

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221447

过鱼设施跌流诱鱼方案及模型试验研究

涂承义¹, 郑铁刚², 黄 维³, 孙双科², 叶 甜¹

(1. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州 311122; 2. 中国水利水电科学研究院
流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 国家能源局大坝安全监察中心, 浙江 杭州 311122)

摘要: 鉴于过鱼设施进口区域集诱鱼效果是影响过鱼效率的关键因素之, 提出了一种新的旁道跌流诱鱼优化思路, 将上游水流以跌流形式补水至鱼道进口外区域, 通过挑流板等辅助设施使平面流场内形成水平吸引流, 并依托大渡河沙坪一级水电站鱼道工程, 建立了大比尺物理模型进行方案论证及优化, 分析了过鱼设施进口附近流场特性, 探讨了诱鱼的可能性。试验结果表明, 采用一次跌落方案更有利于平面流场内对洄游鱼类形成吸引流, 流速为 0.3~0.5 m/s, 且进口区域流态信息丰富, 适宜鱼类聚集。

关键词: 过鱼设施; 跌流诱鱼; 鱼道进口; 流态信息; 模型试验

中图分类号: TV131.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)06-0102-04

1 工程概况

沙坪一级水电站是大渡河干流水电规划的 22 个梯级水电站中的第 20 级沙坪梯级水电站的第一级, 总装机容量 360 MW, 调节库容为 $491 \times 10^4 \text{ m}^3$, 具有日调节性能, 为二等大(2)型工程。电站过鱼设施选取竖缝式鱼道工程, 鱼道位于大坝左岸, 从下游至上游由进口、池室、休息池、观测室、出口等组成。鱼道全长 1 006 m, 净宽 2 m, 为竖缝式结构, 平均坡降为 2.0%。电站过鱼季节(3~9月)下游河道运行水位变幅 6 m, 考虑到电站为日调节水库, 下游水位变化频繁, 鱼道进口控制闸门之间切换困难, 甚至存在闸门切换尚未完成水位即发生变化的情况。因此, 电站需将鱼道进口数量大幅缩减, 从而便于运行管理。进口数量的缩减导致鱼道内运行水深增大, 进而引起鱼道内部流速较低, 不利于诱鱼, 因此需采取补水方案改善诱鱼效果^[1-3]。水流直接补水方案较为多见^[4,5], 然而直接补水措施仅对实施补水的若干池室有效, 而对于未实施补水的相邻上游侧池室其内部流速仍较低, 不足以维持鱼道的进一步上溯, 实际应用效果有限。旁道补水措施的诱鱼效果在一定程度上优于过鱼设施进口直接补水措施

产生的效果^[6,7], 然而水流入池后, 在重力及惯性力作用下, 将沿水深方向向下运动, 无法形成水平方向水流, 将导致洄游鱼类难以识别水流方向。此外, 水流直接跌流入水, 跌水处紊动能最高, 不利于鱼类聚集。鉴此, 本文提出了一种新的旁道跌流诱鱼措施, 并在跌水处下方加设挑流板, 使跌水直接与挑流板碰撞从而形成二次流, 将垂向水流改变为水平水流, 利于鱼类发现水流, 以提升进口周边区域的集诱鱼效果。

2 模型试验设计

模型试验设计见图 1。模型设计比尺为 1:10, 下游尾水渠长 4 m、宽 2 m、高 2 m, 底板高程记为 0.0 m; 尾水渠右侧角部设有一个鱼道进口,

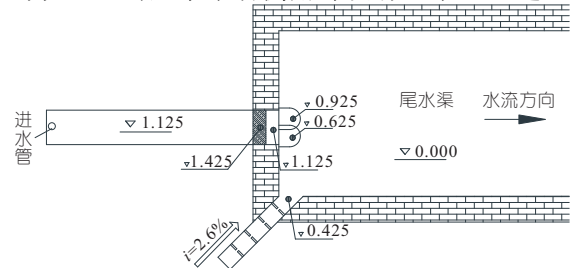


图 1 模型设计示意图(单位:m)

