



风光枢纽扩建船闸上游口门区 通航水流条件试验研究

王建平¹, 刘超², 张世宝³, 谭智天²

(1. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611;

2. 中国电建北京勘测设计研究院, 北京 100024; 3. 华北水利水电大学, 河南 郑州 450046)

摘要: 口门区水流条件的好坏直接影响航运的安全。针对风光枢纽扩建船闸上游口门区及连接段横向流速大、水流条件差等问题, 开展风光枢纽段模型试验, 将上游口门区导航墙长度缩短 40 m, 将导流墩间距调整至 5 m, 数量由 4 个增加到 7 个, 最下游导流墩末端与导航墙的间距为 7 m。试验表明: 导航墙缩短使得口门区距离上游河道弯断的距离增加, 导流墩间距缩小使墩间透水量减少, 水流条件明显改善, 满足规范要求。船模航行试验表明最大通航流量 $Q_{10\%} = 6\,077\text{ m}^3/\text{s}$, 船模可以安全平稳地通过船闸, 操纵参数满足规范要求。

关键词: 口门区; 引航道; 通航水流条件; 模型试验; 风光枢纽

中图分类号: U 612.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)01-0156-06

Experimental research on navigation flow condition in upstream entrance area of Fengguang hydro-junction's expanded locks

WANG Jian-ping¹, LIU Chao², ZHANG Shi-bao³, TAN Zhi-tian²

(1. Pearl River Hydraulic Research Institute of Pearl River, Guangzhou 510611, China;

2. Beijing Research Institute of Survey and Design of China Electric Power Construction, Beijing 100024, China;

3. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: The quality of the flow conditions in the entrance area directly affects the safety of navigation. In view of the problems such as the large transverse velocity and the poor flow conditions in the entrance area and the connecting section of the upstream of Fengguang hydro-junction's expanded locks, we carry out the model experiment of Fengguang hydro-junction, based on which, we shorten the length of the navigation wall in the entrance area of the upstream by 40 m, adjust the spacing of diversion piers to 5 m, and increase the number from 4 to 7, and the distance between the end of the downstream diversion pier and the navigation wall is 7 m. The test results show that after the navigation wall is shortened, the distance between the entrance area and the upstream river bend increases, and after the distance between the diversion piers reduces, the water permeability between the piers decreases, thus water flow condition is obviously improved and meets the requirements of the code. The ship model navigation test shows that the maximum navigable flow is $Q_{10\%} = 6\,077\text{ m}^3/\text{s}$, the ship model can pass through the lock safely and stably, and the control parameters meet the requirements of the specification.

Keywords: entrance area; approach channel; navigable flow condition; model test; Fengguang hydro-junction

1 工程概况

风光枢纽位于东江干流, 是木京梯级及新丰

江水库下游河段的第一个梯级水电站, 下游与沥
口枢纽相接。坝址上距河源市约 11.3 km, 下游距

收稿日期: 2020-04-16

作者简介: 王建平(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事水力学模型试验研究等工作。

紫金县古竹镇约 18.6 km, 控制面积 16 304 km², 是一座以发电、改善水环境为主, 兼顾航运、防洪等综合利用的低水头水利枢纽工程。现有通航建筑物为一座 V 级船闸, 布置在枢纽左岸, 船闸中心线与坝轴线相垂直, 闸室有效尺度为 100 m×16 m×2.5 m(长×宽×门槛水深), 上、下游闸首各为 16 m×30 m(长×宽)的混凝土结构, 通航船舶吨位为 300 t, 设计航道尺度 1.5 m×40 m×260 m(水深×宽度×弯曲半径), 现状为区间通航。扩建船闸平面布置见图 1, 以现有船闸闸室作为上游引航道一部分, 新建 2 个 1 000 吨级船闸, 闸室有效尺度

为 220 m×23 m×4.5 m 和 220 m×16 m×4.5 m, 两线船闸平行布置, 轴线距离 40.5 m。采用船闸上闸首、船闸上游主导航墙及枢纽泄水闸共同组成挡水线, 船闸主体建筑物布置在坝轴线下游, 坝顶桥从船闸引航道上跨过。新建 2 线船闸共用引航道, 引航道宽 100 m, 主导航墙及靠船建筑物分别布置在引航道两侧。岸侧船闸采用曲线进闸, 直线出闸。河侧船闸采用直线进闸, 曲线出闸。引航道轴线与船闸轴线平行, 导航及调顺段长度为 170 m; 停泊段的长度采用保证一次船舶所需长度, 取 220 m^[1]。

