

[文章编号] 1001-246X(2002)05-0377-06

微槽道气体流动的统计模拟

谢 攀, 樊 菁, 沈 青

(中国科学院力学研究所高温气体动力学开放实验室, 北京 100080)

[摘 要] 利用基于分子模型的统计模拟方法——信息保存方法(IP)统计模拟了实验条件下微槽道气体流动, 仔细讨论了用 IP 方法模拟长槽道稀薄气流时遇到的问题, 并给出了解决的方法, 即采取守恒形式的控制方程避免质量流量计算误差积累, 并利用超松弛方法使收敛过程加速. 将 IP 计算结果与压力分布和质量流量实验数据进行了比较.

[关键词] 微机电系统; 微槽道气流; 稀薄气体效应; 统计模拟; 直接模拟 Monte Carlo 方法

[中图分类号] V211

[文献标识码] A

0 引言

由于微机电系统(MEMS)发展的需要, 微尺度气体流动成为当前研究热点. 微型槽道几何形状规则简单, 便于理论分析和实验测量, 是许多 MEMS 器械的基本单元. 针对微槽道气流, 人们做了大量工作^[1~9]. 希望藉此加深对微尺度气体运动特性认识, 为 MEMS 优化设计提供指导.

在微尺度气流中, 稀薄气体效应将变得重要. 这种效应通常用 Knudsen 数表征

$$Kn = \lambda / L, \quad (1)$$

其中 λ 是气体分子平均自由程, L 是流动特征长度. 根据 Kn 数的大小, 可以将流动划分为 4 个区域^[10,11]: 连续介质区 ($Kn < 0.01$), 滑流区 ($0.01 < Kn < 0.1$), 过渡区 ($0.1 < Kn < 10$), 自由分子流区 ($Kn > 10$). 经典流体力学适用于连续介质区. 在滑流区, Navier-Stokes 方程仍然成立, 但需要引入物面滑移速度和温度跳跃. 在过渡区域和自由分子流, 连续介质假设和 Navier-Stokes 方程不再成立, 必须采取分子气体动力学的观点和方法进行研究.

标准状态下的空气分子的平均自由程为 $0.06 \mu\text{m}$, 微槽道气流实验^[1~7]的特征长度约为 $1 \mu\text{m}$. 因此当槽道出口处压强和温度分别为 1 atm 和室温时, 其 Kn 数约为 0.06. 当工质气体的分子碰撞直径比较小时, 如氦气, Kn 数会超过 0.1 甚至达到 1 左右, 整个槽道中稀薄气体效应愈加显著, 肯定有的地

方处于过渡区域. 研究表明^[1~8]: 由于稀薄气体效应的影响, Navier-Stokes 方程和无滑移边界条件给出的微槽道气流的流量和压力分布与测量数据有着显著差别; 在引入滑移速度边界条件后, Navier-Stokes 解与测量数据吻合. 有的工作常调节切向动量适应系数, 把 Navier-Stokes 加滑流解的适应范围扩大. 当 Kn 数进一步增大, 不得不引入不现实的^[4,5]来使滑移 Navier-Stokes 的结果与实验结果相符. 这表明基于连续介质的方法已不再适用.

直接模拟 Monte Carlo (DSMC) 方法^[11]是分析稀薄气体流动的主要工具. 过去 40 年间, 它成功应用于航天领域的各种高超声速气流. 作为一种统计方法, DSMC 面临的基本困难是宏观物理量计算结果中的统计散布. 统计散布源于无规则的热运动速度, 其量阶为 v_m / \sqrt{N} , 其中 $v_m = \sqrt{2RT}$ 为最可几热运动速度, N 为统计样本个数. 为获得统计意义下收敛的计算结果, 统计散布必须小于宏观物理量本身. 微尺度槽道实验中, 入口处的气流速度约为 $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. 室温下空气的最可几热运动速度约为 $400 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 为将 v_m / \sqrt{N} 的量阶减小到 $2 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$, 统计样本数需达到 4×10^8 . 获得大样本数所需的计算量是目前计算机无法承受的. 因此, 有些研究者认为^[12,13] DSMC 方法不适合处理 MEMS 中微尺度气流. 这种看法也符合当前情况. 例如微槽道气流的实验结果已有大量报道, 但尚无相应的 DSMC 计算结

