

超高水头大型船闸闸室明沟消能特性研究

陈明, 陈沿吉, 苗健康, 黄海津

Energy dissipation characteristics of the open ditch located in a large-scale ship lock chamber with an extreme high water head

CHEN Ming, CHEN Yanji, MIAO Jiankang, HUANG Haijin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12170/20210805008>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

船闸末级闸首超长输水廊道泄水水力特性数值模拟

Numerical simulation of hydraulic characteristics of the ultra-long water conveyance corridor at the head of the last-step ship lock chamber

水利水电工程学报. 2021(4): 92 <https://doi.org/10.12170/20200728003>

高水头船闸第二分流口自分流体型水力特性研究

Numerical study of hydraulic characteristics of self-difffluence structure in second diversion port of high-head lock

水利水电工程学报. 2017(6): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.06.001>

高水头船闸一字闸门水动力特性数值模拟

Numerical simulation of hydrodynamic characteristics of single-leaf gate of high-head navigation lock

水利水电工程学报. 2017(1): 87 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.01.012>

双线互输水船闸剩余水头优化研究

Optimization study of residual head of mutual water filling and emptying double-line lock

水利水电工程学报. 2018(4): 61 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2018.04.009>

高水头船闸阀门顶缝空化切片试验研究

Sectioning test study on valve top gap cavitation of high-head lock

水利水电工程学报. 2017(4): 14 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2017.04.003>

大型升船机船厢出入水受力特性原型观测

Prototype monitoring of mechanical characteristics of large ship lift chamber filling and outleting of water

水利水电工程学报. 2019(3): 1 <https://doi.org/10.16198/j.cnki.1009-640X.2019.03.001>

DOI:10.12170/20210805008

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 Ming, CHEN Yanji, MIAO Jiankang, 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. (in Chinese))

超高水头大型船闸闸室明沟消能特性研究

陈明¹, 陈沿吉¹, 苗健康², 黄海津¹

(1. 重庆交通大学 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074; 2. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南长沙 410200)

摘要: 为研究超高水头、大尺度船闸闸底廊道侧支孔输水系统闸室明沟消能特性, 以单级水头 60 m、有效尺度为 280 m×40 m(长×宽)的闸室为研究对象, 采用三维紊流数值模拟方法, 针对流速、紊动能、剩余比能及流速分布均匀度等参数进行分析, 阐明了双层侧支孔单明沟和单层侧支孔双明沟的消能特性, 并对比了两种明沟消能工的消能效果。结果表明: 对于双层侧支孔单明沟布置型式, 垂向间距 d 与支孔面积平方根 D 之比由 $d/D=2.29$ 增加至 5.71 的过程中, 消能效果先变优后变差, 当 $d/D=3.43$ 时可达到的消能效果; 双明沟型式考虑合理的宽度(单个明沟宽度 b 与支孔面积平方根 D 之比 $b/D=2.71$)后, 相比双层侧支孔单明沟型式, 消能效果更佳。研究结果可为类似船闸的消能工设计提供技术支撑。

关键词: 船闸; 超高水头; 大尺度; 明沟; 消能特性

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2022)05-0069-09

随着西部大开发和“一带一路”倡议的实施, 高坝通航成为未来发展趋势。为保障高坝通航, 建设超高水头、大尺度船闸具有广阔的应用前景。苏联有单级水头达 42 m 的乌斯基-卡米诺阿爾斯基船闸^[1-2]; 美国修建了多座水头超过 30 m 的高水头船闸^[3]。我国也修建了多座设计水头接近或超过 40 m 的高水头船闸, 如长江三峡船闸^[4]、黔江大藤峡船闸^[5]、乌江银盘船闸^[6]、沅水五强溪船闸^[7]、赣江万安船闸^[8]等。已建的三峡船闸是国内外多级船闸之最, 闸室尺寸为 280 m×34 m, 总水头 113.0 m; 基本建成的大藤峡船闸是国内单级船闸之最, 闸室有效尺寸 280 m×34 m, 最大水头 40.25 m。超高水头、大尺度情况下, 如何在有限时间和有限水深内快速高效地消杀能量, 以确保闸室内船舶停泊安全, 是当下研究的重点。

明沟消能工是国内外常采用的消能型式之一, 其消能途径为侧支孔高速射流冲击明沟边壁, 水流反射掺混。陈明等^[9]结合广西左江山秀二线船闸工程, 针对船闸闸底长廊道单明沟消能问题, 对闸室充水过程进行三维数值模拟, 研究认为在明沟内增设一道消力槛可显著提高消能效果。然而超高水头、大尺度情况下, 单位时间内进入闸室的能量迅猛增加, 单明沟消能工因闸室横向水流分配不均, 能量耗散不充分等劣势, 已不能满足高水头大尺度船闸的消能要求。鉴于此, 我国研究人员基于单明沟提出了双明沟和三明沟型式。宣国祥等^[10]针对桂平二线船闸闸底长廊道输水系统, 开展了闸室水流条件和船舶系缆力试验研究, 提出了调整水流横向分配更好的双明沟型式。吕伟东等^[11]针对侧墙长廊道单明沟、双明沟及三明沟消能工, 对比分析了 3 种明沟型式的消能效果, 结果表明三明沟消能效果最佳, 双明沟和单明沟消能效果较为接近。杨艳红等^[12]针对设计水头为 40.25 m、闸室尺度 265 m×34 m×5.8 m(长×宽×槛上最小水深)、闸底纵支廊道明沟消能四区段出水的输水系统, 分析了闸室三维水力特性, 并揭示了支孔流量分布规律和明沟消能机理。综上研究, 对单级水头达 40 m 级的闸室明沟消能研究相对较少, 对 60 m 级超高水头大尺度船闸的

