

圆弧型翼帆双帆干扰特性数值模拟

黄 鼎^{1,2,3}, 董国祥^{1,2,3}, 高玉玲^{1,2,3}

(1. 上海船舶运输科学研究所有限公司, 上海 200135; 2. 水路交通控制全国重点实验室, 上海 200135;
3. 航运技术交通行业重点实验室, 上海 200135)

摘 要: [目的]为促进圆弧型翼帆的发展, [方法]通过数值计算研究圆弧型风帆的空气动力性能, 验证数值计算策略的可靠性; 计算单个翼帆在 $0^{\circ}\sim 180^{\circ}$ 攻角下的升力系数和阻力系数; 对双帆纵向布置进行数值模拟, 对比不同双帆间距下各帆的升力系数、阻力系数相较于单帆时的变化情况。[结果]计算不同间距下双帆的推力系数, 结果表明增大间距能够显著提升双帆的推力; 研究双帆不同攻角对推力系数的影响, 结果显示适当改变后帆攻角能够提升双帆的整体推力; 对比纵向、横向 2 种布置方案下双帆的最大推力系数发现, 船舶在侧风航行工况下, 纵向布置方案的推力性能更优, 而在顺风航行工况下, 横向布置方案推力表现更佳。[结论]研究结果可为圆弧型风帆的设计及船舶动力系统的优化配置提供参考。

关键词: 风帆助航; 数值模拟; 翼型帆

中图分类号: U661 **文献标志码:** A **【DOI】** 10.13788/j.cnki.cbgc.2025.09.07

Numerical Simulation on the Interference Characteristics of Double Sails of Circular Arc-Type Wing Sails

HUANG Ding^{1,2,3}, DONG Guoxiang^{1,2,3}, GAO Yuling^{1,2,3}

(1. Shanghai Ship and Shipping Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200135, China; 2. National Key Laboratory of Waterway Traffic Control, Shanghai 200135, China; 3. Key Laboratory of Shipping Technology and Transportation Industry, Shanghai 200135, China)

Abstract: [Purpose] For the development of the circular arc-type wing sail, [Method] To study the aerodynamic performance of arc-shaped sails through numerical calculation, reliability of the numerical calculation strategy is verified, lift coefficient and drag coefficient of a single wing sail at attack angles ranging from 0° to 180° are calculated, numerical simulation on the longitudinal arrangement of two sails are conducted, and the changes in lift coefficient and drag coefficient of each sail under different sail spacings compared to a single sail are compared. [Result] Thrust coefficient of the two sails at different spacings is calculated, and the results show that increasing the spacing can significantly enhance the thrust of the two sails; the influence of different attack angles of the two sails on the thrust coefficient is studied, and the results show that appropriately changing the attack angle of the rear sail can improve the overall thrust of the two sails, the maximum thrust coefficient of the two sails under longitudinal and transverse arrangements are compared, and it is found that in the side wind navigation condition, the thrust performance of the longitudinal arrangement is better, while in the downwind navigation condition, the transverse arrangement has better thrust performance. [Conclusion] The research results can provide a reference for the design of arc-shaped sails and the optimal configuration of the ship's power system.

Key words: sail-assisted navigation; numerical simulation; wing sail

收稿日期: 2024-12-02; 修回日期: 2025-02-13

基金项目: 国家重点研发计划 (2022YFB4300802)

作者简介: 黄鼎 (1999—), 男, 硕士。研究方向: 绿色船型开发、船舶水动力等。

0 引言

随着航运绿色化发展趋势的不断推进, 风帆助推作为一种具有较大潜力的船舶节能减排技术, 受到造船界和航运界的广泛关注。近年来, 众多学者对风帆的空气动力性能、多帆配置的气动干扰效应等开展大量研究。张校铭^[1]对风帆的三维流动进行模拟, 验证了数值模拟的准确性, 并研究风帆在不同风速、攻角、帆高条件下的性能变化; 陈崇^[2]研究单个翼型帆的空气动力性能以及双帆和四帆等多帆配置之间的气动干扰效应; 廖炜昊等^[3]研究2张双圆弧型风帆之间的干扰特性, 发现在侧向逆风条件下双帆产生有利干扰, 即双帆的侧向逆风性能较好; 张天逸^[4]分析风帆助推船在不同风向和风速下的受力情况, 并研究双帆间距、来风方向和风帆旋转角度对能效的影响; 李刚等^[5]分析帆数量对多帆系统推进性能的影响; 王迪^[6]通过风洞试验得到不同风翼攻角对应的升力系数与阻力系数的关系, 并建立风翼助推系统的数学模型。PERSSON等^[7]使用雷诺平均纳维-斯托克斯 (Reynolds-Averaged Navier-Stokes, RANS) 方法计算三角帆的空气动力学性能, 并与试验结果对比, 发现SST $k-\omega$ 模型预测的力值远小于试验值; YOO等^[8]模拟单桅帆船风帆系统的湍流, 并预测实尺度下翼帆的黏性流动现象和气动力; MASUYAMA 等^[9]对国际测量系统 (International Measurement System, IMS) 类型风帆的性能进行数值模拟, 发现风帆的最大推力系数发生在偏转角为 15° 时; FUJIWARA等^[10]指出帆-帆和帆-船体的相互作用对帆的气动力影响很大, 并模拟不同风速和风向船舶的操纵条件; CIORTAN等^[11]在韩国 KORDI 风洞中进行风洞试验, 并进行数值模拟, 展示了计算流体动力学 (Computational Fluid Dynamics, CFD) 在帆船设计和性能优化中的潜力; ATKINSON等^[12-13]通过数值模拟, 研究一种分段刚性帆 (Segmented Rigid Sail, SRS) 的升力和阻力特性, 并基于这些数据计算推力系数。

综上所述, 尽管在风帆空气动力性能和多帆配置的气动干扰效应的研究上已取得显著成果, 但许多研究集中于特定类型的风帆 (如传统翼型帆和三角帆) 或特定的多帆配置 (如双帆和四帆), 针对圆弧型翼帆的研究相对较少。圆弧型翼帆是基于日本新月形硬帆设计的一种改进型帆, 其前部为弯曲面, 后部为平面, 这种设计使其在风向变化较大时仍能保持较好的性能, 适用于多种船舶类型, 尤其适合需要在复杂风向条件下灵活调整帆面的船舶。本文通过商业CFD软件计算圆弧型翼帆在各攻角下的流场, 并深入探讨双帆间距、攻角、表观风向角和布置形式对双帆系统整体推力的影响, 研究双帆间的干扰特性, 期为风帆助航船的设计研究提供

参考。

1 数值计算方法

1.1 风轴坐标系的建立

建立风轴坐标系, 见图1。设海上真实风速为 V_w , 真实风向角为 γ , 船速为 V_s , 表观风速为 V , 表观风向角为 θ , 翼帆弦向与表观风向的夹角定义为攻角 α 。由机翼理论可知, 翼帆受到的气动力 F 可分解为垂直于表观风向的升力 L 和指向表观风向的阻力 D 。进一步将 F 沿航向和垂直于航向分解为2个分力, 可得到辅助船舶前进的推力 T 和使船舶倾斜的侧向力 H 。

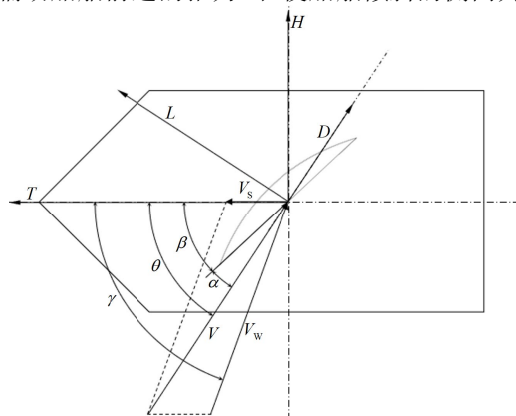


图1 风轴坐标系

Fig. 1 Wind Axis Coordinate System

升力系数 C_L 、阻力系数 C_D 的无量纲化形式分别见式 (1) 和式 (2)。

$$\begin{cases} C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \\ C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A} \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; A 为翼帆面积。

翼帆的推力系数 C_T 和侧向力系数 C_H 可以通过升力系数和阻力系数表示, 则有

$$\begin{cases} C_T = C_L \sin \theta - C_D \cos \theta \\ C_H = C_L \cos \theta + C_D \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

