

DOI: 10.16076/j.cnki.cjhd.2023.05.002

基于动态重叠网格的滑翔艇耐波性计算

张晨亮^{1,2,3}, 刘小健^{2,3}, 王金宝^{2,3}, 万德成^{1*}

(1. 上海交通大学 船海计算水动力学研究中心(CMHL)船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200030, E-mail: dcwan@sjtu.edu.cn;

2. 喷水推进技术重点实验室, 上海 200011

3. 中国船舶及海洋工程设计研究院 上海市船舶工程重点实验室, 上海 200011)

摘要: 滑翔艇航行时其重力主要靠水动力升力支撑, 因其具有阻力小且速度快等优点, 目前在娱乐、救援及军事等多种场景中被广泛应用。滑翔艇在航行过程中处在滑翔状态, 纵摇和升沉运动幅值较常规排水型船舶较高, 尤其在波浪中航行时会出现周期性出水和入水跳跃的现象。该文使用自主开动态重叠网格技术模块, 结合开源 CFD 库 OpenFOAM 对 Generic Prismatic Planing Hull (GPPH)深 V 型滑翔艇进行了耐波性数值模拟, 发现: 数值计算结果与模型试验结果对比吻合较好, 使用动态重叠网格技术能在不影响网格质量的前提下较好地捕捉滑翔艇大幅纵摇和升沉运动; 艇体周期性出水和入水会在船底部产生周期性的大幅值砰击压力, 该文数值计算也可给出合理的压力预报结果。

关键词: 滑翔艇; 重叠网格; 波浪中运动; 砰击压力

中图分类号: TU476

文献标志码: A

Computation of Seakeeping Performance of Planing Craft Based on Dynamic Overset Grids

Zhang Chenliang^{1,2,3}, Liu Xiaojian^{2,3}, Wang Jinbao^{2,3}, Wan Decheng^{1*}

(1. Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;

2. Science and Technology on Water Jet Propulsion Laboratory, Shanghai 200011, China;

3. Shanghai Key Laboratory of Ship Engineering, Marine Design and Research Institute of China, Shanghai 200011, China)

Abstract: Planing craft is a type of marine vehicle, whose weight is predominantly supported by hydrodynamic lift, rather than hydrostatic lift (buoyancy), which results in lower resistance compared with displacement ships at high speed. Because of this characteristic, the planing craft now has widespread applications in recreational and military use as well as for search and rescue operations. The planing craft is in a planing state during navigation, and the amplitude of pitch and heave motion is higher than that of conventional displacement ships. Especially when navigating in waves, periodic get out of water and water entry jumps may occur. In this paper, an in-house dynamic overset grid technology module, combined with the open-source CFD library OpenFOAM, is used to conduct numerical simulation of the seakeeping performance of the General Prismatic Planning hull (GPPH) deep V-shaped planing hull. The numerical calculation results are in good agreement with the model test results, the use of dynamic overset grid technology can effectively capture the significant pitch and heave movements of the planing boat without affecting the grid quality; At the same time, the periodic get out of and entry water of the hull will generate significant periodic slamming pressure at the bottom of the ship. This numerical calculation can also provide reasonable pressure prediction results.

Key words: Planing craft; Overset grid; Seakeeping; Slamming pressure

0 引言

滑翔艇是利用滑翔平板的原理, 在高速航行时依靠水动力升力支撑重力, 减少艇体湿表面积从而达

到减阻的目的。由此可见, 滑翔艇具有航速高且在高航速下阻力小的优点, 因此滑翔艇在军用鱼雷艇、导弹艇、炮艇、猎潜艇、工作艇、侦察艇和布雷艇等以及民用游艇、赛艇和交通艇等均有广泛的应用。随着滑翔艇应用场景的增加, 其水动力性能的研究也显得越来越重要, 但由于滑翔艇具有航行

收稿日期: 2023-04-18 **修改稿收到日期:** 2023-04-30

作者简介: 张晨亮(1990—), 男, 博士。

速度高、运动幅值大以及非线性强等特点,针对滑行艇的性能预报方法没有常规排水型船舶可靠。本文研究目的即基于自主研发的CFD软件,探索适用于滑行艇快速性和耐波性的数值模拟方法。

针对滑行艇数值预报方法,近年来国内外学者也进行了大量的研究。王硕等^[1]基于RANS VOF方法对滑行楔形体进行数值模拟研究,讨论了影响高速滑行艇CFD预报精度的主要因素,对比了结构化网格和非结构切割体网格的预报精度,结果表明:两种类型的网格均能给出合理结果,网格类型对CFD预报精度影响不大。同时,王硕等^[2]还对某特种水面飞行器的快速性能进行了预报并与模型试验结果比较,发现预报精度可以达到10%左右,基本符合工程设计和应用的要求。但其只考虑了滑行艇固定姿态的情况,并未考虑滑行艇运动过程中的姿态变化,因此也未对计算中的动网格技术进行探究。然而,航行中运动姿态的捕捉也是滑行艇性能预报的一个重点和难点。

