

文章编号: 1000-8055(2008)03-0574-06

离子发动机加速栅极腐蚀深度的 DFF 测量与数值模拟

刘 畅¹, 汤海滨¹, 张振鹏¹, 姜志国¹, 顾 左², 李 娟²

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100083;

2. 兰州物理研究所, 兰州 730000)

摘 要: 使用聚焦深度表面测量(DFF)方法对加速栅极下游表面腐蚀深度进行了测量,并将测量结果与数值模拟结果进行了比较,所使用的数值方法为 PIC-Monte Carlo 方法.利用数值模拟程序对离子发动机栅极腐蚀进行了数值模拟.以氙为推进剂,栅极材料为钼.用蒙特卡罗方法模拟了氙离子与中性氙原子之间的电荷交换碰撞.模拟得到了加速栅极下游表面离子溅射腐蚀的深度分布,腐蚀模式与“Pits and grooves”模式相吻合.

关 键 词: 航空、航天推进系统;栅极;腐蚀;溅射;聚焦深度表面测量

中图分类号: V439

文献标识码: A

Numerical simulation and DFF measurement of ion thruster accelerator grid erosion depth

LIU Chang¹, TANG Hai-bin¹, ZHANG Zhen-peng¹,

JIANG Zhi-guo¹, GU Zuo², LI Juan²

(1. School of Astronautics,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

2. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou, 730000, China)

Abstract: Particle simulation of ion thruster grids was carried out via particle-in-cell (PIC) method and numerical method for calculating the erosion depth of the accelerator grid downstream surface was developed. Xenon was used as propellant and Molybdenum was used as grid material. Monte Carlo method was adopted to simulate the charge exchange collisions between Xenon ions and atoms. Distribution of erosion depth of the downstream surface of accelerator grid was obtained, and the erosion pattern agreed with the “pits and grooves” erosion pattern. Depth from focus(DFF) method was used to measure the erosion depth of the downstream surface of the accelerator grid and comparison between the measured and calculated erosion depth was carried out.

Key words: aerospace propulsion system; grids; erosion; sputtering;
depth from focus (DFF)

离子发动机是空间电推进的一种,其显著特点是比冲高,推力小,主要应用于航天器入轨、南

北位置保持和深空探测的主推进.使用离子发动机作为主推进的“深空一号(Deep space 1)”探测

收稿日期: 2007-03-19; 修订日期: 2007-06-07

基金项目:国家自然科学基金(50306001)

作者简介:刘畅(1980-),男,河北定州人,博士生,主要从事空间电推进与特种推进的研究.

器于 1998 年发射升空并获得了成功,这使得各国均对离子发动机研究产生了浓厚的兴趣.离子发动机在轨工作寿命能够达到数万小时,使离子发动机失效的一个重要原因就是栅极的溅射腐蚀.栅极长时间工作后加速栅极孔径会变大并产生烧穿现象,影响发动机的性能,严重时会导致发动机失效.在地面进行离子发动机的栅极寿命实验是非常耗时的(数万小时),并且需要很大的人力投入和资金投入.通过数值方法则可以大大减少时间投入与人力、资金投入.

离子发动机光学系统数值模拟大多采用 PIC (Particle-in-cell) 方法^[1-2], Wang^[3]开发了三维栅极间等离子体流动的数值模拟程序,预示了栅极腐蚀深度的平面分布,并使用表面光度仪测量了栅极的腐蚀深度. Emhoff^[4]开发了二维的光学系统模拟程序,并使用单孔数值模拟程序对整个栅极进行了模拟,进而模拟出了发动机的总体性能参数,如推力和比冲等.本文采用基于图像处理的聚焦深度表面测量(DFF)方法对栅极腐蚀深度进行了测量,并在以前研究工作的基础上,利用已有的三维等离子体粒子模拟程序^[5],对光学系统等离子体引出过程及离子束聚焦特性进行了研究,模拟出了加速栅极电流和加速栅极下游表面腐蚀的深度,测量结果与数值模拟结果相吻合,验证了模拟程序的正确性.

1 实验装置与测量方法

1.1 离子发动机实验系统^[6]

图 1 为该发动机的真空实验系统,该设备主要由真空舱、抽气系统、氙离子发动机地面电源以及氙离子发动机推进剂地面输送系统组成.该设备主舱尺寸为 $\phi_3\ 2\ 000\ \text{mm} \times 5\ 000\ \text{mm}$ (不包括封头),副舱尺寸为 $\phi_3\ 800\ \text{mm} \times 800\ \text{mm}$,极限空载压力小于 $7 \times 10^{-4}\ \text{Pa}$,工作压力小于 $5 \times 10^{-3}\ \text{Pa}$.



