

基于南海波浪要素的波浪滑翔机翼板参数优化设计与仿真

吴世其, 洪梅, 陈希, 毛科峰, 刘科峰

国防科技大学气象海洋学院, 江苏 南京 211101

摘要: 针对南海不同波浪要素条件下波浪滑翔机翼板参数设计的问题进行研究。基于欧洲中尺度天气预报中心大气和海洋全球再分析数据集(ERA5), 对南海不同季节以及台风经过时的波高波周期进行统计。并利用 FLUENT 软件研究南海不同波浪要素条件下翼板最大偏转角度、转轴位置以及翼板间距对波浪滑翔机水下翼板平均推力的影响。仿真结果表明, 波高越大, 翼板最大偏转角度也应相应增大, 才能保证翼板获得更大的推力; 在南海波浪要素条件下, 翼板转轴位置选取在翼板前端 1/5 处较佳; 适当增加翼板间距能够提高翼板获得的推力。通过对翼板被动摆动进行仿真, 得到了翼板在不同参数设置下产生的推力, 为波浪滑翔机翼板设计提供参考。

关键词: 波浪滑翔机; 最大偏转角度; 转轴位置; 翼板间距

中图分类号: P716.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-5470(2021)02-0112-8

Design of Wave Glider optimal wing parameters suitable for the South China Sea

WU Shiqi, HONG Mei, CHEN Xi, MAO Kefeng, LIU Kefeng

College of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing 211101, China

Abstract: In view of different wave height and period in the South China Sea, the design of Wave Glider wing parameters is studied to obtain greater thrust. Based on the reanalysis data set of ERA5, we provide statistics on the wave height and wave period of different seasons and induced by one typhoon in the South China Sea. In addition, the software FLUENT is used to study the influence of the maximum limit angle, the position of rotating axis and the spacing of the wings. The simulation results show that the larger the wave height, the larger the maximum limit angle should be in order to ensure that the wings can get more thrust. Under the conditions of wave height and period in the South China Sea, it is better to select 1/5 of the front of the wing as the position of rotating axis. Increasing the spacing of the wings properly can improve the thrust. By simulating the flapping wings, the thrust generated by the wings under different parameters is obtained, which provides a reference for the design of the wings.

Key words: Wave Glider; maximum limit angle; position of rotating axis; spacing of the wings

波浪滑翔机是一种新型的无人海洋航行器, 最早由美国 Liquid Robotics 公司研发。近年来我国也研制了“黑珍珠”、“海哨兵”、“海鲡”和“蓝鲸”等产品样机(Qi et al, 2013; 杨燕 等, 2014; 张森 等, 2014;

胡滕艳 等, 2018; 李灿, 2018; 桑宏强 等, 2018; 孙秀军 等, 2019)。波浪滑翔机的关键创新之处在于能够从海浪中获取大量能量, 为前进提供动力(Manley et al, 2010b)。同时, 位于母船上的太阳能电

收稿日期: 2020-05-23; 修订日期: 2020-08-29。殷波编辑

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41875061、41075045、41775165、51609254); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20161464); 湖南省自然科学基金(2020JJ4661); 国防科技大学校内科研项目(ZK18-03-48)

作者简介: 吴世其(1996—), 男, 江苏省苏州市人, 硕士研究生, 主要从事海洋调查研究。email: wushiqi17@nudt.edu.cn

通信作者: 洪梅。email: flowerainhm@126.com

Received date: 2020-05-23; Revised date: 2020-08-29. Editor: YIN Bo

Foundation item: National Nature Science Foundation of China (41875061, 41075045, 41775165, 51609254); Nature Science Foundation of Jiangsu (BK20161464); Nature Science Foundation of Hunan (2020JJ4661); National University of Defense Technology (ZK18-03-48)

Corresponding author: HONG Mei. email: flowerainhm@126.com

池板能够不断补充电量, 供给波浪滑翔机的控制系统、通信系统以及搭载的各类传感器(Mullison et al, 2011; Goebel et al, 2014; Carlon, 2015; O'Reilly et al, 2015; Penna et al, 2018)。

波浪滑翔机由水面母船通过绳缆与水下滑翔体连接而组成, 如图 1 所示。推进系统是纯机械式的, 既不产生电力, 也不消耗电力(Hine et al, 2009; Manley et al, 2009)。如图 2 所示, 波面上升时, 波浪滑翔机母船随波面上升带动水下滑翔体上升, 翼板偏转并受到向前及向下两个方向的分力; 同理, 波浪滑翔机随波面下沉时, 翼板偏转并受到向前及向上两个方向的分力。在波面的上下起伏中, 翼板带动波浪滑翔机整体向前运动(Manley et al, 2010a)。

