



嘉陵江利泽航电枢纽工程鱼道进口 水流条件数值模拟

陈明¹, 刘原¹, 段黎明², 枚龙³, 黄海津¹

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 河南省交通规划设计研究院股份有限公司, 河南 郑州 451464;

3. 中交第二航务工程局第二工程有限公司, 重庆 404100)

摘要: 针对山区河流航电枢纽区域有限的诱集鱼条件, 采用二维水流数值模拟方法, 对嘉陵江利泽工程鱼道入口附近的水流条件进行研究。对比分析了 5 种布置方案下的鱼道进口水流流场。结果表明: 鱼道进口靠岸侧布置导墙、靠主河道侧布置反弧堤头加导流墩的组合形式, 可显著改善鱼道进口水流条件。对于该工程而言, 直导墙长度设计为 6 m, 然后以圆弧 ($R=18\text{ m}$) 与岸坡相接; 反弧堤头成 45 度角斜切; 在斜切边壁外布置 2 个尺寸均为 $1.2\text{ m}\times 0.8\text{ m}$ 的导流墩, 布置间隔为 1.2 m。

关键词: 鱼道; 进口布置形式; 数值模拟; 水流条件

中图分类号: TV 135.1; U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)12-0152-06

Numerical simulation of flow conditions near fish way entrance of Lize project in the Jialingjiang River

CHEN Ming¹, LIU Yuan¹, DUAN Li-ming², MEI Long³, HUANG Hai-jin¹

(1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Henan Provincial Communications Planning & Design Institute Co., Ltd., Zhengzhou 451464, China;

3. The Second Construction Company of CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Chongqing 404100, China)

Abstract: Considering the limited attraction flow for fish near the navigation and electricity junction in the mountain river, flow conditions near the fish way entrance are investigated by two-dimensional flow numerical simulation for the Lize project in the Jialingjiang River. The flow fields at the entrance of the fish way under 5 different layout schemes are compared and analyzed. The results show that the combination of guide wall on the bank side of the fish way entrance and reverse arc breakwater head and diversion pier on the main channel side can significantly improve the flow conditions at the fish way entrance. For this project, the straight guide wall is designed to be 6 m long, and then it is connected with the bank slope with an arc ($R=18\text{ m}$); the reverse arc breakwater head is cut at an angle of 45° ; two diversion piers are employed outside the beveled edge wall and both dimensions are $1.2\text{ m}\times 0.8\text{ m}$, which are separated by 1.2 m.

Keywords: fish way; entrance layout; numerical simulation; flow condition

鱼道的建设迄今为止已经有 300 多年, 早在 1662 年法国就提出要在堰坝上建造供鱼上下通行的通道^[1]。目前, 对于鱼道的水流条件研究主要集中在鱼道池室, Laninier 等^[2]、Rajaratnam 等^[3]、

Bombač 等^[4]、Romão 等^[5]、罗琳等^[6]、魏炳乾等^[7]、吕强等^[8]、赵彬如等^[9]均对各种竖缝式或复合式鱼道池室水流结构做了大量研究, 提出了满足过鱼要求的优化结构。相对而言, 已有文献对鱼道

进口附近水流条件的研究相对较少。而实际上, 鱼类是否能顺利通过鱼道, 不仅与内部结构的水流条件有关, 鱼道进鱼口处的水流条件也起着关键性作用^[10-11]。Gisen 等^[12]采用瞬态三维水流数值模拟方法, 得到了鱼类喜好的连续流场对喜好流量的影响, 实际上取决于鱼道进口流速大小的结论; Baek 等^[13]通过 GPS 漂移器对鱼道进口的吸引率进行研究, 得到该鱼道进口达到最大吸引率时的最佳流速; Tan 等^[14]采用物模与数模相结合的方法对鱼道进口进行研究, 发现在鱼道进口下游附近添加丁坝会使进口附近产生较大的流速并且能减少回流; 汪亚超等^[15]依托某鱼道工程, 对其进口布置进行了深入的研究, 并给出了一种能满足边界条件和绝大部分布置原则的初步布置方案; 廖伯文等^[16]对某高坝工程进行研究, 提出了集诱鱼进口所需满足的 2 种水力学条件; 路莅枫等^[17]针对微弯分汊河段上的边界条件, 以大源渡航电枢纽为研究对象, 采用二维水流数学模型, 为确定合适的鱼道进口模拟了不同工况下的枢纽下游流场结果; 文典等^[18]针对某鱼道工程, 通过水声学观测对河段水流条件及鱼类集群分布进行分析, 提出合理的鱼道进口位置。尽管已取得关于鱼道进口水流条件的部分研究成果, 但对于山区河流上的航电枢纽而言, 鱼道进口的布置受诸多条件限制, 如自身布置原则、枢纽布置及河势、地形、地质、下游水位等, 不但造成诱集鱼条件十分有限^[19], 也影响了已有研究成果的适用性。鉴于此, 本文依托嘉陵江利泽鱼道工程, 采用平面二维水流数学模型, 对枢纽下游鱼道进口附近水流条件进行研究, 提出一种能够满足多种鱼类成功上溯的进鱼口布置形式。

