

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.02.013

进鱼口水深不足时竖缝式鱼道水力特性及 进出口允许最大水深差

缪婧娴¹, 王晓刚², 辛沛¹, 唐柱闫³

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 南京水利科学研究院水工水力学研究所, 江苏 南京 210029;
3. 安徽省引江济淮集团有限公司, 安徽 合肥 230041)

摘要: 为研究竖缝式鱼道进鱼口水深不足时鱼道进出口允许最大水深差, 构建了鱼道整体数学模型, 对鱼道流速、流态、水面线等进行了数值模拟分析。结果表明: 当进鱼口水深不足时, 上游段水深与出鱼口水深一致, 流速稳定; 中间段水深开始缓慢下降, 流速逐渐变大; 下游段水深急剧下降, 流速迅速变大, 在进鱼口处出现跌水, 流速出现最大值。当鱼道坡度相同时, 出鱼口水深与进出口允许最大水深差呈线性关系, 出鱼口水深越大, 进出口允许最大水深差越大; 当出鱼口水深相同时, 鱼道坡度与进出口允许最大水深差也呈线性关系, 鱼道坡度越陡, 进出口允许最大水深差越小。

关键词: 竖缝式鱼道; 水深差; 水位变幅; 水面线; 水力特性; 整体模型

中图分类号: TV135.9; S956.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2023)02-0099-07

Hydraulic characteristics of vertical slot fishway and allowable maximum water depth difference between inlet and outlet subject to insufficient inlet water depth

MIAO Jingxian¹, WANG Xiaogang², XIN Pei¹, TANG Zhushuan³

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Hydraulic Engineering Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. Anhui Yangtze River-Huaihe River Diversion Group Co., Ltd., Hefei 230041, China)

Abstract: A quasi-integrated numerical model for the vertical slot fishway was established to investigate the allowable maximum water depth difference between the fishway inlet and outlet, particularly when the fishway is subject to insufficient inlet water depth. The mathematical model was used to numerically simulate the flow velocity, flow pattern and water surface line along the fishway. The results suggest that when the water depth at the inlet is insufficient, the water depth in the upstream section is consistent with that of the outlet, and the flow velocity is stable. The water depth in the middle section begins to drop slowly, and the flow velocity gradually increases. The water depth in the downstream section decreases sharply, and the flow velocity increases rapidly. There is a drop at the inlet and the maximum flow velocity is observed. It indicates that the outlet depth has a linear relationship with the allowable maximum water depth difference between inlet and outlet, i. e., the greater the outlet depth, the greater the allowable maximum water depth difference between inlet and outlet. The results also demonstrate that there is a linear relationship between the fishway slope and the allowable maximum water depth difference between inlet and outlet, which is that a steeper slope corresponds with a smaller the allowable maximum water depth difference between inlet and outlet.

Key words: vertical slot fishway; water depth difference; water level variation; water surface line; hydraulic characteristics; integrated model

闸坝等工程措施破坏了河流连通性, 严重威胁河流生态系统健康^[1-3]。鱼道作为一种保护鱼类资源的水利工程, 具有为鱼类提供迁徙通道和连接河流上下游栖息地的重要作用, 通过鱼道维持河流的连通性和生物

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y120009); 引江济淮工程科技创新课题(YJJH-ZT-ZX-2019); 江西省交通运输厅科技项目(2019C0004, 2019C0005)

作者简介: 缪婧娴(1998—), 女, 硕士研究生, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: 201302010029@hhu.edu.cn

通信作者: 王晓刚(1980—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail: xgwang@nhri.cn

引用本文: 缪婧娴, 王晓刚, 辛沛, 等. 进鱼口水深不足时竖缝式鱼道水力特性及进出口允许最大水深差[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 99-105.

MIAO Jingxian, WANG Xiaogang, XIN Pei, et al. Hydraulic characteristics of vertical slot fishway and allowable maximum water depth difference between inlet and outlet subject to insufficient inlet water depth[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(2): 99-105.

