



# S形弯曲河段低水头闸坝枢纽口门区 通航水流条件研究\*

程璐<sup>1,2</sup>, 赵建钧<sup>1</sup>, 辜晋德<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院, 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,  
通航建筑物建设技术交通行业重点实验室, 江苏南京 210029; 2. 河海大学, 江苏南京 210098)

**摘要:**以老口枢纽为例, 分析S形弯曲河段上低水头闸坝枢纽引航道上、下游口门区水流特点, 通过整体物理模型试验及自航船模验证试验, 提出改善水流条件的具体措施。研究表明: 通过修改上下引航道隔墙形式、局部地形开挖、岸坡回填、增设潜丁坝, 以及调整凸岸岸线等措施, 调整了引航道中心线位置并缩小引航道中心线与河道主流流向交角, 减弱或消除了上下游引航道及口门区存在的回流、挑流及隔墙堤头的绕流等不利流态, 有效改善了老口枢纽的通航水流条件, 为S形弯曲河段低水头闸坝枢纽设计提供参考。

**关键词:**老口枢纽; S形弯曲河段; 引航道; 通航条件; 整流措施

中图分类号: U 61; U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0106-07

## Navigation condition at entrance of approach channel of low-head hydro-junction in S-shaped curved river

CHENG Lu<sup>1,2</sup>, ZHAO Jian-jun<sup>1</sup>, GU Jin-de<sup>1</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering,  
Key Laboratory of Navigation Structure Construction Technology, Ministry of Transport, PRC, Nanjing 210029, China;  
2. Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Taking Laokou junction for example, we study the flow patterns in the upper & downstream entrance area of approach channel on S-shaped curved river by physical model test. The overall model test of Laokou junction and the self-propelled ship model test with both scales 1:100 are adopted to choose some comprehensive measures to improve the flow patterns near the upper approach channel and downstream approach channel. The study results show that, some modification facilities such as partition walls with hollow base, diversion pier, slope excavation, back slope, submerged dike and adjusting bank line, are all used in the modification scheme and get great effect, which provide a basis for the optimized arrangement and navigation condition design.

**Keywords:** Laokou junction; S-shaped curved river; approach channel; navigation condition; modification measure

老口枢纽位于左、右江汇合口下游的反S形河段上, 通航建筑物布置在河道左岸, 上游引航道口门区处于反S形河段上弯道180°转向顶点下

游凹岸, 下游引航道口门区处于反S形河段下弯道顶点附近凸岸(图1)。枢纽布置从左到右依次为: 左岸接头土坝、船闸、门库坝段、泄水闸

收稿日期: 2016-09-19

\*基金项目: 国家重点研发计划 (2016YFC0402004, 2016YFC0401704, 2016YFC0401906)

作者简介: 程璐 (1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事通航水力学研究。

坝、电站厂房、右岸接头混凝土重力坝,船闸通航标准为 $2 \times 1\,000$ 吨级顶推船队。上游最高通航水位 $79.73\text{ m}$ ( $10\text{ a}$ 一遇洪水, $Q=13\,900\text{ m}^3/\text{s}$ ),最低通航水位 $72.00\text{ m}$ (水库最低运行水位, $Q=6\,300\text{ m}^3/\text{s}$ );下游最高通航水位 $79.43\text{ m}$ ( $10\text{ a}$ 一遇洪水, $Q=13\,900\text{ m}^3/\text{s}$ ),最低通航水位 $61.06\text{ m}$ ( $Q=243\text{ m}^3/\text{s}$ )<sup>[1]</sup>。

受上、下游弯曲河段的影响,口门区及连接段通航水流条件较为复杂,存在比较严重的横向

环流、螺旋流、斜向流,导致航行船舶(队)产生横漂和扭转,严重时会出现失控,严重威胁船舶通航安全。同时,老口枢纽为低水头闸坝型结构,泄水闸泄流存在大泄量、高淹没度、低 $Fr$ 数下消能效率较低的问题,枢纽布置和闸下消能等方面的问题较为突出<sup>[2]</sup>。以老口枢纽为例,分析典型弯曲河段中枢纽通航建筑物口门区水流特征,研究改善口门区水流条件的整流措施,对于航运安全技术的提高具有重要意义。

