



融江麻石船闸改建工程输水系统 水力学模型试验研究*

陈明¹, 姜鹏¹, 周绪生¹, 王多银¹, 李学义¹, 杨艳红²

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 北京市官厅水库管理处, 北京 075441)

摘要: 针对麻石船闸改建工程闸室规模大、工作水头高、水力指标要求高等问题, 通过建立比尺为 1:25 的整体水工物理模型, 对船闸输水过程水力特性、船舶停泊条件、输水廊道压力特性、进出水口及引航道水流条件等展开研究。结果表明: 通过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: 麻石船闸; 输水系统; 水力特性; 模型试验

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)10-0075-09

Hydraulic model test of filling and emptying system for Rongjiang Mashi ship lock reconstruction project

CHEN Ming¹, JIANG Peng¹, ZHOU Xusheng¹, WANG Duoyin¹, LI Xueyi¹, YANG Yanhong²

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Beijing Guanting Reservoir Management Office, Beijing 075441, China)

Abstract: In addressing the challenges posed by the reconstruction of the Mashi ship lock, including a large lock chamber, high water head, and stringent hydraulic requirements, a physical model with a scale of 1:25 is established. The hydraulic characteristics of the water filling process, berthing conditions of the ships, pressure characteristics in the water transfer corridor, and flow conditions in the inlet/outlet and approach channel are investigated. The results show that through the implementation of optimization measures such as incorporating energy dissipating blocks in the open ditch, enlarging the turning radius of the corridor protruding body rising cans, increasing the inlet area, and decreasing the inlet elevation, all hydraulic indicators meet the specified standards and design requirements under the recommended valve opening mode. The research results can provide reference for similar engineering projects.

Keywords: Mashi ship lock; filling and emptying system; hydraulic characteristics; model test

西江黄金水道“一干七支”是西南、中南地区连接粤港澳、北部湾经济区乃至东盟国家的大通道、大动脉, 是国家区域发展战略规划实施中珠江—西江经济带的基础和核心, 也是实施生态文

明建设和实现可持续发展的重要平台^[1]。为加快黄金水道发展, 根据《研究西江水系“一干七支”过船设施改扩建项目前期工作的纪要》及《广西壮族自治区交通运输厅发展和改革委员会关于印发广

收稿日期: 2024-01-05

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3206104)

作者简介: 陈明 (1983—), 男, 教授, 从事通航水力学研究。

西内河过船设施改扩建项目前期工作推进方案的通知》,拟对融江麻石电站现有船闸进行改建。已建的融江麻石船闸为单级船闸^[2],布置在电站右岸。船闸按通行 60 t 机动驳船或 2 个 20.0 m×6.0 m (长×宽)的过坝木排尺寸设计,吃水深分别为 0.9 及 0.7 m。船闸等级为 VI 级^[3],闸室有效尺寸为 40.5 m×8.0 m×1.1 m (长×宽×槛上水深)。融江麻石船闸改建标准为通航 2×1 000 吨级顶推船队、1 500 吨级单船。推荐方案闸室有效尺寸为 190.0 m×23.0 m×4.8 m,最大工作水头为 22.0 m。

鉴于输水系统水动力学的复杂性,目前研究主要以模型试验为主。如周俊等^[4]依托贵州旁海枢纽工程,通过物理模型试验对船闸输水水力特性进行研究,确定并优化输水系统布置及船闸结构,为解决中高水头船闸平面输水阀门空化难题提出系列优化工程措施;张震等^[5]通过 1:30 物理模型试验,对船闸输水过程的水力特性、船舶停泊条件和引航道水流条件展开研究,结果表明:采用局部分散输水系统布置,在推荐的阀门运行方式下,船闸各项水力指标均满足规范要求;周家俞等^[6]依托贵港二线船闸建立水工模型,测定船闸充、泄水廊道压力等相关指标,针对充水过程中阀门井产生的掺气现象,通过降低阀门井廊道顶高程进行优化,使廊道压力得到明显提高;宁武等^[7]依托红花二线船闸建立比尺为 1:30 的物理模型,研究不同阀门运行方式下输水系统水力特性、闸室船舶停泊条件及进出口水流条件,提出采用汇合廊道和双纵支廊道的布置形式,进一步改善大宽度船闸单边运行输水过程中,因闸室横向水流分布不均而产生的船舶横向系缆力超标问题;卜美飞等^[8]通过 1:15 物理模型试验,分析碾盘山船闸输水系统水力特性、廊道压力及闸室停泊条件,试验表明:碾盘山船闸采用闸墙长廊道侧支孔输水系统合理,在设计阀门运行方式

