

· 航道及通航建筑物 ·



沅水桃源枢纽左岸船闸桥区 船模通航条件试验研究*

蔡 创, 李 林, 李 科, 王多银, 许光祥

(重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要: 沅江大桥通航环境十分复杂, 原大桥通航孔布置不合理, 严重制约了桃源枢纽二线船闸扩建工程建设。针对桥区通航条件差的问题, 对其左岸桥梁通航孔布置方案进行船模试验研究, 采用定床河工模型和小尺度船模试验相结合, 并从船模试验的舵角、漂角和航速等航行参数进行综合分析, 结果表明: 在相同通航总净宽的情况下, 双孔双向要优于双孔单向; 桥梁通航孔右移可降低一线船闸船舶下行过桥难度, 但会增加二线船闸船舶上行过桥的难度。建议左岸新建桥梁通航孔净宽应不小于 220 m, 桥位相比于现状桥梁右移约 75 m, 采用双孔双向, 两线船闸分槽航行的方式。

关键词: 二线船闸; 船模试验; 通航条件; 桥位

中图分类号: U641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)03-0074-08

Navigation conditions of ship model test in left bank lock bridge area of Yuanshui Taoyuan hub

CAI Chuang, LI Lin, LI Ke, WANG Duoyin, XU Guangxiang

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

Abstract: The navigation environment of Yuanjiang Bridge is very complicated, and the layout of the original bridge is unreasonable, which seriously restricts the construction of the second-line lock expansion project of Taoyuan Hub. In view of the problem of poor navigable conditions in the bridge area, the layout scheme of the bridge navigable hole on the left bank is studied, using the method of combining the bed river model and small scale ship model test, and comprehensively analyzing the steering angle, drift angle and speed of the ship model test. The results show that under the same total navigation width, the double hole two-way is better than the double hole one-way. The right movement of the navigable hole of the bridge can reduce the difficulty of ships crossing the bridge downstream at the first-line lock, but it will increase the difficulty of ships crossing the bridge upstream at the second-line lock. It is suggested that the net width of the navigable hole of the new bridge on the left bank should not be less than 220 m. The bridge position should be shifted to the right by about 75 m compared to the current bridge. The navigation method should be adopted with double holes two-way and two line locks divided into slots.

Keywords: second-line lock; ship model test; navigable condition; bridge location

我国部分通航河流上的桥梁在建设初期并未进行充分的航道通航安全影响评价论证, 尤其是分汊河势与通航环境复杂的河段^[1]。随着社会不

断发展, 通航船舶日益大型化, 此类桥梁往往成为通航关键的制约节点和风险高发区域。因此, 复杂通航环境下桥梁能否通航安全受到水运工程

收稿日期: 2023-06-26

*基金项目: 重庆市研究生联合培养基地建设项目(JDLHPYJD2018001)

作者简介: 蔡创 (1968—), 男, 教授, 从事小尺度船模及水利信息技术研究。

领域密切关注。

在已建船闸的基础上进行扩建工程易受空间、地形条件及原有建筑物等诸多因素制约,导致枢纽布置十分困难。常规的水工、河工模型水流条件量测试验,不能直观、真实地反映航道水流、边界条件对船舶通航的综合影响以及船舶与航道水流条件的相互作用。在水工模型上进行小尺度船模试验成为研究的主要方法之一^[2-6]。

为保障上、下行船只安全顺利过桥,开展自航船模试验,确保船舶安全地通过大桥,提出沅水桃源枢纽桥区船舶最佳驾驶方式和通航难点的研究,为沅水桃源枢纽桥区航道整治方案设计提供参考。

1 枢纽概况

桃源枢纽通航建筑物目前为 500 吨级船闸,不满足Ⅲ级航道的要求,加之下游下切,水位下降,门槛水深不足,扩建 1 000 t 二线船闸势在必行。桃源枢纽二线船闸建设工程,不仅大小船闸双线并存,而且二线船闸与防洪堤、泄洪闸等争地矛盾突出,涉河建筑物相关性较强,枢纽布置十分困难,上游建有沅江大桥,通航环境十分复杂。

2 碍航特性分析

因桃源沅江大桥(图1)位于双洲洲头分汊河道,受枢纽调度影响,桥区通航水流条件复杂,桥位附近的跑马滩水深较浅、水流急、航道较窄,洪水时存在阻水现象。同时桥位布置时忽视了水流及河道特点,桥轴线法线与水流流向夹角为 $20^{\circ} \sim 38^{\circ}$,

