

DOI: 10.7511/jslx201605014

带自由表面水流与离散颗粒耦合模型研究

车海鸥¹, 王凯¹, 张景新^{*1,2,3}

(1. 上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 2. 河口海岸交通行业重点实验室, 上海 201201;
3. 上海交通大学 水动力学教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 基于考察泥沙运动的微观行为特征, 采用离散单元法 (DEM) 模拟泥沙颗粒运动, 结合带自由表面的水动力学计算模型, 建立了 CFD-DEM 耦合数值模型。计算程序开发基于 Fortran 语言来实现。耦合模型中实现了硬球模型和软球模型两种颗粒碰撞模型, 应用范围较广。作为自由表面水流与泥沙颗粒流数值模型的初步研究, 在模型建立的基础上, 对模型做了基本的验证。分别通过单颗粒静水沉降和混合颗粒群分选两个计算工况, 验证了模型的正确性及模拟精度。该耦合模型可进一步丰富带自由表面水流条件下泥沙运动的研究手段。

关键词: 离散单元法; 计算流体力学; 颗粒碰撞; 泥沙运动

中图分类号: O352 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-4708(2016)05-0747-06

1 引言

泥沙运输是河流动力学的重要研究内容, 泥沙运动对河流的变迁也有着重大影响, 研究泥沙在水中的运动行为也因此具有重要意义。目前泥沙研究中数值模拟方法多基于连续介质模型, 通过泥沙的输沙率计算获得推移质及悬移质的运动特征, 及相应的河床冲淤。基于粒子微观运动行为的研究尚不多见。而对于泥沙颗粒微观运动的研究, 有助于泥沙运动的若干机理问题的探讨, 并有助于发展适用于工程应用的宏观计算模型。到目前为止, 对散体 (即颗粒形态的物质) 的相关研究远不及对流体以及固体的研究, 同时, 在散体与流体的混合问题研究中, 也多为气固耦合^[1-3], 泥沙输运这种流固耦合^[4]问题的研究还比较匮乏。

将计算流体力学 CFD (Computational Fluid Dynamics) 与离散元法 DEM (Discrete Element Method) 相耦合, 用以研究流固耦合问题展现了各自的优越性, 可以充分考虑固体与流场之间的相互作用。如牟介刚等^[5]采用 CFD-DEM 耦合模型对提升管内的气固流动进行了模拟, 分析了颗粒间碰

撞弹性恢复系数及摩擦系数和 Saffman 升力、Magnus 力对管内气固流动结果的影响。文献 [6, 7] 采用计算流体力学与离散单元法相耦合的 CFD-DEM 方法研究了气固两相流动在三维非等密度颗粒流化床内的运动问题。文献 [8, 9] 利用 CFD-DEM 方法研究了锥形颗粒在带有圆锥底的圆柱形喷射床中的运动, 主要利用 4 球模型和 7 球模型构建非球形颗粒模型, 研究其在气固两相流中的运动。赵永志等^[10]利用 CFD-DEM 方法研究了两维下行式反应器中颗粒运动行为。上述研究都很好证实了 CFD-DEM 耦合方法在流固耦合问题中的可行性及可靠性。然而, 针对天然河流, 带自由表面水流与泥沙颗粒流的数值模拟研究工作尚不多见。本文探讨了用 CFD-DEM 耦合法建立自由表面水流条件下泥沙颗粒流问题的可行性, 发展了相应的计算程序, 涵盖颗粒碰撞的硬球模型和软球模型, 可进一步应用于泥沙颗粒流的微观特征研究。

2 数学模型

2.1 离散单元法 (DEM) 模型

2.1.1 离散单元法基本假定条件

离散单元法把离散体看作具有一定形状和质量的离散颗粒单元的集合, 每个颗粒为一个单元。作如下假设^[11]。

(1) 颗粒为刚性体, 颗粒系统的变形是这些颗粒接触点变形的总和。

(2) 颗粒之间的接触发生在很小的区域内, 即

收稿日期: 2015-04-27; 修改稿收到日期: 2015-08-25.

