



超高水头大型船闸闸室盖板消能 三维水力特性数值模拟研究*

陈明¹, 陈玫汀¹, 周领²

(1. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074;

2. 金堂县水务工程质量与安全监督站, 四川 成都 610400)

摘要: 随着我国内河航运的高速发展, 超高水头大型船闸工程日益增多, 消能工的性能成为该类船闸设计与运行关注的核心问题之一。以单级水头 40.25 m、闸室有效尺寸 280 m×34 m(长×宽)的四区段顶部出流盖板消能船闸为研究对象, 基于 RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型与 VOF 多相流耦合方法, 构建输水系统三维湍流数学模型, 模拟闸室灌水过程的水力特性, 分析闸室三维流场、顶支孔流量分布及盖板消能特性。结果表明, 廊道顶支孔以高速射流形式进入闸室; 灌水初期, 顶支孔射流速度沿纵支廊道进口水流方向递减; 当流量超过 100 m³/s 后, 射流速度沿程递增, 且各项支孔射流速度不均匀分布愈发明显, 首末出流支孔最大流速比达 1.75 倍; 在盖板的阻挡与消能作用下, 顶支孔射流出流速度显著降低, 主要能量耗散集中发生于顶支孔与盖板形成的限域空间内。研究成果揭示了盖板结构对顶支孔射流调控与能量耗散的作用机理, 可为类似超高水头大型船闸的输水系统设计提供技术参考。

关键词: 船闸; 超高水头; 大尺度; 盖板消能; 数值模拟

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)01-0146-10

Three-dimensional hydraulic simulation of cover-plate energy dissipation in ship lock chambers with large-scale and ultra-high head

CHEN Ming¹, CHEN Meiting¹, ZHOU Ling²

(1. National Engineering Technology Research Center for Inland Waterway Regulation,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Jintang County Water Engineering Quality and Safety Supervision Station, Chengdu 610400, China)

Abstract: With the rapid development of China's inland waterway transportation, the increasing number of large-scale ship lock projects with ultra-high heads has made energy dissipater performance a core concern in their design and operation. This study focuses on a four-section outflow cover-plate energy dissipation ship lock characterized by a single-stage head of 40.25 m and chamber dimensions of 265 m × 34 m (length × width). A three-dimensional turbulent flow mathematical model is established, employing the RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and volume of fluid (VOF) method to simulate hydraulic characteristics during lock filling process. The investigation analyzes three-dimensional flow fields in the chamber, flow distribution through top branch orifices, and energy dissipation mechanisms of cover plates. The results demonstrate that water enters the chamber through top branch orifices as high-velocity jets. During initial filling stages, jet velocities decrease along the flow direction from the longitudinal corridor inlet. When flow rates exceed 100 m³/s, jet velocities progressively increase along the path, with increasingly uneven velocity distribution among top orifices, and the maximum

收稿日期: 2025-04-08 录用日期: 2025-05-15

*基金项目: 国家重点研发计划(2023YFC3206101)

作者简介: 陈明(1983—), 男, 博士, 教授, 从事通航水力学及射流力学研究。

velocity ratio between initial and terminal outflow orifices reaches 1.75. The cover plates effectively reduce jet velocities through obstruction and energy dissipation, with primary energy dissipation concentrated in confined spaces formed between top orifices and cover plates. These findings reveal the regulatory mechanism of cover plate structures on jet flow control and energy dissipation, providing technical references for water conveyance system design in similar ultra-high head and large-scale ship locks.

Keywords: ship lock; ultra-high head; large-scale; cover-plate energy dissipation; numerical simulation

近年来,随着内河航运的高速发展,单级水头超过 40 m 且满足 3 000 吨级船舶(I 级船闸)通行要求的超高水头大型船闸数量持续增加。例如,三峡船闸中间级水头达到 45.2 m,平面尺寸为 280 m×34 m(长×宽);大藤峡船闸单级水头为 40.25 m,平面尺寸同样为 280 m×34 m。随着船闸单级水头及闸室尺寸的不断增大,闸室内输水能量呈指数增长,随之引发的水力学问题日益突出,如出流不均、流态紊乱等,严重威胁船舶停泊的安全性。因此,优化船闸输水系统的消能结构是保障闸室水流平稳、船舶停泊安全的关键问题。其中,消能工的性能优劣已成为超高水头大型船闸设计与运行中的核心关注问题之一。

现行 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》中规定了两种适用于复杂输水系统的典型消能结构,即明沟消能和盖板消能。采用明沟消能的船闸,通过在船闸输水系统支孔出流的侧面布置明沟,消耗进入闸室水体的能量。杨忠超等^[1]依托银盘船闸工程,采用三维数值模型与局部物理模型,对明沟区的流速分布、紊动能、能耗率及剩余比能等参数进行了系统分析。在单明沟基础上,陈亮^[2-3]、吕伟东等^[4]提出双明沟和三明沟结构,并通过数值模拟指出三明沟具有最优的消能性能。为提升单明沟的能耗效果,陈明等^[5-6]提出在沟内增设消力槛,有效增强了消能效率。此外,张星星等^[7]系统评述了明沟的布置形式、消能效果及其在实际工程中的应用情况。陈明等^[8-10]还以单级水头达 60 m 的大型船闸为研究背景,提出了“单明沟+双层侧支孔”的联合消能结构,并提出相应布置建议。

