

文章编号: 1000-4882 (2020) S2-0010-08

船海结构物复杂界面流动的精细化模拟

刘 成, 胡一丁, 杨玉肖, 万德成*

(上海交通大学 船海计算水动力学研究中心 (CMHL))

海洋工程国家重点实验室 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要

复杂海洋环境中自由面与船海结构物相互作用, 对其水动力性能等产生重要影响。随着计算硬件水平的发展, 精细化模拟逐渐成为分析复杂两相流动机理的重要手段。本研究采用自适应网格并行计算方法对自由面、物体表面等关键区域进行局部加密, 大幅提高了模拟效率。采用低耗散数值格式离散两相流动控制方程, 采用几何方法重构两相流界面, 采用高阶浸入边界法模拟流-固界面问题。在上述基础上开发了船海界面流动数值模拟求解器。计算结果表明, 该求解器能够对简单几何结构物(平板)和复杂几何结构物(潜艇)的兴波、尾流等问题进行高保真、高效率的数值预报。上述方法为建构新一代水动力学高性能数值模拟软件提供了可行的技术途径。

关键词: 船海结构物; 两相流; 复杂流场; 自由面; 高性能计算

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

0 引 言

船舶与海洋工程中存在着形式多样的复杂界面流动现象, 如船首兴波破碎与砰击产生气体卷吸和液体飞溅; 船尾流动分离与自由面相互作用引起剧烈的水气掺混等。界面流动对船海结构物的水动力性能、流噪声、尾流可探测性等产生影响, 制约了船舶和海洋装备性能。现有的试验手段^[1-3]难以实现对界面流动现象的完整观测。随着数值方法和计算机浮点运算能力的进步, 精细化模拟^[4-5]已成为分析复杂两相流动的有效手段。精细化模拟方法对数值格式耗散控制水平和网格分辨率有较高的要求, 增加了计算负载。本研究采用自适应网格并行计算方法对自由面、物面、大速度梯度等关键区域进行局部加密, 大幅提高了模拟效率。采用包括多矩有限体积法 (CIP-CSL)^[6-7]在内的多种低耗散数值格式和大密度比、高鲁棒性算法离散两相流动控制方程。针对两相流界面的捕捉, 采用 CLSVOF^[8]等多种几何方法重构自由面。针对流-固界面, 采用守恒格式的高阶浸入边界法^[9]和壁面函数, 重构物面附近流场。

基于上述方法开发求解器, 针对简单几何结构物(平板、方艏)的高 Froude 数流动问题开展精细化数值模拟研究, 验证数值方法与求解器的精度和可靠性。在此基础上, 开展 KCS 高速船、SUBOFF 潜艇(半潜工况)等典型船海结构物的精细化仿真, 对兴波破碎、尾流演化等现象开展系统的研究,

收稿日期: 2020-10-14; 修改稿收稿日期: 2020-11-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51879159, 51979160, 11902199); 国家重点研发计划项目 (2019YFB1704200; 2019YFC0312400); 长江学者奖励计划 (T2014099); 上海市浦江人才计划 (A 类) (19PJ1406100); 工信部高技术船舶数值水池专项课题 (2014-22/09)

为船海结构物水动力性能优化设计、尾流特性、噪声预报等提供数值模拟的技术基础。

1 数值计算方法

1.1 流动控制方程

考虑积分形式的两相流动控制方程, 如式 (1) 所示。

$$\begin{aligned} \int_{\Gamma} \mathbf{u} \mathbf{n} dS &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \mathbf{u} dV + \int_{\Gamma} \rho \mathbf{u} (\mathbf{u} \mathbf{n}) dS &= \int_{\Gamma} p \mathbf{n} dS + \int_{\Gamma} \boldsymbol{\tau} \mathbf{n} dS + \mathbf{F}_s + \mathbf{F}_g \end{aligned} \quad (1)$$

式中, \mathbf{u} 和 p 分别代表速度矢量和压力。对于牛顿流体, 剪应力张量 $\boldsymbol{\tau} = \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T)$ 。控制体 Ω 被法向量为 \mathbf{n} 的边界 Γ 所围成。流体密度 ρ 和粘性系数 μ 由体积分数 C 确定,

$$\rho = \rho_l C + \rho_g (1 - C), \quad \mu = \mu_l C + \mu_g (1 - C) \quad (2)$$

