



## 内河航电枢纽鱼道形式选择方法的思考

彭哲<sup>1</sup>, 刘晓平<sup>2,4</sup>, 刘晓红<sup>3</sup>, 张家强<sup>2</sup>, 陈豪<sup>2</sup>, 刘威<sup>1</sup>

(1. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南长沙 410011;

2. 长沙理工大学, 湖南长沙 410118; 3. 湖南理工学院, 湖南岳阳 414006;

4. 长沙和通生态环境科技有限公司, 湖南长沙 410000)

**摘要:** 基于水力学的模型试验和基于鱼类行为学的生物水力学模型试验是鱼道设计研究中常采用的两种方法, 但由于两者的关注点和评价指标不尽相同, 得到的结论有时会出现差异, 采用哪种试验方法更为合理需要审慎考量。以我国内河航电枢纽鱼道常采用的 L 形和 H 形两种竖缝鱼道形式为例, 以本土鲤科鱼类为研究对象, 采用控制环境因素的物理模型试验进行鱼道形式选择方法比较。结果表明: 基于水力学模型试验的流速控制指标, H 形竖缝鱼道比 L 形竖缝鱼道竖缝处流速降低约 14.8%, 该案例 H 形竖缝鱼道优于 L 形竖缝鱼道; 但基于生物水力学模型试验的控制指标鱼道通过率, L 形竖缝鱼道比 H 形竖缝鱼道通过率高出 30%。分析比较可知, 基于水力学的模型试验方法理论研究和实践经验比较成熟, 试验成本较低, 用于技术相对成熟鱼道的验证设计较合适; 基于鱼类行为学的生物水力学模型试验方法适用于新型鱼道的设计研究和开发。

**关键词:** 竖缝鱼道; 生物水力学; 模型试验; 环境因素; 评价指标

中图分类号: U641; TV131

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)02-0163-09

### Thoughts on selection method of fishway types for inland navigation and hydropower hubs

PENG Zhe<sup>1</sup>, LIU Xiaoping<sup>2,4</sup>, LIU Xiaohong<sup>3</sup>, ZHANG Jiaqiang<sup>2</sup>, CHEN Hao<sup>2</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>

(1. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China;

2. Changsha University of Science and Technology, Changsha 410118, China;

3. Hunan Institute of Science and Technology, Yueyang 414006, China;

4. Changsha Hetong Eco-environmental Technology Co., Ltd., Changsha 410000, China)

**Abstract:** Model tests based on hydraulics and bio-hydraulic model tests based on fish behavior are two commonly adopted methods in fishway design research. However, due to the different focuses and evaluation indicators, the conclusions drawn sometimes differ. Therefore, it is necessary to carefully consider which experimental method is more reasonable to use. Specifically, taking the L-shaped and H-shaped vertical slot fishways commonly used in China's inland river navigation and hydropower hubs as examples, and using native cyprinid fish as the research object, a physical model test controlling environmental factors is conducted to compare the selection methods of fishway types. The results show that based on the flow velocity control indicators of the hydraulics-based model test, the H-shaped vertical slot fishway has a flow velocity reduction of about 14.8% at the vertical slot compared to the L-shaped vertical slot fishway, indicating that the H-shaped vertical slot fishway is superior to the L-shaped vertical slot fishway in this case. However, based on the control indicator of fishway passage rate in the bio-hydraulic model test, the L-shaped vertical slot fishway has a higher passage rate than the H-shaped vertical slot fishway by 30%. Through analysis and comparison, it can be concluded that the theoretical research and practical experience of hydraulic based model testing methods are

收稿日期: 2025-06-09 录用日期: 2025-07-25

作者简介: 彭哲(1985—), 男, 正高级工程师, 从事水运工程建设管理工作。

relatively mature, with lower test costs, making it suitable for the verification design of relatively mature fishways. The bio-hydraulic model test method based on fish behavior is applicable to the design, research, and development of new fishways.

**Keywords:** vertical slot fishway; biohydraulics; model testing; environmental factors; evaluation indicator

为实现社会和经济发展的目的, 世界各地的江河湖泊建造了大量的水坝、泵站和水闸, 这些建筑物阻碍了鱼类迁徙。为了缓解这种情况, 人们修建过鱼设施以恢复河流的连通性。鱼道是过鱼设施中最常用的一种形式, 鱼道有多种类型, 包括竖缝鱼道、丹尼尔鱼道、堰式鱼道和涵洞鱼道等<sup>[1-2]</sup>。

鱼道形式的选择与过鱼对象有关<sup>[3-4]</sup>, 同时也与设计研究方法有关。以国内外运用较多的竖缝鱼道(vertical slot fishway, VSF)为例, 北美最早开发这种鱼道主要是考虑经济价值较高的鲑鱼洄游, 其设计和研究主要采用模型试验<sup>[5]</sup>、原型观测等方法<sup>[6-8]</sup>, 通过实践总结经验, 根据成功案例分析提出鱼道设计控制参数<sup>[9-10]</sup>。