由此可见, 水下翼板的各项参数在很大程度上影响着波浪滑翔机的航行效能。关于波浪滑翔机翼板参数设计, 国内外进行了较多研究。Kraus 等基于船舶六自由度模型, 建立了第一个适用于波浪滑翔机的运动模型, 通过模拟得到翼板最大偏转角度为 20° 最优(Kraus et al, 2011; Kraus, 2012)。Salari 等(2015)模拟了不同海况等级(根据海况等级表, 海况分为 0~9 级, 海况越高所对应波高越高), 翼板最大偏转角度为 10° 或 20° 时, 波浪滑翔机翼板的运动状

况, 发现海况越高翼板所产生的推力越大。贾立娟(2014)对稳态情况下波浪滑翔机翼板的水动力特征进行了仿真, 并比较了翼板在不同间隔分布以及最大偏转角度下的升阻比, 进而确定翼板最优的参数设计。胡合文(2015)研究了翼板的数量、间距以及最大偏转角度对串列翼板平均推力系数的影响。严日华(2017)通过仿真试验分析了翼板数量、间距、最大偏转角度、转轴位置、运动幅值、运动周期以及来流速度对推进性能的影响。吕元博等(2018)分析了波浪滑翔机翼板的最大偏转角度、波高、波周期对翼板推力系数的影响。

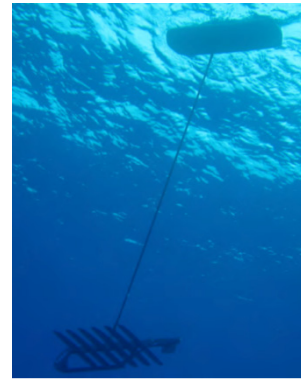


图 1 波浪滑翔机(Manley et al, 2010b)

Fig. 1 The view of Wave Glider from below

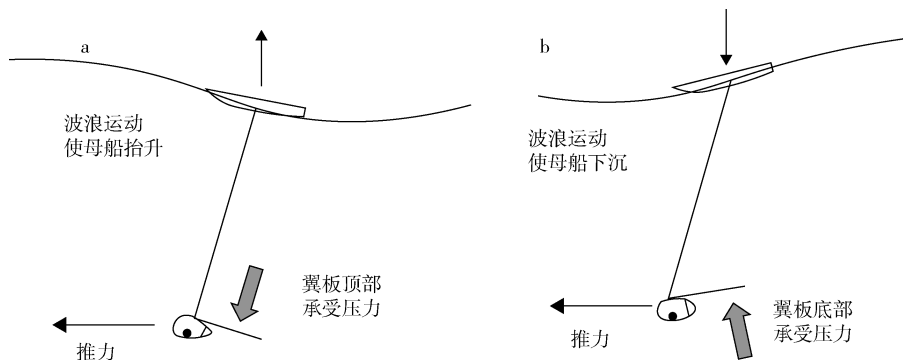


图 2 波浪滑翔机工作原理示意图(Manley et al, 2010a)

a. 上升状态; b. 下降状态

Fig. 2 The operational principles of Wave Glider. (a) on the rise, (b) on the fall

这些研究都说明了翼板参数以及波浪要素对波浪滑翔机的推进效能影响较大, 并求得了在单一波浪要素条件下翼板的各项参数的最优设计。但是这些研究并没有指出针对不同的波浪特征是否存在不同的翼板参数设计。

针对这一问题, 本文首先基于再分析数据集, 对南海不同季节以及台风影响下的波高波周期特征进行统计。再利用 FLUENT 软件, 研究不同波浪要

素条件下, 翼板最大偏转角度、转轴位置以及翼板间距对波浪滑翔机水下翼板平均推力的影响。

1 南海波高和波周期特征

本文选用的数据为欧洲中尺度天气预报中心大气和海洋全球再分析数据集 ERA5 (<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>) 中有效波高和平均波周期数据, 数据的空间分辨率为 $0.5^\circ \times$

0.5°。选取 1981—2010 年逐月时间分辨率数据, 对南海(4°—24°N, 104°—124°E)不同季节的波高和波周期进行统计。选取逐小时时间分辨率的数据, 查看 2017 年第 23 号台风“DAMREY”最强盛时南海波高波周期分布。该台风在 2017 年 11 月 3 日 6 时(UTC)最为强盛, 最大风速达到 $36\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$, 中心气压 970hPa。

我们将每年 3 至 5 月的月平均数据按时间平均, 作为春季的波高和波周期分布情况。同理, 6 至 8 月为夏季, 9 至 11 月为秋季, 12 月至次年 2 月作为冬季。所有季节时间上的平均为全年平均的数值, 结果如图 3a~3e 和图 4a~4e 所示。图 3f 和图 4f 为台风

最强盛时刻的波高和波周期分布。

我们将南海海域空间内各季节及全年的波高、波周期的平均值作为对应时段内的代表值, 而台风状态下则是选取台风眼附近的波高、波周期数据作为代表值。具体数值如表 1 所示。

