

DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221720

墩头结构及间距变化对竖缝式鱼道水力特性的影响

吕阳阳¹,杨路华¹,王 凡²,王 旭¹

(1. 天津农学院水利工程学院, 天津 300384; 2. 中水北方勘测设计研究有限责任公司, 天津 300222)

摘要: 鱼道结构是影响鱼类能否成功上溯的主要因素,考虑墩头导流角和导隔板相对位置两个因素,组成12个不同工况,采用RNG κ - ϵ 紊流模型研究了墩头结构和导隔板水平间距对竖缝式鱼道池室内水力特性的影响。结果表明,墩头结构对水力特性的影响主要体现在流速与紊动能上,墩头导流角越小,流速与紊动能也越小;导隔板间距改变了主流流态与面积大小,进而影响流速分布,导隔板相对位置 $b_0/L=0.15$ 左右时,池室内水流流态较为合理,符合鱼类上溯的基本要求。

关键词: 竖缝式鱼道; 墩头; 间距; 数值模拟; 水力特性

中图分类号: TV135.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-7709(2023)07-0150-04

1 引言

人类在江河上修建了越来越多的水利枢纽工程,在取得巨大成就的同时也破坏了当地的河流内生态系统的稳定性,这些建筑物的修建在一定程度上破坏了原生生物的自然生态环境,同时也切断了鱼类自由通过的通道,多种洄游鱼类几近灭绝^[1,2]。鱼道是保护河流生态环境,供鱼类溯河通过闸、坝等建筑物而设置的一种人工建筑物^[3],作为一种为鱼类提供洄游通道的过鱼设施,在很多河流中都不可或缺。目前,常见的鱼道形式有丹尼尔式、竖缝式、堰流式、孔口式、组合式及仿生生态式,其中竖缝式鱼道结构简单、过鱼效率高,因此应用较广。目前,关于其水力特性与结构优化方面的研究已较多,如 RAJARATNAM N 等^[4]对比分析了18个竖缝式鱼道的流场结构,发现池室长宽比为10:8时为最佳方案。毛熹等^[5]对鱼道结构进行创新,分析了底孔和坡度对池室水流结构的影响。王猛等^[6]在池室中竖缝下游位置布置圆柱形障碍物,可使鱼道水力特性更加稳定,满

足更多鱼类的过坝需求。鱼道池室中竖缝处的水力性能总是最复杂的,若竖缝处的流速超过了目标鱼类的极限游速,则无法满足鱼类的上溯条件。鱼道内水力特性决定了鱼类能否成功上溯,而不同的池室结构会影响鱼道内水力特性,其中墩头结构也是重要的影响因素之一,但实际鱼道工程中墩头结构型式较单一。为此,本文采用数值模拟方法,探讨了墩头型式及间距变化对竖缝式鱼道水力特性的影响,提出一种更优的墩头型式与合理的导隔板相对位置,以为鱼道建设提供理论依据。

2 模型概况

2.1 鱼道布置型式

本文模型布置了7级常规水池,鱼道池室的详细尺寸和结构见图1。其中,池室长 L 为3.6 m,宽 B 为3.0 m,高 H 为2.5 m,两侧挡板厚为0.5 m,鱼道坡度为1:60, b_0 为隔板顶端中点到导板顶端中点的距离,模型全长33.0 m,鱼道池室依次编号#1~#7。

