

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20230416

# 一种新型带槽式 Savonius 叶轮参数多目标优化

杨状状<sup>1,2</sup>, 宋瑞银<sup>2</sup>, 刘博宇<sup>2,3</sup>, 任聪杰<sup>2</sup>, 林 躞<sup>2</sup>, 盛 勇<sup>1,2</sup>

(1. 浙江科技学院机械与能源工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 浙大宁波理工学院, 浙江 宁波 315100;  
3. 浙江大学机械工程学院, 浙江 杭州 310030)

**摘要:** 为了提高 Savonius 型(S型)叶轮的捕能效率和消波效率, 提出了一种新型的带导流槽结构的 MBC 型叶轮。通过数值模拟、试验测试及 BP 神经网络结合 NSGA-II 的多目标优化算法优化 MBC 型叶轮的重叠率、间隙率、内外圆弧夹角、内圆弧半径、导流槽尺寸等 5 个参数, 对比分析了最优 MBC 型、S 型和 MB 型叶轮的性能表现。结果表明, 相关性能的预测值与实际值的误差小于 10%, 验证了所建立的预测模型的性能良好, 得到的最优参数为重叠率 0.136、间隙率 0.003、内外圆弧夹角 5.23°、内圆弧半径 41.42 mm、导流槽尺寸 2.83 mm; 最优 MBC 型叶轮相较于传统 S 型叶轮, 捕能效率、消波效率分别提升了 35.8%、11.0%。

**关键词:** Savonius 型叶轮; BP 神经网络; NSGA-II 遗传算法; 多目标优化

**中图分类号:** TV734; TK79

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)12-0203-04

## 1 引言

Savonius 型(S型)叶轮作为一种垂直轴阻力型叶轮, 具有结构简单、自适应流向及具备一定的捕能和消波特性等优点, 在波浪能发电领域具有不错的发展前景, 但较差的捕能效率是制约其应用的关键问题。为了提升 S 型叶轮的性能, 已开展了大量试验和数值理论分析。PATEL V 等<sup>[1]</sup>通过试验和数值模拟分析了级数、叶片数、重叠比等参数对 S 型叶轮性能的影响; STORTI B A 等<sup>[2]</sup>提出了一种基于元模型的方法, 利用神经网络与遗传算法来优化一组 S 型风力机偏转板的尺寸和形状; ZHANG Y C 等<sup>[3]</sup>采用时间分辨粒子图像测速技术分析 S 型叶轮附近的流场, 发现转子的转矩系数与转子角度和叶片形状密切相关; TIAN W 等<sup>[4]</sup>利用粒子群算法对一种具有不同凹凸边的 S 型叶轮进行优化, 发现最佳叶型具有更强的叶尖涡和恢复流; 梅媛等<sup>[5]</sup>通过仿真分析发现螺旋型 S 水轮机减小旋转产生的负转矩, 提高水轮机的启动效率及能力捕获系数。总体而言, 多数研究只是针对叶轮的捕能效率进行单参数或多参数的独立优化分析, 未分析多参数对于捕能效率和消波性能的耦合影响。鉴此, 本

文提出了一种新型带导流槽式 MBC 型叶轮, 采用 BP 神经网络结合 NSGA-II 算法的多目标优化方法优化了叶轮重叠率、间隙率、内外圆弧夹角、内圆弧半径、导流槽尺寸等 5 个参数, 以期综合提升叶轮捕能效率和消波效率。

## 2 S 型叶轮理论模型与新型结构设计

### 2.1 S 型叶轮理论模型

传统 S 型叶轮由半圆形双叶片、上下端板及转轴构成, 其工作原理是通过流体在叶片上形成的阻力差来产生转矩, 整体结构见图 1。

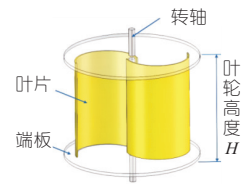


图 1 S 型叶轮的几何结构

Fig. 1 Geometric structure of S-type impeller

由于 S 型叶轮在海浪中所经历的是周期性、非单向的旋转运动, 需计算其转矩和转速的时间加权平均值以获得有效转矩  $\tau_{\text{eff}}$  和有效转速  $N_{\text{eff}}$ 。

S 型叶轮的捕能效率可通过系统整体有效效

收稿日期: 2023-03-20, 修回日期: 2023-04-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(52001276); 浙江省“领雁”重大专项研发项目(2023C03122)

