

LIPS-200 离子推力器放电室 原初电子动力学行为的数值模拟研究*

陈娟娟¹, 张天平¹, 刘明正¹, 贾艳辉¹, 孙安邦²

(1. 兰州空间技术物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. Centrum Wiskunde & Informatica, 1090 GB Amsterdam, Netherlands)

摘 要: 为了得到试验测量不到的气体放电过程中电磁场作用下单个原初电子的动力学行为, 建立了 LIPS-200 离子推力器放电室二维仿真模型, 应用网格粒子法 (PIC) 和蒙特卡洛碰撞 (MCC) 模拟法对其进行了研究。模拟得到在额定工况下原初电子和中性原子之间的碰撞概率、原初电子损耗率、电磁场分布对其运动速度及运动轨迹的影响等。结果表明磁铁表面磁感强度最大, 越靠近放电室内部磁感强度越小, 对称轴区域无磁场分布, 原初电子在电磁场作用下沿磁力线作加速螺旋运动; 运动等离子体的自洽电势大小范围仅为 0~2.0V, 几乎不会影响等离子体运动; 对应总原初电子个数为 1.2×10^6 时直接被阳极表面吸收的损耗率仅为 0.02%。

关键词: LIPS-200; 离子推力器; 放电室; 原初电子; PIC/MCC 数值模拟

中图分类号: V439.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-4055 (2015) 01-0155-06

DOI: 10.13675/j.cnki.tjjs.2015.01.023

Investigation on Dynamical Behavior of Primary Electrons in LIPS-200 Ion Thruster Discharge Chamber

CHEN Juan-juan¹, ZHANG Tian-ping¹, LIU Ming-zheng¹, JIA Yan-hui¹, SUN An-bang²

(1. Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China;

2. Centrum Wiskunde & Informatica 1090 GB Amsterdam, Netherlands)

Abstract: In order to obtain the dynamic behavior of primary electrons that cannot be measured in the ion thruster discharge chamber, a 2D axis symmetric PIC/MCC model is established by using the PIC/MCC simulation. The collisional probabilities between the electrons and neutral atoms, the loss rate of the electrons, the effects of electromagnetic field in the chamber on the velocity and the trajectory of the primary electron are analyzed. The simulation results show that the maximal magnetic field locates at the surface of the permanent magnets. The magnetic field decreases exponentially away from the wall all along the boundary. Dynamic potential induced by space charges is about 0~2.0V, which is so small that cannot affect the dynamical behavior of the primary electron. Motion of a particle along the magnetic field is not affected by this field, however, it causes the particle motion to form a helix along with a radius given by the Larmor radius. Electron loss increases exponentially with the total number of the primary electrons. While the total number of the primary electron is about 1.2×10^6 , its loss rate is only 0.02%.

Key words: LIPS-200; Ion thruster; Discharge chamber; Primary electron; PIC/MCC model

* 收稿日期: 2014-01-10; 修订日期: 2014-02-27。

基金项目: 国家自然科学基金 (9140C550405090C55)。

作者简介: 陈娟娟 (1983—), 女, 博士, 研究领域为电推进技术。E-mail: chenjjgontp@126.com

1 引 言

离子推力器因其推力可调节、高比冲、高效率、长寿命等特点,目前已经被用来执行位置保持、部分轨道转移、深空探测主推进等使命^[1-3]。放电室作为离子推力器的重要组成部分是产生等离子体的主要区域,其性能优劣直接影响离子推力器性能。空心阴极孔发射的原初电子是等离子体产生的源动力,它和中性原子之间的碰撞以及阳极表面的损耗影响着放电室性能。原初电子动力学行为对放电室性能的影响研究主要有两种方法:一是基于 Brophy^[4,5]提出的半经验理论分析模型,根据与几何参数及电参数有关的原初电子碰撞概率、损耗率等得到原初电子的动力学行为对放电室性能的影响。二是利用数值模拟手段^[6,7],通过跟踪原初电子在电磁场作用下的运动得到原初电子动力学行为对放电室性能的影响。相比经验分析模型,由于数值模型^[8-10]能更好地帮助我们全面分析放电室内的等离子体产生过程、运动轨迹及分布情况,反映试验难以测量得到的等离子体内在物理特性,因此它成为了离子推力器放电室内等离子体分布规律研究的有效补充手段,模拟结果能够为未来离子推力器放电室设计及试验研究提供重要的指导意义。区别于国外采用数值计算的方法研究大量原初电子的动力学行为,本文利用数值方法^[11,12]通过随机跟踪离子推力器放电室内气体放电过程中单个原初电子的运动,得到电磁场作用下它的运动轨迹、三个速度分量随迭代次数的变化、损耗率等等。