由式 (2) 可知, 翼帆受到的阻力并非越小越好, 其在一定风向区间内可以为船舶提供推力。

1.2 风帆干扰研究数值方法

在气动计算中, RANS、直接数值模拟 (Direct Numerical Simulation, DNS) 和大涡模拟 (Large-Eddy Simulation, LES) 等3种常见的数值模拟方法, 其中RANS方法能够有效解决工程实际中大多数流体问题。由于该方法无须捕捉流场中的细小尺度和湍流结构的详细信息, 相较于DNS和LES, 其占用的计算资源更少。

考虑到计算风速均远小于声速,可将流动视作不可压缩流体流动,其流动特性满足RANS方程。RANS方程是在Navier-Stokes方程的基础上,通过引入雷诺平均法处理湍流流动得到。对于三维不可压

缩流体, RANS方程包括连续性方程和动量方程, 分别见式(3)和式(4)。

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} + \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \tau_x}{\partial x} \\ \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \tau_y}{\partial y} \\ \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial y} + \mathbf{w} \frac{\partial \mathbf{w}}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 \mathbf{w}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{w}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \mathbf{w}}{\partial z^2} \right) + \frac{\partial \tau_z}{\partial z} \end{cases} \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: p 为雷诺平均压力; u 、 v 和 w 分别为 x 、 y 和 z 方向的雷诺平均速度分量; ν 为流体的运动黏度; τ_x 、 τ_y 和 τ_z 分别为 x 、 y 和 z 方向的雷诺应力张量。

RANS方程中的Reynolds应力项需要引入湍流模型完成闭合。本研究选用Realizable $k-\varepsilon$ 双层湍流模型,该模型根据湍流雷诺数数值将流场区分为核

心区和近壁区,在不同网格划分下均能保证数值的稳定性。此处,壁面函数选用2层全 y^+ 壁面函数。

1.3 数值方法验证

1.3.1 数值模型建立

首先对文献[14]中的翼帆进行数值模拟,该翼帆高为1.3 m,弦长为0.7 m,拱度比为10%,翼型厚度为0.01 m。模型剖面见图2。

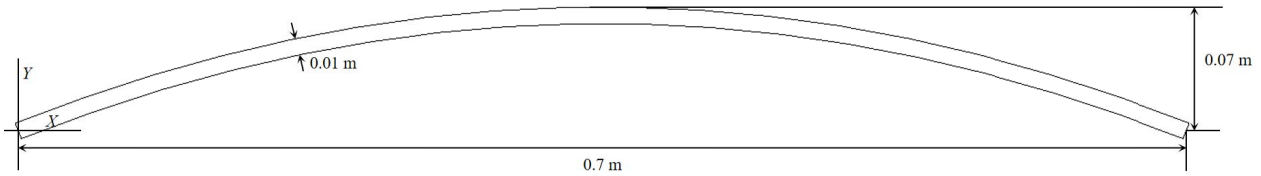
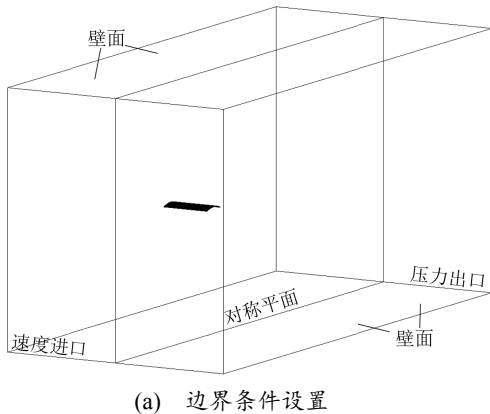


图2 翼帆剖面

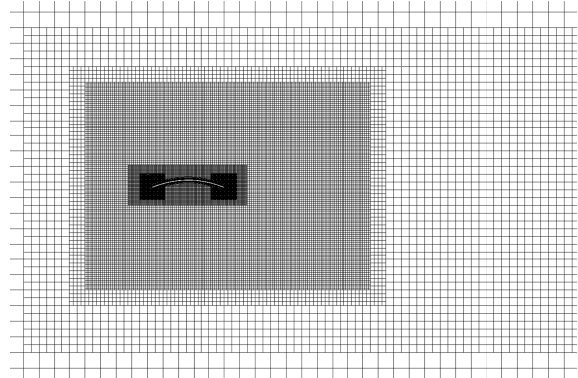
Fig. 2 Wing Sail Section

图3为翼帆数值模型的边界设置和网格划分情况。将入口设为速度进口,艇部出口设为压力出口,流场四周和翼帆表面设为不可滑移壁面。由于翼帆为对称结构,为节省计算资源、提高计算效率,选取一半翼型进行计算,并将翼帆中部对称截面设为对称平面。计算区域长度为20倍弦长(c),宽度为

10倍弦长,高度为5倍展长。翼帆位于计算域前部,距速度进口6倍弦长位置。流场的初始速度为定值,通过改变重叠网格实现攻角的变化。棱柱层数设置7层,第1层棱柱层高度控制在 $y^+ \approx 30$,网格沿翼帆模型向外逐层加密。时间步长设置为0.001 s。



(a) 边界条件设置



(b) 网格划分

图3 翼帆数值模型

Fig. 3 Numerical Model of Wing Sail

1.3.2 网格收敛性分析

雷诺数是流体力学中用来判断流动状态的无量纲参数, 为惯性力与黏性力之比, 表达式为

$$Re = \frac{vl}{\nu} \quad (5)$$

式中: ν 为流体速度; l 为特征长度。

10 m/s风速对应的雷诺数为 4.7×10^5 , 不同网格数量下翼帆在 5° 、 45° 和 90° 攻角下升力系数和阻力系数的计算结果见表1。

表1 不同网格升力系数和阻力系数的计算结果

Tab. 1 Calculation Results of Lift Coefficients and Drag Coefficients for Different Grids

网格编号	网格数量/万	C_L			C_D		
		5°	45°	90°	5°	45°	90°
网格 1	93	0.741 23	0.914 12	-0.000 42	0.124 77	0.822 08	1.239 81
网格 2	153	0.736 93	0.887 78	0.000 13	0.127 25	0.852 42	1.245 44
网格 3	288	0.735 16	0.885 26	0.000 18	0.127 91	0.853 56	1.248 04
网格 4	655	0.734 10	0.884 13	0.000 44	0.128 16	0.854 46	1.249 13
试验结果 ^[14]	—	0.723 55	0.859 04	-0.028 03	0.139 06	0.915 54	1.293 46

令相邻组网格 ij 的升力系数与阻力系数之差定义为 ε_{ij} , 网格收敛因子 R_L 与 R_D 的计算结果见表2。

表2 网格收敛因子

Tab. 2 Grid Convergence Factor

攻角	R_L		R_D	
	$\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}$	$\varepsilon_{43}/\varepsilon_{32}$	$\varepsilon_{32}/\varepsilon_{21}$	$\varepsilon_{43}/\varepsilon_{32}$
5°	0.41	0.59	0.27	0.37
45°	0.10	0.45	0.04	0.78
90°	—	—	0.46	0.42

根据网格收敛因子 R 的大小判断网格是否达到

表3 不同网格升力系数和阻力系数的计算结果与试验结果差异

Tab. 3 Differences Between the Calculation Results of Lift Coefficients and Drag Coefficients of Different Grids and Test Results

网格编号	网格数量/万	C_L			C_D		
		5°	45°	90°	5°	45°	90°
Mesh 1	93	0.024 4	0.064 1	—	-0.102 7	-0.102 1	-0.041 5
Mesh 2	153	0.018 5	0.033 5	—	-0.084 9	-0.068 9	-0.037 1
Mesh 3	288	0.016 0	0.030 5	—	-0.080 1	-0.067 7	-0.035 1
Mesh 4	655	0.014 6	0.029 2	—	-0.078 4	-0.066 7	-0.034 3

由表3可知, 计算精度随网格数的增加出现边际效应, 综合考虑计算资源和计算精度要求, 选用Mesh 2的网格划分方法。

2 单帆气动性能研究

2.1 单翼帆数值模型建立

圆弧翼帆的弦长为6.6 m, 帆高为10 m, 翼帆最大厚度为0.825 m。以1:12的缩尺比将翼帆缩小为0.55 m×0.833 m×0.069 m(弦长×帆高×最大厚度)的模型。翼帆模型剖面见图4。

