

圆柱绕流运动的 GHM 模拟

闫民,冯科珂

北京林业大学工学院,北京 100083

摘要 基于颗粒流体动力学方法(GHM)对不同雷诺数(Re 为80~1646)状态下的圆柱绕流问题进行模拟。结果显示,当 $Re=80$ 时,在圆柱下游有一对较为对称的附着涡;随着雷诺数的增大,流动变得不稳定,圆柱后方的一对附着涡逐渐脱落消失,尾流逐渐变窄。通过圆柱绕流现象的算例研究,讨论了GHM的特点和需要进一步研究的问题。颗粒流体动力学方法将流体视为一个离散的系统,将流场离散为弹性流体颗粒,采用赫兹碰撞理论研究颗粒之间的本构关系,处理颗粒所受到的碰撞力;采用帕斯卡原理和声速导数状态方程研究流场的密度差引起的压强差变化,处理颗粒受到的压差力。颗粒流体动力学方法不同于基于流体为连续体假设所建立的N-S方程,具有一定的原始创新意义。

关键词 圆柱绕流;颗粒流体动力学方法;流体颗粒;流固耦合

中图分类号 O242.26

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.20.008

Numerical Simulation of Flow Motion Around a Circular Cylinder Using Granule Hydrodynamics Method

YAN Min, FENG Keke

School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract Flow around a circular cylinder with different Reynolds numbers (Re is 80–1646) is numerically studied by using Granule Hydrodynamics Method (GHM), and the significant flow characteristics are gained. On the basis of actual simulation, the characters of GHM and the problems for further research are discussed. The GHM thinks the fluid as a discrete system, the fluid field in the system is made up by fluid granules, and the reasons for the fluid motion are fluid granule elastic collision and density difference (pressure difference). GHM has got the law of fluid motion based on the constitutive relation built by the equation of state, Pascal principle, and the speed equation of sound in the gaseous phase, however not based on the traditional Navier–Stokes equation. The fluid motion caused by the fluid granule elastic collision is determined based on the equation of state for fluids and their constitutive relation under the Hertzian contact theory, and the fluid motion caused by density difference is determined based on the Pascal principle and the speed equation of sound in the gaseous phase. GHM has given the physical properties of fluid and solid into consideration. There is a couple of symmetric vortex behind the cylinder, when the Reynolds number is between 5 and 40. When the Reynolds number is about 190, the couple of symmetric vortex is started breaking away from the cylinder. With the increase of Reynolds number, the flow behind the cylinder appears as different forms.

Keywords flow around a circular cylinder; GHM; fluid granule; fluid–solid coupling

0 引言

颗粒流体动力学方法(Granule Hydrodynamics Method, GHM)^[1]是北京林业大学闫民研究组提出的一种不同于传统的研究流体动力学问题的数值计算方法,其主要思想是在一定的时空中将流体视作一个离散的系统,将流体离散为弹性流体颗粒。流体运动的原因被认为是流体颗粒之间产生的碰撞力以及流体的密度差(压强差)产生的作用力。对于碰撞作

用力产生的流体运动,用流体状态方程来确定弹性模量,以此建立的流体颗粒之间的本构关系由赫兹碰撞理论确定;对于密度差(压强差)产生的作用力引起的流体运动,由流体声速导数状态方程确定。

GHM将系统视为非连续介质,系统中的各个单元按照相互位置排列,在空间有其固定位置,处于平衡状态。当所考虑范围内的作用力或边界约束条件发生变化时,某些单元在重

收稿日期:2013-01-28;修回日期:2013-03-26

基金项目:国家自然科学基金项目(11272061,105720207)

作者简介:闫民,副教授,研究方向为车辆工程、机械力学和散体力学,电子信箱:hoffmen@qq.com;冯科珂(共同第一作者),硕士研究生,研究方向为车辆工程,电子信箱:87161702@qq.com

力以及外力作用下产生一定的加速以及相应的位移,使单元与所接触的单元产生“叠合”,根据力-位移关系,产生新的作用力状态,单元由于作用力的传递产生相应的运动和位移。在迭代计算过程中,各个时步的结果模拟了单元位移和转动的全部过程^[2]。

