



兴隆枢纽二线船闸输水系统设计

卜美飞, 杨洪祥, 孙保虎, 章金河

(湖北省交通规划设计院股份有限公司, 湖北 武汉 430051)

摘要: 兴隆枢纽二线船闸建设等级为Ⅱ级, 船闸有效尺度 $300\text{ m}\times 34\text{ m}\times 5.6\text{ m}$, 最大设计水头 13.73 m , 属中水头大型船闸, 一次最大输水体量达 15.5 万 m^3 , 采用闸墙长廊道侧支孔分散输水系统, 对于如此输水规模采用闸墙长廊道侧支孔输水系统目前工程实例较少, 需认真研究该输水系统能否确保此输水规模下船舶安全过闸以及过闸效率的问题。借助该工程实例, 采用三维水动力数学模型对闸墙长廊道侧支孔输水系统水力特性、廊道压力、闸室停泊条件进行研究, 结果表明: 兴隆二线船闸采用闸墙长廊道侧支孔输水系统切实可行, 各项输水水力特征指标均满足设计和规范要求, 闸室输水时水流条件满足船舶安全通行需要, 输水时间可以控制在设计所要求的 12 min 范围内。

关键词: 兴隆二线船闸; 输水系统; 水力计算; 数学模型

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0158-08

Design of filling and emptying system for Xinglong Hub Second-line Ship Lock

BU Meifei, YANG Hongxiang, SUN Baohu, ZHANG Jinhe

(Hubei Provincial Communication Planning and Design Institute Co., Ltd., Wuhan 430051, China)

Abstract: The construction level of the Xinglong Hub Second Line Ship Lock is Grade II, with the effective scale of $300\text{ m}\times 34\text{ m}\times 5.6\text{ m}$ and maximum design water head of 13.73 m . It belongs to the medium head large ship lock, with the maximum water transport volume of $155,000\text{ m}^3$ at a time. This article adopts a decentralized water supply system with gate walls, long corridors, and side support holes. There are currently few engineering examples of using a gate wall long corridor side branch hole filling and emptying system for such a water transmission scale. It is necessary to carefully study whether this filling and emptying system can ensure the safe and efficient passage of ships under such a water transmission scale. With the help of engineering examples, a three-dimensional hydrodynamic mathematical model is used to study the hydraulic characteristics, gallery pressure, and gate chamber parking conditions of the side branch hole water delivery system of the gate wall corridor. The results indicate that the Xinglong Second Line Ship Lock is feasible to use the filling and emptying system with gate walls long corridors and side support holes. All hydraulic characteristic indicators of water transmission meet the design and specification requirements. The water flow conditions during the transfer of water in the lock chamber meet the requirements for safe passage of ships, and the water delivery time can be controlled within the 12 minute range required by the design.

Keywords: Xinglong Second-line Ship Lock; filling and emptying system; hydraulic calculation; mathematical model

闸墙长廊道侧支孔输水系统属于船闸第一类分散输水系统, 由布置在闸墙中贯通上下游并设置了一系列侧向出水支孔的输水廊道组成, 充泄

水时水流经闸墙廊道上的侧向出水支孔分散进出闸室, 其输水水力性能较水流集中在闸首附近进出闸室的集中输水系统有较大的提高。

收稿日期: 2025-02-13

作者简介: 卜美飞(1990—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

目前国内采用闸墙长廊道侧支孔输水系统船闸中规模较大的为湘江长沙双线船闸、株洲二线船闸、大源渡二线船闸、龙溪口二线船闸、龙头山二线船闸以及蜀山一线船闸等, 其规模均属于巨型船闸范畴。已建最高水头船闸为龙溪口船闸, 达 17.94 m; 一次性输水体积和平均能量最大的船闸为龙头山二线船闸, 一次输水量 15.8 万 m^3 , 输水过程闸室水流消能与船舶停泊安全问题十分突出。

本文研究的兴隆枢纽二线船闸有效尺度为 300 m×34 m×5.6 m (有效长度×有效宽度×门槛最小水深), 船闸最大设计水头 13.73 m^[1], 一次输水体积 15.5 万 m^3 , 与已建的龙溪口二线船闸输水体量相当, 为节约工程造价, 选择采用闸墙长廊道侧支孔分散输水系统, 但该输水系统如何确保此输水规模下船舶安全过闸以及过闸效率的问题需要深入研究。

1 输水系统设计

1.1 输水系统形式选择

根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》, 输水系统类型的选择可按式计算^[2]:

