

波浪滑翔机推进装置翼片的启动阶段水动力学分析*

于振江^{1,2}, 常宗瑜^{1,2}, 郑中强^{1,2**}, 孙秀军³, 卢桂桥¹

(1. 中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100; 2. 山东省海洋工程重点实验室, 山东 青岛 266100;
3. 中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛 266100)

摘要: 波浪滑翔机直接利用波浪能实现大范围长距离的机动运动观测,在海洋环境观测中可以发挥重要的作用。本文对波浪滑翔机推进装置在启动阶段的翼片的水动力学行为进行了研究。以波浪滑翔机水下推进装置的翼片为研究对象,运用雷诺平均 Navier-Stokes 方程(RANS),对给定垂荡和摆动运动的翼片水动力学进行了水动力分析和仿真,模拟了单个翼片、纵向阵列多翼片的运动状况,得到推进装置翼片附近的压力分布和整体推进动力,分析翼片间距变化在启动阶段对推进力的影响作用。通过该研究工作为深入理解波浪滑翔机推进装置工作状态提供了理论依据。

关键词: 波浪滑翔机;水动力学;RANS;动网格;启动阶段

中图分类号: TK79

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2020)04-121-07

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20170342

引用格式: 于振江, 常宗瑜, 郑中强, 等. 波浪滑翔机推进装置翼片的启动阶段水动力学分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(4): 121-127.

YU Zhen-Jiang, CHANG Zong-Yu, ZHENG Zhong-Qiang, et al. Hydrodynamic analysis of wave glider in start-up period [J]. Periodical of Ocean University of China, 2020, 50(4): 121-127.

伴随着对海洋环境保护日益重视和大规模海洋开发,各种无人海洋机器人如远程控制机器人(Remoted Operation Vehicle 或 ROV)、自治水下机器人(Automated Underwater Vehicle 或 AUV)、水面无人艇(Unmanned Surface Vessel 或 USV)等在海洋科学考察、海洋工程、海水养殖、军事等领域得到了广泛的应用。从能源供给角度来看以上传统的机动观测装置的能量供给大大限制了它们的长时间、大范围观测的能力。美国 Liquid Robot 公司开发了波浪能驱动的机动浮标产品 Wave Glider,它利用波浪能垂荡运动的能量提供运动能量,该装置已经在海洋动物学、溢油泄漏检测、海平面升高等多领域得到应用,取得较好的效果^[1]。

波浪能滑翔机(见图 1)由水面浮体、水下推进机构及连接两者的缆索组成,它的优点是不需要外界能量的供给,只需要从波浪的上下运动中获取能量来驱动探测机构的前进(见图 2),因此该类型的机构能够长期、大范围、经济灵活、可靠自主的进行海洋观测任务,在民用及军用领域都具有广泛的应用前景^[2]。它的前进动力主要由翼片在流体作用下的被动摆动产生。

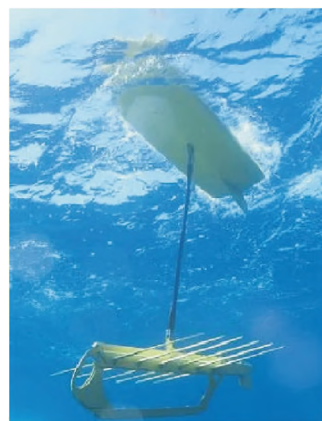


图 1 波浪滑翔机

Fig.1 Wave glider

Eslam 等^[3]分析了在固定雷诺数下理想推进模式下的翼片在不同垂荡和纵荡运动规律下的涡泄脱落情况; Triantafyllou 等^[4]研究了扑翼推进性能和翼片参数的关系; Silva 等^[5]基于雷诺平均纳维-斯托克(Reynolds Average Navier-Stokes, 即 RANS)方程和动网格技术,

* 基金项目:国家自然科学基金项目(51875540; 51175484); 中央高校基本科研业务费专项项目(201513053); 教育部博士点专项基金项目(20130132110024); 高等学校学科创新引智计划项目(B14028)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China (51875540; 51175484); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (201513053); the Doctoral Fund of Education of China (20130132110024); the Programme of Introducing Talents of Discipline to Universities (B14028)