桥墩位于航槽中间,大大缩窄了桥位附近航槽,进一步恶化了此处的水流条件^[7]。



图1 桃源沅江大桥现状

3 小尺度船模试验

3.1 水工模型

水工模型采用沅水桃源枢纽水工正态模型,几何比尺 $\lambda_L = \lambda_H = 100$ 。

本文主要研究左岸新建船闸方案,由左岸新建二线船闸、还建三孔泄洪闸、新建沅江大桥 3 部分组成。此方案由于新建二线船闸方案在左槽坝上、坝下壅水较明显,对泄洪能力影响较大。还建的三孔泄洪闸泄流能力有所不及。

在原设计方案的基础上进行修改,将上游开挖区高程降至与左侧主河槽高程一致。在连接坝段上游增建箭头形分水导流堤,以导顺水流,减小侧收缩。

方案修改后,进行多级流量的水位、流速、流态测试,通过大坝上游开挖区降低和分流堤的修建,方案修改后上游和闸孔泄洪能力有所加强,进出流浮标趋于平顺,出流流速明显增大,上游水位明显降低。

左岸新建船闸存在一种可能,即不拆除现有桥梁(图2),又要满足Ⅲ-3级航道通航条件的需要。通航孔按双孔、单向通航方式进行分析。

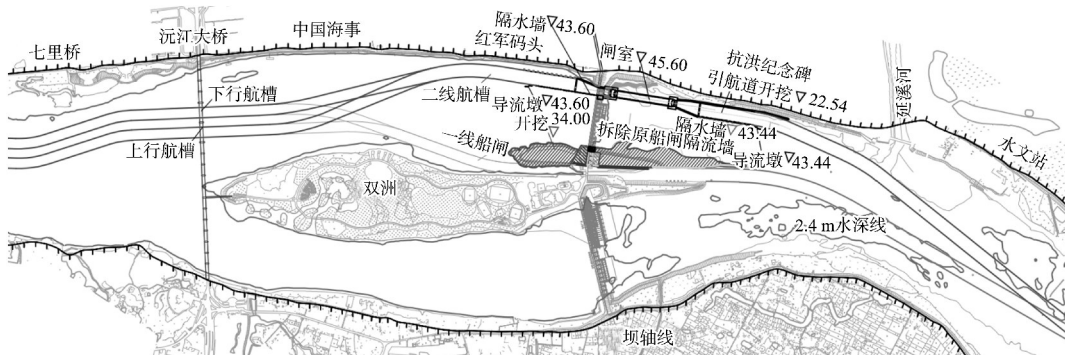


图2 左岸船闸现状桥梁方案(单位:m)

3.2 小尺度船模

船模在水中运动是一个力学过程，应该满足一定的相似条件。根据交通部发布实施的根据 JTS/T 232—2021《水运工程模拟试验技术规范》规定，用于通航条件试验的船模，应满足几何相似和重力相似条件^[8]，其几何比尺： $\lambda_L=\lambda_H=100$ ，时间比尺： $\lambda_t=\lambda_L^{1/2}=10$ ，速度比尺： $\lambda_v=\lambda_L/\lambda_t=10$ ，排水量比尺： $\lambda_\Delta=\lambda_L^3=1\,000\,000$ ，力的比尺：

$\lambda_f=\lambda_L^3=1\,000\,000$ 。

模型试验采用船型为 1 000 t 自航货船，其试验船模相关参数见表 1。

此试验采用减小舵面积的方法进行操纵性能尺度效应修正，经过操纵性能率定试验和尺度效应修正，符合船模与实船操纵性能相似，且实船略偏安全的试验要求^[9]。1 000 吨级机动货船修正后的船模与实船操纵性指数见表 2。

表 1 船模与实船参数

船型	长 L/m	宽 B/m	高 H/m	载质量/ t	静水航速(上行) $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	静水航速(下行) $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	最大舵角(右) $R_{\max}/(^{\circ})$
实船	85.0	10.5	2.0	1.59×10^3	5.00	4.00	35
船模	0.850	0.105	0.020	1.59×10^{-3}	0.50	0.40	35

表 2 1 000 t 货船船模和实船操纵性指数

船型	操作性指数 K'	硬度性指数 T'
实船	1.895	0.586
船模	1.654	0.603
偏差/ $\%$	-12.71	2.90

3.3 船模试验测控设备及试验方法

船模试验实时采集船模运动状态，通过摄像机得到船模航行图像数据，利用图像处理技术获取船模的位置及姿态信息，同时利用软件技术采集船模航行的相关参数，计算得出船模航行时的各种航行参数。

