

场反构型无电极洛伦兹力推力器研究进展

石峰* 史鑫 康鹏涛 张贺龙
(河南理工大学 物理与电子信息学院 454000 焦作)

Overview of the Field Reversed Configuration Lorentz Force Propulsion Technology

SHI Feng*, SHI Xin, KANG Pengtao, ZHANG Helong
(School of Physics and Electronic Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract Field reversed configuration Lorentz force propulsion technology uses a rotating magnetic field to drive plasma to generate field reversed configuration (FRC) and uses Lorentz force to accelerate it to generate thrust. Since this thruster does not use grid acceleration, there is no grid sputtering problem, which greatly extends the working life of the thruster. This technology draws on nuclear fusion technology, with high thrust density and a wide range of power levels, which is feasible for future deep space exploration for high specific impulse, high thrust and long-life propulsion systems. In this paper, the development of field reversed configuration Lorentz force propulsion technology is reviewed, and the working principle, calculation model and key problem are introduced. It provides a reference for plasma thruster technology in China.

Keywords Plasma, Field reversed configuration (FRC), Electrodeless Lorentz force thruster (ELF), Rotating magnetic field (RMF)

摘要 场反构型洛伦兹力推力器利用旋转磁场驱动等离子体产生场反构型等离子体团 (Filed Reversed Configuration-FRC), 并利用洛伦兹力将其加速产生推力。由于该推力器不使用栅极加速, 故不存在栅极溅射问题, 大大延长推力器工作寿命。该技术借鉴自磁约束核聚变技术, 推力密度大、功率扩展性好(MW级), 在未来的深空探测和星际航行中具有广泛的应用前景。文章对场反构型洛伦兹力推力器发展现状进行了综述, 并对工作原理、计算模型和技术瓶颈问题作了介绍, 为中国等离子体推力器技术发展提供参考。

关键词 等离子体 场反构型(FRC) 无电极洛伦兹力推力器(ELF) 旋转磁场(RMF)

中图分类号: V439⁺.4 文献标识码: A doi: 10.13922/j.cnki.cjvst.202303013

目前为止, 技术较为成熟的离子推力器和霍尔推力器均使用电极电离推进剂^[1]。这些推进器虽然在深空探测活动中取得了巨大的成功, 但是由于存在严重的电极和栅极烧蚀, 限制了其工作寿命, 发展无电极电推进技术是解决这一问题的有效方法^[2]。

1 场反构型洛伦兹力推力器工作原理

如图1所示, 场反构型洛伦兹力推力器(Electrodeless Lorentz Force, ELF)主要由气体供应单元、初级电离单元、旋转磁场天线(Rotating Magnetic Field, RMF)(水平和垂直)、偏置电磁线圈

组成^[3]。如图2所示, RMF天线是重要的能量耦合组件, 由两组互相垂直放置在放电腔外的赫姆霍兹线圈组成, 当线圈中通入相位差90°的脉冲电流, 旋转磁场就会形成。

推力器工作过程为: 首先线圈缠绕在锥形喷管外, 产生轴向稳态偏置磁场。气体被电离后, 提供初始等离子体^[4]。RMF天线, 通入相位相差90°的驱动振荡电流产生稳定旋转磁场, 该场完全电离气体, 并产生方位角电流, 此电流逆转等离子体内的场, 产生一个磁隔离的自包含的FRC等离子体。电流在圆锥体周围的通量保持环内被诱导, 从而为等

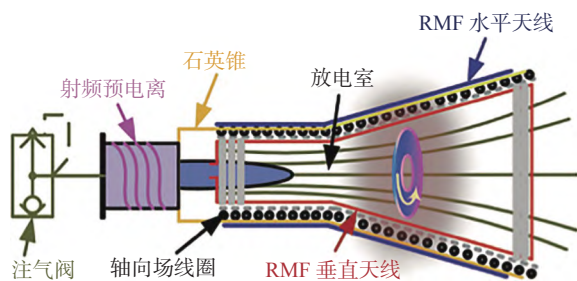


图1 场反构型洛伦兹力推力器结构组成

Fig. 1 Structure composition of Lorentz force thruster with field reversed configuration

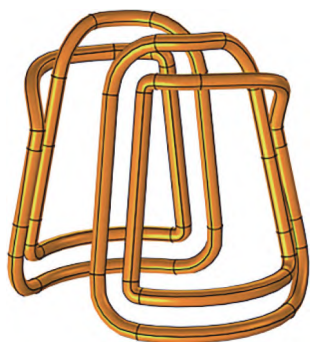


图2 RMF天线

Fig. 2 The RMF antennas

离子体提供径向压力平衡。然后, FRC 通过洛伦兹力和热膨胀高速喷出, 从而产生推力^[5]。

2 国外研究现状

目前仅有美国的 MSNW 公司、密歇根大学、华盛顿大学、日本的东京农工大学和国内的兰州空间物理研究所以及大连理工大学在进行这方面的研究。

2.1 实验研究

美国 MSNW 公司首先提出了 ELF 推力器的概念, 2008 年该公司在美国宇航局(NASA)项目支持下成功研制出第一款 ELF 推力器 ELF-v1, 如图 3 所示, 采用氩气作为工质气体, 首次实现了 1 kW 的

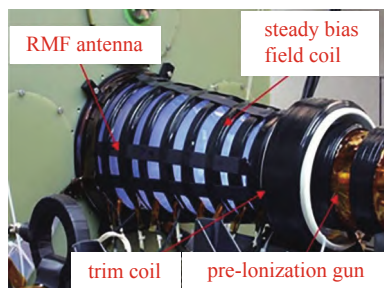


图3 ELF推力器

Fig. 3 Photograph of ELF

ELF 推力器单脉冲和多脉冲工作模式。

该推力器放电室腔体为 5 mm 厚, 420 mm 长, 大半径为 14 cm, 锥角为 8° ^[6]。RMF 线圈的驱动电源电压为 200–500 V, 频率为 300 kHz, 放电气体工质可采用氮气、空气、氧气和氩气, 偏置磁场从 0 到 500 Gauss 变化, 如图 4 所示, 天线的驱动电路如图 5 所示, 天线的外加电压如图 6 所示。在 NASA 格林研究中心进行初步实验, 工质气体为氮气和氩气, 获得了 1000–6000 s 的比冲, ELF 推力器成功地证明了 FRC 的产生、形成和加速。

