

# 船闸凹岸布置上下游引航道水流条件优化\*



李君<sup>1</sup>, 赵建钧<sup>1</sup>, 洪娟<sup>2</sup>, 宣国祥<sup>1</sup>, 王小东<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. 中国人民解放军理工大学野战工程学院, 江苏南京 210007)

**摘要:** 峡江枢纽是赣江高等级航道的控制性工程, 坝址所在河段呈“S”形急弯形态, 枢纽采用集中异岸布置, 船闸布置在河道凹岸, 上游引航道口门位于“S”形河段上弯道凸岸下游, 下游引航道口门区位于下弯道凹岸河道主流顶冲点附近, 布置不利于通航水流条件, 同时该枢纽还具有低水头、大流量的特点, 因而船闸上下游引航道口门区及连接段通航水流条件复杂。通过 1:110 枢纽整体水工模型及自航船模试验, 提出并论证了枢纽上游采用顺岸式整治方案、下游采用顺岸式整治方案结合透空式隔流导墙的综合措施, 极大改善了船闸上下游引航道及其口门区通航水流条件, 各项水力指标均满足了规范要求, 确保过闸船舶的安全。

**关键词:** 船闸; 凹岸布置; 通航水力学; 模型试验; 自航船模

中图分类号: U 641.2<sup>+</sup>11

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2016)12-0101-05

## Flow condition optimization for upstream and downstream approach channels when ship lock lies on concave bank

LI Jun<sup>1</sup>, ZHAO Jian-jun<sup>1</sup>, HONG Juan<sup>2</sup>, XUAN Guo-xiang<sup>1</sup>, WANG Xiao-dong<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. PLA University of Science & Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** Xiajiang hydro-junction is one of the control project of the Ganjiang high level navigation channel, in which the dam site locates at an “S” type sharp bend river section. The junction adopts the layout of structures concentrated with power house and ship lock at different banks. The lock is on the concave bank, and its entrance area of upstream approach channel lies on the downstream of in which the upstream bend convex of the “S” section and the entrance area of downstream approach channel lies on the downstream bend concave of the “S” section, which is neither favourable to the navigation flow condition. Meanwhile, the junction also has the characteristics of low water head and large discharge, all of above provide a complicated navigation flow condition. With the scale model experimentation of the overall junction and the self-propelled ship model experimentation (scale is 1:110), the comprehensive optimization measures have been put forward and verified, which are the along bank control for the both the upstream and downstream and bottom-open-type guide wall for the downstream, and the measures greatly improve the flow conditions in the entrance area of the upstream and downstream approach channels, and all the hydraulic characteristics satisfy the rules, the navigation safety of ship has been confirmed.

**Keywords:** ship lock; concave bank; navigation hydraulics; model experiment; self-propelled ship model

收稿日期: 2016-09-16

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

作者简介: 李君 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事通航建筑物水力学研究。

赣江自南向北纵贯江西省,是国家高等级航道网“十八线”之一。峡江水利枢纽工程位于赣江中游峡江县老县城上游峡谷“S”形急弯河段(图1),是一座以防洪为主,兼有发电、灌溉和航运等综合利用功能的大型水利枢纽工程。枢纽建成后可渠化航道约77 km,对实现赣江航道全线达到三级及以上通航标准具有关键作用。



图1 峡江枢纽坝址所在河段

枢纽主要建筑物总体布置沿轴线从左至右依此为:左岸挡水坝段、船闸、门库坝段、泄水闸、厂房坝段、右岸挡水坝,最大坝高23.1 m,坝顶全长841 m,枢纽总体布置见图2。峡江船闸为内河Ⅲ级,采用单级单线布置,布置于左岸,并预留二线船闸位置,闸室有效尺寸为180 m×23 m×3.5 m(长×宽×门槛水深),通航1 000吨级双排单列一顶二驳船队,设计通航保证率为97%,设计船队尺度为160 m×10.8 m×2.0 m(长×宽×吃水),设计最大水头为15.7 m。

由于峡江枢纽整体布置需求,船闸布置于河段凹岸,其上、下游引航道布置均不利于通航水流条件(上游引航道口门位于“S”形河段上弯道凸岸下游,下游引航道口门区处于下弯道凹岸河道主流顶冲点附近)。因此,为解决枢纽通航水力学问题,确保船舶(队)在船闸引航道口门区及连接段的航行安全,需通过水工模型试验及自航船舶试验论证枢纽引航道布置方案的合理性,并提出相应的优化措施,以创造安全的通航水流条件<sup>[1-2]</sup>。

