



不同船闸泄水过程限制性中间通航航道 流速变化规律

杨俊毅¹, 于广年², 汪磊¹, 马殿光²

(1. 百色枢纽通航投资有限公司, 广西百色 533000; 2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

摘要: 针对船闸泄水非恒定流引起的流速变化, 尤其是限制性中间航道内的水力要素与非恒定流流量变换、中间航道尺度之间的关系, 依托百色通航枢纽中间限制性航道, 通过系统物理模型试验探究船闸非恒定流泄水过程与限制性中间航道内流速变化过程之间的关系。结果表明, 船闸流量迅速下泄过程中, 消能不充分、下泄流量迅速增加以及有界域边界限制是非恒定流泄水波形成的主要原因, 并导致中间航道内流速波动; 分段泄水曲线可通过减小泄水峰值达到减小最大流速和最大回流流速的目的; 在长中间通航航道受沿程能量消耗的影响, 中间渠道下游流速波动远小于上游, 该特征在中间渠道水流流态达到平稳后仍存在。

关键词: 泄水曲线; 船闸泄水波; 非恒定流; 流速变化; 限制性中间航道

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)03-0106-05

Flow velocity fluctuation law in restricted middle navigable channel with different ship lock discharge modes

YANG Jun-yi¹, YU Guang-nian², WANG Lei¹, MA Dian-Guang²

(1.Baise Hub Navigation Investment Co., Ltd., Baise 533000, China;

2.Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: Aiming at the problems of the flow velocity fluctuation process caused by the unsteady flow of ship lock discharge, especially the relationships of the hydraulic factors in the restricted middle navigable channel, the transformation of unsteady flow and the corresponding scales, we study the relationship between the unsteady flow discharge process of ship lock and the flow velocity fluctuation process in the restricted middle channel through systematic experiments of physic model based on the restricted middle navigable channel of Baise navigation project. The results show that the main reasons of the generation of unsteady flow discharge wave are attributed to insufficient energy dissipation, the rapid increase of discharge during the ship lock discharge process, and the limited boundaries, which cause the flow fluctuation. By reducing the peak value of the fragmented time-discharge curve, the maximum velocity and maximum inverse velocity decrease. In the long restricted middle navigable channel, due to the energy consumption, the velocity fluctuation in the downstream is much smaller than that in the upstream, which still exists after the flow pattern reaches a steady state.

Keywords: discharge curve; discharge wave of ship lock; unsteady flow; flow velocity fluctuation; restricted middle navigable channel

船闸-中间航道-升船机组合型通航是我国西部高坝通航枢纽的一种常规平面布置形式, 已在乌江

(构皮滩、沙沱)^[1-2]、西江(百色)通航建筑物建设中被应用。船闸泄水至下游过程中, 由于流量-时间

曲线的变化, 在中间通航航道中产生非恒定流, 引起水面波动、流速和流态的变化, 直接影响船舶的航行安全, 对水利枢纽的运行也会带来不利影响。在船闸-中间航道-升船机这一组合型通航枢纽布置形式中, 受山区地形限制, 中间渠道往往宽度较窄, 受到限制性中间航道的边墙影响, 泄水波在中间航道中无法实现快速扩散和消能, 同时下游升船机边界对泄水波进行反射, 泄水波在中间航道内往复传播, 形成复杂流态, 船闸泄水产生非恒定流对通航的不利影响将进一步加剧^[3-7]。

船闸泄水波的传播、衰减及其对通航影响的研究主要通过理论分析、模型试验及数值模拟展开。考虑到船闸泄水波对中间渠道流态影响主要可以归为以下方面: 1) 瞬时泄水流量增大、泄水时间缩短导致中间通航航道水位壅高, 且形成上下游水位差影响中间航道流速; 2) 下泄水流消能后残余机械能引起中间渠道内流速变化^[8-9]。当中间航道流态、水面波动等变化不能满足通航要求时, 往往需要通过优化水流结构进行调整, 包括延长时间和改善泄水方式、优化中间航道布置、改善船闸消能方式、布设消波措施等^[10-13]。

