

考夫曼离子推力器放电室数值模拟研究综述及展望^{*}

鹿 畅^{1,2,3}, 夏广庆^{1,2,3}, 张军军^{1,2,3}, 孙 斌^{1,2,3}, 李益文⁴

- (1. 大连理工大学 航空航天学院, 辽宁 大连 116024;
2. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 辽宁 大连 116024;
3. 大连理工大学 辽宁省空天飞行器前沿技术重点实验室, 辽宁 大连 116024;
4. 空军工程大学 航空等离子体动力学重点实验室, 陕西 西安 710051)

摘 要: 首先分析了影响考夫曼离子推力器放电性能的关键因素, 然后按照仿真模型的维度对考夫曼离子推力器放电室数值模拟方法进行了分类综述和优缺点分析, 并针对以流体方法为基础的各向异性界面问题进行了分析。在此基础上, 概述了零维模型、二维模型和三维模型下针对放电室所取得的数值模拟研究结果。最后对考夫曼离子推力器放电室数值模拟研究进行了总结及展望。

关键词: 电推进; 考夫曼离子推力器; 放电性能; 放电室; 数值模拟

中图分类号: V439.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2022) 06-201004-14

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 201004

Review and Prospect of Numerical Simulation for Discharge Chamber of Kaufman Ion Thruster

LU Chang^{1,2,3}, XIA Guang-qing^{1,2,3}, ZHANG Jun-jun^{1,2,3}, SUN Bin^{1,2,3}, LI Yi-wen⁴

- (1. School of Aeronautics and Astronautics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
2. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
3. Key Laboratory of Advanced Technology for Aerospace Vehicles of Liaoning Province, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;
4. Science and Technology on Plasma Dynamics Laboratory, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: The key factors influencing the discharge performance of Kaufman ion thruster are summarized and analyzed first. Then, according to the model's dimension, the numerical simulation methods of Kaufman ion thruster discharge chamber are classified and summarized. The advantages and disadvantages are analyzed as well. Also, the anisotropic interface problems in fluid method are analyzed. Meanwhile, the numerical simulation results of zero-dimensional model, two-dimensional model and three-dimensional model for discharge chamber are summarized. Finally, the numerical simulation of Kaufman ion thruster discharge chamber is prospected.

Key words: Electric propulsion; Kaufman ion thruster; Discharge performance; Discharge chamber; Numerical simulation

^{*} 收稿日期: 2021-01-06; 修订日期: 2021-06-22。

基金项目: 国家重点研发计划 (2020YFC2201100; 2021YFE0116000); 国家自然科学基金 (12102082; 12175032); 中央高校基本科研业务费专项资金 (DUT21GJ206); 辽宁省重点研发计划 (2020JH2/10500003); 中央引导地方科技发展资金 (216Z1901G); 天琴计划教育部重点实验室(筹)开放基金 (TQRF-2020-2.5)。

作者简介: 鹿 畅, 博士, 助理研究员, 研究领域为电推进数值模拟。

通讯作者: 夏广庆, 博士, 教授, 研究领域为电推进、微推进等。

引用格式: 鹿 畅, 夏广庆, 张军军, 等. 考夫曼离子推力器放电室数值模拟研究综述及展望[J]. 推进技术, 2022, 43(6): 201004. (LU Chang, XIA Guang-qing, ZHANG Jun-jun, et al. Review and Prospect of Numerical Simulation for Discharge Chamber of Kaufman Ion Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2022, 43(6):201004.)

1 引 言

太空探索不仅要求飞行器的推力器具备可靠的性能和长久的使用寿命,还要求推力器具备足够高的比冲和效率,以使得飞行器可以携带足够的推进工质来完成任务^[1]。在这种需求下,电推进技术应运而生^[2-6]。电推进技术是一种利用电场或电磁场使推进工质获得极高喷出速度,从而显著降低飞行器工质携带量的技术^[7-9]。在电推力器中,离子推力器不仅比冲非常高,而且推力范围也非常广。所以,离子推力器是所有电推力器中应用最为广泛的电推力器之一。除此之外,离子推力器的工质利用率可高达 90%,效率一般在 70% 以上^[10-12]。而且,与其他电推力器相比,离子推力器的使用寿命也比较长^[13]。

根据等离子体源的工作方式不同,离子推力器可以进一步分为直流放电电子轰击式离子推力器(即考夫曼型^[14])、射频离子推力器和电子回旋共振离子推力器(即微波离子推力器或 ECR 离子推力器^[15])。在上述离子推力器中,考夫曼离子推力器又是目前使用最为广泛的离子推力器^[16]。美国率先启动了考夫曼离子推力器的研发,且逐年增大研发投入和力度。近几年,我国在该推力器研发上的投入力度也在不断加大。

为增大推力器的有效载荷比、应对深空探测任务中不断增长的执行时间和飞行距离需求,考夫曼离子推力器的设计尺寸、输入功率和推力水平也在不断增大^[17-18]。在尺寸、结构等方面变化带来了诸多新的问题,例如放电室内等离子体密度过低、电离困难、放电室内等离子体分布的周向均匀性太差等问题。

鉴于数值模拟是研究考夫曼离子推力器放电室的一种高效且重要的手段,本文对其数值模拟研究现状进行了调研、总结及展望,以期促进考夫曼离子推力器数值模拟发展,解决上述问题。

2 影响考夫曼离子推力器放电性能的关键因素

传统的考夫曼离子推力器的放电室结构通常为截圆锥形^[19],如图 1(a)所示。除此之外,为了突破传统考夫曼离子推力器的输入功率和栅极尺寸限制,研究人员还提出了具有不同结构的新型大功率考夫曼离子推力器——环型离子推力器^[20-26],如图 1(b)所示。

环型离子推力器的放电室由两个阳极套筒组

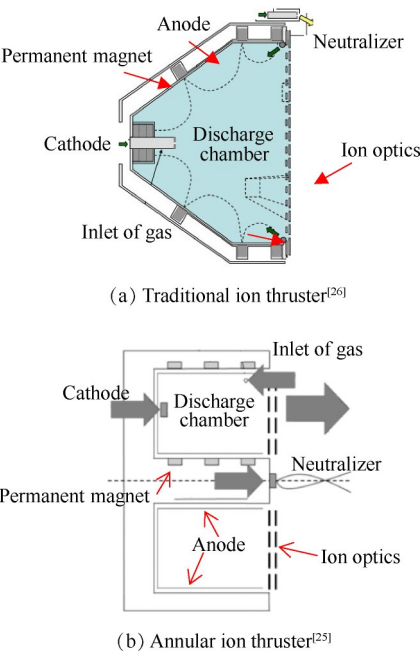


Fig. 1 System composition of Kaufman-type ion thruster

成,放电室结构呈环形^[25]。其阴极偏置于放电室一侧,使得放电室的结构呈非轴对称。除增加了阳极内筒外,环型离子推力器和传统离子推力器的系统组成完全一致:主要由放电室、阳极、阴极、永磁体、栅极和中和器构成。为区别两种推力器,本论文将放电室结构为截圆锥形的考夫曼离子推力器称为传统离子推力器,而将放电室结构呈环形的考夫曼离子推力器仍称为环型离子推力器。

2.1 影响离子推力器放电性能的参数

离子推力器的工作过程大致分为三个阶段:(1)推进工质在放电室内电离产生离子;(2)离子被栅极系统加速形成束流;(3)束流被中和器中和形成羽流。在上述工作过程中,现阶段亟待研究和解决的影响考夫曼离子推力器性能的主要问题涉及放电室内等离子体的分布特性^[7]。下面对该问题及其研究现状进行概述。

衡量考夫曼离子推力器放电室性能的主要参数包括放电损耗、等离子体产生率等参数。而放电室内等离子体的分布特性会对推力器的放电损耗、电离率等参数产生显著影响。其中,放电损耗是指产生单个束流离子所消耗的放电功率,可由放电室输入功率与束电流的比值求得^[27]。因此,放电损耗越小,离子推力器的效率越高。Goebel等^[7]研究发现放电室内等离子体并非均匀分布,若阳极壁面附近的等离子体密度过大,则会导致放电电流显著增大。由于放电电压基本为恒值,在栅极上游等离子体平

均密度不变的情况下(即相同的束流下),放电电流越大放电损耗就越大。等离子体产生率是指单位体积、单位时间内电离产生的离子个数。所以,等离子体产生率越高,则放电室内可获得的等离子体密度越高,进而可获得更高的束流和推力。当阳极壁面附近的等离子体密度过小时,会导致等离子体相对阴极的电位过低,从而导致放电室内的电离率大大降低,严重时甚至会导致阴极无法发射电子^[7]。因此,等离子体在阳极壁附近的密度需要控制在一定的范围,例如NSTAR离子推力器阳极附近的离子密度通常在 $10^{17} \sim 10^{18} \text{ m}^{-3}$ ^[28]。由于放电室内等离子体分布很难通过实验测量获得,所以数值模拟方法是研究该问题的关键手段之一。

