



# 多线船闸下游极低通航水位 通航水流条件试验研究

蒋春钢<sup>1</sup>, 颜志庆<sup>2</sup>, 赵建钧<sup>2</sup>, 辜晋德<sup>2</sup>, 安建峰<sup>2</sup>

(1. 广西西江集团红花二线船闸有限公司, 广西 柳州 545000; 2. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 红花多线船闸下游通航水位较低时, 受河道地形影响, 口门区出现大范围斜流和横流, 严重威胁航运安全。采用 1:100 整体水工模型及自航船模试验, 根据低通航水位水流特点, 提出并论证大区域疏深挖槽导流、降低碍航段沙洲高程、延长隔流堤长度与洼地回填制造隔流带等综合措施, 有效降低了口门区纵、横向流速和回流流速。经验证, 优化措施不仅可满足下游低水位的通航要求, 还可以提高船闸的最大通航流量, 提高船闸通航效率。船模试验结果表明, 船舶操纵参数均在要求范围内。研究结果可供相关枢纽工程参考。

**关键词:** 最低通航水位; 通航水流条件; 口门区; 多线船闸; 自航船模

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)11-0134-08

## Experimental study on navigable flow conditions of extremely low navigable water level downstream of multi-line ship locks

JIANG Chun-gang<sup>1</sup>, YAN Zhi-qing<sup>2</sup>, ZHAO Jian-jun<sup>2</sup>, GU Jin-de<sup>2</sup>, AN Jian-feng<sup>2</sup>

(1. Guangxi Xijiang Group Honghua Second Line Shiplock Co., Ltd., Liuzhou 545000, China;

2. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** Due to the influence of the river topography, large-scale oblique flow and cross flow, which threatens the safety of shipping seriously, will appear in the ship lock entrance area when the downstream navigable water level of Honghua multi-line ship lock is low. According to the results from the hydraulic model study of scale 1:100 and self-propelled ship model test, we take comprehensive measures such as deepening trench diversion in large area, lowering sandbank elevation in obstructive sections, lengthening the separation levee length and making divider by backfilling according to the characteristics of flow pattern at the low navigable water level, by which the velocity of vertical flow, horizontal flow and backflow in the entrance area is reduced effectively. It is verified that the optimization measures not only meet the navigation requirements at the downstream low water level, but also effectively increase the maximum navigable flow and navigation efficiency of the ship lock. It is shown that the ship handling parameters are all within the required range by the test results of ship model. The research results can be used as reference for related pivotal projects.

**Keywords:** the lowest navigable water level; navigable water flow condition; entrance area; multi-line ship lock; self-propelled ship model

作为主要的通航建筑物, 船闸是内河水运交通网络的重要控制节点, 船闸的通过能力关系到

内河航运网络的运输能力<sup>[1]</sup>。船闸口门区位于船闸进出口与上下游航道连接段, 处于边界突变、

收稿日期: 2021-02-01

作者简介: 蒋春钢(1985—), 男, 工程师, 从事水运、水利工程建设管理及工程技术研究。

主流扩散、静动水交界的位置，较易形成斜流、泡漩等不良流态，引起进出船舶横漂，影响通航安全和通航效率<sup>[2]</sup>。船闸引航道口门区水流流态的影响因素较多，如枢纽的运行方式、下泄流量、河道地形条件等。随着水运交通网络的发展和枢纽通航需求量的增加，许多工程需要在原有船闸上建设多线船闸，受到诸多条件的限制，并列布置的船闸也会使口门区水流流态更加复杂<sup>[3]</sup>。此外，枢纽建设开挖、航道升级及河道采砂等导致河床下切、水位下降，为保证通航效率，需调整最低通航水位。通航水位降低造成河道过流断面缩小，水流流态更容易受到宽浅沙洲的影响，使流态更加复杂。关于船闸的通航水流条件，已有许多学者进行研究<sup>[4-8]</sup>，而对于下游极低通航水位下多线船闸的通航水流条件的研究较少。笔者以红花枢纽二线船闸工程为研究背景，分析枢纽下游超低通航水位下的水流流态，并通过 1:100 水工模型试验及自航船模试验分析研究对设计方案进行优化比选，为工程建设及安全运行创造条件。

