涪江渭沱枢纽改扩建船闸输水系统水力学特性优化试验*

陈文兵[1]，傅杨荭[2]，王召兵[3]，许灿亮[3]，舒岳阶[4]

（1. 重庆航运建设发展（集团）有限公司，重庆 401546；2. 重庆市弘禹水利咨询有限公司，重庆 400020；
3. 重庆交通大学，重庆 400074；4. 重庆西科水运工程咨询有限公司，重庆 402247）

摘要：针对受空间限制的渭沱改扩建船闸引航道宽度不足、弯段水流条件复杂及泄水口局部流速过高等问题，开展了船闸输水系统水力特性的优化研究。通过建立比尺为 1∶30 的水力学物理模型，系统评估闸墙长廊道侧支孔分散输水系统的适用性，并提出关键的改进措施。成果表明：采用提前 0.5 m 水头、关阀时间为 2 min 的操作方式，可有效解决闸室水位惯性超高降问题；消能明沟宽度的调整对船舶停泊条件改善有限，但不可完全取消；将出水口优化为“顶侧联合出水”格栅式消能室结构，可显著提高闸室泄流均匀度；该次输水系统布置合理，优化措施有效提升了下引航道复杂边界条件下船闸的水力性能。研究成果为类似受空间制约的船闸工程设计提供了可借鉴的解决方案和技术依据。

关键词：渭沱枢纽；模型试验；船闸输水系统；水力学特性；消力槛

中图分类号：U641.1　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)07-0136-08

Optimization experiment on hydraulic characteristics of filling and emptying system of the reconstructed and expanded ship lock at Weituo Hub of the Fujiang River

CHEN Wenbing[1], FU Lihong[2], WANG Zhaobing[3], XU Canliang[3], SHU Yuejie[4]

(1. Chongqing Shipping Construction Development Group Co., Ltd., Chongqing, 401546, China;
2. Chongqing Hongyu Water Conservancy Consultative Co., Ltd., Chongqing, 400020, China;
3. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
4. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 402247, China)

Abstract: Aiming at the problems of insufficient width of the approach channel, complex water flow conditions in curved sections, and high local flow velocity at the discharge outlet of the Weituo Ship Lock reconstruction and expansion due to spatial limitations, an optimization study on the hydraulic characteristics of the ship lock water conveyance system is carried out. By establishing a hydraulic physical model with a scale of 1∶30, the applicability of the dispersed water supply system for the side support holes of the gate wall corridor is systematically evaluated, and key improvement measures are proposed. The results show that the operation method of advancing the water head by 0.5 m and closing the valve for 2 min can effectively improve the problem of inertia induced high drop in the water level of the gate chamber. The adjustment of the width of the energy dissipation open ditch has limited effect on improving the berthing conditions of ships, but it cannot be completely eliminated. Optimizing the outlet into a “combined top and side outflow” grid type energy dissipation chamber structure significantly improves the uniformity of discharge in the gate chamber. The layout of the filling and emptying system is reasonable, and the optimization measures effectively improve the hydraulic performance of the ship lock under complex boundary conditions in the lower approach channel. The research results provide reference solutions and technical basis for the design of ship lock projects that are similar to those constrained by space.

Keywords: Weituo Hub; model test; lock filling and emptying system; hydraulic characteristics; baffle sill

收稿日期：2025-11-17　　**录用日期：**2025-12-18

***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：陈文兵(1982—)，男，硕士，高级工程师，从事水运工程建设工作。

水运工程

随着航运业发展与船舶大型化趋势，渭沱现有船闸已难以满足通航需求，船舶往往需多次过闸或转载，不仅增加运营成本，也影响通航效率与安全性，成为制约嘉陵江航道整体效益的关键瓶颈。为此，亟需实施船闸扩能改造工程，计划于原船闸右岸侧新建一座有效尺度为 190 m×23 m×4.2 m（有效长度×有效宽度×门槛水深）的船闸。然而，鉴于渭沱枢纽下游河道呈近 180°急弯，加之建设空间受限，其下引航道宽度被严格限制在 50 m，转弯半径为 315 m。这一极为不利的组合，将显著恶化下引航道的水流条件，并加剧泄水口局部流速超限的风险，严重影响船舶航行安全与系统运行稳定性。因此，开展系统的水力学物理模型试验，是保障该复杂条件下船闸安全与效能的必要方法。

