

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

DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0041

一种非闭环 $E \times B$ 霍尔推力器设计与实验研究

张广川¹, 王伟宗^{1,2,*}, 任军学^{1,2}, 王一白^{1,2,3}, 汤海滨^{1,2}, 杨立军^{1,2}

(1. 北京航空航天大学 宇航学院, 北京 100191; 2. 航天器设计优化与动态模拟技术教育部重点实验室, 北京 100191;

3. 北京航空航天大学宁波创新研究院, 宁波 315100)

摘 要: 霍尔推力器是一种广泛应用于航天器的先进电推进装置。传统的环形闭环霍尔推力器由于结构限制, 无法开展放电通道内磁场构型剖切面上等离子体二维分布诊断。为解决这一问题, 设计一种带有光学诊断窗口的非闭环直线型通道电场 $E \times$ 磁场 B 的霍尔推力器, 对推力器内部磁场和流场进行了仿真分析, 提出磁场设计原则。通过稳态放电参数监测、瞬态放电振荡分析、束流区等离子体参数诊断和放电通道内部电离区等离子体分布结构成像, 验证了直线型放电通道构型对等离子体的有效约束与电磁场加速, 发现其放电模式随推进剂流量的演变趋势, 并实现基于放电电压的放电模式调控。成功获取了放电通道内部等离子体在磁场构型剖切面上二维分布精细结构。综上, 实现了简易装置下类霍尔推力器 $E \times B$ 等离子体稳定放电与模式调控, 结合等离子体二维平面上分布结构的光学诊断, 为进一步霍尔推力器典型放电振荡过程的等离子体微观表现提出了新思路。

关键词: 霍尔推力器; 磁场; 等离子体二维分布; 非闭环直线型通道; 放电振荡

中图分类号: V439⁺.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-5965(2026)04-1064-12

巨型低轨卫星互联网星座已经开始为全球提供商业和军事服务。极大的商业和军事需求促使多个国家相继开展了相关卫星互联网星座布局。大规模卫星星座的运行需要配备高性能空间推进装置, 以满足卫星星座多样化的空间任务和长期在轨需求。霍尔推力器是一种静电加速的先进电推进装置^[1], 凭借高比冲、高推力密度、长寿命、结构简单和可靠性高等优势, 已经广泛应用于低轨卫星星座任务中。

霍尔推力器是通过正交电磁场产生和加速离子的静电推力器。等离子体在放电通道内产生, 通道内等离子体与电磁场的分布直接决定了推力器束流分布及推力器宏观性能参数^[2-3]。因此, 对霍尔推力器放电通道内等离子体的研究越来越受到重

视。除了通过仿真计算手段获取放电通道内的等离子体参数外^[4-5], 在实验方面, 研究人员通常使用静电探针和光学手段获取放电通道内部分等离子体参数。静电探针方面, 研究人员通过使用壁面探针和快速进给探针, 获得了霍尔推力器放电通道内部空间电势、等离子体密度及电子温度分布^[6-7], 揭示了霍尔推力器放电通道内部等离子体一维分布规律^[8-10], 明晰电场和电子温度在通道出口处存在最大值, 主要电势降发生在通道出口。光学诊断方面, 研究人员使用发射光谱法, 获得了霍尔推力器放电通道内等离子体的谱线成分, 使得研究人员能够进一步分析放电通道内等离子体的组分及放电过程^[11-12]。激光诱导荧光光谱法的应用使得放电通道内的离子速度分布能够得到测量。研究结果显

收稿日期: 2024-01-18; 录用日期: 2024-01-30; 网络出版时间: 2024-03-12 18:00

网络出版地址: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240312.1539.003

基金项目: 中国博士后科学基金(2023M740181); 中央高校基本科研业务费专项资金(YWF-23-Q-1044)

*通信作者. E-mail: wangweizong@buaa.edu.cn

引用格式: 张广川, 王伟宗, 任军学, 等. 一种非闭环 $E \times B$ 霍尔推力器设计与实验研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2026, 52(4): 1064-1075. ZHANG G C, WANG W Z, REN J X, et al. Design and experimental study of an unclosed-loop $E \times B$ Hall thruster[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2026, 52(4): 1064-1075 (in Chinese).

示,霍尔推力器通道内部的离子轴向加速过程能够通过激光诱导荧光诊断结果显现出来^[13-14]。等离子体在放电通道内产生,沿着放电通道向外逐渐被加速,速度急剧增加的地方位于推力器放电通道出口上游 10 mm。但是在推力器放电通道出口外部(下游 20 mm 范围内)依然存在加速过程,这是因为通道内等离子体与推力器外部的空心阴极形成的加速电场延伸到推力器外部,使得排出通道外的高速离子流依然被加速,直至越过阴极位置。

虽然目前已经有部分针对放电通道内部等离子体参数分布规律的研究,但是目前的研究存在 2 个重要的问题:静电探针诊断,静电探针为侵入式诊断,会给等离子体,尤其是密度较高的放电通道内部的等离子体放电过程带来干扰,破坏原来的物理过程和现象,引入测量误差,且空间分辨率不足;光学诊断手段虽然不干扰等离子体,但是目前还没有关于放电通道内部的等离子体二维平面分布及随时间涨落的相关研究,尤其是磁场对剖切面上等离子体二维分布约束作用,以及等离子体与壁面相互作用的研究。所以,需要从改进等离子体诊断手段和优化等离子体放电装置两方面分别作出努力,以探究放电通道内等离子体二维剖切面上的分布规律。

区别于传统的闭环环形霍尔推力器,研究人员曾设计出多款异形的类霍尔推力器装置,包括线性霍尔推力器(linear Hall thruster, LHT)^[15]、开放式漂移霍尔推力器(open drift thruster, ODT)^[16]或平面霍尔推力器(planar Hall thruster, PHT)^[17],以及跑道型长闭环霍尔推力器(racetrack-shaped Hall thruster, RHT)^[18]。但最终由于推力性能不佳^[19-24],未能得到广泛研究与应用。但这些异形类霍尔推力器却为本文进行电场 $E \times$ 磁场 B 漂移等离子体装置内部等离子体微观行为研究提供了很好的新思路。可以通过对传统闭环环形霍尔推力器结构进行相似变换,设计出具有与传统闭环环形霍尔推力器相似的放电原理、等离子体产生与加速过程的新型放电装置,使其具备易诊断优势,从而实现霍尔推力器内部等离子体放电基本微观过程研究。

基于此,本文设计了一种具有可视放电腔的非闭环 $E \times B$ 漂移推力器(unclosed $E \times B$ drift thruster with visible chamber 01, UDTv01),旨在利用非闭环放电腔等离子体二维诊断的便利性,开展 $E \times B$ 构型放电相关物理过程研究,尤其是放电振荡与放电通道内等离子体电离区之间的匹配关系,最终用于传统环形霍尔推力器的优化设计和性能提升。本文使用石英玻璃窗口取代陶瓷侧壁,使得能够获取放电

通道内等离子体二维分布。同时,本文对 UDTv01 开展了一系列的测试,研究了 UDTv01 的基本放电条件、放电振荡、等离子体参数分布规律。带有观察窗口的陶瓷放电通道使通道内的等离子体可见,促使本文成功获得了放电通道内的等离子体电离区的二维光学图像。

1 非闭环 $E \times B$ 霍尔推力器设计

1.1 整体结构设计

图 1 为传统环形闭环霍尔推力器结构和工作原理图。闭环环形霍尔推力器核心结构包括环形放电腔室、磁场组件(内磁极/线圈、外磁极/线圈和导磁回路)、阳极气体分配器和空心阴极等。闭环环形霍尔推力器工作时,环形放电通道上游的阳极气体分配器上施加百伏级放电电压,同时向放电通道内通入周向均化的推进剂气体,以在放电通道内形成周向均匀的中性原子分布背景。通过向空心阴极内部通入推进剂气体并对发射体进行加热触发空心阴极内部放电,形成稳定的阴极电子源。由空心阴极排出的原初电子受环形放电通道内阳极电势吸引,进入环形放电通道。电子在沿 z 轴方向受电场牵引运动过程中,受径向磁场约束,沿径向磁场做回旋运动。但由于电场和磁场呈正交结构,

