

离子推力器阶梯状结构栅极系统性能分析

陈茂林¹, 夏广庆², 毛根旺¹

(1. 西北工业大学燃烧、热结构与内流场重点实验室, 西安 710072;

2. 大连理工大学工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116024)

摘要: 阶梯状栅极结构是一种新型离子推力器栅极构型。采用三维 PIC 仿真方法对阶梯状结构栅极系统等离子体输运过程进行仿真, 并与传统结构栅极仿真结果进行对比, 分析阶梯状结构栅极对束流分布、离子通过率和发散角损失等参数特性和分布的影响。结果表明: 阶梯状结构栅极系统深入放电腔的鞘层区域相对更小, 故屏栅离子通过率更低; 加速栅电流比相对于普通结构栅极略有下降, 即离子撞击加速栅极几率减小, 栅极腐蚀减慢, 但同时栅极的工作电流区间也随之减小; 由于下游径向电场强度的减弱, 离子的非轴向速度变小, 束流发散角损失减小。研究结果对栅极系统的优化设计具有重要意义。

关键词: 航空宇航推进理论与工程; 离子推力器; 栅极系统; 等离子体模拟; 阶梯状栅极; 束流

中图分类号: V439+.1

Analysis of stepped-structure optics performance for ion thruster

CHEN Maolin¹, XIA GuangQing², MAO GenWang¹

(1. Science and Technology on Combustion, Internal Flow and Thermo-Structure Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072;

2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024)

Abstract: The stepped-structure is a new type of optics design for ion thruster. The plasma transport process in this stepped-structure optics was simulated with a 3D PIC method, and results were compared with the traditional structure optics. The influence of the structure on optics operation performance was analyzed. Such as the beam distribution, ion through the rate and divergence angle loss. The results show that: the sheath region in discharge cavity caused by the stepped-structure optic is relatively smaller, and ion through rate of screen grid is lower than traditional optics; the accelerator grid current caused by ion impact is slightly then traditional optics, which means the grids corrosion maybe slower too; at the same time, the operation current range decreases; the non-axial velocity of ions and the divergence angle loss become small due to the smaller radial electric field intensity in the downstream. The results of the study have important significance to optimize the design of ion thruster optics system.

Key words: Aerospace propulsion theory and engineering; Ion Thruster; Optics System; Plasma Simulation; Stepped-structure; Beam

0 引言

离子推力器为静电式电推力器的一种, 目前已被广泛应用于卫星以及深空探测器的主、辅推进系统, 典型的离子推力器有 XIPS-13、XIPS-25、NSTRA-30、T6 和 μ -10 等 [1-5]。栅极系统是离子推力器性能和寿命的关键部件。由于栅极系统加工工艺较复杂、成本较高, 且实验环境要求严格、周期较长, 为此数值仿真是栅极设计和研制过程中的重要手段和方法。

基金项目: 高等学校博士点专项科研基金资助 (20116102110039); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (3102014KYJD005); 西北工业大学基础研究基金(NPU-FFR-JC20120201)

作者简介: 陈茂林 (1982-), 男, 讲师, 主要研究方向: 等离子体仿真, 等离子体推进, 电推进. E-mail: chmaolin@mail.nwpu.edu.cn

离子推力器栅极的常见结构主要有两类：两栅极系统和三栅极系统。无论两栅极还是三栅极系统，离子对加速栅极的撞击造成的栅极腐蚀都是制约离子推力器寿命的一大关键因素。为了研究栅极腐蚀机制，研究人员开展了大量的仿真研究工作，主要包括：栅极系统的电场分布和离子束流运动轨迹模拟，高精度栅极 PIC 仿真算法研究，栅极腐蚀过程模拟，电子反流、截止电流以及离子引出过程模拟等^[6-9]。弗吉尼亚理工大学的 T. Lin 和 J. Wang^[4]，田纳西大学的 Wilhelmus M. Ruyten^[6]，北京航空航天大学任军学^[10]，哈尔滨工业大学曹勇^[11-13]，兰州空间技术物理研究所贾艳辉^[14]等人在离子推力器栅极的仿真研究方面开展了大量的研究工作，计算了不同推力器栅极系统的屏栅透明度、离子引出路径等与性能评价相关的参数和加速栅溅射腐蚀、屏栅溅射腐蚀等与寿命评价相关的参数。

