

基于生物多样性保护的泵型研究与探讨

张仁田^{1,2}, 张德胜³, 潘 强³, 朱 峰¹

(1. 江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127;

2. 江苏省平原地区水利工程技术研究中心, 江苏 扬州 225127;

3. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 江苏 镇江 212013)

摘要: 泵站工程建设的同时必须考虑生物多样性, 适于鱼类的洄游和迁徙, 保证鱼类自然生态系统的可持续性。以某低扬程泵站为工程案例研发灯泡贯流泵的水力模型, 通过分析影响鱼类友好型水泵研发的机械结构、流体动力学和生物学三大因素, 提出基于生物多样性保护的鱼类友好型水泵优化设计的两类目标函数。

关键词: 水泵; 生物多样性; 鱼类友好型; 水力性能

中图分类号: TV675

文献标识码: A

文章编号: 1007-7839(2024)09-0018-0006

Research and discussion on pump types based on biodiversity conservation

ZHANG Rentian^{1,2}, ZHANG Desheng³, PAN Qiang³, ZHU Feng¹

(1. Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China;

2. Jiangsu Provincial Technology Research Center for Plain Water Engineering, Yangzhou 225217, China;

3. Research Center of Fluid Machinery Engineering and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: At the same time as the construction of pump station projects, biodiversity must be considered, suitable for the traveling back and migration of fish, to ensure the sustainability of the natural ecosystem of fish. A hydraulic model of bulb tubular pump was developed using a low lift pump station as an engineering case. By analyzing the mechanical structure, fluid dynamics, and biology factors that affect the development of fish friendly water pumps, two types of objective functions for optimizing the design of fish friendly water pumps based on biodiversity conservation were proposed.

Key words: water pump; biodiversity; fish friendly; hydraulic performance

水利水电工程在防洪、灌溉、供水、发电、航运、生态和旅游等诸多方面, 对于保障社会安全、促进经济发展发挥了巨大的作用。这些工程设施的建设和运行, 对于河流生态系统具有双重影响。跨流域调水能够为干旱、半干旱地区的植被和生物提供

较为稳定的水源, 也有可能对沿线生态系统造成一定影响^[1]。一方面, 由于流体机械兼具电力生产与能源使用的双重作用, 亟须研究适应未来能源系统特征的先进流体机械技术, 还需通过技术创新来实现节能降耗^[2]。另一方面, 在水生生态系统中,

收稿日期: 2024-05-16

基金项目: 江苏省水利科技项目(2021007); 2022年度水利部重大项目(SKS-20220115)

作者简介: 张仁田(1964—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事水利勘测设计研究工作。E-mail: r_zhang@yzu.edu.cn

输水河湖是各类生物群落的栖息地,为生物栖息提供复杂多变的生境,是鱼类、无脊椎动物等生存繁殖的基本条件和水生植物生长的基础,也是生物多样性保护的重要载体,河流的流量、流速、水深、水温和水文周期以及输水设施水泵等,都直接影响生物栖息地质量。因此,先进、高效、生态友好的流体机械技术对维持生物多样性具有重要的支撑作用。

相关研究^[3-5]系统概述了包括抽水蓄能电站在内的水电站技术优势与应用现状,总结了水轮机及水泵水轮机过鱼机制与常见鱼类损伤类型,归纳了现有的鱼类保护措施与方法,开展基于机械工程、流体力学、生物学的跨学科研究,进一步加强鱼类友好型水泵水轮机研发。

1 鱼类友好型水泵研发的内容

虽然鱼类友好型水泵的设计概念从理论上来说是合理可行的,但是在提高水泵过鱼能力的同时能否确保水泵的流量,以及是否能提高水泵的运行效率和减小鱼类通过水泵时的死亡率,可以借助于先进的数值模拟技术和模型试验进行优化设计,同时还需通过开展现场试验加以验证。鱼类友好型水泵的研发涉及机械结构、流体力学以及生物学等多学科的交叉融合。