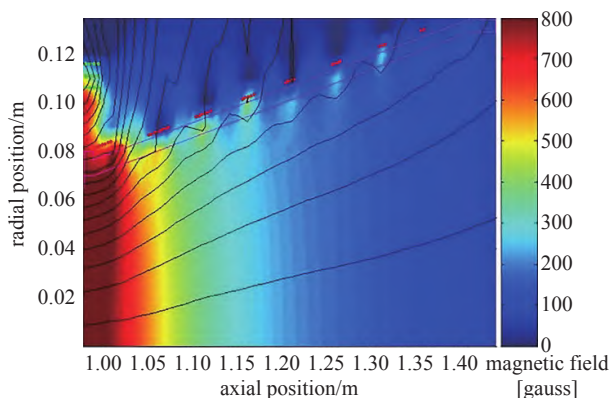


图4 ELF背景磁场位型

Fig. 4 ELF background magnetic field configuration

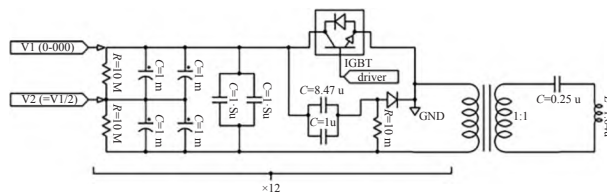


图5 带有 RMF 天线和调谐电容器的驱动电路

Fig. 5 Driver circuit with RMF antenna and tuning capacitor

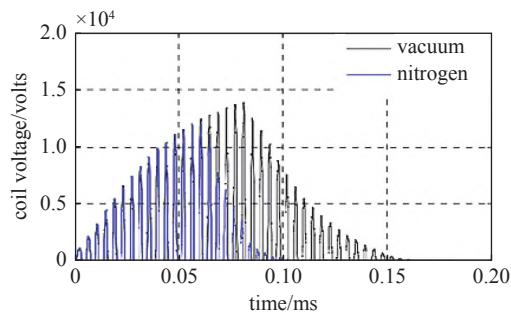


图6 瞬时 RMF 线圈电压

Fig. 6 Instantaneous RMF coil voltage

2009 年华盛顿大学与 MSNW 进行 ELF 推力器方面的合作研制的 ELF 推力器如图 7 所示^[7]。该推力器是一个用于演示高功率场反构型洛伦兹力

推力器的原理样机。放电室由一个 42 cm 长的锥形石英腔组成, 锥角 16° , 石英腔外壁安装有铜材质的磁通保护器, 它在 FRC 的形成和平移的时间尺度上, 起到保持背景磁通量不变的作用。磁通保护器的外部是一系列电磁线圈, 用来约束等离子体。最后, 两对 RMF 线圈位于偏置线圈的外部。这些 RMF 铜带天线与放电腔锥体长度相同, 它们产生的旋转磁场能够驱动等离子体产生方位电流。公开试验数据是旋转磁场在 300 kHz 的频率下对氮工质进行放电, 每脉冲 46 J。试验测试表明, 该推力效率仅为 8%, 辐射能量损失是主要的能量损失机制, 占总输入能量的 78%。



图7 美国华盛顿大学的 ELF 推力器

Fig. 7 ELF Thrusters at the University of Washington

2012 年, MSNW 公司又设计了 ELF-v2, 如图 8 所示, 其长度为 2 m, 口径为 0.2 m, 比冲超过 5000 s, 输入电压为 2.8 kV, 功率为 30 kW, 气体经过初级电离系统, 获得了 500~4000 s 的比冲, 验证了水作为推进剂的可行性^[8-9]。

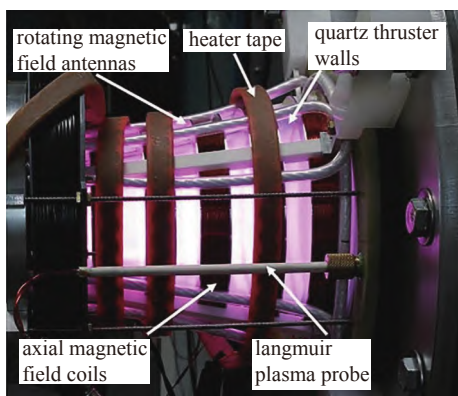


图8 水工质 ELF 推力

Fig. 8 ELF thruster operating on water vapor

30 kW 的 ELF 推力器包括一个锥形石英室, 厚度为 3 mm, 长 20 cm, 半径为 10 cm, 锥角 12° , 如图 9 所示, 被安装在 MSNW 大型真空设备的外部。该放电室外部具有 6 个铝通量保护器和偏置磁体。

这些磁体提供初始磁场和绝缘磁场, 使推力器壁和高压 FRC 隔离, 并提供了部分加速场, RMF 天线由 qlitz 布线构成(4200 根独立的平行线), 高温 tef-zel 绝缘, 在开关和电容器组件位于推力器附近, 并提供 2 英寸宽的条纹线。

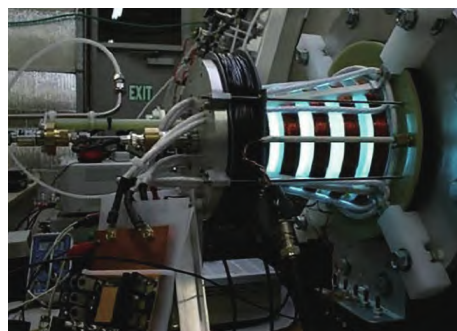


图9 30 kW ELF 推进器

Fig. 9 The 30 kW ELF thruster

试验结果表明, 二氧化碳, 火星大气 (以 95%CO₂, 3%N₂ 和 2%Ar 组成的混合工质气体模拟火星大气) 和水作为推进工质的表现都比纯氙气要差, 需要更多的输入能量, 形成更弱、更低的压力和移动较慢的 FRC, 需要更大的电离能, 才能获得高比冲。同时放电室内等离子体的能量耦合效率较低(实验中并非直接表明为更低的推力器效率), 与纯氙气的 85% 的耦合效率相比, 二氧化碳, 火星大气和水作工质的能量耦合效率普遍仅有 20~50%。研究认为, 该情况是由于放电室和电子设备的限制, 理论上的最优重复率和实际测试的重复率之间的不当匹配所得的结果^[9]。

MSNW 还研制了 1~5 kW 小功率推力器 EMPT (Electromagnetic Plasmoid Thruster), 在单脉冲模式运行时, 测得的元冲量为 0.02 mN·s, 排出速度为 10~40 km/s。最新的测试结果显示采用氙气工质其比冲优于 7000 s。EMPT 推力器每脉冲注入能量 1 J, 口径 0.022 m, 长度 0.1 m, 推力器功率 5 kW 时比冲 4000 s, 元冲量为 0.02 mN·s^[10], 是目前相对较为成熟的场反推力器。

共设计了三个版本的 EMPT, 每个推力器都使用一个圆锥形的石英绝缘体, EMPT-v1 是 10° , 后来的版本都是 12° , 偏置场磁体和磁通量保持器直接位于绝缘体外部, litz 线 RMF 天线连接到推进器体和偏置场磁体上。EMPT-v2 和 EMPT-v3 版本包括更高的偏置场磁铁, 轻质铝通量环保护器^[10-11], 如图 10 所示。

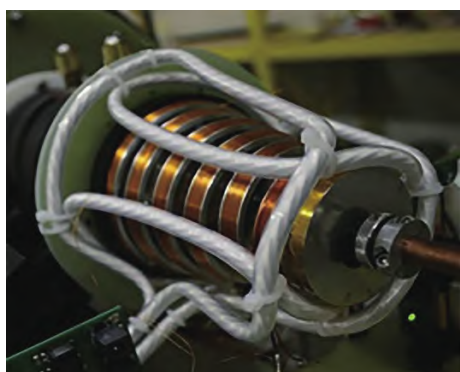


图10 EMPT v2 改进版 RMF 天线

Fig. 10 The EMPT v2 with upgraded RMF antenna

推力器的实验结果表明,在氙气中可以形成超低的 $0.5 \sim 2$ J FRC。FRC 推力器的气体利用率似乎相当高,只要推力器在稳定模式下运行,每次吸气有多个等离子体放电或稳定流动的气体。虽然推力器可以通过单脉冲操作来确定缩放和整体操作,脉冲电磁发射器的前三次放电并不表明后期稳定的工作性能^[10]。

用 EMPT 推力器实现了多个重要第一,在每脉冲能量小于 1 J 的情况下,第一次形成了脉冲感应 FRC 等离子体,比冲为 $500 \sim 7000$ s;通过单一预电离证实多重 FRC 的形成;在稳定的气体流量下操作多重 FRC 排放;实现了 30 万次重复启动。