图 1 离子发动机真空实验系统
Fig. 1 Vacuum test system of ion thruster

离子发动机加速栅极电流,或称截获电流,对研究加速栅极腐蚀有重要的参考意义.图 2 是加速栅极电流测量示意图,加速栅电流 I_a 可以直接从电流表上读出.

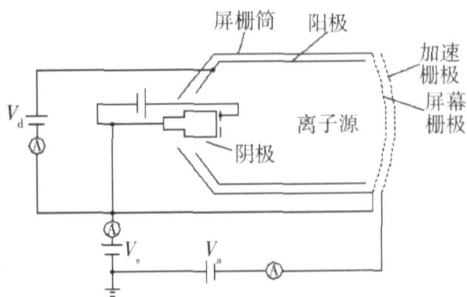


图 2 加速栅极电流测量示意图
Fig. 2 Measurement of accelerator grid current

1.2 加速栅极腐蚀深度测量方法

由于栅极孔的几何尺度非常小,因此腐蚀分布的几何尺度也很小,这使得栅极腐蚀深度的测量非常困难, Wang 使用了激光表面光度仪测量了加速栅极腐蚀深度.本文中采用 DFF 方法^[7]测量了加速栅极的腐蚀深度分布,图 3 为测量设备照片,栅极放置在显微镜的台架上. DFF 方法的基本思想为,首先通过调整显微镜的 z 轴位置,获取显微样本的序列图像,使整个序列覆盖物体在显微镜中的全部 z 轴方向信息,每幅图像有聚焦清晰区域和模糊区域;然后在序列图像中通过一定的融合规则获取每一个像素对应的聚焦清晰位置,从而重建出一幅每一景深部位均十分清晰的图像;再通过聚焦分析恢复深度信息,最后对深度信息进行插值拟合,恢复出比较精确的物体深度信息,从而通过二维图像序列进行三维重建和测量.



图 3 DFF 测量设备
Fig. 3 DFF measurement equipment

2 计算模型^[5,8]

计算域的选取如图 4 所示.计算区域大小为

1.11 mm ×1.92 mm ×14 mm,划分为等距正交网格.

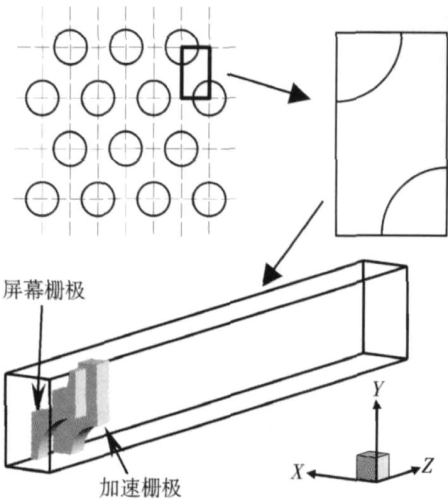


图 4 计算域示意图
Fig.4 Calculation domain

使用有限差分法求解 Poisson 方程得到电势分布

$$\nabla^2 \Phi = - \frac{e}{\epsilon_0} (n_i + n_e)$$

式中 Φ 为电势, e 为电子电量, ϵ_0 为真空介电常数, n_i 为氦离子数密度, n_e 为电子数密度.

计算域左边界和右边界的电场边界条件分别为

$$\Phi = V_{sc} + V_p$$

和

$$\Phi = 0$$

式中 V_{sc} 为屏栅极电压, V_p 为等离子体电势, 本文取为 31 V.

剩余 4 个面的电场边界条件取为 Neumann 边界条件, 即

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = 0$$

和

$$\frac{\partial \Phi}{\partial y} = 0$$

采用上述方法求解出电势后, 电场强度由下式求出

$$E = - \nabla \Phi$$

在本文的模拟中未把电子作为粒子进行模拟, 而是将电子视为热平衡流体, 利用 n_e 与当地电势 Φ 之间的关系, 即 Boltzmann 方程来计算 n_e

$$n_e = n_0 \exp[(\Phi - \Phi_0)/T_e]$$

式中 n_0 为电离室等离子体浓度, 即左边界上的等

离子体浓度, Φ_0 为电离室等离子体电势, 即左边界上的电势, T_e 为电离室电子温度, 本文中取为 5 eV.

