

文章编号: 0258-0926(2005)03-0242-08

LEVEL SET 输运方程的求解方法及其对气-液两相流运动界面数值模拟的影响

李会雄^{1,2}, 邓 晟¹, 赵建福², 陈听宽¹, 王 飞³

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049; 2. 中国科学院力学研究所国家微重力实验室, 北京, 100080; 3. 中国核动力研究设计院空泡物理和自然循环国家级重点实验室, 成都, 610041)

摘要: 用数值模拟方法来研究气-液两相流动与传热现象是当今多相流领域的一个热门课题。由于两相流固有的复杂性, 气-液两相流界面迁移现象的数值模拟一直是两相流研究中的一大难点。本文介绍了捕捉气-液两相流相界面运动的水平集方法(Level Set)及其研究进展, 介绍了求解 Level Set 输运方程的 3 种方法, 即一般差分格式、Superbee-TVD 格式和 Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 组合格式。结合主流场的求解, 分别用这 3 种方法对 4 种典型相界面在 5 种流场中的迁移特性进行了模拟计算, 并对计算结果进行了比较和分析。结果表明, Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 组合格式求解 Level Set 输运方程的效果最好, 在以后的计算中将主要采用这种组合格式来进行气-液相界面输运方程的求解。

关键词: 运动界面; Level Set 方法; 气-液两相流; 5 阶 WENO 格式; Superbee-TVD 格式**中图分类号:** O363 **文献标识码:** A

1 引言

气-液两相流动与传热广泛存在于能源与动力、石油、化工、核反应堆等工程设备与工艺当中。气-液相界面的动力学行为对两相流的宏观特性产生很大影响, 气-液相界面的迁移特性是两相流研究中的一个重要基本问题^[1]。由于相界面及其随时间的迁移、变形、破碎与融合等复杂变化, 使气-液两相流的流动特性比单相流复杂得多, 因此要实现气-液两相流的数值计算首先需要有一套描述气-液相界面的动力学行为的有效方法。对于气-液相界面这样的移动界面问题, 科学家已提出了多种处理方法^[2]。其中, Level Set 方法是其中最为新颖且最具吸引力的方法之一^[3]。在应用 Level Set 方法进行迁移界面数值模拟的过程中, 最重要的步骤是求解 Level Set 输运方程。笔者曾采用 3 阶内差假想离子法(以下简称 CIP 方法)求解主流场的 Navier-Stokes 方程和 Level Set 函数的输运方程, 得到了可喜结果, 但同时也发现,

所能计算的两相流相界面两侧的介质物性比(主要是密度比、粘性比)较小, 远不能满足实际应用的需(如水-空气的密度比接近 1000/1)^[4]。造成这一问题的主要原因之一就是 Level Set 函数输运方程的求解精度与稳定性不够。图 1 给出了用一般差分方法来离散和求解 Level Set 函数输运方程时得到的一个典型结果。显然, 不仅界面形状产生很大偏差, 而且界面内的介质体积明显减少, 造成了质量不守恒。针对这一问题, 对 Level Set 函数输运方程的求解方法进行了仔细研究, 做了重大改进。本文主要介绍这方面的研究进展及结果。

2 基本控制方程

2.1 Level Set 方法及其基本方程

考虑计算区域 Ω 中存在的不可压缩气-液两相流动。气、液两相占据的区域分别为 $\Omega^1(t)$ 、 $\Omega^2(t)$, 气-液分界面为 $\Gamma(t)$ 。气、液两相的密度和动力粘性系数分别为 ρ_1, ρ_2 和 μ_1, μ_2 ; 表面张力

收稿日期: 2004-05-10; 修回日期: 2004-07-28

基金项目: 本研究由国家自然科学基金(NO.50106011)、空泡物理和自然循环重点实验室基金及中国科学院力学所国家微重力实验室开放基金资助

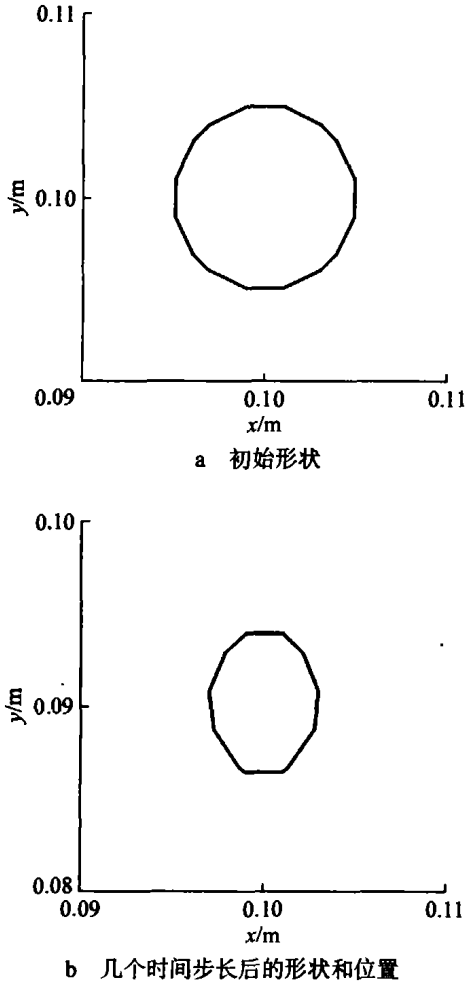


图 1 用一阶离散格式求解 Level Set 方程时的典型结果

Fig. 1 Typical Results Obtained with a Simple First-Order Scheme to Compute the Advection Equation of the Level Set