1 工程概况

嘉陵江利泽航电枢纽位于重庆市合川区利泽场嘉陵江河段, 与合川城区相距约 32 km, 与四川省武胜县相距约 29.7 km。工程等别为Ⅱ等, 工程规模为大(2)型。通航建筑物选择单线一级船闸, 按航道Ⅳ级标准设计, 闸室有效尺度为 180 m×23 m×3 m(长×宽×门槛水深), 通行代表船型为

500 t 船舶, 设计通过能力为 988 万 t。枢纽建成后, 可渠化航道达 29.7 km(重庆境内 12 km, 四川境内 17.7 km)。电站装机容量为 74 MW, 多年平均发电量达 316.57 GW·h。

嘉陵江干流分布鱼类 156 种, 属于 7 目 18 科 85 属, 鲤形目鱼类最常见, 鲇形目次之, 鲈形目最少。从上游到下游, 嘉陵江各江段鱼类物种相似率逐渐增加, 且物种相似率较高。如上游和中游的物种相似率为 86.72%, 中游和下游相似率为 89.55%, 上游和下游也达到了 79.39%^[20]。这种较高的相似率表明嘉陵江各江段的鱼类迁徙交流频繁。而位于嘉陵江干流中下游的利泽枢纽则彻底地切断了以“四大家鱼”(鲤、鲢、鳙、草)等半洄游性鱼类为主的上溯路线。资料显示, 嘉陵江中下游一直是我国重要淡水鱼生产基地之一^[21], 为保护鱼类的生存繁衍, 利泽鱼道的建设势在必行。鱼道布置设计方案见图 1。

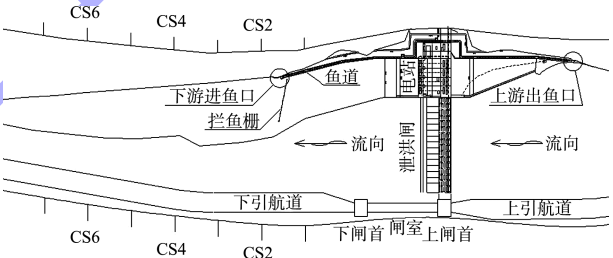


图 1 鱼道布置设计方案

2 数学模型建立

2.1 紊流控制方程及离散

本工程区域的二维水流运动采用沿水深平均的封闭浅水方程组予以描述, 基本控制方程采用水流连续方程和动量方程, 方程组中空间的离散采用控制体积法, 时间的离散采用差分法。

2.2 计算边界条件及网格划分

根据鱼道进口所处位置以及工程后可能引起的洪水位影响范围及资料情况, 并考虑计算需要的进出口长度, 计算进口边界选取坝址轴线, 包括鱼道进口、电站和泄洪闸出口, 其边界均采用恒定流量进口; 出口选取枢纽下游 2.7 km 处, 其边界采用进口流量相适应的水位; 两岸陆地边界采用无滑移的壁面边界, 并引入动边界处理方法