下,各项水力指标均满足规范要求;杨崧^[9]采用模型试验的方法研究七星墩船闸输水系统廊道压力特性及进出口水流条件,提出通过降低泄水阀门段高程、优化进水口格栅布置、调整出水口处消力槛等措施,解决原设计方案中泄水阀门段廊道压力偏低、进出口存在不良水力现象的问题。

由于改建后船闸闸室尺度较大,要求水力指标较高,如何确保船闸输水效率及闸室船舶停泊安全是需要解决的关键问题。因此,本文依托麻石枢纽船闸改建工程,确定船闸输水系统类型,并建立比尺为 1:25 的物理模型,对不同水位组合及阀门运行方式下的船闸输水过程水力特性、闸室船舶停泊条件、输水廊道压力特性、进出口及引航道水流条件等展开研究。

1 输水系统布置

输水系统类型可根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[10](简称规范)中提出的判别公式进行选取,如下式:

$$m = \frac{T}{\sqrt{H}} \quad (1)$$

式中: m 为判别系数,当 $m > 3.5$ 时采用集中输水系统,当 $m < 2.5$ 时采用分散输水系统,当 m 为 2.5~3.5 时应进行技术经济论证或参照类似工程选定; T 为输水时间,取 8~12 min; H 为设计水头,取 22.0 m。

由式(1)计算可得: m 值在 1.71~2.56 之间。考虑该枢纽输水效率、船闸基础特点及类似工程经验,并参考《麻石船闸输水系统布置及水力计算分析》^[11]报告中提出的两种分散输水系统方案比选,综合分析后确定采用闸底长廊道侧支孔明沟消能分散输水系统^[12-13]。船闸各部位特征尺寸见表 1,船闸输水系统总体布置见图 1。

表 1 船闸输水系统特征尺寸

部位	特征	面积/m ²	与阀门面积比
进水口	导墙上垂直 4 支孔进水,喉部高度不变、宽度分级收缩	128.00	4.32
充水阀门段廊道	阀门处廊道顶高程 104.00 m,底高程 100.00 m,最小淹没水深 8.00 m	29.60	1.00
闸底主廊道	通过垂直转弯与水平转弯与阀门段廊道连接	36.00	1.22
闸室出水段廊道	闸底主廊道出水段各设置 32 个出水孔,分为 2 组,上游至下游孔口尺寸(宽×高)分别为 1.00 m×0.56 m(16 孔)、1.00 m×0.50 m(16 孔)	33.92	1.15
明沟	宽 4.40 m、深 5.00 m	-	-
泄水阀门段廊道	阀门前通过水平转弯和斜坡与闸底出水廊道连接,阀门后通过水平转弯与下闸首出水口连接,廊道高度不变;泄水阀门处廊道顶最小淹没水深 8.00 m	29.60	1.00
出水口	下闸首出水口消能室顶部布置出水格栅,格栅孔缝尺寸为 2×14×3.70 m×0.90 m(双排×数量×长×宽),出水孔总面积为 93.24 m ²	93.24	3.15

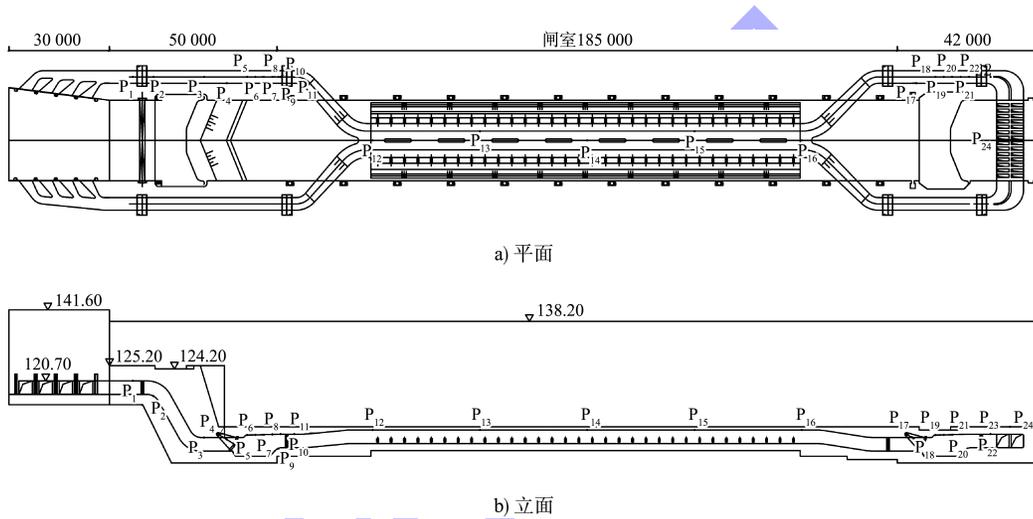


图 1 船闸输水系统总体布置 (高程: m; 尺寸: mm)

