排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2021 年 8 月 Aug. 2021 | 第 39 卷 第 8 期 Vol.39 No.8

复杂潮流条件下导管涡轮机的水动力学性能

宋科[1*]，杨邦成[2]
（1. 昆明学院机电工程学院，云南 昆明 650214；2. 昆明理工大学建筑工程学院，云南 昆明 650500）


宋科

摘要：为了探究导管涡轮机在复杂潮流条件下的非定常性能，依据斋堂岛海域的潮流条件，采用计算流体力学（CFD）数值模拟方法分析了浸没深度和偏流角对导管涡轮机水动力学性能及尾流场流态的影响.研究结果表明：不同浸没深度和偏流角下的导管涡轮机水动力学性能均表现出与波浪频率一致的时间周期性行为；在波流作用下，随着浸没深度的减小，水流将发生强烈的跃迁，由波流引起的水动力学性能波动幅值增大；在波流与偏流共同作用下，随着偏流角的增大，导管涡轮机的平均功率系数及推力系数逐渐减小.此外，水动力学性能在叶轮旋转周期内将出现额外的周期性波动，该波动频率由叶轮转速和叶片数决定，且波动幅值随着偏流角的增加而增大，导管涡轮机后方的尾流场结构也将变得相当不稳定和复杂.

关键词：复杂潮流条件；导管涡轮机；浸没深度；偏流角；水动力学性能
中图分类号：TK730.2　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2021)08-0826-06
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.20.0311

宋科，杨邦成. 复杂潮流条件下导管涡轮机的水动力学性能[J].排灌机械工程学报，2021，39(8)：826-831.
SONG Ke, YANG Bangcheng. Hydrodynamic performance of ducted turbine under complex tidal current condition[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME), 2021, 39(8): 826-831. (in Chinese)

Hydrodynamic performance of ducted turbine under complex tidal current conditions

SONG Ke[1*], *YANG Bangcheng*[2]
(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Kunming University, Kunming, Yunnan 650214, China; 2. Faculty of Civil Engineering and Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China)

Abstract: In order to explore the unsteady performance of ducted turbine under complex tidal current conditions, the effects of immersion depth and the yaw angle on hydrodynamics and wake flow pattern of ducted turbine were analyzed by computational fluid dynamics (CFD) method under the tidal current conditions in Zhaitang Island. The results reveals that the hydrodynamic performance of ducted turbine with different immersion depths and yaw angles reveals time periodic behavior consistent with the wave frequency. There is a strong transition on flow and a higher-amplitude fluctuation on hydrodynamic performance caused by wave-current effect with the decrease of immersion depth. The average power coefficient and thrust coefficient of ducted turbine decrease gradually with the increase of yaw angle under wave-current and yaw flow effect. Besides, it will also cause additional periodic fluctuations in hydrodynamic performance during one rotating period of the rotor, and the frequency of

收稿日期：2020-11-03；**修回日期**：2021-03-06；**网络出版时间**：2021-07-02
网络出版地址：https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20210702.0945.002.html
基金项目：国家自然科学基金资助项目(11172116)；昆明学院人才引进项目(YJL20023)
第一作者简介：宋科(1989—)，男，云南昆明人，讲师，博士(通信作者，songkesk@sina.com)，主要从事新能源流体机械研究.
第二作者简介：杨邦成(1965—)，男，四川成都人，教授(yangbc5@163.com)，主要从事机械及材料性能研究.

the fluctuation is determined by the rotational speed and the number of blades. The fluctuation amplitude increases with the increase of yaw angle, and the wake structure behind ducted turbine will become quite unstable and complex.

