射频自偏压效应离子推力器束流特性实验研究*

杨谨远¹,张思远¹,邓海军²,李 程¹,冯晨曦¹,李吴霖¹, 李依潇³,陈 铮³,孙安邦¹

(1. 西安交通大学 电气工程学院 电力设备电气绝缘国家重点实验室,陕西西安 710049;
2. 内蒙动力机械研究所,内蒙古 呼和浩特 010010;

3. 中国长峰机电技术研究设计院,北京 100854)

摘 要:为了获得不同推力器工况对射频自偏压效应离子推力器的自偏压幅值和束流特性的影响, 本文通过地面实验研究了栅极射频功率、线圈放电功率、工质种类对自偏压幅值和羽流区等离子体参数 的影响,同时对直流栅极工况和射频栅极工况下的束流特性进行了对比。研究结果表明:栅极射频功率 的增大会提高自偏压幅值并提升束流强度,但在较高栅极射频功率下,栅极下游区域将发生自持放电并 形成等离子体;放电腔内放电模式转换会通过改变等离子体阻抗的方式大幅影响栅极直流自偏压幅值和 栅极电压的射频分量,进而影响羽流区等离子体参数;与直流栅极工况相比,射频栅极能同时引出并加 速离子和电子,并在栅极下游实现自中和,且在Ar,Kr,Xe三种工质下均具有自中和能力。

关键词: 自中和; 射频自偏压效应; 离子推力器; 束流特性; 实验研究

中图分类号: V439⁺.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-4055 (2023) 06-2207087-09 **DOI**: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2207087

Experimental Study on Ion Beam Characteristics of Ion Thruster Using RF Self-Bias Effect

YANG Jin-yuan¹, ZHANG Si-yuan¹, DENG Hai-jun², LI Cheng¹, FENG Chen-xi¹, LI Hao-lin¹, LI Yi-xiao³, CHEN Zheng³, SUN An-bang¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, School of Electrical Engineering,

Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Inner Mongolia Power Machinery Research Institute, Hohhot 010010, China;

3. China Changfeng Mechanics and Electronics Technology Academy, Beijing 100854, China)

Abstract: In order to obtain the influences of thruster's operating condition on the self-bias amplitude and ion beam characteristics of ion thruster using RF self-bias effect, the effects of grid's RF power, antenna's discharge power and propellant on the self-bias amplitude and plasma parameters in the plume region were studied, and the ion beam characteristics under DC and RF modes were compared through ground experiments in this paper. The results show that the increase of grid's RF power helps to enlarge the self-bias amplitude and improve the intensity of ion beam, but a higher power would cause self-sustained discharge and form plasma in the downstream region of the grids. The change of discharge mode in the chamber greatly affects the self-bias and RF amplitude by changing plasma's impedance, and then influences the plasma parameters in the plume region. Com-

引用格式:杨谨远,张思远,邓海军,等.射频自偏压效应离子推力器束流特性实验研究[J].推进技术,2023,44(6):
 2207087. (YANG Jin-yuan, ZHANG Si-yuan, DENG Hai-jun, et al. Experimental Study on Ion Beam Characteristics of Ion Thruster Using RF Self-Bias Effect[J]. Journal of Propulsion Technology, 2023, 44(6):2207087.)

^{*} 收稿日期: 2022-07-24; 修订日期: 2022-10-08。

基金项目:未来实验室联合基金(JZ-202109003);电力设备电气绝缘国家重点实验室资助(EIPE22116)。

作者简介:杨谨远,博士生,研究领域为射频离子推力器实验。

通讯作者:孙安邦,博士,教授,博导,研究领域为电推进及特种推进技术领域。E-mail: anbang.sun@xjtu.edu.cn

pared with DC mode, thruster working under RF mode can simultaneously extract and accelerate ions and electrons, and realize self-neutralization downstream the grids. Self-neutralization can be achieved by using Ar, Kr and Xe as propellant.