随着问题的深入研究，栅极腐蚀机制逐渐明晰，主要包括上游离子撞击加速栅造成的“Barrel”腐蚀^[15]和中下游离子撞击加速栅造成的“Pits-and-Grooves”腐蚀^[16]。对于减小“Pits-and-Grooves”腐蚀，一个有效的方法就是采用三栅极结构，通过减速栅极平滑下游电场，减小从中下游撞击加速栅的离子数量和能量^[17]。而对于减小“Barrel”腐蚀并未有一个公认有效的改进方式，直至 2003 年，Farnell 等人提出了阶梯状加速栅极结构^[18]，并预估阶梯状栅极结构可以有效的降低“Barrel”腐蚀。但对这种阶梯状栅极的束流分布及其带来的影响，并未进行细致研究。

本文针对这种阶梯状栅极结构，采用三维 PIC 方法对阶梯状栅极系统内部的离子束流输运过程进行数值仿真，分析栅极鞘层电场和离子束流分布，及阶梯状栅极结构对推力器性能的影响。

1 计算模型

1.1 物理模型与仿真区域

为了与传统栅极仿真结果进行对比，计算采用的栅极结构参数如表 1 所示。其中屏栅结构和两栅间距同 NASA 的 30cm NSTAR 离子推力器栅极结构^[4]；加速栅极结构如图 1 所示。

表 1 栅极结构参数

Tab.1 Structure of Optics

结构参数	值 (mm)
屏栅孔半径 R_s	0.955
屏栅厚 T_s	0.38
加速栅孔最小半径 R_a	0.57
加速栅厚 T_a	0.51
屏栅-加速栅间距 G_{sa}	0.58
孔间距 L	2.21

由于栅孔结构的对称性，仅取 1/4 个栅孔区间作为计算区域，如图 2 所示。图 2 (a) 是单个完整栅孔的三维结构；图 2 (b) 为单个栅孔的左视图；图 2 (c) 为计算区域的左视图；图 2 (d) 为单个栅孔区域的俯视图。

根据栅极结构尺寸，对计算区域进行结构化网格划分，考虑放电室等离子体密度在 $10^{16} \text{m}^{-3} \sim 10^{17} \text{m}^{-3}$ ，网格空间步长取为 $5 \times 10^{-5} \text{m}$ 。

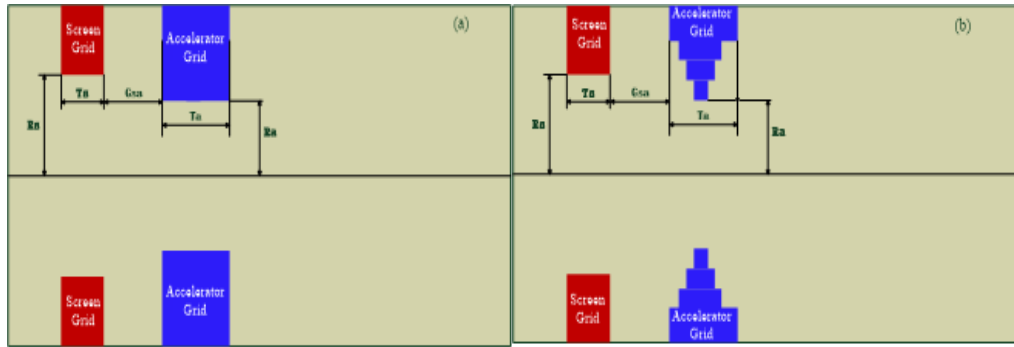


图 1 阶梯状加速栅的阶梯部分参数示意图

Fig.1 Stepped-structure optics

75

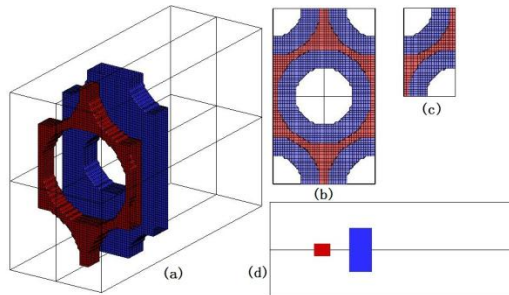


图 2 计算区域

Fig.2 Calculation region

80

1.2 PIC/MCC 模型

PIC 方法是模拟低温等离子体的一种常用数值方法^[19],它是粒子的运动和自洽电场的耦合求解方法。MCC (蒙特卡洛碰撞, Monte Carlo Collision) 是用来描述粒子间碰撞的常用方法, 本文用 MCC 方法来求解带电粒子与中性粒子间的碰撞。

