

集装箱船上层建筑气动干扰特性与风阻优化

孙华伟, 常文田, 李宏伟, 孙寒冰
(哈尔滨工程大学 船舶工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要:为优化具有多个尺寸巨大的上层建筑物集装箱船的风阻,本文以某20000TEU超大型集装箱船上层建筑为研究对象,开展风载荷和PIV流场测量风洞模型试验。根据得到的风阻与流场干扰特性,采用数值模拟对主体建筑纵向间距和局部构型进行优化布置,并通过风洞试验对优化结果进行验证。研究表明:主体建筑纵向间距是影响集装箱船风阻和甲板上方绕流场气动干扰的主要因素,合理调整上层建筑物纵向间距同时对建筑物棱角边缘倒圆角处理可以得到风阻性能更优的布置方案,经风洞试验验证,优化方案较初始方案风阻降低47.19%,具有较大优化空间,可为超大型集装箱船总布置设计提供参考。

关键词:超大型集装箱船;上层建筑;风阻;流场特性;气动干扰;风洞试验;粒子图像测速;数值模拟

DOI: 10.11990/jheu.202204031

网络出版地址: <https://link.cnki.net/kcms/detail/23.1390.U.20240206.1735.004>

中图分类号: U661.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7043(2024)04-0651-08

Aerodynamic interference characteristics and wind resistance optimization of the container ship superstructure

SUN Huawei, CHANG Wentian, LI Hongwei, SUN Hanbing
(College of Shipbuilding Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Considering the superstructure of a 20000TEU ultralarge container ship as the research object, a wind tunnel model for measuring wind load and PIV flow field is tested to optimize the wind resistance of a container ship with multiple huge superstructures. On the basis of the obtained wind resistance and flow field interference, the longitudinal spacing and local configuration of the main building are optimized by numerical simulation, and the optimization results are verified by the wind tunnel test. The results show that the longitudinal spacing of the main building is the main factor affecting the wind resistance of the container ship and the aerodynamic disturbance of the flow field around the deck. By reasonably adjusting the longitudinal spacing of the superstructure and simultaneously rounding the edges and corners of the building, a layout with enhanced wind resistance performance can be obtained. As verified by the wind tunnel test, the optimized scheme reduces the wind resistance by 47.19% compared with the initial scheme. It also has a large optimization space that can serve as a reference for the general layout design of ultralarge container ships.

Keywords: ultralarge container ship; superstructure; wind resistance; flow field characteristics; aerodynamic interference; wind tunnel test; particle image velocimetry; numerical simulation

目前集装箱船向着大型、超大型化发展,集装箱的堆放量已经发展到2万箱以上,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,须引起重视^[1-2]。随着船舶能效设计指数(energy efficiency design in-

dex, EEDI)的逐步推行和不断提高,对于船舶性能的要求也越来越高,研究人员对于阻力的优化点逐渐从水下部分拓展到水上部分。为了研究有效的船舶风阻减阻方法,学者就集装箱的堆箱方式、上层建筑局部构型、导流罩附体对风载荷的影响开展了大量的研究。在堆箱方式影响方面,Andersen^[3-4]针对某超巴拿马型集装箱船开展了不同堆箱布置下风阻风洞试验,对比分析了不同堆箱模式下风载荷特性。Hamed等^[5]针对某9000TEU超巴拿马型集装箱船堆箱方式进行了优化研究,最优方案能够减小25%

收稿日期:2022-04-15

网络出版日期:2024-02-08

基金项目:高技术船舶科研项目(工信部联装(2016)25号);中央高校基本科研业务费项目(3072021CF0105)

作者简介:孙华伟,男,高级实验师;

常文田,男,高级实验师。

通信作者:常文田, E-mail: changwentian@163.com

迎风阻力。罗少泽等^[6]利用拖曳水池敞开式风阻试验和数值方法对系列箱体布置方案的风阻进行了研究,并给出了优化建议。蔡文山等^[7]计算了 6 种不同堆箱布置下风载荷并利用风洞进行验证,提出了能有效评估不同堆箱布置形式风载荷的评估指标。乔丹等^[8]以 10000TEU 大型集装箱船为研究对象,针对不同堆垛模式的风载荷特性开展了系列风洞试验研究。此外还有大量研究人员通过数值模拟方法探讨不同集装箱船型在不同的堆箱方式下的风载荷特性^[9-11]。在上层建筑局部构型影响方面,周传明等^[12]针对上层建筑的形状和整体布置进行优化构型,优化方案迎风阻力减少 13%~27%。在导流罩附体影响方面,常亮等^[13]针对一艘万箱集装箱船的上层建筑设计了导流罩,试验结果表明迎风阻力减少了 9%。随着船舶尺寸的大型化,上层建筑尺寸也随之增大,部分上层建筑对风阻影响已无法忽略。目前的研究大多针对单一上层建筑物情况,对甲板上存在多个大型建筑物(如驾驶楼、烟囱等)时对风载荷影响及优化的研究较少。由于船舶甲板长度有限,当存在多个大型建筑物时,上游建筑物产生的流动分离涡流会对下游建筑物的空气绕流场形成强烈的干扰,从而对风载荷的大小和分布产生较大的影响。