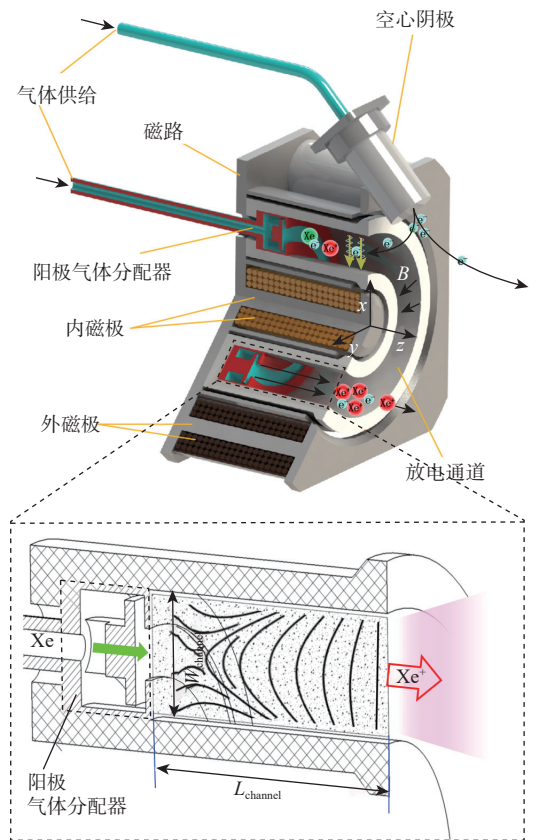


图 1 环形闭环霍尔推力器结构原理图

Fig. 1 Schematic of annular closed-loop Hall thruster structure

使得电子沿 $E \times B$ 方向做漂移运动,即形成沿环形放电通道角向的漂移运动过程。回旋和漂移运动的存在,使得电子在通道内停留时间大幅增加,使电子与背景气体原子碰撞电离,生成等离子体。产生的阳离子在阳极气体分配器高电势的加速下,沿放电通道 z 轴方向向外高速喷出,从而形成反作用推力,用于航天器的空间推进动力。正是由于 $E \times B$ 方向(周向)漂移运动的存在,使得通道内电离区沿周向分布均匀,达到高效电离与加速的效果。

但是这种环形闭环放电通道存在明显等离子体诊断弊端,只能从放电通道出口端面实现对放电通道内等离子体的静电探针及光学方法诊断。但是通道出口处呈现复杂的加速过程与流场结构,光学仪器易受到等离子体高速射流污染与损毁。更重要的是,端面诊断,只能得到放电通道内等离子体分布结构沿 z 轴方向的积分结果,无法获取通道内等离子体在磁场剖切面上(见图1)高空间分辨率的二维分布结果。因此,为对霍尔推力器 $E \times B$ 漂移等离子体源/加速器进行进一步的放电与加速机理研究,本文设计了一种具有二维诊断剖面的直线型通道非闭环 $E \times B$ 霍尔推力器(UDTv01),如图2所示。

UDTv01 核心部件包括陶瓷放电通道、阳极气体分配器、上下永磁体磁极、散热回路及空心阴极电子源。与图1所示环形闭环霍尔推力器不同,UDTv01 采用直线型放电通道。上下永磁体磁极对

向放置,形成沿 x 轴方向的纵向磁场。 x 轴方向纵向磁场与 z 轴方向的电场形成正交电磁场构型,从而约束空心阴极电子源发射的原初电子,产生沿 y 轴方向的 $E \times B$ 漂移运动,形成碰撞电离与等离子体加速微观物理过程。

1.2 光学诊断窗口设计

在直线型放电通道的基础上,UDTv01 侧面配备全通道深度光学诊断窗口,如图3所示。光学诊断窗口由高透光耐热石英玻璃材料制成,嵌入直线型放电通道侧壁,形成封闭式放电通道。光学诊断窗口的设置,使得 UDTv01 放电通道内部等离子体分布、电离和加速区在磁场剖面上的二维结构直接可视化,使得通过高速相机或光谱仪器对 $E \times B$ 漂移等离子体源内部等离子体微观过程进行直接的高空间分辨率二维诊断成为可能。

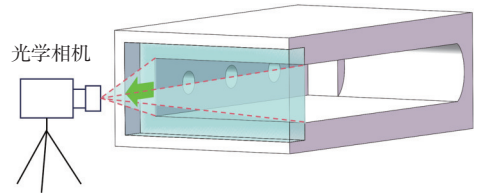


图3 非闭环直线通道光学诊断窗口

Fig. 3 Optical diagnostic window for non-closed loop linear channel

1.3 磁场构型设计

为保证 UDTv01 与环形闭环霍尔推力器具有相似的放电过程,磁场结构是 UDTv01 设计的关键。UDTv01 磁场结构设计遵循如下准则:①相似的径向磁场构型与凸向阳极磁感线走势;②相似的磁场梯度分布,出口磁场强度最大;③沿通道 y 轴方向,磁场存在足够的均匀段。

UDTv01 磁场构型仿真结果如图4~图7所示。其中,图4为放电通道 zx 平面上磁场构型与传统环形霍尔推力器典型通道内磁场。如准则①和准则②所述,“相似的磁场构型和磁感线走势”指沿放电通道 x 轴方向/径向方向的径向磁场分布结构,主要具备以下特点,首先,通道出口磁场径向分量远大于轴向,且与放电通道壁面成近似直角的角