的多样性能够有效防止珍稀鱼类的灭绝^[4]。由于水文情势改变或者水电站调度运行^[1],鱼道上下游水位处于持续变化中。通常设计要求鱼道进鱼口水深大于出鱼口水深,但实际工程中进鱼口水深小于出鱼口水深的情况时有发生。大量工程实践表明,鱼道进鱼口水深不足时,鱼道上游段水面平稳,但下游段水位会持续下降,会在进鱼口段发生明显跌落,甚至出现鱼类难以逾越的跌水。

竖缝式鱼道是应用最为广泛的鱼道布置形式之一,已在池室尺寸布置、鱼道坡度和池室水力特性方面取得了相对成熟的研究成果。尺寸布置方面,Rajaratnam 等^[5-6]较早针对 7 种不同布置形式的竖缝式鱼道进行了水力特性研究,结果表明流量和池室内水深呈线性关系,并且水流以射流形式通过竖缝,当鱼道池室长为 10 倍竖缝宽度、宽为 8 倍竖缝宽度时鱼道的消能效果最好;Bombač 等^[7]利用二维 PCFLOW2D 模型模拟分析了偏转角度、竖缝尺寸、隔板尺寸等影响因素对池室内水流结构的影响。鱼道坡度方面,Wu 等^[8]对 5%、10% 和 20% 3 种坡度的竖缝式鱼道进行了水流结构分析,结果表明,当鱼道坡度为 5% 时池室内水流流态具有明显的二维特性,为 10% 和 20% 时池室内水流流态表现为三维特性;曹庆磊等^[9-10]和刘志雄等^[11]也通过物理模型试验和数值模拟分析发现,在鱼道坡度小于 5% 时竖缝式鱼道内垂向流速变化不大,具有明显的二维特性;郭维东等^[12]研究发现,竖缝式鱼道常规池室底板坡度影响主流的消能速率,底板坡度越大消能速率越大。池室水力特性方面,Puertas 等^[13]利用超声波多普勒测速仪检测了水流结构和量化速度分布,结果发现流场可划分为以最大速度为特征的主流区和由低速与水平涡流确定的回流区;Fujihara 等^[14]利用二维数学模型模拟了竖缝式鱼道池室内水流流态,采用结构性与非结构性相结合的四边形网格并基于浅水方程的二元解对竖缝式鱼道的流场结构进行了分析。

鱼道上下游的运行水位会直接影响过鱼季节的适宜过鱼条件,如水电枢纽机组调度极易造成鱼道上下游水位变幅过大的问题,使得鱼道上下游水位组合不合理,不利于鱼类上溯。Ma 等^[15]基于 EFDC 模型对不同鱼道入口深度的流场分布进行了定量分析,确定了适合鱼类通行的鱼道进鱼口水深条件。Gisen 等^[16]利用分离涡(DES)模型模拟了进鱼口流态,发现低水位时产生的漩涡对鱼类上溯有不利影响。段鸿锋等^[17]对某水电站鱼道进口布置进行了优化,解决了低水位时没有较好的诱鱼水力条件的问题。魏萍等^[18]提出了一种优化的堰孔组合形式以解决进鱼口水位不衔接问题。金志军等^[19]从吸引流和竞争流角度出发,提出了一种鱼道进口概化模型。竖缝式鱼道消能效果较充分,能适应较大水位变幅,一般用于能适应较复杂流态的大、中型鱼类^[20]。此外,设计多个进鱼口也可以较好地适应大水位变幅情况,如丰满水电站^[21]尾水最大变幅为 4.92 m,根据下游水位变幅,丰满水电站过鱼设施布置了不同高程的 4 个进鱼口,其中进口最低水深为 0.64 m;犍为航电枢纽鱼道^[22]进口运行水位为 317.97~321.66 m,为适应水位变幅较大的特点,设置了 2 个进鱼口。

目前国内外关于鱼道沿程水面线变化的研究较少,且数值模拟研究主要集中于模拟 9 或 10 个标准池室的水流结构,缺乏对鱼道进出口允许水深差的研究,不能适应实际工程中大水位变幅的需要,且鲜有关于进鱼口水深不足时鱼道运行水位组合的研究。为此,本文依托鱼道水位变幅达 11 m 的某工程开展进鱼口水深不足时竖缝式鱼道水力特性及进出口允许最大水深差研究。

1 数学模型及验证

某鱼道布置在电站厂房的左侧边坡上,全长 2 194 m,设有 1 个进鱼口和 6 个出鱼口。主要建筑物包括进鱼口、普通池室、休息池和出鱼口等。主要过鱼对象是异齿裂腹鱼、双须叶须鱼和拉萨裂腹鱼等。本文以该鱼道池室细部结构为原型构建数学模型。

