



省水船闸省水池及输水系统布置研究*

安晓峰¹, 王华^{2,3}, 王勤振^{2,3}, 姜兴良^{2,3,4}

(1. 淮安市港航事业发展中心, 江苏淮安 223001; 2. 中交水运规划设计院有限公司, 北京 100007;
3. 中交集团内河水运建设技术研发中心, 北京 100007; 4. 中国海洋大学, 山东青岛 266100)

摘要: 相比于常规船闸, 省水船闸的省水池设计对输水系统的布置产生怎样的影响, 阀门启闭次数翻倍、工作水头降低对输水时间的延长是否可控是关键的问题。通过水力计算和三维水流数学模型试验的方法对马店船闸省水池及输水系统进行研究, 提出“闸底长廊道侧支孔”+“一级省水池”组合的创新型输水系统形式, 其输水时间能够满足“设计输水时间不大于10 min”的要求, 省水运行对船闸输水效率的折减符合设计预期, 水流平稳, 输水系统布置和省水池布置合理。

关键词: 船闸; 输水系统; 省水池; 输水时间

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0153-08

Layout of water-saving pool and water conveyance system for water-saving ship lock

AN Xiaofeng¹, WANG Hua^{2,3}, WANG Qinzhen^{2,3}, JIANG Xingliang^{2,3,4}

(1. Huai'an Port and Shipping Industry Development Center, Huai'an 223001, China;
2. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China;
3. Research and Development Center on Inland Navigation Construction Technology, CCCC, Beijing 100007, China;
4. Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Compared with the conventional ship lock, there are some critical issues for water-saving ship lock, such as how does the design of the water-saving pool affect the layout of the water conveyance system of the ship lock, and whether the doubling of the number of valve opening and closing times and the reduction of the working head can control the extension of the water conveyance time. In this paper, the water-saving pool and water conveyance system of the Madian ship lock are studied by means of hydraulic calculation and three-dimensional water flow digital model test, and an innovative water conveyance system type combining “side branch hole of the sluice bottom corridor” + “first-class water-saving pool” is proposed. The water conveyance time of this water conveyance system can meet the requirements of “the design water conveyance time is not more than 10 min”, and the reduction of the water conveyance efficiency of the ship lock by the water-saving operation is in line with the design expectations. The water flow is stable, and the layout of the water conveyance system and the water-saving pool are reasonable.

Keywords: ship lock; water conveyance system; water-saving pool; water conveyance time

随着通航运河的建设和水资源的日益紧缺, 省水船闸将具有广阔的应用前景。省水船闸既可节省船闸用水量、保护水资源, 还能够降低船闸

工作水头, 改善游引航道及闸室内的水流条件; 缺点是需要建设省水池、增加工程费用、对输水效率和船闸的通过能力有折减、船闸运行程序更

收稿日期: 2023-11-30

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFB2600183); 北京市科学技术委员会、中关村科技园区管理委员会科技服务品牌机构发展基金项目(20230467193); 中交集团特大科技项目(2019-ZJKJ-06)

作者简介: 安晓峰(1978—), 男, 高级工程师, 从事内河船闸、港口、航道工程建设管理。

为复杂。相比于常规船闸，省水池的设计对船闸输水系统的布置产生怎样的影响，阀门启闭次数翻倍、工作水头降低对输水时间的延长是否可控是关键的问题。目前国内对省水船闸的应用尚处于起步阶段，从 20 世纪 60 年代起，省水船闸在我国进行过一些试验和研究，但应用较少^[1]，还未有建成的省水船闸运行管理经验，对船闸实际过闸效率的影响尚无实际经验。本文以马店船闸为例，验证其采用省水技术是否可行，省水池和输水系统总体布置、水流条件是否合理可行，同时验证省水船闸输水时间的延长能否满足“设计输水时间不大于 10 min”的要求。

本文关于省水船闸省水池及输水系统布置的研究服务于唐河航运复航工程的马店船闸，对用水矛盾突出的通航河流具有较高的适用性。

1 工程概况

马店枢纽是唐河航运工程梯级开发自下游至上游的第 3 个梯级，开发任务以航运为主，兼顾防洪、灌溉。马店枢纽坝址处河面较为开阔，左岸布置船闸，右岸布置泄水闸、鱼道、土坝连接段等。

