

2 cm ECRIT 联结磁场对羽流中和的影响

雷一鸣¹, 杨涓¹, 耿海², 吴先明², 牟浩¹, 付瑜亮¹

(1.西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072;
2.兰州空间技术物理研究所 真空技术与物理重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘 要:电子回旋共振离子推力器(electron cyclotron resonance ion thruster, ECRIT)外部联结磁场是影响羽流中和过程以及中和器耦合电压的因素之一。联结磁场随离子源和中和器安装方位及其内部磁极方向的不同而不同, 计算联结磁场分布规律、实验研究磁场对羽流中和的影响是非常重要的工作。针对离子源的 2 个功率和 2 个流量, 加速电压 350~1 450 V 内, 开展中和实验, 研究离子源与中和器磁极方向和位置关系的变化对离子束流引出和最高耦合电压大小的影响规律。结果表明, 离子束流引出不受磁极方向和离子源与中和器安装方位的影响。离子源与中和器相对垂直安装时能降低中和器耦合电压, 同时通过改变中和器磁极方向使其与离子源磁极方向相反也能降低中和器耦合电压。当离子源与中和器磁极方向相反且垂直安装时, 中和器耦合电压最低。

关 键 词:束流引出; 羽流中和; 耦合电压

中图分类号: V439⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-2758(2023)05-0924-08

伴随微型航天器发展, 电推进技术也获得了更多发展机会。电推力器主要包括脉冲式等离子体推力器、场效应发射离子推力器和离子推力器等^[1-3]。离子推力器分为射频放电离子推力器、直流放电离子推力器和电子回旋共振离子推力器^[4-5]。其中电子回旋共振离子推力器(ECRIT)具有结构简单、无阴极烧蚀及比冲高特点, 具有很大发展潜力^[6]。

ECRIT 在轨应用中, 离子源引出离子束流需要短时间内被中和器引出电子束流中和, 否则缺少中和的离子束流会使得离子在空间中堆积, 导致离子返流, 对航天器的安全和寿命产生严重影响^[7-8]。目前对离子推力器羽流中和数值模拟研究工作的主流方法是采取混合模型描述羽流^[9-11]。文献[12]对离子推力器中和过程中的离子-电子耦合及电中性等离子体形成过程的物理机制进行了研究。采用二维轴对称全粒子质点网格法对离子束中和过程和近场羽流进行了数值模拟。结果表明, 在靠近推力器出口处的离子束会形成较高的正电势, 且该正电势会随着时间逐渐增大。推力器出口处的高电势与周

围环境之间形成的势阱能够限制电子的逃逸并加速离子, 最终使得二者的速度趋于一致, 完成离子-电子的耦合过程, 即离子束的中和过程。文献[13]提出了一种混合粒子网格(PIC)流体方法来模拟离子束流和电子束流之间的相互作用。离子和中性粒子用 PIC 方法建模, 而电子被视为流体。通过将模拟域划分为拟中性区域和非中性区域, 处理它们之间平滑过渡的三维混合模型来研究等离子体羽流及羽流中和, 并验证了该模型的准确性。文献[14]描述了一个离子推力器栅极的数值混合模型。当离子和中性粒子被设定为宏观粒子时, 通过求解电子动量平衡、电子连续性和泊松方程的耦合方程来获得电子性质和电势, 对羽流中和有了更深入的认识。

文献[15]采用实验方法, 研究了微波功率和流量对 2 cm ECRIT 离子束流引出和耦合电压的影响, 结果表明不同模式下离子和电子束流与功率和流量呈正相关, 中和器耦合电压随流量减小而增大。文献[16]建立了二维轴对称 PIC/MCC 计算模型, 通过数值模拟研究不同磁路结构对中和器的电子引

收稿日期: 2022-10-13

基金项目: 国家自然科学基金(11875222)资助

作者简介: 雷一鸣(1997—), 西北工业大学硕士研究生, 主要从事电推进研究。

通信作者: 杨涓(1964—), 西北工业大学教授, 主要从事电推进研究。e-mail: yangjuan@nwpu.edu.cn

出,及不同腔体长度对壁面电流损失的影响。计算结果表明,ECR 区位置和引出孔附近磁场构型对中和器的电子引出性能至关重要。当 ECR 区位于天线上游,电子在迁移扩散中易损失,并且电子跨过引出孔前电势阱所需的能量更高。如果更多磁力线平行通过引出孔,中和器引出相同电子电流所需电压较小。

