

· 生态环保 ·



龙溪口航电枢纽工程鱼道进口布置论证与优化^{*}

欧肇松, 陈水兵, 纪 强, 周有宝

(四川岷江港航电开发有限责任公司, 四川 乐山 614000)

摘要: 为确定龙溪口航电枢纽左岸仿生态鱼道的进鱼口布置方案, 结合枢纽的运行工况和现有地形条件, 发现较多工况下鱼道进口附近水流条件不满足鱼类上溯要求, 需采取一定的工程优化措施。针对龙溪口枢纽的特点, 选取典型工况对进鱼口及枢纽下游的水流条件进行研究。根据二维数值仿真模型的研究成果, 拟采用拆除电站与泄水闸之间部分纵向围堰、电站尾水坎下游开挖疏浚以及左岸生境重构等方式, 优化鱼道进口水流条件。对比分析不同进鱼口布置方案的优劣, 推荐采用生境重构结合开挖疏浚的综合措施, 优化龙溪口鱼道进口及下游流场, 两者均满足龙溪口鱼道进口的流速要求。相关成果可为类似进口水流条件的数值模拟及进鱼口布置提供技术参考。

关键词: 龙溪口航电枢纽; 进鱼口; 数值仿真模型; 设计流速

中图分类号: U64

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)10-0052-09

Fishway import arrangement demonstration and optimization of Longxikou Navigation-power Junction project

OU Zhaosong, CHEN Shuibing, JI Qiang, ZHOU Youbao

(Sichuan Minjiang Port & Shipping & Electricity Power Development Co., Ltd., Leshan 614000, China)

Abstract: To determine the layout of the fish inlet of the imitation ecological fishway constructed on the left bank of the Longxikou Navigation-power Junction, this paper combines the operating conditions of the hub and the existing topographic conditions, and analyzes that the water flow conditions near the fishway inlet do not meet the fish upstream requirements under many operating conditions, and certain engineering optimization measures need to be taken. For the characteristics of the Longxikou hub, typical operating conditions are selected to study the water flow conditions at the fish inlet and downstream of the hub. Based on the research findings of a two-dimensional numerical simulation model, it is planned to optimize the water flow conditions at the fishway entrance through measures such as partially removing longitudinal weirs between the power station and spillway, excavating and dredging downstream of the tailwater slope of the power station, and reconstructing habitats on the left bank. The advantages and disadvantages of different fish inlet layout options are compared and analyzed, and it is recommended to optimize the inlet and downstream flow field of the fish passage at Longxikou estuary by using a combination of habitat reconstruction and dredging, both of which can meet the flow velocity requirements of the fish passage inlet at Longxikou estuary. The results can provide technical reference for numerical simulation and fishway inlet arrangement for other similar inlet flow conditions.

Keywords: Longxikou Navigation-power Junction; fish inlet; numerical simulation model; design flow rate

收稿日期: 2023-06-07

***基金项目:** 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目 (Y120009)

作者简介: 欧肇松 (1973—), 男, 高级工程师, 从事交通工程及水利水电工程建设管理。

近年来随着经济的飞速发展, 国内水利基础设施的建设日益受到重视。为解决岷江流域航运的问题, 加大对水资源的综合利用, 龙溪口航电枢纽工程应运而生。但工程的建设势必造成河流生态的受损, 阻断上下游的生态循环与交流。因此在水利建设中必须重视与维护河流连续性与生物的种群交流。鱼道是一种确保鱼类安全、及时、有效地通过障碍物所必需的要素, 对维护鱼类上下游基因交流具有重要意义。

一般鱼道的尺寸宽度较小, 相对于河流来说过窄, 因此鱼道进鱼口的布置尤为重要, 依照水利水电工程鱼道设计导则^[1]与水工设计手册^[2]进行设计。目前国内外对鱼道进鱼口的研究已开展过大量的实验, 如 Clay^[3]通过研究对鱼道进鱼口的位置提出建议, 指出可以通过溢洪道中的水流进行诱鱼; 汤荆燕等^[4]通过模型试验研究鱼道进口不同流态的诱鱼效果, 发现主河道流速大小影响洄游路径的长度; 郑铁刚等^[5]基于生态学与水力学理论和数值模拟方法, 通过流场分布、过鱼对象的游泳能力和生活习性, 划分了适宜布置鱼道进口的河道区域; 杜浩等^[6]通过研究表明不同规格的鱼对流速和水深的选择存在差异, 鱼类密度对水深的选择性明显; 李中华等^[7]对岷江犍为航电枢纽鱼道工程进、出口水流条件进行了二维数值仿真模型研究, 由于岷江龙溪口与犍为航电枢纽同为岷江的上下梯级, 因此两座枢纽之间过鱼对象基本一致, 因此过鱼对象的游泳能力亦可参考犍为鱼道鱼类游泳能力测试结果。犍为航电枢纽鱼道推荐设计流速为 1.1 m/s, 过鱼设施进口诱鱼流速控制在 0.3 ~ 0.8 m/s。

