

· 航道及通航建筑物 ·



省水船闸闸底水平分流式连通廊道 布置形式优化*

陈明, 张萌, 杨岚彬, 黄海津, 张忠原, ASIF Muhammad
(重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074)

摘要: 省水船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统通常采用闸底水平分流式连通廊道布置形式, 以减少工程开挖量, 分流均匀性是此类船闸输水过程的核心难题。针对该问题, 依托我国某省水船闸工程, 采用三维水流数值模拟方法对其连通廊道布置形式进行优化研究。结果表明: 增大连通廊道与闸墙长廊道的接口面积, 可有效改善两侧支廊道流量震荡问题。连通廊道水平分流口两侧宽度与分流墩两侧半径间的比值 K 表征分流口两侧分流的均匀性, 当 $K=1.064$ 时, 两侧支廊道分流均匀性、闸室支孔出流均匀性及水流条件较佳。研究成果可为类似省水船闸连通廊道布置提供技术参考。

关键词: 船闸; 水平分流; 连通廊道; 流量分配; 数值模拟

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)09-0079-07

Optimization of layout form of horizontal diversion connecting culvert at bottom of water-saving ship lock

CHEN Ming, ZHANG Meng, YANG Lanbing, HUANG Haijin, ZHANG Zhongyuan, ASIF Muhamad
(Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,
Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To reduce excavation volume, a horizontal diversion connecting at the bottom of the ship lock is typically adopted for the side support hole water delivery system with sidewall ports of the water-saving ship lock. The diversion uniformity of the connecting culvert is the core challenge in the water delivery process of such ship locks. Addressing this issue, based on a water-saving ship lock project in China, a three-dimensional hydraulic numerical simulation method is used to optimize the layout of the connecting culvert. The results show that increasing the interface area between the connecting culvert and the long culvert of lock wall can effectively mitigate the flow oscillations in the lateral culverts. The diversion uniformity of connecting culvert is characterized by K , defined as the ratio of the width on both sides of the horizontal diversion opening to the radius on both sides of the flow splitter. When $K=1.064$, the flow distribution uniformity in the lateral culverts, the outflow uniformity from the sidewall port, and the hydraulic conditions in chamber are better. The research results can provide technical references for the layout of connecting culverts in similar water-saving ship locks.

Keywords: ship lock; horizontal diversion; connecting culvert; flow distribution; numerical simulation

与传统船闸相比, 省水船闸增设省水池, 由于额外增加输水环节, 将在一定程度上延长船闸输水时间, 从而降低船闸通过能力。本文依托河

南省境内白河某省水船闸工程, 为解决枯水期水资源严重不足引起的船闸耗水问题, 提出了省水船闸建设方案。省水船闸不仅起到节水功能, 还

收稿日期: 2023-12-11

*基金项目: 国家重点研发计划项目 (2023YFC3206104)

作者简介: 陈明 (1983—), 男, 教授, 从事通航水力学教学与研究工作。

可实现消减输水阀门工作水头的目的。近年来，省水船闸在我国的应用日益广泛，如平陆运河的马道和企石船闸工程。省水船闸的核心工作环节是通过连通廊道实现闸室与省水池间的水体交换，因此，省水池与主闸室间连通廊道的布置形式是省水船闸输水系统设计的关键问题之一。

目前，连通廊道的布置形式主要有两种：一种是连通廊道直连主闸室闸底长廊道，并在闸底廊道中部设置水平分流口，如乌江银盘省水船闸^[1]、白马枢纽省水船闸^[2]，此类船闸往往适用于水头较高的情况；另一种是连通廊道与上、下闸首输水短廊道直接相连，如金家堰省水船闸^[3]、小清河水牛韩省水船闸^[4]，此类船闸设计水头往往较低。当主闸室采用闸墙长廊道侧支孔输水形式时，连通廊道必须考虑分流口的布置问题。为降低闸底开挖量，水平分流是较合适的布置结构。水平分流口受非恒定条件影响，在输水过程中难以实现流量的均匀分配，因此水平分流口的设计尤为重要。对此，Menéndez 等^[5]和 Lucas 等^[6]采用三维紊流数值模拟技术对巴拿马运河新船闸连通廊道布置形式进行优化，但未提出对水平分流口的系列优化成果。

