

船闸输水系统研究及闸室消能工优化 的三维数值模拟

叶雅思1,谢春航2,胡瑞昌3,任启江1,苏天宇1

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司,湖南长沙410200; 2. 重庆西科水运工程咨询有限公司,重庆402247;3. 重庆交通大学 西南水利水运工程科学研究院,重庆400016)

摘要:针对木京34m宽船闸原方案下闸室泊稳条件较差的问题,采用数值模拟的方法,进行船闸输水系统灌水的数学 模型试验,研究闸室不同消能工布置形式下的水流条件和停泊条件,揭示此类输水系统闸室输水特性。结果表明,在整个 输水过程内,相较于采用1道消力槛消能工形式布置的原方案,采用"明沟+消力槛"的优化方案能够使闸室内水流流速更 缓、水体表面紊动强度更弱、水面最大纵比降也更小,闸室泊稳条件得以改善。

关键词:船闸;数值模拟;闸室;消能工;通航水流条件
 中图分类号:U641.1
 文献标志码:A

文章编号: 1002-4972(2024)11-0092-08

Three-dimensional numerical simulation for investigating filling and emptying system and optimizing energy dissipater in chamber of ship lock

YE Yasi¹, XIE Chunhang², HU Ruichang³, REN Qijiang¹, SU Tianyu¹

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China;

2. Chongqing Xike Water Transport Engineering Consulting Co., Ltd., Chongqing 402247, China;

3. Southwest Research Institute for Hydraulic and Water Transport Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China)

Abstract: In response to the issue of poor mooring conditions in the chamber under the original plan of the Mujing 34-meter wide ship lock, we use numerical simulation method to conduct mathematical model tests on the water filling and emptying system, study the water flow conditions and mooring conditions in the ship lock chamber under various energy dissipater configurations, and reveal the water conveyance characteristics of such filling and emptying system in the chamber. The results indicate that throughout the entire water conveyance process, compared to the original design with a single dissipating sill, the optimized configuration of "open ditch+dissipating sill" results in slower water flow velocity, weaker turbulence intensity on the water surface, and a smaller longitudinal slope of water surface in the chamber. This optimization enhances the stability of mooring conditions in the chamber.

Keywords: ship lock; numerical simulation; chamber; energy dissipater; navigation flow condition

内河航运是最古老的运输方式之一^[1],是内 陆腹地与沿海地区、内陆地区之间连接的重要纽 带,也是综合运输体系和水资源综合利用的重要 组成部分。积极倡导发展内河水运符合建设资源 节约型、环境友好型社会的要求^[2]。通航船闸以 其技术相对成熟、通过量大、运行稳定可靠、建 设和维护成本较低等优点,成为过坝通航建筑物的 主要形式而得到广泛应用。船闸充、泄水过程中不 可避免地会导致闸室内水体剧烈流动,为保证船只 安全停泊,须采用闸室消能工使水流消能充分^[3]。