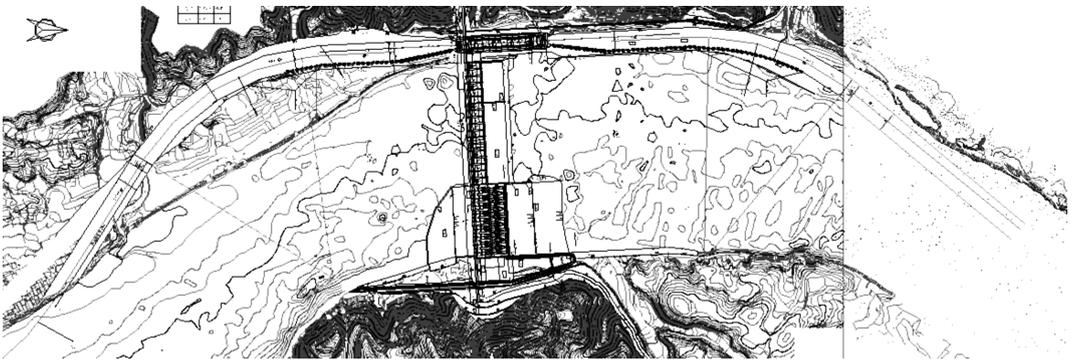


图2 峡江水利枢纽总体布置(原方案)

本文通过比尺为1:110的枢纽整体物理模型,分别进行了各典型通航流量下的上、下游引航道口门区及连接段水流条件优化试验,并通过自航船舶对优化后的通航水流条件进行验证。

## 1 枢纽上游通航水流条件优化

### 1.1 原布置方案通航水流条件

峡江船闸上游引航道采用了曲线进闸、直线出闸的不对称布置形式。主导航墙(长162 m)兼具

调顺和导航作用,停船段(长224 m,底宽55 m)通过分水墙(转弯半径640 m,转角50°,底宽60 m)与引航道口门区相连接。口门区位于上游左岸冲沟及冲沟上游阶地之上,通过直线连接段与上游左侧主航道衔接,具体布置见图1。

原布置方案试验成果表明,由于上游引航道口门区基本处于枢纽“S”形上弯道凸岸下游,受弯道地形影响,上游引航道中心线与河道主流方向夹角较大,导致上游引航道口门区产生大范围超标回

流及横流。设计最大通航流量( $Q=19\ 700\ \text{m}^3/\text{s}$ )工况下口门区最大回流流速达 $1.6\ \text{m/s}$ ,最大横流流速达 $0.7\ \text{m/s}$ ,5 a一遇洪水( $Q=14\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )工况下口门区最大回流流速达 $0.5\ \text{m/s}$ ,最大横流速达 $0.3\ \text{m/s}$ 。上述水流条件均超过了规范<sup>[3-4]</sup>允许值,将直接影响到船舶的安全行驶<sup>[5]</sup>,因此需对上游引航道原布置方案进行优化调整。

## 1.2 优化布置方案通航水流条件

由原布置方案试验成果可知,造成上游引航道口门区及连接段流速超标的主要原因为枢纽所在弯曲河段导致的原引航道中心线与河道主流夹角较大。为缩小其与河道主流流向的交角,对上游引航道中心线进行了调整,并在航道左边界加设导流堤,调整上游引航道口门区及连接段开挖左边界。此外,原上游引航道口门区右侧突出高地也是导致口门区产生超标回流的重要原因,亦对其进行整治开挖,以削弱由此处突出地形引起的回流,同时在此处设置挡船墩群,扩大上游引航道口门张角,延长船舶驾驶反应时间,一定程度上能够保证绕过“S”形上弯道凸岸的船舶穿过河道主流安全地进入引航道口门区。

通过观测比较上游引航道口门区及连接段不同开挖左边界情形下通航水流条件发现,调整上游引航道口门区及连接段开挖左边界对改善引航道口门区通航水流条件是有利的,开挖左边界越靠左岸,引航道中心线与河道主流夹角越小,口门区通航水流条件越有利,综合考虑到工程设计的经济和施工的难度,最终推荐相对较优的布置方案如图3所示。

