



# 汉江某航电枢纽汛期导截流工程 数值仿真与实践\*

肖苾辘<sup>1,2</sup>, 罗伟<sup>1,2</sup>, 冯先导<sup>1,2</sup>, 林红星<sup>1,2</sup>

- (1. 中交第二航务工程局有限公司, 长大桥梁建设施工技术交通行业重点实验室,  
交通运输行业交通基础设施智能制造技术研发中心, 湖北武汉 430040;  
2. 中交公路长大桥梁建设工程研究中心有限公司, 北京 100088)

**摘要:** 针对汉江某航电枢纽土石围堰汛期导截流的问题, 采用数值模拟方法对工程方案进行优化, 研究坝体进占过程的水力特性以及截流对岸坡的冲刷影响, 合理确定水下抛石料粒径。结果表明: 1) 通过对比实测数据, 验证了该数值模拟方法的可靠性。2) 成功预测了一期围堰挡水能力, 预测水位精度高达 0.5 m。3) 二期上游围堰采用双向立堵法, 减少了截流对岸坡的冲刷。同时预测的龙口流速及抛石粒径能够满足施工要求, 为施工组织设计提供了科学依据。研究成果已成功运用于该项目实际施工中, 并保证了该工程汛期一次实现成功截流。

**关键词:** 土石围堰; 导截流工程; 数值仿真; 方案优化

中图分类号: U 615

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0204-06

## Numerical simulation and practice of river diversion and closure project of navigation and electricity junction in the Han River during flood season

XIAO Yi-zhou<sup>1,2</sup>, LUO Wei<sup>1,2</sup>, FENG Xian-dao<sup>1,2</sup>, LIN Hong-xing<sup>1,2</sup>

- (1. CCCC Second Harbor Engineering Company Ltd., Key Laboratory of Large-span Bridge Construction Technology, Research and Development Center of Transport Industry of Intelligent Manufacturing Technologies of Transport Infrastructure, Wuhan 430040, China;  
2. CCCC Highway Bridge National Engineering Research Centre Co., Ltd., Beijing 100088, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the river diversion and closure project of soil-rock cofferdam at a navigation and electricity junction in the Han River during flood season, the numerical simulation method is adopted to optimize the scheme, study the hydraulic characteristics of the berm advancing process and the impact of the closure on the bank slope, and reasonably determine the particle size of underwater riprap. The results show that: 1) The reliability of the numerical simulation method is verified by comparing the measured data. 2) The water retaining capacity of the first stage cofferdam is predicted successfully, and the prediction accuracy of the water level is as high as 0.5 m. 3) The bidirectional vertical blocking method is adopted for the second stage upstream cofferdam, which reduces the scouring of bank slope by the closure. At the same time, the predicted flow velocity and the particle size of riprap can meet the construction requirements of the site, which provides a scientific basis for the construction organization design. The above conclusions have been successfully applied to the actual construction of the project and ensured a successful closure of the project during flood season.

**Keywords:** earth and stone cofferdam; river diversion and closure project; numerical simulation; scheme optimization

收稿日期: 2022-03-28

\*基金项目: 中国博士后科学基金第 61 批面上资助项目(2017M612541)

作者简介: 肖苾辘(1991—), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为水工水力学。

由于水利枢纽、航电枢纽工程的特殊性, 导截流技术在工程中扮演着十分重要的角色。该技术不仅关系着整个项目的施工进度, 而且影响着项目成本以及资金利用率。常用的截流方法主要分为戗堤截流法、瞬时截流法、无戗堤截流法等 3 类。导截流通常可以通过规范公式计算、水工模型试验、数值模拟预测以及原型实测等方法进行研究<sup>[1-4]</sup>。王智娟等<sup>[5]</sup>以乌东德水电站为例, 深入探讨深厚覆盖层河床截流问题, 总结出截流时须关注的问题以及应对措施; 于广斌等<sup>[6]</sup>以巴塘水电站为研究对象, 研究单戗单向立堵截流在施工中的应用; 田苏茂等<sup>[7]</sup>以大藤峡水利枢纽为研究对象, 重点研究了截流龙口流速监测技术手段与应用。近年来的导截流技术发展趋势总结为: 1) 立堵逐渐代替平堵; 2) 趋向较高水头截流; 3) 加大抛投强度, 不用或少用大料; 4) 趋向降低设计标准<sup>[8]</sup>。

