



船闸输水系统单明沟与消力槛 联合布置的消能特性*

陈 明^{1,2}, 杨 颖¹, 黄海津¹, 王多银¹, 陈明栋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. 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 针对船闸闸底长廊道单明沟消能问题, 结合广西左江山秀二线船闸工程, 建立闸底长廊道侧支孔输水系统三维紊流数学模型, 对闸室充水过程进行三维数值模拟。对原设计方案以及 3 个优化方案的闸室内部分流场分布、流速分布均匀度、剩余比能等参数进行对比分析。结果表明, 在明沟内增设一道消力槛可显著提高消能效果。优化方案的剩余比能和流速分布均匀度的量值在消力槛高度达到 1.2 m 后仍存在下降, 但整体上降幅减缓, 说明消力槛高度达到 1.2 m 后消能效果的改善空间不大。

关键词: 船闸; 输水系统; 消力槛; 消能; 三维数值模拟

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0122-08

Energy dissipation characteristics of combined structure consisted of single open ditch and longitudinal sill of filling and emptying system in ship lock

CHEN Ming^{1,2}, YANG Ying¹, HUANG Hai-jin¹, WANG Duo-yin¹, CHEN Ming-dong¹

(1.Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2.Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, Nanjing 210029, China)

Abstract: Aiming at the energy dissipation problem of the single open ditch of the ship lock bottom long-culvert, we combine with the Shanxiu second lock in Zuojiang River in Guangxi province, establish the three-dimensional turbulent mathematical model of the filling and emptying system with side branch hole in the ship lock bottom long-culvert, carry out the three-dimensional simulation for the filling operation period of the chamber, and compare and analyze the internal flow field distribution, velocity distribution uniformity, residual specific flow energy and other parameters of the original design scheme and three optimization schemes. The results show that the energy dissipation performance of the system is significantly enhanced by laying a longitudinal sill for the open ditch. The values of the corresponding flow velocity distribution and specific residual flow energy of the optimization schemes increase slightly beyond a critical value (1.2 m) of the height. The results can indicate that the space for enhancing energy dissipation is limited after the height reaches 1.2 m.

Keywords: ship lock; filling and emptying system; longitudinal sill; energy dissipation; three-dimensional simulation

20 世纪 50 年代, 美国田纳西流域管理局在针对惠勒 (Wheeler)、瓦特斯维列 (Guntersville) 等船

闸工程的前期研究中, 认为有两种方法可以改善水流条件和输水时间问题, 其中一种是采用沿每

收稿日期: 2020-10-14

***基金项目:** 国家重点研发计划项目 (2016YFC0402001); 重庆市自然科学基金项目 (cstc2019jcyj-msxmX0759); 通航建筑物建设技术交通行业重点实验室开放基金项目 (Yt918002); 重庆市研究生科研创新项目 (CYB19171)

作者简介: 陈明 (1983—), 男, 博士, 副教授, 从事通航水力学方面的教学和研究。

侧闸墙设一条长而狭窄的明沟槽(即明沟消能结构), 并提出出水口为 3 排支管的单明沟, 其沟深应至少为 1.8~2.5 m; 4 排出水支管的沟深应为 2.5~3.05 m, 沟宽相应为 1.2~1.8 m^[1]。关于单明沟的研究, Murphy^[2]指出廊道支孔出流的集中水流在明沟中扰动剧烈, 消能效果明显, 并且明沟布置尺度与廊道支孔尺度有关。20 世纪 90 年代, 美国开展了系列闸室长廊道侧支孔输水单明沟消能系统模型试验, 研究该输水系统的水力特性及布置原则, 发现该输水系统与闸墙长廊道的输水效率基本相当^[3-4]。在国内, 须清华等^[5]针对葛洲坝 2 号船闸提出采用闸底纵横支廊道单明沟消能结构, 且根据闸室水流横向分配和过闸船舶系缆力的相关研究, 提出对明沟宽度及高度的布置要求。杨忠超等^[6]针对高水头下单明沟水力结构, 分析其消能特性, 并阐明单明沟消能机理。

