



桃源枢纽船闸下游引航道中水期整治技术

李 帆¹, 乾东岳²

(1. 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 湖南 长沙 410200;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要: 桃源枢纽船闸位于江心洲洲尾, 中水期枢纽两侧同时泄流, 船闸下游引航道及口门区段存在横流和泥沙淤积等碍航问题, 有必要通过工程措施予以解决。采用定床水流和定床输沙试验, 研究不同中水期整治方案下, 船闸下游引航道及口门区的水流泥沙条件。结果表明: 1) 左侧疏浚区能有效平衡右侧疏浚区的侧向引流作用, 疏浚区宽度越宽, 河段横向流速和泥沙淤积量越小。相较于直立墙结构, 斜坡式石笼坝导墙能够有效避免末端回流的形成, 进一步减小口门区横向流速和泥沙淤积。2) 沿下游引航道口门区及连接段左侧布置疏浚区, 疏浚宽度等于 1.5 倍引航道宽度, 疏浚底高程 26.44 m, 同时采用斜坡式石笼坝延长左侧导墙 200 m, 可较好解决中水期河段碍航问题。

关键词: 桃源枢纽; 引航道; 口门区; 中水期; 整治技术; 物理模型试验

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0116-08

Middle water period regulation technique for downstream approach channel of Taoyuan Hydro-junction ship lock

LI Fan¹, QIAN Dong-yue²

(1. Hunan Province Communications, Planning, Survey & Design Institute, Changsha 410008, China; 2. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Key Laboratory of Engineering Sediment, Ministry of Transport, Tianjin 300456, China)

Abstract: The Taoyuan hydro-junction ship lock is located at the tail of the central bar. In the middle water period, the plunging flow is from both sides of the hydro-junction, which causes the problems of transverse current and sand deposition in the downstream approach channel and its entrance area of the ship lock. It is necessary to solve the problem through engineering measures. The fixed bed flow and fixed-bed sediment transport experiments are carried out to study the flow and sediment conditions in the navigation hindering reach under the different regulation work plans of the middle water period. The results show that: 1) The left dredged area can effectively balance the lateral drainage effect caused by the right dredged area. The wider is the width of the left dredged, the smaller are the transverse current velocity and the volume of the sand deposition in the reach. Comparing to the vertical wall construction, the ramp-style gabion dam can effectively avoid the reverse current formed at the end of the dam, so it further reduces the transverse current velocity and the volume of the sand deposition in the reach in the middle water period. 2) A dredging area is arranged along the entrance area of the downstream approach channel and the left side of the connecting section. The dredging width is equal to 1.5 times the width of the approach channel, and the dredging bottom elevation is 26.44 m. At the same time, the slope-type gabion dam is used to extend the left guide wall by 200 m, which can better solve the navigation-obstructing problem in the middle water period.

Keywords: Taoyuan hydro-junction; approach channel; entrance area; middle water period; regulation technique; physical model test

