



# 大藤峡坝下飞凤角整治方法研究

龚涛涛

(广西壮族自治区柳州航道养护中心, 广西 柳州 545007)

**摘要:** 针对大藤峡船闸下游飞凤角航道在小流量( $700\sim 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ )时横流切入主航道、威胁船舶航行安全的问题, 开展横流成因分析及针对性整治方法研究。通过地质勘查、数学模型试验及断面面积法工程量计算, 结合地形特征与水文条件, 经多方案优化研究, 提出分期实施的优化整治方案。研究表明, 横流成因主要为枢纽下泄通道卡口缩窄(21 m高程线宽度减少约50%)、地形抬升及小流量下水流集中。通过优化整治线、切除“S”弯滩嘴、扩宽过水断面等措施, 近期方案显著降低了航道横流强度, 横向流速降幅达18.5%~29.2%, 水面比降减小70%~84%, 通航条件明显改善; 远期方案预留卡口扩展至现状3倍的空间, 兼顾工程经济性与适应性, 且预留了根据未来水文不确定性而进行动态调整的空间。结论表明, 分期整治策略有效缓解航道“卡脖子”问题, 验证了“近期缓解+远期根治”策略的有效性, 可为山区河系类似枢纽的下游航道治理难题提供实践参考。

**关键词:** 下引航道口门区; 危险滩; 横流; 整治工程

中图分类号: U617

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)12-0198-06

## Research on remediation methods at Feifengjiao downstream of Datengxia Dam

GONG Taotao

(Liuzhou Waterway Administration of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Liuzhou 545007, China)

**Abstract:** To address the issue of cross currents intruding into the main navigation channel at the Feifengjiao waterway downstream of the Datengxia ship lock under low discharge conditions ( $700\sim 2,000\text{ m}^3/\text{s}$ ), which poses risks to vessel navigation safety, this study investigates the hydrodynamic causes of cross currents and develops targeted remediation methods. By integrating geological surveys, numerical model simulations, and engineering quantity calculation using cross-sectional area method, an optimized phased remediation scheme is proposed through multi-scheme comparative analysis, tailored to local topographic and hydrological characteristics. The results indicate that the cross currents primarily originate from three factors: significant narrowing of the dam's discharge channel (21 m contour width reduced by approximately 50%), elevated riverbed morphology, and flow concentration under low discharges. Short-term measures, including optimized channel alignment design, excision of the S-shaped shoal bend, and expansion of the flow cross-section, effectively reduced cross-current intensity (lateral velocity decreased by 18.5%–29.2%) and water surface gradient (70%–84% reduction), substantially improving navigability. The long-term scheme reserves expansion capacity to triple the current width of the channel throat, balancing cost efficiency with adaptive flexibility while allowing dynamic adjustments for future hydrological uncertainties. The findings demonstrate that the phased remediation strategy successfully alleviates critical bottleneck constraints, validates the efficacy of the “short-term mitigation + long-term resolution” framework, and offers actionable insights for managing similar navigation challenges downstream of hydraulic hubs in mountainous river systems.

**Keywords:** entrance area of downstream approach channel; rapids; cross currents; remediation works

收稿日期: 2025-03-12 录用日期: 2025-04-22

作者简介: 龚涛涛(1989—), 女, 工程师, 从事航道工程管理工作。

## 1 工程概况

来宾—桂平 2 000 吨级航道工程(简称来桂航道工程)起于来宾港兴宾港区宾港作业区,止于桂平两江汇流口段,航道全长 193.87 km,其中红水河来宾港兴宾港区宾港作业区至黔江大藤峡枢纽上游航道长度 182.71 km,设计航道尺度为 3.5 m×80 m×550 m(水深×宽度×弯曲半径),黔江大藤峡枢纽下游至桂平两江汇流口航道长度 11.16 km,设计航道尺度为 4.1 m×80 m×550 m。全段航道按照内河 2 000 吨级双线航道标准建设,通航保证率为 98%。

来桂航道工程综合考虑了大藤峡船闸下游引航道衔接段与下游习惯航路及河道深槽的关系,把坝下航道的设计尺度由模型试验阶段的 3.5 m×80 m×550 m 调整为 4.1 m×80 m×550 m,并在航道平面布置时使飞凤角上段航道稍向右偏、飞凤角中下段和鹅蛋滩中上段航道稍偏向左偏,让航道线型更加顺畅,同时结合地形适当加宽航道,在飞凤角左侧加宽 9.2~28.1 m、在鹅蛋滩上段左侧加宽 0~50 m,航道通航条件得到进一步改善。

