



# 乌江沙陀电站变动回水区航道整治 二维水流数学模型研究

王秀红<sup>1,2</sup>, 曹民雄<sup>1,2</sup>, 马爱兴<sup>1,2</sup>, 蔡国正<sup>1,2</sup>

(1.南京水利科学研究院, 江苏南京210029,

2.水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京210029)

**摘要:** 沙陀枢纽变动回水区通航水流条件受上游思林枢纽日调节与下游沙陀枢纽水库调度的双重影响, 利用两坝间的二维水流数学模型研究了变动回水区段的整治方案, 对方案进行了优化, 结果表明航道整治工程实施后变动回水区滩险能达到IV航道等级标准, 为航道整治方案设计提供了技术参考。

**关键词:** 乌江; 二维数学模型; 航道整治

中图分类号: U 656.1.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2012)11-0156-05

## Fluctuating backwater area waterway regulation of Wujiang Shatuo hydropower station by 2D mathematical model

WANG Xiu-hong<sup>1,2</sup>, CAO Min-xiong<sup>1,2</sup>, MA Ai-xing<sup>1,2</sup>, CAI Guo-zheng<sup>1,2</sup>

(1. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210029, China)

**Abstract:** The fluctuating backwater zone navigation flow conditions of Shatuo hub are affected by both the upstream Silin hub daily regulation and downstream Shatuo reservoir scheduling. Based on the 2D flow mathematical model of the two dams, this paper studies the fluctuating backwater zone regulation scheme and presents a scheme optimization. The results show that after implementation of waterway regulation, the shoal reach channel of the fluctuating backwater zone reaches grade IV standard, which provides technical reference for waterway regulation scheme design.

**Key words:** Wujiang river; 2D mathematical model; waterway regulation

乌江是长江上游主要支流之一, 发源于贵州省威宁县乌蒙山东麓。思林枢纽位于贵州省乌江中游河段的思南县城上游23 km, 沙陀电站位于贵州省沿河县上游约7 km处, 两枢纽相距116 km, 是乌江干流上贵州省境内最后两个梯级(图1)。思林枢纽已经建成, 沙陀枢纽已经开工建设, 沙陀电站建成后, 枢纽间航道条件大为改善, 为IV级航道建设奠定了基础条件, 但其变动回水区河道需进行整治。



图1 乌江思林、沙陀枢纽位置

### 1 河段概况

#### 1.1 水文特征

思林枢纽至沙陀枢纽两枢纽间相距116 km,

收稿日期: 2012-04-15

作者简介: 王秀红(1979—), 女, 硕士, 工程师, 从事港口航道与工程泥沙研究。

思南水文站为研究河段的控制水文站, 其间有石阡河、小河口、印江河等河流汇入。思南水文站多年平均流量为 $844 \text{ m}^3/\text{s}$ , 历史最大洪水流量 $17000 \text{ m}^3/\text{s}$ , 历史最小枯水流量 $117 \text{ m}^3/\text{s}$ 。思林电站建成后, 近年来水位流量关系略有升高。乌江水沙一般相适应, 一次洪峰过程伴随着一次大的输沙过程, 但有时沙峰落后于洪峰。在时间上, 年内输沙率分布不均, 汛期输沙量约占全年输沙量的 $70\% \sim 80\%$ , 其中4—6月的输沙量占全年总沙量的 $20\% \sim 30\%$ 。乌江渡水库蓄水后的1994—2003年共计10 a间思南水文站的泥沙多年平均含沙量为 $0.154 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 历年最大含沙量 $0.27 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

石阡河为乌江中游较大支流之一, 目前上游已建小型电站, 主要为夜间发电, 下泄流量 $21 \text{ m}^3/\text{s}$ , 白天不发电流量 $10 \text{ m}^3/\text{s}$ 。小河口为乌江中游支流之一, 目前上游已建小型电站, 发电下泄流量 $13.2 \text{ m}^3/\text{s}$ , 不发电流量 $7.02 \text{ m}^3/\text{s}$ , 枯水期流量 $5.0 \sim 5.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 。印江河为乌江中游较大支流之一, 年平均流量 $21 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

