

作者自评推荐表 (供审稿专家核实参考)	
本文主要创新点:	(1) 基于 CFD 方法构建了船舶旋筒风帆力学仿真分析模型, 为旋筒风帆的性能分析、风帆节能效果评估提供了一种有效的方法。 (2) 系统研究了风速、风向角、旋筒转速等参数对风帆节能效果的影响规律, 为旋转风帆的设计和推广应用提供参考。
本文主要的参考价值:	(1) 本文搭建的旋筒风帆力学模型可为相关性能研究 (多个旋筒、旋筒结构载荷评估等) 提供参考; (2) 本文结合一艘 15 万吨级散货船做了旋筒风帆节能效果评估, 可为相关船型节能设计参考。
备注:	

Magnus 旋转式船舶节能装置特性分析

摘要: 船舶助力航行设施的使用是绿色船舶理念的方向之一, 它在降低航运成本提高经济效益的同时还可以在在一定程度上改善海洋环境。旋筒风帆是基于 Magnus 效应原理的一种船舶助力航行设施。本文通过数值模拟方法研究分析了船舶旋筒风帆在风场中的力学性能, 研究分析船舶旋筒风帆推力、横向力以及旋筒所需要的驱动力矩随着旋筒转速、风速、风向角的变化规律。旋筒风帆所产生的推力、横向力随着风速以及旋筒转速的增加而增加, 在风向角=90°时推力到达一个峰值后逐步减小。研究表明: 旋筒风帆可以达到较好的节能效果, 风向角不同, 节能效果也不同, 在风向角等于 90°时节能效果最好; 驱动旋筒旋转也需要消耗功率, 旋筒风帆在产生推力的同时也会产生一个可使船舶偏航的横向力。本文结论可为船舶旋筒风帆优化设计员提供技术支持。

关键词: 马格努斯效应; 绿色船舶; 风帆; 数值模拟; 节能评估

中图分类号: U661.7 文献标识码: A

Characteristic analysis of Magnus rotating marine energy saving device

Abstract: The use of ship assisted navigation facilities is one of the directions of green ship concept. It can not only reduce the shipping cost and improve the economic benefits, but also improve the marine environment to a certain extent. Rotor sail is a kind of ship assisted navigation facility based on Magnus effect principle. In this paper, the numerical simulation method is used to study and analyze the mechanical properties of the ship's rotor sail in the wind field. This paper studies and analyzes the variation rules of the thrust, lateral force and driving torque of the spinning cylinder with the rotation speed, wind speed and wind direction angle of the ship's spinning cylinder. The results show that the thrust and lateral force of the windlass increase with

the increase of wind speed and rotating speed, and the thrust reaches a peak value and then decreases gradually when the wind direction angle is 90° . The results show that: the rotor sail can achieve better energy-saving effect, and the energy-saving effect is different with different wind direction angles, and the best energy-saving effect can be achieved when the wind direction angle is equal to 90° ; the power consumption is also required to drive the spinning cylinder, and a lateral force which can cause the ship to yaw will be produced at the same time when the wind direction angle is equal to 90° . The conclusion of this paper can provide technical support for the sails optimization designers.

Key words: Magnus effect; green ship; rotor sail; numerical simulation; energy saving assessment

0 引言

近年来,在“海洋强国”的战略背景下,人工智能、大数据、新材料和新能源为船舶设计与建造注入了强劲的发展动力,船舶行业迎来了巨大的发展机遇^[1-3]。各种新的设计理念融入到船舶设计与建造过程中,比如智能船舶、绿色船舶^[4]等。绿色船舶是一个综合考虑环境影响和资源利用效率的现代造船理念,绿色理念贯穿于船舶整个生命周期(设计、制造、营运到报废回收)。特别是国际海事组织(IMO)对船舶能效设计指数EEDI^[5-6]提出要求以后,绿色船舶概念更受到行业内的青睐。其中船舶节能设计是绿色船舶技术的一个重要方向。船舶节能设计的主要途径有:船舶航线优化设计^[7]、船舶航行姿态优化^[8]、船型减阻优化^[9-10]、辅助动力装置^[11]等。水动力节能装置在船舶上的应用已经有了非常成熟的产品,实际证明节能效果也非常显著。“船使八面风”,风能在船舶上的应用已有数千年的历史,古人在船舶上安装软质帆,借风力推动船舶前进。现代船舶主要以柴油机为主的推进装置,随着节能环保的深入人心,借助风力推进船舶这一概念重新回到人们的研究范畴^[12-13]。

