



构皮滩通航隧洞尺度对船舶 航行条件影响研究*

于广年¹, 王 齐², 肖章玲¹, 吕 彪¹, 徐俊锋¹, 李少希¹

(1. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456; 2. 贵州省港航集团有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘要: 针对长距离通航隧洞限制性航道小断面系数、隧洞互通连接、船舶航行要素等影响隧洞通过能力提升的技术难题, 以构皮滩通航隧洞为研究对象, 采用资料分析、技术调研、水工物理模型及自航船模试验相结合的技术手段, 开展长距离通航隧洞内水流条件及船舶安全航行控制技术研究, 揭示通航隧洞尺度与船行波、船舶航行阻力、下沉量及船舶操纵性等相关要素的规律, 提出适用于乌江 1 000 吨级航道的隧洞尺度确定原则及主要设计参数, 并给出不同隧洞断面尺度船舶最大安全航速。结果表明, 相同主断面尺度隧洞, 通过隧洞互通, 船舶操纵性得到明显提升, 60 m 间距连通, 船舶最大安全航速可提升 15% 左右。

关键词: 通航隧洞; 断面尺度; 安全航速; 构皮滩

中图分类号: U64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0079-08

Impact of Goupitan navigation tunnel scale on ship navigation conditions

YU Guangnian¹, WANG Qi², XIAO Zhangling¹, LYU Biao¹, XU Junfeng¹, LI Shaoxi¹

(1. Tianjin Research Institute of Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China;

2. Guizhou Port and Channel Group Co., Ltd., Guiyang 550081, China)

Abstract: Long-distance navigation tunnels face critical technical challenges of affecting the improvement of the tunnel's passing capacity, such as small cross-sectional coefficients in confined channels, interconnection of tunnels and vessel navigation factors. We take the Goupitan navigation tunnel as the case study, and adopt an integrated methodology combining data analysis, technical research, hydro-physical model and self-propelled ship model test to systematically investigate flow conditions and safe navigation control technology for ships in long-distance navigation tunnels. We reveal the relationships among the scale of the tunnel and the rules of ship travelling wave, ship navigation resistance, sinking volume and ship maneuverability, further propose the principles and main design parameters to determine the scale of the 1,000-ton class tunnel suitable for the Wujiang River waterway, and provide the maximum safe velocity under different tunnel section scales. The results show that with the same main cross-section scale tunnels, ship maneuverability is significantly improved through the tunnel interconnections, and with 60 m spacing connectivity, the maximum safe ship velocity is increased by about 15%.

Keywords: navigation tunnel; section scale; safe speed; Goupitan

乌江是国家规划的“两横一纵两网十八支线”辅”出省水运主通道的骨干。目前, 乌江干流乌江内河高等级航道重要组成部分, 是贵州省“两主三渡电站以下已建构皮滩、思林、沙沱、彭水、银

收稿日期: 2025-02-13

*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费资助项目(TKS20240202); 贵州省科技重大专项(黔科合重大专项字[2018]3010)

作者简介: 于广年(1979—), 男, 硕士, 研究员, 从事港航工程研究。

盘及在建白马共 6 座梯级,其中构皮滩、思林、沙沱和彭水枢纽已建成一线 500 吨级升船机或船闸的通航建筑物,银盘已建一线 1 000 吨级船闸,白马枢纽一线 1 000 吨级船闸准备开工建设;构皮滩、思林、沙沱和彭水枢纽年设计通过能力分别为 300 万、400 万、420 万和 510 万 t。但随着乌江沿线货物运输需求快速增长,预计 2025 年 4 座枢纽年过坝运量分别为 802 万、866 万、962 万和 1 129 万 t,存在较大缺口,远不能满足沿线运输需求。为此,《贵州省“十四五”水运交通运输发展规划》^[1]提出了加快建设乌江航道提等扩能工程。

