

## 双体风电运维船阻力CFD计算及降阻设计研究

蔡翰翔, 陈超核

引用本文:

蔡翰翔, 陈超核. 双体风电运维船阻力CFD计算及降阻设计研究[J]. 南方能源建设, 2022, 9(1): 20–28.

CAI Hanxiang, CHEN Chaohe. Research on CFD Calculation and Resistance Reduction Design of Catamaran Wind Farm Service Vessel[J]. *Southern Energy Construction*, 2022, 9(1): 20–28.

---

### 相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

#### 海上风电场智能船舶调度及人员管理系统

Scheme Design of Intelligent Vessel Dispatching and Personnel Management System for Offshore Wind Farm

南方能源建设. 2020, 7(1): 47–52 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.007>

#### 浅析海上风电施工安全管控

Brief Analysis on Safety Management and Control of Offshore Wind Farm Construction

南方能源建设. 2020, 7(1): 128–132 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.01.021>

#### 砂土基质下落锚深度试验研究及计算方法

Experimental Study and Calculation Method of Falling Anchor Depth Under Sand Soil

南方能源建设. 2018, 5(z1): 222–227 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.S1.040>

#### 400MW海上升压站电气主接线方案探讨

Discussions on the Main Electrical Wiring Scheme for a 400 MW Offshore Substation Station

南方能源建设. 2019, 6(4): 80–85 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.04.013>

#### 智慧海上风电场的定义、架构体系和建设路径

Definition, Architecture and Constructive Route of Intelligent Offshore Wind Farm

南方能源建设. 2020, 7(3): 62–69 <https://doi.org/10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.03.008>

# 双体风电运维船阻力CFD计算及降阻设计研究

蔡翰翔<sup>1</sup>, 陈超核<sup>1,2,✉</sup>

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641; 2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519080)

**摘要:** [目的] 船舶阻力直接影响着船舶的快速性能, 对于一艘海上风电运维船, 快速性能是此船舶的重要性能指标之一。因此, 需要计算船舶的阻力并研究有效的阻力优化方法。[方法] 基于CFD方法, 建立了数值模型, 对某19.1 m长的双体海上风电运维船的阻力性能进行了研究, 计算并分析10 kn、13 kn、16 kn和20 kn这四个不同航速下船舶的阻力, 并于此船的船尾加装压浪板作为优化方法。共设计三种不同安装角的压浪板方案。对优化前后的船舶均进行了数值模拟, 对得出的计算结果进行了对比分析。[结果] 研究表明, 在此船船尾加装适当安装角的压浪板可以有效地改善船舶在航行时的阻力性能, 降阻效果比较理想。可以改变船舶的航行姿态, 减小船舶航行时的升沉量和纵倾角。[结论] 可以为此船舶的阻力性能计算以及优化方法设计提供参考。

**关键词:** 风电运维船; 船舶阻力; CFD; 降阻; 压浪板

中图分类号: TK89; U661.4

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2022)01-0020-09

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Research on CFD Calculation and Resistance Reduction Design of Catamaran Wind Farm Service Vessel

CAI Hanxiang<sup>1</sup>, CHEN Chaohe<sup>1,2,✉</sup>

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510641, Guangdong, China;

2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519080, Guangdong, China)

**Abstract:** [Introduction] The ship resistance directly affects the fast performance of the ship, for an offshore wind farm service vessel, the fast performance is one of the important performance indexes. Therefore, it is necessary to calculate the ship resistance and study the effective resistance optimization method. [Method] Based on the CFD method, a numerical model was established to study the resistance performance of a 19.1 m-long catamaran offshore wind farm service vessel, the resistance of the ship at four different speeds of 10 kn, 13 kn, 16 kn and 20 kn were calculated and analyzed, and a stern flap was installed at the stern of the ship as the optimization method. Three stern flap schemes with different installation angles were designed. The ships before and after optimization were numerically simulated, and the calculation results were compared and analyzed. [Result] The research shows that the installation of stern flap with appropriate installation angle at the stern of the ship can effectively improve the resistance performance of the ship during navigation. The resistance reduction effect is ideal. The optimization method can change the navigation attitude of the ship and reduce the heave and trim angle of the ship during navigation. [Conclusion] The research results can provide reference for the calculation of ship resistance performance and the design of optimization method.

**Key words:** wind farm service vessel; ship resistance; CFD; resistance reduction; stern flap

2095-8676 © 2022 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2021-02-06 修回日期: 2021-03-17

基金项目: 2021年广东省促进经济高质量发展专项(海洋经济发展)重点项目“深远海高性能海上风电运维船与核心装备研发与应用示范”(GDNRC[2021]39)。

## 0 引言

近些年来, 我国海上风电装机容量呈增长趋势<sup>[1]</sup>, 市场对于用于海上风电场运行维护的专业风电运维船的需求越来越大。目前, 双体船船型比较适用于风电运维船, 双体船有着甲板面积大、稳性好等优点<sup>[2]</sup>。而快速性能良好的风电运维船有利于海上风电场运维作业的完成。所以, 针对此类船舶的阻力性能和优化方法的研究有一定的必要性。

船舶降阻的方法有很多, 比如优化船型; 设计球鼻艏; 加装压浪板等等。高汪涛<sup>[3]</sup>研究了船型优化方法对一艘深拖母船的阻力性能的影响; 李纳<sup>[4]</sup>等分析了某船无球鼻艏以及加装两种不同球鼻艏后的阻力性能; 陈涛<sup>[5]</sup>等研究了艏压浪板和艏垂直板对某高速船的快速性的影响; 李冬琴<sup>[6]</sup>等研究了分段式压浪板对某高速船的阻力性能的影响。

