

DOI:10.11918/202006021

重叠网格技术下振荡水翼的水动力特性

何广华<sup>1,2,3</sup>,莫惟杰<sup>1,2</sup>,王  威<sup>1</sup>,刘朝纲<sup>1</sup>

(1. 哈尔滨工业大学(威海)海洋工程学院,山东 威海 264209;2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院,哈尔滨 150001;  
3. 山东船舶技术研究院,山东 威海 264209)

**摘  要:**为研究运动参数对于振荡水翼在潮流中获能效率的影响,给出水翼高获能效率时的运动参数分布规律,提高振荡翼式潮流能发电装置的获能效率。基于重叠网格技术建立了振荡水翼的数值计算模型,并对网格的有效性进行了验证,通过改变水翼的折算频率 $f^*$ 、摆角幅值 $\theta_0$ 、升沉振幅 $h_0$ 等运动参数,对二维振荡水翼的水动力特性及相应的获能效率进行了研究,分析了涡脱落对水翼运动过程中获能效率的影响;同时研究了双翼之间形成翼地效应时的压力分布,分析了该情况时水翼的水动力特性以及翼地效应对获能效率的影响。结果表明:合理规划振荡水翼的折算频率、摆角幅值、升沉振幅、转轴位置等参数均可以提高水翼的能量捕获效率;水翼在振荡运动过程中,涡脱落的产生将会影响到水翼的获能效率;平行对称双水翼之间的翼地效应会使双翼之间的流域形成高压区,提高水翼升力;增加的升阻比有利于提高水翼的能量捕获效率,在双翼最小间距缩小时,水翼的获能效率会因地面效应作用的增强而提高。

**关键词:**振荡水翼;重叠网格;获能效率;翼地效应;数值模拟

中图分类号:TK79        文献标志码:A        文章编号:0367-6234(2021)12-0135-09

Hydrodynamic performance of oscillating hydrofoils based on overset grid technique

HE Guanghua<sup>1,2,3</sup>, MO Weijie<sup>1,2</sup>, WANG Wei<sup>1</sup>, LIU Chaogang<sup>1</sup>

(1. School of Ocean Engineering, Harbin Institute of Technology, Weihai, Weihai 264209, Shandong, China;  
2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;  
3. Shandong Institute of Shipbuilding Technology, Weihai 264209, Shandong, China)

**Abstract:** This paper aims to study the influence of motion parameters on the power-extraction efficiency of oscillating hydrofoils in tidal current, investigate the distributions of the motion parameters of hydrofoils at high power-extraction efficiency, and improve the power-extraction efficiency of oscillating hydrofoils in tidal power-extraction devices. A numerical calculation model of oscillating hydrofoils was established based on the overset grid technique, and the effectiveness of the grid was verified. By modifying the motion parameters of a hydrofoil including reduced frequency  $f^*$ , pitching amplitude  $\theta_0$ , and heave amplitude  $h_0$ , the hydrodynamic characteristics of two-dimensional oscillating hydrofoil and the corresponding power-extraction efficiency were investigated. In addition, the influence of vortex shedding on the power-extraction efficiency during the motion of the hydrofoil was analyzed. The pressure distribution when the wing-in-ground effect was formed between two hydrofoils was also studied. The hydrodynamic characteristics of the hydrofoil and the influence of the wing-in-ground effect on the power-extraction efficiency were analyzed under this circumstance. Results show that reasonable planning of the reduced frequency, pitching amplitude, heaving amplitude, and shaft position of the oscillating hydrofoil could all improve the power-extraction efficiency. The generation of vortex shedding during the oscillating motion of the hydrofoil could affect the power-extraction efficiency. The wing-in-ground effect between the parallel symmetrical double hydrofoils would form a high-pressure area in the flow field between the two hydrofoils and increase the lift of the hydrofoils. Increasing the lift-to-drag ratio was beneficial to improve the power-extraction efficiency. When the minimum distance between the two hydrofoils reduced, the power-extraction efficiency of the hydrofoil increased due to the enhancement of ground effect.

**Keywords:** oscillating hydrofoil; overset grid; power-extraction efficiency; wing-in-ground effect; numerical simulation

收稿日期: 2020-06-04  
基金项目: 国家自然科学基金(51579058);中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.202017)  
作者简介: 何广华(1980—),男,教授,博士生导师  
通信作者: 王  威,ww9965@163.com

天然化石能源依然是当今世界能源消耗的主要来源;这些不可再生能源的大量消耗,在为全球经济高速发展带来动力的同时,也给人类的生活环境质

量带来了极大的挑战<sup>[1]</sup>。为此,世界各国都在积极地开发和利用可再生的环保能源,其中潮流能依靠太阳和月球的引力产生动能,这种可再生的清洁能源具有周期性特点,能量密度是太阳能的 30 倍、风能的 4 倍<sup>[2]</sup>,且资源分布丰富。因海水的密度约为空气的 1 000 倍,发电机输出相同功率时,水轮机的半径只需风机的 1/2<sup>[3]</sup>,所以在近海处潮流密集地区,尤其流速高于 2 m/s 时,非常适宜布置潮流能发电装置。

潮流能发电的装置按工作原理的不同主要分为水平轴水轮机、垂直轴水轮机、振荡水翼式发电装置。其中水平轴水轮机的开发和利用最为完备和成熟;垂直轴水轮机具有对于来流方向不敏感的特点,但是能量利用率偏低。振荡水翼式发电装置的能量捕获效率较高,浅海领域的应用优势明显<sup>[4]</sup>,并且加工工艺简单,应用前景较好。

1981 年,McKinney 等<sup>[5]</sup>进行了利用振荡翼捕获来流能量的实验,并就实验值和理论解进行了对比,并对理论公式进行了修正。Zhu<sup>[6]</sup>设计了被动式单翼的获能机构,依靠弹簧提供的回复力实现水翼在线性剪切流作用下的升沉、俯仰运动,发现在小剪切率下水翼仍能保持周期性振荡。王俊芳<sup>[7]</sup>研究了二维水翼在不同攻角、雷诺数、摆动频率和幅值条件下的水动力性能。