改变墩头结构与导隔板在 x 方向上的间距,定义隔板头部引导水流的倾斜边壁与 x 轴方向

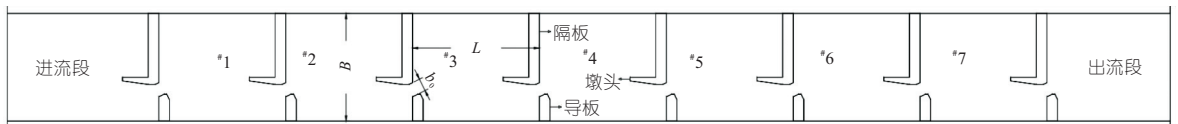


图1 鱼道平面布置图

Fig.1 Layout plan of the fishway

收稿日期: 2022-08-19, 修回日期: 2022-09-19

作者简介: 吕阳阳(1997-),男,硕士研究生,研究方向为水力学, E-mail:594986567@qq.com

通讯作者: 王旭(1982-),男,博士、讲师、硕导,研究方向为水利工程, E-mail:xuwang-82@163.com

的夹角为导流角,通过改变隔板头部与墩头头部连接处的长度来实现墩头导流角度的变化,减小长度的同时实现导流角角度的增大,分别为 0°、15°、30°、45°;张国强等^[7]提出竖缝宽度过宽则横向流速较大,过窄则径向流速分布不均匀,通过等差改变导隔板水平间距来实现相对位置的变化,用 b_0/L 来表示导隔板相对位置,取值 0.10、0.15、0.20,分别对应导隔板水平间距 $\Delta x = 0$ 、0.2、0.4 m,图 2 为单级池室导隔板相对位置 $b_0/L = 0.15$ 的平面布置图。

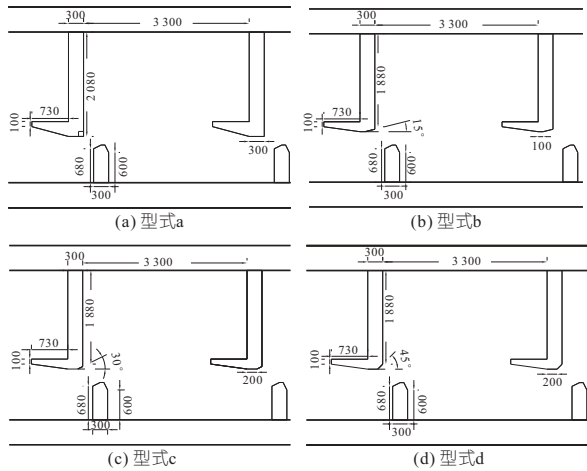


图 2 单级池室平面图(单位:mm)

Fig. 2 The planar graph of single pool

2.2 计算工况

设置墩头导流角与导隔板相对位置两个变量,由 4 个不同的导流角与 3 个不同的导隔板相对位置组成 12 个不同的计算工况(表 1)。

表 1 计算工况

Tab. 1 Cases of numerical simulation

工况	墩头导流角/(°)	导隔板相对位置(b_0/L)	工况	墩头导流角/(°)	导隔板相对位置(b_0/L)
1	0	0.10	7	30	0.10
2	0	0.15	8	30	0.15
3	0	0.20	9	30	0.20
4	15	0.10	10	45	0.10
5	15	0.15	11	45	0.15
6	15	0.20	12	45	0.20

3 数学模型及验证

3.1 数学模型

3.1.1 控制方程

采用 RNG κ - ϵ 紊流模型对竖缝式鱼道进行模拟计算,其主要控制方程中连续方程为:

$$\partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

式中, u_i 为瞬时速度分量。

Navier-Stokes 方程(动量方程)为:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i \partial x_j} + g_i \quad (2)$$

式中, p 为瞬时压强; g_i 为单位流体质量力。

κ - ϵ 方程为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \kappa}{\partial t} + u_j \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_\kappa} \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right) + P + G - \epsilon \\ \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{v_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right) + \\ &C_{1\epsilon} (P + C_{3\epsilon} G) \epsilon / \kappa - C_{2\epsilon} \epsilon^2 / \kappa \end{aligned} \quad (3)$$

