

貊皮岭仿生态鱼道底坡和休息池 水动力数值模拟^{*}

周成海¹, 祝 龙², 谢玉堂³, 胡乔一², 王晓刚²

(1. 江西省路港工程有限公司, 江西南昌 330020; 2. 南京水利科学研究院, 江苏南京 210029;
3. 江西省港航建设投资集团新干航电枢纽分公司, 江西吉安 331300)

摘要: 根据貊皮岭仿生态鱼道工程特点以及过鱼要求, 建立了鱼道池室三维紊流数学模型, 论证了鱼道底坡和休息池尺度。研究结果表明: 1) 该鱼道隔板布置形式能够较好地满足鱼类上溯需求, 推荐鱼道底坡为 1/250 条件下, 隔墙(板)过鱼孔缝最大流速为 0.90 m/s。2) 不同方案休息池内均存在较大范围小流速区, 可供鱼类上溯休憩。3) 20 m 池长方案休息池内小流速区范围较 10 m 池长方案有明显增加, 能够更好地满足鱼类休息需求。

关键词: 鱼道; 仿生态; 底坡; 休息池

中图分类号: TV131; U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)08-0087-06

Hydrodynamic numerical simulation on bottom slope and rest pools of Mopiling nature-like fishway

ZHOU Cheng-hai¹, ZHU Long², XIE Yu-tang³, HU Qiao-yi², WANG Xiao-gang²

(1.Jiangxi Road and Port Engineering Co., Ltd., Nanchang 330020, China; 2.Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3.Jiangxi Port&Waterway Construction Investment Group Co., Ltd., Ji'an 331300, China)

Abstract: According to the characteristics of the Mopiling nature-like fishway project and the requirements of fish passing, a three-dimensional turbulent numerical model of fishway pools is established, and the scale of the fishway bottom slope and rest pools is demonstrated. The results show that: 1) The vertical slot layout of the fishway can meet the demand of fish upstream. When the bottom slope is 1/250, the maximum velocity of the vertical slot and the bottom hole is 0.90 m/s. 2) There is a large range of small flow velocity area in rest pools of different schemes, which can be used for fish upstream rest. 3) The range of small velocity areas in rest pools of 20 m pool length scheme is larger than that of 10 m pool length scheme. In addition, it can better meet the needs of fish.

Keywords: fishway; nature-like; bottom slope; rest pool

我国水利建设已开始从传统水利向资源水利转变, 保护水生态环境、实现人与自然的和谐共处已是社会的普遍共识。在水利建设中重视保护洄游性水生物的洄游路线, 实现人与自然的和谐共处, 对实现水利的可持续发展极其重要。在这方面, 建设鱼道是解决该问题的重要手段和措

施^[1-2]。仿生态鱼道是一类重要的过鱼设施类型, 在秉承传统工程鱼道的形式上, 更注重与生态环境的整体性, 对鱼道建筑形式、结构形式进行生态优化, 以尽可能满足不同鱼类的洄游要求, 满足生物多样性要求, 同时又可以形成景观廊道^[3-4]。

收稿日期: 2020-11-29

*基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(2019C0004、2019C0005), 国家重点研发计划项目(Gz118002)