澳大利亚在经历照搬北美鱼道设计参数和经验失败后<sup>[11-12]</sup>, 结合本土鱼类的行为特性做了大量探索和试验研究, 经过近三十年的努力取得了有效成果<sup>[13-14]</sup>。

目前我国鱼道设计主要参照国外设计资料及国内已建鱼道的设计经验, 鱼道的大部分设计研究建立在以水力学为基础的物理模型或数学模型基础上<sup>[15-17]</sup>并以此作为主要的设计依据<sup>[18-19]</sup>。近十几年国内也有不少研究团队参考国外先进理念和方法<sup>[20-21]</sup>, 结合本土鱼类特点开展生物水力学模型试验研究及原型观测<sup>[22-28]</sup>, 并在模型试验鱼的选择及游泳能力等方面做了大量的基础研究<sup>[29-31]</sup>, 促进了我国鱼道基础研究的进步和发展<sup>[32]</sup>, 但总体上我国在与鱼道相关的鱼类行为学基础研究方面还是比较薄弱<sup>[33]</sup>。

基于水力学的模型试验和基于鱼类行为学的

生物水力学模型试验是鱼道设计研究中常采用的两种方法, 但由于两种方法的关注点略有不同, 其评价指标和结论有时会出现差异, 采用哪种方法更为合理需要审慎考量。

本文以某内河航电枢纽已建标准的 L 形竖缝鱼道和我国自行研发的 H 形竖缝鱼道为例, 见图 1, 以鲤科鱼类为目标对象, 分别采用基于水力学的模型试验方法, 及基于生物水力学模型试验方法, 从水力学指标和鱼类行为学指标对两种试验方法和两种鱼道形式进行分析比较, 拟探讨试验方法对鱼道形式选择设计研究的有效性。

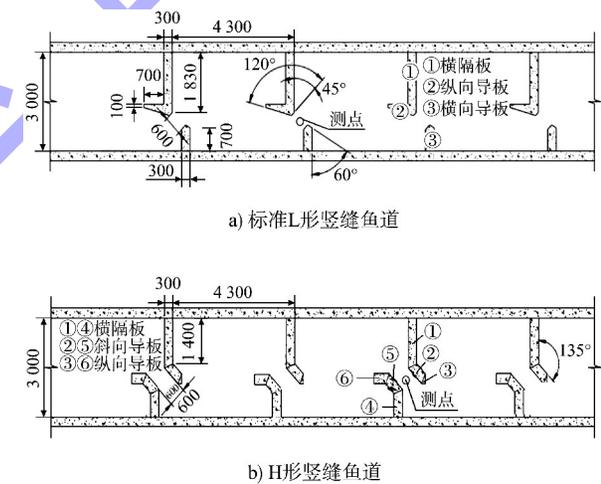


图 1 两种常用的竖缝鱼道形式(单位: mm)  
Fig. 1 Two commonly used types of VSF (unit: mm)

## 1 模型试验方法

### 1.1 水力学的模型试验方法

鱼道形式物理模型试验选择在室内变坡水槽中实施, 其水力学试验装置立面见图 2。水力学模型试验主要关注鱼道池室的竖缝流速、流态、池中水深、池间水位差、单位体积耗散率、流量系数等水力学参数。

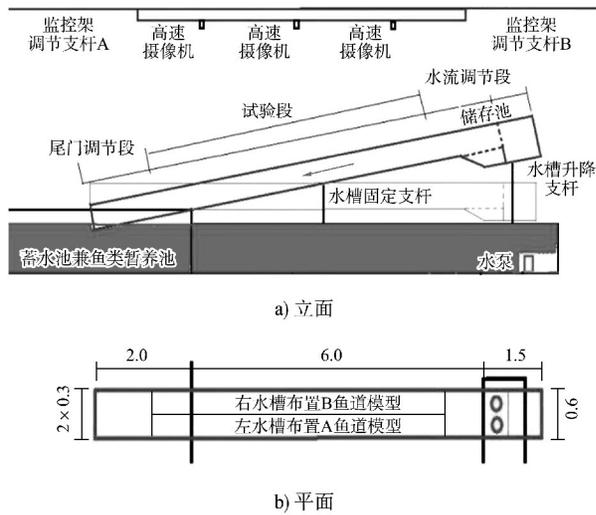


图 2 水力学试验装置(单位: m)  
Fig. 2 Hydraulic experimental device( unit: m)

根据试验水槽尺寸、研究内容以及模型试验要求, 本文研究选择模型几何比尺为 1:10, 依据模型相似原理, 物理模型试验各物理量比尺见表 1。

表 1 物理模型比尺  
Tab. 1 Physical model scale

相似性	比尺名称	公式	采用比尺
几何相似	平面(垂直)几何比尺	$\lambda_L$	10.00
水流连续性相似	水流时间比尺	$\lambda_t = \lambda_l^{1/2}$	3.16
重力相似	流速比尺	$\lambda_v = \lambda_l^{1/2}$	3.16
流量相似	流量比尺	$\lambda_Q = \lambda_l^{5/2}$	316.23
阻力相似	糙率比尺	$\lambda_n = \lambda_l^{1/6}$	1.47