1.1 机械结构方面

为了尽可能地减小间隙水流对鱼类生存的影响,相关研究提出去除轴流式水泵轮毂、叶片和叶轮室间的间隙。从结构上来看,实现的难度比较大。因为对于叶片全调节水泵而言,需要调整其叶片的安放角方能提高运行效率,而叶片安放角的调整离不开调整机构,调整机构又是安装于轮毂内,因此,叶片与轮毂之间就不可避免地存在一定的间隙。由于叶片与叶室分别为转动部件与固定部件,两者在结构上必定会有间隙存在。因此,根据实际状况,只能优化结构设计才能使间隙尽可能减小,从理论上来说,可以达到减小剪切力和空蚀的目的,但是从运行效率和结构要求上却较难实现。

最小间隙转轮(MGR)的研制也成为能源机构关于先进水轮机系统计划项目的一部分。最小间隙转轮叶片采用全球形轮毂体设计,这样在整个叶片节距调节范围内,其设计间隙是常值。除了能够提高鱼类的存活率,这种最小间隙的设计还能给水轮机发电效率带来益处^[6]。涡旋形水轮机(Vortex

Turbine)是另一种轴流式过鱼水轮机,这种水轮机没有传统水轮机中容易伤害鱼群的固定导叶与活动导叶,而是以涡旋形的外壳代之,这样可以使水流以适当的进水角度流入转轮而不至于伤害鱼群。该水轮机转轮有3个等厚叶片,叶片之间的流道比较大,高速水流区比较小,从而使鱼群可以安全通过转轮。该水轮机的尾水管设计为直管,有利于鱼群安全通过。

1.2 流体力学方面

验证鱼类友好型水泵的流道是否适宜鱼类生存,就必需对水泵的流场进行数值模拟,以确立水泵内部水力特性与鱼类存活率的对应关系。随着计算流体力学(CFD)的发展,对水泵全流道进行定常与非定常的流场数值模拟计算已成为水泵流场研究的主要手段,能够比较精确地模拟水泵流场在某些工况下的速度和压力分布状况^[7]。然而,水泵内水力特性与鱼类死亡率的关系,目前尚无确切的定论。

国外有专家曾将幼鱼放入水下有不同喷嘴直径的湍流水槽中,以确定剪切应力对幼鱼伤害的极限值。在该试验中运用了雷诺平均模型来模拟水泵的过流流道,从而预估鱼类在通过水泵某一运行工况时的死亡率。试验结果与预估值差异较大,试验结果表明,鱼类死亡率并不仅仅取决于某一种水力特性,而是多种因素的综合作用结果。因此,综合考虑水泵流道的各种水力特性对鱼类存活率的影响,还需要开展进一步的研究。

1.3 生物学方面

在特定的水泵水力特性和流道尺寸条件下,不同的鱼体通过水泵的存活率并不相同,这也取决于鱼的种类、大小以及鱼类通过水泵的路径。对养殖鲫鱼、野生鲫鱼和黄颡鱼等3种鱼类的试验研究表明^[8],养殖鲫鱼的生存率明显低于野生鲫鱼和黄颡鱼,尤其是在负压条件下生存率急剧下降。通过解剖发现,不同鱼类受到伤害的部位包括鱼鳃、眼球、鳍、表皮等存在差异。国外泵站对鱼类通过后的损伤及死亡情况进行了监测,发现鱼类损伤率随着泵流量的降低和转速的增加而增加,鱼类在通过轴流泵后死亡的比例远大于混流泵和离心泵。因此,在设计鱼类友好型水泵时,还需要从生物学的角度来确定水力特性导致各种鱼类受伤害的程度和死亡的极限值,水泵性能设计也仅能针对某些通过水泵的鱼种展开。此外,鱼体通过水泵流道的路径也是影响水泵过鱼能力的重要因素,为此,还应当从生