作者简介: 周成海(1978—), 男, 高级工程师, 从事港口及航道工程研究。

通讯作者: 祝龙(1988—), 男, 博士, 高级工程师, 从事通航建筑物、鱼道试验及数值模拟研究。

八字嘴航电枢纽工程位于江西余干县白马桥乡熊家村和洪家嘴新渡村，是信江规划的倒数第2个梯级，位于界牌枢纽坝址下游49 km，距余干县城约12 km，其开发任务以航运为主，兼顾发电等综合利用。信江在八字嘴处分成东大河与西大河，因此枢纽分为东大河虎山嘴与西大河貊皮岭两个坝址，两枢纽坝址位于同一轴线。貊皮岭坝址距上游河道分岔口约900 m，鱼道拟布置在枢纽中部的洲滩之上，场地空间相对较为充裕，具有良好的鱼道布置条件，因此设计规划该鱼道采用仿生态鱼道形式，利用电站尾水进行诱鱼。仿生态鱼道断面形式多变，边坡和底坡材质比较复杂，已有学者针对仿生态鱼道中的蛮石墙、蛮石斜坡、卵石墙等开展了一定的研究^[5-9]，但限于问题的复杂性，目前还没有完善的研究方法和设计准则。本文根据貊皮岭仿生态鱼道布置形式，论证鱼道底坡和休息池尺度的合理性，为工程设计提供参考。

1 数学模型建立及验证

1.1 基本方程

数学模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 双方程紊流模型，采用 VOF 技术对自由表面进行捕捉，三维水流模型的控制方程为：

连续方程：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \\ - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \end{aligned} \quad (2)$$

k 方程：

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k (\mu + \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程：

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\varepsilon (\mu + \mu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon}^* \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4)$$

式中： ρ 为流体密度； t 为时间； u_i 和 u_j 为速度分量； x_i 和 x_j 为坐标分量； p 为修正压力； μ 为分子黏性系数； μ_t 为紊流黏性系数，计算公式为 $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$ ； ρg_i 为重力体积力； k 为紊动能； ε 为紊动能耗散率； G_k 为平均速度梯度引起的紊动能产生项；方程中的其他参数：

$$C_{1\varepsilon}^* = C_{1\varepsilon} - \frac{\eta(1-\eta/\eta_0)}{1+\beta\eta^3} \quad (5)$$

$$\eta = \frac{k}{\varepsilon} \sqrt{(2E_{ij} \cdot E_{ij})} \quad (6)$$

$$E_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (7)$$

方程中的经验常数 $C_\mu = 0.0845$, $\alpha_k = \alpha_\varepsilon = 1.39$, $C_{1\varepsilon} = 1.42$, $C_{2\varepsilon} = 1.68$, $\eta_0 = 4.38$, $\beta = 0.012$ 。

采用 VOF 方法捕捉两相流自由液面，对于水气两相流模型，自由液面追踪通过求解如下输运方程来完成：

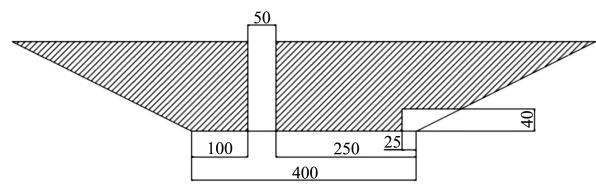
$$\frac{\partial \alpha_w}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_w}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

$$\alpha_w + \alpha_a = 1 \quad (9)$$

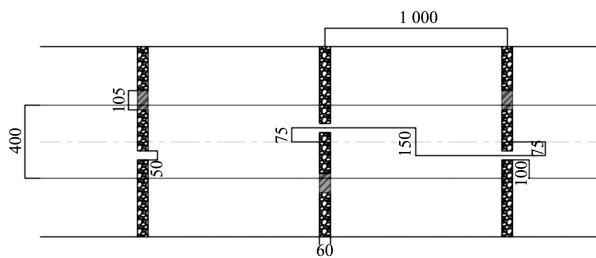
式中： α_w 为液体的体积分数； α_a 为气体的体积分数。

1.2 计算区域及网格划分

貊皮岭仿生态鱼道的隔墙(板)形式和池室布置见图 1。鱼道每级池室长 10.0 m、底宽 4.0 m, 底坡 1:250, 边坡 1:2, 隔墙采用人工石笼或卵石堆砌, 厚 0.6 m, 长短隔墙(板)交错布置, 隔墙(板)竖缝宽度 0.5 m, 满足目标鱼类上溯需求, 两竖缝中心线之间的距离为 1.5 m, 在长隔墙(板)下部开有 0.4 m 高的孔洞。根据我国一些室内外试验和观测资料确定鱼道设计流速, 对于体长大于 30 cm 的鲤科鱼类, 鱼道设计流速值为 1.0~1.2 m/s, 鲥鱼喜爱的流速为 0.7~1.0 m/s, 故确定鱼道的设计流速为 0.7~1.2 m/s, 研究控制鱼道池室隔墙(板)过鱼孔缝的最大流速在 0.95 m/s 左右, 并营造“大流速区”和“小流速区”, 这样既能满足“四大家鱼”上溯, 又可为鲥鱼等珍稀鱼类洄游创造条件。