构皮滩水电站通航建筑物布置在枢纽左岸石棺材—野狼湾一线,采用三级垂直升船机方案,由于 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。构皮滩枢纽上游最高通航水位 630 m、下游最低通航水位 431 m,1 000 吨级通航建筑物采用三级布置方案,全线长度约 3.9 km。三级通航建筑物间采用中间渠道连接,因地势限制,中间渠道只能采用通航隧洞穿过山体,一、二级通航建筑物间渠道长度约 1.15 km,二、三级通航建筑物间渠道长度约 1.9 km,通航隧洞采用双洞单通。通航隧洞是一种特殊的限制性航道,目前已有学者^[2-5]针对通航隧洞设计与其内船舶航行安全开展了相关研究。钮新强等^[6]以通航隧洞断面系数和隧洞宽度为目标函数,基于设计通过能力和船舶临界航速,建立大型通航隧洞断面尺度目标优化数学模型;邓健等^[7]以思林二线通航隧洞为研究对象,通过船舶操纵仿真开展狭长通航隧洞航行安全研究,分析船舶在通航隧洞内不同阶段的航行特点与风险,提出适用于狭长隧洞通航船舶的航行方案;卿正阳等^[8]对通航隧洞内 1 000 吨级船舶的运动过程开展三维数值模拟,分析隧洞内水力特性的时空变化规律,讨论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;周彭雨等^[9]针对三峡和葛洲坝枢纽间的

石碑弯段,采用原型观测和三维数值模拟方法,分别开展隧洞引流和通航隧洞方案的研究;程弘宇等^[10]开展船模试验研究船舶在通航隧洞中航行阻力的变化规律,并针对大型船舶提出了航行阻力估算公式;徐国强等^[11]采用 Civil 3D 和 SAC 软件建立通航隧洞参数化模型,从建筑信息模型(built information modeling, BIM)技术的角度出发开展通航隧洞的参数化应用研究。上述研究大多通过数值仿真或理论分析研究通航隧洞尺度,尚无针对通过船舶在不同尺度隧洞中的航态分析优化隧洞尺度与隧洞通过能力的研究。

通航隧洞尺度设计尚无规范或标准可循,船舶在隧洞中对岸航速、下沉量和隧洞内的水位波动对船舶的航行安全和效率有重要影响。本文以构皮滩通航隧洞为研究对象,针对长距离通航隧洞限制性航道小断面系数、隧洞互通连接、船舶航行要素等影响隧洞通过能力提升的技术难题,采用大比尺隧洞通航整体物理模型结合自航船模试验,开展不同尺度、互通方式、船舶多因素耦合条件下的隧洞内水流条件及航行控制技术研究,分析构皮滩通航隧洞的合理尺度(包括双洞互通方式)和船舶安全航行条件,以确保船舶航行安全和升船机的通过能力。

1 模型设计

1.1 模型范围

本文研究的设计船型为 1 000 t 机动驳,其中散货船主尺度为 58 m×10.8 m×2.5 m(型长×型宽×吃水),集装箱船主尺度为 63 m×11 m×2.3 m(型长×型宽×吃水)。

考虑通航隧洞双洞互通方案水体总量平衡,模型模拟范围包括整个通航隧洞段及上、下游渡槽段,模型上游至一级升船机船厢出口,下游至二级升船机船厢入口,模拟长度约 1.36 km。

1.2 模型设计

根据试验目的、模型范围及试验场地条件,

初步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 $\lambda_H = 20$ 。通航隧洞原体渠道为混凝土建造, 糙率为 0.013, 换算至模型为 0.007 9, 为保障糙率相似, 模型底面及边墙打磨后涂刷地坪漆, 中间渠道内壁选择表面光滑的塑料板制作, 其糙率 n 为 0.007~0.009, 满足试验要求。通航隧洞模型见图 1。



图 1 通航隧洞模型

Fig. 1 Navigation tunnel model

2 不互通隧洞试验

2.1 航速率定试验

船舶在限制性航道中运动, 水流受边界条件的影响产生阻塞效应, 在船舶前后形成水位差, 船周形成回流, 船舶对岸航速减小, 为研究设计代表船型在不同隧洞断面系数下对岸航速变化, 首先进行开阔水域船模航速率定试验, 得到船模在开阔水域中航速与主机功率百分比之间的关系, 见图 2。