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[1]，如卜美飞等[2]建立了比尺为 1∶15 的整体水工物理模型，系统研究碾盘山船闸的水力特性、廊道压力及闸室停泊条件，认为碾盘山船闸采用闸墙长廊道侧支孔输水系统的设计方案较为合理，各项水力指标均满足规范要求。王蛟等[3]通过建立比尺为 1∶30 的整体水工物理模型对笏洲船闸的水力特性、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系统性研究，并优化了闸室和出水口的消能工，大幅改善了闸室内的停泊条件和下游引航道的流态。陈明等[4]依托麻石改扩建船闸，针对其尺度大、水头高、水力指标要求高等问题，建立比尺为 1∶25 的整体水工物理模型，对麻石船闸的各项指标进行了研究，在明沟内增设消力槛、增大廊道突扩体升坎转弯半径、增加进水口面积以及降低进水口高程等优化措施，在满足规范的前提下，大幅提高了麻石船闸的通航效率。周俊等[5]依托旁海船闸，通过船闸输水系统水力学模型试验，研究并采用 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。宁武等[6]通过建立比尺为 1∶30 的整体水工物理模型对红花二线船闸进行研究，提出采用汇合廊道和双纵支廊道的布置形式，极大改善了船闸因单边输水导致的船舶横向系缆力超标问题。阚延炬等[7]建立整体水工物理模型，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，认为水头高达 17.26 m 的蜀山船闸也可采用闸墙长廊道侧支孔输水系统。杨嵚[8]采用物理模型研究的方式，系统研究了七星墩船闸整体及输水系统布置形式的合理性，提出降低泄水段高程、优化进水口格栅布置、调整出水口消力槛等措施来改善输水系统布置，使七星墩船闸可以更安全更高效地运行。

本文依托渭沱船闸改扩建工程，建立比尺为 1∶30 的物理模型，对闸室出流段消能工布置及结构形式进行验证及优化，确保船闸正常运行时闸室泊稳条件满足船舶安全停泊要求；受布置空间限制，上、下游引航道宽度有限，泄水口局部流速可能较高，需通过物理模型试验验证设计方案的合理性，发现问题并对进出水口布置进行优化，保障进出水口条件满足规范和船闸安全高效运行的要求。

1　输水系统布置

在渭沱船闸输水系统整体布置方案论证阶段中，已对分散输水系统与局部分散输水系统进行了综合比选。结合 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》[9]要求、数模计算成果，以及闸室尺度、船舶泊稳标准、闸墙结构形式、地质条件、闸室初始水深与船舶吃水比值等因素，同时考虑渭沱船闸改扩建工程的实际地形与地质条件，在确保输水安全的前提下，为减少开挖量、节约工程投资，最终选用闸墙长廊道侧支孔分散输水系统[10-11]。该方案在适应性与经济性方面均表现更优。设计方案输水系统各部位特征尺寸见表 1，船闸整体平面布置见图 1。

