

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230622

基于 LES 的含阻流圆柱竖缝式鱼道水力特性研究

王 鸽

(雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610051)

摘要: 为解决游动能力弱的小型鱼类在竖缝式鱼道中的上溯需求,在长、短挡板之间的洄游通道中增设阻流圆柱,并利用 Hydro 3D 开源代码,采用基于 LES 的数值模拟技术,模拟增设阻流圆柱前后的竖缝式鱼道内流场。结果表明,根据时均流场中流线分布,增设阻流圆柱后,池室内的涡旋区域面积减少,解决了传统竖缝式鱼道内鱼类上溯过程中方向感缺失的问题;池室内湍动能增加 20%,提升了水流的能量耗散,降低了鱼类上溯过程中的能量消耗;长、短挡板及阻流圆柱周围涡量增加,可能对鱼类游动过程中身体的稳定性产生不利影响,但根据涡结构可知,阻流圆柱后方涡旋直径小于小型鱼类体长的 76%,因此对鱼类游动过程中身体的稳定性影响较小。竖缝式鱼道内设置阻流圆柱可提高游动能力弱的小型鱼类的上溯成功率。

关键词: 竖缝式鱼道; 阻流圆柱; 湍流; 大涡模拟; 水力特性

中图分类号: TV131.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)10-0133-04

1 引言

鱼类是河流生态系统中的重要组成部分,具有重要的生态服务价值。拦河建筑物的建设破坏了河流的连通性,对洄游性鱼类的产卵、觅食等过程产生了不利影响^[1]。鱼道作为一种生态过鱼设施,能够帮助鱼类完成洄游过程,对重建河流连通性具有重要作用^[2]。其中,竖缝式鱼道^[3]因结构简单、适宜性强、阻流效果好等特点,成为应用最广泛的过鱼设施之一。鲑鱼等体型较大、具有商业价值的鱼类物种是竖缝式鱼道设计过程中关注的重点鱼类,为提高其上溯成功率,大量研究对竖缝式鱼道进行了结构优化,如调节河床坡度、池室长宽比、竖缝宽度、挡板形状和位置等因素^[4],以降低主流流速并减少湍动。但小型和非鲑属等游动能力较弱的鱼类同样是鱼类群落的重要组成部分,在竖缝式鱼道应用设计过程中,应同时考虑小型鱼类的上溯需求^[5],在竖缝后方增加障碍物,可有效减少池室内回流区面积^[6],提升小型鱼类上溯成功率。此外,通过对比雷诺时均模型(RANS)中的标准 $\kappa-\varepsilon$ 模型和大涡模拟(LES)中的 Smagorinsky 模型,发现大涡模拟在刻画涡结构方面优于雷诺时均模型^[7]。为解决此问题,本

文通过在竖缝式鱼道挡板下游池室内增设阻流圆柱,使用 LES 模拟流场特性,并以实测数据验证数值模拟的准确性,阻流圆柱将主流分为主、副两条上溯通道,将涡旋作为影响鱼类上溯行为的因素,分析了增设阻流圆柱前后池室内流速、流线、湍动能、涡量、涡结构等水力参数的变化规律,及其对鱼类上溯行为的影响,明确了增设阻流圆柱对池室内流场特性的影响,以期为竖缝式鱼道的设计优化提供参考。

2 数值模拟

2.1 数学模型

采用 Hydro 3D 开源代码,基于 LES 模拟竖缝式鱼道周围的流场,该软件已用于许多复杂工程流程^[8]。LES 是一种涡解析技术,在空间上进行滤波,只过滤小尺度涡而保留大尺度涡,Hydro 3D 求解非定常不可压缩粘性流体的 Navier-Stokes 方程为:

$$\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{u}_i \mathbf{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 \mathbf{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + f_i \quad (2)$$

式中, \mathbf{u}_i 、 \mathbf{u}_j ($i, j = 1, 2, 3$) 均为滤波后的速度向

收稿日期: 2023-04-08, 修回日期: 2023-06-16

基金项目: 江苏省科研创新项目(KYCX20-0546)

作者简介: 王鸽(1984-), 男, 硕士、高级工程师, 研究方向为水电建设管理, E-mail: wangge@ylhdc.com.cn

量; x_i, x_j 分别为 u_i, u_j 在 x 方向的分量; t 为时间; p 为滤波后的压力; ν 为运动粘滞系数; τ_{ij} 为亚格子尺度的应力张量; f_i 为外源项。