85 PIC 模型中, 离子运动遵循牛顿-洛仑兹定律, 其运动方程如下:

$$M \frac{d\vec{v}}{dt} = e \bullet \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right) \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v} \quad (2)$$

电子视为流体, 数密度服从 Boltzmann 分布:

$$n_e = n_{ref} \exp\left(\frac{\phi - \phi_{ref}}{T_{e,ref}}\right), \quad \phi \leq \phi_{ref} \quad (3)$$

$$n_e = n_{ref} \left(1 + \frac{\phi - \phi_{ref}}{T_{e,ref}}\right), \quad \phi > \phi_{ref}$$

90 其中 n_{ref} 、 ϕ_{ref} 和 $T_{e,ref}$ 分别为参考点等离子体数密度、电势以及电子温度。对于加速栅上游电子数密度计算, 参考点为放电腔内部; 对于加速栅下游电子数密度计算, 参考点为下游羽流中和面^[4]。

电场值由泊松方程求解:

$$\nabla \phi = -\frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e) \quad (4)$$

95 将 Boltzmann 方程和泊松方程耦合求解，即有：

$$\nabla^2 \phi + \frac{en_i}{\epsilon_0} - \frac{en_{e,ref}}{\epsilon_0} \exp\left(\frac{e(\phi - \phi_{ref})}{k_B T_{e,ref}}\right) = 0 \quad (5)$$

对上式进行线性化处理^[20]后，可用超松弛迭代方法进行求解。

PIC/MCC 的求解过程如图 3 所示^{[51][20]}：

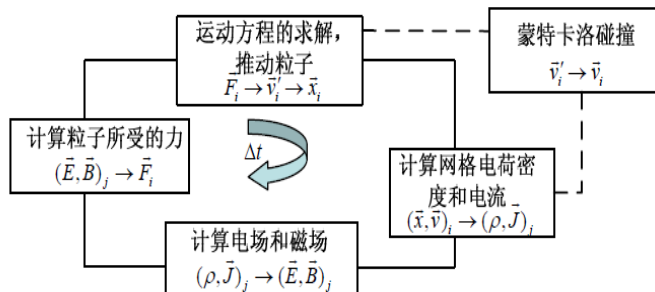


图 3 PIC/MCC 求解流程图

Fig.3 Flow scheme of PIC/MCC

MCC 模型用来描述目标粒子（氙离子）与背景粒子（氙气分子）之间的碰撞。

在 Δt 时间内，目标粒子与背景粒子的碰撞几率可表示为：

$$P = 1 - \exp(-n_t v_{inc} \sigma_T(\epsilon_{inc}) \Delta t) \quad (6)$$

105 式中， n_t 表示目标粒子的数密度， v_{inc} 表示目标粒子的速度， $\sigma_T(\epsilon_{inc})$ 代表粒子之间的碰撞总截面积， ϵ_{inc} 代表目标粒子的能量。

栅极计算中，主要考虑离子和中性分子的弹性碰撞和 CEX 碰撞，氙离子和氙气分子弹性碰撞截面 $\sigma_{in,el}$ 和 CEX 碰撞截面 $\sigma_{in,cex}$ 分别为^{[21][22]}：

$$\sigma_{in,el} = \frac{6.42 \times 10^{-16}}{v_r} m^2 \quad (7)$$

$$110 \quad \sigma_{in,cex} = (-23.30 \times \log_{10} v_r + 142.21) \times 0.8423 \times 10^{-20} m^2 \quad (8)$$

2 模拟结果讨论

2.1 屏栅离子通过率

离子通过率 η_{sc} 是栅极效率的一个重要考核参数，为通过屏栅孔的离子相对于来流离子的比值。采用上述模型，分别计算了普通结构栅极和阶梯状结构栅极系统对应不同束电流的离子通过率， $\eta_{sc} = N_{through} / N_{total}$ ， $N_{through}$ 为穿过屏栅孔的离子个数， N_{total} 为进入计算区域的离子个数，如图 4 所示。