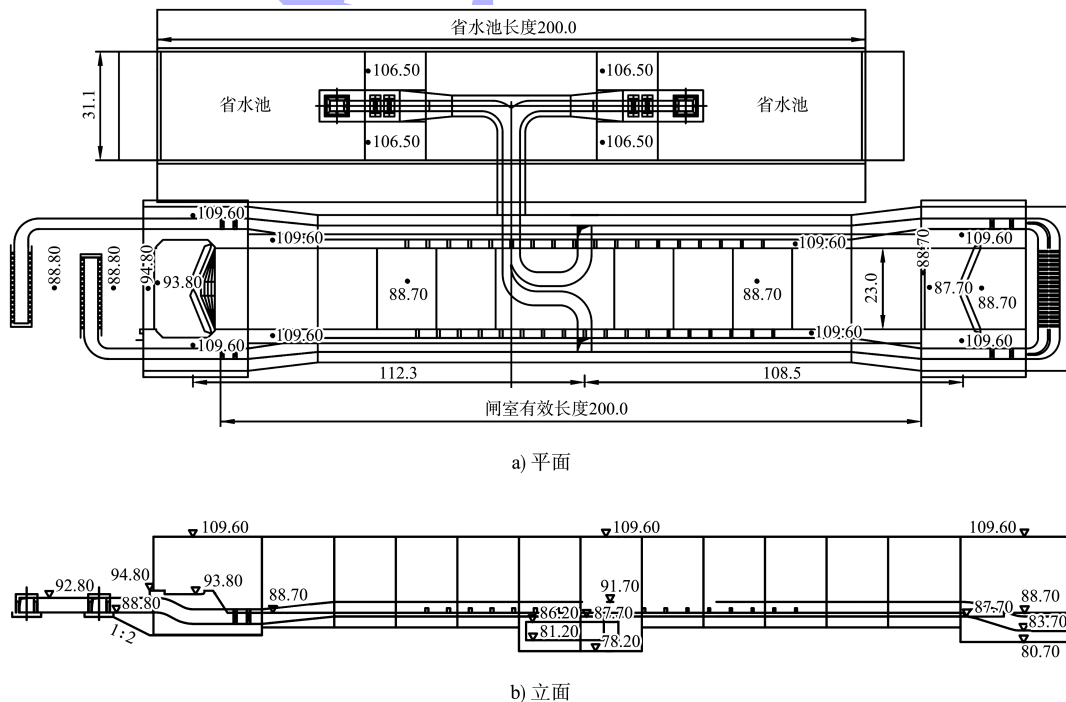
本文依托我国带一级省水池的某省水船闸工程，建立连通廊道与主闸室省水系统的三维数学模型，着重模拟充水过程，研究闸底水平分流口布置形式对流量分配及闸室内水流条件的影响。

1 数学模型建立及验证

1.1 基本参数

本文所依托的船闸工程，设计船型为 1 000 t，满载吃水深度 2.0 m，船闸标准为Ⅲ级，主体段结构均采用整体式 U 形结构，闸室有效尺寸为 200.0 m×23.0 m×4.0 m(长×宽×门槛水深)，带一级省水池，非省水工作水头为 10.80 m，省水工作水头为 6.99 m。

根据船闸总体布置与 JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[7](简称规范)有关规定及要求，采用闸墙长廊道侧支孔输水系统(图 1)。输水阀门处廊道断面面积 ω 为 24 m²。根据规范建议，结合船闸平面尺度，闸墙每侧设 18 个短支孔，分为 3 组，上游至下游孔口尺寸(宽×高)分别为 0.90 m×1.25 m(6 孔)、0.75 m×1.25 m(6 孔)、0.60 m×1.25 m(6 孔)，两侧支孔交错布置，总面积为 33.75 m²。



