



库区急弯航段船舶通航模拟试验^{*}

陈明慧¹, 闫 涛², 李晓松²

(1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究院 工程泥沙交通行业重点实验室, 天津 300456)

摘要:采用数学模型和船舶操纵模拟试验的手段,分析库区急弯航道在枢纽低水位运行工况下的碍航特性,研究采用优化航行方案和调整待闸锚地位置等措施改善通航条件。结果表明,利用码头岭急弯段凹岸的大范围缓流区,采用船舶入弯后先沿右岸驶入缓流区,降速转向后出弯驶向下游的航行方案,可显著降低船舶过弯的横移速度和漂移量;将锚地由闸前调整至弯顶缓流区,船舶抛锚靠泊所需的回旋水域明显减小,横移速度仅为0.4m/s,起锚进闸的操纵风险也较低。上述非工程措施对保障库区急弯段的通航安全有积极作用。

关键词:库区急弯段; 低水位运行; 船舶模拟; 通航安全

中图分类号: U 61

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)05-0147-05

Simulation test of ship navigation in sharp turn section of reservoir area

CHEN Ming-hui¹, YAN Tao², LI Xiao-song²

(1. Hunan Water Transport Construction Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China; 2. Key Laboratory of Engineering Sediment, Ministry of Transport, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Tianjin 300456, China)

Abstract: By means of mathematical model and ship handling simulation test, we analyze the navigation obstruction characteristics of the sharp bend channel in the reservoir area under the operation condition of low water level of the pivot, and improve the navigable conditions by optimizing the navigation scheme and adjusting the position of the anchorage. The results show that the ship's traverse speed and drift can be significantly reduced by taking advantage of the large range of slow flow zone in the concave bank of the Matouling sharp bend section, and adopting the navigation scheme that the ship enters the slow flow zone along the right bank first, turns down and then leaves for the downstream. When the anchorage is adjusted from the front of the lock to the slow flow zone at the top of the bend, the circumferential water required for anchoring is significantly reduced, the traverse speed is only 0.4m/s, and the maneuvering risk of lifting anchor into the lock is also lower. The above non-engineering measures play a positive role in ensuring the navigation safety of the sharp bend section.

Keywords: sharp bend section of reservoir area; low water level operation; ship simulation; navigation safety

天然情况下,急弯河道由于边界条件的突变,在水流向下运动过程中,其流速分布发生重新调整,特别当河道狭窄、流量较大时,急弯河道内常常出现扫弯水、横断面环流与二次流等多种水流结构^[1-2],形成急险滩段威胁通航安全,急弯段通航一直是航道和海事部门关注的重点^[3]。处于

库区的急弯段河道,随着坝前蓄水位的升高,库区弯道水动力减弱,水深、流速和流态与蓄水前相比出现较大变化,如在三峡大坝蓄水至175 m后,大坝上游至重庆港660 km的库区航道,随着平均河宽增大、水深增加以及流速趋缓,原本急险碍航滩段转化为优良河段,通航条件大幅改

收稿日期: 2021-09-06

*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(TKS190406)

作者简介: 陈明慧(1988—),男,工程师,从事水运工程项目管理。

善^[4]。而当水库处于消落期或汛期低水位运行时，库区河段水动力增强，急弯段多种复杂水流结构又随之出现，水流运动特性向天然急弯段趋势发展，不利于通航安全^[5-7]。因此水库低水位运行时的水流条件成为库区急弯段航道的通航控制条件。

与天然急弯段航道整治相比，库区急弯段航道整治具有其特殊性。当水库低水位运行时，位于常年库区的急弯段仍处于壅水状态，若采取常规的急弯段整治工程，如凹岸侧丁坝、填槽、凸岸开挖等强约束工程措施，不仅工程量较大，整治效果难以保证，而且易对库区泥沙淤积和泄洪造成不利影响^[8-9]。考虑到库区急弯段受坝前水位调控影响，其不利通航水流条件的持续时间处于可控范围。本研究选择湘江中游位于常年库区的码头岭急弯段作为典型河段，采用数学模型结合船舶操纵模拟器的手段，针对这类仅在汛期低水位运行时碍航的库区急弯段，探讨满足船舶安全航行要求的非工程措施。

1 库区急弯段概况

湘江干流两岸多为蜿蜒起伏的丘陵，梯级枢纽的建立极大地改善了干流通航条件。浯溪枢纽位于湘江干流中游，是湘水干流梯级开发的第三级，上下分别与潇湘、湘祁枢纽实现通航水位衔接，其通航建筑物可过千吨级船舶。码头岭急弯段位于浯溪枢纽上游约 2 km，属于常年回水区。从平面上看，码头岭急弯段呈反“S”形，河面宽度较上下游小，最窄处河宽不足 250 m，河心自然弯曲半径约 200 m。码头岭急弯弯顶下游存在一处建库前形成的冲刷深潭，范围约 300 m×400 m，最低点高程与周边河床相比低 20 m 左右(图 1)。