1.1 控制方程

鱼道坡度小于 5% 的竖缝式鱼道水流结构具有明显的二维特性,因此本文基于 MIKE21 软件建立二维鱼道水动力模型,其中水动力控制方程由连续性方程和垂向积分的 x 、 y 方向动量方程组成:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial y} = 0 \tag{1}$$

$$\begin{aligned} &\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(h \tau_{xx} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(h \tau_{xy} \right) + gh \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gp \sqrt{p^2 + q^2}}{C^2 h^2} - \\ &\frac{1}{\rho} \left[\frac{\partial}{\partial x} (h \tau_{xx}) + \frac{\partial}{\partial y} (h \tau_{xy}) \right] - \Omega q - f v_w v_{wx} + \frac{h}{\rho} \frac{\partial p_a}{\partial x} = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\rho q}{h}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{q^2}{h}\right) + gh\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gp\sqrt{p^2 + q^2}}{C^2h^2} -$$
$$\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial}{\partial x}(h\tau_{xy}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\tau_{yy})\right] - \Omega p - f v_w v_{wy} + \frac{h}{\rho}\frac{\partial p_a}{\partial y} = 0 \tag{3}$$

式中: h 为水深,m; ζ 为水位,m; t 为时间,s; x,y 为平面坐标,m; C 为谢才系数, $m^{1/2}/s$; g 为重力加速度, m/s^2 ; f 为风摩擦系数; v_w,v_{wx},v_{wy} 为风速及其在 x,y 方向上的分量, m/s ; Ω 为科氏力, s^{-1} ; p_a 为大气压强,Pa; ρ 为水的密度, kg/m^3 ; $\tau_{xx},\tau_{xy},\tau_{yy}$ 为有效剪切力分量,Pa; p,q 分别为 x,y 方向的单宽流量, $m^3/(s\cdot m)$,其中 $p=\bar{u}h$, $q=\bar{v}h$, $\bar{u},\bar{v}$ 分别为 x,y 方向上沿水深的平均流速, m/s 。根据水动力控制方程,利用有限体积法求解即可得到每一时刻在 (x,y) 处的水位、水深以及流速 $\bar{u},\bar{v}$ 。

1.2 模型域与网格剖分

模型长度应包含鱼道中水深不相同的所有池室长度,模型模拟结果才能够准确反映原型鱼道池室水力特性。为模拟全部水深影响范围,模型总长 300 m,包含 100 个普通池室和 4 个休息池。以休息池为间隔,每 20 个池室组成一个池室段。池室自进鱼口向出鱼口以 1 ~ 100 编号,净长 2.5 m,净宽 2 m,竖缝宽度为 0.35 m。休息池净长为普通池室的 2 倍,净宽与普通池室一致。为了更直观地揭示水面线变化特征,暂不考虑转弯段的设置。鱼道进口门槽处桩号 0 m,鱼道整体和池室布置见图 1。

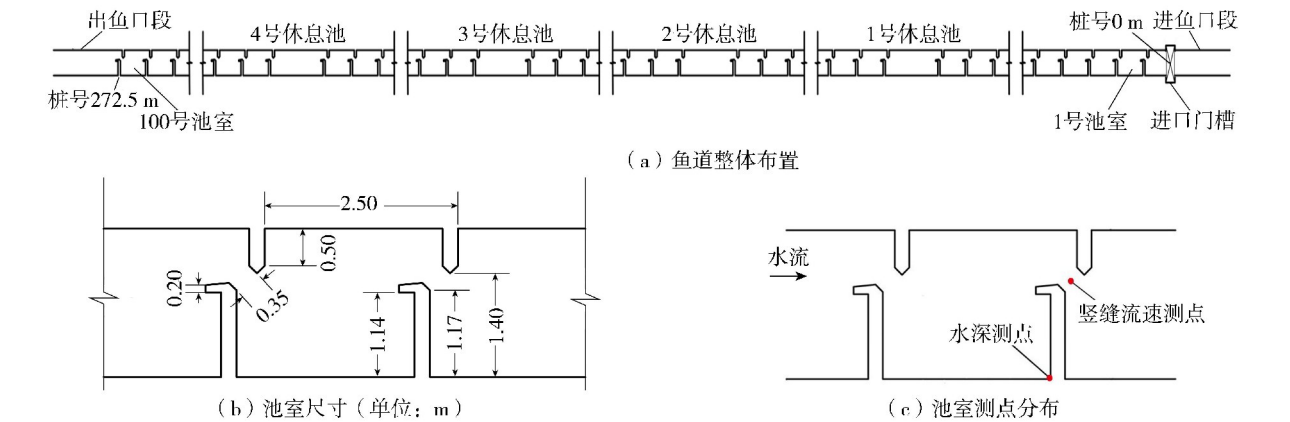


图 1 鱼道布置示意图
Fig.1 Schematic diagram of fishway layout

MIKE21 边界条件可以是水位控制条件或者流量控制条件,为探究鱼道不同上下游水位组合对进出口允许最大水深差的影响,模型边界出鱼口采用上游水位、进鱼口采用下游水位控制。鱼道边壁及底部采用混凝土浇筑,故糙率系数为定值 0.014。模型计算时间步长为 0.05 s,总步数为 72 000 步,计算时间总长为 1 h,干湿判定条件选用软件默认值,不考虑地球自转产生的科氏力的作用,模型为冷启动。

