通航隧洞内非恒定流水力特性试验研究*

韦德鉴[1]，吕　彪[2]，于广年[2]，赵家强[2]，邢　岩[2]，姜兴良[3]
（1. 平陆运河集团有限公司，广西 南宁 530000；2. 交通运输部天津水运工程科学研究院，天津 300456；
3. 中交水运规划设计院有限公司，北京 100007）

摘要：针对船闸和通航隧洞组合式通航建筑物，船闸泄水会在隧洞内引发非恒定流传播，致使隧洞船舶、水体与岸壁三者之间耦合作用更加复杂，对隧洞尺度确定提出更大的挑战。以乌江沙沱二线 1 000 吨级通航隧洞为研究对象，采用 1∶20 正态物理模型与自航船模相结合的技术方法，开展非恒定流水力特性试验，系统观测静水条件和船闸泄水影响下隧洞及连接明渠的水位波动、流速时空分布、水流流态演变特征，分析非恒定流对船舶通航的影响规律。试验结果表明：泄水时，水位与流速峰值同步出现，呈瞬时激增、快速衰减的单峰特征，待泄水完成和闸门开启后隧洞内水波快速坦化，不会出现持续振荡现象，对通航的干扰具有短时性。此外，在隧洞内设置平流槽，可快速高效地抑制波高与水位波动，船舶航行参数与静水工况无显著差异，推荐对岸航速 1.0 m/s 可保障安全通航。

关键词：通航隧洞；非恒定流；水力特性；物理模型试验；船闸泄水
中图分类号：U64　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1002-4972(2026)09-0140-08

Experimental study on hydraulic characteristics of unsteady flow in navigable tunnels

WEI Dejian[1], LYU Biao[2], YU Guangnian[2], ZHAO Jiaqiang[2], XING Yan[2], JIANG Xingliang[3]
(1. Pinglu Canal Group Co., Ltd., Nanning 530000, China;
2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;
3. CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., Beijing 100007, China)

Abstract: For combined lock and navigable tunnel structures, the discharge from the lock can induce unsteady flow propagation within the tunnel, complicating the coupling effects among vessels, water bodies, and sidewalls, thereby posing greater challenges to the determination of tunnel dimensions. Taking the 1, 000-ton-class navigable tunnel of the Shatuo Second Line on the Wujiang River as the study subject, a 1∶20 normal physical model combined with self-propelled vessel models is employed to conduct experiments on hydraulic characteristics of unsteady flow. The study systematically monitors water level fluctuations, spatiotemporal distribution of flow velocity, and evolution characteristics of flow patterns in the tunnel and connected open channel under both still water conditions and lock discharge impacts, and analyzes the influence laws of unsteady flow on vessel navigation. The experimental results show that during discharge, the peak values of water level and flow velocity occur synchronously, exhibiting a single-peak feature of instantaneous surge and rapid decay. After discharge completion and gate opening, the water waves in the tunnel rapidly flatten without persistent oscillation, which means the interference to navigation is short-term. Additionally, installing a flow-stabilizing trough inside the tunnel can effectively suppress wave height and water level fluctuations. There is no significant difference in vessel navigation parameters compared to still water conditions. A bank speed of 1.0 m/s is recommended to ensure safe navigation.

Keywords: navigable tunnel; unsteady flow; hydraulic characteristics; physical model experiments; ship lock discharge

收稿日期：2026-01-13　　**录用日期：**2026-02-21
***基金项目：**国家重点研发计划项目(2023YFB2604700)；中央级公益性科研院所科研创新基金项目(04TK240202)
作者简介：韦德鉴(1966—)，男，教授级高级工程师，从事水运工程建设管理工作。

水运工程

乌江作为国家高等级航道与贵州水运出省主通道，沙沱水电站系乌江流域梯级规划中的第九级，已建一线 500 吨级升船机，布置于枢纽右岸。但随着货运量快速增长，现有通过能力难以满足需求，亟须实施 1 000 吨级提等扩能工程。然而乌江属于典型山区性河流，两岸多为悬崖峭壁、地质条件复杂，500 吨级通航建筑物已占据了有利位置，1 000 吨级通航设施只能在两岸的悬崖峭壁中建设，并且枢纽水头高、河床狭窄、水位变幅巨大、坡陡流急，通航条件极为恶劣，沙沱枢纽二线 1 000 吨级通航建筑物拟采用船闸+通航隧洞+升船机组合方案。