除此之外,更重要的是,放电室内等离子体的分布特性还会显著影响推力器主要构件的使用寿命,特别是栅极系统的使用寿命。当放电室出口处(即栅极上游)的等离子体均匀性太差时,栅极系统会快速失效。然而,受复杂的电磁场环境或者几何结构的影响,放电室出口处的等离子体很难保持较好的均匀性。例如,Herman等^[29]研究发现在传统离子推力器的放电室中,离子的运动主要受等离子体双极扩散电场以及等离子体鞘层电场的影响。如图2所示,在这两种电场的影响下,离子的运动会展现出两种特性——沿磁场线流动的各向异性和被栅极上游鞘层电势汇聚的特性^[30]。因此,即便放电室内部的等离子体产生率是均匀的,在上述两种电场的作用下,当等离子运动至放电室出口处时也很难保持较好的均匀性^[31]。

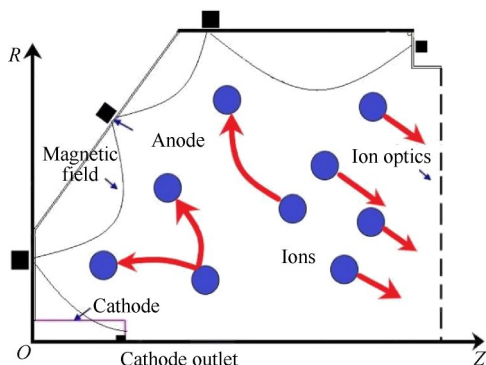


Fig. 2 Diagram of ion flow in the discharge chamber of traditional ion thruster

对于环型离子推力器而言,其环形结构减小了栅极的跨度,从而有利于减小等离子体在径向上的不均匀性^[32]。然而,Patterson等^[24]在实验中发现环形放电室中等离子体在周向上存在显著的不均匀性,

即:在阴极上方区域,等离子体密度容易过大,而在阴极对侧等离子体密度容易过小,如图3所示。对于上述等离子体分布不均匀的问题,利用数值模拟可以高效地分析相关影响因素及规律。

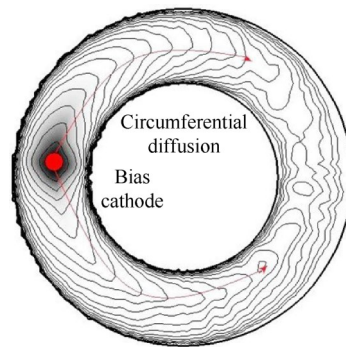


Fig. 3 Diagram of ion circumferential flow in the discharge chamber of annular ion thruster

2.2 影响等离子体分布特性的因素

等离子体的上述分布特性本质上由放电室内原初电子、离子和电子在磁尖、阳极鞘层、空心阴极与放电室的交界位置、栅极与放电室的交界位置的运动特点决定:未发生激发或电离碰撞的原初电子能量较高,通常只在磁尖处损失(或被磁镜反弹),并直接穿过阳极鞘层,在空心阴极与放电室的交界位置通常也直接穿过,但在栅极与放电室的交界位置通常会被加速栅极负电位反弹;离子在磁尖和其他阳极壁面均有损失,但受双极电场引导,在磁尖处损失电流较大,在空心阴极与放电室的交界位置会被阴极负电位吸引而回流至阴极,在栅极与放电室的交界位置会被栅极引出;电子能量较低,通常被阳极鞘层反弹,多数在磁尖处损失(或被磁镜反弹),在空心阴极与放电室的交界位置通常被阴极负电位反弹,在栅极与放电室的交界位置也通常会被加速栅极负电位反弹。文献[26]中认为磁场是影响上述粒子运动的关键因素,并针对磁场形貌的影响进行了研究,他们认为对于环尖型磁场构型,放电室最大闭合等值面越大,等离子体分布会更加均匀,一个设计良好的磁场应当将原初电子引导至合理的位置以改善等离子体的分布。此外,偶数磁极构型相较于奇数磁极构型,其等离子体分布更均匀。

综上所述,等离子体的分布特性不仅会影响推力器的放电性能,还会影响推力器的使用寿命。而放电室内磁场、电场等参数是影响等离子体分布特性的关键因素。

2.3 等离子体分布特性研究现状

2004年~2009年,Sengupta等^[33-34]尝试通过调控传统离子推力器放电室的磁场结构来改善阳极和栅极附近的等离子体分布,发现增大放电室内磁场的闭合等值面可以减少离子在阳极壁面上的损失,因而可以提高放电效率,而减小屏栅极附近的弱磁场区或无磁场区体积有利于降低轴线上的离子密度。可见,调控放电室的参数可以优化等离子体的分布。但除磁场外还存在许多影响等离子体分布的参数,例如放电室尺寸、几何结构、阴极长度等。然而,通过实验研究这些参数需要制造多个不同参数的放电室,所以实验研究的费用高昂且周期很长。

而且,受诊断技术限制(例如,接触式诊断技术^[28, 33-45]会不可避免地对放电室内的等离子体产生干扰,而非接触式诊断技术^[46-53]存在绝对校准困难或者影响电离碰撞过程等问题),通过实验还很难较好地获得等离子体的分布。此外,实验过程中各种影响因素相互耦合,通过实验也较难辨别影响实验结果的主要因素和影响机理。所以,目前的实验研究主要还局限在等离子体特性的诊断及诊断方法的改进,如文献[32-53]中所述。因此,有关放电室参数对等离子体分布影响的实验研究目前仍然较少。

除实验研究外,数值模拟是研究放电室内等离子体分布特性的较好的方法。通过数值模拟可以较为方便地获得放电室内等离子体的分布,还可以通过屏蔽不相关的因素来观测和研究放电室内任意关心的物理量。但是,现有的放电室仿真模型只有零维模型和二维模型。其中,零维模型只能得到放电室内等离子体密度的平均值。而二维模型则忽略了等离子体在周向上的不均匀性。所以,目前仅有较少文献研究过轴对称放电室中的等离子体分布特性,且研究内容主要局限在磁场结构对等离子体分布及放电损耗和电离率等宏观性能的影响^[16]。而有关放电室出口处等离子体均匀性的研究较少,特别是有关环型离子推力器放电室的研究尚处于空白。

3 考夫曼离子推力器放电室数值模拟研究现状

本节对放电室数值模拟的研究现状进行了概述,并对现有仿真模型的不足进行了分析。按仿真模型的维度区分,目前考夫曼离子推力器放电室的仿真模型可以分为零维模型、二维模型和三维模型。另外,需要特别指出的是,由于放电室的几何形状通常非常复杂,在二维及三维模型中还面临着复杂边

界场的求解问题。特别是,在基于流体方法求解等离子体分布的仿真模型中,还要考虑复杂边界场的各向异性问题。这一问题也是目前限制高效、高精度和高维度放电室仿真模型发展的一个重要原因。所以,本节还对具有复杂边界的各向异性场问题的求解方法进行了概述,并在此基础上对放电室三维模型进行了概述。

3.1 零维模型

早期的放电室零维仿真模型是在流体方法的基础上做大量简化得到的简单分析模型,其中许多输入参数要基于经验假设或实验测量结果。这也使得早期的放电室仿真模型大多是半经验模型,并且只能针对放电室的某一种性能进行分析^[54-57]。

第一个可以全面描述放电室性能的零维仿真模型由科罗拉多州立大学的Brophy提出^[58]。Brophy的模型假定放电室内所有粒子的密度、等离子体的产生率等物理量均呈均匀分布,即:在Brophy的仿真模型中,各守恒方程至多保留时间维度,而空间维度则均被忽略。因此,Brophy的仿真模型被称为零维模型(即“0-D”或“single-cell”分析模型)。

在Brophy提出的假设下,描述等离子体的流体方程转变为了一组描述放电室内电流守恒、流率守恒和功率守恒的公式。例如,阳极吸收的原初电子电流可表示为原初电子平均密度、平均速度和阳极损失面积的乘积。电离产生的离子总电流则表示为原子平均密度、二次电子平均密度和平均速度、原初电子平均密度和平均速度、等离子体体积和平均电离碰撞截面的函数。而原子密度则视为均匀分布的背景,并根据流出发电室的原子流率直接计算得到。基于当时可测量的实验数据,Brophy的0-D模型可以对放电损耗、电离率、放电效率、束流和推力等一系列表征推力器性能的物理量进行估算。之后,主要有Goebel等^[59-60]对Brophy的模型进行了改进。改进后的零维模型减少了对部分实验测量值的依赖,还可以对放电室的放电稳定性等问题做定性分析。例如,Goebel等改进的零维模型中等离子体平均电势不再需要实验测量,而是根据推力器的几何尺寸、阴极和阳极的电位等宏观参数进行估算。而且所描述的电流和电势关系更加详细和复杂,如图4所示。