Key words: complex tidal current condition; ducted turbine; immersion depth; yaw angle; hydrodynamic performance

近年来,潮流能作为一种清洁可再生能源受到世界各国的重视,尤其在发达国家的能源体系中占据了越来越多的份额[1].水平轴涡轮机作为开采潮流能的一种转换装置,被认为是目前最有前景的开采装备[2].此外,为了有效地提升水平轴涡轮机的输出功率,在其环向加装导管扩散器是一种最直接的方式,得到了国内外学者的广泛关注.BORG 等[3]对一种新型导管涡轮机的水动力学性能及尾流场进行了研究.刘垚等[4]研究了导管涡轮机的水动力学性能,发现导管可将涡轮机周围的流速提高 1.35 倍,转速提高 1.2 倍,获能效率提高 35%.NUNES 等[5]对 2 种不同的导管涡轮机进行了数值模拟和风洞试验,发现导管可以提升涡轮 48%~79%的输出功率.TAMPIER 等[6]对导管涡轮机进行数值模拟,取得了与试验较为一致的结果,并指出导管与叶轮存在一定的相互作用关系.宋科等[7]从叶轮翼型、叶尖间隙、导管设计参数等方面对一种薄壁导管涡轮机进行了研究.张琰等[8]、郑美云等[9]、KHALID 等[10]研究了导管形状对涡轮机的水动力学性能的影响,发现不同的导管形状对于提高涡轮机能量获取性能有很大的影响.BELLONI 等[11]使用 RANS-BEMT 模型分析了导管涡轮机的水动力学性能,并通过文献验证了数值结果的准确性.DÉBORAH 等[12]提出了一种优化导管涡轮机叶片设计的新方法,以避免叶片在导管加速流体状态下发生空化.

现阶段对导管涡轮机的研究主要集中在性能设计及均匀流条件下的水动力分析等方面.然而在实际海洋环境中,导管涡轮机不可避免地要在波浪、剪切流、偏流等复杂条件下运行.这将对结构及载体的水动力性能和载荷分布产生不同程度的影响.目前,关于导管涡轮机在上述复杂潮流条件下的水动力问题的相关研究和报道很少,为了填补这一空缺和不足,文中依据斋堂岛海域的潮流条件,探讨浸没深度和偏流角对导管涡轮机的水动力学性能及尾流场流态的影响.希望这项工作能对更好地了解导管涡轮机在复杂潮流条件下的运行状态和为其合理布置提供一定的参考.

1　模型与计算方法

1.1　控制方程

假定流体为不可压缩流体,控制方程分为连续方程及动量方程,雷诺平均 Navier-Stokes 方程可表示为

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i}=0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i)+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j)=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu\frac{\partial u_i}{\partial x_j}-\rho\overline{u_i' u_j'}\right)+f_i, \tag{2}$$

式中:u_i 为时均速度;ρ 为流体密度;p 为流体压力;μ 为流体动力黏度;f_i 为体积力分量.

1.2　水动力学参数

涡轮机的水动力性能可定义为量纲一的系数:叶尖速比 TSR、功率系数 C_P、推力系数 C_T、叶轮表面压力脉动系数 $C_{\Delta p}$.

$$TSR=\frac{\pi nR}{30v_0}, \tag{3}$$

$$C_P=\frac{P}{0.5\rho A{v_0}^3}, \tag{4}$$

$$C_T=\frac{T}{0.5\rho A{v_0}^2}, \tag{5}$$

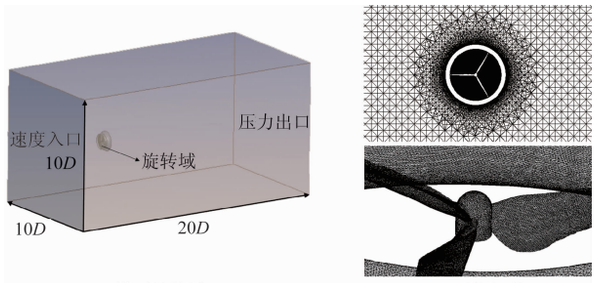
$$C_{\Delta p}=\frac{\Delta p}{0.5\rho{v_0}^2}, \tag{6}$$

式中:n 为涡轮机转速;P 为涡轮机的输出功率,$P=M\times n/9.55$,其中 M 为扭矩;T 为叶轮轴向推力;Δp 为表面压力与其平均值之差;A 为叶轮旋转扫掠面积;v_0 为来流流速.

