

• 水利与土木工程 •

DOI:10.15961/j.jsuese.201701010

高坝过鱼设施集诱鱼进口水力学条件数值模拟与模型试验研究

廖博文, 安瑞冬*, 李嘉, 冯镜洁, 易文敏, 李芳

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川成都 610065)

摘要:集诱鱼设施是高坝过鱼设施的关键组成部分,其进口位置的水力学条件决定了过鱼设施的过鱼效率。为了寻找河道中满足集诱鱼设施进口水力学条件的区域,本文以某高坝工程为例,根据相关调查结果,确定了7种过鱼对象,提出了集诱鱼进口所需要满足的2种水力学条件,即流速范围为0.41~1.00 m/s,紊动能范围为0~0.04 m²/s²。采用标准k-ε紊流模型和VOF方法追踪自由液面,对过鱼季节不同机组运行条件下尾水下游1 km河道范围进行了3维紊流数值模拟,来研究河道中紊动能和流速的空间分布,并通过比尺为1:50的物理模型试验验证了数值模拟的合理性。结果表明,不同机组运行条件下主流靠左岸一侧均存在上溯通道,河道左岸紊动能均小于0.04 m²/s²;从流速分布来看,满足流速条件的区域面积分别为35 732、22 659、12 201 m²;在河道左岸存在面积为1 354 m²的区域在不同机组运行条件下能够同时满足紊动能和流速2种水力学条件,该区域能产生良好的集诱鱼水流,集诱鱼效果较好,即集诱鱼进口适宜布置该区域内。

关键词:高坝过鱼;集诱鱼设施;进口位置;紊流数值模拟;VOF方法

中图分类号:U643.2

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2018)05-0087-07

Numerical Simulation and Model Test Study on the Hydrodynamic Conditions of Fish Luring Inlet of Fish-crossing Facility in High Dams

LIAO Bowen, AN Ruidong*, LI Jia, FENG Jingjie, YI Wenmin, LI Fang

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: The fish collecting and luring facility was the key component of high-dam fish-crossing facilities. The fish-passing efficiency of fish passing facilities was determined by the hydraulic conditions near the inlet. In order to find out the areas where the hydraulic conditions of the inlet of the fish luring facility were satisfied, this paper took a high dam project as an example. According to the related survey results, seven kinds of over-fishing objects were identified, and two kinds of hydraulics conditions that met the requirements of the fish luring inlet were proposed, i.e., the flow range was 0.41~1.00 m/s and the turbulence energy range was 0~0.04 m²/s². The three-dimensional numerical simulations were conducted by using the standard k-ε turbulence model and the VOF method to track the free surface of the water, simulating 1 km long river downstream of the tailrace tunnel under different operational condition of generator sets during the fish crossing seasons. The simulation aimed to study the turbulence energy and velocity in the river. The numerical model was verified by the physical model test with the model scale of 1:50. The results showed that under different operational conditions of generator sets, there existed an upstream fish passage channels along left side of bank with the turbulence energy less than 0.04 m²/s² on all conditions, and according to the distribution of flow velocity, the areas of the passage channel meeting the flow rate conditions were respectively 35 732, 22 659 and 12 201 m², respectively. According to the study, it was found that there was a 1 354 m² area in the left bank that satisfies both hydraulics conditions of turbulence energy and flow velocity. This area was suitable for arranging the inlet of the fish collecting and luring facility.

Key words: high-dam fish-crossing; fish collecting and luring facility; the location of entrance; turbulent numerical simulation; VOF method

收稿日期:2017-12-01

基金项目:国家重点研发计划项目资助(2016YFC0502207);国家自然科学基金资助项目(51779162)

作者简介:廖博文(1993—),男,硕士生.研究方向:环境水力学. E-mail: liaobowen1993@163.com

*通信联系人 E-mail: anruidong@scu.edu.cn

网络出版时间:2018-08-30 00:14:00

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180830.0014.007.html>

<http://jsuese.ijournals.cn>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

鱼道作为过鱼设施的一种,可以帮助目标鱼类顺利克服大坝和水闸等的阻隔完成洄游和产卵^[1],鱼道的修建除了可以减缓工程对目标鱼类的影响外,还保障了河流连续性和生物多样性^[2];鱼道在低水头坝中运用较多,在高坝中,采用单一的鱼道进行过鱼效果不理想,高坝过鱼设施通常采用集诱鱼设施进行诱鱼和集鱼,升鱼机或其它方法将鱼运输过坝的方案。集诱鱼设施包括集鱼船、鱼道式集鱼系统、集鱼平台等,其核心在于集鱼和诱鱼。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目标鱼类顺利找到进口,针对不同洄游目标鱼类,集诱鱼设施进口所需要的水力学条件也不同,进口附近是否存在满足特定水力学条件的集诱鱼水流是整个集诱鱼设施设计的关键。