Fig. 1 Schematic diagram of model design

收稿日期: 2022-07-15, 修回日期: 2022-08-09

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3204203); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室自主研究课题(SKL2020TS04); 沙坪一级水电站鱼道专题科研项目(HY120205A0022021)

作者简介: 涂承义(1987-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水工结构设计与项目管理, E-mail: tu_cy@hdec.com

通讯作者: 郑铁刚(1983-), 男, 博士、正高级工程师、硕导, 研究方向为生态水力学, E-mail: zhengt@iwhr.com

宽 0.2 m,底板相对高程为 0.425 m;尾水渠上游设有补水渠,渠长 2.7 m、宽 0.4 m,渠底高程为 1.125 m。补水渠水出口距离鱼道进口 0.6 m (等于 3 倍鱼道宽度),且水出口设有台阶,台阶与补水渠等宽,长 0.15 m,台阶顶部高程为 1.425 m,用于抬高水流入池高度。水流越过台阶后跌落至补水渠末端,形成二次流进入尾水渠内,台阶末端至补水渠末端间距为 0.15 m。补水渠出口下方设置两个挑流板以调整水流形态,挑流板形状为“马蹄”状,挑流板 I 在上,顶面高程 0.925 m,挑流板 II 在下,顶面高程 0.625 m,水平方向上两块挑流板相互错开,可承托整个补水渠宽度,见图 2。为保证下游尾水渠内水位稳定,尾水渠出流流量等于上游补水渠与鱼道出流流量之和。

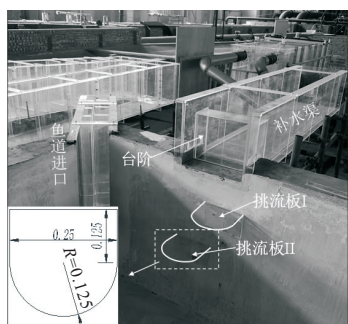


图 2 物理试验模型(单位:m)

Fig. 2 Experimental model

试验过程中,补水流量为 1.68 L/s,鱼道内水深为 0.4、0.6 m。试验中分别采用电磁流量计与水位测针监控补水流量及尾水渠内水位;鱼道及补水渠内水深采用钢直尺量测;尾水渠内流速测量采用日本 JFE advantech 有限公司生产的二维电磁流速仪 ACM-41F 测量,测量精度为 0.5 cm/s,采样频率为 25 Hz,试验中各测点采样时间为 1 min。

3 试验结果与分析

3.1 鱼类游泳行为分析

通常过鱼设施的保护目标可分为物种保护型、资源增殖型、遗传交流型三类。结合地域及工程特点,沙坪一级水电站工程过鱼目标为促进坝址上下游鱼类遗传交流,过鱼对象以齐口裂腹鱼和重口裂腹鱼为主,其中齐口裂腹鱼繁殖期为 3~6 月,重口裂腹鱼繁殖期为 8~9 月。

水生生物对水流的察觉对它们在河流中辨别方向起着决定性作用^[8],水流流速过大将形成水流速度屏障,导致洄游鱼类无法成功上溯;当水流流速低于鱼类的感应流速时,则将导致洄游鱼类

难以追踪水流方向,进而达不到水流诱鱼的效果。因此,在鱼道进口附近形成合适的诱鱼水流是主要目标,也是形成有效水流诱鱼的保障。过鱼对象游泳能力测试结果见表 1。由表 1 可知,鱼道进口附近形成的诱鱼水流流速应为 0.07~1.00 m/s,不宜大于 1.10 m/s。

表 1 过鱼对象游泳能力测试结果

Tab. 1 Test results of swimming capability of target species

种类	感应流速	持续游泳速度	临界游泳速度	突进游泳速度
重口裂腹鱼	0.07~0.28	0.60~1.00	0.61~1.04	0.80~1.59
齐口裂腹鱼	0.07~0.13	0.60~1.00	0.65~1.09	0.85~1.53

