



# 长江上游老虎梁险滩航道整治模型试验研究

刘长波<sup>1,2</sup>, 朱玉君<sup>2</sup>, 吴 双<sup>2</sup>, 谢 卫<sup>2</sup>

(1. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430040;

2. 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430040)

**摘要:** 长江上游老虎梁滩段是重庆—宜昌河段内的重点碍航滩险, 近期发生多起海损事故, 严重影响船舶通航安全及航运效益发挥。针对此问题, 采用物理模型试验和船模试验的研究手段, 在深入揭示老虎梁滩段碍航水流特性及行船安全问题的基础上, 对不同航道整治方案实施后的水流条件、行船状态进行了对比研究。结果表明, 方案实施能减弱不良流态对船舶安全航行的影响, 综合分析比选后推荐了最优方案, 为该滩段航道整治工程设计提供科学依据, 也可供其它类似滩险的航道整治研究参考。

**关键词:** 长江上游; 老虎梁滩段; 航道整治; 模型试验; 船模试验

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)09-0126-07

## Model tests of channel regulation of Laohuliang Beach in upper Yangtze River

LIU Changbo<sup>1,2</sup>, ZHU Yujun<sup>2</sup>, WU Shuang<sup>2</sup>, XIE Wei<sup>2</sup>

(1. Changjiang Waterway Institute of Planning and Design, Wuhan 430040, China;

2. Changjiang Waterway Survey and Design Institute (Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

**Abstract:** Laohuliang Beach in the upper Yangtze River is a major navigation-obstructing shoal from Chongqing to Yichang reach. Several marine accidents have occurred recently, which seriously affect the safety of navigation and shipping efficiency. In view of the above problems, this paper performs a physical model test and a ship model test. On the basis of deeply revealing the navigation-obstructing flow characteristics and navigation safety problems of Laohuliang Beach, the paper compares and studies the flow conditions and navigation states after the implementation of different channel regulation schemes. The results show that the schemes can reduce the influence of bad flow patterns on the safe navigation of ships. After comprehensive comparison, the optimal scheme is put forward, which provides a scientific basis for the design of channel regulation projects on this beach and can be used as a reference for other similar channel regulation research.

**Keywords:** upper Yangtze River; Laohuliang beach; channel regulation; model test; ship model test

长江上游老虎梁滩段地处重庆市境内, 位于三峡常年库区末端, 是保障重庆—宜昌段 4.5 m 水深航道安全运行的关键滩段。该滩段河型弯曲, 两岸礁石林立, 汛期滑梁水、回流、扫弯水等不良流态发育, 可通航水域宽度狭窄, 通航安全问题突出。据统计, 2008 年三峡工程 175 m 蓄水以

来共发生了 16 起因流态恶劣和上、下行船舶航路交叉引起的船舶碰撞和触礁搁浅事故, 而且年均碍航期长达两个半月左右。为改善通航水流条件, 提高重庆—宜昌 4.5 m 水深航道的通航安全保障能力及通航效率, 航道部门正在开展航道整治研究工作。

收稿日期: 2022-11-29

作者简介: 刘长波 (1983—), 男, 硕士, 工程师, 从事航道治理研究工作。

近年来针对礁石险滩的治理广泛采取炸礁的方式<sup>[1-3]</sup>, 主要采用的研究方法有河工模型试验、数学模型和船模试验等, 雷雅文等<sup>[4]</sup>采用正态物理模型研究肖家石盘不同炸礁高程和范围对不良流态的影响; 曾方<sup>[5]</sup>采用船模通航试验研究东溪口整治后船舶通行情况; 胡鹏飞等<sup>[6]</sup>采用数值模拟对五台梁礁石清除前后的通航水流变化进行预测分析。考虑到老虎梁滩段不良流态密集, 表现出明显的三维水流特性, 数学模型难以全面反映其分布与消散特点, 因此在前期数值模拟和船舶仿真模拟研究的基础上<sup>[7-9]</sup>, 本文通过物理模型试验和船模试验的方法, 综合分析老虎梁滩段的滩险特性和碍航因素等, 深入研究不同炸礁方案实施后在不同来流条件下的水位、流场、横流、船舶航行姿态等要素变化情况, 通过方案比选推荐最优炸礁方案。