近年来，国内外关于通航隧洞的论证和研究正密集开展，通航隧洞内船舶-水流-洞室三者的耦联作用属于多边界、多约束工程优化问题，为了降低隧洞内的通航安全风险，当前主要采用水工物理模型+自航船模或曳引船模和三维流固耦合数学+船舶仿真数学模型相结合的研究方法，开展静水条件下(不考虑船闸灌泄水、枢纽调度运行等影响)通航隧洞内的水力学问题研究，通过对比分析因航道边壁限制所产生的船舶航行水力条件(航行阻力、下沉量、水位波动、横波)变化，提出合理的构皮滩一线[1]、七里泷[2]、白市[3]500 吨级和构皮滩二线[4]1 000 吨级通航隧洞的断面尺度以及航速等关键参数。在通航隧洞断面尺度与船舶航行要素关联性方面的研究方面，钮新强等[5]基于设计通过能力和船舶临界航速，建立了大型通航隧洞断面尺度目标优化数学模型；汤建宏等[6]以溪洛渡通航隧洞为例提出隧洞断面经济性分析思路，结合通航建筑物单向过闸时间来确定隧洞内水域断面系数。在通航隧洞内航行阻力及消波减阻研究方面，卿正阳等[7]探讨船舶行驶速度与隧洞宽度对船行波、横向流速、船舶阻力及下沉量的影响；程弘宇等[8-9]提出航行阻力与航速的二次方成正比关系，并研发了一种具有立柱和横板的消波设施。国外在限制性航道水流特性研究方面，较早开展了受限航道阻塞效应、极限航速及浅水效应等理论分析，建立了流速、水位响应模型[10]；在船舶水动力研究方面，采用 CFD 精细化模拟与船舶操纵性数学模型，开展了隧洞内“船-水-壁”相互作用效应研究，制定相应标准规范，形成了较为完善的隧洞净空、航速控制及安全富余设计体系[11]。

综上所述，当前针对静水条件下的通航隧洞水力学已有广泛研究，但在船闸-通航隧洞-升船机联合运行系统中，船闸直接泄水到隧洞内会诱发形成非恒定流，引发水位骤变、流速激增、水流紊动加剧等现象，致使通航隧洞内船舶-水流-洞室三者的耦联作用更加复杂，对通航隧洞断面尺度、航速等关键设计参数的确定提出更大的挑战，因此有必要从非恒定流影响角度，对船舶在通航隧洞的航行条件及水动力相应条件进一步研究。本文依托沙沱通航隧洞工程，通过物理模型试验揭示非恒定流条件下隧洞水位、流速时空分布特征，分析水力要素对船舶航行的影响，提出安全通航控制参数，旨在为小断面通航隧洞工程设计和运行提供参考。

1　工程概况

沙沱水电站二线通航建筑物为Ⅲ级标准，通航 1 000 吨级船舶，由上游船闸、通航隧洞、下游双线升船机组成，见图 1。上游船闸上闸首墩顶高程 372.0 m，下闸首墩顶高程 368.0 m，门槛顶高程 349.0 m，底高程为 343.5 m，船闸设计水头 11.5 m，泄水时通过隧洞向下游输水，形成非恒定流场。输水系统采用闸墙长廊道侧支孔输水系统，输水阀门尺寸为 2×3.0 m×3.5 m(个数×宽×高)。下闸首输水廊道出口段断面尺寸为 3.5 m×3.5 m×2×2(宽×高×两孔×双侧)。上游船闸和下游升船采用通航隧洞连接，两端船闸和垂直升船机的位置确定后，通航隧洞长度较短，隧洞的轴线具有唯一性，通航隧洞平面上采用曲线布置，圆弧曲线半径为 700 m，隧洞总长 287 m，通航隧洞断面为

城门洞型，洞内水位恒定为 353.5 m，水深 5.5 m，有效水域宽度 16 m，底板高程为 348.00 m，洞顶高程 368.00 m，隧洞高净高 20 m，其中直墙高度 15.5 m，隧洞两侧设人行通道，宽 1.2 m，作为检修及紧急时刻的逃生人行通道。下游升船机船厢室布置于上下闸首之间，两线升船机船厢室并排布置，单线结构宽度 43 m(双线共 43 m+0.05 m+43 m)，长度 72.00 m，最大提升高度 64.5 m。