专家学者针对双水翼获能效率的研究取得了一定的成果。王勇等<sup>[8]</sup>对 NACA0015 型双水翼的获能效率进行了研究,指出双水翼耦合振荡捕获潮流能装置在一定条件下获能效率可达 40%。刘海宾等<sup>[9]</sup>研究了二维双水翼的俯仰振幅存在 90° 的相位关系时的获能效率,并指出了 NACA0018 翼型的获能效率相对较好。黄凤跃<sup>[10]</sup>基于 Theodoersen 理论分析了大攻角 NACA0018 振荡薄翼非定常绕流的水动力特性。马鹏磊等<sup>[11]</sup>研究了垂直轴振荡水翼的水动力特性,指出水翼在不同的俯仰振幅下均存在“最优频率”使水翼的能量提取效果达到最佳。谢玉东等<sup>[12]</sup>研究了振荡水翼在非均匀流条件下的能量提取性能,指出水翼的攻角在 30° 附近时,流速在垂直方向的非均匀分布会提高水翼的时均功率系数。

近些年,研究改进翼型水翼的水动力的特性也逐渐受到关注。马鹏磊等<sup>[13]</sup>研究了改进翼型做俯仰运动时的水动力特性,通过改变水翼振荡的运动方式使其在潮流中获取更多的能量。郭春雨等<sup>[14]</sup>分别通过试验和数值模拟比较了普通前缘水翼和波浪形前缘水翼的水动力性能,发现波浪形前缘水翼结构可有效减弱表面涡流分离对水翼的扰动,提高

水翼的水动力性能。

已发表的数值研究结果多是针对前后串联式双水翼、翼间距较大的并行双水翼,而关于地翼效应的双翼研究并不多见。为了实现小间距双水翼的模拟,本文采用重叠网格技术对振荡水翼的水动力性能进行研究,并分析翼地效应在振荡双翼接近时的影响。

## 1 数值模拟方法及验证

### 1.1 数学模型

本文所用数学模型的相关控制方程如下:

1) 连续性方程。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

式中: $\rho$  为流体密度; $t$  为时间; $u_i$  为流体介质在笛卡尔坐标轴  $i$  方向上的速度分量; $x_i$  为  $i$  轴方向的坐标, $i=1,2,3$ 。

2) 动量方程。

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = \rho g_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中: $g_i$  为重力加速度在  $i$  轴方向的分量; $p$  为压力;黏性应力  $\tau_{ij} = \mu \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right]$ ,  $\mu$  为流体介质黏度, $u_j$ 、 $u_k$  分别为流体介质在  $j$  轴方向和  $k$  轴方向的速度分量; $\delta_{ij}$  为克罗内克尔符号。

3) 湍流方程。

SST  $k$ - $\omega$  模型由 Menter<sup>[15]</sup> 提出,它综合了标准  $k$ - $\omega$  模型近壁区计算和标准  $k$ - $\varepsilon$  模型远场计算的优点,适用于翼型计算:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (4)$$

式中: $k$  为湍动能; $\omega$  为湍动能耗散率; $\Gamma_k$ 、 $\Gamma_\omega$  分别为  $k$  和  $\omega$  的有效扩散系数,  $\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}$ ,  $\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega}$ ; 湍动黏度  $\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega}$ , 其中  $\alpha^*$  为修正的低雷诺数的阻尼湍流黏度; $\sigma_k$ 、 $\sigma_\omega$  分别为  $k$  和  $\omega$  的湍流普朗特数;平均速度梯度产生的湍动能项  $G_k = \mu_t S^2$ , 平均应变张量系数  $S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$ ,  $S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ ;  $G_\omega$  为  $\omega$  的生成项,  $G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k$ ,  $\alpha = \frac{\alpha_\infty \left( \alpha_0 + Re_t / R_\omega \right)}{\alpha^* \left( 1 + Re_t / R_\omega \right)}$ ,  $\alpha_\infty = 1$ ,  $\alpha_0 = 1/9$ ,  $Re_t = \rho k / \mu \omega$ ,  $R_\omega = 2.95$ ;  $Y_k$ 、 $Y_\omega$  分别为由湍流引起的  $k$  和  $\omega$  的耗散; $D_\omega$  为交叉扩散项; $S_k$ 、 $S_\omega$  为

用户自定义源项。

1.2 水翼的流域边界条件及获能效率

本文采用重叠网格技术处理水翼的运动问题, 计算域的边界条件如图 1 所示, 水翼的边界为壁面条件。水翼周围的网格属于组分网格, 它重叠在流域背景网格内部<sup>[16]</sup>, 组分网格在背景网格平面内运动。两部分网格之间通过挖洞和嵌入实现耦合<sup>[17]</sup>, 即数值计算时先将背景网格中与组分网格对应的区域删除, 然后通过相邻网格单元的插值实现组分网格和背景网格的数据传递。

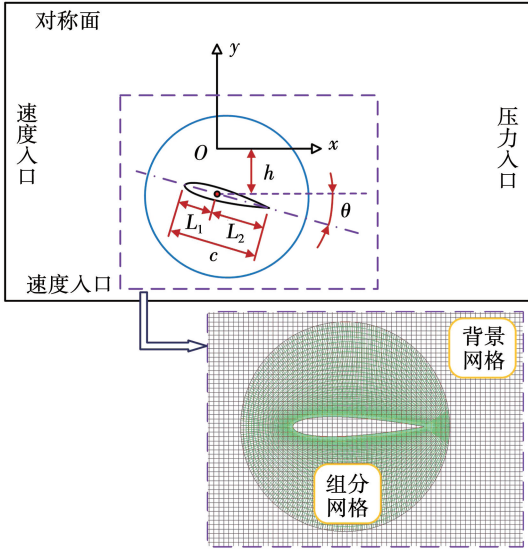


图 1 计算流域边界条件及重叠网格结构

Fig. 1 Setting of boundary conditions and overset grids

通过自定义函数 (user define function, UDF) 的方式实现组分网格的运动, 如图 1 所示, 水翼的运动方程为:

$$h = h_0 \cos(2\pi ft) \tag{5}$$

$$\theta = \theta_0 \sin(2\pi ft) \tag{6}$$

式中:  $h$  为水翼的垂向位移,  $h_0$  为升沉振幅;  $f$  为水翼的振荡频率;  $\theta$  为水翼绕转轴的摆角 (俯仰角),  $\theta_0$  为摆角幅值。