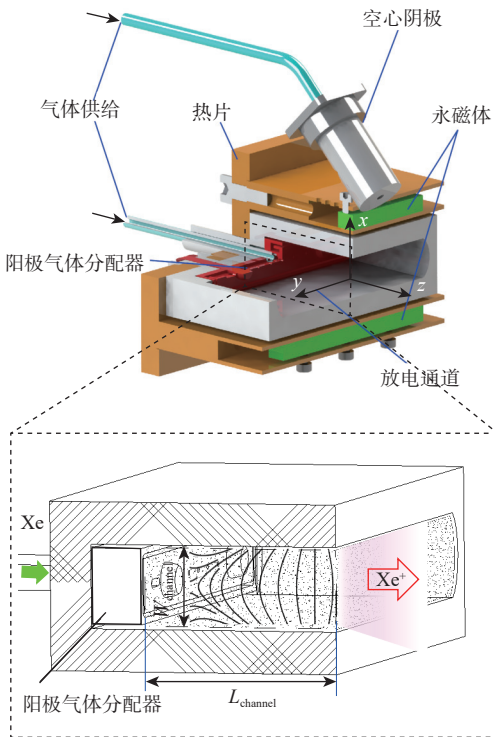


图2 非闭环霍尔推力器结构原理图

Fig. 2 Schematic of unclosed-loop Hall thruster structure

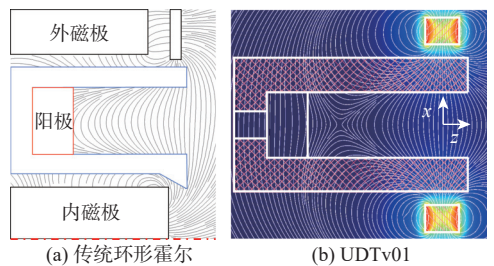


图4 zx 平面上磁场构型

Fig. 4 Magnetic field configuration on zx profile

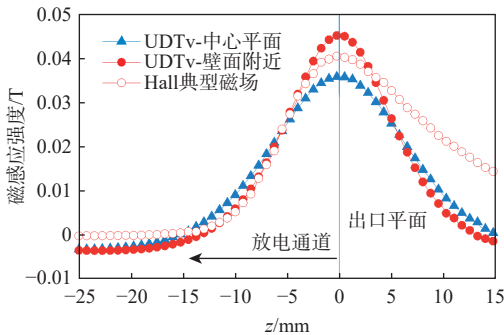


图 5 zx 平面上沿 z 轴磁场强度曲线

Fig. 5 Magnetic field strength curves along z -axis on zx profile

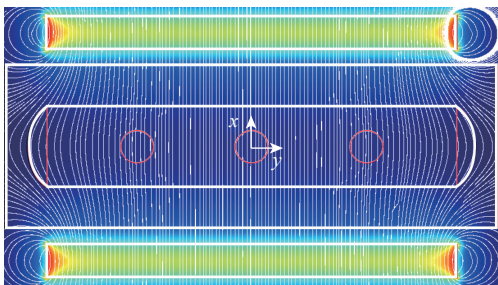


图 6 yx 平面上磁场构型

Fig. 6 Magnetic field configuration on yx profile

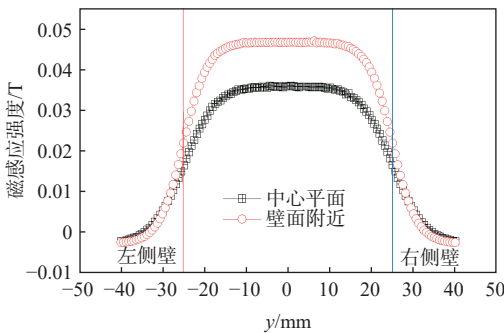


图 7 yx 平面上沿 y 轴磁场强度曲线

Fig. 7 Magnetic field strength curves along y -axis on yx profile

度相交, 从而使电子绕磁感线做回旋运动, 阻止电子直接轰击高电势阳极, 增加电子在通道内停留时间, 促进碰撞电离; 其次, 磁感线呈凸向上游阳极的弯曲走势, 对称中心在放电通道中心平面上, 形成聚焦型磁场, 约束等离子体加速过程; 最后, 随着向上游延伸, 磁感线弯曲程度逐渐增加, 与壁面夹角逐渐减小。

如图 5 所示, 遵循传统霍尔推力器磁场设计准则, UDTv01 采用正磁场梯度以提升霍尔推力器放电稳定性和电流利用效率。放电通道中心平面上磁场最大值约 0.036 T, 确保实现放电通道内电子磁化。磁场最大值在放电通道出口上游 4 mm 处达到, 以促使主要电离和加速过程集中发生于放电通道出口附近, 提升原子电离效率, 约束离子加速过程, 减弱离子加速对放电通道的腐蚀。同时, 在

x 轴方向, 壁面附近磁场高于放电通道中心面上磁场强度, 从而在 UDTv01 放电通道内形成纵向 (径向) 磁镜结构, 实现壁面附近磁镜对等离子体排斥与约束效果, 将等离子体约束在放电通道中心, 以降低等离子体与壁面的相互作用。

在 yx 平面上, UDTv01 磁场分布结构如图 6 和图 7 所示。在 yx 剖切面, 磁感线走势整体上呈与 x 轴平行方向, 但是在放电通道两侧面, 磁感线呈弯曲状且与陶瓷壁面基本平行。顺壁面磁感线走势用以约束电子跨场运动, 降低等离子体与壁面的碰撞概率。如图 7 所示, 在 y 轴方向通道宽度为 55 mm, 磁场在 ± 16 mm 范围内保持恒定, 从而使等离子体在 y 轴方向形成均匀稳定的电离过程, 以保证 UDTv01 侧面光学诊断能得到稳定的二维等离子体分布结构。

1.4 推进剂流场设计

UDTv01 的阳极同时作为推进剂气体分配器, 将推进剂供给管路输送进入 UDTv01 的推进剂气体 (本文使用氙气) 进行导流与均化, 从而实现推进剂气体原子在放电通道内均匀分布。

图 8 为 UDTv01 的气体分配器剖切面结构。该气体分配器内部流道采用一级 y 轴方向主流道配合双 S 型均化腔体。由左侧推进剂供给管路流入的氙气原子, 在管路尽头受到轴向排放小孔的约束, 一部分通过排放小孔进入放电通道, 另一部分受流道约束, 先进入 y 轴方向一级扩散流道, 使管路入口处的高密度氙气原子沿 y 轴流动。在 y 轴方向一级扩散流道沿途, 分别设置宽度不同的排放口, 从而将一级扩散流道内 y 轴方向非均匀分布气体引流至上下 S 型均化腔体, 进一步实现二级均化引流。

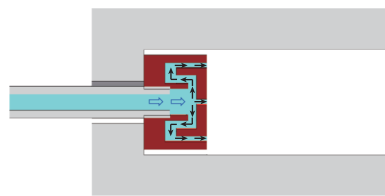


图 8 阳极气体分配器结构设计

Fig. 8 Structure design of anode gas distributor

为进一步优化通道内气体原子分布均匀性, 本文通过仿真获取分配器和放电通道内部流场结构。通道内典型中性原子密度值为 $10^{18} \sim 10^{19} \text{ m}^{-3}$, 数密度 n 取中位数 $5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$, 通道特征尺寸 D 取 10 mm, 氙原子直径 $d = 4.05 \times 10^{-10} \text{ m}$, 由克努森数计算公式 ($K_n = 1 / \sqrt{2} \pi d^2 n D$) 得到本推力器流场的克努森数为 27.46 (> 10), 属于自由分子流态。

采用自由分子流方法对 UDTv01 气体分配器气体扩散过程进行微观仿真模拟, 流动计算域网格划

分采用四面体网格,流道结构采用局部加密,最大网格单元为 1.7 mm,最小网格单元为 0.024 mm。计算中忽略气体原子间的碰撞,原子与固体边界碰撞满足 Knudsen 余弦定律,碰撞后气体原子速度分布概率满足:

$$P(c) = \left(\frac{m_{Xe}}{k_B T}\right)^2 \frac{c^3}{2} \exp\left(-\frac{m_{Xe} c^2}{2k_B T}\right) \quad (1)$$

式中: c 为气体分子速率; m_{Xe} 为 Xe 原子质量; k_B 为玻尔兹曼常量。

图 9 为 2 mL/min 入口流量工况下 UDTv01 放电通道 zx 剖切面上 Xe 原子密度二维密度分布云图。由图可知,在通道上游,UDTv01 放电通道内原子密度分布主要由上下 S 型均化腔出口处的高浓度原子团形成,随着高浓度区域向通道下游扩散,沿 x 轴方向的密度均匀度逐渐增加,在放电通道出口上游 10 mm 处达到均匀状态。

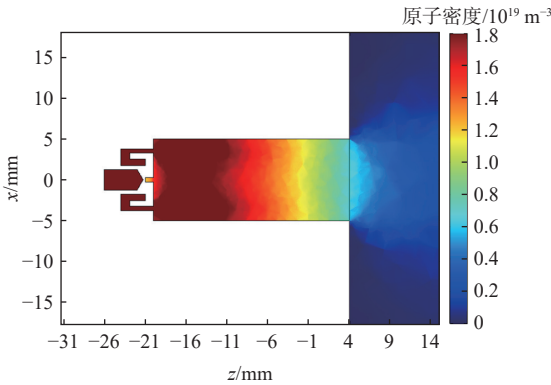


图 9 zx 平面上原子密度二维分布

Fig. 9 2D density distribution of atoms on zx profile

图 10 为放电通道中心面处和上壁面处原子密度分布随 z 轴方向变化曲线。原子密度沿 z 轴方向向外逐渐递减,通道上游阳极表面原子密度达到 $8 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$,通道出口原子密度约为 $2 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 。壁面附近原子密度在通道出口处呈现剧烈下降趋势,这是因为经过通道出口后,随着通道壁面的消失,原子沿 x 轴方向向外扩散,使得出口处壁面附近原

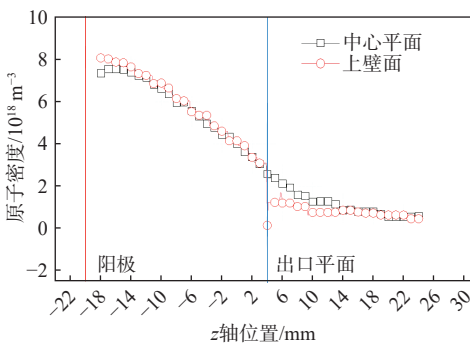


图 10 zx 平面上沿 z 轴原子密度分布

Fig. 10 Density distribution of atoms on zx profile

子密度急剧下降。而通道中心面上原子密度受周围原子密度场的约束,并未受到通道壁面消失的明显影响。

相对 x 方向 10 mm 高度,通道在 y 轴方向通道宽度达 55 mm,中性原子在 y 轴方向分布均匀性决定着通道内电离的连续性和电离效率的优劣。图 11 为 zy 剖切面上中性气体原子分布二维云图。由图 11 可知,放电通道内原子密度沿 y 方向在 55 mm 的宽度上近似均匀分布,更直观的曲线对比如图 12 所示。随着 z 轴位置的增加(距离阳极位置为 10~24 mm),通道内原子密度从 $6.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 下降到 $2.5 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$,但在 y 轴方向,原子密度呈均匀分布,波动范围为 6.75%~23.59%。最大波动出现在阳极出口附近,通道边缘原子密度明显降低。这是由于上述通道壁面约束效果的消失,使得原子向外膨胀,出口处壁面附近原子密度明显降低。但是在通道内部,并无此现象,原子密度波动范围为 6.75%~13.2%,因此,整体上该气体分配器能均化通道内原子密度的效果。