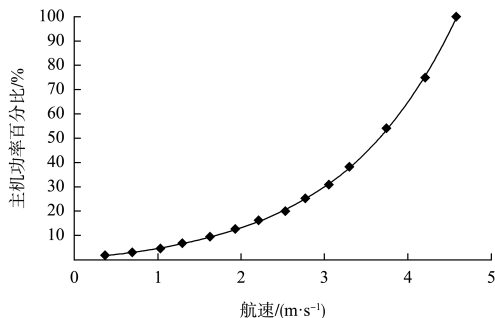


图 2 航速与主机功率百分比关系

Fig. 2 Relationship between velocity and percentage of main engine power

2.2 试验工况

不互通隧洞系列试验工况见表 1。

表 1 不互通隧洞试验工况

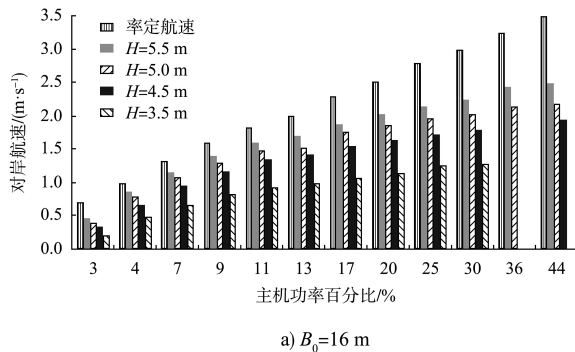
Tab. 1 Test conditions of non-interconnection tunnels

工况	渠道宽 B_0/m	水深 H/m	过水断面面积 A/m^2	断面系数 A/ω	相对水深 H/T	相对航宽 B_0/B_s
1-1	16	3.5	56	2.21	1.40	1.48
1-2		4.5	72	2.84	1.80	1.48
1-3		5.0	80	3.15	2.00	1.48
1-4		5.5	88	3.47	2.20	1.48
1-5	14	4.5	63	2.48	1.80	1.30
1-6		5.5	77	3.04	2.20	1.30
1-7		6.3	88	3.47	2.52	1.30

注: ω 为 1 000 t 机动驳的舢横剖面浸水面积, 为 25.37 m^2 ; T 为吃水; B_s 为型宽。

2.3 船模对岸航速变化

以船模在开阔水域航速 0.7、1.0、1.3、1.6、1.8、2.0、2.3、2.5、2.8、3.0、3.2、3.5、4.0、4.5 m/s 共 14 级航速航行时的主机功率, 分别进行隧洞航行试验, 分析不同航道水深情况下船模对岸航速变化, 结果见图 3~5。可以看出: 1) $H=5.5 \text{ m}$ 时, 航速比 v/v_0 降低了 15%~40%; $H=5.0 \text{ m}$ 时, 航速比 v/v_0 降低了 15%~40%; $H=4.5 \text{ m}$ 时, 航速比 v/v_0 降低了 25%~45%; $H=3.5 \text{ m}$ 时, 航速比 v/v_0 降低了 50%~60%。2) 断面系数不变, 随率定航速增加, 航速比呈减小趋势, 说明随航速增加, 隧洞内船舶阻力增加加速度大于开阔水域, 且随着断面系数的减小, 船舶阻力加速度加大。3) 相同功率条件下, 断面系数与对岸航速的关系不是单一对应关系。



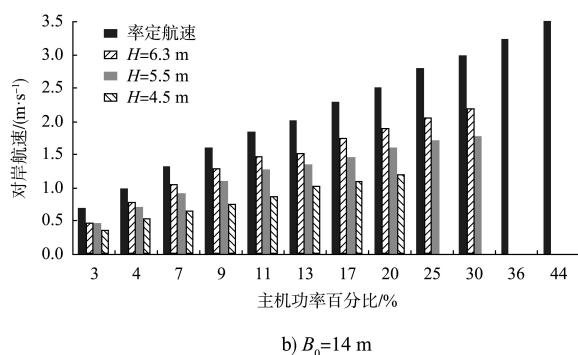
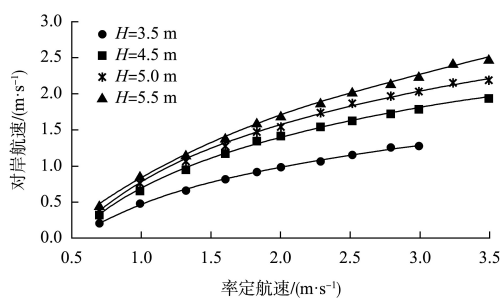
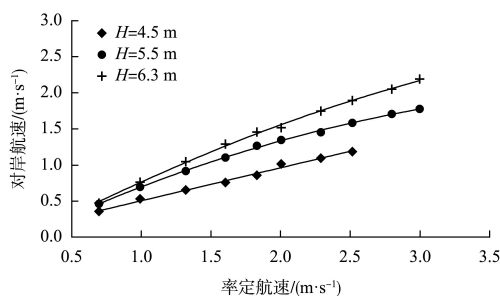
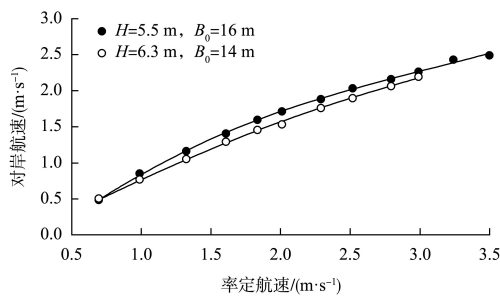


