

单向开口阀式 Savonius 水轮机及其水动力性能研究

吴烨卿^{1,2}, 宋瑞银^{2*}, 崔玉国¹, 蔡泽林³, 陈凯翔³

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 浙大宁波理工学院, 浙江 宁波 315100;

3. 浙江科技学院, 浙江 杭州 310023)

摘要: 为提高 Savonius 水轮机的能量捕获效率, 提出一种单向开口阀式 Savonius 转子设计. 建立转子三维数值模型, 仿真分析转子叶片开口率和曲率等参数对水轮机性能以及减流效果的影响. 最后, 搭建实验平台, 开展物理模型对照实验, 验证数值模拟结果的准确性. 结果显示, 叶片的曲率半径较大且开口率较小时, S 型水轮机的水动力性能有效提升; S 型转子开口率为 0.2 时, 性能平均比无开口的 S 型转子提升 33.57%; 当叶片的曲率半径在 50~70 mm 之间时, S 型转子具有较好的减流效果, 在 S 型转子后方 0.5 m 范围内, 可减少 35% 的流速.

关键词: Savonius 水轮机; 单向开口阀; 开口率; 数值模拟; 转矩; 减流特性

中图分类号: TK79

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2021) 03-0001-06

Savonius (S 型) 水轮机是一种典型的阻力型水轮机, 主要分为水平轴式和垂直轴式^[1-2], 其中垂直轴水轮机结构简单, 启动特性好, 成本低, 具有良好的应用前景^[3]. 而以阻力型 S 式风力机为设计原型的水轮机是最典型的 S 型水轮机^[4]. 许多学者对水轮机转子的结构进行优化来提高其捕获效率. Prasad 等^[5]建立了波浪数字水槽, 并进行了 S 型桨叶的波浪峰值仿真计算. Thakur 等^[6]提出了一种冲击射流导管的设计方法来改善 S 型水轮机的性能. Basumatary 等^[7]在传统双叶片 S 型水轮机基础上开发了一种新的基于组合升阻力(CLD)的叶片设计. 边佩翔等^[8]建立了 S 型水轮机的仿真模型, 对 S 型水轮机在不同叶尖速比下的水动力学及能量提取性能进行研究, 得到了优化的叶尖速比. 姚建均等^[9]通过数值模拟研究了 S 型水轮机的减流特性. 吴映江等^[10]分析了叶片重叠率、相对入水深度等参数对水轮机水动力特性的影响.

然而, 效率低仍然是水轮机的主要问题. 为了提高效率, 研究者们主要对转子结构、叶面形状等进行了优化设计, 但仍难以大幅度提高捕获效率.

本文创新性地提出了在转子叶片上的单向开口阀设计, 并利用 Fluent 数值仿真软件, 分析单向开口阀大小对水轮机性能的影响. 最后搭建实验平台, 开展物理模型对照实验, 验证数值模拟结果的准确性.

1 开口阀式 S 型水轮机理论模型

S 型水轮机的转子主要由凹凸叶片组成(图 1). 在水轮机旋转过程中, 转子会受到力和力矩的影响, 凹叶片的驱动力矩大于凸叶片的阻力矩, 力矩差驱动叶片旋转. 其中, 凹叶片产生的驱动力 F_{d1} 以及凸叶片产生的阻力 F_{d2} 分别为^[11]:

$$F_{d1} = \frac{1}{2} \rho (U - u) A C_{d1}, \quad (1)$$

$$F_{d2} = \frac{1}{2} \rho (U + u) A C_{d2}, \quad (2)$$

式中: ρ 为水密度; U 为来流速度; u 为叶片平均速度; A 为桨叶相对于来流的截面面积; C_d 为阻力系数. 因此, 两个叶片之间的相对转矩 M_1 为:

$$M_1 = (F_{d1} - F_{d2})(d - 0.5s), \quad (3)$$

收稿日期: 2020-09-11.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0300500); 宁波市重大科技攻关项目(2017C110005); 宁波市科技计划(2015C50061).

