

颗粒沉降的格子 Boltzmann 模拟与 PIV 实验验证

张金凤¹, 张庆河¹, 卢 昭²

(1. 天津大学建筑工程学院暨港口与海洋工程教育部重点实验室, 天津 300072; 2. 中交水运规划设计院, 北京 100007)

摘要: 在格子 Boltzmann 方法中引入大涡模拟, 对球形颗粒在静水中沉降引起的紊动流场进行了数值模拟。数值模拟沉速与理论值以及粒子图像测速系统(PIV)实验结果吻合, 验证了模型的合理性。同时分析比较了颗粒沉降过程中尾部紊动流场分布以及尾流流速值, 发现数值模拟结果与实测结果趋势、数值基本一致, 进一步说明了利用格子 Boltzmann 方法与大涡模拟技术相结合可以合理模拟泥沙颗粒在紊流区的沉降。

关键词: 球形颗粒; 沉降; 紊流; 格子 Boltzmann 方法; 大涡模拟; 粒子图像测速

中图分类号: TV142.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2009)04-0480-05

泥沙在水体中的沉降规律直接影响着河口、海岸泥沙悬浮、输运以及沉积。泥沙颗粒在沉降过程中会带动周围的水体, 使之发生运动。当颗粒较小, 沉降雷诺数小于 0.4 时, 颗粒周围的水体运动属于层流运动, 颗粒沉降满足 Stokes 定律。随着泥沙颗粒增大, 沉降雷诺数加大, 水流的惯性渐趋重要, 水流开始产生分离, 并在球体上端造成尾迹, 不断产生漩涡, 这时沉降颗粒周围的水体运动属于紊流运动^[1]。紊动条件下的球体颗粒沉速已有理论公式进行描述, 而泥沙运动轨迹以及周围流场扰动情况还有待进一步研究。

格子 Boltzmann (Lattice Boltzmann, 简称 LB) 方法是从介观尺度对流体力学和水动力问题进行数值模拟的一种新方法, 该方法基于微观尺度的特点, 已成功地用于模拟泥沙颗粒沉降引起的紊动现象^[2-4]。粒子图像测速 (Particle Image Velocimetry, 简称 PIV) 技术是一种新型的速度测量方法, 近年来在流场测量中得到了广泛应用^[5-7]。

为了进一步深入研究大颗粒沉降过程中的尾流紊动规律, 本文将在 LB 方法中引入大涡模拟方法, 模拟较大球形颗粒的紊动沉降, 并与 PIV 测定的紊动流场结果进行比较。

1 数值模型

采用 LB 方法研究颗粒静水沉降, 当球体沉降引起的周围水流运动在层流和过渡区时, 可以用 LB 方法直接模拟; 当球体沉降引起紊动时, 需要引入紊流模型进行模拟。关于 LB 方法模拟颗粒悬浮、沉降的基本理论详见文献[8-9], 这里主要描述如何在 LB 方法中引入紊流模型模拟球体沉降引起的紊动。

Hsu 等^[10]首次把大涡模拟 (Large Eddy Simulation, 简称 LES) 的方法应用到 LB 方法中。其主要思想是改变松弛时间, 假定 τ 的值是固定不变的, 增加一个空间、时间独立的项 τ_t , 松弛时间变为 $\tau_{tot} = \tau + \tau_t$, 这样粘性系数可以分解为

$$\tau_{tot} = \tau + \tau_t \quad (1)$$

式中 τ 为对应于松弛时间 τ 的粘性系数; τ_t 为紊动粘性系数。

$$\tau_t = \frac{r^2}{3} \left(\frac{1}{t} - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

收稿日期: 2008-08-29

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50779046)

作者简介: 张金凤(1978-), 女, 河北张家口人, 讲师, 博士, 主要从事海岸河口水动力及泥沙研究。

E-mail: coastlab@163.com

$$\tau = \frac{3}{\sqrt{2}} \frac{1}{\rho_{tot}} (C_{smago})^2 \sqrt{Q} \quad (3)$$

式中 r 是空间步长; t 是时间步长; ρ 是流体密度; C_{smago} 是 Smagorinsky 常数; Δ 为滤波尺度; 参数 Q 由非平衡动量矩 Π_{ij}^{neq} 得到, $Q = \Pi_{ij}^{neq} \Pi_{ij}^{neq}$ 。

