

舵几何参数影响下的双桨双舵船操纵性分析

奚英奇¹, 朱一鸣^{1*}, 刘靖峤¹, 陈昌哲², 邹璐²

(1. 中国船舶及海洋工程设计研究院, 上海 200011;

2. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘要: 针对某双桨双舵船的舵型特点, 采用计算流体力学方法, 开展不同舵剖面几何参数下该船舵力试验的系列数值模拟, 计算得到舵法向力系数, 分析舵展弦比和厚度比对船后舵水动力性能的影响。在此基础上, 结合构建的四自由度船舶操纵运动数学模型, 对标准回转和 Z 形操纵运动进行数值仿真, 获得对应的操纵性参数, 分析舵展弦比和厚度比对双桨双舵船回转能力、航向保持及转舵纠偏能力的影响。研究结果对优化舵几何参数设计和改善船舶操纵性具有参考意义。

关键词: 船舶工程; 操纵性; 计算流体力学; 双桨双舵船舶; 舵剖面; 舵力试验

中图分类号: U661.33 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1000-4653.2026.02.015

Research on the maneuverability of a twin-propeller and twin-rudder ship under the impacts of rudder geometrical parameters

Xi Yingqi¹, Zhu Yiming^{1*}, Liu Jingqiao¹, Chen Changzhe², Zou Lu²

(1. Mariner Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China;

2. School of Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Considering the rudder features of a twin-propeller and twin-rudder ship, a series of numerical simulations of rudder-force tests with different rudder sectional parameters are carried out by using the Computational Fluid Dynamics method, from which the normal force coefficients of the rudder are obtained and the effects of rudder aspect ratio and thickness ratio on the hydrodynamic performances of the rudder are analyzed. On this basis, the standard turning circle and zigzag maneuvering motions are numerically simulated with the established mathematical model of ship maneuvering motion with four degrees of freedom. The maneuvering parameters are obtained from numerical simulations and the effects of rudder aspect ratio and thickness ratio on the turning ability, course-keeping ability and yaw-checking ability of the twin-propeller and twin-rudder ship are discussed. The research findings provide reference significance for optimizing rudder geometric parameter design and improving ship maneuverability.

Key words: naval architecture; maneuverability; Computational Fluid Dynamics; twin-propeller and twin-rudder ship; rudder section; rudder-force tests

船舶操纵性是船舶重要的水动力性能之一, 与船舶航行安全性密切相关, 而船用舵的几何参数对船舶操纵性具有重要影响。作为船舶水动力学领域的经典问题, 船用舵的水动力性能研究主要通过理论分析、模型试验和数值模拟方法三种方法开展。

理论分析方法从水动力学基本原理出发, 能深入揭示物理本质, 然而对于复杂几何形状的舵体和船体绕流场, 往往难以得到解析解。模型试验能够直接测量得到复杂条件下敞水舵或船后舵^[1-4]水动力参数, 为舵系有关研究和设计提供真实可靠的数据, 但

收稿日期: 2025-03-03

基金项目: 国家自然科学基金(51979164)资助

作者简介: 奚英奇(1981—), 男, 高级工程师, 研究方向为船舶舾装。*通信作者: zym947212603@163.com

引用格式: 奚英奇, 朱一鸣, 刘靖峤, 等. 舵几何参数影响下的双桨双舵船操纵性分析[J]. 中国航海, 2026, 49(2): 127-134.

Xi Y Q, Zhu Y M, Liu J Q, et al. Research on the maneuverability of a twin-propeller and twin-rudder ship under the impacts of rudder geometrical parameters[J]. Navigation of China, 2026, 49(2): 127-134. (in Chinese)

模型试验的经济成本较高,不利于开展系列舵几何参数下的水动力性能优化分析。

目前,利用计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)方法数值模拟船后舵周围流场,并计算其水动力性能已成为主流的研究方法,并且已经逐渐成熟完善^[5]。此外,学者们采用 CFD 方法对常规 NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) 型舵^[6-9]、襟翼舵^[10-11]、组合型舵^[12]、共翼型舵^[13-14]、扭曲舵^[15]等的水动力性能开展了不同的数值研究。然而,上述数值研究仅考虑了敞水舵或船后舵在直航状态下的绕流场和水动力特性。船后舵作为船舶最主要的操纵装置,其几何特征对船舶操纵性能的影响十分显著。目前采用 CFD 方法研究船后舵几何参数对船舶操纵性能影响的还相对较少,更缺乏对双桨双舵船的研究。

因此,本文基于 STAR-CCM+ 软件,采用 RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes) 方法对不同舵几何参数下某双桨双舵船的三维黏性流场进行数值模拟,分析船后舵厚度比和展弦比对水动力特性的影响,并基于 CFD 计算得到的船—舵系统水动力参数,构建船舶操纵运动数学模型,对该船标准操纵性试验进行预报,以探讨舵几何参数对双桨双舵船操纵性能的影响。

1 理论方法

1.1 黏性流场控制方程

假设双桨双舵船体绕流为三维不可压缩黏性流动,其控制方程采用 RANS 方程,包含如下时均连续性方程和动量守恒方程:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \frac{\partial (\bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial x_j} \right] = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \rho \overline{u'_i u'_j} \right] + f_i \quad (2)$$

