



曲线形隧洞式引航道通航断面尺度研究

王能¹, 李明¹, 陈叶华¹, 乾东岳², 章日红², 普晓刚²

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南长沙 410200;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 当船闸与通航隧洞相连并直接从隧洞取水时, 隧洞内将产生十分显著的非恒定水流, 对船舶的安全航行影响较大。针对此种布置情况, 提出船闸隧洞式引航道的概念, 并依托贵州清水江白市水电站枢纽新建船闸工程, 采用1:36正态整体水工模型与遥控自航船模相结合的技术手段, 对多种断面尺度的隧洞式引航道在船闸灌泄水时的通航水流条件以及船舶航行参数进行试验研究, 提出安全、经济的通航隧洞断面尺度及隧洞内船舶航行参数。结果表明, 隧洞内船舶安全通航以水流流速不大于0.5 m/s、水位波动不大于0.5 m、船舶舵角不超过25°为判别标准; 白市船闸通航隧洞推荐净宽为22 m。

关键词: 隧洞式引航道; 非恒定水流; 断面尺度; 水工模型; 自航船模; 弯曲

中图分类号: U641.2+11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)02-0119-08

Navigable section size of curved tunnel type of approach channel

WANG Neng¹, LI Ming¹, CHEN Yehua¹, QIAN Dongyue², ZHANG Rihong², PU Xiaogang²

(1. Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., Changsha 410200, China;

2. Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: When the ship lock is connected to the navigation tunnel and directly draws water from the tunnel, a significant unsteady current will be generated in the tunnel, which will greatly affect the safe navigation of ships. In view of this arrangement, we propose a concept of ship lock tunnel type of approach channel. Relying on the newly built ship lock project of the Baishi hydropower station in Qingshuijiang, Guizhou, we use a 1:36 normal overall hydraulic model and a combination of remote-controlled self-sailing ship models to study the navigation flow conditions and ship navigation parameters of the tunnel type of approach channel of various cross-section scales when the ship lock is filled and emptied with water, and propose the safe and economical cross-sectional dimensions of the navigation tunnel and the ship navigation parameters in the tunnel. The results show that the safety of ship navigation in the tunnel is determined by a flow velocity of no more than 0.5 m/s, a water level fluct of no more than 0.5 m, and a rudder angle of no more than 25°. The recommended clear width of the Baishi ship lock navigation tunnel is 22 m.

Keywords: tunnel type of approach channel; unsteady current; section size; hydraulic model; self-propelled ship model; curved

20世纪80年代起, 应国内经济大发展需求, 国内兴起水电开发。在上游河段水电开发中, 因缺乏水资源综合利用的理念, 不少河流水电开发过程中忽略了通航建筑物的建设。随着近年来航

运发展需求, 该类枢纽的通航设施纷纷进行扩能升级, 因受上游河段两侧高山地形和河道限制, 此时紧挨枢纽两岸布置通航建筑物具有一定的局限性, 需要在相对远离枢纽位置重新开辟航道建

收稿日期: 2024-04-12

作者简介: 王能 (1985—), 男, 高级工程师, 从事水运工程设计。

设通航建筑物, 而选择航道穿越高山峦岭, 此时为减少开挖和环境破坏, 采用开凿通航建筑物的方式进行地下通航, 该通航建筑物即为通航隧洞^[1]。通航隧洞大多采用直线形, 隧洞两端有引航道与主航道相连, 引航道中设有导航建筑物及靠船建筑物, 船舶在航行过程中, 其航行状态的好坏取决于水流条件, 口门区通航水流条件是船舶通航安全论证的重点内容^[2], 但其通航标准尚未统一。一般地, 隧洞断面尺度与船舶航速、航行阻力、船尾下沉等船舶特性具有高度相关性^[3]。