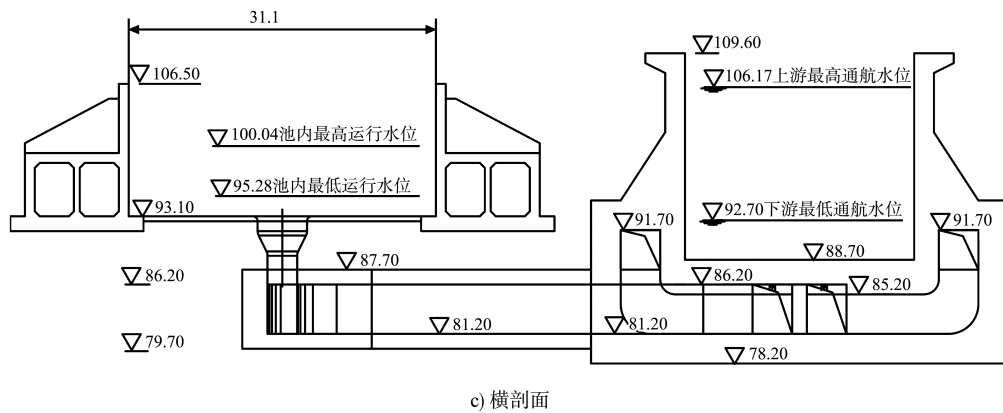


图1 原设计方案船闸布置 (单位: m)

1.2 数值计算原理

本文采用 RNG $k-\epsilon$ 紊流模型对主闸室充水过程进行三维水流数值模拟。通过有限体积法对控制方程组进行离散, 采用 SIMPLEC 算法对压力和速度进行耦合求解, 对壁面边界使用壁面函数法, 通过 VOF 法捕捉闸室自由水面, 相关计算原理及方程可参考文献[8-10]。

1.3 网格剖分及边界条件

本文计算区域如图2所示, 主要由船闸主闸室、闸墙长廊道、侧支孔、省水池与主闸室间的连通廊道组成。计算区域整体划分采用 0.25 m 的六面体结构网格, 并对侧支孔、连通廊道弯曲段等水流流态复杂区域进行网格加密处理, 网格单元总数 380 万个, 网格剖分见图3。主要计算 0~200 s 省水池向主闸室的充水过程, 计算模型进口边界采用流量过程换算的速度进口边界, 其流量过程使用船闸省水运行最大工作水头 ($H=6.99$ m)、连通廊道阀门开启时间为 1.5 min 的水力计算成果, 闸室顶部采用压力出口边界, 其余均为无滑移壁面边界条件, 见图3。

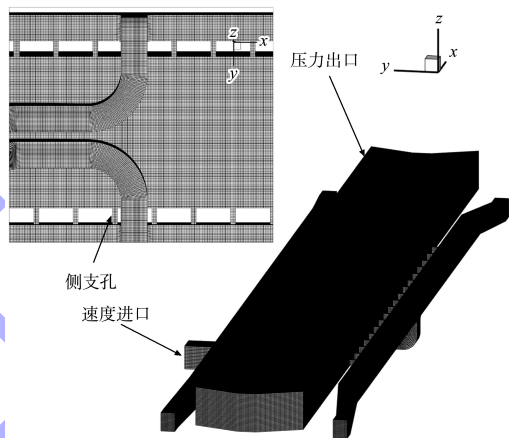


图3 网格剖分及边界条件

1.4 数学模型验证

因缺少物理模型试验数据验证该数学模型, 本文采取闸室侧支孔壁面射流展向流速进行对比验证, 验证数据参考文献[11]。选取 $2D$ (D 为验证支孔面积的算术平方根, 距离侧支孔出口 1.732 m 处)、 $4D$ (距离侧支孔出口 3.464 m 处) 两个典型断面的展向流速分布进行验证。如图4所示, 支孔展向流速分布与文献吻合良好, 数学模型可用于后续研究。