采用 Monte Carlo 方法模拟带电粒子与中性粒子之间的电荷交换碰撞, 为节省计算时间, 本文采用零碰撞方法. 电荷交换碰撞截面采用半经验公式^[9]

$$\sigma = (a - b \lg \Delta v)^2$$

式中 σ 为碰撞截面, Δv 为原子与离子的相对速度, 计算中取 $a = 19.1$, $b = 2$.

3 计算结果、测量结果及讨论

使用本文开发的模拟程序对离子发动机栅极间的等离子体流动过程进行了数值模拟. 模拟中所取的发动机参数见表 1 和表 2.

表 1 光学系统几何参数

Table 1 Geometric parameters of the optics

参 数	数 值
屏幕栅极孔径 r_{sc}/mm	0.955
加速栅极孔径 r_{ac}/mm	0.65
屏幕栅极厚度 t_{sc}/mm	0.4
加速栅极厚度 t_{ac}/mm	0.5
栅间距 l_g/mm	0.44

表 2 离子发动机工作参数

Table 2 Working parameters of the ion thruster

参 数	数 值
屏幕栅极电压 V_{sc}/V	1 200
加速栅极电压 V_{ac}/V	- 400
等离子体电势 V_d/V	30
流量 $\dot{m}_d/10^{-6}(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$	1.09
束流 I_b/mA	700

图 5 为三维电势分布图. 图 6 为氦离子空间分布图, 从图中可以看出电离室中的氦离子被聚焦为离子束后引出, 所有粒子都通过了栅极孔, 没有粒子直接撞击到栅极上.

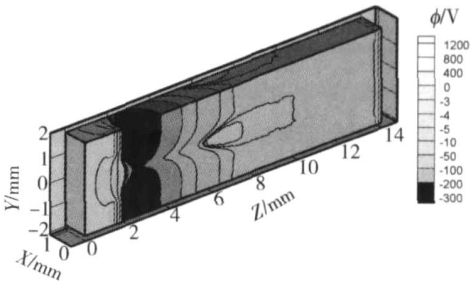


图 5 三维电势分布图

Fig.5 Electric potential contours

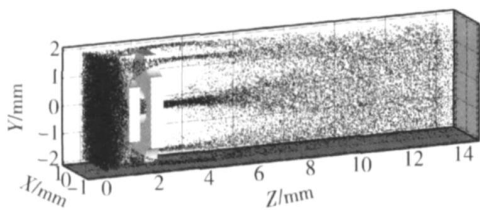


图 6 氙离子空间分布图

Fig. 6 Special distribution of Xenon ions

图 7 为粒子未进入计算域时 $X = 0$ 平面的电势分布图,图 8 为计算稳定后 $X = 0$ 平面的电势分布图,此时计算域中有氙离子.从图中可以看出,粒子进入计算区域后使电场等值线形状发生了改变.在加速栅极下游区域,粒子未进入计算区域时,电场等值线垂直于 Z 轴,而当粒子进入计算域后电场等值线向栅极孔移动,变为接近水平方向.这使得原本为平面的电场等势面变为锥尖形,且锥尖指向栅极孔.电场等值线产生上述变化的原因是粒子进入计算区域后使电场泊松方程中的 n_i 和 n_e 发生变化,因此改变了等值线的走向.这种锥尖形的电场等势面会使电荷交换碰撞中所产生的慢速氙离子加速运动并集中到“Pits and grooves”区域,在本文后面将对此进行讨论.

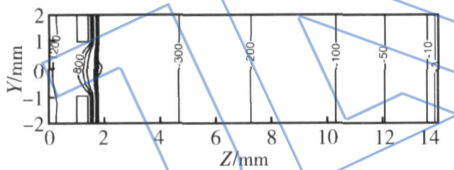


图 7 $X = 0$ 平面的电势分布图 (粒子未进入计算域)

Fig. 7 Electric potential contours without test particles

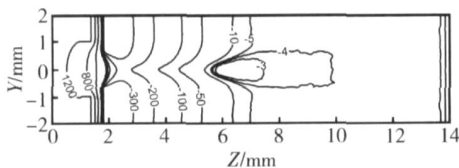


图 8 $X = 0$ 平面的电势分布图 (计算稳定后)

Fig. 8 Electric potential contours with test particles

图 9 为电子数密度分布图,从上文中的电场 Boltzmann 关系可知,电子数密度分布主要取决于当地电势的分布,结合图 8 可以看出,电子应主要集中在屏幕栅极上游的电离室内部和加速栅极下游的离子束中,这与图 9 所显示的结果是相符的.在电离室中,电子应该被约束在等离子体鞘层内部,因此电子的边界应该位于鞘层的位置.图 9 中显示电离室中电子分布的边界呈内凹形,这说明电离室中的等离子体具有内凹形鞘层,这与

Aston 和 Wilbur^[10]的实验测量结果是相吻合的.

