

引用格式: 冀楠, 钱志鹏, 李浩然, 等. 实尺度船舶Z形操纵运动及流场特性模拟[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(3): 93-101.
JI N, QIAN Z P, LI H R, et al. Simulation of zigzag maneuver and flow field characteristics for full-scale ship[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(3): 93-101.

实尺度船舶Z形操纵运动及流场特性模拟



扫码阅读全文

冀楠¹, 钱志鹏¹, 李浩然¹, 万德成^{2,3,4}

1 重庆交通大学 航运与船舶工程学院, 重庆 400074

2 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240

3 上海交通大学 海洋工程国家重点实验室, 上海 200240

4 上海交通大学 船海计算水动力学研究中心, 上海 200240

摘要: [目的] 为了更加真实地预报船舶操纵性能, 有必要进行实船操纵运动直接模拟。[方法] 首先, 基于重叠网格技术进行实船拖航、配套螺旋桨敞水和实船自航计算, 并将计算结果与试验结果进行对比; 然后, 在此基础上开展实尺度船舶的10/10标准Z形操纵运动模拟, 分析船舶操纵运动过程中的船舶运动、水动力、流场及涡结构变化。[结果] 自航结果表明, 所提数值方法可靠; 受螺旋桨尺度效应的影响, 扭矩系数会有所减小; 在操舵过程中, 船舶运动姿态较为剧烈; 受到船-舵系统干扰, 桨后涡结构较为复杂, 且随着漂角的变化会产生一定角度的偏移。[结论] 采用所提数值方法进行实船操纵运动模拟, 可以准确获得船舶运动、水动力特性及流场信息, 能作为一种有效的前期评估手段, 从而为船舶设计提供参考。

关键词: 船舶操纵性; Z形操纵; 船-桨-舵相互作用; 实尺度; 重叠网格技术

中图分类号: U661.33

文献标志码: A

DOI: 10.19693/j.issn.1673-3185.02726

Simulation of zigzag maneuver and flow field characteristics for full-scale ship

Ji Nan¹, Qian Zhipeng¹, Li Haoran¹, Wan Decheng^{2,3,4}

1 School of Shipping and Naval Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

2 School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

3 State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

4 Computational Marine Hydrodynamics Laboratory, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract: [Objective] In order to forecast a ship's maneuverability more realistically, it is necessary to conduct the direct simulation of the full-scale ship's maneuver. [Methods] In this paper, based on overset grid technology, calculations of the full-scale ship towing, supporting propeller open water and full-scale ship self-propulsion are first produced, and the calculations are then compared with the experimental results. On this basis, numerical simulations of the full-scale ship's 10/10 standard zigzag maneuvers are carried out to analyze changes in the ship's motion, hydrodynamics, flow field and vortex structure. [Results] The self-propulsion results show that the numerical method used in this paper is reliable. The torque coefficient decreases due to the propeller scale effect. When maneuvering, the ship's motion is more intense. Due to the interference of the ship-rudder system, the post-propeller vortex structure is more complicated and produces a certain angle of offset with the change in drift angle. [Conclusions] The ship's motion, hydrodynamic characteristics and flow field information can be accurately obtained using this numerical method to simulate full-scale ship maneuvers, it can be used as an effective pre-evaluation tool and provide references for ship design.

Key words: ship maneuverability; zigzag maneuver; hull-propeller-rudder interaction; full-scale; overset grid technique

收稿日期: 2021-12-29 修回日期: 2022-03-24 网络首发时间: 2022-05-24 12:18

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFB1600400); 重庆市科学技术委员会基础与前沿研究计划资助项目(cstc2015jcyjA70009)。

作者简介: 冀楠, 男, 1981年生, 博士, 副教授。研究方向: 计算船舶水动力学, 船舶运动智能控制技术, 虚拟视景仿真技术等。E-mail: jinan@cqjtu.edu.cn

钱志鹏, 男, 1996年生, 硕士生。研究方向: 计算船舶水动力学。E-mail: 872268573@qq.com

李浩然, 男, 1998年生, 硕士生。研究方向: 计算船舶水动力学。E-mail: 847747685@qq.com

万德成, 男, 1967年生, 博士, 教授, 博士生导师。研究方向: 船舶与海洋工程计算流体力学。

E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn

*通信作者: 冀楠

0 引言

船舶操纵性直接关系到实际运营的经济性和船舶航行的安全性。欧盟海事安全局(ESMA)在2020年发布的海上伤亡和事故年度报告中指出,因碰撞、接触和搁浅事故造成的人员伤亡占有所有海事事故的44%以上。自2002年国际海事组织(IMO)颁布《船舶操纵性标准》决议^[1]以来,更早、更好地评估船舶操纵性已成为船舶设计的一个重要方面。国际船模拖曳水池会议(ITTC)针对主流的船舶操纵性预报方法进行了汇总,主要有直接预报法、基于系统的研究方法和CFD数值模拟方法^[2]。

所谓基于系统的研究方法,是通过建立操纵性数学模型,利用预报的水动力系数/导数来获得船舶操纵性指数,包括约束模试验、自航模试验及系统辨识方法预报等^[3]。其中,约束模试验方法是指对一定缩尺比的船模在拖曳水池中进行的大量强迫运动试验,包括斜拖试验、悬臂试验、平面运动机构试验以及圆周运动试验。Ortolani等^[4-5]对某双桨双舵船进行了斜拖试验,分析了螺旋桨在非设计工况下的载荷变化,并针对非定常流下的单桨叶载荷展开了细致的研究。自航模试验方法是指在物理操纵水池中对一定缩尺比下的船体、螺旋桨和舵进行的标准操纵试验,其通过控制螺旋桨转速和操舵来实现船舶操纵运动,典型的标准操纵试验有Z形操纵试验、自由回转试验等。自航模试验作为一种传统的试验方法,被公认为是评价船舶操纵性能最可靠的一种方法,一些典型船型的操纵性试验数据已非常完备^[6-8],但该方法成本昂贵、技术要求严格,需要具备较大的试验水池。系统辨识方法主要包括最小二乘法、扩展卡尔曼滤波法、岭回归分析方法、神经网络方法等。如何通过解决水动力导数的多重共线性问题来减少参数漂移是提高建模精度的关键^[9]。Song等^[10]提出了一种多创新最小二乘算法,用来识别随机梯度双曲正切非线性,并基于实船海试数据对该算法进行了验证,验证结果显示该算法具有良好的收敛性。随着高性能计算机的快速发展,CFD数值模拟方法在船舶领域得到了广泛应用。与传统理论相比,CFD方法同时考虑了流体的黏性和旋度,能够提供更高精度的船舶操纵结果;且与船舶试验相比,采用CFD方法对全流场进行数值求解,能够提供丰富的流场数据。

