

水沙环境对海流能机组水动性能的影响*

倪艺铭, 高艳婧, 刘宏伟, 林勇刚

浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

摘要: 为了探究水沙环境下海流能机组的水动特性, 首先采用 CFD-DPM 模型仿真沙粒对 120 kW 海流能叶片翼型升阻力系数的影响, 再基于叶素动量理论 (BEM, blade element momentum) 计算水沙环境下 120 kW 海流能机组的捕获功率, 最后从叶片设计的角度出发, 提出了为能充分利用沙粒对海流能机组功率的促进作用以及尽量减小沙粒对海流能机组功率的削弱的方法。研究表明: 当颗粒直径为 20 μm 时, 随着沙粒质量浓度的增加, 沙粒能够促使海流能机组功率提升, 当颗粒直径为 2 500 μm 时, 海流能机组功率因沙粒的存在而被削弱; 随着翼型攻角增大, 翼型升力系数增大, 颗粒对翼型升阻力系数的影响程度增强, 升阻力系数的变化量增加; 小升力系数的翼型可以充分利用小直径颗粒对机组的功率提升, 也可以降低大直径颗粒造成的机组功率削弱。

关键词: 海流能机组; 升阻力系数; CFD-DPM; 叶素动量理论

中图分类号: P743; TM612 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)04-0116-10

Effect of water-sediment environment on hydrodynamic performance of a tidal current turbine

NI Yiming, GAO Yanjing, LIU Hongwei, LIN Yonggang

State Key Laboratory of Fluid Power & Mechatronic Systems, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

Abstract: In order to explore the hydrodynamic characteristics of a tidal current turbine under a water-sediment environment, the CFD-DPM model is employed to study the effect of sand particles on the airfoil lift and drag coefficients of 120 kW tidal current turbine blade. Based on the blade element momentum theory (BEM), the 120 kW tidal current turbine power is calculated. From the perspective of blade design, the method to make full use of or reduce the influence of sand particles on the power of the tidal current turbine is put forward. The results show that when the particle diameter is 20 μm , as the concentration of sand grains increases, the sand particle can improve the tidal current turbine power. When the particle diameter is 2 500 μm , the particle will reduce the power. As the angle of attack increases, the lift coefficient increases, and the effect of the sand particle on the lift and drag coefficients is enhanced. Airfoils with a small lift coefficient would receive power improvement with small particles or power loss reduction with large particle diameters.

Key words: tidal current turbine; lift and drag coefficients; CFD-DPM; blade element momentum theory (BEM)

* 收稿日期: 2022-07-14

录用日期: 2022-12-13

网络首发日期: 2023-02-20

基金项目: 浙江省重点研发项目 (2021CO3182); 浙江省科技项目 (2021R52040); 国家重点研发计划 (2018YFB1501900); 国家自然科学基金 (51905472)

作者简介: 倪艺铭 (1999 年生), 女; 研究方向: 可再生能源装备; E-mail: zju22125109@zju.edu.cn

通信作者: 刘宏伟 (1978 年生), 男; 研究方向: 可再生能源装备; E-mail: lhw7802@zju.edu.cn; zju000@163.com

海流能具有能量密度大、储量丰富、可预测性强的天然优势(Myers et al., 2005), 我国的海流能资源丰富可达 14 000 MW。由于水土流失, 我国近海岸海流含有大量泥沙(赵纯厚, 2000; 余文畴等, 2002), 而且不同海域沙粒属性差别很大(谷国传等, 1989)。目前, 沙粒是否会影响海流能机组捕获功率是未知的, 水沙环境下是否需要提出新的叶片设计的方法也是未知的, 所以研究水沙环境下海流能机组的水动性能很有必要。

国内外大部分的研究集中在海流能机组叶片表面粗糙度增加(沙粒冲击、空化以及海水腐蚀)造成的功率损失(Fraenkel et al., 2002; Batten et al., 2008; Ng et al., 2013; Walker et al., 2014; Bammert et al., 1976; David et al., 2018), 水沙两相流对海流能机组捕获功率的影响缺少系统的研究。目前多相流的研究多数采用数值仿真的方法, 最常使用的多相流模型包含欧拉-欧拉模型和欧拉-拉格朗日模型。欧拉-欧拉方法中颗粒和流体都被作为连续相, 需要引入额外的模型模拟颗粒的压力和剪切力, 一方面不能跟踪每一个颗粒轨迹, 另一方面本构关系描述固相压力存在疑问, 求解精度低(于勇, 2008)。欧拉-拉格朗日方法将颗粒视为离

散相, 能准确跟踪每一个颗粒的轨迹(Sun et al., 2020), 离散相(DPM)模型属于其中的一种, 它使用一个颗粒轨道计算具有相同性质的颗粒, 占用内存以及求解时间更少(Wang et al., 2017)。

本文首先采用CFD-DPM模型仿真水沙环境下翼型的升阻力系数, 再基于叶素动量理论计算沙粒对 120 kW 海流能机组捕获功率的影响, 得出小直径颗粒可以提高海流能机组的捕获功率, 大直径颗粒将降低海流能机组的捕获功率。最后从叶片设计的角度, 仿真分析不同攻角下的翼型升阻力系数, 提出充分利用或者削弱颗粒对海流能机组功率影响的方法。

1 计算模型

如图 1 所示, 120 kW 海流能机组在舟山摘箬山岛完成了海试。120 kW 海流能机组的基本参数如表 1 所示, 它包含 30 个叶素, 部分翼型叶素弦长和扭角如表 2 所示。该机组已经并网运行 5 a, 由于所示范的海域含有大量泥沙, 叶片受到沙粒冲击出现了磨损现象。在这个研究中, 基于叶素理论, 将 120 kW 海流能叶片分成为 30 个翼型叶素, 以NACA63-翼型为研究对象。

