



船闸泄水口数量对中间渠道 水力特性影响研究*

李昆洪, 陈 明, 姜 鹏, 杨岚彬

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 针对组合式通航建筑物船闸集中泄水引发的中间渠道非恒定波流问题, 拟通过改变船闸泄水口数量, 改善中间渠道船舶航行条件。以 1 000 吨级船闸与长 1 400 m、宽 20 m、水深 4 m 的中间渠道组合而成的建筑物为研究对象, 采用三维水流数值模拟方法, 探究船闸泄水口数量对中间渠道水力特性影响规律。结果表明, 相较于集中式布置, 采用分散式泄水口布局可显著改善渠道内波流条件。具体而言, 当泄水口数量由单点集中增加至 8 个对称分散式时, 停泊区最大水面比降降幅达 74.3%, 最大流速降幅达 55.0%; 但当集中出水口平均分散超过 6 个后, 波流条件改善幅度趋缓, 渠道内停泊区最大水面比降与最大流速降幅不足 5%。研究成果可为类似工程的中间渠道设计提供理论依据和技术参考。

关键词: 船闸; 中间渠道; 泄水口; 水力特性; 数值模拟

中图分类号: U641.1; TV135.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0118-07

Influence of number of ship lock outlets on hydraulic characteristics of intermediate channel

LI Kunhong, CHEN Ming, JIANG Peng, YANG Lanbin

(School of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: To address the issue of unsteady waves and currents in the intermediate channel caused by the concentrated discharge of the ship lock in a combined navigation structure, the objective of this paper is to enhance the navigational conditions for ships in the intermediate channel by modifying the number of outlets from the ship lock. The research focuses on a structure comprising a 1,000-ton class ship lock and an intermediate channel with dimensions of 1,400 m in length, 20 m in width, and 4 m in depth. Utilizing three-dimensional flow numerical simulation methods, the study investigates the impact of the number of ship lock outlets on the hydraulic characteristics of the intermediate channel. The findings indicate that, in contrast to a centralized outlet configuration, a decentralized layout significantly ameliorates wave and current conditions within the channel. Specifically, increasing the number of outlets from a single point to eight symmetrically dispersed outlets results in a 74.3% reduction in the maximum water surface gradient and a 55.0% decrease in the maximum velocity within the berthing area. However, when the number of outlets exceeds six, the rate of improvement in wave and current conditions diminishes, with reductions in maximum water surface gradient and flow velocity in the berthing area falling below 5%. The research results can provide a theoretical foundation and technical guidance for the design of intermediate channels in similar projects.

Keywords: ship lock; intermediate channel; water outlet; hydraulic characteristics; numerical simulation

收稿日期: 2025-03-03

*基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206104)

作者简介: 李昆洪(2000—), 男, 硕士研究生, 从事通航水力学研究。

通信作者: 陈明(1983—), 男, 博士后, 教授, 从事通航水力学的教学与研究。

船闸-中间渠道-船闸(升船机)组合布置是解决高山峡谷条件下船舶过坝的有效途径,特别是对于高坝通航,组合式布置与单级高水头船闸相比,能减小阀门工作水头,避免阀门及门后廊道发生空化空蚀问题,有利于船闸输水系统设计^[1-2]。而相比连续梯级船闸,组合式布置可灵活调度,有效提高货运能力,且能充分利用渠道的水域面积进行补水或溢水。然而,当上游船闸集中向中间渠道泄水时,容易在封闭的渠道内产生显著的波流耦合运动^[3],从而引起船舶发生横摇、纵倾,影响船舶航行和靠泊安全。