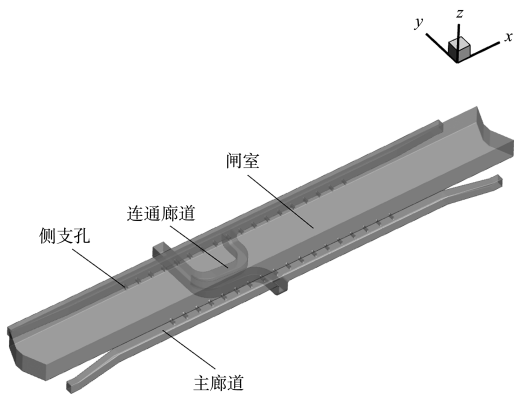
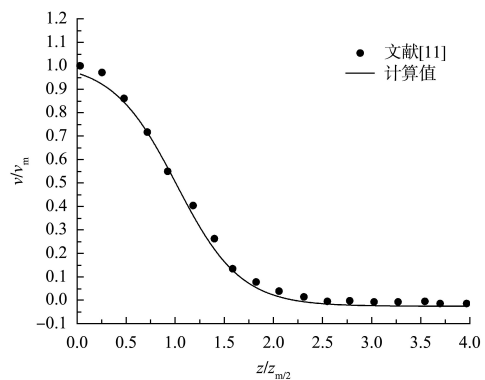
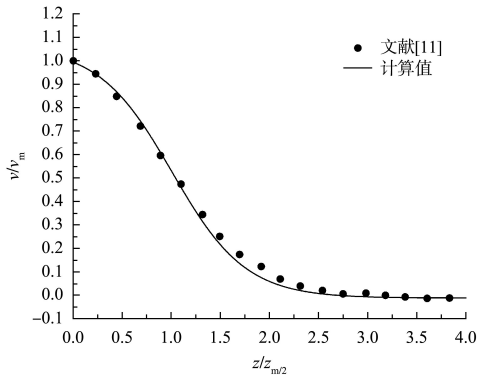


