

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2015.02.022

三维鱼道水力特性及鱼体行进能力数值模拟研究

高东红, 刘亚坤, 高梦露, 孙洪亮

(大连理工大学 水利工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为研究鱼道的水力学特性, 本研究采用 Fluent 商用软件包详细展示了 3D 鱼道计算流体动力学模型。该模型以三维雷诺平均 N-S 方程为理论基础, 采用群理论重整化的 (RNG) $k-\epsilon$ 紊流模型闭合方程, 配合体积分辨率法 (VOF) 来描述鱼道流体力学特性。模型结果表明鱼道内部强烈的 3D 速度场, 伴随有涡流、流动分离、漩涡、上升流和下降流等现象, 并基于鱼种上溯的爆发流速, 计算成年粉红鲑鱼在流场中逆流上溯所受到的阻力与能量损耗, 数值计算结果与前人研究成果吻合度较高。能量消耗的定量分析对于鱼道的优化设计、渔业管理都具有很好的借鉴意义。

关键词: 竖缝式鱼道; 紊流模型; VOF; 能量损耗

中图分类号: TV131.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2015)02-0103-07

Numerical Simulation on Three-Dimensional Fishway Hydrodynamics and Fish Passage Energetics

GAO Dong-hong, LIU Ya-kun, GAO Meng-lu, SUN Hong-liang

(College of Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: A three-dimensional (3D) computational fluid dynamics model (CFD) of a vertical slot fishway was used to characterize fishway hydrodynamics in the use of Fluent in this paper. The model solved the three dimensional Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations, closed with the renormalized group theory (RNG) $k-\epsilon$ turbulence formulation and volume of fraction (VOF) method. Model results showed that a strong 3D velocity field existed in the fishway, with eddies, flow separations, vortices, upwellings and downwellings. In addition, based on the burst swimming speeds of fish species, the simulated flow-field results were employed to calculate the force acting on the adult pink salmon and the energy expenditure of the fish. The numerical results agreed well with previous research. The quantification of energy expenditure in the fishways could be utilized for optimizing the design, operation, and management of fishways.

Keywords: vertical slot fishway; turbulence model; VOF; energy expenditure

我国目前处于水电建设的高峰期, 据不完全统计, 已建设的水库大约有 8.6 万座, 闸、堰等其他水工建筑物更是达到无可计量的程度^[1]。这些闸、堰等水利工程破坏完整的河道水流, 使得河流水生环境片段化, 隔断了鱼类等水生生物的上下游通道。在日益追求可持续及和谐发展的大环境下, 国家水利部及环保局等部委都把生态环境的保护放在了很高的位置。针对鱼类等水生动植物的保护, 相继提出增建过鱼通道, 增殖放流等措施。因此, 针对我国

目前的形势, 积极努力开发鱼道等生态补偿技术, 对于保护水电工程建设中的鱼类资源, 促进生态水力学的发展具有划时代的现实意义。

洄游在鱼类等水生生物的生存中发挥着至关重要的作用。以持续时间差别和肌肉使用情况将鱼类的游泳能力分为三大类^[2]: 持续游泳速度、耐久游泳速度和爆发游泳速度。在持续游泳速度下, 主要使用红色肌肉组织进行有氧呼吸, 在该模式下鱼类可以持续 200 min 以上; 在耐久游泳速度下, 主要使用

收稿日期: 2014-12-11

修稿日期: 2015-01-29

基金项目: 国家自然科学基金(51479022); 国家自然科学基金(51179021)

作者简介: 高东红(1989—), 男, 河南周口市人, 硕士研究生, 研究方向为工程水力学。E-mail: wgdhappy@163.com

通信作者: 刘亚坤(1968—), 女, 黑龙江讷河市人, 博士, 教授, 博导。主要从事工程水力学方面的教学与科研工作。

E-mail: liuyakun@dlut.edu.cn

白色和红色肌肉组织进行无氧呼吸。在该模式下通常持续 20 s ~ 200 min; 在爆发游泳速度下, 主要使用白色肌肉组织进行无氧呼吸, 在该模式下通常可持续 20 s 以下。鱼道内的复杂流场再加之高紊动能常使鱼类难以找到上溯路径, 并且加快鱼类的疲劳而致使鱼类上溯失败。因此, 研究鱼类上溯过程中的耗能情况对鱼道的设计具有重大意义。

