

一种大型船舶减速鳍的实尺度减速性能研究

郝帅, 李祚重, 张泽栋, 南方方, 潘骥, 赵崇宇
(天津理工大学 海运学院, 天津 300384)

摘要:大型船舶在设计航速下的操纵性通常不佳,导致船舶安全航行不断面临风险挑战。与此同时,在船舶智能化、无人化不断发展的今天,大型船舶的先天操纵性不佳问题也对实现安全的船舶自主操控提出了更为严苛的技术要求。为了提升现有船舶的减速性能,文章提出了一种减速鳍装置,基于实尺度计算流体力学(CFD)绕流阻力分析研究其减速性能,并对其减速效果进行仿真。研究表明,配备设计得当的减速鳍,可明显提升大型船舶的减速及转舵性能,从而大幅改善船舶操纵性及航行安全性。

关键词:大型船舶; 减速装置; 计算流体力学(CFD); 实尺度模拟; 航行阻力

中图分类号:U662 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1000-4653.2025.02.013

Real-scale research on deceleration performance of a pair of spoiler fins designed for large ships

HAO Shuai, LI Zuozhong, ZHANG Zedong, NAN Fangfang, PAN Ji, ZHAO Chongyu
(Maritime College, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: The manoeuvrability of large ships is generally undesirable at their design speed, resulting in continuous risks to ship navigation safety. Meanwhile, the development of intelligent and unmanned ship design and construction brings stricter technical requirements for the safe realisation of autonomous ship navigation due to the inherent weakness in the manoeuvrability of large ships. To improve the braking performance of existing ships, the study proposes the installation of a pair of spoiler fins, the braking performance of which is investigated using real-scale CFD flow resistance analyses. Furthermore, the braking effects are simulated. The study shows that equipping large ships with properly designed spoiler fins can significantly improve their deceleration and steering performance, thereby promoting higher ship manoeuvrability and navigation safety.

Key words: large ships; ship's speed reducer; CFD; real-scale simulation; ship resistance

大型船舶的操纵性通常较差,其主要表现为加减速耗时、转舵迟缓,航行中遭遇突发情况存在撞船风险,如图1所示,不但会造成人员伤亡、经济损失,甚至可能破坏海洋环境。对此,航运业过去始终依靠船员的驾驶经验来弥补,如预留充足的减速冲程、限速及限制最小船间距等。然而,这些过于保守的应对措施极大地降低了海上通航效率,也增加了操船难度。而在船舶智能化、无人化不断发展的今天,大型船舶的操纵性不佳还导致了自主操船指令的下

达存在严重的回馈迟滞,进而对实现船舶自主闭环控制提出了更为严苛的要求。

在航空及车辆交通领域,利用控制面来增强交通工具操控性能的案例屡见不鲜,如民航客机的扰流板(又称减速板),又如跑车的尾翼等,如图2及图3所示。它们都能在必要时展开以实现或辅助其减速和转向。现代船舶虽然时常配备减摇鳍,但该装置因结构强度有限,主要用于减摇,不适用于船舶减速,因此需提出一种新型船舶减速装置。

收稿日期:2024-04-03

基金项目:天津市大学生创新创业训练计划-创新训练项目(202110060028)

通信作者:郝帅(1990—),男,讲师,博士,研究方向为船舶及海洋浮式结构物水动力及系泊分析。E-mail:harrison@email.tjut.edu.cn

引用格式:郝帅,李祚重,张泽栋,等.一种大型船舶减速鳍的实尺度减速性能研究[J].中国航海,2025,48(2):98-109.

HAO S, LI Z Z, ZHANG Z D, et al. Real-scale research on deceleration performance of a pair of spoiler fins designed for large ships[J]. Navigation of China, 2025, 48(2): 98-109. (in Chinese)



(a) 交叉相撞



(b) 对遇相撞

图 1 撞船事故

Fig. 1 Collision accident



图 2 民航客机扰流板

Fig. 2 Spoilers on airliners



(a) 左后翼

(b) 右前翼

图 3 跑车的自动升降前后翼

Fig. 3 Automatic front and rear wings on sport cars

在船舶减速装置的设计探索方面,以往的研究大多围绕专利的提出上^[1-5],并未进行系统性的实际减速效果验证,导致人们对该类装置的作用效果知之甚少,而这些专利也未得到广泛实船应用。尽管如此,仍有大批学者致力于大型船舶的航行阻力问题研究:孙晨光等^[6]以 OpenFOAM 为基础,采用 naoe-FOAM-SJTU 求解器及重叠网格技术,对带桨 KVLCC2 船模进行了紧急倒车停船的数值模拟,并将其与模型试验结果进行了对比验证,证明了求解器对于此类工况预报的正确性。ISLAM 等^[7]采用 RANS(时均 N-S 方程)方法,对 KCS(KRISO Con-

tainer Ship) 船模在三种不同傅汝德数及吃水下的航行阻力进行了数值预报,并完成了水池试验验证。FENG 等^[8]对 KCS 集装箱船进行了船体外形参数优化,以寻求其静水及波浪中的最小航行阻力。OBWOGI 等^[9]利用计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)重叠网格技术及组分体积分数(Volume of Fluid, VOF)法对商船上舵附推力鳍的设计过程展开了研究,并进行了模型试验。然而,以上这些研究,均采用缩尺比水池模型试验结果来验证相同缩尺比数值模型计算结果的研究思路。该方法虽然大幅降低了数值模型计算的成本与难度,但需要有模型向实船的换算过程,导致尺度效应带来的误差不可避免。

本文以客机及跑车为启发,提出了一种用于大型船舶快速减速的减速鳍装置,将其对称布置于船舶两舷的设计水线之下。为了研究该装置的减速效果,以大型集装箱船的标准船型为例,基于 CFD 理论及数值计算方法,以实尺度船体建模研究该船型配备减速鳍后在高速航行中的减速及转舵性能改善情况。

1 数值仿真实论及计算模型

本研究基于 CFD 方法,以大型集装箱船为搭载减速鳍装置的母船,以该船型的标准船模试验数据为依据,单独验证母船阻力数值计算结果,证明本研究所采用的建模方法及计算设置的正确性,从而保证集装箱船-减速鳍组合体的阻力计算结果有效而可信。

1.1 流动基本方程与湍流模型

船体周围流场中的速度、压强分布须满足流动基本方程以及该流场在时间和空间上的限制条件。流动基本方程主要包括质量守恒方程和动量守恒方程。通过上述条件建立方程组,可求解相应的流动问题^[10]。另外,船舶航行时周围水体通常处于湍流状态,为了降低求解难度,还需引入基于雷诺平均法的湍流模型来封闭方程组,使之顺利求解^[11]。

质量守恒方程又称连续性方程,对于匀质不可压缩流体,其基于雷诺平均的瞬态连续性方程表达式为

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

式中, ρ 为流体密度, t 为时间变量, x_i 为第 i 个方向上的坐标, u_i 为第 i 个方向上的速度。

对于黏性不可压缩流体,基于雷诺平均的动量

守恒方程表达式可写为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

其中, x_j 表示区别于 i 的第 j 个方向上的坐标, u_j 为第 j 个方向上的速度, δ_{ij} 为单位张量分量, $\overline{u'_i}$ 及 $\overline{u'_j}$ 为平均脉动速度, $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力项。式(1)与式(2)共同组成了基于雷诺平均的 Navier-Stokes 方程 (RANS 方程)。