分散输水系统闸室消能常采用盖板和明沟两 种形式^[4]。盖板消能工在我国应用广泛^[5],研究

收稿日期: 2024-02-21

作者简介:叶雅思 (1988—),男,硕士,高级工程师,从事港口与航道工程技术研究。

比较充分。近年间,许多学者对明沟这类消能工 进行研究,如杨斌等^[6]详细比较高水头下明沟消 能与盖板消能的消能特性、消能效果和消能方式。 此外,还有一些学者对高水头下船闸闸室消能工 进行研究,如杨忠超等^[7]通过局部水工模型试验与 数值模拟方法,研究高水头船闸闸室明沟的消能效 果和消能机理;李静娴^[8]探究垂向孔间距与开孔角 度对双层侧支孔明沟消能特性的影响;李礽民^[9]研 究不同消能工布置下单层侧支孔布置和双层侧支孔 布置形式下的消能效果:陈明等^[10]研究超高水头、 大尺度船闸闸底廊道侧支孔输水系统闸室明沟消能 特性, 阐明双层侧支孔单明沟和单层侧支孔双明沟 的消能特性。另外, 吕伟东等^[11]、王召兵等^[12]利 用局部模型,在恒定流情况下,对侧墙廊道闸室 内布置单明沟、双明沟及三明沟消能工充水过程 进行试验研究;彭永勤等[13]结合具体工程,采用 模型试验的方法,针对消力梁底槛及不同透水孔 高度,进行闸室消能效果试验研究:段黎明^[14]研 究不同侧支孔布置高度、消力槛高度及消力槛与 支孔的间距情况下单明沟协同消力槛消能特性: 陈明等[15]研究船闸闸底长廊道单明沟内增设消力 槛的消能效果:沈立群等¹⁶通过数值模拟研究船 闸输水过程中的消力槛的消能机理及消能效果: Hu 等^[17]对闸室流动结构进行数值模拟,以沟宽、 沟深、侧壁坎高为研究变量,系统探讨4条单明 沟结构变化对闸室输水均匀性的影响。

木京枢纽坝址位于广东省河源市东源县境内 东江中游老隆—河源河段,上距老隆约 81.8 km, 下距河源市(东江与新丰江交汇处)约 9.2 km。木 京枢纽船闸尺度为 220 m×34 m×4.5 m(闸室长×闸 室宽×门槛水深),设计最大水头为 9.1 m,考虑 到 34 m 的闸室较宽,横向出流宽度较大,原方案 采用了 1 道连续消力槛的消能工形式。然而,在 该水头工况以及船闸尺度下,原方案下的闸室水 流极有可能无法充分消能,导致较差的闸室停泊 条件。鉴于此,在原方案以及前人研究的基础上, 提出优化方案,采用"明沟+消力槛"的组合消能 工形式,以调整横向水流分配情况,改善闸室水 流条件。三维数值模拟具有灵活性强、精度高、 成本低等特点,因此本文采用数值模拟方法研究 原方案的输水系统,以及原方案和优化方案不同 消能工形式下的闸室水流条件和停泊条件。

1 数学模型

1.1 控制方程

数学模型选用重整化群(RNG) k-e 湍流模型^[18],其控制方程如下。

连续性方程为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

动量方程为:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[(\mu + \mu_i) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right]$$
(2)

湍流动能 k 方程为:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{u_i}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - \rho \varepsilon$$
(3)

湍流动能耗散率 ε 方程为:

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i\varepsilon)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{u_i}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial\varepsilon}{\partial x_i} \right] + G_{1\varepsilon}\rho \cdot \frac{\varepsilon}{k} G_k - G_{2\varepsilon}\rho \cdot \frac{\varepsilon^2}{k}$$
(4)

其中:

$$\mu_{t} = \rho C_{\mu} \cdot \frac{k^{2}}{\varepsilon} \tag{5}$$

$$G_{k} = \mu_{i} \left(\frac{\partial u_{i}}{\partial u_{j}} + \frac{\partial u_{j}}{\partial u_{i}} \right) \frac{\partial u_{i}}{\partial x_{j}}$$
(6)

式中: ρ 为体积分数平均密度,kg/m³; t 为时间,s; x_i, x_j 为坐标分量; u_i, u_j 为 x_i, x_j 方向的瞬时速 度分量,m/s; μ 为分子黏性系数; p 为修正压强, Pa; μ_i 为紊流黏性系数; G_k 为平均流速梯度变化 引起的紊动能项; σ_k, σ_e 分别为 k 方程、 ε 方程 的紊流 普朗特数, 分别取 0.719 42、0.718 42; C_{1e}, C_{2e} 为 ε 方程常数, 分别取 1.42、1.68; C_{μ} 为常数, 取 0.084 5。