在水工模型上方安装高速、高分辨率摄像机阵列，覆盖整个研究航段，在船模试验中，摄像机对船模航行姿态进行视频采集，同时舵角信号采集器实时接收船模舵角的偏转，通过图像处理技术将船模航行视频转化为连续航行的帧图像，再通过软件技术获取船模的位置信息(图 3)。

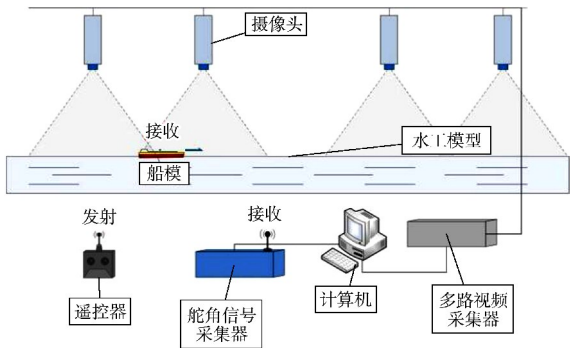


图 3 船模试验采集系统

4 船模试验方案、成果及分析

4.1 试验方案

根据沅水桃源枢纽桥区航道存在的主要问题，结合发展趋势，考虑经济情况，提出对桃源沅江大桥的整治方案(表 3)，并进行船模试验研究。

方案 1：保留现有桥梁，主跨 $2\times105.5\text{ m}$ ，采用双孔单向通航的方式；试验流量 Q 为 6 000、8 800、13 000 m^3/s 。

方案 2：对现有桥梁进行拆除新建，新建桥型为单塔斜拉桥，主跨 $2\times170.0\text{ m}$ ，采用双孔双向通航方式；试验流量 Q 为 2 055、8 800、13 000 m^3/s 。

方案 3：针对方案 2，在船模试验过程中发现二线船闸流量为 13 000 m^3/s 时过桥难度已很大，于是将两个通航孔净宽各增加 50 m，主跨变为 $2\times220.0\text{ m}$ 继续试验，试验流量 Q 为 13 000、20 600 m^3/s 。

表 3 左岸各型桥梁比较

方案	主跨/ m	净跨/ m	桥位(相对于现状桥梁)
1	105.5	95.0	-
2	170.0	154.0	右移 28 m
3	220.0	204.0	右移 78 m

为了准确地获得各级流量的水流特性和通航水流条件，根据沅水桃源枢纽的主要运行方式，结合主要特征通航流量等参数，研究以下 6 个代表流量工况的通航水流条件^[10]：

- 1) $Q=217 \text{ m}^3/\text{s}$, 设计流量, 泄洪闸全闭;
- 2) $Q=2\,055 \text{ m}^3/\text{s}$, 5 台机满发流量, 泄洪闸全闭;
- 3) $Q=6\,000 \text{ m}^3/\text{s}$;
- 4) $Q=8\,800 \text{ m}^3/\text{s}$, 停机流量, 9 台机控发;
- 5) $Q=13\,000 \text{ m}^3/\text{s}$, 常见洪水流量, 停机控泄;
- 6) $Q=20\,600 \text{ m}^3/\text{s}$, 最高通航流量, 停机敞泄。

船舶在航行过程中, 其航行状态的好坏取决于水流条件与船舶本身的动力特性及其操纵性能的优劣。在一定的水流条件下, 船舶的航行状态一般由船舶的航行轨迹、舵角、漂角、车档、航速等航行参数反映。

4.2 试验结果分析

4.2.1 方案 1

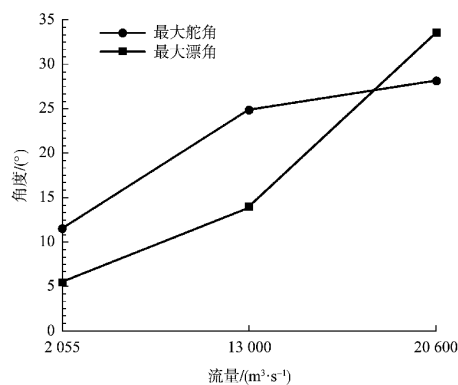
1) 现状桥梁方案下, 船模的最大舵角, 最大漂角均随流量增大而增大, 说明船舶航行难度随流量的增大而加大。

2) 一线船闸船模试验(表 4、图 4)中, $Q \geq 13\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上行最大舵角 $R_{\max} = 24.8^\circ$, 下行最大舵角 $R_{\max} = 24.73^\circ$, 均已临近 25° (船模试验最大舵角限值), 说明船舶上下行过桥困难, 这是受桥梁通航孔净宽不足, 沅江大桥上游七里桥突嘴紧靠桥区, 突端距桥位仅 340 m 等因素的影响导致。