标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型的运输方程^[12] 为:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \varepsilon \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} G_k - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \end{cases} \quad (3)$$

其中, k 为湍流动能, ε 为湍流耗散率, u_i 为湍流黏

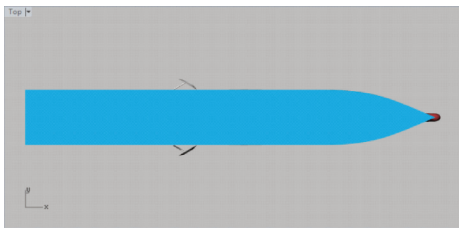
度, $u_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$, σ_k 和 σ_ε 为湍流普朗特数, G_k 代表由平均速度梯度造成的湍流动能生成量。各模型系数采用普适性较强的默认值, 具体为 $C_{1\varepsilon} = 1.44$, $C_{2\varepsilon} = 1.92$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$, $\sigma_\varepsilon = 1.3$ 。

1.2 母船参数

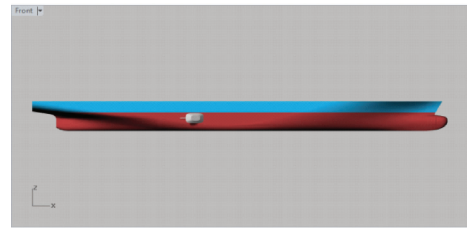
本研究选用搭载减速鳍装置的母船为 KCS 大型集装箱船。该船作为现代大型商船的代表船型, 常被作为多家研究机构水动力模型试验的测试对象, 其中包括船舶操纵仿真方法验证与确认国际研讨会 (Workshop on Verification and Validation of Ship Manoeuvring Simulation Methods, SIMMAN) 及日本国家海事研究所 (National Maritime Research Institute, NMRI)。经过长期研究, 现已总结出一套水池试验和 CFD 数值模拟相互之间的校准方法, 该船型也因此积累了大量可参考测试数据。其船体外形, 如图 4 所示, 主要设计参数, 见表 1。

1.3 减速鳍设计参数

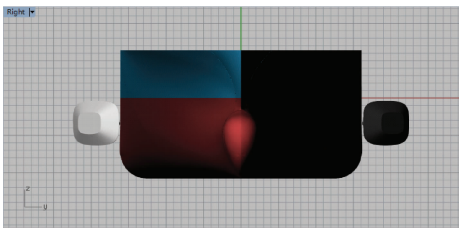
结合客机及跑车扰流板的基本特征, 经过对减速鳍尺寸、材质、布局方式等设计参数的优化, 本文



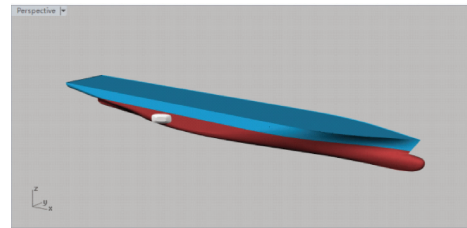
(a) 俯视图



(b) 侧视图



(c) 前视图



(d) 斜视图

图4 KCS 船体外形及减速鳍的布置位置

Fig.4 Hull of KCS and configuration of spoiler fins

提出减速鳍的设计外形, 如图 5 所示, 其设计参数, 见表 2。

减速鳍由液压系统推动, 正常航行时处于完全收起状态。当船舶制动时, 两舷减速鳍对称展开一定或全部角度, 通过增加船体在水中的航行阻力来实现船舶制动。当船舶转向时, 仅展开其中一舷的减速鳍, 使船体两舷受到非平衡的阻力作用, 形成转舵力矩, 以实现船舶快速转向。减速鳍在船体上的

具体布置位置, 如图 4 所示, 减速鳍的不同展开角度, 如图 6 所示。

1.4 模型建立与验证

数值模拟计算借助 ANSYS Fluent 完成。为了校准计算模型, 先采用 VOF 法对缩尺比(1:31.6)及实尺度(1:1)裸船体进行了基准航速下的瞬态绕流阻力分析, 又采用叠模法对实尺度裸船体及船-鳍组合体的定常阻力变化规律进行了瞬态绕流分析。

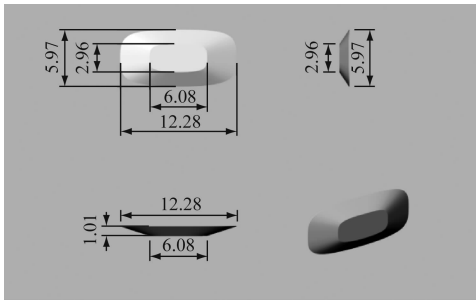


图5 减速鳍设计外形及尺寸(单位:m)

Fig. 5 Outlines and dimensions of the spoiler fins

表1 母船主要设计参数

Tab.1 Design parameters of the parent ship

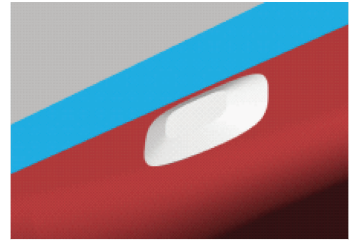
参数	数值
垂线间长 L_{pp}/m	230.0
最大水面宽 B_{wl}/m	32.2
型深 D/m	19.0
吃水 d/m	10.8
排水体积 ∇/m^3	52 030
重心纵向坐标 y_c (距尾垂线)/m	115.0
湿表面积 S_w/m^2	9 424
设计航速 U/kn	24.0
设计航速下的傅汝德数 Fn	0.260
船摇惯性(回转)半径 K_{zz}/m	57.5
舵叶湿表面积 S_R/m^2	115.0

表2 减速鳍设计参数

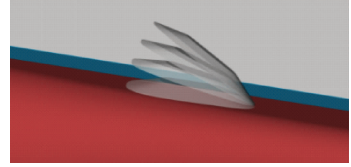
Tab.2 Design parameters of the spoiler fins

参数	数值
最大展开角度 $\theta_{max}/^\circ$	30
完全收起角度 $\theta_0/^\circ$	0
鳍片厚度 t/mm	30
正投影面积 S_p/m^2	66.31
外表面积 S_s/m^2	72.16
材料体积 V_{fin}/m^3	1.989
轮廓体积 V'_{fin}/m^3	40.713

设定计算流域的原点与船舶重心重合, X 轴沿船体纵向, Y 轴沿船体横向, Z 轴竖直向上。基于现有计算硬件条件, 网格数量控制在 500 万级, 均采用四面体网格形式, 在船体表面及附近进行网格加密, 并沿船体固壁外法向增加膨胀层网格以准确计算对阻力影响较大的边界层区域。船体周围的湍流区域采用标准 $k-\varepsilon$ 模型, 并采用标准壁面函数进行近壁