1.2 计算模型

为更完整地模拟船闸的充水过程,船闸的三 维模型模拟范围包括上游部分引航道(导航调顺 段)、进水口段、船闸上下闸首、闸室、输水系统 (包括上游阀门段,输水廊道支孔段)及下游出水 口段,纵向长度为 350 m、横向宽度为 57 m、垂 向高度为 20 m。三维模型布置见图 1。



图1 三维模型布置

根据原方案,采用1道连续消力槛的消能工 布置形式, 消力槛高 0.8 m、宽 0.5 m, 距侧支孔 出口1.8 m。优化方案下,采用"明沟+消力槛" 的消能工形式,在距侧支孔出口4.0 m处设置明 沟消力梁, 高度 2.3 m、宽 0.5 m, 中部设高 0.5 m、 长 6.5 m 的过水缝。消力梁后 4.0m 处设置间断消 力槛, 消力槛长 6.0 m、高 1.8 m, 宽 0.5 m, 其 平面位置正对消力梁透水孔。优化方案消能工更 高,依据JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》[19], 船闸门槛最小水深应满足 H/T≥1.6 的要求(H为 门槛最小水深, T为设计船舶满载时的最大吃 水):为满足此要求,相应降低了优化方案主廊道 及闸室的底高程。虽然淹没水深的增加会增加水 体能量耗散,充水前期,流量较小,闸室水位较 低,存在一定影响,但随着闸室水位上升,能量 耗散更主要的原因仍然在于消能工的形式。原方 案和优化方案布置见图 2、三维效果见图 3。





b) 优化方案

图 2 消能工布置断面 (单位: m)



b)优化方案图 3 消能工布置三维效果

1.3 计算工况

本文计算工况为双边充水,阀门开启时间 为4 min,上游水位为 42.74 m,下游水位为 33.64 m,水头为9.10 m。

- 2 结果与分析
- 2.1 侧支孔流量、流速分布

原方案下,船闸闸墙每侧设 20 个侧支孔,分 为 3 组,从上游到下游孔口尺寸(宽×高)分别为 1.0 m×1.2 m(7 孔)、0.9 m×1.2 m(6 孔)、0.8 m× 1.2 m(7 孔),侧支孔总面积为 43.20 m²,侧支孔 布置见图 4。



图 4 侧支孔布置

为系统分析船闸各侧支孔的输水流量随时间 变化情况,在右侧支孔处设置了流量监测断面, 由此便可得到阀门开启4min时侧支孔的输水流量 过程及喉部断面平均流速过程,部分右侧支孔流 量及平均流速过程线见图5。





图 5 部分右侧支孔流量及平均流速过程线

从图 5a)可以看出,在充水初期,由于前两个 支孔距离廊道水平转弯较近,水流流态紊乱,廊 道断面流速分布不均,导致前两个支孔输水流量 波动较大;总体来看,由于输水廊道较长,水流 未传递到下游支孔,上游侧支孔输水流量整体上 大于下游侧支孔。到整体输水流量达到最大时刻, 最大输水流量出现在第1组的7[#]侧支孔。其后由 于总水头逐渐减小,各支孔输水流量亦开始减小, 在减小幅度上沿程支孔依次递减,因此下游侧支 孔输水流量开始超过上游侧支孔。整个充水过程 中,在不同时段,各支孔输水流量大小及差异均 不同,最大输水流量差异约1.8 m³/s。由图5b)可 以看出, 充水初期, 水流未传递到下游支孔, 支 孔喉部断面平均流速过程与流量类似,随着充水 阀门开度逐渐增加,水流传递到下游,且侧支孔 尺寸从上游到下游逐级递减,靠下游的支孔流速

反而更大, 且持续到充水末期。

- 2.2 流态分析
- 2.2.1 充水初期

为分析不同方案下闸室水流流态,本文着重 围绕充水初期(t=60 s)、充水中前期(t=130 s)以 及输水流量最大时刻(t=235 s)3个典型时刻,提 取闸室侧支孔平面、侧支孔立面及闸室表面流速 矢量云图。其中,充水初期,由于输水时间较短, 此时靠近上游的支孔流量较大,故选取4[#]侧支孔 处;随着时间到充水中前期,水流向下游运动发 展,到达10[#]侧支孔位置;输水流量最大时刻,选 取17[#]侧支孔位置。

