

文章编号: 1000-8055(2010)09-2125-07

离子发动机栅极系统中束流离子的三维模拟

钟凌伟, 刘 宇, 任军学, 仇 钊
(北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191)

摘 要: 应用网格质点法, 对离子发动机栅极系统进行了三维数值模拟. 模拟得到了离子发动机栅极系统中的电场分布、离子运动轨迹、离子在计算域内的空间分布和相空间分布等. 计算结果表明, 屏栅的离子透明度为 69.3%, 大于其物理透明度 67.1%, 加速栅的离子透明度为 100%, 远大于其物理透明度 31.1%, 说明所选模拟工况参数合理. 模拟结果可以为离子发动机栅极的初步设计提供理论参考.

关 键 词: 电推进; 离子发动机; 离子栅极系统; 网格质点法; 束流离子

中图分类号: V439

文献标识码: A

Three-dimensional simulation of beam ions in ion thruster optics system

ZHONG Ling-wei, LIU Yu, REN Jun-xue, QIU Qian

(School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A three-dimensional numerical simulation was carried out with the particle in cell method. The electric field, the paths of the ions, the spatial and the phase spatial distribution of the ions in the calculation domain were obtained from the simulation. It shows that the ion transparency of the screen grid and the acceleration grid is 69.3% and 100%, respectively, which is respectively bigger than the physical transparencies of 67.1% and 31.1% of the screen grid and the acceleration grid. The simulation parameters selected in the calculation are reasonable. The simulation results can provide a reference for the preliminary design of the ion thruster optics.

Key words: electric propulsion; ion thruster; ion optics system;
particle in cell method; beam ions

随着对航天器推进系统要求的逐步提高以及化学推进系统性能达到一定的极限, 从上世纪 90 年代开始, 电推进的研究和发展进入了一个崭新的时期. 电推进是一种能量转换器, 将来自航天器电源的电能转化成推进剂喷气的动能, 根据能量转换方式的不同, 电推进装置可分为三种类型: 电热型、静电型和电磁型^[1].

离子发动机是一种静电型电推进装置. 推进剂在电离室内被电离为离子和电子, 呈准中性的

等离子体状态. 电离室出口安装有栅极系统, 通常为双栅极, 即屏栅和加速栅. 栅极上施加一定的电势, 屏栅正电势略低于电离室等离子体电势, 用于吸引电离室内的离子和屏蔽电子, 加速栅上施加负电势, 用于引出、加速离子束. 高速喷出的离子束对离子发动机的作用力即为离子发动机的推力. 在栅极系统下游, 中和器发射电子以中和高速喷出的离子, 以免发动机和航天器携带过多的净电荷.

收稿日期: 2009-07-26; 修订日期: 2009-12-31

基金项目: 国家自然科学基金(10805004)

作者简介: 钟凌伟(1980-), 男, 河北易县人, 博士生, 主要从事空间推进研究. E-mail: zhonglw@sa.buaa.edu.cn

离子发动机目前已应用于卫星南北位置保持和轨道转移^[2], 在美国的“Deep Space 1”和“Dawn”飞行器上, 离子发动机作为行星际飞行的主推进系统^[3-4].

当前, 对离子发动机的研究主要集中在美国、欧洲和日本等国家, 这些国家的离子发动机均已在航天器上服役或进行了试验飞行^[5-7]. 国内很早就开展了离子发动机的相关研究, 目前已经进行了离子发动机工程样机 3 000 h 的寿命试验^[8].

离子发动机的推力较小, 一般为毫牛量级, 所以完成一定的空间任务需要更长的使用寿命. 数值模拟以其周期短、耗资少成为研究离子发动机的重要方法. 在国外, 科研人员利用数值模拟技术研究了离子发动机的离子引出机制、电离室工作机制、栅极系统寿命等, 并开发出了用于离子发动机电离室和栅极系统模拟的二维和三维仿真软件, 用于离子发动机的初步设计以及与试验的对比研究^[9-10].