近年来,国内外基于CFD方法,采用不同的研究手段进行的操纵运动数值模拟大致可以分

为2种:约束模操纵运动模拟和自航模操纵运动模拟。王慧婷和毕毅^[11]利用STAR-CCM+软件,针对全附体KCS船模开展了斜航、纯艏摇、漂角和艏摇组合这3种平面运动机构(PMM)试验数值模拟。Zhang等^[12]以光体ONRT船模为研究对象开展了斜航拖曳试验,并利用OpenFOAM进行数值模拟,给出了可用于分离型建模(MMG)模型的水动力导数。计算机性能的发展和重叠网格技术的应用让自航模操纵试验直接数值模拟成为可能。建立船-桨-舵系统数值模型,通过控制螺旋桨旋转和操舵来实现船舶自航操纵模拟,可以更加精确地预测船舶的操纵运动过程。Sadat-Hosseini等^[13]通过采用体积力和离散螺旋桨对KP458桨进行处理,对KVLCC2船开展了操纵性试验数值模拟。Carrica等^[14]采用重叠网格,实现了在浅水工况下对KCS船模修正型20/5(其中分子为舵角,分母为进行反向操舵时的艏向角,下同此)Z形操纵试验的数值模拟,并进行了网格验证。王建华等^[15]利用自主开发的naoe-FOAM-SJTU求解器,针对ONRT船模进行了波浪工况下的回转操纵试验模拟。

然而,以上研究都是在一定缩尺比下开展的,试验中螺旋桨转速对应于船模自航点,未进行摩擦阻力修正,忽略了尺度效应的影响。考虑到在实船自航方面已经积累了一定的经验^[16-17],针对实船操纵性试验的直接模拟已经可以实现,且实尺度计算已被用于研究尺度效应、节能设备(ESD)等方面^[18-19],因此有必要开展实尺度下船舶操纵运动的精确预报,为船舶设计提供一些数据作为参考。本文将基于重叠网格技术,采用STAR-CCM+商业软件,直接模拟实尺度船-桨-舵相互作用下的自航及10/10标准Z形操纵运动,分析实尺度船舶在运动过程中的船舶运动、水动力、流场与涡结构变化。

1 数值方法

1.1 流体控制方程及数值格式

本文船体周围的流动被认为是三维非定常不可压缩流,求解的控制方程为RANS方程:

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

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

式中: x_i 和 x_j 为空间坐标分量; u_i 和 u_j 为空间平均速度分量; ρ 、 P 、 μ 分别为流体的密度、静压力和流体

动力黏度; t 为时间; $-\overline{\rho u_i' u_j'}$ 为雷诺应力项, 需引入湍流模型以使方程封闭。本文引入了两方程 SST $k-\omega$ ^[20] 湍流模型来封闭雷诺应力项, 该模型综合了标准 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型的优点, 近壁面选择 All y^+ wall treatment 进行处理。船舶自航操纵时产生的自由表面兴波采用流体体积 (volume of fluid, VOF) 法进行界面捕捉, 高分辨率界面捕捉 (high-resolution interface capturing, HRIC) 技术被用来提高自由面的模拟精度。

采用有限体积法 (FVM) 对整个计算域进行空间离散, 采用二阶迎风格式离散对流项, 用隐式二阶精度插值格式离散扩散项, 时间项的离散则采用二阶欧拉隐式数值格式。方程的压力-速度耦合求解通过 SIMPLE 算法实现。

1.2 重叠网格技术

重叠网格技术是指将重叠区域的网格通过挖洞、插值的方式嵌套到背景网格中, 重叠网格界面存在数据交换。本文中, 船-桨-舵系统的自航模拟共有 4 套计算网格: 1 套背景网格、1 套船体网格、1 套螺旋桨网格、1 套舵网格。重叠网格的分布如图 1 所示。

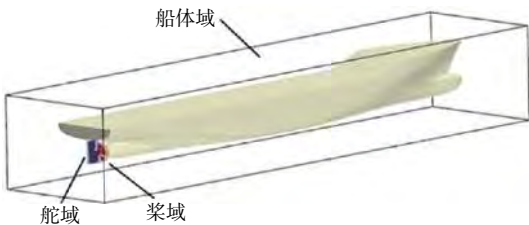


图 1 重叠网格的分布

Fig. 1 Distribution of overset grid

1.3 六自由度运动及其坐标系

为了计算船舶运动响应, 采用动态流体相互作用 (DFBI) 方法, 以使船舶在六自由度 (6-DOFs) 中自由运动。DFBI 模型使 RANS 求解器能够计算作用在刚体上的水动力和力矩, 并用求解刚体运动的控制方程来确定刚体的新位置。在模拟船舶操纵运动的过程中, 螺旋桨和舵作为船体运动的子级物体, 可以基于船体六自由度运动进行自身的旋转运动。

本文中, 5 个笛卡尔坐标系被用于船舶操纵运动。其中, 大地固定坐标系的原点位于船舶艏垂线与水线面交点处, x 轴正向指向船艏, y 轴正向指向船体左舷, z 轴正向指向船体上方; 背景域运动坐标系的原点位置及方向同大地坐标系, 随船舶在 $x-y$ 平面运动; 船体移动坐标系的原点位于船舶重心处, x 轴正向由船艏指向船艉, y 轴正

