

<http://bhxb.buaa.edu.cn> jbuaa@buaa.edu.cn

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0406

μ HT-1 推力器工作参数宽范围调节下束流特性实验研究

黄丹^{1, 2, 3, 4, 5}, 龙建飞^{1, 2, 3, 4, 5, *}, 成烨^{1, 2, 3, 4, 5}, 王嘉彬^{1, 2, 3, 4, 5},
徐禄祥^{1, 2, 3, 4, 5}, 杨威⁶

(1. 国科大杭州高等研究院 基础物理与数学科学学院, 杭州 310024; 2. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100190;

3. 中国科学院大学, 北京, 100049; 4. 国科大杭州高等研究院 引力波太极实验室(杭州), 杭州 310024;

5. 国科大杭州高等研究院 浙江省引力波精密测量重点实验室, 杭州 310024; 6. 重庆科技学院 电气工程学院, 重庆 401331)

摘 要: 面向空间引力波探测任务需求, 设计了瓦级微功率霍尔推力器 μ HT-1, 并对该推力器的束流特性进行实验研究。采用法拉第探针结合三维移动机构进行诊断, 获取阳极电压 700~1 200 V、阳极工质流量 0.1~0.5 sccm 宽范围工况下束流离子电流密度分布, 并进一步分析总束流值、阳极电流、电流利用率、发散角等参数变化趋势。测试结果表明: μ HT-1 推力器可在宽范围工况下稳定工作, 束流呈现出较好的轴对称分布特性; 离子电流密度沿轴向逐渐减小, 沿径向双极扩散; 阳极电压和阳极工质流量分别通过影响电子平均温度和通道中性原子密度分布的方式, 使得电流利用率与发散角呈现出增长的趋势; 推力器总束流与阳极工质流量、阳极电压均呈现线性增长特性。

关键词: 微功率霍尔推力器; 束流特性; 离子电流密度; 等离子体诊断; 实验研究

中图分类号: V439.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2025)06-2119-10

2015 年美国地面激光干涉引力波天文台 aLIGO 成功探测到一例由双黑洞合并导致的引力波事件 GW150914, 证实了引力波的存在, 也打开了引力波探测和引力波天文学的新纪元^[1]。随之世界各国争相开展空间引力波探测计划, 欧空局提出了 LISA 计划, 日本提出了 DECIGO 计划, 中国也正在开展“天琴计划”和“太极计划”^[2-3]。空间引力波探测任务中, 编队卫星平台需要处于超稳和超静的状态, 尽量减少非保守力的干扰, 为了使卫星平台克服非保守力的影响, 必须采用无拖曳控制技术^[4-5]。微推力器作为无拖曳控制技术的执行机构, 需具备推力宽范围调节(0.1~250 μ N)、高分辨率

(<0.1 μ N)、低噪声(<0.1 μ N/Hz^{1/2})、快响应(<100 ms)的能力^[6-7], 同时为了保证任务周期, 一般需要推力器实现工作寿命大于 10 000 h, 这便对微推力器提出了严苛的挑战。

通过分析空间引力波探测任务特点, 2017 年 LISA 列选了 4 种可能的微推力器类型: 胶体推力器、会切型霍尔推力器、冷气微推力器和射频离子推力器。这些推力器均具备产生微牛级推力和宽范围调节的能力, 然而, 由于各自的结构设计和工作原理差异, 均面临一些短期内难以克服的技术挑战^[8-11]。相比而言, 霍尔类推力器在结构和性能兼顾方面具有一定优势。

收稿日期: 2023-06-21; 录用日期: 2023-10-13; 网络出版时间: 2024-01-05 15:25

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240104.1315.002

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFC2202700); 湖南省自然科学基金(2021JJ30564); 湖南省教育厅重点项目(19A440); 重庆市教委科学技术研项目(KJZD-K202101506); 国科大杭州高等研究院自主项目(2022ZZ01009)

*通信作者. E-mail: ljf510@163.com

引用格式: 黄丹, 龙建飞, 成烨, 等. μ HT-1 推力器工作参数宽范围调节下束流特性实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2025, 51(6): 2119-2128.
HUANG D, LONG J F, CHENG Y, et al. Experimental study on beam characteristics of μ HT-1 thruster under wide range adjustment of operating parameters[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2025, 51(6): 2119-2128 (in Chinese).

国内外研究人员在微功率霍尔推力器方面进行了大量研究。2018 年 Hey^[12] 对会切磁场霍尔推力器开展微型化研究,研制出 Full Size NG- μ HEMPT 和 Miniaturised NG- μ HEMPT 两款微推力器。通过实验测试,分别实现了 $6\sim 4\,800\,\mu\text{N}$ 和 $29\sim 86\,\mu\text{N}$ 范围的推力连续调节。于达仁等^[6-7] 也开展了微牛级会切霍尔电推进技术研究,针对空间引力波探测任务,设计的 μ CFT 推力器实现了 $1.8\sim 112.8\,\mu\text{N}$ 的连续调节输出,推力器闭环控制可有效降低噪声,具备应用于无拖曳控制任务的可能。国科大杭州高等研究院联合新加坡南洋理工大学,开展了微牛级双模霍尔电推进技术研究,并研制了霍尔微推力器 HMTs^[13-14]。2019 年 8 月,该推力器搭载“太极一号”成功发射,第一阶段在轨测试数据表明,推力范围为 $5\sim 100\,\mu\text{N}$,推力分辨率达到 $0.7\,\mu\text{N}$,噪声小于 $0.6\,\mu\text{N}/\text{Hz}^{1/2}(0.01\sim 1.0\,\text{Hz})$ 。该推力器在国际上刷新了霍尔推力器在轨应用的功率下限、推力下限和推力调节比^[15]。针对空间引力波探测等科学任务应用,现有微功率霍尔推力器仍需要进一步提升性能,即在宽范围电压和流量变化工况下,实现高效电离和加速效率,同时满足微牛级推力宽范围调节、高分辨率等指标要求。微功率霍尔推力器开发与研制仍是该领域研究的热点与难点。