从式 (2) 可知
$$\tau_{tot} = \frac{3t}{r^2} (\tau + t) + \frac{1}{2} \quad (4)$$

式 (3) 代入式 (4) 得
$$\tau_{tot} = \frac{1}{2} \left[\sqrt{2 + \frac{1}{r^2} (C_{smago})^2 \frac{\sqrt{8Q}}{2}} + \right] \quad (5)$$

式中 $r = 1$; 一般取一个网格尺寸; C_{smago} 一般小于 0.5, 本文计算时取 0.1。

上述方法已经得到了较多应用, 如 Dupuis^[11]成功地应用这一方法模拟了管线冲刷; Yu 等^[12]在 LB 方法中引入 LES 模拟均质紊流的耗散, 并与 DNS 方法模拟结果进行了比较; Ten Cate 等^[13]利用 LES 和 LB 相结合的方法模拟了晶体结晶过程。本文在 Ladd 建立的 LB 模型^[3]的基础上引入上述 LES 模型模拟球体沉降引起的尾流紊动。

2 实验设置

颗粒沉降实验测量装置由颗粒沉降系统与 PIV 系统两部分组成。颗粒沉降系统包括沉降筒和颗粒释放装置。沉降筒为截面积 30 cm × 30 cm、高 80 cm 的长方体。实验时注满纯净水, 水温控制在 20 左右。颗粒释放装置由丝杠与轴承座组成, 可以通过手动操作实现对颗粒的夹紧和释放, 有效消除释放颗粒时对水体的扰动。PIV 系统为德国 LaVision 公司生产的 Flowmaster 3S 型, 由片光源系统激光器、图像拍摄系统、图像分析处理系统 3 部分组成, 如图 1 所示。其中脉冲激光器输出波长为 532 nm 的绿光激光束, 能量为 120 mJ; 图像拍摄系统采用 SONY ICX085 CCD 相机、Nikon AF Nikkor 镜头, 分辨率为 1280 × 1024 像素, 像素尺寸为 6.7 μm × 6.7 μm, 有效区域 8.6 mm × 6.9 mm, 采集速度为 8 帧/s。

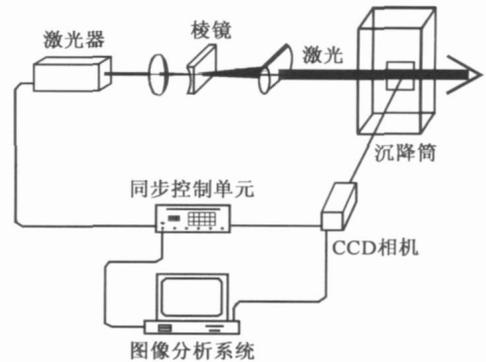


图 1 PIV 实验系统

Fig. 1 PIV measurement system

观测位置标定、示踪粒子选取以及曝光时间的确定是实验中需要解决的关键问题。选择距沉降筒底部 15 cm 处 10 cm × 10 cm 的正方形区域作为观测区域, 然后在计算机上标定该区域为实际的拍摄区域; 考虑到粒子的散射性、跟随性、易获取与否

以及实验室条件等因素, 采用粒径 1.0 ~ 5.0 μm 空心玻璃球作为示踪粒子; 同时综合考虑了流场速度大小和流场变化情况, 选取查询区大小为 32 × 32 像素, 查询区重叠率为 50%, 实验双曝光时间间隔 $t = 6000 \mu s$ 。

实验测量了圆球的沉降, 球体参数见表 1。实测球体沉降速度可以表示为

$$s = s / t \quad (6)$$

式中 t 为经过互相关处理以后的两幅图片的时间间隔, 由于本实验采用双幅/双曝光技术, 此处 $t = 0.25 s$; s 为时间连续的两幅图中颗粒经过的距离, 即为两颗粒中心位置之差, 沉降过程中颗粒的中心位置可以由 FlowMaster 系统的 Davis 6.2 软件标定。在实验中, 对球体进行 3 次重复测量, 3 次测量结果比较接近, 实测平均沉降速度如表 1 所示。

表 1 球体参数及沉降速度

Table 1 Particle parameters and settling velocity

参数	球体直径/m	球体质量/kg	球体密度/(kg·m ⁻³)	雷诺数	实测沉降/(m·s ⁻¹)	计算沉降/(m·s ⁻¹)	模拟沉降/(m·s ⁻¹)
球 A	0.0130	0.0013	1140	2956.6	0.2212	0.2297	0.2127