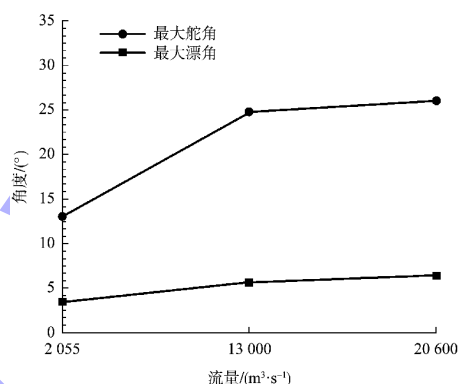
表 4 左岸方案 1 一线船闸桥区航段船模试验成果

航向	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大舵角 $R_{\max}/(^{\circ})$	最大漂角 $D_{\max}/(^{\circ})$	最小航速 $v_{\min}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	航程 S/m	平均航速 $v_A/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
上行	2 055	-11.47	-5.42	4.06	1321	4.40
	13 000	-24.80	13.94	2.07	1 245	2.46
	20 600	28.09	33.5	1.14	1 332	1.65
下行	2 055	13.09	3.48	4.22	1 187	4.45
	13 000	-24.73	5.70	5.29	1 252	5.69
	20 600	-26.03	6.40	6.10	1 232	6.63

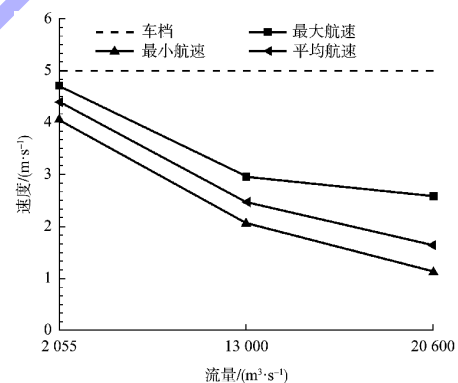
注: 所有数据均已换算为原型值。



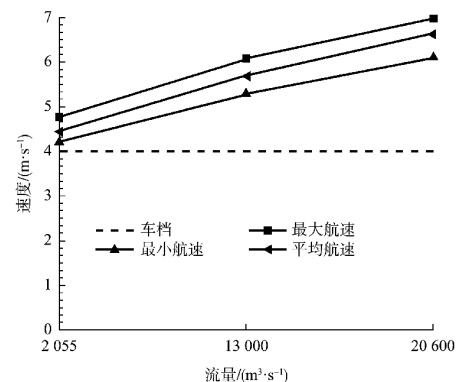
a) 上行角度



b) 下行角度



c) 上行航速



d) 下行航速

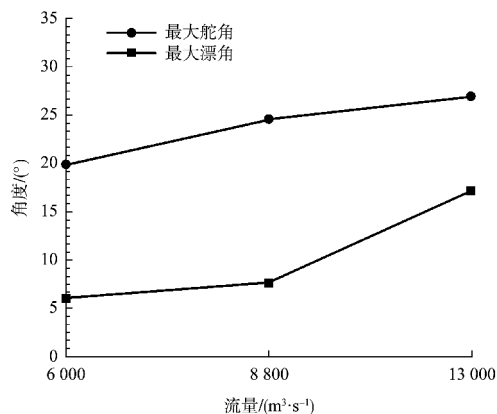
图 4 左岸方案 1 一线船闸上、下行过桥最大舵角、漂角和航速关系

3) 二线船闸船模试验(表 5、图 5)中, $Q \geq 8\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 上行过桥最大舵角 $R_{\max} = 24.51^\circ$; $Q \geq 6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 过桥下行最大舵角 $R_{\max} = 24.57^\circ$, 临近 25° (船模试验最大舵角限值), 已无法保证船舶通航安全。上行过程中由于二线船闸靠近左岸, 船模从二线船闸出发比从一线船闸过桥更早转向, 弯道更大, 操作难度更高; 下行过桥后, 调向后直线段距离不够。