CFD 技术在船舶的水动力性能分析领域中的应用较多, 于兴鹏<sup>[7]</sup>使用 STAR-CCM+ 软件对一艘双体风电运维船的阻力进行了研究; 许媛媛等<sup>[8]</sup>采用 CFD 方法对低速 Wigley 船模的阻力进行计算分析; 张明霞等<sup>[9]</sup>使用 STAR-CCM+ 软件针对 V 型无压载水船舶的阻力进行了分析, 通过优化球鼻艏进行阻力改善; 刘飞<sup>[10]</sup>利用 CFD 方法对某破损船舶的阻力进行了研究; 高天敏<sup>[11]</sup>基于 CFD 技术, 利用 STAR-CCM+ 软件对双体风电运维船的尾部下沉及静水阻力、纵倾等进行了分析; 方静等<sup>[12]</sup>对无人双体船进行 CFD 仿真计算, 研究船舶的阻力性能; 陈悦等<sup>[13]</sup>利用 CFD 方法研究了某三体风电运维船主侧体的排水体积之比以及主侧体相对位置对船舶阻力性能的影响。

CFD 可以计算多种船舶阻力。杨培青等<sup>[14]</sup>利用 CFD 技术, 对某三维船体的摩擦阻力进行了预报; 钱浩等<sup>[15]</sup>利用 CFD 软件对某三体船的剪切阻力 (即摩擦阻力) 和压差阻力进行了分析, 研究安装喷水推进器流道对于船舶阻力性能的影响。

CFD 技术在船舶水动力领域的研究已较为成熟, 利用 CFD 方法针对适用于特殊需求的双体船如海上风电运维船的阻力性能及优化方法的研究有一定的价值。本文以某海上风电运维船为研究对象, 分析此船的阻力及航态, 并且研究加装压浪板这一优化方法, 为此海上风电运维船的优化设计提供一

定的参考。

## 1 数值模型

### 1.1 数值方法

本文基于 CFD 技术对船舶的阻力以及航态进行了研究, 对于不可压缩的三维流体, 需要满足连续方程及动量方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \rho \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial(-\rho \overline{u'_i u'_j})}{\partial x_j} \quad (2)$$

式中:

$\rho$ ——流体密度 ( $\text{kg/m}^3$ );

$u_i$ 、 $u_j$ ——平均速度分量 ( $\text{m/s}$ );

$x_i$ 、 $x_j$ ——坐标系分量 ( $\text{m}$ );

$\mu$ ——动力粘性系数 ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );

$P$ ——平均压力 ( $\text{Pa}$ );

$-\rho \overline{u'_i u'_j}$ ——雷诺应力项 ( $\text{Pa}$ )。

选用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型, 采用 VOF 方法对自由液面进行捕捉。

### 1.2 模型建立

本文所研究的船舶为一艘双体海上风电运维船, 根据船舶型线图, 使用 SolidWorks 和 Rhino 进行建模, 模型和实船的比例为 1:1。

主要参数如表 1 所示, 船模如图 1 所示。

模型建好后, 将船模导入到 STAR-CCM+ 中。

表 1 船舶主要参数

Tab. 1 Main parameters of the vessel

主尺度	实船
水线长 $L_w/\text{m}$	19.1
型宽 $B/\text{m}$	6.0
水线宽 $B_w/\text{m}$	3.6
片体宽 $b/\text{m}$	1.8
型深 $D/\text{m}$	3.2
设计吃水 $d/\text{m}$	1.6
结构吃水 $d_s/\text{m}$	1.6
方形系数 $C_b$	0.638
最大航速 $v/\text{kn}$	20.0
排水量 $\Delta/\text{t}$	71.7

注: 本文中 1 kn = 0.514 44 m/s

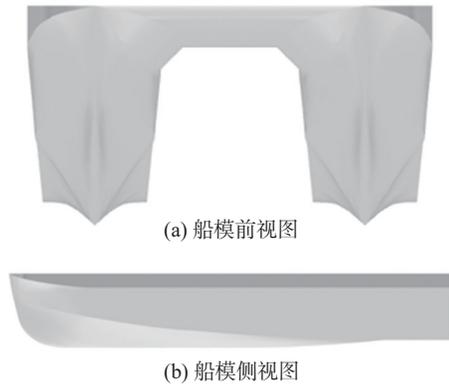


图1 船体模型视图

Fig. 1 Hull model view

### 1.3 计算域和网格生成

由于船舶左右对称，只对船舶的左侧进行数值模拟计算。

计算流体域的尺寸为：船前方向取2.5倍船长，船后方向取4.5倍船长；船宽方向取2倍船长；船下方取2倍船长，船体上方取1倍船长。

计算域包括了背景域和重叠域两个部分。建立的数值试验池的顶部、底部以及入口使用速度入口，两侧侧面使用对称面，出口使用压力出口。如图2所示。

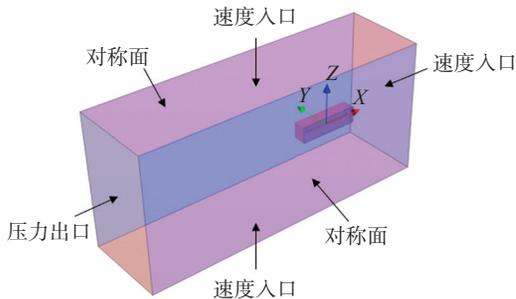


图2 计算域

Fig. 2 Computational domain

在STAR-CCM+软件内对计算域以及模型进行网格划分，采用了重叠网格法。为了保证计算结果的精确性，对船体周围特别是船首船尾处进行了局部加密，并且对自由液面处也进行了局部加密。为了避免反射，使用STAR-CCM+的VOF波阻尼功能进行消波。运动模拟使用DFBI (Dynamic Fluid Body Interaction) 进行求解。模拟时长取100 s。网格划分如图3所示。

