

桃花江航运枢纽整体水力学试验研究

吴福生¹, 宣国祥¹, 雷爱民²

(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. 桂林市环城水系建设开发有限公司, 广西 桂林 541001)

摘要: 桃花江旅游景观船闸在布置上因受到枢纽地形与河道防洪的限制, 难以满足规范要求. 采用几何比尺为 1:25 的整体水工模型进行了试验研究, 2 座枢纽的控制运行条件均为最高通航水位组合, 主河道中流速较大, 特别是上下游口门处引航道的横向流速较大, 不能满足规范要求. 修改方案主要通过减小 2 座船闸上下游引航道与桃花江主河道夹角, 并对口门附近地形进行了相应的疏浚. 试验结果表明, 修改方案有效降低了 2 座船闸上下游口门处横向流速等不利因素.

关键词: 桃花江; 船闸整体枢纽; 水工模型试验; 船闸引航道口门; 橡胶坝

中图分类号: U641.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2012)04-0049-06

桃花江船闸位于广西桂林桃花江风景区, 桃花江在桂林地段的河道是一大“S”形和两小“S”形. 桃花江船闸枢纽包括肖家船闸枢纽和徐家船闸枢纽两座, 每座船闸枢纽均由拦河壅水橡胶坝和旅游景观通航船闸组成, 两船闸间距约 2.1 km, 肖家船闸位于徐家船闸的上游. 船闸枢纽工程布置在桃花江河道上, 桃花江的设计防洪标准为 20 年一遇洪水.

为满足防洪与景观设计要求, 不缩小河道行洪断面, 船闸布置在桃花江主河道之外的岸边. 根据船闸枢纽的设计运行条件, 只有当拦河壅水橡胶坝坝顶溢流水头达到 0.5 m 以上, 橡胶坝塌坝泄洪时, 船闸才停止运行. 也就是说, 船闸运行时, 橡胶坝有不大于 0.5 m 水头的溢流下泄.

鉴于桃花江旅游景观船闸布置上的一些特殊受限条件, 如受枢纽地形与水流条件限制, 肖家船闸上、下游引航道与桃花江的夹角分别为 56° 和 42°, 徐家船闸上、下游引航道与桃花江的夹角分别为 46° 和 34°. 航道中心线与桃花江的夹角较大, 均难满足船闸设计规范的要求. 同时, 船闸运行时, 橡胶坝有不大于 0.5 m 水头的溢流下泄, 上下游引航道的口门区, 将产生较大横向流速、回流与漩涡等不利水流流态, 通航条件较差. 因此, 必须优化枢纽建筑物布置方案, 创造安全的通航水流条件, 以保证游船的安全运行. 基于此, 本文进行了桃花江船闸枢纽整体水工模型试验研究.

1 物理模型设计与试验条件

1.1 物理模型设计

为保证模型和原型的几何相似、水流运动相似和动力相似, 严格执行试验研究受控标准, 利用模型进行水面线、断面流速分布规律及相应流量研究. 模型主要按重力相似准则进行设计, 采用几何比尺为 1:25 的正态模型. 整体模型上游模拟长度以不影响模型工作段流态和上游引航道口门区流态为条件, 下游模拟长度应保证上下游引航道口门区相应位置河床下游流态的相似性, 并满足过流流量及水流能量损失的相似要求. 模型的建筑物采用模块化设计, 以便于修改.

收稿日期: 2011-12-15

作者简介: 吴福生(1963-), 男, 安徽池州人, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事水工水力学及环境水力学研究.

E-mail: fswu@nhri.cn

模型的上下游要保证足够的长度以确保上下游水流的平稳过渡和水位控制,设置消能与水位调节控制装置.模型上游安装量水堰测量控制枢纽的泄流量,并设消浪墙与滚水坝用以消能与平顺水流,使得模型枢纽上游来流相似.模型下游边界采用插板式尾门以控制调节水位.

