



# “S”形急弯河段通航水流条件研究

颜志庆, 赵建钧, 辜晋德, 王 宇

(南京水利科学研究院, 江苏 南京 210029)

**摘要:** 犬木塘枢纽坝址所在河段呈“S”形急弯形态, 上游口门区位于束窄形弯道凹岸, 下游引航道口门区在弯曲河段转向处, 枢纽泄水时上下游口门区及连接段水流条件复杂, 存在较为严重的斜流和回流, 难以满足通航要求。通过 1:100 整体物理模型试验, 研究上、下游航道不良水流条件形成的主要原因, 通过调整上游航线、隔流墙布置、局部疏浚及下游菱形墩结构和布置等综合措施, 有效降低了口门区纵横向流速和回流流速, 使各项水力指标均满足规范要求, 极大改善了船闸上下游引航道及其口门区通航水流条件, 确保过闸船舶的安全。

**关键词:** 船闸; 通航水流条件; 口门区; 物理模型

**中图分类号:** U 641

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1002-4972(2021)06-0128-07

## Study on navigable flow conditions of S-shaped abrupt bend

YAN Zhi-qing, ZHAO Jian-jun, GU Jin-de, WANG Yu

(Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The river section at the dam site of the Quanmutang Junction is an “S” sharp bend. The upstream entrance area is located on the concave bank of the narrow bend, and the downstream approach channel entrance area is at the turning point of the curved river section. The flow conditions in the entrance area and the connecting section are complicated under the influence of serious oblique flow and backflow, and it is difficult to meet the navigation requirements. The main reasons for the formation of unfavorable flow conditions in the upstream and downstream channels are studied by a model of scale 1: 100. The velocity of cross-flow and backflow is effectively reduced by comprehensive measures such as the adjustment of the upstream route, the arrangement of the dividing wall, the local dredging, and the downstream diamond-shaped pier structure. Flow conditions both in the upstream and downstream approach channels and the entrance area are greatly improved. Hydraulic indicators meet the requirements of the navigation specification, which can ensure the safety of ships.

**Keywords:** ship lock; navigable flow condition; entrance area; physical model

通航建筑物是枢纽通航的咽喉, 而船闸引航道口门区是船舶(队)进出引航道的咽喉<sup>[1]</sup>。口门区处在河流动水与引航道静水的交界处, 上游口门是河道断面由宽变窄, 下游口门是河道断面由窄放宽, 很容易形成斜流, 其水流条件是船舶、船队安全畅通过坝满足航运发展的关键<sup>[2]</sup>。山区河流枢纽常布置在弯道附近或两弯道之间的过渡

段, 引航道口门区则常设置在弯道附近<sup>[3]</sup>。弯曲河段枢纽引航道轴线通常与河道主流存在夹角且夹角大小会随着河道流量变化而变化<sup>[4]</sup>, 且受离心惯性力的作用, 弯曲河段的表层水流会流向凹岸侧, 受到岸坡和河床面的限制, 产生水面横比降, 继而构成横向环流。当上、下游口门区位于河道凸岸时, 上、下行船舶必须斜穿河道过渡到

**收稿日期:** 2020-09-14

**作者简介:** 颜志庆(1997—), 女, 硕士研究生, 从事水力学及河流动力学研究。

凹岸去, 弯道水流条件较为复杂, 存在较为严重的斜流、回流等致使航行船舶(队)发生打旋、失控, 偏离航道<sup>[5]</sup>。为保障船舶安全高效通过船闸, 《船闸总体设计规范》<sup>[6]</sup>和《内河通航标准》规定: 船闸引航道口门区水流条件控制指标为纵向流速  $v_y \leq 2 \text{ m/s}$ , 横向流速  $v_x \leq 0.3 \text{ m/s}$ , 回流流速  $v_{\text{回}} \leq 0.4 \text{ m/s}$ , 引航道内宜为静水区。针对布置在弯曲河段的枢纽船闸工程, 采取必要的工程措施来保证船舶(队)通航尤为重要。本文依托犬木塘整体水工模型试验, 分析“S”形急弯形态河段且船闸布置在凸岸时口门区及连接段水流流态, 并提出工程和非工程改善措施。