物技术的角度来考虑诱导鱼类在通过水泵时应采取的最安全的路径^[9]。

2 水力性能和鱼类通过性能的多目标优化

目前,大型水力机械研究多以提升水力性能为目的,而综合考虑水泵性能指标和鱼类损伤的多目标优化研究却较少。对叶片式轴流泵而言,提升鱼类通过性能的措施往往与改善水力效率的措施背道而驰,如何兼顾两者,开发运行效率较高、空化性能优且对环境影响小的鱼类友好型水泵,是大型泵站群向生态友好水利方向转变和发展的重点。

2.1 建立鱼类死亡率叶片撞击数学模型

在轴流式水泵中,叶片撞击是造成鱼类受损的主要因素。为了预估鱼类的撞击概率,叶片撞击模型^[10]简单方便,但忽略了鱼类与流场相互作用对损伤评估的影响,且无法反映鱼体在流场中的真实运动行为。鱼体在流道中的运动本质上是流固耦合问题,可以基于CFD-DEM耦合模拟的方法,通过鱼体在轴流泵中的运动,分析鱼体在流场中的运动行为及撞击损伤情况。

2.1.1 流体控制方程

在模拟过程中遵循流场内质量、动量和能量守恒,不考虑能量传递和耗散所涉及的温度变化。流体视为不可压缩连续介质,采用RANS方程求解。流体控制方程表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f \bar{u}_f) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho_f \bar{u}_f) + \nabla(\rho_f \bar{u}_f \bar{u}_f) = \\ -\nabla p + \nabla[(\mu_f + \mu_t)(\nabla \cdot u_f + \nabla \cdot u_f^T)] + \rho_f g + F \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ_f 为流体密度; \bar{u}_f 为流体平均速度; t 为时间; p 为压力; g 为重力加速度; μ_f 为流体动力黏度; μ_t 为流体湍流黏度; F 为其他作用力共同作用的合力。

2.1.2 鱼形颗粒运动方程

鱼体在流场中不会自主运动,只受到流场的作用力。根据牛顿第二运动定律,鱼形颗粒群求解方程式表示为

$$\begin{cases} m_p \frac{du_p}{dt} = F_d + F_g + F_c \\ I_p \frac{d\omega_p}{dt} = \sum T_t + \sum T_i + \sum T_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: m_p 为颗粒质量; u_p 为鱼体颗粒速度; F_d 为流场对鱼体颗粒作用的曳力; F_g 为鱼体粒子重力和浮力

的总和; F_c 为鱼类颗粒群间撞击产生的接触力; I_p 为转动惯量; ω_p 为颗粒角速度; T_t 为流体力转矩; T_i 为切向力转矩; T_r 为滚动摩擦力转矩。

2.1.3 叶片撞击模型

以鱼体通过叶片进口处过流断面所需时间 t_t 与叶片通过时间 t_b 表征叶片撞击概率,计算式为

$$P_{th} = \frac{t_t}{t_b} = \min\left(1, \frac{k_r L_f A_1 z n}{600 Q}\right) \quad (3)$$

式中: P_{th} 为叶片撞击概率; k_r 为修正系数; L_f 为鱼长; A_1 为过流断面面积; z 为叶轮叶片数; n 为转速; Q 为流量。

采用 f_m 表征鱼类受到叶片前缘撞击后的死亡比率,计算式为

$$f_m = \left[a_1 \ln\left(\frac{L_f}{d}\right) + b_1 \right] (v_s - 4.8) \quad (4)$$

式中: f_m 为鱼类受到叶片前缘撞击后的死亡比率; a_1 、 b_1 为系数; d 为叶片前缘后厚度; v_s 为撞击速度。

该预测模型本质是叶片撞击概率鱼撞击死亡率的乘积在半径方向的面积分,计算式为

$$P_{sur} = 1 - \frac{1}{A_1} \int_{R_{th}}^{R_{ti}} P_{th} f_m(r) 2\pi r dr \quad (5)$$