经过Goebel等的改进,零维模型已发展较为成熟。之后,零维模型多用于不同条件下放电室宏观性能计算,但在算法上并无重大改进。例如,2015年~2018年,Simon等^[61-63]分别利用零维模型对采用碘、氮等不同工质的离子推力器性能进行了研究。2019

年, Simon 等^[64]又利用零维模型对比了氙和氩工质下的传统离子推力器和射频离子推力器的性能。同年, Chloe 等^[65]利用零维模型研究了以 CO_2 为工质的离子推力器性能。

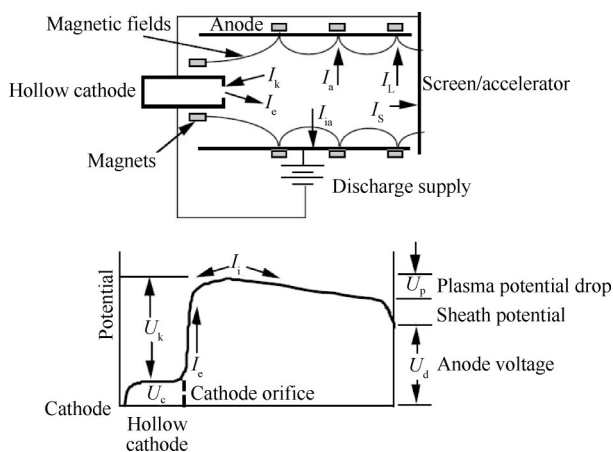


Fig. 4 Analysis of plasma potential in 0-D model^[59]

综上所述, 零维模型的求解方法相对比较简单, 也比较高效。但是, 零维模型仅能得到预估宏观物理量的平均值。所以, 采用零维模型无法用于研究放电室内等离子体的不均匀性, 进而无法用于研究这种不均匀性对栅极性能和羽流分布特性的影响。因此, 必须发展高维度的放电室仿真模型。

3.2 二维模型

1990年, 日本东京大学的 Arakawa 等^[66]基于流体方法首次建立了一个二维轴对称的放电室仿真模型。在 Arakawa 的模型中, 原初电子被视为恒温无碰撞粒子 (Collision-free particle), 从而将原初电子的密度直接表达为磁矢势的函数:

$$\begin{aligned} n_p &= \bar{n}_p (1 - C|A|), |A| < 1/C \\ n_p &= 0, |A| \geq 1/C \end{aligned} \quad (1)$$

式中 n_p 为原初电子密度, $\bar{n}_p$ 为原初电子平均密度, A 为磁矢势, C 为与原初电子温度相关的系数。

而中性原子则视为均匀分布的背景常数, 其密度则根据放电室内的粒子流量守恒计算得到。等离子体则直接采用各向异性双极扩散方程进行描述:

$$-\nabla \cdot (\mathbf{D} \cdot \nabla n) = Q \quad (2)$$

式中 $\mathbf{D}$ 为各向异性双极扩散系数 (沿磁场线方法和垂直磁场方向扩散速率不同), n 为等离子体密度, Q 为等离子体产生率。

其中, Q 又由原初电子密度、中性原子密度和电离反应系数计算得到

$$Q = n_p n_n \langle \sigma v \rangle \quad (3)$$

式中 n_n 为中性原子平均密度, σ 为平均电离碰撞截面, v 为原初电子平均运动速度, 由放电电压和热运动速度求得^[66]。

然后, Arakawa 等采用有限元方法对上述双极扩散方程进行了求解并得到了等离子体的分布。Arakawa 等利用该模型对比了不同磁场结构下阳极附近的等离子体密度大小, 进而分析了不同磁场结构对等离子体的约束性能^[66]。Arakawa 等开发的仿真模型将原初电子视为恒温无碰撞流体, 中性原子视为均匀分布的背景常数, 采用各向异性双极扩散方程描述等离子体流动过程, 且忽略了放电室内电场。这些处理方式与实际物理过程相比进行了非常强的简化, 但该模型为下一步开发更高维度的基于粒子流体混合算法的仿真模型打下了坚实的基础。

20 世纪 90 年代初, Birdsall 提出了 Particle-in-cell (PIC) 算法并引起广泛关注。而后, 基于 PIC 方法的放电室粒子仿真模型被相继提出。但受限于计算量, 早期的 PIC 模型仅针对放电室内的局部区域进行仿真或仅考虑单粒子的运动。例如, 1993 年, Arakawa^[67]首先开发了一个基于 Particle-in-cell Monte Carlo (PIC-MCC) 算法的二维轴对称单电子追踪模型。该模型仅考虑单个电子在强磁场区域内的运动, 如图 5 所示。

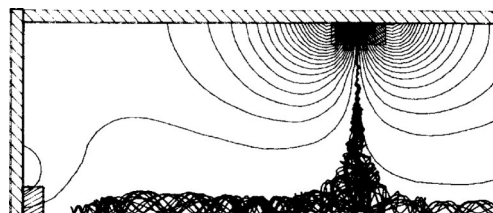


Fig. 5 Single electron trajectory map in strong magnetic field region^[67]

Hirakawa 等^[68]、Yashko 等^[69]对上述模型进行了改进。改进后的模型在强磁场区域中考虑了电离过程, 可计算强磁场区域中阳极壁面的离子损失率。2002 年, Mahalingam 和 Menart 将 Arakawa 和 Yamada 的模型拓展到了整个放电室, 可以对多电子和多磁极磁场进行仿真, 如图 6 所示 (图中数字标记曲线为磁感应强度等值线, 数值表示磁感应强度大小, 单位高斯; 粉色曲线为原初电子轨迹)。但改进后的模型仍然不考虑电离过程^[70-73]。

上述粒子仿真模型本质上均为单粒子模型, 因而无法反映放电室整体的放电过程, 也无法用于研究放电室内等离子体的分布特性。

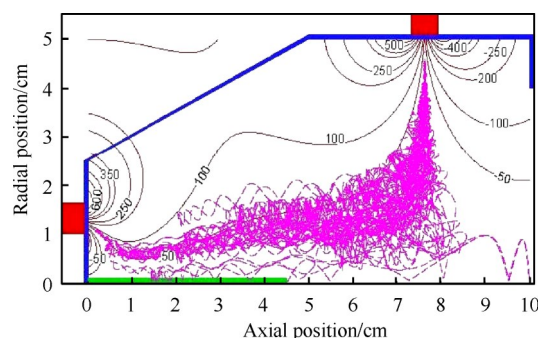


Fig. 6 Electron trajectory diagram in multi-pole magnetic field^[70]

2007年~2010年, Mahalingam等^[74-75]将 Szabo 的缩放算法引入了放电室 PIC-MCC 仿真模型中,首次将电离过程耦合进放电室粒子模型,实现了对放电室内放电过程的全范围仿真。在耦合电离过程的粒子模型中,其计算量大小主要由等离子体德拜长度和重粒子运动速度决定。而 Szabo 的缩放算法通过人为调整真空介电常数和重粒子的质量来提高计算速度。由于德拜长度正比于真空介电常数,而离子运动速度反比于离子质量。所以当真空介电常数增大 γ^2 倍且离子质量缩小 f 倍时,二维粒子模型的计算量将减小 $\gamma^2 f$ 倍,因而可以大大提高计算速度。然而,缩放算法会导致仿真结果失真,而且无法还原为真实的物理量,所以基于缩放算法的粒子模型仿真结果与实验结果差别较大。此外,为了进一步提高计算速度, Mahalingam^[76]还提出了粒子模型的并行加速计算方案。

2011年,为了得到离子推力器内等离子体分布的真实特性,并作为下一步离子推力器数值仿真研究的基准, Mahalingam等^[77]又在缩放算法和并行算法的基础上提出了一种逼近真实放电过程的仿真模型。模型唯一的假设是使用了自相似缩放^[78]来减小计算域的大小,自相似因子取 1/200。在缩小计算区域的基础上,逼近真实放电过程的基本思路为:首先采用自相似缩放方法对离子推力器放电室进行仿真至接近稳态。然后减小放大比例再一次进行仿真至接近稳态。如此迭代数次至最后达到基于真实介电常数的仿真。基于此方法,利用莱特州立大学的超级计算机和并行加速计算技术,历时两个月,他们首次实现了基于真实介电常数的离子推力器放电室二维轴对称全粒子仿真。与 NASA NSTAR 离子推力器放电室内部等离子体分布的实验数据对比显示,他们的仿真程序以较高的精度再现了 NSTAR 离子推力器放电室内部的等离子体分布。然而,由于该模型