[收稿日期] 2001-12-12; [修回日期] 2002-05-13

[基金项目] 国家自然科学基金(59876043, 19889209)及中科院“百人计划”资助项目

[作者简介] 谢攀(1974-), 男, 北京, 助研, 学士, 主要从事稀薄气体与微尺度流动方面的研究.

果报道, DSMC 模拟限于超声速甚至高超声速情况^[12,14], 与 MEMS 中实际条件相去甚远. 文[15]对微槽道气体流动用 DSMC 方法进行模拟, 速度达到了 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的较低水平, 由于巨大的统计散布, 文[15]仅模拟了很短的槽道流动 ($L \sim 30 \mu\text{m}$).

针对 DSMC 方法模拟低速稀薄气流所遇到的困难, 我们提出信息保存 (information preservation, 简称 IP) 法^[16,17]. IP 方法有效地解决了 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 Rayleigh 问题, IP 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与极限精确解吻合; 对二维流动, 如 NACA 0012 翼型绕流^[18]、平板绕流^[19]、过滤器中的流动^[20], IP 方法也给出令人满意的结果. IP 方法也已用于实验条件微槽道气流的模拟, 并获得与实验数据符合的流向压力分布^[21]. 针对 IP 方法模拟实验条件微槽道气流遇到的问题, 本文做了进一步研究, 提出了解决方案, 并模拟了两种实验条件^[1,5]的微槽道气流.

1 IP 方法

DSMC 方法以分子作为研究对象, 每个分子的质量、动量和能量输运通过分子运动实现, 这样的输运方式适合于全部流动领域. 但是, 分子个别的、无规则行为会引起宏观物理量计算结果的统计涨落. 连续介质方法, 如 Navier-Stokes 方程, 以大量分子的集体行为作为研究对象. 这些集体行为通常由宏观密度、速度和温度表征, 并通过本构关系描述. 宏观物理量不受分子个别的、无规则行为的影响, 但是现有的质量、动量和能量输运本构关系只在连续介质领域适用. IP 方法结合了 DSMC 方法和连续介质方法的优点, 即利用分子运动输运大量分子的集体行为. IP 具体做法是, 赋予 DSMC 方法中每个模拟分子两个速度. 一个是分子速度, 用来计算分子运动轨迹, 计算规则与 DSMC 方法相同; 另一个是信息速度, 对应于单个模拟分子所代表的大量真实分子的集体速度. 信息速度有别于宏观速度, 后者对应于许多模拟分子所代表的真实分子的速度的平均.

IP 方法中, 流场的宏观速度是通过分子所携带的信息速度取样及统计平均获得的. 动量输运以及粘性作用通过分子碰撞和运动直接实现. 二维情况下, 每个网格都要满足质量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0, \quad (2)$$

用方程(2)和统计平均获得的流场宏观速度 u 和 v , 可以求出每个时间步长网格密度的变化量. 非均匀压力分布对信息速度有反作用,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial y}, \quad (4)$$

其中 $P = RT$. 由方程(3)和(4)可以求出每个分子在每个时间步长的信息速度增量. IP 方法的具体实施细节见文[16~18].

求解槽道流动会遇到用统计模拟方法模拟低速流动的另一个困难, 即入口出口边界条件的相互影响问题. DSMC 方法要求在边界上规定压强 p 和速度 u 两个参数. 但同时在出入口固定 p 和 u 则过度规定了边界条件. 我们采取固定出入口的 p , 而 u 是变化的, 通过模拟不断修正得到收敛的解^[21,22]. 这样 DSMC (和 IP) 的求解总是逐渐收敛的过程.

