



墩柱截面优化对鱼类迁徙效率的影响研究

谭洁¹, 陈斌²

(1. 长江航道勘察设计院(武汉)有限公司, 湖北 武汉 430000;

2. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 为解决鱼道内鱼类迁徙效率低的问题, 通过数值模拟分析不同墩柱截面形状对水力特性和鱼类迁徙潜力的影响。采用 6 种墩柱形状, 包括传统的矩形墩柱和 5 种改进的流线形墩柱, 对比分析其对鱼道主槽内流速分布和鱼类迁徙效率方面的影响。研究表明, 流线形墩柱能显著减少鱼道内的漂浮碎屑堆积, 降低水流阻力, 从而优化主槽流速, 特别是在 K1 形状的墩柱设计下, 主槽的最大流速有效降低, 使得绝大多数目标鱼种的迁徙成功率提升至 97%。相比之下, 传统矩形墩柱的设计导致主槽流速较高, 鱼类迁徙效率较低, 迁徙成功率远低于改进后的设计。在城市区域, 流线形设计的鱼道能够在有限的空间和资源条件下, 发挥更好的生态作用, 为城市河流生态修复和生物多样性保护提供技术支持。

关键词: 鱼道设计; 墩柱形状; 数值模拟; 鱼类迁徙

中图分类号: U611

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)09-0197-08

Influence of pier section optimization on fish migration efficiency

TAN Jie¹, CHEN Bin²

(1. Yangtze River Waterway Survey and Design Institute(Wuhan) Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: To solve the problem of low fish migration efficiency in fish passages, this study analyzes the effects of different pier cross-sectional shapes on hydraulic characteristics and fish migration potential through numerical simulation. The study uses six pier shapes, including traditional rectangular piers and five improved streamlined piers, and compares and analyzes their effects on flow velocity distribution and fish migration efficiency of the main channel of the fishway. Research results show that streamlined piers can significantly reduce the accumulation of floating debris in the fishway and reduce water flow resistance, thereby optimizing the flow rate of the main channel. Especially under the K1-shaped pier design, the maximum flow rate of the main channel is effectively reduced, making the migration success rate of most target fish species has increased to 97%. In contrast, the design of traditional rectangular piers results in higher flow velocity in the main channel, lower fish migration efficiency, and much lower migration success rate than the improved design. In urban areas, streamlined fish passages can play a better ecological role under limited space and resource conditions, providing technical support for urban river ecological restoration and biodiversity protection.

Keywords: fishway design; pier shape; numerical simulation; fish migration

随着人类活动对自然环境的干扰日益加剧, 河流及其生态系统正面临前所未有的威胁。河流流域内的水利设施虽然在调控水资源、发电和防

洪方面发挥了重要作用, 但它们对河流生态系统的连通性造成了显著影响^[1]。这些结构通常通过拦蓄水流形成阻碍, 直接威胁鱼类的自然迁徙,

收稿日期: 2024-12-17

作者简介: 谭洁 (1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为港航工程与材料。

导致鱼类种群数量锐减,从而打破生态平衡。为应对这一挑战,鱼道作为一种生态工程解决方案被广泛应用,其目的是在水利设施的影响下恢复鱼类迁徙路径,保障河流的生物多样性^[2-3]。

鱼道的设计旨在为鱼类提供安全的迁徙通道,尽可能减少人为障碍对鱼类迁徙的影响。当前鱼道的运行效果常因设计和维护不当而受到限制^[4]。漂浮碎屑,尤其是木质碎屑和人为垃圾的堆积,是鱼道运行中面临的主要问题之一。这些碎屑的滞留不仅会堵塞鱼道通道,导致水流条件发生变化,还会增加设备的维护成本,甚至完全阻断鱼类的迁徙路径。由于空间和基础设施的限制,自然型鱼道的应用难以推广,技术型鱼道成为一种必要的折中选择,但技术型鱼道本身在水流稳定性、迁徙效率和维护成本等方面仍然存在诸多改进空间^[5]。

