

离子推力器栅极透过率径向分布特性研究

龙建飞 张天平 李娟 贾艳辉

Optical transparency radial distribution of ion thruster

Long Jian-Fei Zhang Tian-Ping Li Juan Jia Yan-Hui

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 66, 162901 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.162901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.162901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

DNA超分子水凝胶的粗粒化建模与模拟

Modelling and simulation of DNA hydrogel with a coarse-grained model

物理学报.2017, 66(15): 150201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.150201>

多模式离子推力器栅极系统三维粒子模拟仿真

Three-dimensional particle in cell simulation of multi-mode ion thruster optics system

物理学报.2014, 63(18): 182901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.182901>

单路脉冲功率真空装置的三维数值模拟研究

Three-dimensional numerical simulation of the single-channel pulsed-power vacuum device

物理学报.2013, 62(19): 192901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.192901>

带螺旋支撑杆的同轴磁绝缘传输线三维数值模拟的实现

The implementation of the three-dimensional numerical simulation of the coaxial magnetically insulated transmission line with helical inductor

物理学报.2012, 61(16): 162901 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.162901>

磁绝缘传输线中心汇流区电子能量沉积及温度变化的数值模拟研究

The numerical simulation of the electronic energy deposition and temperature variation in post-hole convolute of magnetically insulated transmission lines

物理学报.2012, 61(16): 162902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.162902>

离子推力器栅极透过率径向分布特性研究*

龙建飞[†] 张天平 李娟 贾艳辉

(兰州空间技术物理研究所, 真空技术与物理重点实验室, 兰州 730000)

(2017年3月18日收到; 2017年6月8日收到修改稿)

栅极系统是离子推力器的主要组件, 其透过率特性对推力器的效率和推力具有重要影响. 为了进一步优化栅极性能和有效评估离子推力器效率, 对离子推力器栅极透过率径向分布进行研究. 采用 particle-In-Cell-Monte Carlo Collision 数值仿真方法对束流引出过程进行了模拟. 分析了屏栅、加速栅以及栅极系统的透过率随栅孔引出束流离子数量的变化关系, 结合放电室出口离子密度分布, 进而分别得到屏栅透过率、加速栅透过率和栅极系统透过率的径向分布特性, 最后进行实验验证. 研究表明: 屏栅透过率径向分布具有中心对称性, 在推力器中心有最小值, 从中心沿着径向逐渐增大; 加速栅透过率径向分布与屏栅透过率变化趋势相反; 栅极系统透过率受加速栅透过率的影响很小, 其径向分布与屏栅透过率径向分布相近; 离子推力器栅极总透过率随着束流增大而缓慢减小. 研究结果可为离子推力器栅极优化提供参考.

关键词: 离子推力器, 栅极系统, 透过率, 粒子模拟

PACS: 29.27.-a, 02.70.Ns, 31.15.-p

DOI: 10.7498/aps.66.162901

1 引言

离子推力器具有高精度、高比冲等特点, 是一种先进的电推进装置^[1-3]. 国内自主研发的 20 cm 离子推力器 (LIPS-200) 已于 2012 年成功实现了空间首次飞行实验^[4], 目前该推力器仍在开展进一步的优化研究. 离子推力器性能优化研究中, 栅极透过率作为评价束流引出能力的参数而备受关注^[5]; 离子推力器长寿命优化^[6] 研究中发现, 透过率的高低直接决定了栅极的腐蚀速度, 是影响推力器寿命的关键因素之一. 因此, 开展栅极透过率研究对离子推力器的性能、寿命优化研究具有重要意义.

栅极透过率的物理含义为单位时间内经由栅极系统引出束流离子数量与从放电室引入栅极离子数量的比值^[7]. 在束流引出过程中, 部分离子将被屏栅或者加速栅截获, 因此该物理参数反映了栅极的引出性能. 研究人员针对栅极透过率开展了大量的仿真和实验研究. 1990 年, Brophy^[8] 建立了束

流引出经验模型, 根据放电室的电子温度、离子密度以及栅极间距等参数推导出栅极透过率经验公式. Arakawa 等^[9] 以及 Wirz 和 Goebel^[10] 通过对离子推力器束流进行数值仿真, 分别研究了电荷交换碰撞、栅极间距等因素对栅极透过率的影响, 并提出了栅极结构优化建议. 格林研究中心 (Glenn Research Center) 的 Haag 等^[11] 和 Anderson 等^[12] 分别针对 NSTAR 离子推力器、DS-1 离子推力器进行栅极透过率测试, 同时分析了栅极透过率对离子推力器性能的影响. 西北工业大学的陈茂林等^[13], 兰州空间技术物理研究所的李娟等^[14] 针对栅极束流引出进行了二维、三维等数值仿真, 分别研究了栅极热形变对屏栅和加速栅透过率的影响. 王蒙等^[15] 开展了离子推力器栅极透过率实验研究, 建立了栅极透过率地面测试方法.

