



# 连续急弯航道滩险碍航特性分析及航线选择\*

邹开明<sup>1,2</sup>, 乾东岳<sup>3</sup>, 彭哲<sup>1</sup>

- (1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011;  
2. 长沙理工大学 水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114;  
3. 交通运输部天津水运工程科学研究所, 天津 300456)

**摘要:** 碍航特性分析对于枢纽上游水位变动区的急弯航道设计尤为关键。针对浯溪枢纽上游马头岭急弯复杂的水流条件, 采用平面二维水流数学模型与船模相结合的技术手段, 进行不同水位组合下弯道河流碍航特性研究, 在分析航道水深、航道流速的基础上提出优化方案。结果表明, 枢纽上游水位变动区的通航设计水位受枢纽运行调度方案的影响较大, 急弯航道航线调整是优化通航条件的有效思路, 可为类似项目建设提供借鉴。

**关键词:** 急弯航道; 二线船闸; 碍航特性; 航线优化

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0134-05

## Navigation-obstructing characteristics of shoals in continuous sharp bend channels and route selection

ZOU Kai-ming<sup>1,2</sup>, QIAN Dong-yue<sup>3</sup>, PENG Zhe<sup>1</sup>

- (1. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China;  
2. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;  
3. Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, MOT, Tianjin 300456, China)

**Abstract:** Analyzing navigation-obstructing characteristics is particularly critical for the design of a sharp bend channel in a water-level-fluctuating zone upstream from a hydro-junction. Considering the complicated water flow conditions of the Matouling sharp bend upstream from the Wuxi Hydro-junction, we adopt the technical means of combining a two-dimensional planar mathematical water flow model with a ship model to study the navigation-obstructing characteristics of the bend river under different water level combinations. An optimization scheme is proposed by analyzing the channel depth and flow rate. The results show that the navigable design water level of a stage-fluctuating zone upstream from a hydro-junction is greatly affected by the operation scheduling plan of the hydro-junction. Adjusting the route on a sharp bend channel is an effective idea for optimizing navigable conditions. This research serves as a reference for the construction of similar projects.

**Keywords:** sharp bend channel; second-lane ship lock; navigation-obstructing characteristic; route optimization

我国地域辽阔, 河流众多, 具有发展内河水运的良好条件。但是, 内河通航河流很多航段为山区弯曲河道, 其平面形态弯曲、河床断面狭窄、通航条件复杂, 航道或者通航建筑物的建设需要充分研究河道的碍航特性并对航线进行选择。目

前, 对于连续弯道水流的研究已有一些成果: 吴华莉等<sup>[1]</sup>对正弦派生曲线生成的连续弯曲型水流特性进行了试验研究; 曾庆华<sup>[2]</sup>研究了弯道纵向时均流速的垂线分布特点; 芮德繁<sup>[3]</sup>通过水槽试验研究弯道环流运动, 并分析弯道泥沙输移的作

收稿日期: 2021-08-14

\*基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新计划项目(201830)

作者简介: 邹开明(1986—), 高级工程师, 从事港口与航道工程建设管理与技术研究工作。

用; 普晓刚等<sup>[4]</sup>结合湘江土谷塘航电枢纽工程实例, 探讨狭窄连续弯道河段枢纽平面布置的原则; 李君涛等<sup>[5]</sup>总结导流墩平面布置形式, 并分析狭窄连续弯道口门区水流条件的改善规律。已有研究通常是以单一弯道或者概化连续弯道为研究对象, 得到的水流特性研究成果有一定的局限性, 不能反映弯曲河段的真实水流运动特性。本文依托浯溪二线船闸工程建设, 充分考虑枢纽运行调度影响, 采用数学模型分析上游马头岭连续急弯航道的碍航特性, 总结航线选择规律, 为解决急弯段碍航问题提出优化方向。

1 工程概况

根据湖南省内河水运规划, 湘江永州萍岛—衡阳蒸水河口 283 km 航道通航等级为Ⅲ级。目前, 湘江衡阳—永州已建成近尾洲、湘祁、浯溪和潇湘 4 座枢纽梯级, 基本为库区航段, 除枢纽通航建筑物等级和部分库尾航道需要疏浚外, 大部分航道水深情况比较理想。

浯溪水电站位于湘江干流中游, 是湘江干流梯级开发的第三级, 枢纽建筑物由右岸船闸、溢流坝、电站厂房及左岸连接土坝组成。浯溪枢纽一线船闸位于枢纽右岸, 通航等级为Ⅳ级, 闸室布置于坝轴线下游, 船闸轴线与坝轴线正交。为减少水流对下游浯溪碑林的影响并使下游引航道与下游航道平顺连接, 二线船闸轴线与一线船闸成 8° 的夹角<sup>[6]</sup>。