图2 船闸计算区域



a) 2D断面



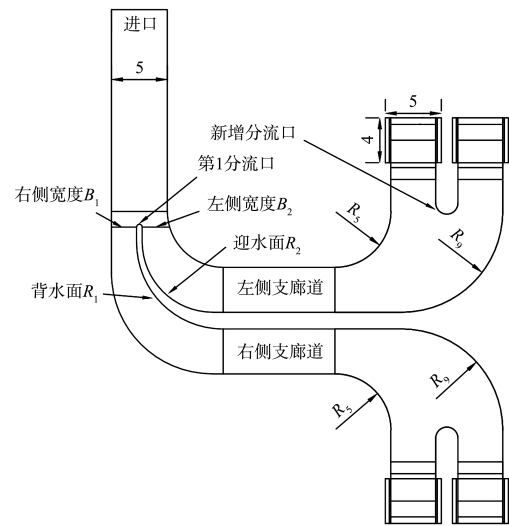
b) 4D断面

注：z、z_{m/2} 分别为展向坐标值、展向速度半宽值；v、v_m 分别为计算断面的速度值及速度最大值。

图4 支孔射流展向速度分布

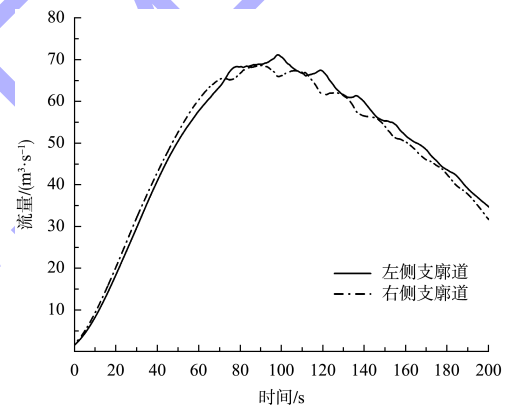
2 计算成果分析

根据设计方案进行数值模拟分析，见图 5a)，得到两侧支廊道最大流量差值约 5.610 m³/s，其流量过程曲线在峰后呈现震荡趋势，见图 6a)，可能造成不利的闸室水流条件。参考巴拿马运河新船闸连通廊道的布置方式，在设计方案连通廊道与闸墙长廊道接口前新增一分流口，见图 5b)，并逐步扩大出口面积。结果显示，出口面积为 40 m² 时两侧支廊道最大流量差异较小，见图 7，且可有效改善支廊道流量震荡性变化问题，其差值约为 3.646 m³/s，见图 6b)。

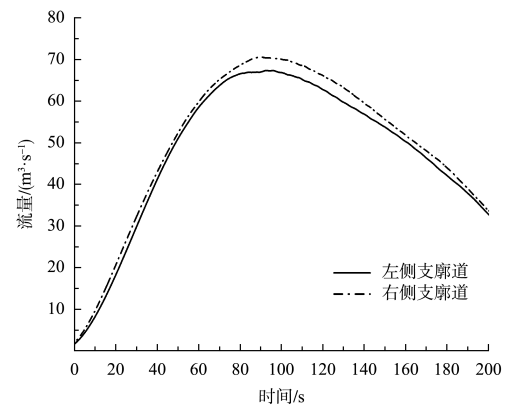


b) 优化方案

图5 连通廊道体型 (单位: m)

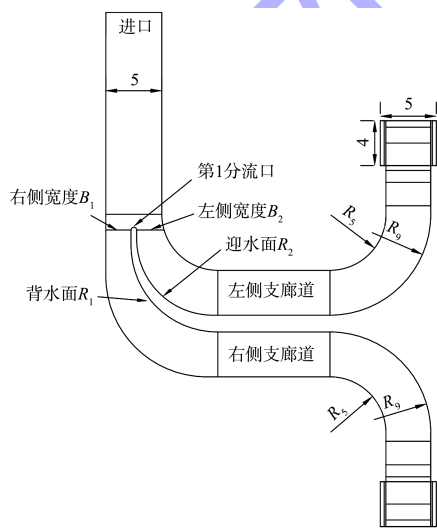


a) 设计方案



b) 优化方案

图6 优化前后流量过程



a) 设计方案

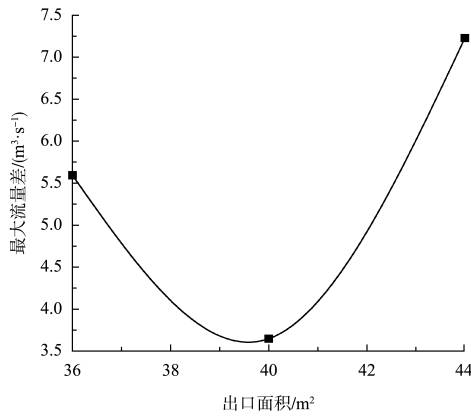


图7 最大流量差与出口面积关系

2.1 分流均匀性分析

在优化方案基础上,探讨连通廊道第1分流口布置形式对两侧支廊道流量分配的影响,通过改变分流墩迎水面半径 R_1 、背水面半径 R_2 、左侧宽度 B_2 的影响因素,分析两侧支廊道的流量大小,对于右侧宽度 B_1 ,因分流墩位于连通廊道进口中心线上,其数值不会改变,因此不考虑,具体工况及计算结果见表1。