图3 不同水深时对岸航速变化

Fig. 3 Variation in relative velocity to shore at different water depths

a) $B_0=16$ mb) $B_0=14$ m

c) 隧道断面系数相同

图4 不同水深对岸航速与率定航速关系

Fig. 4 Relationship of relative velocity to shore to rate velocity at different water depths

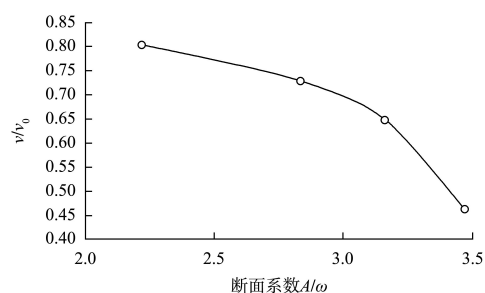
注: v 为对岸航速, v_0 为静水航速。

图5 断面系数与航速比(不同主机功率平均值)关系

Fig. 5 Relationship between section factor and speed ratio (average of different main engine powers)

2.4 船舶下沉量

不同断面系数时, 对岸航速与船尾最大下沉量关系见图6, 主机功率百分比与船尾最大下沉量关系见图7。可以看出: 1) 相同对岸航速情况下, 断面系数减小, 船尾下沉量增加。2) 相同断面系数, 随航速增加, 船尾下沉量增加。3) 对岸航速与船尾下沉量比值呈指数关系, 说明随航速增加, 船尾下沉剧烈程度增加。4) 船尾下沉量与主机功率呈线性关系, 随主机功率增加, 船尾下沉量线性增加; 相同主机功率, 同宽条件下, 船尾下沉量相差不大; 相同断面系数, 不同隧洞宽度条件下, 船尾下沉量与主机功率呈不同的线性关系。

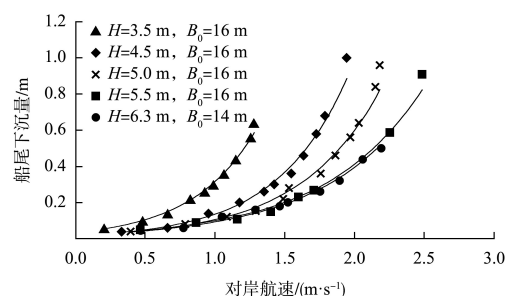


图6 对岸航速与船尾下沉量关系

Fig. 6 Relationship between relative velocity to shore and amount of sinking of stern

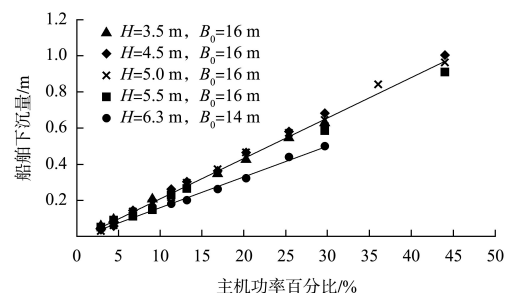


图7 主机功率百分比与船尾下沉量关系

Fig. 7 Relationship between percentage main engine power and amount of sinking of stern

2.5 船舶操纵性

船舶在无限水域中航行产生的船行波通常由艏波系和艉波系组成,而无论艏或艉波系,都是由两组明显的散波和横波组成,其中艏、艉散波呈斜向扩散,横波则垂直船体轴线延伸,散波和横波交汇,波面叠加;而在狭窄渠道中航速,船行波受两侧边壁影响较大,船舶在较低的航速下,产生明显的船行波,而其散波受渠道边壁影响,极易在整个船周围产生小的系列横波。

