

顺直分汊河段洲尾船闸的口门区 三维流态数值模拟

吴琼琳

(湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011)

摘要: 顺直分汊河段汇流区水流情况较为复杂, 将船闸口门区布置在汇流口河中水流掺混区, 存在水流流态紊乱等碍航问题, 不利于船闸的通航安全。为充分认识洲尾船闸口门区水流流态特性, 采用 Mike 3FM 模块三维水流数值模拟技术, 针对沅水下游已建桃源枢纽船闸口门区的三维水流流态进行研究, 得到了分汊河道洲尾船闸口门区中洪水期下泄水流平面流态分布特性, 交汇水流的主流带、掺混区及动力轴线的规律等, 为分汊河段河中布置新建船闸以及旧有船闸的设计和升级改造提供了相关理论基础。

关键词: 分汊河段; 船闸; 洲尾船闸; 水流特性

中图分类号: TV 135.4; U 641.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0162-06

Numerical simulation of three-dimensional flow patterns at entrance area of ship lock at bar tail in straight braided reaches

WU Qiong-lin

(Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China)

Abstract: The water flow situation in the confluence area of straight braided reaches is complicated. If the entrance area of a ship lock is arranged in the mixing area of the confluence river, navigation problems such as flow pattern disorder occur, which is not conducive to the navigation safety of the ship lock. Therefore, the three-dimensional(3D) numerical flow simulation technology of the Mike 3FM module is used to obtain a sufficient understanding of the characteristics of the flow pattern at the entrance area of the ship lock at the bar tail. Specifically, we study the 3D flow pattern at the entrance area of the ship lock in the Taoyuan junction built in the lower reaches of the Yuanshui River and mainly obtain the distribution characteristics of the planar flow pattern of the discharge flow at the entrance area of the ship lock at the bar tail in the braided reach in the middle flood period, as well as the laws of the main flow zone, mixing zone, and dynamic axis of the confluence. The research can provide a theoretical basis for relevant research on the design of a new ship lock and the upgrading and reconstruction design of an old ship lock in braided reaches.

Keywords: braided reach; ship lock; ship lock arrangement at bar tail; water flow characteristic

1 工程概况

沅水是长江第三大支流, 桃源枢纽为沅水干流开发的最末级水利枢纽。桃源枢纽船闸下游引

航道口门区处于分汊河段汇流口区域。汊道段河势顺直, 汇流口下游的河势微弯且逐渐束窄。汊道段原为两处相连的江心洲, 枢纽建成后船闸与

收稿日期: 2021-11-25

作者简介: 吴琼琳(1986—), 男, 工程师, 从事水运项目建设管理。

电站集中布置于江心洲上。桃源枢纽从左至右依次为左汉 14 孔泄洪闸、船闸、电站以及右汉 11 孔泄洪闸，现有船闸闸室有效尺度为 120 m×18 m×3.5 m(长×宽×门槛水深)，现有航道等级为Ⅳ级，规划为Ⅲ级航道，枢纽平面布置见图 1。

由于桃源枢纽下游清水下泄冲刷坝下河床，且下游河段人工采砂活动频繁，导致坝下河床迅速下切，枯水位下降较多，河床组成粗化，河床地形、水沙条件与枢纽设计之初有较大变化。在

上述各种不利因素的综合影响下，船闸建成运行后通航条件较差，口门区水流流态紊乱，甚至形成枯水期断航，严重时需要上游枢纽开闸放水来保证下游河道的通航。实测资料显示，桃源枢纽洪、中水期均存在不同程度流态碍航问题，且其位于沅水航道连接洞庭湖区的咽喉位置，现状条件下的船闸通过率严重影响了整个沅水航道的通航保证率，其船闸口门区流态碍航问题亟待解决。