### 1.2 生物水力学模型试验方法

生物水力学模型试验是在水力学模型试验的基础上, 采用活体鱼以观测目标鱼在鱼道内的行为特性。因影响鱼类行为的因素较多, 生物水力学模型试验要对试验环境进行严格的控制, 比如水质(试验水体的水温、水质、含氧量等)<sup>[34]</sup>、周围环境(气温、光线、噪声、人为干扰等<sup>[35-37]</sup>), 以保证试验的可靠性和稳定性。本次试验主要采用以下措施。

1) 建立一套适合试验鱼生存的仿自然水生态系统, 并将变坡水槽的试验水体与仿生态养鱼池水体同处于一个系统中。

2) 生物水力学模型试验的局限性在于, 在缩尺模型与鱼类行为之间尚未建立严格的数学关系<sup>[38]</sup>。因此在使用幼鱼开展生物水力学试验时,

需尽量采用大比尺的物理模型, 以减小缩尺对鱼类行为的影响。本次试验采用 1:10 比尺的正态物理模型。

3) 为进一步减少外部环境、时间季节、试验鱼个性等差异对试验结果的影响, 设计双水槽鱼道形式对比模型, 即在试验水槽中同时布置 2 个进行比选的鱼道形式, 水槽及系统布置平面见图 3。试验左水槽布置 A 模型(为 L 形竖缝式鱼道), 右水槽布置 B 模型(为 H 形竖缝式鱼道)。2 个模型上游段和下游段为共同水体, 以保证具有基本相同的边界条件和水流条件。

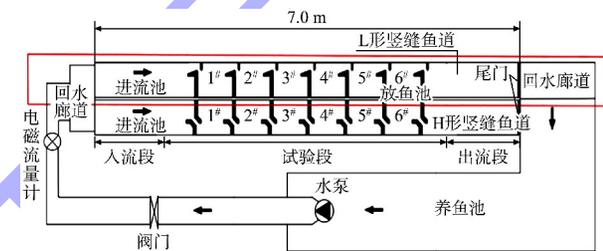


图 3 双水槽鱼道形式对比模型  
Fig. 3 Comparison model of double sink fishway types

4) 试验鱼选择。根据国内外同行的研究与实践, 试验鱼选择主要根据模型比尺、鱼道内及竖缝处设计流速、试验鱼与目标鱼的相似性、游泳能力以及试验鱼易获得性和环境适应性等因素选择。

依据《水利水电工程鱼道设计导则》中估算鱼类极限流速  $v_{max}$  公式:

$$v_{max} = 1.98 \sqrt{L_B} \quad (1)$$

式中:  $v_{max}$  为鱼类极限流速;  $L_B$  为鱼的体长。

根据成型幼鱼与成年鱼有相同的行为特征, 以及体形特征相似鱼类有相似的行为特征, 考虑内河航电枢纽鱼道的过鱼对象主要是鲤科鱼类, 该试验拟选取体长约为 7~12 cm 的草金鱼和草鱼的幼鱼替代主要的鲤科鱼类作为模型试验鱼。试验鱼的感应流速为 0.2~0.3 m/s, 喜好流速为 0.3~0.5 m/s, 极限流速  $v_{max}$  为 0.5~0.7 m/s。

5) 环境控制。系统由视频监控器、温度测定仪、pH 值测定仪、氧饱和度测定仪、光谱照度计、充氧气泵、加热器、循环变频水泵等设备及

系统组成。该研究试验溶解氧浓度控制在 7 mg/L 以上, pH 值控制在 7.00~8.00, 试验期间保持水温在 (20±2) °C。

6) 为获得可靠的、具有统计学意义的试验结果, 每个工况试验要保证足够的试验鱼数量。根据单个鱼道池室水体容积及试验鱼大小, 每组对比试验分别在 A 鱼道模型和 B 鱼道模型下游池室随机投放 16 条试验鱼, 放置 5~10 min, 使试验鱼适应水环境后开始试验, 试验结束后将试验鱼捞出放回到暂养池, 当天不再重复使用。

7) 因试验鱼的行为受较多因素影响, 有一定的随机性, 以及一些个性的差异, 因此对同一试验工况进行多次重复试验, 至少保证有 3 组试验结果的统计规律具有一致性。

### 2 试验结果分析

以湖南湘江流域某 2 个已建航电枢纽的 L 形和 H 形竖缝鱼道为研究背景, 以系列试验中坡比 1:70, 模型流量  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$  (原型流量  $0.88\text{ m}^3/\text{s}$ )、鱼道水深  $H$  为 11.4~11.7 cm 的工况为例, 进行鱼道水力学参数和鱼类行为学参数比较分析。