当 R_1 与 R_2 不变时,缩小左右侧宽度差异可减小两侧支廊道流量差值;在保持 R_2 及左右侧宽度不变时,增大 R_1 ,两侧支廊道的流量差呈现先

减小后增大的趋势;在 R_1 与左右侧宽度不变时,随着 R_2 的减小,两侧支廊道流量差值变小。

本文定义无量纲数 K 为:

$$K = \frac{R_1/R_2}{B_1/B_2} \quad (1)$$

式中:分子表征两侧支廊道局部阻力系数,分母表征过流面积差异。采用无量纲数 K 权衡两侧支廊道局部阻力系数与过流面积,由图8可知,当 K 逐渐增大时,两侧支廊道流量差值先减小后增大,在 $K=1.064$ 时,两侧支廊道流量差值最小。

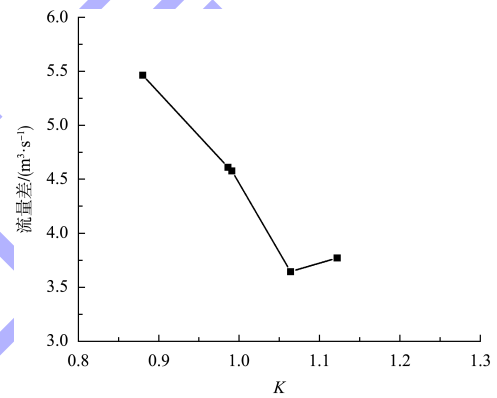


图8 主要影响要素与流量差值规律曲线

表1 计算工况及结果

工况	R_1/m	R_2/m	B_1/m	B_2/m	K	两侧支廊道流量差值 $\Delta Q/(m^3 \cdot s^{-1})$
GK ₁	6.8	6.3	2.25	2.76	0.880	5.464
GK ₂	7.3	6.8	2.25	2.45	0.986	4.612
GK ₃	6.8	6.3	2.25	2.45	0.991	4.578
GK ₄	7.3	6.3	2.25	2.45	1.064	3.646
GK ₅	7.7	6.3	2.25	2.45	1.122	3.772

此外,两侧支廊道分流均匀性直接影响侧支孔出流的均匀性。图9给出最大流量时刻($T=90s$)各工况左右侧支孔的流量差异,支孔编号按照上游至下游依次为1#~18#,见图10。由图9可见, $K=0.880$ 时,支廊道分流均匀性最差,其两侧支孔流量差值也最大,并在11#支孔位置处差值最大,约为 $1.140 m^3/s$; $K=1.064$ 时,支廊道分流均匀性较好,两侧支孔流量差异最小,在10#支孔位置处的最大差值约为 $0.479 m^3/s$;各工况支孔流量差异最大的位置处于10#~12#之间。 K 为0.986、0.991、1.122的支孔流量差异分别为

0.623、0.545、0.601 m^3/s 。

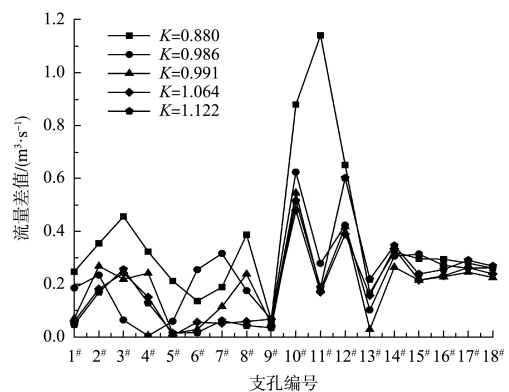


图9 各工况最大流量时刻下左右支孔流量差值

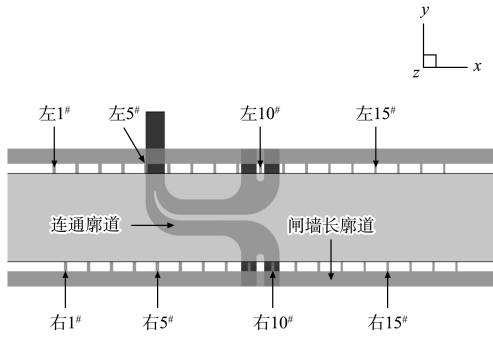


图 10 输水侧支孔编号

2.2 闸室水流条件分析

为进一步分析支孔出流均匀性对闸室水流条件的影响，可采用闸室断面流速分布均匀度进行评估。对于某一水平剖面，闸室断面流速分布均匀度按下式计算^[12]：

$$m_{2t} = \frac{\int c_t v_t^3 dc_t}{c_t v_{mf}^3} \approx \frac{1}{n} \frac{\sum_{i=1}^n v_{ti}^3}{v_{mf}^3} \quad (2)$$

