

· 航道及通航建筑物 ·



北江白石窑水利枢纽下游引航道 通航水力学试验研究

张绪进¹, 程小龙², 王云莉¹

(1. 西南水运工程科学研究所, 重庆 400074; 2. 重庆水利电力职业技术学院, 重庆 402160)

摘要: 通过对原有白石窑水利枢纽船闸进行改扩建来提高航运能力, 将原来的一线船闸改建, 同时在改建船闸左岸增设二线船闸。根据白石窑水利枢纽通航建筑物的整体定床模型试验成果, 研究该工程改扩建后的通航条件。针对由于枢纽下游主河槽与船闸轴线交角较大以及枢纽下游主河槽河床高出下引航道口门区较多而引起的船闸下游口门区及连接段的斜流、乱流等不利通航水流条件, 提出了合理有效的整改措施。该试验成果可供以后类似工程参考和借鉴。

关键词: 通航条件; 下引航道; 口门区; 水力学; 流速

中图分类号: U 612.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)03-0119-06

Experimental research on navigation hydraulics of downstream access channel on Beijiang Baishiyao hydro-junction

ZHANG Xu-jin¹, CHENG Xiao-long², WANG Yun-li¹

(1. South-west Water Transport Engineering Institute, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Water Resources and Electric Engineering School, Chongqing 402160, China)

Abstract: We must take further channel regulation measures to improve the navigation environment of the hydro-junction, increase the shipping capacity of the original first-line ship lock by reconstruction and extension, and add the additional second-line ship lock on left bank of the new ship lock. According to the test results of the overall fixed-bed model of navigation building on Baishiyao hydro-junction, we study the navigation conditions after the reconstruction and extension project. For the unfavorable flow condition, we put forward reasonable and effective measures, which may be used as reference for similar projects.

Key words: navigation condition; downstream access channel; entrance area; hydraulics; flow rate

北江是珠江水系第二大河流, 是广东省北部主要运输通道之一。北江干流已建有5座水利枢纽, 其中白石窑、飞来峡、清远3座枢纽位于乌石至三水河口217 km河段内, 该河段是沟通北江中下游地区与珠江三角洲地区水上运输的唯一通道, 对沿江两岸人民的物质文化交流和经济发展起到了不可替代的作用。近年来, 随着北江腹地经济的发展, 大宗货运量增加迅猛, 而乌石至三水河口河段航道等级低, 航道基础设施相对

落后, 已建枢纽船闸尺度小, 通过能力有限, 与货运量的增长不相适应, 塞船现象屡屡发生。为此, 相关部门拟采取进一步的航道整治措施, 将北江乌石至三水河口217 km河段航道等级由V级(长期整治已达到的通航标准)提高到Ⅲ级, 通行船舶由300吨级提高到1 000吨级。整治具体措施包括白石窑、飞来峡和清远3座水利枢纽的船闸改扩建工程及坝下游滩险河段的航道整治工程等。其中白石窑船闸改扩建工程主要包括拆除原

收稿日期: 2013-05-28

作者简介: 张绪进(1959—), 男, 研究员, 主要从事水工水力学及河流动力学研究。

已建船闸、在原址新建一线船闸，同时增设二线船闸，两船闸均同时布置在左岸。通过白石窑整体水利枢纽定床模型试验，研究白石窑二线船闸改扩建方案下游引航道口门区及连接段通航水力学条件，针对下游引航道口门区及连接段的通航水力学问题提出了合理有效的整改措施。

1 工程概况

白石窑水利枢纽位于广东省英德市上游25 km处，是北江干流的第3个梯级。该枢纽的正常蓄水位是37.32 m。多年平均流量532 m³/s；枢纽设计最大通航流量3 860 m³/s；设计洪水流量 $Q_{P=1\%}=11\ 200\ m^3/s$ ；校核洪水流量 $Q_{P=0.1\%}=14\ 200\ m^3/s$ ；坝下游效能及防护工程按50 a一遇洪水设计，对应流量 $Q_{P=1\%}=10\ 200\ m^3/s$ 。

白石窑枢纽的总体布置格局为：左岸船闸、右岸电站厂房、中间为22孔泄洪闸。已建的一线船闸按V级航道标准建设。船闸有效尺度140 m×14 m×2.5 m（长×宽×门槛水深），可通行100吨级船队和300吨级货船。随着北江沿线地区经济的迅速发展，白石窑枢纽的现实功能缺陷越来越突出，主要问题是：已建的船闸等级低、尺度小，无法满足规划的Ⅲ级航道标准和预测的货运量需求，影响了船闸的使用效率。

