

## 磁帆推进技术研究综述

全荣辉, 许明薇

(南京航空航天大学航天学院, 南京 210016)

**摘要:** 磁帆是一种基于太阳风等离子体的新型推进技术,它通过大尺度线圈产生磁场来偏折太阳风等离子体从而产生推力,在长周期行星际航行任务中具有重要的应用潜力。由于磁帆相比常规电推进具有更高的比冲和推功比,近几年随着木星等行星探测任务的发展,其逐渐成为行星际无工质推进技术的研究热点。本文介绍了磁帆推力的产生原理,阐述了磁帆小型化设计研究历程,总结了其数值分析和实验技术主要特点,比较了不同任务场景中磁帆的应用效果,最后提出磁帆的主要技术瓶颈及未来潜在发展方向,为我国磁帆技术研究提供参考。

**关键词:** 磁帆;磁等离子体帆;深空探测;新型推进技术

中图分类号:V439

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2024)04-0597-12

## Research Progress and Prospect of Magnetic Sail Propulsion Technology

QUAN Ronghui, XU Mingwei

(College of Astronautics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Magnetic sail is an advanced propulsion method based on solar wind plasma. It deflects the solar wind plasma to generate thrust by a magnetic field from a large-scale coil. Because magnetic sail has a higher propulsion impulse and thrust power ratio than conventional electric propulsion, it has important application potential in long-period interplanetary missions. With the development of planetary exploration missions such as Jupiter in recent years, magnetic sails have gradually attracted researchers' interest in propulsion technology. This paper introduces the principle of magnetic sail, the calculation of its thrust, and the research process of magnetic sail miniaturization design. It summarizes the numerical analysis method and main experimental results in magnetic sail, comparing with the application of magnetic sail in different tasks. Finally, it outlines the main technical barriers and future potential development direction of magnetic sail, which provides a reference for the research of magnetic sail in China.

**Key words:** magnetic sail; magnetoplasma sail; deep space exploration; advanced propulsion technology

随着我国航天技术的进步,地外探测任务正迈向更远深空。除月球探测和科研站建设以外,未来10~15年,我国还将开展火星采样、小行星采样、木星、天王星等行星探测,后续还将前往太阳系边缘进行科学探测。行星际航行是深空探测的必经途径,如何使用更少的燃料将探测器送往更远的深空,决定着深空探测器的经济成本和有效载荷比。在此背景下,利用太阳风等外界资源的新型推进技

术,将成为未来行星际航行的重要发展方向。

在日球层的行星际空间,太阳光和太阳风普遍存在。因此现有新型推进技术主要依托太阳光和太阳风等离子体作为工质。例如已提出的太阳帆、磁帆和静电帆等技术途径。在这些推进方式当中,以太阳光压为作用方式太阳帆已经开展了在轨试验,并取得了初步推进效果。静电帆和磁帆均以偏折太阳风等离子体的方式获得动压,其中磁帆由于

收稿日期:2022-12-30;修订日期:2023-10-11

通信作者:全荣辉,男,副教授,E-mail:quanrh@nuaa.edu.cn。

引用格式:全荣辉,许明薇. 磁帆推进技术研究综述[J]. 南京航空航天大学学报,2024,56(4):597-608. QUAN Ronghui, XU Mingwei. Research progress and prospect of magnetic sail propulsion technology[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics,2024, 56(4):597-608.

推重比高于太阳帆1~2个量级,受到更多的关注和研究。

磁帆主要以线圈产生大范围磁场的方式来偏折太阳风。区别于静电帆,磁帆所产生的恒定磁场只能改变太阳风粒子的动量,而无法对其加速或减速。因此磁帆的推力与太阳风粒子的动量相关,存在推力上限问题。不过只要磁帆的磁场作用范围广大,仅通过偏折太阳风粒子就可以获取足够的推力。由此带来的尺寸问题,一直贯穿磁帆技术的整个发展历史。

磁帆技术的加速度理论上最大可达8.3 mN/kg,这比现存的任何其他电推进系统的加速度更大<sup>[1]</sup>。在地球轨道( $1.5 \times 10^{11}$  m)上的太阳引力为5.9 mN/kg,因此磁等离子体帆可以摆脱太阳引力<sup>[2]</sup>。磁等离子体帆的比冲(3 000~10 000 s)也高于电推进,如离子发动机和霍尔推进器,因此可以减少燃料携带量。磁等离子体帆需要长期的电力供应,使用放射性同位素热发电机也可以解决深空对电力的巨大需求<sup>[3]</sup>。如果使用加速度8.3 mN/kg的磁等离子体帆,“旅行者1号”耗时36年的太阳系逃逸( $R > 100$  AU)将在10年或者更短的时间内实现<sup>[1]</sup>。