2 模型设计

根据重力相似准则建立比尺为 1:25 的整体水工物理模型。模型范围包括船闸上/下闸首、进/出水口、闸室、输水系统、上/下游部分引航道(图 2)。

为便于观察,输水阀门段选用有机玻璃制作,输水廊道选用聚乙烯塑料板制作,闸室边墙选用钢板制作,上、下游引航道采用红砖砌成,引航道内地形选用水泥沙浆抹面。

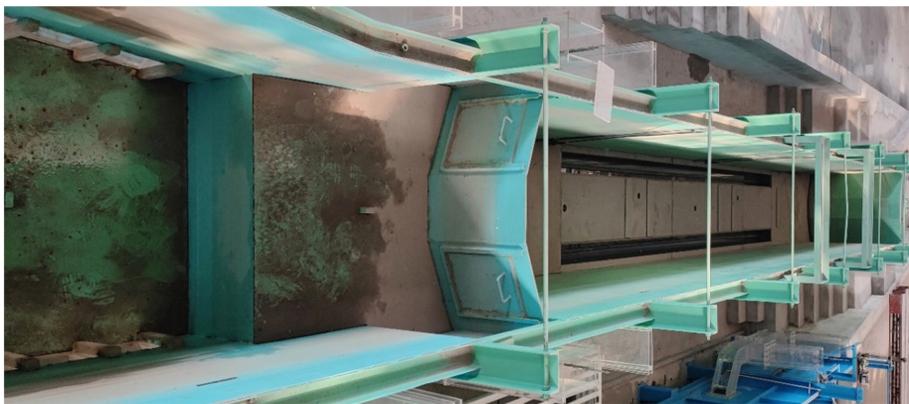


图 2 船闸 1:25 整体水工物理模型

3 试验成果与分析

3.1 闸室充、泄水水力特性

模型试验针对最大水头工况(上游最高通航水位 134.0 m、下游最低通航水位 112.0 m)及最低

水位工况(上游最低通航水位 130.0 m、下游最低通航水位 112.0 m)开展研究。闸室输水水力特征值见表 2。

表 2 闸室输水水力特征值

水位组合	输水方式	t_v/min	T/min	$Q_{\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	$U_{\max}/(\text{m} \cdot \text{min}^{-1})$	$v_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$W_{\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$u_{in,\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$u_{out,\max}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
最大水头组合	双边充水	5	11.05	330.02	3.79	11.15	9.17	1.96	-
		6	11.33	313.18	3.63	10.58	8.70	1.86	-
		7	11.72	291.86	3.34	9.86	8.11	1.74	-
		8	12.08	281.88	3.33	9.52	7.83	1.68	-
	双边泄水	5	11.22	294.93	-3.46	9.96	8.19	-	4.98
		6	11.64	283.64	-3.31	9.58	7.88	-	4.79
		7	12.07	270.96	-3.16	9.15	7.53	-	4.58
		8	12.56	260.65	-3.02	8.81	7.24	-	4.40
最低水位组合	双边充水	5	9.68	283.51	3.28	9.58	7.88	1.69	-
		6	10.17	271.32	3.12	9.17	7.54	1.62	-
		7	10.50	254.36	2.96	8.59	7.07	1.51	-
		8	11.08	240.13	2.91	8.11	6.67	1.43	-
	双边泄水	5	10.05	255.03	-3.12	8.62	7.08	-	4.31
		6	10.64	243.93	-2.93	8.24	6.78	-	4.12
		7	11.13	231.54	-2.80	7.82	6.43	-	3.91
		8	11.36	225.39	-2.72	7.61	6.26	-	3.81

注： t_v 为阀门开启时间， T 为闸室输水时间， Q_{\max} 为最大流量， U_{\max} 为闸室水面最大上升/下降速度， v_{\max} 为阀门廊道处最大断面流速， W_{\max} 为主廊道最大断面流速， $u_{in,\max}$ 为进水口最大断面流速， $u_{out,\max}$ 为出水口最大断面流速。