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

式中: T 为闸室灌水时间, 根据船闸设计通过能力等要求取 12 min; H 为设计水头, 最大为 13.73 m。

经计算 m 值为 3.24, 当 m 为 2.5~3.5 时, 输水系统可以采用集中输水系统, 也可以采用分散输水系统。考虑到船闸规模尺度较大, 一次输水量高达 15.5 万 m^3 , 根据国内外已建同规模相似水头船闸建设经验^[3-7], 并结合工程造价, 拟采用闸墙长廊道侧支孔分散输水系统。

1.2 输水系统布置及主要尺寸确定

1.2.1 输水阀门处廊道尺寸

根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》, 结合给定的输水时间和阀门全开时输水系统流量系数, 输水阀门处廊道断面面积可按下式计算^[8]:

$$\omega = \frac{2C\sqrt{H}}{uT\sqrt{2g}[1-(1-\alpha)k_v]} \quad (2)$$

式中: ω 为输水阀门处廊道断面面积, m^2 ; C 为计

算闸室水域面积, 对单级船闸取闸室水域面积取 11 286 m^2 ; H 取 13.73 m; u 为阀门全开时输水系统的流量系数, 根据输水系统流量计算取 0.78; T 取 720 s; α 为系数, 查表取 0.56; k_v 为阀门开启时间与闸室输水时间的比值, 取 0.6; g 为重力加速度, m^2/s 。

经计算, 输水阀门面积 $\omega = 44.68 \text{ m}^2$, 取 $\omega = 45.0 \text{ m}^2$ 。

1.2.2 进水口段布置

输水系统进水口采用导墙垂直多支孔布置, 支孔喉部面积顺水流方向逐渐缩小, 进水口面积按分散输水系统进口流速 $\leq 2.5 \text{ m/s}$ 的要求设计。经下式初步估算:

$$Q_{\max} = \frac{8}{3\sqrt{3}} \cdot \frac{CH}{T\sqrt{(2-k_v)k_v}} \quad (3)$$

$$v = Q_{\max}/A \quad (4)$$

式中: $Q_{\max}$ 为充水最大流量, 经计算为 361.53 m^3/s ; A 为进水口面积, m^2 ; v 为进口流速, 按不大于 2.5 m/s 控制。

经计算进水口面积不小于 144.61 m^2 , 本次取进水口尺寸为 2×6×2.5 m×5.0 m (边数×个数×宽×高)。

船闸进水口布置在上游导航墙内, 左、右侧进水口均从引航道取水, 每侧进水口设 6 个尺寸为 2.5 m×4.0 m (高×宽) 的进水孔, 进口总面积 150 m^2 。

按规范要求进水口淹没水深宜大于 0.4 倍水头, 考虑上游正常蓄水位、枢纽库区现状运行水位和上游最低通航水位 3 种工况, 按相应的最大水头其淹没水深分别为 5.49、4.26 和 1.75 m, 对应的上游输水系统进水口顶高程应不高于 30.79、30.82 和 28.71 m, 根据结构布置上游输水系统进水口顶、底高程取 25.85、20.85 m, 进水孔外设有拦污栅, 防止杂物进入输水廊道。

1.2.3 闸室主廊道及侧支孔布置

$$\alpha = \omega_1/\omega \quad (5)$$

$$\beta = \omega_2/\omega_1 \quad (6)$$

式中: α 、 β 为系数; ω_1 为主廊道面积, m^2 ; ω_2 为出水支孔断面总面积, m^2 。

原则上, α 值越大, 输水系统出水孔段的损失越小; β 值越小, 越有利于前后支孔出水均匀, 但将增加出水孔段水头损失。根据我国多数船闸的统计, α 值为 1.20~1.31, β 值为 0.95~1.00^[9-10]。因此, 取主廊道断面(宽×高)为 2×5.5×5.0=55 m²。闸墙每侧设 24 个侧支孔, 分为 3 组, 每组 8 孔, 为使顺充水流方向的首、末出水支孔流量分布比较均匀, 上游至下游孔口尺寸(宽×高)分别为 1.0 m×1.25 m、0.9 m×1.25 m、0.8 m×1.25 m, 总面积为 54.0 m², 由此计算得到的 α 、 β 值分别为 1.222 和 0.982。

根据《船闸输水系统设计规范》, 出水孔间距宜为闸室宽度的 1/4, 因此确定出水支孔间距约为 8.5 m, 每侧布置 24 个出水孔, 闸室两侧出水孔交错布置于闸室中部, 单侧出水孔总长为 195.5 m, 约占闸室有效长度的 65.2%。支孔出口应布置在下游最低通航水位时设计船舶深度以下, 本次支孔出口顶底高程分别为 17.70、16.45 m, 下游最低通航水位 22.55 m, 船舶最大吃水 3.2 m, 满足规范要求。