向由船体左舷指向右舷, z 轴正向指向船体下方, 且随船舶六自由度运动; 螺旋桨和舵坐标系的位置与船体坐标系相对固定, 旋转轴分别与桨轴和舵杆平行。

2 实尺度船舶自航数值模拟

2.1 计算模型及网格划分

本文选取带全附体的 KCS 船为计算对象, 船体三维模型如图 2 所示, 主要的船体及其附体参数如表 1 所示。



图 2 KCS 船几何模型

Fig. 2 Geometry model of KCS ship

表 1 主要的船体及其附体参数

Table 1 Main parameters of ship hull and appendage

参数	数值
缩尺比 λ	1
垂线间长 L_{pp}/m	230
船宽 B/m	32.2
吃水 T/m	10.8
排水体积 ∇/m^3	52 030
重心纵向位置 (自船艏) $LCG(\%L_{pp})$	-1.48
重心纵向位置 (自基线) VCG/m	7.28
螺旋桨直径 D/m	7.9
螺旋桨旋向	右旋
螺旋桨纵向位置 (自艏垂线) x/L_{pp}	0.982 5
螺旋桨垂向位置 (自水线而下) $-z/L_{pp}$	0.029 13
舵型	半平衡舵
舵转速 $(^\circ \cdot s^{-1})$	2.32

背景域网格范围为: $-1.5L_{pp} \leq x \leq 2.5L_{pp}$, $-2L_{pp} \leq y \leq 2L_{pp}$, $-1L_{pp} \leq z \leq 0.5L_{pp}$; 船体重叠区域网格范围: $-0.12L_{pp} \leq x \leq 0.1L_{pp}$, $-0.12L_{pp} \leq y \leq 0.12L_{pp}$, $-0.1L_{pp} \leq z \leq 0.09L_{pp}$ 。计算域及三维网格分布如图 3 所示。出口为压力出口边界, 其余边界条件均为速度入口。



图 3 计算域及三维网格

Fig. 3 The computational domain and three-dimensional grid

对于背景域以及船体、舵重叠区域,采用切割体网格进行划分,桨域网格为多面体网格,重叠域边界所在位置的2套网格尺寸保持一致,以减少插值误差。对船艏、艉轴曲率较大的地方进行局部加密,在艉轴与桨、舵杆与舵面之间的小间隙处放置足够数量的网格。在自由波面波高方向,划分10~12层网格用以捕捉船舶航行所带来的兴波,尾流加密区的网格尺寸则应足够小,以捕捉桨后涡结构。实船的雷诺数较高,根据推荐,船体表面 y^+ 值约为200^[21],实桨的 y^+ 接近于30^[22]。不同于船模,实尺度船体表面为粗糙壁面,根据文献[14],设置等效的砂粒粗糙度高度 $\varepsilon = 32 \mu\text{m}$ 。自航船舶不同区域的网格数量如表2所示,局部网格分布如图4所示。

表2 自航模拟网格分布

Table 2 Grid distribution of the self-propulsion simulation

	网格类型	数量
背景域	切割体	1.69×10^6
船体域	切割体	5.34×10^6
桨域	多面体	1.45×10^6
舵域	切割体	0.78×10^6
总计	—	9.26×10^6

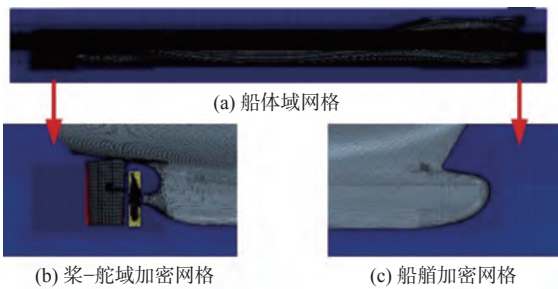


图4 重叠区域网格分布

Fig. 4 Grid distribution of overset domains

2.2 计算工况及结果分析

本文计算工况的设置参照东京2015船舶CFD研讨会上的自航模拟算例。弗劳德数 $Fr = 0.26$ (航速 $U = 12.35 \text{ m/s}$),雷诺数 $Re = 2.487 \times 10^9$ 。螺旋桨转速通过引入PI控制器进行控制,螺旋桨通过调整转速来达到船舶指定航速。螺旋桨PI控制器的公式如下^[23]:

$$n = Pe + I \int_0^t e dt \quad (3)$$

式中: n , dt , t 分别为螺旋桨的转速、单位时间步和旋转时间长度; P , I 分别为比例常数和积分常数,本文设置为 $P = I = 40$; e 为目标航速 U_{target} 与实

时航速 U_{ship} 之间的误差,

$$e = U_{\text{target}} - U_{\text{ship}} \quad (4)$$

为了节省计算时间,先进行 $Fr = 0.26$ 时的深水拖航模拟。通过施加与阻力大小相等、方向相反的强制力,可保证船舶能匀速航行,拖航计算时间步 $\Delta t = 0.005L_{\text{pp}}/U$ ^[21]。待自由兴波充分发展、阻力稳定之后,将桨域嵌套进拖航计算域中,然后通过PI控制器调整螺旋桨转速以达到实船自航点,自航时间步与螺旋桨敞水试验设置的时间步相同,在每个时间步下,螺旋桨旋转 3° 。

深水拖航试验计算的总阻力系数 $C_T = 2.183 \times 10^{-3}$,误差为 -1.7% 。螺旋桨敞水计算结果如图5所示。图中, K_T 为推力系数, K_Q 为转矩系数, J 为推进系数, η 为敞水效率。