1.3　网格划分与数值验证

导管涡轮机叶轮直径为 2 m,计算域中的涡轮机中心距进口 $5D$(D 为叶轮直径),涡轮机中心至出口距离为 $15D$,模型阻塞度小于 1.0%.计算域入口设置为速度入口,出口设置为压力出口,外边界条件为自由滑移边界,叶轮及导管为固壁面无滑移壁面条件.将计算域划分为旋转域和静止域,旋转域设

置为包裹住叶轮的圆柱体.计算采用 SST $k-\omega$ 湍流模型,采用滑移网格模型模拟旋转效应,动静交界面采用 interface 设置,设置叶轮每旋转 1.8°作为 1 个时间步长(0.005 s),每步的计算残差收敛最小值小于 10^{-3}.假设来流速度为 1.56 m/s,参考长度为叶轮半径(1 m),则系统的雷诺数约为 1.6×10^6.对叶轮及导管进行网格加密,叶轮第 1 层边界层网格满足 $Y^+=1$ 条件,导管第 1 层边界层网格满足 $Y^+=10$ 条件.计算域及网格如图 1 所示.对导管涡轮机在 1.56 m/s 和 60 r/min 条件下进行网格数无关性验证,如表 1 所示,当网格数 N 超过 600 万后,C_P 和 C_T 基本不变.最终划分网格总数约为 630 万,其中旋转域为 170 万,静止域为 460 万.



(a) 模型计算域 (b) 网格细节

图 1 计算域及网格

Fig.1 Calculation domain and mesh

表 1 网格数无关验证

Tab.1 Mesh independence assessment results

$N/10^6$	C_P	C_T
4.0	0.602 8	1.061 8
6.0	0.607 5	1.063 9
8.0	0.608 3	1.064 2

为了确保数值模拟的准确性,对叶轮的 CFD 计算结果与功率系数试验值[13]进行比较.其中,该试验为一拖拽水池试验,在 5 种不同的拖拽速度下对试验叶轮的输出功率进行了测试.5 种速度 v 下的 CFD 计算结果与试验值的对比如图 2 所示,由图可以看出,两者吻合度较好,验证了文中数值模型及方法的可靠性.

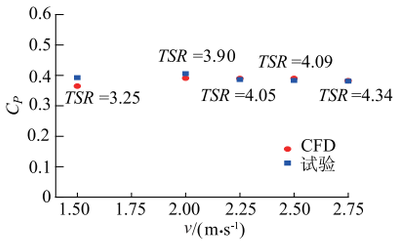


图 2 试验与 CFD 对比结果

Fig.2 Comparison between experiment and CFD

1.4 地理背景与潮流条件设置

青岛斋堂岛海域是中国比较有代表性的潮流能资源区之一,依据该海域实际潮流条件作为研究背景,其日常极限波浪参数为波高 0.6 m,波长 24.8 m,波浪周期为 3.2 s,水深 h 与流速的关系[14]如图 3 所示.可以看出,流速随水深的增加而减小,水深为 0~10 m(5D)时的流速约为 1.56 m/s,此外,水深为 0~15 m(7.5D)时的流速梯度约为 0.002.依照地理数据,将速度入口条件设置为(1.56±0.002h) m/s(导管涡轮机轴切面处的速度为 1.56 m/s,h=0),导管涡轮机转速为 60 r/min.此外,按照上述波浪条件和文献中的设置方法[15],引入多相流模型 VOF 来模拟波浪作用.

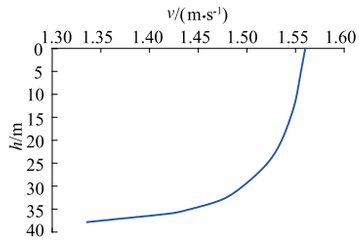


图 3 水深与流速关系

Fig.3 Relationship between water depth and velocity

2 结果与分析

2.1 浸没深度的影响

导管涡轮机轮毂在不同浸没水深下(2D,3D,4D)的 C_P,C_T 和 C_{Δ_p} 随时间变化曲线如图 4 所示.可以看出,波流引起的效应随浸没深度衰减.当浸没深度为 3D 时,导管涡轮机最大瞬时 C_P,C_T 和 $C_{\Delta p}$ 分别比 4D 时增加了 8.0%,4.5%和 132.0%;当浸没深度为 2D 时,导管涡轮机最大瞬时 C_P,C_T 和 $C_{\Delta p}$ 分别比 4D 时增加了 25.0%,13.0%和 313.0%.由此可以看出,波流条件下浸没深度对导管涡轮机水动力性能的影响很大.在同一波流条件下,浸没深度越小,C_P,C_T 和 $C_{\Delta p}$ 波动幅度越大,且浮动值远超纯流条件下的.