## 1 磁帆的基本原理

在行星际空间,太阳风是磁帆的主要作用介质。太阳风主要为低能质子和电子组成的等离子体,由太阳表面向外抛射。例如,在地球附近(1 AU)太阳风的速度约为300~800 km/s,典型离子密度为 $5 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ ,典型离子温度为10 eV。根据太阳风的特点,1991年,Zubrin等首次提出了磁帆的基本概念,其设想由直径千米级的超导线圈电流产生磁场,通过径向电缆线与圆心部位的航天器相连接,如图1所示<sup>[4]</sup>。

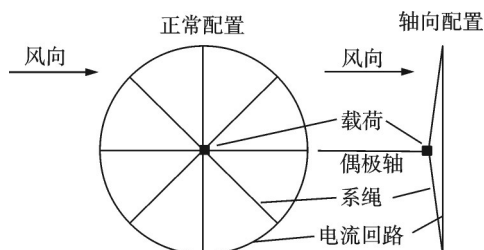


图1 Zubrin的磁帆概念图<sup>[4]</sup>

Fig.1 Concept diagram of Zubrin's magnetic sail<sup>[4]</sup>

磁帆工作期间,进入磁帆磁场的太阳风离子受到洛伦兹力偏转,从而将动量传递给线圈回路。如果相对于航天器,太阳风离子在磁场作用下减速,则磁帆将对太阳风产生阻力,从而使航天器沿太阳

风传播方向加速。

上述作用过程可用以下3种理论进行解释<sup>[5]</sup>:

### (1) 磁层顶边界的压力作用

太阳风等离子体流在磁层顶上产生了压力分布,太阳风动压平衡了二维偶极子磁场的磁压,磁层特征长度 $L$ 可由磁层顶的压力平衡计算得出<sup>[6]</sup>,即

$$\frac{1}{2} n m_i u^2 = \frac{B^2}{2\mu_0} \left( \frac{\mu_0 R_{\text{coil}} I_{\text{coil}}}{2\pi L^2} \right)^2 \quad (1)$$

$$L = \left( \frac{\mu_0 M_m^2}{8\pi^2 n m_i u^2} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (2)$$

式中: $n$ 为太阳风等离子体密度; $u$ 为太阳风等离子体流速度; $m_i$ 为离子质量; $B$ 为磁通密度矢量; $\mu_0$ 为真空磁导率; $M_m$ 为线圈磁矩, $M_m = NIS$ ,其中 $N$ 为线圈匝数, $I$ 为线圈电流, $S$ 为线圈面积。磁层特征长度 $L$ 决定了磁帆的磁层形貌特征。在已知磁层顶距离和面积基础上,可以计算太阳风对整个磁帆的压力为<sup>[5]</sup>

$$F_1 = \iint P_b dS \quad (3)$$

式中: $P_b$ 为太阳风动压; $S$ 为磁层表面积法向矢量。

### (2) 感应电流和线圈电流之间的安培力

在磁层顶,太阳风中电子和质子朝不同方向运动,形成感应电流。磁层顶上的感应电流作用在磁帆线圈上,其安培力为<sup>[5]</sup>

$$F_2 = \oint \left( \frac{J_c \cdot J(r)}{2\pi |r_c - r|} \frac{(r_c - r)}{|r_c - r|} \right) dR \quad (4)$$

式中各项值均归一化。 $J_c$ 为线圈电流; $J$ 为感应电流密度矢量; $r_c$ 为线圈的位置矢量; $r$ 为磁层顶感应电流位置矢量; $R$ 为位置元。

### (3) 太阳风动量变化

磁帆的最终作用效果使得太阳风动量发生变化,因此可以通过统计一定体积中太阳风动量的变化量来推导推力,其基本方程与空气动力学中阻力方程类似<sup>[5]</sup>,即

$$F_{sw} = \iint (\rho u u + p I) \cdot dS \quad (5)$$

式中: $p$ 为气压; $\rho$ 为归一化太阳风质量密度; $I$ 为单位矩阵。式(5)可以进一步简化为

$$F_{sw} = C_D \frac{1}{2} \rho_{sw} u^2 \pi L^2 \quad (6)$$

式中: $\rho_{sw}$ 为太阳风质量密度; $\pi L^2$ 为磁帆有效作用面积,阻力系数 $C_D$ 表述如下<sup>[2]</sup>

$$C_D = \begin{cases} 0.36 \exp(-0.28 R_L^2) & R_L < 1 \\ \frac{3.4}{R_L} \exp\left(-\frac{0.22}{R_L^2}\right) & R_L \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $R_L = \frac{r_{Li}}{L}$ ;  $r_{Li}$ 为离子拉莫尔半径。