马头岭弯道险滩位于浯溪枢纽上游约 2 km,

为反“S”形急弯, 且河面宽度相对狭窄, 最窄处河宽不足 250 m, 河心自然弯曲半径约 200 m, 受浯溪枢纽水库壅水影响, 总体上水流条件较好, 但随着流量的增大, 其坝前水位不断降低, 弯道段的水流条件逐渐恢复至天然情况, 导致通航条件逐渐恶化。由于马头岭急弯下弯道处航槽较上弯道转角和曲率更大、弯曲半径更小、航槽更为狭窄, 使得水流集中于凸岸附近下泄, 形成扫弯水, 过往船舶航行弯曲半径不能满足Ⅲ级航道弯曲半径要求。随着河道流量的增大, 为保障湘江两岸防洪安全, 枢纽坝前水位需继续根据调度方案降低, 通航水流条件将进一步恶化, 下弯道段凹岸则出现较大面积的回流区, 凸岸及河心区域出现明显的扫弯水, 极易造成过往船舶偏转和偏移, 从而出现落弯与打抢等事故。

2 数学模型的建立与验证

2.1 模型的建立

依据规范要求<sup>[7]</sup>, 计算域的进、出口须选在顺直河段上。本文建模范围为马头岭急弯、浯溪枢纽一、二线船闸上下游引航道口门区及连接段, 因此数学模型的模拟范围定为 12 km, 包括枢纽上游约 8 km 河段以及枢纽下游约 4 km 的坝下河段(图 1)。模型采用平面曲线正交网格计算水流运动, 网格尺度 20 m×8 m (长×宽), 工程区局部河段加密至 5 m×2 m, 模型采用实测资料反求的方法确定床面阻力系数, 采用 Smagorinsky 公式计算紊动黏性系数。

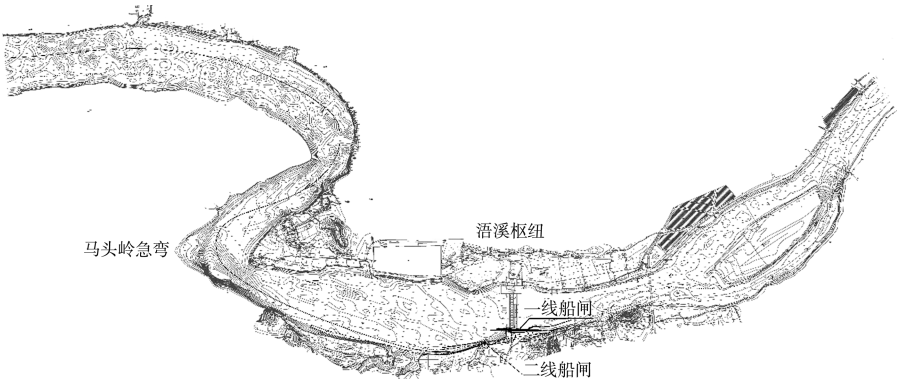


图 1 浯溪枢纽数学模型模拟范围

2.2 试验条件的验证

采用浯溪枢纽实测地形和水位资料，对数学模型分别进行流速和水位的验证。本次验证左右岸共布置 17 把水尺，分别是 L1~L9、R1~R8，将 L9 作为控制水尺，模型共布置 6 条测流断面，其中浯溪枢纽上游布置 CS01~CS04 共 4 条，枢纽下游为 CS05、CS06 共 2 条。模型测流断面及水尺布

置见图 2。测流断面在 1 150、6 300 m<sup>3</sup>/s 两级流量下，枢纽上、下游河道内各测点水位与实测水位基本一致，模型计算水面与原型水位偏差均在规定的范围内(±0.1 m)；流量基本闭合，流量偏差在 ±5% 以内。结果表明，数学模型的参数选择合理，该模型能较好地模拟研究河段的水流运动情况，模型计算精度能够满足要求。