本文以离子发动机双栅极系统为研究对象, 通过三维数值技术模拟离子在栅极系统中的运动, 研究栅极系统中的电势分布、离子分布以及离子运动规律等.

1 数值模型与计算方法

1.1 计算域

为了有效地引出并加速电离室内的离子, 在屏栅和加速栅上加工有成对的栅极小孔, 这些小孔通常呈六角形均匀分布在两个栅极板上, 栅极孔排列如图 1 所示.

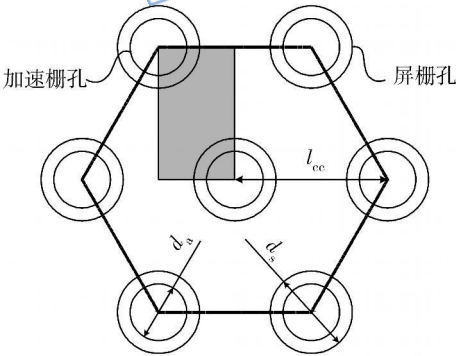


图 1 栅极孔排列方式示意图

Fig. 1 Schematic of the apertures arranged in the ion optics

通常栅极板上有上千对小孔, 根据栅极孔排列的周期性和对称性, 我们选取图 1 中阴影部分作为模拟区域, 即相邻的两个四分之一孔对, 如图

2 所示.

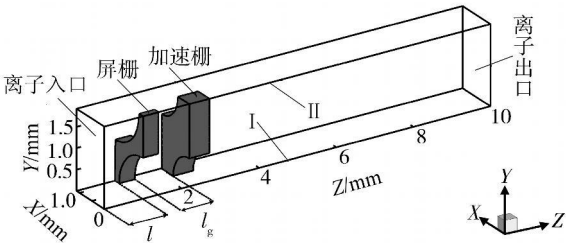


图 2 三维计算区域示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the 3-D simulation domain

离子束沿 Z 轴正方向运动, 上游面代表电离室内部, 离子从此面进入计算域. 离子在此处的 Z 轴速度分量应满足 Bohm 判据, X 和 Y 轴速度分量应满足 Maxwellian 速度分布. 下游面处于中和后的准中性等离子体, 离子从此面离开计算域, 在程序中给定此面的第一类边界条件或第二类边界条件, 文中给定此面上的电势分布. 计算域其余四个侧面均为对称边界条件, 即边界面上电势的导数为 0, 离子位置超出这些边界时镜像对称返回计算域内, 相应的速度分量也作镜像对称. 栅极面上给定电势, 此电势不随计算改变, 离子运动到栅极面时从计算域删除.

表 1 给出了计算域的几何参数和计算时采用的等离子体参数.

表 1 计算中采用的参数

Table 1 Parameters adopted in the calculation

参数	数值
计算域入口到屏栅上游面距离 l / mm	1.0
屏栅厚度 t_s / mm	0.4
屏栅孔直径 d_s / mm	1.91
栅极间距 l_g / mm	0.8
加速栅厚度 t_a / mm	0.6
加速栅孔直径 d_a / mm	1.30
栅极孔间距 l_{cc} / mm	2.22
屏栅电势 V_s / V	1200
加速栅电势 V_a / V	- 300
计算域出口面电势 V_∞ / V	0
电离室等离子体悬浮电势 V_p / V	30
电离室等离子体密度 n / m^{-3}	10^{17}
电离室电子温度 T_0 / eV	5
电离室离子温度 T_i / K	500
计算域出口面电子温度 T_∞ / eV	1.5

由表 1 可以得到屏栅物理透明度(栅极孔面积与栅极板面积之比)为 67.1%, 加速栅物理透明度为 31.1%.