2 理论概述

2.1 翼板运动方程

翼板的运动分为两个部分, 一是由于波浪作用带动的升沉运动, 二是升沉运动导致的被动摆动运动。

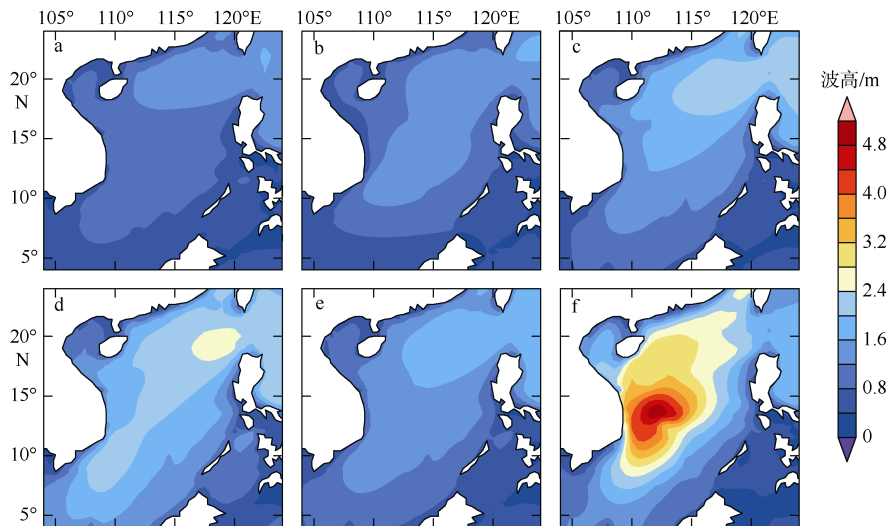


图 3 南海有效波高分布

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季; e. 全年; f. 台风最强盛时刻

Fig. 3 Significant wave height distribution in the South China Sea. (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual, and (f) during typhoon

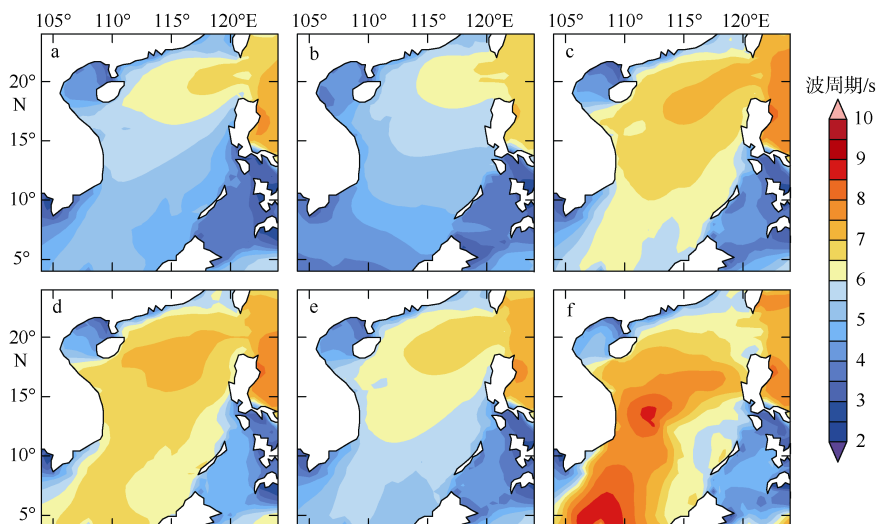


图 4 南海波周期分布

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季; e. 全年; f. 台风最强盛时刻

Fig. 4 Wave period distribution in the South China Sea. (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual, and (f) during typhoon

表 1 南海海域波高和波周期数值

Tab. 1 Wave height and period in the South China Sea

	波高/m	波周期/s
春季	0.96	5.39
夏季	1.04	5.21
秋季	1.44	6.32
冬季	1.79	6.50
全年	1.31	5.85
台风风眼附近	5.15	8.61

翼板的升沉运动 $y(t)$ 可以表示为：

$$y(t) = h_0 \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

式中： t 为运动时间(单位：s)； $h_0 = H/2$ 为升沉运动幅值， H 为波高(单位：m)； $f = 1/T$ 为升沉运动频率， T 为波周期(单位：s)。

水翼被动摆动的控制方程为：

$$\omega = \begin{cases} 0, \theta > \theta_{\max} & \& M > 0 \\ 0, \theta < -\theta_{\max} & \& M < 0 \\ \int (M/I) dt, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\theta = \int_0^t \omega dt \quad (3)$$

式中： ω 为角速度(单位：rad·s⁻¹)； θ 为翼板当前偏转角度(单位：rad)； θ_{\max} 为翼板最大偏转角度； M 为水翼绕转轴力矩(单位：N·m)，通过对翼板表面压强积分得到； I 为翼板绕转轴的转动惯量(单位：kg·m²)。