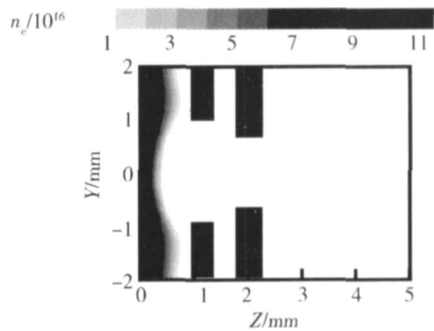


图 9 电子数密度分布图

Fig. 9 Distribution of electron number density

离子与原子之间的电荷交换碰撞会产生出高速的原子和低速的离子,这部分低速的离子会在电场力的作用下向加速栅极运动,有一部分会撞击到加速栅极下游表面,如果离子撞击栅极表面时的入射能量足够高,就会产生溅射腐蚀.图 10 为发动机工作时间为 800 h 后,数值模拟给出的加速栅极下游表面腐蚀深度分布图.图中颜色越深代表腐蚀深度越大.图 11 为模拟出的三维腐蚀深度图.腐蚀深度是由腐蚀率和发动机工作时间计算出的,腐蚀率取决于入射离子对栅极材料的溅射率(溅射产额)、入射电流密度以及栅极材料的物理性质.我们用下述公式计算腐蚀率

$$R_e = \frac{JY(E, \theta) M_{Mo}}{\rho_{Mo}}$$

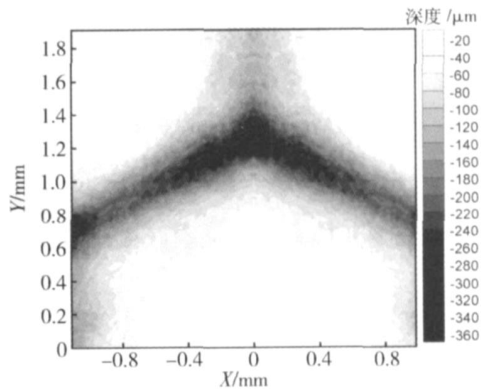


图 10 加速栅极下游表面腐蚀深度分布图

Fig. 10 Simulation result of accelerator grid downstream surface erosion depth

式中 R_e 为腐蚀率, J 为电流密度, Y 为溅射率, E 为入射粒子的能量, θ 为入射角, M_{Mo} 为钼原子的质量, ρ_{Mo} 为钼的密度.

溅射率取决于入射粒子的能量和入射角.从图中可以看出腐蚀最深的地方位于相邻三个孔的中心处,我们称之为“Pits”,另外,相邻的两个孔

的中心处腐蚀也较为严重,我们称之为“Grooves”,图 12 是受腐蚀的栅极表面照片,(a)为本文中模拟的 20 cm 离子发动机加速栅极下游表面,(b)为 NASA Glenn Research Center 40 cm NSTAR 离子发动机^[11].从图 10~图 12 可以看出计算结果与文献中报道的“Pits and grooves”腐蚀模式是相吻合的.

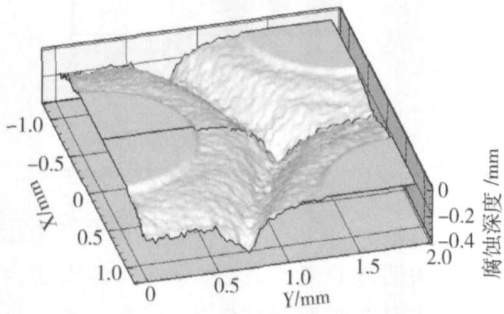
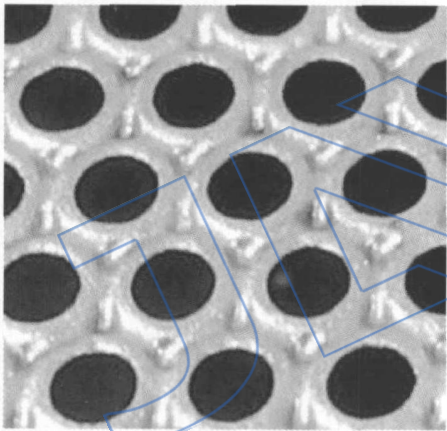
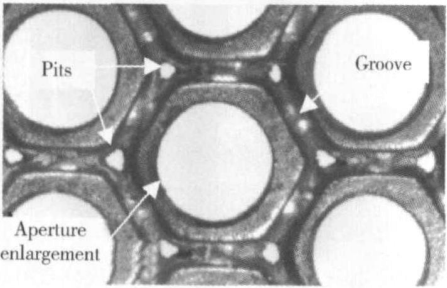