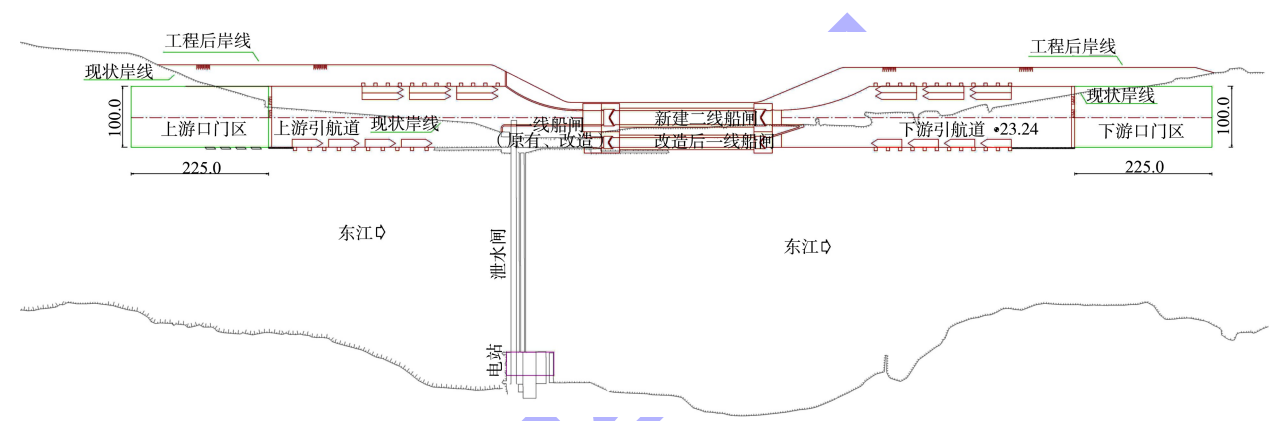


图 1 风光枢纽扩建船闸平面布置 (单位: m)

引航道连接段、口门区是船舶安全进出船闸的咽喉, 该区域通航水流条件直接影响船舶的安全航行^[2-4], 若布置和运行控制不当, 容易引发安全事故^[5-6]。根据 JTJ/T 305—2001《船闸总体设计规范》^[7]确定扩能升级后的船闸级别为Ⅲ级, 口门区长度 135 m(取 2.0 倍顶推船队长度), 口门区宽度与引航道口门宽度相同。引航道口门区与主航道不能直接平顺衔接时, 应设置连接段, 航道连接段长度为 90 m。口门区范围内 $v_{纵} < 2.00$ m/s, $v_{横} < 0.30$ m/s, $v_{回} < 0.40$ m/s, 特殊情况下局部最大流速略超出规定值时, 须经过充分论证确定; 连接段流速限值比口门区的水流条件可适当放宽; 引航道导航和调顺段内宜为静水, 制动段和停泊段的水面 $v_{纵} \leq 0.50$ m/s, $v_{横} \leq 0.15$ m/s。船闸引航道、口门区应避免出现影响船舶航行安全的泡漩和乱流, 并应避免出现影响船舶、船队航行和

停泊安全的风浪、泄水波、浪涌等不良水流条件。风光枢纽的通航建筑物位于弯曲河道的下游左侧凸岸, 口门区水流条件受弯道环流的影响; 拟扩建的二线船闸会使上游口门区河段过流断面一次性束窄 100 m, 口门区河段的过流断面存在较大程度的突缩, 因而发生水流束窄现象, 形成较明显的口门区斜向流; 弯道环流和口门区斜流效应的叠加, 使得上游口门区横向流速超标而影响船舶通航, 相对于布置在顺直河段的下游口门区, 上游口门区的通航水流条件更难满足规范的相关要求。因此, 船闸扩建工程水工物理模型及船舶试验重点研究上游引航道口门区及连接段水流条件(本文中不涉及下游引航道口门区及连接段水流条件研究), 使其满足船舶安全进出上游船闸引航道的需求, 对保证风光航运安全运行具有重要意义, 同时为类似工程提供借鉴。

2 模型设计及验证

根据风光枢纽上下游河道弯曲走势的特点、工程纵向布置、上下游河道地形条件以及规范要求, 试验的模型范围包括坝址上游 3 km、下游 5 km 的河道地形, 模拟河道全长约 8 km。