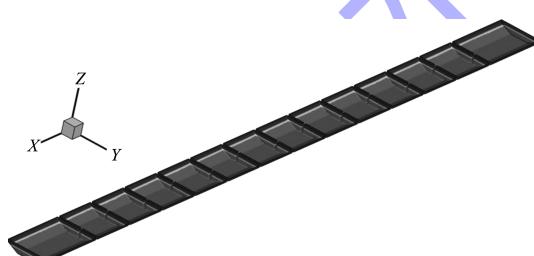
a) 鱼道隔墙尺寸



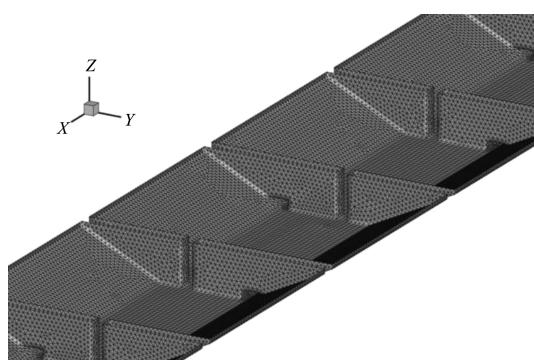
b) 鱼道布置尺寸

图1 鱼道模型 (单位: cm)

鱼道数学模型包括12个普通池室及上、下游各15 m的平段,共150 m长度。通过对豹皮岭鱼道各水位运行工况进行综合分析可知,在上游1.0 m~下游1.0 m水深时,整条鱼道水力指标最大,因此数值仿真模型着重针对该控制工况进行模拟。由于鱼道体型相对复杂,对计算区域采用六面体单元与楔形单元相结合的方式进行网格划分,模型共25万个节点、117万个网格单元。鱼道数学模型和网格划分情况见图2。



a) 普通池室鱼道数学模型



b) 数学模型网格划分

图2 鱼道数学模型计算区域及网格划分

鉴于豹皮岭鱼道池室长度较长,有必要在鱼道整体布置时设置休息池,鱼道休息池能作为鱼类上溯行进途中的休息场所,避免鱼类因过度疲劳而导致上溯失败^[10]。根据以往研究经验,建议鱼道每隔20~40块隔墙(板)设置一个休息池,休息池为平底。本文针对其休息池内水流条件进行单独建模,并设计了两种休息池方案开展对比分析研究。两个方案数学模型中休息池上、下游均包括2个池室,以及15 m长的上、下游平段。休息池的底宽、顶宽以及边坡形式与普通池室相同,其底坡为平底。鱼道休息池数学模型见图3。数学模型常规池室和休息池的计算工况见表1。

