

# 基于数值模拟的鱼道竖缝宽度优化组合研究

翟雨恒

华北水利水电大学水利学院 河南郑州 450046

**摘要:** 鱼道是水利枢纽对原河道生态环境破坏的一种补偿工程。鱼类进入鱼道后的过鱼效率取决于鱼道内部的水力特性,主要包括流速、主流区分布、湍流分布等是否合理。其中在鱼道结构上竖缝宽度的布置对上述三个因素的影响较大。本研究给出了四种竖缝宽度优化组合的方案。经数值模拟后研究发现,在流速分布上,方案四的表现最为优良;在湍流动能和湍流强度分布上,方案四的表现较好。综上所述,方案四表现最佳,可以提升鱼道的过鱼效率。

**关键词:** 竖缝式鱼道; 数值模拟; 优化组合; 竖缝宽度

Study on the Optimization of Fishway Vertical Slot Width Combination Based on Numerical Simulation

Zhai Yu-heng<sup>1</sup>

(1.North China University of Water Resources and Electric Power, School of Water Conservancy, Zhengzhou Henan, 450046)

**ABSTRACT:** Fishways are compensatory projects for the ecological damage caused by hydraulic engineering to the original river channel. The efficiency of fish passage through the fishway depends on the hydraulic characteristics within the fishway, which mainly includes whether the flow velocity, the distribution of the main flow area, and the turbulence distribution are reasonable. Among them, the arrangement of the vertical slot width in the fishway structure has a significant impact on the above three factors. This study proposes four optimization combinations for the vertical slot width. After numerical simulation, it was found that in terms of flow velocity distribution, vertical slot scheme four performed the best; in terms of turbulent kinetic energy and turbulence intensity distribution, vertical slot scheme four also performed well. In summary, scheme four shows the best performance and can improve the efficiency of fish passage through the fishway.

**KEYWORDS:** Vertical slot fishway; Numerical simulation; Optimization combination; Vertical slot width

在鱼道设计过程中,确保鱼类顺利通过该结构的关键在于鱼道内部水池的流速和流态是否符合鱼类洄游习性的需求。有许多结构设计元素会影响到鱼道的水力学特性,包括隔板的设计、水面高度差、池体的尺寸比例、竖缝的间隙以及鱼道的倾斜角度等。在诸多影响要素之中,本研究焦点放在不同竖缝宽度配置下,鱼道内部水力特性如何变化。

对于结构优化方面的研究,中外学者对此展开诸多研究。Wu等<sup>[1]</sup>在不同流量和三种坡度条件下对鱼道的流动特性进行了探讨,识别出池室内有两种主要的流动模式(FP)存在。Tarrade等<sup>[2]</sup>发现放置圆柱体于池室中能有效缩小两个主要回流旋涡区的范围,从而为鱼类创造休息空间而避免它们受困于旋涡之中。Ballu等<sup>[3]</sup>的实验显示,通过调整水池的宽度、鱼道的坡度和底部的粗糙度,可以确认流动模式不仅显著受到坡度和水池宽度的影响,底面粗糙度也起着作用。同时,流量系数受到池室坡度与宽度的制约,而与流量大小和粗糙程度无明显关联。

对结构优化的研究主要是对池室的结构统一调整进行研究,较少涉及到对鱼道池室结构组合优化的研究。本研究将通过竖缝宽度

的组合对鱼道池室的布置进行优化组合研究其特性。

## 1 模型建立

### 1.1 原型设计试验参数

本研究主要以西藏某规划中的过鱼设施设计方案为研究对象,依照已完成的物理模型试验为原始数据,池室宽度  $B=2.00\text{m}$ ,长  $L=2.70\text{m}$ ,长宽比  $L/B=1.35$ ,底坡比降  $1.7:100$ ,竖缝宽度  $b=0.30\text{m}$ ,竖缝宽度与池室宽度比值  $b/B=1:9$ 。原设计物理模型几何比尺为  $1:10$ 。整体模型布置如下图1所示。