采用正态模型, 满足重力、几何和阻力相似, 根据工程规模、模型模拟范围、试验场地及研究精度等要求, 确定模型几何比尺为 1:100。模型河道地形采用断面板法制作, 水泥砂浆抹面, 断面间距为 60 cm, 并对地形复杂区域进行局部加密处理, 用水准仪控制模型高程, 误差控制在±2 mm。试验区间位于东江上游河段, 比降较大, 河道糙率 0.022~0.036, 模型糙率 0.010~0.017, 可以通过调整水泥砂浆抹面的粗糙程度满足阻力相似要求。枢纽建筑物用有机玻璃及塑料板材制作, 安装误差控制在±0.3 mm。模型上边界用流量控制, 下边界用水位控制, 口门区流速用 LS-3C 光电旋桨流速仪测量, 模型流态用单反相机记录。物理模型见图 2。

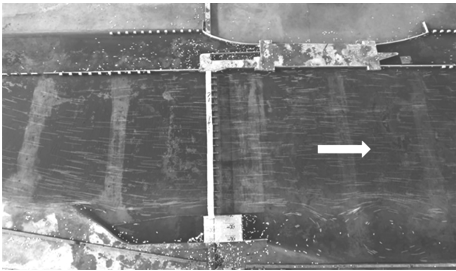


图 2 风光枢纽 1:100 物理模型

模型制作完成后, 依据 2017 年 7 月(枯水)、8 月(中水)工程河段实测水文资料, 对模型水面线、流态进行验证。验证结果表明: 模型水位值与原型值误差在±0.04 m, 流速误差在±0.03 m/s, 河道流态与原型一致, 满足规范要求, 认为模型与原型具有较好的相似性。

船模操控试验选用的实船船型为 1 000 t 机动货驳, 尺寸为 85.0 m×10.5 m×2.0 m(长×宽×吃水), 上行速度为 16.2 km/h, 下行速度为 12.6 km/h, 排水量 1 590 t。船模比尺与水工模型比尺相同, 其中: 几何比尺 λ_L 为 1:100、时间比尺 $\lambda_t=\lambda_L^{1/3}$ 为 1:10、速度比尺 $\lambda_v=\lambda_L/\lambda_t$ 为 1:10、排水量比尺 $\lambda_\Delta=\lambda_L^3$ 为

1:1 000 000、力的比尺 $\lambda_f=\lambda_L^3$ 为 1:1 000 000。模型参数: 85.0 cm×10.5 cm×2.0 cm; 上行速度 0.45 m/s, 下行速度 0.35 m/s; 排水量 1 590 g。

船模制作完成后在静水中进行吃水线 K' 及平面重心位置 T' 的调整, 满足和实船浮态相似的要求。船模为无线遥控的操控方式, 按舵角相似进行左 35°~右 35°的无级比例操舵。经过操纵性能率定试验, 符合船模与实船操纵性能相似。为满足实船略偏安全的试验要求, 采用减少边舵面积的方法进行修正, 修正后的船模与实船操纵性指数见表 1。

表 1 船模操控性能修正指数

船模	K'/m	T'/m
实船	1.895	0.586
船模	1.654	0.603
偏差/%	-12.71	2.90

船模试验过程中, 通过激光扫描对船模运动进行非接触快速检测, 并对船模姿态和操纵要素进行同步遥测, 实时显示相关数据成果^[8]。每一组次进行 3~5 次以上的试验, 取其特征值进行分析, 以减小试验的随机误差。国内在研究内河航道的通航条件时, 对船模航行过程中的舵角及航速值作了相应的限定, 即最大舵角不大于 25°, 最大漂角不大于 20°, 最小航速不小于 0.40 m/s, 并以此来判别航行状态的优劣。

3 设计方案及分析

风光水利枢纽设计最大通航流量为 10 a 一遇洪水流量 6 077 m³/s, 利用 10 a 一遇设计洪水作为控制工况对拟建二线船闸设计方案进行验证、优化, 另外选取 4 组中小流量验证优化方案上游引航道口门区和连接段的水流条件, 试验工况见表 2。

表 2 风光枢纽上游口门区通航水流条件试验工况

工况	下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)	下游水位/m	枢纽运行方式
1	6 077	34.99	闸门敞泄、电厂停机
2	4 696	33.87	
3	2 980	31.55	
4	1 350	29.52	联合运行
5	736	28.57	满发

在最高通航流量条件下, 原设计方案受弯道环流和口门区斜流效应的叠加, 上游引航道口门区通航水流条件较差(图 3)。口门区范围内的斜向水流与引航道中心线形成 $15^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 的夹角, 口门区内横向流速最大达 0.98 m/s (表 3), 不满足通航规范要求, 须对原设计方案进行优化。