收敛水平的条件有4种^[15]:

- 1) 若 $R < 0$, $|R| < 1$, 则网格收敛且为波动收敛。
- 2) 若 $0 < R < 1$, 则网格单调收敛。
- 3) 若 $R > 1$, 则网格解单调发散。
- 4) 若 $R < 0$, $|R| > 1$, 则网格解振荡发散。

攻角 90° 时的升力系数结果均趋于0, 因此不作分析。观察剩余网格收敛因子的计算结果, 发现符合条件2), 满足网格收敛性要求, 则4套网格均单调收敛。各网格数下的升力系数和阻力系数的计算结果与试验结果差异见表3。

图5为圆弧型翼帆数值模型的边界设置情况。由于翼帆尺寸及外形与文献[14]中的翼帆相似, 因此单翼帆计算的边界条件与网格设置沿用前文已验证的计算策略。计算区域长度为 $20c$, 宽度为 $10c$, 高度为5倍展长。翼帆位于计算域前部, 距速度进口5.5倍弦长位置。棱柱层数设置7层, 第1层棱柱层高度控制在 $y^+ \approx 30$, 时间步长设置为0.001 s。网格总数为173万, 偏斜度大于0.85的网格数量为0, 表明网格质量优良。

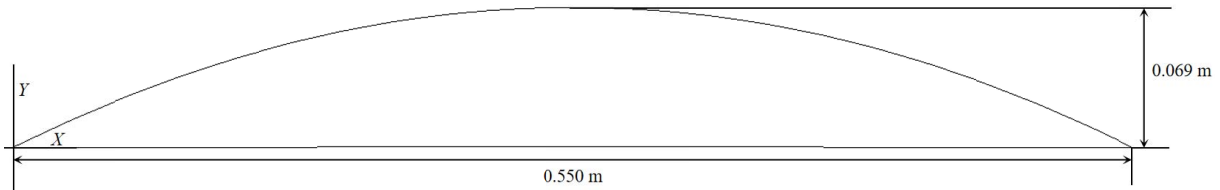


图4 圆弧翼帆模型剖面

Fig. 4 Cross-Section of Arc-Shaped Wing Sail Model

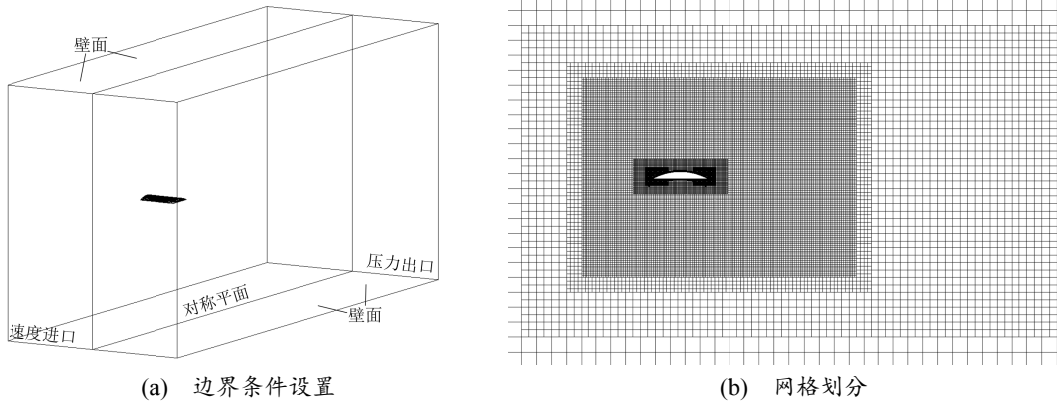


图5 圆弧翼帆数值模型

Fig. 5 Numerical Model of Arc-Shaped Wing Sail

2.2 单翼帆数值结果分析

针对风速15 m/s（对应雷诺数为 5.5×10^5 ）的工况，对单翼帆进行数值模拟。由于翼帆形状对称，只须计算 $0^\circ \sim 90^\circ$ 攻角， $90^\circ \sim 180^\circ$ 的数据可通过对称关系得到。图6为单翼帆模型升力系数和阻力系数随攻角 α 的变化特性，其中攻角为 $20^\circ \sim 40^\circ$ 时，升力系数出现先降后升的现象。

图7为单翼帆周围流场随攻角的变化规律。由图7可知：当攻角为 10° 时，流体紧贴翼帆表面流动；当攻角从 10° 增加到 20° 时，翼帆后缘的流动分离现象逐渐向前缘移动，此时升力系数持续升高；当攻角达到 30° 时，翼帆发生失速现象，升力系数明显下降；当攻角从 30° 增加到 40° 时，翼帆前后缘由于流动分离周期性生成脱落涡，在尾部流场形成旋涡结构，此时升力系数明显回升；当攻角增加到 90° 时，翼帆尾流场的湍流区域达到最大，升力系数几乎为0，

阻力系数达到最大值。

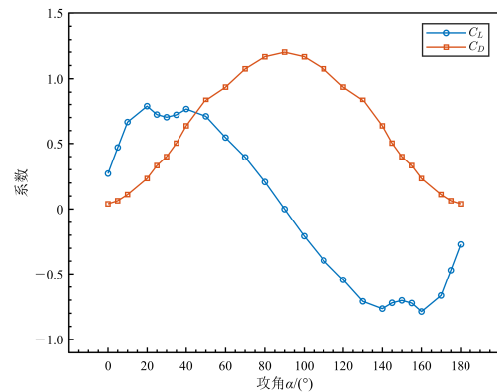


图6 圆弧翼帆的升力系数与阻力系数

Fig. 6 Lift Coefficient and Drag Coefficient of Arc-Shaped Wing Sail

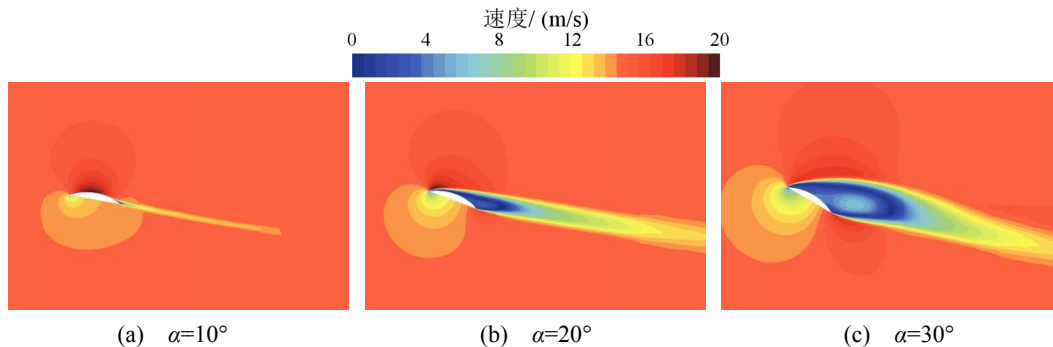


图7 圆弧翼帆速度云图

Fig. 7 Arc-Wing Sail Speed Cloud Map

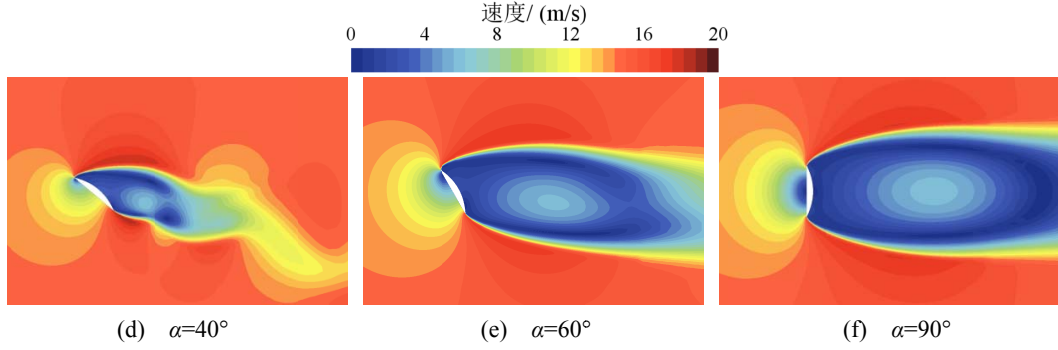


图7 圆弧翼帆速度云图(续)

Fig. 7 Arc-Wing Sail Speed Cloud Map (Continued)