Mikellides 等^[16] 指出,霍尔推进器的性能参数、寿命等与羽流存在密不可分的关系,因此,国内外针对束流特性开展了大量研究。Hofer 等对 $5\,\text{kW}$ 霍尔推进器羽流进行诊断^[17],得到了该推力器束流分布参数,并进一步分析了真空背景压力对束流特性影响规律;朱悉铭等利用快速测算方法针对 HET-P70^[18] 霍尔推力器的束流诊断,基于束流分布参数,进一步分析了束流聚焦特性影响参数;陈新伟等^[19] 采用法拉第对 LHT60 霍尔推力器束流诊断,测试得到了该推力器束流分布特性。不同推力器,其束流分布特性具有一定的差异性。另外显然,当前束流特性研究主要针对结构大、功率高的推力器,而微功率霍尔推力器束流分布研究较少,由于结构更小,空间电流密度更低,束流特性测量存在难度。

国科大杭州高等研究院微推进团队持续开展微功率霍尔电推进技术研究。在前期研究的基础上,探索性设计了新微功率推力器 μ HT-1,并完成了加工与调试,目前尚未开展微推力测量。现阶段主要针对该推力器参数宽范围调节下的羽流分布特性进行实验研究,一方面,通过羽流参数分析,有利于研究推力器内部离子能量转换、分布、损失情况,结合电流利用率等特性,进一步改进推力器的

性能;另一方面,获得该推力器束流发散角,以及总束流随阳极电压、阳极工质流量的变化规律,探索该推力器宽范围性能调节能力。

本文利用自研的等离子体探针针对 μ HT-1 推力器羽流特性进行诊断,首次获得该推力器束流离子电流分布,并进一步分析总束流值、阳极电流、电流利用率、发散角等参数变化趋势。研究结果可为后续该推力器优化提供有力的数据支撑。

1 实验系统及装置

1.1 μ HT-1 推力器

μ HT-1 推力器是基于传统霍尔推力器上开发而来的微功率推力器,并参考了 HMTs 推力器结构,设计阳极功率为 $1\sim 10\,\text{W}$ 可调。一方面,充分继承了霍尔推力器推功比大、可靠性高等优势;另一方面,在磁路结构、放电通道、阴极结构等方面进行了优化,集成化程度得到明显提升。该推力器放电通道外径约为 $20\,\text{mm}$,内径直径约为 $15\,\text{mm}$,采用永磁体结构,通道出口附近最大磁场强度约为 $200\,\text{Gs}$ 。研制过程中,采用有限元方法仿真分析了气体分配器挡板导流小孔直径、双腔比等内部关键尺寸,提升了放电通道内气体的均匀程度^[20-21],为微小流量调节奠定了基础;同时采用环式分压气路绝缘结构^[22-23],显著提升了供气管路的耐压性能,解决了推力器小尺寸结构下的高压击穿问题。

μ HT-1 推力器工作原理及氪气工质点火状态如图 1 所示。推力器工作时,位于环形通道底部的阳极加载高电压,在通道内产生轴向加速电场,通道

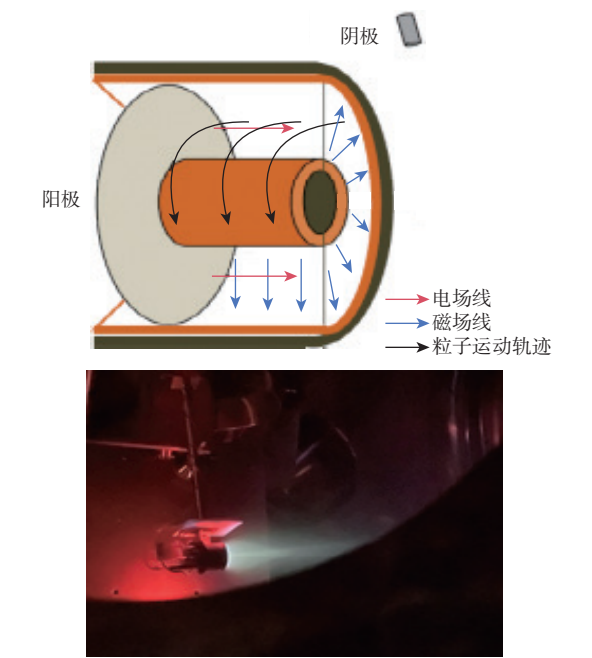


图 1 μ HT-1 推力器工作原理及氪工质点火状态
Fig. 1 The ignition state of krypton gas of μ HT-1 thruster

外部阴极产生的部分电子在阳极高压吸引下进入通道,向阳极移动过程中轰击原子并产生等离子体。推进器径向磁场使电子螺旋旋转形成周向霍尔漂移,由于离子质量远大于电子质量,受到径向磁场的影响微弱,在轴向电场的加速下形成推力束流。阴极不仅是电子发射源,还能中和离子,保持推进器的电中性。微功率霍尔推力器选用钨钨热阴极方案,其发射面为平面结构,发射面直径为 3.5 mm,1 200 $^{\circ}\text{C}$ 条件下可发射电流超过 100 mA,满足微功率霍尔推力器应用要求。

1.2 实验真空系统

实验研究在国科大杭州高等研究院太极实验室 CS-1 600 微牛级电推进实验平台上进行。该实验平台真空舱直径为 1.8 m,长度为 5.0 m,真空舱具有较大空间可以有效减小羽流的相互作用。真空系统配置了 2 台分子泵+多级罗茨泵、1 套大型螺杆+罗茨机械泵组,最大抽速为 34 000 L/s,极限真空度可达到 1.0×10^{-6} Pa 量级,满足本实验条件要求。此外,实验平台还配置了高精度高压电源、高精度微小流量贮供单元等,可满足推力器地面实验电气参数调节要求。CS-1600 微牛级电推进实验平台如图 2 所示。



图 2 CS-1 600 微牛级电推进实验平台

Fig. 2 The CS-1 600 micro Hall electric propulsion experimental platform

1.3 等离子体诊断系统

为了获得 μ HT-1 推力器羽流中离子电流密度、发散角和总束流等参数,采用法拉第探针结合三维

移动机构对该推力器羽流进行诊断。等离子体诊断系统连接及实物如图 3 所示。将推力器固定在安装支架上,法拉第探针和三维移动机构置于推力器出口正下方,两者间采用陶瓷进行绝缘,通过控制三维移动机构带动法拉第探针进行离子密度空间分布测量。采用自编写程序控制三维移动机构可实现 x 、 y 、 z 这 3 个方向的直线移动,每个方向的移动范围为 0~200 mm,最小移动精度为 0.1 mm。实验过程中,以推力器出口端面的中心为原点建立空间坐标,且假定沿着推力器出口轴向为 x 轴,径向为 y 轴,垂直方向为 z 轴,满足右手定则。初始状态下,推力器出口端面中心点坐标固定为(0, 0, 0)。