Key words: Self-neutralization; RF self-bias effect; Ion thruster; Ion beam characteristics; Experimental study

1 引 言

离子推力器具有比冲较高(1000~10000s)、工质 利用效率高(最高可到90%)和寿命较长的特点^[1],是 当前应用最广泛的电推力器之一^[2-3]。传统的离子推 力器通过加速正离子产生推力,并通过中和器发射 电子对引出的离子束进行中和以保持羽流呈电中 性,从而降低羽流中的空间电荷效应并防止羽流中 的带电粒子对航天器造成污染。但是,中和器作为 离子推力器的关键部件,相对脆弱且需要额外的电 能及工质供给,其使用寿命及功率损耗成为制约电 推力器总体工作性能的重要因素^[4]。另外,中和器占 据推力器结构空间,不利于推力器整体小型化,增大 了推力器总体质量,从而增加了航天器发射和运行 成本^[5-9]。

为消除中和器造成的可靠性和成本等方面的劣势,法国学者 Rafalskyi等^[10-11]于 2014年提出了基于 射频(RF: Radio frequency)自偏压效应的无中和器离 子推力器(以下称作射频自偏压效应离子推力器)的 概念,其结构如图1所示,工作原理可解释为:射频电 源通过隔直电容向栅极间施加射频电压,利用屏栅 和加速栅与等离子体接触面积不等的特点在栅极间 产生直流偏压,从而实现对离子的持续的引出和加 速,同时在每个周期内射频电压最低点附近引出电 子,实现羽流区域离子束流的自中和。

近几年,射频自偏压效应离子推力器逐渐成为 研究热点。国内外研究学者针对射频自偏压效应离 子推力器从理论、实验和仿真角度开展了大量研



Fig. 1 Schematic of the ion thruster using RF self-bias effect

究^[10,12-16]。Rafalskvi等^[10-12]完成了射频自偏压效应离 子推力器原理样机"Neptune"的研制和前期的原理验 证工作,在实验中证实了射频栅极系统能形成直流 自偏压并具有自中和能力。Dedrick等^[13-14]研究了束 流中空间电荷相互补偿的机理,通过对比"Neptune" 样机在射频和直流栅极工作模式对应的羽流发射光 谱强度,证明了射频栅极工作模式下鞘层崩塌阶段 能引出电子并有效补偿束流中的离子空间电荷。 Lafleur等^[15-16]对射频自偏压效应离子推力器射频栅 极系统进行了一维理论建模和二维全粒子仿真,从 理论上推导了直流自偏压的表达式,并发现自偏压 的建立源自于束流电荷对栅极电路的充电效应,而 且如果射频频率低于离子振荡频率,会导致离子响 应射频电场的振荡。唐欢等[17]通过仿真探究了不同 的电流密度、射频频率和背景压强对射频栅极系统 引出粒子过程的影响。杨智等[18]实验对比了直流引 出和射频引出时的束流引出情况,对束流下方的空 间悬浮电势、离子能量分布函数和电子能量分布函 数进行了测量与分析。李亦非等[19]利用仿真与实验 相结合的方式研究了不同工质(Ar,Kr和Xe)对射频 栅极引出效果的影响。

目前国内外针对射频自偏压效应离子推力器的 实验研究大部分集中于射频栅极的自中和机理方 面,较少讨论不同推力器工况对自偏压幅值和束流 特性的影响。本文以射频自偏压效应离子推力器为 研究对象,采取地面实验的方法研究了栅极射频功 率、线圈放电功率、工质种类对自偏压幅值和羽流区 等离子体参数的影响,同时对直流栅极和射频栅极 下的束流特性进行了对比。

