

文章编号: 1000-4882 (2022) 04-0159-08

虚拟流体方法在自由面流动问题中的应用

陈松涛, 赵伟文, 万德成*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 船海计算水动力学研究中心, 上海 200240)

摘 要

在诸如大密度比的水-气两相流动问题中, 压力在自由面处不连续。传统的模拟方法难以处理压力跳跃条件, 使得自由面处的压力梯度计算不准确, 并出现虚假速度。论文基于开源代码平台 OpenFOAM, 在船海水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 中引入虚拟流体方法, 自主开发了适用于大密度比两相流动的压力-速度修正模块, 并将其与 VOF 方法相结合, 在非结构化网格上准确模拟压力跳跃条件。斜坡流动和波浪传播问题中的计算结果表明, 采用虚拟流体方法能在自由面处获得清晰的压力突变, 并能有效改善界面附近存在虚假速度的状况。

关 键 词: 虚拟流体方法; 大密度比; 自由面流动; 压力跳跃条件; 软件 naoe-FOAM-SJTU

中图分类号: U661.1

文献标志码: A

0 引 言

与单相流动相比, 在两相流中自由面的引入使得界面附近的物理量如压力、密度、黏度等存在突变, 尤其是在水-气密度比大的流动中更为明显。目前许多主流计算流体力学 (CFD) 软件在利用 VOF (volume of fluid) 或 Level-set 方法求解两相流时, 往往将自由面附近的密度和黏度视为连续场, 依据相分数或距离函数对其进行加权平均 (在 Level-set 方法中指定用 Heaviside 函数光滑)。这样就不能模拟自由面上的压力跳跃, 还存在虚假速度 (spurious velocities) 等问题。

解决上述问题的一种有效方法是虚拟流体方法 (ghost fluid method, GFM)。该方法首先由 Fedkiw 等^[1]提出, 并将其应用于笛卡尔网格中的多相欧拉方程, 捕捉到了燃烧问题中的不连续性。随后, Kang 等^[2]将该方法应用于多相不可压缩层流流动中。Desjardins 等^[3]将 GFM 方法与 Level-set 方法结合, 在大密度比两相流动问题中获得很好的效果。Shin^[4]将 GFM 方法应用于非结构化网格中, 并在内波传播及其与浸没水翼相互作用的问题中得到验证。在船海水动力学领域, Huang 等^[5]针对曲线贴体网格在有限差分方法框架下将 GFM 方法和 Level-set 方法结合, 并在二维浸没凸块流动和 DTMB-5415 船模试验中进行验证。Queutey 等^[6]基于有限体积方法在任意非结构化网格中将 GFM 方法和 VOF 方法结合, 并在 Rayleigh-Taylor 不稳定性试验和 S60 船模试验中进行验证。Vukčević 等^[7]基于船海结构物大尺度的特征, 在忽略表面张力的假设下将 GFM 方法植入到开源计算流体力学代码平台 OpenFOAM 中, 实现了在自由面处压力和密度的突变, 有效改善了虚假速度问题, 并在二维斜坡流动和 KCS 船模阻力试验中进行了验证。需要指出的是, 在该研究中没有对流体的黏度作特殊处理, 仍然采用相分数加权平均的方法求解。Peltonen 等^[8]对动量方程中黏度的扩散项关于自由面进行了修正, 在处理黏性占主导的大

收稿日期: 2021-10-10; 修改稿收稿日期: 2022-07-14

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFB1704200); 国家自然科学基金项目 (52131102, 51879159)

密度比两相剪切流动中求解精度较高。

本文基于开源计算流体力学代码平台 OpenFOAM, 在船海水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 中引入虚拟流体方法, 自主开发了具有模拟界面压力跳跃条件功能的压力-速度修正模块。在此基础上, 对于以斜坡流动和波浪传播为代表的二维自由面流动进行数值模拟, 并在计算效率、流场细节等方面进行了比较和验证, 为今后推广应用于三维复杂问题提供技术基础。