码头岭急弯段受水库壅水影响，总体上水流条件较好，但随着入库流量的增大和坝前水位的降低，弯道段的水流条件呈现天然特性，导致通航条件逐渐恶化。较小的弯曲半径和狭窄的航槽，导致下弯道段凸岸及河心区域出现明显的扫弯水，凹岸则出现较大面积的回流区，极易造成船舶偏转和偏移，而出现落弯、掉钩或打抢等事故。

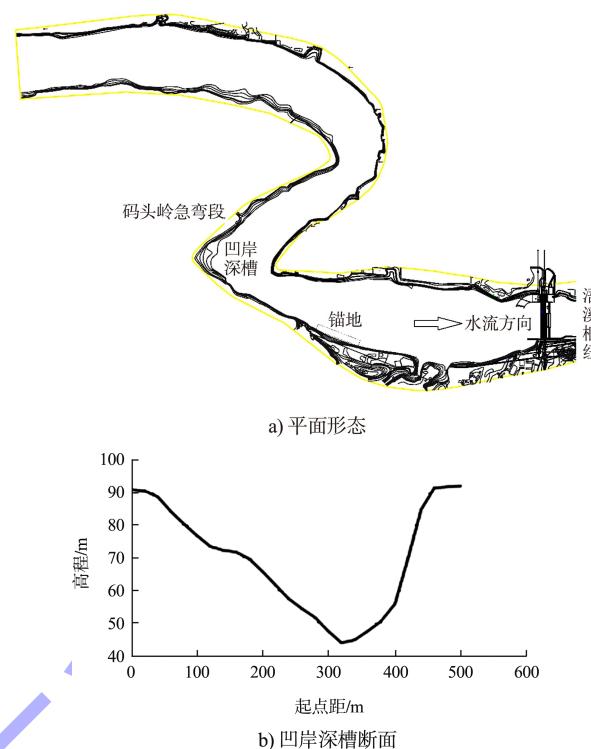


图 1 库区码头岭急弯段平面形态及凹岸深槽断面

2 通航模拟试验

2.1 数学模型试验

建立库区急弯段平面二维水流数学模型，计算枢纽不同运行方式下码头岭急弯段的水动力条件，根据通航水流条件判断通航不利工况。

数学模型的模拟范围定为枢纽上游约 8 km 河段，计算域进、出口位于顺直河段。模型采用曲线正交网格计算水流运动，网格尺度 20 m×8 m，工程区局部河段加密至 5 m×2 m。模型进口边界由入库流量控制；出口边界由坝前水位控制；岸边界采用非划移边界，其边壁流速给定为零。模型采用实测资料反求的方法确定床面综合阻力系数，取值为 0.030~0.036，模型采用 Smagorinsky 公式计算紊动黏性系数，取值为 1。

结合与 2017 年地形同期实测的 1 150、6 300 m³/s 两级流量下水面线和断面流速分布，对模型进行率定。结果表明，模型计算水位与实测水位误差在±0.1 m 内，模型计算流速与实测流速分布规律基本一致，数学模型的验证精度可以满足研究的计算要求。

枢纽不同运行方式下的水动力计算结果表明，

按照目前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, 但横向流速方面, 当来流量在 $2\ 000\sim4\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 枢纽为控泄状态, 航道横向流速在 $0.20\sim0.53\text{ m/s}$; 当来流量 $Q\geq7\ 550\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 枢纽为低水位运行工况, 库区水流流动加剧, 急弯

段航道横向流速为 $1.21\sim1.51\text{ m/s}$ (图 2)。马头岭急弯段影响通航的主要因素是枢纽低水位运行时急弯航段横向流速过大。从平面流速分布看, 枢纽低水位运行工况下, 码头岭弯顶附近存在一个范围较大的缓流区, 其位置与冲刷深潭的位置基本一致(图 3)。