本文以某 20000TEU 超大型集装箱船为研究对象,采用风洞试验研究与计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)数值模拟相结合的手段,研究无箱堆情况下不同总体布置方案主体上层建筑物间(驾驶楼与烟囱)流场气动干扰特性与风阻规律,优化得到风阻最佳的上层建筑布置方案。

1 风洞试验

1.1 试验模型与方案

风洞模型试验在 FL-8 风洞进行,FL-8 风洞为低速单回路闭口风洞,试验段截面为切角矩形,试验段截面尺寸 3.5 m×2.5 m,试验段长度 5.5 m,试验段平均湍流度 0.19%,空风洞最大风速 73 m/s。模型长 $L=2$ m,缩尺比为 1:200,模型主船体由玻璃钢加工而成,上层建筑(驾驶楼和烟囱)通过 3D 打印制作,考虑到主要研究内容为风阻力,模型加工过程中只制作了设计水线面以上部分,如图 1 所示。

模型坐标系设置船舳横剖面,中纵剖面以及设计水线面交点为原点, x 轴指向船艏方向, y 轴指向左舷方向, z 轴竖直向上,定义风向角 θ 为模型与来流风向的夹角,模型逆时针旋转为正。

由于风洞试验很难保证雷诺数相似,但是在实际试验中模型达到临界雷诺数以后气动力系数随雷诺数(风速)变化趋缓。因此首先进行了风速为 15、

20 和 25 m/s 的雷诺数影响试验,在此基础上开展 $0^\circ\sim 180^\circ$ 风向角的常规测力试验和 15 与 25 m/s 风速下 0° 、 45° 与 180° 风向角的粒子图像测速技术(particle image velocimetry, PIV)流场测量试验,并利用活动地板模拟水面。

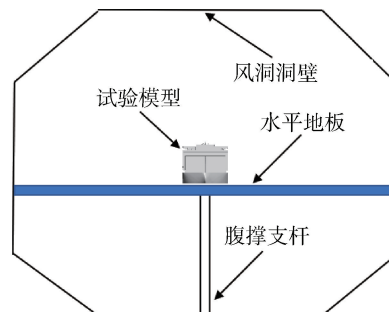


图 1 风洞测力试验示意

Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel force measurement test

如图 2 所示,测力试验时模型采用单支杆腹撑支撑形式,模型和天平连接,天平通过腹撑支杆连接到角度控制机构上。针对模型的各个状态,阶梯式改变模型的风向角,在风速一定的情况下,对模型气动力及力矩进行测量。

流场测量试验则采用 PIV 系统测量模型在不同风速(15 m/s、25 m/s)、风向角(0° 、 45° 、 90°)情况下中纵剖面、水平剖面、横剖面等典型位置处速度场。如图 3 所示,通过相机、激光器和模型的组合移动实现不同剖面的拍摄,由于单次拍摄范围有限,采用移动多次拍摄并对测量结果进行拼接。试验采用便携式压力雾化示踪粒子发生器产生所需的粒子,粒子介质为橄榄油,产生的示踪粒子直径约为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$ 。示踪粒子发生器安装在风洞驻室,试验前由管道引入风洞稳定段。

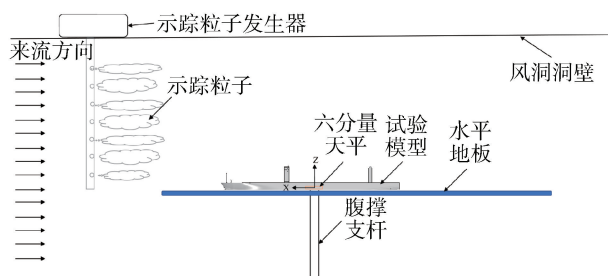


图 2 模型 PIV 试验装置布置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the layout of the PIV model test device

1.2 试验结果与分析

测力试验中主要测量纵向力 F_x 、横向力 F_y 以及偏航力矩 M_z ,进行无因次化处理:

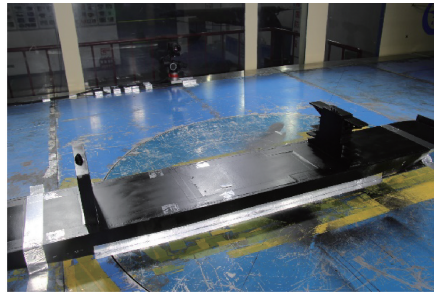
$$C_{F_x} = F_x / (0.5\rho V^2 A_F) \quad (1)$$

$$C_{F_y} = F_y / (0.5\rho V^2 A_L) \quad (2)$$

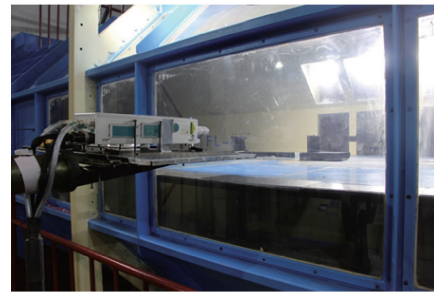
$$C_{M_z} = M_z / (0.5\rho V^2 A_L L) \quad (3)$$

式中: C_{Fx} 、 C_{Fy} 、 C_{Mz} 分别为纵向力系数、横向力系数以及偏航力矩系数; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; V 为来流

