

灯泡贯流泵水力性能和鱼类通过性能的多目标优化研究

叶晓琰¹, 吴跃虎¹, 潘强¹, 张德胜¹, 孙龙月¹, 施卫东²

(1. 江苏大学流体机械工程技术研究中心, 212013, 江苏镇江; 2. 南通大学机械工程学院, 226019, 江苏南通)

摘要: 为兼顾泵站运行效率与鱼类通过安全性, 结合计算流体动力学、鱼类损伤模型、遗传算法寻优开展多目标优化研究。基于敏感度分析, 分别优选了影响贯流泵性能和鱼类存活率的显著因素, 采用最优拉丁超立方抽样、Kriging 模型、NSGA-II 算法构建了多目标优化系统, 通过分配权重因子得到了效率最优(A)、鱼类存活率最优(C)和两者兼顾(B)的3种寻优方案。结果表明: 方案A效率较初设方案提升了5.2%, 方案C鱼类存活率较初设方案提升了49.4%; 叶片包角、弦高、前伸角是影响水力性能的关键因素, 叶片前掠角、前伸角、叶片厚度是影响鱼类存活率的关键因素, 且前伸角对两者的作用效果相反; 撞击死亡率高度影响鱼类过泵存活率, 而撞击概率对此影响较小, 可通过加大叶片前缘厚度、增加叶片前掠角、降低前伸角来提升鱼类存活率。该研究成果应可为我国大型泵站群向生态水利方向发展提供参考。

关键词: 灯泡贯流泵; 鱼类存活率; 生态友好型设计; 敏感度分析; 多目标优化

中图分类号: TH311 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202305002 **文章编号:** 0253-987X(2023)05-0011-13

Multi-Objective Optimization Study on the Hydraulic Performance and Fish Survival Rate of the Bulb Tubular Pump

YE Xiaoyan¹, WU Yuehu¹, PAN Qiang¹, ZHANG Desheng¹, SUN Longyue¹, SHI Weidong²

(1. National Research Center of Pumps and Pumping System, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China;

2. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

Abstract: The passive passing of fish through the pump station leads to a high proportion of injuries and deaths. To balance the operation efficiency and the safety of fish passing through the pump, this paper employs the computational fluid dynamics in combination with the fish damage model and the genetic algorithm to carry out multi-objective optimization research. Based on the sensitivity analysis, the significant factors affecting the performance of the tubular pump and the survival rate of fish are selected respectively. The optimal Latin hypercube sampling, Kriging model and NSGA-II algorithm are used to construct a multi-objective optimization system. Finally, one optimization scheme with the optimal efficiency (A), one with the highest fish survival rate (C) and one that balances both (B) are obtained by assigning weight factors. The results show that the efficiency of scheme A rises by 5.2% and the fish survival rate of scheme C increa-

收稿日期: 2022-11-03。 作者简介: 叶晓琰(1963—), 女, 研究员, 博士生导师; 潘强(通信作者), 男, 助理研究员。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52209111); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20220542); 江苏省杰出青年基金资助项目(BK20211547)。

网络出版时间: 2023-01-02

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20221230.1123.001.html>

ses by 49.4%, compared with the initial design. The blade wrap angle, chord height and blade forward-extended angle are the key factors affecting hydraulic performance. In contrast, the blade forward-swept angle, forward-extended angle and blade thickness are the critical factors influencing the fish survival rate. Among these factors, the forward-extended angle exhibits opposite influence on the hydraulic performance and fish survival rate. In addition, the mortality by blade strike highly affects the survival rate of fish passing through the pump, while the strike probability has a small impact on this. The survival rate of fish can be improved by increasing the thickness of the blade leading edge, enlarging the blade forward-swept angle and reducing the forward-extended angle. The research results in this paper provide a reference for the ecological-protection-oriented development of large pump stations in China.

Keywords: bulb tubular pump; survival rate of fish; eco-friendly design; sensitivity analysis; multi-objective optimization

南水北调工程作为举世瞩目的跨流域调水工程,其东线工程是世界上规模最大的梯度泵站工程^[1]。2020年,南水北调东线二期工程规划黄河以南干线输水梯级泵站共14座,其中约1/3为贯流泵装置^[2]。目前,我国大中型泵站贯流泵机组通常不考虑鱼类通过性能,在鱼类资源丰富的流域,泵叶轮旋转工作时易造成鱼类大面积死亡,不仅对局部水域造成污染,同时会影响鱼类自然生态系统^[3]。

历年来,学者们在生态友好型水力机械方面进行了大量研究,发现造成鱼类损伤和死亡的主要因素是压力波动、流体剪切力和机械损伤^[4-5]。Van Esch等^[6-7]的研究表明,在扬程低于8m的泵站流道中,压力波动和速度剪切在大多数时候并不会对鱼造成致命威胁,叶片前缘撞击才是造成鱼类死亡的主要因素。Amaral等^[8]通过实验发现,半圆形且加厚的叶片前缘可以增强鱼的偏转,提升鱼类存活率。Hogan^[9]通过短时间内迅速降压的方式发现不同鱼类可承受的压降不同,有鱼鳔的鱼类存活率远高于无鱼鳔的鱼类。文献^[10]进行了大量的数值计算和活鱼实验,评估叶片前缘厚度、前缘截面形状对鱼类存活率的影响,结果表明,叶片前缘越厚,鱼类的形变程度越大,可以更大程度上减弱与叶片直接接触时的撞击力。潘强^[11]采用幂函数描述前缘前掠形状函数,得到了不同前缘轮毂比和前掠度下限制水平撞击速度的最优指数,可作为鱼类友好型轴流泵叶片前缘形状的设计依据。Amaral等^[12]对比了传统涡轮叶片与前缘弯掠叶片在活鱼实验中的表现发现,前缘弯掠设计有助于提升鱼类经过中高速涡轮机时的打击存活率。

近年来,随着优化算法的兴起,学者们逐步尝试将这种技术应用到工程中去,并取得了良好结果。

Zhang等^[13]提出了一种由响应面模型和遗传算法组成的优化系统,对抽水蓄能电站垂直管道进、出口参数进行分析及性能优化,结果表明,其总水头损失系数降低了4.69%,进、出流速分布系数分别降低了11.76%和38.59%。刘小民等^[14]将离心叶轮参数化方法、多目标遗传算法与数值计算软件相结合,建立了离心叶轮自动优化平台,以总压比和效率为设计目标,对高速离心叶轮进行优化,优化后叶轮出口截面上流场分布更加均匀,总压比和等熵效率约提高了2.5%和1.0%。王梦成等^[15]采用由反问题设计法、Kriging模型、非支配遗传算法相结合的方法,选取混流泵在0.7Q和1.1Q工况下的效率作为优化指标进行多工况优化,优化后的模型在较大流量范围内的泵段效率均有明显提升。卢金铃等^[16]针对三元扭曲叶片优化设计变量较多的问题,提出一种反问题与神经网络相结合的新方法,减少设计变量的同时大大缩短了计算时间,并利用该方法对混流泵扬程及效率进行优化,优化后叶片性能得到改善。

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少有关注^[11]。对叶片式轴(贯)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,是我国大型泵站群向生态水利方向发展的技术难题。

本文以南水北调工程某泵站水力模型为原型,基于敏感度分析实验、最优拉丁超立方抽样、Kriging模型及NSGA-II算法,构建多目标优化系统,得到综合考虑水泵性能指标和鱼类损伤指标的多目标寻优方案,分析各设计参数与水泵性能和鱼类存活率之间的关联,为大型泵站鱼类友好型优化设计提供参考。

