

文章编号: 1007-7294(2026)01-0021-11

船用翼伞助航系统动力学建模与仿真

张思宇¹, 于发亭¹, 卢金树¹, 李岩军²

(1. 浙江海洋大学 船舶与海运学院, 浙江 舟山 316022; 2. 南京航空航天大学 飞行器环境控制与生命保障工信部重点实验室, 南京 210016)

摘要: 翼伞作为可操纵柔性飞行器, 具有气动性能好、质量轻、包装体积小等优点。本文引入柔性翼伞加装于船舶, 通过系留翼伞滞空飞行、利用高空强劲风能作为船舶辅助动力。基于牛顿-欧拉定律, 建立翼伞升空段、助航段纵向平面内的动力学模型, 并采用四阶龙格-库塔方法开展升空和助航两过程的仿真计算。结果表明: 在升空段, 当系留绳伸长速度过慢时, 伞绳拉力过大, 当伸长速度过快时, 翼伞难以顺利升空, 因此, 在升空过程存在系留绳安全伸长速度区间为 1~2 m/s, 在安全区间内, 系留绳伸长速度越快, 翼伞升空越快, 轨迹越平缓, 伞绳拉力和翼伞攻角越小; 在助航段, 滞空高度越高, 翼伞面积和攻角越大时, 翼伞助航效果越好, 助航翼伞安全工作攻角范围远大于空投翼伞。

关键词: 翼伞助航; 动力学; 风能; 绿色船舶

中图分类号: V244.4 TK89 U661.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1007-7294.2026.01.003

Dynamics modeling and simulation of parafoil-assisted ship propulsion system

ZHANG Si-yu¹, YU Fa-ting¹, LU Jin-shu¹, LI Yan-jun²

(1. School of Naval Architecture and Maritime, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China; 2. Key Laboratory of Aircraft Environment Control and Life Support, MIIT, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: As a maneuverable flexible aircraft, the parafoil has the advantages of superior aerodynamic performance, lightweight and small packing volume. The flexible tethered parafoil on a ship employs strong wind energy as an auxiliary propulsion power during high-altitude hover flights. The dynamic models in the longitudinal plane for the lift-off and the flight-assisting phases were established based on Newton-Euler's law. The simulation calculations for these two processes were carried out using the fourth-order Runge-Kutta method. The findings demonstrate that the tension of the tethered rope is excessive when the rope elongates too slowly during the lift-off phase. Furthermore, it becomes challenging for the parafoil to achieve a smooth take-off when the rope elongates too fast. Therefore, there exists a safe elongation velocity range of 1-2 m/s for the tethered rope during the lift-off phase. When operating within the safe velocity range, the faster the tethered rope elongates, the faster the parafoil lifts off, the smoother the trajectory is, and the smaller the tension and the angle of attack are. In the flight-assisting phase, parafoil-assisted propulsion's effectiveness is found to be positively correlated with the hovering height, the parafoil area, and the angle of attack. Besides, the range of safe operational angles of attack for a propulsion parafoil is considerably broader than that of an

收稿日期: 2025-07-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52501406); 浙江省自然科学基金(LQN25E090006); 173 重点基础研究项目; 航天进入减速与着陆技术实验室开放基金(EDL19092408)

作者简介: 张思宇(1995-), 男, 博士, 讲师; 卢金树(1974-), 男, 博士, 教授, 通讯作者, E-mail: ljs_ljs@zjou.edu.cn。

airdrop parafoil.

Key words: parafoil-assisted; dynamics; wind energy; green ship

0 引言

随着全球能源日趋短缺和温室效应增强,为实现“双碳”愿景,《船舶制造业绿色发展行动纲要(2024–2030年)》提出要加快风力助航等船用节能低碳技术的研发应用。传统风力助航系统主要采用帆^[1–2]、转筒风帆^[3]和翼型风帆^[4–5]等结构。本文引入柔性翼伞加装于船舶,柔性翼伞作为可操纵柔性飞行器^[6–7],在流场作用下可形成良好的气动外形,借助风力长期滞空,有效利用高空稳定而强劲的风力作为船舶辅助动力,其不工作时可以收拢折叠,且包装体积小、重量轻、无需占用大面积甲板空间等优点,便于现有船舶加装改造^[8]。因此,船用翼伞助航系统是未来利用高空风能、实现低碳航行的重要新装置,其设计应用具有重要的战略意义。当前世界具有代表性的翼伞助航系统有欧洲 Airseas^[9]和 SkySails^[24]两种(如图1所示),但尚未正式投入商业使用,而我国仍处于起步阶段。

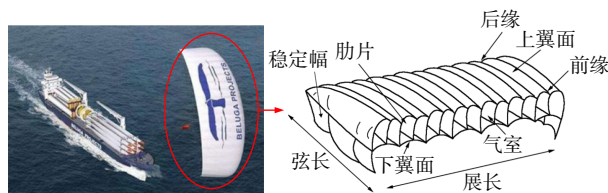


图1 船用翼伞助航系统

Fig.1 Parafoil-assisted ship system

当前针对翼伞助航系统的动力学研究较少,大多集中于空投翼伞滑翔降落过程。李宇辉等^[10]利用翼伞系统质点模型,考虑复杂环境下航迹规划问题提出组合式航迹规划方法;杨华等^[11]忽略伞绳质量建立小型动力翼伞纵向4自由度动力学模型,提出新的降落操纵方式;朱虹等^[12–14]通过提升气动参数的准确性,进而改进了6自由度动力学模型;胡文治等^[15]建立翼伞系统9自由度动力学模型,分析了翼伞攻角、空投物阻力特征等对翼伞飞行的影响;OCHI^[16]、杨海鹏^[17]、周洪森等^[18]学者基于9自由度模型研究了翼伞系统的转弯运动特性;Vishniak^[19]在将翼伞和载荷视作两个刚体基础上考虑中间连接绳的弹性,建立翼伞系统12自由度非线性动力学模型,对翼伞系统的滑翔、转弯、减速和降落进行仿真分析。