式中, 下标 l 和 g 分别代表液体和气体相。 \mathbf{F}_g 和 \mathbf{F}_s 分别为体积力 (重力) 项和表面张力项。本研究涉及的大部分水动力学问题可以忽略 \mathbf{F}_s 。

采用分步法 (fractional step method) 对控制方程的压力和速度解耦。方程 (1) 的数值求解由以下 3 步组成。

(1) Step 1, 计算预测步速度矢量 \mathbf{u}^n :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \rho \mathbf{u}^n dV = - \int_{\Gamma} \rho \mathbf{u}^{n-1} (\mathbf{u}^{n-1} \cdot \mathbf{n}) dS + \int_{\Gamma} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{n} dS + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}_s + \frac{1}{\rho} \mathbf{F}_g \quad (3)$$

(2) Step 2, 求解压力 Poisson 方程:

$$\frac{1}{\rho} \int_{\Omega} \nabla p^n \cdot \mathbf{n} dS = \frac{1}{\Delta t} \int_{\Gamma} \mathbf{u}^n \cdot \mathbf{n} dS \quad (4)$$

(3) Step 3, 速度修正得到满足不可压缩条件的 \mathbf{u}^n :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \Delta \mathbf{u}^n dV = \frac{1}{\rho} \int_{\Gamma} p^n \mathbf{n} dS \quad (5)$$

式中, $\Delta \mathbf{u}^n$ 为由压力梯度提供的修正量。方程 (3) 的数值离散方法可采用低耗散、无震荡格式 (ENO、WENO^[10]等) 进行, 本研究所有算例均使用 5 阶 WENO 格式。

求解器采用交错网格定义物理量 (单元面心: \mathbf{u} ; 体积中心: p, ρ, C 等)。在 WENO 格式中通过引入多组低阶插值模板, 根据光滑因子来确定每组插值模板的权系数。通过权系数降低间断区的插值贡献, 在光滑区实现高阶线性重构。在保证重构精度的同时达到控制非物理数值震荡的目的。对于粘性项和 Laplacian 算子的数值离散采用二阶中心差分形式。为保证流场处处满足连续性条件, 采用迭代最小余量法 (GMRES) 及代数多重网格 (algebra multi-grid) 预条件子 (preconditioner) 方法求解关于压力的线性方程组。本研究涉及的线性方程组求解收敛性条件均为 $\varepsilon \leq 10^{-6}$ 。

1.2 两相流界面

需要求解的 VOF 函数输运方程如式 (6) 所示:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Gamma(\mathbf{x})}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \Gamma(\mathbf{x}) &= 0 \\ C_{i,j,k} &= \frac{1}{V} \int_{\Omega_{i,j,k}} \Gamma(\mathbf{x}) d\mathbf{x} \end{aligned} \quad (6)$$

对于一般 3 维问题, 为了计算简便, 沿 3 个坐标方向分别得到离散方程 (split dimension method)。尽管连续性条件可以在 3 个方向上以积分形式满足, 但无法沿一个方向满足^[11]。因此在实际计算中方程 (6) 需要变换为

$$\frac{\partial \Gamma(\mathbf{x})}{\partial t} + \nabla(\Gamma(\mathbf{x})\mathbf{u}) - \Gamma(\mathbf{x})\nabla\mathbf{u} = 0 \quad (7)$$

通过时间积分并考虑维数分裂法, 得到以相分数更新的方法, $C'_{i,j,k} = F^- - F^+ + F^0$, 其中:

$$\begin{aligned} F^- &= \frac{1}{\Delta x} \int_0^\tau F \left(x_{i-\frac{1}{2},j,k}, t \right) u_{i-\frac{1}{2},j,k} dt \\ F^+ &= \frac{1}{\Delta x} \int_0^\tau F \left(x_{i+\frac{1}{2},j,k}, t \right) u_{i+\frac{1}{2},j,k} dt \\ F^0 &= C_{i,j,k}^{n-1} + \frac{1}{\Delta x} \int_0^\tau \int_0^{\Delta x} F(x,t) \frac{\partial u}{\partial x} dx dt \end{aligned} \quad (8)$$