1 工程概况

犬木塘枢纽作为资水流域梯级开发的第 2 个梯级枢纽工程, 位于资江的“S”形河段上。犬木塘枢纽工程整体布置见图 1。枢纽主要建筑物从左至右依次布置: 左岸 127.5 m 长连接坝, 船闸段 35.0 m, 15 孔泄水闸 309.0 m, 厂房段 96.1 m(包含鱼道), 右岸 76.4 m 长连接坝, 坝顶总长 642.0 m。左、右岸连接坝与资水上游两岸的堤防相接形成完整的防洪封闭圈。采用上引航道向内拓宽、下引航道向内拓宽的不对称布置方式, 上、

下游靠船墩均布置于岸侧, 船舶进出闸方式均为曲线进闸直线出闸。上引航道导航墙段长 70 m, 口门区宽度由 12 m 扩大至 40 m, 调顺段长 100 m 制动停泊段长 135 m, 布置 7 个独立靠船墩, 停泊段后采用 479 m 长的导流堤与上游航道相接; 下引航道导航墙段长 70 m, 口门区宽度由 12 m 扩大至 40 m, 调顺段长 100 m、制动停泊段长 135 m, 布置 7 个独立靠船墩。上、下引航道右侧平行船闸轴线布置 310 m 长的直线段副导航墙, 采用导航墩+分水墙形式, 起分水堤作用。拟定船闸等级为Ⅳ级, 引航道底宽 40.0 m, 设计水头 9.0 m, 通航净高 8 m, 闸室尺寸 135 m×12 m×3.5 m(长×净宽×门槛水深)。

犬木塘枢纽位于典型的“S”形急弯河段, 受天然地势、气候条件、上游桂花大桥以及下游资江二桥的限制, 枢纽引航道口门区与连接段航道中心线与水流交角较大, 上、下游通航水流条件较为复杂, 下游引航道口门区在弯曲河流段转向处, 存在较为严重的斜向流速、回流、泡漩等不利水力现象, 导致船舶扭转或横漂, 增加船舶操作难度, 直接影响船舶能否顺利过坝和安全航行, 故需进一步论证和优化通航水流条件并提出改进措施。

