

一种基于双重空间网格结合的高效 DSMC 实现方法

杜松蔚, 王学德

(南京理工大学 能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘 要: 基于双重空间网格结合策略, 发展了一种高效率的贴体 DSMC (direct simulation Monte Carlo) 方法。通过将仿真分子在物理空间结构网格的位置坐标映射于计算空间的直角网格中, 并在计算空间中完成分子所属网格单元的定位以及分子与边界是否发生作用的判断, 从而结合结构网格的贴体性和直角网格的高效率计算的优点, 提高 DSMC 方法的贴体性和计算效率。基于双重空间网格结合策略, 通过直接映射和间接映射法分别建立 DSMC 程序, 对微尺度收缩扩张喷管气体流动和超声速圆柱绕流进行模拟。数值结果表明: 两种方法均很好地模拟出微喷管因尺度缩小导致的黏性效应和速度滑移现象以及超声速圆柱绕流发生的激波现象, 具备有效性。与传统结构网格方法对比, 两种方法的计算效率平均分别提高了 3.85 倍和 2.85 倍, 具备高效性。

关 键 词: 效率; 贴体; 直接模拟蒙特卡洛; 双重空间网格; 微喷管; 圆柱绕流

中图分类号: V448.2

文献标志码: A

High-efficiency DSMC implement method based on combination of dual spatial grids

DU Songwei, WANG Xuede

(School of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Based on the combination strategy of dual spatial grids, a high-efficiency body-fitting DSMC (direct simulation Monte Carlo) method was developed. By mapping the coordinate of the simulated molecule in structural grid in the physical space to the Cartesian grid in the calculation space, and by completing the location of the grid unit to which the molecule belongs and the judgment of whether the molecule and the boundary are interacting in the calculation space, the body-fitness and computational efficiency of the DSMC method were both improved, in combination with the advantages of the body-fitness of the structured grid and the high-efficiency calculation of the Cartesian grid. Based on the combination strategy of dual spatial grids, DSMC programs were established through direct and indirect mapping methods to simulate the gas flow through the microscale contraction expansion nozzle and the supersonic flow past circular cylinder. Numerical results showed that the two methods were effective in simulating the viscous

收稿日期: 2021-06-24

基金项目: 基础加强重点研究项目 (2020-JCJQ-ZD-111)

作者简介: 杜松蔚 (1996—), 男, 硕士生, 主要从事微尺度气体流动研究。

通信作者: 王学德 (1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事稀薄气体动力学方面研究。E-mail: wangxuede2000@njust.edu.cn

引用格式: 杜松蔚, 王学德. 一种基于双重空间网格结合的高效 DSMC 实现方法 [J]. 航空动力学报, 2022, 37(9): 1846-1854. DU Songwei, WANG Xuede. High-efficiency DSMC implement method based on combination of dual spatial grids [J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(9): 1846-1854.

effect and the velocity slip phenomenon due to the shrinkage of the micro nozzle and the shock wave phenomenon caused by the supersonic flow past circular cylinder, demonstrating the effectiveness of the methods. Compared with the traditional structural grid method, the calculation efficiency of the two methods was respectively increased by 3.85 times and 2.85 times on average, showing the high efficiency of the methods.

Key words: efficiency; body-fitting; direct simulation Monte Carlo; dual spatial grids; micro nozzle; flow past circular cylinder

经过近50年的发展,DSMC(direct simulation Monte Carlo)方法已经成为求解稀薄气体和微尺度流动问题的有效途径^[1-4]。DSMC方法中,网格单元的主要作用是进行分子碰撞对的选取和仿真分子微观信息的统计,以此获得整个目标流场的宏观量。DSMC方法要求网格与边界相适应以及便于分子轨迹的高效追踪^[5]。目前,常用的DSMC基础网格分为三类:一是基于位置元的直角网格^[6],其贴体性差,不利于匹配复杂型面,但善于追踪分子,计算效率极高;二是非结构化网格^[7-9],能够贴体地适应任何复杂型面,边界处理非常容易,但因其拓扑结构的高度无序性,需采用较为繁杂的分子追踪方法定位分子所在的网格单元,计算效率较低;三是结构化网格,其贴体性较好,处理边界相对容易,虽然其拓扑结构简单有序,但目前追踪分子时采用的向量叉积法^[10]等方法由于涉及多步判断和循环,计算效率较低。三类基础网格系统各有利弊,如何通过改造网格系统或寻求更合理的分子追踪方法,从而提高DSMC网格的贴体性和计算效率,一直是人们研究感兴趣的问题^[11-15]。其中,日本学者Abe^[14]曾在结构化网格DSMC方法中引入空间坐标变换的思想,但没有给出与其他实现方法的效率比较,亦没有给出分子在变换网格中与边界发生作用的具体处理方法。本文为提高结构网格DSMC方法的适用性,基于双重空间坐标变换的思想,给出了基于坐标直接映射和间接映射的两种实现途径,将直角网格方法中的高效率分子追踪技术应用于结构化网格DSMC方法中,达到结合结构网格的贴体性和直角网格的高效率计算优势的目的。基于此方法建立一套贴体二维高效率DSMC程序,并通过数值实验验证了这种方法的有效性和高效性。

