



某枢纽船闸输水系统水力学模型试验

张 震，王勤振

(中交水运规划设计院有限公司，北京 100007)

摘要：某枢纽船闸为所处河段通航工程的主要控制性工程，船闸工程的修建将对河道渠化起到重要作用。其闸室规模大、工作水头高、输水能量高，解决输水过程水力学问题是船闸设计的关键环节。为使输水过程船舶与船闸自身安全满足相关要求，通过比尺为 1:30 的物理模型试验，对船闸输水过程水力特性、船舶停泊条件及引航道水流条件开展研究。结果表明：在推荐的输水系统布置和阀门开启方式下，各项水力指标均能满足规范和设计要求。

关键词：船闸输水系统；船舶停泊条件；输水水力特性；模型试验

中图分类号：U 641.1；TV 135.4

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2022)04-0111-05

Hydraulic model tests for water delivery system of junction lock

ZHANG Zhen, WANG Qin-zhen

(CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: A junction lock is the main control project for the navigation engineering of the involved reach, and its construction plays an important role in the channelization of the river. Due to the large scale of the lock chamber, the high working head, and the high water delivery energy, solving hydraulic problems in water delivery is the key link of lock design. To ensure that the ships and locks meet relevant requirements in water delivery, we probe into the hydraulic characteristics, berthing conditions, and flow conditions of approach channels during water delivery on the basis of tests by a physical model with a scale of 1:30. The results show that under the recommended arrangement of the water delivery system and valve opening mode, all hydraulic indexes can meet the requirements of the codes and design.

Keywords: water delivery system of a lock; berthing condition; hydraulic characteristics of water delivery; model test

本论文研究的航道在 20 世纪 50 年代航运较发达，60 年代后上游来流量减少，水位下降，加之无力整治，导致其逐渐断航。现通过建设 5 个梯级枢纽对河段进行渠化。该枢纽为低坝，不考虑拦蓄洪水的功能，主要由挡水、泄水和通航建筑物组成。枢纽船闸级别为Ⅳ 级，设计代表船型为 500 吨级货船和一顶 2×500 吨级顶推船队，兼顾通航 1 000 吨级船舶。由于船闸规模较大，要求水力指标较高，需通过输水系统模型试验加以研究，以确保船闸运行及过闸船舶的安全。

1 枢纽船闸输水系统形式的选择

依据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[1]（简称“规范”）中输水系统类型的判别公式：

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

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 在 2.5~3.5 时应进行技术经济论证，参照类似工程选用； T 为输水时间（min）， T 值在 8~10 min； H 为水头（m）。由式(1)计算可得： m 值在 2.64~

3.30, 介于 2.5~3.5 之间, 可采用集中输水系统, 也可采用分散输水系统^[2-3]。考虑某枢纽输水效率、船闸基础特点及同类工程经验^[4], 初定采用局部分散输水系统。

对于大型船闸, 需基于综合水力指标确定输水系统形式, 计算 m 值时应考虑闸室规模对输水系统形式的影响。该枢纽船闸尺度为 $180\text{ m} \times 23\text{ m} \times 4.0\text{ m}$ (闸室有效长度×净宽×门槛最小水深), 最大设计水头 9.16 m, 设计输水时间为 8~10 min。由于水头较高, 根据总体布置和规范的规定及要求, 对船闸输水系统进行水力学分析, 确定输水系统布置形式及各部位细部尺寸, 并通过输水系统模型试验进行验证。输水系统 m 值在 2.5~3.5, 可选用闸墙长廊道短支管分散输水系统或集中输水系统。闸墙长廊道输水系统形式适用于混凝土重力式闸墙, 因为在闸墙底部布置主廊道是经济的, 在闸墙主廊道上接短支孔也较为方便。这种布置因需兼顾闸室的充水和泄水, 因而廊道断面不变。但该输水系统形式对阀门单边运行的适应性较差, 单边运行时一侧完全无水流, 另一侧(进水侧)出水支孔的水流

