



# 湘江近尾洲枢纽扩建工程一线船闸 船模通航试验研究

蔡 创<sup>1</sup>, 候向勇<sup>1</sup>, 蔡新永<sup>2</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆西南水运工程科学研究所, 重庆 400016)

**摘要:**为了设计出更为合理的船闸布置方案,对湘江近尾洲枢纽扩建工程一线船闸的原设计方案和修改方案的通航安全性进行试验研究。在水工模型的基础上,采用小尺度船模技术观察分析船舶在不同流量下的舵角、航速等通航参数。结果表明,修改方案布置比原设计方案布置更加合理,通航水流条件有所优化。在流量  $Q \leq 5,210 \text{ m}^3/\text{s}$  时,一线船闸上、下游航道的航行参数均没有超过相应限值,总体可满足 1 000 t 自航货船(静水航速 18 km/h)的通航要求。综合试验结果分析,建议一线船闸的最高限制通航流量为 5,210  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

**关键词:** 小尺度船模; 船闸扩建; 通航条件

中图分类号: U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)07-0149-08

## Experimental study on ship model navigation of first ship lock of Jinweizhou hub expansion project in Xiangjiang River

CAI Chuang<sup>1</sup>, HOU Xiang-yong<sup>1</sup>, CAI Xin-yong<sup>2</sup>

(1.School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2.Chongqing Southwest Scientific Research Institute of Water Transportation Engineering, Chongqing 400016, China)

**Abstract:** To design a more reasonable layout scheme of ship lock, we carry out the experimental research on the navigation safety of the original design scheme and the modified scheme of the first ship lock of the Jinweizhou hub expansion project in Xiangjiang River. Based on the hydraulic model test, we apply the small-scale ship model technology to observe and analyze navigation parameters, such as rudder angle and speed. The results show that the modified scheme layout is more reasonable than the original design scheme layout, and the navigable flow conditions are optimized. When  $Q \leq 5,210 \text{ m}^3/\text{s}$ , the navigation parameters of the upstream and downstream channel of the first ship lock do not exceed the corresponding limits, which can generally meet the navigation requirements of 1,000 t self-propelled vessel (still water speed: 18 km/h). From the comprehensive analysis of the study results, we suggest that the maximum restricted navigable flow of the first ship lock should be 5,210  $\text{m}^3/\text{s}$ .

**Keywords:** small-scale ship model; ship lock expansion; navigation condition

随着我国的经济发展,湘江的水运量日益增加,对枢纽通航能力要求更高,其中近尾洲枢纽扩建工程是湘江永州—衡阳三级航道改扩建工程重要的组成部分,在此背景下,开展对近尾洲枢

纽扩建工程的设计方案的船模试验研究。

在已建船闸的基础上进行扩建工程,空间、地形条件及原有建筑物等诸多制约因素导致船闸的上下游引航道的通航水流条件复杂,根据一些

研究以及工程实践表明,引航道的水流条件的好坏会影响到船舶通过船闸的安全,一般都会对船闸的引航道通航水流情况进行专题研究,而在水工模型上进行小尺度船模试验是研究分析的主要手段之一<sup>[1-5]</sup>。因此,在近尾洲水工模型上进行小尺度船模试验研究,分析上下游航道的船舶航行情况,确定船闸的最佳布置方式,确保船舶能够安全地通过船闸。

## 1 工程概况

近尾洲枢纽工程是湘江干流萍岛以下的第4个梯级,位于衡南县、常宁市、祁东县、祁阳市交界处,正常蓄水位为66.10 m,是一座具有发电、航运、灌溉等综合效益的水电工程。枢纽建筑物包括发电厂房、大坝和船闸。其中船闸布置在右岸,有效尺度为120 m×12 m×2.5 m(长×宽×门槛水深),设计为IV级航道,通航500 t船舶,在一一线船闸右侧拟修建二线船闸和电站扩机,扩机在一、二线船闸中间,对通航水流条件可能存在一定影响。因此,为了设计出最佳的船闸布置方案,保障船舶通行安全,开展船模研究很有必要。本文针对近尾洲枢纽一线船闸进行船模通航试验研究,分析船舶在不同流量下的通航情况,为近尾洲枢纽扩建工程提供技术支撑。工程前的船闸平面布置见图1。