2 实验设备与数据处理方法

2.1 实验平台

本文所采用的实验平台示意图如图2所示,实验 平台主体包括真空舱、电源系统、供气系统、诊断与 测量设备、辅助设备和推力器等。真空舱所采用的 抽气系统为旋片泵-罗茨泵-磁悬浮分子泵三级结 构,其主体为四台磁悬浮分子泵,单台分子泵抽速为 600L/s,真空舱空载极限气压可达6×10⁻⁴Pa。电源系 统包括两套变频射频电源和两台直流电源,其中,变 频射频电源由常州瑞思杰尔制造,包括信号发生器、 功率放大器和匹配器三部分,规格参数分别为2~ 30MHz,0~500W和25~60MHz,0~1000W;直流电源由 西安威思曼制造,规格参数分别为0~3000V,0~ 500mA和-2000~0V,0~500mA,可满足推力器点火、 直流栅极引出和射频栅极引出等多种实验工况的需 求。供气系统包括气瓶、流量计和气路等部分,气体 种类覆盖Ar,Kr,Xe三种惰性气体,流量计由西安翼 度制造,量程0~10cm³/min,精度±1%。诊断与测量设 备包括朗缪尔探针、离子能量分析仪、示波器及高压 探头,朗缪尔探针和离子能量分析仪由 Impedans 研 制,示波器及高压探头为泰克公司的成熟产品,可支 持对推力器羽流区的等离子体参数、射频栅极射频 幅值及自偏压幅值进行诊断与测量,测量时,朗缪尔 探针与离子能量分析仪探头均保持与屏栅中央对齐 且垂直于羽流方向放置。辅助设备包括用于调节探 针与推力器栅极相对位置的电位移平台和用于记录 羽流图像的相机。



Fig. 2 Schematic of the experiment platform

2.2 推力器样机

本文所使用的推力器样机(RIT-6)实物图如图 3 所示,该推力器样机采用射频感性耦合的方式产生 等离子体,主体结构包括放电腔体、射频天线、栅极 系统等关键部件。其中,放电腔体为氧化铝陶瓷制 成的圆柱形结构,内径 60mm,长 100mm,壁厚 3mm。 射频天线为紫铜材质的空心裸线管结构,内径 2mm, 外径 4mm,匝数 5 匝。栅极系统包括屏栅、加速栅、绝 缘垫片等结构,屏栅和加速栅均为平面型结构,由不 锈钢制成,绝缘垫片为氧化铝材质,用于控制屏栅和 加速栅间距,栅极系统结构参数如下:屏栅孔直径 4.0mm,加速栅孔直径3.2mm,屏栅厚度0.5mm,加速 栅厚度0.5mm,栅极间距1mm,栅极孔间距4.8mm。



Fig. 3 Schematic of the ion thruster prototype

2.3 数据处理方法

2.3.1 电压波形处理方法

本文采用示波器配合高压探头的方法对推力器 屏栅电压 U_{sg}进行测量,并从电压波形中获得屏栅上 的射频幅值与直流分量(即自偏压幅值),实验中采 用对波形数据进行傅里叶变换的方法从示波器电压 波形获得射频幅值与直流分量。以图4(a)为例(工 况中栅极射频频率为30MHz),是示波器获得的典 型的栅极电压波形图,对其进行傅里叶变换,得到 频域图如图4(b)所示,图中频率为0Hz的部分对应 的幅值的一半(即85.51V)为直流分量,图中频率为 30MHz的部分对应的幅值(即95.44V)为射频幅值。 2.3.2 朗缪尔探针诊断数据处理方法

本文使用朗缪尔单探针对羽流区的等离子体参数进行测量,图5为典型的朗缪尔单探针的结构图, 组件1为钨制探针针尖,长度10mm,直径0.195mm; 组件2为射频补偿电极,提高探针针尖和等离子体之 间的容性耦合,保证探针能实时响应等离子体电势 的变化^[20];组件3为直流补偿电极,用于补偿由于探 针偏压引起的等离子体扰动;组件4为陶瓷外壳,固 定探针并保持密封性。图6为朗缪尔单探针测得的 典型伏安特性(*I-U*)曲线,该曲线中包括(1)离子饱 和区;(2)过渡区;(3)电子饱和区。

在离子饱和区,探针电压 U_p小于悬浮电势 U_f且远小于等离子体电势 U_{sp},电子受鞘层作用不能到达探针表面,只有正离子被探针收集,可获得离子饱和电流 I_o;在过渡区,探针电压 U_p位于悬浮电势 U_f和等离子体电势 U_{sp}之间,探针收集的电流 I_p包括正离子电流 I_i和电子电流 I_c两部分,且探针电流 I_p随扫描电