EMPT 试验目标是演示(Power Processing Unit, PPU)连续波工作模式以及 FRC 脉冲加速。该款样机成功演示了推进剂稳定状态流动下的连续波操作,平均功率 1 kW,脉冲率为 2800 Hz,单脉冲能量 2 J。推力器由一个带有偏置磁场的锥形石英管放电腔和沿放电腔长度方向放置的 RMF 天线组成^[12]。它在推进器底部使用一个小功率阴极作为预电离器。使用弹道摆推力,测量结合 Langmuir 探针获得 FRC 的数据。测试结果显示,在 6 ms 的羽流喷射中,产生 9 个 FRC,获得高达 0.12 mN·s 的冲量。初代的 EMPT 是一个 1 kW 的推力器,能够在 $200 \sim 2000$ W 的范围内运行,对 RMF 天线和磁通量环的几何形状和材料进行了优化,以减少不良的电阻耦合和推力器内部的等离子体负荷。为此重新设计了一个等比例的版本 EMPT,并用于测试各种虚拟负载下的射频天线和磁通耦合组合,结果表明铝通量环对 RMF 的渗透性较低,导致天线之间的电阻耦合更大。同样地,表面覆盖范围更大的通量环几何形状会导致更多的屏蔽。在所有测试的天线中,重叠的几何形状在相同的能量输入下产生更大的

内部径向磁场,并在相同的能量输入下产生更大的内部径向磁场,并在每个周期消耗更多的能量,为此对 EMPT 推力器进行了相应的重新设计,重新设计的 EMPT 推力器采用了大型铝结构板和双射频天线^[13],结构如图 11 所示。

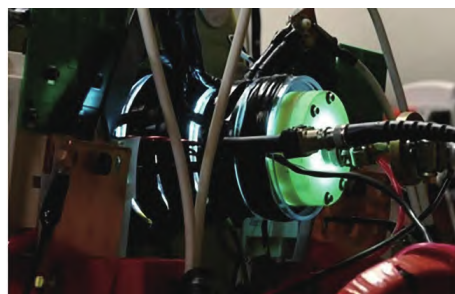


图11 EMPT 中 20 个氙气 FRC 放电时长照片

Fig. 11 A long duration photograph of 20 Xenon FRC discharges in the EMPT

MSNW 公司研制 30 kW 的 ELF-160A 推力器,放电室采用石英玻璃,厚度为 3 mm,长度为 0.2 m,半径为 0.08 m,半锥角为 12° 。主要用途是验证 CH_4 、 H_2O 及 CO_2 等推进剂的可行性,目标是实现小行星或者火星探测的原位资源利用(IRSU)。ELF-160 是 ELF-v2 的改进产品,锥厚 3 mm,锥角 12° ,功率 30 kW,长度 20 cm,半径 8 cm,验证了 CH_4 、 CO_2 、 H_2O 和火星大气作为推进剂的可行性,效率 60% ,比冲 5000 s,液态水注入装置为 T 形管状结构,开展了多种推进剂对推力器性能影响的测试实验。水蒸气、二氧化碳和火星大气测试结果都比纯氙气要差^[14-15]。

2017 年美国空军实验室 RP3-X 是美国空军研究实验室研制的场反推力器,如图 12 所示。用于测试 RMF-FRC 的驱动和形成物理。推力器本身是真空密封,样机采用铜带天线,出口平面连接到一个更大的真空室,每脉冲能量 5 J, RMF 天线相位差 90° ,天线相位延迟 5° ,脉冲放电频率为 10 kHz,实验流率 40 mL/min(标准状态),轴向场 300 Gs,预电离源和 RMF 的时间延迟 10 μs ^[15]。

2018 年密歇根大学研制了场反构型推力器装置 UM—RMF,该推力器是基于 ELF 的设计,如图 13 所示^[16]。推进器的离子源由一个圆柱形的空心阴极提供,偏置磁场是由六个排列紧凑的铝筒外槽缠绕的电磁线圈产生,线圈能够提供 300 Gs 的轴向磁场,这些铝筒(每个 7 cm 宽)直接构成了推力器的锥形放电腔,锥角 16° ,铝筒之间有绝缘隔离,

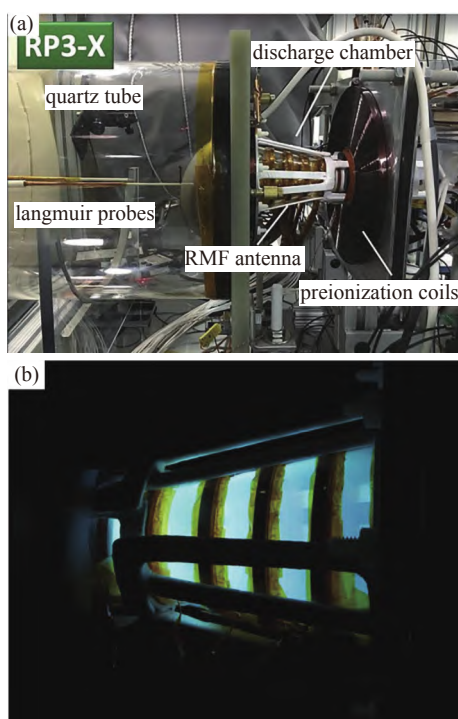


图12 RP3-X 无电极洛伦兹力推力器。(a) 推力器组装图, (b) 推力器放电图

Fig. 12 RP3-X Lorentz Force thruster without electrodes.

(a) Thruster assembly drawing, (b) thruster discharge chart

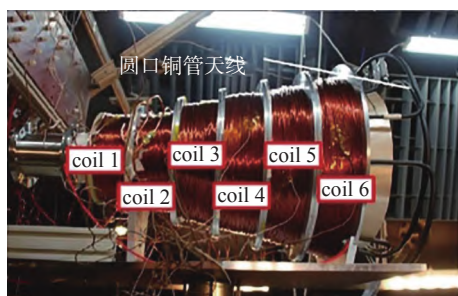


图13 密歇根大学开发的 UM-RMF 推力

Fig. 13 The UM-RMF thrust developed at the University of Michigan

以防止涡流在整个放电腔发展^[17]。在推力器锥体的内部是两对垂直布置的 RMF 天线, 天线由 0.635 cm 直径铜管制成, 冷却水可以在铜管内流动。天线能够在 4.5 kA 的峰值电流下运行, 选择高峰值电流是为了确保 RMF 产生的旋转磁场能够完全渗透到等离子体中。实验结果显示, 增加质量流率和增强背景磁感应强度都产生了更高的能量耦合效率。然而耦合效率在各种情况下均低于 5%, 测试显示实际推力始终不大, 只有几个 mN, 距离高效率情况 (20~40 mN) 下有很大差距^[18]。