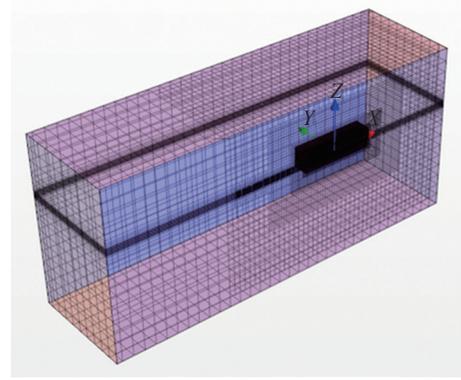


图3 网格划分

Fig. 3 Mesh generation

## 2 网格及时间步长敏感性研究

为了保证网格密度以及时间步长取值的合理性，以裸船模型为对象进行对比分析，以 $\sqrt{2}$ 为比率将网格基准尺寸及时间步长进行改变，对生成的所有方案进行计算，航速均取16 kn。对比分析得到的总阻力大小以验证敏感性。如表2和表3所示。

表2 网格密度敏感性方案

Tab. 2 Grid density sensitivity scheme

时间步长 /s	航速 /kn	网格基准 尺寸/m	生成网格 数量/个	总阻力 /kN
0.015	16	0.707	3 166 778	76.290
0.015	16	1.0	1 423 259	76.485
0.015	16	1.414	700 836	78.493
0.015	16	2.0	363 190	79.180
0.015	16	2.828	186 936	81.961

表3 时间步长敏感性方案

Tab. 3 Time step sensitivity scheme

时间步长 /s	航速 /kn	网格基准 尺寸/m	生成网格 数量/个	总阻力 /kN
0.0106	16	1.0	1 423 259	77.399
0.0150	16	1.0	1 423 259	76.485
0.0212	16	1.0	1 423 259	76.396
0.0300	16	1.0	1 423 259	81.587
0.0424	16	1.0	1 423 259	85.044

结果绘制成曲线图如图4和图5所示。

可以看出，分别以网格密度和时间步长为变量得出的系列总阻力趋向于稳定，由此可以保证数值模拟的网格密度及时间步长对计算结果没有大的影响。考虑到计算结果精确度以及计算资源耗费，最

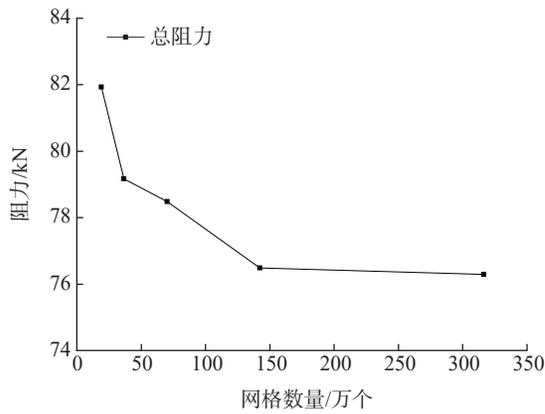


图 4 网格密度敏感性

Fig. 4 Grid density sensitivity

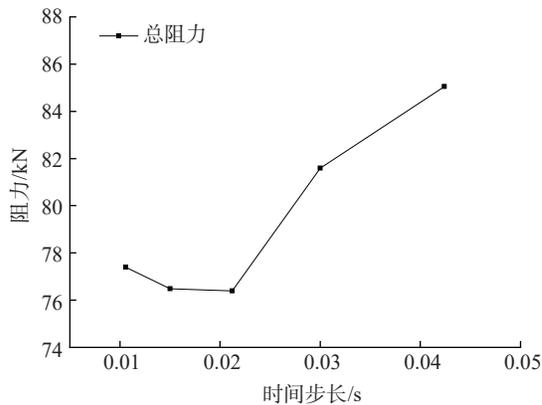


图 5 时间步长敏感性

Fig. 5 Time step sensitivity

终选取网格尺寸为 1.0 m, 网格总数约为  $1.4 \times 10^6$  个, 时间步长为 0.015 s 的方案。

### 3 阻力计算结果

取 10 kn, 13 kn, 16 kn, 20 kn 四个航速, 基于 CFD 技术得出了此船裸船体的阻力计算曲线, 计算时长为 100 s, 如图 6 所示, 阻力结果如图 7 和表 4 所示。由于数值模拟只针对半船进行了计算, 所以计算得到的阻力的两倍才是全船的阻力, 总阻力由摩擦阻力和压阻力组成。