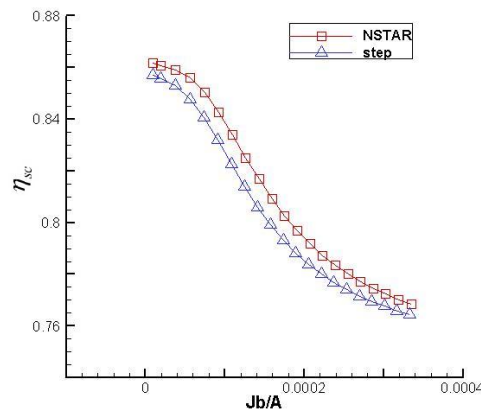


图 4 离子通过率随束电流 J 的变化

Fig.4 Ion through rate with the beam current

120 由图可见，随着束电流 J 的增大，离子通过率 η_{sc} 均呈现出先缓慢变化后迅速减小的趋势。这主要是由鞘层结构决定的， J_b 较小时，鞘层远离屏栅，对离子数通过率影响较小，随着 J_b 增大，鞘层逐渐靠近屏栅并进入屏栅孔内，鞘层影响区域随之减小，受鞘层作用的离子比例减小，离子通过率降低。

125 此外，对比普通结构栅极系统和阶梯状结构栅极系统的离子通过率 η_{sc} 可知，相同束电流 J_b 条件下，阶梯状结构栅极系统的离子通过率略低。分析其原因是，离子通过率主要由屏栅鞘层决定，阶梯状加速栅极结构的引入会改变屏栅上游鞘层结构。图 5 为阶梯状结构栅极系统和普通结构栅极系统在单孔束流 $J_b=0.16mA$ 时的电势分布。

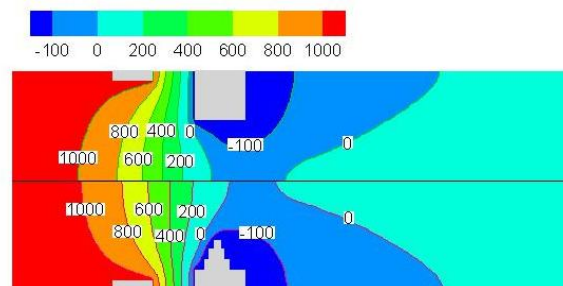


图 5 电势分布图

Fig.5 Potential distribution

130 由图 5 可见，阶梯状栅极结构在屏栅上游引起的鞘层区域略小一些，更小的鞘层区域也就意味着更低的屏栅通过率。

2.2 加速栅电流分析

135 离子推力器工作过程中，部分离子在电场作用力驱动及 CEX 碰撞作用下，会直接撞击在加速栅表面，产生加速栅电流。加速栅极电流越大意味着离子对加速栅的撞击越大，栅极侵蚀越严重，寿命越短。

统计加速栅上游区域和加速栅孔内撞击到加速栅表面的离子电流 J_a ，上游束电流为 J ，定义加速栅电流比 $\eta_a=J_a/J$ 。

140 如图 5 所示为普通结构栅极系统和阶梯状结构栅极系统情况下， η_a 随单孔束流 J_b 的变化。

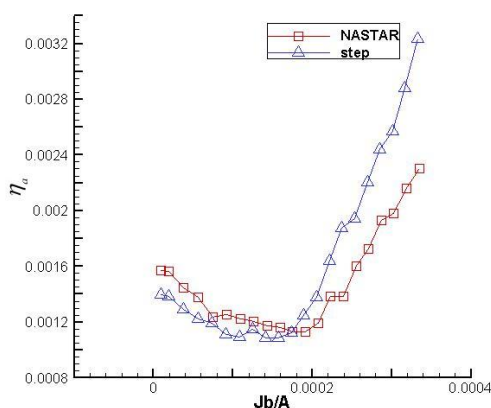


图 6 栅电流比 η_a 随单孔束流 J_b 的变化

Fig.6 The current rate of accelerating grid with the beam current

145 由图 6 可见，阶梯状结构加速栅极电流比曲线的平直段更短，意味着其工作电流区间更

小，会减小推力器的工作模式数。另一方面，平直段的阶梯状结构加速栅电流比相对于普通栅极结构更低，即阶梯状结构对于减小加速栅电流（由离子撞击加速栅形成）有一定的作用，但并不是十分明显。