收稿日期: 2018-10-23; 修订日期: 2018-12-10

作者简介: 于振江(1988-), 男, 博士生. E-mail: yuzhenjiang521@126.com

** 通讯作者: E-mail: zqzheng@ouc.edu.cn

模拟了其水动力学性能;Politis 等^[6]利用边界元方法对波浪垂荡驱动激励下的翼片水动力学进行了研究,分析了翼片产生的推进力和涡泄状态;Böckmann 等^[7]通过控制翼片的纵荡运动获得了更好的推进性能;刘鹏、胡合文等^[8-9]基于 RANS 方程研究了串列扑翼推进的水动力学,发现翼间涡系干扰是导致推进性能差异的主要原因。贾丽娟、郑炳欢、李小涛等^[10-12]对翼片做了水动力定常计算分析,贾丽娟计算了翼型在不同来流速度、不同水翼间隔分布情况下的升阻比值,郑炳欢计算得出水翼的旋转角度为 45°时水翼产生的水平推力达到极大值,李小涛对水面母船不同来流方向和不同吃水做静水阻力计算并与经验公式对比发现趋势相同,并对固定水翼在不同来流攻角下做了定常阻力计算。

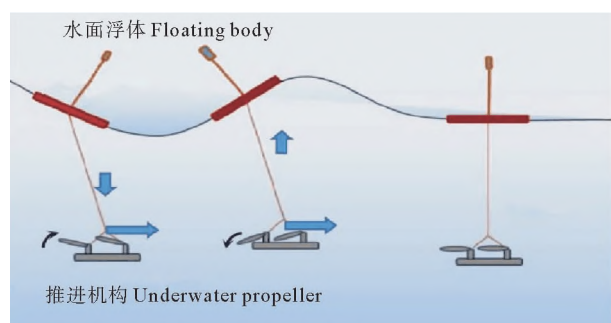


图2 波浪滑翔机工作原理
Fig.2 Operational mechanism

本文基于有限体积法和 Fluent 软件,用雷诺平均 Navier-Stokes 方程(RANS),对开始运动阶段给定垂荡运动和摆动运动的推进装置翼片水动力学进行了分析和仿真,模拟了单个翼片、多翼片纵向阵列的压力分布、涡泄状况和推进动力,着重分析了翼片间距变化对推进力的影响作用。

1 波浪滑翔机推进装置翼片水动力学建模

1.1 波浪滑翔机推进装置翼片水动力学模型

波浪滑翔机是依靠推进机构随浮体上下运动对翼片产生水动力来实现运动的,波浪滑翔机在启动、稳定运转和回收等过程的动态性能的各不相同。本文对该设备的启动阶段进行了研究,启动阶段是典型的非稳态流动或湍流问题。现有的湍流数值模拟的方法有三种:直接数值模拟(Direct Numerical Simulation, DNS),大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)和 Reynolds 平均方法(Reynolds Average Navier-Stokes, RANS)^[13]。直接数值模拟可以获得湍流场的精确信息,是研究湍流机理的有效手段,需要较大的计算资源,限制了其应用范围。LES 大涡模拟的计算量介于另外两者之间,相较于 RANS 方法,LES 可以模拟更多的湍流大尺度运动,LES 所用的湍流亚网格应力模型受边界的几何形状和流动类别的影响小。Reynolds 平

均方法只要设定合理的 Reynolds 应力模型,可以很容易地从 RANS 方程解出湍流的统计量。

对非稳态的 N-S 方程作时间演算,得到方程:

动量方程:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = S_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{\rho \dot{u}_i \dot{u}_j}). \quad (1)$$

湍流运动的连续性方程:

$$\frac{\partial (\rho u_i)}{\partial x_i} = 0. \quad (2)$$

其他变量输运方程:

$$\frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u_j \phi)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} (\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x_j} - \overline{\rho \dot{u}_j \phi}) + S. \quad (3)$$

式中附加应力可记为 $\tau_{ij} = -\overline{\rho \dot{u}_i \dot{u}_j}$, 并称为雷诺应力。

在 Fluent 计算中采用 RNGK- ϵ 模型,使得附加项与时均值联系起来,采用 SIMPLE 算法进行压力速度耦合来求解运算。

1.2 边界条件及参数设置

计算中应用两方程的 RNGK- ϵ 模型,采用非平衡壁面函数法进行壁面修正,使用二维非结构划分整个流域,并采用动网格技术来保证翼片运动过程中的网格质量,翼片网格初始状态如图 3 所示。