采用盖板消能的船闸,通过在船闸输水系统支孔出流的顶部布置盖板,消耗进入闸室水体的能量。须清华等^[11]研究表明,盖板形式对闸室内水流特性影响显著,是决定消能效果的关键因素之一。范润保^[12]针对盖板底梁高度及其侧附加挡梁开展多组试验,发现采用宽盖板并降低出流高度可显著提升消能效果。周华兴等^[13]对不同类型的盖板消能效果进行了比较,提出凹型布置较凸型布置好,且盖板形式以翼型及裙带等型式更优。王召兵等^[14]指出,顶支孔形式的盖板结构具有减小阻力系数、缩短输水时间、改善船舶停泊条件等优势。针对中小尺度高水头银盘船闸工程,张利鹏^[15]开展了三维数值模拟,揭示了盖板结构的能耗分布规律;杨忠超等^[16]、杨斌等^[17]则通过模型试验测量了闸室的流场分布,系统对比了明沟与盖板消能的方式、效果与机制。吴英卓等^[18]提出了适宜大藤峡船闸的四区段八纵支廊道顶部出水盖板消能等惯性输水系统。最近,张文传等^[19]针对三峡水运新通道,提出了一种新型双层等惯性输水系统,闸室出流采用“顶支孔+盖板消能”形式。

基于三峡船闸工程的成熟经验,超高水头大型船闸设计中盖板消能方案已成为主流范式。本文以某超高水头大型船闸(单级水头 40.25 m,闸室有效尺寸 280 m×34 m)为研究对象,针对其四区段顶部出流盖板消能系统,构建输水系统三维数值模型,采用 RNG $k-\varepsilon$ 两方程湍流模型结合 VOF 多相流方法,对闸室灌水过程进行动态模拟,旨在深化超高水头船闸三维流场演化机理与盖板消能特性的认知,并为同类工程设计提供技术参考。

1 数学模型

1.1 控制方程

参照类似船闸水动力学模拟经验^[19-20], 本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 两方程紊流模型封闭雷诺时均方程, 其连续方程、动量方程及 k 、 ε 方程分别如下:

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

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

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_\varepsilon \mu_{eff} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \frac{C_{1\varepsilon}^* \varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

其中:

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1 - \eta/\eta_0)}{1 + \beta\eta^3} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{(2E_{ij} \cdot E_{ij})} \quad (6)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

式中: ρ 和 p 分别为体积分数加权平均密度和修正压力; μ 为体积分数加权平均的分子黏性系数; μ_t 为紊流黏性系数, 可由紊动动能 k 及紊动动能耗散 ε 求出, $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; μ_{eff} 为有效黏性系数, $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$; G_k 为示由于平均速度梯度引起的紊动能产生项。

以上各张量表表达式中: u_i 为 x_i 方向的速度分量, $i, j=1, 2, 3$; 方程中通用模型常数取值分别为 $C_\mu=0.0845, \alpha_k=\alpha_\varepsilon=1.39, C_{1\varepsilon}=1.42, C_{2\varepsilon}=1.68, \eta_0=4.377, \beta=0.012$ 。采用控制体积法对上述偏微

分方程组进行离散, 流场数值计算采用分离式压力修正法中的 PISO 算法。对固壁边界采用壁面函数法。采用水汽两相流的 VOF 模型处理闸室自由液面。

1.2 网格剖分及边界条件

本文依托船闸工程设计单级水头 40.25 m, 船闸闸室有效尺寸为 280 m×34 m, 输水系统采用四区段八纵支廊道顶部出水盖板消能, 见图 1。输水系统阀门段廊道断面尺寸为 (2.0~5.0) m×5.5 m (宽×高), 主廊道断面尺寸为 (2.0~5.0) m×5.5 m, 中支廊道断面尺寸为 (2.0~6.0) m×7.0 m, 出流支廊道断面尺寸为 (5.2~8.0) m×3.1 m; 前 1/4 和后 4/4 出流支廊各布置 14 个出流支孔, 中间 1/2 和 3/4 出流支廊各布置 13 个出流支孔; 出流支孔按等间距、等面积布置, 相邻支孔间距 4 m, 支孔断面尺寸为 5.20 m×0.18 m (长×宽); 消能盖板采用凸型布置, 裙带等高, 为 7.0 m×1.4 m×1.0 m (长×宽×高), 裙带底缘孔高 0.4 m。根据盖板消能四区段出水输水系统布置特点, 计算区域选取整个闸室区域的 1/4 进行模拟。同时, 为保证入流边界上的流速流向平稳, 廊道进口进行了水平延伸处理。

计算区域采用分块四面体和六面体混合格网对计算区域进行剖分, 同时对顶支孔、盖板及其附近区域进行网格加密处理, 剖分的网格单元总数约为 43 万个。计算区域、顶支孔和盖板网格剖分见图 2。计算域范围为 $X=0\sim 34$ m、 $Y=6.80\sim 29.05$ m、 $Z=-77\sim 0$ m, 分别对应闸室的宽度、高度及长度方向。为考察盖板消能特性, 本文研究主要针对灌水过程, 计算 0~400 s 输水时段, 包括最大流量时刻 (373 s)。根据流量过程线, 进口边界按速度进口设置, 闸室出流与大气相通, 采用空气压力出口。边界形态见图 2。