孙源等^[3]对比了4种滑行艇阻力预报的半经验半理论方法,并与Star-CCM+软件数值预报结果和模型试验结果进行了对比,结果表明:在大部分航速下,Star-CCM+都能给出精确的阻力预报结果,半经验半理论方法误差较大,但也能满足前期设计要求。孙源等^[3]使用传统变形动网格技术捕捉滑行艇运动,发现:当滑行艇姿态变化大时,网格质量受到影响,导致运动预报误差较大。类似地,邵文勃等^[4]也使用Star-CCM+软件,基于传统变形动网格技术对某滑行艇进行了数值模拟,讨论了 y^+ 值对滑行艇阻力模拟精度的影响,得出结论:在低航速下 $y^+=50$ (与常规排水型船舶一致)即可得精确预报结果,但在高航速下 $y^+=150$ 方可得到更精确的预报结果,可以看出 y^+ 值对航速变化较敏感,同时也显著影响数值预报精度。同样是基于Star-CCM+软件的变形网格模块,孙华伟等^[5]采用给定船体初始纵倾角的方法,巧妙地减少了网格变形,提高了预报精度,该方法在高速工况下的计算结果精度也在8%以内,提出对于高速滑行艇而言,第一层网格高度取值推荐为 $200 < y^+ < 300$ 。李晓文等^[6]基于Star-CCM+软件,使用变形动网格技术模拟了滑行艇在波浪中的运动,计算值与船模试验值在升沉和

纵摇曲线上的变化趋势基本一致,但由于变形网格的限制相对误差较大。

随着商业软件的普及,越来越多的研究人员使用重叠网格方法开展滑行艇水动力性能研究工作^[7-10]。丁江明等^[11]使用Star-CCM+软件,利用重叠网格方法捕捉滑行艇运动过程中的大幅度姿态变化,研究网格参数,如边界层网格分布、边界层网格厚度及表面网格尺度等因素对计算结果的影响,为滑行艇数值模拟网格生成策略提供了参考,同时还指出传统VOF方法由于无法精确捕捉高速滑行艇飞溅现象,因此数值预报阻力偏小。王硕等^[1-2]利用Star-CCM+ VOF Wave模块和重叠网格模块对某滑行艇波浪中的运动进行了模拟,发现数值预报结果可以准确地捕捉到滑行艇航行过程中的自由液面形状(飞溅效果)以及滑行艇的升沉和纵摇运动时历,可在工程设计中为设计者提供大量参考数据。王慧等^[12]基于CFD方法,应用重叠网格技术对某滑行艇阻力、姿态及兴波进行了模拟,其计算航速覆盖滑行艇排水阶段到滑行阶段,发现:各个阶段的阻力与兴波计算结果都与模型试验测量值吻合良好;由于使用了重叠网格技术,滑行艇姿态预报与试验值吻合良好,在高航速下相对误差较大,但能满足工业应用要求。

综合来看,数值模拟滑行艇水动力性能的一个关键是滑行艇运动的模拟。使用重叠网格方法是一个有效的解决方案,不仅可以精确捕捉滑行艇运动,而且网格质量不会因滑行艇姿态变化而受到影响,进而保证了数值计算精度及其稳定性。国外学者如Luca等^[13]和Sukas等^[14]通过对比变形网格方法和重叠网格方法对滑行艇进行一系列的数值模拟研究,也得到上述结论,Doustdar等^[15]也使用重叠网格技术成功捕捉到了滑行艇的“海豚运动”现象。

为开展滑行艇水动力性能预报,本文基于开源CFD库OpenFOAM平台,实现重叠网格技术的开发,将重叠网格模块与RANS求解器相结合,形成适用于滑行艇快速性和耐波性预报的CFD软件。

1 动态重叠网格方法

重叠网格方法是将计算模型中的每个部分单独划分网格再组装在一起,以实现数值计算中的空

间离散。组装后, 各部分网格之间存在重叠部分, 因此被称之为重叠网格。计算中, 重叠网格需进行“挖洞”操作, 即去除物面内部的单元和多余的重叠单元, 而后计算各网格的连接信息, 即“找点”, 进而利用连接信息在网格间进行“插值”运算, 使得每套网格可以在重叠区域边界进行数据的交换, 以完成整个流场的求解。因此, 重叠网格研发的要点是“挖洞”、“找点”和“插值”算法的实现。