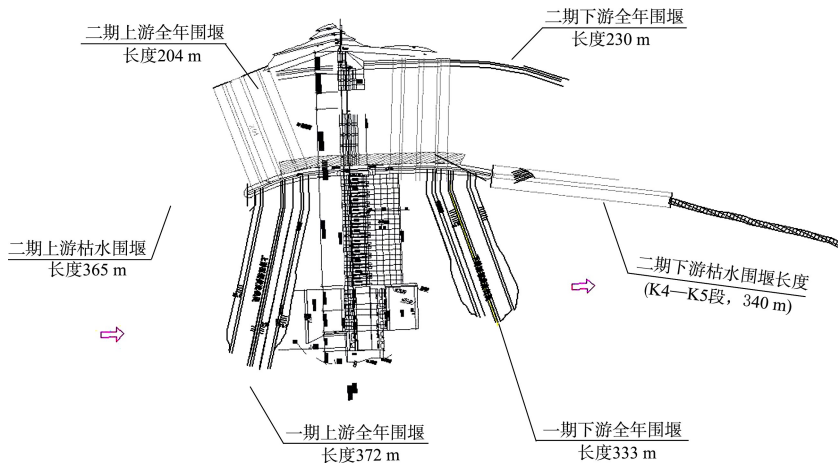
汉江某航电枢纽承担着防洪、航运、发电等重任, 由于工期延误和疫情影响, 导致导截流时机只能在汛期或者停工等至枯水期, 增加了项目的截流难度, 也是国内少有的汛期截流项目。因此, 掌握枢纽水动力条件显得尤为重要。通过数值模拟技术构建二维水动力模型, 模拟工程汛期

导截流过程; 根据分析模拟结果优化导截流方案并指导施工, 最终工程一次截流成功。

## 1 工程概况

枢纽所在河谷呈 U 形, 坝址控制流域面积 60 440 km<sup>2</sup>, 多年平均流量 783 m<sup>3</sup>/s, 年径流量 247 亿 m<sup>3</sup>。水库正常蓄水位 177.23 m, 正常蓄水位以下库容 1.09 亿 m<sup>3</sup>, 水库总库容 2.12 亿 m<sup>3</sup>, 电站装机容量为 180 MW (4×45 MW), 多年平均发电量 580 GW·h, 规划航道等级为 IV 级。枢纽主要由泄水建筑物、电站厂房、通航建筑物、鱼道和两岸挡水坝组成。工程采用分期围堰施工导流方式, 施工分两期进行, 一期利用束窄的原河床导流, 二期利用一期已建好的泄水闸导流。二期全年土石围堰建筑物级别为 4 级。航电枢纽的平面布置及地形见图 1。

导截流通常在枯水期进行, 由于工期延误和疫情影响, 导致项目导截流时机只能在汛期或者停工等至枯水期。在规范进行导截流技术工作操作的基础上, 优化水利水电工程设计方案, 完善各施工环节的不足与缺陷。故开展项目导截流技术与方案的研究, 为在汛期截流成功提供依据和支撑, 从而节省工期。



