

IDEAL 算法在 OpenFOAM 界面两相流求解器中的实现与性能分析

邓雅军^{1,2}, 张琳¹, 孙东亮¹, 宇波¹

(1. 北京石油化工学院机械工程学院, 102617, 北京; 2. 北京安全生产工程技术研究院, 102617, 北京)

摘要: 针对 IDEAL 算法在界面两相流数值模拟中的应用主要基于结构化网格或二维非结构化网格, 难以在复杂问题中推广应用的难题, 将 IDEAL 算法植入到了开源计算流体力学软件 OpenFOAM 的界面两相流求解器 interFoam 中, 然后通过二维液柱倒塌、二维单气泡上升、三维异轴双气泡上升以及三维起伏管段气液两相流 4 个算例对 IDEAL 算法与 OpenFOAM 软件中采用的 PIMPLE 算法进行了计算性能分析。研究结果表明: IDEAL 算法的计算时间较 PIMPLE 算法减少了 17.6%~+∞; 在部分工况下 PIMPLE 算法难以收敛, 而 IDEAL 算法仍然可以快速获得收敛解。研究结果为 IDEAL 算法在复杂界面两相流问题中的推广奠定了基础。

关键词: 两相流; 计算流体力学; IDEAL 算法; OpenFOAM; 计算性能

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202012018 **文章编号:** 0253-987X(2020)12-0147-11



OSID 码

Implementation and Performance Analysis of IDEAL Algorithm for Unsteady Two-Phase Flow Problems in OpenFOAM

DENG Yajun^{1,2}, ZHANG Lin¹, SUN Dongliang¹, YU Bo¹

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Petrochemical Technology, Beijing 102617, China;

2. Beijing Academy of Safety Engineering and Technology, Beijing 102617, China)

Abstract: The IDEAL algorithm is implanted into the two-phase flow solver interFoam in the most popular open-source computational fluid dynamics software OpenFOAM to solve the problem that the existing applications of the IDEAL algorithm in the numerical simulation of two-phase flows are mainly based on the structured grids or two-dimensional unstructured grids, and its further application in complex problems is limited. Then, its performance advantages over the PIMPLE algorithm are verified using four numerical examples, i. e., two-dimensional dam break, two-dimensional single-bubble rising, three-dimensional non-coaxial double-bubble rising, and gas-liquid two-phase flow in an undulating pipeline. The research results indicate that the computational time of the IDEAL algorithm is reduced by 17.6% - +∞ compared with the PIMPLE algorithm. Moreover, the PIMPLE algorithm is difficult to converge in some cases, whereas the IDEAL algorithm can still obtain the convergent solution quickly. This study lays a foundation for extending the IDEAL algorithm to complex two-phase flow problems.

Keywords: two-phase flow; computational fluid dynamics; IDEAL algorithm; OpenFOAM; computational performance

界面两相流广泛存在于能源动力、航空航天和石油化工等诸多领域。数值模拟方法具有成本低、可重复性好、安全可控等优点,因此,在界面两相流领域得到了广泛应用。影响界面两相流数值模拟求解效率的关键点之一是压力与速度的耦合求解。IDEAL算法是本文作者于2008年提出的一种高效的全隐式压力速度耦合算法^[1-2]。该算法通过直接求解改进后的压力,在每个迭代层次上对压力方程进行两次内迭代计算,全面提高了压力速度耦合算法的收敛速度。Sun等基于二维结构化网格模拟了溃坝和气泡上升2个典型的两相流问题,对IDEAL算法在非稳态两相流中的计算性能进行分析,发现IDEAL算法的计算效率远高于SIMPLER算法,大约提高了6~87倍^[3]。随后,Sun等进一步将IDEAL算法在两相流中的应用扩展到了三维结构化网格,通过5个经典三维两相流算例对比了IDEAL算法与SIMPLER算法的计算效率,发现IDEAL算法的计算效率比SIMPLER算法高62.4%~82.4%^[4]。Zhou等基于三角形非结构化网格,采用界面捕捉方法Level set结合IDEAL算法对气液两相流问题进行了模拟^[5]。由于IDEAL算法在两相流模拟中具有显著的性能优势,该算法已被用于气液相变^[6]、核态沸腾^[7]等两相流问题的数值研究中,并且取得了良好的效果。然而,上述研究均基于结构化网格或二维非结构化网格,限制了该算法在复杂问题中的推广应用。

OpenFOAM软件是世界上应用最为广泛的开源计算流体力学软件之一,该软件采用的是任意多面体网格,易于处理复杂几何外形,同时具有大规模并行计算能力。因此,OpenFOAM软件在复杂工程问题数值模拟中的应用日益增多,已被大量用于两相流问题的数值模拟中。OpenFOAM软件采用的是面向对象的编程方法,具有很强的扩展性,用户可根据需求自由植入新模型和新算法,是一个较好的数值计算研究和应用平台。为了增强IDEAL算法对复杂问题的适用性,本文将IDEAL算法植入OpenFOAM软件的界面两相流求解器interFoam中,并通过4个算例对比分析了IDEAL算法与OpenFOAM软件采用的PIMPLE算法的计算效率,进一步验证了IDEAL算法的性能优势。研究结果为IDEAL算法在复杂界面两相流问题中的推广应用奠定了基础。

1 控制方程

流体体积(VOF)方法具有简单直观、对内存要

求低、易于处理两相界面的复杂拓扑变化等优点^[8],被广泛应用于两相流界面追踪的数值模拟中^[9-11]。VOF方法分为几何VOF方法和代数VOF方法^[12-13],其中代数VOF方法不需要重构界面,虽然精度稍低,但其计算效率更高,在工程中有着大量应用。OpenFOAM软件采用的就是代数VOF方法,其控制方程如下。

连续性方程

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

式中: $\mathbf{U}$ 为速度矢量。

动量方程

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)] = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_\sigma \quad (2)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; μ 为动力黏度; μ_t 为湍流黏度; p 为压力; $\mathbf{g}$ 为重力加速度; $\mathbf{F}_\sigma$ 为表面张力,采用Brackbill的CSF模型^[14]进行计算

$$\mathbf{F}_\sigma = \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (3)$$

其中, σ 为表面张力系数, κ 为界面处的曲率, $\kappa = -\nabla \cdot \mathbf{n}$, $\mathbf{n}$ 为曲面微元的单位法向矢量, α 为体积分数,其取值范围为0~1。

定义

$$p_{rgh} = p - \rho \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{h}$ 为网格单元体心的位置矢量。对式(4)进行梯度处理,得

$$\nabla p_{rgh} = \nabla p - \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \nabla \rho - \rho \mathbf{g} \quad (5)$$

将式(3)、式(5)代入式(2),得到最终的动量方程为

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot [(\mu + \mu_t)(\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)] = -\nabla p_{rgh} - \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \nabla \rho + \sigma \kappa \nabla \alpha \quad (6)$$

