

DOI: 10.5846/stxb201308072042

胡运桑, 石小涛, 陈求稳, 黄瑶. 鲢幼鱼通过水流速度障碍的模拟. 生态学报, 2015, 35(8): 2652-2658.

Hu Y S, Shi X T, Chen Q W, Huang Y. The simulation of silver carp crossing through velocity barriers. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2652-2658.

## 鲢幼鱼通过水流速度障碍的模拟

胡运桑<sup>1,2</sup>, 石小涛<sup>2</sup>, 陈求稳<sup>3</sup>, 黄瑶<sup>1,\*</sup>

1 三峡大学, 理学院, 宜昌 443002

2 三峡大学, 三峡库区生态环境教育部工程研究中心, 宜昌 443002

3 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

**摘要:** 鱼类能否通过水流速度障碍直接影响过鱼设施的过鱼效果。利用计算机技术, 综合水力因素、鱼类行为、地理特征及环境因子, 展开鱼类通过水流速度障碍的模拟, 有助于过鱼设施的优化设计。以国外涵洞式鱼道模拟软件 FishXing 为切入点, 结合主要模块和关键因子, 对我国特有鱼类鲢幼鱼进行模拟, 得到鲢通过不同水流速度障碍的成功率; 对比鲢在物理模型中的游泳表现, 从模型主要模块和影响鱼类游泳表现的关键因子角度, 分析影响鱼类通过水流速度障碍模拟的因素。结果表明, FishXing 软件不能精确模拟鲢通过水流速度障碍的表现。分析表明, 该软件在地理要素、管道特征和水力信息等参数方面具备独特的优势, 但对我国鱼类有一定局限性, 主要体现在鱼类的生物学信息如鱼类游泳特征等方面存在不足; 进行鱼过障碍的模拟需要深入研究目标鱼类的生理特征、游泳能力及其与水力环境因子的响应关系。

**关键词:** 过鱼设施; 鲢; 游泳能力; 水力因子; 模拟

## The simulation of silver carp crossing through velocity barriers

HU Yunshen<sup>1,2</sup>, SHI Xiaotao<sup>2</sup>, CHEN Qiuwen<sup>3</sup>, HUANG Yao<sup>1,\*</sup>

1 College of Science, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

2 Engineering Research Center of Eco-environment in Three Gorges Reservoir Region, China Three Gorges University, Yichang 443002, China

3 Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

**Abstract:** Whether fish can overcome water velocity barriers affects their passage at manmade fishways. By integrating hydraulics, fish behavior, geographic characteristics and environmental factors, we simulated how fish pass through different water velocity barriers. We studied the software FishXing and focused on the software's main module and key factors in fish swimming simulation, using the silver carp which is native to China, as test object for simulation and analysis. These simulation will help to improve the design of fish passage. FishXing is a unique software tool for the assessment and design of culverts for fish passage in the United States. It models the complexities of culvert hydraulics and fish performance for a variety of species and configurations. The software models fish swimming performance against culvert hydraulics across a range of expected stream discharges, slopes with different substrate and perch heights. Water surface profiles can be calculated for a variety of culvert shapes using gradually varied flow equations. The program then designates the swimming mode or swimming velocity or leap behavior according to current velocities. The output includes tables and graphs summarizing the water velocities, water depths, and outlet conditions, and the list of factors that limits fish passage for each

**基金项目:** 楚天学者基金(KJ2010B002); 国家自然科学基金(50979049, 51009082, 51210105017); 中国博士后科学基金(20100480487); 水利部公益性行业科研专项(201201030, 201201028-02); 中国长江三峡集团公司科研项目(SDHZ2011117); 农业部海洋与河口渔业资源及生态重点开放实验室开放基金(20090011); 贵州北盘江电力股份有限公司合作项目(SDHZ2012137); 水利部水工程生态效应与生态修复重点实验室开放基金