上述研究主要通过数值模拟的方法尽可能描述出实际羽流中和时的物理现象以便于更了解影响离子束流的中和机理。在实验方面主要通过改进推力器构型来优化推力器性能^[17-19]。文献[17]通过改进 2 cm ECR 离子推力器放电室磁路和天线位置,对放电室结构进行了优化。ECRIT 的离子源和中和器所形成的联结磁场对离子束流引出和中和器耦合电压的影响并未涉及。为此本文对 ECR 离子源和中和器在羽流区形成的联结磁场进行模拟仿真,计算离子源与中和器在不同方位以及不同中和器磁极方向下联结磁场的分布规律。实验研究 2 cm ECRIT 在外部不同联结磁场下,离子束流引出及中和器耦合电压的变化规律。本文研究为提升 ECRIT 羽流的中和性能提供了参考。

1 2 cm ECRIT 束流引出影响因素分析和实验系统

1.1 2 cm ECRIT 组成和原理

2 cm ECRIT 由 ECR 离子源和中和器构成,ECR 离子源和中和器皆利用 ECR 原理加热电子,从而产生高能电子,高能电子不断碰撞工质气体产生高密度等离子体,使得中性气体电离产生并维持等离子体^[17]。ECR 离子源与中和器的放电室结构相同,都由磁路结构、环形天线以及圆柱腔体组成,其中磁路由内外环形永磁体及背部磁轭构成。工作时,微波能量通过环形天线馈入放电室产生 ECR 等离子体。离子源通过双栅极系统引出离子束流形成推力,ECR 离子源中双栅结构由屏栅和加速栅组成,屏栅为正电位,加速栅为负电位。中和器通过电子引出板引出电子,在离子束流堆积所形成的高电势的吸引下输运至离子束流区完成中和^[18,20]。

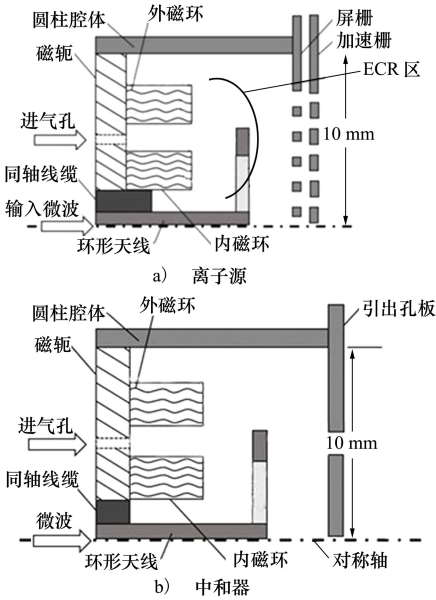


图 1 2 cm ECRIT

1.2 2 cm ECRIT 的羽流场影响因素和磁场特征

2 cm ECRIT 的离子源离子束流和中和器电子束流引出时,由于离子质量比电子质量大,并且在栅极系统的作用下,离子引出几乎不受羽流环境的影响。相比之下,电子质量轻、电子引出板孔径较大使得电子引出束流容易受到下游静磁场和电场的影响。

当离子源与中和器在空间安装方位不同时,推力器下游形成的联结磁场分布也不同,从而对引出电子的运动、电流以及中和器耦合电压和下游静电场分布规律产生不同的影响。而且在不同的静电场和静磁场分布条件下,电子漂移运动各异,进一步影响电子行为和中和器耦合电压。因此,为了进一步分析推力器束流引出性能,计算分析离子源和中和器的相对空间方位不同时下游区域静磁场分布规律十分重要。

本文采用有限元软件 Comsol Multiphysics 5.6 中 AC/DC 模块的磁场、无电流 (magnetic field, no current) 子模块进行 ECR 离子推力器下游静磁场计算,对于静磁场分析做出以下假设^[21]:

1) ECR 离子源与中和器放电室的工作环境均为空载条件,即放电室内不存在等离子体,为大气环境;

2) 连续性假设。首先,放电室内部各零部件及媒质为均匀材料且为各向同性,即其物理特性的参数变化能够保持线性连续;其次,物理特性参数在其

所处的物理单元内变化时也能保持线性连续。

3) 忽略导体电阻的温度效应和磁性材料的磁滞效应。

基于以上假设,建立静磁场有限元求解模型,进行静磁场求解。

可得离子源和中和器内外磁环磁化方向相同

(内磁环端面皆 N 极、外磁环端面皆 S 极)和相反(中和器内磁环端面 N 极、外磁环端面 S 极,离子源内磁环端面 S 极、外磁环端面 N 极)且 2 组件轴线平行与垂直条件下,计算下游的联结磁场分布规律如图 2~3 所示。计算参数设置如表 1 所示。