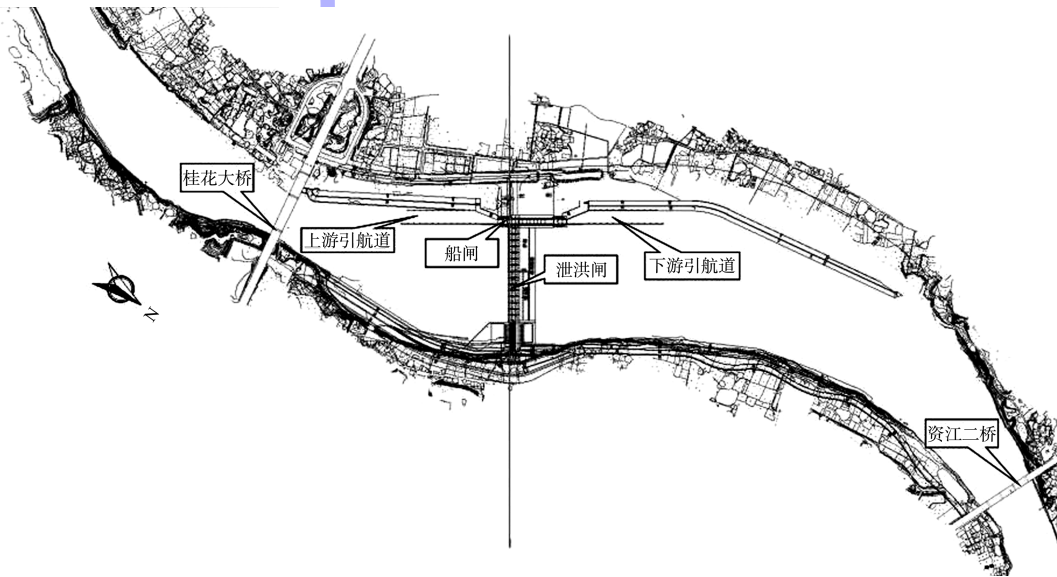


图 1 犬木塘枢纽整体布置

2 模型制作及量测手段

2.1 整体物理模型

模型主要采用佛汝德相似准则进行设计，综合考虑模型雷诺数、枢纽上下游地形条件、模型供水流量和试验场地等因素，将模型设计为几何比尺 1:100 的正态模型，模拟范围需考虑枢纽整体布置形式、枢纽上下游河道形态影响、模型进出水水流调整段、自航船模起动段长度。最终模拟范围确定为上游桂花大桥以上 1 km 河段至下游资江二桥往下 0.7 km 河段。

河道地形根据工程现场实测资料采用断面法制作。平面放样采用三角网导线系统，三角形闭合误差不超过±1′。模型高程用水准仪测定，并在制作过程中校核，安装高程误差控制在±1 mm 以内。为提高制作精度，在复杂地形区局部加密断面。枢纽主要建筑物如泄洪闸、船闸、电站等均采用灰塑料板制作，河道表面采用水泥沙浆制作，并表面加糙以满足模型糙率相似。整体模型见图 2。

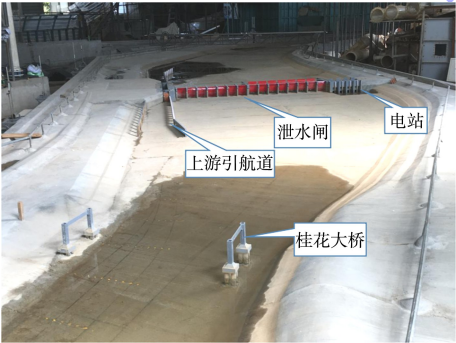


图 2 犬木塘枢纽整体水工模型

模型试验的流速测量采用挪威 Nortek 公司生产的声学多普勒点式流速仪，量程 0.1~400 cm/s；流量采用超声波流量计及标准矩形薄壁堰测定，误差范围≤1%；水位采用自动跟踪式水位仪测量，精度 0.02 mm。

2.2 试验工况

犬木塘枢纽采用低堰、大孔口的泄流布置，可满足大流量泄洪要求。根据闸门开度、孔口开启次序等枢纽调度原则，兼顾上、下游通航水流的要求，模型试验对比多种泄洪运行方案，最终优选各不同流量级下的闸孔开启方式作为模型试

验研究工况，见表 1。

表 1 犬木塘枢纽整体物理模型试验工况

工况	流量/ ( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	电站运行 工况	闸孔开启方式	说明
1	671.6	满发	15 孔关闭	电站单独运行
2	1 800	满发	4 孔泄水闸局开	厂坝联合运行
3	2 700	停机流量	8 孔泄水闸局开	泄水闸泄流
4	3 200	停机	8 孔泄水闸局开	泄水闸泄流
5	3 700	停机	8 孔泄水闸局开	$P=50\%$
6	4 600	停机	15 孔泄水闸全开	$P=33.3\%$

3 上游引航道方案通航水流条件

3.1 原方案上游引航道口门区水流条件

试验结果表明，在  $Q\leq 1\,800\text{ m}^3/\text{s}$  时，桂花大桥上游航道最大流速 1.36 m/s，桂花大桥下游至枢纽段航道最大流速 1.25 m/s，除极个别位置，横向流速普遍小于 0.30 m/s，航道流速基本满足通航要求；当  $Q>1\,800\text{ m}^3/\text{s}$  时，航道内最大纵向流速 2.83 m/s，最大横向流速为 0.78 m/s，在口门区与连接段内横向流速均超过规范要求。从枢纽布置特点来看，受河道地形在桂花大桥处凸出的影响，断面收缩从而流速较大，后又受到泄洪闸的牵引，水流向泄洪闸扩散形成斜向流速，主流与桂花大桥后方的转向航道有明显交角(图 3)。主流与航道线的交角较大，从而导致该区间范围内水流横向流速偏大。