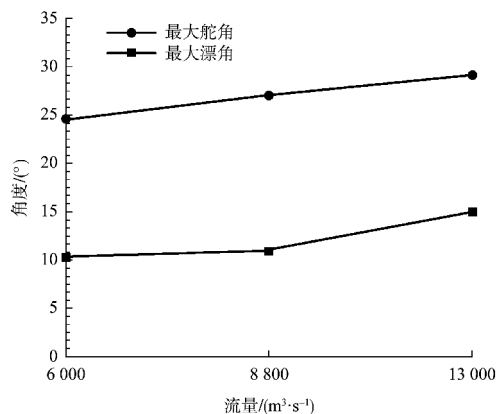
表 5 左岸方案 1 二线船闸桥区航段船模试验成果

航向	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大舵角 $R_{\max}/(^{\circ})$	最大漂角 $D_{\max}/(^{\circ})$	最小航速 $v_{\min}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	航程 S/m	平均航速 $v_A/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
上行	6 000	19.93	-6.14	3.02	1 937	3.42
	8 800	-24.51	7.76	2.69	1 920	3.20
	13 000	-26.92	17.24	1.99	1 906	2.70
下行	6 000	-24.57	10.33	4.21	1 767	4.73
	8 800	-27.01	-11.03	4.33	1 783	5.14
	13 000	-29.12	-15.11	4.72	1 827	5.48

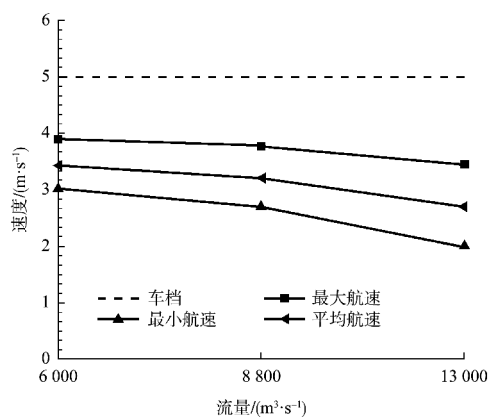
注: 所有数据均已换算为原型值。



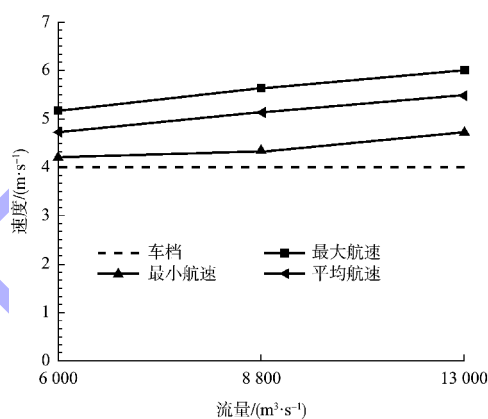
a) 上行角度



b) 下行角度



c) 上行航速



d) 下行航速

图 5 左岸方案 1 二线船闸上、下行过桥最大舵角、漂角和航速关系

4.2.2 方案 2、3

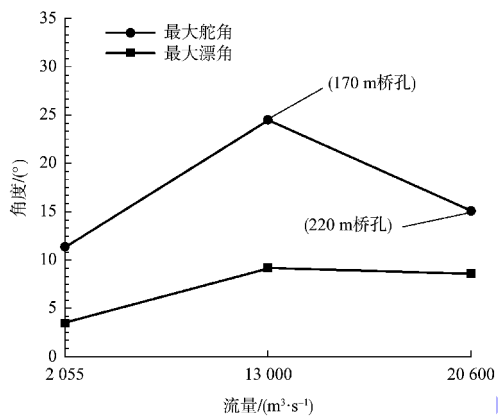
1) 对现有桥梁进行拆除新建后, 船模试验的最大舵角、最大漂角均随流量增大而增大, 说明船舶航行难度依旧随流量的增大而加大。

2) 方案 2 对现有桥梁进行拆除新建, 桥梁净宽增大后, $Q \geq 13\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 一线船闸船模上、下行通航困难(表 6、图 6); $Q \geq 8\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 二线船闸船模上、下行通航困难(表 7、图 7)。相比方案 1, 说明桥梁通航孔净宽增大后, 船舶上、下行过桥难度有所降低。但是桥梁通航孔宽度仍存在不足, 将通航孔净宽增大 50 m 过桥操控难度明显降低, 船舶上、下行均能够安全过桥。

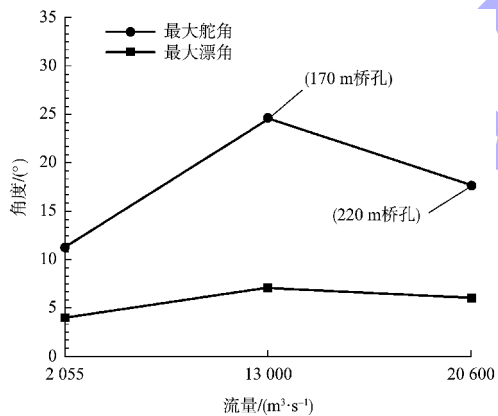
表 6 左岸方案 2、3 一线船闸桥区航段船模试验成果

航向	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大舵角 $R_{\max}/(^{\circ})$	最大漂角 $D_{\max}/(^{\circ})$	最小航速 $v_{\min}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	航程 S/m	平均航速 $v_A/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
上行	2 055	-11.43	3.54	3.97	1 323	4.41
	13 000	-24.46	-9.26	2.23	1 275	2.75
	20 600X	15.18	-8.64	2.03	1 253	2.51
下行	2 055	-11.32	-4.12	3.41	1 253	4.18
	13 000	-24.62	7.15	5.06	1 231	5.59
	20 600X	-17.68	-6.07	5.80	1 211	6.54