目前,国内外学者针对中间渠道非恒定波流水力特性进行了一些研究。Koch 和 Chanson^[4]通过水槽试验,揭示了正涌浪和涌潮中的湍流特性。Treske^[5]基于水槽试验数据,通过控制变量方法,阐明了波动涌动力学特征及其与流动参数的定量关系。Zheng 等^[6]基于矩形水平渠道物理模型,对波状次波进行了研究,阐述了波状次波在静水中传播的独特特征,并开展了逆水流传播的波状次波波动特性研究。曹玉芬等^[7]通过 1:40 的水工概化模型试验,研究上下级船闸不同运转方式下对中间渠道通航水流条件影响,最终确定了先泄后灌的输水方式。李广一等^[8]针对大藤峡水利枢纽带中间渠道,对中间渠道充泄水过程中波速、振荡波高、局部水面比降等水力要素进行分析,给出了上、下级船闸不同运转方式下的水力特性。祝龙等^[9]以分散两级双线船闸带中间渠道布置方案为例,通过数学模型,研究渠道长度、宽度、初始水深等参数对中间渠道水动力特性影响,得出增加中间渠道宽度与初始水深可有效改善渠道内水流条件。孟祥玮等^[10]利用物理模型与数学模型相结合的方式,研究中间渠道内水流条件与渠道尺度的关系,并提出了一系列改善措施。以上研究主要聚焦于船闸集中泄入中间渠道内的水力特性,而鲜有研究船闸泄水口分散布置对中间渠道水力特性的影响,特别是在高水头工况下,长距离中间渠道泄水引发的非恒定波流会

造成船舶停泊条件恶化,如何改善中间渠道航行条件与保证船舶停泊安全性是目前亟需解决的关键问题。

本文以长 1 400 m、宽 20 m、水深 4 m 的中间渠道为研究对象,在 1 000 吨级船闸(30 m 水头)条件下,通过三维数值模拟方法研究泄水口数量对中间渠道水力特性的影响规律,以期组合式通航建筑物设计提供理论基础。

1 数学模型建立

1.1 三维数学模型

本研究拟采用 RNG k - ε 紊流模型^[11],公式如下。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

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

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (3)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon \quad (4)$$

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

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

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

式中: k 为紊动能; G_k 为由平均速度梯度引起的紊动能 k 的产生项; ε 为紊动能耗散率; C_μ 、 $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 是常量,取值分别为 0.084 5、1.42、1.68; β 取值为 0.012; η 为紊流时间尺度与平均流动时间尺度之比; α_k 与 α_ε 分别为 k 与 ε 的有效普朗特数的倒数,取值为 1.39; η_0 是 η 的典型值,取值为 4.377; μ_t 为紊动粘度; μ_{eff} 为修正后的紊动粘度; $C_{1\varepsilon}^*$ 为引入主流时均应变后的模型常数; E_{ij} 为主流在 3 个方向的时均应变率。

1.2 计算区域及边界条件设置

中间渠道设计为矩形断面,几何尺度为 1 400 m × 20 m × 4 m (长 × 宽 × 初始水深),代表船舶尺度为 63 m × 11 m × 2.9 m (长 × 宽 × 吃水深度)。根据

JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》^[12], 停泊区距离船闸闸首应不小于 3 倍设计船长, 本次设计取整为 200 m, 停泊区长度亦按 3 倍设计船长原则设置。渠道在上、中、下部分别设置 3 个停泊区, 见图 1。

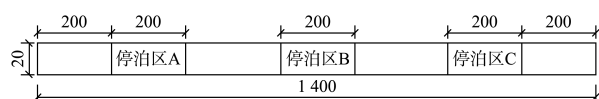


图 1 中间渠道停泊区布置 (单位: m)

Fig. 1 Layout of intermediate channel berthing area (unit: m)

船闸输水系统泄水廊道布置于中间渠道底部, 其泄水口通过在廊道顶部开孔的方式实现, 且孔上方设置盖板进行消能。泄水口总过流面积为 96 m^2 , 由 60 个矩形小孔组成, 每个小孔尺寸为 $2 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽)。在泄水口采用分散式布置时, 为保障输水阻力系数差异较小, 采用均匀分配方式。例如, 在中间渠道设置 5 个泄水口, 则每个泄水口应包含 12 个小孔, 见图 2。中间渠道上游根据 1 000 吨级船闸 (水头 30 m) 在阀门 6 min 开启时的泄水流量作为进口边界; 下游端部、侧壁及底部均为固壁边界; 顶部为空气压力出口边界, 计算边界条件见图 2。

