



# 梯级枢纽间深水复杂流态航道的治理

王海江，易琛

(长江三峡通航管理局，湖北 宜昌 443000)

**摘要：**三峡—葛洲坝两坝间航道受汛期流量及水库调度等综合作用，流速大、流态乱、通航条件差，大流量下船舶航行困难，需限制通行，成为制约两坝枢纽通航效率提升的控制性河段。两坝间深水急流险滩主要位于主航道的咽喉地段，无法通过常规整治方法治理。通过炸除礁石等方法调整河床形态、减小河床陡升度、扩大过水面积，对典型碍航滩段“四滩一弯”进行整治。根据莲沱段航道整治实际效果得出，该航段整治效果明显，航道水流条件提升显著。

**关键词：**梯级枢纽；航道；急流险滩；船舶；航行

中图分类号：U642

文献标志码：A

文章编号：1002-4972(2024)01-0126-06

## Management of deepwater complex flow patterns in waterways between cascade hubs

WANG Haijiang, YI Chen

(Three Gorges Navigation Authority, Yichang 443000, China)

**Abstract:** The waterway between the Three Gorges and Gezhouba dams is affected by the combined effects of flood season flow and reservoir regulation, resulting in high flow velocity, chaotic flow patterns and poor navigation conditions. Under high flow conditions, it is difficult for ships to navigate under large flow and needs to restrict passage, which has become a controlling river section that restricts the improvement of navigation efficiency of the two dam hubs. The deep water rapids and dangerous shoals between the two dams are mainly located at the throat of the main waterway and cannot be treated through conventional remediation methods. In this paper, by means of blasting rocks and other methods to adjust the riverbed shape, reduce the steep rise of the riverbed, expand the water flow area, the typical navigation obstruction beach “four beaches and one bend” is regulated. According to the actual regulation effect of Liantuo section, the regulation effect of this section is obvious, and the flow condition of the channel is improved significantly.

**Keywords:** cascade hub; water way; rapids and shoals; vessel; navigate

山区河流急流险滩是常见的碍航浅滩形式，在滩口下游易形成剪刀水等不良流态，滩口处流速大、比降大，船舶上行困难，形成上急下险的碍航特征。常用的技术手段有扩大泄水断面、构成错口滩型、拓宽缓流航道等。对于水深较大、流速较大的急流险滩，扩大泄水断面，降低断面平均流速，降低滩段流速与比降，从而达到消滩

的目的；但是对于山区河道系统整治工程，需考虑整体性和各滩的相互影响与相互关系，通常通过扩大上游泄水断面，在降低滩段流速、比降的同时将引起河段阻力降低，造成下游河段水位落差加大。常采用人工方法将对口急流滩改成错口急流滩，利用缓流区搭跳上滩<sup>[1]</sup>，但该方法增加了上下行船舶会遇概率。

收稿日期：2023-05-09

作者简介：王海江（1974—），男，高级工程师，从事船闸运行维护管理和设备技术研究。

本文基于改变河床形态、扩大通航水域、调整水流结构和消除不良流态的思路, 进行深水急流滩险整治。在物理模型系统试验的基础上, 提出一种用于山区河流急流段航道整治的阶梯状倒坡结构。采用阶梯状倒坡结构炸扩急流滩段, 滩口过水面积增加, 流速明显减缓, 上水航线对岸侧水流的紊动强度增加, 水位落差分布分散, 水流陡比降减小, 对深水急流滩险碍航流态治理具有显著效果。

## 1 大流量条件下两坝间航道碍航特征

### 1.1 两坝间河道特征

三峡—葛洲坝两坝间河段多为峡谷河段, 平面形态蜿蜒曲折, 河谷陡峭, 河槽窄深, 河道断面多呈 U 或 V 形断面, 河道纵剖面跌宕起伏。汛期河道过水面积增加速率小于流量增加速率。险滩集中在两坝间中段莲沱—偏脑河段, 在 15 km 河段中, 有水田角(莲沱)、喜滩、大沙坝、偏脑等急流滩段和石牌弯道滩段, 其中水田角、喜滩、石牌“两滩一弯”段船舶航行最为困难<sup>[2]</sup>。