实验微槽道的长高比很大. 例如, 文[1,5]中的微槽道长高比分别为 2 500 和 3 333. 流场沿槽道法向变化较快, 需要采取细网格; 在流向, 变化相对缓慢, 采取粗网格对计算结果影响不大^[21~23]. 即使如此, 实际计算中流向网格数仍远大于法向网格数 (表 1). 如果采用非守恒格式, 每个网格质量流量的计算误差 (高阶小量) 经过大量网格积淀后, 会造成槽道流动总质量不守恒. 实际求解总是从槽道流向各截面的质量流量不同的初始流场开始, 通过一个非定常过程逐步达到各截面质量流量相同, 即收敛的结果. 用非守恒格式不能达到调节各截面质量流量为守恒的目的. 解决这个问题的方法是采用守恒形式求解连续方程. 以连续方程(2)中 $\partial(\rho u)/\partial x$ 项为例, 守恒形式的二阶中心差分格式为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} = -\frac{(\rho_{i-1,j}u_{i-1,j} + \rho_{i,j}u_{i,j}) - (\rho_{i+1,j}u_{i+1,j} + \rho_{i,j}u_{i,j})}{2 \Delta x}, \quad (5)$$

下标 i 和 j 分别代表 x 和 y 方向的网格标号. 在每个时间步长, 守恒格式使得每个网格均满足质量守恒

表 1 计算参数

Table 1 Computational parameters			
情形	A	B ^[1]	C ^[5]
网格(流向 × 法向)	60 × 15	300 × 30	400 × 15
TMAC	1.0	1.0	1.0
	1.0	1 000	1 000
计算时间(CPU 小时)	12	48	60

要求,可避免非守恒格式存在的计算误差积累现象。

IP 方法是粒子方法和守恒方程的结合,因此也面临着求解守恒方程普遍存在的稳定性和收敛性问题。与 DSMC 方法相比,IP 方法的统计散布小得多;但是,对于求解守恒方程的 IP 算法部分而言,其扰动影响不容忽视。例如,宏观速度量阶为 $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、样本数为 3×10^4 时,统计噪声方差约为 2.5%。在一个大的计算区域,一个网格的统计扰动会波及相邻网格。统计扰动之间的非线性相互作用严重影响计算稳定性。解决问题的方法是,在每个时间步长取样平均后,利用最小二乘法,分别对每个网格 x 和 y 方向的质量流量 u 和 v 进行数值拟合,消除统计散布。所获得的曲线是光滑的,给出了该时间步长内消除统计涨落后的质量流量分布。以此为基础,利用连续性方程,可以求出每个网格的密度增量,这一增量为原密度的 $10^{-8} \sim 10^{-9}$ 量级。为加快收敛速度,用超松弛方法对网格原密度进行修正,

$$\rho_{i,j}^{t+\Delta t} = \rho_{i,j}^t + \omega (\rho_{i,j}^t - \rho_{i,j}^{t-\Delta t}), \quad (6)$$

其中 ω 是松弛因子。前述对质量流量拟合的方法可以适用于很大的 Δt 而保持稳定性,实际计算中,初始取值介于 100 和 2 000 之间。随着计算结果逐步趋于收敛, ω 值逐步减小至 1,质量流量的拟合强度也减弱。这样在计算达到收敛后,最终结果是严格满足守恒方程的。

在单方向流动 IP 方法实践中^[16,17],模拟分子所携带的信息宏观量对 DSMC 过程没有影响。但用 IP 方法求解槽道流动的一个特殊之处是,IP 方法通过出入边界上的速度变化同时改变了 DSMC 的边界条件^[21,22],从而影响了 DSMC 的模拟过程,使统计模拟得以收敛。

