

# 摆式振荡翼塔筒尾涡潮流能捕获系统的水动力性能分析

朱卫军<sup>1,2</sup>, 庄舒青<sup>1</sup>, 陈东阳<sup>3</sup>, 曹九发<sup>1</sup>, 付士凤<sup>1</sup>, 孙振业<sup>1</sup>

(1.扬州大学 电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州 225127; 2.扬州大学 智慧能源互联网研究院, 江苏 扬州 225127;  
3.西北工业大学 航海学院, 陕西 西安 710072)

**摘要:**为实现对海上风电场中潮流能有效利用,提出一种将振荡水翼潮流能捕获装置与海上风力机水下塔筒结合的摆式振荡翼塔筒尾涡潮流能捕获系统。联合格子玻尔兹曼和大涡模拟方法,对 NA-CA0015 翼型在有无塔筒尾流效应时,不同运动参数对其水动力特性及能量收集效率的影响进行数值分析,并从水翼运动过程中的旋涡结构分析了俯仰振幅、升沉振幅及振荡翼弦长对系统捕能效率的影响。结果表明,塔筒尾涡显著提升振荡翼的能量收集效率,同时振荡翼的加入能减慢塔筒尾流,降低由钝体绕流引起的疲劳载荷。摆式振荡翼在塔筒尾流区域内的捕能效率最高可达 30.72%,与传统振荡翼潮流能捕获装置相比具有明显优势,为提高海上风场整体能源利用率提供了一种有效的方式。

**关键词:**潮流能;振荡水翼;格子玻尔兹曼方法;大涡模拟

**中图分类号:**TK79 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2023)01-0188-10

可再生能源的开发利用已然成为全球共识。与其他可再生能源相比,潮流能具有受天气影响小、能量密度高、可预测性强、载荷稳定等优势。潮流能发电装置根据其原理分为旋转轴式和振荡翼式。与传统旋转轴式水轮机组相比,振荡翼式潮流能收集装置具有以下优点:振荡速度低,对水生生物伤害小,对环境更为友好;结构简单,可靠性高,能量获取效率高。

McKinney<sup>[1]</sup>最早提出振荡翼可用于能量收集,用正弦函数定义了振荡翼的俯仰和升沉,从理论和实验两方面都证明了振荡翼具有从来流中捕获能量的能力。随后,越来越多的学者开展了对振荡翼式能量收集装置的研究。对于升沉-俯仰耦合运动的传统振荡翼,Kinsey 等<sup>[2-3]</sup>系统地研究了振荡翼运动参数对能量收集效率的影响,发现运动参数对能量收集效率有重要影响。除运动参数外,振荡翼运动

过程中的流场结构也对装置的性能有一定影响。Young 和 Su 等<sup>[4-5]</sup>都指出水翼运动过程中前缘涡的发展与脱落是振荡翼能否达到最佳功率的关键因素。Baik 等<sup>[6]</sup>研究不同雷诺数下振荡翼运动过程中非定常力,发现前缘涡的形成与脱落取决于振荡翼的运动频率和俯仰振幅。Ribeiro 等<sup>[7]</sup>用大涡模拟方法研究了不同雷诺数下振荡翼的能量收集效率,发现前缘涡的生成与脱落主要受振荡翼运动方式影响,与雷诺数的相关度较低。对非均匀流内的振荡水翼,谢玉东等<sup>[8]</sup>通过数值研究,发现非均匀流可以改善水翼的能量提取性能。

对于多个振荡翼排列方式对整体性能的影响研究,如 2 个振荡翼前后布置的工况,Akhtar 等<sup>[9]</sup>发现在适当的运动参数下上游振荡翼的尾涡能提高下游振荡翼的推力,使整体的获能效率高于单水翼。对与前后串联布置的振荡翼,Lindsey 和 Jones 等<sup>[10-11]</sup>

**收稿日期:**2022-04-08 **基金项目:**国家重点研发计划(2019YFE0192600)、国家自然科学基金(51905469)与扬州市自然科学基金(2017YFB0902100)资助

**作者简介:**朱卫军(1976—),扬州大学教授、博士生导师,主要从事风力机空气动力学、风力机气动声学研究。

**通信作者:**孙振业(1990—),扬州大学副教授,主要从事风力机空气动力学、风力机气动声学、翼型与叶片设计、气动弹性力学研究。e-mail: zhenye\_sun@yzu.edu.cn

进行了实验和数值研究,发现大振幅低频率有利于实现最大能量收集,较大的有效攻角和薄翼型能够实现更高的能量收集效率。Ashraf 等<sup>[12]</sup>对前后布置的双列 NACA0014 翼型研究发现,尽管双列布置下每个翼型的能量采集量与单翼型相比降低,但总能量收集效率有显著提高。

上述研究都是针对传统简谐运动模型的振荡翼,而乔凯等<sup>[13]</sup>对水翼的俯仰运动进行了改进,改进后的运动模型能使水翼的升力系数在较长时间段内保持较大值,从而提高水翼的捕能效率。孙光等<sup>[14]</sup>提出一种带尾缘襟翼的振荡水翼结构,结果表明尾缘襟翼的摆动能增大水翼的攻角,进而提高时均功率系数。Karbasiyan 等<sup>[15]</sup>首先提出摇臂式振荡翼能量采集运动模式,将水翼的平移与升沉、俯仰耦合,可以在较低的振荡频率下输出较高的功率。进一步地,马鹏磊等<sup>[16-17]</sup>从摆式振荡翼运动过程中攻角的变化和旋涡结构两方面分析了振荡频率和俯仰振幅对水翼水动力性能的影响。

潮流能和海上风能是可再生海洋能源的重要部分,其中海上风能的开发利用较为成熟,但海上风场中的潮流能却无法有效利用。因此,将摆式运动的振荡翼式潮流能收集装置与海上风电场结合,不仅对提高海上风场效能具有重要意义,还对于消除潜在的塔筒涡激振动具有积极意义。本文提出一种摆式振荡翼塔筒尾涡能量收集装置,运用格子玻尔兹曼方法(lattice Boltzmann method, LBM)和大涡模拟方法(large eddy simulation, LES)分析了不同运动参数下系统的水动力性能及能量收集效率,提出了一种高效收集海上风场潮流能的参考方案。