收稿日期: 2013-08-07; 网络出版日期: 2014-07-25

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hbhy1021@ctgu.edu.cn

culvert at a specific flow condition. It can also generate video-based animations. This study tested if FishXing can be used to estimate the swimming performance of silver carp. In our experimental tests, the water velocity in an open channel flume was increased from 0.4 m/s to 1.2m/s at 0.2m/s intervals, which extended beyond the range of critical swimming speeds recorded in juvenile silver carp. A camera was set above the water tank to record fish swimming throughout the experiments. Silver carp were tested one at a time and we recorded whether they could swim across a 1m distance at a given the water flow within 5 min. The FishXing software was then used to evaluate the performance of silver carp at the same values of water flow velocity. The experimental tests indicated that the success of fish at crossing velocity barriers decreased with velocity while the passage rate of fish in the FishXing software remained 100% until the flow far exceeded their critical swimming speed. The results indicate that the FishXing software does not accurately simulate how silver carps cross water velocity barriers. The analysis shows that FishXing has advantages in combing geographic characteristics, flume information and discharges. However, the software has shortcomings in that it lacks a classification of fish by swimming mode such as sustained or prolonged or burst swimming mode. There is a differentiation among different life stages and an analysis on specific behavior according to hydraulics. Further, FishXing does not accommodate non-salmonid species. We conclude that the simulation of fish crossing water velocity barriers needs to explore specific fish behavior in relation to hydraulic factors and environmental factors for different species, together with the swimming behavior of different development stages of the target fish. In the future, we should pay special attention to the swimming mode and behavioral characteristics of different species, particularly coupling swimming behavior and hydraulic characteristics.

**Key Words:** fish passage structures; silver carp; swimming capacity; hydraulic factor; simulation

大坝的修建造成鱼类生境的破碎化,阻隔鱼类的洄游和交流,给鱼类的繁衍、种群结构乃至生存带来一定的危害和影响<sup>[1]</sup>。为解决此问题,需要针对鱼类的洄游需求建设过鱼设施。鱼类通过水流速度障碍的能力直接影响过鱼设施的效果。目前,过鱼设施的水力学设计主要是根据物理模型和鱼类游泳能力来进行<sup>[2]</sup>。虽然上述方法取得了一定的成绩,但是耗费人力物力,在实践中有改善的空间。在鱼类行为及其与水力环境因子响应关系研究的基础上,计算机模拟有望有效地解决此类问题。

国内外已采用计算机软件模拟鱼类行为的思路进行水电工程背景下的鱼类保护学工作<sup>[3-6]</sup>,用于诱驱鱼装置和过鱼通道的设计。Goodwin 等<sup>[5]</sup>提出用欧拉-拉格朗日-因子方法(Eulerian-Lagrangian-agent method, ELAM)模拟水环境,预测三维空间鱼的运动轨迹;李建等<sup>[7]</sup>利用 Delft3D 软件的 FLOW 模块研究了葛洲坝下游修建江心堤前后对中华鲟产卵场处的水流结构及其动力学特征,模拟分析了江心堤对产卵场处河道流速、动能梯度及动能梯度增率的影响;陈求稳等<sup>[1,8]</sup>通过水环境-鱼类耦合模型,研究了鱼类个体对水库运行的生态响应。

在众多的仿真技术中,目前仅 FishXing 软件针对个体鱼类行为展开了初步的预测,包含鱼类行为、水力特征和地理信息等主要模块,是唯一一款用来评估和设计过鱼涵洞的软件。该软件模拟了多种鱼类通过涵洞式鱼道的水力特征和鱼的游泳表现,已被证实针对鲢鳙鱼类,在判断涵洞是否会阻碍其通过方面发挥了一定作用。FishXing 软件在生态型鱼道设计中的应用,对于我国鱼道设计软件研究有借鉴意义<sup>[9]</sup>。鲢虽然不是洄游性鱼类,但依然有顶流的特性,能够作为鱼类通过水流速度障碍的研究对象。本研究在分析 FishXing 软件的基础上,利用鲢幼鱼验证其应用于我国鱼类的效果,探讨我国鱼类过鱼设施的建设和计算机对鱼类的动态模拟的发展方向。