风速, m/s ; A_F 和 A_L 分别为模型水线以上纵向和横向投影面积, m^2 ; L 为模型总长, m 。



(a) 纵向剖面拍摄时相机安装示意



(b) 水平剖面拍摄时激光器安装示意

图3 PIV不同工况试验时相机和激光器安装

Fig. 3 Camera and laser installation during PIV test under different working conditions

由图4可知,本次试验的风速范围 $15 \sim 25 \text{ m}/\text{s}$ ($Re \geq 2.0 \times 10^6$) 已超过临界雷诺数风速,不同雷诺数下各风载荷系数变化不大,试验环境能够真实模拟模型受力与空气绕流场流动情况。

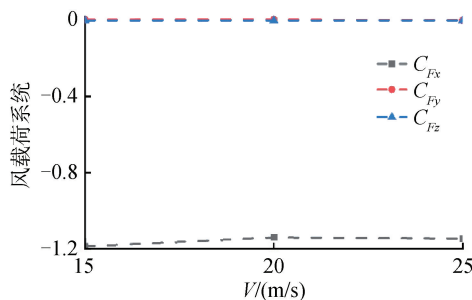
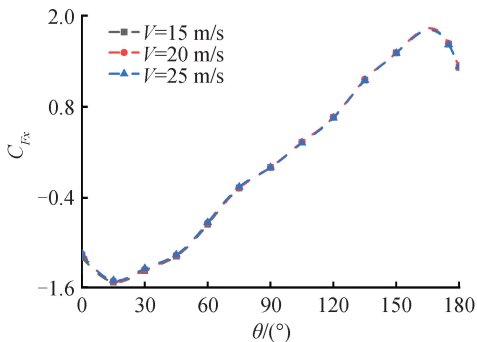


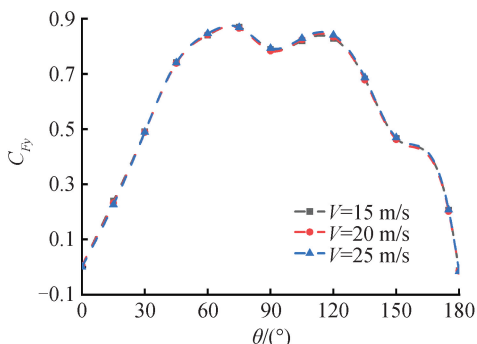
图4 $\theta = 0^\circ$ 时不同风速下风载荷系数

Fig. 4 Wind loads at different wind speeds when $\theta = 0^\circ$

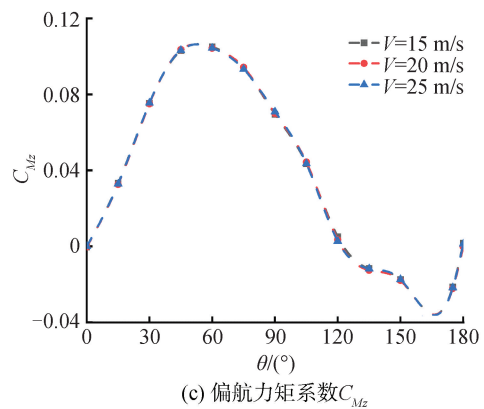
不同风速及风向角下气动载荷系数如图5所示。



(a) 纵向力系数 C_{Fx}



(b) 横向力系数 C_{Fy}



(c) 偏航力矩系数 C_{Mz}

图5 不同风速及风向角下气动载荷系数

Fig. 5 Aerodynamic load factor at different wind speeds and wind direction angles

纵向力系数类似正弦曲线规律变化,其中在 15° 和 165° 风向角时达到极值, 90° 时纵向力最小。横向力曲线在测试的角度范围内整体呈抛物线形状,当 $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ 时, C_{Fy} 随着 θ 的增大而增大,在 $\theta = 75^\circ$ 时达到极值,在 $\theta = 90^\circ$ 时由于甲板以上的上层建筑迎风面积减小,使得横向力迅速减小;继续增大风向角,横向力随之增大并在 $\theta = 120^\circ$ 时达到最大值,进一步增大风向角,由于迎风面积减小,横向力随 θ 的增大而减小。由于模型船体艏艉不对称,同时驾驶楼与烟囱尺寸和形状的巨大差异,因此偏航力矩具有较强的不对称性,在测试的风向角范围内, C_{Mz} 曲线呈类似正弦曲线规律变化,在 60° 和 165° 风向角时达到极值,除正迎风 ($\theta = 0^\circ$) 和正顺风 ($\theta = 180^\circ$) 外,当 $\theta = 120^\circ$ 时, $C_{Mz} \approx 0$ 。

图6为 $V = 25 \text{ m}/\text{s}$, $\theta = 0^\circ$ 时典型剖面下的速度矢量图。空气流经模型时,首先在船艏挡板的上边缘和左、右边缘发生分离,在后方甲板上空形成上洗流和侧滑流,遭遇驾驶楼后一部分气流形成下洗流,在挡板和驾驶楼中间甲板区域形成了强涡流区;另外一部分气流在驾驶楼的上缘以及左右两侧边缘发生分离,在下洗流、侧滑流以及远场气流共同作用