收稿日期: 2020-07-05

作者简介: 李帆(1987—), 男, 硕士, 工程师, 从事港口航道工程设计与研究。

桃源枢纽是沅水干流梯级规划中的最末一级, 坝址位于桃源县城。通航建筑物为Ⅳ级单级船闸, 其下游引航道宽 40 m、直线段长 560 m, 设计底

高程 26.44 m (国家 85 高程)。连接段为半径 330 m、圆心角 30°的圆弧段。桃源枢纽平面布置见图 1。

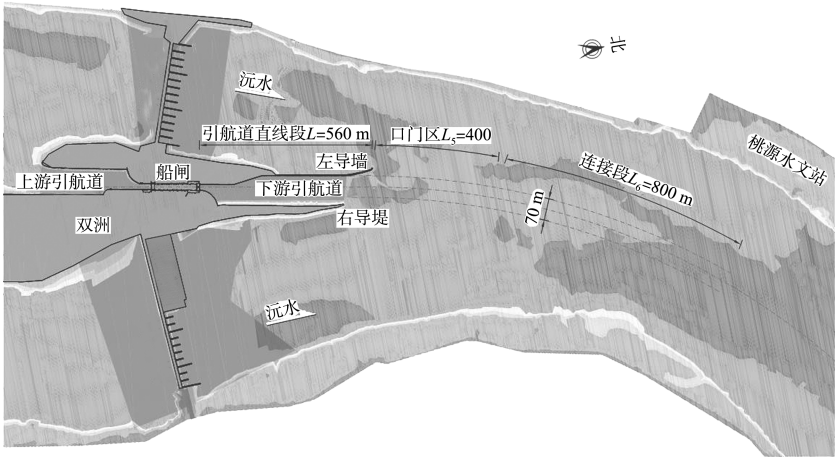


图 1 桃源枢纽平面布置

枢纽船闸位于分汊河段的江心洲洲尾, 其下游引航道及口门区处在两汊水流交汇区。中水期, 枢纽两侧水流同时下泄, 航道内横流较大, 回淤严重, 船舶难以通行。减小引航道及口门区横流、防止泥沙淤积是该碍航河段改造工程需要解决的主要问题, 其与整治方案的布置密切相关, 水工物理模型试验是解决航道水流泥沙问题的重要手段之一。赵江等^[1]通过物理模型试验研究大源渡枢纽二线船闸下游通航水流条件改善措施; 胡旭跃等^[2]在物理模型基础上研究了江心洲型船闸通航安全问题以及采取针对性措施后航行条件的改善效果; 邬年华等^[3]采用物理模型试验研究了峡江枢纽引航道口门区通航水流条件, 并提出了优化布置方案; 乾东岳等^[4]通过定床水流和定床输沙试验, 研究分析了桃源枢纽下汇流区推移质运动特性; 周勤等^[5]开展了古顶水利枢纽二线船闸物理模型试验研究。本文基于整体物理模型试验, 研究不同中水期整治方案下, 船闸下游引航道及口门区的水流泥沙条件, 为该碍航河段改造工程的设计与施工提供技术支持。

1 工程概况

1.1 枢纽运行调度方式

- 1) 枯水期($Q < 3\,600\text{ m}^3/\text{s}$), 仅电站泄流, 下泄水流经右汊进入汇流区。
- 2) 中水期($3\,600\text{ m}^3/\text{s} \leq Q < 8\,800\text{ m}^3/\text{s}$), 为控泄阶段, 右汊电站满发, 下泄流量 $3\,600\text{ m}^3/\text{s}$, 其余从左汊下泄。
- 3) 洪水期($Q \geq 8\,800\text{ m}^3/\text{s}$), 为敞泄阶段, 电站停机, 左岸泄水闸敞泄, 右岸泄水闸随流量增加逐渐打开。

1.2 水流泥沙特性

枢纽船闸位于分汊河段的江心洲洲尾, 中水期左侧流速大于右侧, 同时由于引航道下游河道中间深槽吸流作用, 水流与引航道存在较大夹角, 造成引航道口门区及其连接段横流大, 船舶难以通行。由于左右两侧同时泄流, 两股水流同时冲入主航道, 造成引航道淤积严重, 水位消退后, 通航水深不能满足要求。

坝下河床以床沙冲刷为主, 悬移质泥沙基本不参与造床, 口门区及其右侧滩地冲淤相间, 而

右汉口门区上游总体呈冲刷趋势,说明枯水期口门区淤积主要来自坝下河床冲刷。受坝下河道右侧大规模采砂影响,引航道下游河床左高右低。枢纽下游河床床面泥沙中值粒径在 17~63 mm,以卵砾石为主,泥沙分选性较差。

2 模型设计

2.1 定床模型设计

为充分反映河段河势特征,结合场地条件,整体定床物理模型采用 1:100 正态模型,流速比尺 $\lambda_u = 10$,流量比尺 $\lambda_Q = 100\ 000$,糙率比尺 $\lambda_n = 2.15$,水流运动时间比尺 $\lambda_T = 10$ 。模型模拟范围为坝上 3.2 km 至坝下 4.8 km,模拟河段长度约 8 km。

利用 2017 年 3 月—7 月于工程河段实测的水位、流量、流速等数据,分别对物理模型进行水面线验证、断面流速分布验证、分流比验证,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,模型与原型达到了阻力相似;各断面模型流速分布趋势和流速量值与实测值基本一致,模型水流与原型水流运动达到相似要求;主汊流量偏差在 $\pm 5\%$ 以下。

2.2 定床输沙模型选沙设计

在整体定床模型上进行定床输沙试验,一方面需要满足水流运动相似,另一方面还应满足泥沙起动相似^[6]。根据 2017 年实测的工程河段床沙取样级配资料,床沙中值粒径 $d_{50} = 30\text{ mm}$,最大粒径 $d_{\max} = 63\text{ mm}$ 。为满足泥沙起动相似,分别计算天然沙和模型沙的起动流速,经多组试算以选择合适的模型沙粒径。当 $\lambda_d = 20$ 时,原型流速和模型流速之比为 9.6~10.5,数值接近流速比尺 $\lambda_u = 10$ 。因此,取比尺 $\lambda_d = 20$ 进行试验模型沙配置。