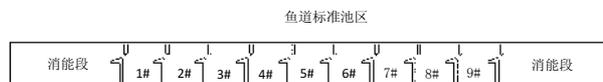


图1 鱼道数值模型布置

Fig 1 Fishway Numerical Model Layout

### 1.2 优化组合方案

此鱼道断面为矩形,隔板形式为竖缝式鱼道同侧竖缝形式。本研究设置以下四个组合方案进行研究,见下表1。本研究将使用数值模拟方法对不同竖缝宽度组合形式的水流结构进行研究,并进行定量比较分析。结合所得到的数据给出最优方案。

表 1 竖缝宽度优化组合比选方案

Tab 1 Selection Scheme for Optimal Combination of Vertical Slot Widths

序号	组合内容
方案一	所有竖缝宽度增加到 0.4m。
方案二	相邻竖缝宽度分别为 0.4m 和 0.6m。
方案三	从水流流入 1#标准池的竖缝起到水流流出 9#标准池的竖缝止，所有竖缝宽度从 0.4m 到 0.6m 等差排列，下一个竖缝宽度比相邻的上一个竖缝宽度增加 0.022m。
方案四	从水流流入 1#标准池的竖缝起到水流流出 9#标准池的竖缝止，所有竖缝宽度从 0.6m 到 0.4m 等差排列，下一个竖缝宽度比相邻的上一个竖缝宽度减小 0.022m。

1.3 优化模型建立

本研究所有模型，用 Space Claim 软件按照鱼道 1:1 原型大小尺寸进行建模，共模拟了九级池室。之后导入 fluent meshing 划分网格，生成多面体网格，模型网格数量超过 130 万。

1.4 边界条件

鱼道进口处边界条件假设为均匀流速分布，上游边界进口条件为压力进口，下游边界出口为压力出口，边壁面使用无滑移边界条件。具体设置参数见下表 2。

表 2 边界条件参数设置表

Table 2 Boundary Condition Parameter Setting Table

进口水深 (m)	进口流速 (m/s)	初始湍流强度 (%)	进口水力直径 (m)	出口水深 (m)	出口水力直径 (m)
2.15	0.143	8	2.73	1.88	2.61

