



乌江思林枢纽二线 1 000 吨级通航建筑物 整体水工物理模型试验研究

张 波, 于广年, 马殿光

(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: 乌江思林枢纽已建与Ⅳ级航道相适应的通航建筑物不能满足按Ⅲ级航道规划的年过坝货运量要求, 拟建思林二线通航建筑物。针对拟建的通航建筑物设计方案引航道口门区及连接段通航水流条件较差的问题, 进行正态物理模型研究。采用水流试验、流场实时测量与自航遥控船模相结合的方法, 研究不同工况条件下通航建筑物上、下游引航道口门区及连接段通航水流条件和船模操控, 通过方案优化比选, 得出口门区最优方案布置和适航流量, 结论是口门区最优方案为本文修改方案 3 布置形式, 口门区最大通航流量建议采用 $1\,793.8\text{ m}^3/\text{s}$, 解决了该通航建筑物口门区通航的关键性问题。

关键词: 枢纽; 物理模型; 通航建筑物

中图分类号: U 64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)04-0081-05

Experimental study on hydraulic physics model of 1,000-ton navigable building in second line of Wujiang Silin Hub

ZHANG Bo, YU Guang-nian, MA Dian-guang

(Key Laboratory of Engineering Sediment of Ministry of Communications, Tianjin Research Institute of
Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: The navigable buildings in Wujiang Silin Hub, which are suitable for class IV channel, can not meet the requirements of the annual freight volume of the crossing dam according to class III channel planning, so the Silin second-lane navigation building is proposed to be constructed. In view of the poor condition of navigable flow at the entrance of the approach channel and the connecting section of the proposed navigable buildings, we conduct normal physical model research. Using a combination of water flow test, real-time flow field measurement, and self-propelled remote control model, we study the navigable water flow conditions and model manipulation in the upstream and downstream approaches of the navigable building and the connecting section under different working conditions, and obtain the optimal layout and navigable flow rate of the entrance area through program optimization, and conclude that the optimal layout of the entrance area is the modified program 3 layout form, and the maximum navigable flow rate of the entrance area is recommended to be $1\,793.8\text{ m}^3/\text{s}$, which solves the key problem of navigability in the entrance area of the navigable building.

Keywords: hub; physical model; navigable building

思林水电站位于贵州省东北部思南县思林乡境内的乌江上, 上游为构皮滩水电站, 下游为沙沱水电站。思林水电站工程^[1]以发电为主, 其次为航运, 兼顾防洪等。乌江航道规划等级已由原

Ⅳ级提高到Ⅲ级, 已建与Ⅳ级航道相适应的垂直升船机不能满足按Ⅲ级航道规划年过坝货运量要求, 故拟建思林二线通航建筑物。依据初步制定的总体设计方案, 将按通航内河 1 000 吨级船舶标

准建设。本文通过整体物理模型水流试验和遥控自航船模试验相结合的研究方法,分析通航建筑物布置的合理性,并提出技术可行、经济合理的布置方案。

苏联采用整体并配合大比尺局部模型校核船闸引航道中船舶的停泊条件,美国主要结合具体工程问题依靠船模航行试验,针对性地提出引航道的通航限制条件。现阶段受水电开发和高坝建设项目萎缩限制,相应的研究成果不多。国内主要依托长江、西江、川江、汉江、红水河、乌江等主要通航河流上大型水电枢纽工程的建设,开展了枢纽通航水流条件研究,旨在解决枢纽通航问题。总体来看,现有成果大多是根据工程需要,采用水工物理模型和数学模型及船舶试验等手段,开展新建或增建通航设施的选型及其上、下游引航道及口门区的工程布置方案。每一条山区河流都有其自身的特点,一条河流上的研究成果对另外一条河流可以起到示范借鉴作用,但不能代替对其进行的专门研究。因此,针对思林枢纽新建的第二线 1 000 吨级通航建筑物,需要通过物理模型研究通航建筑物上、下游引航道口门区及连接段通航水流条件。