水翼的阻力系数  $C_D$ 、升力系数  $C_L$ 、力矩系数  $C_M$  分别为:

$$C_D = F_D / 0.5\rho U_\infty^2 S \tag{7}$$

$$C_L = F_L / 0.5\rho U_\infty^2 S \tag{8}$$

$$C_M = M / 0.5\rho U_\infty^2 S c \tag{9}$$

式中:  $F_D$ 、 $F_L$ 、 $M$  分别为水翼的阻力、升力、力矩;  $U_\infty$  为来流速度;  $S$  为水翼的弦长  $c$  与展长  $l$  的乘积,  $l$  在二维计算中取单位长度。

水翼获能的瞬时功率  $P$  为升力  $F_L$  与俯仰力矩  $M$  做功之和, 即

$$P = F_L \dot{h} + M \dot{\theta} \tag{10}$$

式中  $\dot{h}$ 、 $\dot{\theta}$  分别为水翼的垂向速度和摆动角速度。

水翼的平均功率  $\bar{P}$  为

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt \tag{11}$$

式中  $T$  为水翼的振荡周期。

水翼的瞬时功率系数  $C_p$  为

$$C_p = \frac{1}{U_\infty} (C_L \dot{h} + C_M \dot{\theta} c) \tag{12}$$

水翼的平均功率系数  $\bar{C}_p$  为

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T} \int_0^T C_p dt = \bar{P} / 0.5\rho U_\infty^3 S \tag{13}$$

振荡水翼的总功率  $P_0$  定义为

$$P_0 = 0.5\rho U_\infty^3 H l \tag{14}$$

式中  $H$  为水翼的扫掠高度, 它与展长  $l$  的乘积为水翼的扫掠面积。

振荡水翼在潮流中的获能效率  $\eta$  为

$$\eta = \frac{\bar{P}}{P_0} = \bar{C}_p \frac{c}{H} \tag{15}$$

1.3 模型验证

运用上述数学模型对振荡水翼做数值模拟分析, 按照 Kinsey 等<sup>[18]</sup> 给出的运动参数, 选取 NACA0015 翼型, 取弦长  $c = 0.25 \text{ m}$ , 折算频率<sup>[19]</sup>  $f^* = fc / U_\infty = 0.14$ ,  $\theta_0 = 60^\circ$ ,  $h_0 = 0.25 \text{ m}$ , 水翼转轴位置  $L_1$  取为  $c/3$  弦长位置处, 来流速度  $U_\infty = 2 \text{ m/s}$ , 分析流域边界尺度、网格密度对计算收敛性的影响, 使得水动力计算结果对以上两者不再敏感。

1.3.1 网格无关性验证

本文使用了重叠网格技术, 网格密度调整时应当按照一定比例, 同时协调组分网格和背景网格的密度, 改变翼型表面节点个数的同时, 背景网格的密度以及其各个加密区的网格密度也都要一起做相应调整。本文根据相同的比例设置不同的网格数量 (见表 1), 网格 A 和 B 的获能效率分别和较密的网格 C 比较, 网格 B 的误差为 1% 以内, 选择网格 B 的划分密度作为本文的网格密度。

表 1 网格密度无关性验证

| Tab. 1 Verification of grid resolution independence |       |           |          |
|-----------------------------------------------------|-------|-----------|----------|
| 工况                                                  | 网格数/万 | $\eta/\%$ | 误差/ $\%$ |
| 网格 A                                                | 5.85  | 25.75     | 2.43     |
| 网格 B                                                | 8.20  | 25.23     | 0.36     |
| 网格 C                                                | 11.60 | 25.14     | —        |

采用重叠网格技术中, 水翼所在的组分流域网格需在背景流域网格内周期运动, 在过小的计算域中, 湍流难以得到充分发展, 容易出现边壁反射、出口回流等影响计算精度的问题, 因此对流域的尺寸

做无关性验证。选取网格 B 中的密度标准,对不同流域尺度验证结果见表 2。可以发现当流域尺度大于  $70c \times 70c$  后,水翼的效率趋于稳定,本文选取的流域尺度为  $70c \times 70c$ 。

表 2 计算域收敛性验证数据表

Tab. 2 Verification of computational domain convergence

| 边界尺寸             | $\eta/\%$ | 误差/ $\%$ |
|------------------|-----------|----------|
| $30c \times 30c$ | 25.23     | 9.31     |
| $40c \times 40c$ | 25.63     | 1.59     |
| $50c \times 50c$ | 24.85     | 1.51     |
| $60c \times 60c$ | 25.12     | 0.44     |
| $70c \times 70c$ | 25.23     | 0        |
| $80c \times 80c$ | 25.23     | —        |

1.3.2 模型有效性验证

选取流域边界尺寸为:  $70c \times 70c$ , 网格数目为 8.2 万,  $\theta_0 = 60^\circ$  和  $\theta_0 = 75^\circ$ , 水翼的水动力计算结果与文献中的翼型研究结果对比见表 3、4。从表 3、4 可以看出, 计算结果和文献[18]的结果相差 5% 以内, 充分验证了本文数值计算方法的有效性。

表 3 振荡水翼的计算结果验证 ( $\theta_0 = 60^\circ$ )

Tab. 3 Verification of calculation results of oscillating hydrofoils ( $\theta_0 = 60^\circ$ )

| Case     | $C_{Lmax}$ | $C_{Mmax}$ | $\bar{C}_p$ | $\eta/\%$ |
|----------|------------|------------|-------------|-----------|
| 文献[18]   | 2.012      | 0.383      | 0.581       | 24.23     |
| 本文       | 2.094      | 0.385      | 0.596       | 24.85     |
| 误差/ $\%$ | 4.070      | 0.402      | 2.580       | 2.56      |

表 4 振荡水翼的计算结果验证 ( $\theta_0 = 75^\circ$ )

Tab. 4 Verification of calculation results of oscillating hydrofoils ( $\theta_0 = 75^\circ$ )

| Case     | $C_{Lmax}$ | $C_{Mmax}$ | $\bar{C}_p$ | $\eta/\%$ |
|----------|------------|------------|-------------|-----------|
| 文献[18]   | 2.776      | 0.536      | 0.915       | 35.88     |
| 本文       | 2.694      | 0.554      | 0.947       | 37.13     |
| 误差/ $\%$ | 2.950      | 3.360      | 3.500       | 3.48      |