2.2 控制方程

本文采用二维瞬态不可压缩流进行求解。对于二维不可压缩流，连续性方程和 RANS 方程(雷诺平均方程)可以表示为：

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \left(\frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho u_i' u_j')$$

(5)

式中： u_i 和 u_j 为时间平均的速度分量($i, j=1, 2$)； x_i 和 x_j 为距离(单位：m)； ρ 为液体密度(单位：kg·m⁻³)； p 为压力(单位：Pa)； μ 为动力粘度(单位：N·s·m⁻²)。 $-\rho u_i' u_j'$ 为雷诺应力项，代表湍流效应。为了使方程收敛，还需选取一个适合的湍流模型。

本文采用 SST k - ω 湍流模型(剪切应力输运 k - ω 湍流模型)计算涡动粘度。SST k - ω 湍流模型相比于

标准的 k - ω 湍流模型，较好地避免了模型对自由流动的敏感性，并能精确计算光滑表面的流动分离(Menter, 1994)，其方程式可以表示为：

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k^{\sim} + Y_k + S_k \quad (6)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_{\omega}^{\sim} - Y_{\omega} + D_{\omega} + S_{\omega} \quad (7)$$

式中： k 为湍流动能(单位：J)； ω 为湍流频率(单位：s⁻¹)； G_k^{\sim} 代表由层流速度梯度引起的湍流动能(单位：kg²·m⁻¹·s⁻³)； G_{ω}^{\sim} 代表由层流速度梯度引起的湍流频率(单位：kg·m⁻³·s⁻²)； Γ_k 和 Γ_{ω} 分别表示 k 和 ω 的有效扩散系数； Y_k 和 Y_{ω} 代表由于湍流引起的 k 和 ω 的耗散； D_{ω} 代表交叉扩散项； S_k 和 S_{ω} 为用户定义的源项。

3 网格划分

选取 NACA0012 型翼板，弦长 C 为 0.2m。采用重叠网格，背景网格区域为 6m×5m 的长方形(台风浪研究则选取背景网格区域为 6m×8m 的长方形)。选用四边形对该区域进行划分，左边界设置为速度入口，上下边界和右边界设置为压力出口，翼板设置为无滑移壁面。单个翼板的重叠网格区域为直径 0.6m 的圆，串列翼板的重叠网格区域为 6 个直径 0.22m 的圆，选用三角形对该区域进行划分。利用 GAMBIT 软件进行网格划分，翼板头部尾部适当加密。网格划分情况如图 5 所示，其中图 5a 为单个翼板网格划分情况，图 5b 为串列翼板网格划分情况。

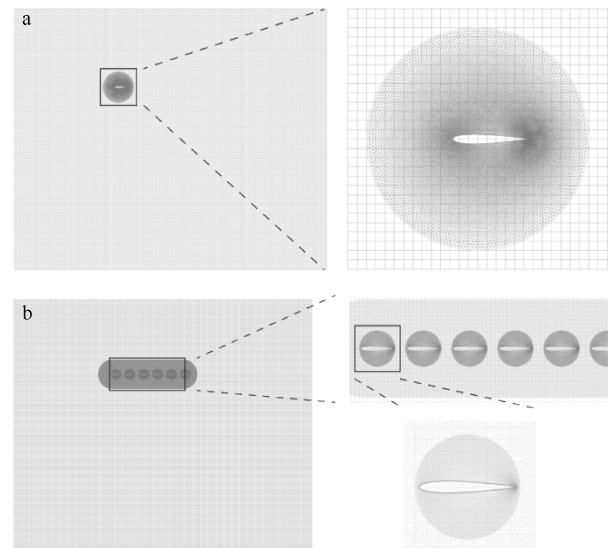


图 5 单个翼板网格划分(a)和串列翼板网格划分(b)
Fig. 5 Meshing single wing (a), and tandem wings (b)

为确保仿真计算的准确性和高效性, 计算了在 4 种网格尺寸下, 单个翼板在南海年平均的波浪要素条件下、最大偏转角为 20° 和转轴位置处于翼板前端

1/3 处时, 翼板摆动产生的平均推力。表 2 记录了 4 种网格尺寸下平均推力的变化, 本文最终采用 A3 网格。串联翼板的网格可以按相同的密度进行划分。

表 2 网格尺寸验证

Tab. 2 Mesh size validation

网格编号	总网格数/个	背景网格数量/个	重叠网格数量/个	平均推力/N
A1	49630	21280	28350	40.3
A2	79053	33400	45653	42.7
A3	114788	48000	66788	43.5
A4	152815	68068	84747	43.5

4 结果分析

首先, 通过对单个翼板的仿真, 分别确定 6 种波浪环境下最佳的偏转角度以及转轴位置。其次, 将计算得到的结果, 设置为串联翼板中每个翼板的参数, 改变翼板间隔, 比较翼板的平均推力。最终得到适用于南海的波浪滑翔机翼板的各项参数。