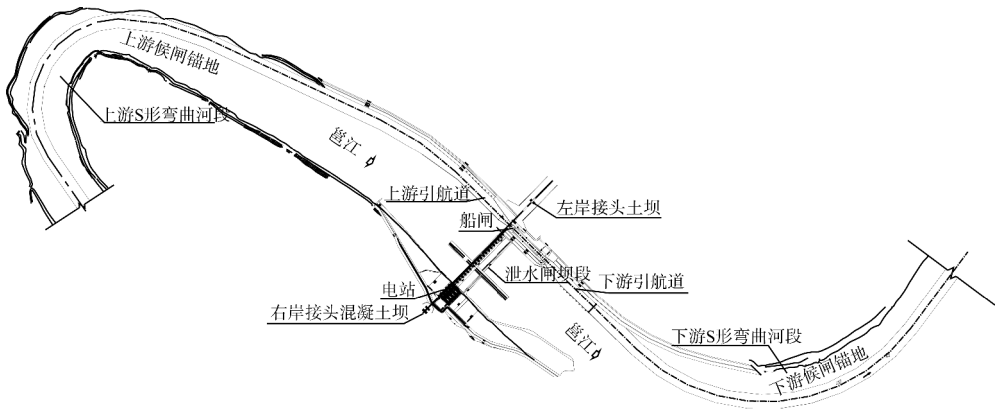


图1 老口枢纽原布置方案

## 1 引航道口门区水流条件标准

在《船闸设计规范》编制过程中,对船舶的通航条件进行了较全面的研究,进行了实船、船模及船模动态校核等项试验,得到了船舶(队)进出口门时安全的水力条件,并由试验得到顶推船队不同航速时相应的允许横向流速限值,同时要求船队在不均匀的横流航区,当发生偏转运动时,船队舵的转动力矩大于横向流速对船体的转动力矩。这些试验成果为制定船闸设计规范提供了依据<sup>[3]</sup>。

JTJ 305—2001《船闸总体设计规范》规定,引航道口门区水面最大流速限值,对 $1\sim 4$ 级船闸, $v_y \leq 2\text{ m/s}$ , $v_x \leq 0.3\text{ m/s}$ , $v_{\text{回}} \leq 0.4\text{ m/s}$ ;对 $5\sim 7$ 级船闸, $v_y \leq 1.5\text{ m/s}$ , $v_x \leq 0.25\text{ m/s}$ , $v_{\text{回}} \leq 0.4\text{ m/s}$ 。

我国自20世纪70年代开始研究使用遥控自航船模,并开发应用船模操纵模拟器等新技术,将研究船闸引航道口门区的斜流效应及将减小横流的措施提高到新水平<sup>[4]</sup>。同时,提出了相应的规定,如船舶(队)航行漂角 $\beta \leq 10^\circ$ ,船舶航行操舵角 $\delta \leq 20^\circ$ 等。

## 2 研究方法及模型设计

通常采用物理模型试验方法研究复杂条件下通航枢纽引航道及口门区通航水流条件及改善措施。本文将比尺为 $1:100$ 的枢纽整体水力学物理模型试验和遥控自航船模试验相结合,重点研究枢纽口门区和连接段的通航水流条件和船模航行条件等,提出改善水流条件的综合整流措施以及枢纽整体优化布置方案。

### 2.1 整体物理模型

模型采用 $Fr$ 相似准则设计,在最小通航流量 $243\text{ m}^3/\text{s}$ 下,原型河道水深约 $3\text{ m}$ ,断面平均流速约 $0.60\text{ m/s}$ ,考虑模型雷诺数相似的要求,将模型设计为几何比尺 $1:100$ 的正态模型。同时考虑到模型上下游边界对通航试验水流条件的影响,模型上游进口设置在上弯道上游约 $1\text{ km}$ ,下游出口设置在下弯道下游约 $1\text{ km}$ ,模型总长约相当于原型 $7\text{ km}$ 。

通常山区型河道糙率在 $0.030\sim 0.035$ ,相应要求模型糙率在 $0.014\sim 0.016$ ,模型表面采用水

泥沙浆抹面基本可以满足糙率相似要求。枢纽建筑物部分采用有机塑料板制作，其中泄水闸、引航道精确模拟，电站厂房模拟进出口体型，船闸模型的闸室符合几何相似。

### 2.2 整体物理模型验证

为确保模型能够准确复演天然河道流态，进行了模型水面线率定。原型实测及模型测得枯水流量(300 m<sup>3</sup>/s)坝址河段水面线见图2。验证结果表明，模型水位与原型实测基本一致，最大偏差小于0.06 m，在较枯流量下，模型河道基本能够复演坝址河段天然水流特性。