模型采用非结构化网格(图 2),在保证计算精度的前提下,对模型进行了网格剖分,采用 6 cm 网格,整个模型节点数为 171 239,网格数为 326 130。

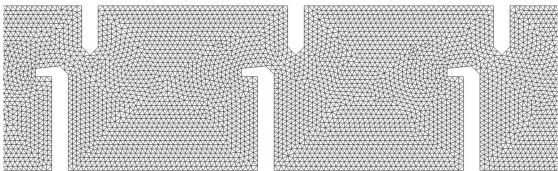


图 2 非结构化网格示意图
Fig.2 Schematic diagram of unstructured mesh

1.3 模型验证

利用所依托工程物理模型试验资料对进鱼口水深不足时数学模型进行验证,验证工况如表 1 所示。由于流量和水位是一一对应的关系,物理模型采用流量水位边界。鱼道物理模型底坡为 2%,包含 50 个池室。

表 1 数学模型验证工况

Table 1 Verification cases for the mathematical model						
工况	出鱼口水位/m	进鱼口水位/m	出鱼口水深/m	进鱼口水深/m	鱼道下泄流量/(m ³ ·s ⁻¹)	工况说明
1	4 263.4	4 258.13	1.2	0.93	0.31	鱼道运行最小水深
2	4 264.5	4 258.13	2.3	0.93	0.57	鱼道运行中间水深
3	4 265.6	4 258.13	3.4	0.93	0.93	鱼道运行上游最大水深

1.3.1 水深验证

鱼道内水位高低是影响水流结构的关键因素。沿程水深验证结果(图 3)显示,水面线沿程下降,数值模拟结果和试验值基本一致。工况 1 上下游水深差为 0.27 m,模拟值和试验值的误差最小,最大误差小于 0.03 m;工况 2 最大误差小于 0.09 m;工况 3 最大误差小于 0.10 m。模拟误差较大的区域均集中在进鱼口段,考虑到该段水位发生大幅下降,水面有明显波动,因而测量时会产生一定的误差。其余位置处误差均小于 5%。

1.3.2 流态流速验证

典型池室平面流态见图 4,可见池室中存在两种不同的流态,一种连通着两级竖缝的主流区,一种是流速较小的形成封闭流线的回流区。主流区明确,鱼类可以感知上溯方向;有一定面积的回流区,保证鱼类有休息区域。主流在池室中整体呈 S 形,分布在池室左侧 1/5 ~ 1/2 的范围之间。回流区流速普遍低于 0.2 m/s,主流左侧回流区面积较小,为逆时针流动;右侧的回流区面积较大,为顺时针流动。数值模拟的回流区范围略大于物理模型试验得到的回流区范围,可能是因为包含了几乎静水的回流区域,而物理模型试验存在一定的人为误差。

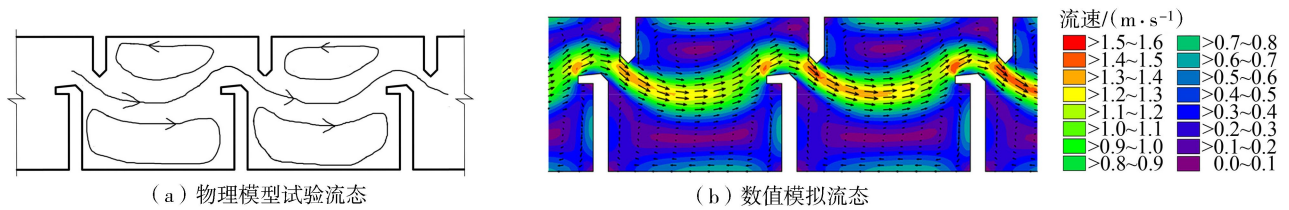


图 4 鱼道池室内流态对比

Fig. 4 Comparison of flow field in the fishway pool

不同工况和池室水深时对应的竖缝流速对比见表 2,可见试验值和模拟值吻合较好。以工况 3 为例,水流从 33 号池室到 2 号池室的过程中,池室水深从 3.00 m 下降至 1.53 m,物理模型试验结果表明池室竖缝流速从 1.05 m/s 增大至 2.37 m/s,数值模拟结果显示池室竖缝流速从 1.03 m/s 增大至 2.32 m/s,模拟误差为 1.64%。