(a) 完全收起

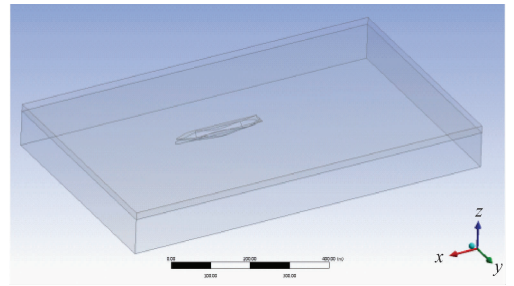


(b) 不同角度展开

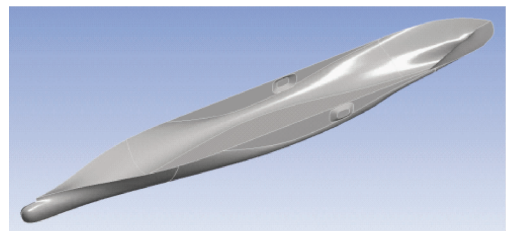
图6 减速鳍的不同展开角度

Fig. 6 Different angles of the spoiler fins

处理。流场边界条件选择速度入口及压力出口, 在压力-速度耦合过程中采用 SIMPLE 算法。上述主要建模及计算过程, 如图 7 ~ 图 9 所示。



(a) 全部计算流域

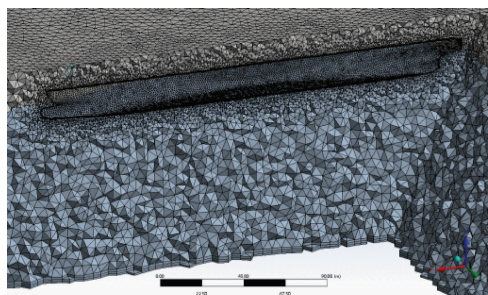


(b) 船体湿表面

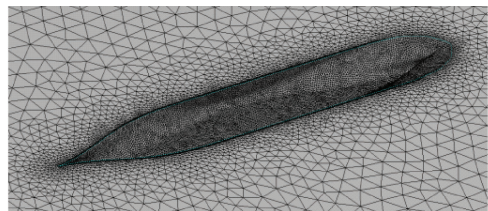
图7 几何模型建立

Fig. 7 Geometry modeling

不同于以往文献主要基于缩尺比数值模型计算来得出结论, 本文采用实尺度数值模拟, 建立与实船等大的 CFD 计算模型, 因此本研究在船模尺度及实船尺度下对数值模型均进行了验证。将裸船体在双尺度模型下的阻力计算结果与 SIMMAN 及 NMRI 公布的 KCS 标准模型试验结果进行比对, 证明了本研究建模方法及计算设置的正确性, 也同时证明了在此基础上形成的船-鳍组合体阻力计算的有效性。验证结果如下, 具体验证过程见第 1.5 节。



(a) 三维网格剖切



(b) 湿表面及静水面网格

图8 网格划分

Fig. 8 Meshing

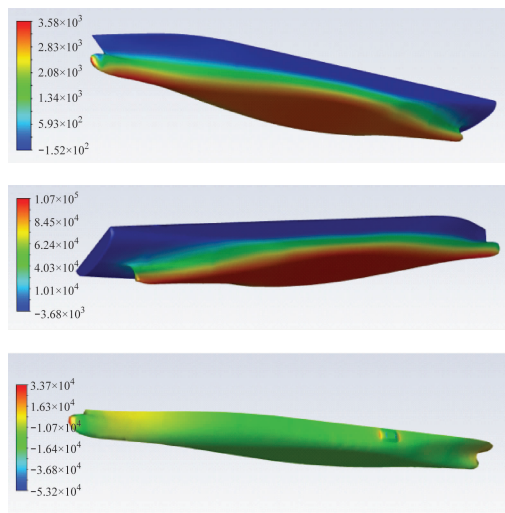


图9 数值计算求解

Fig. 9 Numerical calculation

缩尺比条件下,建立与 KCS 试验船模等大的数值船模,并采用 VOF 法考虑自由液面兴波影响,计算 $F=0.26$ 时(模型航速 $U_m=2.196$ m/s)的阻力值。当瞬态计算稳定后,阻力计算结果为 89.17 N。而水池试验测得的总阻力系数为 $C_T=3.711 \times 10^{-3}$,求得相应的试验总阻力 R_{Tm} 为 85.43 N。然而,由于模型和实船的傅汝德数及雷诺数无法同时相等,单纯依靠模型阻力系数求得的实船阻力将可能存在误差。

实尺度条件下,采用二因次法、三因次法^[13],将标准船模试验的测试数据换算至实船尺度,再与实尺度数值计算结果进行比对。同样采用 VOF 法考虑其兴波影响,计算实船航速 $U=10$ m/s 时的阻力

值。瞬态计算稳定后,求得阻力为 1 153 kN(117.60 t)。若简化数值计算过程,采用叠模法忽略自由液面影响,则阻力结果为 907 kN(92.46 t)。据试验数据,经二因次法换算的实船结果为 1 045 kN(106.58 t);三因次法的换算结果为 971 kN(98.97 t)。

综上所述,双尺度下的数值模型验证误差均很小,故本文所采用的建模方法及计算设置的准确度满足要求。另外,对比上述 VOF 法及叠模法的阻力结果,兴波阻力在总阻力中的占比较小,尽管 VOF 法预报阻力更为精确,但计算成本较叠模法大幅增加。鉴于本研究属于对减速鳍性能的初步探究,统一采用叠模法依然可以接受。

为了更加直观地表达阻力的大小,后文阻力结果以 t 为单位进行表示。除验证某一特定航速下的计算结果外,还验证了不同航速下原裸船体及减速鳍完全收起时的船-鳍组合体阻力变化规律,如图 10 所示。

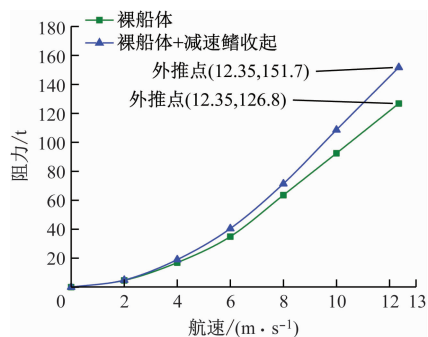


图10 布置减速鳍对原裸船体阻力的影响

Fig. 10 Resistance influence by the spoiler fins to the naked hull

1.5 模型验证过程

根据 SIMMAN 及 NMRI 对 KCS 船开展水池模型试验获得的公开数据,对本文研究采用的数值模型进行验证。不同航速下的船模阻力试验数据见表 3。

表3 不同航速下的船模阻力试验数据

Tab.3 Model resistances under different speeds

F_r	$C_T \times 10^3$	Re	C_{fm}	U_m
0.108	3.796	5.230×10^6	3.369×10^{-3}	0.915
0.152	3.641	7.330×10^6	3.169×10^{-3}	1.281
0.195	3.475	9.420×10^6	3.031×10^{-3}	1.647
0.227	3.467	1.100×10^7	2.951×10^{-3}	1.922
0.260	3.711	1.260×10^7	2.883×10^{-3}	2.196
0.282	4.501	1.360×10^7	2.846×10^{-3}	2.379