1 数值方法及开发

1.1 控制方程

对于两相不可压缩黏性流动, 在 OpenFOAM 中采用的动量方程^[9-12]如下式所示:

$$\frac{\partial(\rho\mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\mathbf{U}\mathbf{U}) - \nabla \cdot (\mu_{\text{eff}}\nabla\mathbf{U}) = -\nabla p_d - \mathbf{g}\mathbf{x}\nabla\rho + f_\sigma \quad (1)$$

式中, ρ 为根据相分数 α 得到的加权平均密度, \mathbf{U} 为速度, p_d 为动压力, \mathbf{g} 为重力加速度, μ_{eff} 代表等效动力黏度, f_σ 代表表面张力项, $\nabla \cdot$ 为散度 (Divergence) 运算符, ∇ 为梯度 (Gradient) 运算符, $\mathbf{U}\mathbf{U}$ 遵循张量乘积运算法则。在船海水动力学问题中通常忽略表面张力的影响。在引入虚拟流体方法后, 动量方程如下式所示:

$$\frac{\partial\mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{U}\mathbf{U}) - \nabla \cdot (v_{\text{eff}}\nabla\mathbf{U}) = -\beta\nabla p_d \quad (2)$$

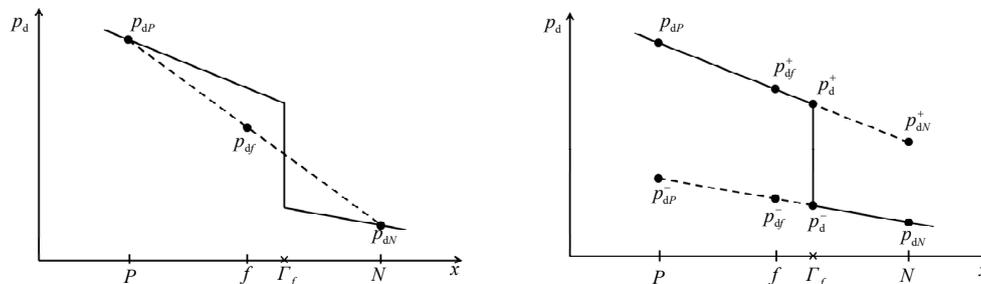
式中, β 为气相或水相密度的倒数, v_{eff} 为等效运动黏度, 具体推导参见文献[7]。

为了更精准地确定自由面的位置, 本文采用 OpenFOAM-v8 版本中基于分段线性界面重构 (piecewise linear interface calculation, PLIC) 的几何类 VOF 方法。其基本思想为通过单个平面将网格单元切分成两部分, 以满足每一时间步的初始相分数, 并将得到的相分数通量代入到输运方程中, 相关介绍可参见文献[13]。

1.2 数值离散

在 OpenFOAM 中基于有限体积方法 (FVM) 框架, 广泛采用二阶精度的线性插值格式, 如图 1(a) 所示。然而, 对于两相流中自由面 Γ_f 附近的网格单元, 若仍采用通常的线性插值格式对式 (2) 右端的压力梯度项离散, 则无法模拟界面处存在的压力跳跃, 从而产生数值误差。

为了解决这个问题, 在自由面附近的网格交界面 f 的面心值不再由相邻的网格单元 P 和 N 线性插值得到, 而是对应于干、湿网格单元有各自对应的值。以湿网格 P (相分数 $\alpha > 0.5$) 为例, 通过判断它与自由面的相对位置, 在线性外插后得到相邻的虚拟网格单元值 p_{dN}^+ , 最终得到用于离散湿网格 P 的面心值 p_{df}^+ 。



(a) 线性插值格式

(b) 考虑界面跳跃的插值格式

图 1 自由面附近不同插值格式示意图

1.3 数值开发

基于虚拟流体方法自主开发的压力-速度修正模块, 在求解流程上与 OpenFOAM 中广泛采用的 PISO (或 PIMPLE) 算法相同, 分为以下 3 步: (1) 构造动量方程; (2) 构造并求解压力泊松方程; (3) 通量修正及速度更新。现以该模块在船海水动力学求解器 naoe-FOAM-SJTU 的植入为例进行说明。