系数为 σ 。定义 Level Set 函数 $\Phi(\bar{x}, t)$ ，使得在任意时刻气-液相界面 $\Gamma(t)$ 恰是 $\Phi(\bar{x}, t)$ 的零等值面，即要求

$$\Gamma(t) = \{\bar{x} \in \Omega : \Phi(\bar{x}, t) = 0\} \quad (1)$$

同时要求函数 $\Phi(\bar{x}, t)$ 应在 $\Gamma(t)$ 附近为法向单调。在气-液两相流研究中，Level Set 函数 $\Phi(\bar{x}, t)$ 的变化遵循下述方程控制

$$\Phi_t + u \cdot \Phi_x + v \cdot \Phi_y = 0 \quad (2)$$

式中， u, v 是主流场速度在 x, y 坐标方向上的分量。根据 Level Set 法的基本思想，Level Set 函数 $\Phi(\bar{x}, t)$ 始终应该保持为符号距离函数。

2.2 主流场控制方程组

借助于 Level Set 函数，含相界面的气-液两相流动可用下述 Navier-Stokes 方程统一描述。在固定的 Euler 坐标系中，Navier-Stokes 方程可被

写为

$$\bar{u}_t + (\bar{u} \cdot \nabla) \bar{u} = \bar{F} + \frac{1}{\rho} [-\nabla p + \nabla(\mu \cdot D) + \sigma \cdot \kappa \cdot \delta(\Phi(\bar{x}, t)) \cdot \bar{n}] \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0, \quad (4)$$

式中， $\bar{u} = (u, v)$ 是流体速度； $\rho = \rho(\bar{x}, t)$ 为流体密度； $\mu = \mu(\bar{x}, t)$ 为粘性系数； D 表示粘性应力张量；而 \bar{F} 代表体积力；方程(3)中的最后一项代表相界面上的表面张力； κ 为相界面曲率； \bar{n} 表示相界面上法向朝外的单位向量。函数 δ 被定义为

$$\delta_\epsilon(d) = \begin{cases} [1 + \cos(\pi d / \epsilon)] / (2\epsilon) & \text{if } |d| < \epsilon \\ 0 & \text{if } |d| \geq \epsilon \end{cases} \quad (5)$$

ϵ 是一个小量规整参数。本文主要研究 Level Set 函数 Φ 的输运方程的求解方法，暂不考虑气-液相界面两侧的物性差别。关于物性参数、界面几何参数、表面张力等的计算见文献[4]。

3 Level Set 函数输运方程的数值求解方法

3.1 一般差分格式求解 Level Set 函数输运方程

对方程(2)中的时间导数和空间导数分别用显式的一阶向前差分进行离散化，可得出一般的差分格式

$$\Phi_{i,j}^{n+1} = \Phi_{i,j}^n - \delta x (u_{i,j}^n (\Phi_{i+1,j}^n - \Phi_{i,j}^n) / \delta x + v_{i,j}^n (\Phi_{i,j+1}^n - \Phi_{i,j}^n) / \delta y) \quad (6)$$

3.2 Superbee TVD 格式来求解 Level Set 函数输运方程

先考虑一维情形的输运方程

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + V \frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

设 $V > 0$ 。在时间和空间控制体积元 $[x_{i-1/2}, x_{i+1/2}] \times [t_n, t_{n+1}]$ 上进行积分可得

$$\int_{x_{i-1/2}}^{x_{i+1/2}} \int_{t_n}^{t_{n+1}} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial t} + V \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dx dt = 0 \quad (8)$$

利用迎风格式的思想和特征线法，对时间积分平均进行变换，并采用梯形公式和被积函数的一阶 Taylor 展开进行简化，可得方程(7)的离散格式为

$$\bar{\Phi}_i^{n+1} = \bar{\Phi}_i^n - c(\bar{\Phi}_i^n - \bar{\Phi}_{i-1}^n) + \frac{c}{2} \delta x (c-1) \delta x (S_i^n - S_{i-1}^n) \quad (9)$$