充水初期(t=60s)流速矢量云图见图 6~9。 由图7可以看出、支孔出流主要集中在闸室上段, 原方案下,射流从侧支孔进入闸室后,流核受到 消力槛的阻挡,与之剧烈碰撞,随后射流向两侧 扩散掺混,形态被破坏:优化方案下,小部分水 体受到第1道消力槛的阻挡向两侧扩散掺混,射 流流核则通过透水孔射向第2道消力槛,并与之 剧烈碰撞,受到阻挡后向两侧扩散掺混。由图9 可以看出,原方案和优化方案下,射流除在平面 上扩散外,底部支孔射流与消力槛相互碰撞后, 在纵向上也形成二次流和立面漩涡,进而与周围 水体掺混、卷吸、对闸室表面水体产生扰动。由 于充水初期闸室上段支孔流量及流速整体上大于 中下段,因此射流对水体的扰动也主要集中在闸 室上段。限于此时刻支孔流量及射流强度均相对 较小(最大射流流速约3m/s), 闸室表面水体紊动 相对较弱,原方案和优化方案下,表面流速分别 在 0.30 和 0.25 m/s 以内, 表面横向流速在 0.25 和 0.20 m/s 以内。



a) 原方案









2.2.2 充水中前期

充水中前期(t=130 s)流速矢量云图见图 10~13。 可以看出,随着支孔流量及射流强度的增加(最大 射流流速约 5 m/s),整个闸室的支孔射流已与消力 槛充分碰撞,并与周围水体掺混,在整个闸室范围 内均已形成明显向上的二次流和立面漩涡,对闸室 表面水体的扰动作用进一步增大,闸室表面水体也 更为紊动不均。原方案下,水体紊动主要集中在闸 室中下部,表面和横向流速分别在 0.55 和 0.40 m/s 范围内; 而优化方案下,主要集中在闸室中上部, 表面和横向流速分别在 0.55 和 0.35 m/s 范围内。







a) 原方案



2.2.3 输水流量最大时刻

充水流量最大时刻(*t*=235 s)流速矢量云图见 图 14~17。可以看出,各支孔流量及射流强度基 本上也达到最大(最大射流流速约7 m/s),射流与 消力槛的碰撞、周围水体的掺混强度也最为剧烈, 向上的二次流和立面漩涡对闸室表面水体的扰动 作用也达到最大,闸室表面水体紊动最为剧烈。 原方案下,表面水体紊动主要集中在闸室下部, 而优化方案下,主要集中在闸室中部,两种方案 下,表流分别在 0.85 和 0.70 m/s 以内,横向流速 分别在 0.75 和 0.60 m/s 范围内。





图 16 充水后期(t=235 s)表面横向流速矢量云图



a) 原方案

流速/(m·s⁻¹) 0.0 0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 3.0 3.5 4.0 4.5 5.0 5.5 6.0 6.5 7.0 7.5 8.0



b) 优化方案

图 17 充水后期(t=235 s)17[#]支孔断面流速矢量云图

2.3 闸室水面纵比降

本工程设计代表船型为1000 t 货船,其主尺 度分别为50 m×12.8 m×2.2 m(总长×型宽×设计吃 水)和67.5 m×10.8 m×2.0 m。根据设计代表船舶 在闸室可能的靠泊情况,取1/2 设计代表船宽、 1 倍船宽及中心线等特征断面对水面比降进行计算 分析,计算分析断面见图18。

根据确定的特征断面,每间隔5s(Δt=5s)从 闸室上游起始点间隔0.5m(Δx=0.5m)提取水位 数据,再以0.5m的距离间隔,由上至下依次遍 历求得以代表船型(50.0和67.5m)为特征长度的 水面比降,由此基本可以得到整个充水过程所有 时间及空间的特征长度水面坡降。50.0和67.5m 代表船型的纵比降极值时间过程线见图19、20。