## 1 滩险概况

老虎梁滩段位于长江上游花滩水道, 上游航

道里程 522.0~518.5 km, 属于礁石、滑梁及扫弯险滩。该滩段河势弯曲, 两岸岸形极不规则, 礁石林立, 上段左岸有老虎梁(高程 152.1 m)、鸡飞梁(145.3 m)、血旺堆(146.3 m)、牛脑壳(149.5 m)等石梁斜向伸入江中碍航, 老虎梁、鸡飞梁与右岸银杯子突嘴对峙, 形成卡口, 束窄航道, 下段白浅石盘(144.7 m)与右岸花滩石梁(146.8 m)对峙阻水成滩。老虎梁滩段下游接平缓坝水道, 平缓坝纵卧江心将河道分为左右两汊, 左汊通航条件较好, 为通航汊道。在消落期末和汛期, 本滩段水流条件接近于天然状态, 受礁石影响, 河段内不良流态发育, 老虎梁、鸡飞梁和花滩横流可达 1.2 m/s。老虎梁滩段河势见图 1。本河段的航道等级为 I 级, 现行航道尺度汛期为 4.5 m×150 m×1 000 m(水深×宽度×弯曲半径), 目前及今后一段时期内干散货运输以 3 000~5 000 吨级船舶为主, 实行上、下行船舶各自靠右, 分道航行。

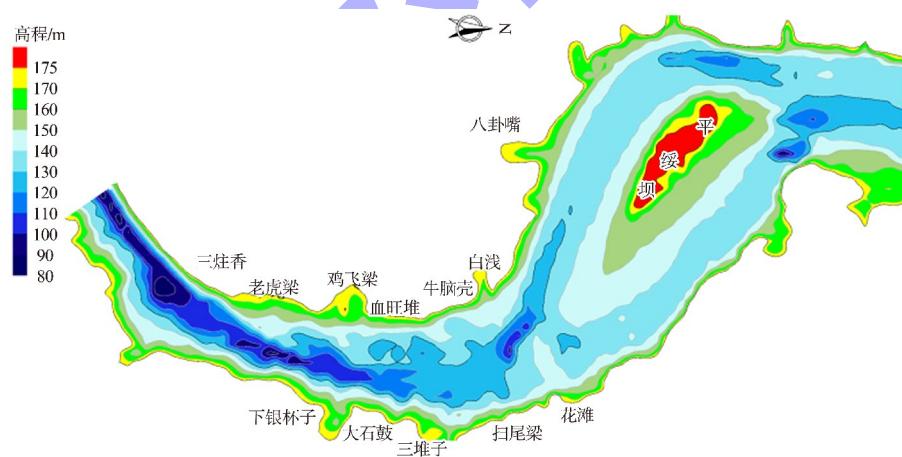


图 1 老虎梁滩段河势

## 2 模型概况

### 2.1 物理模型

老虎梁滩段物理模型试验范围为清溪场—猪圈门(上游航道里程 525.5~513.0 km), 模拟天然河段全长约 12.5 km。物理模型采用平面比尺  $\lambda_L = 100$ 、垂直比尺  $\lambda_H = 100$  的正态模型。试验选取 13 702、16 737、28 127 m<sup>3</sup>/s 共 3 级典型流量对物理模型水

位、断面流速和流向、汊道分流比等进行验证, 结果均符合规范要求<sup>[10]</sup>, 可以进行水流特性及整治工程方案等试验研究。

### 2.2 船舶模型

试验选取 5 000 吨级干散货船作为试验代表船型, 实船尺寸为 105 m×16.3 m×4.1 m(船长×船宽×设计吃水)。船模平面比尺  $\lambda_{L_s} = 100$ , 垂直比尺

$\lambda_{H_s} = 100$ , 时间比尺  $\lambda_{t_s} = 10$ , 航速比尺  $\lambda_{v_s} = 10$ 。在进行船模航行试验前, 对船模的静水性能和运动性能进行校准, 结果满足试验要求。

### 2.3 评价指标

基于前期原观资料、数模研究、实船调研和仿真船模试验等, 采用横流、航行漂角和航行舵角作为险滩水流的主要评价指标, 即安全航行的横流限值 0.6 m/s, 舵角限值 20°, 漂角限值 10°。