兰州空间技术物理研究所研制的 LIPS-200 离子推力器额定性能为推力 40mN,比冲 3000s,效率 60%。作者之前在试验测得的束流离子生产成本数据基础上进行了理论分析,得到了 LIPS-200 离子推力器额定工况下的几何参数和运行参数^[13]。本文在此基础上针对 LIPS-200 离子推力器,模拟了放电室内原初电子的动力学行为,为了清楚地呈现电磁场对原初电子动力学行为的影响以及原初电子运动对放电室性能的影响,本文利用网格粒子法(PIC)和蒙特卡洛碰撞(MCC)方法,通过跟踪空心阴极孔发射的原初电子的运动,结合放电室内电磁场分布情况,分析了 LIPS-200 离子推力器额定工况下原初电子的速度和位置变化。同时还统计分析了该原初电子和中性原子之间的碰撞概率以及原初电子损耗率(未发生任何碰撞就被吸收的原初电子与总原初电子数比例)。

2 数值模型建立

LIPS-200 离子推力器放电室具有轴对称圆柱结构,因此本文研究的问题属于柱坐标系下的二维轴对称问题,并选取其一半作为研究对象。模拟区域左边界位于放电室上游阳极内表面、右边界位于放电室下游屏栅表面,见图 1。

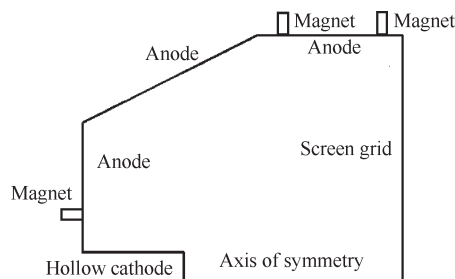


Fig. 1 Geometric structure of the LIPS-200 ion thruster discharge chamber

本文假设发射原初电子的阴极孔半径仅为一个网格^[14],能量为 2eV 的原初电子随机均匀地从阴极孔发射出来,其速度方向与对称轴的夹角小于 15° ^[14];假设带负电的原初电子运动到同样带负电的触持极表面及屏栅极表面时碰撞使得它被镜面反射回放电室内继续参与碰撞。而对于带正电的阳极前、侧及后表面来说,原初电子被碰撞后做吸收处理。本文忽略三价及以上氙离子;忽略氙离子和中性原子发生弹性碰撞时的能量损耗。

等离子体运动产生的自洽磁场相比永磁体产生的上千高斯磁场来说非常小,因此本文忽略运动等离子体产生的自洽磁场。永磁体产生的静磁场可通过求解麦克斯韦方程来得到^[14]

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial (r A_\theta)}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) = \left(\frac{\partial H_{cr}}{\partial z} - \frac{\partial H_{cz}}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中 μ 为钕钴磁铁相对磁导率, A_θ 为磁位, H_{cr} 、 H_{cz} 分别为径向、轴向矫顽力大小。该方程的边界条件为

$$\begin{aligned} A_\theta \rightarrow 0, r \rightarrow \infty; \quad A_\theta \rightarrow 0, z \rightarrow \infty \\ A_\theta \rightarrow 0, z \rightarrow -\infty; \quad \frac{\partial A_\theta}{\partial r} = 0, r = \infty \end{aligned} \quad (2)$$

二维轴对称坐标系中,泊松方程的表达式为

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial r} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} = \frac{e}{\epsilon_0} (n_i - n_e) \quad (3)$$