1) 船模阻力换算过程

根据所公开的船模阻力系数换算船模阻力值,公式如下。换算过程中的参数取值见表4。

表4 船模阻力换算过程

Tab.4 Resistance conversion of model

参数	数值
C_{Tm}	3.711×10^{-3}
$U_m/(m/s)$	2.196
S_{0m}/m^2	9.552
R_{Tm}/N	85.43

$$R_{Tm} = C_{Tm} \frac{1}{2} \rho U_m^2 S_{0m} \quad (4)$$

其中, R_{Tm} 为船模总阻力, C_{Tm} 为船模总阻力系数, U_m 为船模速度, S_{0m} 为船模湿表面积。

2) 实船阻力换算过程

二因次法换算。利用二因次法进行由模型向实船的阻力换算,其公式表达如式(5)。换算过程中的各参数取值见表5。

表5 二因次法换算过程

Tab.5 Resistance conversion by using Froude Method

参数	数值
C_f	1.42×10^{-3}
C_{Tm}	3.47×10^{-3}
C_{fm}	2.99×10^{-3}
ΔC_f	2.67×10^{-4}
C_{aa}	2.16×10^{-5}
C_t	2.19×10^{-3}
$U/(m/s)$	10
S_0/m^2	9 537.87
R_t/kN	1 045

$$\begin{cases} C_t = C_f + (C_{tm} - C_{fm}) + \Delta C_f + C_{aa} \\ R_t = C_t \frac{1}{2} \rho U^2 S_0 \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中, C_f 为实船摩擦阻力系数, C_{fm} 为船模摩擦阻力系数, ΔC_f 为粗糙度补贴系数, C_{aa} 为空气阻力系数, R_t 表示实船总阻力, C_t 为实船总阻力系数, U 为实船航速, S_0 为实船湿表面积。

三因次法换算。利用三因次法进行由模型向实船的阻力换算,其公式表达如下,根据 C_{tm}/C_{fm} 与 F_r^4/C_{fm} 线性关系图的直线截距确定形状因子 $(1+k)$ 。换算过程中的各参数取值见表6,其他参数取值同二因次法。

$$\begin{cases} C_t = C_{tm} - (1+k)(C_{fm} - C_f) + \Delta C_f + C_{aa} \\ \frac{C_{tm}}{C_{fm}} = (1+k) + y \frac{F_r^4}{C_{fm}} \\ R_t = C_t \frac{1}{2} \rho U^2 S_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, $(1+k)$ 为形状因子, y 为测试数据点连线的斜率, F_r 为傅汝德数。

表6 三因次法换算过程

Tab.6 Resistance conversion by using 3-Dimension Method

参数	数值
$1+k$	1.1
C_t	2.04×10^{-3}
R_t/kN	971

3) 校验结果汇总

最终,缩尺比船模阻力及实船阻力的校验结果汇总,如表7所示。

表7 校验结果汇总

Tab.7 Summary of validations

单位:N

对比项目	船模试验阻力结果	CFD 阻力计算结果
设计航速相应速度下的缩尺比模型阻力	85.43	89.17
10 m/s 航速下的实船阻力	1.045(二因次法)	1.153(VOF法)
	0.971(三因次法)	0.907(叠模法)

1.6 网格依赖性分析

在 CFD 计算中,网格质量是取得可靠计算结果的基本保证。为此,本文在进行船-鳍组合体阻力计算前,对减速鳍完全展开条件下的计算网格进行了网格依赖性分析。具体做法为:逐步依次降低和提高已生成计算域网格的网格密度,在其他计算设置

完全相同的条件下测试阻力值随网格数量的变化趋势。

图11为针对当前500万级计算网格数量的网格依赖性分析结果,可见当前阻力值已十分接近阻力随网格数量增加而下降的收敛值。虽然可以继续提升网格密度以获得更高的计算精度,但这将大幅

增加计算成本,且性价比较低。

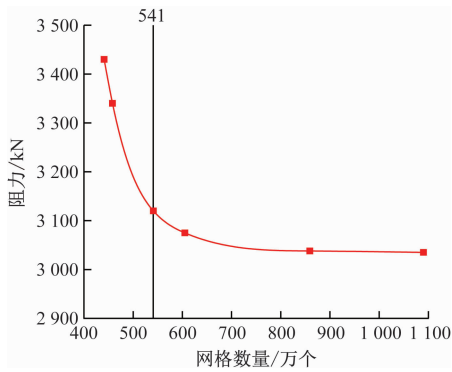


图 11 网格依赖性分析

Fig. 11 Grid independence analysis

2 鳍展开后的船体绕流分析

本文采用参数化建模方法,建立一系列用于减速鳍减速性能计算的定常绕流分析模型,以便形成关于航速和鳍角度的双参数图谱。设置不同航速的计算工况,也为后续研究船-鳍组合体的惯性停船完整时间历程提供了必要基础。

2.1 不同航速下的阻力计算

以左右舷减速鳍对称展开 30° 最大角度为例,研究不同航速对减速鳍减速效果的影响,分别计算了 2 m/s (3.89 kn)、 4 m/s (7.78 kn)、 6 m/s (11.66 kn)、 8 m/s (15.55 kn)、 10 m/s (19.44 kn) 五种航速下的阻力值,其流场计算结果如图 12 ~ 图 14 所示。不同工况下云图的数值显示范围已进行正则化。

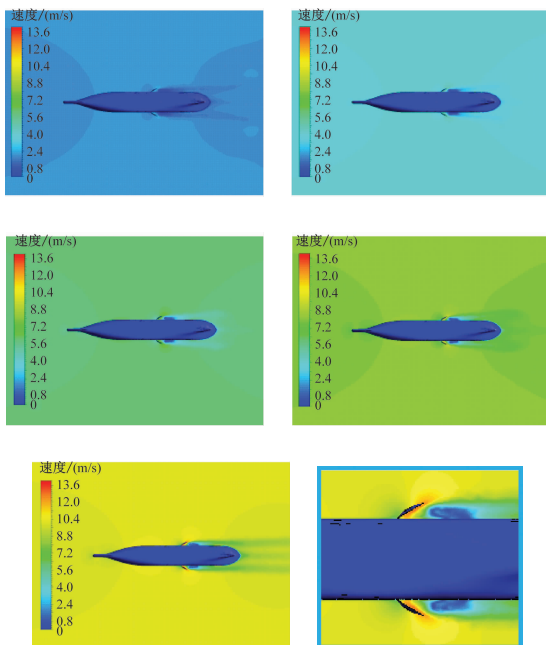


图 12 定常绕流速度分布云图 ($2 \sim 10\text{ m/s}$, 30°)

Fig. 12 Speed contours under steady flows

($2 \sim 10\text{ m/s}$, 30°)

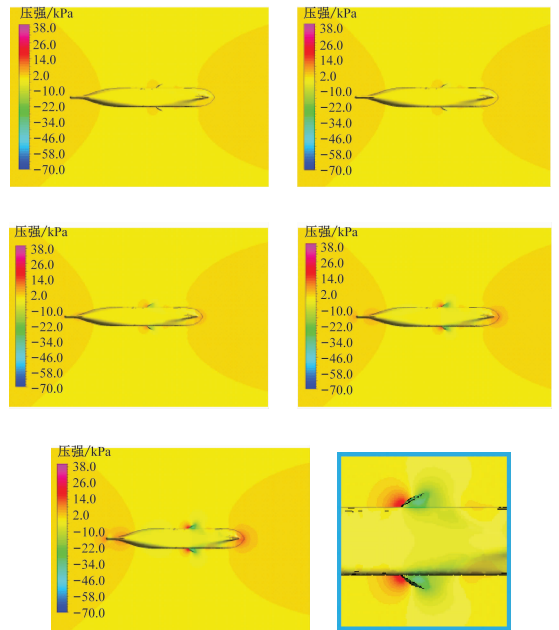


图 13 定常绕流压强分布云图 ($2 \sim 10\text{ m/s}$, 30°)