2 振荡水翼数值模拟结果与分析

2.1 水翼运动及结构参数的影响

首先研究单翼在水流中振荡运动时的水动力特性, 本文针对 NACA0016 型水翼进行分析, 来流速度  $U_\infty = 2 \text{ m/s}$ , 弦长  $c = 0.25 \text{ m}$ 。

2.1.1 折算频率

图 2 给出了振荡水翼在不同折算频率条件下的获能效率变化曲线, 水翼的摆角幅值  $\theta_0 = 60^\circ$ , 升沉振幅  $h_0 = 1c$ 。

从图 2 可以看出: 水翼获能效率  $\eta$  随着折算频率  $f^*$  的增加呈现先增大后减小的趋势。  $f^*$  在  $0.085 \sim 0.095$  之间的获能效率较高, 最高可达 29% 左右;

$f^* < 0.085$  时, 因水翼折算频率的增加, 水翼的垂向运动速度和摆动角速度逐渐增大, 水翼的获能效率逐步增加;  $f^* > 0.095$  以后, 水翼的获能效率下降。为分析获能效率下降的原因,  $f^*$  分别取 0.095 和 0.143 时, 水翼的 3 自由度水动力时历曲线如图 3 所示。

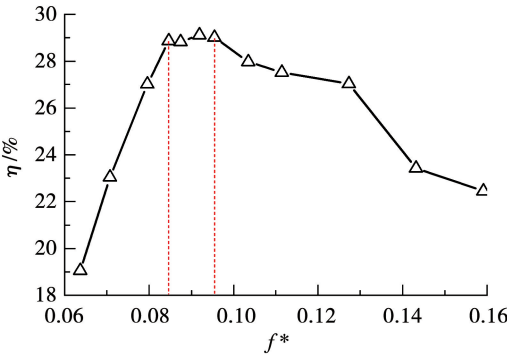


图 2 折算频率对获能效率的影响

Fig. 2 Effect of reduced frequency on power-extraction efficiency of hydrofoils

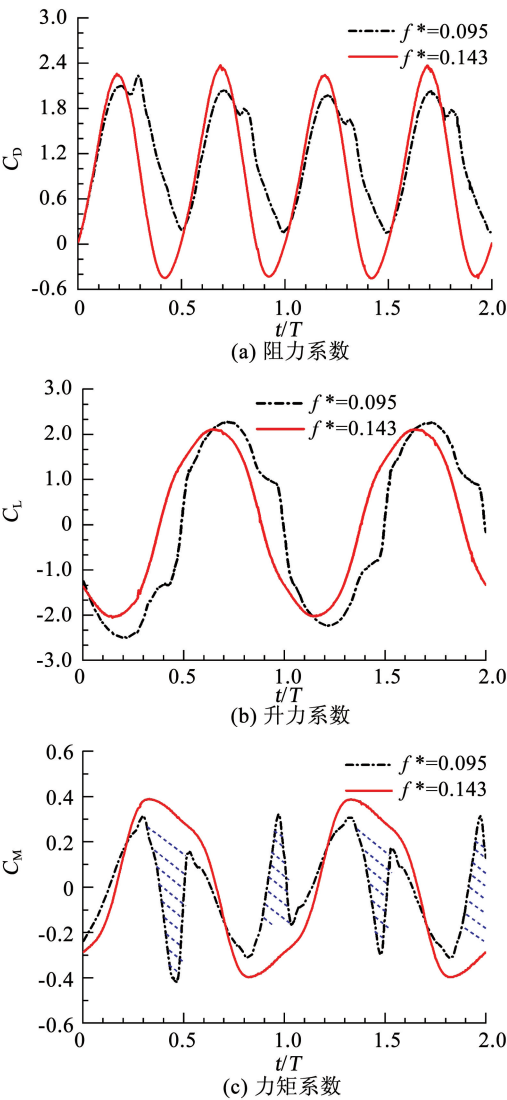


图 3 振荡水翼两个周期内的受力时历曲线

Fig. 3 Instantaneous force and moment coefficient of oscillating hydrofoils over two cycles



从图 3 可以看出,随着摆动频率的增大,水翼的阻力幅值略有提高,但文中水翼并无水平方向的运动,所以阻力对获能效率的影响较小;升力幅值对应的时间点向前移动,但幅值变化不大,对获能效率的影响不大;而力矩系数因水翼振荡频率的减小发生了较大变化,频率较小的时候,力矩系数的峰值处会出现反方向的“塌陷”,这种力矩变化造成了水翼获能效率的差异。因力矩的做功和角速度有关,文中定义量纲一的角速度  $\Theta$  为

$$\Theta = \frac{\dot{\theta}c}{U_{\infty}}$$

(16)

力矩和角速度为同一方向时,水翼是捕获能量的,取力矩和角速度的时历曲线如图 4 所示。图 4 中以量纲一的时间  $t/T=1.5$  左右的范围为例,折算频率为 0.095 条件下,力矩系数的峰值处的“塌陷”使得力矩和水翼的转动同向,力矩对水翼做正功,水翼处于获能状态;而折算频率为 0.143 条件下,力矩系数和水翼的转动反向,力矩对水翼做负功,水翼的获能效率下降。