式中: P_{sur} 为鱼类存活率; r 为叶片半径; d 为叶片厚度; R_{th} 为轮毂半径; R_{ti} 为轮缘半径。

2.2 鱼类友好型水泵叶轮设计

采用优化设计、模拟计算、流场分析和参数修正的迭代过程,对初始设计的水力性能和空化性能进行优化,以达到与原型泵相同的水平并满足使用要求;采用叶片撞击模型计算鱼类友好型轴流泵在一定流量、扬程范围内的鱼类死亡率,分析撞击概率和撞击死亡率降低的原因。

基于大量研究得出的影响鱼类友好型水泵叶轮水力性能的主要几何参数(图1),选取叶轮侧弦高 L_2 、轮毂侧弦高 L_3 、轮毂侧进口冲角 i_{hub} 、轮缘侧进口冲角 i_{shr} 、轮毂侧滑移 r_{hub} 、轮缘侧滑移 r_{shr} 、环量系数 k_e 、包角 θ_2 以优化叶轮效率及扬程。在鱼类友好型设计方面,叶片前缘倾斜和大前缘厚度可以提高鱼类叶片撞击存活率。采用螺旋形叶片前缘可大幅降低撞击速度,提高鱼类受到叶片撞击后的存活率。

水泵的鱼类通过性能与叶轮处过流断面面积有关,因此选取轮毂半径 L_1 、轮毂侧叶片厚度 L_4 、轮缘侧叶片厚度 L_5 、前掠角 θ_1 、前伸角 θ_3 来优化水泵的鱼类通过性能。图1中 β_1 为轮毂侧叶片进口安放角且等于液流角 β'_1 与冲角 i_{hub} 之和,优化时通过控制冲角大小来调整叶片进口安放角的值。

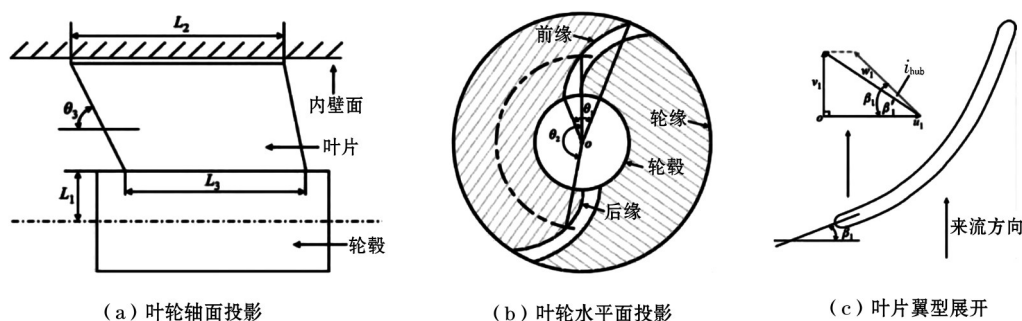


图1 轴流泵几何参数

2.3 鱼类友好型水泵导叶设计

在叶片泵系统中,液流和鱼类在叶轮中被加速后以更快的速度冲向导叶(叶片式扩压器),且常见的叶轮叶片数和导叶数的组合为7/12、5/8和3/5,更多的导叶片造成更多的撞击损伤,因此在泵系统中,导叶撞击造成的鱼类损伤不可忽视。叶片撞击包括鱼类与动叶片前缘和静导叶前缘的撞击,在叶片撞击模型中,撞击概率和撞击损毁率是影响鱼类死亡率的两大因素,根据对虹鳉鱼类进行的一系列实验,发现造成鱼类死亡的临界撞击速度为4.8 m/s。在低于该速度时,无论叶片前缘厚度与鱼体长度的比值为多少,叶片撞击可能造成鱼体损伤但并不导致鱼类死亡。

旋转叶轮与静止导叶之间的剪切作用会像剪刀一样切割鱼体,通常来说,增加叶轮与导叶之前的间隙使其大于鱼体长度时,不再发生剪切作用,但这意味着泵的尺寸和水力损失大幅增加。一个显而易见的例子就是鳗鱼,实际情况中无法达到间隙尺寸大于鳗鱼尺寸,但是可以通过优化设计降低剪切概率。