来宾—桂平 2 000 吨级航道建成试通航后,黔江航道、大藤峡船闸实现 24 h 通航,日均下行过闸船舶数量可达 70 艘。然而,在实际运行中发现,当水流流量较小时(700~2 000 m<sup>3</sup>/s),船闸下引航道出口飞凤角水域有较强横流水切入主航道,影响船舶尤其是 300 吨级以下船舶的安全航行。对此,海事部门实施临时交通管制,禁止该水域夜间通航,这直接导致通航时间大幅缩减,最终造成船舶过闸效率降低,亟需通过工程措施解决航道“卡脖子”难题。

## 2 横流成因及特性

### 2.1 成因

通过对比横流位置模型试验阶段航道测图与来桂航道工程试通航阶段测图可知,大藤峡枢纽拦蓄发电后枢纽下泄通道的砂卵石河床有一定冲深,但在横流位置形成了明显卡口,尤其是 21 m 高程线左侧向下泄通道中心缩窄了约 36 m、右侧

向下泄通道中心缩窄了 17 m,相当于 21 m 等高线从原来的 110.0 m 缩窄至 56.9 m,现状 21 m 高程过水宽度缩小至原河道 21 m 高程过水宽度的 1/2,形成了明显的卡口。

从现场调研看,船闸下游引航道及衔接段与枢纽下泄通道的交汇处在下泄流量较小时水流归槽。近几年,受主河道右侧浅滩——沙角坪地形变化河床抬高形成卡口的影响,下泄水流向左斜冲衔接段航道,航道内出现横流。特别是在小流量情况下,由于航道超深开挖、航道补水量少、下泄通道小礁石阻水等影响,下泄水流过于集中,下泄通道与航道的水位差较大,势能转换为动能,导致横流流速偏大。

### 2.2 特性

当大藤峡水利枢纽下泄流量为 700~2 000 m<sup>3</sup>/s 时,来宾—桂平航道大藤峡坝下飞凤角段存在横流不良流态,横流主流方向与航道中心线的夹角约为 35°~38°,航道右半幅平均横向流速约 1.0 m/s,航道左半幅受横流的影响相对较小。

## 3 整治初步方案

### 3.1 地质勘查

飞凤角所在河道较顺直,河面较宽,水流湍急,该滩险位于靠右岸的主河道上,两岸坡缓,右岸为中密卵石,左岸基岩出露,表层覆盖 0.5~3.0 m 的沉积黏土,靠近横流位置分布棱角分明的块石。地层以卵石混漂石和灰岩为主,卵石混漂石主要分布于右侧河道、主航道河床及右侧河岸,适用大铲斗、大抓斗挖掘;灰岩则分布于整个场地,在左侧河道及河岸有大面积出露,岩面起伏较大、均匀性差,需预爆破后用大铲斗、大抓斗挖掘。

### 3.2 初步方案 1

整治起点位于大藤峡船闸下引航道与来桂航道工程坝下段分界线上游 150 m 处。主要措施包括:1)沿河道走向向下开挖至 20 m 底高程,“S”弯全段切除;2)在鹅蛋滩上游端头设置导流拐角,有效控制泄洪通道水流与航道中心线夹角;3)通过

断面形态优化,引导  $700\sim 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$  流量下泄水流沿河道右侧出流,降低右侧航道横流强度。该方案开挖工程量为  $8.5\text{ 万 m}^3$ ,形成连续线性整治段。

### 3.3 初步方案 2

整治起点位于航道分界线下游  $20\text{ m}$ 。实施要点为:1) 结合下泄通道走向局部切除“S”弯,开挖底高程降至  $19\text{ m}$ ;2) 在飞凤角至龟头石段设置复合型导流结构,通过断面扩挖提升  $700\sim 2\,000\text{ m}^3/\text{s}$  流量下的过流能力;3) 建立双级水流导向系统,上游导流结构将水流导向鹅蛋滩上段,下游结构强化右侧出流控制。该方案开挖量为  $5.7\text{ 万 m}^3$ ,兼具流量适应性与工程经济性。