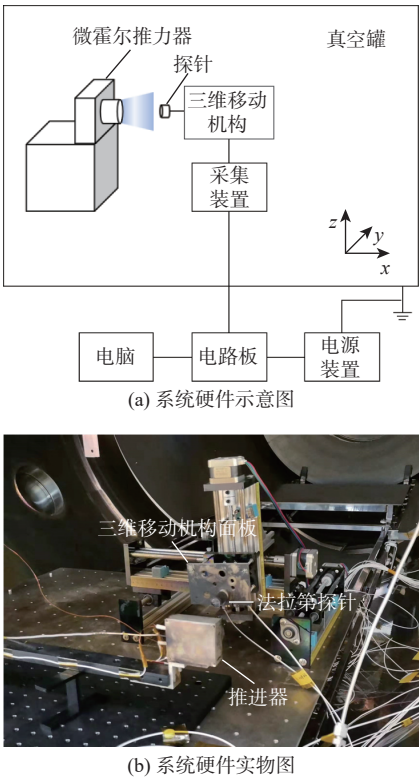


图 3 等离子体诊断系统连接示意图及实物

Fig. 3 The schematic diagram of the connection of the plasma diagnostic system and the physical object

法拉第探针结构如图 4 所示,其中收集极为直径 7.0 mm 的圆形平面,考虑二次电子发射的影响,收集极采用金属钨,该材料二次电子发射系数小,可减少测试误差。保护环为金属圆柱体状,外径为 9 mm,内径为 8 mm,采用成本低、易加工的不锈钢材料,可屏蔽非轴向的低能量离子。收集极和保护环间距为 0.5 mm,该间距与推力器羽流等离子鞘层厚度在同一数量级,并且满足小于等于 10 个德拜长度,能够屏蔽束流中非轴向等离子体^[7]。测试过程中,将收集极和保护环都采用负偏置连接,以排斥电子并确保均匀的势场。通过高精度电流表可

实时读出离子电流值,再用电流值除以收集极面积便可得到离子电流密度。实验中,电流表数据通过采集卡实时采集与存储,采集频率为 2.0 kHz,采集精度优于 0.1%。

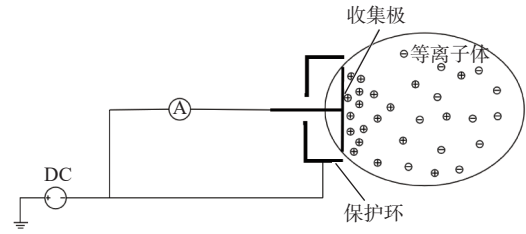


图 4 法拉第筒示意图
Fig. 4 Schematic of Faraday cup

根据推力器羽流分布轴对称性,首先确定 x 轴位置,然后在 y 方向进行移动扫描,从而测得羽流中离子电流密度的径向分布,测试方法^[24]如下。在此基础上,通过积分求和计算出推力器总束流值。束流总值计算^[12]如下:

$$I_b = \frac{2\pi\Delta y \sum I(y_i)y_i}{\pi R^2} \quad (1)$$

式中: y 为距推进器中心线的径向距离; y_i 为第 i 个测量位置处距原点的径向距离; Δy 为相邻 2 个测量位置距离的增量; $I(y_i)$ 为法拉第探针在第 i 个位置测量的离子电流; R 为法拉第筒半径。

电流利用率定义为总束流 I_b 除以阳极电流 I_d , 计算公式如下:

$$\eta_b = \frac{I_b}{I_d} \quad (2)$$

根据离子电流密度分布,进一步可以计算出推力器束流发散角,公式如下:

$$\theta = 2 \arctan \frac{y_{90\%} - \frac{D}{2}}{L} \quad (3)$$

式中: $y_{90\%}$ 为总离子束电流 90% 的位置距原点的径向距离; D 为推进器喷口直径; L 为法拉第探针中心距坐标轴原点的轴向距离。

1.4 实验误差分析

μ HT-1 推力器束流密度测试实验中,测试误差主要来源于法拉第探针和辅助仪器误差,其中辅助仪器主要包括微安电流表、三维移动机构等。

法拉第探针误差主要包括^[25]:收集极二次电子误差、收集极与防护套间接误差,以及收集极与束流球面计算误差。高能离子轰击收集极时会产生二次电子,从而影响收集的离子电流偏差。本文实验中收集极采用金属钼, μ HT-1 推力器最大阳极电压为 1 200 V,考虑二价离子能量约为 1.6 keV 左右,对应钼的二次电子发射系数约为 0.02,即二次

电子发射误差约为 2.0%;收集极直径为 8.0 mm,接收面测试距离为 125~175 mm,根据法拉第筒误差公式^[26]计算,束流球面误差约为 0.43%;为有效避免收集极与保护套间距误差,应该使得该间接小于 5 个德拜长度 λ_d 。根据估算束流离子中德拜长度约为 0.1 mm,本实验中法拉第筒收集极与保护套间接为 0.5 mm,满足 5 个德拜长度,可以较好地消除该项误差。因此,通过以上分析,法拉第探针误差 u_f 主要来自于材料的二次电子发射,约为 2.0%。

辅助仪器误差主要来源于三维移动机构和微安电流表。实验中,三维移动机构采用高精度步进电机进行驱动,控制精度为 0.1 mm;离子电流采用高精度微安电流表进行采集,控制精度优于 0.01 μ A。针对仪器不确定误差,按 B 类不确定度计算,微安电流表不确定度 u_i 和三维移动机构不确定度 u_x 满足:

$$\begin{cases} u_i = \frac{\Delta i}{C} \\ u_x = \frac{\Delta x}{C} \end{cases} \quad (4)$$

式中: Δi 为微安电流表的允许最大误差(误差限); Δx 为三维移动机构的允许最大误差(误差限); C 为包含因子,取决于仪器误差的分布规律,仪器说明书无特殊说明,取矩形分布, $C = \sqrt{3}$ 。