收稿日期: 2021-08-05

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0402001); 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2019jcyj-msxmX0759)

作者简介: 陈明(1983—), 男, 江西九江人, 教授, 博士, 主要从事通航水力学研究。E-mail: chenmingjy@126.com

通信作者: 陈沿吉(E-mail: 1285638137@qq.com)

明沟消能的研究更少。李静娴^[3]在恒定流量的前提下,采用三维数值模拟方法对 60 m 级超大输水功率船闸闸室明沟消能的水力特性和消能效果展开研究,分析不同出水孔层数、垂向孔间距及开孔角度下明沟的消能特性,然而,该研究重点针对单明沟型式,且其边界条件为恒定流,这与船闸实际输水过程存在差异。

本文在前人研究基础上,研究大尺度超高水头船闸闸底廊道双层侧支孔单明沟和双明沟的消能特性,并对分析两种明沟消能工布置型式的消能效果,同时针对双层侧支孔单明沟布置型式(侧支孔为平行错开布置,错孔距离为 2.5 m),分析垂向支孔间距对消能效果的影响规律。

1 模型建立

1.1 研究对象及计算内容

本文研究对象为设计水头 60 m,有效尺度为 280 m×40 m(长×宽)的闸室。参照已建大尺度高水头船闸建设和运行经验,计算模型的输水时间选取 14 min,阀门开启时间为 8 min。根据《船闸输水系统设计规范》计算得 $m' < 2.5$ (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),拟采用垂直分流闸底纵支廊道二区段输水系统型式。本文主要对比双层侧支孔单明沟型式及双明沟型式的消能效果,如图 1 和 2 所示(图 1 中 d 代表侧支孔垂向间距,图 2 中 b 代表单个明沟宽度),其中侧支孔宽度为 0.45 m,详细工况组合见表 1。

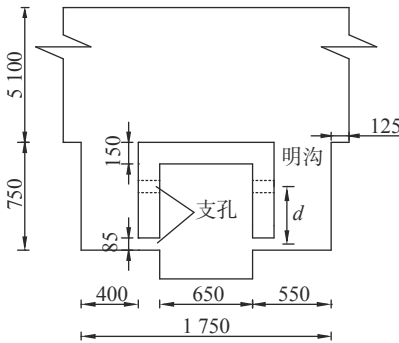


图 1 双层侧支孔单明沟型式(单位: cm)

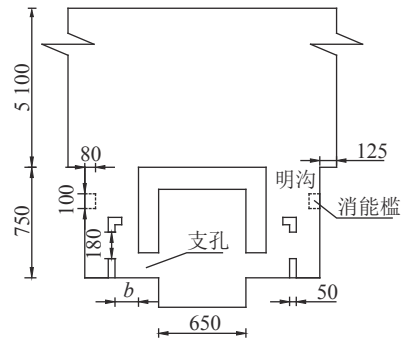


图 2 双明沟型式(单位: cm)

Fig. 1 Single open ditch with double-layer side ports (unit: cm)

Fig. 2 Double open ditches (unit: cm)

表 1 计算工况组合

Tab. 1 Combination of calculation conditions

工况	垂向支孔间距/m	明沟宽度/m	支孔高度/m	备注
SC1	2	4.000	2×0.85	双层侧支孔单明沟
SC2	3	4.000	2×0.85	双层侧支孔单明沟
SC3	4	4.000	2×0.85	双层侧支孔单明沟
SC4	5	4.000	2×0.85	双层侧支孔单明沟
SMG1	\	2×1.750	1.70	双明沟
SMG2	\	2×1.750	1.70	双明沟+消能槛
SMG3	\	2×2.375	1.70	双明沟+明沟加宽

1.2 计算区域及网格剖分

根据输水系统和闸室布置的对称性,计算区域选取了整个闸室区域的 1/4 进行模拟研究,计算区域长 155 m,宽 20 m,沿闸室纵向布置 22 个侧支孔,侧支孔纵向错位间距为 5 m。采用结构化网格对其进行剖分,同时对明沟、侧支孔及附近区域进行网格加密,各工况条件下的最小网格尺寸控制为 0.3 m。双层侧支孔单明沟型式网格单元总数约为 157 万个,节点总数约为 165 万个;双明沟型式网格单元总数约为 74 万个,节点总数约为 79 万个。

本文选取整个闸室区域的 1/4 建立三维数学模型, 对称面上设置对称边界条件, 闸室出口为空气压力出口边界, 廊道进口为质量流进口边界, 其余均为无滑移的壁面边界(图 3), 流量过程线见图 4。