1 双重空间网格结合策略

基于双重空间网格结合的DSMC方法的主

要思想是将物理空间中的分子位置通过映射方法转换为计算空间中的坐标,并在计算空间中完成分子定位和分子与边界是否发生作用的判断。为结合结构化网格的贴体性和直角网格的高效性的优点,在物理空间采用结构化网格,在计算空间采用直角网格。物理空间网格能够贴体地覆盖计算域,负责呈现气体流动的计算演进和实时反映流场的宏观性质。计算空间网格能够准确地映射物理空间的几何关系,负责传输分子的位置信息,定位分子的所属网格和判断分子与边界是否发生作用。物理空间结构化网格的平均网格尺寸应小于当地分子平均自由程,以保证良好的计算精度。计算空间直角网格与物理空间网格构成一一对应的几何映射关系,以保证分子信息在两个空间的准确通讯。分子信息包括分子位置信息、分子所属网格信息和分子与边界作用信息。

在DSMC过程中,首先,基于双重空间内任意点坐标的映射关系,仿真分子可以获得其物理位置在计算空间的投射坐标,实现分子位置信息的通讯。其次,利用直角网格基于位置元的搜索方法,可以快速定位分子在计算空间的所属网格,由于双重空间的空间坐标和网格序号存在唯一映射关系,因此仿真分子在计算空间的网格序号即为其在物理空间的网格序号,实现分子所属网格信息的通讯。最后,基于双重空间边界信息的对应关系,仿真分子可以利用其在计算空间的映射轨迹与直角网格矩形边界的作用信息,作为其在物理空间与物理边界发生作用的确切判据,实现分子与边界作用信息的通讯。

本文的DSMC方法基于双重空间网格结合策略,实现分子的网格定位步骤和分子与边界是否发生作用的判断步骤在计算空间进行,其他运算步骤在物理空间进行的分布式计算,使得结构网格在物理空间发挥贴体优势,直角网格在计算空间发挥高效计算优势,从而提高DSMC方法的贴体性和计算效率。

2 分子位置信息通讯方法

DSMC 方法将分子的运动和碰撞解耦,将宏观气体流动过程视为微观气体分子若干步数的运动行为的总和。仿真分子在物理空间进行时间步长为 Δt 的单步迁移过程中,始末位置变化为

$$\begin{aligned} x' &= x_0 + v_x \Delta t \\ y' &= y_0 + v_y \Delta t \end{aligned} \quad (1)$$

式中 (x_0, y_0) 为该步长分子在物理空间的初位置坐标, (x', y') 为末位置坐标, v_x 和 v_y 是分子的初始速度。如图 1 所示,本文的分子位置信息通讯方法基于直接映射法或间接映射法(具体步骤见下文),实现分子位置信息从物理空间 x - y 向计算空间 ξ - η 的映射,并更新初末坐标 (x_0, y_0) 和 (x', y') 在计算空间的同步映射坐标 (ξ_0, η_0) 和 (ξ', η') 。

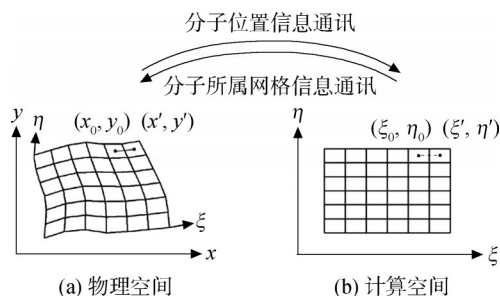


图 1 分子位置信息和分子所属网格信息通讯示意图

Fig.1 Schematic diagram of communication of molecular location information and grid information to which the molecule belongs

2.1 直接映射法

设由物理空间往计算空间映射的坐标变换关系式为

$$\begin{aligned} \xi &= \xi(x, y) \\ \eta &= \eta(x, y) \end{aligned} \quad (2)$$

式中 (x, y) 表示物理空间的任一点坐标, (ξ, η) 是该点在计算空间的变换坐标, $\xi(x, y)$ 和 $\eta(x, y)$ 是坐标变换函数。

根据式(2)可直接求得物理空间任意点坐标往计算空间的映射坐标,因此式(2)是 DSMC 分子位置信息通讯方法的数学依据。本文先参考代数网格生成法^[16-17]求出任意点从计算空间往物理空间的坐标变换函数关系式

$$\begin{aligned} x &= x(\xi, \eta) \\ y &= y(\xi, \eta) \end{aligned} \quad (3)$$

式(3)和式(2)互为二元反函数组。由于物

理区域不规则程度的不同,采取不同的代数法求出的关系式(式(3)),其反函数组(式(2))的显化难易程度也不同。若式(2)容易显化,则通过对式(3)进行代数求逆获得目标式(2),将坐标 (x_0, y_0) 和 (x', y') 代入式(2)即可直接求得目标坐标 (ξ_0, η_0) 和 (ξ', η') 。直接映射法最为便捷,也易于编程实现。