由表 2 可知：最大水头工况下，当双边充水阀门开启时间 $t_v \leq 7 \text{ min}$ 、双边泄水阀门开启时间 $t_v \leq 6 \text{ min}$ 时，闸室输水时间 $T < 12 \text{ min}$ ，满足设计输水时间的要求。对比分析闸室输水水力特征值可以发现，除输水时间 T 外，相同阀门开启时间条件下，充水工况水力特征值均大于泄水工况，因此，在后续分析中仅考虑充水工况下水力特征值是否满足规范要求。此外，考虑到模型缩尺效应与船闸实际运行过程，原型船闸运行时流量系数较模型将有所增加，输水时间较模型将有所缩短，根据国内外已建船闸原型观测与模型试验成果对比，船闸流量系数 $\mu_{\text{原型}} = 1.13\mu_{\text{模型}}$ ，船闸输水时间 $T_{\text{原型}} = 0.857T_{\text{模型}}^{[14]}$ 。因此认为将泄水阀门开启时间控制在 7 min 左右可满足设计要求。

最低水位工况下，当双边输水阀门开启时间 $t_v \leq 8 \text{ min}$ 时，闸室输水时间 $T < 12 \text{ min}$ ，满足设计

输水时间的要求。试验中发现，当充水阀门采用 7 min 开启，阀门全开时进水口处可能出现未掺气的小漩涡，出于安全考虑，推荐采用 8 min 阀门开启方式。

综上所述，最大水头工况下，控制充、泄水阀门开启时间为 7 min；最低水位工况下，控制充、泄水阀门开启时间为 8 min，所有水力特征值均满足设计要求。

3.2 船舶(队)停泊条件

闸室船舶(队)停泊条件试验工况按最大水头工况充水运行考虑。船舶模型以 1 500 t 内河船舶与 2×1 000 t 顶推船队为主，几何比尺 1:25，按排水量进行配重。将 1 500 t 内河船舶分别放置在闸室上部、中部及下部；将 2×1 000 t 顶推船队纵向排列于闸室上游进行试验。采用双边输水方式，阀门开启时间为 6~8 min。

鉴于规范中没有 1 500 t 船舶相应的允许系缆力, 孔令振^[15]根据现有的船舶吨位及对应的允许系缆力进行船舶允许系缆力拟合, 得到 1 500 t 船舶对应的系缆力允许值, 其纵向、横向系缆力允许值分别为 36.89、18.49 kN。

在 1 500 t 船舶系缆力试验中, 当阀门开启时间小于 8 min 时, 船舶后横向系缆力超出允许值, 即使采用 8 min 启门, 船舶后横向系缆力也接近允许值, 见图 3a)。因此, 为解决输水过程中船舶后横向系缆力超标问题, 采用在明沟中增设消力槛的方式对模型进行优化^[16](图 4)。优化后 1 500 t 船舶后横向系缆力见图 3b), 闸室内船舶(队)最大系缆力见表 3。