其中, $\delta x = x_{i+1/2} - x_{i-1/2}$; $\delta t = t_{n+1} - t_n$

$$c = \frac{V\delta t}{\delta x}; S_i^n = \frac{\partial \Phi_i^n}{\partial x}$$

对一般的速度 V , 可将差分格式统一写为

$$\begin{aligned} \bar{\Phi}_i^{n+1} = & \bar{\Phi}_i^n - \frac{\delta t}{\delta x} \max(0, V)(\bar{\Phi}_i^n - \bar{\Phi}_{i-1}^n) + \\ & \frac{1}{2} \frac{\delta t}{\delta x} \delta x \max(0, V)(c-1)(S_i^n - S_{i-1}^n) - \\ & \frac{\delta t}{\delta x} \min(0, V)(\bar{\Phi}_{i+1}^n - \bar{\Phi}_i^n) + \\ & \frac{1}{2} \frac{\delta t}{\delta x} \delta x \min(0, V)(c+1)(S_{i+1}^n - S_i^n) \end{aligned} \quad (10)$$

为了保证上述格式单调, 并防止在间断处产生振荡, 需要对梯度 S_i^n 加以限制^[5,6]。方程(10)即是 Superbee-TVD 格式的基本表达式。对于二维情形, 可采用分步法进行计算。前半个时间步计算 x 方向的变化, 得到中间值 $\Phi^{n+1/2}$; 以此为初值, 在后半个时间步内求解 y 方向的变化, 即可得 $n+1$ 时刻的 Φ^{n+1} 。

3.3 用 3 阶 Runge - Kutta 法和 5 阶 WENO 组合格式求解 Level Set 函数输运方程

将 Level Set 输运方程

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + V \frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0$$

改写为空间导数离散算子的形式, 即

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} = L(\Phi) = -U \frac{\partial \Phi}{\partial x} - V \frac{\partial \Phi}{\partial y} \quad (11)$$

对时间离散, 采用 3 阶 Runge-Kutta 法表示。对空间导数离散算子 $L(\Phi)$ 中的一阶对流项采用 5 阶 WENO 法求解。对点空间坐标点 i_0 , 可从左右两侧求出两个导数, 即左导数 Φ_x^- 和右导数 Φ_x^+ 。为求左导数 Φ_x^- , 选择 6 节点模板为

$$\{\Phi_{i_0-3}, \Phi_{i_0-2}, \Phi_{i_0-1}, \Phi_{i_0}, \Phi_{i_0+1}, \Phi_{i_0+2}\}$$

可求得 5 个一阶牛顿差商 v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 ; 为求右导数 Φ_x^+ , 选择另一个 6 节点模板

$$\{\Phi_{i_0-2}, \Phi_{i_0-1}, \Phi_{i_0}, \Phi_{i_0+1}, \Phi_{i_0+2}, \Phi_{i_0+3}\}$$

可求得另外一组一阶牛顿差商 v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 。根据牛顿差商定义中间系数 a_1, a_2, a_3 , 并由此求得权重系数 $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ 为

$$\omega_1 = \frac{a_1}{a_1 + a_2 + a_3}$$

$$\omega_2 = \frac{a_2}{a_1 + a_2 + a_3}$$

$$\omega_3 = \frac{a_3}{a_1 + a_2 + a_3} \quad (12)$$

对流项的 WENO 离散格式为

$$\begin{aligned} (\Phi_x^-)_{i_0} = & \omega_1 \left(\frac{v_1}{3} - \frac{7v_2}{6} + \frac{11v_3}{6} \right) + \\ & \omega_2 \left(\frac{-v_2}{6} + \frac{5v_3}{6} + \frac{v_4}{3} \right) + \\ & \omega_3 \left(\frac{v_3}{3} + \frac{5v_4}{6} - \frac{v_5}{6} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

根据迎风格式的思想, 对于节点 i_0 , 如果 $u_{i_0} > 0$, Φ_x 取 Φ_x^- , 反之取 Φ_x^+ 。 y 方向的计算方法与此相似。在权系数的计算中, 为保证分母不为零, 通常取 $\epsilon = 10^{-6}$ 。有关权系数的理论基础可参考文献[7, 8]。

4 数值计算方法

本文采用有限差分法对主流场和气-液界面的控制方程同时进行耦合求解。求解步骤为:

- ①流场、物理参数及 Level Set 函数 Φ 等的初始化;
- ②计算速度场;
- ③更新 Level Set 函数值 ($\Phi^n \rightarrow \Phi^{n+1}$);
- ④对函数值 Φ 重新初始化, 使之保持为符号距离函数;
- ⑤ 根据最新 Φ 值分布更新物性参数(在等温流动中主要是密度和粘性系数)分布;
- ⑥重复步骤②~⑤, 直至该时层内速度场收敛;
- ⑦开始下一个时间步, 重复步骤②~⑥, 直至完成所要求的时间。本文数值实验的计算区间为 $x \in [0, 0.2], y \in [0, 0.2]$ 。在大部分计算中采用 100×100 的均匀网格, 部分计算中采用 60×60 的网格。根据求解问题的不同, 计算区域的四周采用光滑固体边界条件或周期性边界条件。