2.2 间接映射法

若式(2)难以显化,则采用间接映射法获取映射坐标。由于式(3)给出了两个空间网格相关的几何因子 $\frac{\partial x}{\partial \xi}$, $\frac{\partial x}{\partial \eta}$, $\frac{\partial y}{\partial \xi}$ 和 $\frac{\partial y}{\partial \eta}$, 因此可以通过全微分求出分子速度从物理空间向计算空间变换的运动速度,关系式为

$$\begin{aligned} v_\xi &= \left(v_x \cdot \frac{\partial y}{\partial \eta} - v_y \cdot \frac{\partial x}{\partial \eta} \right) / J \\ v_\eta &= \left(v_y \cdot \frac{\partial x}{\partial \xi} - v_x \cdot \frac{\partial y}{\partial \xi} \right) / J \end{aligned} \quad (4)$$

式中 v_x 和 v_y 是物理空间仿真分子基于该步长的初始速度, v_ξ 和 v_η 是计算空间仿真分子基于 v_x 和 v_y 的同步变换速度, J 是雅各比行列式, $J = \frac{\partial x}{\partial \xi}$.

$$\frac{\partial y}{\partial \eta} - \frac{\partial x}{\partial \eta} \cdot \frac{\partial y}{\partial \xi}.$$

将物理空间仿真分子的单步迁移映射于计算空间,获得其在计算空间的同步虚拟迁移,其始末位置变化为

$$\begin{aligned} \xi' &= \xi_0 + v_\xi \Delta t \\ \eta' &= \eta_0 + v_\eta \Delta t \end{aligned} \quad (5)$$

式中 (ξ_0, η_0) 为分子在计算空间的同步初位置坐标, (ξ', η') 为同步末位置坐标。通过分子在计算空间的同步虚拟迁移间接获得 (x', y') 在计算空间的映射坐标 (ξ', η') , 并储存记忆,作为下一步虚拟迁移的初始位置。

3 分子所属网格信息通讯方法

如图 1 所示,本文的分子所属网格信息通讯方法是通过计算分子在计算空间的所属网格,并将网格信息返回物理空间。分子在物理空间经过单步迁移,其末坐标 (x', y') 通过文中第 2 节的分子位置信息通讯方法转换为计算空间的同步映射坐标 (ξ', η') 。根据直角网格基于位置元的定位方法,将末坐标 (ξ', η') 除以网格及子网格的划分间隔,找到分子末位置于计算空间中所属的网格和

子网格单元。由于双重空间的空间坐标和网格序号存在唯一映射关系,因此分子在计算空间的网格序号即为其在物理空间的网格序号。因此若分子未与边界发生作用,则直接将分子于计算空间的网格信息返回物理空间。

与非直角网格传统的分子定位方法相比,如有向面积法^[9]和向量叉积法^[10],当分子从原先网格单元逃逸至邻近网格单元时,本文利用直角网格搜索方法可以直接定位其所属网格,无需像其他方法,省去在原先网格的所有邻近单元逐个搜索分子的冗长循环步骤,节约分子迁移定位时间。

4 分子与边界作用信息通讯方法

本文的分子与边界作用信息通讯方法通过在计算空间判断分子与边界是否发生作用,并将作用信息返回物理空间,分子在物理空间经过单步迁移,其始末坐标通过分子位置信息通讯方法转换为计算空间的同步映射坐标 (ξ_0, η_0) 和 (ξ', η') ,两者的连线为虚拟轨迹,如图2所示。在计算空间,若虚拟轨迹穿过虚拟自由边界,则判断分子从计算区域逃逸,返回物理空间删除该分子记录;若虚拟轨迹穿过虚拟物面,则判断分子和物面发生碰撞,返回物理空间求碰撞交点并继续迁移;若虚拟轨迹穿过虚拟对称边界,则返回物理空间按镜面反射处理并继续迁移。与边界碰撞后继续迁移的分子重新进行网格定位,更新其所属网格信息。

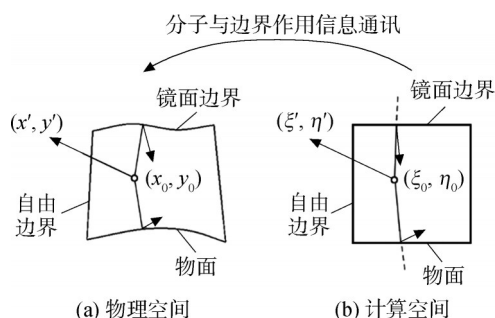


图2 分子与边界作用信息通讯示意图

Fig.2 Schematic diagram of communication of interaction information between molecular and boundary

与非直角网格传统的分子轨迹追踪方法相比,如有向面积法^[9]和向量叉积法^[10],本文方法将真实物面转化为计算空间的边界元^[18](与物体表面相交的位置元)的矩形表面,通过判断边界元矩