针对鱼道内漂浮碎屑堆积问题,桥墩设计的相关研究提供了一些有价值的思路。王彪等^[6]的研究表明,墩柱的截面形状对水流和碎屑运动有显著影响。传统的矩形墩柱易形成涡流,增加碎屑滞留的概率,而圆形或流线形墩柱则能够减少涡流强度,有助于降低碎屑堆积风险。然而,桥墩设计的这些优势在鱼道中尚未被系统性地研究和验证^[7]。同时,鱼道的设计和优化还需充分考虑鱼类的游泳能力和迁徙需求。鱼类的游泳速度可分为持续速度和爆发速度,其中爆发速度是鱼类克服鱼道内高流速区域的关键能力。为了确保鱼类顺利通过鱼道,鱼道的最大流速必须低于目标鱼种的爆发速度。近年来,李渊等^[8]、熊瑛等^[9]、田佳丽等^[10]已开发出一系列迁徙潜力评估方法,通过分析鱼类游泳能力与鱼道内水力条件的匹配程度,评估鱼道对多种鱼类的适用性。但由于鱼道设计的复杂性和实际运行中的碎屑堆积问题,目前的研究尚未完全解决鱼类迁徙成功率较低这一难题。

本研究以珠江流域的技术型鱼道为研究对象,采用数值模拟方法,分析传统矩形墩柱与改进后的流线形墩柱在鱼道内的水力表现和鱼类迁徙潜

力上的差异。研究选取 6 种墩柱截面形状,重点考察主槽内的最大流速、流量分配以及不同鱼种的迁徙成功率。通过引入流线形墩柱设计,本文试图解决鱼道运行中碎屑堆积与迁徙效率之间的矛盾,旨在为鱼道设计提供新思路,并为恢复河流生态连通性的目标提供技术支持。

1 试验方案

1.1 试验地点

试验研究在珠江中部的鱼道进行,所选鱼道采用垂直槽设计。鱼道结构上由多个交叉墙分隔,见图 1,主要槽口交替设置于相邻交叉墙中,每段由长 6 m 的独立室隔开。鱼道主体包括 1 个上游进口室和 9 个独立室,总长 67 m,宽 4.5 m,纵向坡度 2.2%。交叉墙由 5 个尺寸为 0.50 m × 0.64 m 的矩形墩柱构成,从主槽口算起,编号为 R1~R5,其高度分别为 11.8、0.6、1.8、1.2、1.8 m。

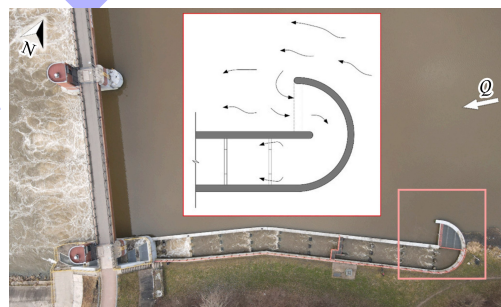


图 1 鱼道平面布置

Fig. 1 Layout of fishway

在 2019—2023 年期间对鱼道进行的现场检查中,观察到在垂直槽之间有漂浮碎屑沉积。这些碎屑主要由木质碎屑组成,也包括漂浮在水面上的人为污染物,如木板、家具面板、塑料袋、塑料瓶等物品。研究鱼道在 4 年期间的状况见图 2。



a) 2019年



b) 2020年

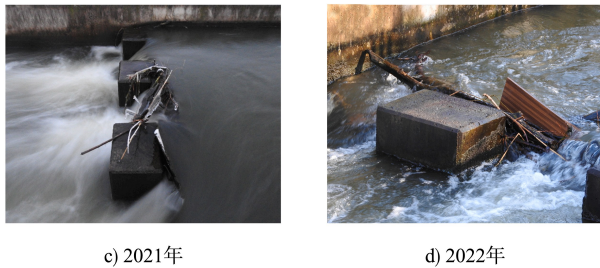


图 2 鱼道内堆积的漂浮物和木质碎片
Fig. 2 Floating objects and wood debris accumulated in fishway