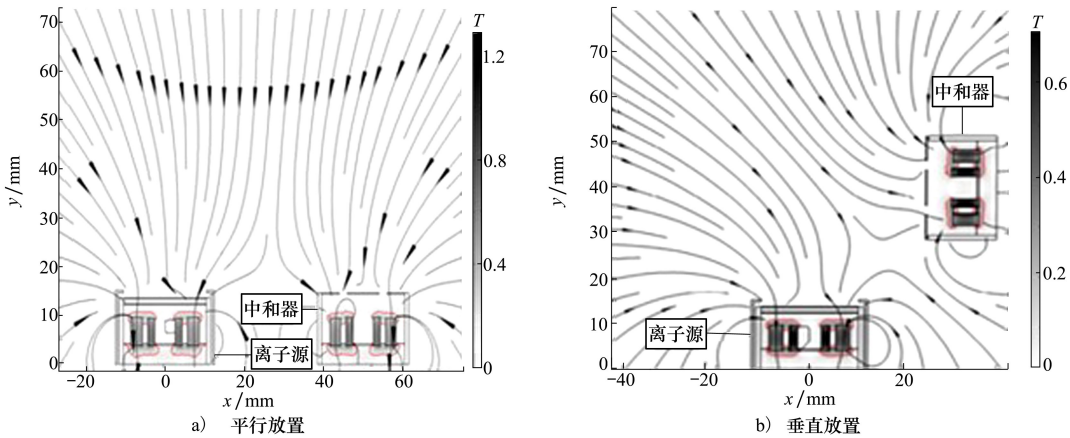


图 2 离子源与中和器磁极相同联结磁场分布

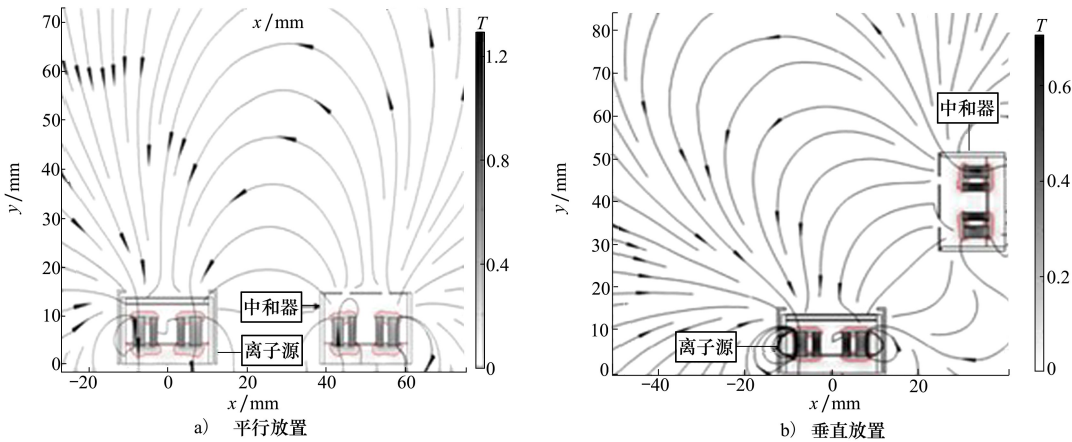


图 3 离子源与中和器磁极不同联结磁场分布

表 1 静磁场计算参数设置

部件	材料	相对磁导率
内外磁环	钕钴永磁体	1.36
磁轭	软磁合金	4 000
空气和铜壁面	硬磁材料	1

从图 2~3 可以看出,在离子源与中和器磁极方向一致、离子源与中和器平行时,从离子源和中和器引出的磁力线近似相互平行且磁力线方向分别指向离子源和中和器。当中和器引出电子后,电子要到