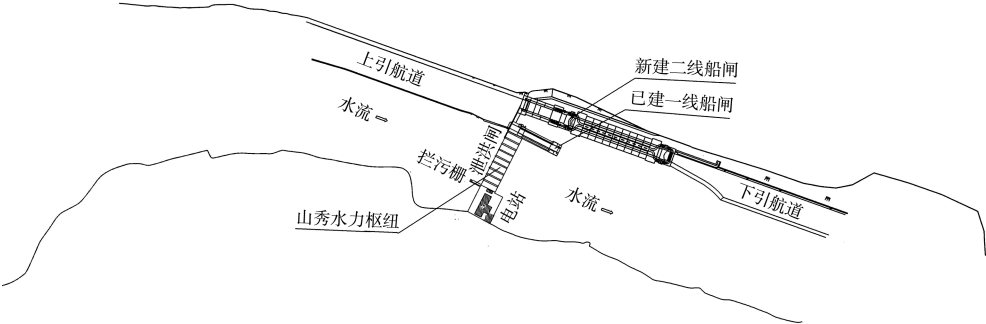
对于单明沟而言, 闸室水流分布受到限制, 从而减少消能水体, 限制消能效果。Ables^[7]对湾泉船闸输水系统进行研究后发现, 明沟中加设挡槛后消能效果明显, 但明沟加设挡槛后, 闸室内纵、横向流速分布出现不均匀现象, 易对过闸船舶造成不利影响。实际上, 这与消力槛的布置高

度和位置息息相关。陈亮^[8]依托闸墙长廊道侧支孔输水系统, 研究单明沟加消力槛和不加消力槛的消能效果, 得出这两种形式下的消能特性和效果截然不同, 且消力槛的布置位置和高度对消能效果的影响显著。然而, 该项研究主要针对闸墙长廊道侧支孔输水系统, 其边界条件与闸底廊道侧支孔明沟形式差异明显。

因此, 本文依托广西左江山秀二线船闸工程, 采用三维紊流数值模拟方法, 研究船闸闸底长廊道单明沟内增设消力槛的消能效果, 为该类输水系统的水力结构设置提供参考。

1 工程概况

山秀电站位于左江主干流下游河段, 距崇左市扶绥县约 14 km, 距南宁市约 90 km, 是一座以发电为主、兼顾航运、灌溉等综合效益的水利水电工程。拟在现有一线船闸左侧新建一座 1 000 吨级(兼顾通航 2 000 吨级单船)的二线船闸, 见图 1。该船闸按Ⅲ级船闸标准建设, 闸室有效尺度为 230 m×23 m×5.5 m(长×宽×门槛水深), 设计水头为 11.50 m(上游正常蓄水位为 86.5 m, 下游最低通航水位为 75 m)^[9]。



根据船闸总体布置与《船闸输水系统设计规范》^[10]的有关规定及要求, 采用闸底长廊道输水系统。输水阀门的宽、高分别为 3.8、4.0 m, 总面积为 30.4 m²。闸底出水主廊道断面宽、高分别为 4.5、4.0 m, 总面积为 36.0 m²(主廊道中间设 1.0 m 隔墙, 40% 左右的面积互通, 以保证单边输水

图 1 枢纽布置

时出流均匀)。为了减小闸室底板厚度, 采用侧支孔出水明沟消能, 明沟宽和深分别为 4.1、4.5 m。闸底廊道出水段每侧设 36 个出水孔, 分为 3 组, 上游至下游孔口尺寸(宽×高)分别为 0.6 m×1.0 m(12 孔)、0.5 m×1.0 m(12 孔)、0.4 m×1.0 m(12 孔), 总面积为 36.0 m²。

2 数学模型建立及计算工况

2.1 数值计算原理

参照已有关于船闸水动力学数值方法^[11-12]，本文采用 RNG $k-\varepsilon$ (动能-耗散率) 紊流模型对船闸充水过程进行三维数值模拟。其中，控制方程组通过有限体积法进行离散，离散的控制方程组采用 PISO 算法(压力耦合方程组的半隐式方法)进行迭代求解，闸室自由水面通过 VOF 法(流体体积法)进行捕捉。

2.2 计算工况及计算区域

本文首先针对原设计方案(无消力槛)进行计算，而后在原设计方案的基础上，根据侧支孔的布置高度($h=1.5\text{ m}$)，针对消力槛高度分别为 1 m (优化方案 1, $h_d/h=0.67$, 其中 h_d 为消力槛高度)、 1.2 m (优化方案 2, $h_d/h=0.8$) 和 1.5 m (优化方案 3, $h_d/h=1$) 进行水力特性模拟，其中消力槛与侧支孔间的净距及其宽度分别采用 1.5 和 0.5 m ，如图 2 所示。模型计算区域包括部分输水廊道、明沟消能工及闸室区。