根据《船闸输水系统设计规范》要求, 侧支孔长度 $L \geq (2 \sim 4)D$, D 为出水支孔直径或断面宽度, 取支孔断面最大宽度 $D=1$ m, 则 $L \geq 2 \sim 4$ m, 取 $L=3$ m, 支孔断面采用标准的与闸墙垂直的水平布置, 为减少水力损失, 支孔进口断面采用四面修圆, 圆弧半径为 0.30 m, 出口断面三面修圆,

圆弧半径也采用 0.30 m, 水平方向按 3.0°角扩散。出水孔外布置消能槛, 消能槛布置于闸室中间, 单侧长 220 m, 顶面高程为 16.95 m, 顶面宽度 0.5 m, 消能槛中心线距闸墙边缘线 1.75 m。

1.2.4 阀门段廊道及出水口段廊道布置

充水阀门段廊道与进水口通过垂直转弯相连接, 充水阀门布置于鹅颈管之后, 再通过垂直和水平转弯与闸室出水段廊道连接, 同时将输水廊道宽度由 4.5 m 扩大至 5.5 m。根据多座船闸的输水系统研究表明, 充水阀门的淹没水深宜为 2.50~5.50 m(淹没水深与水头比宜为 0.21~0.35), 泄水阀门的淹没水深宜为 2.50~4.50 m(淹没水深与水头比宜为 0.13~0.32)。本工程充水阀门处廊道顶底高程分别为 19.55、14.55 m, 下游最低通航水位时阀门处廊道顶淹没水深为 3.0 m, 与水头比为 0.22; 泄水阀门处廊道底高程为 11.15 m, 顶高程为 16.15 m, 阀门处廊道顶淹没水深为 6.4 m, 与水头比为 0.47。

1.2.5 出水口段廊道布置

廊道出水口布置在下闸首内, 采用格栅出水, 出水孔尺寸为 2×2×5.4 m×5.0 m(边数×个数×宽×高), 出水孔顶底高程分别为 16.15、11.15 m, 出水廊道内布置隔流墩。消能室顶部设 32 个变截面出水口^[11], 消能室内设置 3 道挑流槛。

1.2.6 输水系统主要尺寸

兴隆二线船闸输水系统主要尺寸汇总见表 1。

表 1 兴隆二线船闸输水系统特征尺寸
Tab.1 Characteristic dimensions of filling and emptying system of Xinglong Second-line Ship Lock

部位	描述	面积/m ²	与输水阀门面积比
进水口	单边进水墙上设置垂直 6 支孔进水, 单个支孔尺度为 2.5 m×5.0 m	2×6×2.5×5.0=150	3.33
充水阀门段廊道	充水阀门处廊道顶淹没水深 3.0 m, 门前通过垂直转弯与进水口相连接, 门后通过垂直和水平转弯与闸室出水廊道相连接, 同时将输水廊道宽度由 4.5 m 扩大至 5.5 m	2×4.5×5.0=45	1.00
闸室出水段廊道	通过水平和垂直转弯, 上与充水阀门段廊道、下与泄水阀门段廊道相连接	2×5.5×5.0=55	1.22
闸室出水支孔	自上游向下游分 3 组, 每组 8 孔, 孔口尺寸分别为: 1.0 m×1.25 m、0.9 m×1.25 m、0.8 m×1.25 m, 间隔 8.5 m, 总长 195.5 m, 占闸室有效长度 65.2%	2×8×(1.0+0.9+0.8)×1.25=54	1.20
泄水阀门段廊道	通过水平和垂直转弯与闸室出水廊道连接, 水平转弯调整廊道宽度, 垂直转弯调整廊道高度; 泄水阀门后廊道顶淹没水深 6.4 m	2×4.5×5.0=45	1.00
出水口	廊道出口面积放大 2.4 倍, 与消能室相连, 消能室内设挑流槛, 顶部布置 32 组出水孔	2×2×5.4×(1+1+1+0.9+0.9+0.8+0.8+0.6)=151.2	3.36

2 三维水动力数学模型试验

2.1 模型建立

2.1.1 基础理论

输水系统水流属于有自由液面的三维紊流流动, 本文采用 Flow-3D 软件进行模拟, 采用雷诺时均 $N-S$ 方程描述, 针对其水流特点选用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型。其控制方程包括连续性方程、动量守恒方程、紊动能 k 方程和紊动耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (8)$$