从船舶操纵试验观测到,不同断面系数情况下,船舶在达到一定航速时,船尾发生明显摆动现象,船舶操纵难度明显加大,需要频繁用舵控制船位,船舶安全性明显降低。16 和 14 m 渠道宽度时,船艉发生摆动现象时对岸航速见表 2。

表 2 船尾发生横向摆动现象时对岸航速
Tab. 2 Relative velocity to shore for phenomenon of transverse swaying of stern

渠道宽 B_0/m	水深 H/m	断面系数 A/ω	对岸航速 $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
16	3.5	2.21	0.80
	4.5	2.84	1.50
	5.0	3.15	1.80
	5.5	3.47	2.00
14	4.5	2.48	0.80
	5.5	3.04	1.25
	6.3	3.47	1.70

根据以上阶段性试验成果,为保障船舶安全,16 m 宽渠道, $H=4.5\text{ m}$ 时,船舶最大对岸航速应控制在 1.3 m/s ; $H=5.0\text{ m}$ 时,船舶最大对岸航速不宜超过 1.5 m/s ; $H=5.5\text{ m}$ 时,船舶最大对岸航速不宜超过 1.7 m/s 。14 m 宽渠道, $H=4.5\text{ m}$ 时,船舶最大对岸航速不宜超过 0.6 m/s ; $H=5.5\text{ m}$ 时,船舶最大对岸航速不宜超过 1.1 m/s ; $H=6.3\text{ m}$ 时,船舶最大对岸航速不宜超过 1.4 m/s 。

2.6 船舶航行产生的水位波动

模型沿程共布置 29 个波高观测点,用波高仪观测记录船舶在通航隧洞中航行产生的船行波。以船模对岸航速 0.5 、 0.8 、 1.0 、 1.5 、 2.0 m/s 分别进行隧洞航行试验,根据之前的试验结果,选择在 16 m 宽渠道条件下进行。单船试验结果表明:1) 断面系数不变,随船舶对岸航速增加,各

测点波高值变化幅度呈增加趋势。2) 船舶经过测点位置时,隧洞内测点波高值呈先升后降再恢复的过程,波高值下降幅度大于上升幅度;随船舶对岸航速增加,该现象越明显。3) 船舶由闸门通过过渡段进入隧洞直线段时,需要缓慢行驶,调直船身后进入隧洞直线段再加速至控制速度;隧洞内行驶时,根据观测,距船舶尾部后 $20\sim 35\text{ m}$ 处出现水位最低值,水位最低值恢复至正常水位需时约 10 s ,船舶行驶对于船舶后面水位下降的影响距离约 50 m 。

根据之前的试验成果,选择在 16 m 宽渠道 4.5 m 水深情况下,双船以对岸航速 1.5 m/s 分别进行 50 、 75 、 100 m 间距的单向航行试验,结果表明:1) 双船间距不小于 50 m 条件下,各测点波高值变化与单船试验基本一致。2) 双船不同间距时,后船前后倾角随间距增加而趋平, 50 m 间距下后船倾角值约 -2.7° ; 75 m 间距下后船倾角值约 -1.5° ; 100 m 间距下后船倾角值约 -1.1° 。后船左右倾角与双船距离无关,与自身控制相关,左右倾角在 $-0.5^\circ\sim 0.5^\circ$ 。3) 船舶紧急制动刹车随刹车倒挡的功率增加,刹车距离逐渐减小,最大刹车距离为 200 m 。

3 互通隧洞试验

3.1 试验工况

互通隧洞系列试验工况见表 3。

表 3 互通隧洞试验工况
Tab. 3 Interconnecting tunnel test conditions

工况	渠道宽 B_0/m	水深 H/m	连通洞 间距 L/m	断面系数 A/ω	相对水深 H/T	相对航宽 B_0/B_s
2-1	16	4.5	60	2.84	1.8	1.48
2-2			120	2.84	1.8	1.48
2-3	14	4.5	60	2.48	1.8	1.30
2-4			120	2.48	1.8	1.30
2-5		5.5	60	3.04	2.2	1.30
2-6			120	3.04	2.2	1.30

3.2 船模对岸航速变化

以船模在开阔水域航速 0.7 、 1.0 、 1.3 、 1.6 、 1.8 、 2.0 、 2.3 、 2.5 、 2.8 、 3.0 、 3.2 、 3.5 、 4.0 、 4.5 m/s 共 14 级航速航行时的主机功率,分别进