助航翼伞主体结构与空投翼伞相似,但二者工作特点明显不同。首先,助航翼伞面积通常更大,因此其滞空性更强;其次,助航翼伞为系留系统,因此其滞空飞行过程与翼伞空投系统滑翔过程的动力学特性差异较大;此外,空投翼伞主要是利用翼伞的高升阻比特性实现滑翔、操作,而助航翼伞助航系统更多是利用翼伞产生的气动阻力作为船舶前进的辅助动力,同时依赖气动升力抵消重力影响以实现滞空飞行。

当前关于翼伞助航动力学研究主要集中在滞空飞行时的助航性能方面。Fagianio等^[20]采用系统的数学模型和有效的非线性模型预测控制规律对动态翼伞助航性能进行研究;Dadd等^[21]采用零质量模型对八字飞行的动态翼伞轨迹进行仿真,并与实验数据进行比较;Leloup等^[22]采用零质量模型对动态翼伞和静态翼伞节能效果进行对比并得出结论,当风速与船速夹角小于 50° 时,静态翼伞对船舶助航效果更好;Formosa等^[23]采用考虑伞绳质量而忽略翼伞质量的静态翼伞数值模型,对翼伞面积和风速对翼伞动力学性能影响进行理论评估。遗憾的是,上述研究未涉及翼伞升空段动力学研究,且尚未完整建立翼伞助航过程的动力学模型;在研究中采用零质量模型,忽略了翼伞和伞绳质量对助航特性的影响。

为实现翼伞助航系统工作过程的动力学仿真,本文分别针对翼伞升空段和风能助航段建立动力学模型,基于四阶龙格–库塔方法求解,通过计算结果与文献对比,验证本文模型的准确性。针对翼伞升空段,开展系留绳不同伸长速度对翼伞上升特性的影响研究;在风能助航段,获得翼伞高度、攻角、面积等参数对翼伞助航性能的影响规律。本文计算结果可为我国未来船用翼伞助航系统的工程应用提供技术参考。

1 翼伞助航系统动力学模型

在翼伞助航系统工作过程中,翼伞在高空风作用下滞空飞行,产生的气动力通过系留绳带动船舶前行,该过程主要在纵向平面内运动,二者的受力情况如图 2 所示。其中,取船头与绳连接处为坐标原点,船舶前进水平方向为 X 轴,竖直向上为 Y 轴; w 为风速; v 为翼伞空速; F_{line} 为系留绳对翼伞拉力;不计系留绳所受气动升力, F_L 是翼伞升力; F_D 是翼伞和系留绳构成的系统所受阻; G_s 为翼伞和伞绳重力; θ 为翼伞俯仰角; η 为风相对翼伞速度与坐标系 OX 轴夹角; α 为翼伞攻角; β 为系留绳与坐标系 OX 轴夹角; F_f 为船舶所受浮力; G_c 为船舶重力; f 为船舶所受水阻力; F_p 为船舶主机提供的推力。

1.1 翼伞升空段

翼伞升空过程如图 3 所示^[24]。针对翼伞升空段建立牵引动力学模型,在建模过程中作出如下基本假设:

- (1) 平面大地假设;
- (2) 翼伞升空过程处于充满状态;
- (3) 翼伞处于力矩平衡状态,力矩平衡点为翼伞质心,翼伞所受到的气动力、重力、系留绳的牵引力,均汇交于翼伞质心;
- (4) 翼伞具备足够的航向静稳度,忽略侧滑角影响,俯仰角取 10° ;
- (5) 翼伞升空阶段假设船舶水平方向受力平衡。

基于地面坐标系,根据牛顿-欧拉定律建立升空段翼伞动力学模型

$$\begin{cases} m \frac{d^2 x}{dt^2} = F_D \cos \eta + F_L \sin \eta - F_{\text{line}} \cos \beta \\ m \frac{d^2 y}{dt^2} = F_L \cos \eta - F_D \sin \eta - F_{\text{line}} \sin \beta - \bar{m}g \end{cases} \quad (1)$$

其中, g 为重力加速度;不计系留绳所受气动升力, F_L 是翼伞升力; F_D 是翼伞和系留绳构成的系统所受阻; x 、 y 分别对应翼伞相对船头牵引装置的水平、竖直距离。

在图 3 中,角度 β 、 η 、 α 、 θ 满足以下关系

$$\begin{cases} \eta = \arcsin\left(\frac{v_y}{v}\right) \\ \alpha = \theta - \eta \\ \beta = \arcsin\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + y^2}}\right) \end{cases} \quad (2)$$

其中, v_y 为翼伞相对空气竖直速度。

针对翼伞助航系统,系留绳一端连接着翼伞,另一端连接船舶。由于系留绳是柔性体,本文对系留绳和翼伞系统质量进行近似处理^[25]:系统重力的计算采用重力质量 $\bar{m}$;系统运动状态变化的质量使用惯性质量 m 。两种形式计算如下

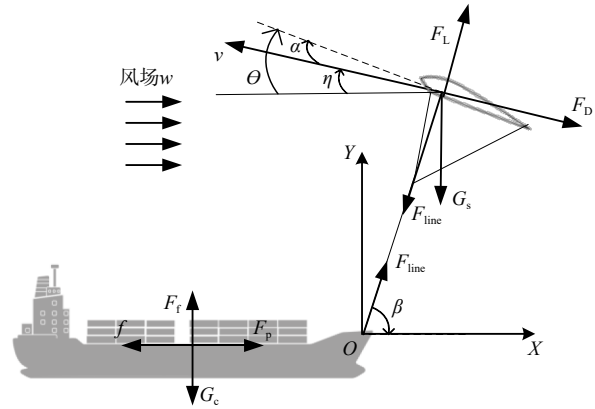


图 2 船舶-翼伞系统受力分析

Fig.2 Force analysis of ship-parafoil system



图 3 翼伞升空过程

Fig.3 Ascent process of the parafoil

$$\begin{cases} \bar{m} = m_s + \frac{m_{\text{line}}}{2} \\ m = m_s + \frac{m_{\text{line}}}{3} \end{cases} \quad (3)$$