基金项目: 国家自然科学基金 (11572196, BC0100133); 国家 973 计划 (2014CB046200); 水利部公益性行业科研专项经费 (201401027); 河口海岸交通行业重点实验室开放课题 (KLECE201303) 资助项目。

作者简介: 车海鸥 (1989-), 男, 硕士生;
王凯 (1992-), 男, 硕士生;
张景新* (1975-), 副教授
(E-mail: zhangjingxin@sztu.edu.cn).

为点接触。

(3) 颗粒接触特性为软接触,即刚性颗粒在接触点允许发生一定的重叠量,颗粒之间的重叠量与颗粒尺寸相比很小,颗粒本身的变形相对于颗粒的平移和转动来说也小得多。

(4) 在每个时步内,扰动不能从任一颗粒同时传播到其相邻颗粒。在所有的时间内,任一颗粒上作用的合力可以由与其接触的颗粒之间的相互作用唯一确定。

颗粒间的碰撞设定了硬球和软球两种模型进行计算,颗粒的运动基于牛顿第二定律进行求解。

2.1.2 硬球模型

硬球模型完全忽略颗粒接触力大小和颗粒表面变形细节,接触过程简化为瞬间完成的碰撞过程,碰后速度通过接触过程中力对时间积分直接计算,碰撞过程中能量的耗散采用恢复系数模拟,运动方程如下。

$$\mathbf{V}'_i = \mathbf{V}_i - [m_j / (m_i + m_j)](1 + e)(\mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad (1)$$

$$\mathbf{V}'_j = \mathbf{V}_j + [m_i / (m_i + m_j)](1 + e)(\mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{V}_i, \mathbf{V}'_i, \mathbf{V}_j$ 和 \mathbf{V}'_j 分别为 i 和 j 两个颗粒碰撞前后的速度, m_i 和 m_j 为颗粒质量, e 为恢复系数, $\mathbf{V}_{ij} = \mathbf{V}_i - \mathbf{V}_j$ 为两个颗粒相对速度, \mathbf{n} 为两颗粒发生碰撞时质心连线的单位矢量:

$$\mathbf{n} = (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) / |\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2| = \mathbf{r}_{12} / |\mathbf{r}_{12}| \quad (3)$$

2.1.3 软球模型

软球模型把颗粒间的法向力简化为弹簧和阻尼器,切向力简化为弹簧、阻尼器和滑动器,引入弹性系数和阻尼系数等参量,不考虑颗粒表面变形,依据颗粒间法向重叠量和切向相对位移计算接触力,不考虑接触力的加载历史。

法向与切向弹性系数和阻尼系数由颗粒材料的弹性模量和泊松比等参数等效计算得到

$$k_n = \frac{4}{3} \left[\frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \right]^{-1} \left[\frac{R_i + R_j}{R_i R_j} \right]^{-1/2} \quad (4)$$

$$c_n = 2 \sqrt{[m_i m_j / (m_i + m_j)] k_n} \quad (5)$$

$$k_t = 8 \alpha^{1/2} \left[\frac{1 - \nu_i^2}{G_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{G_j} \right]^{-1} \left[\frac{R_i + R_j}{R_i R_j} \right]^{-1/2} \quad (6)$$

$$c_t = 2 \sqrt{[m_i m_j / (m_i + m_j)] k_t} \quad (7)$$

式中 E, G 和 ν 为材料的弹性模量,剪切模量和泊松比, m_i, m_j, R_i 和 R_j 为颗粒的质量和半径。

法向力:

$$\mathbf{F}_{n,ij} = (-k_n \alpha^{3/2} - c_n \mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} \quad (8)$$

切向力:

$$\mathbf{F}_{t,ij} = -k_t \boldsymbol{\delta} - c_t \mathbf{V}_{ct} \quad (9)$$

滑动速度矢量:

$$\mathbf{V}_{ct} = \mathbf{V}_{ij} - (\mathbf{V}_{ij} \cdot \mathbf{n}) \mathbf{n} + R_i \boldsymbol{\omega}_i \times \mathbf{n} + R_j \boldsymbol{\omega}_j \times \mathbf{n} \quad (10)$$