上述研究工作在离子推力器栅极透过率数值计算和实验测试方法方面取得了丰硕的成果, 同时对放电室等离子体参数、栅极热形变等因素对栅极透过率的影响也开展了卓有成效的研究, 而关于离

* 国家自然科学基金(批准号: 61601210)、国家重大基础研究项目(批准号: 61××34)和重点实验室基金(批准号: 9140C55026150C55013)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ljf510@163.com

子推力器栅极透过率径向分布特性的研究则少有报道.

本文建立栅极束流引出数值模型, 以LIPS-200离子推力器为研究对象, 通过仿真计算分析栅极单孔透过率与引出束流离子数量的关系, 结合放电室出口离子密度分布, 进一步研究屏栅、加速栅以及栅极系统的透过率径向分布特性, 分析并讨论计算结果, 最后开展实验验证.

2 数值模型

2.1 仿真区域

图1为仿真区域示意图. 离子推力器束流引出一般采用单孔进行仿真, 考虑栅孔中心的对称性, 选取1/2栅孔作为仿真区域, 其中: z 为轴向位置, r 为径向位置, r_{sc} 为屏栅的栅孔半径, t_{sc} 为屏栅厚度, r_{ac} 为加速栅的栅孔半径, t_{ac} 为加速栅厚度, d 为栅间距, R_{max} 为计算区域高度, Z_{max} 为计算区域长度. 计算区域的左下角定义为坐标原点, 下边界为栅孔中心线, 左边界位于屏栅上游放电室内, 右边界位于加速栅下游区域.

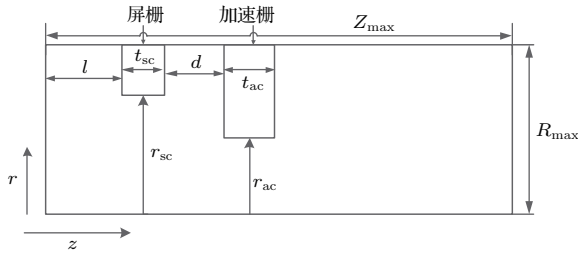


图1 计算区域示意图

Fig. 1. Schematic calculation area.

2.2 粒子模拟-蒙特卡罗模拟 (particle in cell-Monte Carlo, PIC-MCC) 模型

针对离子推力器束流引出过程, 本文采用PIC-MCC法进行数值模拟. PIC是模拟低温等离子体的一种常用数值方法^[16], 在本文模型中主要用于求解自洽电场和描述离子运动, 而MCC法可以较好地描述粒子间碰撞过程^[17], 模型中主要考虑离子与原子之间的弹性碰撞以及电荷交换碰撞. 由MCC产生的交换电荷离子将代入下一步PIC计算中, 直至模型达到收敛.

PIC模型中, 电势 Φ 由泊松方程求解:

$$\nabla^2\Phi = -\frac{e}{\epsilon_0}(n_i - n_e), \quad (1)$$

式中, e 为电子电量, ϵ_0 为真空介电常数, n_i 为离子密度, n_e 为电子密度.

进一步计算出电场 \mathbf{E} 为

$$\mathbf{E} = -\nabla\Phi. \quad (2)$$

离子运动满足牛顿洛伦兹定理, 运动方程为^[10]:

$$m\frac{d\mathbf{v}}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}),$$

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{v}, \quad (3)$$

式中, m 为离子质量, q 为离子电荷, \mathbf{v} 为离子速度, \mathbf{x} 为离子位置, \mathbf{E} 和 \mathbf{B} 分别为离子所在位置处的电场和磁场强度.

电子按照流体方法处理, 其密度分布满足Boltzmann分布. 利用电子密度与其所在位置电势之间的关系, 即Boltzmann方程可以计算得到电子密度的分布. 电子密度与所在位置电势的关系可以表示为^[13]

$$n_e = n_{e,\text{ref}} \exp\left(\frac{\Phi - \Phi_{\text{ref}}}{T_{e,\text{ref}}}\right) \quad \Phi \leq \Phi_{\text{ref}},$$

$$n_e = n_{e,\text{ref}} \left(1 + \frac{\Phi - \Phi_{\text{ref}}}{T_{e,\text{ref}}}\right) \quad \Phi > \Phi_{\text{ref}}, \quad (4)$$

式中, $n_{e,\text{ref}}$ 为参考点电子密度, Φ_{ref} 为参考点电势, $T_{e,\text{ref}}$ 为参考点电子温度. 其中计算屏栅上游电子密度时, 参考点为推力器放电室; 而计算加速栅下游电子密度时, 参考点为下游羽流中和面.

MCC模型中, 束流离子将与放电室未被电离的原子发生弹性碰撞以及电荷交换碰撞, 碰撞概率 P 在 Δt 时间内可以表示为^[18]

$$P = 1 - \exp(-n_i v_{\text{inc}} \sigma \Delta t), \quad (5)$$

式中, n_i 为离子密度, v_{inc} 为离子与原子的相对速度, σ 为碰撞截面, Δt 为时间步长, 其中碰撞截面见参考文献^[19].