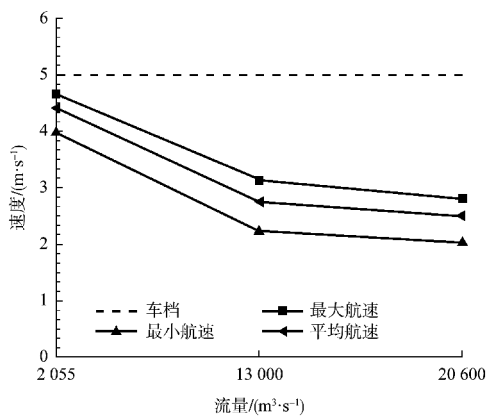
注: 所有数据均已换算为原型值。带 X 为方案 3(220 m 桥孔), 其余为方案 2(170 m 桥孔)。



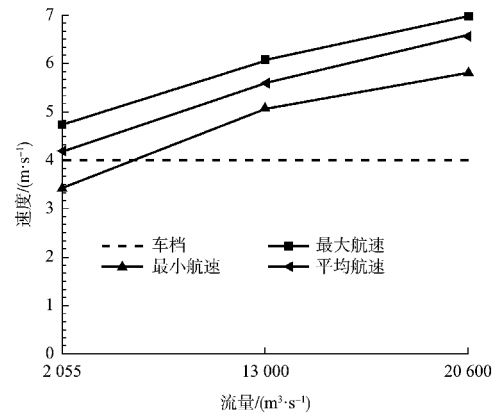
a) 上行角度



b) 下行角度



c) 上行航速

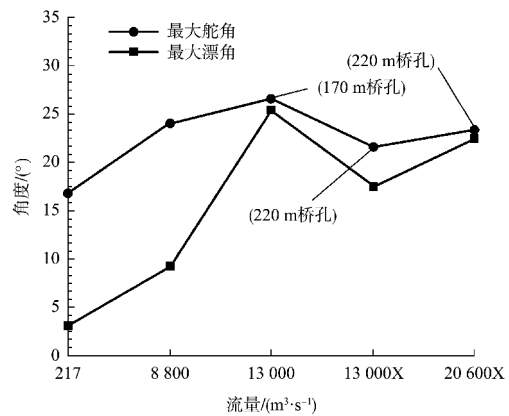


d) 下行航速

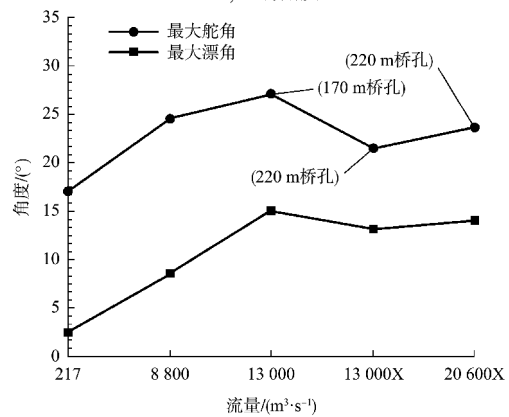
图 6 左岸方案 2、3 一线船闸上、下行过桥最大舵角、漂角和航速

表 7 左岸方案 2、3 二线船闸桥区航段船模试验成果

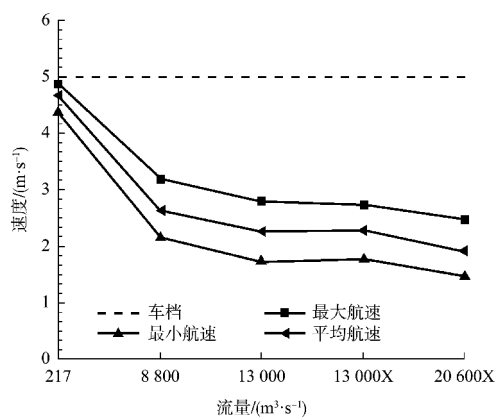
航向	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	最大舵角 $R_{\max}/(^{\circ})$	最大漂角 $D_{\max}/(^{\circ})$	最小航速 $v_{\min}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	航程 S/m	平均航速 $v_A/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
上行	217	-16.89	3.26	4.35	1 893	4.65
	8 800	-24.07	9.37	2.15	1 915	2.63
	13 000	-26.63	-25.42	1.73	1 980	2.26
	13 000X	-21.66	17.60	1.77	1 920	2.28
	20 600X	-23.41	22.51	1.47	1 904	1.93
下行	217	-17.03	2.57	4.25	1 712	4.53
	8 800	-24.56	-8.57	4.46	1 785	4.96
	13 000	-27.10	15.06	4.87	1 761	5.39
	13 000X	-21.49	-13.22	4.88	1 767	5.41
	20 600X	-23.67	-14.08	5.40	1 750	6.25