### 3.4 初步方案 3

整治起点位于航道分界线下游  $55\text{ m}$ 。技术特征体现在:1) 采用“S”弯局部切除方案,开挖底高程维持  $20\text{ m}$ ,形成平顺过渡的下泄通道;2) 通过断面系统扩挖与水流轴线优化,同步实现泄洪能力提升与航道水流夹角控制;3) 构建三级导流体系,重点强化鹅蛋滩上段水流归槽与右侧出流稳定性。该方案开挖量最小,约  $3.0\text{ 万 m}^3$ ,具有显著的工程量优势。

## 4 优化思路及过程

考虑到整治施工便利性和节约投资的因素,在初步方案的基础上进一步优化。

1) 飞凤角中下游及鹅蛋滩上游区域存在显著横流冲击现象,该问题在下泄流量较小时尤为突出,因此重点针对小流量下的横流进行整治,将主流引导至主河道,减少横流对飞凤角段航道的影

响。

2) 考虑到低水位下本河段平面呈 S 形,因此整治线宜布置在“S”弯上游起点处,清除下泄通道的障碍物,扩大过流断面,调整滩口河床形态,使得水流平顺下泄。

3) 应尽量增大切角,将主流引导至下游河道,扩大下泄通道过水断面,减少下泄通道与航道的水

流差,调顺下泄通道水流与航道中心线的交角。

4) 由于坝下航段水文条件复杂、地形变化较大,宜按近期整治和远期整治的思路分期进行,近期整治疏挖至底高程  $19.5\text{ m}$ ,减缓危险程度,后续观测整治效果并开展水文测验,结合试验成果再开展远期整治工程。

## 5 整治优化方案

优化方案按近期方案和远期方案设计实施,优化方案平面布置见图 1。

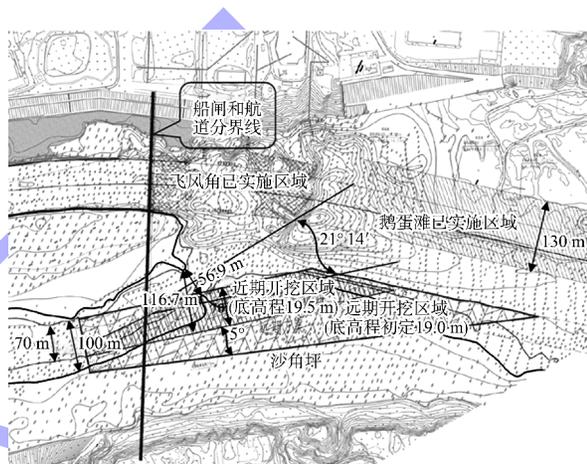


图 1 优化方案平面布置

Fig. 1 Layout plan of optimized scheme

### 5.1 优化近期方案

近期整治的上游起点位于船闸和航道分界线上游约  $116\text{ m}$ ,为更好地调顺水流,从上至下顺延  $20\text{ m}$  等高线,相对原  $20\text{ m}$  等高线往右侧摆动约  $18^\circ$ ,顺畅下泄通道;由于下泄通道内分界线上游 2 条  $20\text{ m}$  等高线之间宽度约  $70\text{ m}$ , $21\text{ m}$  等高线卡口位置宽约  $56.9\text{ m}$ ,若按照  $70\text{ m}$  宽度开挖,开挖底高程取  $19.5\text{ m}$ ,且右侧边线基本按照  $21\text{ m}$  高程线走向布置,则此卡口可扩大至  $116.7\text{ m}$ ,为现状卡口宽度的 2 倍。经过数学模型试验对比分析,该方案可有效降低  $700\text{ m}^3/\text{s}$  流量级下的横流,整治后低流量下泄主流的角度向右侧摆动约  $21^\circ 14'$ ;保留左侧卡口,可减小横流直冲航道。

### 5.2 优化近期方案工程量

在枯水期开挖作业,卡口存在跌水约  $1.5\text{ m}$ ,因此选择以卡口分界,卡口下游约  $20\text{ m}$  按照陆上

开挖考虑，卡口上游按照 21 m 高程以下进行水下疏浚考虑，挖泥船结合泄水通道的水流条件选择合适的水位开展水下开挖施工。

采用断面面积法计算开挖工程量，断面间距为 20 m，计算公式如下。

$$V = \frac{A_0 + A_1}{2} L_1 + \frac{A_1 + A_2}{2} L_2 + \dots + \frac{A_{n-1} + A_n}{2} L_n \quad (1)$$