式(1)和(2)中, x_i 为第*i*个坐标分量; \bar{u}_i 和 \bar{u}_j 表示时均速度分量($i, j = 1, 2, 3$); \bar{P} 为时均压力; t 为时间; μ 为黏性系数; f_i 为体积力; ρ 为流体密度; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 表示雷诺应力,通过 SST $k-\omega$ 湍流模型求解。

1.2 MMG 模型

目前,应用最为广泛的船舶操纵运动数学模型主要有整体型和分离型两类,即 Abkowitz 模型和 MMG (Maneuvering Modeling Group) 模型。与

Abkowitz 模型相比,MMG 模型将作用在船、桨、舵上的水动力分开描述,模型结构较为清晰。本文采用四自由度 MMG 模型^[16]描述双桨双舵船的操纵运动:

$$\begin{cases} m(\dot{u} - vr) = X_H + X_P + X_R \\ m(\dot{v} + ur) = Y_H + Y_P + Y_R \\ I_x \dot{p} = K_H + K_P + K_R \\ I_z \dot{r} = N_H + N_P + N_R \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中, m 为船舶的质量; u 和 v 分别为船体沿*x*和*y*方向的速度分量; p 和 r 分别表示为绕*x*和*z*轴的横倾角速度和转舵角速度; I_x 和 I_z 为船体绕*x*和*z*轴的惯性矩; X 和 Y 分别为*x*和*y*方向上水动力的分量; K 和 N 分别为绕*x*轴的横倾力矩和绕*z*轴的转舵力矩;下标“H”“P”“R”分别表示船、桨、舵。由于本文研究重点为舵几何参数对船舶操纵性的影响,故主要给出舵力试验对应的舵水动力模型以及船—桨—舵干扰系数。船体水动力模型(下标“H”有关水动力和力矩表达)和螺旋桨水动力模型(下标“P”有关水动力和力矩表达)参考文献^[16]。

船后舵同时受到船体伴流和螺旋桨尾流的影响,故操纵状态下舵水动力性能变化相当复杂。双桨双舵船的舵水动力模型表达如下:

$$\begin{cases} X_R = -(1 - t_R)(F_{N(p)} + F_{N(s)}) \sin \delta \\ Y_R = -(1 + a_H)(F_{N(p)} + F_{N(s)}) \cos \delta \cos \phi \\ K_R = Z_{HR}(1 + a_H)(F_{N(p)} + F_{N(s)}) \cos \delta \\ N_R = -(X_R + a_H X_H)(F_{N(p)} + F_{N(s)}) \cos \delta \cos \phi \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中, F_N 为舵法向力,“p”和“s”分别对应左舷和右舷; t_R 和 a_H 为舵对船体水动力的影响系数,分别表示由于舵偏转引起船体纵向力及横向力的变化。当舵产生偏转时,船后流场流速总体下降,船尾舵迎流侧的流速上升,背流侧的流速下降,这种流场不均导致船体受到更小的阻力以及更大的转舵力,舵水动力模型将该船体力分配在舵力上。因此 t_R 前为减号, a_H 前为加号; Z_{HR} 为舵横向力作用点的垂向坐标; X_R 为舵轴的纵向位置, X_H 为附加横向力作用点的纵向坐标; δ 为舵角, ϕ 为船体横倾角。 F_N 采用以下方程描述:

$$F_N = \frac{1}{2} \rho A_R (u_R^2 + v_R^2) \frac{6.13 A_R}{A_R + 2.25} \sin \alpha_R \quad (5)$$

$$\alpha_R = \delta - v_R / u_R \quad (6)$$

式(5)中, A_R 为舵面积, A_R 为舵展弦比; u_R 和 v_R 为舵入流速度的纵向和横向分量。考虑双桨双舵船操纵状态下尾部左、右舷流场的差异, u_R 和 v_R 采用下

式表达:

$$u_R = \varepsilon(1 - w_{p(T)})u \times \sqrt{\eta \left\{ 1 + \kappa \left(\sqrt{1 + 8K_T / \pi J^2} - 1 \right) \right\}^2 + (1 - \eta)} \quad (7)$$

$$v_R = U[\pm \alpha_p + \gamma_R^{\pm}(\beta - l_R^{\pm} r')] \quad (8)$$

式(7)和(8)中, ε 为舵前伴流速度与桨前伴流速度的比值; η 为处于螺旋桨尾流中的舵面积百分比, κ 为桨—舵干扰系数; K_T 为螺旋桨推力系数, J 为进速系数; α_p 为螺旋桨诱导入流角,对于本文研究的内旋桨而言,左舷为负,右舷为正; β 为漂角; $r' = rL/V$ 为无因次转首角速度, V 为船速; γ_R^+ 和 γ_R^- 分别表示迎风侧和内背风侧的整流系数;类似地, l_R^+ 和 l_R^- 分别为迎风侧和背风侧的整流效应转艏修正系数。

2 船后舵水动力预报

2.1 计算工况

选择船长 $L = 280$ m的某双桨双舵LNG船为研究对象。该船舵剖面采用NACA系列翼型。选取3个厚度比,对应翼型分别为:NACA0018、NACA0020和NACA0022;另选取3个展弦比 λ ,分别为 $\lambda = 1.15$ 、 1.25 和 1.37 。以展弦比 $\lambda = 1.25$ 为例,图1给出了舵几何的侧视图(单位:mm)。