1.2 鱼类的游泳能力

鱼类的游泳能力通常通过流速指标表征, 包括诱导速度 U_{ind} 、临界游泳速度 U_{crit} 和爆发速度 U_{burst} 。 U_{ind} 为鱼类能够感知水流方向的最低流速, 反映其对水流变化的反应能力, 基于鱼类的趋流性, 不同物种间有所差异。 U_{crit} 为鱼类在有氧状态下使用红肌维持的最大可持续游泳速度, 反映鱼类的持续游泳能力。 U_{burst} 为鱼类在紧急情况下使用无氧白肌所能达到的最高速度, 仅能维持极短时间。鱼道设计通常假设最大水流速度为 2 m/s。针对珠江中上游的目标鱼种, 鱼道设计需满足这些物种的迁徙需求。鱼道垂直槽内允许的最大流速应与目标鱼种的 U_{burst} 相匹配, 以确保至少 90% 的鱼类能够顺利通过, 区域内常见鱼类的游泳能力见表 1^[11-13]。

表 1 不同鱼类的游泳能力

Tab. 1 Swimming ability of different fishes

种类	$U_{crit}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$U_{burst}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$
海鲢鱼	0.90~1.50	2.00~2.50
鲢鱼	1.30~6.40	2.00~9.30
海鳊鱼	0.96~2.95	2.00~4.00
褐鳊鱼	0.80~1.00	1.37~9.30
文鳊鱼	0.50~1.50	2.00~3.30
鲮鱼	-	0.93~4.32
白鲮	-	2.62
拟鲤	-	0.77~1.53
雅罗鱼	-	0.46~2.40
河鲈	0.42~0.49	1.08~1.45

1.3 Iber 软件

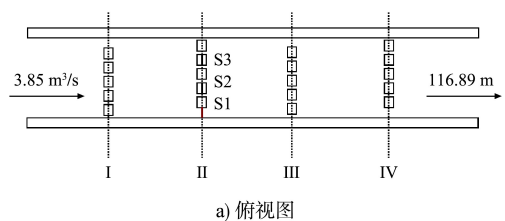
Iber 软件是一款将欧拉水动力学模拟方法与拉格朗日方法相结合的综合工具, 专用于分析水体动力学和木质碎屑输运过程。其核心基于浅水

方程, 能够模拟水动力行为, 并进一步整合了湍流和泥沙输运模型。本研究采用 Iber 软件模拟鱼道内的水动力条件和漂浮碎屑的运动轨迹。通过该软件, 可以清晰地分析水流与碎屑的分布特点, 为优化鱼道设计、减少碎屑堆积的影响提供数据支持。借助 Iber 软件的高精度模拟能力, 本研究进一步探讨不同环境条件下鱼道内水流特性和碎屑传输的动态变化, 验证设计参数对鱼类迁徙和鱼道通畅性的潜在影响。

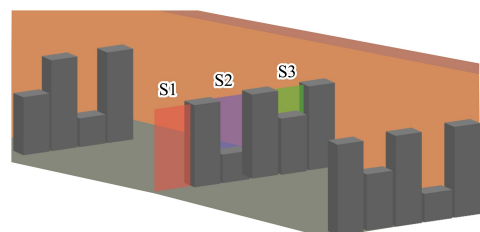
1.4 数值模型

为加快计算速度并节约计算资源, 从整体结构中选取一个包含 4 排交叉墙的特定段落作为研究对象。该段落的边界条件与整体模型在标称参数下的条件保持一致。入口边界条件设定为强制流量, 流量值为 $3.85 \text{ m}^3/\text{s}$; 出口边界条件设定为水位高程 116.89 m。

在模型空间中划分 3 个区域, 分别为 S1、S2 和 S3, 见图 3。S1 为主槽口截面, 宽 0.80 m, 主要用于鱼类迁徙; S2 为中间间隙截面, 宽 1.50 m, 设有水下墩柱 R2; S3 为侧间隙截面, 宽 1.75 m, 包括水下墩柱 R4 及墩柱 R5 与墙体之间的间隙。研究假设漂浮碎屑由于浮力作用主要在水面移动, 而墩柱高出水面的部分最容易捕获碎屑。基于此假设, 对模型段落进行计算和测量。



a) 俯视图



b) 模型

图 3 3 个区域的横截面

Fig. 3 Cross section of three parts

1.5 网格收敛性与优化

利用数值模型的网格细化方法计算网格收敛指数(grid convergence index,GCI)评估最佳网格密度的标准是计算网格数量对主槽(S1 区)中第 2 排交叉墙的最大速度影响是否达到独立性。研究在参考工况 K0 下进行 6 种网格尺寸的计算,包括最小元素尺寸小于 0.010 m 的细网格和最大单元尺寸为 0.20 m 的粗网格。GCI 分析表明,随着网格