1 工程概况

柳江下游 59.2 km 的红花水利枢纽工程是广

西柳江干流综合规划的最下游一个梯级，是以发电、航运为主，兼顾灌溉、旅游、养殖的综合利用工程。红花一线船闸位于枢纽左侧，与发电厂房异侧布置，为单线单级船闸，船闸主尺度为 180 m×18 m×3.0 m (长×宽×槛上水深)，代表船队为 2×300 吨级顶推船队，兼顾 1 000 吨级单船，全线按一类航标配布。上、下游船舶均为曲线进闸、直线出闸，引航道布置方式为不对称型，均往左侧拓宽，靠船墩均布置于引航道的左侧，上游引航道直线段长 360 m，下游引航道直线段长 484 m，引航道底宽为 50 m。红花二线船闸建设规模按 2 000 吨级船闸 (兼顾 3 000 吨级船舶，Ⅱ级船闸) 建设，船闸有效尺度为 280 m×34 m×5.8 m，引航道底宽 74 m，转弯段底宽 96 m，口门区底宽 111 m。上游引航道总长约 1 350 m，其中导航、调顺段长 216 m，停泊段长 184 m，转弯段角度 29°，口门区中心线与河流轴线的夹角为 6°；下游引航道总长约 1 520 m，导航、调顺段及停泊段与上游相同，转弯段角度 34°，口门区中心线与河流轴线的夹角为 18°。初设阶段拟推荐两船闸轴线间距 120 m 方案，上、下游引航道均采用曲线进闸曲线出闸的布置形式 (图 1)。

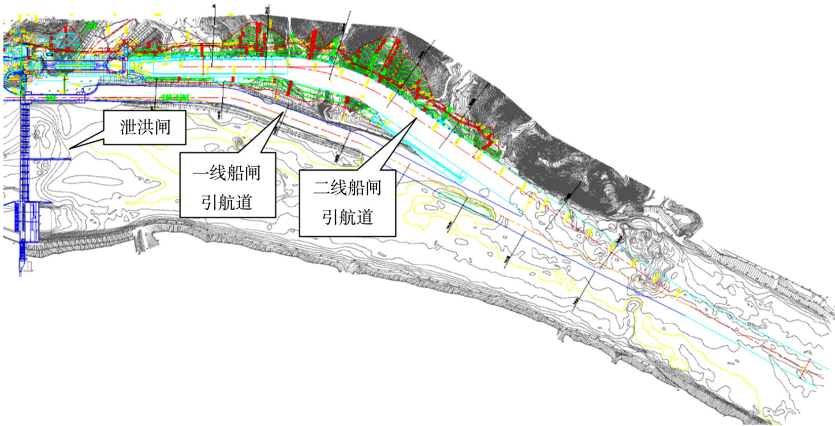


图 1 红花枢纽下游平面布置

电站泄流、红花二线船闸扩建和河道采砂<sup>[9]</sup>等导致枢纽下游河床冲刷、水位下降。为恢复红花船闸的通过能力，结合下游大藤峡枢纽的运行

调度方式，将红花下游最低通航水位由 59.6 m 降为 58.3 m，相应地挖深下游引航道以满足船舶吃水的要求。下游水位为 58.3 m 时，下游河道滩地

大面积露出,属于极低通航水位,水流流态显著受到地形影响,变化较大,因此有必要对此进行通航水流条件的研究。

2 下游极低水位通航水流流态

下游河道为最低通航水位 58.3 m 时,对应的枢纽运行工况为单台机发电工况 ( $Q=307\text{ m}^3/\text{s}$ )。通过模型试验可知,在该工况下,因总体下泄流量较小,下游水位低于一线船闸下游引航道隔流堤高程 (63.5~64.0 m),故一线船闸引航道内水流基本不受影响。但河道右侧高程均在 59 m 以上,约 2/3 断面几乎不过流,电站尾水斜向穿过河

道,在左侧顺一线船闸隔流堤下泄,在一线船闸口门区横向穿过一线船闸航道 (图 2),受附近沙洲 (纵向长度约 200 m,横向宽度 20 m,高程 61.5 m) 地势挤压,水流在二线船闸隔流堤堤头斜向进入二线船闸口门区,形成较大的横流和回流区 (最大回流流速 0.49 m/s),而后主流顺航道深槽下泄。在  $Q=11\ 100\text{ m}^3/\text{s}$  工况下,一线船闸口门区最大横向流速 0.56 m/s,最大纵向流速 0.78 m/s;二线船闸口门区最大横向流速 0.60 m/s,最大纵向流速 0.97 m/s。上述水流条件均超过了规范允许值,将直接影响到船舶的安全行驶,因此需对下游通航水流条件进行优化调整。