作者简介: 杨状状(1998-), 男, 硕士研究生, 研究方向为波浪能发电, E-mail: 872957250@qq.com

通讯作者: 宋瑞银(1974-), 男, 教授、硕导, 研究方向为海洋机电装备, E-mail: ruiyinsong@163.com

率  $\eta_{\text{eff}}$  表示,表达式为:

$$\eta_{\text{eff}} = P_{\text{eff}}/P_w \quad (1)$$

其中  $P_{\text{eff}} = \text{rms}[\tau(2\pi N/60)] \quad (2)$

$$P_w = \frac{1}{32}\rho g H^2 \frac{\lambda^2}{T\pi} b \left[ 1 + \frac{4\pi h/\lambda}{\sinh(4\pi h/\lambda)} \right] \quad (3)$$

式中,  $P_{\text{eff}}$  为叶轮的有效转矩功率;  $P_w$  为每周期入射波理论功率; rms 为均方根;  $\tau$  为每个相等时间间隔的瞬时转矩值;  $N$  为每个相等时间间隔的瞬时转速;  $b$  为叶轮宽度;  $\lambda$  为入射波波长;  $H$  为入射波波高;  $g$  为重力加速度;  $T$  为入射波周期;  $h$  为水深。

消波性能通常引入透射系数  $K_t$  来表示,表达式为:

$$K_t = H_t/H_i \quad (4)$$

式中,  $H_t$  为经过叶轮后的透射波高;  $H_i$  为原始波高。

### 2.2 新型叶轮结构设计

ALOM N 等<sup>[6]</sup> 根据对 MB 型剖面阻力和升力特性的研究,发现 MB 型剖面的阻力系数  $C_D$  明显比其他剖面的大,而升力系数  $C_L$  相较于半圆型叶轮并无优势。基于此,对 S 型叶片凹凸面形状进行独立设计,并在端板与叶片连接的位置设计一定宽度的导流槽,得到了一种带槽的新型 MBC 叶轮结构,见图 2。叶片凸面为半径 50 mm 的半圆形,凹面采用 MB 型形状,最薄处的叶片厚度为 2 mm。内外圆弧夹角  $\theta$  和内圆弧半径  $R$  定义了凹面形状,导流槽轮廓与凸面相同,旨在使作用在背浪叶片上的水流通过导流槽向侧边流出,减小叶片所受阻力。

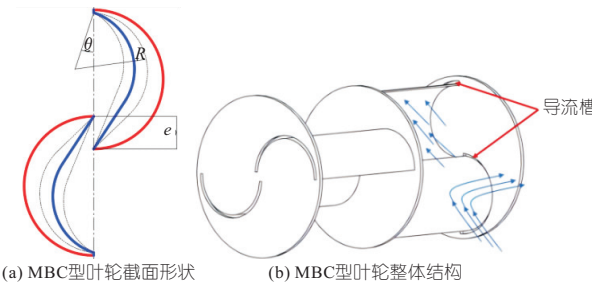


图 2 新型叶轮结构设计

Fig. 2 New impeller structure design

参考关于 S 型叶轮参数优化研究中的相关结论及考虑叶轮结构的合理性,划定了 5 个参数的取值范围,见表 1。

表 1 特征参数取值范围

Tab. 1 Range of values of characteristic parameters

几何参数	取值	几何参数	取值
重叠率( $O_R$ )	0~0.3	内外圆弧夹角/(°)	0~20
间隙率( $G_R$ )	0~0.15	内圆弧半径/mm	30~45
导流槽尺寸/mm	1~5		

## 3 数值模拟与试验测试

### 3.1 模型建立和网格划分

为了使叶轮转动更加平稳,采用二阶形式进行数值模拟和试验测试。叶轮的仿真流场域长 10 m、宽 1 m、高 1 m、旋转域直径 250 mm、长 400 mm,采用滑移网格控制。流场域的入场边界设置为速度入口,出场边界设置为压力出口。网格划分方面,采用非结构化四面体网格对自由液面上下 0.3 m 区域与叶轮附近区域进行加密,流场其他区域采用结构化六面体网格,另外在叶片与流体接触部分设置膨胀率为 1.2 的 5 层边界层网格,见图 3。