2.3 发散角损失

150 发散角损失 ε_{div} 是离子推力器的推力损失的重要组成部分，加速栅极结构的改变会对推力发散角损失造成一定的影响。图 7 为普通结构栅极和阶梯状结构栅极系统的发散角损失随单孔束流 J_b 的变化。

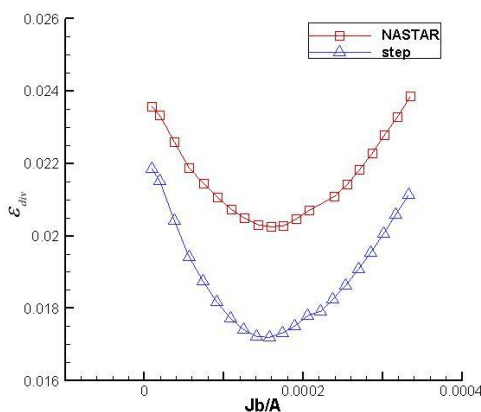


图 7 发散角损失随束电流 J_b 的变化

Fig.7 The divergence loss with the beam current

155 由图 7 可见，阶梯状结构栅极系统和普通结构栅极系统的发散角损失均随着 J 的增大呈现出先减小后增大的趋势。这是因为阶梯状结构加速栅未明显改变系统的聚焦过程，仍遵循普通结构栅极系统的“欠聚焦”、“聚焦”到“过聚焦”的演变过程。

160 此外，由图 7 可见，阶梯状结构栅极系统的发散角损失明显小于普通结构栅极系统。造成这种现象的原因是阶梯状加速栅结构设计使得下游区域的径向电场强度变弱，离子速度沿径向偏转减弱。图 8、图 9 分别为普通结构栅极和阶梯状结构栅极系统在 $J_b=0.16\text{mA}$ 时的径向电场分布和离子数密度分布。

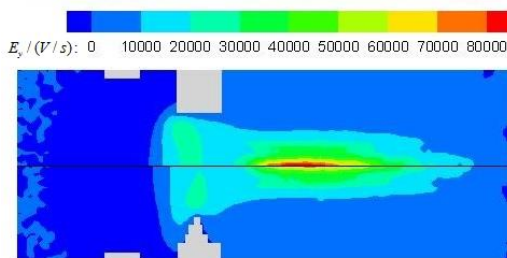


图 8 径向电场分布

Fig.8 The radial electric field distribution

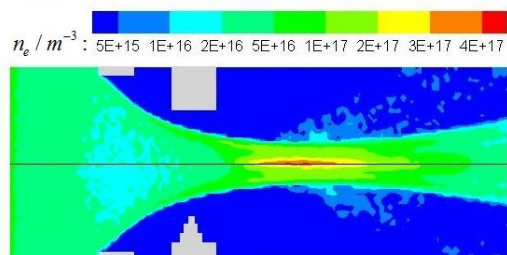


图 9 离子数密度分布

Fig.9 The ion density distribution

由图 8 可见, 阶梯状结构栅极系统中, 加速栅极下游的径向电场比传统栅极稍小, 故其对离子束流的非轴向加速也更少, 离子的发散角损失更小。同样, 图 9 的离子束流分布也显示了, 相比于传统栅极结构, 阶梯状结构栅极系统内脱离主束流区域的离子更少些。

3 结论

采用 3D-PIC 方法模拟了离子推力器阶梯状结构栅极系统内等离子体运输过程, 分析了阶梯状结构加速栅的引入对栅极工作特性的影响, 获得结论如下:

(1) 阶梯状结构栅极系统由于栅极结构的变化, 会使得屏栅上游鞘层区域减小, 进而导致离子通过率略有下降;

(2) 相对于传统结构栅极系统, 阶梯状栅极结构对于减小加速栅电流有一定作用, 即离子对加速栅的撞击导致的腐蚀效应变缓, 但另一方面, 又会使得栅极系统的工作电流区间变小;