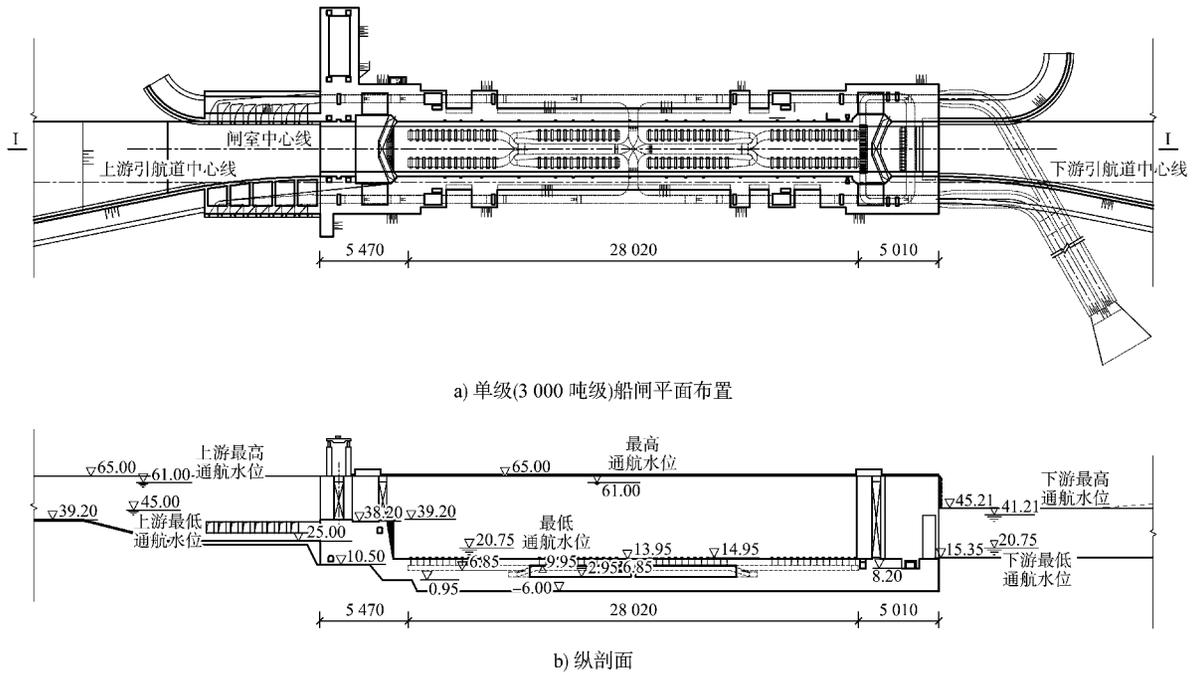


图 1 船闸输水系统布置 (高程:m;尺寸:mm)

Fig. 1 Layout of the filling-emptying system of ship locks (elevation:m;dimension:mm)

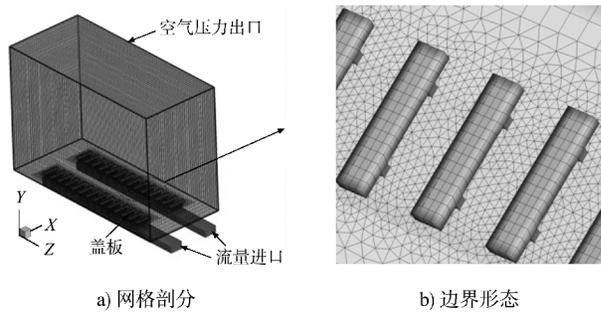


图 2 网格剖分及边界形态

Fig. 2 Mesh generation and boundary configuration

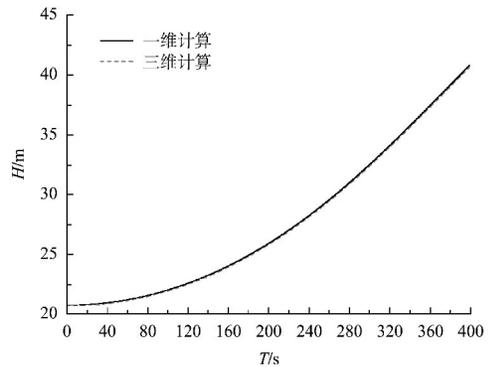


图 3 闸室水位过程线对比

Fig. 3 Comparison of water level process line in lock chamber

1.3 数学模型验证结果

三维非恒定流计算过程中,对闸室任意3点的水位过程线进行监测。比较了三维非恒定流监测点水位平均值的过程线与一维非恒定流水位过程线,见图3,两者的闸室水位变化曲线吻合较好,说明研究采用的三维紊流数学模型及其数值方法可准确模拟船闸的输水过程。

2 消能特性分析

2.1 流场分布

本文重点围绕4个典型时刻对盖板消能特性进行分析,分别为灌水流量 $Q = 50 \text{ m}^3/\text{s}$ (灌水初期, $T = 19 \text{ s}$)、 $Q = 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T = 76 \text{ s}$)、 $Q = 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ($T = 183 \text{ s}$)、 $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$ (最大流量时刻, $T = 373 \text{ s}$),

具体分析了闸室横向剖面、纵向剖面和水平剖面的水流流速分布情况。

2.1.1 横向剖面流场分布

闸室典型横向剖面流场分布($Z=-38\text{ m}$)见图4。当 $Q=50\text{ m}^3/\text{s}$ 时,水流出顶支孔后,受盖板的阻挡,由盖板四周出流,由于流速较小,水流平稳流向闸室自由面,见图4a)。当 $Q=200\text{ m}^3/\text{s}$ 时,顶支孔最小断面平均射流速度为 1.43 m/s ,在两盖板之间的闸室横向出流方向,出流后的水流形成对冲,在盖板周边形成了不同尺度的漩涡,掺混消能,见图4b)。而且漩涡尺度和强度与顶支孔出流速度有关,在最大流量 $896\text{ m}^3/\text{s}$ 时,见图4c),支孔最小断面平均射流速度增加至 6.69 m/s ,在盖板周边形成的漩涡流态更为明显,水流较为紊乱。由流速分布可看出,当灌水流量增加至一定值后,尽管水流从纵支廊道进入顶支孔时形成了高速射流,但在盖板的阻挡消能下,盖板出流速度大幅降低,如在最大流量时,盖板出流最大速度仅为 2.4 m/s 。