Fig. 13 Pressure contours under steady flows

($2 \sim 10\text{ m/s}$, 30°)

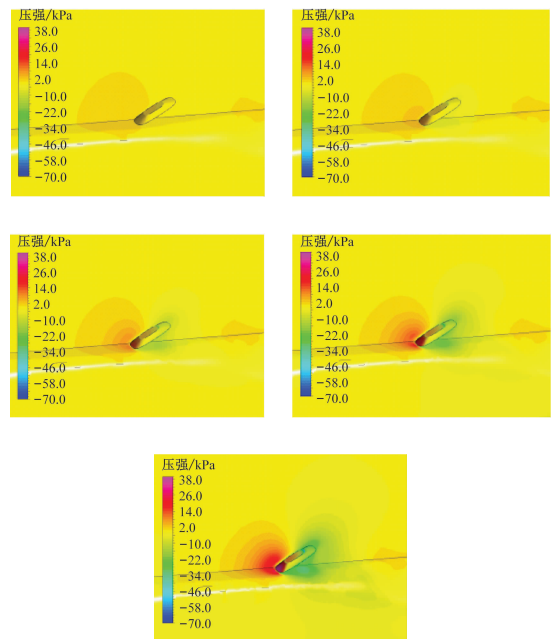


图 14 压强分布云图局部缩放 ($2 \sim 10\text{ m/s}$, 30°)

Fig. 14 Zoomed pressure contours under steady flows

($2 \sim 10\text{ m/s}$, 30°)

图 12 为船-鳍组合体周围的水流速度分布,按照上述 $2 \sim 10\text{ m/s}$ 共 5 个计算点将组图依次排序(最后一幅为 10 m/s 工况的局部缩放图)。可见由于减速鳍的存在,使得鳍的根部外侧出现低速区,而鳍的尖端处和内侧产生了很明显的高速区。在鳍下游处的船体舷侧出现了狭长的低速区,且在此区域内速度具有不均匀性。这说明此处为漩涡区域,湍

流强度较大。从能量角度分析,减速鳍使下游生成大量漩涡并激发出更强的湍流流态,从而加速耗散船体行进中具有动能。

另一方面,从受力角度进行分析,图 13 和图 14 表明:当水流绕过减速鳍后,在鳍的根部前端形成了明显的高压分布,而鳍内侧及部分下游船体舷侧则出现了低压区。外侧高压与内侧低压共同作用于鳍表面而产生合力,使鳍受到整体向后且向内翻转的作用力。通过不同航速下的横向对比发现,上述速度及压强分布情况,均随着航速的增加而愈发明显。

2.2 不同展开角度下的阻力计算

除 30° 最大角度外,本文还计算了左右舷减速鳍对称展开 10° 和 20° 的阻力值,再配合已求解的减速鳍收起时(0°)的阻力值,进一步研究同一航速下鳍的不同展开角度对其减速效果的影响。由于航速计算点较多,这里仅展示 10 m/s 航速下减速鳍 0° 、 10° 、 20° 及 30° 时的流场模拟结果,如图 15 ~ 图 17 所示。不同云图之间同样进行了正则化,并按照角度顺序由小到大依次排序。根据速度及压强分布结

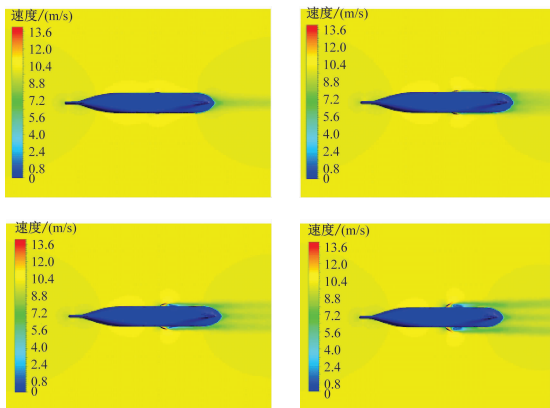


图 15 定常绕流速度分布云图 (10 m/s , $0^\circ \sim 30^\circ$)

Fig. 15 Speed contours under steady flows
(10 m/s , $0^\circ \sim 30^\circ$)

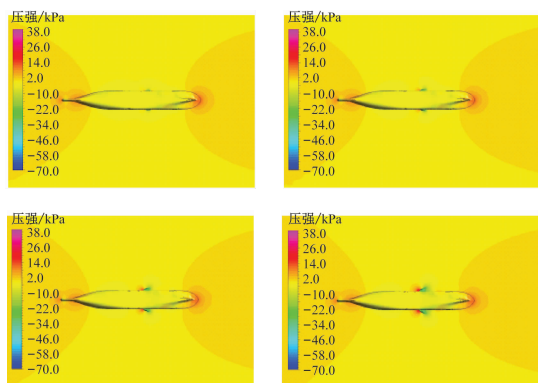


图 16 定常绕流压强分布云图 (10 m/s , $0^\circ \sim 30^\circ$)

Fig. 16 Pressure contours under steady flows
(10 m/s , $0^\circ \sim 30^\circ$)

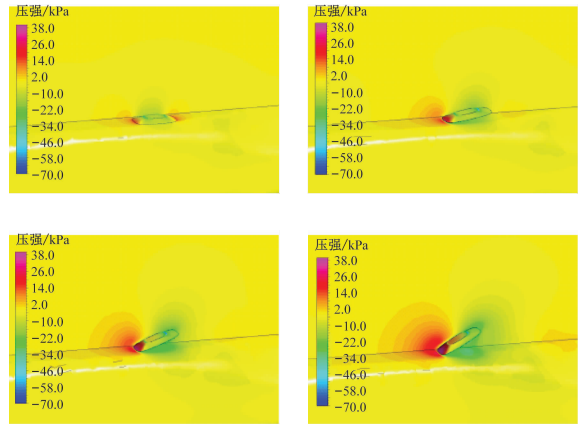


图 17 压强分布云图局部缩放 (10 m/s , $0^\circ \sim 30^\circ$)

Fig. 17 Zoomed pressure contours under steady flows
(10 m/s , $0^\circ \sim 30^\circ$)

果,得到阻力随鳍展开角度的变化规律,即减速鳍展开角度越大,在鳍附近区域形成的局部流场变化越显而易见。

3 计算结果分析及讨论

通过对集装箱船-减速鳍组合体进行阻力计算,得到特征航速及减速鳍角度下的阻力值。而后,拟合绘制出阻力-航速曲线、阻力-展开角曲线,进而形成一套阻力图谱。由于船体质量固定不变,又可将阻力图谱转换为船舶反向加速度图谱,从而研究其时变减速历程。