Fig. 4 Voltage waveform and its FFT analysis



1: Tungsten probe tip 2: RF compensation electrode 3: DC compensation electrode

4: Ceramic cover

Fig. 5 Schematic of the Langmuir probe



Fig. 6 I-U curve obtained by Langmuir probe

压 U_p 升高而近似指数增大;在电子饱和区,探针电压 U_p 大于等离子体电势 U_{sp} 时,正离子受鞘层电场排斥不能到达探针表面,可获得电子饱和电流 I_{e0} 。从图中可获得离子密度 n_i 、电子密度 n_e 、电子温度 T_e 和悬浮电势 U_i 等参数,数据处理方法如下^[21]:

(1)等离子体电势U_{sp}

在过渡区中,探针电流随电压升高而近似指数 增大,并在电子饱和区饱和,因此过渡区与电子饱和 区相接处的*I-U*曲线存在一个拐点,该点对应的探针 电压值即为等离子体电势*U*_{sp}。可通过对*I-U*曲线求 一阶导数,取一阶导数最大值点电压为*U*_{sp}。 (2) 悬浮电势 U_f

当探针电压 U_p与悬浮电势 U_f相等时,探针收集的离子电流与电子电流相等,探针电流为0,因此 I-U 曲线与横坐标轴交点电压值即为悬浮电势 U_f。

(3)电子温度 T_e

在过渡区探针电流 *I*_p与 *U*_p和 *U*_{sp}的差有指数关系,即

$$I_{\rm p} = I_{\rm i} - I_{\rm e} \approx I_{\rm e} = I_{\rm e0} \exp\left[\frac{e(U_{\rm p} - U_{\rm sp})}{T_{\rm e}}\right]$$
(1)

式中e为元电荷量(1.6×10⁻¹⁹C),经变换,可得电子温度 $T_{e}(eV)$ 。

$$T_{\rm e} = \frac{e(U_{\rm p} - U_{\rm sp})}{\ln(I_{\rm p}) - \ln(I_{\rm e0})}$$
(2)

(4)电子密度*n*_e

电子饱和电流 Ie0(单位:mA)表达式为

$$I_{e0} = An_{e}e \sqrt{\frac{T_{e}}{2\pi m_{e}}}$$
(3)

式中A为探针有效收集面积(cm^2), m_e 为电子质量(kg),可推导出电子密度 n_e (cm^{-3})表达式为

$$n_e = \frac{I_{e0}\sqrt{2\pi m_e}}{eA\sqrt{T_e}} \tag{4}$$

(5)离子密度 n_i

离子饱和电流 I_{i0}(mA)表达式为

$$I_{i0} \approx 0.605 n_i e A \sqrt{\frac{T_e}{m_i}}$$
 (5)

式中 m_i 为离子质量(kg),可推导出离子密度 n_i (cm⁻³) 表达式为

$$n_{\rm i} \approx \frac{1.653I_{\rm i0}}{eA} \sqrt{\frac{m_{\rm i}}{T_{\rm e}}} \tag{6}$$

3 实验结果与讨论

3.1 栅极射频功率对自偏压幅值和束流特性的影响

本文首先研究了栅极射频功率对射频自偏压效 应离子推力器的自偏压幅值和束流特性的影响。实 验中调整朗缪尔探针的位置,使其处于栅极中央下 游5.5cm处,实验参数控制如下:工质为Ar,进气流量 10cm³/min,栅极射频频率30MHz,栅极射频功率从 40W以40W步长上升至280W,线圈放电功率170W, 线圈放电频率3MHz,得到实验结果如图7~9所示。 图中,U_{de}为屏栅上测得的自偏压幅值。