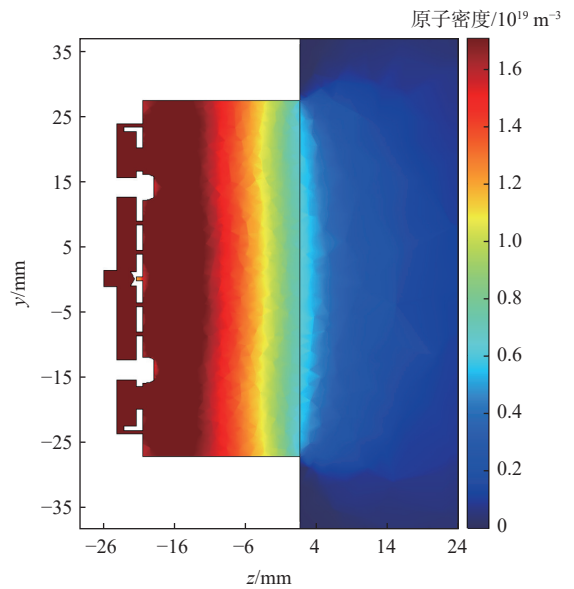


图 11 zy 平面上原子密度二维分布

Fig. 11 2D density distribution of atoms on zy profile

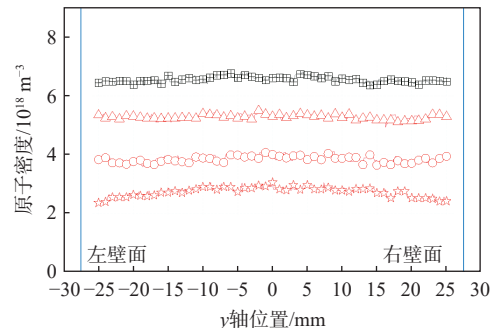


图 12 zy 平面上沿 y 轴原子密度变化曲线

Fig. 12 Density variation curves of atoms on zy profile

2 实验设备

2.1 真空环境与放电系统

图 13 为 DiWenBeng-2500 (DWB-2500) 真空室环境模拟, 该真空室的直径为 2.5 m, 长度为 5.5 m。真空室被束流保护板分为霍尔推力器诊断及测试设施空间及抽气泵组的舱室。DWB-2500 真空室总共配备了三级真空泵, 可以将舱内的真空环境提高到 1×10^{-5} Pa。该真空舱主要用于为各型号霍尔推力器性能测试、寿命考核、束流诊断等实验。实验中氙气和氦气被通入舱内, 动态真空度可以保持在 5×10^{-3} Pa 以下, 能够保持推力器正常放电。同时, 配备气体进给、微推力架、电参数监测、光学三维侵蚀形貌重建、强化电荷耦合器件 (intensified charge-coupled device, ICCD) 相机和光谱仪, 可以满足霍尔推力器地面测试和等离子体诊断需求^[25]。

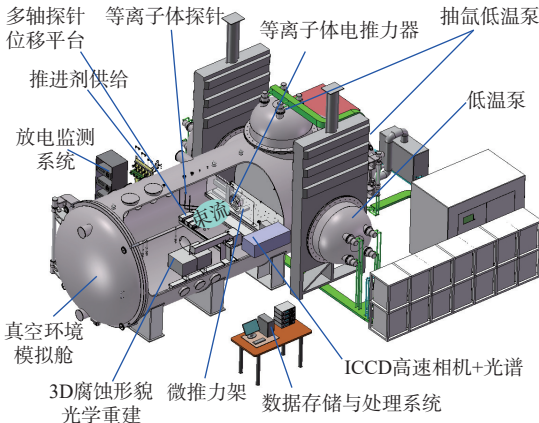


图 13 真空舱和电推进放电与诊断测试系统

Fig. 13 Vacuum chamber and electric propulsion discharge and diagnostic test system

2.2 微推力测量装置

图 14 为微小推力测量架的结构原理图。推力架由定架、动架、位移传感器、PID 控制箱、电磁反馈器等组成。推力作用于动架上产生位移, 位移信号传入 PID 控制箱后, 转化为电流信号传入电磁反馈器, 使推力架动架处于平衡状态。通过标准砝码

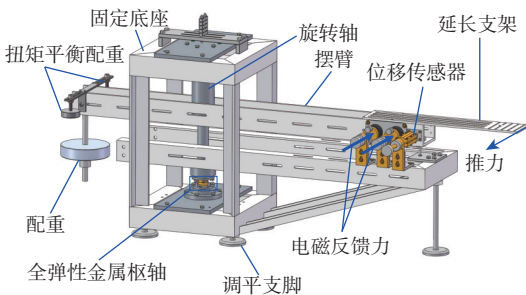


图 14 微小推力测量架

Fig. 14 Micro-thrust measurement device

对电磁力信号进行标定, 将反馈信号与推力信号一一对应, 得到推力值 T 。进一步, 通过已知的推进剂流量 m 和平均速度计算公式 ($v = F/m$) 计算束流中重粒子平均速度 v , 这是对包括带正电离子加速和推进剂原子电离效果的综合评估。

2.3 等离子体诊断探针与成像

法拉第探针通常用于分析推力器放电通道外束流区等离子体特性^[25-28], 包括离子束电流密度、等离子体束流发散程度等, 进而推算推力器积分离子束电流、推进剂利用率和电流利用率。本文采用的带保护环法拉第探针的示意图及电路设置如图 15 所示, 由平面的钨收集器、保护环和若干陶瓷绝缘体组成。平面钨收集器直径为 4 mm, 直接暴露在等离子体束中。收集器被包围在一个不锈钢保护环内, 且保护环和收集器之间设置有绝缘陶瓷圈。

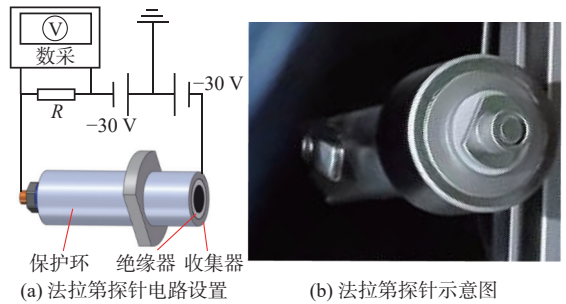


图 15 法拉第探针和电路配制

Fig. 15 Faraday probe and electrical circuit setup

在等离子体束流参数测试期间, 收集器和保护环均被设置为对地 (真空室) 的 -30 V 的偏置电压, 以排斥电子、收集离子, 同时保护环能削弱探针收集过程中的边缘效应。在实验中, 法拉第探针的扫描路径分为 2 种, 首先, 在 UDTv01 出口下游不同 z 轴距离 (10 mm、26 mm 和 38 mm) 处, 沿 y 轴方向进行扫描, 以获取 UDTv01 等离子体束流在 y 轴方向的非均匀性分布情况。其次, 沿 UDTv01 的 x 轴方向进行扫描, 以对比不同 x 轴位置处等离子体束流结构的偏心情况与阴极束流对 UDTv01 束流的影响。

3 结果与讨论

3.1 稳态伏安特性

图 16 为 UDTv01 阳极平均放电电流随放电电压变化趋势。随着放电电压的增加, 放电电流约呈线性上升, 这是因为固定推进剂流量下, 阳极放电电压的提升促进了放电通道内电子能量获取和电子与背景原子碰撞电离过程, 提升通道内等离子体密度, 从而使得阳极吸收更多电子导致阳极放电电流升高。进一步, 改变阳极推进剂流量会影响 UDTv01 的放电电流, 更高的流量对应着更大的放