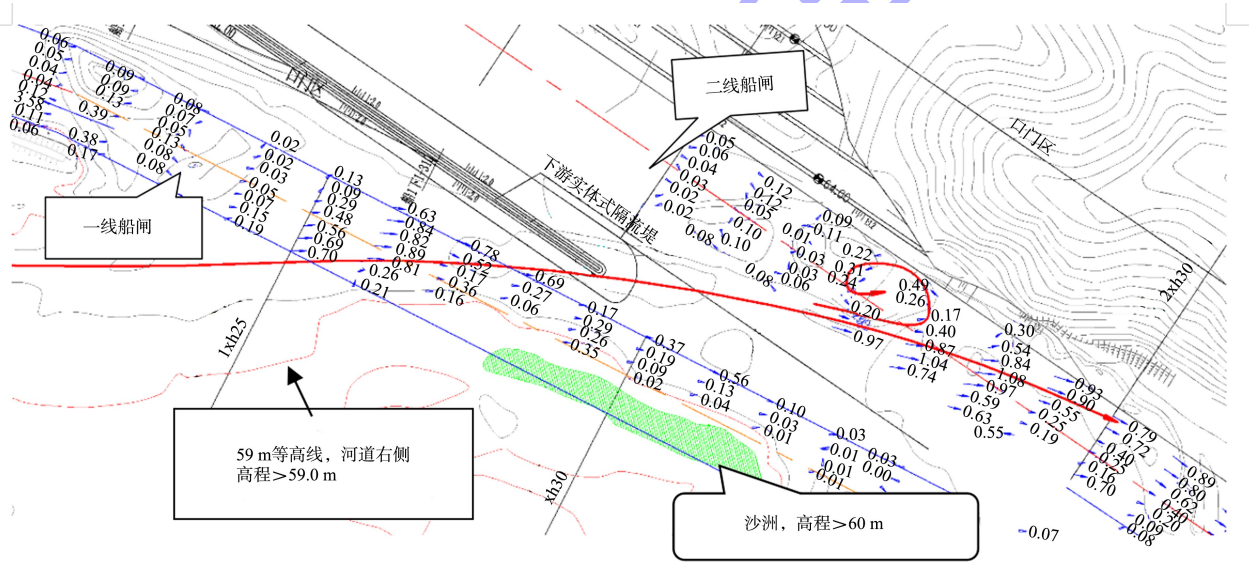


图 2 原布置方案引航道口门区流态

船闸引航道口门区及连接段不利水流流态改善的途径主要有工程措施和非工程措施。无论采用哪一种措施,最终都是从降低流速、调整流向、改善流态等方面入手,研究分析引航道上、下游口门区最不利流态的成因,并采取相应的措施。

3 下游极低通航水位航道优化措施

由模型试验结果可知,造成下游一、二线船闸口门区及连接段流速超标的原因主要是二线船闸航道的挖深等效于河道深泓左移及一线船闸附

近沙洲对水流的挑流和压缩作用所致。且扩建后,一线船闸航道右移,沙洲占据了设计航道宽 50%,其高程 >60 m (一线船闸引航道底高程 <57 m) 为碍航段,故必须对其进行整治开挖,以满足一线船闸的运行要求。

3.1 河道疏浚措施

为降低引航道右侧斜向流动对口门区横向流速的影响,为河势的调整提供操作空间,以增大水流归槽流量的方式将河道进行大区域疏深,即一线船闸下游连接段航道右侧采取挖槽导流,扩大低水位下的河道过流断面,用扩散水流的措施

降低河道流速。开挖方案为：桩号船 1+250 至桩号船 1+350，开挖高程由原地形高程逐步过渡至 57 m，坡度约为 1:50，桩号船 1+350 至上游堤头

(对应桩号船 1+800) 高程由 57 m 平滑过渡至 56 m，堤头下游开挖高程亦为 56 m，且下游深槽开挖宽度 60 m，并与引航道开挖地形顺接(图 3)。