图 1 桃源枢纽平面布置

2 三维水流数学模型建立与验证

选用 DHI 公司软件 Mike 3FM 模块进行三维水流数值模拟计算，考虑倒虹吸管特点，本项目采用 $k-\epsilon$ 模型进行三维水流模拟。模型中采用 2016 年实测桃源枢纽现场地形，上游边界位于桃源枢纽坝轴线，按照左右两汉泄水闸和电站分别设置进口边界，各泄水建筑物为独立流量进口边界。下游出口位于坝轴线下游约 4.8 km，根据桃源水文站提供的坝下水位流量关系反推得下边界水位，边界位置选取弯道下游河势顺直段，见图 2。水平方向网格采用三角剖分，垂向网格按比例分层，最小网格尺度 0.2 m，最大网格尺度 5 m；模型糙率根据流迹、流速分布、水位等实测水文数据验证，按河段实测资料进行率定，糙率 n 在 0.022~0.035 之间，坝下河段为宽浅河流，垂向 6 层，见图 3。

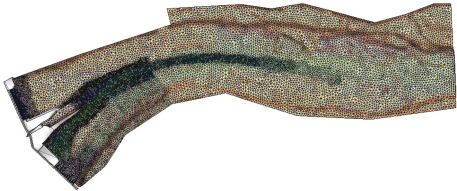


图 2 模拟范围及平面网格剖分

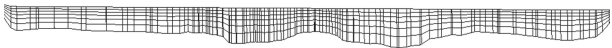
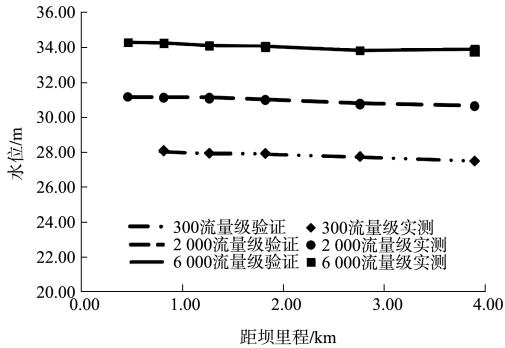


图 3 垂向网格剖分

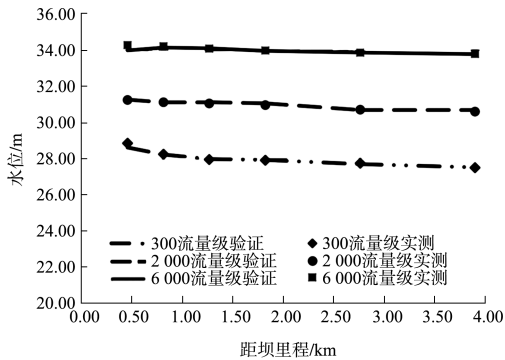
2.1 水面线验证

采用 2017 年 3 月 ($Q=300\text{ m}^3/\text{s}$)、4 月 ($Q=2\,100\text{ m}^3/\text{s}$)、6 月 ($Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$) 实测水位作为模型的验证资料，分别对枯、中、洪三级流量的水面线进行验证。