1 模型设计与制作

1.1 模型范围

模型布置 2 个上游开边界及 1 个下游开边界,其中上游乌江干流开边界位于思林枢纽上游约 2.5 km 处,石阡河开边界位于汇流口以上约 0.7 km,下游开边界位于思林枢纽以下约 9 km(图 1)。

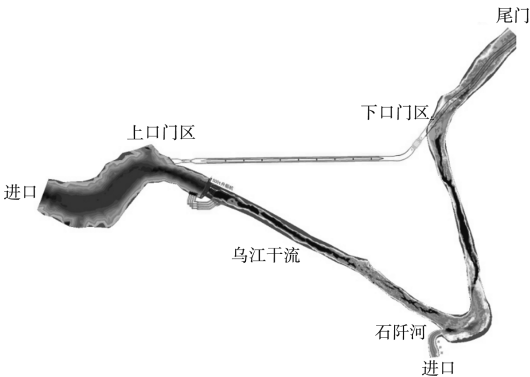


图 1 模型范围

1.2 模型相似条件及比尺

根据试验目的、模型范围及试验场地条件,初步确定模型平面比尺为 $\lambda_L = 100$, 因船模试验需要,模型必须为正态^[2-4], 因此垂直比尺 $\lambda_H = 100$ 。

1) 几何相似 $\lambda_L = \lambda_H = 100$ 。

2) 流速相似 $\lambda_v = \lambda_L^{\frac{1}{2}} = 10$ 。

3) 阻力相似 $\lambda_n = \lambda_L^{\frac{1}{5}} = 2.154$ 。

4) 流量相似 $\lambda_Q = \lambda_L^{\frac{5}{2}} = 100\,000$ 。

5) 模型最小雷诺数 $Re_m = 2\,500$, 表明模型处于阻力平方区, 满足紊流条件。

6) 模型最小水深 $h_m = 4\text{ cm}$, 能够避免水流受表面张力的影响, 满足试验要求。

1.3 模型测控设备

定床模型采用断面法制作, 制模初始地形将采用实测地形图。模型断面根据实测河床地形按平面比尺和垂直比尺缩制而成。模型断面由 5 层板制成, 由布置好的主导控制架设, 断面高程控制误差小于 $\pm 1.0\text{ mm}$, 平面控制中误差小于 $\pm 1.0\text{ cm}$, 符合《内河航道和港口水流泥沙模拟技术规程》的要求。模型表面用水泥沙浆抹面, 泄洪闸、电站、船闸等过流建筑物用 PVC 塑料板进行加工与制作, 确保水流条件的相似性。

根据《长江水系过闸运输船舶标准船型主尺度系列》, 综合考虑《贵州省水运发展规划(2012—2030 年)》和《乌江航道提等扩能工程建设预可行性研究报告》中对乌江库区 1 000 吨级货船的分析, 1 000 吨级设计代表船型尺寸为 $57\text{ m} \times 10.8\text{ m} \times 2.5\text{ m}$ (船长 \times 船宽 \times 满载吃水)。由船模与实船各参数之间的比尺关系, 可计算出船模的主要参数。

水位观测: 测针式水位仪。

流速观测: 采用清华大学 VDMS 流场实时测量系统。

开边界: 上游流量边界, 采用电磁流量计控制, 模型下边界为水位边界, 尾门水位用翻板式尾门进行控制和调节。

2 模型验证

模型建立后首先开展了验证工作, 验证基础资

料为 2010 年 5 月乌江思林电站—三花滩水尺同步观测资料。模型沿程水位与原型值相差在±0.1 m 以内, 各测点的模型与原型值的流速值相比差值基本在 0.10 m/s 以内, 符合技术规程规定的精度要求。

3 工程前水流特性试验

方案试验前, 对工程前口门区上、下游的水

流特性开展了试验观测, 观测内容包括各级流量情况下的水流条件等, 以全面了解研究河段的水流特性, 为下阶段通航建筑物建成后上、下游口门区河段的水位及流速的变化等提供参考资料。