与美国研制思路不同, 日本采用螺旋波放电作为初级电离单元的放电形式, 以便于获得更高等离子体密度和更高密度的电离率^[19-20]。日本东京农工大学、九州大学等高校针对放电管长度、天线位形、放电模式以及螺旋波传播机理等方面研究了多款推力器。Shunjiro Shinohara 教授分别在大型磁镜设备 (Large Mirror Device, LMD) (内径 10~17 cm, 长 100 cm)、小型螺旋波设备 (small helicon device, SHD) (内径 2 cm, 长 40 cm)、大型螺旋波等离子体设备 (large helicon plasma device, LHPD) (内径 74 cm, 长 486 cm) 等装置中进行了相关实验研究, 如图 14、15 所示。结果表明, $m=0$ 的激发模式、双鞍形射频天线、较长的放电管长度 L_p (实验中, $5.5 \text{ cm} \leq L_p \leq 486 \text{ cm}$), 有助于提高螺旋波源的等离子体密度^[21-25] ($10^{12} \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$)、降低等离子体的输入功率 ($2 \text{ kW} \leq P_{\text{inp}} \leq 4 \text{ kW}$), 为 FRC 单元提供有利的能量耦合条件。东京农工大学采用矩形线圈设计, 每个线圈采用 5 匝矩形线圈结构^[26]。

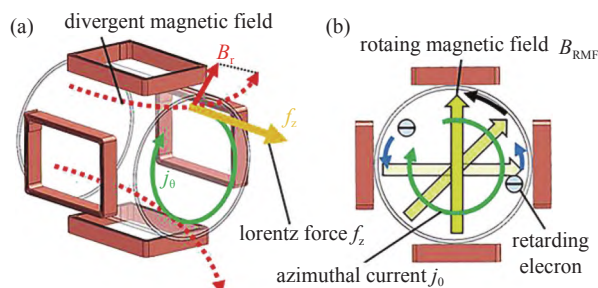


图14 RMF 的结构示意图。(a) 俯视图, (b) 横截面图

Fig. 14 Schematic view of RMF. (a) Top view, (b) cross-section view

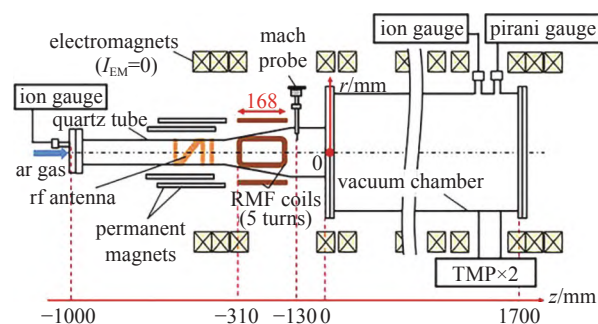


图15 LMD 示意图

Fig. 15 Schematic diagram of LMD

东京农工大学为了证明 RMF 的加速效应, 重点研究了等离子体参数的空间效应, 和 RMF 的磁场, 对于 $f_{\text{RMF}}=1 \text{ MHz}$, 离子马赫数 M_i 和 n_e 在 RMF 天线的附近增加, 这是因为在开放磁场结构中存在

包括抗磁效应和 RMF 方位角电流驱动在内的协同加速效应, 对于 $f_{\text{RMF}}=1$ MHz, 抗磁力比 RMF 的洛伦兹力更占主导, 对于 $f_{\text{RMF}}=0.7$ MHz 的情况, 已经完成了完全渗透^[27-28]。测量了 RMF 在 x 和 y 方向的交流分量, 在等离子体中心的 $x=0$ mm 处增加, 存在一个密度峰值剖面, 从 RMF 天线的上游区域延伸到下游, 其内部磁场分布如图 16 所示。RMF 与等离子体的耦合与典型的射频天线相当, 在一定的条件下, 表明 RMF 对密度生成的贡献。对于 $f_{\text{RMF}}=1$ MHz 可以提供良好的性能来增加推力器下游的总的等离子体推力^[29]。

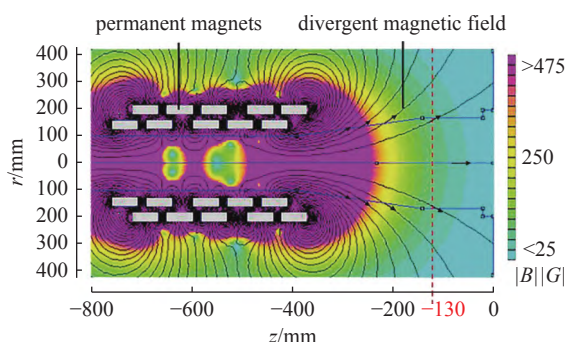


图16 磁通密度及其永磁场线

Fig. 16 Magnetic flux density and its permanent magnet field line

对于 $f_{\text{RMF}}=3$ MHz 和 $f_{\text{RMF}}=5$ MHz, 发现 n_e 和 v_i 的增加近似与 I_{RMF} 的平方成正比。对于 $f_{\text{RMF}}=3$ MHz 的情况, 作者研究了 n_e 和 v_i 与 Φ 的关系, n_e 和 v_i 的增加在加速阶段和减速阶段相比非常小^[30]。从 n_e 和 v_i 的径向剖面可以看出, n_e 和 v_i 增加通过改变气体流率, 更高的密度和离子密度在圆柱的等离子体中心。除了 $f_i=40$ mL/min 和 $r=60$ mm, 等离子体的密度和离子速度均增加。 v_i 增加了高达 28%, 然而, n_i 和 v_i 与 $f_{\text{RMF}}=3$ MHz 组的值高于 $f_{\text{RMF}}=5$ MHz 组, 如前所述。作为一个可能的原因, RMF 功率耦合到等离子体与 $f_{\text{RMF}}=3$ MHz 优于 $f_{\text{RMF}}=5$ MHz^[31-33]。

2.2 计算模型

场反构型洛伦兹力推力器的理论研究主要集中在 FRC 的形成和加速上, 其次是对推力器性能的评估。这些计算模型包括简化模型、等效电路模型和等离子体数值仿真等。

2.2.1 等效电路模型

Woods 等利用等效电路模型研究了高 RMF 场强的情况, 分析了 RMF-FRC 机制, 如图 17 所示。

将等离子体表示为密度恒定的圆柱体, 忽略等离子体给驱动电路带来的负载损失, 推导出了推力、效率和脉冲的解析表达式。

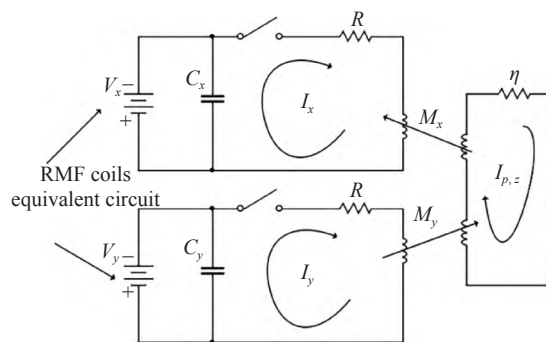


图17 RMF-FRC 的集总电路模型

Fig. 17 Lumped circuit model of RMF-FRC

结果表明, 性能随着耦合因子的增加有所增加。在低输入能量下, 比冲迅速增加, 效率也会迅速提高, 在高输入能量下逐渐稳定。在保持参数不变的情况下, 存在一个最佳的输入能量以实现最大效率。电子完全磁化时产生最大角向电流, 增加电子的磁化强度, 就能提高推力效率。

图 18 表示 RMF 的简化几何模型:

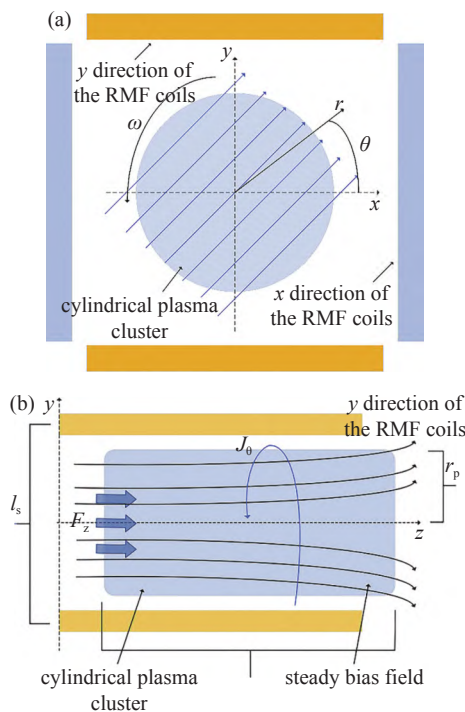


图18 推力器性能简化几何模型。(a)前视图, (b)侧视图

Fig. 18 Simplified geometric modeling of thruster performance. (a) Front view, (b) side view

以图 17 作为电路模板, 使用基尔霍夫电压定律为每个 RMF 线圈构建电路方程:

$$V_x(t) + RI_x(x) + LI'_x(t) = k\Phi'_x(t) \quad (1)$$

$$V_y(t) + RI_y(x) + LI'_y(t) = k\Phi'_y(t) \quad (2)$$

式中 k 为 RMF 线圈 $V_x(t)$ 和 $V_y(t)$ 与等离子体之间的耦合因子, 考虑了耦合中的非理想性, 如非均匀场, 并在分析中作为自由参数, $V_x(t)$ 和 $V_y(t)$ 定义为:

$$V'_x(t) = \frac{I_x(t)}{C} \quad (3)$$

$$V'_y(t) = \frac{I_y(t)}{C} \quad (4)$$

$\Phi_x(t)$ 和 $\Phi_y(t)$ 分别为 RMF 线圈在 x 和 y 方向的

$$J_z = -\frac{r\frac{\mu_0 N}{l_s}(-I'_x(t)\sin(\theta) + I'_y(t)\cos(\theta))}{\eta} + \frac{r\left(\frac{\mu_0 N}{l_s}\right)^2\left(B_{s,r} + \frac{\mu_0 N}{l_s}(I_x(t)\cos(\theta) + I_y(t)\sin(\theta))\right)\left(-I_y(t)I'_x(t) + I_x(t)I'_y(t)\right)}{\eta^3 n^2 e^2 \left(2 + \frac{2B_{s,r} + \left(\frac{\mu_0 N}{l_s}\right)^2(I_x(t)^2 + I_y(t)^2)}{\eta^2 n^2 e^2}\right)} \quad (6)$$

2.2.2 数值仿真模型

(1) 磁流体动力学模型

MHD 代码求解器 MOQUI 被用于求解 FRC 的形成和约束过程。该求解器的优点是网格自适应性, 能够跟随 FRC 的移动改变网格密度, 该求解器具有网格适应性, 能够在强磁场和高压梯度区域提高网格密度^[15]。

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot (n\vec{u}) = 0 \quad (7)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \vec{u} = \vec{J} \times \vec{B} - \nabla p - \nabla \cdot \Pi \quad (8)$$

$$\frac{n_s}{\gamma - 1} \left(\frac{\partial}{\partial t} + \vec{u}_s \cdot \nabla \right) T_s = -p_s \nabla \cdot \vec{u}_s - \left[\Pi \right]_s : \nabla \cdot \vec{u}_s - \nabla \cdot \vec{q}_s + Q_s \quad (9)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\nabla \times \vec{E} \quad (10)$$

$$\vec{E} = -\vec{u} \times \vec{B} + \eta \vec{J} + \frac{1}{ne} \left(\vec{J} \times \vec{B} - \nabla p_e \right) + \frac{m_e}{ne^2} \left(\frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \right) \quad (11)$$

式中, n 是粒子数密度, \vec{u} 是流体流动速度, \vec{B} 是磁场, \vec{E} 是电场, $\vec{J} = \nabla \times \vec{B}$ 是等离子体电流, p 是压力, T 是温度, 下标 s 表示粒子类型。式 (11) 是广义欧姆定律, 电磁流体动力学只包括右边前两项, 第三项是霍尔项, 最后一项是电子惯性项。这里假定等离子体是完全电离的, 没有考虑电离、辐射和电荷交换。

(2) 流体模型

美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory, AFRL) 采用流体模型研究了 FRC 等离子体形成的物理机理^[15], 考虑了电子、离子、中性原

产生的通量的时间导数。可以根据线圈电流来定义 RMF, 为了简化模型, 假设无限长等离子柱的理想情况, 根据线圈电流来定义 RMF:

$$\vec{B}_{RMF} = \frac{\mu_0 N}{l_s} (I_x(t) \cos(\theta) \hat{x} + I_y(t) \sin(\theta) \hat{y}) \quad (5)$$

当由式 (5) 来表示磁场的作用时, 产生的旋转磁场。该场与 RMF 线圈耦合, 可以计算产生的磁通量。根据 RMF 线圈电流、 I_x 和 I_y 并与法拉第感应定律和广义欧姆定律相结合, 重新推导轴向电流密度:

子不同物性的多流体等离子体模型, 并与 RP3-X 实验数据进行了比较, 结果表明 RMF 穿透等离子体柱的方式与实验结果一致。从 FRC 的形成和加速, 时间的跨度比较大, 模拟需要大量的计算时间, 同时由于物理问题的非线性, 加剧了数值计算的难度。同时, 缺少用于验证和校准数值模拟结果的实验数据, 对于数值计算提出了很大的挑战。

(3) 粒子模型

日本东北大学使用粒子方法对带有磁喷管的推力器的加速区域进行了数值模拟^[18]。模拟结果表明, RMF z 方向的电场分量 E_z 与 z 方向的电流密度 J_z 之间的相位差会引起等离子体的收缩, RMF 的幅值 B_w 较强且其频率 f 较高时推力较低, 磁喷管的 z 方向幅值 B_{wz} 不利于推力产生, 存在一个最优的磁喷管 r 方向的幅值 B_{wr} , 该最优值与 RMF 的幅值 B_w 的强度等比例大小。最终通过优化 RMF 的幅值和磁喷管的结构, 获得了 10^{-5} N 的推力。

2.3 国内研究现状

国内仅有大连理工大学和兰州空间技术物理研究所进行了这方面的研究。大连理工大学对该推力器的发展进行了前期的理论调研。从工质气体、初级电离单元、FRC 加速单元、磁场位形以及射频电源几部分详细对比了各研究单位的发展概况^[34]。图 19 EPT 结构示意图兰州空间技术物理研究所开展了多种大功率电推进技术的广泛调研。在综合考虑各种推进技术的优缺点的基础上, 提出

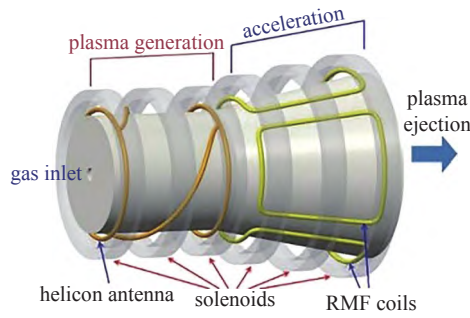


图19 EPT结构示意图

Fig. 19 EPT structure diagram

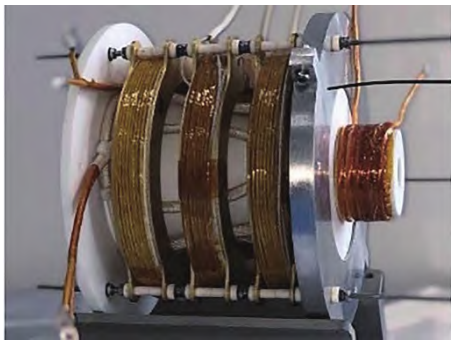


图20 EPT样机

Fig. 20 EPT prototype

了将射频等离子体源与旋转磁场加速相结合的无电极等离子体团推力器(Electrodeless Plasmoid Thruster, EPT)^[35],其推力器结构图如图19所示。

