DOI:10.15928/j.1674-3075.2019.06.009

一种鱼道进口诱鱼结构装置的试验研究

陈海燕[1],赵再兴[2],李郴娟[3]

(1.贵州广播电视大学,贵州 贵阳 550004;
2.中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,贵州 贵阳 550081;
3.贵州交通职业技术学院,贵州 贵阳 550004)

摘要:常规鱼道的研究和设计大多侧重于其内部结构和水流条件等方面,对鱼道进口位置布置及结构优化的研究相对较少,往往存在鱼类发现并进入鱼道较为困难的情况。通过建立鱼道进口设计的生态水力学指标,提出了某项目集诱鱼进口所需要满足的流速范围为0.47~1.30 m/s,将鱼类游泳能力与鱼道进口流态指标相结合,用标准三维 κ-ε 模型数值模拟的方式,对以往鱼道进口位置的选择原则进行了验证,提出了一种可控流量、流速的新型诱鱼补水装置,对鱼道进口结构进行优化。该诱鱼补水装置利用局部水流落差,上游发电下泄水流进行诱鱼补水,避免采用自库区压力管道引水而产生的消能问题,降低了鱼道运行的成本;同时降低机组满发或发电流量较高时河段内的流速,可达到灵活调控诱鱼水流进而诱导鱼类进入鱼道完成洄游的效果,最终完成鱼道进口的优化,提高过鱼效果。

关键词:鱼道进口;三维 κ-ε 模型;数值模拟;诱鱼补水

中图分类号:S956 **文献标志码**:A **文章编号**:1674-3075(2019)06-0061-06

在河道中修建闸坝,会阻断河道原有的连续性,导致水生生物栖息环境发生变化。对于洄游性鱼类将无法完成生活史,导致其种群数量下降;对于非洄游性鱼类,将影响水域群体间的遗传交流,导致其种群遗传多样性减少(李志华,2009)。为让鱼类顺利通过障碍物,人工修建的鱼道在水利水电工程中被广泛应用。作为一种常用的过鱼设施,鱼道是在鱼类洄游时供鱼类通过闸、坝的人工水槽,其主要结构组成包括进口段、槽身段、出口段和辅助设施(王兴勇和郭军,2005)。在大多数水利水电工程中,鱼道是水生动物能够顺利通过障碍物并成功上溯的唯一通路,已成为人工方式对河流生态改良的关键设施,对于恢复鱼类及其他水生物种在河流中的自由通道具有重要的意义。鱼道的形成和发展体现了人们对修建拦河工程引起的水生生态环境问题的重视。

目前,常规鱼道在研究和设计时大多侧重于其内部结构和水流条件等方面,在优化鱼道内部结构的基础上,保证鱼道内部水流速度满足鱼类洄游的要求(Beach, 1984;狄高健等,2018)。由于对鱼类生活习性和洄游规律等方面的认识还不完善,对鱼道进口位置布置及结构的研究相对较少,导致鱼类进入鱼道困难,甚至根本无法进入鱼道,诱鱼效果差。一些研究通过监测资料并结合一些成功的过鱼设施经验,提出了鱼道进口位置选择原则,并改进了鱼道进口结构(Bunt, 2001)。鱼类能否较快地发现进口并准确进入鱼道是设计成败的关键之一。本文在前人研究的基础上,尝试建立鱼道进口设计的生态水力学指标,将鱼类游泳能力与鱼道进口流态指标相结合,探究鱼道进口位置与结构优化。

1 材料与方法

1.1 鱼道概况

选择西南地区某水电站为试验对象,装机容量为360 MW,机组满发引用流量约2 680 m^3/s。水库死水位574.0 m,正常蓄水位577.0 m,相应库容1 867万 m^3。在工程河段实际分布的鱼类有58种,其中省级保护鱼类5种,裸体鳅鮀(*Gobiobotia nudicorpa*)、重口裂腹鱼[*Schizothorax* (*Racoma*) *davidi*]、青石爬鮡(*Euchiloglanis davidi*)、大渡白甲鱼(*Onychostoma daduense*)、侧沟爬岩鳅(*Beaufortia liui*)、长薄鳅(*Leptobotia elongata*)、齐口裂腹鱼[*Schizothorax* (*Schizothorax*) *prenanti*]、长鳍吻鮈(*Rhinogobio ventralis*)等19种为长江上