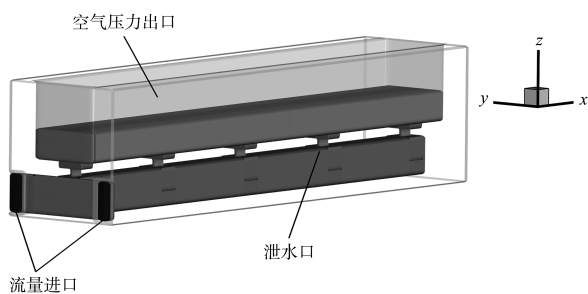


图 2 中间渠道泄水口布置

Fig. 2 Layout of water outlets in the middle channel

1.3 计算工况

为探究船闸泄水口数量对中间渠道内水力特性的影响规律, 选取 8 组计算工况, 见表 1, 分别对应渠道内 1~8 个泄水口, 其中 1 个泄水口为集中式布置, 2~8 个泄水口为分散式布置。

表 1 泄水口数量计算工况

Tab. 1 Calculation conditions for the number of discharge outlets

工况	水头 H/m	阀门开启时间 T/min	泄水口数量 $n/\text{个}$
S1	30	6	1
S2			2
S3			3
S4			4
S5			5
S6			6
S7			7
S8			8

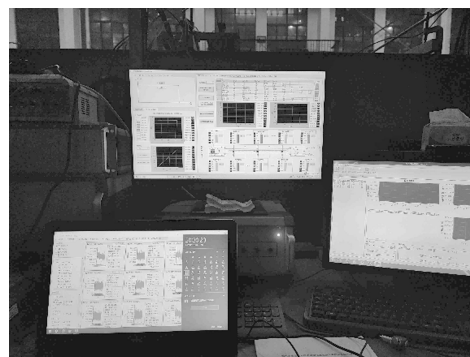
注: n 为泄水口个数。

1.4 数学模型验证

为验证三维数学模型的可靠性, 本文基于 1:50 的中间渠道物理模型开展验证性试验, 模型尺度为 $28 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.4 \text{ m}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。物理模型试验的边界条件与数模保持一致, 采用波高仪测量渠道内水位变化, 物理模型及数据采集系统见图 3。数模与物模单点水位随时间变化的对比见图 4。可见, 数值模拟结果与物模实测结果除局部存在一定差异外, 总体吻合程度较好, 因此所建立的三维数学模型能够有效模拟中间渠道水流特性。



