

垂直轴潮流能涡轮机水动特性研究

汤金桦, 李春, 李润杰

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘要:潮流能水轮机日益受到重视,针对其叶轮翼型水动力问题,提出了一种襟翼控制策略,计算不同襟翼翼型的垂直轴潮流能涡轮机水动力学动态特性,对比分析了襟翼控制前、后的垂直轴潮流能涡轮机力矩系数周期性变化规律。结果表明:所提控制策略可在不影响力矩系数均值的情况下,有效降低力矩系数振幅,且非对称襟翼翼型力矩系数振幅小于对称襟翼翼型;通过分析流场结构发现,施加控制策略的翼型尾缘流场较未施加控制策略的尾缘流场细长;襟翼控制叶片转过之后的尾涡贴合于旋转轨迹,对下游流场影响较小,易于耗散;发生大涡分离的方位角范围为 $160^\circ \sim 260^\circ$,叶片内侧涡强增大,而施加控制策略之后,该现象得到很好改善。

关键词:翼型;襟翼;翼缝角度;水动特性;垂直轴潮流;涡轮机

中图分类号:TV136;TK83

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2017)01-0130-06

Research on hydrodynamic characteristics of vertical axis tidal current turbine

TANG Jinhua, LI Chun, LI Runjie

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The tidal current turbine was paid more and more attentions, a flap control strategy is proposed for the hydrodynamic problem of its impeller airfoil, the hydrodynamic dynamic characteristics of the turbine with different flap airfoil are calculated, the variation law of the torque coefficient of the vertical axis tidal current before and after the flap control was analyzed. The results showed that the proposed control strategy can effectively reduce the amplitude of the torque coefficient without affecting the mean value of the moment coefficient, while the amplitude coefficient of the asymmetric flap wing was smaller than that of the symmetrical flap; by analyzing the flow field structure, it was found that the flow field of the trapezoidal trailing edge of the control strategy was more slender than the flow field without the control strategy; the flap controlled the vane after the blade is turned into the rotation trajectory, which had little effect on the downstream flow field and is easy to dissipate; the azimuth angle of the large vortex was $160^\circ \sim 260^\circ$, and the vortex intensity increased, the phenomenon was improved after the control strategy was applied.

Key words: airfoil; flap; slot angle; hydrodynamic characteristics; vertical axis current; turbine

1 研究背景

近年来,因工业和科技的快速发展,全球对能源需求日益增大,使得可再生能源再次成为世界各国关注的焦点^[1]。潮汐能对气候影响的不敏感性,以及其在时间与空间的可预测性,使得其在各种海洋可再生能源中具有极大的优越性^[2]。潮汐能(潮流能、温差能、潮汐能、波浪能和盐差能等)是指由潮汐现象所引起的海水流动能,受月球沿其轨道周期性运动影响,对地球

产生吸引力,使得海水流动每天周期性地改变其大小和方向。仅我国沿海,潮汐能理论平均功率就高达 $1.39 \times 10^{11} \text{ W}^{[3-4]}$ 。潮流能利用的主要形式为潮汐能发电,垂直轴水轮机能适应多方向往复潮流,自启动性能好,备受国内外学者的关注^[5-6],而潮流水轮机叶片所用翼型为水轮机能量捕获的关键所在。Jungn 等^[7]对垂直轴潮流能涡轮机进行绕流场的二维数值模拟,通过对叶尖速比和叶片数进行优化,获得最优的能量转化效率。Jiang Jin 等^[8]对 H 型垂直轴潮流能涡轮机分别

收稿日期:2016-09-09; 修回日期:2016-09-29

基金项目:国家自然科学基金项目(E51176131);上海市科委资助项目(13DZ2260900)