对于集诱鱼设施进口的研究,国内外学者主要采用模型试验、数值模拟和原型观测等方法; Alvarez-Vázquez等^[3]通过研究发现鱼道进口处的最低流速大约为1.0 m/s; 史斌等^[4]对楠溪江水闸鱼道的进行研究,采用模型试验的方法进行了放鱼实验,对鱼道进口水力学条件进行了论证; Bunt等^[5]对已建的丹尼尔鱼道进口的布置进行了优化,发现鱼道进口布置在接近坝堰附近时产生的水流对目标鱼类更具有吸引力; 谢春航等^[6]采用数值模拟计算对两种鱼道进口布置方式进行了研究,发现由导流墙与河岸所构成的集诱鱼通道中的集诱鱼水流流态对目标鱼类更具有吸引力; Andersson等^[7]采用Ansys对不同位置下的鱼道进口进行了数值模拟,发现鱼道进口的水流受电站尾水影响较小时能产生良好的诱鱼水流; 汤荆燕等^[8]以齐口裂腹鱼为对象进行了鱼道进口的模型实验,研究表明进口处流速为0.4 m/s时对目标鱼类的吸引力最大; Abad等^[9]采用FLOW-3D软件对加拿大北支河下鱼道进口与下游河道的相关关系进行了研究,通过 $k-\epsilon$ 模型和VOF模型鱼道进口的选择以及鱼道结构的优化提出了建议; 龚丽等^[10]通过设计鱼道进口概化模型,以草鱼为研究对象,发现了鱼道水流与鱼道进口水流之间的最优流速比约为2.3; Lindmark等^[11]设计了一种可以加速水流流速的U形流量装置作为诱鱼通道,通过加速通道内的水流流速产生吸引力较高的诱鱼水流,通过试验研究发现在2004年和2005年夏天一共有528条目标鱼类从该通道进入鱼道。

前人关于集诱鱼设施进口的研究大多集中在进口布置方式对诱鱼水流的影响上,对集诱鱼进口所需要满足的水力学条件研究较少,与前人研究相比,作者拟结合国内外研究成果和经验,提出集诱鱼设施进口所需要满足的水力学条件,并采用Flow-

3D软件对某工程下游河道进行3维数值计算,以确定适宜布置集诱鱼设施进口的区域。

1 过鱼设施概况

1.1 过鱼设施特点

针对高坝过鱼,采用“鱼道式集诱鱼系统+公路轨道提升+放鱼船”组合形式的过鱼设施方案,对于该过鱼设施,鱼道式集诱鱼系统即是集诱鱼设施,鱼道进口即为集诱鱼进口。该过鱼设施的过鱼目标主要是维持大坝上下游各种目标鱼类种群的基因交流,避免鱼种的单一化和退化。

1.2 过鱼季节和过鱼对象

根据相关调查成果确定了主要过鱼对象为裸体异鳔鳅鲇、鲈鲤、长丝裂腹鱼、细鳞裂腹鱼、松潘裸鲤、青石爬鮡及中华鮡等7种目标鱼类,7种主要过鱼对象均为小型目标鱼类,成鱼体长基本上在30 cm以下,繁殖季节基本在3到7月,7种目标鱼类均有洄游需求,其中裂腹鱼类、鮡类对产卵场环境要求并不苛刻,裂腹鱼类产卵场主要为急流砾石滩底质,鮡科鱼类产卵水域主要在急流礁石底质河段,7种目标鱼类生活在峡谷急流河段的底层,根据相关游泳能力测试结果,主要过鱼季节为3—7月。

2 集诱鱼进口的水力学条件研究

目标鱼类在上溯过程中,能够通过其完善的侧线系统去感知周围区域的水力学条件的细微变化并做出相应的顶流、绕行避让等游泳行为^[12]。

集诱鱼进口区域水力学条件良好的集诱鱼水流能够对目标鱼类产生较好的吸引力,引导目标鱼类完成一系列顶流、绕行避让等游泳行为并顺利上溯找到进口,作者根据对已建工程中目标鱼类上溯的观测及相关研究,提出了集诱鱼进口需满足的水力学条件。

2.1 流速条件

流速是最常用的水流水力学特性表征指标,也是过鱼设施设计和研究中最重要指标。在不同的流速中,目标鱼类将表现出不同的洄游反应,感应流速、突进泳速、临界泳速、持续泳速是反映目标鱼类游泳能力常用的5个指标,其中感应流速和临界泳速是确定目标鱼类喜好流速的关键。

感应流速指能让目标鱼类产生趋流反应的流速值,在此流速以上目标鱼类可以找到洄游方向^[13],能够根据水流方向顶流游动,故该流速是集诱鱼进口区域所需满足的最小流速条件,根据相关游泳能力测试结果,作者选取所有目标鱼类感应流速的最大值0.41 m/s作为集诱鱼进口区域需满足的流速条件的

