



CSTAM 2012-B03-0060

复杂几何边界下液体流动的 SPH 数值模拟

邵家儒，刘谋斌

中国科学院力学研究所水动力与海洋工程
重点实验室

第七届全国流体力学学术会议

2012 年 11 月 12—14 日 广西·桂林

复杂几何边界下液体流动的SPH数值模拟¹⁾

邵家儒*, 刘谋斌*,²⁾

* (中国科学院力学研究所水动力与海洋工程重点实验室, 北京海淀区 100190)

摘要 本文应用改进的光滑粒子动力学方法 (SPH) 对复杂几何边界条件下的液体流动进行了数值模拟。通过对核函数及核梯度的修正提高了粒子近似精度; 通过改进的耦合动力边界模型弥补了边界粒子的缺失, 无需特殊处理就可以很好的处理复杂几何边界。文章对具有复杂形状的模具冲型过程进行了数值模拟, 其结果与实验及其它数值模拟结果吻合良好, 可以比较准确地预测水体的运动形态。

关键词 光滑粒子动力学, 核梯度修正, 耦合动力边界

引言

水动力学与海洋工程领域存在众多的大变形自由表面流动及其与固体结构的强烈耦合作用。控制方程的高度非线性, 急剧变化的自由表面, 给相关问题的数值模拟带来极大的挑战。

传统基于网格的方法, 如有限差分方法[1] (FDM)、有限体积方法 (FVM), 已经广泛应用于计算流体力学的研究中, 并逐渐发展了一些自由表面追踪技术如 VOF[2], Level set [3] 等。然而在不规则的复杂区域上构造规则的网格是比较困难的, 常常需要复杂的数学变换, 同时网格发生畸变时也会大大降低该方法的精度。

近年来, 很多学者将研究的方向转移到光滑粒子动力学方法[4, 5] (SPH) 上来, 并取得的很多成果。Colagrossi [6]应用边界虚粒子法对溃坝相关问题进行了研究; Khatter[7] 等人应用修正的不可压缩 SPH 方法在水波破碎方面进行了相关工作; 崔岩等人[8]对二维矩形水槽晃动问题进行了数值模拟, 模拟了不同外界激励下自由表面的变化。然而这些研究考虑的都是相对简单的几何边界, 处理复杂几何边界的能力较差, 不能完全保证无穿透及高精度。本文应用以前所构造的耦合动力学边界条件[9]对复杂几何边界条件下的液体流动行为进行了数值模拟。模拟结果与实验结果吻合良好。

1 光滑粒子动力学方法

光滑粒子动力学方法是一种拉格朗日型无网格粒子方法, 它使用粒子离散和代表所模拟的介质 (流体或固体), 并且基于粒子体系近似和计算介质运动的控制方程。通过核近似和粒子近似可以将偏微分方程进行离散, 离散后的 N-S 方程可以表示为:

$$\frac{d\rho_i}{dt} = \sum_{j=1}^N m_j \mathbf{v}_{ij} \cdot \nabla_i W_{ij}, \quad (1)$$

$$\frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = -\sum_{j=1}^N m_j \left(\frac{p_i}{\rho_i^2} + \frac{p_j}{\rho_j^2} \right) \bullet \nabla_i W_{ij} + \mathbf{g}. \quad (2)$$

其中 W , ρ , \mathbf{v} , p , \mathbf{g} 分别代表核函数、密度、速度、压力以及重力加速度, i, j 对应粒子的角标。在 SPH 模拟中, 将水看做是弱可压缩流体, 使用 Monaghan[10] 提出的状态方程来实现方程组的封闭, 即

$$p = B \left[\left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma - 1 \right]. \quad (3)$$

其中 $B = c^2 \rho_0 / \gamma$, 对于水一般取 $\gamma = 7$, ρ_0 是参考密度, c 为数值声速。

由于传统 SPH 方法精度较低, 尤其是在边界及粒子分布不均匀区域。因此本文在整个流场中周期性应用密度修正 (正则化), 并通过泰勒展开提高了核梯度的精度。边界处使用两类粒子构造了耦合动力学边界条件, 基本可以实现对任意形状的几何边界的构造, 详见 Shao[11]。

1) 基金资助项目 (国家自然科学基金 11172306)

2) Email: liumoubin@imech.ac.cn; shaojiaru@imech.ac.cn.