a) 平面布置

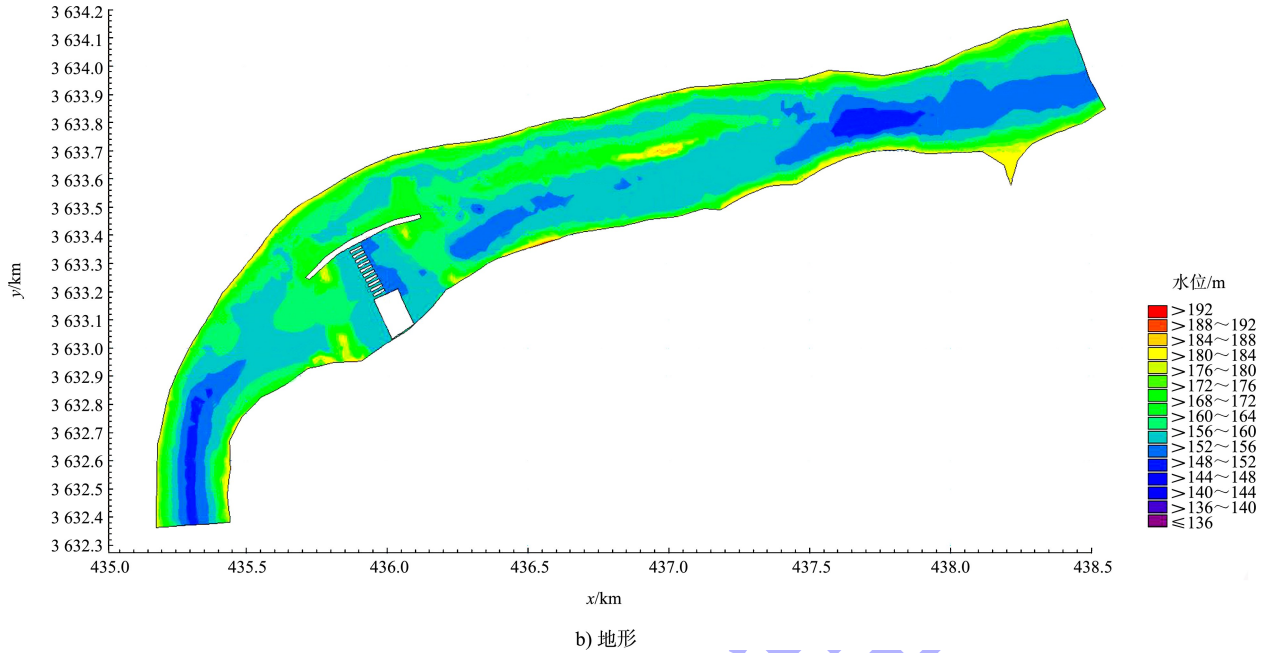


图1 汉江某航电枢纽平面布置及地形

## 2 数学模型

### 2.1 控制方程

采用丹麦水力研究所 (DHI) 研制的 MIKE 21 FM 平面二维水流模型进行计算。二维水动力数值模拟分析基于以下 4 项基本假定：不可压缩性假定、静水压力假定、Boussinesq 假定、Reynolds 值均布假定。水动力模块控制方程应用沿水深积分

的不可压缩的 Navier-Stokes 方程，主要包括二维平面流的连续性方程、运动方程<sup>[9]</sup>。

水流连续性方程：

$$\frac{\partial z}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = s \quad (1)$$

水流运动方程：

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{p^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial y} (pq) + gh \frac{\partial z}{\partial x} + \frac{g}{c^2} \frac{p}{h} \sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} - \Omega q - E \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) = s_{ix} \\ \frac{\partial q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{q^2}{h} \right) + \frac{\partial}{\partial x} (pq) + gh \frac{\partial z}{\partial y} + \frac{g}{c^2} \frac{q}{h} \sqrt{\frac{p^2}{h^2} + \frac{q^2}{h^2}} - \Omega p - E \left( \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 q}{\partial y^2} \right) = s_{iy} \end{cases} \quad (2)$$

式中： $t$  为时间； $z$  为水位； $p$ 、 $q$  为  $x$ 、 $y$  方向单宽流量； $h$  为水深； $s$  为源汇项； $s_{ix}$ 、 $s_{iy}$  为源汇项在  $x$ 、 $y$  方向的分量； $c$  为谢才阻力系数； $\Omega$  为科氏力； $E$  为涡黏扩散系数。

### 2.2 计算模型及边界条件

MIKE 21 FM 模型采用有限体积法作为数值解，对于空间和时间离散，均采用高阶插值格式。

模型糙率系数的选取需经过模型的校验确定，工程河段主槽糙率系数取值范围为 0.020~0.025，

滩地验证取值范围为 0.030~0.040。

涡黏系数根据 Smagorinsky 公式确定：

$$E = C_s^2 \Delta^2 \left[ \left( \frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 \right] \quad (3)$$

式中： $u$ 、 $v$  为  $x$ 、 $y$  方向垂线平均流速； $\Delta$  为网格间距； $C_s$  为计算参数， $0.25 < C_s < 1.00$ 。

为保证满足计算稳定收敛条件，本次模型计算中最大时间步长取 3 s。

计算区域中存在随潮位涨落而变化的动边界，

为保证模型计算的连续性, 采用干湿处理技术。当计算节点水深小于 0.001 m 时, 该计算节点不参加计算; 当水深大于 0.01 m 时, 该计算节点重新参加计算。