基于航速或展开角的阻力曲线,如图 18 和图 19 所示。而裸船体、左鳍和右鳍在不同工况下的阻力成分对比,如图 20 所示。由于大型船舶减速过程较为漫长,船舶在减速冲程中时刻处于“缓变运动”状态^[14],故近似使用准静态分析方法,将减速过程中船舶每时每刻的受力状态等效为一系列对应不同实时航速的船舶准定常绕流阻力问题。利用反向加速度-速度关系曲线进行时间积分而获得船舶速度及位置变化的时间历程曲线,如图 21 和图 22。

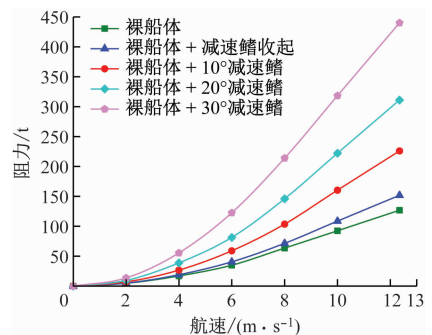


图 18 不同航速,相同角度下的阻力曲线

Fig. 18 Resistance curves under different speeds and the same angle

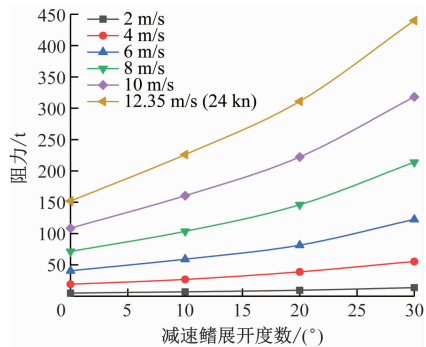


图19 相同航速、不同角度下的阻力曲线

Fig. 19 Resistance curves under the same speed and different angles

航速越高,则阻力值越大,且越高的航速下阻力曲线爬升越快,这也符合阻力为航速平方关系的基本规律^[15]。以 30° 减速鳍为例,2 m/s 航速下的阻力值为 13.53 t,4 m/s 下为 55.38 t,6 m/s 下为 122.53 t,8 m/s 下为 213.77 t,10 m/s 下为 318.20 t,12.35 m/s(24 kn) 航速下为 439.95 t。设计航速下,减速鳍全开后的总阻力是单纯裸船体阻力值的 3.47 倍。

鳍的展开角度越大,则阻力越大,且阻力的增加与鳍的展开角度存在非线性关系,后半程减速效果更加明显。以 10 m/s 航速为例,裸船体阻力值为

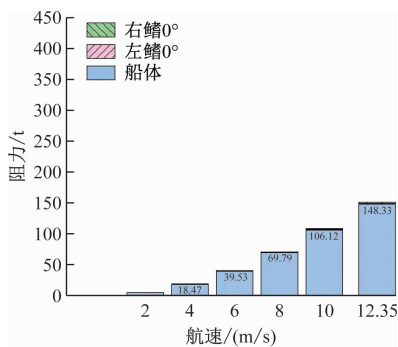
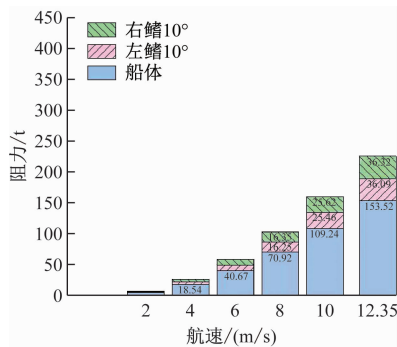
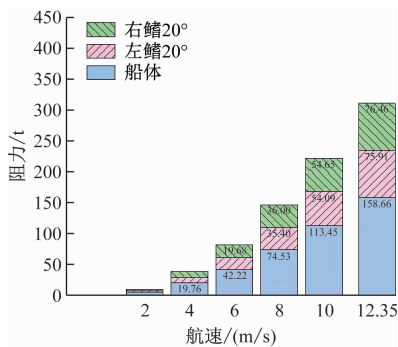
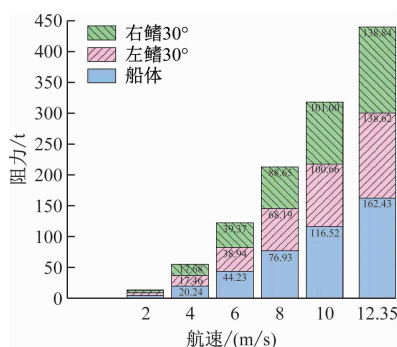
(a) 减速鳍 0° (b) 减速鳍 10° (c) 减速鳍 20° (d) 减速鳍 30°

图20 各工况下船、减速鳍产生的阻力成分对比

Fig. 20 Resistance component contrast of the hull and fins under different conditions

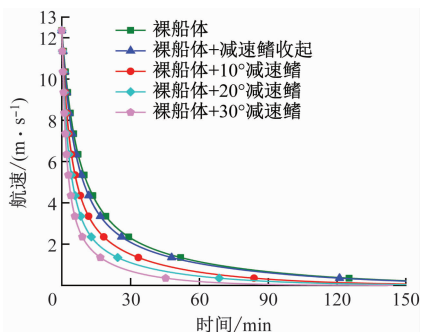


图21 船-鳍组合体减速冲程的速度-时间曲线

Fig. 21 Speed time history curves of the ship-fin body in its stop stroke

20° 下为 222.19 t, 30° 最大角度下为 318.20 t。基于此种非线性变化关系可知,在单纯利用减速鳍停船的过程中,若需要获得最大值 50% 的减速力,则需展开大于 50% 行程的减速鳍角度,且该情况在高航速下表现得更强。

随着航速提高,左右舷减速鳍产生的阻力在总阻力中占比相对稳定,三者之间同步增长。然而,随着展开角度增加,鳍阻力的占比则快速提高。单侧减速鳍阻力占比在 0° 鳍下几乎为零, 10° 下为 16.08%, 20° 下为 24.58%, 30° 下为 31.56%。由于结构对称性,左右鳍阻力数值相当。另一方面,尽管角度增大,相同航速下裸船体的阻力成分数值几乎

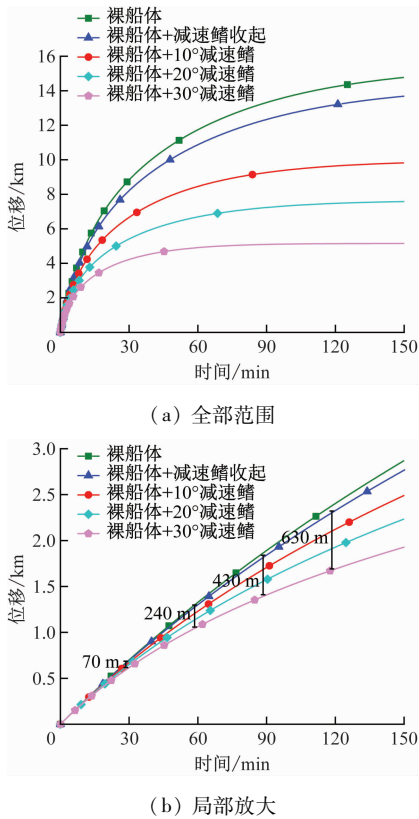


图 22 船-鳍组合体减速冲程的位移-时间曲线

Fig. 22 Position time history curves of the ship-fin body in its stop stroke

不变,说明鳍的展开程度与裸船体自身阻力之间的耦合关系较为微弱。因此,在初步设计时,对裸船体单体或减速鳍单体进行研究而获得的各自阻力变化规律可相互叠加并应用于船-鳍组合体的研发与设计。

