

VOF 方法理论与应用综述

张 健¹ 方 杰¹ 范波芹²

(1. 河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 浙江省水利水电技术咨询中心, 浙江 杭州 310012)

摘要 分析两相流中采用 VOF 方法模拟界面运动变化的基本原理, 概述近年来为提高 VOF 方法计算精度和自由面重构效果所做出的各种改进和在各个领域所取得的研究成果及应用前景. 指出 VOF 方法如在基础理论上进行改进, 则在多维流场的数值模拟上将会有更广阔的应用空间.

关键词 两相流; VOF 方法; 界面重构

中图分类号: TV13 文献标识码: A 文章编号: 1006-764X(2005)02-0067-04

Advances in research of VOF method//ZHANG Jian¹, FANG Jie¹, FAN Bo-qin²(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China; 2. Water Resources and Hydropower Technology Consulting Center of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China)

Abstract: An introduction was given to the principle of the VOF method in the simulation of interface variation in two-phase flows. Some works for improvement of the calculation precision and the effect of interface reconstruction of the VOF method and some research results were summarized. Finally, it was pointed out that the VOF method could be widely applied to numerical simulation of multi-dimensional flow fields if some theoretical improvements were made.

Key words: two-phase flow; VOF method; interface reconstruction

1 VOF 方法及原理

VOF 方法的基本原理是通过研究网格单元中流体和网格体积比函数 F 来确定自由面, 追踪流体的变化, 而非追踪自由液面上质点的运动. VOF 方法可以处理自由面重入等强非线性现象, 所需计算时间短、存储量少, 但在处理 F 的变化时稍显繁琐, 有一定人为因素. VOF 方法根据体积比函数 F 来构造和追踪自由面. 若 $F = 1$, 则说明该单元全部为指定相流体所占据; 若 $F = 0$, 则该单元为无指定相流体单元; 当 $0 < F < 1$ 时, 则该单元称为交界面单元. 假定流场中任意点 (x, y) , 定义函数 $f(x, y, t)$ 如下:

$$f(x, y, t) = \begin{cases} 1 & \text{在 } (x, y) \text{ 点有该相流体质点} \\ 0 & \text{在 } (x, y) \text{ 点无该相流体质点} \end{cases} \quad (1)$$

守恒形式的传输方程表示为

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \frac{\partial uf}{\partial x} + \frac{\partial vf}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

采用图 1 所示的交错网格, 阴影表示液体部分, 时间采用一阶差分格式, 方程 (2) 差分形式为

$$\frac{F_{i,j}^{n+1} - F_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{\delta F_{i+\frac{1}{2},j} - \delta F_{i-\frac{1}{2},j}}{\Delta x_i} +$$

$$\frac{\delta F_{i,j+\frac{1}{2}} - \delta F_{i,j-\frac{1}{2}}}{\Delta y_j} = 0 \quad (3)$$

其中 $\delta F_{i\pm\frac{1}{2},j}$ 和 $\delta F_{i,j\pm\frac{1}{2}}$ 为通过网格单元边界的流通量(图 1 箭头方向表示流通量方向), 其积分形式为

$$\begin{cases} \delta F_{i\pm\frac{1}{2},j} = \frac{1}{\Delta t \Delta y_j} \int dt \int_{\Delta y_j} (uf)_{i\pm\frac{1}{2},j} dy \\ \delta F_{i,j\pm\frac{1}{2}} = \frac{1}{\Delta t \Delta x_i} \int dt \int_{\Delta x_i} (vf)_{i,j\pm\frac{1}{2}} dx \end{cases} \quad (4)$$

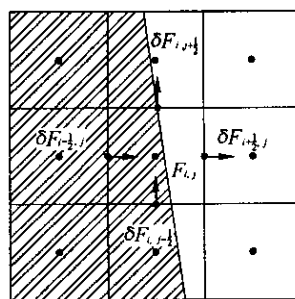


图 1 网格单元上的变量表示

2 VOF 方法研究进展

自 Hirt 和 Nichols 首次提出 VOF 方法以来, 为了精确模拟强非线性流动, 国内外学者从方程差分格

基金项目: 国家重点实验室开放基金资助项目(2003B005); 教育部博士基金资助项目(20010294006)

作者简介: 张健(1970—), 男, 河南信阳人, 博士, 教授, 从事电站水力学研究.