图 11 三维腐蚀深度图

Fig. 11 Simulated accelerator grid surface erosion distribution



(a) 加速栅极腐蚀照片



(b) 40 cm NSTAR 离子发动机加速栅极

图 12 加速栅极表面腐蚀

Fig. 12 Picture of eroded accelerator grid surface

图 13 为 DFF 方法测量结果,图中颜色越深代表深度越大.除了上述测量结果外,该方法还可进行定量的分析,如图 14 所示,该图所显示的曲线为沿图 13 中黑色直线的腐蚀深度.从图中可以看出计算结果与测量结果是相吻合的.但在 x 大

于 0.2 mm 的区域计算结果与测量值存在较大的误差,这是由数值计算的模型误差引起的.从图中可以看出,经过 800 h 的工作,加速栅极的最大腐蚀深度位于“Pits”处,达到 0.3 mm.

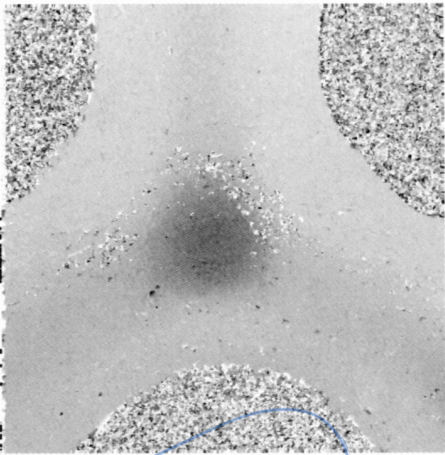


图 13 DFF 方法测量结果

Fig. 13 Measured erosion depth distribution with DFF method

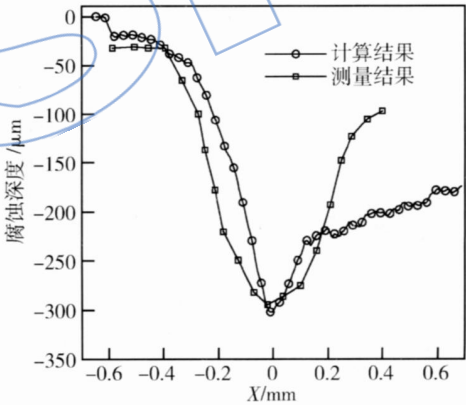


图 14 测量结果与计算结果的比较

Fig. 14 Comparison of simulation result of grid erosion with measurement data

图 15 为加速栅极电流随加速栅极电压变化关系图.图中方块代表的曲线是模拟出的,圆圈代表的曲线是实验测量出的.从图中可以看出,随着加速栅极电压的逐渐变大,加速栅极电流逐渐变小,这是由于加速栅极电压越大,光学系统的聚焦性能就越好,加速栅极电流就会随之减小.栅极电流是带电粒子撞击到栅极上形成的,加速栅极电流主要由两部分组成,一部分是被引出的离子束由于聚焦不好而直接撞击到加速栅极上引起的截获电流,如果栅极的几何参数和电压设计的合理,就可以减少这部分电流.另一部分是氦离子与中性原子之间的电荷交换碰撞所产生的慢速氦离子

被栅极吸引而撞击到栅极上形成的。如果碰撞发生在栅极之间的区域,那么碰撞产生的氙离子会撞击到加速栅极的上游表面或孔壁面,如果碰撞发生在加速栅极下游较远的区域,那么碰撞产生的氙离子会撞击到加速栅极的下游表面,产生溅射,这就是腐蚀形成的原因。本文只对加速栅极下游表面腐蚀进行了模拟,而实际发动机工作过程中加速栅极孔壁处的溅射腐蚀也是很严重的,会引起加速栅极孔径变大。对加速栅极孔壁的溅射腐蚀的模拟将是本文进一步的工作。