## 1.2 碍航特性

沙陀枢纽变动回水区从鬼错路滩至三汊河滩长 $23.1 \text{ km}$ , 共有滩险16处(图2)。该河段具有典型的山区河流特性, 峡谷段和宽谷段相间出现, 鬼错路至镇江阁及白虎沱至三汊河为宽谷段, 镇江阁至白虎沱为峡谷段。河床质组成主要为石盘、崩岩、卵石, 也存在以卵石和基岩混合底质为主的河床。受突嘴、石梁、石盘挑流制约, 河道流态复杂, 如剪刀水、滑梁水等, 峡谷河段比降大、水流湍急, 同时伴随巨浪、跌坎等。

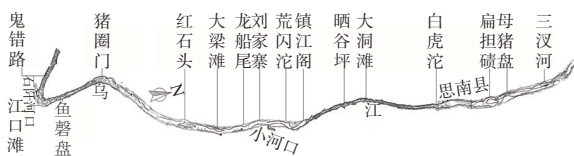


图2 乌江沙陀枢纽变动回水区河势及滩险

天然来流情况下, 河段的成滩期以比降较大为主要特征, 各滩的成滩水位不同。鬼错路、猪圈门、晒谷坪、大洞滩、白虎沱、母猪盘为中洪水滩, 中洪水期比降流速较大; 江口滩、红石头、大梁滩、龙船尾、荒闪沱、镇江阁、扁担

磧、三汊河为枯水滩, 枯水期比降流速较大。

## 2 二维水流数学模型计算分析

### 2.1 二维水流数学模型<sup>[1]</sup>

采用平面二维浅水方程最为水流计算的控制方程, 主要方程如下:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \alpha_0}{\partial x} \right) - fv - \frac{\varepsilon_{xx}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{gu}{c^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \left( \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \alpha_0}{\partial y} \right) + fu - \frac{\varepsilon_{xy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \frac{\varepsilon_{yy}}{\rho} \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{gv}{c^2 h} \sqrt{u^2 + v^2} = 0 \quad (3)$$

式中:  $x, y$ 是水平坐标轴;  $u, v$ 为 $x, y$ 轴向流速;  $t$ 是时间变量;  $g$ 为重力加速度;  $h$ 为水深;  $\alpha_0$ 为河床泥面高程;  $\rho$ 为水流密度;  $f$ 为科氏力参数, 计算区域较小时, 可不考虑科氏力的影响;  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{xy}, \varepsilon_{yx}, \varepsilon_{yy}$ 为紊动黏滞系数;  $c$ 为谢才系数, 计算时利用曼宁(Manning)公式进行转换。

利用有限体积法求解基本方程的数值解, 研究河段岸滩条件复杂, 边滩、礁石等淹没和露滩、露礁频繁, 为了合理模拟该流域的水流形态, 模型闭边界采用干湿判别的动边界。上边界及支流边界采用流量边界, 下边界采用水位边界。

### 2.2 二维数学模型的建立与验证

建模地形为2008年实测1:1000地形图, 计算网格由无结构三角形网格单元构成。针对滩险碍航特点, 重点滩段的断面间距与网格进行局部加密来反映复杂的地形特征, 加密的网格尺寸沿水流方向一般 $3 \text{ m}$ , 垂直于水流方向 $3 \text{ m}$ 。沿程桥梁的桥墩、码头等水工建筑物采用加大所在网格单元的糙率处理, 糙率加大至 $0.06$ 。整个计算网格结点约 $144\ 119$ 个, 单元 $278\ 246$ 个。

对实测水文资料进行了恒定流与非恒定流12把水尺的水位验证及恒定流5个断面流速验证(图3~4), 水位计算与实测水位误差在 $10 \text{ cm}$ , 断面流速分布基本一致, 模型的水流运动达到与原相类似的要求。

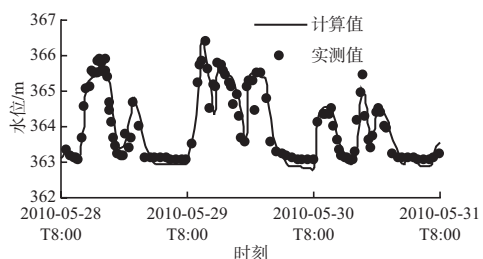


图3 3#模型水位验证

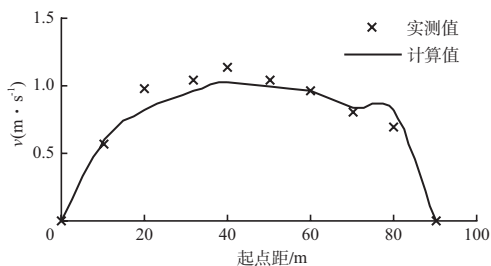


图4 4#模型断面流速验证(枯水)