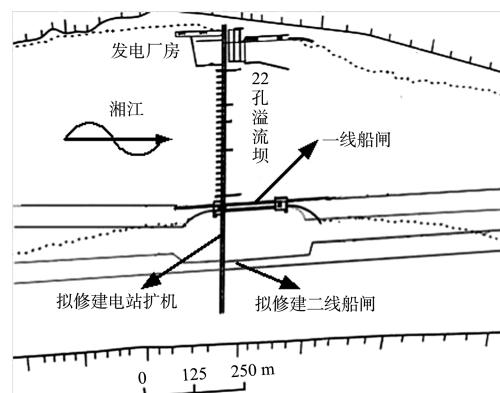


图1 工程前的船闸平面布置

## 2 船模试验

### 2.1 船模设计

对于小尺度船模的设计,要做到与实船的完全相似是不可能的,因此主要使船模在航行时满足与实船的运动相似、整体操纵性能相似、几何相似、质量相似和水动力相似<sup>[6]</sup>。然而小尺度船模在实际的应用中,因为各种因素造成的不相似,主要是通过对小尺度船模的整体性能的测控率定来对其做一定的修正和控制,使船模试验结果更加的真实可靠<sup>[7]</sup>。船模各物理量的相似比尺为:几何比尺 $\lambda_L = \lambda_H = 100$ ,速度比尺 $\lambda_v = 10$ ,时间比尺 $\lambda_t = \lambda_L^{0.5} = 10$ ,力比尺 $\lambda_F = \lambda_L^3 = 10^6$ ,排水量比尺 $\lambda_A = \lambda_L^3 = 10^6$ 。实际要求的实船船型为1 000 t机动货船,船模与实船的相关参数见表1。

表1 船模与实船参数

船型	总长 <i>L/m</i>	型宽 <i>B/m</i>	吃水 <i>H/m</i>	载质量 <i>DWT/t</i>	静水航速(上行) <i>v<sub>上行</sub></i> (m·s <sup>-1</sup> )	静水航速(下行) <i>v<sub>下行</sub></i> (m·s <sup>-1</sup> )	最大舵角(左) <i>R<sub>max,左</sub></i> (°)	最大舵角(右) <i>R<sub>max,右</sub></i> (°)
实船	85	10.5	2	$1.59 \times 10^3$	5	4	35	35
船模	0.85	0.105	0.02	$1.59 \times 10^{-3}$	0.5	0.4	35	35

小尺度船模在实际应用中,通过船模操纵安全性能测量试验,着重要求保证船模的部分操纵性指数与实船相似,并且船模航行时比实船航行时保留适当的安全控制余地<sup>[8]</sup>。船舶采用减少边舵面积修正后的船模与实船操纵性指数对比<sup>[9]</sup>见表2。

表2 操纵性指数对比

船型船队	回转性指数 <i>K</i>		应舵性指数 <i>T</i>		
	数值	误差/%	数值	误差/%	
1 000 t 机动货船	实船	1.895	-	0.586	-
	1/100 船模	1.654	-12.71	0.603	2.90

### 2.2 试验流量及工况

为了能够准确地得到在各级流量下的水流特性和通航水流条件,根据近尾洲枢纽的运行方式,结合主要特征通航流量等参数确定近尾洲枢纽一线船闸船模试验流量工况<sup>[10]</sup>:

- 工况1的上、下游航道流量 $Q = 373 \text{ m}^3/\text{s}$ (新机满发,老机停机不泄,电站不泄洪)。
- 工况2的上、下游航道流量 $Q = 2 193 \text{ m}^3/\text{s}$ (老机、新机满发控泄,泄洪闸7#~9#孔匀开)。
- 工况3的上、下游航道流量 $Q = 5 210 \text{ m}^3/\text{s}$

(老机、新机满发控泄,泄洪闸7#~14#孔匀开,边孔补流310 m<sup>3</sup>/s)。

4)工况4的上、下游航道流量  $Q=8\ 200\ m^3/s$

(停机控泄,泄洪闸7#~22#孔开启,边孔补流310 m<sup>3</sup>/s,2 a一遇洪水)。

5)工况5的上、下游航道流量  $Q=12\ 300\ m^3/s$

(停机敞泄,泄洪闸1#~22#孔全开,边孔补流310 m<sup>3</sup>/s,10 a一遇洪水)。

船舶在实际航行过程中,主要会受到水流条件、船舶本身的动力特性及船舶操纵性能的优劣等因素的影响,船舶航行状态的安全与否可以通过测定船舶的舵角、漂角、航速等航行参数加以判别。国内许多学者通过对许多航道的船舶通航试验研究,对船舶航行时的用舵以及最低航速做了限定标准,即在船模通航试验中,小尺度船模的最大舵角安全限值  $R_{max} \leq 25^\circ$ ,最低航速安全限值  $v_{min} \geq 0.4\ m/s$ ,并以此指标来判别船舶是否处于安全航行状态<sup>[11]</sup>。若船模试验的最大舵角  $R_{max} > 25^\circ$  或最低航速  $v_{min} < 0.4\ m/s$ ,则可认为船舶在指定航道的航线上航行不安全。在船模试验中,为了