对波浪滑翔机启动阶段进行分析,设定来流速度为 0,对波浪滑翔机的工作原理和实验过程进行观察^[8],估计翼片摆动的时间占整个运动周期的 1/4,翼片的摆动规律设为:

$$\begin{aligned} \text{当 } t = (0 - \frac{T}{8}) \text{ 时, } & \begin{cases} Y = y_0 \sin(2\pi ft), \\ A = a_0 \sin(2\pi ft); \end{cases} \\ \text{当 } t = (\frac{T}{8} - \frac{T}{2}) \text{ 时, } & \begin{cases} Y = y_0 \sin(2\pi ft), \\ A = 0; \end{cases} \\ \text{当 } t = (\frac{T}{2} - \frac{5T}{8}) \text{ 时, } & \begin{cases} Y = y_0 \sin(2\pi ft), \\ A = a_0 \sin(2\pi ft); \end{cases} \\ \text{当 } t = (\frac{5T}{8} - T) \text{ 时, } & \begin{cases} Y = y_0 \sin(2\pi ft), \\ A = 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: T 为运动周期; f 为频率; Y 为升沉运动的振幅; A 为翼片的摆动角。运动规律通过 Fluent 中的用户定义函数(UDF)来定义,翼片运动规律如图 4 所示。

翼型采用 NACA0008 对称翼型,划分三角形网格。计算分析周期 6.5 s,振幅 0.5 m 下翼片最大偏转角度为 28°的受力情况。

在实际模拟假设:浮体对波浪完全响应,即驱动翼片运动周期等于波浪周期,升沉幅度等于波高;对波浪滑翔机启动阶段推进装置的翼片水动力学行为进行研究,通过控制翼片主动运动分析启动阶段的受力与流场。

波浪滑翔机理论计算中的水平推力系数 C_x , 竖直

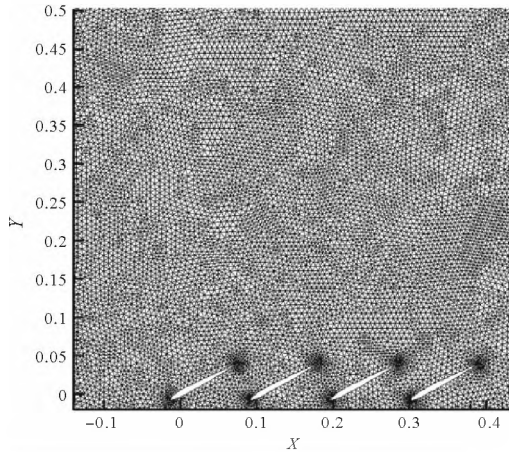


图3 翼片初始姿态网格

Fig.3 Mesh of fin in initial state

方向升力系数 C_y , 以及以翼片转轴为作用点的力矩系数 C_m 由相应的推力 F_x , 升力 F_y 和力矩 M_0 沿翼片表面积积分确定:

$$\begin{aligned} C_x &= \int_s \frac{2F_x}{\rho C_0 v_0^2} ds; \\ C_y &= \int_s \frac{2F_y}{\rho C_0 v_0^2} ds; \\ C_m &= \int_s \frac{2M_0}{\rho C_0 v_0^2} ds. \end{aligned} \quad (5)$$