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma(\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\sigma_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{\varepsilon 1}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (10)$$

式中: ρ 和 μ 分别为体积分平均密度和分子黏性

系数; u_i 、 u_j 为流速在 2 个坐标轴上的分量; p 为作用在流体微元上的压力; σ_k 和 σ_ε 分别为紊动能和紊动耗散率对应的 $Prandtl$ 数, 均为 1.39; μ_t 为紊流黏性系数, 可由 k 和 ε 求出, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; G_k 为流速梯度引起的紊动能 k 产生项; C_μ 为经验常数, 取 0.084 5; $C_{\varepsilon 1}$ 和 $C_{\varepsilon 2}$ 为经验常数, 分别取值为 1.42 和 1.68; $\eta_0 = 4.377$; $\beta = 0.012$ 。

自由液面追踪采用 Tru VOF 方法, 利用水汽二相流体积分数 F 的连续方程追踪自由液面, 当 $F=1$ 时, 表面该单元控制体内充满液体, 当 $F=0$ 时, 表明该单元控制体内无液体, 当 $F=0 \sim 1$ 时, 表明该单元控制体内部分充满液体, 其表达式如下:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (11)$$

式中: F 为单元网格中气体体积分; u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 和 z 方向的流速。

2.1.2 模型范围

兴隆二线船闸模型采用三维建模软件建立, 模型整体及局部三维建模效果见图 1。

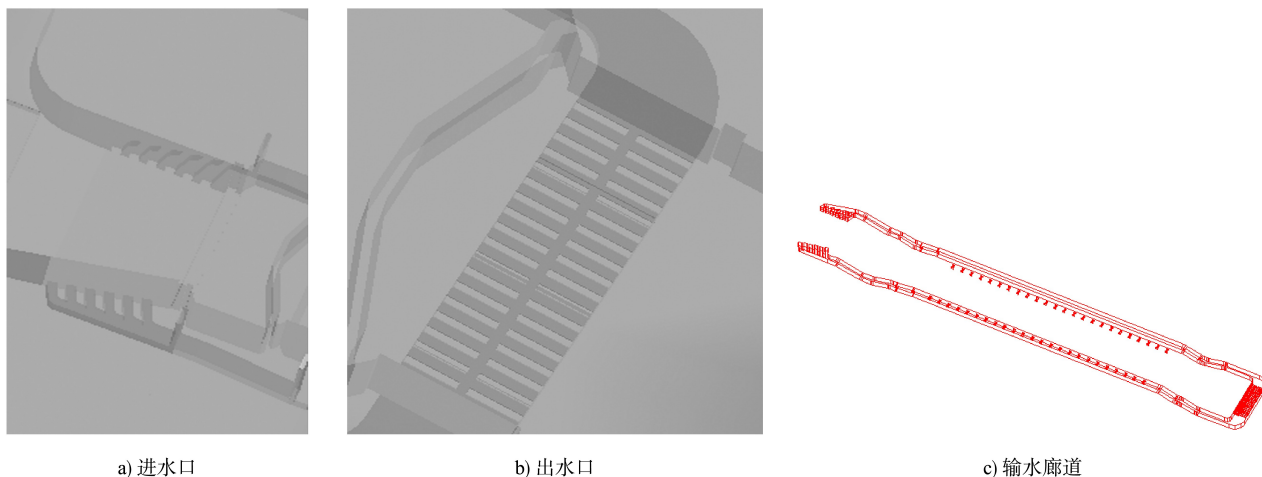


图 1 兴隆二线船闸输水系统整体及局部三维模型

Fig. 1 Overall and partial 3D model of filling and emptying system of Xinglong Second-line Ship Lock

2.1.3 模型边界处理

灌水: 1) 船闸三维数学模型计算入口边界采用水位边界条件, 给定上游入口断面水面高程 36.28 m; 2) 闸室初始水位 22.55 m, 闸室上方临大气侧设为气压边界, 压强为 0, 用以模拟大气边界; 3) 下闸首侧及廊道壁面设为固壁边界; 4) 墙面粗糙度设

置为 0.001 (对应混凝土糙率 0.013), 见图 2a)。

泄水: 1) 船闸三维数学模型计算出口边界采用水位边界条件, 给定下游出口断面水面高程 22.55 m; 2) 闸室初始水位 36.28 m, 闸室上方临大气侧设为气压边界, 压强为 0, 用以模拟大气边界; 3) 上闸首侧及廊道壁面设为固壁边界; 4) 墙面粗糙度设