作者简介:汤金桦(1991-),男,山东威海人,硕士研究生.研究方向:海上能源发电。

通讯作者:李春(1963-),男,北京通州人,博士后,教授,博士生导师,主要从事计算流体力学、叶轮机械气动力学、能源规划及风能利用等方面研究工作。

基于两种遗传算法对定实度情况下的最优弦长问题、固定叶尖速比下稳态偏角最优问题和叶尖速比范围内稳态偏角最优问题进行优化,并分析效率提高的原因。Laín 等^[9]对达里厄型垂直轴潮流能涡轮机开展了二、三维数值模拟(包括转矩系数、功率系数、切向力系数和法向力系数),结果表明:叶尖涡和卡门涡是效率降低的主要原因。文献[10]研究了柔性叶片的可行性,有效解决了垂直轴潮流能涡轮机刚性叶片捕获能量效率低的问题。文献[11]以功率最大化为优化目标,提出限位角参数优化选取方法,对垂直轴潮流能涡轮机采用多体耦合数值模拟方法进行计算,结果表明这种优化可显著提高其效率。Guo Wei 等^[12]分别建立有、无支臂三维垂直轴潮流能涡轮机模型,研究有无支臂时对能量转换系数的影响,同时分析了 3 种不同翼型厚度和不同翼型弯度对转矩系数和能量转化系数的影响。文献[13]为了研究叶片安装位置对固定偏角垂直轴潮流能涡轮机水动力性能的影响,建立了水槽模型试验系统,对其性能和载荷进行了实验测试。文献[14]采用 CFX 软件对两叶片垂直轴潮流能涡轮机艄摇进行数值模拟,对不同频率、不同尖速比下的推力系数和侧向力系数时历曲线进行分析,结果表明艄摇不会影响其能量利用率,但是对推力和侧向力的瞬时波

动幅值影响较大。

综上可知,尽管各种襟翼技术从最早发明用于航空领域,到现在已广泛引起风力机(包括各种形式的水平轴和垂直轴风力机)领域的重视^[15-16],并开展了许多实验、数值和应用研究。但襟翼翼型尚未应用于垂直轴潮流能涡轮机中,这方面研究文献资料鲜见。本文采用 CFD 方法,以 NACA0018 为原始翼型建立两种襟翼翼型模型,将其应用于垂直轴潮流能涡轮机叶片中,并提出一种襟翼控制策略,通过对襟翼施加控制以期达到降低作用于水轮载荷效果,延长其运行寿命。

2 模型与计算方法

2.1 建立模型

以 NACA0018 为原始翼型,建立两种襟翼翼型模型,其结构如图 1 所示,翼型整体包括主翼和襟翼。其中, x 为主翼长度,m; l 为襟翼长度,m; w 为翼缝宽度,m; c 为原始弦长,m; c' 为名义弦长,m; θ 为襟翼摆动角度,(°); β 为翼缝倾斜角度,(°); α 为攻角,(°); ψ 为方位角,(°)。襟翼可绕其旋转中心摆动,当襟翼处于弦线 OA 上方时,定义 $\theta > 0^\circ$;当襟翼处于弦线 OA 下方时,定义 $\theta < 0^\circ$ 。

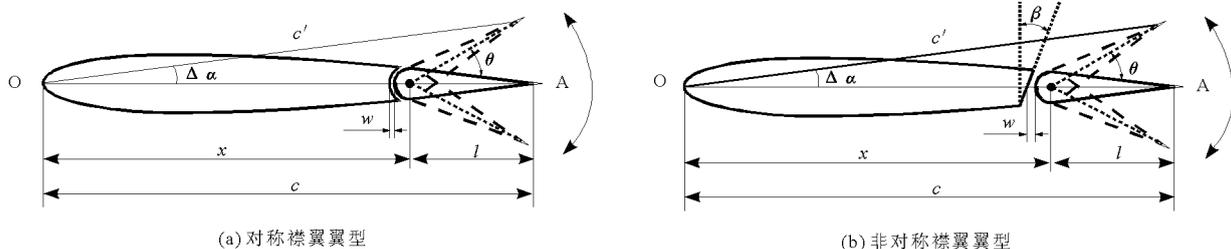


图 1 襟翼控制示意图

襟翼摆角的大小决定了襟翼的空间位置,但就襟翼翼型整体而言,按传统攻角和弦长定义,两者都发生了变化,或言襟翼摆角变化改变了整体翼型的弦长和攻角,而攻角定义是翼型弦长与来流的夹角,因此,弦长改变最终导致攻角变化。不失一般性,又与传统弦长和攻角定义一致,本文定义 $\Delta\alpha$ 为攻角变化量,其与襟翼摆动角度 θ 之间关系式可表示为:

$$\Delta\alpha = \frac{d\alpha}{d\theta} = \arctan\left(\frac{\sin\theta}{3 + \cos\theta}\right) \quad (1)$$