分析图7中不同栅极射频功率下的羽流图像,可 以发现,栅极施加的射频功率越大,引出的束流越明 显,说明离子得到了有效引出。由图8可知,随着栅 极射频功率的增大,自偏压幅值会随之增大,但空间 悬浮电势趋近于零,这表明了该工况下具有良好的 自中和能力。在图9所示的羽流区电子的电子温度 方面,其变化趋势存在较大的波动但整体处于10~

the grid's RF power



Fig. 9 Electron temperature as a function of the grid's RF power

30eV内,表明电子受到了加速。

本文进一步使用离子能量分析仪对羽流区的离 子能量分布函数(Ion energy distribution function, IEDF)进行测量,实验中离子能量分析仪探头与朗缪 尔探针处于同一位置,其余参数保持不变,得到屏栅 上射频幅值100V时的IEDF曲线如图10所示。发现 峰值处对应的离子能量高于直流偏压,进一步证实 引出束流中的离子得到了有效加速,且由于离子净 加速电压包括鞘层电压和栅极直流偏压两部分,因 此大部分离子的能量高于直流偏压,同时也可从 IEDF 观测到有少部分离子能量低于直流偏压,该部 分离子来源于下游高能电子与中性粒子间的电离碰 撞或高能离子与中性粒子之间的电荷交换(Charge exchange,CEX)碰撞。有部分IEDF曲线低于零,这是 因为在施加高扫描电压时离子能量分析仪探头的各 极板间存在漏电流。



Fig. 10 IEDF measured under the condition of 100V RF voltage amplitude

3.2 线圈放电功率对自偏压幅值和束流特性的影响

通过调整栅极射频功率为80W,线圈放电功率 从120W以10W步长上升至200W,线圈放电频率 3MHz,并使栅极射频频率和工质种类及流量等其余 参数保持与3.1节不变,研究了线圈放电功率对射频 自偏压效应离子推力器的自偏压幅值和束流特性的 影响。实验得到的屏栅处自偏压幅值和羽流区的空 间电势随线圈放电功率的变化规律如图11所示,羽流 区的电子温度、带电粒子密度(电子密度 n_e,离子密度 n_i)随线圈放电功率的变化规律如图12和图13所示。



Fig. 11 Bias voltage and floating potential as a function of the discharge power



Fig. 12 Electron temperature as a function of the discharge power



Fig. 13 Particle density as a function of the discharge power

随着线圈放电功率的增大,自偏压幅值随着放 电功率的增大呈先上升后下降的趋势,羽流区空间 悬浮电势整体呈上升状态但低于自偏压幅值,电子 温度随着线圈放电功率的增大先整体下降,但下降 速度呈先迅速后缓慢的趋势,而离子密度和电子密 度随着放电功率的增大而上升。对比线圈放电功率 对上述参数的影响规律,发现自偏压幅值和电子温 度的变化趋势发生变化时对应的线圈放电功率均在 150W附近。

为分析上述规律的原因,本文对不同线圈放电 功率下的羽流图像进行了拍摄,如图14所示,可以发 现随着线圈放电功率的升高,束流的亮度越来越高, 且在120~150W内放电腔和羽流区亮度均存在突 变,间接反映在该功率区间内放电腔内放电模式由 E模式转变为了H模式。而放电模式的转变会导致 腔内电子数和离子数密度激增,受栅极引出的电子 和离子数增多,等离子体阻抗下降,射频幅值下降。 同时,E/H模式的转换过程还导致放电腔内电子温度 下降,引起栅极自偏压及自偏压百分比(即直流自偏 压与射频幅值之比)升高^[15-16],进而降低了栅极间电 子的引出电压并缩短了引出时间,促使羽流区的电 子温度在线圈放电功率120~150W的区间呈下降 趋势。





3.3 工质种类对自偏压幅值和束流特性的影响

本文进一步探究了不同工质对自偏压幅值和束流特性的影响,实验工况调整如下:朗缪尔探针位置处于栅极中央下游 5.5cm处,控制栅极射频频率 30MHz,栅极射频功率从 40W 以 40W 步长上升至

160W,线圈放电功率200W,频率3MHz,在测量自偏 压幅值实验中,保证各工质间的质量流量相同:分别为 (1)Ar,进气流量6.5cm³/min;(2)Kr,进气流量3.1cm³/min; (3)Xe,进气流量2cm³/min,得到不同工质下屏栅处自 偏压幅值的变化规律如图15所示。在获得羽流区等 离子体参数的实验中,改为控制各工质间体积流量 相同:实验所使用工质(Ar,Kr,Xe)进气流量均为 6.5cm³/min,得到羽流区等离子体参数的变化规律,如 图16所示。

