

DOI: 10.7652/xjtuxb201311016

采用移动粒子半隐式法的进口流动速度边界模型

孙中国, 李帝辰, 陈啸, 梁杨杨, 席光

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对有限空间、半无限大空间和无限大空间 3 种开放式流动系统的进口类型, 采用无网格移动粒子半隐式法, 依据进口附近新增流体变形程度不同的特点建立了相应的进口速度边界模型。通过控制进口流速和添加固体边界来避免模型可能产生的流动不连续和自由面形状不光滑、不规则等问题。基于该模型, 在三维情况下模拟实现了两个圆柱形喷嘴的液柱喷射及互击碰撞过程。液柱碰撞在系统的对称面上产生了一层液膜, 该液膜在一定碰撞参数下的形状、厚度、鞍部的高度和流场速度分布等信息及其非定常变化过程均可以从计算结果中进行提取和研究。数值模拟结果符合物理原理, 模型的建立扩展了移动粒子半隐式法的应用范围, 规范了进口模型的科学使用, 使计算更加便捷和精确。

关键词: 无网格法; 移动粒子半隐式法; 进口流动; 液体喷注

中图分类号: O351.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2013)11-0087-05

Velocity Boundary Models of Inlet Flow Using Moving Particle Semi-Implicit Method

SUN Zhongguo, LI Dichen, CHEN Xiao, LIANG Yangyang, XI Guang

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The distinct velocity boundary models were established according to the different deformation degrees of the newly added liquid around the inlet area and on the basis of the moving particle semi-implicit method for the finite space inlet flow, semi-infinite space inlet flow and infinite space inlet flow in an open flow system. The velocity arrangement and the extra solid boundary were employed to avoid some problems such as discontinuous flow, and irregular and unsmooth free surface in the simulation with the models. With the present models, the three-dimensional injection and collision process of two liquid jets with circular cross sections was simulated. The results show that a typical liquid film is generated on the symmetrical plane by the collision. The data including the shape, thickness, saddle height and flow field of the film, and their unsteady changes can be gained from the calculation. The numerical simulation results agree with the physical principle. It appears that our findings not only significantly expand the application range of the moving particle semi-implicit method but also normalize the usage of the inlet flow models, which can improve the accuracy and convenience of the calculation.

Keywords: meshless method; moving particle semi-implicit method; inlet flow; liquid injection

流体通过进口通道进入到系统中的流动喷注过程是工业生产中最为常见的基本流动现象之一,例如冷却塔喷淋、注塑与铸造、发动机燃料喷射以及污水处理曝气等,但在通常情况下,伴随着流体进入系统这一过程,流体的形态将产生诸如变形、破碎和雾化等巨大变化。传统基于网格剖分的数值方法由于受到网格重构和调整等复杂过程的限制,模拟这些过程存在一定困难。移动粒子半隐式(MPS)法^[1]作为无网格法的一种,其基本计算单元(流体粒子)之间没有根据位置形成固定的拓扑关系,而是在拉格朗日框架下随着时间推移产生流动,位置变化后的流体粒子再与当地局部流体粒子建立新的作用关系。这一算法特点使得 MPS 法能够模拟存在任意大变形的非定常流动过程,也使模拟上述带有进口流动的流体喷注过程成为可能。具体算法及实现和应用可参考文献[1-8],本文在此不作详述。

从空间结构考虑,流体喷注过程依据流体进入到系统时面临的环境特点大致可分为有限空间、半无限大空间和无限大空间 3 类。其中,有限空间类表示流体进入到有限体积的容器中,实现对目标容器的注入或填充,如管道流动;半无限大空间类表示流体进入系统后即会与壁面形成撞击,但撞击形成的流动将会在壁面外的半无限大空间中流动,也可叫做近壁面喷注,如开放系统的液体冲洗;无限大空间类即流体进入系统后不受任何拦阻或者近壁面的限制,如液体火箭发动机的燃料喷注雾化^[9]等。

基于 MPS 法带进口流动的二维数值模拟已在蒸发管^[10]、毛细血管流动^[11]、射流注水^[12-13]等应用计算研究中出现过,但对进口流体添加的方式均没有建模或进行详细系统的说明。本文将针对不同种类进口特点,系统地分析和讨论建立进口流动速度边界模型的条件并建立相应最优模型,这对采用 MPS 法进行带有进出口流动的数值模拟具有非常重要的意义。