下限值。

反映目标鱼类长距离洄游迁移能力强弱的指标主要为其有氧运动能力,而临界泳速是评价有氧运动能力最重要的指标^[14]。临界泳速可视为目标鱼类进行持续游泳时的最大值和长距离洄游中所喜好的最大流速,根据相关游泳能力测试结果,选取所有目标鱼类临界泳速的最小值1.00 m/s作为集诱鱼进口区域需满足的流速条件的上限值。

故满足集诱鱼进口区域流速条件的水流速度范围为0.41~1.00 m/s。

2.2 紊动能条件

紊动能反映了脉动流速振幅的特性和水流紊动状态,剧烈的水流紊动,将使目标鱼类不断地调整身体游动姿势,增加体力的消耗。当紊动能较大时,目标鱼类无法保持正常的游泳姿势,失去平衡,甚至会出现不同程度的损伤^[15]。

满足集诱鱼进口区域水力学条件的水流应尽可能平稳顺直,故紊动能的下限值为 $0 \text{ m}^2/\text{s}^2$,同时紊动能不宜过大,较大的紊动能会使目标鱼类在洄游过程中消耗更大的能量,加大洄游的难度。有研究表明,裂腹鱼在洄游上溯过程中,很明显地会避开紊动能大于 $0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 的水域^[16],结合相关研究成果,确定满足集诱鱼进口水力学条件的紊动能范围为 $0 \sim 0.04 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。

3 数学模拟方法及模型验证

本文基于Flow-3D进行3维紊流数值计算,所采用的控制方程为连续性方程和动量方程,紊流模型采用标准 $k-\varepsilon$ 模型求解,并用VOF模型进行自由液面追踪。

3.1 模拟区域

计算区域选取自西南山区雅砻江某大型水电站及其下游河道,该电站采用坝式发电,装机容量为1500 WM,最大坝高为155.0 m,该电站主要由挡水建筑物、泄洪消能建筑物、引水发电建筑物等组成,建成后共有4台发电机组,单机发电流量为 $424.7 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

计算区域包括尾水洞及其下游1 km河道,全长约为1350 m,河道模型通过真实地形文件制作成数字地形,作为计算的几何模型,图1为计算区域示意图。

3.2 边界条件

由于自由表面为水体与大气的交界面,因此,自由表面的边界条件设定为压力边界条件, $p=p_a$ (大气压力), $F=0$ (充满空气);计算入口采用流量入口边界,给定电站发电机组尾水洞出口流量 Q ;出口采用压力边界条件,给定出口断面的水面高程 H_{outlet} 及水面压力 $p=p_a$ (大气压力);壁面采用无滑移壁面条件,

河道壁面糙率为0.03;为了精确控制发电机组尾水出口的流量,采用质量源项的处理方式,对枢纽坝下出流面积和流量进行设置;为了提高计算效率,在计算前进行初始化设定,在计算区域内以水位高程的方式初始化流体。

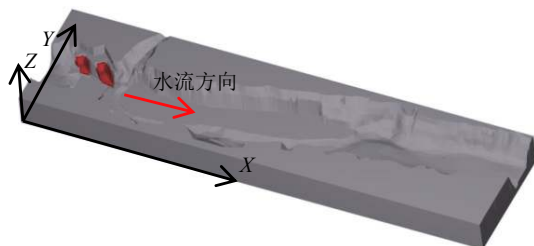


图1 计算区域示意图

Fig. 1 Diagram of simulation area

表1为尾水下游流场数值模拟工况设置,尾水洞采用二洞四机的布置型式,从上游往下游依次为2号尾水洞和1号尾水洞,其中,1[#]、2[#]发电机组共用1号尾水洞,3[#]、4[#]发电机组共用2号尾水洞。作者选用过鱼季节电站最有可能出现的运行方式作为工况设置的依据,所有工况均考虑了下游水库回水影响,故出口边界水位变化较小。

表1 工况设置

Tab. 1 Condition setting

工况	机组运行方式	入口边界 $Q/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$		出口边界水位/m
		1号尾水洞	2号尾水洞	
1	1 [#]	424.7	0	1987.11
2	1 [#] 、3 [#]	424.7	424.7	1987.17
3	1 [#] ~4 [#]	849.4	849.4	1987.41

3.3 网格划分

本文采用六面体的结构化网格,由于模拟范围较大,为减少网格数量,提高计算效率,采用渐变网格进行局部加密,在发电机组尾水渠区域加密网格,最小网格尺寸为1.0 m。在X方向,网格尺寸最小为1 m,最大为5 m;在Y方向网格尺寸均为2 m;Z方向的网格尺寸均为1 m。网格总数量约为537万。

