文章编号：1007−7294(2026)07−1078−12

风帆协同驱动波浪滑翔机动力学建模与运动响应分析

赵启伟[1]，王　鹏[1,2]，田新亮[1,2]，刘然然[1,2]，王宇林[1]，温斌荣[1,2]
（1. 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室，上海 200240；2. 上海交通大学 三亚崖州湾深海科技研究院，海南 三亚 572024）

摘要：波浪滑翔机是一种依赖波浪能驱动的超长续航水面无人船，广泛应用于水文气象观测及海洋环境调查等领域。然而其单一的驱动方式导致航速较低，限制了其海上适应能力。为提升航行速度，本文首次提出风帆协同驱动波浪滑翔机的方法。首先通过 CFD 数值模拟获取波浪滑翔机协同驱动风帆的气动特性参数；随后，构建风帆协同驱动波浪滑翔机的多体动力学耦合模型；最后，在典型海况下进行了风浪协同驱动效应仿真与分析。研究结果表明：在风向为 30°顺风和逆风角度外，航速均有提升，且在 90°横风条件下航速提升效果最佳。在二级海况下，风速为 20 kn 时，航速提升可达 28%。此外，风浪协同驱动效应及双体结构运动响应特征表现出与波浪以及风场的强耦合特性。研究成果为风帆协同驱动波浪滑翔机的结构优化与控制提供了重要的理论支撑与设计基础。

关键词：波浪滑翔机；风浪协同驱动；多体耦合动力学
中图分类号：U674.941　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.3969/j.issn.1007−7294.2026.07.004

Dynamic modeling and motion response analysis of sail-assisted wave glider

ZHAO Qi−wei[1], *WANG Peng*[1,2], *TIAN Xin−liang*[1,2], *LIU Ran−ran*[1,2], *WANG Yu−lin*[1], *WEN Bin−rong*[1,2]
(1. State Key Laboratory and Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 2. Yazhou Bay Institute of Deepsea Science and Technology, Shanghai Jiao Tong University, Sanya 572024, China)

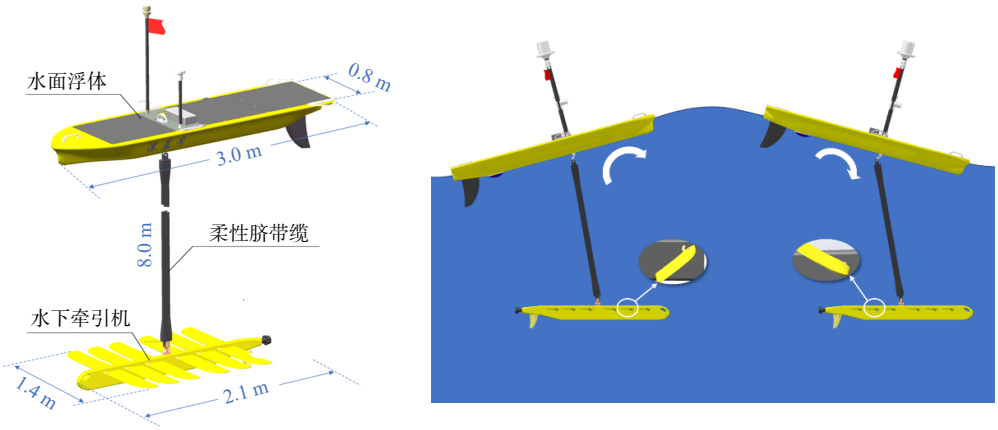
Abstract: The wave glider is a long-endurance unmanned surface vehicle driven by wave energy, widely used in hydrological and meteorological observations as well as oceanographic surveys. However, its low speed due to a single driving mechanism limits its adaptability at sea. To improve speed, this paper proposes a method of sail-assisted wave glider. First, the aerodynamic parameters of the sail were obtained through CFD numerical simulation. Next, a multi-body dynamics coupling model for the wave and sail-assisted wave glider was established. Finally, the synergistic driving effects under typical sea conditions were simulated and analyzed. The results show that, except for headwind and tailwind angles within 30°, the speed increases, with the optimal enhancement observed under crosswind conditions. Under a second-level sea state and a wind speed of 20 kn, the speed can increase by up to 28%. Furthermore, the synergistic propulsion effect and the motion response characteristics of the twin-body structure exhibit strong coupling with wave and wind fields. The research findings provide important theoretical support and design foundations for the optimization of the propulsion system and navigation control strategies of sail-assisted wave gliders.

收稿日期：2025−12−18
基金项目：上海市自然科学基金面上项目(24ZR1437000)；第 75 批博士后面上资助项目(2024M751981)
作者简介：赵启伟(2001−)，男，硕士研究生；
王　鹏(1994−)，男，博士，助理研究员，通讯作者，E-mail：wp6726454@sjtu.edu.cn。

Key words: wave glider; wind-wave cooperative propulsion; multi-body coupled dynamics

0 引　言

波浪滑翔机是一种依靠波浪驱动的水面无人航行器，可以不依赖外部能源供给实现长达数月的海上自主航行[1]。波浪滑翔机由水面浮体和水下牵引机组成，两者之间通过 8 m 长的脐带缆相连（如图 1(a)）。波浪滑翔机的前进动力来自于水面浮体在波浪中的起伏运动，浮体运动通过脐带缆传递到水下牵引机，牵引机串列水翼将起伏运动转化为持续向前的推力，该推力通过柔性脐带缆传递回水面浮体，推动其向前运动（如图 1(b)）。搭载在浮体表面的太阳能板为数据采集、传输以及波浪滑翔机的航向控制提供能源。因此，波浪滑翔机具有超长续航以及耐恶劣海况、隐身性好、成本低等优点，在海洋水文气象监测、生态环境调查、军事侦察等活动中具有独特的优势。然而传统波浪滑翔机主要依靠自身双体结构纯机械式、被动地将波浪能转化为前进的动能，航速大小依赖于波浪，驱动方式单一，能效较低。当波浪较小时，波浪滑翔机可能无法抵御海流的影响，甚至出现失控的情况。因此，波浪滑翔机“航速低”的问题限制了其在海上的活动范围，已成为制约波浪滑翔机大规模应用的主要障碍。基于波浪滑翔机双体结构特性和动力学特征，建立新的波浪滑翔机航速提升方法，是波浪滑翔机发展亟待解决的关键难题。



（a）波浪滑翔机双体结构　　（b）波浪滑翔机运动原理

图 1　波浪滑翔机结构及运动原理

Fig.1　Structure and motion principle of wave glider

为了提高波浪滑翔机的能量利用效率，提升航行速度，国内外学者开展了大量研究。传统的波浪滑翔机的航速提升方法主要包括增加电能辅助推进[2] 以及水动力优化两种。对前者而言，辅助推进电能来自于太阳能，而波浪滑翔机只能维持平均 5~20 W 的负载能耗，因此电能辅助推进只适用于短期及海上紧急避险情况；而后者旨在通过改善水下牵引机的外形、结构以及串联翼板的关键技术参数设计来提高波浪能转化效率，从而提升波浪滑翔机航行性能，这是目前波浪滑翔机航速提升的主流技术手段。Wang 等[3] 在考虑海洋复杂波流环境的基础上，建立了波浪滑翔机双体耦合 8 自由度运动学与动力学模型，并搭建了波浪滑翔机结构设计和性能提升的优化平台。Sun 等[4] 基于 Fluent 平台，采用重叠网格技术构建二维水翼的数值模型，并融合波浪滑翔机弹簧−水翼机构的数学模型进行耦合仿真，系统分析了弹簧刚度系数和限位俯仰角对水翼水动力性能的影响；Qi 等[5] 使用有限体积法研究了水下牵引机串列水翼的间距及涡旋效应对推进性能的影响，重点分析了水翼间距和运动同步性对推进性能的影响。Feng 等[6] 利用 ADMAS 软件模拟波浪滑翔机多体耦合运动，研究了不同波浪条件下水翼恢复刚度对推进性能的影响并探讨了刚度最优分布以及刚度选择原则，为提高波浪滑翔机在复杂海洋环境下的推进性能提供参考。Ma 等[7] 通过数值模拟和海上试验，研究不同波浪环境下牵引机的俯仰角对串联水翼推