同时,还可以看出,在波流条件下,C_P,C_T 和 $C_{\Delta p}$ 表现出与波浪频率一致的时间周期性行为,波峰通过时导管涡轮机产生最大功率,波谷通过时产生最小功率.此外,3 种浸没深度下与纯流条件下导管涡轮机的平均 C_P,C_T 非常接近,说明波浪的效应基本不会影响导管涡轮机的时均输出功率和轴向推力.导管涡轮机在 3 种浸没深度下,不同下游位置的流向速度截面分布如图 5 所示(t=6 s,当涡轮机处于

波浪的波峰附近时刻）.

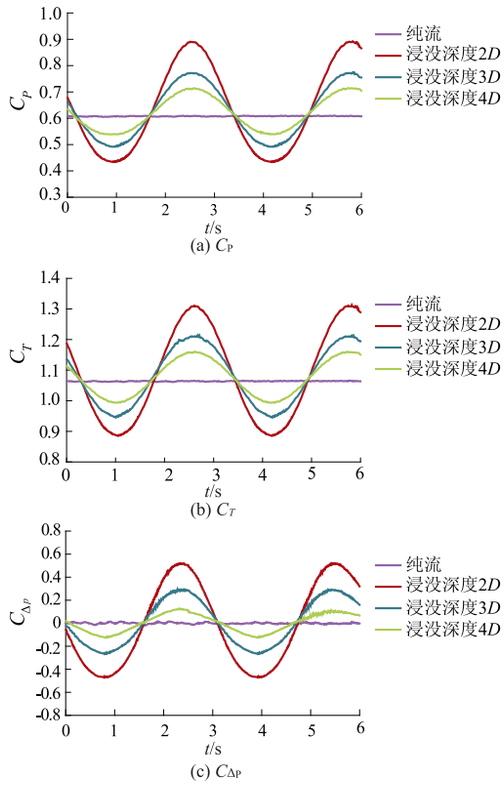


图 4　不同浸没深度下 C_P，C_T，$C_{\Delta p}$ 随时间变化曲线

Fig.4　C_P, C_T and $C_{\Delta p}$ versus time curves at different immersion depths

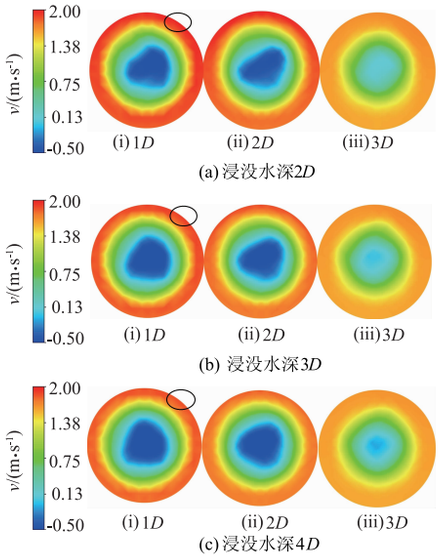


图 5　不同浸没深度下的流向速度截面分布

Fig.5　Velocity cross-section distribution at different immersion depths

由图 5 可以看出，叶轮旋转与波流共同作用对导管涡轮机尾流区域流态的影响，在 1 个波流周期内的尾流场周边流速经历 1 个不断变化的过程. 当波峰通过时，将诱导尾流加速向上，波谷则相反，导管涡轮机的尾流结构在 1 个波流周期内是不断地被抬高和抑制的.

此外，在波浪的作用下，水-气交界面整体变形较大，将引起明显的流速跃迁变化. 因此，当浸没水深较浅时，水流将发生强烈的跃迁，波流的振荡效应也将变得十分明显，叶轮扫掠区域后方周围的流场流速较快（体现在云图中颜色较深，圈出部位）. 随着浸没深度的增加，流速的迁移效果逐渐减弱，对扫掠区域后方附近的流场的影响也逐渐减小. 这也解释了越靠近水面对导管涡轮机 C_P，C_T 和 $C_{\Delta p}$ 的影响越明显的原因.