1.2 试验条件与测量手段

试验条件根据船闸通航运行条件确定.肖家橡胶坝坝顶高程 149.2 m,坝前水位达到最高通航水位 149.7 m 时,坝顶溢流流量 $80 \text{ m}^3/\text{s}$,超过此水位时,橡胶坝塌坝运行;徐家橡胶坝坝顶高程 147.4 m,坝前水位达到最高通航水位 147.9 m 时,坝顶溢流流量 $80 \text{ m}^3/\text{s}$,超过此水位时,橡胶坝塌坝运行.肖家船闸枢纽运行时的典型水位组合为:上、下游最高通航水位 149.7 和 147.9 m,水位差 1.8 m;上、下游正常通航水位 149.2 和 147.4 m,水位差为 1.8 m;上、下游最低通航水位 149.0 和 147.2 m,水位差为 1.8 m.徐家船闸枢纽运行时的典型水位组合为:上、下游最高通航水位 147.9 和 146.8 m,水位差 1.1 m;上、下游正常通航水位 147.4 和 145.6 m,水位差为 1.8 m;上、下游最低通航水位 147.2 和 144.8 m,水位差为 2.4 m.试验采用挪威 Nortek AS 公司生产的三维 ADV 流速测量系统对河道流速、引航道进出口口门区流态复杂区域的流速进行测量,采样频率为 25 Hz,量程为 0.5 ~ 400 cm/s,具有较高的测量精度.在模型上游采用矩形薄壁量水堰测控流量.

2 原设计方案试验

2.1 肖家船闸枢纽原设计方案试验

由船闸总体设计规范^[1]可知,在没有足够资料的情况下,引航道、口门区的中心线与河流主流流向之间的夹角不宜大于 25° .但因桃花江旅游景观船闸布置上受到枢纽地形与河道防洪的限制,肖家船闸上、下游引航道与桃花江主流方向的夹角为 56° 与 42° ,显然不满足规范要求.由试验结果可知,船舶以主河道为航迹线航行时,上游口门区主河道流速约为 $0.44 \sim 0.54 \text{ m/s}$,其横向流速为 $0.34 \sim 0.40 \text{ m/s}$,且上游口门最近处离橡胶坝坝轴线仅 50 m;下游口门区主河道流速约为 $0.59 \sim 0.70 \text{ m/s}$,相应横向流速为 $0.21 \sim 0.49 \text{ m/s}$,均不满足规范要求($\leq 0.25 \text{ m/s}$).游船最不利的航行条件是最高通航水位,当船舶从上游向下游行驶时,由于横向流速较大,难以调整航向安全驶入引航道,以致主流将船舶直接带到橡胶坝前而导致翻船,存在着较大的不安全因素.

最高通航水位时,上下游口门附近主河道中平行于航线的纵向流速均小于 1.0 m/s ,满足相关规范要求($\leq 1.5 \text{ m/s}$).船闸闸室进口处引航道存在一较弱回流,回流流速小于 0.1 m/s ;船闸闸室出口附近引航道内也存在一较弱回流,回流流速小于 0.15 m/s ,也满足规范要求($\leq 0.4 \text{ m/s}$).下游引航道与桃花江主流向的夹角为 42° ,口门区平均流速为 0.53 m/s ,不满足规范要求.正常水位组合与最低水位组合时,上下游口门区及航道中各流速均满足规范要求.

可见,肖家船闸控制运行条件为最高通航水位组合.在该通航水位条件下,船闸上下游引航道口门区横向流速大于 0.25 m/s ,不满足规范要求.应减小上游引航道与桃花江的夹角,使肖家船闸上游引航道口门区横向流速满足规范要求.同时,使上游引航道口门区上移,远离橡胶坝,增大行船通过船闸枢纽的安全系数.

2.2 徐家船闸枢纽原设计方案试验

徐家船闸枢纽最高通航水位时,上游口门附近河道中平行航线的纵向流速均较小,小于 0.7 m/s ,满足规范要求.由于下游引航道与桃花江主流向的夹角较大(34°),口门区与主河道交界处河道过流断面狭窄,且河道水下地形较高,水深相对较浅,河面水流流速较大(1.5 m/s),达到规范要求最大值,不利于船舶安全行驶.

最高通航水位时,上游口门区断面平均流速为 $0.47 \sim 0.48 \text{ m/s}$,相应引航道的横向流速为 $0.33 \sim 0.35 \text{ m/s}$.下游口门区引航道断面平均流速为 $0.81 \sim 1.12 \text{ m/s}$,其横向流速为 $0.53 \sim 0.75 \text{ m/s}$.可见,船闸上下游引航道口门区横向流速大于规范要求($\leq 0.25 \text{ m/s}$),上游口门最近处距离橡胶坝很近,仅 50 m,船舶行驶时存在着较大的不安全因素.

船闸闸室进口处上游引航道存在一较弱回流,回流流速小于 0.17 m/s ;船闸闸室出口处下游引航道也存在一较弱回流,回流流速小于 0.16 m/s ,满足规范要求($\leq 0.4 \text{ m/s}$).

