

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.022

过鱼设施进口及吸引流设计

金志军¹, 单承康¹, 崔磊², 王 猛¹, 罗 思¹, 石小涛³, 马卫忠¹

(1. 中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081; 2. 水电水利规划设计总院, 北京 100120;
3. 三峡大学三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 湖北 宜昌 443002)

摘要:利用过鱼设施效果评价模型, 分析得到过鱼设施进口吸引流是影响过鱼设施效果的关键因素。通过研究我国过鱼设施现状, 指出我国过鱼设施在进口吸引流设计方面存在的不足。结合水利水电工程特性, 从过鱼设施吸引流和竞争流的角度出发, 给出了过鱼设施位置、进口位置、进口朝向、进口吸引流流量和流速等关键问题的设计思路, 并提出了过鱼设施进口概化模型。

关键词:过鱼设施; 进口位置; 朝向; 吸引流; 进口概化模型

中图分类号:TV222 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)06-0145-10

Design of entrance and attraction flow of fish passage facility // JIN Zhijun¹, SHAN Chengkang¹, CUI Lei², WANG Meng¹, LUO Si¹, SHI Xiaotao³, MA Weizhong¹ (1. Guiyang Engineering Co., Ltd., Power China, Guiyang 550081, China; 2. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China; 3. Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, Ministry of Education, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: By using the efficiency evaluation model of fish passage facilities, it is found that the attraction flow at the entrance is the key factor affecting the efficiency of fish passage facilities. This paper studies the current situation of fish passage facilities in China, and points out the shortcomings in the design of entrance attraction flow of fish passage facilities in China. Combined with the characteristics of water conservancy and hydropower projects, from the perspective of attraction flow and competition flow of fish passage facilities, the design ideas of key issues such as the location of fish passage facilities, the position of the entrance, the entrance orientation, the flow and velocity of the entrance attraction flow are given, and a generalized model of the entrance of fish passage facilities is proposed.

Key words: fish passage facility; entrance position; orientation; attraction flow; generalized model of entrance

过鱼设施指能够帮助受到阻隔的鱼类顺利上行或下行通过大坝或其他障碍物, 到达其繁殖地、索饵场或越冬场等重要生活史场所的工程或技术手段。其主要原理是, 首先通过一定的诱鱼措施将坝下或坝上的鱼类集中聚集起来, 然后通过模拟自然的洄游通道或者人工将鱼输送过坝^[1-2]。在诱鱼设施有效, 洄游通道或人工输鱼过程设置合理的情况下, 鱼类可以在过鱼设施的帮助下顺利通过大坝。Bunt 等^[3]对池堰式鱼道、竖缝式鱼道、丹尼尔式鱼道和仿自然鱼道的过鱼效果进行统计, 数据涉及 6 个国家的 26 种洄游鱼类 (包括河海洄游性鱼类和河湖洄游性鱼类), 数据显示过鱼设施进口吸引率具有

高度差异性: 池堰式鱼道的吸引率为 29% ~ 100%, 平均值为 77%, 中位数为 81%; 竖缝式鱼道的吸引率为 0 ~ 100%, 平均值为 63%, 中位数为 80%; 丹尼尔式鱼道的吸引率为 21% ~ 100%, 平均值为 61%, 中位数为 57%; 仿自然鱼道的吸引率为 0 ~ 100%, 平均值为 48%, 中位数为 50%。Bunt 等^[3]进一步通过主成分分析和 logistic 回归模型进行研究, 结果表明: 过鱼设施进口吸引率的变化是由所研究鱼类的生物学特性和进口吸引力决定的。不考虑鱼类生物学特性差异, 过鱼设施效果取决于内部结构和进口条件, 因此首先利用过鱼设施效果评价模型, 研究影响过鱼效果的关键因素。

基金项目: 中国电力建设股份有限公司科技项目 (DJ-ZDXM-2014-04); 国家自然科学基金 (51579136); 黔科合基础 [2018] 1169; 贵阳院电力科学技术发展基金 (YJ2016-17)

作者简介: 金志军 (1990—), 男, 助理工程师, 硕士, 主要从事生态水力学研究。E-mail: jinzhijunxyz@qq.com

通信作者: 马卫忠, 高级工程师。E-mail: 123214989@qq.com

1 影响过鱼效果的关键因素

过鱼设施设计和实施的目的是为鱼类提供安全、及时、有效的通道。这一过程中的几个概念定义如下^[4-5]:安全通过:鱼类通过通行区过程中,不会导致不可接受的压力,增加伤害或死亡(例如,涡轮卷吸、撞击坝体和增加的被捕食几率);如果鱼类通过障碍物过程中导致洄游延迟、生理损害或死亡,从而影响随后的游泳行为、生长或繁殖,则不应将其视为安全过鱼通道。及时通过:鱼群通过通行区,没有实质性的延迟或影响其基本行为和生活史要求。高效通过:在一个或多个关键时期,由于过鱼设施结构设计、操作运行和环境条件的良好条件下,目标物种能有效通过通行区;目标物种是否高效通过过鱼设施主要由成功率和吸引率进行定量评价。过鱼设施进口吸引率 P_A :鱼类到达过鱼设施吸引区所占的比例,吸引区是指鱼类感受到的鱼道进口吸引流或辅助诱导措施信号,吸引区一般指靠近过鱼设施进口附近;如图1所示,到达坝下的10尾鱼中有7尾鱼被吸引到过鱼设施进口附近,则过鱼设施进口吸引率为70%。过鱼设施进口成功率 P_E :被过鱼设施成功吸引并进入进口的比例,通常以进入进口的种群(包括种类和数量)百分比来度量;如图1所示,靠近过鱼设施进口的7尾鱼中有5尾鱼通过进口,则过鱼设施进口成功率为71.4%。鱼道通过率 P_p :鱼类进入鱼道并顺利通过鱼道的鱼数量占进入鱼道数量的比例,也称为“鱼道内部效率”;如图1所示,进入鱼道内的5尾鱼中有4尾鱼游出鱼道出口,则鱼道通过率为80%。过鱼设施效率 P_{tot} :一种定量测量从通行区成功通过整个障碍的鱼种数量所占的比例,通常表示为进口吸引率、进口成功率和鱼道通过率的乘积,也可定性反映过鱼设施是否为鱼类提供了安全、及时的通道。