当襟翼未摆动时,即 $\theta = 0$ 时,定义其为初始攻角 α_0 ,则可以得到攻角 α 与方位角 ψ 、尖速比 λ 及襟翼摆动角度 θ 之间的关系式为:

$$\alpha = \alpha_0 + \Delta\alpha = \arctan\left(\frac{\cos\psi}{\lambda + \sin\psi}\right) +$$

$$\arctan\left(\frac{\sin\theta}{3 + \cos\theta}\right) \quad (2)$$

襟翼的摆动,会导致叶片弯度改变,且当摆动角度 θ 确定,名义弦长 c' 与原始弦长 c 之间关系式为:

$$\begin{aligned} c' &= \frac{1}{4}c \sqrt{\sin^2\theta + (3 + \cos\theta)^2} \\ &= \frac{1}{4}c \sqrt{10 + 6\cos\theta} \end{aligned} \quad (3)$$

根据公式(1)~(3)得出叶片旋转时,襟翼的摆角随攻角的变化。本文通过襟翼摆角连续变化的控制策略,缩小涡轮机翼型在各个方位角上翼型升阻力系数的差距,从而减小叶片振幅,降低主轴的疲劳载荷,提高涡轮机的使用寿命。

图 2 为 H 型垂直轴潮流能涡轮机截面速度三

角形及受力示意图,3个叶片等方位角布置,方位角间隔 120° 。潮流来流速度大小为 V_∞ ,方向为 x 轴正方向。叶轮逆时针方向旋转,旋转角速度为 ω ,旋转半径为 r 。相对来流速度为来流速度 V_∞ 与切向线速度 $V_r = \vec{\omega} \cdot \vec{r}$ 矢量和,即: $\vec{V} = \vec{V}_\infty + \vec{V}_r$ 。 \vec{V} 与翼型弦线的夹角 α 即为叶片攻角。当叶片旋转到方位角 $\psi = \omega \cdot t$ 时,相对来流速度流过叶片表面,并在翼型压力面与吸力面形成压力差,产生与相对来流速度方向垂直的升力 F_l 和与相对来流速度方向一致的阻力 F_d 。需要特别注意的是,阻力力矩在叶轮运行过程中始终做负功,总体来讲,升力力矩大于阻力力矩,合力矩 M 提供叶轮转动动力^[17]。

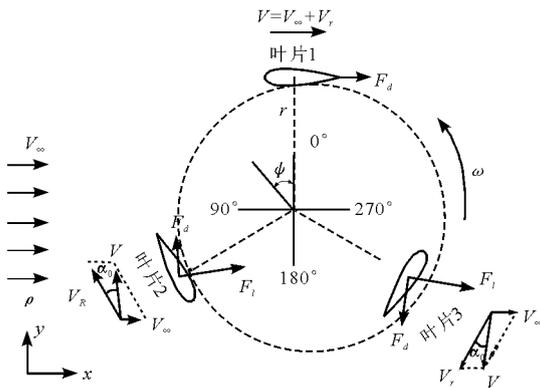


图2 速度三角形及受力示意图

2.2 计算条件

依据 WANXIANG 2 号电站^[18]所用 40 kW 发电机,数值模拟所用垂直轴潮流能发电机模型参数选取如下:涡轮旋转半径为 2 m,叶片数目为 3,叶片所用翼型弦长为 0.2 m^[19],原始翼型仍为 NACA0018 翼型。流域中水的密度 $\rho_2 = 1\ 025\ \text{kg/m}^3$, $\mu_2 = 1.01 \times 10^{-3}\ \text{kg/(m} \cdot \text{s)}$,来流水速 $V_\infty = 2.2\ \text{m/s}$ 。计算流域如图 3 所示, ψ 是翼型旋转方位角,上下边界 ae,cd 以及迎风区边界 abc 设置为速度进口;背风区边界 egd 设置为压力出口;叶片部分设置为无滑移壁面;af,cf 为不动的虚拟壁面设置为 Interior;内流域 Z1、主体旋转流域 Z2 以及外流域 Z3 的交接面设置成 Interface。