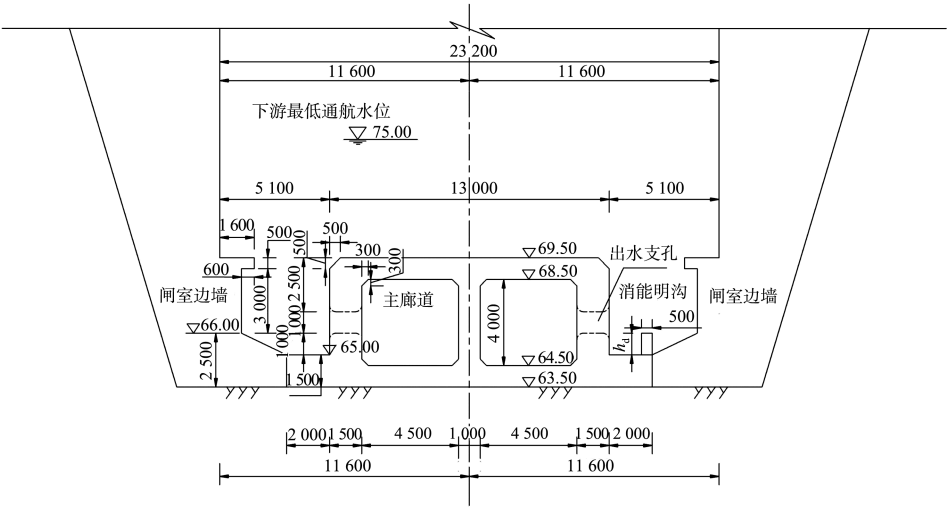


图 2 消力槛布置 (尺寸: mm; 高程: m)

2.3 网格剖分及边界条件

计算区域采用分块六面体结构网格对计算区域进行剖分，同时对侧支孔、明沟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 127 万个，节点总数约为 134 万个。

为考察明沟消能特性，本文主要针对灌水过程，计算 $0\sim575\text{ s}$ 的灌水过程，包括最大比能时刻($t=150\text{ s}$)和最大流量时刻($t=260\text{ s}$)。计算模型进口边界按速度进口设置，速度过程结合一维计算成果，以灌水时间 5 min 、阀门双边匀速开启作为计算进口边界条件。闸室出流与大气相通，采用空气压力出口。网格剖分及计算边界条件见图 3。

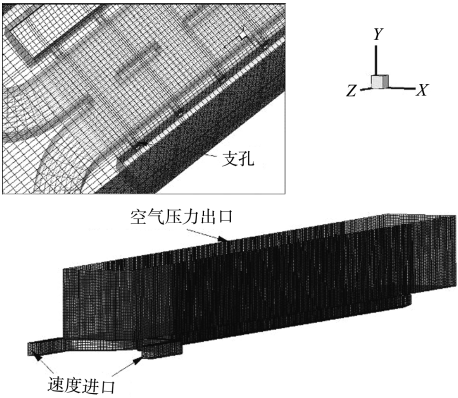


图 3 网格剖分及边界条件

2.4 数学模型验证

三维非恒定流计算过程中，监测闸室沿纵向上、中、下典型 3 点的水位，取 3 点的平均值。

原设计方案条件下的闸室水位计算值与水工物理模型实测值对比见图 4^[13]。可以看出, 闸室水位计算值整体高于物模实测值, 水位差值最大误差为 4.3%, 意味着计算模型中的流量系数大于模型值, 这与一维计算模型所取输水系统阻力系数的大小和模型缩尺效应有关^[14]。但两者随时间的变化趋势吻合较好, 且输水时间差异较小。

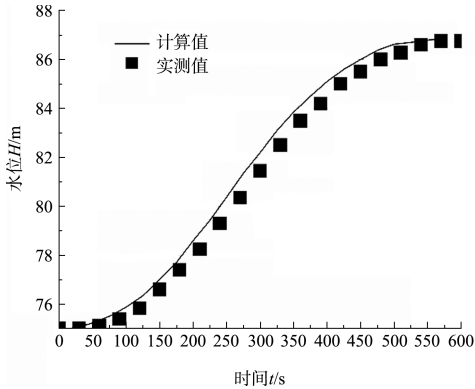
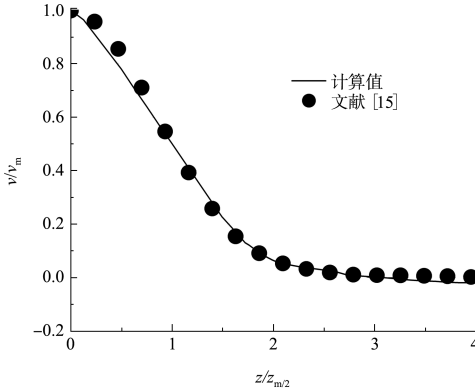
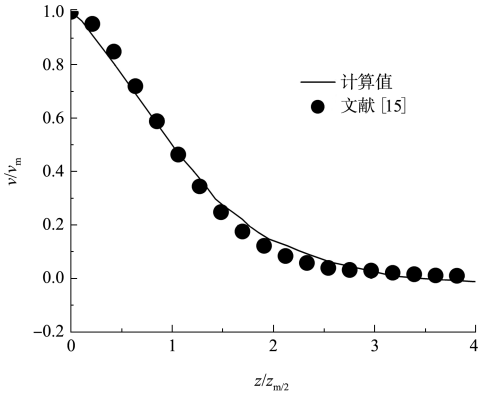