式中: C_0 为翼片的特征长度; ρ 为水的密度; V_0 为水流速度。

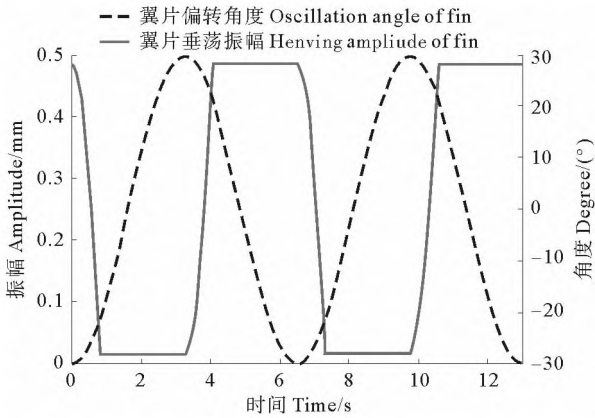


图4 翼片运动规律

Fig.4 Motion of fin

图 5(a) 为水下推进机构随着上浮体在波浪激励下向下运动运动时翼片受力, 可以看出翼片会产生一个向前的推力。

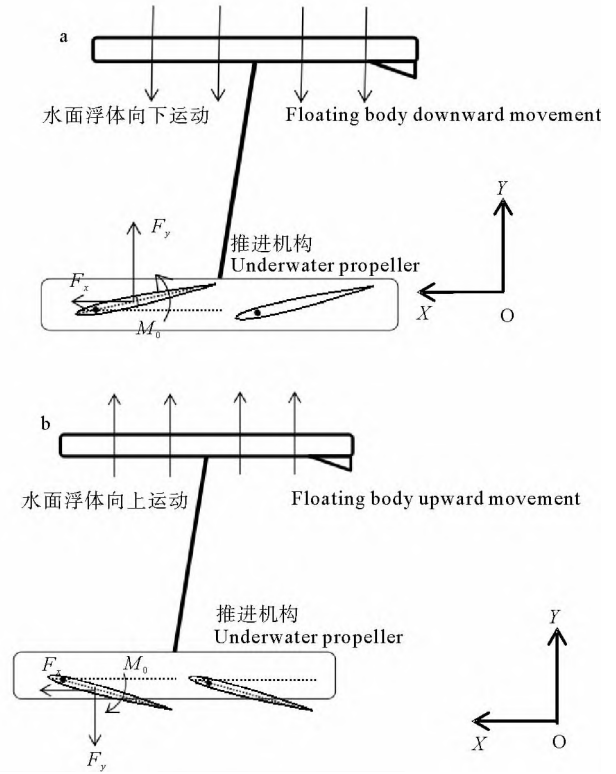
图 5(b) 为水下推进机构随着上浮体在波浪激励下向上运动运动时翼片受力, 可以看出翼片同样会产生一个向前的推力使波浪滑翔机向前运动。

2 结果和分析

2.1 单片翼片水动力学分析

图 6 为单翼片在 X 方向所受到的驱动力变化曲

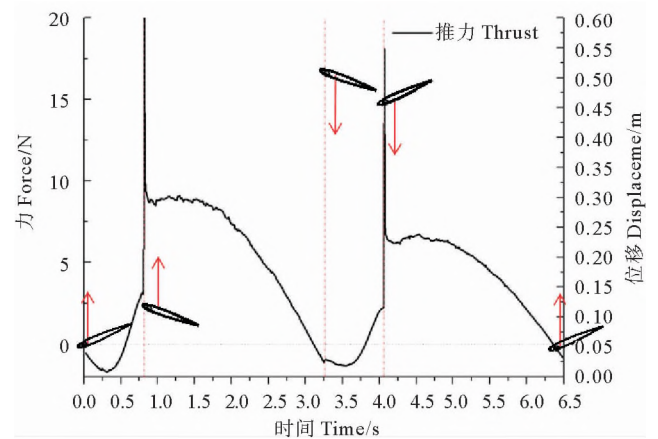
线, 可以看出在翼片偏转到最大角度时由于限位作用会产生推进力的突变。在启动阶段尚未达到稳定的运行状态时, 前半周期所产生的推进力大于后半周期。翼片随着上浮体在波浪激励下上下运动时都可以产生向前的推进力。



(a. 水面浮体向下运动 Floating body downward movement; b. 水面浮体向上运动 Floating body upward movement)