收稿日期:2019-02-28

基金项目:国家自然科学基金资助项目-过鱼设施集诱鱼流态塑造与典型鱼类洄游的生态行为学响应机制(51779126)。

作者简介:陈海燕,1983年生,女,副教授,主要从事环境水力学教研工作。E-mail:269769555@qq.com

游特有鱼类。工程涉及河段无长距离洄游鱼类，部分为短距离洄游鱼类，大多数鱼类产卵繁殖期集中在4－8月，产卵时间相对较集中，确定该鱼道的主要过鱼季节为每年4－8月(廖伯文等，2018)。

为减缓水电站对该江段鱼类资源产生的不利影响，恢复工程上下游鱼类洄游与基因交流通道，工程考虑采取鱼道作为过鱼设施。鱼道结构自下向上由鱼道进口系统、鱼道池室、过坝段、鱼道出口段等组成。总长约1 200 m，池室长度2.5 m，宽度为2.0 m，池室坡度为$i=0.033$，池室水深1.5～2.5 m。池室平面布置如图1所示。

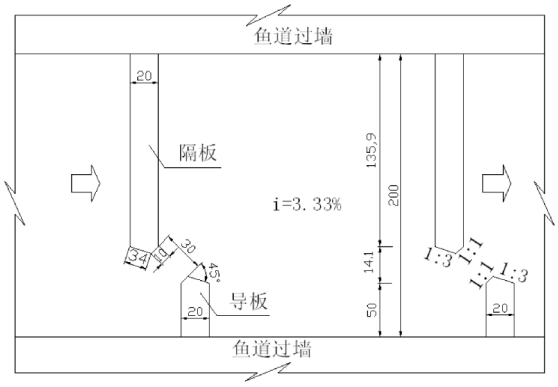

图1　池室平面布置图

Fig.1　Schematic diagram of the proposed fish passage

1.2　鱼道进口水力学指标

游泳能力被认为是决定许多鱼类和水生生物生存的主要特征。在鱼道进口，鱼类的游泳能力指标包括感应流速、临界游泳速度和突进游泳速度(Beamish，1978)。感应流速指鱼类开始产生反应的流速值，其标准通常是鱼类改变游动的方向；临界游泳速度是鱼类在一段特定时间内保持的最大速度，也是其稳定式游动和冲刺-滑行式游动的边界速度；突进游泳速度则是鱼类能够达到的最大速度，只能维持较短的时间。通过建立系列生态水力学指标，将鱼类的游泳能力还原至水力学指标，通过工程措施来更好满足其洄游需求。

鱼类能通过鱼道洄游的前提条件是其首先能通过鱼道进口进入鱼道。因此，必须将鱼道进口附近流速设置为“诱鱼流速”，即鱼道进口处的流速能让鱼类感知，从而吸引鱼群过来，能使其继续往鱼道洄游。感应流速是最小的“诱鱼流速”，临界游泳速度则是最佳的“诱鱼流速”。鱼道进口即水流出口，当鱼类被“诱鱼流速”吸引到鱼道进口时，鱼类会持续往上洄游，鱼道“进口流速”应该在感应游泳速度上限和临界游泳速度上限之间，不能超过突进游泳流速。根据本河段鱼类游泳能力相关研究资料分析，该工程项目所在河段目标鱼类的感应游泳速度上限为0.47 m/s，临界游泳速度上限为1.30 m/s，突进游泳流速1.35～1.60 m/s。故满足诱鱼流速条件的水流速度为0.47～1.30 m/s，极限流速为突进游泳流速下限1.35 m/s(孙东坡等，2016；王晓臣和邢娟娟，2018)。