本研究将船舶减速过程中不同时刻的准定常绕流分析与减速运动时间历程相结合,利用准静态近似将计算结果合成为完整的动态时间历程。由于本文重点关注减速鳍的减速效果,故假设船舶减速过程中均不用车(忽略螺旋桨推力和阻力),并利用舵把定航向。当开始执行减速操作时,设船舶统一处于设计航速(24 kn)下的匀速直航状态,且认为减速鳍能迅速展开至指定角度。利用反向加速度-速度关系曲线进行时间积分而获得的船舶速度-时间曲线可知,初始时间段内的减速速率较快,这是由于前文所得的高航速下船体阻力较大所致。而后,航速逐渐降低,阻力也逐渐减小,故减速速率越来越慢,最终形成了一条趋于横轴的渐近线。对比不同曲线,阻力越大的减速鳍工况其曲线越处于下方,说明经过相同减速时间后,阻力越大其剩余航速越小。若船舶因紧急避险而选择减速,相同反应及处置时间后(例如 10 min),原船的剩余航速约为 5 m/s,而

减速鳍全开条件下的剩余航速仅约为 2 m/s。若碰撞等危险发生,更低的船速意味着更轻微的损失后果。且根据动能表达式 $\frac{1}{2}mv^2$,破坏能量随瞬时速度降低呈指数衰减形式,所以因额外减速而带来的安全性提升幅度明显。

根据速度-时间曲线,分别进行时间积分即可获得对应的位移-时间曲线。该组曲线的纵轴表示:以初始船位为起点,船舶所在把定航向上的实时前进距离。由于减速过程后期的减速速率越来越小,实时位移曲线逐渐趋于水平。阻力越大的工况,其位移曲线越靠近下方,说明相同时间内船舶继续行进的距离较短。从局部缩放图可见,减速 1 min 后,减速鳍全开的情况比未展开减速鳍的少前进 70 m;2 min 后少 240 m;3 min 后少 430 m;4 min 后则相差 630 m。这是仅考虑用鳍减速的效果,若配合车舵则效果更佳。在航行过程中,自险情出现起经过相同时间后,船舶前进距离越少,则危险程度越低,因为可争取到更宽裕的操船空间,甚至可能在碰撞发生前实现完全停船。

最后需要指出的是,当船舶在航行中选择采取紧急避碰措施时,单纯地进行直线减速是远远不够的,还要充分利用船舶的转艏性能,即船舶改变初始航向的初段反应能力。考虑到减速鳍在直航中非对称展开能够形成船舶附加转艏力矩的情况,本文还对减速鳍的辅助转艏性能进行了简要分析。

利用减速鳍对称展开的已有流场计算结果,求解单侧减速鳍在船舶质心处形成的 Z 轴力矩,可绘制直航中不同工况下的附加转艏力矩曲线,如图 23 所示。在舵力基础上,这种附加初始转艏力矩能使船舶更迅速地步入转艏过程,缩短转艏响应时长,从而有助于提高船舶安全性。可以看出,该力矩随航速的增加而增大,而增大的方向又与减速鳍的展开角度有关。这里力矩以船体左转为正。设计航速

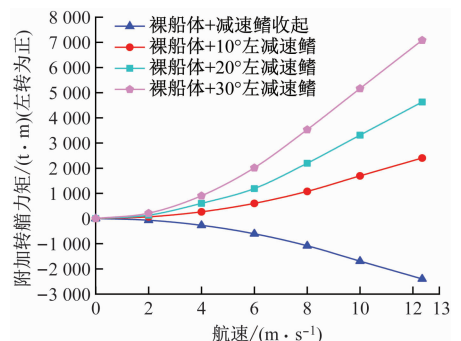


图 23 减速鳍单侧展开形成的附加转艏力矩

Fig. 23 Additional moment of turning ship under the fin on a single side developed

下,当左鳍展开 30° 时,左鳍可获得约 $7\ 000\ \text{t}\cdot\text{m}$ 的力矩。要注意的是,单侧鳍在收起状态下,由于外形凸起形成吸力面,反而会产生反向力矩。由此,左鳍 30° 而右鳍 0° ,将共同形成约 $9\ 400\ \text{t}\cdot\text{m}$ 的左转力矩。利用该船配备舵设备的设计参数,估算其满舵侧向力可在 $200\ \text{t}$ 上下^[16],舵转艏力矩则约 $20\ 000\ \text{t}\cdot\text{m}$ 量级,而上述附加转艏力矩可在其中占比高达 50% ,故该减速鳍的辅助转艏作用也相当可观。

4 结论

本文通过在船舶两舷水线以下对称布置一种减速鳍装置来改善大型船舶的减速及转艏性能。当船舶制动时,展开两舷减速鳍,通过增加船体在水中的航行阻力来辅助船舶制动;当船舶转向时,展开其中一舷减速鳍,利用船体两舷受到的不平衡力作用而助船转向。经过实尺度 CFD 建模与验证、数值计算与分析,本文的主要研究结论可归纳为以下几点。

1) 船舶航行中,当减速鳍展开,鳍根部外侧出现低速高压区,而尖端及内侧产生高速低压区。二者合力形成减速鳍的阻力。在下游舷侧附近产生低速漩涡区,从而能够耗散船体大部分动能。航速越高,减速鳍展开角度越大,上述流场分布情况越明显。单侧减速鳍最大可获得与原船体阻力相当的附加阻力。

2) 航速越大,相同减速鳍角度下的整体阻力越大;角度越大,相同航速下的整体阻力也越大,且相互间均表现为非线性关系。利用减速鳍进行减速,相同时间后剩余航速大幅减小,惯性冲程也大幅减少。附加转艏力矩随航速增加而增大,增大方向又与减速鳍的展开角度有关,减速鳍的辅助转艏性能优良。

3) 减速鳍上阻力与裸船体自身阻力之间的耦合关系较为微弱,对裸船体单体或减速鳍单体进行研究而获得的各自阻力变化规律可相互叠加。

虽然为现有船舶配备减速鳍将一定程度上增加船舶的设计、建造成本,但是能明显提升大型船舶的减速及转艏性能,从而大幅改善船舶操纵性及航行安全性。对于战斗舰艇、复杂特殊水域航行的船舶,减速鳍无疑能够大大增强其机动性能。即使对于普通商船,减速鳍能提高港口、锚地、狭水道等航行管制区域内的船舶限速,在保证航行安全的前提下,增加船舶航次内全速、中高速航行的有效时长,提升通航效率。与此同时,良好的船舶操纵性将大幅降低无人船安全航行所需的技术门槛,也为未来实现无人船编队航行的整体控制提供更为有力的技术支撑。

参 考 文 献

[1] 姚震球,徐植融,姚潇,等.一种空气动力艇制动装

置:CN106985994A[P].2017-07-28.

YAO Z Q, XU Z R, YAO X, et al. A braking device of the aerodynamical boat: CN106985994A[P]. 2017-07-28. (in Chinese)

[2] 姜博瀚,姜易良.具有侧向外展收合装置的船:CN108146607A[P].2018-06-12.