### 1.2 两坝间重点险滩河段碍航特征

三峡—葛洲坝两坝间河段长 38 km, 是三峡电站的反调节河段, 无较大支流, 主要为三峡枢纽下泄流量。根据三峡枢纽调度规程, 当上游来水量小于 56 700 m<sup>3</sup>/s 时, 按天然流量过程下泄, 进库流量与出库流量一致; 当上游来水量大于 56 700 m<sup>3</sup>/s 时, 下泄流量不超过 56 700 m<sup>3</sup>/s<sup>[3]</sup>。三峡枢纽下引航道最高通航水位为 73.8 m, 最低通航水位为 62.0 m。

三峡、葛洲坝枢纽建成后, 两坝间水深大幅增加, 非汛期两坝间水流条件呈水库特性, 水流条件较建成前得到了极大改善。但在汛期大流量下( $Q \geq 25\,000 \text{ m}^3/\text{s}$ , 年均 34 d), 由于葛洲坝为低水头径流式枢纽, 反调节能力较弱, 两坝间水流呈现明显的山区河流特性, 表现为流急(航线流速大于 3 m/s), 局部水面坡降大, 流态紊乱(泡漩水、大范围回流), 适航水域狭窄, 部分河段弯曲半径不足(石牌弯道 750 m), 使得船舶航行更加困难。与非汛期船舶各自靠右航行航线不同, 汛

期需单独制订航线、航法及采取禁航、限航等措施保障船舶的通航安全。

综上, 两坝间河段大流量下碍航的根本原因是河道平面形态突缩突扩, 剖面形态陡降陡升, 断面多呈 U、V 形、局部河段有效过水面积不足等, 流量愈大, 滩段碍航特征愈明显。大流量条件下两坝间碍航代表滩段为“四滩一弯”, 即水田角(莲沱)、喜滩、大沙坝、偏脑和石牌弯道(图 1)。



a) 水田角(洪水急流滩)



b) 喜滩(洪水对口急流滩)



c) 大沙坝(洪水急流滩)



d) 石牌(急弯险滩)



e) 偏脑(洪水急流滩)

图 1 两坝间险滩类型

## 2 三峡电站汛期调峰对两坝间航道通航条件的影响

三峡电站调峰期间,两坝间河段水流为非恒定流。研究表明,无论是涨水过程还是落水过程,河段沿程水位具有明显的差异性,可能同涨同落,也可能上游涨下游落或下游涨上游落。在日调节过程中,两坝间水位受葛洲坝运行水位影响较大,受三峡下泄流量变化影响相对较小。

在不考虑葛洲坝水利枢纽调度影响的情况下,水面比降与水位变化基本同步,表现为涨水过程中,水位增加,比降增大,附加比降为正值;落水过程中,水位降低,比降减小,附加比降为负值。随着非恒定流向下游的逐渐传播,各河段纵向比降不断调整,直至最终稳定。

从非恒定流传播过程来看,对同一葛洲坝水位,在初始流量为  $25\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 、非恒定流变幅  $5\,000\sim20\,000\text{ m}^3/\text{s}$  时,非恒定流传播至葛洲坝

枢纽需  $50\sim60\text{ min}$ ,在  $360\text{ min}$  内两坝间水位可基本稳定;且非恒定流变幅越大,附加比降越大,传播历时越短,稳定历时越长。

随着下泄非恒定流流量的增加,非恒定流传播所到之处必然引起水位抬高、流速增大;落水过程中随着下泄非恒定流流量的减小,非恒定流传播所到之处必然引起水位降低、流速减小。

现状条件下非恒定流船模航行试验表明,在涨、落水过程中,水田角、喜滩、大沙坝及石牌仍是船舶航行较困难的滩段。另外,非恒定流产生的附加流速和比降增大了船舶(队)的操纵难度,不利于船舶(队)在两坝间安全航行。