体积分数方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) + \nabla \cdot [\alpha(1-\alpha) \mathbf{U}_c] = 0 \quad (7)$$

式中: $\mathbf{U}_c$ 为压缩速度,其定义为

$$\mathbf{U}_c = c \left| \mathbf{U} \right| \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \quad (8)$$

其中, c 表示压缩因子,当 $c=0$ 时,无压缩效果, c 越大,压缩效果越明显。式(7)第三项为OpenFOAM软件中人工添加的可压缩项,用于修正相界面附近的体积分数。

最终的体积分数方程为

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) + \nabla \cdot \left[\alpha(1-\alpha)c \left| \mathbf{U} \right| \frac{\nabla \alpha}{|\nabla \alpha|} \right] = 0 \quad (9)$$

2 压力方程

对动量方程进行半离散^[15],得到

$$a_P \mathbf{U}_P + \sum_f a_N \mathbf{U}_N = \mathbf{S}(\mathbf{U}) - \nabla p_{rgh,P} - \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \nabla \rho_P + \sigma \kappa \nabla \alpha_P \quad (10)$$

式中: $\mathbf{U}_N$ 为相邻节点的速度; a_P 、 a_N 为系数; $\mathbf{S}(\mathbf{U})$ 表示除压力梯度之外的源项; $\mathbf{U}_P$ 为当前节点的速度, 可表示为

$$\mathbf{U}_P = \frac{\mathbf{H}(\mathbf{U})}{a_P} - \frac{1}{a_P} (\nabla p_{rgh,P} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \nabla \rho_P - \sigma \kappa \nabla \alpha_P) \quad (11)$$

其中, $\mathbf{H}(\mathbf{U}) = - \sum_f a_N \mathbf{U}_N + \mathbf{S}(\mathbf{U})$ 。

根据动量插值方法^[16], 界面上的速度 $\mathbf{U}_f$ 可表示为

$$\mathbf{U}_f = \left(\frac{\mathbf{H}(\mathbf{U})}{a_P} \right)_f - \left(\frac{1}{a_P} \right)_f (\nabla \cdot \frac{1}{f} p_{rgh,P} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \nabla \cdot \frac{1}{f} \rho_P - \sigma \kappa \nabla \cdot \frac{1}{f} \alpha_P)_f \quad (12)$$

界面通量 F_f 的计算公式为

$$F_f = \mathbf{S}_f \cdot \mathbf{U}_f = \mathbf{S}_f \cdot \left[\left(\frac{\mathbf{H}(\mathbf{U})}{a_P} \right)_f - \left(\frac{1}{a_P} \right)_f (\nabla \cdot \frac{1}{f} p_{rgh,P} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \nabla \cdot \frac{1}{f} \rho_P - \sigma \kappa \nabla \cdot \frac{1}{f} \alpha_P)_f \right] \quad (13)$$

连续性方程的离散表达式为

$$\iint_{V_P} \nabla \cdot \mathbf{U} dV = \sum_f \mathbf{S}_f \mathbf{U}_f = \sum_f F_f = 0 \quad (14)$$

将式(13)代入式(14), 可得到压力方程的离散形式

$$\sum_f \mathbf{S}_f \cdot \left[\left(\frac{1}{a_P} \right)_f (\nabla \cdot \frac{1}{f} p_{rgh,P} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \nabla \cdot \frac{1}{f} \rho_P - \sigma \kappa \nabla \cdot \frac{1}{f} \alpha_P)_f \right] = \sum_f \mathbf{S}_f \cdot \left(\frac{\mathbf{H}(\mathbf{U})}{a_P} \right)_f \quad (15)$$

即

$$\nabla \cdot \left[\frac{1}{a_P} (\nabla p_{rgh} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{h} \nabla \rho_P - \sigma \kappa \nabla \alpha_P) \right] = \nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{H}(\mathbf{U})}{a_P} \right) \quad (16)$$

3 PIMPLE 算法和 IDEAL 算法在非稳态两相流问题中的求解步骤

对于非稳态问题, 使用较为广泛的压力速度耦合算法为 PISO 算法。PISO 算法对库朗数的要求较高, 时间步长取值较小。为此, OpenFOAM 基金会开发了一种适用于大时间步长的压力速度耦合算法——PIMPLE 算法。该算法增加了压力速度耦合循环过程, 是一种融合了 PISO 算法和 SIMPLE 算法核心思想的新算法。图 1 给出了 PIMPLE 算法求解非稳态两相流问题的过程。

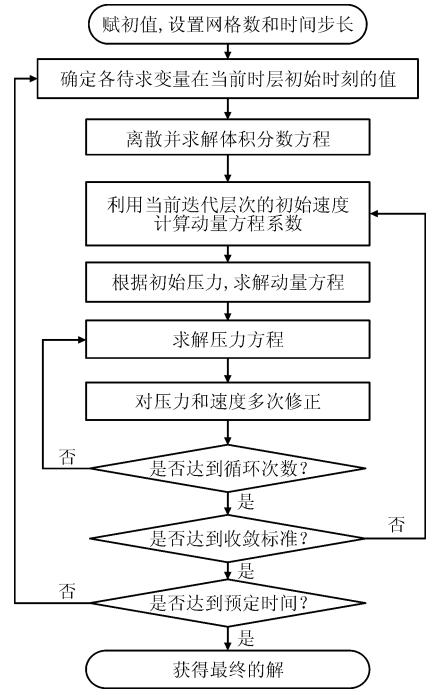


图 1 PIMPLE 算法求解非稳态两相流的过程

PIMPLE 算法融合了 PISO 算法和 SIMPLE 算法的核心思想, 可在更大的时间步长内获得收敛解。然而, PIMPLE 算法并未完全克服 SIMPLE 算法的两个基本假设, 依然存在收敛较慢的问题。IDEAL 算法通过在每个迭代层次上对压力方程进行两次内迭代计算, 完全克服了 SIMPLE 算法的两个基本假设, 因此在收敛速度方面具有显著优势。本文将 IDEAL 算法植入到 OpenFOAM 软件的界面两相流求解器 interFoam 中, 求解过程如图 2 所示。