## 1 运动模型

图 1 为摆式振荡翼运动示意图,水翼的俯仰轴绕塔筒圆心做周期性的往复摆动,同时水翼绕其俯仰轴做俯仰运动,其数学模型为:

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

$$x(t) = R \cos[\gamma \cos(2\pi ft)] \quad (2)$$

$$y(t) = R \sin[\gamma \cos(2\pi ft)] \quad (3)$$

$$\gamma = \arcsin(H_0/R) \quad (4)$$

式中,  $\theta_0$  为振荡翼的俯仰振幅;  $f$  为振荡频率;  $x(t)$  为水翼俯仰轴  $x$  方向的位移;  $y(t)$  为水翼俯仰轴  $y$  方向的位移;  $R$  为摆动半径;  $\gamma$  为摆动角幅值;  $H_0$  为

升沉振幅; 取俯仰轴位置为翼型弦长  $1/3$  处, 即  $X_p/c = 1/3$ 。

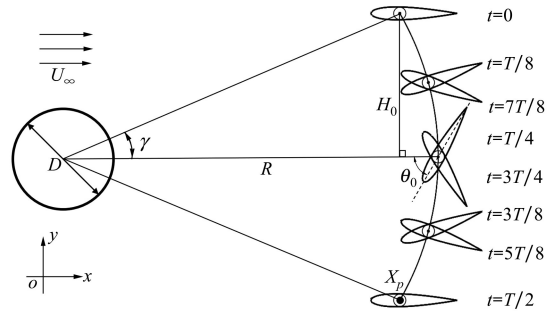


图 1 摆式振荡翼运动模型示意图

在来流作用下振荡翼产生的水动力可分解为垂直于来流方向的力  $F_Y(t)$  和平行于来流方向的力  $F_X(t)$  及因俯仰运动而产生的力矩  $M(t)$ 。振荡翼的瞬时功率系数  $C_p(t)$  及时均功率系数  $\bar{C}_p$  可表示为

$$C_p(t) = C_{pX}(t) + C_{pY}(t) + C_{pM}(t) = \frac{2}{\rho U_\infty^3 c} \times \left[ F_X(t) \frac{dx(t)}{dt} + F_Y(t) \frac{dy(t)}{dt} + M(t) \frac{d\theta(t)}{dt} \right] \quad (5)$$

$$\bar{C}_p = \bar{C}_{pX} + \bar{C}_{pY} + \bar{C}_{pM} = \frac{1}{T} \left[ \int_0^T C_{pX}(t) dt + \int_0^T C_{pY}(t) dt + \int_0^T C_{pM}(t) dt \right] \quad (6)$$

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T} \int_0^T C_p(t) dt = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^3 c} \quad (7)$$

式中:  $\rho$  为海水密度;  $U_\infty$  为来流速度;  $c$  为振荡翼弦长;  $C_{pX}(t)$  为分力  $F_X(t)$  贡献的瞬时功率系数;  $C_{pM}(t)$  为俯仰力矩贡献的瞬时功率系数;  $\bar{C}_{pX}$  为分力  $F_X(t)$  贡献的时均功率系数;  $\bar{C}_{pM}$  为俯仰力矩贡献的时均功率系数;  $T$  为振荡翼运动周期;  $\bar{P}$  为时均功率。

攻角是影响水翼性能的重要因素之一,受振荡翼摆动影响,等效攻角为

$$\alpha_c(t) = \alpha_h(t) - \theta(t) = \arctan \left[ \frac{-\frac{dy(t)}{dt}}{\left( U_\infty - \frac{dx(t)}{dt} \right)} \right] - \theta(t) \quad (8)$$

式中,  $\alpha_h(t)$  为升沉诱导角。

对二维情况而言,振荡翼的扫掠面积  $S$  与其扫掠高度相当,则振荡翼从来流中捕获能量的效率为

$$\eta = \frac{2\bar{P}}{\rho U_\infty^3 S} = \bar{C}_p \cdot \frac{c}{2H_0 + d} \quad (9)$$

式中:  $d$  为振荡翼厚度;  $H_0$  为扫掠高度。无量纲频率定义为

$$f^* = \frac{fc}{U_\infty} \quad (10)$$

## 2 数值方法

### 2.1 LBM 方法

LBM 方法是对 Boltzmann-BGK 方程<sup>[18]</sup>进行离散,进而把连续介质处理成位于网格节点的众多离散流体质点粒子,其中粒子按碰撞及迁移规则在网格上运动,最后统计各网格流体质点及运动特征得到流体的宏观运动规律。在 Boltzmann 方程中,分布函数被用来描述粒子的统计特征

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \xi \cdot \nabla_x f + a \cdot \nabla_\xi \cdot f = \Omega(f) \quad (11)$$

式中:  $x$  为粒子的位置坐标;  $\xi$  为粒子的速度;  $a$  为粒子的加速度;  $\Omega$  为碰撞项。对碰撞项进行 BGK 近似 (bhatnagar-gross-krook, BGK), 简化碰撞项得到动力学演化方程<sup>[19]</sup>

$$\Omega_i^{\text{BGK}} = \frac{1}{\tau} (f_i^{\text{eq}} - f_i) \quad (12)$$

$$f_i(x + e_i \Delta t, t + \Delta t) - f_i(x, t) = -\frac{1}{\tau} [f_i(x, t) - f_i^{\text{eq}}(x, t)] \quad (13)$$

式中:  $f_i(x, t)$  为  $t$  时刻, 在位置  $x$  处,  $i$  方向粒子的分布函数;  $c_i$  为粒子在  $i$  方向上的运动速度;  $f_i^{\text{eq}}$  是平衡分布函数;  $\tau$  为无量纲松弛时间;  $\Delta t$  为时间步长, (13) 式等号左侧为迁移项, 右侧为碰撞项。

对于离散速度模型, 本文采用单松弛格式的 D2Q9 模型(2 个空间维度, 9 个方向的离散速度), 各方向粒子的速度分布如图 2 所示。其离散速度为

$$e_i = \begin{cases} (0, 0) & i = 0 \\ c \{ \cos[(i-1)\pi/2], \sin[(i-1)\pi/2] \} & i = 1 \sim 4 \\ \sqrt{2}c \{ \cos[(2i-1)\pi/4], \sin[(2i-1)\pi/4] \} & i = 5 \sim 8 \end{cases} \quad (14)$$