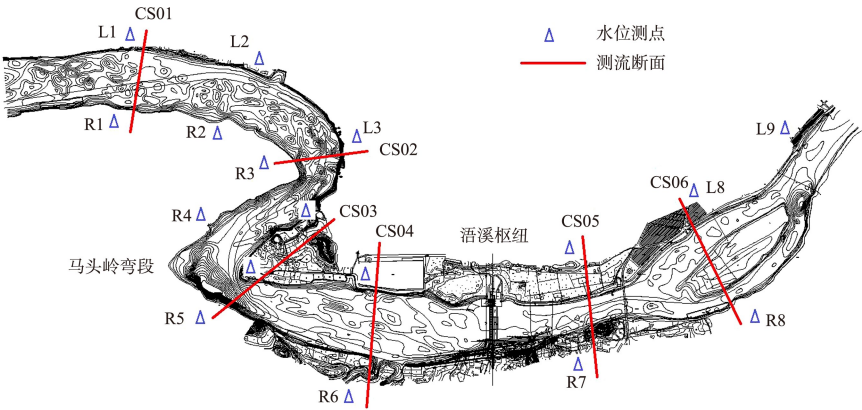


图 2 模拟河段测流断面及水尺布置

3 通航水流条件研究

3.1 航道水深与比降分析

图 3 所示为各级流量下马头岭急弯段航道内水深。马头岭弯段航道的统计范围自设计船闸口门区上游 3.2 km 起，至 1.2 km 止，共计 2 km 长。由图 3 可知，随着流量的增大，航道水深呈先减小后增大的规律，当流量  $Q=7\,550\text{ m}^3/\text{s}$  时，航道水深最小。这一特点与枢纽运行方式密切相关。从整体看，8 级典型流量弯道航段水深基本在 10 m 以上，完全满足设计水深要求。马头岭急弯段内 3 处局部比降较大，分别是马头岭急弯段入口处(距口门 2.5 km)、急弯段凸嘴处(距口门 2.1 km)、急弯段出口放宽处(距口门 1.6 km)，但 3 级洪水流量下，最大局部比降均不超过 2‰。

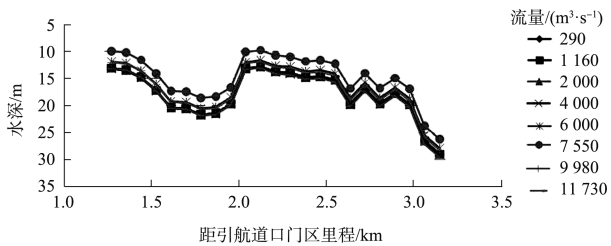


图 3 马头岭急弯段航道水深

3.2 航道流速分布

为研究马头岭急弯段通航水流条件，基于 8 级典型流量计算结果，分别统计航道内纵向及横向流速最大值，以及急弯段航道内横向流速分布。

当流量不超过 6 000 m<sup>3</sup>/s 时，因枢纽处于控制泄洪运行状态，航道内纵向流速整体较小，最大值小于 1.6 m/s；当流量  $Q\geq 7\,550\text{ m}^3/\text{s}$  时，枢纽敞泄，航道内纵向流速迅速增大，2 处极大值分别位于距二线船闸口门约 2.5 和 1.5 km 处，即马头岭急弯段入口处和急弯段出口放宽处；当  $Q=7\,550\text{ m}^3/\text{s}$  时，流速分别达 2.17 和 2.35 m/s；当  $Q$  增大至 11 730 m<sup>3</sup>/s 时，流速分别为 2.53 和 3.08 m/s。

图 4 统计了马头岭弯段航道内横向流速最大值沿程变化。由图 4 可知：当来流量小于 2 000 m<sup>3</sup>/s 时，枢纽以发电为主，库区水位基本水平，水动力微弱，故马头岭弯段航道内横向流速很小，基本在 0.2 m/s 以内；当来流量在 2 000~4 000 m<sup>3</sup>/s 时，随着泄水闸泄流量增大，库区水流运动变强，横向流速凸显，横向流速较大的位置主要集中在弯道的入弯段和出弯段。在入弯段由于航线先于水流弯曲，水流保持惯性仍向右岸顶冲，故此段横向

流速指向右岸; 过弯顶后在出弯段, 受曲率半径限制, 航线晚于水流弯曲, 水流自弯顶折返后居中, 故此段横向流速主要指向左岸。如图 4 中所示入弯段横向流速为负值, 出弯段横向流速为正值。当流量为  $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 入弯段横向流速达  $0.53\text{ m/s}$ , 出弯段横向流速达  $0.47\text{ m/s}$ , 船舶在此急弯段航道内航行可能存在困难; 当流量  $Q\geq 7\,550\text{ m}^3/\text{s}$  时, 泄水闸开始敞泄, 库区水流流动加剧, 弯道段横向流速值有一个较为显著的增幅, 横向流速较大的范围在入弯段和出弯道分别向上、下游延伸, 水流条件十分恶劣; 当流量为  $7\,550\text{ m}^3/\text{s}$  时, 入弯段横向流速达  $1.21\text{ m/s}$ , 出弯段横向流速达  $0.88\text{ m/s}$ ; 当流量达到  $11\,730\text{ m}^3/\text{s}$  时, 整个弯道段横向流速均在  $0.4\text{ m/s}$  以上, 其中入弯段极值约  $1.51\text{ m/s}$ , 而出弯段极值也达到了  $1.32\text{ m/s}$ , 船舶通航条件十分恶劣。