2.2　偏流的影响

通过调整导管涡轮机的角度来模拟不同偏流角下的水动力学性能. 导管涡轮机（浸没深度为 3D）在不同偏流角（30°，45°，60°）的 C_P，C_T 和 $C_{\Delta p}$ 随时间变化曲线如图 6 所示. 可以看出，C_P，C_T 和 $C_{\Delta p}$ 表现出与波浪频率一致的时间周期性行为. 同时，随着偏流角的增大，流向上的扫掠投影面积越来越小，水流动能逐渐由轴向分量转移至侧向分量，导管涡轮机的平均 C_P 和 C_T 逐渐减小. 同时，由于偏流角的变化改变了涡轮机叶片原本叶素截面的局部相对攻角分布，这也影响了涡轮机的能量捕获能力和推力. 导管涡轮机在 30°时的平均 C_P，C_T 分别比无偏流时减小 13%，10%；在 45°时的平均 C_P，C_T 分别比无偏流时减小了 48% 和 34%；在 60°时的平均 C_P，C_T 分别比无偏流时减小了 88% 和 64%. 可见，在大偏流角下导管涡轮机的 C_P，C_T 有 1 个明显的下滑[16].

由于偏流的不对称性使叶轮前后两端的压力差始终处于不稳定的状态，导致 C_P，C_T 和 $C_{\Delta p}$ 在波浪周期内出现额外的周期性波动，该波动频率由转速和叶片数决定. 叶轮的旋转周期为 1 s，叶片数为 3. 当 1 个叶片正好处于竖直位置时，C_P，C_T 和 $C_{\Delta p}$ 则处于额外周期的波峰处；而当 1 个叶片正好处于水平位置时，C_P，C_T 和 $C_{\Delta p}$ 则处于额外周期的波谷处[17]，因此导管涡轮机在 1 个时间周期内要经历 3 次额外的周期性波动. 随着偏流角的增大，该额外周期性波动的振幅也逐渐增大. 在偏流角为 30°时，C_P，C_T 和 $C_{\Delta p}$ 的额外周期性波动最大振幅分别为 0.041，0.033 和 0.087. 在偏流角为 45°时，C_P，C_T 和 $C_{\Delta p}$ 的额外周期性波动最大振幅分别为 0.151，0.155 和 0.128. 在偏流角为 60°时，C_P，C_T 和 $C_{\Delta p}$ 的额外周期性波动最大振幅分别为 0.205，0.282 和 0.218. 因此，导管涡轮机叶片在波流与偏流共同作用下将承受极高的压力梯度和由此带来的水动力不平衡力的影响.

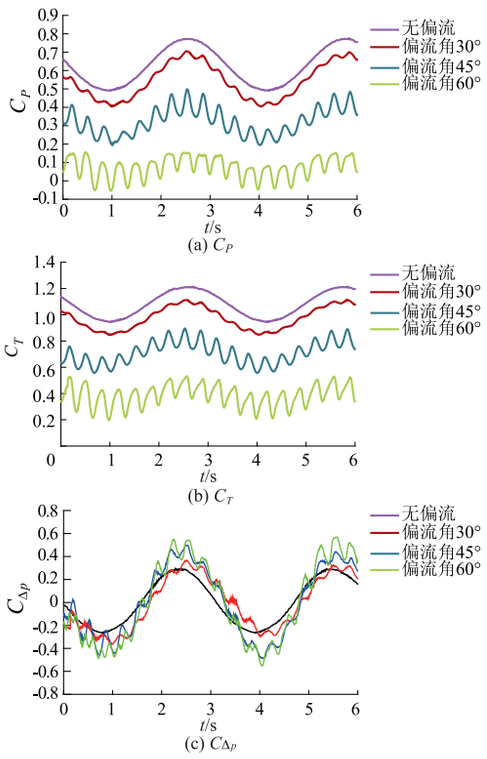


图 6 不同偏流角下 C_P,C_T,$C_{\Delta p}$随时间变化曲线

Fig.6 C_P, C_T and $C_{\Delta p}$ versus time curves at different yaw angles

导管涡轮机在 3 种偏流角下不同下游位置的流向速度截面分布如图 7 所示(t=6 s,当涡轮机处于波浪的波峰附近时刻).