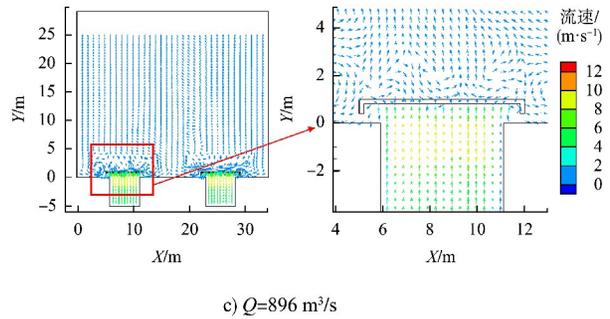
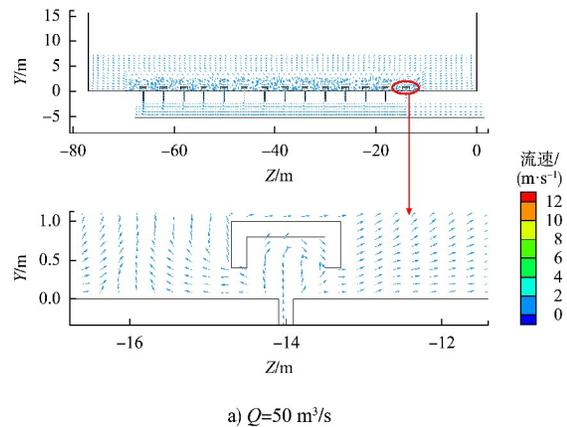
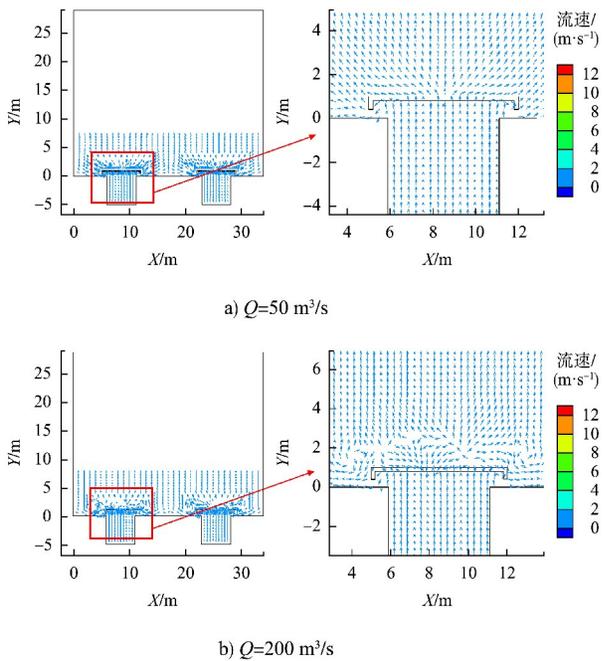


图4 闸室典型横向剖面流场分布($Z=-38\text{ m}$)
Fig. 4 Flow field distribution of typical cross-section in lock chamber($Z=-38\text{ m}$)

2.1.2 纵向剖面流场分布

闸室典型纵向剖面流场分布($X=25.5\text{ m}$)见图5。在灌水初期,由于流速较小,水流由闸底纵支廊道流经顶支孔后,绕经盖板四周平稳流向闸室自由面,见图5a)。同2.1.1节所述,当流量达到 $200\text{ m}^3/\text{s}$ 后,水流由顶支孔出流进入盖板内,在盖板的阻挡下流态较为紊乱,见图5b)。经盖板四周出流后,在盖板间两股水流的挤压下,盖板周边及其上方形成了不同尺度的漩涡,且盖板周边形成的漩涡流态随顶支孔出流速度的增大而愈来愈明显,流态紊乱程度增强。随着水流的上升,远离支廊道进口的顶支孔出流后,水流流向上游,靠近支廊道进口的顶支孔出流后,水流流向下游。



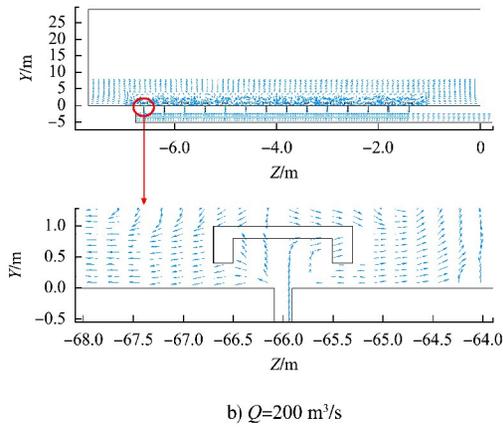
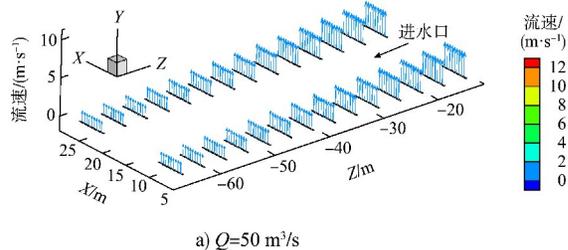


图 5 闸室典型纵向剖面流场分布 ($X=25.5\text{ m}$)
 Fig. 5 Flow field distribution of typical longitudinal section in lock chamber ($X=25.5\text{ m}$)