生成网格如图 4 所示,图 4(a)为整个计算域域网格图,图 4(b)为 3 叶片区域网格,可明显看出叶片周围网格经过加密处理。

2.3 计算精度验证

涉及本文由襟翼翼型组成的水轮性能实验数据目前尚未发现,故将单原始翼型在做圆周运动时力矩系数计算结果与 Xiao Qing^[1]等计算结果进行对

比。图 5 为力矩系数随方位角变化对比图,从图中可以看出,两种计算结果的 C_m 值吻合度较高,且其值为同一数量级,间接验证了本文数值模拟方法的有效性及其计算结果的准确性。

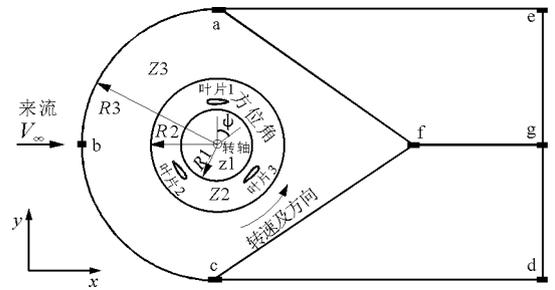
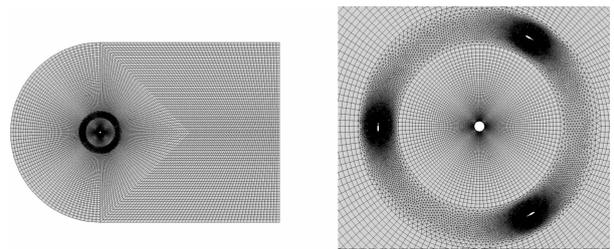


图3 计算流域示意图



(a) 计算域网格分布及拓扑结构

(b) 网格局部加密放大图

图4 网格生成

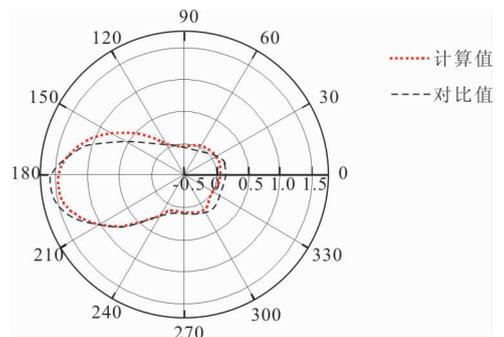


图5 力矩系数随方位角变化对比图

3 计算结果分析

直接将力矩系数 C_m 作为研究目标有两个原因:首先,力矩系数是整个垂直轴潮流能涡轮机做功性能的重要参数之一;其次,力矩系数能够真实反映主轴所受瞬态力矩的大小,是结构受力或结构的基础。对襟翼的不同控制的效果主要体现在垂直轴潮流能涡轮机整体力矩系数变化上,对其施加合适的控制策略可以减小力矩系数幅值。SST $k - \omega$ 模型增加了横向导数项,同时在湍流定义中 4 湍流剪切应力的输运过程,模型中使用的湍流常数也有所不同,因此,本文选用该模型进行垂直轴潮流能涡轮机

数值计算。图 6 为施加控制策略的对称襟翼翼型和非对称襟翼翼型与未施加控制策略的原始翼型关于力矩系数随时间变化的对比图,可以看出,施加控制策略的力矩振幅明显小于未施加控制策略的力矩振幅,其物理意义为:对于垂直轴潮流能涡轮机每个旋转周期上受到的最大转矩均减小,从而延其运行寿命。虽然转矩系数曲线振幅明显降低,但曲线平均值并没有减小,即保证了输出功率相同,因此控制策略并不是以降低出力为代价来控制振幅的;非对称襟翼翼型力矩系数振幅小于对称襟翼翼型,表明对于减小力矩系数振幅的控制策略更加适用于非对称襟翼翼型。