2 数值分析

2.1 流速分析

本研究采用流体力学模拟计算软件 fluent 对方案一到方案四进行数值模拟计算，计算结果如下图所示。

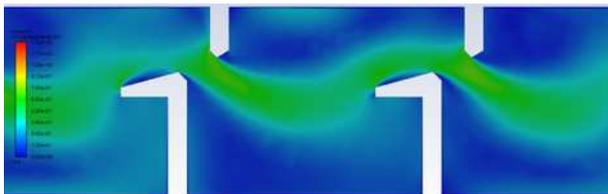


图 2 方案一速度云图分布示意图

Fig 2 Schematic Diagram of Velocity Distribution for Plan 1

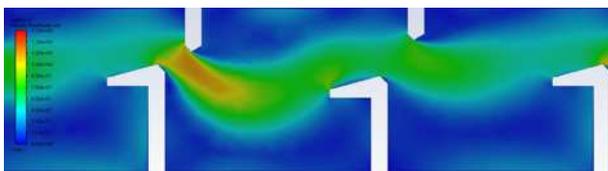


图 3 方案二速度云图分布示意图

Fig 3 Schematic Diagram of Velocity Distribution for Plan 2

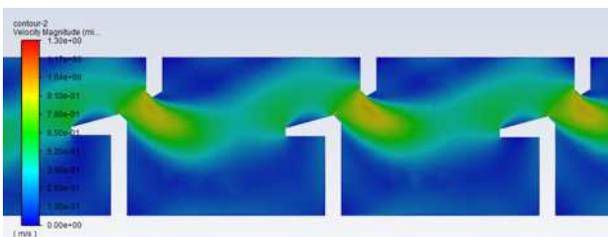


图 4 方案三速度云图分布示意图

Fig 4 Schematic Diagram of Velocity Distribution for Plan 3

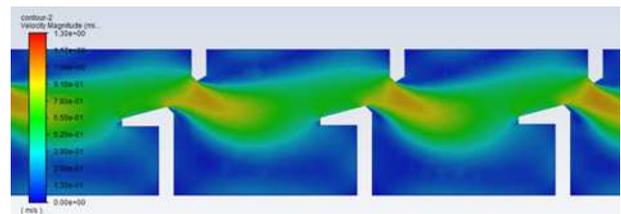


图 5 方案四速度云图分布示意图

Fig 5 Schematic Diagram of Velocity Distribution for Plan 4

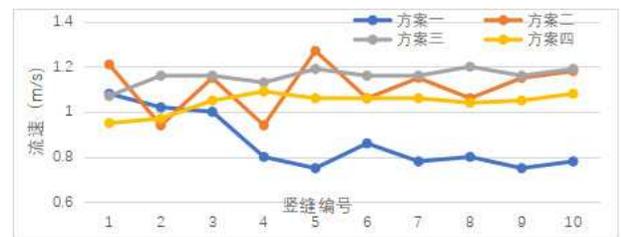


图 6 四种方案竖缝处的流速分布图

Fig 6 Velocity distribution diagram at the vertical joint of four schemes

由图 2-图 5 可知：方案一主流区流速呈现为中间向两侧递减趋势，符合水力学水流运动规律，且主流区流速平稳；方案二流速分布是一个标准池的主流区扩大，临近的标准池的主流区变小，这与竖缝宽度 0.4m 和 0.6m 交替设置有关；方案三主流区的范围稳定，与回流区的边界区分明显，适合让洄游性鱼类找到主流区完成洄游行为；方案四主流区的分布规律与方案三相仿，只是随着竖缝宽度的等差减小，主流区有增大的趋势，但增加的较为缓慢，整体仍呈

现对称分布的状态。

由图 6 可知：方案一竖缝流速整体趋势为由上游向下游依次递减。最大测量的流速达到了 1.2m/s，此速度超过了大多数洄游性鱼类的极限爆发游泳速度；方案二竖缝处的流速分布成折线分布；方案三竖缝处流速分布均匀，速度起伏较前两个方案都小，最大流速达到 1.1m/s，小于大多数洄游性鱼类的极限爆发游泳速度 1.2m/s，适合大多数鱼类完成洄游行为；方案四竖缝处的流速整体趋向于逐渐增大的状态，最大流速达到 1.1m/s，此流速分布有利于洄游性鱼类在最开始时有充足的体力经过鱼道进口附近的标准池，而随着其体力的下降，鱼道内的最大流速也在缓慢降低，自适应鱼类逐渐降低的极限游泳速度，让鱼类越游越轻松，最后成功完成洄游行为。

综上所述，四种方案从流域分布和流速大小角度分析，可以看出，方案三和方案四的流域分布更有规律，流速变化更小，更适合鱼类洄游，理论上可以增加鱼道的过鱼效率。

### 2.2 湍流动能分析

水流的湍流动能和湍流强度的大小对鱼类的洄游行为有着一定的影响力。湍流动能较高，会延长鱼类成功通过鱼道的时间，进而影响鱼道的过鱼效率。本小结以所得数据为基础，从标准池内的湍流动能分布和湍流强度两个方面，定性分析竖缝宽度优化组合的竖缝式鱼道标准池所表现的水力特性。以方案三和方案四模拟结果为例，结果分布如下图所示。