式和自由面流体传输两方面着手,结合自由面重构格式对 VOF 方法进行了联合改进. Noh 等^[2]提出的 SLIC-VOF 方法采用分裂算法,规定界面法向与坐标轴平行,人为性较强. Hirt 和 Nichols 采用施主-受主格式(图 1 中 (i, j) 单元右边界的流通量由边界相邻单元的体积比函数 F 以及边界速度共同确定,具体见式(5)),自由面方向由相邻 8 个单元的 F 值规定. Cook 等^[3]在此基础上推广至三维,对输运方程在空间上离散采用二阶迎风格式,网格划分采用非正交自适应网格,流体输运规则仍采用施主-受主法则.

$$\delta F_{i+\frac{1}{2},j} = \delta y \left\{ \min \left[F_{i,j} \delta x, U_{i+\frac{1}{2},j} F_{i+1,j} \delta t + \max \left(0.0, U_{i+\frac{1}{2},j} (1 - F_{i+1,j}) \delta t - (1.0 - F_{i,j}) \delta x \right) \right] \right\} \quad (5)$$

Puckett 等^[4]为保证质量守恒,对输运方程采用方向分裂算法,将方程(2)改写成方程(6)和(7),再沿两个方向交替进行数值计算.该方法对自由面则用离散的线段来表示,通过相邻网格的体积分数来预测自由面的法向,近似重构得到的结果相对较粗糙. Gao 等^[5]通过计算认为在一个时步内,交替方向重复循环计算可得到更精确的 F 值.

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (Fu)}{\partial x} = F \frac{\partial u}{\partial x} & (6) \\ \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial (Fv)}{\partial y} = F \frac{\partial v}{\partial y} & (7) \end{cases}$$

FCT-VOF 方法由 Boris 和 Book^[6]提出并经 Zalesak^[7]改进扩展至多维.扩展方法有两种:①基于数值流通量守恒来求解体积函数,不分裂算子.二维 x 方向上右边界的流体体积量由式(8)和式(9)求解:

$$\begin{cases} \delta F_{i+\frac{1}{2},j}^L = \begin{cases} U_{i+\frac{1}{2},j} F_{i,j} & U_{i+\frac{1}{2},j} \geq 0 \\ U_{i+\frac{1}{2},j} F_{i+\frac{1}{2},j} & U_{i+\frac{1}{2},j} < 0 \end{cases} \\ \delta F_{i+\frac{1}{2},j}^H = \begin{cases} U_{i+\frac{1}{2},j} F_{i+1,j} & U_{i+\frac{1}{2},j} \geq 0 \\ U_{i+\frac{1}{2},j} F_{i,j} & U_{i+\frac{1}{2},j} < 0 \end{cases} \end{cases} \quad (8)$$

$$\delta F_{i+\frac{1}{2},j} = \delta F_{i+\frac{1}{2},j}^L + q_{i+\frac{1}{2},j} (\delta F_{i+\frac{1}{2},j}^H - \delta F_{i+\frac{1}{2},j}^L) \quad (9)$$

其中低阶流通量采用顺风格式,高阶流通量采用逆风格式, $q_{i+\frac{1}{2},j}$ 为流量校正因子.该格式既可消除逆风格的耗散效应,又可抑制顺风格式的不稳定.②采用方向分裂算法. Rudmar^[8]通过验证发现后者模拟效果更好,但缺点是在进行交替方向计算时得到的中间值 F 可能会大于 1.0. 由于在进行另一方向的计算时要用到 F ,因此原来满流体单元内部的值会小于 1.0,产生一些非物理的破碎区域. Rudmar^[8,9]在此基础上针对交替方向计算可能会出现 F 大于 1.0 的情况,对每个方向计算的是流体体

积,再利用 Lagrange 的观点修正网格体积,两者比值即为中间体积比函数 F ,对每个方向进行计算,最后得到网格下一时刻的流体体积比函数 F .此外 Rudman 还对多相流体交界面建立数学模型,认为对于多相流体交界面均可采用流体输运方程,只是其中流体体积比函数 F 的定义不同.

Youngs^[10]提出的 PLIC 方法对于满单元采用一阶顺风格式.对于自由面单元,先计算自由面法向,第一次引入自由面直线与 x 轴夹角 β ,根据 β 判断自由面类型,并由此计算流过四周边界的流体体积,来修改网格内的流体体积,考虑了相邻界面流体的细微输运,计算结果非常精细.重构方法则注意了自由面直线与四边的交点. Guignard^[11]通过在自由面的斜线段上设置标记点,根据标记点的移动方位来判断得到下时刻的 F ,与 PLIC 方法相比,这样做的优点是可以采用更大的时间步长.1991 年 Liang^[12]引入对角法向单元,从而将 VOF 法从正交坐标系拓展到非正交坐标系.以上算法中自由面单元的连接基本上都是协调的,多数采用一阶精度的施主-受主模型.