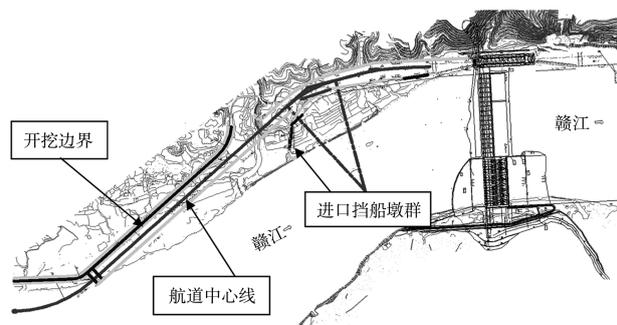


图3 峡江船闸上游引航道推荐布置方案

在推荐的布置方案下开展了典型流量的通航水流条件试验,结果表明调整上游引航道口门区及连接段开挖左边界对改善引航道口门区通航水流条件是有利的。在此方案下,设计最大通航流量( $Q=17\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$ )下,上游引航道口门区回流范围及回流强度较大,局部回流流速大于 $1.0\ \text{m/s}$ ,受弯道凸岸地形影响,在上游引航道口门上游 $800\sim 900\ \text{m}$ 处,航道中心线右侧局部横向流速 $>0.3\ \text{m/s}$ ,但较原方案有较大的改善; $Q<17\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$ 以下各级流量口门区及连接段水流纵、横向流速分布基本能够满足规范要求,仅在上游引航道口门上游 $800\sim 900\ \text{m}$ 处个别点横向流速大于 $0.3\ \text{m/s}$ 。

## 2 枢纽下游通航水流条件优化

### 2.1 原布置方案通航水流条件

峡江枢纽船闸下游引航道采用了曲线出闸、直线进闸的不对称布置形式。主导航墙(长 $162\ \text{m}$ )兼具调顺和导航作用,停船段(长 $248\ \text{m}$ ,底宽 $55\ \text{m}$ )通过分水墙(转弯半径 $640\ \text{m}$ ,转角 $38^\circ$ ,底宽 $60\ \text{m}$ )与引航道口门区相连接。口门区位于左岸冲沟下游阶地之上,通过直线连接段与下游左侧主航道衔接(图2)。

原布置方案试验结果表明,由于下游引航道口门区基本处于“S”形下弯道凹岸,引航道中心线与河道主流流向夹角较大,口门区存在小范围回流,枢纽下泄形成直冲下游引航道口门区的斜向水流,造成下游引航道口门区纵、横向流速偏大,5 a一遇洪水( $Q=14\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )工况下口门下游 $150\ \text{m}$ 处最大横流流速已达到 $1\ \text{m/s}$ ,最大纵向流速则达到 $2.08\ \text{m/s}$ ,均超过规范标准,将直接影响到船舶的安全行驶。因此,需对下游引航道布置进行优化调整。

### 2.2 优化布置方案通航水流条件

根据原布置方案试验结果可知,解决下游引航道口门区及连接段流速超标的主要目标为缩小航道中心线与下泄主流流向的交角,并适当向下游引航道口门区引入部分流量以减小回流影响。经综合考虑,进行了以下优化措施研究<sup>[6-9]</sup>:

1) 取消原转弯段分水墙, 使口门区上移; 2) 口门区加设伸向河道中心的导流墩群; 3) 采用伸向河道中心更远的底部透空式导流隔墙代替原导

流墩群; 4) 对下游引航道口门区及连接段开挖左边界进行调整。各种措施及措施组合对通航水流条件的优化效果对比见表1。

表1 下游引航道口门区及连接段通航水流条件优化措施效果对比

优化方案序号	优化措施	优化效果
1	取消原转弯段分水墙	口门区纵、横流流速超标现象较原方案下虽有所改善, 但同时口门区原有回流范围变大, 强度变强
2	取消原转弯段分水墙及部分直线段分水墙+加设导流墩群	部分水流导入引航道内后, 口门区回流范围有所减小, 但引入流量偏大, 导致停船段内横向流速超标, 且导流墩群后存在间歇性旋流
3	取消原转弯段分水墙+加设菱形导流墩群+调整开挖左边界	口门区回流范围减小, 横向水流较上一方案进一步改善, 但在部分流量下横向流速仍不满足规范要求, 且导流墩群后存在间歇性旋流
4	加设底部透空式导航墙+调整开挖左边界	口门区纵、横向流速基本满足规范要求, 仅极小范围横向流速略大于0.3 m/s, 且位于航道中心线右侧的航道边缘上, 对船舶航行影响较小, 回流范围及回流强度均有所减小, 并且消除了方案2、3中存在的导流墩后间歇性旋流, 使得口门区整体流态更加稳定