置为 0.001(对应混凝土糙率 0.013), 见图 2b)。

工作阀门采用流固耦合计算模型, 根据充泄水工况给定匀速开启速率。

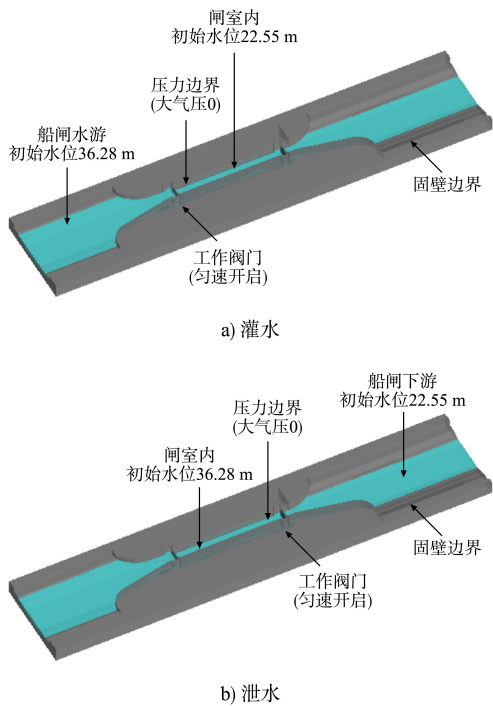


图 2 兴隆二线船闸输水系统三维模型边界条件设置
Fig. 2 Boundary condition setting for 3D model of filling and emptying system of Xinglong Second-line Ship Lock

2.1.4 模型试验工况

为模拟不同水头下船闸过闸过程中输水系统水力特性, 选定以下 2 组水位作为试验工况, 考虑到泄水工况不是控制工况, 本次重点对充水工况进行研究, 试验工况见表 2。

表 2 试验工况
Tab. 2 Test conditions

工况	阀门开启时间/min	上游水位/m	下游水位/m	水头差/m	备注
1	充水 7~10	36.28	22.55	13.73	最大水头工况
2	充水 6~9	35.02	26.30	8.70	正常运行工况

结合通过能力计算分析, 最大水头工况下 (13.73 m) 充水时间拟控制在 12 min 内, 正常运行水头工况下 (8.70 m) 充水时间拟控制在 10 min 内。

2.2 试验成果分析

2.2.1 流量系数

在恒定流条件下, 测定工作阀门全开的输水流量及引航道和闸室水位。输水系统流量系数 μ 的计算公式为:

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gh}} \quad (12)$$

式中: Q 为流量; ω 为阀门全开面积; h 为引航道及闸室的水位差。

拟定多个水头差工况, 对闸室灌水阀门双边开启情形计算, 取多次试验结果的平均值, 计算得灌水阀门全开时输水系统的流量系数 $\mu=0.78$ 。

2.2.2 输水系统水力特性

在不同水位组合以及充水阀门不同开启时间工况下, 船闸充水主要水力特征参数见表 3。闸室充水曲线见图 3, 闸室充水时间与阀门开启时间的关系曲线见图 4。

表 3 不同工况下充水主要水力特征参数
Tab. 3 Main hydraulic characteristic parameters for water filling under different working conditions

工况	设计水头 H/m	阀门开启时间 t_v/min	闸室输水时间 T/min	k_v	最大流量 $Q_{\max}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	廊道断面最大流速 $/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	
						进水口	闸墙主廊
1	13.73	7	11.05	0.63	387.65	2.58	7.05
		8	11.52	0.69	365.87	2.44	6.65
		9	11.97	0.75	344.96	2.30	6.27
		10	12.45	0.80	329.67	2.20	5.99
2	8.70	6	8.63	0.70	308.35	2.06	5.61
		7	9.10	0.77	293.22	1.95	5.33
		8	9.73	0.86	278.15	1.85	5.06
		9	10.37	0.90	265.80	1.77	4.83