#### 2.1 水力学参数分析

竖缝流速、流态、单位体积耗散率是目前评价鱼道设计优劣的主要指标。该工况试验获得的主要水力学参数见表 2。试验工况 L、H 形竖缝式鱼道池室流态见图 4。

将该流态与竖缝式鱼道池室典型流态相比较, H 形鱼道池室主流弯曲度  $>B/2$  ( $B$  为鱼道池室宽度), 流态介于 PF2 型和 PF3 型流态之间, 主流呈现  $\Omega$  形分布。L 形鱼道池室主流弯曲度  $<B/2$  流态介于 PF1 型和 PF2 型流态之间, 主流呈现 S 形分布。

表 2 L 形和 H 形竖缝鱼道水力参数比较 (模型试验值)  
Tab. 2 Comparison of hydraulic parameters between L-shaped and H-shaped VSF (model test values)

鱼道形式	竖缝流速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	池室流态	池间水位差/m	池室水深/m	单位体积耗散率
L 形	0.412	FP1~FP2	0.008	0.114	2.47
H 形	0.351	FP2~FP3	0.007	0.117	2.76

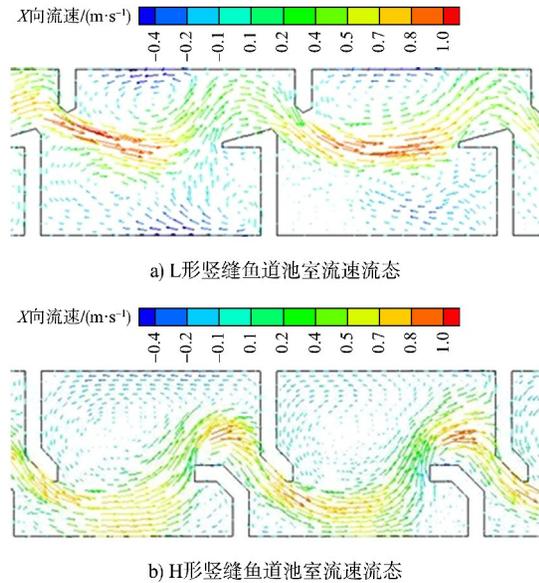


图 4 L 形和 H 形竖缝鱼道池室流态

(1:70,  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ , 池室水深  $H=11.4\sim 11.7\text{ cm}$ )  
Fig. 4 Flow state of L-shaped and H-shaped VSF pool chamber (1:70,  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=11.4\sim 11.7\text{ cm}$ )

综合分析比较, H 形竖缝式鱼道在几何边界约束下, 主流在池室蜿蜒路径长, 消效率高, 竖缝处流速为 0.351 m/s (原型流速 1.11 m/s), 小于同等条件下 L 形竖缝鱼道的竖缝处流速 0.412 m/s (原型流速 1.30 m/s, 小于极限流速), 由表 2 可知, 该案例 H 形竖缝式鱼道优于 L 形竖缝式鱼道。

#### 2.2 鱼类行为学参数统计分析

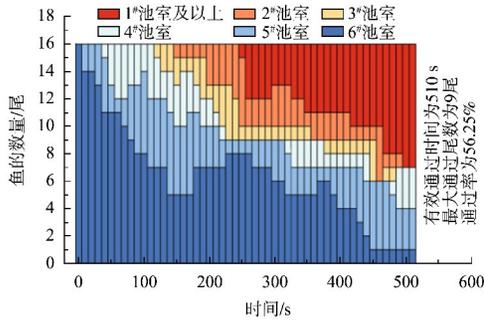
鱼道形式选择生物水力学模型试验, 选择鱼道通过率、通过时间、上溯过程时空分布等作为鱼类行为学参数。

为将试验鱼的通过率、通过时间、上溯过程时空分布等行为结果综合展现, 设计试验鱼上溯时空分布, 见图 5。每间隔 10 s 统计出柱状图, 表示在统计时段试验鱼在鱼道池室分布的位置和数量。

定义试验鱼上溯通过率  $R_p$  为:

$$R_p = \frac{N_s}{N_t} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $N_t$  为总试验鱼尾数;  $N_s$  为自主上溯至 1<sup>#</sup> 池室的试验鱼尾数;  $R_p$  为成功通过的试验鱼尾数占总试验鱼尾的百分比。



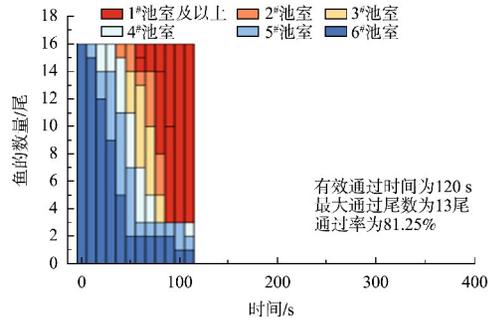
注: H形鱼道各池室内实验鱼尾数在通过时间上的分布情况(1:70,  $Q=12\text{ m}^3/\text{h}$ )。