行不同间距的隧洞互通航行试验, 将试验结果与不互通航行试验结果对比, 见图 8。可以看出: 1) 相同率定航速条件下, 因连通洞处断面系数增加, 总体表现为船舶隧洞内的对岸航速与不连通相比有所增加。连通洞间距越小, 则对岸航速增加值越大, 60 m 间距连通对岸航速增加值明显大于 120 m 连通。16 m 宽 4.5 m 水深隧洞内, 120 m 连通对岸航速最大增加仅 3.3%, 而 60 m 连通对岸航速最大增加 24.7%。2) 相同宽度条件下, 水深越大, 连通洞对对岸航速增加影响越小。60 m 连通条件下, 14 m 宽、4.5 m 水深隧洞内, 对岸航速最大增加 15.2%; 14 m 宽、5.5 m 水深隧洞内, 对岸航速最大增加 5.3%。

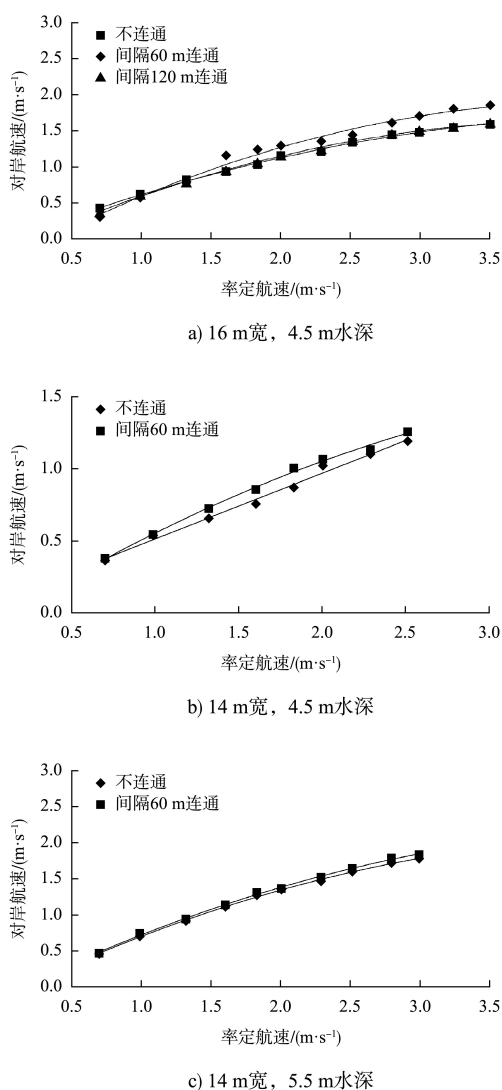
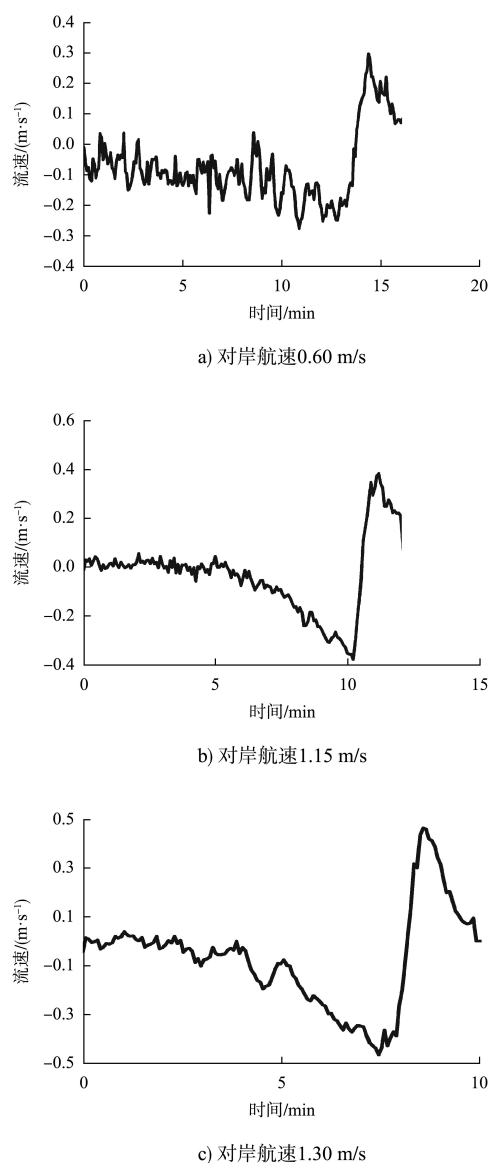