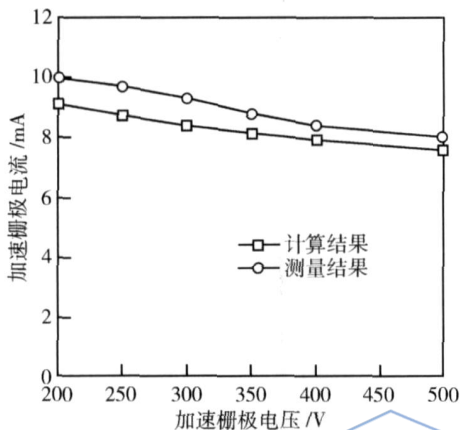


图 15 加速栅极电流随电压变化关系图

Fig. 15 Accelerator grid current against accelerator grid potential

4 结 论

本文对 20 cm 离子发动机加速栅极下游表面腐蚀深度进行了数值模拟,得出结论如下:

(1) 在文中给定的工作条件下,数值模拟结果显示发动机工作 800 h 后腐蚀深度最大达到 0.3 mm,位置位于文献报道中的“Pits”处;

(2) 加速栅极下游表面产生腐蚀的主要原因是电荷交换碰撞产生的慢速氙离子在电场力的加速作用下撞击到栅极表面,产生溅射腐蚀。由于离子束的作用,加速栅极下游区域电场呈现为山峰形的结构,氙离子在这种形状电场的加速作用下将会被集中到栅极的“Pits”和“Grooves”区域;

(3) 使用 DFF 方法可测量出加速栅极下游表面腐蚀分布,数值模拟结果与 DFF 测量结果相吻合。

致谢:本项研究得到了“真空低温技术与物理国家重点实验室”的大力帮助,特此感谢!

参考文献:

- [1] Peng X, Keefer D, Ruyten W M. Plasma particle simulation of electrostatic ion thrusters[J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(2): 361-366.
- [2] Okawa Y, Takegahara H. Numerical study of beam extraction phenomena in ion thruster[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(1): 314-321.
- [3] Wang J, Polk J, Brophy J, et al. Three-dimensional particle simulations of ionoptics plasma flow and grid erosion [J]. Journal of Propulsion and Power, 2003, 19(6): 1192-1199.
- [4] Emhoff J W, Boyd I D. Modeling of total thruster performance for NASA's evolutionary Xenon thruster ion optics[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(4): 741-748.
- [5] 刘畅, 汤海滨, 顾左, 等. 考虑电荷交换的三维离子发动机栅极粒子模拟[J]. 推进技术, 2006, 27(5): 464-468.
LIU Chang, TANG Haibin, GU Zuo, et al. Three dimensional particle simulation of ion thruster grids with charge exchange[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 27(5): 464-468.
- [6] 李娟. 20 cm 氙离子推力器离子光学系统的设计与实验研究[D]. 兰州: 中国空间技术研究院兰州物理研究所, 2005.
LI Juan. A design and an experimental study of ion optic system on 20 cm Xenon ion thruster [D]. Lanzhou: Lanzhou Institute of Physics, China Academy of Space Technology. 2005.
- [7] 姜志国, 史文华, 韩冬兵, 等. 基于聚焦集成显微三维成像系统[J]. CT理论与应用研究, 2004, 13(4): 9-15.
JIANG Zhiguo, SHI Wenhua, HAN Dongbing, et al. Three-dimensional microscopy image system based on depth from focus[J]. Computerized Tomography Theory and Applications, 2004, 13(4): 9-15.
- [8] Birdsall C K, Langdon A B. Plasma physics via computer simulation[M]. New York: McGraw-Hill, 1985.
- [9] 熊家贵, 王德武. 考虑电荷交换的 RF 共振离子引出方法的模拟[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(10): 1-4.
XIONG Jiagui, WANG Dewu. Simulation of ion extraction by RF resonance method with charge exchange[J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2000, 40(10): 1-4.
- [10] Aston G, Wibur P J. Ion extraction from a plasma[J]. Journal of Applied Physics, 1981, 52(4): 2614-2626.
- [11] Soulas G C. Design and performance of 40 cm ion optics [C] // 27th International Electric Propulsion Conference. Pasadena, California: 2001, IEPC 01-90.