1 工程概况

龙溪口航电枢纽工程闸址位于岷江河段, 下游 8 km 即为长江上游珍稀特有国家级自然保护区。龙溪口航电枢纽的建设和运行将改变工程河段河道的连通性, 为了减缓水电工程对水生生态的不利影响, 建设过鱼设施。其主要目的是保证

多目标鱼类顺利发现龙溪口左岸进鱼口并顺利上溯, 保障坝上坝下鱼类群体之间的基因交流及保留鱼类洄游通道。综合考虑工程鱼类的过鱼需求、过鱼价值, 结合鱼类资源量现状^[8], 确定主要的过鱼对象有达氏鲟、胭脂鱼、草鱼、鲢、长薄鳅、圆筒吻鲟、长鳍吻鲟、吻鲟等。主要过鱼季节为 4—9 月, 龙溪口鱼道内部设计流速建议为 1.1 m/s。

通过建立进鱼口附近及枢纽下游二维数学模型^[9], 计算进鱼口及河道下游流场, 分析其流场结构, 研究进鱼口水流条件的优化工程措施, 对不利的水流条件提出经济合理的改善措施, 以期得到满足进鱼口水流条件的优化方案。旨在为类似鱼道进鱼口的布置提供参考。

2 水力学模型建立与验证

2.1 模型的建立

采用 SMS-RMA2 水力学模型对龙溪口进鱼口及下游河段水流流场结构进行建模分析。

2.1.1 基本方程

连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial(uH)}{\partial x} + \frac{\partial(vH)}{\partial y} = q \quad (1)$$

沿 X 方向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(uH)}{\partial t} + \frac{\partial(uuH)}{\partial x} + \frac{\partial(uvH)}{\partial y} = & -gH \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t H \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t H \frac{\partial u}{\partial y} \right) - g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2} + fvH \end{aligned} \quad (2)$$

沿 Y 方向动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(vH)}{\partial t} + \frac{\partial(uvH)}{\partial x} + \frac{\partial(vvH)}{\partial y} = & -gH \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(v_t H \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \\ & \frac{\partial}{\partial y} \left(v_t H \frac{\partial v}{\partial y} \right) - g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{c^2} - fuH \end{aligned} \quad (3)$$

式中: H 、 Z 分别为水深和水位; u 、 v 分别为 x 、 y 向的流速; ρ 为水体密度; v_t 为紊动黏性系数; c 为谢才系数, $c = \frac{1}{n} R^{1/6}$; R 为水力半径; n 为床糙率; f 为柯氏力系数, $f = 2\omega \sin \varphi$; ω 为地球自

转角速度； φ 为计算水域所在地理纬度。

2.1.2 定解条件

方程的定解条件包括初始条件和边界条件：

初始条件：

$$\begin{cases} Z(x,y,0)=Z_0(x,y) \\ u(x,y,0)=u_0(x,y) \\ v(x,y,0)=v_0(x,y) \end{cases} \quad (4)$$

边界条件：将枢纽不同电站运行工况的下泄水流作为流量边界，河道断面边界作为水位边界条件；固定边界处设置干、湿节点并允许干湿交替，水动力计算采用法向通量为零的边界条件。