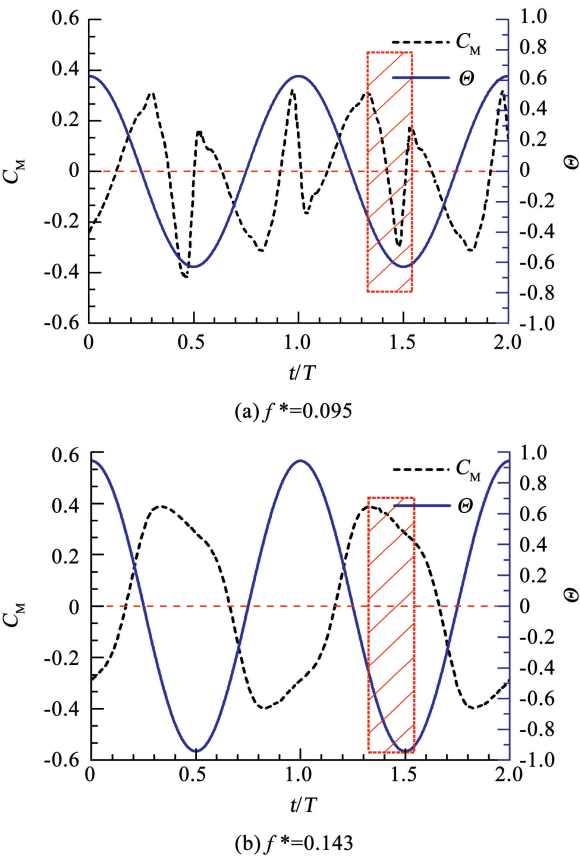


图 4 振荡水翼的力矩系数和量纲一的角速度的时历曲线

Fig. 4 Instantaneous moment coefficient and nondimensional angular velocity of oscillating hydrofoils

分析小频率条件下水翼力矩系数峰值“塌陷”的原因,流场漩涡结构的变化是影响水动力的直接因素<sup>[13]</sup>,取  $t/T=1.35 \sim 1.50$  的范围为例,水翼的漩涡结构如图 5 所示。该时刻水翼逐渐摆动到最下方的水平位置,因迎/背流面的压差作用,水翼前缘表面因流动分离而产生漩涡,漩涡附近的压力较低,漩涡沿水翼表面向下游运动时,会影响水翼所受的力矩方向,从而出现了图 3(c)中的力矩系数曲线的“塌陷”变化。

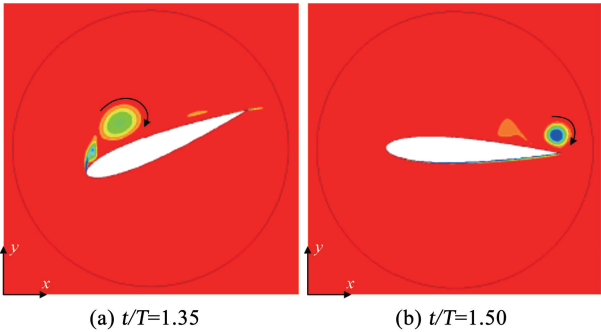


图 5 振荡水翼运动过程中的涡脱落

Fig. 5 Vortices shedding during motion sequences of oscillating hydrofoil

2.1.2 摆角幅值

由式(15)知,水翼的扫掠高度  $H$  对水翼的获能效率  $\eta$  有重要影响。从图 1 可知水翼转轴距离前缘长度为  $L_1$ ,距离后缘长度为  $L_2$ ,那么前缘和后缘的扫掠高度  $H_1$  和  $H_2$  分别为:

$$H_1 = 2(h - L_1 \sin \theta_0)$$

(17)

$$H_2 = 2(h + L_2 \sin \theta_0)$$

(18)

那么振荡水翼的实际扫掠高度  $H$  为

$$H = \max(H_1, H_2)$$

(19)

可见振荡水翼的摆角幅值  $\theta_0$  对获能效率  $\eta$  存在影响。设定水翼的转轴位置  $L_1 = c/3$ ,研究不同的摆角幅值对水翼获能效率的影响,如图 6 所示。

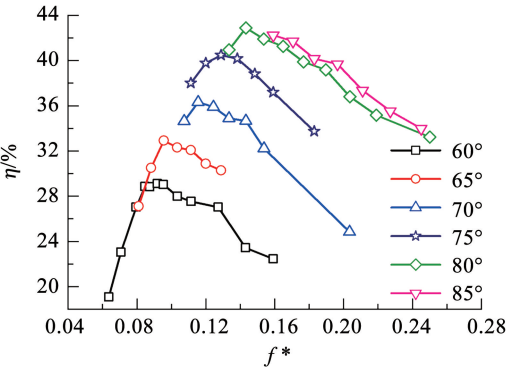


图 6 摆角幅值对水翼获能效率的影响

Fig. 6 Effect of pitching amplitude on power-extraction efficiency of hydrofoils

从图 6 可以看出:随着摆角幅值的增大,总体上水翼获能效率会得到提高;因为小幅度地增加摆角幅值会提高水翼的有效攻角,会提高获能效率。但是过大的摆角幅值会使振荡水翼的有效攻角接近失速角,降低振荡翼的水动力性能,并且扩大了水翼对来流的扫掠高度  $H$ ,由式(15)知水翼的获能效率  $\eta$  也会减小。

从图 6 可以发现:每个摆角幅值曲线中最大获能效率所对应的折算频率  $f^*$  也会随摆角幅值的增大而增大;摆角幅值在  $80^\circ$  附近时,振荡水翼最大获能效率  $\eta$  达到 42.89%,说明振荡水翼的摆角幅值处于  $75^\circ \sim 80^\circ$  时,水翼的获能性能较好,这与文献[9]的结论一致。虽然较大摆角幅值的水翼在高频条件下的获能效率要比较小摆角幅值的水翼在低频条件下的获能效率高,但是较高的摆动频率对潮流的流动环境及振荡水翼发电装置的稳定性也提出了较高的要求,所以追求提升振荡水翼获能效率的时候,要兼顾最优获能频率和摆角幅值的综合影响。

2.1.3 升沉振幅

振荡水翼的升沉振幅  $h_0$  对获能效率  $\eta$  存在影响,在摆角幅值  $\theta_0 = 60^\circ$  的条件下,水翼的平均功率系数和获能效率如图 7 所示。随着水翼的升沉振幅  $h_0$  逐渐增大,水翼获能的平均功率系数  $\bar{C}_p$  也逐渐增大,但获能效率  $\eta$  先增大后减小。当水翼的升沉振幅在 1 倍弦长以内时,平均功率系数和获能效率都随升沉振幅的增加而增大;当升沉振幅大于 1 倍弦长时,由式(15)知,升沉振幅的增大会扩大水翼的扫掠高度,导致捕获能量效率减小。从图 7 可知,设计振荡水翼系统时,升沉振幅应该取 1 倍弦长左右为宜,升沉振幅选取过小,不利于水翼获能效率的提升,而振幅选取过大,获能效率并未提升,同时会给工作系统带来剧烈振荡,增加水翼结构的负荷。