## 1 数据来源和研究方法

### 1.1 FishXing 及对鲢幼鱼通过水流的仿真模拟

FishXing 是一款集成了涵洞设计和鱼道评估的交互式软件。模型可以适应涵洞复杂的水力特性和鱼类

行为的多样性。具有三大主要模块:信息输入、计算、输出,技术路线如图 1 所示。其中输入模块包括特定流域的地理信息、鱼类信息(包括鱼类尺寸、游泳能力信息)、管道特征(包括尺寸、安装信息)、流量信息(最大流量、最小流量和设计流量)和尾水信息<sup>[10]</sup>。计算模块可根据输入的鲢的游泳能力和水力信息应用渐变流方程计算出鱼道的水表面概况和鱼道内各处的水流速度大小。输出模块以列表的形式输出整个鱼道不同位置的流速、水深等结果,列出阻碍鱼类通过的因素和水流情况,以图形的方式输出水面线图、涵洞概况图、评分曲线图和动态展示图,利用动画演示鱼通过涵洞式鱼道的过程。作为设计软件, FishXing 具有交互功能,可以用来设计包括鱼道和其它涵洞的评估模型,用来模拟验证鱼类是否能够通过水流障碍。

### 1.1.1 参数的设定

为了保证验证试验的可靠性,程序中参数以验证性试验为依据。涵洞管道的形状为长方形,长、宽、高分别为 1 m、0.4 m、0.2 m。鱼的长度设定为 10 cm。以验证性实验中持续游泳速度和爆发游泳速度为依据,程序中持续游泳速度和爆发游泳速度分别设定为 0.35 m/s 和 0.9 m/s,疲劳时间分别为 2 min 和 20 s。鲢游泳所需的最小水深设为 3.5cm。试验中调节的流速分别为 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 m/s,水深设定为 5 cm。根据  $Q = VA$ , 计算得到流量  $Q$  分别为 0.14、0.21、0.28、0.35、0.42 cfs。因此在软件中设定流量的范围为 0.14—0.42 cfs。材料选择 PVC。没有设置倾斜度,所以入口和出口高程均设置为 0。

### 1.1.2 计算与判断(程序运行机理)

完成了 FishXing 参数输入后,程序会按照相关算法进行计算,包括边界条件的计算、鱼道入口和出口落差的计算、水流能耗的计算以及鱼通过水流障碍的计算等。由于 FishXing 主要是用来检测和评估鱼类能否通过水流障碍的软件,因此计算和判断主要针对不同障碍进行。

FishXing 模拟鱼过障碍的障碍检测流程如图 2 所示。从输入的界面可以知道,鱼进入鱼道有游入和跳跃两种情况。本研究中的鲢是以游泳的形式进入鱼道的,且出水口落差设置为 0,因此,不会存在跳跃障碍和出水口落差障碍。通过对鱼道各点的水深的计算,与设定的鲢游泳需要的最小水深进行比较,判断是否会出现水深不足的障碍。当水流速度大于鱼体最大游泳速度时,就会出现速度障碍,鲢将不能成功通过。只有整个通道内的水流速度都在限度之内,且按照其游泳能力鲢能抵抗通道内的水流速度,鲢才能成功的通过整个通道。