式中： $V$  为挖槽断面工程量， $m^3$ ； $A_0 \sim A_n$  分别为各计算断面上的开挖面积， $m^2$ ； $L_1 \sim L_n$  分别为  $A_0$  与  $A_1$ 、 $A_1$  与  $A_2 \dots A_{n-1}$  与  $A_n$  计算断面的间距， $m$ 。

通过计算，近期整治工程量为陆上开挖 2.943 9 万  $m^3$ 、水下开挖 1.127 3 万  $m^3$ 。根据开挖区域附近的地勘资料，近期开挖底高程以上以卵石混漂石为主，若遇到岩石则可保留，但需在开挖区右侧开挖与岩石方量等量的卵石混漂石，并顺畅上下游的边线线型，以保证过水断面面积。

### 5.3 优化近期方案整治效果

1) 水位变化。通过分析飞凤角附近河段主流线水面线数据，在流量  $Q = 700$  和  $1\,450\, m^3/s$  时，距整治区域上游起点 200 m 处的水位落差较整治

前分别减少 0.46 和 0.45 m，水面落差的分布更加分散，主流汇入航道前的流速也有所减小。飞凤角附近河段主流线水面线见图 2。

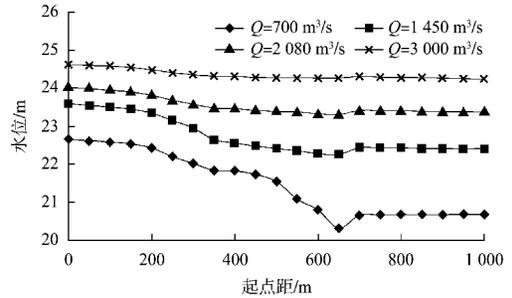


图 2 飞凤角附近河段主流线水面线  
Fig. 2 Main channel waterline of the river reach adjacent to Feifengjiao

2) 航道流速流态。比对航中线和航道右侧边线流速数据，航道内的纵向和横向流速显著降低，在  $Q = 700\, m^3/s$  时，航中线最大纵向流速从 2.06 m/s 降至 1.24 m/s，最大横向流速从 0.81 m/s 降至 0.66 m/s；在  $Q = 1\,450\, m^3/s$  时，最大纵向流速从 3.00 m/s 降至 2.14 m/s，最大横向流速从 0.89 m/s 降至 0.63 m/s。各级流量下航道最大流速见表 1。

表 1 各级流量下航道最大流速

Tab. 1 Maximum flow velocity in the channel under various discharge levels

位置	最大纵向流速/( $m \cdot s^{-1}$ )				最大横向流速/( $m \cdot s^{-1}$ )			
	$Q = 700\, m^3/s$	$Q = 1\,450\, m^3/s$	$Q = 2\,080\, m^3/s$	$Q = 3\,000\, m^3/s$	$Q = 700\, m^3/s$	$Q = 1\,450\, m^3/s$	$Q = 2\,080\, m^3/s$	$Q = 3\,000\, m^3/s$
	航中线							
近期方案	1.24	2.14	1.87	1.89	0.66	0.63	0.36	0.26
现状	2.06	3.00	2.02	1.83	0.81	0.89	0.47	0.23
变化值	-0.82	-0.86	-0.15	0.06	-0.15	-0.26	-0.11	0.03
右边线								
近期方案	1.21	2.36	2.35	2.22	0.42	0.88	0.60	0.62
现状	2.10	2.69	2.65	2.24	0.83	0.98	0.66	0.31
变化值	-0.89	-0.33	-0.3	-0.02	-0.41	-0.1	-0.06	0.31

3) 航中线比降。重点碍航区段的水面比降大幅减小， $Q = 700\, m^3/s$  时最大比降从整治前的 0.26‰ 降至 0.08‰， $Q = 1\,450\, m^3/s$  时从 0.75‰ 降至 0.12‰。各级流量下航中线沿程比降见表 2。