的时间成本太高,所以并未在放电室的工程设计问题中得到广泛应用。

在 Arakawa 等工作的启发下,喷气推进实验室 (JPL) 的 Wirz 等^[79-82]首次提出了一个二维轴对称的放电室粒子流体混合仿真模型。在该仿真模型中,原初电子采用 PIC-MCC 模型进行仿真,等离子体采用基于准中性假设得到的双极扩散模型,而中性原子的计算则借鉴了在空间热辐射计算中常用的 View Factor 技术。Wirz 模型中的各子模型通过将各自的输出结果作为其他子模型的输入参数来进行耦合。该模型对离子推力器宏观性能的仿真较为精确,而且具备较高的计算效率。

Wirz 的模型非常适合解决放电室的设计问题。2008年, Wirz 等^[19]利用该模型研究了磁场结构对放电室内等离子体分布的影响。他们研究发现磁场的拓扑结构对考夫曼离子推力器的性能(例如推进工质利用率、束流平坦度等)有较大影响,仅仅增加磁场强度而不改变磁场的拓扑结构无法降低放电室中心轴线区域的双价离子的密度。在合适的磁场拓扑结构下,磁力线可以将高能的原初电子引导至放电室内的特定区域并主要产生单价离子从而降低中心轴线区域的双价离子的密度。

Wirz 的模型为放电室混合模型的发展提供了较好的思路。然而,该模型中仍然存在一些问题阻碍了其往更高维度上的发展。Wirz 的模型通过使用 View Factor 算法将原子的流动和电离过程耦合在了一起。在 View Factor 算法中,需要预先建立独立的边界网格,并假设每个边界单元向放电室内发射原子。在此基础上, View Factor 算法的第一步为计算每个边界单元发射的中性原子流率。由质量守恒可知,稳态时每个边界单元发射的原子流率必然等于该边界单元从其余边界单元和发射源接收的原子流率,以及离子在该边界单元的复合率,即

$$Y_h = \sum_m V_{mh} Y_m (1 - \xi_{o,m}) + \sum_s V_{sh} Y_s + Y_{rh} \quad (4)$$

式中 Y_h 为第 h 个边界单元发射的原子流率, Y_m 为第 m 个边界单元发射的原子流率, V_{mh} 为第 h 边界单元与第 m 个边界单元之间的视角因子, $\xi_{o,m}$ 为第 m 个边界单元的原子透过率, Y_s 为第 s 个发射源发射的原子流率, V_{sh} 为第 h 边界单元与第 s 个发射源之间的视角因子, Y_{rh} 为第 h 个边界单元的离子复合率。

在式(4)中,两个单元之间的视角因子 V 由两单元间的角系数和路径电离积分系数求得^[81]。那么,所有的边界单元和发射源可组成如下所示的线性方

程组^[79]:

$$\begin{bmatrix} 1 & -V_{21}(1-\xi_{0,2}) & \cdot & \cdot \\ -V_{12}(1-\xi_{0,1}) & 1 & -V_{13}(1-\xi_{0,3}) & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_s V_{s1} Y_s + Y_{r1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix} \quad (5)$$

求解式(5)可得到每个边界单元发射的原子流率。然后,根据每个边界单元发射的原子流率和单元面积可以计算每个边界单元发射的平均原子通量密度^[79]。那么,计算区域内某点的原子总通量密度可由该点从所有边界单元和发射源接收的原子通量密度相加求得

$$y_k = \sum_m V_{mk} y_m (1 - \xi_{0,m}) + \sum_s y_{sk} \quad (6)$$

式中 y_k 为第 k 个内部点的原子总通量密度, y_m 为第 m 个边界单元发射的平均原子通量密度, y_{sk} 为第 k 内部点从第 s 个发射源接收的原子通量密度^[79]。

最后,原子的宏观流速忽略不计,则第 k 个内部点的原子密度可由该点的原子总通量密度和原子的平均热速度求得

$$n_k = 4y_k / \bar{C} \quad (7)$$

式中 n_k 为第 k 个内部点的原子密度, $\bar{C}$ 为原子平均热速度。

由上述算法的基本过程可知,在View Factor算法中不仅必须建立边界网格,还需要对计算区域内的电离率做路径积分。因此,这一算法在三维模型中将变得非常复杂。首先,三维模型的边界条件更加复杂,所以边界网格和计算区域网格的建立与标定会随之变得复杂。而且,不同尺寸或不同结构的放电室需要建立不同的边界网格和计算区域网格。其次,三维模型中划分的边界网格数相应增多,所以模型的计算量将显著增大。最后,三维模型中电离率路径积分的计算也将更加复杂,所以视角因子的计算量不仅大大增加,而且计算难度也显著增大。除此之外,由于在放电室内存在结构复杂的磁场,而等离子体在平行于和垂直于磁场线方向的扩散系数差别巨大,所以等离子体会在放电室内呈现出显著的各向异性。为了可以在笛卡尔网格中描述等离子体的各向异性扩散过程,Wirz的模型将计算区域的边界进行了简化。然而,简化后强磁场区域

解精度也随之降低。这一问题也限制了Wirz模型的进一步发展。本论文将在下一小节对该问题进行探讨。

此后,放电室二维仿真模型在算法上并无本质突破。2014年,Araki^[83]对微型Kaufman离子推力器(MiXI Thruster)的放电过程进行了研究。为了可以在小尺寸下(<3cm)精确计算强磁场区域的放电过程,Araki等^[84]改进了Wirz模型中PIC算法在非结构化网格中的插值方法,以及磁场线网格的生成算法。Araki研究发现对于柱坐标系下的非均匀网格,用于粒子模拟的标准面积加权方法会导致粒子密度的系统误差。通过使用加权单元体积统计密度,可以显著减少这些误差。Araki改进了非均匀网格中的校正体积计算和单元中心加权算法。修正体积的简单公式可用于柱坐标系中任何类型的四边形和/或三角形网格。针对自适应笛卡尔网格和非结构网格中均匀、线性递减和贝塞尔函数的径向密度分布,计算了由单元中心加权算法引起的密度误差。对于所有的密度分布,加权算法使密度计算得到了显著改进。然而,对于单调递减的密度分布,相对较大的密度误差可能存在于最外层单元。密度误差对势场计算的影响分析表明,最外层单元的误差不会传播到势场解中。2014年~2018年,Mao等^[85]、Dankongkakul等^[86-87]利用Araki改进的模型对MiXI Thruster的磁场结构和阴极尺寸等参数进行了优化。Gary等^[88]利用Wirz的模型研究了轴向环尖混合放电(ARCH)模式中原初电子和等离子体的约束行为。与Langmuir探针测量数据对比表明,仿真模型可较好地预测等离子体分布。Gary等提出了几个推力器灵敏度研究,包括背板偏置、原子注入方式、外磁位移、灯丝与空心阴极发射。结果表明,背板静电约束显著提高了整体放电性能。不同原子注入点的仿真结果基本一致。外磁的位移敏感度研究表明,径向位移1~2mm时能显著改善束流轮廓,束流平直度可高达0.76。空心阴极模拟结果表明,中心放置可导致高峰束流分布,而径向偏移的空心阴极与背板齐平可产生理想的等离子体分布。

2019年,南安普顿大学Cannat等^[89]基于Wirz的模型建立了放电室二维仿真模型,并将仿真结果与实验结果进行了对比。结果显示仿真结果与实验结果量级一致,但整体分布上存在差异:在计算区域中心,仿真所得等离子体密度高于实验结果,而在计算区域边缘则低于实验结果。不同工况的束流对比结果显示,仿真所得离子束流分别为3.10A,3.18A和

4.11A, 分别比实验结果高 16%, 17% 和 12%, 平均偏差约 15%。由于实际实验中, 栅极边缘部分区域被遮挡, 所以仿真结果与实验结果的偏差估计为 7%。Cannat 等分析认为模型和实验之间的差异可能由以下几个原因导致: 首先, 模型采用了结构化网格, 其计算精度较磁场对齐的网格较差, 特别是在等离子体区域和阳极附近的磁尖端区域。其次, 模型假设电子服从麦克斯韦分布, 而双极扩散系数也基于该假设得到。然而, 因为存在快、慢电子和库仑相互作用, 电子分布基本不符合麦克斯韦分布。此外, 描述磁化等离子体扩散时, 等离子体被视为准中性态。然而, 实际计算过程中, 电子的产生率高于离子产生率, 且忽略了双价离子, 所以等离子体并不满足准中性。最后, Cannat 等认为电子输运和双极扩散的理论假设和数值计算仍亟待研究, 例如漂移输运中的反常输运等。