Ashgriz 和 Pofo^[13]提出的 FLAIR-VOF 方法也采用分裂算法.对于相邻单元为满单元,输运方程采用一阶迎风格式;对于含自由面单元,则根据相邻网格的体积分数求出自由面斜线段,再根据斜线段斜率以及网格边界速度方向来决定边界上的流通量,输运方程在空间离散可以达到二阶精度,修正后的 Lax-Wendoff 格式仅适用于均匀网格.王志东^[14]对该方法进行了修改,使其适用于非均匀网格.李谊乐等^[15]采用 TVD 差分格式,根据 Hirt-VOF 方法原则采用 1/4 和 3/4 单元表示自由面网格中流体的形状,使自由面的 TVD 格式可以达到二阶精度,即可以消除自由面剧烈变化时 Lax-Wendoff 格式引起的震荡和一阶迎风格的耗散效应. Lafaurie 等^[16]将三维输运方程离散,根据自由面的法向和边界面流速方向夹角值来确定边界面的流通量.夹角值由界面相邻单元的流体体积确定,显然这样规定较简单. Gueyffier 等^[17]将 PLIC 方法推广至三维,边界面上流通量由相邻网格单元流体体积数及边界面上中心速度和相邻单元中将要流过边界的质点速度共同确定,界面构造则是寻找运动界面所穿过的网格范围,仅进行与运动界面相交及相邻网格的运算,界面的位置和方向采用几何和代数方法迭代得到,并推导出了自由面方程的近似解析解.

Ubbink 和 Issa^[18]根据 Gaskell 和 Lau 的可压缩性构造思想,提出了 CICSAM 方法.控制体内流体体积为连续流构造的流通量和可压缩性思想构造的流

通量的平均值,利用精细网格内界面的迁移方法得到界面在网格内的运动位置和法向.该方法采用半隐格式处理.根据式(10)和(11),不用分裂算子就可扩展至多维.方程采用 C-N 格式离散,并对网格边界上的流通量进行修正,既保证有界,又维持体积函数守恒,并且适用于无结构网格.

$$(F_p^{n+1} - F_p^n)V_p = - \sum_{l=1}^K \frac{1}{2} [(F_l \delta F_l)^n + (F_l \delta F_l)^{n+1}] \delta t \quad (10)$$

$$F_l = (1 - \beta_l)F_D + \beta_l F_A \quad (11)$$

式中: P, K, I, V_p, F_l 分别代表控制体中心位置、边界数目、控制体边界位置、控制体体积、第 l 边界上的流通量. β_l 通过 NVD 方法确定.

Dendy 等^[19]对 CICSAM 方法做了两点改进:第一,输运方程采用显格式,修正流体输运公式,采用多维连续流格式代替 CICSAM 方法中的 ULTIMATE-QUICKEST 高阶一维格式,适用于四边形、三角形网格.对于连续水流区域的控制体 K ,第 l 面流通量 δF_l 表示如式(12).第二,继续使用 CICSAM 方法的 C-N 项,但采用 Thuburn 流量因子,对于包含其他相流体的不连续流体区域,则用高阶迎风显格式和光滑连续隐格式相结合代替 C-N 格式,以便在大库朗特数情况下也可以计算,且适用于无结构网格.

$$\delta F_K = \frac{1}{V_K} \sum_{l=1}^n F_l A_l N_{K-l} \quad (12)$$

式中: V_K, A_l 分别为第 K 控制体体积和第 l 边界面积.

Hong^[20]提出了一种斜线段界面重构法,采用水平相邻 3 个单元的 F 值来确定斜率,方程系数由相邻 8 个单元的 F 值来确定. Kim 等^[21]采用二次曲线来构造自由面,做得更为精细.图 2 为几种常用 VOF 法对实际流体进行构造,其中图 2(a)为实际界面.分别采用 Flair, Youngs, Hirt 方法的构造规则对图 2(a)进行构造,结果如图 2(b)、图 2(c)和图 2(d)所示.图 2(b)和图 2(c)采用斜线段来构造自由面,得到的结果与实际情况更吻合.