IDEAL 算法的详细求解步骤如下。

步骤 1: 把当前时层的速度场 $\mathbf{U}^n$ 看作初始速度场 $\mathbf{U}^0$ 。

步骤 2: 对体积分数方程进行离散并求解。

步骤 3: 由假定的初始速度场 $\mathbf{U}^0$, 计算动量方程的系数和源项。

步骤 4: 迭代求解压力方程, 得到的压力 p^* 为当前迭代层次的初始值, 迭代次数由第一次内迭代次数 N_1 控制。

步骤 5: 求解动量方程, 获得的速度为中间速度 $\mathbf{U}^*$ 。

步骤 6: 再次迭代求解压力方程, 迭代次数由第二次内迭代次数 N_2 控制, 获得的速度为该时层上的最终速度 $\mathbf{U}$ 。

步骤 7: 求解其他标量方程。

步骤 8: 如果残差满足收敛标准, 返回步骤 1 重

新计算下一个时层。如果不满足,返到步骤 2 继续迭代计算。

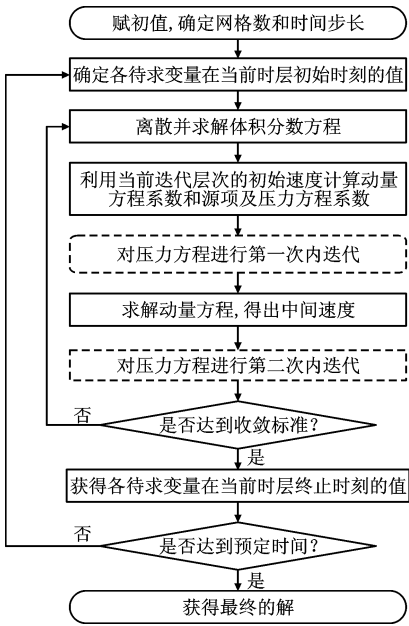


图 2 IDEAL 算法求解非稳态两相流的过程

4 算例的比较条件和收敛标准

本文系统比较了 IDEAL 算法与 PIMPLE 算法^[17]在不同条件下所需的计算时间,比较时所采用的条件和收敛标准如下。

(1)离散格式:动量方程对流项采用二阶迎风格式离散;体积分数方程对流项采用 vanLeer 有界格式离散。

(2)代数方程组求解:使用稳定型预条件共轭梯度法(PBiCGSTAB)求解动量方程,使用代数多重网格方法(GAMG)求解压力方程,使用高斯赛德尔法求解体积分数方程。

(3)亚松弛因子:在非稳态问题的数值求解中,时间步长取值较小,相邻时层的速度和压力变化不大,因此在求解过程中速度和压力亚松弛因子均取 1。

(4)库朗数:两相流问题对库朗数较为敏感,几何 VOF 方法一般取 0.25,代数 VOF 方法对库朗数要求稍低,本文所有算例中库朗数取值均为 1。

(5)收敛标准:本文算例中所有方程的规正余量小于同一规定值 10^{-4} 。

5 计算性能分析

5.1 算例 1:二维液柱倒塌过程

图 3 为垂直液柱倒塌过程的物理模型。图中为长、宽均为 $4L$ 的充满空气的正方形容器,容器的左

端竖直放置长为 $2L$ 、宽为 L 的液柱,其中 $L=0.146$ m。模拟过程中边界条件设置为上壁面为自由出口,其他 3 个壁面均为无滑移壁面。液柱在重力作用下发生倒塌与容器壁面发生撞击,计算中各参数设置如表 1 所示。

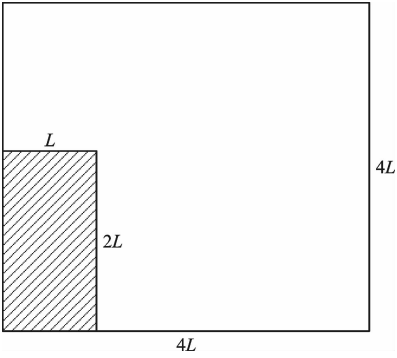


图 3 垂直液柱倒塌过程物理模型

表 1 液柱倒塌过程算例参数设置

参数	数值
气体密度 $\rho_g / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1
气体黏度 $\eta_g / (\mu\text{Pa} \cdot \text{s})$	0.5
液体密度 $\rho_l / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1 000
液体黏度 $\eta_l / (\text{mPa} \cdot \text{s})$	0.5
重力加速度 $g / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	9.8
$\sigma / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	0.075 5

对算例 1 的计算区域进行四边形网格划分,网格示意图如图 4 所示。分别采用网格数为 150×150 、 250×250 和 350×350 的粗、中、密 3 种网格对液柱倒塌过程进行网格无关性验证。图 5 给出了采用 3 种网格计算得到的液柱运动倒塌轨迹与时间的关系,其中 Z 表示液柱倒塌后液体运动的最前沿的位置与左壁面的距离, L 表示液柱的宽度。可以看出,3 种网格的计算结果差别非常小,基本吻合,可以认为这 3 种网格下均可以得到与网格无关的解。

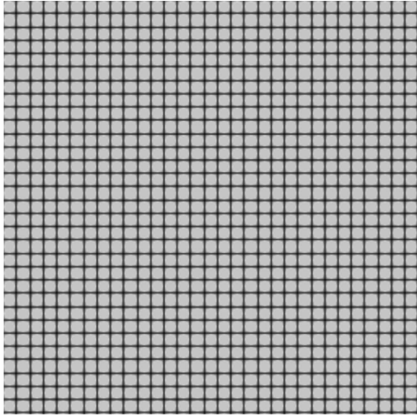


图 4 液柱倒塌过程网格示意图

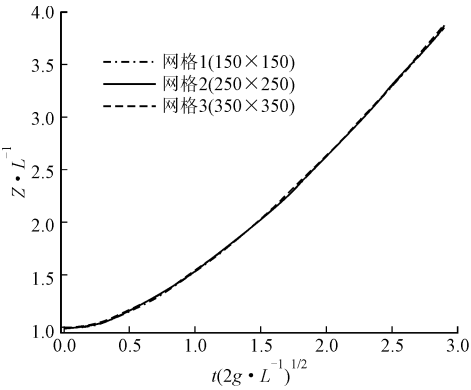


图 5 不同网格数下液柱运动倒塌轨迹与时间的关系

图 6 为本文的液柱倒塌过程中水相体积分数模拟结果与文献[3]模拟结果对比。从图中可以看出,各时间段的模拟结果与文献[3]吻合良好。Martin 等做了液柱倒塌的实验,得到了液柱倒塌过程中液体运动轨迹与时间的关系^[18]。为验证模拟结果的准确性,图 7 给出了本算例液柱倒塌过程的模拟结果与实验结果(文献[18])、文献结果(文献[3])对比图。从图中可以看出,本算例的模拟结果与文献[3]结果完全吻合,与实验结果(文献[18])也吻合较好,验证了本文基于 OpenFOAM 软件开发的非稳态两相流 IDEAL 算法的正确性。