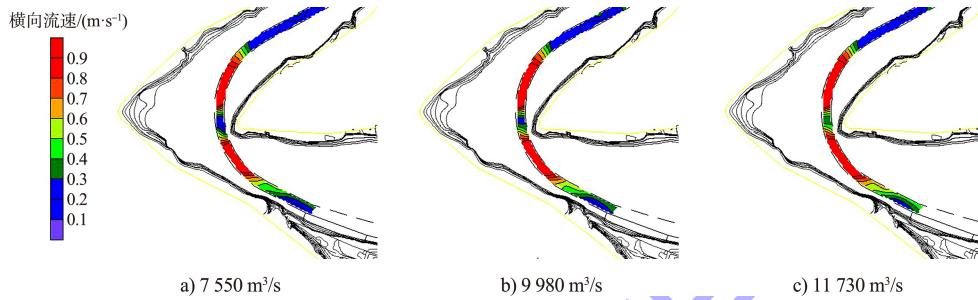


图 2 低水位运行工况下码头岭急弯段航道横向流速分布

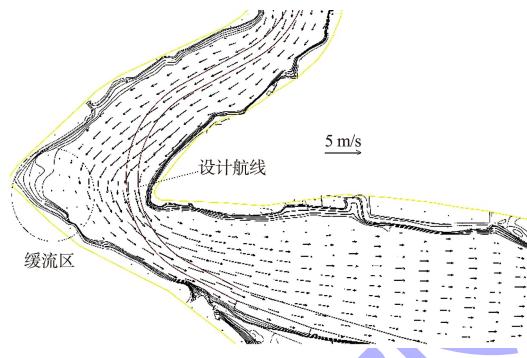


图 3 $7\ 550\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下急弯段流场分布

2.2 船舶模拟试验

基于船舶操纵模拟器, 建立码头岭急弯河段研究范围内的水深和模拟实景图, 选取湘江干流 1 000 吨级船舶作为代表船型, 其主尺度为 $85.0\text{ m}\times10.8\text{ m}\times2.0\text{ m}$ (长×宽×满载吃水), 通过优化相关参数进行船舶模型旋回、保向、停船率定, 使模拟船操纵特性与参考原型船操纵特性具有相似性。

将数学模型计算得到的水动力结果作为边界条件, 进行枢纽低水位运行工况下设计方案(设计航线、闸前锚地)船舶航行操纵模拟试验。模拟试验选取的洪水期入库流量分别为 $7\ 550$ 、 $9\ 980$ 和 $11\ 730\text{ m}^3/\text{s}$, 代表了 2 a 一遇、5 a 一遇和 10 a 一遇入库流量。从结果可以看出, 采用设计航线与规划的闸前锚地, 下行进闸船舶的通航风险主要体现在 2 个方面。

对设计航线而言, 当入库流量为 $7\ 550\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 下行通过码头岭急弯段的船舶在弯道水域航行时最大横移速度可达 0.85 m/s ; 当入库流量为 $11\ 730\text{ m}^3/\text{s}$ 时, 在弯道水域航行时最大横移速度可达 1.41 m/s , 所压舵角最大为 35° 且持续时间较长。按照设计航线航行时存在较大的通航风险。 $7\ 550\text{ m}^3/\text{s}$ 和 $11\ 730\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下船舶通过急弯段的航行轨迹见图 4。

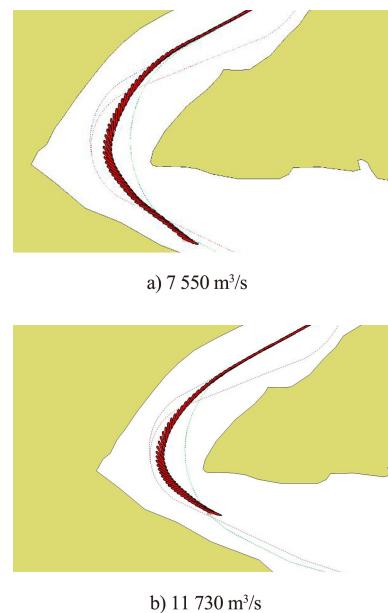


图 4 不同流量下急弯段下行船舶航行轨迹

设计的闸前锚地位于右岸, 上距码头岭急弯段弯顶约 1.2 km , 下距枢纽泄水闸约 1.4 km 。当

入库流量为 $7\ 550\ m^3/s$ 时, 下行船舶在进入规划锚地的过程中需占用较大的水域掉头, 影响范围约为 $250\ m$, 且航迹带距离泄水闸较近, 掉头迎流抛锚存在较大风险(图 5); 而从锚地起锚进闸过程中, 船舶掉头占用的水域较小, 起锚进闸的风险相对较低, 航行姿态优于进入锚地抛锚的情况。