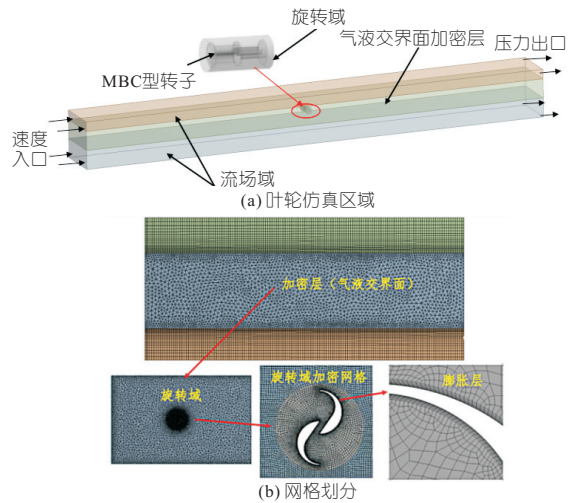


图 3 叶轮仿真区域及网络划分

Fig. 3 Impeller simulation area and meshing

湍流模型采用 Realizable  $\kappa-\epsilon$  模型,自由液面采用 VOF 两相流方法观测,并在叶轮上施加 0.01 N·m 的负载模拟真实发电工况。求解方法使用计算量较小易于收敛的 SIMPLEC 算法,残差收敛标准设为  $1 \times 10^{-5}$ 。

### 3.2 试验测试

在试验水槽中设置 3 处波高监测点:波高仪 1、2 位于叶轮前方 1.25、1 倍波长处,波高仪 3 位于叶轮后 1 倍波长处,分别监测入射波高、反射波高和透射波高。试验台整体结构为十字型,见图 4。叶轮通过轴与轴承座固定在铝型材框架上,通过同步带进行扭矩传输,扭矩传感器将得到叶轮的实时扭矩、速度等数据传输给电脑,负载由磁粉制动器提供。选取叶轮稳定转动的 3 个周期内的数据,每组试验重复 3 次,计算得到的平均值作为最终结果。叶轮实物模型由 3D 打印而成,具体参数见表 2。

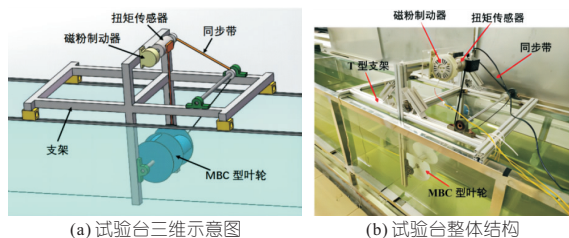


图 4 叶轮试验台结构

Fig. 4 Impeller test bench structure

表 2 测试模型参数

Tab. 2 Test model parameters

参数	重叠率	间隙率	内外圆弧夹角/(°)	内圆弧半径/mm	浸没深度/mm	叶轮高度/mm	端板直径/mm
取值	0.15	0	6	40	100	330	220

为了验证数值模拟结果的准确性,共进行了波浪周期为 1.1 s、波高范围在 0.10~0.15 m 的 6 组不同波况的水槽试验。对比试验和数值模拟测得的有效转速可知,两者趋势基本相同,试验结果数值偏低,这是由于转轴和联轴器之间的摩擦损耗等系统误差所致。综合看来,两者相对误差小于 10%,验证了本文所采用数值模拟方法的准确性。

## 4 MBC 型叶轮优化模型构建

### 4.1 多目标优化策略

采用基于 BP 神经网络结合 NSGA-II 算法的多目标优化策略来优化 MBC 型叶轮的结构参数,整体流程见图 5。

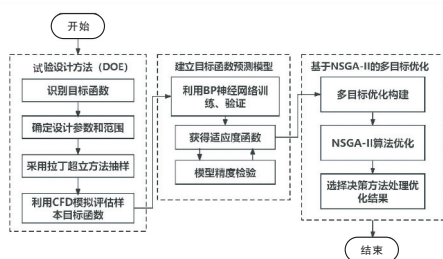


图 5 MBC 型叶轮多目标优化策略流程框架

Fig. 5 MBC-type impeller multi-objective optimization strategy process framework

## 4.2 BP 神经网络构建

采用拉丁超立方采样及数值模拟方法建立了 2 组大小为 50、100 的数据集,在其中选取 80% 作为训练集,20% 作为验证集,用以构建 BP 神经网络。设置网络输入、输出、隐藏层节点数分别为 5、2、10。使用均方误差  $M_{MSE}$  与相关系数  $R$  作为性能评价指标。当  $M_{MSE}$  值趋近于 0、 $R$  的值趋近于 1,表示拟合效果越好。