## 3 滩险碍航特性

### 3.1 碍航特性

老虎梁滩段的碍航特性是以礁石和不良流态引起的险为主, 兼有局部水流急的问题, 主要体现在: 1) 上段老虎梁、鸡飞梁等多道石梁伸入江心, 在一定水位期滑梁水势强大, 梁间回流旺盛, 在弯曲河势下过老虎梁主流右偏, 靠右上行船舶难以操控, 需要过河, 航路交叉, 船舶航行的安全风险极大; 2) 下段左岸牛脑壳伸入江心近半, 白浅石盘与右岸花滩石梁对峙形成卡口, 加上河势弯曲, 形成河心向两岸滑泻的水势, 可航水域弯曲狭窄, 上、下行航路相互交织, 通航安全问题突出。

### 3.2 水流运动特性分析

为了研究老虎梁滩段在天然状态下的碍航特性, 水流运动特性试验选取包括消落期、汛期、蓄水期在内的 5 级流量(9 920、18 200、24 500、30 400、43 000 m<sup>3</sup>/s)对本滩段的流速分布和流态等进行观测, 结果表明:

1) 上段老虎梁、鸡飞梁汛期滑梁水势强大, 梁间回流旺盛, 横流大于 0.6 m/s 的横流区占据航槽一半, 上行船舶靠右航行困难。老虎梁汛期随着水位的下降和来流量的增加, 石梁淹没区及前沿横流逐渐显现, 流量为 24 500 m<sup>3</sup>/s 时石梁前沿航槽边界横流 0.52 m/s, 流量为 43 000 m<sup>3</sup>/s 时最大横流为 0.72 m/s。汛期各级流量下, 鸡飞梁水域都存在横流区, 流量  $\geq 24 500$  m<sup>3</sup>/s 时航槽

横流超过 0.75 m/s, 30 400 m<sup>3</sup>/s 时横流最强, 设计航槽边界上最大横流约 1.02 m/s。

2) 下段牛脑壳和白浅航槽急弯, 但由于河道放宽, 流速减缓, 横向流速大小有所减小, 但范围分布较广。在 24 500 m<sup>3</sup>/s 流量时牛脑壳挑流作用明显, 横流为 0.63 m/s, 白浅在流量为 18 820 m<sup>3</sup>/s 时横流为 0.38 m/s。

## 4 整治方案

### 4.1 整治思路

保持目前平绥坝水道左汊通航的有利条件, 切除左岸石梁突嘴, 平顺河道岸线, 从根本解决靠右上行的流态问题, 增加弯曲段航宽, 提高船舶操纵性和通航安全性, 满足全年上、下分道航行需要。

### 4.2 整治方案布置

根据整治思路, 提出 3 种炸礁方案进行比选。方案 1: 基本顺应岸线切除老虎梁、鸡飞梁、牛脑壳、白浅, 清除血旺堆孤礁, 清礁控制线距航槽约 120 m, 并利用清礁弃渣对局部岸线进行平顺。老虎梁、鸡飞梁、牛脑壳清礁底高分两级平台, 清礁底高程分别为设计最低通航水位下 4 m 和 6 m; 白浅、血旺堆清礁底高程为设计水位下 5 m; 边坡及衔接坡比为 1:0.75。

由于方案 1 中老虎梁清礁区距离三峡库区消落带生态保护红线较近, 方案 2、3 均将老虎梁清礁区靠岸侧清礁范围进行调减, 增加鸡飞梁头部清礁深度以接纳上游外侧进一步炸深所增加的水流。方案 2: 减小老虎梁清礁范围, 将清礁深度提高为设计水位下 8 m; 鸡飞梁外侧平台炸深至 7 m; 根据上下游河势和清礁基线走向, 向河心调整血旺堆和白浅清礁区范围; 降低生境重建区的抛填厚度, 扩大生境重建区覆盖范围。方案 3: 保持鸡飞梁滩段外侧平台 6 m 深度不变, 将内侧平台进一步炸深至 6 m, 其余工程区的布置同方案 2。各方案平面布置见图 2。