综上所述，整治后航道横流可得到显著改善，尽管局部仍存在大于 0.7 m/s 的横流，但其分布范围较小，对船舶航行影响较小。

表 2 各级流量下航中线沿程比降

Tab. 2 Longitudinal gradients along the course of channel alignment under various discharge levels

距主航道起点/m	比降/‰			
	$Q = 700\, m^3/s$	$Q = 1\,450\, m^3/s$	$Q = 2\,080\, m^3/s$	$Q = 3\,000\, m^3/s$
	20	-0.06	-0.13	-0.06
70	-0.11	0.02	-0.12	-0.27
120	0.17	0.03	-0.05	-0.21
170	0.28	0.03	0.06	0.22

续表2

距主航道起点/ m	比降/‰			
	Q=700 m <sup>3</sup> /s	Q=1 450 m <sup>3</sup> /s	Q=2 080 m <sup>3</sup> /s	Q=3 000 m <sup>3</sup> /s
220	0.01	0.01	0.00	0.21
270	-0.14	-0.07	-0.14	-0.16
320	-0.12	-0.06	-0.05	-0.20
370	0.08	0.08	0.23	0.31
420	0.02	0.11	0.21	0.29
470	-0.23	0.05	0.14	0.26
520	-0.07	0.12	0.23	0.36
570	0.06	0.12	0.20	0.30
620	0.07	0.06	0.11	0.17
670	0.08	0.08	0.10	0.15
720	0.11	0.05	0.11	0.20
770	0.08	0.02	0.08	0.15
820	0.03	-0.01	0.03	0.10
870	0.09	0.07	0.12	0.22
920	0.14	0.14	0.20	0.30
970	0.10	0.02	0.06	0.12
1 020	0.09	0.02	0.03	0.04
1 070	0.22	0.20	0.21	0.27
1 120	0.34	0.31	0.32	0.41
1 170	0.28	0.25	0.25	0.32
1 220	0.34	0.29	0.29	0.36
1 270	0.48	0.43	0.44	0.53
1 320	0.36	0.35	0.36	0.42
1 370	0.28	0.33	0.34	0.39
1 420	0.32	0.37	0.39	0.46
1 470	0.31	0.35	0.37	0.45

### 5.4 优化远期方案

远期整治起点与近期起点一致，由于下泄通道内分界线上游两条 21 m 高程线之间宽度约 100 m，暂定上游开挖宽度 100 m，远期右侧边线与近期的右侧边线呈 5° 夹角，此时边线与右侧岸线基本平行，顺应整体河道走势，此时卡口位置宽约 166.8 m，约为现状卡口宽度的 3 倍；整治起点位置河道底高程约 19 m，因此远期整治底高程初定 19 m；按此方案整治后，低流量下的下泄主流的角度向右侧摆动 25° 51′，保留左侧卡口，可减小横流直冲航道。

大藤峡船闸下游段航道可通航流量在 700 ~ 27 000 m<sup>3</sup>/s，近期整治方案着重改善小流量下的横流，减缓急险程度，由于坝下段航道地形变化较大且整治后可能造成其他不良流态，航道特性复杂，后续在近期整治完成后根据现场观测和模型试验比选验证情况，再择机开展远期整治。

### 6 方案对比分析

初步方案 3 工程量最小，但优化近期方案通过分期实施(陆上+水下结合)进一步降低施工难度，同时保证整治效果。优化远期方案在工程量上可能接近初步方案 1，但通过分阶段投资可减少初期资金压力。优化远期方案基于近期效果动态调整，避免初步方案中“一刀切”的局限性，技术适应性更强。各整治方案对比分析见表 3。

表 3 飞凤角不同整治方案对比

Tab. 3 Comparison of different Feifengjiao remediation schemes

方案	工程量/万 m <sup>3</sup>	投资成本	施工难度	整治效果	
初步方案	方案 1	8.5	高	较高(需大规模水下开挖)	显著(但依赖大规模开挖)
	方案 2	5.7	中	高(全部水下开挖)	中等(受限于开挖范围)
	方案 3	3.0	低	中(部分水上开挖)	有限(过水断面扩展不足)
优化方案	近期方案	4.07(陆上 2.94+水下 1.13)	中低	低(分段施工,陆上为主)	显著(横向流速降 18.5%~29.2%)
	远期方案	待定	中高(分期投入)	中(需结合监测动态调整)	更优(卡口宽度扩展至现状 3 倍)