垂直竖缝式鱼道是鱼类通过闸、坝等障碍物上溯洄游的水工建筑物(如图 1 所示^[3])。加拿大 Albert 大学的 Rajaratnam 等^[4]首先对竖缝式鱼道的水力特性进行了系统的缩尺模型试验, 研究表明: 通过竖缝处的流动可看作平面射流, 但与平面射流又存在很大的区别。Rajaratnam 等^[5]、Wu 等^[6]和 Puertas 等^[7]经过试验提出, 在均匀流状态下, 竖缝式鱼道内的水流流态主要取决于特定的水池设计, 其中主要取决于水池的长宽比。在国内, 董志勇等^[8]对竖缝式鱼道进行了放鱼试验研究, 结果表明: 同侧竖缝式鱼道适用于中等流量情形, 若流量较大, 水池内射流、漩涡的作用较强, 不利于鱼类的上溯。徐体兵^[9]和毛熹等^[10]对鱼道水池结构也都进行了不同研究。随着计算机技术和数值算法的进步, 计算流体力学(CFD)模型越来越多用于复杂流场的分析和水工建筑物的设计。Cea 等^[11]和 Bermudez 等^[2]基于二维水深平均浅水方程结合适当的湍流模型, 对竖缝式鱼道进行了二维数值模拟, 其中 Cea 采用 $k \sim \epsilon$ 模型(KES)与代数应力模型(ASM)两个的结果与试验数据吻合较好; Bermudez 发现当水池长宽比以 1.25 与 1.88 为临界值时, 射流会出现三种流态; Barton 等^[12]基于重整化群理论的 $k \sim \epsilon$ 紊流模型(RNG $k \sim \epsilon$ 紊流模型)并加以 VOF 追踪自由液面对三维竖缝式鱼道进行了模拟, 并详细展示了竖缝处不同水深处的流速场, 并与 Wu 等所取得的试验数据资料作了验证, 之后又展示鱼道内部强烈的二次流, 取得了较为满意的结果。Khan 等^[3]采用 STAR-CD 进行了三维鱼道的模拟, 然而并没有考虑水与空气的交互界面。

通过数值模拟分析鱼道流场, 探讨鱼道的水力特性是目前研究的发展趋势, 而上述多数研究模拟的结果与实际物理试验现象也颇为相似, 证实了数值模拟具有一定的可靠性, 是未来鱼道设计的一种主流。数值模拟除模拟鱼道的流态、流速场、紊流特性等水力特性外, 目前以鱼类上溯配合鱼道数值模拟的研究还未有深入的探讨。本文针对垂直竖缝式鱼道, 基于 CFD 通用软件 FLUENT 建立鱼道三维

数值模型, 详细展示了鱼道内部复杂的水力特性, 并以粉红鲑鱼为例, 基于其上溯时的爆发流速, 计算分析鱼种在流场中上溯时所遇到的阻力及能量损耗。

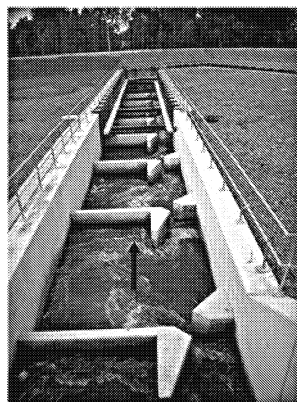


图 1 垂直竖缝式鱼道内复杂的流态
(箭头方向为主流方向)

1 三维鱼道数值模拟

1.1 鱼道流场控制方程

对于所有的流动问题, 模型都需要求解质量和动量方程, 但由于鱼道是包含两相介质的区域模拟, 其空气与水的交界处的流场控制方程, 除满足连续方程、动量方程、紊流动能方程和紊流动能消散率方程外, 还应同时求解包含两相的复杂流场。流经鱼道内的流体假设为不可压缩的牛顿流体, 本研究的连续方程和动量方程分别为^[13]:

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

$$\frac{\partial \rho \bar{U}_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \bar{U}_i \bar{U}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \rho \nu_T) \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g_i \quad (2)$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

式中: t 表示时间; \bar{U}_i 表示 i 方向的平均速度 ($i = 1, 2, 3$); \bar{P} 为平均压力; ρ 为流体密度; g_i 为不同方向的重力加速度; k 为紊流动能; ϵ 为紊流动能消散率; μ 为水分子粘性系数; ν_T 为紊流运动粘性系数, $C_\mu = 0.085$, 为半经验系数。

1.2 紊流模型的选取

上述闭合问题需进一步利用紊流模型计算流场, 以往研究中基本都采用标准紊流 $k \sim \epsilon$ (standard $k \sim \epsilon$ turbulent model) 配合有限体积法来模拟三维鱼道的流场。然而由于鱼道中人工构造物的设置与倾斜的坡度, 使得鱼道中极易产生复杂的紊流环境,