1 计算模型及数值方法

1.1 水力模型

本文优化对象以南水北调工程某泵站模型为原型,流体区域包括以下 5 个部分,分别为进水流道、叶轮、导叶、灯泡体、出水流道、延伸段,如图 1 所示。多目标优化旨在改善鱼类通过性能的同时维持泵的水力性能达到原型要求。本文在额定工况点下对原型叶轮进行生态友好型初步设计,两者三维模型及详细参数见图 2 和表 1。

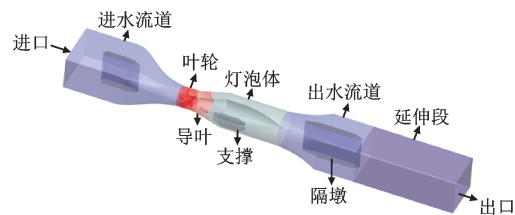
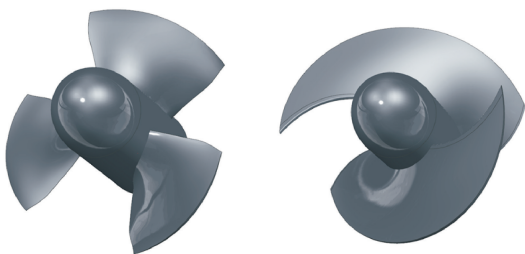


图 1 贯流泵模型计算域

Fig. 1 Calculation domain of tubular pump model



(a)原型叶轮 (b)生态友好型叶轮

图 2 生态友好型设计前后叶轮对比

Fig. 2 Comparison of impellers before and after eco-friendly design

表 1 模型泵详细参数

Table 1 Detailed parameters of model pump

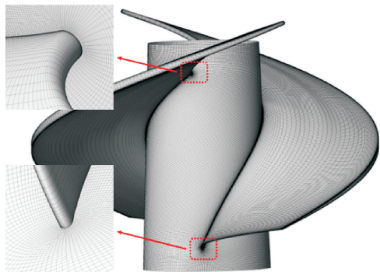
参数	符号	数值
流量/($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$)	Q	1 480
扬程/m	H	4.8
转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	N	1 450
比转速	n_s	1 046
叶轮直径/mm	D	300
叶轮叶片数	Z_1	2
导叶叶片数	Z_2	7

1.2 数值模拟及网格无关性论证

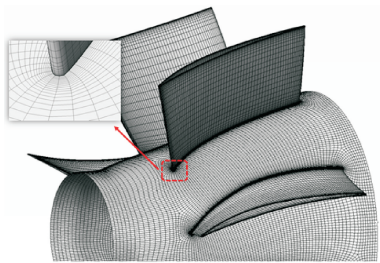
本文采用 CFX 进行数值模拟,为模拟泵内不可压缩流动,借助剪切应力输运湍流模型 $k-\omega$ SST 求

解控制方程,采用压力入口与质量流量出口来描述进出口边界条件,泵内所有物理界面均采用无滑移壁面,利用二阶离散格式,收敛精度为 10^{-6} 。非定常计算中,以叶轮旋转 3° 作为一个时间步长,在流场监测参数达到相对稳定后,采用最后一个周期的数据进行非定常流动特性分析。

所用模型的详细网格结构如图 3 所示。为捕捉近壁面流动状况,通过边界层加密的方式进一步提升模拟准确性,其中叶轮与导叶作为关键部件,其平均 y^+ 均小于 10。



(a)叶轮域



(b)导叶域

图 3 计算域网格划分

Fig. 3 Computing domain meshing

为验证网格独立性,分别生成了 6 组网格,如图 4 所示,当网格节点数从 931 万增加到 1 413 万之后,效率值趋于平稳且始终在 0.15% 以内波动,扬程曲线的波动也很小。为了在保证模拟精度的前提下减少计算资源,本研究中初始模型和优选模型采用非定常计算,且网格数均保持在 1 413 万左右,优化过程抽样所得 125 组模型采用定常计算,并将进出水流道简化成圆管,控制网格数量至 900 万左右。

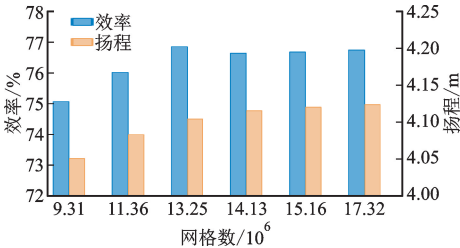


图 4 网格无关性论证

Fig. 4 Grid independence argument

1.3 实验验证

对原型泵水力模型进行外特性实验,以验证本文数值模拟方法的准确性。该模型的外特性实验在江苏大学国家水泵及系统工程技术研究中心水力机械四象限实验台上进行,图 5 为该实验台平面图,图 6 为实验台实物图。

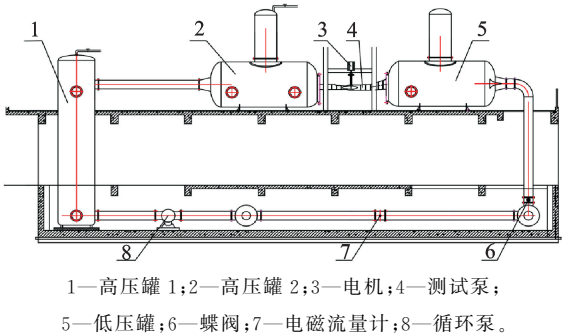


图 5 本文模型外特性实验台平面图

Fig. 5 Diagram of external characteristic test bench of this model



图 6 本文模型外特性实验台实物图

Fig. 6 Physical image of external characteristic test bench of this model

在实验过程中,扬程由压差传感器测量(型号为 EJA110A,误差为 $\pm 0.1\%$),流量通过电磁流量计测量(型号为 OPTIEFUX2000F,误差为 $\pm 0.1\%$),采用转矩转速测量仪测量输入功率(型号为 NJ L2,误差为 $\pm 0.1\%$),实验台系统的综合不确定度小于等于 0.3,详见文献[17]。实验所得外特性曲线与数值模拟结果如图 7 所示,其中 Q_d 为标准工况下流量。图中 Q_d 为设计工况下的流量,可以看出,模拟与实验所得曲线趋势一致,在设计工况点的扬程误差为 4.1%,效率误差为 2.8%,非设计工况点模拟与实验值最大偏差均小于 5%,数值计算结果与实验结果的吻合度较高。

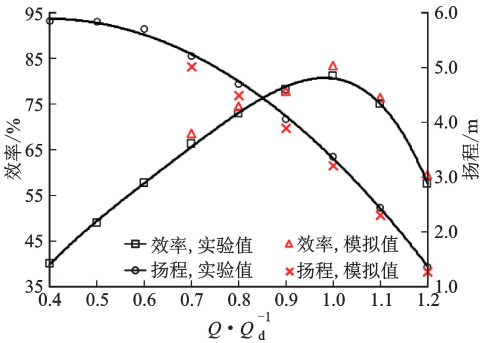


图 7 外特性模拟曲线与实验曲线

Fig. 7 External characteristic simulation curve and test curve

1.4 叶片撞击模型

叶片撞击模型自 Von Raben^[18]首次提出后,被大量应用在水力机械中进行鱼类损伤的理论预测。应用此模型可在短时间内定量估算出不同类型泵在多种条件下的鱼类通过性能。文献[19]提出了一种预测轴流泵不同致损因素导致的鱼类损伤概率,并通过实验验证了该准则的准确性;文献[6-7]建立并通过实验验证了轴流泵叶片撞击模型,并提出一种鱼类损伤的相似准则,可以在泵的整个运行参数范围内换算鱼类死亡率;文献[20]提出了一种叶片撞击模型,该模型结合并修正了 Van Esch 和 Krakters 的预测模型,并与活鱼实验的结果进行了对比验证,如图 8 所示,该模型在 10 组工况下的预测值与实验值之间具有较好的一致性。因此,本文采用 Pan 提出的叶片撞击模型来预测鱼类死亡率,以鱼体通过叶片进口处过流断面所需时间 t_f 与叶片通过时间 t_b 表征叶片撞击概率,即

$$P_{th} = \frac{t_f}{t_b} = \min\left(1, \frac{k_f L_f A_1 n_i N}{60Q}\right) \quad (1)$$