其中
$$C_{2\epsilon}^* = C_{2\epsilon} + \frac{C_\mu \eta^3 (1 - \eta / \eta_0)}{1 + \beta \eta^3}$$

$$\eta = S \kappa / \epsilon; S = (2 \langle S_{ij} S_{ij} \rangle)^{1/2}$$

式中, P 为由平均速度梯度引起的紊动能产生项; G 为由于浮力影响引起的紊动能产生项; $S_{ij} S_{ij}$ 为雷诺应力项; κ 为紊动能; ϵ 为耗散率; $C_{1\epsilon} = 1.42$; $C_{2\epsilon} = 1.68$; $\sigma_\kappa = 0.7194$; $\sigma_\epsilon = 0.7194$; $C_\mu = 0.0845$; $\eta_0 = 4.38$; $\beta = 0.012$ 。

3.1.2 网格划分与边界条件

采用均匀结构化正交网格对模型进行网格划分,其网格单元边长为 0.05 m,总网格单元数为 3 022 848 个。

模型的进、出口均采用压力边界,并设置相应的进出口水位;初始条件选用静水压强,鱼道进口设计水位为 3 m,出口水位为 2.25 m。鱼道底部与边壁设置为固体边界,模型粗糙度为 0.05,初始时间步长及最小时间步长均使用默认值。

3.2 模型验证

青海省地盘子水电站物理模型与本文模型近似,因此采用青海省地盘子水电站过鱼设施垂直竖缝段的物理模型和试验数据^[8],对本文的数学模型进行验证。竖缝式鱼道段常规过鱼池室结构尺寸与实际工程完全相同,考虑到计算成本,选取 S35~S57 段共 20 个池室、2 个休息池进行模拟。物理模型比尺为 1 : 10,进、出口水位分别为 0.395、0.210 m,提取竖缝处的平均流速、隔板前后水深,将数值计算结果与试验测量数据进行对比分析,结果见图 3。由图 3 可知,竖缝处平均流速相对误差为 4.8%,隔板前水深的实测值与计算值相对误差为 1.42%,隔板后水深的实测值与计算值相对误差 0.31%。数值计算结果与试验

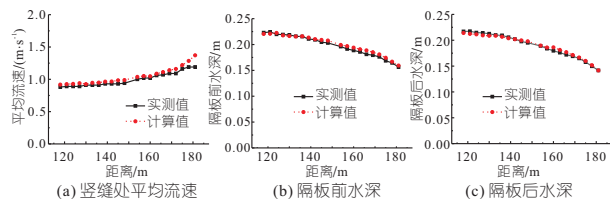


图 3 模拟计算结果与文献试验结果对比

Fig. 3 The contrast of simulation results and experimental results in literature

结果基本一致,可见数值模型设置合理。

4 计算结果分析

4.1 间距变化对主流区特性的影响

主流区的大小与流速分布对鱼类成功上溯非常重要,水流从上游入口流入,经过隔板的阻隔与导板的导流作用,使其在经过竖缝后呈现散射状,竖缝处的过流流速急剧增加,形成高流速的主流。而隔板和导板会改变流速方向形成两个回流区。一般而言,主流区的流速应大于洄游鱼类的感应流速,同时也不应超过鱼类上溯时的爆发游泳速度,可用主流速度沿程变化曲线来反映主流区的流速分布。

图 4 为主流区最大流速分布。为避免上下游边界对池室流场的影响,选取[#]4 池室进行分析,因此 x 方向的起点为 14.75 m。由图 4 可看出,不同结构型式的鱼道产生的主流区最大流速曲线十分相似,且大致呈现“S”型走向。但导隔板相对位置 $b_0/L = 0.10$ 时的工况 1、4、7、10 主流流线并未发生过多的弯曲,这是因为间距较小导致的竖缝过窄,主流还未发生偏转即到达了下一池室,并由下一池室的墩头将水流引导通过下一竖缝。主流整体的耗散程度较低,鱼道的结构不能对水流速度进行有效的衰减,因此导隔板相对位置 $b_0/L = 0.10$ 时的工况不应予以考虑。