图 5 试验鱼上溯时空分布

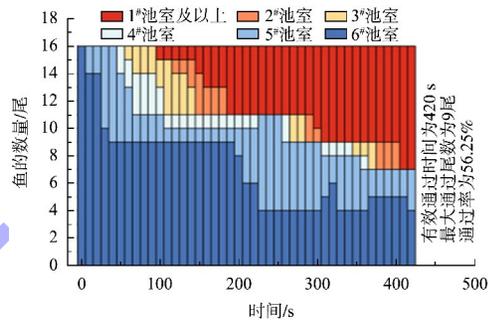
Fig. 5 Temporal and spatial distribution of upstream process of experimental fish

上溯通过时间  $T_p$  为试验鱼从试验计时开始至全部成功上溯的时间。或者试验鱼部分上溯成功, 此后一段时间成功上溯鱼的数量未再发生改变, 将达到这个数量时所对应的时间也定义为上溯通过时间  $T_p$  (在时空分布图中用试验“有效通过时间”表示区别)。

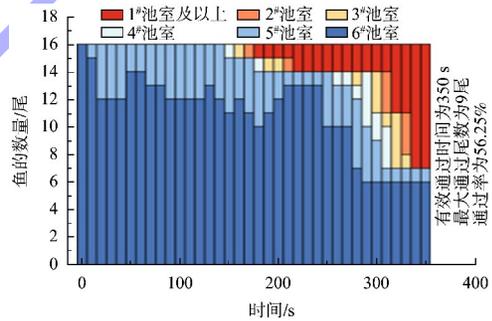
以鱼道坡比 1:70, 试验流量  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$  工况试验鱼上溯过程时空分布的结果为例, 见图 6, 对试验结果进行比较分析。



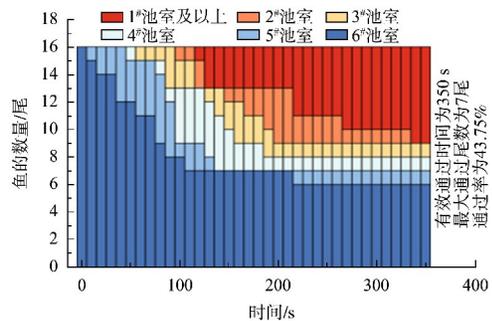
c) L形鱼道各池室内试验鱼尾数在通过时间上的分布情况 (12月3日, 1:70,  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ )



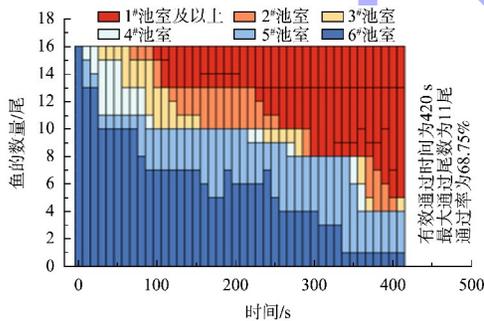
d) H形鱼道各池室内试验鱼尾数在通过时间上的分布情况 (10月5日, 1:70,  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ )



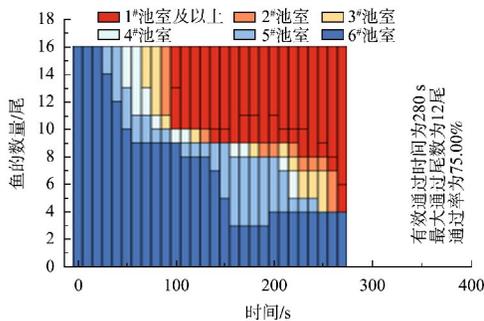
e) H形鱼道各池室内试验鱼尾数在通过时间上的分布情况 (10月30日, 1:70,  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ )



f) H形鱼道各池室内试验鱼尾数在通过时间上的分布情况 (12月3日, 1:70,  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ )



a) L形鱼道各池室内试验鱼尾数在通过时间上的分布情况 (10月5日, 1:70,  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ )



b) L形鱼道各池室内试验鱼尾数在通过时间上的分布情况 (10月30日, 1:70,  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ )

图 6 不同试验工况下试验鱼上溯时空分布  
Fig. 6 Temporal and spatial distribution of upstream process of experimental fish under different experimental conditions

1) 从不同时间的 3 场重复试验可以看出: 图 6a)~c) 显示 L 形鱼道试验鱼启动较快, 均有上溯积极的共性; 6d)~f) 则显示 H 形鱼道试验鱼启动较慢、在池室内徘徊时间较长。

2) 从同一试验场次两种不同形式竖缝鱼道的试验结果比较可以看出(相对应的两张图): 在同样的环境因素和水流条件下, L 形竖缝式鱼

道的通过率高于 H 形竖缝式鱼道。两种鱼道通过率和通过时间比较见表 3, 由表可知: L 形竖缝式鱼道平均通过率为 75.0%, 高于 H 形竖缝式鱼道的平均通过率 52.1%; 而 L 形竖缝式鱼道平均有效过鱼时间为 273.3 s(原型 14.4 min), 小于 H 形竖缝式鱼道有效过鱼时间 373.3 s(原型 19.7 min)。