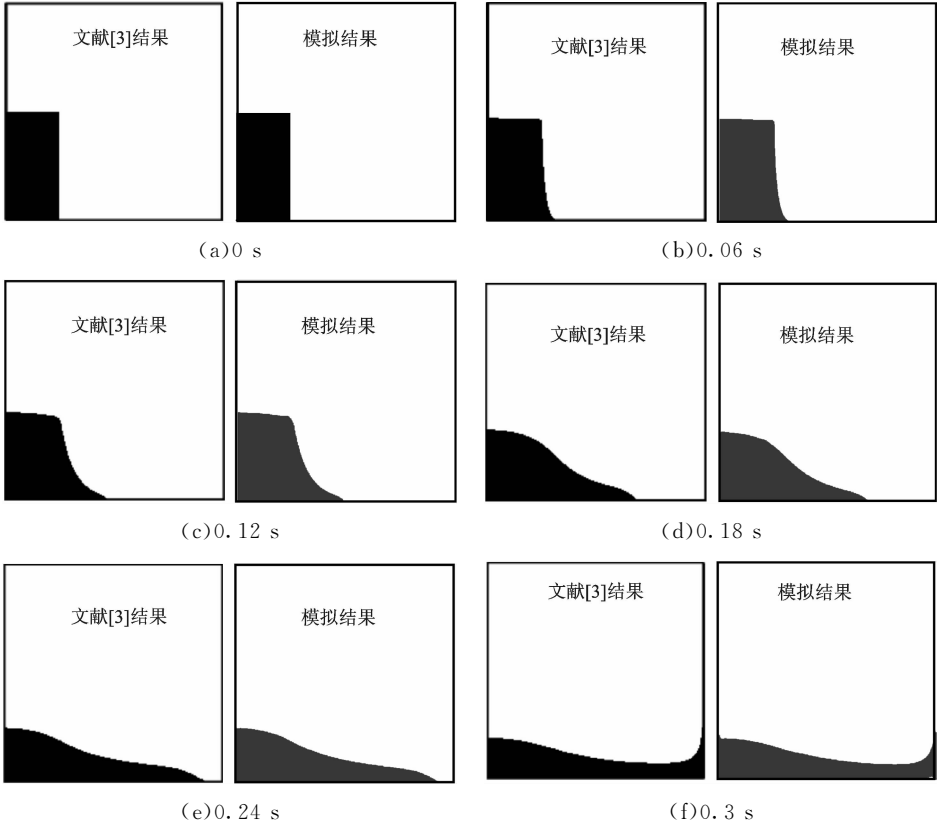


图 6 液柱倒塌过程模拟结果与文献[3]对比

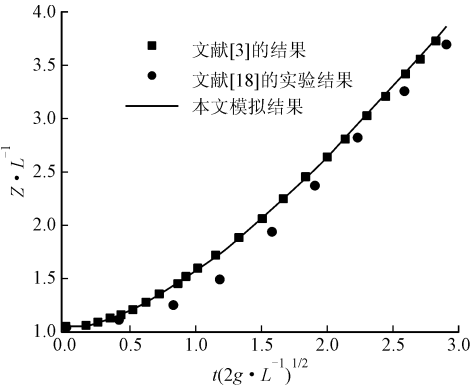


图 7 本文模拟结果与文献结果的对比

表 2 给出了算例 1 IDEAL 算法、PIMPLE 算法的计算时间比较。可以看出,不同网格数下,IDEAL 算法均能获得收敛的解,而 PIMPLE 算法在密网格(350×350)下无法计算,验证了 IDEAL 算法的健壮性。另外,在 PIMPLE 算法可计算的网格范围内,IDEAL 算法的计算效率也高于 PIMPLE 算法,减少比率为 44.74%~+∞,验证了 IDEAL 算法具有较好的收敛性。

5.2 算例 2:二维单气泡上升过程

Grace 对大量的实验数据进行分析,得出单个气泡上升运动过程的气泡形态变化、气泡上升速度

表 2 算例 1 的 IDEAL 算法与 PIMPLE 算法
计算时间比较

网格数	计算时间/s		减少比率 /%
	IDEAL 算法	PIMPLE 算法	
150×150	499.3	1 031.54	51.6
250×250	2 323.06	4 203.68	44.74
350×350	6 976.57		+∞

等运动特性由以下 4 个无量纲数共同决定:黏度比率(K)、密度比率(γ)、Morton 数(Mo)和 Eotvos 数(Eo)^[19]。表达式如下

$$K = \eta / \eta_g \tag{17}$$

$$\gamma = \rho_l / \rho_g \tag{18}$$

$$Mo = g \eta_l^4 / \rho_l \sigma^3 \tag{19}$$

$$Eo = g d^2 (\rho_l - \rho_g) / \sigma \tag{20}$$

式中: d 为初始气泡直径。

本算例对重力场下的单气泡上升过程进行模拟,计算区域为 0.05 m×0.15 m 充满液体的矩形区域,一个初始直径为 0.01 m 的气泡从(0.025 m, 0.02 m)的位置开始释放。首先,采用四边形网格对计算区域进行网格划分,然后分别采用网格数为

50×150、70×210 和 90×270 的粗、中、密三套网格对气泡上升过程进行网格无关性验证。参数设置:黏度比率为 1 000,密度比率为 1 000, Mo 为 0.1, Eo 为 10,表面张力系数为 0.979。图 8 给出了采用 3 种网格数计算得到的气泡上升速度随时间变化的趋势。从图 8 可以看出,中网格与细网格之间的计算结果差别较小,因此选用 70×210 的中网格进行后续的计算。