尽可能地减小船模试验结果的随机误差,提高试验结果的真实可靠性,每一种流量工况下都会进行多航次试验,并用其特征值分析通航情况。

### 3 一线船闸通航水流条件试验

#### 3.1 原设计方案布置试验

原设计方案布置:电站扩机中心线与一线船闸中心线距离60.3 m。一线上游航槽靠右岸布置,上游引水渠进口位于一线船闸上口门上游约85 m,轴线与航槽斜交26°,引水渠进口底宽27 m,底高程62.0 m,左侧直立边坡、右侧边坡1:1.25;一线下游航槽出导航墙堤头后顺其趋势运行420 m,后稍右舵运行约520 m,随后过河到左侧凸岸而下,下游尾水渠出口位于一线船闸下口门下游约96 m,轴线与航槽斜交30°,尾水渠出口底宽18.5 m,底高程由51.5 m渐变到航道底部高程54.6 m。二线船闸布置在电站扩机右侧,下游顺引航道过渡到左侧凸岸深槽区(称为X0槽),船闸按1 000吨级货船标准设计。船闸平面布置见图2。

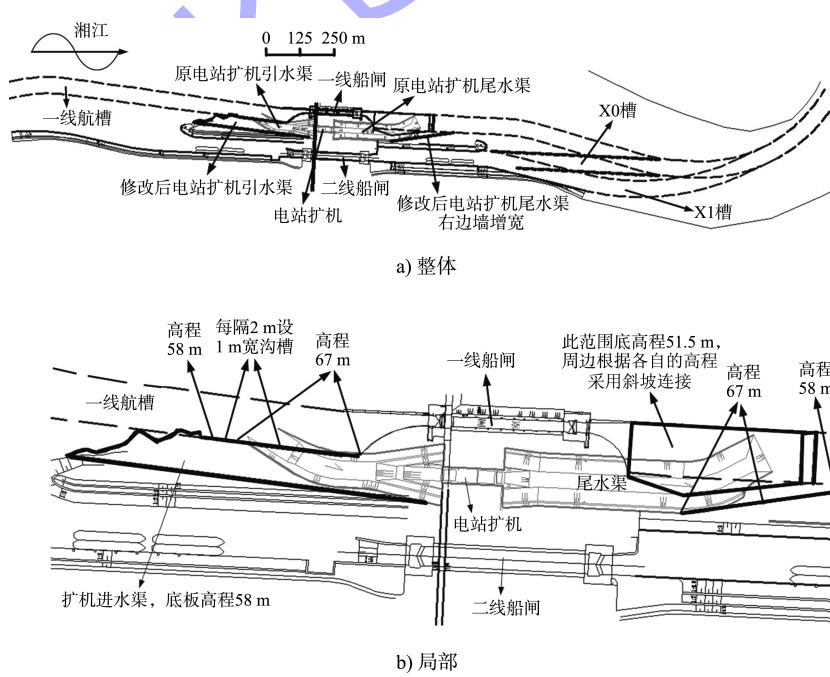


图2 原设计方案和修改方案船闸平面布置比较

一线船闸上、下游航道原设计方案布置在口门区和连接段的最大特征流速随流量变化的情况

如图3所示。根据图3和水工模型试验分析可知,在上游航道,每级流量下口门区的最大横流流速

均超过  $0.3 \text{ m/s}$  的限值；在  $Q = 373 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $Q = 11834 \text{ m}^3/\text{s}$  时，最大纵流流速超过  $2 \text{ m/s}$  的限值，其余流量下的最大纵流流速均没有超标。连接段在流量  $Q$  为  $373 \sim 11834 \text{ m}^3/\text{s}$  时，最大纵流流速为  $0.23 \sim 2.33 \text{ m/s}$ ，最大横流流速为  $0.05 \sim 0.46 \text{ m/s}$ ，虽个别有超标，但整体上超标不大，连接段基本满足通航条件。在下游航道，每级流量下口门区的最大横流流速都超过  $0.3 \text{ m/s}$  的限值；在  $Q = 373 \text{ m}^3/\text{s}$  和  $Q = 11834 \text{ m}^3/\text{s}$  时，最大纵流流速超标明显，其余流量下的最大纵流流速均没有超标。连接段在流量  $Q \leq 5210 \text{ m}^3/\text{s}$  时，纵、横流流速没有超标；在  $Q \leq 7672 \text{ m}^3/\text{s}$  时，最大纵流流速均不超标，最大横流流速  $0.93 \text{ m/s}$ ，有一定幅度的超标； $Q = 11834 \text{ m}^3/\text{s}$  时最大纵、横流流速分别达到  $2.59$ 、 $1.10 \text{ m/s}$ 。