其中, m_s 为船的质量; $m_{\text{line}} = d_{\text{cc}}^2 \pi (r_t + nl) \rho_c / 4$ 为系留绳质量, 与系留绳长度有关, r_t 为 t 时刻系留绳长度; d_{cc} 为系留绳直径; n 为伞绳数量; l 为伞绳长度; ρ_c 为系留绳密度。系留绳拉力为

$$F_{\text{line}} = F_D \cos(\beta + \eta) + F_L \sin(\beta + \eta) - \bar{m} g \sin \beta + \frac{\left(\frac{dx}{dt} - \frac{dr_x}{dt} \right)^2 + \left(\frac{dy}{dt} - \frac{dr_y}{dt} \right)^2}{r} m \quad (4)$$

其中, $r = r_t + l$ 为 t 时刻翼伞到舰面牵引电机距离; $\frac{dr_x}{dt}$ 、 $\frac{dr_y}{dt}$ 分别为系留绳速度在地面坐标系两个坐标轴方向分量的大小, 具体为

$$\begin{cases} \frac{dr_x}{dt} = v_r \cdot \cos \beta \\ \frac{dr_y}{dt} = v_r \cdot \sin \beta \end{cases} \quad (5)$$

其中, v_r 为系留绳伸长速度。

1.2 风能助航段

在翼伞辅助船舶前进过程中, 假设系留绳长度不变, 处于张紧状态, 船舶在翼伞和发动机的共同作用下前进, 该过程中风相对翼伞速度与大地坐标系 OX 轴夹角 η 为 0。

建立风能助航段的俯视图, 如图 4 所示, 以船舶前进方向为 x 轴, 水平面内垂直船中轴线为 z 轴, 船舶前进方向与风向之间夹角为风偏角, 记为 γ 。

由于翼伞产生升力与船舶自重差距很大, 所以忽略翼伞升力对船舶浮态的影响。基于地面坐标系, 根据牛顿-欧拉定律可得

$$\begin{cases} (m + m_c) \frac{d^2 x}{dt^2} = F_D \cos \gamma + F_p - f \\ (m + m_c) \frac{d^2 z}{dt^2} = F_D \sin \gamma - f' \end{cases} \quad (6)$$

其中, f 为船舶前进受到的水的阻力, f' 为船舶受到横向阻力, m_c 为船的质量, F_p 为船舶主机提供的推力。

根据方形系数得到船舶质量

$$m_c = B d_c L C_B \rho_s \quad (7)$$

其中, B 为船宽, d_c 为船吃水深度, L 为水线长, C_B 为方形系数, ρ_s 为海水密度。

无翼伞船舶发动机提供的推力为 $F_p = f$, 船舶主机功率 P 和船舶发动机提供的推进功率 P' 为

$$\begin{cases} P' = F_p \cdot v_c \\ P = P' / k \end{cases} \quad (8)$$

其中, k 为主机推进效率, v_c 为船速。

1.3 海面风场模型

本文采用指数律公式进行风速计算^[26-27], 如图 5 所示。风速廓线指数律公式为

$$w = w_0 \left(\frac{h}{h_0} \right)^\mu \quad (9)$$

其中, w_0 为参考风速; h 为高度; h_0 为参考高度; μ 为稳定度参数, 取值为 1/7。

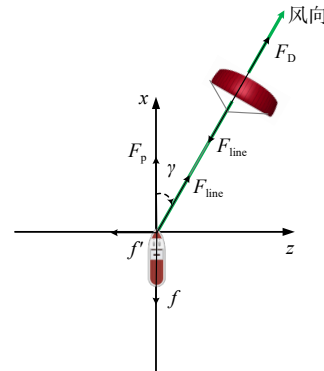


图4 风能助航过程的俯视图

Fig.4 Top view of wind assisted navigation process

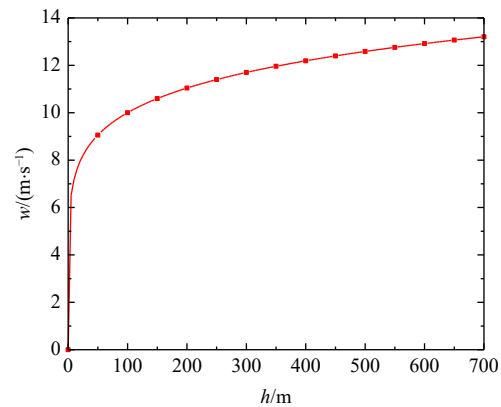


图5 海上风速分布

Fig.5 Distribution of offshore wind

1.4 风场下的翼伞气动力模型

翼伞气动力与空速相关,受风场影响很大。空速、绝对运动速度、风速满足速度矢量三角形关系,本文假设风场为水平方向,则存在以下关系

$$\begin{cases} v_x = \frac{dx}{dt} - w \\ v_y = \frac{dy}{dt} \\ v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2} \end{cases} \quad (10)$$

其中, v_x 为翼伞相对空气水平速度。

根据速度关系式,可以得到气象风影响下的气动力为

$$\begin{cases} F_L = \frac{1}{2} \rho_q v^2 A C_L(\alpha) \\ F_D = D_s + D_{line} \\ D_s = \frac{1}{2} \rho_q v^2 A C_D(\alpha) \\ D_{line} = \frac{C_{DC} \rho_q (r_t + nl) d_{cc}}{8} v^2 \end{cases} \quad (11)$$

其中, $C_L(\alpha)$ 、 $C_D(\alpha)$ 为翼伞的升力系数、阻力系数, ρ_q 为空气密度, A 为翼伞特征面积, D_s 是翼伞气动阻力, D_{line} 是系留绳气动阻力, C_{DC} 为系留绳气动阻力系数, $(r_t + nl) d_{cc}$ 代表系留绳特征面积。