对流项和扩散项近似为四阶精度的中心差分逼近, 时间推进采用三阶显式龙格-库塔格式^[9], 压力速度耦合的泊松方程求解后, 得到无散度条件。采用 SGS 模型对 τ_{ij} 的各向异性部分进行近似分析, 即 $\tau_{ij}^a = \tau_{ij} = -\frac{2}{3}\delta_{ij}k_r$ (δ_{ij} 为克罗内克函数; k_r 为残余动能)。在标准的 SGS 模型中, 亚网格尺度的涡旋粘度 ν_t 被近似为:

$$\nu_t = (C_s \Delta)^2 |S_{ij}| \quad (3)$$

$$|S_{ij}| = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad (4)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

式中, C_s 为 Smagorinsky 常数, 取值为 0.1; Δ 为与网格单元大小相等的过滤尺寸; $|S_{ij}|$ 为过滤后分解速度的应变分解率。然后利用粘度计算各向异性的亚网格应力张量:

$$\tau_{ij}^a = -2\nu_t S_{ij} \quad (6)$$

2.2 计算设置与边界条件

本次数值模拟共设置两种工况(表 1), 其中雷诺数 ($Re = U_0 H / \nu$) (U_0, H, ν 分别为进口平均流速、水深、液体运动粘滞系数) 根据平均水深 ($U_0 = Q / (WH)$) (Q, W 分别为流量、宽度) 计算。工况 1 为传统竖缝式鱼道, 工况 2 在工况 1 基础上增设阻流圆柱以改善洄游鱼类通过竖缝式鱼道的水力条件。工况 1 的验证数据对应阿尔托-布兰卡水电站的 VSF 现场测量数据^[10], 该竖缝式鱼道由 24 个垂直槽组成, 采用声学多普勒测速技术来测量下游段选定水池的速度分量。竖缝式鱼道的布局及相关几何参数见图 1。每个池室大小相同, 长度 L 为 3.0 m, 宽度 W 为 2.2 m。测量时流量条件保持不变, 即排量 $Q = 1.0 \text{ m}^3/\text{s}$, 水深 $H = 1.30 \text{ m}$, 水流已经达到充分发展阶段, 沿着主流的两个测量点 V1、V2 在 $z/H = 0.4$ 位置的 4 条采样线分别用圆圈和虚线表示。

表 1 工况设置

Tab. 1 Operation setting

工况	进口平均流速 $U_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr	圆柱个数/个	浸没点数量
1	0.349 7	349 700	0.098	0	1 012 004
2	0.349 7	349 700	0.098	2	1 141 488

在竖缝式鱼道设计中, 每个池室入口处均由一个长挡板、一个短挡板及中间的竖缝组成。在工况 1 中, 长、短挡板分别位于渠道两侧, 这种不对称布局使得相邻两个竖缝之间产生供鱼类休息

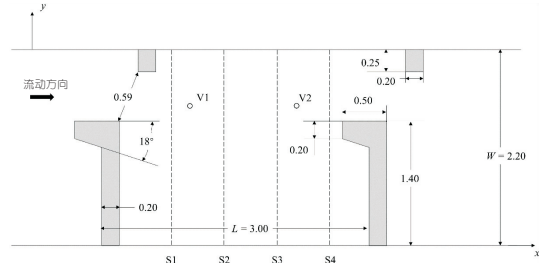


图 1 竖缝式鱼道体型参数(单位:m)

Fig. 1 Shape parameters of vertical slot fishway

的池室。工况 2 在竖缝下游嵌入阻流圆柱, 以分离挡板之间的高速水流。在工况 2 中, 阻流圆柱直径为 0.2 m, 位于竖缝下游, 以分离挡板之间的高速水流。

图 2 为两种工况下的计算域和阻流圆柱的分布情况, 为节省 LES 计算成本, 计算域长度设置为 6 m, 包括上游半个池室, 中段整个池室及下游半个池室。由于在竖缝式鱼道中水流经过充分发展, 沿流向使用周期性边界条件, 即出口流出的水流被重新作为入口边界条件。水流流动由平行于渠道床面的重力加速度分量驱动, 其中床面坡度等于现场测量的水面坡度 ($S_0 = 0.016 7$)。由于弗劳德数 ($Fr = 0.098$) 小于 0.1, 因此 LES 中的自由液面被假定为无摩擦刚性盖, 忽略自由液面的影响^[11]。其他固体边界的近壁速度用壁面函数的无滑移条件处理。阻流圆柱使用浸没边界点进行映射, 其上的近壁速度由粘度和浸没方法决定。在三个空间方向上采用相同的网格大小, 即 $d_x = d_y = d_z = 0.01 \text{ m}$, 共生成约 $1 700 \times 10^4$ 个网格单元。