1.2 数值模型

离子进入计算域后, 受到的其他力可忽略不计, 离子在电场作用下运动. 因此, 描述电磁场的 Maxwell 方程组可简化为静电场 Poisson 方程. 在三维正交坐标系下, Poisson 方程的具体形式为

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = - \frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e) \tag{1}$$

式中 ϕ 为计算域中某点电势, e 为电子电量, ϵ_0 为真空介电常数, n_i 和 n_e 分别为离子数密度和电子数密度.

应用逐次超松弛有限差分迭代法对方程(1)进行求解, 可得到计算域内的电势分布. 由计算域内的电势分布可以得到电场强度 E

$$E = - \nabla \phi \tag{2}$$

因不考虑磁场和重力等因素, 由计算域内电场强度分布可以得到离子受到的力, 计算域内离子的运动用 Newton 第二定律求解

$$\begin{aligned} m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} &= qE \\ \frac{d\mathbf{x}_i}{dt} &= \mathbf{v}_i \end{aligned} \tag{3}$$

式中 m_i 为离子质量, $\mathbf{v}_i$ 为离子速度矢量, q 为其所带电量, $\mathbf{x}_i$ 为离子位移.

2 粒子模拟方法

2.1 离子的模拟

本文采用网格质点法(particle-in-cell, PIC) 建立离子及其与计算域内所在网格的联系, 网格质点法在每个时间步中求解静电场中离子运动分为 4 个环节^[11], 如图 3 所示.

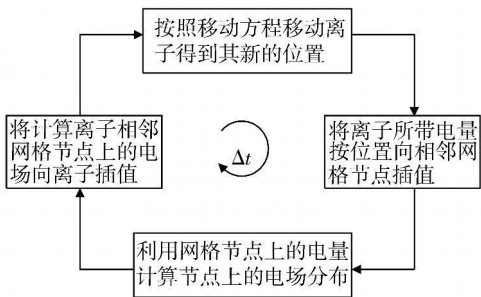


图 3 每个时间步中网格质点法的求解步骤
Fig. 3 Computing sequence for PIC method in a time step

首先将计算域划分为 $28 \times 48 \times 250$ 个网格, 网格长度在三个方向上相同, 均为 0.04 mm.

离子电量向所在网格节点的插值以及网格节点上的电场强度向网格内部离子插值均采用体积权重法, 两者为逆过程, 以离子电量插值为例, 示意如图 4 所示.

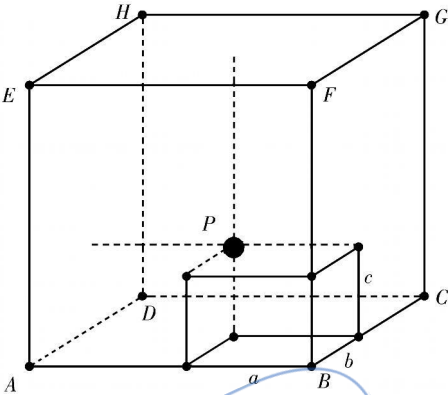


图 4 体积权重法示意图
Fig. 4 Schematic of the volume weighting

离子所带电量为 q , 处于网格中 P 点. 过 P 点作三个平面分别平行于三个坐标平面, 则可以将网格分为 8 个小长方体. P 点到以 B 为顶点的三个网格表面的距离分别为 a , b 和 c , 则离子电量向 H 点权重为

$$q^H = \frac{a \times b \times c}{\Delta x \times \Delta y \times \Delta z} \times q \tag{4}$$

式中 Δx , Δy 和 Δz 分别为计算域内网格三个坐标方向上的长度, q^H 为离子电量向网格节点 H 上的权重.

在程序中, 一个试验粒子代表 1 000 个真实的离子, 其质量和电量也分别乘以相应的倍数. 推进剂采用氙, 在每个时间步 4×10^{-10} s 中, 300 个试验氙离子从入口进入计算域, 每个离子的初始位置为 (random 1, random 2, 0), random 1 和 random 2 为两个 (0~1) 之间均匀分布的随机数, 由随机数函数产生. 离子的位置和速度等信息采用单链表存储^[12].