2 船闸改扩建方案

白石窑枢纽船闸改扩建工程按Ⅲ级标准设计。其中，新建的二线船闸（或2#船闸）闸室有效尺度为220 m×23 m×4.5 m（长×宽×门槛水

深，下同）；改建的一线船闸（或1#船闸）闸室有效尺度为140 m×16 m×4.5 m。一、二线船闸采用在左岸并列布置的方式，改建的一线船闸在原已建船闸的位置不变，新建的二线船闸紧邻原一线船闸的左侧，两船闸轴线距离78.9 m。根据两线船闸是否共用下引航道，提出两个设计方案。方案1两线船闸上、下游引航道均全部共用、方案2两线船闸上引航道共用而下引航道分开。

2.1 设计方案1

该方案是船闸上、下游引航道宽均按直进曲出的布置方式，即一线船闸采取向左拓宽，二线船闸采取向右拓宽的布置形式，见图1。两船闸上、下游引航道宽均为98.4 m，上游引航道底高程27.52 m，两侧主导航墙长均为85 m，顶高程均为39.32 m，在其上游127.5 m处的左右两侧各依次向上游布置12个靠船墩，靠船墩段长220 m，以上为半径389.2 m（中心线）、中心角29°的圆弧过渡段向左转弯，再以直线段与主航道衔接。两船闸的下引航道底高程19.32 m，利用原一线船闸外侧的分隔墙将其与主河床动水分隔，两侧主导墙长亦均为85 m，顶高程为37.77 m，在其下游127.5 m处的左右两侧亦依次向下游布置12个靠船墩，靠船墩段长220 m，以下以弯曲半径389.2 m（中心线）、中心角26°的圆弧过渡段向左转弯，再与下游整治后的航槽衔接。在新建的二线船闸左侧布置有排涝渠，为避免排涝渠出口水流对下引航道口门区的通航水流条件产生不利影响，在排涝渠出口段设有长约112 m的直立式导流墙，以调顺出口水流的流向。

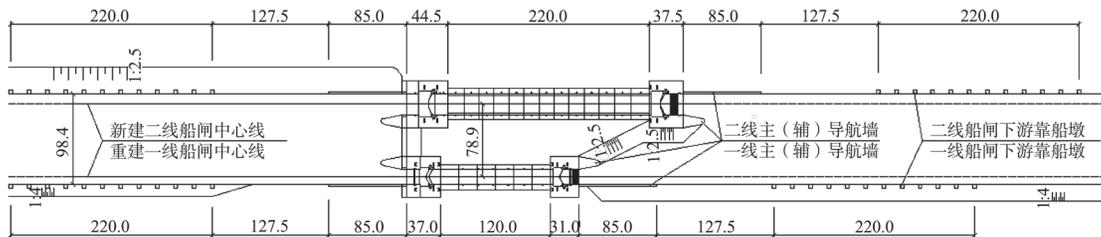


图1 方案1白石窑枢纽船闸改扩建工程平面布置

2.2 设计方案2

该方案是上引航道，仍采取两线船闸共用的布置形式，其引航道布置与方案1基本相同，见图2。两线船闸上游引航道宽度仍为98.4 m，按直

进曲出的方式布置，即一线船闸采取向左拓宽，二线船闸采取向右拓宽的布置形式。两船闸共用的上游引航道底高程27.52 m，两侧的主导墙长均为67.5 m，顶高程39.32 m，在其上游102.5 m处的