本文重叠网格方法基于辅助背景网格实现, 即建立辅助笛卡尔网格并与计算网格形成相互映射关系, 这样的分治思想有效提高了重叠网格方法的计算效率。在“挖洞”运算中, 利用辅助笛卡尔网格建立洞映射, 即将每个笛卡尔划分为位于物面“外部”、“内部”和“边缘”三种。“外部”的网格单元均非洞单元, “内部”的网格单元均为洞单元, 再对物面“边缘”的网格单元进行遍历搜索, 判断网格是否为洞单元, 从而完成“挖洞”运算。本文在洞映射的建立过程中采用了泛洪算法及任意二叉树的数据结构。“找点”运算同样基于辅助笛卡尔网格, 基于任意二叉树数据结构进行搜索运算, 找到每个网格单元的贡献单元, 最终根据单元分辨率确定边界单元及流场单元等单元类型。“插值”运算利用“找点”运算中得到的贡献单元, 建立了Inverse Distance Weight, 3次多项式等插值格式可以根据实际问题选择。完成“挖洞”、“找点”和“插值”运算后就实现了重叠网格方法的核心, 进一步可将重叠网格方法与RANS方程求解器相结合, 建立CFD求解器。

2 数值方法

2.1 控制方程

求解滑翔艇问题涉及水气两相流非定常不可压黏性流体, 该问题求解采用的控制方程为不可压缩的两相流RANS(Reynolds-Averaged Navier-Stokes)方程

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot [\rho(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\mathbf{U}] = \\ -\nabla p_d - \mathbf{g} \cdot \mathbf{x} \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{U}) + f_\sigma \end{aligned} \quad (2)$$

式中: \mathbf{U} 为速度矢量; \mathbf{U}_g 为计算网格移动速度矢量; ρ 为流体密度, 本文中为空气或水的密度; \mathbf{g} 为重力加速度; \mathbf{x} 为流体位置; p_d 为流体动压力, $p_d = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$; μ 为有效动力黏性系数, $\mu = \rho \nu$, 其中 ν 为运动黏性系数; f_σ 为两相流模型中的表面张力项。

控制方程中的未知量压力和速度是相互耦合的, 通过PISO(pressure implicit with splitting of operator)算法实现速度和压力的解耦; 使用带有人工压缩技术的VOF(volume of fluid)方法求解水气两相, 其中物相分数输运方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot [(\mathbf{U} - \mathbf{U}_g)\alpha] + \nabla \cdot [\mathbf{U}_r(1 - \alpha)\alpha] = 0 \quad (3)$$

式中: α 为物相体积分, 其值大小代表每一个网格单元中水所占的体积百分比; \mathbf{U}_r 为实现水、气界面压缩的速度场, 其值通过水、气界面速度通量计算得到。控制方程离散时间项采用隐式Euler格式, 对流项采用二阶迎风格式, 扩散项采用中心差分格式。Marco等^[16]讨论了不同湍流模型对滑翔艇数值预报精度的影响, 发现SST $k-\omega$ 模型可给出精确的整体量(阻力和运动等)预报结果, 因此本文采用SST $k-\omega$ 湍流模型。

本文使用速度入口加区域松弛造波和消波技术的开源数值波浪库waves2Foam^[17]造波。该方法通过在控制方程中添加源项, 实现数值造波和消波功能, 同时可有效避免数值波浪反射对造波入口产生的影响。

2.2 重叠网格方法与CFD求解器结合

重叠网格方法与CFD求解器的结合主要包括两项工作: 第一是完成CFD求解器对网格的控制, 即根据求解的船体运动信息更新网格位置, 再根据最新的网格位置进行重叠网格“挖洞”、“找点”和“插值”运算; 第二是明确重叠网格的使用对系数矩阵的影响, 即根据重叠网格中的单元类型运算结果, 在系数矩阵中将“洞”单元“挖”去, 建立贡献单元与边界单元的“插值”关系。

本文实现了dynamicOversetFvMesh类型, 其组合了overset类型和mymotionSolver类型, 其中: mymotionSolver类型实现了六自由度运动计算功

能, 可计算船体受到水动力作用后的运动情况; `overset`类型即本文编写的重叠网格软件接口, 可调用重叠网格模块完成“挖洞”、“找点”和“插值”运算。`dynamicOversetFvMesh`类型UML如图1所示。

`dynamicOversetFvMesh`类型`update`函数不仅调用`motionSolver`计算网格运动信息, 还在网格发生运动后调用`overset`进行网格更新后的“挖洞”、“找点”和“插值”运算, 返回最新的DCI信息。