2.1.3 计算范围及网格划分

针对龙溪口枢纽的特点，建立枢纽下游及进鱼口数值仿真模型计算区域及网格划分见图 1、2。

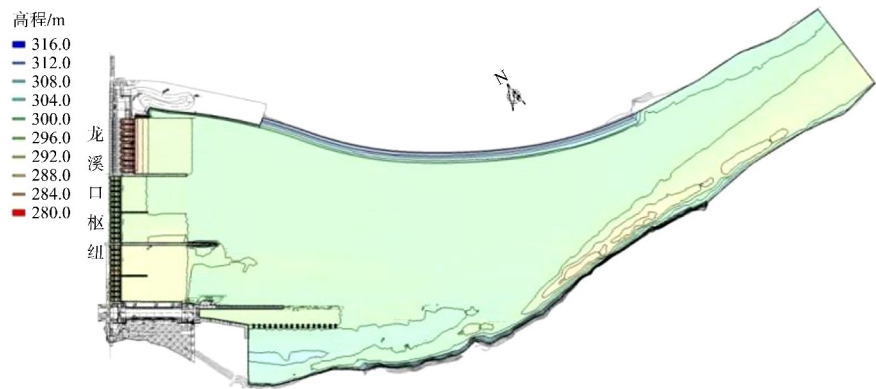


图 1 龙溪口枢纽下游高程

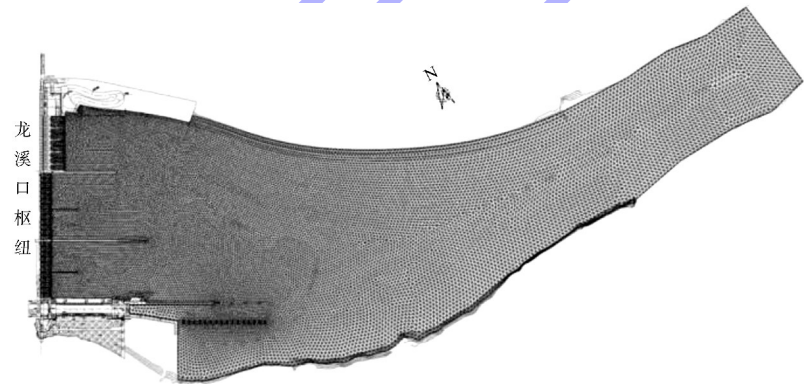


图 2 龙溪口枢纽下游数值模型网格划分

2.2 数学模型验证

选取有物理模型资料，且同属于弯曲河道上

的某枢纽来验证数学模型的河段，模型范围见图 3。

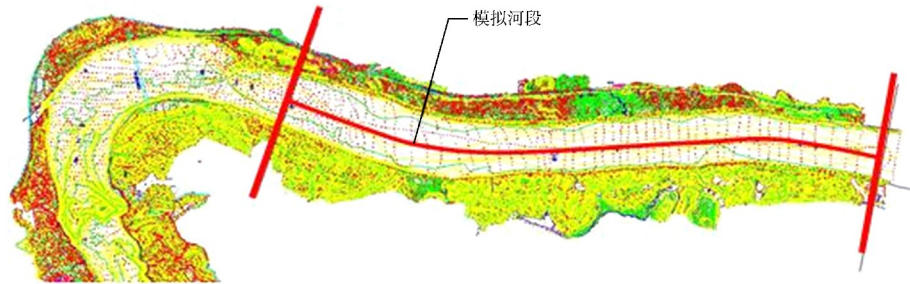


图 3 验证模型

利用建立的二维数值仿真模型, 在航电枢纽 $Q=1.41$ 万 m^3/s ($P=10\%$, 10 a 一遇洪水流量) 和 $Q=1.18$ 万 m^3/s ($P=20\%$, 5 a 一遇洪水流量) 两种工况下, 对枢纽附近的流场进行验证。数学模型和物理模型计算所得验证断面速度分布见图 4

和表 1。由计算结果可知, 二者流速分布基本一致, 说明数学模型网格剖分合理, 参数选择正确, 控制方程的离散方法可行, 计算程序可靠, 数值计算结果基本反映了原型水流的运动情况。

表 1 断面流速

流量/ (万 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	距基线 距离/m	中心位置流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		右侧流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)		左侧流速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	
		物理模型	数学模型	物理模型	数学模型	物理模型	数学模型
1.41	0	0.11	0.13	0.19	0.34	0.10	0.07
	50	0.48	0.44	0.95	0.95	0.21	0.24
	100	0.65	0.73	1.29	1.22	0.40	0.45
	150	0.96	0.98	1.38	1.41	0.60	0.67
	200	1.35	1.20	1.50	1.54	1.00	0.95
	250	1.43	1.36	1.54	1.65	1.14	1.03
	300	1.53	1.49	1.65	1.73	1.24	1.18
	350	1.56	1.54	1.91	1.82	1.46	1.37
	400	1.66	1.60	1.89	1.84	1.45	1.38
	450	1.67	1.68	1.83	1.87	1.56	1.52
1.18	0	0.15	0.14	0.39	0.35	0.10	0.09
	50	0.32	0.44	1.00	0.86	0.22	0.27
	100	0.61	0.69	1.41	1.35	0.41	0.47
	150	1.00	0.89	1.58	1.47	0.75	0.66
	200	1.20	1.05	1.55	1.50	1.00	0.87
	250	1.31	1.23	1.60	1.57	1.20	1.05
	300	1.54	1.46	1.67	1.63	1.37	1.26
	350	1.59	1.51	1.63	1.64	1.45	1.34
	400	1.58	1.55	1.66	1.67	1.40	1.30
	450	1.55	1.57	1.72	1.70	1.36	1.36