### 7 结语

1) 大藤峡枢纽下泄通道卡口缩窄(21 m 高程线宽度减少约 50%)、地形抬升及小流量下水流集中是横流形成的主因，导致小流量下航道内横向

流速过大，影响船舶安全。

2) 通过优化整治线、切除滩嘴、扩大过水断面等措施，近期方案使横流流速显著降低(降幅达 18.5%~29.2%)，局部水面比降减小 70%~84%，

有效缓解了“卡脖子”问题。数学模型验证表明, 航道流态改善明显, 通航效率提升。

3) 采用分期整治策略, 近期方案工程量为 4.07 万  $m^3$  (陆上 2.94 万  $m^3$  + 水下 1.13 万  $m^3$ ), 兼顾施工便利与成本控制; 远期方案预留扩展空间, 适应复杂水文地形变化。

4) 需持续监测整治效果, 结合水文试验优化远期方案; 同时加强航道动态管理, 确保小流量时段通航安全。研究成果为类似枢纽下游航道治理提供了“近期缓解+远期根治”的实践范例。

#### 参考文献:

- [1] 中交水运规划设计院有限公司. 来宾至桂平 2 000 吨级航道工程初步设计[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2019.  
CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd. Preliminary design of Laibin-Guiping 2, 000-tonnage channel project[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2019.
- [2] 中交水运规划设计院有限公司. 来宾至桂平 2 000 吨级航道工程施工图[R]. 北京: 中交水运规划设计院有限公司, 2020.  
CCCC Water Transportation Consultants Institute Co., Ltd. Construction drawings for Laibin-Guiping 2, 000-tonnage channel project[R]. Beijing: CCCC Water Transportation Consultants Co., Ltd., 2020.
- [3] 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.  
Navigation standard of inland waterway: GB 50139-2014[S]. Beijing: China Planning Press, 2014.
- [4] 航道工程设计规范: JTS 181—2016[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2016.  
Design code for waterway engineering: JTS 181-2016[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2016.
- [5] 王常红, 程小兵, 李旺生. 南盘江燕子石—甲完恩滩段航道治理[J]. 水运工程, 2018(5): 132-137, 144.  
WANG C H, CHENG X B, LI W S. Waterway regulation of Yanzishi-Jiawanen rapids reach on Nanpan River[J]. Port & waterway engineering, 2018(5): 132-137, 144.
- [6] 刘勇, 王涛, 解中柱, 等. 长江上游斗笠子滩航道整治工程试验研究[J]. 水运工程, 2012(10): 47-51.  
LIU Y, WANG T, XIE Z Z, et al. Experimental research on waterway regulation project of Doulizhi shallow in the upper Yangtze River[J]. Port & waterway engineering, 2012(10): 47-51.
- [7] 李育林. 来宾至桂平 2 000 吨级航道工程建设管理存在问题及解决措施探析[J]. 珠江水运, 2023(19): 36-39.  
LI Y L. Problems and solutions in the construction and management of Laibin-Guiping 2, 000-tonnage channel project[J]. Pearl River water transport, 2023(19): 36-39.
- [8] 李艳, 黄军, 刘洋, 等. 长洲五线船闸下引航道通航水流条件试验研究[J]. 水运工程, 2024(10): 104-109.  
LI Y, HUANG J, LIU Y, et al. Experimental research on navigation flow conditions in downstream approach channel of Changzhou fifth-line ship lock [J]. Port & waterway engineering, 2024(10): 104-109.
- [9] 张翼. 山区河道船闸上游引航道内具有侧流汇入的通航水流条件保障措施研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2023.  
ZHANG Y. Study on measures to ensure navigable water flow conditions in the upstream approach channel of mountainous river locks with side flow inflow [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2023.
- [10] 陈玉丹, 官坤明. 长江上游卵石急滩整治方法研究[J]. 中国水运(下半月), 2017, 17(1), 199-201.  
CHEN Y D, GUAN K M. Research on regulation methods for gravel rapids in upper Yangtze River[J]. China water transport(the second half of the month), 2017, 17(1): 199-201.

(本文编辑 王传瑜)