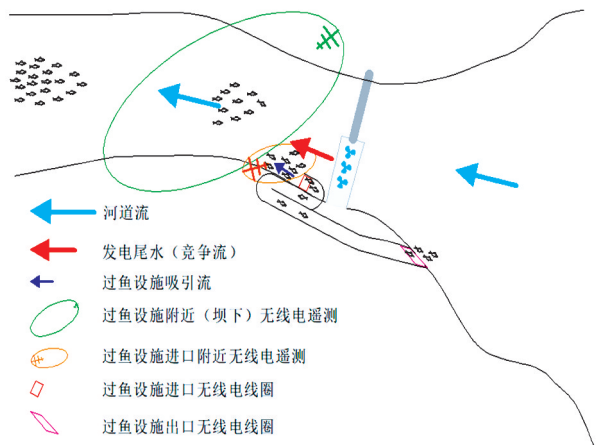


图1 过鱼效果标准化评价模型示意图

由图1可见,设计过鱼设施时需要考虑两个关键问题:一是将鱼吸引到进口通道中,二是将鱼移出过鱼设施出口。进口可通过性、鱼道内部可通过性和过鱼设施操作运行时间这3个因素决定了过鱼设施总效果。其中进口可通过性由进口吸引率和进口成功率决定;鱼道内部可通过性由鱼道通过率决定;过鱼设施操作运行时间是指目标鱼类洄游期,在洄游期间过鱼设施处于良好运行状态的时间长短,很大程度上决定了鱼总的通过数量。影响进口可通过性的关键因素主要包括进口位置、进口朝向、吸引流量、进口流速和进口水头落差^[6-7]。

2 我国过鱼设施建设现状及存在的主要问题

2.1 我国过鱼设施建设现状

在已有的过鱼设施建设情况统计基础上^[8-12],进一步收集资料,对1958—2018年水利水电工程建设项目中的过鱼设施工程进行了统计,包括已建和设计中的过鱼设施共80项,得到我国过鱼设施类型和数量分布情况见图2。

根据鱼类洄游路径来划分,目前我国过鱼设施项目均涉及鱼类上行过鱼设施,除了金沙江龙开口水电站和金沙江苏洼龙水电站同时设计了鱼类上行和下行过鱼设施外,其余的水利水电工程配套的鱼类下行过鱼措施大多为网捕过坝或将鱼类上行过鱼设施作为鱼类下行通道。因此下面主要针对鱼类上行过鱼设施进行相关的介绍。

根据鱼类是否自主上溯过坝,我国过鱼设施可分为鱼类自主上溯型过鱼设施(有竖缝式鱼道、池堰式鱼道、仿自然鱼道、丹尼尔鱼道以及组合式)和鱼类非自主上溯型过鱼设施(升鱼机、集运鱼船等集运鱼系统)。其中自主上溯型过鱼设施占75.0%(60项),非自主上溯型过鱼设施占13.8%(11项),剩余的11.2%(9项)过鱼设施类型不详。在所有类型已知的过鱼设施中,其中竖缝式鱼道占59.2%,池堰式鱼道占14.1%,仿自然鱼道占5.6%,仿自然+竖缝式组合形式占4.2%,丹尼尔鱼道占1.4%,集运鱼船系统占5.6%,升鱼机系统占9.9%。

我国竖缝式鱼道类型有同侧竖缝、异侧竖缝和双侧竖缝式鱼道;池堰式鱼道主要为有带孔(有底孔,中孔,表孔)和不带孔的横隔板式鱼道;仿自然鱼道的阻流体主要是由卵石砌起来的阻流墙(类似于竖缝式鱼道);过鱼设施类型已知的统计项目中只有广州溪流河水厂坝过鱼设施类型为丹尼尔式鱼道;彭水水电站、马马崖一级水电站、龙开口水电站和果多水电站过鱼设施类型均为集运鱼船系统。统计发现,目前我国高坝过鱼设施类型主要趋势是集

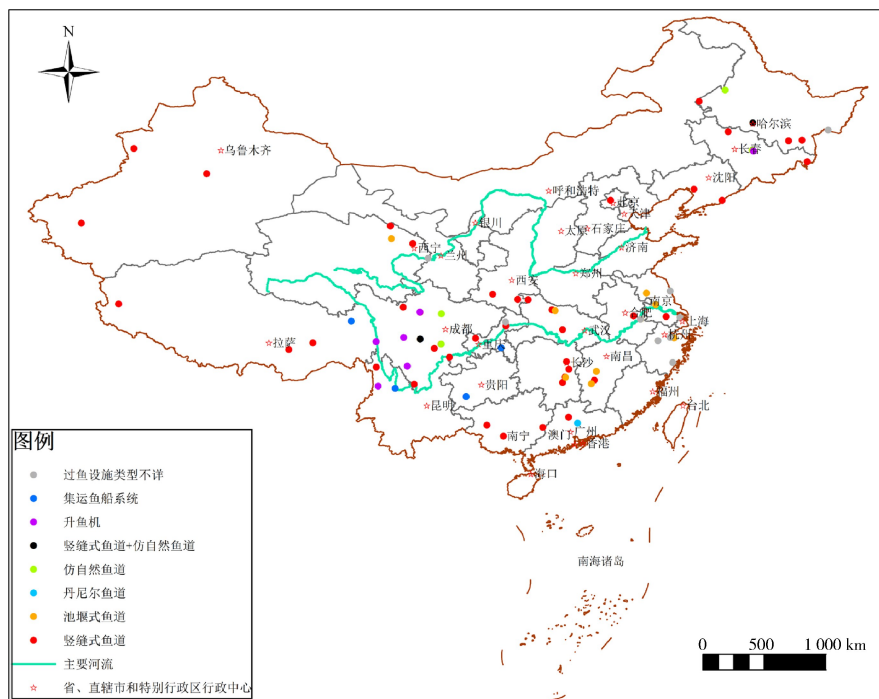


图2 我国过鱼设施类型和数量分布

诱鱼通道 + 提升系统 + 运鱼系统(运鱼船或运鱼车)的组合形式,如丰满水电站、两河口水电站、杨房沟水电站、双江口水电站、黄登水电站、苏洼龙水电站和卡拉水电站均是通过竖缝式鱼道段集诱鱼,绞车提升,运鱼船运输放流的形式来实现鱼类上行过坝。

2.2 我国过鱼设施存在的主要问题

过鱼设施吸引流包括从过鱼设施出口流入鱼道内部的流量(设计流量,也称为鱼道基流)和过鱼设施辅助吸引流系统排放的流量。通过对设计流量和辅助诱鱼措施有明确数值或设计工艺的文献进行统计(表1),统计指标包括鱼道基流、辅助吸引流和诱鱼措施等,结果表明我国过鱼设施吸引流流量占坝址多年平均流量和发电引水流量的比率极小,甚至可以忽略不计(绝大部分少于1%),这与陈凯麒等^[9]2012年统计结果一致;同时只有少数过鱼设施设计有辅助吸引流,但目前仍未有成功案例报道。虽然部分过鱼设施设计以通过少量的水喷出水柱溅落来产生水花、水流声的补水方式,但至今未有文献报道水声、水花能增强过鱼设施诱鱼效果。同时发现,在吸引流流量定义和定量以及辅助吸引流设计工艺等方面我国尚无统一的认识。

3 过鱼设施竞争流和吸引流

3.1 过鱼设施竞争流

在典型的水利水电项目中,河道水流经过、穿过和绕过各种机器和水控制结构。流经涡轮机、溢洪道、闸等水控制结构的水流产生的流场可能吸引鱼,从而与过鱼设施吸引流相竞争。图3为竞争流和过