随着我国西部大型水利枢纽的建设和航运的快速发展, 高坝通航建筑物设计中更多涉及限制

性中间航道的布置和应用。受到地形地质条件影响, 限制性中间航道的设计难以按照现有规范进行。目前针对于船闸泄水非恒定流引起流场变化的形成机理、流速变化规律、流速衰减过程等方面^[14-16], 尤其是限制性中间航道内的水力要素与非恒定流流量变换、中间航道尺度之间的关系仍缺乏系统性研究^[17-20]。本文依托百色通航枢纽中间航道, 对船闸非恒定流泄水过程与限制性中间航道内的流场变化进行系统物理试验研究, 探究中间航道不同区域流速变化与船闸泄水强度之间的关系, 以及不同泄水曲线对流速变化的影响机制。

1 试验设计

受地形制约, 百色枢纽中间航道通航线路布置于百色水利枢纽左岸的那禄沟, 过船设施由船闸、中间航道、挡水土坝、通航渡槽及其挡洪检修闸、垂直升船机组成, 线路全长约 4.245 km。试验布置方案见图 1。考虑中间航道内水体总量平衡, 模型模拟范围包括整个中间航道、船闸下游引航道段、升船机上游引航道段及泄水汊道、模型上游—上游船闸下闸首、下游—下游升船机上闸首, 并包括那禄沟低洼段。

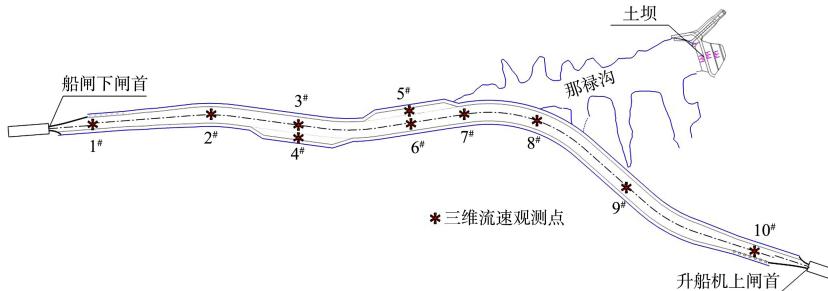


图 1 百色枢纽中间航道模型试验布置方案

为获取准确水流结构及波动特性, 选用正态模型, 根据几何相似原则, 其长度比尺设置为 $\lambda_L = 30$, 对应流速比尺为 $\lambda_v = \lambda_L^{0.5} = 5.48$, 阻力比尺为 $\lambda_n = \lambda_L^{1/6} = 1.76$ 。

百色枢纽中间航道在山体中开凿, 边坡采用

混凝土板衬砌, 糙率在 0.016~0.020, 根据重力相似原理, 对应模型糙率为 0.009~0.011, 因此模型选用水泥砂浆抹面压光, 对应糙率在 0.01 左右。根据模型范围, 模型全长 120 m, 平均宽度 10 m(含泄水汊道)。试验利用非恒定流控制系统

准确控制不同船闸泄水非恒定过程，并利用 Nortek 公司生产的 Vectrino 小威龙 ADV 流速测量系统进行流速测量。

2 工况设置

根据船闸泄水资料，百色船闸泄水工况分为正常蓄水位省水工况及汛限水位非省水工况，根据前期船闸水力学试验，获得船闸泄水流量-时间变化曲线见图 2。原设计泄水方式采用单峰泄水形式，在 450 s 内完成船闸流量下泄，最大下泄流量在船闸开启后 54 s 内达到 $50.85 \text{ m}^3/\text{s}$ ，中间限制性航道内最大回流流速达到 -0.6 m/s ，严重影响船舶航行和下游升船机运行，因此需要对泄水曲线优化。优化泄水曲线采用多次下泄流量方式，工况 1 采用双峰泄水曲线方式，增加下泄时间至 550 s 的同时，有效减小了下泄过程中的最大流量，两个峰值分别为 54 s 时的 $50.85 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 408 s 时的 $50.77 \text{ m}^3/\text{s}$ ；工况 2 则采用三峰下泄过程，进一步减小峰值流量，3 个峰值分别为 47 s 时的 $44.25 \text{ m}^3/\text{s}$ 、247 s 时的 $49.63 \text{ m}^3/\text{s}$ 和 407 s 时的 $49.24 \text{ m}^3/\text{s}$ 。考虑到原始流量下泄方式无法保证中间枢纽运行的稳定性和安全性，因此本文仅对工况 1 和 2 泄水方式中泄水波传播及衰减规律进行研究。