旋筒风帆是一种借助风力推动船舶的节能装置,是Magnus效应的实践应用。Magnus效应是德国科学家H.G.马格纳斯于1852发现的一种流体力学现象,指的是在粘性不可压缩流体中,运动的旋转物体受到升力作用,从而影响物体在流体介质中的行进路线的一种现象。此后各种应用Magnus效应的工程实践装置先后出现。Seifert^[14]介绍了基于Magnus效应的航空装置的概念设计,将旋转圆柱体作为航空器的升力装置,取得了良好的航行效果程友良^[15]等研究了Magus圆柱叶轮的水动力学特性及效率,指出Magnus圆柱叶轮比传统叶片有更好的启动性能,圆柱自转会减小叶顶能量损失。朱弘^[16]提出了一种基于Magnus效应的风能叶片的新构型,通过CFD模拟了基于Magnus效应的风力叶片的流场,并比较了Magnus翼型与传统翼型各自的性能特征。肖中云^[17]等研究了船尾形状对旋转体Magnus效应的影响,得出了相对于标准形状的其他船尾形状在所有来流下都起到了增大Magnus效应的作用且Magnus力和力矩与船尾角成正比的结论。李欣^[18]等以大型远洋船为研究对象,分析了旋筒风帆作为辅助动力装置对船的稳性、混合推进系统、电力负荷计算以及节能效果。旋筒风帆的原理基于马格努斯效应,它利用发动机产生自转的旋筒在运动的气流中旋转时,会使其一侧的气压增大,另一侧的气压降低,从而产生一个垂直于气流方向的横向力,引导风力产生向上的升力。通过调整旋筒转速,升力大小和方向可以调整,从而产生向前的推力。

基于Magnus效应的实践应用体现在各个领域,尽管也有船舶旋筒风帆的文献报道,但是这些报道多注重于旋筒风帆节能效果、工程应用或者产品推广,针对旋筒风帆的力学性能研究并不细致、安装模式细节分析并不详细。

本文基于Magnus效应构建了船舶旋筒风帆力学分析模型,通过数值模拟分析了其在风场的力学性能,并将其应用于一艘散货船,评估了旋筒风帆的节能效果。期望本研究成果

能为相关人员提供技术支持。

1 旋筒风帆概念设计

如图1、图2所示，圆柱体在来流中做顺时针旋转，带动圆柱体附近流体一起做旋转运动，这使得与圆柱同向旋转的流体速度增加、与其旋向相反的流体速度减小；则应有圆柱一侧的气流速度大于另一侧的气流速度，根据伯努利定理，圆柱两侧之间有一个压力差，此即为 Magnus 效应力。同理，当圆柱旋向改变时，圆柱受力方向也随之改变。圆柱同时受到一个与来流速度相反的阻力。

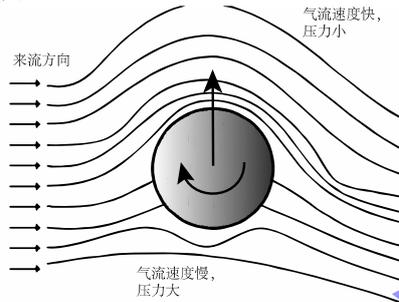


图1 马格努斯效应（流场）

Fig.1 Magnus effect (flow field)