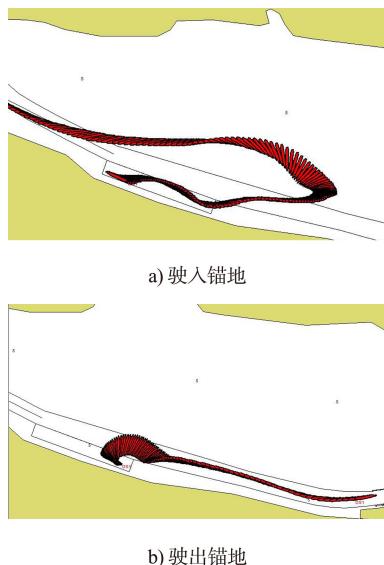
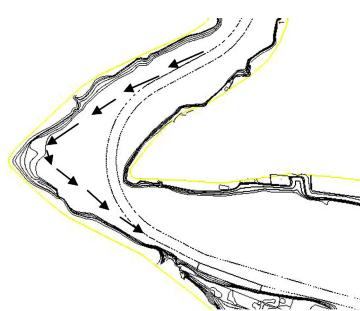


图 5 $7\ 550\ m^3/s$ 流量下进闸船舶驶入和驶出闸前锚地的航迹

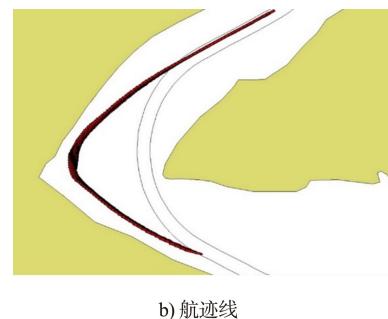
3 航行方案优化

3.1 过弯航线优化

在中、洪水时, 设计航线无法满足船舶在急弯河段的安全航行要求, 所以对过弯航线及航行方案进行优化。按照航线与水流平顺的原则, 结合数模流场计算结果, 充分利用弯顶处较大范围的缓流区, 在保证航道水深满足要求的前提下, 考虑船舶入弯后先沿右岸驶入缓流区, 在此水域降速转向后出弯, 进而驶入船闸。图 6 为急弯段航行优化线路及 $7\ 550\ m^3/s$ 流量下操纵模拟试验获得的船舶航行轨迹。



a) 航行优化线路



b) 航迹线

图 6 急弯段航行优化线路及 $7\ 550\ m^3/s$ 流量航迹

根据上述思路, 进行枢纽低水位运行工况下三级洪水流量的船舶航行模拟试验, 同时统计急弯段航道沿程的舵角、漂角、漂移量及横移速度等船舶航行参数, 并与设计方案进行对比(图 7、表 1)。可以看出, 三级洪水流量下, 采用优化后的航行方案, 船舶在整个过弯过程中所操舵角最大为 35° , 与优化前保持一致, 但持续里程均为约 2 倍船长, 远小于优化前的 $600\sim1\ 000\ m$ 。过弯时最大横移速度在 $7\ 550\ m^3/s$ 流量下为 $0.39\ m/s$, 在 $11\ 730\ m^3/s$ 流量下增大至 $0.73\ m/s$, 而优化前最大横移速度在 $7\ 550\ m^3/s$ 时即达 $0.85\ m/s$ 。相应地, 优化前后漂移量也有较大差异, 前者在 $7\ 550\ m^3/s$ 时达 $110\ m$, 优化后减小至 $46.0\ m$ 。可见, 与优化前相比, 优化后的航行方案在横移速度和漂移量方面明显改善。