进性能的影响，提出了有利于波浪能转化的顺势俯仰角。

上述研究有效促进了波浪滑翔机水动力性能优化方法及理论的发展，并且在波浪滑翔机的航速提升方面取得了一定成果。然而由于波浪能的捕获和转化效率存在理论上限，仅依靠水动力优化提升波浪滑翔机航速的空间有限。Kessel[8] 通过理论分析探讨了波浪滑翔机的速度上限及其与波浪特性的关系。结果表明：随着海况等级的提升，波浪滑翔机的平均航速逐渐趋于稳定，存在约 1.5 kn 的上限。

为进一步提升波浪滑翔机航行速度，亟需从全新的角度出发，探索新的辅助推进技术路径。风能作为另一种海上丰富的自然能源，在船舶推进领域展现出显著的应用潜力。近年来，风能驱动已在多种类型的船舶平台上得到成功应用，包括海上无人帆船、风帆/风筒助航等，相关理论研究及工程应用已得到充分的验证[9−11]。因此，合理利用海上丰富的风能资源，引入风帆辅助推进系统，是进一步提升波浪滑翔机航速的潜在方法。然而，对于双体结构柔性连接的波浪滑翔机而言，在水面浮体上增加风帆辅助推进系统，会直接影响其双体结构动力学响应及整体的航行稳定性，不同风浪环境下的风浪耦合驱动效应以及双体结构的运动响应特征尚不明确。

本文聚焦于波浪滑翔机航速提升的核心需求，提出基于风帆辅助推进的波浪滑翔机风−浪协同驱动方法，其结构特征与整体示意如图 2 所示。同时研究风浪协同驱动下波浪滑翔机多体结构耦合运动响应特性及不同风浪环境条件下的协同驱动效应，探讨了该方法在多种风浪环境下的适用性和可行性。首先，采用 CFD 数值模拟方法计算风帆在不同风速与攻角条件下的气动特性参数，并建立完整的气动特性数据库；随后，基于牛顿−欧拉法构建风帆协同驱动波浪滑翔机的多体动力学耦合模型，以准确模拟其动力学行为；最后，在不同环境激励条件下，对风帆协同驱动波浪滑翔机的运动特性进行仿真与分析，探究其驱动效应和动力学响应关系。

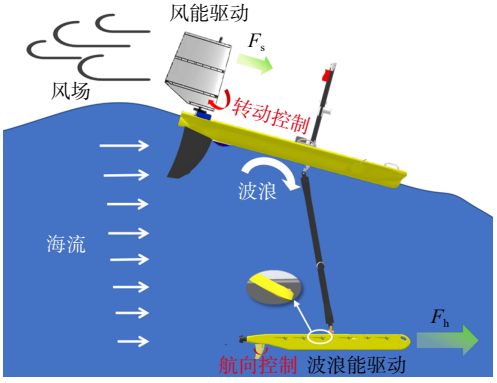


图 2 风浪协同驱动波浪滑翔机示意图

Fig.2 Schematic of wave glider by wind-wave cooperative propulsion

1 风帆的气动力特性研究

风帆作为将风能直接转化为推力的关键装置，其结构特征和气动特性很大程度上决定了风能的捕获能力和转化效率。目前应用于无人帆船上的风帆主要包括传统软帆、平衡帆和刚性翼帆[12]。为了应对复杂多变的海洋环境，并确保波浪滑翔机在左右舷迎风条件下均能高效利用风能并转化为推进力，本文选用刚性对称翼帆作为风力推进装置，翼型截面采用 NACA 0018，并在风帆底部设计切角结构，以减小甲板上浪对风帆的冲击影响，如图 3 所示，风帆设计参数见表 1。本节采用 Star-CCM+流体仿真软件对风帆气动力特性进行数值模拟分析。