判定计算域内的不间断露滩。本模型计算区域主要通过三角形网格与四边形网格进行剖分，网格沿河道河势宽窄变化渐变分布，局部加密鱼道进口

附近的网格。设计方案对应的网格单元 29 207 个、网格节点 15 022 个，网格节点平均间距 10 m 左右。计算边界及网格布置见图 2。

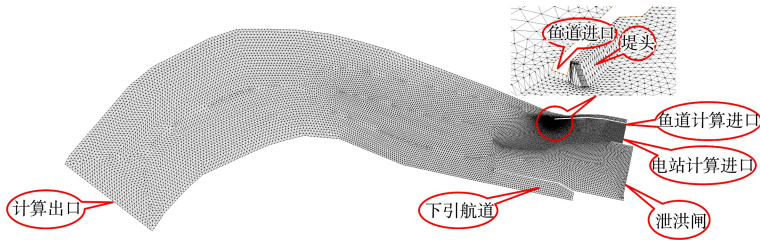


图 2 设计方案计算区域及网格剖分

2.3 计算工况及水位组合

进行组合，得到计算工况及特征水位，见表 1。

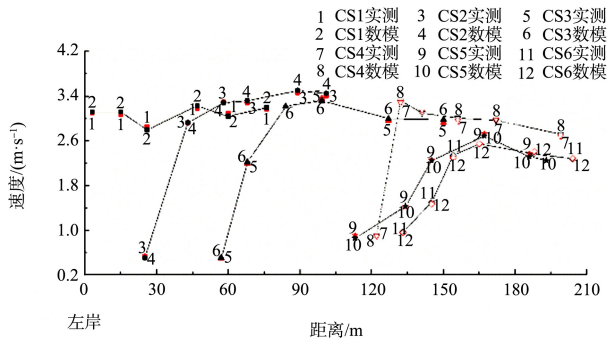
对电厂运行方式、鱼道流量和补充流量特征

表 1 各工况下水位流量组合

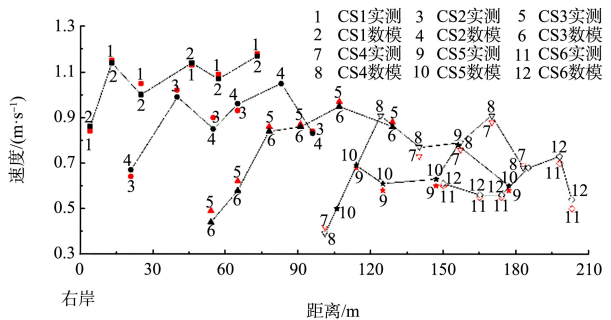
计算工况	电厂运行方式	尾门水位/m	流量/(m ³ ·s ⁻¹)			
			大坝流量	鱼道流量	补充流量	鱼道进口总流量
1	单机不满发	202.59	200	0.75	1.00	1.75
2	单机满发(1 [#])	202.84	281	0.75	0.93	1.68
3	单机满发(2 [#])			0.75	0.93	1.68
4	单机满发(3 [#])			0.75	0.93	1.68
5	单机满发(4 [#])			0.75	0.93	1.68
6	2 台机满发(1 [#] 、2 [#])	203.26	601	0.75	1.21	1.96
7	2 台机满发(3 [#] 、4 [#])	203.72	973	0.75	1.21	1.96
8	3 台机满发			0.75	1.72	2.47
9	4 台机满发	204.31	1 453	0.75	1.93	2.68

2.4 模型验证

为了验证计算结果的合理性，进行了流速分布的验证。流速分布以 2 个典型大坝流量 $Q=281\text{ m}^3/\text{s}$ (工况 2, 单机满发) 和 $Q=1\,453\text{ m}^3/\text{s}$ (工况 9, 4 台机满发) 时枢纽工程河段物理模型试验实测流速资料进行验证。对测量区域几个典型断面 (CS1 ~ CS6) 的计算流速与实测流速进行对比 (图 3)，结果表明计算流速与实测流速基本吻合、数值模拟计算成果可信。



b) 计算工况9



a) 计算工况2

图 3 流速验证

3 流速指标

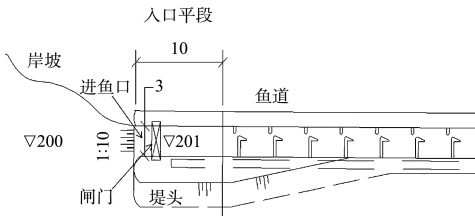
鱼类的游泳能力一般用感应流速、喜爱流速和极限流速等指标来表示。本文拟保护鱼类的感应流速大致相同，一般在 $0.30\sim0.80\text{ m/s}$ [22]。但各种鱼类的极限流速和喜爱流速由于体长、季节、生活环境不同，即使同种鱼类都有很大差别。鱼