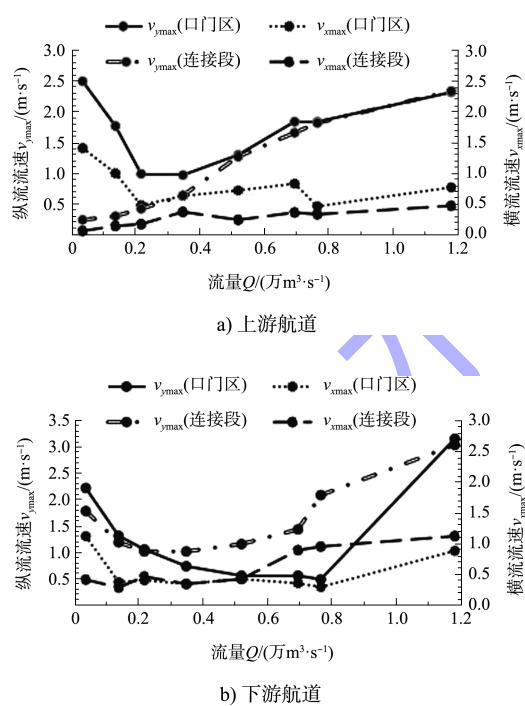


图 3 一线船闸上下游航道原设计方案布置在口门区和连接段的最大特征流速

### 3.2 修改方案布置

综合以上分析，原设计方案一线船闸存在的主要问题为扩机工程的引水渠与一线船闸上游口门区、尾水渠与下游口门区在平面位置上存在明显的交叉（图 2）。扩机工程上游引水渠紧靠一线船闸口门，发电引水导致口门区出现强烈纵、横

流，下游尾水渠出口轴线与航槽斜交，位置紧贴下游口门，在口门区出现较强的横流。

针对主要问题提出修改方案，航槽布置等均与原设计方案相同，主要修改之处为：1) 电站扩机引水渠变向延伸至远离一线船闸口门区，渠宽增至  $42 \text{ m}$ ，底部高程降至  $58 \text{ m}$ 。引水渠左边墙上游段长约  $120 \text{ m}$  的高程从  $58 \text{ m}$  渐变到  $67 \text{ m}$ ，下段长约  $306 \text{ m}$  的高程  $67 \text{ m}$ ；左边墙堤头每隔  $2 \text{ m}$  设  $1 \text{ m}$  宽沟槽，沟底高程  $60.85 \text{ m}$ ，可减缓堤头绕流引起的横流集中现象；右边墙的高程根据自然地形变化设置。2) 电站扩机尾水渠出口段右边墙向右侧适当扩展，并将一线船闸下游口门区航槽底部高程挖深到  $51.5 \text{ m}$ ，周边与自然地形采用斜坡连接。3) 二线船闸下游航槽出引航道后向右岸侧转动  $10.8^\circ$  贴右岸布置，然后在口门下游  $400 \text{ m}$  左右再逐渐过河到左侧凸岸（称为 X1 槽）。