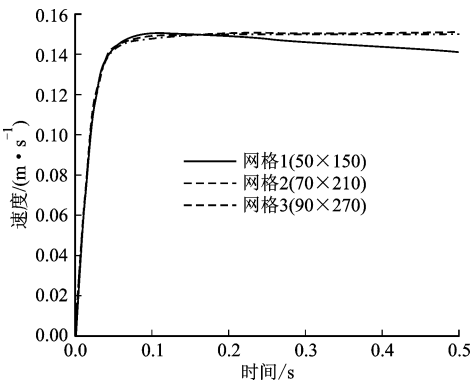


图 8 不同网格数下气泡上升速度随时间的变化

图 9 给出了网格数 70×210 情况下采用 IDEAL

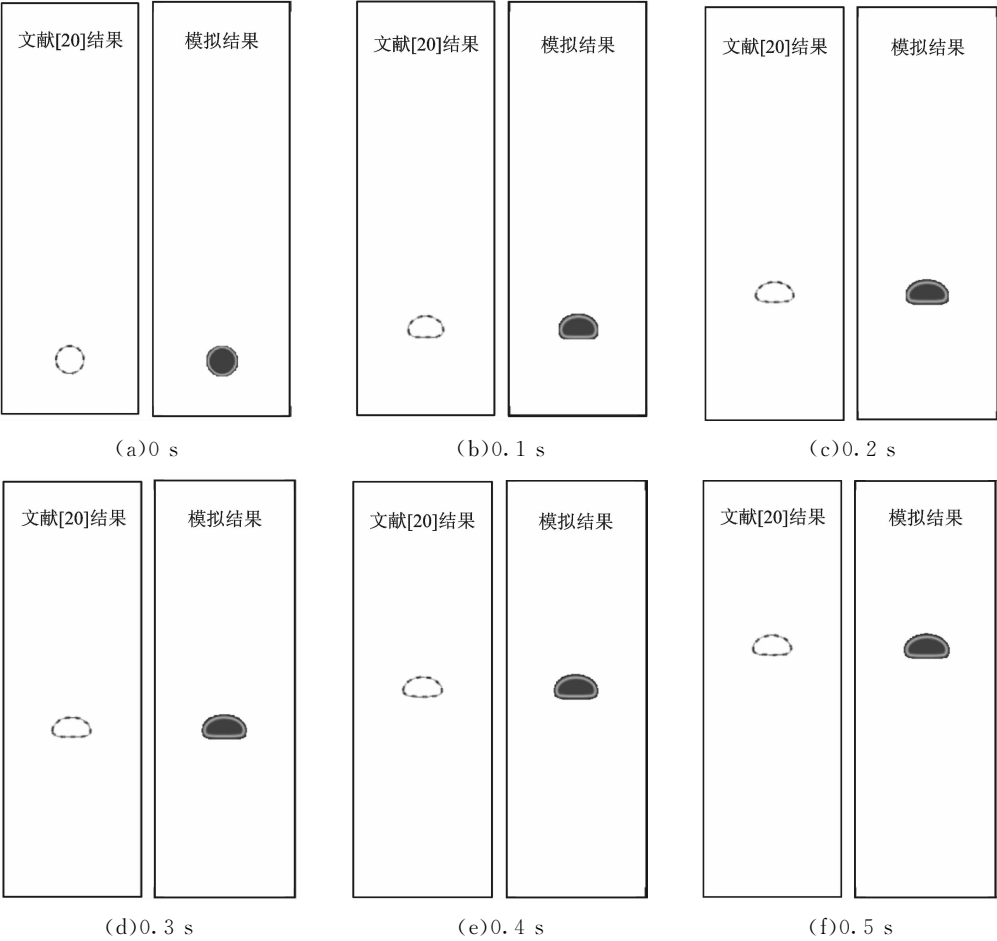
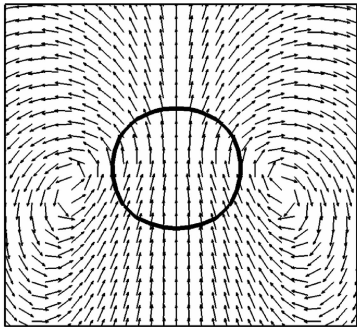


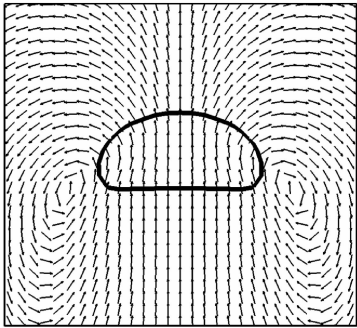
图 9 二维单气泡上升过程模拟结果与文献[20]对比

算法计算得到的气泡上升过程,其中左侧为文献[20]的模拟结果,右侧为本文的模拟结果。对比云图可以看出,无论是气泡在上升过程中的形态变化还是上升速度均与文献[20]相吻合,进一步验证了本文基于 OpenFOAM 软件构建的非稳态两相流 IDEAL 算法的正确性。

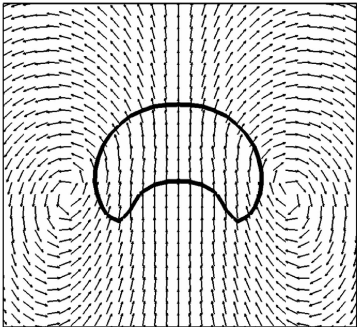
表 3 给出了 3 种情况下模拟气泡上升过程的参数设置,其中黏度比率和密度比率均为 1 000,通过改变 Mo 和 Eo 来改变表面张力的的大小。图 10 显示了 0.5 s 时刻 3 种情况下的气泡终端形状。从图 10 可以看出,由于表面张力、黏性力以及浮升力等影响,3 种情况下得到的气泡形状也有较大差别。随着表面张力的减小(Mo 的增加)与浮升力的增加(Eo 的增加),气泡变形越来越明显。



(a)情况 a



(b)情况 b



(c)情况 c

图 10 0.5 s 时 3 种情况下的气泡形状

表 3 3 种情况下的参数设置

参数	情况 a	情况 b	情况 c
表面张力系数	9.79	0.979	0.097 9
密度比率	1 000	1 000	1 000
黏性比率	1 000	1 000	1 000
Mo	0.001	0.1	1 000
Eo	1	10	100

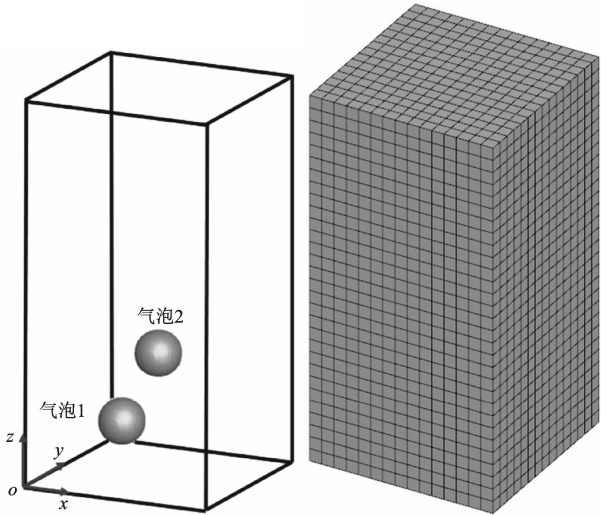
表 4 给出了算例 2 在 3 种情况下 IDEAL 算法、PIMPLE 算法的计算时间比较。从表 4 可以看出,在设定的 3 种情况下,IDEAL 算法均能获得收敛的解,而 PIMPLE 算法在情况 a 下无法进行计算,验证了 IDEAL 算法的健壮性。此外,在 PIMPLE 算法可计算的情况下,IDEAL 算法的计算效率也高于 PIMPLE 算法,减少比率为 21.7%~+∞,验证了 IDEAL 算法具有较好的收敛性。

表 4 算例 2 的 IDEAL 算法与 PIMPLE 算法
计算时间比较

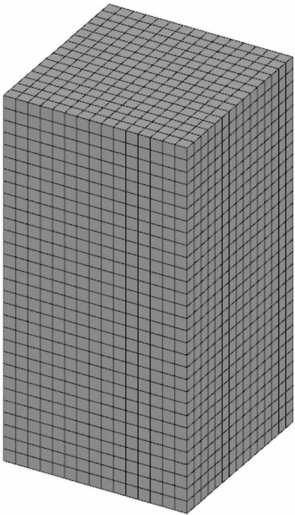
情况	计算时间/s		减少比率 /%
	IDEAL 算法	PIMPLE 算法	
情况 a	1 061.18		+∞
情况 b	2 879.67	3 677.58	21.7
情况 c	549.45	1 433.92	61.7