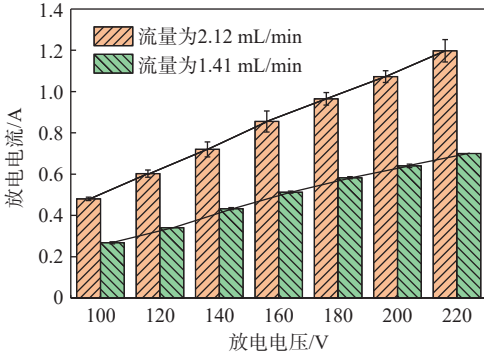


图 16 UDTv01 放电伏安特性

Fig. 16 Discharge voltametric characterization of UDTv01

电电流。这是因为阳极流量主导了放电通道内的电离过程,较高的流量能够生成较高的等离子体密度,同时也产生较大的放电电流。对比不同流量下,放电电流随放电电压的增长速度发现,相比流量为 1.41 mL/min 工况,大流量(2.12 mL/min)工况下放电电流随放电电压增长速度更快,这是因为在相同电压提升幅度的情况下,大流量工况下更多背景气体原子参与电离,电压的提升对电离促进效果更明显。

3.2 瞬态放电振荡

在实现 UDTv01 稳定放电并获取其放电电流均值随放电电压和推进剂流量演化规律的前提下,本文进一步开展 UDTv01 放电瞬态特性分析。图 17 为 1.05 mL/min 流量工况下放电电流瞬态波形和傅里叶变换频谱图。由图可知,1.05 mL/min 流量工况下,UDTv01 放电存在 2 种模式,即稳态直流放电模式和低频振荡模式。当放电电压小于 160 V 时,放电电流处于 0.2~0.35 A 的恒流模式,随着放电电压的增加,当电压超过 170 V 后,放电电流进入周期性振荡模式,周期约为 125 μs,放电电流主频为 8 kHz。

上述放电振荡是 $E \times B$ 霍尔推力器中的微观物理过程的表征,放电振荡的主要原因是背景推进剂原子的消耗与补充间的非平衡状态。放电开始时,在高电压下,由于电子获取足够能量,从而诱发放电通道内电子与原子的碰撞电离,然而随着背景原子的消耗,电离区原子密度降低,电离被抑制,因此,放电电流呈现典型的 U 型周期性振荡波形。其中,波形上升对应由电离碰撞诱发的电子雪崩效应,波形下降对应电离导致的原子消耗,进而导致等离子体密度迅速下降。电流波谷对应放电通道内中性原子的补给与电离再次建立的过程。然而,在小电压下,放电电流成稳态恒流模式,这是因为在小电压下,电子获得能量较低,在特定的小流量(1.05 mL/min)工况下,放电通道内电离效率较低,

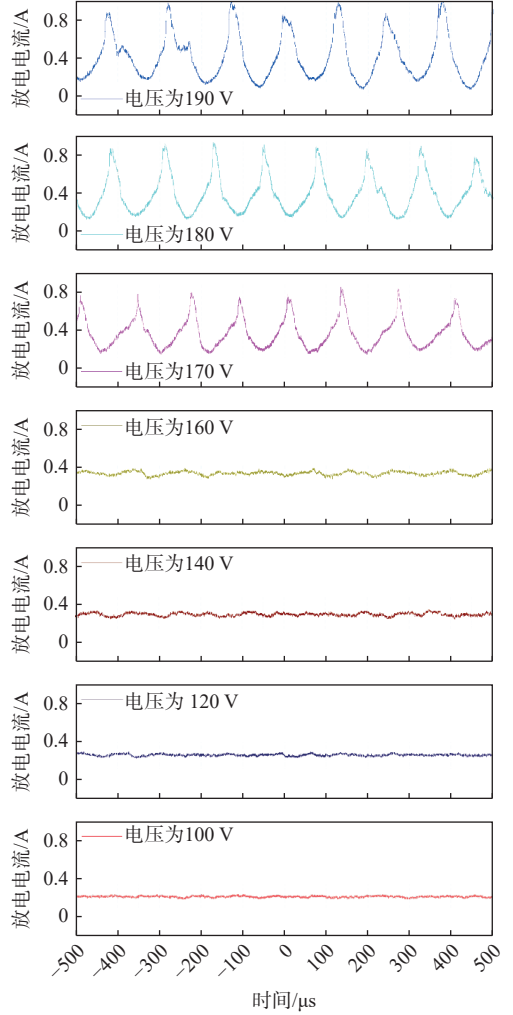


图 17 1.05 mL/min 流量工况放电电流振荡曲线

Fig. 17 Oscillation curves of discharge current at flowrate of 1.05 mL/min

不足以诱发过量的背景原子消耗,因此,该状态下背景原子的消耗与补充呈现平衡状态,放电电流呈现稳态直流现象。

然而,随着推进剂流量的增加,UDTv01 放电模式发生进一步的改变。图 18 为 1.95 mL/min 流量工况下放电电流瞬态波形和傅里叶变换频谱图。由图可知,相比 1.05 mL/min 流量下 170 V 的模式跳变点,1.95 mL/min 流量下,大电压工况模式跳变点出现明显延迟,周期性放电振荡出现在放电电压高于 220 V 的工况,且振荡周期缩短至 100 μs。当放电电压低于 220 V 时,放电电流为低幅值振荡状态,但是并不存在明显的主导振荡频率。与 1.05 mL/min 流量工况下单次模式跳变不同的是,在 1.95 mL/min 流量工况下,随着放电电压的进一步降低,放电电流再次进入周期性振荡模式,主导频率约为 15 kHz,但是该周期性振荡明显区别于高放电电压下的振荡模式。通过对比 1.05 mL/min 和 1.95 mL/min 流量工况放电模式可以发现,不同流量放电差异主要