式中 n_i 和 n_e 分别表示离子、电子数密度。等式右边为 0 时对应的方程为拉普拉斯方程。由于计算粒子数量巨大,本文采用超粒子,其权重取为 1.0×10^{11} 。

原初电子在电磁场中的运动满足牛顿第二定律。

$$m \frac{dv}{dt} = e(E + v \times B) \quad (4)$$

$$\frac{dx}{dt} = v$$

计算流程如图2所示。

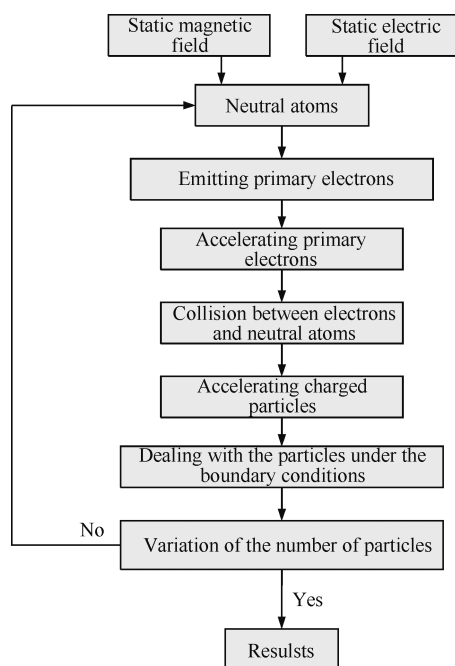


Fig. 2 Flow chart

3 计算结果及分析

本文利用试验测量得到的 LIPS-200 离子推力器束流离子生产成本、运行条件及推力器几何尺寸确定了本文所选模型的边界条件及参数,该参数与文献[13]中相同。永磁体产生的静磁场分布可利用超松弛迭代法通过求解式(1)、(2)来得到。图3所示为 LIPS-200 离子推力器放电室永磁体产生的轴向磁场分布 B_z 和径向磁场分布 B_r , 单位为特斯拉。

模拟结果显示永磁铁表面的磁感强度最大,约

为 1000Gs, 越靠近放电室内部磁感强度越小。空心阴极孔处几乎不存在径向磁场, 轴向磁感强度约为 20Gs, 此时对应的拉莫尔半径约为 $2.39 \times 10^{-7} \text{m}$ 。对称轴区域的磁感强度约为 0, 因此原初电子在对称轴区域不受磁场的约束而在电场作用下做加速直线运动。

刚进入计算区域的原初电子在静电磁场作用下沿磁力线做加速螺旋运动, 静电场的求解可利用超松弛迭代法通过求解拉普拉斯方程来得到。随着进入计算区域的原初电子数增多、粒子间碰撞频率越来越大, 若要考虑所有粒子间碰撞, 且利用 PIC 仿真手段跟踪每个带电粒子的运动, 这对计算机的性能及运算速度提出了很高的要求, 一般的计算机难以实现。因此本文采用平均自由程方法选取恰当的粒子碰撞类型, 只考虑原初电子和中性原子发生弹性、激发、离化碰撞; 氙离子和中性原子发生弹性、交换电荷碰撞。利用 MCC 模拟手段处理粒子间碰撞。计算区域内的带电粒子将重复进行以下过程: 通过面积权重法将带电粒子所带电量权重到每个网格节点, 得到网格节点上的电荷密度; 再根据电荷密度和边界条件利用超松弛迭代法通过求解式(3)可得到计算域内电势分布; 采用线性插值法得到带电粒子所在位置处的电场、磁场大小; 然后用牛顿第二定律对带电粒子进行加速; 最后对于达到模拟区域边界的粒子, 按照其边界条件进行处理。图4所示为稳态下静电势 ϕ_s 、自洽电势 ϕ_d 分布。图示所示值为放电室内的电势大小, 单位为 V。