3.4 模型验证

为了验证本文数值模拟的准确性,对工况3进行了物理模型试验,模型试验采用1:50的几何比尺,并将工况3数值模拟结果与相应的物理模型试验 $x=400 \text{ m}$ 与 $x=600 \text{ m}$ 两段面流速测量结果作对比,断面测点从河道右岸向左岸依次编号1~10。

如图2和3所示,河道主流偏向右岸,主流流速范围为 $2.0 \sim 5.5 \text{ m/s}$,两个验证断面上实测流速与计算流速最大误差出现在600 m断面的2号测点,误差为 0.21 m/s 。

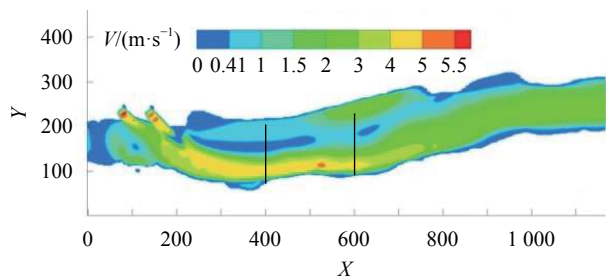
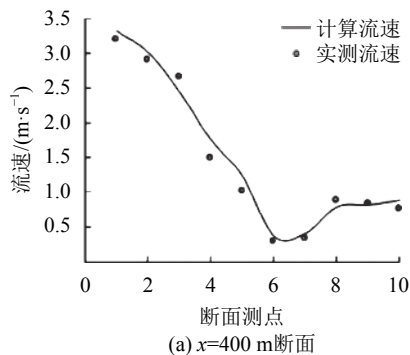
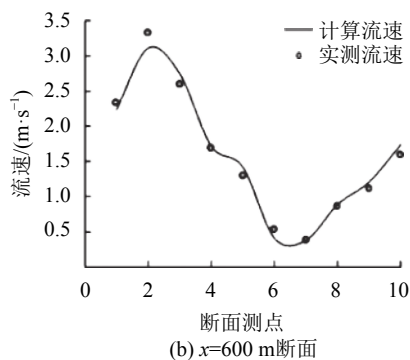


图 2 工况3数值模拟流场(黑色竖线为验证断面)

Fig. 2 Results of flow field on condition 3(the black lines represent the verification sections)



(a) $x=400$ m断面



(b) $x=600$ m断面

图 3 工况3计算流速与实测流速断面分布

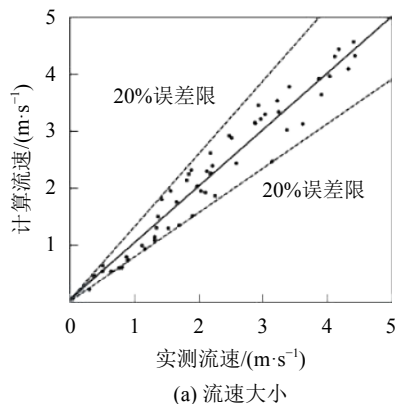
Fig. 3 Distribution of simulated and experimental velocity of sections

数值模拟和模型试验流速大小对比和流速方向见图4, 流速大小相对误差范围约1%~20%, 流速大小平均绝对误差0.25 m/s, 平均相对误差为14%, 均方根误差为0.06 m/s, 流速方向相对误差范围约为1%~30%, 流速方向绝对误差8.69°, 平均相对误差为17%, 均方根误差为13.30°, 由上述对比可知, 数值模拟结果可信。

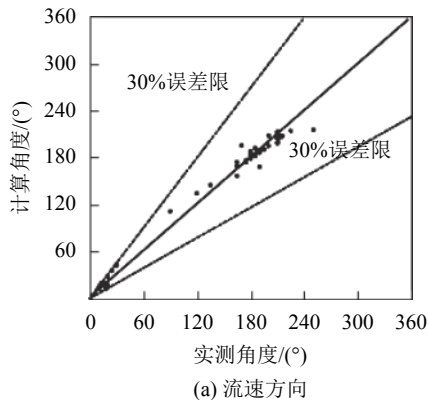
4 数值模拟结果分析

鱼道进口一般布置在经常有水流下泄、目标鱼类洄游路线以及目标鱼类经常聚集的区域, 并尽可能靠近目标鱼类能洄游到达的最前沿即阻碍目标鱼类洄游的障碍物附近^[17], 作者对过鱼季节常遇工况数值分析结果进行分析, 研究尾水下游550 m区域内