2 数值算例

本文对圆环形管道，及多转角管道内的液体填充过程进行了数值模拟，通过与实验结果的对比来体现文中 SPH 模型对复杂几何外形的适应能力。

1.1 圆环形管道内液体填充过程

本模型的基本数据来源于 Kulasegaram S [12]的实验，如图 1 所示，外圆环直径为 135mm，内圆环直径为 45mm，入口宽 45mm，与圆心的距离为 115mm，入口处的注水速度为 18m/s。SPH 模型中初始粒子间距为 0.00075m，时间步长为 1.0e-7s，冲型结束时流体粒子数约为 15000，边界粒子数约 5000 个。

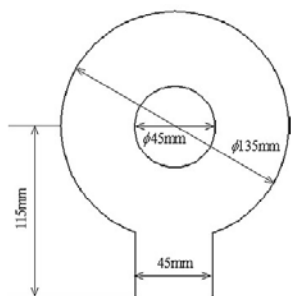


图 1 圆环形管道模型示意图

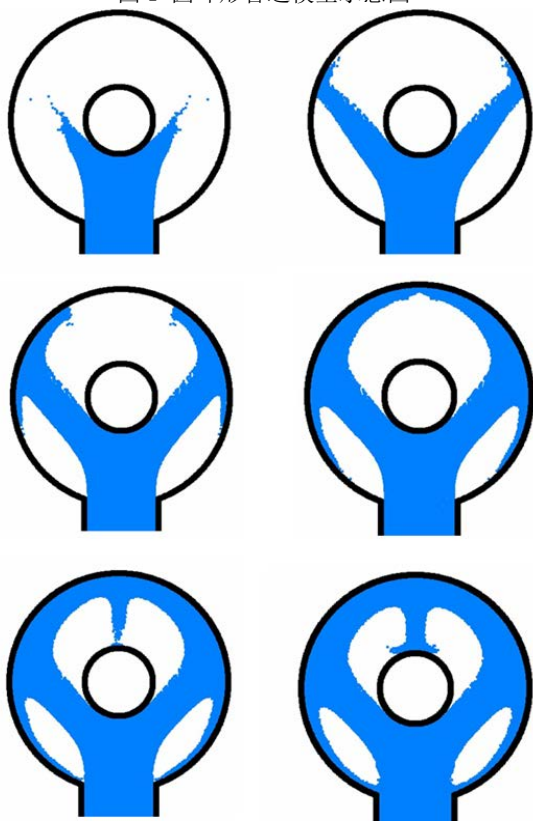


图 2 冲水过程示意图

如图 2 所示，水体进入圆环形管道后首先与内环冲击，产生水流的飞溅效应后对外环产生较为强烈的冲击。冲击后水体沿外环壁面扩散，并逐渐包络整个外环内壁，两侧水流在外环顶部相遇，冲击后的水流开始向下运动再次冲击内环顶部，并逐渐充满整个空腔。图 3 中将本文的模拟结果与 Kulasegaram S 的实验及模拟结果进行了对比，流动形态吻合的较好。

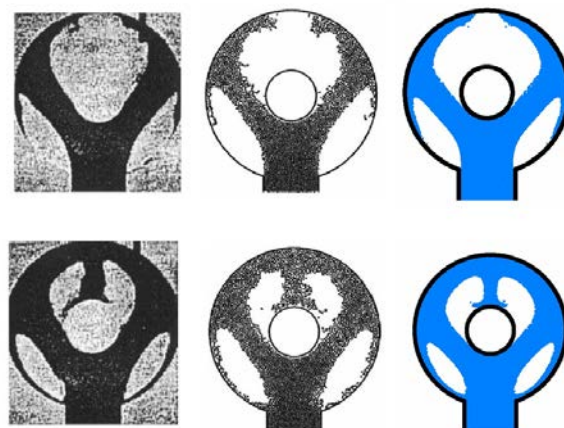


图 3 冲水过程与文献中结果的对比（从左到右分别为文献[12]中的实验、模拟结果，以及本文的模拟结果）

该算例应用了改进的耦合边界条件，固壁粒子间距和流体粒子初始间距相同，不会增加过多的计算时间，非常适合处理复杂边界，在边界区域粒子分布仍然十分均匀，并能达到较高的精度。

