

Doi: 10.20062/j.cnki.CN 37-1453/N.2025.01.003

集装箱船挡风墙设计与风阻优化研究

徐荣静¹, 陈秋屹^{2a}, 李仁佳^{2b}, 石洪源^{2b}, 张克正^{2a}

(1.烟台开发区天源水产有限公司, 山东 烟台 264006; 2.鲁东大学 a.交通学院; b.水利土木学院, 山东 烟台 264039)

摘要: 集装箱船在海上航行时常面临强风带来的阻力, 航行速度与燃料消耗都会受到影响。本文通过数值模拟方法, 对某超大型集装箱船进行了挡风墙设计与优化研究, 采用计算流体力学(CFD)技术对加装挡风墙前后的流场特性及阻力变化进行了分析。结果表明, 通过合理设计的挡风墙, 能显著减少集装箱船的风阻, 优化设计后的挡风墙在正迎风航行状态下可减少 16.7% 的风阻, 提升了船舶的航行效率, 并提供了流场改善的可行路径, 为集装箱船总布置设计提供参考。

关键词: CFD; 挡风墙; 集装箱船; 风阻

中图分类号: U661.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-8020(2025)01-0019-06

近年来, 全球航运业的迅猛发展使得集装箱船的设计和运营愈发重要。随着全球化贸易的加速, 船舶的规模逐步增大, 集装箱船成为国际货物运输的重要载体。然而, 随着船舶体积的增大, 集装箱的堆放量已经超过 2 万箱, 水线以上结构物的迎风面积迅速增加, 受到的风载荷急剧增大, 在船舶总阻力中所占的比例迅速提高^[1-2], 尤其船首部位在航行中面临的风压问题愈发严重^[3]。船舶在高速航行时, 在风速和船速叠加下, 船首和船上装载的集装箱会受到较大的正压力作用, 其操控性和安全性会受到影响。

随着船舶能效设计指数(EEDI)的逐步实施并不断提升, 对船舶性能的要求日益严格。研究人员的阻力优化重点已从水下部分逐渐扩展至水上部分。为探索有效的船舶风阻减阻方法, 学者们针对集装箱堆叠方式^[4-5]、上层建筑的局部设计^[6-7]、航速及载荷^[8-9]等对船舶风阻的影响进行了广泛研究。罗少泽等^[10]通过拖曳水池中的开放式风阻试验和数值模拟, 研究了多种集装箱布置方案的风阻, 并提出了优化建议。蔡文山等^[11]针对某集装箱船计算了 6 种不同堆叠方式下的风载荷, 使用风洞实验进行了验证, 并提出了评估不同堆叠方式风载荷的有效指标。乔丹等^[12]则以一艘 10 000 TEU 大型集装箱船为研究对象, 针对不同堆叠方式下的风载荷特性, 开展了

一系列风洞实验研究, 结果表明, 相较于不规则堆垛布置, 流线型或者阶梯型堆垛布置的纵向力会显著减小。以上研究均为不外加结构件的同时, 通过减小箱距以及采用流线型的布置形式来减小风阻。除此之外, 为减小这种风阻带来的影响, 在船舶部安装挡风墙已成为集装箱船设计中的一个重要趋势, 以满足日益严苛的 EEDI 要求。杜培利^[13]设计了 8 种船舶的减阻装置, 利用控制变量和正交试验相结合的方法, 对减阻装置的参数进行优化设计, 最终确定了减阻率高达 32.4% 的最优减阻方案。图 1 为日本 ONE 船舶联盟超大型集装箱船安装挡风墙后的实船效果图^[14]。

船舶挡风墙主要是设置在船舶的前甲板区域, 通常用来阻挡迎面而来的强风, 以减轻风力对船体及船上货物的作用力。这不仅能够提高船舶的航行稳定性, 还能有效减少燃油消耗, 从而提升经济性。此外, 防风墙的设计与安装对于船舶的结构安全、操作安全性及货物的保护也具有重要意义。本文基于计算流体力学(CFD)技术, 对某集装箱船的挡风墙设计进行了优化研究, 不仅考虑正迎风航行时(迎风角为 0°)的全船的阻力, 而且增加了在迎风角为 30°航行时的阻力系数变化, 旨在通过模拟分析探讨挡风墙对风阻的改善作用, 从而为在实践中优化集装箱船设计、提高航行效率提供重要的理论依据。