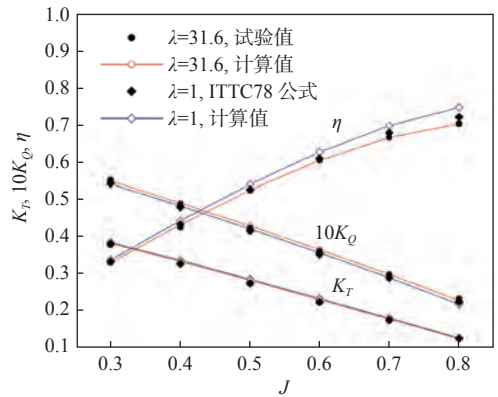


图5 螺旋桨敞水特性曲线

Fig. 5 Open water performance curves of propeller

模型桨推力系数 K_T 和转矩系数 K_Q 的计算值与试验值的最大误差分别为3.14%和1.35%,实桨推力系数 K_T 和转矩系数 K_Q 的计算值与ITTC修正值的最大误差分别为4.19%和 -2.90% 。由此可以看出,拖航模拟及螺旋桨敞水计算结果与试验值间吻合较好,验证了重叠网格技术对实尺度拖航和螺旋桨敞水计算的合理性。

图6所示为自航试验数值模拟过程中螺旋桨转速 n 与实船航速 U 的时历曲线。表3为达到目标航速后得到的自航计算结果,并与试验值进行了对比,相对误差用百分比表示。作为比较参考,表3同样列出了一些CFD计算结果。由表3可以看出,除转矩系数 K_Q 的误差达7.292%以外,其余计算结果的误差均在2%以内。转矩系数误差大是可以预见的,因为水动力系数的试验值是韩国船舶与海洋工程研究所(KRISO)在模型尺度下得到的。由图5以及文献[24]可知,螺旋桨的水动力系数存在尺度效应,而尺度效应主要影响螺旋桨的转矩系数,会导致实尺度螺旋桨的转矩

系数减少, 推力系数增大。总体而言, 基于重叠网格技术能准确进行实尺度自航推进计算。

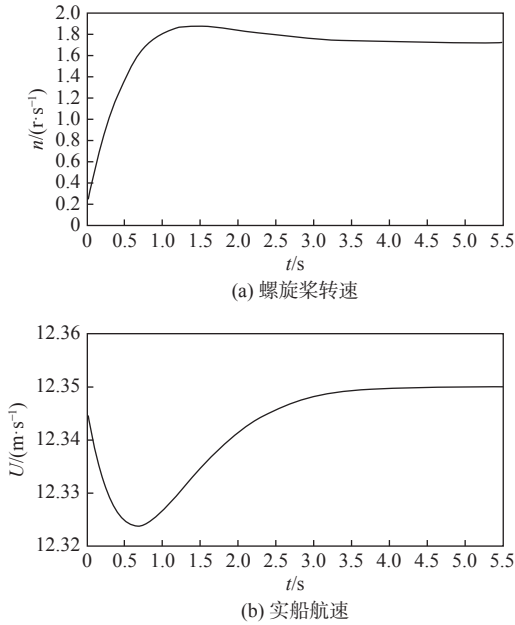


图 6 螺旋桨转速和实船航速时历曲线

Fig. 6 Time histories of propeller rotation speed and full-scale ship speed

表 3 实尺度船舶自航计算结果对比

Table 3 Comparison of the self-propulsion results for full-scale ship

参数	本文结果 (带舵)	试验值 (不带舵)	Song等 ^[5] (带舵)	Can等 ^[7] (带舵)	Castro等 ^[14] (不带舵)
C_T	2.718×10^{-3}	-	2.583×10^{-3}	2.772×10^{-3}	2.773×10^{-3}
$n/(r \cdot s^{-1})$	1.719 (-1.716%)	1.690	1.737	1.719	1.736
K_T	0.169 (-0.588%)	0.170	0.158	0.172	0.166
K_Q	0.0267 (-7.292%)	0.0288	0.0263	0.0254	0.0261

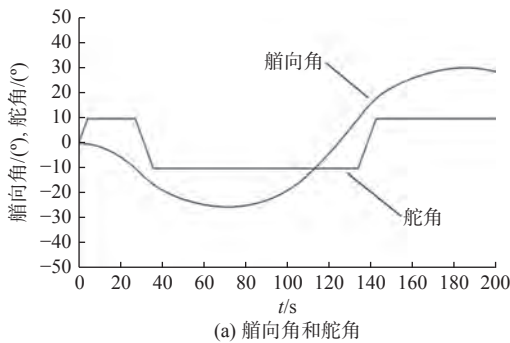
3 实尺度船舶 Z 形操纵运动数值模拟

舵以指定舵速转向目标舵角, 船体受到响应会向舵角方向转向, 在达到目标艏向角后, 操反舵直至达到目标舵角, 如此反复, 实现船舶的 Z 形操纵运动。本文参考 SIMMAN 2020 深水 10/10 标准型 Z 形操纵试验算例, 来进行实尺度 KCS 船的 10/10 标准型 Z 形操纵运动数值模拟, 采用的计算模型及相关设置与上节相同。在进行 Z 形操纵之前, 先进行实尺度的自航推进计算, 在船舶航行的同时放开垂荡和纵摇这 2 个自由度; 待到达实船自航点 ($Fr = 0.26$) 后, 保持转速不变, 然后放开其余 4 个自由度, 以 $2.32 (^\circ)/s$ 的舵转速开展 10/10 标准型 Z 形操舵试验模拟。

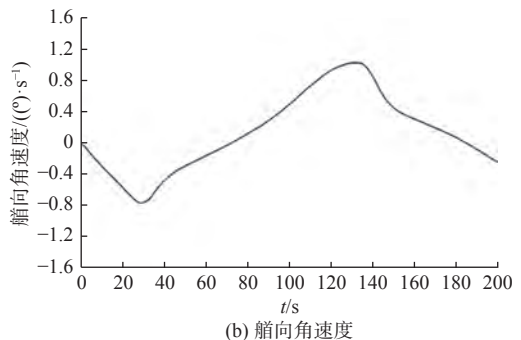
图 7 给出了 10/10 Z 形操纵的船舶运动和舵角时历曲线。同模型试验一样, 采用 CFD 方法只计算了一个 Z 形操纵周期。由图 7 可以看出, 船舶艏向角速度曲线与漂角曲线形状相似, 但方向相反。在艏向角达到换舵艏向角并开始操反舵时, 艏向角速度、漂角、横摇角、纵摇角以及垂荡都会出现峰值, 此时的船舶运动将最为剧烈。而横摇角则因船舶本身固有的横摇周期, 会具有更高频率的横摇变化。

