

X 舵在不同位置时 SUBOFF 潜艇的水动力特性

王祥瑞,王琨,焦波*,卜治丞

山东交通学院船舶与港口工程学院,山东 威海 264209

摘要:为分析 X 舵在不同纵向位置时现代潜艇的水动力特性,采用计算流体力学进行数值模拟,采用非结构网格研究 X 舵在 3 个位置时 SUBOFF 潜艇在不同来流速度下直航所受总阻力,及在攻角为 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$ 下所受纵向力、垂向力和俯仰力矩,研究直航和俯仰运动状态下 X 舵纵向布局对潜艇水动力性能的影响,及对应的压力云图。对结果进行分析对比可知:X 舵位置变化对潜艇所受纵向力的影响较小,但对垂向力和俯仰力矩影响增大;随 X 舵位置向后移动,潜艇的垂向力增大,俯仰力矩减小,两者均在攻角为 $\pm 5^\circ$ 时变化最大。

关键词:X 舵;SUBOFF 潜艇;水动力;计算流体力学

中图分类号:U662.2

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2023)02-0109-08

引用格式:王祥瑞,王琨,焦波,等. X 舵在不同位置时 SUBOFF 潜艇的水动力特性[J]. 山东交通学院学报, 2023,31(2):109-116.

WANG Xiangrui, WANG Kun, JIAO Bo, et al. Hydrodynamic characteristics of SUBOFF marine with X-rudder at different positions[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2023,31(2):109-116.

0 引言

潜艇具有良好的隐身性,在军事、科研和商用领域得到广泛发展,改善或提高潜艇的总体性能对提高其应用能力具有重要作用。潜艇船体结构的总体性能包括稳定性^[1]、快速性^[2]、耐波性^[3]、操纵性^[4]及结构强度^[5]等,国内外学者均取得较多研究成果,并发布一系列图谱^[6]供学术界参考。操纵性直接关系到潜艇在水下运动的灵活性和作战性,文献[7-9]精确分析求解与操纵性相关的水动力系数,根据研究成果采用模型试验和计算流体力学(computational fluid dynamics,CFD)数值分析的方法指导潜艇设计^[10]。

现代潜艇的舵翼分为十字舵和 X 舵 2 种类型,舵翼的位置、大小、形状均影响潜艇的操纵性。美国国防部高级研究计划局的 SUBOFF 项目曾发布在泰勒水池研究的十字舵 SUBOFF 潜艇的水动力报告^[11-12]。王庆云等^[13]采用软件 STAR-CCM+模拟分析 SUBOFF 系列舵翼的水动力性能,探讨十字舵在不同雷诺数下水动力特性的变化,并验证模拟结果的可靠性。张露等^[14]采用数值模拟分析垂直面变攻角的舵翼,对比十字舵和 X 舵在不同攻角下的升力,认为 X 舵水动力性能优于十字舵。Feng 等^[15]、Dubbioso 等^[16]分析潜艇的机动性能,发现 X 舵配置的转向能力优于十字舵配置。Han 等^[17]分析前十字型舵和后 X 型舵间操纵面的舵效应,验证 X 型舵的优势。Xiao 等^[18]在展弦比和安装位置不变的情况下,将 X 舵的三维尺寸分别缩小到原始舵尺寸的 80%、85%、90%、95%,采用 CFD 模拟分析不同面积的 X 舵,发现在舵角分别为 0° 、 5° 、 10° 、 15° 、 20° 时,不同面积的 X 舵所受阻力与偏航力矩均优于十字舵。Suastika 等^[19]对十字舵和 X 舵分别进行回转模拟试验,试验表明符合文献[20]战术直径和半径的十字

收稿日期:2022-08-08

基金项目:山东交通学院博士科研启动基金项目(BS2020032);山东交通学院科研基金项目(Z202124)

第一作者简介:王祥瑞(2000—),男,山东聊城人,硕士研究生,主要研究方向为船舶操纵,E-mail:wang132681082@163.com。

*通信作者简介:焦波(1981—),女,黑龙江佳木斯人,教授,工学博士,硕士生导师,主要研究方向为绿色船舶技术与海洋能源利用,E-mail:200003@sdjtu.edu.cn。

舵最小舵角为 25° , X 舵为 10° , 认为 X 舵是舵舵平面的最优配置。李士强等^[21]整合动网格、六自由度运动方法、虚拟桨盘体积法和流体体积法 (volume of fluid, VOF) 法, 模拟 X 舵和十字舵潜艇的水平面回转运动, 结果表明 X 舵潜艇的水平面回转灵活性优于十字舵潜艇。