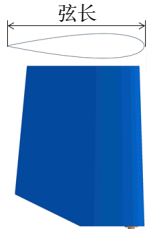


图 3 风帆结构

Fig.3 Sail structure

表 1 风帆主要参数

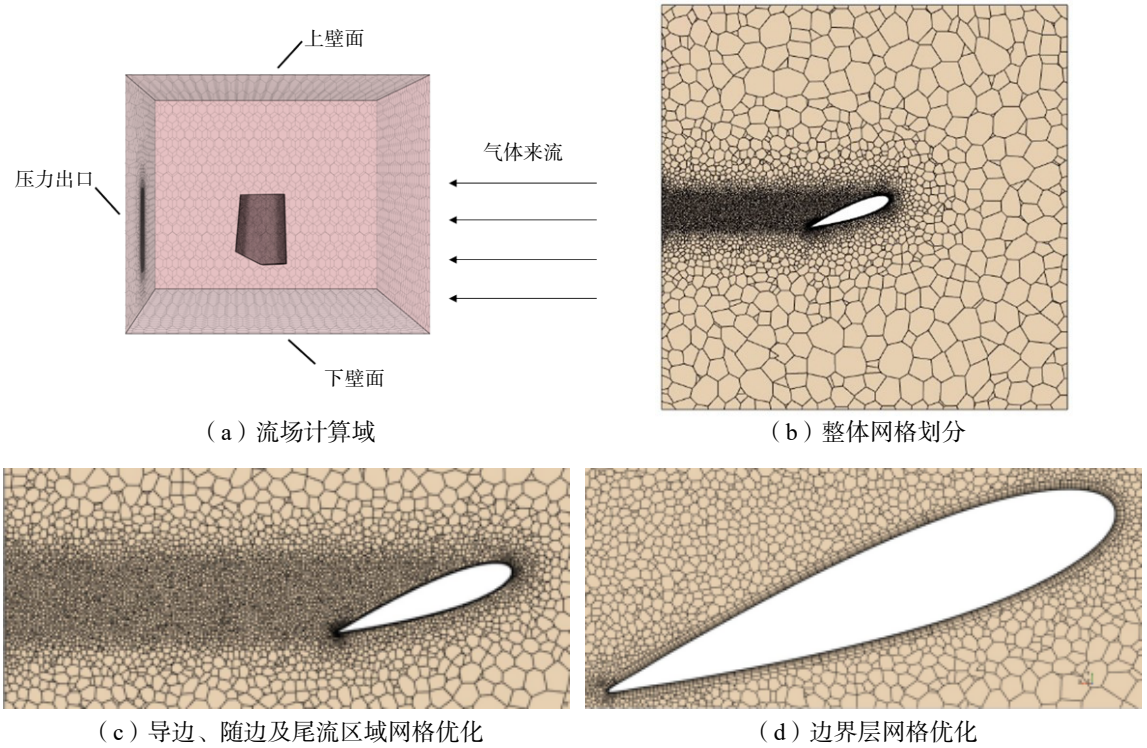
Tab.1 Main parameters of the sail

参数名称	数值
翼型截面	NACA 0018
风帆高度h/m	0.90
最大弦长l/m	0.72
迎风面积A/m²	0.60

1.1 计算域和网格划分

仿真计算域设为 3.0 m×3.0 m×2.5 m 的立方体区域，如图 4(a)所示。设置进口、左边界、右边界为

速度入口，出口为压力出口，上下界面为壁面。



（a）流场计算域　　（b）整体网格划分

（c）导边、随边及尾流区域网格优化　　（d）边界层网格优化

图 4 流场计算域和网格划分

Fig.4 Computational domain for flow field model and mesh division

在计算域的网格划分过程中，本文采用多面体网格进行离散，网格增长率设定为 1.2，以实现计算域的平滑过渡并提升数值求解的收敛效率。为进一步提高仿真精度，针对边界层区域以及风帆的导边、随边和尾流区域进行局部网格优化。在边界层区域布设 5 层棱柱层网格进行加密处理，第一层厚度取棱柱层总厚度的 10%，设置棱柱层增长率为 1.2，以在准确捕捉边界层内速度梯度和湍流特性的同时，维持较高的计算效率。对风帆导边、随边等几何特征区域及尾流区域进行局部网格加密处理，有效提升风帆与流体之间相互作用以及尾流演化过程的模拟精度。网格划分结果如图 4(b)~(d)所示。

在上述网格划分基础上，为确保仿真结果的可靠性与计算过程的稳定性，同时提高计算效率，本文开展了网格无关性与时间步长无关性验证。通过对不同网格密度和时间步长设置下的仿真结果进行对比分析，评估网格划分精度与计算时间步长对关键计算结果的影响。相关验证结果如表 2 所示。

表 2 网格无关性和时间步长无关性验证

Tab.2 Independence verification of grid and time-step

网格尺寸	网格数量	时间步长/s	F_x平均值/N	F_y平均值/N
粗化网格	413 999	0.001	4.61	20.33
中等网格	780 846	0.0005	4.60	20.41
中等网格	780 846	0.001	4.64	20.43
中等网格	780 846	0.002	4.53	20.36
精细网格	1 525 383	0.001	4.68	20.47

基于表中计算结果，综合考虑计算精度与计算效率，本文选取中等网格尺寸和时间步长为 0.001 s 进行数值模拟。波浪滑翔机在海面航行过程中周围风速远低于 0.3 马赫，且温度与压强变化较小，风帆周围空气可视为不可压缩流体。在此条件下，流场中速度、密度及温度等物理量随时间变化可忽略不计，故采用稳态流动假设进行计算，以在保证计算精度的同时有效提高计算效率[13]。同时，考虑风

帆表面流动特征的相对简单性，选用标准 k-ε(k-epsilon)湍流模型进行数值模拟。k-ε 湍流模型作为一种经典的两方程湍流模型，通过求解湍流动能(k)和湍流耗散率(ε)的运输方程来描述湍流特性。该模型不仅具有较高的计算效率，而且在处理工程中常见的湍流流动问题时表现出良好的适用性和可靠性[14]。

1.2 气动特性参数计算结果

为系统全面地获取风帆在不同工况下的气动性能参数，本研究对多种流场环境进行模拟分析。所选流场速度涵盖 1 至 3 级海况下可能出现的风速，取 3 m/s、5 m/s、7 m/s、9 m/s 和 11 m/s。攻角为来流方向与风帆弦线所成的夹角，考虑到 NACA 0018 翼型表现出最佳升阻比的攻角通常小于 20°[15]，因此攻角范围选取 0°~20°，以 2°为一间隔，计算风帆在各工况下的升力系数与阻力系数。

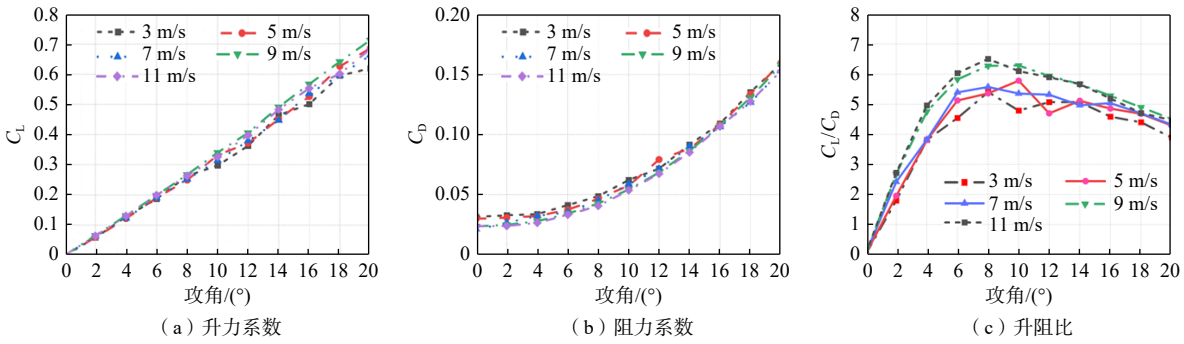
升力系数C_{L}、阻力系数C_{D}通过以下公式计算

$$C_{\mathrm{L}}=\frac{F_{\mathrm{L}}}{0.5\rho V^2 A} \tag{1}$$

$$C_{\mathrm{D}}=\frac{F_{\mathrm{D}}}{0.5\rho V^2 A} \tag{2}$$

式中：F_{L}和F_{D}为数值模拟计算得到的风帆升力和阻力；ρ为空气密度；V为风速；A为风帆的迎风面积。

所选取的风帆气动特性参数如图 5 所示。



（a）升力系数　（b）阻力系数　（c）升阻比

图 5 气动特性参数曲线

Fig.5 Curves of aerodynamic characteristic parameters

计算结果表明，在所设定的五种风速工况下，本文所选风帆的升力系数与阻力系数均随攻角增大而增大，且在攻角范围 6°~14°之间表现出较高的升阻比，具有良好的气动效率。基于上述仿真结果，建立了风帆气动特性数据库，为后续风帆协同驱动波浪滑翔机的动力学建模提供准确的风帆气动力输入，同时也为风帆控制策略的设计与优化提供重要的数据支持。

2 风帆协同驱动波浪滑翔机的动力学建模

风帆协同驱动波浪滑翔机涉及到风浪混合动力驱动以及双体结构耦合运动响应，导致整个系统的动力学响应具有高度复杂性。因此本文通过构建风帆协同驱动波浪滑翔机的多体动力学耦合模型，深入分析其运动特性。波浪滑翔机的基本结构参数如表 3 所示。

表 3 波浪滑翔机基本结构参数

Tab.3 Characteristic parameters of the wave glider

参数名称/单位	数值	参数名称/单位	数值
水面浮体尺寸（长×宽×高）/m	3.0×0.8×0.25	水下牵引机尺寸（长×宽×高）/m	2.1×1.4×0.2
水面浮体质量/kg	100	水下牵引机质量/kg	80
柔性脐带缆长度/m	8.0		