4.1 最大偏转角度对推进效能的影响

取转轴位置为翼板前端 1/3 处, 改变翼板被动摆动的最大偏转角度(θ_{\max}), 分别对 6 种不同波浪环境下翼板运动一个周期的平均推力进行比较。首先计算 $\theta_{\max} = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ, 45^\circ$ 时的平均推力, 再分别对极大值附近进行加密仿真

计算。台风浪情形下, θ_{\max} 在 $[15^\circ, 45^\circ]$ 区间内, 翼板受到推力单调递增, 所以添加了 $\theta_{\max} = 50^\circ, 55^\circ, 60^\circ, 65^\circ, 70^\circ$ 时的情况, 再对极大值附近进行加密仿真计算。

图 6 显示在不同波浪要素条件下, 翼板获得的平均推力随最大偏转角度的变化情况。仿真结果表明, 对于同样的最大偏转角, 波高越大, 波浪滑翔机翼板系统能够获得的推力就越大。并且波高越大, 最大偏转角度也必须相应增大才能保证翼板获得更大的推力。针对南海全年平均的波浪要素, 最大偏转角度取 27° 为最佳, 而春季应为 20° , 夏季应为 22° , 秋季应为 32° , 冬季应为 38° , 台风影响下应为 58° 。

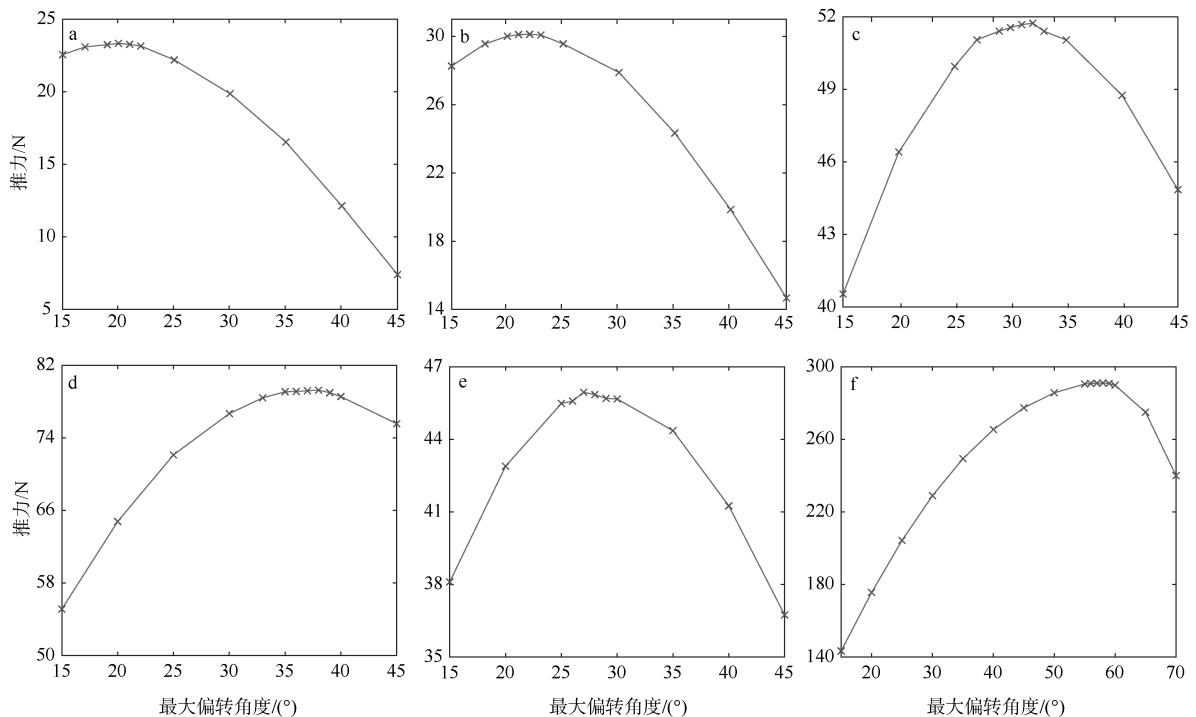


图 6 不同波浪要素条件下翼板获得的平均推力随最大偏转角度的变化情况

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季; e. 全年; f. 台风最强盛时刻

Fig. 6 Average thrust obtained by the wing under different wave condition as a function of maximum limit angle. (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual, and (f) during typhoon

4.2 转轴位置对推进效能的影响

对 NACA 型翼板的摆动研究大多选取翼板前端 1/3 处(Anderson et al, 1998; Read et al, 2003), 本文再添加 3/10、2/10 (1/5)、1/10 3 处转轴位置进行仿真。4 种转轴位置、, 如图 7 所示, 编号、, 转轴位于翼板前端 1/3 处; 编号、, 转轴位于翼