上述3种理论所描述的物理过程将在太阳风与磁帆相互作用时同时发生,不过其侧重点不同。磁帆所产生磁场的磁压大小跟太阳风动量变化密切相关,而太阳风电子和质子分离正是动量变化的表现形式,所产生的感应电流同样影响磁层的特征长度。在较大尺度下,磁流体力学作用范围中,3种理论可以互通;但随着磁帆尺寸的缩小,电子和离子的流体效应减弱时,采用太阳风动量变化的方式更适合描述磁帆的作用过程。

## 2 磁帆的数值分析方法

根据磁层大小,磁场和等离子体相互作用的方式会发生变化。在磁场中运动的带电粒子将以拉莫尔半径旋转运动,离子的拉莫尔半径  $r_{Li}$  表述如下

$$r_{Li} = \frac{mu}{e \cdot 2B_{mp}} \quad (8)$$

式中:  $B_{mp}$  为磁场边界处磁场强度;  $e$  为电子电荷;  $m$  为太阳风离子的平均质量。太阳风与磁场相互作用类型依赖于离子拉莫尔半径与磁层长度之比  $r_{Li}/L$ 。根据其比值的不同,磁帆的数值模拟具有不同的方法,如图2所示<sup>[7]</sup>。目前常用的方法包括磁流体力学模拟(Magnetohydrodynamics, MHD)、全质点网格模拟(Full particle in cell, Full-PIC)、混合质点网格模拟(Hybrid particle in cell, Hybrid-PIC)、通量管模型(Flux-tube)等。

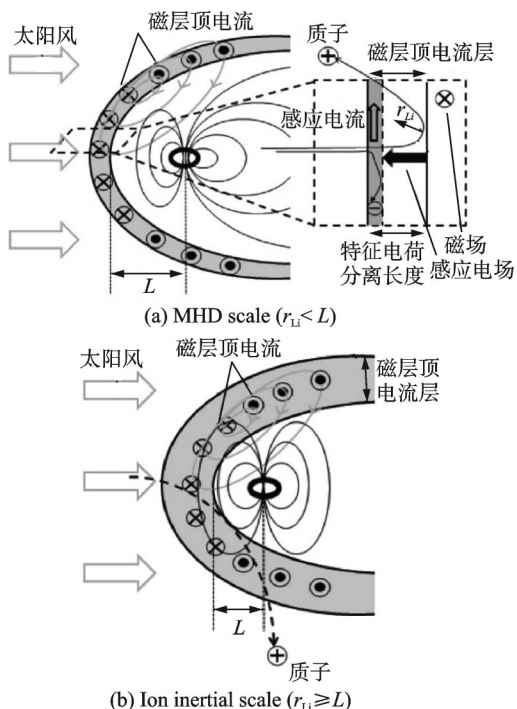


图2 离子拉莫尔半径与磁层长度之间的关系<sup>[7]</sup>

Fig.2 Relationship between Larmor radius of ions and length  $L$  of magnetic layer<sup>[7]</sup>

### 2.1 磁流体力学模拟

MHD 该方法适合大尺度结构,要求磁层的特征长度足够大。如果  $L$  远大于磁层顶处的离子拉莫尔半径  $r_{Li}$  ( $r_{Li} \ll L$ : MHD 尺度),可忽略离子和电子的粒子效应,此时可以将太阳风等离子体视作流体,通常采用磁流体动力学方程来模拟仿真,归一化方程如下<sup>[5]</sup>

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (9)$$

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot \{ \rho u u + p I \} = J \times B \quad (10)$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} - \nabla \times (u \times B) = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial E_i}{\partial t} + \nabla \cdot \left\{ \left( E_i + p + \frac{B^2}{2} \right) u - (u \cdot B) B \right\} = 0 \quad (12)$$

$$E_i = \frac{p}{\gamma - 1} + \rho \frac{u^2}{2} + \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (13)$$