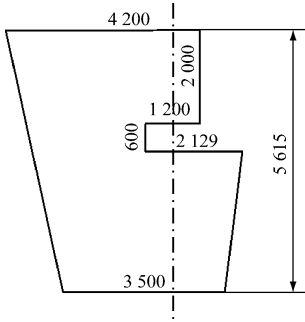


图1 展弦比为 $\lambda = 1.25$ 的舵几何形状(侧视图)

Fig. 1 Rudder geometry with the aspect ratio $\lambda = 1.25$ (side view)

通过RANS方法模拟双桨双舵船在直航状况下的系列舵力试验,以获得舵角、舵剖面几何参数变化对舵相关水动力参数的影响。单个舵力试验中两个舵固定在同一舵角 δ 下(向右转舵为正)进行不同舵剖面厚度比和展弦比的系列计算。此外,计算中采用船模尺度,缩尺比为 $1:40$,船模船速为 $V = 1.789$ m/s(对应实船船速为22 kn,傅汝德数为0.230),螺旋桨转速参考自航状态取为 1116 r/min。船后舵工况的具体计算参数如表1所示。

表1 船后舵计算参数

Tab. 1 Calculation parameters of ship rudder

船速/ (m/s)	螺旋桨转速/ (r/min)	舵角/ (°)	厚度比	展弦比
1.789	1116	0,10, 20,30	0018,0020, 0022	1.15,1.25, 1.37

2.2 计算域和边界条件

考虑到舵力试验中由于转舵导致的流场不对称性,计算域覆盖全船周围流场:总长度为7.5倍船长,宽度为5倍船长,水深为2倍船长,计算域总大小为 $52.5 \times 35 \times 14$ m。由于该船的舵体距离自由面较远,自由面兴波对舵力的影响可以忽略,因此舵力试验数值模拟中采用叠模方式忽略兴波的影响^[17]。对应的边界条件为:船体表面设置为固壁边界条件;计算域出口设置为压力出口,其他计算域界面都设置为速度入口,如图2a所示。由于本文研究重点为舵几何参数的影响,且以水动力参数预报为主,为保证计算效率,采用体积力模型模拟船后螺旋桨,计算时间步长取为 0.05 s。

2.3 网格划分和数值计算方法

整个计算域采用以六面体为主的非结构化网格进行离散,船体固壁面附近采用棱柱形边界层,结合壁面函数求解边界层内流动,并通过调整棱柱形网格的厚度和增长率,使得壁面的无因次 y^+ 值保持在30以上。此外,采用局部加密方法来提高船体附近等流动变化较大区域的模拟精度。图2b给出了船体附近网格分布示意。

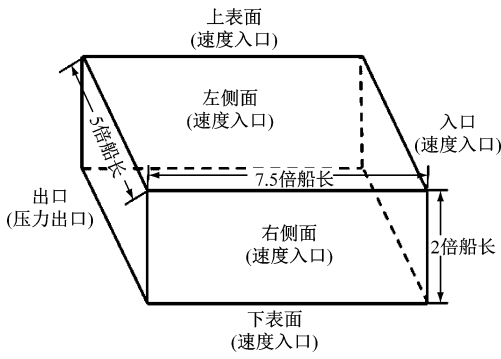
2.4 计算结果分析

通过舵力试验数值模拟,获得不同舵角、舵剖面几何参数下的水动力参数。本文重点讨论舵几何参数对船后舵的水动力参数和船—桨—舵干扰系数的影响。在船舶操纵性研究中,通过舵法向力系数 F'_N 来分析船后舵的水动力性能,其定义如下:

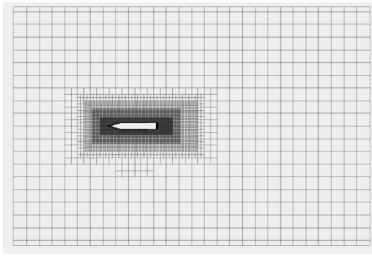
$$F'_N = \frac{F_N}{0.5\rho A_R U^2} \quad (9)$$

式(9)中, F_N 为舵法向力, A_R 为舵横剖面面积, U 为无量纲化参考速度。

由于双桨双舵船的几何对称性以及采用体积力模型模拟螺旋桨,故仅计算正舵角下的船后舵法向力系数。图3给出了三种厚度比下展弦比对法向力系数影响的变化曲线,可以明显看出,对双桨双舵船的两个舵的受力是不均匀的。绝大部分情况下,左