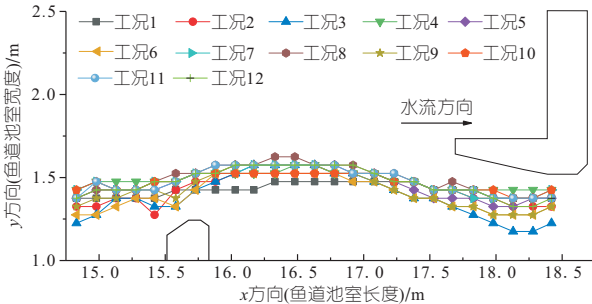


图 4 主流区最大流速分布

Fig. 4 Distribution of the maximum velocity in the mainstream area

为减小上游来水对导板的冲击,设置一定间距,可使主流形成一定的弯曲与流速变化。图 5 为主流速度沿程变化曲线。由图 5 可看出,主流速度沿程总体上呈现先增大后减小再增大的趋势,竖缝处断面的流速相对较大但最大流速均出现在竖缝中心下游的 0.2~0.3 m 区域。但工况 6、9、12 在达到最大流速后衰减较慢,且工况 12 不符合最大流速变化趋势,证明 $b_0/L = 0.20$ 时的工况无法对流速起到足够的衰减作用,因此导隔板相对位置 $b_0/L = 0.20$ 时的工况不予考虑。

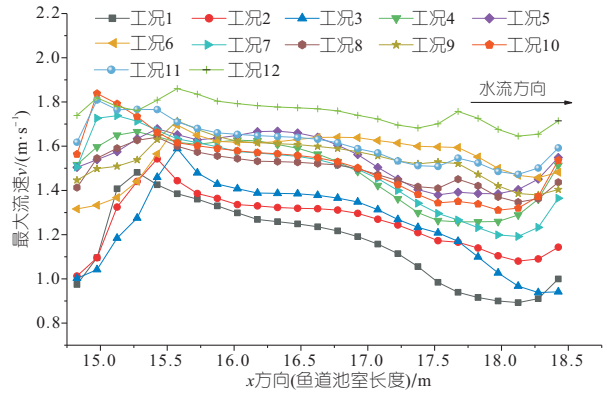


图 5 主流速度沿程变化曲线

Fig. 5 The mainstream velocity varies along the curve

表 2 为不同工况主流区面积占比。由表 2 可知,墩头型式 b、c、d 的变化对主流区面积的影响较小,而导隔板相对位置对主流区面积影响较大,在相同的鱼道墩头型式下,导隔板相对位置越大,主流区面积也越大。 $b_0/L = 0.10$ 时,主流区面积偏小,主流流态平顺,与周围水体掺混较弱,导隔板无法对水流进行有效的消能; $b_0/L = 0.20$ 时,主流区面积偏大,主流在横向上较发散,偏转较大,导致流速衰减也较慢。张国强等^[7]提出竖缝宽度 b/B 宜取 0.15~0.20,经过换算,即 b_0/L 取值范围在 0.125~0.167 之间,因此在已有经验基础上,综合考虑流速的沿程衰减与主流区面积占比后,认为导隔板相对位置 $b_0/L = 0.15$ 时的工况更为合理。

表 2 不同工况主流区面积占比

Tab. 2 Percentage of mainstream area of different simulation

墩头型式	面积占比/%		
	$b_0/L = 0.10$	$b_0/L = 0.15$	$b_0/L = 0.20$
a	14.2	19.3	23.5
b	21.2	24.5	27.0
c	22.5	24.8	27.4
d	20.2	25.0	28.8

4.2 墩头变化对主流区特性的影响

徐体兵等^[9]对比了有无墩头对水流流态的影响,证明不设墩头时主流区在横向上扩散幅度更大。设置墩头后,主流会更加集中地折向下一道竖缝,主流区在横向宽度上基本无变化,因此设置不同墩头角度旨在探讨主流在横向上的变化规律。