3.1 试验工况

从枢纽调度、来流特征等多方面考虑^[5-6], 工程前水流特性试验选取 6 种试验工况开展研究(表 1)。

表 1 试验工况

工况	干流流量/(m ³ ·s ⁻¹)	石阡河流量/(m ³ ·s ⁻¹)	尾门水位/m	思林枢纽调度	沙陀坝前水位/m	思林坝前水位/m
1	430.0	10.0	361.58	电站发电, 泄水闸关闭		
2	780.0	10.0	362.39	电站发电, 泄水闸关闭		
3	1 772.8	21.0	363.78	电站发电, 泄水闸关闭	353.50	431.00
4	2 500.0	21.0	364.67	电站发电, 泄水闸调度	(死水位)	(死水位)
5	3 500.0	21.0	365.62	电站发电, 泄水闸调度		
6	4 420.0	21.0	366.45	电站发电, 泄水闸调度		

3.2 试验结论

1) 思林枢纽坝上河段水位变幅极小, 各级流量下水位落差在 0~0.05 m; 上游口门区河段为静水, 对于通航来说无不利影响。

2) 下游口门区为弯曲河段, 电站发电、泄水闸关闭($440.0\leq Q\leq 1\,793.8\text{ m}^3/\text{s}$)方式下, 下游口门区河段流速最大值约 3.3 m/s, 位置位于口门区下游 520 m 附近; 电站发电、泄水闸调度($2\,521.0\leq Q\leq 4\,441.0\text{ m}^3/\text{s}$)方式下, 下游口门区河段流速最大值约 4.2 m/s, 位于口门区下游 830 m 附近。因此, 下游口门区河段是本研究的重点。

4 原方案试验

4.1 工程布置

通航建筑物布置于已建枢纽左岸, 通过对乌江截弯取直, 与上、下游引航道相接。考虑到货运量及年过坝船舶数量均较大, 为提高通航建筑物的利用率, 同时考虑并行的 2 条通航隧洞的安全距离等因素, 引航道采用双向扩宽的方式对称布置, 宽度为 60 m, 靠船墩布置在引航道两侧。为满足代表船型 2.5 m 的吃水深, 并适当考虑冗余, 引航道水深取 4.5 m(图 2)。



a) 上游口门区



b) 下游口门区

图 2 原方案工程布置

4.2 试验结论

1) 当流量 $Q\leq 4\,421.0\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 库区内流速极

小,上游口门区及连接段附近流速均小于 0.1 m/s,通航水流条件很好。

2)当流量 $Q \leq 1\,793.8\text{ m}^3/\text{s}$ 时,下游口门区及连接段附近流速小于 3.5 m/s,因航线走向与主流交角较大,横向流速较大,最大横向流速分量达到 1.98 m/s,通航水流条件极差。

3)当流量 $Q > 1\,793.8\text{ m}^3/\text{s}$ 时,下引航道内产生口门区及连接段弯道段斜流更大, $Q = 4\,441.0\text{ m}^3/\text{s}$ 下游口门区及连接段最大纵向流速达到 4.38 m/s,最大横向流速分量达到 2.5 m/s,通航水流条件极差,引航道内还存在较大回流区(图 3),因此需要对此进行优化。



图 3 下游口门区流态

5 修改方案试验

5.1 修改方案 1

5.1.1 工程布置

1)将原设计方案引航道走向逆时针旋转 17°,口门区更加靠近左岸,减小与主流的交角;

2)根据航线走向,调整下游连接段。

5.1.2 试验结论

1)因航线走向与主流交角比设计方案有所减小,所以横向流速有所减小,通航水流条件有所改善。 $Q = 4\,441.0\text{ m}^3/\text{s}$ 下游口门区及连接段最大纵向流速达到 3.74 m/s,最大横向流速分量达到 1.6 m/s。