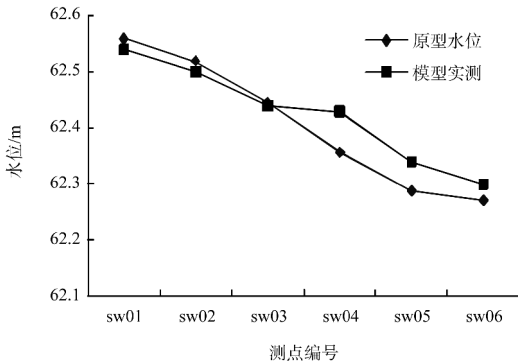


图2 坝址河段枯水面线(Q=300 m<sup>3</sup>/s)验证

2008年8月和2008年9月分别实测了两次洪水老口枢纽坝址河段水面线。实测流量10 900 m<sup>3</sup>/s与模型施放流量11 800 m<sup>3</sup>/s比较接近，分析原型和模型各水尺与坝址水尺之间水位差列于表1，模型与原型各水尺与坝址水尺之间水位差偏差小于0.1 m，模型水面线与原型水面线符合性较好。

表1 模型与实测坝址河段水面线对比

测点编号	水位/m		与坝址水位差/m		区间水位差偏差/m
	流量	流量	流量	流量	
	11 800 m <sup>3</sup> /s (模型)	10 900 m <sup>3</sup> /s (实测)	11 800 m <sup>3</sup> /s (模型)	10 900 m <sup>3</sup> /s (实测)	
sw01	78.02	77.09	0.10	0.08	0.02
sw02	77.95	77.05	0.30	0.04	-0.01
sw03	77.92	77.01	0.00	0.00	0.00
sw04	77.91	76.70	-0.01	-0.01	0.00
sw05	77.78	76.94	-0.14	-0.07	-0.07
sw06	77.75	76.93	-0.17	-0.08	-0.09

### 2.3 船模设计与制作

自航船模按重力相似准则设计，比尺与水工模

型一致为1:100。船闸通过船舶吨级为2×1 000 t，设计代表驳船船队组合为2驳1顶，设计船队尺度为160.0 m×10.8 m×2.0 m(长×宽×吃水)，以及1 000 t自航船舶，尺度为67.5 m×10.8 m×2.0 m(长×宽×吃水)。船模除满足与实船的尺度、线型几何相似外，船模与实船的排水量也相似，即 $\lambda_w = \lambda_L^3$ 。

船模制作主要根据船舶的线型图、桨叶图、舵叶图按几何比尺缩尺加工，制作的技术要求依据JTJ/T 232—1998《内河航道与港口水流、泥沙模拟技术规程》执行。船模制成后，进行操纵性率定试验，进行了尺度效应修正，达到航行相似。

### 3 引航道口门区通航水流条件改善措施

老口枢纽引航道口门区是指引航道分水建筑物头部外一定范围内的水域，处于河流动水与引航道静水的交界处，是船闸进出口与河道自由航行河段起纽带作用的区域。影响引航道口门区水流条件的因素有：河道正常过流、枢纽布置方式、泄水闸开启方式、电站调节水量变化、船闸充泄水等。

#### 3.1 原布置方案引航道口门区水流特征

各级通航流量(6 300 m<sup>3</sup>/s ≤ Q ≤ 13 900 m<sup>3</sup>/s)下，枢纽来流受上游弯道影响，主流基本偏向河道凹岸(左岸)，凸岸一侧流速较小，在电站上游引水渠存在回流区(图3)，在引航道内及口门区内也存在强度较强回流区。在上引航道隔墙堤头有绕流存在，局部点横向流速大于0.3 m/s，在Q=11 800 m<sup>3</sup>/s工况下，最大横向流速0.8 m/s。在距口门约600 m的连接段上，受上游弯道水流和局部地形突变的影响，部分测点横向流速>0.3 m/s，纵向流速>2.0 m/s。