(3) 阶梯状加速栅极结构可有效降低下游径向电场强度, 进而减小束流的发散角损失。

[参考文献] (References)

- [1] Goebel D M, Katz I. Fundamentals of electric propulsion: ion and hall thrusters[M]. New Jersey:John Wiley& Sons Inc, 2008.
- [2] Dunning J D, Ben son S, Oleson S. NASA's electric propulsion program[C]. 27th International Electric Propulsion Conference, Cleveland, USA: [s.n.],2001.
- [3] 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.
- [4] Wang J, Polk J, Brophy J. Three-dimensional particle simulations of ion-optics plasma flow and grid erosion[J]. Journal of propulsion and power,2003,19(6):1192-1199.
- [5] 陈茂林, 毛根旺, 夏广庆, 等. 电子回旋共振离子推力器栅极光学系统的 PIC/MCC 模拟[J]. 推进技术, 2012, 33(1): 150-154.
- [6] Peng X, Ruyten W, Friedly V, et al. Particle simulation of ion optics and grid erosion for two-grid and three-grid systems[J]. Review of Scientific Instruments,1994,65(5): 1770-1773.
- [7] Birdsall C K. Particle-in-cell charged-particle simulations, plus Monte Carlo collision with neutral atoms, PIC-MCC[J]. IEEE transact ion on plasma science,1991,19(2):65-85.
- [8] 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.

- [9] 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.
- [10] 钟凌伟, 刘宇, 任军学, 仇钊. 离子发动机栅极系统中束流离子的三维模拟[J]. 航空动力学报, 2010, 25(9): 2125-2131.
- 200 [11] CHU Yuchuan, CAO Yong, HE Xiaoming, LUO Min. Asymptotic Boundary Conditions with Immersed Finite Elements for Interface Magnetostatic/Electrostatic Field Problems with Open Boundary[J]. Computer Physics Communications,2011, 182(11):2331-2338.
- [12] CAO Yong,, HE Xiaoming, LU Tao. An algorithm using the finite volume element method and its splitting extrapolation[J], Journal of Computational and Applied Mathematics, 2011, 235(13): 3734-3742.
- 205 [13] 王二蒙, 楚豫川, 曹勇, 李娟. 基于 IFE-PIC 和 MCC 方法的离子推进器加速栅极孔壁腐蚀机理仿真[J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1763-1771.
- [14] 贾艳辉, 李忠明, 张天平, 李娟. 等离子体密度对栅极系统影响分析[J]. 中国空间科学技术, 2012, 32(3): 72-77.
- 210 [15] Wriz R and Katz I. XIPS ion thruster grid erosion predictions for Deep Space missions[C]. 30th International Electric Propulsion Conference, Florence, Italy: [s.n.], 2007
- [16] Doerner R, White D and Goebel D M. Sputtering yield measurements during low energy Xenon plasma bombardment[J]. Journal of applied physics,2003,93(9):5816-5823.
- [17] 陈茂林,夏广庆, 杨正岩, 张斌, 徐宗琦, 毛根旺. 离子推力器三栅极系统的 3 维 PIC 仿真[J]. 高压电技术, 2014,40(10): 3012-3017.
- 215 [18] Farnell C C, Williams J D, and Wilbur P J. NEXT ion optics simulation via ffx[C]. 39th AIAA Joint Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, Alabama: [s.n.], 2003.
- [19] 段萍, 周新维, 沈鸿娟, 覃海娟, 曹安宁, 殷燕. 霍尔推进器等离子体鞘层特性的 Particle-in-Cell 模拟[J]. 高电压技术, 2013, 39(7): 1557-1562.
- 220 [20] 孙安邦. 离子推力器等离子体流动规律研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
- [21] Miller J S, Pullins S H, Levandier D J, Chiu Y, and Dressler R A. Xenon Charge Exchange Cross Sections for Electrostatic Thruster Models [J]. Journal of Applied Physics,2002,91(3):984-991.
- [22] Sudhakar M, James A. M. Particle-Based Plasma Simulations for an Ion Engine Discharge Chamber [J]. Journal of Propulsion and Power,2010,26(4):673-688.
- 225