

霍尔推进器磁屏蔽对磁场的优化效应研究^{*}

王 健, 汪友梅, 刘忠茂

(杭州电子科技大学 理学院, 浙江 杭州 310018)

摘 要: 为研究磁屏蔽对霍尔推进器磁场位形分布的影响, 以轴对称环形霍尔推进器为研究对象, 采用FEMM软件对各种磁屏蔽情况下的磁场分布进行仿真; 结合流体模型, 利用四阶龙格库塔方法对放电通道内各粒子的输运性质进行研究。结果表明: 内外磁屏蔽材料高度变化时磁场位形存在最优分布; 电子温度在放电通道出口附近达到最大值, 约64eV。离子化频率和电子轴向有效散射频率峰值也出现在通道出口附近。

关键词: 霍尔推进器; 磁屏蔽; 电子温度; 磁场优化

中图分类号: O539 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2020) 03-0715-06

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 190025

Study on Optimization of Magnetic Field in Magnetic Shielding of Hall Thruster

WANG Jian, WANG You-mei, LIU Zhong-mao

(School of Science, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In order to study the effects of magnetic shielding on the magnetic field configuration distribution of Hall thruster, this paper takes an axisymmetric annular Hall thruster as an example to study the magnetic field distribution under various magnetic shielding conditions by FEMM. The fourth-order Runge-Kutta method was used to study the transport properties of particles in the discharge channel. The results show that the optimum distribution of magnetic field configuration exists when the heights of inner and outer magnetic shielding materials change, and the maximum electron temperature is about 64eV near the exit plane of the discharge channel. The peak values of ionization frequency and electron axial effective scattering frequency also appear near the channel exit.

Key words: Hall thruster; Magnetic shielding; Electronic temperature; Magnetic field optimization

1 引 言

霍尔推进器是一种电磁式加速推进装置, 通过电离中性气体, 喷射高速离子形成反向推力^[1-3]。与化学推进器相比, 霍尔推进器具有高比冲、长寿命、

高有效载荷率等特点, 已被各国广泛应用于航天领域^[4]。目前霍尔推进器是技术最成熟、应用最广泛的电推进技术, 主要应用在低、高轨卫星和深空探测等领域, 其主要任务是位置保持、姿态控制、倾角修正和调整定位等^[5]。霍尔推进器放电过程在两个绝缘

^{*} 收稿日期: 2019-01-07; 修订日期: 2019-04-23。

基金项目: 国家自然科学基金 (11705041); 北京控制工程研究所先进空间推进技术实验室和北京市高效能及绿色宇航推进工程技术研究中心开放基金。

作者简介: 王 健, 硕士生, 研究领域为等离子体。E-mail: 1298509631@qq.com

通讯作者: 汪友梅, 博士, 副教授, 研究领域为等离子体。E-mail: ymwang@hdu.edu.cn

引用格式: 王 健, 汪友梅, 刘忠茂. 霍尔推进器磁屏蔽对磁场的优化效应研究[J]. 推进技术, 2020, 41(3): 715-720.
(WANG Jian, WANG You-mei, LIU Zhong-mao. Study on Optimization of Magnetic Field in Magnetic Shielding of Hall Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(3): 715-720.)

套筒之间的狭窄通道中进行,通道两端施加了约几百伏的放电电压。通道中电子在径向磁场和轴向电场的作用下沿周向作霍尔漂移运动,约束电子横越磁场的输运^[6-8],而离子在轴向电场的作用下加速喷出从而产生推力^[9]。

霍尔推进器中磁场通过洛伦兹力直接作用于通道内带电粒子,影响工质电离及推进器在轨寿命等性能。霍尔推进器的磁屏蔽技术能够最大程度地减小粒子与壁面的相互作用,降低通道腐蚀速率,提高推进器在轨运行寿命^[10]。2010年洛克达因公司推出BPT-4000型霍尔推进器后,美国喷气推进实验室(JPL)在此基础上首次提出了磁屏蔽设计的物理概念。近年来科学家又针对高比冲、高功率、低功率及壁面材料等关键性磁屏蔽技术问题展开了深入研究^[11-12],实现了磁屏蔽霍尔推进器寿命测试运行10000h通道壁面零销蚀,与传统霍尔推进器相比壁面腐蚀降低了约1个数量级,壁面腐蚀速率不超过10~20 $\mu\text{m/h}$ 。这在提高霍尔推进器寿命的发展中迈出了重要一步,使磁屏蔽技术成为降低壁面腐蚀、提高推进器寿命的一种有效手段^[10,13-14]。不仅如此,磁场的分布还对霍尔推进器的一些主要性能产生重要影响^[15-16]。好的磁场位形分布可以增加对电子的捕获率,从而增加电子与中性气体分子的碰撞频率,最终可以提高推进器的推力和效率等。磁场的分布也将会对放电通道内各粒子输运性质产生重要影响。因此在霍尔推进器中,磁场的设计和优化非常重要。