1.3　鱼道进口结构优化

目前，鱼类如何寻找进口、进入的效率以及吸引水流的信息很少。集诱鱼进口是鱼道工程的“针眼”，良好的集诱鱼水流能够对洄游目标鱼类产生足够的吸引并引导其顺利到达进口(田志福和蒋固政，2013)。本研究尝试利用局部水流落差，提出一种新型的鱼道进口结构，引用上游发电下泄水流进行补水诱鱼，同时实现更为合理的流量和流速控制方式。此诱鱼补水装置主要包括集鱼挡墙(高度同于鱼道挡墙)，目的是将鱼诱至进口后，尽量停留于进口附近；流量控制栅栏(孔板组合形式)及消能段是为了增加补水流量并形成诱鱼水流，同时保证补水流速低于鱼类突进泳速；鱼道进口设置控制闸门，消能段前设置拦网。其结构如图2所示。

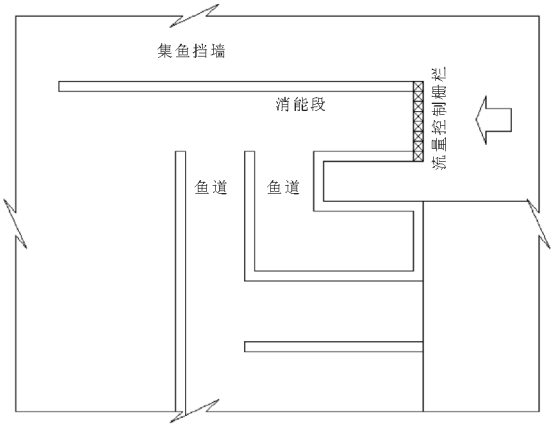

图2　鱼道进口诱鱼补水装置示意图

Fig.2　Schematic diagram of the fish attracting entrance to the fish passage

鱼道进口流量控制栅栏通过调整两块孔板的相对位置来实现对流量和流速的控制，当两块孔板刚好完全重合时，过水流量最大，这时相当于只有一块孔板。当调整两块孔板交错排列且相对位置最大时，过水流量最小(毛熹等，2011)；再通过消能段，使刚从流量控制栅流过的剧烈紊流变得平缓，从而控制鱼道进口处的流速及流态，满足诱鱼水流要求。鱼道进口流量控制栅栏孔板由均匀的横缝组成，结构模型见图3。

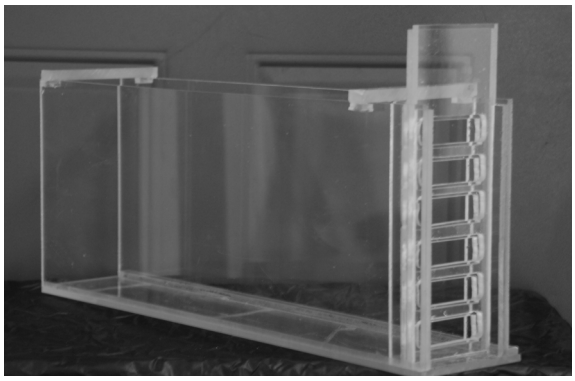

图 3　鱼道进口流量控制栅拦的结构模型

Fig.3　Model of the flow control fence for the fish passage entrance

1.4　鱼道进口数值模拟方法

针对前述某实际工程采用标准三维 κ-ε 模型进行计算(金忠青,1989;王福军,2004;李玲和李玉梁,2009);鱼道净宽 2.0 m,水深 1.5 m,保证流量为 1.0 m^3/s,其控制方程如下。

(1)连续方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{1}$$

(2)动量方程:

$$\frac{\partial u}{\partial i}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial x}+(v+v_i)\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 u}{\partial x\partial z}\right) \tag{2}$$

$$\frac{\partial v}{\partial i}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial y}+(v+v_i)\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x\partial y}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y\partial z}\right) \tag{3}$$

$$\frac{\partial w}{\partial i}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}=-\frac{1}{\rho}\frac{\partial \rho}{\partial z}+(v+v_i)\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial z}+\frac{\partial^2 w}{\partial y\partial z}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)+g \tag{4}$$