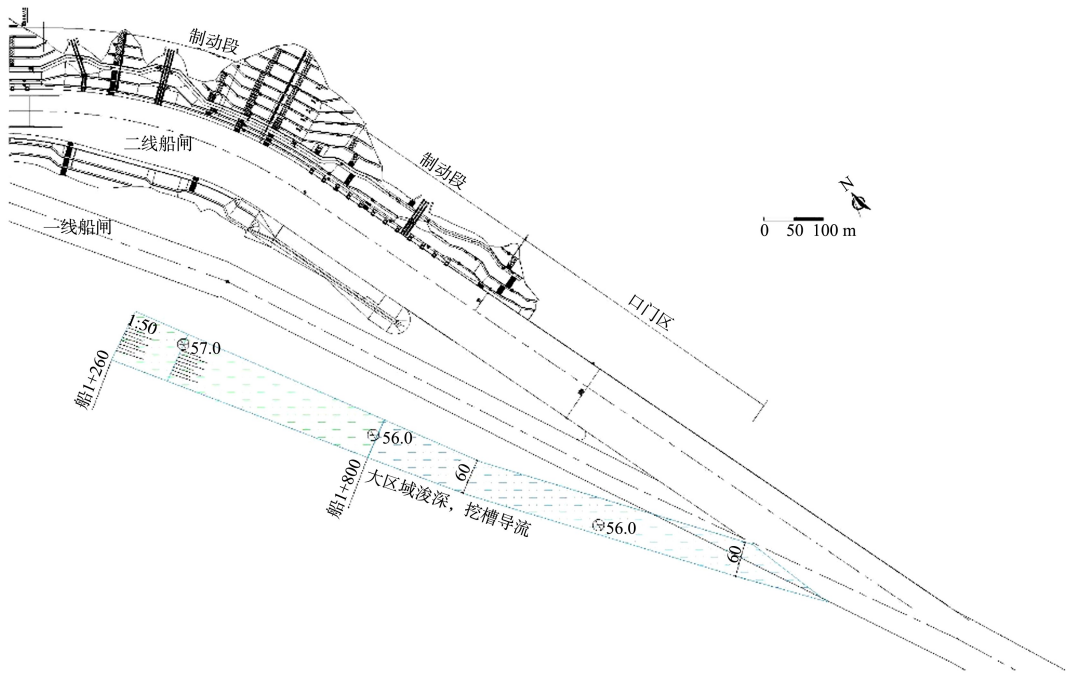


图 3 红花枢纽下游河道疏浚措施 (单位: m)

河道疏浚后，在  $Q=307\text{ m}^3/\text{s}$  (单台机发电工况) 下，河道后水流主要经开挖深槽下泄，并自深槽左侧边界高程较低处漫入引航道。由于深槽开挖长度约 1 280 m，漫水区单宽流量很小，使引航道口门处形成较大范围的低流速区，口门附近最大横向流速不超过 0.19 m/s。在  $Q=1\,842\text{ m}^3/\text{s}$  (电站满发工况) 下，引航道口门区横向流速均小于 0.3 m/s。但在  $Q=4\,800\text{ m}^3/\text{s}$  (电站与泄水闸联合运用工况) 下，二线船闸引航道口门区最大横向流速 0.47 m/s，处于中心线右侧 50 m 处的航道边线上；在中心线右侧 20 m 处，最大横向流速 0.37 m/s；在航道中心线右侧 30 m 处，最大横向流速 0.39 m/s；在中心线右侧 40 m 处，最大横向流速 0.42 m/s；总体看通航宽度仅为 20 m，不能满足规范规定的通航水流条件要求。

试验结果表明：河道疏浚方案对小流量 ( $Q<4\,800\text{ m}^3/\text{s}$ )、低水位工况下一、二线船闸下游引航道口门区通航水流条件改善作用明显；但大流量下 ( $Q\geq 4\,800\text{ m}^3/\text{s}$ )，口门区横向流速仍大范围超标，不满足船舶安全通航的要求。

3.2 一线船闸航道连接段疏浚及隔流措施

试验过程中发现，口门区右方有深槽集中水流，且下游隔流堤较短，在大流量下 ( $Q\geq 4\,800\text{ m}^3/\text{s}$ ) 无法阻隔下游主流斜穿口门区，口门区航道与主流流向交角较大(最大交角达 20°)。随着流量增加，口门区航道内斜向流速、回流强度和横向流速加大。为提高通航流量，考虑在大区域疏浚、挖槽导流的基础上将一线船闸连接段航道范围内的沙洲底高程降至 56.5 m，并研究延长二线船闸下游隔流堤(图 4)，以减缓口门区的斜流。