其中包含水流正面碰击构造物时上下自由液面剧烈的波动所形成的回流区;在竖缝处形成的射流所造成的高流速梯度区域;在速度梯度与底床剪力作用下造成的流场分离,再加上自由液面所产生的阻尼效应,紊乱的流态导致流场更加难以分析。由上述原因,本文基于 FLUENT 商业软件包对鱼道内复杂流场进行研究,以控制方程的时间平均形式加以 RNG $k \sim \epsilon$ 湍流模型来实现雷诺应力的封闭。RNG $k \sim \epsilon$ 模型是由一种严谨的统计方法即重整化群理论推导出的,它与 Standard $k \sim \epsilon$ turbulent model 保持形式上的一致并加以改进,在其 ϵ 方程中增加了额外项,这样显著提高了快速应变流动的准确性。该模型中也包括了漩涡的紊流影响,使得它比标准的 $k \sim \epsilon$ 模型更加适应快速应变和流线曲率的影响。其 k 方程和 ϵ 方程具有如下形式:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{U_i k})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\rho \nu_T}{\sigma_k} \right) \cdot \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \overline{U_i \epsilon})}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\rho \nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \cdot \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right] + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

$$P_k = \rho \nu_T \frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} \left(\frac{\partial \overline{U_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_j}}{\partial x_i} \right) \quad (6)$$

为了同时求解包含水与空气二相介质的流场,以上参数应符合:

$$\begin{cases} \rho = a_w \rho_w + (1 - a_w) \rho_a \\ \mu = a_w \mu_w + (1 - a_w) \mu_a \end{cases} \quad (7)$$

上述各式中,字母含义同流速场控制方程,另 σ_k 和 σ_ϵ 分别为 k 方程和 ϵ 方程的湍流 Prandtl 常数,此时取 $\sigma_k = \sigma_\epsilon = 0.72$, $C_{\epsilon 1}$ 为半经验系数,取 $C_{\epsilon 1} = 1.42$, $C_{\epsilon 2}$ 由 k 、 ϵ 及 RNG 模型的剪切速率计算所得,取 $C_{\epsilon 2} = 1.68$ 。 a_w 为水体积相对于控制体体积之比。

1.3 自由液面边界与底面边界

自由液面边界设置可分为两种:(1) 对称性边界条件(俗称“刚盖假定”);(2) 体积分辨率法(VOF)。对称性边界条件即假设通过此边界的所有物理梯度量为零,假设自由液面边界不会随时间变动,而实际鱼道内流场自由边界会随时间改变而改变,所以对称性的固定液面对于自由边界的模拟不精确,不符合鱼道自由液面的模拟条件,而 VOF 的原理是利用空气与水的流体控制方程形式相同但因物理特性不同的差异,以所占的比例方式带入控制方程。

鱼道流场模拟近底壁处紊流扰动速度受底床粗

糙度、不可滑动边界条件等因素影响,会导致急速变化的速度梯度与压力梯度,远离边壁却不受影响,使得流场呈现出非等向性,再加之漩涡、竖缝处的射流及流动分离,本研究采用非平衡的壁面函数,它具有解释涉及射流、分离漩涡等复杂流场所形成的压力梯度与平衡效应的能力。

1.4 鱼体上溯研究

CFD 模型能提供鱼道内流场的详细特征,因此,模拟的结果能够用来估算鱼类上溯的能量损耗。鱼类上溯过程所遇到的主要水动力为水的阻力 $F^{[14]}$, 其中

$$F = 0.5 C_d \rho A_s (U_w - U_f)^2 \quad (8)$$

$$C_d = C_f + C_p \approx 1.2 C_f \quad C_f = 0.074 Re^{-0.2} \quad A_s = \alpha L^\beta \quad (9)$$

$$E = \int_0^S |F| ds \quad (10)$$

式中: C_d 是阻力系数, C_d 由摩擦阻力系数 C_f 和压力阻力系数 C_p 两部分组成; ρ 为水的密度; A_s 为鱼的润湿表面积; U_w 为水的流速; U_f 为鱼的上溯游泳速度; Re 为雷诺数; L 为鱼的体长, $\alpha = 0.465$, $\beta = 2.11$ 。消耗的能量 E 为阻力对路径 S 的积分值。