(a) 案例1



(b) 案例2



(c) 案例3



(d) 案例4

图3 过鱼设施吸引流和竞争流

表1 国内部分鱼道设计流量(鱼道基流)、辅助吸引流和诱鱼措施情况统计

项目名称	所属河流	鱼道类型	设计流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	有无辅助 吸引流设计	备注	参考文献
丹东三湾水利枢纽	鸭绿江	竖缝式	0.41	无	坝址处河道多年平均流量为 $12.03 \text{ m}^3/\text{s}$ 。设计流量为多年平均流量的 $3\% \sim 5\%$	曹刚 ^[13]
鱼梁航运枢纽	广西右江	竖缝式	1.03	有	补水流量为 $12 \sim 20 \text{ m}^3/\text{s}$	艾克明 ^[14]
湘江长沙综合枢纽	湘江	竖缝式	1.8	无		刘新征 ^[15]
开都河第二分水枢纽	开都河	竖缝式	0.74	N/A		曹娜等 ^[10]
峡江水利枢纽	赣江中游	竖缝式	2.5	无		翟梓良等 ^[16]
引大济湟工程	大通河	竖缝式	1.35	无		曹娜等 ^[10]
依兰航电枢纽	松花江	仿自然+竖缝式	1.06	无	河道流量为 $1665 \sim 2220 \text{ m}^3/\text{s}$	于广年 ^[17]
长洲水利枢纽	西江	竖缝式	6.64	无	坝址多年平均流量为 $6120 \text{ m}^3/\text{s}$;设置有辅助供水系统,该辅助供水系统以喷出的多股水柱溅落时形成水花,产生水流声来诱鱼	谭细畅等 ^[18]
老龙口水利枢纽	珥春河	竖缝式	N/A	无	布置有拦鱼、导鱼电栅	赵学昌等 ^[19]
兴隆水利枢纽	汉江	竖缝式	0.65	有	在发电尾水管处设计有多个进口的集鱼渠道	曹娜等 ^[10]
老口航运枢纽	郁江	竖缝式	0.8	无		赵学昌等 ^[19-20]
沙坪坝二级水电站	大渡河	竖缝式	0.5	N/A		曹娜等 ^[10]
枕头坝一级水电站	大渡河	竖缝式	1.08	无	坝址多年平均流量为 $1360 \text{ m}^3/\text{s}$;有3个进口、3个出口来满足上下游水位波动	陈国柱等 ^[21]
丰满水电站	松花江	升鱼机	1.37	无		刘志国等 ^[22-23]
新集水电站	汉江	竖缝式	0.5-0.6	N/A		曹娜等 ^[10]
汉江旬阳水电站	汉江	竖缝式	0.75~0.87	无		金奔等 ^[24]
多布水电站	尼洋河	竖缝式	4	无		李天宇等 ^[25]
赣江井冈山山水电站	赣江	池堰式	0.4~1.0	N/A		曹娜等 ^[10]
四川省绰斯甲河绰斯甲水电站	大渡河	竖缝式	1.2	N/A		曹娜等 ^[10]
金沙水电站	金沙江	竖缝式	2.3	有	通过两根相互独立、内径为 0.7 m 的引水管从上游向下游引水;鱼类洄游期发电流量为 $511 \sim 3140 \text{ m}^3/\text{s}$	朱世洪等 ^[26]
藏木水电站	雅鲁藏布江	竖缝式	0.27~0.74	无	有3个鱼道进口	陈静等 ^[27]
株洲航电枢纽	湘江	竖缝式	N/A	无		姜兴良 ^[28]
楠溪江拦河闸	楠溪江	不详	1	无	发电流量为 $45 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$	史斌等 ^[29]
绥芬河渠道拦河坝	绥芬河	竖缝式	0.64	无		殷悦来等 ^[30]
湖南省洋塘水闸	洙水	池堰式	1.34	有	补水流量为 $16 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$	艾克明 ^[14]
新疆叶尔羌河鳌高水电站	叶尔羌河	竖缝式	0.45~0.65	无		向晨光等 ^[31]
湘江土谷塘航电枢纽工程	湘江	竖缝式	N/A	有	设计有辅助吸引流(通过抽水泵增加进口流量)	甘茂辉等 ^[32]
太平闸鱼道	太平河	池堰式	1.5	无		南京水利科学 研究院 ^[33]
新疆北岸干渠引水枢纽	伊犁河	竖缝式	0.78~1.2	无		戚印鑫等 ^[34]
三峡水库开县水位调节坝	小江澎溪河	竖缝式	N/A	有	补水管管径为 0.6 m ,补水流量为 $0.4 \text{ m}^3/\text{s}$	高大水等 ^[35]
辽河盘山闸	辽河	竖缝式	>0.93	无		王明磊等 ^[36]
广州溪流河水厂坝	溪流河	丹尼尔式	0.52	无	河道流量 $29 \sim 54 \text{ m}^3/\text{s}$	张艳艳等 ^[37]
利泽航运枢纽	嘉陵江	竖缝式	0.57~0.75	有	采用上游由有压钢管引水,鱼道进口段底板出水 的形式	李明伟等 ^[38]
北京上庄水库	南沙河	竖缝式	0.262	无	在鱼道进口和出口设置有辅助供水系统,该辅助供水系统喷出的多股水柱溅落时形成水花,产生水流声诱鱼	张双科 ^[39]

注:表格中 N/A 表示内容不详;其中通过少量的水以喷出水柱溅落来产生水花、水流声来诱鱼的补水方式在本表中不属于辅助吸引流。

鱼设施吸引流相竞争的例子,其中案例1中仿自然鱼道进口位置距离发电尾水较远,鱼类容易被流量较大的发电尾水吸引,导致鱼道吸引流与发电尾水竞争失败,案例2、3、4的鱼道进口位置是正确的。

3.2 过鱼设施吸引流

3.2.1 吸引流流量

在大多数设计条件下,鱼道内部不能直接排放

足够的吸引流。因此,为了创造足够的吸引水流,过鱼设施必须辅以诱鱼水流。目前确定吸引流的流量有以下两种方法:①统计水文学法,即吸引流流量占河流流量的某一比例;②竞争流占比法,即吸引流占所有竞争流总和的某一比例。由于发电流量通常是最主要和最可预测的竞争流量,因此这种方法通常被简化为吸引流量占发电流量的某一比例。采用统