表 1　船闸输水系统特征尺寸

Tab. 1　Characteristic dimensions of lock filling and emptying system

部位	特征	面积/m^2	与输水阀门面积比
进水口	导墙上垂直 4 支孔进水口,喉部高度不变、宽度分级收缩	84	4. 70
上闸首工作阀门段廊道	廊道顶高程 200. 2 m,淹没水深 4. 8 m	18	1. 00
上闸首充水主廊道	工作阀门后廊道渐扩至 3. 5 m 高	21	1. 17
闸室主廊道	采用闸墙长廊道,共 2 条	21	1. 17
闸室出水支孔	每侧共布置 21 个出水支孔,分为 3 组,由上游至下游支孔喉部断面尺寸(宽×高)分别为 0. 65 m×0. 8 m(7 个),0. 6 m×0. 8 m(8 个),0. 55 m×0. 8 m(7 个)	21. 12	1. 17
下闸首工作阀门段廊道	廊道顶高程 194. 1 m,淹没水深 5. 3 m	18	1. 00
下闸首泄水主廊道	工作阀门后廊道渐扩至 3. 5 m 高	21	1. 17
出水口	采用格栅出流,出水口顶高程 195. 2 m;顶部格栅总出流面积为 83. 2 m^2,侧面格栅总出流面积为 44. 8 m^2	128	7. 10

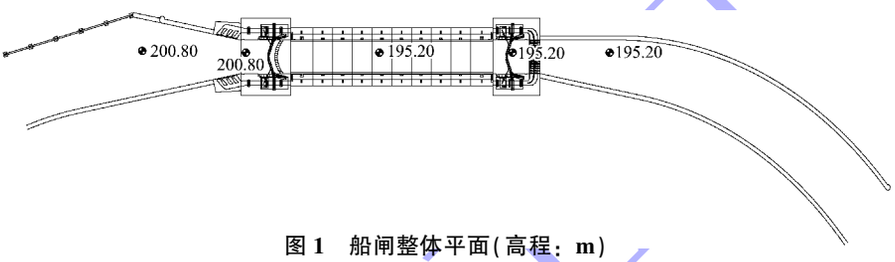
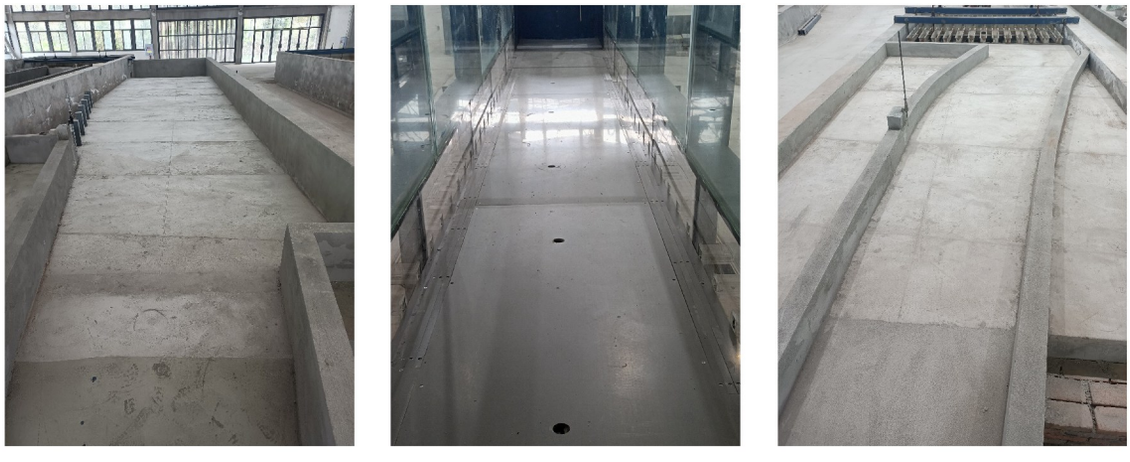


图 1　船闸整体平面(高程：m)

Fig. 1　Overall plan of ship lock(elevation：m)