当鱼类顺着流线运动时,若叶轮前缘处没有发生撞击,由于相对位置不发生改变,鱼体在叶轮内的运动不会接触叶片,当运动至叶片后缘处时,同样不发生碰撞,在这种情况下即使与导叶前缘碰撞,也不会产生剪切力。因此,剪切作用的前提是鱼类与叶轮前缘产生撞击,并顺着叶片工作面相对滑动至后缘,在鱼体离开叶片后缘的过程中若接触

到导叶前缘,则产生剪切作用。

因此,减低导叶内鱼类损伤的方式包括减少导叶的叶片数、增加间隙比和弯掠导叶前缘等,具体方式的采用可结合叶轮优化设计综合确定。

3 方案拟定与初步研究成果

3.1 方案拟定

以南水北调东线二期工程某泵站为研究背景,该泵站设计扬程 $H=3.15$ m、单机流量 $Q=64$ m³/s,初步拟定采用灯泡贯流泵、变频调速的方案,设计工况下的效率不低于83%,装置型式如图2所示,预想性能曲线如图3。鱼类友好型水泵研发确定的目标是在改善鱼类通过性能的同时维持泵的水力性能达到原有要求。不同方案模型泵基本参数如表1所列,选取 $L_1=75$ mm, $L_1/D=1/4$,方案1、方案2和方案3分别为考虑效率最优、鱼类存活最优和两者兼顾的方案。

优化设计后的叶轮叶片数从常规的4片减少为2片、导叶片数保持7片,但前缘弯掠发生改变。叶轮对比如图4所示。

3.2 水力性能

鱼类友好型叶轮的扬程-流量曲线明显优于常规叶轮,主要是叶片数减少,过流面积增大。但在最优工况附近效率明显低于常规叶轮,这是需要进一步优化设计的工作。方案1的最优效率可达到84.5%,方案2仅为78.1%,方案3最优效率为83.6%,达到了不小于83%的预期目标。

表1 不同方案叶片参数

方案	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	$i_{\text{hub}}/(^{\circ})$	L_4/mm	L_5/mm	$\theta_1/(^{\circ})$	$\theta_2/(^{\circ})$	$\theta_3/(^{\circ})$
方案1	47.9	176.9	150.9	-7.5	4.7	3.6	41.2	181.8	65.9
方案2	42.7	177.1	161.9	-5.4	7.2	6.1	47.1	167.3	52.8
方案3	44.5	185.4	159.0	-6.0	5.9	2.5	51.6	189.1	59.6



