

文章编号:1671-1637(2015)05-0057-08

风帆助航船舶运动模型

沈智鹏,姜仲昊

(大连海事大学 信息科学技术学院,辽宁 大连 116026)

摘要:分析了处于复杂环境下的风帆受力,给出了风帆在最佳攻角下的受力函数。基于船舶运动与主机转速之间的耦合关系,得出了船舶主机输出转矩与油门杆位置的拟合函数。以76 000 DWT大型远洋散货船“文竹海”号为研究对象,根据实船参数建立了4自由度的风帆助航船舶运动模型。仿真结果表明:添加风帆后船舶速度增大,横摇角减小,但偏航增加。添加风帆后,在相同时间内船舶行驶的里程、最佳攻角下的船速与横摇幅度都随风速的增大而增大,但横摇角小于 15° ,在安全范围之内。可见,船舶运动模型符合实际船舶运动规律,是有效的。

关键词:船舶工程;风帆助航船舶;船舶运动;船舶主机;数学建模;仿真分析

中图分类号:U664.31 **文献标志码:**A

Motion model of sail-assisted ship

SHEN Zhi-peng, JIANG Zhong-hao

(School of Information Science and Technology, Dalian Maritime University, Dalian 116026, Liaoning, China)

Abstract: The forces of sail in complex environment were analyzed, and the force functions of sail under the best attack angle were obtained. Based on the coupling relationship between ship motion and ship main diesel engine revolution, the fitting function of main diesel engine output torque and throttle lever position of ship was deduced. 76 000 DWT large ocean-going bulk ship ‘Wenzhuhai’ was taken as research object, a sail-assisted ship motion model with four degrees of freedom was constructed based on real ship parameters. Simulation result shows that after adding sail, ship speed increases and roll angle decreases, but ship yaws more. Ship journey in the same time, ship speed under the best attack angle, and roll amplitude increase with the increase of wind speed after adding sail. Roll angle is less than 15° within safe range. Analysis result is consistent with the motion laws of real ship, so the model is effective. 1 tab, 15 figs, 25 refs.

Key words: ship engineering; sail-assisted ship; ship motion; ship main diesel engine; mathematical modeling; simulation analysis

Author resume: SHEN Zhi-peng(1977-), male, professor, PhD, +86-411-84729941, s_z_p@263.net.

0 引言

现代船舶多以螺旋桨为主推进器,其能源以柴油为主。随着世界石油危机的出现与人类环保意识

的增强,为船舶节能减排寻求方法已经成为船舶运输业不得不考虑的问题,然而,现代船舶的常规节能减排措施已几近极致,因此,为达到节能减排的目的,寻求其他能源辅助推进船舶运动势必会逐渐成

收稿日期:2015-05-10

基金项目:国家863计划项目(2012AA112702);国家自然科学基金项目(61374114);中央高校基本科研业务费专项资金项目(3132014321,3132015040)

作者简介:沈智鹏(1977-),男,福建永定人,大连海事大学教授,工学博士,从事船舶运动控制研究。

为航运业的主趋势。而在众多可使用能源中,风能有着较大的潜力。据估计,全球每年可以利用的风能总能量约为 2 千万兆瓦,是地球可利用水能总量的 10 倍,同时风能还具有取之不尽、用之不竭的特点,因此,利用风力助航对船舶运输业来说是一种拥有很大潜力且符合绿色船舶发展理念的节能方式^[1]。Cruz 等对风帆助航船舶的节能效果进行了分析并对应用前景进行了展望,结果表明大部分船舶安装风帆后可节能 4%~10%^[2],可推断风力助航船舶的研究与推广极有可能成为未来航运业竞相发展的一种新趋势。

风帆助航技术早已受到人们的关注,在 1980 年日本便建成了世界上第 1 艘具有现代意义的商用风翼助航船舶“新爱德丸”号^[3];Fujiwara 等对混合帆船进行了研究^[4];中国交通运输部在 1986 年七五规划中将风帆助航 5 000 吨级单桨、双桨江海油船的操纵性能作为重点研究项目^[5];洪安生等成功实现了 120 吨级风帆助航机动船舶水上试验,并在之后的河流载货营运中获得了良好的经济效益^[6];1990 年研制成功的长江 300 吨级风帆助航综合节能货船成为中国第 1 艘以风帆助航技术为主的节能船舶^[7];Dupriez-Robin 等基于能量交换与系统核心参数提出了一种原始模型,从而得到混合动力风帆船舶的控制方法^[8];古纯清对风帆辅助船舶的推进性能进行了分析和计算,并讨论了帆的选择与节能效果和帆、机、桨、船的工作匹配等问题^[9];王宏明对风帆助航船舶的横摇运动进行了分析,并对其安全性进行了分析^[10];于人生搭建了风翼助航船舶风翼控制试验平台并研究了相应的控制算法^[11];Legursky 改进了空气动力模型,将帆角作为输入量加入到 4 自由度的帆船模型当中^[12];Lin 等建立了帆船的 4 自由度非线性动态模型,使用试验帆船进行了相应的控制试验,并取得了良好的效果^[13]。