进一步,由于法拉第探针和辅助仪器误差之间互不相关,结合误差传递函数,系统误差计算公式满足:

$$u_{all} = \sqrt{u_f^2 + u_i^2 + u_x^2} \quad (5)$$

式中: u_{all} 为系统误差; u_f 为法拉第探针误差。

实验中,法拉第探针测试误差为 2%,微安电流表控制精度为 0.01 μ A,三维移动机构控制精度为 0.1 mm,因此,系统测试误差约为 2.43%。

2 测试数据分析

2.1 束流离子电流密度分布诊断

为了全面获得该推力器束流空间分布,法拉第探针在不同轴向位置进行径向扫描。测试过程中,推力器阳极工质流量固定为 0.5 sccm,阳极电压 1 200 V 保持不变,法拉第探针从初始位置(0, 0, 125 mm)首先沿轴向(x 轴)后移,每次移动 5 mm。然后法拉第探针再沿径向(y 轴)从 -50 mm 扫描至 50 mm,每次移动步长为 1 mm,停留时间为 3 min,采集系统对收集极电流值自动采集,再用该电流值除以接收面积计算得到离子电流密度。为了减少测量误差,每个参数下共测试 5 次,取平均值为测试结果,并将最大值与最小值的差值作为测试误差棒。测试中沿着轴向共移动 11 次,即最后移动到

(0, 0, 175 mm)处,共采集数据 5 500 个。 μ HT-1 推力器束流离子电流密度分布如图 5 所示。

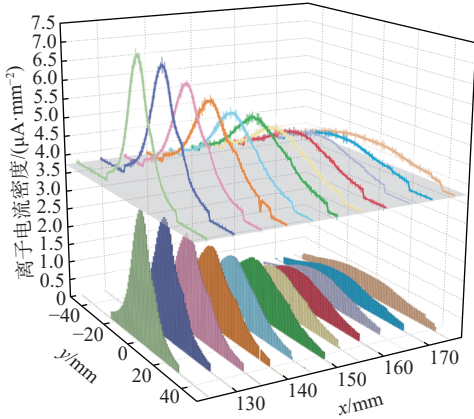


图 5 束流离子电流密度分布随轴向距离变化

Fig. 5 The variation curves of ion current density under different axial distances

三维移动机构从轴向 125 mm 移动到 175 mm 的过程中,束流离子电流密度分布平直度越来越好。这与束流离子的空间扩散过程相关,推力器中心离子电流密度最大值从 $3.516 \mu\text{A}/\text{mm}^2$ 逐渐减少到 $0.586 \mu\text{A}/\text{mm}^2$,减小幅度为 83.3%。

根据粒子数守恒,不同轴向位置的离子通量保持一致,球面坐标(R, θ)及立体角(Ω)下可表示为

$$R_1^2 j(R_1, \theta) d\Omega = R_2^2 j(R_2, \theta) d\Omega \quad (6)$$

根据推力器束流模型^[27],可得:

$$j(R, \theta) = \frac{\Gamma(\theta)}{R^2} \quad (7)$$

式中: $\Gamma(\theta)$ 表示 $j(R, \theta)$ 依赖于角度 θ 的变化关系。

由于束流具有一定的发散角度,随着三维移动机构远离推力器出口端面(即 z 越大),对应束流离子空间分布越来越稀疏,进而使得离子密度减小。同时,电子与离子在运动过程中相结合,也使得空间中的离子数量随着轴向距离增加而减少。

2.2 阳极电压参数调节

阳极电压作为 μ HT 推力器主要调节参数,对推力器束流分布具有重要影响。实验过程中,阳极工质流量设定为 0.5 sccm,阳极电压调节范围选取 700~1 200 V,调节间隔为 100 V,法拉第探针初始位置(0, 0, 150 mm),即法拉第探针收集极位于推力器出口端下游 150 mm 处,法拉第探针沿 y 轴从 -50 mm 移至 50 mm,每次移动步长为 1 mm,停留时间为 3 min,实验中每个参数共测试 5 次,取平均值为测试结果,并将最大值与最小值的差值作为测试误差棒。通过测试,获得不同阳极电压下离子电流密度分布。

离子电流密度分布随阳极电压变化如图 6 所

示。推力器束流离子电流密度分布总体表现出较好的轴对称性。这种轴向对称分布间接验证了该推力小尺寸结构下供气、磁场分布等轴向均匀性。

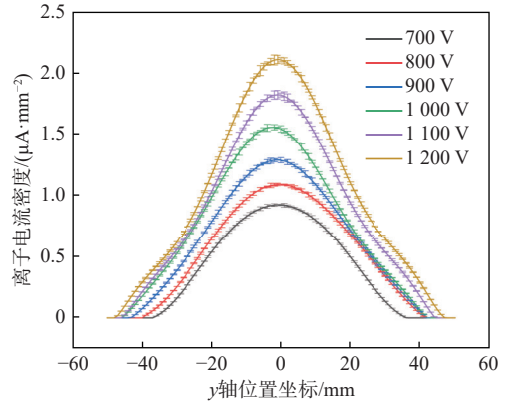


图 6 离子电流密度分布随阳极电压变化

Fig. 6 The variation curves of ion current density under different anode voltage

束流离子在空间中加速:

$$eU = \frac{1}{2}mv^2 \quad (8)$$

式中: e 为单位电荷; U 为通道内电压; m 为粒子质量; v 为粒子速度。

由离子加速过程可知,喷出离子速度 v_i 、离子电流密度 j 、阳极电压 V_d 满足:

$$\begin{cases} v_i = \sqrt{\frac{2eV_d\eta_v}{m_i}} \\ j = n_i e v_i \end{cases} \quad (9)$$

式中: m_i 为离子质量; η_v 为电压效率; n_i 为离子数密度。

因此,随着阳极电压从 700 V 增大到 1 200 V,通道内加速电场强度变大,离子所获得加速能量更多,同时通道内电离率和二价离子成分可能增大等(该部分参数未能测试),多重效果下使得束流离子电流密度整体增大,不同电压下束流曲线整体趋势如锥形嵌套。

图 7 为不同阳极电压下束流和阳极电流变化关系。当阳极电压从 700 V 逐渐增大到 1 200 V 时,阳极电流从 2.07 mA 增加到 4.76 mA,而束流也从 1.10 mA 增加到 3.22 mA,总束流值和阳极电流均呈现线性增长趋势。由于总束流根据式(1)积分计算得到,因此,总束流值也将随着阳极电压增大而增大。测试结果可为推力宽范围调节提供较好的数据支撑。