三种工质下的自偏压幅值均随栅极射频功率增 大而呈上升趋势。空间悬浮电势方面,Xe工质下悬 浮电势最高,Ar工质下悬浮电势最低,且均低于自偏



Fig. 15 Bias voltage as a function of the grid's RF power for different propellants

压幅值,表明射频自偏压效应离子推力器在三种工 质条件下均具有自中和能力。羽流区的电子温度方 面,各工质下电子温度均在5~30eV内,表明电子在引 出过程中均受到一定程度的加速。在羽流区的带电 粒子密度方面,所有工质下的电子密度均普遍高于 离子密度,且Xe工质下测得羽流区带电粒子密度最 高,Kr工质下其次,Ar工质下最低,原因来自于三种 工质的电离能、碰撞截面的差异导致的放电腔内等 离子体密度上的差异,进而影响了经栅极引出并加 速的电子和离子密度。另一方面,对于同一工质,羽 流区离子密度和电子密度随栅极侧射频功率的变化 趋势保持了一致性,但工质间有所差异:随着栅极侧 射频功率的升高,Ar和Xe工质下带电粒子密度呈先 下降后上升的趋势,但Kr工质下带电粒子密度整体 仅呈下降趋势。根据离子通量守恒,离子密度呈下 降的趋势间接表明更高的栅极射频功率下离子获得 了更高的速度;而带电粒子密度的变化趋势存在上 升阶段表明栅极下游区域存在较为显著的电离 现象。

3.4 直流栅极和射频栅极下束流特性对比

本文最后对直流栅极和射频栅极下朗缪尔探针 测得的空间悬浮电势和电子温度进行了对比。实验 中,工质选取为Ar,进气流量10cm³/min,线圈放电功



Fig. 16 Plasma parameters as a function of the grid's RF power for different propellants

率 170W,频率 3MHz, 朗缪尔探针固定于栅极中央下游 2.5cm 处。以屏栅上自偏压幅值为横坐标,获得羽流区空间悬浮电势和电子温度的变化情况如图 17 和图 18 所示。



Fig. 17 Floating potential as a function of the bias voltage for RF and DC mode



Fig. 18 Electron temperature as a function of the bias voltage for RF and DC mode

在直流栅极工况下,随着屏栅电压的上升,空间 电势随之增大,且空间电势小于直流电压,但两者的 数值较为接近。对比直流栅极和射频栅极工况下的 空间电势,可以明确在没有中和器的情况下,射频栅 极引出的电子与离子实现了相互中和,而直流栅极 由于没有中和器且只能引出离子,所以羽流区空间 电势较高。通过对比直流栅极和射频栅极工况下栅 极下游的电子温度,可以证明射频栅极下电子在引 出时会被有效加速。

4 结 论

本文以射频自偏压效应离子推力器为研究对象,研究了不同影响因素对自偏压幅值和束流特性的影响,得到以下结论:

(1)与直流栅极工况相比,射频栅极工况的羽流 区具有更高的电子温度与更低的空间悬浮电势,证 明了射频栅极能引出并加速电子,且能在栅极下游 与离子结合,实现自中和。

(2)射频栅极工况下,随着栅极射频功率的增大,自偏压幅值会随之增大,引出的束流强度越高, IEDF分析显示引出束流中的离子得到了有效加速, 但由于栅极下游区域存在高能电子与中性粒子间的 电离碰撞或离子与中性粒子之间的CEX碰撞,导致 了少量低能离子的形成。

(3)射频栅极工况下,放电腔内放电模式转换 (即E/H模式转换)会通过改变等离子体阻抗的方式 大幅影响自偏压幅值和射频幅值,进而影响羽流区 等离子体参数。线圈放电功率增大有助于提高栅极 引出的离子与电子密度。

(4)射频自偏压效应离子推力器在Ar,Kr,Xe三 种工质下均具有自中和能力,在相同体积流量下,三 种工质的羽流区带电粒子密度有所区别,原因来自 于三种工质的电离能、碰撞截面的差异导致放电腔 内等离子体密度上存在区别。对于同一工质,羽流 区离子密度和电子密度随栅极侧射频功率的变化趋 势保持了一致性。