实尺度 KCS 船在 10/10 Z 形操纵过程中的最大艏向角、超越角以及最大艏向角速度见表 4。

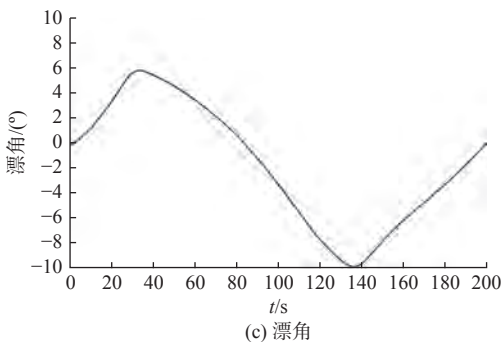
图 8 示出了一个 10/10 Z 形操纵周期的航速变化曲线。由图可见, 在这一周期内, 航速整体呈下降趋势, 且未出现周期性的变化。曲线上较快的降速均发生在两次操舵执行之后。



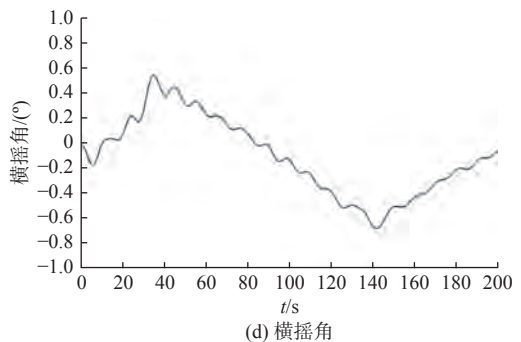
(a) 艏向角和舵角



(b) 艏向角速度



(c) 漂角



(d) 横摇角

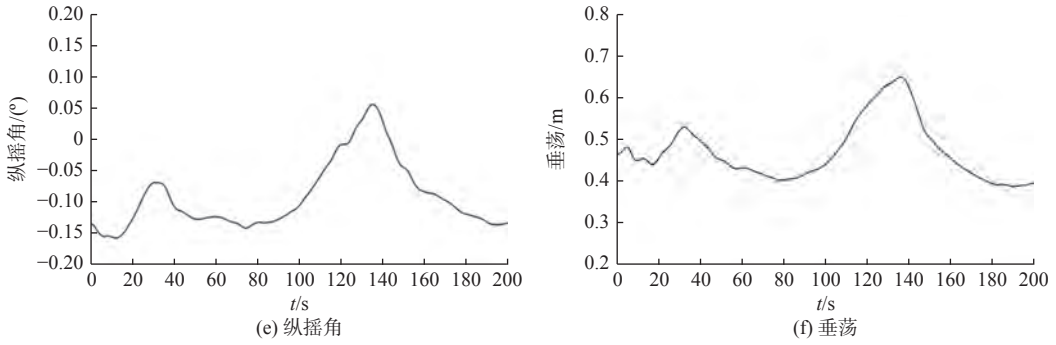


图7 实船运动及舵角的时历曲线

Fig. 7 Time histories of full-scale ship motion and rudder angle

表4 实尺度 KCS 船 Z 形操纵计算结果

Table 4 Calculation results of zigzag maneuver for full-scale KCS ship

参数	第1次换舵	第2次换舵
最大艏向角/(°)	-25.24	30.27
超越角/(°)	15.24	20.27
最大艏向角速度/(°·s ⁻¹)	-0.754	1.033

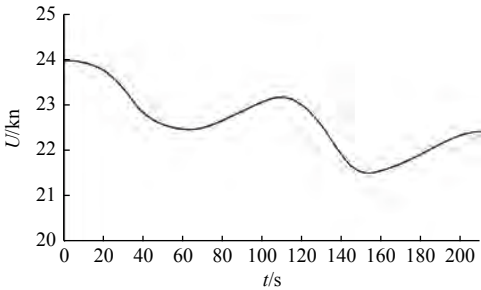


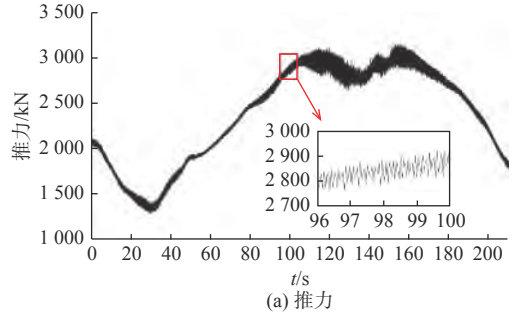
图8 航速时历曲线

Fig. 8 Time history of ship speed

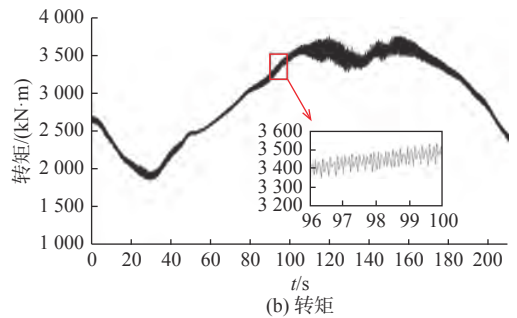
图9所示为10/10 Z形操纵过程中螺旋桨推力和转矩时历曲线。从图中可以看出,在船舶操纵运动过程中,螺旋桨的推力和转矩出现了低频波动,且推力与转矩的波动情况类似;另外,由局部放大图可以看出高频的波动现象,这是由离散螺旋桨在真实旋转过程中桨叶切割流场所导致。舵的运动加剧螺旋桨的高频振动,因此在舵角变化的这一段过程中,船体受到的轴承力会增大,而这对船舶的振动与噪声不利。在这一个操纵周期内,平均推力的波动范围为-34.39%~44.74%,平均转矩的波动范围为-27.37%~36.97%。在实船操纵过程中,螺旋桨的水动力变化较为明显。