图 4 闸室水位过程线对比

为进一步论证数学模型计算结果的准确性, 本文对支孔出流流速的延展方向和垂直方向分布进行验证, 对比数据引自文献[15]。根据 2D (D 为支孔平均面积, 距侧支孔出口 1.41 m 处) 和 4D (距侧支孔出口 2.82 m 处) 两个典型断面上延展方向和垂直方向速度分布比较可知, 支孔射流流速与文献[15]整体吻合良好, 见图 5、6。



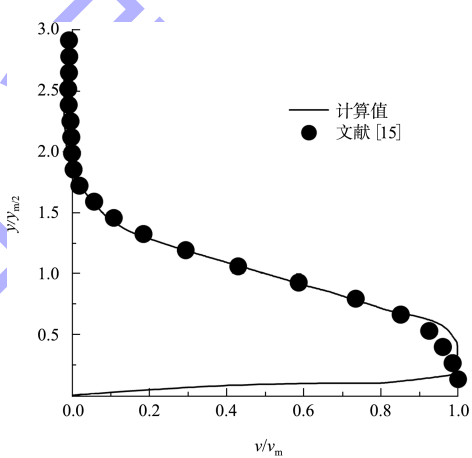
a) 2D断面



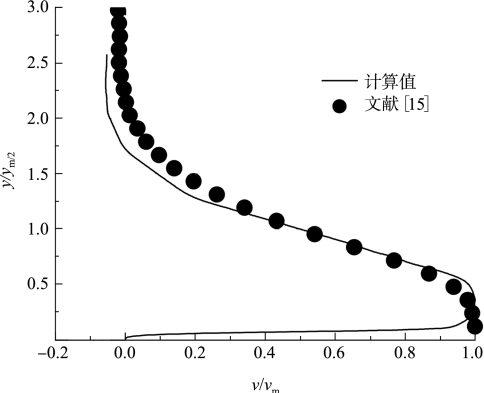
b) 4D断面

注: v 、 v_m 分别为统计断面上的速度值、最大速度值;
 z 、 $z_{m/2}$ 分别为展向坐标值、速度半宽值。

图 5 支孔射流延展方向速度分布对比



a) 2D断面



b) 4D断面

注: y 、 $y_{m/2}$ 分别为垂向坐标值、速度半宽值。

图 6 支孔射流垂直方向速度分布对比

3 计算结果分析

对闸室水力特性分析, 本文重点围绕最大闸室断面比能($t=150\text{ s}$)和最大流量($t=260\text{ s}$)两个重要时刻进行比较分析。

3.1 剩余比能对比

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_{pr} 。对某一水平剖面, 剩余比能按下式计算^[16]:

$$E_{\text{pr}} = \frac{\rho}{2} m_{2t} v_{\text{mt}}^3 \tag{1}$$

式中: E_{pr} 为 t 时刻的剩余比能; ρ 为水的密度; v_{mt} 为 t 时刻的断面平均流速; m_{2t} 为断面流速分布均匀度(也称动能校正系数), 用于反映闸室断面速度分布均匀程度, m_{2t} 越接近 1 则说明流速分布越均匀, 可用下式计算:

$$m_{2t} = \frac{\int v_t^3 dc_t}{c_t v_{\text{mt}}^3} \approx \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n v_{ti}^3}{v_{\text{mt}}^3} \tag{2}$$