为了对风帆助航船舶进行后续研究,建立恰当的风帆助航船舶模型是十分必要的。Pêtrès 等为小型帆船建立模型并给出了相应的路径规划方法^[14];Stelzer 等对处于复杂环境下的帆船进行建模,同时提出了一种基于经验的帆船模糊控制方法^[15];Xiao 等对帆船建立了 4 自由度模型,并采用自积分反演方法设计了船舶运动非线性控制器^[16];Fujiwara 等对混合风帆辅助散装货船舶建立了 4 自由度模型,并通过模型对目标船舶运行稳定性进行了研究^[17]。然而,目前大多数风帆助航船舶研究中所采用的船

舶数学模型存在着一定的局限性。Pêtrès 等对自动导航帆船进行了研究^[18];葛艳等对比赛用小型帆船进行了研究^[19];Stelzer 等对巡逻帆船进行了研究^[20]。这些研究单独考虑风帆的空气动力特性而没有建立精确的数学模型。陈鲁愚等基于 MMG (Mathematical Modelling Group) 分离模型建立了船舶模型^[21],但模型只包括前进、横漂和艏摇 3 个自由度,没有考虑横摇,这与潘德位等在普通船舶控制器设计时所构建的模型相比有一定的差距^[22],而且横摇在风帆助航船舶运动中担任着重要的角色,并与大型商用船舶航行时的安全性有着紧密关系,在模型建立过程中考虑横摇能与实际状况更加接近;Fujiwara 等虽然建立了 4 自由度数学模型^[17],但并没有考虑船舶运动与主推进器之间的耦合关系。

本文从空气动力学原理出发,对风帆受力进行分析,获得风帆最佳攻角函数,建立其数学模型。然后,综合考虑船舶运动与主推进器之间的耦合关系以及风帆在船舶运动中不同时刻的受力情况,基于 MMG 分离模型思想建立含有主机特性的 4 自由度风帆助航船舶运动模型。最后,以 76 000 DWT 大型远洋散货船“文竹海”号为研究对象,根据实船参数设计圆弧型硬帆并建立数学模型,在不同风力、风向等干扰环境下,进行风帆受力与船舶运动仿真,对仿真结果进行对比分析。

1 风帆的受力分析

以船舶重心为原点建立直角坐标系对风帆进行受力分析(图 1),定义船首方向为 x 轴正方向,纵轴右侧为 y 轴正方向。图 1 中: α 为真风与航向的夹角; θ 为迎风角,又称相对风向角; γ 为风帆攻角; φ 为转帆角; β 为横漂角; F_1 为升力; F_2 为阻力; V_1 为风速; V_2 为船速引起的风速; V_3 为相对风速。 V_3 是 V_1 与 V_2 的矢量和,如果风帆助航船舶完全顺风航行,则有 $V_3 = V_1 - V_2$,可见顺风时风帆所受的相对风速比真风速度小。

风帆的空气动力性能与机翼相仿,当风以某一攻角吹向风帆时,帆上的升力与阻力随着攻角的变化而改变,这 2 个力可分为船舶前进方向的分量推进力和垂直于前进方向的分量横漂力。对于来流中的风帆,其输入量为绝对风速、绝对风速角、航速和攻角,输出量为垂直于来流方向的升力 F_1 和阻力 F_2 。根据受力分析,结合图 1 可得以下方程

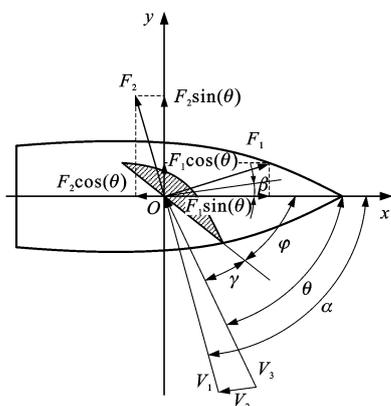


图 1 风帆的受力分析

Fig. 1 Force analysis of sail

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{2}\rho S V_3^2 C_1 \\ F_2 = \frac{1}{2}\rho S V_3^2 C_2 \\ C_3 = C_1 \sin(\theta) - C_2 \cos(\theta) \\ C_4 = C_1 \cos(\theta) + C_2 \sin(\theta) \\ X_0 = \frac{1}{2}\rho S V_3^2 C_3 \\ Y_0 = \frac{1}{2}\rho S V_3^2 C_4 \\ N_0 = \frac{1}{2}\rho S V_3^2 C_5 l_1 \\ L_0 = Y_0 l_2 \end{cases} \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; S 为风帆的面积; C_1 、 C_2 分别为升力、阻力系数; C_3 、 C_4 分别为最大推力系数与横向力系数; C_5 为转矩系数; X_0 、 Y_0 分别为帆船前进方向、横漂方向的受力; N_0 、 L_0 分别为艏摇、横摇力矩; l_1 为风帆的弦长; l_2 为风帆的重心到船重心的竖向距离; θ 右舷为正,左舷为负。

完全顺风时, $\theta=180^\circ$,相对风速比真风速度小,并不能得到最大推力。由式(1)可知,假设 C_1 、 C_2 不变,当 $|\theta| \in (90^\circ, 180^\circ)$ 时 X_0 存在最大值。