根据两个数据集所建立的 BP 神经网络的训练与预测结果,发现大小为 100 的数据集构建的模型训练和验证集的  $R$  值均大于 0.9,目标值的期望值和预测值之间的误差小于 10%,拟合效果符合要求。

## 4.3 NSGA-II 多目标优化

采用 Matlab 自带的基于 NSGA-II 多目标优化算法的 Gamultiobj 函数进行叶轮参数的多目标优化,由于 NSGA-II 的默认操作是最小化目标函数,因此将用于优化的有效效率设定为 1 与真实有效效率的差值。相关参数设置见表 3。

表 3 NSGA-II 参数设置

Tab. 3 NSGA-II parameter setting

参数	设置值	参数	设置值
种群数量	100	交叉概率	0.9
迭代次数	500	变异概率	0.1
Pareto 分数	0.2		

根据优化后得到的 Pareto 前沿结果,将有效效率、透射系数的权重分别设置为 0.6、0.4,采用模糊决策方法从 Pareto 最优解集中计算出各解的隶属度加权值,得到最优参数为重叠率 0.136、间隙率 0.003、外圆弧夹角  $5.23^\circ$ 、外圆弧半径 41.42 mm、导流槽尺寸 2.83 mm,对应的有效效率为 0.337、透射系数为 0.725。

## 5 优化结果分析

采用数值模拟方法比较原始参数配置(重叠率为 0.15、间隙率为 0)的 S 型、MB 型与最优 MBC 型叶轮之间的性能差异,三者其余参数相同。图 6 为 3 种叶轮处于同一波况(规则波,波高一

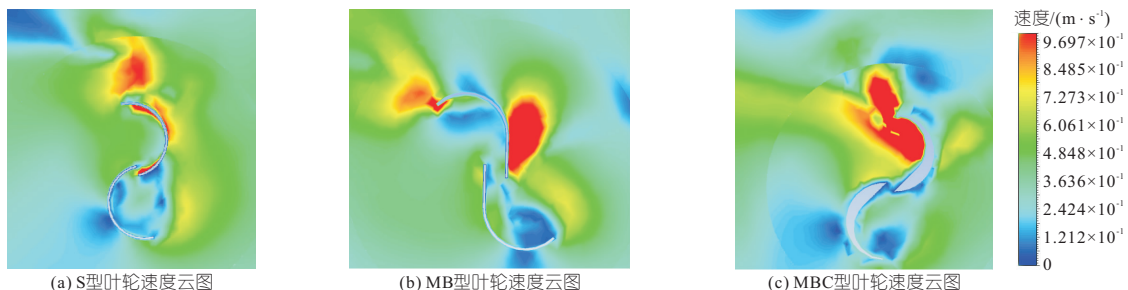


图 6 3 种叶轮在同一波况下的速度云图

Fig. 6 Velocity clouds of different leaf types at same working condition

0.15 m,周期=1.1 s)与稳定状态下旋转至 $0^\circ$ 时的速度云图。由图6可知,相较于S型和MB型叶片,最优MBC型迎浪叶片的凹面区域显示有大面积的流速峰值。这是因为优化凹面形状后,水流冲击叶片时更加平滑,减小了能量损失和水体振荡。当叶片与高速水流碰撞时,会改变水质点的运动方向导致其流速降低,大量流体动能转化成压能,产生较大的驱动力。关于背浪叶片,MBC型叶片凸面周围的流速与S型叶轮分布趋于一致,流速较低。但由于导流槽的存在,叶片凸面周围形成的低流速区域比S型叶片更大,这是由于作用在叶片上的水流通过导流槽流向端板外侧,使流速下降。综合来说,带有导流槽结构的MBC型叶轮结合了MB型和S型叶轮的优点,在迎浪背浪时表现出不错的驱动和阻力特性。

图7为3种叶轮的有效效率及透射系数。由图7可知,最优MBC型叶轮有效效率明显高于其他两种叶轮,相较于S型叶轮有效效率提升了近35.8%。在透射系数上,最优MBC型叶轮同样低于其他两种叶轮,消波效率相较于S型叶轮提升了将近11%。