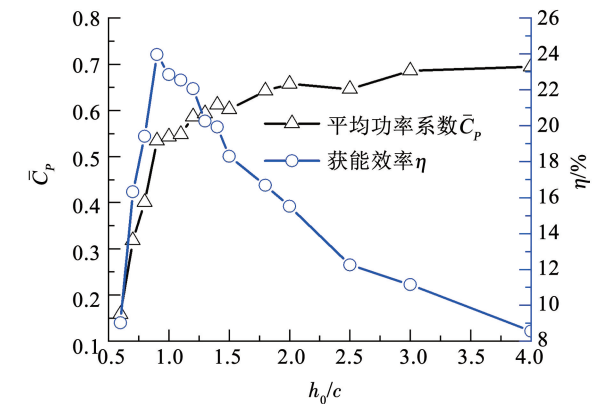


图 7 升沉振幅对水翼获能效率的影响

Fig. 7 Effect of heave amplitude on power-extraction efficiency of hydrofoils

2.1.4 转轴位置

为综合研究振荡水翼的水动力性能,进一步分析了水翼的转轴位置对获能效率的影响,转轴距离水翼前缘的距离为  $L_1$ ,不同转轴位置水翼的获能效率变化如图 8 所示。

从图 8 可以看出:随着转轴位置  $L_1$  的逐渐增大,水翼的获能效率  $\eta$  曲线呈现先增大后减小的趋势;当水翼的转轴位于距离前缘的  $1/3$  弦长附近时,水翼的获能效率最佳。后文的研究中取  $1/3$  弦长的位置作为振荡水翼的转轴。

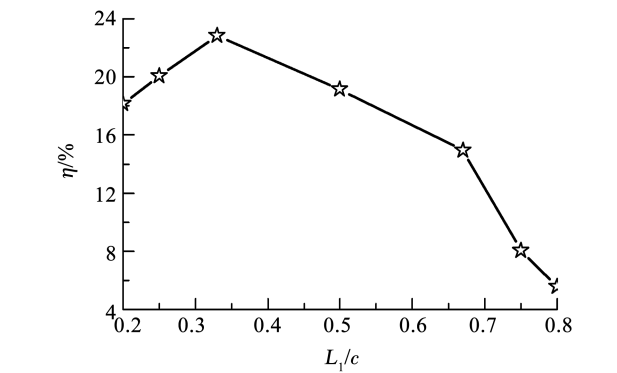


图 8 转轴位置对水翼获能效率的影响

Fig. 8 Effect of shaft position on power-extraction efficiency of hydrofoils

2.2 翼地效应

翼地效应是指运动物体贴近地面飞行时,地面对物体产生的空气动力干扰,影响到空气对飞行器的绕流特性,使飞行器上下压力差增大、升力增加,获得比空中飞行更高升阻比的流体力学效应。对于平行对称布置的双翼,随着上下两个水翼的不断接近,双翼之间会形成类似翼地效应的高压,使双翼分别获得更大的升力,提高双翼的能量捕获性能。

2.2.1 双翼间距

根据上文的研究结果,选取水翼的摆角幅值  $\theta_0 = 80^\circ$ ,折算频率  $f^* = 0.16$ ,转轴位置  $L_1 = c/3$ ,双翼之间的最小距离设为 1 ~ 6 倍弦长时的能量捕获效率见表 5。

| 表 5 振荡水翼间距对能量捕获效率的影响                                                                        |       |       |       |       |       |       |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Tab. 5 Effect of distance between two oscillating hydrofoils on power-extraction efficiency |       |       |       |       |       |       |
| 间距                                                                                          | 1c    | 2c    | 3c    | 4c    | 5c    | 6c    |
| $\bar{C}_p$                                                                                 | 1.169 | 1.160 | 1.140 | 1.144 | 1.141 | 1.143 |
| $\eta/\%$                                                                                   | 45.04 | 44.66 | 43.90 | 44.04 | 43.92 | 44.02 |

从表 5 可以看出对称双翼的上下间距扩大过程中,水翼的能量捕获效率逐渐减小并趋于平稳,但是变化范围并不大;说明水翼间距较远时双翼彼此的

影响会逐渐减小,并与各翼单独运动的情况趋于相同,所以研究对称双翼间的翼地效应对获能效率影响主要侧重于双翼间距小于 1 倍弦长的情况。

2.2.2 翼地效应分析

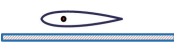
对称双翼之间的运动规律是对称的,它们的相位差为  $\pi$ 。为避免双翼发生碰撞,选取双翼的摆角幅值  $\theta_0 = 60^\circ$ ;根据图 6 的结果,选择折算频率  $f^* = 0.08$ ,振荡水翼的工况见表 6。