本文采用更改推进器磁场屏蔽结构的方法,对霍尔推进器磁场位形进行设计优化,研究不同磁场位形对推进器通道电子温度、离子化频率及电子轴向有效散射频率等参数的影响。

2 理论模型

霍尔推进器放电通道内磁场的分布,不仅会影响电子被捕获的效率,还会影响其他物理量的分布,如电子密度、电子温度等。为了更加详细地了解优化后磁场条件下,放电通道内各粒子的输运特性,本文利用流体模型进行了相关的模拟计算。放电通道中等离子体参数的计算考虑了霍尔推进器通道中静电、热和动力学效应之间的复杂相互作用。利用推进器所对应的边界条件,数值求解了相应的动量和能量守恒方程。放电中的电子和离子是由电子-中性碰撞电离产生的。因此,通道中三种粒子满足连续性方程。通道内存在三种粒子:电子(e)、离子(i)和中性粒子(n),其连续性方程、运动方程和能量方

程的具体表达式如下^[17]

$$\frac{d}{dx}(A\rho_e v_i) = \frac{d}{dx}(A\rho_e v_e) = -\frac{d}{dx}(A\rho_n v_n) = A\rho_e v_i \quad (1)$$

$$v_n = \text{const} \quad (2)$$

$$m_i v_i \frac{dv_i}{dx} = -e \frac{d\phi}{dx} - \nu_i m_i (v_i - v_n) \quad (3)$$

$$0 = -e\rho_e \frac{d\phi}{dx} - \frac{d}{dx}(\rho_e T_e) - \nu_d m_e \rho_e v_e \quad (4)$$

$$v_e \frac{d}{dx}\left(\frac{3}{2}T_e\right) = -T_e \frac{dv_e}{dx} + \nu_d m_e v_e^2 - \nu_i \left(\alpha_i E_i + \frac{3}{2}T_e\right) \quad (5)$$

式中 m, ρ, v 分别为粒子质量、粒子密度和速度; ϕ 是电势; e 是电荷电量的基本单位(所有离子都被认为是单电荷); T_e 是电子温度(以能量电子伏为单位); E_i 是气体的电离能; α_i 为由于激发碰撞导致的每次实际电离的有效能量损失; ν_i, ν_d 分别是电离频率和电子轴向扩散的有效频率^[13],其表达式如下

$$\nu_i = 5 \times 10^{-20} \rho_n \sqrt{\frac{8T_e}{\pi m_e}} \left(1 + \frac{T_e E_i}{(T_e + E_i)^2}\right) \exp\left(-\frac{E_i}{T_e}\right) \quad (6)$$

$$\nu_d = \frac{\left(\frac{eB}{m_e}\right)^2}{27 \times 10^{-20} \rho_n \sqrt{\frac{8T_e}{\pi m_e}} + \frac{eB}{16m_e}} \quad (7)$$

式中的磁感应强度 B 是通过有限元软件FEMM仿真得到。FEMM软件根据磁场的安培环路定理和高斯定理来计算磁场的空间分布^[18]。在稳态情况下,磁场强度和磁感应强度分布满足下式

$$\nabla \times \mathbf{H} = \nabla \times \frac{\mathbf{B}}{\mu} = \mathbf{J} \quad (8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (9)$$

磁场强度可以表示为

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (10)$$

式中 $\mathbf{A}$ 为磁场的矢势。

联立式(8)~(10)可以得到

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}\right) = \mathbf{J} \quad (11)$$

给出线圈中的电流分布、推进器各组件材料和边界条件,FEMM软件根据式(11)就可以计算出磁场的分布。本文所采用边界条件是狄拉克边界条件,Mesh时网格节点为32726个。