收稿日期: 2024-09-29; 修回日期: 2024-12-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(42330406); 烟台市科技创新发展计划项目(2023JCYJ097, 2023JCYJ094)

通信作者简介: 张克正(1986—), 男, 讲师, 博士, 研究方向为计算流体力学数值计算与热流体技术。E-mail: ytalonso@hotmail.com

图 1 日本 ONE 船舶联盟超大型集装箱船挡风墙安装效果^[14]Fig.1 Installation of wind shield on a super large container ship of Japan ONE Ship Alliance^[14]

1 船舶概况与挡风墙设计要求

本研究对象是一艘大型集装箱船,该船总长 L_{oa} 约为 339.62 m,垂线间长 L_{pp} 为 332.6 m,型宽 B 为 45.6 m,型深 D 为 24.6 m,设计吃水 d 为 13.0 m,半船模型如图 2 所示。根据船体结构和集装箱布置,挡风墙的设计需尽可能减少迎风阻力,同时不影响船舶的操作与视线^[15]。为此,挡风墙的设计需考虑栏杆位于船舶中前部以减少视线限制,且前甲板长度约 22 m,最大宽度约 42 m。此外,由于集装箱分布高度差异较大,从第 1 排到第 15 排高度逐渐升高,设计空间受限于视线与舷墙的几何形状,这对挡风墙的形状和安装提出了更高要求。

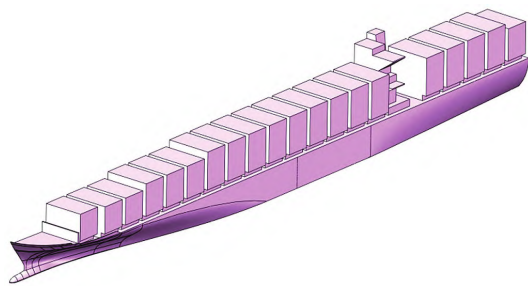


图 2 某集装箱船半船模型

Fig.2 Half hull container ship model

2 数值模拟

CFD 仿真过程中采用雷诺平均 N-S 方程 (RANS) 和湍流模型来模拟船舶周围的风场^[16]。

挡风墙的优化设计以减小风阻为目标,在保证不影响视线和操作的前提下,探讨不同风角下挡风墙设计对风阻的影响。

2.1 控制方程

在流体动力学中,连续性方程用于确保质量守恒。对于不可压缩流体,连续性方程表示为:

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

其中 u_i 是流体的速度分量, x_i 是空间坐标。

N-S 方程是描述流体运动的基本方程,结合动量守恒定律,表达式如下:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) + \rho g_i, \quad (2)$$

其中 ρ 是流体密度, μ 是流体动力粘度, p 是压力, g_i 是重力加速度。本研究为风阻计算,故流体为空气。N-S 方程描述了流体中的粘性作用和流动特性,在 CFD 中用于计算流场的速度、压力和其他相关物理量。

由于实际工程中的流动大多是湍流,本文采用了标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型来模拟流体的湍流效应。该模型使用湍动能 k 和湍流耗散率 ε 来描述湍流的特性,其方程如下^[17]:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P_k - \rho \varepsilon, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \varepsilon u_j)}{\partial x_j} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_t \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (4)$$