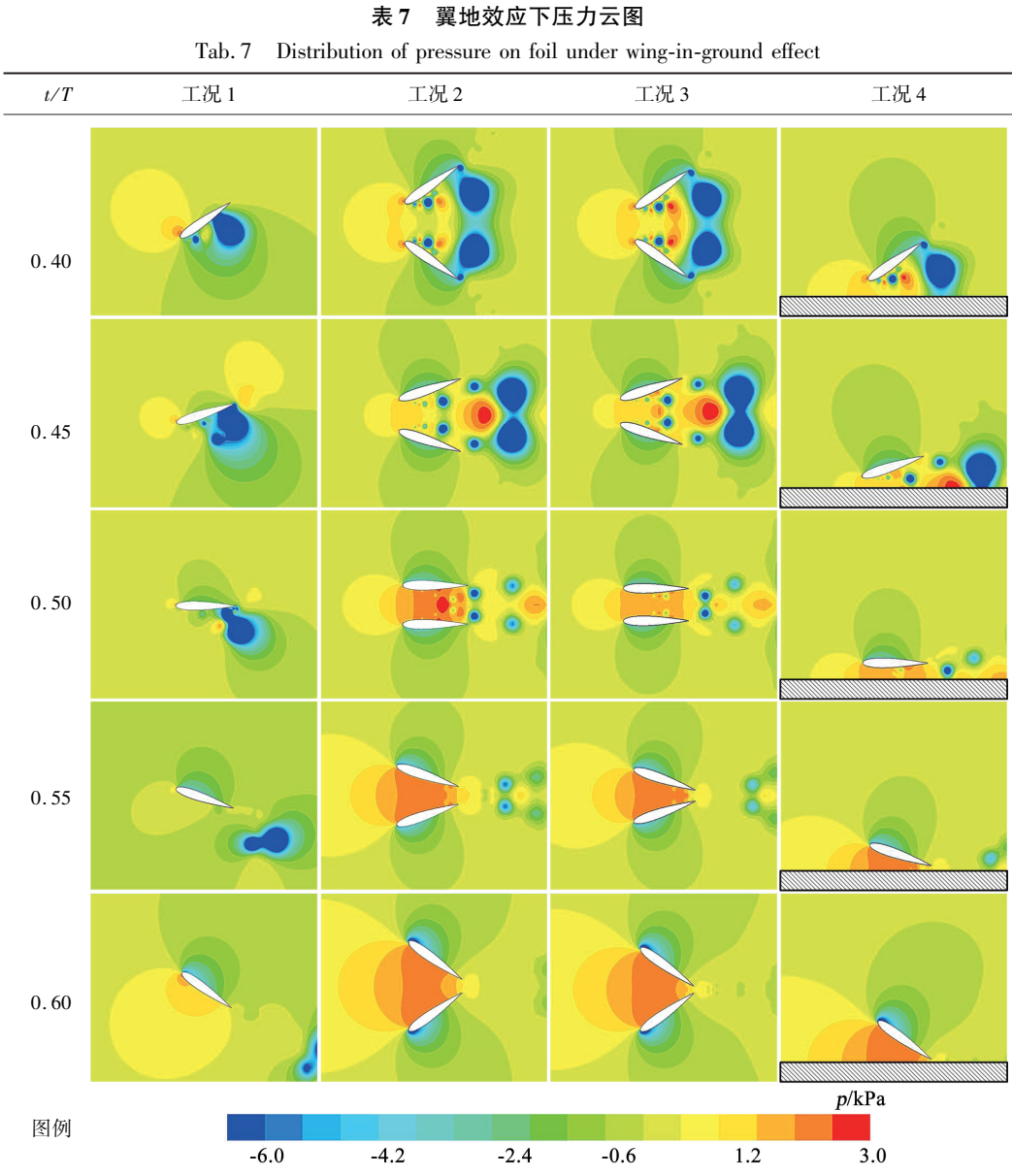
在水翼摆动数个周期后回到平衡位置时,提取表 6 中流场的压力分布见表 7。比较发现,相较于单振荡水翼的工况 1,双振荡水翼的工况 2 系统中,两水翼的距离接近时,翼面之间形成了高压区。这是因为随着双翼距离的不断靠近,两个水翼相互充当“地面”,依靠翼地效应在双水翼之间形成了高压区,并使水翼两侧压差增大,提高了水翼的升力,使

水翼的能量捕获效率  $\eta$  从工况 1 中单翼情况的 24.86% 达到工况 2 中双翼情况的 25.27%,而工况 3 的能量捕获效率达到 25.41%。

表 6 翼地效应的工况

Tab.6 Four working cases of wing-in-ground effect

| 工况 | 示意图                                                                               | 最小间距  | 备注  |
|----|-----------------------------------------------------------------------------------|-------|-----|
| 1  |  | —     | 单翼  |
| 2  |  | 0.60c | 双翼  |
| 3  |  | 0.50c | 双翼  |
| 4  |  | 0.25c | 翼与板 |





工况 3 中流场的压力分布与工况 2 相似, 工况 4 主要起到对比分析的作用, 给出了单个振荡水翼与固定平板组成的能量捕获系统的流场压力分布情况。从表 7 工况 4 中可以看出当水翼与平板的距离较近时, 两者之间的确形成了高压区域, 水翼会获得更大的升力, 此时的获能效率为 27.51%。而水翼与平板或者双水翼的距离较大时, 流场的压力分布状况与单水翼相似。通过以上分析可知, 双翼彼此之间在系统中互相充当了“地面”, 形成了翼地效应。

进一步分析水翼的升阻比性能, 升阻比  $K$  定义为水翼升力系数和阻力系数的比值如下:

$$K = C_L / C_D \quad (20)$$

在水翼逐渐远离运动轨迹平衡位置(或水翼从平板附近远离)的时候, 分析水翼的升阻比变化特性。因形成翼地效应的时间较短, 所以只分析前  $T/64$  的时间段即可, 各工况水翼的升阻比  $K$  的变化如图 9 所示。可以发现工况 1 中单水翼的升阻比相对较小, 其最大值仅为 38.4; 工况 2 中双水翼的升阻比最大值为 51.8; 工况 3 中双水翼的升阻比最大值为 87.4; 工况 4 单水翼和平板系统中, 升阻比高达 101.9; 说明双翼的距离越小, 翼地效应对振荡水翼升阻比的影响越明显。

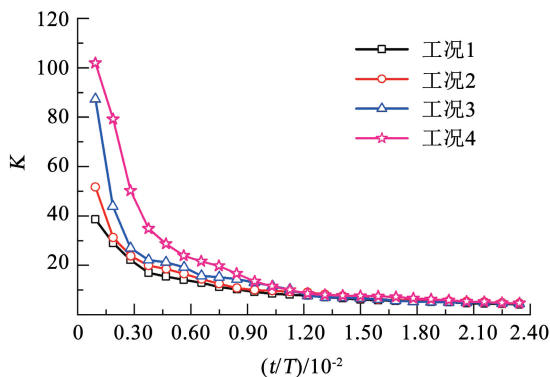


图 9 翼地效应时各工况水翼的升阻比曲线图

Fig. 9 Curves of lift-to-drag ratio of hydrofoils among four working cases under wing-in-ground effect

### 3 结 论

1) 振荡水翼的能量捕获效率  $\eta$  随着折算频率  $f^*$  的升高而先增加后减少, 折算频率处于 0.085 ~ 0.095 区间时, 水翼的能量捕获效率较高, 而涡脱落对获能效率存在重要影响。

2) 振荡水翼的获能效率  $\eta$  总体上随着摆角幅值  $\theta_0$  的增加而增加, 但受有效攻角  $\alpha_e$  和扫掠高度  $H$

