

基于突扩明渠水流数值模拟的鱼类游泳行为研究

查伟¹, 曾玉红¹, 黄明海²

(1 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉, 430072, Email: wzha@whu.edu.cn)

(2 长江水利委员会长江科学院, 湖北武汉 430010)

摘要: 为了优化鱼道设计, 提高鱼道过鱼成功率, 利用大涡模拟对突扩明渠中的分离流进行了数值模拟, 探讨了突扩明渠流场的瞬时和时均特性, 结合鱼类游泳试验资料, 进一步分析讨论突扩明渠水流对鱼类游泳行为的影响。结果表明, 建立的三维模型成功地模拟了突扩明渠水流运动, 瞬态流和时均流在流场结构方面具有较大差异; 随着流速增加, 相同体长的鱼类在回流区的停留时间在增加。此而随着流速越大或者体长减小, 增加趋势在变缓。

关键词: 大涡模拟, 洄游鱼类, 停留时间, 突扩流动, 游泳行为

1 引言

现阶段我国建设了大量的水利水电工程, 因此而带来的是鱼类栖息地被压缩, 洄游通道被阻隔。为更好地保护鱼类资源, 鱼道作为生态措施, 已广泛应用于生态保护^[1]。为保证鱼类能够成功通过鱼道上溯洄游, 了解鱼类游泳行为成为当前生态水力学研究的重要课题。

目前, 许多学者在流速、紊流强度和复杂流场对鱼类游泳行为的影响开展了大量研究, 如 Haro 等认为洄游鱼类能够感觉在溢洪道拦鱼栅附近的流速变化, 并作出相应调整^[2], Pavlov 等对非洄游性鱼类的研究中发现, 水流紊动也会间接地吸引鱼类, 并且可以促进洄游性鱼类的上溯迁移^[3], 董志勇等发现鱼类进入鱼道池室后当流速不高, 则沿主流游动, 若流速过大, 则转入回流区休息或徘徊^[4], 但国内外对突扩明渠分离流下鱼类游泳行为研究较少。边界分离再附着流是突扩明渠水流的重要特征, 主要经历边界层分离、再附合再发展^[5]。本研究采用大涡模拟技术对突扩明渠水流进行数值计算, 结合鱼类游泳试验资料, 研究突扩明渠对鱼类游泳行为的影响, 为优化鱼道设计提供参考。

2 数学模型

2.1 控制方程

大涡模拟采用的控制方程为滤波后的 N-S 方程, 即连续性方程和动量方程如下:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} - \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_i \partial x_j} - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: \bar{u}_i 、 \bar{P} 分别为滤波后的流速分量和压强; ρ 、 ν 分别为水的密度和动力黏性系数; x_i ($i=1,2,3$) 代表坐标轴 x , y , z ; τ_{ij} 为亚格子应力, 体现小尺度扰动对大尺度运动的影响。

本次模拟采用标准 Smagorinsky-Lilly 模式模拟亚格子应力, 如下所示:

$$\begin{cases} \tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \\ \nu_t = (C_s \Delta)^2 \sqrt{2\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: ν_t 为亚格子涡黏性系数; τ_{kk} 为亚网格尺度各向同性的一部分; $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ 是可解尺度的变形率张量; Δ 为网格梯级; C_s 为经验系数, 本次模拟中取 0.1。

2.2 模型建立与边界条件

选择单边突扩明渠结构为研究对象, 突扩断面上游长 5m, 下游 8m, 上游渠道宽 B_0 和突扩壁面长度 (特征长度) B_s 均为 0.25m, 渠道宽度 $B=0.50$ m, 突扩比 2:1, 结构布置如图 1 所示。采用 Gambit 建立三维突扩明渠模型并划分网格, 采取 Cooper 的方式划分六面体结构化网格, 进行了局部网格加密, 划分的网格总数为 305.4 万。