2.3 初始条件

模拟中每个时间步都有一定数量的模拟粒子以特定的速度从计算区域的左边界进入计算区域, 同时在计算区域的右边界每个时间步会有一定数量的模拟离子离开计算区域. 当右边界离开的离子数与栅极吸收离子数之和等于每个时间步进入的离子数时, 认为系统束流离子引出达到平衡. 每个时间步从左边界进入到计算区域的离子数 ΔN 可

以利用 Child-Langmuir 定律确定 [20],

$$\Delta N = n_0 \left(\frac{kT_e}{m} \right)^{1/2} \pi r_{sc}^2 \exp \left(-\frac{1}{2} \right) dt, \quad (6)$$

式中, n 为栅孔位置对应放电室出口的离子密度, k 为玻尔兹曼常数, T_e 为电子温度, m 为离子质量, r_{sc} 为屏栅孔半径.

放电室离子进入计算区域的初始速度由 Bohm 准则确定. 由于在计算区域左边界选取时, 边界设置在等离子体鞘层位置处, 因此模拟离子的轴线方向初始速度可取为 Bohm 速度 [13], 则离子轴向初始速度 v_{z0} 为

$$v_{z0} = \sqrt{\frac{kT_e}{m}}. \quad (7)$$

径向方向的初始速度假设满足麦克斯韦速度分布.

进入计算区域的离子的初始位置设置在计算区域的左边界上, 也就是 $z = 0$ 的平面上, 径向方向的位置随机给定, 但要保证在圆形发射面上的均匀分布, 圆形发射面指在左边界以计算区域高度 R_{max} 为半径的圆面. 因此离子进入计算区域的初始位置可表示为

$$\begin{aligned} z_0 &= 0, \\ r_0 &= R_{max} \sqrt{ran}, \end{aligned} \quad (8)$$

式中 ran 为 0—1 之间的随机数.

2.4 边界条件

计算区域的左边界为入流边界, 右边界为出流边界, 模拟粒子由计算域左边界进入, 经过栅极间的电场加速后从右边界离开计算区域. 屏栅和加速栅为吸收边界, 当粒子撞到栅极上时就将其删除. 上边界与下边界为对称边界, 下边界是栅极孔的轴线, 由于采用二维轴对称建模, 相当于只取了栅极孔的一半区域, 因此从下边界反射回来的模拟粒子相当于栅极孔的未模拟的另一半区域中的粒子进入到了计算区域, 同样, 从上边界反射回来的模拟粒子相当于相邻的栅极孔中引出的粒子进入到了计算区域.

3 计算结果分析

以兰州空间技术物理研究所自主研发的 LIPS-200 离子推力器为研究对象, 模型计算参数如表 1 所列.

仿真计算中, 收敛条件为电场变化小于 0.1%. 当程序达到稳定时, 对束流离子参数进行统计, 包括单位时间内喷出的离子数量 (右边界)、每个离子喷出速度、屏栅截获离子数量、加速栅截获离子数量等.

表 1 LIPS-200 推力器主要参数
Table 1. Main parameters of LIPS-200 thruster.

参数	数值	参数	数值
r_{sc}/mm	0.95	V_p/V	30
r_{ac}/mm	0.55	T_i/K	500
t_{sc}/mm	0.4	T_{eo}/eV	5.00
t_{ac}/mm	0.5	T_{ed}/eV	1.5
d/mm	0.8	Nm/m^{-3}	2.66×10^{17}
V_{ac}/V	-200	R_{max}/mm	1.0
V_{sc}/V	1000		

3.1 单孔引出束流离子的数量分析

放电室出口离子密度作为束流引出的输入条件, 对束流参数计算具有重要影响. 由于放电室出口离子密度非均匀分布, 将导致不同径向位置处栅孔引出束流离子数量不同, 因此, 需要对推力器放电室出口离子密度进行估算. 文献 [21] 研究表明, 环尖场离子推力器中放电室出口 (屏栅上游) 处离子密度分布规律与束流离子密度分布规律相近, 因此, 根据 LIPS-200 离子推力器束流密度实验数据 [22] 计算出束流密度分布规律, 将该分布近似为放电室出口离子密度分布规律, 具体如图 2 所示. 从图中可以看出, 该推力器束流密度 (放电室出口离子密度) 径向分布具有较好的中心轴对称性, 离子密度在中心 ($r = 0 \text{ mm}$) 处有最大值, 从中心处沿着径向 r 逐渐减小.

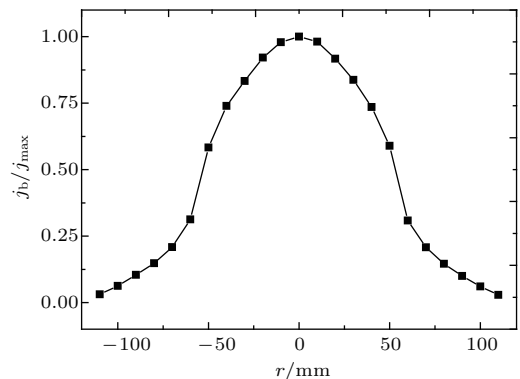


图 2 放电室出口离子密度分布

Fig. 2. Ion density distribution at the exit of the discharge chamber.

LIPS-200 离子推力器束流平直度为0.60, 束流为0.80 A, 可计算出放电室出口处最大离子密度约为 $2.66 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$ [5], 结合离子密度径向分布, 可以定量计算出不同径向位置的离子密度.