达离子束流区需要跨越磁力线,电子在低加速电压下很难完成这一动作。离子源与中和器垂直放置时,在离子源与中和器中间形成了弱场区,磁力线分布密度低,电子输运路径缩短。离子源和中和器引出磁力线几乎平行并且排斥。这种情况电子仍需跨越磁力线完成对离子束的中和。在低加速电压下,由静磁场决定电子输运情况,此时相较于平行放置,垂直放置将使得电子更容易沿着磁力线输运到离子源束流区完成对离子束流的中和。离子源和中和器平行放置且中和器磁极方向与离子源磁极方向相反时,磁力线在离子源和中和器之间实现联结,引出磁

力线大部分都将形成封闭弯曲的磁力线,会导致羽流区磁力线由中和器指向离子源,使得电子在输运过程中,可以直接沿磁力线方向运动至离子束流区。在离子源和中和器垂直放置且中和器磁极与离子源磁极方向相反时,在离子源和中和器下游区域形成封闭连续的磁力线,在电子输运路径缩短的同时电子不需要跨越平行磁力线,仅需较低耦合电压便可沿磁力线运动到离子束流区完成中和,也使得在加速栅下游更容易形成电子桥便于离子束流中和。

通过以上静磁场计算,可以看出在离子源和中和器磁极相反时,无论离子源和中和器处于垂直放置还是平行放置,中和器引出电子束流,都将更容易沿磁力线方向连续且以最短路径输运至离子源引出离子束流区域。同时在离子源和中和器轴线垂直放置的情况下,电子输运至离子束流区域需要的运动路径相较于平行放置缩短,离子束流将会更容易得到中和。

1.3 2 cm ECRIT 束流中和实验系统

推力器实验系统如图 4 所示,系统由真空部分、气路部分、电路部分和微波部分构成。真空部分由旋片泵、中置罗茨泵和罗茨主泵构成前级泵和扩散泵,维持泵构成整个真空系统,能够满足实验过程中真空度保持在 5×10^{-3} Pa。电路部分主要由屏栅电源、加速栅电源、屏栅保护电阻、加速栅保护电阻和中和器电源构成,其中屏栅和加速栅保护电阻分别串联在两路中,通过测量保护电阻分压大小得出离子源屏栅引出电流 I_s 以及加速栅截获电流 I_a ,则引出离子束流 I_b 等于屏栅引出电流 I_s 减去加速栅截获电流 I_a 。微波部分包括固态微波源、水冷微波源、衰减器、微波隔直器、功率计和同轴线缆。离子源在中和器协助下共同工作,通过调整中和器电压使得离子源引出离子束流与中和器引出电子束流相

等,认为离子羽流得到了完全的中和。中和器电源正极接地,负极接中和器,中和器与地之间电势差即为耦合电压。

首先,实验前需对离子源和中和器两路微波源进行上下行标定,以降低馈入微波功率误差。需要标定馈入离子源和中和器一端的同轴线缆,由此可得出实际馈入负载端的微波能量大小。通过多次标定求得平均值以减少误差。在实验开始后,需在每一种工况下测量上行和下行 2 组引出束流大小再求其平均值,从而进一步减少误差影响。中和实验中,屏栅电压由 300 V 逐渐增加至 1 200 V,加速栅电压由-50 V 变化至-250 V。同时固定中和器工况不变,保持在微波功率分别 1 W,工质流量为 0.1 mL/min;离子源功率分别为 2 W 和 3 W,工质流量分别为 0.1,0.2 和 0.3 mL/min 下进行实验。

2 实验结果分析及讨论

2.1 磁极相同的离子源与中和器在不同方位条件下的中和实验

设置离子源加速电压范围为 350~1 450 V、离子源功率分别为 2 和 3 W、流量分别为 0.1 和 0.3 mL/min,中和器微波功率为 1 W,流量为 0.1 mL/min,进行磁极相同离子源和中和器在不同方位下的束流引出实验,离子束流引出结果如图 5 所示,可以看出离子源和中和器不同方位时对离子束流引出影响不大。当离子源和中和器平行放置时,离子源功率和流量为 2 W,0.3 mL/min,在加速电压 1 200 V 达到最大引出为 6.25 mA;离子源功率和流量为 3 W,0.3 mL/min,在加速电压 1 450 V 达到最大引出为 6.5 mA。当推力器达到最大引出时,其离子束流在固定功率和流量下相对于加速电压达到饱和状态,继续增大加速电压会使得离子源内部等离子体密度降低,剩余的电子不足以提供工质电离所需的能量,继而降低离子引出束流。当离子源和中和器垂直放置时,离子源功率和流量为 2 W,0.3 mL/min,在加速电压 1 200 V 时,引出离子束流为 6.9 mA;离子源功率和流量为 3 W,0.3 mL/min,在加速电压 1 450 V 条件下,引出离子束流为 7.5 mA。