3 中水期整治方案布置

受桃源枢纽运行调度的影响,船闸下游引航道段在各级流量下的碍航特性不尽相同。枯水期,电站集中泄流水动力较强,导致航段左向横流较大,且松散砂砾石被带入航道造成淤积。中水期,由于下游河床左高右低,造成从左汊进入口门区的横流较大。

在右侧布置一处疏浚区并于右导堤堤头处设置一条潜坝,用以解决枯水期河段碍航问题。针对中水期碍航特性及其成因,在枯水期整治措施已定的前提下,拟通过降低左汊滩地河床高程的方式调整左汊河床动力轴线并改变左汊输沙带分布,同时通过导流方式,削弱口门区横向流速。中水期整治措施考虑以下 6 个方案:

方案 1:在左导墙末端设 3 座导流墩,墩顶高程 39.8 m、长 20 m、宽 3.5 m,间距 20 m,见图 2a)。

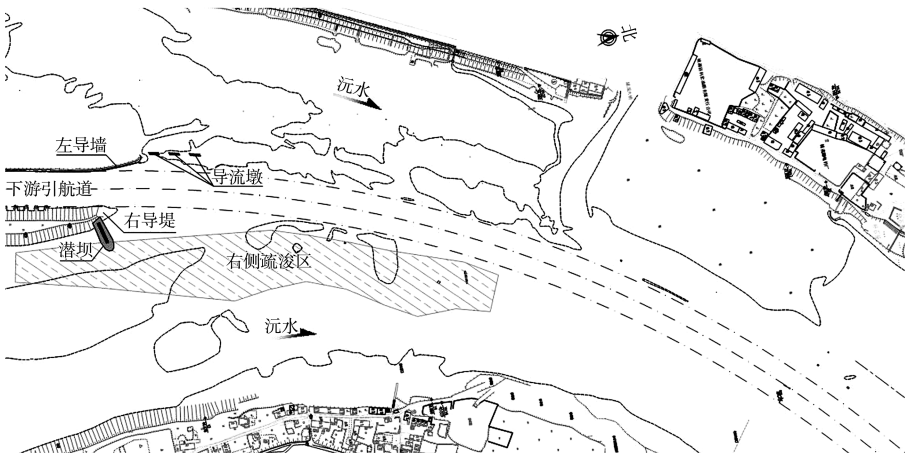
方案 2:在方案 1 基础上,增加左侧疏浚区,其纵向沿下游引航道口门区及连接段平行布置,疏浚宽度取 0.5 倍引航道宽度 B_0 ,疏浚底高程取引航道底高程 26.44 m,见图 2b)。