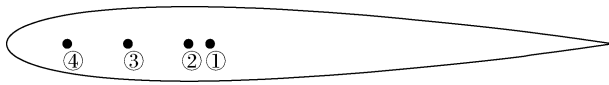


图 7 翼板转轴位置示意图

为 1/3 转轴位置; 为 3/10 转轴位置; 为 1/5 转轴位置; 为 1/10 转轴位置

Fig. 7 Schematic diagram of rotating axis

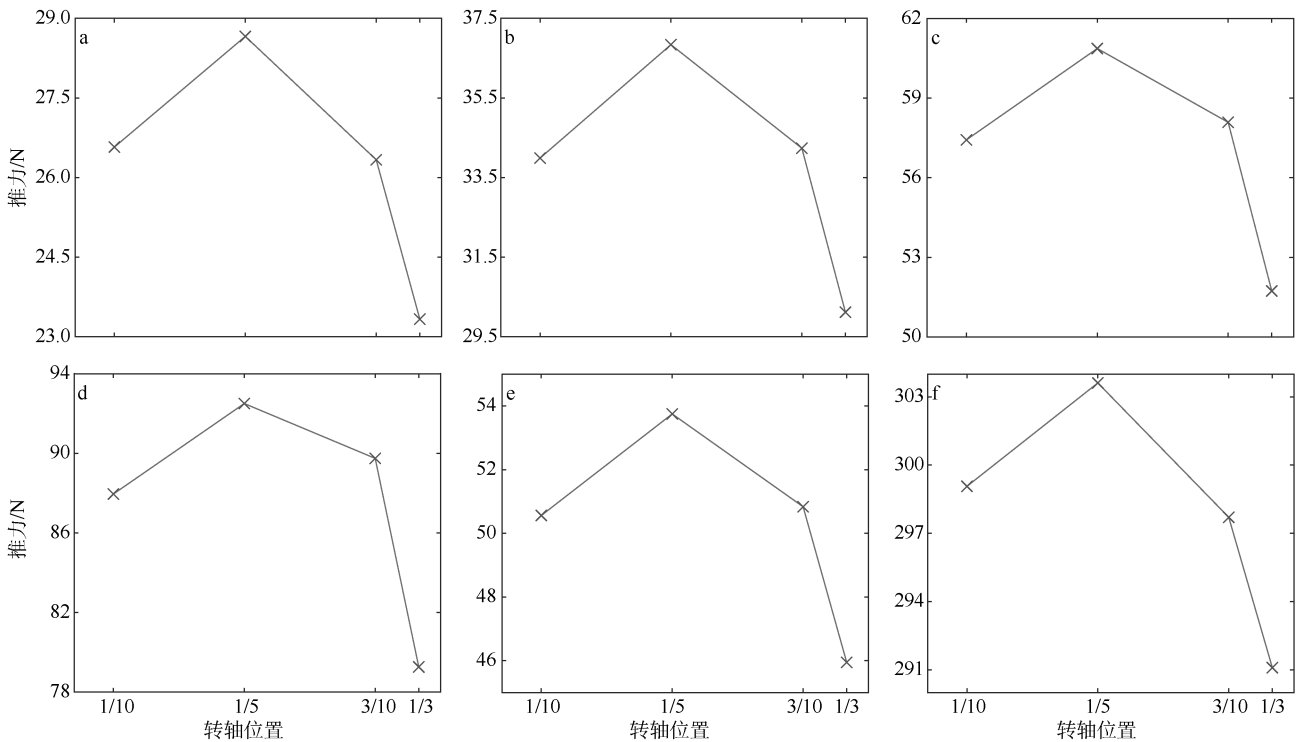


图 8 不同波浪要素条件下翼板获得的平均推力随转轴位置的变化情况

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季; e. 全年; f. 台风最强盛时刻

Fig. 8 Average thrust obtained by the wing under different wave condition as a function of rotating axis position. (a) spring, (b) summer, (c) autumn, (d) winter, (e) annual, and (f) during typhoon

4.3 翼板间间距对推进效能的影响

翼板最大偏转角度分别设置为 27° (全年)、 20° (春季)、 22° (夏季)、 32° (秋季)、 38° (冬季)和 58° (台风), 转轴位置取在翼板前端 1/5 处, 翼板对数为 6 对时, 分别仿真翼板间距为 40mm、80mm、120mm、160mm 4 种不同的情况, 结果如图 9 所示。

图 9 显示了在不同的波浪要素条件下, 串列翼板的平均推力随翼板间间隔的变化情况。图中可以看出, 翼板间距越大, 翼板获得的平均推力越大。但

板前端 3/10 处; 编号、, 转轴位于翼板前端 1/5 处; 编号、, 转轴位于翼板前端 1/10 处。

翼板最大偏转角度分别设置为 27° (全年)、 20° (春季)、 22° (夏季)、 32° (秋季)、 38° (冬季)和 58° (台风), 翼板转轴位置改变为上述 4 处翼板转轴位置。仿真计算单个翼板运动一个周期的平均推力, 结果如图 8 所示。