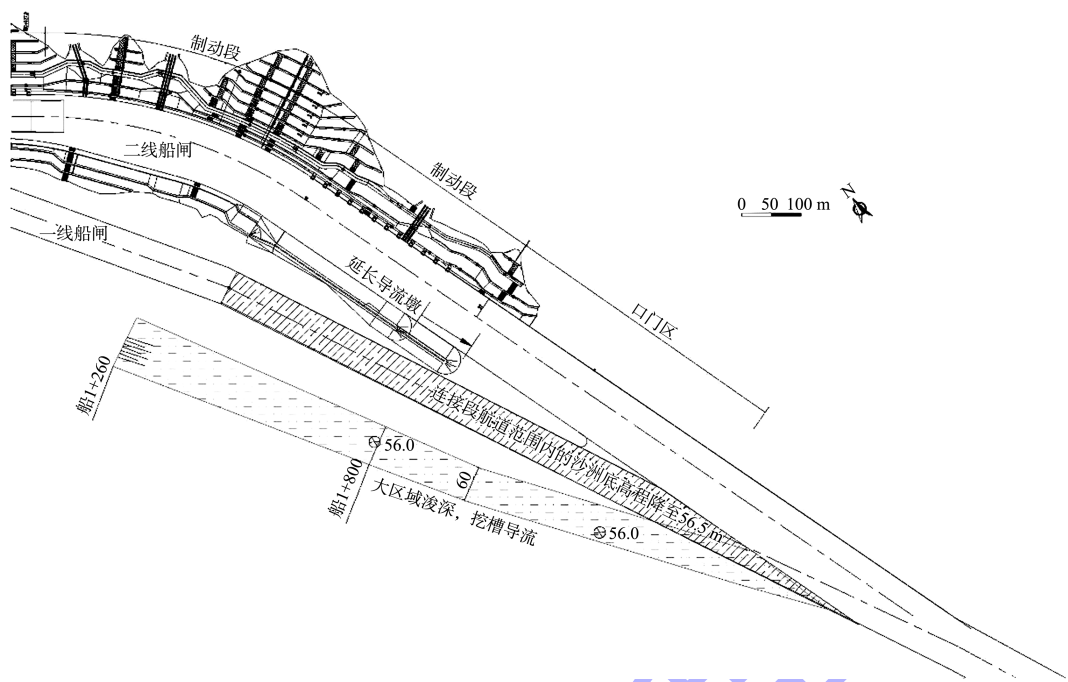


图 4 红花枢纽下游一线船闸航道疏浚措施 (单位: m)

试验结果表明: 航道疏浚后, 在主流分流的  
基础上, 扩大一线航道过流断面, 起到了进一步  
分流的作用。在  $Q=8\,800\text{ m}^3/\text{s}$  工况下, 最大横向  
流速  $0.48\text{ m/s}$ , 横向流速超过  $0.3\text{ m/s}$  流速区位于  
航道右侧  $20\text{ m}$  以外。相对上述单一的河道疏浚措  
施, 水流条件进一步改善, 但在  $Q=11\,100\text{ m}^3/\text{s}$   
工况, 口门区横流及回流仍然流速过大。在航道

疏浚的基础上延长隔流堤, 可使主流在其作用下  
偏向河道中央, 使口门区成为缓流区, 削弱口门  
区的横流, 有利于改善口门区的通航水流条件。  
分别在现有基础上延长隔流堤  $30、60$  和  $100\text{ m}$ ,  
观测隔流堤长度对二线口门区通航水流条件的影  
响。试验结果见表 1。

表 1 不同长度隔流堤下游引航道口门区流速

试验方案	枢纽下泄流量 $Q/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	口门区通航水流条件		工况评价
		横向流速 $v_x/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	纵向流速 $v_y/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	
隔流堤长度不变	614	$v_{x\text{max}}=0.13$ , 无 $v_x\geq 0.30$ 区域	$v_{y\text{max}}=0.84$ , 无 $v_y\geq 2.0$ 区域	满足
	11 100	$v_{x\text{max}}=0.60$ , $v_x\geq 0.30$ 区域横向范围 $100\text{ m}$ (全断面), 纵向范围 $500\text{ m}$	$v_{y\text{max}}=1.77$ , 无 $v_y\geq 2.0$ 区域	不满足
隔流堤延长 $30\text{ m}$	614	$v_{x\text{max}}=0.14$ , 无 $v_x\geq 0.30$ 区域	$v_{y\text{max}}=0.83$ , 无 $v_y\geq 2.0$ 区域	满足
	11 000	$v_{x\text{max}}=0.53$ , $v_x\geq 0.30$ 区域横向范围 $60\text{ m}$ , 纵向范围 $300\text{ m}$	$v_{y\text{max}}=1.75\text{ m/s}$ , 无 $v_y\geq 2.0$ 区域	不满足
隔流堤延长 $60\text{ m}$	614	$v_{x\text{max}}=0.21$ , 无 $v_x\geq 0.30$ 区域	$v_{y\text{max}}=0.78\text{ m/s}$ , 无 $v_y\geq 2.0$ 区域	满足
	11 100	$v_{x\text{max}}=0.53$ , $v_x\geq 0.30$ 区域横向范围 $50\text{ m}$ , 纵向范围 $200\text{ m}$	$v_{y\text{max}}=1.68\text{ m/s}$ , 无 $v_y\geq 2.0$ 区域	基本满足
隔流堤延长 $100\text{ m}$	614	$v_{x\text{max}}=0.23$ , 无 $v_x\geq 0.30$ 区域	$v_{y\text{max}}=0.76\text{ m/s}$ , 无 $v_y\geq 2.0$ 区域	满足
	11 100	$v_{x\text{max}}=0.44$ , $v_x\geq 0.30$ 区域横向范围 $40\text{ m}$ , 纵向范围 $200\text{ m}$	$v_{y\text{max}}=1.70\text{ m/s}$ , 无 $v_y\geq 2.0$ 区域	基本满足

从试验结果可知: 随着隔流堤长度增加, 在小流量下( $Q=614\text{ m}^3/\text{s}$ ), 对沿一线航道水流形成约束作用, 原水流沿一线航道下泄沿程向左侧二线航道扩散变为在二线口门区较集中横向进入航道, 口门区横向流速有小幅增加, 但仍然在规范运行范围内; 大流量下( $Q=11\ 100\text{ m}^3/\text{s}$ ), 隔流堤长度越长, 引航道及口门区的水流条件越好, 横向流速和回流流速均显著减小, 考虑到上行船舶舵效应较好, 只要过往船舶靠右行驶适当避开上述区域, 船舶便可安全进、出闸, 最大横向流速及横流范围均减小。但隔流墙下延至 100 m 后, 接近主河道的深槽, 若再向下游延伸, 则有可能影响行洪安全。