方案 3:左侧疏浚宽度为 B_0 ,其余布置同方案 2,见图 2c)。

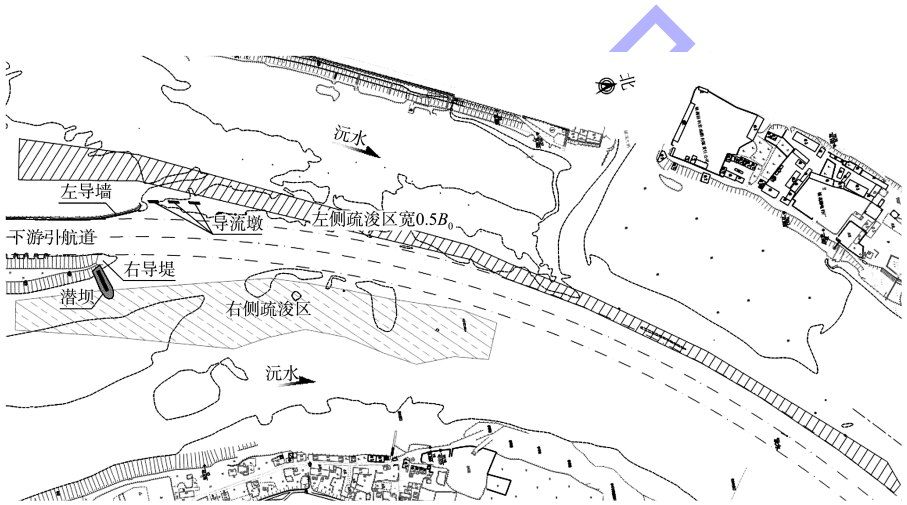
方案 4:左侧疏浚宽度为 $1.5B_0$,其余布置同方案 2,见图 2d)。

方案 5:在方案 4 基础上,取消导流墩,左侧导堤以直立墙形式延长 200 m,墙顶高程 39.8 m,直立墙结构形式见图 3a)。

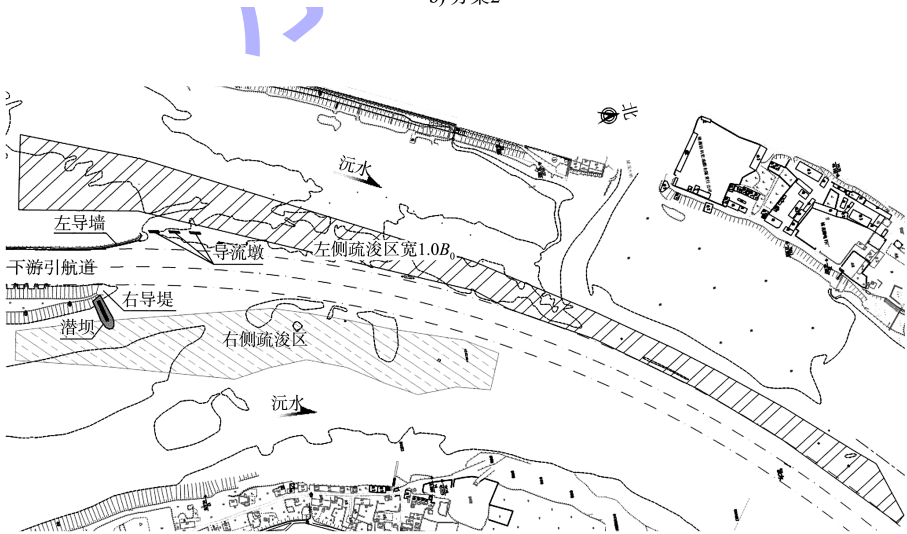
方案 6:在方案 5 基础上,左侧导堤改为以斜坡式石笼坝形式延长 200 m,坝顶高程以坝根为起点向坝头方向沿程降低,起点高程 39.8 m,末端高程 29.8 m,坝体横断面两侧坡比均为 1:1,顶宽 3 m,见图 3b)石笼坝结构形式见图 4。