图8为单翼帆表面压力分布随攻角的变化规律。根据翼帆升力的产生规律,将翼帆两侧分别定义为压力侧和吸力侧。研究发现:当攻角从 10° 增加到 20° 时,翼帆两侧的压力差逐渐增大;当攻角从 20° 增加

到 30° 时,翼帆吸力侧低压区面积扩大;当攻角增加到 40° 时,翼帆压力侧和吸力侧的高压、低压区面积进一步扩大;当攻角达到 90° 时,翼帆两侧压力差达到最大值,翼帆受力特性完全转变为阻力。

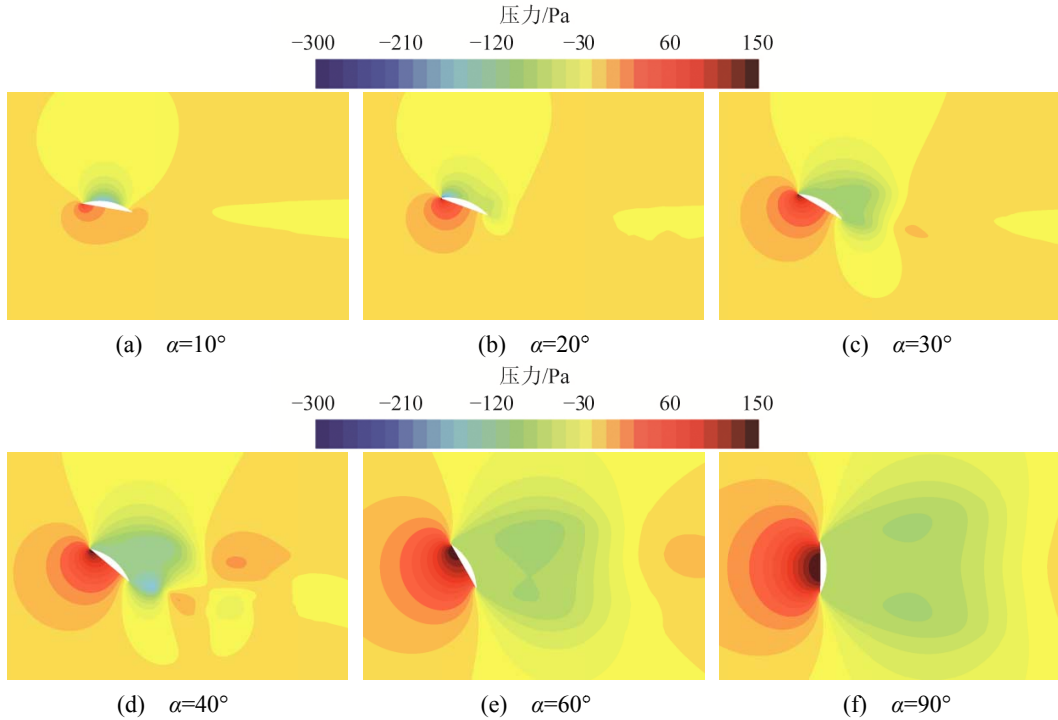


图8 圆弧翼帆压力云图

Fig. 8 Arc-Shaped Wing Sail Pressure Cloud Map

当表观风向角从 0° 增加到 180° 时,将翼帆各攻角下的升力系数和阻力系数通过式(3)转化为推力系数,各表观风向角下翼帆的最大推力系数及其对应的攻角见图9。由图9可知:随着表观风向角的增大,圆弧翼帆的最大推力系数呈上升趋势,且在大部分角度范围内表现出较好的推力性能。当表观风

向角为 $50^\circ \sim 90^\circ$ 时,翼帆在 20° 左右攻角下获最大推力,此时的推力完全由升力提供;当表观风向角大于 90° 时,推力由升力和阻力共同组成,最大推力对应的攻角先增大到约 50° ,随后随着表观风向角的增大渐增加到 90° 。

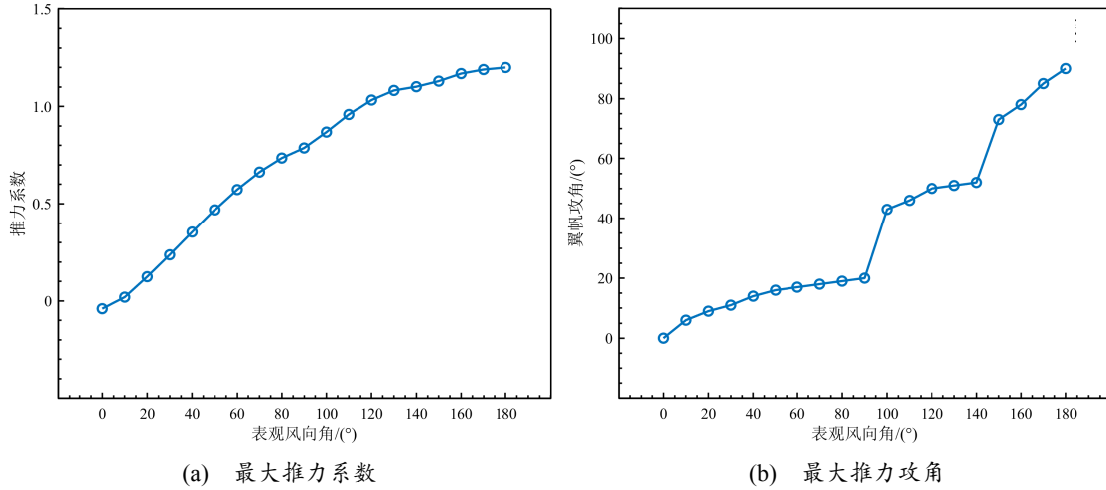


图9 圆弧翼帆最大推力系数及对应攻角

Fig. 9 Maximum Thrust Coefficients of the Arc-Shaped Wing Sail and the Corresponding Angle of Attack

3 双帆干扰特性研究

3.1 双翼帆数值模型建立

图10为双帆计算模型。图10中：帆间距离为 l ，仍以缩尺比为1:12的翼帆模型为研究对象，双帆绕

各自底边弦长中点旋转，翼帆弦长方向与来流方向的夹角为攻角 α ，帆1对应攻角 α_1 ，帆2对应攻角 α_2 。船中线与来流的夹角定义为表观风向角 θ ，其中 $\theta=0^\circ$ 为迎风， $\theta=90^\circ$ 为侧风， $\theta=180^\circ$ 为顺风。

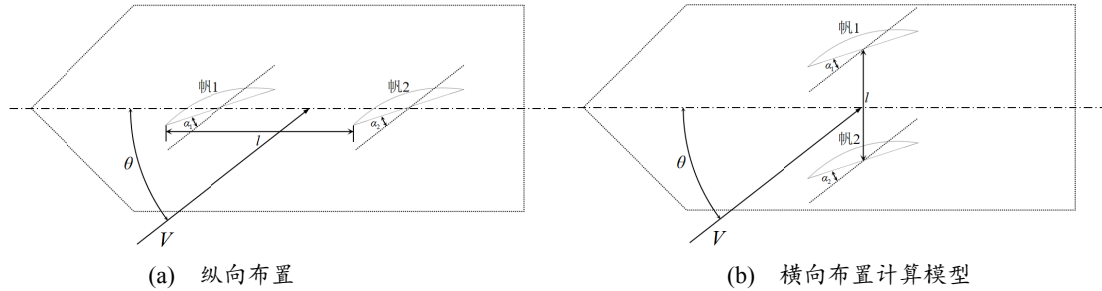


图10 双帆计算模型

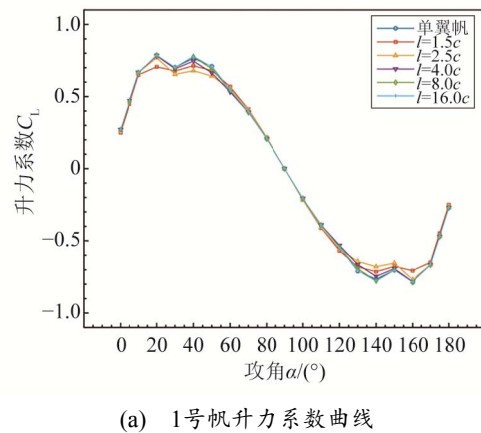
Fig. 10 Double-Sail Computing Model

网格划分在单翼帆模型的基础上，对帆2区域进行相同的网格加密处理，计算域长为20倍翼帆弦长，宽为14.5倍弦长，高为5倍翼帆展长。

3.2 帆间距离与攻角对双帆气动性能的影响

当来流风速为15 m/s时，针对双帆纵向布置迎风状态，对双帆间距 l 分别为 $1.5c$ 、 $2.5c$ 、 $4c$ 、 $8c$ 、 $16c$ （ c 为翼帆弦长）进行数值模拟，且双帆攻角变化一致。双帆升力系数和阻力系数曲线见图11。由图11可知：间距对帆1升力系数的影响主要集中在攻角为 $10^\circ \sim 60^\circ$ 时，对其阻力系数的影响则集中在攻角为 $40^\circ \sim 90^\circ$ 时；当间距为 $8c$ 时，帆1的升力系数和阻力系数曲线与单翼帆时的曲线高度重合。对于帆2，随着间距的增加，其升力系数逐渐增大，当间距为 $4c$ 时，帆2的最大升力系数与单翼帆的基本一致；帆2的阻力系数曲线在到达某攻角时突降，这是由于帆1的尾流场在双帆间形成低压区。将该突降点定义为阻力拐点，进一步分析发现，随着间距的增大，阻