水面线沿程变化和竖缝流速验证结果表明模型参数设置合理,模拟结果可以很好地反映实际水流结构。

2 模拟结果与分析

2.1 鱼道沿程水力特性

鱼道上下游水位变化会引起池室水深的壅高或者降低。竖缝流速是判断鱼类能否成功上溯的关键,为揭示水面线和竖缝流速沿程变化规律,模拟了出鱼口水深均为 2.3 m、进鱼口水深分别为 1.0 m(工况 4)、1.8 m(工况 5)和 2.2 m(工况 6)3 种工况鱼道池室的水流结构。

2.1.1 水面线

工况 4、5、6 水面线和水深沿程变化如图 5 所示。由图 5(a)可知,进鱼口水深不足时,水面线沿程变化可分为 3 段:上游段水面线和鱼道底坡基本平行;中间段水深开始缓慢下降;下游段水深迅速减小,越靠近进鱼口相邻池室水深差越大,水面坡降陡增,形成跌水。以工况 5 为例,上游段为距离进口门槽 100 m 以外区域,此段池室水深与出鱼口水深一致,维持在 2.3 m 不变;中间段为距离进口门槽 40 ~ 100 m 范围区域,此段池室水深从 2.3 m 缓慢降至 2.1 m,在长达 60 m 的鱼道范围内水深差仅为 0.2 m;下游段为距离进口门槽 40 m 以内区域,此段池室水深从 2.1 m 降至 1.8 m,在 40 m 的鱼道范围内水深差达 0.3 m,水面陡降,因此需

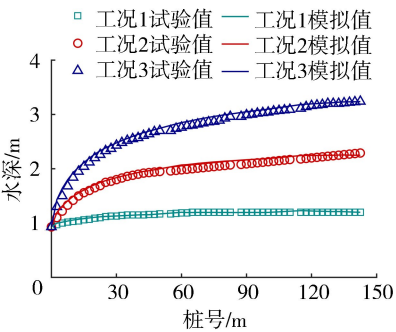


图 3 鱼道沿程水深试验值与模拟值对比

Fig. 3 Comparison of experimental and modeled water depth along the fishway

表 2 竖缝流速试验值与模拟值对比				
Table 2 Comparison of experimental and modeled vertical slot velocity				
工况	池室编号	水深/m	竖缝流速/(m·s ⁻¹)	
			试验值	模拟值
工况 1	2	1.00	1.21	1.17
	5	1.10	1.16	1.12
	48	1.20	1.04	0.99
工况 2	1	1.10	1.79	1.76
	6	1.60	1.46	1.45
	17	1.90	1.15	1.14
	45	2.23	1.02	1.01
工况 3	2	1.53	2.37	2.32
	5	2.00	1.63	1.62
	14	2.50	1.36	1.35
	33	3.00	1.05	1.03

重点关注下降段是否会形成流速屏障,阻碍鱼类上溯。

此外,由图 5(b)可以看出,上游段水深不变,无明显波动。工况 4 因进鱼口水深不足,水深影响的池室长度范围(水深低于出鱼口水深)约为 130 m,工况 5 和工况 6 水深影响的池室长度范围约分别为 100 m 和 40 m。可见进出口水深差越大,水深影响的池室长度范围越大,跌水越显著。

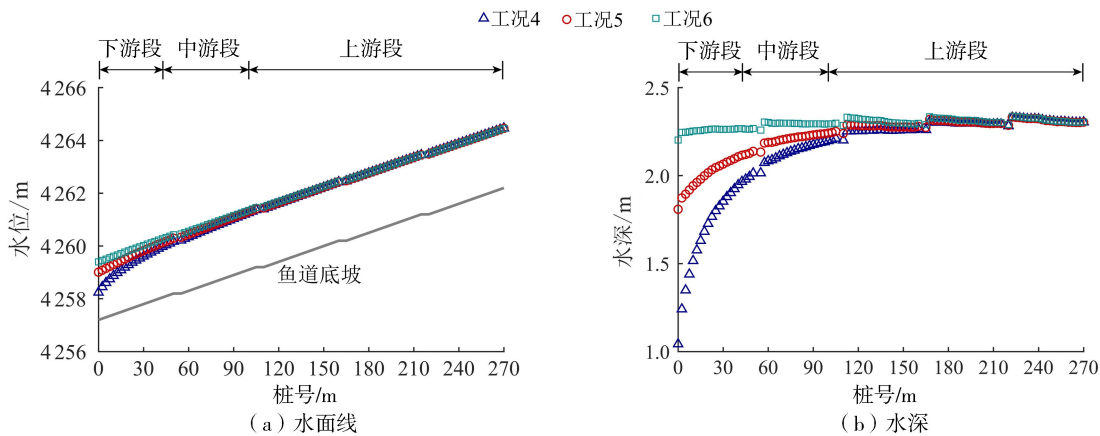


图 5 鱼道水面线和水深沿程变化
Fig. 5 Changes of water surface line and water depth along the fishway