本文研究对象根据 SkySails 翼伞系统^[28] 设计,其气动特性参数随攻角变化的规律如图 6 所示,则可以得到的气动系数为

$$C_L(\alpha) = \begin{cases} 0.47 + 0.0425\alpha & \alpha < 8^\circ \\ 0.81 & 8^\circ \leq \alpha < 25^\circ \\ 0.81 - 0.009385(\alpha - 25.0) & 25^\circ \leq \alpha < 90^\circ \end{cases} \quad (12)$$

$$C_D(\alpha) = \begin{cases} 0.12 & \alpha < 0^\circ \\ 0.12 + 0.01\alpha & 0^\circ \leq \alpha < 10^\circ \\ 0.22 + 0.012(\alpha - 10.0) & 10^\circ \leq \alpha < 20^\circ \\ 0.34 + 0.015(\alpha - 20.0) & 20^\circ \leq \alpha < 90^\circ \end{cases} \quad (13)$$

1.5 模型验证

为验证本文建立的动力学模型,以文献[28]中翼伞为对象,翼伞面积为 500 m^2 。采用四阶龙格-库塔法对本文翼伞升空段动力学方程进行数值计算,并将本文结果与文献[28]结果进行对比,如图 7 所示。可以看出,两条轨迹规律一致,平均误差为 0.53%,结果表明本文计算方法可以合理描述翼伞升空运动阶段。

对风能助航段,采用本文动力学模型计算得到稳定前进速度为 6.471 m/s ,采用经典力学平衡理论计算可得稳定前进速度为 6.418 m/s ,二者误差为 0.83%,验证了本文计算方法可以合理描述风能助航段运动。

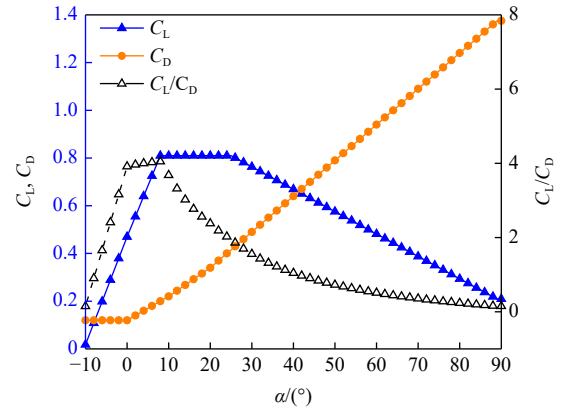


图 6 翼伞气动特性

Fig.6 Aerodynamic characteristics of the parafoil

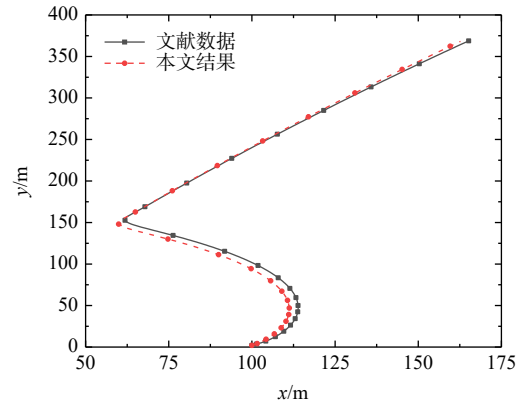


图 7 翼伞升空轨迹对比

Fig.7 Comparison of parafoil ascent trajectory

2 研究对象

本文研究采用的翼伞结构如图 8 所示。船舶采用系列 60 船舶^[23]作为研究对象,根据实验数据,系列 60 船舶总阻力与船速关系如图 9 所示。翼伞和船舶的结构参数如表 1 所示。本文翼伞飞行高度在 15~500 m 范围,假设助航过程的船舶吃水深度不变,伞绳和系留绳材质、规格等完全一样,空气密度为定值,取 1.23 kg/m^3 ,海水密度取 1025 kg/m^3 。

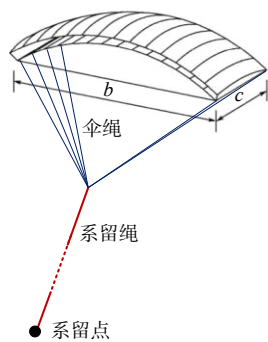


图 8 系留翼伞结构图

Fig.8 Structure of tethered parafoil

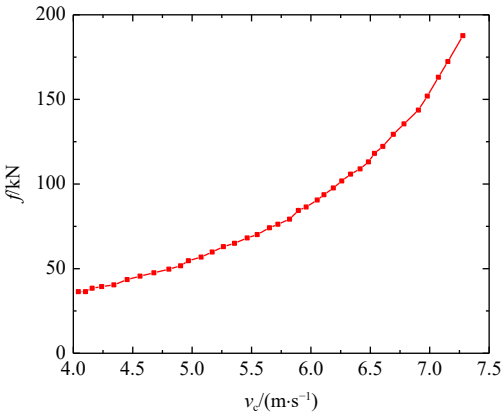


图 9 船舶阻力随航速变化

Fig.9 Range of drag at different velocities

表 1 船舶-翼伞助航系统参数

Tab.1 Parameters of the ship-parafoil system

名称	符号/单位	数值	名称	符号/单位	数值
翼伞展长	b/m	41.6	伞绳阻力系数	C_{DC}	0.04
翼伞弦长	c/m	12	伞绳密度	$\rho_c/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	370
翼伞质量	m_s/kg	50	船宽	B/m	10.75
伞绳长度	l/m	25	水线长	L/m	75.23
伞绳直径	d_{cc}/m	0.02	船吃水深度	d_c/m	3.58
伞绳数量	n	208	方形系数	C_B	0.7

