

运用 CFD-DEM 耦合模拟计算离心泵内非稳态固液两相流动

黄思, 杨富翔, 宿向辉

华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510640

摘要 对于泵内固液两相流数值模拟, 一般方法是将固体颗粒相视为拟流体, 采用多相流的 CFD 方法进行计算, 但这难以体现固体颗粒形状大小、碰撞、凝聚和分离等特性。本文以工程中常用的 IS 型离心泵作为研究对象, 运用 DEM 离散元法结合 CFD 方法, 采用 EDEM-Fluent 耦合, 模拟计算离心泵内非稳态固液两相流动, 探索泵内固体颗粒群运动规律及其对外特性的影响。计算采用的固体颗粒密度为 1500 kg/m^3 , 泵入口固相体积率为 15%, 粒径在 1.0~3.0 mm 范围内随机变化。计算得到了固液两相泵随时间的外特性变化, 包括泵扬程、泵内固体颗粒体积的变化规律; 得到了泵内固体颗粒群的运动轨迹和固相体积率分布等有价值的结果。

关键词 CFD-DEM 耦合; 离心泵固液两相流; 颗粒群轨迹; 非稳态数值模拟

中图分类号 O359

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.27.004

Unsteady Numerical Simulation for Solid-Liquid Two-Phase Flow in Centrifugal Pump by CFD-DEM Coupling

HUANG Si, YANG Fuxiang, SU Xianghui

School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

Abstract In a numerical simulation of the solid-liquid two-phase flow in pumps, the conventional approach is to treat solid particles as a kind of quasi-fluid, using the CFD in the multiphase flow case, but in this way, the characteristics of the solid particles, such as the shape and size, the collision, the agglomeration and the separation, can not be reasonably represented. In this paper, the unsteady solid-liquid two-phase flow in an IS type centrifugal pump is simulated numerically, using the discrete element method (DEM) combined with the CFD method. With the coupling of the codes of the EDEM and the Fluent, the motions of the solid particles and their effects on the pump performance are investigated. In the simulation, the solid particles are 1500 kg/m^3 in density, 15% in the volume rate at the pump inlet, 1.0-3.0 mm in sizes in a random distribution. Some valuable conclusions are reached, including the time-dependent head, the particle trajectories and the solid volume rate distributions in the centrifugal pump.

Keywords CFD-DEM coupling; solid-liquid two-phase flow in centrifugal pump; trajectories of particle group; unsteady numerical simulation

离心泵广泛用于各种固液混合介质的输送, 研究固体颗粒对泵内流场及外特性的影响具有重要的学术和工程价值^[1-3]。目前针对流体-颗粒系统的数值模拟, 主要有多相流的 CFD 方法和 CFD-DEM 耦合方法。多相流 CFD 方法是基于连续介质假设, 在欧拉坐标系下把颗粒相看作是整体分散但局部连续的拟流体相进行多相计算。现有的主要商用 CFD 软件一般都包含上述多相流模型, 众多学者采用该模型计算了水泵固液两相流动, 并得到了一些研究成果^[6-14]。但由于该

方法的颗粒相按连续介质进行处理, 从本质上削弱了固体颗粒非均匀结构的真实性, 难以体现颗粒形状大小、相互碰撞、聚合和分离等特征。

离散元法 (distinct element method, DEM) 起源于 20 世纪 70 年代^[5], 并逐渐应用到有关颗粒系统的计算。该方法考虑颗粒的形状大小、材料属性、粒径分布等因素, 根据牛顿第二定律求解每个颗粒的受力、位置和速度等变化。CFD-DEM 耦合方法是采用 DEM 法和 CFD 法分别求解颗粒和流体流动,

收稿日期: 2014-07-30; 修回日期: 2014-08-11

作者简介: 黄思, 教授, 研究方向为流体机械, 电子信箱: huangsi@scut.edu.cn

引用格式: 黄思, 杨富翔, 宿向辉. 运用 CFD-DEM 耦合模拟计算离心泵内非稳态固液两相流动[J]. 科技导报, 2014, 32(27): 28-31.