确定风帆的面积有许多方法,一种常用的方法是先假定一定百分比的节能要求初步估计风帆面积,然后校核船舶稳性。另一种常用的方法是根据近似式初步估计风帆的面积,之后根据其他标准进行校准。本文采用经验公式确定风帆的面积

$$S = \frac{CEH}{M} \quad (2)$$

式中: C 为系数,通常取值为 $0.3 \sim 0.6$; E 为船长; H 为船宽; M 为风帆的个数。

设 C_1 - C_2 曲线为某风帆的特性曲线,使该曲线的横坐标与相对风向平行且同向,船首的方向通过

坐标原点,可得风帆的空气动力特性见图 2。

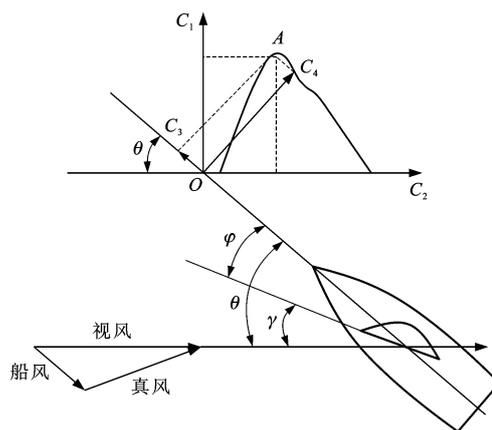


图 2 风帆的空气动力特性

Fig. 2 Aerodynamic characteristics of sail

由图 2 可知,当迎风角 θ 一定时,在 C_1 - C_2 曲线上可找到一点 A ,使其在航向线上的投影最长,此时得到的推力系数 C_3 为此迎风角下的最大推力系数,对应的攻角为最佳攻角 ϵ 。当迎风角变化时,风帆的最佳攻角也会随之改变。因而结合张云彩等所得到的经验公式^[23],可得

$$\epsilon = 30^\circ - 0.027\theta \quad (3)$$

为了对风帆助航船舶进行建模,首先需要确定风帆的 C_1 、 C_2 。于小虎对风帆性能进行了分析^[24],使用 Fluent 软件对圆弧型风帆进行数值模拟,得到了 C_1 - θ 、 C_2 - θ 离散数据点序列(图 3)。由图 3 可知,在相同风速下风帆的受力随迎风角的变化而变化。为了后续建模需要,对风帆的 C_1 、 C_2 进行线性拟合,拟合函数为

$$\begin{cases} C_2 = -4.1 \times 10^{-7}\theta^4 + 1.1 \times 10^{-6}\theta^3 - \\ 6.8 \times 10^{-4}\theta^2 + 1.8 \times 10^{-2}\theta - 1.5 \times 10^{-2} \\ C_1 = 1.5 \times 10^{-8}\theta^4 - 6.0 \times 10^{-6}\theta^3 + \\ 6.3 \times 10^{-4}\theta^2 - 9.0 \times 10^{-3}\theta + 1.9 \times 10^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可得 C_1 - θ 、 C_2 - θ 曲线(图 4),通过比较可

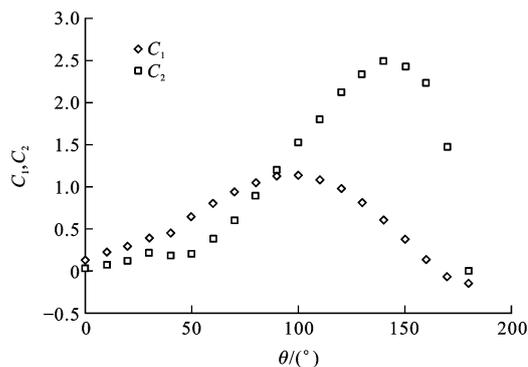
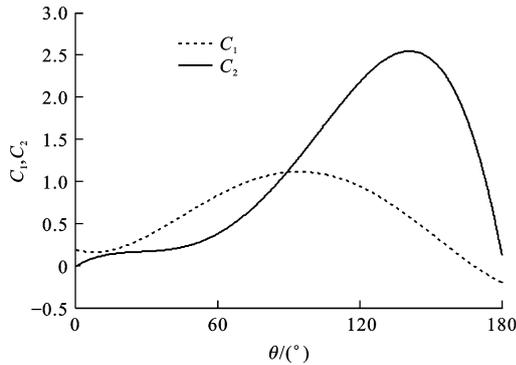


图 3 C_1 - θ 、 C_2 - θ 离散数据

Fig. 3 Scatter data of C_1 - θ , C_2 - θ

图 4 $C_1-\theta$ 、 $C_2-\theta$ 曲线Fig. 4 $C_1-\theta$, $C_2-\theta$ curves

看出拟合的 $C_1-\theta$ 、 $C_2-\theta$ 曲线与图 3 数据基本吻合。

2 风帆助航船舶运动建模

基于 MMG 分离建模思想^[25], 可将作用于船体上的外力与外力矩分为来自裸船体、螺旋桨、舵、海风、海浪和风帆的力与力矩。结合式(1), 可将风帆助航船舶运动惯性数学模型表示为

$$\begin{cases} (m+m_x)\dot{u}-(m+m_y)vr = X_0+X_1+X_2+X_3+X_4+X_5 \\ (m+m_y)\dot{v}+(m+m_x)ur = Y_0+Y_1+Y_2+Y_3+Y_4+Y_5 \\ J_z\dot{r} = N_0+N_1+N_2+N_3+N_4+N_5 \\ J_x\dot{p} = L_0+L_1+L_2+L_3+L_4+L_5 \end{cases} \quad (5)$$