由表 3 可知: 最大设计水头工况下 (工况 1, 水头 13.73 m), 对于控制输水时间, 只要充水阀门开启时间不超过 9 min, 均能满足输水时间小于

12 min 的要求; 对于控制水力特性指标, 只要充水阀门开启时间不小于 8 min, 各项水力特性指标均能满足规范要求。

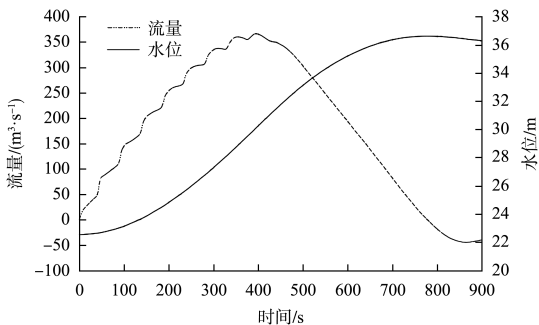


图 3 闸室充水曲线 ($H=13.73\text{ m}$, $t_v=8\text{ min}$)

Fig. 3 Water filling curve of lock chamber ($H=13.73\text{ m}$, $t_v=8\text{ min}$)

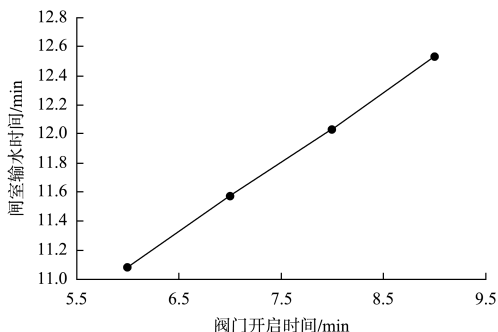


图 4 闸室充水时间与阀门开启时间的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between water filling time of lock chamber and valve opening time

正常运行水头工况下(工况 2, 水头 8.7 m), 对于控制输水时间, 只要充水阀门开启时间不超过 8 min , 均能满足输水时间小于 10 min 的要求; 对于控制水力特性指标, 只要充水阀门开启时间不小于 6 min , 各项水力特性指标均能满足规范要求。

2.2.3 泊稳条件分析

考虑到数学模型试验无法测定系缆力, 本次

采用充水过程中闸室水面比降特征判定泊稳条件。

船闸充水过程中, 闸室内水体出现大幅度扰动和紊流运动, 水面纵向、横向比降过大, 均可能导致系船的缆绳上出现很大的拉力。船体在闸室水面所受的作用力既可能是因为闸室水体整体运动产生的, 也可能是局部水流冲击造成的。表面水流在闸室横向上受到的支孔射流碰撞水面紊动、固体边界反射水流往复波动、波的传递叠加碰撞破碎等作用较纵向更为剧烈, 因此闸室横向水面波动更为随机无序, 在代表船长范围内波动的大小及方向各异, 较难用单一的横向水面比降来判别船舶横向泊稳条件。因此本文研究重点对闸室水面纵向比降进行分析。

1) 水面比降控制标准: 在利用闸室水面比降初步估算船舶整体受力时, 可以认为船舶所受纵向合力为水面比降引起的船舶自身重力的纵向分力, 其计算公式为 $F_{\text{纵}} = W \times J_{\text{纵}}$, 其中 W 为货物与船舶自重力之和, 船舶质量按 0.2 倍的载质量考虑, 由此可反算得到各吨位船舶水面比降控制标准。工程设计代表船型为 $2\,000\text{ t}$ 货船, 其纵向水面坡降控制标准为 1.67‰ 。

2) 闸室水面比较计算分析: 根据设计代表船舶在闸室可能的靠泊情况, 取中心线为特征断面计算分析 1 倍船长范围内的水面比降, 计算分析断面见图 5。根据确定的特征断面, 每间隔 2 s ($\Delta T=2\text{ s}$) 提取水位数据, 求得以代表船长为特征长度的水面比降。

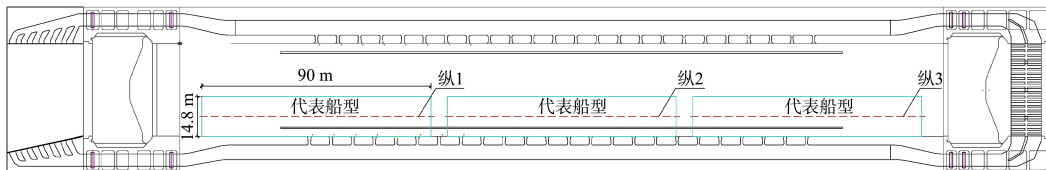


图 5 闸室水面线断面位置

Fig. 5 Cross-sectional position of water surface profile in lock chamber

设计最大水头 $H=13.73\text{ m}$ 工况下船舶尺度范围内水面纵向比降随时间的变化过程见图 6(图中, 距闸室中心点的距离, 纵向上, 以向上游侧为正、