式中 α 为颗粒 i 和 j 碰撞时的法向重叠量, δ 为颗粒 i 和 j 碰撞时的切向重叠量, $\boldsymbol{\omega}$ 为角速度。

颗粒 i 受到的颗粒 j 作用下的合力和合力矩分别为

$$\mathbf{F}_{ij} = \mathbf{F}_{n,ij} + \mathbf{F}_{t,ij}, \quad \mathbf{T}_{l,ij} = R_i \mathbf{n} \times \mathbf{F}_{t,ij} \quad (11, 12)$$

2.1.4 颗粒运动

本文颗粒运动过程中的受力主要考虑四种力作用,即自身重力、在流场所受的浮力和运动过程中的运动阻力和颗粒间的相互作用力(法向及切向碰撞接触力 $\mathbf{F}_{n,ij}$ 和 $\mathbf{F}_{t,ij}$),其他力,如 Magnus 力和 Saffman 力尚未计及。根据牛顿第二定律,每个颗粒的运动方程如下。

$$m_i \frac{d\mathbf{V}_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + \mathbf{F}_D + \mathbf{F}_L + \sum (\mathbf{F}_{n,ij} + \mathbf{F}_{t,ij}) \quad (13)$$

式中 \mathbf{F}_D 为颗粒运动时流场的运动阻力, \mathbf{F}_L 为浮力。

此外,颗粒还受到切向力矩的作用为

$$I_i (d\mathbf{X}_i / dt) = \sum \mathbf{T}_{l,ij} \quad (14)$$

在上述力和力矩的作用下,颗粒发生平移和滚动。两式中的 m_i 和 I_i 分别为颗粒的总质量和转动惯量, \mathbf{V}_i 为移动速度, \mathbf{X}_i 为角速度, t 为时间, g 为重力加速度。

2.2 自由表面水流模型

流场部分控制方程为带自由表面的三维水动力学方程,通过垂向 σ 坐标^[12]转换捕捉自由表面位置及底部边界。 σ 坐标系下的控制方程为

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_\sigma}{\partial \sigma} = 0 \quad (15)$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial q_x u}{\partial x} + \frac{\partial q_x v}{\partial y} + \frac{\partial q_x \tilde{\omega}}{\partial \sigma} = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial x} - \frac{D}{\rho_0} \frac{\partial p_n}{\partial x} -$$

$$\frac{D}{\rho_0} \frac{\partial p_{atm}}{\partial x} + f q_x + \frac{\partial}{\partial x} \left[2v_{tH} \frac{\partial q_x}{\partial x} \right] +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[v_{tH} \left(\frac{\partial q_x}{\partial y} + \frac{\partial q_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{v_{tV}}{D} \frac{\partial q_x}{\partial \sigma} \right] \quad (16)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial q_y u}{\partial x} + \frac{\partial q_y v}{\partial y} + \frac{\partial q_y \tilde{\omega}}{\partial \sigma} = -gD \frac{\partial \zeta}{\partial y} - \frac{D}{\rho_0} \frac{\partial p_n}{\partial y} -$$

$$\frac{D}{\rho_0} \frac{\partial p_{atm}}{\partial y} - f q_y + \frac{\partial}{\partial x} \left[v_{tH} \left(\frac{\partial q_y}{\partial x} + \frac{\partial q_x}{\partial y} \right) \right] +$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left[2v_{tH} \frac{\partial q_y}{\partial y} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{v_{tV}}{D} \frac{\partial q_y}{\partial \sigma} \right] \quad (17)$$

$$\frac{\partial q_\sigma}{\partial t} + \frac{\partial q_\sigma u}{\partial x} + \frac{\partial q_\sigma v}{\partial y} + \frac{\partial q_\sigma \tilde{\omega}}{\partial \sigma} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p_n}{\partial \sigma} + \frac{\partial}{\partial x} \times$$

$$\left[v_{tH} \frac{\partial q_\sigma}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[v_{tH} \frac{\partial q_\sigma}{\partial y} \right] + \frac{1}{D} \frac{\partial}{\partial \sigma} \left[\frac{v_{tV}}{D} \frac{\partial q_\sigma}{\partial \sigma} \right] \quad (18)$$