2 计算条件

实验系统中的微槽道(图 1),高约 $1 \mu\text{m}$,宽为几十个 μm ,长为几千 μm 。加工工艺包括硅底氧化刻蚀、成形以及硅板粘合等。槽道两端为进气口和出气

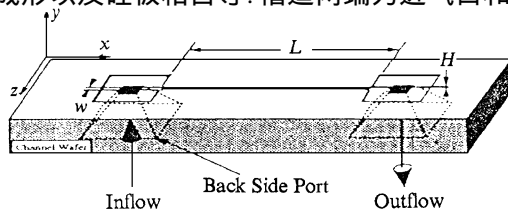


图 1 微槽道气体流动实验示意图^[6]

Fig. 1 Schematic diagram of microchannel gas flows in experiment^[6]

口,分别与两个压力恒定的气源联通。气源压差驱动槽道中气体流动。由于槽道尺寸很小,粘性作用显著,气流速度很小,量阶约为 $20 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

实验槽道的宽度远大于高度,因此可以忽略流动的展向效应,将流动简化为一个二维问题(图 2)。采用直角坐标系, A 为坐标原点, x, y 轴分别沿 AB 和 AO 方向。考虑到问题的对称性,只需模拟一半流场($ABO O$)。为便于与实验比较^[1,5],气体与固壁表面的温度均为室温,并给定入口和出口压力。固壁 AB 采用完全漫反射条件,对称面 OO 采用镜面反射条件。

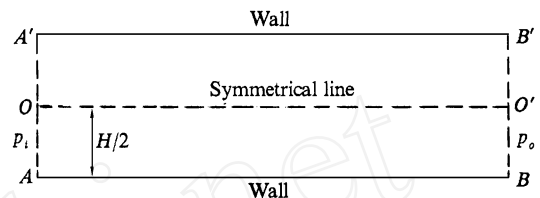


图 2 微槽道气流计算图

Fig. 2 Computational domain of microchannel gas flows

3 结果与讨论

情形 A: IP 和 DSMC 结果的比较

槽道长度为 $15 \mu\text{m}$ 、高度为 $1 \mu\text{m}$,流动介质为氮气,入口压力 p_i 和出口压力 p_o 分别为 $1.2 \times 10^5 \text{ Pa}$ 和 $1.0 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。由于流向压力梯度大,气流在入口中心处的速度约为 $11 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。同时由于槽道短,速度大,使得计算量比较小,便于获得统计收敛的 DSMC 结果。

整个流场的 Kn 数变化都很小,介于 0.04(入口)和 0.05(出口)。因此流动处于滑流区。图 3 和 4 分别比较了 IP 方法、DSMC 方法和滑移 Navier-Stokes 方程(边界切向动量适应系数 $\alpha = 1.0$)在 $x = 7.5 \mu\text{m}$ 处横截面的流向速度分布与全流场流向压力分布。3 种结果符合得很好。尽管模拟选择了较大的气流速度,为减小计算结果的统计散布,DSMC 仍需要很大的样本数(5×10^6),而 IP 方法需 2 500 个样本数。

为了解初始状态对计算结果的影响,考虑 3 种初始压力分布: 均匀压力场,其值等于入口压力和出口压力平均; 压力沿流向线性分布; 滑移 Navier-Stokes 压力分布。3 种初始分布经过不同的时间演化,给出了相同结果。不过,初始均匀压力分布需要较长的演化时间达到定常状态。

为说明 DSMC 方法模拟此问题的困难,以滑移 N-S 方程为初始条件,图 5 和图 6 比较了 IP 和 DSMC 在入口中心处(图 2 的 O 处)流向宏观的速度

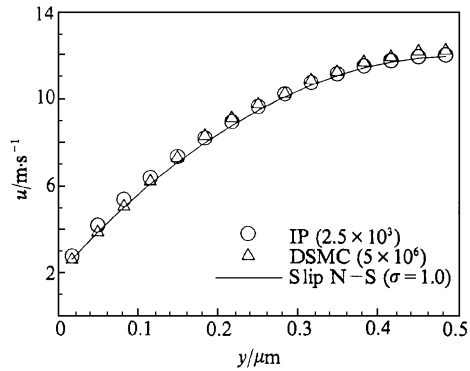
图 3 算例 A 在 $x = L/2$ 横截面流向速度比较

Fig. 3 Comparison of streamwise velocity distribution at a cross section $x = L/2$ for case A.