3 结果讨论分析

3.1 磁屏蔽对磁场分布的影响

本文所研究的霍尔推进器结构如图1所示。黑色部分为推进器的基座,蓝色部分为氮化硼通道壁,红色部分为通电线圈,用来产生电离通道中的磁场,绿色部分为内磁屏蔽,紫色部分为外磁屏蔽。推进器中的磁场是由两个同轴的电流线圈共同产生的。磁场的空间分布可以通过改变线圈中电流大小及线圈的匝数来进行调整。中性气体从放电通道底部的阳极以一定的速率注入到通道中。阴极发射的电子,在电场力的作用下运动到通道出口附近被磁场捕获,沿着圆周方向作漂移运动,形成霍尔电流。从阳极注入中性气体分子在此位置与电子发生碰撞,从而产生电离,形成等离子体。离子在电场力的加速作用下从通道出口喷出产生推力。

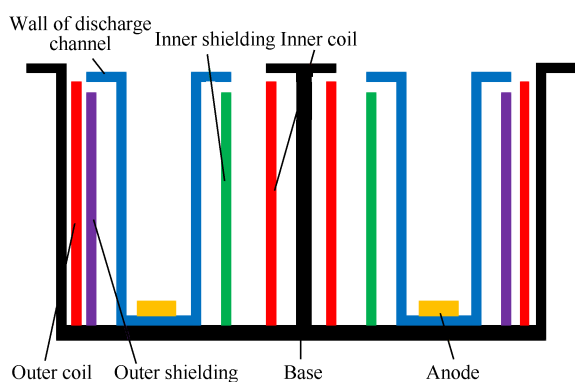


Fig. 1 Hall thruster structure

在霍尔推进器中,磁场的分布在很大程度上决定推进器的性能,使用有限元法电磁学软件(FEMM)对推进器的磁场进行分析,得到推进器各部位磁感线分布如图2所示。通过分析推进器放电通道轴线上的磁场分布,对磁场进行优化。

图2是FEMM软件模拟的推进器通道内磁通量的分布情况,黑色曲线代表磁通量线。显然,磁通在中心磁芯具有最高的密度。磁通密度在通道出口附

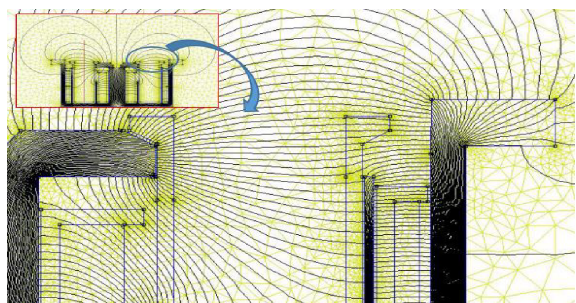
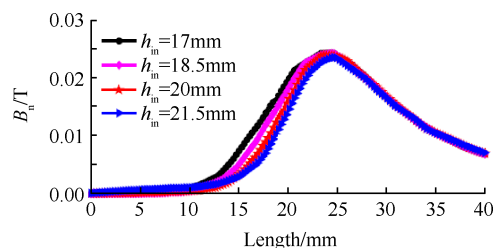


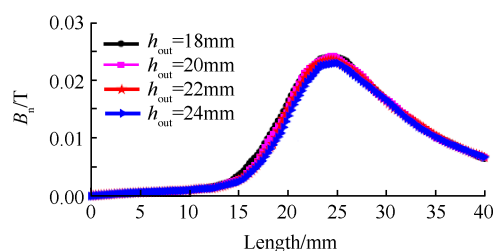
Fig. 2 Propeller magnetic line profile

近变得均匀,磁场位形在此处彼此平行,并且基本垂直于推进器的对称轴。这样分布的磁场将使从阴极逸出的电子做螺旋形轨道运动。

当推进器的结构或者材料改变时,放电通道轴线上的磁场分布情况会发生改变。内外屏蔽材料的高度变化也会改变推进器的磁场分布。图3(a)为外屏蔽材料高度 $h_{out}=23\text{mm}$ 时,内屏蔽材料高度 h_{in} 的改变对通道轴线上磁场分布所产生的影响;图3(b)为内屏蔽材料高度 $h_{in}=21.5\text{mm}$ 时,外屏蔽材料高度 h_{out} 的改变对通道轴线上磁场分布所产生的影响。



(a) $h_{out}=23\text{mm}$



(b) $h_{in}=21.5\text{mm}$

Fig. 3 Variation curve of the normal magnetic field corresponding to the change of the shield height