有关鲢的游泳能力和水流速度的比较如图 3 所示。FishXing 把整个过鱼通道沿着鱼游动的方向划分为多个节点,计算每个节点处的水流速度的大小和鲢游泳的时间。水流速度大于爆发游泳速度时,出现速度障碍;水流速度小于爆发游泳速度且大于持续游泳速度时,鲢以爆发游泳模式通过通道;水流速度小于持续游泳速度时,鲢以持续游泳模式通过通道。在任何一种游泳模式下,都要对此模式下游泳的总时间和此模式的疲劳时间进行比较,当此节点处鲢游泳时间小于疲劳时间时,计算下一个节点。在持续游泳模式下,当计算得到的持续游泳时间比疲劳时间长,鲢将选择另一种游泳模式,即爆发游泳模式进行游泳,若爆发游泳的时间大于疲劳时间,鲢就会出现体力障碍。只有在所有节点都不出现速度障碍和体力障碍,鲢能成功通过水流速度障碍。

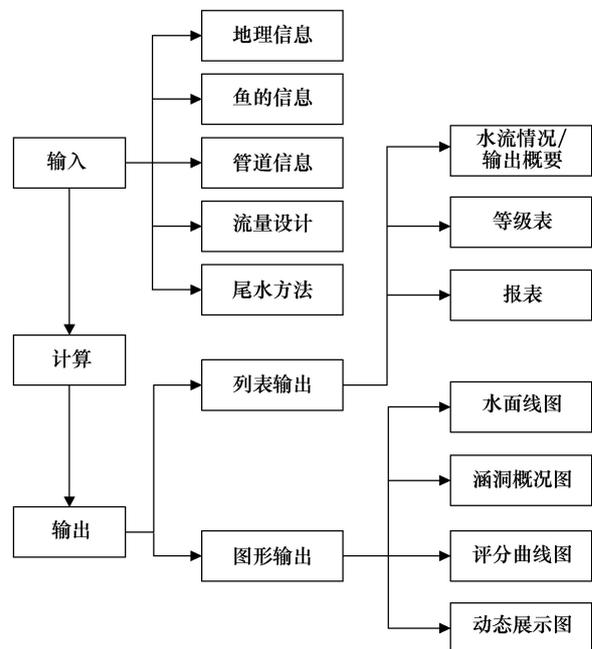


图 1 FishXing 技术路线

Fig.1 Technology Roadmap of FishXing

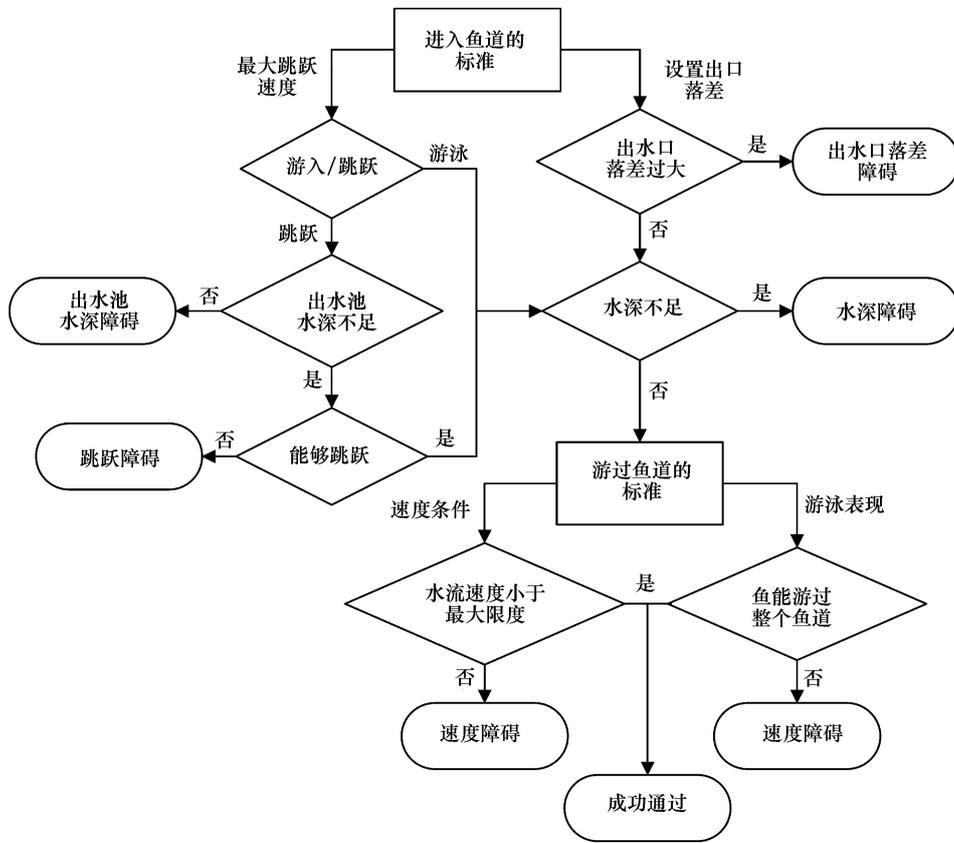
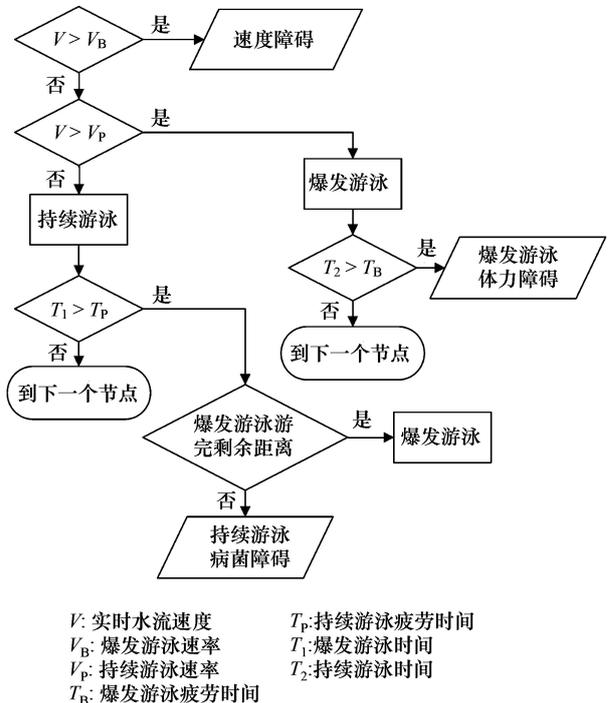


图2 FishXing 模拟鱼过障碍的障碍检测流程  