5.3 算例 3:三维异轴双气泡上升过程

本算例进一步将气泡上升过程扩展至三维计算中,模拟两个在不同轴上的气泡的上升融合过程,各参数均与文献[4]一致。如图 11a 所示,计算区域的



(a)几何示意图



(b)网格示意图

图 11 三维异轴双气泡几何和网格示意图

长、宽、高分别为 0.04、0.04 和 0.08 m,两个直径为 0.01 m 的气泡 1 和气泡 2 分别在坐标为(0.012, 0.02,0.01)和(0.02,0.02,0.025)的位置释放。计算区域采用六面体网格划分,网格示意图如图 11b 所示,网格数分别为 $80 \times 80 \times 160$ 和 $130 \times 130 \times 260$ 。表 5 给出了本算例的各参数。

表 5 三维异轴双气泡上升参数设置

参数	数值
密度比率	1 000
黏度比率	1 000
Mo	0.000 2
EO	16
$\sigma/(N \cdot m^{-1})$	0.611 9

图 12 显示了异轴双气泡上升过程气泡界面模拟结果。图中左侧为文献[4]中给出的每一时刻的气泡上升位置和形态,右侧为本文的模拟结果。从中可以看出,气泡 1 在上升过程中变形较大,这是由于气泡 2 在上升过程中的尾迹作用使得气泡 1 上升阻力较小,因此气泡 1 会自动地调整运动方向和形态。同时,由于阻力较小,气泡 1 上升速度也较快。模拟结果与文献[4]结果吻合较好,验证了本文构建的非稳态两相流 IDEAL 算法的正确性。

表 6 给出了算例 3 IDEAL 算法、PIMPLE 算法的计算时间比较,可以看出,IDEAL 算法的计算时间较 PIMPLE 算法减少 31.37%,验证了 IDEAL 算法在求解不可压缩非稳态两相流问题时在收敛性方面的优势。

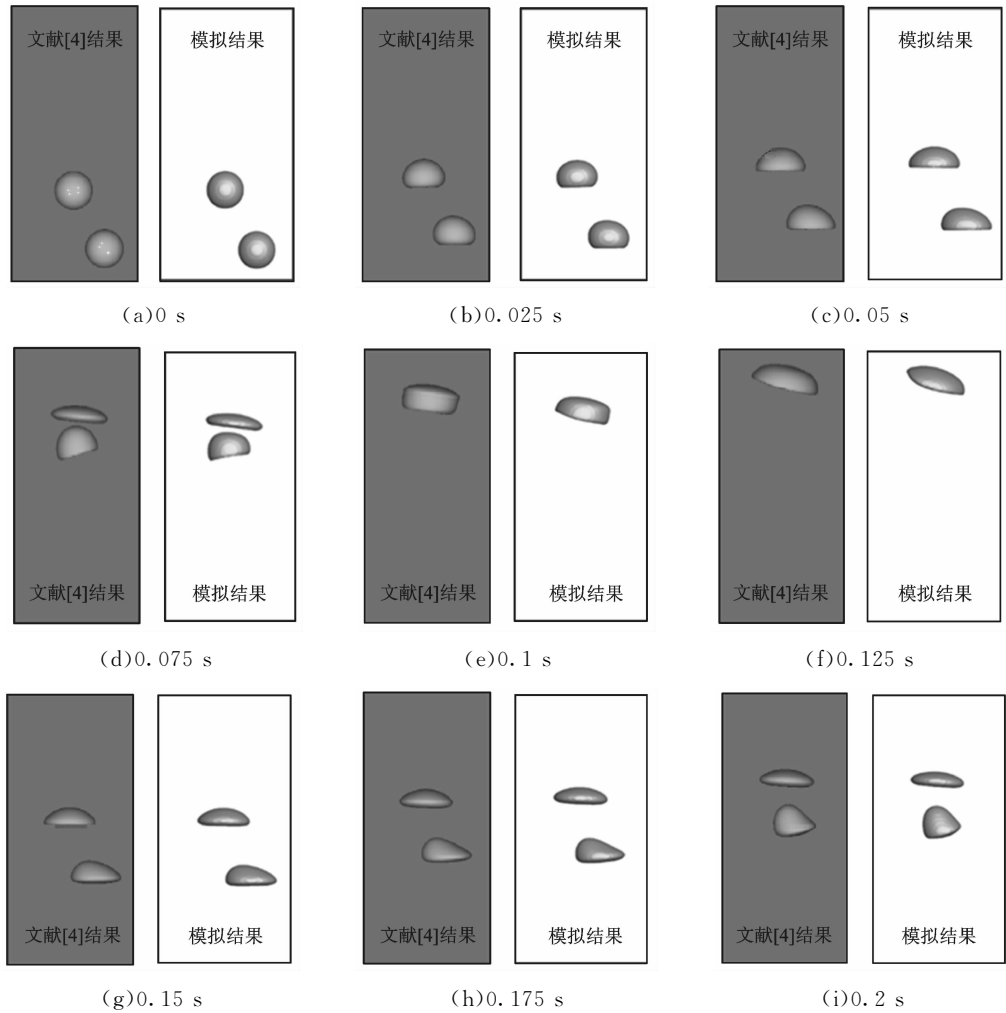


图 12 三维异轴双气泡上升过程气泡界面模拟结果与文献[4]对比

5.4 算例 4:三维起伏管段气液两相流动过程

以上 3 个经典的两相流问题充分验证了本文基于 OpenFOAM 软件构建的两相流 IDEAL 算法的正确性,同时通过与 PIMPLE 算法比较也验证了

IDEAL算法的收敛性。下面将构建的两相流 IDEAL 算法应用到实际工程问题中。

管道的顺利投产运行是管道工程建设的关键。空管投产前,若管道中存在残留液体,运行时会发生

表 6 算例 3 的 IDEAL 算法与 PIMPLE 算法
计算时间比较

网格数	计算时间/s		减少比率 /%
	IDEAL 算法	PIMPLE 算法	
80×80×160	10 380.5	15 123.9	31.37
130×130×260	82 953.4	200 432.0	58.60

堵塞,不仅会影响顺利投产,严重时还会引起管道爆裂,造成安全隐患和财产损失^[21]。因此,在工程实际中,对管道起伏段气液两相流过程进行模拟可以为管段尺寸设计提供参考。

图 13 为三维起伏管段几何结构示意图。起初管内充满空气,管底有少量积液,积液高度为管径的一半,即 $D/2$,液体以 2 m/s 的恒定速度由右端入口流进管道。管道尺寸取值分别为:管道弯曲处的曲率半径 $R=0.35$,管长 $L_1=6\text{ m}$, $L_2=5\text{ m}$,管径 $D=0.6458\text{ m}$,倾角 $\theta=45^\circ$ 。为了更突出液体流入管道时各参数的变化,本算例选取远大于工程实际管道倾角进行计算。模拟边界条件设置为:入口为速度入口,出口为压力出口(大气压),管壁均为无滑移壁面边界条件。湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型。其他物性参数设置如表 7 所示。