形表面是否与虚拟轨迹相交提供分子与边界是否发生作用的信息判据,无需像其他方法在真实物面内生成虚拟网格协助判断,从而提高计算效率。本文通过双重空间网格结合策略实现分子追踪定位的流程如图3所示。

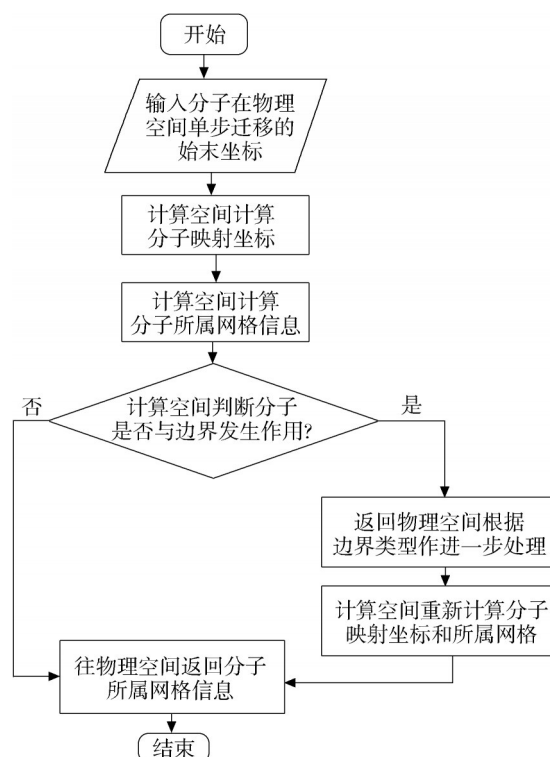


图3 分子追踪定位流程图

Fig.3 Flow chart of molecular tracking and positioning

在本文DSMC程序中,分子碰撞模型采用变径硬球模型(variable hard sphere, VHS)计算。分子间碰撞的能量交换和再分配采用Larsen-Borgnakke模型计算。碰撞对的抽样选取方法采用非时间计算器法(no time counter, NTC)。分子与界面发生碰撞时,对称界面采用镜面反射模型,黏性壁面采用完全漫反射模型。

5 算例与分析

5.1 微尺度收缩扩张喷管

微尺度收缩扩张喷管(下文简称为微喷管)是微型航天器的推进系统的关键部件,帮助微型航天器实现姿态调控和轨道修正等功能^[19]。本文模拟了微喷管的气体流动,计算模型取自文献[20],具体参数如下:微喷管进出口宽度均为136 μm ;喉部为尖角设计,其宽度为34 μm ;半收缩角为45°,半扩张角为20°,扩张比为4:1。模拟气体介质采用氮气。为节省时间,根据对称性取一半流

场进行模拟。在物理空间网格划分时,依据网格尺寸小于分子平均自由程原则,总网格数为 382×136 。图 4(a)表示模型的物理空间网格,上边界为对称边界,下边界为物面,左边界为来流,右边界设置为真空。流场入口处设为由质量流得到的速度压力边界,入口压力为 68 960 Pa。将微喷管沿喉部界线左右分区,基于边界规范代数法变换得到计算空间网格,如图 4(b)所示。根据直接映射法和间接映射法两种分子位置信息通讯方法建立两个 DSMC 模拟程序,分别对算例进行模拟。

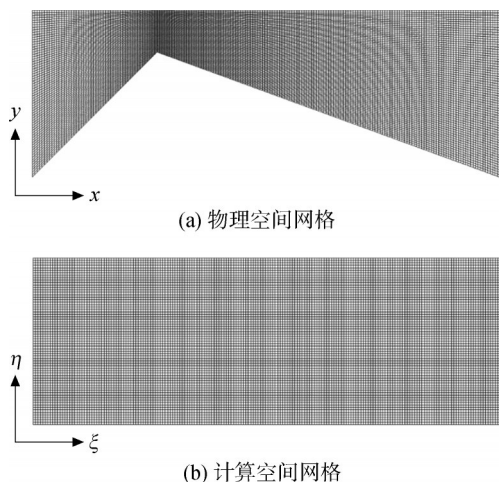


图 4 不同空间下的模型网格
Fig.4 Model grids in different spaces

5.1.1 有效性验证

图 5 给出了直接映射法和间接映射法的微喷管马赫数等值线分布云图与文献[20]结果的对比,从趋势和数值上看,两者都与参考文献保持高度的一致。从图 5 可知,亚声速气体经收缩段加速,在喉部达到声速,后经扩张段,出口马赫数膨胀到 2.6,该值接近于一维等熵流计算的理论值 2.9。由于此时微喷管的喉部雷诺数比较低,仅为 350,黏性效应显著。亚声速边界层厚度沿扩张段壁面逐渐增大,在出口附近达到最大值,占据出口截面将近 4% 的面积,使得微喷管有效扩张面积下降,阻碍气体的有效膨胀,降低微喷管性能。