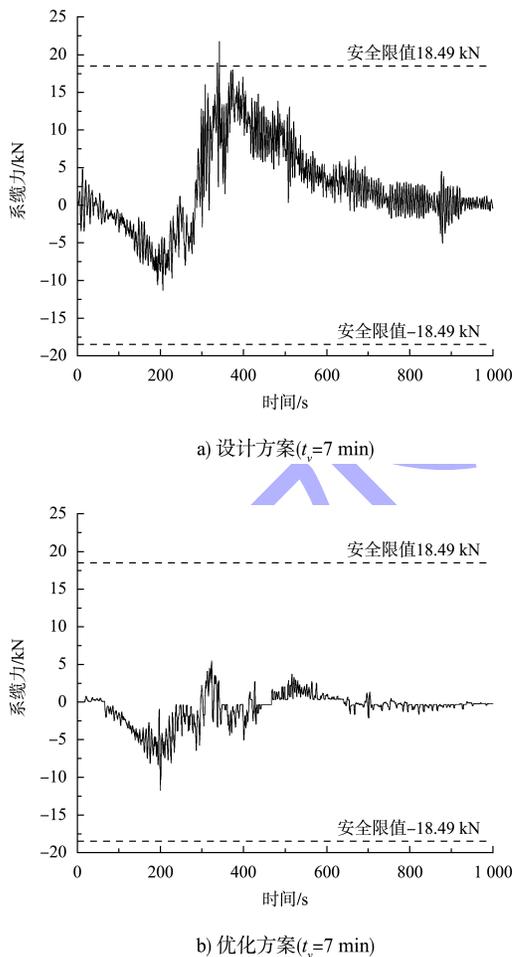


图 3 闸室中部典型工况下 1 500 t 船舶后横向系缆力过程线

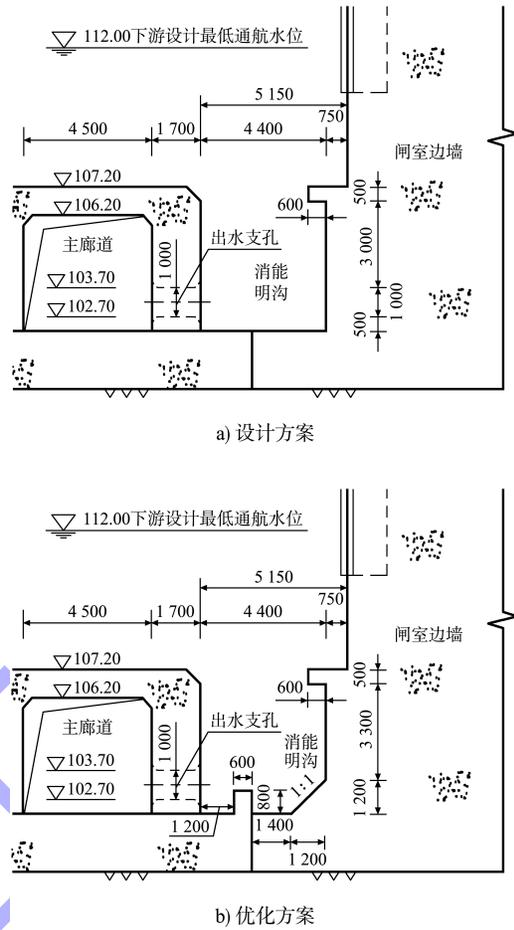


图 4 明沟优化布置 (高程: m; 尺寸: mm)

表 3 闸室内船舶(队)最大系缆力

船舶(队)类型	阀门运行方式	t_v /min	船舶(队)停靠位置	纵向力/kN	前横向力/kN	后横向力/kN
1 500 t	双边充水	6	闸室上部	23.24	9.32	14.44
			闸室中部	15.52	14.00	13.42
			闸室下部	18.16	11.48	8.06
		7	闸室上部	16.96	9.31	11.20
			闸室中部	15.19	11.08	12.11
			闸室下部	18.53	11.28	8.28
2×1 000 t	双边充水	8	闸室上部	20.16	9.09	13.04
			闸室中部	14.71	10.33	11.75
			闸室下部	18.85	8.84	6.08
		6	闸室上部	14.57	12.73	15.42
			闸室中部	20.05	10.64	14.73
			闸室上部	17.90	10.60	13.43

注: 2×1 000 t 船队纵向系缆力允许值为 40.00 kN; 横向系缆力允许值为 20.00 kN。

试验结果表明：在明沟中增设消力槛后，闸室内无明显纵向、横向水流，水流紊动较小，水面平稳。因此在推荐的阀门开启方式下，设计船型系缆力均满足规范要求。

本工程物理模型的前池和尾池距离上、下游部分引航道停泊区很近，无法满足引航道内船舶系缆力特性的试验条件。在具体研究过程中，对于引航道停泊段船舶系缆力特性，借助平面二维水流数学模型，依据规范中引航道内船舶(队)系缆力计算公式进行研究^[17]。试验按最大水头工况考虑，引航道内船舶(队)最大系缆力见表4。

由表4可知，最大水头工况下，阀门7 min 双边充水运行，上游引航道停泊段1 500 t 及2×1 000 t 船舶(队)最大系缆力分别为10.62、10.37 kN；阀门7 min 双边泄水运行，下游引航道停泊段1 500 t 及2×1 000 t 船舶(队)最大系缆力分别为

34.95、32.70 kN。综上所述，在推荐的阀门运行方式下，上、下游引航道停泊段设计船型系缆力均满足规范要求。

表4 引航道停泊段船舶(队)最大系缆力

船舶类型	t_v /min	阀门运行方式	引航道	系缆力/kN
1 500 t	7	双边充水	上引航道	10.62
			下引航道	34.95
2×1000 t		双边泄水	上引航道	10.37
			下引航道	32.70

注：1 500 t 船舶纵向系缆力允许值为36.89 kN；2×1 000 t 船队纵向系缆力允许值为40.00 kN。

3.3 输水廊道压力特性

为了解输水廊道典型部位非恒定流压力特性，在输水廊道顶部或侧面共布置24个压力测点(图1)，利用压力传感器测量输水阀门段廊道顶部输水过程非恒定流压力特性。实测阀门段特征部位非恒定流压力统计值见表5。