图 3 风光枢纽上游口门区水流流态

表 3 风光枢纽上游口门区设计方案流速($Q_{10\%}$)

桩号	左岸右侧 0 m		左岸右侧 20 m		左岸右侧 40 m		左岸右侧 60 m		左岸右侧 80 m		左岸右侧 100 m	
	v_x	v_y	v_x	v_y	v_x	v_y	v_x	v_y	v_x	v_y	v_x	v_y
0-400	0	0	0	0	0	0	0	0	0.21	0.17	1.17	0.98
0-425	0	0	0	0	0	0	0	0	0.47	0.08	0.77	0.07
0-450	0	0	0	0	0	0	0	0	0.59	0.22	0.94	0.25
0-475	0	0	0	0	0	0	0	0	0.66	0.12	1.08	0.19
0-500	0	0	0	0	0	0	0.28	0.08	0.83	0.22	1.21	0.21
0-525	0	0	0	0	0.22	0.13	0.51	0.43	0.78	0.45	1.24	0.45
0-550	0	0	0	0	0.29	0.17	0.89	0.41	0.99	0.57	1.55	0.41
0-575	0	0	0.15	0.13	0.78	0.36	0.90	0.52	1.46	0.53	1.64	0.44
0-600	0	0	0.28	0.08	0.94	0.16	1.07	0.39	1.42	0.52	1.69	0.45
0-625	0	0	0.55	0.15	0.92	0.25	1.36	0.36	1.64	0.44	1.69	0.45

注: v_x 为纵向流速, v_y 为横向流速。

4 优化方案模型试验

4.1 优化方案 1

由于风光枢纽上游引航道口门区通航水流条件不满足规范要求, 副导航墙附近横向流速超标, 需要对原方案进行调整, 特提出排桩方案作为优化方案 1, 见图 4a)。在设计方案原有的 4 个导流墩基础上, 加设 100 m 长的透水排桩, 桩半径 1.0 m, 桩间距 4.0 m。透水排桩可起到增加水流阻力、均化水流的作用, 试验中发现增设排桩后口门区的斜流强度有所减小, 但泄流的影响范围有所扩大, 导致横向流速超标的范围反而增大, 优化后上游口门区通航水流条件仍不能满足规范要求, 故需要对设计方案进一步优化。

4.2 优化方案 2

优化方案 2 在原设计方案基础上将上游口门区导航墙长度缩短 40 m, 导流墩数量由原来的 4 个增加到 7 个, 导流墩间距调整至 5 m, 最下游导流墩末端内侧与导航墙的间距为 7 m, 见图 4b)。

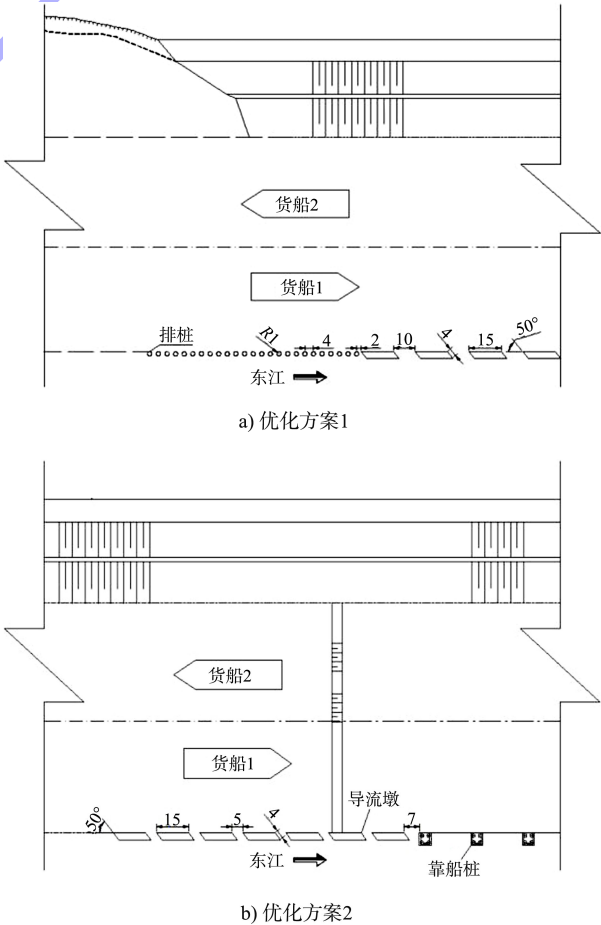


图 4 风光枢纽上游引航道口门区优化方案

试验结果表明：引航道导墙缩短，口门区位置随之下移，口门区距离上游弯段河道的距离增加，口门区水域受弯道环流的不利影响减弱，导流墩数量增加、间距缩小后，一方面可保证墩间总透水量，通过引入口门区部分水量以削弱上游段口门区斜流强度和影响范围；另一方面减少相邻导流墩间的局部透水量以降低横向水流的影响程度，导流墩的长边还可起到沿程持续调顺水流方向的作用，原方案上游口门区范围的斜向水流强度降低，口门区水流方向与航线夹角较小，导