目前国内外针对曲线形通航隧洞的研究较少, 一方面是由于在枢纽布置时, 充分利用现有河道条件, 将通航建筑物贴岸布置, 利用隧洞通航的案例很少; 另一方面是隧洞通航需要满足水下断面形状要求、水上部分净空要求和隧道通航安全保障措施要求, 而弯曲形河道其本身水流条件就差, 两者叠加, 加剧了曲线形通航隧洞通航安全风险。王犹扬等^[4]提出隧洞布置方案, 对枢纽布置进行一系列的优化调整; 李焱等^[5]采用水工物理模型及船模试验, 对构皮滩第一级中间渠道内的航行水力条件、单线通航隧洞和渡槽的尺度进行研究, 并提出合理的通航隧洞尺度; 吴德兴等^[6]以富春江七里泷航道通航隧道工程为依托, 提出适合IV级单线航道的通航隧道断面, 并对其隧洞轮廓进行优化设计; 钮新强等^[7]通过建立大型通航隧洞断面尺度目标优化数学模型, 对构皮滩通航隧洞断面尺度进行深度分析, 得出大型通航隧洞断面尺度优化问题的最优解。现有研究成果多集中于直线隧洞断面形式选择, 未考虑曲线布置对船舶航行安全的影响。同时国内大多数引航道考虑船舶低速域操纵性较差, 多采用直线形布置。在空间受限时, 可在局部调整引航道轴线, 形成折线形引航道或曲线形引航道, 为保障引航道通航安全, 轴线转弯段需要局部加宽。而通航隧洞断面尺度随有效宽度的增加, 工程造价成倍增加。调整引航道布置方案同时满足穿越山体、

引航道功能性设计以及保障隧洞内船舶航行安全是曲线形隧洞式引航道的主要难点。总体而言, 目前国内外对大断面通航隧洞尺度及在其中航行的船舶航行参数尚无可参照的标准规范, 在曲线形隧洞式引航道适航条件研究方向上处于空白阶段。

因此, 本文依托清水江白市枢纽船闸工程上游轴线布置、口门区条件^[8]和引航道通航系统, 通过物理模型试验, 分析不同通航隧洞尺度与灌水非恒定流相互响应的特征及规律, 提出安全、经济的通航隧洞断面尺度及隧洞内船舶航行参数, 可为其他类似工程设计提供参考。

1 工程概况与设计方案的

1.1 工程概况

白市水电站是清水江贵州省境内最后一个梯级, 位于贵州省黔东南州天柱县境内, 是一个以发电为主, 兼有防洪、航运、水产养殖等综合利用效益的工程。其现有通航建筑物为50 t垂直升船机, 按50吨级船舶过坝设计, 远不满足国家规划的通航500吨级船舶的标准, 且白市—水溪河段34 km航道现状为VI级。根据白市目前货运量增长情况及远期预测货物运量需求, 为提高通航建筑物至IV级(500吨级)标准, 避免大范围的岩石高边坡开挖, 船闸上游引航道中间高山段采用隧洞通航方式连通上下游停泊段, 利用右岸冲沟地形布置船闸, 既结合通航隧洞形式避免大范围的岩石高边坡开挖, 又保证了通航安全性。

1.2 设计方案

白市船闸通航设计代表船型为500 t货船, 船长55 m、宽10.8 m、设计吃水1.6 m, 船闸上、下引航道设计方案平面布置采用不对称形式, 船舶采用曲线进闸、直线出闸方式过闸^[9]。从上至下依次布置为上游曲线形明渠连接段(半径 $R=500$ m、长 $L=650$ m)、隧洞上游直线形明渠连接段($L=75$ m)、曲线形通航隧洞段($R=800$ m、 $L=550$ m)、隧洞下游直线形明渠连接段($L=135$ m)、上游停泊段

($L=142\text{ m}$)、上游导航调顺段($L=130\text{ m}$)、船闸主体段($L=250\text{ m}$)、下游导航调顺段($L=130\text{ m}$)、下游停泊段($L=142\text{ m}$)、下游连接段, 总长 $2\,496\text{ m}$ 。上下游停泊段满足停靠 1 闸次 2 艘船舶。船闸采取省水船闸形式, 在闸室右侧单侧布置三级省水池, 各级省水池面积与闸室水域面积相等, 见图 1。

通航隧洞按单线通航设计, 平面为弧形布置, 弧长 550 m 、半径 800 m ; 采用曲墙式断面形式, 隧洞通航净宽 22 m 、通航净高 8 m 、通航水深 4.0 m 。隧洞开挖最大宽度达 28 m , 最大高度 25 m , 隧洞内航道有效底高程 290 m 。通航隧洞设计方案见图 2。