式中: m 为船舶的质量; m_x 、 m_y 分别为附体坐标系下 x 、 y 轴的附加水质量; J_x 、 J_z 分别为附体坐标系下 x 、 z 轴的转动惯量; u 为纵荡速度; v 为横荡速度; r 为艏摇角速度; p 为横摇角速度; $X_1 \sim X_5$ 分别为帆船前进方向所受来自裸船体、螺旋桨、舵、海风、海浪的力; $Y_1 \sim Y_5$ 分别为垂直于帆船前进方向所受来自裸船体、螺旋桨、舵、海风、海浪的力; $N_1 \sim N_5$ 分别为来自裸船体、螺旋桨、舵、海风、海浪的艏摇力矩; $L_1 \sim L_5$ 分别为来自裸船体、螺旋桨、舵、海风、海浪的横摇力矩。

设式(5)中海风干扰为规则波, 将某一时刻船舶所受风力分解为平均风力与扰动风力, 由风压力系数和风压力矩系数可确定式(5)中的 X_4 、 Y_4 、 N_4 、 L_4 。

2.1 螺旋桨与船舶主推进数学模型

由于船舶的主机转速与船舶运动之间存在着耦合关系, 船舶操纵时船舶所受阻力会发生变化, 从而对螺旋桨的吸收转矩与主机转速产生影响, 并最终对船舶运动造成影响。由动量矩定理可得推进装置运动方程为

$$2\pi I\dot{n} = Q_1 - Q_2 - Q_3 \quad (6)$$

式中: I 为螺旋桨与轴系的转动惯量之和; n 为主机转速; Q_1 为主机输出转矩; Q_2 为螺旋桨的吸收转矩; Q_3 为轴系摩擦消耗的转矩, 通常取值为 Q_1 的 3%。

为求取螺旋桨的吸收转矩, 可根据实际工况建立船舶正车前进时螺旋桨推力与转矩模型分别为

$$\begin{cases} X_2 = (1-t)\rho n^2 D^4 k_1 \\ Q_2 = \rho n^2 D^5 k_2 \end{cases} \quad (7)$$

式中: t 为推力减额系数; D 为螺旋桨直径; k_1 、 k_2 分别为螺旋桨的推力系数与转矩系数, 是进速系数的函数。

螺旋桨的吸收转矩受主机转速与螺旋桨进度系数影响, 螺旋桨所产生的横向力 Y_2 与横摇力矩 N_2 相对很小, 暂不考虑。

为体现风帆助航船舶的操纵性与主机转速的耦合关系, 建立的模型应当含有主机特性。依据袁士春所得的主机特性公式^[25], 可得本文仿真船舶的主机输出转矩与油门杆位置拟合函数为

$$Q_1 = -36.355Z^2 + 13870.731Z - 457772.933 \quad (8)$$

式中: Z 为油门杆位置。

结合式(8)推进装置模型, 可体现所建模型的主机特性。

2.2 风帆助航船舶运动数学模型

综合式(5)~(7), 依照仿真试验与观测需要, 最终可建立包含主机特性的 4 自由度风帆助航船舶运动数学模型为

$$\begin{cases} \dot{u} = [X_0+X_1+X_2+X_3+X_4+X_5+(m+m_y)vr](m+m_x)^{-1} \\ \dot{v} = [Y_0+Y_1+Y_2+Y_3+Y_4+Y_5-(m+m_x)ur](m+m_y)^{-1} \\ \dot{r} = (N_0+N_1+N_2+N_3+N_4+N_5-Y_1c)J_z^{-1} \\ \phi = r\cos(\lambda) \\ \dot{n} = \frac{Q_1-Q_2-Q_3}{2\pi I} \\ \dot{\delta} = \frac{\eta-\delta}{T} \\ \dot{p} = \frac{L_0+L_1+L_2+L_3+L_4+L_5}{J_x} \\ \dot{\lambda} = p \\ \dot{U} = \dot{u} + V_4 r \sin(\sigma - \phi) \\ \dot{V} = \dot{v} - V_4 r \cos(\sigma - \phi) \\ \dot{X} = U \cos(\phi) - V \cos(\lambda) \sin(\phi) \\ \dot{Y} = V \cos(\phi) + U \cos(\lambda) \sin(\phi) \end{cases} \quad (9)$$

式中: c 为浮心纵向位置; ψ 为艏摇角; λ 为横摇角; δ 为实际舵角; η 为命令舵角; T 为舵机时间常数,一般为 2.5 s; U 、 V 分别为船舶的纵向、横向绝对速度; V_4 为水流的速度; σ 为水流方向角; X 、 Y 分别为船舶在惯性坐标系中 x 轴、 y 轴上的位移。