经消力槛消去部分能量后继续冲至对面闸墙, 在闸室内形成水面横向坡降, 使船舶所受的横向力较大。由于本船闸水头较高($H=9.16\text{ m}$), 且输水时间要求较短(T 在 8~10 min), 布置集中输水系统的难度较大, 拟采用新型短廊道集中输水系统。该输水系统既具有可降低初始波浪力的优点, 又具有局部闸底消能效率高、可降低局部水流作用力、不设镇静段的优点^[5]。

结合 2 种输水系统布置形式, 分别对闸首、闸室结构形式进行比选, 最终决定采用新型短廊道集中输水系统, 节省工程量及投资(图 1、2)。船闸部位特征尺寸见表 1。

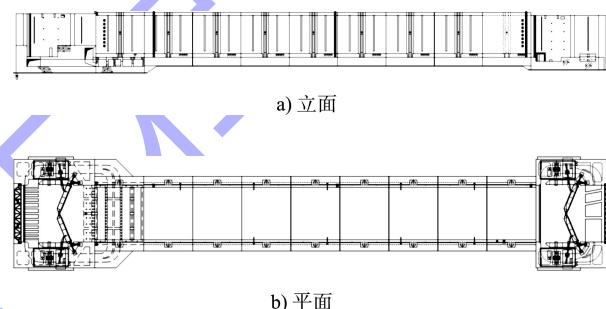
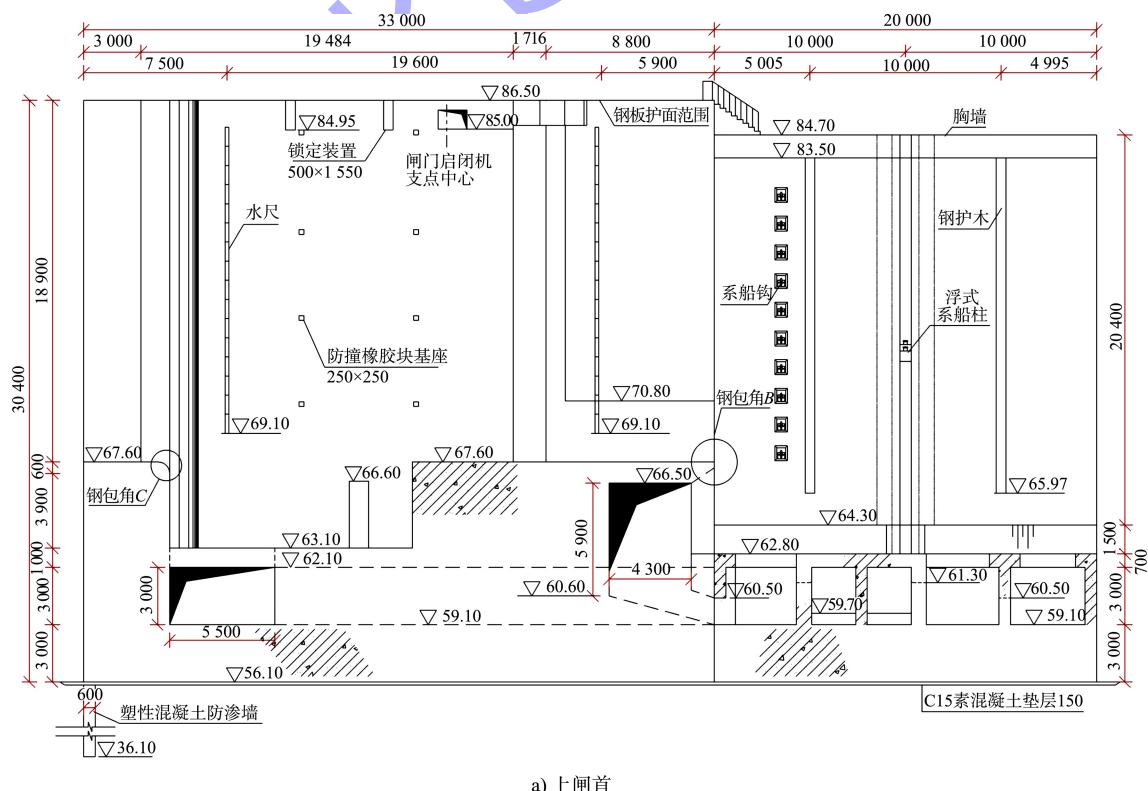