此外,过鱼对象具有逆流而上的洄游习性,形成有利的水流方向可有效增加水流诱鱼效果。同时,大于体长的漩涡会将洄游鱼类困住而使其迷失方向,因此鱼道进口附近的水流应避免存在较大漩涡等流态^[9,10]。

3.2 尾水渠水流特征分析

不同鱼道进口水深条件下,鱼道进口附近流场测试结果见图 3。试验表明,水流沿补水渠前行,越过台阶后跌落至补水渠末段,然后发生二次跌流,以 30°角跌入下游水垫,见图 4。然而,挑流板 I 与二次跌流发生位置高程差为 2 m,主流入射点距边墙约为 3.5 m,而挑流板长度仅为 2.5

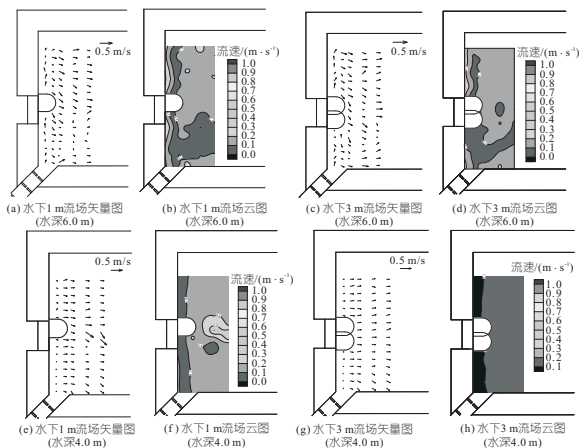


图 3 原方案鱼道进口附近流场分布

Fig. 3 Distribution of flow pattern near fishway inlet for original scheme

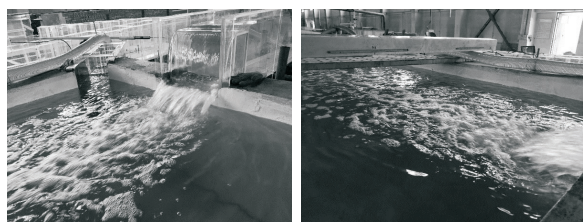


图 4 原方案尾水渠流场试验照片(鱼道进口水深 6.0 m)

Fig. 4 Experimental photos of flow pattern in tailwater channel for original scheme

m,因此水流直接跌落入水,并未再与挑流板 I 发生碰撞,与方案初衷违背,不利于形成诱鱼水流。此外,当鱼道进口水深为 6.5 m 时,鱼道进口附近水面以下 1、3 m 平面流场分布较为均匀,流速约为 0.1 m/s(见图 3(a)、(c)),满足鱼类感应流速要求,但未见明显吸引流,且无显著跌流入水点,进而对鱼类洄游路线不能产生明显指向性。这是由于该工况下水垫较深,尾水渠水面距离二次跌落发生点仅 0.5 m(模型值 5 cm),此时跌落主流由势能转化的冲量较小,并受水垫影响在水体表面形成泡状流前行(图 4),而主流入水下潜部分有限,由此导致该工况水面以下 1、3 m 平面流场受跌流影响较小,但受跌流影响上游边壁附近产生明显横向流,流速约为 0.2 m/s。

由图 3(e)~(h)可知,当鱼道内水深为 4.0 m 时,鱼道进口附近流场及流速分布相似,但相比鱼道水深 6.5 m 工况而言,由于尾水渠水面与跌落点距离增大,即由势能转化动能加大,因此该工况水下 1 m 平面流场可见明显入水点(图 3(e)、(f)),水流入射点距上游边墙约为 4 m,入射点位置流速约为 0.3 m/s。然而,受水垫影响,跌落主流未能下潜至水下 3 m,在水下 1~3 m 空间上浮前行,水下 3 m 平面流速约为 0.1 m/s,无明显主流。