`dynamicOversetFvMesh`实现了 `sendMesh` 和 `calculateDCI`两个成员函数, 其作用分别是将计算网格信息发送至重叠网格类型实例`os_`, 以及调用重叠网格类型进行DCI运算。

为实现在CFD计算中根据重叠网格运算结果及插值信息对线性方程组系数矩阵进行修改, 本文实现了`oversetFvPatchField`类型, 该类型类似于CFD运算中的边界条件类, 包含 `manipulateMatrix` 和 `evaluate`两个接口成员函数, 其中: `manipulateMatrix`成员函数的作用是根据重叠网格DCI信息对方程组系数矩阵进行修改; `evaluate`成员函数的作用是根据重叠网格DCI信息对计算得到的流场值进行修正。`oversetFvPatchField`类型UML如图2所示。

至此, 本文实现了重叠网格方法与CFD求解器相结合, 后续滑行艇水动力性能预报将基于该求解器展开。

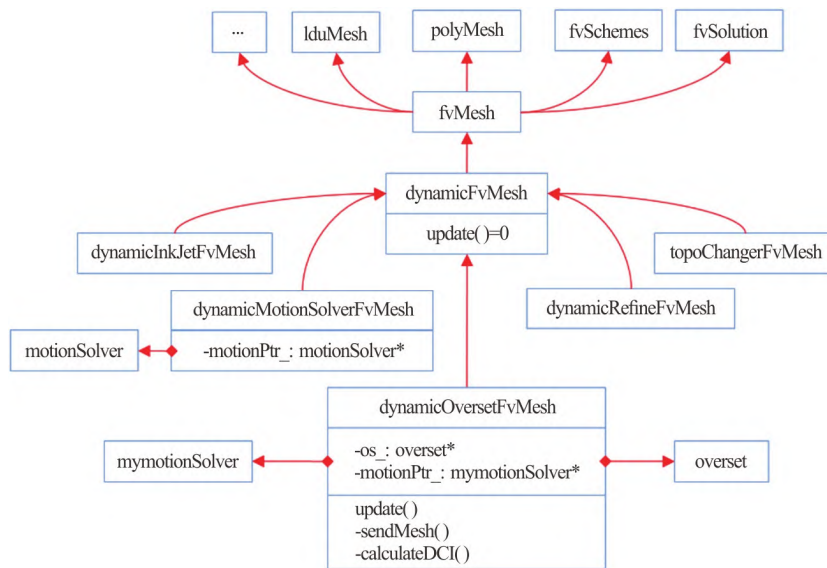


图 1 (网上彩图) 动网格类 UML 图
Fig.1 (Color online) UML chart of the dynamicOversetFvMesh class

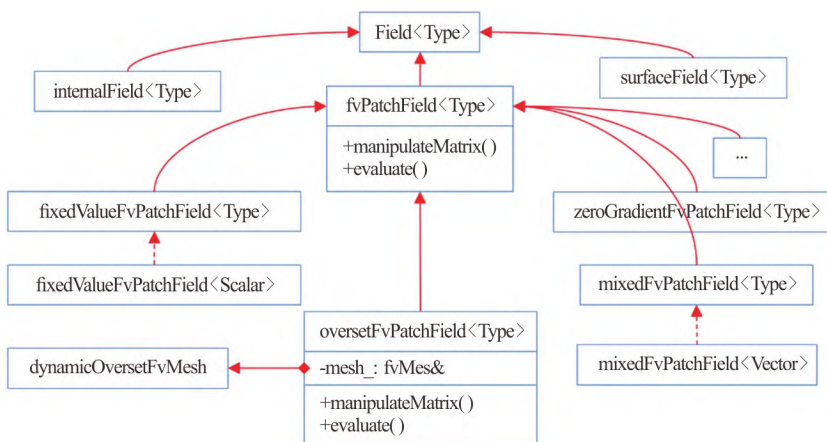


图 2 (网上彩图) 重叠网格边界类 UML 图
Fig.2 (Color online) UML chart of the oversetFvPatchField class

3 计算模型及算例配置

3.1 计算模型及工况

本文选取美国海军水面作战中心(NSWCCD)设计的GPPH(Generic Prismatic Planing Hull)滑翔艇, 该模型主尺度如表1所示。NSWCCD水池对该滑翔艇进行了快速性及耐波性模型试验^[18-19], 并进行了不确定度分析及数值计算对比验证。