2　水力学模型设计

渭沱船闸采用正态 1∶30 水工物理模型进行水工试验研究。为确保模型试验结果的准确性，模型建造遵循重力相似准则和几何相似准则。考虑到渭沱船闸上、下游引航道均沿岸线布置，而上、下游岸线均较为弯曲，难以模拟停泊段水流条件，因此本次模型试验聚焦船闸输水系统水力学问题，引航道部分主要关注导航调顺段的水流条件。上游为库区，模拟的范围较大，下游引航道与主河道通过弯曲的分水墙隔开，因此主要模拟了导航调顺段，模拟上游约 400 m，船闸主体段约 270 m，下游约 150 m，模型模拟原型总长约 820 m。同时，为满足阻力相似(模型糙率接近原型)和阀门廊道段流态观测需求，输水廊道均采用有机玻璃制作。闸室两侧墙设计为上部玻璃框架与下部有机玻璃拼装而成。船闸物理模型试验布置见图 2。



a) 上引航道　　b) 闸室　　c) 下引航道

图 2　物理模型试验布置

Fig. 2　Physical model test arrangement

3　模型试验成果分析

3.1　试验工况

为系统评估渭沱船闸输水系统在复杂边界条件下的水力性能，研究依据重力相似准则设计比尺为 1:30 的整体水工物理模型。试验旨在识别控制工况并验证优化措施，主要设置以下两类工况。

1）最大水头工况：上游正常蓄水位(206.00 m)至下游最低通航水位(199.40 m)，设计水头 6.6 m。此工况为系统的控制工况，输水过程中的动力载荷最为显著。在此条件下，系统测试了输水时间、闸室水位升降过程、惯性超高降、阀门井水位波动、船舶(系船柱)系缆力以及引航道流速分布等全部核心水力指标。

2）最小淹没工况：上游最低通航水位(205.00 m)至下游水位(199.40 m)，水头 5.6 m。该工况下、上游进水口的淹没深度最小，是评估进水口漩涡和吸气等不良流态的控制工况。试验重点观测了进水口及上游引航道区域的流态稳定性。

3.2　闸室充、泄水水力特性

在控制工况下，船闸阀门双边开启时间 $t_v=3\sim6$ min 和阀门单边开启时间 $t_v=5\sim7$ 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

Tab. 2　Hydraulic characteristic values of water conveyance in the sluice chamber

阀门开启方式		阀门开启时间/min	闸室充(泄)水时间/min	最大流量/($m^3\cdot s^{-1}$)	主廊道最大断面流速/($m\cdot s^{-1}$)	水位瞬时最大变幅/($cm\cdot s^{-1}$)
充水	双边	3	7.3	124	5.90	2.5
		4	7.8	115	5.48	2.3
		5	8.4	107	5.10	2.2
		6	9.0	98	4.67	2.0
	单边	5	14.9	68	6.48	1.4
		6	15.3	64	6.10	1.3
		7	15.8	60	5.71	1.2
泄水	双边	3	8.8	108	5.14	2.2
		4	9.2	100	4.76	2.0
		5	9.5	94	4.48	1.9
		6	9.9	88	4.19	1.8
	单边	5	18.0	59	5.62	1.2
		6	18.5	56	5.33	1.1
		7	19.1	53	5.05	1.1

模型试验成果表明，渭沱船闸采用的闸墙长廊道侧支孔输水系统特征断面水力指标均满足规范要求，双边启门速率为 3～6 min 时，输水总时长＜10 min，满足设计需求。单边输水时，输水流量明显减小，输水时间显著延长，但单边输水为事故或检修等特殊工况，不属于输水系统设计控制工况。因此，试验成果表明渭沱船闸输水系统设计合理，达到了设计目标，并留有一定富余度。

3.3　惯性超高降

水流在非恒定运动过程中将产生惯性作用，受此影响，闸室水位在充、泄水时将产生超高、超降现象。试验实测了阀门双边开启充泄水时闸室水位超高、超降值，为了验证并比较模型实测值，根据试验资料，对船闸充、泄水惯性超高和超降 d 进行计算。计算公式如下：

$$d=\mu^2\omega L_{np}/\Omega \tag{1}$$

式中：μ 为流量系数；ω 为阀门处廊道面积；L_{np} 为计算段廊道相对阀门处廊道断面处的换算长度；Ω 为闸室水域面积。

输水系统水力学试验得出，输水系统推荐方案、最不利水位组合条件下，当渭沱船闸阀门双边开启 $t_v=3\sim6$ min，实测超高值为 0.26～0.28 m，计算值为一定值 0.29 m；泄水实测超降值为−0.20～