## 3 两坝间航道急流险滩碍航流态整治

### 3.1 整治原则

由于三峡—葛洲坝两坝间为峡谷河段,长度仅  $38\text{ km}$ ,同时又为葛洲坝常年回水区,因此,通过工程措施改变其总纵比降和减小水流流速成效甚微。只有利用两坝间水深、河宽足够的有利条件,从调整河床形态入手,调整复杂的水流结构和断面流速分布、消除或减弱不良碍航流态,扩大船舶有效通航水域,方可达到改善航道条件的目的<sup>[4]</sup>。各碍航滩段整治原则见表 1。

表 1 各类急流险滩分类及整治原则

急流滩类型	碍航表现特征	整治原则	典型滩段
河宽突扩	滩口上段流急,河宽突扩段主流两侧存在大范围对口回流、泡漩区	扩大滩口过水断面,使河宽平顺过渡	水田角
河宽突缩	滩口上段流缓,河宽突缩段主流集中	扩大滩口过水断面,使河宽平顺过渡	大沙坝
弯道	航线弯曲半径不足,船舶航行难度大	拓宽弯道突岸船舶航线水域	石牌
河床陡降	主流集中在河中深槽狭窄范围内,流速、比降大,流态紊乱	减小河床陡降程度,使河床高程平顺过渡	水田角
河床陡升	主流集中在河中深槽狭窄范围内,流态紊乱	减小河床陡升程度,使河床倒坡平缓	石牌
过水断面面积不足	河道窄深,主流集中在河中深槽,流速大,流态紊乱	扩大近岸缓流区范围	喜滩
有效过水断面面积不足	河道断面面积大,但主流两侧存在大范围对口回流、泡漩区,有效过水断面面积不足	减弱回流、泡漩水范围与强度,增大有效过水断面面积	水田角 石牌