图2 灯泡贯流泵装置示意

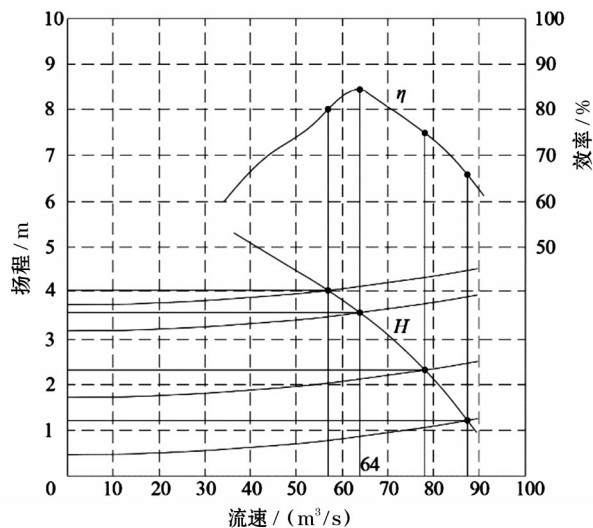


图3 预想的性能曲线

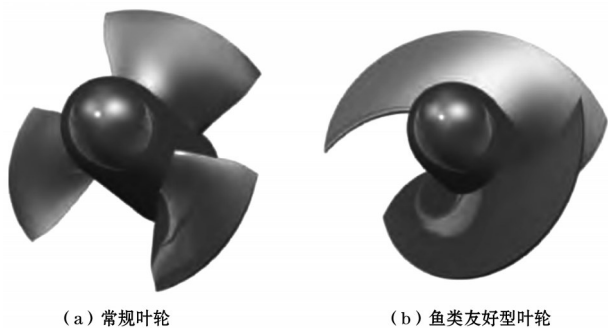


图4 优化前后叶轮对比

方案1和方案3采用了相对较小的 L_4 、 L_5 ,减小了来流对前缘的撞击,较大的 θ_3 使得叶片前伸程度更小,合理的 i_{hub} 改善了由于径向流动导致的进口安放角与液流角的不匹配问题,因而在一定程度上减少了低压区面积。其中,方案1的过渡更顺畅平和、梯度明显,更好地遏制住了扩散趋势。但是,更多考虑鱼类通过性能的方案2则表现不佳。当来流受叶片前缘作用径向运动时,趋向于朝叶片吸力面的低压区流动,较小的 L_1 增大了锥形轮毂的锥度,使轮毂侧液流的轴向速度进一步受到抑制。因此,其前缘低压区面积进一步增加,轮毂侧压力分布较为紊乱,并伴随有向后缘及叶片中部扩散的趋势,可能导致空化性能下降。

3.3 鱼类损伤评估

鱼类损伤评估是对鱼类通过性能的量化估算与分析,也是对旋转机械鱼类友好型设计效果的检验。现从撞击概率、撞击死亡率、鱼类存活率方面进一步分析优化后的方案,同时引入无量纲数 L_t/D ,以关联鱼体长度与泵类关键参数,使得相关研究结论更具普适性。

3.3.1 撞击概率

通过计算得到各方案在不同鱼长下的撞击概率, L_t/D 越小、撞击的概率越低; $L_t/D=1/3$ 时,不同方案的撞击概率均在60%以上;而 $L_t/D=1/12$ 时,撞击概率低于20%。不同方案在面对同等鱼长时的撞击概率相差非常小,说明对于不同鱼类友好型设计的叶轮,在撞击概率方面的差异是很小的。结合上述研究可知,撞击概率虽为影响鱼类存活率的因素之一,但并非主要影响因素。

3.3.2 撞击死亡率

撞击死亡率受损毁率与撞击速度的影响,现从这两方面分别进行分析。撞击死亡率和撞击速度计算式为

$$f_m = k_i(v_s - 4.8) = \left[a \ln \left(\frac{L_t}{d} \right) + b \right] (v_s - 4.8) \quad (6)$$

$$v_s = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = \sqrt{\left(\frac{2\pi r n}{60} \sin \alpha \right)^2 + \left(\frac{Q}{A} \sin \beta \right)^2} \quad (7)$$

式中: k_i 为损毁率; d 为叶片厚度; v_1 为撞击速度的圆周分速度; v_2 为撞击速度的轴面分速度;其余符号含义同上。

各方案在不同鱼长下的损毁率 k_i 见表2,该数值越低,则在同等撞击速度下,鱼类撞击死亡率越低。可以看出,方案2、3由于考虑了鱼类通过性能,在同等鱼长条件下,其损毁率均较方案1有所降低,且方案2下降更多。对比不同鱼长条件下的各方案损毁率,可发现鱼长越短损毁率越低,且方案2损毁率下降更快。综合以上两点并结合式(7)与表2可得出结论,在损毁率方面,叶片厚度较大的方案2更具优势,且这种优势在低鱼长条件下表现得更为明显。

表2 不同方案损毁率与鱼体长度关系

鱼体长度/ mm	L_t/D	损毁率/%		
		方案1	方案2	方案3
100	1/3	21.86	20.34	21.82
75	1/4	20.92	19.40	20.88
50	1/6	19.59	16.57	19.56
25	1/12	14.67	10.83	14.57