第一作者: 吴烨卿(1995-), 男, 江苏无锡人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 水轮机水动力学. E-mail: Yeqingwu_nbu@163.com

*通信作者: 宋瑞银(1974-), 男, 四川广安人, 教授, 主要研究方向: 海洋机电装备技术. E-mail: Ruiyinsong@163.com

式中: d 为叶片的宽度; s 为两叶片重叠部分的宽度, 如图 1 所示.

水轮机的动转矩系数 C_m 是评估转子性能的重要参数, 其计算公式可表示为:

$$C_m = \frac{M_1}{0.5\rho AdU^2}. \quad (4)$$

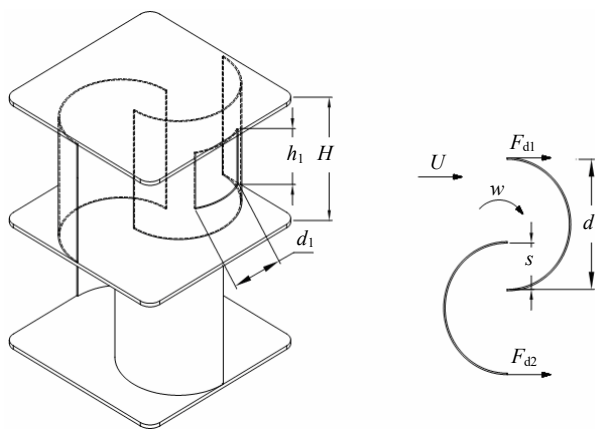


图 1 S 型转子结构

S 型转子的结构如图 1 所示, 图中, H 为叶片高度. 根据能量守恒定律, 参考 Thakur 等^[6]实验最优结构参数(双叶片, 重叠率 0.15)分析 S 型水轮机的捕获效率, 捕获效率是指水轮机捕获的能量与流经水轮机的潮流能总能量的比值, 是探究水轮机性能的重要参数, 捕获效率越高, 水轮机性能越好. S 型转子几何模型的主要结构参数见表 1. 保持叶片宽度 d 不变, 改变叶片曲率半径, 探究水轮机性能达到最佳时的曲率半径和开口率.

表 1 S 型转子的结构参数

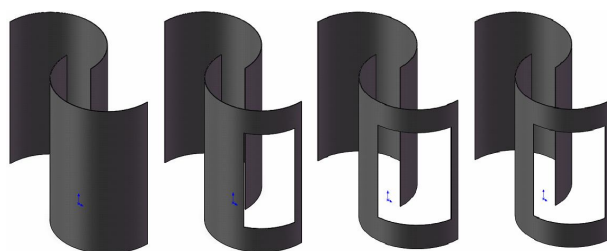
叶片数	重叠率	叶片高度/mm
2	0.15	100
叶片曲率半径/mm	叶片开口率	
40~70	0~0.6	

此外, 本文在 S 型转子的叶片上设计了单向开口阀. 其原理如图 1 所示, 凹叶片受水流冲击时, 开口阀关闭; 凸叶片受水流冲击时, 开口阀打开, 以此来增大凹凸叶片之间的压差, 进而提高叶片捕获效率. 开口率 α 定义为:

$$\alpha = \frac{d_1 h_1}{dH}, \quad (5)$$

式中: d_1 为叶片开口阀的宽度; h_1 为叶片开口阀的高度. 如图 2 所示, 开口阀的开口率变化范围为

0~0.6.



(a) 开口率 0 (b) 开口率 0.2 (c) 开口率 0.4 (d) 开口率 0.6

图 2 叶片不同开口率情况

引入开口阀后, 两个叶片之间的相对转矩 M 可表示为:

$$M = [F_{d1} - (1 - \alpha)F_{d2}](d - 0.5s). \quad (6)$$

2 数值模拟

2.1 仿真区域建立及网格划分

图 3 展示了 S 型转子的仿真区域, 其长度为 9 m, 宽度为 0.8 m, 高度为 1 m. S 型转子置于仿真区域中间, 左侧入口设置为速度入口, 给定水流速度及湍流参数; 右侧出口设置为压力出口; 上下区域设置为对称边界.