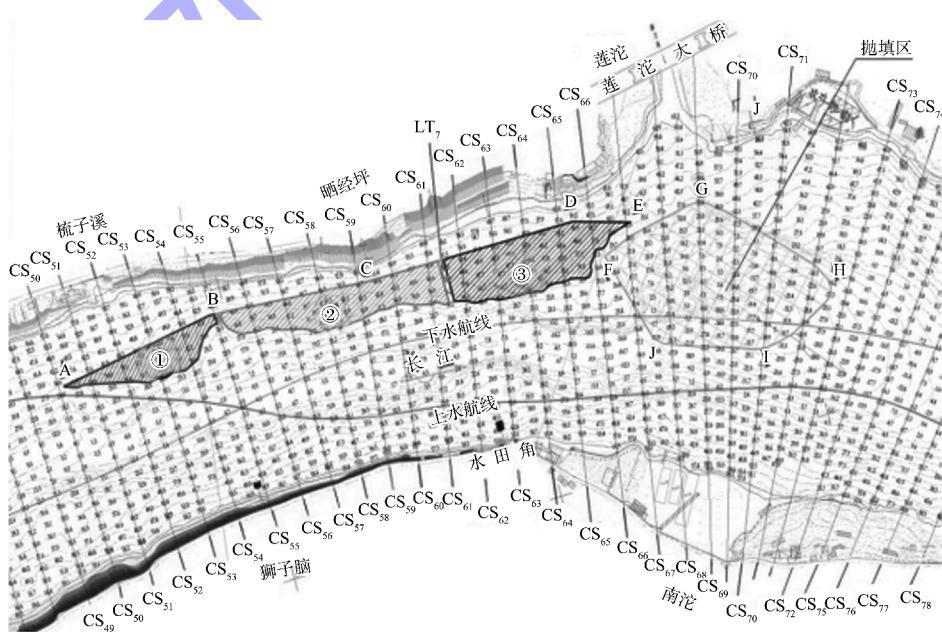
### 3.2 典型险滩整治设计

根据两坝间大流量条件下碍航滩段碍航特性, 对典型险滩提出系统的整治设计方案。1) 乐天溪炸低锚地碍航礁石, 改善船舶停泊条件; 炸低河心孤立石梁及右岸挑流石嘴, 改善船舶航行水流条件。2) 水田角炸除滩口水下岩盘突嘴, 扩大有效过水面积, 减小滩口挑流作用和水流流速、比降; 在河道深泓陡降陡升的深沱弃渣和抛填, 平顺河床高程, 消弱泡漩水、剪刀水强度。3) 喜滩平顺两岸水下断续分布的近岸石嘴、孤石、乱石, 归顺水下岸线, 减弱泡漩水, 扩大有效过水面积和近岸缓流区范围, 增加可利用航线的宽度。4) 大沙坝炸除伸入河中的突嘴石盘, 减小挑流作用, 扩大过水面积; 减小河宽突缩段主流流速, 调整流速分布, 扩大通航水域; 平顺突缩段上游近岸浅水区岸线。5) 石牌炸除突起大片岩盘和水下凸嘴, 调整河床底坡, 改善底流流态, 减弱滩段竖轴回流范围和强度、消弱泡漩水强度, 增大有效过水面积和航宽。6) 偏脑炸除滩口两岸水下突出的石盘, 扩大过水断面, 将河宽突扩变为渐变, 减小主流流速; 减弱河宽突扩段主流两侧的大范围对口回流、泡漩区, 扩大通航水域。

### 3.3 深水急流滩险航道整治

#### 3.3.1 整治设计

以两坝间水田角(莲沱)为例, 整治方案平面布置见图2。1) 下岸溪—丁头镇河道两岸水下岩嘴炸礁。炸礁区共6处, LT<sub>1</sub>~LT<sub>5</sub>位于河道右岸下岸溪—陡山沱汽渡沿线一带, LT<sub>6</sub>位于左岸丁头镇; 炸礁设计底高程56.5 m, 底部设计为平坡; 近岸侧炸礁基线处边坡1:0.5。2) 梳子溪—晒经坪左岸水下河床炸礁。该炸礁区编号LT<sub>7</sub>, 位于河道左侧, 炸礁区长1 058 m, 上距丁头镇500 m, 底部调整为阶梯状底坡, 按底高程不同分为3段: 上段高程28 m、长300 m(CS<sub>50</sub>~CS<sub>55</sub>), 中段高程30 m、长400 m(CS<sub>55</sub>~CS<sub>61</sub>), 下段高程32 m、长350 m(CS<sub>62</sub>~CS<sub>67</sub>); 近岸侧炸礁基线由4段直线组成, 基线处边坡1:0.5; 炸礁区设计底高程为30.0 m, 河心侧边线以30.0 m等高线控制。3) 抛填区平面布置。炸礁产生的石渣抛填于莲沱弯道深沱沱心的左侧, 主要是抛填于深沱以左水下较低处河床及深沱内左侧的边坡, 用以平顺水下崎岖地形。抛填区为缓坡, 抛填区左侧连线不超过30.0 m等高线, 上下游边界为左侧水下河床的陡坎和突出岩嘴, 用于平顺水下陡坎之间的较低河床。该弃渣区可容纳75万m<sup>3</sup>石渣。