模拟结果显示相比静电势来说运动的等离子体产生的自洽电势非常小, 其大小仅为 0~2.0V, 符合实验结果^[15]。等离子体运动产生的自洽电场几乎不会影响粒子运动。这说明对静电场和自洽电场分开求解的假设是合理的。图5所示为稳态下轴向、径向电场分布, 单位为 V/m。

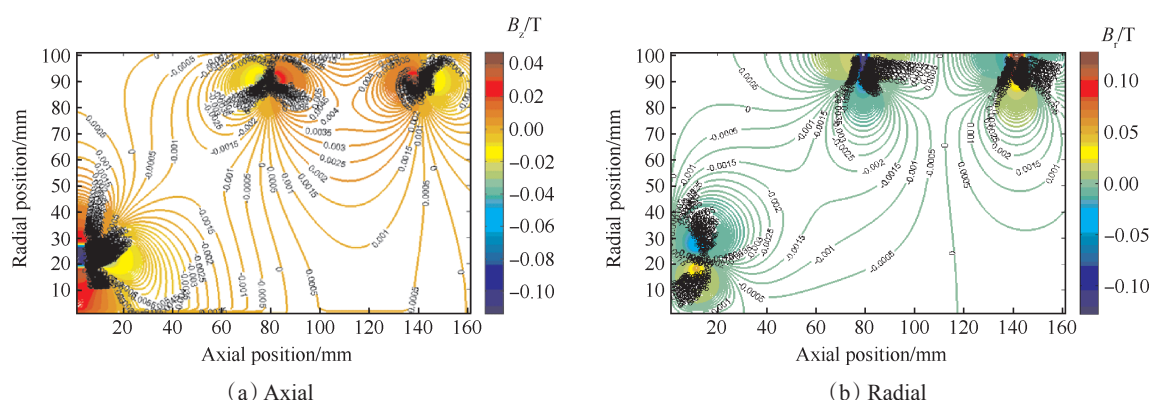


Fig. 3 Magnetic flux density contours for the LIPS-200 ion thruster discharge chamber

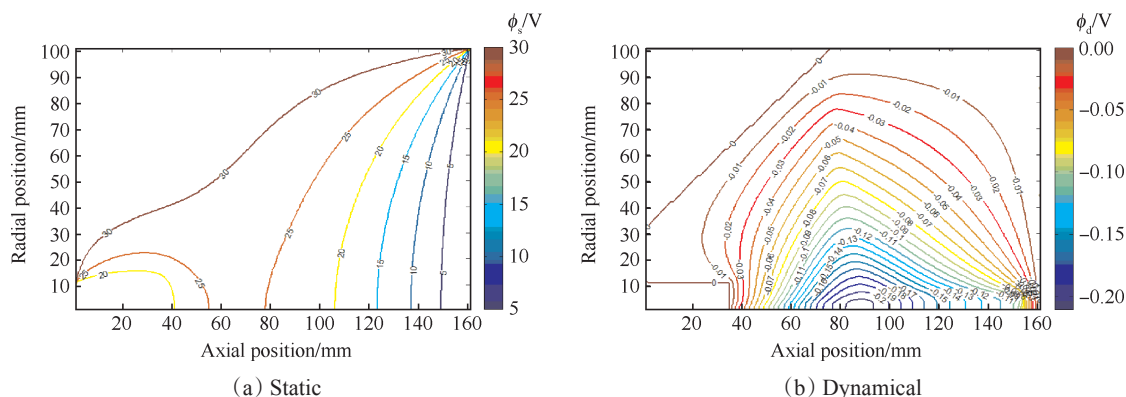


Fig. 4 Electric potential contours in volts for the LIPS-200 ion thruster discharge chamber