由此可见,原方案试图采用水流通过两次跌落入水以增强水平方向水流的思路仍存在不足,原方案下水流挑距较大,而挑流板长度较短,水下挑流板不能发挥作用。尽管鱼道进口附近流场未见大的漩涡等不利流态,且水流流速基本满足感应流速,但区域内流速量值较均匀,不存在明显吸引流,进而不足引导鱼类洄游至鱼道进口附近,故尚需进一步对体型进行优化,优化思路可为加长挑流板长度或将水流由两次跌落调整为一次跌落,从而试图形成明显吸引流。经综合考虑,初步采用将补水渠溢流断面后移至补水渠末端,进而发生一次水流跌落的设计方案,结合该方案进一步开展模型试验研究。

3.3 优化体型试验结果分析

将补水渠溢流堰后移至末端,形成一次折射流,水流状态见图 5。由图 5 可知,调整为一级跌落后,水流挑距为 1.0~1.5 m,挑流板起作用,水流撞击挑流板后向四周扩散。当低水位工况时,一部分水流跌入水体,而另一部水流冲击挑流板 I 发生二次挑射,落点距离边墙约 5.0 m。针对优化体型,不同尾水渠水深条件下平面流场及流速分布模型试验结果见图 6。试验结果表明,优化方案下尾水渠内流态较原二次跌落方案具有

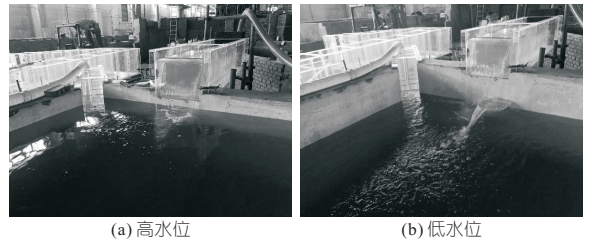


图 5 优化方案尾水渠流场试验照片

Fig. 5 Experimental photos of flow pattern in tailwater channel for optimized scheme

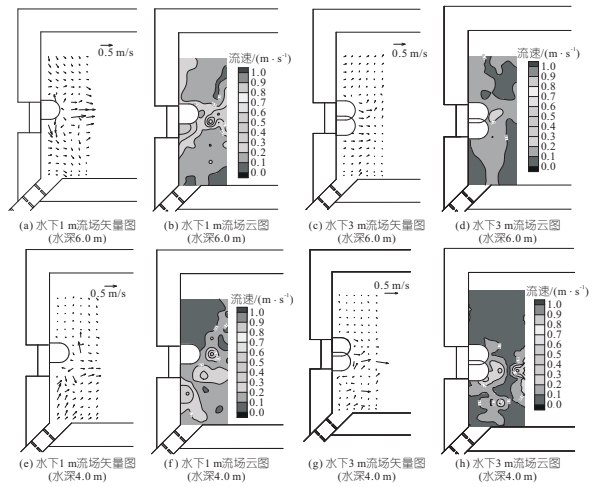


图 6 优化方案鱼道进口附近流场分布

Fig. 6 Flow pattern near fishway inlet for optimized scheme

明显改善,跌落点附近形成明显主流。由图 6(a)可知,水流入水后继续下潜,部分水体与挑流板 I 发生撞击,水流向四周扩散,在距上游边墙约 4 m 位置形成二次入水点,并形成明显朝向下流的水流,流速为 0.3~0.5 m/s,已明显大于鱼类感应流速,在环境流流速较低背景下,适宜鱼类发现主流,并向鱼道进口附近聚集。除部分水体与挑流板 I 碰撞扩散外,另一部分水体继续下潜,由图 6(c)发现该部分跌落水流并未与挑流板 II 发生碰撞,未形成明显主流。

由图 6(e)、(f)可知,当鱼道进口水深为 4.0 m 时,挑流板 I 和挑流板 II 均发挥作用,在挑流板作用下,水面以下 1、3 m 平面上挑流板下游均形成明显主流,主流流速约为 0.3 m/s,适宜吸引不同水深的鱼类聚集至鱼道进口附近。