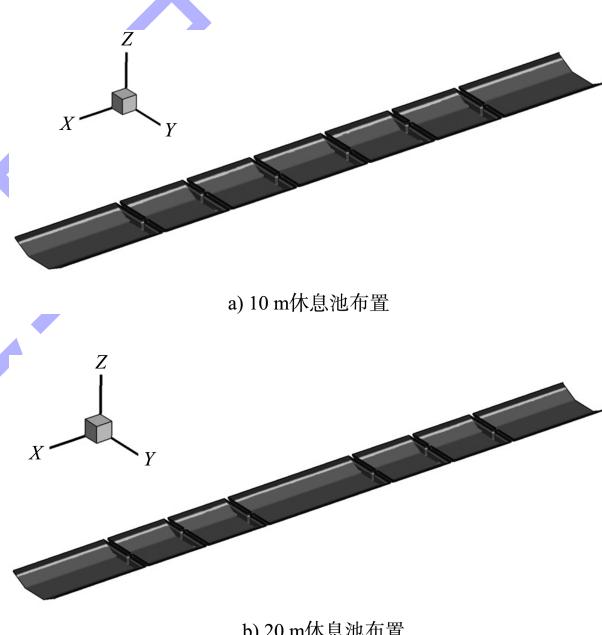


图3 鱼道休息池数学模型

表1 鱼道数学模型计算工况

池室	计算工况	竖缝宽度/m	底宽/m	池室长度/m	边坡	底坡
普通池室	P1					1:225
	P2	0.5	4	10	1:2	1:250
	P3					1:275
休息池	X1	0.5	4	10		
	X2			20	1:2	1:250

1.3 模型验证

利用南京水利科学研究院开展的丹巴鱼道局部物理模型试验^[11]ADV池室流速数据对三维数学模型进行验证。鱼道池室流速数值模拟值和物理模型测量值对比见图4,模拟值和测量值较为接

近；对鱼道最为重要的竖缝流速进行验证，数学模型测得竖缝总平均流速为 0.97 m/s，最大流速为 1.01 m/s，物理模型测得竖缝总平均流速为 0.95 m/s，最大流速为 1.05 m/s，两个重要参数分别仅差 2% 和 4%，表明数学模型参数取值合理。

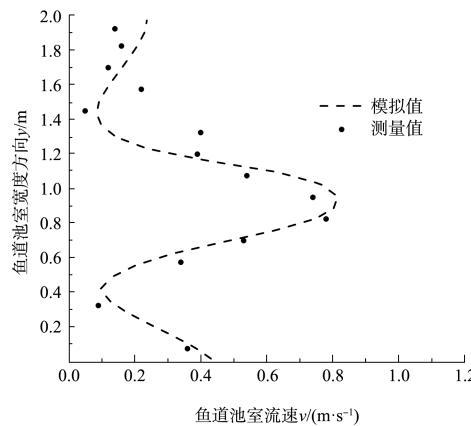
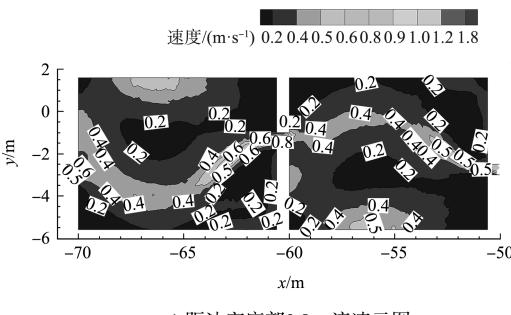


