

高精度 SPH 方法及其在海洋工程中的应用

刘谋斌* 杨秀峰 邵家儒

中国科学院力学研究所, 北京 100190

关键词: 流固耦合; 自由液面流动; 数值模拟; 粒子方法

海洋资源的开发利用以及军事海洋能力的建设等都涉及各种复杂的水动力学问题, 如水下爆炸、极限波浪、海啸、液体晃动与抨击等。这类复杂水动力学问题具有强非线性、强流固耦合、大冲击载荷的特点, 涉及水体自由表面的翻卷与破碎, 以及固体结构的快速运动与弹、塑性变形。

随着计算科学的发展, 数值模拟在强非线性复杂水动力学问题的研究中发挥着越来越重要的作用。有限差分与有限元等作为代表性的网格类方法, 经过长期的发展, 已经在计算流体与固体力学领域居于主导地位, 但在强非线性复杂水动力学问题的应用中遇到了特殊的困难。例如在有限元方法中, 如果介质产生大位移/大变形, 有限元网格会发生畸变并可能导致计算中断; 而有限差分/有限体积方法不易处理自由表面、运动界面和可变形边界。光滑粒子动力学(smoothed particle hydrodynamics, SPH)^[1-3]方法作为一种拉格朗日型无网格粒子方法, 兼具欧拉方法和拉格朗日方法的优点, 能够自然追踪运动界面、方便处理大变形及流固耦合, 在模拟强非线性水动力学问题方面具有特殊优势。

传统的 SPH 方法离散格式数值精度较低, 不能精确近似常数及线性函数, 并且受边界区域、粒子分布、光滑长度以及光滑函数选择的影响。通过对 SPH 方法进行连续性分析^[4], 提出了一种新的数值近似方案, 有限粒子法(finite particle method, FPM)^[5], 保留了 SPH 方法的灵活性, 同时能够精确近似常数及线性函数, 严格具有二阶精度, 并且消除了因粒子不规则分布引起的数值不稳定性^[6]。图 1 显示了初始粒子不规则分布并且长时间模拟时, 传统 SPH 与改进 SPH(FPM)所得到的 Poiseuille 流动速度分布。

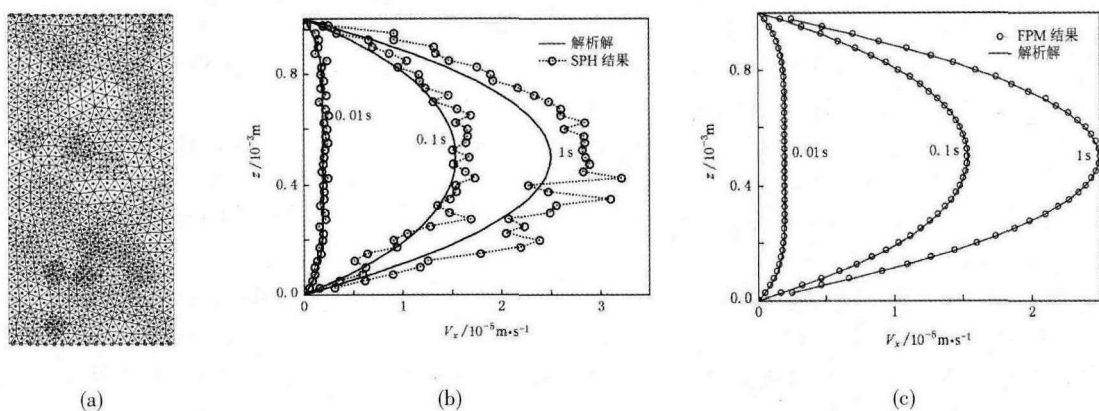


图 1 初始粒子不规则分布时(a), 传统 SPH(b)与改进 SPH(FPM)(c)所得到的 Poiseuille 流动速度分布

资助项目: 国家自然科学基金项目(11302237, 11172306)

作者简介: 刘谋斌*(1970—), 男, 博士, 研究员, 主要从事流固耦合与数值模拟方法方面的研究。E-mail: liumoubin@imech.ac.cn.

