

低速圆管流动的粒子仿真*

陈伟芳,李 壮,尹 乐

(国防科技大学 航天与材料工程学院,湖南 长沙 410073)

摘要 运用信息保存法对低速圆管的流动现象进行了模拟,并与实验结果进行了比较。粒子仿真结果与实验结果吻合较好,且优于 NS 方程的结果。研究表明,在对低速圆管的模拟过程中,运用 IP 法在获得较好的结果的同时,具有比 DSMC 方法更高的计算效率。IP 算法是解决低速圆管流动问题的有效途径。

关键词 信息保存法;DSMC 方法;低速;流动;圆管

中图分类号:V211 文献标识码:A

Partical Simulation of Low-speed Flow in a Round Tube

CHEN Wei-fang, LI Zhuang, YIN Le

(College of Aerospace and Material Engineering, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract The information preservation method (IP) is applied to calculate the low-speed flow in a tube. The results are compared with that of the experiment and the datum tallies well. The results of IP method is better than NS equations'. The study indicates that IP method is an effective method to simulate the low-speed flow in a tube. Furthermore, better results and higher computer efficiency can be achieved.

Key words information preservation method; DSMC method; low-speed; flow; tube

微型电子机械系统 (MEMS) 是当今活跃的研究领域^[1]。在 MEMS 中的微流动系统是大多数微系统中感应元件和执行器件的主要组成部分。在 MEMS 中的气体流动,由于系统的微小尺度而具有相对较大的 Kn 数,一般进入了滑流领域和过渡领域。DSMC 方法是模拟这种流动的合适的工具。将 DSMC 方法应用于 MEMS 中,由于大量的仿真分子数和计算步,会遇到对计算机内存和机时过高要求的问题。模拟微尺度系统中低速流动遇到的最难以克服的问题是 DSMC 结果的巨大的统计散布。要想从巨大的背景噪声中分辨出有用的信息,需要很大的取样。这样大的样本数对于机时会有过大的要求,这使得有些研究者认为 DSMC 方法在现阶段不适合模拟 MEMS 中的流动^[2]。为了解决 DSMC 方法处理低速流动时遇到的巨大噪声远远大于有用信息,从而引起需要非常大的取样的问题,有学者^[3,4]提出了信息保存 (Information Preservation, IP) 方法。IP 法有效地解决了 DSMC 方法中的统计涨落问题,已成功应用于多种流动。对单方向流动问题,如 Couette 流动、Poiseuille 流动和 Reyleigh 问题,IP 法所得结果在过渡区域与实验数据、Boltzmann 解和 DSMC 结果符合得很好,在连续介质和自由分子流中与极限精确解吻合;对二维流动,如 NACA0012 翼型绕流^[5]、平板绕流^[6]、过滤器中的流动^[7],IP 方法也给出令人满意的结果。在模拟微槽道气流的过程中,IP 法获得了与实验数据符合的流向压力分布^[8]。本文运用 IP 方法对低速条件下圆管中的气体流动现象进行了模拟与分析,并与实验结果进行了比较。

1 信息保存法概述

直接模拟 Monte-Carl(DSMC, Direct Simulation Monte-Carlo) 方法^[9]把模拟分子的整体信息和统计发散混为一体,在模拟低速流动时面临着宏观流动信息被统计误差掩盖的问题。IP 方法的目的是保存真

* 收稿日期:2004-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(19902021),武器装备预研基金资助项目

作者简介:陈伟芳(1977-),男,副教授,博士。

实分子的整体信息,通过信息的统计平均获得感兴趣的宏观量。在IP法中,粒子遵循DSMC中同样的运动定律,即将仿真分子的迁移运动与碰撞作用解耦处理。在每个时间步长内,首先认为每个仿真分子作匀速直线运动,得到新的位置坐标,如果仿真分子与边界发生相互作用则进行相应处理,然后计算仿真分子之间的碰撞,这表明DSMC方法的结果同样能通过IP法获得。当粒子运动以及粒子之间和粒子与边界之间碰撞时,粒子携带的整体信息(动量和能量)随之变化。不考虑粘性和热传导时,信息是守恒的。粘性和热传导的作用可以认为只在碰撞中体现,除了这些作用外,信息还根据欧拉方程更新。每一时间步长内都要考虑上述的两步:拉格朗日步和欧拉步。在拉格朗日步中,被选择用于碰撞的粒子的信息根据通用守恒律进行调整。当粒子通过网格边界或者被壁面反射时,就会发生信息转移。在欧拉步中,被保存的信息根据欧拉方程进行更新。在每个时间步长末,抽样网格信息可以用于下一时间步,以及作为有效的边界条件。IP法计算流程图如图1所示。