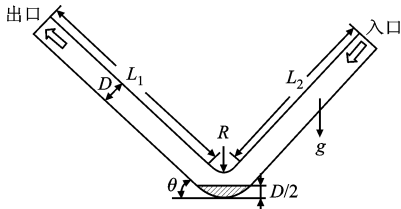


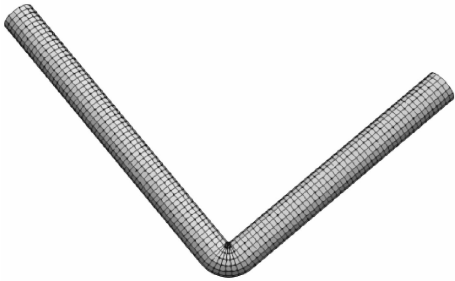
图 13 三维起伏管段几何结构示意图

表 7 起伏管段各参数设置

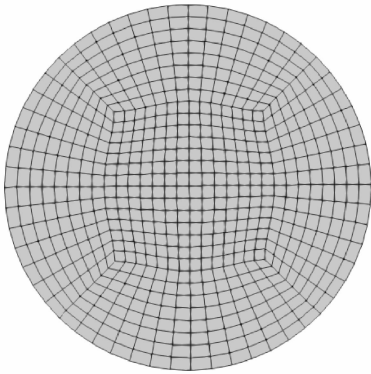
参数	数值
$\rho_g/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.185
$\eta_g/(\mu\text{Pa}\cdot\text{s})$	18.35
$\rho_l/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	998.2
$\eta_l/(\text{mPa}\cdot\text{s})$	1
$g/(\text{m}\cdot\text{s}^{-2})$	9.8
$\sigma/(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	0.072 75

为提高网格质量以确保计算结果的精准,采用 ICEM CFD 软件对计算区域进行纯六面体网格划分,网格示意图如图 14 所示。图 14a 为 Z 方向网格示意图,图 14b 为管道横截面网格示意图。

分别采用网格数为 81 600、172 368 和 257 600 的粗、中、密 3 种网格对三维起伏管段气液两相流动



(a) Z 方向网格示意图



(b) 横截面网格示意图

图 14 起伏管段网格示意图

过程进行网格无关性验证。图 15 给出了采用 3 种网格计算得到的管道持液率随时间的变化,从中可以看出,中网格与密网格的计算结果差别较小,因此选取中网格来进行后续的计算。

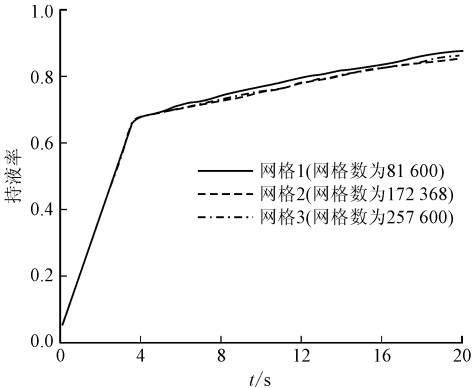


图 15 不同网格数下持液率增长曲线

图 16 为起伏管段内气液流动过程中水相体积分分数随时间的变化图。充液初期,由于重力作用,液体沿着下壁面以不满流的形式向下流动,在 1 s 时刻与管底积液发生接触。充液中期, 1.2 s 时刻到达管底部的液体与积液一起开始向上流动,随着液体的不断进入,此阶段管内空气不断沿着管道向外排出。充液后期, 5 s 时刻开始向外排出液体,此时空气发生回流形成封闭的气囊,大气泡受不断进入的

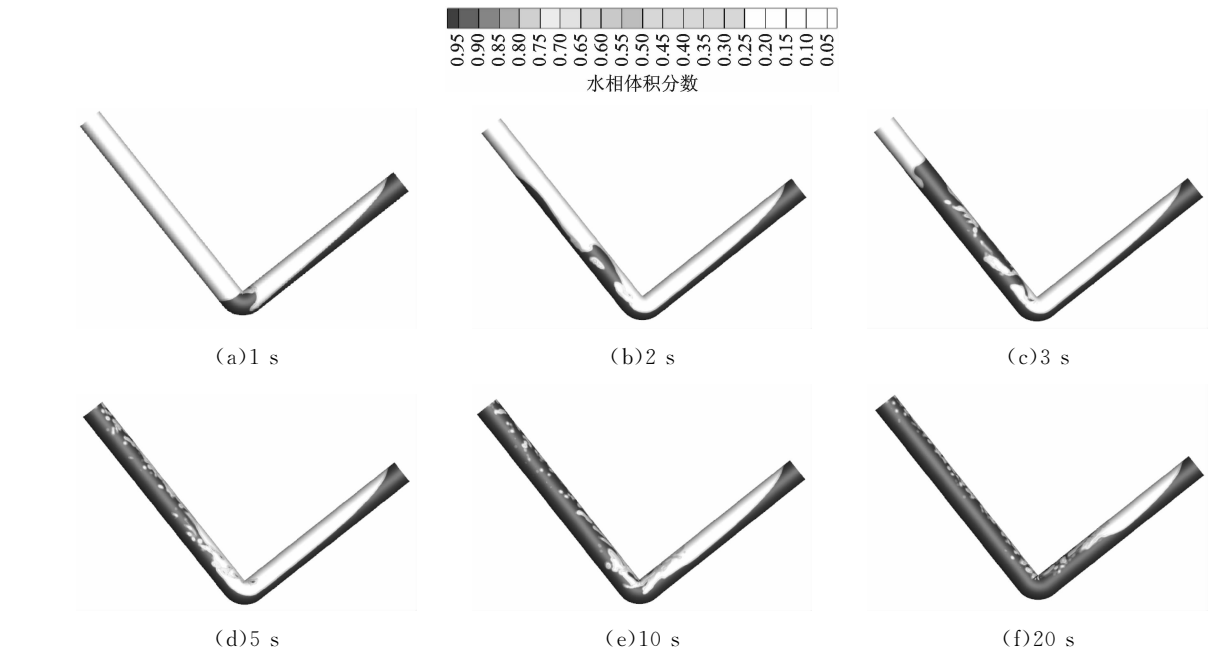


图 16 起伏管段流动水相体积分数变化图

液体带来的剪切力形成大量的小气泡,小气泡随着液体缓慢的向外排出,气囊的体积不断变小,最终达到稳定状态。

表 8 给出了算例 4 IDEAL 算法、PIMPLE 算法的计算时间比较。可以看出,在 3 种网格数下,IDEAL 算法均能获得收敛的解,而 PIMPLE 算法只能在粗网格下进行计算,验证了 IDEAL 算法的健壮性。另外,在 PIMPLE 算法可计算的网格范围内,IDEAL 算法的计算效率也高于 PIMPLE 算法,减少比率为 17.6%~+∞,验证了 IDEAL 算法具有较好的收敛性。