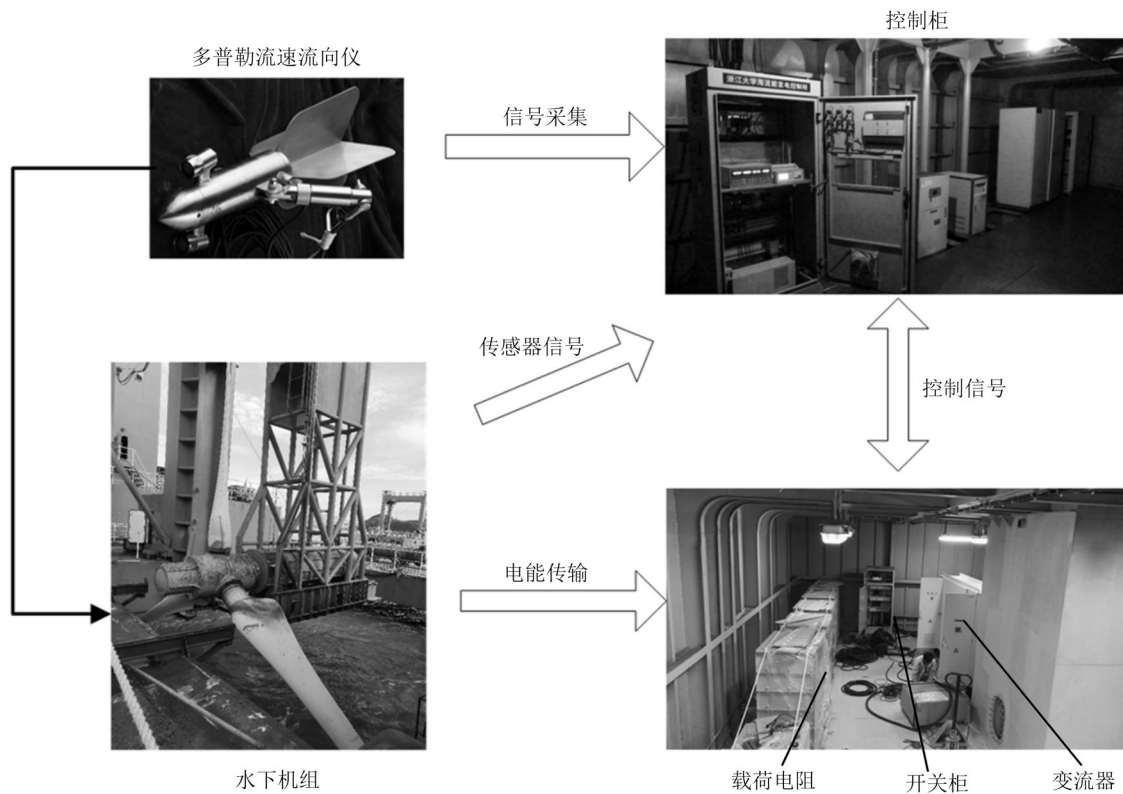


图1 120 kW 海流能机组发电系统海上试验

Fig. 1 Sea test of power generation system of 120 kW tidal current turbine

表 1 120 kW 海流能机组设计参数

Table 1 120 kW tidal current turbine design parameters

设计参数	数值
额定流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	2
额定转速/($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	20
叶片半径/m	5
叶片数目	3
轮毂半径/m	0.6
最佳叶尖速比	6

表 2 不同翼型叶素的弦长和扭角

Table 2 The chord length and twist under different airfoil elements

距离/m	弦长/m	扭角/($^{\circ}$)	厚度/%
0	0.460	22.50	100.0
0.4	0.622	22.45	68.1
0.8	0.872	18.27	36.1
1.25	0.718	12.62	31.1
1.7	0.577	9.03	27.6
2.2	0.469	6.37	25.0
2.8	0.391	4.19	22.2
3.4	0.326	2.61	21.0
3.8	0.268	1.64	21.0
4.2	0.241	0.54	21.0
4.4	0.152	0	16.0

1.1 网格划分和边界条件

在 ICEM 中完成部分建模、网格划分, 如图 2 所示, 计算流域展向取翼型弦长的 1 倍, 上游、下游分别为翼型弦长的 12.5 倍和 16 倍。颗粒喷射面位于翼型上游 6 倍弦长的位置, 喷射面长度为弦长的 10 倍, 颗粒喷射面是在 FLUENT 中创建的虚拟面, 通过设置节点数目可以保证喷射面网格均匀。

结构化网格能够生成高质量的网格, 采用结构化网格划分流场, 由于翼型附近的网格需要加密, 采用 C-block 划分网格的方法(李鹏飞等, 2011)。选取首层网格高度为 0.02 mm, 以控制无量纲高度 y^+ 小于 1(于勇, 2008)。网格数量的不同会影响仿真计算的时间和结果的精度, 当网格达到一定数量后, 计算的耗时增加, 但结果精度几乎不变。改变网格节点数目划分网格, 不同网格数量的仿真计算结果见表 3。随着网格数量的增大, 升力系数增大, 阻力系数减少而且最终基本

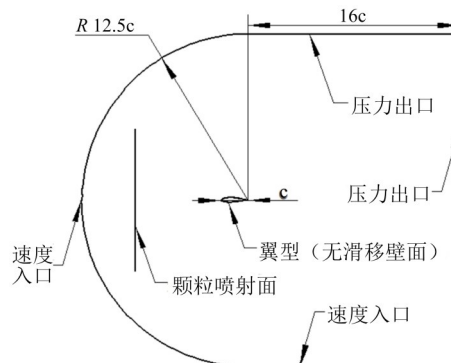


图 2 计算域和边界条件

Fig. 2 Calculation domain and boundary conditions

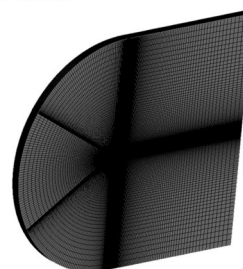
不变(控制相对误差为 0.1%), 最终选择网格 3 进行仿真计算, 如图 3 所示。