5 算例及分析

用前述方法分别对圆形、正方形、三角形、Zaleska 图形所代表的典型相界面在不同流场中的迁移现象进行模拟计算, 并进行比较分析。典型流场包括:

- (1)垂直均匀流: $U=0; V=-0.05$
- (2)水平均匀流: $U=0.5; V=0$
- (3)与网格倾斜相交的斜向均匀流场: $U=-$

0.05, $V = -0.05$

(4) 旋转场:

$$U = -0.2\pi(y - 0.1), V = 0.2\pi(x - 0.1)$$

(5) 剪切场:

$$U = 0.2\pi \cos[\pi(x - 0.1)] \sin[\pi(y - 0.1)]$$

$$V = -0.2\pi \sin[\pi(x - 0.1)] \cos[\pi(y - 0.1)]$$

5.1 一般差分格式对圆形界面在垂直均匀流场中运动过程的数值模拟

图 1 给出的是用方程(6)所表示的一般差分格式模拟圆形相界面在垂直均匀流场中运动时的结果。如前所述,用这种简单格式计算出的结果误差较大,在以后的计算中不使用。

5.2 Superbee-TVD 格式和 Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 组合格式的计算结果比较

5.2.1 圆形界面在斜向均匀流场中运动过程的数值模拟 用 Superbee-TVD 格式和 Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 组合格式模拟圆形界面在斜向均匀流场中运动时所得出的计算结果见图 2。圆形界面的初始半径 $R = 0.01\text{m}$, 初始圆心位置为

$(x_0, y_0) = (0.1, 0.1)$; 速度场为条件(3)。由图 2 可见, Superbee TVD 格式的计算结果(图 2a)使界面不能够保持原有面曲的光滑性, 而采用 Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 组合格式的计算结果(图 2b)对原有相界面的形状保持得很好。

5.2.2 正方形界面在旋转流场中运动过程的数值模拟 用 Superbee-TVD 格式和 Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 组合格式模拟正方形界面在旋转流场中运动时所得出的结果见图 3。初始时刻, 正方形中心位于 $(x_0, y_0) = (0.1, 0.1)$; 计算时间 $t=2.0\text{s}$; 速度场条件为(4), 即旋转流场。由图 3 可以看到, 在旋转流场条件下, Superbee TVD 格式的计算结果对直线段的特性保持较好(图 3a), 而 Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 组合格式的计算结果则使原始的直线段形状改变为弧形线(图 3b), 但对直线段相交处的处理则显得比较光滑连续。

5.2.3 Zaleska 模型在旋转流场中运动过程的数值模拟 用 Superbee-TVD 格式和 Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 组合格式模拟 Zaleska 模型界面在旋

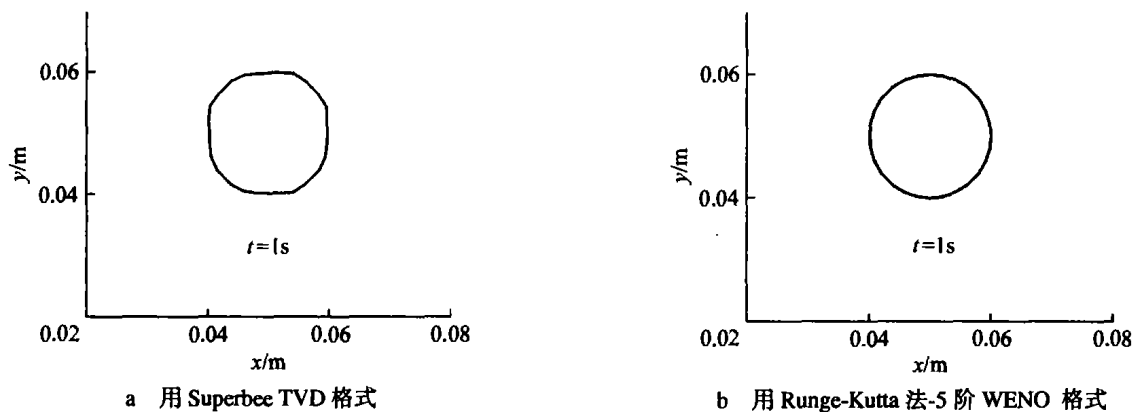


图 2 圆形界面在倾斜均匀流场中的运动过程数值模拟

Fig. 2 Numerical Simulation of the Movement of a Circular Interface in the Inclined Uniform Flow Field