需要说明的是，本研究重点关注风帆辅助推进在纵向方向上对波浪滑翔机航行性能、动力响应及

双体结构运动关系的影响，因此在建模及仿真分析过程中，暂不考虑风帆引起的横向偏移、横摇和纵摇等响应。

2.1 坐标系定义

如图 6 所示，建立大地坐标系{n}和两个随体坐标系{b_1}和{b_2}。大地坐标系{n}的原点设在海面任意位置，x_n轴指向正北，y_n轴指向正东，z_n轴垂直于地球表面指向地心方向。随体坐标系{b_1}和{b_2}的原点分别固定在水面浮体和水下牵引机的重心位置，x轴指向波浪滑翔机前进方向，y轴指向右舷，z轴遵循右手坐标系垂直于xoy平面向下。

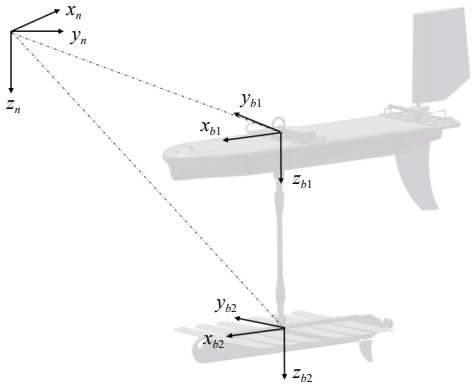


图 6　参考坐标系

Fig.6　Reference coordinate system

2.2 动力学建模

基于所建立的坐标系，本文构建了水面浮体的纵荡、横荡、垂荡和艏摇四自由度运动学与动力学模型。将随体坐标系下的运动转化为大地坐标系下的运动，可以通过以下欧拉角表示

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{J}_{\Theta}(\boldsymbol{\eta})\boldsymbol{v} \tag{3}$$

式中：$\boldsymbol{\eta}$为水面浮体在大地坐标系下的位置和姿态向量，$\boldsymbol{v}$ 为浮体在随体坐标系下的速度向量，$\boldsymbol{J}_{\Theta}(\boldsymbol{\eta})$为从随体坐标系到大地坐标系的转化矩阵。

基于牛顿−欧拉法建立水面浮体的动力学方程如下

$$\left[\boldsymbol{M}_{\mathrm{RB}}{}^{(1)} + \boldsymbol{A}^{(1)}\right]\dot{\boldsymbol{v}}_1 + \boldsymbol{C}_{\mathrm{RB}}{}^{(1)}(\boldsymbol{v}_1)\boldsymbol{v}_1 + \boldsymbol{C}_{\mathrm{A}}{}^{(1)}(\boldsymbol{v}_{1\text{-r}})\boldsymbol{v}_{1\text{-r}} + \boldsymbol{D}^{(1)}(\boldsymbol{v}_{1\text{-r}})\boldsymbol{v}_{1\text{-r}} + \boldsymbol{g}^{(1)}(\boldsymbol{\eta}_1) = \tau_{1\text{-tether}} + \tau_{\mathrm{wave}} + F_{\mathrm{s}} \tag{4}$$

式中：v_1为水面浮体的速度，$v_{1\text{-r}} = v_1 - v_{\mathrm{current}}$为考虑流的相对速度；$\boldsymbol{M}_{\mathrm{RB}}{}^{(1)} + \boldsymbol{A}^{(1)}$为刚体惯性矩阵和附加质量矩阵；$\boldsymbol{C}_{\mathrm{RB}}{}^{(1)}(\boldsymbol{v}_1) + \boldsymbol{C}_{\mathrm{A}}{}^{(1)}(\boldsymbol{v}_{1\text{-r}})$为科氏向心力系数矩阵；$\boldsymbol{D}^{(1)}(\boldsymbol{v}_{1\text{-r}})$为水面船体的阻尼系数矩阵；$\boldsymbol{g}^{(1)}(\boldsymbol{\eta}_1)$为水面浮体的重力−浮力矩阵；$\tau_{1\text{-tether}}$为柔性脐带缆对水面浮体的拉力；$\boldsymbol{\tau}_{\mathrm{wave}}$为基于水动力计算软件求得的波浪力；$F_s$为风帆的气动力。

风帆在 z 方向产生的作用力为 0，同时为了简化模型，将水面浮体四自由度运动模型分解为 xoy 平面的三自由度运动模型和 z 方向上的波频运动模型[3]。

简化后的水面浮体在xoy平面三自由度动力学方程可表示为

$$\left[\boldsymbol{M}_{\mathrm{RB}}{}^{(1)} + \boldsymbol{A}^{(1)}\right]\dot{\boldsymbol{v}}_1 + \boldsymbol{C}_{\mathrm{RB}}{}^{(1)}(\boldsymbol{v}_1)\boldsymbol{v}_1 + \boldsymbol{C}_{\mathrm{A}}{}^{(1)}(\boldsymbol{v}_{1\text{-r}})\boldsymbol{v}_{1\text{-r}} + \boldsymbol{D}^{(1)}(\boldsymbol{v}_{1\text{-r}})\boldsymbol{v}_{1\text{-r}} = \tau_{1\text{-tether}} + \tau_{\mathrm{wave}} + F_{\mathrm{s}} \tag{5}$$

风帆作用在浮体上的作用力与航行速度和风向角的关系如图 7 所示。

图 7 中，$\vec{\boldsymbol{V}}_x$为波浪滑翔机航行速度矢量，$\vec{\boldsymbol{V}}_{\mathrm{tw}}$为真实来风，$\vec{\boldsymbol{V}}_{\mathrm{aw}} = \vec{\boldsymbol{V}}_{\mathrm{tw}} - \vec{\boldsymbol{V}}_x$为相对来风，$\vec{\boldsymbol{V}}_{\mathrm{aw}}$与翼帆弦线的夹角$\alpha_{\mathrm{t}}$为相对攻角，风帆产生的升力和阻力分别为

$$F_{\mathrm{L}} = \frac{1}{2}\rho A V_{\mathrm{aw}}{}^2 \cdot C_{\mathrm{L}} \tag{6}$$

$$F_{\mathrm{D}} = \frac{1}{2}\rho A V_{\mathrm{aw}}{}^2 \cdot C_{\mathrm{D}} \tag{7}$$

式中：C_{L}根据数值模拟求解的升力系数曲线插值得到，C_{D}根据数值模拟求解的阻力系数曲线插值得到；A 为风帆迎风面积；ρ为空气密度。

xoy 平面上风帆对水面浮体的作用力为

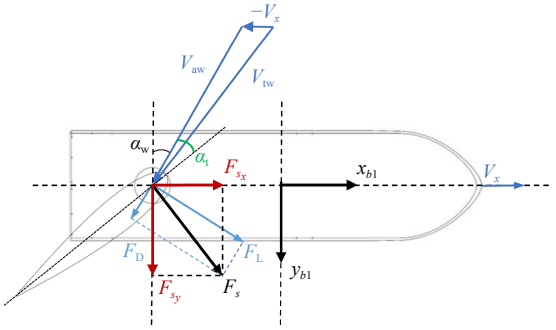


图 7　风帆推力图

Fig.7　Sail thrust

$$F_{\mathrm{s}}=\begin{bmatrix}F_{\mathrm{s}_x}\\F_{\mathrm{s}_y}\\M_{\mathrm{s}_z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}F_{\mathrm{L}}\cos\alpha_{\mathrm{w}}-F_{\mathrm{D}}\sin\alpha_{\mathrm{w}}\\F_{\mathrm{L}}\sin\alpha_{\mathrm{w}}+F_{\mathrm{D}}\cos\alpha_{\mathrm{w}}\\-(F_{\mathrm{L}}\sin\alpha_{\mathrm{w}}+F_{\mathrm{D}}\cos\alpha_{\mathrm{w}})\cdot L_{\mathrm{op}}\end{bmatrix} \tag{8}$$