式中: P_{th} 为叶片撞击概率; k_f 为修正系数; L_f 为鱼长; A_1 为过流断面面积; n_i 为叶轮叶片数; N 为转速。

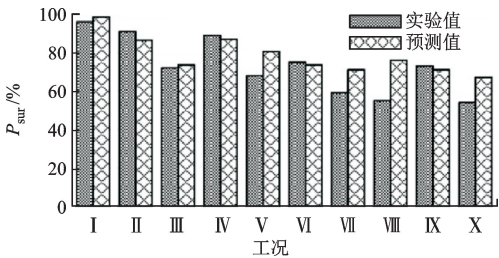


图 8 本文预测值与活鱼实验结果对比

Fig. 8 Comparison between predicted value and live fish experiment results

采用 f_m 表征鱼类受到叶片前缘撞击后的死亡比率,即

$$f_m = \left[a_1 \ln \left(\frac{L_f}{d} \right) + b_1 \right] (v_s - 4.8) \tag{2}$$

式中： a_1 、 b_1 为系数； d 为叶片前缘厚度； v_s 为撞击速度。

该预测模型本质是叶片撞击概率与撞击死亡率的乘积在半径方向的面积分，即

$$P_{sur} = 1 - \frac{1}{A_1} \int_{R_{lh}}^{R_{lt}} P_{th} f_m(r) 2\pi r dr \tag{3}$$

式中： P_{sur} 为鱼类存活率； R_{lh} 为轮毂半径； R_{lt} 为轮毂半径。

2 多目标优化设计系统

本优化系统包括三维参数化设计、敏感度分析、计算流体力学、实验设计、近似模型、非支配遗传算法等，优化流程如图 9 所示。

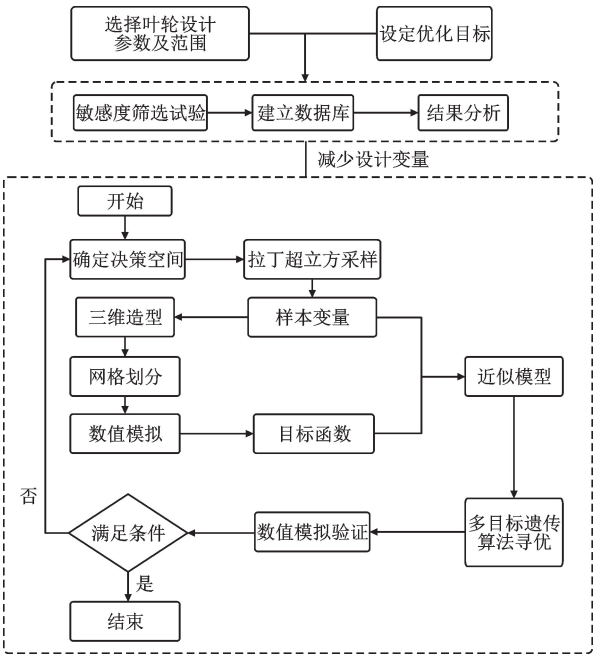


图 9 本文多目标优化设计系统流程

Fig. 9 Flow chart of multi-objective optimization design system in this paper

2.1 参数化

大量学者研究得到了影响叶轮水力性能的主要几何参数^[21-25]，基于此，本文选取参数 L_2 、 L_3 、 i_{hub} 、 i_{shr} 、 r_{hub} 、 r_{shr} 、 k_c 、 θ_2 以优化叶轮效率及扬程，参数说明见表 2。在鱼类友好型设计方面，Amaral 等^[8]指出，叶片前缘倾斜和大前缘厚度可以提高叶片撞击存活率。潘强等^[11]提出，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。Van Esch 等^[6-7]提出的叶片撞击模型表明，鱼

类通过性能与叶轮处过流断面面积有关。

综上，本文选取参数 L_1 、 L_4 、 L_5 、 θ_1 、 θ_3 以优化鱼类通过性能。上述参数在表 2 中说明，并在图 10、11、12 中标注，图 10 为叶轮轴面投影图，图 11 为叶轮水平面投影图。图 12 为翼型展开图，其中 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} 的和，本优化通过控制冲角大小来调整叶片进口安放角的值。

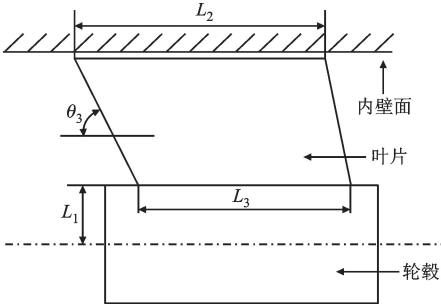


图 10 叶轮轴面投影图
Fig. 10 Impeller axial projection

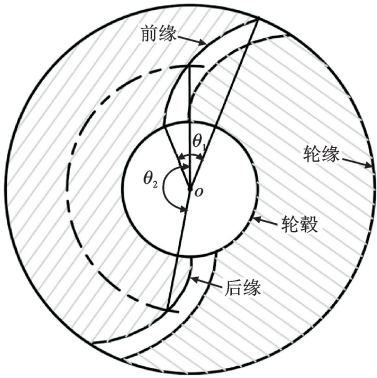


图 11 叶轮水平面投影图
Fig. 11 Impeller horizontal projection

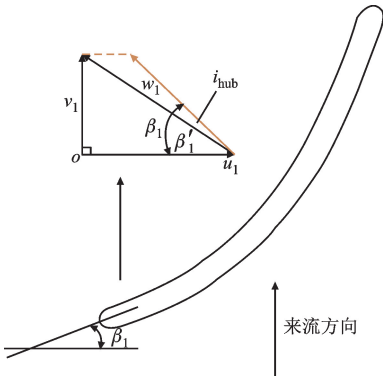


图 12 贯流泵叶片翼型展开图
Fig. 12 Expanded drawing of blade airfoil of tubular pump

2.2 敏感度分析实验

本次优化选择 13 因素 3 水平,依据田口设计法得到 27 组方案,各因素名称、缩写符号及因素水平如表 2 所示。

表 2 田口设计优化参数表(13 因素 3 水平)
Table 1 Taguchi design optimization parameters table
(13 factors and 3 levels)

因素	符号	因素水平		
		低	中	高
轮毂半径/mm	L_1	44	49.5	55
轮缘侧弦高/mm	L_2	156.6	174	191.4
轮毂侧弦高/mm	L_3	158.4	176	193.6
轮毂侧进口冲角/(°)	i_{hub}	-10	-6	-2
轮缘侧进口冲角/(°)	i_{shr}	0	2	4
轮毂侧滑移/%	r_{hub}	80	90	100
轮缘侧滑移/%	r_{shr}	81	90	99
环量系数	k_c	0.36	0.4	0.44
轮毂侧叶片厚度/mm	L_4	5	7	9
轮缘侧叶片厚度/mm	L_5	3	5	7
前掠角/(°)	θ_1	40.5	45	49.5
包角/(°)	θ_2	151.2	168	184.8
前伸角/(°)	θ_3	54	60	66