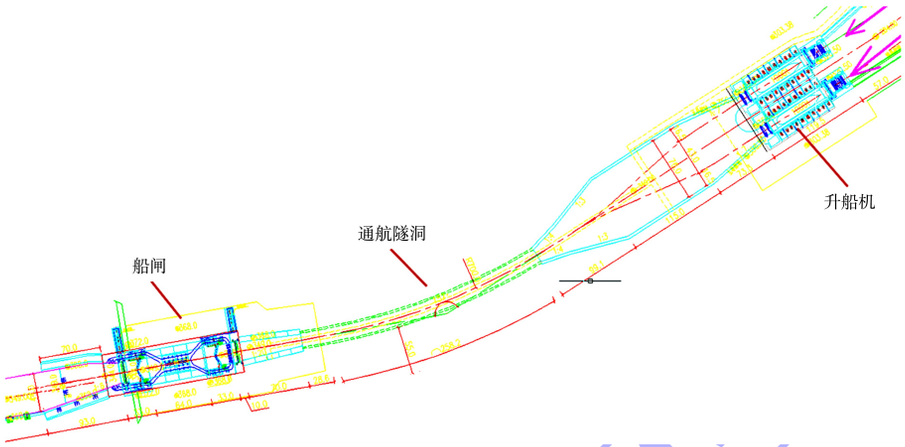


图 1　沙沱枢纽二线 1 000 吨级通航建筑物平面布置

Fig. 1　Layout of the 1,000-ton-class navigable building of the Shatuo Hub Second Line

2　模型设计与验证

为研究隧洞式中间渠道内船舶、水流与隧洞设计参数的互馈机理，依托乌江沙沱枢纽二线 1 000 吨级通航隧洞工程，采用 1∶20 的正态整体水工物理模型与遥控自航船模相结合的技术方法，开展静水条件和船闸泄水情况下隧洞内水面波动和船舶航行条件试验研究。

1)模型范围。考虑通航隧洞水体总量平衡，模型模拟范围需包括整个通航隧洞段及上、下游引航道段，模型上游至上游船闸出口，下游至下游升船机船厢入口，见图 2。根据试验目的、模型范围及试验场地条件，研究确定模型平面比尺为 $\lambda_L=20$，因船模试验需要，模型必须为正态，因此垂直比尺 $\lambda_H=20$。

2)设计船型。该研究设计船型为 1 000 t 机动驳，其主尺度为 58 m×10.8 m×2.5 m(型长×型宽×吃水)。船模与水工模型一致设计为几何正态，比尺为 1∶20，即 $\lambda_L=20$。船模进行了开阔水域船模航速率定试验，确定船模在开阔水域中航速与主机功率百分比之间的关系。

图 2　沙沱通航隧洞模型

Fig. 2　Shatuo navigable tunnel model

3)观测点布置。为了观测模型范围内的水波传播规律，在模型沿程共布置 10 个波高观测点，其中隧洞段布设 5 个($1^{\#}$~$5^{\#}$)，明渠段布设 5 个($6^{\#}$~$10^{\#}$)；为了观测模型范围内的流速传播变化规律，共布设 14 个流速观测点，其中隧洞段布设 5 个($1^{\#}$~$5^{\#}$)，考虑到平面形态变化可能会引起流速的突变，明渠段进行加密布设共 9 个($6^{\#}$~$14^{\#}$)，具体物理模型采样点布置见图 3。

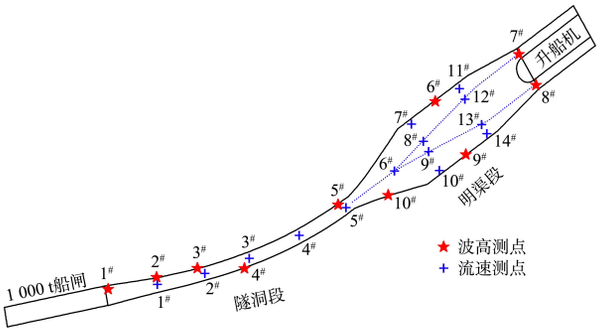


图 3　波高、流速观测点布置

Fig. 3　Layout of wave height and flow velocity observation points

4)试验工况。根据主要研究内容，模型进行了隧洞静水船模航行试验、隧洞非恒定流水力特性试验及隧洞泄水后船模航行试验。参考构皮滩隧洞船实船航速数据(0.5~1.2 m/s)、国内主要通航隧洞内的设计航速范围(1.2~1.8 m/s)和航行阻力变化规律经验，静水船模航行试验选取 1.0、1.5、2.0 和 2.5 m/s 共 4 组不同航速试验工况。沙沱枢纽上游最高通航水位 365 m，隧洞设计水位 353.5 m，水头差 11.5 m，泄流曲线由设计单位提供，泄水试验主要为了研究船闸泄水产生的非恒定流传播规律，包括水面波动和流速的变化 2 组工况。为了分析隧洞泄水对船舶航行的影响，参考静水航行试验的航速取值，泄水后船模航行试验中选取 0.8、1.2、1.5、1.8 和 2.0 m/s 共 5 组不同航速试验工况，具体试验工况见表 1。