密度的增加,计算结果的精度得到提升,从而验证了合理选择网格尺寸对模拟可靠性的必要性。GCI 计算结果(表 2)明确了网格细化在数值建模中的重要作用,并强调了计算效率与结果精度之间平衡的重要性。当网格尺寸为 0.020 m 时,GCI 评估表明计算结果已处于预期的渐近收敛范围内,进一步细化网格的需求较低。

表 2 模型中各墩形的水力参数
Tab. 2 Hydraulic parameters of various pier shapes in the model

编号	最大网格尺寸/m	区域	流量/($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	深度/m	平均速度 $v_{\text{mean}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	最大速度 $v_{\text{max}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	鱼道内平均深度/m
K0	0.200	S1	1.73	1.48	1.76	2.20	1.58
		S2	1.21	1.49	1.06	1.63	
		S3	0.91	1.53	0.69	1.62	
K1	0.150	S1	1.53	1.33	1.50	1.68	1.35
		S2	1.27	1.30	1.21	1.08	
		S3	1.05	1.28	1.03	2.02	
K2	0.100	S1	1.75	1.37	1.56	2.77	1.42
		S2	1.16	1.36	1.07	1.70	
		S3	0.94	1.34	0.93	2.57	
K3	0.050	S1	1.69	1.38	1.51	1.66	1.41
		S2	1.26	1.37	1.07	1.82	
		S3	0.90	1.36	0.79	2.01	
K4	0.030	S1	1.74	1.38	1.59	1.70	1.43
		S2	1.24	1.36	1.12	2.06	
		S3	0.87	1.41	0.72	1.84	
K5	0.010	S1	1.40	1.30	1.50	1.88	1.38
		S2	1.21	1.34	1.30	2.09	
		S3	1.24	1.30	0.87	2.19	

2 分析与讨论

2.1 垂直槽内的流速

通过数值建模分析鱼道在无墩柱间碎屑阻塞情况下的水力参数,以及装置在自然尺度下的运行条件。由于研究采用分离研究段的方法,水力条件会与整体装置略有不同。为尽量减少研究范围限制的影响,研究空间内设置 4 排交叉墙。数值研究提供了鱼道内的水力条件数据,特别是墩柱间的空间,重点分析主槽(S1 区)。其中,最大流速是关键参数,因为它决定了鱼类能否通过。在水深和流速分析中,通过计算标准差量化测量

值的变异性,并通过置信区间确定真实均值可能的范围。对于每个截面和形状,以 63 个样本点为基础,计算自由度后得出结果。第 1 排交叉墙直接接收入口强流,流速波动较大,而第 3 排及以后的区域,由于受到计算域边界设置的影响,水力条件与实际情况存在一定偏差。相比之下,第 2 排交叉墙位于这些区域之间,流速和压力分布较为均匀,且前一排交叉墙的作用使其流动模式更加稳定。为尽量减少前一排交叉墙对第 2 排的影响,模型设置中对入口条件和边界条件进行了优化,验证表明,前一排交叉墙的局部涡流对第 2 排交