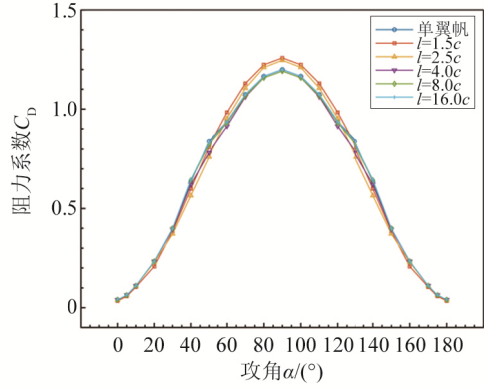
力拐点对应的攻角逐渐延后。总体而言，在双帆干扰下，帆1的受干扰程度远低于帆2。



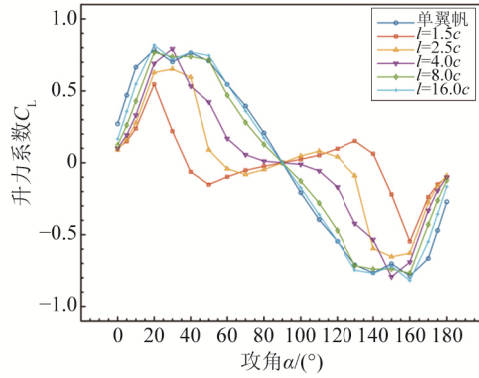
(a) 1号帆升力系数曲线

图11 双帆不同间距下的升力系数与阻力系数曲线

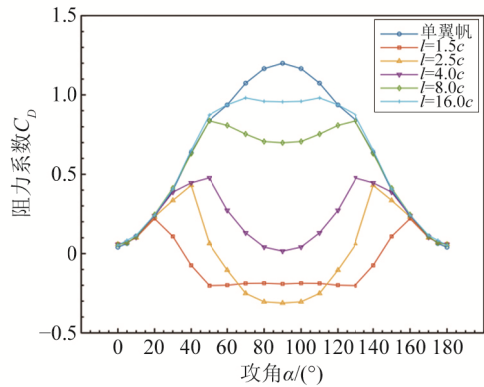
Fig. 11 Lift Coefficient and Drag Coefficient Curves of the Double Sails at Different Spacings



(b) 1号帆阻力系数曲线



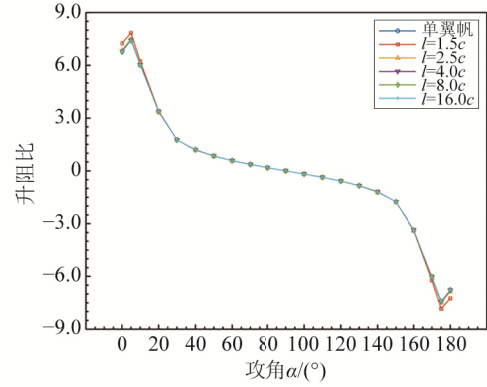
(c) 2号帆升力系数曲线



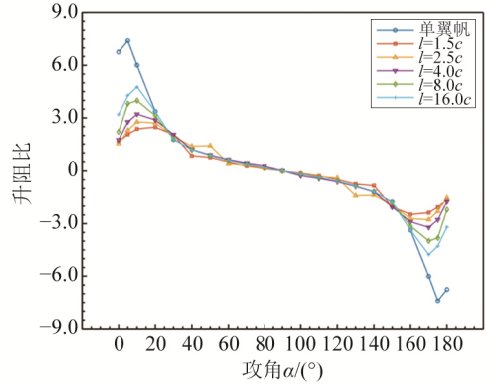
(d) 2号帆阻力系数曲线

 图 11 双帆不同间距下的升力系数与阻力系数曲线(续)
 Fig. 11 Lift Coefficient and Drag Coefficient Curves of the Double Sails at Different Spacings (Continued)

双帆升阻比曲线见图12。当攻角为 $0^\circ \sim 30^\circ$ 时，帆2的升阻比受双帆间距影响较大，而帆1几乎不受影响。



(a) 1号帆



(b) 2号帆

图 12 双帆不同间距下的升阻比

Fig. 12 Lift-to-Drag Ratio of Double Sails at Different Spacings

通过分析 30° 、 60° 和 90° 攻角下的速度和压力云图，得到不同翼帆间距下的速度场，见图13。由13可知：当间距为 $1.5c$ 时，双帆间存在大片低速区，导致帆2难以接触进流以产生升力；随着间距的增大，双帆间的低速区面积显著减小；当间距为 $4c$ 时，攻角 30° 下帆2压力侧已能接触进流并产生升力；当间距为 $8c$ 时，帆1对帆2速度场的干扰进一步减弱。