其中, P_k 是湍动能的生成项, μ_t 是湍流粘性系数, σ_k 是湍流 Prandtl 数, C_1 和 C_2 是湍流模型的常

数。通过 $k-\epsilon$ 模型,可以有效捕捉集装箱船周围复杂的湍流现象,尤其是在挡风墙引起的流动分离和再附过程中,该模型能较好地描述流场的变化。

2.2 边界条件及网格信息

为了分析挡风墙的减阻效果,本研究根据船体型线图及总布置图等相关图纸资料,利用 SolidWorks 进行船体建模,并导入仿真软件

ANSYS FLUENT MESHING 进行网格划分,最终利用 ANSYS FLUENT 进行求解及后处理。计算域设置如图 3 所示,将整个模型缩小 100 倍,进口边界距船首为船长的 3 倍,出口边界距船尾为船长的 5 倍,侧边界距船侧为 3 倍船长,顶边界距船顶为两倍船长。边界条件包括进口速度为 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 和压力出口,船侧为无滑移壁面,计算域侧为滑移壁面条件;同时,沿着船中纵剖面为对称面,整个计算域随着不同航行风角在 0° 和 30° 进行变化。

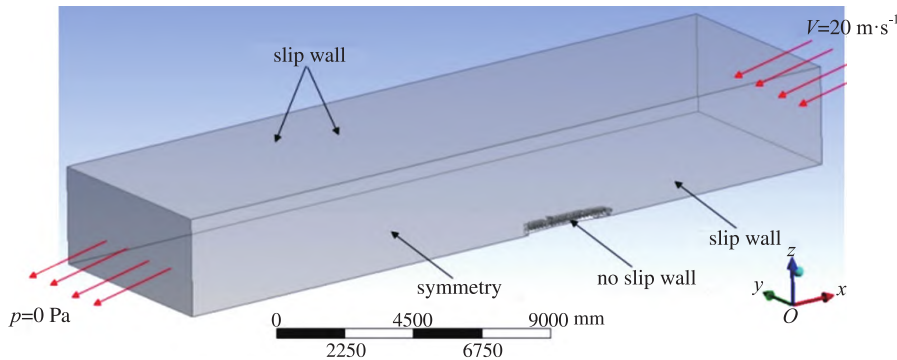
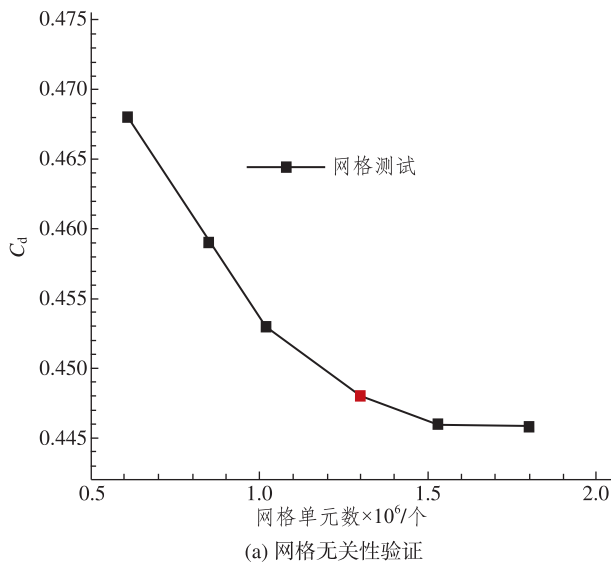


图 3 计算域及边界条件

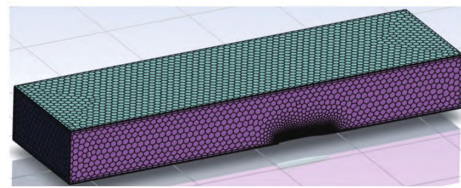
Fig.3 Whole computational domain and boundary conditions

为了减小网格对仿真结果的影响,需要对安装挡风墙模型进行网格无关性测试。取 6 套不同的网格尺寸,分别为 63 万、87 万、102 万、130 万、153 万及 180 万网格单元数,模型网格信息见图 4。由图 4(a)可知,从第四套网格开始,阻力系数 C_d 值的变化趋于收敛,误差分别为 0.6% 和 0.4%,证明第四套网格是最经济的网格尺寸,其基础网格