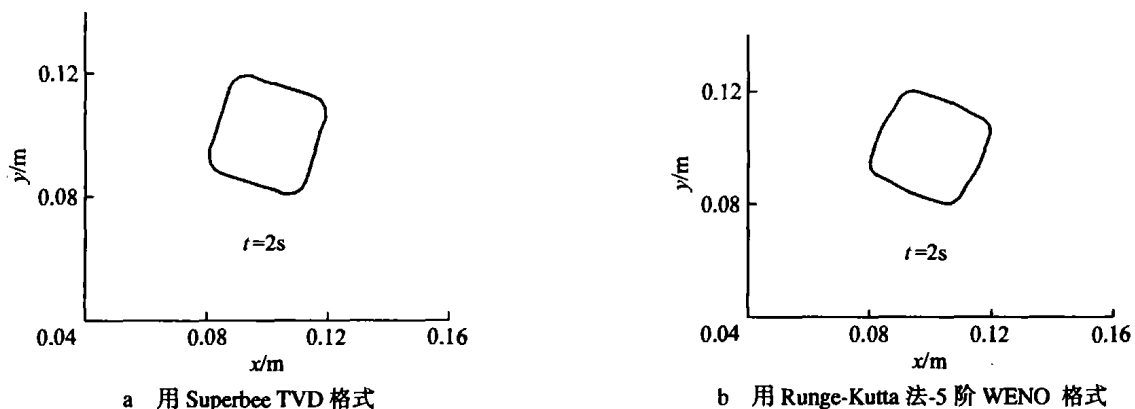
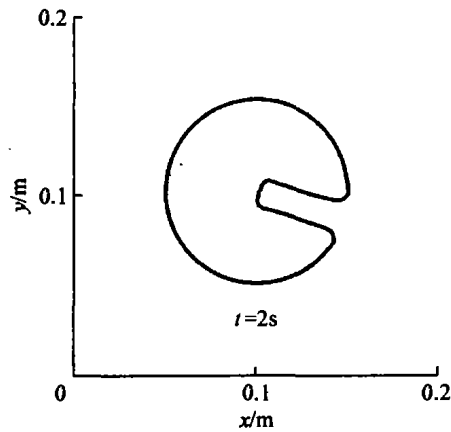


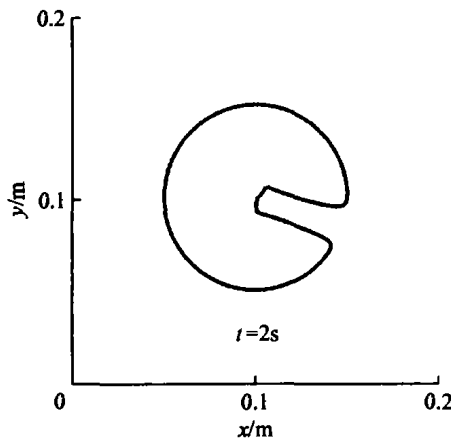
图 3 正方形界面在旋转流场中的运动过程数值模拟

Fig. 3 Numerical Simulation of the Movement of a Square Interface in the Rotating Flow Field

转流场中运动时的计算结果见图 4。Zalska 模型表示一个马蹄形界面。初始时刻，圆心在 $(x_0, y_0) = (0.1, 0.1)$ ；半径为 0.05m；在圆心正下方有一个宽为 0.02m 的缺口^[9]；速度场为条件(4)。可以看到，Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 组合格式对开口处直线和圆弧交点区域的模拟结果比图 4a 的更光滑，而且，圆内直线段有所变形；Superbee- TVD 格式的结果相对更准确。



a 用 Superbee TVD 格式

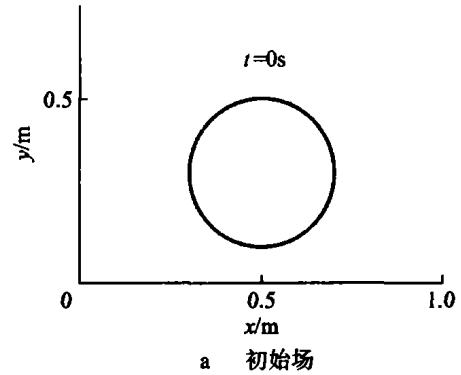


b 用 Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 格式

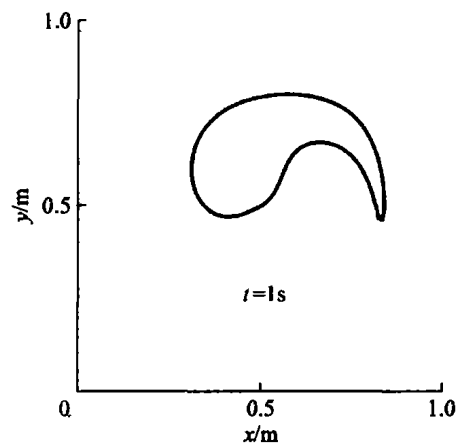
图 4 Zaleska 模型界面在旋转流场中运动的数值模拟

Fig. 4 Numerical Simulation of the Movement of a Zaleska Model in the Rotating Flow Field