3 结果与讨论

3.1 LB 模型验证

为了验证LB方法的正确性,模拟了直径为0.013 m的球体沉降情况。在LB模拟中,采用量纲一量计算,其中计算区域 $120 \times 120 \times 800$,颗粒直径 $d=20$,时间步长 $\Delta t=1$,运动粘性系数 $\nu=0.001$ 。通过阻力相似和重力相似准则转化为实际物理量分别为 $78 \text{ mm} \times 78 \text{ mm} \times 520 \text{ mm}$, 0.013 mm , $4.13 \times 10^{-4} \text{ s}$ 和 $1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。图2给出了球体沉降速度历时曲线,从图中可以看出,经过最初的加速阶段,颗粒达到稳定状态,达到最大值 0.2127 m/s ,与实测速度 0.2212 m/s 较吻合,误差为3.85%。同时当颗粒沉降雷诺数 $Re > 1000$ 时,球体沉速

可近似表示为^[1]

$$v_s = 1.72 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} g D} \quad (7)$$

式中 ρ_s 为球体密度; ρ_f 为流体密度; g 为重力加速度; D 为球体直径。

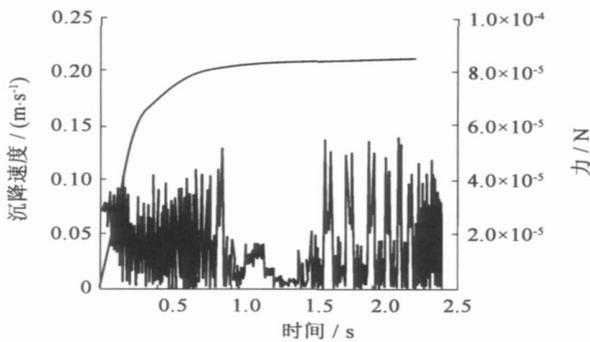


图2 LB模拟球体沉降速度和受到的总力历时曲线

Fig. 2 Variation of sphere settling velocity and force on the sphere with time

由式(7)可得,球体沉速为 0.2297 m/s ,数值模拟结果和经验公式计算结果相对误差为7.4%。就球体沉降速度而言,LB方法数值模拟结果与经验公式计算值和PIV实测值吻合,表明LB方法可以合理模拟泥沙颗粒在静水中沉降。

图2显示了球体在沉降过程中受到的总的的作用力历时曲线,大约经过1 s以后,颗粒受到的力在一段时间内保持相对稳定,从速度历时曲线看出,此时球体沉降基本稳定,因此受力基本保持不变,没有太大的振荡。随后,球体沉降尾流开始发展,随着尾流的扰动,球体受力又有明显的振荡起伏。从球体的沉降速度和受力变化看,LB方法可以较合理地模拟球体在静水中沉降引起的紊动以及球体尾部紊流发展的全过程。

3.2 球体沉降过程中周围流场

图3给出了PIV测得的球体周围流场速度矢量场,此时颗粒沉降到观测区域底部,即距离沉降筒底部15 cm处。由图可以清楚地看到球体沉降过程中尾流发展过程,且球体周围水体速度较大,在尾流延伸较远处水体仍保持一定的速度,球体尾部有连续涡旋出现。图4显示了颗粒运动到实验观测区域附近时LB方法模拟的流场矢量图。和实验结果比较可知,球体沉降扰动周围水体,在尾部接近 $160 \sim 170 \text{ mm}$, $190 \sim 200 \text{ mm}$ 和 $220 \sim 230 \text{ mm}$