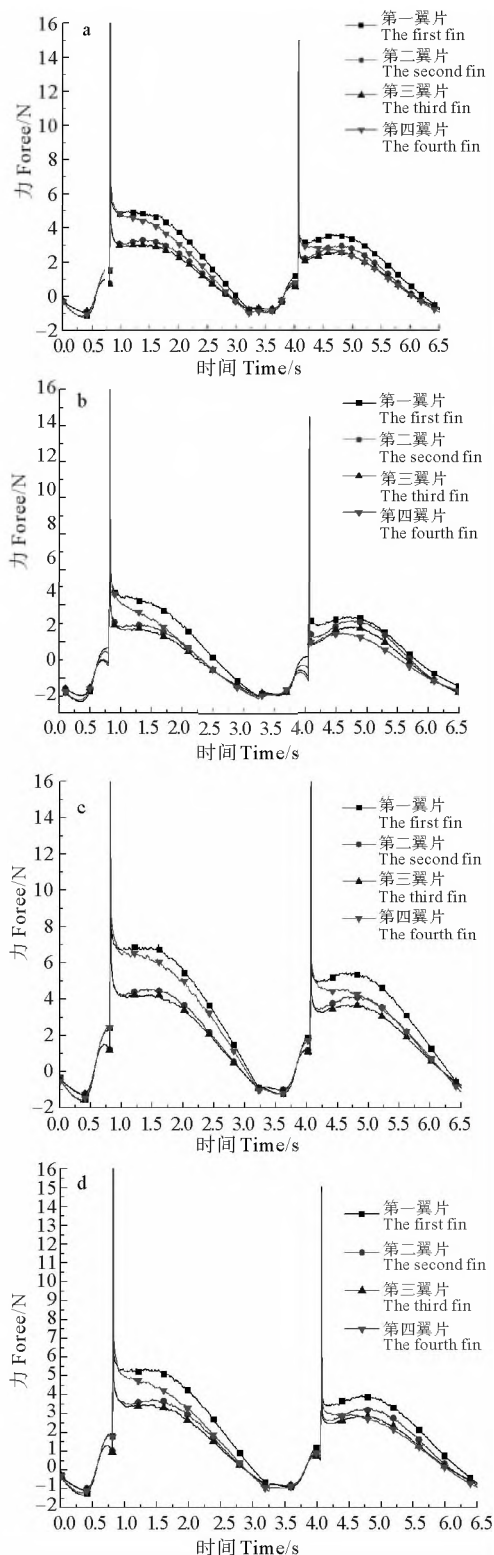
图5 翼片工作原理

Fig.5 Operational mechanism

图6 单个翼片 X 方向驱动力Fig.6 thrust of single fin in X direction

2.2 纵向阵列翼片受力分析

图 7 为相同运动状态下 5、10、15 及 20 mm 间距下各翼片的受力情况。由图可见不同位置的翼片驱动力不同, 表明翼片间的流场扰动对翼片的驱动力有较大的影响, 不同间距下纵向阵列翼片的受力为最前端与



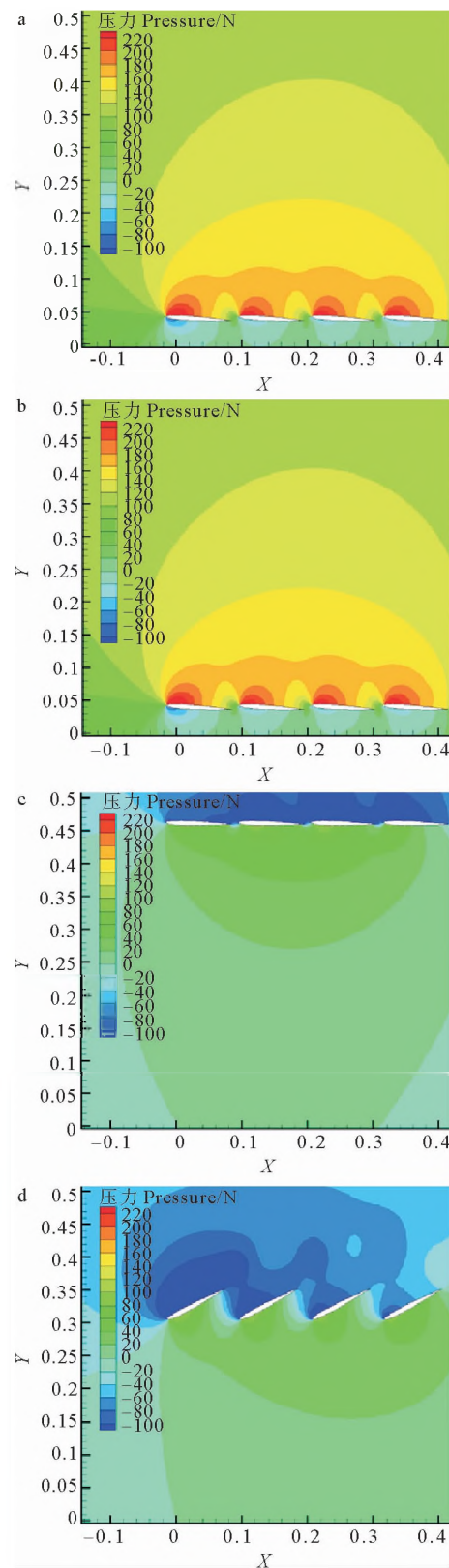
(a. 5 mm 间距下翼片推进力 Thrust of fin with distance of 5 mm;
b. 10 mm 间距下翼片推进力 Thrust of fin with distance of 10 mm;
c. 15 mm 间距下翼片推进力 Thrust of fin with distance of 15 mm;
d. 20 mm 间距下翼片推进力 Thrust of fin with distance of 20 mm.)