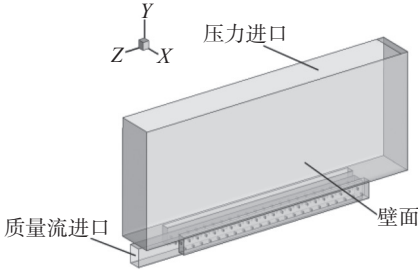


图 3 模型边界条件

Fig. 3 Boundary conditions

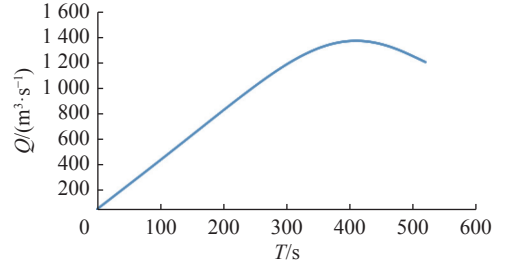


图 4 流量过程线

Fig. 4 Time-history of the flow rate

1.3 计算原理和方法

考虑到侧支孔出流均具有高速射流特性, 而高速射流各向异性较强, 因此本文采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型进行模拟。具体模型见文献 [14-15]。采用 SIMPLEC 算法对离散的控制方程组进行迭代求解, 采用 VOF 法对闸室自由水面进行捕捉。其连续方程、动量方程和 k, ε 方程分别表示如下:

$$\text{连续方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\text{动量方程: } \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g \quad (2)$$

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

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

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, 由紊流动能 k 和紊流动能耗散 ε 求出, 即 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$; g 为重力加速度; μ_{eff} 为有效黏性系数, $\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t$; G_k 为平均速度梯度引起的紊动能产生项: $C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3}$, $\eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{(2\mathbf{E}_{ij} \cdot \mathbf{E}_{ij})}$, $\mathbf{E}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ 。上述各张量表达式中: u_i 为 x_i 方向的速度分量, i, j 取值为 1、2、3; 方程中通用模型常数取值分别为 $C_\mu = 0.0845$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\eta_0 = 4.377$, $\beta = 0.012$ 。

2 模型验证

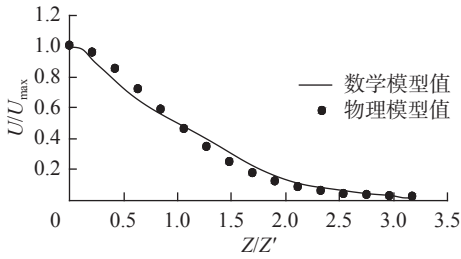
以双明沟布置型式为基础, 开展测点流速的对比分析, 双明沟物理模型试验数据引自文献 [16]。本文选取最小网格尺寸 0.3 m, 并将闸室中部距闸底 10.4 m 断面处流速与物理模型进行验证对比, 结果见图 5。

由图 5 可见, 最小网格尺寸 0.3 m 时的数学模型计算结果与物理模型实测结果变化趋势整体上吻合良好, 除个别边墙测点以外, 其余测点流速误差均在 ± 0.05 m/s 之内。

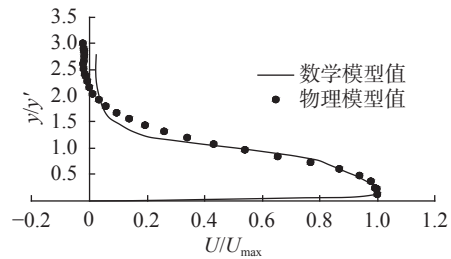
以单明沟布置型式为基础, 从有限空间中三维壁面射流展向、垂向速度分布两方面开展物理模型数据和数学模型计算结果的对比分析(坐标原点 O 位于射孔底部的中心, 纵向为 X 轴、垂向为 Y 轴、横向为 Z 轴, 展向为 XOZ 面, 垂向为 XOY 面), 试验数据引自文献 [17]。单明沟型式中, 侧支孔尺寸为 $0.45 \text{ m} \times 1.70 \text{ m}$ (宽 \times 高), 以支孔面积平方根 D 作为长度比尺 ($D=0.875 \text{ m}$)。明沟宽度为 4 m, 提取轴向距离 $4D$

(3.5 m)处的速度分布为验证断面,无量纲速度分布如图 6 所示(其中 Z' 展向速度分布半宽值, y' 为垂向速度分布半宽值, U 为轴向射流速度, U_{\max} 为统计断面上的最大轴向射流速度)。

由图 6(a)可知,展向速度分布曲线与物理模型试验数据吻合较好。由图 6(b)可知,垂向速度分布曲线与物理模型试验数据整体吻合较好,但在 $y/y' > 1.2$ 区域存在一定差异,这与约束条件不一致有关。总体而言,射孔展向和垂向速度分布与物理模型试验数据吻合较好,故认为采用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型可较好地模拟船闸输水系统水力特性。



(a) 展向速度分布 (4D)



(b) 垂向速度分布 (4D)

图 6 断面流速分布

Fig. 6 Velocity profiles on typical sections

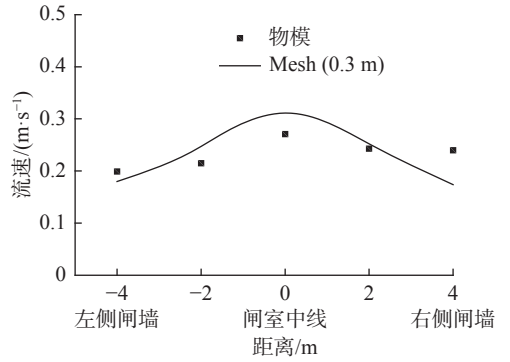


图 5 断面测点流速

Fig. 5 Velocity profiles of typical section points

3 计算结果分析

3.1 双层侧支孔单明沟消能特性

衡量船闸输水系统的消能效果,通常采用的重要参数为剩余比能 E_{pt} 和流速分布均匀度 m 。对某一水平剖面,可按式(9)计算:

$$E_{pt} = \frac{\rho}{2} m \bar{v}_t^3 \quad (5)$$

$$m = \int_{c_t} v_t^3 dc_t / (c_t \bar{v}_t^3) \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_{ti}^3 / (\bar{v}_t^3) \quad (6)$$