表 3 L 形和 H 形竖缝式鱼道通过率和通过时间比较

Tab. 3 Comparison of fish passage rate and passage time between L-shaped and H-shaped VSF

工况	鱼道形式	通过率/%				有效时间/s			
		A 组	B 组	C 组	平均值	A 组	B 组	C 组	平均值
		2022-10-05	2022-10-30	2022-12-03		2022-10-05	2022-10-30	2022-12-03	
$Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=11.4\text{ cm}$	L 形	68.8	75.0	81.3	75.0	420	280	102	273.3
	H 形	56.3	56.3	43.8	52.1	420	350	350	373.3

综合比较, 所选工程案例的 L 形竖缝式鱼道过鱼效率高于 H 形竖缝式鱼道。

### 2.3 试验鱼行为分析

试验鱼在鱼道内的行为轨迹是反映鱼道池室水流条件和池室几何边界条件对试验鱼影响的最直观描述。提取的典型试验鱼行为轨迹见图 7, 可以看出: 该案例的 L 形竖缝鱼道试验鱼沿着主流很容易找到上溯方向, 偶尔进入主流右侧缓流区后也能很快顺着主流重新找到上溯方向; 而且试验鱼可以沿着竖缝处主流的左右两侧以爆发速度进入上一个池室。

而该案例的 H 形竖缝式鱼道, 试验鱼顺着 H 形竖缝加速突进上一个池室后, 大概率进入到主流左侧的回流区, 在这个区域由于大直径回流影响, 以及 H 形鱼道物理边界的影响, 试验鱼停留时间增加, 需要徘徊多次后才能重新找到主流和上溯方向; 而且试验鱼基本是沿竖缝左侧进入上一池室, 相较于 L 形竖缝式鱼道其上溯概率降低。这也是所选工程案例 H 形竖缝式鱼道试验鱼通过效率低于 L 形竖缝式鱼道的原因之一。

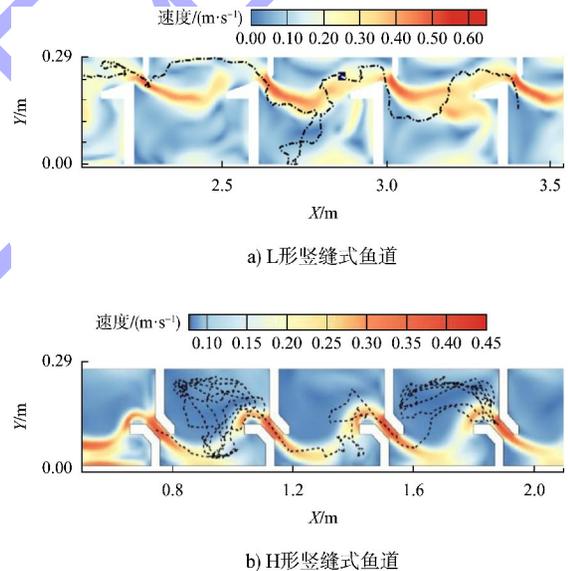


图 7 竖缝式鱼道典型试验鱼的行为轨迹  
(1:70,  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=11.4\sim 11.7\text{ cm}$ )

Fig. 7 Behavioral trajectory of typical experimental fish in VSF(1:70,  $Q=10\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=11.4\sim 11.7\text{ cm}$ )

### 3 结论

1) 对于国内外在理论研究和实践经验都比较成熟的鱼道(如标准的 L 形竖缝鱼道), 采用基于水力学的模型试验方法进行鱼道形式选择的设计和验证是较为经济和可行的方法。

2) 对于新开发的鱼道,模型试验除关注鱼道的水力学指标,更应重点关注目标鱼的行为学指标,只有将两者结合起来,才能更好地评价鱼道设计。H形竖缝鱼道水力学参数良好,可进一步采用基于鱼类行为学的生物水力学模型试验方法进行研究和完善。