综上所述, X 舵在不同攻角下的升力、转向能力及舵效应均优于十字舵, X 舵潜艇的操纵性优于十字舵潜艇, 但 X 舵在艇艏的布置对水动力性能的影响尚不明确, 研究 X 舵不同布局的水动力特性对潜艇水下航行操纵性能和舵翼的设计具有重要意义。本文基于 CFD 模拟方法, 以 SUBOFF 潜艇为原型, 研究 3 种 X 舵不同布局的 SUBOFF 潜艇在直航和多个角度俯仰运动的水动力性能。

1 计算方法

1.1 控制方程

潜艇在黏性流场中做直航与俯仰运动, 通常认为流场中的水是不可压缩流体, CFD 数值模拟的控制方程主要包括连续性方程和 RANS 方程^[22], 分别为:

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

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u_i' u_j'} \right) + S_i, \quad (2)$$

式中: x_i, x_j 为笛卡尔直角坐标, $i, j = 1, 2, 3$, i, j 分别为自由指标和求和指标; u_i, u_j 为 3 个坐标轴方向的速度; $\overline{u_i'}, \overline{u_j'}$ 为 3 个坐标轴方向上的平均脉动速度; t 为时间; p 为流场压强; μ 为黏性系数; ρ 为水的密度; $\rho \overline{u_i' u_j'}$ 为雷诺应力; S_i 为自定义源项。

1.2 湍流模型及算法

选择的湍流模型类型不同影响仿真结果的准确性。经验证发现, 采用剪切应力输运 (shear stress transport, SST) $k-\omega$ 湍流模型模拟分析潜艇航行流场, 计算结果更准确^[23]。

湍流动能 k 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k - Y_k + S_k, \quad (3)$$

式中: Γ_k 为 k 的有效扩散系数, G_k 为 k 产生的湍流动能, Y_k 为扩散项, S_k 为自定义项。

特殊耗散率 ω 方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_i} \right] + G_\omega - Y_\omega + S_\omega + D_\omega, \quad (4)$$

式中: Γ_ω 为 ω 的有效扩散系数, G_ω 为 ω 产生的湍流动能, Y_ω 为扩散项, S_ω 为自定义项, D_ω 为交叉扩散项。

在软件 Fluent 中, SIMPLEC 算法比 SIMPLE 算法更易收敛, 适用于计算相对简单的模型。SIMPLE 算法虽不易收敛, 但适用于较复杂模型, 计算结果更准确。本文选用 SIMPLE 算法求解压力速度耦合方程, 对流项采用二阶迎风格式。

2 计算对象

2.1 几何模型

将缩尺比为 1:24 的 3 种 SUBOFF 十字舵潜艇^[24]改为 X 舵在不同位置的 SUBOFF 潜艇, 附体包括指挥台围壳和 4 个几何形状完全相同的 X 舵翼。舵翼位置的布置原则为: 将原模型十字舵旋转 45° 得到 X 舵潜艇, 在艇体轴线到舵顶端距离为潜艇最大半径时, 改变舵在潜艇上的纵向位置, 3 种布置方案如图 1 所示。潜艇全长 4356 mm, 直径为 508 mm, 潜艇的湿表面积分别为 $S_1 = 80\,562\text{ mm}^2$, $S_2 = 111\,498\text{ mm}^2$, $S_3 = 143\,669\text{ mm}^2$ 。舵形状和参数如图 2 和表 1 所示。