可以得出结果: 对于本船, 总阻力随着航速的增加而增大, 在总阻力中, 压阻力的占比大于摩擦阻力, 减小压阻力是优化此船舶总阻力的有效手段之一。

### 4 优化方法及结果分析

#### 4.1 优化方法

对船舶阻力的优化有很多种, 如减小船体表面

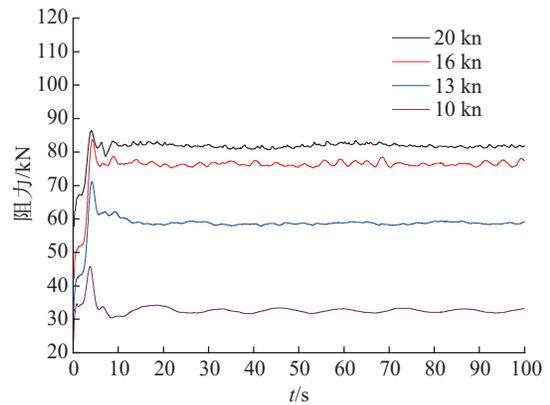


图 6 双体船各航速总阻力曲线

Fig. 6 Total resistance curve of catamaran at each speed

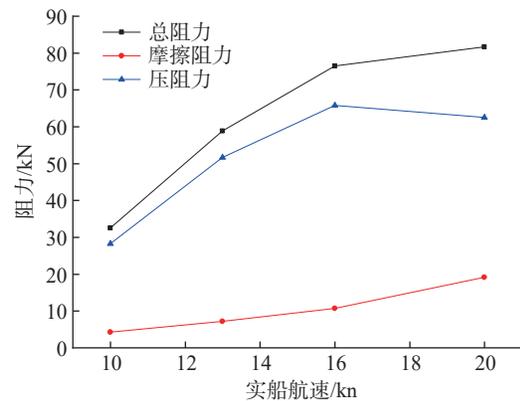


图 7 阻力结果曲线

Fig. 7 Resistance result curve

表 4 阻力计算结果

Tab. 4 Resistance calculation results

$F_r$	航速/kn	总阻力/kN	摩擦阻力/kN	压阻力/kN
0.376	10	32.517	4.271	28.246
0.489	13	58.827	7.200	51.627
0.602	16	76.485	10.700	65.785
0.752	20	81.635	19.112	62.523

粗糙度, 优化船型, 加装压浪板等。

由于加装压浪板的方法对于本船来说相对较为简易, 所以本文将加装压浪板作为优化方法, 尾压浪板指位于船体艉封板处沿船体底板向后延伸的一块短板, 尾压浪板通常有一定的安装角度  $\theta$ , 指的是压浪板与水平面的夹角, 如图 8 所示, 压浪板的长度可取船长的 1%-2%<sup>[16]</sup>, 综合考虑, 本文设计的尾压浪板的长度取船长的 2%, 安装角取  $0^\circ, 5^\circ, 7^\circ$ , 厚度均取 30 mm。最终得到三种压浪板的方案, 压浪板的参数如表 5 所示。



图8 压浪板示意图

Fig. 8 Schematic diagram of stern flap

表5 压浪板参数

Tab. 5 stern flap parameters

压浪板方案	长度/mm	安装角/(°)
方案一	382	0
方案二	382	5
方案三	382	7

## 4.2 减阻效果分析

本文针对船舶裸船体及压浪板的三种安装方案,计算10 kn, 13 kn, 16 kn, 20 kn四种航速下的船舶总阻力,如表6所示。

表6 各方案总阻力

Tab. 6 Total resistance of each scheme

$F_r$	航速/kn	模型	总阻力/kN	减阻效果/%
0.376	10	裸船体	32.517	—
0.376	10	0°压浪板	31.983	1.64
0.376	10	5°压浪板	32.824	-0.94
0.376	10	7°压浪板	33.252	-2.26
0.489	13	裸船体	58.827	—
0.489	13	0°压浪板	56.018	4.78
0.489	13	5°压浪板	56.026	4.76
0.489	13	7°压浪板	56.478	3.99
0.602	16	裸船体	76.485	—
0.602	16	0°压浪板	73.254	4.22
0.602	16	5°压浪板	71.340	6.73
0.602	16	7°压浪板	70.919	7.28
0.752	20	裸船体	81.635	—
0.752	20	0°压浪板	78.222	4.18
0.752	20	5°压浪板	75.665	7.31
0.752	20	7°压浪板	74.954	8.18

可以绘制出各个方案的总阻力曲线,如图9所示。

由计算结果可以分析出:在实船航速大于等于13 kn时,在船尾加装压浪板的减阻效果十分明显,减阻效果均处于3.99%及以上,最大减阻效果达到

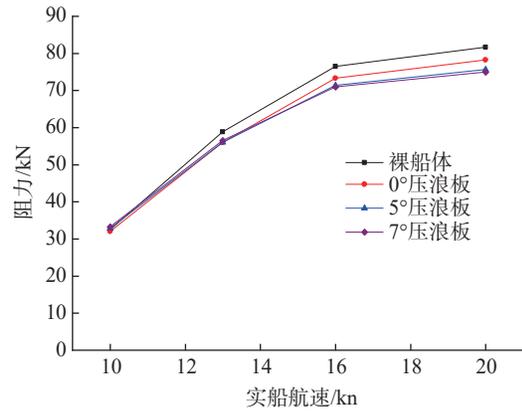


图9 各方案总阻力曲线

Fig. 9 Total resistance curve of each scheme

了8.18%,在16 kn和20 kn航速时,安装角为5°、7°的压浪板的减阻效果优于0°压浪板;在13 kn航速时,各压浪板方案减阻效果接近;在实船航速为10 kn时,在船尾加装压浪板的减阻效果比较差,几乎失去了减阻效果。压浪板的减阻效果主要是因为安装了压浪板之后,通过增加船体的虚长度影响尾部的流场<sup>[17]</sup>,降低尾部相应波区的波高,减少船舶的兴波阻力,进而减少船舶总阻力,可见本文4.4节的波形图分析。