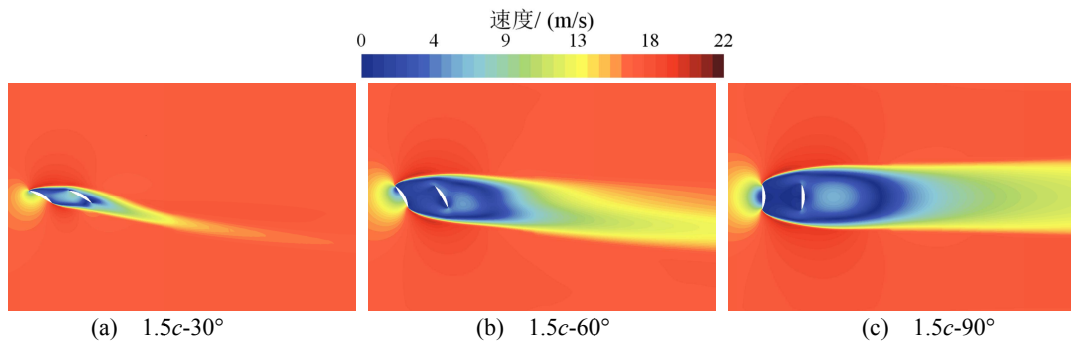


图 13 不同翼帆间距下的速度场

Fig. 13 Velocity Field at Different Wing Sail Spacings

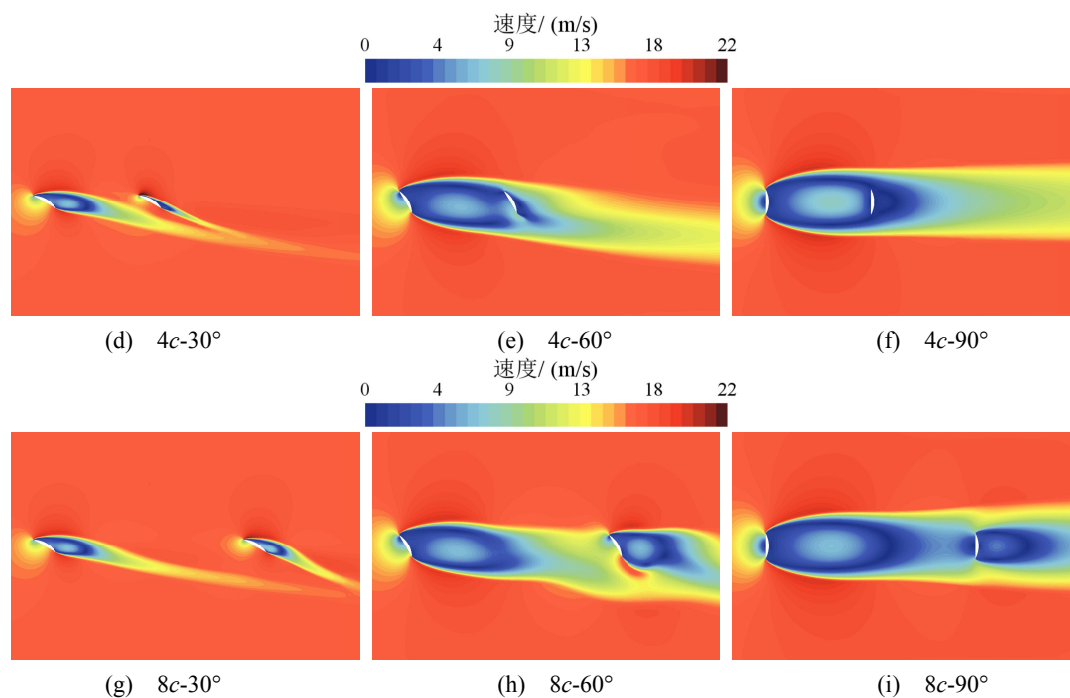


图 13 不同翼帆间距下的速度场 (续)

Fig. 13 Velocity Field at Different Wing Sail Spacings (Continued)

图14为不同翼帆间距下的圆弧翼帆压力场。当双帆间距为 $1.5c$ 时，双帆之间存在低压区，导致个别攻角下帆2受到的阻力出现负值；当间距为 $4c$ 时，

帆2逐渐远离低压区；当间距为 $8c$ 时，帆1对帆2的干扰进一步减弱。

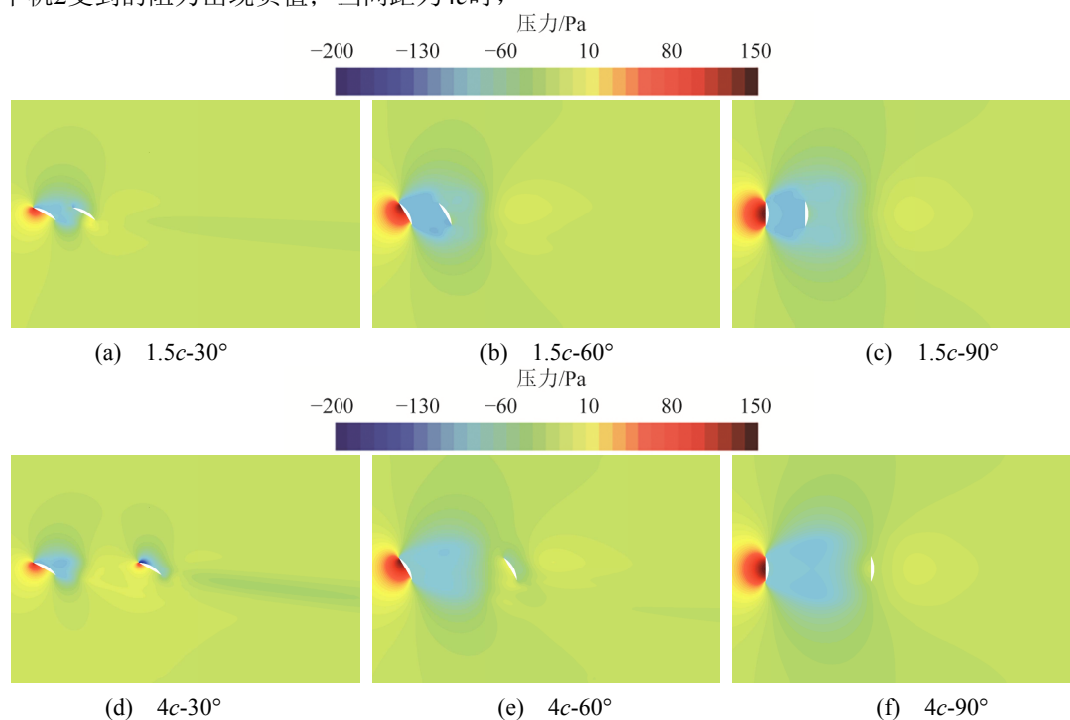


图 14 不同翼帆间距下的圆弧翼帆压力场

Fig. 14 Arc-Shaped Wing Sail Pressure Field Under Different Wing Sail Spacings

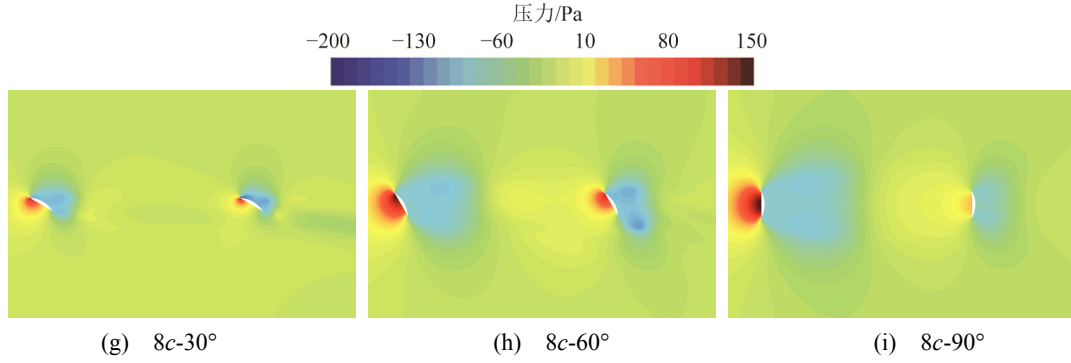


图 14 不同翼帆间距下的圆弧翼帆压力场 (续)

Fig. 14 Arc-Shaped Wing Sail Pressure Field Under Different Wing Sail Spacings (Continued)

表4为双帆在不同间距时相对无干扰情况的平均推力下降率, 由表4可知: 随着双帆间距的增加, 总推力下降速度逐渐减缓, 说明增大间距能减小双帆串列干扰对总推力的不利影响。

表 4 双帆平均推力较无干扰时的下降率

Tab. 4 Rate of Decline in the Average Thrust of the Double Sails Compared to When There is No Interference

双帆间距	平均推力下降率/%
1.5c	56.74
2.5c	52.23
4c	39.64
8c	17.91
16c	3.45

进一步针对双帆串列系统下的帆2攻角 (α_2) 控制展开研究, 设定双帆间距为4c, 表观风向角 θ 为0°。计算中使帆2攻角 (α_2) 在原角度基础上增减5°、10°, 通过得到的双帆升力系数和阻力系数计算双帆系统的推力系数。改变 α_2 后, 双帆总推力系数的变化率见图15。

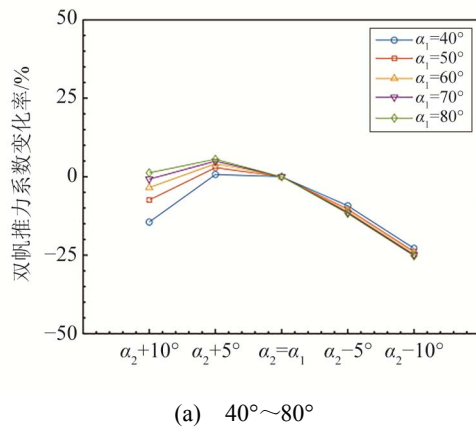


图 15 变攻角时双帆推力系数变化率

Fig. 15 Rate of Change of the Thrust Coefficient of the Double Sails When the Angle of Attack is Changed