模型范围为航电枢纽工程及其上下游部分河道, 主河道长度约 3.9 km, 计算范围见图 1。整个计算区域采用三角形网格剖分, 在泄水闸、围堰位置进行局部加密。

### 2.3 计算工况

4 类计算工况见表 1。1) 率定与验证。根据工程现场实测水文数据和地形数据, 对其中 1 组代表性数据进行率定, 调整计算模型参数; 然后将该组计算模型参数代入另一组代表性数据进行验证。2) 一期围堰挡水能力计算。计算一期围堰能抵挡多少流量, 保证一期围堰不漫顶, 保护一期工程建筑物。3) 单向立堵法。在一期围堰具备过流能力条件下, 对二期围堰不同龙口宽度下的流场进行计算, 为合龙方案提供参数。4) 双向立堵法。对截流方案进行优化, 提出了二期上游围堰采用双向立堵法进行截流。

表 1 计算工况

工况	流量/( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	下游水位/m
率定与验证	1 130	161.88
	825	161.66
一期围堰挡水能力	试算求得	参考晴雨表并插值
	1 100	161.86
单向立堵法	1 500	162.30
	500	161.20
双向立堵法	895	161.63
	1 100	161.86

## 3 结果分析

### 3.1 率定与验证

依据航电枢纽 2020 年 3 月的晴雨表和地形进行数值模拟计算, 其目的是率定与验算模型参数、调整参数至合理范围。现阶段(一期上、下游围堰均已拆除至高程 167 m, 二期上、下游围堰已进占 66、72 m), 采用 2020-03-17—2020-03-19 实测数据分别进行率定与验证, 结果见表 2, 表中结果吻合度

较好、精度控制在 0.5 m 左右。

表 2 率定与验证计算结果

计算工况	实测流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	实测下游 水位/m	实测上游 水位/m	数模计算上 游水位/m
率定模型 (2020-03-17 实测)	1 130	161.88	166.23	166.82
验证模型 (2020-03-19 实测)	825	161.66	165.57	166.09

### 3.2 一期围堰挡水能力

一期围堰挡水能力的计算基于一期上、下游围堰均已拆除至高程 167 m, 二期上、下游围堰已进占 66、72 m。目的是保证一期围堰不漫顶, 保护一期工程建筑物。通过对模型进行不断试算, 得到上游水位最接近 167 m 的工况对应的流量即为现阶段挡水能力。表 3 计算结果表明: 现阶段保证不漫顶的最大流量为 1 200  $\text{m}^3/\text{s}$ 。后续在春汛实测数据证明, 该挡水能力计算值十分准确, 成功地规避了施工风险。

表 3 现阶段挡水能力计算方案及结果

计算工况	实测流量/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ )	实测下游 水位/m	实测上游 水位/m	数模计算 上游水位/m
1	1 250	162.03	166.56(插值)	167.09
2	1 200	161.97	166.47(插值)	166.99
3	1 150	161.92	166.38(插值)	166.88

### 3.3 单向立堵法

在一期围堰具备过流的条件下, 对二期围堰不同龙口宽度下的流场进行计算, 为合龙方案提供参数。一期围堰拆除至高程 163 m, 上、下游底宽为 116 和 125 m, 呈台阶式倒梯形断面, 破口断面按照设计图完成(见图 2)。二期围堰由右向左岸进占, 戗堤顶部高程 167 m; 二期围堰龙口宽度 60 m 时, 上、下游围堰预进占长度分别为 101、140 m; 龙口宽度 40 m 时, 上、下游围堰预进占长度分别为 121、160 m(图 3); 龙口宽度 30 m 时, 上、下游围堰预进占长度分别为 131、170 m; 龙口宽度 20 m 时, 上、下游围堰预进占长度分别为 141、180 m。计算方案见表 4。