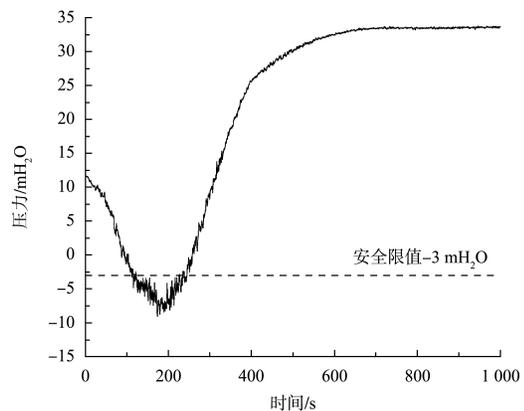
表5 阀门段特征部位非恒定流压力

阀门运行方式	阀门开启时间/min	阀门后廊道顶部最低平均压力/mH ₂ O	阀门后廊道顶部最低脉动压力/mH ₂ O	升坎处最低平均压力/mH ₂ O	升坎处最低脉动压力/mH ₂ O	鹅颈转弯段最低平均压力/mH ₂ O	鹅颈转弯段最低脉动压力/mH ₂ O
双边充水	7	2.59	0.68	-6.27	-9.01	5.81	5.57
	8	3.16	1.71	-5.44	-7.80	6.95	6.61
双边泄水	7	2.83	1.66	-	-	-	-
	8	2.30	0.76	-	-	-	-

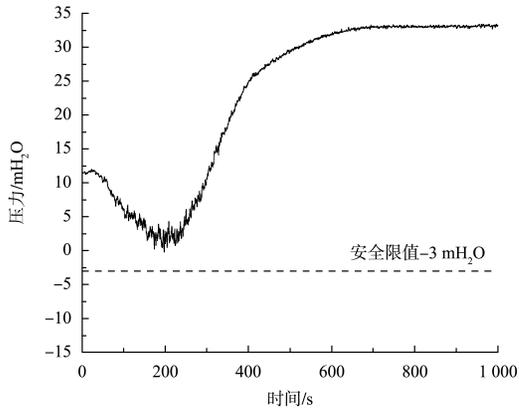
由表5可知：最大设计水头工况下，充水阀门双边开启($t_v=7、8$ min)，阀门后廊道顶部最低平均压力分别为2.59、3.16 mH₂O，最低脉动压力分别为0.68、1.71 mH₂O，升坎处最低平均压力分别为-6.27、-5.44 mH₂O，最低脉动压力分别为-9.01、-7.80 mH₂O；泄水阀门双边开启($t_v=7、8$ min)，阀门后廊道顶部最低平均压力分别为2.83、2.30 mH₂O，最低脉动压力分别为1.66、0.76 mH₂O。设计方案在升坎处的廊道压力明显低于规范允许值(-3 mH₂O)，见图5a)，且设计中的门楣掺气也不能解决升坎处负压，因此有必要对阀门后廊道突扩体升坎处进行优化。

优化方案为调整阀门后廊道突扩体升坎转弯曲线，将升坎处转弯半径增大至8 m(图6)。经优

化后，充水阀门双边开启($t_v=7、8$ min)时，升坎处最低平均压力分别为1.98、2.68 mH₂O，最低脉动压力分别为-0.26、0.74 mH₂O，见图5b)。压力得到明显改善，满足规范及设计要求。



a) 设计方案($t_v=7$ min)



b) 优化方案($t_v=7$ min)

图 5 典型工况下阀门段升坎处非恒定流压力过程线 (双边充水)

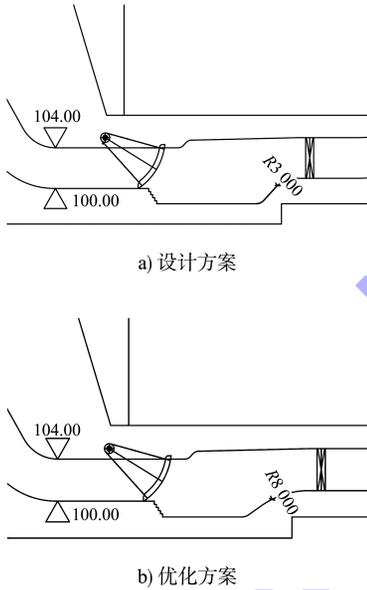


图 6 充水阀门后廊道突扩体升坎优化布置 (高程: m; 尺寸: mm)

3.4 进、出水口及引航道水流条件

上闸首进水口采用闸墙垂直多孔布置，廊道进水口顶高程 120.7m，进水口面积为 $2 \times 4 \times 4.0 \text{ m} \times 4.0 \text{ m}$ (双侧 \times 每侧孔口数量 \times 宽 \times 高) = 128.0 m^2 。试验发现：最大水头工况下，阀门 7 min 开启时出现立轴漩涡现象(未形成气泡)；最低水位工况下，阀门 7 min 开启时出现串气立轴漩涡现象(图 7)。为改善进水口流态，将进水口高程降低 3 m、进水口面积调整为 $2 \times 5 \times 4.2 \text{ m} \times 4.0 \text{ m} = 168.0 \text{ m}^2$ ，见图 8。