取导隔板相对位置 $b_0/L = 0.15$ 时的 4 个不同墩头型式的池室,对比沿程最大流速及位置,见图 6。由图 6 可知,型式 a 的最大流速为 1.54 m/s,型式 b、c 的最大流速均在 1.68 m/s 以下,且相差不大,但型式 d 的最大流速达到了 1.81 m/s。在上游竖缝处,最大流速在 1.01~1.61 m/s 之间,随后由墩头引起的过水断面面积减小,最大流速不断变大,型式 a、c、d 在 $x = 15.0 \sim$

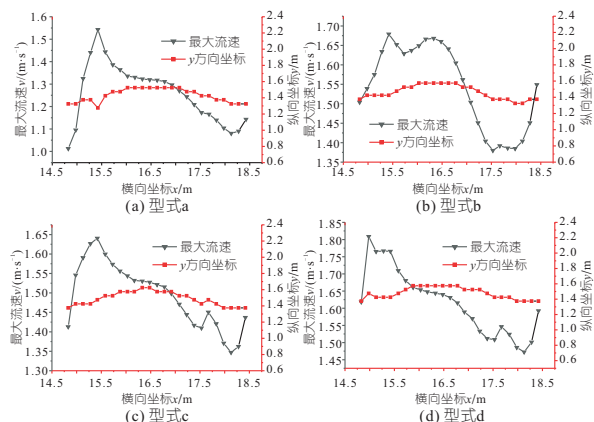


图 6 沿程最大流速及位置

Fig. 6 Maximum velocity and position along the way

15.5 m 之间达到峰值,直到水流完全经过上一池室隔板末端时,流速立刻呈下降趋势;型式 c、d 在 $x=17.675$ m 处,主流到达墩头尖端的位置,又出现一次流速突然增大的情况,之后主流发生弯曲流向导板,流速不断衰减,直至水流经过下一竖缝处,过流面积再次减小,流速再次增大。但型式 a、b 在 $x=17.675$ m 处流速无明显突然增大的现象,这与型式 c、d 不同,是因为型式 a、b 墩头导流角度较小,主流未发生过多的偏转,且在 $x=17.675$ m 处的主流流向正好与墩头角度接近一致,因此并未出现流速又一次明显增大的情况。对比 4 种不同的墩头型式,型式 a 的最大流速最小,且主流轨迹线变化平稳,对水流消能效果最佳。

4.3 墩头变化对紊动能的影响

图 7 为池室紊动能分布。由图 7 可知,紊动能分布在主流区的两侧呈带状分布,最大紊动能出现在导板尖端处,随着墩头导流角度的变大,紊动能的最大值也越靠近上游位置。在导流角引流的作用下,水流在导板处紊动程度较剧烈,是一种消能效果的体现。型式 a、b、c、d 的最大紊动能分别达 0.091、0.112、0.118、0.155 J/kg,这表明随墩头导流角度的增大水流的紊动强度也变大。

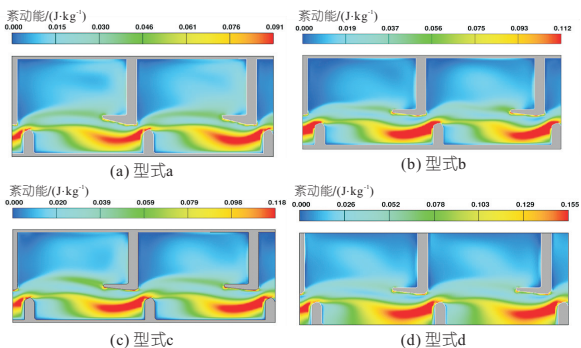


图 7 池室紊动能分布

Fig. 7 Turbulent energy distribution of the pool

综上所述,对于流态平稳、流线顺直的鱼道,可选用较大的设计流速值^[10],且我国多数河流中

均以“四大家鱼”为主,主要过鱼对象为大体型的青、草、鲢、鳙,游泳能力较强。本文流速与紊动能均会随墩头导流角度的变大而增大,如型式 d 墩头导流角大使主流流态过于发散,会导致主流流速过大,且紊动强度较高,不利于鱼类上溯。型式 a 的最大流速为 1.54 m/s,最大紊动能为 0.091 J/kg,均为 4 种型式中最为合理的墩头型式,能够满足鱼类上溯需求。