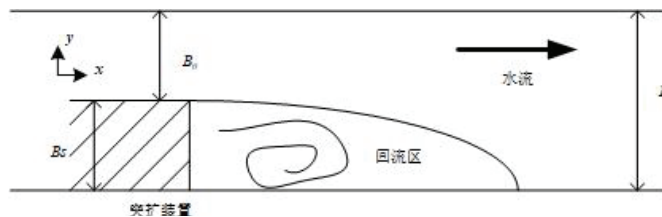


图 1 单边突扩明渠结构布置示意图

针对上述突扩明渠结构布置, 模拟工况为上游收缩段渠道平均流速 (特征流速) U_0 分别为 0.2m/s、0.4m/s、0.6m/s、0.8m/s 和 1.0m/s 共 5 种水流计算工况。上游进口以速度控制, 取流量为边界条件; 下游出口以压力控制, 取水位为边界条件, 控制下游出口断面水深 0.6m;

固壁面取无滑移边界条件。

3 数值模拟结果分析

3.1 流场瞬态特性分析

取流速 0.2m/s 为例分析漩涡的演变过程（其他流速下情况类似），图像取样时间间隔为 1s ，如图 2 所示。从图 2 中可以看出：在各种来流情况下，突扩断面至下游 $10B_s$ 范围渠段内水流可以分为主流区、回流区和上壁漩涡区三部分。主流区流线较为顺直，流速相对较大，回流区由 3~5 个尺度与台阶高度同量级、纵向排列的分布漩涡组成，上壁漩涡区范围较小，在流场图中不太明显；从不同时刻流场结构中可观测到主流周期性摆动，回流区内分布涡在水流粘性摩擦等因素作用下会逐渐演化成一些离散的漩涡。流场的漩涡现象与已经开展的相关模型试验结果相似^[6]，说明大涡模拟的模拟具有一定的可靠性。

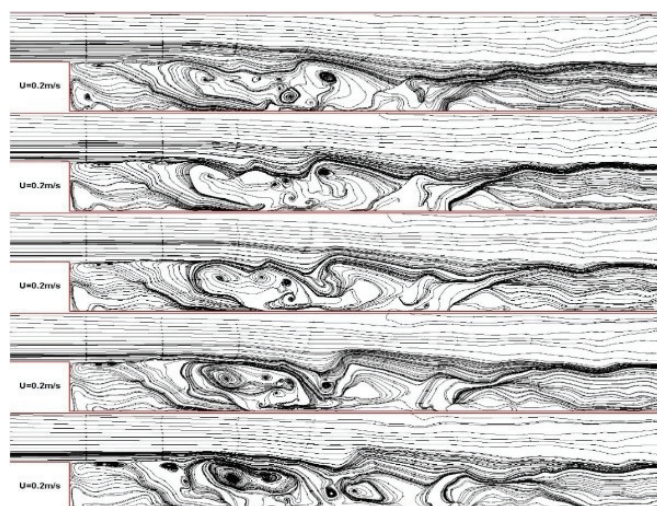


图 2 $U=0.2\text{m/s}$ 水流情况下瞬态流场漩涡结构演变过程 ($\Delta t=1\text{s}$)

3.2 流场时均特性分析

如图 3 所示为 $U=0.6\text{m/s}$ 的时均流线图（其他流速下情况类似），不同特征流速的时均流线图表明存在一个稳定的大回流区。在突扩段的低压区对主流的影响作用下，会形成一个顺时针的涡，与贡琳慧等的结论相同^[7]。在不同特征流速下，回流区长度基本维持在一定长度，没有太大的变化，说明回流区长度与雷诺数无关，该结论与文献研究结果相吻合^[8]。