的流场、紊动能和适宜流速范围。



(a) 流速大小



(a) 流速方向

图 4 数值模拟和模型试验对比

Fig. 4 Comparison of simulated and experimental velocity

4.1 流场分析

河道流场数值模拟结果如图5所示, 3种工况下, 主流受尾水出水角度及右岸地形约束, 均偏向右岸往下游流动, 最大流速均出现在尾水洞口处, 工况1主流流速约为0.41~3.00 m/s, 最大流速约为3.0 m/s, 工况2主流流速约1.0~3.5 m/s, 最大流速约为3.5 m/s, 工况3主流流速约2.0~5.5 m/s, 最大流速约为5.5 m/s。

目标鱼类喜好沿着主流靠近左右岸两侧进行上溯从而接近集诱鱼进口, 河道流场需存在供目标鱼类上溯的洄游路线, 本文目标鱼类喜好流速为0.41~1.00 m/s, 由于主流流速较大, 所有工况下主流均存在流速屏障, 主流靠近左岸一侧存在满足目标鱼类喜好流速的低流速区, 目标鱼类可沿着主流靠近左岸一侧上溯, 其中, 相较于工况2与工况3, 工况1流量较小, 主流下游扩散均匀, 下游有满足目标鱼类喜好流速的区域, 目标鱼类可沿着主流上溯一段距离后遇到高流速主流, 继而沿着主流靠近左岸一侧低流速区继续上溯; 同时, 受地形影响3种工况下主流偏向右岸, 同时随着流量增大, 主流在右岸更为集中, 流速较大, 存在流速屏障, 右岸不适合目标鱼类上溯, 左岸存在流速小于0.41 m/s的区域, 目标鱼类也可沿左岸低流速区上溯, 同时可作为目标鱼类上溯

过程中的休息场所。综上所述,3种工况下目标鱼类均能成功上溯。

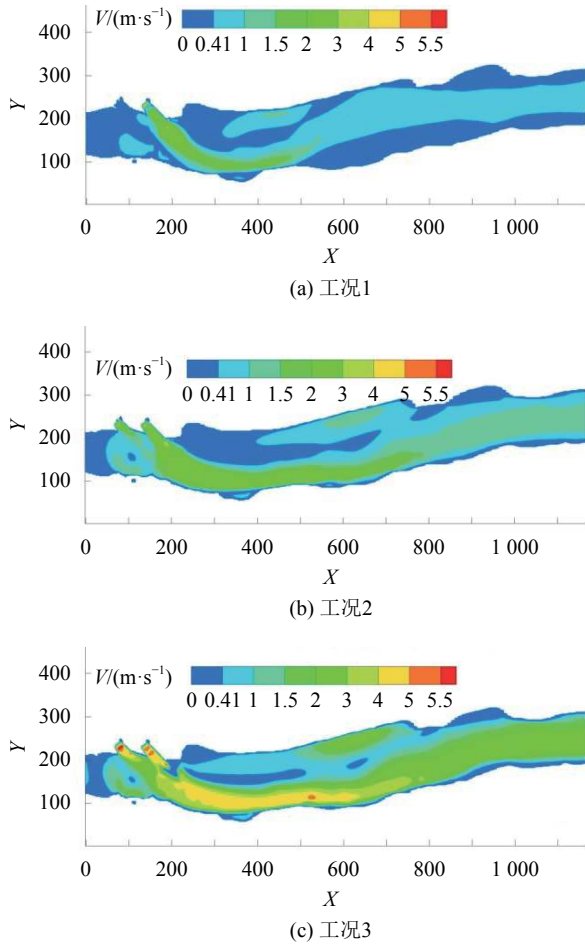


图5 流场结果

Fig. 5 Results of flow field

4.2 紊动能分析

目标鱼类喜好沿着紊动能较低的区域上溯,过大的紊动能使目标鱼类消耗大量能量,难以保持自身平衡,满足本文集诱鱼进口水力学条件的紊动能范围为 $0\sim 0.04\text{ m}^2/\text{s}^2$ 。如图6所示,由3种工况下河道紊动能结果图可知,水流在尾水洞口处紊动最为剧烈,主流紊动能集中偏大,受地形影响,主流靠近左岸一侧低流速区紊动能较小,同时流速较小,满足集诱鱼进口的紊动能条件,可供目标鱼类上溯与休息。工况1最大紊动能为 $0.3\text{ m}^2/\text{s}^2$,主流紊动能范围约 $0.01\sim 0.10\text{ m}^2/\text{s}^2$;工况2最大紊动能约为 $0.40\text{ m}^2/\text{s}^2$,主流紊动能范围约 $0.02\sim 0.20\text{ m}^2/\text{s}^2$;工况3最大紊动能约为 $0.60\text{ m}^2/\text{s}^2$,主流紊动能范围约 $0.05\sim 0.40\text{ m}^2/\text{s}^2$;