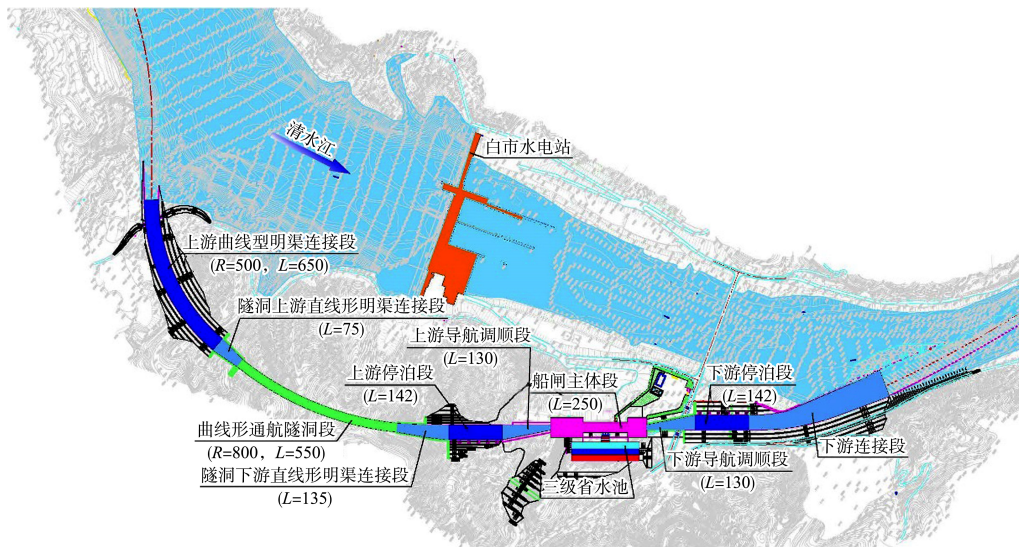


图 1 白市船闸布置 (单位: m)
Fig. 1 Layout of Baishi ship lock (unit: m)

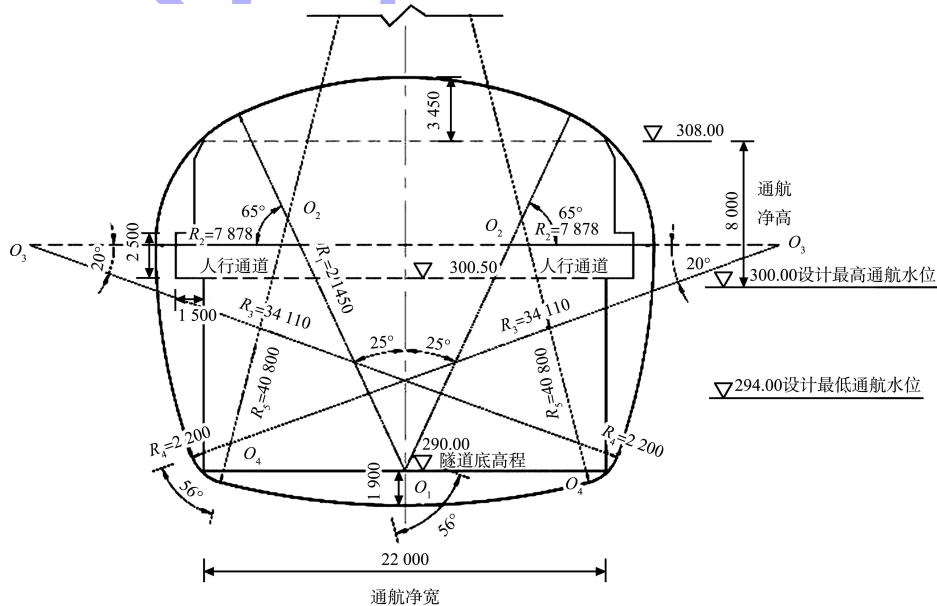


图 2 白市船闸通航隧洞设计方案 (尺寸: mm; 高程: m)
Fig. 2 Design scheme for navigation tunnel of Baishi ship lock (size: mm; elevation: m)