下,驾驶楼和烟囱之间形成了多个分离涡区,气流同样再次在烟囱处发生分离,并在其后方形成了类似的低压分离涡流区。因此,空气流经具有 2 个高大上层建筑物的集装箱船时,在其甲板上方共有 3 处较大分离涡流区存在,上游流动会对下游分离现象产生影响,在甲板以下的船体周围由于几何形状光顺,因此逆压梯度小,没有发生流动分离现象。

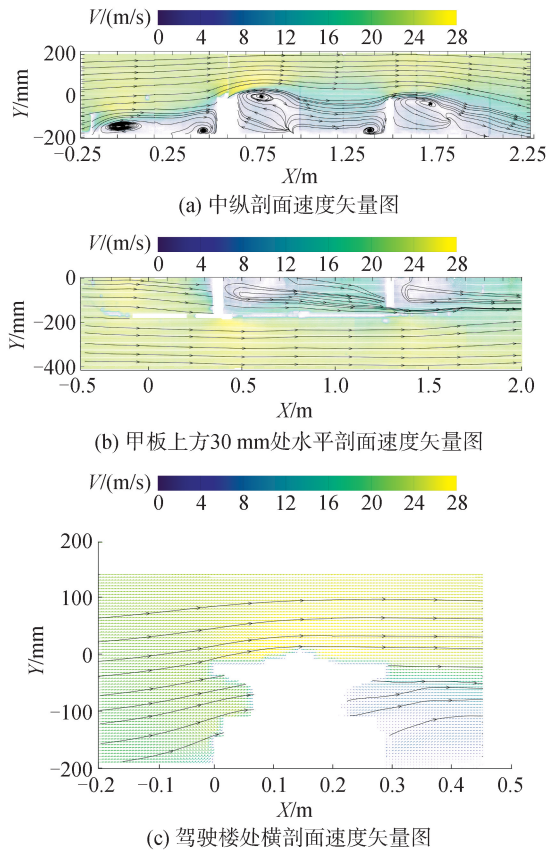


图 6 $V=25\text{ m/s}, \theta=0^\circ$ PIV 试验结果
Fig. 6 $V=25\text{ m/s}, \theta=0^\circ$ PIV test results

2 上层建筑布置优化设计与数值分析

2.1 数值计算方案

基于 Star ccm+ 软件平台,以试验船模为对象开展数值模拟研究。利用直角网格对流体域进行划分,计算域为 $12L \times 10L \times 2L$ 的长方体,第 1 层网格高度 $y^+ = 0.4$,在船体周围设置加密区,加密区为长方体,位于左舷流动分离区,长 $3.5L$,宽 $1.5L$,高 $0.5L$,全域网格量约 500 万,如图 7 所示。

由于集装箱船实际遭遇风速和模型试验风速均远小于声速,采用求解定常不可压缩 RANS 方程计算模拟,对流项采用二阶离散格式求解;湍流模型选为 SST $k-\omega$ 湍流模型并结合 All y^+ Wall Treatment 壁面处理方式。SST $k-\omega$ 湍流模型方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \quad (5)$$

式中: G_k 为湍流的动能; G_ω 为 ω 方程, $G_\omega = \alpha \frac{\omega}{k} G_k$; Γ_k 和 Γ_ω 分别为 k 与 ω 的有效扩散项; Y_k 和 Y_ω 分别为 k 与 ω 的发散项; D_ω 为正交发散项。

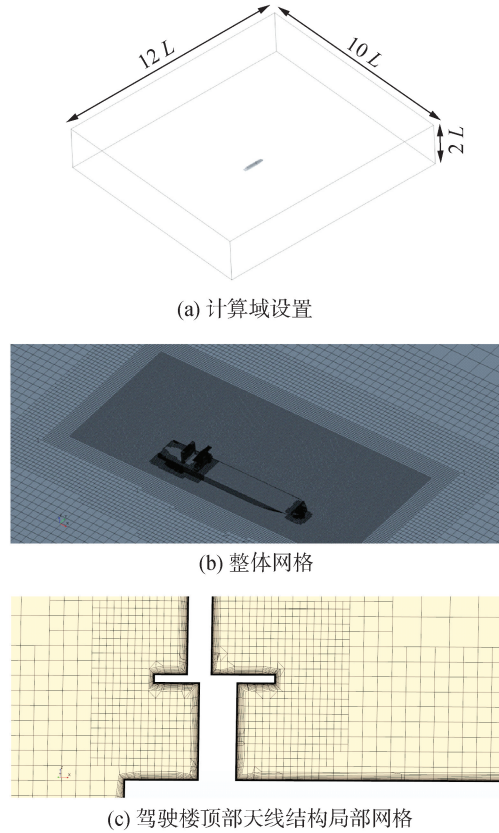


图 7 计算域设置与网格划分示意

Fig. 7 Diagram of calculation domain setting and meshing

模型前方、上方与左右两侧计算域表面设为速度入口,后方为压力出口,船体表面与地面为无滑移壁面。

对比计算表明, 0° 风向角状态纵向阻力计算结果与试验偏差为 3.313%,基本满足后续数值模拟的准确度要求。

2.2 上层建筑纵向相对位置优化

根据风洞 PIV 试验流场测量结果,改变上层建筑间的间距会使得艇流场结构发生较大变化,本文研究对象的主要上层建筑物为驾驶楼和烟囱,考虑到烟囱一般位于船艏,而驾驶楼尺寸更大且根据不同船舶总布置要求的不同会处于不同纵向位置,因此通过调整驾驶楼研究上层建筑间距对超大型集装箱船风载荷以及流场结构的影响影响规律,提出风阻最优的布置方案。