3.3 三维模型

3.3.1 各向异性界面问题

如前文所述, 考夫曼离子推力器放电室内的等离子体流动问题是一个典型的具有复杂边界的各向异性扩散问题。目前, 该问题主要有两种求解方法:

(1) 特征线网格法: 如图 7 所示, 在该方法中, 将仿真区域按特征线 (如磁场线) 划分网格^[90-91]。因此, 研究对象在网格线方向上的物理特性保持一致, 从而易于描述。

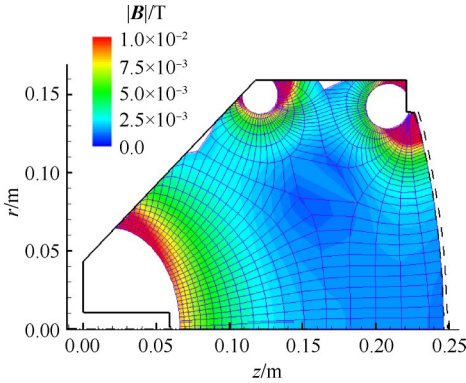


Fig. 7 Magnetic field line meshes used in literature^[81]

但是, 特征线网格法仅适用于研究某些特定的物理现象, 而不适用于工程设计问题。这是因为研究对象的物理性质通常对外部环境非常敏感, 所以当外部环境发生变化时, 特征线网格法的网格需要不断重新划分, 因而计算效率大大降低。

(2) 非特征线网格法: 如图 8 所示, 在该方法中, 网格线不再是特征线, 所以该方法允许使用结构化

的网格^[92-93]。但是, 研究对象在特征线方向上的物理性质需要通过坐标变换传递到网格线上。

由于传统的场求解方法通常使用非结构化网格^[94-96], 所以当计算区域的边界条件非常复杂时, 非特征线网格法的坐标转换同样会异常复杂。因此, 在非特征线网格法中通常只能对几何结构规则的放电室, 或者只截取放电室部分几何结构规则的区域进行仿真。又或者, 如 Wirz 的模型, 将边界与计算区域分割。然后, 在计算区域内部建立笛卡尔网格, 而在边界建立一套独立的边界网格, 如图 8 所示。但是, 在这种方法中, 边界网格与计算区域网格之间需要通过插值相互传递参数, 所以该方法不仅牺牲了高磁场强度区域的求解精度, 还降低了计算效率。

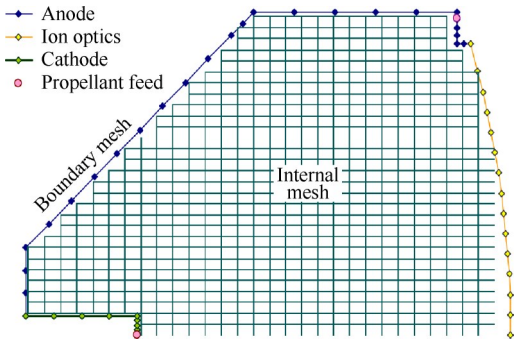


Fig. 8 Boundary meshes used in Wirz model^[78]

另一方面, 如前文所述, 考夫曼离子推力器的放电室存在非轴对称的情况 (如环型离子推力器放电室的非轴对称几何结构、传统离子推力器放电室内的非轴对称磁场结构^[97]), 所以二维模型不再适用, 需要开发三维的仿真模型。但是, 上述文献中处理各向异性扩散问题的方法都很难在三维的仿真模型中应用。例如: 由于三维的磁场结构通常非常复杂, 因而很难在三维情况下实现磁场线网格。对于非特征线网格法, 若在三维情况下采用非结构化网格, 则坐标变换过程将更为复杂。而建立边界网格的方法也将因三维边界的复杂性而变得较为复杂, 且无法保证边界附近的求解精度。

所以, 综上所述, 在考夫曼离子推力器放电室的数值模拟中亟需一种可以在结构化网格上求解具有复杂边界条件的各向异性扩散问题的数值计算方法。

3.3.2 基于混合 PIC 算法的三维仿真模型

2015 年~2019 年, 鹿畅等^[98-100]开发了高效高精度的三维放电室仿真模型。首先基于放电室中不同粒子的特性提出了混合宏粒子 (Hybrid-PIC) 解耦迭代

算法,通过对等离子体控制方程解耦,提高了计算速度。采用该方法可以对三维稳态放电室进行仿真。该算法的三个基本假设如下所示:(1)原初电子处于高度非平衡态。原初电子与其他粒子之间的碰撞主要以原初电子与中性原子之间的碰撞为主。(2)等离子体产生率的大小主要由原初电子与中性原子间的电离碰撞决定;二次电子由于本身能量较低(远小于电离阈值),基本不参与电离碰撞;等离子体复合为原子的复合率也远小于电离率,所以忽略不计。稳态时,离子和二次电子的温度视为常数。电离稳定后,等离子体的数密度($10^{17} \sim 10^{18}/\text{m}^3$)远大于原初电子的数密度($10^{14} \sim 10^{15}/\text{m}^3$)。所以,等离子体满足准中性假设。(3)中性原子的宏观流速忽略不计,其密度视为均匀分布的背景常数。

基于上述假设,原初电子采用动理学方法描述:

$$\frac{\partial f_p}{\partial t} + \mathbf{u}_p \cdot \nabla_{\mathbf{x}} f_p + \frac{q_p}{m_p} (\mathbf{E} + \mathbf{u}_p \times \mathbf{B}) \cdot \nabla_{\mathbf{u}} f_p = \Omega \quad (8)$$

式中 f_p 为原初电子速度分布函数, t 为时间, $\mathbf{u}_p$ 为原初电子速度, q_p 为原初电子电荷量, m_p 为原初电子质量, $\mathbf{E}$ 为电场, $\mathbf{B}$ 为磁场, Ω 为碰撞项。

由于在稳态放电过程中阴极发射的原初电子数密度远小于等离子体的密度,所以原初电子的运动不影响放电室内的电势分布,且认为阴极发射的原初电子运动对中性原子没有影响。放电室内原初电子的数量稀少且处于高度非平衡态,PIC-MCC方法是用于逼近方程(8)常用的方法。因此,本文采用PIC-MCC算法处理方程(8)。其中,原初电子的运动采用PIC方法模拟,而原初电子的碰撞用MCC算法处理。在PIC算法中,每个原初电子的运动可由方程(9)描述:

$$m_p \frac{d\mathbf{u}_p}{dt} = q_p (\mathbf{E} + \mathbf{u}_p \times \mathbf{B}) \quad (9)$$

在MCC算法中,原初电子的碰撞仅考虑四种类型:弹性碰撞、激发碰撞、电离碰撞和玻姆碰撞。原初电子对中性气体的等离子体产生率 G ,可以通过式(10)计算。

$$G \approx \frac{\rho_0 \sum_{i=1}^N \omega \|\mathbf{u}_p\| \sigma_{\text{ionization}}}{V_{\text{cell}}} \quad (10)$$

式中 ρ_0 为中性原子密度, ω 为宏粒子权重, $\sigma_{\text{ionization}}$ 为电离碰撞截面, V_{cell} 为单元体积。

等离子体由准中性假设下的双极扩散方程描述,等离子体的自洽电势由双极扩散方程求解得到

$$\nabla \cdot (\mathbf{D} \cdot \nabla \rho) + G = 0 \quad (11)$$

$$\nabla^2 \phi = \nabla \cdot \left(\mathbf{M} \left(\frac{1}{\rho} \nabla \rho \right) \right) \quad (12)$$

式中 ρ 为等离子体密度, $\mathbf{D}$ 为各向异性双极扩散张量系数, ϕ 为等离子体电势, $\mathbf{M}$ 为各向异性双极电场张量系数。系数 $\mathbf{D}$ 和 $\mathbf{M}$ 的具体计算过程详见文献[100]。方程(11),(12)均采用各项异性浸入式有限元(IFE)算法^[98-99]进行求解。

最后,中性原子被假设为均匀分布的背景,并采用零维模型描述,即

$$\int_{r_{\text{screen}}} \mathbf{D} \cdot \nabla \rho \cdot \mathbf{n}_r d\sigma - \frac{\rho_0 u_{\text{thermal}} A_{\text{screen}} \eta_{\text{screen}}}{4} + \frac{Q_{\text{in}}}{m_0} = 0 \quad (13)$$