3 结果与分析

3.1 翼伞升空段

在升空段,系留绳伸长速度由舰面牵引电机控制,通常为匀速伸长,本文控制翼伞升到 500 m 为滞空高度。本文针对翼伞在系留绳不同伸长速度约束下升空开展计算,范围取 0.5~4 m/s,间隔 0.5 m/s,翼伞初始位置为 $x=0\text{ m}$, $y=25\text{ m}$ 。

不同系留绳伸长速度下的翼伞轨迹如图 10 所示,可以看出,系留绳伸长速度越快,翼伞上升轨迹越平缓。当系留绳伸长速度为 4 m/s 时,翼伞无法顺利升空,这是由于系留绳伸长速度过快导致翼伞空速过小,使得气动升力小于重力,导致翼伞失速坠落。由此可得系留绳最大伸长速度为 3.5 m/s。

不同系留绳伸长速度下,翼伞的系留绳绳长、攻角与升空高度的关系分别如图 11~12 所示。可以看出,系留绳伸长速度越快,翼伞升空所需系留绳越长,与图 10 现象一致;系留绳伸长速度越快,翼伞升空后的攻角越小,结合图 6 翼伞的气动性能参数变化可知,翼伞攻角位于 $-10^{\circ}\sim 10^{\circ}$ 区间时,随着攻角减

小,其升阻比不断减小,翼伞水平方向阻力比竖直方向的气动升力更大,导致上升相同高度水平位移更大,所需绳长更多。

图 13 是翼伞升空高度随时间的变化,可以看出,系留绳伸长速度越快,翼伞更快到达指定高度。这是由于系留绳伸长速度快可以减小对翼伞束缚,使翼伞更快上升。而图 13 中系留绳以 3.5 m/s 速度伸长时上升到 500 m 高度比以 2.5 m/s 速度伸长所需时间长,因为图 11~12 中所系留绳伸长速度较大,上升到相同高度所需绳长更长,导致系统质量大、翼伞攻角小,从而导致翼伞竖直向上的升力小。然而,若使翼伞上升到更高的高度,随着空速增加,翼伞竖直上升的力不断增加,仍然呈现系留绳伸长速度越快,翼伞到达相同高度所需时间更短的规律。

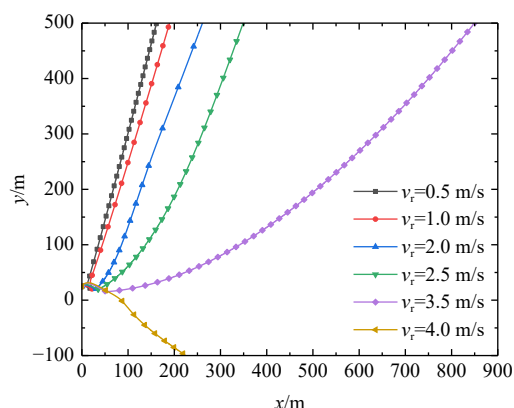


图 10 翼伞上升轨迹

Fig.10 Parafoil ascent trajectory

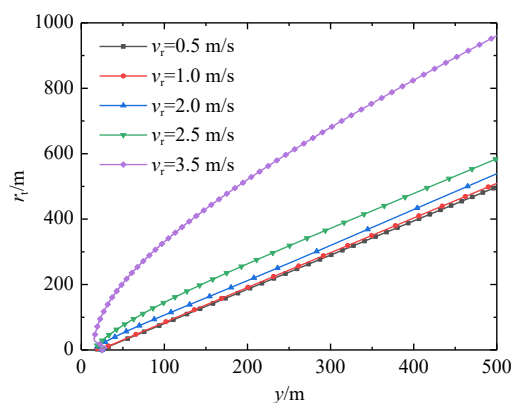


图 11 系留绳长随升空高度变化

Fig.11 Evolution of the tethered rope length over ascent altitude

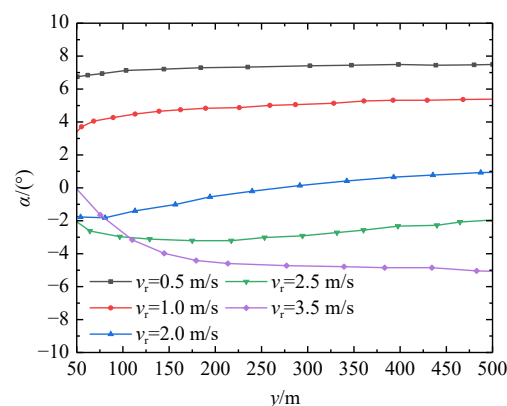


图 12 翼伞攻角随升空高度变化

Fig.12 Evolution of the attack angle over ascent altitude

图 14 是系留绳拉力与升空高度的关系,可以看出,随着系留绳伸长速度增加,绳所受拉力逐渐减小。这是由于系留绳伸长速度越快,翼伞到达相同高度时所需的绳长越长,绳伞系统的质量越大,同时翼伞攻角越小,竖直向上升力越小,进而使系留绳拉力越小。