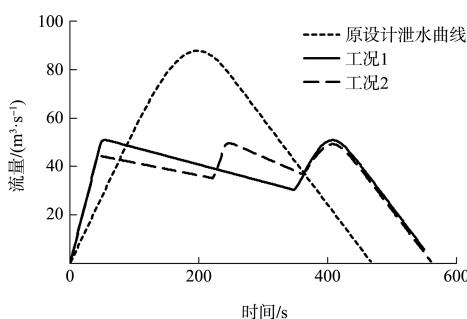


图 2 不同工况下上游船闸泄水流量-时间曲线

3 结果分析

上游船闸泄水过程中，流量在短时间内迅速下泄并向下游发展，形成推进型泄水长波。在推进过程中，随着能量衰减、波动叠加和波峰坦化

效应，波动逐渐减小。随着波动传递到限制性中间航道末端，受到下游升船机闸门的反射，波动向上游传递，经过往复反射与叠加，形成往复运动的振荡波，最后在航道内形成以中部为节点的驻波。

不同工况条件下中间航道上游(1#测点)、下游(10#测点)及锚泊区(4#测点)平均流速变化见图 3。

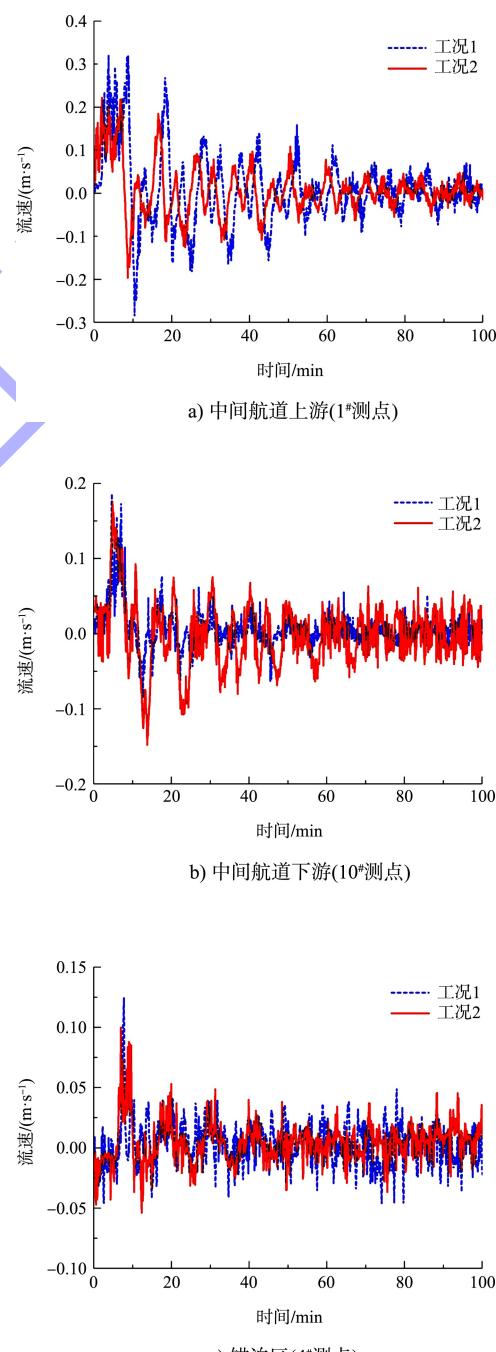


图 3 不同工况条件下流速随时间变化过程

中间航道上游流速随时间变化过程见图3a), 因受到闸门泄水的直接影响, 泄水水流在上游形成有限域自由界面射流, 最大流速随着流量的增加而增加, 工况1泄流过程中最大流速出现在3.72 min时为0.32 m/s, 而最大回流流速出现在10.46 min时为-0.29 m/s。与之相比, 随着最大瞬时泄流流量减小, 工况2的最大流速和最大回流流速均减小, 泄流过程中最大流速出现在2.01 min时为0.22 m/s, 最大回流流速出现在8.67 min时-0.20 m/s。由于工况2泄流流量的峰值更早达到, 因此工况2最大流速和最大回流流速的最大值均更早达到。锚泊区的流速随时间变化见图3b), 水流经过一段时间的传递, 由于沿程阻力的作用, 最大泄流流速和会流流速均较中间渠道上游减小。工况1泄流过程中最大流速出现在4.65 min时为0.19 m/s, 而最大回流流速出现在12.23 min时为-0.08 m/s。与之相比, 随着最大瞬时泄流流量减小, 工况2的最大流速和最大回流流速均减小, 泄流过程中最大流速出现在4.87 min时为0.18 m/s, 最大回流流速出现在13.27 min时为-0.14 m/s。中间渠道下游升船机上游闸门处流速时间变化过程见图3c), 随着水流传播中沿程能量的进一步损耗, 最大流速小于船闸下游和锚泊区流速, 工况1最大流速为0.12 m/s, 最大回流流速为-0.05 m/s。与之相比, 工况2最大流速为0.10 m/s, 最大回流流速为-0.05 m/s。