计算结束的条件为计算域内的离子数目基本恒定, 计算域电场基本保持不变.

2.2 电子的模拟

电子的质量比离子要小得多, 而且电子的温度远远高于离子的温度, 其热速度远远大于离子的热速度. 因此将电子看作为恒温的无碰撞流, 在屏栅上游和加速栅下游, 电子的数密度服从 Boltzmann 分布^[13].

屏栅上游电子数密度为

$$n_e = n_0 \exp\left[\frac{\phi - \phi_0}{T_0}\right], \quad \phi \leq \phi_0$$
$$n_e = n_0 \left[1 + \frac{\phi - \phi_0}{T_0}\right], \quad \phi > \phi_0 \quad (5)$$

式中 n_e 为电子数密度, n_0 为计算域入口处的离子数密度, ϕ_0 为计算域入口处的电势, T_0 为计算域入口处的电子温度.

加速栅下游电子数密度为

$$n_e = n_\infty \exp\left[\frac{\phi - \phi_\infty}{T_\infty}\right], \quad \phi \leq \phi_\infty$$
$$n_e = n_\infty \left[1 + \frac{\phi - \phi_\infty}{T_\infty}\right], \quad \phi > \phi_\infty \quad (6)$$

式中 n_∞ 为计算域出口处的离子数密度, ϕ_∞ 为加速栅下游等离子体电势, 在本文中即为计算域出口处的电势, T_∞ 为计算域出口处的电子温度. 因为计算域出口处的离子数密度随位置变化, 因此模拟中取为出口处的平均值.

3 计算结果

以前面给出的参数和条件, 程序运行到 10000 步后计算域内的离子数目保持在 430 000 左右, 电场也无明显变化. 计算域内的离子数目以及每个时间步内离开计算域的离子数目随时间步长变化曲线如图 5 所示.

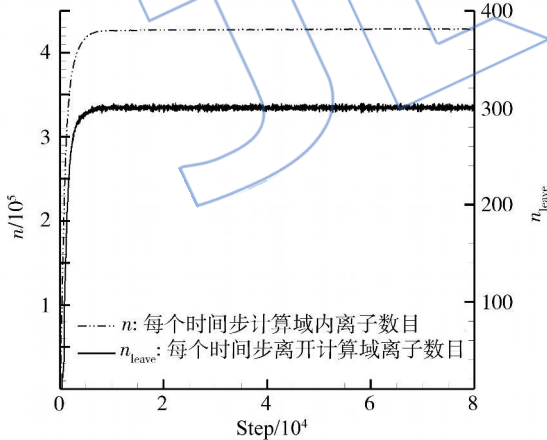


图 5 计算域内离子数目变化曲线

Fig. 5 Ion number variation against with time step in simulation domain

图 6 给出了计算域内的电势等值面图, 图 6 (a) 是计算开始时的等值面图, 此时计算域内尚无离子进入, 图 6(b) 为模拟结束时的等值面分布情况, 此时计算域内离子数目达到动态平衡. 无离子时, 1200 V 电势等值面远离屏栅且正对栅极孔位置处曲率较小. 稳定状态时此等值面整体向屏栅

移动且正对栅极孔位置处有较大的凸向上游的曲率, 这是由于屏栅电势略低于电离室电势, 在其上游面附近形成了等离子鞘层, 鞘层内离子数密度远大于电子数密度, 电势也随之上升. 屏栅上游, 离子速度较小, 其运动轨迹基本垂直于电势等势面, 栅极孔位置正对的等势面出现较大的曲率, 有利于栅极系统对电离室内离子的聚焦引出. 栅极系统的聚焦效果直接决定了离子发动机能否正常工作.