图 8 为电流利用率和束流发散角随阳极电压变化关系。电流利用率从 53.4% 增长到 67.7%,发散角全角从 41.3° 增大到 56.1° 。束流发散角和电流利用率均呈现出先快速增大后趋于缓和的趋势。

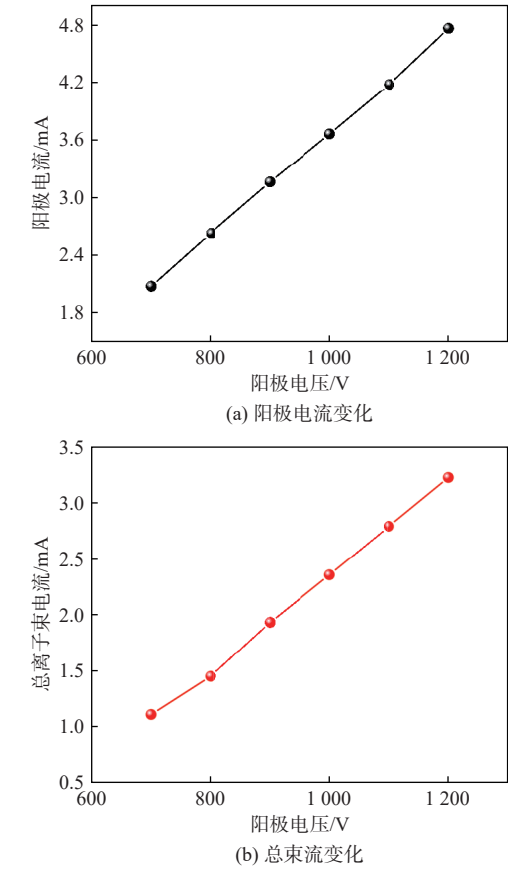


图 7 不同阳极电压下束流和阳极电流变化关系

Fig. 7 The curves of anode current and total ion beam current under anode voltage

分析认为: 随着阳极电压的增大, 通道内电子平均温度增大使得电离率提高, 因此, 电流利用率也相应增大; 同时, 通道壁面能量损耗增大使得电流利用率在获得迅速增大后便逐渐趋于饱和^[28]。束流发散角主要与通道内加速电场分布相关, 随着阳极电压大范围提高, 磁场对高能电子约束能力逐渐减弱, 影响了加速电场的聚焦性^[29], 使得发散角先增大后逐渐趋于稳定。

2.3 阳极工质流量参数调节

阳极工质流量作为推力器另一个重要调节参数, 对束流分布同样具有重要影响。因此, 实验过程中, 阳极电压设定为 1 200 V, 三维移动机构初始位置依然在 (0, 0, 150 mm) 处。测试时每组测试数据 5 次, 对测试结果取平均并进行误差棒处理。阳极工质流量变化共测试 5 种工况 (0.1 ~ 0.5 sccm), 每种工况下采集数据 1 500 个。

离子电流密度分布随阳极工质流量变化如图 9 所示。测试数据显示, 与阳极电压变化规律类似, 不同流量下的离子电流密度也呈现出中心对称分布的特性。不同阳极工质流量主要影响通道电离过程, 其中通道内原子和离子一维稳态连续性如下:

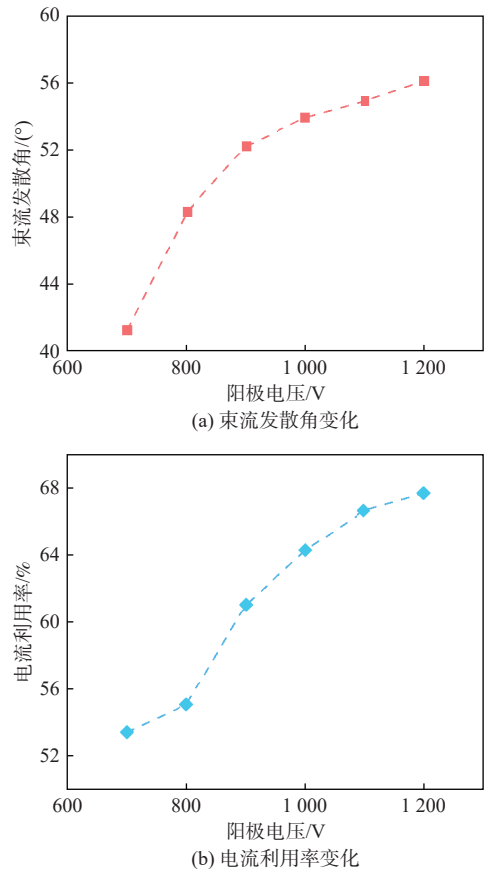


图 8 不同阳极电压下电流利用率和束流发散角变化关系

Fig. 8 The curves of beam divergence angle and current utilization efficiency under anode voltage

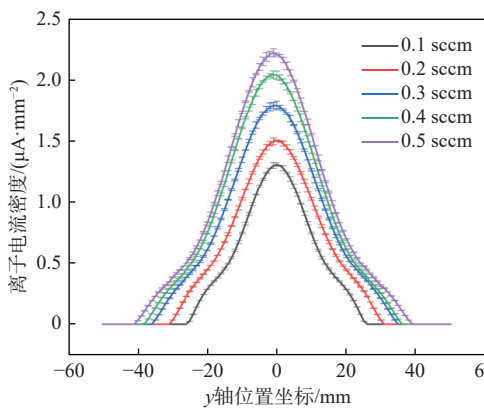


图 9 离子电流密度分布随阳极工质流量变化

Fig. 9 The variation curves of ion current density under different krypton work flow

$$\begin{cases} v_0 \frac{dn_0}{dz} = -n_e(z)n_0(z)\beta_{iz}(z) \\ v_i \frac{dn_i}{dz} = n_e(z)n_0(z)\beta_{iz}(z) \end{cases} \quad (10)$$