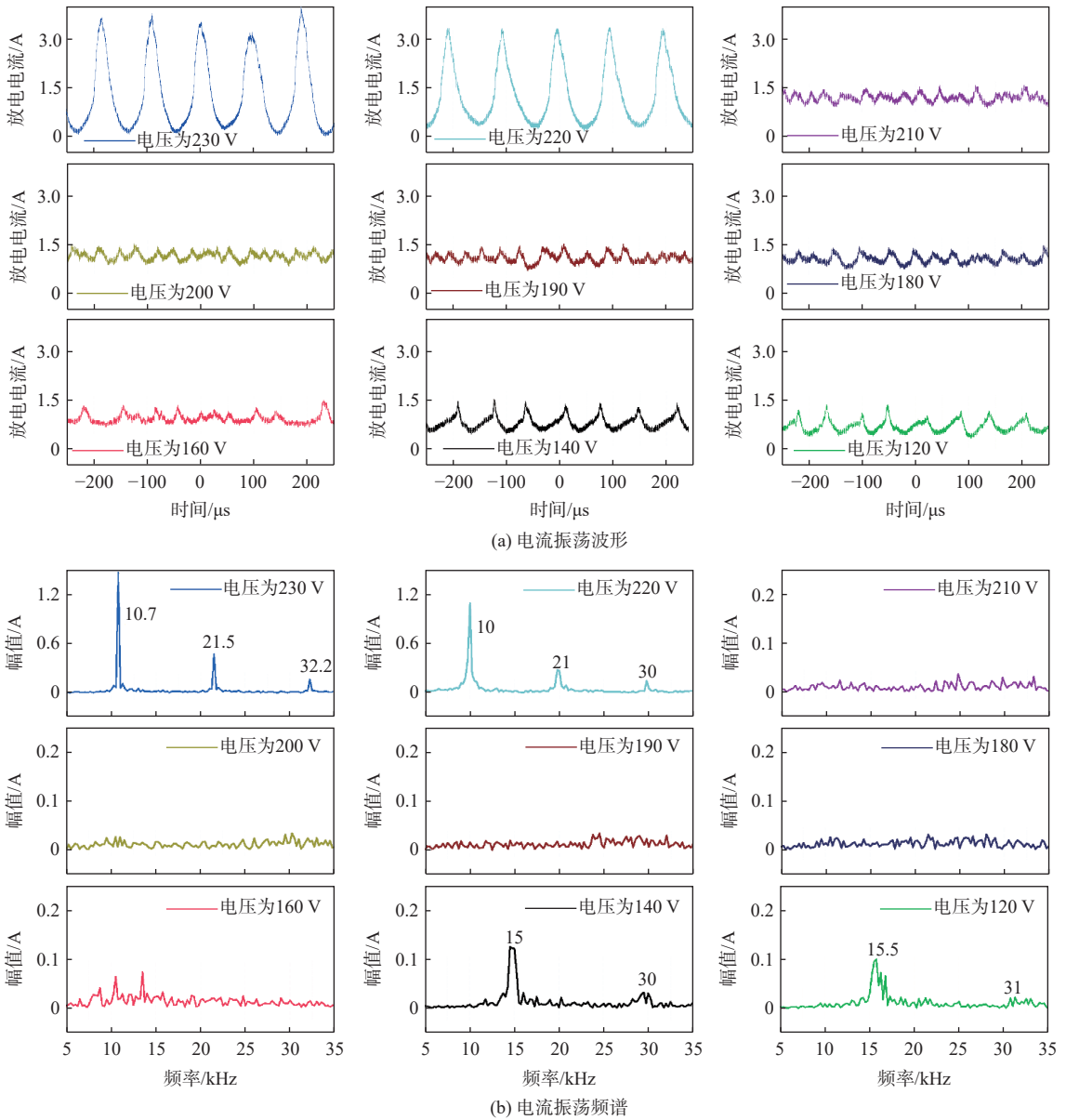


图 18 1.95 mL/min 流量工况放电电流振荡曲线

Fig. 18 Oscillation curves of discharge current at flowrate of 1.95 mL/min

体现在高电压和低电压 2 种放电状态。

为进一步分析不同电压下 UDTv01 放电模式随流量的演变规律, 其各电流波形分别提取如图 19 所示。由图 19 可知, 放电电压为 120 V 时, 随着推进剂流量从 1.05 mL/min 逐渐增加至 1.95 mL/min, UDTv01 逐渐进入放电振荡模式。这是因为, 低电压时, 推进剂流量主导电离率, 进而主导通道内放电模式。小流量下电离效率低, 原子电离消耗较慢, 难以进入振荡模式。然而, 如图 20 所示, 电压为 180 V 时, 电子能量升高诱发高电离率和快速的背景原子消耗, 因此, 小流量可以进入振荡模式。但是小流量下消耗和供给间平衡更容易被打破, 所以 UDTv01 放电振荡幅值更大。

但是, 对于高流量状态, 放电电压较低时, UDTv01 放电通道内电子能量有限, 部分原子被消

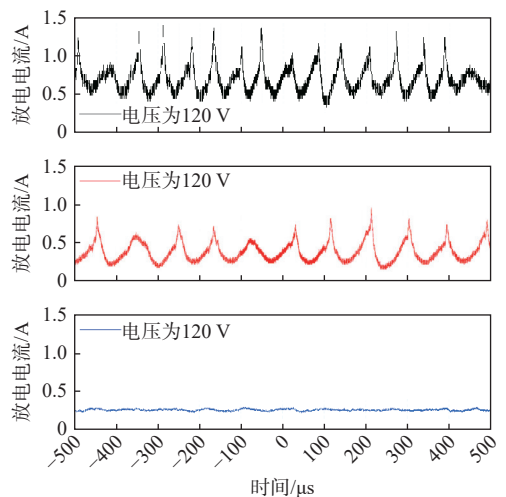


图 19 120 V 放电电压工况下放电电流振荡曲线

Fig. 19 Discharge current oscillation curves under 120 V discharge voltage condition

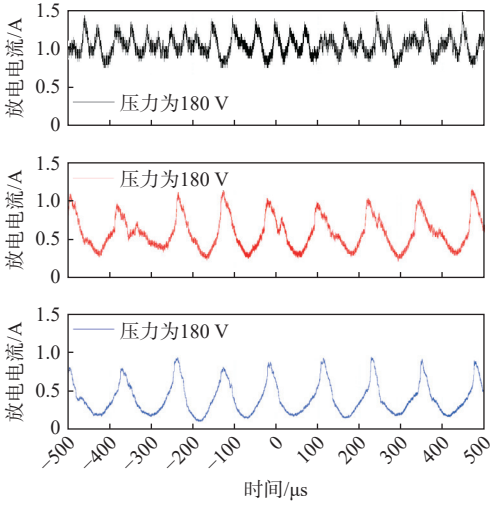


图 20 180 V 放电电压工况下放电电流振荡曲线
 Fig. 20 Discharge current oscillation curves at 180 V discharge voltage condition

耗,瞬态原子密度处于电离雪崩所需阈值之下,但是补充速度较快,形成幅值较低且频率较高的振荡模式,电流振荡波谷值大于 0。随着放电电压的增加,电子能量提升,放电通道内原子消耗量增加,一个放电周期内原子消耗殆尽,因此,完全补充至电离雪崩所需阈值需要更长时间,所以在高电压模式下,放电电流呈现幅值较高且频率较低的振荡模式,放电电流振荡波谷值趋近于 0。

对于中间过渡模式下小振荡状态,本文进一步分析,提出可能原因是放电通道内电离区的结构变化。通过后续通道内电离区结构成像实验发现,在低电压下,电离区呈明显两侧分布,中心呈中空状态。此时放电主要发生在两侧窄电离区,呈现推进剂原子小规模消耗诱发的小幅度较高频率振荡。随着电压的逐步升高,中空区域等离子体密度逐渐增加,开始产生电离,通道内电离区域得到延伸,推进剂的消耗和补充区域扩大,但是此时电压不足以对大区域内推进剂原子消耗和补充动态平衡产生威胁,因此,电离较为稳定,呈现无振荡平稳过渡模式。但是,随着电压进一步的提升,电子具有足够能量对大区域内推进剂原子产生碰撞电离效应,造成推进剂原子大量消耗,此外由于电离区长度较大,补充周期长,因此,呈现出大幅值较低频率振荡模式。

3.3 束流结构

放电电流特性之外,本文获取了 UDTv01 放电通道下游等离子体束流结构参数,直观点火束流见图 21,图中 UDTv01 直线型放电通道下游形成明显锥状射流,表明通道内等离子体得到显著加速效果。利用微推力架对 UDTv01 等离子体束流重粒子宏观平均速度进行测量,测量结果如图 22 所

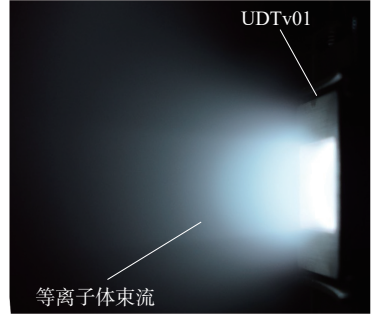


图 21 UDTv01 等离子体束流图像
 Fig. 21 Plasma plume image of UDTv01

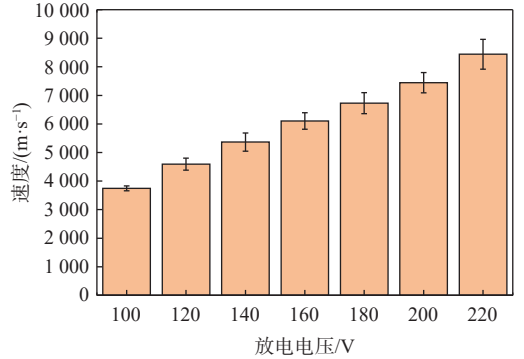


图 22 UDTv01 等离子体束流重粒子加速性能
 Fig. 22 UDTv01 plasma beam heavy ion acceleration performance

示。随着放电电压从 100 V 升高至 220 V,计算得到推力器等离子体束流重粒子宏观平均速度从 3 800 m/s 升高至 8 500 m/s,表明 UDTv01 通道内产生的离子得到一定的电场加速,但由于电离效率的约束,平均加速效率较低。

在横向 y 轴方向,通道内等离子体均呈现高密度状态,但是光学图像不足以定量表明其等离子体束流沿 y 轴的分布规律,因此,通过法拉第探针针对 UDTv01 等离子体束电流密度进行进一步测量与诊断,结果如图 23 和图 24 所示。图 23 为距离 UDTv01 放电通道出口 10 mm 处不同 y 轴位置下等离子体束流密度 j(y) 曲线,包括推力器通道中心平面 (x=0 mm)、上壁面 (x=+5 mm)、下壁面 (x=