5 结论

a. 当水流从竖缝断面流入池室后,竖缝式鱼道的主流速度沿程变化总呈先增大后减小再增大的趋势。且最大值出现在竖缝 b_0 。中心下游的 0.2~0.3 m 处,即导板尖端处。

b. 就导流角度而言,墩头导流角越小对水流的约束越大,流态与流速也越有利于鱼类洄游,当墩头导流角为 0° 时,对水流的约束效果最好。就导隔板相对位置而言,最佳取值范围宜为 $b_0/L=0.15$ 左右,池室内流速与流态更加合理,满足鱼类上溯要求。

c. 本文仅设计了导隔板相对位置的 3 组变量,后期可增加 2~3 组变量以进一步得出更精确的适合鱼类上溯的结构类型。

参考文献:

- [1] 曹娜,钟治国,曹晓红,等.我国鱼道建设现状及典型案例[J].水资源保护,2016,32(6):156-162.
- [2] 史云鹏,曹晓红.水利水电工程维持河流连通性的思考[J].中国水能及电气化,2011(12):20-25.
- [3] 杨培思,蔡德所,莫崇勋.基于 FLOW-3D 的竖缝式鱼道水力特性研究[J].广西大学学报(自然科学版),2018,43(4):1675-1683.
- [4] RAJARATNAM N, KATOPODIS C, SOLANKI S. New designs for vertical slot fishways[J]. Canadian journal of civil engineering, 1992, 19(3):402-414.
- [5] 毛熹,脱友才,安瑞冬,等.结构变化对鱼道水力特性的影响[J].四川大学学报(工程科学版),2012,44(3):13-18.
- [6] 王猛,史德亮,陈辉,等.竖缝式鱼道池室结构变化对水力特性的影响分析[J].长江科学院院报,2015,32(1):79-83.
- [7] 张国强,孙双科.竖缝宽度对竖缝式鱼道水流结构的影响[J].水力发电学报,2012,31(1):151-156.
- [8] 袁海石.地盘子水电站过鱼设施设计与试验研究[D].西安:西安理工大学,2017.
- [9] 徐体兵,孙双科.竖缝式鱼道水流结构的数值模拟[J].水利学报,2009,40(11):1386-1391.
- [10] 南京水利科学研究所.鱼道[M].北京:电力工业出版社,1982.

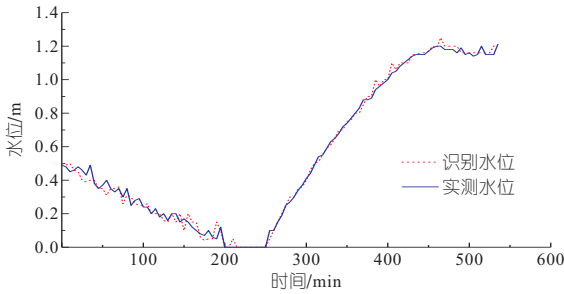


图 7 明海闸后水位数据对比图

Fig. 7 Comparison chart of water level data of Minghai sluice back station

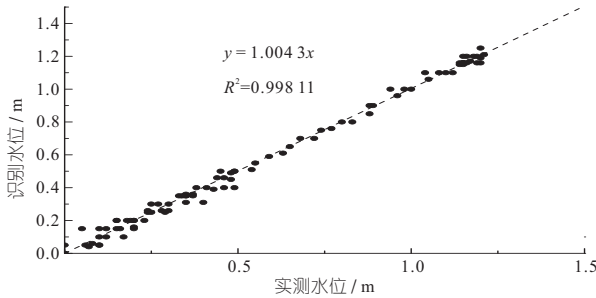


图 8 明海闸后水位识别结果相关性

Fig. 8 Correlation of water level identification results of Minghai sluice back station