表 3 敏感度分析实验信噪比响应秩
Table 3 SNR response rank of sensitivity analysis experiment

参数	秩排												
	L_1	L_2	L_3	i_{hub}	i_{shr}	r_{hub}	r_{shr}	k_c	L_4	L_5	θ_1	θ_2	θ_3
效率	5	2	6	4	8	11	7	13	10	9	12	1	3
扬程	10	2	3	5	9	6	8	13	12	7	11	1	4
鱼类存活率	5	10	11	8	12	13	9	6	4	3	1	7	2

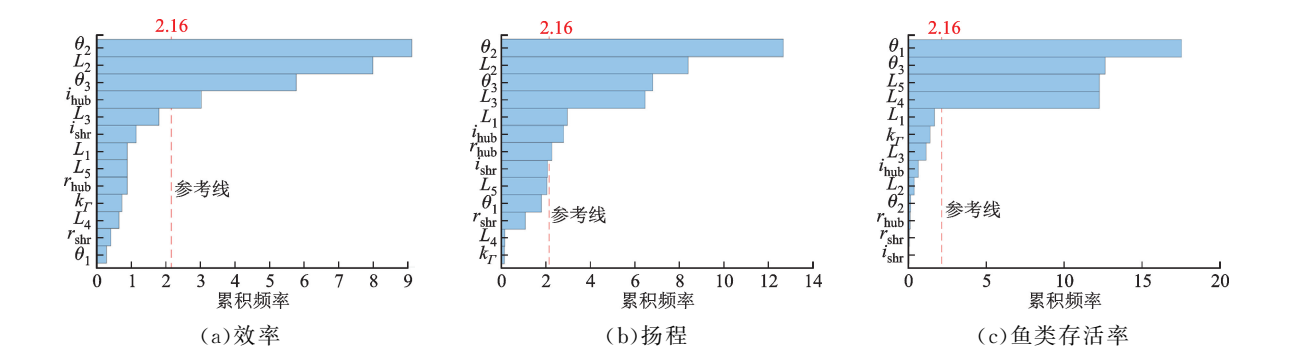


图 13 Plackett-Burman 筛选实验设计标准化 Pareto 图

Fig. 13 Plackett-Burman screening experiment design standardized Pareto chart

2.4 近似模型

常用的近似模型有响应面法、人工神经网络、Kriging 模型、混合近似模型等^[28]。本次优化采用 Kriging 模型来构建近似模型,它具有局部估计的

利用 Minitab 软件进行敏感度实验分析,得到其信噪比响应如表 3 所示,其中秩排越靠前表明其对目标影响越大。为进一步分析上述 13 个因素与优化目标之间的关系,取 3 水平中的高、低两水平进行 Plackett-Burman 筛选实验设计,绘制具有标准化效应的 Pareto 图,如图 13 所示,纵坐标为各因素名称,横坐标为频率,图中标有频率参考线,超过参考线的因素称之为显著因素。选取上述两种方法中对各目标影响排序前 5 的因素,剔除重复因素后发现两种方法选择的因素完全一致,分别为 L_1 、 L_2 、 L_3 、 i_{hub} 、 L_4 、 L_5 、 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 。因此,取这 9 个因素作为 2.3 节实验设计的最终因素。

2.3 实验设计

常见的实验设计方法有全因子法、中心复合法、正交实验法、拉丁超立方法等^[26]。本次优化的实验设计采用最优拉丁超立方法,抽取 125 组数据作为样本库。该方法可在设计空间内均匀采样,每个因素都有 n 个水平,每个因子水平通过执行准则后随机组合且只进行一次组合。相较于其他实验设计方法,该方法可以捕捉到更高阶的效果^[27]。

特点,包含回归部分与非参数部分^[29],表达式如下

$$Y(x) = \sum_{j=1}^k \beta_j f_j(x) + Z(x) \tag{4}$$

式中: $f_j(x)$ 为 k 个已知的回归函数; β_j 为回归系

数; $Z(x)$ 为相关函数。

采用无偏估计模型,估计任意两个 $z(s_i)$ 和 $z(s_j)$ 之间的协方差,即

$$\text{cov}[z(s_i), z(s_j)] = \sigma^2 r(s_i, s_j) \tag{5}$$

式中: s_i 和 s_j 为任意两个样本点; σ^2 为过程方差; $r(s_i, s_j)$ 为空间相关函数。

本次优化通过在样本库内抽取 100 组数据生成近似模型,以剩余的 25 组数据来检验模型,采用的 Kriging 模型参数设置如表 4 所示。

表 4 近似模型参数设置

Table 4 Approximate model parameter settings	
项目	数值
类型	各向异性
相关函数	高斯函数
过滤距离	5.0×10^{-5}
拟合中最大迭代次数	2 000

生成模型后,通过使用决定系数 R^2 与均方根误差 σ_{RMSE} 交叉验证模型准确性,其数值可利用式(6)、(7)计算。一般认为, R^2 在 0.9 以上, σ_{RMSE} 小于 0.1,则该模型具有较高准确性^[30],本次优化构建的代理模型的 R^2 与 σ_{RMSE} 如表 5 所示,因此本次构建的代理模型的准确度足以满足本次优化需要。 R^2 表达式如下

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \tag{6}$$

式中: R^2 为决定系数; y_i 为真实值; $\hat{y}_i$ 为预测值; $\bar{y}$ 为真实值的平均值。

σ_{RMSE} 表达式如下

$$\sigma_{\text{RMSE}} = \sqrt{[Y_i - f(x_i)]^2} \tag{7}$$

式中: σ_{RMSE} 为均方根误差; N 为样本数; Y_i 为真实值; $f(x_i)$ 为预测值。

表 5 代理模型的准确性

Table 5 Proxy model accuracy		
参数	数值	
	R^2	σ_{RMSE}
效率	0.942	0.072 19
扬程	0.960	0.034 65
鱼类存活率	0.983	0.051 32

2.5 优化算法

对于多目标优化问题而言,要求所有子目标均能取得最优值,大多数情况下极难实现。各目标之间的冲突通常难以调和,往往呈现一种此消彼长的

状况。Deb 等^[31]提出一种求解 Pareto 最优解的带精英策略的快速非支配遗传算法(NSGA-II)。该算法使用了快速非支配排序法以减小计算复杂程度,同时引进精英策略使得样本采集范围得以扩展,大部分优秀个体得以保留,而且利用拥挤度的概念,提高同一支配层的种群多样性。为使本次优化的 Pareto最优解具有良好的收敛性与鲁棒性,采用该算法进行求解,部分参数设置如表 6 所示。

表 6 优化算法参数设置

Table 6 Optimized algorithm parameter Settings	
参数	数值
种群规模	100
代数	100
交叉概率	0.9
交叉分布指数	10
突变分布指数	20
初始化模式	随机