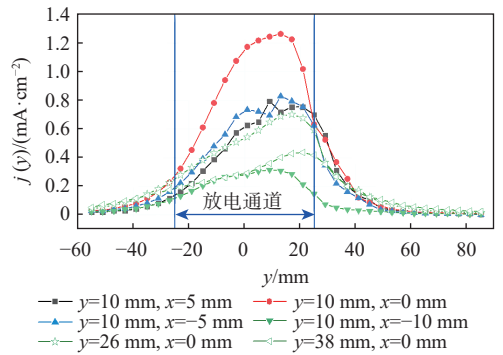


图 23 离子束流密度沿 y 轴变化曲线
 Fig. 23 Variation curves of ion beam density along y-axis

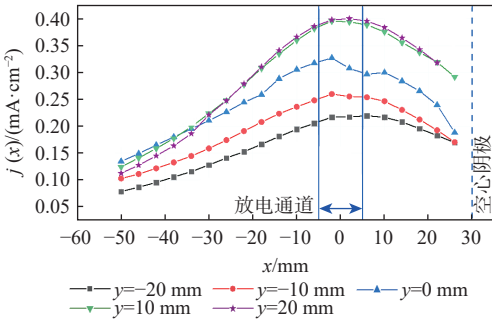


图 24 离子束流密度沿 x 轴变化曲线

Fig. 24 Variation curves of ion beam density along x -axis

-5 mm) 和外侧下壁面 ($x = -10$ mm) 4 个 x 轴向位置处, 束流密度分布情况。由图可知, 在推力器放电通道中心平面上, 等离子体束流密度最高, 随着向 x 轴两侧延伸, 束流密度逐渐降低, 在上下壁面处, 束流密度分布相近, 随着距离的进一步增加至 -10 mm, 束流密度进一步降低。该分布结构表明, 通道内电子在 x 轴方向发生了充足的迁移与碰撞, 等离子体在 x 轴方向近似对称分布。

进一步, 在 y 轴方向, 由图 23 可知, 等离子体束流呈现一侧高的非均匀状态。从放电通道左侧 ($y = -25$ mm) 至放电通道中心 ($y = 0$ mm), 束流密度 $j(y)$ 呈先增加后平稳的趋势, 从放电通道中心 ($y = 0$ mm) 至通道右侧 ($y = 17$ mm), 束流密度变化较小, 呈现出一段均匀电离区。随着 y 轴距离进一步增加, 束流密度出现锐减。随着法拉第探针与放电通道出口距离延长至 38 mm (见图 23), 束流密度逐渐降低, 上述等离子体束流非均匀现象更加明显, 这是因为随着束流的进一步向外碰撞, 束流中心的均匀区域消失, 束流逐渐演变成单峰分布结构。不同 x 轴位置下等离子体束流密度 $j(x)$ 曲线的方向仍然近似呈对称趋势 (见图 24), 上侧 ($x > 0$ mm) 由于空心阴极束流区的存在, 等离子体密度略高于下侧 ($x < 0$ mm)。

束流密度沿 y 轴方向分布结构反映出 $E \times B$ 等离子体放电结构的固有特性, 即等离子体的 $E \times B$ (y 轴方向) 漂移运动。正是由于该运动的存在, 使得 UDTv01 放电通道左侧电子向右侧漂移, 使得右侧等离子体密度高于左侧。但是由于在 y 轴方向有足够长度的均匀磁场分布, 从放电通道中心处开始, 由于高频率碰撞电离效应, 使得电子漂移跨场输运减弱, 等离子体密度增长变缓, 呈现均匀状态。证明 UDTv01 在 y 轴方向磁场设计方案可行, 能够在放电通道内形成一段均匀分布等离子体, 以供进一步对通道内部等离子体进行磁场剖面上等离子体二维分布诊断。

3.4 电离区结构与形成机制

经过稳态伏安特性、瞬态放电振荡和推力器

等离子体束流诊断等多项放电测试, 可以证实 UDTv01 能够进行类霍尔推力器的稳定放电, 并对等离子体形成明显加速。此外, UDTv01 放电通道内部能够产生沿 y 轴方向均匀分布的电离区。基于此, 本文尝试对 UDTv01 放电通道内部磁场剖面上等离子体二维分布结构进行高分辨率光学诊断成像, 结果如图 25 所示。根据图 25, 可以把 UDTv01 放电通道内磁场剖面等离子体电离区结构分为 5 个区域。其中, I 为近阳极区, II 为内电离区, III 为中空区, IV 为出口电离加速区, V 为通道外羽流膨胀区。从光学图像可知, UDTv01 放电通道内存在 II 和 IV 这 2 个近似对称分布的电离区。加在 II 和 IV 中间的是呈低密度分布的中空区域 III。通过磁场分析发现, III 的存在是因为纯径向的磁场构型直接诱导电子与放电通道壁面碰撞损失能量, 形成低能电子^[29], 降低该区域电离率, 形成中空区域。而电子在 II 和 IV 由于镜像磁镜结构受到有效约束, 电离效率较高, 等离子体密度提升。

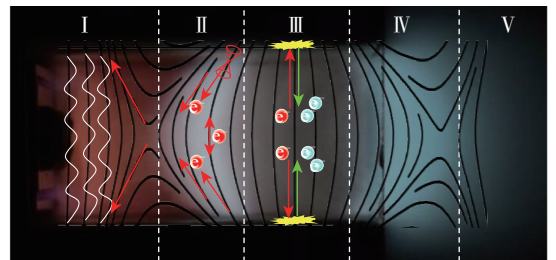


图 25 放电通道内磁场剖面上电离区二维成像

Fig. 25 2D imaging of ionization zone on magnetic field section plane within discharge channel

通过改变阳极位置, 本文将阳极放在磁零点上游以探究磁零点对阳极附近等离子体的影响。由图 25 中近阳极区 I 可以发现, 电子在经过 I 区和 II 区的磁零点后, 受到阳极电势吸引运动获取能量, 但被阳极附近径向磁感线的约束作用, 绕磁感线做回旋运动, 沿 z 轴方向运动受阻, 致使阳极表面存在电势梯度, 从而降低了 UDTv01 阳极电压加速效率。因此, 本文提供了推力器阳极位置设计的直接证据支撑, 根据这一实验结果, 环形霍尔推力器设计时需要避免这一现象, 阳极位置不能仅出于保障电离率而过于靠近上游, 需要配合通道内磁感线走势, 阳极表面应处于凸向阳极的磁场末端, 从而实现电子向阳极稳定迁移。

环形推力器放电通道和本文的非环形推力器放电构型间最大的差距是电磁场的差异。非闭环直线型放电构型的设计, 源于霍尔推力器功率和体积逐渐放大的趋势, 当推力器径向尺寸远大于放电通道宽度时, 可以近似考虑霍尔推力器环形放电室由数个小型直线型通道圆周阵列组成。 $E \times B$ 的存

在使得等离子体沿 $E \times B$ 方向 (y 方向) 产生漂移运动从而产生 y 方向的流场与电磁场分布, 从而出现三维效应。由于对侧壁面的存在, y 轴方向等离子体运动加剧了与对侧陶瓷壁面的相互作用, 改变等离子体近壁传导等物理过程, 这是影响放电的主要因素。不过经过试验验证发现, 对侧壁面的近壁传导显著降低对侧壁面附近的电子温度, 从而抑制了该处推进剂原子的电离, 因此, 在对侧附近法拉第探针实验结果同样显示等离子体密度下降, 并未在侧壁附近形成显著电离区, 保证了从光学观察窗对通道内等离子体二维分布进行诊断的背景不受影响。同时, 通过对 y 轴方向匀强磁场的长度进行把控, 可以保证在放电通道中心形成稳定的类似环形霍尔推力器通道内等离子体产生、轴向加速与径向漂移的过程, 从而保证放电和实验结果的可靠性。但是, 侧壁依然会影响对侧区域阳极电流组分的形成和阳极电流效率, 需要进一步优化。