表 1　试验工况

Tab. 1　Experimental conditions

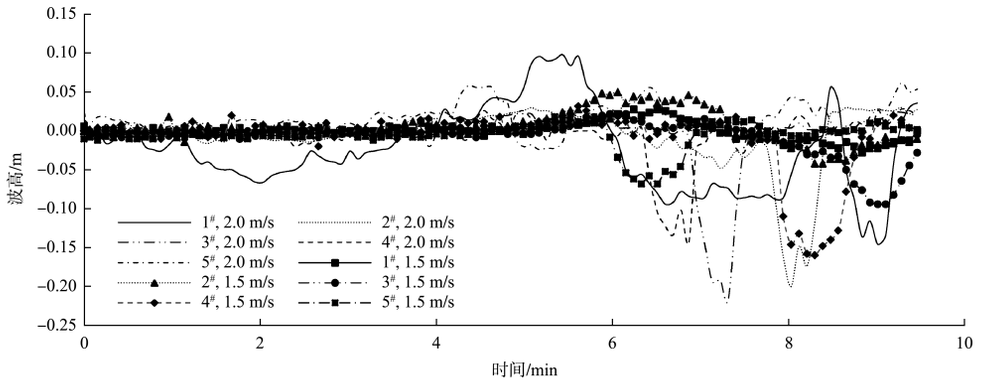
试验组次	水流状态	率定航速/(m·s^{-1})	备注
1-1	静水	1.0	船模航行
1-2	静水	1.5	船模航行
1-3	静水	2.0	船模航行
1-4	静水	2.5	船模航行
2-1	泄水	–	非恒定流水面波动观测
2-2	泄水	–	非恒定流流速观测
3-1	泄水	0.8	船模航行
3-2	泄水	1.2	船模航行
3-3	泄水	1.5	船模航行
3-4	泄水	1.8	船模航行
3-5	泄水	2.0	船模航行

3　静水工况船舶航行试验研究

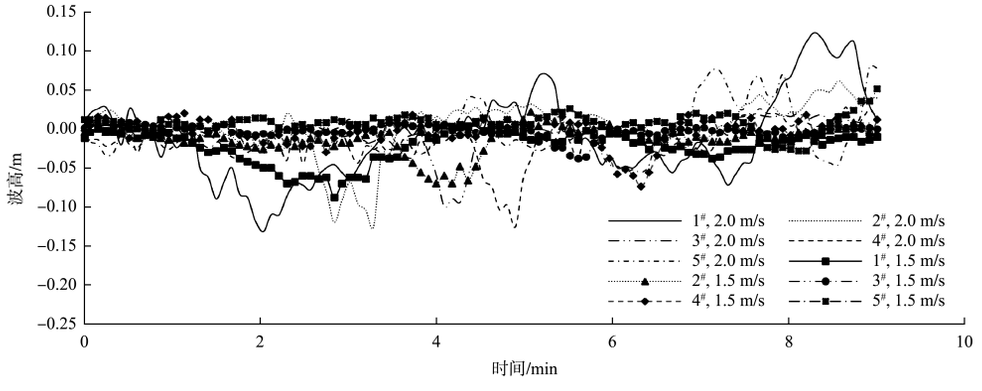
静水条件下(只考虑船行波的影响)，进行了率定航速 1.0、1.5 、2.0 及 2.5 m/s 共 4 个航速试验，观测隧洞及停泊段水面波动、船模对岸航速、船尾下沉量及船模航态。不同航速隧洞段水面波动情况见图 4，从试验及结果分析可以看出：1)当船模以率定航速 $V_0 \leqslant 1.0$ m/s 进出隧洞时，隧洞内水面波动小于 0.03 m。2)船模以率定航速 $V_0 = 1.5$ m/s 进出隧洞时，隧洞内长波引起的水面波动基本在 0.05 m 内，船体附近局部水位下降最大 0.17 m。3)船模以率定航速 $V_0 = 2.0$ m/s 进出隧洞时，隧洞内长波引起的水面波动基本在 0.1 m 内，船体附近局部水位下降最大 0.2 m。4)船舶下行通过隧洞引起的局部水位下降值小于船舶上行下降值。5)船舶在小断面系数水域航行时，对水面波动的影响主要分为两方面，一方面是船舶上游水体被船推动向上游流动，形成长波，导致水面波动，其特点是周期长、波高小；另一方面是船舶运动导致船体附近局部水位下降；随着船舶航行产生的水波传播，水面波动逐渐减小至稳定状态。