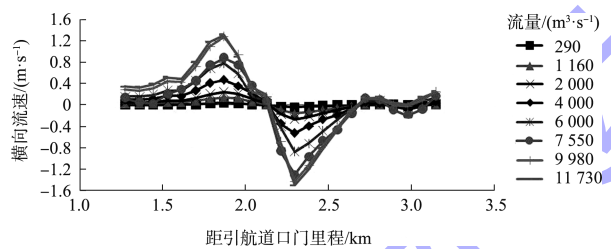


图 4 马头岭急弯段航道内最大横向流速沿程变化

4 方案优化

设计方案中提出的马头岭急弯段航线布置, 各级流量下航道水深、航道内局部比降和纵向流速均可满足通航要求, 马头岭急弯段的主要问题在于流量超过  $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$  后, 弯道横向流速过大。基于利用弯顶缓流区过弯的整治思路, 利用数学模型进行了填潭与扩挖方案的探索性试验。对于  $7\,000\text{ m}^3/\text{s}$  以上的流量, 对比方案实施前、后的水位流速变化发现, 水位变幅不超过  $0.03\text{ m}$ , 流速大小与流向的改变也十分有限。因此主要从改变航线布置, 以及改变上、下行船舶过弯方式着手, 对马头岭急弯段通航条件进行优化(图 5)。

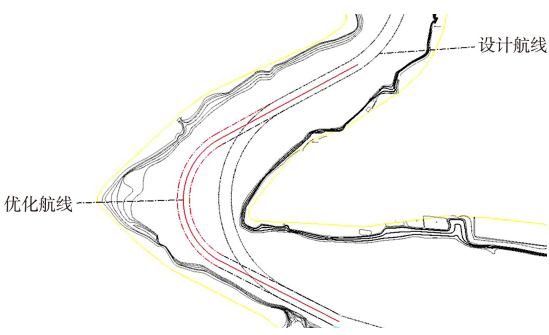


图 5 马头岭优化航线布置

与调整前相比变化较为明显, 横向流速较大的航段原本处于入弯段位置, 调整后此区域下移至马头岭弯顶附近, 下移的同时横向流速值也大幅减小。原航线入弯段最大横向流速在  $4\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时已超过  $0.4\text{ m/s}$ ,  $6\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时超过  $0.8\text{ m/s}$ , 当流量为  $7\,550\text{ m}^3/\text{s}$  时达  $1.2\text{ m/s}$ 。航线调整后, 当流量不超过  $6\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时, 弯顶处横向流速均在  $0.4\text{ m/s}$  以内; 当流量在  $7\,550\text{ m}^3/\text{s}$  及以上时, 最大横向流速值达到  $0.8\text{ m/s}$  左右。

在马头岭出弯段, 调整前横向流速也较大,  $7\,550\text{ m}^3/\text{s}$  时最大横向流速可达  $0.8\text{ m/s}$ 。调整后的航线, 因采取利用弯顶缓流区过弯的思路, 出弯段航道与水流流速基本顺直, 横向流速较小, 各级流量下最大横向流速均在  $0.4\text{ m/s}$  以内。

航道内最大纵向流速、最大横向流速沿程分布的分析结果(图 6)表明, 马头岭急弯段调整后的航线通航水流条件大幅改善, 可将其作为解决急弯段碍航问题的优化方案。结合船舶模拟试验, 船舶行驶经过马头岭弯道, 无论采取何种航线布置, 均会受到横向流速的影响, 特别是  $7\,550\text{ m}^3/\text{s}$  以上的洪水流量, 横向流速影响更为显著, 使船舶舵角与漂角均较大, 航行轨迹连续性较差。通过充分利用马头岭弯道弯顶处的缓流区, 可以达到调整船舶航向的目的。在保证航道水深满足要求的前提下, 上行船舶入弯后先驶入缓流区, 在此调整航向后再出弯。同样, 下行船舶入弯后, 进入缓流区调整航向, 而后出弯进入下游。