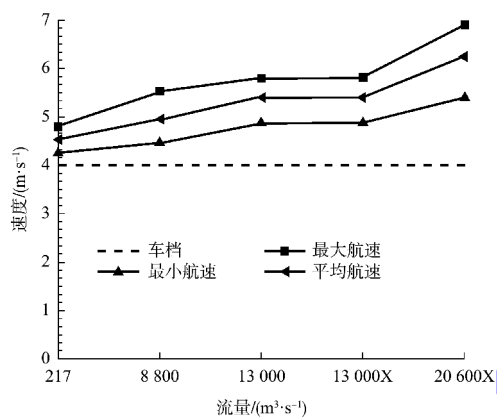
a) 上行角度



b) 下行角度



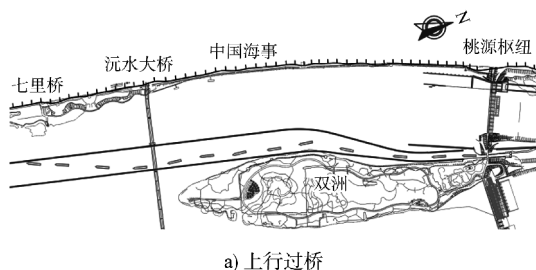
c) 上行航速



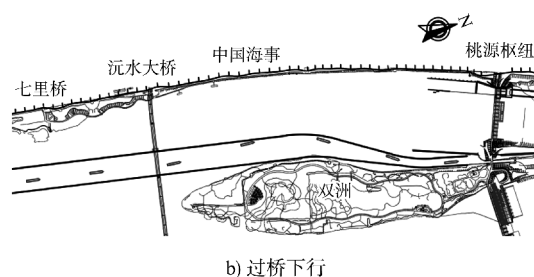
d) 下行航速

图7 左岸方案2、3二线船闸上、下行过桥最大舵角、漂角和航速

3) 现状桥梁从拆除、新建到修改, 桥位先右移 28 m 再右移 50 m, 方案 3 船模试验进行最高通航流量 $Q=20\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 下, 一线船闸上、下行过桥(图 8)的最大舵角 R_{\max} 分别为 15.18° 、 17.65° , 远小于 25° (船模试验最大舵角限值), 而二线船闸上、下行过桥(图 9)的最大舵角 R_{\max} 分别为 23.41° 、 23.67° 均已临近 25° (船模试验最大舵角限值), 船模通航困难, 说明桥梁通航孔右移能降低船舶一线船闸过桥通航难度, 但会增加二线船闸过桥通航的难度。

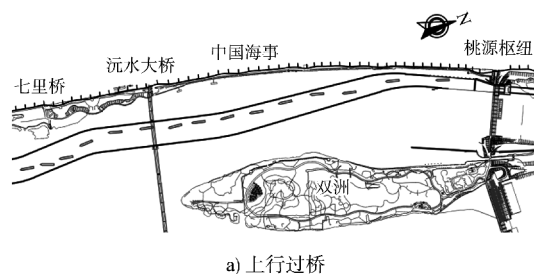


a) 上行过桥

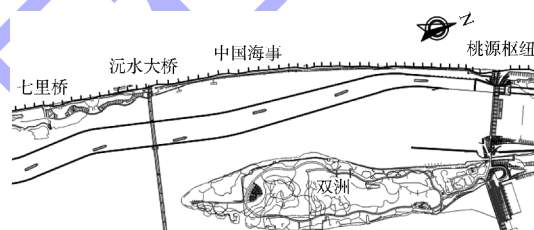


b) 过桥下行

图8 $Q=20\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 工况, 左岸方案一线船闸桥区航迹线



a) 上行过桥



b) 过桥下行

图9 $Q=20\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 工况, 左岸方案二线船闸桥区航迹线

4) 以上方案船模试验表明, 船舶最小航速均优于船模试验最低航速安全限值(0.40 m/s), 该试验航速不是影响航行的主要因素。

5 建议

5.1 驾驶方式和航行难点

5.1.1 一线船闸桥区船舶驾驶方式

上行过桥: 船舶驶出上游引航道后, 适时用左舵绕过双洲广场突端逐渐向左调向进入直线段, 然后适时操左、右舵保持直行姿态, 顺直从左通航孔中部驶过, 通过大桥后应及时操左舵避开七里桥突嘴驶向上游。