图 4 鱼道池室流速模拟值与测量值对比

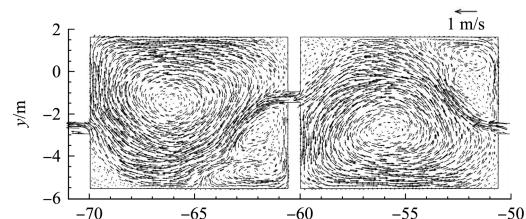
2 结果与分析

2.1 鱼道常规池室水流条件分析

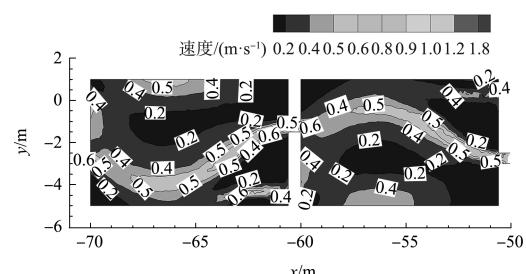
针对貊皮岭鱼道池室水流条件开展三维数值模拟研究，鱼道池室不同水层流速分布见图 5。由图 5 可知：鱼道池室内上、中、下层水流流态均较为平顺，流速及流态满足鱼道设计要求；受底孔水流影响，鱼道池室中、下层存在两股明确的主流，利于鱼类上溯；鱼道池室内不同水层存在较大范围回流漩涡，但是其强度较弱，水流流速指标绝大部分在 0.20 m/s 以下，该小流速区便于上溯鱼类调整和休息；鱼道隔墙(板)过鱼底孔最大流速约 0.90 m/s，而垂直竖缝最大水流流速约 0.80 m/s，比底孔流速略小，整个鱼道池室内形成了较好的“大流速区”和“小流速区”，有利于满足不同目标鱼类的上溯需求。



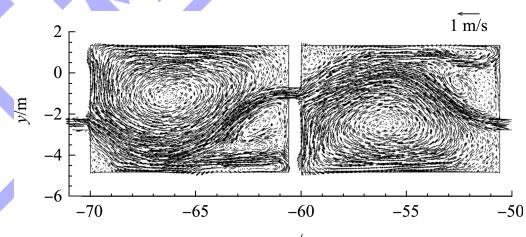
a) 距池室底部 0.8 m 流速云图



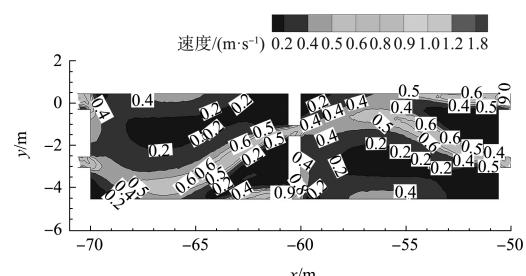
b) 距池室底部 0.8 m 流速矢量



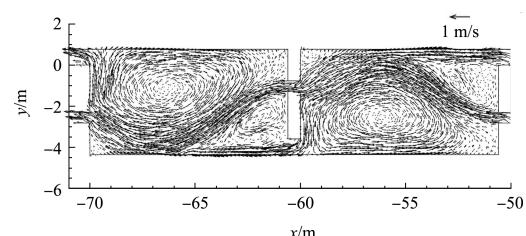
c) 距池室底部 0.5 m 流速云图



d) 距池室底部 0.5 m 流速矢量



e) 距池室底部 0.25 m 流速云图



f) 距池室底部 0.25 m 流速矢量

图 5 鱼道池室流速分布

2.2 鱼道底坡影响分析

貊皮岭鱼道位于八字嘴枢纽中间洲岛上，在

鱼道实际布置时可能会根据水工建筑物布置要求等对鱼道总体长度进行调整, 因此, 为了进一步探究鱼道底坡坡度变化对鱼道池室水流条件的影响, 在保持鱼道池室水深、池长、边坡等参数不变的情况下, 对 $i=1:225$ 和 $i=1:275$ 两个底坡下鱼道池室的水流条件进行了补充计算分析。

对比可知, 在 3 个坡度下, 鱼道池室内的流态均较接近。鱼道隔墙(板)垂直竖缝及过鱼底孔流速见表 2。随着底坡的变缓, 坚缝及过流底孔内水流流速均略有减小。3 种底坡下鱼道内各处的流场结构均能满足设计要求, 在鱼道布置过程中, 可根据现场实际地形条件, 适当调整底坡坡度, 但考虑到本鱼道的仿生态特性, 在条件允许情况下, 宜取较缓坡度, 更有利于目标鱼类上溯且方便后续调整布置。

表 2 鱼道隔墙(板)垂直竖缝及过鱼底孔流速对比

工况 编号	底坡	过鱼底孔流速/(m·s ⁻¹)		垂直竖缝流速/(m·s ⁻¹)	
		平均值	最大值	平均值	最大值
P1	1:225	0.73	0.91	0.70	0.90
P2	1:250	0.66	0.90	0.63	0.80
P3	1:275	0.63	0.80	0.55	0.80