式中: v_t 为 t 时刻断面的点流速; c_t 为 t 时刻断面面积; v_{ti} 为 t 时刻第 i 个计算点的流速; n 为流速的计算点数量。

各方案剩余比能随闸室水深变化的对比见图 7。可清晰看出, 原设计方案的剩余比能值最大, 优化方案 3 最小。以距闸底 $0.1H$ 断面上的剩余比能值为例, 最大闸室比能时刻, 原设计方案、优化方案 1、2、3 分别为 1.042 、 0.872 、 0.541 、 0.363 W/m^2 ; 最大流量时刻, 原设计方案、优化方案 1、2、3 分别为 2.862 、 2.369 、 1.445 、 0.947 W/m^2 。各方案的动能校正系数 m_{2t} 对比见图 8。 m_{2t} 在最大闸室比能和最大流量时刻的变化特征与剩余比能类似, 即原设计方案的 m_{2t} 值最大, 增设消力槛后, m_{2t} 值随消力槛高度的增加而随之减小。由此可知, 消力槛高度对消能的影响较为显著, 且消力槛高度越大, 消能效果越好。然而, 仔细对比 3 个优化方案发现, 剩余比能值和流速分布均匀度的量值在消力槛高度达到 1.2 m

后仍存在下降, 但整体上降幅减缓, 说明消力槛高度达到 1.2 m 后, 消能效果的改善空间不大。以距闸底 $0.5H$ 处的剩余比能值和流速分布均匀度为例, 见图 9。可以看出, 消力槛高度由 1 m ($h_d/h=0.67$) 增加至 1.2 m ($h_d/h=0.8$) 过程中, 最大流量时刻的剩余比能减小了 1.051 W/m^2 , 流速分布均匀度减小了 28, 消能效果变化较为显著; 而由 1.2 m ($h_d/h=0.8$) 增加至 1.5 m ($h_d/h=1$) 过程中, 最大流量时刻的剩余比能减小了 0.391 W/m^2 , 流速分布均匀度减小了 11.5, 消能效果提升速度明显减缓, 且对比两组数据可以发现前一段的优化效果是后一段的 2 倍左右, 从图 7、8 中也发现类似规律。根据山秀二线船闸的实际情况, 其消力槛适宜的高度推荐采用 1.2 m ($h_d/h=0.8$), 该结论与文献[13]的水工物理模型试验成果一致。

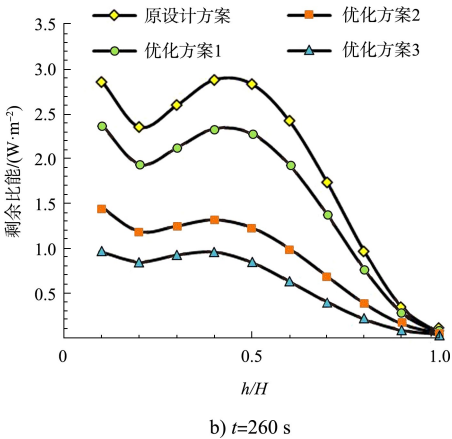
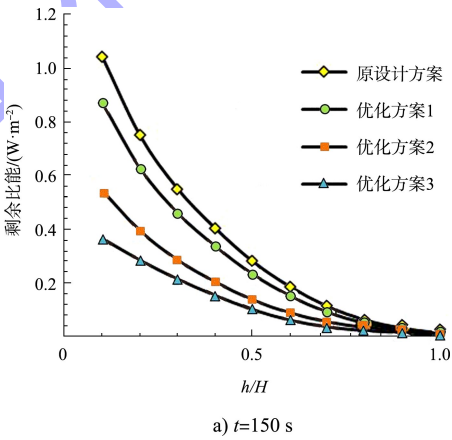