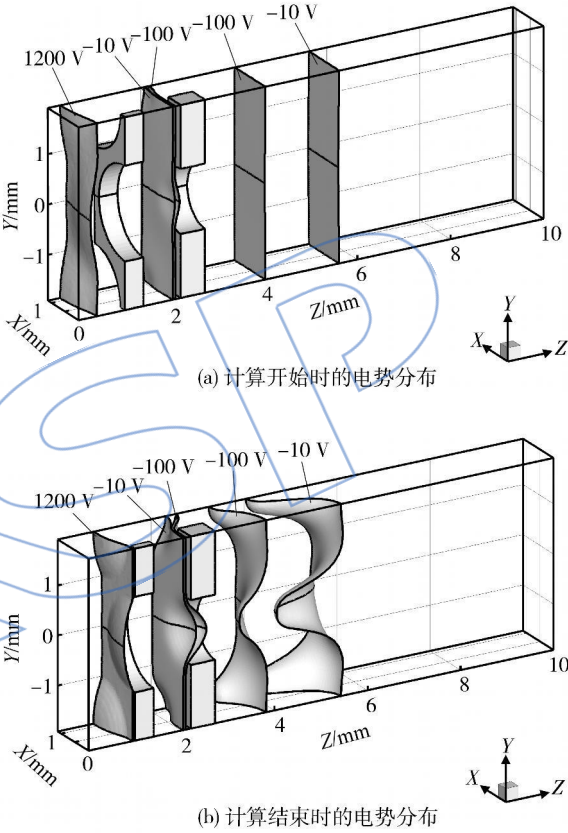


图 6 计算域内电势等值面比较

Fig. 6 Comparison of the potential contours

加速栅前后均存在 -100 V 和 -10 V 电势等值面, 计算域内无离子时, 加速栅上游的这两个等势面只在栅极孔位置处稍凹向栅极孔, 加速栅后面的等势面则接近垂直于 Z 轴的平面. 模拟结束时, 加速栅前面的等势面在栅极孔位置处愈加凹向加速栅孔. 加速栅后面的等势面在整体向上游移动的同时, 在栅极孔轴线附近的等势面也凹向加速栅孔方向. 这是由于栅极孔轴线位置处聚集了大量的带有正电荷的离子, 由方程(1)可知此处的电势高于径向距离大的位置处的电势.

计算域内离子数目达到平衡后, 离子束流轴线(图 2 中边线 I)及两对栅极孔中心轴线(图 2 中边线 II)上的电势随束流方向变化曲线如图 7

所示. 在 A 点之前, 相同轴向位置处两条边线上的电势基本相等. 在 A 点和 B 点之间的区域, 两条线上的电势迅速降低, 离子获得很高的轴向速度. 相同轴向位置处 I 线上的电势小于 II 线上的电势, 此时带正电荷的离子将产生向束流中心线 I 的速度分量, 即前面提到的屏栅对电离室内离子的聚焦作用. 在 B 点到 C 点之间, 相同轴向位置处 I 线上的电势大于 II 线上的电势, 此间 I 线上的最低点电势称为鞍点电势. 鞍点电势较下游等离子体电势低, 可以阻止下游等离子体中的电子向上游回流. 由图 7 中可以看到, 鞍点位于加速栅下游面附近, 这与文献[10]中得到的模拟结果是一样的. 在 B 点和鞍点之间, 离子由于惯性作用, 束流直径仍然减小, 同时离子的轴向速度继续增加. 在鞍点和 C 点之间, 两条线上的电势均呈上升趋势, 离子的轴向速度减小的同时, 还受到远离束流中心的力, 因此束流直径会增大. 在 C 点之后, 相同轴向位置处两条边线上的电势基本相同, 此时离子处于栅极系统下游的等离子体中, 束流中的离子成一定角度发散运动.