(1) 在模块 UEqn.H 中, 根据式 (2), 重新修改构造类型为 fvVectorMatrix 的动量方程矩阵 UEqn。

(2) 基于 OpenFOAM 中对拉普拉斯项和梯度项离散的 2 个类 gaussLaplacianScheme 和 gaussGrad, 根据图 1(b) 所示的原理, 派生 2 个新的类 GFMgaussLaplacianScheme 和 GFMgaussGrad, 生成考虑界面跳跃的数值离散格式库, 用于求解压力泊松方程。

(3) 在模块 pEqn.H 中, 针对真实和虚拟流体网格单元值之间差异造成的通量不守恒, 进行二次修正, 保证速度更新的准确性。

通过以上步骤开发的压力-速度修正模块, 保证了求解器原有顶层代码的完整性, 减少了模块植入所需要的工作量, 提高了计算效率。

2 数值验证

2.1 二维斜坡流动

为了验证基于虚拟流体方法自主开发的压力-速度修正模块, 本节选取文献[7-8]中的二维斜坡流动问题进行数值模拟。图 2 为计算域示意图。在初始时刻静止自由面位于 $y = 0$ 处, 在自由面以上为一种无黏流体, 且 $\rho_1 = 0.001 \text{ kg/m}^3$; 在自由面以下为另一种无黏流体, 且 $\rho_2 = 1 \text{ kg/m}^3$, 这与实际问题中的空气-水密度比相当。计算开始后, 自由面以下的无黏流体以 $U = 6 \text{ m/s}$ 的速度持续流入计算域, 由于底部斜坡的存在, 自由面会逐渐升高并最终趋于稳定。图 3 所示为计算网格, 总数为 $60 \times 48 = 2880$ 。

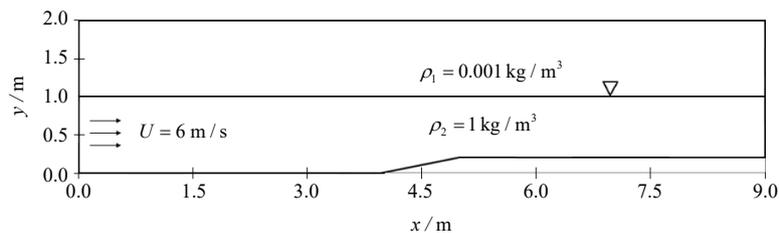


图 2 计算域

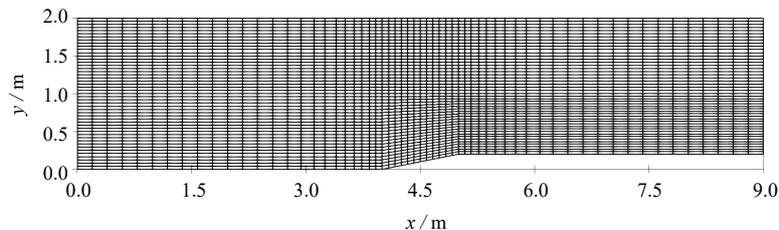


图 3 计算网格

在图 4 ~ 图 7 中分别展示了自由面稳定后的相分数场、动压力场、垂向动压力梯度场和速度场。为了更好地说明问题, 在保证其他设置相同的情况下选取了不采用虚拟流体方法的 interFoam 求解器进行对比, 而且在后处理中均直接展示网格单元的体心值 (未进行光滑处理)。从相分数来看, 由于二者采用的是相同的自由面捕捉方法, 得到的自由面形态没有明显的差异。从压力场来看, 与 interFoam 的解中两相之间区分度低的情况相比, naoe-FOAM-SJTU 在自由面处获得了锐利清晰的分界线。对压力场作进一步处理后, 可以看到用通常的线性插值格式无法显示的界面突变。interFoam 得到的垂向动压

力梯度场沿液面出现了异常分布（深色的条带状分布），其原因如图 1(a) 中的虚线所示，而 naoe-FOAM-SJTU 则在总体上获得了相对连续分布。从速度场来看，在来流速度较大的情况下，naoe-FOAM-SJTU 在自由面处获得了相对清晰的分布，而 interFoam 则在自由面上方观察到较为明显的虚假速度。通过二维斜坡流动的比较和验证，说明利用虚拟流体方法能够准确模拟自由面处的压力跳跃，还能够削弱虚假速度。