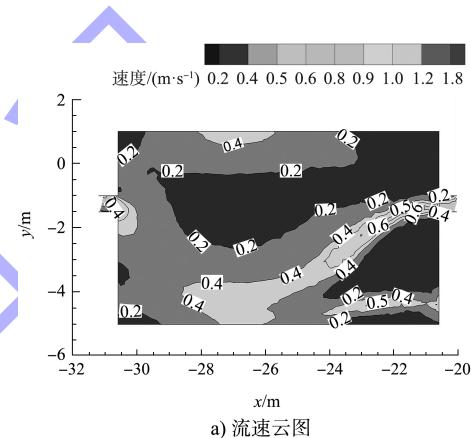
2.3 鱼道休息池水流条件分析

因豹皮岭鱼道较长, 需分段设置休息池。为论证长度对休息池的影响, 对底坡 $i=1:250$ 、休息池长分别为 10、20 m 的两个方案进行了对比研究。

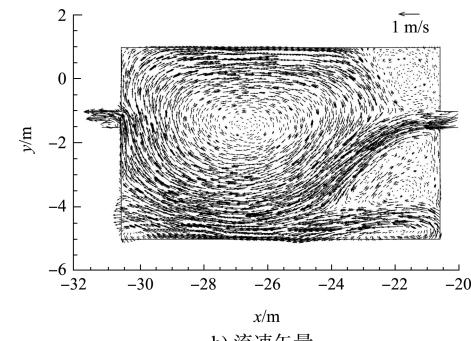
选取鱼道中层(距池室底部 0.5 m)为代表, 不同休息池工况计算结果见图 6、7。由计算结果可得, 休息池长 10 m 工况下, 池内的流态与常规鱼道池室内的流态较为相似, 池内流速最大值为 0.60 m/s; 休息池内主流明确, 主流区域大部分流速在 0.20~0.60 m/s; 休息池内水流流速相对普通鱼道池室内流速整体有所下降, 其主流一侧靠近边墙, 另一侧有大范围弱回流区, 回流区水流流速在 0.20 m/s 左右, 能够满足上溯鱼类休息的要求。休息池长为 20 m 时, 休息池内主流先流经一侧边墙, 再绕行到另一侧边墙, 最后归于下一级池室竖缝内, 主流整体呈“S”形; 20 m 休息池

内流速最大值出现的位置和数值与休息池长为 10 m 的工况较为相近, 主流大部分区域流速在 0.20~0.50 m/s, 但 20 m 休息池内小流速区范围较池长 10 m 工况有明显增加, 能够更好地满足鱼类休息需求。

综合以上分析可知, 休息池长 10、20 m 两个工况下, 其内部水流流场均能够满足鱼类休憩要求, 其中 20 m 长休息池内小流速区范围相对更大, 在确定休息池长度时可根据现场实际条件进行选择, 在场地条件有限的部位可选用 10 m 长休息池方案。

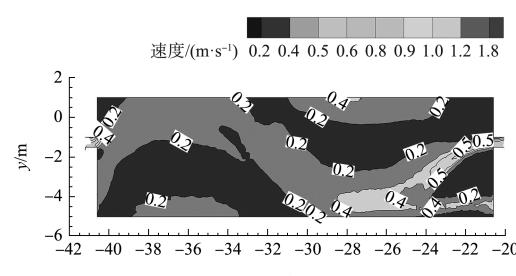


a) 流速云图



b) 流速矢量

图 6 鱼道 10 m 休息池中层流速分布(距池室底部 0.5 m)



a) 流速云图

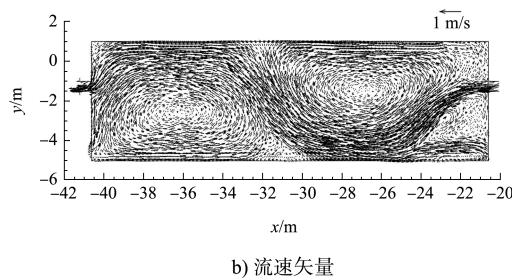


图 7 鱼道 20 m 休息池中层流速分布(距池室底部 0.5 m)