注: ①区域炸礁高程28 m; ②区域炸礁高程30 m; ③区域炸礁高程32 m。

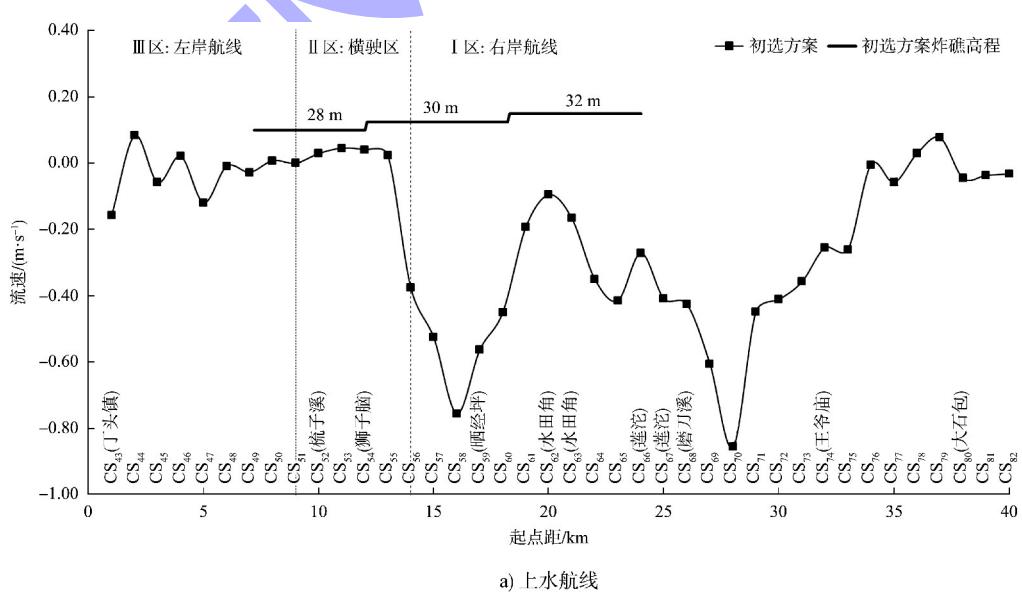
图2 水田角(莲沱)滩险航道整治平面布置

### 3.3.2 试验结果

1) 工程前后水位、比降变化。初选方案工程实施后工程区上游河段水位产生降落，最大降落值为 0.07 m。梳子溪—晒经坪河段左右岸比降均大幅减小，减小值为左岸 2.66‰，右岸 2.26‰。芭蕉溪左岸比降大幅减小，减小值 4.25‰。整治前后水面、比降变化见表 2。

表 2 整治前后水面比降变化

水尺位置	整治前比降/%		整治后比降/%		变化值/%	
	左岸	右岸	左岸	右岸	左岸	右岸
黄陵庙水文站	-	-	-	-	-	-
红沙沱	1.22	1.92	0.80	1.32	-0.42	-0.60
丁头镇	1.19	1.27	1.49	1.96	0.30	0.69
梳子溪上	-0.33	2.13	-0.13	2.16	0.20	0.03
梳子溪下	1.03	2.11	1.99	3.38	0.96	1.27
晒经坪	4.17	5.38	1.51	3.12	-2.66	-2.26
莲沱上	-2.40	-3.00	-2.21	-3.29	0.19	-0.29
莲沱	1.74	-3.26	-2.25	-0.93	-3.99	2.33
王爷庙	-1.91	0.64	-0.68	-0.29	1.23	-0.93
包脑	-1.80	-1.00	-1.34	-1.16	0.46	-0.16
芭蕉溪	11.75	-0.50	7.50	1.75	-4.25	2.25
天柱山	-2.19	5.18	0.28	5.74	2.47	0.56
茶园	5.71	0.56	5.06	-0.15	-0.65	-0.71
新路口	3.52	1.76	3.61	1.41	0.09	-0.35
脚踏铺	2.25	2.75	1.31	2.19	-0.94	-0.56
黄桑洞	-1.12	-0.82	-0.33	-0.25	0.79	0.57



2) 上水航线流速变化。整治方案上水航线流速变化见图 3a)。丁头镇—梳子溪段梳子溪以上右岸上水航线流速以减小为主，最大减少值 0.12 m/s，工程后流速最大流速 2.49 m/s。狮子脑—梳子溪横驶区受炸扩左岸影响，横驶区断面流速分布更为均匀，航线最大流速由 3.53 m/s 降至 3.15 m/s。水田角—狮子脑段有效过水面积增加，狮子脑以下上水航线流速大幅减小，减小值 0.75 m/s，工程后航线最大流速 2.75 m/s。

3) 下水航线流速变化。下水航线流速变化见图 3b)。水田角河段下行航线流速以减小为主，梳子溪以上河段流速最大减小值 0.13 m/s。晒经坪上游河势收缩段流速显著减小，最大减小值 0.32 m/s。晒经坪附近至大石包河段航线流速均显著减小，最大减小值 0.46 m/s。

整治方案在增加上段炸礁量的同时减少下段炸礁量，炸礁高程变幅 ±2 m，将炸礁区从平坡调整为纵向阶梯状倒坡。工程后航线流速梯度与水面比降趋于平缓，其中 LT<sub>7</sub> 炸礁区河段航线流速大幅减小，且横驶区比降也有小幅降低，整治效果良好。