进行质量、动量和能量的传递实现耦合^[16-17]。该方法结合了CFD和DEM各自优势,更准确地描述颗粒的运动及其与流场的相互影响。目前为止,尚未见到使用CFD-DEM法进行固液泵两相流动的研究报道。

本文运用EDEM和Fluent流固软件耦合,模拟计算离心泵内固液两相流动,探索泵内固体颗粒群运动规律及其对外特性的影响,以为降低能耗、减少泵过流部件的磨损及水泵优化设计等问题提供理论依据。

1 模型和方法

1.1 EDEM-Fluent耦合

应用Euler-Lagrange模型进行固液两相耦合,在欧拉坐标系下求解非稳态雷诺平均N-S方程及标准k-ε湍流模型得到泵内液相流场。在拉格朗日坐标系下求解各个颗粒运动方程,固液相之间的耦合由颗粒曳力和两相动量交换的迭代计算完成,整体流程见图1。

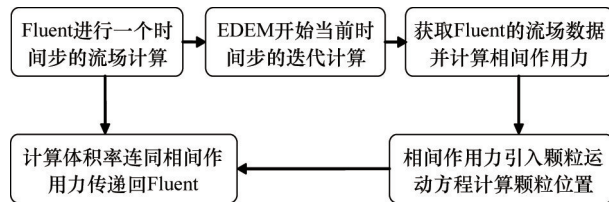


图1 EDEM-Fluent耦合方法
Fig. 1 EDEM-Fluent coupling

1.2 介质参数

选取常温清水作为连续相。实际应用中水泵的固体颗粒体积率基本在15%范围内^[1],因此本文采用的泵入口固相体积率为15%。为简化计算,设定颗粒为球形,颗粒与颗粒、颗粒与泵体间的碰撞采用Hertz-Mindlin无滑动接触模型。泵体材料、颗粒物料的有关参数见表1,颗粒与颗粒和颗粒与泵体间的相互影响系数见表2。

表1 材料属性

Table 1 Materials property

材料	泊松比	剪切模量/ MPa	密度/ (kg·m ⁻³)	粒径/ mm	泵入口 体积率/%
泵体	0.30	70.0	7800		
颗粒	0.40	21.3	1500	1.0~3.0	15

表2 材料的相互作用

Table 2 Materials interaction

相互作用	材料恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
颗粒-颗粒	0.44	0.27	0.01
颗粒-泵体	0.50	0.15	0.01

1.3 流动计算域及网格划分

选取常用的IS型离心泵作为研究对象,其基本参数为:

流量 $Q_1=88.5 \text{ m}^3/\text{h}$,扬程 $H=14.5 \text{ m}$,转速 $n=1450 \text{ r/m}$,叶轮进口直径 $D_0=125 \text{ mm}$,出口宽度 $b_2=26.5 \text{ mm}$,叶片数 $Z=6$,叶片包角 100° 。流场计算域由入口管路、叶轮、蜗壳和出口管路组成。应用Pro-E构造流体计算域的三维模型,导入ICEM软件中进行计算网格划分,得到如图2所示的六面体结构网格单元,网格单元总数为1019538。采用滑移网格进行水泵非定常计算,设置入口段、泵体与叶轮的交界面为滑移界面,叶轮计算域设在旋转坐标系,其余计算域设在静止坐标系。重力加速度为 9.81 m/s^2 ,重力方向与泵进口来流方向相反。

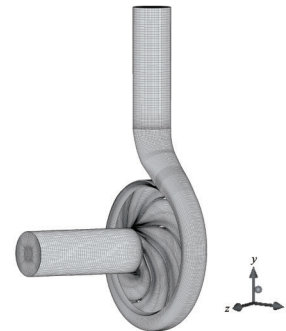


图2 计算域网格单元

Fig. 2 Computational domains and grids

1.4 非稳态计算方法

非稳态计算中,假设叶轮转速恒为常数($n=1450 \text{ r/min}$)。初始状态($t=0$)下泵内流体为静止,计算开始后固体颗粒按体积率 $\alpha=15\%$ 从泵入口恒定释放,粒径 d_p 在 $1.0\sim 3.0 \text{ mm}$ 内随机变化。流体进口边界条件按工况流量值给定,出口边界条件按压力值给定。设流体计算时间步长 $\Delta t = 60/65nZ$,相当于小于叶轮旋转 1° 的时间步长。此外,EDEM-Fluent耦合计算中颗粒计算时间步长要求不能大于流体计算时间步长。通过监测计算域固体颗粒总体积和水泵扬程 H 的谐波稳定程度判断非稳态计算是否结束。