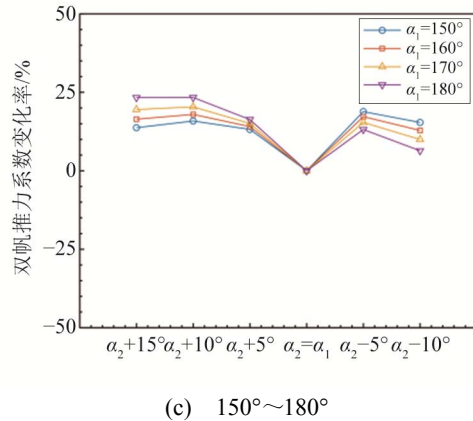
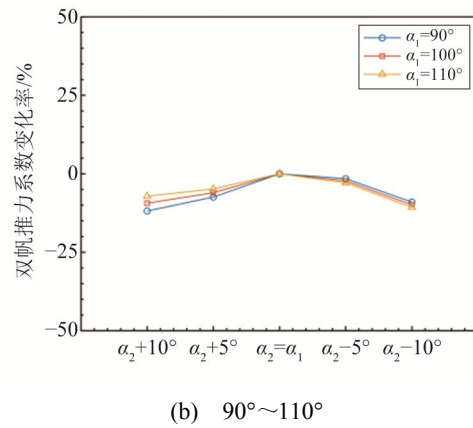


图 15 变攻角时双帆推力系数变化率 (续)

Fig. 15 Rate of Change of the Thrust Coefficient of the Double Sails When the Angle of Attack is Changed (Continued)

由图15可知: 当攻角为40°~80°时, 将 α_2 增加5°左右可有效提高双帆系统整体的推力系数, 且随着攻角的增加, 提升效果愈发明显; 当攻角为90°~110°时, 调整 α_2 会使双帆整体推力系数下降, 此时应保持双帆攻角相同; 当攻角为150°~180°时, α_2 的增减均可提高双帆整体的推力系数, α_2 增加10°左右时总推力系数提升幅度最大, 继续增大则效果减弱。

3.3 表观风向和布置方式对双帆气动性能的影响

双帆纵向间距为4倍弦长时干扰效应已较弱,因此设置双帆间距为4倍弦长,对不同表观风向角下双帆模型进行数值模拟,双帆保持相同攻角。纵向和横向布置结果在90°表观风向角下呈现对称性,因此

以纵向布置为例进行分析,图16为双帆升力系数和阻力系数曲线。对于帆1,升力系数受到的影响较小,其阻力系数随表观风向角的增加而增大;帆2仅在较小的表观风向角(0°和10°)下升力、阻力受到的干扰较大,随着表观风向角的增加,干扰效应减弱。

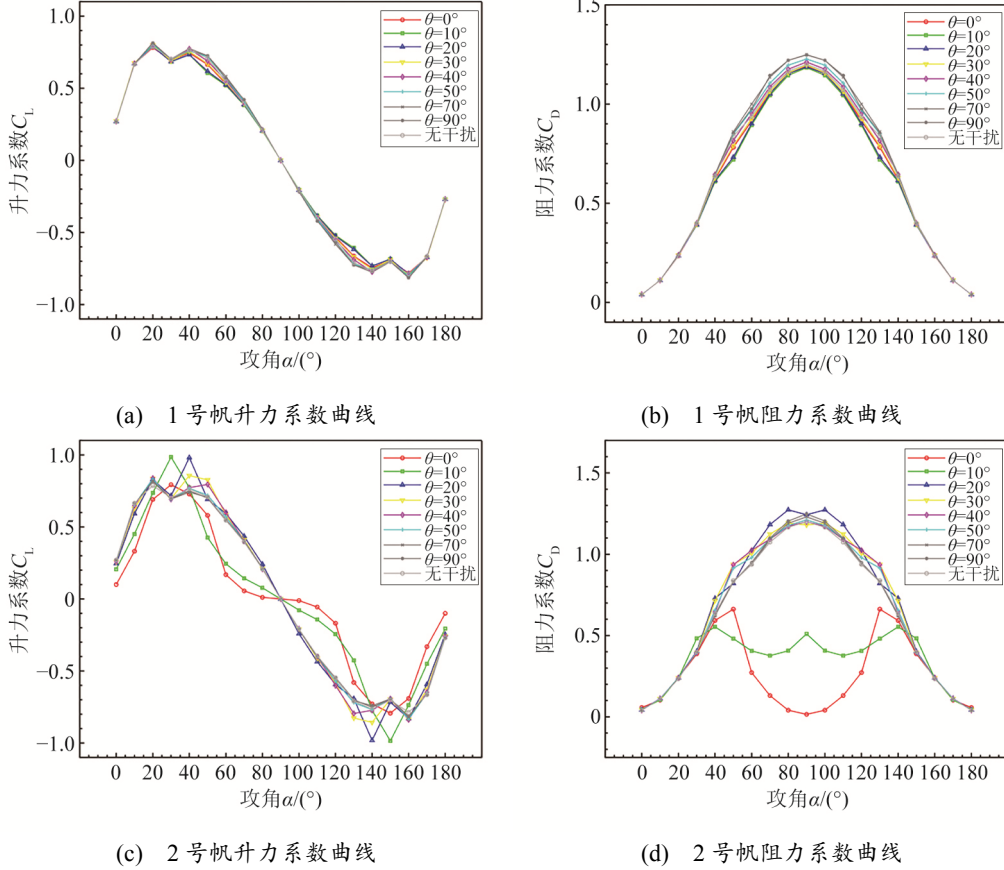


图 16 双帆不同表观风向角下的升力系数和阻力系数曲线

Fig. 16 Lift Coefficient and Drag Coefficient Curves of Two Sails at Different Apparent Wind Angles