1 无限大空间进口流动速度边界模型

1.1 新增流体判据及基本进口模型

进口流动实际上是新增流体经过进口窗口进入到系统内的过程,这一过程包含两个重要条件,即进口窗口和新增流体连续通过这一窗口。基于网格的算法,进口通常采用线(二维)或面(三维)来表达,边界条件在线和面上进行设定。对于无网格 MPS 算法,粒子间的作用关系表达是基于核函数的,核函数存在一定的作用半径,因此在本方法中,进口的设定

将在流动速度方向上呈现一定的厚度,即进口为一个区域,如图 1 中虚线所示的 Ω 区域。该区域可看作虚拟进口,在区域内部布置预将进入系统的新增流体粒子,如图 1 中 Ω 区域内部的灰色矩形所示,这部分流体粒子的速度设定为 U 。在新增流体粒子以速度 U 离开 Ω 区域进入到系统的过程中,模型将扫描 Ω 区域,判断流体粒子是否全部流出,若全部流出,则在 Ω 区域继续添加一批新增流体。对于无限大空间进口流动且空间加速度 $|g|=0$ 的情况,上述基本模型可以以最简单的模式实现流体通过进口连续注入到系统中的过程。

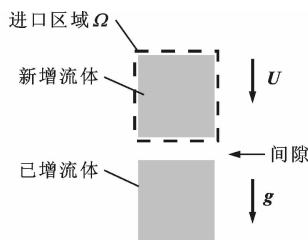


图 1 进口喷注流动基本物理过程

1.2 新增流体粒子的存储

在 MPS 基本算法中,流体和边界所有粒子以及它们附带的流动信息都存储在同一个大型矩阵 M 里面。为便于变维度大型稀疏矩阵的建立及运算,存储的顺序一般是流体粒子在前、固体壁面粒子在后,如图 2 中 t 时刻的矩阵 M_t 所示。当添加进口模型,且 Δt 时间后有新增流体进入到系统时,矩阵 M_t 的维度将扩充,壁面粒子的存储位置后移至一定位置,留出存储空间给新增粒子,如图 2 矩阵 $M_{t+\Delta t}$ 所示。这样可以保持流体粒子存储在一起,为压力泊松方程的求解带来方便。出口模型的数据存储模式与此类似,只是删除粒子代替添加,本文暂不作讨论。

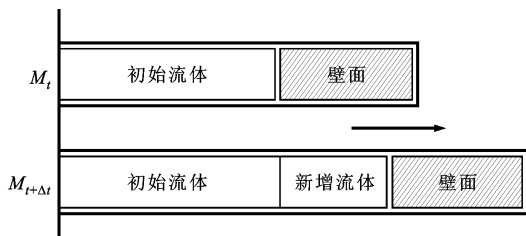


图 2 进口新增流体数据存储模式

1.3 模型可能存在的问题及改进

根据计算经验,上述基本进口模型在空间加速度 $|g|\neq 0$ 的时候会出现进口流动不连续的现象,在已增流体团和新增流体团之间存在间隙(如图 1 中所示)。这是由于新增流体从产生到整体流出 Ω 区域的过程中,都受到空间加速度的作用,在做初速度

为 U 、加速度为 g 的加速运动。当新增流体全部流出 Ω 区域成为已增流体的同时, Ω 区域产生新增流体,此时已增流体的速度增大为 $U + g\Delta t$,略大于初始速度 U ,正是这一速度差导致了流体团之间间隙的存在。为了在空间加速度 $|g| \neq 0$ 的情况下消除间隙,实现连续流动,模型将进行如下改进,如图 3 所示。

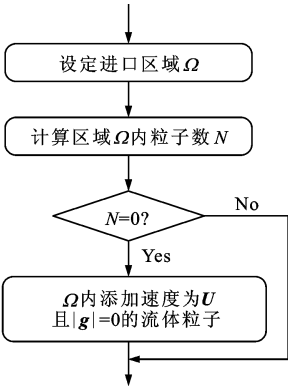


图 3 无限大空间进口速度边界模型基本算法

设定 Ω 区域内的新增流体粒子不受空间加速度的作用并以设定速度 U 向系统内部运动,一旦进入到系统内即按照系统内的流动条件和环境来进行计算,即进入系统部分的流体粒子受到加速度的作用,而尚未进入的粒子不受加速度的作用。该模型可消除间隙,实现无限大空间情况下流动喷注的连续性。