试验结果表明，模型沿程各水尺水位与原型水位偏差均不超过 0.1 m，模型水面线与天然水面线基本吻合，见图 4。



a) 左汊

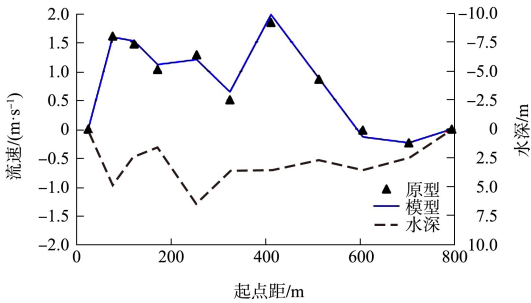


b) 右汊

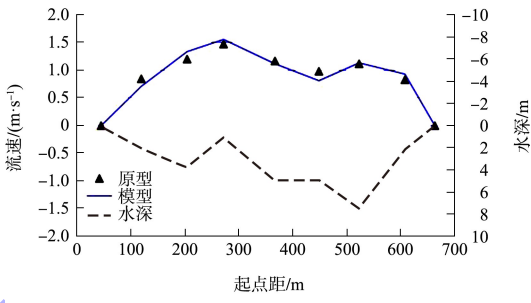
图 4 沿程水面线验证

2.2 流速分布验证

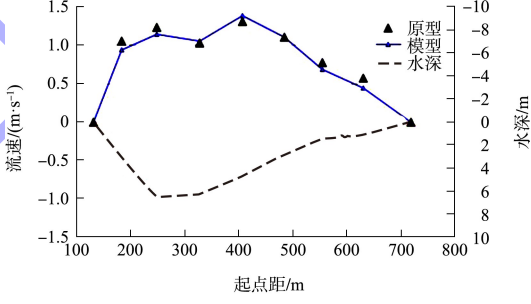
模型断面流速分布与原型实测值对比见图 5。由图可以看出，各断面模型流速分布趋势和流量值与实测值基本一致。



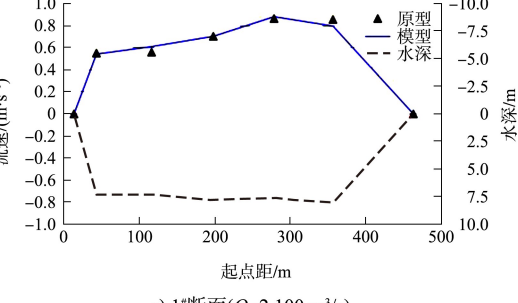
c) 3#断面($Q=2\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$)



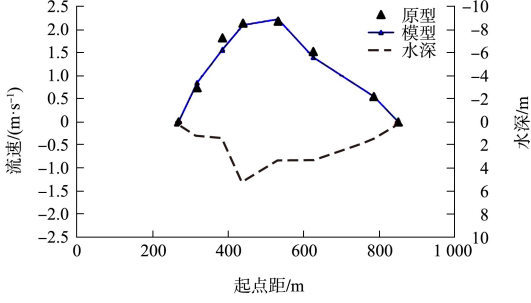
d) 4#断面($Q=2\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$)



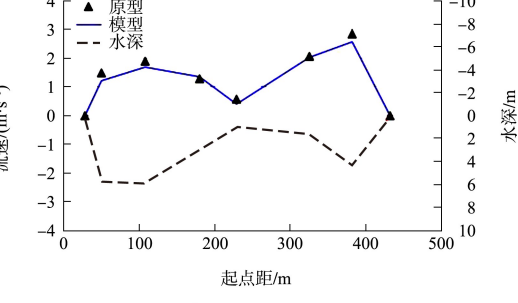
e) 5#断面($Q=2\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$)



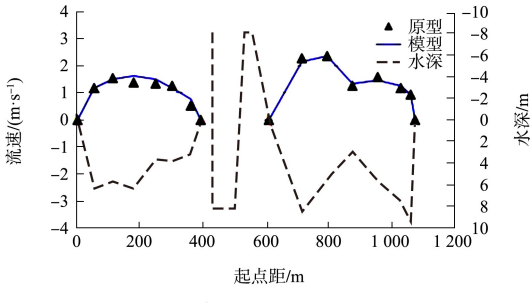
a) 1#断面($Q=2\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$)



f) 6#断面($Q=2\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$)



b) 2#断面($Q=2\ 100\ \text{m}^3/\text{s}$)



g) 2#断面($Q=5\ 926\ \text{m}^3/\text{s}$)