双帆不同表观风向角下的升阻比曲线见图17。由图17可知:表观风向对帆1的升阻比几乎没有影响;当攻角为0°~30°时,帆2的升阻比受表观风向影响

较大,而当表观风向角大于40°时,帆2升阻比几乎不受影响。

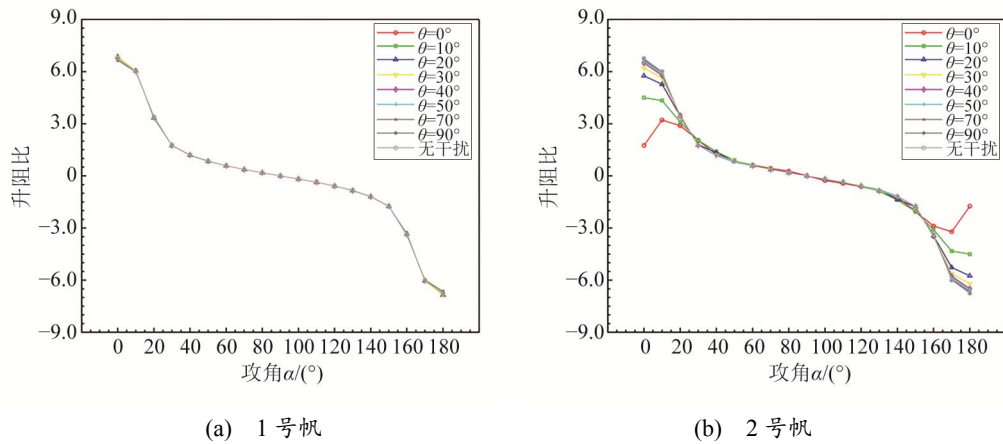


图 17 双帆不同表观风向角下的升阻比

Fig. 17 Lift-to-Drag Ratio of Two Sails at Different Apparent Wind Angles

将双帆的升力系数和阻力系数分别投影到沿航向和垂直航向得到双帆的推力系数, 图18(a)和图18(b)分别为2种布置不同表观风向角下的双帆推力

系数曲线拟合而成的曲面, 图18(c)和图18(d)为各表观风向角下的最大推力系数及其对应的攻角。

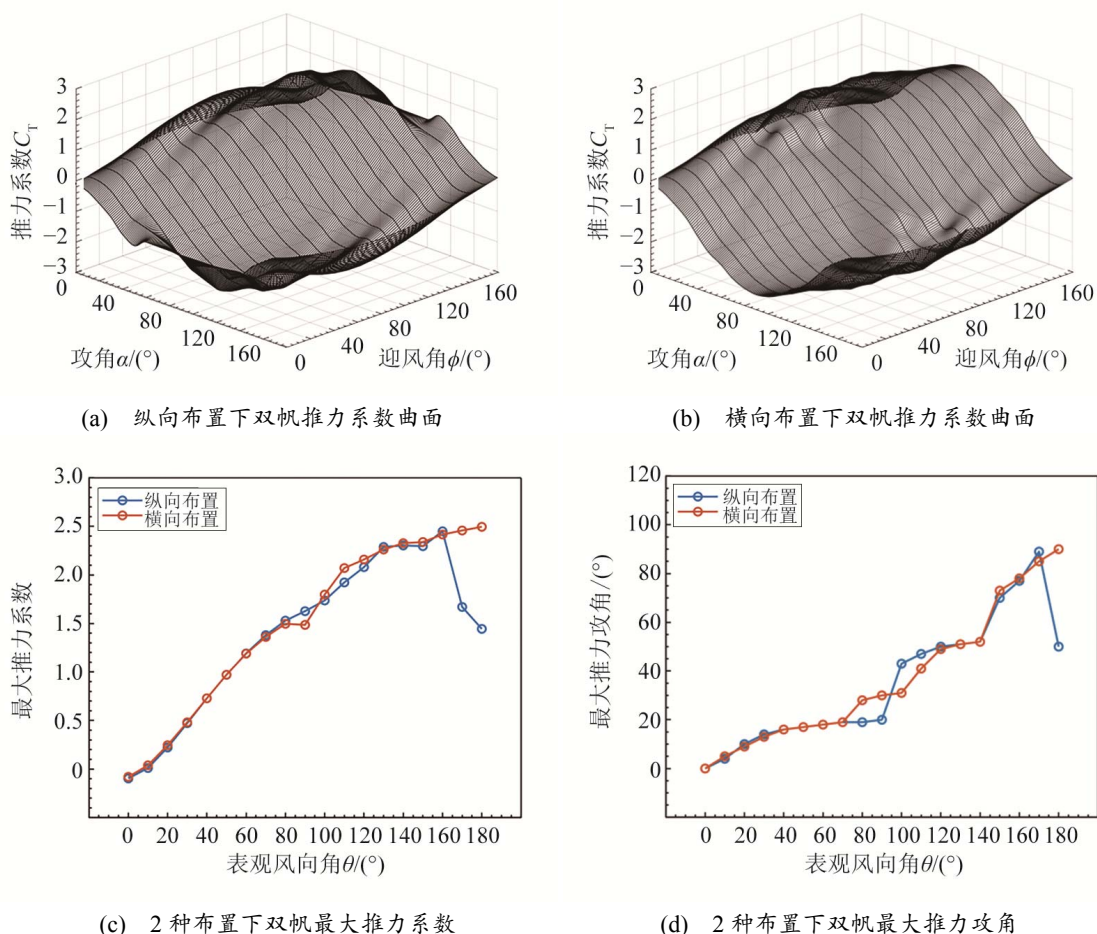


图 18 2 种布置下双帆推力系数

Fig. 18 Thrust Coefficients of Double Sails Under Two Different Arrangements

由图18可知, 2种布置形式下, 双帆最大推力系数总体随着表观风向角的增大呈上升趋势, 但纵向布置在接近顺风时出现明显下降, 横向布置则在侧风时出现小幅下降。这是因为此时后帆均处于前帆的下风处, 导致气动性能下降。对比2种布置形式发现, 顺风时横向布置的推力表现更好; 而当侧风情况较多时, 纵向布置的推力表现更佳。

4 结论

通过数值计算研究圆弧型翼帆的气动特性及双帆纵向布置时的干扰特性, 得出以下结论。

- 1) 圆弧型翼帆在较大攻角范围内表现出优异的气动性能和推力性能, 适用于船舶风力助推装置。
- 2) 纵向布置迎风时, 双帆间距对帆1的气动性能影响较小, 对帆2的气动性能影响较大。随着双帆间距的增加, 帆2的升力系数逐渐增大, 当双帆间距为4倍弦长时, 帆2的最大升力系数与单翼帆时基本

一致; 增加双帆间距能够显著改善双帆干扰导致的推力损失, 实际布局中应在空间允许的情况下尽量增大间距, 以减弱不利干扰。

3) 纵向布置下, 当表观风向角小于 90° 时, 将帆2的攻角增加 5° 可以提高双帆的整体推力; 当表观风向角为 $90^\circ \sim 110^\circ$ 时, 应保持双帆攻角相同; 当表观风向角为 $150^\circ \sim 180^\circ$ 时, 帆2攻角的增减均会提高双帆的整体推力, 其中将帆2攻角增加 10° 左右, 总推力提升效果最明显。

4) 纵向布置下, 帆1受干扰较小, 而帆2在表观风向角为 0° 和 10° 时升力、阻力受干扰较大, 表观风向角增大后干扰减弱; 随着表观风向角的增加, 2种布置形式下双帆的最大推力系数总体呈上升趋势, 但纵向布置在接近顺风时明显下降, 横向布置则在侧风时小幅下降。在船舶实际应用中, 表观风向角大于 90° 时双帆推力较大, 侧风时纵向布置推力表现更好, 而顺风时横向布置推力表现更佳。

参考文献:

- [1] 张校铭. 风帆船帆绕流数值模拟研究[D]. 辽宁大连: 大连理工大学, 2021.
ZHANG X M. Numerical Simulation Study on the Flow Around the Sail of a Sailboat[D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2021.
- [2] 陈崇. 船舶风帆助推的多帆动力学干扰研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2023.
CHEN C. Study on Dynamic Interference of Multi-Sails Boosted by Ship Sails[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
- [3] 廖炜昊, 黄连忠, 林虹兆, 等. 风力助航的双帆干扰研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(8): 1216-1220.
LIAO W H, HUANG L Z, LIN H Z, et al. Research on Double-Sail Interference for Wind-Assisted Navigation [J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(8): 1216-1220.
- [4] 张天逸. 双帆助航船能效优化及最小主机功率的研究[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2018.
ZHANG T Y. Study on Energy Efficiency Optimization and Minimum Main Engine Power of Double Sail Navigation Aid Ship[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2018.
- [5] 李刚, 蔡薇, 曾青松. 帆数量对低攻角多翼帆系统推进性能的影响[J]. 船舶工程, 2023, 45(10): 76-83.
LI G, CAI W, ZENG Q S. The Influence of Sail Quantity on the Propulsion Performance of Low Angle of Attack Multi-Wing Sail System[J]. Ship Engineering, 2023, 45(10): 76-83.
- [6] 王迪. 风帆助航船舶推进装置调速系统的研究[D]. 辽宁大连: 大连海事大学, 2012.
WANG D. Study on Speed Regulation System of Propulsion Device of Sail-Assisted Ship[D]. Dalian, Liaoning: Dalian Maritime University, 2012.
- [7] PERSSON A, LINDSTRAND R, MUGGIASCA S, et al. CFD Prediction of Steady and Unsteady Upwind Sail Aerodynamics[J]. Ocean Engineering, 2017, 141: 543-554.
- [8] YOO J, KIM H T. Computational and Experimental Study on Performance of Sails of a Yacht[J]. Ocean Engineering, 2006, 33(10): 1322-1342.
- [9] MASUYAMA Y, TAHARA Y, FUKASAWA T, et al. Database of Sail Shapes Versus Sail Performance and Validation of Numerical Calculations for the Upwind Condition[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2009, 14(2): 137-160.
- [10] FUJIWARA T, HEARN G E, KITAMURA F, et al. Sail-Sail and Sail-Hull Interaction Effects of Hybrid-Sail Assisted Bulk Carrier[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2005, 10(2): 82-95.
- [11] CIORTAN C, SOARES C G. Computational Study of Sail Performance in Upwind Condition[J]. Ocean Engineering, 2007, 34(16): 2198-2206.
- [12] ATKINSON G M, BINNS J. Analysis of Drag, Airflow and Surface Pressure Characteristics of a Segment Rigid Sail[J]. Journal of Marine Engineering & Technology, 2018, 17(3): 143-152.
- [13] ATKINSON G M. Analysis of Lift, Drag and C_X Polar Graph for a 3D Segment Rigid Sail Using CFD Analysis[J]. Journal of Marine Engineering & Technology, 2019, 18(1): 36-45.
- [14] BORDOGNA G, KEUNING J A, HUIJSMANS R H M, et al. Wind-Tunnel Experiments on the Aerodynamic Interaction Between Two Rigid Sails Used for Wind-Assisted Propulsion[J]. International Shipbuilding Progress, 2018, 65(1): 93-125.
- [15] 陈凯, 朱仁庆, 夏志平, 等. KCS 基准船模绕流场数值模拟不确定度分析[J]. 江苏船舶, 2023, 40(3): 5-8.
CHEN K, ZHU R Q, XIA Z P, et al. Uncertainty Analysis of Numerical Simulation of Flow Field Around KCS Reference Ship Model[J]. Jiangsu Ship, 2023, 40(3): 5-8.