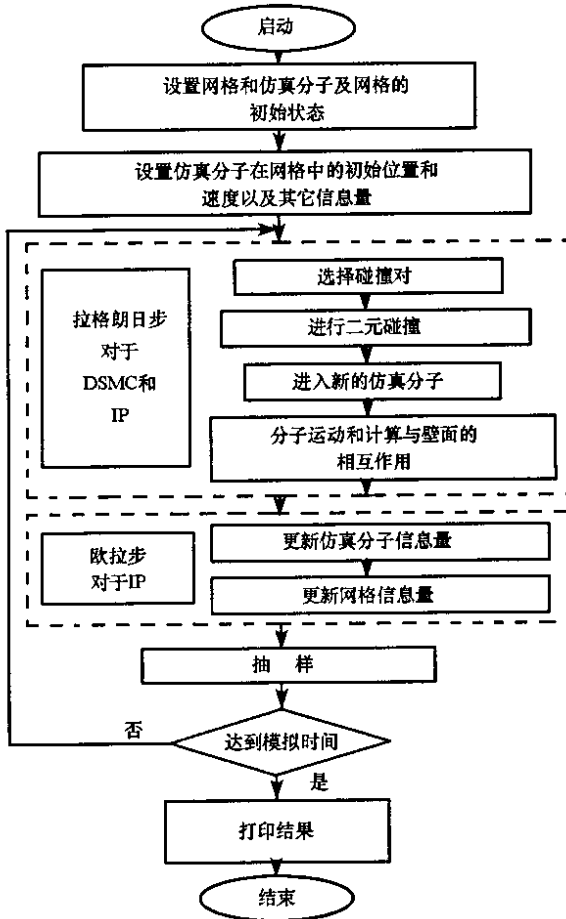


图1 IP法计算流程图

Fig.1 The procession of IP

2 算例及结果分析

算例采用氩气体,来流速度为 30m/s ,来流相对于平板长度的克努森数 $Kn = 0.0283$ 。计算域及边界条件的处理如图2,其中 AB 为入口边界, CD 为出口边界。模拟时 AB 、 CD 边界都采用自由来流边界条件; BC 为轴线, AD 为固壁,温度为 100K ,采用漫反射。由于整个流场都为亚声速,考虑流动向外的扰动很强,保持入口压强不变,采用可变入口条件。网格划分为 240×20 ,每个网格又划分为 2×2 个子网格。

图3是在出口压强与进口压强比分别为 0.4 、 0.5 和 0.6 时的速度等值线图。从图中可以看出速度沿着流动方向不断增大,这说明了流动的可压缩性。在垂直于流向的截面上,由于粘性作用,壁面速度小于中心的速度。随着出口压强的不断增大,不论是进口速度还是出口速度都明显减小。图4是在不

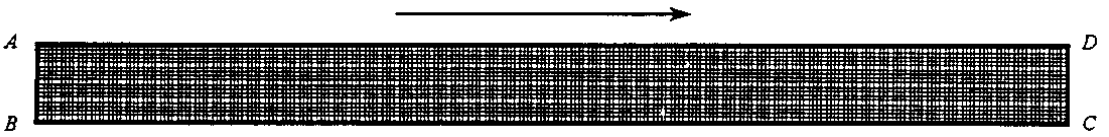
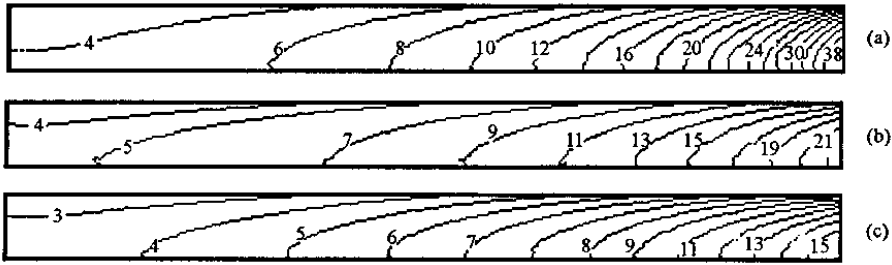