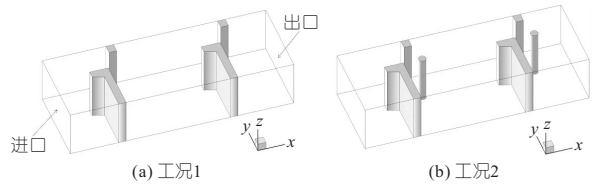


图 2 计算域三维视图

Fig. 2 Three-dimensional view of computational domain

2.3 模型验证

使用实测数据^[10]验证工况 1 数学模型, 测点位置见图 1。验证结果表明, LES 模拟的流速值与测量值相近, 但在 V1、V2 点靠近自由液面区域, 模拟结果分别高估了流速约 4%、10%, 这可能是由于现场测量中自由液面存在波动, 而模拟中采用的刚盖假定忽略了自由液面的波动造成的差异。四条虚线处测得的速度数据与 LES 结果平均误差低于 10%, 但 S2 右壁附近 ($y/W < 0.2$) 的模拟值存在误差, 这表明 S2 下部角落是来流和池室内主涡流的交汇点。根据仿真结果与实测数

据对比,数值模拟结果与试验数据结果吻合良好,模拟结果能够反映真实流场流动状态。

3 结果分析

3.1 时均速度流场

图 3 为 $z/H=0.5$ 处两种工况下的时均流速与流线,能够在一定程度上反映整个鱼道内的流场结构。速度范围为 $0.6\sim 1.6$ m/s,表示鱼类的主要迁移路径,速度范围为 $-0.4\sim 0.6$ m/s,此区域内较低的流速为鱼类提供了休息区,当洄游鱼类逆流流动时,速度的方向与鱼类运动方向相反。

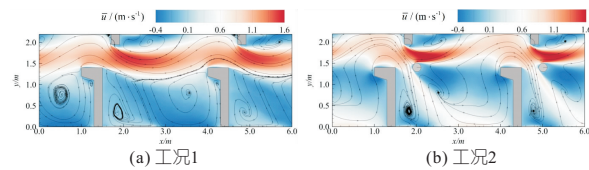


图 3 时均流场

Fig. 3 Time-averaged flow field

图 3(a)为传统的竖缝式鱼道,主流以射流曲线的形式穿过连续分布的竖缝,最大时均速度为 1.52 m/s,出现在短挡板一侧竖缝下游。大部分鱼类以高流速区域为主要洄游路径,成年大西洋鲑等游动能力强的鱼类能够完成上溯,游动能力弱的小型鱼类的上溯流速通常在 0.8 m/s 以下,体长在 10 cm 以下^[12],原体型竖缝式鱼道内流速明显超出双斑长鳍吻鲷、贝氏鲶及部分幼鱼等游动能力弱的鱼类的上溯能力范围^[13]。图 3(b)为增加了阻流圆柱的竖缝式鱼道,阻流圆柱将上溯通道分为两部分,游动能力较弱的鱼类能够在其下侧的低速通道游动,从而完成上溯,此外,工况 2 沿 x 方向的最大平均流速增加 8.5% ,能够保证游动能力强、体型较大的鱼类完成上溯过程。

根据流线分布,工况 1 上溯通道两侧存在 3 个涡旋区域,其中一个涡旋区域位于短挡板一侧,沿 x 方向长度约 1.1 m,另 2 个涡旋区域位于长挡板一侧,占据整个长挡板一侧的池室。在工况 2 中增设阻流圆柱后,对短挡板一侧的涡旋区域影响较小,长挡板一侧涡旋区域面积明显减少,而水流的旋转会影响鱼类对水流方向的感知,对鱼类的洄游方向产生影响^[14],而阻流圆柱减少了池室内的涡旋区域,有利于鱼类向正确方向上溯。