航墙头部的局部绕流减弱，横向流速明显改善（图 5）。在最高通航设计工况下，上游口门区最大横向流速小于 0.30 m/s，最大纵向流速小于 2.00 m/s，上游口门区流速分量见表 4。



图 5 上游口门区推荐方案水流流态

表 4 风光枢纽上游口门区推荐方案流速($Q_{10\%}$)m/s

桩号	左岸右侧 0 m		左岸右侧 20 m		左岸右侧 40 m		左岸右侧 60 m		左岸右侧 80 m		左岸右侧 100 m	
	v_x	v_y	v_x	v_y	v_x	v_y	v_x	v_y	v_x	v_y	v_x	v_y
0-400	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.50	0.29
0-425	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.32	0.06
0-450	0	0	0	0	0	0	0	0	0.34	0.06	0.51	0.09
0-475	0	0	0	0	0	0	0.11	0	0.60	0	0.81	0
0-500	0	0	0	0	0	0	0.28	0	0.59	0.16	0.94	0.16
0-525	0	0	0	0	0	0	0.28	0	0.74	0.13	1.01	0.18
0-550	0	0	0	0	0	0	0.51	0.19	0.62	0.11	1.13	0.20
0-575	0	0	0	0	0	0	0.65	0.17	0.93	0.16	1.32	0.23
0-600	0	0	0	0	0.78	0.14	0.98	0.17	1.15	0.20	1.49	0.26
0-625	0	0	0.19	0.03	0.78	0.14	1.20	0.21	1.41	0.25	1.58	0.28

5 上游口门区通航条件试验

选取部分特征通航流量(1 350、2 980、4 696、6 077 m³/s)进行船模试验，验证优化方案 2 船舶是否可以安全通过口门区。

5.1 通航条件

各工况船模试验成果见表 5。在 $Q\leq 6\,077\text{ m}^3/\text{s}$ (10 a 一遇洪水、泄水闸敞泄、电站停机) 时，1 000 t 自航驳的上、下行最大舵角分别为 18.54° 和 22.40°，均未超过船模试验安全舵角限值，上

行的最小航速为 1.68 m/s，不低于船模试验最低航速安全限值，风光枢纽改建船闸(优化方案 2)上游航道通航条件满足 1 000 t 自航驳的通航要求。

$Q=6\,077\text{ m}^3/\text{s}$ (10 a 一遇洪水、泄水闸敞泄、电站停机) 工况，上游口门区多个流速测点的横向流速值为 0.25~0.29 m/s，接近 0.30 m/s 的规范限值，船舶顺流下行时的舵效差，故船舶下行的最大舵角达到 22.40°，也接近船模试验安全舵角限值，表明船模操控试验成果与水工模型试验成果是一致的。

表 5 优化方案 2 上游口门区船舶试验参数

航向	流量/ ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	最大舵角/(°)		最大漂角/(°)		车档 /($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		航速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		航程/m	航行时间/ min	平均航速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
		右	左	右	左	最大	最小	最大	最小			
上行	1 350	14.53	16.08	6.58	3.79	4.50	4.50	3.32	2.46	1 038	5.72	3.02
	2 980	13.07	16.13	13.20	9.99	4.50	4.50	2.86	1.78	1 063	7.84	2.27
	4 696	16.20	16.15	13.79	6.02	4.50	4.50	3.08	1.74	1 049	7.67	2.28
	6 077	16.58	18.54	16.49	8.92	4.50	4.50	3.09	1.68	1 055	8.00	2.20
下行	1 350	11.06	13.50	3.28	9.13	3.50	3.50	3.93	2.88	1 049	4.83	3.62
	2 980	15.22	14.42	3.43	14.79	3.50	3.50	4.73	2.88	1 054	4.14	4.25
	4 696	14.54	21.28	2.88	14.81	3.50	3.50	4.81	3.27	1 050	4.00	4.38
	6 077	11.45	22.40	1.74	17.53	3.50	3.50	4.97	3.72	1 037	3.67	4.72