马店船闸建设标准为 IV 级，闸室有效长度 180 m、

闸室净宽 23 m、最小门槛水深 4.0 m、最大设计水头 9.5 m，设计通过最大船型为 1 000 吨级货船。由于河道 95% 保证率来流量难以满足船闸各水平年的耗水量需求，受下游河道生态环境用水等水资源因素制约明显，待库区可调节库容补偿殆尽后，须利用补水泵站从下游补水，因此马店船闸按照省水船闸设计，采用节水技术，减小船闸耗水量。

2 省水池布置

2.1 省水池的布置原则

- 1) 省水船闸的布置应因地制宜，简化闸室结构及输水系统布置、缩短输水时间。
- 2) 根据工程地形、地质条件及拟定的省水池分级数进行总体布置，确定省水池形式和数量。
- 3) 省水池应利用相对落差实现闸室与省水池水体之间的自流量交换。当天然流量不足时，可设置抽水泵站抽水的辅助措施。
- 4) 同时考虑船闸省水率和经济性，合理确定船闸省水池面积大小和省水率。对于单级省水池，确定省水池面积时，省水池水域面积和闸室水域面积比若为 S ，则省水率为 $S/(2S+1)$ 。面积比与省水率的关系见表 1。

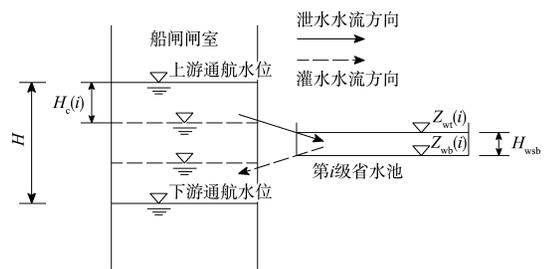
表 1 省水池面积比与省水率的关系

省水池面积比 S	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0
省水率/%	33.3	34.4	35.3	36.1	36.8	37.5	38.1	38.6	39.1	39.6	40.0

由表 1 可知，随着省水池面积的增大，省水率提升的效果越来越不明显，当省水率达到 36% 以后，继续增加省水池面积性价比变低。因此省水池面积的确定须合理考虑省水率和经济性，当省水率不能满足需求时，可采用多级省水池的节水方式。

2.2 省水池水位的确定

省水池级数需要根据所在河流的天然来水条件、枢纽运行条件、省水率要求以及工作水头等综合确定。省水池级数和水位划分见图 1。



注： $H_{ws(i)}$ 为第 i 级省水池水位变化， H_e 为 H_{ws} 对应的闸室水位变化。

图 1 省水池级数和水位划分

根据河道沿线航运、灌溉等水资源综合利用的要求，马店船闸初拟定须达到 36% 的省水率，

假设省水船闸为完全压力平衡情况, 理论省水率按下式计算:

$$E = \frac{kn}{k(n+1)+1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E 为省水船闸每次过闸的理论省水率, 马店船闸 $E=36\%$; n 为省水池级数, 定义自下而上省水池编号 $i=1, 2, \dots, n$, 综合省水效率与建造费用, 马店船闸采用闸室单侧省水池布置, 即 $n=1$; k 为省水池面积 A_B 与闸室面积 A 的比值。

通过计算可得 $k=1.28$, 即为了马店船闸 36% 的省水率, 取单级省水池面积 $A_B = 1.28A$ (即 $A_B = 6\,177\text{ m}^2$, 其中 $A = 4\,826\text{ m}^2$)。

省水池最高运行水位和最低运行水位可按下式计算^[2]:

$$Z_{wt}(i) = Z_{up} - \frac{ik(Z_{up} - Z_{down}) - [k(2i+n+1)+1]\Delta H}{k(n+1)+1} \quad (2)$$

$$Z_{wb}(i) = Z_{up} - \frac{(ik+1)(Z_{up} - Z_{down}) - [k(2i+n+1)+3]\Delta H}{k(n+1)+1} \quad (3)$$

式中: $Z_{wt}(i)$ 为第 i 级最高运行水位 (省水池灌水完成时的水位), m; $Z_{wb}(i)$ 为第 i 级最低运行水位 (省水池泄水完成时的水位), m; Z_{up} 为上游水位, 本船闸上游水位为 91.5 m; Z_{down} 为下游水位, 本船闸下游水位为 82 m; ΔH 为省水运行剩余水头, 考虑马店船闸省水运行为完全压力平衡条件, 则 $\Delta H=0\text{ m}$ 。经计算, $Z_{wt}(i) = 88.08\text{ m}$, $Z_{wb}(i) = 85.42\text{ m}$ 。