2.1.3 水平剖面流场分布

闸室典型水平剖面流场分布 ($Y=-1\text{ m}$) 见图 6。灌水初期时, 沿支廊道进口水流方向, 顶支孔射流流速大小呈递减分布, 其中最大顶支孔断面平均射流速度为 0.64 m/s , 最小为 0.29 m/s , 见图 6a)。 $Q=200\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 沿支廊道进口水流方向, 顶支孔射流流速大小呈递增分布, 其中最大顶支孔断面平均射流速度为 2.50 m/s , 最小为 1.43 m/s , 见图 6b); 之后, 随着流量的继续增加, 流速递增分布愈来愈明显。当灌水流量增加至最大值时, 最大顶支孔断面平均射流速度为 11.49 m/s , 最小为 6.69 m/s , 见图 6c)。由此可知, 在灌水初期, 水流主要集中于临近进口的顶支孔流出, 随着灌水流量的不断增加, 顶支孔集中出流区域逐渐远离进口。出现上述流速分布演变的原因, 灌水初期水流自然寻找最近的顶支孔流入闸室, 当纵支廊道流速增加至一定值后, 临近进口顶支孔的分流能力有限, 大部分水流寻主流方向继续向前。



a) $Q=50\text{ m}^3/\text{s}$

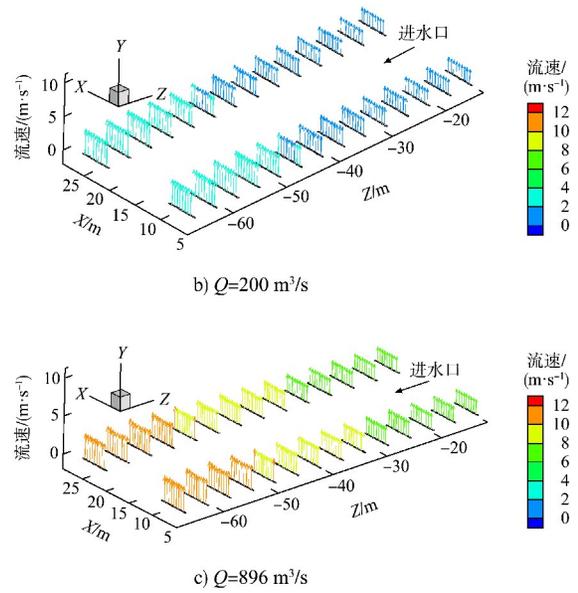
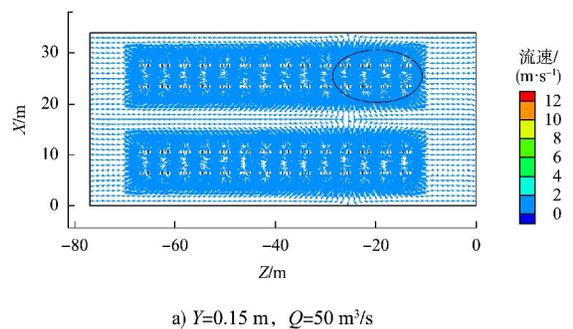


图 6 闸室典型水平剖面流场分布 ($Y=-1\text{ m}$)
 Fig. 6 Flow field distribution of horizontal section in lock chamber ($Y=-1\text{ m}$)

沿闸室水深方向典型水平剖面流场分布见图 7。在 $Y=0.15\text{ m}$ 断面上可清晰看出, 顶支孔射流在盖板的阻挡下, 往盖板四周流出, 见图 7a) 和 7b)。由 $Y=2\text{ m}$ 断面上的流速分布可知, 在 $Q=50\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q=200\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 可看出盖板上、下游方向的出流较多, 闸室横向出流较少, 见图 7c) 和 7d)。当流量增加至 $Q=500\text{ m}^3/\text{s}$, 该断面上的流场分布较为紊乱, 两排纵向盖板出流相互掺混较为明显, 见图 7e)。当闸室水深不断升高时, 相应的断面流速逐渐减小, 流态较为平稳, 在水深为 3 m 即 $Y=4\text{ m}$ 时, 断面流速分布相对较为均匀, 见图 7f)。