图 6 和图 7 分别给出了微喷管壁面压力和壁面滑移速度曲线图。从图中可以看出,基于直接映射法和间接映射法两种方法的 DSMC 程序的模拟结果,与文献[20]中算例给出的结果相比,从趋势和数值上看,两者都与参考文献保持高度的一致,平均偏差均小于 15%。图 6 显示,壁面压力

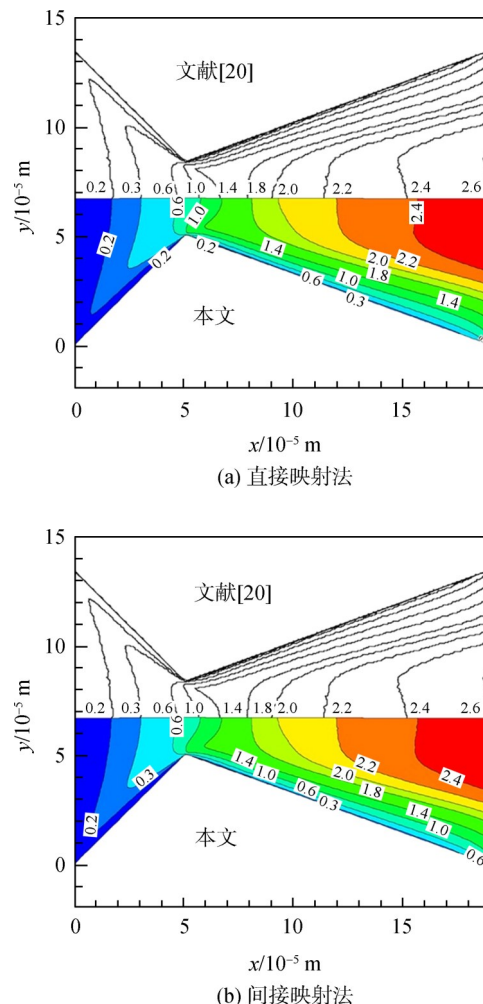


图 5 两种方法的马赫数云图和文献[20]结果对比
Fig.5 Comparison of the Mach number cloud diagram of the two methods and the results of Ref.[20]

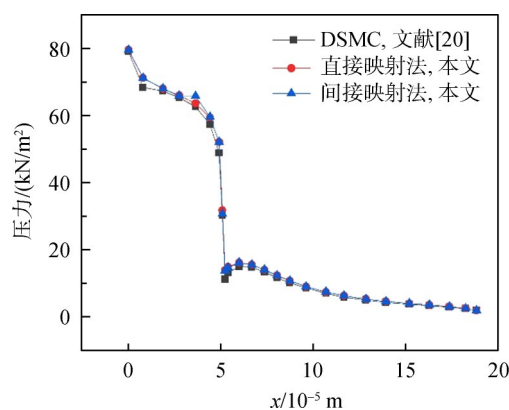


图 6 壁面压力
Fig.6 Wall pressure

沿壁面方向逐渐减小。图 7 看出,微喷管壁面出现滑移速度,并沿壁面整体呈上升趋势。这是由于扩张段的气体流速远高于收缩段,气体分子和壁面的碰撞频率和碰撞强烈程度更高,因此产生

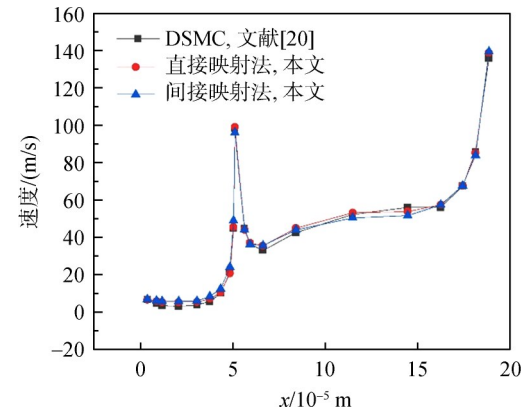


图 7 壁面滑移速度
Fig.7 Wall sliding velocity

更明显的速度滑移现象。在喉部处,壁面压力和滑移速度均出现明显的极值断点,这归因于喉部的尖角形状设计,气流突然扩张导致的速度突变现象。

图 8 给出了微喷管出口截面的亚声速边界层厚度和推力分别随不同喉部雷诺数的变化情况,四种工况雷诺数(Re)分别是 350、702、1 405 和 2 107。从图 8 可以看出,随着微喷管喉部雷诺数的增加,出口截面的亚声速边界层厚度在逐渐减小,降低了边界层对气流的黏性阻塞作用,同时提升了推力。

由图 6~图 8 可知,本文 DSMC 程序对微喷管气体流动的模拟结果与文献[20]的参考结果高度符合,同时较好地模拟出微喷管因尺度缩小导致的黏性效应和速度滑移现象,因此具备有效性。