图 8 显示了不同波浪要素条件下, 翼板获得的平均推力随转轴位置的变化情况。仿真结果显示, 在 6 种波浪环境下, 翼板的转轴位置随推力变化的趋势基本一致, 并且获得推力的极大值点都发生在翼板前端 1/5 处。

由于翼板间间隔越大, 意味着水下滑翔体的质量越大。所以推力的增加, 并不能直接意味着推进效能的提高。

5 结论

本文基于 ERA5 再分析数据集, 对南海不同季节以及台风经过时的波高波周期特征进行统计, 得到代表值。再利用 FLUENT 软件, 研究在这些波浪要素条件下, 翼板最大偏转角度、转轴位置以及翼

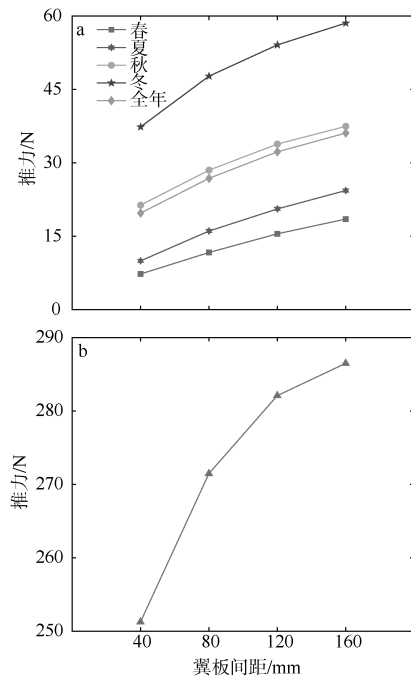


图9 翼板平均推力随翼板间隔的变化情况

a. 四季和全年平均; b. 台风

Fig. 9 Average thrust obtained by the wing under different wave condition as a function of wings spacing. (a) four seasons and annual, and (b) during typhoon

板间距对波浪滑翔机水下翼板的平均推力的影响。针对波浪滑翔机翼板的数值仿真试验得到主要仿真趋势如下:

1) 波高越大, 波浪滑翔机翼板系统获取的推力越大;

2) 波高越大, 最大偏转角度也必须相应增大才能保证翼板获得更大的推力。针对南海的波浪要素, 最大偏转角度在6种波浪情况下分别取27°(全年)、20°(春季)、22°(夏季)、32°(秋季)、38°(冬季)、58°(台风影响下)为最佳;

3) 在南海波浪要素条件下, 翼板转轴位置选取在翼板前端1/5处较佳;

4) 适当增加翼板间距能够提高翼板获得的推力。

本文中翼板转轴位置的改变过于理想化, 实际中还应考虑翼板的弹簧结构、最大承受压力等诸多因素。同时, 文中翼板运动的控制方程较为理想化, 实际中翼板的运动应结合波浪滑翔机整体动力学特征分析, 这些都是我们下一步工作的方向。