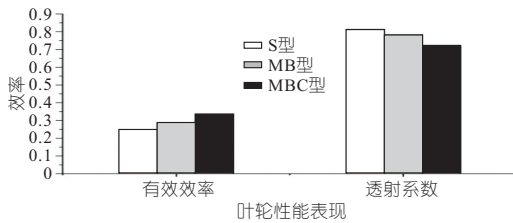


图7 3种叶轮的性能表现

Fig. 7 Performance of three types of impellers

## 6 结论

a. 水流冲击MBC型叶轮迎浪叶片时更加平滑,减小了能量损失和水体振荡,从而聚集大量压

能提供更大驱动力;而导流槽结构能使作用在背浪叶片上的水流通过导流槽流向端板外侧,减小叶片所受阻力,因此带有导流槽结构的MBC型叶轮结合了MB型和S型叶轮的优点,在迎浪背浪时表现出不错的驱动和阻力特性。

b. 本文使用BP神经网络结合NSGA-II算法对新型导流槽式MBC型叶轮参数进行参数优化,得到的最优参数为重叠率0.136、间隙率0.003、内外圆弧夹角 $5.23^\circ$ 、内圆弧半径41.42 mm、导流槽尺寸2.83 mm。性能相比传统S型叶轮,有效效率提升了35.8%,消波效率提升了11%,验证了采用该方法进行MBC叶轮多目标优化的可行性。

### 参考文献:

- [1] PATEL V, BHAT G, ELDHO T I, et al. Influence of overlap ratio and aspect ratio on the performance of Savonius hydrokinetic turbine[J]. International journal of energy research, 2017, 41(6): 829-844.
- [2] STORTI B A, DORELLA J J, ROMAN N D, et al. Improving the efficiency of a Savonius wind turbine by designing a set of deflector plates with a meta-model-based optimization approach[J]. Energy, 2019, 186: 115814.
- [3] ZHANG Y C, KANG C, JI Y G, et al. Experimental and numerical investigation of flow patterns and performance of a modified Savonius hydrokinetic rotor[J]. Renewable energy, 2019, 141: 1067-1079.
- [4] TIAN W, MAO Z, ZHANG B, et al. Shape optimization of a Savonius wind rotor with different convex and concave sides[J]. Renewable energy, 2018, 117: 287-299.
- [5] 梅媛, 李其朋, 陈岁繁, 等. S型水轮机水力性能研究[J]. 水电能源科学, 2022, 40(1): 180-183.
- [6] ALOM N, SAHA U K. Influence of blade profiles on Savonius rotor performance: numerical simulation and experimental validation[J]. Energy conversion and management, 2019, 186(1): 267-277.

## Multi-objective Optimization of A New Savonius-type Impeller Parameters with Slots

YANG Zhuang-zhuang<sup>1,2</sup>, SONG Rui-yin<sup>2</sup>, LIU Bo-yu<sup>2,3</sup>, REN Cong-jie<sup>2</sup>, LIN Zuan<sup>2</sup>, SHENG Yong<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University of Science and Technology,

Hangzhou 310023, China; 2. NingboTech University, Ningbo 315100, China; 3. School of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310030, China)

**Abstract:** A new type of MBC impeller with a guide vane slot structure was proposed to improve the energy capture and wave reduction efficiency of Savonius-type (S-type) impeller. A multi-objective optimization algorithm combined BP neural network, NSGA-II, numerical simulation and experimental test was used to optimize five parameters of the MBC impeller including overlap ratio, gap ratio, internal and external arc angle, internal arc radius, and guide vane size. The performance of the optimal MBC impeller was compared with that of the S-type and MB-type impellers. The results show that the prediction error of the relevant performance values is less than 10% compared to the actual values, verifying the good performance of the established prediction model. The obtained optimal parameters are: overlap ratio of 0.136, gap ratio of 0.003, internal and external arc angle of  $5.23^\circ$ , internal arc radius of 41.42 mm, and guide vane size of 2.83 mm. Compared with the traditional S-type impeller, the optimal MBC impeller has increased energy capture efficiency by 35.8% and wave reduction efficiency by 11%.

**Key words:** Savonius-type impeller; BP neural network; NSGA-II genetic algorithm; multi-objective optimization