叉墙整体流速分布的影响较小,能够满足研究的精度需求。鱼道结构中的墩柱形状见图4。

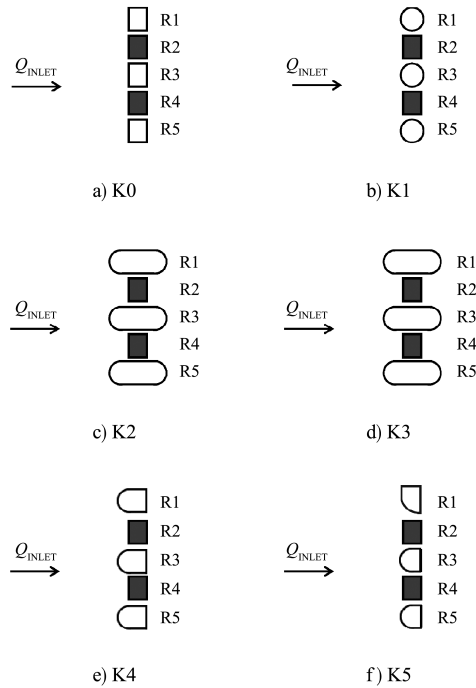


图4 鱼道中的墩柱形状
Fig.4 Pier shapes in fishway

数据分析显示,不同鱼道结构形状下的水流特性存在显著差异。在S1区中,形状K0的最大流速为2.20 m/s,为最高值;形状K4的最大流速为1.66 m/s,为最低值。对于K0、K2、K3和K4形状,水流分布在主槽(S1)、中间间隙(S2)和侧间隙(S3)的比例分别为44%、31%、25%。而对于K1,三者比例分别为39%、39%、28%;K5则显示了更均匀的分布,分别为36%、31%、33%。第2排交叉墙的速度分布情况见图5,表明测量截面前后区域的速度分布对室内各测量截面的流速有影响。

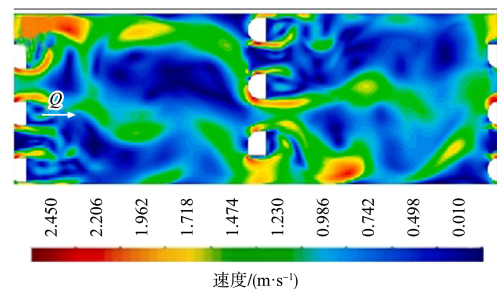
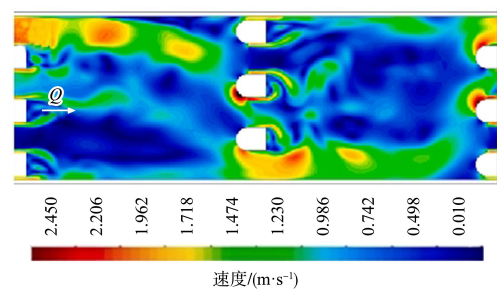
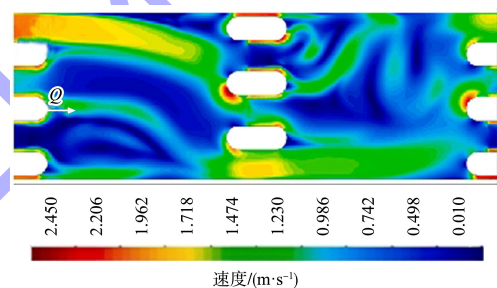
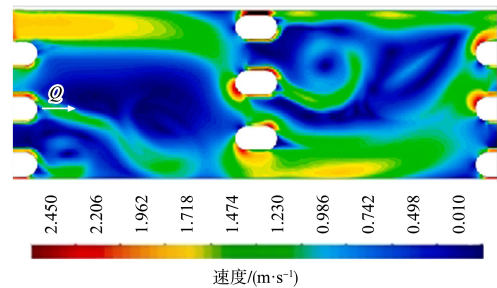
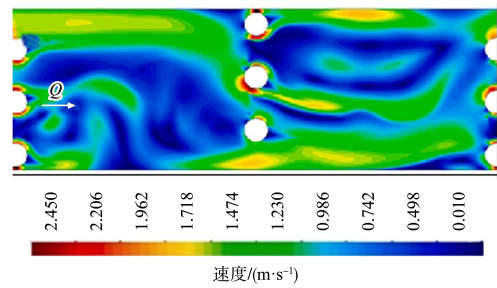
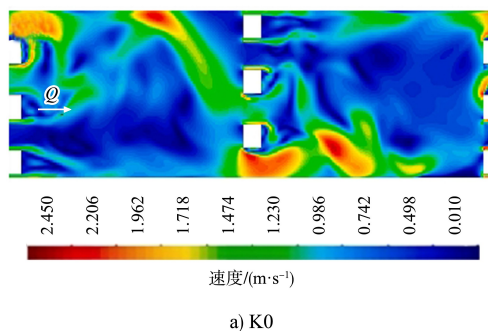


图5 各墩形的速度分布

Fig.5 Velocity distribution of various pier shapes

为确保分析结果的代表性与稳定性,对 S1 区的异常值和极端值进行剔除,使用 Statistica 软件进行统计分析,计算中位数、四分位距及 10%~90%百分位,统计分析结果见表 3 和图 6。在形状 K1 中,S1 区流速的稳定性最高,没有观察到异常值或极端值,数据均处于正常范围内。而在参考形状 K0 和 K5 中,存在大量极端值和异常值,表明流速变化较大,流动条件不够稳定。研究认为,第 2 排交叉墙的水力条件最接近真实工况,因此表 3 列出了所有墩柱形状(K0~K5)在第 2 排交叉墙的结果,不同形状的垂直槽流速结果显示,形状 K0 的流速变化范围最广,最低为 0.48 m/s,最