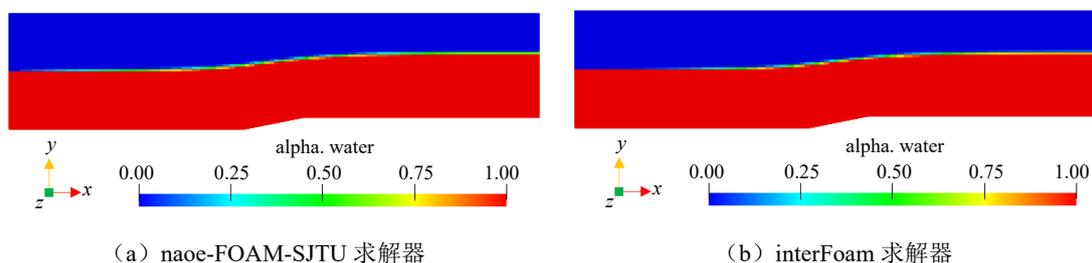


图 4 相分数场

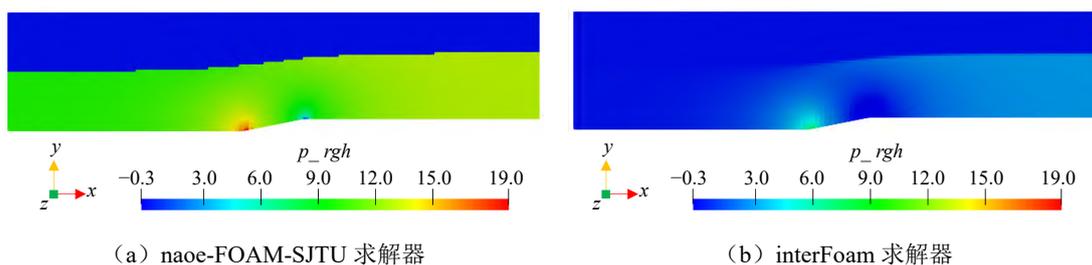


图 5 动压力场

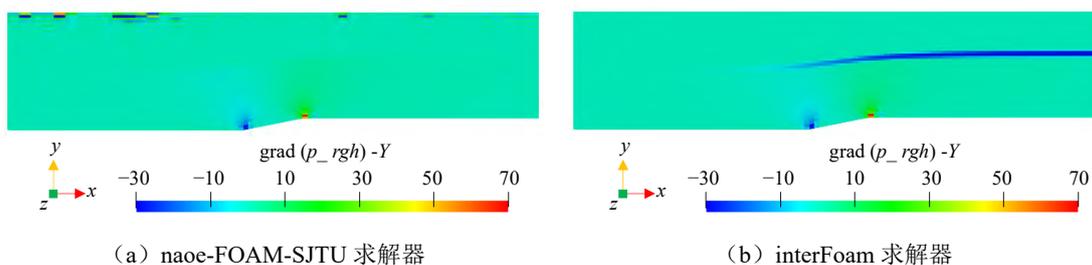


图 6 垂向动压力梯度场

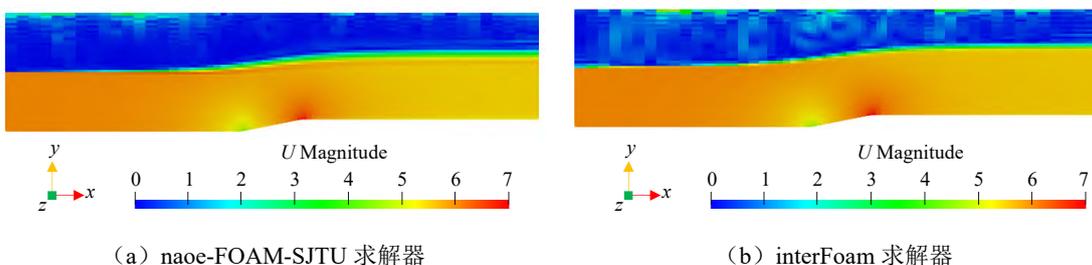


图 7 速度场

2.2 二维波浪传播

在本节中选取经典的二维波浪传播问题进行数值模拟。引入开源的第三方波浪工具箱 waves2foam，它具备速度入口式造波和在松弛区消波的能力。

选取的波浪理论模型为 Stokes 二阶规则波，波高 H 为 0.1 m，周期 T 为 1.5 s，深度 h 为 2 m。图 8 所示为计算域，在入口边界 1 倍波长内及出口边界 1.5 倍波长内均设置了松弛区。图 9 所示为计