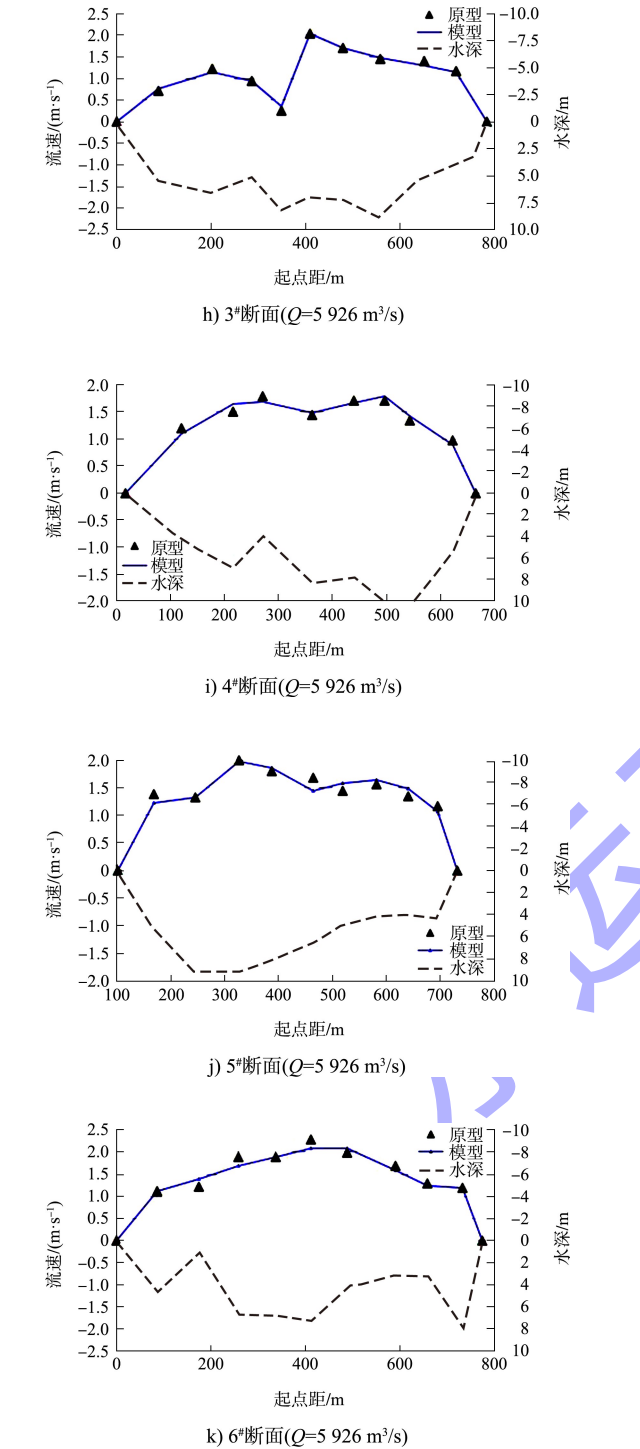


图5 模型与原型实测断面流速分布对比

3 计算工况

分汊河段汇流口流态随上游来流分流比不同而变化^[1-3]，为深入研究桃源枢纽所在分汊河道汇流口区三维流态的变化规律^[4]，结合桃源枢纽现状条件下的运行调度方式分别开展了5组数值模拟研究，见表1。

表1 数值模拟计算工况				
流量级 $/(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	左侧泄水闸 下泄流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	右侧泄水闸 下泄流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	电站 下泄流量/ $(\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1})$	备注
3 600	—	—	3 600	电站满发
5 000	1 400	—	3 600	交汇水流
6 000	2 400	—	3 600	
7 000	3 400	—	3 600	交汇水流
10 000	敞泄	敞泄	—	交汇水流
20 350	敞泄	敞泄	—	交汇水流

4 口门区三维水流流态特性

4.1 水流特性

中洪水期时，桃源枢纽左右两汊同时泄流，在船闸下游口门区会形成交汇水流^[5]，两侧主流交汇后在交界面处因水流梯度产生掺混运动，掺混范围受流速梯度、地形边界等因素影响，随分流比变化而变化^[6-8]。汇流河段掺混区没有确切的定义，考虑推移质易在主流带与掺混区交界处沉积，选取长江寸滩经验公式计算推移质泥沙起动流速 u_c ：

$$u_c = \eta \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} g d} \left(\frac{h}{d} \right)^m \quad (1)$$