(a) 计算域和边界条件

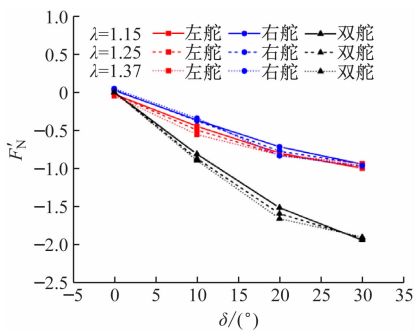


(b) 网格分布示意

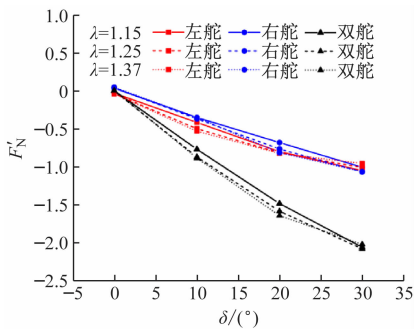
图 2 计算域、边界条件和网格分布示意

Fig. 2 Computational domain, boundary conditions and grid distributions

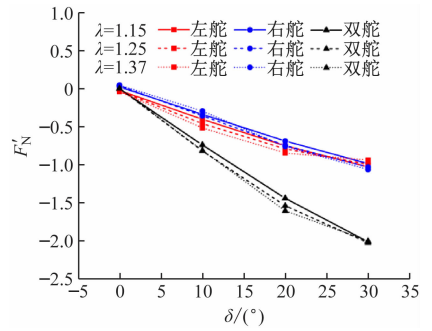
舵上的法向力系数大于右舵的法向力系数,但对于大舵角(舵角为 30°),左舵和右舵的法向力系数相差不大。中小舵角下(舵角小于等于 20°),当展弦比越大时,双舵总法向力系数越大;对于大舵角(舵角为 30°),不同展弦比下双舵总法向力系数相差不大。因此根据数值计算结果,采用展弦比为 1.37 的舵型可以得到更大的船后舵总法向力系数。



(a) NACA0018



(b) NACA0020

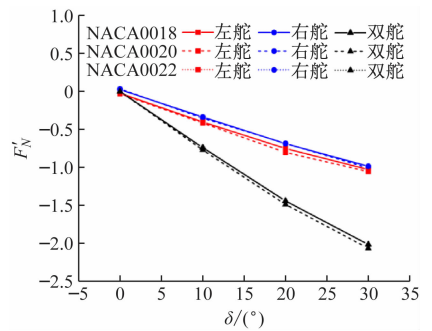


(c) NACA0022

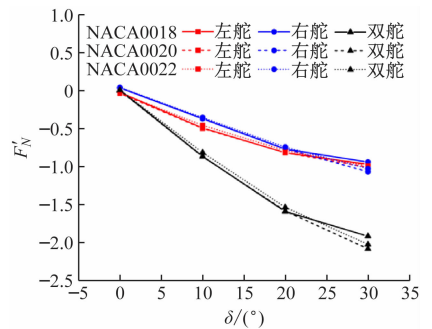
图 3 三种厚度比下展弦比对船后舵法向力系数的影响

Fig. 3 Influence of aspect ratio on the normal force coefficient of ship rudder under three thickness ratios

图 4 给出三种展弦比下厚度比对法向力系数影响的变化曲线。对于展弦比为 1.15 的舵型,左舵上的法向力系数大于右舵的法向力系数;对于展弦比为 1.25 与 1.37 的舵型,当舵角为中舵角时 (10° 与 20°),左舵上的法向力系数大于右舵的法向力系数,而大舵角时 (30°),左右舵的法向力系数相差不大。图 4 可以看出,中小舵角时 (10° 与 20°),NACA0018 翼型舵的法向力系数大于其他翼型舵,而当舵角为大舵角时 (30°),NACA0018 翼型舵的法向力系数反而小于其他翼型舵。总体来看,中小舵角时,双舵总法向力系数随着厚度比增大而减小;大舵角时,NACA0020 翼型的双舵总法向力系数最大,而 NACA0018 翼型的双舵总法向力系数最小。



(a) $\lambda = 1.15$



(b) $\lambda = 1.25$

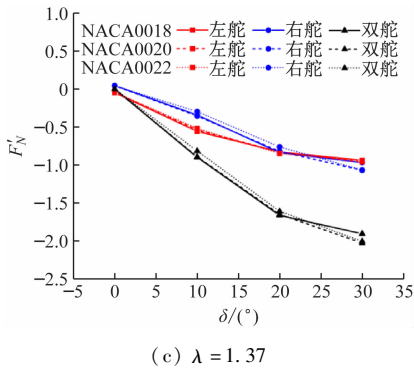


图4 三种展弦比下厚度比对船后舵法向力系数的影响

Fig.4 Influence of thickness ratio on the normal force coefficient of ship rudder under three aspect ratios

表2 不同展弦比下的船—桨—舵干扰系数

Tab.2 Hull-propeller-rudder interaction coefficients under different aspect ratios

展弦比	t_R	a_H	Z_{HR}/L	X_R/L	X_H/L	ε	κ
1.15	0.031	0.087	0.033	-0.471	-0.395	0.929	0.773
1.25	0.035	0.091	0.033	-0.471	-0.387	0.850	1.067
1.37	0.071	0.093	0.031	-0.471	-0.393	0.900	0.859

表3 不同厚度比下的船—桨—舵干扰系数

Tab.3 Hull-propeller-rudder interaction coefficients under different thickness ratios

翼型	t_R	a_H	Z_{HR}/L	X_R/L	X_H/L	ε	κ
NACA0018	0.031	0.087	0.033	-0.471	-0.395	0.929	0.773
NACA0020	0.149	0.122	0.035	-0.471	-0.403	0.898	0.796
NACA0022	0.180	0.123	0.034	-0.471	-0.397	0.868	0.831