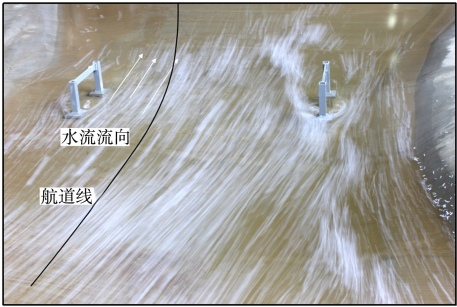


图 3 设计方案下 2 700  $\text{m}^3/\text{s}$  通航流量时上游河道流态

3.2 上游引航道通航水流条件优化

在船闸工程中，常见的改善水流条件措施有：调整导流堤长度与转角、导航堤堤头与堤身开孔、布设菱形导流墩、调整航道中心线、局部地形开挖与平整和调顺岸线等。

原设计方案中上游引航道及口门区横向流速及回流超标的主要原因如下：1) 船闸处于“S”

形急弯形态河段, 上游口门区及连接段均处于弯道顶点上, 船舶上、下行航线的设置会受到弯道的制约; 2) 桂花大桥上下游存在地形向河道中心凸出且存在局部高地, 水流向河道右侧偏转, 易造成水流主流与上游航道线产生较大的交角进而导致横向流速偏大; 3) 透空导流堤的开孔高度不够导致透过的水量不多, 动、静水流交界处由于剪切作用造成的回流现象十分明显。

针对上述原因采取如下措施: 1) 在保证航道与桥墩安全距离的前提下, 将上游航道向左岸平移, 减小大桥下游航道与主流的交角; 2) 将桂花大桥上游进行局部漫滩疏浚和边坡优化, 疏浚高

程为 207 m, 并重新布设边坡至桂花大桥上游 100 m 处以进一步平顺水流, 水流顶托变小, 同时能降低凸岸地形对水流的影响, 为河势调整提供可操作的空间; 3) 将导流堤透空顶高程由 209 m 抬升至 212 m, 并将上游导流堤最后 80 m 向外扩即逆时针旋转 8°。区间水流流量的分流作用可以使更大流量的水流通过导流堤引入上游引航道, 增加导流堤的透水面积后, 通过导流堤底部出水孔从引航道内沿程更顺畅地向外排出, 以减小口门外的横向流速和回流(图 4)。采取优化措施后, 不同通航流量下的上游口门区流速见表 2。