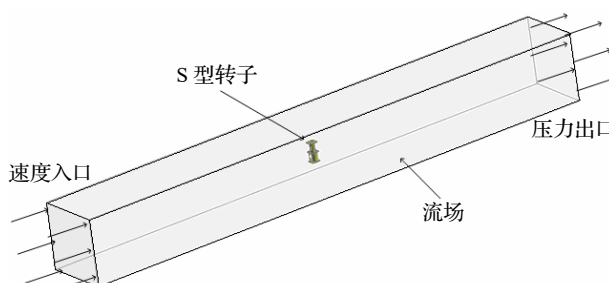


图 3 仿真区域及边界条件

计算域的网格划分如图 4 所示, 采用非结构四面体网格对整个流场区域进行划分, 同时为了满足计算精度并减少计算量, 在 S 型转子周围 0.5 m 范围内的流场进行网格加密.

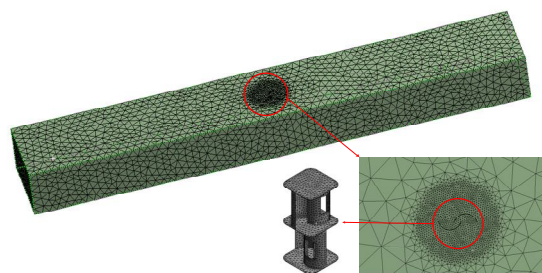


图 4 网格划分

2.2 求解设置与独立性验证

本研究采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 在求解算法设置中, 压力-速度耦合方法选用 SIMPLEC 算法, 在计算中适当放大松弛因子, 可以加快计算速度, 动量离散格式采用二阶迎风格。

建立不同网格数的数值模拟模型, 选取不同时间步长进行独立性验证。网格单元数量 N_1 、时间步数 N_2 及数值结果见表 2。由表 2 可知, 本文数值模拟结果与网格单元数量以及时间步数无关。为了兼顾计算精度以及计算量, 本文选取中等网格数量 167 000 以及时间步长 500 进行计算。

表 2 网格与时间步长独立性验证

验证项目	N_1	N_2	$M/(N \cdot m^{-1})$
网格数量	131 000	500	0.989 4
	167 000	500	0.985 2
	221 000	500	0.984 6
时间步长	167 000	300	0.985 7
	167 000	500	0.985 2
	167 000	800	0.985 0

3 物理实验

为验证数值模拟结果, 采用波流水槽进行物理模型实验, 实验场地与造流设备如图 5 所示, 实验水槽长 12 m, 宽 0.6 m, 高 0.6 m。为确保流速稳定, 采用 DDLS-1 单点流速采集仪监测瞬时流速。



图 5 实验场地与造流设备

S 型水轮机的转子叶片以及上下端板采用 3D 打印制作而成, 如图 6 所示。此外, 在转子叶片上开孔来固定开口阀, 通过固定不同位置的孔来调节开口阀大小。单向开口阀的设计如图 7 所示, 凹叶片受水流冲击时, 开口阀关闭; 凸叶片受水流冲击时, 开口阀打开, 该设计可保证转子在转动过程中有且仅有凸叶片上开口阀打开。实验过程如图 8 所示, 将 S 型转子固定在铝型材框架上, 通过轴承