表4 舵法向力模型参数

Tab.4 Parameters of rudder normal force model

α_P	γ_R^+	γ_R^-	l_R^+	l_R^-
0.055 5	0.754 6	0.400 0	-0.483 7	-0.872 3

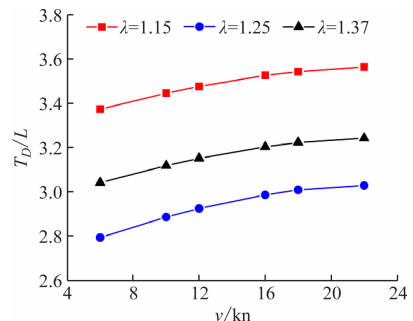
3 操纵性分析

将求得的船体力、螺旋桨力以及舵力代入式(3)的四自由度MMG模型中,采用四阶龙格库塔方法求解方程,通过数值仿真模拟该双桨双舵船在不同航速下的回转和Z形标准操纵运动,获得对应的操纵性参数,分别评估船舶的回转能力以及转舵纠偏和航向保持能力。

图5给出了数值仿真获得的采用NACA0018剖面和不同展弦比舵型的目标船在35°回转操纵运动中的回转性参数,包括无因次巡回初径 T_D/L 、无因次定常回转半径 R/L 以及最大横倾角 ϕ_{max} 。其中, L 为用于无因次化表达的船长。可以看出,采用不同

此外,将舵力试验数值模拟获得的不同舵角下的水动力参数代入舵水动力模型,并采用最小二乘法进行拟合,最终可得到不同展弦比和厚度比船舵下的船—桨—舵干扰系数。不同展弦比下NACA0018翼型的船—桨—舵干扰系数如表2所示;展弦比为 $\lambda = 1.15$ 时,不同厚度比下的船—桨—舵干扰系数如表3所示。对于舵法向力模型式(7)和(8)中未确定的参数,考虑到船型相似性,选取文献中同为双桨双舵船的ONRT标模的舵法向力模型参数RANS计算结果,如表4所示。

展弦比舵方案的双桨双舵船均表现出较好的回转性能:巡回初径约为3~3.5倍船长,回转半径约为1.0~1.5倍船长。随着展弦比的增大,该船巡回初径和定常回转半径呈现先减小后增大的趋势,即:展弦比 $\lambda = 1.25$ 时这些回转性参数均最小,并且在不同航速下均呈现上述规律,表明采用展弦比1.25的舵型可以得到最优的回转能力。此外,采用更大的航速进行回转运动时,该船最大横倾角也增加,说明船舶在较高航速下做回转运动时需要注意横倾的影



(a) 无因次巡回初径

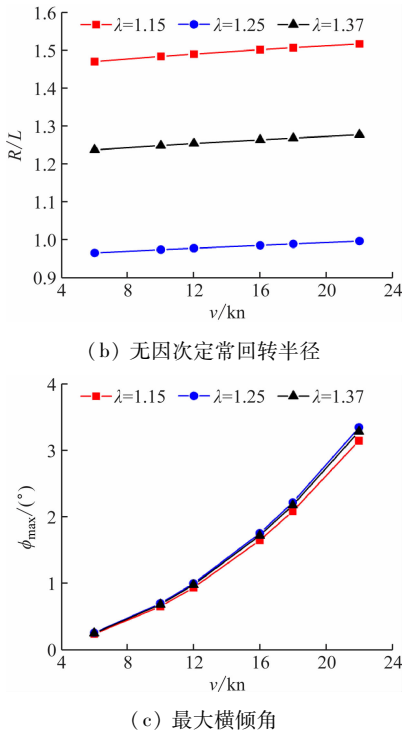


图5 回转性参数随舵展弦比的变化曲线
Fig. 5 Parameters of turning ability versus rudder aspect ratios

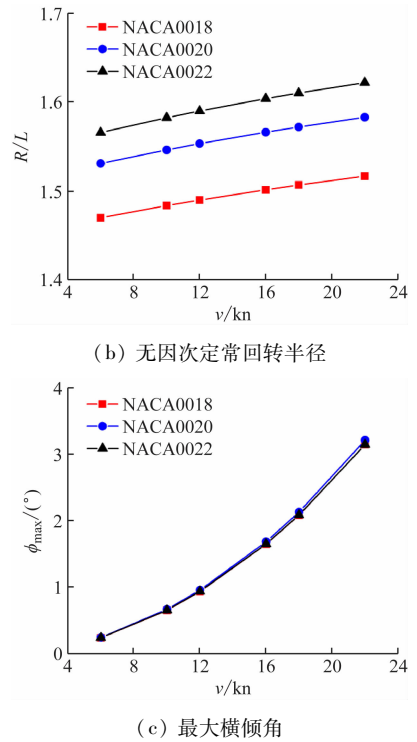


图6 回转性参数随舵剖面厚度比的变化曲线
Fig. 6 Parameters of turning ability versus thickness ratios of rudder section

响,但展弦比对横倾角的影响相对不明显。

图6给出了采用1.15展弦比和不同剖面厚度比舵型的目标船在35°回转运动中的无因次旋回初径、无因次定常回转半径和最大横倾角。图6可以看出,采用不同剖面厚度比舵方案的目标船型均表现出较好的回转性能:旋回初径约为3~3.5倍船长,回转半径约为1.2~1.5倍船长。随着剖面厚度比的增大,该船旋回初径和回转半径均呈增大趋势,表明采用更大剖面厚度比舵时该船回转能力有所下降,而且在不同航速下均呈现上述规律。因此,采用小剖面厚度比(NACA0018)舵型时该船能具备更优的回转能力。此外,与展弦比的影响类似,舵剖面厚度比对船舶回转运动时最大横倾角的影响相对不明显,横倾角主要随航速增大而增加,同样需关注高航速回转运动对船舶横倾的影响。