(3) 紊动能 k 方程和耗散率 ε 方程:

$$\frac{\partial k}{\partial i}+u\frac{\partial k}{\partial x}+v\frac{\partial k}{\partial y}+w\frac{\partial k}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{v_i}{\partial_k}\frac{\partial_k}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{v_i}{\partial_k}\frac{\partial_k}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{v_i}{\partial_k}\frac{\partial_k}{\partial z}\right]+\frac{G_k}{\rho}-\varepsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial i}+u\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}+v\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}+w\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left[\frac{v_i}{\partial_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right]+\frac{\partial}{\partial y}\left[\frac{v_i}{\partial_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial y}\right]+\frac{\partial}{\partial z}\left[\frac{v_i}{\partial_k}\frac{\partial \varepsilon}{\partial z}\right]+\frac{\varepsilon}{k}C_{1z}\frac{G_k}{\rho}-C_{2z}\frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

其中:

$$G_k=\rho v_i\left\{2\left[\left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial w}{\partial z}\right)^2\right]+\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)^2\right\} \tag{7}$$

$$v_i=C_u\frac{k^2}{\varepsilon} \tag{8}$$

式中:u、v、w 分别为 x、y、z 方向的速度(m/s);ρ 为水体密度(kg/m^3);p 为时均压强(Pa);v 和 v_t 分别表示水的分子粘性系数和紊动涡粘系数;g 为重力加速度(m^2/s);k 表示紊动动能(m^2/s^2);ε 表示紊动动能耗散率(m^2/s^3);σ_k、σ_z、C_{1z}、C_{2z}、C_μ 均为经验常数(吕强等,2016),$\sigma_k=1.0$,$\sigma_z=1.3$,$C_{1z}=1.44$,$C_{2z}=1.92$,$C_\mu=0.09$。

2　结果与分析

选择鱼道进口布置位置时,单纯依靠监测鱼类资料和已建成工程实例经验是远远不够,需要进行数值模拟和模型试验来验证。本文以数值模拟的方式验证以往鱼道进口位置的选择原则。以水力学模型试验的方式来验证鱼道进口结构优化后的补水诱鱼效果改善情况。

2.1　鱼道进口数值模拟

利用标准三维 k-ε 模型进行计算,结果如图 4。

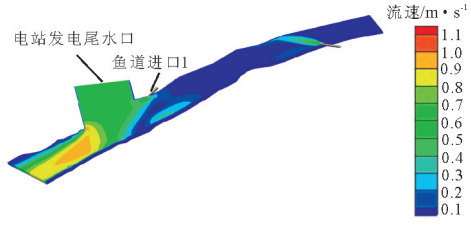

图 4　计算结果三维流场

Fig.4　Three dimensional flow field diagram for the fish attracting entrance of the fish passage

从数值模拟结果来看,整个计算范围的最大流速出现在电站发电尾水渠出口及其附近下游河道交汇处,约为 1.1 m/s;电站发电尾水渠出口及其下游河段区域的流速较大,范围在 0.5～1.0 m/s。模拟结果表明,该水电工程最适宜的鱼道进口布设位置

在发电站同侧，发电尾水渠出口是大坝向下游泄水的主要途径和最直接的诱鱼区。将鱼道进口设置在电站发电尾水渠出口附近，能使鱼类洄游途径上的“死水区”减少到最小，避免溯河洄游的鱼类难以察觉到进口并仍然停留在死水区而被困住的局面(Ellerby & Herskin，2013)。

2.2　鱼道进口诱鱼装置模型

将前文所述数值模拟方法确定的鱼道进口位置区域应用于工程枢纽模型中，对诱鱼补水装置优化的鱼道进口结构进行水力学模型试验，测量诱鱼补水装置的出水口下游局部区域靠边处流速及鱼道进口区域流速，均采取两块孔板完全重合的控制方法，共模拟了4种不同的工况(表1)。