式中 $q_x = Du, q_y = Dv, q_z = Dw, g$ 为重力加速度, D 为总水深, $f = 2\omega \sin \varphi$ 为科氏项, φ 为纬度, $\tilde{\omega}$ 为 σ 坐标系下垂向速度, ζ 为自由表面位置。控制方程求解基于非结构网格下的 FVM, 时间积分采用半隐式, 对流项求解采用二阶 TVD 格式^[13]。

2.3 程序计算流程

CFD/DEM 耦合模型程序计算流程如图 1 所示。

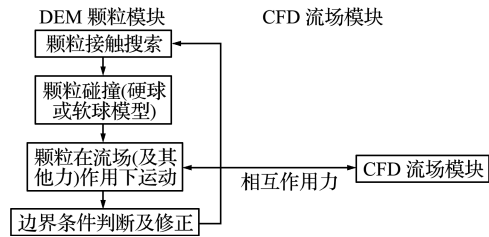


图 1 耦合模型计算流程

Fig. 1 Process sketch of calculation program

由于颗粒碰撞时间短, 两个模块循环步长不一致, 流场 CFD 模块步长大于颗粒 DEM 模块步长, 具体根据实际情况设置。

2.4 颗粒与流场耦合

流场对颗粒作用力的计算有多种表达式, 多基于雷诺数的变化采用不同的计算公式。雷诺数定义为

$$Re = \rho v_{f-p} d / \mu \quad (19)$$

式中 d 为特征长度(取颗粒直径), v_{f-p} 为流场与颗粒的相对速度, ρ 为流体密度, μ 为流体动力粘性系数依据雷诺数, 将阻力(流场速度大于颗粒速度时为动力)计算公式汇总如下。

(1) $Re < 1$

$$F_D = \left[0.63 + \frac{4.8}{Re^{0.5}} \right]^2 \frac{\rho v_{f-p}^2 \pi d^2}{2 \cdot 4} \quad (20)$$

(2) $Re = 25 \sim 10^3$

$$F_D = \frac{2.5}{\sqrt{Re}} \frac{\rho v_{f-p}^2 \pi d^2}{2 \cdot 4} \quad (21)$$

(3) $Re = 10^3 \sim 10^5$

$$F_D = \left[\frac{1}{20} \cdots \frac{1}{16} \right] \pi d^2 v_{f-p}^2 \rho \quad (22)$$

颗粒对流场的反作用力以流场计算单元中所有粒子所受流动阻力的合力的方式引入流场控制方程的求解, 即

$$F = \sum_{i=1}^n (-F_{d_i}) \quad (23)$$

式中 i 为某时刻落在某网格内的第 i 个粒子, n 为落在某网格内的粒子总数。固壁边界条件设定为

反射方式, 即粒子不可穿透固壁, 粒子反弹强度通过恢复系数实现。

3 模型验证

3.1 单个小球在静水中的自由落体运动

验证本文的 CFD-DEM 耦合数值模型, 采用文献[14]单一铁球下落的实验作为基本算例。数值模型流场计算域尺寸如图 2 所示, 其他计算参数列入表 1。流场计算时间步长 $\Delta t_1 = 1.0 \times 10^{-3}$, DEM 模块时间步长 $\Delta t_2 = 1.0 \times 10^{-4}$, 即 CFD 模块步进一次, DEM 模块循环 10 次。通过试算, 确保小球在 Δt_2 时间内的运动距离对流场影响可以忽略, 减少流场计算时间, 提高模型整体效率。

图 3 为小铁球在自由表面以下静水中的下落过程中垂向位置的变化。图中符号为相应的实验

表 1 数值计算参数

Tab. 1 Parameters used for simulation

参数	数值
流场密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1000.0
小球直径/mm	2.0
小球密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7850.0
弹性模量/GPa	212.0
泊松比	0.31
恢复系数	0.5