2 鱼道的水力特性分析

2.1 CFD 鱼道模型的建立

本研究根据戚印鑫^[15]等物理模型试验中鱼道形式建立的。根据以往研究表明:鱼道内除首尾两鱼池外的流动性质是极其相似的。在 CFD 模型中,首尾两鱼池的数值解很大程度上受上下游边界条件的影响,继而又会影响到下一鱼池的解,所以在 CFD 模型中要有足够的鱼池来保证能远离上下游边界条件的影响,本研究选用 10 个鱼池来进行模拟,由于第 5 和第 6 个鱼池距离上下游鱼池较远,受上下游边界影响较小且具有相同的流动形态,因此,本研究仅选用第 5 个鱼池来反映原型池的流场特性。

模型建立如图 2 所示,由 ICEM CFD HEXA 生成约 33 万个网格单元,图 3 展示了典型鱼池的细部结构。

2.2 边界条件及算法

模型所施加的边界条件主要包括进口、出口、压力和无滑移等边界条件。其中进口下部采用水速度进口,由戚印鑫等提供鱼道在设计水位工况下数据推算出, $v = 0.41$ m/s,上部采用空气压力进口;出口采用空气压力出口;在鱼道底床、边壁及隔板上均采用无滑移边界设定。

为了空间离散的方便,本研究将控制方程转化

为代数形式。压力项采用 Body Force Weighted 离散,较传统的 Standard 法更适合模拟二相流自由液面边界且易于达到良好的收敛效果。动量和湍流项采用 QUICK 格式离散,使用结构化网格时,QUICK 格式在求解旋转和涡流时能提供更好的精度。采用 PISO 算法求解非稳态流场下压力-速度的耦合,因其中含有压力修正方程式,修正了每个网格面的质量通量,能够提高收敛效率。采用自适应迭代,时间步长设定为 0.001 s,所有的数值运算结果前后误差小于 0.001 即认为收敛。

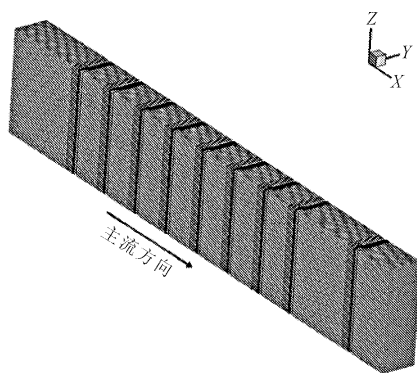
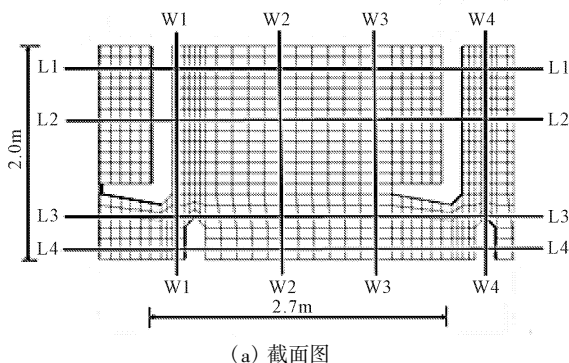
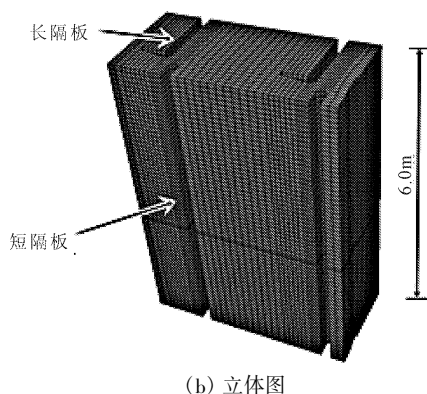


图 2 整个鱼道模型计算网格



(a) 截面图



(b) 立体图

图 3 鱼池的细部结构,纵截面(L1-L1 至 L4-L4)和横截面(W1-W1 至 W4-W4)

3 计算结果及讨论

3.1 鱼道的水力特性

鱼道 CFD 模型的计算结果见图 4~图 7。图 4 展示了鱼道内部气液两相流的空间变化。该图表明:在隔板作用下,鱼道水流逐级降落,图中的等值线表明水面高程的降落量级。