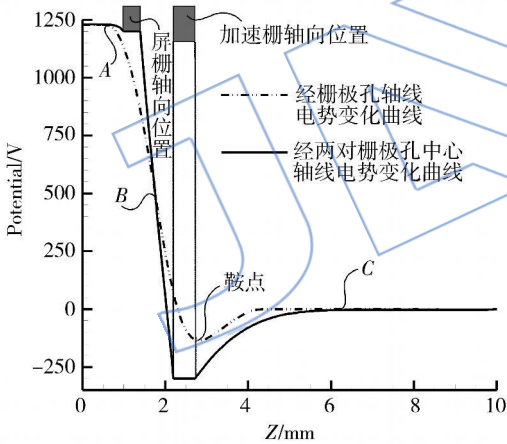


图 7 电势变化趋势曲线

Fig. 7 Potential profiles along the beam direction

图 8 为第 10000 时间步中喷入计算域中的部分离子的运动轨迹图。

由图 8 中可以看出, 一部分离子直接撞击到了屏栅形成屏栅电流, 此部分离子速度较小, 对屏栅造成的腐蚀并不严重. 经过屏栅孔的离子有一个明显的聚焦过程, 当栅极电势以及加速栅孔径选择合适时, 被屏栅聚焦的离子全部通过加速栅孔. 当离子通过加速栅孔后, 由于在相同的栅极孔轴线位置处, 电势随与栅极孔轴线距离的增大而减小, 带正电荷的离子要经历一个减速电场, 离子

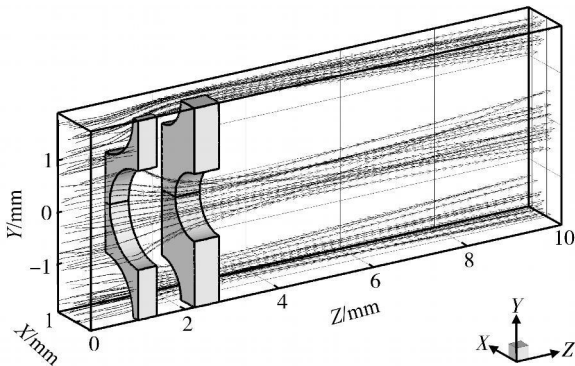


图 8 离子运动轨迹

Fig. 8 Paths of the ions

运动时与栅极孔轴线的角度会逐渐增大, 直到进入准中性的等离子体区域。

计算域内的离子空间分布如图 9 所示。

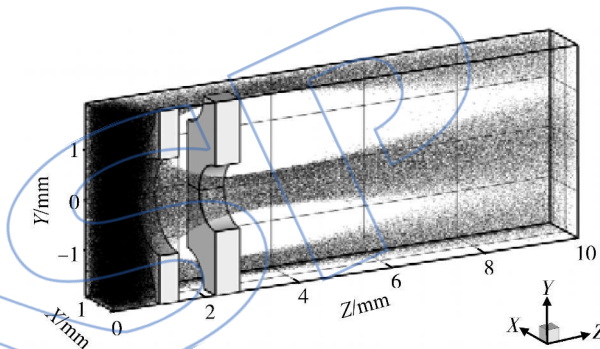


图 9 计算域内离子分布

Fig. 9 Spatial distribution of ions in simulation domain

由图 9 的离子分布可以看出, 经过屏栅的聚焦, 电离室内的离子形成离子束, 离子束在加速栅的作用下继续加速, 在加速栅位置, 其直径小于加速栅孔径. 栅极的离子透明度定义为通过栅极孔的离子数目与栅极上游向栅极运动的离子数目之比. 根据前面给出的模拟条件, 模拟区域屏栅电流为 0.03690 mA, 加速栅电流为 0 mA, 离子束电流为 0.083 25 mA. 由此可得出屏栅离子透明度为 69.3%, 加速栅离子透明度为 100%.