本研究中, 数值通量的计算采用基于线性几何重构 (PLIC, D. Gueyffier 等^[12]) 的半拉格朗日方法进行。若采用线性几何重构方法, 则通量 F^- , F^+ 和 F^0 代表直线或平面与六面体围成的几何区域。PLIC 方法涉及两类几何问题的计算: (1) 通过平面方程参数 α 和法向量 \mathbf{n} 计算相体积分, 定义为 $C(\mathbf{n}, \alpha)$; (2) 问题 1 的反问题, 即通过相体积分 C 和法向量 \mathbf{n} 确定平面方程参数 α , 定义为 $\alpha(\mathbf{n}, C)$ 。密度函数 ρ 的更新可由相体积分确定。为保证数值模拟过程的稳定性, 可采用 Gaussian 核函数等对相体积分进行平滑处理, 得到 \hat{C} , 再由 \hat{C} 对密度函数进行更新。

1.3 流-固界面

本研究采用符号距离函数 (signed distance) 方法追踪物体^[6, 9]。

$$\phi(\mathbf{X}, 0) = \text{sign}(\min(\|\mathbf{X} - \mathbf{X}_r\|))$$

因此, 物面 ($\phi = 0$) 可被隐式地确定。在计算过程中, 为避免频繁地重构符号距离函数, 可采用随动背景网格插值映射的方式快速地更新符号距离函数。

根据符号距离函数的定义可以将网格点分为 3 类: 流体点、固体点、力点。其中两类边界条件 (Dirichlet、Neumann 边界条件) 可以在力点通过流场重构的方式施加。为保证流场重构的精度和计算效率, 本研究采用移动最小二乘插值来重构物面附近速度场^[6-7]。

$$q(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^m p_i(\mathbf{x}) c_i = \mathbf{p}^T(\mathbf{x}) \mathbf{c}$$

式中, $\mathbf{p}^T(\mathbf{x})$ 为正交基函数向量, 可由插值精度来确定函数基。 \mathbf{c} 为待定插值系数, 可以由最小残差方法确定:

$$\sum_{j=1}^n W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_j) \mathbf{p}(\mathbf{x}_j) \mathbf{p}^T(\mathbf{x}_j) \mathbf{c} = (W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_1) \mathbf{p}(\mathbf{x}_1), W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_2) \mathbf{p}(\mathbf{x}_2), \dots, W(\mathbf{x} - \mathbf{x}_n) \mathbf{p}(\mathbf{x}_n)) \begin{pmatrix} q_1 \\ \dots \\ q_n \end{pmatrix} = 0 \quad (9)$$

式中, W 为权函数, 本研究中使用三次样条函数确定。方程 (9) 形成线性系统可由 Gauss 消去法求解。

1.4 自适应网格

高精度 (低耗散) 格式的使用对提高求解器对细微流动结构的捕捉能力至关重要。传统高阶无震荡格式 (WENO) 等构造复杂, 计算量较大。对复杂界面流动问题, 通常需要在自由面附近加密网格。

本研究采用自适应网格^[13]对自由面、物体表面、流场大梯度区域等流场关键区域进行网格自适应加密。在使用高精度格式的同时, 提高网格利用率和计算效率。求解器所使用的自适应网格系统基于分布式并行计算系统开发。计算区域由一系列循环嵌套的网格块覆盖组成, 所有的网格块拥有相同的几何逻辑结构 (包括块边界单元层数、长宽比率、有效计算区域网格数等)。因此, 程序的编写可以基于逻辑一致的网格块进行。所有的网格块由二叉树 (2D) / 八叉树 (3D) 数据结构索引, 需要加密时, 网格块沿每个维度方向作二等分分裂。需要注意的是, 尽管按上述方式定义的块可以重叠覆盖整个计算区域, 但只有最外层网格块分配物理内存。因此, 整个自适应网格系统更接近于非结构化网格拓扑^[6-7]。

本研究所涉及的全部算例的加密准则均依据自由面位置 ($\epsilon \leq C \leq 1 - \epsilon$, $\epsilon = 10^{-10}$) 及物面位置 ($|\phi| \leq 2\Delta h$, Δh 为网格间距) 来确定。