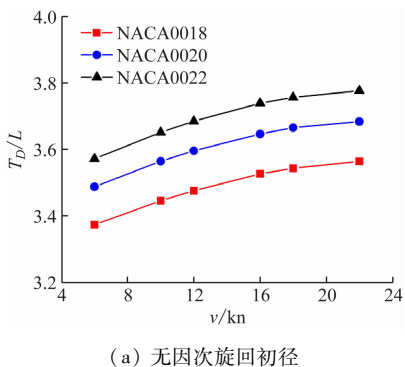
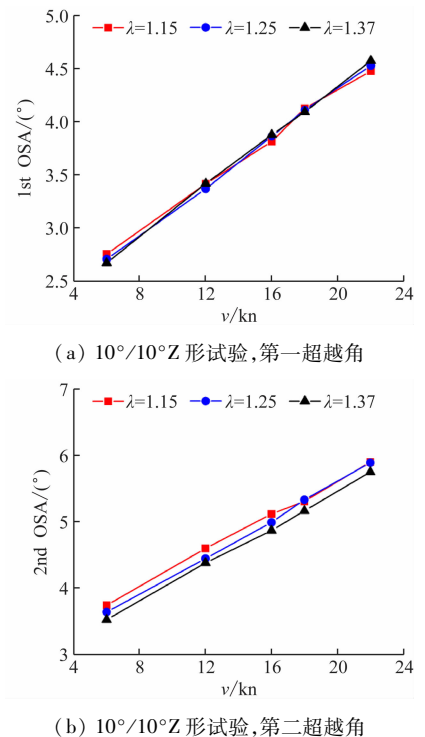
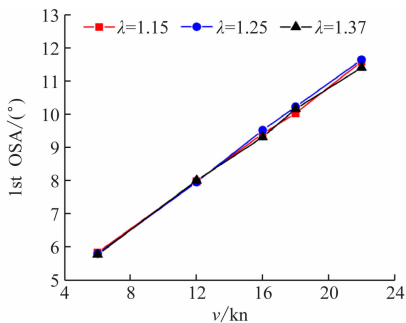
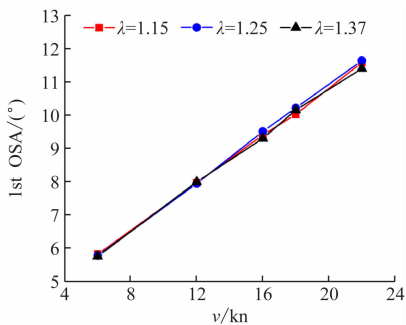


图7给出了采用NACA0018剖面和不同展弦比舵型的目标船在10°/10°和20°/20°标准Z形运动中的第一超越角(1st OSA)和第二超越角(2nd OSA)。图7可以看出,采用不同展弦比舵型的双桨双舵船均表现出较好的转舵纠偏和航向保持能力:10°/10°Z形试验第一超越角和第二超越角均小于





(c) 20°/20°Z 形试验,第一超越角



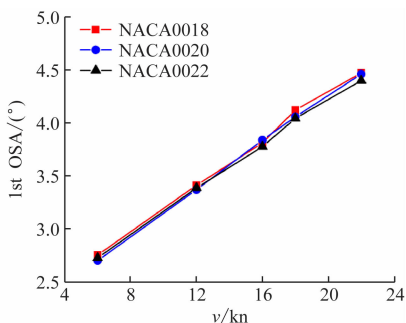
(d) 20°/20°Z 形试验,第二超越角

图7 第一和第二超越角随舵展弦比的变化曲线

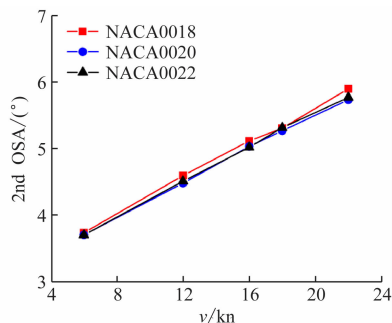
Fig. 7 1st OSA and 2nd OSA versus rudder aspect ratio

6°;20°/20°Z 形试验第一超越角和第二超越角均小于12°。随着展弦比的增大,该船第一超越角整体变化不大,而第二超越角略有减小,表明舵展弦比对于目标船的转舵纠偏和航向保持能力影响相对有限。

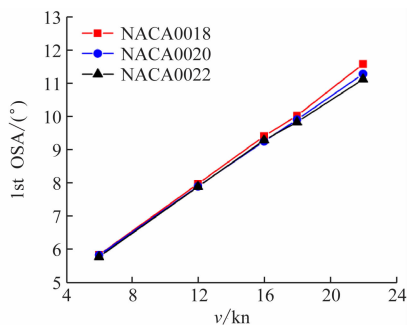
图8给出了采用1.15展弦比和不同剖面厚度比舵型的目标船在10°/10°和20°/20°标准Z形运动中的第一和第二超越角。可与图7结果类似,采用不同剖面厚度比舵方案的目标船型表现出较好的转舵纠偏和航向保持能力:10°/10°Z形试验第一超越角和第二超越角均小于6°;20°/20°Z形试验第一超越角和第二超越角均小于12°。随着舵剖面厚度比的增大,该船第一超越角和第二超越角整体呈减小趋势但变化幅度有限,高航速工况下,采用NACA0022剖面舵型的双桨双舵船超越角数值相对最小,说明能略微提高转舵纠偏和航向保持能力。