图3 枢纽敞泄电站上游回流

枢纽下泄水流呈现出左侧大、右侧小的分布,在下游弯道束窄段,河道水深增大明显,主流也逐渐由左侧向河道深泓区过渡。原布置方案下枢纽泄洪时,下泄水流受下游弯道影响,主流偏向右岸,受下引航道隔墙挑流作用及凸岸地形影响,下引航道口门区流态复杂,存在贴岸回流、隔墙挑流回流及其他次生回流的多种作用,水流条件较差(图4)。在 $Q=6\ 300\ \text{m}^3/\text{s}$ 工况下,在下引航道口门区附近,主流已开始向右岸深泓区偏移,在口门区附近断面,河道最大流速 $0.85\ \text{m/s}$ 左右。在最大通航流量 $Q=13\ 900\ \text{m}^3/\text{s}$ 工况下,口门区航道中心线右侧纵向流速达到 $2.5\ \text{m/s}$ 以上,中心线上最大流速达 $2.73\ \text{m/s}$ ,连接段上普遍超过 $2.0\ \text{m/s}$ ,船舶上行进闸较为困难。

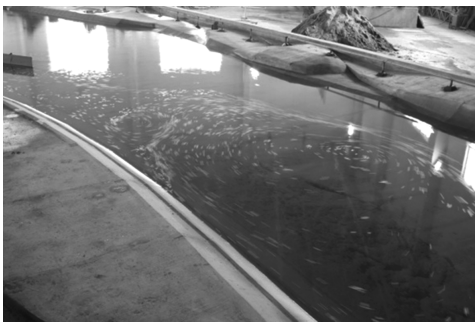


图4 电站满发下引航道口门区回流

从流态上看, S形弯曲河段造成横向环流,水流沿河槽运动,流态不能够及时调整,会产生岸坡顶冲现象,弯曲河段中水流顶冲点常出现在弯顶前凸岸侧。随着流量的增大,顶冲点的位置下移,同时主流线向河道中间移动。

引航道通常布置于河道的一侧,上、下游引航道轴线与河槽主流方向存在一定交角,因水流流向与航线不一致造成水流的分流、扩散和旋涡等不良流态,在引航道口门区及连接段产生斜向水流和回流。河道的主流与航道轴线夹角越大,斜向流作用越明显;在引航道隔流建筑物的末端,由于主河道运动的水流与引航道内相对静止的水流流速不同、存在压力梯度,导致两种水流之间相对运动,发生水流扩散现象,进而产生旋转翻

滚的回流区。弯曲河段的三维螺旋流与口门区附近动静水结合部位的水流相互作用,水流的流速场和压力场都发生明显变化,水流流动呈现出高度的三维特性,在口门区出现复杂的回流区。河道水流流速越大,口门区的回流强度和范围也越大。

由于老口枢纽为低水头闸坝型结构,泄水闸泄流存在大泄量、高淹没度、低 $F_r$ 数下消能效率较低等问题,当枢纽下泄流量较大时,对下游引航道口门区产生一定的冲击作用,加剧口门区斜向流的强度。此外,下游引航道末端过水断面发生突扩,也加剧了口门区的斜向流。

### 3.2 整流措施及效果

船舶进入上游口门区主要受横向水流的作用。目前,改善横向水流的措施有:导航堤堤头与堤身开孔;口门外一定距离设置丁坝(或潜丁坝);在导航堤前方加设一定数量的潜坝;局部地形开挖或岸坡回填等<sup>[5]</sup>。

#### 3.2.1 底部开孔式分水隔墙

为了改善引航道隔墙堤头存在绕流及局部横向流速超标的情况(图5),将上引航道隔墙底部开孔,从口门顺流引部分流量进入引航道内,然后通过隔墙底部出水孔从引航道内沿程向外排出,以减弱堤头绕流的影响,同时对堤头附近岸坡进行回填,以平顺水流边界,降低横向流速<sup>[6]</sup>。