图 7 各方案闸室剩余比能对比

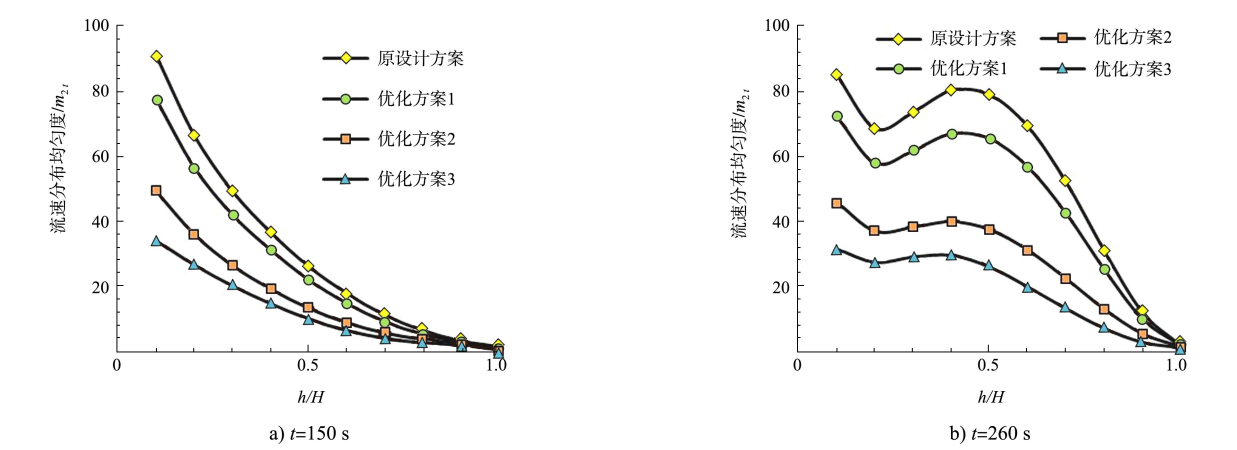


图 8 各方案闸室断面速度分布均匀度对比

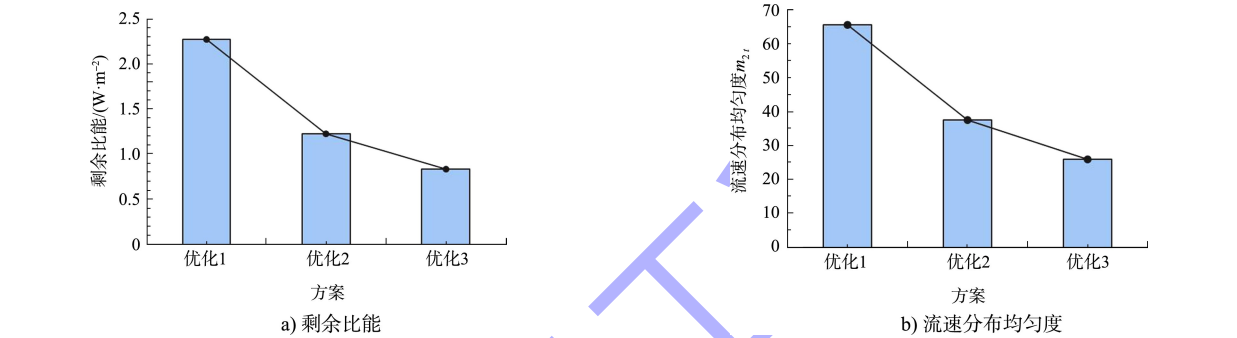
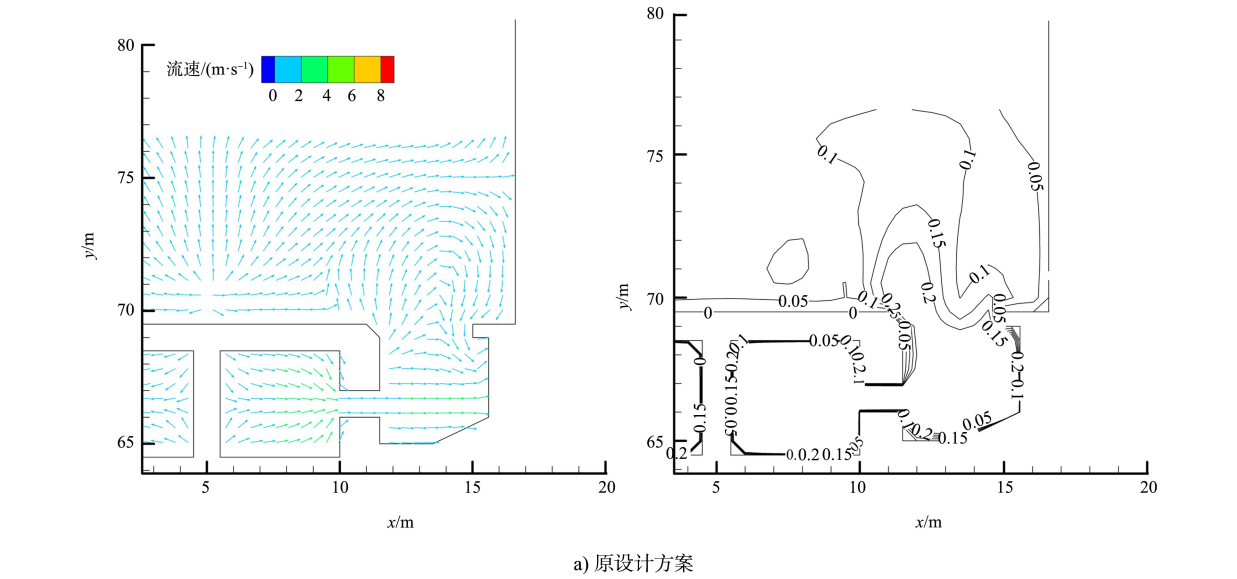