式(9)的输出变量包含航向、航迹与船速等 12 个信息,这样可实现风帆助航船舶运动与主推进的仿真。

3 仿真结果分析

本文以 76 000 DWT 大型远洋散货船“文竹海”号为对象,根据其实际船参数建立含有 4 个圆弧型硬帆的 4 自由度数学模型。目标船舶与风帆参数见表 1。

表 1 船舶主要参数
Tab. 1 Main parameters of ship

| | |
|---------------------|--------|
| 垂线间长/m | 217 |
| 型宽/m | 32.26 |
| 型深/m | 19.6 |
| 设计吃水/m | 14.4 |
| 方形系数 | 0.76 |
| 排水量/DWT | 76 000 |
| 风帆面积/m ² | 720 |
| 风帆个数 | 4 |
| 拱度比 | 0.14 |
| 展弦比 | 1.5 |

仿真过程中假设风为扰动风且风浪方向不变,流力、流向在行驶过程中为定值。由于风帆在一定的风速下才能实现助航的作用,因此,本文选用风级在 4~8 级之间。

3.1 风帆推力、横向力与迎风角的关系

设风帆时刻位于最佳攻角,船舶主机功率固定,风速为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,可得最大推力系数、横向力系数与迎风角的关系曲线见图 5,可知,迎风角为 $130^\circ \sim 150^\circ$ 时风帆最大推力系数达到峰值。

为比较风帆助航船舶在不同迎风角时的加速性能,假设船舶主机扭矩固定,风速恒定为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,不同迎风角下的船速随时间变化的曲线见图 6。可知,风帆保持最佳攻角时船舶在实际风向角为 150° 时取得最大速度,不同风向的船舶最低速度和最高速度相差在 3 kn 以内,与实际相符。

3.2 添加风帆助航前后船舶运动状态对比

为比较船舶在添加风帆前后运动状态的变化,假设风帆时刻位于最佳攻角,船舶重载、低速、稳定

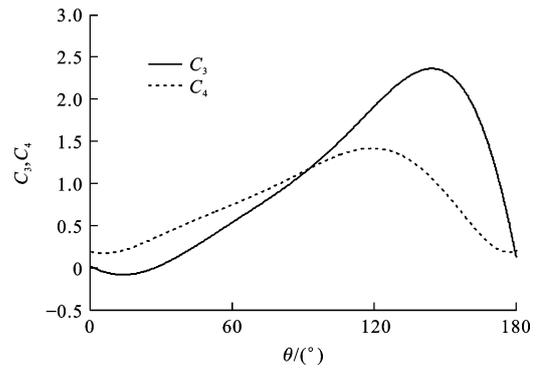


图 5 最大推力和横向力系数

Fig. 5 Coefficients of maximum thrust force and transverse force

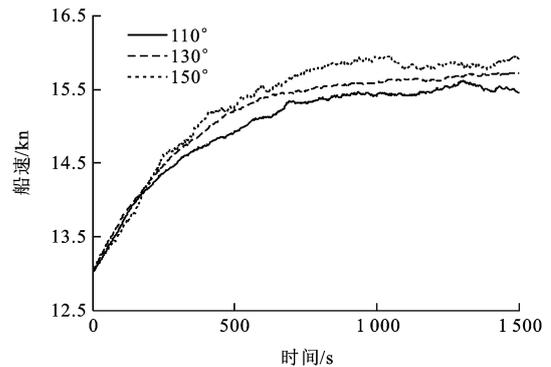


图 6 不同迎风角下的船速

Fig. 6 Ship speeds under different upwind angles

运行,主机转速为 $91 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,船速为 13 kn,舵角为 0° 。对船体施加风速为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、迎风角为 130° 的扰动风,观察船舶运动状态的变化。

船舶在风浪中航行时,风会对风帆产生一个与船舶前进方向垂直的横向力,相对于添加风帆前,船舶在添加风帆后会产生更大偏航(图 7)。添加风帆前后的船速对比见图 8。可知,在相同的时间内添加风帆后船舶速度有很大的提升,由此可推断风帆推力对船舶速度的提升有显著的作用。