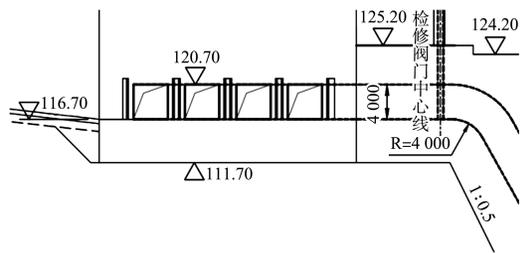


a) 最大水头工况($t_v=7$ min)

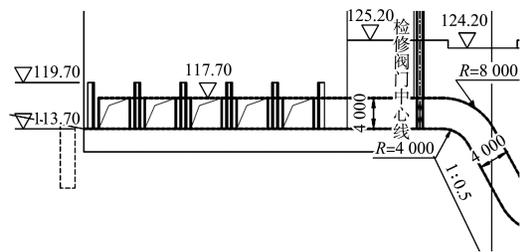


b) 最低水位工况($t_v=7$ min)

图 7 进水口流态



a) 设计方案



b) 优化方案

图 8 进水口优化布置 (高程: m; 尺寸: mm)

经优化调整后，船闸充水过程中进水口附近水面平稳，未形成有害串气漩涡现象。最大水头工况下，充水阀门采用5~8 min 双边开启，进水口淹没水深为16.3 m，充水最大流量为330.02 m³/s ($t_v=5$ min)，进水口最大平均流速为1.96 m/s ($t_v=5$ min)，当 $t_v=7$ min 阀门双边开启时，上游引航道最大断面平均流速为0.47 m/s，满足规范要求；最低水位工况下，充水阀门采用5~8 min 双边开启，上游进水口淹没水深为12.3 m，充水最大流量为283.51 m³/s、进水口最大平均流速为1.69 m/s ($t_v=5$ min)，当 $t_v=8$ min 阀门双边开启时，上游引航道最大断面平均流速为0.74 m/s，满足规范要求。

下闸首出水口选用顶出水格栅式消能室，格栅孔缝尺寸为2×14×3.7 m×0.9 m(双排×数量×长×宽)，出水孔总面积为93.24 m²，消能室内设3道挑流坎，以调整出水支孔的出流分配(图9)，出水口及下游引航道水流流态见图10。鉴于模型场地原因，针对下引航道表面流场流速分布，通过建立平面二维水流数学模型进行研究。下游引航道流速见表6，下游引航道流场分布见图11。

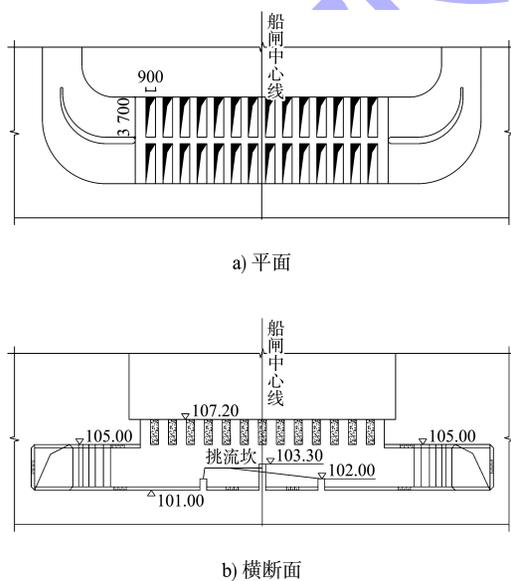


图9 下闸首出水口消能工布置(高程:m;尺寸:mm)



图10 出水口及下游引航道水流流态
(最大水头工况, $t_v=7$ min)

表6 下游引航道流速(最大水头工况, $t_v=7$ min)

测点	距下闸首 距离/m	纵向流速/ (m·s ⁻¹)	横向流速/ (m·s ⁻¹)
X ₁	184	1.12	-0.08
X ₂	204	0.96	0.00
X ₃	224	0.95	0.00
X ₄	244	0.88	0.00
X ₅	264	0.92	0.00
X ₆	284	0.84	0.00
X ₇	304	0.81	0.00
X ₈	324	0.86	0.00
X ₉	344	0.88	0.02
X ₁₀	364	0.89	0.02
X ₁₁	384	0.87	0.03