座连接固定, 利用扭矩传感器(型号: CYT-302)将数据传输至计算机获得瞬时转矩。

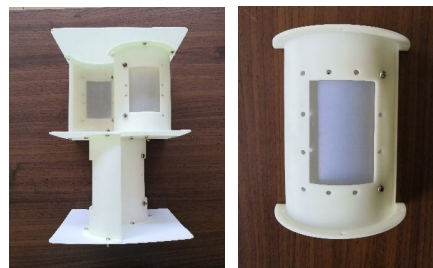


图 6 S 型水轮机转子

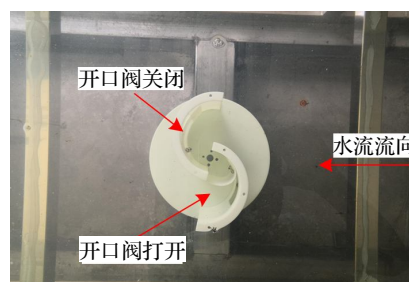


图 7 开口阀工作原理



图 8 物理实验过程

实验过程采用与数值模拟相同的流速, 监测并记录实验与数值模拟中转矩的变化。数据比较如图 9 所示。通过数值分析和实验得到的转矩最大相对误差小于 15%, 流速最大相对误差小于 10%, 验证了本文所采用的仿真分析方法的准确性。

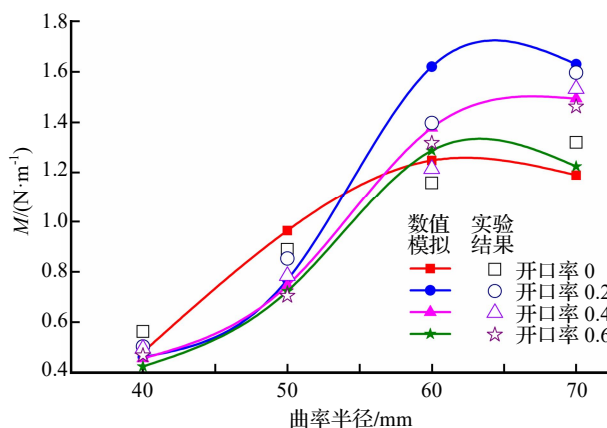


图 9 转矩的实验与仿真结果对比

4 结果与讨论

4.1 叶片曲率和开口率对转子转矩的影响

根据图9的数据可以得到S型转子在不同曲率半径下的变化情况. 不难看出, 随着曲率半径的增大, S型转子的转矩 M 先增大后减小. S型转子在曲率半径为60~70 mm时性能达到最佳值. 图10显示了S型转子在开口率为0.2时不同曲率半径的压力云图, 当曲率半径较大时, 转子叶片凸面上的低压区相对较大, 进而增大了转子两叶片之间的转矩.

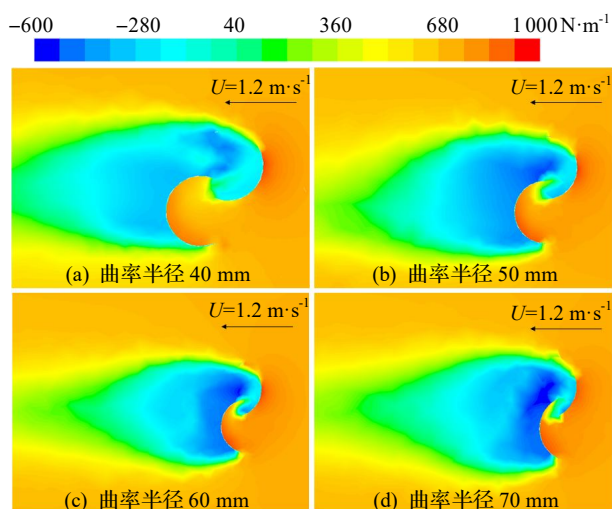


图10 开口率为0.2时的转子压力云图

根据图9还可得到S型转子在不同开口率时的转矩变化. 根据数值模拟结果可知, 当转子的曲率半径为60~70 mm时, 开口率为0.2、0.4和0.6时S型转子的性能平均比无开口的S型转子高33.57%、18.08%和3.04%. 图11显示了S型转子在曲率半