1.2 多转角管道内液体填充过程

本模型的基本数据来源于 Schmid M 和 Klein F[13]的实验。其具体几何尺寸如图 4 所示，强洪夫[14]也用 SPH 方法进行了相关的数值模拟，但是其边界处理方式实施复杂，且所需粒子太多，大大降低了数值模拟效率。在数值模拟过程中，粒子间距为 0.001m，时间步长为 0.5e-6s。模型中边界粒子数约 10000 个，当模拟结束时填充的流体粒子数约为 17000 个，人工粘性系数为 0.1，入口处保持恒定的注水速度 8.7m/s。图 5 展示了冲水过程在 7.15，25.03，39.34，53.64ms 时刻的模拟结果，通过与实验结果的对比可以看出，整个流动形态基本吻合较好，边界附近粒子分布规则。

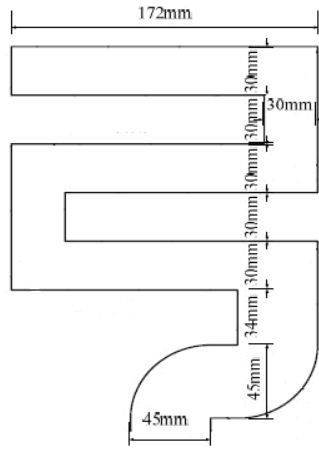
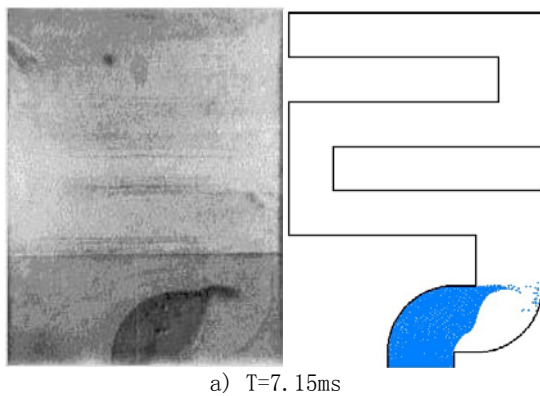
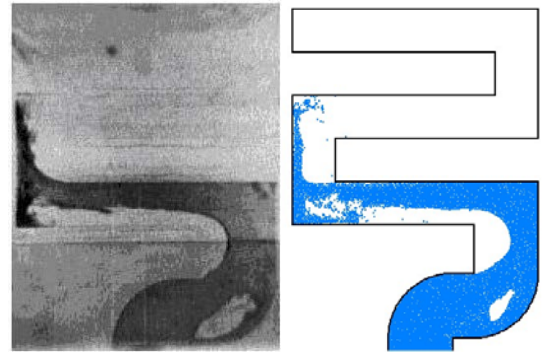


图4 多转角管道模型示意图

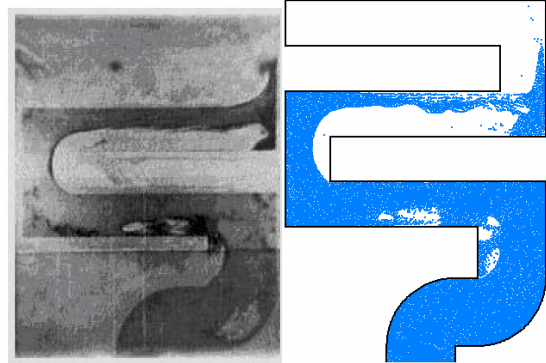
从冲型开始到结果，流体发生了多次撞击，每次撞击都会出现水流飞溅的现象。多个转角使得整个流场的湍流效应比较剧烈，并会伴随着空腔的产生。空腔随着冲型过程的进行逐渐变化。在 $T=7.15$ 至 $T=25.03$ ms 间，第一个大的空腔在第二个圆弧形转角附近产生，然而由于本文的模拟中只是使用了单相模型，没有考虑空气的作用，当该空腔被水体完全包络后，随着时间的推移会逐渐变小并最终湮灭，这与实验结果有些差别。在以后会通过建立两相流模型对该类问题进行进一步的模拟。尽管如此，改进的 SPH 方法已经可以实现该类问题的简单预测，以满足工程实际中的需要。