舵阻力和升力的计算结果如图10所示。操舵会使来流攻角急剧变化,其中阻力存在2个低谷,升力则会发生突变。相对于零舵角自航,在船舶操纵过程中,舵阻力较大,最高峰值达350 kN,这也是造成航速下降的主要原因之一。

图11示出了不同时刻的自由波面波高(上图)及船体边界层轴向速度(下图),这里波高及



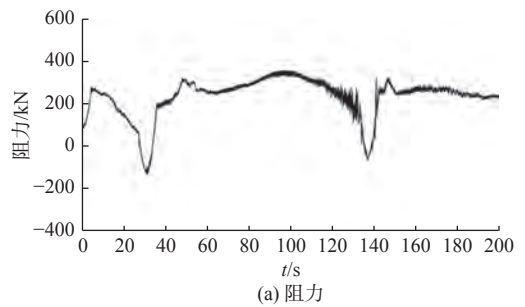
(a) 推力



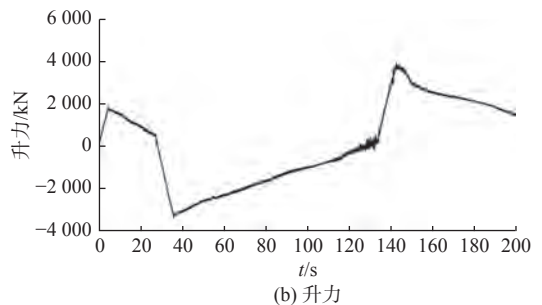
(b) 转矩

图9 螺旋桨推力和转矩时历曲线

Fig. 9 Time histories of propeller thrust and moment



(a) 阻力



(b) 升力

图10 舵的阻力和升力时历曲线

Fig. 10 Time histories of rudder drag and lift

轴向速度 V_x 为无量纲。观察自由波面的变化可以看出, 自航推进的自由波面呈良好的对称性; 在操纵运动过程中, 漂角和艏向角的变化导致了波面的非对称性; 且两侧的凯尔文角也产生了变化, 迎浪面的凯尔文角较大。由图 11(b)和图 11(c)可以明显看出, 2个漂角状态下的凯尔文角并不对称, 最大负向漂角的波形略大, 究其原因, 可以

归结为在这一操纵周期内, 漂角并不呈对称性变化(图 7)。由图 11所示沿船长方向的边界层横截面轴向速度分布可以看出, 随着漂角的变化, 边界层的速度分布表现为非对称性, 在迎浪面出现了脱流, 且最大负向漂角时刻的脱流尺度较大; 船艏轴处伴流因漂角的变化发生了同向偏移, 进而改变了螺旋桨的进流迎角。

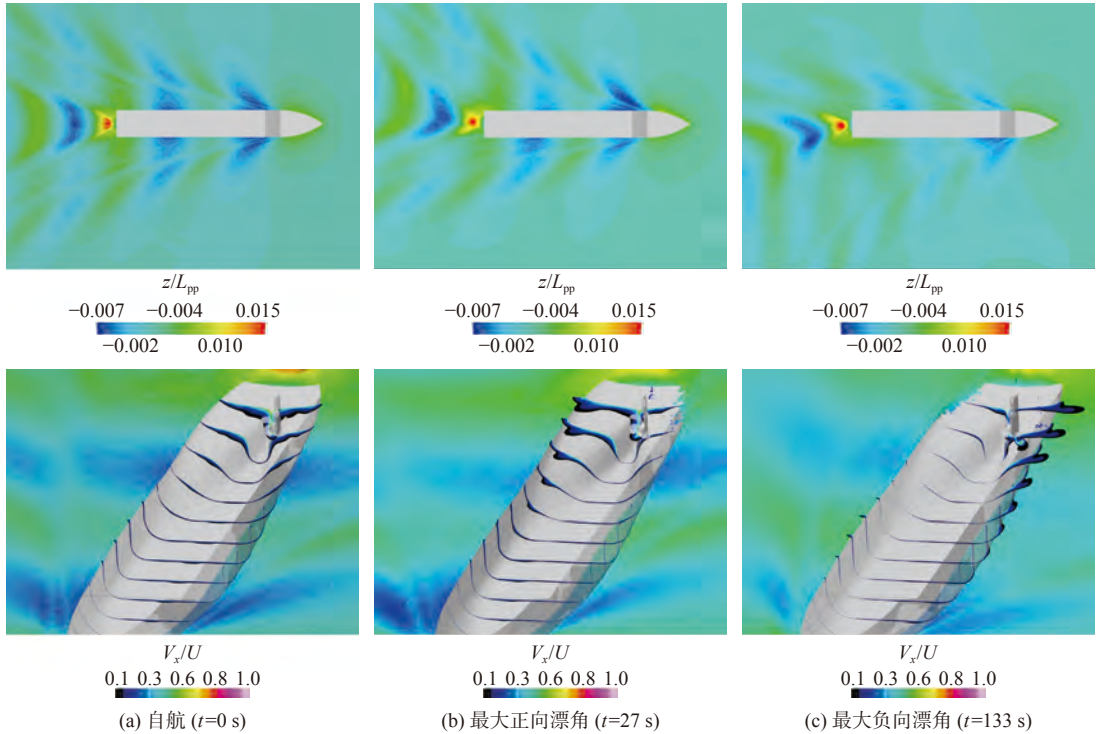


图 11 不同时刻的自由波面及边界层横截面

Fig. 11 Free wave surface and cross sections showing the boundary layer at different moments

图 12 示出了 $Q=2$ 时不同时刻三维涡结构的轴向速度, Q 准则涡量的等值面用无量纲化轴向速度着色, 其中深红色部位代表高速度分布。由图 12(a)可以看出, 因为加密区域的存在, 螺旋桨整体涡结构能够被清晰地捕捉到。受舵的干扰, 螺旋桨左半部分泄出的梢涡有向上流动的趋势,