3.3 局部回填隔流措施

一线航道连接段疏浚后, 在电站部分机组发电工况下, 下泄流量较小。一线船闸下游航道进行开挖后, 受下游河道地形影响, 主流偏转沿河道中间进入疏浚深槽, 另有两股水流, 其中一股通过一线引航道隔流堤与疏浚深槽之间洼地进入一线船闸下游口门区, 形成斜向水流; 另一股漫过深槽进入口门区中部, 与上一股水流一并汇入二线船闸下游引航道, 影响通航水流条件。根据机组发电时的水流轨迹, 在上述优化措施的基础上将一线引航道隔流堤与疏浚深槽之间洼地地形回填为隔流区, 洼地回填高程与沙洲高程相同为 60 m(下游沙洲高程约为 60 m)(图 5)。

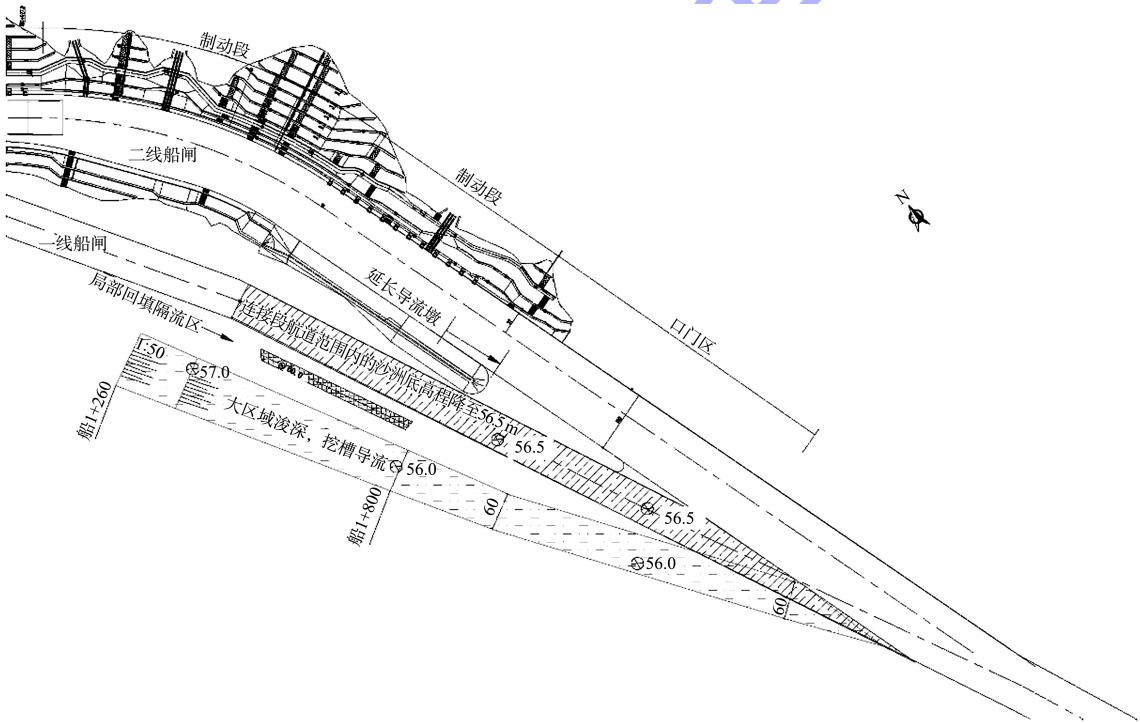


图 5 红花枢纽下游引航道推荐布置方案 (单位: m)

该方案下船闸口门区最大流速见表 2。从表 2 可知: 小流量下一线船闸口门区通航水流条件明显改善, 斜流强度明显减弱; 大流量级下变化则不明显。回填后完全阻断了小流量下的斜流通道,

引航道口门区范围内的河段主流流速分布较为均匀, 同时口门区范围内的回流区缩小, 回流流速大幅度减小, 改善了一、二线船闸下引航道水流条件。

表 2 各级流量下回流区最大流速

流量/( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	1 842	4 800	6 800	8 800	11 000	14 100	18 400
流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1.20	1.68	1.76	1.82	2.01	2.32	2.51

对比各方案, 最终选定河道疏浚、一线引航道连接段开挖、隔流堤延长及一线船闸与深槽低

洼回填的措施为推荐方案。在该方案下, 枢纽左侧下泄部分水流在隔流堤的引导下平顺扩散进入

引航道口门区；主流经下游引航道口门区及导流连接段开挖深槽下泄，并自深槽左侧边界高程较低处漫入引航道，缩小引航道中心线与下泄水流流向的交角，从而达到降低口门区回流及横流流速的目的。