针对1~5 kW级无电极等离子体团推力器实验样机,如图20所示。利用仿真计算和实验测试的方法对推力器的射频等离子体源开展了初步研究。研究结果显示,采用附加磁场能够提升等离子体源的放电效率^[36]。

研究了偶对称和奇对称天线对推力器结构的

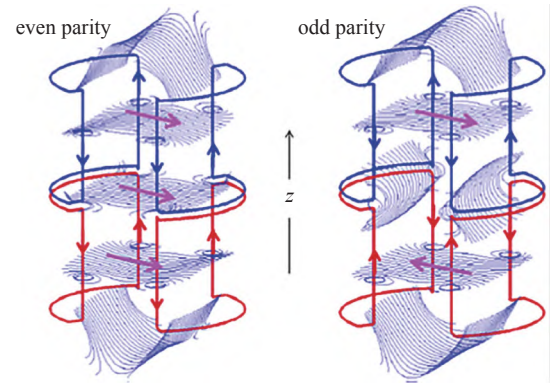


图21 两种不同的RMF天线示意图

Fig. 21 Schematic of two different RMF antennas

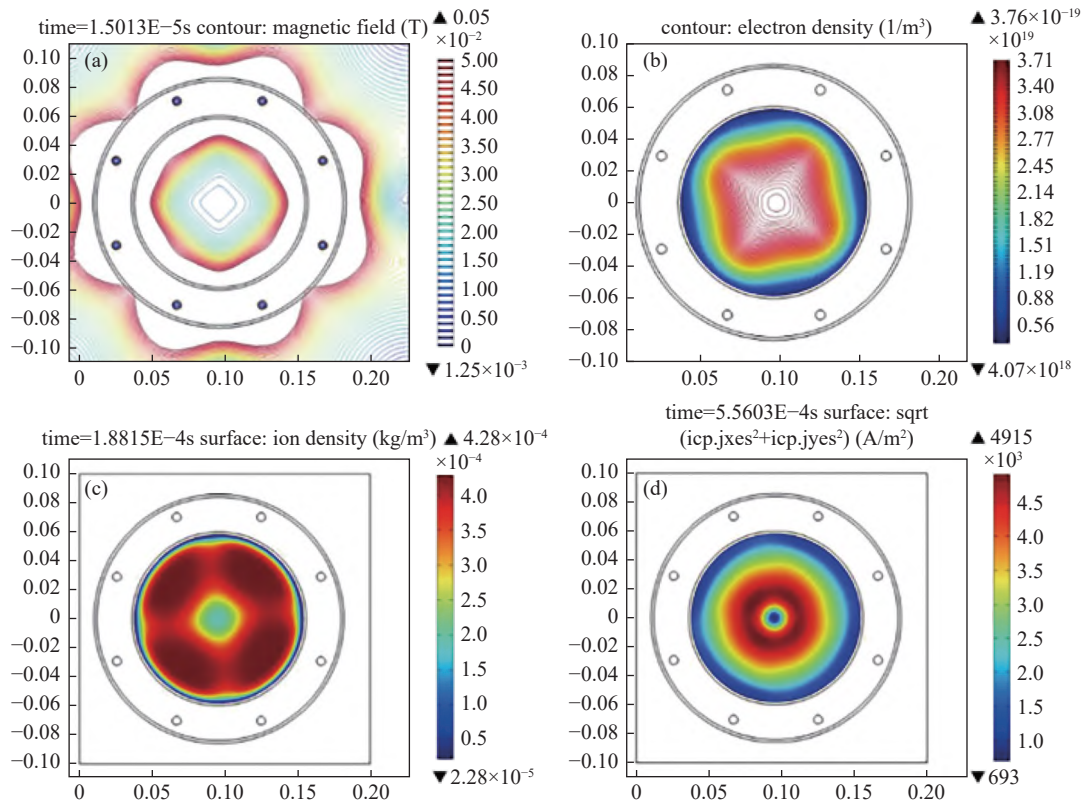


图22 不同天线结构的驱动方位电流密度

Fig. 22 The azimuthal current density with different antenna configuration

影响,如图 21 和 22 所示。结果表明对于等离子体的穿透,电离和电流驱动,存在一个临界的最佳频率。结果表明在能量约束、电流驱动、局部电场和等离子体平衡方面,奇态 RMF 天线比偶态 RMF 天线效率更高,因此,奇态天线可以提高推力器的性

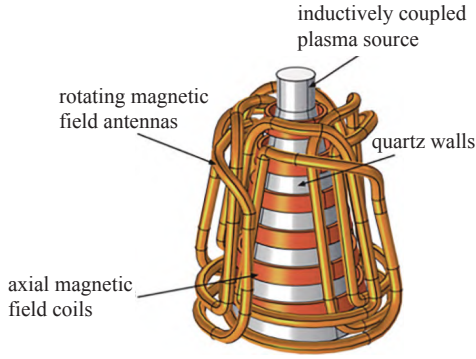


图23 ELF 推力器的结构示意图

Fig. 23 Schematic diagram of ELF thruster structure

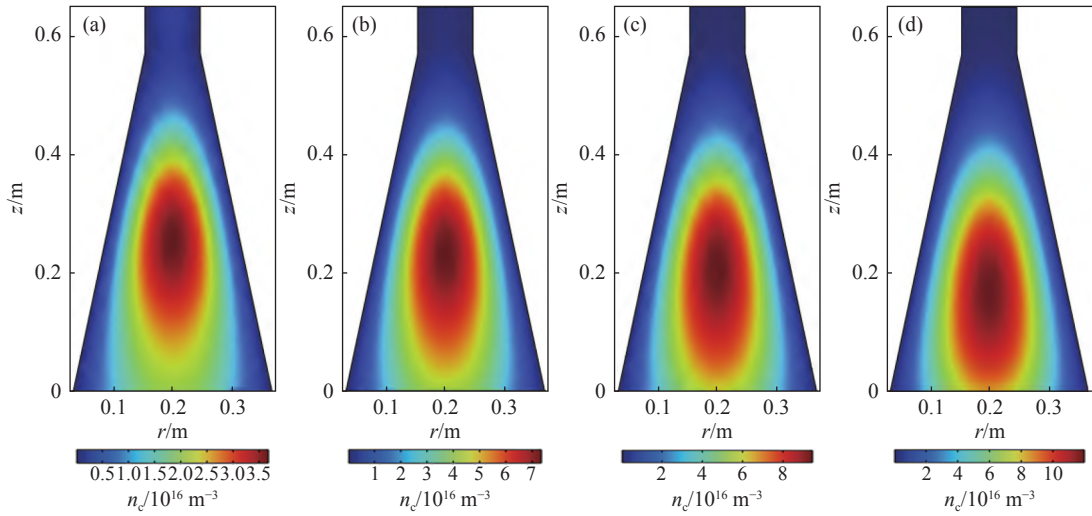


图24 不同时刻的电子密度的空间分布。(a) $t=3 \mu\text{s}$, (b) $t=5 \mu\text{s}$, (c) $t=7 \mu\text{s}$, (d) $t=10 \mu\text{s}$