下游侧为负)。统计输水过程中船舶尺度范围内闸室水面纵向比降极值见表 4。

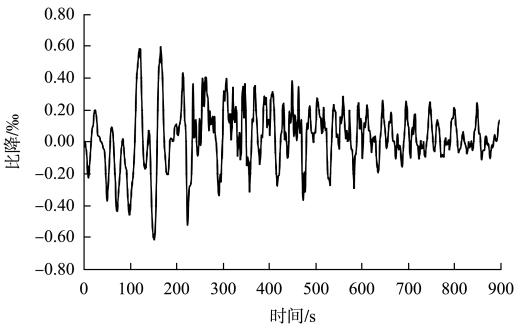


图 6 闸室充水时水面纵比降曲线
($H=13.73\text{ m}$, $t_v=8\text{ min}$)

Fig. 6 Longitudinal gradient curve of water surface during chamber filling ($H=13.73\text{ m}$, $t_v=8\text{ min}$)

表 4 船舶尺度范围内闸室水面比降极值 ($H=13.73\text{ m}$)
Tab. 4 Extreme water surface gradient in lock chamber within scale range of ships ($H=13.73\text{ m}$)

阀门开启时间 t_v/min	船舶尺度范围内水面比降极值/‰		
	纵 1	纵 2	纵 3
7	0.75	0.50	0.76
	-0.48	-0.74	-0.75
8	0.59	0.39	0.81
	-0.62	-0.78	-0.57
9	0.85	0.58	0.78
	-0.67	-0.89	-0.68
10	0.74	0.60	0.65
	-0.61	-0.72	-0.53

由图 6 及表 4 可知,受输水流量沿程分布差异、闸室往复流、表面波动等影响,充水前中期最大纵比降在阀门开启时段内波动较大,后期最大比降逐渐减小。在充水前期,上游侧支孔充水流量较下游侧支孔大,此时段闸室上游水流向下游传递,形成长波运动,主要产生正比降;此后,下游侧支孔逐渐充水,整个闸室水位开始波动,当上游水流传递到闸室末端,形成往复流,产生整体倒比降(上游整体水位低于下游);经历 1~2 次往复流长波运动后,各支孔射流开始不同程度掺混与碰撞,闸室水位开始不规则的短波运动,表面波也随之叠加、碰撞、破碎,在局部范围内出现正比降极值和倒比降极值。

闸室内 3 个船舶靠泊位置中,船长范围内的最大正比降为 0.85‰、0.58‰和 0.81‰,最大倒比降分别为-0.62‰、-0.89‰和-0.75‰。在设计方案下,充水阀门开启时间为 8~10 min 时,对于 2 000 t 船舶,闸室最大纵比降为 0.89‰,小于 1.67‰。

2.2.4 输水廊道压力特性

在充水阀门廊道后分别布置 7 个测点进行压力观测,观测点布置见图 7。各工况下充水试验各测点压力最小值见表 5。

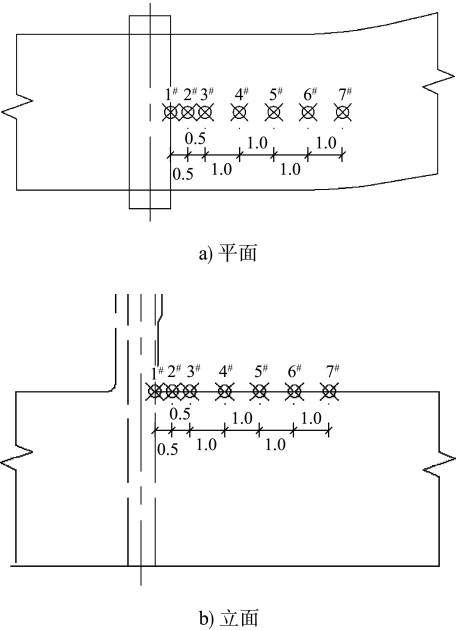


图 7 充水工作阀门段廊道压力测点布置 (单位: m)
Fig. 7 Layout of pressure measuring points in gallery of water filling valve section (unit: m)

表 5 各测点压力最小值
Tab. 5 Minimum pressure at each measuring point

工况	测点	最小值/m
最大设计水头 (13.73 m)	1#	0.37
	2#	0.37
	3#	0.37
	4#	0.25
	5#	0.22
	6#	0.18
	7#	0.15
正常运行水头 (8.70 m)	1#	4.64
	2#	4.61
	3#	4.60
	4#	4.56
	5#	4.53
	6#	4.51
	7#	4.49