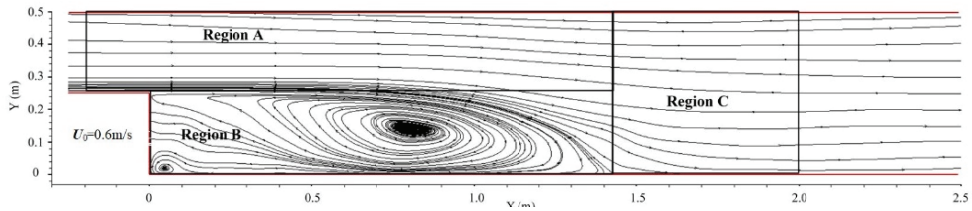


图 3 $U_0=0.6\text{m/s}$ 水流下时均流场及分区示意图

4 鱼类游泳行为分析

4.1 鱼类游泳试验

根据上述对突扩明渠流场特性的讨论，结合现有的试验资料对鱼类游泳行为进行分析研究，现对突扩明渠中鱼类游泳行为试验研究进行简要描述。

试验选择对水流比较敏感的红鲫鱼作为研究对象，选择体长为 15cm、10cm 和 5cm 3 种大小的鱼。突扩明渠模型布置在玻璃水槽内，模型结构布置与上述数学模型相同。鱼类活动观测区域为突扩断面上游 0.2m 至下游 2.0m 水槽区段。采用高速摄像机采集鱼类游动图像视频，连续观测红鲫鱼的位置随时间的变化和游泳状态。

4.2 游动轨迹点分析

根据对突扩明渠流场的分析，依据时均流场的特点，可以将突扩流场大致分为 3 个区域，如图 3 所示，分别是区域 A 主流大流速区、区域 B 回流区以及区域 C 回流区下游。依据现有鱼类试验资料，分析不同流速下大、中、小 3 种体长的鱼在区域 B 的停留时间情况（图 4）。

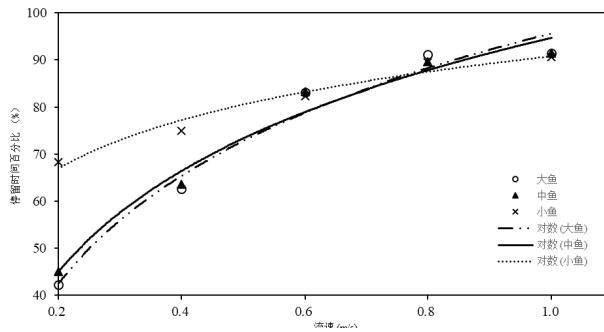


图 4 不同体长鱼类在区域 B 的停留时间分布

4.2.1 随流速增加，鱼在回流区的停留时间变长

一方面，根据林高等^[9]文献中所提回流强度概念来理解这种变化规律，回流强度 V 是指回流区内最大流量与入口处流量的比值， E 是渠道突扩比， Re 是来流雷诺数。当突扩比 E 一定时，回流强度 V 近似为 Re 的指数函数，表示为：

$$V = \theta(1 - e^{-\varepsilon Re}) \quad (3)$$

式中： θ 、 ε 都是无量纲参数，是突扩比 E 的函数，采用多项式表示如下：

$$\begin{cases} \theta = -0.24934 + 0.16184E + 0.01548381E^2 \\ \varepsilon = 0.05705 - 0.06552E^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

由此可见，随着流速的逐渐增大，回流强度会越来越大，回流区内流量会随之增大。试验所用红鲫鱼对水流较为敏感，具有较强的趋流性，往往会头部顶流趋向于朝流量更大的地方游动；其次流量增大会使得回流区内溶解氧增多；当流速越大的时候，回流强度 V 会越来越趋向于一个常数，即当流速增大到一定程度时，鱼类在回流区的分布会随之增加非常缓慢，这与实验结果刚好吻合。

另一方面，通过对突扩明渠的数值模拟，回流区域由于突扩段的低压区影响主流会存在一个顺时针的回流漩涡，漩涡内压强较小，会造成来流方向的微生物堆积，存在的微生物就会越多，鱼类捕食就越轻易，这也导致了鱼会较多出现在回流区。

4.2.2 随体长减小，对数曲线增长趋势变缓

不同体长鱼类在回流区的停留情况虽然大致相似，但也有差别：采用对数曲线进行拟合时，大、中、小鱼的系数分别为0.3303、0.3086、0.1481，随着体长减小而减小。