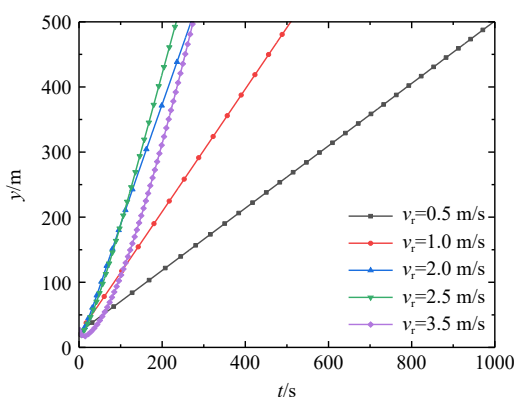


图 13 翼伞升空高度随时间变化

Fig.13 Evolution of ascent altitude over time

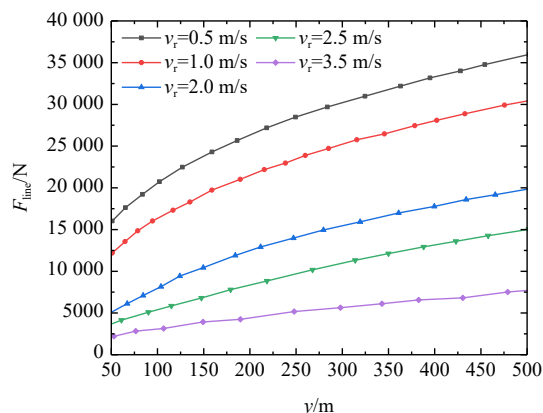


图 14 系留绳拉力随升空高度变化

Fig.14 Evolution of the rope tension over ascent altitude

在不同系留绳伸长速度下,翼伞上升到 500 m 时的特征参数对比如表 2 所示。根据表中数据可以看出,使翼伞能够上升到 500 m 而不会坠落的系留绳伸长速度区间为 0.5~3.5 m/s; 为确保系留绳拉力始终低于其材料最大安全拉力(35 000 N), 伸长速度应大于 1 m/s; 同时, 为保证翼伞在升空过程中处于正攻角范围, 则系留绳伸长速度区间为 1~2 m/s。因此, 综合考虑, 本文认为翼伞升空过程存在一个安全升空的系留绳伸长速度区间, 为 1~2 m/s。

表 2 翼伞升空到 500 m 处的参数对比

Tab.2 Comparison of parameters for parafoil ascent up to 500 m

系留绳伸长速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	耗时/s	系留绳长度/m	系留绳拉力/N	攻角/ $^{\circ}$
0.5	997	498	35 798	7.49
1	509	509	30 368	5.38
2	269	539	19 992	0.95
2.5	234	589	15 096	-1.92
3.5	274	964	7628	-5.08

3.2 风能助航段

在风能助航段, 船舶初始速度为 6 m/s, 通过系留绳控制翼伞攻角为 30° , 飞行高度 500 m。

不同风偏角 γ 下的船舶速度变化如图 15 所示, 可以看出, 不同风偏角下, 翼伞助航过程中船舶速度变化趋势基本相同, 但随风偏角增大, 助航效果减弱。因此在翼伞助航过程中, 当风向与船舶前进方向夹角过大时, 翼伞难以利用海洋风能实现助航, 此时需将翼伞进行折叠回收; 当风场条件合适时, 再将翼伞升空进行风能助航。总体上, 翼伞升空助航是建立在前期风力资源航线轨迹规划研究^[29-31]基础上的, 在助航过程中应尽量减小船舶航向与风向夹角。

为进一步明晰不同工况参数对助航效果的影响, 本文以顺风航行为例, 采用控制变量法, 在研究某一参数的影响时, 其他参数保持不变。

翼伞攻角对系统运动性能的影响规律如

图 16 所示, 可以看出, 随着翼伞攻角的增加, 船舶稳定前行速度更快。但是, 随攻角不断增加时, 翼伞助航系统前进速度增大, 空速逐渐减小, 且升力系数降低, 因此翼伞产生的气动升力逐渐减小。该过程中翼伞升力-重力比及空速随攻角的变化规律如图 17 所示。与空投翼伞明显不同, 当空投翼伞攻角大于 10° 左右时, 就会因为升阻比急剧减小而导致系统滑翔速度大幅降低, 气动力急剧减小, 产生失速现象。而助航翼伞的动力是依靠风速, 当攻角很大时, 不会因为升阻比的减小而导致空速急剧减小。因此, 存在一个临界攻角, 此时翼伞产生气动升力无法抵消重力, 难以实现滞空。但基于冗余安全设计, 本文取的安全系数为 1.5, 即升力最小为重力的 1.5 倍, 从而保证翼伞不会坠落。计算结果表明临界攻角为 55° 。

翼伞飞行高度对助航性能的影响规律如图 18 所示, 可以看出随着翼伞飞行越高, 船舶速度越快, 这是由于高度越高风速越大, 翼伞所受气动力越大, 为船舶提供的前进力越大。保持翼伞伞型、展弦比不变, 改变翼伞面积, 得到的船舶运动变化情况如图 19 所示, 可以看出, 船舶速度随翼伞面积增大而增大, 这是由于翼伞面积增大, 翼伞所受气动力增大从而增大了对船舶的牵引力。