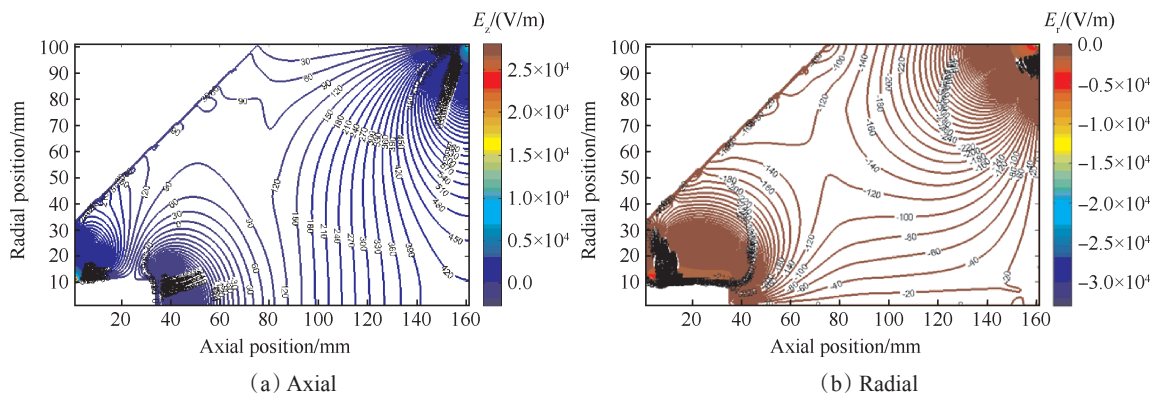


Fig. 5 Electric field contours for the LIPS-200 ion thruster discharge chamber

模拟结果显示由于阴极和阳极、阳极和屏栅极之间存在着较大电势差,因此在它们的交界处电场强度非常大。以轴向电场为例,图5所示空心阴极孔处的轴向电场强度最大,约为 $-3 \times 10^4 \text{ V/m}$,沿对称轴正方向电场强度大小逐渐减小、方向相反,电子在此电场作用下做加速运动;当轴向位置约为70mm时电场强度为0,此时原初电子运动速度达到最大约为 $2.7 \times 10^6 \text{ m/s}$,见图6。随后随电场强度发生方向反转,沿对称轴正向大小增大,原初电子开始做减速运动,到达屏栅表面附近的原初电子减速到零并朝相反方向做加速运动。径向方向和方位角方向的速度变化规律同轴向分析类似。图6所示为原初电子轴向速度随轴向位置的变化关系。

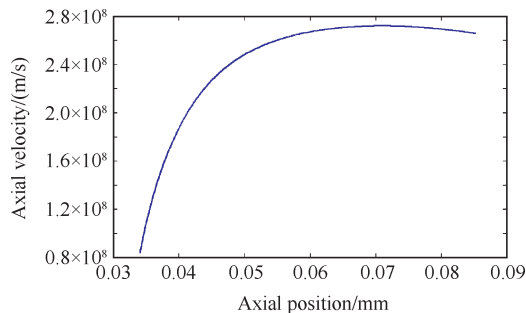


Fig. 6 Change of the axial velocity for a primary electron with its position

图7所示为原初电子在轴向、径向、方位角方向的速度大小以及速率随迭代次数的变化曲线。

从图7速率图可以看出,若原初电子和中性原子之间发生电离或激发碰撞,则其速度将会降低,这与真实情况相符。同时还可以从图7看出,当粒子没有发生任何碰撞时,原初电子的速度经过一段时间会进入一个稳定状态,其各方向的速度呈现规律变化;而一旦原初电子与中性原子发生碰撞,其速度保持的状态将被打破,然后经过一段时间,又会进入下一个稳定状态。

图8所示为程序迭代6000步时两个不同原初电子的运动轨迹。

模拟结果显示原初电子在电磁场作用下沿磁力线作螺旋运动,其运动半径与磁感强度大小有关。放电室内的磁场主要用来约束原初电子运动,使它的平均自由程增大。电场主要用来加速原初电子。

空心阴极孔发射到放电室内的原初电子大部分在电磁场作用下沿磁力线做加速螺旋运动,并和其中的中性原子发生碰撞,另外还有少量原初电子在没有参与任何碰撞的前提下直接被阳极表面吸收,使得原初电子损耗率提高。图9所示为未和中性原子发生碰撞就直接被阳极吸收的原初电子个数随总