在优化过程中,通过不同权重因子配比对水力效率与鱼类存活率组成的目标函数进行了 3 种方案的算法寻优,其中,扬程作为约束条件参与。该优化问题的目标函数如下

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{满足 } \max f = af_1 + bf_2 \\ \left\{ \begin{array}{l} \max E = f_1(L_1, L_2, L_3, i_{\text{hub}}, L_4, L_5, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \\ \max P_{\text{sur}} = f_2(L_1, L_2, L_3, i_{\text{hub}}, L_4, L_5, \theta_1, \theta_2, \theta_3) \end{array} \right. \\ \text{条件} \\ 38.5 \text{ mm} \leq L_1 \leq 55 \text{ mm} \\ 147.9 \text{ mm} \leq L_2 \leq 200.1 \text{ mm} \\ 149.6 \text{ mm} \leq L_3 \leq 202.4 \text{ mm} \\ -12^\circ \leq i_{\text{hub}} \leq 0^\circ \\ 4 \text{ mm} \leq L_4 \leq 10 \text{ mm} \\ 2 \text{ mm} \leq L_5 \leq 8 \text{ mm} \\ 38.25^\circ \leq \theta_1 \leq 51.75^\circ \\ 142.8^\circ \leq \theta_2 \leq 193.2^\circ \\ 51^\circ \leq \theta_3 \leq 69^\circ \\ 3 \text{ m} \leq H \leq 6 \text{ m} \end{array} \right. \tag{8}$$

式中: $f_1(x)$ 为近似模型中效率的代理函数; $f_2(x)$ 为近似模型中鱼类存活率的代理函数; a 、 b 为权重因子; H 为扬程。

3 结果与讨论

3.1 优化结果

采用 NSGA-II 算法求解灯泡贯流泵的多目标优化问题,经过 10^4 次迭代以后, Pareto 边界趋于稳

定,迭代过程及优化结果如图 14 所示。方案 A、B、C 分别为效率最优个体、折中个体、鱼类存活率最优个体,权重因子配比分别见表 7。各方案的详细参数及额定工况下定常计算结果如表 8 所示,方案 A、B 的效率较初设方案提升了 5.2%、4%,方案 B、C 的鱼类存活率较初设方案提升了 21.5%、49.4%。可以看出,优化后的方案在侧重考虑的性能方面均较初设方案有所提升,但也导致其他方面性能一定程度的下降。因此,如何选择真正合适的优化方案仍需工程师结合工程实际需求进一步考量。

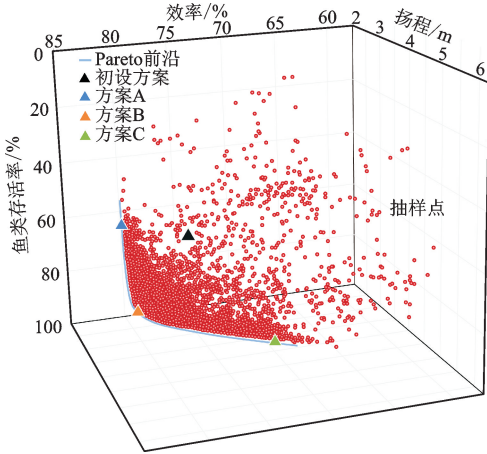


图 14 NSGA-Ⅱ算法迭代求解 Pareto 前沿

Fig. 14 NSGA-Ⅱ algorithm iterative solution to Pareto frontier

表 7 各方案权重因子配比

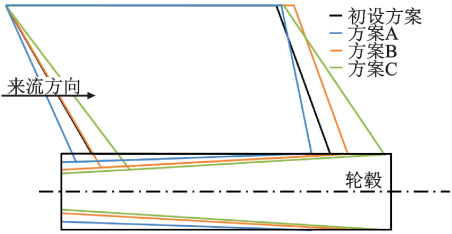
Table 7 Weight factor ratio of each scheme

方案	权重因子配比	
	<i>a</i>	<i>b</i>
方案 A	1	0
方案 B	0.5	0.5
方案 C	0	1

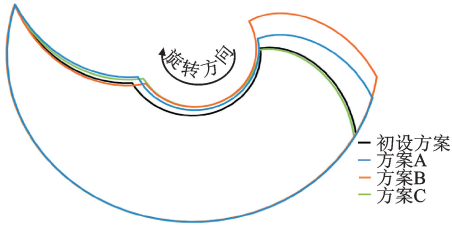
初始方案与 3 个优化方案的轴面投影图、水平投影图与叶片实体对比图如图 15 所示。结合表 8 可

以发现,方案 B、C 的 θ_3 数值较方案 A 有大幅减少,尽管 L_2 数值也在逐渐减少,但仍然导致叶轮叶片在轴向投影上的长度较初始方案与方案 A 大幅增加。方案 B 的 θ_1 、 θ_2 数值较大,因此其在水平投影图的圆周方向上长度也较长。

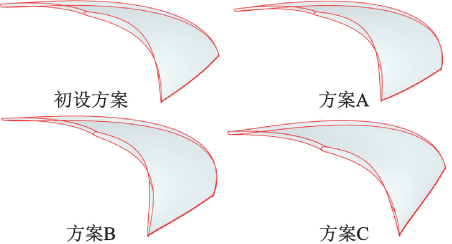
观察 3 个优化方案中对鱼类存活率影响较大的因素数值可发现,3 个方案的 L_1 数值递减,因而导致叶轮过流断面面积逐渐增大,撞击概率减小, θ_3 也呈递减趋势,而 L_4 、 L_5 的平均值递增,该数值将影响撞击死亡率系数。与此同时,方案 B、C 的 θ_1 相较方案 A 增大,该数值会对叶片前缘撞击速度产生影响。



(a)轴面投影对比



(b)水平面投影对比



(c)叶片实体对比

图 15 优化前后各方案叶片对比图

Fig. 15 Comparison diagram of blades before and after optimization

表 8 各方案叶片参数对比($L_f=75\text{ mm}$, $L_f/D=1/4$)

Table 8 Comparison of blade parameters of each scheme ($L_f=75\text{ mm}$, $L_f/D=1/4$)

方案	$L_1/$ mm	$L_2/$ mm	$L_3/$ mm	$i_{\text{hub}}/$ ($^\circ$)	$L_4/$ mm	$L_5/$ mm	$\theta_1/$ ($^\circ$)	$\theta_2/$ ($^\circ$)	$\theta_3/$ ($^\circ$)	效率/%	H/m	$P_{\text{sur}}/\%$
初设方案	55.0	172.1	153.1	-1.9	5.0	5.0	45.0	168.5	59.8	81.5	4.9	36.4
方案 A	47.9	176.9	150.9	-7.5	4.7	3.6	41.2	181.8	65.9	84.5	4.5	31.9
方案 B	44.5	185.4	159.0	-6.0	5.9	2.5	51.6	189.1	59.6	83.6	4.6	57.9
方案 C	42.7	177.1	161.9	-5.4	7.2	6.1	47.1	167.3	52.8	78.1	5.8	85.8

3.2 水力性能

各方案外特性曲线如图 16 所示,可以看出,方案 A、B 在多数工况下的水力效率均较初设方案有明显提升,而方案 C 的性能曲线与初设方案相比相差较大,其效率曲线更为平缓。

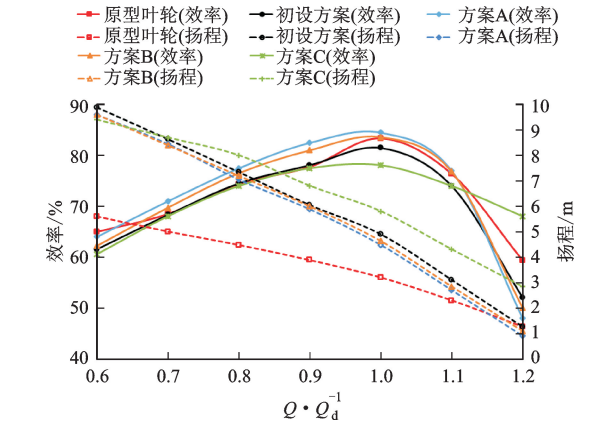


图 16 优化前后各方案外特性曲线对比(效率+扬程)
Fig. 16 Comparison of external characteristic curves of each scheme before and after optimization (efficiency+head)