图2 计算域、网格划分及边界条件示意图

Fig.2 The computing domain , grids and boundary conditions for simulation

同压强比下的轴线的压强分布图。从图中可以看出压强沿中线不断减小,大致上出口压强较低的情况下压强偏低,压强在出口处的变化较大。压强的非线性分布表明在微流动中尽管速度很小但流动仍然是可压缩的,并且压差越大,可压缩性越强。图5是在不同压强比下的轴线速度分布图。从图中可以看出速度沿中线不断增大,在出口附近速度的变化较快,同时大致上,出口压强较低的情况下速度较大。随着压差的增大,速度分布的非线性化增强。图6是在不同压强比下的壁面滑移速度分布图。从图中可以看出滑移速度沿流向不断增大,并且大致上,在出口压强较低的情况下滑移速度偏大,滑移速度在出口附近区域变化程度较大。与流向速度相比,这里的滑移速度已经不可忽略,稀薄效应很明显。



(a) $P_{out}/P_{in}=0.4$ (b) $P_{out}/P_{in}=0.5$ (c) $P_{out}/P_{in}=0.6$

图3 不同进出口压强比下的速度分布

Fig.3 Velocity at different ratio of pressure

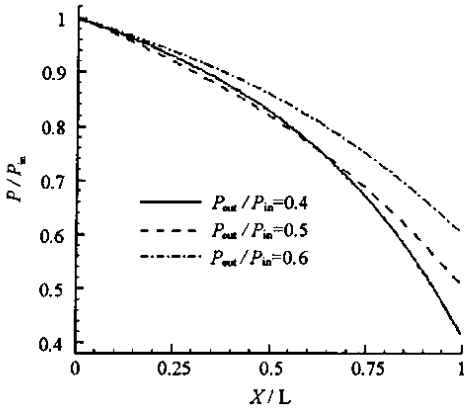


图4 不同进出口压强比下的轴线压强分布
Fig.4 Axial pressure at different ratio of pressure

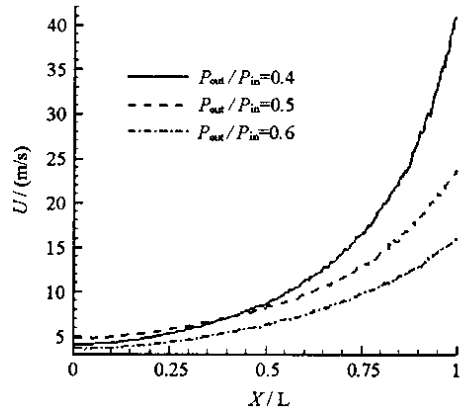


图5 不同进出口压强比下的轴线速度分布
Fig.5 Axial velocity at different ratio of pressure

3 与实验结果的比较

运用 IP 法对大长径比圆管流动中的流量进行统计计算,并与孙德军等人^[10]的实验结果进行比较。选用气体为氦气,管道长 28.84mm,管径为 17.9 μ m,来流温度和壁温都为 302.6K,入口压强为 1.01325 \times 10⁵Pa,出口压强分别为 1.99 \times 10⁻⁵、2.69 \times 10⁻⁵、3.64 \times 10⁻⁵、4.65 \times 10⁻⁵和 5.23 \times 10⁻⁵Pa。计算域及边界条件的处理如图 2 所示,其中,AD 为入口边界,BC 为出口边界。模拟时 AB、CD 边界都采用自由来流边界条件,BC 为轴线,AD 为固壁。由于整个流场都为亚声速,考虑流动向外的扰动很强,保持入口压强不变,采用可变入口条件。采用漫反射和 DSMC 方法中常用的可变硬球(VHS)碰撞模型。其克努森