### 3 航道整治工程计算及效果分析

#### 3.1 航道整治标准

目前航道达到内河V级航道标准,按内河IV级航道标准进行建设;相应航道尺度:1.6 m×30~50 m×330 m,通行500吨级自航机驳,航道通过能力达774.144万t。消滩水力指标为流速控制在3.0 m/s以内,比降控制在5‰。

#### 3.2 计算条件

因河段受电站非恒定流调节影响,计算中考考虑恒定流195 m<sup>3</sup>/s(设计流量),702 m<sup>3</sup>/s(整治流量),844 m<sup>3</sup>/s(多年平均流量),最高通航流量4 420 m<sup>3</sup>/s及日调节与下游水库运行水位的不利组合,支流考虑平均流量,进行工程方案的研究(表1)。

表1 工程河段计算水文条件

水情	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )				沙陀枢纽下边界
	乌江	石阡河	小河口	印江河	
设计流量	195	10	5	21	死水位353.5 m
整治流量	702	20	5	21	防洪限制水位357 m
多年平均流量(思南)	844	20	5	21	正常蓄水位365 m
最高通航流量	4 420	20	5	21	正常蓄水位365 m
日调节	日调节	20	5	21	死水位353.5 m

#### 3.3 整治原则

根据该段的碍航特点,采取疏浚、炸礁工程及丁顺坝等整治建筑物相结合的方式。航槽边礁、乱暗礁、石盘突入江中碍航,拟采取炸礁措施,将产生陡比降、恶劣流态、大流速的碍航石梁、石盘、石嘴、孤石等进行清炸,使航槽平整,流态改善。对于航槽断面较小、流速比降大,船舶上行困难的航段,采用增加过水断面面积,减小流速、比降。有些地方水浅流急,航道等级提高后水深不够,需要开挖,河道放宽的淤沙处,需要疏浚与整治相结合。在以上整治原则的基础上,本文进行了多组整治工程方案的试验研究,经对比分析,最终得到满足设计航道尺度标准的整治工程方案。限于篇幅,本文只介绍推荐方案的具体整治工程布置及其效果分析。

#### 3.4 整治工程方案布置

根据计算分析成果,本文提出了优化方案,优化方案主要针对方案存在的不足,从下游往上

游依次优化,循序渐进地对航槽开挖尺度、坝体等进行调整<sup>[1-3]</sup>。

沙陀枢纽变动回水区航道整治工程包括在鬼错路、江口滩、红石头、大梁滩、龙船尾、刘家寨、荒闪沱、镇江阁等河段共布置坝体共31条,同时配合其滩段的疏浚与炸礁(图5)。鬼错路主要顺应河势,利用现有航槽,拓宽加深航槽,采取炸礁工程措施以保证航道尺度,上游建锁坝2座,控制滩头水位降落,锁坝长度分别为27.4 m和15.5 m。江口滩处石阡河口回流区占据枯水航道较大区域,因此在石阡河口设置潜坝一座,长70 m,坝体高程364.6 m。左、右岸各建顺坝1座,用以封堵弯道,固定岸线,导顺水流。猪圈门河段拓宽加深现有航槽,采取炸礁工程措施以保证航道尺度。红石头整治措施为:疏浚浅区以提高航道尺度;上段建丁(顺)坝群集水归槽,将中、枯水流量基本集中于左汊以利航槽冲刷;江心洲较矮,新建一导流顺坝以控制整治线宽