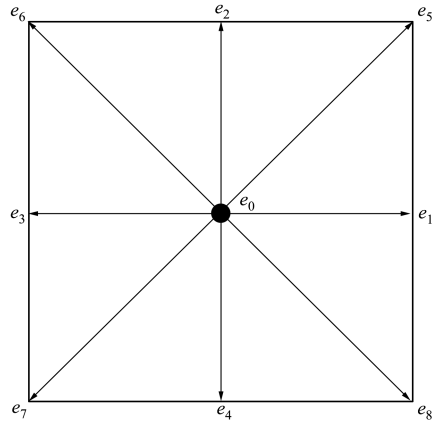


图 2 D2Q9 速度离散模型

局部平衡态分布函数可表示为

$$f_i^{\text{eq}} = \rho \omega_i \left( 1 + \frac{3e_i \cdot u}{c^2} + \frac{9(e_i \cdot u)^2}{2c^4} - \frac{3u^2}{2c^2} \right) \quad (15)$$

式中:  $\rho$  为宏观密度;  $u$  为宏观速度;  $c$  为格子声速,  $c = \sqrt{RT}$ ,  $RT = 1/3$ 。  $\omega_i$  为权系数, 对于 D2Q9 模型, 有  $\omega_{i=0} = 4/9$ ,  $\omega_{i=1,2,3,4} = 1/9$ ,  $\omega_{i=5,6,7,8} = 1/36$ 。

### 2.2 LES 方法

LES 方法借助滤波器方程完成对“小涡”的滤波处理, 从而形成关于大涡的控制方程, 小尺度的涡则通过亚格子模型来描述。常用的亚格子湍流模型有 Smagorinsky 模型、Dynamic Smagorinsky 模型以及 WALE (wall adapting local eddy) 模型。WALE 模型<sup>[20]</sup>通过优化应变率张量, 优化了亚格子黏性的计算, 使得对近壁面湍流及转捩的计算结果更准确。因此, 本文选取 WALE 模型作为亚格子模型。其涡黏度为

$$\nu_i = \rho L_s^2 \frac{(S_{ij}^d S_{ij}^d)^{3/2}}{(\bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij})^{5/2} + (S_{ij}^d S_{ij}^d)^{5/4}} \quad (16)$$

式中:  $L_s = \min(\kappa d, \Delta^{1/3})$ ;  $\kappa$  为冯卡门系数;  $d$  为距壁面最短距离, 过滤尺度为  $\Delta = V^{1/3}$ ;  $V$  为计算网格单元的体积。应变率张量为

$$S_{ij}^d = \frac{1}{2} (\bar{g}_{ij}^2 + \bar{g}_{ji}^2) - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{g}_{kk}^2 \quad (17)$$

$$\bar{g}_{ij} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \quad (18)$$

LBM 方法与 LES 方法的耦合是通过 WALE 亚格子模型改变 LBM 方法中碰撞模型的松弛时间来实现的, 简言之滤波尺度之下的小涡对流场的影响是通过加入湍流松弛时间实现的, 具体的方程在此不再赘述, 请参考文献[21], 此文中首次将大涡模

拟引入到 LBM 中。

### 2.3 可靠性验证

为验证本文数值方法的可靠性,以 NACA0015 翼型为研究对象,并将本文方法与文献[3]在相同工况下的结果进行对比。计算域大小为  $75c \times 75c$ ,  $c$  为翼型弦长,格子分布如图 3 所示,近壁面区域  $y^+ = 0.27$ ,尾流采用动态自适应跟踪优化<sup>[22]</sup>。时间步长取  $T/2\ 000$ ,根据前期研究及文献[23-24],确定一个时间步长机构走过振荡翼运动周期的  $1/2\ 000$ 。水翼与塔筒的几何边界均为壁面条件,关于 LBM 对曲线边界的捕捉方法请见文献[18]。LES 采用的 WALE 亚格子模型常数设置  $C_w = 0.325$ 。

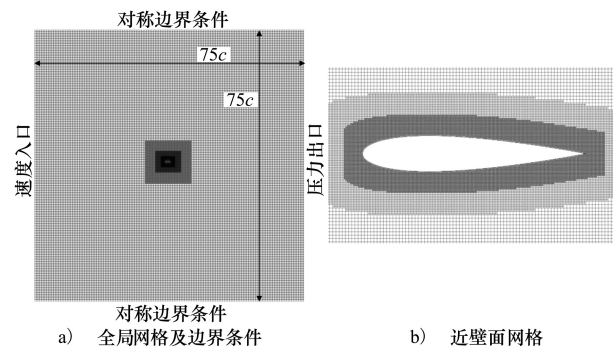
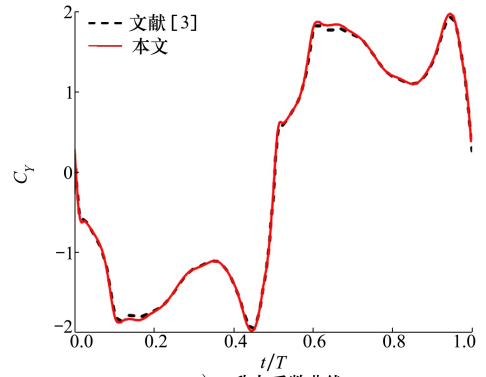


图 3 计算域示意图

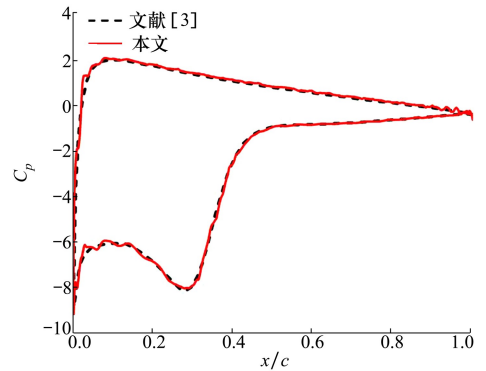
图 4a) 为一个运动周期内升力系数变化,  $t/T = 0.25$  时,水翼表面压力系数的对比如图 4b) 所示,结果表明本文的计算结果与文献[3]具有较好的一致性。数值计算工况为: NACA0015,  $Re = 1\ 100$ ,  $X_p/c = 1/3$ ,  $y_0/c = 1.0$ ,  $f^* = 0.14$ ,  $\theta_0 = 76.33^\circ$ 。数值计算结果对比如表 1 所示,其中  $\bar{C}_x$  为平均阻力系数,  $\hat{C}_y$  为最大升力系数,  $\hat{C}_M$  为最大俯仰力矩系数,各参数误差都在 1% 以内,证明了本文数值计算方法的可靠性。