4 自航船模航行试验

4.1 一线船闸进出闸自航船模试验

对一线船闸下游引航道口门区附近局部地形进行疏浚后，扩大了低水位下河道过流断面，河道整体流速降低，进闸船舶航行较为平稳，仅需在口门区适当操左舵以克服横流影响。在最低通航水位下，进闸船舶全程最大舵角 10°，最大漂角 -12°，口门区最大舵角 4°，最大漂角 -6°。

在最低通航水位下，出闸船舶在航行至引航道弯道时，需预先操右舵转向，向右偏转经过下游引航道直线段，在下游引航道口门区，根据船舶姿态，适时操右舵，逐渐向右偏转以克服口门区横流作用。船舶行至隔堤堤头附近时，需继续操右舵保持航向，避免在横流作用下与二线船闸引航道内船舶发生碰擦。出闸船舶全程最大舵角 11°，最大漂角 -8°，口门区最大舵角 8°，最大漂角 6°。

在  $Q=11\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$  工况下，进闸船舶全程最大舵角 4°，最大漂角 -10°，口门区最大舵角 3°，最大漂角 -7°；出闸船舶全程最大舵角 10°，最大漂角 5°，口门区最大舵角 2°，最大漂角 5°。

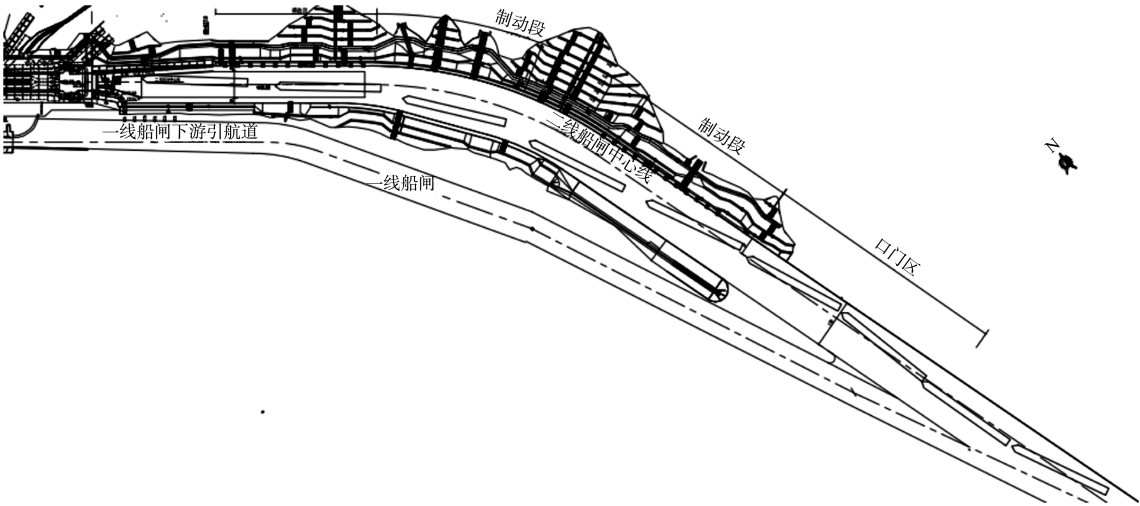
4.2 二线船闸进出闸自航船模试验

在最低通航水位下，进闸船舶航行较为平稳，在连接段需适当操右舵，以克服横流作用，在口门区操舵调整航向，在距口门约 50 m 附近预先操右舵转向穿过引航道转弯段，随着横流的沿程减小逐渐回舵，以小舵角进入口门区后，操左舵转向进入靠船段。全程最大操舵角 20°，出现在引航道转弯段，口门区最大漂角接近 6°。上行船队关键是要掌握好操舵时机，适时调整航向以进入口门区。进闸船舶试验见图 6a)。

在最低通航水位下，出闸船舶航行需以左舵 18°通过下游引航道转弯段后，进入直线段后需适当操右舵调整航向，在下引航道口门区，需操左舵克服局部横流驶过口门区，在连接段以操右舵为主。全程最大操舵角小于 18°，最大漂角 6°，对岸航速在进入口门区后受纵向流速影响，逐步增大。进闸船舶试验见图 6b)。

在  $Q=11\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$  工况下，出闸船舶通过口门区需操右舵克服横流作用，进闸船舶需操左舵调整航向，全程最大操舵角 20°，口门区漂角小于 5°。

