.
- [14] IZQUIERDO U, GALERA-CALERO L, ALBAINA I, et al.

Experimental and numerical determination of the optimum configuration of a parabolic wave extinction system for flumes [J]. Ocean engineering, 2021, 238: 109748.

- [15] KEULEGAN G. H. Gradual damping of solitary waves[J]. Journal of research of the national bureau of standards, 1948, 40(6): 487-498.

(本文编辑 赵娟)