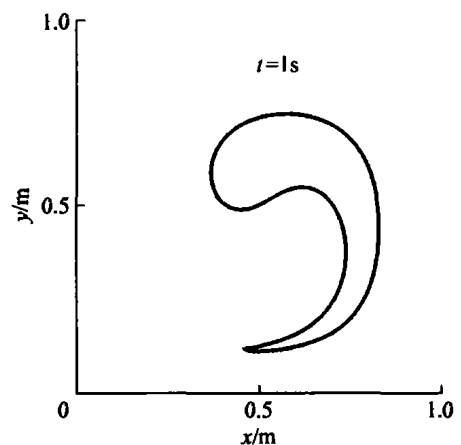
5.2.4 圆形界面在剪切场中运动过程的数值模拟 图 5 为用 Superbee TVD 格式与 Runge-kutta 法-5 阶 WENO 组合格式对圆形界面在剪切场中运动过程的数值模拟结果。速度场为条件(5)；初始界面为一个圆心在 $(0.5, 0.3)$ ，半径 $R=0.2m$ 的圆(图 5a)；显然，这两种格式的模拟结果差别较大。用 Runge-Kutta 法-5 阶 WENO 组合格式的计算结果与文献[8]中的计算结果相吻合，而用 Superbee-



a 初始场



b 使用 Superbee TVD 格式



c 使用 Runge-Kutta and WENO 格式

图 5 圆形界面在剪切流场中的运动过程的数值模拟

Fig. 5 Numerical Simulation of the Movement of a Circular Interface in the Shear Field

TVD 格式计算的结果则偏差较大。

5.2.5 讨论 除上述结果之外，还用 Superbee-TVD 格式与 Runge-kutta 法-5 阶 WENO 组合格式分别对圆形、三角形、正方形界面及 Zaleska 模型界面在其它流场中的运动过程进行了模拟计算。通过比较分析发现，可得出下述有意义的结论：