a) 渠道物理模型



b) 数据采集系统

图 3 物理模型及测量设备

Fig. 3 Physical model and measuring equipment

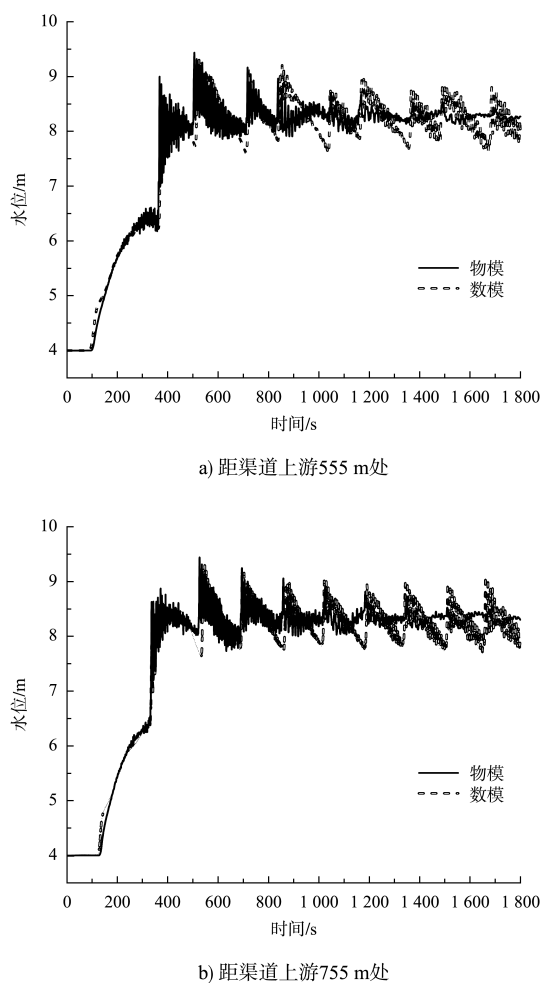


图 4 水位验证过程

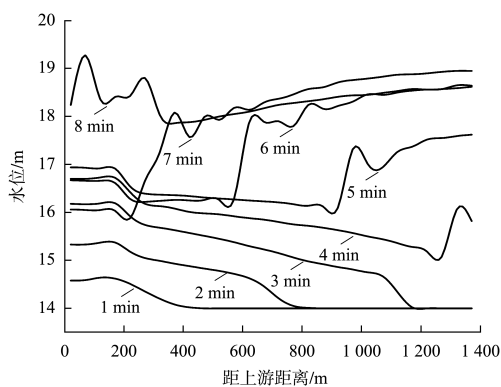
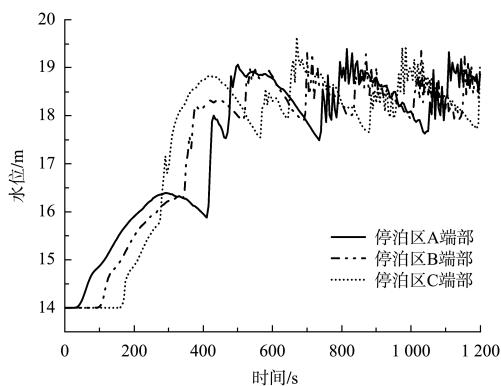
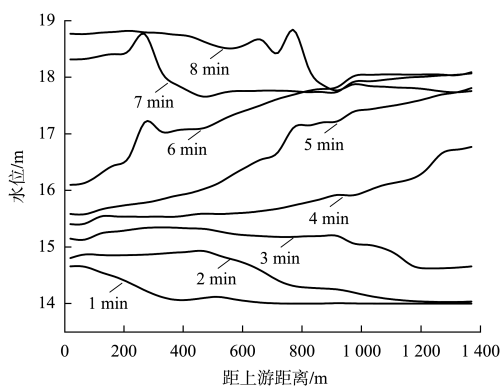
Fig. 4 Water level verification process

2 结果分析与讨论

2.1 水位波动

1 个、4 个以及 6 个泄水口工况下, 渠道内瞬时水面线与停泊区典型位置处水位变化见图 5。结果表明, 当船闸向中间渠道泄水时, 渠道内形成一道涨水波并向远端传播, 随着下泄流量逐渐增大, 涨水波高逐渐变大, 约 4 min 后, 涨水波抵达下游端部, 经过端部叠加反射后形成逆向传播的反射波, 在推进过程中受垂向流速分布差异影响, 波前逐渐变陡, 波高变大。在经过多次往复反射叠加之后, 渠道内形成周期性振荡波。通过对比

可以发现, 泄水口数量的增加对波动特征具有显著削弱作用。随着泄水口个数从 1 个增至 6 个, 渠道内的振荡波高减小了 0.56 m, 最大水位变幅降低了 0.51 m。此现象主要归因于泄水口分散布置后, 减小了单个泄水口出流流量, 从而削弱了波动强度。

a) 中间渠道瞬时水面线($n=1$)b) 停泊区典型位置处水位变化($n=1$)c) 中间渠道瞬时水面线($n=4$)