不同条件下(不受限水域、直线隧洞、弧线隧洞)航速对比见图 5，从图中可以看出：1)受水流阻塞及边壁效应影响，船舶在隧洞中对岸航速减小，沙沱隧洞船速减幅在 20%~25%之间。2)船舶出隧洞进入明渠后，由于断面系数增大，对岸航速增大。3)率定航速越大，航速损失百分比越大，说明随航速增加，阻力加速度增大。4)隧洞进出口附近，水深由 5.5 m 减小至 4.5 m，断面系数由 3.47 缩小至 2.84，对岸航速显著减小。5)相同断面系数下，相较于直线布置，隧洞弧线布置对岸航速减小，说明隧洞弧线布置船舶所受阻力更大。

水运工程



a) 船舶上行



b) 船舶下行

图 4　不同静水航速时船舶上、下行水面波动变化

Fig. 4　Variations of water surface fluctuations for upstream and downstream vessels under different still water speeds

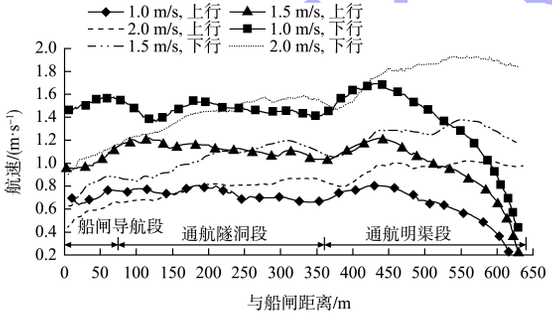


图 5　对岸航速沿程变化

Fig. 5　Variations of bank speed along the tunnel

4　隧洞非恒定流水力特性试验研究

以乌江沙沱水电站第二线 1 000 吨级通航建筑物船闸输水过程为典型，设置船闸泄流流量过程，开展船闸泄水影响下隧洞内非恒定流水力特性试验研究。船闸利用隧洞进行泄水，隧洞进水口位于船闸闸室下游引航道底部，隧洞出水口位于隧洞出口右侧导航段，为了减小船闸泄水引起的非恒定流对船舶航行的影响，在隧洞出口设置溢流口。泄水时，隧洞内产生非恒定流，为了分析隧洞泄水对船舶航行的影响，试验对隧洞泄水过程中及泄水后一定时间段内的隧洞内流速及沿程水位进行了观测。

船闸泄水影响下通航隧洞内水位变化过程见图 6，由图可知：1)泄水开始后，泄水波快速向下游传播，受船闸下闸首至隧洞进口过渡段宽度由 22 m 逐渐减小至 16 m 的影响，水位波动逐渐增加，最大达 0.40 m，泄水波进入隧洞后，宽度不变，较过渡段宽度有所减少，水位波动反而逐渐抬高，最大水位抬高至 0.46 m，由于出口以下明渠段宽度逐渐拓宽，泄水波传到隧洞下段时水位波动也略有降低，特别是泄水波传到出口段时，水位波动下降较为明显，水位波动小于 0.25 m；2)泄水完成后，隧洞上段水位波动首先开始消落，随后中段和下段水位波动也开始消落，至闸门开

启后，隧洞内最大水位波动小于 0.20 m，泄水开始 15 min 后，水位波动基本下降到 0.10 m 内，水位波动明显降低；3）总体来看，非恒定流水位扰动集中于泄水初期，衰减速度快，由于隧洞出口布设溢流槽，削弱水位波动效果明显，通航隧洞内无持续振荡现象。