高为 2.20 m/s,中位数为 1.91 m/s,显示出较大的流速动态变化;相比之下,形状 K1 的变化范围最小,仅为 1.28~1.68 m/s,中位数为 1.50 m/s,表明其流动模式较为稳定。形状 K5 尽管流速范围较大(0.18~1.88 m/s),但其中位数为 1.61 m/s,与其他形状中位数相当,说明其流动特性存在一定的独特性。S1 区的流速分析结果表明,最大流速不得超过 2 m/s。参考形状 K0 未能满足此要求,而其他 5 种形状配置的流速均未超过设定的上限。从鱼类游泳能力的分类来看,仅修改后的形状 K1~K5 对鲑鱼类鱼种有利。

表 3 各墩形流速分布统计结果
Tab. 3 Statistical results of velocity distribution of various pier shapes

墩形编号	流速/(m·s ⁻¹)							
	平均值	中位数	最小值	最大值	下四分位数	上四分位数	10%分位数	90%分位数
K0	1.76	1.91	0.48	2.20	1.76	2.02	0.97	2.13
K1	1.50	1.50	1.28	1.68	1.37	1.63	1.31	1.67
K2	1.56	1.56	1.25	1.70	1.53	1.63	1.45	1.69
K3	1.51	1.55	0.99	1.66	1.44	1.65	1.35	1.66
K4	1.59	1.61	1.09	1.70	1.58	1.68	1.47	1.70
K5	1.50	1.61	0.18	1.88	1.57	1.66	1.02	1.81

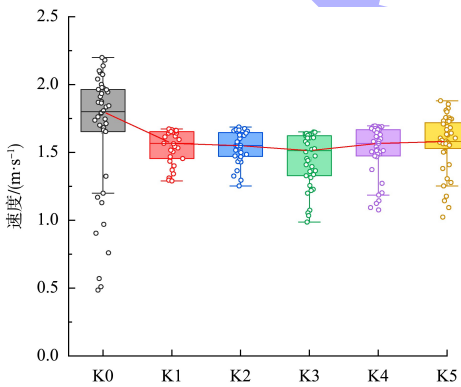


图 6 鱼道 S1 截面速度
Fig. 6 Velocity at section S1 of the fishway

2.2 迁徙潜力

为比较鱼道中不同墩柱形状对主槽测量截面流速的影响,采用四分位数作为中心测度。由于在自然条件下无法验证,靠近鱼道墙体和墩柱附近出现的极端值并不可靠,这些极端值通常是由水流受障碍物影响而引起的局部扰动现象。为避

免这些异常数据对结果的影响,研究采用 25%~75%四分位区间作为高质量数据的评估范围。

鱼类通常依靠爆发速度通过垂直槽,因此在主槽 S1 区中, U_{burst} 被视为目标鱼种的关键参数,超出该速度范围,鱼类将难以克服水流阻力。结合主槽中测量截面的最大和最小流速,与目标鱼种的 U_{burst} 范围进行对比,生成迁徙潜力图,并划分出 3 种迁徙可能性类别:1) 失败。当鱼类的最大游泳速度小于或等于槽内的最小流速($U_{burst,max} \leq v_{min}$),鱼类无法通过垂直槽。2) 可能。当鱼类的最大游泳速度大于槽内的最小流速,或者其最小游泳速度小于或等于槽内的最大流速($v_{min} < U_{burst,min}$ 或 $U_{burst,min} \leq v_{max}$),鱼类可能有部分通过的机会。3) 成功。当鱼类的最小游泳速度大于槽内的最大流速($U_{burst,min} > v_{max}$),鱼类能够顺利通过垂直槽。

为了便于分析,x 轴流速限值为 3 m/s,结果

显示,对于鲟鱼、鲑鱼、海鲂、文鳊鱼和鲂鱼,修改后的鱼道墩柱形状(K1~K5)创造了有利的水力条件,使这些鱼类能够无障碍迁徙。在这些形状中,主槽内的最大流速未超过鱼类的最小游泳速度。相比之下,设计形状K0的最大流速超出了目标鱼种 U_{burst} 范围的3%,使部分鱼类通过主槽时可能面临困难,仅能被归类为“可能”。