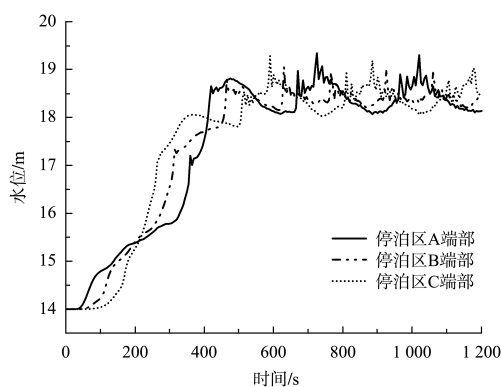
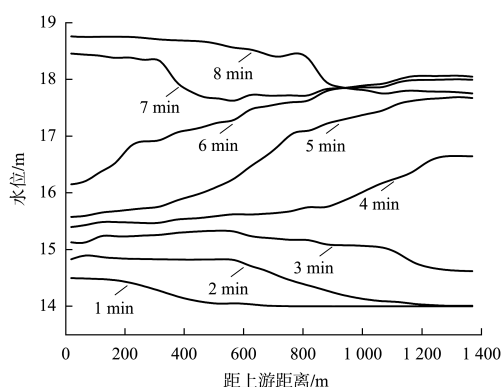
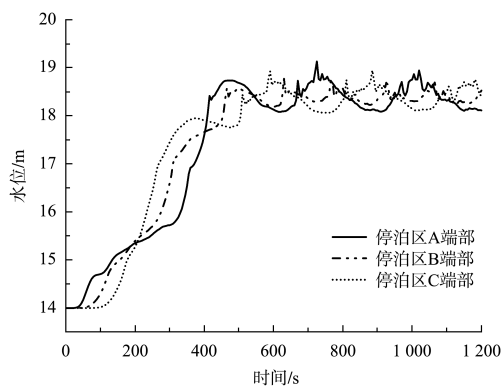
d) 停泊区典型位置处水位变化($n=4$)e) 中间渠道瞬时水面线($n=6$)f) 停泊区典型位置处水位变化($n=6$)

图5 中间渠道水位波动变化

Fig.5 Fluctuation of water level in middle channel

2.2 水面比降

不同泄水口数量对应的停泊区最大水面比降值见表2。数据分析表明,泄水口数量与水面比降呈现显著负相关。当泄水口数量由1个增至8个时,渠道内的最大水面比降从2.96%锐减至0.76%,降幅达74.3%,其中当泄水口数量较少时(1~4个),最大水面比降主要分布于渠道两端,随着泄水口增加至6~8个后,最大水面比降逐渐

移向渠道中部。同时发现,渠道内最大与最小比降的差值由0.37%降至0.13%,降幅达64.9%,表明分散式泄水口布置有效改善了水力梯度分布,使其更加均匀化。

表2 不同停泊区最大比降统计
Tab.2 Statistics of maximum gradient in different berthing areas

泄水口数量 n /个	停泊区 A 最大比降 J_1 /%	停泊区 B 最大比降 J_2 /%	停泊区 C 最大比降 J_3 /%
1	2.96	2.59	2.70
2	1.88	1.93	2.36
3	1.32	1.55	1.56
4	1.28	1.27	1.35
5	1.04	1.08	1.00
6	0.78	0.88	0.82
7	0.63	0.78	0.77
8	0.62	0.76	0.65

2.3 流速变化

1个与8个泄水口情况下渠道内最大流量时刻(260 s)流速分布情况见图6。可以看出,随着泄水口数量的增加,渠道内停泊区的流速呈现明显的减小趋势。从表3亦可看出,当泄水口数量为单个时,停泊区的最大流速为3.62 m/s;当泄水口数量增加至8个时,停泊区最大流速减小为1.63 m/s,降幅达55.0%。从流速分布可明显看出,泄水口数量的增加能够有效分散水流,减小局部区域水流集中,使水流能更好地扩散到渠道内的各个区域,从而使停泊区流速显著减小。

表3 不同停泊区最大流速统计
Tab.3 Statistics of maximum velocity in different berthing areas

泄水口 数量 n / 个	停泊区 A 最大流速 v_1 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	停泊区 B 最大流速 v_2 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	停泊区 C 最大流速 v_3 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	3.62	3.17	2.76
2	2.11	1.77	1.25
3	1.59	2.22	1.25
4	1.40	1.34	1.52
5	1.36	1.83	1.54
6	1.46	1.65	1.38
7	1.37	1.56	1.31
8	1.33	1.63	1.51