对比各种优化方案, 最终推荐采用方案4的布置(图4), 与枢纽原布置方案(图2)相比, 推荐方案取消原布置方案下转弯段分水墙, 代之以伸向河道中心的底部透空导流隔墙, 使得原方案中主流顶冲点下移, 处于下泄主流顶冲点附近的口门区上移, 同时枢纽左侧下泄水流在底部透空导流隔墙的引导下平顺扩散进入引航道口门区; 此外, 对下游引航道口门区及连接段开挖左边界进行调整, 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。

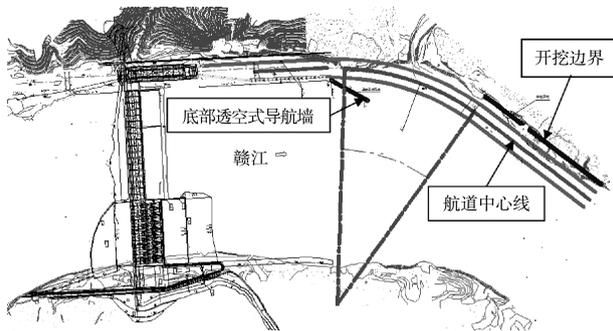


图4 峡江船闸下游引航道推荐布置方案

推荐方案试验结果表明, 2 a 一遇洪水( $Q=10\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )以下各级流量下游引航道口门区水流纵、横向流速分布均能够满足规范要求; 2 a 一遇洪水( $Q=10\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )工况需要调整枢纽运行方式, 由原来开启泄水闸左6孔调整为开启泄水闸右12孔; 5 a 一遇洪水( $Q=14\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )工况下,

仅引航道口门区下游270 m处极小区域横向流速超标, 其余均满足规范要求; 5 a 一遇洪水( $Q=14\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )以上流量工况引航道口门区存在大范围超标横向水流。

### 3 自航船模航行试验

#### 3.1 上游引航道自航船模航行试验

5 a 一遇洪水( $Q=14\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )工况下1顶2驳船队上行出闸航迹线见图5a)。上行出闸船队出闸后, 需预先操左舵, 向左偏转经过上游引航道直线段, 再向左舵 $16^\circ$ 通过上游引航道转弯段后, 在上游引航道口门区, 根据船舶姿态, 适时调整舵角, 通过上游引航道口门区, 然后操右舵, 逐渐向右偏转, 调整航向通过上游引航道口门区及连接段。船舶出闸过程中, 左右最大漂角分别为 $-8^\circ$ 和 $10^\circ$ , 主要出现在出闸口门区段, 以向右漂为主。从操舵过程线可以看出, 在上游引航道口门区, 需操右舵并适时调整舵角, 以保持航向稳定。

1顶2驳船队下行进闸航迹线及船舶姿态见图5b)。在上游引航道连接段, 需适时操舵以克服横向水流作用下船舶的横漂, 及时调整航向; 在口门区前半段需操左舵克服口门区前右向横流的作用, 在距口门约75 m附近预先操右舵转向穿过上游引航道转弯段, 在距弯道终点约40 m处,

开始减速, 调正航向后在直线靠船段靠泊。从操舵过程线可以看出, 下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。进闸过程中最大操舵角  $16^\circ$ , 船舶最大漂角小于  $10^\circ$ , 在口门区船舶左右漂移, 要求操控灵活。