2.3 省水池布置

与常规船闸的布置相比, 省水船闸还应考虑

省水池及其廊道对船闸主体的影响, 省水池的布置主要考虑与闸室的相对位置关系、长宽、面积、池顶高程、池底高程、连接廊道位置、进出水口的选择等因素, 应尽量减少省水池与闸室的距离并平行布置, 长宽宜与闸室相同, 有利于提高输水效率, 水池面积综合考虑省水率和经济性确定, 池顶高程和池底高程依据水池运行水位确定, 与闸室之间的连接廊道布置应尽量减少输水时间并有利于输水过程中的水流平稳。

马店船闸采用单级开敞式省水池, 受地形和总体布置限制, 水池最大长度 182.5 m、最大宽度 35.7 m, 省水池面积 6 177 m², 沿闸室长度方向平行布置于闸室左岸侧, 净距 19 m, 省水池与闸室之间采用并行布置两支输水廊道连接, 连接廊道布置在闸室中间段, 水流通过闸室中间段分流至上下游两端, 中间段省水池底板设置进出水口, 与闸室底廊道采用 90°垂直转弯连接, 每支连接廊道中间设置两道控制阀门。

省水池池底高程为该池最低运行水位与初始水深之差, 池顶高程为该池最高运行水位与预留高度之和。为了避免省水池向闸室灌水时在池底泄水口产生漩涡, 省水池应留有一定初始水深, 参考已建船闸, 初始水深取 1.52 m, 省水池最低运行水位为 85.42 m, 因此省水池底高程为 83.90 m; 预留高度取 1.52 m, 省水池最高运行水位为 88.08 m, 因此省水池顶高程为 92.20 m。

省水池典型断面见图 2。省水池与闸室模型布置见图 3。

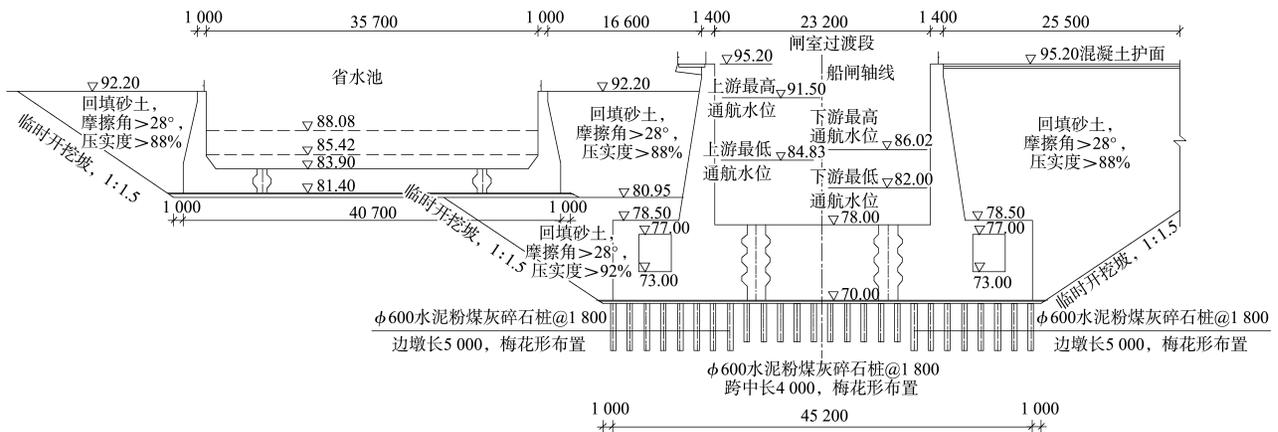


图 2 省水池及船闸典型断面 (尺寸: mm; 高程: m)