表 3 不同网格分辨率下翼型升阻力系数

Table 3 The airfoil lift and drag coefficient under different grid resolutions

网格数量	升力系数	阻力系数
1 936 784	0.921 97	0.012 98
2 577 494	0.925 66	0.012 87
3 239 204	0.928 25	0.012 82
3 921 914	0.928 83	0.012 81

(a) 计算域网格



(b) 翼型表面网格

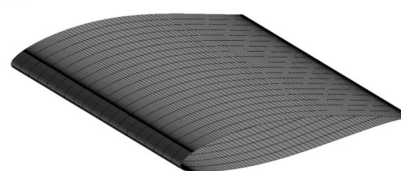


图 3 网格划分

Fig. 3 Mesh generation

计算域入口采用速度入口, 出口为压力出口, 翼型壁面设为无滑移壁面(Tampieret al., 2017), 颗粒在颗粒喷射面以与流体相同的速度进入流场。设置颗粒在翼型壁面时为“reflect”, 在出口处为“escaped”。

研究选择 SST $k-\omega$ 湍流模型 (Bagheri-Sadeghi et al., 2018; Tampier et al., 2017), 运用 Segregated 隐式求解器, 压力速度耦合采用 SIMPLE 算法, 梯度采用格林-高斯节点法 (Green-Gause node-based method), 压力、动量、湍流动能和比耗散速率采用二阶离散化方法 (于勇, 2008)。

1.2 模拟方法验证

首先采用 CFD-DPM 模型计算每个翼型的升阻力系数, 然后基于叶素动量理论计算 120 kW 海流能机组叶片的输出转矩和功率。图 4 展示了不同水流流速下的叶轮实测功率值和仿真功率值, 仿真结果和实测功率基本吻合。

为了进一步验证 CFD-DPM 模型的准确性, 使用颗粒冲击 120 kW 海流能叶片造成的磨损数据作为实验数据。选择考虑颗粒形状因子和冲击角的 Ahlert 侵蚀模型 (Ahlert et al., 1994)。图 5(a) 为实海况下 120 kW 海流能叶片的沙粒冲蚀图, 图 5(b) 为 120 kW 海流能叶片的仿真冲蚀云图。图 6 为模拟和实验的最大侵蚀位置对比, 由图 6 可知, 最大侵蚀位置从叶根向叶尖移动, 与实验数据能较好吻合。

2 含沙环境对 120 kW 海流能功率的影响

仿真计算每个翼型叶素在不同质量浓度下的升

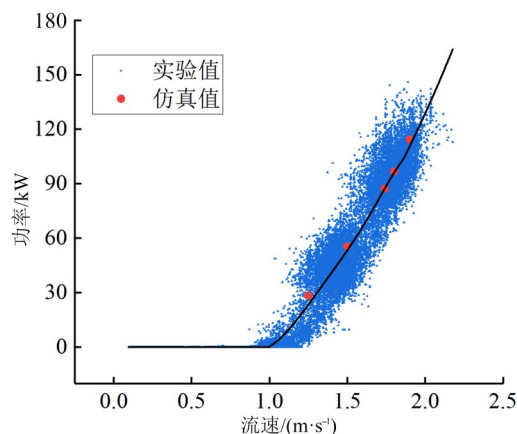


图4 不同流速下叶轮实验功率和仿真功率对比

Fig. 4 Comparison of the simulated turbine power with the experimental data at different flow velocities

阻力系数, 以叶素 28 为例, 如图 7 所示, 当颗粒直径为 $20\ \mu\text{m}$ 时, 升力系数大于无颗粒时的升力系数, 而且随着颗粒质量浓度的增大, 升力系数增大。阻力系数大于无颗粒时的阻力系数, 随着颗粒质量浓度增大, 阻力系数也增大。基于叶素动量理论计算不同质量浓度下 120 kW 海流能机组叶片的捕获功率, 如图 8 所示。随着颗粒质量浓度增大, 叶轮捕获功率增大, 当颗粒质量浓度为 $100\ \text{g/L}$ 时, 相比于不含沙环境叶轮捕获功率提高了 2.932%。