右侧涡有向下流动的趋势。桨毂涡受到舵的作用, 被分割为两股, 分别在舵的左、右两侧向后发展, 并且具有较高的涡强度。在舵的梢部及根部, 存在两股向后发展的涡。总体而言, 相比无舵的螺旋桨桨后涡结构, 螺旋桨泄涡与舵相互作用会导致更为复杂的涡结构干扰。

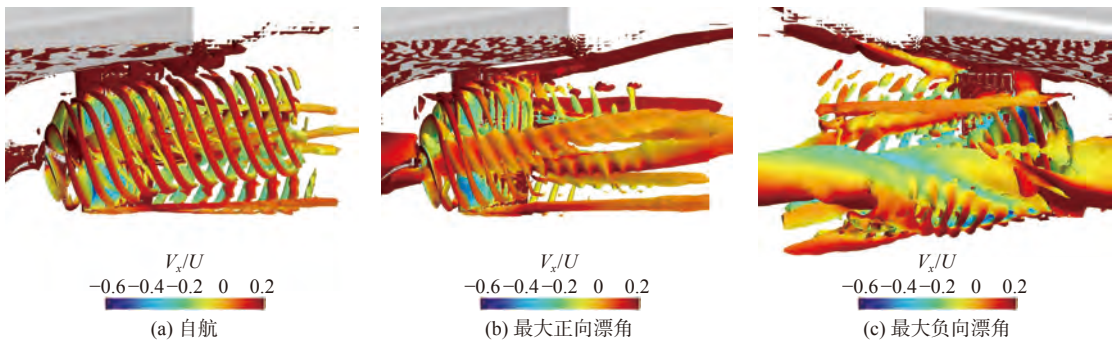


图 12 不同时刻的三维涡结构轴向速度 ($Q=2$)

Fig. 12 Axial velocity of three-dimensional vortical structures at different moments ($Q=2$)

由图 12(b)和图 12(c)可以看出, 随着舵角及漂角的改变, 螺旋桨泄涡产生了严重的偏向, 船

体底部生成的纵向尾涡使得螺旋桨的整体涡结构更为复杂。图 12(b)示出了最大正向漂角的螺旋

浆三维涡结构,此时,舵角偏向左舷 10° 。从中可以看出,梢涡强度有所减弱,而来自船体的纵向尾涡则穿过桨盘面,与桨的随边涡和桨毂发生融合,进而形成强度较高的两股泄涡并向后方传递。图12(c)示出了最大负向漂角的螺旋桨三维涡结构,此时,舵角偏向右舷 10° 。与最大正向漂角涡结构不同,梢涡强度有所增大。且由于最大漂角指向船体右舷的幅值相对较大,导致船体纵向尾涡尺度更大,右侧部分梢涡与船体纵向尾涡在下方产生了融合,从而形成了一股尺度较大的向后发展的泄涡。显然,对于因操纵运动而产生的复杂涡系结构问题,需要选择合适的加密区域,采用精细的网格来捕捉完整的螺旋桨后涡流场的演变,这就对实尺度涡流场计算提出了更高的要求。

4 结 语

本文基于重叠网格技术,采用商业软件 STAR-CCM+,对船-桨-舵一体的实尺度船舶的自航及10/10标准Z形操纵运动进行了直接模拟,结果显示实尺度KCS船的自航数值计算结果与试验值吻合良好,表明基于重叠网格技术进行实船自航计算是合理的。

然后,在此基础上给出了10/10标准Z形操纵一个周期内的船舶运动与水动力特性时历曲线,数值预报了最大艏向角、超越角及最大艏向角速度。计算结果表明,船舶运动在满足给定的换舵艏向角继而开始操舵这一过程中,艏向角速度与漂角均会出现峰值,且在此阶段船舶运动姿态最为剧烈。由于操纵运动的对象为单桨船,在螺旋桨的右旋运动作用下,船舶操纵运动及船舶水动力均呈现出非对称性。

最后,根据在不同时刻得到的流场信息,分析了自由面、船体边界层和涡结构的变化。分析结果表明,在船舶操纵运动过程中,迎浪面的凯尔文角较大,且在艏部出现了舭涡;艉轴处的伴流场因为漂角的改变会产生同向偏移;由于漂角的改变,螺旋桨产生的涡结构相比自航会更加复杂;桨叶梢部的螺旋形梢涡受到干扰,涡强度有所减弱,难以辨识;桨毂泄出的毂涡在与纵向尾涡融合后,涡尺度和强度会有所增大。因此,需要采用更加精细的网格与数值方法来捕捉。

本文针对实船操纵运动进行的直接模拟可以为实船操纵性能评估、船舶数字化设计及操纵手段的选择提供一定的参考。未来,还可针对实船与船模因雷诺数的差异而产生的尺度效应问题,

及其对船舶操纵性能的影响,开展更加深入、细致的研究。

参考文献:

- [1] 国际海事组织海上安全委员会. 船舶操纵性标准: MSC. 137(76)[S]. 伦敦: 国际海事组织海上安全委员会, 2002. Maritime Safety Committee of IMO. Standards for ship manoeuvrability: MSC. 137(76)[S]. London: Maritime Safety Committee of IMO, 2002 (in Chinese).
- [2] ITTC. Final report and recommendations to the 25th ITTC[C]//Proceedings of the 25th International Towing Tank Conference. Fukuoka: ITTC, 2008.
- [3] 王建华, 万德成. 船舶操纵运动CFD数值模拟研究进展[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(5): 813-824. WANG J H, WAN D C. CFD simulations of ship maneuvering motion[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2018, 39(5): 813-824 (in Chinese).
- [4] ORTOLANI F, VIVIANI M, TANI G, et al. Experimental investigation of single blade loads by captive model tests in pure oblique flow[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 196: 106789.
- [5] ORTOLANI F, TANI G, VIVIANI M, et al. Experimental investigation of single blade loads by captive model tests in pure oblique flow. Part II: propeller in-plane loads and preliminary comparison of single blade loads during transient phases[J]. *Ocean Engineering*, 2021, 234: 109149.
- [6] SANADA Y, ELSHIEKH H, TODA Y, et al. ONR tumblehome course keeping and maneuvering in calm water and waves[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 24(3): 948-967.
- [7] KIM D J, YUN K H, PARK J Y, et al. Experimental investigation on turning characteristics of KVLCC2 tanker in regular waves[J]. *Ocean Engineering*, 2019, 175: 197-206.
- [8] PENG W C, NI L Y, XIU P Q, et al. Experiment of ship maneuvering motion in muddy navigation area[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 621: 012157.
- [9] 罗伟林. 基于支持向量机方法的船舶操纵运动建模研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009. LUO W L. On the modeling of ship maneuvering motion by using supporting vector machines[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009 (in Chinese).
- [10] SONG C Y, ZHANG X K, ZHANG G Q. Nonlinear identification for 4-DOF ship maneuvering modeling via full-scale trial data[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2022, 69(2): 1829-1835.
- [11] 王慧婷, 毕毅. 基于体积力法的全附体KCS型船模PMM运动数值模拟[J]. *中国舰船研究*, 2016, 11(4): 29-37, 66.

- WANG H T, BI Y. Numerical simulation on planar motion mechanism of KCS ship model with a body-force propeller model[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2016, 11(4): 29–37, 66 (in Chinese).
- [12] ZHANG C L, LIU X J, WAN D C, et al. Experimental and numerical investigations of advancing speed effects on hydrodynamic derivatives in MMG model. Part I: $X_{T\dot{V}}$, Y_V , N_V [J]. *Ocean Engineering*, 2019, 179: 67–75.
- [13] SADAT-HOSSEINI H, WU P C, STERN F. CFD simulations of KVLCC2 maneuvering with different propeller modeling, verification and validation of ship maneuvering simulation method workshop[C]//Workshop on Verification and Validation of Ship Maneuvering Simulation Methods (SIMMAN 2014), 2014.
- [14] CARRICA P M, MOFIDI A, ELOOT K, et al. Direct simulation and experimental study of zigzag maneuver of KCS in shallow water[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 112: 117–133.
- [15] 王建华, 万德成. CFD 数值模拟船舶在波浪中的回转操纵运动 [J]. *中国舰船研究*, 2019, 14(1): 1–8.
WANG J H, WAN D C. CFD simulation of ship turning motion in waves[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2019, 14(1): 1–8 (in Chinese).
- [16] CASTRO A M, CARRICA P M, STERN F. Full scale self-propulsion computations using discretized propeller for the KRISO container ship KCS[J]. *Computers & Fluids*, 2011, 51(1): 35–47.
- [17] CAN U, DELEN C, BAL S. Effective wake estimation of KCS hull at full-scale by GEOSIM method based on CFD[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 218: 108052.
- [18] SHEN H L, OBWOGI E O, SU Y M. Scale effects for rudder bulb and rudder thrust fin on propulsive efficiency based on computational fluid dynamics[J]. *Ocean Engineering*, 2016, 117: 199–209.
- [19] SU Y M, LIN J F, ZHAO D G, et al. Influence of a pre-swirl stator and rudder bulb system on the propulsion performance of a large-scale ship model[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 218: 108189.
- [20] MENTER F R. Zonal two equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows[C]//Proceedings of the 23rd Fluid Dynamics, Plasmadynamics, and Lasers Conference. Orlando: AIAA, 1993.
- [21] 苏玉民, 林健峰, 赵大刚, 等. 实尺度船舶快速性数值模拟方法综述 [J]. *中国造船*, 2020, 61(2): 229–239.
SU Y M, LIN J F, ZHAO D G, et al. Review of numerical simulation methods for full-scale ship resistance and propulsion performance[J]. *Shipbuilding of China*, 2020, 61(2): 229–239 (in Chinese).
- [22] CHOI J K, KIM H T. An investigation on the effect of the wall treatments in RANS simulations of model and full-scale marine propeller flows[J]. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2020: 967–987.
- [23] 沈志荣. 船桨舵相互作用的重叠网格技术数值方法研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.
SHEN Z R. Development of overset grid technique for hull-propeller-rudder interactions[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014 (in Chinese).
- [24] SUN S, WANG C, GUO C Y, et al. Numerical study of scale effect on the wake dynamics of a propeller[J]. *Ocean Engineering*, 2020, 196: 106810.
- [25] SONG S, DEMIREL Y K, ATLAR M. Penalty of hull and propeller fouling on ship self-propulsion performance[J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 94: 102006.



(上接第 77 页)

- [10] 陈建华. 舰艇作战模拟理论与实践 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
CHEN J H. The theory and practice of naval combat simulation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002 (in Chinese).
- [11] ALPERS W, HENNINGS I. A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 1984, 89(C6): 10529–10546.
- [12] ALPERS W R, ROSS D B, RUFENACH C L. On the detectability of ocean surface waves by real and synthetic aperture radar[J]. *Journal of Geophysical Research:Oceans*, 1981, 86(C7): 6481–6498.
- [13] SHAFFER D A. Surface waves generated by submerged rankine ovoids starting from rest[R]. Washington, DC: David Taylor Model Basin, 1966.
- [14] 刘金芳, 毛可修, 张晓娟, 等. 中国海密度跃层分布特征概况 [J]. *海洋预报*, 2013, 30(6): 21–27.
LIU J F, MAO K X, ZHANG X J, et al. The general distribution characteristics of pycnocline of China Sea[J]. *Marine Forecasts*, 2013, 30(6): 21–27 (in Chinese).
- [15] 江伟, 李培, 高文洋, 等. 西北太平洋密度跃层特征分析 [J]. *海洋预报*, 2010, 27(2): 15–21.
JIANG W, LI P, GAO W Y, et al. Pycnocline analysis on the Northwest Pacific Ocean[J]. *Marine Forecasts*, 2010, 27(2): 15–21 (in Chinese).