Fig. 24 Spatial distribution of electron density at different times. (a) $t=3 \mu\text{s}$, (b) $t=5 \mu\text{s}$, (c) $t=7 \mu\text{s}$, (d) $t=10 \mu\text{s}$

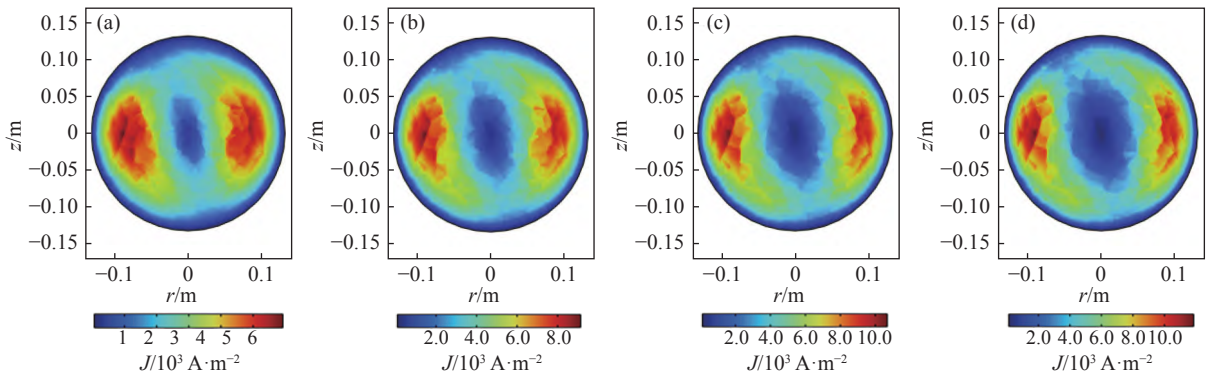


图25 不同时刻的电流密度分布。(a) $t=3 \mu\text{s}$, (b) $t=5 \mu\text{s}$, (c) $t=7 \mu\text{s}$, (d) $t=10 \mu\text{s}$

Fig. 25 Current density distribution at different times. (a) $t=3 \mu\text{s}$, (b) $t=5 \mu\text{s}$, (c) $t=7 \mu\text{s}$, (d) $t=10 \mu\text{s}$

能^[37-38]。

作者对该推力器进行了初步研究,建立了推力器的初步模型,如图 23 所示。并进行了数值模拟,得到了推力器内部的等离子体流动规律,如图 24 和图 25 所示,揭示了等离子体从产生到喷出推力器的整个过程。

该工作仅仅是推力器的初步建模,后期还需要在数值模拟结果的对推力器的结构参数进行优化。

3 关键技术

从 ELF 推力器的工作原理和发展过程来看,该推力器的研发还处于起步阶段,若要将其实际应用,还存在许多细节问题和技术难题亟待解决,具体如下:

3.1 FRC 脉冲的产生和加速过程

通过预电离产生一个初始的背景等离子体,初

始电离需要的能量很低,然而,空间分布打破了第一个等离子体形成的临界电离初始条件。对于多脉冲等离子体,第二和随后的 FRC 形成过程本质上是由前一个脉冲的最终条件促进。预电离建模极其困难,因为注入的推进剂可以通过许多不同的机制进行预电离,除了各种气体注入外,需要单独蒸发阶段的离子液体等各种推进剂已经作为潜在的 FRC 推进剂进行了测试^[9]。因为即使最短的 FRC 发射由数百个单独的等离子体喷射,高精度的建模集中在弱电离、稀薄和化学反应的准确评估,直到形成最后的脉冲。在这一阶段,电离动力学的关键细节驱动流动从弱电离稀薄状态到完全电离连续态,在此过程中,电子能量分布函数的非平衡方面在 FRC 形成的开始过程中起着关键的作用。

3.2 场/等离子体模型

等离子体在物理上非常丰富,很大程度上是因为相空间结构和自诱导电磁力之间的耦合,此外,在中性流的急剧中断中,等离子体在光速的时间尺度上对外部磁场作出反应。磁流体力学模型常被用于 FRC 模拟,但它非常严格地假设等离子体是一个单一的准中性流体。典型的等离子体在推进器中的停留时间约为 10 μs ,在这段时间内,等离子体基本上保持完全电离,强烈的环形电流与外部场相互作用,产生洛伦兹力,加速等离子体。当等离子体向下游移动时,它们通过弹性和非弹性碰撞在其路径上与缓慢的中性体相互作用。

3.3 多尺度效应

FRC 的模拟具有挑战性,因为在分界线内外的等离子体行为有显著的差异,在分界线内部,等离子体是连续的,可以有效地平均小尺度特性;然而,在分界线边界处,驱动了 FRC 的形成。将动力学模拟扩展到更大的时间和长度尺度。虽然气体单原子推进剂是研究 FRC 推力器的首选,但是离子液体等推进剂的分解、气化甚至可能燃烧的复杂物理需要复杂的数值和物理模型。

4 总结

本文综述了场反构型洛伦兹力推力器的发展概况和最新进展。由于 FRC 等离子体是与外部场紧密绝缘的,不被束缚在外部场线上,它们很容易与封闭的外部场分离。此外,FRC 中的大部分电流都在等离子体表面附近的一层中,因此它们可以通

过外加磁场有效地平移和加速。由于喷出的等离子体是准中性的,推力器不需要电极,并且不需要中和器中和,可以兼容多种推进剂。相较于其他类型的高功率推力器,ELF 推力器具有显著的性能优势和发展潜力。

综合以上分析,对该推力器技术的下一步发展方向进行以下建议:(1)开展复杂气体在推力器中的运动仿真分析,同时需要单独设计推进剂的储存和注入装置;(2)旋转磁场天线长时间工作时处于高温状态,如何降温和隔热是需要考虑的问题;(3)降低电源系统的质量和体积,优化电源处理方案,实现电源处理单元的小型化和轻质化,从而实现推力器的工程应用;(4)工质气体种类,旋转磁场天线位型,放电腔体的结构,磁场的结构等因素都会影响推力器加速效果,为了获得最大的能量耦合效率,需要对各参数进行精准匹配,在此基础上设计全新的推力器结构。

总之,该推力器具有比冲高、寿命长、推力与功率范围广等优点,并且该推力器的提出和发展时间比较短。国内应该加快该推力器的研究,通过广泛的合作和深入的技术研究,有望在短期内追赶国外技术水平,为中国高功率推进技术的进步打下坚实的基础。

参 考 文 献

- [1] Blevin H A, Thonemann P C. Plasma confinement using an alternating magnetic field[R]. Abingdon, Berks: Culham Lab., 1962
- [2] Hugrass W N, Grimm R C. A numerical study of the generation of an azimuthal current in a plasma cylinder using a transverse rotating magnetic field[J]. *Journal of Plasma Physics*, 1981, 26(3): 455-464
- [3] Jones I R. A review of rotating magnetic field current drive and the operation of the rotamak as a field-reversed configuration (Rotamak-FRC) and a spherical tokamak (Rotamak-ST)[J]. *Physics of Plasmas*, 1999, 6(5): 1950-1957
- [4] Milroy R D. A numerical study of rotating magnetic fields as a current drive for field reversed configurations[J]. *Physics of Plasmas*, 1999, 6(7): 2771-2780
- [5] Slough J, Kirtley D, Weber T. Pulsed plasmoid propulsion: the ELF thruster[C]//Proceedings of the 31st International Electric Propulsion Conference. 2009: 2009-265
- [6] Weber T E, Slough J T, Kirtley D. The electrodeless