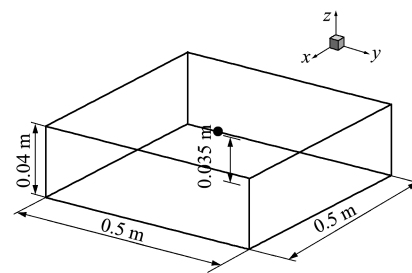


图 2 模型尺寸

Fig. 2 Schematics of the simulation

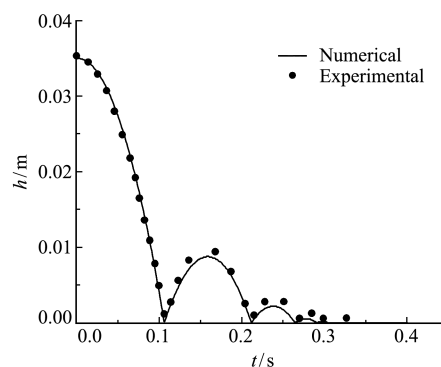


图 3 小球垂向位置随时间变化实验与数值结果
Fig. 3 Experimental and numerical results change of ball z -coordinate with time

值^[14],实线为计算值,数值模拟结果与实验结果吻合较好。有效模拟了小球下落过程中的变加速运动以及触及底面后的回弹运动。图4给出了小球不同下落位置处的局部流场,描述了不同时刻随着小铁球下落,流体速度场受小球影响而改变。小球引起的流动主要分布在后部尾迹范围内,流动较弱。

3.2 不同密度小球在流场中的悬浮沉淀运动

本算例针对包含颗粒间碰撞问题的多个颗粒在流场中的复杂运动。初始时刻将两种不同密度小球充分混合,模拟随后不同密度球体的运动。流场计算域为 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m} \times 0.2\text{ m}$,小球物理参数列入表2。初始时刻按随机方式混合两种小球,置于水体中,既而模拟在重力和浮力作用下球体的运动,而在球体运动过程中,将发生颗粒碰撞,影响球体的上升和下降运动。

图5给出了不同时刻两种密度的球体的空间分布,深色为重密度球体,浅色为轻密度球体。结

果显示由于密度不同导致小球随时间不断分离,最终较轻小球上升至水面,较重小球下降至水底,在 $t=1.5\text{ s}$ 时刻小球基本分离,至计算时间为 3 s 时,球体位置基本达到稳定状态。球体在静水中上浮和下沉,对水体产生扰动。初始阶段,影响范围局限在小球群上方,水位由于上升小球的影响而抬升。随着球体运动的延续,水位的影响逐渐向四周扩散,如图6所示。

表2 数值计算参数

Tab. 2 Parameters used for the simulation

参数	数值
小球直径/mm	2.0
轻球密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	900.0
轻小球个数	5000
重球密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1100.0
重小球个数	5000
弹性模量/GPa	8.7
泊松比	0.3
恢复系数	0.5