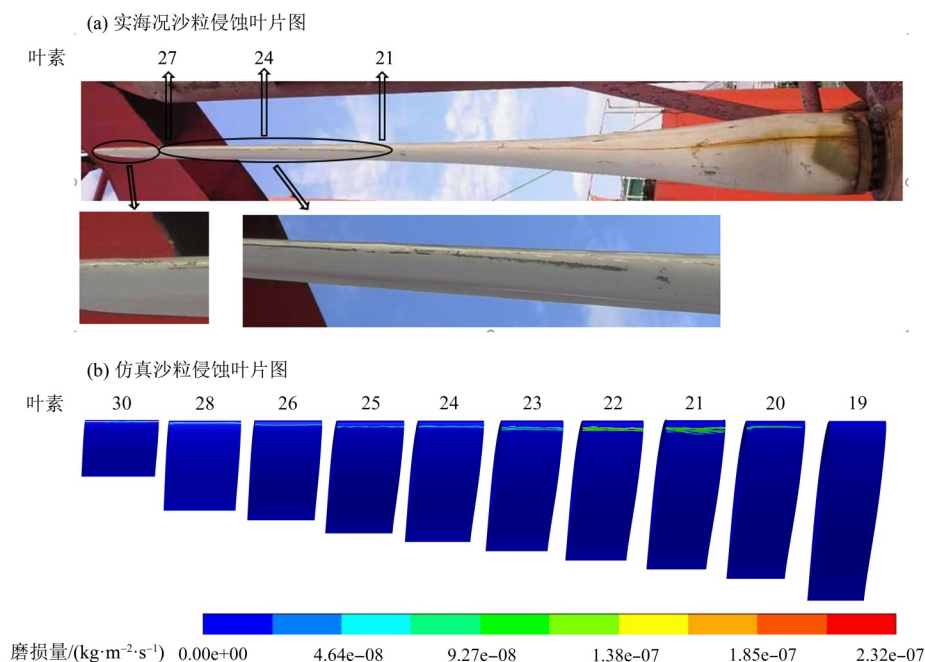


图5 120 kW 海流能叶片的颗粒侵蚀图

Fig. 5 Erosion diagram caused by the sand of the 120 kW tidal current turbine

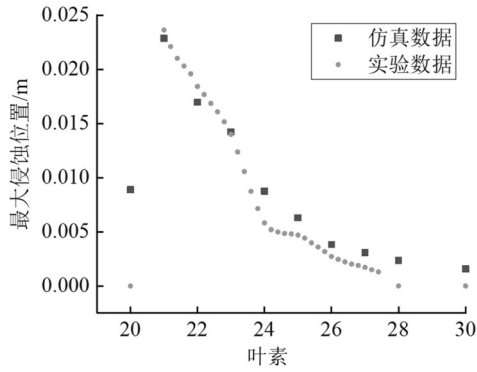


图 6 最大侵蚀位置仿真和实验对比

Fig. 6 Comparison of the maximum erosion location of the simulation and the experiment

同样以叶素 28 为例, 如图 9 所示, 当颗粒直径为 2 500 μm 时, 升力系数小于无颗粒时的升力系数, 而且随着颗粒质量浓度的增大, 升力系数减小。和小直径颗粒 20 μm 一样, 阻力系数大于无颗粒时的阻力系数, 随着颗粒质量浓度增大, 阻力系数增大。图 10 展示了当颗粒直径为 2 500 μm 时, 不同颗粒质量浓度下 120 kW 海流能机组叶片的捕获功率。随着颗粒质量浓度增大, 叶轮捕获功率减小, 当颗粒质量浓度为 100 g/L 时, 相比于不含沙环境叶轮捕获功率减小了 21.4%。

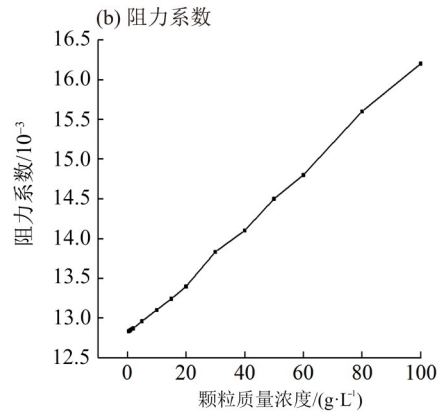
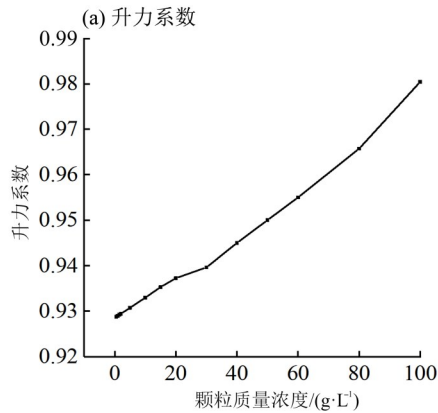
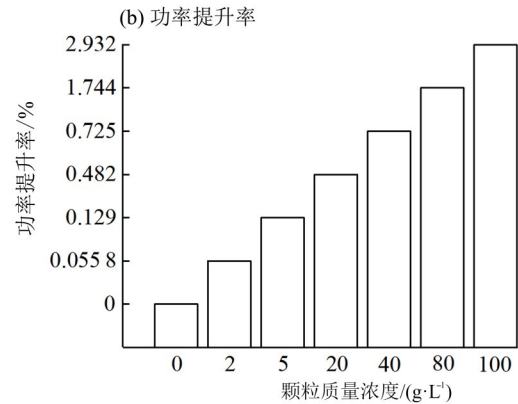
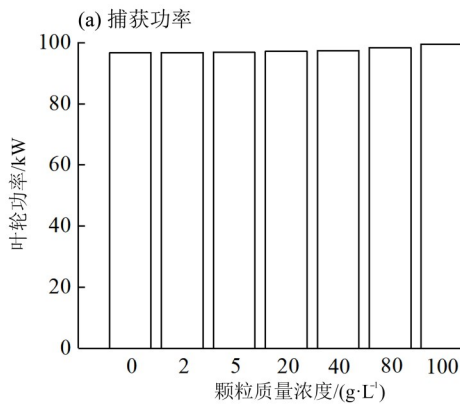


图 7 颗粒直径为 20 μm 升阻力系数随颗粒质量浓度的变化曲线

Fig. 7 The lift and drag coefficients versus particle concentration when the particle diameter is 20 μm



$$\text{功率提升率} = (\text{含沙功率} - \text{无颗粒功率}) / \text{无颗粒功率}$$

图 8 颗粒直径为 20 μm 叶轮捕获功率

Fig. 8 The blade power when the particle diameter is 20 μm

当颗粒直径比较小时, 颗粒的惯性小, 颗粒跟随流体运动, 颗粒轨迹和流体流线基本重合, 如图 11 所示。颗粒和流体可以看作为单相, 这就等效于增加了海水的密度, 升阻力增大, 从而导

致海流能机组捕获功率增大。当颗粒直径较大时, 颗粒惯性增大, 颗粒独立于流体运动, 颗粒与流体之间相互作用。压力面流体速度受翼型影响速度下降, 流体对颗粒拖曳力作用导致颗粒速度随