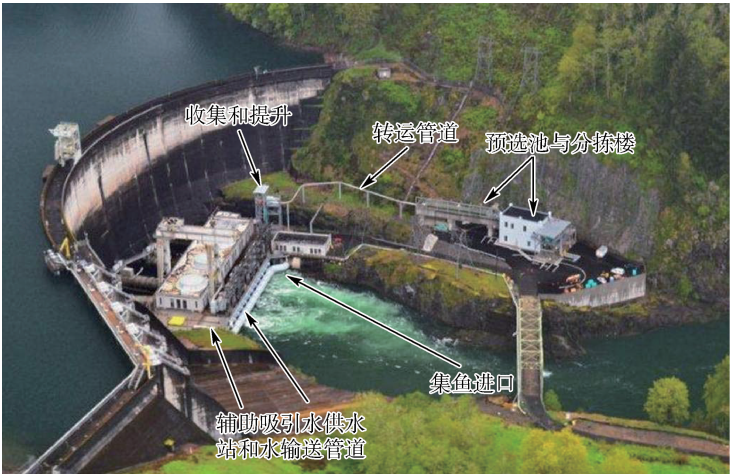
计水文学方法的情况下,通常鱼道吸引流占河道总流量比例越大,其过鱼效果越好。但是吸引流流量确定除了需要考虑发电效益外,同时受地形、坝下水流条件、季节变化和进口与大坝相隔距离的影响。美国国家海洋渔业服务中心(National Marine Fisheries Service, NMFS)建议在诸如哥伦比亚河和蛇河(Columbia and Snake rivers)等大型河流的过鱼设施中,其吸引流流量不低于河道年平均流量的3%;对于在无水电站的大坝中修建过鱼设施, NMFS认为美国西北地区年平均流量超过1000立方英尺每秒(约 $30\text{ m}^3/\text{s}$)的河流,过鱼设施吸引流流量占鱼类洄游期间河道设计流量的5%~10%,且对于流量较小的河流,过鱼设施吸引流所占的比例更大;此外, NMFS建议鱼道吸引流应该从整个过鱼设施中流出或者在进口段集中流出^[41]。在英格兰和威尔士地区, Armstrong等^[42]建议过鱼设施吸引流最小流量相当于年平均河道流量的5%,如果可能的话,大于或等于10%。对于基于竞争流占比法,针对有水力发电的大坝, NMFS建议过鱼设施吸引流量不低于发电流量的3%~5%^[42]; Orvis等^[43]认为过鱼设施吸引流流量应占最大发电流量的3%~5%; Armstrong等^[42]推荐过鱼设施

吸引流流量占最大发电流量的5%~10%,同时对于流量较小的河道或者过鱼设施进口位置远离坝址的情况,要求过鱼设施吸引流占竞争流的比例更高。可见,国外在过鱼设施吸引流流量定量方面有明确的推荐值和规定,但目前在我国还未有相关文献和技术指南对过鱼设施吸引流做出相关的规定。

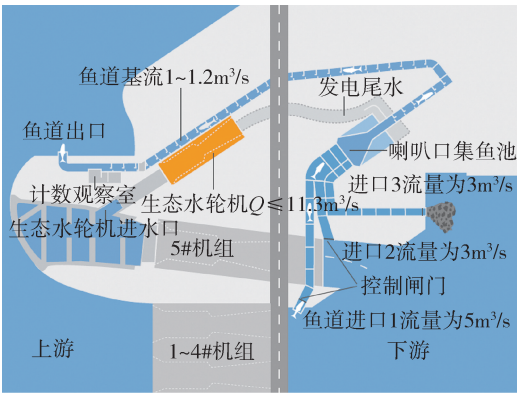
在工程设计中,进口吸引流除了引自库区,也可通过工程措施将竞争流转化为过鱼设施吸引流:如将小型生态水轮机的发电尾水充当过鱼设施辅助吸引流^[44],通过水泵输送竞争流至过鱼设施进口通道来充当吸引流^[45],通过导流^[38]、集流^[46]等工程手段将发电尾水或河道池水导入进口通道等,案例见图4。图4(a)为嘉陵江利泽航运枢纽鱼道进口模型,鱼道进口左侧斜切边壁外每隔1.2 m布置了两个混凝土导流墩,达到将发电尾水导入鱼道进口处增加进口吸引流的目的;图4(b)为美国 Lewis 河 Merwin 大坝集运鱼系统,辅助吸引流泵站通过管道将右岸发电尾水输向左岸鱼道进口通道,最大可提供 $16.8\text{ m}^3/\text{s}$ 的流量;图4(c)为德国 Rhine 河 Iffezheim 水电站鱼道,鱼道基流为 $1.2\text{ m}^3/\text{s}$,生态水轮机发电尾水提供吸引流流量高达 $11.8\text{ m}^3/\text{s}$;图4(d)为葡萄牙



(a) 案例1



(b) 案例2



(c) 案例3



(d) 案例4

图4 增强过鱼设施进口吸引流的工程案例

Mondego 河 Coimbra 坝鱼道,坝下游开挖有集流凹槽,弃水流量在 $5 \sim 100 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,大部分水进入左岸鱼道进口渠道,充当吸引流。

3.2.2 吸引流流速

过鱼设施吸引流的水力影响一直持续到吸引流与尾水完全混合,射流的速度与周围流场无法区分为止。为了增加过鱼设施吸引流吸引力,射流的速度和吸引流容积必须产生足够的动量,以便与周边水体区分,制造更广的影响范围。同时,射流速度不能对迁移鱼类造成速度障碍。进口速度受到进口通道几何形状、进口闸门的开度(或角度)、尾水高度及周边竞争流影响。闸门位置必须根据不同的尾水高度进行调整,以保证良好的鱼类通过条件。NMFS 建议对于大西洋东海岸的过鱼设施项目,如果过鱼对象为美洲鲱鱼,则进口射流速度(在进口处测量)在 4 至 6 英尺每秒(约 $1.219 \sim 1.829 \text{ m/s}$)的范围内;如果目标鱼种只有游泳能力较强的大西洋鲑鱼,则进口射流速度为 4 至 8 英尺每秒(约 $1.219 \sim 2.438 \text{ m/s}$)^[41]。

鱼类穿越较高流速区域,特别是通过速度屏障区(如鱼道进口高速区、堰口、孔口和竖缝等处)的能力取决于物种游泳能力和目标物种个体大小,以及鱼类必须通过高流速区的区域长度。进口射流制造的高速区长度往往较短,在设计时,可以通过鱼类游泳速度-持续游泳时间关系曲线来推导出鱼类可通过高流速区的区域长度^[5,47],进而反演出吸引流流量和流速的设计区间。

4 过鱼设施布局

4.1 过鱼设施位置

过鱼设施位置的确定要考虑障碍物的布置、发

电情况等因素。不同情况下的鱼道位置见图 5。

①障碍物无发电要求。在这种情况下(一般为低水头堰)。拦河堰阻隔了鱼类上行通道,上行鱼类一般聚集堰下。这时,过鱼设施通常位于靠近堰和河岸的位置。对于宽河道上的全河段障碍物,可能需要设计两座鱼道(图 5(a));在障碍物斜向布置情况下,过鱼设施应位于河边,其进口在鱼类通常聚集的尖角处(图 5(b))。②坝式水电站。在大多数情况下,发电尾水形成的主流吸引鱼类向坝下聚拢。因此,鱼道应布置在临近水轮机尾水管的岸边处(图 5(c))。③引水式水电站。主河道经常与来自发电尾水的水流相竞争,但主河道流量制造的吸引流有限。由于大多数鱼类将沿着发电尾水产生竞争流通道上溯,这将导致位于主河道处的过鱼设施效果降低。此外,由于主河道相比发电尾水通道具有更宽的河道,但通过截面流量相比较少,因此低流量期间主河道的流速可能无法提供鱼类洄游所需的水力条件(如流速和水深)。这种情况下,最好的解决方案是设计两座鱼道(图 5(d))。如果修建两座鱼道方案不可行,应增加主河道的被感知能力(例如足够的流量、水深和流速),或者建造连接尾水通道和主河道的过鱼旁路。