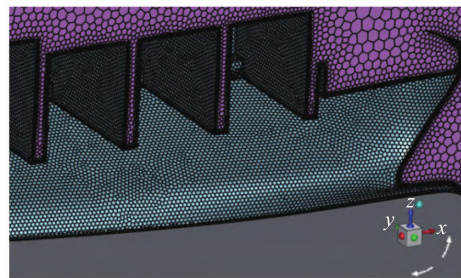
尺寸为 6 mm,整个空气域网格为 40 mm,边界层层数为 6;基于所选取的湍流模型, y^+ 数值推荐值为 30,故可反推出第一层边界层网格的厚度为 0.6 mm。基于上述网格设置,采用多面体网格类型,网格总节点数为 410 万个,总网格单元数为 130 万个,分别如图 4(b)、(c)所示。



(a) 网格无关性验证



(b) 整体网格



(c) 船体网格

图 4 模型网格信息

Fig.4 Mesh information of the model

3 结果分析

本研究目的是对集装箱船挡风墙进行优化设计,具体优化策略为:设计变量为挡风墙与船舶甲板的夹角 α ,目标函数为最小化整船的阻力系数 C_d ,考虑到挡风墙设计不能遮挡视线,约束条件为挡风墙高度 H 以及宽度 B ;通过CFD仿真,对挡风墙的形状进行多次迭代优化,最终确定了最佳设计方案。优化后的挡风墙在船首处起到了良好的导流作用,能够有效减少空气在集装箱首排及甲板前方的分离现象。为了定量表示安装挡风墙前后的风阻变化,通过阻力系数(C_d)衡量船体在不同风角下的风阻变化。该系数的计算公式为^[18]:

$$C_d = \frac{2F_x}{\rho V^2 A_d}, \quad (5)$$

其中, ρ 是空气密度, V 是风速, F_x 为船体固定坐标系方向的风载荷, A_d 为船舶水线以上的投影面积。图5为风角分别 0° 和 30° 时,安装和不安装挡风墙4种不同模型和边界条件下的 C_d 收敛曲线。由图5可以看出:在计算1000步左右达到收敛,即曲线趋于平缓;无论风角为 0° 还是 30° ,增加挡风墙后 C_d 均减小,在风角为 0° 时减小的幅度更大,减阻效果愈明显。

3.1 流线和涡流现象分析

图5所示风角分别 0° 和 30° 时,整船的平均阻力系数 C_d 的数值变化,该数值是通过积分得到的。风角为 0° 时,挡风墙使得全船阻力系数从无挡风墙时的0.538下降至0.448,减阻效果达到了16.7%。风角为 30° 时,阻力系数从0.726下降至0.679,减阻率为6.5%。为了揭示该数值变化的流动机理,本文进一步分析挡风墙对船舶局部风速及压力分布的影响,并对不同风角下的流场进行详细探讨。图6展示了风角为 0° 时船舶中纵剖面的空气流速及流线图,清晰地显示了挡风墙前后流场的变化。在迎风状态(风角为 0°)下,在无挡风墙时,空气流过船首与前排集装箱时形成了明显的涡流和分离现象。安装挡风墙后,船首涡流区域显著减小,气流被挡风墙引导而更为平滑,流线更加顺畅,减少了集装箱前部的涡流。此时,阻力系数下降了

16.7%,有效减少了迎风面的空气阻力。这一结果表明,挡风墙在风角为 0° 时显著降低了迎风阻力,减少了空气与船体表面之间的摩擦与分离现象,提升了船舶的燃料利用率。

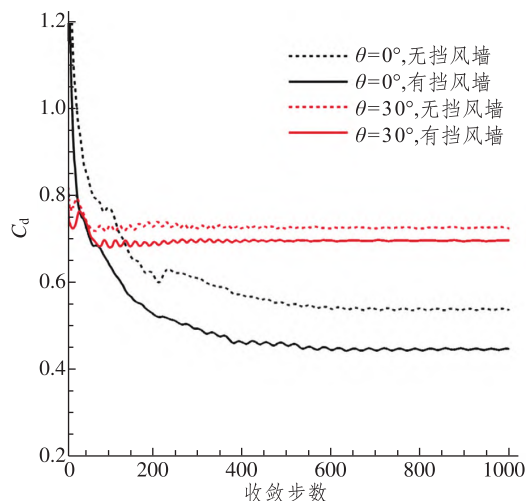


图5 仿真计算中风角为 0° 与 30° 阻力系数 C_d 的收敛曲线
Fig.5 The convergence curves of C_d during numerical simulation with attack angle of 0° and 30°