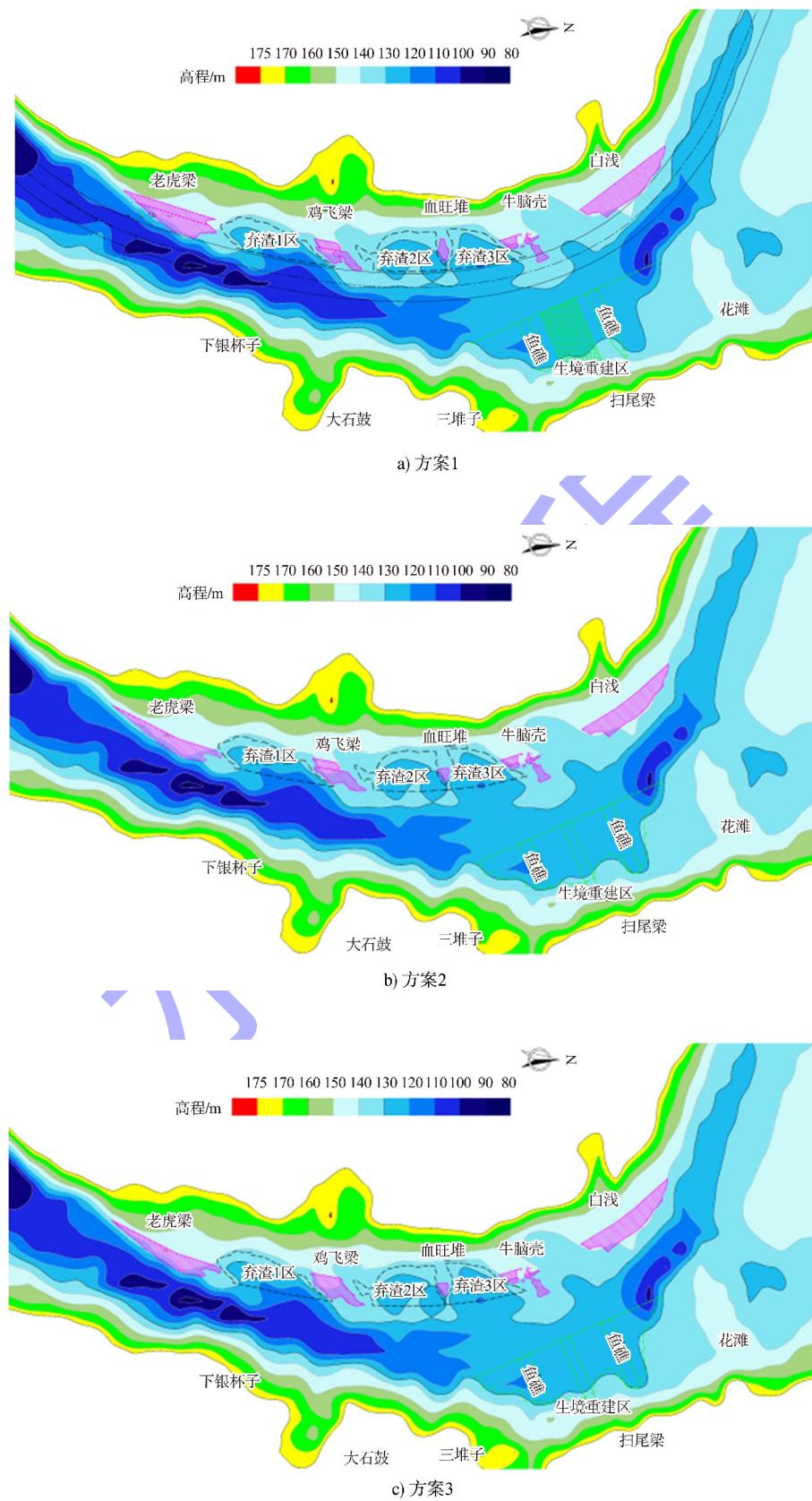


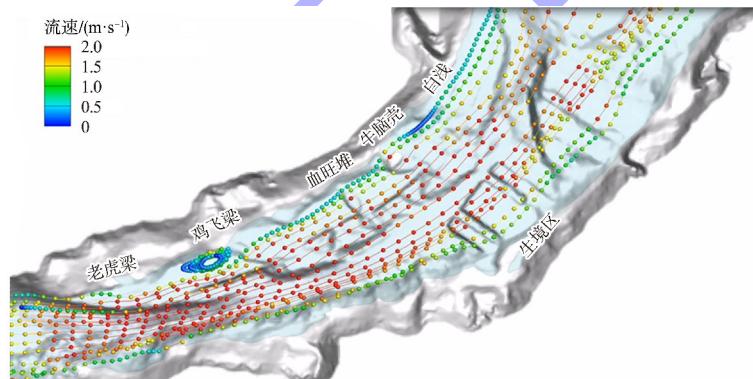
图2 各方案平面布置

### 4.3 整治效果

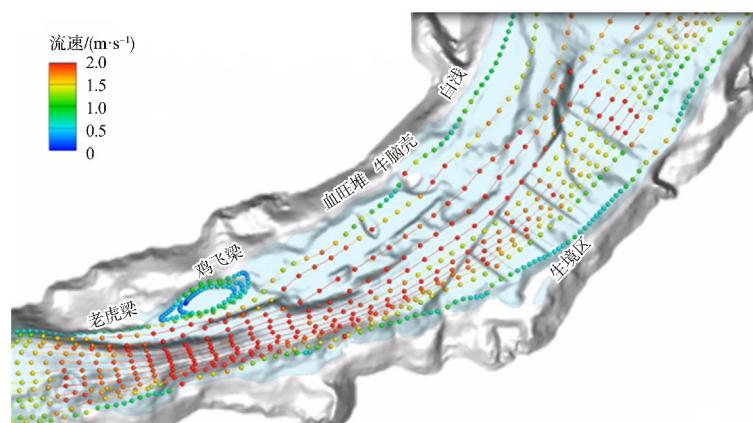
试验工况与水流运动特性试验一致, 试验结果表明, 方案 1 实施后: 1) 分流比变化。各流量级下平缓坝左右槽分流比变化不大, 分流格局不变, 左槽维持主汊, 工程实施对两汊分流影响不大; 2) 水位变化。工程对水位的影响主要表现在工程区局部区域, 清礁区水位有所降低, 中枯水情况下左岸横比降增大, 有利于左槽的进流, 利于白浅段水流调顺; 3) 流场变化。航槽内的流线变得平顺, 老虎梁—鸡飞梁航槽内流速均有所减小, 减小值为 0.02~0.05 m/s, 两个礁石区的回流范围大幅减小, 石梁外侧斜流大幅减弱, 牛脑壳和白浅清礁区由于生境区实施后归顺水流, 航槽内流速有所增加, 幅度为 0.01~0.03 m/s。4) 横流变化。各级流量下老虎梁滩段航槽内横流均有所减小, 老虎梁、鸡飞梁最大横流减小至 0.45 m/s

和 0.51 m/s, 血旺堆横流减小到 0.2 m/s 左右, 牛脑壳和白浅附近最大横流在 0.3 m/s 左右。

方案 2、3 实施后分流比、水位及流场变化同方案 1 基本一致。方案 2 实施后航槽区横流区范围减小, 航槽内横流均小于 0.6 m/s。老虎梁在流量 43 000 m<sup>3</sup>/s 时最大横流为 0.48 m/s; 鸡飞梁在流量 30 400 m<sup>3</sup>/s 时最大横流为 0.53 m/s, 血旺堆最大横流为 0.18 m/s; 白浅在流量 24 500 m<sup>3</sup>/s 时最大横流为 0.27 m/s; 牛脑壳后横流变化幅度较大, 从最大的 0.63 m/s 减小至 0.32 m/s。方案 3 实施后流场和横流与方案 2 相比变化不大, 但老虎梁—鸡飞梁回流范围比方案 2 实施后稍大, 且鸡飞梁在流量 30 400 m<sup>3</sup>/s 时最大横流为 0.57 m/s, 减小横流效果同方案 2 相比较差。各方案实施后在流量为 24 500 m<sup>3</sup>/s 的流场流线见图 3。