- Lorentz force (ELF) thruster experimental facility[J]. [Review of Scientific Instruments](#), 2012, 83(11): 113509
- [7] Miller S, Rovey J. Pulse discharge network development for a heavy gas field reversed configuration plasma device[C]//Proceedings of the 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. Orlando: AIAA, 2010: 626
- [8] Hill C S. Translation studies on an annular field reversed configuration device for space propulsion[D]. Houghton: Michigan Technological University, 2012
- [9] Kirtley D, Pancotti A, Slough J, et al. Steady operation of an FRC thruster on Martian atmosphere and liquid water propellants[C]//Proceedings of the 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Atlanta: AIAA, 2012: 4071
- [10] Kirtley D, Slough J, Pfaff M, et al. Steady operation of an electromagnetic plasmoid thruster[C]//Proceedings of the 8th MSS/6th LPS/5th SPS Joint Subcommittee Meeting. 2011
- [11] Brackbill J, Cambier J L, Gimelshein N E, et al. Numerical analysis of neutral entrainment effect on field-reversed configuration thruster efficiency[J]. [Journal of Propulsion and Power](#), 2014, 30(6): 1450–1458
- [12] Polzin K, Martin A, Little J, et al. State-of-the-art and advancement paths for inductive pulsed plasma thrusters[J]. [Aerospace](#), 2020, 7(8): 105
- [13] Waldock J, Kirtley D, Slough J. Electromagnetic optimization of FRC-based pulsed plasma thrusters[C]//Proceedings of the 33rd International Electric Propulsion Conference. Washington, 2013
- [14] Pancotti A P, Little J M, Neuhoﬀ J S, et al. Electrodeless Lorentz force (ELF) thruster for ISRU and sample return mission[C]//Proceedings of the 34th International Electric Propulsion Conference. Kobe-Hyogo, 2015: 4-10
- [15] Koo J, Martin R, Sousa E M. High fidelity modeling of field reversed configuration (FRC) thrusters[R]. AFRL/RQRS, 2017
- [16] Sercel C L, Gill T, Woods J M, et al. Performance measurements of a 5 kW-class rotating magnetic field thruster [C]//AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum. AIAA, 2021
- [17] Sercel C L, Woods J M, Gill T, et al. Impact of flux conservers on performance of inductively driven pulsed plasmoid thrusters[C]//Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum. AIAA, 2020: 3632
- [18] Woods J M, Sercel C L, Gill T, et al. Performance measurements of a 60 kW field-reversed configuration thruster [C]//Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum. AIAA, 2020: 3633
- [19] Uchigasaki D, Ohnishi N. Particle simulation of electrodeless plasma thruster with rotating magnetic field[C]//Proceedings of the 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Grapevine: AIAA, 2017: 1343
- [20] Sercel C L, Gill T, Woods J M, et al. Performance measurements of a 5 kW-Class rotating magnetic field thruster [C]//Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum. AIAA, 2021: 3384
- [21] Shinohara S, Nishida H, Tanikawa T, et al. Development of electrodeless plasma thrusters with high-density helicon plasma sources[J]. [IEEE Transactions on Plasma Science](#), 2014, 42(5): 1245–1254
- [22] Kuwahara D, Shinohara S, Yano K. Thrust characteristics of high-density helicon plasma using argon and xenon gases[J]. [Journal of Propulsion and Power](#), 2017, 33(2): 420–424
- [23] Kuwahara D, Shinohara S, Ishii T, et al. High-density helicon plasma thrusters using electrodeless acceleration schemes[J]. [Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan](#), 2016, 14(ists30): Pb_117–Pb_121
- [24] Furukawa T, Kuwahara D, Shinohara S. Spatial characteristics of rotating magnetic field (RMF) plasma acceleration method in open magnetic field configuration under partial RMF penetration[J]. [Physics of Plasmas](#), 2021, 28(7): 073507
- [25] Gill T, Sercel C L, Woods J M, et al. Experimental characterization of efficiency modes in a rotating magnetic field thruster[C]//Proceedings of the AIAA SCITECH 2022 Forum. San Diego: AIAA, 2022: 2191
- [26] Miller K E, Prager J, Henson A, et al. Continuously-operating repetitively-pulsed RMF-FRC thruster and power system[C]//Proceedings of 2021 IEEE International Conference on Plasma Science. Lake Tahoe: IEEE, 2021: 104–111
- [27] Furukawa T, Shimura K, Kuwahara D, et al. Verification of azimuthal current generation employing a rotating magnetic field plasma acceleration method in an open magnetic field configuration[J]. [Physics of Plasmas](#), 2019, 26(3): 033505
- [28] Woods J M, Sercel C L, Gill T, et al. Equivalent circuit model for a rotating magnetic field thruster[C]//Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy 2021 Forum.

- AIAA, 2021
- [29] Cohen S A, Evans E S, David L, et al. Laboratory study of the PFRC-2's initial plasma densification stages[J]. *Physics of Plasmas*, 2023, 30(10): 102503
- [30] Furukawa T, Takizawa K, Kuwahara D, et al. Study on electromagnetic plasma propulsion using rotating magnetic field acceleration scheme[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(4): 043505
- [31] Furukawa T, Takizawa K, Kuwahara D, et al. Electrodeless plasma acceleration system using rotating magnetic field method[J]. *AIP Advances*, 2017, 7(11): 115204
- [32] Glasser A H, Cohen S A. Interpreting ion-energy distributions using charge exchange emitted from deeply kinetic field-reversed-configuration plasmas[J]. *Physics of Plasmas*, 2022, 29(5): 052508
- [33] Furukawa T, Kuwahara D, Shinohara S. Ion flow velocimetry radio frequency plasma thruster using additional rotating magnetic field acceleration method[J]. 2022
- [34] Li Z L, Zhou C, Zhang Y, et al. Development of electrodeless Lorentz force thruster[J]. *Aerospace Control and Application*, 2021, 47(4): 31-40 (李忠林, 周成, 张越, 等. 无电极洛伦兹力推力器技术发展研究 [J]. *空间控制技术与应用*, 2021, 47(4): 31-40(in chinese))
- [35] Sun X F, Wen X D, Zhang T P, et al. Research on high-power RF field reversed configuration plasma electromagnetic propulsion[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2018, 44(1): 44-52. (孙新锋, 温晓东, 张天平, 等. 大功率射频场反构型等离子体电推进研究 [J]. *火箭推进*, 2018, 44(1): 44-52(in chinese))
- [36] Liu L J, Wen X D, Sun X F, et al. High power electrodeless electromagnetic propulsion based on high density plasma: a review[J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2019, 39(5): 37-48 (刘莉娟, 温晓东, 孙新锋, 等. 大功率无电极高密度等离子体电磁推进概述 [J]. *中国空间科学技术*, 2019, 39(5): 37-48(in chinese))
- [37] Zhao D N, Zhang T P, Sun X F. The research of ISRU-based electromagnetic propulsion technology[J]. *Vacuum and Cryogenics*, 2019, 25(3): 156-162 (赵大年, 张天平, 孙新锋. 基于 ISRU 应用的电磁推进技术 [J]. *真空与低温*, 2019, 25(3): 156-162(in chinese))
- [38] Sun X F, Jia Y H, Zhang T P, et al. The study of the RMF effect on the performance of field reversed configuration thruster[C]//Proceedings of the 35th International Electric Propulsion Conference. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2017