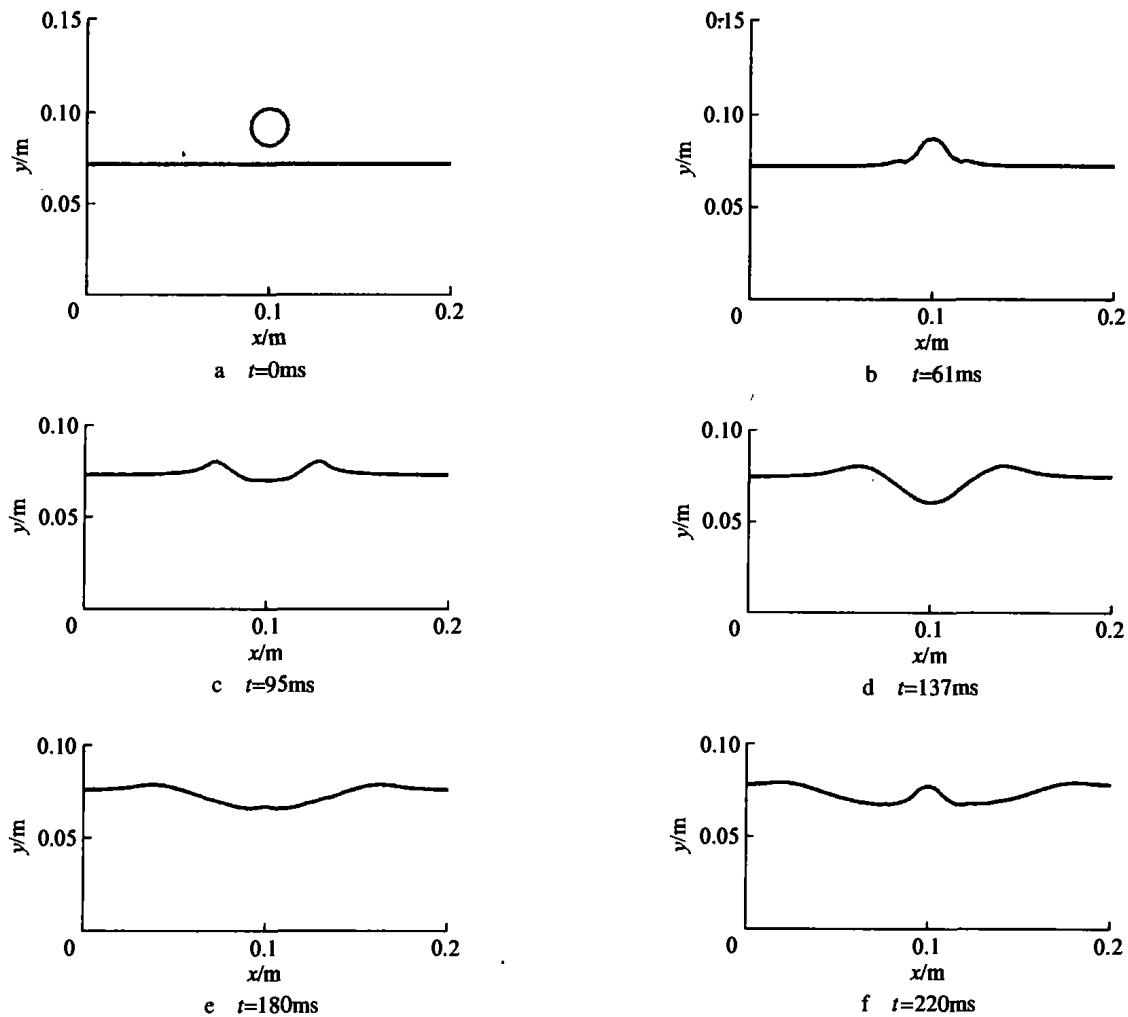


图6 水滴从空气中静止落入水面后的水滴及自由水面的形状变化

Fig. 6 Simulation of the Impact of a Freely Falling Water Droplet onto the Free Surface of Water

(1)由于数值耗散等原因,对气-液相界面这样的运动界面的数值模拟总会存在一定的误差,特别是在存在尖锐拐角的地方,相界面几何特性的急剧变化容易被抹平。

(2)随着流场条件和相界面几何特性的不同,Superbee-TVD格式与Runge-kutta法-5阶WENO组合格式分别表现出不同的优点和不足。

(3)总体而言,Runge-kutta法-5阶WENO组合格式比Superbee TVD格式的数值模拟结果更为准确,效果更好。

目前,已有作者提出了一些辅助方法,可以更精确的保持相界面几何特性的尖锐变化,如Ghost Fluid Method^[10]。但值得注意的是,这些方法必须与诸如本文介绍的相界面输运方程的求解方法相结合;另一方面,这些辅助方法主要是从数学的角度提出的,在实际物理问题的求解中如何实施仍需仔细研究。

5.3 水滴自由下落与水面冲击过程的数值模拟

为了说明本文方法在气-液两相流中的应用效果,图6给出了对雨滴落入水体自由表面这一典型气-液两相流问题的一个模拟结果。初始时刻静止的水滴在空气中自由下落,落入大面积水体后与水体自由表面融合,造成水体自由表面的波动。计算中,气、液两相的密度比为1000/1。由图6可看到,水滴从空气中下落并接触到水面后,继续下降,逐渐与水体自由表面融合;由于水滴初始动量的作用,水体自由表面上出现凹陷,并在水滴落入点周围形成“弹坑”和“环形山弧”;继而由于表面张力作用,水面又继续向上反弹;在此过程中,由于水滴的冲击而形成的波动向四周逐渐传递。数值模拟得到的这一图象与实际现象很符合,表明本文介绍的方法有效而且可靠。更多的研究结果见文献[5]。

6 结束语

Level Set 函数法是对气-液两相流中界面迁移过程进行数值模拟研究的有效方法,而且精度很高。总体而言,采用3阶 Runge-Kutta 法-5阶 WENO 组合格式求解相界面输运方程比采用

Superbee TVD 等其它格式具有更高的精度,尤其是对曲线和直线相交处的处理显得更加细腻,能够达到较高分辨率,对曲线形状的保持也很好。在我们的研究中也发现了一些问题,比如 Runge-Kutta 法-5阶 WENO 组合格式对直线段的形状保持则不如 Superbee TVD 格式的好,诸如此类的问题还有待于继续探讨。

参考文献:

- [1] 陈学俊, 陈立勋, 周芳德. 气液两相流与传热基础[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [2] Lebaigue O, Jamet D, Duquenois C et al. Review of Existing Methods for Direct Numerical Simulation of Liquid-Vapor Two-Phase Flows[C]. Proceedings of the 6th International Conference on Nuclear Engineering, San Diego, 1998.

- [3] Sethian J A, Adalsteinsson D. An Overview of Level Set Methods for Etching, Deposition, and Lithography Development[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1997, 10(1): 167 ~ 184.
- [4] 李会雄, 杨冬, 陈昕宽等. LEVEL SET 方法及其在两相流数值模拟研究中的应用[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(1): 233 ~ 236.
- [5] 邓晟. 气-液两相流的相界面追踪及数值模拟方法研究[D]. 西安: 西安交通大学能源与动力工程学院, 2004.
- [6] Harten A. High Resolution Schemes for Hyperbolic Conservation Laws[J]. J Comput Phys, 1983, 49, 357 ~ 393.
- [7] Jiang G, Shu C W. Efficient Implementation of Weighted ENO Schemes[J]. J Comput. Phys, 1996, 126: 202 ~ 228.
- [8] 刘儒勋, 王志峰. 数值模拟方法和运动界面追踪[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.
- [9] Zaleska S T. Fully Multi-Dimensional Flux Corrected Transport Algorithms for Fluid Flow[J]. J. of Comput. Phys, 1979, 31(3): 335 ~ 362.
- [10] Fedkiw R P, Aslam T, Merriman B. A Non-Oscillatory Eulerian Approach to Interfaces in Multimaterial Flows (the Ghost Fluid Method) [J]. J Comput Phys, 1999, 152(2): 457 ~ 492.