对于圆柱绕流问题,已经有不少学者进行了研究^[3-6]。圆柱绕流问题中,当雷诺数介于5~40时,圆柱后方稳定地存在一对对称的附着涡,当雷诺数达到190时,对称涡开始脱落,随着雷诺数的增大,圆柱后方的尾流形态呈现出很大的不同^[7]。小雷诺数下,各漩涡的运动规律服从层流流动特性^[8]。

1 GHM 基本假设

颗粒流体动力学方法能有效解决多运动固体的流固耦合计算问题,建立能够描述此类流固耦合系统的分析模型,可以方便地获得流场的瞬时分布信息,以及每一瞬时颗粒之间的相互作用力。对于复杂的流固耦合系统,根据流体的物理属性及运动特点,GHM 对流体的基本假设如下^[1]:

(1) 流体颗粒是由一定质量的流体组成半径一定的刚性小球体,其弹性模量符合相应流体的状态方程,在碰撞时其本构关系遵从赫兹碰撞理论;

(2) 流体颗粒的尺度被认为是宏观的,即流体颗粒是由尺度更小的流体组成的微团,在该微团中的流体具有相同的物理属性和运动属性;

(3) 流体的压强传导符合流体声速导数状态方程;

(4) 流体的运动是由流体颗粒的弹性碰撞作用力和密度差(压强差)作用力所引起。

2 GHM 圆柱绕流运动模拟

2.1 GHM 圆柱绕流计算模型

本文 GHM 圆柱绕流计算模型采用 Borland C++ Builder 6.0 编写,计算区域如图 1 所示,其中二维计算区域为 $5 \times 10^{-2} \text{m} \times 2 \times 10^{-2} \text{m}$;流体的流动从左至右,左侧为入口,右侧为出口,上下为固定弹性边界;圆柱布置在距入口 $1.75 \times 10^{-3} \text{m}$ 处,距上下边界各为 0.01m ,圆柱直径 $D=0.0025 \text{m}$;空气颗粒直径 $d=0.0005 \text{m}$,动力黏度系数取 $\eta=1.83 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

本文的雷诺数计算公式采用

$$Re = \rho v L / \eta$$

式中, ρ 为流体密度,这里取常温空气密度 1.205kg/m^3 ; v 为入

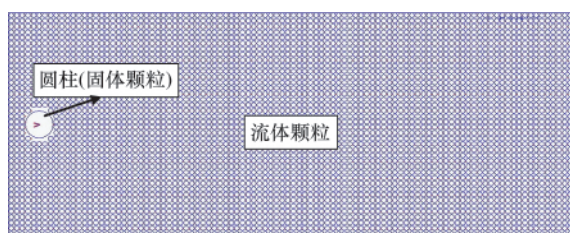


图 1 计算区域

Fig. 1 Calculation region

口速度, m/s ; L 为特征长度, m ; D 为圆柱直径, m 。在此计算区域内,包括圆柱大颗粒一共分布 5972 个颗粒单元,计算时间步长取 $2 \times 10^{-6} \text{s}$ 。

2.2 数值计算结果

本文对不同雷诺数条件下的圆柱绕流运动进行研究,通过流线图和速度矢量图等形式,得到了不同的圆柱绕流流动特性。分别进行了 Re 为 80, 164, 823, 1646 的数值计算。

图 2、图 3 所示为 $Re=80$ 的数值模拟结果。可以看出,当 $Re=80$ 时,在圆柱下游有一对较为对称的附着涡。

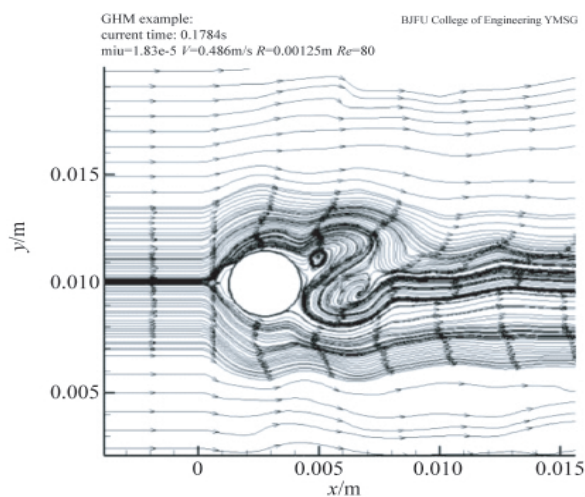


图 2 流线图 ($Re=80$)