JIANG B H, JIANG Y L. A ship equipped a wingspan developing and retrieving device: CN108146607A[P]. 2018-06-12. (in Chinese)

[3] 王绪明,洪畅,胡江,等.一种高速艇的急停装置:CN205469750U[P].2016-08-17.

WANG X M, HONG C, HU J, et al. A device for emergency brake on the high speed boat: CN205469750U[P]. 2016-08-17. (in Chinese)

[4] 鲁一南,高勋海.多功能船舶控速鳍:CN105292426A[P].2016-02-03.

LU Y N, GAO X H. A multifunctional speed controlling fin on ships: CN105292426A[P]. 2016-02-03. (in Chinese)

[5] 朴成基.利用空气的船舶阻力减速装置:CN116034074A[P].2023-04-28.

PIAO C J. A ship resistance braking device utilizing air flow: CN116034074A[P]. 2023-04-28. (in Chinese)

[6] 孙晨光,王建华,万德成.基于重叠网格的船模停船操纵 CFD 数值模拟[J].中国舰船研究,2019,14(2):8-14.

SUN C G, WANG J H, WANG D C. CFD simulations of stopping maneuver using dynamic overset grid technology[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(2): 8-14. (in Chinese)

[7] ISLAM H, GUEDES SOARES C. Effect of trim on container ship resistance at different ship speeds and drafts[J]. Ocean Engineering, 2019, 183: 106-115.

[8] FENG Y X, OULD E M, SCHELLIN T E. Parametric hull form optimization of containership for minimum resistance in calm water and in waves[J]. Journal of Marine Science and Application, 2022: 1-24.

[9] OBWOGI E O, SHEN H L, SU Y M. Study on the design procedure of rudder attached thrust fin for merchant ship based on computational fluid dynamics[J]. Ocean Engineering, 2021, 234: 109263.

[10] 朱仁庆,杨松林,王志东.船舶流体力学(第二版)[M].上海:上海交通大学出版社,2022.

ZHU R Q, YANG S L, WANG Z D. Marine hydrodynamics (2nd edition)[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2022. (in Chinese)

[11] 赵勇.船舶与海洋工程流体力学[M].大连:大连海事大学出版社,2023.

ZHAO Y. Hydrodynamics of naval architecture and ocean engineering[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2023. (in Chinese)

- [12] ANSYS Inc.. Fluent theory guide (2023R2 edition) [M]. Canonsburg: ANSYS Inc., 2023.
- [13] 盛振邦. 船舶原理(上册 第2版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2017.
SHENG Z B. Principles of Ships (Volume 1, 2nd Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2017. (in Chinese)
- [14] 梁霄, 李巍. 船舶操纵性与耐波性 [M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2019.
LIANG X, LI W. Ship maneuverability and seakeeping performance [M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2019. (in Chinese)
- [15] 刘红, 郑剑. 船舶原理(第2版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2020.
LIU H, ZHENG J. Principles of naval architecture (2nd Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2020. (in Chinese)
- [16] 盛振邦. 船舶原理(下册 第2版) [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019.
SHENG Z B. Principles of ships (Volume 2, 2nd Edition) [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2019. (in Chinese)
- (上接第 97 页)
- [4] WOERNER K, BENJAMIN M R, NOVITZKY M, et al. Quantifying protocol evaluation for autonomous collision avoidance: toward establishing COLREGS compliance metrics [J]. Autonomous Robots, 2019, 43: 967-991.
- [5] 赵玺. 开阔水域船舶智能避碰算法的合规性测试方法 [D]. 大连: 大连海事大学, 2022.
ZHAO X. A compliance testing method for intelligent collision avoidance algorithms for ships in open water [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2022. (in Chinese)
- [6] LØVOLL E. Evaluating collision avoidance algorithms in urban and semi-restricted waters using fuzzy logic [D]. Taipei: National Taiwan Normal University, 2022.
- [7] 翁建军, 刘明俊. 船舶值班与避碰 [M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2016.
WENG J J, LIU M J. Ship watching and collision avoidance [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [8] 李丽娜. 船舶自动避碰研究中安全会遇距离等要素的确定 [J]. 大连海事大学学报, 2002, 28(3): 23-26.
LI L N. Determination of factors such as safe encounter distance in automatic vessel traffic avoidance studies [J]. Journal of Dalian Maritime University, 2002, 28(3): 23-26. (in Chinese)
- [9] 李丽娜, 陈国权, 李国定, 等. 一种关联避让行为的船舶碰撞危险及危险度评价方法: CN109887339A [P]. 2020-9-15.
LI L N, CHEN G Q, LI G D, et al. A method for evaluating ship collision risk and hazard degree by associating avoidance behaviors; CN109887339A [P]. 2020-9-15. (in Chinese)
- [10] 李丽娜, 陈国权, 杨凌波, 等. 船舶拟人智能避碰决策算法测试及应用 [J]. 中国航海, 2022, 45(1): 1-7.
LI L N, CHEN G Q, LI G D, et al. Test and application of personifying intelligent decision-making algorithm for vessel collision avoidance [J]. Navigation of China, 2022, 45(1): 1-7. (in Chinese)
- [11] 李丽娜, 王兴华, 陈国权. 一种基于PIDVCA预测复航时间的方法: ZL202010305212.6 [P]. 2022-7-26.
LI L N, WANG X H, CHEN G Q. A method for predicting resumption time based on PIDVCA; ZL202010305212.6 [P]. 2022-7-26. (in Chinese)
- [12] 马春野, 于双志, 王少洁, 等. 智能网联汽车在智慧城市应用中的评价体系研究与探索 [J]. 现代交通与冶金材料, 2023, 3(3): 2-9.
MA C Y, YU S Z, WANG S J, et al. Research and exploration of evaluation system of intelligent connected vehicles in smart city applications. [J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2023, 3(3): 2-9. (in Chinese)
- [13] 彭张林, 张爱萍, 王素凤, 等. 综合评价指标体系的设计原则与构建流程 [J]. 科研管理, 2017, 38(增刊1): 209-215.
PENG Z L, ZHANG A P, WANG S F, et al. Designing principles and constructing processes of the comprehensive evaluation indicator system [J]. Science Research Management, 2017, 38(Suppl. 1): 209-215. (in Chinese)
- [14] 李丽娜, 陈国权, 马吉林, 等. 船舶拟人智能避碰决策 [M]. 北京: 海洋出版社, 2023.
LI L N, CHEN G Q, MA J L, et al. Ship anthropomorphic intelligent collision avoidance decision-making [M]. Beijing: Ocean Press, 2023. (in Chinese)
- [15] 贺仲雄. 模糊数学及应用 [M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1985.
HE Z X. Fuzzy mathematics and applications [M]. Tianjin: Tianjin Science and Technology Press, 1985. (in Chinese)
- [16] 刘秋艳, 吴新年. 多要素评价中指标权重的确定方法评述 [J]. 知识管理论坛, 2017, 2(6): 500-510.
LIU Y Q, WU X N. Review of methods for determining indicator weights in multi-factor evaluation [J]. Knowledge Management Forum, 2017, 2(6): 500-510. (in Chinese)