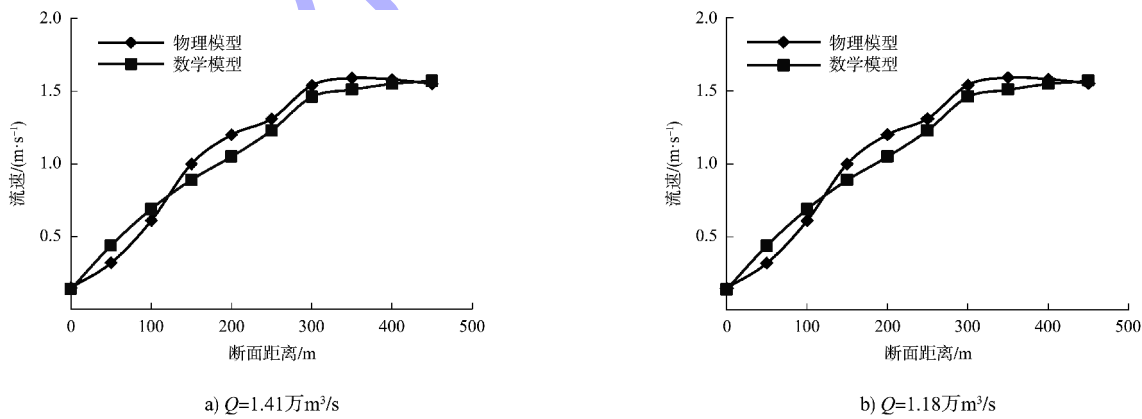


图 4 计算区域中心流速对比

3 进鱼口水流条件分析与优化

3.1 初始地形水流条件的研究工况

由地形及鱼道运行资料可知, 龙溪口航电枢

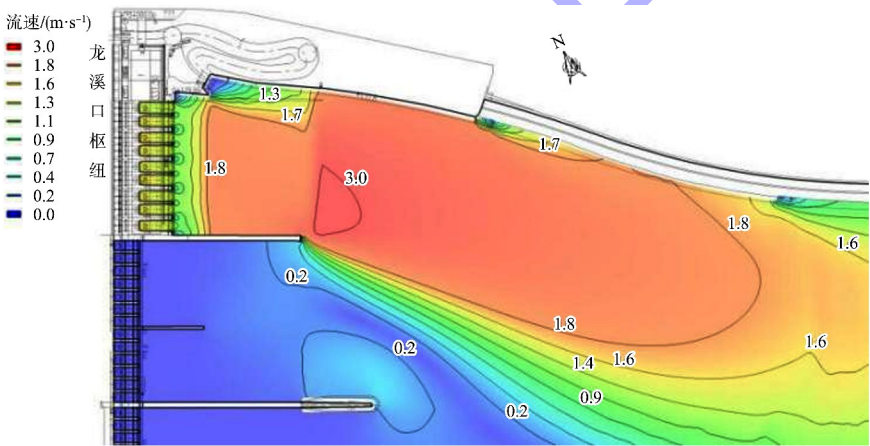
纽鱼道进口水流条件主要与其附近的流速场有关。根据工程的生态环保要求和工程运行调度状况, 选取表 2 所示的研究工况。

表 2 进鱼口水流条件研究工况

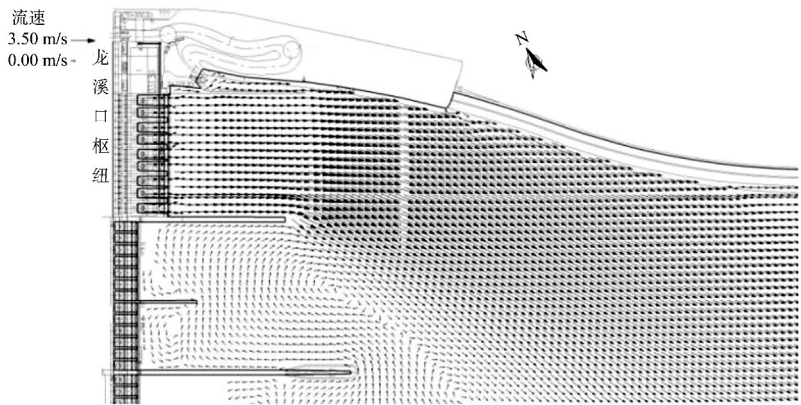
工况	下泄流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	发电机组	下游 水位/m	备注
1	900.00	9 号机组满发, 8 号 机组开启 69%	301.7	过鱼季节 最小流量
2	900.00	8 号机组满发, 9 号 机组开启 69%	301.7	过鱼季节 最小流量
3	900.00	1 号机组满发, 2 号 机组开启 69%	301.7	过鱼季节 最小流量
4	900.00	2 号机组满发, 1 号 机组开启 69%	301.7	过鱼季节 最小流量
5	1 598.80	1、5、9 号机组发电	302.7	3 台机对 称发电
6	1 598.80	7、8、9 号机组发电	302.7	3 台机对 称发电
7	2 131.70	1、2、8、9 号机组 发电	303.2	4 台机对 称发电
8	2 131.70	6、7、8、9 号机组 发电	303.2	4 台机对 称发电
9	2 664.65	1、2、5、8、9 号机组 发电	303.5	5 台机对 称发电
10	3 730.51	2、3、4、5、6、7、8 号 机组发电	304.1	7 台机对 称发电
11	4 796.28	9 台机满发	304.8	机组满发

3.2 初始地形水流条件计算与分析

基于各工况分析进鱼口及枢纽下游的水流条件可知：前 6 个工况中只有工况 3 与 4 进口处流速满足过鱼要求。工况 7~9 鱼道进口附近流速满足要求，但距坝纵轴线 280 m 范围外，进口下游靠岸侧流速不满足鱼类上溯要求。在工况 10 与 11 下，距坝纵轴线 280 m 范围外，进口下游靠岸侧流速均达到 2.0 m/s 以上，大于鱼道设计流速。工况 11 鱼道进口附近及其下游流场结果见图 5。综上可知，在枢纽泄流量为 1 598.80 m^3/s 及以下时，1) 开启左侧机组时，鱼道下游存在贯通性低流速区，适于鱼类上溯洄游；2) 仅开启右侧机组时，因电站泄水距离鱼道进口较远，进口处流速小于 0.2 m/s 的鱼类感应流速，不利于鱼类顺利找到进口。因此较多工况下水流条件不满足鱼类上溯要求，需采取一定的工程优化措施。



a) 流速等值线



b) 流速矢量

图 5 工况 11 鱼道进口及枢纽下游流场

3.3 疏浚和生境重构条件下的水流条件分析与优化

初期采取拆除电站与泄水闸纵向围堰, 疏浚开挖的方式拓宽过流断面、降低流速, 从而优化进鱼口水流条件。但若以疏浚开挖为主要手段改善进鱼口水流条件, 需要开挖的范围和开挖量较大, 可能影响枢纽的整体结构和安全运行, 因此提出结合生境重构的工程措施, 并进行论证。选取工况 11 作为典型工况进行水流条件计算, 推荐 3 种可行的优化方案:

为了降低对枢纽整体结构的影响, 决定拆除电站纵向围堰 45 m 至坝体下游坝纵 0+235.00 m

位置, 在此基础上提出优化方案 1, 即通过生境重构和少量开挖的方式进行优化。具体措施为在电站下游靠岸侧设置宽 30 m、高程 303.30 m 的生境重构平台, 供鱼类上溯, 长度至下游新民码头, 以减小靠岸侧流速。为改善电站下游码头处的水流条件, 将平台与码头的连接处进行修圆处理。对电站下游进行开挖, 开挖区域呈两块平行四边形, 中心线与坝纵轴线夹角分别为 25° 、 5° , 长度方向至坝纵 0+920.00 m, 开挖高程为 296.00 m。优化工程措施见图 6。

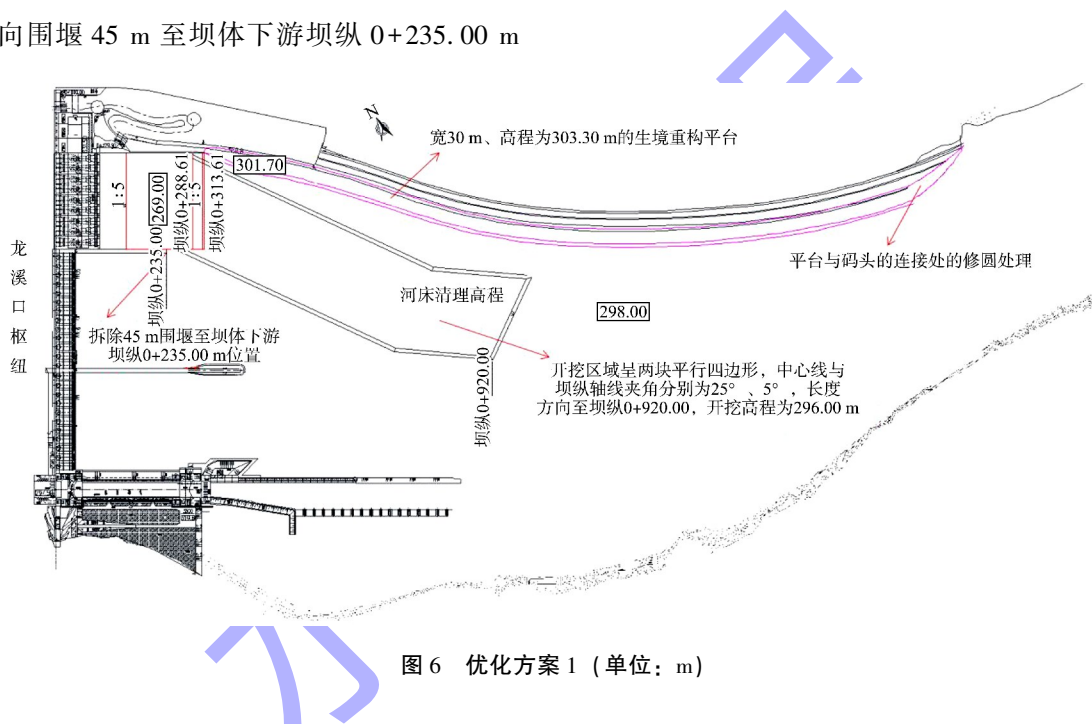


图 6 优化方案 1 (单位: m)

采取优化方案 1 后, 下游靠岸侧在紧靠电站的位置流速较大, 且在平台处初始位置存在宽度不足和地形突变的问题。但在坝下游坝纵轴 0+460.00 m 及以下的区域, 下游靠岸侧流速均在 1.1 m/s 以下, 且电站下游码头处流速较为平顺, 低于鱼道设计流速 1.1 m/s, 下游靠岸侧存在贯通性低流速区供鱼类上溯。

为改善方案 1 中平台初始位置对电站下泄水流的阻挡作用, 提出优化方案 2。即在方案 1 的基础上, 将平台向上游延伸 50 m, 并对平台初始端与电站下游连接处的体形采取了平滑、修圆