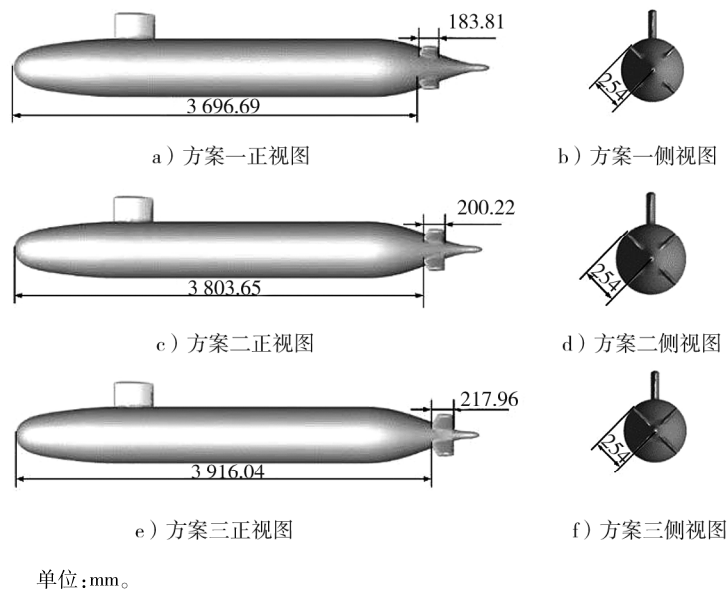


图 1 3 种 X 舵布置方案的 SUBOFF 潜艇几何模型示意图

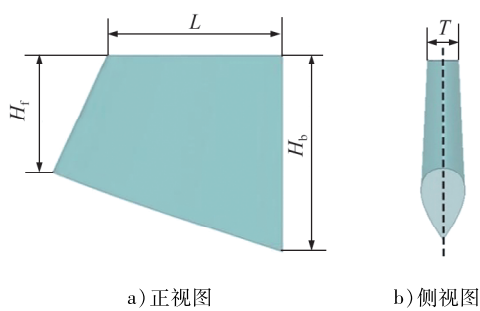


图 2 舵的形状示意图

表 1 舵的几何尺寸 单位:mm				
方案	H_f	H_b	L	T
一	78	134	152	15.24
二	102	170	152	15.24
三	135	203	152	15.24

2.2 坐标系

建立固定坐标系 $O_0-x_0y_0z_0$ 表示潜艇的航行姿态,潜艇运动具有 6 个自由度,设置随潜艇共同运动的运动坐标系 $O-xyz$,由艇尾指向艇艏为 x 轴正方向,指向潜艇右舷为 y 轴正方向,垂直于 xOy 面指向下方为 z 轴正方向。 V 表示来流方向,在模拟过程中潜艇处于静止状态,来流速度代替潜艇实际航行速度。运动坐标系的原点位于潜艇重心位置,坐标为 $O(2017,0,0)$,如图 3 所示。

潜艇俯仰运动是在竖直平面(xOz)内将模型绕 Y 轴旋转一定角度所得到的运动状态。来流方向与 x 轴间的夹角为攻角 α ,攻角分别为 0° (直航,如图 3 所示)、 $\pm 5^\circ$ 、 $\pm 10^\circ$,如图 4 所示。潜艇航行时受纵向力、垂向力和俯仰力矩,是分析潜艇操纵性的核心参数。

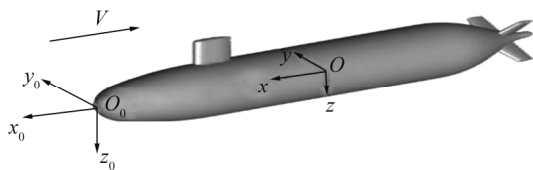


图 3 坐标系及直航示意图

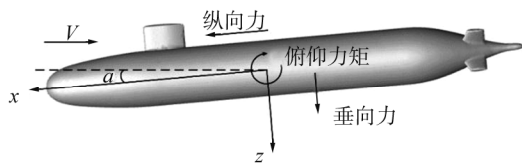


图 4 俯仰潜艇运动状态

3 计算域设置及网格划分

对 X 舵在不同位置的 SUBOFF 潜艇建模后,需建立合适的计算流域进行计算模拟。采用圆柱形流

域,以艇长 $L=4\,356\text{ mm}$ 作为特征长度建立流域,流域前部距艇体前端 L ,流域后部距艇体后端 $2L$,流域的直径为 $2L$ 。潜艇的计算流域设置示意图如图 5 所示。

将入口计算流域边界距潜艇首部 L 处设为速度入口,根据文献[11-12]数据设置来流速度分别为 5.93、10.00、11.85、13.92、16.00 kn;将出口计算流域边界距离潜艇尾部 $2L$ 处设置为压力出口,对应无穷远端,设置流域相对压力为 0;设置潜艇表面为无滑移壁面,计算流域周围为滑移壁面。

因计算模型较复杂,采用四面体网格对潜艇的表面及流体域进行非结构网格划分,潜艇表面边界层采用棱柱层网络。在接近潜艇表面处采用较细密的网格,设置较密集的网格节点;在距潜艇较远的位置采用较稀疏的网格,可相对减少计算量。结合计算资源及实际条件需要,将潜艇模型分别以 50 万、210 万、300 万个网格进行模拟计算,相同工况下(攻角为 0,来流速度为 5.93 kn)。潜艇的模拟总阻力与试验总阻力^[11]对比如表 2 所示。

由表 2 可知:当网格数为 210 万和 300 万时,模拟总阻力已趋于稳定;综合考虑计算时间和计算精度,后续所有工况的数值模拟分析均采用 210 万个网格的模型。

不同航速下 210 万个网格模型的模拟总阻力与试验总阻力对比如表 3 所示。由图 3 可知最大误差为 2.01%。不同方案的 SUBOFF 潜艇模型各有 43 万个总节点,边界层有 10 层,总厚度为 0.04 mm,无量纲壁面距离 $y^+=1$ ^[25]。X 舵潜艇的体网格纵剖面图如图 6 所示,表面网格如图 7 所示。