由图 19、20 可以看出,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,均可 能出现极值,后期最大纵比降逐渐减小。由侧支 孔流量分布可知,在充水前期,上游侧支孔充水 流量较下游侧支孔的大,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 程度的掺混与碰撞,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。

具体来看,在整个充水过程中,各个特征断面 纵比降极值随时间分布规律基本一致。对于1000 t 船舶50.0 m 代表船型,充水阀门开启时间为 4 min 时,原方案和优化方案下,最大正比降分别 为2.09%o和1.49%o,最大倒比降分别为2.12%o和 2.01%o;对于1000 t 船舶67.5 m 代表船型,最大 正比降分别为1.40%o和1.37%o,最大倒比降分别 为1.77%o和1.73%o。

总体来看, 闸室水面纵比降是输水流量沿程 分布差异、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多因 素作用的结果, 其大小与时间、空间及选取的计 算特征长度均有关系, 是一个极为复杂的综合性 指标, 能一定程度上反映闸室水流条件和泊稳条 件。充水阀门开启时间为4 min 时, 在原方案和优 化方案下, 对于1 000 t 船舶, 船闸闸室最大纵比 降分别为 2. 12‰和 2. 01‰。

3 结论

1) 侧支孔输水平均流量沿程分布存在一定差
 异,尤其是15%~35%出水段,总体输水平均流量
 较其他支孔明显偏大,而最上游侧支孔距离廊道

水平转弯较近,水流流态紊乱,因此输水流量偏 小,且波动较大。

 相比较于原方案,优化方案下的闸室水流 紊动强度更弱,泊稳条件更好,最大表面流速从
 0.85 m/s 减小至 0.70 m/s,最大表面横向流速从
 0.75 m/s 减小至 0.60 m/s,最大水面纵比降从
 2.11‰减小至 2.01‰。

参考文献:

- 吴澎.中国内河航运发展的机遇与挑战[J].水运工程, 2010(2):11-15.
- [2] 中国人民共和国交通部.全国内河航道与港口布局规划[J].中国港口,2007(7):6-7.
- [3] 杨忠超,杨斌,陈明栋,等.高水头船闸闸室明沟消能效 果及机理分析[J].水运工程,2009(12):168-173.
- [4] 朱磊.船闸明沟消能研究综述[J].东北水利水电, 2015, 33(7):67-70, 72.
- [5] 宗慕伟,杨盂藩.船闸输水系统设计[R].南京:南京水利科学研究院, 1989.
- [6] 杨斌,陈明栋,王军,等.超高水头船闸输水系统消能试验研究[J].水运工程,2007(3):73-77.
- [7] 杨忠超,陈明栋,杨斌,等.高水头船闸闸室消能工消能效果实验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版), 2010,29(3):461-465.
- [8] 李静娴.超大输水功率条件下闸室明沟消能特性数值 模拟研究[D].重庆:重庆交通大学,2018.
- [9] 李礽民.60m级巨型船闸闸底长廊道多层侧支孔消能 特性研究[D].重庆:重庆交通大学,2021.
- [10] 陈明,陈沿吉,苗健康,等.超高水头大型船闸闸室明 沟消能特性研究[J].水利水运工程学报,2022(5):
 69-77.
- [11] 吕伟东, 刘平昌, 陈亮, 等. 船闸闸室明沟消能工消能 效果三维数值模拟[J]. 水道港口, 2013, 34(6): 508-512.
- [12] 王召兵,陈亮,彭永勤.船闸闸室明沟形式及消能效果 分析[J].水运工程,2015(7):129-134.
- [13] 彭永勤,张绪进.贵港二线船闸闸室消能工优化试验 研究[J].水运工程,2016(7):91-94.

(下转第107页)