徐家船闸枢纽正常水位组合与最低水位组合时,上下游口门区与航道中流速均满足规范要求。

可见,徐家船闸控制运行条件为最高通航水位组合。船闸上下游引航道口门区横向流速不满足规范要求。船舶从上游向下游行驶时,由于横向流速大,难以调整航向安全驶入引航道,以致主流将船舶直接带到橡胶坝前而导致翻船。所以,应减小上下游引航道与桃花江的夹角,使肖家船闸引航道口门区横向流速满足规范要求。同时,使上游引航道口门区上移,远离橡胶坝,增大船舶过闸的安全性。

船闸下游引航道口门处及下游河道较窄,且水深小,因而河道中流速较大,存在不安全因素;应适当减小下游引航道与主河道的夹角,并疏浚下游口门附近航道,扩大过流断面,减小河道流速。

3 修改方案试验

船闸总体设计规范规定要求引航道、口门区的中心线与河流主流流向之间的夹角宜缩小。在没有足够资料的情况下,此夹角不宜大于 25° 。但因桃花江旅游景观船闸布置上受到枢纽地形与河道防洪的限制,肖家船闸与徐家船闸上下游引航道与桃花江主流方向的夹角较大,肖家船闸为 56° 与 42° ,徐家船闸为 46° 与 32° 。显然难以满足规范要求。

考虑到:①原设计方案中肖家与徐家船闸上下游引航道口门区横向流速较大,超过了规范要求的最大值;②船闸下游引航道口门处附近河道表面流速较大,特别是徐家船闸下游引航道口门处附近河道较窄,且水深小,河道中平行航线的纵向流速较大,达到规范规定的最大值 1.5 m/s ,存在不安全因素,不利于船舶的安全正常航行。针对原设计方案中这些问题,对肖家与徐家船闸设计方案作以下修改:

(1)肖家船闸上游引航道与桃花江夹角由原 56° 减小至 35° ,与原设计方案相比,船舶能更平顺地进入引航道口门区,同时将口门附近地形疏浚至引航道高程 145.5 m 。下游引航道与桃花江夹角由原 42° 减小至 28° ,与原设计方案相比,船舶行驶航迹线更加平顺,同时将口门附近地形疏浚至引航道高程 145.5 m ,详见图1(a)。

(2)徐家船闸上游引航道与桃花江夹角由原 46° 减小至 30° ,与原设计方案相比,船舶行驶航迹线更平顺,同时将口门附近地形疏浚至引航道高程 143.6 m 。下游引航道与桃花江夹角由原 32° 减小至 28° ,与原设计方案相比,船舶行驶航迹线也更平顺些,同时将口门附近地形疏浚至引航道高程 143.6 m ,详见图1(b)。

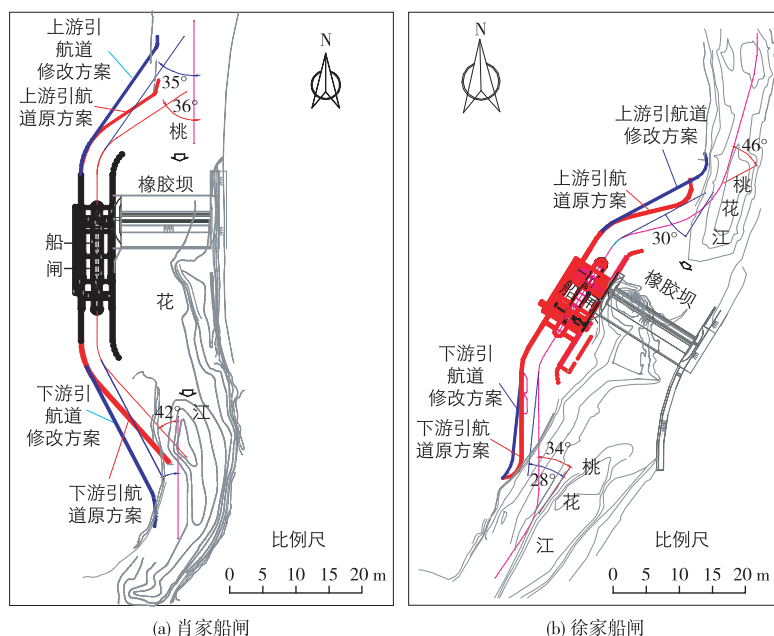


图1 肖家与徐家船闸枢纽上下游引航道修改方案示意图

Fig. 1 The modified schemes of the upstream and downstream channels of Xiaojia and Xujia navigation lock projects

3.1 肖家船闸枢纽修改方案试验

图 2 为最高通航水位下肖家与徐家船闸枢纽修改方案的流速分布与航迹线. 从图 2 可见, 上下游主河道中平行航线的纵向流速均不大于 1.0 m/s , 满足规范要求 ($\leq 1.5 \text{ m/s}$).