图 9 各优化方案距闸底 0.5H 处最大流量时刻 ($t=260$ s) 剩余比能及流速分布均匀度对比

3.2 闸室流场分布比较

为进一步阐明明沟增设消力槛的消能效果,可从流场分布角度进行分析。最大比能时刻各个方案闸室典型横断面流速分布见图 10。可清晰看出,未增设消力槛时,支孔出流在明沟内产生的高流速带较为明显,说明明沟对支孔射流的消能有限;增设消力槛后,支孔出流方向在消力槛的阻挡下,流线向四周改向,增加了射流与明沟内

更多水体的掺混,进而起到更好的消能效果,且此掺混现象随消力槛高度的增加而愈来愈剧烈。从明沟最大出流速度的量值来看,原设计方案、优化方案 1、2、3 分别为 0.20、0.15、0.14、0.10 m/s。结合各方案的剩余比能对比图,可以发现优化方案 2、3 消能效果相对较好,说明在明沟内布置消力槛可达到比较理想的消能效果,这与前述相一致。



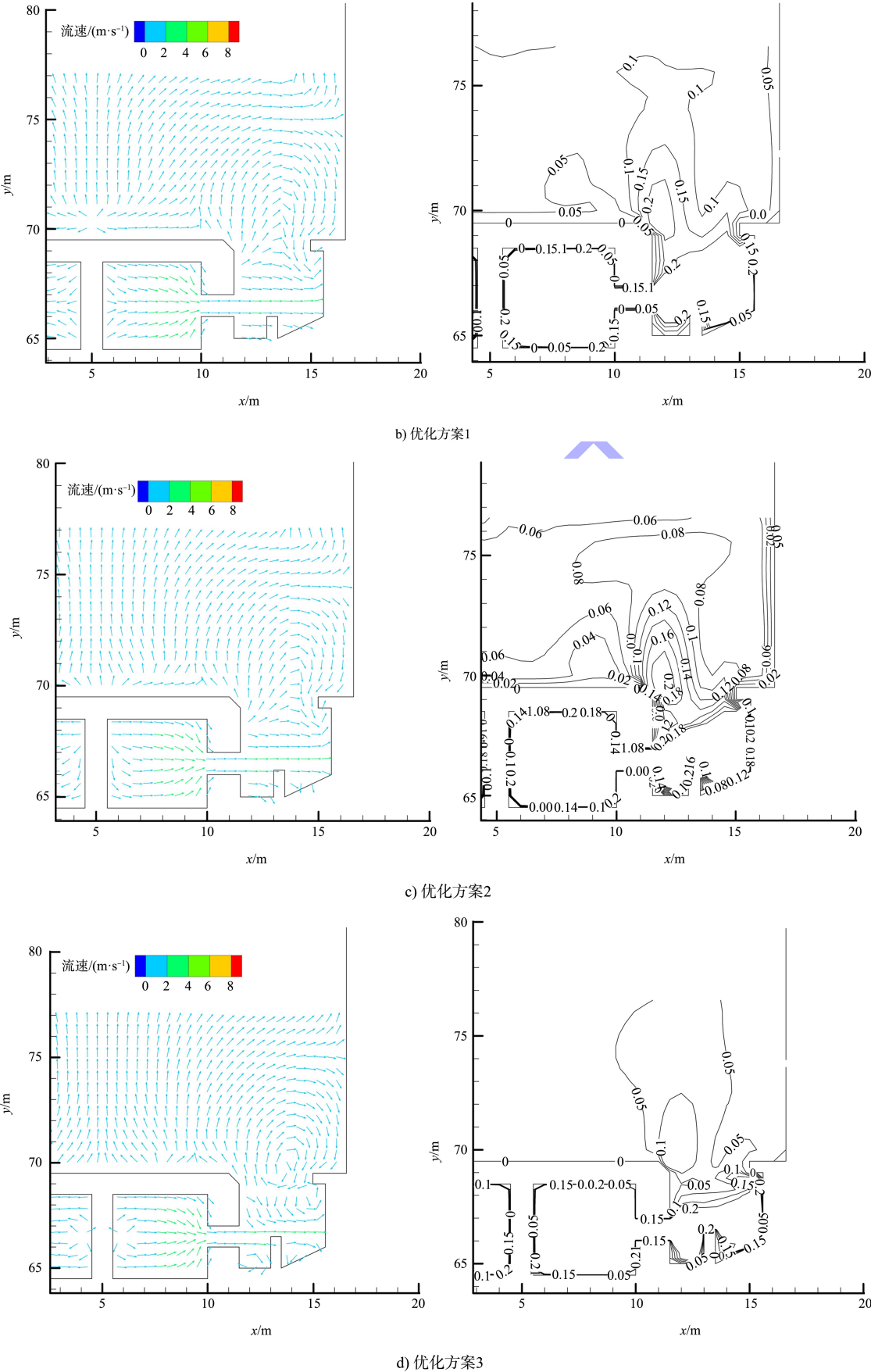


图 10 各方案闸室横剖面流速矢量与等值线图

4 结 语

1)在明沟内增设一道消力槛可显著提高消能效果,且消能效果随着消力槛高度的增加先显著提高,增加一定值后明显减缓。

2)侧支孔高速出流方向在消力槛的阻挡下,流线向四周改向,从而增加了射流与明沟内更多水体的掺混和剪切作用,同时也有效缩窄了支孔出流形成的高流速带范围,进而起到更好的消能效果。

3)消力槛高度增加至一定值后,消能效果提升有限,实际上这与支孔布置高度和消力槛布置位置有关,下一阶段可围绕明沟宽度和高度、消力槛高度和布置位置以及支孔布置高度开展系列研究,以期提出相应的计算公式和布置原则。

参考文献:

[1] MULDER1 T D, VERELST K, VERCRUYSE J, et al.On hawser force criteria for navigation lock design: case study of maritime locks in port of Antwerp [C]//PIANC. The Proceedings of 32nd PIANC Congress.Brussels: PIANC, 2010.

[2] MURPHY T E.Lock design, bottom longitudinal filling and emptying system[R]. Vicksburg: US Army Engineer Waterways Experiment Station, 1980.

[3] HITE J E.In-chamber longitudinal culvert design for lock filling and emptying system[R].Washington: USACE, 2003.

[4] HITE J E, STOCKSTILL R L. Hydraulic design of a longitudinal culvert for lock filling and emptying systems[J]. Journal of hydraulic engineering, 2004, 130 (5) : 381-388.

[5] 须清华,张瑞凯.船闸水力学研究的新成就[J].水利水运科学研究, 1995(3): 234-245.