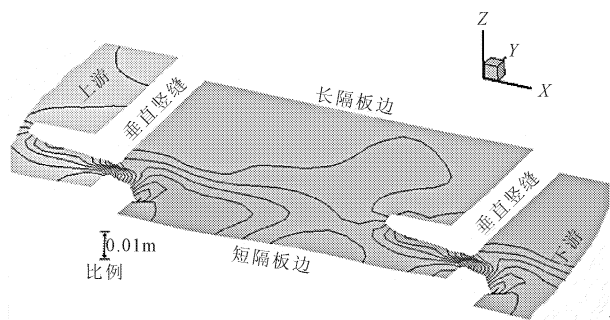


图 4 鱼道内自由水面的空间变化图

鱼道中复杂的流速分布造成了沿鱼池横向和纵向水面高程的变化,从而在鱼道鱼池内形成上升流、下降流、涡流和死水区等现象。图 5(a)表明沿着长隔板附近的流速较低,且在鱼池两端形成上升流;图 5(b)中,流态发生了明显的变化,并且有涡流产生;

图 5(c)中,在通过竖缝处,形成了射流形式,在竖缝上游形成下降流而在下游附近形成上升流;图 5(d)中形成了由鱼池中部流向短隔板处的下降流。

图 6 展示了竖缝处所形成射流的消散以及由此产生的流动形态。射流的核心区位于自由表面下一小段距离。在竖缝附近,循环模式是非常相似的,且在此处形成速度相对非常大的下降流。远离竖缝后,射流横向发展(图 6(b)),然后逐渐消散(图 6(c))。

图 7 表明了射流在四个不同相对水深处($d/D = 0.05, 0.33, 0.67, 0.95$)的空间特性,其中 D 为池内流动平均水深。除了自由表面附近,鱼池内的循环模式主要为分散在射流两边的漩涡。一般情况下,位于短隔板边的漩涡靠近下游,在自由表面附近,漩涡相对较弱,并且靠近上游隔板。图 5~图 7 表明,鱼池内循环模式及射流的消散与以往物理模型试验观察的现象相一致。

3.2 鱼体上溯耗能研究

不同的鱼类上溯,因其物种特有的运动习性、体型尺寸和鱼道的环境流场不同,均会对其上溯能力产生影响。由于我国上溯鱼类特性方面的研究资料普遍缺乏,故本研究采用的上溯鱼种为资料较充足的粉红鲑鱼。