对于褐鳟鱼,K0的水力条件最为不利,近5%的游泳能力无法克服主槽中的流速。修改形状后(K2~K5),“失败”比例降至1%~3%,而K1的“失败”比例为0%,表明鱼类的最大爆发速度高于主槽最小流速。在K1和K2条件下,褐鳟鱼的迁徙成功率提高到97%,而K0仅为92%。

鲂鱼的游泳能力相对较低,在K0形状中,24%的条件属于“失败”,8%属于“可能”,仅68%属于“成功”。修改形状后,K1~K5的“成功”比例提高至78%~79%,其中K1的“失败”比例最低,仅为13%,而K2~K5的“失败”比例为15%~18%。对于鲑鱼,K1、K3和K5的流速过高,不满足其迁徙条件。尤其是K1和K3,分别有21%和12%的游泳条件被归类为“可能”。类似的情况也出现在河鲈中,K1和K3的“可能”比例分别为21%和4%。对于白鲟,K2、K4和K5形状下“失败”比例占55%~57%，“可能”占5%，而“成功”占37%~39%。在设计形状K0中，“失败”比例高达67%，“可能”占13%，仅20%属于“成功”。而在K1和K3中，“失败”比例降至50%以下，“可能”比例为11%~13%，“成功”比例提升至39%。

综上,所有5种改进后的墩柱形状均显著提升了鱼道的迁徙效率。其中,K1形状的墩柱表现最优,能够实现绝大多数目标鱼种的无障碍迁徙。根据本研究提出的迁徙潜力评估标准,K1形状的最大流速范围最小,并表现出较高的迁徙成功率。这一改进主要归因于墩柱形状优化后降低了S1区的最大流速,同时改变了槽间流量分配比例,从而优化了整个鱼道内的速度分布。K3形状在本研究中同样表现出良好的效果,进一步证明流线形墩柱设计的潜力。

2.3 技术型鱼道的应用潜力

尽管仿自然鱼道因其更接近自然生态的特性,在恢复河流生态连通性方面具有明显优势,但在高度城市化区域,由于空间和基础设施限制,仿自然鱼道的实施往往受到制约,技术型鱼道因此成为一种必要的替代方案。本研究通过对墩柱形状的优化设计,显著改善了技术型鱼道的水力性能和鱼类迁徙潜力。

研究表明,采用圆形截面和其他流线形截面设计的墩柱能够有效降低主槽的最大流速,从K0的2.20 m/s降至1.50~1.68 m/s,迁徙成功率由K0的92%提升至K1的97%。相比之下,传统矩形墩柱最大流速范围广,且超过部分鱼类的爆发游泳速度,无法满足多种鱼类迁徙的需求。在城市化环境中,通过技术型鱼道的优化设计,不仅能够提升鱼类的迁徙能力,还能延长鱼道的有效运行周期,减少对运维资源的依赖。

3 结论

1) 流线形墩柱能够有效减少鱼道内漂浮碎屑的堆积,优化鱼道内的水力条件。研究表明,改进后的墩柱形状(K1和K3)显著降低了主槽的最大和平均流速,减少了碎屑阻塞的风险,并延长了鱼道在标称条件下的运行周期。

2) 改进后的墩柱形状提升了鱼类的迁徙成功率,特别是K1形状能够满足绝大多数目标鱼种的迁徙需求。相比传统矩形墩柱设计,K1和K3形状优化了主槽内流速分布比例,使鱼类迁徙成功率提高至97%,并减少了迁徙失败率,体现了流线形设计在改善鱼道迁徙功能中的重要作用。

3) 尽管仿自然鱼道在生态功能上更具优势,但在城市化区域,技术型鱼道是不可或缺的替代方案。本文研究可以为城市环境限制下优化鱼道功能提供了可行的技术路径,具有推广价值。

4) 本文研究为鱼道墩柱形状优化提供了理论支持和技术参考,提出了针对鱼道碎屑滞留问题的解决方案,同时验证了改进设计对鱼类迁徙潜力的提升效果。

参考文献:

- [1] 黄涌增, 祝龙, 刘大雷, 等. 基于鱼类分布与水力特性的鱼道进口布置方案比选[J]. 水运工程, 2023(4): 116-122.
HUANG Y Z, ZHU L, LIU D L, et al. Comparison and selection of fishway entrance layout schemes based on fish distribution and hydraulic characteristics [J]. Port & waterway engineering, 2023(4): 116-122.
- [2] 班朝军, 金志军, 单承康, 等. 龙溪口航电枢纽仿自然鱼道设计[J]. 水运工程, 2023(10): 65-69.
BAN C J, JIN Z J, SHAN C K, et al. Simulated natural fishway design of longxikou navigation-power junction[J]. Port & waterway engineering, 2023(10): 65-69.
- [3] 陈磊, 谭均军, 石小涛, 等. 组合隔板式鱼道水力特性数值模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2021, 38(9): 86-91.
CHEN L, TAN J J, SHI X T, et al. Numerical simulation of hydraulic characteristics of combined baffle type fishway[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2021, 38(9): 86-91.
- [4] 刘桂泽, 程东昱, 张建海, 等. 管型座基础应力状态及损伤特性分析[J]. 四川轻化工大学学报(自然科学版), 2022(2): 85-92.
LIU G Z, CHENG D Y, ZHANG J H, et al. Analysis of force and damage characteristics of tubular seat foundation[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering(natural science edition), 2022(2): 85-92.
- [5] 朱海峰, 刘流, 路波, 等. 鱼类下行过坝相关工程措施综述[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(10): 33-37.
ZHU H F, LIU L, LU B, et al. A review of fish passage facilities for downstream migrants[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2015, 32(10): 33-37.
- [6] 王彪, 刘军, 杨帅. 桥墩柔性防撞装置设计及数值分析[J]. 机电工程, 2016, 33(1): 30-36.
WANG B, LIU J, YANG S. Flexible anti-collision device design and numerical analysis on viaduct pier[J]. Journal of mechanical & electrical engineering, 2016, 33(1): 30-36.
- [7] 朱世洪, 王智娟, 黎贤访, 等. 仿自然通道及鱼道池室结构布置研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(12): 48-52.
ZHU S H, WANG Z J, LI X F, et al. Pool structure of nature-like and technical fish passage [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(12): 48-52.
- [8] 李渊, 温一琳, 李海, 等. eDNA 技术在深远海鱼类多样性研究中的应用潜力[J]. 上海海洋大学学报, 2024, 33(5): 1238-1247.
LI Y, WEN Y L, LI H, et al. Potential use of environmental DNA technology in oceanic fish diversity study [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2024, 33(5): 1238-1247.
- [9] 熊瑛, 刘洪波, 汤建华, 等. 耳石微化学在海洋鱼类洄游类型和种群识别研究中的应用[J]. 生命科学, 2015, 27(7): 953-959.
XIONG Y, LIU H B, TANG J H, et al. Application of otolith microchemistry on reconstruction of migratory patterns and stock discrimination in marine fishes [J]. Chinese bulletin of life sciences, 2015, 27(7): 953-959.
- [10] 田佳丽, 王银平, 李佩杰, 等. 长江近口段近岸段鱼类群落多样性现状[J]. 上海海洋大学学报, 2021, 30(2): 320-330.
TIAN J L, WANG Y P, LI P J, et al. Species diversity of fish in the section near the Yangtze River estuary [J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2021, 30(2): 320-330.
- [11] 郑金秀, 韩德举, 胡望斌, 等. 与鱼道设计相关的鱼类游泳行为研究[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(5): 104-110.
ZHENG J X, HAN D J, HU W B, et al. Fish swimming performance related to fishway design [J]. Journal of hydroecology, 2010, 3(5): 104-110.
- [12] CHEN X F, LIU S K, WANG Y M, et al. Restoration of a fish-attracting flow field downstream of a dam based on the swimming ability of endemic fishes: a case study in the upper Yangtze River basin [J]. Journal of environmental management, 2023, 345: 118694.
- [13] YANG H L, SHEN L, HE Y F, et al. Status of aquatic organisms resources and their environments in Yangtze River system(2017-2021)[J]. Aquaculture and fisheries, 2024, 9(5): 833-850.

(本文编辑 王传瑜)