式中： v_{mf} 为 t 时刻断面平均流速； v_t 为 t 时刻断面的点流速； c_t 为 t 时刻断面面积。 m_{2t} 为断面流速分布均匀度，反映闸室断面速度分布均匀程度， m_{2t} 越接近 1 说明流速分布越均匀。

本文以支廊道流量差异最大及最小的两种工况为例，分析最大流量时刻 ($T=90\text{ s}$)，两者闸室断面流速分布均匀度随水深的变化规律。如图 11 所示，距闸底 $0.1H$ 断面到 $0.6H$ 断面上， $K=1.064$ 的闸室断面流速分布均匀度均小于 $K=0.880$ 工况，且在 $0.1H$ 断面位置，两者闸室断面流速分布均匀度相差 6.01。随着水深增大，两者差值逐渐缩小，在距闸底 $0.7H$ 断面至 $1.0H$ 断面上， $K=0.880$ 的闸室断面流速分布均匀度小于 $K=1.064$ 工况，但两者差异较小，且两者断面流速分布均匀度趋于平缓，数值处于 2~3 的范围内。当 $K=1.064$ 时 1 000 t 船舶吃水深度水平剖面的流速分布情况，见图 12，闸室内流速处于 $0.1\sim 0.2\text{ m/s}$ 的范围内。从整体上看，当 $K=1.064$ 时，其闸室水流条件较佳，与支廊道分流均匀性及支孔出流均匀性所得结论一致。

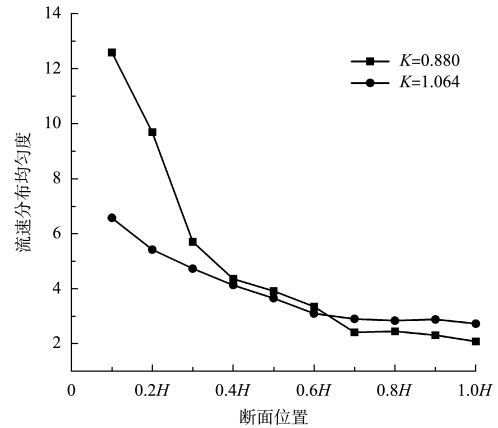


图 11 $T=90\text{ s}$ 闸室断面流速分布均匀度对比

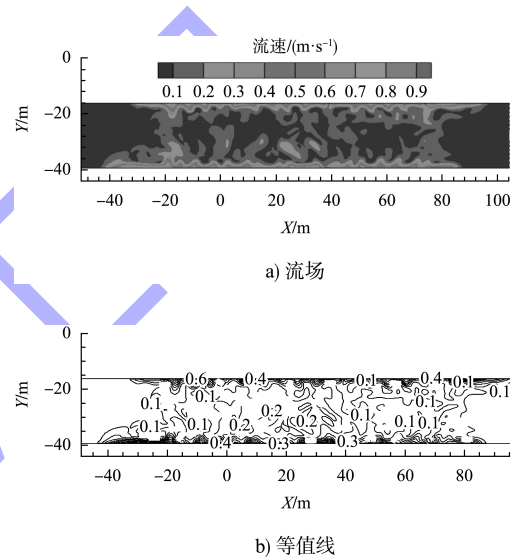


图 12 $K=1.064$ 流速流场及 $Z=11.08\text{ m}$ 等值线

3 结论

1) 以某带一级省水池的省水船闸为例，在设计方案基础上，将连通廊道与闸墙长廊道接口处新增一分流口，并将出口面积由 20 m^2 逐渐增大至 44 m^2 ，发现当出口面积为 40 m^2 时，改善支廊道流量震荡性变化的效果相对较好。