Fig.2 Identifying process of fish passage barriers in FishXing

1.2 验证性试验

为了检验 FishXing 对鲢幼鱼通过水流障碍的仿真模拟的准确性,设计鲢通过水流障碍的试验。试验装置如图 4 所示。本试验装置为一个自循环控温系统,通过抽水泵将底部回水水箱里的水抽到蓄水池中,调整蓄水池出水口处挡板的高度可以控制蓄水池出口水的流量。试验对象鲢体长为  $(10 \pm 1)$  cm,均由湖北宜都渔场提供,通过充氧水包或供氧水箱车分批运送到三峡大学生态水工试验室,暂养 3d 后进行试验。暂养水槽为直径 2 m、深为 0.5 m 的圆形水槽。暂养期间水温为  $(20 \pm 1)$  °C,24 h 连续持续充氧。每 2 d 换暂养水的 30%,每天投食面粉、麦麸等饵料和吸粪便、残渣 1 次,试验前 1 天停止喂食。试验水槽为长 1 m、宽 0.2 m、高 0.4 m 的长方体。装置中设置 3 个水泵,功率分别为 250、500、1000 W,可组合实现 7 个功率梯度的运行。流速分为 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 m/s,水深 5 cm,每个流速下选用 20 尾鲢进行试验,每次试验测试一尾试验鱼,试验鱼不重复使用。