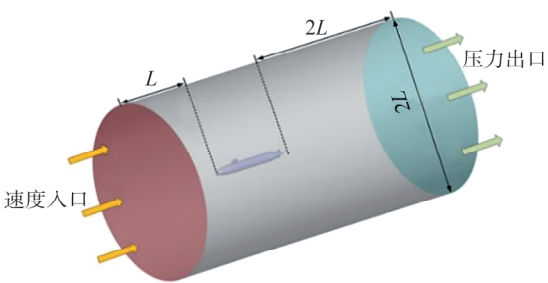


图 5 潜艇的计算流域设置示意图

表 2 相同工况下模拟总阻力与试验总阻力对比

网格数/万	模拟总阻力/N	试验总阻力/N	误差/%
50	124.20		21.40
210	102.13	102.3	-0.17
300	102.16		-0.14

表 3 不同航速下 210 万个网格模型的模拟总阻力与试验总阻力对比

航速/kn	模拟总阻力/N	试验总阻力/N	误差/%
5.93	102.13	102.30	-0.17
10.00	279.67	283.80	-1.46
11.85	389.64	389.20	0.11
13.92	529.70	526.60	0.59
16.00	689.18	675.60	2.01

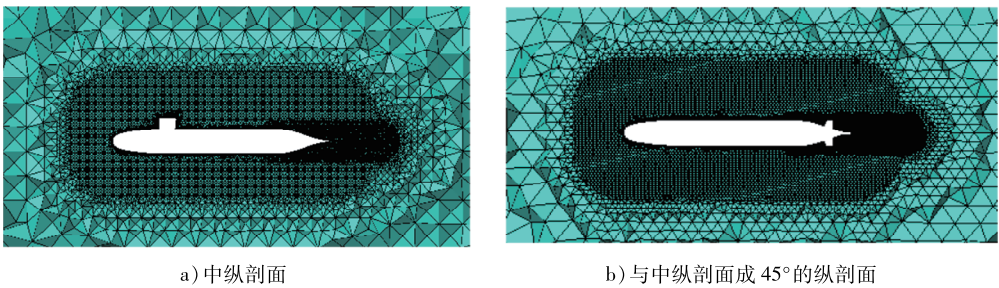


图 6 X 舵潜艇的体网格纵剖面图

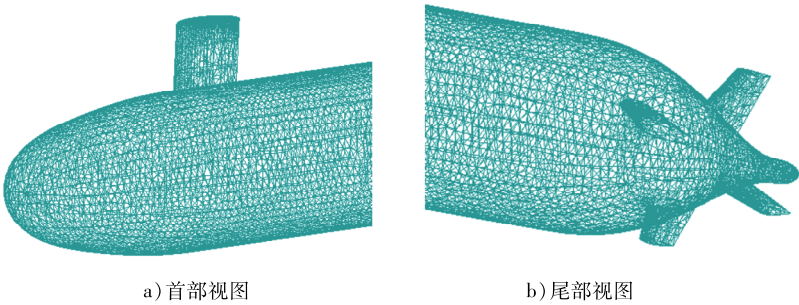


图 7 X 舵潜艇的表面网格

4 计算结果及分析

4.1 纵向力

通过 RANS 方程和 SST $k-\omega$ 湍流模型,模拟 3 种方案的潜艇在来流速度分别为 5.93、10.00、11.85、13.92、16.00 kn 时的直航运动(攻角为 0 时)并测得潜艇的总阻力(此时总阻力与纵向力相同),如图 8 所示。

由图 8 可知:潜艇所受总阻力随航速的增大而近似线性增大;在 X 舵位置后移,即舵面积增大时,潜艇所受总阻力相应增大,在航速为 10.00、13.92 kn 时,方案三潜艇所受总阻力比方案一约增大 10%。