等优化措施, 见图 7。在工况 11 下电站下游在平台处的流态平顺, 最大流速为 1.2 m/s, 在电站尾水坎下游位置, 基本满足鱼类上溯要求。在坝纵轴 0+460.00 m 及以下的区域, 下游靠岸侧流速均在 1.1 m/s 以下, 且电站下游码头处流速也较为平顺, 低于鱼道设计流速 1.1 m/s, 水流条件满足过鱼要求, 此时的流场分布情况见图 8。此方案下, 当枢纽泄流在 $4\,796.3\text{ m}^3/\text{s}$ 流量及以下时, 电站进口及下游水流条件基本满足过鱼要求, 靠岸侧可形成不大于 1.1 m/s 的流速带供鱼类上溯。

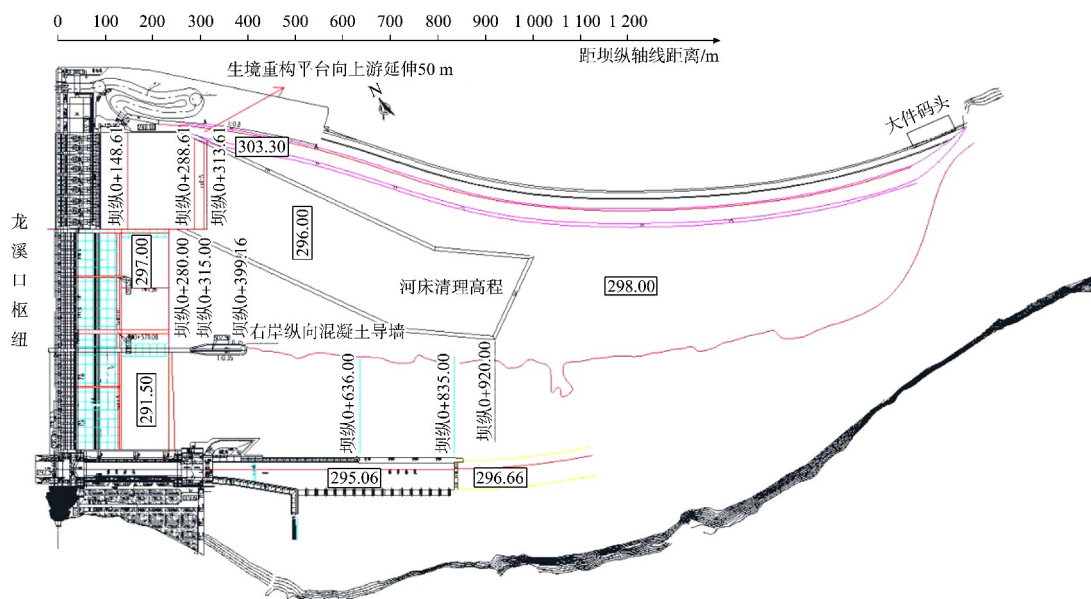
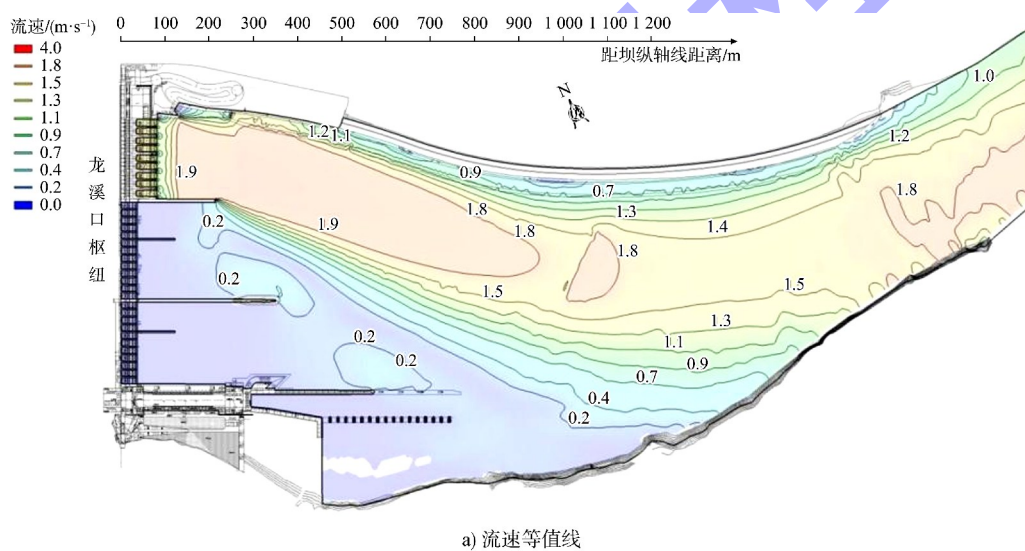
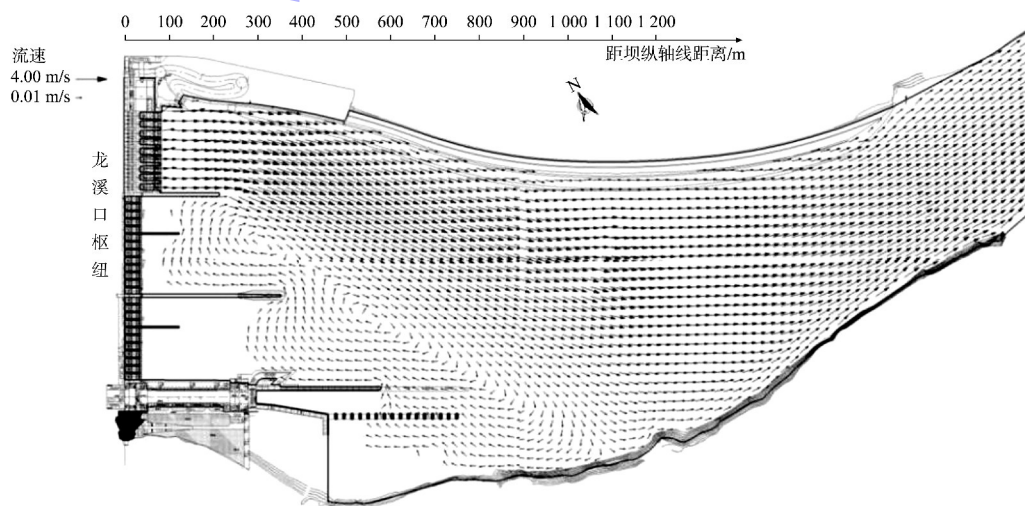