试验前,控制水泵的功率的大小和流量控制挡板的



$V$ : 实时水流速度  
 $V_B$ : 爆发游泳速率  
 $V_P$ : 持续游泳速率  
 $T_B$ : 爆发游泳疲劳时间  
 $T_1$ : 爆发游泳时间  
 $T_2$ : 持续游泳时间  
 $T_P$ : 持续游泳疲劳时间

图3 FishXing 模拟鱼类游泳的速度选择过程  
Fig.3 FishXing Swim Algorithm

高度,用型号为 LS300-A 的便携式流速仪测水流速度。流速测定仪探头放置在中层水流,本研究的水流速度为水槽中的中层水流速度。将鲢放在适应区水槽中适应 5 min,抽出隔离鲢的网状隔板,通过摄像头观察 5 min,如 5 min 内贴壁即停止试验,5 min 内能通过 1 m 水槽说明鲢能够克服水流障碍(图 5)。

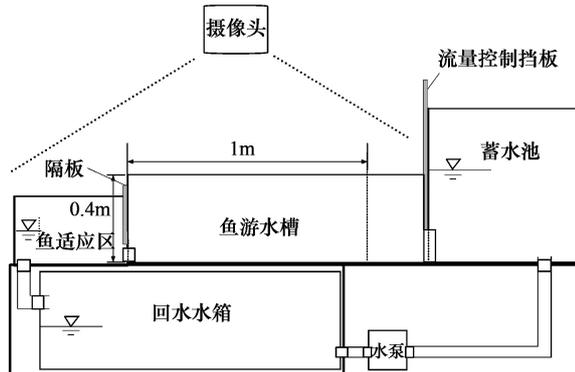


图 4 鲢通过水流障碍试验装置(侧视图)

Fig.4 Installation for experiment (side view)



图 5 鲢通过水流障碍试验录像截图(主视图)

Fig.5 Capture of the experiment video (top view)

## 2 结果与分析

FishXing 软件根据输入的相关水力条件、鱼类游泳能力以及鱼道概况,通过分析和计算,以图表形式把这些量直观展现出来,并且最终以动画的形式直接判断目标鱼类能否克服水流。模拟结果如表 1 所示,在 0.14—0.36 cfs 的流量范围内鲢可以成功通过水流障碍,在 0.36—0.42 cfs 的流量范围内存在速度障碍。但物理模型试验的结果是在流速为 0.6 m/s 以内的流速范围,即 0.21 cfs 以内的流量范围,鲢成功通过水流障碍的成功率为 80%以上;流速大于 0.8 m/s,即流量大于 0.28 cfs 时,鲢通过水流障碍的成功率不足 10%。

通过 FishXing 的模拟仿真结果和验证性试验结果比较,可以看出 FishXing 软件不能准确的模拟鲢通过水流速度障碍的成功率。

表 1 FishXing 模拟和试验中鲢在不同流速流量下的通过率

Table 1 Passage rate of silver carp crossing through the velocity barrier

分类 Classification	0.4 m/s (0.14 cfs)	0.6 m/s (0.21 cfs)	0.8 m/s (0.28 cfs)	1.0 m/s (0.35 cfs)	1.2 m/s (0.42 cfs)
FishXing 模拟通过率 Passage rate by FishXing/%	100	100	100	100	0
物理模型试验通过率 Passage rate by experiment/%	90	85	10	0	0

## 3 讨论

FishXing 软件不能精确模拟鲢幼鱼通过水流速度障碍。分析其原因,首先,FishXing 里设计的程序模块与鲢的实际游泳行为不一致。按照目前国际上广泛认同的分类方法,鱼类的游泳类型分为爆发式游泳、持续式游泳和耐久式游泳<sup>[1,11]</sup>,鲢有爆发游泳、持续游泳、耐久游泳等游泳模式以及爆发-滑行和跳跃等游泳行为。程序模拟中鲢只能以持续游泳速度和爆发游泳速度游泳,与实际不符。鱼类游泳状态的研究还不够深入,针对不同的鱼类,如何划分和评估游泳速度、如何把鱼类游泳行为和水力环境相结合还有待完善<sup>[12-16]</sup>。其次,FishXing 对水环境的模拟不够真实。FishXing 把鱼游方向上的鱼道分为有限个点,计算其水流速度的大小,忽略了两侧内壁对水流速度的影响。水槽断面的水流速度会有不一致,这也是 FishXing 程序设计中没有充分考虑的一点。FishXing 程序模拟鲢鱼类游泳通过涵洞所取得的较好结果,主要是因为鲢鱼类的游泳模式