图5 引航道隔墙堤头流态

上引航道隔墙外扩段开孔后,口门附近的流态明显改善,水流流态较为平顺(图6),堤头绕

流明显减弱，靠近隔墙一侧进入引航道的流速增大，引航道内存在回流，但强度较弱，能够达到通航水流条件标准。

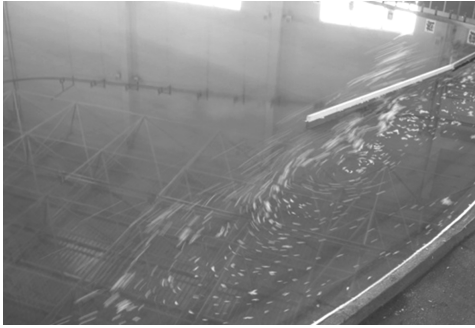


图6 隔墙开孔后口门区流态

研究对比不同开孔面积和引流流量的整流效果，结果表明：如果引入引航道的流量太小，则不能起到改善流态的作用；如果开孔面积过大，尽管堤头绕流现象减弱明显，但是靠近隔墙一侧进入引航道的流速增大，在剪切作用下会导致引航道内的回流强度增加。通过模型试验，确定分水隔墙开孔高程为 68.5~70.5 m，开孔宽度为 8 m。开孔布置方案见图 7。

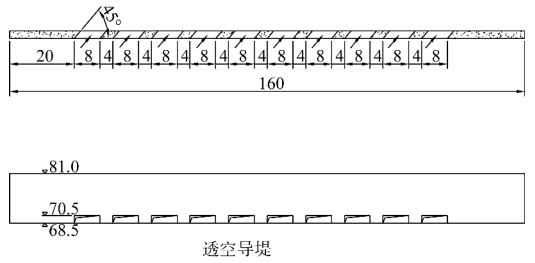


图7 上引航道分水隔墙开孔方案 (单位: m)

### 3.2.2 设置潜丁坝并结合地形开挖及岸坡回填

上引航道在距口门约 600 m 附近的连接段上，受弯道水流和局部地形的双重作用，横向水流局部达 0.6 m/s，纵向水流局部达 2.86 m/s，对船舶操纵有不利影响。为了局部改善水流条件，试验尝试了在凹岸设置顶高程为 68.5 m 的潜坝，但受到河势影响，弯道水流偏向凹岸一侧的现象在较短的距离内人为改变较为困难，单纯布置 1 个潜坝对改善通航水流条件的作用有限。因此，考虑到平顺岸线、消除局部地形突变所引起的水流条件的突变等因素，对局部地形进行开挖，并对岸侧突出岬点上下游局部进行回填。整流方案布置见图 8。

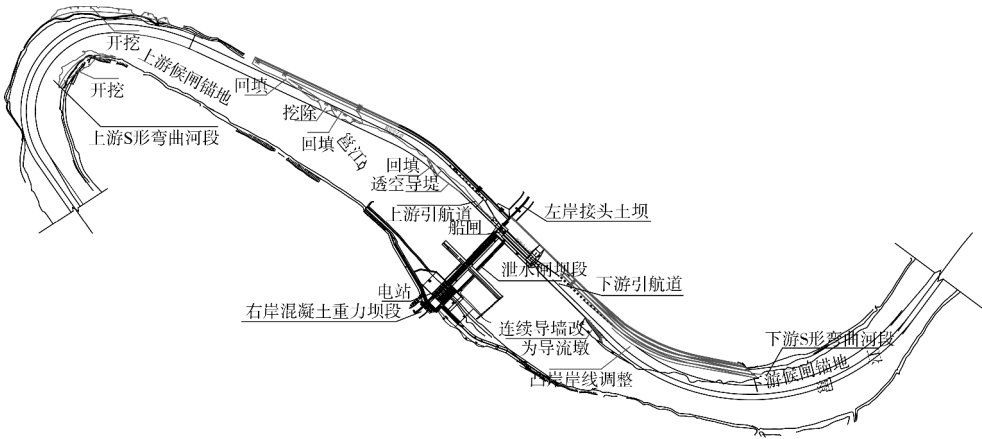


图8 引航道口门区整流方案布置

该整流方案试验结果显示，连接段水流条件改善明显，较好地消除了连接段上岸边回流。其中，局部地形开挖结合岸坡回填对消除连接段上岸边回流作用较明显。该方案在  $Q=8\ 690\ \text{m}^3/\text{s}$  工况下，连接段水流纵向流速基本在 2.3 m/s 以下，横向流速仅个别点大于 0.3 m/s，但小于 0.35 m/s；在  $Q=13\ 900\ \text{m}^3/\text{s}$  工况下，连接段水流纵向流速