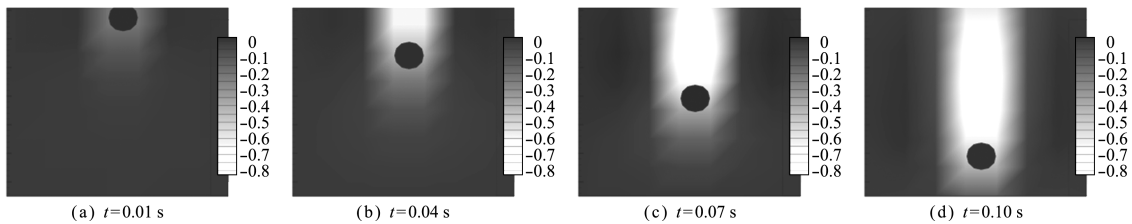


图4 不同时刻小球位置变化及流场Z方向速度(m/s)等值云图

Fig. 3 Ball position during falling and the flows induced by the falling ball

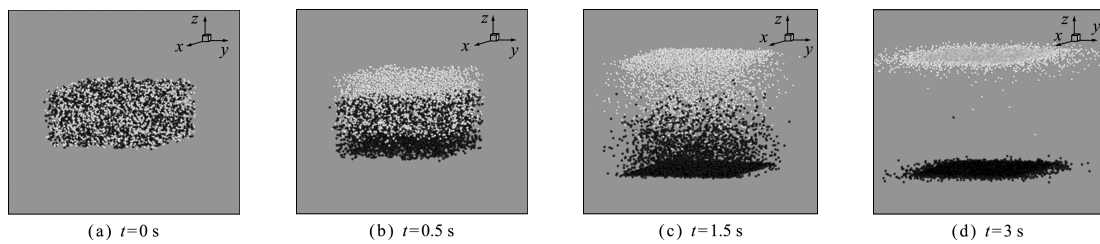


图5 不同时刻两种密度小球上升或下降运动的分离行为

Fig. 5 Rising or falling of different density balls at different time

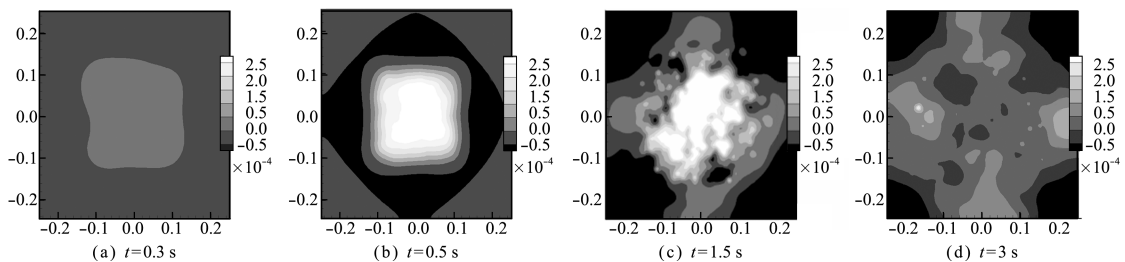


图6 不同时刻自由表面水位(m)变化

Fig. 6 Change of free surface water level in different time

4 总 结

本文将带自由表面水流运动的数值模型与颗粒流的离散元模型相结合,建立了流固耦合数值模型。通过算例验证了自行开发的 CFD-DEM 程序的可靠性及模拟精度。该数值模型可进一步为自由水流中的泥沙颗粒细观行为的研究提供有效的技术手段,使得可以从更加细观的角度进行水中泥沙颗粒行为的研究,进而总结泥沙运动的宏观特征,从而应用于工程实际。

本文模型的建立尚处于初级阶段,在多孔介质水流模拟和颗粒受力分析中,如适当引入 Saffman 力和 Magnus 力等方面和颗粒形状因素等问题还需进一步开展工作。程序中的计算方法优化从而提高计算效率也是模型研究的进一步工作。

参考文献(References):