驾驶楼以原始方案为基准,向前或向后移动,移动时以该船型设计吃水工况中集装箱箱堆位置作为

移动的距离单位,如原始方案驾驶楼和烟囱相隔 12 个集装箱堆,间距约为 $0.438L$,不同方案从前到后不同位置分别命名为 S_1, S_2, \dots, S_9 ,如图 8 所示。

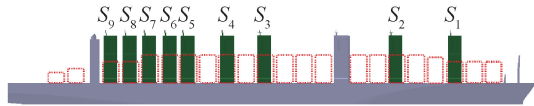


图 8 不同驾驶楼纵向位置方案

Fig. 8 Longitudinal position schemes of different driving buildings

原型试验结果为 1.146,不同方案下正迎风阻力计算结果如表 1 所示。驾驶楼纵向位置改变对风阻影响非常大,不同工况间最大偏差能够达到 60.38%,当驾驶楼纵向位置向船艏方向移动时,风阻随向前移动距离的增加而增大,最大增阻 12.65%;向船艉方向移动时,将会减小风阻,移至 S_7 位置时,减阻效果最好,达到 47.73%,但继续向后移动,减阻效果有所减弱。

表 1 驾驶楼纵向位置对纵向力系数的影响

Table 1 Influence of longitudinal position of driving building on C_{Fx}

工况名称	C_{Fx} 计算结果	减阻率/%
S_1	1.291	-12.65
S_2	1.274	-11.17
S_3	1.092	4.71
S_4	0.864	24.61
S_5	0.716	37.52
S_6	0.697	39.18
S_7	0.599	47.73
S_8	0.638	44.33
S_9	0.744	35.08

图 9、10 给出 S_1, S_7 和 S_9 中纵剖面以及 $Z = 0.125 m$ 水平剖面速度矢量图。当驾驶楼前移后,船舶挡板和驾驶楼之间的间距减小,一定程度上抑制了分离涡的发展,涡流强度和大小和原始工况相比有所减小,但是前移后驾驶楼和烟囱之间的距离增大,二者之间的涡流区范围扩大,由于此区域是主涡流区,因此对阻力增量影响大于前面挡板所产生涡流减小的影响;另一方面,驾驶楼与烟囱之间距离增大后,远场来流的影响增大,烟囱迎风面来流速度增加,流动分离增强,其后分离涡区范围有所增长,由于驾驶楼和烟囱迎面和体积比挡板要大得多,因此其对减阻效果的所产生的负收益要比挡板所带来的正收益要大的多,所以从整体上看 S_1 工况阻力有较大幅度增加。

驾驶楼后移后,船舶挡板和驾驶楼的间距加大,因此气流遭遇驾驶楼后产生的下洗流对于挡板产生分离涡流影响大幅减小,同时由于挡板的高度和大小有限,因此其产生的分离涡流范围与强度与原始

工况相比反而降低,而驾驶楼与烟囱的距离减小后,烟囱对于驾驶楼所产生的分离涡的发展有了很大的抑制作用,涡流范围与强度减弱,同时由于烟囱处于驾驶楼的涡流区中,平均来流速度降低,烟囱引起的分离涡范围与强度同样有所降低,所以当驾驶楼移动至 S_7 位置时,能够大幅降低风阻。

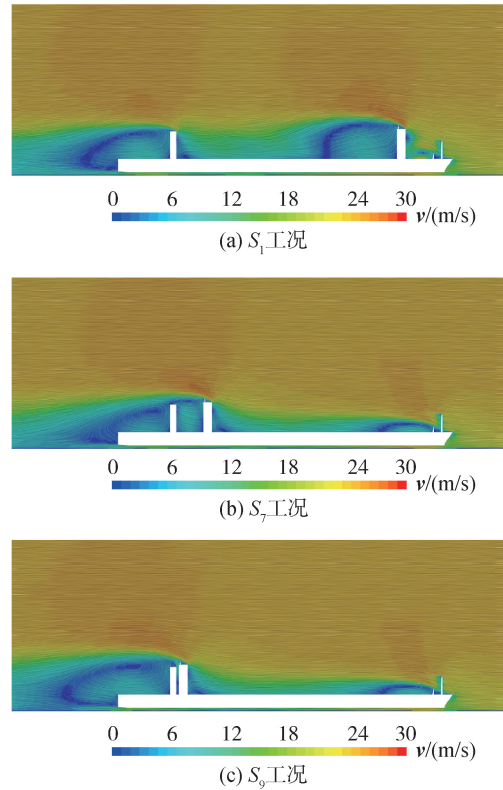


图 9 不同工况中纵剖面速度矢量图

Fig. 9 Longitudinal profile velocity vector diagram in different case

对于 S_9 工况,驾驶楼和烟囱相邻布置,2 个建筑物之间间距很小,原先存在于 2 个建筑物之间的分离涡区几乎消失,由于船舶挡板产生的涡流对此位置的驾驶楼和烟囱影响已经很小,远方来流的影响加强,在船艉形成了一个和原始工况相比范围更大的分离涡区,所以 S_9 工况的减阻效果比 S_7 工况要差。