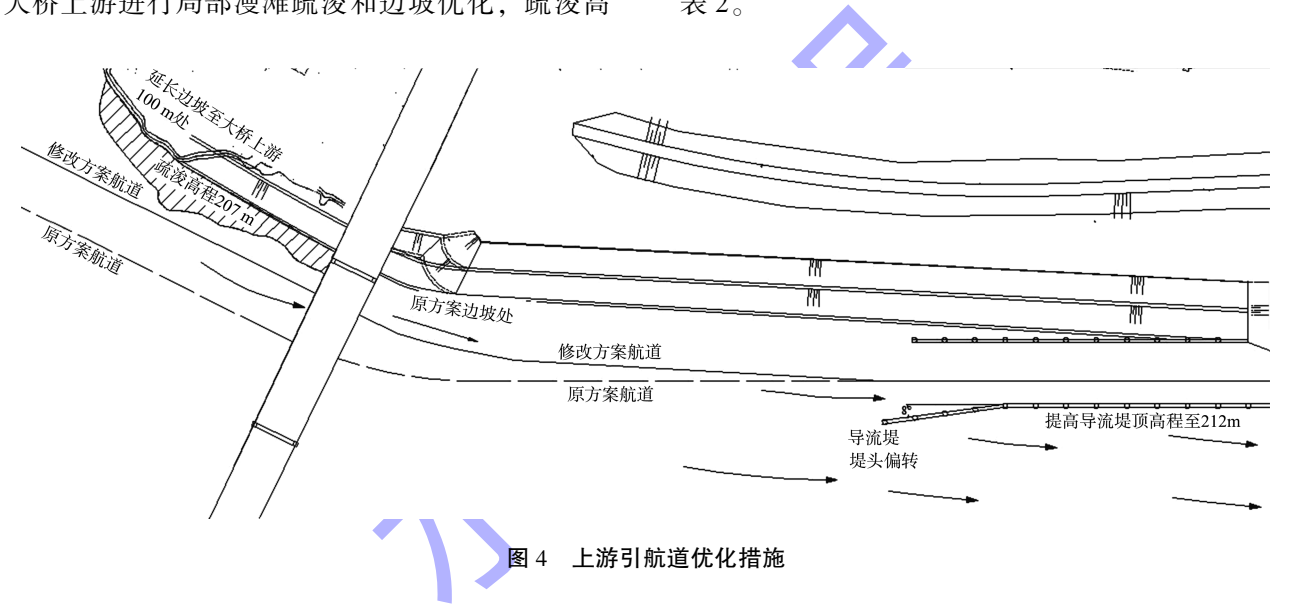


图 4 上游引航道优化措施

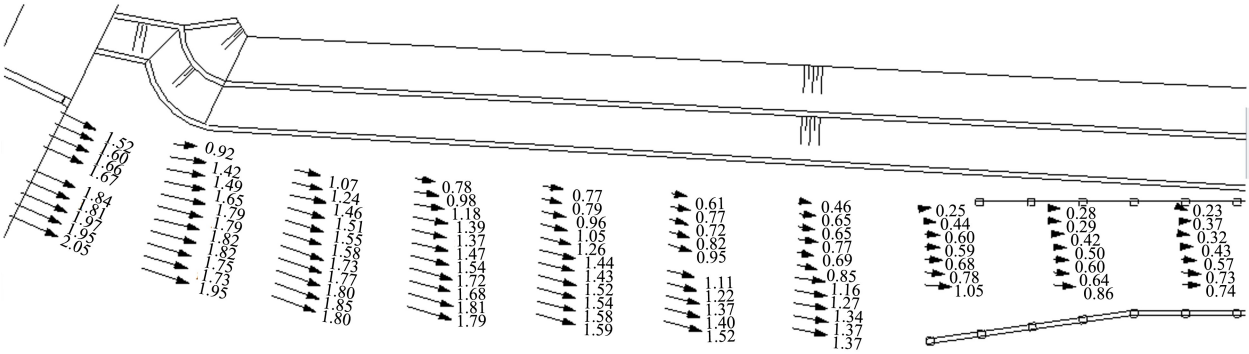
表 2 上游引航道口门区流速

通航流量/( $\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$ )	最大流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	平均横向流速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	描述
1 800	0.72	0.12	横向流速均未超标
2 700	1.26	0.15	横向流速均未超标
3 200	1.78	0.18	横向流速均未超标
3 700	1.95	0.20	口门上游 150~250 m 区间航道右侧部分横向测点超标, 超标幅度较小
4 600	2.80	0.25	口门上游 50~250 m 区间航道右侧横向流速普遍超标, 超标幅度较大

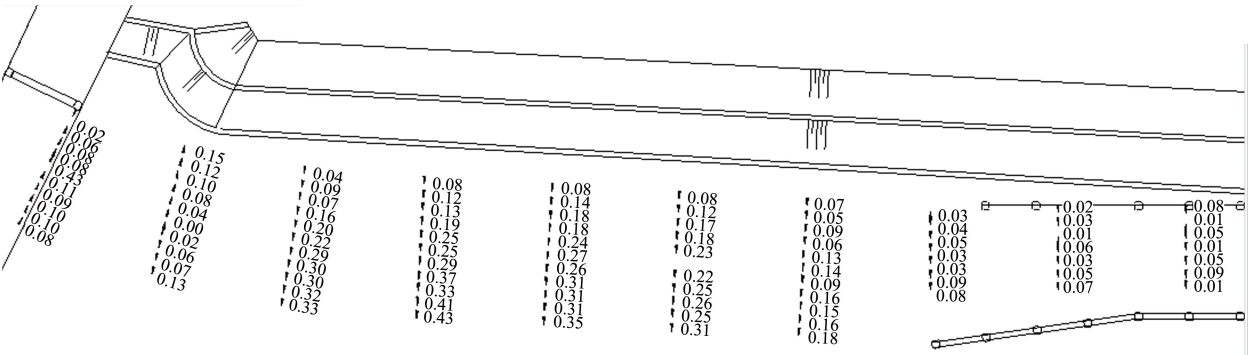
$Q=3\,700\text{ m}^3/\text{s}$  通航流量下, 上游引航道口门区及连接段流速分布和横向流速分布见图 5。由图 5 可以看出, 桂花大桥下游至枢纽段航道最大流速为 1.95 m/s, 平均横向流速约为 0.20 m/s, 口门上游 150~250 m 区间航道右侧有部分测点横向流速超标, 但超标幅度较小, 基本不影响船舶航行; 桂花大桥上游航道最大流速为 1.96 m/s, 由于河流的弯道作用使桂花大桥上游 300~350 m