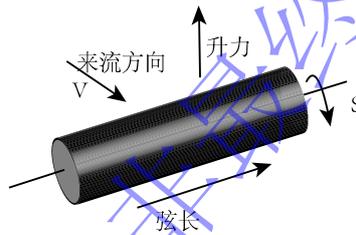


图2 马格努斯效应（受力）

Fig.2 Magnus effect (force)

在船舶甲板上安装一个或多个圆柱体（圆筒），如图3所示，机械力驱动圆柱旋转，在力矩 M 的驱动下在风中旋转，在水平方向受到与风向一致的阻力 F_D ，同时受到与风向垂直的升力 F_L 作用(见图4)。这就是旋筒风帆的基本原理。

自然界的风速风向定义为真风；船舶在航行时所产生的一种风向与船舶运动方向相反、风速与船速相等的风，称为船风；在船上观察到的风是真风和船风的矢量和，定义为视风。视风为船舶旋筒风帆可利用的风。船舶顺风航行时，也就是船风和真风方向相反，视风最小。船舶迎风航行时，此时真风和船风方向一致，视风最大，但和前进方向相反的逆风是阻碍船舶前进的，产生的风能不足以抵消产生的阻力。所以能使旋筒风帆助航效果最好的情况为迎风最小情况的最大视风，也就是垂直于船舶前进方向的风——横风。

如图5所示，当风向和船舶航行方向垂直时，旋筒风帆的升力与航向一致，但风向很难完全和船舶前进方向垂直。定义 θ 是视风方向和航速方向的夹角，跟航向一致的推力为 F_T ，横向力为 F_H 。

有：

$$F_T = F_D \cos \theta + F_L \sin \theta \quad (1)$$

$$F_H = F_D \sin \theta - F_L \cos \theta \quad (2)$$

如果船上有多旋筒，由于旋筒位置不同，与螺旋桨推力的合力也不同，可以通过控制改变各自旋筒的旋转速度，获得最优的风帆助航效果。同时，风速、风向也并非一成不变，为获取最优的助航效果，旋转速度也应该适时调整。

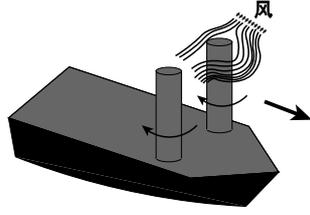


图3 船舶旋筒风帆

Fig.3 rotor sail of ship

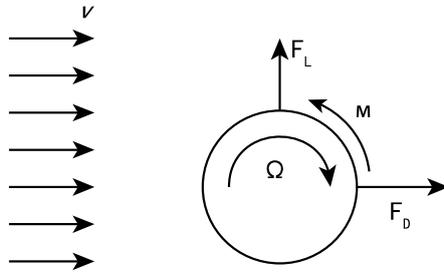


图4 旋筒受力示意图

Fig.4 free-body diagram of rotating cylinder

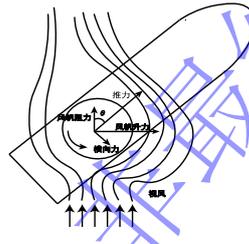


图5 旋筒风帆助力示意图

Fig.5 free-body diagram of rotor sail of ship

2 旋筒风帆性能研究

计算对象为一个直径 D 为5m、高 H 为30m的圆柱体，该圆柱体在空气中旋转，在前方有空气稳定来流的情况下产生的马格努斯效应，包括力、力矩和流场分布。考虑到圆柱上下对称，计算采用对称计算域算法，以圆柱轴长中点为坐标系原点，以轴长方向为坐标系 z 轴方向，则平面 $z=0$ 为计算域对称面（图6）。计算网格分为两部分，内部网格Rotor为旋转域，外部网格Out为静止域。Rotor的边界大小为直径为6m，高15.5m的圆柱，边界为内部面，与Out的对应面旋转域按设定的旋转速度整体转动。Out的边界范围为 x 从-18m到40m， y 从-25m到25m， z 从0到30m的长方体。Out的前方、上方和侧方为入流条件，后方为0梯度出流条件。底部为对称面。