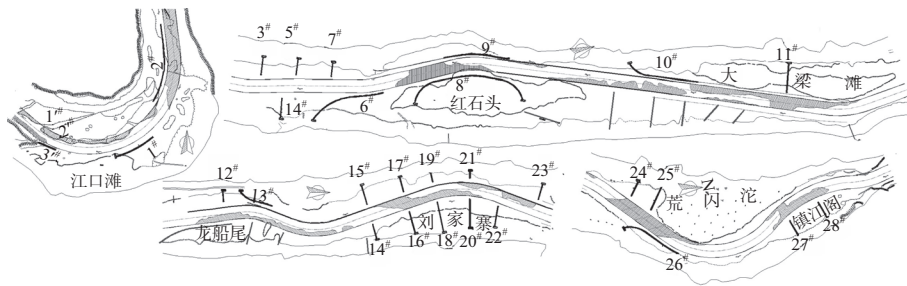


图5 部分滩险航道整治方案

度,并在左汊接长原顺坝以免该滩继续向弯曲型发展;坝体顶宽1.5~2 m,坡比1:1.5~1:2。坝体一般高于设计水位以上0.8~1.2 m。

### 3.5 整治方案效果分析

#### 3.5.1 整治方案对水位的影响

航道整治工程实施一方面考虑整治后航槽水深,一方面考虑下游滩险整治后引起的上游滩头水位的降落。从各级流量条件下滩头水位降落情况来看(表2),流量越大,水位降落值越小。设计流量时引起的水位降落达0.448 m。方案优化过程中,鬼错路滩段2条锁坝有效地控制了滩头水位降落,改善了航槽的水深。

表2 各级流量条件推荐方案引起的滩头水位降落值

流量级/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	工程前/m	推荐方案工程后/m	水位降落/m
195	364.256	363.808	0.448
702	365.915	365.555	0.360
844	366.669	366.445	0.224
4 420	373.080	372.880	0.200

日调节计算统计分析表明:日调节过程出现的最低水位较设计流量时有所升高(图6),全河段航槽水深滩险水深整治后全河段达到了1.6 m的通航水深的要求(图7)。日调节最不利情况下滩段的每小时水位变幅超过1 m的主要出现在

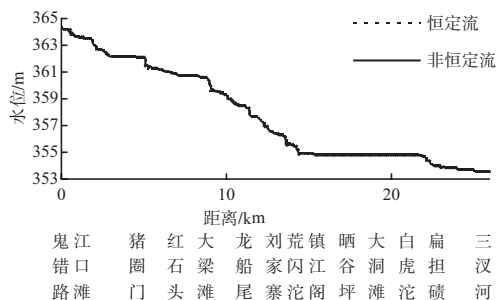


图6 推荐方案沿程最小水位(设计流量)

8:00—11:00, 19:00—20:00以及23:00—0:00局部时段(图8)。

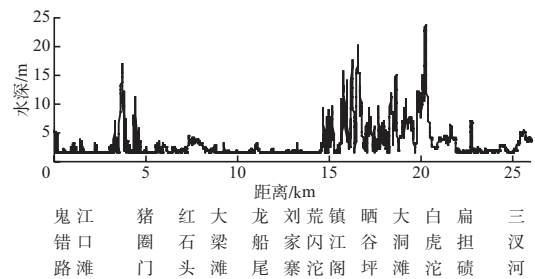


图7 推荐方案沿程最小水深

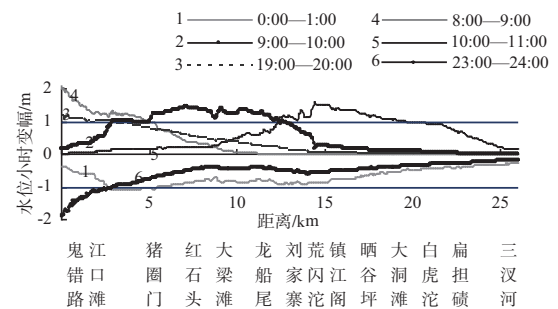


图8 推荐方案日调节水位小时变幅

#### 3.5.2 整治方案对流速的影响

航道整治工程前存在的主要问题为枯水期通航,统计表明:推荐方案实施后,恒定流时低水时航道内纵向流速一般在3.0 m以下,高水时航道内流速增大(表3),中洪水期船舶可在近岸行驶,避开流速较大的河段。红石头滩段附近0.5 m/s以上横

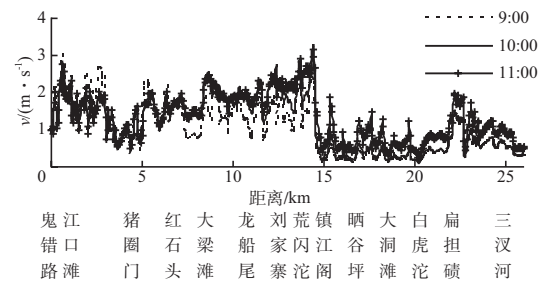


图9 推荐方案局部时段航道中心线沿程流速(日调节)