表 1 数值计算结果对比

方法	$\bar{C}_x$	$\hat{C}_y$	$\hat{C}_M$	$\bar{C}_p$	$\eta/\%$
文献[3]	2.019	1.942	0.664	0.863	33.900
本文	2.038	1.940	0.670	0.868	33.897



a) 升力系数曲线



b)  $t/T=0.25$  时刻压力系数曲线

图 4 升力系数与压力系数对比

## 3 结果与分析

本节的数值计算均以 NACA0015 翼型为研究对象。与传统运动方式的振荡翼不同,本文研究的摆式振荡翼置于塔筒尾涡内,振荡翼的运动频率须与塔筒涡脱频率保持一致。

### 3.1 塔筒与振荡翼的耦合影响

以塔筒直径  $D$  为参照,取  $Re = 400$  进行塔筒尾涡与翼型绕流耦合特性分析。取振荡翼弦长  $c = D$ ,摆动半径  $R = 6D$ ,俯仰振幅  $\theta_0 = 80^\circ$ ,升沉振幅  $H_0 = 0.8D$ 。表 2 为有无塔筒工况下的振荡翼水动力性能,通过对比可以发现塔筒尾涡能够提升水翼的能量捕获效率。水翼对塔筒载荷及涡脱频率的影响见表 3,其中  $\bar{C}_d$  为塔筒平均阻力系数,  $\hat{C}_l$  为塔筒最大升力系数,  $T$  为塔筒涡脱周期,发现在塔筒尾涡区域加入振荡翼后,可以降低塔筒的水动力载荷,减慢塔筒涡脱,降低由钝体绕流引起的疲劳载荷。

表 2 有无塔筒情况下的振荡翼水动力性能

工况	$\bar{C}_x$	$\hat{C}_y$	$\hat{C}_M$	$\bar{C}_p$	$\eta/\%$
无塔筒	2.269	2.547	0.594	0.621	27.312
有塔筒	1.583	2.259	0.624	0.699	30.724

表 3 有无水翼情况下的塔筒载荷与涡脱周期

工况	$\bar{C}_d$	$\hat{C}_l$	$T/s$
塔筒	1.430	1.088	18.363
塔筒+水翼	1.383	1.067	18.897

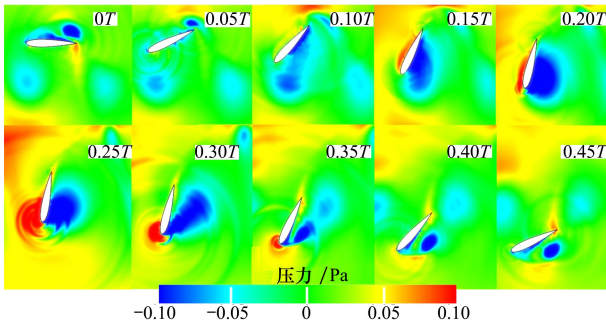


图 5 下行程振荡翼压力云图

由(1)~(4)式定义的运动模型,振荡翼在(0~0.5) $T$ 为下行程,(0.5~1.0 $T$ )为上行程,2个行程的运动方向相反,振荡翼所载荷荷也完全相反。为便于分析,以下行程为例,结合图 5~8 对振荡翼的水动力特性进行分析。

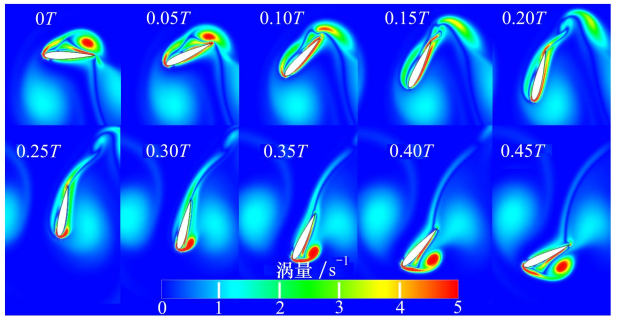


图 6 下行程振荡翼涡量云图

在(0~0.1) $T$ 期间,上个周期的上行程形成的前缘涡在水翼上表面的尾缘脱落,使上表面附近压力逐渐从负压转变为正压;又由于水翼的逆时针俯仰以及向下的升沉,使次级前缘涡无法附着在翼面进一步发展,在上表面形成狭长的涡面并逐渐脱落,上表面压力逐渐从负压向正压转变;同时水翼做逆时针的俯仰运动,且俯仰轴离前缘较近,尾缘上表面附近的流体受挤压,压力增大,尾缘下表面边界层加速分离,压力减小,水翼上下表面压差快速转变,升沉力逐渐从做负功转变为做正功。在(0.1~0.2) $T$ 期间,水翼前缘逐渐进入尾涡涡团,在涡团与逆时针俯仰的共同作用下,水翼上表面压力进一步升高,下表面压力进一步降低,表面压差增大,时均功率系数逐渐达到第一个峰值(见图 8b))。

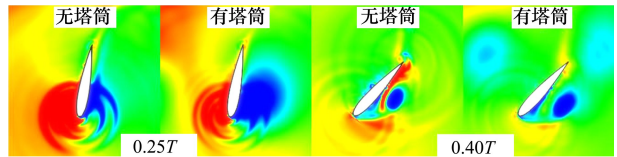


图 7 0.25 $T$ 和0.4 $T$ 时刻振荡翼压力云图

在(0.2~0.4) $T$ 期间,受下表面附近塔筒尾涡的涡团影响,延缓水翼下表面前缘涡的生成与发展,水翼发生失速延迟,升力系数变化不大(见图 8a))。图 7 中在 0.25 $T$ 时刻水翼的负压区更大,0.4 $T$ 时刻水翼下表面尾缘反向流减弱,前缘涡发展更充分,使水翼两侧压差稳定,升力系数  $C_y$  维持在较高值。在(0.4~0.5) $T$ 期间,水翼逐渐远离塔筒尾涡,前缘涡进一步发展并逐渐脱落,使  $C_y$  达到第二个峰值(见图 8a))。随着水翼的进一步运动,前缘涡发展至尾缘附近,在上行程开始时逐渐脱落。