2 模型设计与验证

船闸曲线形隧洞式引航道设计参数与通航水流条件、船舶尺度、船舶航速等因素相互关联与制约，且隧洞段工程投资对隧洞断面尺度极为敏感，属于复杂的多目标优化问题。为研究船闸曲线形隧洞式引航道内船舶、水流与隧洞设计参数的互馈机理，依托贵州清水江白市水电站枢纽新建船闸工程，采用 1:36 正态整体水工模型与遥控自航船模相结合的技术手段，开展模型试验研究^[10]。主要研究内容包括：隧洞式引航道内船闸灌水诱发的非恒定波流传播特性与规律；隧洞内非恒定波流运动作用下的通航水流条件；断面尺度与隧洞内通航水流条件的响应规律，以及非恒定波流运动环境下曲线隧洞内船舶航行条件；提出安全、经济的通航隧洞断面尺度及隧洞内船舶航行参数。

根据白市上下游河道走势、地形条件等特点，通航隧洞物理模型上游模拟至上游引航道出口外 50 m，下游模拟至船闸主体下游段。模拟河段最宽处约 320 m，平均宽度约 80 m，长度约 2 000 m。模型采用 1:36 的几何比尺，满足几何相似和重力相似条件，其运动速度及时间也应与实船相似。模型采取直导线的导线网控制，采用全站仪精密放样，平面精度控制在 1 cm 内，闸室及输水廊道采用聚氯乙烯 (PVC) 塑料板制作，上游导航段采用水泥砂浆制作，通航隧洞以模型 0.5 m 间距布置，采用内衬垂直断面+底部曲线形断面及弧形刮板控制隧洞特殊的断面形态表面涂刷清漆，以满足隧洞形态精度及糙率要求。根据研究内容，模型沿程共布置 27 个波高观测点、8 个流速观测点，物理模型及采样点布置见图 3、4。



图 3 隧洞式引航道 1:36 物理模型
Fig. 3 1:36 physical model of tunnel type of approach channel

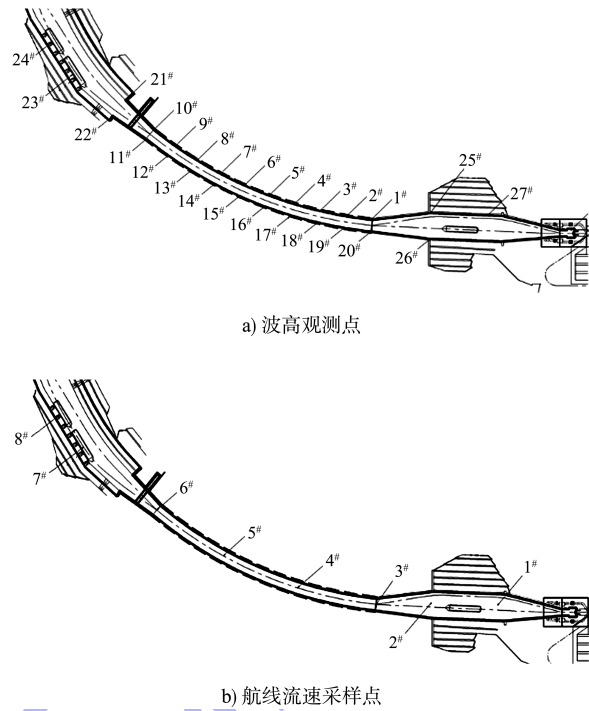


图 4 采样点布置
Fig. 4 Sampling point layout

船模制作完成后，对船模静水性能和运动性能进行校准。船模与实船在静水中的排水量、吃水及平面重心位置达到相似要求。在保证船模直航稳定的前提下，调整螺旋桨的转速，率定 0.6、0.8、1.2、1.5、1.8 和 2.0 m/s 6 档静水航速，使船模的航速与实船相似。根据 JTS/T 231—2021 《水运工程模拟技术规范》^[11] 要求，为减小尺度效应对通航船模操纵性的影响，一般采用减小舵面积的方法予以修正。目前常用的内河通航船模的舵面积须减小为原舵面积的 60%~80%，本工程减小为 75%，并选取类似尺度实船操纵性数据为基准，开展船模操纵性能率定试验，微调舵面积达到修正尺度效应的效果，修正后的船模与同类型实船操纵性能基本一致。