算网格, 根据文献[14]的研究, 自由面附近的网格单元保持均匀, 设置为 $\Delta x = 1/100 \lambda$, $\Delta z = 1/20H$, 网格总数为 5.04×10^4 。数值模拟的时间总共为 60 s, 时间步长 $\Delta t = 1/300T$, 满足最大库朗数 (Courant-Friedrichs-Lewy number) 小于 0.25 的要求。

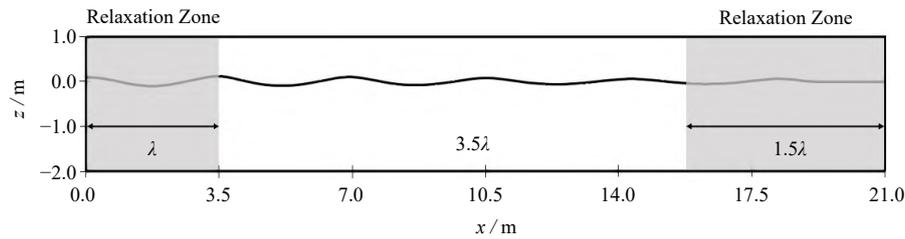


图 8 计算域

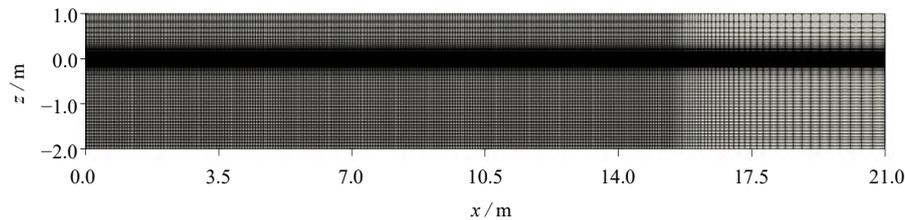


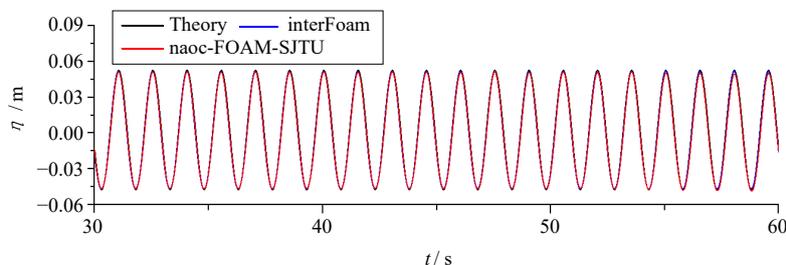
图 9 计算网格

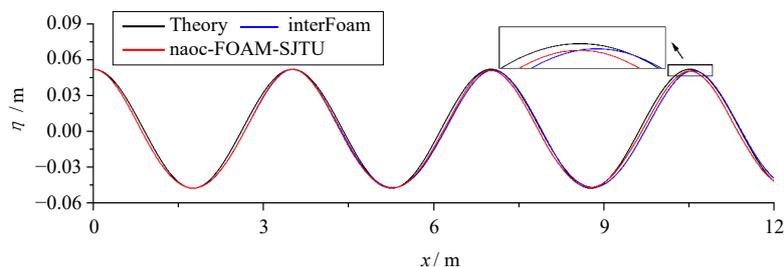
表 1 所示为使用 naoe-FOAM-SJTU 求解器和 interFoam 求解器计算效率的比较。考虑到今后三维复杂问题计算的需求, 在该算例中采用 8 核分块并行计算。二者使用的计算时间基本相当, 说明本文开发的压力-速度修正模块在有效提高流场求解精度的同时, 不会对计算效率产生显著的影响, 具备未来应用于工程实际问题的能力。