2)水流穿过靠船墩中间间隙进入到口门区,流态较乱,需要对此进行优化。

5.2 修改方案 2

5.2.1 工程布置

1)将右侧靠船墩外侧布置导航墙,以阻止水流穿过靠船墩间隙进入口门区;

2)导航墙下游布置导流墙,长度为 60 m,与

导航墙交角为 17°。

5.2.2 试验结论

1)下引航道内产生的口门区及连接段横向流速比修改方案 1 有所减小,且导航墙掩护的范围比较大,横流影响范围减小,但是口门区及连接段由于导航墙增加后河宽缩小,纵向流速增加, $Q = 4\,441.0\text{ m}^3/\text{s}$ 下游口门区及连接段最大纵向流速达到 4.35 m/s,最大横向流速分量达到 1.56 m/s。

2)右侧靠船墩外侧布置导航墙后口门区流态得到较大改善。

3)通航建筑物建设后,上游口门区河段水位无变化,下游口门区河段上游水位有所抬高,水位增加最大值为 0.13 m。因此,工程的建设对防洪有影响。

5.3 修改方案 3

5.3.1 工程布置

1)将修改方案 2 引航道走向逆时针旋转 7°,使口门区更加靠近左岸,进一步减小与主流的交角;

2)下游靠船墩及外侧导航墙下移 57 m,并去除外侧导流墙;

3)根据航线走向,调整下游连接段。

5.3.2 试验结论

1)下引航道内产生的口门区及连接段横向流速和纵向流速比修改方案 2 有所减小, $Q = 4\,441.0\text{ m}^3/\text{s}$ 下游口门区及连接段最大纵向流速为 4.13 m/s,最大横向流速为 1.17 m/s。

2)上游口门区,试验船模沿航线进口门比较顺利。下游口门区, $Q = 1\,793.8\text{ m}^3/\text{s}$ 时,船模可沿推荐航道缓慢上行并安全进入下游船闸引航道,下行出引航道口门前只须提前操右舵抵御斜流后便能安全驶出口门区(图 4); $Q = 2\,521.0\text{ m}^3/\text{s}$ 时,在下游距口门 300~500 m 范围内,由于横流影响较大,在引航道口门前须提高航速至 4.5 m/s 并提前操 25°右舵抵御斜流后才能安全驶出口门区,航行舵角和航行漂角均较大。从纵向流速、横向流速及船模试验结果看,下游口门区及连接段可通航流量不能超过 $1\,793.8\text{ m}^3/\text{s}$,该流量下各方案横向流速比较结果显示修改方案 3 的数值最小(表 2)。