自适应加密过程中, 不可避免地带来频繁的块边界数据通信。由于 5 阶 WENO 使用 5 个格子点模板, 因此每个块至少需要填充 3 层边界虚拟单元。如果虚拟单元恰好位于计算区域边界, 可根据边界条件填充虚拟单元; 如果虚拟单元所在区域被更精细的网格覆盖, 可以根据算术平均方法填充虚拟单元; 若虚拟单元所在区域被更粗的网格覆盖, 可根据守恒插值方法填充虚拟单元。

2 算例结果讨论

2.1 平板破波

高速行驶的船舶会在船首出现破浪翻卷和破碎, 且随着速度增加而加剧。该现象对船舶的噪声性能、水动力学性能有重要的影响, 是船型设计需要考虑的重要因素。本研究采用网格自适应加密方法, 研究静水中结构物高速拖曳产生的兴波破碎问题。为了简化问题, 在本算例中针对平板破波开展精细化模拟, 对兴波高度、尾流特性等开展定性、定量分析, 并与试验数据对比^[14-15], 以验证算法和程序的有效性。用浸入边界法来模拟移动的平板, 可以有效避免复杂的网格生成问题。

平板特征尺寸如下所述。长度: 0.782 m, 高度: 0.5 m, 吃水: 0.2 m。平板拖曳速度: $U = 1.5, 1.75, 2, 2.25, 2.5$ m/s ($Fr = 0.8 \sim 1.8$)。半进水角 $\alpha_E = 10^\circ \sim 30^\circ$ 。外倾角 $\gamma = 0^\circ \sim 15^\circ$ 。数值模拟显示, 在进水角较小的情况, 会在艏部附近形成稳定的艏波破碎形态。图 1 所示显示了稳定的艏波破碎过程, 包括翻卷波的形成, 抨击自由面, 形成飞溅, 产生二次抨击, 以及最终达到稳定状态。

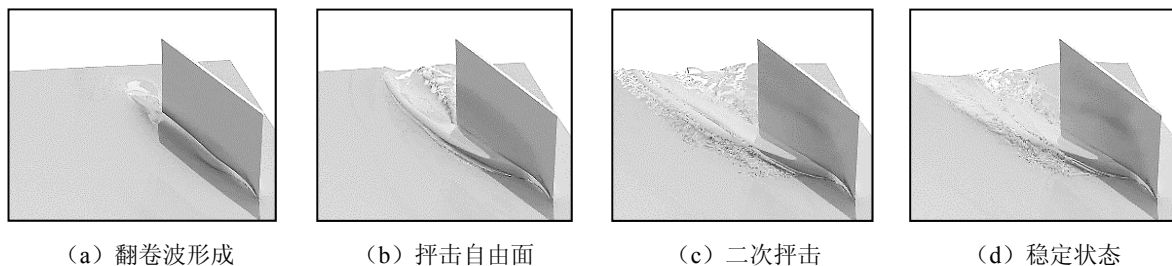


图 1 船首波破碎演化过程

图2和图3分别给出了不同进水角下,最大波高 $(Z_b g / U^2) \cos \alpha_E / \tan \alpha_E$ 和波峰与平板前缘无量纲距离 $X_b g / U^2$ 的数值预报、理论预测和试验数据^[14],其中 U 为来流速度, g 为重力加速度。

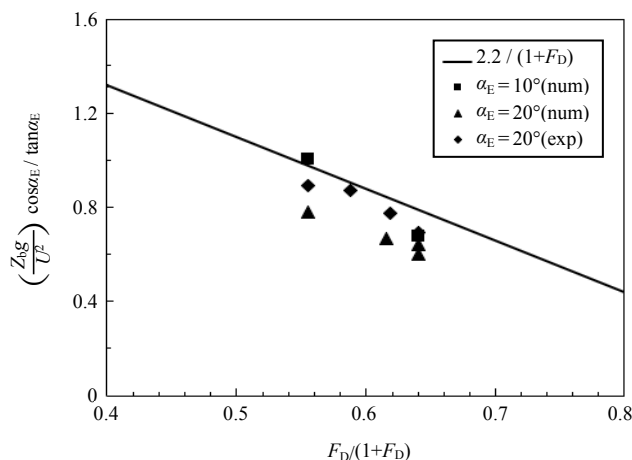


图2 归一化参数 $(Z_b g / U^2) \cos \alpha_E / \tan \alpha_E$ 的理论预测(实线)、数值模拟($\alpha_E = 10^\circ, 20^\circ$, $\blacksquare, \blacktriangle$)和试验数据($\alpha_E = 20^\circ$, \blacklozenge)的比较