-0.19 m，计算值为一定值-0.22 m。实测双边充水过程惯性超高值略大于规范建议值 0.25 m，考虑到原型流量系数更大，惯性超高降将进一步增加，需要采用提前动水关阀或平水开启人字门等方式控制惯性超高降。

物理模型针对双边充水过程，开展了提前动水关阀试验研究，试验成果见表 3。考虑到过快的闭门速率对阀门启闭系统将提出更高要求，本次研究采用 2 min 速率动水闭门，通过一系列不同提前动水闭门水头试验，确定渭沱船闸采用提前 0.5 m 水头动水全关阀门的方式，可将惯性超高控制在 0.25 m 以内，满足规范要求。采用提前动水闭门措施后，充水过程输水总时长将延长约 0.5 min，仍然满足设计要求。

表 3　提前动水闭门控制惯性超高降试验成果

Tab. 3　Results of inertia ultra high drop test for pre-moving water closing control

运行方式	阀门开启时间/min	惯性超高/m		输水时间/min	
		最不利运行方式	提前 0.5 m 采用 2 min 速率动水全关阀门	最不利运行方式	提前 0.5 m 采用 2 min 速率动水全关阀门
双边充水	3	0.28	0.11	7.3	7.8
	4	0.28	0.10	7.8	8.3
	5	0.27	0.10	8.4	8.9
	6	0.26	0.10	9.0	9.5

3.4　闸室船舶停泊条件

设计方案条件下，闸室内明沟出流偏向于闸室中部，闸室两侧出流相对略少。因此，在不改变明沟深度的前提下，可以通过减小明沟宽度来调整闸室横向分流比，将更多的水体挑向闸室两侧。同时，考虑到设计方案条件下，闸室出流条件虽未达到最优，但已无不良流态，整体出流效果良好，因此，从节约工程投资的角度，进一步考虑取消消能明沟，支孔上抬 0.4 m，进一步简化输水系统闸室段布置。设计方案条件下，明沟深度为 0.4 m，已达到出水支孔高度（0.8 m）的 50%，根据研究经验，进一步增加明沟深度可能会对支孔出流造成明显的阻流作用，因此，本次优化试验暂不考虑修改明沟深度。具体修改方案见表 4 和图 3，各方案闸室中部船舶最大平均系缆力见表 5。

可见，设计方案条件下，1 000 吨级船舶停于闸室内，双边充水工况下，船舶系缆力较小，均在 10 kN 以内，船舶受力均满足规范要求。相对于设计方案，修改方案 1 条件下，闸室中部船舶受力略有减小，船闸侧部船舶受力基本维持一致。修改方案 2 条件下，闸室船舶受力明显增大，特别是横向系缆力，几乎成倍增加，快速启门工况下，船舶横向系缆力距离规范限值的富余度明显减小。

表 4　闸室消能明沟修改方案

Tab. 4　Modification plan for energy dissipation open ditch in sluice chamber

方案名称	方案描述	备注
设计方案	明沟宽 1.5 m、深 0.4 m	闸室中部出流略多
修改方案 1	明沟宽 1.0 m、深 0.4 m	通过修改明沟宽度来调整闸室横向分流比
修改方案 2	取消明沟，支孔抬高 0.4 m	进一步节约工程投资，出流效果有待检验