图 6 为磁极相同、离子源和中和器不同方位耦合电压变化曲线。平行放置时,离子源功率和流量为 2 W,0.3 mL/min,在加速电压 1 200 V 条件下,达

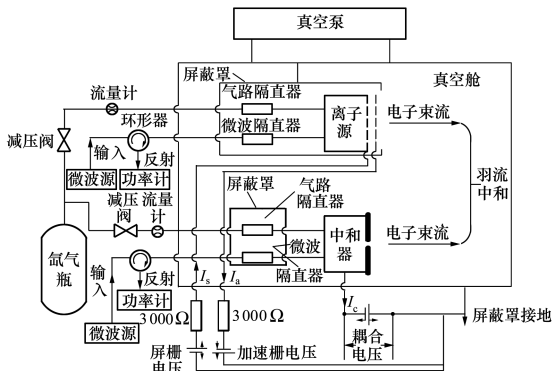


图 4 中和实验系统图

到最大耦合电压 35 V;离子源功率和流量为 3 W, 0.3 mL/min,在加速电压 1 450 V 条件下,达到最大耦合电压为 70 V。垂直放置时,离子源功率和流量为 2 W,0.3 mL/min,在加速电压 1 200 V 条件下,最

大耦合电压为 6 V;离子源功率和流量为 3 W, 0.3 mL/min,在加速电压 1 200 V 条件下,最大耦合电压为 31 V。

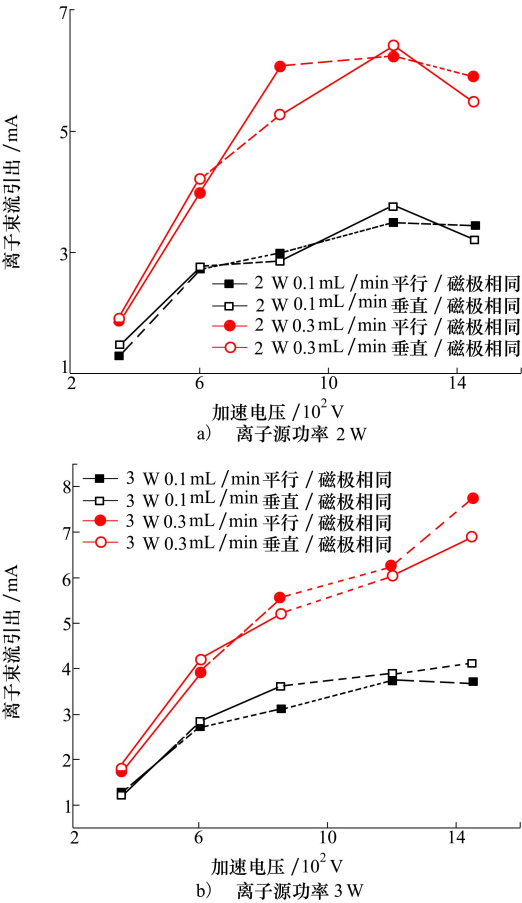


图 5 离子源和中和器磁极相同方位不同时中和实验的离子束流引出

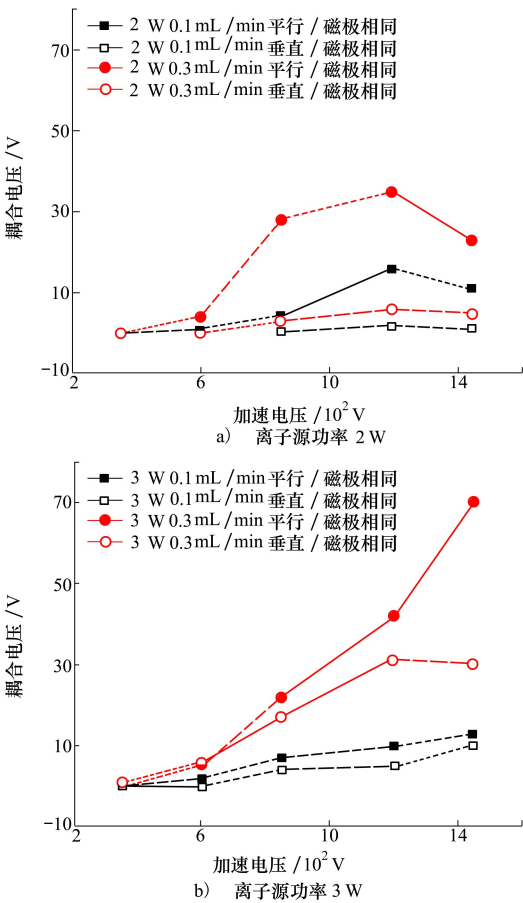


图 6 离子源和中和器磁极相同方位不同时中和实验的耦合电压

ECR 离子源和中和器垂直放置时,正如磁场特征分析,中和器引出电子更容易沿着磁力线方向像离子束流运动完成中和,所以同一条件下垂直放置要比平行放置时的耦合电压低,即离子束流会更容易更充分地实现中和。低的耦合电压会减少中和器受到的离子溅射,同时降低整个系统的功耗从而提升整体性能。离子源功率增加至 3 W 时,同样满足垂直放置时要比平行放置时的耦合电压低。

2.2 磁极相反的离子源与中和器在不同方位条件下的中和实验

设置离子源加速电压为 350~1 450 V,离子源微波功率保持 3 W 不变,工质流量分别为 0.1 和 0.3 mL/min;中和器微波功率 1 W,流量为 0.1 mL/min。进行离子源与中和器磁极相反且在不