区间部分位置横向流速较大, 考虑到此处距离口门较远, 横向流速超标位置船舶可通过自身调整航速加强操控性。引航道内、口门到口门下游 350 m 位置航道左侧存在少量回流, 回流范围比 3 200  $\text{m}^3/\text{s}$  工况小, 最大回流流速为 0.22 m/s, 航道中心线右侧纵向流速较小。可以看出, 上游采取优化措施后, 通航流量由原设计方案的  $Q=1\,800\text{ m}^3/\text{s}$  提高至  $Q=3\,700\text{ m}^3/\text{s}$ 。





a) 引航道流速



b) 横向流速

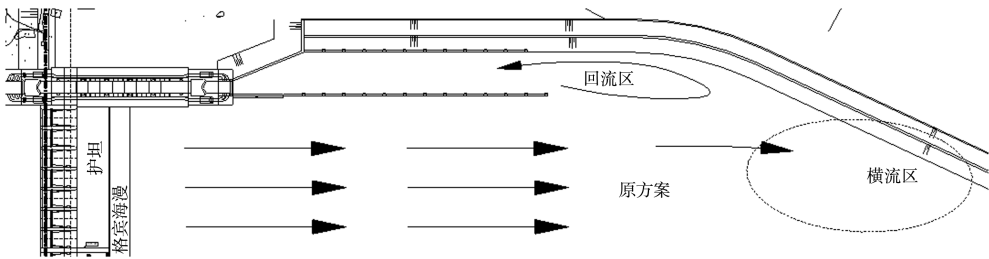
图 5 3 700 m<sup>3</sup>/s 优化后上游引航道流速和横向流速

4 下游引航道口门区水流条件

4.1 原方案下游引航道口门区水流条件

模型试验结果表明，当  $Q=3\,700\text{ m}^3/\text{s}$  时下游引航道口门下游 750 m 范围内最大流速为 2.68 m/s，最大横向流速为 0.77 m/s，口门外 150~350 m 区间横向流速大面积超过规范标准；引航道内出现明显回流，最大回流流速达到

0.72 m/s(图 6)。其主要原因为下泄水流与引航道内静水剪切形成范围回流，又受地形限制主流与转弯航道形成较大交角导致航道内出现明显横流。同时，透空堤由于透水量不足，难以消除回流。种种原因导致口门区横向、回流流速较大，流态恶劣，不利于通航。