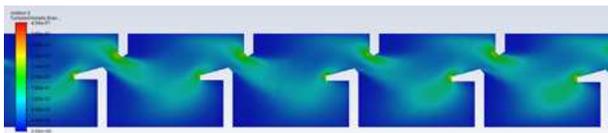


图 7 方案三湍流动能云图

Fig 7 Turbulent kinetic energy cloud map for four conditions of Plan 3

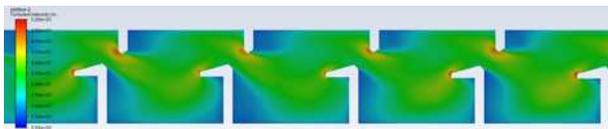


图 8 方案三湍流强度云图

Fig 8 Turbulence intensity cloud map of Plan 3

由图 7 和 8 可知，方案三湍流动能和湍流强度的分布与主流区分布相一致，但范围更大。湍流动能随竖缝宽度的等差增大呈现逐渐增大的趋势，湍流动能达到了最大值超过了  $0.5\text{m}^2/\text{s}^2$ ，同时湍流强度也是随着流量的增大逐渐开始出现集中点，最大值接近 50%，区域集中在隔板和导流桩附近，区域较小。整体湍流动能和强度分布较为规律，从分布上分析，适宜鱼类的洄游行为；但整体平均值过高，达到了  $0.3\text{m}^2/\text{s}^2$ ，会使鱼类消耗更多的体力，增加洄游失败的概率。

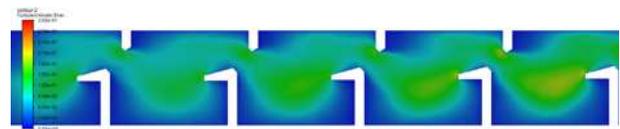


图 9 方案四湍流动能云图

Fig 9 Turbulent kinetic energy cloud map for four conditions of Plan 4

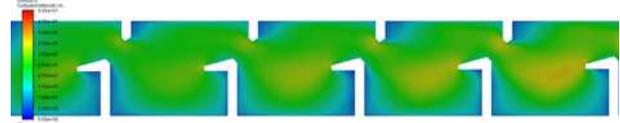


图 10 方案四湍流强度云图

Fig 10 Turbulence intensity cloud map of Plan 4

由图 9 和 10 可知，方案四的湍流动能和湍流强度分布呈现从上游到下游逐渐增大的趋势，而增大也在一定范围，湍流动能最大值达到了  $0.24\text{m}^2/\text{s}^2$ ，湍流强度接近 40%，湍流动能平均值在  $0.2\text{m}^2/\text{s}^2$  左右。从分布和数值上看都是较为适宜鱼类洄游的区间，能够增加鱼道得鱼效率。

综上所述，从湍流角度分析，最佳的为方案四，接近鱼类洄游最适宜的数据区间。综合考虑，因为竖缝宽度（b）/池室宽度（B）的大小没有达到合适的比例导致模拟的湍流数值未达到理想值。不过总体来看，竖缝宽度优化组合对改善鱼道的湍流分布和大小起到了一定的作用。

### 3 结论

本研究通过使用数值模拟的方法，提出了四种竖缝宽度的组合优化方案，初步得出以下结论：

（1）通过对四种竖缝宽度优化组合的数值模拟，所得数据表明：在流域和流速分析上，方案四表现优良，整体有益于鱼类的洄游行为；

（2）从湍流动能和湍流强度的角度分析，方案四表现较好。这需要通过其他结构优化方案改善，总体而言，四种优化方案中，方案四表现最佳，可以提升鱼道的过鱼效率。

### 参考文献：

- [1]WU S, KATOPODIS C, RAJARATNAM N. Structure of flow in vertical slot fishway[J]. Journal of hydraulic engineering, 1999, (4) : 125.
- [2]TARRADE L, TEXIER A, DAVID L, et al. Topologies and measurements of turbulent flow in vertical slot fishways[J]. Hydrobiologia, 2008: 609.
- [3]BALLU A, CALLUAUD D, PINEAU G, et al. Experimental study of the influence of macro-roughnesses on vertical slot fishway flows[J]. Houille Blanche, 2017, (2) : 9-14.