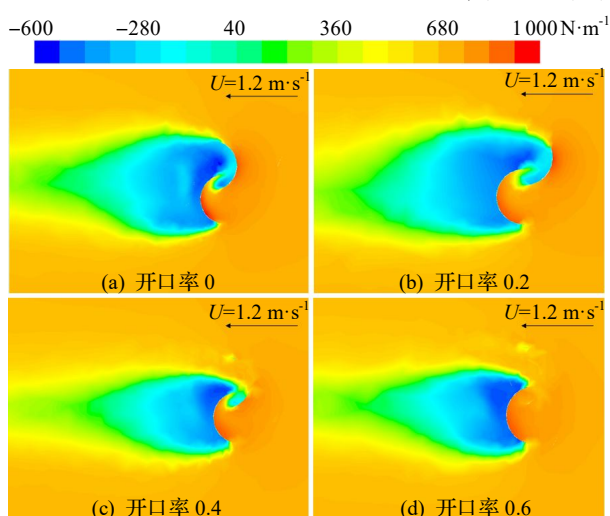


图11 曲率半径为60 mm时的转子压力云图

径为60 mm时不同开口率的压力云图, 转子叶片上开口阀开启可显著增加叶片凹侧和凸侧之间的压力差, 从而产生更大的转矩. 理论上, 开口率越大, S型转子的转矩越大. 但事实上, 当开口率为0.2时, S型转子的性能最好. 这是因为当开口率较大时, 水流直接流过叶片, 影响叶片凹侧的流动循环, 从而导致凹凸叶片的转矩减小.

4.2 叶片曲率和开口率对减流效果的影响

图12显示了S型转子的叶片在不同曲率半径和开口率下的减流效果的变化. 当叶片的曲率半径在50~70 mm之间时, S型转子具有较好的减流效果, 但随着开口率的增加, 减流效果逐渐减弱. 这是因为一部分流量可直接在开口阀打开时流过叶片, 叶片对这部分流量没有阻碍作用.

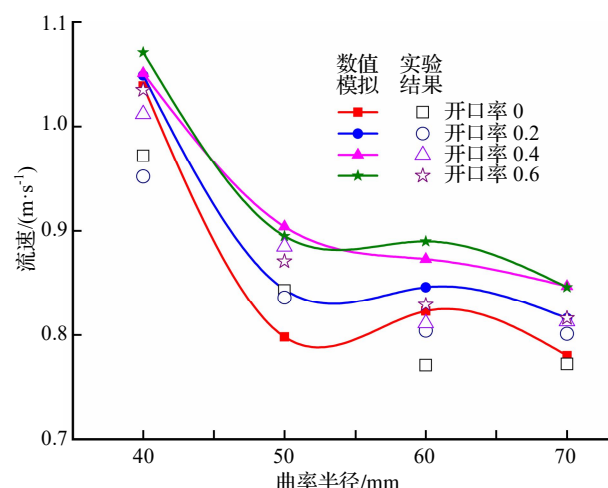


图12 流速的实验与仿真结果对比

根据图13整个流场的速度云图可知, S型转子能有效降低流速, 从而保护海上设施设备. S型转子的最佳减流区域在叶片后0.5 m范围内, 可使流速降低25%~35%. 此外S型转子的减流效果在3 m后几乎为0, 从能量守恒的角度分析, 是因为流体在S型水轮机前的水位高, 经过水轮机后水位降低, 两者之间的水位差所产生的势能转化成了桨叶捕获的能量.