从各方案叶片前缘的速度值可以发现,方案1的 v_0 较高,对鱼类造成的损伤更大,而方案2、3的 v_0 控制得更好,方案2在轮毂侧表现更好,方案3在轮缘侧更具优势。结合表1与叶片撞击模型进一步对比方案2、3参数可发现,由于方案2的 θ_3 更小,导致其 v_2 更小,而方案3的 θ_1 更大,导致其 v_1 更小。因此,在叶片设计过程中需要注意 θ_1 、 θ_3 的取值。

3.3.3 鱼类存活率

不同方案在不同鱼体长度下的鱼类存活率存在较大差异,而在鱼体长度较小时差异不大且鱼类存活率表现均较好。尽管方案2在水力性能方面有待改进,但其鱼类通过性能方面表现最好,在不同鱼体长度下的鱼类存活率均保持在80%以上;方案1的鱼类通过性能较差,尤其是在鱼体长度较大时表现得更为明显, $L_t/D=1/3$ 时的存活率仅有10%;方案3在优化过程中考虑了鱼类存活率,其鱼类通过性能较方案1有明显提升。

4 结 论

基于生物多样性保护目标开展鱼类友好型水泵研发,既要保证水泵的最优性能、降低运行能耗、实现节能减排,又要尽可能最大限度地提高鱼类的存活率、降低损毁率,这是泵站工程建设责任所在,对于实现生物多样性保护目标,推进生态文明建设具有重要意义。

(1)鱼类友好型水泵的研发需要机械结构、流体动力学和生物学多学科交叉融合,统筹兼顾,综合平衡。不仅需要研究适应鱼类通过的水泵结构、材料特性,保证水泵能量特性和空化特性的流体动力特性模拟分析和试验研究,而且需要研究不同类别、不同体型鱼种的游动生活习性。

(2)建立基于多个几何参数的鱼类友好型水泵优化设计模型,在兼顾水泵水力性能和鱼类存活两类目标的前提下选择水泵叶轮和导叶几何参数进行优化,并构建判别鱼类撞击概率、撞击死亡率、损

毁率和存活率函数,用于不同方案对比。

(3)根据优化目标对某工程拟采用的灯泡贯流泵叶轮拟定3组方案进行研发,初步结果表明最优效率可达到预期,鱼类存活率在80%以上,基本实现了两类目标兼顾。

(4)不同鱼类的生活习性千差万别,目前的试验成果所涵盖的鱼种类、鱼尺寸大小较为有限,鱼类友好型水泵的鱼类损毁率、存活率等指标尚需大量的工程实践加以检验。

参考文献:

- [1] 董哲仁. 探索生态水利工程学[J]. 中国工程科学, 2007, 9(1): 1-7.
- [2] 罗先武, 叶维祥, 宋雪漪, 等. 支撑“双碳”目标的未来流体机械技术[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2022, 62(4): 678-692.
- [3] Ling BAI and Ling ZHOU. Aiming for fish-friendly hydropower plant[J]. Science, 2021, 374(6571): 1061-1063.
- [4] 杨春霞, 郑源, 张玉全, 等. 鱼类友好型水轮机设计研究综述[J]. 中国工程科学, 2018, 20(3): 96-101.
- [5] 兰昊, 张思青. 环保式过鱼水轮机发展及研制探讨[J]. 人民长江, 2015, 46(21): 71-75.
- [6] 潘强, 施卫东, 张德胜. 鱼友好型轴流泵流场数值分析与汽蚀性能优化[J]. 农业机械学报, 2016, 47(4): 15-21.
- [7] 张德胜, 史科航, 潘强, 等. 基于鱼形颗粒群追踪的贯流泵鱼类撞击损伤特性研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(10): 152-160.
- [8] YANG C X, ZHANG Q X, GUO J, et al. Optimal design and fish-passing performance analysis of a fish-friendly axial flow pump[J]. Applied Sciences, 2023, 13(21): 12-16.
- [9] 叶晓琰, 吴跃虎, 潘强, 等. 灯泡贯流泵水力性能和鱼类通过性能的多目标优化研究[J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(5): 11-23.
- [10] 潘强, 张德胜, 施卫东. 基于叶片撞击模型的鱼友好型轴流泵优化设计[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 102-108.