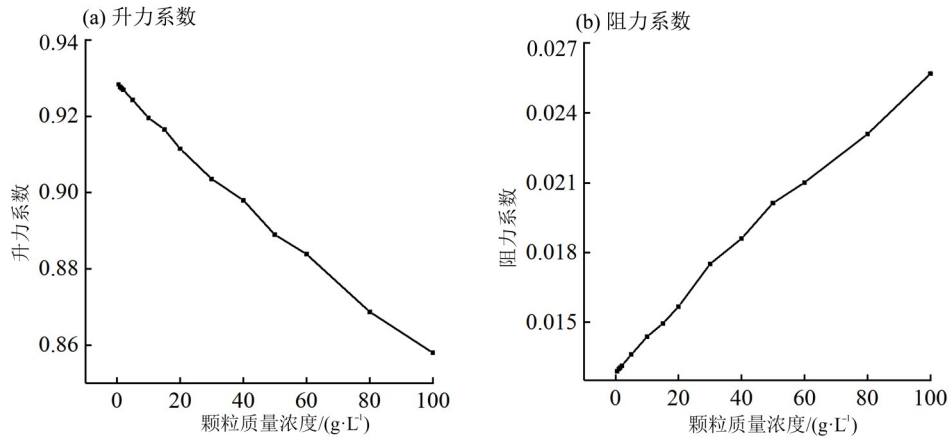
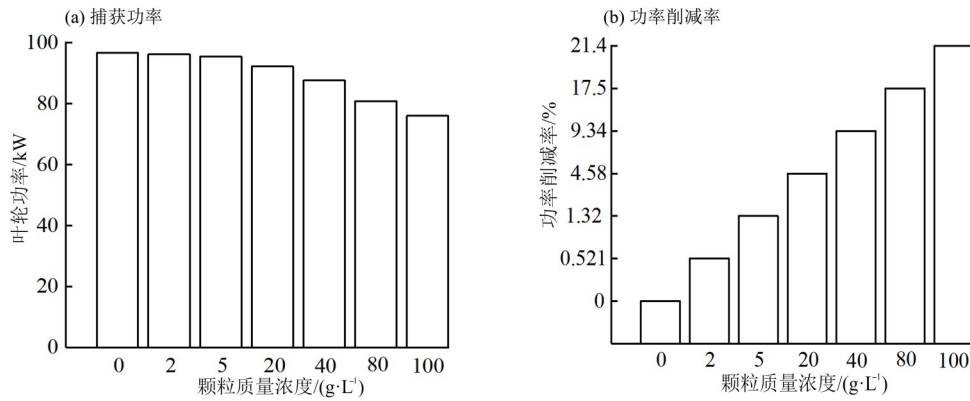


图9 颗粒直径为 2 500 μm 升阻力系数随颗粒质量浓度的变化曲线

Fig. 9 The lift and drag coefficients versus particle concentration when the particle diameter is 2 500 μm



$$\text{功率削减率} = (\text{无颗粒功率} - \text{含沙功率}) / \text{无颗粒功率}$$

图 10 颗粒直径为 2 500 μm 叶轮捕获功率

Fig. 10 The blade power when the particle diameter is 2 500 μm

之下降, 但颗粒速度的下降程度小于流体, 故颗粒速度大于流体速度, 此时颗粒对流体作用导致流体速度减小程度减小, 这就等效于相对流速

度的减小, 如图 12 所示。流体速度的减小导致升力系数减小, 阻力系数增大, 最终叶轮捕获功率减小。

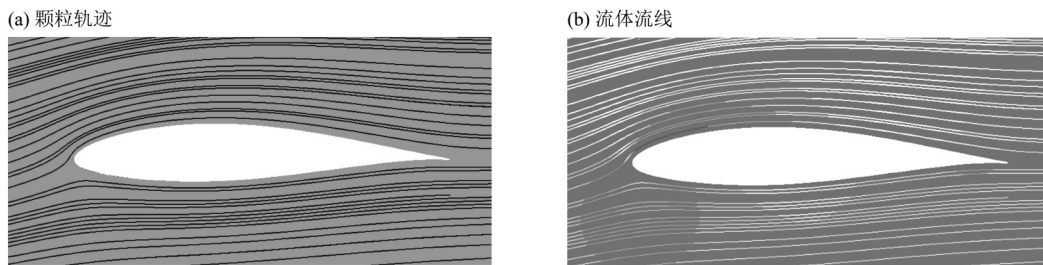
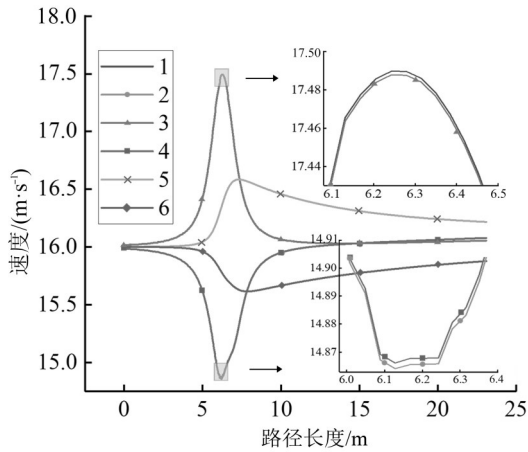


图 11 颗粒直径为 20 μm 时颗粒轨迹和流体流线

Fig. 11 The particle trajectories and streamlines when the particle diameter is 20 μm

大直径颗粒造成海流能机组捕获功率降低, 小直径颗粒造成海流能捕获功率提升, 这对含沙环境下海流能叶片设计提供建议和参考。在我国不同海域的颗粒属性差别还是很大的, 这对如何