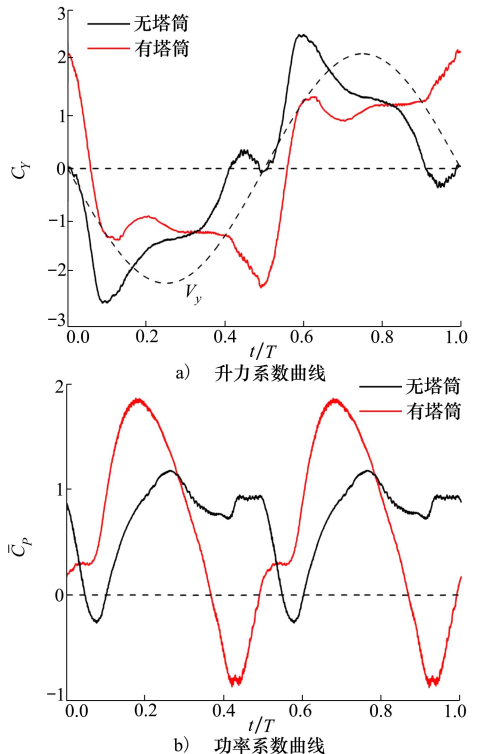


图 8 振荡翼的升力系数  $C_y$  和时均功率系数  $\bar{C}_p$  曲线

振荡翼置于塔筒尾涡区域内和无塔筒尾涡作用下振荡翼的升力系数曲线和功率系数曲线如图 8 所示。塔筒尾涡延缓了振荡翼前缘涡的发展,使升力系数  $C_y$  与升沉速度  $V_y$  的同步性更好,一个运动周期内升沉力大部分时间对翼型做正功,因而能够获得更高的效率,从功率系数曲线中也体现了这一点;尤其在  $(0.25 \sim 0.5)T$  期间,塔筒尾涡对振荡翼的功率提升有着明显的积极作用。

### 3.2 俯仰振幅

为进一步分析俯仰振幅  $\theta_0$  对摆式振荡翼的影响,保持其他运动参数相同 ( $Re = 400, c = D, R = 6D, H_0 = 0.8D$ ),有无塔筒情况下振荡翼能量收集效率  $\eta$  随俯仰振幅  $\theta_0$  的变化如图 9 所示。无论是否有塔筒尾涡作用,当  $\theta_0 = 80^\circ$  时,振荡翼的能量收集效率  $\eta$  都达到最大值,分别为 30.72% 和 27.31%,在塔筒尾涡的作用下  $\eta$  相对提高了 12.49%。塔筒尾涡对能量收集效率有着明显的提升作用,尤其当  $\theta_0 = 50^\circ$  时候,在塔筒尾涡的作用下,能量收集效率由负值转为正值,即振荡翼由推进模式转变为能量收集模式。随着  $\theta_0$  的进一步增大,振荡翼能量收集效率又逐渐降低。

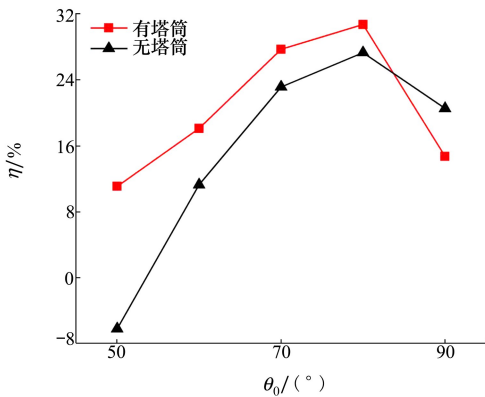


图 9 俯仰振幅  $\theta_0$  对能量收集效率  $\eta$  的影响 ( $Re = 400, c = D, R = 6D, H_0 = 0.8D$ )

振荡翼运动过程中受力的变化是水动力性能的直接体现,图 10 显示了有塔筒情况下不同俯仰振幅下振荡翼力系数在一个运动周期内的变化情况。随着俯仰振幅的增大,振荡翼的升力系数  $C_y$  和阻力系数  $C_x$  均有所增大,当  $\theta_0$  超过  $80^\circ$  后,升力系数不再增大,而阻力系数继续增大,使振荡翼的能量吸收效率达到峰值后开始降低。

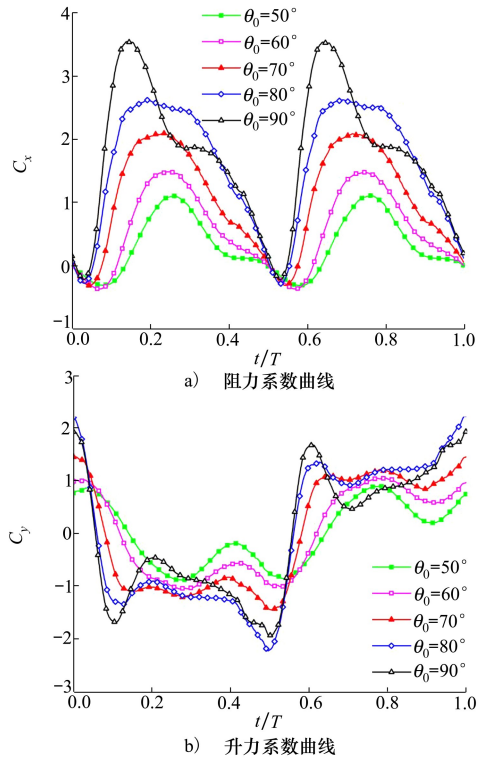


图 10 有塔筒情况不同俯仰振幅  $\theta_0$  振荡翼力系数的变化 ( $Re = 400, c = D, R = 6D, H_0 = 0.8D$ )