由此可见,在挑流板与下游水垫作用下,上游补水渠水流跌入下游鱼道进口附近,进口附近流态极为复杂,但有明显主流存在,且无较大漩涡等不利流态形成,主流流速显著高于感应流速且不大于临界游速,利于洄游鱼类发现主流并沿主流上溯至鱼道进口附近。此外,区域内存在正流速、负流速、垂向流及回流等各种流态,水流信息丰富,适宜鱼类聚集于此。

4 结论

a. 提出了一种旁道跌流诱鱼优化措施,试验结果表明,一次跌落方案优于二次跌落方案,下游鱼道进口附近水力特性指标更适宜洄游鱼类发现主流并沿主流上溯。该诱鱼措施不仅适用于鱼道工程,同样适用于其他过鱼设施进口诱鱼。

b. 基于鱼类行为学的实鱼试验是开展诱鱼效果分析的直接手段,下一步应在前期水流特征研究成果的基础上,进一步开展实鱼试验,进而论证跌流诱鱼措施的有效性。同时,结合水力学指标与鱼类行为,分析鱼道进口附近水力学指标与鱼类聚集行为的响应关系,进一步优化诱鱼措施,为诱鱼思路的设计与提升提供理论依据。

参考文献:

[1] 韩雷,李树航,李洋,等. 基于竖缝式鱼道的鱼类上溯试验研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(6): 146-149, 138.

[2] STUART I G, BERGHUIS A P, LONG P E, et al. Do fish locks have potential in tropical rivers? [J]. River research and application, 2007, 23(3): 269-286.

[3] 张艳艳,何贞俊,何用,等. 低水头闸坝工程鱼道过鱼效果评价[J]. 水利学报, 2017, 48(6): 748-756.

[4] WILLIAMS J G, ARMSTRONG G, KATOPODIS C, et al. Thinking like a fish: a key ingredient for development of effective fish passage facilities at river obstructions[J]. River research and applications, 2012, 28(4): 407-417.

[5] CHEONG T S, KAVVAS M L, ANDERSON E K. Evaluation of adult white sturgeon swimming capabilities and applications to fishway design[J]. Environmental biology of fishes, 2006, 77(2): 197-208.

[6] BUNT C M, KATOPODIS C, MCKINLEY R S. Attraction and passage efficiency of white suckers and smallmouth bass by two denil fishways[J]. North American journal of fisheries management, 1999, 19(3): 793-803.

[7] 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.

[8] 郑铁刚,孙双科,柳海涛,等. 基于鱼类行为学与水力学的水电站鱼道进口位置选择[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 164-170.

[9] SILVA A T, KATOPODIS C, SANTOS J M, et al. Cyprinid swimming behaviour in response to turbulent flow[J]. Ecological engineering, 2012, 44: 314-328.

[10] ZHENG T, NIU Z, SUN S, et al. Optimizing fish-friendly flow pattern in vertical slot fishway based on fish swimming capability validation[J]. Ecological engineering, 2022, 185: 106796.

Model Test on Effect of Drop-flow Luring Fish for Fish-passing Facilities

TU Cheng-yi¹, ZHENG Tie-gang², HUANG Wei³, SUN Shuang-ke², YE Tian¹

(1. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou 311122, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Large Dam Safety Supervision Center, National Energy Administration, Hangzhou 311122, China)

Abstract: The effect of luring fish is one of the key factors affecting fish passing efficiency in the entrance area of fish-passing facilities. Proposed a new optimization idea of side-channel drop-flow to lure fish. The upstream water was replenished to the area outside the fishway entrance as drop-flow. With the help of auxiliary facilities such as cantilever plate, the attractive flow was formed in the horizontal orientation. Take the fishway project of Shaping I Hydropower Station as example, a large scale physical model was established to demonstrate and optimize the scheme, and the flow pattern near the entrance of the fish-passing facility were analyzed, and the possibility of attracting fish was discussed. The experimental results show that the one-drop scheme is favorable for attracting the migratory fish in the horizontal orientation, with the flow velocity of 0.3-0.5 m/s, and the information of flow pattern is rich in the entrance area, which is suitable for fish aggregation.

Key words: fish-passing facilities; drop-flow to lure fish; fishway entrance; flow pattern information; model test