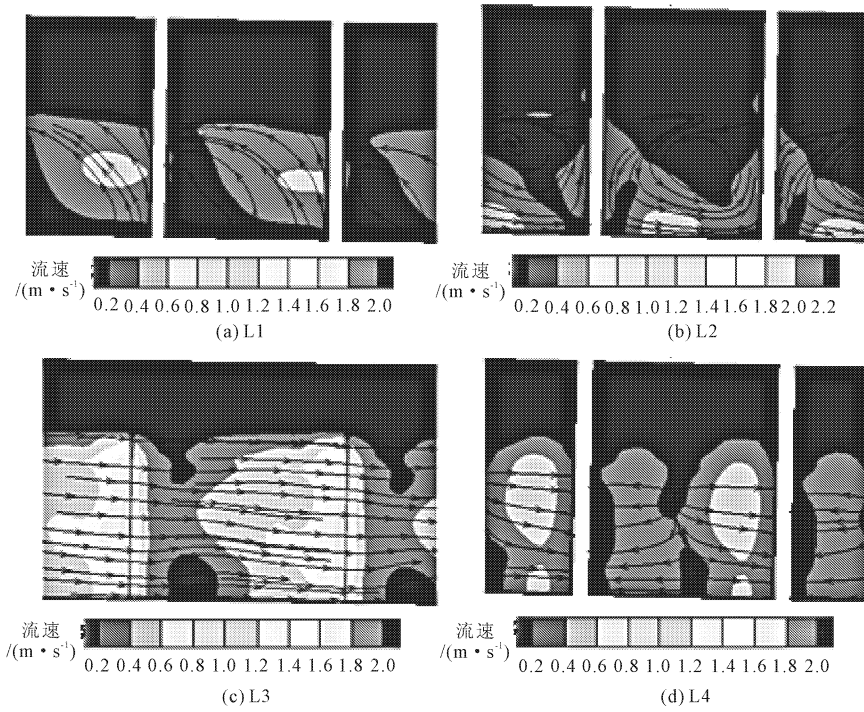


图 5 沿鱼池四个纵向区域(L1 - L4)的水面线、流速和流线的空间变化图

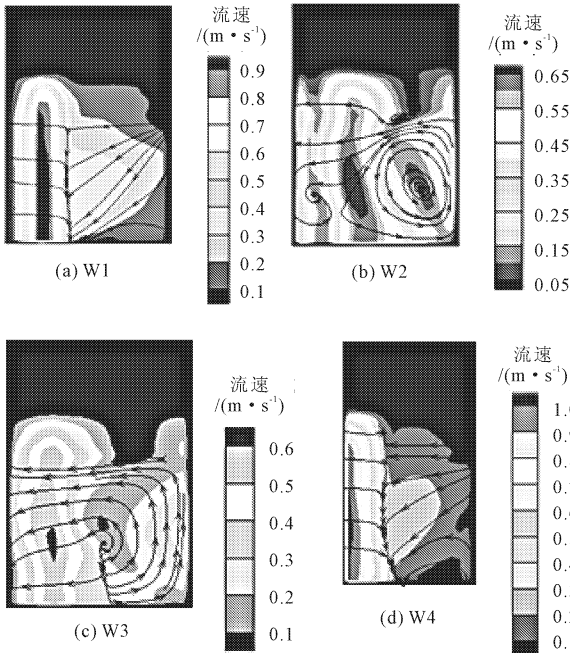


图 6 沿鱼池四个横向区域(W1 - W4)水面线、流速和流线的空间变化图

计算鱼体耗能时需要设定三个参数^[13], 鱼体长度 L , 游泳速度 U_f , 上溯路径 S 。在本研究中 $L = 0.50 \text{ m}$, $|U_f| = 3.00 \text{ m/s}$ 。因为本鱼种的成鱼体长一般为 $0.45 \text{ m} \sim 0.60 \text{ m}$ 。游速采用平均爆发游速, 不考虑流体流速对鱼类的影响, 鱼类将以此流速不

停歇地通过鱼池。假设 A、B、C 三条上溯路径(图 8 (a)), 代表了三种极限情况。A 路径为射流的外部边界; B 路径的鱼类将会遇到最大的流速; C 路径代表了漩涡与射流的分离区。上溯路径距离为两箭头之间的距离, 假设鱼种从标为“开始”的地方开始上溯。各计算参数如表 1 所示。

图 8(b)显示流速沿着上溯路径强烈的空间变化, 最小和最大值分别为 0.16 m/s 和 0.97 m/s 。竖缝处的流速将决定着鱼种能否上溯成功。Hell's Gate^[3]鱼道竖缝处的平均流速为 2.4 m/s , 属于大流速型鱼道, 粉红鲑鱼能很好的通过, 鱼道建成后起到了很好的过鱼效果。粉红鲑鱼爆发游速持续 $6 \text{ s} \sim 20 \text{ s}$, 因此, 该鱼种将能持续通过多个鱼池。尽管本研究鱼道没有具体的试验数据来验证, 但 Hell's Gate 的成功运行将会为本研究的结论提供定性的支持。

图 8(c)展示了与流速相对应的阻力的空间变化, 由式(8)计算出的阻力变化范围为 $4.45 \text{ N} \sim 5.10 \text{ N}$ 。由于本鱼道内最大流速约为 1 m/s , 且沿路径上的流速变化范围也不大, 因此阻力变化的范围也很小。沿着路径 B 上溯的平均阻力为 4.67 N 。在本研究中, 忽略了鱼短暂的加速阶段, 这一阶段的惯性力也是非常显著的。因此, 在稍微大流速鱼道中, 鱼类以爆发游速上溯时所受阻力将会非常高。