表 1 计算效率对比 (计算配置: i7-9700K, 8 Cores)

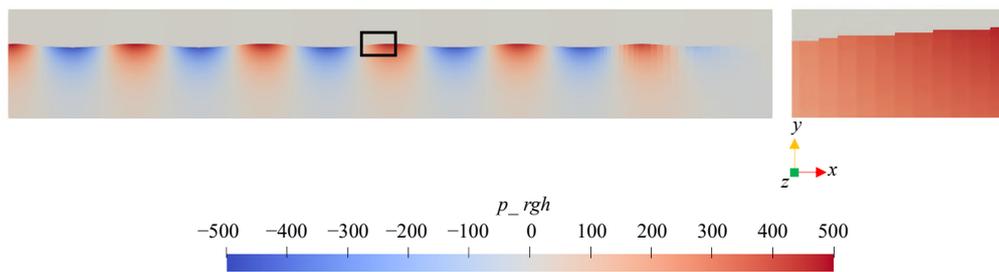
求解器	网格数/ 10^4	计算步数	计算时间/ s
naoe-FOAM-SJTU	5.04	12 000	2 602.44
interFoam	5.04	12 000	2 620.95

在图 10 中展示了在 $x = 6 \text{ m}$ 处波面时历曲线, 并给出了理论解作为参考。可以发现, 在经过长时间的模拟后, naoe-FOAM-SJTU 求得的解在相位与幅值上仍然与理论解吻合较好, 并与 interFoam 求解器的计算结果相当。在图 11 中展示了 $t = 30 \text{ s}$ 时计算域内的波面曲线。可以发现, 由于数值耗散等问题, naoe-FOAM-SJTU 求解得到的波动幅值随距离增大出现了一定的衰减, 但 interFoam 也发生了相同程度的衰减, 说明这不是采用虚拟流体方法导致的。在图 11 中的局部放大图显示 interFoam 求解器得到的波峰位置与理论解相比出现一定的偏离, 而 naoe-FOAM-SJTU 的结果则保持一致, 说明它在相位保持上具有一定的优势。