a) 原方案下游口门区流态

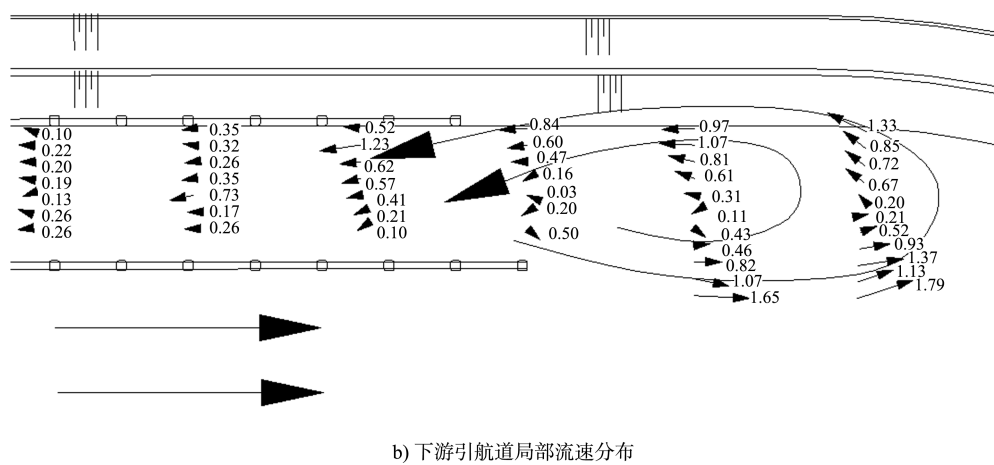


图 6 设计方案通航流量 3 700 m<sup>3</sup>/s 下游引航道口门区流速

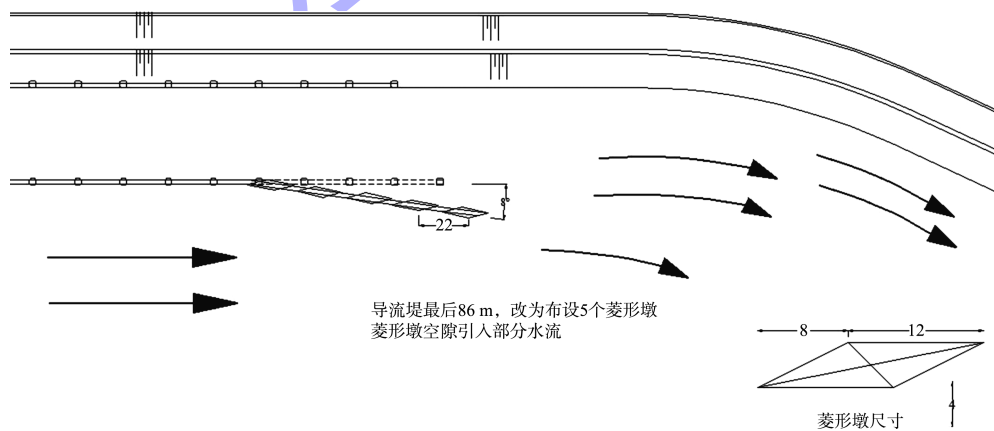
4.2 下游引航道通航水流条件优化

导流墩是削弱斜流和回流、提高口门区水流条件的新型改善措施。其原理为导墩间隙进入口门区的水流对扩散水流的调顺作用，使得导流墩末端的斜向水流交角和横向流速均减小；口门区内大范围的回流区分解成若干不连续的小回流区，由于主动力作用长度减小，口门区内的回流强度减弱<sup>[7-8]</sup>。

原方案研究表明，枢纽下游  $Q=2\,700\text{ m}^3/\text{s}$  工况下口门下游 150~250 m 水流横向流速超标较大，其主要原因在于下游弯道的存在使出闸水

流直冲岸坡，使弯道附近的水流有显著的横向流动趋势。控制导流堤朝向以改变泄洪闸下泄水流方向，减小下泄水流与下游转弯航道的交角；调整菱形墩的间距与菱形墩朝向，控制菱形墩的透水量与过水朝向，消除下游回流的同时控制原回流区的横纵向流速。

通过模型试验研究确定最终优化措施为：在原布置的基础上将隔流堤最后的 86 m 改为布设 4 或 5 个菱形墩，布设形式为：导流墩轴线外扩角度顺时针 8°，导流墩与中心线交角 10°，导流墩中心距 22 m(图 7)。



由表 3 可知：在  $Q=3\,700\text{ m}^3/\text{s}$  工况下，布设 4 个菱形墩时，航道最大流速 1.30 m/s，平均横向流速约为 0.15 m/s，但在口门下游 200~300 m 区间航道大范围横向流速超标，最大横向流速

0.68 m/s。虽然上述优化措施研究显示下游弯道处的横向流速仍超标，但与原方案相比，下游横向流速有了较为明显的改善。布设 5 个菱形墩时，航道最大流速 0.74 m/s，平均横向流速约为