式中 Γ_{screen} 表示屏栅极边界, $\mathbf{n}_r$ 为屏栅极边界法向量, u_{thermal} 为原子平均热速度, A_{screen} 为屏栅极面积, η_{screen} 表示原子透过率, Q_{in} 为原子流入放电室的流率, m_0 为原子质量。方程(13)可直接求解。

由于带电粒子运动产生的感应磁场远小于静磁场,因此在放电室内只考虑外加静磁场。解耦迭代的基本思路为:首先,任意给定一个初始的电场和中性原子密度将方程(8)~(12)进行解耦求解。然后,通过方程(13)来验证所给定的初始值是否正确。当求得的放电室内等离子体的流率和给定的中性原子流率满足公式(13)时,那么便得到了方程组的稳态解;若不满足,可以根据公式(13)修正中性原子密度初始值,然后继续对方程(8)~(12)进行求解,直至等离子体的流率和中性原子的流率满足公式(13)。由于采用了等离子体准中性假设,该模型的空间步长不受等离子体德拜长度限制,从而显著提高了计算速度。另一方面,由于解耦了控制方程组,忽略了方程中的非线性项,不仅提高了求解速度,也提高了了解的稳定性,适用于三维放电室的仿真。

LIPS-300离子推力器放电室仿真结果如图9所示,数据为无量纲化。与LIPS-300离子推力器实验测量的束流对比显示,该模型仿真结果与实验结果吻合良好,表明其可以对非轴对称的放电室进行可靠的仿真和辅助设计。

但是该模型采用了工质原子均匀分布假设,目前尚不能用于工质原子三维分布特性的仿真分析。Pan等^[101-102]详细分析了固定原子分布方法、MCC方法和View Factor方法对计算时间和准确程度的影响。他们发现,与View Factor相比,固定原子分布方法收敛速度更快。全粒子模拟方法在2160h后仍然没有收敛。这三种方法的时间开销为100:133:(>478)。与全粒子方法相比,View Factor方法显著降低了计算量。同时,与固定原子分布方法相比,View

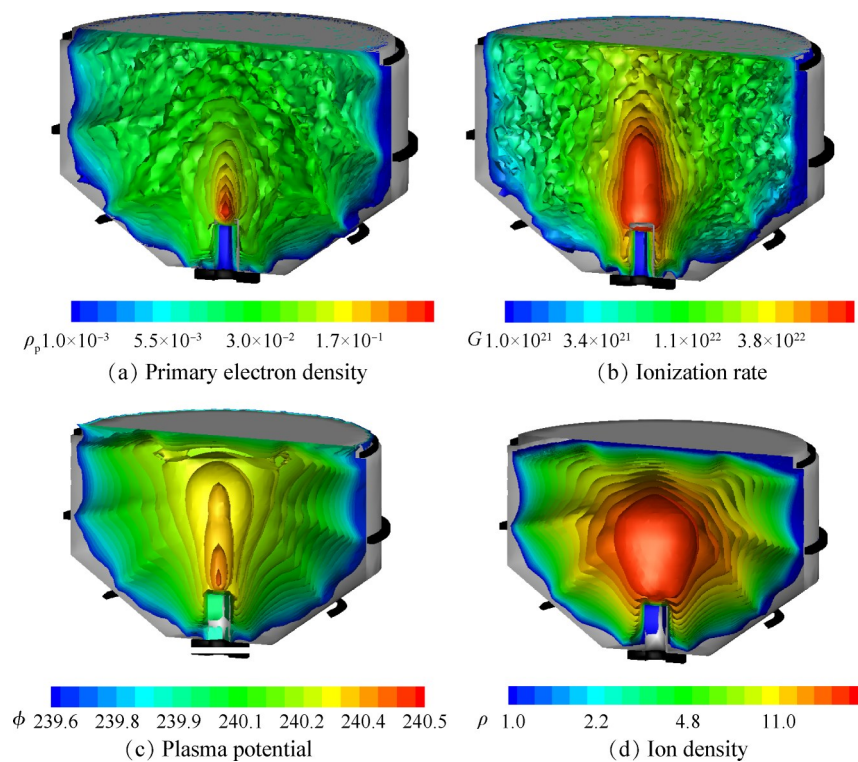


Fig. 9 Simulation results of LIPS-300 ion thruster(normalized)^[98]

Factor 方法的模拟时间只增加了 33%。View Factor 方法的额外模拟时间主要由三部分组成:View Factor 方法的额外迭代时间(28%)、时间步长提前(17%)和粒子提前(55%)。因此,建议参考 Wirz 等^[82]或 Pan 等^[101-102]的工作采用 View Factor 方法改进原子分布的计算。

对于放电室内等离子体分布的准确性也尚未进行对比。特别是对于该三维模型中双极扩散系数的选取及其对仿真结果准确性的影响,鹿畅等尚未开展相关研究。考虑到 Wirz 的仿真模型^[88]与实验测量的等离子体分布吻合良好,离子推力器中等离子体的双极扩散系数可参考 Wirz 的仿真模型^[82]改进。此外,模型基于准中性假设建立,鞘层处等离子体密度基于经验假设,也会导致壁面附近等离子体密度计算不准确;若鞘层处等离子体密度设置过高则会导致放电室内等离子体密度整体过高,反之则会导致放电室内等离子体密度整体过低。对于该问题,建议结合实验测量结果对鞘层处密度进行修正。

4 总结及展望

随着尺寸、结构的变化,考夫曼离子推力器出现等离子体密度过低、电离困难、等离子体分布均匀性差等问题,严重制约了其发展。而数值模拟是解决上述问题的一种高效且重要的手段。经过近半个世

纪的发展,研究人员相继提出了不同维度、不同算法的数值仿真模型:

(1)按照仿真模型维度区分,其放电室仿真模型包括零维模型、二维模型和三维模型。其中零维模型计算效率最高,但计算精度最低,二维模型和三维模型的计算精度和效率与所选取的数值算法相关,但从适用性角度看,二维模型仅适用于轴对称模型,而三维模型适用于轴对称或非轴对称模型。

(2)按照模拟算法区分,其放电室仿真模型主要包括基于缩放算法的全粒子模型和粒子流体混合模型。其中,全粒子模型计算量大,但在计算精度方面具有优势,适用于分析放电室中的物理过程;而混合模型在计算效率方面具备较大优势,适用于推力器参数的优化设计。

由于模拟算法是决定考夫曼离子推力器放电室仿真模型性能的关键因素,因此对其模拟算法进行如下展望:

(1)对于全粒子模型,建议结合隐格式 PIC 算法进一步加速计算收敛。隐格式 PIC 算法在等离子体模拟方面已出现一段时间,在大规模数值模拟方面表现出了巨大潜力,但目前未见过基于隐格式 PIC 算法在离子推力器放电室仿真方面的公开报道。如文献[103]中所述,隐格式 PIC 模拟是针对长期以来 PIC 模拟难以处理高密度和大尺度等离子体问题的一种

变通尝试。由于能够绕过时间步长限制,并且对于空间网格限制也有一定的放松作用。对于大尺寸等离子体模拟,例如工程尺寸的放电腔室等离子体,甚至更大尺寸的日地空间物理、天体物理中的等离子体问题,也是一种非常有希望的研究手段。

(2)对于混合算法,主要考虑以下改进方向:首先,建立兼具仿真效率和精度的工质原子三维仿真模型,并将其耦合进入三维的放电室模型,然后针对推进工质流率和工质原子分布对等离子体分布特性的影响进行研究。其次,建立更高效的处理等离子体各向异性界面问题的求解方法,并且可以较好地处理等离子体鞘层问题。最后,对于等离子体可建立更完备的高维度磁流体方程。

致 谢:感谢国家重点研发计划、国家自然科学基金、中央高校基本科研业务费专项资金、辽宁省重点研发计划、中央引导地方科技发展资金、天琴计划教育部重点实验室(筹)开放基金的资助。