类能否从枢纽下泄的各种水流中轻易分辨出进鱼口下泄的水流是鱼道进口一个很重要的布置原则。在鱼道进口处,泄流流速要比鱼类的感应流速略大,即在不同的过鱼水位组合下,进口附近的流速须达到 0.30~0.80 m/s。

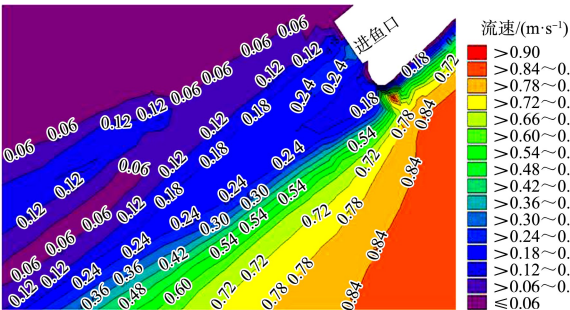
4 原设计方案水流条件分析

鱼道进口布置一般遵循两个原则:1)应设于闸坝下游鱼类最易发觉又能够溯游到距上游最近的水域;2)经常有水流下泄处、紧靠主流的两侧、鱼类洄游路线及经常集群的地方。结合该布置原则,进口位于坝轴线下游 473.45 m(沿鱼道长度方向)处。鱼道进口左设楔形堤头,右平顺连接岸坡,进口宽 3 m,鱼道入口外底板由高程 201 m 以坡度 1:10 与地面高程 200 m 衔接,见图 4a)。

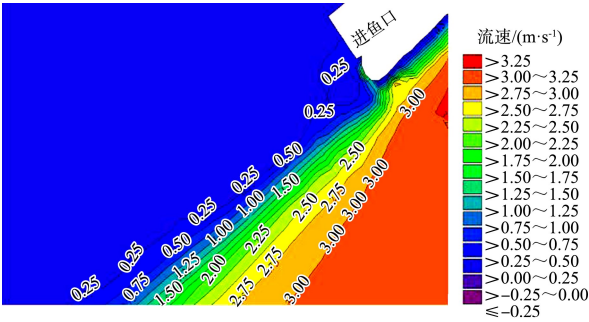
图 4b)~4c)给出了原设计方案 2 个典型工况的流场,计算结果表明:各工况下主河槽下泄水流流速均大于鱼类感应流速(0.3~0.80 m/s),鱼类能够上溯到达鱼道进口附近。但由于鱼道进口出流向右岸扩散及回流影响,使得鱼道进口附近及下游部分区域流速均小于感应流速,不能形成一条既能满足上下游连通又能达到鱼类感应流速的下泄水流。



a) 方案布置(单位: m)



b) 工况1流场等值线



c) 工况9流场等值线

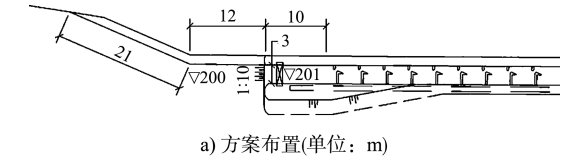
图 4 原设计方案布置及水流条件

5 优化方案比选分析

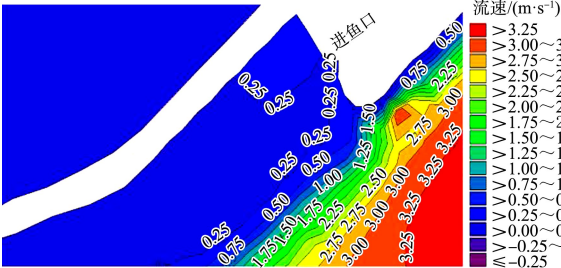
针对原设计方案中鱼道进口附近及下游局部区域流速偏小现象,从缩窄过水面积和导流的角度,在鱼道进口右侧(靠河岸侧)增设呈内收角度(即导墙轴线沿主流摆向河心)的导墙并改变堤头布置形式。基于此,通过比较导墙内收角度(0°~8°)、长度(6~12 m)、堤头布置形式等,提出优化布置方案并计算鱼道进口附近水流条件。重点给出了鱼道最大运行流量的计算结果,即工况 9。