2 结果及分析

2.1 固液两相泵特性随时间的变化

图3为通过Fluent后处理得到的固液两相泵及清水泵扬程 H 随时间 t 的变化曲线,两泵的液相流量相同($Q_1=88.5 \text{ m}^3/\text{h}$)。由图3可见,在经历了一段过渡时间(约 $3T$, T 为叶轮旋转周期, $T=0.0414 \text{ s}$)后,输送清水和固液两相的 H 随 t 开始作稳定的谐波变化,流动进入正常工作阶段。在 $1T$ 内, H 出现6次峰值,与叶轮的叶片数相对应。固液泵 H 值随 t 的脉动幅度明显大于清水泵 H 值的脉动幅度,但固液泵的 H 时均值低于清水泵的 H 时均值。图4是通过EDEM后处理得到的离心泵计算域内固体颗粒无量纲体积 $V_p' = V_p / (V_1 + V_p)$ 随时间的变化曲线, V_p 和 V_1 分别是固体和液体在泵内的体积。由图4可见,从初始状态 $t=0$ 到约 $t=0.3 \text{ s}$ 期间,进入泵内的固体颗粒体积 V_p 随时间 t 单调增加,表明此期间进入泵内的颗粒多于排出泵外的固体颗粒。此后排出泵体的固体颗粒与进入泵体的

颗粒大体相当,泵体内的固体颗粒达到饱和状态,体积不再增加。图4的意义在于通过模拟计算,可掌握泵内固体颗粒的饱和状况以达到疏导固相、避免颗粒滞留改善泵设计的目的。

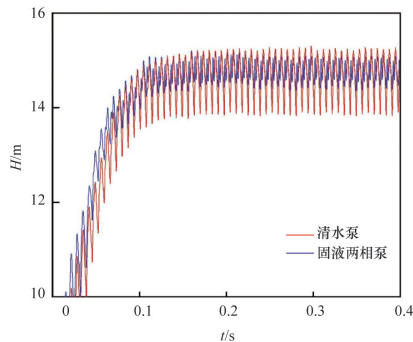


图3 泵H随时间t的变化

Fig. 3 Variation of pump H with t

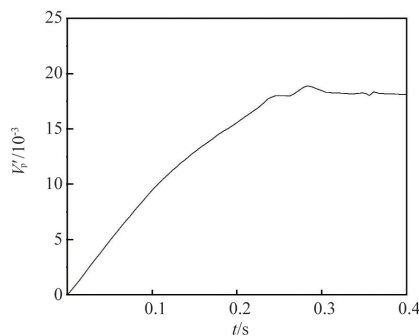


图4 泵内颗粒体积V_p随时间t的变化

Fig. 4 Variation of particle volume V_p inside pump with t

2.2 固体颗粒群轨迹

图5为耦合计算得到的离心泵内固体颗粒群随时间的轨迹变化。对照图4的颗粒体积曲线,图5(a)~(c)对应的是泵内颗粒量增加阶段,图5(d)对应的是泵内颗粒饱和状态。为便于观察颗粒在核心部件叶轮和蜗壳的运动轨迹,图5~图7中均隐去叶轮进水管和蜗壳排水管部分。由图5可以看出:泵叶轮进水段颗粒基本均匀分布(图5(a)),进入叶轮后颗粒大体上沿着叶轮叶片工作面甩向蜗壳(图5(b))。进入蜗壳后,少数颗粒直接从隔舌“短路”进入蜗壳出口,靠近蜗壳出口的叶轮叶片甩出的固体颗粒也以螺旋状整齐地排出泵外(图5(c)),但绝大部分颗粒还是逐渐形成主流沿着蜗壳外壁面向下游排出泵外(图5(d))。重力的作用使得蜗壳外壁面聚集的固体颗粒群偏向重力方向一侧。

为更清晰地观察叶轮内的颗粒群运动轨迹,图6给出了叶轮的局部放大效果,其中暖色颗粒代表有较大粒径,冷色代表较小的粒径。由图6可见,叶轮叶片头部无论是工作面还是背面附近都聚集有固体颗粒,随后叶片背面侧的颗粒很快脱离背面靠向邻近的叶片工作面,使得颗粒总体上聚集在叶片工作面一侧,这个结果与相似离心泵的实测结论^[18]一致。约在1/3叶片长度的位置,固体颗粒开始脱离叶片工作