3 VOF 法的应用和前景

VOF 方法简单而有效,在实际工程应用中取得

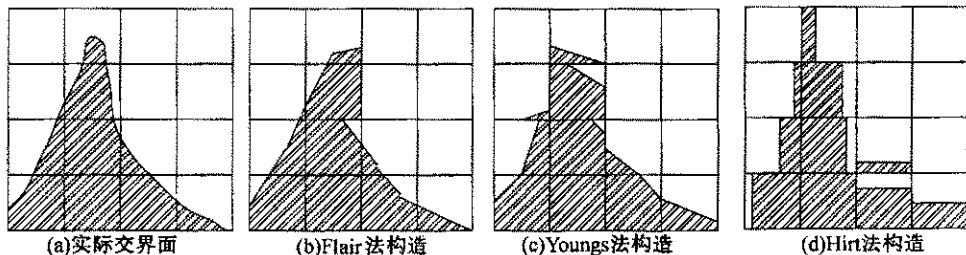


图 2 几种常用 VOF 法构造界面

了满意的计算结果.李然等^[22]利用三维 VOF 模型模拟水利工程中天然河流水面线,计算分析得到的洪水对泄洪渠的影响程度和范围与实测结果相比误差很小.姚朝辉等^[23]利用 HIRT-VOF 方法对核电站热力管系统中存在的蒸汽和冷水混流中出现的蒸汽泡冷凝溃灭过程进行数值模拟,分析了热力管系统中出现蒸汽泡和冷水交汇时气泡溃灭的变化过程,指出热力管中蒸汽泡溃灭将产生巨大的水锤压力;包光伟^[24]采用 HIRT-VOF 方法对火箭燃料箱内的液体在关机时段的大幅晃动响应过程进行了模拟,结果表明该方法计算液体飞溅和破碎现象的能力较强;李梅娥等^[25]通过 SOLA-VOF 方法对金属铸造成型过程中的流体运动规律进行数值模拟,得出改变浇铸系统浇口和改变液体温度应力分布可以提高液面稳定、改善充型形态的结论;戴会超等^[26]采用 HIRT-VOF 方法较准确地模拟出淹没水跃的大尺度紊流结构及其微观结构;Hur Dong-Soo 等^[27]采用三维 SOLA-VOF 方法对无碎波海域中不对称建筑物周围的水流流态进行数值模拟,准确俘获到建筑物附近的海域波型;Hieu Phung Dang 等^[28]采用 HF-VOF 方法对斜坡海岸上的波浪翻滚现象进行模拟,指出采用 N-S 双方程耦合求解可改进自由面单元中的压力和速度插值;Tseng 等^[29]采用 PLIC-VOF 方法模拟微观管网系统中微观井的充液过程,指出井的形状和液体的表面张力对充液结果影响很大.

近年来,随着我国对西部水电的开发,输水管线越来越长,布置形式日趋复杂,由于长时间停机造成管道中聚集大量气体,短时间无法顺利排出,在机组启动时,可能产生比常规水锤大得多的压力;此外,在一些大型水电站输水系统的方案比选中,提出了一种新的布置形式——变顶高尾水洞方案,当输水系统发生水力瞬变时,变顶高尾水洞尾水流出为明满交替流;采用无结构网格进行数值模拟分析,得到的结果将会更符合实际;另外,随着城市建设不断发展,供排水系统日趋复杂,当突降暴雨时,地面积水由于排水系统中存在气体而无法顺畅排出,水流流态由于地下系统气、液交界面的存在变得相当复杂,甚至会对地下排水系统的安全构成威胁.由此可见,

很多涉及水、气两相交界面,互相推动的水力瞬变问题亟待解决,而VOF方法作为处理自由面边界条件的重要方法,将在未来发挥越来越大的作用。

4 结 论

VOF方法的发展和改进使两相、多相交界面的计算仿真越来越精确,流体输运方程由二维拓展至三维,差分格式复杂多样,边界适用条件从规则边界到不规则边界,计算网格从二维网格发展到三维网格、正交网格、非正交自适应网格、无结构网格等等。VOF方法除提高自由面的模拟精度外,其处理的边界条件越来越复杂,适用范围越来越广,所解决的问题涉及化学、热能、机械、水利等众多学科和不同领域,在未来应用中将有更广阔的前景。

参考文献:

[1] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundary[J]. *Compute Phys*, 1981, 39: 201—225.

[2] Noh W F, Woodward P. SLIC (simple line interface calculation) in van Dooren A I and Zandberger P [J]. *Lecture Notes in Physics*, 1982, 59: 273—285.

[3] Cook M, Behnia M. Bubble motion during inclined intermittent flow[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2001, 22: 543—551.