同方位下的中和实验。离子束流引出结果如图 7a) 所示,离子源和中和器平行放置时,离子源功率和流量为 3 W,0.3 mL/min,在加速电压 1 450 V 条件下,最大引出离子束流为 7.04 mA。离子源和中和器垂直放置时,离子源功率和流量为 3 W,0.3 mL/min,在加速电压 1 450 V 条件下,最大引出离子束流为 7.05 mA。耦合电压结果如图 7b) 所示,离子源和中和器平行放置时,离子源功率和流量为 3 W, 0.3 mL/min,在加速电压 1 450 V 条件下,最大耦合电压为 50 V。离子源和中和器垂直放置时,离子源功率和流量为 3 W, 0.3 mL/min,在加速电压 1 450 V 条件下,最大耦合电压为 24 V。明显看出离子源和中和器在磁极相反条件下束流引出效果和磁极相同条件下束流引出效果类似,离子源和中和器

在 2 种方位下的离子束流引出十分接近,表明离子束流引出效果受磁极方向和空间位置的影响较小。

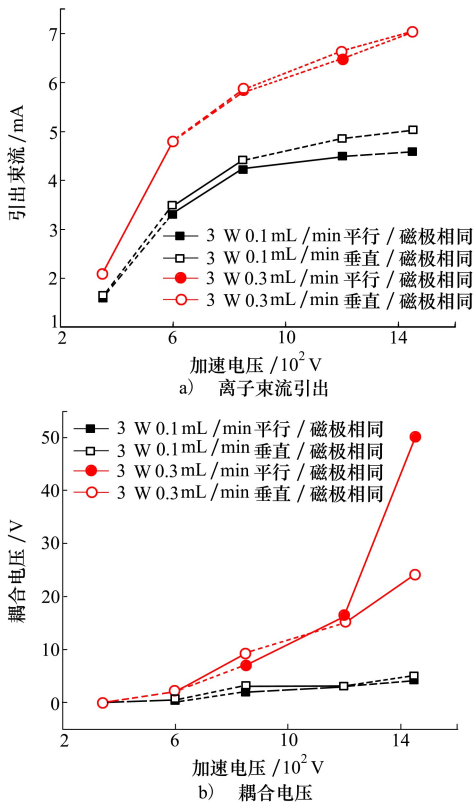


图 7 相反磁极不同方位条件下中和实验

图 7b) 中表示离子源和中和器在不同空间位置且离子源与中和器磁极相反的中和器耦合电压变化规律,可以看出当离子源与中和器垂直放置时耦合电压最低。然而相较于图 6b) 所示结果,可以看出,改变中和器磁极方向会比调整离子源与中和器空间位置更能降低中和耦合电压。

通过静磁场模拟可以看出在改变中和器磁极方向后,无论离子源与中和器处于垂直放置还是平行

放置,如图 3 所示加速栅下游所形成的联结磁场中磁场线连续、方向由中和器指向离子源,使电子更容易输运至离子束流区,更容易在电子束流和离子束流之间形成连续的等电子体桥,使离子束流容易得到中和,降低离子束流区由于离子堆积所形成的较高空间电势。同时,在离子源和中和器垂直放置时如图 3b) 所示,电子运动至离子源束流区所需输运路径相对于两者平行放置时变短,两者之间磁力线指向更加明确,容易在离子束流和电子束流之间形成电子桥,使得耦合电压也得到了降低。