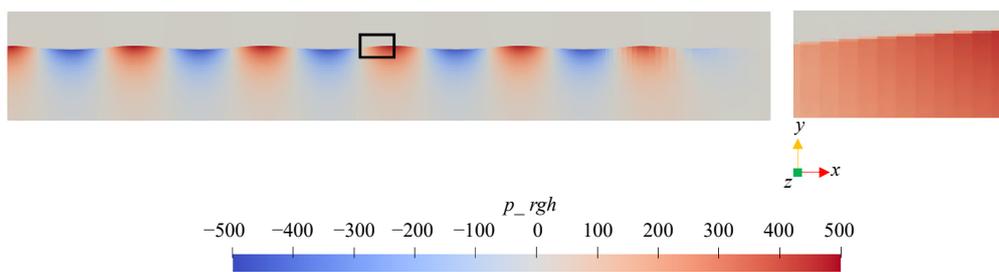
图 10 $x = 6 \text{ m}$ 处波面时历曲线

图 11 $t = 30$ s 时波面曲线

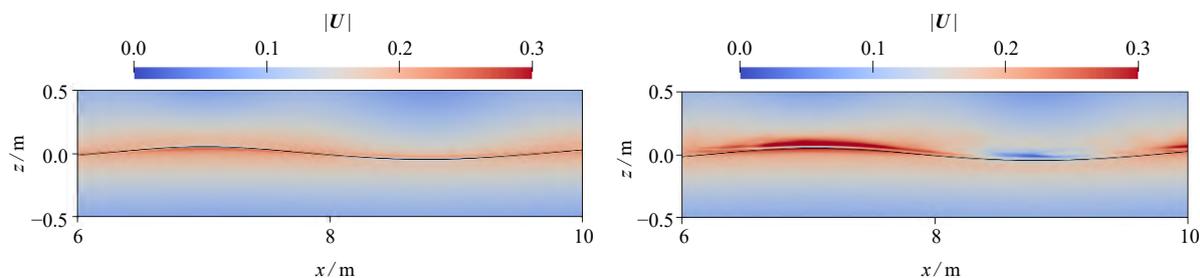
在图 12 中给出了 $t = 30$ s 时动压力场的云图比较。总体来看, naoe-FOAM-SJTU 与 interFoam 求解器得到的动压力分布基本一致。从局部细节看, naoe-FOAM-SJTU 求解器在波面两侧准确地模拟了动压在界面的跳跃。由于波面附近的网格加密程度较高, interFoam 求解器也获得了较为锐利的动压分布, 但是仍无法解决固有的虚假速度问题。在图 13 中给出波面附近的速度场分布, 其中黑色实线代表波面 ($\alpha = 0.5$)。可以观察到, 在波面上方(即气相), 采用 interFoam 求解得到的速度场存在着明显的虚假速度, 而在 naoe-FOAM-SJTU 中这一状况得到显著改善。对速度场作进一步处理, 在图 14 中给出涡量场云图的比较。可以看到, 虚假速度的存在使波面上方产生了过大且紊乱的涡量场。这在后续用湍流模型研究波浪与结构物作用时发生的破碎、翻卷等现象时可能会存在湍流黏度过大的问题。这意味着在求解波浪破碎等问题时虚拟流体方法有一定的优势, 已为文献[15]证实。



(a) naoe-FOAM-SJTU 求解器



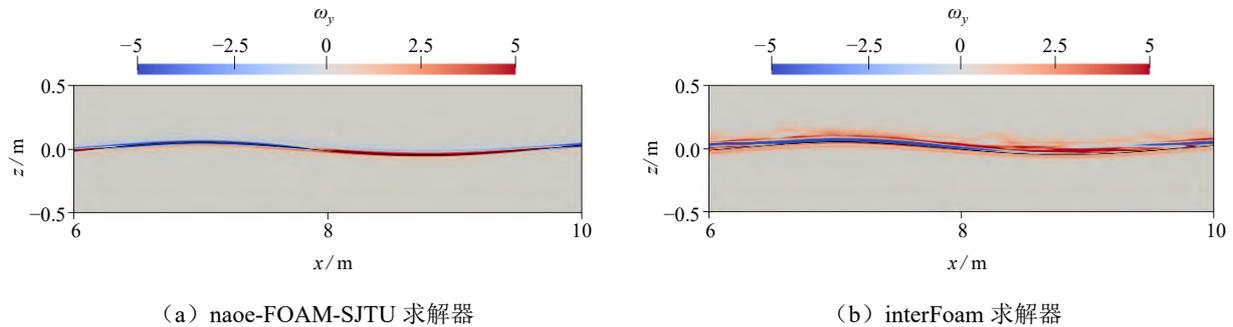
(b) interFoam 求解器

图 12 $t = 30$ s 时动压力场

(a) naoe-FOAM-SJTU 求解器

(b) interFoam 求解器

图 13 $t = 30$ s 时速度场

图 14 $t = 30 \text{ s}$ 时涡量场

3 结 论

本文基于虚拟流体方法, 自主开发了适用于大密度比如水-气两相流动问题的压力-速度修正模块, 并将其应用于船海水动力学求解器 naoc-FOAM-SJTU 中, 提高了两相流数值模拟的精确性。通过对斜坡流动二维标模的计算, 验证了该求解器能捕捉到界面处的压力跳跃, 并有效改善了出现虚假速度的状况。对典型的波浪传播问题的计算和分析表明, 在保证计算效率的同时, 波浪能在长时间传播中更好地维持幅值和相位, 为今后推广应用于波浪-结构物相互作用等复杂问题提供保障。

致 谢

本文工作得到国家重点研发计划项目 (2019YFB1704200) 和国家自然科学基金项目 (52131102, 51879159) 资助。在此一并表示衷心感谢!