4.2 进口位置和朝向

过鱼设施进口位置必须保证上行鱼类通过吸引水流的引导及时进入进口。通常,进口应该位于紧邻大坝坝下或坝下主流附近。在靠近厂房的水流流速相对较慢、湍动值较低区域,往往能够创造良好的进口条件。在竞争流存在的情况下,过鱼设施进口吸引率取决于吸引流影响范围,因此,设计时应尽量避免发电尾水对过鱼设施吸引流流向、流速的影响,

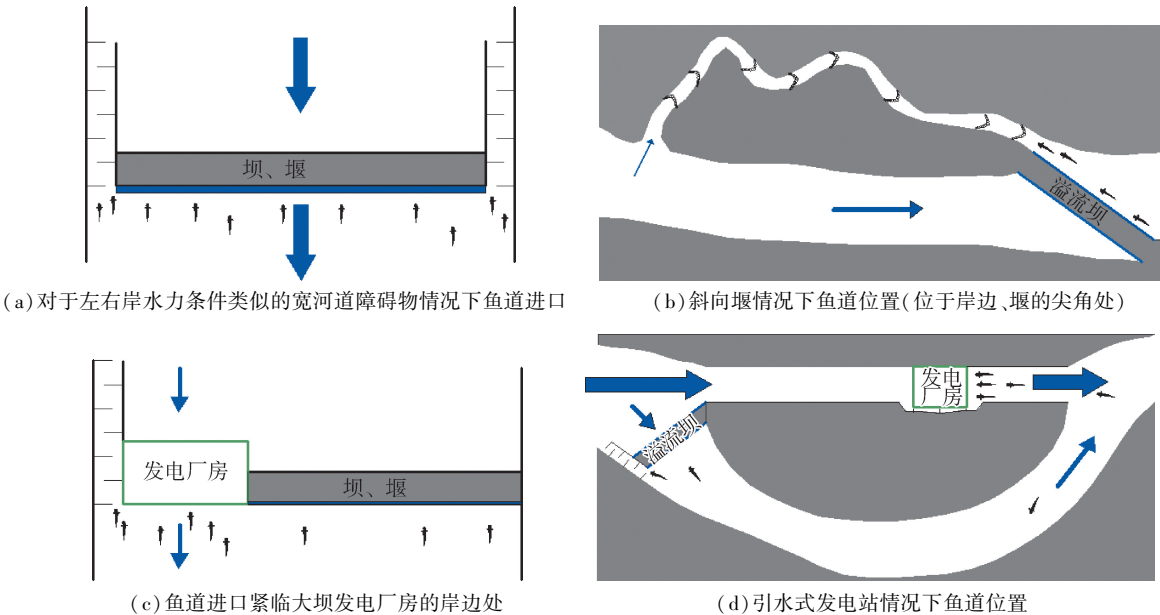


图 5 不同情况下的鱼道位置

以确保过鱼设施吸引流产生的水力信号到达尽可能远的下游。一般来说,过鱼设施进口吸引流水流方向应尽可能与主流流向平行(要求小于 30°)^[48]。在不确定的情况下(项目环境复杂,如地形限制、竞争流空间跨度大等情况),往往需要结合物理模型和数值模拟来分析坝下水流流态。通常过鱼设施进口位置可以通过以下几点确定:①靠近或接近鱼类迁徙路径;②靠近障碍物但远离高湍流区(发电尾水形成的水花区);③靠近河岸;④在主流一侧(一般在外侧);⑤在电站厂房所在位置的一侧;⑥位于水轮机出水口靠近尾水管末端的一侧,与水轮机出流流向平行或成一定角度($<30^{\circ}$);⑦考虑到贴河底迁徙鱼类,要求过鱼设施进口与河床进行过渡性连接(即过鱼设施进口与河床通过仿自然坡道相连接,坡道坡度一般低于 $1:2$);⑧对于无发电用途的斜向溢流堰,鱼道进口布置几种情况见图6,其中(a)、(d)为鱼道进口位置正确布置方式。

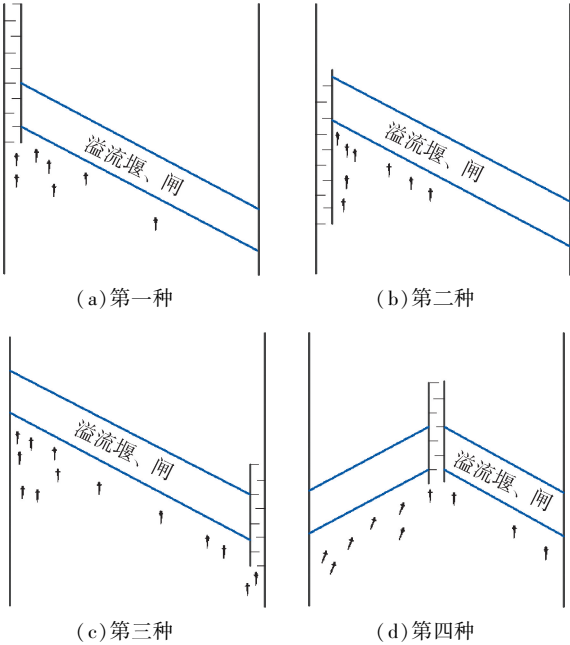


图6 斜向溢流堰情况下鱼道进口位置

4.3 尾水位变化条件下的过鱼设施进口

进口的设计需要考虑坝下水位变化的情况。尾水水位的增加会导致过鱼设施进口通道淹没,这将降低吸引流的吸引力。对于这个问题没有整体的解决方案。所以,过鱼设施进口设计,应该至少在鱼类主要洄游周期和各个设计流量区间条件下确保其功能性。在工程实践中,也可以通过一定措施使得在水位变化情况下过鱼设施进口的被感知能力达到最优:①增加鱼道基流或者辅助吸引流;进口通道有可调节的闸门,保证进口通道过流面可调。②过鱼设施有多个进口,并且各进口有可以调控过流面开度的装置。③对于仿自然鱼道,如图3(b)所示,即使下

游尾水淹没部分鱼道,鱼道仍可保证足够的吸引力。

5 过鱼设施进口概化模型

在具有鱼道的水利水电项目(尤其是我国西南地区)中,坝下区域通常空间有限且地形复杂。这通常导致过鱼设施进口布置困难。通常需要过鱼设施进口进行 180° 转弯来使过鱼设施吸引流与水电站尾水出流平行。在受限的空间下,增加进口通道额外的辅助吸引流是一大难题。此外,在尾水位波动情况下,必须在进口安装可调节装置(如,闸门),以保持恒定的吸引流流态。针对这种情况下的过鱼设施进口设计,下面提出一种过鱼设施进口概化模型。