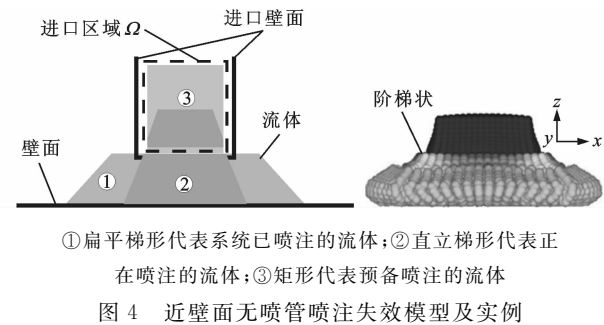
2 半无限大空间进口流动速度边界模型

2.1 物理条件的变化及模型失效形式

对于半无限大空间的进口流动,本文假设为近壁面喷注,原适用于无限大空间的进口流动模型将会失效,其失效模型如图 4 所示。当已喷注的流体(如图 4 中区域①所示)刚刚完全流出进口区域 Ω (如图 4 中虚线矩形框所示)时,根据新增流体判据,在 Ω 区域添加新增流体团(如图 4 中区域③所示),此时界面本应光滑连续过渡的流体团①和流体团③之间产生了阶梯状表面(如图 4 中右图实例所示),这并不符合基本物理原理或实际情况。

阶梯状现象产生的原因是在进口喷注过程中,流体团受到近壁面的阻挡作用发生了明显的变形(如图 4 中区域②所示)。流体团的侧面部分从 Ω 区域的侧面溢出并持续变形,当流体团在重力作用下不断扁平化直到顶部最后一部分流体离开 Ω 区域时,新的流体团才被添加,但此时图 4 中区域①的上边界宽度已远大于实际进口 Ω 区域的宽度。 Ω

区域对新增流体在产生到完全进入系统这一过程缺乏有效约束,这是导致流体界面不光滑的主要原因。



2.2 基本算法及模型改进

为了准确描述速度进口边界条件,尤其是 Ω 区域下边界的流动参数,本文提出强制 Ω 区域内的新增流体满足速度恒定的要求。这表明当新增流体粒子尚未流出 Ω 区域时,流体粒子分布保持均匀且速度恒定的状态。同时,设置真实进口壁面(如图 4 中进口壁面所示)来限制和保护进口区域,避免 Ω 区域外的流体粒子对内部流体粒子流动状态产生影响,例如破碎液滴飞溅误撞入进口 Ω 区域,具体算法如图 5 所示。与上一小节所提的无限大空间进口模型相比,近壁面喷注模型主要是添加了进口壁面并强制 Ω 区域内的新增流体粒子在流出区域外之前保持恒速。

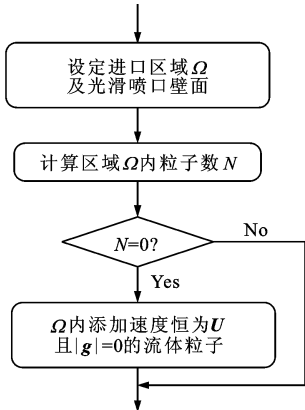


图 5 近壁面进口速度边界模型基本算法

进口壁面的固体粒子与系统计算中的壁面粒子性质相同,也需要参加整个算法中的粒子数密度和压力泊松方程的求解过程,但为了适应本模型中新增粒子判据的要求,进口壁面内部需满足光滑条件,即新增流体在 Ω 区域内部不发生变形。

此外,在有限空间进口速度边界模型中,由于流体进入系统后只能按照已有壁面所控制空间进行流动,因此不需要进行特殊的改动,基本可以直接套用

半无限大空间的进口模型,本文不再累述。

3 圆形截面进口初始布置优化

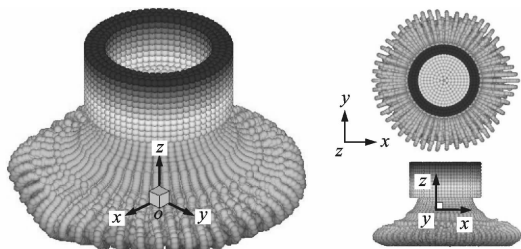
依图 5 所示的近壁面进口速度边界模型作一个进口截面为圆形的三维数值模拟,根据圆弧边界粒子的精确布置方法^[8]对进口壁面和内部粒子进行了设置,在圆弧线上布置整数个流体粒子,然后将取整产生的微小误差均布到弧线上每两两相邻粒子的间距内,再利用计算中流体粒子的自适应性吸收这部分误差。在该粒子分布情况下得到的计算结果如图 6a 所示。进入系统的流体基本实现了连续光滑的流动状态,但是从模拟结果的细节来看,尽管原粒子布置方法实现了圆弧边界的精确表达,却对流体点源扩散形式的流动表现出了各向异性,尤其是从图 6a 右上侧的俯视图来看,扩散面并非标准圆形,存在不规则棱角。