图3为典型的单孔束流引出仿真结果. 根据栅极束流引出PIC-MCC数值模型, 结合放电室出口离子密度的径向分布(图2), 可以对不同径向位置的单孔束流引出进行数值模拟. 以栅极中心 ($r = 0 \text{ mm}$) 单孔束流引出为例进行仿真, 该栅孔对应放电室出口最大离子密度约为 $2.66 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$. 图3(a)结果显示, 电势分布在计算区域主要沿着轴向 z 变化, 径向 r 变化相对很小. 计算区域左边

界等势线曲率朝向栅孔中心, 产生指向栅孔中心方向的加速电场, 从而使得放电室入射离子向栅孔中心运动, 形成束流离子聚焦; 屏栅与加速栅之间的电势降较大, 即产生大加速电场使得离子获得较高的能量; 在计算区域右边界, 电势分布趋于平稳 (0 V), 即离子已完成主要的加速过程, 朝着轴向 (z) 喷出并形成稳定的束流. 图3(b)结果显示, 离子密度沿着轴向在左边界快速减小, 而临近右边界时离子密度趋于稳定. 离子密度径向分布主要集中在栅孔中心附近, 加速栅附近离子密度几乎可以忽略. 仿真结果表明该栅孔束流引出具有较好的聚焦、加速和引出等特性.

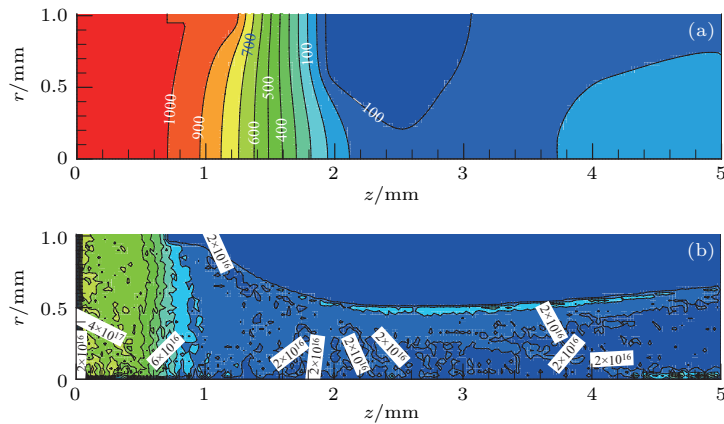


图3 (网刊彩色) 典型单孔束流引出仿真结果 (a) 电势分布; (b) 离子密度分布
Fig. 3. (color online) Typical simulation results of beam extracted in a grid: (a) Potential distribution; (b) ion density distribution.

图4为单孔引出束流离子数量与放电室出口离子密度的关系. 根据图2可以计算出LIPS-200离子推力器放电室出口离子密度范围为 $2.0 \times 10^{16} - 2.66 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, 因此, 依次统计了该

范围内多组离子密度下单孔引出束流离子数量, 进而得到单孔引出束流离子数量随放电室出口离子密度变化的规律. 从图中可以看出, 随着放电室出口离子密度从 $2.0 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$ 增大到 $2.66 \times 10^{17} \text{ m}^{-3}$, 栅孔引出的束流离子数量从 $1.0 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 近线性增长到 $1.2 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$. 分析可以得到, 放电室从计算区域左边界流入栅孔的离子主要以束流离子形式喷出, 而被栅极(屏栅和加速栅)截获离子数量相对较小.

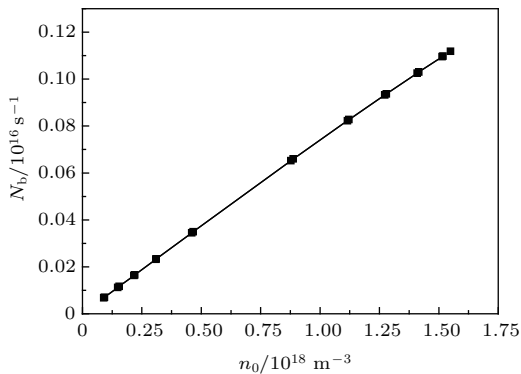


图4 单孔引出束流离子数量与放电室出口离子密度的变化
Fig. 4. Number of ion extracted in a grid various with ion density in the discharge chamber.

3.2 单孔透过率分析

由于放电室出口离子密度分布不均匀, 使得不同径向位置栅孔的输入离子数量存在差异, 进而导致各栅孔的透过率不一致. 仿真中对各单孔透过率进行计算, 分别统计单孔中的进入离子数量、截获离子数量和引出离子数量, 并将引出离子数量除以进入离子数量, 则可以求出单孔透过率.

图5为屏栅透过率与束流离子数量的变化关系. 结果显示, 随着栅孔引出离子数量从 $1.0 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 开始增大, 屏栅单孔透过率先从0.88开始缓慢下降, 在引出离子数量约为 $4.0 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 时出现快速下降, 当栅孔引出离子数量最大到 $1.2 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ 时, 屏栅单孔透过率下降到最小约为0.84. 这是因为随着进入栅孔内的离子数量增加, 屏栅上游鞘层区域将会减小 [23], 这导致了聚焦的离子数量相对减少 (更多地离子轰击屏栅上游面), 从而使得屏栅透过率下降.