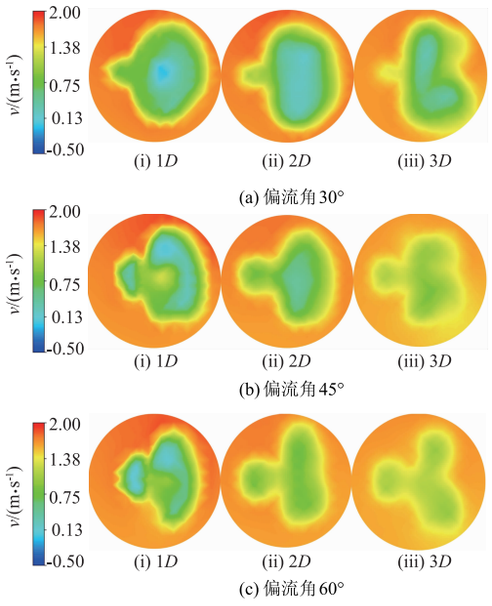


图 7 不同偏流角下的流向速度截面分布

Fig.7 Velocity cross-section distribution at different yaw angles

水流通过导管涡轮机后将被诱导分离为轴向与侧向分量,只有轴向分量有利于导管涡轮机的能量捕获.这种由偏流导致的速度变化,也成为决定导管涡轮机水动力载荷的因素之一.由图 7 可以看出,导管涡轮机在偏流条件下的尾流都发生了侧向的偏移和变形,呈现出非对称流动结构.随着偏流角的增大,下游流场结构变得相当不稳定和复杂.在 30°偏流角下,尾流分布近似于一种椭圆的几何形状.当偏流角为 45°和 60°时,尾流被分离成 2 个低速区,此时尾流分布已无特定形状可言.值得一提的是,随着偏离角的增大,尾流恢复逐渐加快.

3 结 论

根据斋堂岛海域条件对导管涡轮机在复杂波流条件下进行了数值模拟研究,探讨了浸没深度和偏流角对其水动力学性能的影响,得出以下主要结论:

1) 在波流作用下,随着浸没深度的减小,水流将发生强烈的跃迁,波浪效应增强,叶轮扫掠区域后方附近的流场流速加快,波流引起的 C_P,C_T和 $C_{\Delta p}$振幅增大.当波峰通过时产生最大值,波谷通过时产生最小值.此外,导管涡轮机在 3 种浸没深度下与纯流条件下的平均 C_P,C_T非常接近.

2) 在波流与偏流共同作用下,随着偏流角的增大,流向上的扫掠投影面积越来越小,水流动能逐渐由轴向分量转移至侧向分量,导管涡轮机的平均 C_P和 C_T逐渐减小.此外,下游的尾流结构都发生了侧向的偏移和变形,呈现出非对称流动结构,且随着偏流角的增大,流场结构将变得相当不稳定和复杂,但尾流恢复逐渐加快.

3) 处于不同浸没深度及偏流角的导管涡轮机 C_P,C_T和 $C_{\Delta p}$均表现出与波浪频率一致的时间周期性行为.此外,偏流将导致 C_P,C_T和 $C_{\Delta p}$在叶轮旋转周期内出现额外的周期性波动,该波动频率由转速和叶片数决定,且波动幅值随着偏流角的增加而增大.

参考文献(References)

[1] MAGAGNA D, MONFARDINI R, UIHLEIN A. JRC ocean energy status report 2016 edition[R]. Brussel: Publications Office of the European Union, 2016.

[2] OLCZAK A, STALLARD T, FENG T, et al. Comparison of a RANS blade element model for tidal turbine arrays with laboratory scale measurements of wake velocity

and rotor thrust[J]. Journal of fluids and structures, 2016, 64: 87-106.

[3] BORG M G, XIAO Q, ALLSOP S, et al. A numerical performance analysis of a ducted high-solidity tidal turbine[J]. Renewable energy, 2020, 159: 663-682.