式中： ρ_s 为泥沙密度； ρ 为水的密度； h 为水深； d 为颗粒粒径； η 、 m 为经验系数，不同公式略有差别，长江寸滩经验公式中， $\eta=1.08$ 、 $m=1/7$ 。

由上式可知，推移质泥沙临界起动流速受水深影响，无法按统一值确定。根据枢纽运行调度规程，中洪水期左右汊水流流态可分为控泄和敞泄两个阶段。当来流量为 $3\,600\sim8\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 时，右汊泄水闸控泄，电站泄流；当来流量大于 $8\,800\text{ m}^3/\text{s}$ 时，泄水闸敞泄，电站停机。本次数模根据各工况数值模拟计算成果，采用推移质临界起动流速作为掺混区范围界定标准，将计算得到的单元格临界起动流速大于该处底流流速处定义为掺混区。图6为仅电站泄流时($Q=3\,600\text{ m}^3/\text{s}$)坝下水流平面流态分布，图7为各工况下计算出的主流带及掺混区分布，由图可知：

1) $Q=3\,600\text{ m}^3/\text{s}$ 时，仅电站满发泄流时，电站泄流宽度远小于支汊河宽，主流分离成两股水流，其中主流带水力强度明显强于2#主流带。

1#主流带从船闸右导堤外侧以较大夹角进入口门区形成斜流段，其末端主流带逐渐扩宽直至恢复天然。左汊因泄水闸关闭形成类似“盲肠河段”的区域，在主流带带动下形成一个大范围回流区。在口门处，经右导堤下游深槽进入口门的主流和经左导墙进入口门的回流相互挤压，形成次生回流。

2)中洪水期各工况主流带范围分布基本一致，受掺混区影响仅局部略有不同。

3) $Q=5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时，右汊下泄流量为 $3\,600\text{ m}^3/\text{s}$ ，大于左汊下泄流量 $1\,400\text{ m}^3/\text{s}$ ，右汊水流强度大于左汊，掺混区宽度明显大于 $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 及以上各工况且向左岸偏转。由此可知，分流比对各工况下水流掺混区分布影响较大。

4) $Q=6\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 及以上各工况，因左汊水流强度大于右汊水流强度，掺混区分布趋势基本一致，呈向右岸偏转的月牙形区域。掺混区范围随流量和流速的增加而拉长。

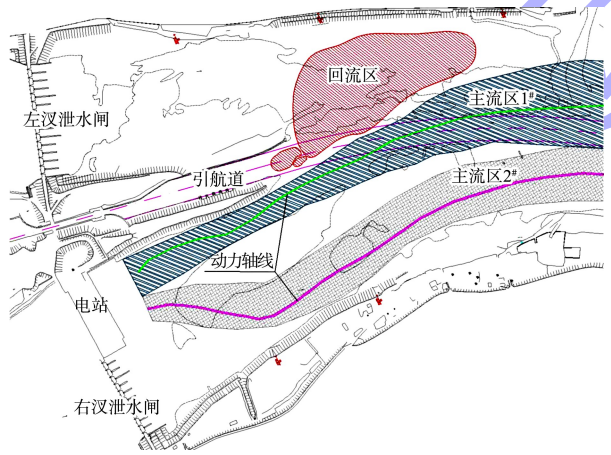


图 6 仅电站泄流时坝下水流平面流态分布 ($Q=3\,600\text{ m}^3/\text{s}$)