图 1 输水系统总体布置



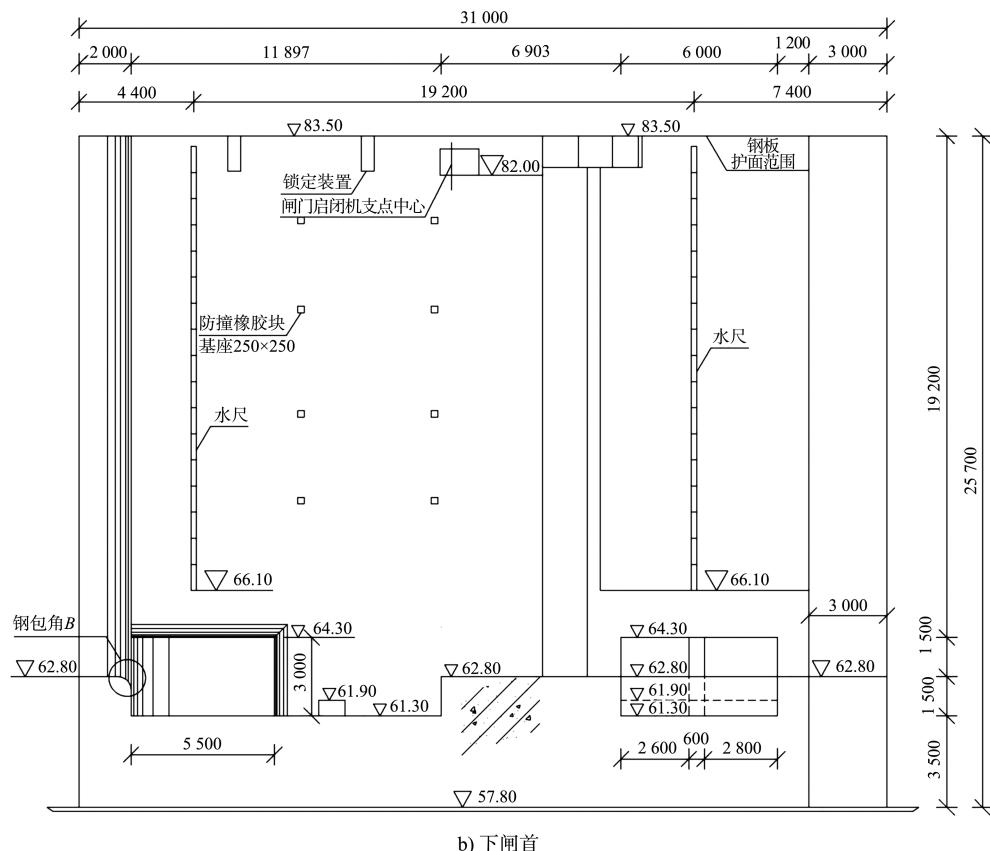


图2 上、下闸头局部布置(高程: m; 尺寸: mm)

表1 船闸局部分散输水系统设计方案特征尺寸

部位	面积/m ²	与输水阀门面积比
上闸首	进水口	68.20
	充水阀门段廊道	20.40
	廊道出口及联接廊道	27.60
	出水孔	26.93
下闸首	进水口	33.00
	阀门段	20.40
	出水口	36.00

500吨级船队, 船模采用红松、铁皮制作, 几何比例尺1:30, 并按排水量进行配重。



a) 船闸

b) 船模
图3 船闸水力学模型

2 输水系统水力特性试验与成果分析

2.1 闸室输水水力特性

船闸水力学模型范围包括船闸上/下闸首、闸室、输水系统、进/出水口、上/下游部分引航道。

依据枢纽船闸结构和输水系统布置初步设计进行模型制作(图3)。为便于观察, 输水廊道、闸室内出水支孔段、部分闸室边墙均选用有机玻璃制作; 上、下闸首用灰塑料板和红松制作; 闸室用角钢框架结构和灰塑料板合成; 上、下游引航道模型边墙用砖砌成, 引航道内地形用水泥砂浆抹面; 试验代表船型选取1 000吨级单船及2×