因此,针对本文研究对象,驾驶楼与烟囱最佳间距方案为 S_7 方案,间隔 2 个集装箱堆 ($0.073L$),风阻较原方案减小 47.73%。

2.3 上层建筑迎风面构型优化

在甲板上方多个上层建筑物条件下,从控制并减小气流的分离,保持流向的一致性的角度出发,优化上层建筑局部构型降低风阻。优化方案分为 2 种:一种是在保证足够工作和生活空间前提下,将原始方案中驾驶楼迎风向向前拉伸,然后将单个平面变为多个具有一定夹角的平面或者曲面, $S_{10} \sim S_{12}$ 方案是将迎风面分别变成具有一个折角,2 个折角和 4

个折角平面, S_{13} 方案是圆弧曲面方案, 如图 11 所示; 另外一种是对建筑物的棱角边缘进行倒角处理, 其中 S_{14} 方案倒圆角, S_{15} 方案进行切角处理, 如图 12 所示。各种方案正投影面积一致。

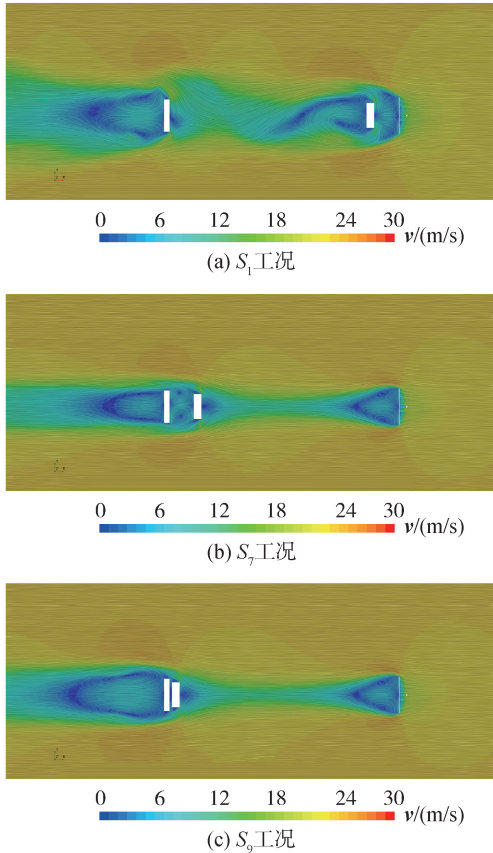


图 10 不同工况水平剖面速度矢量图
Fig. 10 Horizontal profile velocity vector diagram of different case

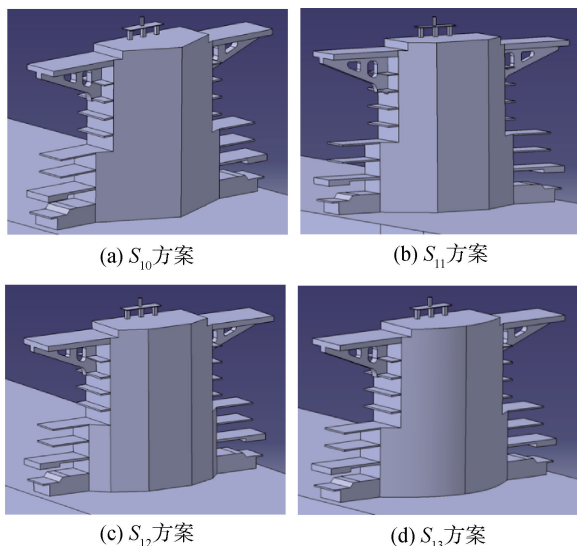


图 11 迎风面形状改变方案
Fig. 11 Scheme of changing the shape of the windward side

原试验结果依然为 1.146 时, 不同方案下减阻效

果如表 2 所示, 上层建筑局部构型优化均具有一定的减阻效果, 其中驾驶楼迎风面变成圆弧面和棱角边缘倒圆角方案具有更高的减阻率。如图 13 所示, 和原始工况相比, 当迎风面由平直端面改成圆弧面以后, 生活楼和烟囱两侧边缘侧滑流强度有所减弱, 但由于建筑本身巨大体积与遮蔽作用, 涡流区范围和强度上差距相对较小, 减阻效果相对有限。如图 14 所示, 原始工况在上表面发生了较为严重的流动分离现象, 当棱角边缘改成圆角后, 分离现象得到了很大的改善, 但这种改善只是对局部产生影响, 对于整个流场而言, 影响相对较小。