a) 方案1



b) 方案2



c) 方案3

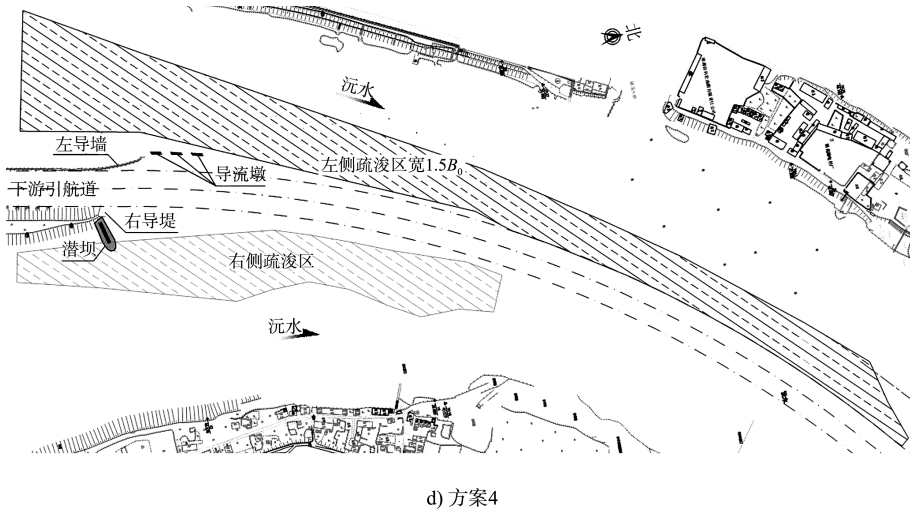


图 2 左侧疏浚区范围

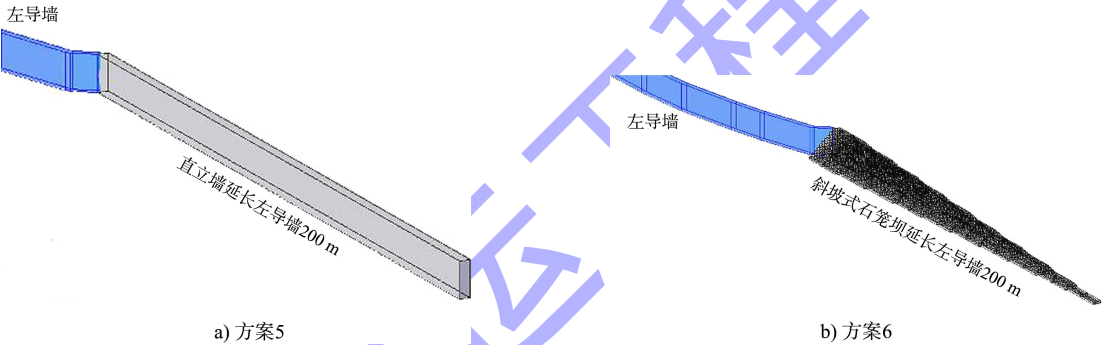


图 3 左侧导墙延长方案结构形式

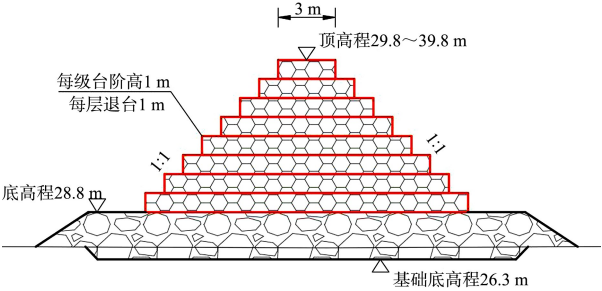
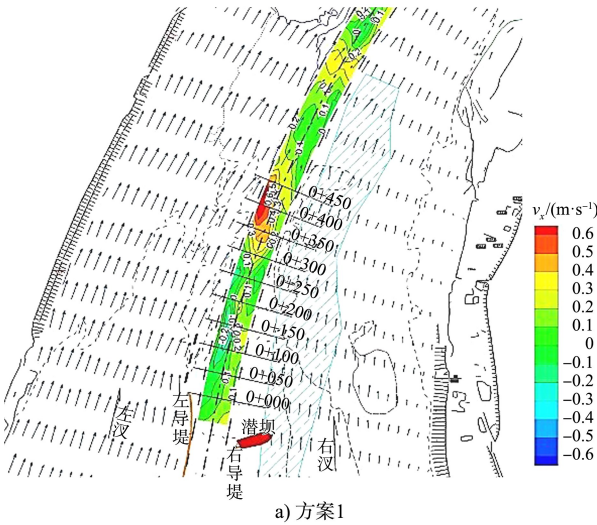