式中: α_{w}为相对来风$\overrightarrow{\boldsymbol{V}_{\mathrm{aw}}}$与水面浮体$y$轴的夹角, L_{op}为风帆推力的作用点与水面浮体质心位置的纵向距离。

船体尾部挡流板在航行过程中起到增加航向稳定性、抵消横向偏移和偏航的作用。本研究重点关注风浪协同驱动下波浪滑翔机在前进方向的航速特性、动力特性以及双体结构耦合响应关系, 横向响应暂不做研究。

水面浮体在垂荡方向上的波频运动方程可以表示为

$$[m_1+A(\omega_{\mathrm{heave}})]\ddot{z}+[B(\omega_{\mathrm{heave}})]\dot{z}+\rho_{\mathrm{water}}gA_{\mathrm{wp}}z=\tau_{\mathrm{wF}}+\tau_{z\text{-tether}} \tag{9}$$

式中: m_1为水面浮体的质量; ω_{heave}为水面浮体在垂荡方向的固有频率; $A(\omega_{\mathrm{heave}})$为该固有频率下垂荡方向的附加质量; $B(\omega_{\mathrm{heave}})$为该固有频率下的阻尼; ρ_{water}为水的密度; A_{wp}为水线面面积; τ_{wF}为一阶波浪力在垂荡方向的分量; $\tau_{z\text{-tether}}$为柔性脐带缆对水面浮体的拉力在垂荡方向的分量。

该模型是一个二阶质量−阻尼−弹簧系统, 其主频为固有频率, 垂荡运动恒频模型取其固有频率

$$\omega_{\mathrm{heave}}=\sqrt{\frac{\rho gA_{\mathrm{wp}}}{m_1+A(\omega_{\mathrm{heave}})}} \tag{10}$$

式中: g取重力加速度。

水下牵引机的纵荡、横荡、垂荡及艏摇四自由度动力学方程如下

$$\left[\boldsymbol{M}^{(2)}{}_{\mathrm{RB}}+\boldsymbol{A}^{(2)}\right]\dot{\boldsymbol{v}}_2+[\boldsymbol{C}^{(2)}{}_{\mathrm{RB}}(\boldsymbol{v}_2)+\boldsymbol{C}^{(2)}{}_{\mathrm{A}}(\boldsymbol{v}_2)]\boldsymbol{v}_2+\boldsymbol{D}^{(2)}(\boldsymbol{v}_{2\text{-r}})\boldsymbol{v}_{2\text{-r}}+\boldsymbol{g}^{(2)}(\boldsymbol{\eta}_2)=\boldsymbol{\tau}_{2\text{-tether}}+\boldsymbol{F}_{\mathrm{h}} \tag{11}$$

式中: v_2为水下牵引机的速度, $\boldsymbol{M}^{(2)}{}_{\mathrm{RB}}+\boldsymbol{A}^{(2)}$为水下牵引机的刚体惯性矩阵和附加质量矩阵; $\boldsymbol{C}^{(2)}{}_{\mathrm{RB}}(\boldsymbol{v}_2)+\boldsymbol{C}^{(2)}{}_{\mathrm{A}}(\boldsymbol{v}_2)$为水下牵引机的科氏向心力系数矩阵; $\boldsymbol{D}^{(2)}(\boldsymbol{v}_{2\text{-r}})$为水下牵引机的阻尼系数矩阵; $\boldsymbol{g}^{(2)}(\boldsymbol{\eta}_2)$为水下牵引机重力−浮力矩阵; $\boldsymbol{\tau}_{2\text{-tether}}$为柔性脐带缆对水下牵引机的拉力; $\boldsymbol{F}_{\mathrm{h}}$代表串列水翼产生的水动力, 其表达式为

$$\boldsymbol{F}_{\mathrm{h}}=\begin{bmatrix}F_{\mathrm{h}_x}\\F_{\mathrm{h}_y}\\F_{\mathrm{h}_z}\\M_{\mathrm{h}_z}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}C_x\rho_{\mathrm{water}}V_2^2\\0\\C_z\rho_{\mathrm{water}}V_2^2\\0\end{bmatrix} \tag{12}$$

式中: F_{h_x}为串列水翼在x方向上的水动力, C_x为通过水下牵引机水动力试验得到的x方向的水动力系数; F_{h_z}为串列水翼在z方向上的水动力, C_z为通过水下牵引机水动力试验得到的z方向的水动力系数[16]。串列水翼在横荡和艏摇方向的作用力为0。V_2为水下牵引机的前进速度。

柔性脐带缆可简化为高刚度的弹簧模型, 其张力通过水面浮体和水下牵引机的相对位置计算, 并进一步分解为xoy平面内分量和z方向分量作用于两者[3]。

水下牵引机共包含6组串列水翼, 其中单个水翼的基本参数如图8所示。

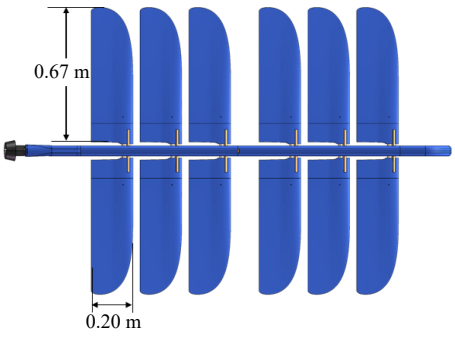


图8 水翼基本结构参数

Fig.8 Main parameters of the hydrofoil

3 风浪协同驱动效应仿真分析

基于所建立的波浪滑翔机风浪协同驱动动力学模型, 对波浪滑翔机在不同海况下的运动特性进行分析。分析内容主要包括以下几个方面: 风浪协同驱动下航速提升效果; 风帆与水翼的推力耦合影响机制; 风浪协同驱动下双体结构的运动响应关系。鉴于传统波浪滑翔机在低海况下航行速度慢、难以抵

抗海流作用、机动性较差等不足尤为显著，本文将分别模拟 1 级、2 级和 3 级海况下不同风速条件对波浪滑翔机运动特性的影响。波浪参数及风速对应选取为 1、2、3 级海况下常见的浪高与风速范围，具体参数如表 4 所示。