3 结 论

本文通过计算模拟 2 cm ECR 离子源和中和器在不同安装方位和磁极方向条件下的联结磁场分布规律,并实验研究了相应的离子引出束流和中和器耦合电压的变化规律。得出了如下结论:

- 1) 离子引出束流大小几乎不受离子源和中和器的方位以及中和器磁极方向的影响。
- 2) 当中和器磁极方向与离子源磁极方向相反时,下游联结磁场磁力线皆由中和器指向离子源。此时电子无需跨越磁力线而是沿磁力线输运,易形成电子桥,从而降低了对电子输运至离子束流区完成中和所需耦合电压的要求。
- 3) 当离子源与中和器垂直放置时,电子输运至离子束流区的距离较短,有利于完成中和,从而降低耦合电压。
- 4) 当离子源和中和器磁极相反且垂直放置时,离子源功率和工质流量分别为 3 W, 0.3 mL/min, 在 1 450 V 加速电压条件下,最大耦合电压为 24 V 此时离子引出束流为 7.05 mA。

参考文献:

[1] PENCIL E J, KAMHAWI H, ARRINGTON L. Overview of NASA's pulsed plasma thruster development program[C] //40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004

[2] MARCUCCIO S. The design of micronewton FEEP thrusters for disturbance reduction systems[C] //Proceedings of 28th International Electric Propulsion Conference, 2003

[3] 吴汉基, 蒋远大, 张志远. 电推进技术的应用与发展趋势[J]. 推进技术, 2003, 24(5): 385-392

WU Hanji, JIANG Yuanda, ZHANG Zhiyuan. Application and development trend of electric propulsion technology[J]. Journal of Propulsion Technology, 2003, 24(5): 385-392 (in Chinese)