表 8 算例 4 的 IDEAL 算法与 PIMPLE 算法计算时间比较

网格数	计算时间/s		减少比率 /%
	IDEAL 算法	PIMPLE 算法	
81 600	17 169.9	20 834.1	17.6
172 368	54 952.4		+∞
257 600	106 847.0		+∞

6 结 论

本文针对非稳态两相流问题,基于开源流体力学软件 OpenFOAM 构建了任意多面体网格下的非稳态两相流问题压力速度耦合算法 IDEAL。通过对 4 个非稳态两相流问题进行数值模拟分析,对比了 IDEAL 算法与 OpenFOAM 软件采用的 PIM-

PLE 算法的计算时间,得出以下结论。

(1)基于 OpenFOAM 软件构建的非稳态两相流 IDEAL 算法计算结果与实验结果吻合良好,验证了所构建算法的正确性。

(2)综合 4 个算例的计算结果,IDEAL 算法的计算效率高于 PIMPLE 算法,所需计算时间较 PIMPLE 算法的减少比率为 17.6%~+∞;在部分工况下,PIMPLE 算法难以收敛,而 IDEAL 算法仍然可以快速获得收敛解。

(3)在非稳态两相流问题的数值计算中,压力速度耦合求解过程推荐采用 IDEAL 算法,以提高计算效率。

参考文献:

[1] SUN Dongliang, QU Zhiguo, HE Yaling, et al. An efficient segregated algorithm for incompressible fluid flow and heat transfer problems-IDEAL (Inner Doubly Iterative Efficient Algorithm for Linked Equations): part I Mathematical formulation and solution procedure [J]. Numerical Heat Transfer; Part B Fundamentals, 2008, 53(1): 1-17.

[2] SUN Dongliang, QU Zhiguo, HE Yaling, et al. An efficient segregated algorithm for incompressible fluid flow and heat transfer problems-IDEAL (Inner Doubly Iterative Efficient Algorithm for Linked Equations): part II Application examples [J]. Numerical Heat Transfer; Part B Fundamentals, 2008, 53(1): 18-

- 38.
- [3] SUN Dongliang, XU Jinliang, DING Peng, et al. Implementation of the IDEAL algorithm on unsteady two-phase flows and application examples [J]. *Numerical Heat Transfer: Part B Fundamentals*, 2013, 63(3): 204-221.
- [4] SUN Dongliang, YU Shuai, YU Bo, et al. A VOSET method combined with IDEAL algorithm for 3D two-phase flows with large density and viscosity ratio [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 114: 155-168.
- [5] ZHOU Wen, OUYANG Jie, ZHANG Lin, et al. Development of new finite volume schemes on unstructured triangular grid for simulating the gas-liquid two-phase flow [J]. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2016, 81(1): 45-67.
- [6] GUO Dongzhi, SUN Dongliang, LI Zengyao, et al. Phase change heat transfer simulation for boiling bubbles arising from a vapor film by the VOSET method [J]. *Numerical Heat Transfer: Part A Applications*, 2011, 59(11): 857-881.
- [7] CAO Zhizhu, ZHOU Jie, WEI Jinjia, et al. Experimental and numerical study on bubble dynamics and heat transfer during nucleate boiling of FC-72 [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 139: 822-831.
- [8] HIRT C W, NICHOLS B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary [J]. *Journal of Computational Physics*, 1981, 39(1): 201-225.
- [9] 孙红霞, 苏军伟. 亚网格内两相流动界面位置的精确定位算法 [J]. *西安交通大学学报*, 2017, 51(1): 79-87.
- SUN Hongxia, SU Junwei. A sub-grid interface locating algorithm for free surface two-phase flows [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2017, 51(1): 79-87.
- [10] 殷翔, 钱吉裕, 孔祥举, 等. 天线阵面沸腾换热的数值分析及优化 [J]. *西安交通大学学报*, 2014, 48(11): 64-69.
- YIN Xiang, QIAN Jiyu, KONG Xiangju, et al. Numerical investigation and optimization on boiling heat exchange of antenna surface [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2014, 48(11): 64-69.
- [11] 黄萌, 武利龙, 陈斌. 一种基于非结构化网格的流体体积法界面重构方案 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(9): 99-103.
- HUANG Meng, WU Lilong, CHEN Bin. Unstructured grid based volume-of-fluid method [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(9): 99-103.
- [12] JAMSHIDI F, HEIMEL H, HASERT M, et al. On suitability of phase-field and algebraic volume-of-fluid OpenFOAM® solvers for gas-liquid microfluidic applications [J]. *Computer Physics Communications*, 2019, 236: 72-85.
- [13] CIFANI P, MICHALEK W R, PRIEMS G J M, et al. A comparison between the surface compression method and an interface reconstruction method for the VOF approach [J]. *Computers & Fluids*, 2016, 136: 421-435.
- [14] BRACKBILL J U, KOTHE D B, ZEMACH C. A continuum method for modeling surface tension [J]. *Journal of Computational Physics*, 1992, 100(2): 335-354.
- [15] JASAK H. Error analysis and estimation for the finite volume method with applications to fluid flows [D]. London, UK: University of London, 1996: 145-146.
- [16] RHIE C M, CHOW W L. Numerical study of the turbulent flow past an airfoil with trailing edge separation [J]. *AIAA Journal*, 1983, 21(11): 1525-1532.
- [17] DEISING D, MARSCHALL H, BOTHE D. A unified single-field model framework for Volume-Of-Fluid simulations of interfacial species transfer applied to bubbly flows [J]. *Chemical Engineering Science*, 2016, 139: 173-195.
- [18] MARTIN J C, MOYCE W J. An experimental study of the collapse of fluid columns on a rigid horizontal plane [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London; Series A*, 1952, 244: 312-324.
- [19] GRACE J R. Shapes and velocities of bubbles rising in infinite liquids [J]. *Trans Instn Chem Engrs*, 1973, 51: 116-120.
- [20] 齐亚强. 高性能界面两相流数值模拟方法的构建及性能分析 [D]. 北京: 北京石油化工学院, 2019: 28-29.
- [21] 王祺来, 张欣雨, 张康鑫, 等. 起伏管段气液两相流数值模拟 [J]. *北京石油化工学院学报*, 2018, 26(3): 26-31.
- WANG Qilai, ZHANG Xinyu, ZHANG Kangxin, et al. Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow in undulating pipe section [J]. *Journal of Beijing Institute of Petrochemical Technology*, 2018, 26(3): 26-31.

(编辑 亢列梅)