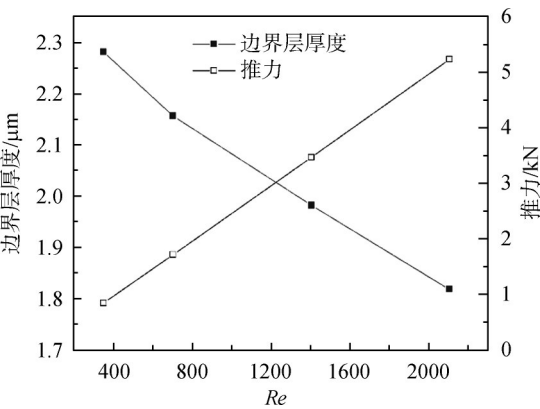


图 8 出口截面亚声速边界层厚度和推力分别与雷诺数的关系
Fig.8 Relationships of the subsonic boundary layer thickness at the exit section and the thrust with the Reynolds number

5.1.2 高效性验证

本文的 DSMC 程序中,时间步长设置为 2.5×10^{-10} s,时间步长小于分子平均碰撞时间 2.7×10^{-10} s。每循环 2 个时间步长进行一次流动采样,每循环 20 个时间步长更新一次输出文件,称之为 1 个文件更新步。大约进行 25 000 个文件更新步后流场趋于收敛和稳定。除了直接映射法和间接映射法,同时采用基于文献[10]编制的结构网格 DSMC 程序对本文算例进行模拟,该程序的分子轨迹追踪方法采用传统的向量叉积法。计算所用的机器配置:CPU 为 AMD Ryzen 7 5 800 H 3.20 GHz,内存大小为 16 G,编译环境为 Intel Visual Fortran Compiler 19.1。表 1 给出了三种方法的耗时和比较,其中,单步长平均耗时指所有仿真分子在整个物理流场推进 1 个时间步长的所用时间。由表 1 看出,间接映射法由于每个步长增加了速度变换和同步虚拟运动的代数运算步骤,因此单步长耗时和总耗时都比直接映射法高。而直接映射法和间接映射法在每个步长求得变换坐标后即可直接定位分子所属网格,无需像传统结构网格方法在当地邻近网格单元进行逐个搜索的多步判断和循环步骤,因此两者的耗时都低于传统结构网格方法。与传统结构网格方法对比,直接映射法和间接映射法的计算效率分别提高了 3.9 倍和 2.6 倍。

表 1 微喷管流动模拟三种方法的耗时比较
Table 1 Time consumption comparison of three methods for the simulation of the micro-nozzle flow

方法	单步长平均耗时/s	总耗时/h
直接映射法	0.20	27.3
间接映射法	0.30	41.7
传统结构网格方法	0.78	108.3

5.2 超声速圆柱绕流

计算模型取自文献[21],根据对称性取一半流场进行模拟,计算流场为半径为 0.4 m 的半圆区域,圆柱直径为 0.1 m。模型的网格划分为 100×100 ,网格尺寸小于气体分子平均自由程。图 9(a)表示流场的物理空间网格,左半外圆边界为来流,右半外圆边界为出口,下边界为对称边界,内半圆代表圆柱上壁面。基于边界规范代数法变换得到计算空间网格,如图 9(b)所示。来流

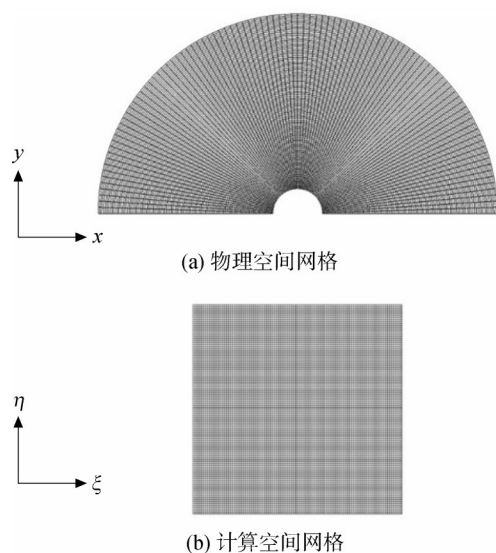


图 9 不同空间下的流场网格
Fig.9 Flow field grids in different spaces

气体为氮气,温度为 300 K,壁面温度为 500 K,气体分子数密度为 1.0×10^{20} 个/ m^3 ,来流速度为 1 412.5 m/s。根据直接映射法和间接映射法两种方法建立两个 DSMC 模拟程序,分别对算例进行模拟。

5.2.1 有效性验证

图 10 给出了直接映射法和间接映射法的超声速圆柱绕流的马赫数分布图。图中看出,圆柱上游出现激波。气体经过激波后开始减速至亚声速。而在背风处,气流逐渐加速至超声速状态。

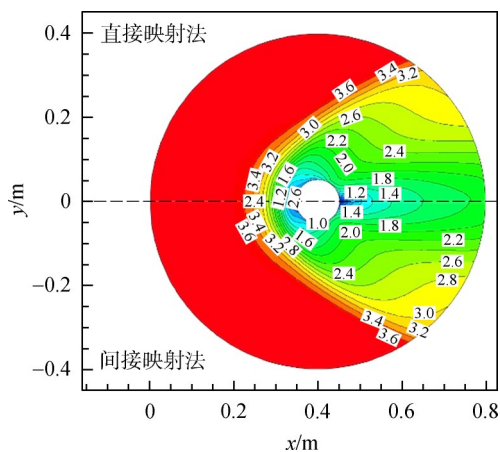


图 10 两种方法的马赫数云图
Fig.10 Mach number cloud diagram of two methods

图 11 和图 12 分别给出了气流沿驻点线的马赫数 (Ma) 分布图和气流沿圆柱上壁面的压力系数分布图。图中可以看出,基于直接映射法和间接映射法两种方法的 DSMC 程序的模拟结果,与