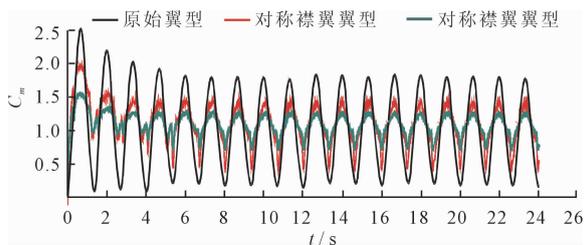


图 6 力矩系数随时间变化趋势

图 7 为不同方位角下,施加控制策略的襟翼翼型与未施加控制策略的原始翼型在不同方位角力矩系数对比。可以看出,施加控制策略的力矩系数振幅明显小于未施加控制策略时的力矩系数。而在施加控制策略时,非对称襟翼翼型力矩系数振幅略小

于对称襟翼翼型,此时非对称襟翼翼型能较好的减小涡轮机力矩系数振幅,延长垂直轴潮流能涡轮机寿命,力矩系数波动趋势与图 6 吻合。

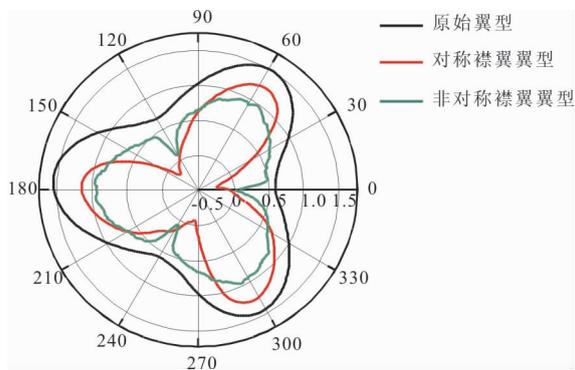
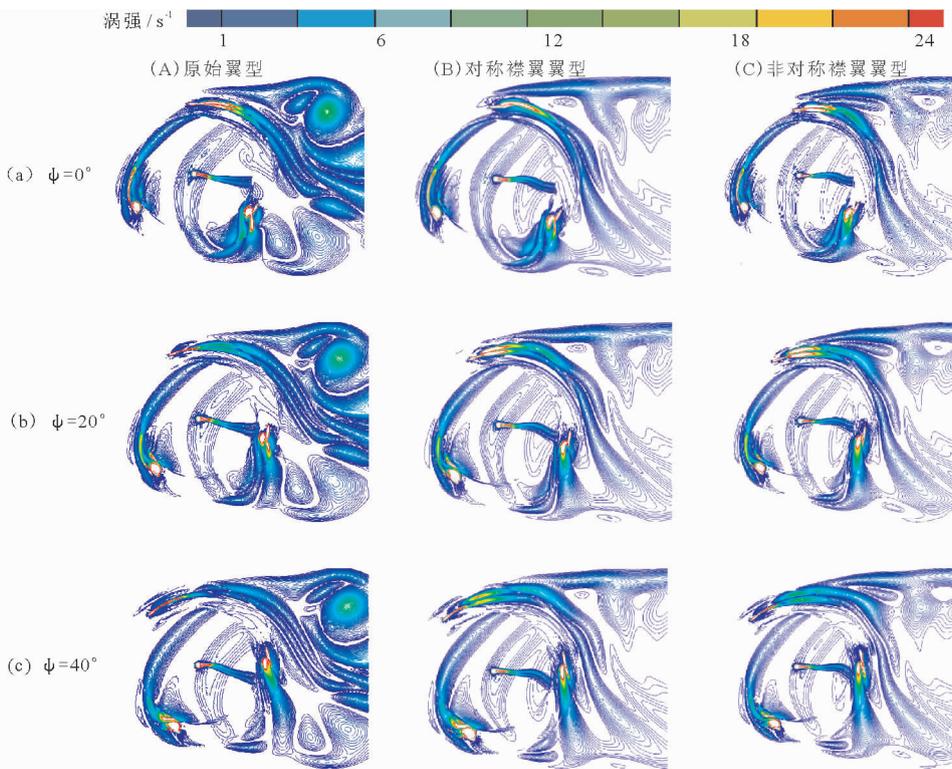