在 2.7 m/s 以下，横向流速在 0.45 m/s 以下。

### 3.2.3 凸岸岸线调整

上游通航水流条件得到一定的改善后，模型试验针对下游引航道及口门区连接段存在的不良流态制定相应的整流改善措施。

由于受下游弯道水流影响，凸岸存在较强的贴岸回流，回流压缩了过流断面，增大了航线上

纵向流速,且横向流速也较大,因此考虑调整下游凸岸岸线,减少贴岸回流区的开挖,以减弱贴岸回流的强度及对口门区水流条件的影响。

凸岸岸线调整方案见图8。试验结果显示,下游凸岸岸线调整以后,贴岸回流得到了削弱,但引航道分水隔墙挑流作用引起的口门区回流仍然存在,需要进一步结合其他形式的整流措施。

### 3.2.4 导流墩

针对口门区存在下引航道隔墙引起的挑流回流且回流范围较大问题,整流方案在下游凸岸岸线调整的基础上,在引航道导流堤堤头口门区的动静水交界面设置导流墩,可以削弱斜向水流的作用,减小斜向水流的夹角和横向流速分量,同时由于导流墩的作用还在于可以将大的回流分解为若干个小的回流,缩小回流的范围、减小回流的流速、缩短流速见前面位置恢复距离等。

通过模型试验研究对比了不同导流墩的外扩角度及导流墩中心距离、导流墩的墩头形式、导流墩个数等,确定整流方案为:将原方案中的连续导墙改为10个导流墩;选取的导流墩形式为:轴线外扩角度 $8^\circ$ ,导流墩与中心线交角 $20^\circ$ ,导流墩中心距15 m,同时对导流墩上部进行封堵,形成潜孔,开孔高度15 m。在导流墩末端布置25 m外扩隔墙,与航道中心线交角为 $30^\circ$ 。整流方案总平面布置见图8,导流墩具体尺寸及结构布置见图9。

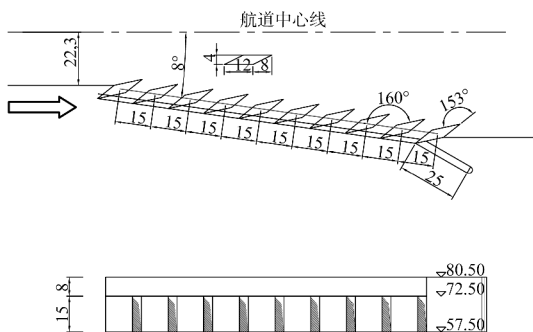


图9 下游引航道导流墩布置(单位:m)

该方案各级通航流量下,下游口门区及连接段流态较好,隔墙引起的挑流、回流等不利流态基本消除。在 $Q=8\ 690\ \text{m}^3/\text{s}$ 工况下,口门区横向及纵向流速均能够满足通航要求,最大通航流量

下( $Q=13\ 900\ \text{m}^3/\text{s}$ ),口门区纵横向流速能够满足要求,连接段纵向流速在 $2.5\ \text{m/s}$ 以下,横向流速在 $0.45\ \text{m/s}$ 以下。

试验结果表明,通过导流墩的引流作用,沿程引入部分水流可以有效削弱口门区回流强度,甚至消除口门区附近的回流,但如果引入流量过大,则导致了口门区纵向流速超标。

## 4 自航船模验证试验

### 4.1 上游引航道口门区

整流措施及枢纽总体布置方案确定以后,进行了自航船模验证试验。

上游最低通航水位下,船队右舵 $20^\circ$ 可以安全上行通过弯道,最大漂角约 $-10^\circ$ ,平均漂角约 $-6^\circ$ ,船队在距离口门500 m以后,船舶受弯道水流影响较大,在船队上行进入弯道前最大漂角 $-8.0^\circ\sim 8^\circ$ ,船舶可以安全上行。船队下行时,在弯道段下行船舶最大漂角约 $12^\circ$ ,最小漂角 $8^\circ$ ,舵角达到了 $20^\circ$ ,在连接段及口门区,船舶(队)各项操作指标能够满足要求。

在最大通航流量 $13\ 900\ \text{m}^3/\text{s}$ 下,船舶出口门区后,由于纵向流速逐渐增大,对岸航速降低,在口门上游500~1 200 m范围内,航道流速达到了 $2.5\ \text{m/s}$ ,船舶上行较困难,在此区间内上行船舶宜靠近河心行驶,以避免弯道凹岸下游的大流速区;船舶上行进入弯道前,宜基本保持航向,沿规划航线左侧航行,通过弯道下连接段后,操左舵 $20^\circ$ 上行通过弯道后回舵调正航向。下行船队在弯道段为克服受弯道水流避免漂向河道左岸,需提前操舵,选择河道主流区以右舵 $20^\circ$ 下行通过弯道。在出弯道后以应适时操左舵以避免河道局部地形变化引起的横向水流的影响。下行通过弯道段时,船舶漂角达到 $22^\circ$ ,出弯道后,漂角逐渐减小至 $10^\circ$ 以下,距口门1.2 km范围内,漂角不大于 $8^\circ$ ,船队通过弯道需谨慎操作。