2) 在增大出口面积后，采用 K 权衡连通廊道分流口两侧支廊道局部阻力系数与过流面积，当 K 逐渐增大时，两侧支廊道流量差值先减小后增大，且当 $K=1.064$ 时，使得两侧支廊道流量差值最小为 $3.646\text{ m}^3/\text{s}$ ，两侧支孔流量差异最小为 $0.479\text{ m}^3/\text{s}$ ，其闸室水流条件较好。

3) 本文分析成果尚局限于三维水力特性数值模拟，而进一步检验连通廊道布置形式，特别是水平分流口布置结构的合理性，需通过闸室船舶

停泊条件进行评估,后续将结合水工物理模型试验成果进行深入分析。

参考文献:

- [1] 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].水利水运工程学报,2010(2):61-66.
- [2] 陶园园,麦建清,陈明栋,等.绣江复航工程白马枢纽省水船闸三维水力特性数值模拟[J].水运工程,2018(3):112-117,123.
- [3] 何良德,戈国庆,杨晓松,等.金家堰省水船闸互通式短廊道输水系统计算[J].水运工程,2021(2):64-70,88.
- [4] 陈莹颖,李中华,许铎.小清河水牛韩省水船闸输水系统布置及水力计算[J].水运工程,2020(1):63-69,102.
- [5] MENÉNDEZ A N, LECERTUA E A, Badano N D. Optimización del diseño del sistema de llenado/vaciado del Tercer Juego de Esclusas del Canal de Panamá[J]. Ribagua, 2014, 1(1): 4-13.
- [6] LUCAS E, GOBETTI C. Design of the filling and emptying system of the new Panama Canal locks [J],

Journal of applied water engineering and research, 2013, 1(1): 28-38.

- [7] 南京水利科学研究所,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.
- [8] 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.
- [9] 李洪奇,杨忠超,陈明,等.基于动网格技术对银盘船闸阀门段体型优化动态仿真研究[J].水运工程,2010(2):147-151.
- [10] 陈亮,孙倩,徐启航,等.船闸顶扩廊道阀门段水力特性模拟研究[J].中国农村水利水电,2023(6):274-279.
- [11] 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.
- [12] 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 赵娟)

(上接第72页)

3) 后续优化了推荐方案,对于完全不能利用的沉箱,在满足LNG船舶安全靠离泊要求的前提下,提高拆除高程,减少拆除工程量;工艺上采用垂直伸缩臂挖机陆上开挖回填料,相较于水上抓斗挖泥船开挖,减少了水上作业,降低安全风险,环境污染少,施工进度快。8个沉箱通过125d已全部拆除,如期按计划节点为后续新建码头提供稳定工作面。

4) 现存沉箱利旧需结合工程自身特点,从设计、施工和经济等方面进行多维度风险评估,具体可参考风险态势结构模型,将风险因素通过清晰的量化指标来评估,为方案选择提供重要依据。

参考文献:

- [1] 李青美.大型沉箱出运及其安装工艺的研究[D].青岛:中国海洋大学,2010.
- [2] 张龙强.大型沉箱出运及其安装工艺的研究[J].中国水运(上半月),2018(3):65-66.
- [3] 李善新.沉箱偏心浮运安全性研究[J].水运工程,2023(8):51-55.
- [4] 中交第三航务工程勘察设计院有限公司.龙口南山LNG接收站一期码头工程海域现存沉箱利用方案研究报告[R].上海:中交第三航务工程勘察设计院有限公司,2019.
- [5] 王晋,王炜正.某液化天然气码头系泊设施布置研究[J].港工技术,2012,49(5):16-21.
- [6] 中交第四航务工程勘察设计院有限公司.液化天然气码头设计规范:JTS 165-5—2021[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2021.

(本文编辑 赵娟)