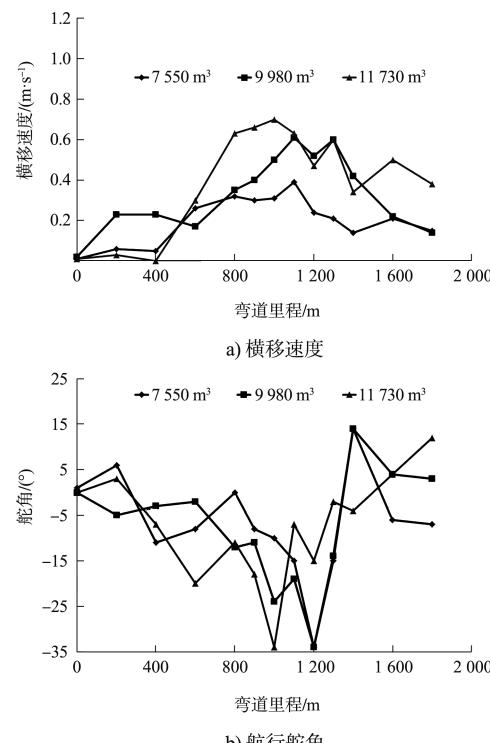


图 7 优化航行方案船舶过弯参数沿程变化

表1 船舶航行方案优化前后参数对比

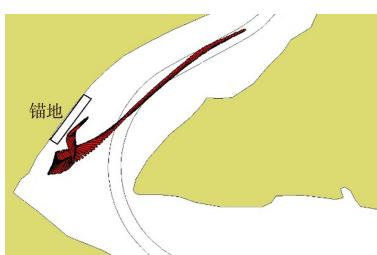
流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	航行 方案	最大舵 角/(°)	最大舵角 航行里程/m	漂移量/ m	横移速度/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
7 750	设计	35	600	110	0.85
	优化	35	150	46	0.39
9 980	设计	35	850	150	1.16
	优化	35	200	57	0.61
11 730	设计	35	1 000	182	1.41
	优化	35	200	66	0.73

3.2 锚地布置优化

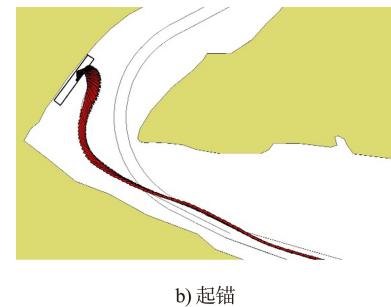
船舶驶入锚地过程中须先航行至锚地下游弯顶水域进行掉头, 然后航行至锚地靠船墩靠泊。当前锚地存在的主要风险为抛锚船舶转弯半径过大, 且转弯水域与枢纽泄水闸距离过于接近。优化锚地布置同样基于充分利用弯道水域缓流区的思路, 优化方案将待闸锚地上移至弯顶附近, 与枢纽泄水闸距离由 1.4 km 增大为约 3 km, 同时建议在待闸锚地设置靠船墩。

图 8 为 1 000 t 货船在 7 550 m³/s 流量下驶入和驶出锚地的航迹图。船舶行至弯顶水域时, 航速控制在 4 kn 以下, 产生的横移速度最大为 0.4 m/s; 到达弯顶水域时, 利用车、舵并借助水流进行转向, 转向占用的横向距离约 80 m; 转向完成后顶流进入锚地进行靠泊, 靠泊过程中产生的横移速度最大为 0.3 m/s, 靠泊风险较低。

船舶从锚地靠船墩驶出过程中, 待船舶离开靠船墩一段距离后进行掉头, 掉头完成后迅速驶入航道, 按照设计航线航行。图 8 为起锚进闸的航行轨迹, 从图中可以得出, 在车、舵的协助下并借助水流的作用, 船舶掉头占用的水域较小, 船舶从锚地起锚进闸的航行风险较低。



a) 抛锚



b) 起锚

图 8 锚地优化后 7 550 m³/s 流量下抛锚和起锚船舶轨迹

通过对锚地优化前后的航行参数发现(表2), 7 550 m³/s 流量下进入锚地过程中航行参数差异最大。将锚地位置优化至弯顶缓流区后, 船舶掉头占用的水域范围由 250 m 减小至 80 m, 仅为原方案的 1/3, 最大横移速度由 1.00 m/s 降低至 0.30 m/s。11 730 m³/s 流量下进入锚地过程中, 锚地位置优化至弯顶缓流区后, 船舶掉头占用的水域范围由 370 m 减小至 120 m, 最大横移速度由 1.70 m/s 降低至 0.53 m/s。当船舶驶出锚地时, 2 种方案的掉头范围和最大横移速度相差不大。

表2 锚地优化前后航行参数对比

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	锚地 方案	进入锚地		驶出锚地	
		掉头范 围/m	最大横移速 度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	掉头范 围/m	最大横移速 度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
7 750	优化前	250	1.0	60	0.30
	优化后	80	0.3	50	0.20
9 980	优化前	310	1.4	85	0.35
	优化后	100	0.4	70	0.30
11 730	优化前	370	1.7	100	0.50
	优化后	120	0.5	82	0.40

4 结论

1) 库区急弯段航道的整治受壅水影响, 采取常规的丁坝、填槽、开挖等强约束工程措施, 不仅工程量较大、整治效果难以保证, 而且对库区泥沙淤积和泄洪易造成不利影响, 因此研究采取非工程措施改善库区急弯段通航具有现实意义。

2) 码头岭急弯段枢纽洪水期低水位运行工况下, 随着库区水动力增强, 原有设计航线的横向流速达 1.21 ~ 1.51 m/s, 使船舶产生的漂距和横移速度均较大, 航行风险突出。利用凹岸缓流区对航行方式进行优化, 可降低船舶的横移速度和漂移量, 通航条件得到改善。

(下转第 158 页)