致 谢:感谢未来实验室联合基金和电力设备电气绝缘 国家重点实验室的资助。

参考文献

- [1] 张天平. 国外离子和霍尔电推进技术最新进展[J]. 真空与低温, 2006, 12(4): 187-193.
- [2] Lev D, Myers R M, Lemmer K M, et al. The Technological and Commercial Expansion of Electric Propulsion [J]. Acta Astronautica, 2019, 159: 213-227.
- [3] 张天平, 耿 海, 张雪儿, 等. 离子电推进技术的发 展现状与未来[J]. 上海航天, 2019, 36(6): 88-96.
- [4] Goebel D M, Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008.
- [5] Kuninaka H, Funaki I, Nishiyama K, et al. Virtual Anode Phenomena Due to Lack of Neutralization on Ion Thrusters Based on MUSES-C Program [C]. Salt Lake City: 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2001.
- [6] Kuninaka H, Molina-Morales P. Spacecraft Charging Due to Lack of Neutralization on Ion Thrusters [J]. Acta Astronautica, 2004, 55: 27-38.
- [7] Agasid E, Burton R, Carlino R, et al. Small Spacecraft Technology State of the Art[R]. NASA/TP-2015-216648.
- [8] Koizumi H, Kawahara H, Yaginuma K, et al. In-Flight Operation of the Miniature Propulsion System Installed on Small Space Probe: PROCYON[J]. Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan, 2016, 14(30): 13-22.

- [9] Rafalskyi D, Aanesland A. Brief Review on Plasma Propulsion with Neutralizer-Free Systems[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2016, 25(4): 043001.
- [10] Rafalskyi D, Aanesland A. Coincident Ion Acceleration and Electron Extraction for Space Propulsion Using the Self-Bias Formed on a Set of RF Biased Grids Bounding a Plasma Source[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(49): 495203.
- [11] Rafalskyi D, Aanesland A. Neutralizer-Free Gridded Ion Thruster [C]. Cleveland: 50th AIAA/ASME/SAE/AS-EE Joint Propulsion Conference, 2014.
- [12] Rafalskyi D, Aanesland A. Plasma Acceleration Using a Radio Frequency Self-Bias Effect [J]. Physics of Plasmas, 2015, 22(6): 063502.
- [13] Dedrick J, Gibson A R, Rafalskyi D, et al. Phase-Resolved Optical Emission Spectroscopy of a Neutralizer-Free Gridded Ion Thruster [C]. Atlanta: American Institute of Aeronautics and Astronautics: 35th International Electric Propulsion Conference, 2017.
- [14] Dedrick J, Gibson A R, Rafalskyi D, et al. Transient Propagation Dynamics of Flowing Plasmas Accelerated by Radio-Frequency Electric Fields [J]. *Physics of Plas-*

mas, 2017, 24(5): 050703.

- [15] Lafleur T, Rafalskyi D. Radio-Frequency Biasing of Ion Acceleration Grids[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2018, 27(12): 125004.
- [16] Lafleur T, Rafalskyi D, Aanesland A. Radio-Frequency Biasing of Ion Thruster Grids [R]. IEPC-2019-362, 2019.
- [17] 唐 欢,李亦非,翁惠焱,等.射频自中和栅极系统 粒子引出加速机理研究[C].北京:第十六届中国电 推进技术学术研讨会,2020.
- [18] 杨 智,郭宏辉,白进纬,等.无中和器射频偏压栅 极电推力器束流特性[C].北京:第十七届中国电推 进技术学术研讨会,2021.
- [19] Li Y, Tang H, Cai G, et al. Radio-Frequency Biasing of Ion Acceleration Grids with Different Propellants [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2022, 31(3): 035009.
- [20] Sudit I D, Chen F F. RF Compensated Probes for High-Density Discharges [J]. Plasma Sources Science & Technology, 1999, 8(2).
- [21] Orlando A, Daniel L F. Plasma Diagnostics [M]. San Diego: Academic Press, 1989.

(编辑:白 鹭)