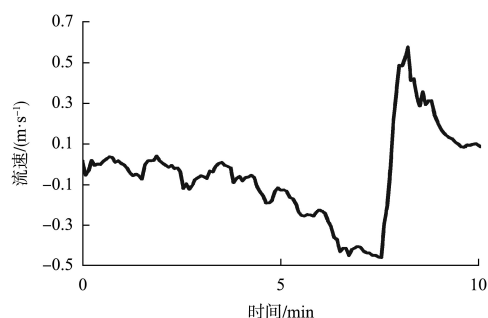
图 8 连通洞不同间距下对岸航速对比

Fig. 8 Comparison of relative velocity to shore at different spacing of connecting holes

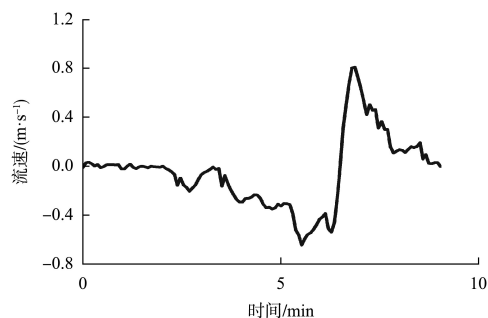
3.3 连通洞内流速变化

船模在 16 m 宽、4.5 m 水深条件下, 分别进行对岸航速的隧洞互通航行试验, 观测连通洞流速变化过程见图 9。结果表明: 1) 船舶在一侧行驶时还未到达连通洞位置时, 船头顶推前方水面, 水位升高, 连通洞内水流从船侧流入另一侧, 船舶距离连通洞位置距离越近, 流速值越大; 船舶在驶离连通洞位置后, 船尾后面水位下降, 连通洞内水流从另一侧迅速流入船侧。2) 连通洞内流速峰值呈船侧流入另一侧小于另一侧流入船侧, 连通洞内水流从船侧流入另一侧持续时间大于从另一侧流入船侧时间。3) 从双船异道对开试验观测到, 连通洞内水流运动对双船对开操纵性没有明显影响。

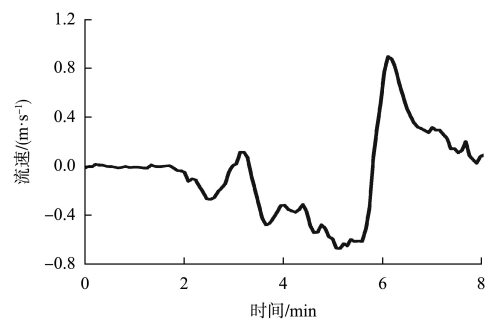




d) 对岸航速 1.45 m/s



e) 对岸航速 1.70 m/s



f) 对岸航速 1.85 m/s

图 9 16 m 宽、4.5 m 水深时连通洞流速变化过程

Fig. 9 Processes of flow velocity change in connecting hole when 16 m width and 4.5 m water depth

3.4 船舶操纵性

从船舶操纵试验观测到, 连通洞不同间距情况下, 船舶在达到一定航速时, 船尾发生明显摆动现象, 船舶操纵难度明显加大, 需要频繁用舵控制船位, 船舶安全性明显降低。本文研究连通洞不同间距情况下, 船尾发生摆动现象时对岸航速, 结果见表 4。根据以上阶段性试验结果, 为保

障船舶安全, 16 m 宽渠道, $H=4.5$ m 时, 60 m 间距连通, 船舶最大对岸航速不宜超过 1.5 m/s; 120 m 间距连通, 船舶最大对岸航速不宜超过 1.3 m/s。14 m 宽渠道, $H=4.5$ m 时, 60 m 间距连通, 船舶最大对岸航速不宜超过 0.8 m/s; 120 m 间距连通, 船舶最大对岸航速不宜超过 0.6 m/s。14 m 宽渠道, $H=5.5$ m 时, 60 m 间距连通, 船舶最大对岸航速不宜超过 1.3 m/s; 120 m 间距连通, 船舶最大对岸航速不宜超过 1.1 m/s。