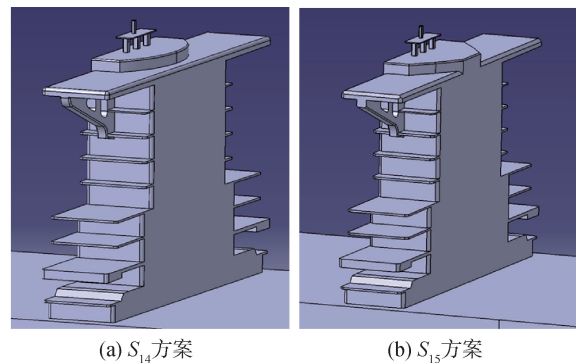


图 12 棱角边缘形状改变方案
Fig. 12 Edge shape change scheme

表 2 不同优化方案对纵向力系数的影响

Table 2 The influence of different optimization schemes on C_{Fx}

工况名称	C_{Fx} 计算结果	减阻率/%
S_{10}	1.024	10.65
S_{11}	1.025	10.56
S_{12}	1.022	10.82
S_{13}	0.974	15.01
S_{14}	0.998	12.91
S_{15}	1.038	9.42

为了进一步提升阻力优化效果, 分别将 S_7 方案、 S_{13} 方案和 S_{14} 方案进行组合, 比较不同因素的耦合作用下的减阻效果。不同组合方案减阻结果如表 3 所示。不同组合方案均具有不同程度的减阻效果, 其中 3 个因素组合方案 ($S_7+S_{13}+S_{14}$ 组合) 减阻率最高, 达到 49.56%, $S_{13}+S_{14}$ 组合减阻效果相对最差, 为 20.42%。可见, 移动驾驶楼仍然是减阻的主要因素, 当不同因素组合作用时, 减阻率并没有相应的叠加, 说明不同因素同时作用时对流场的作用存在一定的耦合干扰。

2.4 风洞试验验证

为了验证上层建筑布置优化结果以及对集装箱船设计装载工况下的影响, 进行了图 15 所示第 2 期的风洞模型试验, 试验工况如表 4 所示。风速以及相关测试设备与环境与第 1 期相同, 重复性试验 2 期试验结果吻合较好。

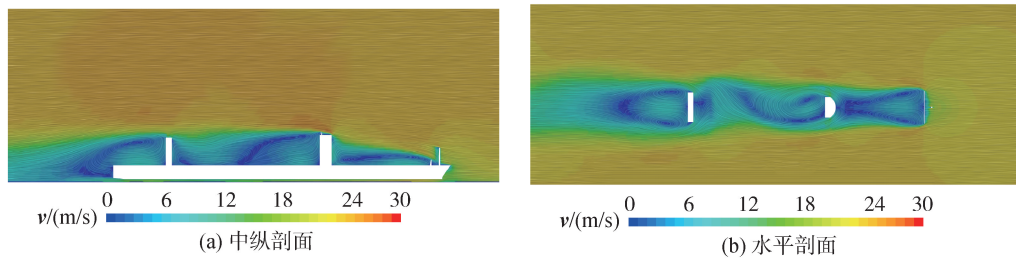


图 13 S_{13} 工况不同剖面下速度矢量图

Fig. 13 Case S_{13} velocity vector diagram under different profiles

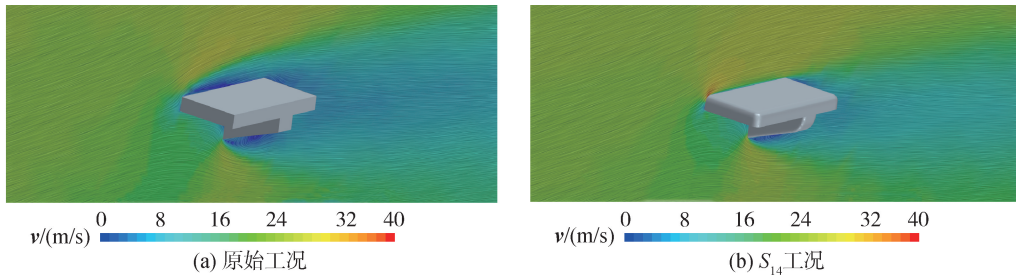


图 14 原始工况和 S_{14} 工况局部流场对比

Fig. 14 Comparison of local flow field between original condition and case S_{14}

表 3 不同组合方案对纵向力系数的影响

Table 3 The influence of different combination schemes on C_{Fx}

工况名称	C_{Fx} 计算结果	减阻率/%
S_7+S_{13}	0.616	46.25
S_7+S_{14}	0.912	20.42
$S_{13}+S_{14}$	0.584	49.04
$S_7+S_{13}+S_{14}$	0.578	49.56

表 4 风速为 25 m/s 时风洞验证试验工况

Table 4 Wind tunnel validation test case at a wind speed of 25 m/s

序号	是否含有堆箱	工况名称
1	否	S_7
2	否	S_9
3	否	S_1
4	否	S_{13}
5	否	S_{14}
6	否	S_7+S_{13}
7	否	S_7+S_{14}
8	否	$S_{13}+S_{14}$
9	否	$S_7+S_{13}+S_{14}$
10	是	设计吃水方案初始工况
11	是	驾驶楼位置(S_7)
12	是	驾驶楼位置(S_7)+棱角边缘(S_{14})

表 5 不同风阻优化方案纵向力系数结果验证

Table 5 Verification of C_{Fx} results for different wind resistance optimization schemes