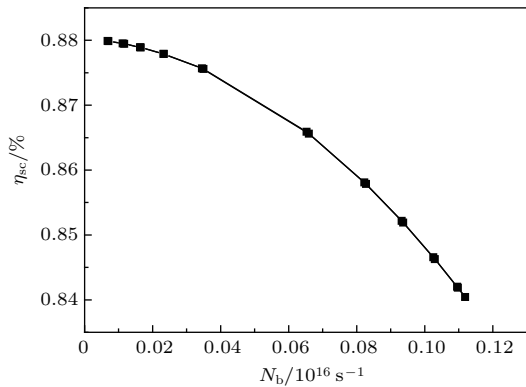


图5 屏栅透过率与引出束流离子数量变化
Fig. 5. Screen grid transmittance various with number of ion extracted.

图6为加速栅单孔透过率与引出束流离子数量的关系. 结果显示, 当引出束流离子数量较小时 (小于 $1.0 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$), 加速栅单孔透过率随着引出束流离子数量的增大而快速上升; 当引出束流离子数量在 $1.0 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} \text{—} 1.4 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 范围时, 加速栅单孔透过率变化较为缓慢, 而当引出束流离子数量大于 $1.4 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 时, 加速栅单孔透过率出现快速下降. 分析认为, 这主要是由栅极工作过程中束流聚焦特性导致, 当离子数量低于交叉阈值时, 束流将产生过聚焦效应, 使得加速栅截获离子数量增加 (透过率相应减小), 而当离子数量高于截获阈值时, 束流将产生欠聚焦效应, 也使得加速栅截获离子数量显著增加, 从而使得加速栅透过率快速下降. 仿真结果显示, 该推力器加速栅结构设计的交叉阈值对应栅孔束流离子数约为 $1.0 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, 截获阈值对应栅孔束流离子数约为 $1.4 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, 当栅孔束流离子数量在 $1.0 \times 10^{15} \text{ s}^{-1} \text{—} 1.4 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 之间时, 加速栅具有较好的透过特性.

图7为栅极系统单孔透过率与引出束流离子数量的关系. 从图中可以看出, 随着引出束流离子数量增大, 栅极系统单孔透过率先缓慢变化后快速

下降. 分析可知, 推力器栅极系统单孔引出束流离子数量在 $1.0 \times 10^{14} \text{—} 1.2 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ 范围, 对应加速栅有较好的聚焦性 (透过率超过 99.87%), 使得加速栅对栅极系统透过率影响很小. 由此可见, 栅极系统透过率主要受屏栅透过率影响.

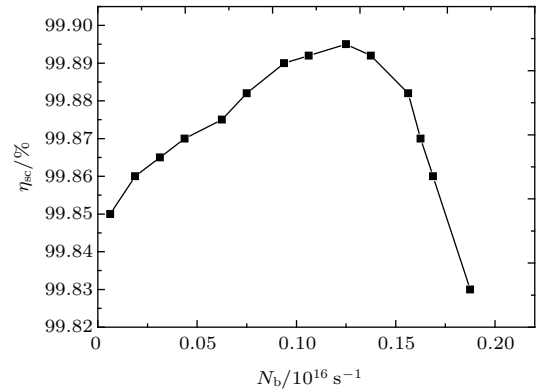


图6 加速栅透过率随引出束流离子数量的变化
Fig. 6. Accelerate grid transmittance various with number of ion extracted.

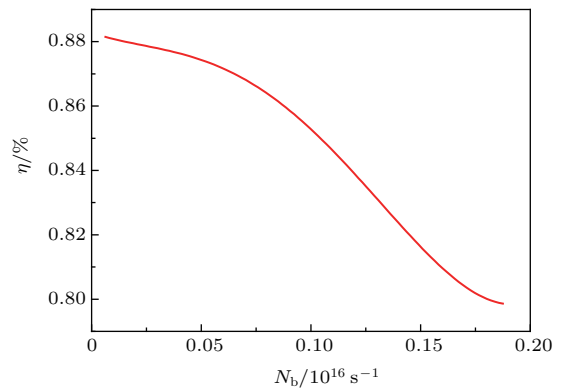


图7 栅极系统单孔透过率随引出束流离子数量的变化
Fig. 7. Optical grid transmittance various with number of ion extracted.

3.3 透过率径向分布特性

图8为屏栅透过率径向分布计算结果. 根据放电室出口离子密度分布, 可计算出不同径向位置单孔的引出束流离子数量, 结合单孔透过率与引出束流离子数量关系, 进而得到离子推力器透过率的径向分布特性. 仿真结果显示, 屏栅透过率径向分布具有较好的中心轴对称性, 在推力器中间 ($r = 0 \text{ mm}$) 有最低透过率约0.84, 而栅极边缘附近 ($r = 100 \text{ mm}$) 有最高透过率约为0.88. 分析认为, 放电室中心附近有最大离子密度 (图2), 根据图4的关系可知, 中心附近的栅孔引出束流离子数量相应最大, 进一步结合图5仿真结果可知, 此时

对应屏栅透过率有最小值. 放电室离子密度从中心沿着径向逐渐减小, 使得栅孔引出束流离子数量也逐渐变少, 从而使得屏栅透过率从中心沿着径向反向增大.