表3 各级流量条件下滩段最大流速

流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	鬼错路	江口滩	猪圈门	红石头	大梁滩	龙船尾	刘家寨	荒闪沱	镇江阁	晒谷坪	大洞滩	白虎沱	扁担碛	三汊河
195	2.30	2.37	2.03	2.07	1.76	1.86	1.93	2.20	2.51	0.30	0.52	0.50	1.59	0.70
702	3.03	2.28	2.05	2.17	1.93	2.07	2.15	1.70	1.72	0.74	1.14	1.12	0.92	0.67
844	2.14	1.64	1.03	0.64	0.60	0.61	0.56	0.51	0.67	0.49	0.63	0.56	0.34	0.29
4 420	3.75	3.98	2.68	1.81	1.89	1.94	1.93	1.77	2.77	2.15	2.80	2.60	1.56	1.37

向流速得到有效改善。日调节不利情况下局部时段航道中心线平均流速超过3 m/s，主要出现在鬼错路、镇江阁滩段（图9）。

3.5.3 整治方案对河心比降的影响

工程前设计流量时，鬼错路、江口滩、猪圈门、红石头、龙船尾出现5‰以上的比降，推荐方案实施后，各级流量条件下比降较大现象改善明显（图10），日调节情况下局部时段鬼错路滩段比降超过5‰（图11）。

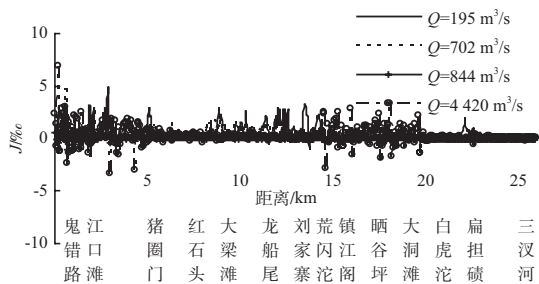


图10 推荐方案沿程河心比降（恒定流）

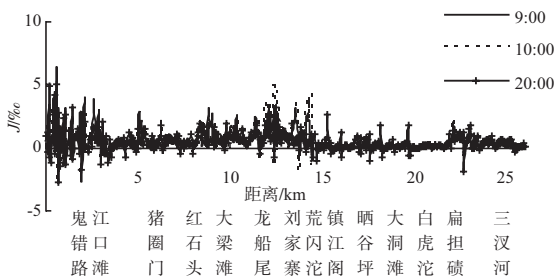


图11 推荐方案局部时段沿程河心比降（日调节）

3.5.4 整治方案对通航的影响

推荐方案实施后，恒定流情况下，低水时，各滩段均满足消滩水力指标要求，最高通航流量时，鬼错路滩段航行困难，需避开流速较大区域，靠岸行驶。

工程实施前日调节不利情况下局部时段鬼错路、江口滩、猪圈门、红石头、龙船尾、荒闪沱等滩段不能满足通航水力指标要求，工程实施后滩段流速及比降过大现象得到明显改善，统计表明仅鬼错路局部时段不满足通航水力指标要求。除鬼错路、镇江阁局部时段流速比降超标外，其余各滩段流速、比降基本满足要求。

4 结语

1) 沙陀枢纽变动回水区采用疏浚与炸礁结合丁顺坝等整治建筑物治理后，航行条件得到较大改善，工程实施后水流较为平顺，解决了流速大、比降大、航道尺度不足、局部横流较大等碍航问题，航道达到IV级航道标准。

2) 山区河流变动回水区滩群的整治较为复杂，下游滩险整治可能引起上游滩段水位降落，造成与上游过船设施不衔接，因此应严格控制滩头水位降落，滩群的整治需采用物理模型或数学模型进行整治措施优化研究，优化的原则是从下游至上游、分类解决主次矛盾，最终达到科学有效的治理效果。

参考文献:

[1] 南京水利科学研究院. 沙陀电站变动回水区航道整治计算与分析[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.  
 [2] 贵州顺达水运设计所. 乌江(乌江渡—龚滩)航运建设工程初步设计[R]. 贵阳: 贵州顺达水运设计所, 2009.  
 [3] 南京水利科学研究院. 乌江思林枢纽下游近坝段航道整治物理模型试验研究[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.

( 本文编辑 武亚庆 )