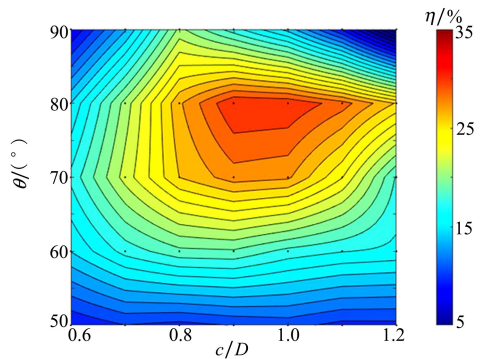


图 11 有塔筒情况不同俯仰振幅振荡翼能量收集效率图 ( $Re = 400, R = 6D, H_0 = 0.8D$ )

为进一步分析有塔筒情况下俯仰振幅  $\theta_0$  对振荡翼能量收集效率的影响,保持其他运动参数相同 ( $Re = 400, R = 6D, H_0 = 0.8D$ ),其能量收集效率  $\eta$  随俯仰振幅的变化如图 11 所示,  $\eta$  不随俯仰振幅或水翼弦长  $c$  单调增加或减少,在参数域内存在高效区间,在  $\theta_0 = 80^\circ, c = 0.9D$  附近取得。

### 3.3 升沉振幅

由(9)式可知,振荡翼的能量收集效率与时均功率系数  $\bar{C}_p$  呈正相关,与升沉振幅  $H_0$  呈负相关。

图 12 为有无塔筒情况下振荡翼时均功率系数  $\bar{C}_p$  和能量收集效率  $\eta$  随升沉振幅  $H_0$  的变化曲线 ( $Re = 400, c = D, R = 6D, \theta_0 = 80^\circ$ ), 随着升沉幅度的增大, (8) 式中升沉诱导角  $\alpha_h(t)$  增大, 使最大等效攻角逐渐小于失速角, 时均功率系数先增后减, 在  $H_0 = D$  时达到最大值; 但时均功率系数不与升沉振幅呈相应比例增加, 能量收集效率反而随升沉振幅增大而降低。从图 12b) 也可以看出, 振荡翼的能量收集效率  $\eta$  随着升沉振幅  $H_0$  的增大而降低, 且随着振荡翼升沉振幅的增大, 有无塔筒情况下的能量收集效率逐渐接近。

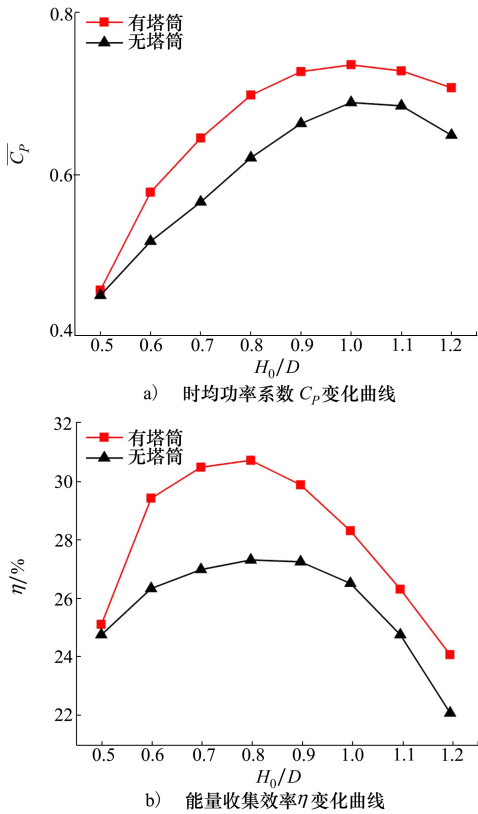


图 12 升沉振幅  $H_0$  对时均功率系数  $\bar{C}_p$  和能量收集效率  $\eta$  的影响 ( $Re = 400, c = D, R = 6D, \theta_0 = 80^\circ$ )

图 13 为有塔筒情况  $0.4T$  时刻不同升沉幅度下振荡翼的压力和涡量云图, 对比发现, 随着  $H_0$  的增大, 水翼逐渐远离塔筒尾涡涡团, 使涡团对前缘发展的延缓作用逐渐减弱; 同时振荡翼摆动速度也随着  $H_0$  的增大而增大, 前缘涡更靠近下表面且距尾缘更近, 使下表面尾缘附近的反向流增强, 在下表面尾缘附近形成正压, 减小了水翼两面的压差, 从而使水

翼的能量收集效率降低。图 13 表明, 随着振荡翼升沉振幅的增大, 塔筒尾涡区域在振荡翼摆动范围内的占比逐渐降低, 塔筒尾涡对振荡翼的影响逐渐降低, 因此能量收集效率随着  $H_0$  的增大逐渐与无塔筒情况对应的值接近。

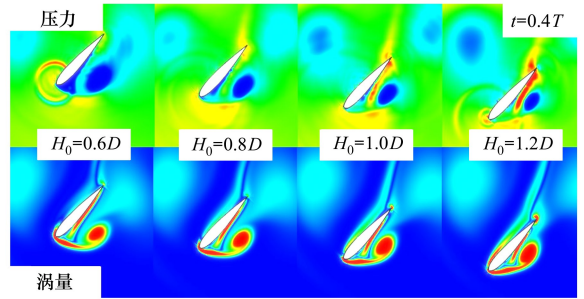


图 13 有塔筒情况  $0.4T$  时刻不同升沉振幅  $H_0$  振荡翼的压力和涡量云图

### 3.4 振荡翼弦长的相关性

由于振荡翼置于塔筒尾涡区域内, 振荡翼运动频率与塔筒涡脱频率保持一致, 因此折算频率  $f^*$  仅与振荡翼弦长  $c$  有关。图 14 为有无塔筒情况下振荡