图 7 力矩系数随方位角变化趋势

图 8 为施加控制策略与未施加控制策略下整个流场涡量分布情况。从图中可以看出,方位角为 0° 时,未施加控制策略要大且更显混乱,形如卡门涡街不断脱落,说明垂直轴潮流能涡轮机在运行当中力矩系数变化幅值明显,表现为有较大振动。当方位角为 20° 时,控制策略使得襟翼翼型转过之后形成一条条状涡量形状,此时控制策略非常好地改善了流场涡量分布情况。方位角为 40° 的时候,襟翼翼型脱落涡继续形成,而添加控制策略的襟翼翼型流场较好的抑制了涡的形成。在方位角为 $80^\circ \sim 100^\circ$ 之间时,原始翼型的潮流能涡轮机流场涡量与施加



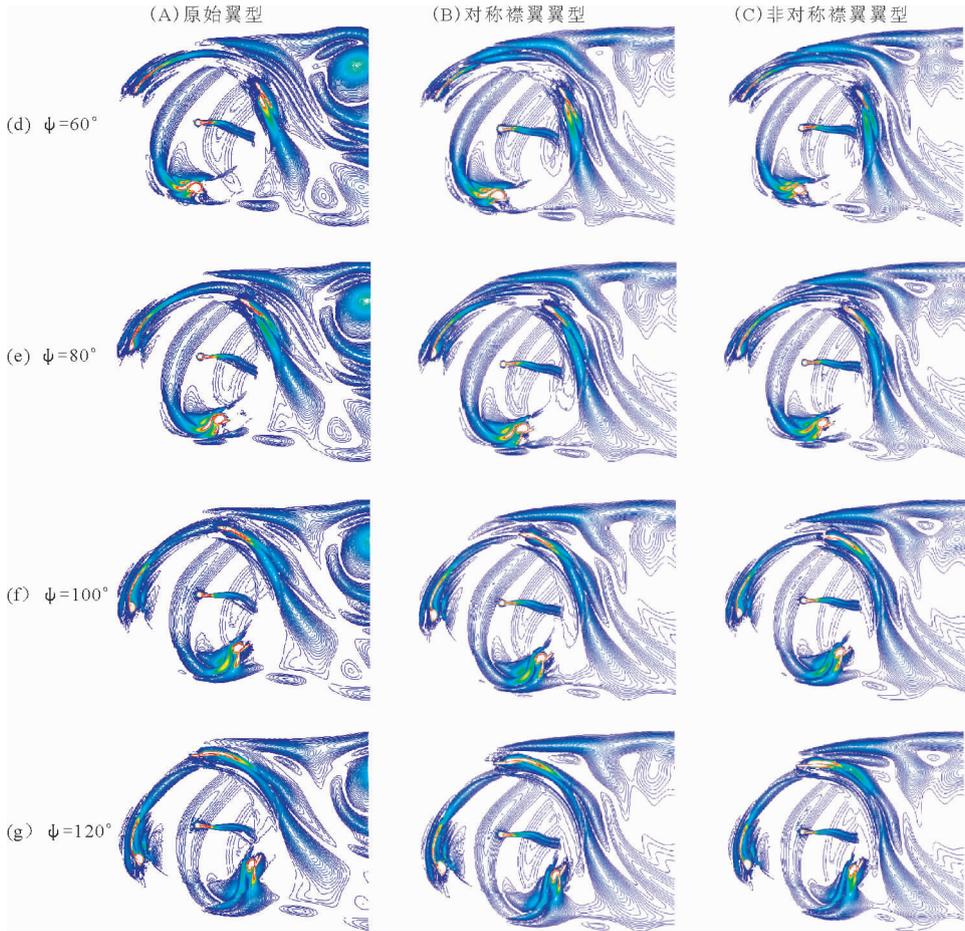


图8 流场涡量图

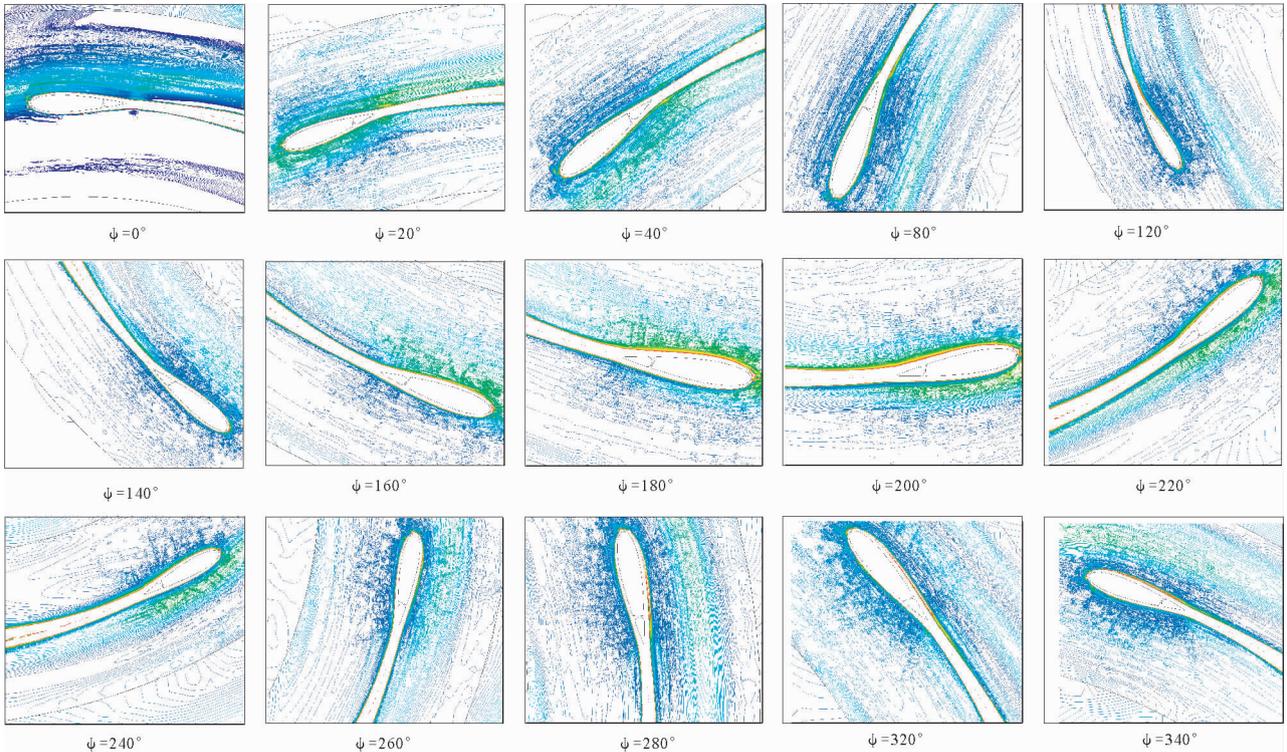


图9 不同方位角下翼型流场涡量等值线图

控制策略时的几乎相同,但是施加控制策略的翼型尾缘流场较未施加控制策略的尾缘流场细长,在一定程度上改变了潮流能涡轮机的性能,提高了效率。由以上论述可知,施加控制策略能够使潮流能涡轮机叶片在所有来流攻角下获得一个较好的流场环境,减小其力矩系数,使垂直轴潮流能涡轮机使用寿命延长。

图 9 为非对称翼型不同方位角下流场涡量图,从 0° 开始到 360° 追踪一个翼型,可以看出,控制策略使得襟翼翼型转过之后形成一条条状涡量形状,表示其尾缘涡易耗散,发生大涡分离的方位角主要集中在 $160^\circ \sim 260^\circ$ 之间,叶片内侧正涡区变得越来越厚,而施加控制策略之后,该现象得到很好改善,此时控制策略非常好的改善了流场涡量分布情况。

4 结 论

本文基于 SST $k-\omega$ 湍流模型,以 NACA0018 为原始翼型建立两种襟翼翼型,提出一种襟翼控制策略,将其应用于垂直轴潮流能涡轮机叶片中,结果表明:

(1) 施加控制策略可在不影响力矩系数均值即保证输出功率相同的情况下,有效降低力矩系数振幅,且非对称襟翼翼型力矩系数振幅小于对称襟翼翼型。

(2) 施加控制策略的翼型尾缘流场较未施加控制策略的尾缘流场细长,襟翼控制叶片转过之后的尾涡贴合于旋转轨迹,对下游流场影响较小,易于耗散。

(3) 叶片发生大涡分离的方位角范围为 $160^\circ \sim 260^\circ$ 之间,叶片内侧涡强增大,而施加控制策略之后,该现象得到较大改善。

参考文献:

[1] Xiao Qing, Liu Wendi, Incecik A. Flow control for VATT by fixed and oscillating flap [J]. *Renewable Energy*, 2013, 51(2): 141 - 152.

[2] Nicholls - Lee R F, Turnock S R, Boyd S W, et al. Simulation based optimization of marine current turbine blades [C]// 7th International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries (COMPIT '08), Liege, Belgium, 2008: 21 - 23.

[3] 赵广,郭嘉楠,刘艳,等. 竖轴潮流能水轮机实验台设计及水动力性能测试[J]. *太阳能学报*, 2013, 34(7): 1271 - 1279.

[4] 王传崑,卢苇. 海洋能资源分析方法及存储评估[M]. 北京:海洋出版社, 2009.

[5] 汪鲁兵,张亮,曾念东. 一种竖轴潮流发电水轮机性能

优化方法的初步研究[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2004, 25(4): 417 - 421.

[6] Coiro D P, Nicolosi F, De Marco A, et al. Dynamic behavior of novel vertical axis tidal current turbine: Numerical and experimental investigations [C]// Proceeding of the 15th International Offshore and Polar Engineering Conference, Seoul, 2005.

[7] Jung H J, Lee J H, Rhee S H, et al. Unsteady flow around a two - imensional section of a vertical axis turbine for tidal stream energy conversion[J]. *International Journal of Naval Architecture & Ocean Engineering*, 2009, 1(2): 64 - 69.

[8] Jiang Jin, Zhang Liang. Genetic algorithm based optimization of a vertical variable pitch turbine for tidal current energy conversion[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2010, 31(1): 54 - 58.

[9] Laín S, López O, Quintero B, et al. Design Optimization of a Vertical Axis Water Turbine with CFD[J]. *Alternative Energies*, 2013, 34: 113 - 139.

[10] 王树杰,李冬,赵龙武,等. 柔性叶片水流发电模型实验研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(3): 362 - 366.

[11] 张学伟,张亮,李志川,等. 潮流能自由变偏角水轮机限位角优化方法[J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2012, 33(1): 1341 - 1345.

[12] Guo Wei, Kang Haigui, Chen Bing, et al. Numerical and Experimental Study of the 3D Effect on Connecting Arm of Vertical Axis Tidal Current Turbine[J]. *China Ocean Engineering*, 2016, 30(1): 83 - 96.

[13] 李志川,张学伟,张亮,等. 固定偏角垂直轴潮流能水轮机叶片安装位置试验研究[J]. *可再生能源*, 2012, 30(4): 37 - 41.

[14] 王凯,孙科,张亮,等. 船摇对立轴潮流能水轮机的水动力性能影响[J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(4): 563 - 568 + 574.

[15] 聂佳斌. 两段式翼型在垂直轴风力机的应用研究[D]. 上海理工大学, 2013.

[16] 祖红亚,李春,李润杰,等. 襟翼相对长度对翼型气动性能的影响[J]. *动力工程学报*, 2015, 35(8): 666 - 673.

[17] Saeed F, Paraschivoiu I, Trifu O, et al. Inverse Airfoil Design Method for Low - Speed Straight - Bladed Darrieus - Type VAWT Applications [J]. *Wind Engineering*, 2011, 35(3): 357 - 368.

[18] Castelli M R, Englaro A, Benini E. The darrieus wind turbine: proposal for a new performance prediction model based on CFD[J]. *Energy*, 2011, 36(8): 4919 - 4934.

[19] Reddy T S R, Kaza K R V. A comparative study of some dynamic-stall models [R]. NASA Tech Memo 88917, USA, 1987.