的影响, 获能效率的提升要兼顾最优获能频率和摆角幅值的综合影响, 当折算频率处于获能最优区间时, 摆角幅值在  $75^\circ \sim 80^\circ$  的范围内, 振荡水翼的获能性能较好。

3) 振荡水翼的升沉振幅  $h_0$  在 1 倍弦长附近, 转轴距离前缘  $1/3$  弦长位置时, 水翼的能量捕获效率较好。

4) 双振荡水翼互相靠近时, 两翼之间相互作用形成了翼地效应的现象, 水翼之间的流场形成高压区域, 水翼的升阻比大幅度提高, 提升了水翼的能量捕获性能。

### 参考文献

- [1] 代晓东, 王余宝, 毕晓光, 等. 2016 年世界能源供需情况分析 & 未来展望——基于《BP 世界能源统计年鉴》与《BP 世界能源展望》[J]. 天然气与石油, 2017, 35(6): 8  
DAI Xiaodong, WANG Yubao, BI Xiaoguang, et al. Analysis on world energy supply & demand in 2016 and future prospects——Based on BP statistical review on world energy and BP world energy prospect [J]. Natural Gas And Oil, 2017, 35(6): 8. DOI: 10.3969/j. issn. 1006-5539. 2017. 06. 002
- [2] 张亮, 李新仲, 耿敬, 等. 潮流能研究现状 2013 [J]. 新能源进展, 2013, 1(1): 53  
ZHANG Liang, LI Xinzong, GENG Jing, et al. Tidal current energy update 2013 [J]. Advances In New And Renewable Energy, 2013, 1(1): 53. DOI: 10.3969/j. issn. 2095-560X. 2013. 01. 006
- [3] 戴庆忠. 潮流能发电及潮流能发电装置 [J]. 东方电机, 2010(2): 51  
DAI Qingzhong. Tidal power generation and device [J]. Dongfang Electrical Machine, 2010(2): 51. DOI: CNKI: SUN:DFDJ. 0. 2010-02-024
- [4] 逮建伟. 振荡水翼捕获潮流能系统的水动力和能量捕获性能研究 [D]. 济南: 山东大学, 2014  
LU Jianwei. Study on hydrodynamic and energy extraction performance of a tidal energy extraction system based on an oscillating hydrofoil [D]. Jinan: Shandong University, 2014. DOI: 10.7666/d. Y2598622
- [5] MCKINNEY W, DELAURIER J. The wingmill: An oscillating-wing windmill [J]. Journal of Energy, 1981, 5(2): 109. DOI: 10.2514/3.62510
- [6] ZHU Qiang. Energy harvesting by a purely passive flapping foil from shear flows [J]. Journal of Fluids and Structures, 2012, 34: 157. DOI: 10.1016/j.jfluidstructs. 2012. 05. 013
- [7] 王俊芳. 二维振荡水翼的水动力特性分析 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013  
WANG Junfang. Hydrodynamic anlysis of two-dimensional oscillating hydrofoil [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013. DOI: 10.7666/d. D328052
- [8] 王勇, 刘海滨, 谢玉东, 等. 双水翼耦合振荡捕获潮流能系统二维数值模拟 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2016, 48(5): 173  
WANG Yong, LIU Haibin, XIE Yudong, et al. Two-dimensional



numerical simulation of dual-oscillating hydrofoils in an energy extraction system[J]. Journal of Sichuan University ( Engineering Science Edition ), 2016, 48(5): 173. DOI: 10.15961/j.jsuese.2016.05.024

[9] 刘海宾, 王勇, 马鹏磊, 等. 基于平行式振荡翼系统参数耦合分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(1): 153  
LIU Haibin, WANG Yong, MA Penglei, et al. Coupling analysis of parameters based on parallel-oscillating hydrofoils hydrokinetic turbine[J]. Journal of Zhejiang University ( Engineering Science ), 2017, 51(1): 153. DOI: 10.3785/j.issn.1008-973X.2017.01.019

[10] 黄凤跃. 双水翼联动捕获潮流能发电系统设计与水动力分析[D]. 济南: 山东大学, 2017.  
HUANG Fengyue. Design of a tidal energy extraction system based on a double hrdfoil linkage and hydrodynamic analysis [D]. Jinan: Shandong University, 2017

[11] 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  
MA Penglei, WANG Yong, LIU Haibin, et al. Analysis on hydrodynamic performance of flapping foil with swing motion[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(3): 665

[12] 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  
XIE Yudong, MA Penglei, WANG Yong, et al. Analysis of energy extraction performance of oscillating foil in non-uniform flow[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(4): 886

[13] 马鹏磊, 王勇, 刘海宾, 等. 振荡翼改进模型的水动力性能分析[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 65  
MA Penglei, WANG Yong, LIU Haibin, et al. Hydrodynamic performance analysis on modified model of oscillating airfoil[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 45(3): 65. DOI: 10.13245/j.hust.170311

[14] 郭春雨, 张佐天, 徐佩, 等. 改进型振荡水翼水动力试验及机理[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2019, 47(4): 87  
GUO Chunyu, ZHANG Zuotian, XU Pei, et al. Hydrodynamic experiment and mechanism of improved oscillating hydrofoil[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 47(4): 87. DOI: 10.13245/j.hust.190415

[15] MENTER F R. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. AIAA Journal, 1994, 32(8): 1598. DOI: 10.2514/3.12149

[16] PREWRTT N C, BELK D M, SHYY W. Parallel computing of overset grids for aerodynamic problems with moving objects[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2000, 36(2): 117. DOI: 10.1016/S0376-0421(99)00013-5

[17] BLANC F. Patch assembly: An automated overlapping grid assembly strategy[J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(1): 11. DOI: 10.2514/1.44116

[18] KINSEY T, DUMAS G. Computational fluid dynamics analysis of a hydrokinetic turbine Based on oscillating hydrofoils[J]. Journal of Fluids Engineering, 2012, 134(2): 21104. DOI: 10.1115/1.4005841

[19] KINSEY T, DUMAS G. Parametric study of an oscillating airfoil in a power-extraction regime[J]. AIAA Journal, 2008, 46(6): 1318. DOI: 10.2514/1.26253

(编辑 张 红)