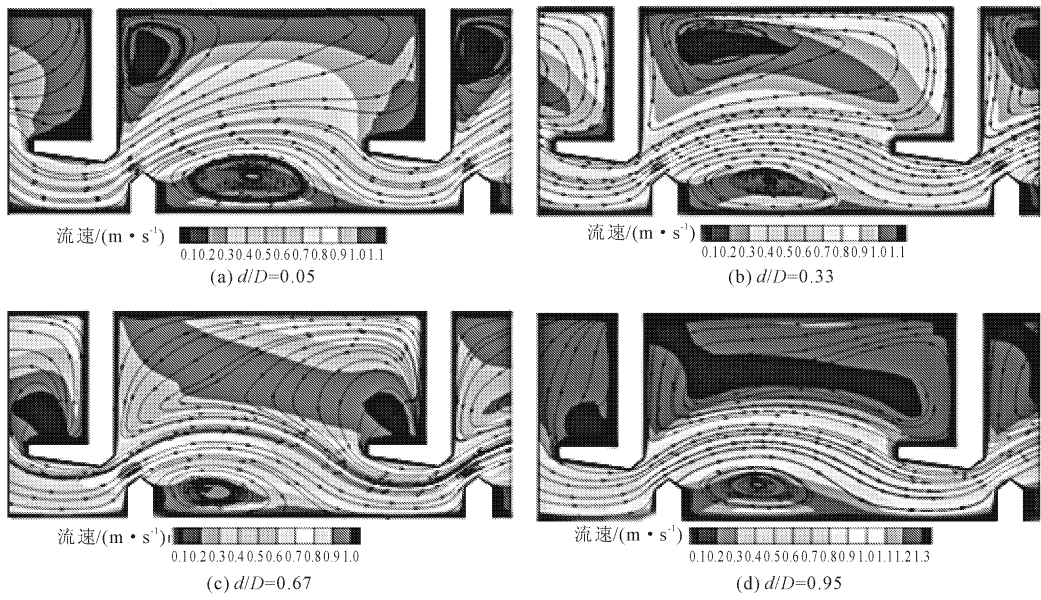


图 7 平行于鱼道底坡四个不同水深面流速和流线的空间变化

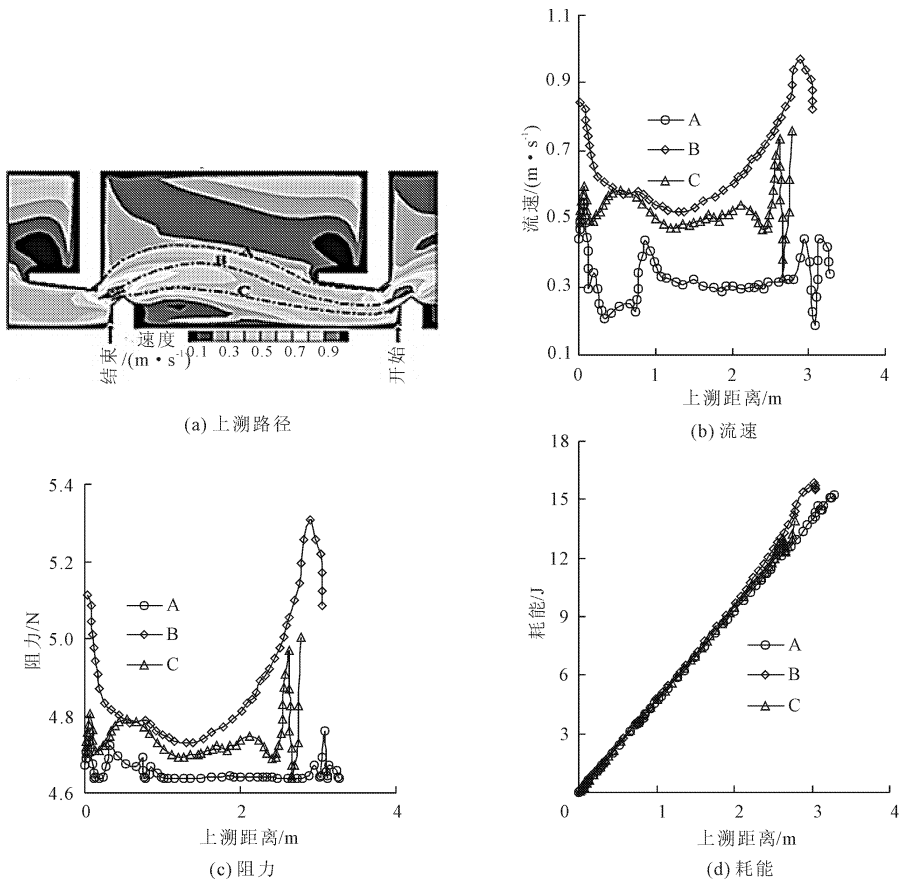


图 8 鱼体上溯耗能计算

表 1 鱼体上溯能耗参数计算

上溯路径	路径长度/m	最大流速/($m \cdot s^{-1}$)	平均流速/($m \cdot s^{-1}$)	通过时间/s	最大阻力/N	平均阻力/N	总耗能/J	平均耗能/($J \cdot m^{-1}$)
A	3.27	0.54	0.31	1.19	4.74	4.45	15.2	4.39
B	3.05	0.97	0.65	1.27	5.31	4.68	15.8	4.69
C	2.78	0.75	0.52	1.12	4.96	4.54	13.9	4.54

图 8(d)表明了鱼类沿着三条路径上溯时的累计能量消耗,由式(10)计算出沿着三条路径平均耗能分别为 4.38 J/m ~ 4.57 J/m,耗能的计算是由阻力沿着上溯路径的积分得来,与阻力的变化将成正相关关系。本研究计算的平均能量消耗与 Standen 等^[16]所分析的数据 4.78 J/m 相接近,由于本研究中鱼道流速和阻力相对较小,因此能量损耗值较小且变化范围不大。