注: 下游引航道制动段与停泊段水面最大纵向流速≤1.00 m/s; 最大横向流速≤0.15 m/s。

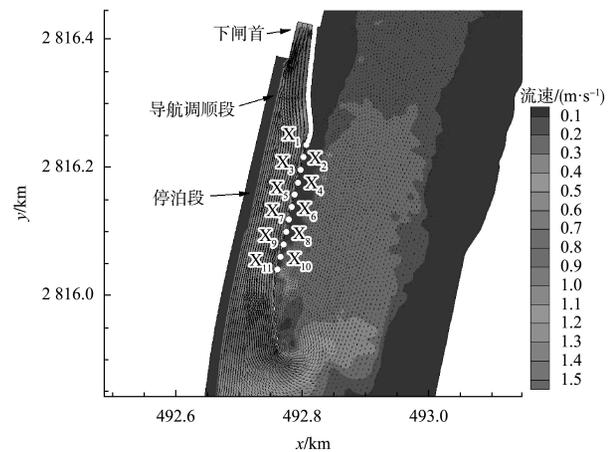


图11 下游引航道流场分布(最大水头工况, $t_v=7$ min)

由表6和图11可知,最大水头工况下,阀门7 min 双边泄水运行,下游引航道内整体水流流态良好,未见漩涡等不良水力现象。纵向流速为

0.81~1.12 m/s, 横向流速为-0.08~0.03 m/s, 除个别测点纵向流速超出规范值以外, 其他测点纵向、横向流速均满足规范要求。

3.5 输水廊道阻力系数及流量系数

通过在输水廊道顶部或侧面布置时均压力测点, 测得工作阀门不同开度下各恒定流工况中输水廊道各部分的压力, 由此得到阀门全开充水阻力系数为 1.81, 对应流量系数为 0.74; 泄水阻力系数为 2.43, 对应流量系数为 0.64。

4 结论

1) 麻石改扩建船闸 1:25 整体水工物理模型试验结果表明: 采用的闸底长廊道侧支孔明沟消能分散输水系统布置合理。

2) 在推荐的阀门运行方式下, 最大水头工况与最低水位工况对应的充、泄水时间分别为 11.72、12.07 及 10.50、11.30 min。考虑模型缩尺效应, 上述输水时间均满足设计要求。

3) 在明沟内增设消力槛(槛高 0.8 m, 距支孔间距 1.2 m)后, 闸室水流平稳, 船舶(队)在充水上升过程中停泊条件可控; 将阀门后廊道突扩体升坎转弯半径增大至 8 m, 升坎处廊道压力得到明显改善; 通过增加进水口面积、降低 3 m 进水口高程, 船闸充水过程中进水口附近水面平稳, 未形成有害串气漩涡; 采用顶出水格栅式消能室, 船闸泄水过程中出水口水流水平扩散良好, 无回流现象。综上, 在推荐的阀门运行方式下, 船闸输水系统水力特征值均满足规范及设计要求。

参考文献:

[1] 胡华平. 启程“十四五”全力打造西江黄金水道升级版[J]. 珠江水运, 2021(14): 10-11.
[2] 重庆交通大学. 西南水运出海北线通道柳江流域融江麻石水电站工程船闸改建工程可行性研究阶段枢纽整体水工模型试验研究[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.

[3] 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.
[4] 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.
[5] 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.
[6] 周家俞, 徐奎, 黄成林, 等. 贵港二线船闸输水系统模型试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2018, 18(2): 137-138, 183.
[7] 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.
[8] 卜美飞, 孙保虎, 胡峰军, 等. 碾盘山船闸输水系统设计及试验研究[J]. 水运工程, 2022(5): 104-109, 138.
[9] 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.
[10] 中交水运规划设计院有限公司. 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
[11] 重庆交通大学. 西南水运出海北线通道柳江流域融江麻石水电站工程船闸改建工程船闸输水系统布置及水力计算分析[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
[12] 张星星, 陈明栋, 陈明, 等. 船闸闸底长廊道侧支孔输水系统研究进展[J]. 水运工程, 2016(6): 135-143.
[13] 曹凤帅, 吴澎. 闸底长廊道输水系统研究[J]. 水运工程, 2019(4): 98-101, 109.
[14] 周华兴, 郑宝友. 分散输水系统船闸模型的缩尺影响问题[J]. 水道港口, 1991(1): 30-38.
[15] 孔令振. 船闸闸底长廊道双层侧支孔消能效果模型试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.
[16] 陈明, 马鑫林, 段黎明, 等. 消力槛对船闸闸室单明沟消能特性的影响研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(6): 76-83.
[17] 重庆交通大学. 西南水运出海北线通道柳江流域融江麻石水电站枢纽工程船闸改建工程船闸引航道通航水流条件数值模拟研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.

(本文编辑 赵娟)