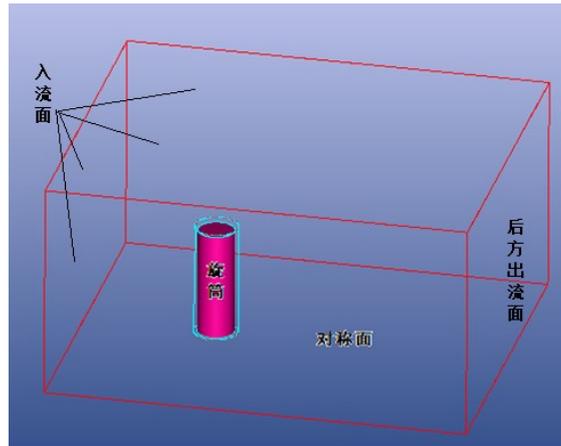


图6 计算域

Fig.6 computational domain

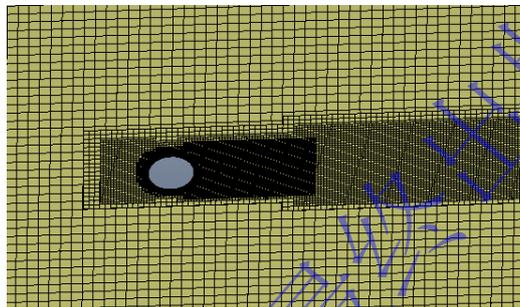


图7 计算网格

Fig.7 computational grid

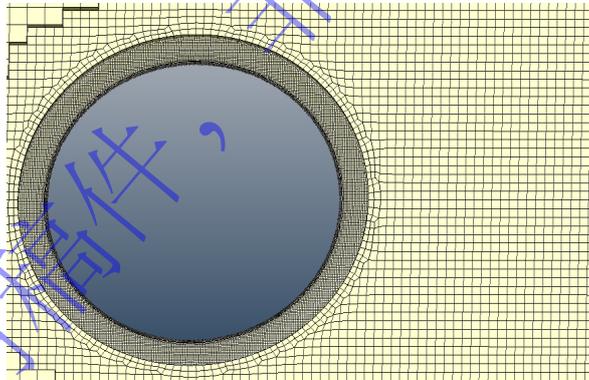


图8 旋筒周围的边界层网格

Fig.8 boundary layer grid around a rotating cylinder

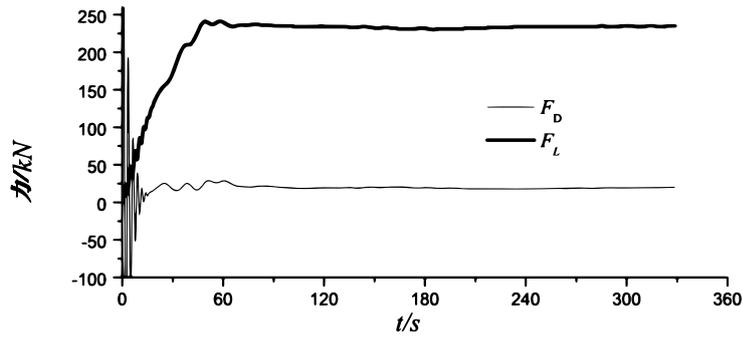


图9 旋筒升力、阻力时历图

Fig. 9 lift and resistance time chart of rotary cylinder

图7显示了计算域的网格划分情况，在旋筒前方1.5倍处至出口的范围采用网格加密，其中在旋筒的后方3倍直径范围内采用更密的网格。图8显示旋筒周围的边界层网格。

图9为旋筒升力、阻力曲线的时历图，可见在60s左右，升力阻力趋于稳定，逐渐收敛。阻力绝对值相对升力非常小。

定义船舶航速为 U ，自然界真风速度为 V ，风向角 ψ 为真风与航向的夹角， ω 为旋筒转速。图10为推力、横向力随风速变化曲线，此时 $U=7.5\text{ m/s}$ ， $\omega=360\text{ r/min}$ ， $\psi=90^\circ$ ，真风速度 V 从 4 m/s 逐渐增大至 12 m/s 。横风状态下，横向力随风速的变化不大，随风速增大缓慢增加。推力随风速的增加而增大，显然，横风状态下风速越大旋筒风帆的助航效果越明显。