图 7 不同间距下翼片推进力

Fig. 7 Thrust of fin with different distance

最尾端翼片所产生的推进力均大于中间两翼片所产生的推进力。翼片驱动力变化规律同单翼片变化相同。

图 8 为 10 mm 间距下不同时刻的压力分布情况, 可知 0~3.25 s 这半个周期的压力差明显大于后半周期



(a. 0.6 s 压力分布 Pressure distribution of fin in 0.6 s; b. 1.4 s 压力分布。Pressure distribution of fin in 1.4 s; c. 3.8 s 压力分布 Pressure distribution of fin in 3.8 s; d. 4.6 s 压力分布 Pressure distribution in of fin 4.6 s.)

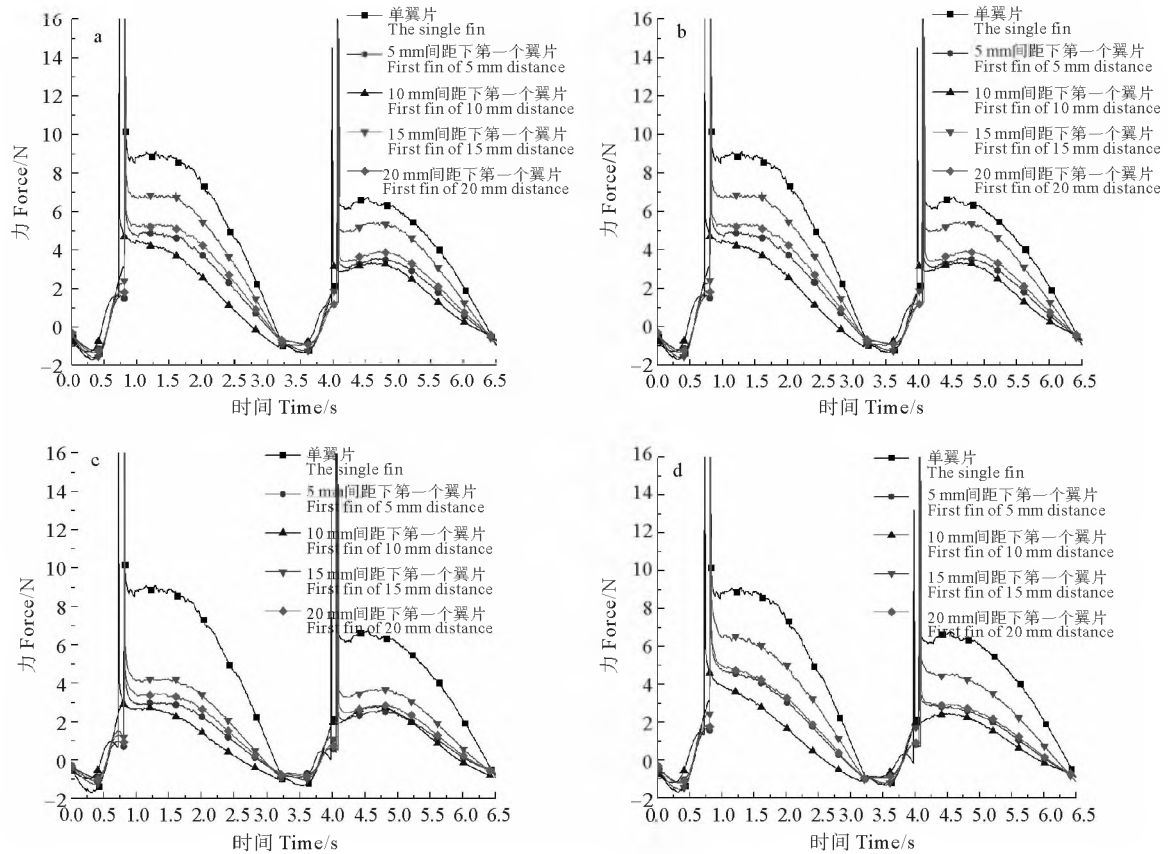
图 8 翼片间距 10 mm 下不同时刻压力分布

Fig. 8 Pressure distribution of fin with distance of 10 mm in one period

周期, 这是后半周期幅值小于前半周期的原因, 在启动阶段产生的推进力大于稳定运行阶段。由 10 mm 间距下不同时刻的压力分布情况可以看出, 不同翼片形成的前缘涡与尾涡相互影响较大, 是导致不同位置翼片驱动力不同的原因。

2.3 单片翼片推进力和多翼片纵向阵列比较

由图 9 可以看出单独翼片所产生的推进力都大于阵列翼片所产生的推进力。15 mm 间距时纵向阵列翼片所产生的推进力都大于 5、10、20 mm 间距时阵列翼片所产生的推进力。



(a. 不同间距第一翼片与单翼片推力 Compare thrust of single fin with first fin in different distance; b. 不同间距第二翼片与单翼片推力 Compare thrust of single fin with second fin in different distance; c. 不同间距第三翼片与单翼片推力; Compare thrust of single fin with third fin in different distance; d. 不同间距第四翼片与单翼片推力 Compare thrust of single fin with fourth fin in different distance.)