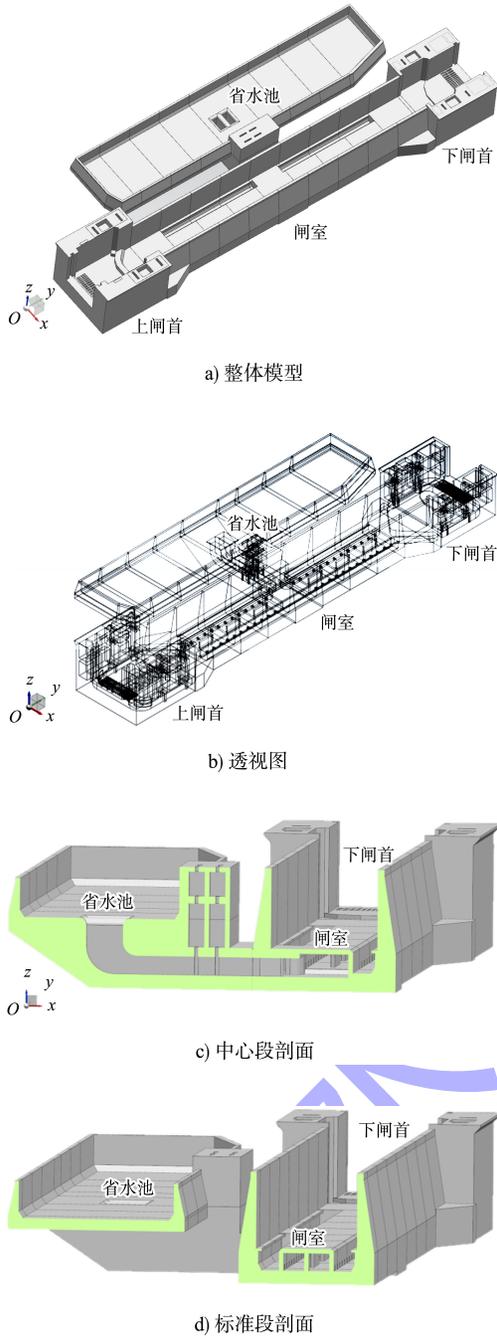


图3 省水池与闸室布置

3 输水系统布置

根据 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[3] (简称“规范”), 输水系统类型的判别公式为:

$$m = \frac{T}{\sqrt{H}} \quad (4)$$

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, m 为 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, 取 8~10 min; H 为设计水头, m,

取 9.5 m。

经计算得出 m 为 2.60~3.24, 综合规范及马店船闸省水运行对输水效率的折减, 采用“闸底长廊道侧支孔+一级省水池”的输水系统布置方案。

3.1 闸室输水系统布置

闸底长廊道输水系统是指输水廊道布置在闸室底板内, 水流经过上闸首左右双支廊道后在闸室底板内主廊道汇流, 随后经主廊道两侧的支孔流入闸室, 最后经过下闸首左右双支廊道流入下游引航道, 优点是水流消能条件较好, 可以较好地适应输水系统输水阀门单边或省水池单侧布置时闸室内的泊稳条件。

本船闸一次输水的水体大、水力指标较高, 省水池位于闸室左侧, 当省水池自船闸一侧向闸室输水时, 会产生单侧大流量输水水流均匀性问题, 直接影响到闸室内船舶停泊安全。针对这一难题, 提出在省水池底部设置横支廊道与闸室底部纵支廊道平面连接, 并将分流口布置在闸室中心段, 通过向上下游两侧均匀输水, 以起到稳定输水水流和均匀分流的作用。

在确定船闸输水主廊道及进水形式后, 对于闸室内水流消能有两种布置形式可供选择: 侧支孔明沟消能和顶支孔盖板消能, 这两种形式均能满足水流消能要求, 但结合本工程地质条件及空间布置两方面综合考虑, 确定选择结构整体性能较好的侧支孔明沟消能形式。

根据规范, 输水阀门处廊道断面面积可按下列式计算:

$$\omega = \frac{2C\sqrt{H}}{\mu T \sqrt{2g} [1 - (1-\alpha)k_v]} \quad (5)$$

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, m^2 ; H 为设计水头, m; μ 为阀门全开时输水系统的流量系数, 可取 0.6~0.8; T 为闸室充水时间, s; k_v 为输水阀门开启时间与闸室灌水时间的比值, 可取 0.6~0.8; α 为相关系数, 可查表取值。

对于本船闸, $C=4\,825.6\text{ m}^2$ 、 $H=9.5\text{ m}$ 、 $T=600\text{ s}$, 取 $\mu=0.7$ 、 $\alpha=0.56$ 、 $k_v=0.8$, 因此计算出

阀门处廊道断面面积 $\omega = 24.68 \text{ m}^2$, 取 $\omega = 28.0 \text{ m}^2$ 。

在选择主廊道断面面积以及出水支孔断面面积时^[4], α 与 β 值应加以注意, 其中 α 为主廊道断面面积与阀门处廊道断面面积之比, β 为出水支孔

断面面积与主廊道断面面积之比。 α 值愈大, 输水系统主廊道各段的损失愈小; β 值愈小, 各出水支孔之间出流越均匀, 但将增加出水孔段水头损失。部分船闸的 α 、 β 值见表 2。