3) 在使用幼鱼开展生物水力学试验时要尽量采用大比尺的物理模型,减小缩尺对鱼类行为的影响。

4) 生物水力学模型试验是解决鱼道问题较为有效的方法。只要严格控制试验现场的环境影响因素,采用正确有效的试验方法,就能获得比较可靠理想的试验结果。

#### 参考文献:

- [1] 李志华,王柯,刘绍平,等. 鱼道:设计、尺寸及监测[M]. 北京:中国农业出版社,2009.
- LI Z H, WANG K, LIU S P, et al. Fishway: design, dimensions, and monitoring [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2009.
- [2] Fish passage engineering design criteria[S]. Washington: U. S. Fish and Wildlife Service, 2019.
- [3] CLAY C H. 鱼道及其他过鱼设施的设计[M]北京:中国水利水电出版社,2016.
- CLAY C H. Design of fishways and other fish facilities[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016.
- [4] FUENTES-PÉREZ J F, GARCÍA-VEGA A, MARTÍNEZ DE AZAGRA PAREDES A, et al. A step forward in fishway engineering: validation and implementation of advanced algorithms for effective stepped fishway design, modeling, and retrofitting [J]. Heliyon, 2024, 10(4): e25996.
- [5] TARRADE L, PINEAU G, CALLUAUD D, et al. Detailed experimental study of hydrodynamic turbulent flows generated in vertical slot fishways[J]. Environmental fluid mechanics, 2011, 11(1): 1-21.
- [6] OVIDIOM, SONNY D, WATTHEZ Q, et al. Evaluation of the performance of successive multispecies improved fishways to reconnect a rehabilitated river[J]. Wetlands ecology and management, 2020, 28(4): 641-654.
- [7] MATTHEW L K, TAMI C C, MICHAEL A J, et al. Adult pacific lamprey passage: data synthesis and fishway improvement prioritization tools [R]. Iowa: Department of Fish and Wildlife Sciences College of Natural Resources, University of Idaho, 2012.
- [8] HAERY C, THIEM J D, HATIN D, et al. Fishway approach behaviour and passage of three redhorse species in the Richelieu River, Quebec. [J]. Environmental biology of fishes, 2016(99): 249-263.
- [9] RAJARATNAM N, KATOPODIS C, SOLANKI S. New designs for vertical slot fishways[J]. Canadian journal of civil engineering, 1992, 19(3): 402-414.
- [10] BARRETT J, MALLEEN-COOPER M. The Murray River's "Sea to Hume Dam" fish passage program: progress to date and lessons learned [J]. Ecological management & restoration, 2006, 7(3): 173-183.
- [11] MALLEEN-COOPER M, BRAND D A. Non-salmonids in a salmonid fishway: what do 50 years of data tell us about past and future fish passage? [J]. Fisheries management and ecology, 2007, 14(5): 319-332.
- [12] BAUMGARTNER L, ZAMPATTI B, JONES M, et al. Fish passage in the Murray-Darling Basin, Australia: not just an upstream battle [J]. Ecological management & restoration, 2014, 15(S1): 28-39.
- [13] MARTIN M C, BRENTON Z, IVOR S, et al. Innovative fishways-manipulating turbulence in the vertical-slot design to improve performance and reduce cost [R]. NSW: South Australian Research and Development Institute, 2008.
- [14] NEWBOLD L R. Experimental quantification of fish swimming performance and behavioural response to

- hydraulic stimuli: application to fish pass design in the UK and China [D]. Southampton: University of Southampton, 2015.
- [15] 陈明, 刘原, 段黎明, 等. 嘉陵江利泽航电枢纽工程鱼道进口水流条件数值模拟[J]. 水运工程, 2022(12): 152-157, 163.
- CHEN M, LIU Y, DUAN L M, et al. Numerical simulation of flow conditions near fish way entrance of Lize project in the Jialingjiang River [J]. Port & waterway engineering, 2022(12): 152-157, 163.
- [16] 罗琳, 刘慧芳. 株洲枢纽隔板式鱼道设计[J]. 水运工程, 2019(3): 52-55.
- LUO L, LIU H F. Design of diaphragm plate fishway of Zhuzhou junction [J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 52-55.
- [17] 薛正梅, 官志鑫, 刘博雅, 等. 大源渡枢纽扩建鱼道工程总体布置[J]. 水运工程, 2019(3): 56-61.
- XUE Z M, GUAN Z X, LIU B Y, et al. Overall layout of enlarged fishway construction of Dayuandu navigation & hydropower complex [J]. Port & waterway engineering, 2019(3): 56-61.
- [18] 贾召文, 黄子叶, 王猛, 等. 西藏扎拉水电站竖缝式鱼道池室水力特性研究[J]. 水利水电快报, 2024, 45(6): 69-75, 115.
- JIA Z W, HUANG Z Y, WANG M, et al. Research on hydraulic characteristics of vertical slot fishway pools of Xizang Zhala Hydropower Station [J]. Express water resources & hydropower information, 2024, 45(6): 69-75, 115.
- [19] 范穗兴, 蒋光灿, 黄天宝. 大藤峡水利枢纽南木江鱼道水力衔接段的研究应用[J]. 人民珠江, 2022, 43(12): 6-12.
- FAN S X, JIANG G C, HUANG T B. Research and application of the hydraulic connection section in Nanmujiang river fishway at Datengxia water conservancy project [J]. Pearl River, 2022, 43(12): 6-12.
- [20] KYNARD B, HORGAN M, PUGH D, et al. Using juvenile sturgeons as a substitute for adults: a new way to develop fish passage for large fish [J]. Journal of applied ichthyology, 2008: 1-21.
- [21] MARTIN-PODEVIN L. Does fishway passage success depend on individual phenotype? A study in three-spined sticklebacks [D]. Groningen: University of Groningen, 2022.
- [22] 李敏讷, 王妍, 王新源, 等. 鱼类行为生态水力学模型研究现状与发展趋势[J]. 湖泊科学, 2024, 36(5): 1323-1335.
- LI M N, WANG Y, WANG X Y, et al. Research status and trends of models integrating fish behavior and eco-hydraulic dynamics [J]. Journal of lake sciences, 2024, 36(5): 1323-1335.
- [23] ZHANG D, XU Y H, DENG J, et al. Relationships among the fish passage efficiency, fish swimming behavior, and hydraulic properties in a vertical-slot fishway [J]. Fisheries management and ecology, 2024, 31(3): e12681.
- [24] 石小涛, 邓星勇, 陈小龙, 等. 竖缝式鱼道内短须裂腹鱼上溯行为模拟[J]. 农业工程学报, 2025, 41(2): 175-184.
- SHI X T, DENG X Y, CHEN X L, et al. Simulation of the upstream behavior of *Schizothorax wangchiachii* in vertical slot fishway [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2025, 41(2): 175-184.
- [25] 宋韵涛, 曾令锋, 谭细畅, 等. 基于 PIT 技术的老口航运枢纽鱼道通行效率及鱼类行为分析[J]. 农业工程学报, 2024, 40(8): 216-222.
- SONG Y T, ZENG L F, TAN X C, et al. Passage efficiency and fish behavior of Laokou navigation junction fishway using passive integrated transponder (PIT) telemetry [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2024, 40(8): 216-222.