别结果满足视频识别水尺水位的精度要求,可以补充无水位传感器设备区域的监测空白,为城市防洪排涝提供数据支撑。

Water Level Identification Method of Rivers and Lakes Based on Mask RCNN

XU Zhi¹, GAO Kai², GAO Xi-chao², LIANG Li-li¹, YI Pan³

- (1. Science and Technology Research Inst., China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China;
- 2. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
- 3. Beijing Hydrology Center, Beijing 100089, China)

Abstract: With the development of deep learning and image recognition technology, monitoring the water level of urban rivers and lakes through video has become a hot research topic in recent years. In order to realize the comprehensiveness of urban river and lake water level monitoring, a method of river and lake water level identification based on Mask RCNN was proposed. The water level was obtained by the water level characters and their position relations in the video images, and it was verified by the monitoring video of the real water level station in Dongying City, Shandong Province. The results show that the probability that the comparison error between the water level identification result and the measured data was less than 2 cm was 68.5%, the probability of error less than 3 cm is 76.9%, the probability of error less than 5 cm is 93.5%, the average error is 2.1 cm, and the root mean square error (RMSE) is 3.0 cm, which meets the recognition accuracy requirements of video water gauge level in Technical Outline of Digital Twin Watershed Construction (Trial). Therefore, the model has a good recognition effect and a certain application prospect.

Key words: water level identification; image recognition; deep learning; Mask RCNN

(上接第 153 页)

Influence of Structure and Interval Variation on Hydraulic Characteristics of Vertical Slot Fishway

LV Yang-yang¹, YANG Lu-hua¹, WANG Fan², WANG Xu¹

- (1. College of Hydraulic Engineering, Tianjin Agricultural College, Tianjin 300384, China;
- 2. Zhongshui North Survey, Design and Research Co. LTD., Tianjin 300222, China)

Abstract: The structure of fishway is the major factor that fish migrates successfully. The impact of pier head structure and horizontal interval of baffles on the hydraulic characteristics of a vertical slot fishway pool were researched. Twelve different working conditions were composed of two factors, namely, the diversion angle of pier head and the relative position of baffles. The RNG κ - ϵ turbulence model was used to simulate the hydraulic characteristics of fishway. The results indicate that the influence of pier head structure on hydraulic characteristics is mainly reflected on velocity and turbulent energy, and the smaller the diversion Angle, the smaller the velocity and turbulent energy are. The distance between flow deflector and baffle plate changed the mainstream flow pattern and area size, and then affected the distribution of flow velocity. When the relative position of $b_0/L=0.15$ or so, the flow pattern in the pool was reasonable, which met the basic requirements of fish migration.

Key words: vertical slot fishway; pier head; interval; numerical simulation; hydraulic characteristics

4 结论

a. 提出的基于 Mask RCNN 的河湖水位识别方法思路简单、受水面线影响较小、精度较高,具有一定应用前景。

b. 识别水位的关键是水尺字符识别,当在特殊条件下水面产生水尺倒影时,水尺倒影中的水尺字符可能会影响识别结果,后续将进一步研究如何消除水尺倒影的影响。

参考文献:

- [1] 傅启凡,路茗,张质懿,等. 基于语义分割的水位监测方法研究[J]. 激光与光电子学进展,2022,59(4): 89-100.
- [2] 张衍,王剑平,张果,等. 图像法水位检测研究进展[J]. 电子测量技术,2021,44(13):104-113.
- [3] 陈梦,陈华,黄贵平,等. 河道流量视频测验技术应用研究及误差分析[J]. 中国农村水利水电. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1419.TV.20221013.0837.002.html>.
- [4] 任娣声. 基于深度学习的货架状态画像研究与实现[D]. 西安:西安理工大学,2021.
- [5] 中华人民共和国水利部. 数字孪生流域建设技术大纲(试行)[Z]. 2002.