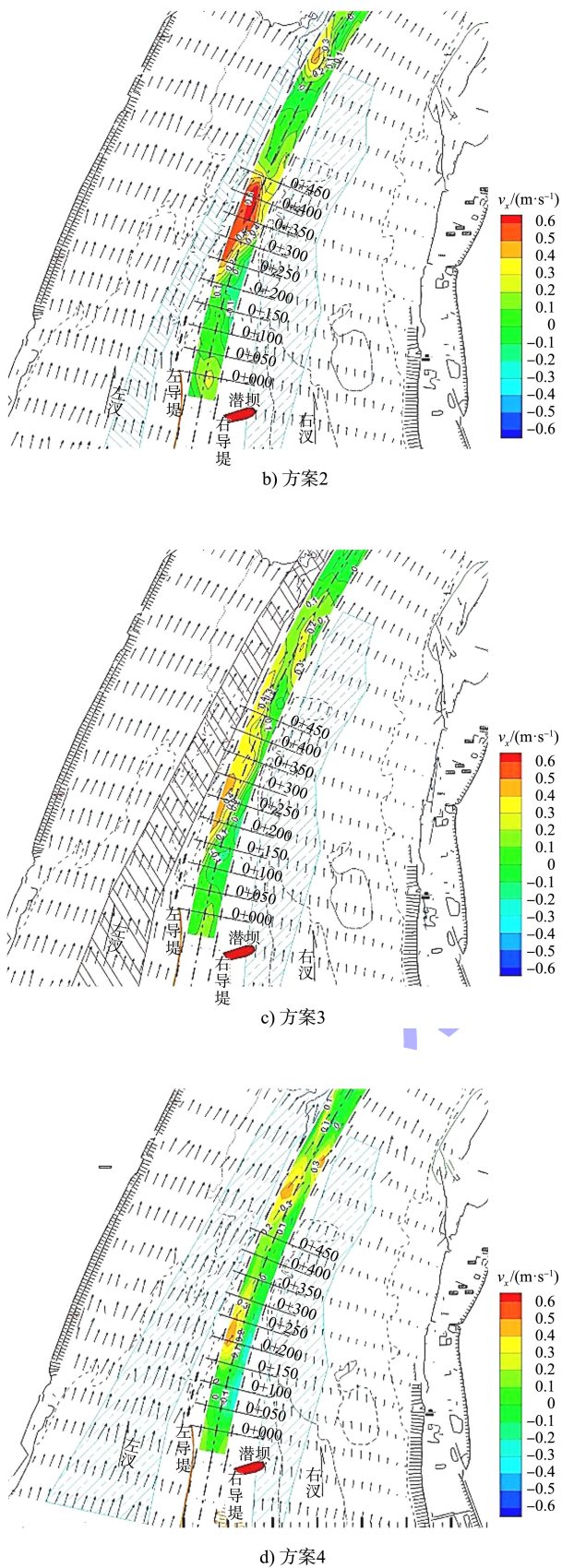
图 4 斜坡式石笼坝横断面

4 试验结果分析

4.1 不同疏浚区布置水流泥沙条件

选取 $Q=7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 作为对比工况，各方案流场及输沙带分布见图 5、6。





注: 横向流速 v_x , 向右为正。

图5 航道流场对比

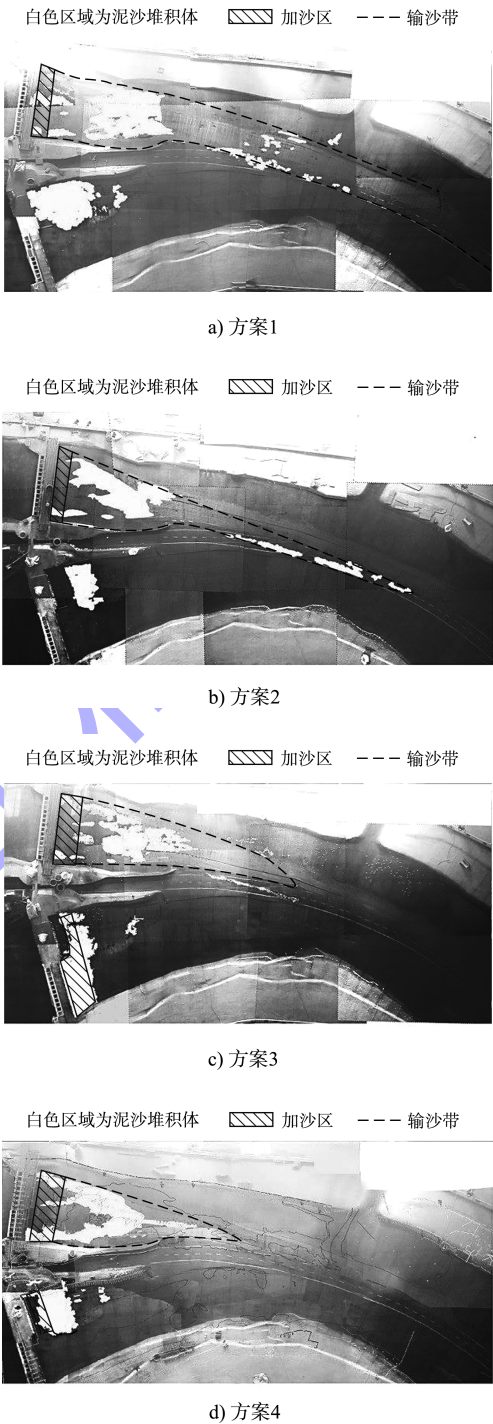


图6 输沙带对比

方案1, 无左侧疏浚区。由于航道左侧河床平均高程约28 m, 右侧河床疏浚区高程24 m, 横向河床高程达4 m, 下游引航道口门区横向流速明显增加, 最大横向流速0.67 m/s。定床输沙试验显示, 左汊推移质输沙带从左侧导墙末端约300 m处进入航道, 航道内最大淤积带宽度53 m。