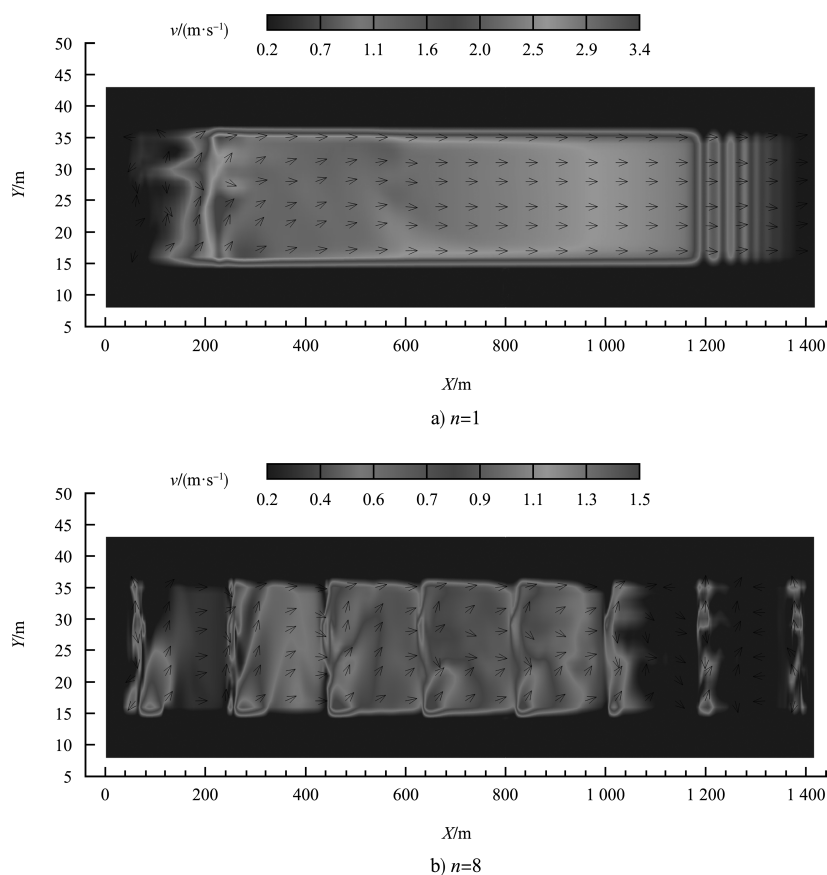


图 6 最大流量时刻 (260 s) 中间渠道流速分布

Fig. 6 Velocity distribution of intermediate channel at the time of maximum flow (260 s)

基于前述成果,统计了泄水口数量对中间渠道水力特性影响,见表 4。分散式泄水口(2~8 个)相较集中式泄水口,波流条件得到了显著改善。随着泄水口数量的增加,中间渠道最大比降与最大水位变幅逐渐降低,同时最大流速也呈现逐渐减小的趋势。值得注意的是,4 个泄水口相较其他形式的泄水口流速呈现显著降低,这主要是由

于 4 个泄水口布置情况下,停泊区与泄水口之间的距离相对较远,受船闸泄流引发的水流扰动较小。在泄水口个数增至 6 个之后,渠道内停泊区最大水面比降与最大流速降幅均不足 5%,综合中间渠道内水力特性变化与工程经济性,6 个泄水口为设定工况下较佳的配置方案。

表 4 船闸泄水口数量对中间渠道水力特性影响

Tab. 4 Influence of the number of ship lock outlets on hydraulic characteristics of the intermediate channel

出水口数量 $n/\text{个}$	水头 H/m	阀门开启时间 T/min	最大比降 $J/\%$	最大比降 降幅/%	最大流速 $v/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大流速 降幅/%	最大水位变幅 $\Delta H/\text{m}$
1	30	6	2.96	—	3.62	—	5.65
2			2.36	20.3	2.11	41.7	5.62
3			1.56	47.3	2.22	38.7	5.37
4			1.35	54.4	1.52	58.0	5.34
5			1.08	63.5	1.83	49.4	5.31
6			0.88	70.3	1.65	54.4	5.14
7			0.78	73.6	1.56	56.9	5.08
8			0.76	74.3	1.63	55.0	5.01