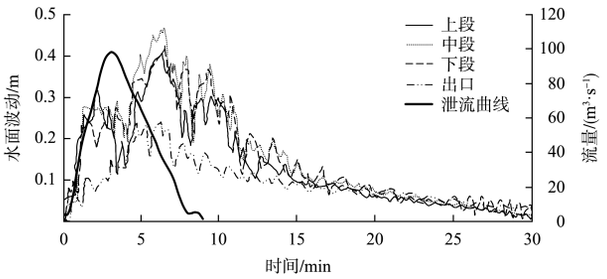


图 6　通航隧洞段水位变化过程

Fig. 6　Water level variations in the navigable tunnel section

在船闸泄水影响下，通航隧洞内沿程流速变化见图 7，从图可知，1）隧洞内流速受泄水波影响显著，泄水开始时，随着泄水流量增大，流速快速增加，2.5 min 后流速达到极值，约 1.00 m/s，位于隧洞进口处；进入隧洞后，由于隧洞宽度、水深一定即断面系数不变，流速略有减小至 0.80 m/s 左右，由于长度较短，隧洞内沿程流速衰减的幅度较小，随着泄水流量减小，隧洞内流速也会逐渐减小。2）泄水 5 min 后受泄水波反射影响，隧洞内流速略有增加，增加的幅度约为 0.20 m/s，最大达 0.35 m/s；至泄水完成后，隧洞内流速快速减小至 0.15 m/s 以下。3）至闸门开启后，隧洞内流速波动进一步减小，流速基本在 0.10 m/s 以内，泄水波影响基本消除，没有出现持续振荡现象。

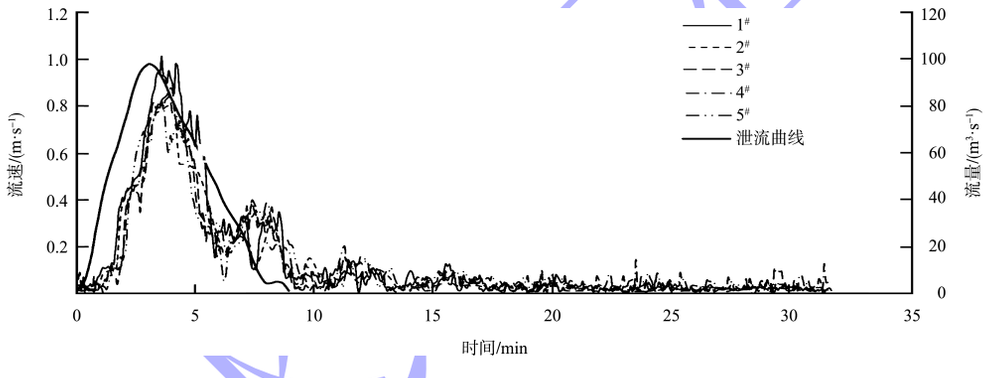


图 7　通航隧洞段流速变化

Fig. 7　Flow velocity variation in the navigable tunnel section

以上结果表明，由于船闸泄水诱发的非恒定流对隧洞内的水位和流速会产生较大影响，给船舶运行带来较大的安全隐患。当隧洞设计阶段考虑船闸直接泄水至隧洞时，应严格管控泄水和闸门开启过程中，禁止船舶进入隧洞；同时辅以溢流槽，可有效减小船闸泄水对隧洞内通航水流条件的影响。

5　隧洞泄水工况船模航行试验研究

在隧洞泄水工况下，进行了率定航速 0.8、1.2、1.5、1.8 及 2.0 m/s 这 5 个航速试验，分别对隧洞及停泊段水面波动、船模对岸航速及船模航态进行了观测。

船舶上下行运行组织流程见图 8，根据最不利原则，下行船舶在船闸泄水闸门开启后（11.5 min），出船闸进入隧洞，上行船舶在船闸泄水后（8.5 min），开始从下游升船机出闸上行，同时船闸下闸首闸门缓慢开启。

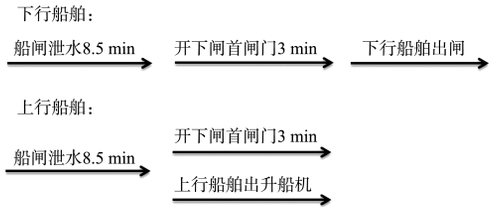


图 8　船舶上、下行通航运行组织方案

Fig. 8　Operation scheme for upstream and downstream vessels

在上述船闸泄水条件影响下，不同航速隧洞段水面波动情况见图 9，由图可知：受隧洞泄水影

响，船舶航行过程中，隧洞内各测点水位仍然处于下降过程，下降幅度约为 0.2 m，静水航行时产生的长波现象不明显，$V \leqslant 1.5$ m/s 时，隧洞内水面波动与无船泄水工况相似，各测点水位波动值小于 0.1 m；$V_0 \geqslant 1.8$ m/s 时，隧洞内水位波动值增加至 0.2 m 左右。