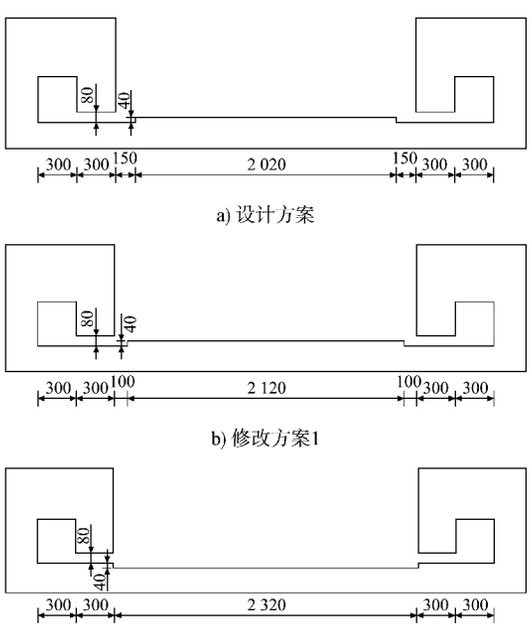


图 3　闸室消能明沟修改方案（单位：cm）

Fig. 3　Modification plan for energy dissipation open ditch in sluice chamber（unit：cm）

表 5　不同消能工方案下闸室船舶最大平均系缆力对比

Tab. 5　Comparison of maximum average mooring force of lock chamber vessels under different energy dissipation

方案	系缆力部位		系缆力/kN			
			t_v=3 min	t_v=4 min	t_v=5 min	t_v=6 min
设计方案	前纵	上游(+)	7	6	5	5
		下游(−)	−6	−4	−4	−5
	前横	左岸(+)	3	5	6	3
		右岸(−)	−6	−5	−5	−4
	后横	左岸(+)	2	4	4	3
		右岸(−)	−5	−6	−5	−5
修改方案 1	前纵	上游(+)	6	5	4	4
		下游(−)	−9	−7	−6	−5
	前横	左岸(+)	5	4	3	4
		右岸(−)	−3	−4	−3	−4
	后横	左岸(+)	5	4	2	3
		右岸(−)	−7	−7	−6	−6
修改方案 2	前纵	上游(+)	9	7	6	5
		下游(−)	−10	−9	−9	−7
	前横	左岸(+)	8	8	6	6
		右岸(−)	−1	−2	−2	−1
	后横	左岸(+)	12	7	7	6
		右岸(−)	−3	−4	−3	−4

注：1 000 吨级船舶系缆力允许值：纵向为 32 kN、横向 16 kN。系缆力方向，上游为“+”，下游为“−”。

综上，由于渭沱船闸工作水头不高，试验工况条件下，船舶受力较小，修改明沟宽度对船舶受力的影响不大，但完全取消消能工会对闸室横向出流比影响较大，船舶横向系缆力增幅明显。考虑到取消消能工同时需提高出水支孔高程，降低了出水段的淹没深度，不利于船闸未来增速提效，因此，船闸消能明沟为 1.0 m 宽、0.4 m 深时，闸室内停泊条件较优。

3.5　泄水口及下引航道水流条件

3.5.1　泄水口布置

因地形条件、枢纽平面布置等多方面限制，渭沱船闸下游引航道布置条件有限，采用弯曲布置，弯曲半径为 315 m，由闸室宽度 23 m 逐步扩大至 50 m。因此，若采用传统顶侧格栅出水无法满足下游引航道的流速要求。其他采用格栅出水形式的船闸试验数据统计见表 6，可以发现泄水口顶部最大壅高值与出流比(格栅孔面积与阀门面积的比值)和流量系数之间存在一定关系。出流比和流量系数共同作用于泄水口顶部最大壅高，且呈现反比关系。因此，为减小渭沱船闸泄水口顶部壅高，下游泄水口采用“顶侧联合出水”格栅式消能室，顶侧格栅均采用“两端疏、中间密”的非等宽形式，具体形式和尺寸见图 4。侧面格栅出流后与消力池衔接，消力池深 4.6 m、宽 4 m。