3 试验工况及通航判别标准

3.1 试验工况

根据设计，白市船闸上游最高通航水位 300 m，最低通航水位 294 m；下游最高通航水位 251.44 m，下游最低通航水位 240.4 m。经静水条件下的船模航行试验，初步了解到船模通过曲线形隧洞均需

要较大的舵角。对于隧洞弯道形态,以最大舵角不超过 25° 判断船舶操控难易度较为合理。另外,在上、下游引航道均为最低通航水位时的灌水过程中,隧洞断面系数小,隧洞内水流条件及船舶航行条件最差,此为决定隧洞断面尺度及船舶安全航行的控制性工况。

根据船闸运行组织调度流程,船舶航行主要考虑灌水波影响的情况。对于有灌水波影响的船舶航行情况分为船舶出闸上行和船舶下行进闸;由于船舶出闸上行至上停泊段后,下行进闸船舶才可解缆航行进入隧洞,此时距船闸灌水结束的时间较长,下行船舶的航行水流条件比船舶出闸上行更优,因此非恒定流条件下隧洞内船舶航行条件研究以船舶出闸上行通过隧洞为主。

针对曲线形隧洞式引航道通航断面尺度对通航条件的影响问题,结合不同的船舶航行速度,针对22、20和18 m共3种不同的隧洞净宽尺度,共开展4组次共9个工况的研究,工况组合设计见表1。

表1 工况设计
Tab. 1 Operating condition design

组次	初始水位/ m	静水航速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	隧洞净宽/ m	隧洞有效底高程/ m	其他条件
1	294	0.8、1.2、1.5	22	289	灌水,船舶上行
2	294	0.8、1.0、1.2	20	289	灌水,船舶上行
3	294	0.6、0.8、1.0	18	289	灌水,船舶上行

3.2 通航判别标准

对于船闸引航道内通航水流流速标准, JTJ 306—2001《船闸输水系统设计规范》^[12]提出船闸灌泄水时,上游引航道最大纵向流速应不大于 $0.5\sim 0.8\text{ m/s}$;对于引航道内灌水引起的波高标准, JTS 196-6—2012《三峡船闸通航调度技术规程》^[13]规定船闸引航道口门区涌浪高度不大于 0.5 m ;对于引航道内船舶航行标准,“七五”期间三峡船闸引航道口门区的通航条件研究成果对口门区船舶航行状态进行判断,即舵角应小于 20° ,漂角应小于 10° ,且不能长时间用大舵角^[14-15]。

综上,本工程隧洞式引航道为平面弯曲布置,断面系数小,船舶进出闸航速较小,舵效相对较差,船舶安全通航判别标准宜定为水流流速不大于 0.5 m/s 、涌浪波高不大于 0.5 m 、船舶舵角最大不超过 25° 。

4 研究结果

4.1 水流流速分析

灌水结束后不同净宽隧洞内沿程最大流速见图5。由图可知:1) 船闸灌水结束后,隧洞内存在往复型非恒定流;2) 隧洞内最大流速值呈现自下游向上游逐渐增大的趋势,隧洞上游最大流速可达 0.60 m/s 以上;3) 隧洞有效宽度越大,灌水结束后隧洞内沿程水流流速越小;4) 3种净宽尺度隧洞内沿程最大流速大都超过 0.50 m/s ,水流条件较差,船舶不宜立即进入隧洞航行。

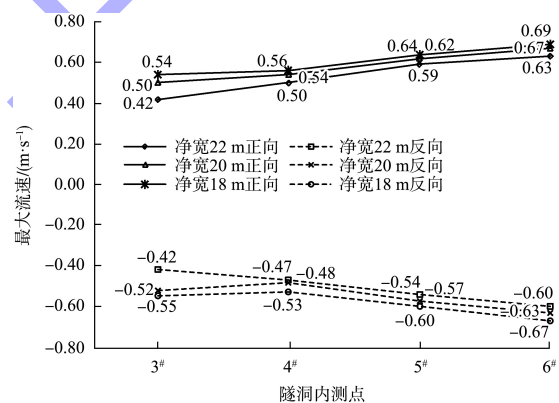


图5 灌水结束后隧洞内沿程最大流速
Fig. 5 Maximum flow velocity along tunnel after water filling

4.2 涌浪波高分析

灌水结束后不同净宽隧洞内沿程最大波高见图6。由图可知:1) 船闸灌水结束后,隧洞内水位波动幅度自下游至上游呈现逐渐减小的趋势,负向波动大于正向波动;2) 隧洞有效宽度越大,灌水结束后隧洞内沿程涌浪波高越小;3) 隧洞净宽减小后,灌水结束后最大水位波动有较大幅度的增加,18 m净宽负向波高达到 -0.69 m ,较22 m净宽增加 0.14 m 。