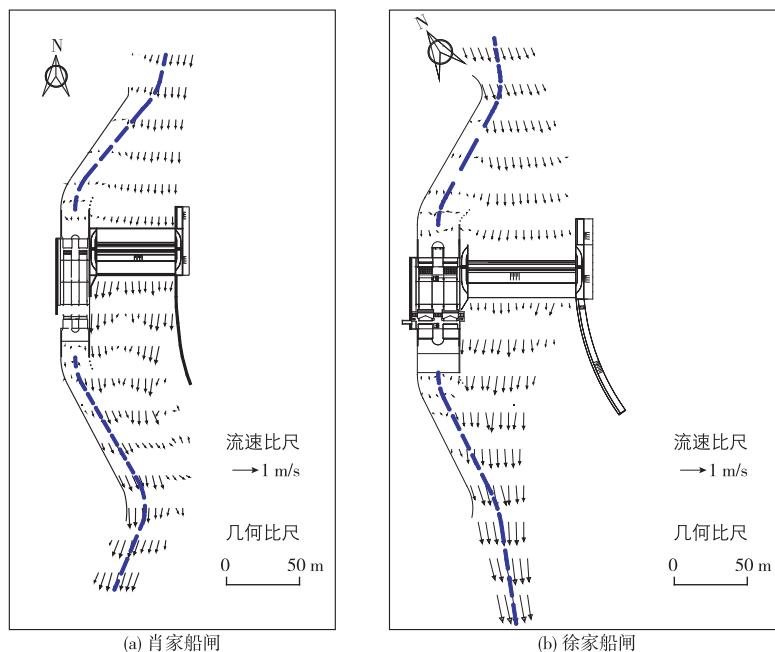


图 2 最高通航水位肖家与徐家船闸枢纽流速分布与航迹线(修改方案)

Fig. 2 Velocity distribution and navigation route during the highest navigable stage in Xiaojia and Xujia navigation lock projects (modified schemes)

最高通航水位时, 水流主要通过橡胶坝泄流, 上游口门附近断面流速分布呈左岸流速大、右岸流速小的特征. 船舶在船闸上游口门附近的航迹线以主河道的断面平均流速来考虑, 则上游口门区主河道的平均流速为 $0.39 \sim 0.42 \text{ m/s}$, 相应引航道的横向流速为 $0.22 \sim 0.24 \text{ m/s}$. 因此, 当上游引航道轴线与河道主流夹角为 35° 时, 船闸上游引航道口门区横向流速满足规范要求 ($\leq 0.25 \text{ m/s}$), 船舶行驶的航迹线也更平顺, 增大了船舶行驶的安全性.

船闸闸室进口处引航道存在一较弱回流, 回流流速小于 0.17 m/s ; 船闸闸室出口处引航道也存在一较弱回流, 回流流速小于 0.10 m/s , 均满足规范要求 ($\leq 0.4 \text{ m/s}$).

下游引航道与桃花江主流向的夹角减小为 28° , 下游口门区水流流速与原设计方案接近. 下游口门区引航道的横向流速为 $0.20 \sim 0.38 \text{ m/s}$, 尚不满足规范要求, 但因受下游公路桥的限制, 下游引航道与主河道夹角不宜进一步减小.

最高通航水位时, 下游河道左侧有一回流, 平均流速小于 0.29 m/s . 正常通航水位组合橡胶坝不过流, 上游口门区最大流速为 0.09 m/s , 下游航道中最大流速仅 0.28 m/s , 其横向流速满足规范要求. 最低水位组合橡胶坝不过流, 上游口门区最大流速为 0.08 m/s , 下游航道中最大流速仅 0.25 m/s , 其横向流速满足规范要求.

上述分析表明, 在修改方案中, 肖家船闸控制运行条件应为最高通航水位组合. 在该通航水位条件下, 船闸上游引航道口门区横向流速为 0.24 m/s , 满足规范要求. 主河道平行航线的流速与船闸闸室进出口附近回流均满足规范要求. 下游口门区引航道的横向流速略大于规范要求, 但受下游公路桥的限制, 下游引航道与主河道夹角不宜进一步减小.