Numerical Simulation of Interface Movement in Gas-Liquid Two-Phase Flows with Level Set Method

LI Hui-xiong^{1,2}, DENG Sheng¹, ZHAO Jian-fu², CHEN Ting-kuan¹, WANG Fei³

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, 710049, China;

2. National Micro-Gravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080, China;

3. National Key Laboratory of Bubble Physics & Natural Convection, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China)

Abstract: Numerical simulation of gas-liquid two-phase flow and heat transfer has been an attractive work for a quite long time, but still remains as a knotty difficulty due to the inherent complexities of the gas-liquid two-phase flow resulted from the existence of moving interfaces with topology changes. This paper reports the effort and the latest advances that have been made by the author and his collaborators, with special emphasis on the methods for computing solutions to the advection equation of the Level set function, which is utilized to capture the moving interfaces in gas-liquid two-phase flows. Three different schemes, i.e. the simple finite difference scheme, the Superbee-TVD scheme and the 5-order WENO scheme in combination with the Runge-Kutta method are respectively applied to solve the advection equation of the Level Set. A numerical procedure based on the well-verified SIMPLER method is employed to numerically calculate the momentum equations of the two-phase flow. The above-mentioned three schemes are employed to simulate the movement of four typical interfaces under 5 typical flowing conditions. Analysis of the numerical results shows that the 5-order WENO scheme and the Superbee-TVD scheme are much better than the simple finite difference scheme, and the 5-order WENO scheme is the best to compute solutions to the advection equation of the Level Set. The 5-order WENO scheme will be employed as the main scheme to get solutions to the advection equations of the Level Set when gas-liquid two-phase flows are numerically studied in the future.

Key words: Level set method, Gas-liquid two-phase flow, 5-WENO scheme, Superbee-TVD scheme

(下转第 267 页)

- [5] Maxwell Robert S, Cohenour Rebecca, Sung William, et al. The Effects of γ -Radiation on the Thermal, Mechanical, and Segmental Dynamics of a Silica Filled, Room Temperature Vulcanized Polysiloxane Rubber [J]. Polymer Degradation and Stability, 2003, 80: 443 ~ 450.
- [6] Hill D J T, O'Donnell J H, Perera M C S et al. High Energy Radiation Effects on Halogenated Butyl Rubbers[J]. Polymer, 1995, 36(8): 4185 ~ 4192.
- [7] 傅依备. 几种高分子材料的核辐射效应研究[J]. 材料导报, 2003, 12(2): 4 ~ 7.
- [8] Giessler K H, Maldener J, Becht T et al. Nuclear Reaction Analysis of Thin Fluorinated Polymer Films [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 1995, 99: 444 ~ 446.

Effects of γ -ray on the Fireproof Materials

WEI Zhao-rong¹, ZHU Shi-fu¹, ZHAO Bei-jun¹, ZOU Hong²,
YANG Wen-bin¹, WEI Yong-lin¹

(1. Sichuan University, Chengdu, 610064, China; 2. National Key Laboratory for Nuclear Fuel and Materials, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China)

Abstract: In order to guarantee the fire safety of nuclear power plants, we have studied the radio resistance of two kinds of fireproof materials—the cable fireproof coating and organic fireproof putty, which are widely used in nuclear power stations. The results indicate that the γ -ray over 1000 kGy can seriously deteriorates the bending-resistance performance, the wet-resistance and heat-resistance, the cold-resistance and heat-resistance performances of the cable fireproof coating. The γ -ray over 500 kGy not only possess great effects on the corrosion performance of the organic fireproof putty but decreases the fireproof capability greatly.

Key words: γ -ray, Cable fireproof coating, Organic fireproof putty, Performance

作者简介:

魏昭荣(1966—), 男, 博士研究生。1999年毕业于北京理工大学, 获理学硕士学位。现从事材料物理与化学的研究。

朱世富(1945—)男, 教授, 博士生导师。1970年毕业于四川大学物理系。现从事材料物理与化学的研究。

赵北君(1949—)女, 教授, 博士生导师。1982年毕业于四川大学物理系。现从事材料物理与化学的研究。

(责任编辑: 刘胜吾)

(上接第 248 页)

作者简介:

李会雄(1966—), 男, 教授, 博士生导师。1987年毕业于西安交通大学热能工程专业, 1994年获得工学博士学位, 1996~1999年在瑞典皇家工学院做博士后研究。现主要从事多相流与传热现象研究。

邓 晟(1975—), 男, 西安交通大学热能工程专业硕士研究生。

赵建福(1967—), 男, 博士, 副研究员。1998年毕业于武汉水利电力大学, 获博士学位。目前主要从事微重力和微细尺度气液两相流与传热研究。

(责任编辑: 查刚菊)