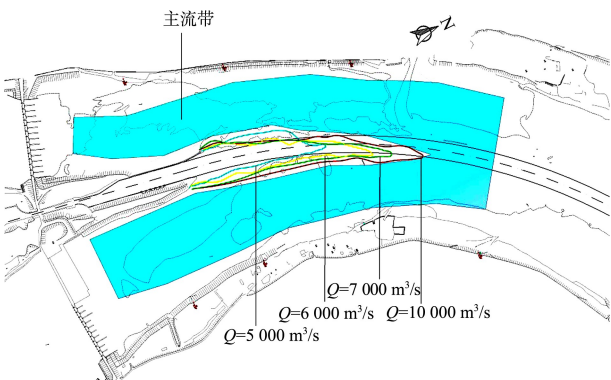


图 7 各工况主流带及掺混区分布

4.2 动力轴线分布规律

图 8 为计算得到的各工况下动力轴线分布，可以看出，中洪水期动力轴线分布受枢纽运行调度及分流比影响显著：

1)由于泄流位置不同，控泄期两汊动力轴线偏向河中，敞泄期两汊动力轴线偏向河岸。

2)因左右两汊分流比不同，汇流区动力轴线变化显著。 $Q=5\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时因右汊水动力强度大于左汊，口门以下河段动力轴线偏向左岸，而口门与坝轴线之间河段动力轴线偏向河中，整体呈“S”形。而随着流量增加，动力轴线逐渐趋直。

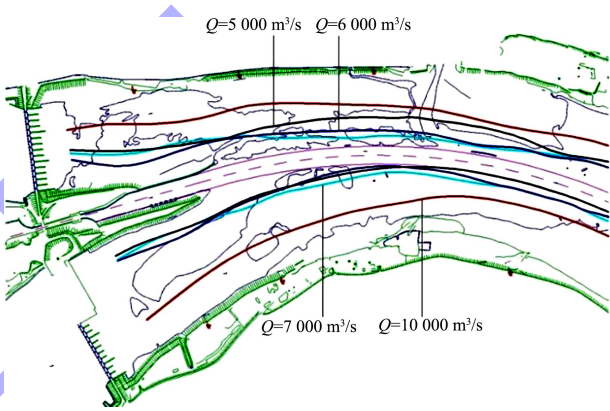


图 8 各工况动力轴线分布

4.3 掺混区三维水流结构

图 9 为计算得到的各流量下汇流口掺混区纵向长度分布；图 10 为 $Q=7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时坝下口门区流场三维切片图；图 11 为 $Q=7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 时坝下三维流场等值曲面，左汊泄流量 $3\,400\text{ m}^3/\text{s}$ ，右汊泄流量 $3\,600\text{ m}^3/\text{s}$ ，左右汊分流比接近 1:1，并标示了 0.50、0.95、1.40 m/s 3 个流速等值面，其中坝下河床推移质 d_{95} 对应临界起动流速 0.95 m/s， d_{50} 对应临界起动流速 1.40 m/s。