对比不同工况流速衰减过程, 在中间渠道上游, 工况1和2的流速随时间演化过程中速度振幅存在一个明显的随时间衰减的过程, 但在锚泊区和升船机闸门上游的流速随时间演化过程并未出现明显的衰减, 均在20~25 min后流速数值振荡达到一个稳定的区间, 锚泊区速度区间在-0.08~0.08 m/s, 而升船机上游则在-0.05~0.05 m/s。

中间通航渠道沿程最大流速变化过程见图4, 由于中间渠道紧接上游船闸泄水口, 因此不同泄水曲线对中间渠道上游引航道的流速变化影响最大。相比于工况1, 工况2最大泄流流量减小, 因

此在下泄过程中, 中间渠道上游的最大流速和最大回流流速均更小。由于中间渠道长度接近2.5 km, 流速传播过程中沿程能量消耗导致最大流速和最大回流流速均减小, 在中间渠道末端, 工况1和2的回流流速接近, 均不影响船舶正常进出升船机。

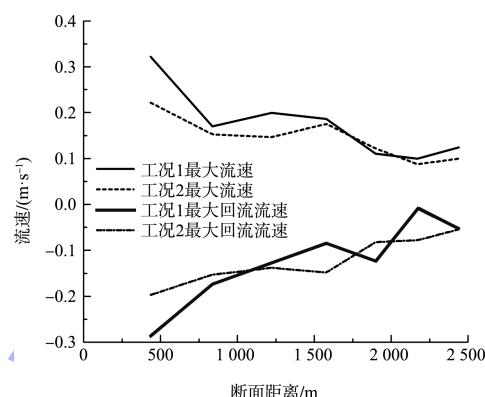


图4 限制性中间航道最高和最低水位与断面距离之间关系

不同工况下中间渠道内最大泄流流速和泄水20 min后最大泄流流速见表1。可以看出20 min后, 随着泄水波消耗与反射, 水流流速逐渐达到稳定值, 此时工况1中间渠道上游最大流速为0.14 m/s, 较工况2大40%, 而最大回流流速较工况2大55%。在中间渠道下游, 工况1和2在泄水20 min后流速差异较小。

表1 不同工况条件下中间航道上、下游流速变幅

工况	最大流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大回流 流速/($m \cdot s^{-1}$)	泄水20 min后	
			最大流速/ ($m \cdot s^{-1}$)	最大回流流速/ ($m \cdot s^{-1}$)
工况1上游	0.32	-0.29	0.14	-0.17
工况2上游	0.22	-0.20	0.10	-0.11
工况1下游	0.12	-0.05	0.05	-0.05
工况2下游	0.10	-0.05	0.05	-0.04

4 结论

1) 泄水波迅速下泄过程中, 消能不充分和下泄流量增加是导致中间渠道流速变化的主要原因。
2) 利用分段泄水、减小泄水峰值是减小上游最大流速和最大回流流速的有效手段。随着流速沿程传递中的能量消耗, 长中间渠道中、下游最大流速和最大回流流速受峰值影响较小。
3) 中间渠道水流流态平稳后(泄水时间>20 min),