3.2.1 压力分布对比

各方案的叶轮叶片吸力面静压分布如图 17 所示,初始方案的叶片前缘存在低压区,其中轮毂侧低压范围较大并有向后缘扩散的趋势。叶片前缘流动复杂,过低的压力极易在该处诱发空化现象,导致流场不稳定,效率降低。相比而言,方案 A、B 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 A 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 C 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

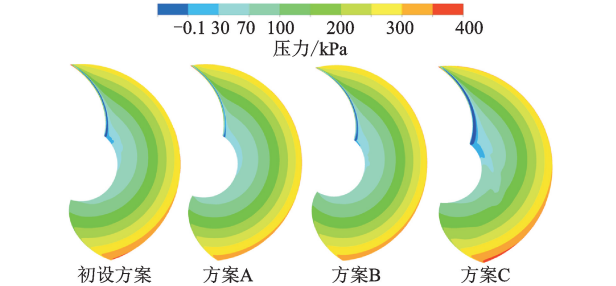


图 17 各方案叶轮叶片吸力面压力分布对比
Fig. 17 Comparison of pressure distribution on suction surface of impeller blades in various schemes

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,可能导致必须汽蚀余量降低。

3.2.2 湍动能分布对比

湍动能可表征流体速度脉动的剧烈程度,数值越大,则表明流体流动越不平稳^[32],分析该数值的分布情况,有助于进一步了解固体壁面附近的流动损耗^[33]。如图 18 所示,各方案吸力面湍动能较大的区域均集中在轮缘侧,其中靠近前缘处的湍动能最大,即图中红色表示的区域。方案 A、B 通过优化降低了该区域的湍动能,减少了损耗,而方案 C 的情况比较糟糕。方案 C 由于充分考虑鱼类通过性能,因此采用了更小的 θ_3 ,其叶片前伸程度更大,导致更加剧烈的径向流动,湍动能因此增加。同时,方案 C 的 L_4 、 L_5 较其他方案有了大幅度增加,叶片厚度更大,加之叶片前缘靠轮毂侧的相对速度较大,造成该区域极易产生流动分离及旋涡,湍动能也更大。值得关注的是,剧烈的径向流动可能是导致方案 C 的高湍动能区域有从轮缘侧向轮毂侧扩散的原因之一。除此以外,通过观察图 18 中虚线框选的部分可发现,初设方案及方案 B、C 的湍动能在轮毂侧出现了不同程度的突变,而方案 A 则通过优化极好的规避了这种现象的发生。

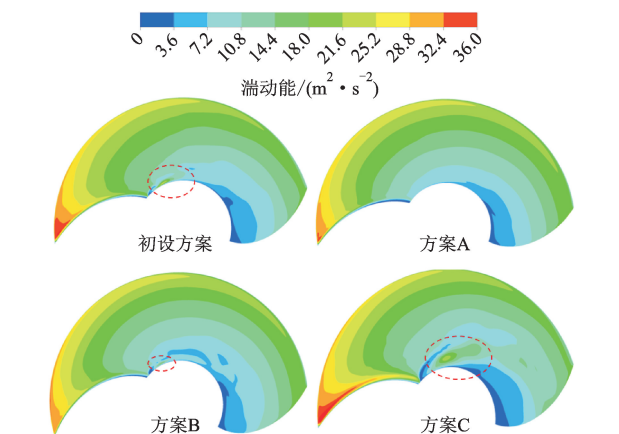


图 18 各方案叶轮叶片吸力面湍动能分布对比
Fig. 18 Comparison of turbulent kinetic energy distribution on suction surface of impeller blades in different schemes

3.2.3 局部熵产率分布对比

对于水泵而言,因其工作介质的黏性及存在雷诺应力,使得其在运行过程中机械能不可逆地向内能转化,带来不可逆的能量损失^[34]。一些研究者通过能量分析聚焦水力机械中的局部损失区域,开展

针对性的流动不稳定分析及优化设计,取得了良好的效果。Kock 等^[35]提出了一种计算局部熵产率的理论,被证明是科学、准确的,也是目前学者们使用的主流方法之一。本文采用这种方法进行各方案的局部熵产率计算。

各方案在展向 0.02、0.5、0.98 处的熵产率分布如图 19 所示。以图 19(a)初设方案为例,该图左侧为叶轮展向截面,右侧为导叶展向截面,图中红色所示代表该区域的熵产率较高,是高损失区域。通过观察图 19(a)可以发现,方案 A 几乎消除了初设方案中叶轮吸力面的高损失区域,同时通过优化叶轮的方式减少了导叶部分的高损失区域。对于方案 B 而言,尽管优化后的叶轮吸力面仍存在高损失区域,但其导叶部分的高损失区域较初设方案减少了。对于充分考虑鱼类通过性能的方案 C 而言,其在叶轮与导叶部分存在大量高损失区域,这必然会导致其水力效率的下降。同时,通过观察图 19(b)的导叶末端与图 19(c)的叶轮末端均可以发现,方案 A、B 较初设方案有了一定提升,但方案 C 的表现则相对较差。

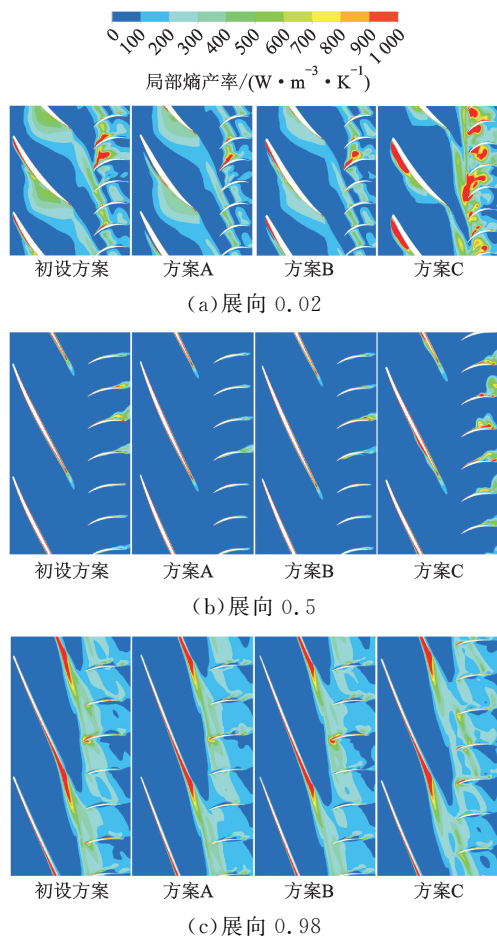


图 19 叶片不同展向处局部熵产率分布对比
Fig. 19 Comparison of local entropy yield distribution in different spanwise parts of leaves

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^[36]。本文从撞击概率、撞击死亡率、鱼类存活率方面进一步分析优化后的 3 种方案,同时引入无量纲数 L_f/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,如图 20 所示。各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。结合式(3)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。