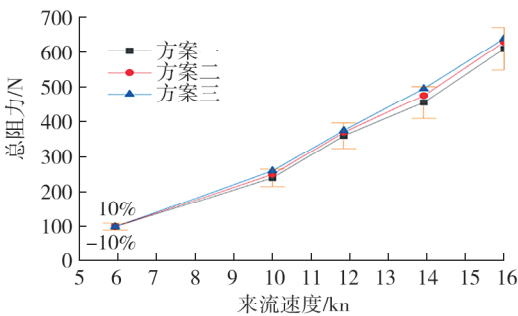


图 8 不同方案下总阻力随来流速度的变化曲线

来流速度分别为 5.93、11.85、16.00 kn 时,不同攻角的潜艇所受纵向力的变化曲线如图 9 所示。

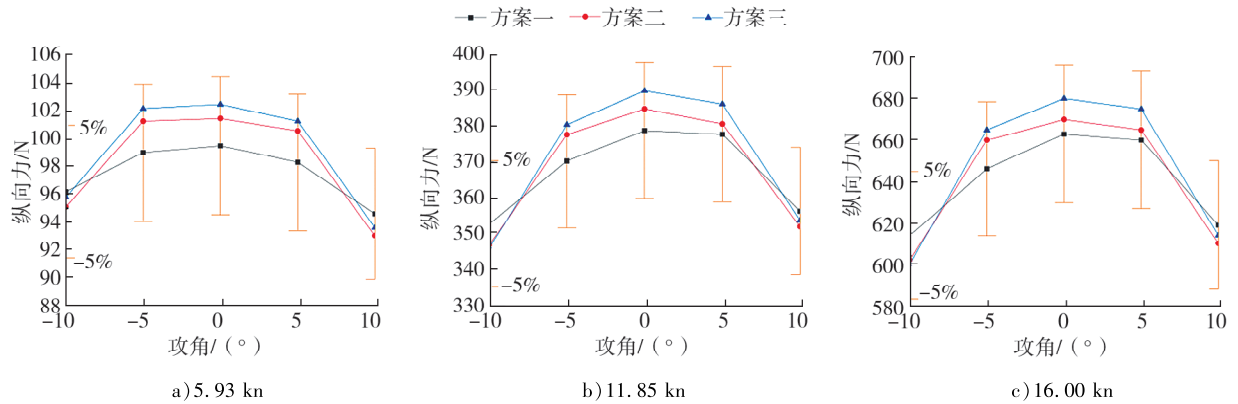


图 9 不同航速下不同攻角的潜艇所受纵向力的变化曲线

由图 9 可知:3 个航速下纵向力的变化趋势相同,纵向力随攻角的增大而减小;攻角为 $\pm 5^\circ$ 时,随尾翼的后移舵面积增大,纵向力略有增大,按纵向力从大到小的顺序依次是方案三、方案二、方案一;攻角为 -10° 时,3 个模型的纵向力按从大到小的顺序依次是方案一、方案三、方案二;攻角为 10° 时,方案二潜艇所受纵向力与方案三接近,舵位置对纵向力的影响减小;不同攻角下潜艇所受纵向力的变化均小于 5%。

航速为 11.85 kn 时方案二潜艇模型舵周围的压力云图如图 10 所示。由图 10 可知:攻角由 -10° 增至 0° 时,高压面积变化较小,负压面积越来越小,高压面积相对增大,纵向力逐渐增大;攻角由 0° 增至 10° 时,高压面积减小,负压面积变化较小,负压面积相对增大,纵向力随之越小。因此,攻角由 -10° 增至 10° 时,压力分布的变化是纵向力先增大后减小的主要原因。

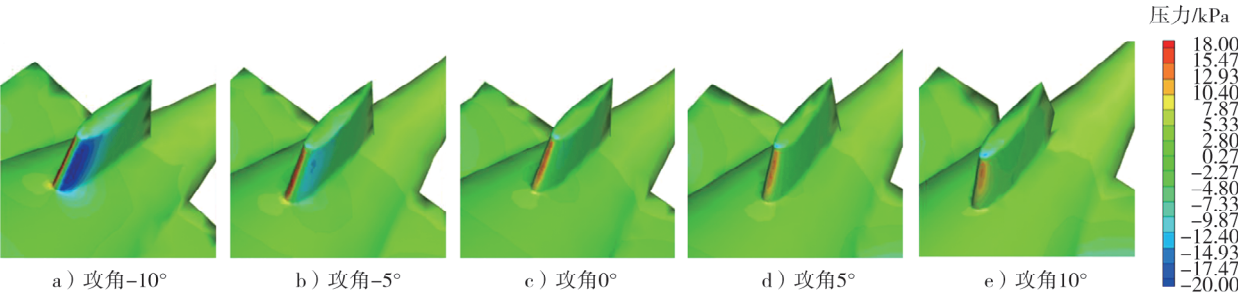


图 10 航速一定时不同攻角下方案二潜艇模型舵周围的压力云图

3 种方案的潜艇模型在航速为 16 kn,攻角分别为 -10° 、 -5° 时,舵周围的压力云图如图 11 所示。由图 11 可知:方案一潜艇的舵位置靠前,舵后高压面积分布范围最大,方案二和方案三逐渐较小;相较于方案一,方案二和方案三的舵身面积增大,舵上负压面积分布随攻角的变化而变化,二者综合影响潜艇所受纵向力。