过桥下行: 船舶顺航槽绕过七里桥突嘴进入直线段, 然后适时操左、右舵保持直行姿态, 顺直从右通航孔中部驶过后驶向上游引航道。

5.1.2 二线船闸桥区船舶驾驶方式

上行过桥: 船舶驶出上游引航道后, 沿航槽

操左舵绕进入直线段,然后适时操左、右舵保持直行姿态,顺直从左通航孔左部驶过。当船舶航行至新建沅江大桥左通航孔左桥墩处,船头驶过桥墩前先用右舵,使船舶克服桥墩处的绕流,船头与桥墩保持一定距离,顺直驶过桥墩,船舶大部驶过桥墩时,及时反向用左舵,避免横流压尾,才能使船舶安全上行过桥。通过大桥后应及时操左舵避开七里桥突嘴驶向上游。

过桥下行:船舶顺航槽行绕过七里桥突嘴进入直线段,然后适时操左、右舵保持直行姿态,顺直从左通航孔右部过桥后驶向上游引航道。

5.2 航行难点

因桥上游七里桥突嘴、桥下游双洲广场突端的影响,一线船闸航线中,船舶上、下行直线段均不足;二线船闸航线中,由于桥上游七里桥突嘴,桥下游引航道和通航孔不在一条轴线上等因素影响,船舶上、下行通过桥孔时都需要调向。上、下行过桥都应小心驾驶,保证船舶顺直通过大桥。

6 结论

1) 左岸二线船闸现状桥梁方案,受桥梁通航孔净宽不足,沅江大桥上游七里桥突嘴紧靠桥区,突端距桥位仅 340 m 等因素的影响,上行过桥需提前调向,下行过桥调向后直线段距离不够, $Q \geq 6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时船舶安全通过大桥已很困难。建议通航流量控制在 $Q < 6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 。

2) 桥梁通航孔右移能降低船舶一线船闸下行过桥难度,但会增加二线船闸上行过桥的难度;桥梁通航孔净宽对船舶过桥难易度影响较大,船

舶上、下行过桥难度均随通航孔净宽的增大而减小;在相同通航总净宽的情况下,双孔双向要优于双孔单向。建议左岸新建桥梁通航孔净宽不小于 220 m,采用双孔双向的形式,一、二线船闸分槽航行。

参考文献:

- [1] 胡宝瑶,江涛,邓涯,等.弯曲分汊河段桥区通航水流条件及通航孔调整净宽分析[J].水运工程,2022(7):192-198.
- [2] 蔡创,蔡新永.基于小尺度船模技术的小半径回头弯曲航道试验研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2019,38(12):81-85,96.
- [3] 刘中峰,刘达,黄本胜,等.孟洲坝枢纽二线船闸上引航道通航水流条件试验研究[J].水运工程,2019(1):119-125.
- [4] 刘超,张世宝,张金明,等.沅口枢纽上游口门区通航水流条件试验研究[J].水运工程,2019(4):141-146.
- [5] 刘中峰,刘达,黄本胜,等.基于船模的木京扩建船闸通航水流条件试验研究[J].水运工程,2020(1):83-89.
- [6] 蔡创,蔡汝哲.嘉陵江沙溪枢纽引航道船模通航预报试验研究[J].水道港口,2009,30(3):191-196.
- [7] 程永舟,胡旭跃,沈小雄.桃源沅水大桥碍航问题试验研究[J].长沙交通学院学报,2001,17(2):62-65.
- [8] 蔡新永,蔡汝哲,李晓飏,等.向家坝非恒定流对航道通航条件影响的试验研究[J].水运工程,2017(2):77-82.
- [9] 蔡创,侯向勇,蔡新永.湘江近尾洲枢纽扩建工程一线船闸船模通航试验研究[J].水运工程,2021(7):149-156.
- [10] 许光祥,蔡创,王多银.沅水桃源枢纽二线船闸建设工程船闸布置及通航条件物理模型试验研究报告[R].重庆:重庆交通大学,2023.

(本文编辑 赵娟)

欢迎投稿 欢迎订阅