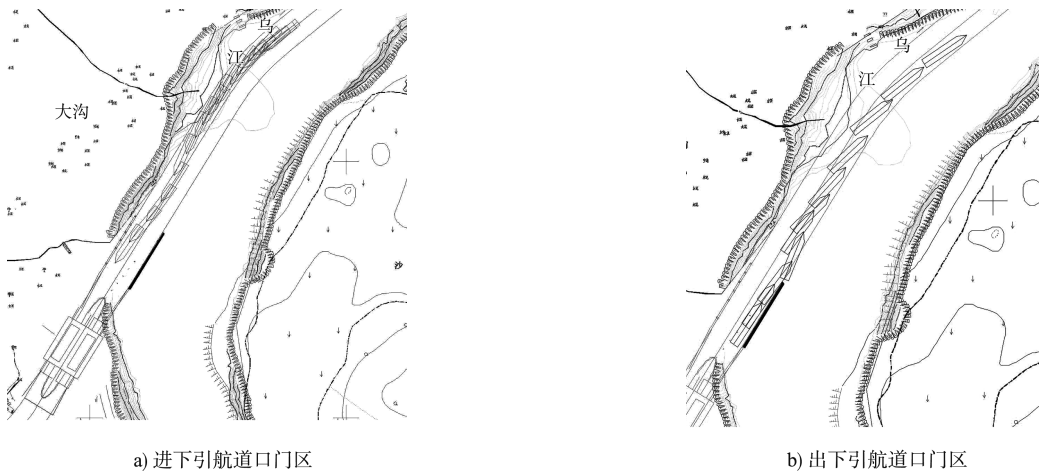


图 4 $Q=1\,793.8\text{ m}^3/\text{s}$ 时船模进、出下引航道口门区轨迹线

表 2 $Q=1\,793.8\text{ m}^3/\text{s}$ 下游口门区横向流速、纵向流速

方案	横向流速最大值		纵向流速最大值	
	$v_{\text{横 max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	出现位置	$v_{\text{纵 max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	出现位置
原方案	1.83	距堤头 140 m 右侧边缘	2.53	距堤头 140 m 右侧边缘
修改方案 1	0.75	距堤头 140 m 右侧边缘	1.34	距堤头 140 m 右侧边缘
修改方案 2	0.46	距堤头 140 m 右侧边缘	1.46	距堤头 140 m 右侧边缘
修改方案 3	0.36	距堤头 140 m 右侧边缘	1.40	距堤头 140 m 右侧边缘

6 结语

1) 试验研究表明, 各修改方案的纵向流速差别不大, 因此对于船舶通航条件的影响主要为口门区的横向流速条件, 纵向流速条件次之。

2) 各方案试验表明, 下游口门区及连接段都与主流存在不同程度的交角, 交角越大, 口门区横流越大, 且横流值随流量增加而增加。修改方案 3 口门区及连接段与主流交角最小。通过试验得出流量 $1\,793.8\text{ m}^3/\text{s}$ 下, 船舶能顺利进出口门区, 推荐采用修改方案 3 布置形式。

3) 试验边界条件采用的是沙沱枢纽死水位, 是最不利条件, 具有较高的保证率。

参考文献:

[1] 刘恩举, 柯春琴, 周小乾. 思林水电站通航建筑物布置[J]. 珠江水运, 2013(19): 84-85.

[2] 交通运输部天津水运工程科学研究所. 内河航道与港口水流泥沙模拟技术规程: JTS/T 233-4—2018[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[3] 张瑞瑾. 河流动力学[M]. 北京: 中国工业出版社, 1960.

[4] 交通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 235—2003[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

[5] 王世平, 张娜, 孔显玉. 构皮滩、思林水库常遇洪水联合预泄调度研究[J]. 人民长江, 2014, 45(13): 1-5.

[6] 范国福. 乌江思林水电站水库汛期水位动态控制的思考[J]. 水电勘测设计, 2012(1): 1-3. (本文编辑 郭雪珍)



(上接第 48 页)

[6] MAVRAKIS D, KONTINAKIS N. A queueing model of maritime traffic in Bosphorus Straits[J]. Simulation modelling practice & theory, 2007, 16(3): 315-328.

[7] 蔡学龙, 刘克中, 杨星, 等. 内河航道交汇水域交通流仿真[J]. 大连海事大学学报, 2012, 38(2): 19-21.

[8] 闫化然, 薛松辉, 熊华, 等. 大型船舶进出洋山港四期码头交通组织[J]. 中国航海, 2018, 41(4): 53-56.

[9] 叶宇旻, 浦伟庆, 于传见. 马迹山矿石码头三期工程水域平面布置[J]. 水运工程, 2018(6): 87-92.

[10] 陈伟丰, 冯开峰, 邵建国. 宁波舟山港蛇移门航道及其航行方法[J]. 航海技术, 2017(4): 5-9.

[11] 夏良军, 冯开峰. 鼠浪湖码头水域潮流及其对船舶操纵的影响分析[J]. 中国水运, 2019(5): 83-84.

[12] 张宝刚, 张磊. LNG 船舶进出洋山港主航道的通航安全研究[J]. 航海技术, 2013(4): 15-17.

[13] 杨星, 王晶尧, 刘克中, 等. 基于船舶减速的单线航道通航效率评价[J]. 中国航海, 2020, 43(1): 35-39.

(本文编辑 武亚庆)