参 考 文 献

- [1] FEDKIW R P, ASLAM T, MERRIMAN B, et al. A non-oscillatory Eulerian approach to interfaces in multimaterial flows (the ghost fluid method) [J]. *Journal of Computational Physics*, 1999, 152(2): 457-492.
- [2] KANG M, FEDKIW R P, LIU X D. A boundary condition capturing method for multiphase incompressible flow[J]. *Journal of Scientific Computing*, 2000, 15(3): 323-360.
- [3] DESJARDINS O, MOUREAU V, PITSCH H. An accurate conservative level set/ghost fluid method for simulating turbulent atomization [J]. *Journal of Computational Physics*, 2008, 227(18): 8395-8416.
- [4] SHIN S. Internal wave computations using the ghost fluid method on unstructured grids[J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2005, 47(3): 233-251.
- [5] HUANG J, CARRICA P M, STERN F. Coupled ghost fluid/two-phase level set method for curvilinear body-fitted grids [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2007, 55(9): 867-897.
- [6] QUEUTEY P, VISONNEAU M. An interface capturing method for free-surface hydrodynamic flows [J]. *Computers and Fluids*, 2007, 36(9): 1481-1510.
- [7] VUKČEVIĆ V, JASAK H, GATIN I. Implementation of the ghost fluid method for free surface flows in polyhedral finite volume framework [J]. *Computers and Fluids*, 2017, 153: 1-19.
- [8] PELTONEN P, KANNINEN P, LAURILA E, et al. The ghost fluid method for OpenFOAM: A comparative study in marine context [J/OL]. *Ocean Engineering*, 2020, 216: 108007.
- [9] JASAK H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows [D]. London: Imperial College, University of London, 1996.
- [10] UBBINK O. Numerical prediction of two fluid systems with sharp interfaces [D]. London: Imperial College, University of

London, 1997.

- [11] SHEN Z, WAN D, CARRICA P M. Dynamic overset grids in OpenFOAM with application to KCS self-propulsion and maneuvering [J]. *Ocean Engineering*, 2015, 108: 287-306.
- [12] VUKČEVIĆ V, JASAK H, MALENICA Š. Decomposition model for naval hydrodynamic applications, Part I: Computational method [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 121: 37-46.
- [13] 陈松涛, 赵伟文, 万德成. 带自由面有限长圆柱绕流数值模拟[J]. *中国舰船研究*, 2022, 17(1): 91-98.
- [14] 查晶晶, 万德成. 用OpenFOAM实现数值水池造波和消波[J]. *海洋工程*, 2011, 29(3):1-12.
- [15] LIU S, ONG M C, OBHRAI C, et al. Influences of free surface jump conditions and different $k-\omega$ SST turbulence models on breaking wave modelling [J/OL]. *Ocean Engineering*, 2020, 217: 107746.

Application of Ghost Fluid Method in Free Surface Flow

CHEN Songtao, ZHAO Weiwen, WAN Decheng*

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

Abstract

In two phase flow with large density ratio such as water-air two phase flow, dynamic pressure is discontinuous at the free surface, and a pressure jump is resulted in. Traditional methods for simulating two phase flow are difficult to deal with the pressure jump condition, and will lead to an incorrect calculation of the dynamic pressure gradient and inevitable occurrence of spurious velocities at the free surface. In order to solve this problem, based on the open-source platform OpenFOAM, this paper introduces the ghost fluid method into the marine hydrodynamics solver naoe-FOAM-SJTU, and develops a pressure-velocity correction module independently for two phase flow with large density ratio. Combined with the VOF method, accurate simulation of the pressure jump is achieved on arbitrary polyhedral unstructured meshes. In applications of typical two-dimensional ramp flow and wave propagation, accuracy of the developed module is validated. The results show that the ghost fluid method can obtain a sharp distribution of dynamic pressure at the free surface and reduce spurious velocities effectively.

Key words: ghost fluid method; large density ratio; free surface flow; pressure jump condition; software naoe-FOAM-SJTU

作者简介

陈松涛 男, 1997年生, 博士研究生。主要从事两相流与海洋平台涡激运动的研究工作。

赵伟文 男, 1990年生, 博士, 助理研究员。主要从事高雷诺数流动、自由面流动数值方法与涡激运动数值模拟的研究工作。

万德成 男, 1967年生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事船海计算水动力学、高性能计算与 CFD 和 CAE 软件开发等研究工作。

*通讯作者: 万德成