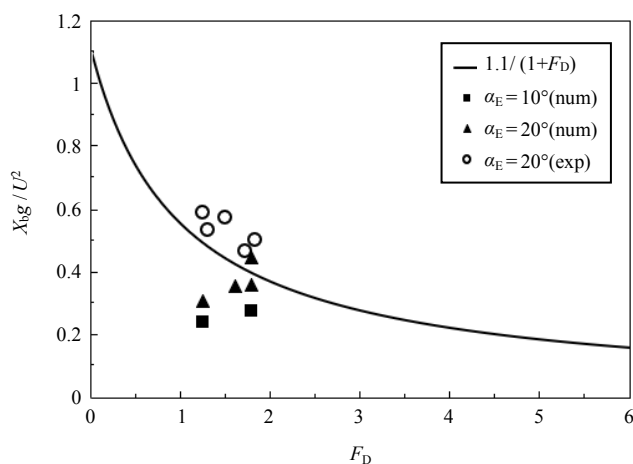
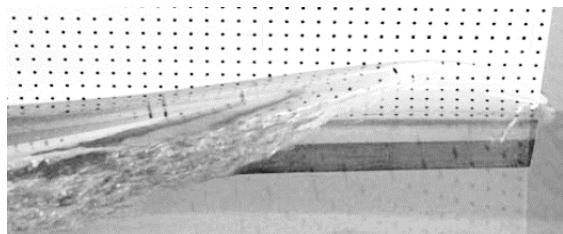
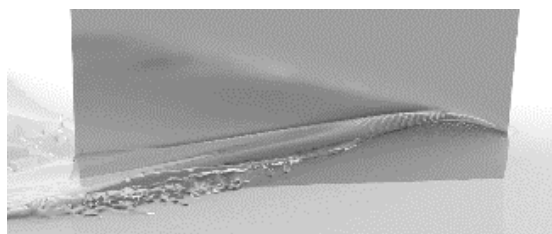


图3 归一化参数 $X_b g / U^2$ 的理论预测(实线)、数值模拟($\alpha_E = 10^\circ, 20^\circ$, $\blacksquare, \blacktriangle$)和试验数据($\alpha_E = 20^\circ$, \circ)的比较

计算结果显示,改变进水角,会得到不同的破波形式。在不同进速下,自由面数值仿真与模型试验吻合较好,如图4所示。此外,当进水角小于 25° 时,在波峰翻卷过后,会形成一种稳定的船首波破碎状态;反之,船波将在波峰到来之前出现不稳定破碎。



(a) $\alpha_E = 15^\circ$, 水池试验



(b) $\alpha_E = 15^\circ$, 数值计算

图4 考虑两种进水角度的平板边缘附近波浪翻卷破碎状态的比较

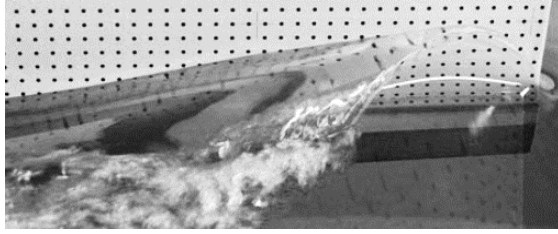
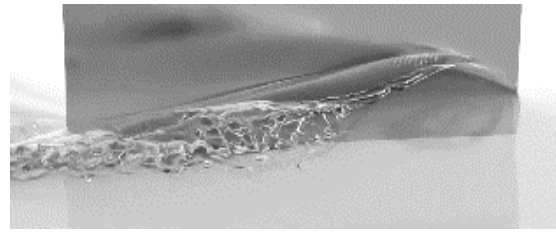
(c) $\alpha_E = 20^\circ$, 水池试验(d) $\alpha_E = 20^\circ$, 数值计算