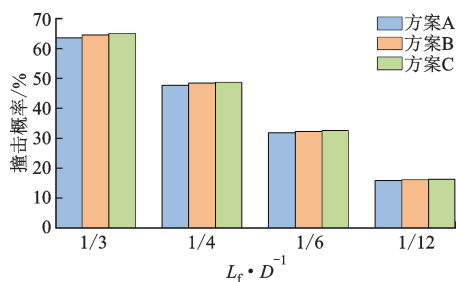


图 20 各方案不同鱼长下的撞击概率对比
Fig. 20 Comparison of impact probability under different fish lengths of each scheme

3.3.2 撞击死亡率

撞击死亡率受损毁率与撞击速度影响,本文将从这两方面分别进行分析。撞击死亡率和撞击速度表达式如下

$$f_m = k_1 (v_s - 4.8) = \left[a \ln \left(\frac{L_f}{d} \right) + b \right] (v_s - 4.8) \quad (9)$$

$$v_s = \sqrt{v_1^2 + v_2^2} = \sqrt{\left(\frac{2\pi r m}{60} \sin \alpha \right)^2 + \left(\frac{Q}{A} \sin \beta \right)^2} \quad (10)$$

式中: k_1 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。

表 9 列出了各方案在不同鱼长下的损毁率 k_1 , 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 B、C 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 A 有所降低,且方案 C 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 C 下降更快。综合以上两点并结合式(9)与表 9 可

得出结论,在损毁率方面,叶片厚度较大的方案 C 更具优势,且这种优势在低鱼长条件下表现得更为明显。

表 9 各方案在不同鱼长下的损毁率对比
Table 9 Comparison of damage rates of different schemes under different fish lengths

鱼体长度 /mm	$L_f \cdot D^{-1}$	损毁率		
		方案 A	方案 B	方案 C
100	1/3	0.218 6	0.218 2	0.203 4
75	1/4	0.209 2	0.208 8	0.194 0
50	1/6	0.195 9	0.195 6	0.165 7
25	1/12	0.146 7	0.145 7	0.108 3

各方案叶片前缘的 v_s 、 v_1 、 v_2 如图 21 所示,可以发现,方案 A 的 v_s 较高,对鱼类造成的损伤更大,而方案 B、C 的 v_s 控制得更好,方案 C 在轮毂侧表现更好,方案 B 在轮缘侧更具优势。结合表 8 与叶片撞击模型进一步对比方案 B、C 参数可发现,由于方案 C 的 θ_3 更小,导致其 v_2 更小,而方案 B 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。

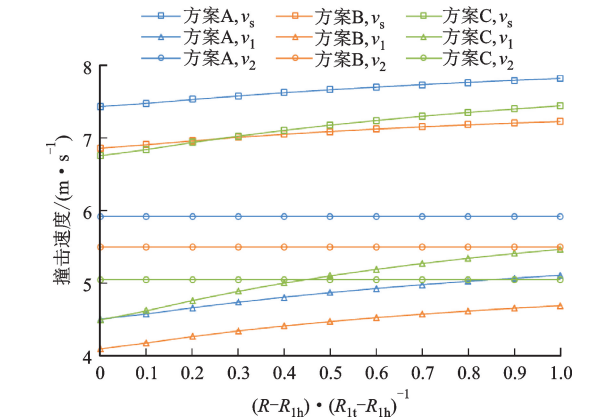


图 21 各方案叶片前缘撞击速度对比(轮毂侧-轮缘侧)
Fig. 21 Comparison of blade leading edge impact velocity of each scheme (hub-rim side)

3.3.3 鱼类存活率

各方案在不同鱼长下的鱼类存活率如图 22 所示,可以观察到,各方案在高鱼长条件下的差异较大,而在低鱼长条件下差异不大且表现均较好。尽管方案 C 在水力性能方面表现不佳,但其鱼类通过性能方面表现最好,在不同鱼长下的鱼类存活率均保持在 80% 以上。方案 A 的鱼类通过性能最差,尤其是在高鱼长条件下表现得更为明显,方案 B 在优化过程中考虑了鱼类存活率,其鱼类通过性能较方

案 A 有明显提升。

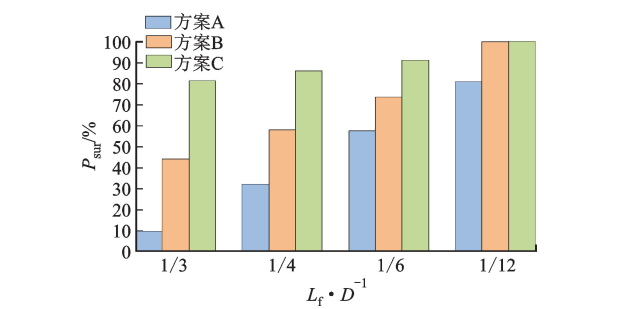


图 22 各方案不同鱼长下的鱼类存活率对比
Fig. 22 Comparison of fish survival rate under different fish lengths in different schemes

4 结 论

本文结合计算流体力学、鱼类损伤预测模型、遗传算法寻优,对某灯泡贯流泵水力性能和鱼类通过性能开展了多目标优化研究,主要研究结论如下。

(1)影响贯流泵水力性能(效率、扬程)的主要因素有包角 θ_2 、轮缘侧弦高 L_2 、前伸角 θ_3 ,影响鱼类过泵存活率的主要参数有前掠角 θ_1 、前伸角 θ_3 、轮缘侧叶片厚度 L_5 ,且前伸角 θ_3 对两者的作用效果相反。

(2)叶片吸力面的前缘附近及轮毂侧是使效率下降的关键区域,该区域极易产生流动分离及旋涡,也是需要重点优化的部分。叶轮叶片设计过程中,前伸角 θ_3 越小,越会加剧流动分离及旋涡的发生,在优化过程中,可通过修正轮毂侧进口冲角 i_{hub} 来减缓该现象。

(3)撞击死亡率 f_m 是影响鱼类通过存活率的主要因素,通过优化设计难以大幅降低叶片撞击概率,而增加叶片轮毂侧叶片厚度 L_4 、轮缘侧叶片厚度 L_5 可降低鱼类损毁率。同时,通过增大前掠角 θ_1 、减小前伸角 θ_3 ,可降低有效撞击速度,进一步提升鱼类存活率。

(4)3 种优化方案中:方案 A 效率较初设方案提升了 5.2%,但鱼类通过性能有所降低;方案 B 效率较初设方案提升了 4%,鱼类存活率较初设方案提升了 21.5%;方案 C 鱼类存活率较初设方案提升了 49.4%,但水力性能有所下降。本次优化的 3 种方案均较初设方案有不同程度的提升,均有各自的优势,可供参考。

参考文献:

[1] 吴永兴,吴晨,刘远书,等. 大型线性水利工程文化旅游规划研究:以南水北调中线为例 [J]. 北京规划

- 建设, 2016(1): 86-89.
- WU Yongxing, WU Chen, LIU Yuanshu, et al. Study on cultural tourism planning of large-scale linear water conservancy project: a case study of the middle route of south-to-north water transfer project [J]. Beijing Planning Review, 2016(1): 86-89.
- [2] 刘辉. 南水北调东线工程回顾与展望 [J]. 治淮, 2020 (12): 23-26.
- LIU Hui. Review and prospect of the east route of south to north water transfer project [J]. Harnessing the Huaihe River, 2020(12): 23-26.
- [3] 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.
- YANG Chunxia, ZHENG Yuan, ZHANG Yuquan, et al. A review of research on the design of fish-friendly hydraulic turbines [J]. Strategic Study of CAE, 2018, 20(3): 96-101.
- [4] HEO M W, KIM K Y, KIM J H, et al. High-efficiency design of a mixed-flow pump using a surrogate model [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2016, 30(2): 541-547.
- [5] ÇADA G, LOAR J, GARRISON L, et al. Efforts to reduce mortality to hydroelectric turbine-passed fish: locating and quantifying damaging shear stresses [J]. Environmental Management, 2006, 37(6): 898-906.
- [6] VAN ESCH B P M, SPIERTS I L Y. Validation of a model to predict fish passage mortality in pumping stations [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 2014, 71(12): 1910-1923.
- [7] VAN ESCH B P M. Fish injury and mortality during passage through pumping stations [J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(7): 071302.
- [8] AMARAL S V, COLEMAN B S, RACKOVAN J L, et al. Survival of fish passing downstream at a small hydropower facility [J]. Marine & Freshwater Research, 2018, 69(12): 1870-1881.
- [9] HOGAN J. The effects of high vacuum on fish [J]. Transactions of the American Fisheries Society, 1941, 70(1): 469-474.
- [10] Electric Power Research Institute (EPRI). Fish passage through turbines: application of conventional hydropower data to hydrokinetic technologies [EB/OL]. (2011-10-01)[2022-10-22]. <https://tethys.pnnl.gov/publications/fish-passage-through-turbines-application-conventional-hydropower-data-hydrokinetic>.
- [11] 潘强. 基于叶片撞击模型的鱼类友好型轴流泵设计理论与应用 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
- [12] AMARAL S V, WATSON S M, SCHNEIDER A D, et al. Improving survival: injury and mortality of fish struck by blades with slanted, blunt leading edges [J]. Journal of Ecohydraulics, 2020, 5(2): 175-183.
- [13] ZHANG Han, GAO Xueping, SUN Bowen, et al. Parameter analysis and performance optimization for the vertical pipe intake-outlet of a pumped hydro energy storage station [J]. Renewable Energy, 2020, 162: 1499-1518.
- [14] 刘小民, 张文斌. 采用遗传算法的离心叶轮多目标自动优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2010, 44(1): 31-35.
- LIU Xiaomin, ZHANG Wenbin. Multi-objective automatic optimization design of centrifugal impeller based on genetic algorithm [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2010, 44(1): 31-35.
- [15] 王梦成, 袁建平, 李彦军, 等. 混流泵叶轮的三维反问题设计多目标优化 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(12): 1854-1860.
- WANG Mengcheng, YUAN Jianping, LI Yanjun, et al. Multi-objective optimization of mixed-flow pump impeller based on 3-D inverse design [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2020, 41(12): 1854-1860.
- [16] 卢金铃, 席光, 祁大同. 反问题与神经网络相结合的混流泵叶片优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(3): 308-312.
- LU Jinling, XI Guang, QI Datong. Blade optimization of mixed-flow pump using inverse design method and neural network [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(3): 308-312.
- [17] 潘强, 孙龙月, 丁威, 等. 灯泡贯流泵局部熵产与能量损失特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(1): 131-140.
- PAN Qiang, SUN Longyue, DING Wei, et al. Study on the characteristics of local entropy generation and energy loss in bulb flow pump [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(1): 131-140.
- [18] VON R. Regarding the problem of mutilations of fishes by hydraulic turbines [J]. Die Wasser Wirtschaft, 1957, 4: 97-100.
- [19] KRAKERS L A, KRUYT N P, RUTJES H A. Full-scale validation of a comprehensive criterion to predict fish-friendliness of pumps [C]//ASME/JSME/KSME 2015 Joint Fluids Engineering Conference. New York, NY, USA: ASME, 2015: V001T16A001.
- [20] PAN Qiang, SHI Weidong, ZHANG Desheng, et al. Fish-friendly design of an axial flow pump impeller based on a blade strike model [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers: Part A Journal of Power and Energy, 2020, 234(2): 173-186.

- [21] 王文杰, 袁寿其, 裴吉, 等. 基于 Kriging 模型和遗传算法的泵叶轮两工况水力优化设计 [J]. 机械工程学报, 2015, 51(15): 33-38.
- WANG Wenjie, YUAN Shouqi, PEI Ji, et al. Two-point hydraulic optimization of pump impeller based on Kriging model and neighborhood cultivation genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(15): 33-38.
- [22] 徐杨, 刘启蒙, 李瑞鹏, 等. 弦长对二维拍动翼的水动力性能影响研究 [C]//第二届中国海洋(岸)工程学术讨论会论文集(上). 2022: 116-121.
- [23] 张克危. 流体机械原理: 下册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [24] ZANGENEH M, GOTO A, TAKEMURA T. Suppression of secondary flows in a mixed-flow pump impeller by application of three-dimensional inverse design method: part 1 design and numerical validation [J]. Journal of Turbomachinery, 1996, 118(3): 536-543.
- [25] 张德胜, 施卫东, 李通通, 等. 轴流泵叶轮非线性环量数学模型建立与实验 [J]. 农业机械学报, 2013, 44(1): 58-61, 66.
- ZHANG Desheng, SHI Weidong, LI Tongtong, et al. Establishment and experiment on nonlinear circulation mathematical model of axial flow pump impeller [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(1): 58-61, 66.
- [26] 任露泉. 实验设计及其优化 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [27] 季宁, 张卫星, 于洋洋, 等. 基于最优拉丁超立方抽样方法和 NSGA-II 算法的注射成型多目标优化 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(3): 72-77.
- JINing, ZHANG Weixing, YU Yangyang, et al. Multi-objective optimization of injection molding based on optimal Latin hypercube sampling method and NSGA-II algorithm [J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(3): 72-77.
- [28] FORRESTER A I J, SÓBESTER A, KEANE A J. Engineering design via surrogate modelling: a practical guide [M]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley, 2008.
- [29] 于向军, 张利辉, 李春然, 等. 克里金模型及其在全局优化设计中的应用 [J]. 中国工程机械学报, 2006, 4(3): 259-261.
- YU Xiangjun, ZHANG Lihui, LI Chunran, et al. Applying kriging model for global design optimization [J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2006, 4(3): 259-261.
- [30] QIN Yonglin, LI Deyou, WANG Hongjie, et al. Multi-objective optimization design on high pressure side of a pump-turbine runner with high efficiency [J]. Renewable Energy, 2022, 190: 103-120.
- [31] SRINIVAS N, DEB K. Multiobjective optimization using nondominated sorting in genetic algorithms [J]. Evolutionary Computation, 1994, 2(3): 221-248.
- [32] ZHOU Zhuo, WU Jiuhui, LIANG Xiao. Quantitative analysis of production of turbulent kinetic energy by using catastrophe method for the whole process of turbulence formation [J]. Modern Physics Letters: B, 2021, 35(25): 2150402.
- [33] TONICELLO N, LODATO G, VERVISCH L. Turbulence kinetic energy transfers in direct numerical simulation of shock-wave-turbulence interaction in a compression/expansion ramp [J]. Journal of Fluid Mechanics, 2022, 935: A31.
- [34] ZHOU Ling, HANG Jianwei, BAI Ling, et al. Application of entropy production theory for energy losses and other investigation in pumps and turbines: a review [J]. Applied Energy, 2022, 318: 119211.
- [35] KOCK F, HERWIG H. Local entropy production in turbulent shear flows: a high-Reynolds number model with wall functions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47(10/11): 2205-2215.
- [36] VOWLES A S, KARLSSON S P, UZUNOVA E P, et al. The importance of behaviour in predicting the impact of a novel small-scale hydropower device on the survival of downstream moving fish [J]. Ecological Engineering, 2014, 69: 151-159.

(编辑 杜秀杰)