3.2 徐家船闸枢纽修改方案试验

最高通航水位时,上游主河道中平行航线的最大纵向流速均不大于 0.7 m/s ,而下游主河道中平行航线的最大纵向流速不大于 1.31 m/s ,满足规范要求 ($\leq 1.5 \text{ m/s}$).

上游口门区断面平均流速为 $0.41 \sim 0.43 \text{ m/s}$,相应引航道的横向流速为 $0.19 \sim 0.22 \text{ m/s}$.因此,方案修改后徐家船闸上游引航道口门区横向流速满足规范要求 ($\leq 0.25 \text{ m/s}$),且口门向上游移动了约 30 m ,增大了口门与橡胶坝的距离,加大了船舶行驶的安全系数.

船闸闸室进口处引航道存在一较弱回流,流速小于 0.11 m/s ;船闸闸室出口处引航道也存在一较弱回流,流速小于 0.12 m/s .两者均满足规范要求 ($\leq 0.4 \text{ m/s}$).下游引航道与桃花江主流向的夹角减小为 27° ,并且对下游口门区附近河道进行了疏浚,下游主河道最大流速由原设计方案 1.5 m/s 降至 1.31 m/s ,满足了规范要求.

正常通航水位组合下,上游口门区最大流速为 0.09 m/s ,下游航道中最大流速仅 0.28 m/s ,其横向流速满足规范要求.最低水位组合下,橡胶坝不过流,上游口门区最大流速为 0.12 m/s ,下游航道中最大流速仅 0.70 m/s ;下游口门区河道平均流速 $0.27 \sim 0.37 \text{ m/s}$,其横向流速满足规范要求.

可见在修改方案中,徐家船闸控制运行条件应为最高通航水位组合.在该通航水位条件下,船闸上游引航道口门区横向流速为 0.22 m/s ,满足规范要求.由于下游引航道与主河道夹角减小并对河道进行了相应的疏浚,下游口门区附近主河道平行航线的流速得到有效控制,比原设计方案有了明显的改善,下游河道流速小于 1.23 m/s ,满足了规范要求.下游引航道口门处的横向流速为 $0.29 \sim 0.40 \text{ m/s}$,尚不满足规范要求,但因受地形条件的限制,不宜进一步减小下游引航道与桃花江的夹角.

4 结 语

(1)原设计方案控制运行条件为最高通航水位组合.考虑船舶在船闸上游口门附近沿航迹线航行,在最高通航水位条件下,2座船闸上下游引航道口门区横向流速达到 0.35 m/s ,不满足规范要求.且上游口门距溢流坝较近,船舶航行时存在安全隐患.原设计方案徐家船闸下游引航道口门处附近河道较窄,且水深小,下游引航道口门近平行航线的纵向流速较大,达到规范规定的最大值 1.5 m/s ,存在不安全因素.

(2)通过减小橡胶坝泄流量,降低通航保证率来保证船闸的安全运行.试验得出安全航运时桃花江船闸枢纽橡胶坝的过坝流量为 $49.3 \text{ m}^3/\text{s}$.在不超过此泄流量条件下,两船闸上游口门处的横向流速满足规范要求.

(3)修改方案中,肖家船闸在最高通航水位组合条件下,船闸上游引航道口门区横向流速为 0.24 m/s ,满足了规范要求.但下游口门区引航道的横向流速为 $0.20 \sim 0.38 \text{ m/s}$,尚不满足规范要求,受下游公路桥鲁家桥的限制,下游引航道与主河道夹角不宜进一步减小.

修改方案中,徐家船闸在最高通航水位组合条件下,船闸上游引航道口门区横向流速为 0.22 m/s ,满足了规范要求.下游引航道口门处的横向流速为 $0.29 \sim 0.40 \text{ m/s}$,尚不满足规范要求,但因受地形条件的限制,不宜进一步减小下游引航道与桃花江的夹角.由于下游引航道与主河道夹角减小并对河道进行了相应的疏浚,扩大了过流断面,下游口门区附近主河道平行航线的纵向流速得到有效控制,满足了规范要求.