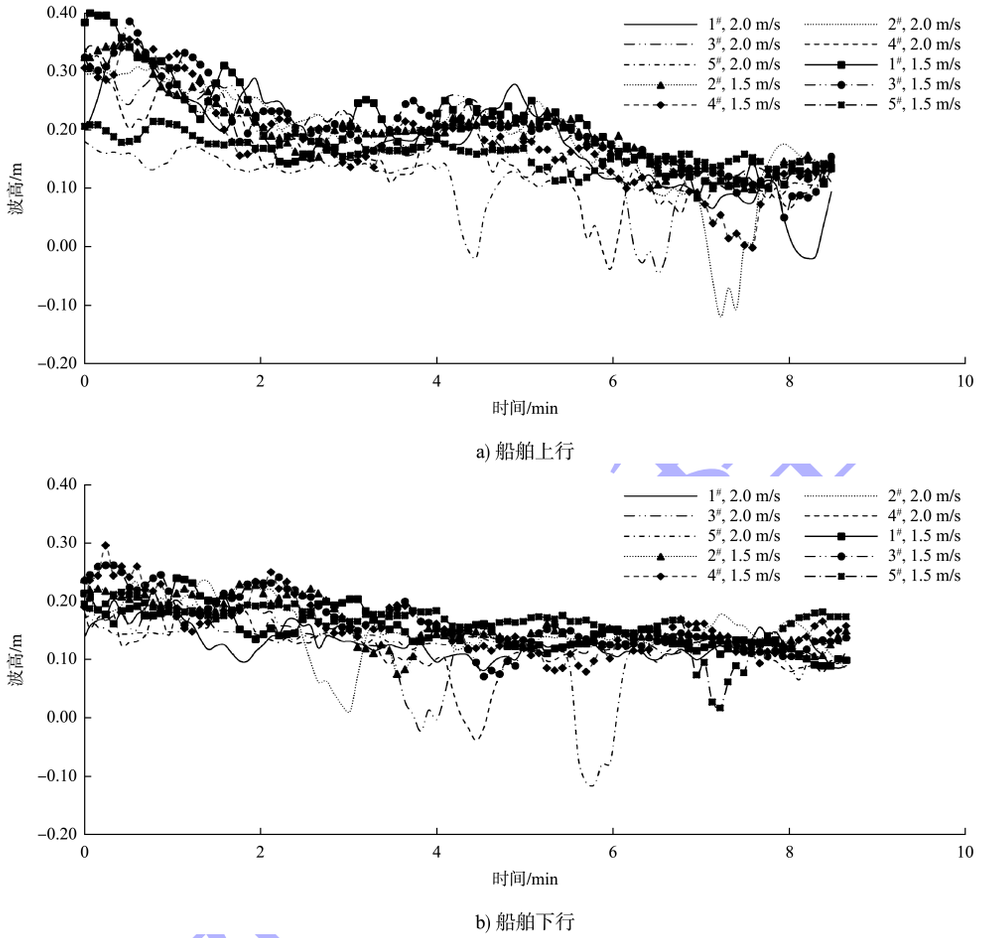


图 9　不同航速下隧洞内水面波动变化

Fig. 9　Variation of water surface fluctuation in navigable tunnel under different speeds

隧洞泄水工况，船舶上行、下行对岸航速沿程变化见图 10，由图可知，1)泄水完成后短时间内水位恢复平稳，对通航持续性影响较小，隧洞泄水工况船舶对岸航速变化与静水工况相差不大。2)船舶上行。船舶出升船机后对岸航速增加较快，明渠段最大对岸航速可达到率定航速的 85%左右。到达隧洞入口附近，随着断面系数的减小，对岸航速减小，隧洞内对岸航速减小至率定航速的 70%~80%。3)船舶下行。船舶出船闸后对岸航速缓慢增加，行至隧洞弯顶附近时，对岸航速增加至率定航速的 70%~80%；进入隧洞下段，对岸航速继续增加，于距离船闸下闸首约 320 m 处达到最大值；而后受隧洞出口过水断面缩窄(水深 4.5 m)的影响，对岸航速有所减小；出隧洞后，随着断面系数的增大，对岸航速明显增加，最大对岸航速接近率定航速。

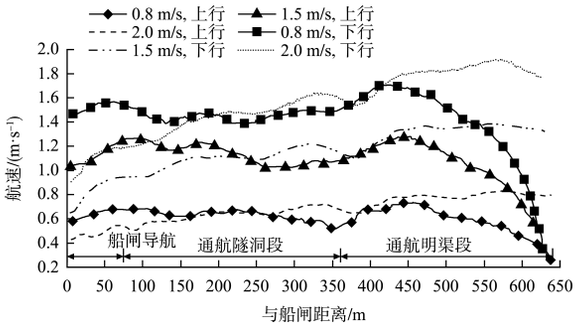


图 10　不同航速下隧洞内船舶航行对岸航速变化

Fig. 10　Bank speed variations of vessels in navigable tunnel under different speeds