参考文献 References

- 胡合文, 2015. 波浪滑翔机的水动力分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学. HU KEWEN, 2015. Hydrodynamic analysis of Wave Glider[D]. Harbin: Harbin Engineering University (in Chinese with English abstract).
- 胡滕艳, 孙秀军, 王兵振, 等, 2018. 利用 Fluent 仿真分析波浪滑翔器的水动力性能[J]. 海洋技术学报, 37(3): 8–12. HU TENG YAN, SUN XIUJUN, WANG BINGZHEN, et al, 2018. Simulative analysis of the hydrodynamic performances of Wave Gliders using Fluent[J]. Journal of Ocean Technology, 37(3): 8–12 (in Chinese with English abstract).
- 贾立娟, 2014. 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. JIA LIJUAN, 2014. Study of operation principle of two-part architecture and dynamic behavior of Wave Glider[D]. Tianjin: National Ocean Technology Center (in Chinese with English abstract).
- 李灿, 2018. 波浪滑翔器动力学分析及性能优化[D]. 天津: 天津工业大学 (in Chinese).
- 吕元博, 田新亮, 李欣, 等, 2018. NACA 0012 摆动水翼水动力特性的二维数值模拟[J]. 中国舰船研究, 13(2): 7–15. LYU YUANBO, TIAN XINLIANG, LI XIN, et al, 2018. Two-dimensional numerical simulation of NACA 0012 flapping foil hydrodynamics[J]. Chinese Journal of Ship Research, 13(2): 7–15 (in Chinese with English abstract).
- 桑宏强, 李灿, 孙秀军, 2018. 波浪滑翔器纵向速度与波浪参数定量分析[J]. 水下无人系统学报, 26(1): 16–22. SANG HONGQIANG, LI CAN, SUN XIUJUN, 2018. Quantitative analysis on longitudinal velocity and wave parameter of Wave Glider[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 26(1): 16–22 (in Chinese with English abstract).
- 孙秀军, 王雷, 桑宏强, 2019. “黑珍珠”波浪滑翔器南海台风观测应用[J]. 水下无人系统学报, 27(5): 562–569. SUN XIUJUN, WANG LEI, SANG HONGQIANG, 2019. Application of Wave Glider “Black Pearl” to typhoon observation in South China Sea[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 27(5): 562–569 (in Chinese with English abstract).
- 严日华, 2017. 波浪滑翔器潜体水动力性能分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学. YAN RIHUA, 2017. Hydrodynamic analysis of Wave Glider submerged body part[D]. Harbin: Harbin Engineering University (in Chinese with English abstract).
- 杨燕, 张森, 史健, 等, 2014. 波浪动力滑翔机海洋环境监测系统[J]. 海洋技术学报, 33(1): 109–114. YANG YAN, ZHANG SEN, SHI JIAN, et al, 2014. Wave Glider marine environmental monitoring system[J]. Journal of Ocean Technology, 33(1): 109–114 (in Chinese with English abstract).
- 张森, 史健, 张选明, 等, 2014. 波浪动力滑翔机岸基监控系统[J]. 海洋技术学报, 33(3): 119–124. ZHANG SEN, SHI JIAN, ZHANG XUANMING, et al, 2014. Design of the shore-based monitoring system for Wave Gliders[J]. Journal of Ocean Technology, 33(3): 119–124 (in Chinese with English abstract).
- ANDERSON J M, STREITLIEN K, BARRETT D S, et al. 1998.

- Oscillating foils of high propulsive efficiency[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 360: 41–72.
- CARLON R, 2015. Tracking tagged fish using a Wave Glider[C]//OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington. Washington, DC, USA: IEEE.
- GOEBEL N L, FROLOV S, EDWARDS C A, 2014. Complementary use of Wave Glider and satellite measurements: description of spatial decorrelation scales in Chl-*a* fluorescence across the Pacific Basin[J]. *Methods in Oceanography*, 10: 90–103.
- HINE R, WILLCOX S, HINE G, et al, 2009. The Wave Glider: a wave-powered autonomous marine vehicle[C]//Proceedings of OCEANS 2009. Biloxi, MS, USA: IEEE.
- KRAUS N, BINGHAM B, 2011. Estimation of Wave Glider dynamics for precise positioning[C]//Proceedings of OCEANS'11 MTS/IEEE KONA. Waikoloa, HI, USA: IEEE.
- KRAUS N, 2012. Wave Glider dynamic modeling, parameter identification and simulation[D]. Honolulu: University of Hawaii at Manoa.
- MANLEY J, WILLCOX S, WESTWOOD R, 2009. The Wave Glider: an energy harvesting unmanned surface vehicle[J]. *Marine Technology Reporter*, 5(11): 27–31.
- MANLEY J, WILLCOX S, 2010a. The Wave Glider: a new concept for deploying ocean instrumentation[J]. *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, 13(6): 8–13.
- MANLEY J, WILLCOX S, 2010b. The Wave Glider: a persistent platform for ocean science[C]//Proceedings of OCEANS'10 IEEE Sydney. Sydney, NSW, Australia: IEEE.
- MENTER F R, 1994. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications[J]. *AIAA Journal*, 32(8): 1598–1605.
- MULLISON J, SYMONDS D, TRENAMAN N, 2011. ADCP data collected from a liquid robotics Wave Glider®[C] //Proceedings of the IEEE/OES 10th current, waves and turbulence measurements. Monterey, CA, USA: IEEE: 266–272
- O'REILLY T C, KIEFT B, CHAFFEY M, 2015. Communications relay and autonomous tracking applications for Wave Glider[C]//Proceedings of IEEE OCEANS 2015. Genova, Italy: IEEE: 1–6.
- PENNA N T, MAQUEDA M A M, MARTIN I, et al, 2018. Sea surface height measurement using a GNSS wave glider[J]. *Geophysical Research Letters*, 45(11): 5609–5616.
- QI ZHANFENG, LIU WENXIA, JIA LIJUAN, et al, 2013. Dynamic modeling and motion simulation for Wave Glider[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 397–400: 285–290.
- READ D A, HOVER F S, TRIANTAFYLLOU M S, 2003. Forces on oscillating foils for propulsion and maneuvering[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 17(1): 163–183.
- SALARI M R, ANVAR A M, 2015. CFD Modelling and Real-time testing of the Wave Surface Glider (WSG) Robot[C]//21st international congress on modelling and simulation. Gold Coast, Australia.