由于波浪滑翔机左右舷对称，因此风浪角度设置为 0°~180°，其中 0°顺风顺浪，180°逆风逆浪，风浪同向。

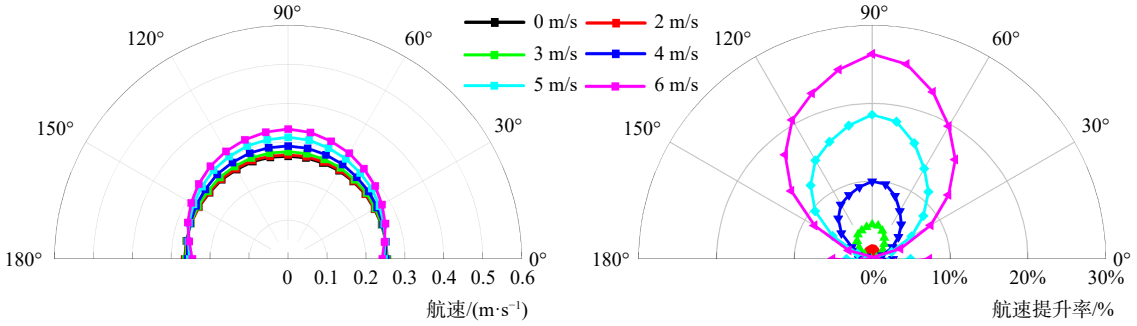
表 4　模拟环境条件

Tab.4　Simulated environmental conditions

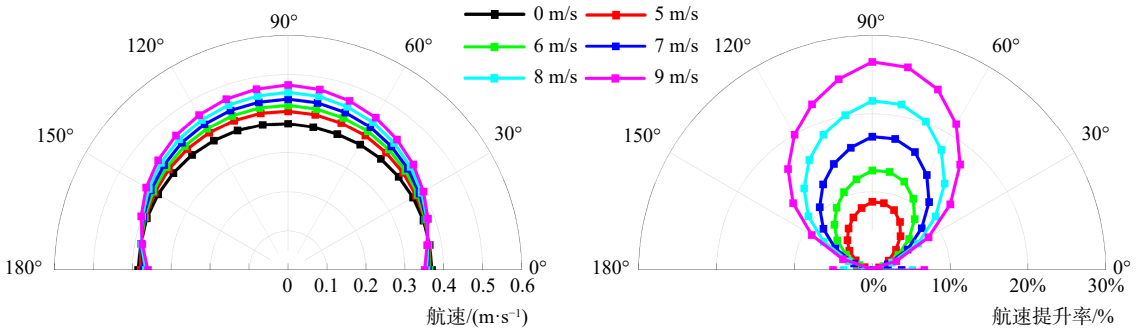
海况/单位	#1	#2	#3
波高 /m	0.2	0.5	1
波频 /（rad·s^{-1}）	1.5	1	0.76
风速范围 /（m·s^{-1}）	2~6	5~9	7~11

3.1 风浪协同驱动下航速性能

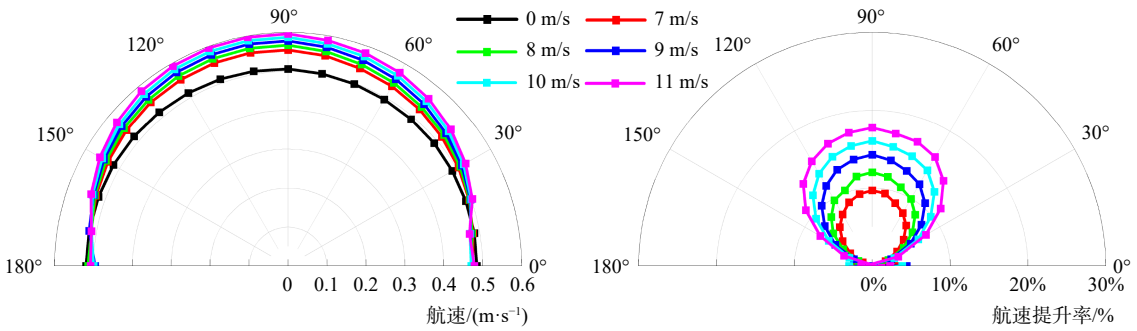
风帆协同推进波浪滑翔机的核心目标是提升其航速。为此，本文分别在三种不同海况下，模拟了不同风速、风向和不同浪高、浪向条件下波浪滑翔机的航速表现，并与未配备风帆系统时纯波浪驱动下的航速进行了对比分析。通过计算航速提升率，评估风浪协同驱动下的航速优化效果。三种海况下的航速表现与提升效果如图 9 所示，其中航速为仿真时段内的平均速度，风速 0 m/s 代表纯波浪驱动，航速提升率定义为风浪协同驱动下航速相对于纯波浪驱动航速的提升百分比。



（a）1级海况下航速与航速提升率



（b）2级海况下航速与航速提升率



（c）3级海况下航速与航速提升率

图 9　航速与航速提升率

Fig.9　Speed and enhancement rate

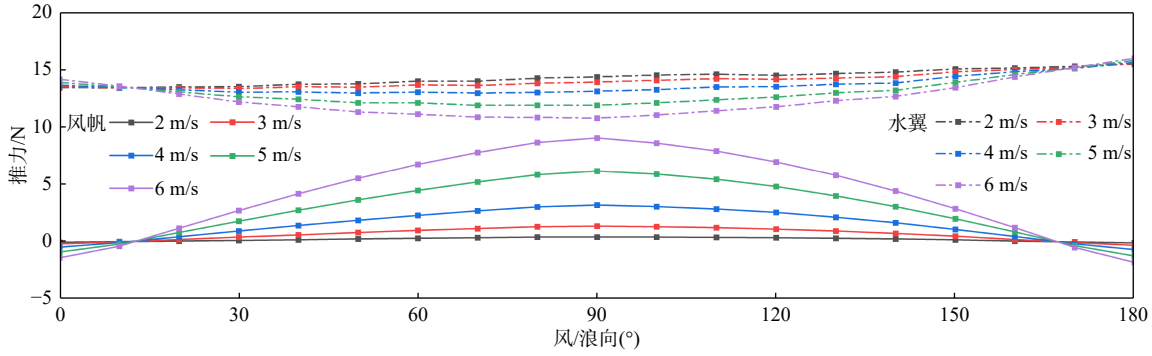
研究结果表明，风浪协同推进对波浪滑翔机航速的提升不仅依赖于风速，更受到风向的直接影响。在相同风速条件下，横风作用时航速提升最为显著，这是由于在该风向条件下，风帆所产生的升力能够最大程度地转化为有效推进力。在本研究所采用的风帆和水翼设计参数及模拟海况环境条件下，1、2级海况横风作用时风帆协同驱动波浪滑翔机的最大航速提升可达25%~28%。然而，在3级海况下，由于波浪滑翔机依靠波浪能驱动已能获得较优的航速表现，风帆协同驱动的增益效果相较于低海况有所减弱，但最大仍可提供约15%的航速提升。

在横风作用范围之外，风浪协同驱动下的航速随风向逐渐偏离横风方向而降低，风帆协同推进的增益效果也相应减弱。当风向进入30°顺风或逆风范围内时，风帆协同推进对航速提升效果显著降低，且在15°逆风和顺风角度下航速约降低3%~5%。上述研究结果初步揭示了风帆协同推进在不同环境条件下对航速提升的作用，并明确了风帆推进系统的有效性受风向约束的特点。基于以上结论，在实际航行过程中，合理规划航行路径，规避完全顺风和逆风，并充分利用横风条件，可显著提升风帆协同推进波浪滑翔机的航速性能。