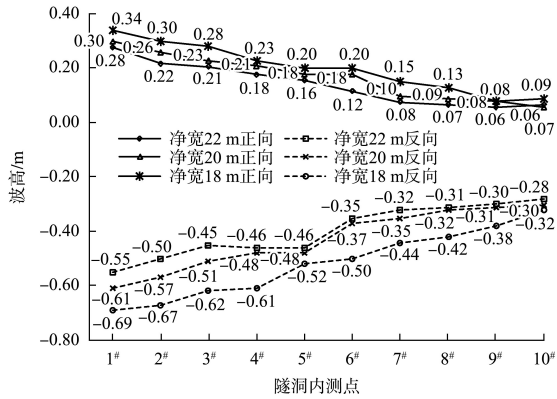


图6 灌水结束后隧洞内沿程最大波高

Fig. 6 Maximum wave height along tunnel after water filling

4.3 船舶航行条件分析

净宽 22 m 隧洞内船舶不同航速条件下沿程最大舵角见图 7。由图可知：1) 当船舶以 1.2、1.5 m/s 静水航速航行时，舵角基本在 25.0° 以内，船舶航态较好；2) 以 0.8 m/s 静水航速航行时，航行舵角较大，船舶操控较为困难，通航效率较低且存在安全风险。

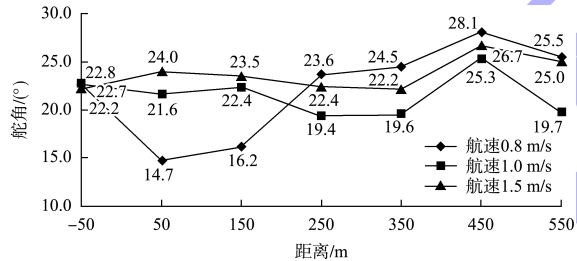


图7 22 m 净宽时隧洞内船舶不同航速下的舵角变化
Fig. 7 Rudder angle variation of ships in tunnels at different speeds when net width is 22 m

净宽 20 m 隧洞内船舶不同航速条件下沿程最大舵角变化见图 8，航行参数见表 2。由图表可知：1) 受通航隧洞宽度变窄影响，在非恒定流情况下，隧洞内水流流速增大，船舶受非恒定流影响加大。当船舶以 0.8 m/s 静水航速航行时，船舶通过隧洞时对岸航速最小时仅为 0.45 m/s，航行时调整航态所需舵角最大为 33.06°，船舷距隧洞边壁最小距离不足 0.5 m。2) 当静水航速提高至 1.0 m/s 时，船舶航行时最小航速 0.5 m/s，航行时调整航态所需舵角最大时为 35.50°，船舷离隧洞边壁最小距离约为 0.8 m。试验中当船舶航速控制在 0.8~1.0 m/s 通过隧洞时，航行最大舵角均大于 30.00°，且船舷距隧洞边壁距离较近，船舶航行风险较大。3) 当船舶以 1.2 m/s 静水航速通过隧洞时，船模试验时均发生船模触碰边壁情况。

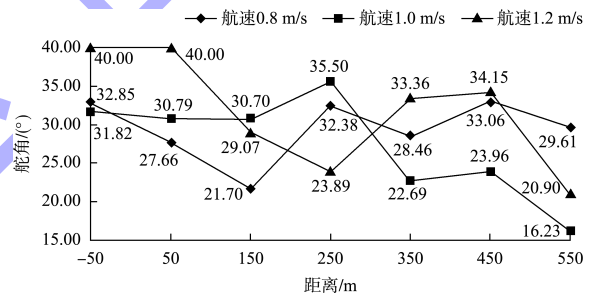


图8 20 m 净宽时隧洞内船舶不同航速下的舵角变化
Fig. 8 Rudder angle variation of ships in tunnels at different speeds when net width is 20 m