能够利用小直径颗粒造成的功率提升和避免大颗粒直径造成的功率削减提出了要求。翼型攻角是叶片设计中的参数变量, 下文从翼型攻角方面探究沙粒对机组功率的影响。



1: 无颗粒流体速度(ID=45 000); 2: 无颗粒流体速度 (ID=23 000); 3: 颗粒作用后流体速度(ID=45 000); 4: 颗粒作用后流体速度(ID=23 000); 5: 颗粒速度 (ID=45 000); 6: 颗粒速度(ID=23 000); ID: 颗粒编号。

图 12 沿 ID=45 000 和 ID=23 000 的颗粒轨迹的颗粒速度以及流体速度

Fig. 12 The particle velocity and fluid velocity along the trajectory of Particle ID=45 000 and Particle ID=23 000

3 翼型攻角

3.1 不同攻角下小直径颗粒对翼型升阻力系数的影响

图 13 展示随着攻角增大, 大于无颗粒升力系数的临界直径值减小。随着攻角增大, 升力系数

增大, 压力面流体速度减小程度增大, 如图 14 所示。颗粒没有时间响应流体大的速度变化, 颗粒偏离流体流线的程度增大。颗粒和流体可以作为单相的颗粒直径减小, 所以大于无颗粒升力系数的临界直径值减小。为了充分利用小直径颗粒带来的功率提高, 在最大升阻比和强度满足要求时, 应选择小升力系数的翼型。

3.2 不同攻角下大直径沙粒对翼型升阻力系数的影响

翼型升力系数会随攻角改变而变化, 为了探究不同攻角下大直径颗粒对升力系数的影响, 升力系数的变化程度[(无颗粒升力系数-带颗粒升力系数)/无颗粒升力系数]被用于衡量沙粒的作用。从图 15 可以看出, 随着攻角增大, 升力系数的变化程度 ∇C_L 也相应增大。

在下面的研究中, U_{p-f} : 沿同一颗粒 ID 轨迹下颗粒与无颗粒流体的速度之差(沿某一个颗粒 ID 的无颗粒流体速度通过读有颗粒的 case 和无颗粒的 data 文件获得)。 U_{f-p} : 沿同一颗粒 ID 轨迹下流体与无颗粒流体的速度之差。路径长度: 沿着某一颗粒 ID 的颗粒轨迹的路径长度, 以颗粒喷射面作为起点开始计算。

随着攻角增大, 升力系数增大。颗粒偏离流体流线的程度增加, U_{p-f} 增加, 颗粒对流体速度

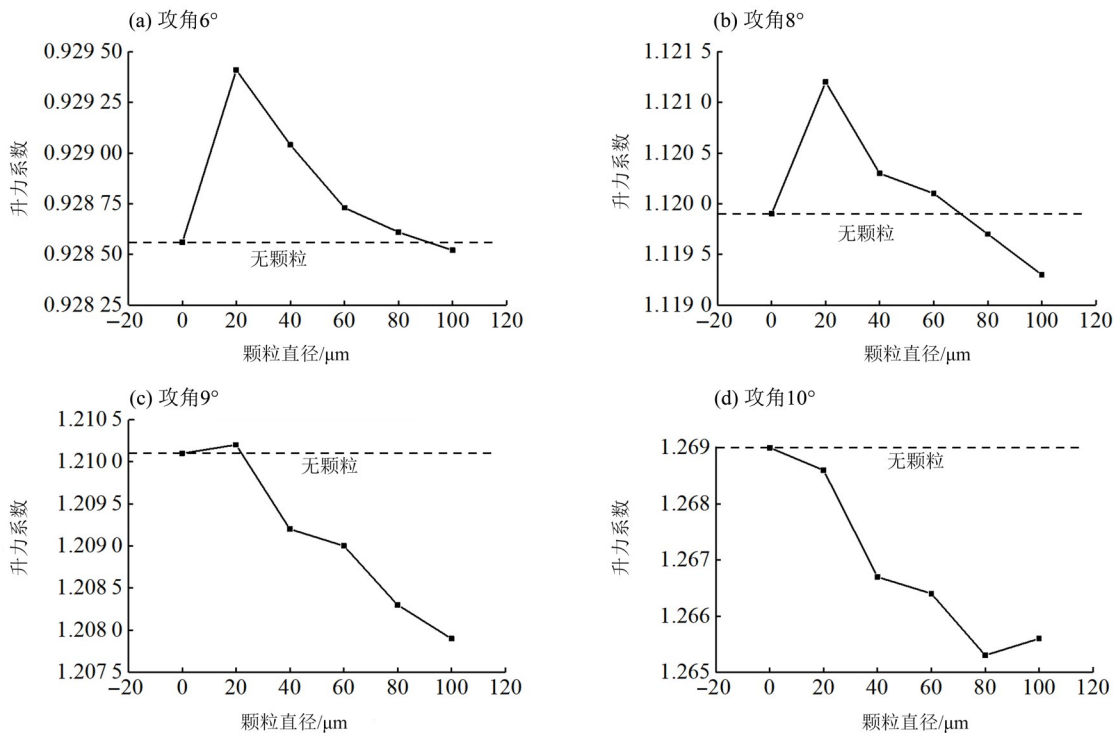


图 13 不同攻角下升力系数随直径的变化曲线

Fig. 13 The lift coefficient versus particle diameter under different angles of attack