3.2 湍动能分布

湍动能 κ 是反映水流紊动能力的重要参数,其计算公式为:

$$\kappa = 0.5(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'}) \quad (7)$$

式中, $\overline{u'}$ 、 $\overline{v'}$ 、 $\overline{w'}$ 分别为 x 、 y 、 z 三个方向的平均脉

动速度。

图 4 为竖缝式鱼道内 $z/H=0.5$ 断面上湍动能分布情况,在两个工况中,湍动能分布的峰值区域位于短挡板下游尾迹,分离涡在此位置产生、发展和消散。工况 1 中长挡板将上游来流分离,阻碍湍流发展,而工况 2 中阻流圆柱的存在增加了水流紊动,挡板和阻流圆柱下游湍动能增加了 20% ,从而产生了更大的能量耗散,降低了整体水流的动能,并降低了鱼类游动过程中的能量消耗,从而满足游动能力较弱的小型鱼类的上溯需求。

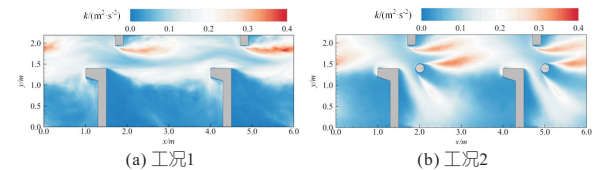


图 4 湍动能

Fig. 4 Turbulent kinetic energy

3.3 瞬时涡量分布

涡量是描述流体旋转强度的物理量^[14],竖缝式鱼道内存在大量涡旋,池室内鱼类的游动过程受到涡直径、涡量大小和方向的影响。图 5 为两种工况下 $z/H=0.5$ 断面上垂向涡量 Ω_z 的分布情况,在工况 1 中,高涡量区域集中于长、短挡板下游位置,其中短挡板下游涡量为正,长挡板下游涡量为负,表明两个位置处水流旋转方向相反。在工况 2 增设阻流圆柱后,在柱体表面产生剪切层并分离成尾涡,柱体后方产生的 Kelvin-Helmholtz(K-H) 涡呈不对称分布,其与上下两个表面涡脱落速度有关。下表面 K-H 涡发生较早,最终上表面下游位置 K-H 涡消散于池室中部位置。综上所述,由于阻流圆柱的影响,短挡板周围涡量增加,进而影响鱼类洄游过程中身体的稳定性。

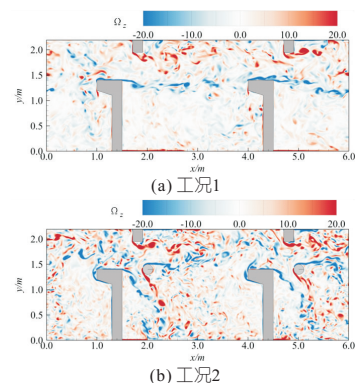


图 5 瞬时涡量

Fig. 5 Instantaneous vortex

3.4 涡结构

为将三维涡旋结构可视化,通过 Q 准则计算等值面,图 6 为俯视图视角下竖缝式鱼道内水流的涡旋结构,并使用流速进行着色来反映水流携带

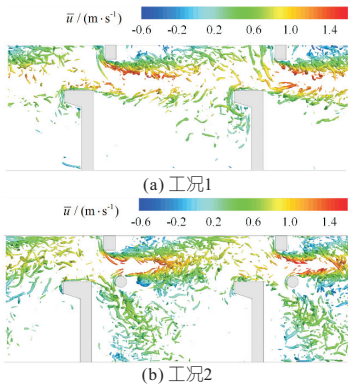


图 6 Q 准则涡结构

Fig. 6 Q criterion vortex structure

的动量,在两种工况下,挡板和阻流圆柱边缘的剪切层产生的 K-H 涡以可视化的形态展现出来,能够明显观察到其耗散所产生的不稳定性。在工况 1(图 6(a))中,一个携带大量能量的涡旋从主流上边缘扩散至池室内上边壁,类似于丁坝后方的涡旋结构^[15];主流另一侧涡旋结构中发夹涡分布稀疏。在工况 2 中增加阻流圆柱后,显著增加了池室内水流中涡旋的数量,由涡结构上流速分布可知,下方池室内涡旋所携带的动能较小,因此沿着主流一侧洄游的鱼类需克服更强的涡流,而沿着圆柱下方路径进行洄游的鱼类遇到的涡流较弱。影响鱼类游动过程中稳定性的涡旋最小直径为鱼类体长的 76%,而大部分涡旋的直径小于这一数值,因此增设阻流圆柱后产生的涡旋对鱼类的洄游过程影响较小。