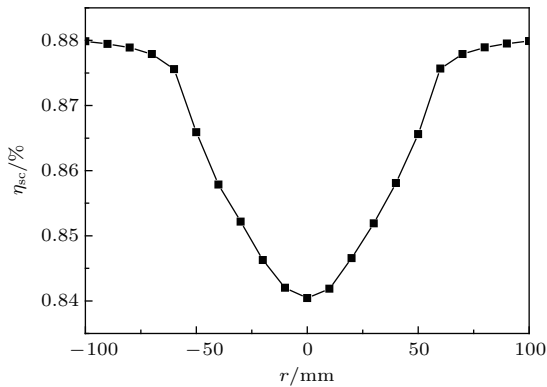


图8 屏栅透过率径向分布

Fig. 8. Radial distribution of screen grid transparency.

图9为加速栅透过率径向分布计算结果. 结果显示, 加速栅透过率径向分布同样具有较好的中心轴对称性, 其透过率从中心沿着径向逐渐减小, 与屏栅透过率径向分布趋势相反. 离子推力器中间单孔有最大引出束流离子数量约为 $1.2 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$, 根据图6结果计算, 该值位于交叉阈值与截获阈值之间, 即当栅孔引出束流离子数量最大时, 加速栅仍不会发生欠聚焦效应, 因此, 在该推力器放电室离子密度范围内, 加速栅透过率随着栅孔引出束流离子数量单调增大. 同时结合图2和图4的仿真结果, 不难得出加速栅透过率从中心沿着径向逐渐减少的变化趋势.

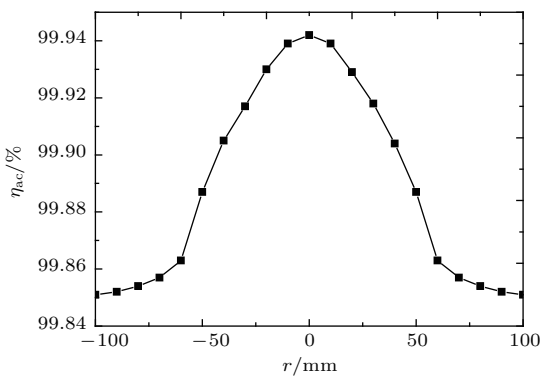


图9 加速栅透过率径向分布

Fig. 9. Radial distribution of accelerate grid transparency.

图10为栅极系统透过率径向分布计算结果. 结果表明, 栅极系统透过率径向分布与屏栅透过率径向分布相近, 即从中心沿着径向逐渐增大. 根据

计算结果, 屏栅透过率在0.84—0.88之间, 而加速栅透过率均超过了99%, 相比可知, 加速栅对栅极系统透过率的影响很小. 因此, 栅极系统透过率主要受屏栅透过率影响, 即透过率径向分布与屏栅透过率分布相近.

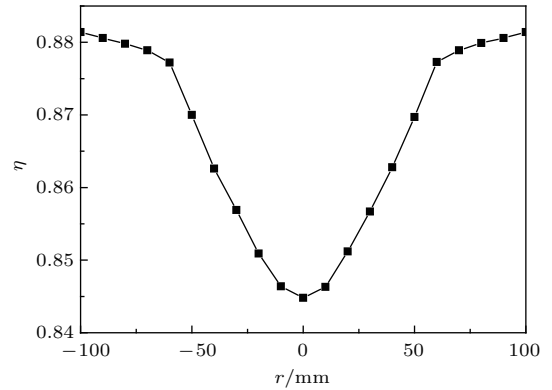


图10 栅极系统透过率径向分布

Fig. 10. Radial distribution of optics transparency.

分析可知, 栅极系统透过率径向分布特性将有助于实现推力器束流的均匀性, 并进一步影响推力器的推力面密度等性能. 当放电室中心附近离子密度较高时, 栅极系统透过率相对较低, 可抑制引出束流离子数量. 而当放电室边缘的离子密度相对较低时, 此时栅极对应较高的透过率, 使得引出束流离子数量尽可能多, 从而调节了束流的整体均匀性. 由于束流引出过程中所有喷出离子速度相近 (主要受屏栅电压影响), 因此, 这种栅极系统透过率径向分布也将改善推力器的推力性能, 使其推力面密度更为均匀.

3.4 实验验证

为了验证计算结果的正确性, 对离子推力器透过率进行了实验测试. 实验在兰州空间技术物理研究所TS-6平台进行, 实验中对LIPS-200离子推力器进行了内部机械结构和电气结构改进, 实验连接以及测试细则见参考文献[15], 实验中分别测试出屏栅电流、加速栅电流和束流电流.