方案 2，疏浚区宽度为 $0.5B_0$ 。疏浚区位于左汊主流右侧，由于疏浚宽度较小，侧向引流作用明显。与方案 1 相比，口门区横向流速最大值为 0.64 m/s ，但横向流速超标范围扩大 1 倍，通航水流条件恶化。定床输沙试验显示，左汊推移质输沙带从左侧导墙末端约 270 m 处进入航道，航道内最大淤积带宽度 30 m 。

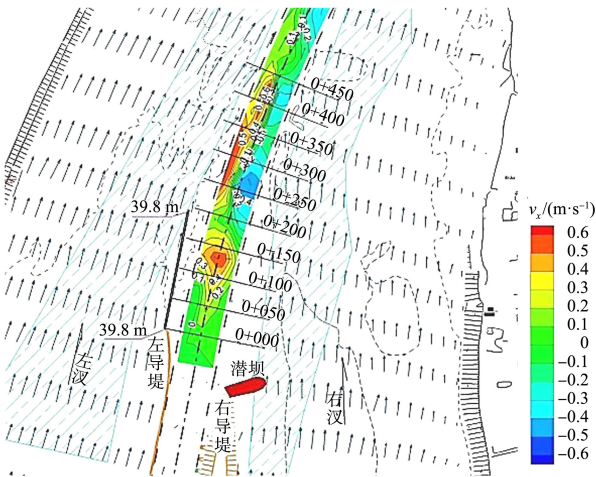
方案 3，疏浚区宽度为 B_0 。与方案 1 相比，口门区横向流速最大值为 0.49 m/s ，口门区水流动力强度下降，但横向流速超标范围纵向长度约 400 m ，通航水流条件仍较差。定床输沙试验显示，左汊推移质输沙带从左侧导墙末端约 280 m 处进入航道，航道内最大淤积带宽度 19 m 。

方案 4，疏浚区宽度为 $1.5B_0$ 。与方案 1~3 相比，横向流速明显降低，最大横向流速为 0.42 m/s 。横向流速超标范围约 100 m ，基本满足规范要求^[7]。定床输沙试验显示，左汊泥沙沿疏浚区向下游运动，输沙带少量覆盖航道，但未见明显淤积区。

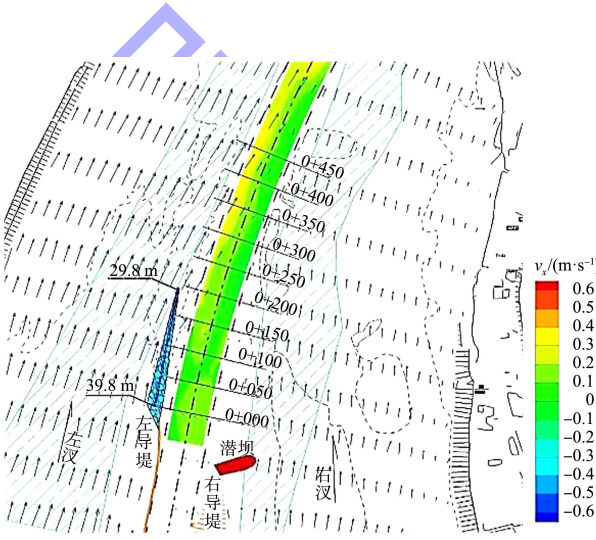
试验结果说明，各方案下两侧泄流交汇区均位于口门区与连接段交界处，距左导墙墙端约 400 m ，对引航道内水流条件影响较小。左侧疏浚区能有效平衡右侧疏浚区的侧向引流作用，增加下游引航道口门区过水断面面积，从而降低河段水动力强度。疏浚区宽度越宽，其有效过水面积越大，右汊疏浚区横向引流作用越小。从输沙带分布来看，横流进入航道后流速迅速降低，形成较大范围的淤积，疏浚宽度越小越明显。随着疏浚区宽度的增加，河段横向流速随之减小，从而较好地避免了推移质泥沙输沙带进入航道。

4.2 不同导墙结构形式水流条件

设置导流墩能够削弱左导墙末端挑流作用，但导流墩施工难度较大^[8]，故拟采用延长导墙的方式调整左汊进入口门区的水流。选取 $Q=7\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 作为对比工况，各方案流场及输沙带分布见图 7。



a) 方案5



b) 方案6

图 7 航道流场对比

1) 方案 5，导墙采用直立墙形式。能够起到一定的挑流作用，墙体末端横流较大。由于两侧水流进入航道的位置不对称，在口门区形成回流，回流流速 0.45 m/s ，最大横向流速 0.55 m/s ，通航水流条件较差。同时，直立墙末端具有挑流作用，增加了其末端附近河床水流挟沙力，推移质泥沙输沙带进入航道。