过鱼设施进口概化模型见图7(图中 Q 为发电尾水竞争流; Q_1 为鱼道基流; Q_2 为辅助吸引流; Q_3 为过鱼设施吸引流)。模型设计有4个关键的位置:①转弯段。原则上,进口通道 180° 偏转能制造有利的水力条件,可以在有限的空间内使进口位置尽可能靠近障碍物(由于大坝阻隔,洄游期间往往有大量鱼类聚集在坝下),使进口吸引流与竞争流出流方向平行。对于特定工程而言, 90° 偏转也可实现该目的。②调节装置。该装置的过流截面开度可以根据吸引流流量和尾水位进行调节,以在入口处产生均匀的流动,避免进口处产生明显的水流跌落现象。③检修闸门。应在进口设置一个附加的关闭装置,以便能够关闭鱼道进行维修。④辅助吸引流通道。辅助吸引流进入过鱼通道前需要进行消能整流。因此,辅助吸引流通道包括消能整流装置(如混凝土块阵列、管道阵列等)。此外,必须采取措施防止鱼类进入辅助吸引流通道。

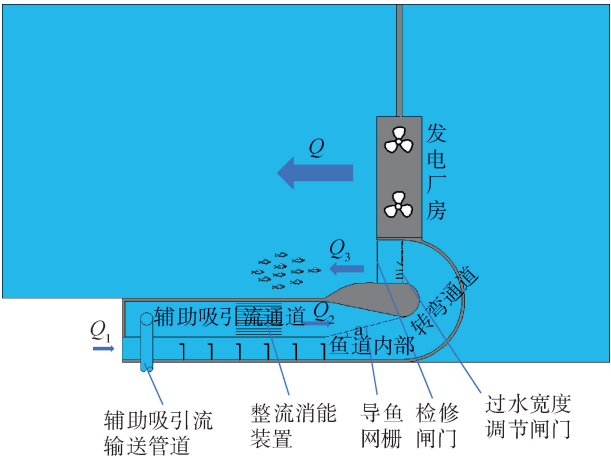


图7 过鱼设施进口概化模型示意图

基于以上过鱼设施进口模型,进一步提出系统各组成部件布置原则:

a. 辅助吸引流系统。辅助吸引流流量可能要

根据实际情况进行调整,可在辅助吸引流取水口或者在辅助吸引流进入过鱼通道前进行调节。国外大多数鱼道项目,辅助水流是通过压力管道输送到辅助吸引流渠道,很少采用明渠输送。根据可用的水头和流量,辅助吸引水流可先用于小型水轮机发电。辅助吸引流渠道中安装具有消能整流功能的装置,有助于制造均匀流态。同时,应尽量保证辅助吸引流与鱼道基流平行汇聚成进口吸引流,辅助吸引流通道的流速受导鱼网栅强度和过鱼对象游泳能力的限制,一般该通道断面平均流速介于 $0.2 \sim 0.4 \text{ m/s}$ 。

b. 导鱼网栅。导鱼网栅是由细条网组成的物理网屏,其目的是防止鱼类和其他水生生物进入辅助吸引流通道,细条网间距由过鱼对象体形尺寸和游泳行为决定。导鱼网栅必须经常清理,同时辅助吸引流进水口要做拦垃圾碎片的措施(如外围设置滤网)。此外辅助吸引流通道顶部要盖上遮拦物(如网栅),以防止人或物体掉入。导鱼网栅与鱼道基流流向的夹角要有利于引导鱼进入鱼道内部,一般为 $10^\circ \sim 30^\circ$,导鱼网栅的高度要考虑尾水位变化和吸引流流量大小。

c. 进口通道。进口通道最小平均流速必须大于目标鱼类正趋流性发生的流速阈值,并确保在任何尾水条件下鱼都能感应到进口。进口通道最大平均流速取决于通道长度和鱼类游泳能力。进口通道与河底通过仿自然坡道相连接,以便于底栖鱼类能顺利进入进口。

d. 过水宽度调节闸门。闸门开度取决于吸引流流量、尾水位、过鱼对象体形(如德国过鱼设施设计准则要求竖窄口宽度大于3倍的最大过鱼对象的体宽^[49])和游泳行为,闸门应根据水力条件进行调节,应避免产生明显的水流跌落。同时,闸门触水面要求光滑,避免鱼类上溯过程中擦伤。过水宽度调节闸门根据叶片数量可选择 180° 转向单叶闸门、双叶片人字闸门和多叶片水力栅式闸门。

6 结 语

由于过鱼设施进口可通过性受多种因素的影响,很难将吸引流流量和过鱼效率这两者建立直接的相关性。但很明显,过鱼设施吸引流流量是影响过鱼设施效果的关键参数。一般来说,过鱼设施修建费用和水能源生产损失等因素(也可能是由于特定场地的限制)是导致过鱼设施吸引流的流量有限的主要原因。本文列举了诸多案例,可利用水泵抽下游水、生态水轮机供给水等措施增强过鱼设施进口吸引力,同时也减少水能源损失。本文只概述了国外确定进口吸引流的方法以及相应的设计工艺,

并未推荐我国过鱼设施进口吸引流流量值范围。但通过对我国已建或设计中过鱼设施的统计,发现目前我国过鱼设施吸引流流量普遍偏低,并且大部分过鱼设施项目在设计时无辅助吸引流概念,这是制约过鱼设施达到最佳效率关键点之一。本文中过鱼设施进口概化模型是在综合考虑过鱼设施进口位置、进口朝向、吸引流流量、进口流速和进口水头落差等影响过鱼设施进口可通过性的关键因素的基础上提出的,但还未有相关的试验对此模型进行支撑,未来可参照该模型进行各参数的定量研究。

参考文献:

- [1] 曹庆磊,杨文俊,周良景. 国内外过鱼设施研究综述[J]. 长江科学院院报, 2010, 27(5): 39-43. (CAO Qinglei, YANG Wenjun, ZHOU Liangjing. Review on study of fishery facilities at home and abroad[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2010, 27(5): 39-43. (in Chinese))
- [2] 韩艳利,王新功,黄文海,等. 黄河黑山峡不同开发方案对鱼类的影响[J]. 水资源保护, 2011, 27(5): 92-96. (HAN Yanli, WANG Xingong, HUANG Wenhai, et al. Study on impacts of different development programs on fish in Heishan Gorge of Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(5): 92-96. (in Chinese))
- [3] BUNT C M, CASTRO-SANTOS T, HARO A. Performance of fish passage structures at upstream barriers to migration[J]. River Research & Applications, 2012, 28(4): 457-478.
- [4] SILVA A T, LUCAS M C, CASTRO-SANTOS T, et al. The future of fish passage science, engineering, and practice[J]. Fish & Fisheries, 2017, 2: 340-362.
- [5] 金志军,马卫忠,张袁宁,等. 异齿裂腹鱼通过鱼道内流速障碍能力及行为[J]. 水利学报, 2018, 49(4): 512-522. (JIN Zhijun, MA Weizhong, ZHANG Yuanning, et al. Assessing the swimming ability and performance of Schizothorax oconnori to cross velocity barriers in fishway[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(4): 512-522. (in Chinese))
- [6] KATOPODIS C, WILLIAMS J G. The development of fish passage research in a historical context[J]. Ecological Engineering, 2012, 48(7): 8-18.
- [7] WILLIAMS J G, ARMSTRONG G, KATOPODIS C. 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.
- [8] 严灿,胡加琴,路波,等. 水电背景鱼类救护工程与投资回报:中国鱼类资源前景堪忧[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(增刊1): 44-49. (YAN Chan, HU Jiaqing, LU Bo, et al. Fish rescue and protection program and investment returns analysis under hydroelectric background: gloomy prospect of fish resources in china