表 2 部分闸底长廊道船闸输水系统尺寸

船闸名称	阀门处廊道断面面积/m ²	主廊道断面面积/m ²	出水支孔总面积/m ²	出水段长度/m	出水段长度与闸室有效长度之比	α 值	β 值
土谷塘船闸	24.50	31.92	30.19	138.0	0.76	1.30	0.946
沙溪口船闸	10.00	15.00	18.00	75.0	0.54	1.50	1.20
长洲 1# 船闸	24.00	33.00	30.48	114.0	0.60	1.375	0.92
王甫洲船闸	18.00	8.00	11.08	72.0	0.60	1.00	1.38
五强溪船闸	18.00	24.00	31.96	60.0	0.50	1.33	1.33
飞来峡船闸	18.00	24.00	24.30	115.0	0.60	1.33	1.01
七里垅船闸	8.75	15.00	19.20	56.0	0.55	1.71	1.28
康杰船闸	24.45	30.00	23.76	96.1	0.49	1.23	0.79
桥巩船闸	11.00	13.44	11.76	65.0	0.54	1.22	0.88
红花船闸	16.64	19.20	17.95	97.8	0.54	1.15	0.93
桂平二线船闸	45.00	55.00	51.00	195.5	0.70	1.22	0.93

由表 2 可见, 一般船闸的 $\alpha > 1$ 、 $0.79 \leq \beta \leq 1.38$, 出水段越长, β 取值越小, 出流均匀性越好。马店船闸闸底出水主廊道采用双支廊道并排紧邻布置, 每支廊道宽 4.8 m、高 4.0 m, 主廊道总面积 38.4 m²。两支主廊道中间隔墙厚度 1 m, 隔墙开洞使两侧水流连通同时对廊道起到支撑作用。

消能工采用侧支孔出水明沟消能, 闸底廊道出水段经省水池汇入, 在挖深段分割, 分为上下游两个出水段, 上下游出水段两侧各布置 13 个出水孔, 孔宽 0.6 m、孔高 1.0 m, 出水孔总面积为 31.2 m²。计算出 α 、 β 分别为 1.37、0.81。出水段总长为 140 m, 占闸室有效长度 77.8%, 所有出水支孔间距均采用 5.0 m。

根据规范要求, 消能明沟宽度 B 不小于 5 倍支孔宽度 (3 m)。明沟挡坎高度 D 根据下式计算:

$$D \geq d_0 + 0.24B \quad (6)$$

式中: d_0 为出水支孔高度, 为 1.0 m。通过计算, $D \geq 1.72 \text{ m}$ 。

综合闸室有效宽度 23 m, 确定消能明沟尺寸及断面, 明沟宽度 $B = 4.8 \text{ m}$ 、明沟深度 $D = 4.9 \text{ m}$ 。

按规范要求, 分散输水系统的进、出水口宜

为流线形式; 进口顶的淹没水深宜大于 0.4 倍的设计水头, 并应考虑进口处水面的局部降落; 进口的最大断面平均流速不宜大于 2.5 m/s。

输水系统进水口采用上闸首顶面进水方式, 见图 4。进水口后采用水平转弯段与灌水阀门廊道段相连。顶面进水孔顶高程 78 m, 上游正常蓄水位、最低通航水位条件下, 顶淹没水深分别为 13.5、6.83 m, 满足规范要求。

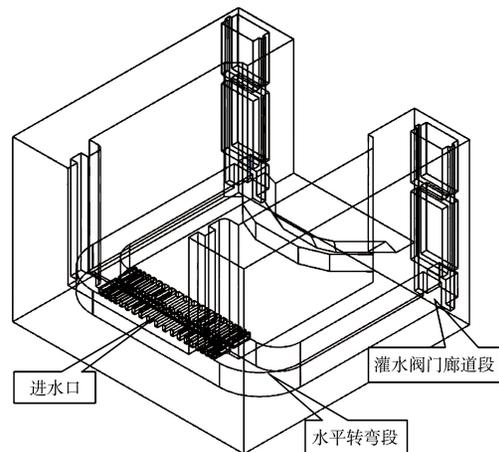


图 4 上闸首三维模型

上闸首两侧垂直进水利道面积越大, 进口流速越小, 最大流量 Q_{\max} 按下式估算:

$$Q_{\max} = \frac{8CH(1-k_v)}{T(2-k_v)^2} \quad (7)$$

式中： k_v 为输水阀门开启时间与闸室灌水时间的比值，取 0.6。估算出最大流量为 124.74 m³/s，进水口面积应大于 49.9 m²。考虑一定富余，取顶面进水口面积为 80.6 m²。此时进水口最大平均流速为 1.55 m/s，满足进口流速不大于 2.5 m/s 的规范要求。