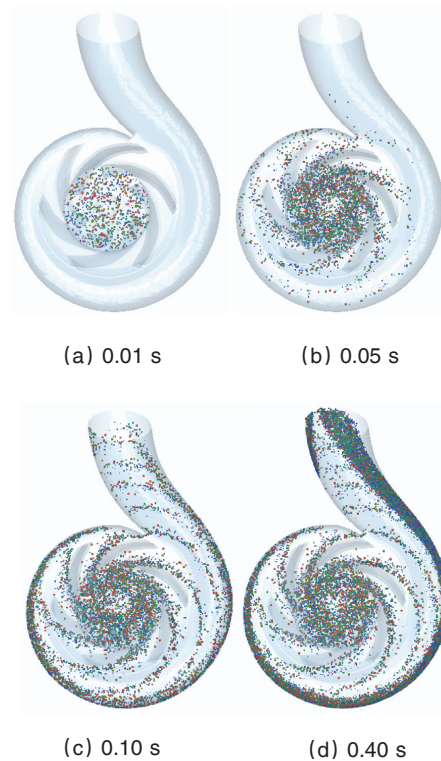


图5 泵内固体颗粒群轨迹

Fig. 5 Particle trajectories inside pump

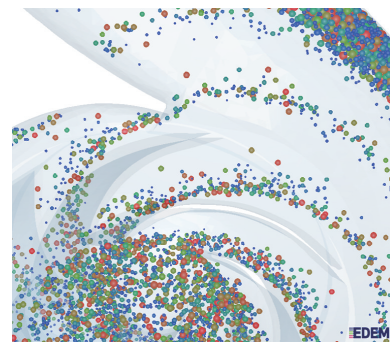


图6 叶轮内固体颗粒的运动轨迹(t=0.40 s)

Fig. 6 Particle trajectories inside impeller (t=0.40 s)

面但仍基本保持叶片形状整齐地向下游运动。由于本计算采用了较高的泵入口颗粒浓度,颗粒之间的相互作用比较频繁,因此从图6中很难看出不同粒径颗粒的轨迹差异。

2.3 固相体积率分布

图7为耦合计算得到的饱和状态下蜗壳内颗粒体积率分布云图。对照图5(d)可以看出,即使饱和状态下颗粒群密集聚合在蜗壳外侧,但颗粒间隙的存在使得颗粒体积率最高值 α_{max} 在0.5左右,与拟流体多相流的计算结果(α_{max} 一般都比较高)相比,这个结果比较客观地反映了颗粒具有大小和形状的特征。

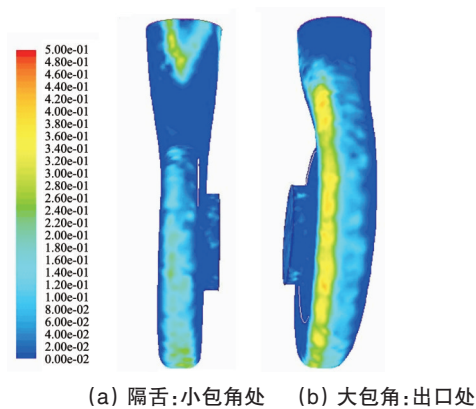


图7 饱和状态下蜗壳内颗粒体积率分布
Fig. 7 Particle volume ratio in volute under saturated condition

3 结论

采用DEM-CFD耦合方法,对离心泵内固液两相非稳态流动进行了模拟计算。

1) 对于工程中常用的固液两相离心泵,扬程随时间的脉动幅度大于清水泵扬程的脉动幅度,但扬程时均值低于清水泵的扬程时均值。

2) 工作开始后一定时间内,进入泵内的固体颗粒体积随时间单调递增,此后固体颗粒达到饱和状态,体积不再增加。

3) 固体颗粒在泵进水段基本均匀分布,进入叶轮后颗粒大体上沿着叶片工作面整齐地向蜗壳或泵出口下游运动。进入蜗壳中的绝大部分颗粒逐渐形成主流沿着蜗壳外侧壁面向下游排出泵外,重力的作用不可忽略。

4) 进入泵内固体颗粒之间的相互作用比较频繁,使得不同粒径颗粒的运动轨迹没有明显的差异。

参考文献(References)

- [1] 胡庆宏, 胡寿根, 孙业志, 等. 固液两相流泵的研究热点和进展[J]. 机械研究与应用, 2010(5): 1-4.
Hu Qinghong, Hu Shougen, Sun Yezhi, et al. The hot spot and development research for the solid-liquid two phase pump[J]. Mechanical Research & Application, 2010(5): 1-4.
- [2] 苏波隆 B K. 混合液在泥浆泵流道中的流动特性的研究[J]. 杂质泵技术, 1986(12): 36-54.
Su Bolong B K. Study on flow characteristics of mixed liquid in the flow of mud pump[J]. Impurity Pump Technology, 1986(12): 36-54.
- [3] 陈次昌, 刘正英, 刘天宝, 等. 两相流泵的理论与设计[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1994.
Chen Cichang, Liu Zhengyin, Liu Tianbao, et al. Theory and design of two phase flow pump[M]. Beijing: Weapon Industry Press, 1994.
- [4] 项桂梁, 李昉, 唐华. 固液两相离心泵内部非定常流动特性研究[J]. 机电工程, 2014, 31(6): 702-706.
Xiang Jialiang, Li Yi, Tang Hua. Study on unsteady flow characteristics of solid-liquid two-phase centrifugal pump[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2014, 31(6): 702-706.
- [5] 王秀礼, 张俊杰, 朱荣生, 等. 固体颗粒含量对离心泵空化特性影响分析[J]. 热能与动力工程, 2014, 29(2): 202-222.
Wang Xiuli, Zhang Junjie, Zhu Rongsheng, et al. Analysis of the influence of the solid particle content on the cavitation characteristics of a centrifugal pump[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy

- and Power, 2014, 29(2): 202-222.
- [6] 王开继, 潘永琛, 郑俊, 等. 细颗粒泥沙对离心泵工作特性影响的数值研究[J]. 中国农村水利水电, 2013(5): 129-136.
Wang Kaiji, Pan Yongchen, Zheng Jun, et al. A numerical study of the impact of fine sand-particles on centrifugal pump working characteristics[J]. China Rural Water and Hydropower. 2013(5): 129-136.
- [7] 付强, 袁寿其, 朱荣生, 等. 离心泵气液固多相流动数值模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 52-57.
Fu Qiang, Yuan Shouqi, Zhu Rongsheng, et al. Numerical simulation and experiment on gas-liquid-solid multiphase flow in centrifugal pump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(14): 52-57.
- [8] 许洪元, 高志强, 吴玉林. 离心泵叶轮中固体颗粒运动轨迹计算[J]. 工程热物理学报, 1993, 14(4): 381-385.
Xu Hongyuan, Gao Zhiqiang, Wu Yulin. Calculation of solid particle motion in impeller of centrifugal pump[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1993, 14(4): 381-385.
- [9] 吴玉林, 曹树良, 葛亮, 等. 渣浆泵叶轮中固液两相湍流的计算和实验[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(1): 71-74.
Wu Yulin, Cao Shuliang, Ge Liang, et al. Solid liquid two phase turbulent flow calculation and measurement through centrifugal slurry pump impellers[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1998, 38(1): 71-74.
- [10] 魏进家, 姜培正, 宇波. 离心泵叶轮内密相液固两相湍流的数值模拟[J]. 应用力学学报, 2000, 17(1): 1-6.
Wei Jinjia, Jiang Peizheng, Yu Bo. Numerical simulation of dense liquid-solid two-phase turbulent flow in a centrifugal pump impeller [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2000, 17(1): 1-6.
- [11] 刘建瑞, 徐永刚, 王董梅, 等. 离心泵叶轮固液两相流动及泵外特性数值分析[J]. 农业机械学报, 2010, 41(3): 86-90.
Liu Jianrui, Xu Yonggang, Wang Dongmei, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in impeller channel and pump characteristics analysis[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(3): 86-90.
- [12] 汪家琼, 蒋万明, 孔繁余, 等. 基于Particle模型固液两相流离心泵流场数值模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(10): 846-850.
Wang Jiaqiong, Jiang Wanming, Kong Fanyu, et al. Numerical simulation of solid-liquid two-phase turbulent flow in centrifugal pump based on particle model[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(10): 846-850.
- [13] 王洋, 徐小敏, 张翔. 离心泵内低浓度固体颗粒运动的数值模拟[J]. 流体机械, 2009, 37(2): 24-27.
Wang Yang, Xu Xiaomin, Zhang Xiang. Numerical simulation for the motion of dilute solid particles in centrifugal pump[J]. Fluid Machinery, 2009, 37(2): 24-27.
- [14] 杨敏官, 刘栋, 高波, 等. 离心泵叶轮内部液固两相湍流的数值模拟[J]. 水泵技术, 2007(6): 14-16.
Yang Minguan, Liu Dong, Gao Bo, et al. Numerical simulation of internal liquid solid two phase turbulent flow in the impeller of centrifugal pump[J]. Pump Technology, 2007(6): 14-16.
- [15] Cundall P A. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock system[C]//Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics. France: Nancy, 1971: 8-12.
- [16] Tsuji Y, Kawaguchi T, Tanaka T. Discrete particle simulation of two-dimensional fluidized bed[J]. Powder Technology, 1993, 77(1): 79-87.
- [17] Kafui K D, Thornton C, Adams M J. Discrete particle-continuum fluid modelling of gas-solid fluidised beds[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(13): 2395-2410.
- [18] 刘娟, 许洪元, 唐澍, 等. 离心泵内固体颗粒运动规律的实验研究[J]. 水力发电学报, 2009, 27(6): 168-172.
Liu Juan, Xu Hongyuan, Tang Shu, et al. Experimental research on the movement rule of solid particles in centrifugal pump[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2009, 27(6): 168-172.

(责任编辑 刘志远)