由图3(a)可以看出,当 h_{out} 一定,仅改变 h_{in} 时,推进器通道轴线处的磁场分布会发生变化。 h_{in} 越高,磁场的有效宽度就变得越窄,通道口附近磁场的最大值也变得越小。由图3(b)可以看出,当 h_{in} 一定,仅改变 h_{out} 时,推进器通道轴线磁场分布也会发生变化, h_{out} 越高,磁场的最大值就越小。当屏蔽材料高度改变时,推进器通道内轴线上磁场分布都是随着与放电通道底部(阳极)之间距离的增加而增加,在通道出口附近达到最大值,而后开始逐渐减小。由于要把电子束缚在通道口做霍尔漂移运动,因此要求通道口有较大磁场而通道靠近底部的磁场尽可能被屏蔽。所以将内外屏蔽材料高度同时改变,比较各种情况下的磁场,从而得出最优磁场分布。图4为内外屏蔽材料高度同时改变时,通道轴线上磁场分布。

通过比较图4中的各条磁场分布曲线可以发现,黑色曲线显示有效磁场分布过宽,蓝色曲线显示磁

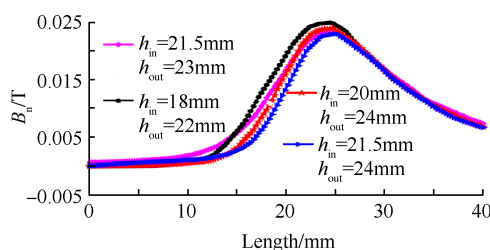


Fig. 4 Distribution curve of the normal magnetic field on the channel axis when the height of the inner and outer shielding materials changes simultaneously

场的最大值过小,紫色曲线显示通道底部的磁场过大,相比之下,红色曲线磁场分布宽度及最大值最满足要求,因此选择红色曲线对应磁场分布为霍尔推进器的优化磁场,对应的内外屏蔽层高度分别为20mm和24mm。法向磁场峰值位于约23mm左右,电子运动到此区域将会被捕获。对该磁场进行拟合可得其表达式为

$$B(x) = 0.01644e^{-\frac{(x-0.0233)^2}{0.005856}} + 0.01208e^{-\frac{(x-0.0319)^2}{0.0109}} \quad (12)$$

图5是优化后的磁场在放电通道中心线($r=20\text{mm}$)上的梯度分布。图中红色曲线表示总通量密度 B 的梯度分布,蓝色曲线表示切向磁通密度 B_t 的梯度,绿色曲线表示法向通量密度 B_n 的梯度。从图5中可以看到,总磁场和法向磁场的梯度变化有几乎相同的变化趋势,先增加然后减小。通量密度的切向部分 B_t 显示出相反的趋势。总磁场和法向磁场的梯度峰位于约18mm~23mm处。电子运动的拉莫尔半径是由所在位置的磁场分布和电子速度决定的,因此磁通密度在确定电子拉莫尔半径时起关键作用。图6显示了电子的拉莫尔半径随到阳极距离的变化关系。在放电通道出口附近,拉莫尔半径达到最小值,约为1mm,远小于放电通道的宽度。因此,电子在通道出口附近被有效地磁化,产生霍尔漂移运动。但是,离子的拉莫尔半径约为200cm,比通道宽度大得多,不能被磁场所捕获。在阳极和阴极之间的电压作用下,离子沿着 Z 方向的加速度不会显著地受到磁场干扰。

3.2 放电通道内性质研究

将式(12)代入式(7),然后联立方程(1)~(7),即可求得通道内各参数的分布情况。

电子温度沿放电通道轴线分布如图7所示。图7中的横坐标为离通道底部的距离。从图7可以看出,电子在通道底部温度很小,接近通道口附近电子的温度开始上升,在通道出口处附近电子的温度达到最大,然后又迅速降低。在出口位置,电子被磁场捕