其原因在于采用原粒子初始布置法时,由于圆弧线沿着进口壁面高度是层叠关系,使得基于粒子位置布置而产生的误差也位于相同的相位,再加上本进口模型要求流体粒子在进口区域 Ω 内保持速度恒定,阻碍了应有的流体粒子之间的自适应调整过程,因此反映在流体进入系统后进行点源式扩散流动时,布置误差就被进行了叠加和放大,导致扩散面不圆。

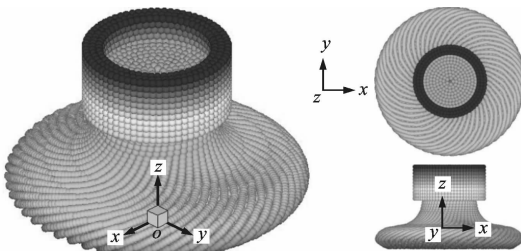
为了在进口速度边界模型的框架下消除这一误差,本文提出除了在原粒子布置误差沿圆弧线内进行均布外,在沿进口高度方向上也实行相位均布,使得在周相位上的原始布置误差不被叠加放大。算例计算的结果如图 6b 所示。与改进前的结果相比,使用新粒子布置后流体的自由面变得更加连续光滑,扩散面达到了标准圆形,模拟结果更加接近实际情况。本节对粒子布置的优化,实际上并没有增加或者删减粒子数目,因此粒子数密度基本保持与笛卡儿坐标系下的布置相同,对计算的影响基本可以忽略不计。

4 进口模型验证性算例

根据提出的近壁面进口模型及圆形截面进口的粒子布置优化,本文对两个液柱喷射且相互撞击的过程进行了简单的数值模拟,计算结果如图 7 所示。模拟了空间中两个相向且夹角为 120° 的喷嘴,液体以 1.6 m/s 的速度喷射出来并产生碰撞的过程。碰撞在系统的对称面上产生了一层液膜,液膜在压力的作用下展开并在速度方向和重力加速度的作用下



(a) 传统粒子布置方式下的模拟结果



(b) 改进粒子布置方式下的模拟结果

图 6 粒子布置改进及近壁面喷注模拟结果的三维图、俯视图和正视图

形成偏移。液柱撞击所形成液膜的形状及厚度、鞍部的高度和流场速度分布均可以从数值模拟的结果中进行提取和研究,计算实现了进口喷注流动的数值模拟且结果符合基本物理原理。由于是验证进口流动速度边界模型,所以本模拟没有添加液体表面张力模型。

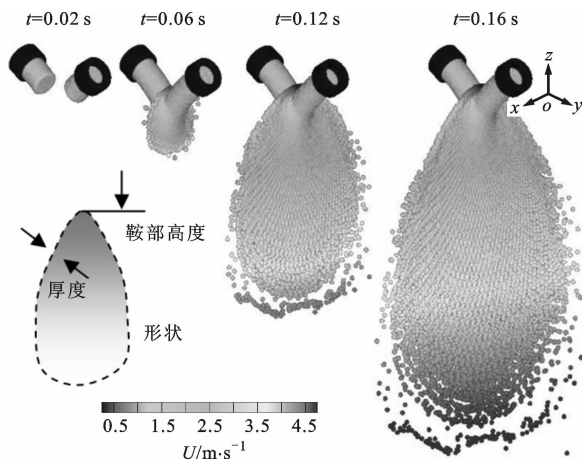


图 7 液柱喷射碰撞过程

5 结 论

(1) 系统地研究了进口流动喷注的物理过程,依据进口流动附近是否有流动阻碍及阻碍的形式将进口流动分为有限空间、半无限大空间和无限大空间 3 类。基于无网格 MPS 法,分类别进行了讨论并依

据各类型特点建立了相应的进口流动速度边界模型。根据进口类型选取合适的进口流动模型将有利于计算的便捷和准确。

(2)分析得出进口模型产生流动不连续问题的原因在于进口区域内的流体粒子受到空间加速度的作用,在相邻两新增流体团之间产生了速度差。通过去除进口区域内的加速度作用,消除了流动间隙,实现了连续流动。