2.1.2 流速

工况 4、5、6 各池室竖缝流速沿程分布见图 6,可见 3 种工况鱼道内流速顺着水流方向总体上呈现增大趋势。竖缝流速沿程变化曲线可分为 3 段:上游段很稳定,流速在小范围内波动,与进鱼口水深无关,3 种工况下竖缝平均流速均为 0.89 m/s,最大流速达到 0.93 m/s;中游段流速开始逐渐变大;下游段变化较大,因水位大幅度下降,竖缝流速越来越大,在进鱼口处流速出现最大值。因此,进鱼口水深不足时,出鱼口水深是鱼类上溯的关键。当出鱼口水深一定时,进出口水深差存在一允许最大值,超过该值,鱼道进鱼口将出现流速屏障甚至跌水,阻碍鱼类上溯。

竖缝断面弗劳德数 Fr 沿程变化如图 7 所示,进鱼口水深不足时,弗劳德数顺着水流方向沿程增大;水深稳定时,弗劳德数稳定在 0.2;水深下降时弗劳德数增大,且水深下降得越快,弗劳德数增幅越大。但弗劳德数全程始终小于 1,因此竖缝处水流为缓流时有利于鱼类上溯。

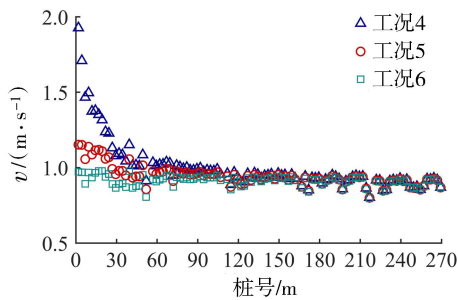


图 6 竖缝流速沿程变化
Fig. 6 Variation in vertical slot velocity along the fishway

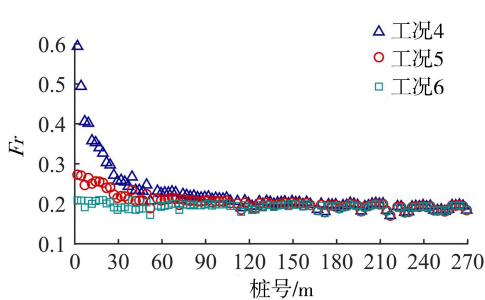


图 7 竖缝断面弗劳德数沿程变化
Fig. 7 Variation of Froude number along the vertical slot section

2.2 鱼道进出口允许最大水深差

在鱼道坡度为 2% 不变的情况下,通过数学模型试算出鱼口水深一定时,不同进鱼口水深组合,并逐渐减小进鱼口水深,从而得到进鱼口允许最小水深,以此来探究进出口允许最大水深差。四大家鱼的爆发游泳速度为 1.2 m/s,且我国竖缝式鱼道设计流速一般不大于 1.2 m/s^[23],相对于竖缝宽度,鱼类体宽较小,故以竖缝剖面 70% 区域流速小于 1.2 m/s 为判断依据,模拟得出进鱼口允许最小水深。鱼道坡度为 2% 时不同上下游水位组合对应的进出口允许最大水深差试算结果(图 8)表明,出鱼口水深变大时,进出口允许最大水深差呈现增大的趋势。

2.2.1 不同出鱼口水深时进出口允许最大水深差

为不失一般性,对2%、1.3%和1%3种鱼道坡度时进出口允许最大水深差与出鱼口水深的关系进行模拟分析。进出口允许最大水深差和出鱼口水深模拟结果见图8,可见相同坡度时进出口允许最大水深差和出鱼口水深呈线性关系,出鱼口水深越大,进出口允许最大水深差越大。当鱼道坡度为2%、1.3%和1%时,拟合方程分别为