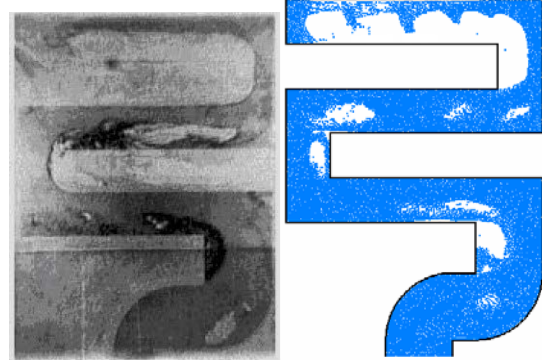
a) $T=7.15$ ms



b) $T=25.03$ ms



c) $T=39.34$ ms



d) $T=53.64$ ms

图5 冲水过程的模拟结果及与实验结果的对比

3 结 论

本文应用改进的 SPH 方法对复杂几何外形的液体冲型过程进行了数值模拟。核梯度及密度修正可以提高粒子分布不均匀处的数值精度，配合改进的耦合动力学边界，可以非常好的处理各种复杂几何边界。模拟结果与实验结果吻合良好，改进的 SPH 方法可以对该类问题进行预测，以满足工程需要。

参考文献

1. Mitchell A R, Griffiths D F. The finite difference method in partial differential equations(Book).

Chichester, Sussex, England and New York, Wiley-Interscience, 1980. 281

2. Hirt C, Nichols B. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries* 1. Journal of computational physics, 1981. 39(1): 201~225.
3. Sethian J A. Level set methods and fast marching methods. Journal of Computing and Information Technology, 2003. 11(1): 1~2.
4. Gingold R A, Monaghan J J. Smoothed particle hydrodynamics—Theory and application to non-spherical stars. MONTHLY NOTICES OF THE ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY, 1977. 181:375~389.
5. Liu M B, Liu G R, Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments. Archives of Computational Methods in Engineering, 2010. 17(1): 25~76.
6. Colagrossi A, Landrini M. Numerical simulation of interfacial flows by smoothed particle hydrodynamics* 1. Journal of computational physics, 2003. 191(2): 448~475.
7. Khayyer A, Gotoh H, Shao S D. Corrected incompressible SPH method for accurate water-surface tracking in breaking waves. Coastal Engineering, 2008. 55(3): 236~250.
8. 崔岩, 吴卫, 龚凯, 刘桦. 二维矩形水槽晃荡过程的 SPH 方法模拟. 水动力学研究与进展: A 辑, 2008(006): 618~624.
9. Liu M B, Shao J R, Chang J Z. On the treatment of solid boundary in smoothed particle hydrodynamics. SCIENCE CHINA Technological Sciences, 2011: 1~11.
10. Monaghan J J. Simulating free surface flows with SPH. Journal of Computational Physics, 1994. 110: 399~406.
11. Shao J R, Li H Q, Liu G R, Liu M B. An improved SPH method for modeling liquid sloshing dynamics. Computers & Structures, 2012, 100-101: 18~26.
12. Kulasegaram S, B.J., Lewis RW, Profit M, Mould filling simulation in high pressure mould casting by meshless method. . Fifth world congress on computational mechanics, 2002. Vienna, Austria.
13. Schmid, M. and F. Klein. Fluid flow in die cavities—experimental and numerical simulation, NADCA 18. 1995.
14. 强洪夫, 韩亚伟, 王坤鹏, 高巍然. 基于罚函数 SPH 新方法的水模拟充型过程的数值分析. 工程力学, 2011. 28(001): 245~250.

SPH SIMULATION OF FLUID FLOW IN COMPLEX GEOMETRIC BOUNDARY

SHAO Jiaru LIU Moubin

(LHO, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract The water flow in complex geometric boundary was simulated using improved smoothed particle hydrodynamics (SPH) method. The accuracy is improved through adding the kernel gradient correction (KGC) and density correction. The coupled dynamic boundary condition was used to make up the boundary particles, and it can deal with complex boundary easily. The filling processes in complex model are simulated, and the results agree well with the experimental results. The improved SPH method can predicate the water flow motion accurately.

Key words SPH, KGC, coupled dynamic boundary