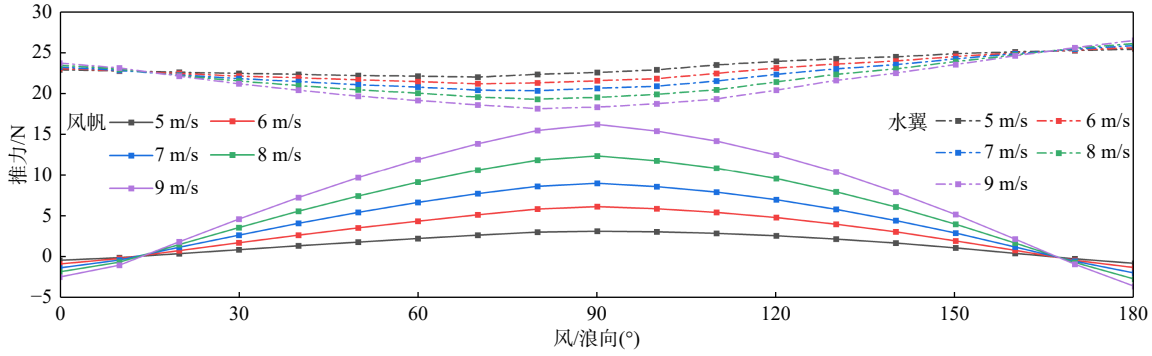
3.2 风帆与水翼推力对比

水翼–风帆混合驱动系统构成风浪协同驱动的核心动力来源，其中水翼作为波浪能转化模块，风帆则作为风能转化模块，两者通过协同作用实现整体的持续前进与动力优化。本节基于构建的多体动力学模型，对比分析风帆与水翼的平均推进力，初步评估两种动力源的推进贡献，初步揭示其协同工作机制。风帆与水翼的平均推力如图10所示。

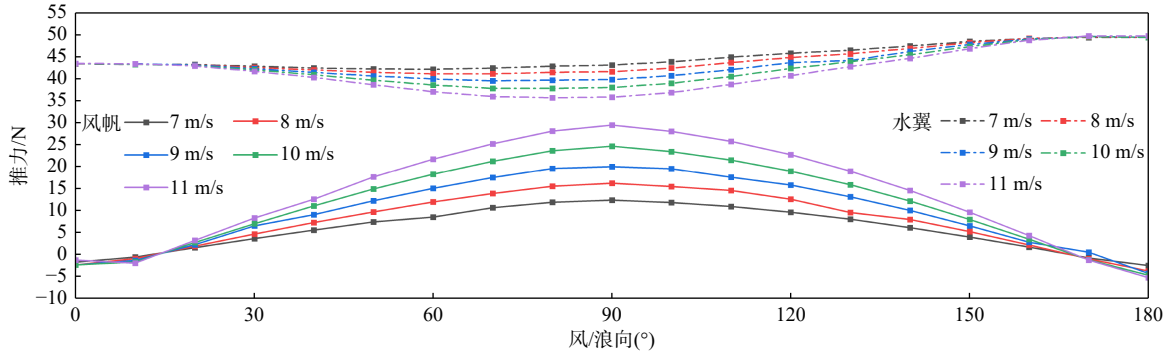
图10展示了不同风浪条件下风帆与水翼的平均推力对比情况。结果表明，风帆推力与航速呈现一致的变化趋势，在横风条件下推力达到最大值，并随着风向偏离横风方向逐渐减小，在15°以内的顺风和逆风条件下推力出现负值。进一步分析发现，相同迎风迎浪角度下，风速的增加导致水翼推力略有下降，但风帆与水翼的总推力显著提升。以3种海况下的最大横风工况为例：1级海况下水翼推力下降约27%，总推力增加约50%；2级海况下水翼推力下降约18%，总推力增加约33%；3级海况下水翼推力下降约17%，总推力增加约18%。上述结果表明，风帆协同驱动波浪滑翔机可显著提升系统的总体推进性能，特别是在横风条件下效果最为突出。



（a）1级海况下风帆与水翼平均推力



（b）2级海况下风帆与水翼平均推力



（c）3级海况下风帆与水翼推力

图 10　风帆与水翼平均推力

Fig.10　Comparison of sail and hydrofoil thrust

3.3 双体结构运动响应特征

考虑到风帆系统直接作用于水面浮体，而水下牵引机则通过柔性脐带缆向浮体传递动力，双体结构在动力响应上的耦合关系复杂，风浪协同驱动效应仍需进一步明确。因此，本节通过对风浪协同驱动条件下波浪滑翔机双体结构运动响应进行仿真分析，进一步阐明其协同驱动效应。

基于前述分析，在 90°横风条件下，风帆推力和波浪滑翔机的航速均达到最大值，此时风帆系统对水面浮体及整个双体结构的运动影响最为显著。因此，本节针对不同风速下的横向来风情形，开展风浪协同驱动波浪滑翔机双体结构运动响应的仿真分析。图 11 对比了纯波浪驱动和不同风浪环境协同驱动条件下，波浪滑翔机在航行过程中水面浮体与水下牵引机的双体运动响应关系。

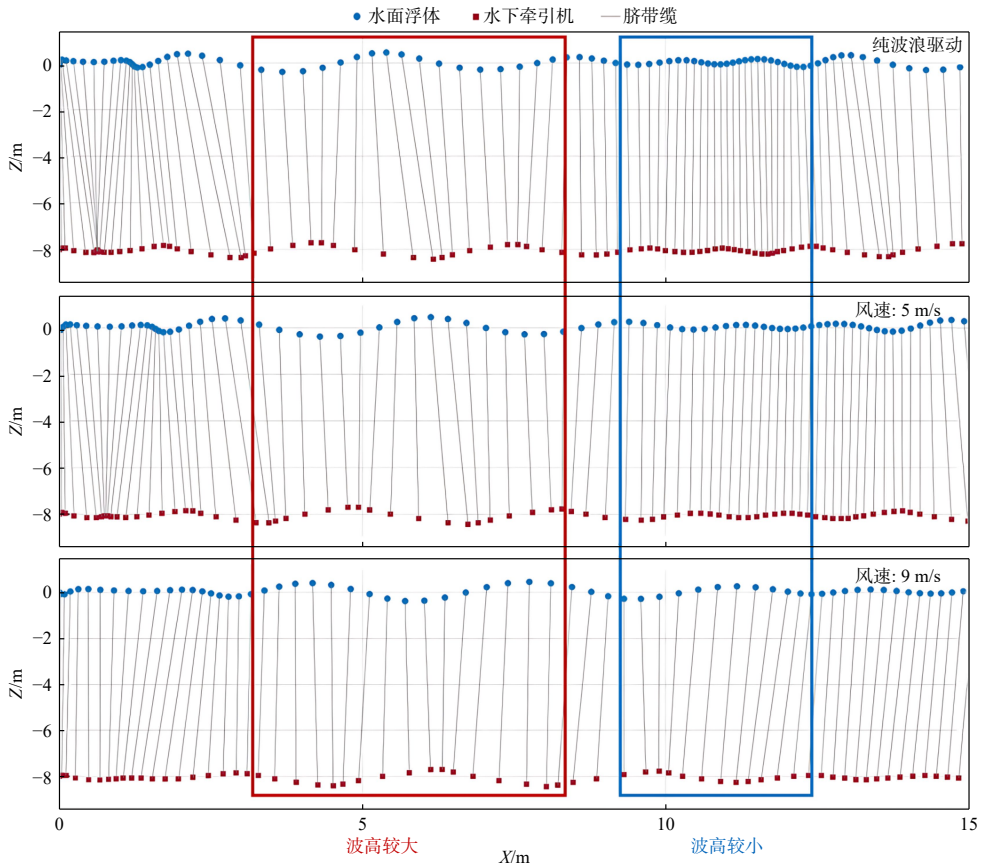


图 11　双体结构运动响应关系

Fig.11　Response relationship of floater and glider

根据图示结果分析,在无风条件下,即未引入风帆协同驱动时,水下牵引机作为动力结构通常位于浮体前方。随着风速增加,水下牵引机与浮体的相对运动模式发生变化。当风速增至 5 m/s 时,在波高较大阶段,牵引机仍作为主要动力来源主导推进过程,而在波高较小阶段,双体结构的运动逐渐趋于同步,水面浮体略有领先;当风速达到 9 m/s 时,水面浮体在整个航行过程中始终位于水下牵引机前方,风帆系统成为主导推进力来源。