图14显示了开口率为0.2时不同曲率半径的转子速度云图, 图中可观察到曲率半径为40 mm的叶片尖端线速度在1.6~1.7 m·s⁻¹范围内, 曲率半径为70 mm的叶片尖端线速度在1.3~1.4 m·s⁻¹之间, 叶片尖端线速度的差异最终导致了曲率半径较小时减流效果不佳. 另外, 图15给出了曲率半径为

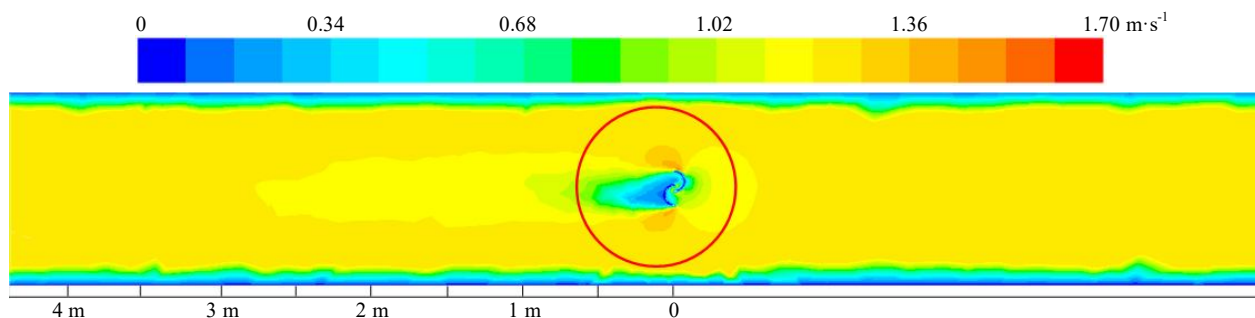


图 13 流场整体速度云图

60 mm 时不同开口率的转子速度云图, 一部分流量可直接在开口阀打开时流过叶片, 叶片对这部分流量没有阻碍作用. 因此, 随着开口率的增加, S 型转子的减流效果逐渐减弱.

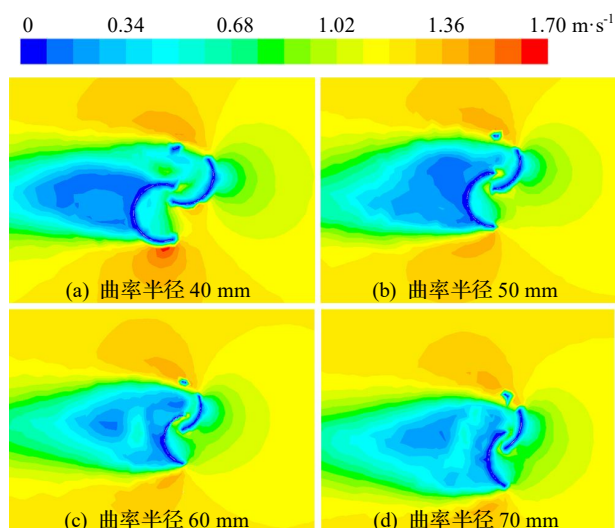


图 14 开口率为 0.2 时的转子速度云图

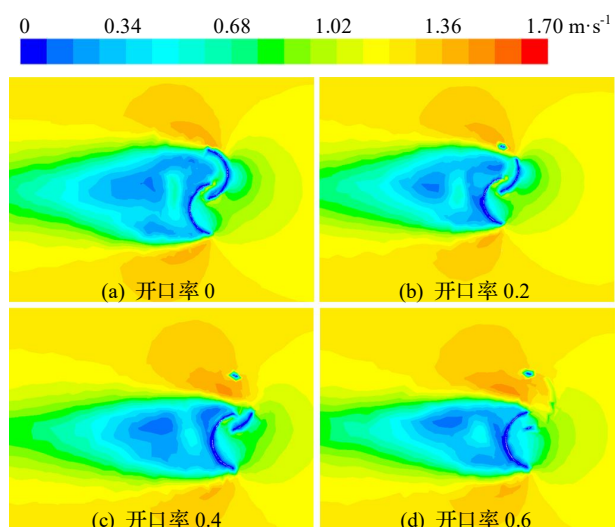


图 15 曲率半径为 60 mm 时的转子速度云图

5 结论

本文提出了一种新型单向开口阀式 S 型水轮机, 以提高能量捕获效率, 提高深海设施的安全性. 采用 Fluent 对 S 型转子的不同曲率半径和开口率进行了数值模拟和实验研究, 依据实验对象得出以下结论:

(1) 叶片的曲率半径较大且开口率较小时, S 型水轮机的水动力性能可有效提升.