Fig. 2 Diagram of streamlines ($Re=80$)

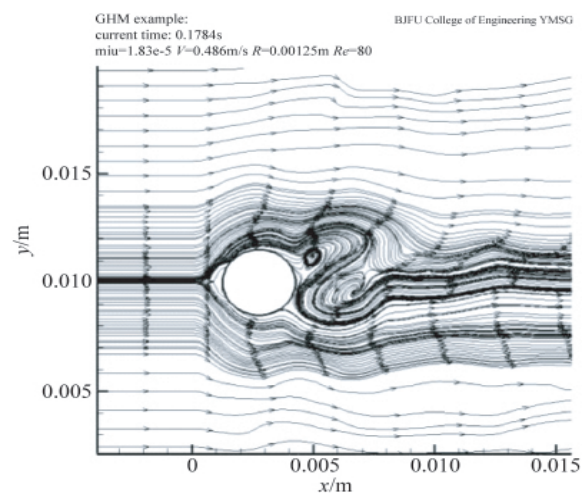


图 3 速度矢量图 ($Re=80$)

Fig. 3 Diagram of velocity vectors ($Re=80$)

图 4~图 9 所示为 Re 为 164, 823, 1646 的数值模拟结果。可以看到,随着雷诺数的增大,流动变的不稳定,圆柱后方的一对附着涡逐渐脱落消失,尾流逐渐变窄。

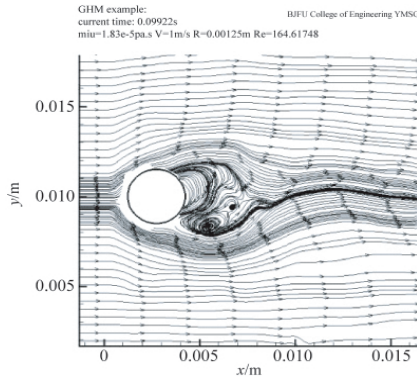


图 4 流线图 ($Re=164$)

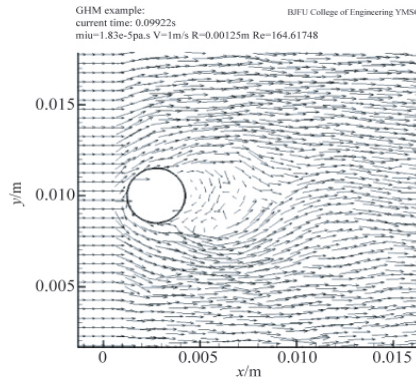


图 5 速度矢量图 ($Re=164$)

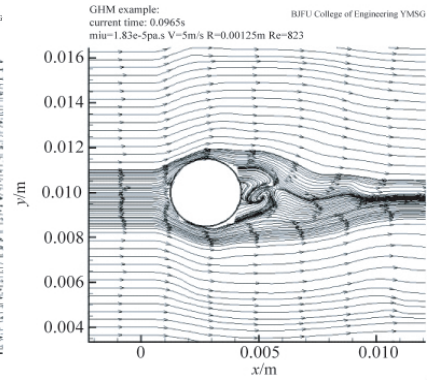


图 6 流线图 ($Re=823$)

Fig. 4 Diagram of streamlines ($Re=164$)

Fig. 5 Diagram of velocity vectors ($Re=164$)

Fig. 6 Diagram of streamlines ($Re=823$)

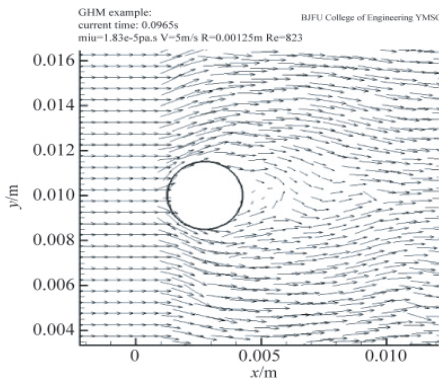


图 7 速度矢量图 ($Re=823$)