由于本文采用单孔数值仿真, 计算所得仅为单孔透过率. 结合放电室出口等离子体分布特性, 近似认为相同径向位置 r 处栅孔透过率相同. 因此, 首先通过统计, 依次计算出推力器栅极径向范围内 (0—100 mm) 所有单孔的屏栅截获电流、加速栅截获电流、栅孔束流等, 其次结合栅极小孔结构分布, 通过等效扩展计算出整个栅极的透过率 (η). 具体

计算公式如下:

$$\eta = \frac{I_b}{I_b + I_{sc} + I_{acc}},$$

$$I_{sc} = \sum N j_{sc}$$

$$I_{acc} = \sum N j_{acc} \quad (9)$$

式中, j_{sc} 为单孔屏栅电流, j_{acc} 为单孔加速栅电流, N 为栅极结构中相同径向位置对应的单孔个数.

图 11 为栅极透过率数值计算与实验测试结果的对比. 从图中可以看出, 两者具有相同的变化趋势, 即栅极系统透过率随着束流增大而减小. 进一步对比显示, 数值计算结果均大于实验测试值, 数值计算结果范围约 0.84—0.86, 实验测试结果仅为 0.7—0.72.

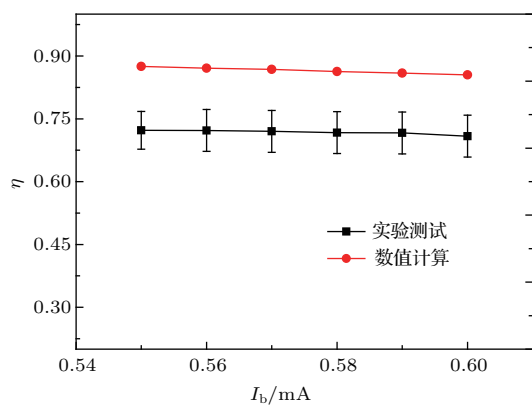


图 11 栅极系统透过率随束流电流变化

Fig. 11. Optical system transmittance various with beam current.

针对数值计算与实验测试结果之间的差异, 分析认为, 本文建立的数值模型主要关注束流离子加速过程, 忽略了放电室等离子体与栅极系统耦合作用下屏栅上游离子轰击效应, 因此计算结果整体偏高; 同时离子推力器工作过程中, 栅极系统存在热形变效应使得其结构参数发生改变, 从而影响到栅极的透过率特性, 而数值模型中栅极结构参数为固定值, 因而产生偏差. 针对以上因素, 后续将开展放电室等离子体与栅极耦合机理研究, 并考虑栅极热形变效应, 进一步完善数值模型.

4 结 论

本文采用 PIC/MCC 方法对栅极束流引出过程进行数值模拟, 分别计算出屏栅单孔透过率、加速栅单孔透过率以及栅极系统单孔透过率随引出束流离子数量的变化关系. 结合放电室出口离子密

度分布, 进一步对离子推力器透过率径向分布特性进行了研究, 得到如下结论:

1) 屏栅透过率径向分布具有较好的中心对称性, 在推力器中心有最小值, 沿着径向屏栅透过率逐渐增大, 在栅极边缘附近有最高透过率; LIPS-200 离子推力器屏栅单孔透过率在 0.84—0.88 之间;

2) 加速栅透过率径向分布具有较好的中心对称性, 在中心有最大值, 从中心沿着径向逐渐减小, 在栅极边缘附近有最小值, 该变化趋势与屏栅透过率径向分布规律相反; LIPS-200 推力器栅加速栅设计参数在交叉阈值和截获阈值之间, 从而保证了加速栅具有较高的透过率;

3) 栅极系统透过率在推力器中心为最低, 沿着径向方向逐渐增大, 至栅极边缘附近有最大值; 由于加速栅透过率超过 99%, 相比而言对栅极系统透过率影响较小, 栅极系统透过率径向分布与屏栅透过率相近;

4) 数值计算结果与实验结果具有相同的变化趋势, 即离子推力器总透过率随着束流增大而缓慢减小, 这是随着推力器束流增大, 栅极系统单孔透过率将会减小, 从而导致栅极系统的总透过率减小.

参考文献

- [1] Porst J P, Kuhmann J, Kukies R, Leiter H 2015 *Presented at Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nanosatellite Symposium*, Hyogo-Kobe Japan, July 4–10, 2015 p2015-b-2901
- [2] Hutchins M, Simpson H, Palencia Jiménez J 2015 *Presented at Joint Conference of 30th International Symposium on Space Technology and Science 34th International Electric Propulsion Conference and 6th Nanosatellite Symposium* Hyogo-Kobe, Japan, July 4–10, 2015 p2015-b-1311
- [3] Chen M L, Xia G Q, Mao G W 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 182901 (in Chinese) [陈茂林, 夏广庆, 毛根旺 2014 物理学报 **63** 182901]
- [4] Zhang T P, Wang X Y, Jiang H C 2013 *Presented at the 33th International Electric Propulsion Conference* Washington, USA, 2013 p2013-48-1
- [5] Chen J J, Zhang T P, Jia Y H, Li X P 2012 *High Power Laser and Particle Beams* **24** 2469 (in Chinese) [陈娟娟, 张天平, 贾艳辉, 李小平 2012 强激光与粒子束 **24** 2469]
- [6] Zhou Z C, Wang M, Zhong X Q, Chen J J, Zhang T P 2015 *Chin. J. Vacuum Sci. Technol.* **35** 1088 (in Chinese) [周志成, 王敏, 仲小清, 陈娟娟, 张天平 2015 真空科学与技术学报 **35** 1088]