表 1 GPPH 船型试验模型主尺度
Table 1 Parameters of the GPPH hull

参数/单位	数值
船长/m	2.41
吃水/m	0.087 3
排水量/kg	102
重心纵向位置(距尾封板) /m	0.843 9
重心垂向位置(距基线) /m	0.137 9
初始纵倾/(°)	0.127
纵向惯性半径/m	0.454 2
Deadrise 角/(°)	18

本文基于自主研发的支持动态重叠网格技术的CFD求解开展GPPH滑翔艇耐波性计算, 计算工况与模型试验工况保持一致, 如表2所示。

表 2 GPPH 耐波性试验工况
Table 2 Test conditions of the GPPH hull

航速 /kn	Froude 数 Fr	波长/船长 λ/L	波高/波长 H/λ	遭遇周期 T/s
14.8	1.567	2.87	1/52	0.64
17.5	1.852	2.87	1/52	0.57

3.2 计算模型及工况

本文计算工况航速较高, 为避免滑翔艇兴波反射造成的数值误差, 计算域设置相对较大, 如图3所示。入口为波浪入口条件, 距船首1倍船长, 并设置有造波松弛区域; 下边界和左右边界采用无穷远边界条件, 距滑翔艇中纵剖面1.5倍船长, 由于滑翔艇高航速状态下兴波角会显著小于Kelvin角, 左右边界几乎不会兴波, 因此无需很远; 出口采用自由出流边界条件, 距离船尾4倍船长, 设有松弛消波边界, 防止波浪反射; 计算域上边界采用总压力边界条件, 保证上边界总压力与大气压一致。

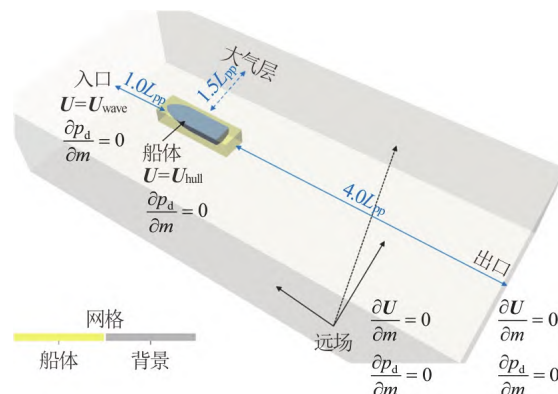


图 3 (网上彩图) 计算域示意图
Fig.3 (Color online) Computational domain

图4给出了本论文滑翔艇数值模拟的计算网格图, 采用重叠网格技术, 其中船体网格数量为170万, 背景网格数量450万, 其中背景网格在自由面及与船体网格重叠区域进行加密, 保证对数值波浪及船体兴波的精确捕捉及流场数据插值精度; 船体网格在滑翔艇折边线和尾封板等区域进行局部加密, 保证对几何外形的精确捕捉。

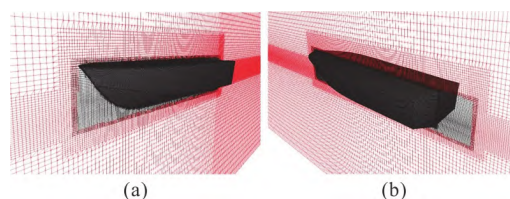


图 4 (网上彩图) 计算网格图
Fig.4 (Color online) Computational grids

4 计算结果分析

本文开展GPPH滑翔艇耐波性计算, 主要对滑翔艇在波浪中运动、加速度及砰击压力进行预报, 并与模型试验结果对比, 验证数值方法的可靠性。

图5给出了两个航速下滑翔艇运动时历数值预报结果与模型试验结果的对比情况, 其中图5(a)和图5(b)为14.8 kn航速预报结果, 图5(c)和图5(d)为17.5 kn航速预报结果, 图5(a)和图5(c)为升沉预报结果, 图5(b)和图5(d)为纵摇预报结果, 可以看到: 相较于试验结果, 数值预报纵摇运动幅值偏大, 最大相对误差在10%, 升沉预报结果误差相对较小, 小于10%; 对于滑翔艇波浪中运动的数值预报结果, 运动负方向幅值与试验值均吻合良好, 误差主要出现在正方向幅值上, 整体误差小于10%, 满足工程