表1　数值模拟的4种不同工况

Tab.1　Four operational scenarios for numerical simulation of entrance hydraulics

项目	工况			
	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
机组/台	2	3	4	6
流量/$m^3 \cdot s^{-1}$	679.4	1105.1	1579.8	2750.6

试验中，选择4台机组放水，对应流量1 579.8 m^3/s为典型工况，4台机组放水工况下，诱鱼补水装置出水口下游局部区域鱼道进口1靠边处流速的沿程变化如图5。

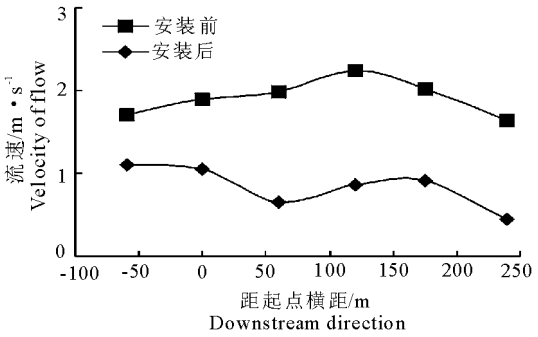

图5　鱼道进口1靠边处流速沿程变化

Fig.5　Velocity along the side of the fish attracting entrance

试验表明，诱鱼补水装置安装前，进口处流速为1.2～2.2 m/s，大部分区域高于目标鱼类的临界流速上限，超过诱鱼流速范围；装置安装后，进口处流速在0.5～1.1 m/s，比装置安装前的流速降低了近50%，大部分区域满足诱鱼流速要求。表明该装置能较好地降低下游进口处的流速，满足诱鱼的流速要求，即大于目标鱼类的感应流速，接近于目标鱼类的临界游泳速度，能吸引鱼类找到鱼道进口。

与4台机组的计算方法相同，再进行放水试验，计算2台、3台、4台、6台机组放水情况下分别为0.60 m/s、0.62 m/s、0.63 m/s和0.78 m/s时的鱼道进口流速，如图6所示。