图 7 优化方案 2 (单位: m)



a) 流速等值线



b) 流速矢量

图 8 优化方案 2 典型工况鱼道进口及枢纽下游流场

为降低对枢纽水工结构的影响, 提出优化方案 3。保留电站与泄水闸之间的纵向围堰, 缩小开挖范围, 与此同时将生境重构平台向左岸平移 30 m, 拓宽河床过流面积, 生境重构平台高程 303.3 m, 宽度 15~30 m, 长度至下游新民码头, 优化工程措施见图 9。此方案在工况 11 下, 电站下游在生

境重构平台处的流态较平顺, 靠左岸侧流速比原生境重构平台方案提高约 10%~20%, 但仍存在自下游至进鱼口上下贯通的鱼类上溯通道。在工况 11 下, 流场分布情况见图 10。若延长电站下游开挖区域, 流速条件将进一步改善。

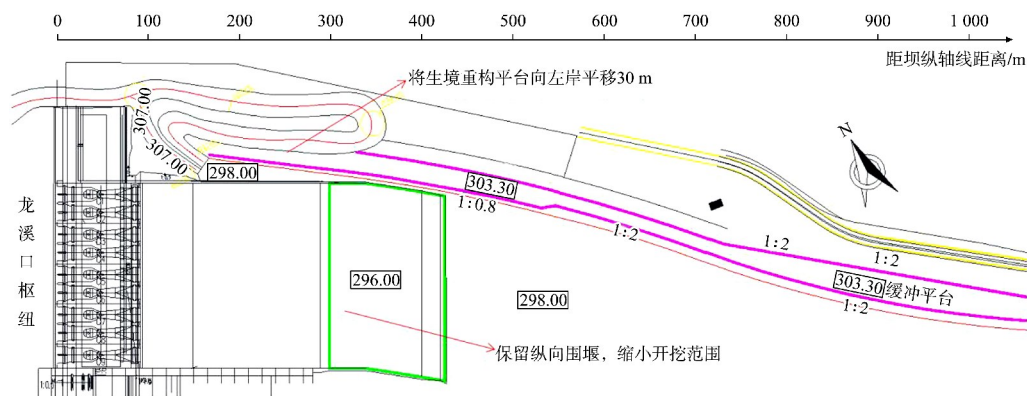
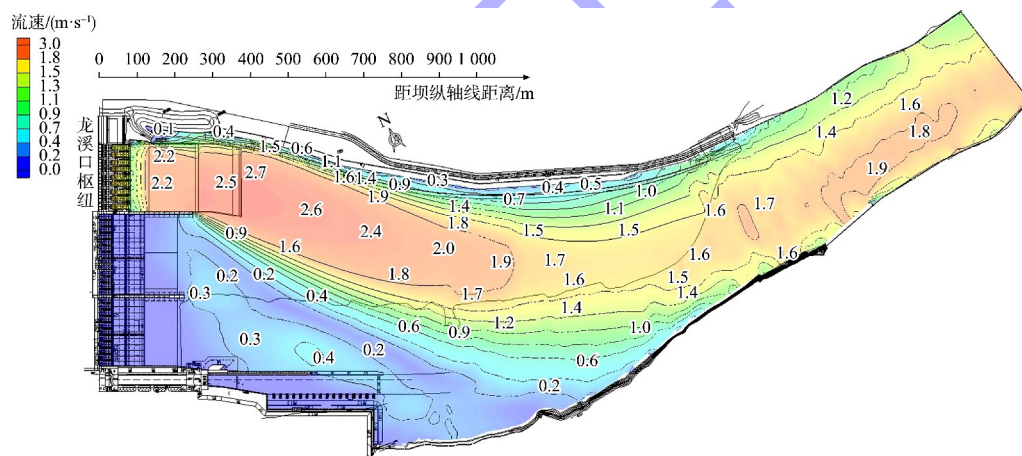
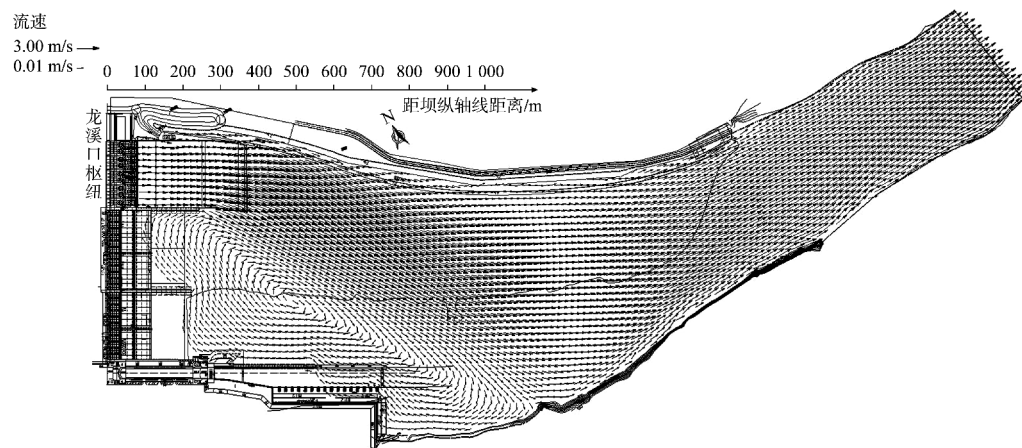