计算域内离子三个速度坐标分量的相空间分布分别如图 10 中的 (a), (b) 和 (c) 所示。

因栅极孔的轴对称性, 离子在 X 轴和 Y 轴方向上的速度相空间分布近似相同, 如图 10(a) 和图 10(b) 所示. 结合图 7 可知, 在图 7 中的 A 点之前, 离子在 X 和 Y 方向上的速度很小, 此时离子在电场的作用下基本沿轴向运动, 如图 8 中屏栅上游所示. 在图 7 中 A 点与 B 点之间, 离子在屏栅的聚焦作用下向栅极孔中心轴线加速运动, 速度值迅速增大, 如图 10(a) 和图 10(b) 中屏栅区域

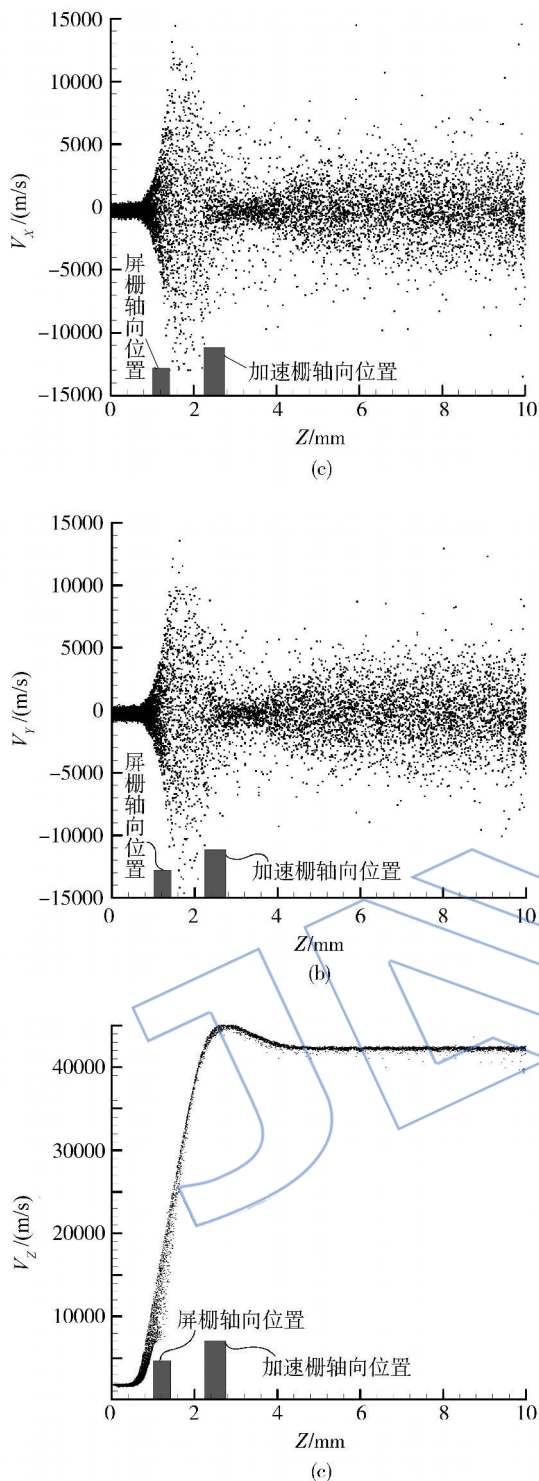


图 10 计算域内离子相空间分布

Fig. 10 Phase space distribution of the ions in simulation domain

所示. 在图 7 中 B 点与鞍点之间, 离子在 X 和 Y 方向上减速, 在通过加速栅孔时, 大部分离子在 X 和 Y 两个方向上的速度分量很小, 如图 10(a) 和图 10(b) 中加速栅下游面前面所示. 在图 7 中鞍点和 C 点之间, 离子向远离栅极孔中心轴线的方

向有加速度, 离子束流发散, 如图 10(a) 和图 10(b) 中加速栅下游面下游附近所示. 在图 7 中 C 点之后为等离子体区域, 此时离子在 X 和 Y 方向上的加速度为 0, 离子在这两个方向上的速度基本保持恒定, 如图 10(a) 和图 10(b) 中加速栅下游面后较远处所示.