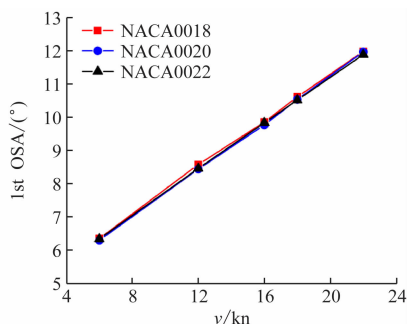
(a) 10°/10°Z 形试验,第一超越角



(b) 10°/10°Z 形试验,第二超越角



(c) 20°/20°Z 形试验,第一超越角



(d) 20°/20°Z 形试验,第二超越角

图8 第一和第二超越角随舵厚度比的变化曲线

Fig. 8 1st OSA and 2nd OSA versus rudder thickness ratio

4 结束语

本文探讨了舵型厚度比与展弦比对某双桨双舵船操纵性的影响,主要结论如下:

1) 对于双桨双舵船,左右舵呈现明显的水动力特性不一致性,且双舵总法向力与展弦比呈正相关;小舵角时,双舵总法向力系数随着厚度比增大而减小;大舵角时,NACA0020剖面舵型的双舵总法向力系数最大,NACA0018的双舵总法向力系数最小。

2) 在本文选取的舵展弦比数值范围内,随着展弦比增大,双桨双舵船回转性参数先增加后下降;展弦比为1.25时该船的回转能力最好;舵展弦比对船舶回转运动时最大横倾角的影响相对不明显,主要需关注高航速回转运动对船舶横倾的影响;而展弦比对该船转舵纠偏和航向保持能力影响相对有限。

3) 在本文选取的舵厚度比数值范围内,随着厚

度比增加,双桨双舵船回转能力显著下降。舵剖面为 NACA0018 时,该船回转能力最好;该船回转运动时的最大横倾角受舵厚度比的影响同样较小,最大影响仍为航速;随着厚度比增加,超越角呈减小趋势但幅度变化有限;高航速工况下,采用 NACA0022 剖面舵型能略微提高转舵纠偏和航向保持能力。

参 考 文 献

- [1] 吴梓鑫,陈伟民,李建鹏. 舵和艉鳍对超大型集装箱船操纵性的影响[J]. 上海船舶运输科学研究所学报, 2019, 42(2):7.
Wu Z X, Chen W M, Li J P. Effect of rudder and skeg on maneuverability of ULCS[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2019, 42(2):7. (in Chinese)
- [2] 陈雷强,严周广,石雯,等. 不同舵角下前置预旋导轮对桨舵影响的模型试验研究[J]. 中国造船, 2018, 59(4):97-104.
Chen L Q, Yan Z G, Shi W, et al. Experimental research on influence of PSV on performances of propeller and rudder at different rudder angles [J]. Shipbuilding of China, 2018, 59(4):97-104. (in Chinese)
- [3] 谢添慰. 大型集装箱船—桨—舵耦合的水动力性能数值模拟及试验验证[D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2024.
Xie T W. Numerical simulation and experimental verification of hydrodynamic performance of large container Ship-Propeller-Rudder coupling [D]. Hangzhou: Hangzhou Dianzi University, 2024. (in Chinese)
- [4] 周广礼,杜度,欧勇鹏,等. 连续往复操舵工况下船桨后舵水动力性能试验研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(9):7.
Zhou G L, Du D, Ou Y P, et al. Experimental study on hydrodynamic performance of rudders in continuous swing steering condition[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(9):7. (in Chinese)
- [5] Liu J L, Hekkenberg R. Interaction effects on hydrodynamic characteristics of twin rudders [C]// Proceedings of International Conference on Maritime Technology (ICMT 2016). Harbin, China, 2016.
- [6] 胡帅,宋文武,程伟,等. 翼型水动绕流特性数值模拟分析[J]. 水电能源科学, 2017, 35(6):147-150.
Hu S, Song W W, Cheng W, et al. Numerical simulation analysis of airfoil hydrodynamic flow characteristics[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(6):147-150. (in Chinese)
- [7] 李淑江,张育辉,窦如宏. 翼型厚度对水动力特性影响的数值模拟分析[J]. 中国测试, 2020, 46(5):148-153.
Li S J, Zhang Y H, Dou R H. Numerical simulation analysis of influence for airfoil thickness on hydrodynamic characteristics[J]. China Measurement & Test, 2020, 46(5):148-153. (in Chinese)
- [8] 林钦城,邹璐,梅天龙,等. 不同舵参数对敞水舵水动力性能影响的数值研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2021, 36(4):540-546.
Lin Q C, Zou L, Mei T L, et al. Numerical study on influence of rudder parameters on hydrodynamic performance of free-stream rudder[J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2021, 36(4):540-546. (in Chinese)
- [9] 程杰,方正,张伟. 翼型剖面绕流流场的 CFD 与势流数值模拟方法比较研究[J]. 水动力学研究与进展(A辑), 2023, 38(5):677-682.
Cheng J, Fang Z, Zhang W. Comparative study on simulating flow around foil section using CFD approach and potential flow theory [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2023, 38(5):677-682. (in Chinese)
- [10] 常婷婷. JfS 翼型襟翼舵水动力性能及设计研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2017.
Chang T T. Study on the hydrodynamic performance and design of JfS flap rudder[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese)
- [11] 杨立,张华,沈定安,等. 舵型参数对襟翼舵升力特性影响的数值计算研究[J]. 中国造船, 2017, 58(1):19-27.
Yang L, Zhang H, Shen D A, et al. Numerical research on influence of parameters of flap-rudder on its lift performance[J]. Shipbuilding of China, 2017, 58(1):19-27. (in Chinese)
- [12] 叶剑钊,黄技,黄斯慧,等. 基于 FLUENT 的新型船舵的水动力性能计算[J]. 中国水运(下半月), 2016, 16(11):1-3.
Ye J Z, Huang J, Huang S H, et al. Hydrodynamic performance calculation of a new rudder based on FLUENT[J]. China Water Transport, 2016, 16(11):1-3. (in Chinese)
- [13] 刘志华,熊鹰,叶青. 共翼型舵水动力特性的模型试验与数值模拟[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(4):658-663.
Liu Z H, Xiong Y, Ye Q. Model experiment and numerical simulation of the hydrodynamic performance of a conformal rudder[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(4):658-663. (in Chinese)