表 6　不同船闸泄水口最大壅高

Tab. 6　Maximum backwater height at different ship lock discharge outlets

船闸	阀门面积/m²	格栅孔面积/m²	出流比	流量系数	最大壅高/m
淮安东	50.0	60.0	1.2	0.613	0.83
山秀	30.4	60.8	2.0	0.651	0.73
微山	40.0	75.0	1.88	0.786	0.62
剑潭一线	21.0	55.2	2.6	0.642	0.58
笏洲	45.0	90.0	2.0	0.754	0.20
渭沱	21.0	128.0	7.1	0.671	0.29

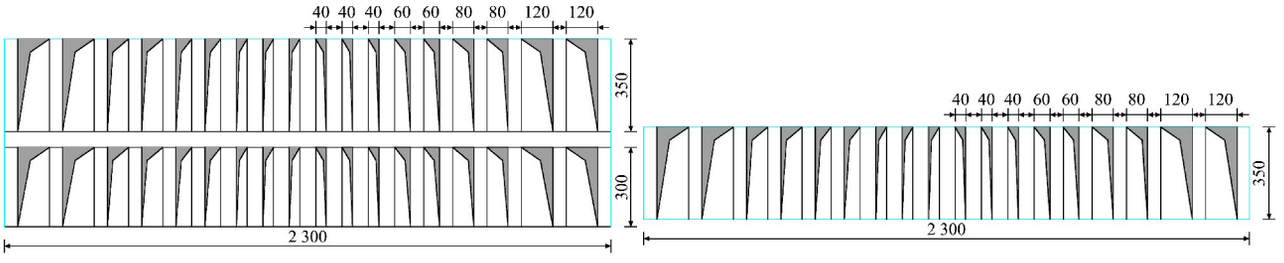


图 4　泄水口消能格栅布置(单位：mm)

Fig. 4　Energy dissipation grid layout of the outlet(unit：mm)

水运工程

3.5.2　泄水口流态

采用“顶侧联合出水”格栅式消能室后，双边泄水时（t_v = 4 min），泄水初期，下泄流量不大，泄水口水面较为平静，各格栅出水孔之间无明显壅高。随着阀门开度的增大，泄水口顶部格栅逐步形成“左-中-右”3 个相对明显的出水壅高点，且无明显差异，说明格栅较好地分散了水流；泄水中后期，中部水位壅高逐渐降低，未见“剪刀水”等不良流态。单边泄水时（t_v = 6 min），随下泄流量的不断增加，从出水闸墙侧逐步形成向对岸的横向比降，由于泄水口采用的是顶侧联合出水形式，出流面积较大，因此未形成明显的水面壅高，单侧出流时横向扩散范围有限，未冲击对侧闸墙及引航道边墙。水体经泄水口逐步向下游扩散，出流侧流速相对更高，但并未在引航道内形成回流等不良流态。

可见，渭沱船闸泄水过程中，泄水口出流较为均匀，未见不良流态，说明泄水口消能工布置合理，对下泄水体的分流比调节较为适宜，泄水口水流条件良好。

3.5.3　泄水口水位波动

输水系统推荐方案布置条件下，试验观测了船闸泄水过程中下闸首出水口顶部的水位波动情况，水位组合为上游正常蓄水位 206.00 m 至下游最低通航水位 199.40 m，船闸启门方式为双边开启 t_v = 3 ~ 6 min。各工况下泄水口附近水位变化过程见图 5。

成果表明，下闸首泄水口顶部实测最大壅高值为 22 ~ 29 cm，跌水值在 4 cm 以内。可见，设计水位条件下，渭沱船闸泄水口附近水位壅高在 30 cm 以内，说明采用顶侧联合出水的出流方式较好地调节了出流比例，相较于类似船闸仅采用顶部出流方案，其水位壅高明显降低。同时，结合泄水口流态可知，格栅左-中-右 3 部分出流基本均匀，未形成“剪刀水”等不良流态，说明格栅出流支孔布置合理。另外，需注意的是泄水口跌水值较小，一方面因为顶侧联合泄流方式下，泄水口附近水位变幅本来不大；另一方面因为在模型试验方案下，下游引航道导航调顺段弯曲度较大，可能对下泄水流的往复运动有抑制作用，因此水位变化偏缓。