下闸首输水阀门段廊道通过水平转弯与闸室输水廊道相连接，见图 5。泄水阀门处廊道底高程为 73.0 m，顶高程为 77.0 m，廊道顶最小淹没水深为 5.0 m。阀门后廊道通过水平转弯与下闸首出水口消能室相连接。泄水廊道出口净宽增大至阀门处廊道宽度的 2 倍，出水口廊道断面面积为 52 m²，水流进入消能室后采用顶支孔出水布置形式。

为了改善下闸首出水的水流条件，下闸首下游端布置消能室，消能室顶面对称布置出水孔，根据结构尺寸，共集中布置 40 个大小不同的出水

孔，单个出水孔长度均为 3.25 m，出水孔宽度采用中间小、两边大、以船闸中轴线对称布置的形式，从中间向两侧的宽度依次为 0.3 m (8 孔)、0.4 m (8 孔)、0.6 m (8 孔)、0.8 m (8 孔)、1.0 m (8 孔)，顶出水支孔的总面积为 80.6 m²。消能室内设置 3 道消力槛，进一步消能和调整水流流态。输水系统布置特征尺寸见表 3。

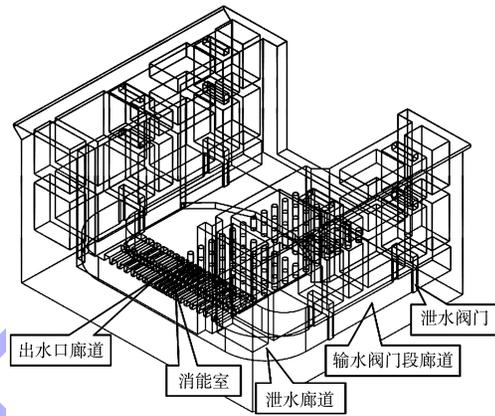


图 5 下闸首三维模型

表 3 闸底长廊道侧支孔输水系统特征尺寸

部位	特征描述	面积/m ²	与输水阀门面积比
进水口	上闸首顶面格栅进水,后水流经左右边墙上垂直进口流入灌水阀门段廊道。格栅顶高程 78 m,进水孔 40 个,尺寸中间稍大、两侧略小	52.00(垂直进水支孔), 80.60(格栅进水孔)	1.86(垂直进水支孔), 2.88(格栅进水孔)
充水阀门段廊道	阀门顶高程 77 m,设计水头时,阀门后廊道淹没水深 5 m	28.00	1.00
充水主廊道	充水阀门后廊道通过水平转弯调整廊道宽度,与闸底主廊道相连。廊道高度保持不变	-	-
闸底主廊道	水平转弯,上与充水阀门廊道、下与泄水阀门廊道相连接,主廊道顶高程 77 m,底高程 73 m,中间设有 1 m 厚的隔墩,保留约 58%互通	38.40	1.37
闸室出水支孔	闸底主廊道在省水池汇入挖深段分割下,出水孔段分为两个出水区段,每个区段主廊道单侧布置 13 个出水孔,出水孔中心间距 5 m	31.20	1.11
消能明沟	消能明沟宽 4.8 m、高 4.9 m	-	-
泄水阀门段廊道	设计水头工况下,阀门后廊道淹没水深 5 m,阀门顶高程 77 m	28.00	1.00
出水口	下闸首两侧边墙设垂直出水支孔,水流经泄水廊道进入下游消能室后由顶部格栅出流。格栅顶高程 78 m,出水孔 40 个,尺寸中间稍小、两侧略大	52.00(垂直出水支孔), 80.60(格栅出水孔)	1.86(垂直出水支孔), 2.88(格栅出水孔)

3.2 省水池输水系统布置

省水池输水系统采用双支输水廊道的布置形式，输水阀门处廊道断面面积 ω_s 按下式计算：

$$\omega_s = \frac{2C_s \sqrt{H_s}}{\mu_s T_s \sqrt{2g} [1 - (1-\alpha)k_v]} \quad (8)$$

式中： C_s 为闸室水域面积，m²，对于闸室与省水池之间的输水过程，相当于多级船闸的中间级闸室输水过程； H_s 为设计水头，m，初始工作水头为 6.08 m，考虑到输水末期需要动水关阀以缩短输水时间，此处不再考虑惯性水头 d 的作用； μ_s 为