试验结果表明:充水工况下,阀门开启瞬间,由于水流惯性作用,随着阀门开启,阀门后漩滚开始形成和发展,各测点压力随之下降,随着阀门开启高度增大,各测点的压力逐渐回升。船闸充水过程中,廊道各压力测点均未出现负压。

3 结语

1) 最大设计水头工况下(水头 13.73 m), 对于控制输水时间, 只要充水阀门开启时间不超过 9 min, 可以满足输水时间小于 12 min 的要求; 对于控制水力特性指标, 只要充水阀门开启时间不小于 8 min, 各项水力特性指标均能满足规范要求。

2) 正常运行水头工况下(水头 8.70 m), 对于控制输水时间, 只要充水阀门开启时间不超过 8 min, 可以满足输水时间小于 10 min 的要求; 对于控制水力特性指标, 只要充水阀门开启时间不小于 6 min, 各项水力特性指标均能满足规范要求。

3) 最大设计水头及正常设计水头充水工况下, 阀门开启瞬间, 由于水流惯性作用, 随着阀门开启, 阀门后漩滚开始形成和发展, 各测点压力随之下降, 随着阀门开启高度增大, 各测点的压力逐渐回升。船闸充水过程中, 廊道各压力测点均未出现负压。

4) 采用闸室水面比降判断泊稳条件, 最大设计水头工况下(水头 13.73 m)船舶尺度范围内纵向比降范围 0.22‰~0.89‰, 小于极限值 1.67‰, 泊稳条件满足要求。

参考文献:

- [1] 孙保虎, 杨洪祥, 卜美飞. 汉江兴隆枢纽 2 000 吨级二线船闸工程初步设计[R]. 武汉: 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 2024.
SUN B H, YANG H X, PU M F. Preliminary design of the 2000 ton Xinglong Hub Second Line Ship Lock Project in Hanjiang River[R]. Wuhan: Hubei Provincial Communication Planning and Design Institute, 2024.
- [2] 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.
- [3] 宣国祥, 李君, 黄岳, 等. 中水头巨型船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统水动力学研究[J]. 水运工程, 2016(12): 36-41.
XUAN G X, LI J, HUANG Y, et al. Hydrodynamics study of wall-culvert side-port filling and emptying system in medium-head huge lock [J]. Port & waterway engineering, 2016(12): 36-41.

- [4] 孙倩, 陈亮, 王召兵. 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.
SUN Q, CHEN L, WANG Z B. Layout and experimental study of water conveyance system for single side lock wall long corridor of ship lock [J]. Yangtze River, 2019, 50(12): 182-186, 191.
- [5] 黄瑶, 曹风帅. 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.
HUANG Y, CAO F S. Research on selection criteria for ship lock water conveyance system [J]. China water transport(the second half of the month), 2019, 19(5): 114-116.
- [6] 钱黎辉. 船闸单侧廊道集中输水型式分析[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(1): 184-185, 188.
QIAN L H. Analysis of centralized water transfer type in one side gallery of ship lock [J]. China water transport(the second half of the month), 2017, 17(1): 184-185, 188.
- [7] 王文, 吴礼国, 李泳龙. 龙溪口航电枢纽工程船闸输水系统设计[J]. 水运工程, 2023(10): 23-26, 60.
WANG W, WU L G, LI Y L. Filling and emptying system design of ship lock in Longxikou Navigation-power Junction project [J]. Port & waterway engineering, 2023(10): 23-26, 60.
- [8] 王作高. 船闸设计[M]. 北京: 水力电力出版社, 1992.
WANG Z G. Lock design [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1992.
- [9] 王召兵, 徐奎, 陈亮, 等. 红岩子船闸输水系统优化设计[J]. 水运工程, 2017(12): 165-168.
WANG Z B, XU K, CHEN L, et al. Optimum design of filling-emptying system of Hongyanzi ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2017(12): 165-168.
- [10] 王能, 高衡东, 胡越高, 等. 洪江船闸改造输水系统布置试验研究[J]. 水道港口, 2021, 42(2): 229-236.
WANG N, GAO H D, HU Y G, et al. Study on the layout of filling and emptying system of Hongjiang lock renovation [J]. Journal of waterway and harbor, 2021, 42(2): 229-236.
- [11] 张庆亮, 吴星. 船闸闸底长廊道输水系统水力特性模拟研究[J]. 中国水运, 2022(7): 119-121.
ZHANG Q L, WU X. Simulation study on hydraulic characteristics of water conveyance system in long corridor at bottom of ship lock [J]. China water transport, 2022(7): 119-121.

(本文编辑 赵娟)