鱼类游泳行为与漩涡有着密切的关系，漩涡对鱼类游泳行为的影响主要取决于单个漩涡大小与鱼类体长之间的相对尺寸。当 $\lambda/L \ll 1$ （为漩涡直径特征值， L 为鱼体长度）时，紊流漩涡对于鱼类游泳行为的影响微乎其微。Tritico发现：在 λ/L 为0.75至0.9的漩涡水流中，鱼体摆尾幅度较大，鱼类游泳能力和稳定性会较大程度减弱^[10]。Webb同样研究得到在尺寸足够大（ $\lambda/L \gg 1$ ）的漩涡中，鱼类会以角速度形式作接近直线游动^[11]。

由此我们得知，随着体长的减小，单个漩涡尺寸与鱼类体长之间的相对尺寸会逐渐增大。根据上述发现，大、中鱼在漩涡中由于摆尾幅度较大，游泳能力和游动稳定性会较大程度减弱，而小鱼由于体型较小，会以角速度形式接近直线运动，受漩涡影响不大。

5 结论

三维大涡模型成功地模拟了突扩明渠水流：瞬态流场包括主流区、回流区和上壁漩涡区三部分，回流是由3~5个尺度与台阶高度同量级、纵向排列的分布漩涡组成；时均流场存在一个稳定的大回流区，没有上壁漩涡区。

突扩明渠影响下，流速和体长会影响鱼类游泳行为：随着流速的增加，鱼类在回流区的停留时间会增加；在流速较小时增加的较快，当流速接近1.0m/s时，增加速度会变慢；随着体长减小，停留时间曲线的增长趋势在逐渐变缓。

参 考 文 献

- 1 陈凯麒, 常仲农, 曹晓红,等. 我国鱼道的建设现状与展望[J]. 水利学报, 2012, 43(2):182-188.
- 2 Alex Haro, MufeedOdeh, John Noreika, et al. Effect of Water Acceleration on Downstream Migratory Behavior and Passage of Atlantic Salmon Smolts and Juvenile American Shad at Surface Bypasses[J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1998, 127(1):118-127.
- 3 Pavlov D S, Lupandin A I, Skorobogatov M A. The effects of flow turbulence on the behavior and distribution of fish[J]. Journal of Ichthyology, 2000.
- 4 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, 2008, 27(6):126-130.
- 5 曾诚. 带自由表面的后向台阶流动的流场研究[D]. 河海大学, 2006.
- 6 齐鄂荣, 黄明海, 李炜,等. 二维后向台阶流流动特性的实验研究[J]. 实验力学, 2006, 21(2):000225-232.
- 7 贡琳慧, 王泽, GONGLin-hui,等. 突扩明渠的三维紊流数值模拟[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(4):404-408.
- 8 Bf A, F D, Jc P, et al. Experimental and theoretical investigation of backward-facing step flow[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1983, 127(6):473-496.
- 9 林高平, 龚晓波, 冯霄,等. 圆管突扩层流流动计算[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(6):108-110.
- 10 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(Pt 13):2284.
- 11 Webb P W, Cotel A J. Turbulence: does vorticity affect the structure and shape of body and fin propulsors?[J]. Integrative & Comparative Biology, 2010, volume 50(6):1155-1166(12).

Swimming behavior of fish based on numerical simulation of open channel flow with sudden-expansion

ZHA Wei¹, ZENG Yu-hong¹, HUANG Ming-hai²

(1 State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, 430072. Email: wzha@whu.edu.cn

2 Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010)

Abstract: In order to provide a technical reference for the design of fish passageways and improve the passage efficiency, numerical solutions of separation flows in sudden-expansion open channel are obtained by use of the large-eddy simulation. The characteristics of the transient flow field and the time averaged flow field is investigated. The results combined with experimental data can help to explore the fish swimming behavior in sudden-expansion open

channel. The results show that the established three-dimensional model can simulate the flow in sudden-expansion open channel successfully and there are great differences between transient flow field and time averaged flow field. As the flow velocity increases, the residence time which the fish having the same body length stay in the recirculation zone is increasing. Moreover, the greater the flow velocity or the smaller fish, the slower the increasing trend.

Key words: Large-eddy simulation; Migratory fish; Residence time; Sudden-expansion flow; Swimming behavior.