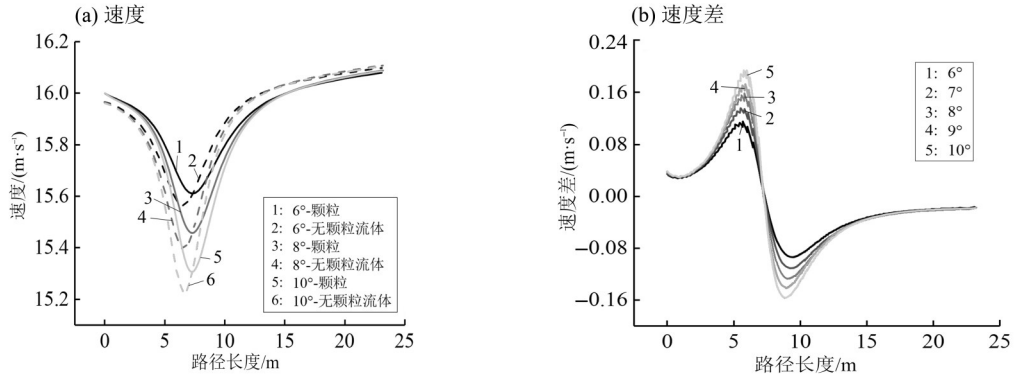


图14 不同攻角下沿着同一颗粒轨迹的颗粒速度和无颗粒流体速度

Fig. 14 Particle velocity and fluid velocity without particles along the same particle trajectory under different angles of attack

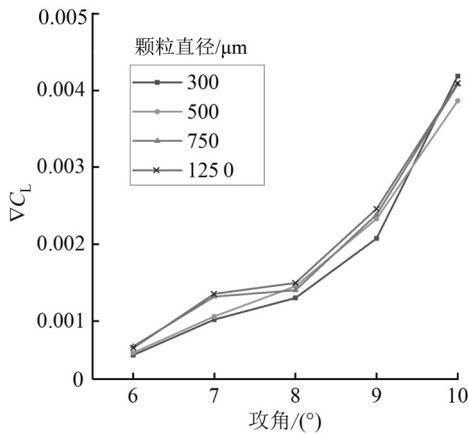


图15 升力系数变化程度随攻角的变化曲线

Fig. 15 The degree of change in the lift coefficient versus angle of attack

的影响程度增强, 如图14所示。而且在流域中大攻角下的流体速度降低程度更大, 无颗粒流体的速度更小, 如图14(a)所示。考虑这两个因素, 当攻角增大时, U_{fp-m} 增大, 等效相对流体速度减小值增大, 如图16所示。

沿着相同颗粒ID的颗粒轨迹, 如果流体速度减小值相同, 攻角越大, 升力系数变化程度也越大, 如图17(a)所示。而且, 随着攻角的增加, U_{fp-m} 增加, 等效相对流体速度减小值增加, 最终导致升力系数变化程度 ∇C_L 随攻角增大而增大。

图17(b)为大直径颗粒下攻角对阻力系数变化程度 ∇C_D [(带颗粒阻力系数-无颗粒升力系数)/无颗粒升力系数] 的影响。随着攻角增加, 阻力系数变化程度 ∇C_D 也随之增加。图17(c)显示当流体速

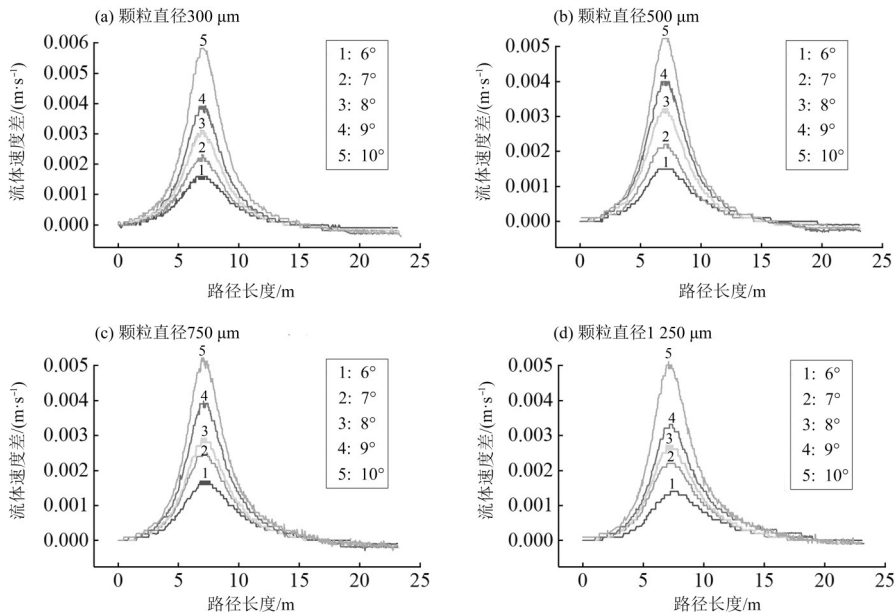
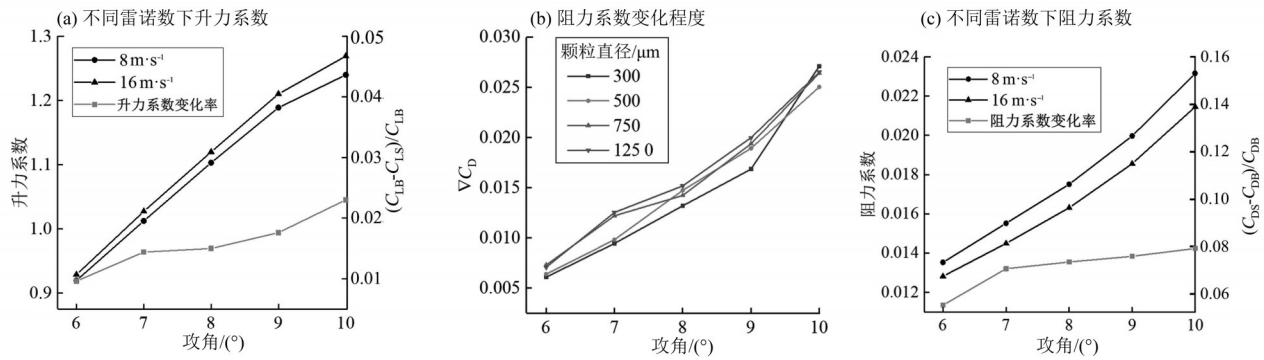