- [26] 金瑶,王翔,陶江平,等.基于PIT遥测技术的竖缝式鱼道过鱼效率及鱼类行为分析[J].农业工程学报,2022,38(4):251-259.  
JIN Y, WANG X, TAO J P, et al. Fish passage efficiency and fish behavior analysis in the vertical slot fishway using the PIT telemetry technology [J]. Transactions of the Chinese society of agricultural engineering, 2022, 38(4): 251-259.
- [27] CAO P, MU X P, LI X, et al. Relationship between upstream swimming behaviors of juvenile grass carp and characteristic hydraulic conditions of a vertical slot fishway[J]. Water, 2021, 13(9): 1299.
- [28] 李捷,李新辉,朱书礼,等.连江西牛鱼道过鱼效果及其影响因子研究[J].生态与农村环境学报,2019,35(12):1593-1600.  
LI J, LI X H, ZHU S L, et al. Study on the efficiency and influencing factors of xiniu fishway in the Lianjiang River[J]. Journal of ecology and rural environment, 2019, 35(12): 1593-1600.
- [29] 黄应平,蔡露,袁喜,等.鱼类行为研究与过鱼设施流速设计[M].北京:科学出版社,2020.  
HUANG Y P, CAI L, YUAN X, et al. Research on fish behavior and flow velocity design of fish passing facilities[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [30] 吴一红,穆祥鹏,韩瑞,等.基于鱼类游泳行为特性的鱼道水力学研究[M].北京:科学出版社,2023.  
WU Y H, MU X P, HAN R, et al. Research on fishway hydraulics based on fish swimming behavior characteristics[M]. Beijing: Science Press, 2023.
- [31] 石小涛,柯森繁,涂志英,等.鱼类游泳能力分析及在过鱼设施中的应用[M].北京:科学出版社,2024.  
SHI X T, KE S F, TU Z Y, et al. Analysis of fish swimming ability and its application in fish passing facilities[M]. Beijing: Science Press, 2024.
- [32] 石小涛.过鱼设施关键技术与实践[M].北京:科学出版社,2024.  
SHI X T. Key technology and practice of fish passing facilities[M]. Beijing: Science Press, 2024.
- [33] BAI R Q, LIU X H, LIU X F, et al. The development of biodiversity conservation measures in China's hydro projects: a review [J]. Environment international, 2017, 108: 285-298.
- [34] GUINY E, ERVINE D A, ARMSTRONG J D. Hydraulic and biological aspects of fish passes for Atlantic salmon [J]. Journal of hydraulic engineering, 2005, 131(7): 542-553.
- [35] TARENA F, COMOGLIO C, CANDIOTTO A, et al. Artificial light at night affects fish passage rates in two small-sized Cypriniformes fish [J]. Ecology of freshwater fish, 2024, 33(3): e12766.
- [36] WALTERS V. Body form and swimming performance in the scombroid fishes [J]. American zoologist, 1962, 2(2): 143-149.
- [37] LI G N, SUN S K, ZHANG C, et al. Evaluation of flow patterns in vertical slot fishways with different slot positions based on a comparison passage experiment for juvenile grass carp [J]. Ecological engineering, 2019, 133: 148-159.
- [38] 王宇,谭均军,刘振彪,等.鱼道水工模型及放鱼试验比尺效应研究[J].水利科学与寒区工程,2023,6(4):5-13.  
WANG Y, TAN J J, LIU Z B, et al. Study on hydraulic model of fishways and scale effect in hydrobiological test [J]. Hydro science and cold zone engineering, 2023, 6(4): 5-13.

(本文编辑 赵娟)