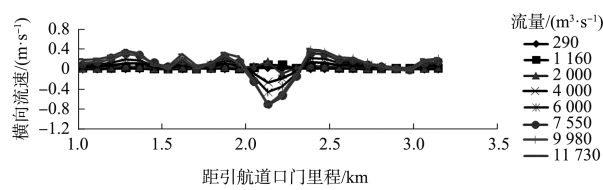


图 6 马头岭急弯段优化航道内最大横向流速沿程变化

5 结 语

- 1) 沿程水位和断面流速分布实测资料计算模型验证结果表明, 水位及断面流速分布偏差满足规范要求, 能较好地模拟研究河段的水流运动情况。
- 2) 枢纽上游水位变动区的通航设计水位受枢纽运行调度方案影响较大, 应结合枢纽运行调度方案及河段水文特征, 充分考虑河段冲淤等影响因素综合研究确定。
- 3) 在疏浚、填潭等其他整治方案受限时, 改变航线布置, 以及改变上、下行船舶过弯方式是急弯段通航条件优化的有效手段。
- 4) 通常渠化枢纽库区航段连续弯道在枯水流量时, 上游为深水库区, 库区河道内水流平缓, 断面流速分布相对均匀, 船舶基本可以按照既定的航线航行, 航行风险较低。中洪水流量时, 船

(上接第 109 页)

2) 碾盘山船闸闸室平面尺度大, 为保证船闸设计通过能力, 输水时间要求短, 输水强度高, 瞬时流量大, 采用闸墙长廊道侧支孔分散输水系统是合理的, 该输水系统各项指标达到了预期的设计目标和要求。

参考文献:

[1] 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.

[2] 孙保虎, 卜美飞.湖北省碾盘山水利水电枢纽工程施工图设计(通航建筑物)[R].武汉: 湖北省交通规划设计院股份有限公司, 2019.

[3] 南京水利科学研究院, 天津水运工程科学研究所.船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001 [S].北京: 人民交通出版社, 2001.

舶在弯道水域航行时产生的漂距和横移速度均较大, 且须长时间压大舵角, 存在一定的航行风险。

参考文献:

[1] 吴华莉, 金中武, 张小峰, 等.连续弯道水流特性的试验研究[J].水利水电技术, 2014, 45(1): 73-76.

[2] 曾庆华.弯道河床演变中几个问题的研究[J].人民长江, 1978(1): 46-51.

[3] 芮德繁.连续弯道环流运动与泥沙冲淤特性的数值模拟及实验[D].成都: 四川大学, 2005.

[4] 普晓刚, 李民, 郝媛媛, 等.狭窄连续弯道河段航电枢纽平面布置原则探讨[J].长江科学院院报, 2012, 29(6): 16-21.

[5] 李君涛, 普晓刚, 张明.导流墩对狭窄连续弯道枢纽船闸引航道口门区水流条件改善规律研究[J].水运工程, 2011(6): 100-105.

[6] 湖南省交通规划勘察设计院有限公司.湘江永州至衡阳三级航道三期工程工程可行性研究报告[R].长沙: 湖南省交通规划勘察设计院有限公司, 2021.

[7] 交通运输部天津水运工程科学研究所.水运工程模拟试验技术规范: JTS/T 231—2021 [S].北京: 人民交通出版社, 2021.

(本文编辑 郭雪珍)

[4] 宣国祥, 李君, 黄岳, 等.中水头巨型船闸闸墙长廊道侧支孔输水系统水动力学研究[J].水运工程, 2016(12): 36-41.

[5] 王作高.船闸设计[M].北京: 水利电力出版社, 1992.

[6] 王伟, 王亮.船闸输水系统设计探讨[J].中国水运(下半月), 2015, 15(1): 214-215, 255.

[7] 彭永勤, 张绪进.孟洲坝二线船闸输水系统水力学试验研究[J].水运工程, 2016(8): 131-134, 150.

[8] 陈亮, 金莹, 孙倩, 等.沱水船闸短廊道输水系统布置及试验研究[J].水运工程, 2020(1): 57-62.

[9] 李君, 郭超, 金英, 等.赣江万安二线船闸输水系统水力学模型试验研究[J].水运工程, 2021(2): 7-11, 21.

[10] 王能, 高衡东, 胡越高, 等.洪江船闸改造输水系统布置试验研究[J].水道港口, 2021, 42(2): 229-236.

(本文编辑 王璁)