中间渠道上游最大流速与最大回流流速均随着泄流曲线峰值的增加而增加；中间渠道下游流速不受下泄峰值流量的影响，不同工况的最大流速和最大回流流速趋于一致。

参考文献：

- [1] 李焱, 郑宝友, 周华兴. 构皮滩升船机中间渠道通航隧洞和渡槽的尺度研究[J]. 水道港口, 2012, 33(1): 45-50.
- [2] 程璐, 王本龙, 胡亚安, 等. 下水式升船机船厢入水过程三维数值模拟技术[J]. 水运工程, 2016(12): 169-175.
- [3] 申霞, 谢瑞, 姬昌辉, 等. 船闸泄水的非恒定流特性及通航安全措施[J]. 中国港湾建设, 2016, 36(4): 34-38.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 赵德志. 船闸充泄水时引航道中的不稳定流[J]. 水道港口, 1991(4): 41-47.
- [7] 杨文俊, 孙尔雨, 杨伟, 等. 三峡水利枢纽工程非恒定流通航影响研究 I: 上、下引航道[J]. 水力发电学报, 2006, 25(1): 45-49.
- [8] 李君涛. 双线船闸灌泄水引航道非恒定流特性及对通航条件影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [9] 王涛. 明渠非恒定流传播特性研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2009.
- [10] 林勇. 高水头船闸输水阀门段廊道非恒定流水动力特

(上接第 105 页)

4) 本文从航道尺度的角度提出葛洲坝三江下引航道挖深拓宽方案, 但方案的成立与优化还需要通过数模、物模研究通航水流条件。

参考文献：

- [1] 周建武. 提高葛洲坝枢纽船闸通过量的实践[J]. 交通企业管理, 2015, 30(7): 15-17.
- [2] 张义军, 杨利. 三峡枢纽船闸年通过量亿吨后通过能力提升思考[J]. 中国水运, 2016(10): 28-29.
- [3] 邹静, 余金燕, 朱晶晶. 船舶积压常态化下的三峡枢纽挖潜扩能措施研究[J]. 中国水运, 2019(10): 19-20.

性试验研究[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(4): 243-246.

- [11] 孟祥玮, 周华兴, 郑宝伟, 等. 船闸灌泄水引航道和中间渠道通航水流条件研究[M]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014.
- [12] 杜鹏, 胡海豹, 黄潇. 限制水域内船舶阻力和兴波特性研究[C]// 吴有生, 邵雪明, 王军. 第三十届全国水动力学研讨会暨第十五届全国水动力学学术会议论文集(下册). 北京: 海洋出版社, 2019: 196-203.
- [13] 古宇翔, 杨胜发, 黄岱, 等. 多波长明渠非恒定流传播特性研究[J]. 广东水利水电, 2020(6): 11-16.
- [14] 胡江, 杨胜发, 王涛. 基于 PIV 技术的明渠非恒定流试验系统[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2009, 28(2): 306-309.
- [15] 胡江, 杨胜发, 周华君. 明渠非恒定流传播规律及阻力特性的试验研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [16] 韩国其, 汪德耀. 宽浅型明渠非定常流的数值模拟[J]. 河海大学学报, 1990(3): 40-46.
- [17] 程永光, 索丽生. 三维明渠非恒定流的格子 Boltzmann 模拟[J]. 水科学进展, 2003, 14(1): 9-14.
- [18] 乔清松, 杨开林, 王涛, 等. 调水工程明渠非恒定流解析近似控制模型研究[J]. 水力发电学报, 2008, 27(6): 116-120, 115.
- [19] 胡江, 杨胜发, 周华君. 光滑明渠非恒定流传播速度实验研究[J]. 水运工程, 2009(3): 15-17.
- [20] 赵潜宜, 刘士和, 廖伟坚. 明渠恒定紊流的总流控制方程与能量损失特性[J]. 水科学进展, 2020, 31(2): 270-277.

(本文编辑 王璁)

- [4] 长江勘测规划设计有限责任公司. 三峡水利枢纽水运新通道和葛洲坝水利枢纽航运扩能工程项目建议书[R]. 武汉: 长江勘测规划设计有限责任公司, 2018.
- [5] 长江三峡通航管理局, 南京水利科学研究院, 中交水运规划设计院有限公司. 三峡船闸船舶过闸吃水控制标准和配套措施研究[R]. 武汉: 长江三峡通航管理局, 2011.
- [6] 郭涛. 三峡工程蓄水前后水运成本比较研究[J]. 水运工程, 2012(2): 25-29.

(本文编辑 武亚庆)