### 3.3 修改方案布置试验

一线船闸上、下游航道修改方案口门区和连接段的最大特征流速随流量变化的情况如图 4 所示。

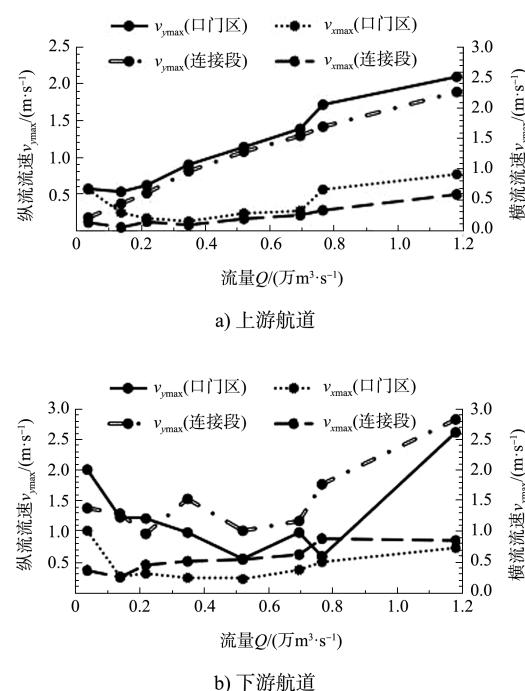


图 4 一线船闸上下游航道修改方案口门区和连接段的最大特征流速

根据图 4 和水工模型试验分析可知，在上游

航道, 口门区在  $Q=11\,834\text{ m}^3/\text{s}$  时最大纵流流速为  $2.09\text{ m/s}$ , 稍超规范, 其余流量均没有超标;  $Q=373\text{ m}^3/\text{s}$  和  $Q \geq 7\,672\text{ m}^3/\text{s}$  时横流流速均超标明显, 其余流量没有超标; 最大通航流量可达  $6\,963\text{ m}^3/\text{s}$ 。连接段在  $Q$  为  $373\sim7\,672\text{ m}^3/\text{s}$  时, 最大纵流流速为  $0.2\sim1.6\text{ m/s}$ , 最大横流流速为  $0.12\sim0.24\text{ m/s}$ , 虽个别有超标, 但基本满足通航条件,  $Q=11\,834\text{ m}^3/\text{s}$  时最大纵流流速为  $2.26\text{ m/s}$ , 最大横流流速为  $0.58\text{ m/s}$ , 超过规范, 最大通航流量可达  $7\,672\text{ m}^3/\text{s}$ 。在下游航道, 口门区在  $Q=11\,834\text{ m}^3/\text{s}$  时最大纵流流速超标明显, 其余流量下没有超标;  $Q=373\text{ m}^3/\text{s}$  和  $Q=11\,834\text{ m}^3/\text{s}$  时最大横流流速超标明显,  $Q$  为  $6\,963\sim7\,672\text{ m}^3/\text{s}$  时最大横流流速为  $0.41\sim0.49\text{ m/s}$ , 超标范围不大, 通航流量达到  $6\,963\text{ m}^3/\text{s}$ 。连接段  $Q=11\,834\text{ m}^3/\text{s}$  时最大纵流流速超标明显, 其余流量下没有超过  $2.0\text{ m/s}$  的限值;  $Q \geq 6\,963\text{ m}^3/\text{s}$  时最大横流流速为  $0.61\sim0.87\text{ m/s}$ , 超标明显。

## 4 船模通航试验

### 4.1 上游航道船模试验

船舶行驶航线为沿原设计航槽的航线通过上游航道进出船闸, 航线如图 5 所示。具体船模试验结果见表 3。

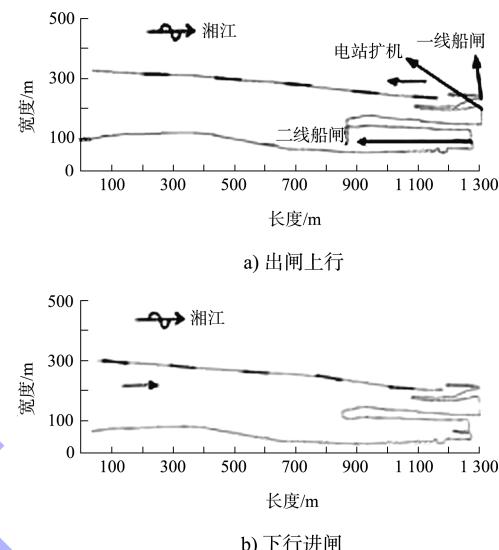


图 5 一线船闸上游航道船舶上、下行航线

表 3 一线船闸上游航道船模试验结果

航向	流量 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	试验方案	最大舵角 $R_{\max}/(^{\circ})$	最大漂角 $D_{\max}/(^{\circ})$	航速 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	平均航速 $v_A/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
上行	373	原设计	30.88	31.69	2.18	4.18
		修改	17.82	5.66	2.43	4.45
	2 193	原设计	27.59	24.19	2.11	3.91
		修改	18.51	11.73	2.34	9.97
	5 210	原设计	27.30	19.85	2.09	3.43
		修改	19.90	15.23	1.82	3.27
	8 200	原设计	26.04	16.18	1.99	3.38
		修改	24.54	25.49	1.76	2.59
	12 300	原设计	26.39	15.69	1.81	2.97
		修改	29.74	33.64	1.08	2.24
下行	373	原设计	31.40	33.33	3.09	3.06
		修改	18.98	6.03	4.09	3.99
	2 193	原设计	28.58	25.17	4.29	3.76
		修改	19.30	12.31	4.51	4.35
	5 210	原设计	28.26	18.95	4.82	4.63
		修改	20.52	16.19	4.83	4.73
	8 200	原设计	26.28	17.70	4.99	4.89
		修改	24.90	26.44	5.53	5.42
	12 300	原设计	27.29	16.10	6.08	5.84
		修改	30.18	34.84	6.11	5.97