试验结果表明:在各级通航流量下,进出闸船舶可以顺利通过上引航道口门区,在距口门700 m范围内,各项指标均可满足要求。

### 4.2 下引航道口门区

不同通航流量下,设计船队均能顺利进出下游引航道及口门区,口门区的各项航模操控指标均满足规范要求,船模可以通过连接段顺利进出口门区,下游布置方案可以满足实际船舶航行的要求。但是,下游航道连接段处于枢纽下游弯道上的主流区,上行船舶进闸时,宜在规划航线靠岸一侧行驶。

## 5 结论

1) 老口枢纽位于S形弯曲河段上,原设计方案下枢纽来流受上游弯道影响,主流基本偏向河道凹岸(左岸),在上下游引航道及口门区都存在回流、挑流,及隔墙堤头的绕流等不利流态,局部点横向流速及纵向流速较大,航行船舶(队)进出船闸时发生横漂和扭转,严重时会出现失控,船舶通行困难。同时,枢纽本身为低水头闸坝型结构,枢纽布置和闸下消能等方面问题较为突出。

2) 针对枢纽上下游航道存在的水力学问题,通过采用局部地形开挖、岸坡回填、增设潜丁坝,以及调整凸岸岸线、修改上下引航道隔墙形式等整流措施,较好地改善了枢纽的通航水流条件,减弱及消除了上下游引航道口门区及连接段存在的不利流态,各级通航流量下纵横向流速能够满

足船舶通航要求,整流措施切实可行,整流方案下的自航船模试验也验证了这一结果。

3) 采用1:100的枢纽整体水力学物理模型试验和遥控自航船模试验相结合的方法,分析典型S形弯曲河段中枢纽通航建筑物口门区水流特征,重点研究枢纽口门区和连接段的通航水流条件和船模航行条件等,提出有效的改善水流条件的综合整流措施,为其他弯曲河段中低水头闸坝枢纽工程的建设提供技术借鉴。

### 参考文献:

[1] 须清华.通航建筑物应用基础研究[M].北京:中国水利水电出版社,1994.

[2] 毛昶熙,周名德,柴恭纯.闸坝工程水力学与设计管理[M].北京:水利电力出版社,1995.

[3] 陈桂馥,张晓明,王召兵.船闸导航建筑物透空形式对通航水流条件的影响[J].水运工程,2004(9):56-58.

[4] 韩昌海,王博文.飞来峡水利枢纽下游引航道口门区通航条件改善途径探讨[J].水运工程,1996(12):26-29.

[5] 赵建钧,宣国祥,程璐.广西郁江老口枢纽工程水工模型试验研究——整体模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2010.

[6] 胡亚安,宣国祥,赵建钧.青田枢纽水工整体模型试验研究报告[R].南京:南京水利科学研究院,2013.

(本文编辑 郭雪珍)

⋯⋯⋯  
(上接第100页)

### 参考文献:

[1] 张绪进,武宁,周家俞.郁江贵港枢纽二线船闸上引航道口门区通航水流条件试验研究[J].中国科技信息,2013(3):109-110.

[2] 郝品正,李伯海,李一兵.大源渡枢纽通航建筑物优化布置及通航条件试验研究[J].水运工程,2000(10):29-33.

[3] 余之光.弯曲河道枢纽布置及通航水流条件研究[D].南京:水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究

院,2013.

[4] 杨宇,韩昌海,李艳富.广西南宁市邕宁水利枢纽工程牛湾坝址整体水工模型试验报告[R].南京:水利部交通运输部国家能源局南京水利科学研究院,2012

[5] JTJ 305—2001 船闸总体设计规范[S].

[6] 李焱,郑宝友,卢文蕾,等.引航道与河流主航道的夹角对通航条件影响试验[J].水道港口,2009(1):42-45.

(本文编辑 郭雪珍)