式中: ρ 为水的密度; \bar{v}_t 为时刻 t 的断面平均流速; v_t 为 t 时刻断面的点流速; c_t 为 t 时刻闸室断面面积。

根据上述计算式,分别计算 4 种布置型式在典型时刻下典型断面上的剩余比能和流速分布均匀度。所选的闸室水平断面距闸底越近,越能反映消能工的消能效果。因此,本文重点关注距闸底 $0.1h$ 处(h 代表某一典型时刻的闸室水深)的剩余比能和流速分布均匀度,计算结果见表 2。

表 2 双层侧支孔单明沟型式闸室剩余比能和流速分布均匀度对比

Tab. 2 Comparison of remaining specific energy and flow velocity distribution uniformity of ship lock chamber (single open ditch with double-layer side ports)

时刻	剩余比能/($W \cdot m^{-2}$)				流速分布均匀度			
	$d/D=2.29$	$d/D=3.43$	$d/D=4.57$	$d/D=5.71$	$d/D=2.29$	$d/D=3.43$	$d/D=4.57$	$d/D=5.71$
$t=100$ s	0.30	0.26	0.34	0.39	22.19	19.64	21.42	21.72
$t=410$ s	17.83	11.33	17.63	21.31	23.09	15.10	25.14	34.47

由表 2 可知, 灌水初期($t=100$ s)支孔间距比 d/D 由 2.29 增加至 3.43, 剩余比能逐渐减小; 之后, 剩余比能转而递增。随着灌水流量的增加, 各支孔间剩余比能变化幅度更加显著, 如最大流量时刻($t=410$ s), 支孔间距比 d/D 由 2.29 增加至 3.43, 剩余比能显著减小; 随后, 剩余比能随支孔间距增加而增大。流速分布均匀度随支孔间距的变化规律与剩余比能一致, 说明支孔间距比 d/D 达到 3.43 时, 可取得较好的消能效果。

图 7 给出了最大流量时刻($t=410$ s)闸室水平剖面的速度等值线(其中水平剖面取距闸底 3 m 处), 图中红线标识了一侧明沟范围。由图 7 可知, 集中出流区域主要分布于两侧明沟上方, 且随垂向间距比 d/D 的变化, 最大出流速度和流速分布均匀程度与上述结果一致, 如 d/D 分别为 2.29、3.43、4.57 和 5.71 时, 最大流速值分别为 1.03、0.91、1.13 和 1.21 m/s。

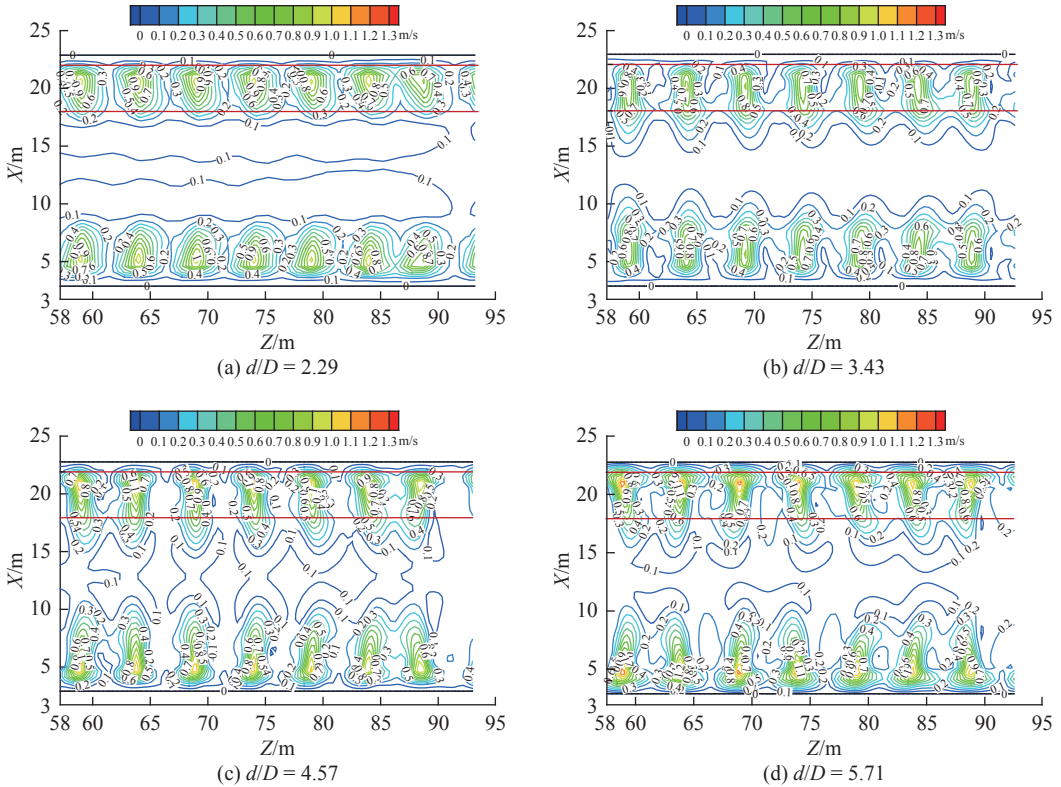


图 7 闸室水平剖面流速等值线(双层侧支孔单明沟)