图 9 单翼片推进力与不同间距纵向阵列翼片推力比较

Fig. 9 Compare thrust of single fin with array fin in different distance

3 结论

本文对波浪滑翔机在起始运动阶段推进装置的水动力学采用流体有限元进行了研究, 得到如下结论:

- (1) 对比一个运动周期内纵向阵列翼片内每个翼片所产生的推进力, 单个翼片所产生的推进力均大于纵向阵列翼片中每个翼片的推进力, 不同位置的翼片所产生的推进力不同。
- (2) 对比纵向阵列翼片不同间距下各翼片所产生的推进力, 首端与末端翼片所产生的推进力均大于中间翼片所产生的推进力。
- (3) 对比纵向阵列翼片间距为 5、10、15、20 mm 下纵向阵列翼片的受力情况, 发现在 15 mm 间距时翼片所产生的推进力更大。

- (4) 翼片随着上浮体在波浪激励下向上及向下运动时都可以产生推进滑翔机运动的推进力。

参考文献:

- [1] Hine R, Willcox S, Hine G, et al. The wave glider: A wave-powered autonomous marine vehicle[C]. /Ocean 2009, Biloxi: IEEE Xplore, 2009: 1-6.
- [2] Daniel T, Manley J, Trenaman N. The Wave Glider: Enabling a new approach to persistent ocean observation and research[J]. Ocean Dynamics, 2011, 61(10): 1509-1520.
- [3] Eslam Panah A, Buchholz J. Hydrodynamics of efficient propulsion in oscillating foils[C]. /APS Division of Fluid Dynamics Meeting. Portland, Oregon: APS Division of Fluid Dynamics Meeting Abstracts, 2010.
- [4] Triantafyllou M S, Techet A H, Hover F S. Review of experimental work in biomimetic foils[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineer-