- Systems, 2023, 21(8): 2708-2717.
- [8] Zhang W, Wang Q, Du X, et al. Real-time NMPC for three-dimensional trajectory tracking control of AUV with disturbances [J]. Ocean Engineering, 2025, 319: 120267.
- [9] 钱小斌,尹勇,张秀凤,等. 模型预测控制在船舶动力定位模拟器中的应用[J]. 系统仿真学报, 2016, 28(10):2620-2625.
- Qian X B, Yin Y, Zhang X F, et al. Application of Model Prediction Control in Ship Dynamic Positioning Simulator [J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(10):2620-2625. (in Chinese)
- [10] Liu S, Zhang G, Guo G, et al. Adaptive output-feedback event-triggered formation control for underactuated ships with obstacle avoidance mechanism [J]. Ocean Engineering, 2024, 299: 117373.
- [11] Zhu G, Ma Y, Hu S. Event-triggered adaptive PID fault-tolerant control of underactuated ASVs under saturation constraint [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2023, 53(8): 4922-4933.
- [12] Zhang C H, Yang G H. Event-triggered adaptive output feedback control for a class of uncertain nonlinear systems with actuator failures[J]. IEEE transactions on cybernetics, 2018, 50(1): 201-210.
- [13] 王元慧,张潇月,王成龙. 船舶系泊动力定位控制技术综述[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2023, 44(2): 172-180.
- Wang Y H, Zhang X Y, Wang C L. A survey on ship position mooring control technology [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(2): 172-180. (in Chinese)
- [14] Peng Z, Wang J. Output-feedback path-following control of autonomous underwater vehicles based on an extended state observer and projection neural networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2017, 48(4): 535-544.
- [15] Hu X, Gao X, Li T, et al. Dynamic event-triggered prescribed performance disturbance rejection fault-tolerant trajectory tracking for surface vehicles [J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119063.
- [16] Zhu W, Wang Y C, Gao D J, et al. Fault-Tolerant Control Strategy of Intelligent Ship Based on Model Predictive Control [J]. Ship Engineering, 2022, 44(11):98-104.
- [17] Mou J, Zhu Q, Liu Y, et al. Multi-objective optimal thrust allocation strategy for automatic berthing of surface ships using adaptive non-dominated sorting genetic algorithm III [J]. Ocean Engineering, 2024, 299: 117288.
- [18] 夏元清,付梦印,邓志红,等. 滑模控制和自抗扰控制的研究进展[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(2): 137-147.
- Xia Y Q, Fu M Y, Deng Z H, et al. Recent developments in sliding mode control and active disturbance rejection control [J]. Control Theory and Applications, 2013, 30(2): 137-147. (in Chinese)
- [19] 朱昱雯,肖健梅,王锡淮. 基于改进 SHADE 算法的船舶电力系统推力分配[J]. 中国舰船研究, 2020, 15(4): 173-182.
- Zhu Y W, Xiao J M, Wang X H. Thrust distribution of marine power system based on improved SHADE algorithm[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2020, 15(4): 173-182. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 134 页)

- [14] 刘志华,翟朔,骆飞洋. 共翼型舵特性及其对潜艇潜浮运动影响研究[J]. 船舶力学, 2021, 25(6): 726-738.
- Liu Z H, Zhai S, Luo F Y. Study on the characteristics of conformal rudders and their influence on vertical plane maneuver of submarines [J]. Journal of Ship Mechanics, 2021, 25(6): 726-738. (in Chinese)
- [15] 叶金铭,王威,于安斌,等. 抗空化扭曲舵的设计及其水动力性能分析[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(3): 314-319.
- Ye J M, Wang W, Yu A B, et al. Design and Numerical Analysis of Hydrodynamic Performance for Anti-Cavitation Twisted Rudder[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2017, 51(3): 314-319. (in Chinese)
- [16] 郭海鹏. 基于 CFD 的双桨双舵船四自由度 MMG 模型建模及操纵性预报研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- Guo H P. Research on the CFD-based modeling of 4-DoF MMG model and maneuverability prediction for a twin-propeller twin-rudder ship [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019. (in Chinese)
- [17] Guo H P, Zou Z J. CFD and system-based investigation on the turning maneuver of a twin-screw ship considering hull-engine-propeller interaction [J]. Ocean Engineering, 2022, 251: 110893.