$$y = 0.19x + 0.03 \quad (R^2 = 0.98) \tag{1}$$

$$y = 0.29x + 0.18 \quad (R^2 = 0.99) \tag{2}$$

$$y = 0.37x + 0.20 \quad (R^2 = 0.99) \tag{3}$$

2.2.2 不同鱼道坡度时允许最大水深差

对于特定的鱼道,水深差一定时,鱼道坡度越陡,每块隔板平均水深差越大,鱼类上溯越困难。为了分析鱼道坡度对进出口允许最大水深差的影响,设定出鱼口水深2.3 m,鱼道坡度为1%~2.8%,经过大量试算,得到不同鱼道坡度时进出口允许最大水深差如图9所示。由图9可知,进出口允许最大水深差和鱼道坡度呈线性关系,鱼道坡度越陡,进出口允许最大水深差越小。因此当鱼道坡度较小时,鱼类能够适应更大的水位变动,但是相应的鱼道距离需要加长,建设费用也就增加。所以实际工程修建时需要选择合适的鱼道坡度,才能既提高鱼类上溯率,又节省工程造价。对于相同布置形式的鱼道,可以通过数学模型模拟两个已知鱼道坡度的进出口允许最大水深差,再插值得到未知坡度下鱼道进出口允许最大水深差,以寻求鱼道坡度最优解。

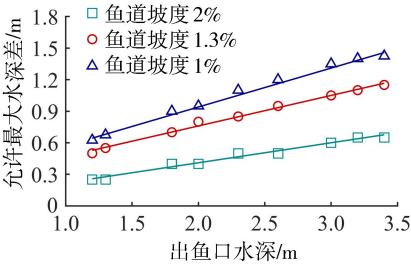


图8 不同出鱼口水深时进出口允许最大水深差

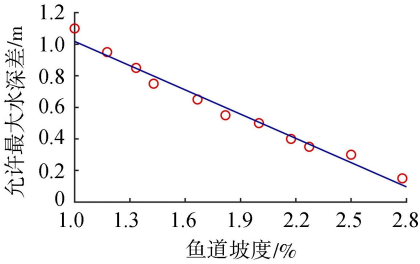


图9 不同鱼道坡度时进出口允许最大水深差

Fig.8 Allowable maximum water depth difference between inlet and outlet under different outlet depths Fig.9 Allowable maximum water depth difference between inlet and outlet under different slopes

3 结 论

- a. 当进鱼口水深不足时,鱼道沿程水面线可分为3段:上游段水深与出鱼口水深一致,水面线和鱼道底坡基本平行,流速稳定;中间段水深开始缓慢下降,流速逐渐变大;下游段水深急剧下降,流速迅速变大,在进鱼口处出现跌水,流速出现最大值,出现流速屏障。
- b. 当鱼道坡度相同时,出鱼口水深与进出口允许最大水深差呈线性关系,出鱼口水深越大,进出口允许最大水深差越大。
- c. 当出鱼口水深相同时,鱼道坡度与进出口允许最大水深差呈线性关系,鱼道坡度越陡,进出口允许最大水深差越小。

参考文献:

[1] 高玉琴,周桐,马真臻,等.考虑天然水文情势的水库调度图优化[J].水资源保护,2020,36(4):60-67. (GAO Yuqin, ZHOU Tong, MA Zhenzhen, et al. Optimization of reservoir operation chart considering natural hydrological regime[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(4): 60-67. (in Chinese))

[2] 代稳,王金凤,陕振沛,等.荆南三口流域水系连通性变化对水资源开发利用的影响[J].水资源保护,2021,37(6):114-120. (DAI Wen, WANG Jinfeng, SHAN Zhenpei, et al. Influence of water system connectivity variation on water resources development and utilization in the Three Outlets Basin of Southern Jingjiang River[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6): 114-120. (in Chinese))

[3] 杨志,冯民权.基于图论的强人工干扰流域综合连通性量化的改进方法[J].水资源保护,2020,36(4):52-59. (YANG Zhi, FENG Minquan. An improved method based on graph theory to quantify comprehensive connectivity of basins with strong

artificial disturbance[J]. *Water Resources Protection*,2020,36(4):52-59. (in Chinese))

[4] 刘超,张世宝,王二平,等. 鳊鱼道堰面加糙的过鱼效果评价[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2020,48(2):136-142. (LIU Chao,ZHANG Shibao,WANG Erping,et al. Study on elver passing efficiency for weir surface roughing of eel channel[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2020,48(2):136-142. (in Chinese))

[5] RAJARATNAM N, VAN DER VINNE G, KATOPODIS C. Hydraulics of vertical slot fishways[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,1986,112(10):909-927.

[6] RAJARATNAM N, KATOPODIS C, SOLANKI S. New designs for vertical slot fishways[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*,1992,19(3):402-414.

[7] BOMBAČ M, ČETINA M, NOVAK G. Study on flow characteristics in vertical slot fishways regarding slot layout optimization[J]. *Ecological Engineering*,2017,107:126-136.