3 结语

1) 该鱼道隔墙(板)布置形式能够较好地满足鱼类上溯需求, 推荐鱼道设计底坡为 1/250 条件下, 隔墙(板)过鱼孔缝最大流速为 0.90 m/s。

2) 由于貊皮岭鱼道有相对较为充裕的布置空间, 因此其底坡坡度相对较缓, 在数模不同底坡计算工况下, 鱼道池室内水流流速指标均能满足设计要求, 可根据现场实际情况适当调整底坡。

3) 对不同休息池布置形式进行对比分析结果表明, 两种布置方案下, 休息池内均存在较大范围小流速区, 可为上溯鱼类提供较好的休息空间; 20 m 池长方案休息池室内小流速区范围较 10 m 池长方案有明显增加, 能够更好地满足鱼类休息需求。

参考文献:

- [1] 陈凯麒, 常仲农, 曹晓红, 等. 我国鱼道的建设现状与展

(本文编辑 武亚庆)

(上接第 86 页)

- [5] 张绪进, 胡真真, 刘亚辉, 等. 向家坝水电站日调节非恒定流的传播特征研究 [J]. 水道港口, 2015, 36(5): 414-418.
- [6] 杜思材, 胡江, 薛飞龙, 等. 金沙江宜宾段非恒定流过程及传播特性 [J]. 水运工程, 2017(10): 166-170.
- [7] 张毅, 刘勇, 张帅帅. 向家坝日调节运行对长江叙渝段航道维护影响研究 [J]. 水运工程, 2017(1): 108-114.

- [8] 黄岱. 长江上游宜宾—重庆河段日调节非恒定流传播特性研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- [9] 徐金环. 航道整治 [M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
- [10] 廖江花, 陈玉丹, 陈杏文, 等. 东溪口新开卵石航槽的稳定性分析 [J]. 水利科技与经济, 2017, 23(3): 1-5.
- [11] 蒋永强, 杨忠勇, 石小涛, 等. 基于多重水力学因子的竖缝式鱼道中鱼类上溯轨迹模拟 [J]. 生态学杂志, 2018, 37(4): 1282-1290.
- [3] 刘圣尧, 谢鸿. 生态鱼道在低水头堰坝工程中的应用 [J]. 浙江水利科技, 2014, 42(4): 60-62.
- [4] 李盛青, 丁晓文, 刘道明. 仿自然过鱼通道综述 [J]. 人民长江, 2014, 45(21): 70-73, 96.
- [5] 林宁亚, 安瑞冬, 李嘉, 等. 交错蛮石墙式仿自然鱼道水力学特性研究 [J]. 水电能源科学, 2017, 35(12): 82-85, 9.
- [6] 胡乔一, 祝龙. 孔缝组合式仿生态鱼道流动特性数值模拟研究 [J]. 中国农村水利水电, 2020(3): 119-123, 128.
- [7] 何雨麟, 安瑞冬, 李嘉, 等. 蛮石斜坡型仿自然鱼道水力学特性研究 [J]. 水力发电学报, 2016, 35(10): 40-47.
- [8] 李广宁, 孙双科, 柳海涛, 等. 仿自然鱼道中卵石墙对池室水力特性改善效果 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(15): 184-189.
- [9] 徐进超, 王晓刚, 宣国祥, 等. 仿自然鱼道整体物理模型试验研究 [J]. 水科学进展, 2017, 28(6): 879-887.
- [10] 王晓刚, 李云, 何飞飞, 等. 竖缝式鱼道休息池水动力特性研究 [J]. 水利水运工程学报, 2020(1): 40-50.
- [11] 李中华, 郭超, 杨宇. 丹巴水电站可行性研究阶段鱼道模型试验研究报告 [R]. 南京: 南京水利科学研究院, 2014.

(本文编辑 王璁)