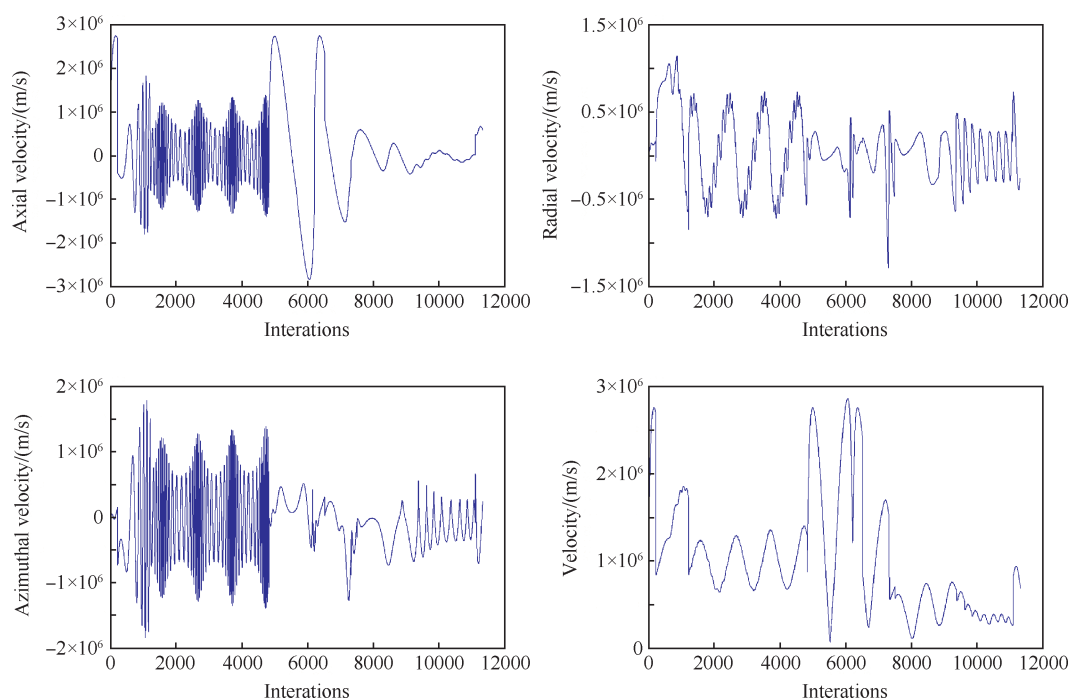


Fig. 7 Change of the velocity for a primary electron with the iterations

原初电子个数变化的曲线。

模拟结果显示随着进入计算区域的原初电子个数增多,在没和中性原子发生任何碰撞之前就被阳极表面吸收的原初电子个数呈指数增长。当总原初电子个数为 1.2×10^6 时,未和中性原子发生碰撞就被阳极吸收的原初电子损耗率仅为 0.02%。

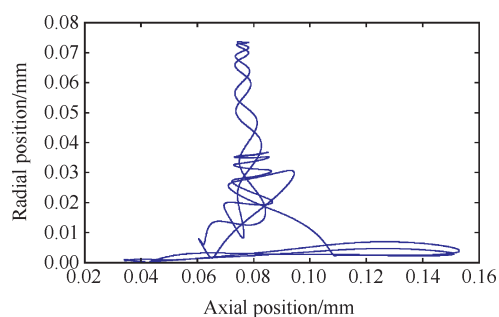


Fig. 8 Trajectory of the two primary electrons

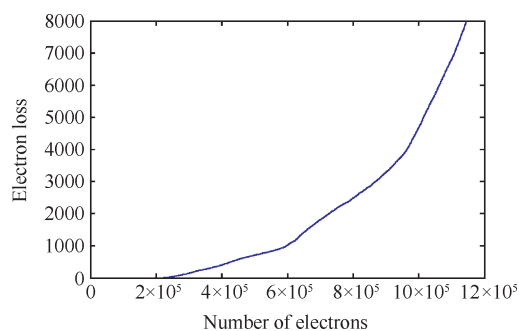


Fig. 9 Number of primary electrons being absorbed by anode

4 结 论

本文建立了二维轴对称 PIC/MCC 放电室模型用于模拟 LIPS-200 离子推力器放电室气体放电过程中原初电子的动力学行为。初步得到了以下结论:

(1) 磁体表面磁感强度最强,空心阴极附近磁感强度较小,对称轴区域磁感强度约为 0;运动等离子体的自洽电势大小范围仅为 0~2.0V,几乎不会影响等离子体运动;

(2) 原初电子在电磁场作用下沿磁力线做加速螺旋运动。当粒子没有发生任何碰撞时,原初电子的速度经过一段时间后会进入一个稳定状态,其各方向的速度呈现规律变化;而一旦原初电子与中性原子发生碰撞,其速度保持的状态将被打破,再经过一段时间后,原初电子又会进入下一个稳定状态。

(3) 当总原初电子个数为 1.2×10^6 时,未和中性原子发生碰撞就被阳极吸收的原初电子损耗率仅为 0.02%。

参考文献:

- [1] 张天平. 国外离子或霍尔电推进技术最新进展[J]. 真空与低温, 2006, 12(4): 187~1932.
- [2] 毛根旺, 韩先伟, 杨 涓, 等. 电推进研究的技术状态和发展前景[J]. 推进技术, 2000, 21(5): 1~5. (MAO Gen-wang, HAN Xian-wei, YANG Juan, et al. Research State of Electric Propulsion and Its Develop-

- ment Prospect [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(5): 1-5.)
- [3] 吴汉基, 蒋远大, 张志远. 电推进技术的应用与发展趋势[J]. 推进技术, 2003, 24(5): 385-392. (WU Han-ji, JIANG Yuan-da, ZHANG Zhi-yuan. Application and Development Trend of Electric Propulsion Technology[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2003, 24(5): 385-392.)
- [4] Brophy J R. Ion Thruster Performance Model [R]. NASA CR-174810, 1984.
- [5] GOEBEL D M, WIRZ R E, KATZ I. Analytical Ion Thruster Discharge Performance Model[R]. AIAA 2006-4486.
- [6] Arakawa Y, Yamada T. Monte Carlo Simulation of Primary Electron Motions in Cusped Discharge Chambers [R]. AIAA 90-2654.
- [7] Stueber J. Discharge Chamber Primary Electron Modeling Activities in Thress- Dimension [R]. AIAA 2004-4105.
- [8] Sudhakar Mahalingam, James A Menart. Primary Electron Modeling in the Discharge Chamber of an Ion Engine[R]. AIAA 2002-4262.
- [9] Aimee A Hubble, John E Foster. Primary Electron Transport and Losses in a Ring-Cusp Discharge Chamber[R]. IEPC-2009-156.
- [10] Stueber T J. Discharge Chamber Primary Electron Modeling Activities in 3-Dimension[R]. AIAA 2004-4105.
- [11] 孙安邦, 毛根旺, 夏广庆, 等. 离子推力器放电腔内等离子体流动规律的全离子模型[J]. 推进技术, 2012, 24(10): 2469-2473. (SUN An-bang, MAO Gen-wang, XIA Guang-qing, et al. Full Particles Model of Plasma Flow for Ion Thruster Discharge Chamber [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2012, 24(10): 2469-2473.)
- [12] Miharuru H, Yoshihiro A. Plasma Particle Simulation in Cusped Ion Thrusters[R]. IEPC-93-242.
- [13] 陈娟娟, 张天平, 贾艳辉, 等. 20cm 氙离子推力器放电室性能优化[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(10): 2469-2473.
- [14] Mahalingam S. Particle Based Plasma Simulation for an Ion Engine Discharge Chamber [D]. Dayton: Wright State University, 2007.
- [15] Herman D A. The Use of Electrostatic Probes to Characterize the Discharge Plasma Structure and Identify Discharge Cathode Erosion Mechanisms in Ring-Cusp Ion Thrusters[D]. Michigan: University of Michigan, 2005.

(编辑:梅 瑛)