由于主流偏向右岸,紊动能较大,工况3主流紊动能均大于 $0.04\text{ m}^2/\text{s}^2$,目标鱼类难以保持自身的平衡,会做出避让等游泳行为,不利于上溯,左岸水流较为平稳,3种工况下河道左岸存在较大范围的低紊动区,目标鱼类受水流紊动较小,能够维持正常的游

泳姿势。相较于工况3,工况1与工况2主流下游存在着水流紊动能小于 $0.04\text{ m}^2/\text{s}^2$ 区域,目标鱼类可沿主流短距离上溯至高紊动区,受紊动影响做出一系列绕行避让等游泳行为,继而沿着主流靠近左岸一侧低紊动区上溯。

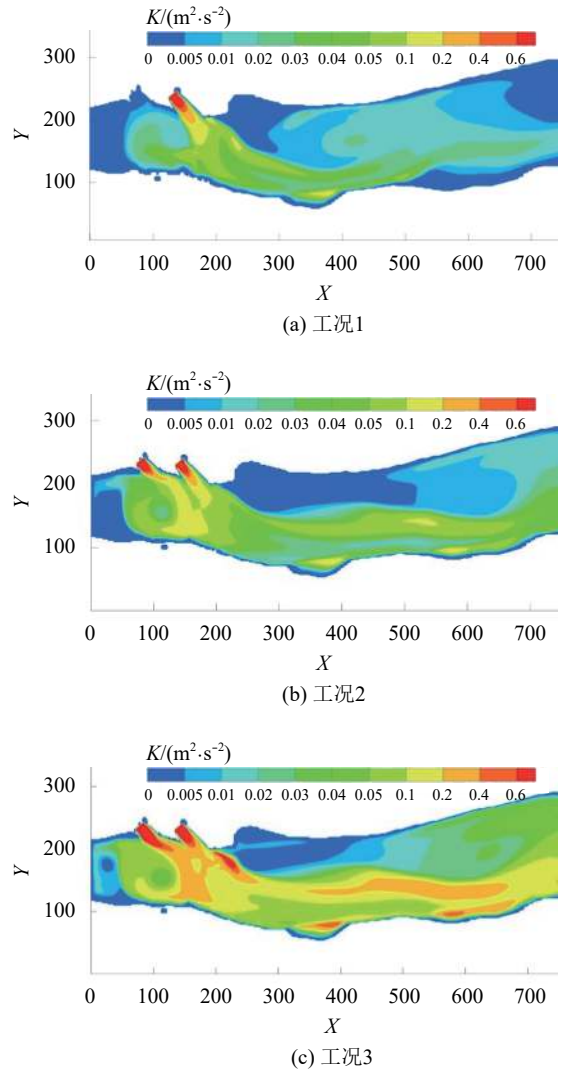


图6 紊动能结果

Fig. 6 Results of turbulent kinetic

4.3 适宜流速区间分布

适宜流速是目标鱼类在洄游过程中喜好的流速,集诱鱼进口水流的流速条件即是满足适宜流速,更大面积的流速适宜区更易于目标鱼类识别,能够提高集诱鱼效果,更大面积的低流速区可以作为目标鱼类洄游过程中的息场所,使目标鱼类恢复体力,从而进行下一阶段的洄游,适宜流速在 $0.41\sim 1.00\text{ m/s}$ 时对目标鱼类能产生足够的吸引力,流速低于 0.41 m/s 的低流速区可供目标鱼类休息。

如图7所示,由3种工况下的适宜流速分布图可知,3种工况下河道左岸均出现一定面积的适宜流速区域和低流速区,工况1X方向 $332.2\sim 422.6\text{ m}$ 和

483.8~541.1 m区域内存在平均横向宽度约50 m的适宜流速区域,面积约为35 732 m²,约占研究河段面积的40%,同时附近区域存在大面积的低流速区,面积约占41%;工况2X方向412.6~569.4 m和709.8~779.6 m区域内存在平均横向宽度约40 m的适宜流速区域,面积约为22 659 m²,约占研究河段面积的26%,低流速区面积约占26%;工况3X方向230.5~494.6 m区域内存在平均横向宽度约15 m的适宜流速区域,面积约为12 201 m²,约占研究河段面积的25%,低流速区面积约占14%。