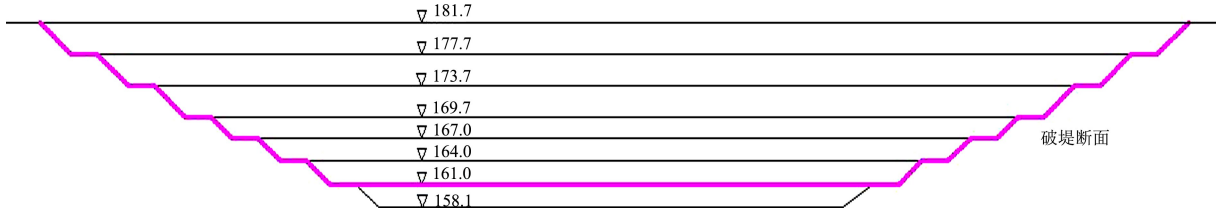
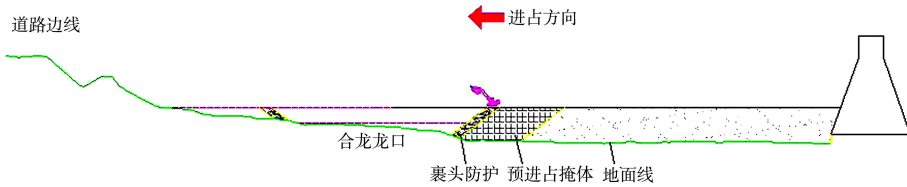


图2 一期围堰拆至高程 163 m 的一期上游围堰破堤示意 (单位: m)



注: 右进占 121、160 m, 龙口宽度为 40 m。

图3 二期单向立堵截流示意

表4 一期拆至高程 163 m、二期围堰截流工况计算方案

龙口宽度/m	流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	下游水位/m
60	1 100	161.86
40		
30		
20		
60	1 500	162.30
40		
30		
20		

不同龙口宽度下的计算结果见表5, 抛石粒径计算依据 DLT 5741—2016《水电水利工程截流施工技术规范》<sup>[10]</sup>。计算结果表明: 流量为 1 100 m<sup>3</sup>/s, 一期围堰拆至 163 m 均不漫顶, 所需抛石粒径增大至 40、90 cm, 龙口宽度为 40 m 时龙口流速较大、平均流速为 6.51 m/s、所需抛石粒径为 90 cm; 流量为 1 500 m<sup>3</sup>/s, 一期围堰拆至 163 m (除龙口宽度 60 m) 出现漫顶, 所需抛石粒径为 75 cm(龙口宽度 60 m)。

表5 不同流量不同龙口宽度下的计算结果

流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	龙口宽度/m	上游水位/m	上下游水头差/m	二期过流流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	平均流速/(m·s <sup>-1</sup> )		抛石粒径/cm
					上游龙口	下游龙口	
1 100	60	166.35	4.04	264	4.24	4.03	40
	40	166.50	4.12	227	2.85	6.51	90
	30	166.71	4.36	109	3.12	4.28	40
	20	166.84	4.45	49	2.00	4.18	40
1 500	60	166.94	4.04	398	5.94	4.65	75
	40	167.10(漫顶)	4.18	316	2.16	6.12	-
	30	167.35(漫顶)	4.40	186	2.83	5.03	-
	20	167.51(漫顶)	4.53	102	1.17	2.43	-