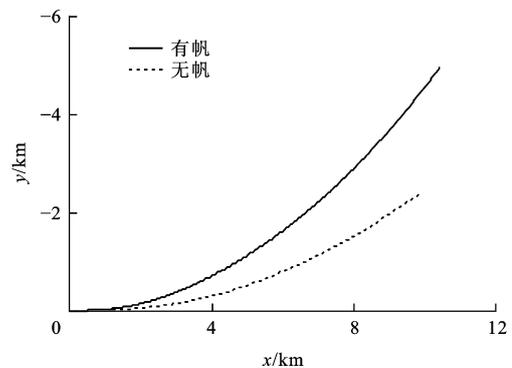


图 7 航迹对比

Fig. 7 Comparison of ship trajectories

船舶在添加风帆前后的横摇状态分别见图 9、10。由于船舶重载,船舶添加风帆前后横摇差别不

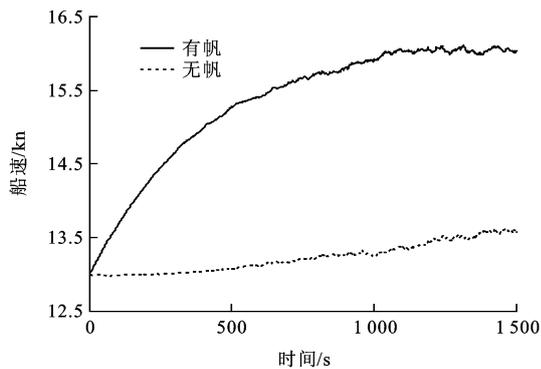


图 8 船速对比

Fig. 8 Comparison of ship speeds

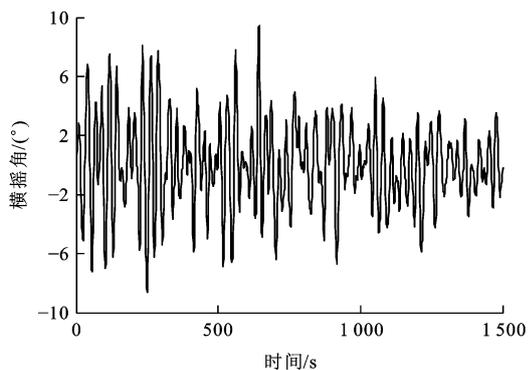


图 9 无风帆船舶的横摇角

Fig. 9 Ship roll angle without sail

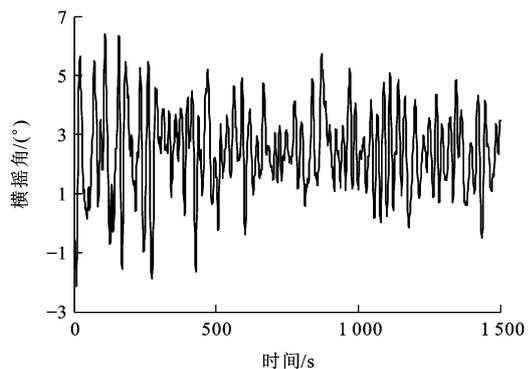


图 10 有风帆船舶的横摇角

Fig. 10 Ship roll angle with sail

大,但相对于添加风帆前,添加风帆后的船舶横摇角相对较小,符合实际船舶运动规律。由图 7~10 可知,为船舶添加风帆是可行的,但为风帆助航船舶进行航迹控制是后期必不可少的环节。

3.3 风帆助航船舶在不同风力下的运动状态

当风帆助航船舶处于不同风力下时,在主机扭矩相同的情况下,风帆助航船舶运动状态应有差别。假设船舶重载、低速、稳定运行,主机转速为 $91 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,船速为 13 kn ,舵角为 0° ,分别对船体施加风速为 $13, 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、迎风角均为 120° 的扰动

风,观察船舶运动状态的变化。不同风速下的航迹对比见图 11,若风帆的升力系数与阻力系数随风速变化不大,在相同时间内施加较大风力的风帆助航船舶行驶的路程较远。

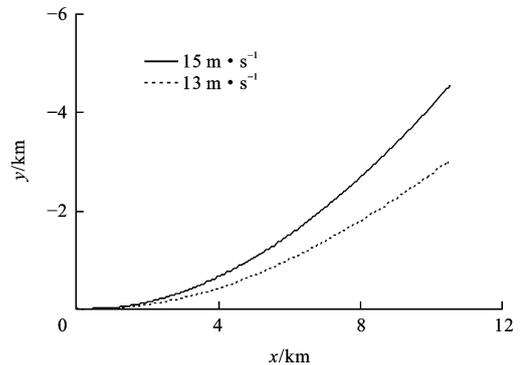


图 11 不同风速下的航迹对比

Fig. 11 Comparison of ship trajectories under different wind speeds

不同风速下的船速对比见图 12,在相同的时间内施加较大风力的风帆助航船舶速度明显增大。不同风速下的船摇角对比见图 13,在相同时间内风帆助航船舶偏航随风速的增大而增加,符合实际。2 种风速下的船舶横摇角分别见图 14、15,船舶横摇幅度随风速的增加而增大,且在设定环境下横摇角均小于 15° ,在安全范围之内,符合实际船舶运动规律。

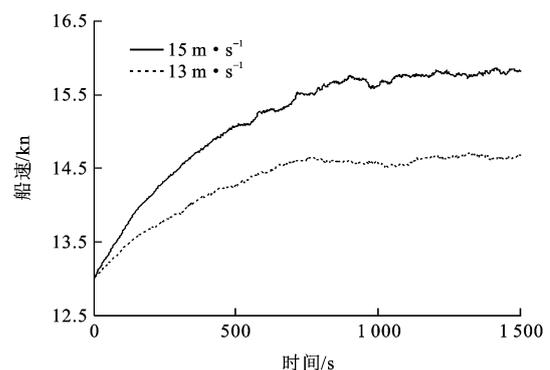


图 12 不同风速下的船速对比

Fig. 12 Comparison of ship speeds under different wind speeds

4 结 语

基于 MMG 分离模型思想,建立了包含主机特性的 4 自由度风帆助航船舶运动模型,并对船舶运动模型进行了仿真分析。仿真结果表明,添加风帆后船舶速度得到提升,横摇角减小,但偏航会有所增加。添加风帆后在相同时间内船舶行驶的路程、在最佳攻角下船速与横摇幅度随风速的增大而增大,但横摇角小于 15° ,在安全范围之内,符合实际船舶