Fig. 7 Diagram of velocity vectors ($Re=823$)

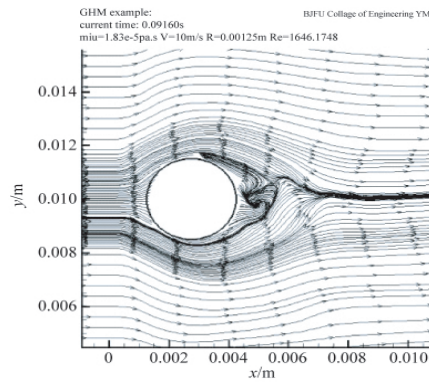


图 8 流线图 ($Re=1646$)

Fig. 8 Diagram of streamlines ($Re=1646$)

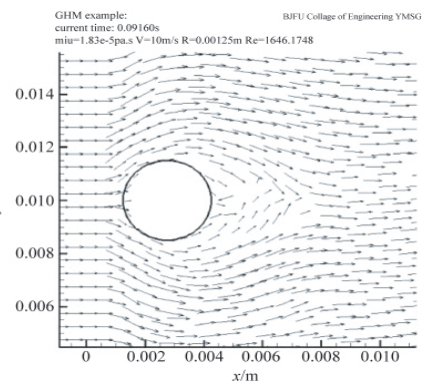


图 9 速度矢量图 ($Re=1646$)

Fig. 9 Diagram of velocity vectors ($Re=1646$)

3 结论

由上述计算结果得出如下结论。

(1) 运用 GHM 对圆柱绕流运动进行数值模拟,可以反映出不同雷诺数下的圆柱绕流情况,表明 GHM 可以用于计算此类绕流问题以及类似的流动问题。

(2) GHM 对于流固耦合运动规律的获得,不依赖于传统以流体为连续体假设所建立的 N-S 方程,而是基于流体的状态方程和声速导数状态方程所建立的本构关系。在 GHM 模型中考虑了流体及固体的物理属性,即 GHM 考虑了固体颗粒的变形影响流体颗粒的运动,同时流体颗粒的运动也对固体颗粒的变形产生作用,因此上述计算获得的是圆柱绕流的流固耦合运动规律。GHM 对空间离散化,在微观尺度上对流体颗粒的物理性质进行模拟,能够用于复杂的流固耦合运动的数值计算,这对同类问题的研究具有参考价值。

(3) 实际的流动并不仅存在于二维层面下,所以流体运动的三维 GHM 模拟还需要进一步展开研究。

参考文献 (References)

[1] Yan Min. Granule hydrodynamics method: A discrete element method on fluid motions[J]. International Journal of Computational Methods, 2012, 9 (1): 8-9.
[2] 方俊, 闫民, 许立峰. 颗粒轮胎与颗粒地面模型[J]. 科技导报, 2007, 25

(24): 69-72.
Fang Jun, Yan Min, Xu Lifeng. Science & Technology Review, 2007, 25 (24): 69-72.
[3] 樊洪明, 王小华, 何钟怡. 黏性流体圆柱绕流的有限元模拟[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2001, 34(1): 62-66.
Fan Hongming, Wang Xiaohua, He Zhongyi. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 2001, 34(1): 62-66.
[4] 王龙. 圆柱绕流的 LBM 模拟[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2002, 38 (5): 647-652.
Wang Long. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2002, 38(5): 647-652.
[5] 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. Advances in Water Science, 2005, 16 (5): 628-633.
[6] 董婧, 宗智, 陈伟, 等. 二维圆柱绕流的离散涡法计算[J]. 中国海洋平台, 2011, 26(1): 4-10, 22.
Dong Jing, Zong Zhi, Chen Wei, et al. China Offshore Platform, 2011, 26 (1): 4-10, 22.
[7] Kravchenko A G, Moin P. Numerical studies of flow over a circular cylinder at $Re=3900$ [J]. Physics of Fluids, 2000, 12(2): 403-417.
[8] 张立. 小雷诺数下圆柱绕流的数值模拟[J]. 力学季刊, 2010, 31(4): 544-547.
Zhang Li. Chinese Quarterly of Mechanics, 2010, 31(4): 544-547.

(责任编辑 朱宇, 马宇红)