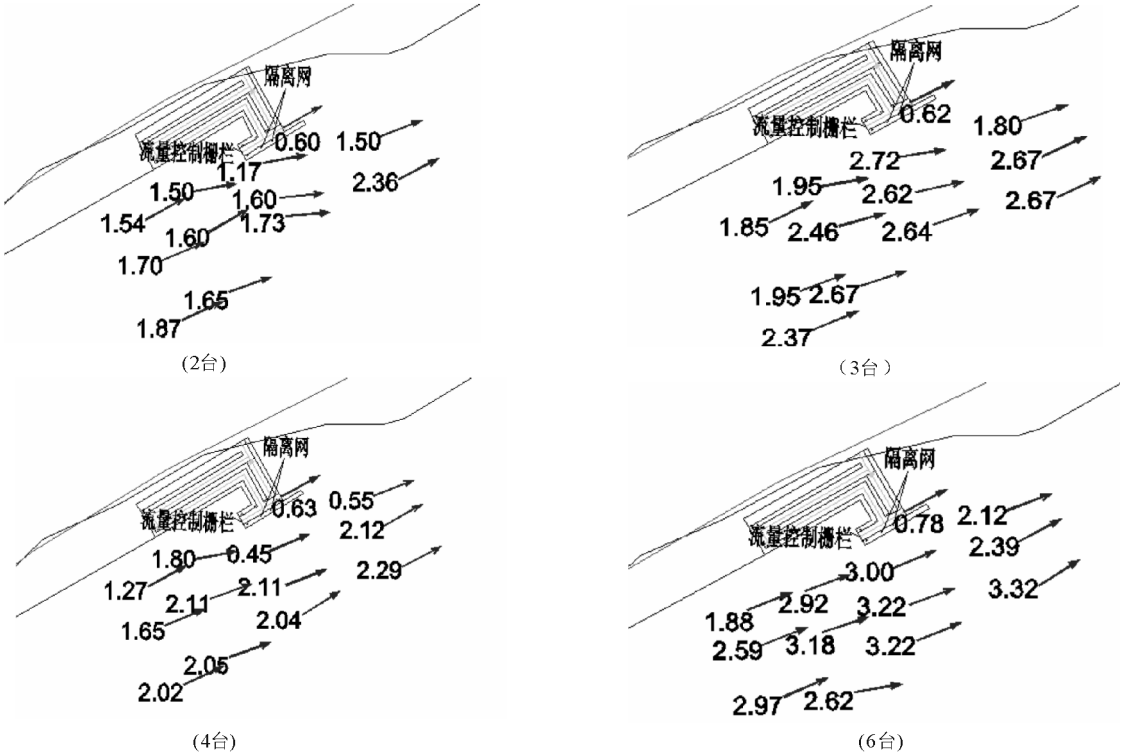

图6　不同机组放水时的鱼道进口局部区域流速(m/s)分布示意

Fig.6　Entrance velocity distributions under difference hydraulic conditions

根据测量结果，流速对于流量控制栅栏的调节变化比较敏感，相对于附近的高流速，不同工况下鱼道进口处的流速在 0.60～0.78 m/s，满足鱼道进口流速的要求，大于目标鱼类的感应游泳速度上限，小于目标鱼类的突进游泳速度下限。即使运行后监测鱼道进口处的流速超过目标鱼类的突进游泳速度，只需要调整流量控制栅栏的空隙率，即可控制鱼道进口处的流速(Crowder & Diplas, 2011)。

3　结论

(1)以往鱼道进口的设计对鱼类游泳能力指标更好地反映至流态上考虑较少。本文尝试建立了鱼道进口的生态水力学指标，将鱼类的游泳能力还原成水力学指标，在鱼道设计过程中，将目标过鱼对象感应流速上限作为诱鱼流速下限，以达到不同过鱼对象可以辨识鱼道进口主流方向并满足鱼道入口诱鱼的目的，继而通过工程措施更好地满足鱼类洄游的需求。

(2)实际工程中，鱼道进口必须定位在鱼类溯河运动时集中的地方，可根据下游水流特征及水电站布置情况确定该集中区(南京水利科学研究院，1982)。本文采用标准三维 k-ε 模型，模拟加入鱼道进口后整体河道的三维流场，验证发现鱼类集中区在发电尾水处，鱼道进口位置应选择在发电尾水附近，避开“死水区”，避免鱼类感应不到主流方向而徘徊在进口以外的情况。

(3)通过优化鱼道进口结构，采用就地引用河道水量的形式，利用局部水流落差，上游发电下泄水流进行诱鱼补水，避免采用自库区压力管道引水而产生的消能问题，降低了鱼道运行的成本。

(4)优化后的鱼道进口，流速对调整流量控制栅栏的调节变化比较敏感，安装诱鱼补水装置安装后，流速降低了近 50%，实现了对流量和流速的控制(华东水利学院，1982)；该结构设计针对不同的目标鱼类，均可达到灵活调控诱鱼水流，进而诱导鱼类进入鱼道，完成洄游的目的。

参考文献

狄高健，韩雷，田振华，等，2018. 细鳞河水库鱼道进口河段水力特性数值模拟研究[J]. 水利科学与寒区工程，10(1)：14－18.

华东水利学院，1982. 水工设计手册(第 6 册)——泄水与过坝建筑物[M]. 北京：水利电力出版社.

金忠青，1989. N-S 方程的数值解和紊流模型[M]. 南京：河海大学出版社：50－57.

李玲，李玉梁，2009. 应用基于 RNG 方法的湍流模型数值模拟钝体绕流的湍流流动[J]. 水利学报，40(11)：1386－1391.