如图 5a)所示,方案 I 在原设计方案的基础上,鱼道进口右侧增设一道 12 m 长的直导墙,直导墙内收 0°,通过一段长为 21 m 的外扩导墙与岸坡连接,与直导墙夹角呈 157°向岸侧倾斜。根据图 5b)数值模拟结果可以看出,最大流量运行时,鱼道进口附近部分水域流速偏小,未达到 0.3 m/s,且无法与主流衔接成功,分析认为鱼道进口右侧导墙布置对主流衔接产生较大影响。因此,基于方案 I,方案 II 令右侧导墙内收 8°,以半径 $R=18$ m 的圆弧连接岸坡,鱼道进口宽度缩窄到 2 m,同时将左侧堤头调整为流线形,见图 6a)。目的是通过缩窄鱼道进口宽度,从而增加鱼道进口出流速度并与主流衔接贯通。结果导致鱼道进口流速大于鱼类最大感应流速 0.8 m/s,见图 6b)。主要原因是右侧导墙内收角度过大,从而使导墙与主流形成了较大的夹角,且鱼道进口缩窄过大共同导致鱼道进口附近流速偏大。方案 III 令右侧直导墙内收角度减小至 4°,鱼道进口宽度增大至 2.5 m,见图 7a)。如图 7b)所示,方案 III 布置下进口水流条件得到明显改善,但流速仍大于 0.8 m/s,同样

阻碍鱼类成功上溯。分析原因主要是左侧堤头为流线形，同时受到电站发电和地形影响，主流偏向左岸，综合作用导致鱼道进口引流过大。因此方案Ⅳ在方案Ⅲ的基础上，将鱼道进口左侧堤头由流线形改为反弧形，将主流引向河心方向，同时头部成 45°角斜切，把部分主流引向鱼道进口处，见图 8a)。在此布置下，最大流量(工况 9)时，出现进口引流不足情况，鱼道进口附近有小部分区域水流流速过小，未达到 0.3 m/s 的鱼类感应流速，见图 8b)。

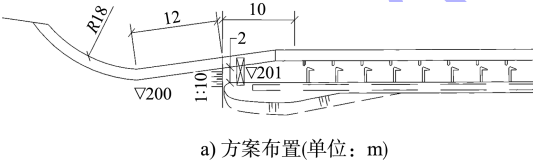


a) 方案布置(单位: m)

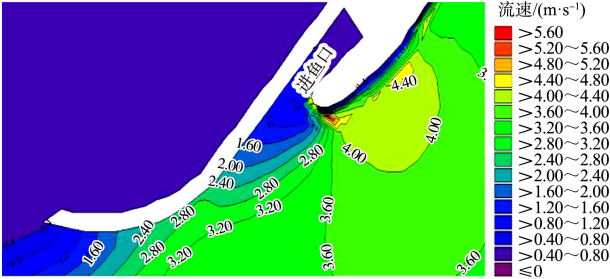


b) $Q=1\,453\text{ m}^3/\text{s}$ 流场等值线

图 5 优化方案 I 布置及水流条件

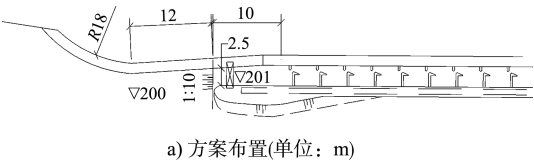


a) 方案布置(单位: m)