## 4.3 船舶航态分析

### 4.3.1 升沉分析

本文还分析了在船尾加装压浪板对于船舶航态中的升沉的影响,如表7所示。

可以绘制出各个方案的升沉量曲线,如图10所示。

由计算结果可以分析出:加装压浪板对于船舶航态的升沉有着一定的影响,在16 kn以及20 kn的较高航速下,加装压浪板对升沉量的降低效果较大,均处于13.19%及以上,最大降低效果达到了59.91%;在其他航速下,加装安装角为0°时的压浪板对于升沉量的降低效果相对较小;各航速下加装安装角为5°的压浪板对于船舶升沉量的降低效果均大于安装角为0°的压浪板,安装角为7°的压浪板的降低效果大于安装角为5°的压浪板。

### 4.3.2 纵倾分析

本文还分析了在船尾加装压浪板对于船舶航态中的纵倾的影响,如表8所示。

可以绘制出各个方案的纵倾角曲线,如图11所示。

表 7 各方案升沉量

Tab. 7 Heave of each scheme

$F_r$	航速/kn	模型	升沉量/mm	升沉量降低/%
0.376	10	裸船体	-111.23	—
0.376	10	0°压浪板	-103.73	6.74
0.376	10	5°压浪板	-95.12	14.48
0.376	10	7°压浪板	-91.27	17.94
0.489	13	裸船体	-217.88	—
0.489	13	0°压浪板	-208.76	4.19
0.489	13	5°压浪板	-194.88	10.56
0.489	13	7°压浪板	-187.68	13.86
0.602	16	裸船体	-174.54	—
0.602	16	0°压浪板	-151.52	13.19
0.602	16	5°压浪板	-136.11	22.02
0.602	16	7°压浪板	-131.10	24.89
0.752	20	裸船体	-61.78	—
0.752	20	0°压浪板	-46.03	25.50
0.752	20	5°压浪板	-33.58	45.64
0.752	20	7°压浪板	-24.77	59.91

表 8 各方案纵倾角

Tab. 8 Trim angle of each scheme

$F_r$	航速/kn	模型	纵倾角/(°)	纵倾角降低/%
0.376	10	裸船体	-0.38	—
0.376	10	0°压浪板	-0.24	37.79
0.376	10	5°压浪板	-0.06	85.45
0.376	10	7°压浪板	0.01	102.64
0.489	13	裸船体	-2.38	—
0.489	13	0°压浪板	-2.14	10.13
0.489	13	5°压浪板	-1.86	21.76
0.489	13	7°压浪板	-1.77	25.62
0.602	16	裸船体	-3.24	—
0.602	16	0°压浪板	-2.92	9.80
0.602	16	5°压浪板	-2.54	21.66
0.602	16	7°压浪板	-2.40	25.92
0.752	20	裸船体	-2.95	—
0.752	20	0°压浪板	-2.50	15.24
0.752	20	5°压浪板	-1.93	34.64
0.752	20	7°压浪板	-1.75	40.66

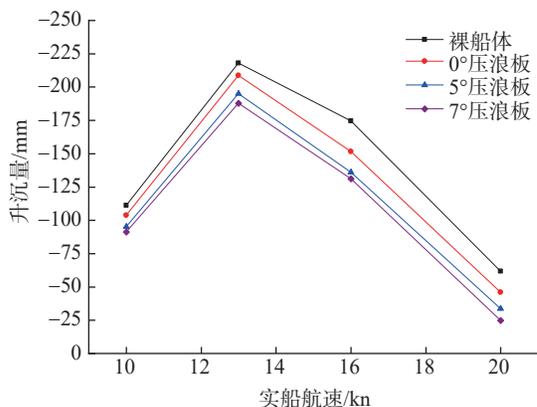


图 10 各方案升沉量曲线

Fig. 10 Heave curve of each scheme

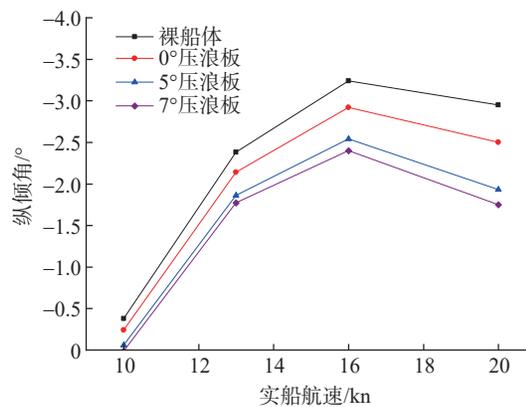


图 11 各方案纵倾角曲线

Fig. 11 Trim angle curve of each scheme

由计算结果可以分析出: 加装压浪板对于船舶航态的纵倾角有着一定的影响, 在各个航速下, 对于纵倾角的降低效果均处于 9.80% 及以上, 最大降低效果达到了 102.64%; 加装安装角为 5° 的压浪板对于船舶纵倾角的降低效果大于安装角为 0° 的压浪板, 安装角为 7° 的压浪板的降低效果大于安装角为 5° 的压浪板。需要注意, 当加装安装角为 7° 的压浪板后, 船舶在 10 kn 航速下航行时, 可能会出现微小的艏倾现象。