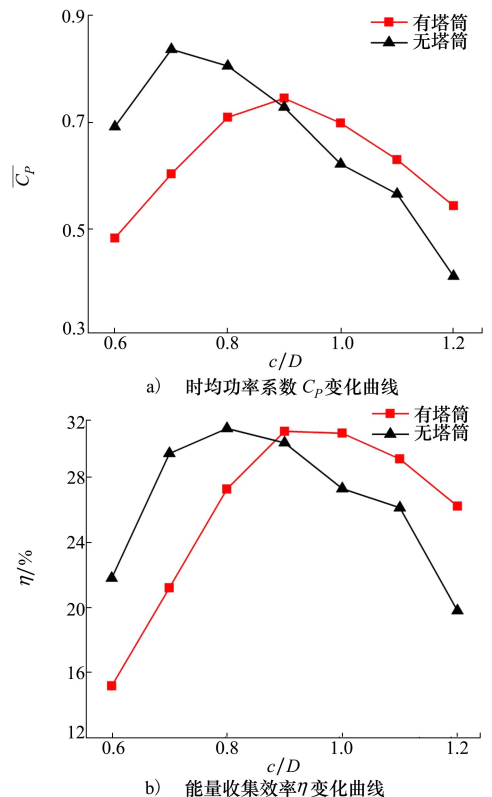


图 14 振荡翼弦长  $c$  对时均功率系数  $\bar{C}_p$  和能量收集效率  $\eta$  的影响 ( $Re = 400, R = 6D, \theta_0 = 80^\circ, H_0 = 0.8D$ )

翼时均功率系数和能量收集效率随弦长的变化 ( $Re = 400, R = 6D, \theta_0 = 80^\circ, H_0 = 0.8D$ ), 从中可以看出, 随着翼型弦长的增大, 时均功率系数和能量收集效率都先增后减。由 (9) 式可知, 振荡翼的能量收集效率与时均功率系数  $\bar{C}_p$  呈正相关, 与振荡翼弦长也呈正相关。无塔筒工况下, 当  $c = 0.9D$  时  $\eta$  达到最大值 30.14%, 对应的折算频率为 0.190 9; 有塔筒的工况下, 最高效率 30.72% 在  $c = D$  时获得, 此时的折算频率为 0.211 5。

在塔筒尾涡的影响下, 振荡翼的最佳折算频率增大, 能量收集性能有显著提升; 且随着弦长的增大, 塔筒尾涡对能量收集效率的积极作用越发明显。在  $0.4T$  时刻不同弦长振荡翼的压力云图如图 15 所示, 对比发现, 随着振荡翼弦长的增大, 前缘涡逐渐靠近前缘且与下表面接近, 尾缘反向流随之增强, 使振荡翼性能下降。有塔筒情况下, 振荡翼下表面的尾缘反向流弱于无塔筒情况, 且随着弦长的增大, 塔筒尾涡对尾缘反向流的抑制作用越明显, 从而使振荡翼能保持较高水动力性能。

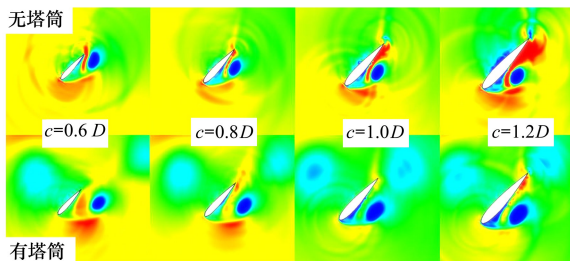


图 15  $0.4T$  时刻不同弦长振荡翼的压力云图

## 4 结 论

本文采用 LBM\_LES 方法, 对振荡翼塔筒尾涡潮流能捕获系统进行二维数值模拟, 分析不同运动参数对能量捕获效率的影响。在验证数值方法可靠性的前提下, 分析了有无塔筒情况下, 俯仰振幅、升沉振幅和弦长变化对振荡翼塔筒尾涡潮流能捕获系统的能量收集效率及水动力性能的影响。二维数值模拟具有一定的局限性, 但是其结果表明:

1) 在塔筒尾涡区域加入振荡水翼后, 可以降低塔筒的水动力载荷, 减慢塔筒涡脱, 降低由钝体绕流引起的疲劳载荷; 在合适的运动参数下, 塔筒尾涡能改善振荡翼的水动力性能, 显著提高能量收集效率。

2) 塔筒尾涡对振荡翼水动力性能的提升作用随着俯仰振幅的增大逐渐减弱, 当  $\theta_0 = 50^\circ$  时, 在塔筒尾涡的作用下, 振荡翼由推进模式转变为能量收集模式。

3) 不同的升沉振幅下, 塔筒尾涡都能显著提高振荡翼的能量收集效率, 且随着振荡翼升沉振幅的增大, 塔筒尾涡对振荡翼的影响逐渐降低, 有无塔筒情况下的能量收集效率逐渐接近。

4) 塔筒尾涡使振荡翼的最佳折算频率增大, 能量收集性显著提升; 且随着弦长的增大, 塔筒尾涡对能量收集效率的积极作用越发明显, 在  $c = D$  时获得最高效率 30.72%, 此时的折算频率为 0.211 5。

## 参考文献:

- [1] MCKINNEY W, DELAURIER J. Wingmill: an oscillating-wing windmill[J]. Journal of Energy, 1981, 5(2): 80-87
- [2] KINSEY T, DUMAS G. Computational fluid dynamics analysis of a hydrokinetic turbine based on oscillating hydrofoils[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(2): 1-16
- [3] KINSEY T, DUMAS G. Parametric study of an oscillating airfoil in a power-extraction regime[J]. AIAA Journal, 2008, 46(6): 1318-1330
- [4] YOUNG J, ASHRAF M A, LAI J, et al. Numerical simulation of fully passive flapping foil power generation[J]. AIAA Journal, 2013, 51(11): 2727-2739
- [5] SU Y, BREUER K S. Resonant response and optimal energy harvesting of an elastically mounted pitching and heaving hydrofoil [J]. Physical Review Fluids, 2019, 4(6): 1-18
- [6] BAIK Y S, BERNAL L P, GRANLUND K, et al. Unsteady force generation and vortex dynamics of pitching and plunging aerofoils[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 709:37-68
- [7] RIBEIRO B L R, FRANK S L, FRANCK J A. Vortex dynamics and Reynolds number effects of an oscillating hydrofoil in energy harvesting mode[J]. Journal of Fluids and Structures, 2020, 94: 1-15
- [8] 谢玉东, 马鹏磊, 王勇, 等. 振荡翼在非均匀流中的能量提取性能分析[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 886-891