图 9 优化方案 3 (单位: m)



a) 流速等值线



b) 流速矢量

图 10 优化方案 3 工况 11 鱼道进口及枢纽下游流场

4 结论

1) 在初始地形条件下, 有较多工况的进口附近水流条件不满足鱼类上溯要求。

2) 初期以电站尾水坎下游开挖为主的方式优化鱼道进口水流条件。在优化方案 1 下, 下游靠岸侧存在贯通性低流速区供鱼类上溯。但电站下游靠岸侧在紧靠电站的位置流速较大, 且在平台处初始位置由于宽度不足和地形的突变, 水流流速也相应突增。

3) 通过生境重构结合开挖疏浚的方案优化进鱼口水流条件, 提出优化方案 2。采用该优化方案, 可满足枢纽 $4\,796.3\text{ m}^3/\text{s}$ 及以下泄量的要求, 但若枢纽泄量继续增加, 进口下游靠岸侧及下游河道将无法形成贯通性低流速区, 鱼类难以顺利洄游。

4) 为减小相关工程措施对枢纽水工结构的影响, 提出生境重构结合开挖疏浚的优化方案 3。在此方案的典型工况下, 当下游水高于生境重构平台时, 靠左岸侧流速比原生境重构平台条件增加约 $10\%\sim 20\%$, 但基本满足过鱼要求, 若适当延长电站下游开挖范围, 还可进一步改善进鱼口水流条件。

5) 通过两种优化方案的对比发现, 优化方案 2 的水流条件略优于优化方案 3, 但电站下游开挖范围更大, 可综合评估后选择优化方案。进鱼口水

流条件的优化方法可为其他类似鱼道工程提供参考。

参考文献:

- [1] 南京水利科学研究院. 水利水电工程鱼道设计导则: SL 609—2013[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2013.
- [2] 索丽生, 刘宁. 水工设计手册第 6 卷: 土石坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014.
- [3] CLAY C H. Design of fishways and other fish facilities [M]. Florida: CRC Press, 1995.
- [4] 汤荆燕, 高策, 陈昊, 等. 不同流态对鱼道进口诱鱼效果影响的实验研究[J]. 红水河, 2013, 32(1): 34-39, 44.
- [5] 郑铁刚, 孙双科, 柳海涛, 等. 基于生态学与水力学的水电站鱼道进口位置优化研究[J]. 水利水电技术, 2018, 49(2): 105-111.
- [6] 杜浩, 班璇, 张辉, 等. 天然河道中鱼类对水深、流速选择特性的初步观测: 以长江江口至涪市段为例[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(10): 70-74.
- [7] 李中华, 徐进超, 安建峰, 等. 岷江犍为航电枢纽鱼道工程进、出口水流条件二维数值仿真模型研究 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2016.
- [8] 陈求稳. 河流生态水力学—坝下河道生态效应与水库生态友好调度[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [9] 黄岳, 王晓刚. 广西郁江老口枢纽工程水工模型试验研究: 鱼道水工水力学模型试验研究报告[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.

(本文编辑 赵娟)

(上接第 26 页)

参考文献:

- [1] 长江航道局. 内河通航标准: GB 50139—2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [2] 南京水利科学研究院, 天津水运工程科学研究所. 船闸输水系统设计规范: JTJ 306—2001 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [3] 卢文蕾, 付文周. 岷江龙溪口航电枢纽工程初步设计[R].

成都: 四川省交通运输厅交通勘察设计研究院, 2017.

- [4] 南京水利科学研究院. 岷江龙溪口航电枢纽工程船闸输水系统水力学模型试验[R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2011.
- [5] 任启江, 叶雅思. 旁海枢纽工程船闸输水系统布置及试验研究[J]. 水运工程, 2018(12): 129-133.

(本文编辑 王璁)