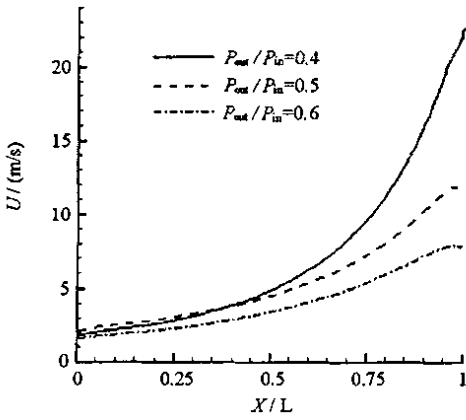


图6 不同进出口压强比下壁面的滑移速度分布

Fig.6 Slip velocity at different ratio of pressure

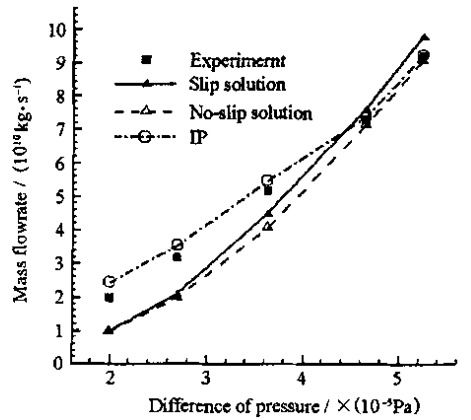


图7 不同出口压强下的流量

Fig.7 Mass flowrate at different ratio of pressure

数的范围为 $3 \times 10^{-3} \sim 7 \times 10^{-3}$ 。

运算结果见图7,从图中可见,随着出口压强的增大,质量流量增大,IP法的运算结果与实验结果十分吻合,并优于NS方程的结果。通过比较还可以看到,由于克努森数不大,得到的滑移解和无滑移解差别很小,可见对于克努森数小于0.01的流动,稀薄效应一般可忽略,微尺度主要引起可压缩性效应。

4 结论

本文运用IP方法对低速条件下圆管气体流动现象进行了模拟,并与实验结果进行了比较。运用IP算法得到的微圆管中的质量流量与实验结果吻合,并优于NS方程的结果,验证了其正确性。微管道中的流动受到可压缩性和稀薄效应相互作用,具有宏观流动所没有的特征。随着压差的不断增大,可压缩性和稀薄效应增强。研究表明,IP算法可以对微机电中的低速圆管流动问题进行有效的模拟。

参考文献:

- [1] Karniadakis G E, Beskok A. Micro Flow[M]. Springer-Verlag, New York, Berlin Heidelberg, 2001.
- [2] Oran E S, Oh C M, Liu J Q, et al. Non-linear Pressure Distribution in Uniform Microchannels[J]. ASME-FED, 1994, 197: 51.
- [3] Fan J, Shen C. Statistical Simulation of Low-speed Unidirectional Flows in Transition Regime[R]. 21st International Symposium on Rarefied Gas Dynamics, Marseilles, 1999.
- [4] Fan J, Shen C. Statistical Simulation of Low-speed Unidirectional Flow[J]. Journal of Computational Physics, 2001, 167: 393-412.
- [5] Fan J, Boyd I D, Cai C P, et al. Computation of Rarefied Gas Flows Around a NACA 0012 Airfoil[J]. AIAA J., 2001, 39(4): 618.
- [6] Sun Q, Boyd I D, Fan J. Development of an Information Preservation Method of Subsonic, Micro-scale Gas Flows[A]. Rarefied Gas Dynamics[M]. AIP, 547, 2000.
- [7] Liu H L, Xie C, Shen C, et al. Flow in Membrane Filter Simulated as Microchannel Flow with Diaphragm[A]. Rarefied Gas Dynamics[M]. AIP, 524, 2000.
- [8] Cai C P, Boyd I D, Fan J, et al. Direct Simulation Methods for Low-speed Microchannel Flows[J]. J. Thermophysics and Heat Transfer, 2000, 14(3): 368.
- [9] Bird G A. Molecular Gas Dynamics and Direct Simulation of Gas Flow[M]. Clarendon, Oxford, 1994.
- [10] 赵汉中. 微细圆管中气体流动的稀薄效应和可压缩性[J]. 华中科技大学学报, 2001, 29(10).
- [11] 吴其芬, 陈伟芳. 高温稀薄气体热化学非平衡流动的DSMC方法[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 2000.