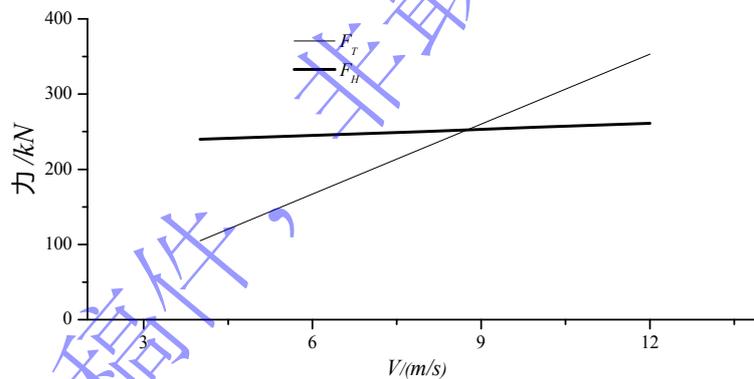


图10 推力、横向力随风速变化

Fig. 10 change of thrust and lateral force with wind speed

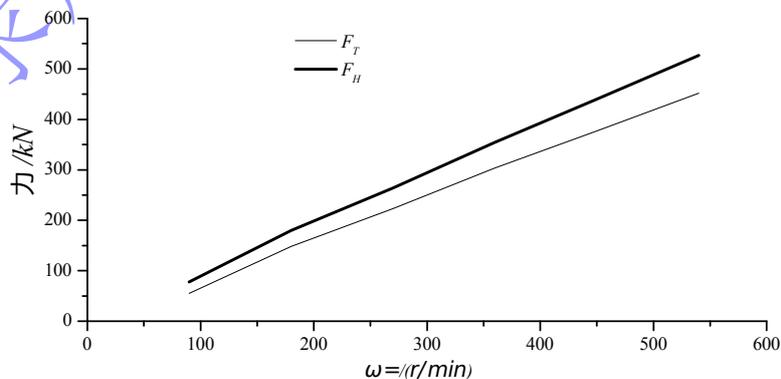


图11 推力、横向力随转速变化

Fig. 11 change of thrust and lateral force with rotating speed

图 11 为推力、横向力随旋筒转速变化曲线，此时航速 $U=7.5\text{m/s}$ ， $\psi=90^\circ$ ，风速 $V=7.5\text{m/s}$ ，旋转速度 ω 从 90r/min 逐渐增大至 540r/min 。从图 11 可知，推力、横向力随转速提高而增大，推力增大有益于船舶能耗降低，而横向力增大会使得船舶增加一个偏航力矩于航行无益。图 12 为相同工况下驱动旋筒风帆的旋转力矩，由图可知，随着转速增加，所需驱动力矩迅速增加，这意味着驱动旋筒风帆需要的功率也在增大。