- [7] Kaufman H R 1999 *Plasma Sources Sci. Technol.* **8** R1
- [8] Brophy J R 1990 *Presented at the 21th International Electric Propulsion Conference* California, USA, 1990 p90-2655-1
- [9] Arakawa Y, Nakano M 1996 *Presented at the 32nd Joint Propulsion Conference and Exhibit, Joint Propulsion Conferences* Vista, USA, 1996 p96-3198-1
- [10] Wirz R, Goebel D M 2008 *Plasma Sources Sci. Technol.* **17** 035010
- [11] Haag T, Soulas G C 2002 *Presented at the 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, Joint Propulsion Conferences* Indianapolis, Indiana, 2002 p2003-4557-1
- [12] Anderson J, Goodfellow K, Polk J, Shotwell R, Rawlin V, Sovey J, Patterson M 1999 *Presented at the 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit, Joint Propulsion Conferences* California USA, 1999 p99-2857-1
- [13] Chen M L, Xia G Q, Yang Z Y, Zhang B, Xu Z Q, Mao G W 2014 *High Voltage Engineering* **40** 3012 (in Chinese) [陈茂林, 夏广庆, 杨正岩, 张斌, 徐宗琦, 毛根旺 2014 高电压技术 **40** 3012]
- [14] Li J, Chu Y C, Cao Y 2012 *J. Propul. Technol.* **33** 131 (in Chinese) [李娟, 楚豫川, 曹勇 2012 推进技术 **33** 131]
- [15] Wang M, Gu Z, Xu J L 2013 *Vacuum & Cryogenics* **19** 95 (in Chinese) [王蒙, 顾左, 徐金灵 2013 真空与低温 **19** 95]
- [16] Zhong L W, Liu Y, Li J, Gu Z, Jiang H C, Wang H X, Tang H B 2010 *Chin. J. Aeronaut.* **23** 15
- [17] Hu W P, Sang C F, Tang T F, Wang D Z, Li M, Jin D Z, Tan X H 2014 *Phys. Plasmas* **21** 033510
- [18] Liu H, Wu B, Yu D, Cao Y, Duan P 2010 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **43** 165202
- [19] Boer P 1997 *J. Propul. Power* **13** 783
- [20] Wang J, Polk J, Brophy J, Katz J 2003 *J. Propul. Power* **19** 1192
- [21] Herman D A, Gallimore A D 2013 *Presented at the 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, Joint Propulsion Conferences* Florida USA 2013 p2004-3794-1
- [22] Zheng M F, Jiang H C 2011 *J. Propul. Technol.* **32** 762 (in Chinese) [郑茂繁, 江蒙成 2011 推进技术 **32** 762]
- [23] Farnell C C, Williams J D 2010 *J. Propul. Power* **26** 125

Optical transparency radial distribution of ion thruster*

Long Jian-Fei[†] Zhang Tian-Ping Li Juan Jia Yan-Hui

(Science and Technology on Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics, Lanzhou 730000, China)

(Received 18 March 2017; revised manuscript received 8 June 2017)

Abstract

The optical system is one of the main components of an ion thruster, which consists of electrically biased multi-aperture grids. The grid design is critical to the ion thruster operation since its transparency has an important influence on the thruster efficiency and thrust. To further optimize the optical system performance and evaluate effectively the efficiency of ion thruster, the optical transparency radial distribution of ion thruster is analyzed and discussed in experiment and simulation. The process of beam extraction is simulated by the particle-in-cell-Monte Carlo collision (PIC-MCC) method, and the movement of the ions is investigated by the PIC method while the collisions of particles are handled by the MCC method. Then the interdependency among the transparency of screen grid, the accelerator grid, optics system and the number of ion extracted is analyzed. Taking into account the distribution of ion density at the exit of discharge chamber, the radial distribution of the screen grid transparency, accelerator grid transparency and optical system transparency are acquired. An experiment is performed to verify the simulation based derivation, indicating the good agreement between experimental and simulation results. The results show that the radial distribution of screen grid transparency increases gradually along the radial direction and has a good central axial symmetry, and its minimum value is located in the center of the thruster while the maximum value is near the margin region of screen grid. The radial distribution of accelerator grid transparency is opposite to that of the screen grid transparency, which decreases along the radial direction, and its maximum value is located at the axis of the thruster. The radial distribution of optical system transparency is the same as that of the screen grid transparency. And its minimum value is in the center of optics system, which indicates that the effect of accelerator grid transparency on the optical system transparency is little. In addition, the study also finds that the total optical transparency of ion thruster decreases slowly as the beam current increases. This work will provide a lot of support for the optimal design of ion thruster optics system.

Keywords: ion thruster, optics, transparency, particle in cell

PACS: 29.27.-a, 02.70.Ns, 31.15.-p

DOI: 10.7498/aps.66.162901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61601210), the National Basic Research Project of China (Grant No. 61××34), and the Key Laboratory Fund (Grant No. 9140C550206130C55003).

[†] Corresponding author. E-mail: ljf510@163.com