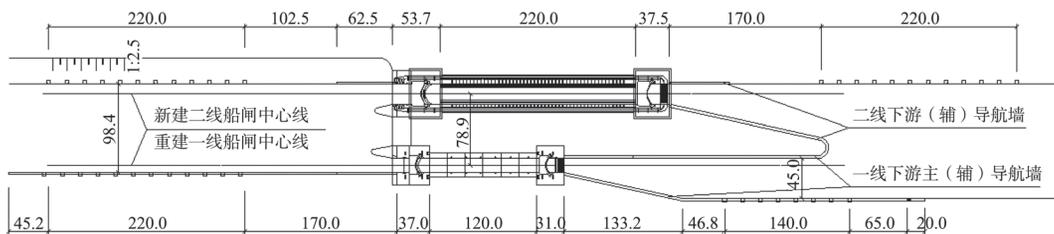


图2 方案2白石窑枢纽船闸改扩建工程平面布置

左右两侧仍依次向上游布置12个靠船墩, 靠船墩段长度220 m, 以上为半径389.2 m (中心线)、中心角29°的圆弧过渡段向左转弯, 再以直线段与上游主航道衔接。下引航道则采取各自分开的布置形式, 一线船闸按曲进直出的布置方式, 引航道底高程为19.32 m, 引航道宽45 m, 下闸首右侧主导航墙扩展段长133.2 m, 其后接长为272 m的直线段导航墙, 直线段采用板桩结构, 设8个靠船墩, 左侧辅导航墙长280 m, 导航墙顶高程均为37.77 m; 二线船闸下引航道按直进曲出的布置方式, 引航道宽60 m, 底高程19.32 m, 左侧主导墙长亦为67.5 m, 在其下游101.5 m处依次向下游布置12个靠船墩, 靠船墩段长220 m, 右侧辅导航墙向右拓宽。一、二线船闸下引航道下游共用段及挖槽段总宽127.4 m, 在距下闸首约680 m处航道中心线以半径500 m和中心角26°的圆弧过渡段向左转弯, 并逐渐收缩与下游主航槽衔接。同样, 为避免二线船闸左侧排涝渠出口水流对下引航道口门区的通航水流条件产生不利影响, 在排涝渠的出口段设有长约90 m的立式导流墙, 以调顺出口水流的流向。

3 模型设计与相似性验证

模型河道范围应能充分反映工程所在河段的河势特征, 并在其上、下游预留足够长的调整过渡段, 以满足试验河段的水流条件相似性要求。白石窑枢纽所在河段河势微弯, 河道相对顺直。根据试验任务要求, 并考虑试验场地大小、供水能力及船模试验等相关因素, 决定选用几何比尺为 $\lambda_L = \lambda_H = 100$ 的正态模型。模型范围包括: 从坝轴线上游约2.7 km开始至坝轴线下游约3.6 km为止, 模拟原型河道总长约6.3 km。本模型按重力相似准则进行设计, 将几何比尺代入关系式即可得到该模型水流运动各项相似比尺值, 见表1。

表1 北江白石窑枢纽通航建筑物整体水工模型比尺

比尺名称	公式	比尺值
几何比尺	$\lambda_L = \lambda_H$	100
流速比尺	$\lambda_v = \lambda_H^{1/2}$	10
流量比尺	$\lambda_Q = \lambda_L \lambda_H \lambda_v$	100 000
河床糙率比尺	$\lambda_n = \lambda_H^{1/6} \left(\frac{\lambda_H}{\lambda_L} \right)^{1/2}$	2.15
水流运动时间比尺	$\lambda_{t(水)} = \frac{\lambda_L}{\lambda_v}$	10

通过对完建的模型进行系统的几何相似性检验, 结果表明, 模型平面误差绝对值小于1.0 cm (模型值), 高程误差绝对值小于1 mm (模型值), 即模型与原型河床达到几何相似的要求。

4 船闸下游引航道的通航水力学试验

白石窑枢纽下引航道口门区及下游连接段位于三板洲左主汊的中下段, 上游主槽由右向左过渡, 其走向与下引航道中心线形成约30°的交角, 该处部分河床高程26.0~28.7 m, 明显高于下引航道底板高程19.32 m。由于飞来峡水库的回水位与白石窑枢纽下游尾水位不衔接^[4], 为满足通航要求, 本次航道整治拟对白石窑枢纽下游航槽进行开挖整治, 开挖整治后下引航道口门区及连接段航槽宽100 m, 底高程19.32 m, 而下引航道口门区右侧与主河槽 (即三板洲左主汊) 交界处的河床高程约在24.0 m。

4.1 设计方案1船闸下游引航道的通航研究

4.1.1 平面布置情况

根据前期试验观测: 无论是设计方案1或设计方案2, 在各级中小流量时, 电站尾水均以跌水的形式流入下引航道口门区, 并对通航条件产生不利影响。为此, 需要在设计方案1或设计方案2的基础上, 对三板洲左主汊进行开挖整治, 以确保水流的平顺衔接。试验通过研究多级流量上游