- [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25 (Sup1): 44-49. (in Chinese))
- [9] 陈凯麒, 常仲农, 曹晓红, 等. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. 水利学报, 2012, 43 (2): 182-188. (CHEN Kaiqi, CHANG Zhongnong, CAO Xiaohong, et al. Status and prospect of fish pass construction in China[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43 (2): 182-188. (in Chinese))
- [10] 曹娜, 钟治国, 曹晓红, 等. 我国鱼道建设现状及典型案例分析[J]. 水资源保护, 2016, 32 (6): 156-162. (CAO Na, ZHONG Zhiguo, CAO Xiaohong, et al. Status of fishway construction in China and typical case analysis [J]. Water Resources Protection, 2016, 32 (6): 156-162. (in Chinese))
- [11] 祁昌军, 曹晓红, 温静雅, 等. 我国鱼道建设的实践与问题研究[J]. 环境保护, 2017, 45 (6): 47-51. (QI Changjun, CAO Xiaohong, WEN Jingya, et al. The practice and problems of the fishway construction in China [J]. Environmental Protection, 2017, 45 (6): 47-51. (in Chinese))
- [12] SHI X, KYNARD B, LIU D, et al. Development of Fish Passage in China[J]. Fisheries, 2015, 40(4): 161-169.
- [13] 曹刚. 三湾水利枢纽工程鱼道设计[J]. 中国水运(下半月), 2009, 9 (4): 122-123. (CAO Gang. Fishway design of Sanwan hydro-junction [J]. China Water Transport, 2009, 9(4): 122-123. (in Chinese))
- [14] 艾克明. 鱼道水力设计的基本要点与工程实例[J]. 水利科技与经济, 2012, 18 (10): 82-85. (AI Keming. The basic points and engineering example of fishway hydraulic design[J]. Water Conservancy Science and Technology and Economy, 2012, 18(10): 82-85. (in Chinese))
- [15] 刘新征. 湘江长沙综合枢纽工程鱼道选型设计[J]. 湖南水利水电, 2015 (4): 16-18. (LIU Xinzheng. The type selection and design of fishway for Changsha hydro-junction on Xiangjiang river[J]. Hunan Hydro & Power, 2015(4): 16-18. (in Chinese))
- [16] 翟梓良, 张曦彦. 峡江水利枢纽鱼道设计施工与运行[J]. 水利水电施工, 2018 (1): 17-20. (ZHAI Ziliang, ZHANG Xiyan. Design, construction and operation of fishway on Xiajiang hydro-junction [J]. Water Conservancy and Hydropower Construction, 2018(1): 17-20. (in Chinese))
- [17] 于广年. 依兰航电枢纽竖缝式鱼道优化研究[J]. 水利规划与设计, 2011 (5): 65-67. (YU Guangnian. The optimization of vertical-slot fishway of Yilan Navigation-Power junction [J]. Water Resources Planning and Design, 2011(5): 65-67. (in Chinese))
- [18] 谭细畅, 黄鹤, 陶江平, 等. 长洲水利枢纽鱼道过鱼种群结构[J]. 应用生态学报, 2015, 26 (5): 1548-1552. (TAN Xichang, HUANG He, TAO Jiangping, et al. Fish population structure in the fishway of Changzhou hydro-junction[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26 (5): 1548 - 1552. (in Chinese))
- [19] 赵学昌, 黄祖芹. 老口航运枢纽过鱼设施与鱼类增殖保护站设计[J]. 广西水利水电, 2012 (01): 16-20 + 28. (ZHAO Xuechang, HUANG Zhuqin. Design of fishway and fish restocking station on Laokou hydro-junction[J]. Guangxi Water Resources & Hydropower Engineering, 2012(01): 16-20 + 28. (in Chinese))
- [20] 韩若冰, 蔡德所. 广西老口枢纽 U 型鱼道转弯段水力特性研究[J]. 吉林农业, 2018 (22): 120-121. (HAN Ruobing, CAI Desuo. Study on Hydraulic Characteristic of flow in Turning Pools for Laokou hydro-junction's fishway [J]. Agriculture of Jilin, 2018 (22): 120-121. (in Chinese))
- [21] 陈国柱, 王猛, 王海胜, 等. 枕头坝一级水电站竖缝式鱼道过鱼效果初探[J]. 水力发电, 2018, 44 (7): 4-8. (CHEN Guozhu, WANG Meng, WANG Haisheng, et al. Preliminary study on fish passing effect of the vertical-slot fishway in Zhentouba I Hydropower Station [J]. Water Power, 2018, 44(7): 4-8. (in Chinese))
- [22] 刘志国, 郑飞东, 王晓刚. 丰满水电站重建工程升鱼机进鱼口水流条件优化措施研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48 (2): 106-112. (LIU Zhiguo, ZHENG Feidong, WANG Xiaogang. Study on optimization measures of flow condition at inlet of fishlift for Fengman Hydropower Station Reconstruction Project [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48 (2): 106-112. (in Chinese))
- [23] 吕军, 汪雪格, 刘伟, 等. 松花江流域主要干支流纵向连通性与鱼类生境[J]. 水资源保护, 2017, 33 (6): 155-160. (LYU Jun, WANG Xuege, LIU Wei, et al. Longitudinal connectivity and fish habitat of main tributaries in Songhuajiang River Basin [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (6): 155-160. (in Chinese))
- [24] 金弈, 康建民, 喻卫奇, 等. 旬阳水电站的鱼道设计[J]. 水力发电, 2011, 37 (12): 13-15. (JIN Yi, KANG Jianmin, YU Weiqi, et al. Design of Fishway for Xunyang Hydropower Station [J]. Water Power, 2011, 37(12): 13-15. (in Chinese))
- [25] 李天宇, 任苇, 王琪, 等. 多布水电站鱼道布置设计[J]. 西北水电, 2017 (2): 44-47. (LI Tianyu, REN Wei, WANG Qi, et al. Design of Fishway Layout, Duobu Hydropower Station [J]. Northwest Hydropower, 2017(2): 44-47. (in Chinese))
- [26] 朱世洪, 彭海波, 王翔, 等. 金沙水电站的鱼道设计与研究[J]. 四川水力发电, 2018, 37 (2): 14-16. (ZHU Shihong, PENG Haibo, WANG Xiang, et al. Design and Research of Fish Passage on Jinsha River [J]. Sichuan Water Power, 2018, 37(2): 14-16. (in Chinese))
- [27] 陈静, 郎建, 周小波, 等. 雅鲁藏布江藏木水电站鱼道工程设计与研究[J]. 水电站设计, 2017, 33 (1): 52-58. (CHEN Jing, LANG Jian, ZHOU Xiaobo, et al. Design and Research of Fish Passage at Zangmu Hydropower on Yarlung Zangbo River [J]. Design of Hydroelectric Power