图 10(c) 为离子轴向速度相空间图, 与图 10(a) 和图 10(b) 相比, 离子的轴向速度很集中, 基本上经历一条曲线. 结合图 7, 在其所示的 A 点之前, 离子在 Z 方向上基本以 Bohm 速度向下游运动, 在 A 点和鞍点之间, 离子在 Z 方向上的速度分量迅速增大, 在鞍点附近达到峰值. 在鞍点之后, 离子进入减速场, 离子的速度减小并在 C 点之后基本达到一个稳定值.

4 结 论

利用网格质点法模拟了离子发动机栅极系统中离子的运动, 得到了栅极系统中的电势分布, 离子的运动轨迹、离子空间分布和相空间分布等. 得出的结论如下:

- 1) 在文中给定参数情况下, 程序能较好地模拟离子在栅极系统间的运动情况.
- 2) 屏栅的离子透明度为 69.3%, 大于其物理透明度 67.1%; 加速栅的离子透明度为 100%, 远大于其物理透明度 31.1%, 说明经屏栅聚焦的离子全部通过加速栅孔, 文中所选模拟参数合理.

电荷交换碰撞是离子发动机中非常重要的物理现象, 碰撞产生的电荷交换离子对栅极系统的工作有重要影响, 在以后的工作中, 将进行电荷交换离子的模拟.

参考文献:

- [1] Goebel D M, Katz I. Fundamentals of electric propulsion: ion and hall thrusters [M]. New Jersey: John Wiley & Sons Inc., 2008: 36.
- [2] Frisbee R H. Advanced propulsion for the 21st century [R]. AIAA 2003-2589, 2003.
- [3] Polk J E, Kakuda R Y, Anderson J R, et al. Validation of the NSTAR ion propulsion system on the Deep Space One mission—overview and initial results [R]. AIAA 1999-2274, 1999.
- [4] Raman M D, Fraschetti T C, Raymond C A, et al. Preparing for the Dawn Mission to Vesta and Ceres [R]. Fukuoka, Japan: 56th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, 2005.
- [5] Dunning J D, Benson S, Oleson S. NASA's electric propulsion program [R]. Cleveland: 27th International Electric

Propulsion Conference, 2001.

[6] Saccoccia G. European electric propulsion activities and programs[R]. Cleveland: 27th International Electric Propulsion Conference, 2001.

[7] Komurasaki K. Overview of electric propulsion activities in Japan[R]. AIAA 2007-5166, 2007.

[8] 郑茂繁, 江豪成, 顾左, 等. 20cm 氙离子推力器 3000h 寿命试验[J]. 航天器环境工程. 2009, 26(4): 374-378.

ZHENG Maofan, JIANG Haocheng, GU Zuo, et al. 20cm xenon ion thruster 3000 hour life test[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2009, 26(4): 374-378. (in Chinese).

[9] Peng X, Keefer D, Ruyten W M. Plasma particle simulation of electrostatic ion thruster[J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(2): 361-366.

[10] Wang J, Polk J, Brophy J, et al. Three-dimensional particle simulations of ion optics plasma flow and grid erosion[J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(6): 1192-1199.

[11] Birdsall C K. Particle in cell charged particle simulations, plus Monte Carlo collision with neutral atoms, PIG-MCC[J]. IEEE transaction on plasma science, 1991, 19(2): 65-85.

[12] 刘畅, 汤海滨, 顾佐, 等. 单链表在离子发动机光学系统粒子模拟中的应用[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(7): 1193-1198.

LIU Chang, TANG Haibin, GU Zuo, et al. Particle simulation of ion thruster optical system using single linked list[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(7): 1193-1198. (in Chinese).

[13] Oh D Y, Hasting D E, Marrese C M, et al. Modeling of stationary plasma thruster 100 thruster plumes and implications for satellite design[J]. Journal of Propulsion and Power, 1999, 15(2): 345-357.