当风角为 30° 时,此时风向与船体呈 30° 角,主甲板面风速分布如图7所示。无挡风墙时,空气沿首部集装箱侧边缘形成了较大的流速区域,导致了较强的涡流效应。挡风墙安装后,虽然最大风速相较无挡风墙有所增大,但是船首的涡流区域明显缩小,流线在挡风墙的导流作用下沿船体平滑过渡,降低了集装箱前排的风阻,减阻率达到了6.5%。在不同风角下,挡风墙同样表现出一定的减阻效果,相较于 30° 风角,风角为 0° 时减阻最为显著。此时,挡风墙引导了船首的流场,减缓了流体分离和湍流现象,使得集装箱船的流线型结构得以增强。流线的改善不仅有助于降低风阻,还对船体的操纵性和航行稳定性产生积极影响。流场的平滑有助于减少由涡流引起的不稳定力,从而提升船舶的航行稳定性。

3.2 压力分布分析

压力分布图(图8)展示了挡风墙安装前后集装箱船迎风面压力变化。在迎风状态(风角为 0°)下,高压区出现在船艏部及驾驶室两侧。无挡风墙时,船首及前排集装箱的迎风面压力较大,尤其是在船首区域形成了显著的高压区,导致气流分离和较大的阻力。安装挡风墙后,船首区域

的高压区面积显著减少,挡风墙有效分散了迎风面空气的压力,减少了集装箱前排的阻力。通过挡风墙的导向作用,气流更加顺畅地流过船体,减少了压力梯度,降低了船首的风阻。当风角为