注：表中数值为 3 次平均数。

5.2 上行和下行比较

由于船舶出闸上行时由狭窄水域驶向宽广水域, 而下行进闸是由宽广水域驶入狭窄水域, 且上行舵效好, 故大流量泄洪工况时, 下行舵角均大于上行, 下行航行难度大于上行, 船模航行条件与口门区水流特性相吻合。

5.3 不同流量的航行条件

各工况的船模试验结果表明, 随着河道流量的增加, 船闸口门区纵横向流速也随之加大, 造成船舶上下行的舵角和漂角加大、上行的最小航速减小, 航行难度随流量增加而加大。

6 结论

1) 船闸扩建工程实施后, 引航道宽度增大, 在上游口门区河段的过流断面存在较大程度的突缩, 因而发生水流束窄现象, 形成较明显的口门区斜向流。口门区泄流与引航道中心线形成 15°~40°的夹角, 口门区内水流流态较差且横向流速最大达 0.98 m/s, 不满足通航要求。

2) 优化方案 2 通过缩短导航墙长度、增加导流墩数量、减小导流墩间距的方式, 改善口门区通航水流条件。当 $Q_{10\%}=6\,077\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 口门区纵横向流速值明显降低, 水流方向与航线夹角减小, 最大横向流速小于 0.30 m/s, 最大纵向流速小于 2.00 m/s, 能够满足通航要求。

3) 船模试验表明: 在 $Q_{10\%}\leq 6\,077\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 1 000 t 自航货驳上行出闸、下行进闸最大舵角均未超过船模试验安全舵角限值, 上行最小航速优

于船模试验最低航速限值, 只要操纵得当, 船舶即可安全通过船闸上游口门区。

4) 本文提出的在上游引航道导航墙末端设置多个间距较小、截面为平行四边形的导流墩的优化思路, 可有效改善上游口门区斜向流速, 使上游口门区横向流速指标满足规范要求, 为船闸扩建上游口门区通航水流条件优化提供借鉴。

参考文献:

[1] 王建平, 何贞俊, 刘超, 等. 东江河源至石龙航道扩能升级工程—风光枢纽整体定床物理模型试验研究报告[R]. 广州: 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 2018.

[2] 刘超, 张世宝, 张金明, 等. 沥口枢纽上游口门区通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2019(4): 141-146.

[3] 胡浩, 王崇宇, 舒适. 复杂条件下扩建船闸口门区布置及改善措施[J]. 水运工程, 2019(3): 103-109, 120.

[4] 符蔚, 王能, 李志威, 等. 分汊河段船闸引航道整治试验研究[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(8): 17-22.

[5] 姚实, 扈晓雯. 福建闽江水口坝下枢纽通航技术模型试验研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2018, 37(12): 61-68.

[6] 周华兴. 双线船闸共用引航道的尺度分析[J]. 水道港口, 1992(4): 42-48.

[7] 中交水运规划设计院. 船闸总体设计规范: JTJ/T 305—2001[S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.

[8] 李晓飏, 蔡新永, 王建平, 等. 东江河源至石龙航道扩能升级工程—风光枢纽船模通航试验研究报告[R]. 广州: 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 2018.

(本文编辑 郭雪珍)

~~~~~  
(上接第 141 页)

参考文献:

[1] 刘长俭. 贯彻落实《国务院关于加快长江等内河水运发展的意见》的建议[J]. 水运管理, 2011, 33(3): 8-10.

[2] 何远成, 董千里. 长江水运战略地位研究[J]. 交通企业管理, 2008, 23(12): 36-37.

[3] 潘文达, 潘思延. 长江水运物流对区域经济贡献的量化分析[J]. 水运工程, 2011(5): 7-12, 39.

[4] 仲伟斌. 长江下游湖口至浏河口河段支汊航道技术等级与航道尺度研究[J]. 水道港口, 2014, 35(2): 159-164.

[5] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.

[6] 长江航道局, 中交水运规划设计院有限公司. 长江干线通航标准: JTS 180-4—2015[S]. 北京: 人民交通股份有限公司, 2015.

[7] 中交水运规划设计院有限公司, 中交第一航务工程勘察设计院有限公司. 海港总体设计规范: JTS 165—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

[8] 林强. 长江下游铜陵东港航道开通公用航道可行性分析[J]. 水运管理, 2014, 36(12): 15-18.

(本文编辑 王璁)