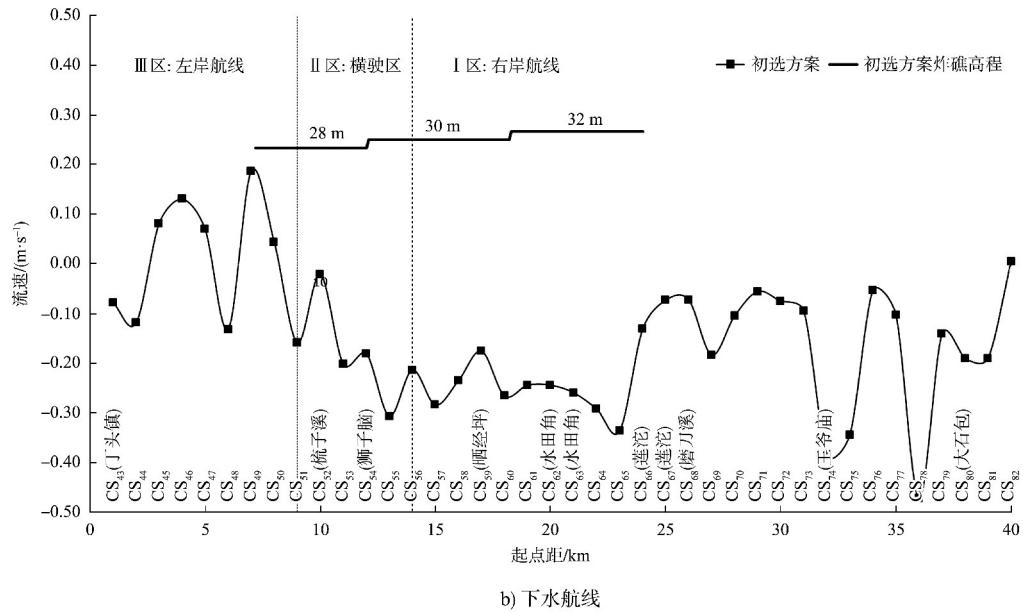


图3 工程前后航线流速变化

#### 4 结论

1) 分析了大流量条件下两坝间航道碍航特征, 揭示了汛期大流量与水库调度叠加作用下的山区枢纽航道碍航机理。

2) 基于改变河床形态、扩大通航水域、调整水流结构和消除不良流态的思路进行深水急流险滩整治。

3) 根据已完成 90% 炸礁工程量的莲沱段航道整治实际效果得出, 乐天溪航段整治工程的实施使得航道水流条件得以明显改善。如按本研究确定的整治方案有序推进两坝间其它险滩及弯道整治, 可整体提升两坝间定线制航行流量级和限制性通航流量级(船舶限制通航流量级由 25 000 m<sup>3</sup>/s

提高到 30 000 m<sup>3</sup>/s), 两坝间航道的瓶颈作用将得到明显改观, 从而提升三峡—葛洲坝梯级枢纽的通航效率, 保障两坝间航道的通航安全。

#### 参考文献:

- [1] 赵鹏飞, 王玮. 长直窄深型急滩治理方法研究[J]. 水利规划与设计, 2016(1): 89-92.
- [2] 王玮. 两坝间喜滩长直窄深型急滩治理方法研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2014.
- [3] 陈厚忠. 三峡坝区水上交通系统安全性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [4] 章日红. 三峡—葛洲坝两坝间典型滩段大流量下通航条件改善措施试验研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.

(本文编辑 王传瑜)

近期不断发现有人冒用《水运工程》编辑部名义进行非法活动, 他们建立伪网站, 利用代理投稿、审稿等手段进行诈骗活动。《水运工程》编辑部郑重声明, 从未委托第三方为本编辑部约稿、投稿、审稿。《水运工程》编辑部唯一投稿网址: www.sygc.com.cn, 敬请广大读者和作者周知并相互转告。

#### 编辑部声明

《水运工程》编辑部