工况	C_{Fx} 计算结果	C_{Fx} 试验结果	偏差/%	原型阻力 (2期)	减阻率/%
1	0.599	0.636	-5.929	1.138	44.11
2	0.744	0.786	-5.318	1.138	30.93
3	1.291	1.355	-4.710	1.138	-19.07
4	0.983	1.006	-2.274	1.138	11.60
5	0.998	1.033	-3.469	1.138	9.23
6	0.912	0.957	-4.696	1.138	15.91
7	0.584	0.601	-2.914	1.138	47.19
8	0.578	0.608	-4.998	1.138	46.57
9	0.616	0.625	-1.407	1.138	45.08
11	0.671	0.663	1.225	0.743	10.77
12	0.621	0.612	1.426	0.743	17.63

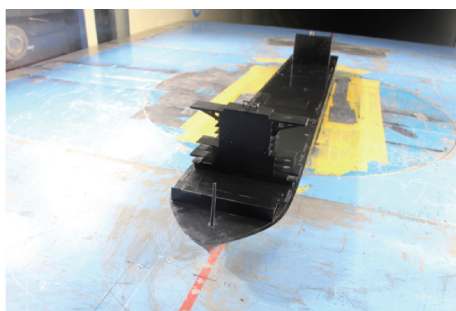


图 15 风洞验证试验工况模型

Fig. 15 Wind tunnel validation test case model

风洞试验结果如表 5 所示。本文建立的数值计算方法具有一定的可靠性,计算结果与试验结果吻合较好。主体建筑间的气动干扰是影响集装箱船风阻的主要因素,调整大型上层建筑间的纵向相对位置并结合对建筑物棱角边缘的倒圆角处理能够有效地降低正迎风阻力。当甲板上布置集装箱时,由于集装箱的填充作用,会一定程度上减弱上层建筑间的气动干扰的效果,相同布置方案下,迎风状态风阻优化率降低至 17.63%。

3 结论

1) 船体长度有限的条件下, 甲板上方多个高大建筑物由于表面的流动分离与遮蔽效应所形成的低压分离涡流区的强度和范围会互相影响。

2) 调整上层建筑纵向间距能够有效改变流场干扰特性, 从而影响风载荷特性, 是影响正迎风阻力的主要因素, 本文不同工况下阻力最大偏差达到60.38%, 具有巨大的优化空间。

3) 采用数值方法分析空气流场干扰特性, 优化风阻具有一定的可靠性和准确性, 当通过多种流动控制手段优化风阻时, 耦合方案优化效果具有非线性特点, 本文所研究的20000TEU超大型集装箱船船型, 合理调整其上层建筑物纵向间距同时对建筑物棱角边缘倒圆角处理方案能够得到最优减阻效果。

4) 当集装箱船布置箱堆以后降低了建筑物的等效高度, 减小了分离涡强度与范围, 风阻优化效果也随之降低。

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] DECK A, VINCENT I. Wind-tunnel investigation of wind loads on a post-panamax container ship as a function of the container configuration on deck [C]//Proceedings of the 11th International Marine Design Conference 2012. Glasgow: University of Strathclyde, 2012.
- [4] ANDERSEN I M V. Wind loads on post-panamax container ship[J]. Ocean engineering, 2013, 58: 115-134.
- [5] 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.
- [6] 罗少泽, 马宁, 平川嘉昭, 等. 大型集装箱船拖曳水池敞开放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.
LUO Shaoze, MA Ning, PING Chuanjiazhao, et al. Exper-

imental and numerical study of wind drag of large containership by using open wind test in towing tank[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2016, 50(3): 389-394.

- [7] 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.
CAI Wenshan, MA Weixing, DENG Rui, et al. Numerical simulation on wind loads on ship with different container configurations[J]. Navigation of China, 2018, 41(2): 91-96.
- [8] 乔丹, 马宁, 顾解冲. 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.
QIAO Dan, MA Ning, GU Jiechong. Study on wind load characteristics for a container ship under different stacking modes[J]. Chinese journal of ship research, 2019, 14(3): 105-115.
- [9] HASSAN K, WHITE M F, CIORTA C. Effect of container stack arrangements on the power optimization of a container ship[J]. Journal of ship production and design, 2012, 28(1): 10-19.
- [10] 张金鹏. 大型集装箱船风载荷理论分析及计算[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 14-78.
ZHANG Jinpeng. Theoretical analysis and calculation of wind load on large container ships[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2012: 14-78.
- [11] 刘强, 谢伟, 段文洋, 等. 四种不同布置形式集装箱船风载荷计算研究[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(10): 95-99.
LIU Qiang, XIE Wei, DUAN Wenyang, et al. Calculating wind loads of container ships with four different layouts [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (natural science edition), 2013, 41(10): 95-99.
- [12] 周传明, 董国祥, 高玉玲. 20000DWT散货船风载荷数值计算及上层建筑降阻优化[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2017, 40(2): 6-12.
ZHOU Chuanming, DONG Guoxiang, GAO Yuling. Wind load simulations of 20000DWT bulk carrier and resistance reduction optimization of superstructure [J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2017, 40(2): 6-12.
- [13] 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.
CHANG Liang, ZHANG Wei, ZHAO Qiang. Optimization of wind resistance of container ship's superstructure and its influence on received power in wind [J]. Shipbuilding of China, 2019, 60(2): 171-176.

本文引用格式:

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.
SUN Huawei, CHANG Wentian, LI Hongwei, et al. Aerodynamic interference characteristics and wind resistance optimization of the container ship superstructure[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2024, 45(4): 651-658.