4 结论

a. 设置阻流圆柱后,竖缝式鱼道的上溯通道变为主、副两条,其中副通道内流速较低,为游动能力弱的小型鱼类提供了上溯通道;池室内环流区面积明显减少,增强了鱼类上溯过程中的方向感知。

b. 增设阻流圆柱提高了竖缝式鱼道内湍动能,增加了水流的能量耗散速度,减少了鱼类上溯过程中的能量消耗;虽然涡量增加影响了鱼类运动,但涡旋的直径较小,未达到小型鱼类体长的 76%,对鱼类游动过程中身体的稳定性影响较小。

参考文献:

[1] 汪靖阳,李广宁,郗志红,等. 竖缝式鱼道内齐口裂腹鱼洄游行为模拟[J]. 农业工程学报,2023,39(2): 173-181.
 [2] 常志强,汪靖阳,吴鑫森,等. 曲线边壁竖缝式鱼道水力特性及过鱼效果研究[J]. 水电能源科学,2022, 40(12):201-204,200.

[3] 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.
 [4] ROSCOE D W, HINCH S G. Effectiveness monitoring offish passage facilities: historical trends, geographic patterns and future directions[J]. Fish and fisheries, 2010, 11(1): 12-33.
 [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.
 [6] 柳松涛,李广宁,石凯,等. 竖缝式鱼道桩柱结构过鱼效果探究[J/OL]. 水生态学杂志. <http://doi.org/10.15928/j.1674-3075.202207140270>.
 [7] FUENTES-PÉREZ J F, SILVA A T, TUHTAN J A, et al. 3D modelling of non-uniform and turbulent flow in vertical slot fishways[J]. Environmental modelling & software, 2018, 99(C): 156-169.
 [8] STOESSER T, KIM S J, DIPLAS P. Turbulent flow through idealized emergent vegetation [J]. Journal of hydraulic engineering, 2010, 136(12): 1003-1017.
 [9] CRISTALLO A, VERZICCO R. Combined immersed boundary/large-eddy-simulations of incompressible three dimensional complex flows[J]. Flow, turbulence & combustion, 2006, 77(1-4):3-26.
 [10] MARTIN BOMBĚ, GORAZD NOVAK, JURIJ MIAČNIK, et al. Extensive field measurements of flow in vertical slot fishway as data for validation of numerical simulations[J]. Ecological engineering, 2015, 84:476-484.
 [11] OURO P, WILSON C A M E, EVANS P, et al. Large-eddy simulation of shallow turbulent wakes behind a conical island[J]. Physics of fluids, 2017, 29(12):1-16.
 [12] TRITICO H M, COTEL A J. The effects of turbulent eddies on the stability and critical swimming speed of creek chub (semotilus atromaculatus)[J]. Journal of experimental biology, 2010, 213(13): 2284-2293.
 [13] WATSON J R, GOODRICH H R, CRAMP R L, et al. Utilising the boundary layer to help restore the connectivity of fish habitats and populations[J]. Ecological engineering, 2018, 122:286-294.
 [14] 常留红,徐斌,张鹏,等. 深水航道整治丁坝群对鱼类生境的影响[J]. 水利学报,2019,50(9):1086-1094.
 [15] CHEN YANHONG, LU YANG, YANG SHUTAN, et al. Numerical investigation of flow structure and turbulence characteristic around a spur dike using large-eddy simulation[J]. Water, 2022, 14(3158): 3158.

动水压强的研究,得到各工况在消力池前半段 x/L 为 $0\sim 0.5$ 处,时均压强呈明显下降趋势,池首处时均压强均呈最大值;在消力池后半段 x/L 为 $0.5\sim 1$ 处,时均压强趋于稳定且降幅较小。

b. 在设计及校核流量下,各工况下层悬栅时均压强差值 $|\Delta p_2|$ 均大于 $|\Delta p_1|$,且 #1 悬栅所受时均压强差最大,故在实际工程中应优先考虑下层悬栅上表面 C 及下表面 D 的抗压强度。

c. 圆化悬栅优化方案避免了悬栅棱角处压强集中现象,但由于悬栅总压强未降低,故适用于小流量悬栅消力池,趾墩一悬栅优化方案在校核流量下总压强及悬栅处时均压强均显著降低,故对于大流量悬栅消力池,应优先选择趾墩一悬栅优化方案避免悬栅压强破坏。

参考文献:

[1] 刘之平,夏庆福,孙双科. 跌坎底流消能水流再附长度的数值模拟研究[J]. 水力发电学报,2012,31(1): 162-167.