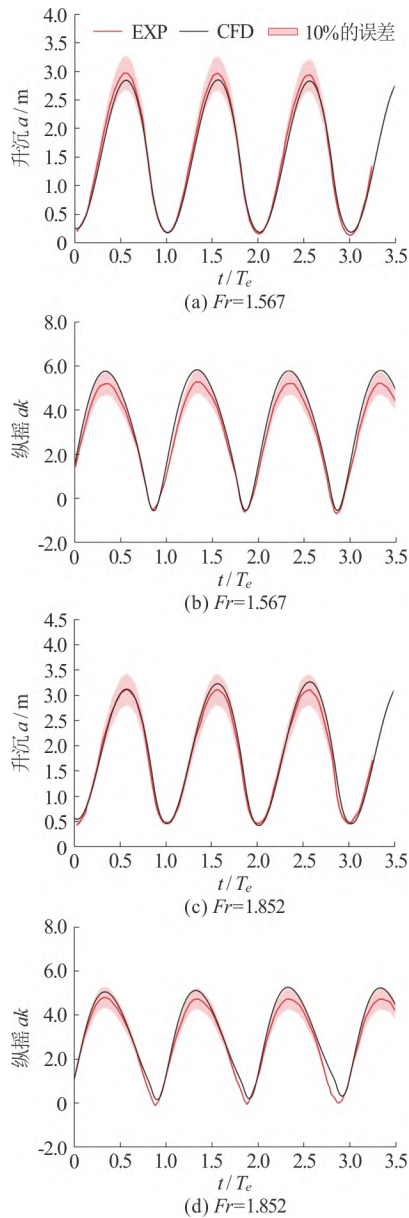


图5(网上彩图) GPPH滑翔艇波浪中运动数值预报结果与试验值对比(其中 a 为波幅, k 为波数)
Fig.5 (Color online) Comparison of numerical prediction results and experimental measurements of motion in waves of the GPPH planing craft
(a : wave amplitude, k : wave number)

设计需求,且已经达到了国内外先进水平。

图6给出了14.8 kn工况下一个波浪周期内滑翔艇的瞬时状态,可以看到数值预报方法较好地捕捉到:滑翔艇遇到波峰抬首、出水的过程,在空中滑翔并埋首落入波谷处,同时在船首发生砰击。

图7给出了GPPH滑翔艇船首加速度时历数值预报与模型试验结果的对比,可以看出数值预报结果与模型试验结果在周期和相位上吻合较好,数值预报加速度幅值相对较小,相对误差在10%左右,

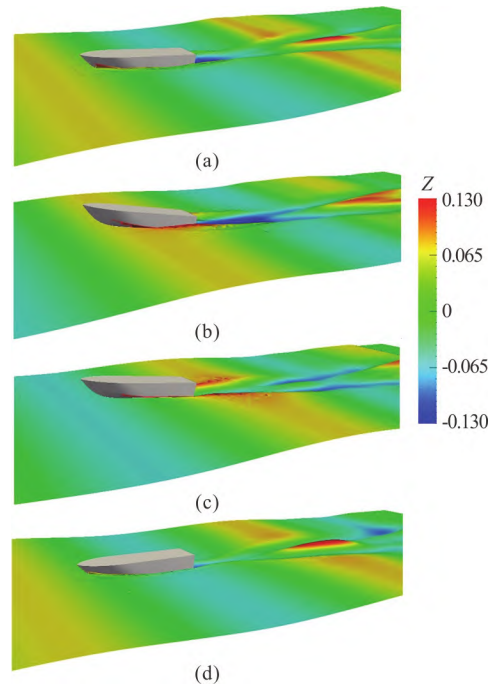


图6(网上彩图) GPPH波浪中不同时刻运动状态($Fr=1.567$)
Fig.6 (Color online) Motion states at different times of the GPPH hull in waves ($Fr=1.567$)

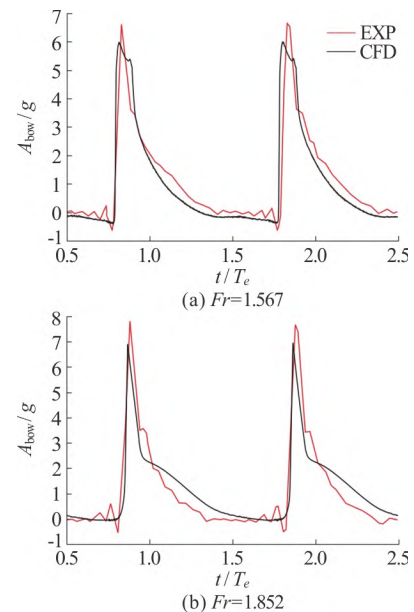


图7(网上彩图) GPPH波浪中船首加速度
Fig.7 (Color online) Bow acceleration of the GPPH hull in waves

整体而言数值计算结果是可靠的。从加速度幅值来看,滑翔艇首部在波浪中的最大加速度可以达到 $7g\sim 8g$,这对于实际作业是不利的,也是滑翔艇设计中需要重点关注的。