a) $Y=0.15\text{ m}, Q=50\text{ m}^3/\text{s}$

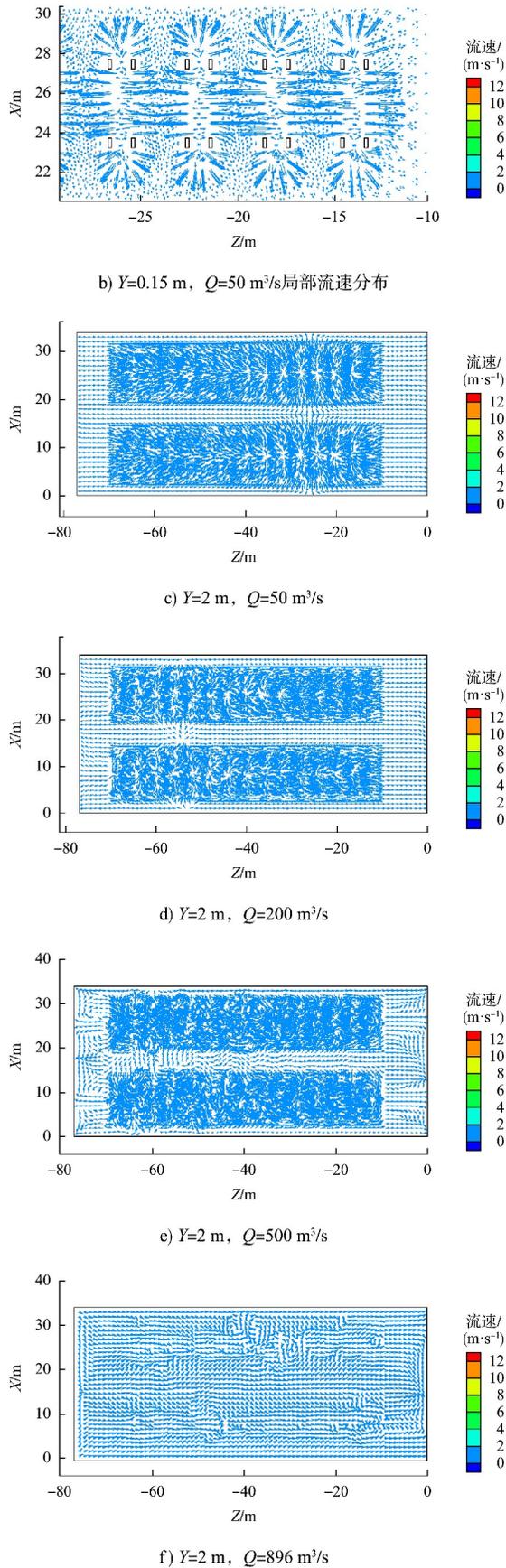


图7 闸室水平剖面流场分布

Fig. 7 Flow field distribution of horizontal section in lock chamber

2.2 顶支孔流量分布

盖板消能输水系统顶支孔的排序见图8。根据该编号, 各顶支孔在不同灌水流量下的流量分布见图9。由图可知, 灌水初期, 在1号和15号顶支孔流量最大, 为 $0.60\text{ m}^3/\text{s}$; 在14号和28号顶支孔流量最小, 为 $0.27\text{ m}^3/\text{s}$ 。在 $Q=100\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 各顶支孔流量分布相对较为均匀, 流量差值最大为 $0.20\text{ m}^3/\text{s}$ 。此后, 各顶支孔流量又出现了不均匀分布, 如在 $Q=500\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $Q=896\text{ m}^3/\text{s}$ (最大流量)时, 最大流量发生在14号和28号顶支孔中, 分别为 6.00 和 $10.74\text{ m}^3/\text{s}$; 最小流量发生在1号和15号顶支孔中, 分别为 3.43 和 $6.25\text{ m}^3/\text{s}$; 首末出流支孔最大流量比分别为 1.75 和 1.72 。

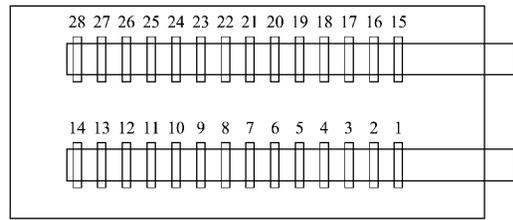


图8 顶支孔布置

Fig. 8 Top branch orifice layout

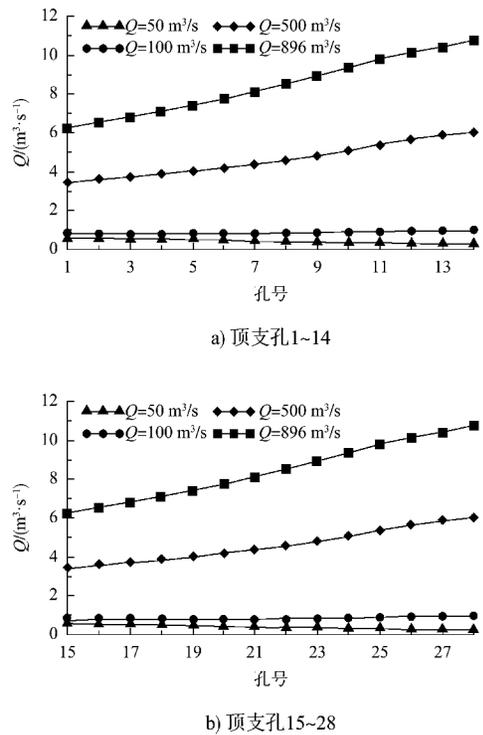


图9 顶支孔流量分布

Fig. 9 Flow distribution of top support holes

根据上述分析结果, 可以得出顶支孔流量分配随时间和空间的变化规律。灌水流量 $Q = 100 \text{ m}^3/\text{s}$ 为分配变化的转折点, 即在 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 的范围内, 顶支孔流量沿支廊道进口流速方向呈递减分布, 随后至最大流量 $896 \text{ m}^3/\text{s}$ 的范围内, 变为递增分布。此结果与前述流速分布、漩涡形成及其位置的变化等分析成果相辅相成。

2.3 消能特性

闸室断面剩余比能及流速分布均匀度是衡量船闸输水系统的消能效果的重要水力指标。各流量条件下, 闸室剩余比能及流速分布均匀度沿闸室水深的变化特性见图 10。可见, 断面剩余比能随水深的增加而减小, 流速分布均匀度随水深的增加而增加, 说明当闸室水深不断升高时, 相应的断面流速逐渐减小、流速分布逐渐均匀。值得说明的是, 当船闸灌水流量较小时 ($Q \leq 200 \text{ m}^3/\text{s}$), 闸室剩余比能相对较小, 故在对比图中予以剔除。进一步, 以流量 $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$ 为例, 闸室典型纵向剖面 ($X = 25.5 \text{ m}$) 和典型水平剖面 ($Y = 0.15 \text{ m}$) 上的紊动能和紊动耗散率的分布情况分别见图 11、12。由图可知, 在纵剖面上紊动能和紊动耗散率主要分布在盖板内, 且其最大值分别为 0.63 和 $12.68 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 。在水平剖面上水流紊动也主要分布在盖板范围内, 且其最大值分别为 0.74 和 $13.65 \text{ m}^2/\text{s}^3$ 。由此说明, 盖板消能主要是由于盖板阻挡顶支孔高速射流, 在盖板形成的狭小空间内消耗水流动能。