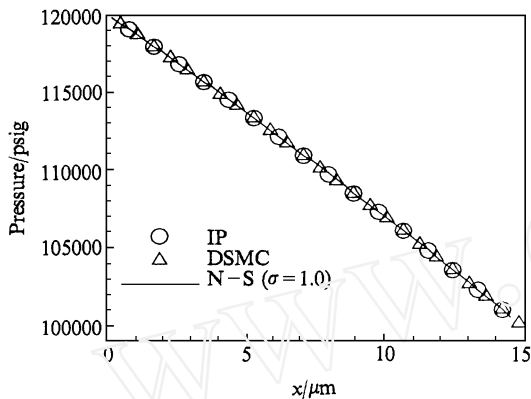


图 4 算例 A 的 IP 和 DSMC 流向压强分布比较

Fig. 4 Comparison of IP and DSMC streamwise pressure distribution for case A.

演化过程. 模拟中每个网格有大约 50 个模拟分子. 可见, 在宏观速度为 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 量级时, DSMC 方法已有明显涨落的问题, 需要大量的样本来降低方差以满足对边界条件(边界速度剖面)的收敛要求, 这样必然需要大量的模拟时间并减慢了收敛的速度.

情形 B: IP 结果与文[1]实验数据的比较

Pong, Ho, Liu 和 Tai^[1] 发展了第一代微槽道气流实验和压力测量系统. 微槽道高 $1.2 \mu\text{m}$, 宽 $40 \mu\text{m}$, 长 $3000 \mu\text{m}$. 来流和槽道表面的温度与室温相同. 利用微加工技术, 直接将 6 个压力传感器嵌入槽道表面, 测量沿流向的压力分布. 图 7 比较了 5 种情况下 IP 和实验给出的氮气流向压力分布. 入口压力分别为 25、20、15、10 和 5 psig, 出口压力保持为 1 atm. 计算时间步长约为入口分子平均碰撞时间的三分之一. 计算和测量结果符合得很好. 压力分布的非线性特征由稀薄气体效应引起. 文[19]利用 IP 方法模拟了入口压力等于 20 psig 的情况, 也给出与实验数据相符的结果.

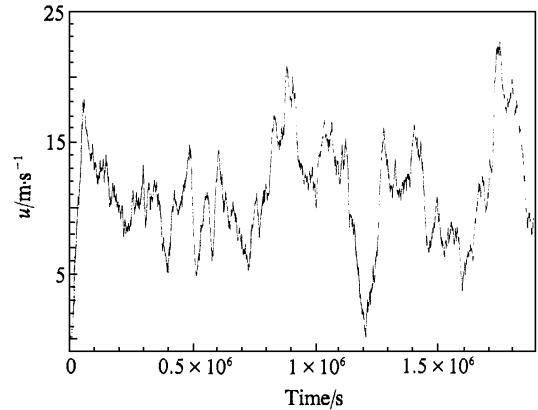


图 5 算例 A 入口中心线处 DSMC 速度演化过程

Fig. 5 Evolution of streamwise velocity at the inlet center given by DSMC for case A.