李志华，2009. 鱼道——设计、尺寸及监测[M]. 北京：中国农业出版社.

廖伯文，安瑞冬，李嘉，等，2018. 高坝过鱼设施集鱼进口水力学条件数值模拟与模型试验研究[J]. 工程科学与技术，50(5)：86－92.

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

毛熹，李嘉，易文敏，等，2011. 鱼道结构优化研究[J]. 四川大学学报(工程科学版)，43(S1)：54－59.

南京水利科学研究院，1982. 鱼道[M]. 北京：电力工业出版社.

孙东坡，何胜男，王鹏涛，等，2016. 明槽式鱼道进流口区水流特性及改善措施[J]. 水利水电技术，58(4)：58－62.

田志福，蒋固政，2013.欧洲河流鱼类洄游通道恢复的研究与实践[J]. 水生态学杂志，34(4)：10－13.

王福军，2004. 计算流体动力学分析—CFD 软件原理与应用[M]. 北京：清华大学出版社.

王晓臣，邢娟娟，2018. 5 种鱼感应流速比较分析[J]. 水生态学杂志，39(2)：77－81.

王兴勇，郭军，2005. 国内外鱼道研究与建设[J]. 中国水利水电科学研究院学报，3(3)：222－228.

Beach M A, 1984. Fish Pass Design. Fisheries Research Technical Report No. 78[M]. Lowestoft, England: Ministry of Agriculture, Fisheries and Food.

Beamish F W H, 1978. Swimming capacity[C]. In: Hoar, W S, Randall, J D (Eds), Fish Physiology, vol. 7[M]. Academic Press Inc, New York: 101－187.

Bunt C M, 2001. Fishway entrance modications enhance fish attraction[J]. Fishes Management and Ecology, 8(2): 95－105.

Crowder D W, Diplas P, 2011. Evaluating spatially explicit metrics of stream energy gradients using hydrodynamic model simulations[J]. Canadian journal of fisheries & aquatic sciences, 57(7): 1497－1507.

Ellerby D J, Herskin J, 2013. Swimming Flumes as a Tool for Studying Swimming Behavior and Physiology: Current Applications and Future Developments[M]. Swimming Physiology of Fish, Springer Berlin Heidelberg: 345－375.

(责任编辑　万月华)

Study of a Proposed Fish Attracting Entrance for a Fish Passage

CHEN Hai-yan[1], ZHAO Zai-xing[2], LI Chen-juan[3]

(1.Guizhou Radio & TV University, Guiyang 550004, P.R.China;
2.Power China Guiyang Engineering Corporation Limited, Guiyang 550081, P.R.China;
3.Guizhou Jiaotong College, Guiyang 550081, P.R.China)

Abstract: Location and structure optimization of fish passage inlets are key issues for fish passage design. Previous research has focused on the internal structure and appropriate water flow conditions in fish passages, but it is important to attract fish to the passage entrance. In this study, we studied the ecohydraulics of a proposed entrance design that attracts fish and provides water for a fish passage being designed for a hydropower station in southwest China. Ecohydraulic criteria were first established for the fish passage entrance, with a flow velocity in the range of 0.47 – 1.30 m/s, based on the swimming ability of target fish species and the flow pattern at the entrance. Numerical simulation was then carried out to verify the entrance location using the standard three-dimensional κ-ε turbulence model and hydraulic model test was used to optimize the entrance structure. Finally, the optimized entrance structure, with controllable water flow and velocity, was proposed for the fish passage. The device uses the discharge from upstream power generation as the water source, avoiding the energy dissipation that would result from diverting water in a pressured pipeline from the reservoir and reducing the cost of operating the fishway. Furthermore, the design allows regulation of flow so that a velocity that attracts fish entering the entrance can be achieved. The proposed design allows fish to successfully navigate the fish passage under different hydropower generating conditions and decreases the cost of operating the passage.

Key words: fish passage entrance; three-dimensional k-ε model; numerical simulation; fish attracting and water replenishment