最大设计水头 9.16 m, 充、泄水阀门双边匀速开启时, 闸室输水水力特征值见表 2。

通过模型试验结果分析可知, 最大设计水头时, 试验设定充水阀门双边开启时间 t_v 分别为 5、6、7 min, 闸室充水完成时间 T 分别为 9.22、9.68、10.13 min, 基本满足设计输水完成时间要求。此时闸室充水最大流量 Q_{\max} 分别为 125.34、116.98、114.22 m³/s, 相应的充水廊道最大流速 v_{\max} 分别为

6.14、5.73、5.60 m/s, 符合设计规范要求。

最大设计水头时, 试验设定泄水阀门双边开启时间 t_v 分别为 6、7、8 min, 闸室泄水完成时间 T 分别为 8.67、9.77、10.13 min, 基本满足设计输水完成时间要求。此时闸室泄水最大流量 Q_{\max} 分别为 132.47、132.15、123.84 m³/s, 相应的泄水廊道最大流速 v_{\max} 分别为 6.4、6.48、6.07 m/s, 均符合设计规范要求。

表 2 闸室输水水力特征值

输水方式	开启时间 t_v /min	水位组合 H /m	泄水时间 T /s	最大流量 Q_{\max} /(m ³ ·s ⁻¹)	最大流速 v_{\max} /(m·min ⁻¹)	惯性超高(降) d /m
双边充水	5		553.18	125.34	1.63	0.27
	6	76.00~66.84	580.56	116.98	1.53	0.17
	7		607.95	114.22	1.49	0.02
双边泄水	6		520.32	132.47	1.73	-0.49
	7	76.00~66.84	586.04	132.15	1.72	-0.18
	8		607.95	123.84	1.62	-0.05

图 4 为最大设计水头时充泄水阀门双边匀速开启时间与输水完成时间关系曲线。由于所采用的输水系统形式介于集中输水系统和分散输水系统之间, 因此, 输水时闸室仍然存在一定的惯性超高(降), 当充水阀门双边开启时间 t_v 为 5 min 时惯性超高达最大值 d 为 0.27 m; 当充水阀门双边开启时间 t_v 延长至 6、7 min 时, 惯性超高值 d 有所减小, 分别为 0.17、0.02 m; 当泄水阀门双边开启时间 t_v 为 6 min 时惯性超降最大值 d 为 0.49 m, 同样当泄水阀门双边开启时间 t_v 延长至 7、8 min 时, 闸室惯性超降值 d 有所减小, 分别为 -0.18、-0.05 m。因此当充、泄水时间闸室水面超高、超降值 d 超出规范 0.25 m 的要求时, 充、泄水后期须采取平水开启人字闸门或提前关闭输水阀门等工程措施。

综合闸室内船舶停泊条件试验成果及闸室输水水力特性试验成果, 推荐阀门运行方式为: 输水系统充水阀门双边匀速开启时间 t_v 为 6 min, 泄水阀门双边匀速开启时间 t_v 为 7 min。

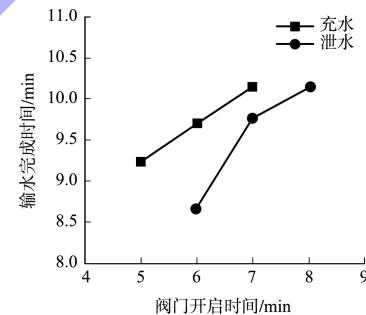


图 4 最大设计水头下输水时间与阀门开启时间关系

2.2 闸室船舶(队)停泊条件

船闸输水过程中闸室内船舶(队)停泊条件主要受充水工况控制, 对某枢纽船闸而言, 船舶停泊条件控制工况应为最大设计水头工况。船舶系缆力试验选择设计船型中 1 000 吨级单船及 2×500 吨级船队进行试验。试验设定船舶(队)在闸室内不同排列方式, 并进行双边充水试验, 试验工况及系缆力特征值见表 3。

由表 3 可知, 最大设计水头 9.16 m 条件下, 当 1 000 吨级单船单列排列在闸室上游段、充水阀门双边开启时间为 $t_v=5$ min 时, 最大纵向系缆力为 32.42 kN, 大于规范允许值 32.00 kN。