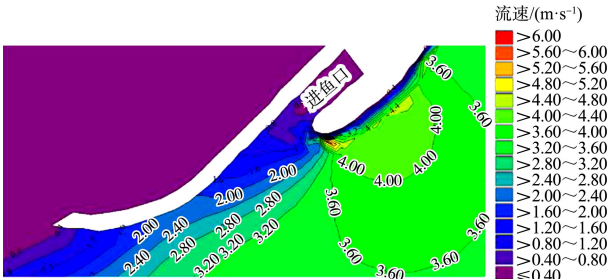


b) $Q=1\,453\text{ m}^3/\text{s}$ 流场等值线

图 6 优化方案 II 布置及水流条件

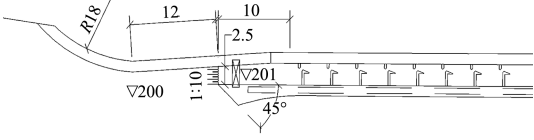


a) 方案布置(单位: m)

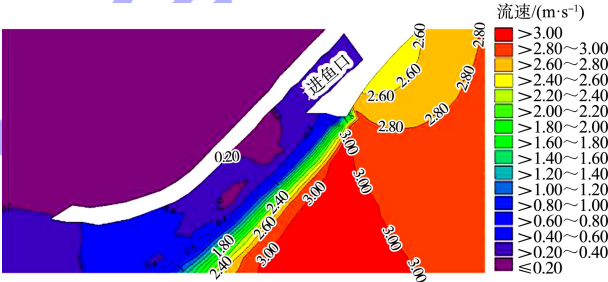


b) $Q=1\,453\text{ m}^3/\text{s}$ 流场等值线

图 7 优化方案 III 布置及水流条件



a) 方案布置(单位: m)



b) $Q=1\,453\text{ m}^3/\text{s}$ 流场等值线

图 8 优化方案 IV 布置及水流条件

综上，进一步优化鱼道进口布置。为了增加进口引流量，方案Ⅴ在方案Ⅳ基础上，在左侧斜切堤头边壁外间隔 1.2 m 布置 2 个导流墩，导流墩尺寸为 1.2 m×0.8 m(长×宽)，两头为半径为 0.4 m 的半圆。且将 201 m 高程处鱼道底板向前延伸 3.6 m 至导流墩以外，减少水深，增加进口流速，其后以 1:10 坡连接至 200 m 高程。同时为了改善进口流态、减小工程量，缩短直导墙长度至 6 m，以圆弧(半径 $R=27\text{ m}$)与岸坡相接，以增大进口外的缓流区范围，供鱼类休息聚集。方案Ⅴ中各工况主河槽均存在上下游连通且大于鱼类感应流速的下泄水流，鱼类可成功溯游到鱼道进口附近。同时，鱼道进口附近及下游一定区域内流速在 0.3~0.8 m/s，满足鱼类感应流速，能够形成一股既满足上下游连通又能达到鱼类感应流速的下泄水流，便于鱼类能够找到鱼道进口，见图 9b)。综合考虑各方案下的鱼道进口水流条件，推荐方案Ⅴ作为进口布置形式。