[2] 洪振国,苟勤章,李海华. 水利工程溢洪道底流消能水力特性分析[J]. 排灌机械工程学报,2022,40(3): 258-263.

[3] 吴战营,牧振伟. 消力池内悬栅辅助消能工优化试验[J]. 水利水电科技进展,2014,34(1):27-31.

[4] 蒋健楠,牧振伟,张佳祎. 消力池内双层悬栅对消能效果影响试验研究[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(3):157-160.

[5] 俞晓伟,牧振伟,高尚. 低弗劳德数梯形墩一悬栅消力池水力特性研究[J]. 长江科学院院报,2023,40(1):107-115.

[6] 高尚,牧振伟,俞晓伟. 趾墩一悬栅消力池水力特性及消能效果研究[J]. 水电能源科学,2021,39(6): 108-111,122.

[7] 尹进步,梁宗祥,郑治,等. 与宽尾墩联合使用的消力池底板压强特性试验研究[J]. 水力发电学报,2011,30(4):103-108.

[8] 蒋健楠,牧振伟,贾萍阳,等. 消力池内布置双层悬栅的压强特性数值模拟[J]. 水电能源科学,2016,34(11):100-103,71.

Study and Optimization of Pressure Characteristics of Suspended Grid Stilling Basin

ZHOU Kai^{1,2}, MU Zhen-wei^{1,2}, ZHAO Qian^{1,2}, GAO Shang^{1,2}

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Hydraulic Engineering Security and Water Disasters Prevention, Urumqi 830052, China)

Abstract: In order to solve the problem of instability of the bottom plate and pressure damage of the suspended grid due to the excessive time-average pressure in the suspended grid stilling basin, numerical simulation was used to study the water level difference and pressure field in four different arrangements of the suspended grille under the design and calibration flow. Two optimization schemes of the combined toe pier-suspended grille and circularized suspended grille were proposed on the basis of the scheme 4 with better water stabilization effect. The results show that the combined toe pier-hanging grille optimisation scheme can reduce the time-average pressure at the bottom plate by 63% and 50% compared to scheme 4 at the design and calibration flow rates, effectively reducing the difference in the time-average pressure Δp_2 between the upper surface C and the lower surface D of the grille in the basin. The rounded grille optimisation scheme can make the total pressure distribution at the grille more uniform and avoid local damage to the grille. Therefore, it is recommended to choose a combined auxiliary energy dissipation method of toe pier-suspended grille for high flow stilling basin with pressure requirements.

Key words: underflow stilling basin; suspended grate; time-averaged dynamic water pressure; water level difference; numerical simulation

(上接第 136 页)

Study on Hydraulic Characteristics of Vertical Slit Fishway with Resistance Flow Based on LES

WANG Ge

(Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610051, China)

Abstract: In order to solve the upstream demand of small fish with weak swimming ability in the vertical slot fishway, an anti-flow cylinder is added to the migration channel between the long and short baffles. Hydro 3D open source code and LES-based numerical simulation technology are used to simulate the flow field in the vertical slot fishway before and after the anti-flow cylinder is added. According to the streamline distribution in the time-averaged flow field, the results show that the area of the vortex area in the pool is reduced after adding the blocking cylinder, which solves the problem of lack of sense of direction in the process of fish upstream in the traditional vertical slot fishway. The turbulent kinetic energy in the pool increases by 20%, which raised the energy dissipation of the water flow and reduced the energy consumption during the fish upstream process. The increase of vorticity around the long and short baffles and the blocking cylinder may have an adverse effect on the stability of the fish during swimming. However, according to the vortex structure, the vortex diameter behind the blocking cylinder is less than 76% of the body length of the small fish, so it has little impact on the stability of the fish during swimming. In summary, the setting of a flow blocking cylinder in the vertical slit fishway can improve the success rate of small fish upstream.

Key words: vertical slit fishway; obstructive flow cylinder; turbulence; large eddy simulation; hydraulic characteristics