(3)针对近壁面进口模型设置了光滑进口壁面,限制了流体在径向上的变形,消除了自由面的阶梯状现象。同时,改进圆形截面进口的粒子布置,使得自由面更加对称和光滑。在三维情况下实现了两股液柱喷射碰撞的数值模拟,从物理原理上验证了本文提出的进口速度边界模型的正确性。

下一步工作将结合表面张力模型,尝试对液体喷注碰撞过程或雾化现象进行整体数值模拟。

参考文献:

- [1] KOSHIZUKA S, OKA Y. Moving-particle semi-implicit method for fragmentation of incompressible fluid [J]. Nuclear Science and Engineering, 1996, 123(3): 421-434.
- [2] 席光, 项利峰. 自由表面流动的移动粒子半隐式模拟方法 [J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(2): 249-252. XI Guang, XIANG Lifeng. Numerical simulation of fluid free surface flow using moving particle semi-implicit method [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(2): 249-252.
- [3] 张帅, 解利军, 郑耀. 一种稳定的移动粒子半隐式法 [J]. 水动力学研究与进展, 2010, 25(2): 239-246. ZHANG Shuai, XIE Lijun, ZHENG Yao. A stable moving particle semi-implicit method [J]. Chinese Journal of Hydrodynamics, 2010, 25(2): 239-246.
- [4] 徐刚, 段文洋. 自由面流动模拟的 MPS 算法研究 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2008, 29(6): 539-543. XU Gang, DUAN Wenyang. An investigation of MPS algorithm for free surface flow simulation [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2008, 29(6): 539-543.
- [5] 李绍武, 于志安, 熊赞. 基于 MPS 无网格方法的孤立波传播的数值模拟 [J]. 海洋学报, 2007, 29(2): 830-835. LI Shaowu, YU Zhian, XIONG Zan. Numerical simulation of solitary wave propagation based on MPS method [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2007, 29(2):

830-835.

- [6] SUN Zhongguo, XI Guang, CHEN Xi. Mechanism study of deformation and mass transfer for binary droplet collisions with particle method [J]. Physics of Fluids, 2009, 21 (3): 032106.
- [7] 种道彤, 刘继平, 严俊杰, 等. 基于 MPS 方法的汽泡凝结数值模拟研究 [J]. 工程热物理论, 2011, 32 (9): 1505-1508. CHONG Daotong, LIU Jiping, YAN Junjie, et al. Numerical simulation on steam bubble condensation based on MPS method [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(9): 1505-1508.
- [8] SUN Zhongguo, XI Guang, CHEN Xi. A numerical study of stir mixing of liquids with particle method [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64 (2): 341-350.
- [9] 周松柏, 刘君, 郭正, 等. 超燃冲压发动机燃烧室燃料喷注及其内流场的数值模拟 [J]. 国防科技大学学报, 2007, 29(2): 24-28. ZHOU Songbai, LIU Jun, GUO Zheng, et al. Numerical simulation for the fuel jet and inner flow field of scramjet combustion chamber [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2007, 29 (2): 24-28.
- [10] 邢菲, 张帅, 郑耀. 采用移动粒子法对蒸发管结构优化 [J]. 推进技术, 2011, 32(3): 339-342. XING Fei, ZHANG Shuai, ZHENG Yao. An optimal study on a TVC evaporation tube using moving particle semi-implicit method [J]. Journal of Propulsion Technology, 2011, 32(3): 339-342.
- [11] 荣少山, 陈斌. 毛细血管内原位血栓形成的 MPS 模拟 [J]. 西安交通大学学报, 2011, 32(2): 227-229. RONG Shaoshan, CHEN Bin. MPS simulation of primary thrombus formation in capillary [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2011, 32(2): 227-229.
- [12] 张帅, 解利军, 郑耀. 基于移动粒子半隐式法的表面张力模拟 [J]. 计算力学学报, 2011, 28(3): 345-349. ZHANG Shuai, XIE Lijun, ZHENG Yao. Simulation of surface tension force using moving particle semi-implicit method [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2011, 28(3): 345-349.
- [13] PARK S, JEUN G. Coupling of rigid body dynamics and moving particle semi-implicit method for simulating isothermal multi-phase fluid interactions [J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 2011, 200(1/2/3/4): 130-140.

(编辑 荆树蓉)