[4] 刘垚, 卢蕊, 蔡卫军. 基于重叠网格的水轮机导流罩水动力特性研究[J]. 排灌机械工程学报, 2019, 37(7): 606-611.
LIU Yao, LU Rui, CAI Weijun. Hydrodynamic performance of marine current turbine with diffuser based on overlap grid method [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2019, 37(7): 606-611. (in Chinese)

[5] NUNES M M, MENDES R C F, OLIVEIRA T F, et al. An experimental study on the diffuser-enhanced propeller hydrokinetic turbines[J]. Renewable energy, 2019, 133: 840-848.

[6] TAMPIER G, TRONCOSO C, ZILIC F. Numerical analysis of a diffuser-augmented hydrokinetic turbine[J]. Ocean engineering, 2017, 145: 138-147.

[7] 宋科, 王文全, 闫妍. 潮流能导管涡轮发电装置水动力学特性影响因素[J]. 太阳能学报, 2020, 41(4): 302-309.
SONG Ke, WANG Wenquan, YAN Yan. Influencing factors of hydrodynamic performance of tidal power ducted turbine current energy generator [J]. Acta energiae solaris sinica, 2020, 41(4): 302-309. (in Chinese)

[8] 张琰, 高强, 闫宏伟, 等.微水头水流能发电装置导流罩水动力性能研究[J]. 人民长江, 2020, 51(10): 187-191.
ZHANG Yan, GAO Qiang, YAN Hongwei, et al. Study on hydrodynamic performance of shroud of a hydroelectric generator of micro-head flow[J]. Yangtze River, 2020, 51(10): 187-191. (in Chinese)

[9] 郑美云, 李卓越, 杜鹏, 等. 入口段线型影响潮流能导流增效装置水动力性能的数值模拟研究[J]. 西北工业大学学报, 2021, 39(1): 93-100.
ZHENG Meiyun, LI Zhuoyue, DU Peng, et al. Influence of inlet line shape on hydrodynamic performance of tidal energy diffuser [J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2021, 39 (1): 93-100. (in Chinese)

[10] KHALID W, SHERBAZ S, MAQSOOD A. Design and optimization of a diffuser for a horizontal axis hydrokinetic turbine using computational fluid dynamics based surrogate modelling[J]. Mechanics, 2020, 26(2): 161-170.

[11] BELLONI C S K, WILLDEN R H J, HOULSBY G T. An investigation of ducted and open-centre tidal turbines employing CFD-embedded BEM[J]. Renewable energy, 2017, 108: 622-634.

[12] DÉBORAH A T D, JERSON R P, PAULO A S F. An approach for the optimization of diffuser-augmented hydrokinetic blades free of cavitation[J]. Energy for sustainable development, 2018, 45: 142-149.

[13] SONG K, WANG W Q, YAN Y. Numerical and experimental analysis of a diffuser-augmented micro-hydro turbine[J]. Ocean engineering, 2019, 171: 590-602.

[14] 姜雪英, 王树杰, 司先才, 等. 斋堂岛海域潮流特性分析与微观选址[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 892-899.
JIANG Xueying, WANG Shujie, SI Xiancai, et al. Tidal stream characteristic analysis and micro-sitting selection in sea area around Zhaitang Island[J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(4): 892-899. (in Chinese)

[15] 袁鹏, 梁兰健, 王树杰, 等. 波浪作用下安装深度对水平轴潮流能水轮机水动力性能的影响研究[J]. 海洋技术学报, 2018, 37(3): 72-78.
YUAN Peng, LIANG Lanjian, WANG Shujie, et al. Study on the influence of installation depth on the hydrodynamic performance of horizontal axial tidal turbine under wave effects [J]. Journal of Ocean Technology, 2018, 37(3): 72-78.(in Chinese)

[16] COIRO D P, TROISE G, SCHERILLO F, et al. Development, deployment and experimental test on the novel tethered system GEM for tidal current energy exploitation [J]. Renewable energy, 2017, 114: 323-336.

[17] YAHAGI K, TAKAGI K. Moment loads acting on a blade of an ocean current turbine in shear flow[J]. Ocean engineering, 2019, 172: 446-455.

(责任编辑　朱漪云)