2) 方案 6，导墙采用斜坡式石笼坝形式。口门区未出现大范围回流区，且横向流速较方案 5 有所降低，最大横向流速 0.35 m/s 。输沙带主要集中在疏浚区内，进入航道推移质泥沙量较少。

试验结果说明, 石笼坝台阶式边坡的存在能够有效抵消顶部过流形成的跌水, 其结构自身所具有的透水性也有利于分散进口门区的横流。

5 结论

1) 枢纽船闸位于分汊河段的江心洲洲尾, 其下游引航道及口门区处在两汊水流交汇区。中水期, 枢纽两侧水流同时下泄, 航道内横流较大, 回淤严重, 船舶难以通行, 因此有必要采取工程措施改善航道水流泥沙条件。

2) 保持左侧疏浚区长度及底高程不变, 当疏浚宽度增至引航道宽度 B_0 时, 航道水流泥沙条件有所改善; 当疏浚宽度增至 $1.5B_0$ 时, 航道水流泥沙条件进一步改善。试验研究表明, 左侧疏浚区能有效平衡右侧疏浚区的侧向引流作用, 随着疏浚区宽度的增加, 河段横向流速随之减小, 同时较好地避免了推移质泥沙输沙带进入航道。定床输沙试验表明, 极限状态下方案 6 疏浚区泥沙回淤量较小, 保守估计 3~5 a 开展一次维护性疏浚可保证疏浚区平衡水流的作用。

3) 相较于直立墙结构, 斜坡式石笼坝导墙不仅能够削弱原左侧外扩段导墙挑流作用, 还能有效避免末端回流的形成, 并进一步减小口门区横向流速和泥沙淤积。

4) 综合整体物理模型试验结果, 方案 6 能够较好地解决中水期河段碍航问题, 即在左侧河道平行于下游引航道口门区及连接段布置一疏浚区,

疏浚宽度为 $1.5B_0$, 疏浚底高程 26.44 m, 同时采用斜坡式石笼坝延长左侧导墙 200 m。该方案基本被采纳为工程实施方案, 并于 2019 年 5 月完工, 在实际运行中取得了较好的整治效果。

参考文献:

[1] 赵江, 刘晓平, 任启明, 等. 大源渡航电枢纽二线船闸下游通航条件优化试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(6): 32-36.

[2] 胡旭跃, 许晓琳, 沈小雄, 等. 江心洲型船闸通航安全问题及改善措施研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 94-97.

[3] 郭年华, 罗优, 丁晶晶, 等. 峡江水利枢纽引航道通航水流条件改善措施试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2015, 13(3): 54-59.

[4] 乾东岳, 普晓刚, 王能, 等. 桃源枢纽坝下汇流区推移质运动特性试验研究[J]. 水运工程, 2019(5): 118-124.

[5] 周勤, 谢灵运, 马倩, 等. 古顶水利枢纽二线船闸下游引航道布置物理模型试验研究[J]. 水运工程, 2019(6): 105-110, 166.

[6] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 通航建筑物水力学模拟技术规程: JTJ/T 235—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2003.

[7] 中交水运规划设计院有限公司. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[8] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 桃源枢纽船闸下游引航道改造工程物理模型试验研究报告[R]. 天津: 交通运输部天津水运工程科学研究所, 2017.

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 38 页)

[8] 中冶京诚工程技术有限公司. 钢结构设计规范: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.

[9] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 京唐港 31#、32#泊位码头结构地质勘查报告[R]. 天津: 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 2004.

[10] 李斌. 遮帘式板桩码头结构土压力算法及承载特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.

[11] 孔纲强. 群桩负摩阻力特性研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2009.

[12] 中交第一航务工程勘察设计院有限公司, 中交第三航

务工程勘察设计院有限公司, 中交第四航务工程局有限公司. 码头结构设计规范: JTS 167—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[13] 刘汉龙. 现浇 X 形桩沉模装置: 200720036892.6[P]. 2007-05-09.

[14] 刘汉龙, 王智强, 丁选明, 等. 一种现浇 X 形混凝土桩活瓣桩尖结构装置及使用方法: 200910213162.2[P]. 2009-10-30.

[15] 刘汉龙. 现浇 X 形钢筋混凝土桩施工方法: 200710020306.3[P]. 2007-02-12. (本文编辑 王璁)