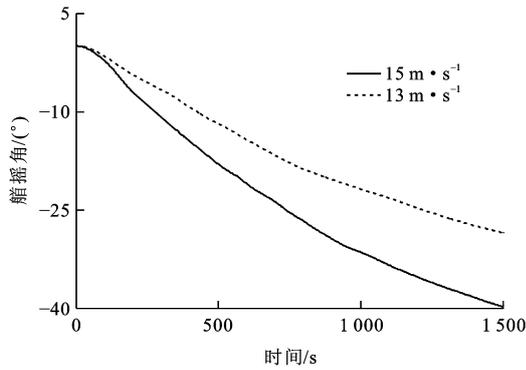
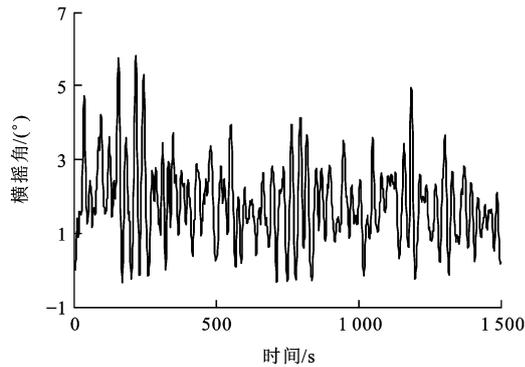
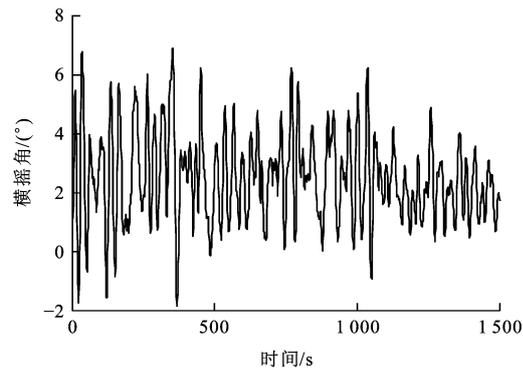


图 13 不同风速下的船摇角对比

Fig. 13 Comparison of yaw angles under different wind speeds

图 14 风速为 $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的横摇角Fig. 14 Ship roll angle with wind speed of $13 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 图 15 风速为 $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 时的横摇角Fig. 15 Ship roll angle with wind speed of $15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

运动规律,表明了所建数学模型的有效性。本文所建立的风帆助航船舶运动数学模型可为今后进行风帆助航船舶运动控制算法的研究提供参考。

参考文献:

References:

[1] SUN Y W, YAN X P, YUAN C Q, et al. Research progress in marine grid-connected photovoltaic technology[C]// ANZSES. Proceedings of 47th Annual Conference of the Australian and New Zealand Solar Energy Society (ANZSES). Melbourne: ANZSES, 2009: 1-9.

[2] CRUZ N A, ALVES J C. Autonomous sailboats: an emerging technology for ocean sampling and surveillance[C]// IEEE. OCEANS 2008. New York: IEEE, 2008: 1-6.

[3] FUJIWARA T, HEARN G E, KITAMURA F, et al. Sail-sail and sail-hull interaction effects of hybrid-sail assisted bulk carrier[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2005, 10(2): 82-95.

[4] FUJIWARA T, HIRATA K, UENO M, et al. On aerodynamic characteristics of a hybrid-sail with square soft sail[C]// ISOPE. Proceedings of 13th International Offshore and Polar Engineering Conference. Cupertino: ISOPE, 2003: 326-333.

[5] 吴秀恒,张乐文,刘跃明.风帆助航 5000 吨级江海油船操纵性试验研究[J].武汉水运工程学院学报,1988,12(3):13-19. WU Xiu-heng, ZHANG Le-wen, LIU Yue-ming. Research on maneuverability of 5000 t sail-assisted tankers[J]. Journal of Wuhan University of Water Transportation Engineering, 1988, 12(3): 13-19. (in Chinese)

[6] 洪安生,张泽华.120 吨级风帆助航机动船[J].造船技术,1987(12):46-48. HONG An-sheng, ZHANG Ze-hua. 120 ton sail-assisted ship motor vessel[J]. Marine Technology, 1987(12): 46-48. (in Chinese)

[7] 郎锁庆.长江 300 t 风帆助航综合节能货船研究与设计[J].武汉水运工程学院学报,1990,14(3):227-236. LANG Suo-qing. Study and design of 300 t sail-assisted power-saving ship on the Yangtze River[J]. Journal of Wuhan University of Water Transportation Engineering, 1990, 14(3): 227-236. (in Chinese)

[8] DUPRIEZ-ROBIN F, LORON L, CLAVEAU F, et al. Design and optimization of a hybrid sailboat by a power modeling approach[C]//IEEE. ESTS 2009. New York: IEEE, 2009: 270-277.