[4] 朱毅麟. 电推进的现状与展望[J]. 上海航天, 1998, 15(3): 48-53

- ZHU Yilin. Current situation and prospect of electric propulsion[J]. Aerospace Shanghai, 1998, 15(3): 48-53 (in Chinese)
- [5] 金逸舟, 杨涓, 冯冰冰, 等. 不同磁路电子回旋共振离子源引出实验[J]. 物理学报, 2015, 64(21): 215202
- JIN Yizhou, YANG Juan, FENG Bingbing, et al. Electron cyclotron resonance ion source extraction experiment with different magnetic circuit[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(21): 215202 (in Chinese)
- [6] WEN J M, PENG S X, REN H T, et al. A miniaturized 2.45 GHz ECR ion source at Peking University[J]. Chinese Physics B, 2018, 27(5): 055204
- [7] IOANNIS G M, GARY A J, IRA K, et al. Plume modeling of stationary plasma thrusters and interactions with the express-a spacecraft[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2002, 39(6): 894-903
- [8] KUNINAKA H, MOLINA-MORALES P. Spacecraft charging due to lack of neutralization on ion thrusters[J]. Acta Astronautica, 2004, 55(1): 27-38
- [9] FARNELL C C, WILLIAMS J D, WILBUR P J. Numerical simulation of ion thruster optics[C]//28th International Electric Propulsion Conference, 2003
- [10] JIA Y H, CHEN J J, GUO N, et al. 2D hybrid-PIC simulation of the two and three-grid system of ion thruster[J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20(10): 105502
- [11] KAFIFY R. Immersed finite element particle-in-cell simulations of ion propulsion[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2005
- [12] 操慧珺, 楚豫川, 曹勇, 等. 离子推进器中离子束中和及推进过程的全粒子数值模拟[J]. 高压电技术, 2014(7): 2119-2124
- CAO Huijun, CHU Yuchuan, CAO Yong, et al. Full particle numerical simulation of ion beam neutralization and propulsion in ion thrusters[J]. High Voltage Engineering, 2014(7): 2119-2124 (in Chinese)
- [13] FILIPPO C, ADRIÁN D, MARIO M, et al. Hybrid 3D model for the interaction of plasma thruster plumes with nearby objects[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2017, 26(12): 125008
- [14] JESUS P, FILIPPO C, MARIO M, EDUARDO A. Formation and neutralization of electric charge and current of an ion thruster plume[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2021, 30(10): 105023
- [15] KOIZUMI H, KUNINAKA H. Ion beam extraction and electron emission from the miniature microwave discharge ion engine μ_1 [C]//International Electric Propulsion Conference, 2009
- [16] 夏旭, 杨涓, 耿海, 等. 不同磁路下微型 ECR 中和器电子引出的模拟研究[J]. 物理学报, 2022, 71(4): 045201
- XIA Xu, YANG Juan, GENG Hai, et al. Simulation of electron extraction in micro-ECR neutralizer with different magnetic circuits[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(4): 045201 (in Chinese)
- [17] 夏旭, 杨涓, 金逸舟, 等. 磁路和天线位置对 2 cm 电子回旋共振离子推力器性能影响的实验研究[J]. 物理学报, 2019, 68(23): 235202
- XIA Xu, YANG Juan, JIN Yizhou, et al. Experimental study on the influence of magnetic circuit and antenna position on the performance of a 2 cm electron cyclotron resonance ion thruster[J]. Acta Physica Sinica, 2019, 68(23): 235202 (in Chinese)
- [18] 黄益智. 氙工质微推力 ECR 离子推力器实验研究[D]. 西安:西北工业大学, 2018
- HUANG Yizhi. Experimental study on the micro-thrust ECR ion thruster[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2018 (in Chinese)
- [19] 汤明杰, 杨涓, 金逸舟, 等. 微型电子回旋共振离子推力器离子源结构优化实验研究[J]. 物理学报, 2015, 64(21): 327-333
- TANG Mingjie, YANG Juan, JIN Yizhou, et al. Experimental study on optimization of ion source structure of micro electron cyclotron resonance ion thruster[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(21): 327-333 (in Chinese)
- [20] 陈琳英, 宋仁旺. 离子推力器羽流特性及其污染分析[J]. 上海航天, 2005, 22(4): 36-40
- CHEN Linying, SONG Renwang. Plume characteristics and pollution analysis of ion thrusters[J]. Aerospace Shanghai, 2005, 22(4): 36-40 (in Chinese)
- [21] 张朝晖. ANSYS 工程应用与范例入门与提高[M]. 北京:清华大学出版社, 2004
- ZHANG Chaohui. Introduction and improvement of ANSYS engineering application and examples[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004 (in Chinese)

Influences of coupling magnetic field of 2 cm electron cyclotron resonance ion thruster on plume neutralization

LEI Yiming¹, YANG Juan¹, GENG Hai², WU Xianming², MOU Hao¹, FU Yuliang¹

(¹.School of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
².Vacuum Technology and Physics Laboratory, Lanzhou Institute of Physics for Space Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: An electron cyclotron resonance ion thruster (ECRIT) has advantages of long service life and simple structure. The external coupling magnetic field of the ECRIT is one of factors that influences the plume neutralization process and coupling voltage of the neutralizer. The coupling magnetic field varies with the installation direction of the ion source and neutralizer as well as the direction of the internal magnetic pole. Calculating the distribution law of the coupling magnetic field and experimentally studying the influence of the coupling magnetic field on plume neutralization are very important. This paper focuses on two power rates and two flow rates of the ion source and conducts experiments on neutralization within the acceleration voltage range of 350 to 1 450 V to study the influence of changes in the direction and position of the ion source and the influence of the neutralizer's magnetic pole on the ion beam extraction and maximum coupling voltage. The results indicate that the ion beam extraction is not influenced by the direction of the magnetic pole and the installation direction of the ion source and neutralizer. When the ion source is installed relatively perpendicular to the neutralizer, its coupling voltage is reduced. At the same time, changing the direction of the magnetic pole of the neutralizer into the opposite of the direction of the magnetic pole of the ion source also reduces the coupling voltage of the neutralizer. When the ion source is installed perpendicular to the magnetic pole of the neutralizer in the opposite direction, the coupling voltage is the lowest.

Keywords: beam extraction; plume neutralization; coupling voltage

引用格式: 雷一鸣, 杨涓, 耿海, 等. 2 cm ECRIT 联结磁场对羽流中和的影响[J]. 西北工业大学学报, 2023, 41(5): 924-931
LEI Yiming, YANG Juan, GENG Hai, et al. Influences of coupling magnetic field of 2 cm electron cyclotron resonance ion thruster on plume neutralization[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2023, 41(5): 924-931 (in Chinese)