由于连接段下游 1 000 m 航道均为直线段，船舶上下行进出连接段时无需进行转弯等复杂操控，在航道内依照航道纵向流速通航标准能安全顺利上行时，在连接段亦能保证航行安全。自航船模验证试验表明，推荐方案下  $Q\leq 11\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$  以下与最低通航水位工况之间各级流量船舶进、出闸操纵性能较好。



a) 进闸

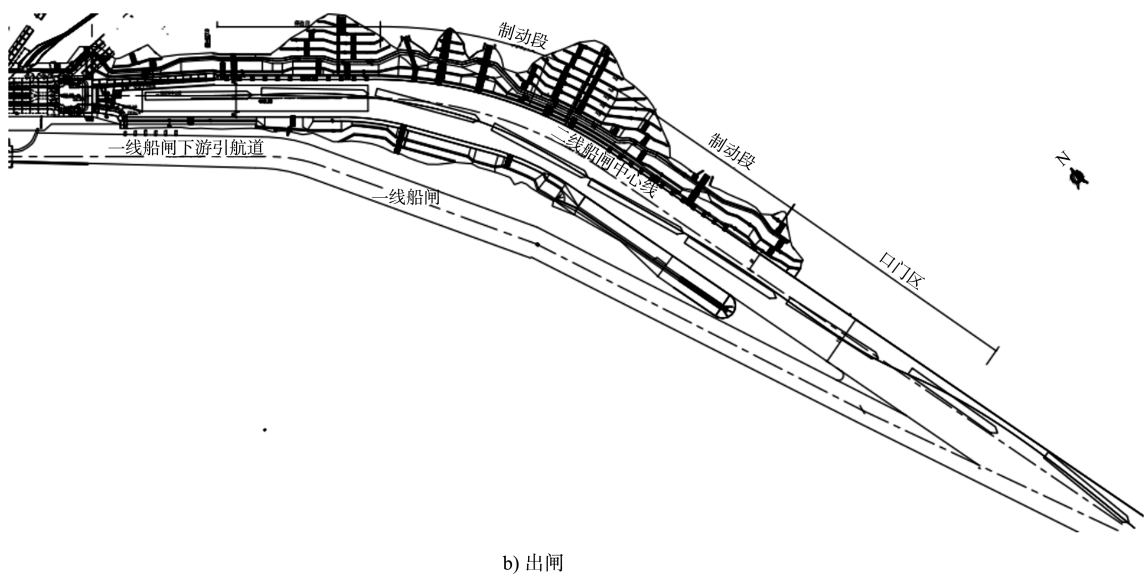


图 6 二线船闸进、出闸船舶航迹线及航行姿态

5 结语

1)红花枢纽下游极低通航水位下,河道滩地大面积露出,同时二线船闸航道的挖深等效于河道深泓左移,兼有一线船闸附近沙洲对水流的挑流和压缩作用,导致小流量工况下,河道右侧约2/3断面几乎不过流,口门区均出现较大横流和回流区等不利水力现象,影响船舶通航安全。

2)针对极低通航水位存在的问题,结合河床形态和枢纽总体布置,提出局部疏浚碍航滩段配合导流墩或大区域挖槽导流、辅以深槽与一线船闸之间洼地回填隔流等工程措施,有效改善了下引航道通航条件。

3)在推荐方案下,  $Q \leq 11\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$  各级通航流量,船舶均能顺利进出引航道口门区及连接段,随着流量减小,操舵过程逐渐简单,漂角过程线趋于平缓,船舶操纵性逐渐改善。船模航行试验验证船舶可以安全平稳地通过口门区,且船舶操纵参数均在要求范围以内。

参考文献:

[1] 廖鹏.内河船闸通过能力研究进展[J].水利水运工程学

报, 2009(3): 34-40.

[2] 余凯, 马骏, 王志鹏.赣江井冈山航电枢纽船闸下游口门区及连接段通航水流条件试验研究[J].水运工程, 2020(11): 122-126.

[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] 徐进超, 宣国祥, 刘本芹, 等.贵港二线船闸下引航道物理模型试验研究[J].水利水运工程学报, 2017(6): 9-13.

[5] 胡旭跃, 李彪, 徐立君.水利枢纽通航水流条件研究综述[J].水运工程, 2005(11): 65-70.

[6] 刘亚辉, 王云莉, 张绍培, 等.窄深河道急弯下游枢纽上引航道布置及通航水流条件试验[J].水运工程, 2020, 573(9): 118-125.

[7] 东培华, 马洪亮, 尤薇, 等.多线船闸下游引航道通航水流条件及改善方案研究[J].水道港口, 2013, 34(5): 420-424.

[8] 田辉.船闸引航道口门区通航水流条件研究[D].长沙: 长沙理工大学, 2013.

[9] 宁武, 姜兴良.船闸工程下游设计最低通航水位影响因素[J].中国水运(下半月), 2017, 17(9): 157-160.

(本文编辑 郭雪珍)