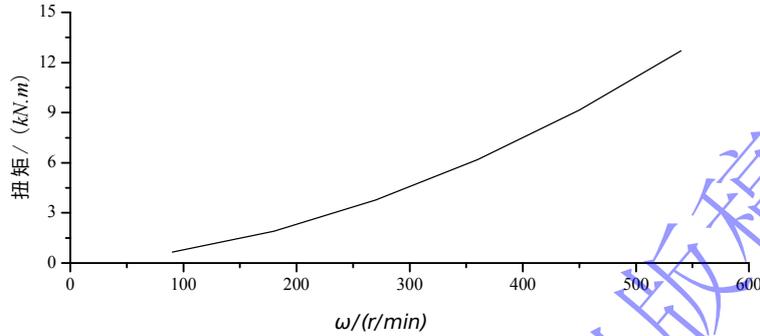


图 12 扭矩随转速变化

Figure 12 torque variation with speed

图 13 为推力、横向力随风向角变化的计算结果。航速 $U=7.5\text{m/s}$ ，风速 $V=7.5\text{m/s}$ ，旋转速度 $\omega=360\text{r/min}$ ，风向角 ψ 从 0° 逐渐增大至 180° ；从图中可知，在 $\psi=[0, 90^\circ]$ 区间内，推力随风向角增大而增大，在 $\psi=[90, 180^\circ]$ 区间内，推力从峰值又逐渐减小；横向力在 $\psi=[0, 180^\circ]$ 区间内随风向角增大而增大。从图中看，在 $\psi=[60, 90^\circ]$ 区间内，推力在峰值附近，而横向力相对较小，此时助航效果比较好。

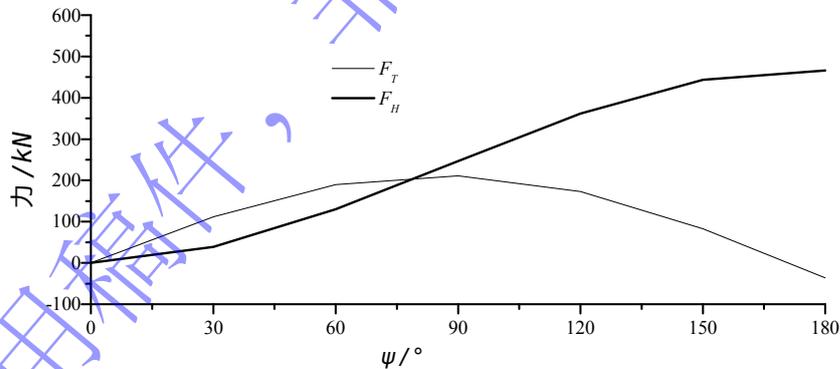


图 13 推力、横向力随风向角变化

Fig. 13 thrust and lateral force change with wind direction angle

3 旋筒风帆节能评估

选取一艘 15 万吨级散货船作为评估对象，该船主尺度为：垂线间长 $L_{pp}=264\text{m}$ ，型宽 $B=48\text{m}$ ，型深 $D=23.2\text{m}$ ，满载吃水 $d=16\text{m}$ ，方形系数 $C_b=0.819$ ，设计航速 $V_s=15\text{kn}$ 。在该船安装 2 个旋筒风帆，风帆直径为 5m 、高为 30m 。

图 14 为有效功率计算结果，风速 V 为 6m/s ，风向角 $\psi=90^\circ$ ，风帆旋转转速 $\omega=360\text{r/min}$ ，计算结果显示，安装风帆后的船舶有效功率较原来明显降低，在设计航速 $V_s=15\text{kn}$ 时，可实现节能 18.7%。