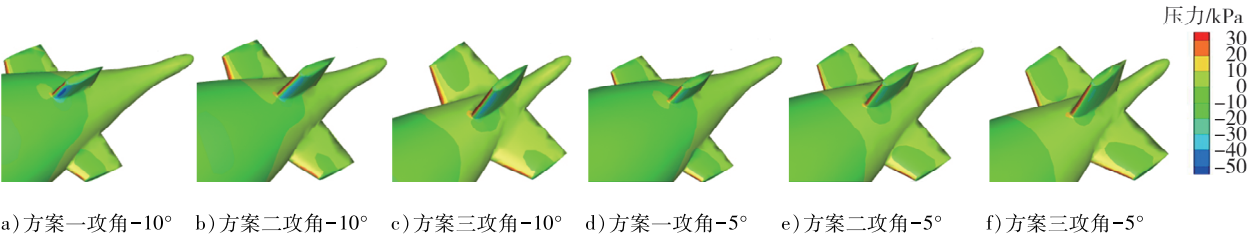


图 11 航速为 16 kn 时 3 种方案潜艇模型舵周围的压力云图

4.2 垂向力和俯仰力矩

在航速分别为 5.93、11.85、16.00 kn 时,3 种方案中 X 舵所受垂向力和俯仰力矩随攻角变化的曲线如图 12、13 所示。

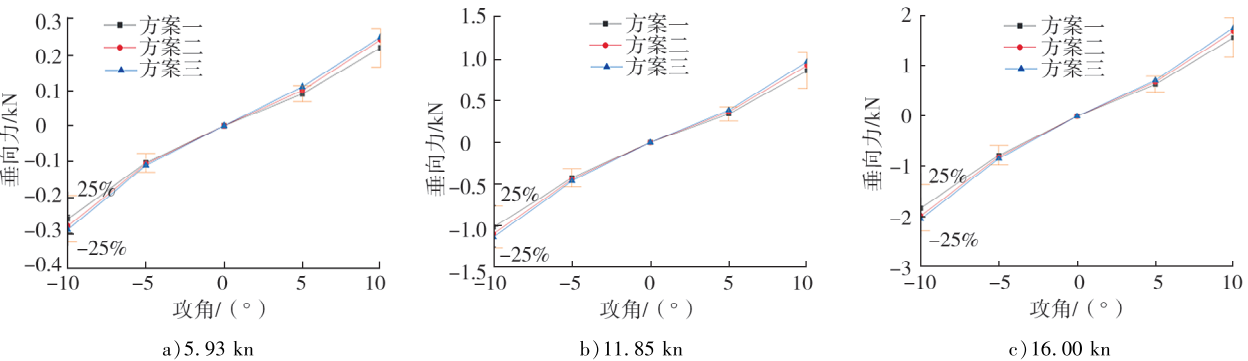


图 12 不同航速下 3 种方案中 X 舵所受垂向力随攻角变化的曲线

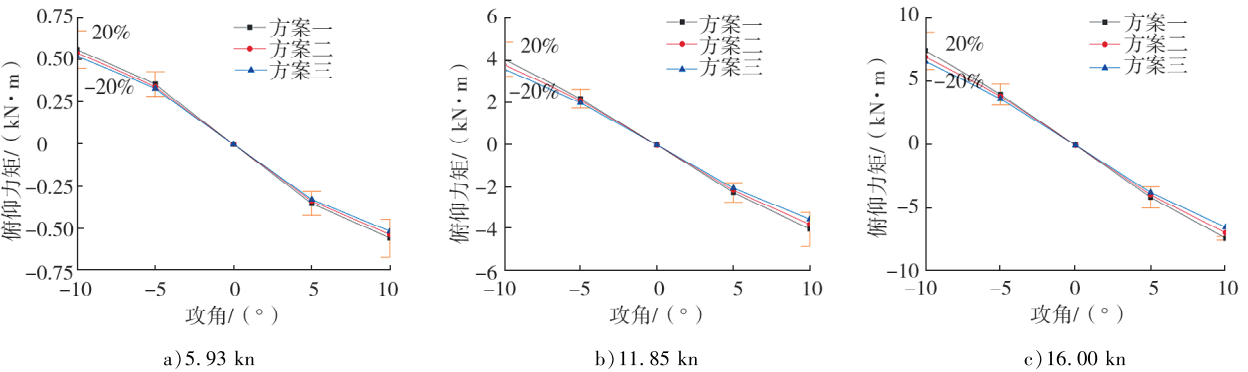


图 13 不同航速下 3 种方案中 X 舵所受俯仰力矩随攻角变化的曲线

由图 12、13 可知:潜艇的垂向力和俯仰力矩随攻角的增大呈近似线性变化;在相同的攻角和航速下,垂向力随 X 舵位置的后移而增大,攻角为 $\pm 5^{\circ}$ 时垂向力增大的幅度最大,攻角为 $\pm 10^{\circ}$ 时垂向力增大的幅度略有降低;俯仰力矩随 X 舵位置的后移而减小,攻角为 $\pm 5^{\circ}$ 俯仰力矩减小的幅度最大,攻角为 $\pm 10^{\circ}$ 时俯仰力矩增大的幅度略有降低。垂向力主要受压力分布的影响,俯仰力矩受压力和重心位置的共同影响。随 X 舵后移,潜艇的重心略有后移,力臂减小。