30°时,此时既有纵向力,也有横风产生的横向力,虽然最高压力保持一致,但是加装挡风墙后的艏部集装箱结构的压力减小,而且整船压力分布更均匀。

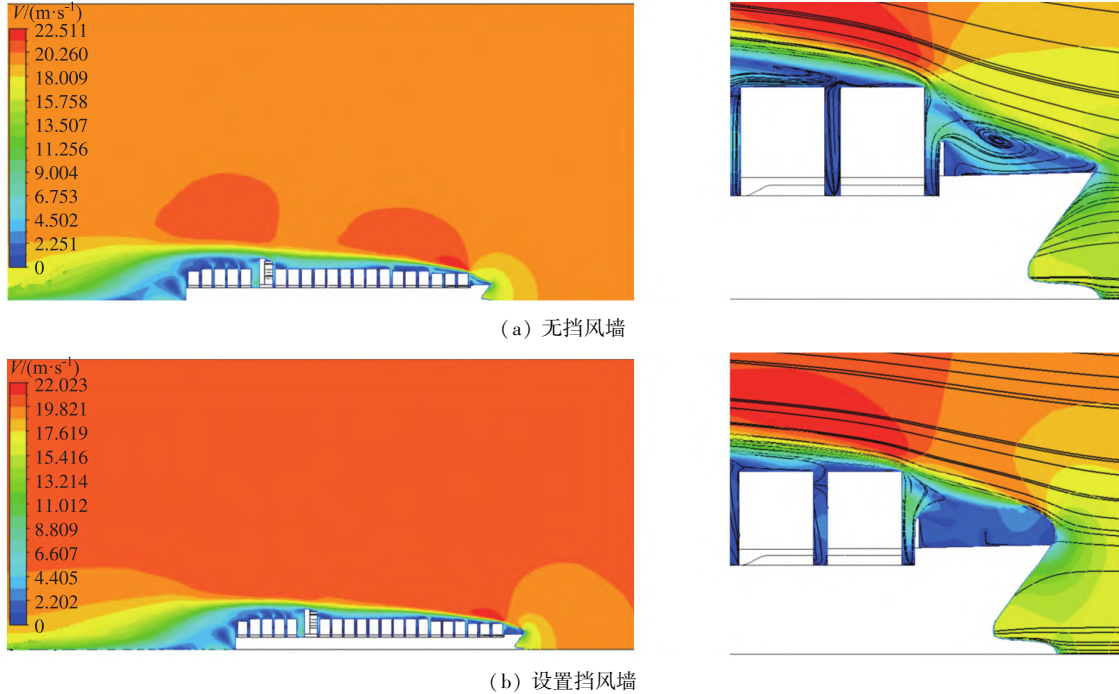


图 6 风角为 0°时速度及流线的中纵剖面的分布

Fig.6 Velocity contours and streamline distribution with attack angle of 0°

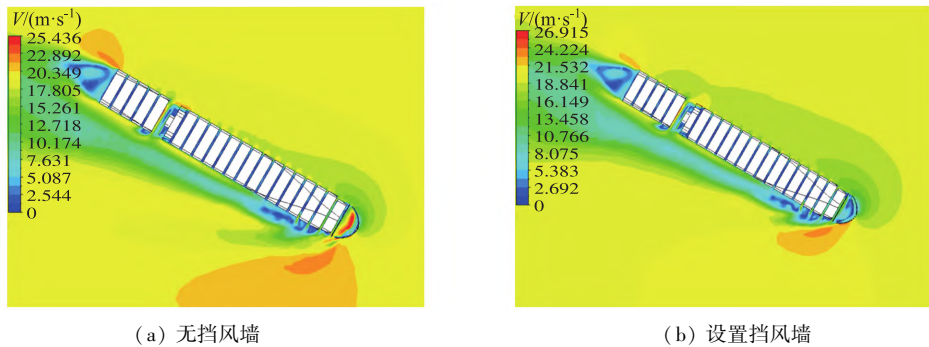
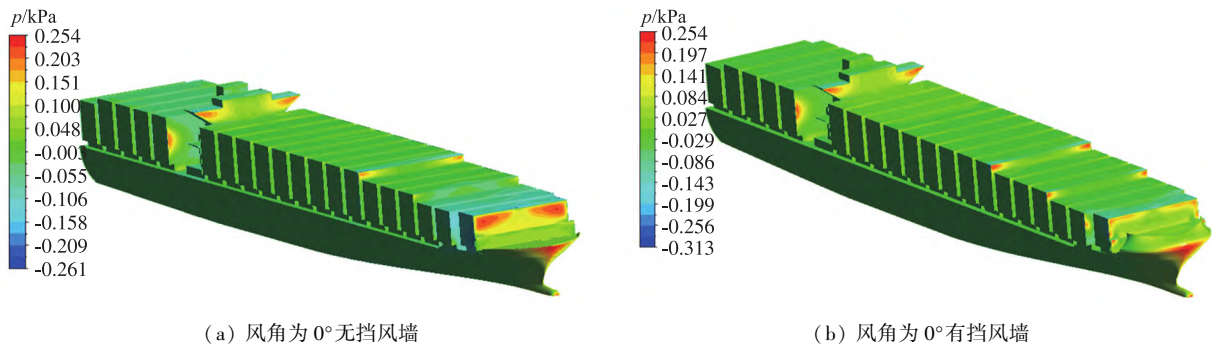