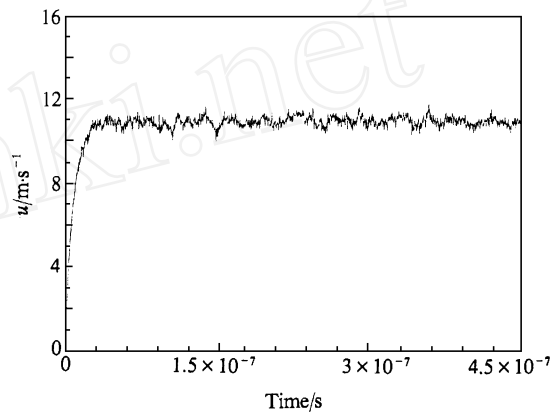


图 6 算例 A 入口中心线处 IP 速度演化过程

Fig. 6 Evolution of streamwise velocity at the inlet center given by IP for case A.

情形 C: IP 结果与文[5]实验数据的比较

Shih, Ho, Liu 和 Tai^[5] 发展的第二代微槽道气流实验和测量系统, 微槽道高和宽仍然为 $1.2 \mu\text{m}$ 和 $40 \mu\text{m}$, 长度增加为 $4000 \mu\text{m}$, 来流和槽道表面的温度与室温相同. 沿流向布置了 13 个压力传感器. 图 8 比较了 3 种情况下 IP 和实验给出的氮气流向压力分布. 入口压力分别为 19、13.6 和 8.7 psig, 出口压力保持为 1 atm. 计算时间步长约为入口分子平均碰撞时间的三分之一. IP 结果和实验数据比较令人满意. 个别传感器在实验过程中出现故障, 没有给出测量数据.

图 9 给出了不同时刻质量流量分布(入口压力为 19.0 psig). 三角和圆圈符号分别对应于初始模拟阶段和收敛阶段一个时间步长内取样、统计平均给出的质量流量分布. 尽管计算的入口和出口压力与实验相同, 但是计算的初始压力分布采取滑移 Navier-Stokes 方程.

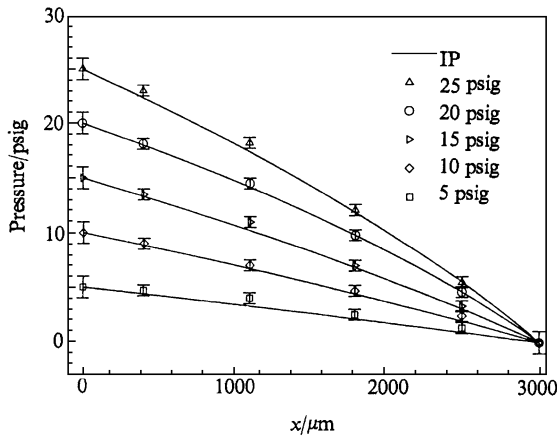


图 7 算例 B 的 IP 流向压强分布与实验数据比较

Fig. 7 Comparison of streamwise pressure distributions given by IP and experiment for case B.

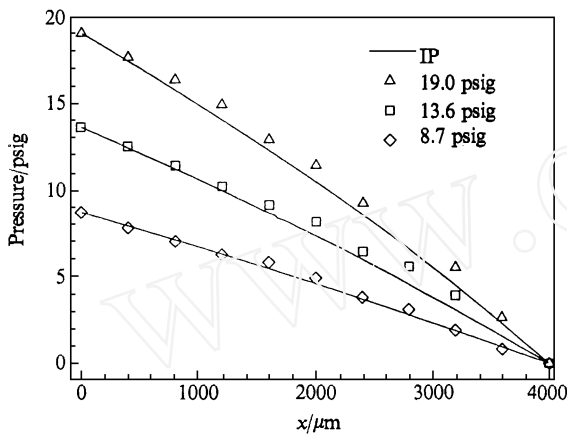


图 8 算例 C 的 IP 流向压强分布与实验数据比较

Fig. 8 Comparison of streamwise pressure distributions given by IP and experiment for case C.

er-Stokes 解,与实际压力分布不同.压力分布与槽道表面剪应力的不平衡导致横截面气流平均速度在出口附近增加,在入口附近减小.这使得压力分布逐渐趋于实际,质量流量趋于守恒.在流动达到定常后,多步采样给出的结果(实线)消除了单步结果存在的统计涨落.图 10 给出质量流量与入口压力的关系,IP 结果与实验数据符合得很好.

