

可压缩多介质流体的三维自适应求解算法研究

郑洪伟*

中国科学院力学研究所 高温气体动力学国家重点实验室, 北京, 100190

E-mail: h.zheng@imech.ac.cn

关键词：六面体背景网格, 自适应网格, 多介质流体

1 引言

对于很多复杂外形的复杂流动, 其流动现象(如激波、面层及多介质界面不稳定等)一般具有多尺度及各向异性的特征。为了精确模拟和捕捉这些流动特征, 传统的网格生成技术很难胜任。比如, 对于多介质流体的界面的捕捉, 如果网格没有达到足够密的情况下, 很难捕捉到界面不稳定性引起的小涡。这就要求发展自适应网格生成技术。自适应网格中一大类是笛卡儿网格[1-3]。它具有快速自动生成的优点。但是它也有其致命缺点, 那就是面层很难精确拟合, 因此面层处理精度不高。另外一大类是基于非结构化背景网格的自适应网格生成方法[4-6]。本文发展了基于六面体背景网格的自适应网格生成方法, 能容易生成高质量的自适应网格, 同时占用内存少、效率高的优点, 并且能容易捕捉小尺度流场结构的特征。本文主要包含了两个方面的工作。第一个方面是基于六面体背景网格的自适应网格生成。它与笛卡儿网格的只有一个“根”节点的基于“树”的数据存储结构不同, 此方法采用许多“根”节点的基于“森林”的数据存储结构。它以非结构化四面形背景网格上的每个单元为“树”的根节点, 这些“树”的集体就形成了“森林”, 这样自适应生成相应的网格就是一片以背景网格上各个单元为“根”节点的树的“森林”。除此外, 本自适应网格方法具有占用内存少的优点。

第二个方面工作是数值算法方面的工作, 主要发展了在三维自适应网格下求解可压缩多介质流体的数值方法[6,7,8], 特别是采用了与求解流场一致的 HLLC 格式去离散界面输运方程, 界面附近不会出现数值振荡等的非物理现象。另外, 所有单元的面是按照有无被加密分别存储在两个不同列表里: 没有被加密的面(本文中也称为“叶”面)和有“子”面的面(本文中也称为“母”面)。这样就可以用上基于面的算残量方法, 也就是只算“叶”面的通量, 然后同时更新这个面的左右单元的残量。我们知道, 有限体积法的计算量主要集中在面的通量的计算上, 因此这样做的结果是极大的减少了计算量, 提高了计算效率。此方法另外一大特点是, 各个不同层的单元也存储在不同的列表里, 因此求解方程可以只在最底层的单元中进行, 而上面各个层的单元的解只要从各自下层单元的解通过守恒律直接得到。

2 算例分析

为了验证本方法, 这里对激波和气泡相互作用的经典算例进行计算。一个气泡被放在充满水的区域($[0,1.2] \times [0,1] \times [0,1] \text{m}^3$)中。开始时, 一个 Mach 数为 1.422 从右边往左边传播。气泡中心位于 $(0.7, 0.5, 0.5)\text{m}$, 半径 r_0 为 0.2m 。这个问题有大的压力跳跃和大声阻比, 因此很考验算法的鲁棒性。这里采用基于 $12 \times 10 \times 10$ 的六面体背景网格上的四层自适应计算网格来计算。上下面为反射边界条件, 其余面为无反射边界条件。

计算的不同时刻 ($100\mu\text{s}$, $200\mu\text{s}$, $300\mu\text{s}$) 的自适应网格图、密度等值面以及界面位置。从中可以明显看出, 自适应网格很好的捕捉了气泡表面、激波等流产结构。激波是从右往左传播的, 开始

激波没有打到气泡时，可以明显感觉到气泡右边被压缩了。当激波继续从右往左传播并打到气泡时，激波从气泡表面会反射上下两个圆的波。这个可以从图 1 里的气泡界面图看的更加清楚。

3 结论

本文发展了基于六面体背景网格的自适应网格生成方法，能容易生成高质量的自适应网格，同时占用内存少、效率高的优点，并且能容易捕捉小尺度流场结构的特征。本文阐述了具体的数据结构和自适应算法，并用激波和气泡相互作用数值模拟来考察发展的自适应算法，说明了本方法能用于大压力跳跃、大密度比的可压缩多介质流体的计算，反映了本方法的可靠性。

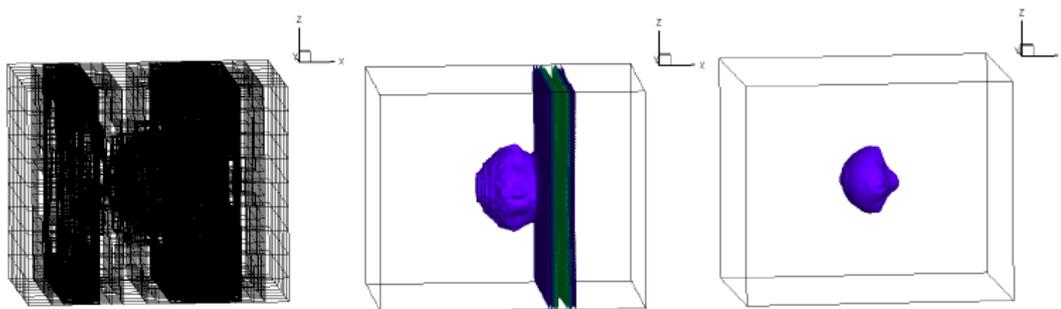


图 1 网格，密度等值面，界面位置图($t=300\mu\text{s}$)

参考文献：

- [1] Zeeuw, D. De and Powell, K. G., An Adaptive Refined Cartesian Mesh Method for the Euler Equations, *J. Comput. Phys.* 104 (1993) 56–68.
- [2] Berger, M.J. and LeVeque, R., Adaptive mesh refinement for two-dimensional hyperbolic systems and the AMRCLAW software, *SIAM J. Numer. Anal.* 35 (1998) 2298-2316.
- [3] Wang, Z.J., A Quadtree-based adaptive Cartesian/Quad grid flow solver for Navier-Stokes equations, *Computers & fluids* 27 (1998) 529-549.
- [4] Habashi WG, Dompierre J, Bourgault Y, Ait-Ali-Yahia D, Fortin M, Vallet MG. Anisotropic mesh adaptation: towards user-independent, mesh-independent and solver-independent CFD. Part II: Structured meshes, *Int. J. for Num. Meth. in Fluids* 39(2002) 657–673.
- [5] H. W. Zheng, C. Shu and Y.T. Chew, An Object-Oriented and Quadrilateral-mesh based Solution Adaptive Algorithm for Compressible Multi-fluid Flows, *J. Comput. Phys.*, 227(2008)6895–6921.
- [6] H. W. Zheng, N. Qin, F. Nicolleau, and C. Shu, A quadrilateral-mesh based anisotropic solution adaptive solver for Euler equation, *CICP*, 9,1,(2011)68-88.
- [7] Shyue, K.M., An efficient shock-capturing algorithm for compressible multi-component problems, *J. Comput. Phys.*, 142, 208-242, 1998.
- [8] Abgrall, R., and Karni, S., Computations of Compressible Multifluids, *J. Comput. Phys.* 169, 594-623, 2001.