由表 3 可看出, 在原设计方案中, 船舶上行的最小航速均大于最低航速安全限值  $0.4\text{ m/s}$ , 但

在各级流量下, 船舶上、下行的最大舵角均已明显超过船模试验舵角安全限值  $25^{\circ}$ , 已无法保证船

舶安全通航，必须进行优化。

在修改方案中，由于电站扩机引水渠布置优化，上游航道的通航水流条件有很大改善。从具体参数上看，在  $Q$  为 373、2 193、5 210 和 8 200  $\text{m}^3/\text{s}$  这 4 种流量工况下，船舶上、下行的最大舵角均小于船模试验安全最大舵角限值  $25^\circ$ ，上行的最低航速均大于船模试验最低航速限值  $0.4 \text{ m/s}$ ，船舶在上游航道可以安全地进出船闸。但在  $Q = 8 200 \text{ m}^3/\text{s}$  时，上、下行的最大舵角达  $24.54^\circ$ 、 $24.90^\circ$ ，已接近船模试验最大舵角安全限值  $25^\circ$ ，航行难度升高，须小心驾驶。在  $Q = 12 300 \text{ m}^3/\text{s}$  时，船舶上下行的最大舵角分别为  $29.74^\circ$ 、 $30.18^\circ$ ，均已超过船模试验最大舵角安全限值  $25^\circ$ ，无法保证船舶航行安全。

在各级流量下，修改方案的船舶航行参数整体上较原设计方案均有所提高，上游航道最大通航流量达到  $8 200 \text{ m}^3/\text{s}$ ，比原设计方案提高许多。

在修改方案中，上、下行的最大舵角和最大漂角随流量增大而增大，上行最小航速和平均航速随流量增大而减小，下行最大航速和平均航速随流量增大而增大，这是因为流量增大使口门区的纵横流速增加，使船舶的航行难度增加。从数据还可看出，船舶下行进闸时各级流量下最大舵角、最大漂角均比上行出闸时大，说明船队下行进闸难度大于上行出闸。这是因为上行出闸是逆水航行，对岸航速相对较低，舵效相对较好，且是由狭窄水域驶向宽广水域，所以操纵难度相对较小；下行进闸时的情况刚好相反，船舶操纵难度较大。

#### 4.2 下游航道船模试验

在下游航道，原设计方案走 X0 槽，修改方案走 X1 槽。船舶行驶航线：

1) 原设计航线(X0 槽)：船舶由下游左岸缓流区上行沿凸岸过弯，船舶出弯道后继续上行，然后逐渐向船闸下口门靠拢，驶入船闸；下行船舶沿此航线反向行驶，下行船舶驶出下游船闸口门区后，逐渐向弯道凸岸靠拢，沿凸岸驶向下游，航线见图 6。

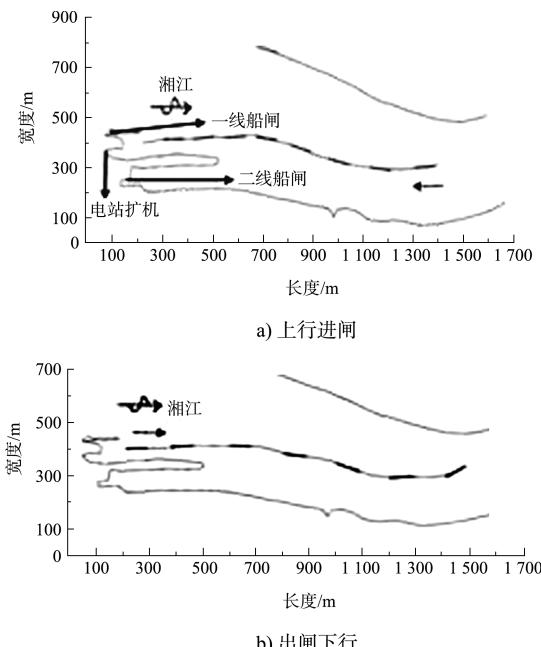


图 6 一线船闸下游航道船舶上、下行航线

2) X1 槽：船舶由下游左岸缓流区上行沿凸岸过弯，船舶驶出弯道后尽快过江靠近右岸(凹岸)，靠近凹岸上行，然后右转向船闸下口门靠拢，驶入船闸；下行船舶沿此航线反向行驶，下行船舶驶出下游船闸口门区后，先右转向凹岸弯道靠近，靠近弯道凹岸下行一段，然后左转驶向弯道凸岸继续下行，航线见图 7。下游航道船模试验结果见表 4。