a) 方案1



b) 方案2

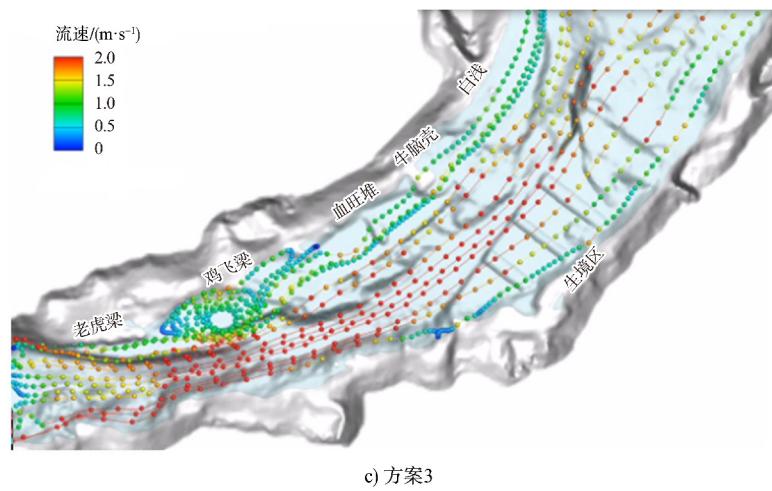


图3 各方案实施后流场流线

## 5 船模试验

### 5.1 试验工况

为进一步掌握工程效果, 对水流改善效果较好的方案1、2开展了5级流量下的船模试验。1) 工程前航行工况: ①上行过河: 按照现行航行规则进行过河试验; ②上行不过河: 按照靠右航行的规则进行上行试验; ③按照现行航线正常下行试验。2) 工程后航行工况: 按照整治目标, 老虎梁段要消除航路交叉, 达到分边航行的治理目标, 进行上行靠右航行、下行靠右航行的双向航行试验。

### 5.2 工程前船模试验

1) 上行过河航行试验。在经过礁石区时, 受横流等影响, 航行参数略大, 其他航段航行条件较好。上水船舶在白浅段水域航行时所压最大舵角 $R$ 为 $21^\circ$ , 最大漂角 $D$ 在 $11^\circ$ 以内, 航行轨迹偏出设计航道中心线, 较为弯曲; 在牛脑壳滩段上行船舶需向右压以抑制横流影响, 最大舵角为 $25^\circ$ ( $24\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ 时), 最大漂角为 $13^\circ$ , 航线偏向右岸一侧; 上行船舶进入鸡飞梁尾开始过河, 过河过程中受横流影响, 船舶产生较大漂角 $14^\circ$ ( $30\ 400\text{ m}^3/\text{s}$ 时), 航线也变得弯曲; 在老虎梁滩段由于河道较窄, 受老虎梁横流影响, 最大漂角为 $15^\circ$ ( $43\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 时)。

2) 上行不过河航行试验。上行通过鸡飞梁和

老虎梁段的航槽对船舶航行均存在不同程度的影响, 在 $24\ 500$ 、 $30\ 400$ 、 $43\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量条件下存在较大航行风险。白浅段上水船舶沿右侧航槽航行时, 所压舵角最大为 $21^\circ$ , 漂角最大 $12^\circ$ ; 牛脑壳需向右压 $21^\circ$ 舵角抑制横移; 上行经过鸡飞梁, 船舶航迹线极不稳定, 最大漂角 $15^\circ$ , 最大舵角 $17^\circ$ , 偏离航槽 $70\text{ m}$ ,  $30\ 400\text{ m}^3/\text{s}$ 流量以上出现上行失败(漂角 $25^\circ$ , 最大舵角 $39^\circ$ ); 老虎梁航段航迹线较弯曲, 最大漂角 $17^\circ$ , 最大舵角 $23^\circ$ , 受横流影响, 航迹线弯曲。

3) 下行航行试验。下行船舶在老虎梁段顺流航行时, 所压舵角最大 $20^\circ$ , 漂角最大 $12^\circ$ ; 到达鸡飞梁时, 所压舵角最大 $25^\circ$ , 漂角最大 $12^\circ$ ; 在血旺堆水域, 航行较平顺; 但在白浅、牛脑壳滩段时, 受弯道及横流的影响, 船舶转向所压舵角也较大, 船舶操纵困难。