- ing, 2004, 29(3): 585-594.
- [5] Silva L W A D, Yamaguchi H. Numerical study on active wave devouring propulsion[J]. *Journal of Marine Science & Technology*, 2012, 17(3): 261-275.
- [6] Politis G, Politis K. Biomimetic propulsion under random heaving conditions, using active pitch control[J]. *Journal of Fluids & Structures*, 2014, 47(2): 139-149.
- [7] Bockmann E, Steen S. Experiments with actively pitch-controlled and spring-loaded oscillating foils[J]. *Applied Ocean Research*, 2014, 48: 227-235.
- [8] 刘鹏, 苏玉民, 刘焕兴, 等. 串列异步拍动翼推进性能分析[J]. *上海交通大学学报*, 2014(4): 457-463.
Liu P, Su Y M, Liu H X, et al. Propulsive performance analysis of tandem asynchronous flapping foil[J]. *Journal of Shanghai Jiao Tong University*, 2014(4): 457-463.
- [9] 胡合文. 波浪滑翔机的水动力分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2015.
Hu H W. Hydrodynamic Analysis of Wave Glider[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2015.
- [10] 贾立娟. 波浪动力滑翔机双体结构工作机理与动力学行为研究[D]. 天津: 国家海洋技术中心, 2014.
Jia L J. Study of Operation Principle of Two-part Architecture and Dynamic Behavior of Wave glider[D]. Tianjin: Nation Ocean Technology Center, 2014.
- [11] Zheng B H, Xu C Y, Yao C L, et al. The effect of attack angle on the performance of wave glider wings[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 727-728: 587-591.
- [12] 李小涛. 波浪滑翔器动力学建模及其仿真研究[D]. 北京: 中国舰船研究院, 2014.
Li X T. Dynamic Model and Simulation Study Based on The Wave Glider[D]. Beijing: China Ship Research and Development Academy, 2014.
- [13] 王雄. 圆孔射流近场湍流特性 DNS 与 RANS、LES 的对比研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2010.
Wang X. Investigation on the Turbulence Characteristics in the Near Field of Round Jet Flow with DNS, RANS and LES[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.

Hydrodynamic Analysis of Wave Glider in Start-up Period

YU Zhen-Jiang^{1,2}, CHANG Zong-Yu^{1,2}, ZHENG Zhong-Qiang^{1,2}, SUN Xiu-Jun³, LU Gui-Qiao¹

(1. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. Key Lab of Ocean Engineering of Shandong Province, Qingdao 266100, China; 3. College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Qingdao 266100, China)

Abstract: The wave glider is able to use wave energy to realize mobile measurement with long range and distance, playing an important role in ocean environment measurement. Wave glider, with the float move up and down, relies on the propulsion mechanism to produce hydrodynamic of the fin to achieve movement. In the process of start-up, steady operation and recovery, etc., the dynamic performance of the glider is different. According to experimental of the wave glider, the working principle were observed. It estimates that the swing of the fin accounted for 1/4 of the whole movement period, and the maximum swing angle of the fin was 28° when the experimental period was 6.5 s and the amplitude was 0.5 m. During simulation, it assumes that the motion of the floating body completely matches with the wave, that is to say, the motion period of the fin equals to the wave period and the amplitude of the rising and falling is equal to the wave amplitude. The fins' hydrodynamic behavior of the propulsion device is studied during the start-up period. One of the differences from the stable operation phase is that the forward speed is zero at this time; the force and the flow field in the start-up period are analyzed by setting the active motion of fin. Based on Reynolds average Navier-Stokes equation (RANS), the motion of single fin and longitudinal array of multi-fins were simulated by Fluent. The driving force was emphatically analyzed considering different distance of thrust fin. The conclusions could be obtained as follows: When the fin attains the maximum angle, position-limiting will cause the mutation of the propulsion force. When the start-up period has not yet reached a stable state of operation, the thrust generated in the first half of the cycle is greater than the latter half of the cycle. The fins can generate forward propulsion following the floating buoy up and down under wave excitation. Comparing the propulsion force generated by each fin in a longitudinal array of fins in a motion cycle, the propulsion force generated by a single fin is greater than that of each fin in the longitudinal array fin, and the propulsion force generated by the fins are different in different positions. Comparing the propulsive forces generated by the fins at different pitches of the longitudinal array fin, the propulsive forces generated by the first and last fins are greater than those generated by the middle fins. Comparing the force of different longitudinal array of the fin with the different distance, the best distance of the fin is found and is equal 15 mm. This work provides the theoretical basis for understanding the working state of the propulsion device -Wave glider.

Key words: wave glider; hydrodynamics; RANS; dynamic mesh; launch stage

责任编辑 高 蓓