Fig. 7 Velocity contours of the typical horizontal sections of the lock chamber (single open ditch with double-layer side ports)

产生上述变化规律, 其主要原因在于双层侧支孔布置型式相比单层侧支孔布置型式额外增加了消能级数, 即双层支孔间形成了消能垫层。图 8 给出了最大流量时刻($t=410$ s)闸室纵剖面的流线, 其中纵剖面取明沟中轴线处。当 d/D 分别为 2.29、3.43、4.57 和 5.71 时, 上下支孔平均出流速度分别为 8.15、7.70、7.51 和 7.55 m/s。当垂向间距比 d/D 为 2.29 时, 消能垫层内流线呈圆形, 支孔出流水体因消能空间较小未得到充分掺混消能; d/D 增加至 3.43 时, 消能垫层内流线呈方形, 双层出流水体相互挤压、掺混消能较充分; 而后, 随支孔间距的增加, 因消能空间过大, 造成在消能垫层上方形成不同范围的漩涡, 从而导致上下两股射流掺混力度逐渐减弱。

图 9 给出了 4 种布置型式下最大流量时刻($t=410$ s)横剖面紊动能分布(其中横剖面取中间支孔中轴线处)。由图 9 可知, 垂向支孔间距不同的情况下, 紊动能主要分布在明沟范围内且规律基本相似。当 d/D 分别为 2.29、3.43、4.57 时, 最大紊动能分别为 2.06、0.75、0.68 m^2/s^2 , 其中心逐渐由明沟中央位置向明沟边壁位置移动, 当 d/D 增加至 5.71 时, 最大紊动能为 0.7 m^2/s^2 并紧靠明沟边壁位置, 主廊道最大紊动能为 0.22 m^2/s^2 , 位于主廊道顶部中心位置。

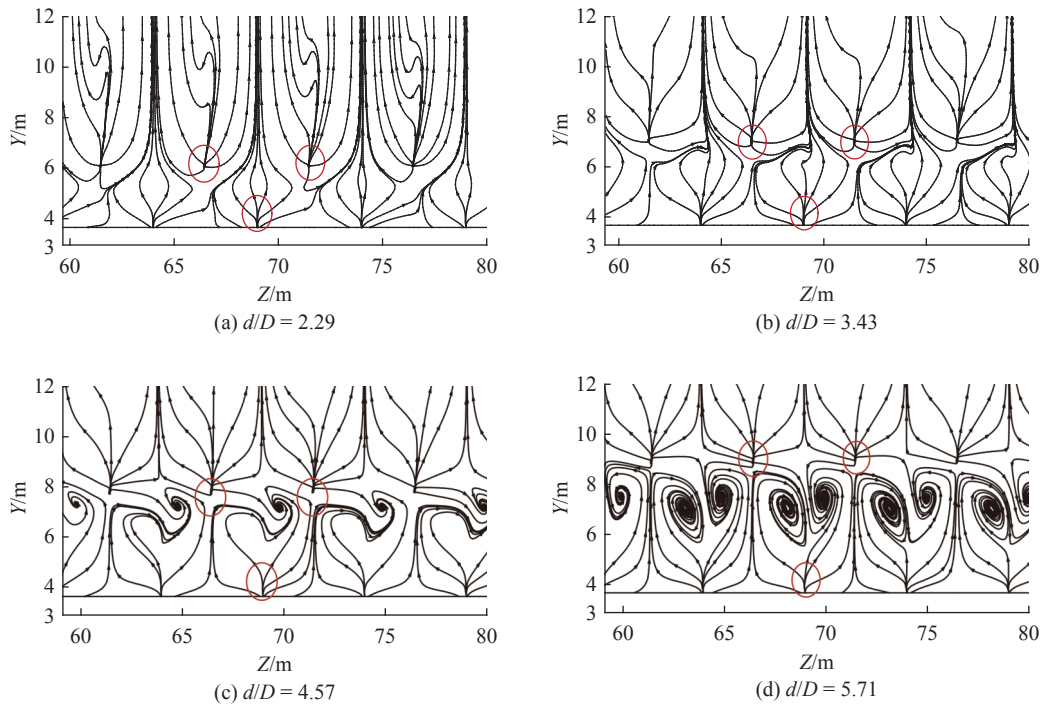


图 8 闸室纵剖面流线(双层侧支孔单明沟)

Fig. 8 Stream lines of the typical longitudinal section of the lock chamber (single open ditch with double-layer side ports)