上述结果表明,风浪协同驱动下波浪滑翔机双体运动响应与风浪环境之间存在强耦合特性。水下牵引机作为波浪滑翔机的航向控制结构,应保障其在推进过程中的主导地位。因此,在风帆系统的设计中需充分评估其对双体结构动力响应和航行稳定性的影响,确保波浪滑翔机在风浪协同驱动下具备良好的操控性与动力协调性。

4 结 论

本文针对波浪滑翔机的航速优化问题,提出了波浪滑翔机风−浪协同驱动方法,构建了风帆协同驱动波浪滑翔机动力学模型,并对不同环境下的风浪耦合驱动效应以及双体结构的运动响应特征进行了仿真研究,得出以下结论:

(1)1、2、3 级海况下,当风向角与航向夹角在 30°~50°之间,风帆协同驱动对波浪滑翔机的航速有提升效果。特别是在 90°横风条件下,由于风帆产生的升力方向与航行方向保持一致,风帆推进效果最优。以本文采用的风帆结构参数为例,在横风条件下,1、2 级海况下航速相较于纯波浪能驱动增加 26%~28%,3 级海况下增加 16%。然而,在完全顺风和逆风条件下航速下降约 5%。

(2)在相同迎风迎浪角度下,风速的增加导致水翼的推力略有减小,但风浪协同驱动推进系统的总推力呈明显上升趋势,其中横向来风条件下最为显著。以 2 级海况下最大风速条件为例,横向来风时水翼推力减小约 18%,而协同推进的系统总推力增加约 33%。风帆推进系统的引入增强了整体的推进性能,特别在横风条件下表现出更优的增益效果。

(3)在风浪协同驱动模式下,波浪滑翔机双体结构动力响应呈现出与风浪环境的强耦合特性。 风速较低或波高较大时,水下牵引机仍为主要动力来源;而在风速较高或波浪激励减弱的条件下,风帆系统推进的贡献显著增强,逐渐成为主导推进力来源,对波浪滑翔机航向控制性能会产生潜在影响。

本文基于特定形状与尺寸的风帆开展了风帆协同驱动波浪滑翔机的运动性能研究,揭示了风浪协同驱动下波浪滑翔机多体结构耦合运动响应特性及不同风浪环境条件下的协同驱动效应,初步验证了该协同驱动方式的可行性。需要指出的是,本文重点关注风帆辅助推进对纵向航行性能的影响,暂未考虑风帆引起的横向偏移、横摇、纵摇及其耦合动力学响应。后续将进一步围绕风帆尺寸优化设计、风帆高效控制策略、风浪协同驱动下波浪滑翔机航向控制稳定性及复杂姿态耦合运动响应开展深入研究。

参 考 文 献:

[1] Manley J, Willcox S. The wave glider: A persistent platform for ocean science[C]//OCEANS'10 IEEE SYDNEY. IEEE, 2010.

[2] Liu F, Chang Z Z, Zhang S, et al. The maneuverability analysis of the wave glider with a propeller-rudder system[J]. Ocean Engineering, 2024, 294: 116782.

[3] Wang P, Tian X L, Lu W Y, et al. Dynamic modeling and simulations of the wave glider[J]. Applied Mathematical Modelling, 2019, 66: 77–96.

[4] Sun X J, Ma S Y, Sang H Q, et al. Research on the propulsion performance of spring-hydrofoil mechanism of the wave glider[J]. Ocean Engineering, 2022, 266: 112709.

[5] Qi Z F, Xing Z W, Qian Y N, et al. The propulsion performance of the semi-active tandem flapping foils for wave gliders: A study on vortex interactions and hydrodynamic performance[J]. Ocean Engineering, 2024, 305: 117981.

[6] Feng Z X, Wang H B, Jiang L, et al. Dynamic performance of wave glider based on restoring spring stiffness design under irregular wave condition[J]. Ocean Engineering, 2025, 323: 120551.

[7] Ma S Y, Sun X J, Li C, et al. Effect of passive pitching in the wave glider's submerged glider on tandem hydrofoil propulsion performance[J]. Ocean Engineering, 2025, 319: 120271.

[8] Kessel R. How sea-wave spectra naturally limit the speed of wave gliders[R]. Seamount Analytics, Ottawa, 2019.

[9] Voosen P. Saildrone fleet could help replace aging buoys[J]. Science, 2018, 359(6380): 1082–1083.

[10] Jia C, Minnett P J, Luo B. Significant diurnal warming events observed by Saildrone at high latitudes[J]. Journal of Geophysical Research: Oceans, 2023, 128(1): e2022JC019368.

[11] Inal O B, Charpentier J F, Deniz C. Hybrid power and propulsion systems for ships: Current status and future challenges[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 156: 111965.

[12] 俞建成, 孙朝阳, 张艾群. 无人帆船研究现状与展望[J]. 机械工程学报, 2018, 54(24): 98–110.
Yu J C, Sun Z Y, Zhang A Q. Research status and prospect of autonomous sailboats[J]. Research Status and Prospect of Autonomous Sailboats, 2018, 54(24): 98–110. (in Chinese)

[13] 李森茂, 管殿柱, 夏　涛, 等. 基于 CFD 的无人帆船襟翼帆空气动力研究[J]. 船舶工程, 2022, 44(3): 67–72+144.
Li S M, Guan D Z, Xia T, et al. Research on aerodynamics of flap sail for unmanned sailboat based on CFD[J]. Ship Engineering, 2022, 44(3): 67–72+144. (in Chinese)

[14] 史俊武, 丁　晨, 刘爱兵, 等. 基于 CFD 的直翼推进器水动力性能研究及参数影响分析[J]. 船舶力学, 2021, 25(2): 183–192.
Shi J W, Ding C, Liu A B, et al. Hydrodynamic performance research and parameter effect analysis for cycloidal propellers based on CFD[J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(2): 183–192. (in Chinese)

[15] Guo H P, Li G N, Zou Z J, et al. Numerical simulation of the flow around NACA0018 airfoil at high incidences by using RANS and DES methods[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(7): 847.

[16] Liu R R, Tian X L, Wang P, et al. Experimental-based hydrodynamic simulation of submarine glider for wave gliders[J]. Applied Ocean Research, 2024, 153: 104224.