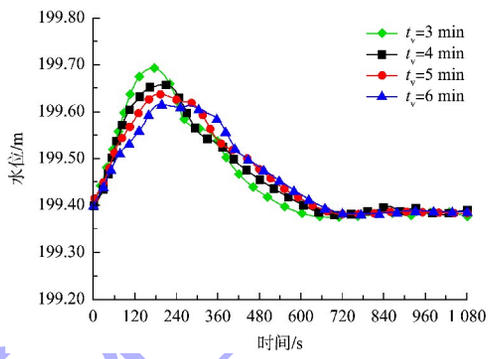


图 5　泄水过程泄水口水位变化过程线

Fig. 5　Process line of water level change at discharge outlet during discharge process

4　结论

1）渭沱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，双边运行工况下闸室平均输水时间均可满足≤10 min 的设计要求。

2）船闸双边惯性超高略大于规范值，采用提前 0.5 m 水头动水全关阀门的方式可将惯性超高减小到 0.1 m 左右，输水时间仅延长约 0.5 min。

3）设置消能明沟条件下，船舶受力较小，修改明沟宽度对船舶受力的影响不大；但完全取消消能明沟会对闸室横向出流比影响较大，船舶横向系缆力增幅明显。

4）船闸下游出水口采用“顶侧联合出水”格栅式消能室效果较优，格栅消能室顶部出流呈现“左-中-右”3 个局部壅高现象，各壅高点差异不大，且整体壅高不明显，泄水口出流较为均匀，未见明显不良流态，说明泄水口消能工布置合理，对下泄水体的分流比调节较为合适。

参考文献：

[1] 吴英卓, 江耀祖, 刘火箭, 等. 适应整体式闸室结构的船闸输水系统研究[J]. 人民长江, 2021, 52(1): 145-150, 166.
WU Y Z, JIANG Y Z, LIU H J, et al. Research on ship lock filling and emptying system adapted to integral lock chamber structure [J]. Yangtze River, 2021, 52(1): 145-150, 166.

[2] 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.
BU M F, SUN B H, HU F J, et al. Design and test study on filling and emptying system of Nianpanshan lock[J]. Port & waterway engineering, 2022(5): 104-109, 138.

[3] 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.

[4] 陈明, 姜鹏, 周绪生, 等. 融江麻石船闸改建工程输水系统水力学模型试验研究[J]. 水运工程, 2024(10): 75-83.
CHEN M, JIANG P, ZHOU X S, et al. Hydraulic model test of filling and emptying system for Rongjiang Mashi ship lock reconstruction project [J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 75-83.

[5] 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.
ZHOU J, KUANG T, WANG N. Type selection and test research of filling and emptying system in medium and high head ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2021(6): 121-127.

[6] 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.
NING W, LI J, XUAN G X, et al. Layout and hydraulic modelling test of the filling and emptying system of Honghua 2nd lane lock on Liujiang River [J]. Port & waterway engineering, 2017(10): 154-159.

[7] 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.
KAN Y J, LI J, XUAN G X, et al. Hydraulic modelling test of lock filling and emptying system of Shushan Pump Station [J]. Port & waterway engineering, 2017(9): 126-130, 143.

[8] 杨嵚. 七星墩船闸输水系统布置及优化[J]. 水运工程, 2023(12): 145-150.
YANG Q. Layout and optimization of water conveyance system of Qixingdun ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2023(12): 145-150.

[9] 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.

[10] 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(10): 114-116.
HUANG Y, CAO F S. Research on selection criteria of ship lock water conveyance system [J]. China water transport(the second half of the month), 2019(10): 114-116.

[11] 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.
LI Z H, XUAN G X. Filling and emptying system decision for navigation lock based on multiple factors[J]. Port & waterway engineering, 2020(10): 1-6.

(本文编辑　赵娟)

水运工程