式中: $n_e(z)$ 为通道轴向电子数密度; $\beta_{iz}(z)$ 为电离速率系数; z 为轴向坐标。

当阳极工质流量增大时, 放电通道原子数量增多, 使得电离碰撞产生的离子数量变多, 经加速电场喷出后收集到的离子数量增多, 即束流离子电流

密度整体增大。

图 10 为不同阳极工质流量下总束流和阳极电流变化关系。当阳极工质流量从 0.1 sccm 逐渐增大到 0.5 sccm 时, 总束流由最小值 0.83 mA 增长到 3.19 mA, 而阳极电流也从 1.45 mA 增长到 4.80 mA, 均表现出较好的线性增长趋势。

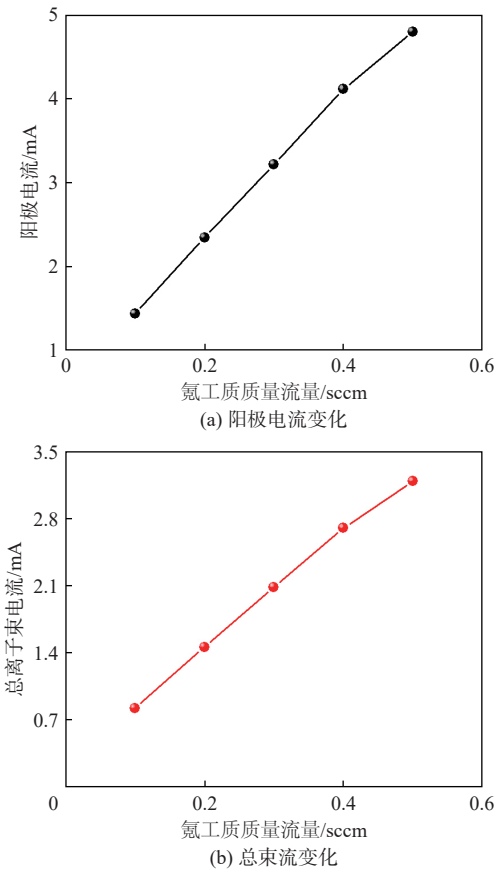


图 10 不同阳极工质流量下总束流和阳极电流变化关系
Fig. 10 The curves of anode current and total ion beam current under krypton work flow

霍尔推进器的阳极效率与离子质量和阳极电流的关系如下:

$$\frac{M}{e} I_a \eta_b = \dot{m}_i \tag{11}$$

式中: e 为单位电荷; M 为原子质量; $\dot{m}_i$ 为离子质量流量。

总质量利用效率可以表示如下:

$$\eta_m = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_p} = \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_a + \dot{m}_c} \tag{12}$$

式中: η_m 为质量利用效率; $\dot{m}_p$ 为推进器总质量流量; $\dot{m}_a$ 为阳极质量流量; $\dot{m}_c$ 为阴极质量流量。

根据上述推力器工作原理, 束流 I_b 与阳极工质流量 $\dot{m}_a$ 满足下式:

$$I_b = \frac{e \dot{m}_a \eta_m}{M} \tag{13}$$

由上式可知, 束流 I_b 主要与阳极工质流量、工

质利用率相关。当阳极电压固定时, 工质利用率较为稳定, 因此, 束流与阳极工质流量具有较好的线性关系。阳极电流的增加不仅与阳极工质流量的增大有关, 还需要考虑壁面二次电子^[27] 等因素。束流和阳极工质流量线性增长规律可为推力宽范围调节提供数据支撑。

图 11 为不同阳极工质流量下电流利用率和发散角变化关系。随着阳极工质流量增大, 电流利用率和发散角均呈现出先快速增大后趋于缓和的变化趋势。

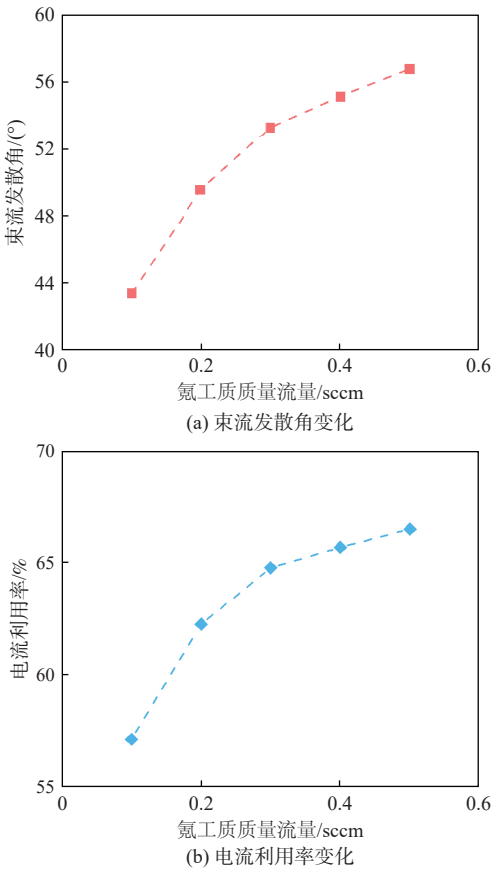


图 11 不同阳极工质流量下电流利用率和发散角变化
Fig. 11 The curves of beam divergence angle and current utilization efficiency under krypton work flow

阳极工质流量主要影响通道内中性原子密度分布, 而当原初电子的数量和电子温度相对稳定时, 电流利用率将随着电离率饱和而趋于稳定。此外, 随着阳极工质流量增加, 通道内电离区逐渐移向出口^[28], 电离碰撞产生离子的初始位置更多地聚集在出口附近, 从而影响束流发散角。

3 结 论

采用法拉第探针结合三维移动机构首次对 μ HT-1 推力器束流特性进行诊断, 通过实验数据分析, 得到主要结论如下:

1) 随着束流离子在空间中的扩散运动以及电子与离子的复合作用, μ HT-1 推力器束流离子密度沿轴向距离的增加呈现逐渐减小的趋势, 且束流平直度随距离增大而显著改善。

2) μ HT-1 推力器在宽范围工况下(阳极电压为 700~1 200 V, 阳极工质流量为 0.1~0.5 sccm)可实现稳定工作, 束流呈现出较好的轴对称分布特性。

3) 随着阳极电压增大, 离子获得能量增加, 束流离子电流密度整体增大, 呈现出锥形嵌套形式, 且具有较好的轴对称性。同时, 电子平均温度升高进一步导致电离率提高, 即电流利用率从 53.4% 增长到 67.7%, 也使得磁场对高能电子约束能力减弱, 影响电场聚焦性, 表现为发散角从 41.3°增大到 56.1°。

4) 随着阳极工质流量增大, 离子电流密度分布变化规律与阳极电压变化相似。但阳极工质流量变化主要对通道内中性原子密度分布有影响, 这种密度分布和电子温度间接使得电流利用率在 57.1%~66.8% 范围内波动。而影响发散角的原因主要是离子碰撞区向出口转移, 从而呈现出增长速度由快及慢增长, 从 43.4°增加到 56.7°。

5) 推力器总束流值与阳极工质流量、阳极电压均呈现线性变化, 可为后续推力宽范围调节、推力分辨率分析等提供数据基础。后续将开展多工况下的推力测量, 进一步对该推力器性能进行综合评估。

参考文献 (References)

[1] ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. *Physical Review Letters*, 2016, 116(6): 061102.