4 结 论

(1) 本研究以计算生态流体力学为基础,以 3D CFD 模型模拟具有自由表面流的紊流鱼道流场,针对竖缝式鱼道的模拟结果,分析研究鱼体上溯时沿不同路径的能量损耗。借助 FLUENT 软件成功以 3D CFD 模型,并采用 RNG $k \sim \epsilon$ 紊流模型搭配体积分辨率法模拟竖缝式鱼道的流场情形,结果表明鱼道内部流场呈现明显的三维特性,并伴随有漩涡、上升流、下降流和流动分离等现象,模拟结果与以往物理模型试验所观察的现象相一致,证明了 3D CFD 模型模拟复杂流场的可靠性。

(2) 根据模拟的流场,沿假设上溯路径流速变化范围为 0.16 m/s ~ 0.97 m/s,基于鱼类爆发流速与流场流速表明粉红鲑鱼能很容易通过该流场。

(3) 基于 CFD 模拟结果来计算分析鱼类上溯可能遇到的流速和阻力,进而分析沿不同路径上溯的耗能情况,能量损耗值得范围为 4.38 J/m ~ 4.57 J/m,表明鱼类以某种流速上溯时的耗能与鱼道内流速呈正相关关系。本文研究结果与 Standen 等所分析的结果 4.78 J/m 吻合度较好。虽然研究仅展示了垂直竖缝式鱼道的结果,但该模型方法也能适用于其他类型鱼道研究,对鱼道设计及渔业管理都具有很好的借鉴意义。

参考文献:

- [1] 白音包力皋,王 玎,陈兴茹,等.鱼道水力学关键问题及设计要点 [C]//西安:水力学与水利信息学进展,2009:206-211.
- [2] Bermudez M, Puertas J, Cea L, et al. Influence of pool geometry on the biological efficiency of vertical slot fishways [J]. *Ecological Engineering*, 2010, (10):1355-1364.
- [3] Khan L A, E A Wicklein, M Rashid. A 3 - D CFD model analysis of the hydraulics of an outfall structure at a power plant[J]. *Journal of Hydro-informatics* 2005, (7):283-290.
- [4] Rajaratnam N, Vander Vinne G, Katopodis C. Hydraulics of vertical slot fishways[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1986, 112(10):909-927.
- [5] Rajaratnam N, Katopodis C, Solanki S. New designs for vertical slot fishways[J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 1992, 19(3):402-414.
- [6] Wu S, Rajaratnam N, Katopodis C. Structure of flow in vertical slot fishway[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1999, 125(4):351-360.
- [7] 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.
- [8] 董志勇,冯玉平,Alan Ervine.异侧竖缝式鱼道水力特性及放鱼试验研究[J].*水力发电学报*,2004,27(6):126-130.
- [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] 毛 熹,脱友才,安瑞冬,等.结构变化对鱼道水力学特性的影响[J].*四川大学学报:工程科学版*,2012,44(3):13-18.
- [11] Cea L, Pena L, Puertas J. Application of several depth-averaged turbulence models to simulate flow in vertical slot fishways [J]. *Journal of Hydraulic Engineering ASCE*, 2007, 133(2):160-172.
- [12] Barton A F, Keller R J. 3D free surface model of a vertical slot fishway [C]//XXX IAHR Congress, Thessoloniki, Greece, International Association of Hydraulic Engineering and Research,2003.
- [13] 许少华,刘建荣,等.以 FLUENT 三维模拟检核马鞍漏鱼道本体流场的和适度[J].*中华水土保持学报*,2010,41(4):343-351.
- [14] Khan L A. A Three-dimensional computational fluid dynamics (CFD) model analysis of free surface hydrodynamics and fish passage energetics in a vertical-slot fishway[J]. *North American Journal of Fishwaies Management*, 2011, 26(2):255-267.
- [15] 戚印鑫,孙 娟,邱秀云.水利枢纽中的鱼道设计及试验研究[J].*水利与建筑工程学报*,2009,7(3):55-58,62.
- [16] Standen E M, Hinch S G, Healey M C, et al. Energetic costs of migration through the Fraser River Canyon, British Columbia, in adult pink (*Oncorhynchus garbuscha*) and sockeye (*Oncorhynchus nerka*) salmon as assessed by EGM telemetry[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*,2002,59(11):1809-1818.