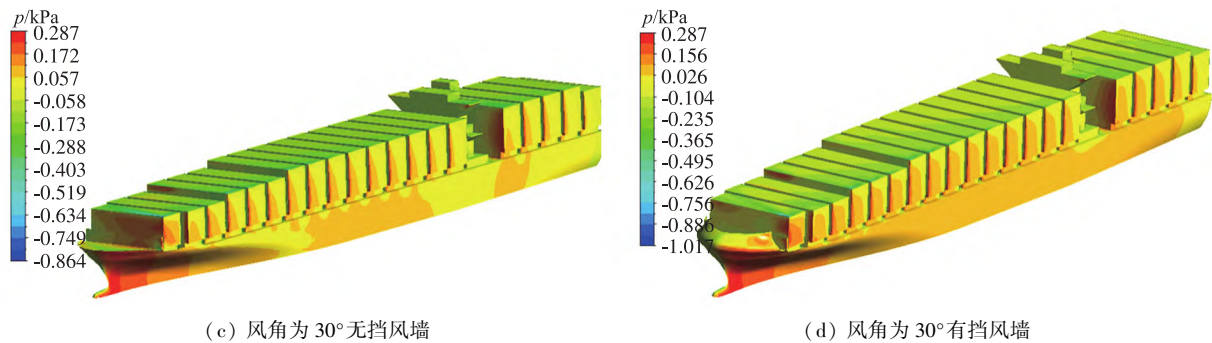
图 7 风角为 30°时甲板面的风速分布

Fig.7 Velocity contours in the main deck plane with attack angle of 30°



(a) 风角为 0°无挡风墙

(b) 风角为 0°有挡风墙



(c) 风角为 30° 无挡风墙

(d) 风角为 30° 有挡风墙

图 8 整船压力分布

Fig.8 Pressure distribution for the whole ship

4 结论

本文以某集装箱船为研究对象,基于 CFD 对船舶正迎风(风角为 0°)和侧风(风角为 30°)航行时加装挡风墙,并对优化前后的船舶阻力系数进行了仿真对比,结论如下。

1) 在相同风力前提下,集装箱船船艏安装挡风墙后,正迎风航行时整船阻力系数降低约 16.7%,侧风航行时也能降低约 6.5%。

2) 船艏安装挡风墙后,能有效改善附近的流线分布,减小速度梯度,显著阻止和延缓气体的流动分离,实现有效减阻。

3) 挡风墙不仅提高了船舶的航行安全性和操控性,还可显著降低燃油消耗,减少运营成本,并对环境保护产生积极作用。

随着航运业的进一步发展,集装箱船设计中防风墙的应用将会更加普及,并逐步优化设计和材料选择,以适应不同航线和气候条件下的需求。

参考文献:

- [1] FUJIWARA T, NIMURA T. New estimation method of wind forces acting on ships on the basis of mathematical model [J]. *Journal of the Kansai Society of Naval Architects*, 1997, 228: 91-100.
- [2] HADDARA M R, GUEDES SOARES C. Wind loads on marine structures [J]. *Marine Structures*, 1999, 12(3): 199-209.
- [3] ANDERSEN I M V. Wind loads on post-panamax container ship [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 58: 115-134.
- [4] MAJIDIAN H, AZARSINA F. Aerodynamic simulation of a containership to evaluate cargo configuration effect on frontal wind loads [J]. *China Ocean Engineering*, 2018, 32(2): 196-205.
- [5] DENG R, SONG Z J, REN H, et al. Investigation on the

effect of container configurations and forecastle fairings on wind resistance and aerodynamic performance of large container ships [J]. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2022, 16(1): 1279-1304.