3 结论

1) 船闸泄水后, 非恒定波流在中间渠道内发生叠加、反射, 最终形成周期性振荡波。渠道内最大水面比降随泄水口数量增加从端部停泊区逐渐移向中部停泊区。

2) 分散式泄水口相较于集中式泄水口可显著改善水力特性, 泄水口数量增加对渠道内水力特性具有显著的改善作用。随着渠道内泄水口数量从 1 个增加至 8 个, 最大水面比降从 2.96% 锐减至 0.76%, 降幅达 74.3%; 最大流速从 3.62 m/s 减小至 1.63 m/s, 降幅达 55.0%; 最大水位变幅减小 0.64 m。同时, 多泄水口的分流作用对中间渠道内水体进行扰动与耗散, 使中间渠道内最大与最小比降的差值由 0.37% 降至 0.13%, 降幅达 64.9%, 有效改善了水力梯度分布, 使其更加均匀化。

3) 当船闸泄水口数量增至 6 个之后, 中间渠道波流条件改善幅度趋缓, 渠道内停泊区最大水面比降与最大流速降幅均不足 5%, 综合中间渠道内水力特性变化与工程经济性, 6 个泄水口为较佳的配置方案。

参考文献:

- [1] 梅铃钦, 安建峰, 张首元, 等. 分散梯级船闸输水时的作用水头和中间渠道断面形式对通航水流条件的影响[J]. 水运工程, 2024(4): 88-92, 106.
MEI L Q, AN J F, ZHANG S Y, et al. Influence of cross-section type and working head of intermediate channel on navigation flow conditions in decentralized cascade lock during water transfer [J]. Port & waterway engineering, 2024(4): 88-92, 106.
- [2] 孟祥玮. 船闸灌泄水引航道非恒定流研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
MENG X W. Study on unsteady flow in the approach channel of ship lock[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.
- [3] 郑飞东, 李云, 王晓刚. 中间渠道次生波发育长度数值模拟研究[J]. 水利水电工程学报, 2022(6): 1-8.
ZHENG F D, Li Y, WANG X G. A numerical study on the development length of secondary waves in an intermediate navigation channel [J]. Hydro-science and engineering, 2022(6): 1-8.
- [4] KOCH C, CHANSON H. Turbulence measurements in positive surges and bores [J]. Journal of hydraulic research, 2009, 47(1): 29-40.
- [5] TRESKE A. Undular bores (favre-waves) in open channels: experimental studies [J]. Journal of hydraulic research, 2010, 32(3): 355-370.
- [6] ZHENG F D, WANG P Y, AN J F, et al. Characteristics of undular surges propagating in still water[J]. KSCE journal of civil engineering, 2021, 25(9): 3359-3368.
- [7] 曹玉芬, 戈龙仔, 孟祥玮, 等. 带中间渠道船闸运转方式的试验研究[J]. 水道港口, 2007, 28(2): 126-132.
CAO Y F, GE L Z, MENG X W, et al. Study on run mode of upper and lower lock with intermediate channel [J]. Journal of waterway and harbor, 2007, 28(2): 126-132.
- [8] 李广一, 范宝山, 金贤, 等. 大藤峡水利枢纽船闸中间渠道非恒定流三维数值模拟研究[J]. 水利科技与经济, 2012, 18(10): 58-65.
LI G Y, FAN B S, JIN X, et al. 3D numerical simulation of unsteady flow in intermediate channel of dateng gorge water control project's ship lock [J]. Water conservancy science and technology and economy, 2012, 18(10): 58-65.
- [9] 祝龙, 刘本芹, 宣国祥, 等. 分散梯级船闸中间渠道水力特性及关键参数影响研究[J]. 水运工程, 2020(12): 15-21.
ZHU L, LIU B Q, XUAN G X, et al. Study on hydraulic characteristics and influence of key parameters of middle channel of the dispersed cascade ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2020(12): 15-21.
- [10] 孟祥玮, 高学平, 周华兴. 船闸中间渠道尺度对通航水流条件影响的研究[J]. 水利水电技术, 2010, 41(10): 31-36.
MENG X W, GAO X P, ZHOU H X. Study on influence from scale of ship lock intermediate channel on navigation flow condition [J]. Water resources and hydropower engineering, 2010, 41(10): 31-36.
- [11] YAKHOT V, ORSZAG S A. Renormalization group analysis of turbulence, I: basic theory [J]. Journal of scientific computing, 1986, 1(1): 3-51.
- [12] 船闸总体设计规范: JTJ 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Code for master design of shiplocks: JTJ 305-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.

(本文编辑 王传瑜)