- Station, 2017, 33(1): 52-58. (in Chinese))
- [28] 姜兴良, 周丁. 株洲航电枢纽补建鱼道建设方案[J]. 中国港湾建设, 2015, 35(10): 35-38. (JIANG Xingliang, ZHOU Ding. Construction scheme on fishway of Zhuzhou navigation-power junction [J]. China Harbour Engineering, 2015, 35(10): 35-38. (in Chinese))
- [29] 史斌, 王斌, 徐岗, 等. 浙江楠溪江拦河闸鱼道进口布置优化研究[J]. 人民长江, 2011, 42(1): 69-71. (SHI Bin, WANG Bin, XU Gang, et al. Research on optimization of fishway entrance of sluice on Nanxi River in Zhejiang Proxinc [J]. Yangtze River, 2011, 42(1): 69-71. (in Chinese))
- [30] 殷悦来, 李克顺, 吴世男. 谈鱼道的设计与施工[J]. 黑龙江水利科技, 1996(2): 92-93. (YIN Yuelai, LI Keshun, WU Shinan. Design and construction of fishway [J]. Heilongjiang Science and Technology of Water Conservancy, 1996(2): 92-93. (in Chinese))
- [31] 向晨光, 陈和春, 王继保. 新疆鳌高水电站鱼道过流能力研究[J]. 人民长江, 2017, 48(增刊2): 193-195. (XIANG Chenguang, CHEN Hechun, WANG Jibao. Study on fishway discharge capacity of Zangao hydropower station in Xinjiang [J]. Yangtze River, 2017, 48(Sup2): 193-195. (in Chinese))
- [32] 甘茂辉, 贺柏武. 湘江土谷塘航电枢纽工程过鱼设施研究[J]. 湖南交通科技, 2010, 36(3): 108-110. (GAN Maohui, HE Bowu. Design and research of fish passage at Tugutang Hydropower on Xiangjiang River [J]. Hunan Communication Science and Technology, 2010, 36(3): 108-110. (in Chinese))
- [33] 南京水利科学研究院. 江苏省太平闸鱼道初步小结[J]. 水利水运科技情报, 1973(6): 1-15. (NHRI (Nanning Hydraulic Research Institute). Preliminary summary of fishway of Taiping Gate in Jiangsu province [J]. Scientific and Technological Information of Water Conservancy and Water Transportation, 1973(6): 1-15. (in Chinese))
- [34] 戚印鑫, 孙娟, 邱秀云. 水利枢纽中的鱼道设计及试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2009, 7(3): 55-58. (QI Yinxin, SUN Juan, QIU Xiuyun. Design and experimental research on fish-ways in hydro-junction project [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2009, 7(3): 55-58. (in Chinese))
- [35] 高大水, 叶俊荣, 朱光平, 等. 三峡水库开县水位调节坝鱼道工程设计[J]. 人民长江, 2015, 46(22): 54-56. (GAO Dashui, YE Junrong, ZHU Guangping, et al. Fishway design of a water-level regulation dam in Kaixian County of Three Gorges Reservoir [J]. Yangtze River, 2015, 46(22): 54-56. (in Chinese))
- [36] 王明磊. 辽河盘山闸鱼道设计研究[J]. 人民长江, 2015, 46(10): 16-18. (WANG Minglei. Study of design of fishway at Panshan sluice on Liaohe River [J]. Yangtze River, 2015, 46(10): 16-18. (in Chinese))
- [37] 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. (ZHANG Yanyan, HE Zhenjun, HE Yong, et al. Analysis on the efficiency of fishway for the low-head gate dam [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(6): 748-756. (in Chinese))
- [38] 李明伟. 山区河流竖缝式鱼道水力特性试验研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2017.
- [39] 孙双科. 北京市上庄新闻竖缝式鱼道的水力设计研究[C]//水电 2006 国际研讨会论文集. 昆明: 中国水利水电科学研究院, 2006: 951-957.
- [40] REDEKER M. An overview of the new German fishway standard for upstream fish passage [C] // International Conference on Engineering and Ecohydrology for Fish Passage. Massachusetts: University of Massachusetts Amherst, 2014.
- [41] NMFS (National Marine Fisheries Service). Anadromous salmonid passage facility design [M]. Portland: NMFS, Northwest Region, 2011.
- [42] ARMSTRONG G S, APRAHAMIAN M W, FEWINGS G A, et al. Environment agency fish pass manual [M]. Washington: United States Fish and Wildlife Service, 2010.
- [43] ORVIS C, TOWLER B, MULLIGAN K. Fish Passage engineering design criteria [M]. Washington: United States Fish and Wildlife Service, 2016.
- [44] ENBW International. So funktioniert der Fischpass in Iffezheim [EB/OL]. [2019-10-12]. <https://www.enbw.com/unternehmen/konzern/energieerzeugung/neubau-und-projekte/rheinkraftwerk-iffenheim/oekologie-umweltschutz.html>.
- [45] Pacifi Corp & Public Utility District No. 1 of Cowlitz County. Lewis River Fish Passage Program 2015 Annual Report [R]. Washington DC: PacifiCorp, 2016.
- [46] CARDOSO G R, BELO A F, MATEUS C S, et al. Session D1: Modelling the Efficiency of a Vertical Slot Fishway for Anadromous Fishes [C] // International Conference on Engineering and Ecohydrology for Fish Passage. Massachusetts: University of Massachusetts Amherst, 2015.
- [47] 金志军, 陈小龙, 王从锋, 等. 应用于鱼道设计的马口鱼 (*Opsariichthys bidens*) 游泳能力[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2678-2684. (JIN Zhijun, CHEN Xiaolong, WANG Chongfeng, et al. Swimming performance of *Opsariichthys bidens* related to fishway design [J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(9): 2678-2684. (in Chinese))
- [48] FIEDLER G. Design of auxiliary water systems for fishways [C] // TULLIS B, BUNG D. 7th International Symposium on Hydraulic Structures. Aachen: Utah State University, 2018: 253-260.
- [49] DWA-M 509. Upstream fishways and hydraulic structures passable for fish [M]. Geologie: DWA, 2016.

(收稿日期: 2018-11-18 编辑: 王芳)