阀门全开时输水系统的流量系数, 参考已有工程, 取闸室与省水池之间充、泄水流量系数为 0.5; T_s 为闸室充水时间, s, 取第 1 阶段闸室与省水池之间的输水时间为 300 s; α 为相关系数, 平面阀门取 0.63; k_v 为输水阀门开启时间与闸室灌水时间的比值, 参考已有工程, 对于省水池输水阀门, 考虑需要快速开启, 取 0.33。与常规船闸相比, 省水船闸省水运行输水计算过程中, 最为特殊的即是公式中闸室水域面积的取值。由于在省水池输水过程中, 省水池的水面高程和闸室内水面高程同步变化, 相当于多级船闸的中间级, 根据规范以及相关文献^[5], 中间级计算闸室水域面积取实际闸室水域面积的一半, 本船闸取省水池面积的一半即 $C_s = 2\ 412.8\ \text{m}^2$ 。经计算可得省水池 $\omega_s = 20.15\ \text{m}^2$ 。

分析国外已建典型省水船闸的输水系统布置, 为了缩短充、泄水全过程的总时间, 闸室与省水池相连的输水廊道控制断面面积一般大于普通船闸计算得出的阀门面积。同时, 关闭省水池输水阀门还需要一定时间, 因此为了节省总输水时间, 初步确定闸室与省水池之间的输水阀门处廊道断面尺寸与闸首输水阀门处的廊道断面尺寸基本相同, 总面积为 $26.0\ \text{m}^2$ 。

在闸室底部输水廊道中段未设置出水孔的位置, 其廊道底高程由 73.0 m 降至 72.0 m, 同时设置两支输水廊道与侧面省水池连接。省水池输水阀门处廊道底高程 72.00 m、顶高程为 76.00 m, 最小淹没水深 6.0 m, 每支省水池输水廊道设一道双向止水检修平面阀门, 一道双向止水工作平面阀门, 阀门后廊道通过 90°垂直转弯与省水池底部连接, 同时将每支廊道垂直段的断面尺寸扩大为 3.5 m×8.0 m(高×宽), 省水池内廊道出水口处通过圆弧向四面扩大, 与省水池底高程衔接, 圆弧半径为 1.5 m, 相应扩大后的尺寸为 6.5 m×11.0 m(高×宽)。两支输水廊道在闸室中心水平分流口汇合。省水池廊道平面和剖面见图 6。

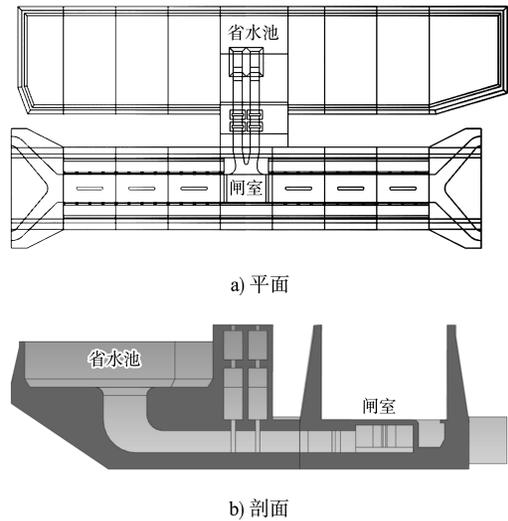


图 6 省水池廊道平面和剖面

4 数学模型试验结果

为了验证输水系统中加入省水运行的环节后, 前文水力计算得到的廊道尺度能否满足输水要求, 输水系统总体布置、水流条件是否合理可行, 阀门启闭次数翻倍、工作水头降低对输水时间的延长能否满足马店船闸“设计输水时间不大于 10 min”的要求。对马店船闸省水池及输水系统的布置进行三维水流数学模型模拟, 选取典型阀门开启工况开展船闸灌水省水运行模拟。

通过数值模拟得到水力特性曲线, 在 600 s 时船闸输水基本完成, 输水 400 s 时的最大流量约 $250\ \text{m}^3/\text{s}$ 。船闸省水运行灌水水力特性曲线见图 7, 船闸输水流量最大时刻时出水支孔流场分布见图 8。