来流条件及与下引航道口门区流速流态的相互关系，确定开挖整治方案，如图3所示。

1) 挖槽平面布置：挖槽上游与泄洪闸下游深槽相连，下游端与下引航道口门区右侧衔接，挖槽起始段开挖高程21.82 m，尾端衔接处高程

20.82 m，挖槽宽约110 m，两侧边坡为1：4，挖槽中心线与下引航道轴线之间的交角约24°。

2) 为改善中、枯水期一线船闸停泊段的水流条件，将下引航道外侧隔墙延长约10 m，其顶面高程逐渐下降，至末端与河床高程齐平。

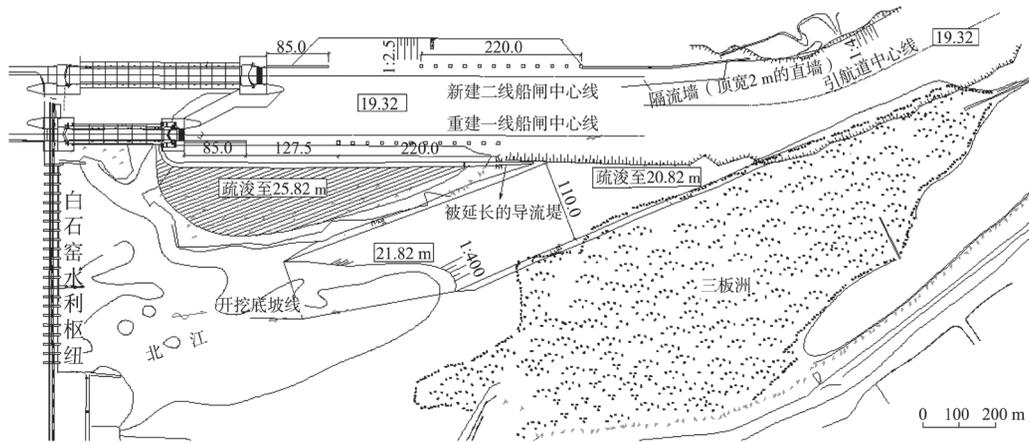


图3 方案1船闸下引航道平面布置

3) 对下引航道分隔墙外侧的河床地形进行适当清理整治，其整治高程为25.82 m，以进一步调顺进入下引航道口门区水流的交角。

4.1.2 通航水力学试验

试验针对设计方案1，观测并研究了在 $Q=98\sim 7\ 860\text{ m}^3/\text{s}$ 共8级流量下的船闸下引航道口门区及下游连接段的通航水流条件^[1]。根据试验结果分析了在水库雍水运行时和全闸开启敞泄洪水时分别对应的流量情况下，其下游引航道的口门区及连接段的通航水流条件，并结合实际情况提出可行的改善措施。

4.1.2.1 在水库雍水运行时的通航条件

在闸门控制开启的各级流量情况下，上游来水较为平顺，原有的跌水流态已经消失，下泄主流与下引航道轴线的交角减小，其最大交角不超过18°。

1) 当枢纽下泄流量 $Q\leq 4\ 990\text{ m}^3/\text{s}$ 时，下引航道口门区的最大纵向流速、最大横向流速和最大回流流速基本上都不超标，随着流量的逐渐增大，航道局部会出现流速超标现象，但对于通航影响不大^[2]。譬如，在下泄流量分别为1 000，2 000，3 860和4 990 m^3/s 时，最大流速均发生在下引航道口门区右侧边缘，在左侧排洪渠分隔墙

前沿存在较小范围的弱小回流，通航水流条件较好。当下泄流量 $Q=4\ 990\text{ m}^3/\text{s}$ 时，最大纵横向流速略超标，但超标区域也是均发生在下引航道口门区及连接段右侧边缘，其余大部分区域流速满足通航要求。

2) 当枢纽下泄流量 $Q=6\ 740\text{ m}^3/\text{s}$ 时，下引航道右导墙（即右侧的分水隔墙）刚好被淹没，下引航道口门区最大纵向流速2.07 m/s，最大横向流速0.25 m/s，其纵向流速略超过规范要求；下游连接段的最大流速2.30 m/s，最大横向流速0.37 m/s，其纵、横向流速略超过规范要求。但超标区域均发生在下引航道口门区及连接段右侧边缘，其余大部分区域均满足安全通航的要求。左侧排洪渠隔流堤前沿附近的回流宽度约为30 m，最大回流流速为0.44 m/s。

3) 当枢纽下泄流量 $Q=7\ 860\text{ m}^3/\text{s}$ 时，在下引航道口门区的最大纵向流速为1.68 m/s，最大横向流速为0.35 m/s；下游连接段的最大纵向流速2.07 m/s，最大横向流速0.42 m/s，其纵横向流速均略有超标。此时由于下引航道右导墙已完全被水流淹没，上游来流部分翻越进入下引航道内，左侧排洪渠隔流堤前沿附近的回流宽度约为30 m，最大回流流速为0.28 m/s。因此，需要适当增加下

4.2.2.1 在水库雍水运行时的通航条件

在闸门控制开启的各级流量情况下，上游来水均较为平顺，下泄主流与下引航道轴线的交角较小，其最大交角不超过18°。

1) 当枢纽下泄流量 $Q=98, 1\ 000, 2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，下引航道口门区的最大纵向流速、最大横向流速和最大回流流速指标均满足规范要求。其中泄流量 $Q=1\ 000, 2\ 000\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，在一线船闸下引航道口门区的右侧与河槽交界处附近的局部区域，并且在左侧排涝渠分隔墙前沿宽约10 m的范围内存在弱小回流区域，最大回流流速约为0.45 m/s。但对于通航影响不大。