图16 不同攻角下沿着同一颗粒轨迹的有无颗粒流体速度差

Fig. 16 The velocity difference between the fluid and the fluid without particles along the same particle trajectory under different angles of attack



C_{L16} : 速度为 16 m/s 的升力系数; C_{L8} : 速度为 8 m/s 的升力系数; C_{D16} : 速度为 16 m/s 的升力系数; C_{D8} : 速度为 8 m/s 的升力系数。

图 17 不同雷诺数下升阻力系数及阻力系数变化程度随攻角的变化曲线

Fig. 17 The airfoil lift coefficient and drag coefficient under different Reynolds numbers and the degree of change in the drag coefficient versus angle of attack

度减小相同值时, 阻力系数的变化程度随攻角的增大而增大。随着攻角增加, U_{ip-in} 增加, 流体速度减小值增大, 所以阻力系数的变化程度 ∇C_D 随攻角的增大而增大。

随着翼型攻角增大, 升力系数增大。压力面流体速度的降低程度增加, 升力系数变化程度 ∇C_L 和阻力系数变化程度 ∇C_D 都增加。和充分利用小直径颗粒对功率提升的方式一样, 选择小升力系数翼型同样可以减小大直径颗粒对机组叶轮造成的功率损失。

4 结论

本文基于 SSTk- ω 湍流模型和 DPM 模型, 首先探究了不同沙粒直径对 120 kW 海流能机组捕获功率的影响, 接下来为了充分利用和削减沙粒对海流能机组功率的影响, 研究了不同攻角下翼型升阻力系数的变化, 结论如下:

1) 小直径颗粒由于惯性小, 颗粒和流体可以

被作为单相, 相当于增加了介质密度, 提升了海流能机组功率, 当颗粒直径为 20 μm 和颗粒质量浓度为 100 g/L 时, 和无颗粒相比叶轮捕获功率提升了 2.932%。

2) 大直径颗粒由于惯性大, 颗粒和流体相互作用, 颗粒等效于减小了相对流体速度, 升力系数减小, 阻力系数增大, 导致海流能机组功率衰减, 当颗粒直径为 2 500 μm 和颗粒质量浓度为 100 g/L 时, 和无颗粒相比叶轮捕获功率削弱了 21.4%。

3) 随着翼型攻角增大, 大于无颗粒升力系数的临界直径值减小, 选择小升力系数翼型可以充分利用小直径颗粒造成的机组功率提升。

4) 随着翼型攻角增大, 升力系数增大, 大直径颗粒作用下, 升力系数的变化程度 ∇C_L 和阻力系数的变化程度 ∇C_D 都增大, 选择小升力系数翼型可以削弱大直径颗粒造成的机组功率损失。

参考文献:

谷国传, 胡方西, 1989. 我国沿海近岸带水域的悬沙分布特征[J]. 地理研究, 8(2): 1-15.
 李鹏飞, 徐敏义, 王飞飞, 2011. 精通 CFD 工程仿真与案例实战[M]. 北京: 人民邮电出版社.
 余文畴, 岳红艳, 2002. 长江径流泥沙在世界江河中的地位[J]. 长江科学院院报, 19(6): 13-16.
 于勇, 2008. FLUENT 入门与进阶教程[M]. 北京: 北京理工大学出版社.
 赵纯厚, 朱振宏, 周端庄, 2000. 世界江河与大坝[M]. 北京: 中国水利水电出版社.

AHLERT K R, 1994. Effects of particle impingement angle and surface wetting on solid particle erosion of AISI 1018 Steel[D]. Tulsa: The University of Tulsa. Department of Mechanical Engineering: 15-23.
 BAGHERI-SADEGHI N, HELENBROOK B T, VISSER K D, 2018. Ducted wind turbine optimization and sensitivity to rotor position[J]. Wind Energy Sci, 3(1): 221-229.
 BMMERT K, SANDSTEDTE H, 1976. Influences of manufacturing tolerances and surface roughness of blades on the performance of turbines[J]. J Eng Power, 98(1):

- 29–36.
- BATTEN W M J, BAHAJ A S, MOLLAND A F, et al, 2008. The prediction of the hydrodynamic performance of marine current turbines[J]. *Renew Energy*, 33(5): 1085–1096.
- FRAENKEL P L, 2002. Power from marine currents[J]. *Proc Inst Mech Eng A J Power Energy*, 216(1): 1–14.
- MYERS L, BAHAJ A S, 2005. Simulated electrical power potential harnessed by marine current turbine arrays in the Alderney Race[J]. *Renew Energy*, 30(11): 1713–1731.
- NG K W, LAM W H, NG K C, 2013. 2002–2012: 10 years of research progress in horizontal-axis marine current turbines[J]. *Energies*, 6(3): 1497–1526.
- OWEN D, DEMIREL Y K, OGUZ E, et al, 2018. Investigating the effect of biofouling on propeller characteristics using CFD[J]. *Ocean Eng*, 159: 505–516.
- SUN L, MA C, SONG P, et al, 2020. Quantitative computational fluid dynamic analyses of oil droplets deposition on vaneless diffuser walls of a centrifugal compressor[J]. *Energy Sci Eng*, 8(3): 910–921.
- TAMPIER G, TRONCOSO C, ZILIC F, 2017. Numerical analysis of a diffuser-augmented hydrokinetic turbine[J]. *Ocean Eng*, 145: 138–147.
- WALKER J M, FLACK K A, LUST E E, et al, 2014. Experimental and numerical studies of blade roughness and fouling on marine current turbine performance[J]. *Renew Energy*, 66: 257–267.
- WANG K, LI X, WANG Y, et al, 2017. Numerical investigation of the erosion behavior in elbows of petroleum pipelines[J]. *Powder Technol*, 314: 490–499.

(责任编辑 张 冰)