[2] 罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极 1 号”在轨测试[J]. *深空探测学报*, 2020, 7(1): 3-10.

LUO Z R, ZHANG M, JIN G, et al. Introduction of Chinese spaceborne gravitational wave detection program “taiji” and “taiji-1” satellite mission[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2020, 7(1): 3-10 (in Chinese).

[3] 涂良成. 天琴计划的回顾与小结[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(增刊 1): 253.

TU L C. Review and summary of Tianqin Project[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60(Sup 1): 253 (in Chinese).

[4] 胡越欣, 张立华, 高永, 等. 空间引力波探测航天器关键技术分析[J]. *航天器工程*, 2022, 31(4): 1-7.

HU Y X, ZHANG L H, GAO Y, et al. Analysis of key technologies of spacecraft for gravitational waves detection in space[J]. *Spacecraft Engineering*, 2022, 31(4): 1-7 (in Chinese).

[5] 祝竺, 赵艳彬, 尤超蓝, 等. 面向空间引力波探测的非接触式卫星平台无拖曳控制技术[J]. *南京航空航天大学学报*, 2022, 54(增刊 1): 9-13.

ZHU Z, ZHAO Y B, YOU C L, et al. Drag-free control technology of non-contact satellite platform for space gravitational wave detection[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2022, 54(Sup 1): 9-13 (in Chinese).

[6] 于达仁, 崔凯, 刘辉, 等. 用于引力波探测的微牛级霍尔电推进技术[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2020, 52(6): 171-181.

YU D R, CUI K, LIU H, et al. Micro-Newton hall electric propulsion technology for gravitational wave detection[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2020, 52(6): 171-181 (in Chinese).

[7] 于达仁, 牛翔, 王泰卜, 等. 面向空间引力波探测任务的微推进技术研究进展[J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(增刊 1): 194-212.

YU D R, NIU X, WANG T B, et al. The developments of micro propulsion technology based on space gravitational wave detection task[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2021, 60(Sup 1): 194-212 (in Chinese).

[8] ZIEMER J, MARRESE-READING C, DUNN C, et al. Colloid microthruster flight performance results from space technology 7 disturbance reduction system[C]//*Proceedings of International Electric Propulsion Conference*. Reston: AIAA, 2017.

[9] LEITER H, LOTZ B, FEILI D, et al. Design development and test of the RIT-ÅX mini ion engine system[C]//*Proceedings of the 31st International Electric Propulsion Conference*. Michigan: IEPC, 2009: 179.

[10] 李永, 刘旭辉, 汪旭东, 等. 空间极小推力宽范围可调推进技术研究进展[J]. *空间控制技术与应用*, 2019, 45(6): 1-12, 19.

LI Y, LIU X H, WANG X D, et al. Review and prospect on the large-range thrust throttling technology with extremely small thrust[J]. *Aerospace Control and Application*, 2019, 45(6): 1-12, 19 (in Chinese).

[11] AMARO-SEOANE P, AUDLEY H, BABAK S, et al. Laser interferometer space antenna[EB/OL]. (2017-02-01) [2013-05-28]. <https://arxiv.org/abs/1702.00786>, 2017.

[12] HEY F G. Micro Newton thruster development[M]. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.

[13] XU S Y, XU L X, CONG L X, et al. First result of orbit verification of Taiji-1 hall micro thruster[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, 36: 2140013-21400S9.

[14] POTRIVITU G C, SUN Y F, BIN ROHAIZAT M W A, et al. A review of low-power electric propulsion research at the space propulsion centre Singapore[J]. *Aerospace*, 2020, 7(6): 67.

[15] 杭观荣, 李诗凝, 康小录, 等. 霍尔电推进空间应用现状及未来展望[J]. *推进技术*, 2023, 44(6): 38-51.

HANG G R, LI S N, KANG X L, et al. Current space application status and future prospect of Hall electric propulsion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(6): 38-51 (in Chinese).

[16] MIKELLIDES I G, KATZ I, GOEBEL D M, et al. Hollow cathode theory and experiment. II. A two-dimensional theoretical model of the emitter region[J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 98(11): 113303.1-113303.14.

[17] HOFER R R, GOEBEL D M, MIKELLIDES I G, et al. Magnetic shielding of a laboratory Hall thruster. II. Experiments[J]. *Journal of Applied Physics*, 2014, 115(4): 043304.

[18] 朱悉铭, 宁中喜, 于达仁. HEP-70 霍尔推力器的发射光谱诊断研究[C]//*第十八届全国等离子体科学技术会议摘要集*. 合肥: 中国

科学技术大学出版社, 2017: 240.

ZHU X M, NING Z X, YU D R. Emission spectroscopy diagnostics of HEP-70 Hall thruster [C]//Proceedings of the 18th National Conference on Plasma Science and Technology. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2017: 240(in Chinese).

[19] 陈新伟, 高俊, 顾左, 等. 变工况下自励磁模式 LHT-60 霍尔推力器放电特性试验研究[J]. *真空与低温*, 2022, 28(1): 106-114(in Chinese).

CHEN X W, GAO J, GU Z, et al. Experimental study on discharge characteristics of self-field mode LHT-60 Hall thruster under variable operating conditions[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2022, 28(1): 106-114.

[20] LU S X, LUO W, LONG J F, et al. Numerical simulation optimization of neutral flow dynamics in low-power Hall thruster[J]. *Res-uluts in Physics*, 2023, 46: 106268.