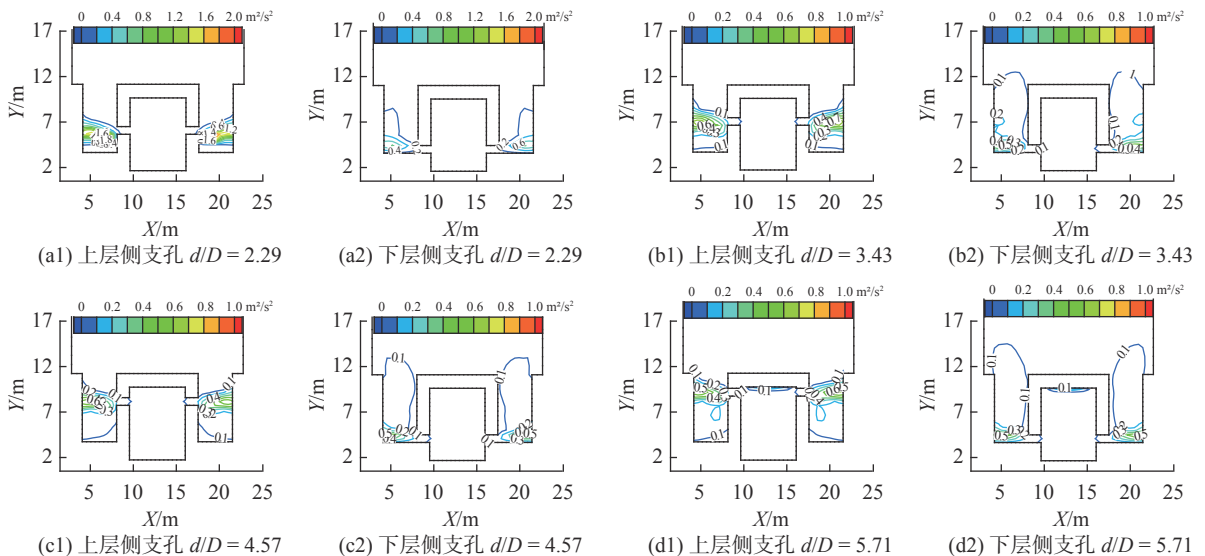


图 9 横剖面紊动能分布(双层侧支孔单明沟)

Fig. 9 Turbulent energy distribution on the cross sections within the lock chamber (single open ditch with double-layer side ports)

3.2 双明沟消能特性

3种双明沟布置型式的剩余比能和流速分布均匀度比较见表3。可见,灌水初期($t=100\text{ s}$)双明沟型式与双明沟+消能槛型式($b/D=2.00$)相差不大,而当明沟宽度增加后($b/D=2.71$),剩余比能和流速分布均匀度均明显减小;随着输水流量的增加,各型式的差值愈加明显,如最大流量时刻($t=410\text{ s}$),基于双明沟型式,在闸墙上增设消能槛后,剩余比能和流速分布均匀度均增加,而拓宽明沟后($b/D=2.71$),剩余比能和流速分布均匀度均明显减小。

图10给出了双明沟条件下最大流量时刻($t=410\text{ s}$)闸室水平剖面的流速等值线(其中水平剖面取距闸

底 3 m 处)。双明沟型式下, 支孔出流速度为 7.89 m/s, 出流水体经掺混消能后在明沟中央附近出流, 第一道明沟出流最大速度为 0.48 m/s, 第二道明沟出流最大速度为 0.72 m/s。双明沟+消能槛型式下, 支孔出流速度为 8.16 m/s, 消能槛减小了出流面积而使得明沟出流流速增大, 且偏向闸室中央出流, 第一道明沟出流最大速度为 0.88 m/s, 第二道明沟出流最大速度为 0.52 m/s。双明沟加宽型式下, 支孔出流速度为 7.93 m/s, 第一道明沟出流最大速度为 0.51 m/s, 第二道明沟出流最大速度为 0.39 m/s。综上所述, 双明沟加宽后因明沟内有充足的水体掺混消能, 从而加速了明沟内水流能量的转化与耗散, 消能效果相对较佳。

表 3 双明沟型式闸室剩余比能和流速分布均匀度对比

Tab. 3 Comparison of remaining specific energy and flow velocity distribution uniformity of ship lock chamber (double open ditches)

时刻	剩余比能($W \cdot m^{-2}$)			流速分布均匀度		
	$d/D=2.00$ (双明沟)	$d/D=2.00$ (消能槛双明沟)	$d/D=2.71$ (双明沟加宽)	$d/D=2.00$ (双明沟)	$d/D=2.00$ (消能槛双明沟)	$d/D=2.71$ (双明沟加宽)
$t=100\text{ s}$	0.18	0.19	0.07	10.18	11.82	5.88
$t=410\text{ s}$	11.81	19.19	6.04	19.22	26.00	15.55

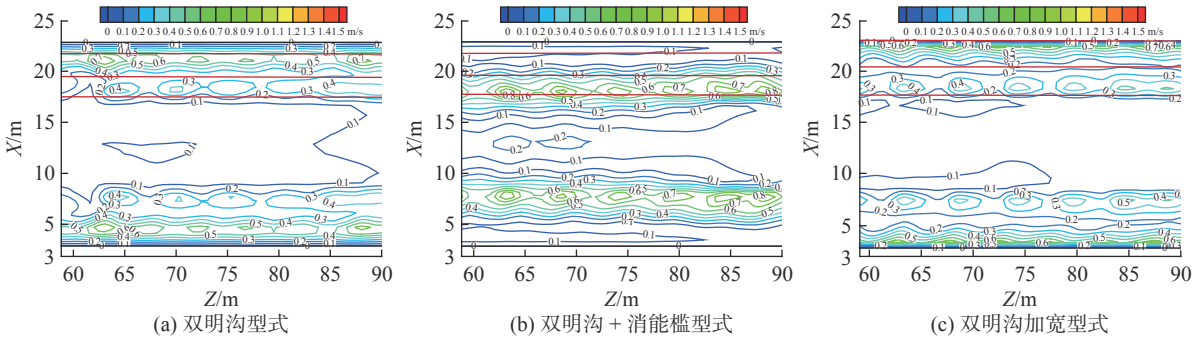


图 10 闸室水平剖面流速等值线(双明沟)