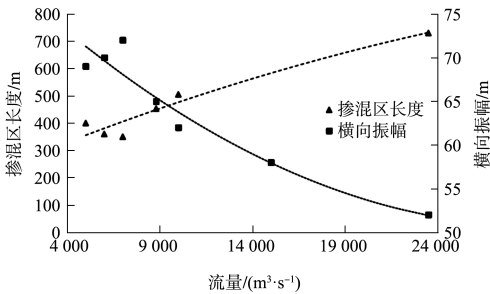


图 9 各流量级下汇流口掺混区长度与横向振幅

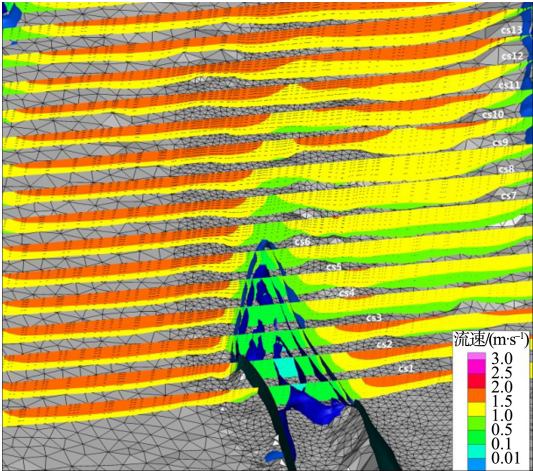
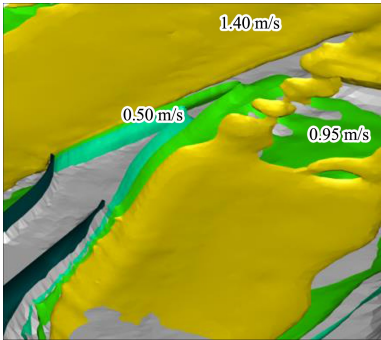
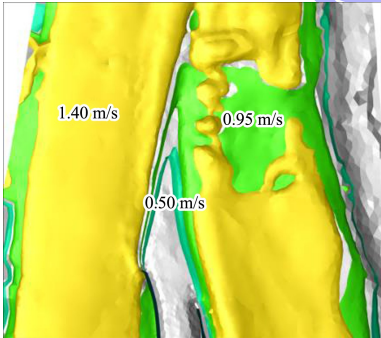


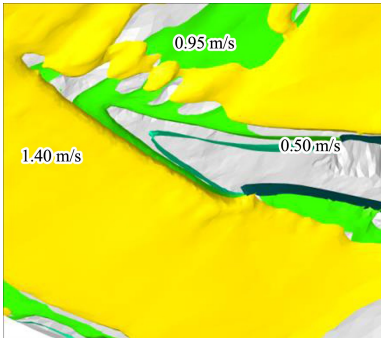
图 10 三维流场切片 ($Q=7\,000\text{ m}^3/\text{s}$)



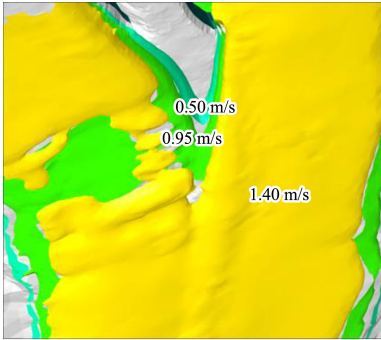
a) 右汊(坝址右岸向下游视角)



b) 俯视角



c) 左汊(坝址右岸向下游视角)



d) 自下游向船闸口门区视角

图 11 三维流速等值曲面 ($Q=7\,000\text{ m}^3/\text{s}$)

因左汊地势高于右汊，掺混区尾部水流偏向右岸。右侧主流带与掺混区交界面基本处于航道边线以外，掺混区呈非对称型，左右两汊水流在掺混区形成多个次生回流。水流掺混区左右摆动，形成类似于涡街结构的周期性竖轴回流区。随着单宽流量的增加，掺混区逐渐拉长，两侧主流交角逐渐减小，同时掺混区振幅逐渐降低。

5 结论

1) 枢纽在枯水期只有电站泄流时，1[#]主流带从船闸右导堤外侧以较大夹角进入口门区形成斜流段。左汊因泄水闸关闭形成类似“盲肠河段”的区域，在船闸口门处，经右导堤下游深槽进入口门的主流和经左导墙进入口门的回流相互挤压，形成次生回流。

2) 交汇水流掺混区分布复杂多变，掺混区长度与掺混区摆动幅度基本呈负相关。掺混区越长，水流越平稳，左右摆动，形成类似于涡街结构的周期性竖轴回流区。随着单宽流量的增加，掺混区逐渐拉长，两侧主流交角逐渐减小，同时掺混区振幅逐渐降低。

3) 分汊河道汇流口处的三维水流流态较为复杂，若因船闸受限布置于此，需合理布置导流及挡泄水建筑物，使船闸下游口门区尽量远离掺混区，以减小复杂水流流态对船舶航行的不利影响。

参考文献：

[1] 童朝锋.分汊口水沙运动特征及三维水流数学模型应用研究[D].南京:河海大学,2005. (下转第 172 页)