[6] 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.

[7] ABLES J H.Filling and emptying system for Bay Springs Lock tmmnessee-tombigee waterway[R].Mississippi: Hydraulic Model Investigation, 1978.

[8] 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.

[9] 王多银,陈明栋,陈明,等.广西左江山秀船闸扩能工程山秀枢纽二线船闸输水系统水力计算报告[R].重庆: 重庆交通大学, 2019.

[10] 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, 2001.

[11] 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.

[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.

[13] 张绪进,王召兵,陈亮,等.广西左江山秀船闸扩能工程山秀枢纽二线船闸输水系统水力学模型试验研究报告[R].重庆: 重庆西科水运工程咨询中心, 2019.

[14] 须清华.船闸输水系统的水工模型缩尺影响[J].水利水运科学研究, 1985(4) : 1-8.

[15] 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.

[16] 杨忠超,陈明.船闸水动力学数值模拟与工程应用研究[M].北京: 科学出版社, 2015.

(本文编辑 王璁)

(上接第 83 页)

[10] HUDSON R Y. Laboratory investigation of rubble-mound breakwaters[J]. Transactions of the American society of civil engineers, 1961, 126(4) : 492-520.

[11] 潘宝雄.波浪作用下护面块体稳定重量的探讨[J].水利水运科学研究, 1983(4) : 82-95.

[12] 朴正,马小舟,董国海.斜坡式防波堤人工护面块体稳定重量计算公式研究[J].中国港湾建设, 2013(3) : 6-10+70.

[13] 俞聿修,柳淑学,朱传华.多向不规则波作用下斜坡式

建筑物护面块体的稳定性[J].海洋学报(中文版), 2002(4) : 92-104.

[14] 柳玉良,杨洪旗,沈如军.大水深斜坡堤护面块体稳定重量的确定[J]. 海岸工程, 2007(1) : 48-51.

[15] 钟雄华,林登荣,陈国平,等.波浪作用下扭王字块体稳定性研究[J].水运工程 2016(8) : 55-60.

[16] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司.防波堤设计与施工规范: JST 154—2018[S].北京: 人民交通出版社有限公司, 2018.

(本文编辑 武亚庆)