2) 当枢纽下泄流量 $Q=3\ 860\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，其大部分区域的最大纵横流速以及回流流速基本上符合规范。但在一线船闸下引航道口门区的右侧与河槽交界处附近的局部区域，并且在左侧排涝渠分隔墙前沿宽约15 m的范围内存在弱小回流区域，最大回流

流速约为0.53 m/s。船模试验结果表明：只要注意操作，设计船舶就能够较顺利地安全进出船闸。

4.2.2.2 在全闸开启敞泄洪水时的通航条件

根据试验结果分析，当枢纽下泄流量 $Q=3\ 860$ 和 $4\ 990\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，局部区域出现最大纵横流速超标的现象，主要发生在一线船闸下引航道口门区右侧和下游连接段尾端附近，并且左侧排涝渠分隔墙前沿宽约20 m的范围内发生弱小回流^[5]。船模试验结果表明：由于该级流量船闸下引航道大部分区域流速较小且流态较好，航宽较大，船舶在下引航道口门区的航行和进出闸仍较顺利。

在枢纽下泄流量 $Q>6\ 740\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，流量数据显示，随着流量的逐级加大，在原来的局部纵横流速超标区域范围也相应扩大（图6）。船舶在下引航道口门区及下游连接段的航行和进出闸具有一定的难度。

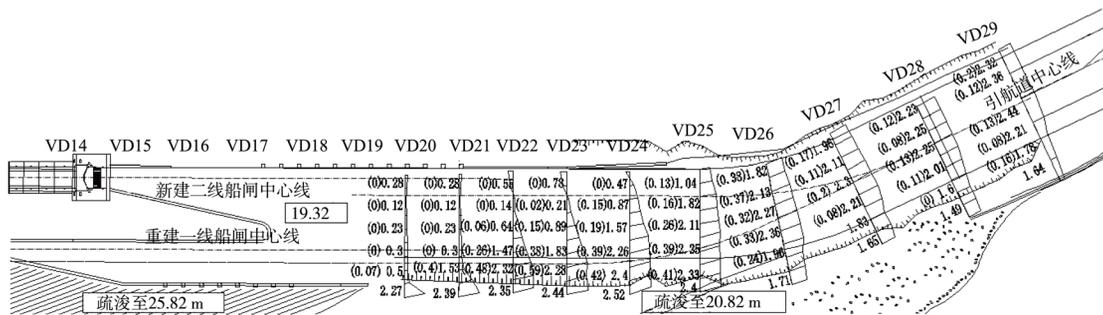


图6 方案2下泄流量为 $Q=7\ 860\ \text{m}^3/\text{s}$ 时的流速分布（单位：m/s）

5 结论

1) 由于白石窑枢纽下引航道口门区及下游连接段位于枢纽下游三板洲的左主汊中下段，上游主槽与船闸轴线交角约达30°，其河床地形高出下引航道口门区6~9 m，在各级中小流量时，电站尾水均以跌水的形式斜向冲入下引航道口门区，使下引航道产生斜流、乱流等不良流态，并对通航条件产生不利影响。试验证明：通过开挖整治上游河床、适当延长下引航道外侧分水隔墙，可有效改善下引航道口门区的通航水流条件。

2) 在对下引航道口门区外侧采取开挖整治措施的前提下，设计方案1在枢纽下泄流量 $Q \leq 3\ 800\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，下引航道口门区及下游连接段的各项流速指标均能满足规范要求；当枢纽下泄流量 $3\ 800\ \text{m}^3/\text{s} < Q \leq 6\ 740\ \text{m}^3/\text{s}$ 时，无论水库壅水

运行（即泄洪闸控制开启）还是全闸开启敞泄洪水情况下，下引航道口门区右侧边缘和连接段尾端局部区域纵横向流速略超标外，其余绝大部分区域的纵横向流速能够满足要求；枢纽下泄流量 $Q > 6\ 740\ \text{m}^3/\text{s}$ 后，由于外侧隔墙翻水，下引航道及口门区水流条件不能满足安全通航要求。

3) 设计方案2的船闸下引航道口门区和连接段与设计方案1基本相同，而且对改建的二线船闸下引航道口门区外侧河床采取相同的开挖整治。在相同流速下，分别对设计方案1和方案2的下游引航道口门区流态进行比较，通过观察和分析，断面流速和整体流态满足通航水力学要求。下引航道的通航水流条件亦基本一致。

（下转第150页）