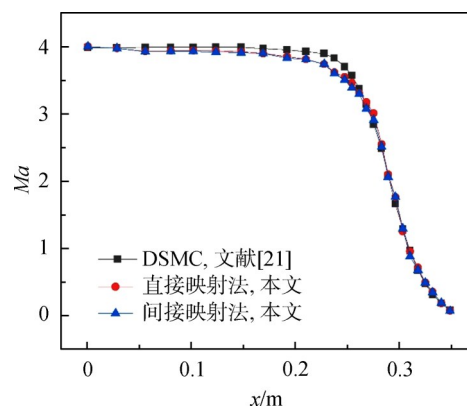


图 11 气流沿驻点线的马赫数分布图
Fig.11 Distribution of Mach number of the gas flow along the stagnation point line

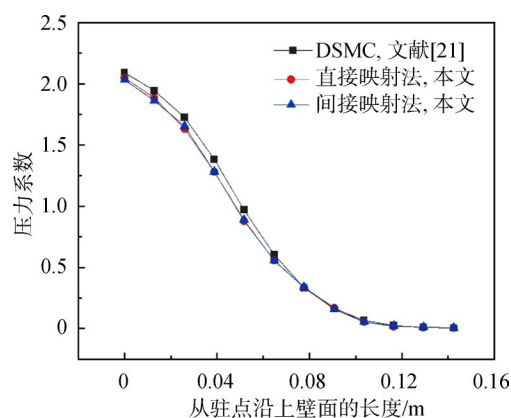


图 12 圆柱绕流上壁面的压力系数分布图
Fig.12 Distribution of pressure coefficient on the upper wall of the flow past circular cylinder

文献[21]中算例给出的结果相比,在趋势和数值方面,两者都与参考文献保持高度的一致,平均偏差均小于 15%。

图 11 显示,超声速气流在经过激波后,流速逐步下降至亚声速,在驻点处气流马赫数几乎为零。图 12 显示,从驻点起始的压力系数分布曲线分布近似于余弦函数分布曲线。

由图 11 和图 12 可知,本文 DSMC 程序对超声速圆柱绕流的模拟结果与文献的参考结果高度符合,同时较好地模拟出圆柱在超声速气流中发生的激波现象,因此具备有效性。

5.2.2 高效性验证

本文的 DSMC 程序中,时间步长设置为 4×10^{-6} s,时间步长小于气体分子平均碰撞时间 2.7×10^{-5} s。每循环 2 个时间步长进行一次流动采样,每循环 20 个时间步长更新 1 个文件更新步。大约进行 10 000 个文件更新步后流场趋于收敛和稳定。除了直接映射法和间接映射法,同时

采用基于文献[10]编制的结构网格 DSMC 程序对本文算例进行模拟。采用的机器配置与文中第 5.1 节的算例一致。表 2 给出了三种方式的耗时比较。由表 2 看出,直接映射法速度最快,间接映射法其次,其单步耗时和总耗时比直接映射法略高。两者的耗时均低于传统结构网格方法,直接映射法和间接映射法的计算效率相较于传统结构网格方法分别提高了 3.8 倍和 3.1 倍。该结论与文中第 5.1.2 节关于效率的结论相符合,两个算例均验证了本文发展的 DSMC 方法可以减少分子迁移定位的计算耗时,提高模拟效率。

表 2 超声速圆柱绕流模拟三种方法的耗时比较
Table 2 Time consumption comparison of three methods for the simulation of the supersonic flow past circular cylinder

方法	单步长平均耗时/s	总耗时/h
直接映射法	0.25	13.9
间接映射法	0.30	16.7
传统结构网格方法	0.95	52.8

6 结 论

本文基于双重空间网格结合策略,将物理空间分子的位置坐标映射于计算空间,并在计算空间中完成分子所属网格单元的定位以及分子与边界是否发生作用的判断,从而结合结构网格和直角网格的各自优势,实现提高 DSMC 方法的贴体性和计算效率。通过对微尺度收缩扩张喷管流动和超声速圆柱绕流的数值模拟,验证了基于双重空间网格结合的 DSMC 方法的有效性和高效性。数值结果表明,流场计算结果与参考文献提供的结果高度符合,本文 DSMC 方法很好地模拟出微喷管因尺度缩小导致的黏性效应和速度滑移现象以及超声速圆柱绕流发生的激波现象,具备有效性。两个数值模拟显示,本文 DSMC 方法与传统结构网格方法对比,直接映射法和间接映射法的计算效率平均分别提高了 3.85 倍和 2.85 倍,具备高效性。

参考文献:

[1] BIRD G A.Molecular gas dynamics[M].Oxford, UK:Clarendon Press, 1976.
[2] 蔡国飙.真空羽流问题的数值模拟研究[D].北京:北京航空航天大学,1995.