6　结论

1）船闸泄水引发的通航隧洞非恒定流，水位与流速呈瞬时峰值、快速衰减的特征，隧洞段最大水位抬升 0.46 m、最大流速 1.00 m/s，泄水后 15 min 内恢复平稳，流速迅速降至 0.15 m/s 以下，对通航的干扰具有短时性。

2）从船模航行试验看，非恒定流对船舶航速、操纵性影响较小，1 000 吨级船舶安全通航对岸航速宜控制在 1.0 m/s，隧洞净宽 16 m、水深 5.5 m(断面系数 3.47)可满足安全要求。

3）研究成果可为峡谷区通航隧洞水力设计与运行调度提供一定的试验与技术参考，但隧洞内船闸泄水诱发的非恒定流传播规律与隧洞的平面形态、断面尺度及泄水曲线特征等因素相关，可结合具体工程特征开展进一步的研究。

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.
LI Y, ZHENG B Y, ZHOU H X. Test on scale of navigation tunnel and canal bridge in the intermediate channel between ship lifts of Goupitan Power Station[J]. Journal of waterway and harbor, 2012, 33(1): 45-50.

[2] 吴德兴, 周红升, 郭洪雨, 等. 富春江通航隧道建筑限界及内轮廓设计研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(11): 1182-1187.
WU D X, ZHOU H S, GUO H Y, et al. Study on design of cross-section of Fuchunjiang waterway tunnel[J]. Tunnel construction, 2015, 35(11): 1182-1187.

[3] 王能, 李明, 陈叶华, 等. 曲线形隧洞式引航道通航断面尺度研究[J]. 水运工程, 2025(2): 119-126.
WANG N, LI M, CHEN Y H, et al. Navigable section size of curved tunnel type of approach channel[J]. Port & waterway engineering, 2025(2): 119-126.

[4] 于广年, 王齐, 肖章玲, 等. 构皮滩通航隧洞尺度对船舶航行条件影响研究[J]. 水运工程, 2025(11): 79-86.
YU G N, WANG Q, XIAO Z L, et al. Impact of Goupitan navigation tunnel scale on ship navigation conditions[J]. Port & waterway engineering, 2025(11): 79-86.

[5] 钮新强, 吴俊东, 王小威. 基于目标优化的大型通航隧洞断面尺度研究[J]. 水利水运工程学报, 2021(3): 1-8.
NIU X Q, WU J D, WANG X W. Study on section size of large navigation tunnel based on objective optimization[J]. Hydro-science and engineering, 2021(3): 1-8.

[6] 汤建宏, 阚得静. 高坝通航建筑物通航隧洞断面经济性分析[J]. 水运工程, 2017(7): 141-144.
TANG J H, KAN D J. Economic analysis of navigable tunnel section of high dam[J]. Port & waterway engineering, 2017(7): 141-144.

[7] 卿正阳, 薛宏程, 陈明, 等. 通航隧洞内船舶通航数值模拟[J]. 水运工程, 2024(10): 63-68, 124.
QING Z Y, XUE H C, CHEN M, et al. Numerical simulation of ship navigation in navigation tunnels[J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 63-68, 124.

[8] 程弘宇, 张首元, 赵根生, 等. 通航隧洞船舶航行阻力试验研究[J]. 水运工程, 2023(9): 101-105, 125.
CHENG H Y, ZHANG S Y, ZHAO G S, et al. Test of sailing resistance of ship in navigable tunnel[J]. Port & waterway engineering, 2023(9): 101-105, 125.

[9] 程弘宇, 张首元, 郭超, 等. 通航隧洞内消波设施试验研究[J]. 水运工程, 2023(7): 146-150, 156.
CHENG H Y, ZHANG S Y, GUO C, et al. Experimental study on wave absorber in navigable tunnels[J]. Port & waterway engineering, 2023(7): 146-150, 156.

[10] 邓斌, 王孟飞, 蒋昌波, 等. 通航隧道内船行波传播特性及对船舶连续通航安全影响[J]. 科学通报, 2021, 66(9): 1101-1112.
DENG B, WANG M F, JIANG C B, et al. Propagation characteristics of ship waves in navigation tunnel and its influence on continuous navigation safety of ship[J]. Chinese science bulletin, 2021, 66(9): 1101-1112.

[11] PIANC. Guidelines for navigation in confined waterways[R]. Brussels: PIANC, 2017.

（本文编辑　赵娟）