表 2 20 m 净宽时隧洞内船舶航行参数

Tab. 2 Navigation parameters of ships inside tunnel when net width is 20 m

位置/ m	航速 0.8 m/s			航速 1.0 m/s			航速 1.2 m/s		
	舵角/(°)	漂角/(°)	对岸航速/(m·s ⁻¹)	舵角/(°)	漂角/(°)	对岸航速/(m·s ⁻¹)	舵角/(°)	漂角/(°)	对岸航速/(m·s ⁻¹)
-100~<0	32.85	-8.98	0.38	31.82	-6.78	0.81	撞壁	-	-
0~<100	27.66	5.23	0.54	30.79	-7.17	0.96	撞壁	-	-
100~<200	21.70	-6.00	0.62	30.70	-4.57	0.43	29.07	-5.95	0.94
200~<300	32.38	-4.48	0.76	35.50	-8.56	0.61	23.89	8.47	1.09
300~<400	28.46	-7.74	0.77	22.69	6.47	0.86	33.36	5.60	1.20
400~<500	33.06	5.48	0.42	23.96	-6.02	0.92	34.15	-9.91	0.99
500~<600	29.61	-7.25	0.45	16.23	-8.08	1.10	20.90	13.40	0.96

净宽 18 m 隧洞内船舶不同航速条件下的航行参数见表 3。由表可知：1) 受通航隧洞宽度进一步变窄影响，在非恒定流情况下，隧洞内水流流

速进一步增大，船舶受非恒定流影响更大；2) 若船舶在船闸灌水完成后立即出闸进入隧洞，采用不同航速均难以安全航行，出现舵效差、长时间

使用大舵角和“贴壁航行”等情况;3)若船舶在船闸灌水完成后等待15 min出闸,非恒定流影响减弱,船舶以0.8 m/s静水航速上行时所操舵角最大为27.71°,距边壁安全距离均大于1 m,基本可通过隧洞;4)若船舶在船闸灌水完成后等待30 min出闸,船舶以0.8 m/s静水航速上行,除进入隧洞时调整航态所需舵角超过25.00°(27.62°),其余均小于25°,航行状态较好。

表3 18m净宽时隧洞内船舶航行参数

Tab. 3 Navigation parameters of ships inside tunnel when net width is 18 m

静水航速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	灌水后等待时间/ min	对岸航速区间/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	最大舵角/ ($^{\circ}$)	航行评价
0.6		0.32~0.85	35.00	舵效差,有“倒退”现象
0.8	0	0.47~0.90	35.00	与边壁安全距离小
1.0		0.62~0.95	24.45	碰壁
0.6		0.42~0.85	35.00	舵效差
0.8	15	0.66~1.20	27.71	基本可通航
1.0		0.69~1.37	30.85	贴壁航行
0.6		0.50~0.86	35.00	舵效差
0.8	30	0.74~1.09	23.75	可通航
1.0		0.79~1.35	23.58	有碰壁风险

5 结论

1) 模型试验表明,隧洞内船舶安全通航以水流流速0.5 m/s、水位波动0.5 m、船舶舵角最大不超过25°为判别标准是比较适宜的。

2) 白市船闸通航隧洞净宽22 m情况下,船闸灌水后船舶可以1.2~1.5 m/s静水航速安全上行通过隧洞,航行条件最优;隧洞宽度20 m情况下,船舶航行困难,容易发生触碰边壁情况;隧洞宽度18 m情况下航行空间更加受限,船舶在船闸灌水完成15 min后,才可以0.8 m/s静水航速缓慢通过隧洞。故推荐白市船闸通航隧洞净宽采用22 m。