[8] WU S, RAJARATNAM N, KATOPODIS C. Structure of flow in vertical slot fishway[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,1999,125(4):351-360.

[9] 曹庆磊,杨文俊,陈辉. 同侧竖缝式鱼道水力特性的数值模拟[J]. *长江科学院院报*,2010,27(7):26-30. (CAO Qinglei, YANG Wenjun, CHEN Hui. Numerical simulation of characteristics of vertical slot fishway on same one side[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*,2010,27(7):26-30. (in Chinese))

[10] 曹庆磊,杨文俊,陈辉. 异侧竖缝式鱼道水力特性试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*,2010,38(6):698-703. (CAO Qinglei, YANG Wenjun, CHEN Hui. Experimental study on hydraulic characteristics of vertical slot fishway from side to side[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*,2010,38(6):698-703. (in Chinese))

[11] 刘志雄,刘东,周赤. 异侧竖缝式鱼道水力特性研究[J]. *人民长江*,2011,42(15):66-68. (LIU Zhixiong, LIU Dong, ZHOU Chi. Study of hydraulic characteristics of fish way with vertical cross-set slots[J]. *Yangtze River*,2011,42(15):66-68. (in Chinese))

[12] 郭维东,孙磊,高宇,等. 同侧竖缝式鱼道水力特性研究[J]. *水电能源科学*,2012,30(3):81-83. (GUO Weidong, SUN Lei, GAO Yu, et al. Study of hydraulic characteristics in one side vertical slot fish way[J]. *Water Resources and Power*,2012,30(3):81-83. (in Chinese))

[13] PUERTAS J, PENA L, TEIJEIRO T. Experimental approach to the hydraulics of vertical slot fishways[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2004,130(1):10-23.

[14] FUJIHARA M, FUKUSHIMA T, TACHIBANA K. Numerical investigations of flow in vertical single-and double-slot fishways[J]. *Transactions of the Japanese Society of Irrigation, Drainage and Reclamation Engineering*,2003,223:79-88.

[15] MA B, DONG F, PENG W Q, et al. Numerical simulation of effects of inlet water depth of ecological fishway on the suitability of passing fish[J]. *IOP Conference Series:Earth and Environmental Science*,2019,344(1):012064.

[16] GISEN D C, WEICHERT R B, NESTLER J M. Optimizing attraction flow for upstream fish passage at a hydropower dam employing 3D detached-eddy simulation[J]. *Ecological Engineering*,2017,100:344-353.

[17] 段鸿锋,孙治才,赵绍熙,等. 高水位变幅鱼道进口布置水力学试验研究[J]. *水电能源科学*,2020,38(1):116-118. (DUAN Hongfeng, SUN Zhicai, ZHAO Shaoxi, et al. Hydraulic experimental study on layout of fishway inlet under the condition of high water level variation[J]. *Water Resources and Power*,2020,38(1):116-118. (in Chinese))

[18] 魏萍,王晓刚,何飞飞,等. 适应下游水位变动的堰孔式鱼道进口段隔板优化研究[J]. *水利水电技术(中英文)*,2021,52(4):143-152. (WEI Ping, WANG Xiaogang, HE Feifei, et al. Optimization of baffle plate in inlet section of weir fishway to adapt to downstream water level fluctuation[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*,2021,52(4):143-152. (in Chinese))

[19] 金志军,单承康,崔磊,等. 过鱼设施进口及吸引流设计[J]. *水资源保护*,2019,35(6):145-154. (JIN Zhijun, SHAN Chengkang, CUI Lei, et al. Design of entrance and attraction flow of fish passage facility[J]. *Water Resources Protection*,2019,35(6):145-154. (in Chinese))

[20] 边永欢,孙双科. 竖缝式鱼道的水力特性研究[J]. *水利学报*,2013,44(12):1462-1467. (BIAN Yonghuan, SUN Shuangke. Study on hydraulic characteristic of flow in the vertical slot fishway[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*,2013,44(12):1462-1467. (in Chinese))

[21] 苏加林. 丰满重建工程过鱼设施方案设计优化[J]. *水利水电技术*,2019,50(10):98-103. (SU Jialin. Design optimization of fish passing facility scheme for reconstruction project of Fengman Hydropower Station[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*,2019,50(10):98-103. (in Chinese))

[22] 文屹. 犍为航电枢纽鱼道布置设计[J]. *红水河*,2021,40(2):38-40. (WEN Yi. Layout design of fishway for Qianwei Navigation-Power Junction[J]. *Hongshui River*,2021,40(2):38-40. (in Chinese))

[23] 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))