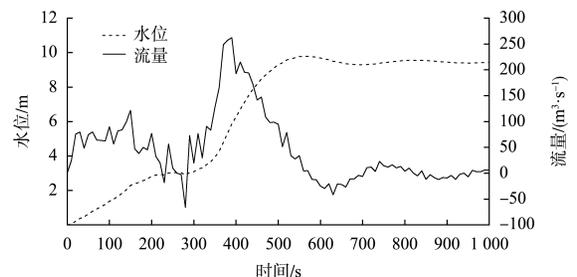


图 7 省水运行灌水水力特性曲线

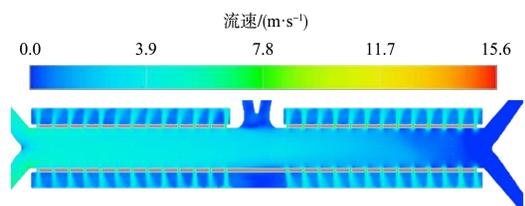


图 8 输水流量最大时出水支孔流场分布

综上, 闸室灌水完成时间可满足设计输水 10 min 要求, 省水运行对船闸输水效率的影响在设计可接受范围内, 且最大流量发生时各支孔出流分配较为均匀、水流平稳, 船闸设计的输水时间合理, 输水系统布置和省水池布置基本合理。

5 结论

1) 马店船闸采用省水船闸布置, 设计省水率为 36%, 输水系统采用“闸底长廊道侧支孔+一级省水池”的输水系统, 通过水力计算和数值模拟验证, 该输水系统的布置方案合适, 能够在不影响输水效率的情况下, 满足船闸节水需求, 具备一定的成功经验, 可供其他单级省水船闸的省水池及输水系统设计借鉴。

2) 由于省水运行对输水效率有折减, 该船闸输水系统和省水池的输水系统布置输水时间能够满足“设计输水时间不大于 10 min”的要求, 省水运行对船闸输水效率的影响符合设计预期。

3) 船闸输水廊道阀门处断面面积 28 m², 当充水、泄水阀门双边匀速开启时, 对应最大流量 250 m³/s, 且最大流量发生对应时刻各支孔出流分配较为均匀, 廊道断面平均流速 8.93 m/s, 本输

水系统基本满足设计及规范要求。

4) 阀门双边开启时, 上下闸首、省水池阀门后廊道顶无负压产生, 水流条件平稳。在最大流量时进水口未形成有害串气漩涡, 不影响正常运行。下闸首出水口水流水平扩散良好, 无回旋现象。

参考文献:

[1] 王晓青, 刘畅. 省水船闸发展及研究现状[J]. 重庆建筑, 2013, 12(10): 52-54.

[2] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 唐河省界一社旗航运工程马店枢纽船闸输水系统水力学模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2023.

[3] 南京水利科学研究院, 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, 2013.

[4] 宣国祥, 薛丽金, 李中华. 柳江红花水利枢纽工程船闸输水系统布置[J]. 水运工程, 2006(2): 74-78.

[5] 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.

(本文编辑 王璁)

(上接第 129 页)

[12] 朱利英, 魏源送, 王春荣, 等. 1980—2015 年北运河流域土地利用时空变异及其对生态服务价值的影响[J]. 环境科学学报, 2021, 41(1): 301-310.

[13] 陈万旭, 李江风, 朱丽君. 长江中游地区生态系统服务价值空间分异及敏感性分析[J]. 自然资源学报, 2019, 34(2): 325-337.

[14] 张璐, 杨硕果, 何洪名, 等. 水库工程区水土保持生态服务价值估算[J]. 人民黄河, 2020, 42(12): 78-81.

[15] ZHENG L, LIU H, HUANG Y F, et al. Assessment and analysis of ecosystem services value along the Yangtze River under the background of the Yangtze River protection strategy[J]. Journal of geographical sciences,

2020(4): 553-568.

[16] 刘海, 武靖, 陈晓玲. 丹江口水源区生态系统服务时空变化及权衡协同关系[J]. 生态学报, 2018, 38(13): 4609-4624.

[17] 樊雷, 余娇, 芦艳艳, 等. 浙川县生态系统服务对土地利用变化的敏感性分析[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(S2): 302-308.

[18] 董亚坤, 郭羽鑫, 吴碧兰, 等. 基于土地利用动态变化的洱海流域上游生态系统服务价值分析[J]. 水生态学杂志, 2023, 44(1): 16-24.

[19] 曾涛, 范鹏朋, 陈希. 长江上游莲石滩航道生态整治方案[J]. 水运工程, 2022(9): 141-146, 165.

(本文编辑 王传瑜)