此外,本文还对比了滑翔艇底部砰击压力,试验与数值计算中压力测点布置如图8所示。图9给出

了P21和P13两个压力测点砰击压力数值结果与试验测量结果的对比: 从周期相位来看, 数值计算结果与模型试验结果吻合较好; 从幅值来看, 数值计算结果无法准确预报出压力峰值, 相对偏小; 压力的变化时历也有较大的不同。目前, 数值计算砰击压力的模拟还不够精确, 需进一步考虑湍流模型和空气可压缩性等问题以精确模拟砰击压力值。

图10给出了一个周期内滑行艇出水到入水过程中压力场的变化情况, 可以看出: 首先, 船首和船底在空气中, 随着落入水中的瞬间, 船底砰击压力达到峰值, 对应图9砰击压力的第一个峰值; 随后, 船底部压力迅速变小, 对应P21测点压力值迅速变小, 但可以看到在船首还存在高压区, 即P13测点砰击压力并不会迅速变小, 而是缓慢下降; 直到滑行艇再次出水, 船首和船底压力又降为最小值。

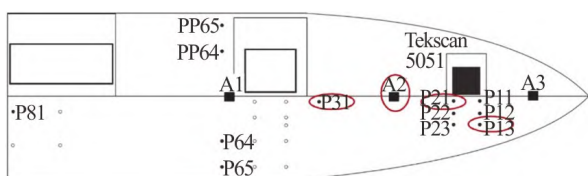


图8 (网上彩图) 砰击压力测量压力传感器布置图^[19]
Fig.8 (Color online) Layout of pressure sensors for slamming pressure measurement^[19]

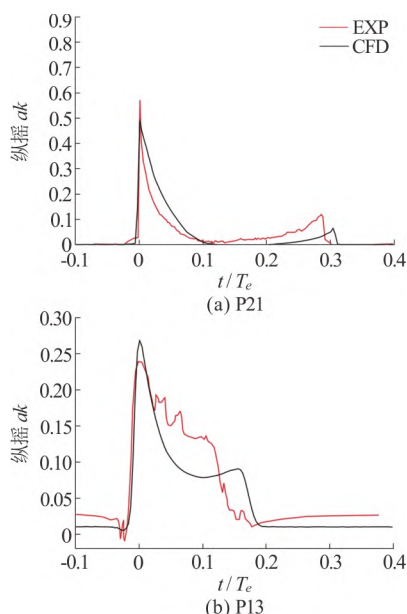


图9 (网上彩图) 砰击压力数值模拟结果与模型试验值对比 (其中 a 为波幅, k 为波数)
Fig.9 (Color online) Comparison between numerical simulation results of slamming pressure and experimental measurements
(a : wave amplitude, k : wave number)

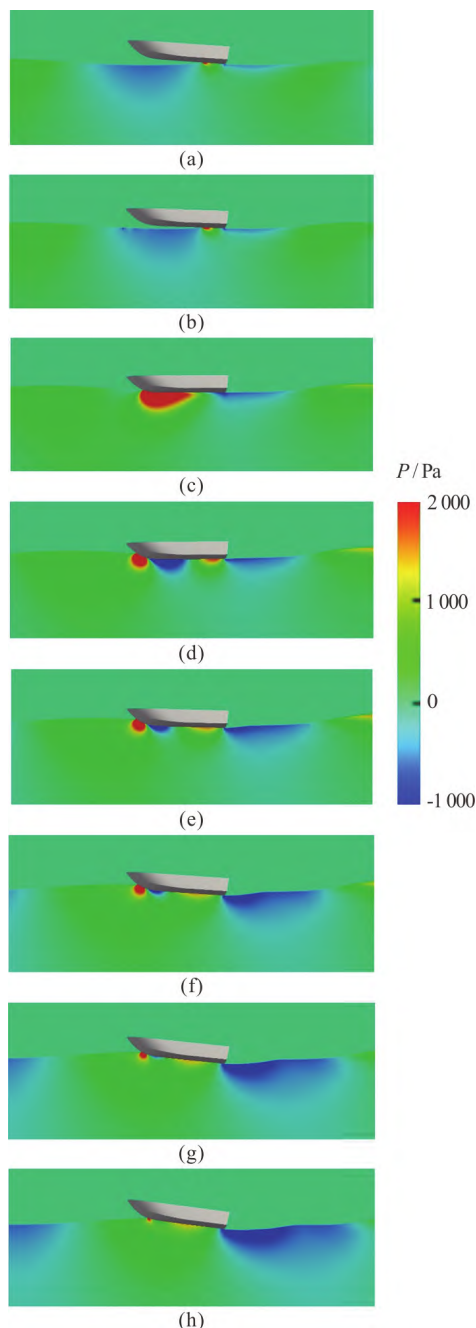


图10 (网上彩图) GPPH 波浪中不同时刻压力场变化($Fr=1.567$)
Fig.10 (Color online) Pressure field changes at different times ($Fr=1.567$)