CAI Guobiao. Research on numerical simulation of vacuum plume problem[D].Beijing:Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1995.(in Chinese)
[3] 王沐然.微纳尺度气体流动和换热的 Monte Carlo 模拟[D].北京:清华大学,2004.
WANG Moran.Monte Carlo simulation of gas flow and heat transfer at micro-nano scale[D].Beijing:Tsinghua University, 2004.(in Chinese)
[4] 杨宪章,魏守水,何晓川.微通道内气体流动的 DSMC 模拟[J].武汉理工大学学报,2009,31(13):99-103.
YANG Xianzhang, WEI Shoushui, HE Xiaochuan. DSMC simulation of gas flow in microchannels[J].Journal of Wuhan University of Technology, 2009,31(13):99-103.(in Chinese)
[5] BIRD G A. Molecular gas dynamics and the direct simulation of gas flows[M].Oxford, UK:Clarendon Press, 1994.
[6] BIRD G A. Application of the DSMC method to the full shuttle geometry[R].AIAA-90-1692, 1990.
[7] LAUX M, FASOULAS S, MESSERSCHMID E. Development of a DSMC code on planar unstructured grids with automatic grid adaptation[R].AIAA-95-2053, 1995
[8] WU J S, TSENG K C, KUO C H. The direct simulation Monte Carlo method using unstructured adaptive mesh and its application[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2002, 38(4):351-375.
[9] 王学德,伍贻兆,夏健.二维非结构网格 DSMC 方法的实现及其应用[J].南京航空航天大学学报,2004,36(6):704-707.
WANG Xuede, WU Yizhao, XIA Jian. Implementation and application of two-dimensional unstructured grid DSMC method[J].Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004,36(6):704-707.(in Chinese)
[10] 汤继斌,钟诚文.一种基于结构化贴体网格的 DSMC 方法研究[J].航空计算技术,2005,35(2):57-61.
TANG Jibin, ZHONG Chengwen. A DSMC method based on structured body-fitted grid[J].Aeronautical Computing Technology, 2005,35(2):57-61.(in Chinese)
[11] 沈青,胡振华.过渡领域三维绕流直接统计模拟位置元法的一种新方案[J].空气动力学学报,1996,14(3):295-303.
SHEN Qing, HU Zhenhua. A new scheme of position element method for direct statistical simulation of three-dimensional flow around the transition field[J].Acta Aerodynamica Sinica, 1996, 14(3):295-303.(in Chinese)
[12] 侯凤龙,蔡国飙.应用于 DSMC 方法的直角网格技术[J].北京航空航天大学学报,2010,36(6):694-699.
HOU Fenglong, CAI Guobiao. Rectangular grid technology applied to DSMC method[J].Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2010,36(6):694-699.(in Chinese)
[13] 王春财,程嘉,季林红,等.基于 Delaunay 三角形网格的 2 维 DSMC 算法实现及应用[J].清华大学学报(自然科学版), 2015,55(10):1079-1086.
WANG Chuncai, CHENG Jia, JI Linhong, et al. Implementation and application of 2D DSMC algorithm based on Delaunay triangular mesh[J].Journal of Tsinghua University (Natural

- Science Edition), 2015, 55(10):1079-1086. (in Chinese)
- [14] ABE T. Rarefied gas flow analysis by direct simulation Monte Carlo method in body-fitted coordinate system[J]. Journal of Computational Physics, 1989, 83(2):424-432.
- [15] 张斌, 刘洪, 余彬. 针对 DSMC 方法的 BCP 粒子定位实现方法及系统: CN108920872A[P]. 2018-11-30.
- [16] 张来平, 常兴华, 赵钟, 等. 计算流体力学网格生成技术[M]. 北京: 科学出版社, 2017: 64-68.
- [17] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 437-441.
- [18] 樊菁, 彭世镠, 刘宏立, 等. DSMC 位置元方法中的表面元的程序标识及分子表面反射确定论判据[J]. 力学学报, 1999, 31(6): 671-676.
- FAN Jing, PENG Shiyu, LIU Hongli, et al. The program identification of surface elements and the deterministic criterion of molecular surface reflection in DSMC position element method[J]. Theoretical and Applied Mechanics, 1999, 31(6): 671-676. (in Chinese)
- [19] 杨海威. 微喷管流动与换热特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- YANG Haiwei. Research on flow and heat transfer characteristics of micro-nozzle[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [20] MARKELOV, GENNADY N. Numerical study of 2D/3D micronozzle flows[J]. American Institute of Physics, 2001, 585(1): 539-546.
- [21] 王学德. 高超声速稀薄气流非结构网格 DSMC 及并行算法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006.
- WANG Xuede. Research on DSMC and parallel algorithm of hypersonic rare airflow unstructured grid[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)