在以上研究基础上,提出如下建议:①最不利的航行条件是最高通航水位,当船舶从上游向下游行驶时,由于主河道流速大,可能导致船舶不能及时调整航向驶入引航道,以致主流将船舶直接带到橡胶坝前而导致翻船.建议根据实际情况,采取一定的安全防护措施.②由于缺少旅游船舶的航行性能资料,其适应的纵横向水流流速是参照了V~VII级船闸的标准,因此,其实用性尚待在原型实际运用中进行检验.

参 考 文 献:

[1] 赵健,赵宁雨,张梦军.草街航电枢纽通航建筑物布置与通航条件研究[J].水运工程,2010(6):108-114.(ZHAO Jian,

- ZHAO Ning-yu, ZHANG Meng-jun. On navigation structures layout and navigation condition of Caojie navigation-hydropower junction[J]. Port & Waterway Engineering, 2010(6): 108-114. (in Chinese))
- [2] 刘劲. 广西郁江老口航运枢纽船闸总体设计[J]. 水运工程, 2011(10): 78-82. (LIU Jing. Overall design of shiplock for Laokou navigation hub in Guangxi Yujiang River [J]. Port & Waterway Engineering, 2011(10): 78-82. (in Chinese))
- [3] 李焱, 李金合, 周华兴. 那吉航运枢纽船闸布置及其通航条件试验研究[J]. 水运工程, 2004(8): 50-54. (LI Yan, LI Jin-he, ZHOU Hua-xin. Optimized arrangement of navigation structures and test study of navigation conditions of Naji hydro-junction [J]. Port & Waterway Engineering, 2004(8): 50-54. (in Chinese))
- [4] 李君涛, 郝品正, 李金合. 右江鱼梁航运枢纽平面布置优化研究[J]. 水道港口, 2007(5): 348-353. (LI Jun-tao, HAO Pin-zheng, LI Jin-he. Optimization research on plan layout of Yuliang hydro-junction project of Youjiang River [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2007(5): 348-353. (in Chinese))
- [5] 普晓刚, 李俊, 郝媛媛, 等. 湘江土谷塘航电枢纽船闸通航水流条件优化试验研究[J]. 水道港口, 2011(5): 346-350. (PU Xiao-gang, LI Jun, HAO Yuan-yuan, et al. Navigation flow condition optimization of Tugutang navigation-power junction of Xiangjiang River [J]. Journal of Waterway and Harbor, 2011(5): 346-350. (in Chinese))
- [6] 刘运化, 王峰. 钱塘江上游游埠航电枢纽通航水流条件数值模拟[J]. 水运工程, 2011(3): 107-110. (LIU Yun-hua, WANG Feng. Numerical simulation on navigation condition of Youbu hydro-junction project in the upper reach of Qiantang River [J]. Port & Waterway Engineering, 2011(3): 107-110. (in Chinese))
- [7] 刘运化, 王峰. 钱塘江中上游姚家航运枢纽坝址方案选择研究[J]. 人民珠江, 2010(5): 36-38. (LIU Yun-hua, WANG Feng. Research on dam site selection for Yaojia navigation project in up and middle stream of Qiantangjiang River [J]. Pearl River, 2010(5): 36-38. (in Chinese))
- [8] 于广年, 王义安, 章日红. 松花江依兰航电枢纽平面布置研究[J]. 东北水利水电, 2011(6): 1-4. (YU Guang-nian, WANG Yi-an, ZHANG Ri-hong. Study on plane layout of Yilan navigation power junction in Songhua River [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast, 2011(6): 1-4. (in Chinese))

Hydraulic experimental studies of Taohuajiang River navigation project

WU Fu-sheng¹, XUAN Guo-xiang¹, LEI Ai-min²

(1. Key Laboratory of Navigation Structures, State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Guilin River Navigation System Construction Development Limited Company, Guilin 541001, China)

Abstract: Taohuajiang shiplock aims at tourist travel. It is hard to satisfy the national navigation norm due to being subjected to restriction of the geography and river flood control. A 1:25 hydraulic model is adopted for the research. The research results show that the control condition of two shiplocks is the highest navigable stage. At this time, the flow velocity is large, especially the horizontal current velocity near the entrance area of the approach channel. It dissatisfies the norm requirements for ships and brings about an insecurity factor. The modified scheme is to decrease the angle between the upstream and downstream approach channels and Taohuajiang main course, and to dredge the entrance of the approach channel of the shiplock. Experiment results of the modified scheme show that horizontal current velocities near the upper entrance areas of the two shiplocks has been improved substantially.

Key words: Taohuajiang River; navigation project; hydraulic model test; entrance of the ship approach channel lock; rubber dam