参考文献

- [1] Jackson J, Allen M, Myers R, et al. 13kW Advanced Electric Propulsion Flight System Development and Qualification[C]. *Atlanta: 35th International Electric Propulsion Conference*, 2017.
- [2] Koppel C, Quinsac G. Electric Thruster Selection Criteria[C]. *Madrid: 8th European Conference for Aeronautics and Space Sciences(EUCASS)*, 2019.
- [3] Gary Q, Boris S, Christophe K, et al. Attitude Control: A Key Factor During the Design of Low-Thrust Propulsion for Cubesats[J]. *Acta Astronautica*, 2020, 176: 40–51.
- [4] 张中磊,丁永杰,于达仁. 面向任务的电推进航天器性能优化与控制[J]. *宇航学报*, 2016, 37(8): 1006–1014.
- [5] Jackson S W, Marshall R. Conceptual Design of an Air-breathing Electric Thruster for CubeSat Applications[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2018, 55(3): 632–639.
- [6] 魏立秋,李文博,蔡海阔,等. 霍尔推力器点火过程研究现状及展望[J]. *宇航学报*, 2020, 41(6): 666–675.
- [7] Goebel D M, Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters[M]. *California: John Wiley & Sons*, 2008.
- [8] 官长斌,沈 岩,魏延明,等. 面向空间电推力器的氙气供给系统发展综述及展望[J]. *宇航学报*, 2020, 41(3): 251–261.
- [9] Kalyan Raj I J, Parks G. Development of a Deep Space Nuclear Electric Propulsion (NEP) System—a NuAER Plasma NEP Reactor[C]. *Indianapolis: AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*, 2019.
- [10] Choi Y J. Modeling an Anode Layer Hall Thruster and Its Plume[D]. *Ann Arbor: University of Michigan*, 2008.
- [11] 周志成,王 敏,仲小清,等. 20cm口径离子推力器性能建模与仿真[J]. *宇航学报*, 2015, 36(9): 1043–1048.
- [12] 孙明明,耿 海,王 亮,等. 空间在轨环境下的30cm离子推力器三栅极组件间距变化仿真分析[J]. *宇航学报*, 2019, 40(11): 1375–1382.
- [13] 张天平. 国外离子和霍尔电推进技术最新进展[J]. *真空与低温*, 2006, 12(4): 187–193.
- [14] Patterson M J. Next-Generation Electric Propulsion Thrusters[C]. *San Diego: 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2011.
- [15] 孟海波,杨 涓,黄文斌,等. 10cm ECR中和器性能优化实验研究[J]. *宇航学报*, 2019, 40(12): 1478–1484.
- [16] 于达仁. 空间电推进原理[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
- [17] 赵以德,张天平,郑茂繁,等. 高推力密度离子推力器研究[J]. *真空*, 2017, 54(1): 14–16.
- [18] 郑茂繁,张天平,梁 凯,等. 40cm离子推力器研究[C]. 北京: 中国宇航学会·中国空间法学会2012年学术年会, 2012.
- [19] Wirz R, Goebel D. Effects of Magnetic Field Topography on Ion Thruster Discharge Performance [J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2008, 17(3): 3–10.
- [20] Aston G, Brophy J R. A 50cm Diameter Annular Ion Engine [C]. *Monterey: 25th Joint Propulsion Conference*, 1989.
- [21] Aston G, Aston M B, Kolts J B. Preliminary Tests of Annular Ion Optics[C]. *Nashville: 28th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1992.
- [22] Aston G, Aston M B, Rawlin V K. 50cm Ion Engine Operation with Annular Ion Accelerator System[C]. *San Diego: 31st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 1995.
- [23] Shastry R, Patterson M J, Herman D A, et al. Current Density Measurements of an Annular-Geometry Ion Engine [C]. *Atlanta: 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2012.
- [24] Patterson M, Herman D, Shastry R, et al. Annular-Geometry Ion Engine: Concept, Development Status, and Preliminary Performance[C]. *Atlanta: 48th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2012.
- [25] Patterson M J, Foster J E, Young J A, et al. Annular Engine Development Status [C]. *San Jose: 49th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2013.

- [26] 王彦龙, 杨 浩, 李兴达, 等. 5kW 环型离子推力器试验研究[J]. 深空探测学报, 2017, 4(3): 232-237.
- [27] 张天平, 陈娟娟, 李兴坤. 中高功率离子推力器的性能参数分析研究[J]. 真空与低温, 2012(1): 9-20.
- [28] Herman D A, Gallimore A D. Comparison of Discharge Plasma Parameters in a 30cm NSTAR Type Ion Engine with and without Beam Extraction[C]. *Huntsville: 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2003.
- [29] Herman D A, Soulas G C, Patterson M J. Status of the NEXT Ion Thruster Long-Duration Test after 10100H and 207kg Demonstrated[C]. *Ohio: 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2007.
- [30] Polk J, Anderson J, Brophy J, et al. An Overview of the Results from an 8200 Hour Wear Test of the NSTAR Ion Thruster[C]. *Los Angeles: 35th Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 1999.
- [31] 贾艳辉, 冯 杰, 王 亮, 等. LIPS-300 多模式离子推力器中和器优化研究[J]. 真空与低温, 2018, 24(1): 15-18.
- [32] 陈娟娟, 张天平, 刘明正, 等. 磁拓扑结构对环型离子推力器放电性能的影响[J]. 中国空间科学技术, 2018, 38(5): 46-54.
- [33] Sengupta A, Goebel D, Fitzgerald D, et al. Experimentally Determined Neutral Density and Plasma Parameters in a 30cm Ion Engine[C]. *Fort Lauderdale: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2004.
- [34] Sengupta A, Goebel D, Owens A G. Langmuir Probe Studies of Magnetic Confinement in an Ion Thruster Discharge Plasma[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2009, 25(2): 387-396.
- [35] Masek T D. Plasma Properties and Performance of Mercury Ion Thrusters[J]. *AIAA Journal*, 1971, 9(2): 205-212.
- [36] Milder N L. A Survey and Evaluation of Research on the Discharge Chamber Plasma of Kaufman Thrusters [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1970, 7(6): 641-649.
- [37] Arakawa Y, Hamatani C. Analysis of Plasma Loss in a Ring-Cusp Ion Thruster[C]. *Colorado Springs: 19th International Electric Propulsion Conference*, 1987.
- [38] Hayakawa Y, Miyazaki K, Kitamura S. Measurements of Electron Energy Distributions in a 14cm Diameter Ring Cusp Ion Thruster[C]. *Monterey: 25th Joint Propulsion Conference*, 1989.
- [39] Monterde M P, Haines M G, Dangor A E, et al. Kaufman-Type Xenon Ion Thruster Coupling Plasma: Langmuir Probe Measurements[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1997, 30(5).
- [40] Ballesteros J, Fernandez Palop J I, Hernandez M A, et al. Labview Virtual Instrument for Automatic Plasma Diagnostic[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(1): 90-93.
- [41] Sengupta A, Goebel D, Fitzgerald D, et al. Experimentally Determined Neutral Density and Plasma Parameters in a 30cm Ion Engine[C]. *Fort Lauderdale: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2004.
- [42] Herman D A, Gallimore A D. Discharge Chamber Plasma Structure of a 30cm NSTAR-Type Ion Engine[C]. *Fort Lauderdale: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2004.
- [43] Herman D A, Gallimore A D. Discharge Cathode Electron Energy Distribution Functions in a 40cm NEXT-Type Ion Engine[C]. *Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005.
- [44] 王胡舰. 静电探针测试系统的研制[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2005.
- [45] 叶 超, 宁兆元, 江美福, 等. 低气压低温等离子体诊断原理与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [46] Hershkowitz N, Cho M H. Measurement of Plasma Potential Using Collecting and Emitting Probes[J]. *Journal of Vacuum Science and Technology*, 1988, 6(3): 2054-2059.
- [47] 吴先明, 张天平, 王 亮, 等. 离子推力器放电室等离子体电势诊断方案研究[J]. 真空与低温, 2014, 20(6): 352-356.
- [48] Herman D A, Gallimore A D. Discharge Chamber Plasma Potential Mapping of a 40cm NEXT-Type Ion Engine[C]. *Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005.
- [49] 于全芝, 李玉同, 张 杰. Thomson 散射诊断技术的新进展[J]. 实验技术, 2004, 33(6): 446-451.
- [50] Yamamoto N, Tomita K, Sugita K, et al. Measurement of Xenon Plasma Properties in an Ion Thruster Using Laser Thomson Scattering Technique[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83(7).
- [51] Yamamoto N, Iwamoto M, Morita T, et al. Measurement of Electron and Neutral Atom Density Downstream of an Electric Propulsion[C]. *Salt Lake City: 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2016.
- [52] Williams G J, Smith T B, Domonkos M T, et al. Laser-Induced Fluorescence Characterization of Ions Emitted from Hollow Cathodes[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2000, 28(5): 1664-1675.
- [53] Williams G J, Smith T B, Glick K H, et al. FMT-2 Discharge Cathode Erosion Rate Measurements Via Laser-Induced Fluorescence[C]. *Las Vegas: 36th AIAA/ASME/*

- SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2000.
- [54] Kaufman H R. An Ion Rocket with an Electron-Bombardment Ion Source [M]. Washington: NASA Technical Note, 1961.
- [55] John E F, Michael J P. Internal Plasma Properties and Enhanced Performance of 8-Centimeter Ion Thruster Discharge[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2001, 17(2): 428-432.
- [56] Ward J, Masek T. A Discharge Computer Model for an Electron Bombardment Thruster[C]. Florida: 12th International Electric Propulsion Conference, 1976.
- [57] Matossian J N, Beattie J R. Model for Computing Volume Averaged Plasma Properties in Electron-Bombardment Ion Thrusters[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1989, 5(2): 188-196.
- [58] Brophy J R, Wilbur P J. Simple Performance Model for Ring and Line Cusp Ion Thruster[J]. *AIAA Journal*, 1985, 23(11): 1731-1736.
- [59] Goebel D M, Wirz R E, Katz I. Analytical Ion Thruster Discharge Performance Model[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(5): 1055-1067.
- [60] Goebel D M. Analytical Discharge Model for RF Ion Thrusters[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(5): 2111-2121.
- [61] Simon C M, Mercado R, Schnell S K, et al. What Are the Best Materials to Separate a Xenon/Krypton Mixture[J]. *Chemistry of Materials*, 2015, 27(12): 4459-4475.
- [62] Simon B G. Hollow Cathode Operation with Different Gases[C]. Atlanta: 35th International Electric Propulsion Conference, 2017.
- [63] Nazareno F, Simon B G, Igor O G, et al. Alternative Propellants for Gridded Ion Engines[C]. Seville: 6th Space Propulsion Conference, 2018.
- [64] Simon B G, Steve B G, Igor O G, et al. Mission Cost for Gridded Ion Engines using Alternative Propellants[C]. Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference, 2019.
- [65] Chloe B, Konstantinos K, Georg H, et al. A Detailed Global Model for Modeling and Optical Diagnostics of Low Power Propulsion Devices Fed by CO₂[C]. Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference, 2019.
- [66] Arakawa Y, Wilbur P J. Finite Element Analysis of Plasma Flows in Cusped Discharge Chambers[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1991, 7(1): 125-128.
- [67] Arakawa Y. Monte Carlo Simulation of Primary Electron Motions in Cusped Discharge chambers[C]. Orlando: 21st International Electric Propulsion Conference, 1990.
- [68] Hirakawa M, Arakawa Y. Plasma Particle Simulation in Cusped Ion Thrusters[C]. Seattle: 23rd International Electric Propulsion Conference, 1993.
- [69] Yashko G, Giffin G, Hastings D. Design Considerations for Ion Microthrusters[C]. Cleveland: 25th International Electric Propulsion Conference, 1997.
- [70] Mahalingam S, Menart J A. Primary Electron Modeling in the Discharge Chamber of an Ion Engine[C]. Indianapolis: 38th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2002.
- [71] Deshpande S S, Mahalingam S, Menart J A. Computational Study of Primary Electrons in the Cusp Region of an Ion Engine's Discharge Chamber[C]. Fort Lauderdale: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004.
- [72] Ogunjobi T A, Menart J A. Computational Study of Ring-Cusp Magnet Configurations that Provide Maximum Electron Confinement[C]. Sacramento: 42nd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006.
- [73] Bennett W, Ogunjobi T, Menart J A. Computational Study of the Effects of Cathode Placement, Electron Energy, and Magnetic Field Strength on the Confinement of Electrons[C]. Cincinnati: 43rd AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2007.
- [74] Mahalingam S, Menart J A. Particle-Based Plasma Simulations for an Ion Engine Discharge Chamber[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(4): 673-688.
- [75] Mahalingam S, Menart J A. Computational Study of Primary Electron Confinement by Magnetic Fields in the Discharge Chamber of an Ion Engine[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2007, 23(1): 69-72.
- [76] Mahalingam S. Particle Based Plasma Simulation for an Ion Engine Discharge Chamber[D]. Dayton: Wright State University, 2007.
- [77] Mahalingam S, Choi Y, Loverich J, et al. Fully Coupled Electric Field/PIC-MCC Simulation Results of the Plasma in the Discharge Chamber of an Ion Engine[C]. San Diego: 47th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2011.
- [78] Taccogna F, Longo S, Capitelli M, et al. Stationary Plasma Thruster Simulation[J]. *Computer Physics Communications*, 2004, 164(1): 160-170.
- [79] Wirz R. Discharge Plasma Processes of Ring-Cusp Ion Thrusters[D]. Pasadena: California Institute of Technology, 2005.
- [80] Wirz R, Katz I. A Preliminary 2-D Computational Model of an Ion Thruster Discharge Chamber[C]. Huntsville: 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, 2003.

- [81] Wirz R, Katz I. 2-D Discharge Chamber Model for Ion Thrusters[C]. *Fort Lauderdale: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, 2004.
- [82] Wirz R, Katz I. Plasma Processes of DC Ion Thruster Discharge Chambers[C]. *Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005.
- [83] Araki S J. Multi-Scale Multi-Species Modeling for Plasma Devices[D]. *Los Angeles: University of California*, 2014.
- [84] Araki S J, Wirz R E. Cell-Centered Particle Weighting Algorithm for PIC Simulations in a Non-Uniform 2D Axisymmetric Mesh[J]. *Journal of Computational Physics*, 2014, 272: 218-226.
- [85] Mao H S, Wirz R E, Goebel D M. Plasma Structure of Miniature Ring-Cusp Ion Thruster Discharges[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(3): 628-636.
- [86] Dankongkakul B, Wirz R E. Axial Ring-Cusp Hybrid (ARCH) Plasma Discharge: an Approach to Highly Efficient Miniature-Scale Ion Sources[J]. *Plasma Sources Science and Technology*, 2018, 27(12).
- [87] Dankongkakul B, Araki S J, Wirz R E. Magnetic Field Structure Influence on Primary Electron Cusp Losses for Micro-Scale Discharges [J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(4).
- [88] Gary Li, Huerta C, Wirz R E. Computational Modeling of an Axial Ring Cusp Hybrid Discharge for the Mixi Thruster[C]. *Ohio: AIAA Propulsion and Energy Forum*, 2018.
- [89] Cannat F, Guarducci F, Gabriel S B. Analytical and Numerical Simulation of Ring Cusp Discharge Chamber[C]. *Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference*, 2019.
- [90] Andreussi T, Giannetti V, Leporini A, et al. Influence of the Magnetic Field Configuration on the Plasma Flow in Hall Thrusters[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2017, 60(1).
- [91] Cichocki F, Dom'inguez-Vázquez A, Merino 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).
- [92] Komurasaki K, Arakawa Y. Two Dimensional Numerical Model of Plasma Flow in a Hall Thruster[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 1995, 11(6): 1317 - 1323.
- [93] Wirz R, Katz I. Plasma Processes of DC Ion Thruster Discharge Chambers[M]. *Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration*, 2005.
- [94] Babuska I. The Finite Element Method for Elliptic Equations with Discontinuous Coefficients [J]. *Computing*, 1970, 5: 207-213.
- [95] Bramble J H, King J T. A Finite Element Method for Interface Problems in Domains with Smooth Boundary and Interfaces[J]. *Advances in Computational Mathematics*, 1996, 6: 109-138.
- [96] Chen Z, Zou J. Finite Element Methods and Their Convergence for Elliptic and Parabolic Interface Problems [J]. *Numerische Mathematik*, 1998, 79: 175-202.
- [97] 孙明明, 张天平, 陈娟娟, 等. LIPS-200 环型会切磁场离子推力器热模型计算分析[J]. *推进技术*, 2015, 36(8): 1274-1280. (SUN Ming-ming, ZHANG Tian-ping, CHEN Juan-juan, et al. Thermal Model of LIPS-200 Ring-Cusp Magnet Field Ion Thruster[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2015, 36(8): 1274-1280.)
- [98] 鹿畅. Kaufman 型离子推力器中等离子体的数值模拟研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2019.
- [99] Lu C, Yang Z, Bai J W, et al. Three-Dimensional Immersed Finite-Element Method for Anisotropic Magneto-static/Electrostatic Interface Problems with Nonhomogeneous Flux Jump[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2020, 121: 2107-2127.
- [100] Lu C, Wan J, Cao Y, et al. A Fully Decoupled Iterative Method with Three-Dimensional Anisotropic Immersed Finite Elements for Kaufman-Type Discharge Problems [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2020, 372(11).
- [101] Pan R, Ren J, Tang H, et al. Application of the View Factor Model on the Particle-in-Cell and Monte Carlo Collision Code[J]. *Physical Review E*, 2020, 102(3).
- [102] Pan R, Li Z, Cao S, et al. Parallel Codes Using Particles Decomposition and View Factor Model Methods for the Particle in Cell-Monte Carlo Collision (PIC-MCC) Simulation on Cylinder Hall Thruster[C]. *Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference*, 2019.
- [103] 王虹宇. 隐式粒子云网格模拟的原理和进展[J]. *鞍山师范学院学报*, 2011, 13(2): 10-14.

(编辑:张 贺)