[21] 罗威, 龙建飞, 徐禄祥, 等. 霍尔推力器放电通道中性气体分布及检测技术研究进展[J]. *固体火箭技术*, 2023, 46(1): 158-166.

LUO W, LONG J F, XU L X, et al. Research progress of distribution and detection technology neutral gas in Hall thruster discharge channel[J]. *Journal of Solid Rocket Technology*, 2023, 46(1): 158-166 (in Chinese).

[22] 龙建飞, 徐禄祥, 吴铭钊, 等. 一种霍尔推力器供气管路的气路分压绝缘方法及其应用: 中国, CN114458565B[P]. 2022-07-12.

LONG J F, XU L X, WU M S, et al. A method of gas circuit pressure divider insulation for Hall thruster supply line and its application: China, CN114458565B[P]. 2022-07-12(in Chinese).

[23] 龙建飞, 徐禄祥, 吴铭钊, 等. 一种霍尔推力器环式分压气路绝缘结构: 中国, CN114458564B[P]. 2022-07-12.

LONG J F, XU L X, WU M S, et al. An annular voltage-division gas path insulation structure for Hall thruster: China, CN114458564B [P]. 2022-07-12(in Chinese).

[24] 宁中喜. 霍尔推力器羽流发散角的定向探针测量方法[J]. *推进技术*, 2011, 32(6): 895-899.

NING Z X. Directional probe measurement of plume divergence angle in Hall thrusters[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(6): 895-899 (in Chinese).

[25] 龙建飞, 张天平, 吴宸宸, 等. LIPS-200 离子推力器放电室出口离子密度分布研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(5): 1194-1200.

LONG J F, ZHANG T P, WU C C, et al. Study on ion density distribution in discharge chamber exit of LIPS-200 ion thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(5): 1194-1200 (in Chinese).

[26] 刘星宇, 李鸿, 毛威, 等. 霍尔推力器能量损失系统性评价方法[J]. *推进技术*, 2022, 43(7): 470-480.

LIU X Y, LI H, MAO W, et al. Systematic evaluation method for power loss of Hall thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(7): 470-480 (in Chinese).

[27] 商圣飞, 顾左, 贺碧蛟, 等. 离子推力器束流密度分布模型[J]. *真空科学与技术学报*, 2015, 35(12): 1414-1419.

SHANG S F, GU Z, HE B J, et al. Modelling of ion beam current density of ion thruster[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2015, 35(12): 1414-1419 (in Chinese).

[28] 卿绍伟, 鄂鹏, 段萍. 壁面二次电子发射对霍尔推力器放电通道绝缘壁面双鞘特性的影响[J]. *物理学报*, 2013, 62(5): 279-286.

QING S W, E P, DUAN P. Effect of wall secondary electron emission on the characteristics of double sheath near the dielectric wall in Hall thruster[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(5): 279-286 (in Chinese).

[29] 杨三祥, 王倩楠, 高俊, 等. 径向磁场对霍尔推力器性能影响的数值模拟研究[J]. *物理学报*, 2022, 71(10): 347-355.

YANG S X, WANG Q N, GAO J, et al. Numerical study of the effect of radial magnetic field on performance of Hall thruster[J]. *Acta Physica Sinica*, 2022, 71(10): 347-355 (in Chinese).

Experimental study on beam characteristics of μ HT-1 thruster under wide range adjustment of operating parameters

HUANG Dan^{1, 2, 3, 4, 5}, LONG Jianfei^{1, 2, 3, 4, 5, *}, CHENG Ye^{1, 2, 3, 4, 5}, WANG Jiabin^{1, 2, 3, 4, 5},
XU Luxiang^{1, 2, 3, 4, 5}, YANG Wei⁶

(1. School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study,
UCAS, Hangzhou, 310024, Zhejiang, China;

2. National Space Science Centre, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

4. Gravitational Wave Universe Taiji Laboratory, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China;

5. Key Laboratory of Gravitational Wave Precision Measurement of Zhejiang Province, UCAS, Hangzhou 310024, China;

6. School of Electrical Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 401331 China)

Abstract: The beam properties of the micro Hall thruster μ HT-1, which is intended for space gravitational wave detection, are being experimentally investigated for the first time. A Faraday probe combined with a three-dimensional mobile mechanism was used for diagnosis, and the beam ion current density distribution under a wide range of the anode voltage from 700 to 1 200 V and the anode mass flow from 0.1 to 0.5 sccm was obtained. Moreover, the variation trend of total ion beam current, anode current, current utilization efficiency, beam divergence angle and other parameters were further analyzed. According to test data, the spatial distribution of beam ions changes from dense to sparse as one moves away from the axial direction of the μ HT-1 thruster. Additionally, the beam becomes more flat due to the diffusion motion of beam ions in space and the binding motion of electrons and ions. The μ HT-1 thruster can work stably under a wide range of conditions (anode voltage 700~1 200 V, anode mass flow 0.1~0.5 sccm), and the beam current presents a good axis-symmetric distribution. With the increase of anode voltage, the average temperature of electrons can be increased, which further leads to the increase of ionization rate, that is, the current utilization efficiency increases from 53.4% to 67.7%; and the magnetic field restraint ability of high-energy electrons is weakened, affecting the electric field focusing, and the beam divergence angle increases from 41.3 ° to 56.1 °. With the increase of anode mass flow, the neutral atom density distribution in the channel is affected, the current utilization efficiency fluctuates in the range of 57.1 % ~ 66.8 %; and the ion collision zone is transferred to the outlet, making the beam divergence angle increase from 43.4 ° to 56.7 °. The total ion beam current of the thruster changes linearly with anode mass flow and anode voltage, which provides the data basis for the subsequent thrust wide range adjustment and thrust resolution analysis.

Keywords: micro Hall thruster; beam characteristics; ion current density; plasma diagnosis; experimental study

Received: 2023-06-21; **Accepted:** 2023-10-13; **Published Online:** 2024-01-05 15:25
URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240104.1315.002
Foundation items: National Key R&D Program of China (2021YFC2202700); Natural Science Foundation of Hunan Province (2021JJ30564); Key Project of Hunan Provincial Department of Education (19A440); Science and Technology Research Project of Chongqing Municipal Education Commission (KJZD-K202101506); Independent Project of Hangzhou Institute of Advanced Studies, National University of Science and Technology (2022ZZ01009)

* Corresponding author. E-mail: ljf510@163.com