5 结论

以 SUBOFF 潜艇为母型艇,在不同来流速度和攻角下对 3 种设计方案潜艇的运动进行 CFD 模拟,分

析 X 舵的后移对潜艇水动力系数的影响。

1) 在直航运动中,比较 3 种设计方案潜艇所受总阻力,X 舵潜艇所受总阻力随舵的后移(即舵面积的增大)而增大,较小舵翼面积的潜艇阻力更小。

2) 潜艇所受纵向力随攻角的增大而减小;X 舵后移对潜艇所受纵向力的影响较小,变化幅度均在 5% 以内。

3) 潜艇所受垂向力和俯仰力矩随攻角的增大近似呈线性变化;随 X 舵后移,垂向力增大而俯仰力矩减小,两者都在攻角为 $\pm 5^\circ$ 时变化幅度最大,在攻角为 $\pm 10^\circ$ 时变化幅度略有减小。

在此研究基础上,还需对其他艇型的潜艇进行舵翼布局设计,采用试验或数值模拟的方法,完善 X 舵位置对潜艇水动力性能影响的研究。

参考文献:

- [1] JIANG Weijian, WANG Zhilin, HE Ran, et al. Numerical simulation of submarine surfacing with six degrees of freedom in regular waves[C]//Proceedings of 35th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Busan, South Korea: American Society of Mechanical Engineers, 2016: V007T06A109.
- [2] LIU Shuang, HE Guanghua, WANG Zhengke, et al. Resistance and flow field of a submarine in a density stratified fluid[J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 107934.
- [3] ZHANG Zhiguo, GUO Lixiang, WEI Peng, et al. Numerical simulation of submarine surfacing motion in regular waves[J]. Iranian Journal of Science and Technology: Transactions of Mechanical Engineering, 2020, 44(2): 359-372.
- [4] 胡坤, 何斌, 张建华, 等. 波浪环境下潜艇近水面操纵特性仿真分析[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(2): 6-11.
HU Kun, HE Bin, ZHANG Jianhua, et al. Simulation analysis of submarine maneuvering characteristics near water surface in wave environment[J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(2): 6-11.
- [5] DIVSALAR K. Improving the hydrodynamic performance of the SUBOFF bare hull model: a CFD approach[J]. Acta Mechanica Sinica, 2020, 36(1): 44-56.
- [6] LIU Yuhong, YU Zhenji, ZHANG Lianhong, et al. A fine drag coefficient model for hull shape of underwater vehicles[J]. Ocean Engineering, 2021, 236(Sep. 15): 109361. 1-109361. 13. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.109361.
- [7] CHO Y J, SEOK W, CHEON K H, et al. Maneuvering simulation of an X-plane submarine using computational fluid dynamics[J]. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2020, 12: 843-855.
- [8] 董苗苗, 张喜秋, 于昌利, 等. 潜体水动力系数计算研究综述[J]. 舰船科学技术, 2019, 41(1): 1-6.
DONG Miaomiao, ZHANG Xiqiu, YU Changli, et al. Research development on calculation of underwater vehicle's hydrodynamic coefficients[J]. Ship Science and Technology, 2019, 41(1): 1-6.
- [9] ZHANG Chenliang, LIU Xiaojian, WAN Decheng, et al. Experimental and numerical investigations of advancing speed effects on hydrodynamic derivatives in MMG model: Part I: X_{vv} , Y_v , N_v [J]. Ocean Engineering, 2019, 179: 67-75.
- [10] LUNGU A. A DES-based study of the flow around the self-propelled DARPA Suboff working in deep immersion and beneath the free-surface[J]. Ocean Engineering, 2022, 244: 110358.
- [11] LIU H L, HUANG T T. Summary of DARPA SUBOFF experimental program data[R]. Bethesda, Maryland: Naval Surface Warfare Center Carderock Div Bethesda MD Hydromechanics Directorate, 1998: 1-28.
- [12] RODDY R F. Investigation of the stability and control characteristics of several configurations of the DARPA SUBOFF model (DTRC Model 5470) from captive-model experiments[R]. Bethesda, Maryland: David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept, 1990: 1-122.
- [13] 王庆云, 庞永杰, 李伟坡, 等. 系列舵翼潜艇水动力系数数值计算及试验研究[J]. 舰船科学技术, 2015, 37(11): 21-26.
WANG Qingyun, PANG Yongjie, LI Weipo, et al. Numerical calculation and experimental study of hydrodynamic coefficients of submarine of a series of rudder and wing[J]. Ship Science and Technology, 2015, 37(11): 21-26.
- [14] 张露, 肖昌润, 焦玉超. 十字舵与 X 舵潜艇的水动力性能数值比较[J]. 舰船科学技术, 2017, 39(7): 24-28.
ZHANG Lu, XIAO Changrun, JIAO Yuchao. Numerical comparison on hydrodynamic performance of cross rudder and X rudder submarine[J]. Ship Science and Technology, 2017, 39(7): 24-28.
- [15] FENG Dakui, CHEN Xuanshu, LIU Hao, et al. Comparisons of turning abilities of submarine with different rudder