4 结 论

1) 本文利用永磁体设计了具有可视放电腔的非闭环 $E \times B$ 漂移推力器 UDTv01, 提出相似磁场构型、相似轴向梯度、足够的磁场均匀段 3 条设计原则。实验表明: UDTv01 呈现出与环形霍尔推力器相似的伏安特性, 验证了其工作原理相似性及可靠性。

2) UDTv01 中存在典型 $E \times B$ 等离子体低频振荡, 主导频率 $8 \sim 15$ kHz, 实现不同振荡模式调控。小流量下电压主导电子能量引起电离率变化, 使之进入无振荡模式和大幅度低频振荡模式。高流量下原子密度增加碰撞电离效率, 低电压下更易进入低幅值振荡状态; 电压提升, 原子电离消耗剧增, 进入大幅值长周期振荡模式。

3) 实现对通道内电离区二维成像, 具备了直接实验研究霍尔推力器的放电与加速过程中二维平面上等离子体微观表现的手段。在磁镜结构主导的多区域电离区上游, 直接观测到了由阳极表面磁感线约束形成的近阳极电子阻滞电离区域, 是推力器阳极加速效率的损失来源, 为霍尔推力器磁场设计提供直接支撑。

参考文献 (References)

- [1] BOEUF J P. Tutorial: physics and modeling of Hall thrusters[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121: 011101.
- [2] PETERSON P, JACOBSON D, MANZELLA D, et al. The performance and wear characterization of a high-power high-isp NASA Hall thruster[C]//Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston: AIAA, 2005.
- [3] GARRIGUES L, SANTHOSH S, GRIMAUD L, et al. Operation of a low-power Hall thruster: comparison between magnetically unshielded and shielded configuration[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2019, 28(3): 034003.
- [4] SZABO J J. Fully kinetic numerical modeling of a plasma thruster[D]. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2001.
- [5] SZABO J, WARNER N, MARTINEZ-SANCHEZ M, et al. Full particle-in-cell simulation methodology for axisymmetric Hall effect thrusters[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(1): 197-208.
- [6] LINNELL J A, GALLIMORE A D. Internal plasma potential measurements of a Hall thruster using xenon and krypton propellant[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(9): 093502.
- [7] LINNELL J A, GALLIMORE A D. Internal plasma potential measurements of a Hall thruster using plasma lens focusing[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13(10): 103504.
- [8] 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): 043303.
- [9] 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.
- [10] HAAS J M, GALLIMORE A D, MCFALL K, et al. Development of a high-speed, reciprocating electrostatic probe system for Hall thruster interrogation[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(11): 4131-4138.
- [11] YAN S L, LI W B, DING Y J, et al. High-speed camera imaging in the discharge channel during a Hall thruster ignition[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2018, 46(4): 1058-1061.
- [12] ZHANG H G, NING Z X, DING Y J, et al. High-speed camera imaging of the ignition process in a heaterless hollow cathode[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2019, 47(2): 1487-1491.
- [13] MAZOUFFRE S. Laser-induced fluorescence diagnostics of the cross-field discharge of Hall thrusters[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2013, 22(1): 013001.
- [14] MAZOUFFRE S, KULAEV V, LUNA J P. Ion diagnostics of a discharge in crossed electric and magnetic fields for electric propulsion[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2009, 18(3): 034022.
- [15] HARGUS Jr W A, CAPPELLI M A. Development of a linear Hall thruster[C]//Proceedings of the 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 1998.
- [16] GASCON N, THOMAS C, HERMANN W, et al. Further investigations of an open drift Hall thruster with boron nitride and diamond wall [C]//Proceedings of the 28th International Electric Propulsion Conference. Reston: AIAA, 2003.
- [17] ROVEY J L, GIACOMI M P, STUBBERS R A, et al. Plume profiles of a planar crossed-field thruster with hall current injection[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(3): 737-745.
- [18] MIYASAKA T, NAGAO R, FUKAGAWA K, et al. Plume interference effects of the racetrack-shaped anode-layer Hall thruster system[J]. *Mechanical Engineering Journal*, 2022, 9(2): 21-00347.
- [19] MEEZAN N B, GASCON N, CAPPELLI M A. Linear geometry hall thruster with boron nitride and diamond walls[C]//Proceedings of the 27th International Electric Propulsion Conference. Reston:

- AIAA, 2001.
- [20] GASCON N, THOMAS C A, HERMANN W A, et al. Operating regimes of a linear SPT with low secondary electron-induced wall conductivity[C]//Proceedings of the 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2003.
- [21] SCHMIDT D P, MEEZAN N B, HARGUS Jr W A, et al. Operating characteristics of a linear Hall thruster with an open electron-drift[C]//Proceedings of the 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 1999.
- [22] GASCON N, CAPPELLI M A, HARGUS Jr W A. Ion velocity measurements in a linear Hall thruster[C]//Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Reston: AIAA, 2005.
- [23] CAPPELLI M, WALKER Q, MEEZAN N, et al. Performance of a linear Hall discharge with an open electron drift[C]//Proceedings of the 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2001.
- [24] BEAL B, GALLIMORE A. Development of the linear gridless ion thruster[C]//Proceedings of the 37th Joint Propulsion Conference and Exhibit. Reston: AIAA, 2001.
- [25] ZHANG Z, ZHANG Z, XU S T, et al. Three-dimensional measurement of a stationary plasma plume with a Faraday probe array[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 110: 106480.
- [26] ZHANG Z, ZHANG Z, TANG H B, et al. Measurement of the distribution of charge exchange ions in a Hall-effect thruster plume[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(8): 085001.
- [27] BROWN D L, WALKER M L R, SZABO J, et al. Recommended practice for use of faraday probes in electric propulsion testing[J]. Journal of Propulsion and Power, 2017, 33(3): 582-613.
- [28] RAITSES Y, STAACK D, KEIDAR M, et al. Electron-wall interaction in Hall thrusters[J]. Physics of Plasmas, 2005, 12(5): 057104.
- [29] ZHANG G C, REN J X, TANG H B, et al. Plasma diagnosis of an unclosed $E \times B$ drift thruster with a visible ionization zone[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2022, 31(7): 075002.

Design and experimental study of an unclosed-loop $E \times B$ Hall thruster

ZHANG Guangchuan¹, WANG Weizong^{1, 2, *}, REN Junxue^{1, 2}, WANG Yibai^{1, 2, 3},
TANG Haibin^{1, 2}, YANG Lijun^{1, 2}

(1. School of Astronautics, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Key Laboratory of Spacecraft Design Optimization & Dynamic Simulation Technologies, Ministry of Education, Beijing 100191, China;

3. Ningbo Institute of Technology, Beihang University, Ningbo 315100, China)

Abstract: A common form of sophisticated electric propulsion technology in spacecraft is the Hall thruster. The traditional annular closed-loop Hall thrusters are unable to carry out the 2D distribution diagnosis of plasma inside the discharge channel due to structural limitations. In order to address this issue, an unclosed-loop linear channel $E \times B$ Hall thruster with optical diagnostic windows was constructed, the magnetic and flow fields inside the thruster were simulated and evaluated, and magnetic field design principles were suggested. Further, this paper verified the effective plasma confinement and electromagnetic field acceleration by the linear discharge channel configuration through steady-state discharge parameter monitoring, transient discharge oscillation analysis, plasma parameter diagnosis in the beam region, and plasma distribution structure imaging in the ionized region inside the discharge channel. The discharge mode regulation based on the discharge voltage was realized, and the evolutionary tendency of the discharge mode with the propellant flow rate was identified. Finally, this paper successfully obtained the 2D distribution fine structure of plasma inside the discharge channel on the magnetic field configuration profile. In summary, this paper realized the stable discharge and mode regulation of the plasma in the $E \times B$ field of a Hall-like thruster under a simple device, combined with the optical diagnosis of the distribution structure of the plasma in the two-dimensional plane, and put forward a new idea for the further microscopic manifestation of the typical discharge oscillation process of a Hall thruster.

Keywords: Hall thrusters; magnetic field; 2D distribution of plasma; unclosed-loop linear channel; discharge oscillations

Received: 2024-01-18; Accepted: 2024-01-30; Published Online: 2024-03-12 18:00

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20240312.1539.003

Foundation items: China Postdoctoral Science Foundation (2023M740181); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (YWF-23-Q-1044)

* Corresponding author. E-mail: wangweizong@buaa.edu.cn