由图4结果可得, 龙口最大流速所在位置表示上、下游左岸、戽堤堤脚都要注意防护, 尤其是下游左岸。一期水流经过泄水闸后形成射流,

导致下游围堰破口区域流速较大, 需要注意防护(模型里未考虑后期建成的消力池等消能工, 若有消力池, 流速会减小)。

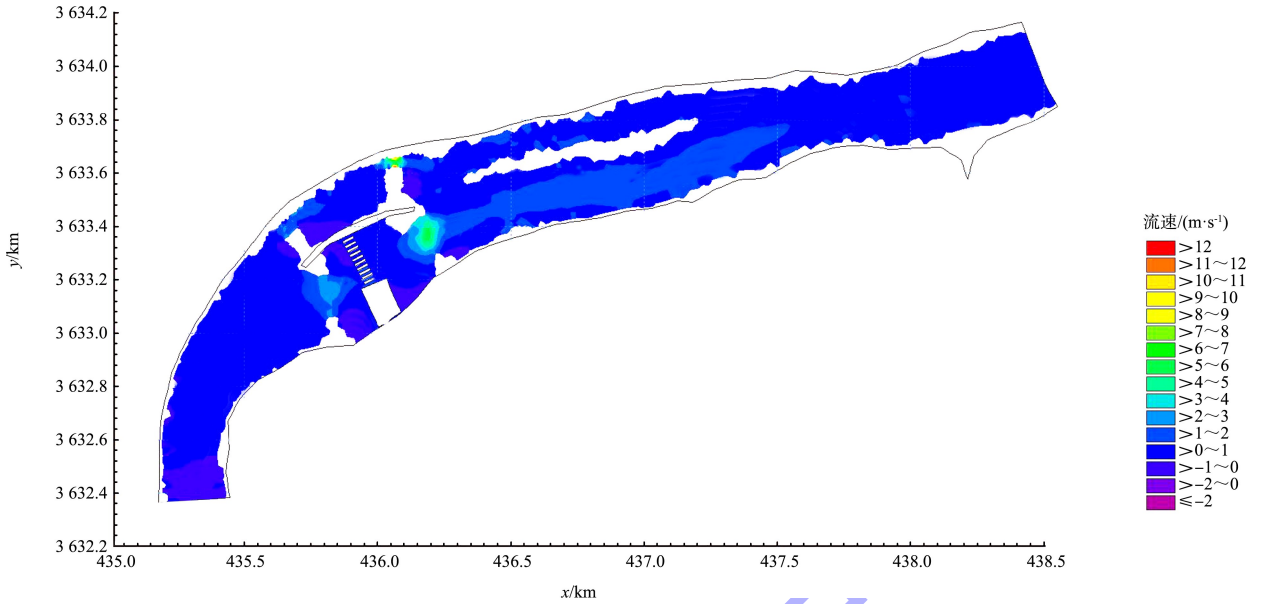


图 4 流量 1 100 m<sup>3</sup>/s、龙口宽度 40 m 时流速分布

### 3.4 双向立堵法

考虑到单向立堵法截流时水流对岸坡的冲刷, 对截流方案进行优化, 提出了二期上游围堰采用双向立堵法进行截流。首先, 一期围堰的上游围堰底高为 163 m、底宽 120 m, 下游围堰底高 161 m、底宽 110 m。然后, 二期围堰的上游围堰采用双向立堵, 截流戗堤顶高 170 m; 龙口宽度 68.2 m, 左岸进占 70 m, 右侧进占 66 m; 龙口宽度 53.2 m, 左岸进占 70 m, 右侧进占 81 m; 龙口宽度 40 m, 左岸进占 70 m, 右侧进占 94.2 m; 龙口宽度 30 m, 左岸进占 73.4 m, 右侧进占 100.8 m; 龙口宽度 20 m, 左岸进占 76.8 m, 右侧进占 107.4 m。计算方案见表 6, 计算结果见表 7。计算结果表明: 1) 二期上游围堰双向立堵法能够很好地缓解截流过程中对二期下游岸坡的冲刷; 2) 流量在 1 100 m<sup>3</sup>/s 下, 龙口宽度在 30~40 m 的流速较大, 平均流速在 2.50~4.36 m/s, 对应抛石粒径为 10~40 cm。最终, 工程采用了双向立堵法, 能够减少截流对岸坡的影响。

表 6 二期围堰上游双向立堵截流计算方案

流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	下游水位/m
500	161.20
895	161.63
1 100	161.86

表 7 二期围堰上游双向立堵截流计算结果

流量/ (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	龙口宽 度/m	Q <sub>二期</sub> / (m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	上游水 位/m	下游水 位/m	上下游 落差/m	龙口平 均流速/ (m·s <sup>-1</sup> )	平均流 速抛石 粒径/cm
500	40.0	106	164.98	161.34	3.64	3.72	30
	30.0	68	165.10	161.35	3.75	2.50	15
	20.0	29	165.22	161.35	3.87	2.56	15
895	68.2	314	165.52	161.96	3.56	3.96	35
	53.2	253	165.68	161.97	3.71	4.25	40
	40.0	185	165.83	161.96	3.87	4.24	40
	30.0	127	165.95	161.97	3.98	3.12	25
	20.0	53	166.06	161.97	4.09	2.56	15
1 100	40.0	218	166.12	162.29	3.83	4.36	40
	30.0	148	166.25	162.29	3.96	3.26	25
	20.0	64	166.39	162.29	4.01	1.84	10

### 4 结论

1) 通过对计算模型的率定与验证, 确定了该计算模型的可靠性, 水位预测精度控制在 0.5 m 左右。

2) 一期围堰挡水能力的预测成果成功保证了一期围堰不漫顶、保护一期工程和人员机械的安全。

3) 通过对单向立堵法的模拟计算, 发现该方法会对二期下游岸坡产生较大的冲刷、影响岸坡稳定, 提出了二期施工采用上游围堰双向立堵法的优化方案。