以及游泳速度的研究已有较为系统的数据,而且个体较大的成年鲢鳙鱼类利用小水体边界水流的可能性较小,因此对精细流场的要求稍低<sup>[10]</sup>。试验中对鱼游水槽内各点流速的测定表明,水槽两边的水流速度明显比中间的流速小,鲢更喜欢在流速较小的水槽两侧游动,因此鱼类游泳通过水流的研究需要进一步分析鱼类利用精细流场的规律。综合以上分析可知,FishXing 软件模拟鱼类通过水流速度障碍的过程有待进一步优化,但模型预测与试验观察通过率的比较并不能充分说明该模型模拟的不可用性。模型的意义在于通过参数的改变,提高反映真实情况的概率,从而将这些参数应用到实践中;本研究拟探讨的鱼类通过水流速度障碍数字模型需进一步明确模拟思路、关键模型参数及明确鱼类行为和水力的响应关系,并进一步通过物理模型分析调整试验装置的参数,最终优化数字模型。

在进行鱼通过障碍模拟软件的设计时,应考虑不同目标物种和不同环境条件下参数设置的差异性。模型的建立要找准影响模型准确性的关键因子,比如游泳速度、水流速度、流态、管道、水头等。软件参数的设置要以试验为依据,充分利用现有的鱼类游泳能力的研究成果。本实验中鲢模拟不成功即与参数设置有直接关系。FishXing 软件具有丰富的参数输入、数据计算、结果输出的模块,具备很强的交互功能,可以根据需要进行不同鱼类在不同环境下的鱼过障碍的模拟。虽然目前在鱼类的游泳能力和行为上要想做出精确的仿真模拟存在困难,但是深入研究目标鱼类不同发育阶段的游泳能力和游泳行为,及其对水力因子和环境因子的响应,特别是游泳状态和水力因子如爆发游泳与水力特征的偶联关系,有望实现鱼类通过水流速度障碍的模拟,并有助于过鱼设施的优化设计。此外,基于水力参数和鱼类游泳特征的鱼类通过流速障碍仿真思路还有助于实现鱼类分布情况的动态模拟以及水资源的优化利用,有待进一步挖掘。

随着计算机软件的更新,越来越多的计算机软件能为生态环境和生物活动的模拟提供帮助。水力模拟中较为常用的一维模拟软件有 PHABSIM 和 RHABSIM,二维模拟软件有 River2D 和 RMA2,三维模拟软件有 DELFT3D 和 SSIIM3D 等。总体而言,水力模拟已经取得了长足发展<sup>[17]</sup>。在鱼类行为研究方面,计算机模拟和传统意义上的物理试验相比,有着众多的优势。不仅节省人力、物力,还可以轻松实现鱼类行为与水利信息、环境因子的耦合,建立多元模块模型。例如美国科学家提出的 NFS 模型(Numerical Fish Surrogate)运用计算流体动力学模型能够描述复杂的水体流场分析、预测鱼的运动规律;在计算流体模型内的固定网格节点插水力信息,构造粒子追踪模型能够得到鱼在不同位置的情况;由计算流体动力学预测模型模拟个体鱼的认知行为的行为响应<sup>[18]</sup>。鱼类行为模拟研究的重点是以生理生态过程为基础,利用结构化技术,建立面向对象的环境模型,特别是加强动态模拟及关键模型参数的估计,同时运用多媒体技术实现可视化和动画化,从而提高模拟模型的机理性、预测性和动态性。