作为一种拉格朗日型粒子方法,SPH 中固壁边界条件很难直接、严格实施,而一般在边界区域采用虚粒子间接实施。虚粒子的布置、信息的求取及其与流体粒子的相互作用方式直接影响 SPH 计算的精度^[3]。提出了一种耦合动力边界算法,能够在防止流体粒子穿透固体壁面的同时,保证边界区域计算的精度,消除压力振荡。该耦合动力边界算法包括一种新型的软球排斥力和新型的虚粒子信息求取方法,新型的软球排斥力能够有效阻止粒子穿透,减小压力振荡。虚粒子信息由流动粒子信息通过高精度 SPH 格式动态求取,并与流动粒子相互作用,保证固壁区域计算精度^[7]。图 2 显示了该耦合动力边界算法实施示意图,图 3 显示了传统斥力法(上)、虚粒子法(中)及耦合动力边界算法(下)模拟溃坝问题的比较。

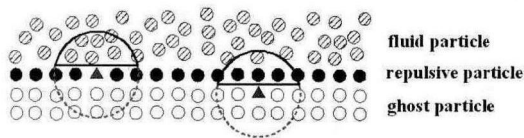


图 2 耦合动力边界算法示意图

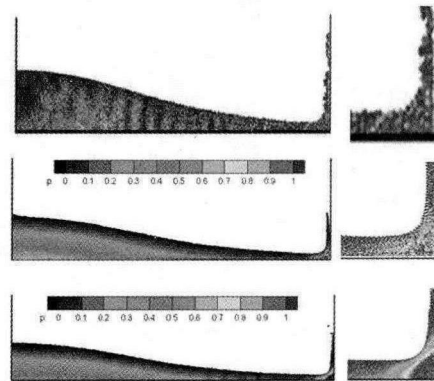


图 3 传统斥力法(上)、虚粒子法(中)及耦合动力边界算法(下)模拟溃坝流动所得流场压力分布

SPH 方法既具有拉氏计算的描述物质界面准确的优势,又兼备欧拉方法的长处,因此已经广泛地应用于工程和科学的众多领域。本文重点介绍 SPH 方法在水动力学与海洋工程尤其是强非线性水动力学方面的应用,主要包括:

- 波浪冲击及其与结构的相互作用;
- 高速航行体出入水;
- 船体及其他海洋结构中液体的晃荡及其导致的翻覆^[8];
- 海洋溢油拦截^[9]。

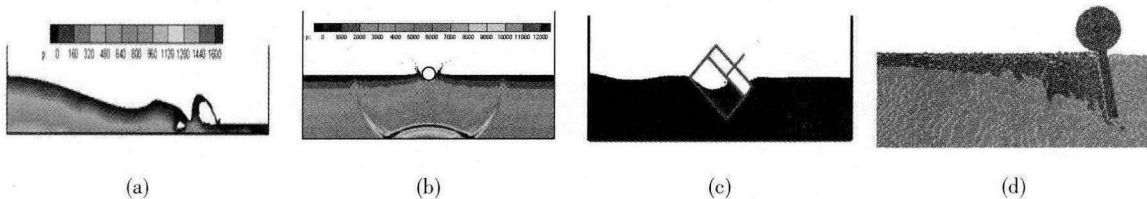


图 4 SPH 方法模拟溃坝(a)、刚体入水(b)、液舱晃荡(c)及海洋溢油拦截(d)等问题

参考文献

- [1] Lucy L. B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis[J]. *Astronomical Journal*, 1977, 82(12):1013-1024.
- [2] Gingold R. A., Monaghan J. J. Smoothed particle hydrodynamics—Theory and application to non-spherical stars[J]. *Monthly Notices of The Royal Astronomical Society*, 1977, 181:375-389.
- [3] Liu M. B., Liu G. R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments[J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2010, 17(1):25-76.
- [4] Liu M. B., Liu G. R. Restoring particle consistency in smoothed particle hydrodynamics[J]. *Applied Numerical Mathematics*

- ics, 2006, 56(1):19-36.
- [5] Liu M. B., Xie W. P., Liu G. R. Modeling incompressible flows using a finite particle method[J]. Applied Mathematical Modelling, 2005, 29(12):1252-1270.
- [6] Liu M. B., Chang J. Z. Particle distribution and numerical stability in the SPH method[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(6):3654-3662.
- [7] Liu M. B., Shao J. R., Chang J. Z. On the treatment of solid boundary in smoothed particle hydro-dynamics[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(1):244-254.
- [8] Shao J. R., Li H. Q., Liu G. R., Liu M. B. An improved SPH method for modeling liquid sloshing dynamics[J]. Computers & Structures, 2012, 100-101(18-26).
- [9] Yang X. F., Liu M. B. Numerical modeling of oil spill containment by boom using SPH. Science China Physics[J]. Mechanics & Astronomy, 2013, 56(2):315-321