### 5.3 工程后船模试验

#### 5.3.1 方案1船模试验

1) 上行航行试验。在 $9\ 920$ 、 $18\ 200$ 、 $24\ 500\text{ m}^3/\text{s}$ 3个流量下, 船舶上行通过各个礁石时漂角均较工程前小, 均能控制在 $10^\circ$ 之内, 舵角也可控制在 $20^\circ$ 以内; 在 $30\ 400$ 、 $43\ 000\text{ m}^3/\text{s}$ 流量下, 航行漂角较清礁前减小, 尤其是在鸡飞梁和老虎梁礁石处航行漂角分别减小至 $10^\circ$ 和 $7^\circ$ , 航迹线变得平顺。

2) 下行航行试验。方案1实施后, 船舶在工

程河段航行时基本可以安全通过，但在白浅、牛脑壳滩段，受弯道的影响，还需弯曲转舵以顺应河势，相比工程前，舵角有较大程度的改善，可控制在 20°以内，漂角在 10°以内，航行风险减小。

### 5.3.2 方案 2 船模试验

1) 上行航行试验。各级流量下的船模航行试验与方案 1 变化不大，主要区别在于大流量情况下老虎梁段的漂角有所增大，在 43 000 m<sup>3</sup>/s 流量

条件下，通过老虎梁礁石时，最大航行漂角由 15°减小至 9°以内。

2) 下行航行试验。下行航行试验与方案 1 实施后基本一致，船舶在老虎梁、鸡飞梁、血旺堆航行时基本可以安全通过，但在白浅、牛脑壳滩段还需弯曲转舵以顺应河势，舵角可控制在 20°以内，漂角在 10°以内。

工程前后船模航行动向见表 1。

表 1 工程前后船模航行动向 (°)

方案	工况	老虎梁		鸡飞梁		血旺堆		牛脑壳		白浅	
		R	D	R	D	R	D	R	D	R	D
工程前	上行过河	23	15	19	14	14	12	25	13	21	12
	上行不过河	23	17	38	25	15	12	21	15	21	12
	下行	20	12	25	12	15	10	24	15	27	25
1	上行	17	9	18	9	17	9	16	9	17	9
	下行	18	10	17	6	12	6	18	8	17	7
2	上行	15	9	17	8	15	9	15	8	18	9
	下行	17	8	10	7	15	8	18	9	16	7

### 5.4 方案比选

试验表明，3 个方案均能够显著减小横流的大小，满足横流控制指标的要求。方案 1、2 实施后，船模航路平顺，可满足船舶分道航行的要求。

上述 3 种方案各有优劣(表 2)，相对而言，方案 1 对改善局部不良流态效果较优，方案 2 次之。但考虑到方案 2 对外部环境影响和工程量均更小，建议将方案 2 作为推荐方案。

表 2 方案比选

方案	清礁工程量/ 万 m <sup>3</sup>	覆盖层清除 工程量/万 m <sup>3</sup>	最大横流流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	不良流态	上/下行漂角/ (°)	上/下行舵角/ (°)	外部条件
1	31.0	11.7	0.50	基本消失	9/10	18/18	紧邻生态红线
2	29.9	9.0	0.53	退至岸边	9/9	18/18	与生态红线 有一定距离
3	30.0	9.0	0.57	退出航槽	-	-	
方案比选	方案 2	方案 2	方案 1	方案 1	基本相当	基本相当	方案 2、3

## 6 结论

1) 老虎梁滩险段的水流特性表现为：上段老虎梁、鸡飞梁等伸入江中，汛期滑梁水势强大，梁间回流旺盛，下段牛脑壳伸入江心近半，白浅石盘与右岸花滩石梁对峙，且河势弯曲，形成河心向两岸滑泻的水势，使得可通航水域弯曲、狭窄。

2) 3 种整治方案均能将各级流量下航槽内横

流流速减小至 0.6 m/s 以下，船舶通过礁石时航行漂角可控制在 10°以内，舵角在 20°以内，能够解决滩碍航问题，达到船舶分道航行的基本要求。方案 2 对减小老虎梁后回流效果较好，改善横流最汹段鸡飞梁滩段水流条件效果更优，且对外部环境影响相对较小，因此，建议将方案 2 作为推荐方案。

(下转第 157 页)