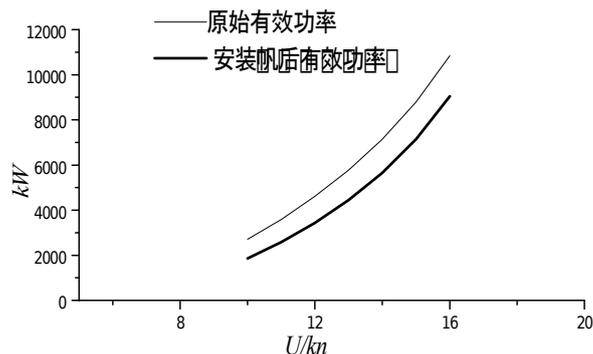


图 14 船舶有效功率曲线
Figure 14 effective power curve of ship

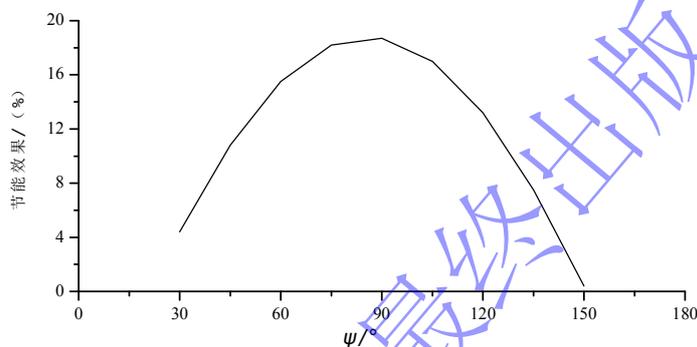


图 15 不同风向角情况下旋筒风帆节能效果

Fig 15 energy saving effect of rotor sail under different wind directions

如前所述，风向角不同，旋筒风帆的节能效果也不一样，图 15 为计算得到的不同风向角情况下旋筒风帆的节能效果，此时船舶航速 $U=15\text{kn}$ ，风速 $V=6\text{m/s}$ ，风帆旋转转速 ω 为 360r/min ，从图中看，在 $\psi=30^\circ$ 时可节能 4%， $\psi=60^\circ$ 时节能 13.2%， $\psi=90^\circ$ 时，节能效果达到峰值为 18.7%，此后随风向角增大，节能效果逐渐减弱。

4 结论

从绿色船舶的理念出发，本文基于 Magnus 效应原理设计了船舶旋筒风帆助力装置并模拟了其力学性能，对应用旋筒风帆助力装置的一艘散货船进行了节能评估。可以得到以下结论：

(1) 旋筒风帆所产生的推力、横向力随着风速以及旋筒转速的增加而增加，随风向角的增大，横向力逐渐增大，在 $\psi=90^\circ$ 时推力到达一个峰值后逐步减小。随转速增加，驱动旋筒风帆所需的功率也在增加。

(2) 从计算结果看，一条船上布置 2 个旋筒风帆，最高可以达到 18.7% 的节能效果。风向角不同，节能效果也不一样，在风向角等于 90° 时节能效果最好。

(3) 驱动旋筒旋转也需要消耗功率，旋筒风帆在产生推力的同时也会产生一个可使船舶偏航的横向力。

(4) 船舶航行时风速、风向时刻变化，同一艘船舶上安装多个旋筒风帆时，由于所处位置不同，同样的转速在同一风场中对船舶航行的助力效果也不相同，应根据风速风向的变化及时调整风帆旋转速度，以获得最佳的助航效果。