由此可以看出, 本文的数值预报结果虽然在砰击压力幅值和细节预报上还有一定差距, 但整体过程捕捉较合理, 可在滑行艇耐波性预报和滑行艇设计工作中发挥一定作用。

5 结论

本文使用自主开发动态重叠网格技术模块, 结合开源 CFD 库 OpenFOAM 对 Generic Prismatic

Planing Hull (GPPH)深V型滑艇进行了耐波性数值模拟并与模型试验结果对比分析。发现针对滑艇在波浪中运动幅值大,并伴随周期性出入水现象,重叠网格方法可以有效地避免传统动网格方法由于网格变形带来的数值误差,比较精确地预报滑艇在波浪中的升沉和纵摇运动,运动幅值相对误差在10%以内;同时数值模拟可以准确地捕捉到滑艇周期性出入水现象,船首加速度预报结果与试验值误差在一个重力加速度以内;船首入水时抨击压力幅值、相位数值预报结果与试验值吻合良好,可以满足滑艇初步设计阶段精度需求。

参 考 文 献:

- [1] 王硕, 苏玉民, 庞永杰, 等. 高速滑艇 CFD 精度研究 [J]. 船舶力学, 2013, 17(10): 1107-1114.
- [2] 王硕, 苏玉民, 杜欣. 滑艇静水直航及波浪中运动的数值模拟 [J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 119-126.
- [3] 孙源, 卢晓平, 李井煜, 等. 滑艇阻力计算方法对比研究 [J]. 中国舰船研究, 2019, 14(1): 27-32.
- [4] 邵文勃, 马山, 段文洋, 等. 基于 CFD 技术的滑艇静水阻力计算 [J]. 船舶工程, 2019, 41(9): 41-45+137.
- [5] 孙华伟, 马伟佳, 朱江波. 影响滑艇阻力数值计算的网格因素研究 [J]. 中国造船, 2015, 56(2): 170-178.
- [6] 李晓文, 林壮, 郭志群, 等. 速滑艇阻力性能 RANS 计算中网格影基于 Star-CCM+的滑艇水动力性能模拟计算 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(S2): 133-137.
- [7] 邹劲, 姬朋辉, 孙寒冰, 等. 网格因素对三体滑艇阻力计算影响探究 [J]. 船舶, 2016, 27(3): 8-14.
- [8] 凌宏杰, 王志东. 高速滑艇“海豚运动”现象的实时数值预报方法 [J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(1): 106-110.
- [9] 邹劲, 韩晓坤, 张元刚, 等. 倒 V 型槽道滑艇船型的水动力性能研究 [J]. 船舶, 2017, 28(6): 13-20.
- [10] 邹劲, 马晶晶, 姬朋辉, 等. 槽道参数对倒 V 型槽道滑艇阻力性能的影响 [J]. 船舶, 2018, 29(2): 7-14.
- [11] 丁江明, 江佳炳, 秦江涛, 等. 高速滑艇阻力性能 RANS 计算中网格影响因素 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(6): 1065-1071.
- [12] 王慧, 朱仁传, 杨云涛, 等. 基于 CFD 的滑艇兴波与姿态模拟分析 [J]. 中国造船, 2020, 61(3): 1-14.
- [13] Luca F-D, Mancini S, Miranda S, et al. An extended verification and validation study of CFD simulations for planing hulls [J]. *Journal of Ship Research*, 2016, 60(2): 101-118.
- [14] Sukas O-F, Kinaci O-K, Cakici F, et al. Hydrodynamic assessment of planing hulls using overset grids [J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 65: 35-46.
- [15] Doustdar M-M, Kazemi H. Effects of fixed and dynamic mesh methods on simulation of stepped planing craft [J]. *Journal of Ocean Engineering and Science*, 2019, 4: 33-48.
- [16] Marco A-D, Mancini S, Miranda S, et al. Experimental and numerical hydrodynamic analysis of a stepped planing hull [J]. *Applied Ocean Research*, 2017, 64: 135-154.
- [17] Jacobsen N. waves2Foam Manual [Z]. 2017.
- [18] Judge C, Mousaviraad M, Stern F, et al. Experiments and CFD of a high-speed deep-V planing hull-Part I: Calm water [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 96: 102060.
- [19] Judge C, Mousaviraad M, Stern F, et al. Experiments and CFD of a high-speed deep-V planing hull-Part II: Slamming in waves [J]. *Applied Ocean Research*, 2020, 97: 102059.