- [6] 常亮, 张伟, 赵强. 船舶上层建筑风阻力优化及其对风浪中功率影响的研究 [J]. *中国造船*, 2019, 60(2): 171-176.
- [7] 孙华伟, 常文田, 李宏伟, 等. 集装箱船上层建筑气动干扰特性与风阻优化 [J]. *哈尔滨工程大学学报*, 2024, 45(4): 651-658.
- [8] ANDERSEN I M V. Wind loads on post-panamax container ship [J]. *Ocean Engineering*, 2013, 58: 115-134.
- [9] GRLJ C G, DEGIULI N, TUKOVIC Ž, et al. The effect of loading conditions and ship speed on the wind and air resistance of a containership [J]. *Ocean Engineering*, 2023, 273: 113991.
- [10] 罗少泽, 马宁, 平川嘉昭, 等. 大型集装箱船拖曳水池敞开式风场中风阻试验与数值计算 [J]. *上海交通大学学报*, 2016, 50(3): 389-394.
- [11] 蔡文山, 马卫星, 邓锐, 等. 不同集装箱布置下船舶风载荷数值仿真 [J]. *中国航海*, 2018, 41(2): 91-96.
- [12] 乔丹, 马宁, 顾解仲. 不同堆垛模式下集装箱船风载荷特性研究 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(3): 105-115.
- [13] 杜培利. 船舶减风阻装置设计及优化 [D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [14] 刘方琦. 商船三井为集装箱船安装挡风墙 [J]. *船舶与配套*, 2015(10): 90.
- [15] 潘亚彬. 集装箱船舶视线盲区的计算方法 [J]. *集装箱化*, 2006(9): 27-28.
- [16] 何川. CFD 基础及应用 [M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2015.
- [17] 任玉新, 陈海昕. 计算流体力学基础 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [18] 林建忠. 流体力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

(下转第 61 页)

Spatiotemporal Changes of Ecosystem Service Value in Yantai City based on Land Use

ZHENG Zijin, WANG Qiuxian, LIU Huiling

(School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China)

Abstract: As the first national ecological civilization construction demonstration zone, a national low-carbon city pilot, and a core city for the transformation of new and old kinetic energy in Shandong Province, Yantai firmly establishes and practices the concept of “green mountains and clear waters are invaluable assets”, vigorously improves the service value of land ecosystems, and coordinates the comprehensive transformation of the city towards green development. This article is based on the land use data of Yantai City from 1990 to 2020, and uses equivalent value evaluation method to analyze the spatiotemporal changes in the ecosystem service value of the research area in the past 30 years. Research shows that from 1990 to 2020, the main land types in Yantai City were arable land, forest land, and construction land, accounting for more than 90% of the total area. The construction land area increased significantly by 2.53%, and the comprehensive land use dynamic degree was the highest from 2010 to 2020, at 0.44%. From 1990 to 2020, the total value of ecosystem services in Yantai City has been decreasing year by year, with a significant decrease of 2.151 billion yuan in the value of ecosystem services in arable land and grassland, and a significant increase of 1.915 billion yuan in forest land and water bodies. From 1990 to 2020, the ecosystem service value showed a pattern of high in the east and low in the west. Urbanization led to the expansion of construction land, and areas with low ecosystem service value spread from urban areas to the surrounding areas. High value areas were located along the coastline and high-altitude mountains. Although some areas have increased due to seawater erosion and the policy of returning farmland to forests, the overall ecosystem service value is still declining.

Keywords: value of ecosystem services; land use; temporal and spatial changes; Yantai City

(上接第 24 页)

Abstract ID: 1673-8020(2025)01-0019-EA

The Design of Wind Shield and Wind Resistance Optimization for Container Ships

XU Rongjing¹, CHEN Qiuyi^{2a}, LI Renjia^{2b}, SHI Hongyuan^{2b}, ZHANG Kezheng^{2a}

(1. Yantai Development Zone Tianyuan Aquatic Products Co., Ltd., Yantai 264006, China;

2. a. School of Transportation; b. School of Hydraulic and Civil Engineering, Ludong University, Yantai 264039, China)

Abstract: Container ships currently face resistance caused by strong winds during sea navigation, which affects sailing speed and fuel consumption. This paper conducted design and optimization research on wind shield for a certain ultra-large container ship using numerical simulation methods. By employing computational fluid dynamics (CFD) technology, the flow field characteristics and resistance changes before and after the wind shield were analyzed. The results show that the wind shield can significantly reduce the wind resistance of the container ship, the optimally designed wind shield wall can reduce wind resistance by 16.7% under direct headwind conditions during the container ship's voyage, enhancing the ship's navigational efficiency, providing a feasible path for flow field improvement, and offers a reference for the general layout design of container ships.

Keywords: CFD; wind shield; container ship; wind resistance