参考文献

- [1] 符妃.我国海洋工程装备发展现状及对策研究[J].中国设备工程,2020(13):213-214.
FU F. Research on the development status and Countermeasures of Marine engineering equipment in China[J]. China Plant Engineering,2020(13):213-214.
- [2] 曹凤富.浅谈船舶节能减排对改善海洋环境的重要性[J].中国设备工程,2019,07:207-207.
CAO F F. The recovering of the importance of ship energy conservation and emission reduction to improve marine environment[J]. China Plant Engineering, 2019, 07: 207-207.
- [3] Environmental Clean Technologies; Data on Environmental Clean Technologies Reported by Researchers at Shandong University (Evaluation of ship's green degree using a novel hybrid approach combining group fuzzy entropy and cloud technique for the order of preference by similarity...)[J]. Ecology, Environment & Conservation,2020.
- [4] 程慧勇.面向绿色航运的绿色船舶设计[J].船舶标准化工程师,2019,52(03):45-49.
CHEN H Y. Green ship design exploration for green shipping[J]. Shipbuilding Technnology Research, 2019, 52(03):45-49.
- [5] 李百齐,程红蓉.关于EEDI基准线的研究[J].中国造船,2010,51(04):51-57.
LI B Q, CHEN H R. Study on EEDI baseline[J]. Shipbuilding of China, 2010,51(04):51-57.
- [6] 李百齐,程红蓉.关于EEDI基准基面的研究[J].中国造船,2011,52(02):34-39.
LI B Q, CHEN H R. Study on EEDI surface[J]. Shipbuilding of China, 2011,52(02):34-39.
- [7] 张彦,黄靖晨,李慧媛.船舶清洁能源利用与航线优化的协同性[J].中国航海,2018,41(01):109-112.
ZHANG Y, HUANG J C, LI H Y. Synergy of marine clean energy with route optimization[J]. Navigation of China,2018,41(01):109-112.
- [8] 许宇彤.基于纵倾优化的船舶航行节能控制系统[J].科技与创新,2020(10):31-33.
XU Y T. Ship navigation energy saving control system based on trim optimization[J]. Science and Technology & Innovation, 2020(10):31-33.
- [9] 叶萌,冯佰威,常海超.基于近似模型的载重46000t油船阻力性能优化[J].造船技术,2020(03):6-12.
YE M, FENG B W, CHAO H C. Optimization of resistance performance of deadweight tonnage 46 000 t oil tanker based on approximate model[J]. Marine Technology, 2020(03):6-12.
- [10] 万德成,缪爱琴,赵敏.基于水动力性能优化的船型设计研究进展[J].水动力学研究与进展(A辑),2019,34(06):693-712.
WAN D C, MIAO A Q, ZHAO M. Research progress in ship design based on optimization of hydrodynamic performances[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2019,34(06):693-712.
- [11] 张文兵.关于船舶动力装置的发展分析探讨[J].中国水运,2020,20(04):50-52.
ZHANG W B. Analysis and discussion on the development of Marine power plant[J]. China Water Transport, 2020,20(04):50-52.
- [12] 汪洋,王志华,陈爱国.风帆助航的研究与应用综述[J].广州航海学院学报,2017,03,25(01):5-8.
WANG Y, WANG Z H, CHEN A G. Overview on the study and applications of propulsion with sail assistance[J]. Journal of GuangZhou Maritime Institute,2017,03,25(01):5-8.
- [13] 闫亚胜.风能在现代船舶风翼助航中应用研究[J].海洋工程装备与技术,2019,11 Vol.6.suppl.
YAN Y S. Research of wind energy using in modern sail-assisted vessel[J]. Ocean Engineering Equipment and Technology,2019,11 Vol.6.suppl.
- [14] Seifert J. A review of the Magnus effect in aeronautics [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2012, 55:17-45.
- [15] 程友良,刘鑫,汪辉. Magnus 圆柱叶轮的水动力学特性及效率研究[J].水动力学研究与进展,2019,05,34(03):361-366.
CHEN Y L, LIU X, WANG H. Study on hydrodynamic characterisitc and efficiency of the Magus cylindrical blade impeller[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2019, 05, 34(03):361-366.
- [16] 朱弘.基于马格努斯效应的风力机叶片流场的数值模拟[D].哈尔滨,中国:哈尔滨工业大学,2010.
ZHU H. Flow field numerical simulation of windmill blade based on Magnus effect[D]. Harbin, China: Harbin Institute of

Technology, 2010.

[17] 肖中云, 缪涛, 陈波, 江雄. 船尾形状对旋成体马格努斯效应的影响[J]. 航空学报, 2018, 39(06): 43-52.

XIAO Z Y, MIAO T, CHEN B, JIANG X. Influence of boattail shape on Magnus effects of a spinning rotating body[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2018, 39(06): 43-52.

[18] 李欣, 王怡, 周颖, 严先锐, 刘刚. 旋转风筒节能装置在大型远洋船上的应用[J]. 船舶工程, 2019, 41(12): 42-45+137.

LI X, WANG Y, ZHOU J, LIU G. Energy saving device of rotating wind turbine on large ocean-going ship[J]. Ship Engineering, 2019, 41(12): 42-45+137.

录用稿件，
非最终出版稿