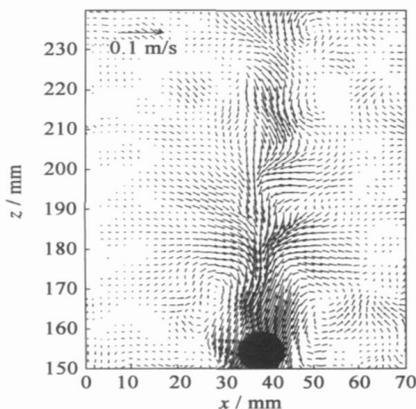


图3 PIV测得球体周围流场矢量

Fig. 3 Velocity vector field around the sphere using PIV

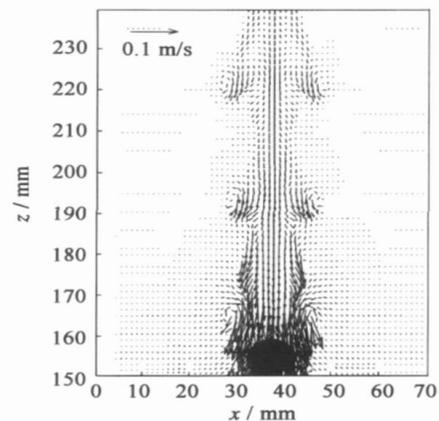


图4 LB模拟球体周围流场矢量

Fig. 4 Velocity vector field around the sphere using LB model

位置处均有明显的漩涡。只是数值模拟产生的尾流场是完全对称的,而实测尾流漩涡不是完全对称的,略向右偏移,主要是由于实验中球体由于加工精度误差造成颗粒形状不是完全标准的圆球体,有一定的偏差,引起尾流漩涡向右偏移。

3.3 球体尾流区域流速分析

从图3和图4可以定性地看出球体沉降引起的紊动流场分布,从图中分别取球体尾流区中部速度来分析球体达到稳定状态后尾流区域流速变化,如图5所示。为了分析不同球体尾流区速度变化趋势,采用相对速度,即各测点的速度(总速度)均以中部轴线上最靠近颗粒处的速度为参考,即以坐标值(38.5, 160)处的速度作为参考速度。球体背后的距离采用相对距离,将 z 坐标转化为以中部轴线参考速度对应位置(38.5, 160)为基点,以直径 D 作为参考长度,图中横纵坐标均是量纲一值。从图中可以看出, LB 模拟结果与实测趋势相同,球体尾流区速度先增加后减少,速度最大值出现在参考基点以上 $1D \sim 1.5D$ 的范围内,峰值大于1.2倍的参考速度,在 $4D$ 附近速度为参考速度的40%左右。相对实验结果, LB 模拟的尾流速度减小趋势较缓,这种不一致可能和 LB 方法模拟的是理想水体,而实测流体中添加了示踪粒子,尽管浓度较小,可是流体的粘性仍会发生一定变化,同时也存在测量误差有关。LB 模拟的球体沉降过程中尾流约在 $30D$ 左右速度才完全消散,但是在 $6D$ 处速度已降到颗粒基点速度的20%以下,这与3.2节中尾流流场定性分析结果相符。

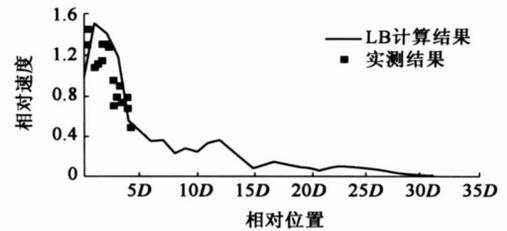


图5 球体尾流区流场速度比较

Fig. 5 Comparison of the wake-flow velocities

综上所述, LB 模拟结果与 PIV 实测结果在球体沉速、周围流场以及尾流场分布等方面基本一致,说明 LB 方法可以较合理地模拟球体沉降过程中引起的紊动。

4 结 论

本文应用 LB 方法模拟了圆球在静水中的沉降过程,利用 PIV 测定了球体颗粒在静水中的沉降速度和颗粒周围流场,并对模拟结果和实验结果进行了比较,得到如下结论:

- (1) LB 数值模拟结果与 PIV 实测颗粒沉降速度、颗粒周围速度场等的比较表明,模拟结果与实测结果基本一致,说明 LB 方法可以应用于颗粒沉降模拟。
- (2) 利用 LB 方法与 LES 相结合可以模拟较大颗粒在静水中沉降引起的紊动,以及颗粒尾部紊流发展的全过程,这对揭示泥沙颗粒的沉降规律有重要意义。
- (3) 初步工作表明,应用 LB 方法进一步模拟实际泥沙颗粒在紊动水流中的运动是有可能的,该项研究的深入有可能在单个泥沙运动规律研究的基础上进一步获得泥沙群体运动规律。

参考文献:

- [1] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M].北京:科学出版社,2003.(QIAN Ning, WAN Zhao-hui. Mechanics of sediment transport[M]. Beijing: Science Press, 2003. (in Chinese))
- [2] 王叶龙,林建忠,石兴.柱状粒子间相互作用对沉降运动的影响[J].自然科学进展,2004,14(1):39-45.(WANG Ye-long, LIN Jian-zhong, SHI Xing. The study of effects of inter-particle collision on the sedimentation[J]. Progress in Natural Science, 2004, 14 (1): 39-45. (in Chinese))
- [3] LADD A J C, VERBERG R. Lattice-Boltzmann simulations of particle-fluid suspensions[J]. Journal of Statistical Physics, 2001, 104(516): 1191-1251.
- [4] KRAFZYK M, TILKE J, LUO L S. Large-eddy simulations with a multiple-relaxation-time LBE model[J]. International Journal of Modern Physics B, 2003, 17(1/2): 33-40.

- [5] 金文,王道增. PIV 直接测量泥沙沉速试验研究[J]. 水动力学研究与进展 :A 辑, 2005, 20(1) : 19-23. (JIN Wen, WANG Dao-zen. Direct settling velocity detection of sediment using PIV[J]. Journal of Hydrodynamics:Ser A, 2005, 20(1) : 19-23. (in Chinese))
- [6] 吴剑,齐鄂荣,李炜,等.应用 PIV 系统研究横流中近壁水平圆柱绕流旋涡特性[J]. 水科学进展, 2005, 16(5) : 628-633. (WU Jian, QI Erong, LI Wei, et al. Research on vortexes of cross flow past a horizontal circular cylinder by PIV system[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(5) : 628-633. (in Chinese))
- [7] 李永,吴玉林,袁辉靖,等.三维 PIV 技术在吸入涡流态测量中的应用[J]. 水科学进展, 2007, 18(3) : 368-373. (LI Yong, WU Yu-lin, YUAN Hui-jing, et al. Application of 3-D PIV in measuring the entrained vortex[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(3) : 368-373. (in Chinese))
- [8] 张金凤,张庆河,林列.三维分形絮团沉降的格子 Boltzmann 模拟[J]. 水利学报, 2006, 37(10) : 1253-1258. (ZHANG Jinfeng, ZHANG Qing-he, LIN Lie. Lattice Boltzmann simulation of 3D fractal flocs settling[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(10) : 1253-1258. (in Chinese))
- [9] ZHANG Q H, ZHANG J F. Modeling of 3D fractal mud flocs settling via Lattice Boltzmann Method[C]// KUSUDA T, YAMANISHI H, SPEARMAN J, et al. Sediment and Ecohydraulics: INTERCOH 2005. Netherlands: Elsevier, 2007, 227-240.
- [10] HOU S, STERLING J, CHEN S, et al. A lattice subgrid model for high Reynolds number flows[J]. Fields Institute Communications, 1996, 6: 151-166.
- [11] DUPUIS A, CHOPARD B. Lattice gas modeling of scour formation under submarine pipelines[J]. Journal of Computational Physics, 2002, 178: 167-174.
- [12] YU H, GIRMAJI S S, LUO L S. DNS and LES of decaying isotropic turbulence with and without frame rotation using lattice Boltzmann method[J]. Journal of Computational Physics, 2005, 209: 599-616.
- [13] TEN CATE A, DERKSEN J J, KRAMER H J M, et al. The microscopic modelling of hydrodynamics in industrial crystallisers[J]. Chemical Engineering Science, 2001, 56: 2495-2509.

Lattice Boltzmann simulation of particle settling and experimental validation by PIV^{*}

ZHANG Jinfeng¹, ZHANG Qing-he¹, LU Zhao²

(1. School of Civil Engineering, Tianjin University & Key Laboratory of Harbor and Ocean Engineering, Ministry of Education, Tianjin 300072, China; 2. China Communications Planning and Design Institute for Water Transportation, Beijing 100007, China)

Abstract : To investigate the behavior of the particle-laid turbulent flows, a numerical model is presented through the lattice Boltzmann (LB) method with the large eddy simulation. The simulated settling velocity of the spherical particle agrees with the theoretical value and the measured result by the particle imaging velocimetry (PIV). Furthermore, the flow field around particles and the flow velocity in the tail are illustrated. The computed results are basically in accordance with the measured values. It verifies that the LB method and the large eddy simulation can be applied to simulating the particle-laid turbulent flows.

Key words : spherical particle; sedimentation; turbulent flow; lattice Boltzmann method; large eddy simulation; PIV

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50779046).