图 4 续 考虑两种进水角度的平板边缘附近波浪翻卷破碎状态的比较

2.2 SUBOFF 艇首破波和艇尾尾流

潜艇等细长圆柱形结构体在水面航行时的兴波现象与普通船舶有很大的不同, 其兴波破碎诱因、破碎区域分布等也与普通船舶有较大差异^[6]。在兴波破碎过程中, 自由面剧烈变化, 通常伴随着气液两相湍流混合。在波浪破碎过程中需要捕捉射流、飞溅、流动分离、卷吸等复杂流动现象, 同时需要模拟气泡、液滴等小尺度结构, 对数值方法提出了很高的要求。

本算例对 $Fr = 0.28$, 处于水面航行状态的 SUBOFF 模型艇在不同吃水工况下的自由面演化进行数值仿真试算。该模型艇尺寸如下, 艇长 $L = 4.356 \text{ m}$, 艇体直径 $D = 0.508 \text{ m}$, 艇体高度 $H = 0.714 \text{ m}$ (含指挥围壳)。计算过程中对自由面、艇体表面区域进行动态自适应网格加密。

图 5 展示了求解器在两种吃水深度 ($0.93D$ 和 $0.74D$) 下的波浪破碎区域已演化至相对稳定的状态, 与实际航行及试验观察到的状态基本吻合。经初步分析, 得到如下结论: (1) SUBOFF 等细长圆柱形结构体水面航行兴波初生区域有 3 个, 分别在靠近艇首的外侧区域、艇中部区域、艇尾区域。(2) 兴波破碎的原因主要包括波浪翻卷和波浪卷吸。(3) 在相同的 Fr 数下, 模型艇吃水深度对兴波和尾流演化有重要影响。图 5(a) 显示, 在 $Fr = 0.28$ 工况下, 当吃水较深时, 模型艇水面兴波区域包括艇首、艇中和艇尾。图 5(b) 显示当吃水较浅时, 模型艇水面兴波只在艇中和艇尾产生。此外, 在吃水较浅情况下, 艇中的兴波角角度更大, 艇尾的兴波高度在吃水较深的情况下波面更高。在试算完成后, 将开展一系列模型艇高保真数值模拟, 给出阻力、气泡卷吸体积分数、尾流扩散区域的统计数据。

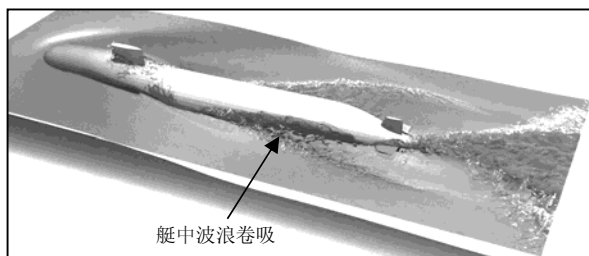
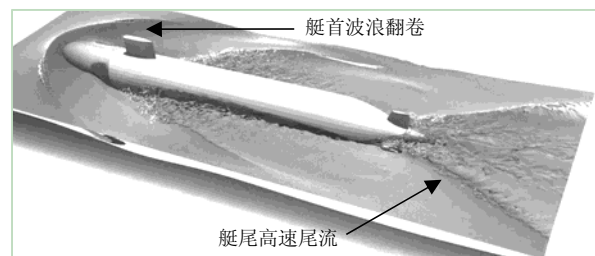
(a) 吃水 $0.93D$ (b) 吃水 $0.74D$

图 5 水面状态下的潜艇兴波

3 结 语

通过这项研究初步形成了大密度比气液两相流动高鲁棒模拟新技术, 提高了剧烈两相流动模拟的数值稳定性。将该方法与自适应网格加密技术相结合, 实现了对高 Froude 数平板、潜艇的兴波、尾流等精细化数值模拟, 并对波高、波浪破碎区域分布等展开了初步分析统计。

致 谢

本文的工作得到国家自然科学基金项目(51879159, 51979160, 11902199), 国家重点研发计划项目(2019YFB1704200, 2019YFC0312400), 长江学者奖励计划(T2014099), 上海市浦江人才计划(A类)(19PJ1406100); 工信部高技术船舶数值水池专项课题(2014-22/09)的资助。在此表示感谢!