表3 阀室内船舶(队)停泊条件特征值(充水阀门双边开启)

船型	停泊方式	停泊位置	开启时间/min	最大纵向力/kN	最大前横向力/kN	最大后横向力/kN
1 000 吨级单船	单列	闸室上游段	5	32.42	15.13	14.09
			6	26.30	6.58	6.80
			7	16.10	7.31	3.69
		闸室下游段	6	14.93	2.82	8.22
			7	10.95	3.47	3.69
	双列	闸室上游段	6	22.43	8.39	4.15
			7	14.31	7.75	6.26
		闸室下游段	6	17.96	5.25	7.01
			7	10.03	2.87	5.25
2×500 吨级船队	单列	闸室中上游段	6	12.23	8.25	3.06
			7	11.94	6.18	2.43
		闸室下游段	6	7.33	9.50	4.23
			7	3.75	6.05	2.89

但当充水阀门双边开启时间为 6、7 min 时, 最大纵向系统缆力分别为 26.30、16.10 kN, 最大前横向系统缆力分别为 6.58、7.31 kN, 最大后横向系统缆力分别为 6.80、3.69 kN; 当单船单列排列在闸室下游段、对应充水阀门双边开启时(t_v 为 6、7 min)时, 最大纵向系统缆力分别为 14.93、10.95 kN, 最大前横向系统缆力分别为 2.82、3.47 kN, 最大后横向系统缆力分别为 8.22、3.69 kN; 1 000 吨级单船以单列方式停泊在闸室内时, 所有纵、横系统缆力均满足规范要求。

当 1 000 吨级单船以双列方式停泊在闸室内时, 对应充水阀门双边开启时间 $t_v = 6$ min, 当单船停泊在闸室上游段时纵向系统缆力达到最大值 22.43 kN 时, 对应阀门开启时间 $t_v = 6$ min, 单船停泊在闸室上游段时后横向系统缆力达最大值为 8.39 kN, 仍小于规范规定的纵、横向允许系统缆力。

针对 2×500 吨级船队, 对应充水阀门双边开启时间 $t_v = 6$ min, 船队停泊在闸室上游段所受纵向系统缆力达最大值 12.23 kN, 对应充水阀门双边开启时间 $t_v = 6$ min, 停泊在闸室下游段的船队所受前横向系统缆力达最大值 9.50 kN, 仍小于规范规定的纵、横向允许系统缆力。

2.3 进、出水口水流条件

枢纽船闸上闸首廊道进水口采用横支廊道顶支孔布置, 最大设计水头 9.16 m 的条件下, 上游

进水口顶淹没水深为 12.9 m, 当充水阀门分别以 6、7 min 匀速开启时, 进水口最大平均流速为 1.72 m/s ($t_v = 6$ min), 在最大流量发生前、后进水口偶见少量表面旋转水流, 并未形成有害串气漩涡, 不影响船闸正常运行。

最大设计水头条件下, 对应泄水阀门不同的开启方式, 下游引航道流速特征值见表 4。当泄水阀门以 $t_v = 6$ min 双边开启时, 消能段最大壅水位为 0.55 m, 泄流时水流水平扩散完好, 流速分布较为均匀, 无回漩现象。

表4 不同阀门开启方式下游引航道流速特征值

工况	阀门开启时间 t_v/min	下游引航道最大平 均流速/(m·s ⁻¹)
泄水阀门双边开启	6	0.75
	7	0.65

3 结论

1) 船闸采用局部分散输水系统的整体布置设计合理可行, 达到了预期的目标和要求。

2) 最大设计水头 9.16 m 时, 推荐输水系统充水阀门双边匀速开启时间为 6 min, 泄水阀门双边匀速开启时间为 7 min。当充水阀门双边匀速开启时间为 6 min 时, 输水完成时间为 9.68 min, 最大纵向系统缆力 26.30 kN(单船单列停泊于闸室上游段), 最大横向系统缆力 9.50 kN(船队单列停泊于闸室上游段, 前横向系统缆力)。

(下转第 132 页)