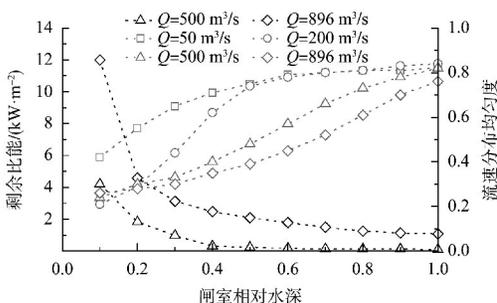


图 10 闸室剩余比能与流速分布均匀度对比
Fig. 10 Comparison of the remaining specific kinetic energy and flow velocity distribution uniformity in lock chamber

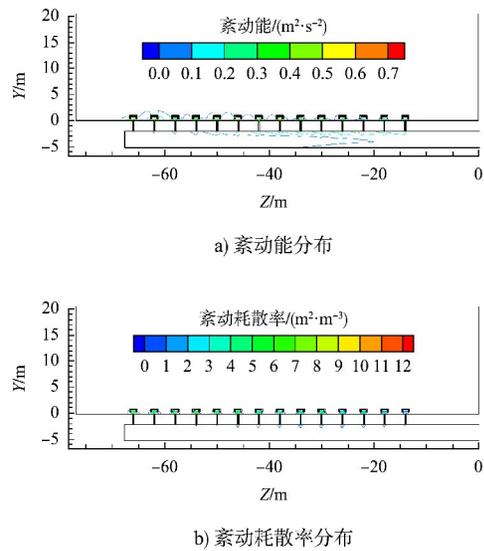


图 11 闸室典型纵剖面紊动能和紊动耗散率分布 ($X = 25.5 \text{ m}$, $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 11 Distribution of turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate of typical longitudinal section in lock chamber ($X = 25.5 \text{ m}$, $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$)

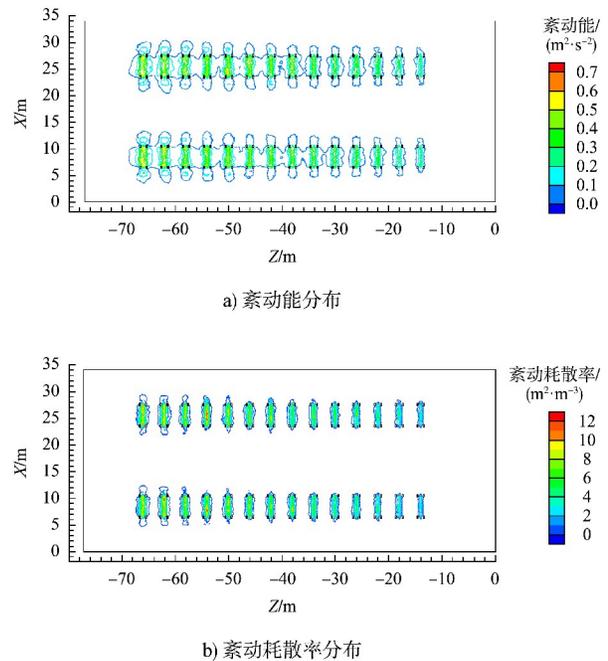


图 12 闸室典型水平剖面紊动能和紊动耗散率分布 ($Y = 0.15 \text{ m}$, $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$)

Fig. 12 Distribution of turbulent kinetic energy and turbulent dissipation rate of typical horizontal section in lock chamber ($Y = 0.15 \text{ m}$, $Q = 896 \text{ m}^3/\text{s}$)

3 结论

1) 本文依托我国某超高水头大型船闸四区段出流盖板消能输水系统, 采用三维紊流数值模拟方法, 研究分析了船闸灌水过程的水动力特性,

包括闸室三维流场分布、顶支孔流量分布规律和消能特性。

2) 灌水初期($Q=50\text{ m}^3/\text{s}$)，沿纵支廊道进口水流方向，顶支孔射流速度沿程递减；当灌水流量超过 $100\text{ m}^3/\text{s}$ 后，顶支孔射流速度沿程递增；当流量进一步增加，各项支孔射流速度不均匀分布愈来愈明显，首末出流支孔最大流速比达1.75。

3) 当灌水流量增加至一定水平后，纵支廊道内的水流通过顶支孔形成高速射流；在盖板结构的阻挡与消能作用下，射流动能得到有效衰减，出流速度显著降低，表明盖板结构可有效耗散船闸输水过程中的多余能量，并改善闸室内的流态分布。

4) 顶支孔流量分配演变规律为随灌水流量的增加先递减后递增，其转折点为灌水流量 $Q=100\text{ m}^3/\text{s}$ ，该流量演化过程直接影响顶支孔射流速度及闸室流场分布特性。

5) 盖板消能主要是由于盖板阻挡顶支孔高速射流，在盖板形成的狭小空间内消刹水流动能。

参考文献:

- [1] 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.
YANG Z C, CHEN M D, YANG B, et al. Experimental study on energy dissipation effect of chamber energy dissipater in superhigh-head lock[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2010, 29(3): 461-465.
- [2] 陈亮, 刘平昌, 张绪进, 等. 贵港二线船闸闸室双明沟消能工布置及消能特性研究[J]. 水道港口, 2013, 34(2): 144-149.
CHEN L, LIU P C, ZHANG X J, et al. Layout of double open trench energy dissipater and energy dissipation characteristics of Guigang second line ship lock chamber[J]. Journal of waterway and harbor, 2013, 34(2): 144-149.
- [3] 陈亮. 船闸闸室明沟消能工布置及消能机理研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
CHEN L. Research on energy dissipation mechanism of the open ditch in shiplock chamber [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [4] 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.
LYU W D, LIU P C, CHEN L, et al. Three-dimensional numerical simulation of energy dissipation effect in energy dissipater of lock chamber open ditch[J]. Journal of waterway and harbor, 2013, 34(6): 508-512.
- [5] 陈明, 杨颖, 黄海津, 等. 船闸输水系统单明沟与消力槛联合布置的消能特性[J]. 水运工程, 2021(7): 122-129.
CHEN M, YANG Y, HUANG H J, et al. Energy dissipation characteristics of combined structure consisted of single open ditch and longitudinal sill of filling and emptying system in ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2021(7): 122-129.
- [6] 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.
CHEN M, MA X L, DUAN L M, et al. Effect of the baffle sill on energy dissipation characteristics of the single open ditch located in ship lock chamber[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (natural science), 2023, 42(6): 76-83.
- [7] 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.
ZHANG X X, CHEN M D, CHEN M, et al. Review of studies on filling and emptying system with chamber floor's long culvert and lateral orifice [J]. Port & waterway engineering, 2016(6): 135-143.
- [8] 陈明, 刘甜甜, 李静娴, 等. 超高水头大尺度船闸闸底廊道双层侧支孔消能特性研究[J]. 水动力学研究与进展, 2022, 37(3): 301-308.
CHEN M, LIU T T, LI J X, et al. Energy dissipation characteristics of double-layer side ports in in-chamber culvert designed for large-scale lock chamber with extreme high water head [J]. Chinese journal of

- hydrodynamics, 2022, 37(3): 301-308.
- [9] 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.
CHEN M, CHEN Y J, MIAO J K, et al. Energy dissipation characteristics of the open ditch located in a large-scale ship lock chamber with an extreme high water head [J]. Hydro-science and engineering, 2022 (5): 69-77.
- [10] CHEN M, ZHOU X S, LI R M, et al. Energy dissipation characteristics of an in-chamber longitudinal culvert system with three-layer side ports designed for a large-scale lock with 60m water head [J]. Engineering review, 2023, 43(1): 49-65.
- [11] 须清华, 杨孟藩. 船闸廊道输水系统水力学研究综合报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 1963.
XU Q H, YANG M F. Comprehensive report on hydraulic research of lock corridor water conveyance systems[R]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 1963.
- [12] 范润保. 大藤峡船闸输水系统试验研究[R]. 长春: 东北勘测设计研究院水利科学研究所, 1996.
FAN R B. Experimental study on the water conveyance system of Datengxia Lock [R]. Changchun: Water Conservancy Science Research Institute of Northeast Survey and Design Institute, 1996.
- [13] 周华兴, 宗慕伟, 孟祥玮. 船闸输水廊道顶部支孔消能盖板型式的研究[J]. 水道港口, 2001, 22(2): 66-72.
ZHOU H X, ZONG M W, MENG X W. Study on the pattern of energy dissipating cover plate at top of a lock culvert [J]. Journal of waterway and harbor, 2001, 22(2): 66-72.
- [14] 王召兵, 姜华, 缪吉伦, 等. 闸底长廊道顶缝出水输水系统研究[J]. 水运工程, 2007(5): 76-79.
WANG Z B, JIANG H, MIAO J L, et al. On filling & emptying system of long culvert top outlet in shiplock bottom [J]. Port & waterway engineering, 2007 (5): 76-79.
- [15] 张利鹏. 高水头船闸水流三维数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2008.
ZHANG L P. The 3D numerical simulation study on the turbulent flow of high head lock [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2008.
- [16] 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.
YANG Z C, YANG B, CHEN M D, et al. Energy dissipation effect and mechanism of open ditch energy dissipater in high-head lock [J]. Port & waterway engineering, 2009(12): 168-173.
- [17] 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.
YANG B, CHEN M D, WANG J, et al. Experimental study on energy dissipation of filling and emptying system of superhigh-head lock [J]. Port & waterway engineering, 2007(3): 73-77.
- [18] 吴英卓, 江耀祖, 姜伯乐, 等. 大藤峡船闸关键水力学问题研究[J]. 长江科学院院报, 2018, 35(12): 68-73.
WU Y Z, JIANG Y Z, JIANG B L, et al. Hydraulic key issues in the ship lock of Datengxia hydropower project [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2018, 35(12): 68-73.
- [19] 张文传, 蒋筱民, 童迪, 等. 高水头船闸双层输水系统数值计算[J]. 水运工程, 2024(1): 90-96, 104.
ZHANG W C, JIANG X M, TONG D, et al. Numerical calculation on double layer filling-emptying system of high-head ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2024(1): 90-96, 104.
- [20] 陈明, 梁应辰, 宣国祥, 等. 船闸输水过程三维水力特性动态仿真研究[J]. 水动力学研究与进展, 2013, 28(5): 559-565.
CHEN M, LIANG Y C, XUAN G X, et al. Numerical simulation for dynamic characteristics of 3D flow during shiplock filling process [J]. Chinese journal of hydrodynamics, 2013, 28(5): 559-565.