4 结论

本文利用 IP 方法对微槽道气流进行了模拟.模拟的 Kn 数范围从 0.05 到 0.135,流动处于滑流区域.针对 IP 方法模拟长槽道所遇到的收敛性与稳定性问题,本文提出采用守恒格式的必要性以及数据光滑处理后采用超松弛方法加快收敛速度的方法.对各类算例的试验表明,IP 方法具有很快的收

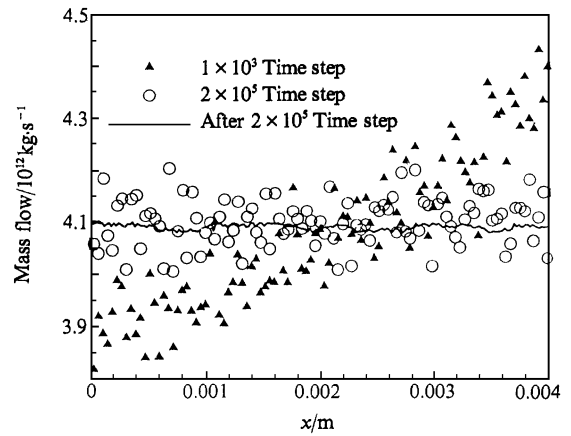


图 9 算例 C 入口压强为 20psig 流量分布的演化过程

Fig. 9 Evolution of mass flux distribution for case C of an inlet pressure of 20 psig.

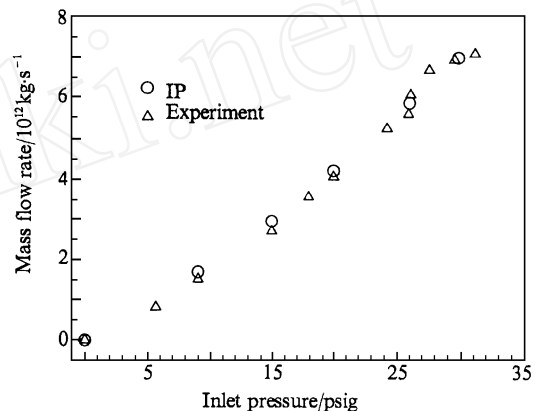


图 10 算例 C 的质量流量分布与 IP 结果对比

Fig. 10 Comparison of mass flux given by IP and experiment for case C.

敛速度,在现有的 PC 机上可以有效的模拟实际应用中的微槽道气体流动问题.IP 结果与压力分布和质量流量的实验数据以及 DSMC 结果的比较是令人满意的.

[参 考 文 献]

[1] Pong K C, Ho C M, Liu J Q, Tai Y C. Nonlinear pressure distribution in uniform micro-channels [J]. ASME-FED, 1994, 197:51.
 [2] Arkilic E B, Breuer K, Schmidt M A. Gaseous slip flow in long microchannels [J]. Micro Electro Mechanical Systems, 1995, 6:167.
 [3] Harley J C, Huang Y, Bau H, Zemel J N. Gas flow in micro-channels [J]. Fluid Mech, 1995, 248:257.
 [4] Shih J C, Ho C M, Liu J Q, Tai Y C. Nonlinear pressure distribution in uniform microchannels [J]. ASME-AMED, 1995, 238.