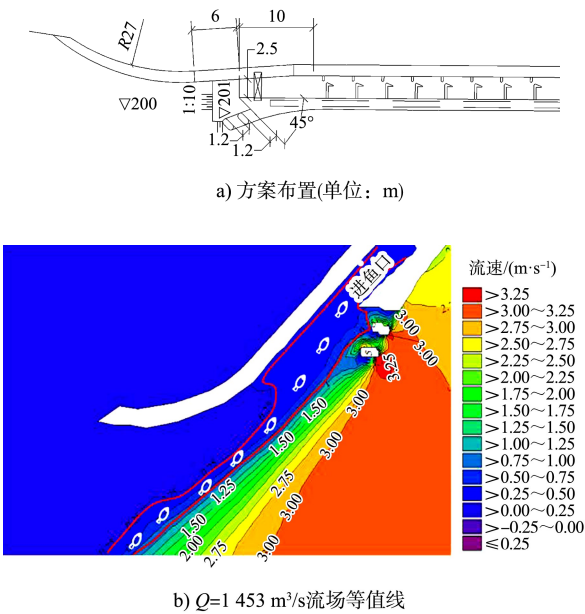


图 9 优化方案 V 布置及水流条件

6 结论

1) 针对嘉陵江利泽鱼道工程进口布置形式, 通过多方案比选, 提出靠岸侧布置 6 m 长的直导墙, 且呈 4° 内收角度, 以圆弧 ($R=18\text{ m}$) 与岸坡相接; 靠主河道侧堤头为反弧形式, 头部成 45° 斜切角, 在斜切边壁外布置 2 个导流墩, 间隔为 1.2 m, 导流墩尺寸均为 1.2 m×0.8 m, 墩的两边为半径 0.4 m 的半圆, 将 201 m 高程处鱼道底板向前延伸 3.6 m 到导流墩以外, 用 1:10 的坡度连接至 200 m 高程。

2) 计算成果表明: 鱼道进口靠岸侧布置导墙、进口靠主河道侧布置反弧堤头加导流墩的鱼道进口形式, 可为鱼类寻找鱼道进口创造良好的水流条件, 亦可为类似工程的进口布置形式提供优化思路。

3) 为进一步掌握计算成果与实际工程间的差异, 下阶段可通过建立三维数学模型进行更为精准的水流结构模拟, 同时建议在嘉陵江利泽航电枢纽工程鱼道建成投运前进行必要的原型水文观测和放鱼试验工作, 确保鱼道可有效吸引鱼群, 充分发挥鱼道的投资效益。

参考文献:

[1] 刘志雄, 周赤, 黄明海. 鱼道应用现状和研究进展[J]. 长

江科学院院报, 2010, 27(4): 28-31, 35.

[2] LANINIER M, TRAVADE F, PORCHER J P. Fishways: biological basis, design criteria and monitoring[J]. Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture, 2002 (364, spécial milieux tropicaux): 208-211.

[3] RAJARATNAM N, VAN DER VINNE G, KATOPODIS C. Hydraulics of vertical slot fishways[J]. Journal of hydraulic engineering, 1986, 112(10): 909-927.

[4] BOMBAČ M, ČETINA M, NOVAK G. Study on flow characteristics in vertical slot fishways regarding slot layout optimization[J]. Ecological engineering, 2017, 107: 126-136.

[5] ROMÃO F, BRANCO P, QUARESMA A L, et al. Effectiveness of a multi-slot vertical slot fishway versus a standard vertical slot fishway for potamodromous cyprinids [J]. Hydrobiologia, 2018, 816(1): 153-163.

[6] 罗琳, 刘慧芳. 株洲枢纽隔板式鱼道设计[J]. 水运工程, 2019(3): 52-55.

[7] 魏炳乾, 黄磊, 袁海石, 等. 竖缝式与仿自然结合鱼道水力特性及其优化[J]. 水利水电工程学报, 2019(4): 9-16.

[8] 吕强, 孙双科, 边永欢. 双侧竖缝式鱼道水力特性研究[J]. 水生态学杂志, 2016, 37(4): 55-62.

[9] 赵彬如, 戴会超, 戎贵文, 等. 竖缝位置对竖缝式鱼道水力特性的影响[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(5): 69-73, 83.

[10] 罗凯强, 康昭君, 夏威, 等. 鱼道进口不同补水形式对齐口裂腹鱼上溯行为的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(4): 1182-1191.

[11] 薛正梅, 官志鑫, 刘博雅, 等. 大源渡枢纽扩建鱼道工程总体布置[J]. 水运工程, 2019(3): 56-61.

[12] GISEN D C, WEICHERT R B, NESTLER J M. Optimizing attraction flow for upstream fish passage at a hydropowerdam employing 3D detached-Eddy simulation [J]. Ecological engineering, 2016, 100: 344-353.

[13] BAEK K O, LEE J M, KU T G, et al. Evaluation of by-pass fishway operation for attraction efficiency based on GPS drifter field experiments[J]. Water, 2021, 13(16): 2302.

[14] TAN J J, TAN H L, GOERIG E, et al. Optimization of fishway attraction flow based on endemic fish swimming performance and hydraulics[J]. Ecological engineering, 2021, 170: 106332.

[15] 汪亚超, 陈小虎, 张婷, 等. 鱼道进口布置方案研究[J]. 水生态学杂志, 2013, 34(4): 30-34. (下转第 163 页)