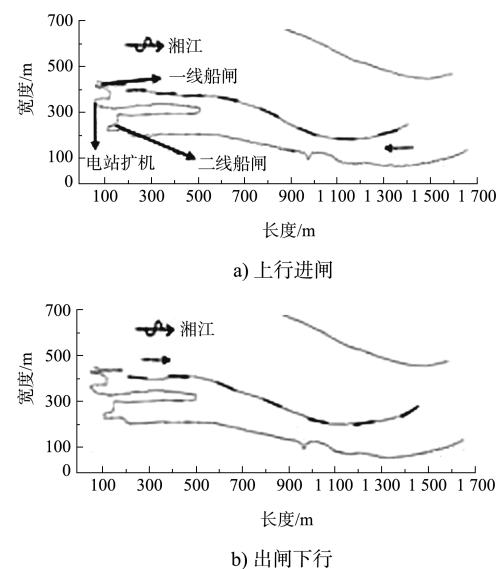


图 7 一线船闸下游航道船舶上、下行航线

表4 一线船闸下游航道船模试验结果

航向	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	试验方案	最大舵角 $R_{max}/(^{\circ})$	最大漂角 $D_{max}/(^{\circ})$	航速 $v/(m \cdot s^{-1})$	平均航速 $v_A/(m \cdot s^{-1})$
上行	373	原设计	21.29	16.63	2.01	2.93
		修改	20.29	14.60	2.27	3.10
	2 193	原设计	19.65	10.19	3.22	3.62
		修改	18.96	9.26	2.96	3.49
	5 210	原设计	20.39	12.58	2.04	2.64
		修改	19.27	11.03	2.46	2.83
	8 200	原设计	26.69	13.86	1.83	2.27
		修改	26.56	13.34	1.89	2.28
	12 300	原设计	31.11	14.67	1.19	1.77
		修改	30.89	14.37	1.63	1.90
下行	373	原设计	20.52	12.28	3.98	3.40
		修改	20.40	11.36	4.10	3.39
	2 193	原设计	18.64	11.21	5.17	4.21
		修改	18.12	10.31	4.97	4.08
	5 210	原设计	21.16	17.86	5.98	4.60
		修改	19.66	16.85	5.83	4.39
	8 200	原设计	26.87	19.36	6.50	4.98
		修改	26.71	18.98	6.43	4.91
	12 300	原设计	30.22	22.68	6.93	5.30
		修改	31.07	21.39	6.85	5.19

由表4可看出,在不同流量情况下,原设计方案和修改方案中,船舶上、下行的最大舵角、最大漂角的总体趋势都是随着流量增加而加大,船舶上行最小航速、平均航速的总体趋势随流量增大而减小,船舶下行最大航速、平均航速的总体趋势随流量增大而增大,说明不管是原设计方案还是修改方案,船舶上、下航行难度均随流量加大而加大。这是因为流量的增大使口门区的纵、横流速增加,使船舶的航行难度增加。其中,在  $Q=373 m^3/s$  时,由于水深较浅,浅底效应使船舶的航速偏低,操纵性能变低,最大漂角、最大舵角偏大。

在  $Q$  为  $373$ 、 $2 193$ 、 $5 210 m^3/s$  时,原设计方案和修改方案的最大舵角均没有超过最大舵角安全限值  $25^{\circ}$ ,上行最小航速均大于最小航速安全限值  $0.4 m/s$ ,船舶可以安全地进出船闸。当  $Q$  达到  $8 200 m^3/s$  时,原设计方案和修改方案的上行最小航速虽然都大于  $0.4 m/s$ ,但是上下行的最大舵角都超过  $25^{\circ}$ ,船舶的通航安全无法得到保障。

原设计方案和修改方案能够达到的最大通航

流量都是  $5 210 m^3/s$ ,但是在同等流量的情况下,修改方案的船舶航行参数总体上要比原设计方案有所优化,说明修改方案是可行的。

## 5 建议

### 5.1 上游航道

一线船闸修改方案上游航道的最高限制通航流量可达  $8 200 m^3/s$ ,和工程前基本一致,在此流量及以下时,船舶可以安全上、下行通过上游航道进出船闸。根据船模试验,一线船闸上游航道沿原设计航槽的航线航行即可,最佳驾驶方式为:

1) 船舶出闸上行时,船舶先沿引航道中部上行,出引航道先适当用左舵使船首和引航道导墙堤头保持一定距离,减小导墙堤头横流对船舶航行的影响,避免船舶与导墙堤头擦碰,然后略用右舵使船舶驶出引航道,出引航道时要及时用左舵,避免船舶被横流推向江心,然后适当左右操舵控制航线和航向,保持船舶在设计航槽中部,继续驶向上游。

2) 船舶下行进闸时,下行船舶在船闸口门上

游 700~800 m 处即保持岸距, 用舵调整航向, 沿原设计航线的航槽中部驶向下游, 在引航道口门上游 300~400 m 处, 适当用右舵, 避免船舶被横流推向江心, 向引航道的口门驶进前, 船头要先用右舵, 使船舶克服引航道导墙堤头横流, 船头与导墙堤头保持一定距离, 驶入引航道, 船舶大部分驶入引航道时, 要及时反向用左舵, 避免横流压尾, 以便船舶可以安全地通过引航道, 下行进闸。

## 5.2 下游航道

一线船闸修改方案下游航道能够达到的最大通航流量为  $5\ 210\ m^3/s$ , 在此流量及以下时, 船舶可以安全上、下行通过下游航道进出船闸。根据船模试验, 当流量  $Q \leq 5\ 210\ m^3/s$  时, 下游口门区和连接段横向流速不高, 下游航道船舶走原设计航槽或 X1 槽都可顺利通航。

## 5.3 一线船闸整体通航

综合以上分析, 一线船闸修改方案能够达到的最大通航流量为  $5\ 210\ m^3/s$ 。低于通航流量标准较多, 主要原因是随着流量增大, 电站下游口门区的横流、回流依然较大, 对船舶的航行安全有威胁; 其次因为修建二线船闸, 对一线船闸的通航流量要求不高,  $Q = 5\ 210\ m^3/s$  已达到了设计要求。当  $Q = 8\ 200\ m^3/s$  时, 船舶下游航道的最大舵角略超出  $25^\circ$ , 但是为了通航安全, 建议当  $Q > 5\ 210\ m^3/s$  时, 船舶改走二线船闸。

## 6 结语

1) 因为电站扩机引水渠的布置优化, 一线船闸上游口门区和连接段通航水流条件比原布置方案明显改善。在  $Q \leq 8\ 200\ m^3/s$  时, 船舶上下行的最大舵角均没有超过最大舵角安全限值  $25^\circ$ , 船舶可以安全通航。但在  $Q = 8\ 200\ m^3/s$  时, 上下行的最大舵角已接近船模试验最大舵角安全限值  $25^\circ$ , 航行难度升高, 须小心驾驶。船舶沿原设计航线航行即可。

2) 下游航道在  $Q \leq 5\ 210\ m^3/s$  时, 船舶上下行

最大舵角均没有超过最大舵角安全限值  $25^\circ$ , 船舶可以安全通航, 沿原设计航线或 X1 槽航行可安全通航。

3) 综合通航水流条件和船模试验, 建议将  $Q = 5\ 210\ m^3/s$  (电站满发, 泄洪闸控泄) 作为近尾洲枢纽一线船闸的最大通航流量, 该流量满足设计要求。当流量  $Q > 5\ 210\ m^3/s$  时, 船舶改走二线船闸。

## 参 考 文 献:

- [1] 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.
- [2] 刘超, 张世宝, 张金明, 等. 沔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.
- [3] 邱颂曦, 刘达, 刘中峰, 等. 剑潭水利枢纽船闸改扩建工程下引航道通航水流条件试验研究[J]. 广东水利水电, 2019(7): 11-16.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 蔡新永, 蔡汝哲, 李晓飚, 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.
- [7] 蔡新永, 蔡创, 雷鹏华. 基于小尺度船模技术在通航枢纽设计优化中的应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2017, 36(8): 58-62.
- [8] 蔡创, 蔡新永, 赵传波. 嘉陵江草街航电枢纽施工导流明渠通航船模试验研究[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 492-495, 346.
- [9] 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.
- [10] 许光祥, 蔡创, 蔡汝哲. 湘江永州至衡阳三级航道改扩建工程近尾洲枢纽扩建二线船闸通航整体定床物理模型试验研究报告[R]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [11] 须清华, 张瑞凯. 通航建筑物应用基础研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999.

(本文编辑 王璁)