- XIE Yudong, MA Penglei, WANG Yong, et al. Analysis of energy extraction performance of oscillating foil in non-uniform flow [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2018, 39(4): 886-891 (in Chinese)
- [9] AKHTAR I, MITTAL R, LAUDER G V, et al. Hydrodynamics of a biologically inspired tandem flapping foil configuration [J]. *Theoretical & Computational Fluid Dynamics*, 2007, 21(3): 155-170
- [10] LINDSEY K. Feasibility study of oscillating-wing power generators [D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2002
- [11] JONES K D, LINDSEY K, PLATZER M F. An investigation of the fluid-structure interaction in an oscillating-wing micro-hydro-power generator [J]. *Physics of Atomic Nuclei*, 2003, 71: 73-82
- [12] ASHRAF M A, YOUNG J, LAI J, et al. Numerical analysis of an oscillating-wing wind and hydropower generator [J]. *AIAA Journal*, 2011, 49(7): 1374-1386
- [13] 乔凯, 王启先, 王勇, 等. 振荡翼改进运动模型的能量捕获性能分析 [J]. *山东大学学报*, 2020, 50(6): 40-47  
QIAO Kai, WANG Qixian, WANG Yong, et al. Energy harvesting performance analysis on improved motion model of oscillating hydro-foil [J]. *Journal of Shandong University*, 2020, 50(6): 40-47 (in Chinese)
- [14] 孙光, 王勇, 谢玉东, 等. 尾缘襟翼振荡水翼的水动力特性 [J]. *山东大学学报*, 2020, 50(6): 23-29  
SUN Guang, WANG Yong, XIE Yudong, et al. Hydrodynamic characteristics of oscillating hydrofoil with trailing edge [J]. *Journal of Shandong University*, 2020, 50(6): 23-29 (in Chinese)
- [15] KARBASIAN H R, ESFAHANI J A, BARATI E. The power extraction by flapping foil hydrokinetic turbine in swing arm mode [J]. *Renewable Energy*, 2016, 88: 130-142
- [16] MA Penglei, YANG Zhihong, WANG Yong, et al. Energy extraction and hydrodynamic behavior analysis by an oscillating hydro-foil device [J]. *Renewable Energy*, 2017, 113: 648-659
- [17] 马鹏磊, 王勇, 刘海宾, 等. 摆式振荡水翼的水动力性能分析 [J]. *太阳能学报*, 2018, 39(3): 665-672  
MA Penglei, WANG Yong, LIU Haibin, et al. Analysis on hydrodynamic performance of flapping foil with swing motion [J]. *Acta Energetica Sinica*, 2018, 39(3): 665-672 (in Chinese)
- [18] 何雅玲, 王勇, 李庆. 格子 Boltzmann 方法的理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2009  
HE Yaling, WANG Yong, LI Qing. Theory and application of lattice Boltzmann method [M]. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese)
- [19] QIAN Y H, D'HUMIRES D, LALLEMAND P. Lattice BGK model for Navier-Stokes equation [J]. *Europhysics Letters*, 1992, 17(6): 479-484
- [20] NICOU D, DUCROS F. Subgrid-scale stress modelling based on the square of the velocity gradient tensor [J]. *Flow Turbulence and Combustion*, 1999, 62(3): 183-200
- [21] HOU S, STERLING J, CHEN S, et al. A lattice Boltzmann subgrid model for high Reynolds number flows [J]. *Fields Institute Communications*, 1994, 6: 1-18
- [22] 许昌, 黄海琴, 施晨, 等. 基于 LBM-LES 方法的典型复杂地形作用下风力机尾流数值模拟 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(13): 4236-4243  
XU Chang, HUANG Haiqin, SHI Chen, et al. Numerical simulation of wind turbine wakes in typical complex terrains based on LBM-LES Method [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(13): 4236-4243 (in Chinese)
- [23] RIBEIRO A, CASALINO D, FARES E. Lattice-Boltzmann simulations of an oscillating NACA0012 airfoil in dynamic stall [M]. Mykonos: Springer International Publishing, 2016
- [24] POVITSKY A. Modeling of pitching and plunging airfoils in proximity for thrust generation [C] // 46th AIAA Fluid Dynamics Conference, Washington, 2016

# Hydrodynamic performance analysis of tower wake vortex tidal current energy capture system with swing oscillating hydrofoil

ZHU Weijun<sup>1,2</sup>, ZHUANG Shuqing<sup>1</sup>, CHEN Dongyang<sup>3</sup>,  
CAO Jiufa<sup>1</sup>, FU Shifeng<sup>1</sup>, SUN Zhenye<sup>1</sup>

(1.College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China;  
2.Smart Energy Internet Research Institute, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China;  
3.School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** In order to effectively utilize the tidal current energy in offshore wind farms, a swing oscillating hydrofoil system for tidal current energy capture is proposed. The system is constructed with oscillating hydrofoils as tidal current energy capture device combined with offshore wind turbine underwater tower. Lattice Boltzmann method and large eddy simulation method were combined, and the hydrodynamic characteristics and energy collection efficiency of a NACA0015 airfoil with different motion parameters were numerically analyzed with or without the influence of tower wake. The influence of pitch amplitude, heave amplitude and chord length of the hydrofoil on the energy collection efficiency of the system is analyzed from the aspect of vortex structure in the moving process. The results show that the energy collection efficiency of the oscillating wing is significantly improved by the trailing vortex of the tower, and the vortex shedding behind the tower can be reduced by the addition of the oscillating wing, consequently, the fatigue load caused by the flow around the cylindrical body can be reduced. The energy capture efficiency of the oscillating wing can reach a highest efficiency of 30.72% in the wake vortex region of the tower, which has obvious advantages compared with the traditional oscillating wing tidal current energy capture device, and provides an effective way to improve the overall energy utilization rate of offshore wind farms.

**Keywords:** tidal current energy; oscillating hydrofoil; lattice Boltzmann method; large eddy simulation

**引用格式:**朱卫军, 庄舒青, 陈东阳, 等. 摆式振荡翼塔筒尾涡潮流能捕获系统的水动力性能分析[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(1): 188-197

ZHU Weijun, ZHUANG Shuqing, CHEN Dongyang, et al. Hydrodynamic performance analysis of tower wake vortex tidal current energy capture system with swing oscillating hydrofoil[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(1): 188-197 (in Chinese)