- [1] 赵海波,柳朝晖,郑楚光,等. 气固两相流中颗粒碰撞的 Monte-Carlo 数值模拟[J]. 计算力学学报,2005, **22**(3): 299-304. (ZHAO Hai-bo, LIU Chao-hui, ZHENG Chu-guang, et al. Monte-Carlo numerical simulation of inter-particle collisions in gas-solid flows [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*,2005, **22**(3):299-304. (in Chinese))
- [2] 昌泽舟, Berlemont A, Gouesbet G. 考虑颗粒间碰撞的气固两相流拉格朗日模拟 [J]. 计算力学学报, 2001, **18**(4): 388-392. (CHANG Ze-zhou, Berlemont A, Gouesbet G. Simulation of inter-particle collisions based on a particle Lagrangian simulation in gas-solid flows [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*,2001, **18**(4): 388-392. (in Chinese))
- [3] 刘向军,石磊,徐旭常. 稠密气固两相流欧拉-拉格朗日法的研究现状 [J]. 计算力学学报,2007, **24**(2): 166-172. (LIU Xiang-jun, SHI Lei, XU Xu-chang. Activities of dense particle-gas two-phase flow modeling in Eulerian-Lagrangian approach [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*, 2007, **24**(2): 166-172. (in Chinese))
- [4] 楚锡华,李锡夔. 含液颗粒材料液固耦合分析的离散颗粒模型及特征线 SPH 法 [J]. 计算力学学报, 2007, **24**(6): 719-726. (CHU Xi-hua, LI Xi-kui. A discrete particle model and characteristic based SPH method for fluid-solid interaction of granular materials filled with liquids [J]. *Chinese Journal of Computational Mechanics*,2007, **24**(6): 719-726. (in Chinese))
- [5] 牟介刚,赵永攀,许明远,等. 提升管内气固流动行为的 CFD-DEM 模拟 [J]. 轻工机械,2010, **28**(6): 36-40. (MU Jie-gang, ZHAO Yong-pan, XU Ming-yuan, et al. CFD-DEM simulations of gas-solids flow in riser [J]. *Light Industry Machinery*, 2010, **28**(6): 36-40. (in Chinese))
- [6] 江茂强,赵永志,郑津洋. 非等密度颗粒气固流化床的微观尺度模拟与分析 [J]. 浙江大学学报(工学版), 2009, **43**(9): 1703-1708. (JIANG Mao-qiang, ZHAO Yong-zhi, ZHENG Jin-yang. Micro-scale simulation and analysis of gas-solid fluidized bed with multi-density distribution of particles [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2009, **43**(9): 1703-1708. (in Chinese))
- [7] Karimi M, Mostoufi N, Zarghami R, et al. A new method for validation of a CFD-DEM model of gas-solid fluidized bed [J]. *International Journal of Multiphase Flow*,2012, **47**:133-140.
- [8] Ren B, Zhong W Q, Chen Y, et al. CFD-DEM simulation of spouting of corn-shaped particles [J]. *Particulate Science and Technology*,2012, **10**(5):562-572.
- [9] Rong L W, Zhan J M. Improved DEM-CFD model and validation: a conical-base spouted bed simulation study [J]. *Journal of Hydrodynamics*,2010, **22**(3): 351-359.
- [10] Zhao Y Z, Ding Y L, Wu C N, et al. Numerical simulation of hydrodynamics in downers using a CFD-DEM coupled approach [J]. *Powder Technology*, 2010, **199**(1):2-12.
- [11] 王国强,郝万军,王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践 [M]. 西安:西北工业大学出版社,2010. (WANG Guo-qiang, HAO Wan-jun, WANG Ji-xin. *Discrete Element Method and Practice in EDEM* [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press,2010. (in Chinese))
- [12] Phillips N A. A coordinate system having some special advantages for numerical forecasting [J]. *Journal of Meteorology*,1957, **14**(2):184-185.
- [13] Zhang J X, Sukhodolov A N, Liu H. Fully hydrodynamic versus hydrostatic modeling for shallow environmental flows [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, **26**(4):840-847.
- [14] Qiu L C, Wu C Y. A hybrid DEM-CFD approach for solid-liquid flows [J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2014, **26**(1):19-25.

Study of numerical model coupling of hydrodynamic CFD-DEM simulation

CHE Hai-ou¹, WANG Kai¹, ZHANG Jing-xin^{*1,2,3}

(1. School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Key Laboratory of Estuarine & Coastal Engineering, Ministry of Transport, Shanghai 201201, China;

3. MOE Key Laboratory of Hydrodynamics, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to investigate the sediment transportation by means of numerical simulating particles' motion, a numerical model coupling of CFD and DEM is established in this paper. The codes in-house is based on Fortran. There are two types of particle collision modes established in the present numerical model, i. e. the rigid particle mode and the soft particle mode. To verify the numerical model, two study cases were carried out. One is about the free falling motion of a single spherical particle in the still water, and the another one is about the motion of well mixed particles with different density initially in the still water. With the well validation, the present numerical model is confirmed to be feasible in the research of sediment motion with the mesoscopic view.

Key words: computational fluid dynamics(CFD); discrete element method(DEM); particle collision; sediment motion

~~~~~  
(上接第 746 页)

## A modified HLLC method and its application in Baer-Nunziato model

LI Zheng, WANG Shuang-hu<sup>\*</sup>

(Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Wave-speed is very important for HLLC method. If the wave-speed is too small, the wave characters can not be caught; if it is too large, there would be more viscosity in the calculation. There are a lot of methods be caught to determine the wave-speed, but every method has its applicability. This paper presents a modified HLLC method without estimating wave-speed, and it is applied to simulate the Baer-Nunziato model. It is compared with three classic wave-speed estimating methods. Numerical results show that the new method is better than others.

**Key words:** compressible; multi-phase flow; Baer-Nunziato model; HLLC method; wave-speed