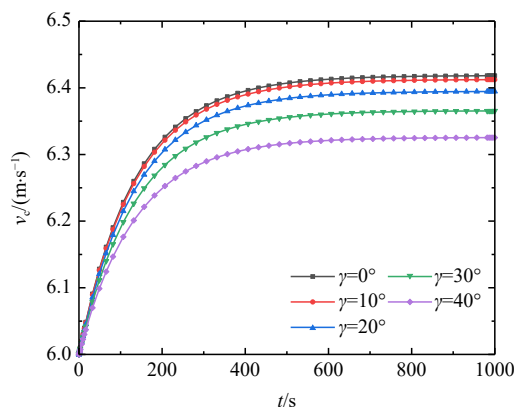


图 15 不同风偏角下船舶速度随时间变化

Fig.15 Evolution of ship velocities over time at different angles of wind

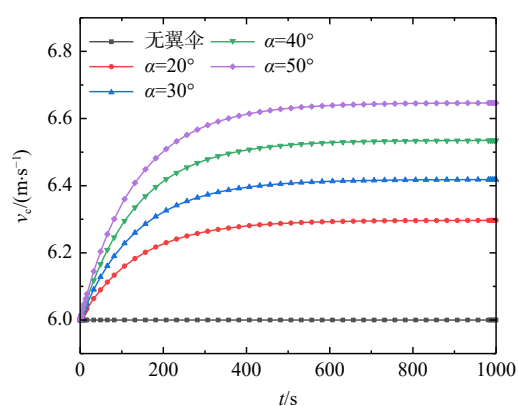


图 16 不同攻角下船舶速度随时间变化

Fig.16 Evolution of ship velocities over time at different angles of attack

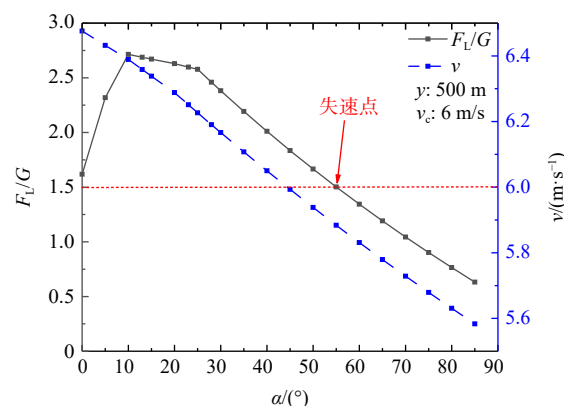


图 17 升力与重力比值和空速随攻角变化

Fig.17 Evolution of lift-to-gravity ratio and airspeed over different angles of attack

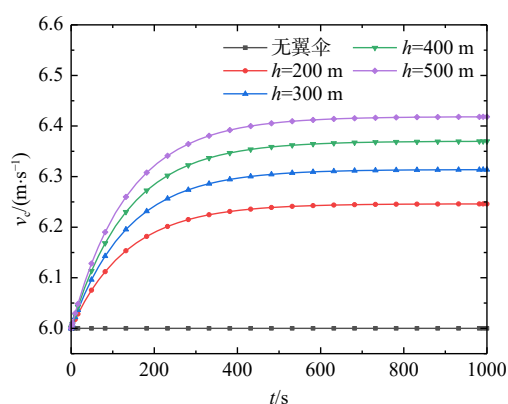


图 18 不同飞行高度下船舶速度随时间变化

Fig.18 Evolution of ship velocities over time at different flight altitudes

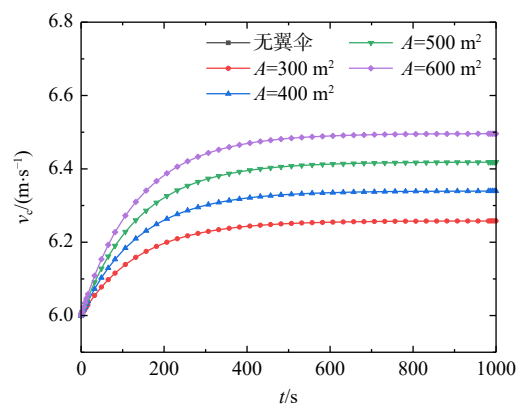


图 19 不同翼伞面积下船舶速度随时间变化

Fig.19 Evolution of ship velocities over time at different parafoil areas

4 结 论

针对船用翼伞助航系统,本文建立了翼伞上升段和风能助航段的动力学模型,通过与文献结果对比验证了本文模型的准确性,并在此基础上开展了不同阶段的动力学分析研究,得到以下结论:

(1) 在翼伞升空段,当系留绳伸长速度过慢时,系留绳拉力过大;当伸长速度过快时,翼伞攻角、空速减小,系统质量增加,导致重力超过气动升力,翼伞难以顺利升空。因此,助航翼伞在升空过程中存在一个系留绳安全伸长速度区间,为 1~2 m/s。

(2) 在升空安全伸长速度区间内,系留绳伸长速度越快,翼伞到达指定高度越快,升空轨迹越平缓,所需系留绳越长,系留绳拉力越小,升空后的攻角越小。

(3) 在风能助航段,船舶的航行速度与翼伞攻角、飞行高度和翼伞面积正相关。需要指出的是,助航翼伞与空投翼伞明显不同,其安全工作攻角范围远大于空投翼伞,且随着翼伞攻角的增加,船舶前行速度增大,空速逐渐减小,升力系数降低,因此翼伞产生的气动升力逐渐减小。基于冗余安全设计,助航翼伞的攻角不宜超过 55°。

参 考 文 献:

- [1] 陈纪军, 吴宝山, 沈定安. 风帆辅助推进船舶操纵可控区研究[J]. 船舶力学, 2011, 15(5): 456–462.
Chen J J, Wu B S, Shen D A. Freely maneuverable range study for a sail-assisted ship[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(5): 456–462. (in Chinese)
- [2] 陈纪军, 潘子英, 张胜利, 等. 差动操帆对风帆船节能的影响评估[J]. 船舶力学, 2023, 27(4): 471–480.
Chen J J, Pan Z Y, Zhang S L, et al. Evaluation of energy savings for a sail-assisted ship under differential sailing strategy[J]. Journal of Ship Mechanics, 2023, 27(4): 471–480. (in Chinese)
- [3] 石 杰, 朱元清, 冯永明, 等. Flettner 转筒风帆的研究现状[J]. 能源与节能, 2022(1): 38–40+69.
Shi J, Zhu Y Q, Feng Y M, et al. Research status of Flettner rotor[J]. Energy and Energy Conservation, 2022(1): 38–40+69. (in Chinese)
- [4] 王宏明, 孙培廷, 石昌峰, 等. 风帆助航船非线性横摇倾覆概率研究 (英文)[J]. 船舶力学, 2011, 15(12): 1353–1361.
Wang H M, Sun P T, Shi C F, et al. Capsize probability research on sailing ship's roll[J]. Journal of Ship Mechanics, 2011, 15(12): 1353–1361. (in Chinese)
- [5] 李 臣, 孙培廷. 船用翼帆辅助推进技术发展综述[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(19): 90–96.
Li C, Sun P T. Review on the development of marine wingsail-assisted propulsion technology[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(19): 90–96. (in Chinese)
- [6] Zhang S Y, Yu L, Wu Z H, et al. Numerical investigation of ram-air parachutes inflation with fluid-structure interaction method in wind environments[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 109: 106400.
- [7] 张思宇, 余 莉, 刘 鑫. 翼伞充气过程的流固耦合方法数值仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2020, 46(6): 1108–1115.
Zhang S Y, Yu L, Liu X. Numerical simulation of fluid-structure coupling method for aerofoil aeration process[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020, 46(6): 1108–1115. (in Chinese)
- [8] Traut M, Gilbert P, Walsh C, et al. Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes[J]. Applied Energy, 2014, 113: 362–372.
- [9] 闫亚胜. 风能在现代船舶风翼助航中应用研究[J]. 海洋工程装备与技术, 2019, 6(S1): 389–394.
Yan Y S. Research of wind energy using in modern sail-assisted vessel[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology, 2019, 6(Supplement 1): 389–394. (in Chinese)
- [10] 李宇辉, 赵 敏, 陈 奇, 等. 复杂环境下翼伞系统的组合式航迹规划[J]. 航空学报, 2021, 42(6): 556–567.
Li Y H, Zhao M, Chen Q, et al. Combined trajectory planning of parafoil systems in complex environments[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(6): 556–567. (in Chinese)
- [11] 杨 华, 宋 磊, 王文剑, 等. 动力翼伞纵向四自由度动力学仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(11): 1615–1622.
Yang H, Song L, Wang W J, et al. 4-DOF Longitudinal dynamic simulation of powered-parafoil[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(11): 1615–1622. (in Chinese)
- [12] 朱 虹, 孙青林, 郭婉楠, 等. 伞翼无人机精确建模与控制[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 79–91.
Zhu H, Sun Q L, Wu W N, et al. Accurate modeling and control for parawing unmanned aerial vehicle[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(6): 79–91. (in Chinese)
- [13] 孙 昊, 孙青林, 滕海山, 等. 复杂环境下考虑动力学约束的翼伞轨迹规划[J]. 航空学报, 2021, 42(3): 372–381.
Sun H, Sun Q L, Teng H S, et al. Trajectory planning for parafoil system considering dynamic constraints in complicated environment[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(3): 372–381. (in Chinese)
- [14] 康鹤云. 动力翼伞飞行特性与控制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2019.
Kang H Y. Research on power parafoil of flight characteristics and control[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2019. (in Chinese)
- [15] 胡文治, 陈建平, 张红英, 等. 翼伞空投系统的动力学建模与飞行控制仿真[J]. 航空计算技术, 2017, 47(3): 70–73+79.
Hu W Z, Chen J P, Zhang H Y, et al. Dynamic modeling and flight control simulation of parafoil aerial delivery systems[J].

- Aeronautical Computing Technique, 2017, 47(3): 70–73+79. (in Chinese)
- [16] Ochi Y. Modeling and simulation of flight dynamics of a relative-roll-type parafoil[C]//AIAA Scitech 2020 Forum, 2020: 1643.
- [17] 杨海鹏. 翼伞九自由度动力学建模与仿真[J]. 科技创新导报, 2017, 14(29): 7–9.
Yang H P. 9-DOF dynamic modeling and simulation of parafoil[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2017, 14(29): 7–9. (in Chinese)
- [18] 周洪森, 于剑桥, 于 勇. 敏捷转弯伞弹系统动力学建模与分岔特性分析[J]. 航空学报, 2024, 45(7): 176–190.
Zhou H M, Yu J Q, Yu Y. Dynamic modeling and bifurcation analysis of agile turn of parafoil-missile system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2024, 45(7): 176–190. (in Chinese)
- [19] Vishniak A. Simulation of the payload-parachute-wing system flight dynamics[C]//Aerospace Design Conference, 1993: 1250.
- [20] Fagiano L, Milanese M, Razza V, et al. Control of power kites for naval propulsion[C]//Proceedings of the 2010 American Control Conference, 2010: 4325–4330.
- [21] Dadd G M, Hudson D A, Shenoi R. Determination of kite forces using three-dimensional flight trajectories for ship propulsion[J]. Renewable Energy, 2011, 36(10): 2667–2678.
- [22] Leloup R, Roncin K, Behrel M, et al. A continuous and analytical modeling for kites as auxiliary propulsion devoted to merchant ships, including fuel saving estimation[J]. Renewable Energy, 2016, 86: 483–496.
- [23] Formosa W, Sant T, De Marco Muscat-Fenech C, et al. Wind-assisted ship propulsion of a series 60 ship using a static kite sail[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2023, 11(1): 117.
- [24] SkySails. SkySails and Humphreys yacht design present towing kite propulsion for superyachts[EB/OL]. (2022-05-10)
- [25] Houska B, Diehl M. Optimal control of towing kites[C]//Proceedings of the 45th IEEE Conference on Decision and Control, 2006: 2693–2697.
- [26] 马惠群, 曲 宁, 李 超, 等. 风电场风切变指数研究[J]. 电网与清洁能源, 2012, 28(6): 88–90.
Ma H Q, Qu N, Li C, et al. Study on wind shear index of wind farm[J]. Power System and Clean Energy, 2012, 28(6): 88–90. (in Chinese)
- [27] Justus C, Mikhail A. Height variation of wind speed and wind distributions statistics[J]. Geophysical Research Letters, 1976, 3(5): 261–264.
- [28] 冉兴隆. 高空风能发电牵引翼伞动力学与控制研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
Ran X L. Study of dynamics and control on high altitude wind power generating towing parafoil[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
- [29] 金世国, 闫 冰. 风力助航在船舶航行中的优化建模研究[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(12): 46–48.
Jin S G, Yan B. The study on optimization modeling of wind aids in sailing ship[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(12): 46–48. (in Chinese)
- [30] 常志东. 基于智能算法的风力助航船舶航线优化[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(9): 83–86.
Chang Z D. Research on route optimization of wind assisted navigation ship based on intelligent algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(9): 83–86. (in Chinese)
- [31] 李元奎. 风力助航船舶航线优化模型及智能算法研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2014.
Li Y K. Routing optimization model and intelligence algorithm for wind-assisted ships[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2014. (in Chinese)