- [5] Shih J C, Ho C M, Liu J Q, Tai Y C. Monoatomic and polyatomic gas flow through uniform microchannels [J]. ASME-DSC, 1996, **59**:197.
- [6] Arkilic E B, Schmidt M A, Breuer K S. Measurement of the TMAC in silicon microchannels [A]. In: Shen C, ed. Rarefied Gas Dynamics [M]. Beijing: Peking University Press, 1997. 983.
- [7] Arkilic E B. Measurement of the mass flow and tangential momentum accommodation coefficients in silicon microchannels [Ph. D. Thesis,] [D]. MIT, FDRL TR 97-1, 1997.
- [8] Ho C M, Tai C Y. Micro-electro-mechanical-systems (MEMS) and fluid flows [J]. Annu Rev Fluid Mech, 1998, **30**:579.
- [9] Beskok A, Karniadakis Gern. Rarefaction and compressibility effects in gas microflows [J]. J Fluids Engin, 1996, **11**:448.
- [10] Tsien Hsue-Shen. Superaerodynamics, mechanics of rarefied gases [J]. J Aeronautical Sciences-december, 1946.
- [11] Bird G A. Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flow [M]. New York:Oxford, 1994.
- [12] Oh C K, Oran E S, Sinkovits R S. Computations of high-speed, high Knudsen number microchannel flows [J]. J Thermophy and Heat Transfer, 1997, **12**:447.
- [13] Oran E S, Oh C K, Cybyk B Z. Direct simulation Monte Carlo: recent advances and applications [J]. Annu Rev Fluid Mech, 1998, **30**:403.
- [14] Ahn J C, Mavriplc C, Goulard R. Heat transfer and flow fields in microchannels using the DSMC simulation method [R]. AIAA Paper, 96-0361, 1996.
- [15] 秦丰华, 孙德军, 尹学远. 微管道气体流动的蒙特卡洛直接模拟 [J]. 计算物理, 2001, **18**(6):507.
- [16] Fan J, Shen C. Statistical simulation of low-speed unidirectional flows in transitional regime [A]. In: Brun R, Campargue R, Gatignol R, Lengrand J-C, eds. Rarefied Gas Dynamics [M]. Cepadues Editions, 1999, **2**:245.
- [17] Fan J, Shen C. Statistical simulation of low-speed rarefied gas flows [J]. J Computational Physics, 2001, **167**:393.
- [18] Fan J, Boyd I D, Cai C P, Hennighausen K, Candler G V. Computation of rarefied gas flows around a NACA 0012 airfoil [J]. AIAA J, 2001, **39**(4):618.
- [19] Sun Q, Boyd I D, Fan J. Development of an information preservation method for subsonic, micro-scale gas flows [A]. In: Baretel Timothy J, Gallis Michael A, eds. Rarefied Gas Dynamics [M]. AIP. 2000. 547.
- [20] Liu H L, Xie C, Shen C, Fan J. Flow in membrane filter simulated as microchannel flow with diaphragm [A]. In: Bartel Timothy J, Gallis Michael A, eds. Rarefied Gas Dynamics [M]. AIP. 2000. 524.
- [21] Cai C P, Boyd I D, Fan J, Candler G. Direct simulation methods for low-speed microchannel flows [J]. J Thermophysics and Heat Transfer, 2000, **14**(3):368.
- [22] 谢洪, 樊菁, 沈青. 微槽道流动的直接统计模拟 [A]. 中国工程热物理学会传热传质学术会议论文集. 2000.
- [23] Nance R P, Hash D, Hassan H A. Role of boundary conditions in Monte Carlo simulation of MEMS devices [J]. J Thermophy and Heat Transfer, 1997, **11**:497.

RAREFIED GAS FLOWS IN MICRO-CHANNELS

XIE Chong, FAN Jing, SHEN Ching

(Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

[**Abstract**] A kinetic approach, named as the information preservation (IP) technique, is used to simulate rarefied gas flows in micro-channels under conditions where experimental data are available with about several thousand microns of channel lengths and about 0.135 of the largest Knudsen number at the outlet. Some issues for IP calculation of the long micro-channels such as the computational stability and convergence speed are addressed. The calculated streamwise pressure distributions and mass fluxes are in agreement with experimental data.

[**Key words**] MEMS; microchannel gas flow; rarefied effect; statistical simulation; DSMC