Fig. 10 Velocity contours of the typical horizontal sections of the lock chamber (double open ditches)

3.3 消能效果对比

通过流场图、剩余比能及流速分布均匀度的综合对比分析, 选出了各个方案中的最优布置型式, 分别为双层侧支孔单明沟型式($d/D=3.43$)及双明沟加宽型式($b/D=2.71$)。

比较表 2 和表 3 可知, 灌水初期($t=100\text{ s}$)双明沟加宽型式相比双层侧支孔单明沟型式, 前者的剩余比能小于后者, 两种布置型式剩余比能差值为 0.19 W/m^2 ; 随着流量的增加, 各型式剩余比能逐渐增大, 最大流量时刻($t=410\text{ s}$), 两种布置型式剩余比能差值为 5.29 W/m^2 。流速分布均匀度方面, 灌水初期($t=100\text{ s}$)双明沟加宽型式相比双层侧支孔单明沟型式, 流速分布均匀度显著减小, 两种布置型式流速分布均匀度差值达到 15.54; 随着输水流量的增加, 双层侧支孔单明沟型式流速分布均匀度有所下降, 双明沟加宽型式流速分布均匀度有所增加。

由图 9(b)和图 11 对比可知, 双层侧支孔单明沟型式($d/D=3.43$)情况下, 上支孔紊动能大于下支孔, 最大紊动能为 $0.75\text{ m}^2/\text{s}^2$; 双明沟加宽型式($b/D=2.71$)情况下, 紊动能分布主要区域在挡坎和第二道明沟边壁附近, 挡坎附近最大紊动能为 $0.64\text{ m}^2/\text{s}^2$, 第二道明沟边壁附近最大紊动能为 $1.12\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。总体而言,

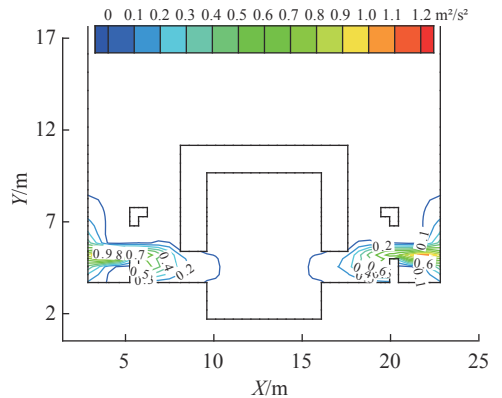


图 11 横剖面紊动能分布(双明沟)

Fig. 11 Turbulent energy distribution on the cross sections within the lock chamber (double open ditches)

明沟加宽后掺混消能更为充分, 闸室水平面流速较小, 水流分布较为均匀, 消能效果明显优于双层侧支孔单明沟型式。

4 结 语

(1)对于单明沟双层平行错开侧支孔方案, 双层侧支孔间形成消能垫层后, 双层侧支孔垂向间距直接影响消能垫层的消能效果。研究发现, 当垂向间距比 d/D 由 2.29 增加至 5.71 时, 消能效果先变优而后逐渐变差, $d/D=3.43$ 时消能效果相对较佳。

(2)为进一步提高消能效果, 在常规双明沟布置型式的基础上提出双明沟+消能槛方案及双明沟加宽方案。结果表明, 增加明沟宽度可有效提高消能效果, 当明沟加宽至闸室边壁位置, 即单个明沟宽度比 b/D 由 2.00 增加至 2.71, 消能效果相对较优。

(3)比较各方案最优布置型式的消能效果可见, 双明沟加宽型式消能效果优于双层侧支孔单明沟型式。因此, 在超高水头、大尺度情况下, 可选择船闸明沟消能工布置型式, 同时应设计合理的明沟型式。

本文对特定边界条件下的闸室消能特性进行三维数值模拟研究, 研究结果可为类似船闸的消能工设计提供技术支撑, 但本研究中尚未考虑惯性影响造成的支孔出流不均等因素, 也尚未涉及船舶停泊条件的评判。因此, 可通过构建船闸输水系统的全域动态仿真模型, 研究船闸三维水力特性和船舶泊稳条件。

参 考 文 献:

- [1] LIPATOV I V, SITKOV A N, CHICHKIN O I. An analytical approach to assessing the efficiency of the elements of dissipating the flow energy in transport hydraulic structures[J]. *Morgen Intellektent Tekhnologie*, 2018, 2(42): 170-176.
- [2] GAPEEV A M, MORGUNOV K P. Basic indicators of the filling system of a navigation lock chamber having cylindrical culverts[J]. *Power Technology and Engineering*, 2021, 54(6): 788-792.
- [3] 陆谟芳. 美国高水头船闸的水力学设计[J]. 人民长江, 1986(3): 48-55. (LU Mofang. Hydraulic design of high-head ship locks in the United States[J]. *Yangtze River*, 1986(3): 48-55. (in Chinese))
- [4] 陈磊, 曹光荣. 三峡船闸完建工程关键技术研究与实践[J]. *水利水电工程学报*, 2012(4): 92-97. (CHEN Lei, CAO Guangrong. Key technology research and practice of Three Gorges shiplock in the final construction stage[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2012(4): 92-97. (in Chinese))
- [5] 覃业传, 宣国祥, 麦建清, 等. 大藤峡水利枢纽单级船闸输水系统初步分析[J]. *水利水电工程学报*, 2012(4): 71-76. (QIN Yechuan, XUAN Guoxiang, MAI Jianqing, et al. Feasibility analysis of the filling and emptying system for Datengxia high head single-step shiplock[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2012(4): 71-76. (in Chinese))
- [6] 杨忠超, 陈明栋, 杨斌. 乌江银盘省水船闸整体水力学模型试验研究[J]. *水利水电工程学报*, 2010(2): 61-66. (YANG Zhongchao, CHEN Mingdong, YANG Bin. Experimental studies on the overall hydraulic model of Yingpan saving basin ship lock in Wujiang River[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2010(2): 61-66. (in Chinese))
- [7] 路莅枫, 王能, 普晓刚. 山区复杂条件下已建船闸通航条件改善措施研究[J]. *水道港口*, 2018, 39(5): 579-583. (LU Lifeng, WANG Neng, PU Xiaogang. Study on improvement measures of navigation conditions of ship locks constructed under complex conditions in mountainous areas[J]. *Journal of Waterway and Harbor*, 2018, 39(5): 579-583. (in Chinese))
- [8] 李君, 郭超, 金英, 等. 赣江万安二线船闸输水系统水力学模型试验研究[J]. *水运工程*, 2021(2): 7-11, 21. (LI Jun, GUO Chao, JIN Ying, et al. Hydraulic model test and study on filling and emptying system of Wan'an 2nd lane lock on the Ganjiang River[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2021(2): 7-11, 21. (in Chinese))
- [9] 陈明, 杨颖, 黄海洋, 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 Ming, YANG Ying, HUANG Haijin, 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. (in Chinese))
- [10] 宣国祥, 黄岳, 李君. 桂平二线船闸闸底长廊道输水系统布置研究[J]. *水运工程*, 2009(3): 109-115. (XUAN Guoxiang, HUANG Yue, LI Jun. Arrangement of lock bottom long-culvert filling & emptying system of Guiping Second-lane lock[J].

Port & Waterway Engineering, 2009(3): 109-115. (in Chinese))

- [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. (LÜ Weidong, LIU Pingchang, CHEN Liang, 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. (in Chinese))
- [12] 杨艳红, 陈明, 张星星, 等. 高水头大尺度船闸闸室消能明沟三维水力特性数值模拟[J]. *水运工程*, 2018(4): 84-90. (YANG Yanhong, CHEN Ming, ZHANG Xingxing, et al. Three-dimensional numerical simulation of hydraulic characteristics of ditches designed for a navigation lock with high-head and large scale[J]. *Port & Waterway Engineering*, 2018(4): 84-90. (in Chinese))
- [13] 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. (LI Jingxian. Research on energy dissipation characteristics of the open ditch in shiplock chamber with super large water transmission power[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018. (in Chinese))
- [14] 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(A辑)*, 2013, 28(5): 559-565. (CHEN Ming, LIANG Yingchen, XUAN Guoxiang, et al. Numerical simulation for dynamic characteristics of 3D flow during shiplock filling process[J]. *Chinese Journal of Hydrodynamics*, 2013, 28(5): 559-565. (in Chinese))
- [15] 沈立群, 刘浩源, 聂艺博, 等. 船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统闸室内消力槛研究[J]. *中国农村水利水电*, 2020(12): 217-223. (SHEN Liqun, LIU Haoyuan, NIE Yibo, et al. Research on the baffle sill of long-culvert filling and emptying system with lateral holes of ship lock[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(12): 217-223. (in Chinese))
- [16] 王军. 超高水头船闸明沟消能效果模型试验与三维数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2007. (WANG Jun. The study on experiment and 3-D numerical simulation on the effect of open ditch energy dissipater of the super-high hydraulic head lock[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2007. (in Chinese))
- [17] 张星星, 陈明, 许光祥, 等. 有限空间中三维壁面紊动射流流动特性试验研究[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 93-101. (ZHANG Xingxing, CHEN Ming, XU Guangxiang, et al. An experimental study on the flow characteristics of a three-dimensional turbulent wall jet in a limited space[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 93-101. (in Chinese))

Energy dissipation characteristics of the open ditch located in a large-scale ship lock chamber with an extreme high water head

CHEN Ming¹, CHEN Yanji¹, MIAO Jiankang², HUANG Haijin¹

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China)

Abstract: In order to study the energy dissipation characteristics of open ditch combined with the side ports located in an in-chamber culvert designed for a large-scale lock chamber with an extreme high water head, in case of the water head 60 m and the useful dimension of the lock chamber 280 m×40 m (length×width), the three-dimensional turbulent numerical simulation method was used to analyze the parameters such as velocity, turbulent energy distribution, remaining specific energy and flow velocity distribution uniformity, and present the energy dissipation characteristics of the single open ditch with double-layer side ports and the double open ditches with single-layer side ports. Moreover, the corresponding energy dissipation results between them were compared. The results show that for the case of the single open ditch with the double-layer side ports, when the ratio of vertical spacing d between ports to square root of side ports area D , d/D , increases from 2.29 to 5.71, the energy dissipation results become better firstly and then worse. When d/D reaches 3.43, the corresponding energy dissipation results become the best. In addition, the widening type of the double open ditches (the ratio of one open ditch width b to square root of side ports area D , $b/D=2.71$) has better energy dissipation effect than that of the type of the single open ditch with the double-layer side ports. The research results can provide a technical support for the design of energy dissipators in similar ship locks.

Key words: ship lock; extreme high water head; large scale; open ditch; energy dissipation characteristics