[4] Puckett E G, Almgren A S, Bell J B, et al. A high-order projection method for tracking fluid interface in variable density incompressible flow[J]. *Compute Phys*, 1997, 130: 269—282.

[5] Gao D, Morley N B, Dhir V. Numerical simulation of wavy falling film flow using VOF method[J]. *Compute Phys*, 2003, 192: 624—642.

[6] Boris J P, Book D L. Flux-corrected transport algorithm that work[J]. *Compute Phys*, 1973, 11: 38—69.

[7] Zalesak S T. Fully multi-dimensional flux-corrected transport algorithms for fluid[J]. *Compute Phys*, 1979, 31: 335—362.

[8] Rudman M. A volume-tracking method for incompressible multi-fluid flows with large density variations[J]. *Inter Numeric Methods in Fluids*, 1998, 28: 357—378.

[9] Rudman M. Volume-tracking methods for interfacial flow calculation[J]. *Inter Numeric Methods in Fluids*, 1997, 24: 671—691.

[10] Youngs D L. Time-dependent multi-material flow with large fluid distortion[D]. New York: Academic, 1982. 273—285.

[11] Guignard Stephan, Marcer Richard, Rey Vincent, et al. Solitary wave breaking sloping beaches 2-D two phase flow numerical simulation by SL-VOF method[J]. *Eur J Mech B-Fluids*, 2001, 20: 57—74.

[12] Liang P Y. Numerical method for calculation of surface tension flows in arbitrary grid[J]. *AIAA J*, 1991, 29: 161—167.

[13] Ashgriz N, Poo J Y. Flux line-segment model for advection and interface reconstruction[J]. *Compute Phys*, 1991, 93: 449—468.

[14] 王志东. 三维自由面湍流流场数值模拟及其在水利工程中的应用[D]. 南京: 河海大学, 2003.

[15] 李谊乐, 刘应中, 繆国平. 二阶精度的VOF自由面追踪方法及其应用[J]. *船舶力学*, 1999, 3(1): 44—52.

[16] Lafaurie B, Nardone C, Scardovelli R, et al. Modelling merging and fragmentation in multiphase flows with SURFER[J]. *Comput Phys*, 1994, 113: 134—147.

[17] Gueyffier D, Jie L. Volume-of-fluid interface tracking with smoothed surface stress methods for 3D flows[J]. *Compute Phys*, 1999, 152: 423—456.

[18] Ubbink O, Issa R I. A method for capturing sharp fluid interfaces on arbitrary meshes[J]. *Compute Phys*, 1999, 153: 26—50.

[19] Dendy E D, Padias Collins N T, VanderHeyden W B. A general-purpose finite-volume advection scheme for continuous and discontinuous fields on unstructured grids[J]. *Compute Phys*, 2002, 180: 559—583.

[20] Hong F W. A new free surface reconstruction method in VOF[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 1999, 3(3): 8—13.

[21] Kim S O, No H C. Second-order model for free surface convection and interface reconstruction[J]. *Inter Numeric Methods in Fluids*, 1998, 26: 79—100.

[22] 李然, 李宏, 李嘉, 等. 气液两相流理论在明渠水气界面计算中的应用[J]. *水动力学研究与进展*, 2002, 17(1): 77—83.

[23] 姚朝辉, 叶宏开, 王学芳, 等. 空泡溃灭水锤的VOF计算方法[J]. *原子能科学技术*, 1995, 29(1): 20—26.

[24] 包光伟. 火箭推进剂液体晃动关机响应的数值仿真[J]. *宇航学报*, 2002, 23(2): 84—88.

[25] 李梅娥, 王友序. 薄板件反重力充型形态的数值模拟研究[J]. *特种铸造及有色合金*, 2000(2): 45—47.

[26] 戴会超, 王玲玲. 淹没水跃的数值模拟[J]. *水科学进展*, 2004, 15(2): 184—188.

[27] Hur Dong-Soo, Miutani Norimi, Kim Do-Sam. Direct 3-D numerical simulation of wave forces on asymmetric structures[J]. *Coastal Engineerin*, 2004, 51: 407—420.

[28] Hieu Phung Dang, Katsutoshi Tanimoto, Ca Vu Thanh. Numerical simulation of breaking waves using a two-phase flow model[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2004, 28: 983—1005.

[29] Tseng F G, Yang I D. Fluid filling into micro-fabricated reservoirs[J]. *Sensors and Actuators A*, 2002, 97: 131—138.

(收稿日期 2004-06-28 编辑 高建群)