- configurations [C]//Proceedings of the ASME 2018 37th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Madrid, Spain; American Society of Mechanical Engineers, 2018; V07AT06A016
- [16] DUBBIOSO G, BROGLIA R, ZAGHI S. CFD analysis of turning abilities of a submarine model[J]. Ocean Engineering, 2017, 129:459-479.
- [17] HAN Zhaolin, ZHANG Zhongzheng, WANG Longjin. The effect analysis of rudder between X-form and cross-form[C]//Proceedings of 2017 3rd International Conference on Computational Systems and Communications (ICCSC 2017). Beijing: Hong Kong International Society for Informatization and Engineering, 2017:13-18.
- [18] XIAO Xiao, LIANG Qiufeng, KE Lin, et al. Effects of X rudder area on the horizontal mechanical properties and wake flow field of submarines[J]. Journal of Physics:Conference Series, 2021, 2095(1):012089.
- [19] SUASTIKA K, VIRLIANI P, WASIS D A. Submarine rudder stern-plane configuration for optimum manoeuvring[C]//Proceedings of the 5th International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environmental and Natural Disaster Management (ISOCEEN). Surabaya, Indonesia; E D P Sciences, 2018:01024.
- [20] 国际海事组织. MSC. 137(76)船舶操纵性标准:国际海事组织(IMO)第 MSC. 137(76)号决议[S/OL]. (2015-01-30)[2022-07-20]. <https://www.doc88.com/p-6071842809473.html?r=1>.
- [21] 李士强, 叶金铭, 张海宽. X舵与十字舵潜艇水下定深回转特性分析[J]. 船舶力学, 2020, 24(11):1433-1442.
LI Shiqiang, YE Jinming, ZHANG Haikuan. Analysis of underwater fixed depth turning characteristic of X-rudder and C-rudder submarine[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(11):1433-1442.
- [22] REN Jinyu, XU Dezhi, XU Jing. RANS simulation for the maneuvering and control of a suboff submarine model[J]. FDMP-Fluid Dynamics & Materials Processing, 2020, 16(3):561-572.
- [23] 单铁兵, 黄胜. 基于多块结构化网格的全附体潜艇粘性流场的数值模拟[C]//黑龙江省造船工程学会 2008 年学术年会论文集. 哈尔滨:黑龙江省造船工程学会, 2008:140-144.
- [24] GROVES N C, HUANG T T, CHANG M S. Geometric characteristics of DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) SUBOFF models (DTRC model numbers 5470 and 5471)[R]. Bethesda, Maryland:Geometric Characteristics of Darpa SUBOFF Models, David Taylor Research Center Bethesda MD Ship Hydromechanics Dept, 1989.
- [25] 陆炜. 层化海洋环境下潜艇航行阻力与兴波特征研究[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
LU Wei. Investigation on the resistance and wave-maker of submarine traveling in a stratified marine environment[D]. Dalian:Dalian University of Technology, 2020.

Hydrodynamic characteristics of SUBOFF marine with X-rudder at different positions

WANG Xiangrui, WANG Kun, JIAO Bo*, BU Zhicheng

Naval Architecture and Port Engineering College, Shandong Jiaotong University, Weihai 264209, China

Abstract: In order to analyze the hydrodynamic characteristics of modern submarine with X rudder at different longitudinal positions, computational fluid dynamics (CFD) is used to carry out numerical simulation, and unstructured grid is used to study the total resistance of SUBOFF submarine with X rudder at three positions under different flow velocities in straight sailing, as well as longitudinal force, vertical force and pitching moment at attack angles of $\pm 5^\circ$ and $\pm 10^\circ$. The effects of the longitudinal layout of X-rudder on the hydrodynamic performance of submarine in straight sailing and pitching motion and the corresponding pressure nephogram are obtained. The analysis and comparison of the results show that the change of X rudder position has little influence on the longitudinal force of submarine, but has more influence on the vertical force and pitching moment. With the X rudder position moving backward, the submarine's vertical force increases and the pitching moment decreases, both of which have the maximum variation at attack angles of $\pm 5^\circ$.

Keywords: X-rudder; SUBOFF marine; hydrodynamic; CFD simulation

(责任编辑:王惠)