[9] 古纯清.风帆助航改装船主推进装置性能研究[D].大连:大连海事大学,2010. GU Chun-qing. The study on the capability of main propulsion plant in the renewed wind-assisted ship[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2010. (in Chinese)

[10] 王宏明.风翼助航船非线性横摇运动及其航行安全性研究[D].大连:大连海事大学,2013. WANG Hong-ming. Study on nonlinear roll motion and sailing safety of wing-assisted ships[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)

[11] 于人生.风翼实验平台建模与控制[D].大连:大连海事大学,2013. YU Ren-sheng. Wing experimental platform modeling and control[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2013. (in Chinese)

[12] LEGURSKY K. A modified model, simulation, and tests of a full-scale sailing yacht[C]//IEEE. OCEANS 2012. New York: IEEE, 2012: 1-7.

[13] LIN X, ALVES J C, CRUZ N A, et al. Online speed optimization for sailing yachts using extremum seeking[C]//IEEE.

- OCEANS 2012. New York: IEEE, 2012: 1-6.
- [14] PÉTRÈS C, ROMERO-RAMIREZ M A, PLUMET F, et al. Modeling and reactive navigation of an autonomous sailboat[C]//IEEE. 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. New York: IEEE, 2011: 3571-3576.
- [15] STELZER R, PRÖLL T, JOHN R I. Fuzzy logic control system for autonomous sailboats[C]//IEEE. 2007 IEEE International Conference on Fuzzy Systems. New York: IEEE, 2007: 1-6.
- [16] XIAO L, JOUFFROY J. Modeling and nonlinear heading control of sailing yachts[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2014, 39(2): 256-268.
- [17] FUJIWARA T, HEARN G E, KITAMURA F, et al. Steady sailing performance of a hybrid-sail assisted bulk carrier[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2005, 10(3): 131-146.
- [18] PÉTRÈS C, ROMERO-RAMIREZ M A, PLUMER F. A potential field approach for reactive navigation of autonomous sailboats[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2012, 60(12): 1520-1527.
- [19] 葛 艳, 孟庆春, 张 文, 等. 帆船的模糊自适应控制方法研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(12): 1658-1660, 1742.
- GE Yan, MENG Qing-chun, ZHANG Wen, et al. Research on fuzzy adaptive control method of a sailboat[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(12): 1658-1660, 1742. (in Chinese)
- [20] STELZER R, PRÖLL T. Autonomous sailboat navigation for short course racing[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(7): 604-614.
- [21] 陈鲁愚, 陈顺怀, 严新平. 大型远洋风帆助航船舶节能效率分析[J]. 船海工程, 2010, 39(6): 121-123, 128.
- CHEN Lu-yu, CHEN Shun-huai, YAN Xin-ping. Analysis on energy conservation of sail-assisted ocean-going vessel[J]. Ship and Ocean Engineering, 2010, 39(6): 121-123, 128. (in Chinese)
- [22] 潘 德位, 林成新, 孙德平, 等. 大倾角搁浅船舶扳正过程分析[J]. 交通运输工程学报, 2015, 15(2): 50-58.
- PAN De-wei, LIN Cheng-xin, SUN De-peng, et al. Uprighting process analysis of big-angle tilted aground ship[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2015, 15(2): 50-58. (in Chinese)
- [23] 张云彩, 盛振邦. 圆弧型风帆空气动力性能的试验研究[J]. 中国造船, 1983(4): 3-12.
- ZHANG Yun-cai, SHENG Zhen-bang. An experimental study on aerodynamic performance of circular-arc sails[J]. Shipbuilding of China, 1983(4): 3-12. (in Chinese)
- [24] 于小虎. 风帆助航节能应用研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- YU Xiao-hu. Study on application of energy-saving of sail-assisted ship[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2011. (in Chinese)
- [25] 袁士春. 船舶运动与主推进线性变参数联合控制的研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2007.
- YUAN Shi-chun. A study on the integrated control of ship motion and mainpropulsion using linear parameter-varying[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2007. (in Chinese)

《交通运输工程学报》2016 年征订通知

《交通运输工程学报》是由国家教育部主管、长安大学主办、国务院学位委员会交通运输工程学科评议组、东南大学与西南交通大学共同协办的交通运输领域的学术理论刊物, 两院院士沈志云教授任名誉主任委员; 主要刊载道路与铁道工程、载运工具运用工程、交通运输规划与管理、交通信息工程与控制等领域高水平的学术论文和重大工程实践项目产生的论文; 主要读者对象为国内外交通运输领域的科研人员、工程技术人员及大专院校相关专业的师生。

《交通运输工程学报》为双月刊, 大 16 开本, 160 个页码, 每期定价 100.00 元, 全年共 600.00 元。可到当地邮局订阅, 邮发代号为 52-195, 也可直接汇款至《交通运输工程学报》编辑部订阅。

开户银行: 中国银行西安翠华路支行

账 号: 102407337258

账 户: 长安大学杂志社

邮政编码: 710064

联 系 人: 胡广平

电 话: 029-82334382

地 址: 陕西省西安市南二环路段长安大学杂志社

E-mail: jygc@chd.edu.cn