(2) S 型转子开口率为 0.2 时, 性能平均比无开口的 S 型转子提升 33.57%.

(3) 当叶片的曲率半径在 50~70 mm 之间时, S 型转子具有较好的减流效果, 但随着开口率的增加, 减流效果逐渐减弱.

(4) 在 S 型转子后方 0.5 m 范围内, S 型转子可减少 35% 的流速.

在实际工程应用中, 选择开口率 0.2 作为最佳开口叶片设计基础. 此外, 为了进一步提高 S 型水轮机的捕获性能, 并提高其减流效果, 未来将进一步研究 S 型水轮机在多个转子相互作用下的性能改进和减流特性.

参考文献:

- [1] 安琪. 锚泊浮台潮流能水轮机组的阵列研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [2] 陈炫光, 陈俊华, 董新龙, 等. 波浪作用下串联浮筒对船型网箱锚泊系统的受力影响分析[J]. 宁波大学学报(理工版), 2020, 33(3):99-104.
- [3] El-Askary W A, Saad A S, AbdelSalam A M, et al. Experimental and theoretical studies for improving the performance of a modified shape Savonius wind turbine [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2020, 142(12):1-12.

- [4] 胡缘, 杨绍辉, 何宏舟, 等. 半潜式多浮体波浪能发电装置的水动力性能分析[J]. 水力发电学报, 2019, 38(9): 91-101.
- [5] Prasad D D, Ahmed M R, Lee Y H. Studies on the performance of Savonius rotors in a numerical wave tank [J]. Ocean Engineering, 2018, 158:29-37.
- [6] Thakur N, Biswas A, Kumar Y, et al. CFD analysis of performance improvement of the Savonius water turbine by using an impinging jet duct design[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 27(4):794-801.
- [7] Basumatary M, Biswas A, Misra R D. CFD analysis of an innovative combined lift and drag (CLD) based modified Savonius water turbine[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 174:72-87.
- [8] 边佩翔, 杨志宏, 王勇, 等. Savonius 式水轮机水动力学性能[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(2):268-272.
- [9] 姚建均, 李凤甦, 王贤成, 等. Savonius 型水轮机减流特性数值模拟研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2020, 41(6):870-876.
- [10] 吴映江, 宋瑞银, 郑堤, 等. Savonius 型桨叶水动力特性研究[J]. 海洋工程, 2020, 38(2):143-150.
- [11] 谢敏捷. 波流耦合作用下 Savonius 型桨叶性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.

Hydrodynamic performance of Savonius turbine with one-way open valve

WU Yeqing^{1,2}, SONG Ruiyin^{2*}, CUI Yuguo¹, CAI Zelin³, CHEN Kaixiang³

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Ningbotech University, Ningbo 315100, China;

3.Zhejiang University of Science & Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: In order to improve the energy capture efficiency of Savonius turbine, a one-way open valve Savonius rotor design is proposed. A three-dimensional numerical model of the rotor is established to simulate the influence of the opening ratio and curvature of the blade on the performance of the turbine and the effect of flow reduction. Finally, an experimental platform was built and a physical model experiment was carried out to verify the accuracy of the numerical simulation results. The results show that the hydrodynamic performance of Savonius turbine can be effectively improved when the curvature of blade is large and the opening ratio is small. When the opening ratio of Savonius rotor is 0.2, the average performance is 33.57% higher than that of Savonius rotor without one-way open valve. When the curvature of the blade is between 50 and 70 mm, the Savonius rotor has good flow reduction effect, which reaches 35% in the area of 0.5 m behind the S-shaped rotor.

Key words: hydraulic Savonius turbine; one-way open valve; opening ratio; numerical simulation; torque; flow reduction characteristics

(责任编辑 韩 超)