5 a 一遇洪水以下各级流量船舶(队)进、出闸操纵性能较好, 单船进、出闸操纵较船队更为容易。5 a 一遇洪水以上流量船舶操纵十分困难, 无法顺利进、出引航道。

### 3.2 下游引航道自航船模航行试验

在 5 a 一遇洪水( $Q=14\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )工况下, 下游进闸船舶航行轨迹线及航行姿态见图 5c)。进闸船舶(队)在下游引航道连接段需预操左舵  $16^\circ$  进入转弯段, 在口门区前半段操右舵调整航向后以左满舵穿过口门区进入下游引航道靠船段靠泊。进入下游引航道过程中, 漂角在  $-5^\circ\sim 8^\circ$ 。下行出闸船舶航行轨迹线及航行姿态见图 5d)。下行出闸船舶(队)以右舵  $16^\circ$  穿过口门区后, 适时转左舵克服横流作用调整航向, 在连接段以操右舵为主。船舶(队)进入下游引航道过程中, 漂角在  $-8^\circ\sim 2^\circ$ 。

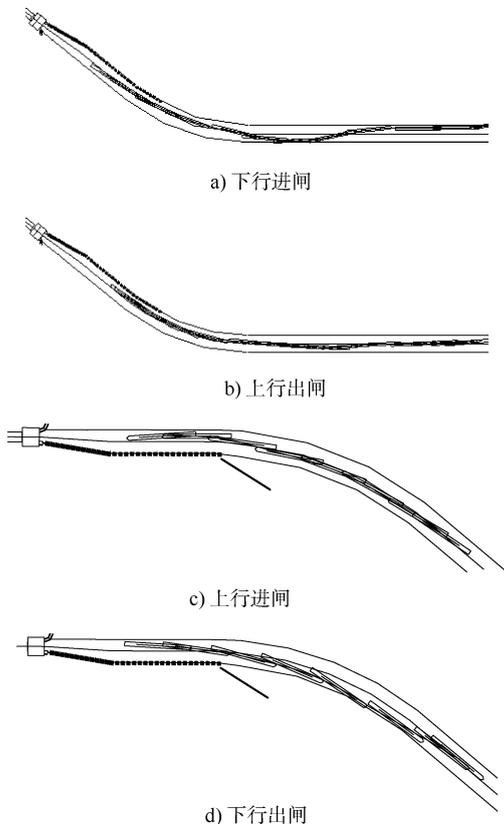


图 5 1 顶 2 驳船队航行轨迹线( $Q=14\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ )

下游最低通航水位工况, 由于此时航道水深较浅, 船舶舵效差, 进闸船舶(队)在下游引航道连接段需频繁操舵调整航向, 在口门区操左舵入下游引航道靠船段靠泊。船舶(队)进入下游引航道过程中, 漂角在  $-4^\circ\sim 9^\circ$ 。船舶下行出闸过程与进闸船舶相似, 先以右舵  $16^\circ$  穿过口门区, 然后减舵角穿过弯道后转左舵以克服连接段上的横流作用。船舶(队)下行出下游引航道过程中, 漂角在  $-9^\circ\sim 5^\circ$ 。

5 a 一遇洪水以下与最低通航水位工况之间各级流量船舶(队)进、出闸操纵性能较好, 单船进、出闸操纵较船队更为容易。5 a 一遇洪水以上流量船舶操纵十分困难, 无法顺利进、出引航道。

## 4 关于峡江枢纽通航标准的讨论

峡江枢纽设计最大通航标准为 10 a 一遇洪水( $Q=17\ 400\ \text{m}^3/\text{s}$ )。但从枢纽整体布置看, 峡江船闸布置在枢纽左侧, 上游引航道口门区位于弯道凸岸一侧, 下游引航道口门位于凹岸一侧, 该布置对通航水流条件十分不利。从水文条件看, 10 a 一遇洪水过程峰形尖瘦, 历时较短, 平均到每年不足 1 d, 对通航的影响有限。从模型试验成果看, 上下游引航道口门区水流条件能够满足 5 a 一遇洪水, 从运行安全角度考虑, 不宜再提高通航标准。从改善水流条件的工程措施来看, 下游引航道口门区位于弯道顶冲点附近, 要改善下游引航道口门区水流条件, 将通航标准提高到 10 a 一遇, 需要在整个弯道段设置较多的整流防护设施, 而且仍需要结合岸线整治工程, 对左岸岸坡进行大范围开挖, 工程量较大, 而仅能增加每年一个通航日, 经济上不尽合理; 另外在河道主流区设置整流设施, 对枢纽行洪也将产生一定的影响。

综合考虑以上因素, 建议峡江枢纽通航标准宜定为 5 a 一遇洪水或以下。