3) 隧洞式引航道通航条件受船闸灌水非恒定流影响大,一般情况下隧洞净宽尺度越大,隧洞内水流流速、涌浪波高越小,船舶航行条件更优。

4) 实际工程运用中隧洞尺度宜根据通航水流条件、施工难度,通航效率及工程造价进行综合比选。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 刘剑明, 王新, 黄群, 等. 景洪升船机下游引航道口门区通航水流条件观测研究[J]. 水运工程, 2021(1): 6-11, 16.
LIU J M, WANG X, HUANG Q, et al. Study on navigation flow conditions of downstream approach channel of Jinghong ship lift [J]. Port & waterway engineering, 2021(1): 6-11, 16.
- [3] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
Changjing Waterway Bureau. Navigation standard of inland waterway: GB 50139 - 2014 [S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [4] 王犹扬, 胡中平, 杨一峰. 构皮滩水电站枢纽布置及优化[J]. 人民长江, 2006(3): 20-22.
WANG Y Y, HU Z P, YANG Y F. Layout and optimization of Goupitan hydropower station hub [J]. Yangtze River, 2006(3): 20-22.
- [5] 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. Scale study of navigation tunnel and aqueduct in the middle channel of Goupitan ship lift [J]. Journal of waterway and harbor, 2012, 33(1): 45-50.
- [6] 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.
- [7] 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.

[8] 李明, 王能, 张日红, 等. 高坝枢纽新建通航建筑物轴线及通航条件研究[J]. 水运工程, 2021(3): 98-106, 137.
LI M, WANG N, ZHANG R H, et al. Study on the axis and navigation conditions of newly-built navigable buildings in high dam junction [J]. Port & waterway engineering, 2021(3): 98-106, 137.

[9] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司. 清水江白市至分水溪航道建设工程可行性研究报告[R]. 长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2017.
Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd. Feasibility study report on the construction project of Qingshuijiang Baishi to Fenshuixi waterway [R]. Changsha: Hunan Provincial Communications Planning, Survey & Design Institute Co., Ltd., 2017.

[10] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 清水江白市枢纽船闸上游隧洞式引航道通航系统安全通航条件物理模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2020.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering. Research report on physical model test of safe navigation conditions for the upstream tunnel style approach channel navigation system of Baishi hub ship lock on Qingshui river [R]. Tianjin: Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, 2020.

[11] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2021.
Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering. Technical code of modelling test for port and waterway engineering: JTS/T 231—2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2021.

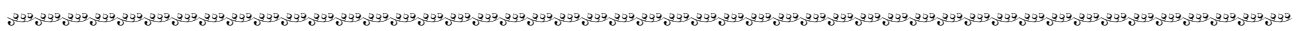
[12] 南京水利科学研究院, 天津水运工程科学研究所. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
Nanjing Hydraulic Research Institute, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering. Design code for filling and emptying system of shiplocks: JTJ 306-2001[S]. Beijing: China Communications Press, 2001.

[13] 长江三峡通航管理局. 三峡船闸通航调度技术规程: JTS 196-6—2012[S]. 北京: 人民交通出版社, 2012.
Three Gorges Navigation Administration of the Yangtze River. Technical code of Navigation scheduling for the Three Gorges ship lock: JTS 196-6-2012 [S]. Beijing: China Communications Press, 2012.

[14] 孙精石. 从《内河通航标准》看某些特殊限制性航道宽度的确定[J]. 水道港口, 2006, 27(5): 300-305.
SUN J S. The determination of certain special restricted channel widths from the perspective of the *Navigation Standard of Inland Waterway* [J]. Journal of waterway and harbor, 2006, 27(5): 300-305.

[15] 孙精石. 从《内河通航标准》看某些特殊限制性航道水深的确定[J]. 水道港口, 2006, 27(6): 373-377.
SUN J S. Determination of water depth for certain special restricted channels from the perspective of *Navigation Standard of Inland Waterway* [J]. Journal of waterway and harbor, 2006, 27(6): 373-377.

(本文编辑 王璁)



(上接第 109 页)

[57] 邓金运, 范少英. 基于能量的鄱阳湖—长江相互作用表征指标研究[J]. 地理学报, 2017, 72(9): 1645-1654.
DENG J Y, FAN S Y. Characterization index for expressing the relationship between the Yangtze River and Poyang Lake based on the theory of energy [J]. Actageographica sinica, 2017, 72(9): 1645-1654.

[58] 李雨, 许全喜. 三峡水库运用后长江倒灌鄱阳湖特性研究[J]. 工程科学与技术, 2017, 49(6): 10-18.
LI Y, XU Q X. Characteristics of backflows from the Yangtze River to the Poyang Lake after using of the Three Gorges Reservoir [J]. Advanced engineering sciences, 2017, 49(6): 10-18.

(本文编辑 王璁)