#### 参考文献 (References):

- [ 1 ] 陈求稳,韩瑞,叶飞. 水库运行对下游岸边带植被和鱼类的影响. 水动力学研究与进展, 2010, 25(1): 85-92.
- [ 2 ] 郑金秀,韩德举,胡望斌,王翔,张晓敏. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究. 水生态学杂志, 2010, 3(5): 104-110.
- [ 3 ] McMillan S, Sadayappan P, Orin D E. Efficient dynamic simulation of multiple manipulator systems with singularities. ICRA, 1992, 1: 299-304.
- [ 4 ] Scruton D A, McKinley R S, Kouwen N, Eddy W, Booth R K. Use of telemetry and hydraulic modeling to evaluate and improve fish guidance efficiency at a louver and bypass system for downstream-migrating Atlantic salmon (*Salmo salar*) smolts and kelts. Hydrobiologia, 2002, 483(1/3): 83-94.
- [ 5 ] Goodwin R A, Nestler J M, Anderson J J, Weber L J, Loucks D P. Forecasting 3-D fish movement behavior using a Eulerian-Lagrangian-agent method (ELAM). Ecological Modelling, 2006, 192(1/2): 197-223.
- [ 6 ] Rayamajhi B, Vasconcelos J G, Devkota J P, Baral D, Tritico H M. Should fish passage through culverts be a concern for midwest engineers and planners; Determining the percentage of culverts that act as barriers to fish passage in NE Ohio. World Environmental and Water Resources Congress: Crossing Boundaries, 2012: 1624-1634.
- [ 7 ] 李建,夏自强,王远坤,李帆. 葛洲坝下游江心堤对中华鲟产卵场河道动能梯度影响. 水电能源科学, 2009, 27(2): 79-82.
- [ 8 ] 陈求稳,程仲尼,蔡德所,吴世勇. 基于个体模型模拟的鱼类对上游水库运行的生态响应分析. 水利学报, 2009, 40(8): 897-903.
- [ 9 ] 方真珠,潘文斌,赵扬. 生态型鱼道设计的原理和方法综述. 能源与环境, 2012, 4: 84-86.

- [10] 许晓蓉, 刘德富, 汪红波, 王从锋. 涵洞式鱼道设计现状与展望. 长江科学院院报, 2012, 29(4): 44-48, 63-63.
- [11] Plaut I. Critical swimming speed: Its ecological relevance. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 2001, 131(1): 41-50.
- [12] Beamish F W H. Swimming capacity // Hoar S, Randall D J. *Fish Physiology*. New York: Academic Press, 1978: 101-187.
- [13] 曹庆磊, 杨文俊, 周良景. 国内外过鱼设施研究综述. 长江科学院院报, 2010, 27(5): 39-43.
- [14] 王萍, 桂福坤, 吴常文. 鱼类游泳速度分类方法的探讨. 中国水产科学, 2010, 17(5): 1137-1146.
- [15] 石小涛, 陈求稳, 黄应平, 刘德富, 庄平. 鱼类通过鱼道内水流速度障碍能力的评估方法. 生态学报, 2011, 31(22): 6967-6972.
- [16] 齐亮, 杨宇, 王悦, 严忠民. 鱼类对水动力环境变化的行为响应特征. 河海大学学报: 自然科学版, 2012, 40(4): 438-445.
- [17] 郭文献, 谷红梅, 王鸿翔, 徐建新, 夏自强. 长江中游四大家鱼产卵场物理生境模拟研究. 水力发电学报, 2011, 30(5): 68-72.
- [18] Baigún C R M, Nestler J M, Oldani N O, Goodwin R A, Weber L J. Can north american fish passage tools work for south American migratory fishes? *Neotropical Ichthyology*, 2007, 5(2): 109-119.