### 4.3.3 航态改变分析

加装压浪板可以改变航态主要是因为船舶航

行过程中, 压浪板可以使船舶产生附加力矩, 进而改变船舶的航态。

### 4.4 波形图分析

将实船 16 kn ( $F_r=0.602$ ) 时的裸船体以及安装角分别为 0°、5°、7° 的压浪板方案的波形图进行对比分析, 波形图所处时刻均为结果稳定处的相同时刻, 如图 12 至图 15 所示。

波形斜视图如图 16 至图 19 所示。

由波形图可以看出, 安装压浪板的船体, 虚长度比裸船体稍长, 而安装角为 5° 及 7° 的压浪板的虚长度更长。压浪板的安装会有效降低尾部相应波区

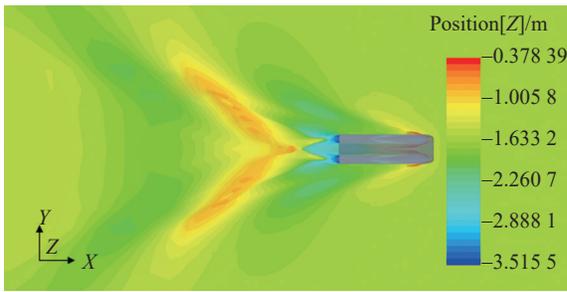


图 12 裸船体 16 kn 波形图  
Fig. 12 16 kn waveform of bare hull

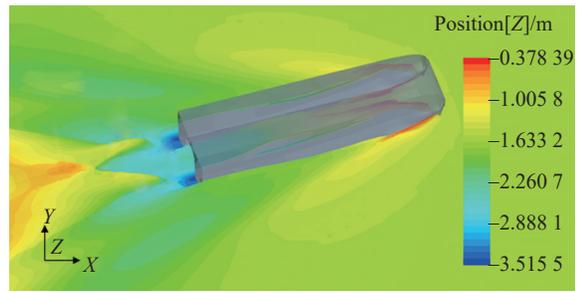


图 16 裸船体 16 kn 波形斜视图  
Fig. 16 Oblique view of bare hull 16 kn waveform

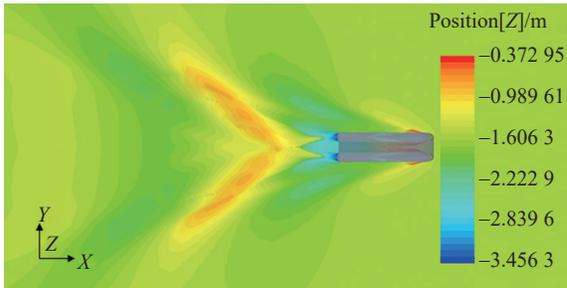


图 13 0°压浪板 16 kn 波形图  
Fig. 13 16 kn waveform of 0° stern flap

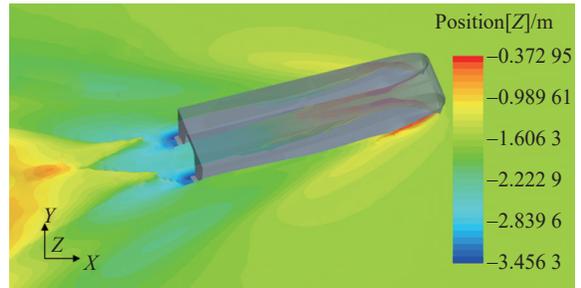


图 17 0°压浪板 16 kn 波形斜视图  
Fig. 17 Oblique view of 16 kn waveform of 0° stern flap

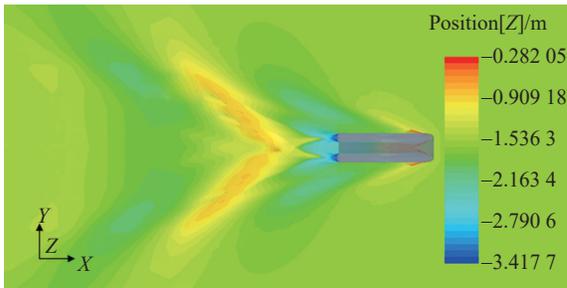


图 14 5°压浪板 16 kn 波形图  
Fig. 14 16 kn waveform of 5° stern flap

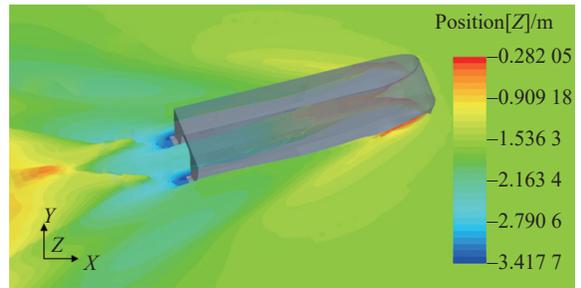


图 18 5°压浪板 16 kn 波形斜视图  
Fig. 18 Oblique view of 16 kn waveform of 5° stern flap

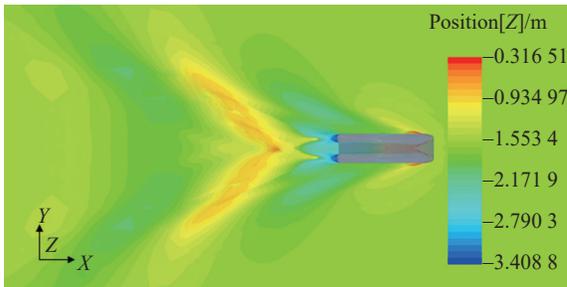


图 15 7°压浪板 16 kn 波形图  
Fig. 15 16 kn waveform of 7° stern flap

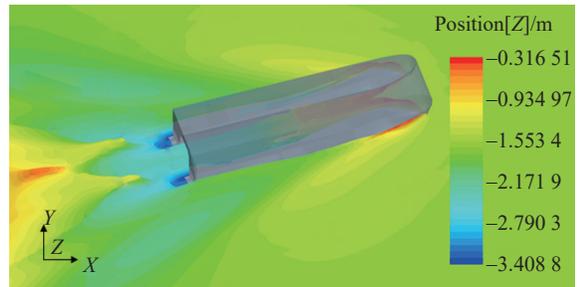


图 19 7°压浪板 16 kn 波形斜视图  
Fig. 19 Oblique view of 16 kn waveform of 7° stern flap

的波高值，降低船舶兴波阻力，最终降低船舶的总阻力。

### 5 结 论

文章基于CFD方法对本双体船的阻力进行了数

值模拟计算，对四个航速下的总阻力进行分析，在总阻力中，压阻力的占比大于摩擦阻力。

在船尾加装压浪板可以降低此船的阻力，并且改变船舶航行时的升沉量、纵倾角。阻力方面：随着航速增加，压浪板的减阻效果也随之增大，在较

高航速时, 减阻效果尤为明显。且在给定的安装角范围内, 随着船体加装压浪板的安装角角度增加, 减阻效果也随之增大; 升沉量方面: 在较高航速时, 对升沉量的降低效果尤为明显。在给定的安装角范围内, 随着压浪板的安装角角度增加, 升沉量降低效果也随之增大; 纵倾角方面: 在各个航速下, 对于船舶纵倾角都有一定的降低效果。在给定的安装角范围内, 随着压浪板的安装角角度增加, 纵倾角降低效果也随之增大。

综上所述, 在船尾加装合适的压浪板对双体船的阻力性能有一定的改善效果, 同时也能改变船舶的航态, 可以为本船的性能优化提供参考。

#### 参考文献:

- [1] 李红涛, 王宾, 唐广银. 海上风电场设施技术规范综述 [J]. 南方能源建设, 2019, 6(2): 1-6. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.001.  
LI H T, WANG B, TANG G Y. Summary of technical specifications for offshore wind farm facilities [J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(2): 1-6. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.02.001.
- [2] 周成, 王志永, 程海刚. 29.6 m 高速双体风电运维船有限元强度分析 [J]. 江苏船舶, 2020, 37(3): 8-10+5. DOI: 10.19646/j.cnki.32-1230.2020.03.003.  
ZHOU C, WANG Z Y, CHENG H G. Finite element strength analysis of a 29.6 m high-speed catamaran wind power operation and maintenance ship [J]. Jiangsu Ship, 2020, 37(3): 8-10+5. DOI: 10.19646/j.cnki.32-1230.2020.03.003.
- [3] 高汪涛. 某深拖母船阻力性能研究与船型优化 [D]. 上海: 上海交通大学, 2019. DOI: 10.27307/d.cnki.gsjtu.2019.000587.  
GAO W T. Research on resistance performance of a deep-towing mothership and its hull form optimization [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. DOI: 10.27307/d.cnki.gsjtu.2019.000587.
- [4] 李纳, 刘和炜, 张彬. 基于 STAR-CCM+ 的鱿鱼钓船波浪增阻数值计算与球鼻艏选型分析 [J]. 中国渔业质量与标准, 2021, 11(3): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1833.2021.03.004.  