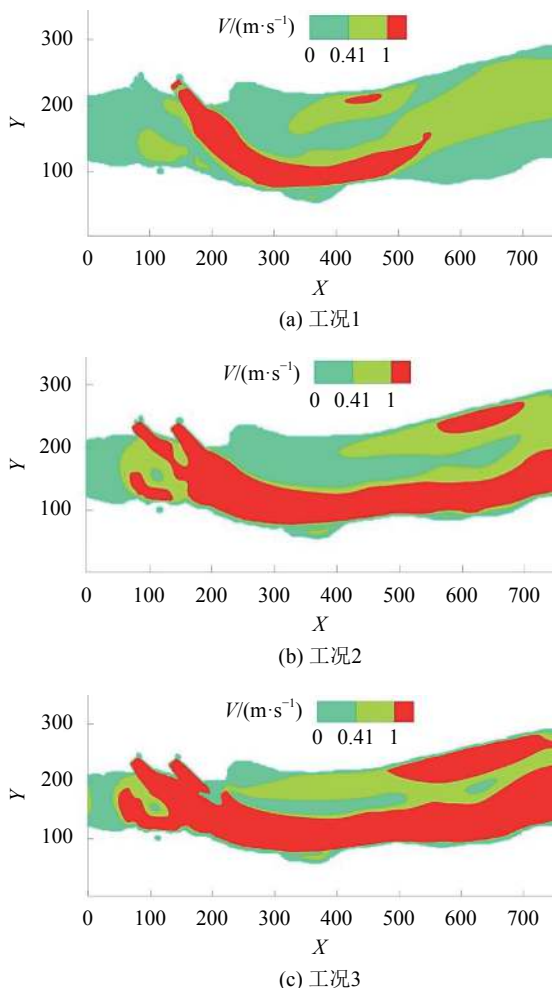


图7 适宜流速分布

Fig. 7 Distribution of suitable velocity

流速区间分布如表2所示,工况1流速适宜区面积分别比工况2和工况3大14%、15%,低流速区面积大了15%、17%,目标鱼类在该工况下上溯并找到集诱鱼进口的可能性最高。叠加3个工况下的流速适宜区域,河道左岸X方向412.6~422.6 m和483.8~494.6 m区域,平均宽度约为40 m,面积约为1 354 m²,该区域在所有工况下均处于流速适宜区,目标鱼类能沿主流靠近左右岸两侧和河道左岸低流速区上溯至该区域,区域内流态较为平稳,目标容易聚集,集诱鱼效

果较好,区域附近存在低流速区可提供休息场所,满足集诱鱼进口的流速条件,适合在此布置集诱鱼进口。

表2 流速区间分布

Tab. 2 Flow rate distribution

工况	适宜流速区面积/m ²	适宜流速区面积占比/%	低流速区面积占比/%	进口适宜位置/m
1	35 732	40	41	332.2~422.6 483.8~541.1
2	22 659	26	26	412.6~569.4 709.8~779.6
3	12 201	25	14	230.5~494.6

5 结论与展望

以某工程为例,采用FLOW-3D对尾水洞下游河道进行了3维数值模拟计算,并通过物理模型试验验证计算结果,流速大小平均绝对误差0.25 m/s,平均相对误差为14%,均方根误差为0.06 m/s,流速方向绝对误差8.69°,平均相对误差为17%,均方根误差为13.30°说明计算结果可信。同时,对X方向200~750 m即尾水下游550 m范围内河道流场、紊动能和流速适宜区间进行分析,得到以下结论:

1) 3种工况下,主流受尾水出流角度及右岸地形约束,偏向右岸向下游流动,主流流速较大,不满足进口对流速条件的要求,主流靠近左右岸两侧和河道左岸存在低流速区可供目标鱼类上溯。

2) 工况1与工况2主流下游存在着水流紊动能小于0.04 m²/s²区域,目标鱼类可先沿主流上溯继而沿主流靠近左岸一侧上溯,同时3种工况下左岸紊动能较小,目标鱼类能维持正常的游泳姿势,满足集诱鱼进口的紊动能条件,流态较为平稳,更有利于目标鱼类的洄游。

3) 工况1~工况3流速适宜区域面积分别约为35 732、22 659、12 201 m²,占河道面积分别约为40%、26%和25%,工况1下目标鱼类较工况2和工况3更容易找到适宜流速区域,河道左岸X方向412.6~422.6 m和483.8~494.6 m,平均宽度约为40 m,面积约为1 354 m²区域存在流速适宜区,满足集诱鱼进口的流速条件和紊动能条件,集诱鱼效果较好,集诱鱼进口宜布置在该区域内。

国内过鱼设施研究起步较晚,对于高坝集诱鱼进口的研究更为不足,集诱鱼进口的研究涉及到水力学和鱼类行为学等多个学科,作者从流速和紊动能上对满足集诱鱼进口区域水流的水力学条件进行了模拟与试验研究,对类似工程具有借鉴意义。

参考文献:

[1] An R, Li J, Liang R, et al. Three-dimensional simulation and

- experimental study for optimising a vertical slot fishway[J].*Journal of Hydro-environment Research*,2016,12:119–129.
- [2] Barton A F,Keller R J.3D Free Surface Model of a Vertical Slot Fishway[C]//*Proceedings of XXX IAHR Congress*. Madrid,Spain:International Association of Hydraulic Engineering and Research,2003.
- [3] Alvarez-Vázquez L J,Martínez A,Vázquez-Méndez M E,et al.An optimal shape problem related to the realistic design of river fishways[J].*Ecological Engineering*,2008,32(4):293–300.
- [4] Shi Bin,Wang Bin,Xu Gang,et al.Study on the optimization of import arrangements of fish tracks in Nanxi River barges[J].*Yangtze River*,2011,42(1):69–71.[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.]
- [5] Bunt C M.Fishway entrance modifications enhance fish attraction[J].*Fisheries Management & Ecology*,2001,8(2):95–105.
- [6] Xie Chunhang,AN Ruidong,Li Jia,et al.Study on the influence of fishway entrance layout mode on hydraulic characteristics of fish luring flow[J].*Advanced Engineering Sciences*,2017,49(Supp2):25–32.[谢春航,安瑞冬,李嘉,等.鱼道进口布置方式对集诱鱼水流水力学特性的影响研究[J].*工程科学与技术*,2017,49(增刊2):25–32.]
- [7] Andersson A G,Lindberg D E,Lindmark E,et al.A numerical study of the location and function of the entrance of a fishway in a regulated river[J].*International Symposium on Ecohydraulics*,2010:277–284.
- [8] Tang Jingyan,Gao Ce,Chen Yu,et al.Study on influence of different flow patterns on fish attracting effect at fish way entrance[J].*Hongshui River*,2013,32(1):34–39.[汤荆燕,高策,陈旻,等.不同流态对鱼道进口诱鱼效果影响的实验研究[J].*红水河*,2013,32(1):34–39.]
- [9] Abad J D,Waratuke A,Barnas C,et al.Hydraulic model study of canoe chute and fish passage for the Chicago River north branch dam[C] *World Environmental and Water Resources Congress*.Reston, VA: American Society of Civil Engineers,2015:1–11.
- [10] Gong Li,Wu Yihong,Baiyin Baoligao,et al.Study on impact of water flow at fishway entrance on migratory behavior of juvenile grass carp[J].*Water Resources and Hydro-power Engineering*,2016,47(11):89–93.[龚丽,吴一红,白音包力皋,等.鱼道进口水流对草鱼幼鱼上溯行为的影响研究[J].*水利水电技术*,2016,47(11):89–93.]
- [11] Lindmark E,Gustavsson L H.Field study of an attraction channel as entrance to fishways[J].*River Research & Applications*,2010,24(5):564–570.
- [12] Kanter M J,Coombs S.Rheotaxis and prey detection in uniform currents by Lake Michigan mottled sculpin (*Cottus bairdi*)[J].*Journal of Experimental Biology*,2003,206(1):59–70.
- [13] Fu Jingjing,Li Jia,AN Ruidong,et al.Study of creating vertical slot fishway flow field based on swimming ability of *Schizothorax Prenanti*[J].*Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*,2013,45(3):12–17.[傅菁菁,李嘉,安瑞冬,等.基于齐口裂腹鱼游泳能力的竖缝式鱼道流态塑造研究[J].*四川大学学报(工程科学版)*,2013,45(3):12–17.]
- [14] Tu Zhiying,Yuan Xi,Han Jingcheng,et al.Research progress on swimming ability of target fish[J].*Resources and Environment in the Yangtze Basin*,2011(Supp1):59–65.[涂志英,袁喜,韩京成,等.目标鱼类游泳能力研究进展[J].*长江流域资源与环境*,2011(增刊1):59–65.]
- [15] Qi Liang,Yang Yu,Wang Yue,et al.Fish behavior characteristics in response to change of hydrodynamic environment[J].*Journal of Hohai University(Natural Sciences)*,2012,40(4):438–445.[齐亮,杨宇,王悦,等.鱼类对水动力环境变化的行为响应特征[J].*河海大学学报(自然科学版)*,2012,40(4):438–445.]
- [16] Mao Xi.Study on hydrodynamics of river fish-friendly fishpond in southwest mountainous area in China[D].Chengdu: Sichuan University,2015.[毛熹.中国西南山区河流目标鱼类友好型鱼道水力学研究[D].成都:四川大学,2015.]
- [17] Wang Yachao,Chen Xiaohu,Zhang Ting,et al.Study on layout scheme of fishway entrance[J].*Journal of Hydroecology*,2013,34(4):30–34.[汪亚超,陈小虎,张婷,等.鱼道进口布置方案研究[J].*水生态学杂志*,2013,34(4):30–34.]

(编辑 张琼)

引用格式: Liao Bowen,AN Ruidong,Li Jia,et al.Numerical simulation and model test study on the hydrodynamic conditions of fish luring inlet of fish-crossing facility in high dams[J].*Advanced Engineering Sciences*,2018,50(5):87–93.[廖伯文,安瑞冬,李嘉,等.高坝过鱼设施集诱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*,2018,50(5):87–93.]