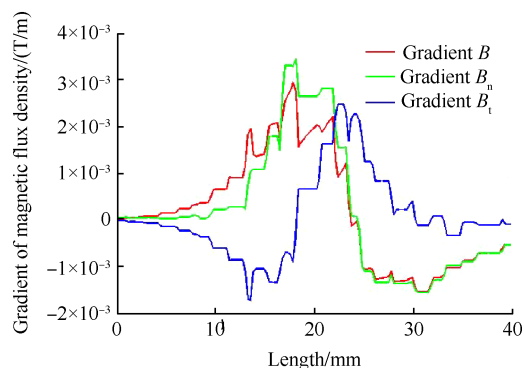


Fig. 5 Gradients of the magnetic flux density

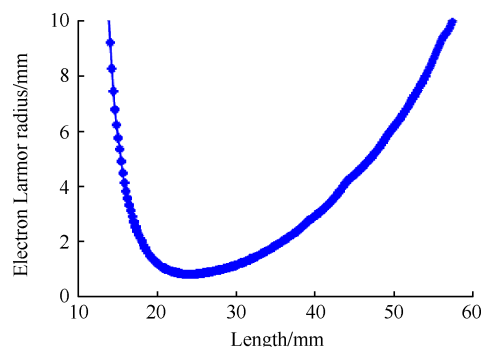


Fig. 6 Electron Larmor radius vs distance from anode

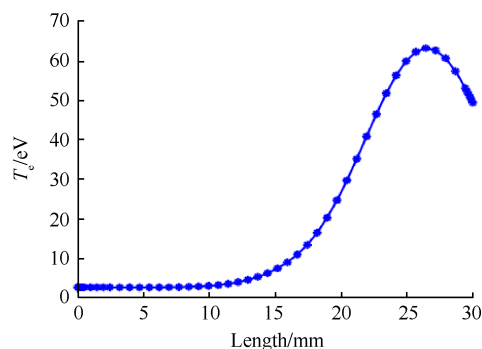


Fig.7 Electron temperature distribution

获,在洛伦兹力作用下,电子做高速螺旋状圆周运动,因此在此位置电子的温度最高,在64eV左右。从图7中可以看出,温度峰值坐标比磁场的峰值坐标要靠外一些。从阴极发射的电子在电场的作用下向通道口方向做加速运动,在通道口外,形成了温度分布的峰值,电子如果继续向通道里运动,很大一部分电子会被磁场捕获,做霍尔漂移运动,形成霍尔电子。电子的空间密度分布很大。未被捕获的电子继续向通道内的方向运动,由于在出口附近区域电子、各价离子的密度都很大,因此彼此之间的碰撞变得频繁,电子能量损失较大。此时电子在电场中获得的能量不足以弥补由碰撞引起的能量损失,电子的温度开始下降。

通道内电子运动的剧烈程度对中性气体的电离产生重要的影响。在通道出口附近,电子的温度越高,该区域电子运动越剧烈,从阳极过来的中性气体分子与电子碰撞的概率增加,从而增加了离子化频率。放电通道内的离子化频率分布如图8所示。

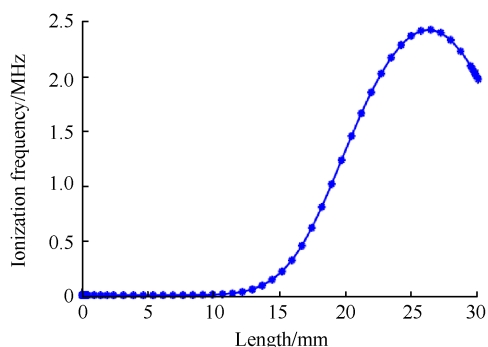


Fig. 8 Ionization frequency along the discharged channel axis

在远离出口的靠近阳极的区域,电子的温度很低,电子运动相对缓慢,这个区域电子密度很小。即使阳极出来的中性气体分子与此区域的电子发生碰撞,也难以使气体分子电离。其离子化频率出现的峰值与电子温度出现的峰值基本一样,约在离阳极26mm~27mm左右。但是电子沿轴向散射的有效频率却不一样,峰值出现在23mm~24mm附近,几乎与法向磁场分布的峰值出现在同一位置,如图9所示。

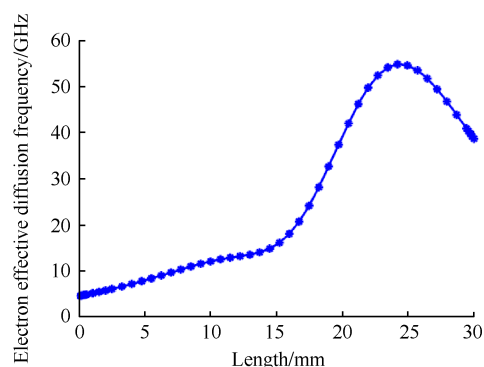


Fig. 9 Effective diffusion frequency for electron along the discharged channel axis

4 结 论

本文从磁屏蔽的角度出发,分析磁屏蔽对磁场位形分布的影响,得到优化分布磁场;利用四阶龙格库塔方法对流体模型进行求解,研究放电通道中各粒子的输运性质。得到主要结论如下:

(1)内外磁屏蔽的高度变化对磁场位形分布有

着重要影响,内屏蔽高度20mm,外屏蔽高度24mm时,通道内磁场位形分布最佳。

(2)通道内电子做霍尔漂移的拉莫尔半径约为1mm。

(3)电子温度峰值出现在通道口附近,约64eV,与离子化频率峰值分布的位置较为接近;而电子轴向有效散射频率峰值位置更靠通道里面一些,与磁场峰值分布的位置比较接近。

致 谢:感谢国家自然科学基金、北京控制工程研究所先进空间推进技术实验室和北京市高效能及绿色宇航推进工程技术研究中心开放基金资助。

参考文献

- [1] Levchenko I, Xu S, Teel G, et al. Recent Progress and Perspectives of Space Electric Propulsion Systems Based on Smart Nanomaterials [J]. *Nature Communications*, 2018, 9(1).
- [2] Mazouffre S. Electric Propulsion for Satellites and Spacecraft: Established Technologies and Novel Approaches [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2016, 25(3).
- [3] Ahedo E. Plasmas for Space Propulsion [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2011, 53(12).
- [4] 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 Development Prospect [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2000, 21(5): 1-5.)
- [5] Ding Y, Sun H, Wei L, et al. A 200W Hall Thruster with Hollow Indented Anode [J]. *Acta Astronautica*, 2017, 139: 521-527.
- [6] Sydorenko D, Smolyakov A, Kaganovich I, et al. Modification of Electron Velocity Distribution in Bounded Plasmas by Secondary Electron Emission [J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2006, 34(3): 815-824.
- [7] Sydorenko D, Smolyakov A, Kaganovich I, et al. Plasma-Sheath Instability in Hall Thrusters Due to Periodic Modulation of the Energy of Secondary Electrons in Cyclotron Motion [J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(5).
- [8] 于达仁, 张凤奎, 李 鸿, 等. 霍尔推进器中振荡鞘层对电子与壁面碰撞频率的影响研究[J]. 物理学报, 2009, 58(3): 1844-1848.
- [9] 段 萍, 覃海娟, 周新维, 等. 霍尔推进器壁面材料二次电子发射及鞘层特性[J]. 物理学报, 2014, 63(8): 288-294.
- [10] 边兴宇. 霍尔推力器放电通道壁面分割及磁屏蔽效应研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2018.

- [11] Kamhawi H, Haag T, Jacobson D, et al. Performance Evaluation of the NASA-300M 20kW Hall Thruster[R]. AIAA 2011-5521.
- [12] Mikellides I G, Katz I, Hofer R R, et al. Magnetic Shielding of a Laboratory Hall Thruster. I. Theory and Validation[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(4).
- [13] 张志远, 严立, 王平阳, 等. 霍尔推力器放电室壁面溅射产额研究[J]. 推进技术, 2015, 36(3): 476-480. (ZHANG Zhi-yuan, YAN Li, WANG Ping-yang, et al. Study on Sputtering Yield of Hall Thruster Discharge Chamber Wall[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(3): 476-480.)
- [14] Yu D R, Zhang F K, Liu H, et al. Effect of Electron Temperature on Dynamic Characteristics of Two-Dimensional Sheath in Hall Thrusters[J]. *Physics of Plasma*, 2008, 15(10).
- [15] 丁永杰, 扈延林, 颜世林, 等. 聚焦磁场及发散磁场对霍尔推力器壁面侵蚀的影响研究[J]. 推进技术, 2015, 36(5): 795-800. (DIGN Yong-jie, HU Yan-lin, YAN Shi-lin, et al. Effects of Focusing and Diverging Magnetic Field Topology on Hall Thruster Channel Wall Erosion [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(5): 795-800.)
- [16] Wang Y M, Xu S, Levchenko I, et al. Approach to Simplified Numerical Optimization of Low-Power Hall Thrusters[J]. *Vacuum*, 2018, 152: 173-183.
- [17] Ahedo E, Martínez-Sánchez M, Martínez-Sánchez M. One-Dimensional Model of the Plasma Flow in a Hall Thruster[J]. *Physics of Plasmas*, 2001, 8(6): 3058-3068.
- [18] Baltzis K B. The FEMM Package: A Simple, Fast, and Accurate Open Source Electromagnetic Tool in Science and Engineering[J]. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 2008, 1: 83-89.

(编辑:张 贺)