LI N, LIU H W, ZHANG B. Numerical calculation of wave-added resistance and selection analysis of bulbous bow for squid jigging boat based on STAR-CCM+ [J]. Chinese Fishery Quality and Standards, 2021, 11(3): 25-31. DOI: 10.3969/j.issn.2095-1833.2021.03.004.
- [5] 陈涛, 崔健, 陆泽华, 等. 艉压浪板与艉垂直板对浅吃水高速船快速性的影响比较 [J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2019, 42(3): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5949.2019.03.001.  
CHEN T, CUI J, LU Z H, et al. Comparison of the effects of stern flap and stern vertical plate on the speed and resistance of high speed ships with shallow draft [J]. Journal of Shanghai Scientific Research Institute of Shipping, 2019, 42(3): 1-5. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5949.2019.03.001.
- [6] 李冬琴, 李鹏, 章易立, 等. 分段式尾压浪板对高速船阻力性能的影响 [J]. 船舶工程, 2019, 41(7): 37-43. DOI: 10.13788/j.cnki.cbgc.2019.07.07.  
LI D Q, LI P, ZHANG Y L, et al. Influence of segmented stern flap on resistance performance of high speed craft [J]. Ship Engineering, 2019, 41(7): 37-43. DOI: 10.13788/j.cnki.cbgc.2019.07.07.
- [7] 于兴鹏. 海上双体风电运维船总体设计的关键技术研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020. DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2020.000067.  
YU X P. Research on the key technologies of the overall design of offshore catamaran wind power operation and maintenance ship [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2020.000067.
- [8] 许媛媛, 吕彩霞, 李建, 等. 基于 CFD 的中低速 Wigley 船模黏性阻力 [J]. 船舶工程, 2019, 41(9): 36-40+99. DOI: 10.13788/j.cnki.cbgc.2019.09.08.  
XU Y Y, LÜ C X, LI J, et al. Viscous resistance of medium and low speed wigley ship model based on CFD [J]. Ship Engineering, 2019, 41(9): 36-40+99. DOI: 10.13788/j.cnki.cbgc.2019.09.08.
- [9] 张明霞, 李岗, 王志豪, 等. 基于 STAR-CCM+ 的 V 型无压载水船阻力性能研究 [J]. 船舶工程, 2020, 42(3): 47-55+134. DOI: 10.13788/j.cnki.cbgc.2020.03.09.  
ZHANG M X, LI G, WANG Z H, et al. Research on resistance performance of V-shape non-ballast water ship based on STAR-CCM+ [J]. Ship Engineering, 2020, 42(3): 47-55+134. DOI: 10.13788/j.cnki.cbgc.2020.03.09.
- [10] 刘飞. 基于 CFD 方法的破损船舶阻力预报研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2021. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000911.  
LIU F. Study on resistance prediction of damaged ship based on CFD method [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2021. DOI: 10.27060/d.cnki.ghbcu.2021.000911.
- [11] 高天敏. 双体风电运维船尾下沉与阻力及耐波性综合研究 [D]. 镇江: 江苏科技大学, 2020. DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2020.000390.  
GAO T M. The comprehensive research on sinking, resistance and wave resistance of the catamaran wind power operation and maintenance ship [D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2020. DOI: 10.27171/d.cnki.ghdcc.2020.000390.
- [12] 方静, 黄晶, 冯佰威, 等. 基于 CFD 的超小型双体无人船总体设计 [J]. 船舶工程, 2018, 40(5): 1-3+56. DOI: 10.13788/j.cnki.cbgc.2018.05.001.  
FANG J, HUANG J, FENG B W, et al. General design of un-