表 4 船尾发生横向摆动现象时对岸航速

Tab. 4 Relative velocity to shore for phenomenon of lateral swaying of stern

渠道宽 B_0 /m	水深 H /m	连通洞间距/m	对岸航速 $v/(m \cdot s^{-1})$
16	4.5	60	1.65
		120	1.55
14	4.5	60	1.05
		120	0.85
	5.5	60	1.60
		120	1.25

4 结语

1) 断面系数不变情况下, 随船舶航速增加, 船舶阻力增加, 船尾下沉量增大, 当航速增加至某个值时, 船尾会发生横向摆动, 船舶操纵性明显降低, 因此, 为保障隧洞内船舶通航安全, 通航隧洞断面系数建议不小于 3, 船舶对岸航速在 1.5~1.8 m/s。

2) 上下行隧洞连通后, 船舶上游壅水可通过连通洞流入对向隧洞, 从而降低船舶上游壅水, 减小船舶阻力, 提高隧洞内船舶对岸航速及操纵性, 因此, 双隧洞互通对不增加隧洞断面面积而提高船舶隧洞内安全航速是较为有效的, 连通洞最佳间距建议取船舶长度。

3) 研究成果可为国内构皮滩、沙沱、思林通航隧洞的工程设计提供重要技术参考。

参考文献:

- [1] 贵州省交通运输厅. 贵州省“十四五”水运交通运输发展规划[A]. 贵阳: 贵州省交通运输厅, 2022.
- Department of Transportation of Guizhou Province. “14th Five-Year Plan” for water transport development of Guizhou Province [A]. Guiyang: Guizhou Provincial Department of Transportation, 2022.
- [2] 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.
- [3] 干伟东, 邓健, 李延伟. 通航隧洞内船舶安全间距模型[J]. 安全与环境学报, 2021, 21(3): 1124-1129.
- GAN W D, DENG J, LI Y W. Practical trace and examination of the safety intermediate distance between and among the sailing ships in the navigational tunnel[J]. Journal of safety and environment, 2021, 21 (3): 1124-1129.
- [4] 谢颖涵, 汪亚超, 吴经干, 等. 构皮滩水电站通航建筑物第一级中间渠道布置与设计优化[J]. 水利水电快报, 2023, 44(9): 62-67.
- DENG Y H, WANG Y C, WU J G, et al. Layout and design optimization of first intermediate channel of navigation construction of Goupitan hydropower station [J]. Express water resources & hydropower information, 2023, 44(9): 62-67.
- [5] 王齐, 吴俊, 王伟, 等. 大型通航隧洞建设发展现状分析与拖曳通航演进趋势[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2024, 43(9): 34-42.
- WANG Q, WU J, WANG W, et al. Current situation of development of large-scale navigation tunnels and evolution trend of towing navigation [J]. Journal of ChongqingJiaotong University (natural science), 2024, 43(9): 34-42.
- [6] 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.
- [7] 邓健, 廖芳达, 谢澄, 等. 船舶操纵仿真的狭长通航隧洞航行安全研究[J]. 中国航海, 2021, 44(4): 7-12.
- DENG J, LIAO F D, XIE C, et al. Ship handling simulation in research on safety of navigation in narrow and long tunnel [J]. Navigation of China, 2021, 44 (4): 7-12.
- [8] 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.
- [9] 周彭雨, 马倩, 薛宏程, 等. 深水库区急弯段航道通航能力提升方案[J]. 水运工程, 2024(2): 94-100, 106.
- ZHOU P Y, MA Q, XUE H C, et al. Improvement measures for navigation capacity of bend waterway in deep reservoir [J]. Port & waterway engineering, 2024 (2): 94-100, 106.
- [10] 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.
- [11] 徐国强, 左邦祥, 蔡国辉, 等. 基于 Civil 3D 和 SAC 的通航隧洞参数化应用研究[J]. 中国水运(下半月), 2022, 22(12): 66-69, 71.
- XU G Q, ZUO B X, CAI G H, et al. Parametric application study of navigable tunnels based on Civil 3D and SAC [J]. China water transport (the second half of the month), 2022, 22(12): 66-69, 71.

(本文编辑 王璁)