参 考 文 献

- [1] DONG R R, KATZ J, HUANG T T. On the structure of bow waves on a ship model [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1997, 346: 77-115.
- [2] WANIEWSKI T A, BRENNEN C E, RAICHLIN F. Measurements of air entrainment by bow waves [J]. *Journal of Fluids Engineering*, 2001, 123(1): 57-63.
- [3] WANIEWSKI T A, BRENNEN C E, RAICHLIN F. Bow wave dynamics [J]. *Journal of Ship Research*, 2002, 46(1): 1-15.
- [4] LUBIN P, GLOCKNER S. Numerical simulations of three-dimensional plunging breaking waves: generation and evolution of aerated vortex filaments [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2015, 767: 364-393.
- [5] DOMMERMUTH D G, SUSSMAN M, BECK R F, et al. The numerical simulation of ship waves using Cartesian grid methods with adaptive mesh refinement [J]. *arXiv preprint arXiv:1410.1942*, 2014.
- [6] LIU C, HU C. Block-based adaptive mesh refinement for fluid-structure interactions in incompressible flows [J]. *Computer Physics Communications*, 2018, 232: 104-123.
- [7] LIU C, HU C. An adaptive multi-moment FVM approach for incompressible flows [J]. *Journal of Computational Physics*, 2018, 359: 239-262.
- [8] SUSSMAN M, PUCKETT E G. A coupled level set and volume-of-fluid method for computing 3D and axisymmetric incompressible two-phase flows [J]. *Journal of Computational Physics*, 2000, 162(2): 301-337.
- [9] LIU C, HU C. An efficient immersed boundary treatment for complex moving object [J]. *Journal of Computational Physics*, 2014, 274: 654-680.
- [10] SHU C W. High-order finite difference and finite volume WENO schemes and discontinuous Galerkin methods for CFD [J]. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 2003, 17(2): 107-118.
- [11] LOPEZ J, HERNANDEZ J, GOMEZ P, et al. An improved PLIC-VOF method for tracking thin fluid structures in incompressible two-phase flows [J]. *Journal of Computational Physics*, 2005, 208(1): 51-74.
- [12] GUEYFFIER D, LI J, NADIM A, et al. Volume-of-fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for three-dimensional flows [J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, 152(2): 423-456.
- [13] BERGER M J, OLIGER J. Adaptive mesh refinement for hyperbolic partial differential equations [J]. *Journal of Computational Physics*, 1984, 53(3): 484-512.
- [14] NOBLESSE F, HENDRIX D, FAUL L, et al. Simple analytical expressions for the height, location, and steepness of a ship bow wave [J]. *Journal of Ship Research*, 2006, 50(4): 360-370.
- [15] NOBLESSE F, DELHOMMEAU G E R, GUILBAUD M, et al. Simple analytical relations for ship bow waves [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2008, 600: 105.
- [16] MOONESUN M, GHASEMZADEH F, KOROL Y, et al. Technical Notes on the Near Surface Experiments of Submerged Submarine [J]. *International Journal of Maritime Technology*, 2016, 5: 41-54.

High Fidelity Numerical Simulation of Violent Free Surface Flow for Ship and Marine Structures

LIU Cheng, HU Yiding, YANG Yuxiao, WAN Decheng*

(Computational Marine Hydrodynamics Lab (CMHL), State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract

In the present study, the strategy of parallel adaptive mesh refinement is applied to enhance computational efficiency. Critical mesh regions such as free surface and body surface region are refined accordingly. The low-dissipative scheme, geometric volume of fluid method and immersed boundary method are assembled to a parallel solver. The present solver is capable in providing numerical prediction with high fidelity and high efficiency for the hydrodynamic analysis of simple (i.e. thin plate) or complex (i.e. submarine) geometry. These numerical methods are promised to develop a new generation of computational hydrodynamic software.

Key words: marine structure; two-phase flow; complex flow; free surface; high-performance computation

作者简介

刘 成 男, 1987 年生, 副教授, 博士生导师。主要从事船舶与海洋工程计算水动力学算法研究和软件开发工作。

胡一丁 男, 1998 年生, 博士研究生。主要从事船舶与海洋工程水动力学问题建模与精细化仿真模拟工作。

杨玉肖 男, 1998 年生, 硕士研究生。主要从事船舶与海洋工程水动力学问题精细化仿真模拟与数据处理工作。

万德成 男, 1967 年生, 长江学者特聘教授, 博士生导师。主要从事船舶与海洋工程水动力学、计算流体力学、船舶与海洋工程水动力学 CAE 软件、高性能计算等研究。

*通讯作者: 万德成