- manned ultra-small catamaran ship based on CFD [J]. *Ship Engineering*, 2018, 40(5): 1-3+56. DOI: 10.13788/j.cnki.cb-gc.2018.05.001.
- [13] 陈悦, 胡冬芳, 杨铃玉, 等. 三体风电运维船主侧体特征参数及阻力性能研究 [J]. *中国造船*, 2016, 57(4): 80-86. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2016.04.009.
- CHEN Y, HU D F, YANG L Y, et al. Research on parameters of main and side hull and resistance performance of a transportation and maintenance trimaran [J]. *Shipbuilding of China*, 2016, 57(4): 80-86. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2016.04.009.
- [14] 杨培青, 管义锋. 基于CFD的三维船体摩擦阻力预报与验证 [J]. *船舶工程*, 2007, 29(3): 61-64. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6982.2007.03.012.
- YANG P Q, GUAN Y F. Prediction and validation of frictional resistance of 3-D hull based on CFD [J]. *Ship Engineering*, 2007, 29(3): 61-64. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6982.2007.03.012.
- [15] 钱浩, 宋科委, 郭春雨, 等. 喷水推进器流道对船舶阻力性能的影响 [J]. *中国舰船研究*, 2017, 12(2): 22-29. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2017.02.003.
- QIAN H, SONG K W, GUO C Y, et al. Influence of waterjet duct on ship's resistance performance [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2017, 12(2): 22-29. DOI: 10.3969/j.issn.1673-3185.2017.02.003.
- [16] 邵世明, 王云才. 尾压浪板对高速艇阻力性能的影响 [J]. *中国造船*, 1981(1): 31-41.
- SHAO S M, WANG Y C. The effects of stern trimming flap on resistance of high speed craft [J]. *Shipbuilding of China*, 1981(1): 31-41.
- [17] 孙聪, 宋科委, 尹晓辉, 等. 两种尾部附体在过渡型船舶上的对比研究 [J]. *中国造船*, 2019, 60(1): 30-39. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2019.01.004.
- SUN C, SONG K W, YIN X H, et al. Comparative study of two types of stern appendages on semi-displacement ships [J].

*Shipbuilding of China*, 2019, 60(1): 30-39. DOI: 10.3969/j.issn.1000-4882.2019.01.004.

#### 作者简介:



蔡翰翔

1997-, 男, 江苏盐城人, 船舶与海洋工程硕士研究生, 主要从事海上风电运维船研究 (e-mail) caihanxiang2019@163.com。

蔡翰翔

#### 陈超核 (通信作者)

1962-, 男, 湖南蓝山人, 教授, 博士生导师, 主要从事船舶与海洋工程装备研发 (e-mail) chenchaoh@scut.edu.cn。

#### 项目简介:

**项目名称** 2021年广东省促进经济高质量发展专项(海洋经济发展)重点项目“深远海高性能海上风电运维船与核心装备研发与应用示范”(GDNRC [2021] 39)

**承担单位** 中集海洋工程有限公司, 华南理工大学等

**项目概述** 基于船舶流体力学以及结构力学方法, 开展深远海长自持海上风电运维船智能优化设计方法; 提出配置永磁电机和直流总线的运维船混动系统方案设计; 研发与DP联动的主动式波浪补偿的运维船登乘系统, 讨论不同控制方法稳定性与收敛性。

**主要创新点** (1) 比选多学科多目标智能优化方法, 开展满足快速性、耐波性、舒适性以及轻量化要求的深远海长自持海上风电运维船智能优化设计方法; (2) 结合运维船实际需求, 优化混动系统动力分配方式和介入方式; (3) 分析主动式补偿登乘系统在不同环境载荷作用下的有效性与适应性, 优化时滞影响。

(责任编辑 叶筠英)