式中  $E_i$  为能量密度。

MHD 方程在等离子体的波动等领域已得到广泛应用,其数值模拟过程已较成熟。将太阳风似为流体可以模拟出太阳风与磁帆作用的弓激波结构,但对于太阳风粒子穿越与偏折等微观过程无法详细地描述。

### 2.2 全粒子网格与混合粒子网格法

PIC 法最初用于研究无碰撞等离子体,它将欧拉网格中的介质划分为若干个质点,每个质点带有介质的质量、动量和能量,其输运过程可以用质点的运动来表示。

根据对电子的处理方式不同,它可以分为 Full-PIC 法和 Hybrid-PIC 法。Full-PIC 法将电子视为粒子。如果  $L$  小于离子拉莫尔半径  $r_{Li}$ ,且大于电子拉莫尔半径  $r_{Le}$  ( $r_{Le} < L < r_{Li}$ : 电子惯性尺度),离子和电子的粒子效应均不可忽略,模拟过程中可采用 Full-PIC 法。

Hybrid-PIC 法将电子视为流体,而将离子视为粒子。如果磁层特征长度  $L$  与离子拉莫尔半径  $r_{Li}$  可比,且远大于电子拉莫尔半径  $r_{Le}$  ( $r_{Li} \approx L, r_{Le} \ll L$ : 离子惯性尺度),则不可忽略离子的粒子效应,模拟时仅对离子使用 PIC 法,即 Hybrid-PIC 法。

PIC 法可以分析离子的有限拉莫尔半径效应、电荷分离和磁层顶电场的影响。对应的粒子运动方程如下<sup>[7]</sup>

$$\frac{dr_s}{dt} = u_s \quad (14)$$

$$m_s \frac{du_s}{dt} = q_s (E + u_s \times B) \quad (15)$$

式中  $s$  代表离子或电子。然后由运动方程得到粒



子运动轨迹,通过加权,最终得到密度和电流分布,采用时域有限差分法求解麦克斯韦方程组以获得自洽的电磁场分布。

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E} \quad (16)$$

$$\frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \nabla \times \mathbf{B} - \mu_0 \mathbf{J} \quad (17)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{e(n_i - n_e)}{\epsilon_0} \quad (18)$$

式中:电场 $\mathbf{E}$ 用泊松方程进行计算; $\epsilon_0$ 为真空介电常数。

与MHD模拟方法相反,PIC模拟更侧重于微观粒子运动过程,对于激波和大尺度波动现象的分析往往无法达到理想计算效果。此外随着计算尺度和模拟粒子数的增加,PIC方法的运算量快速上升,因此对计算硬件平台有较高要求。

### 2.3 通量管模型

为了解决PIC的计算成本问题,Ashida等<sup>[8]</sup>在Hybrid-PIC法的基础上,提出了一种新的通量管模型。Flux-tube模型忽略电磁波、声波等波传播,仅求解等离子体流的稳态情况。该模型构建了一个包含感应磁场的通量管来求解离子的粒子轨迹,并在准中性和稳态假设下将电子视为磁流体,运动方程如下<sup>[8]</sup>

$$en_e(E + u_e \times B) + k_B T_e \nabla n_e = 0 \quad (19)$$

式中:第二项表示流体压力; $n_e$ 为电子数密度; $T_e$ 为电子温度。在磁层中,平行于磁场方向和垂直于磁场方向的电子温度不同。因为无质量电子对推力的影响较小,为简化模型,通常假设电子温度各向同性。

通量管模型所求得的推力水平与MHD模型和Hybrid-PIC模型获得的结果非常吻合,且其计算成本仅为Hybrid-PIC模型的1/10<sup>[8]</sup>。不过由于Flux-tube模型做了准静态假设,因此并不适用于波动现象等动态效应分析。

## 3 磁帆小型化设计

在磁帆的原型设计中,Zubrin等<sup>[4]</sup>设想的磁帆典型参数为 $R_m = 31.6 \text{ km}$ ,  $B_m = 10^6 \text{ T}$ ,  $I = 50 \text{ kA}$ ,总质量达到5 t。通过MHD模拟仿真,如图3所示,在1 AU附近航行时推力据评估可以达到88.215 N,对应磁帆加速度0.017 2 m/s<sup>2</sup><sup>[4]</sup>。

在长期的行星际加速过程中,上述参数需求可以进一步下降。不过Fujita等通过数值模拟发现,在1 AU附近,只有传统磁帆的磁层特征长度 $L$ 达到20 km才能实现1 N推力<sup>[2]</sup>。此时所需线圈电流

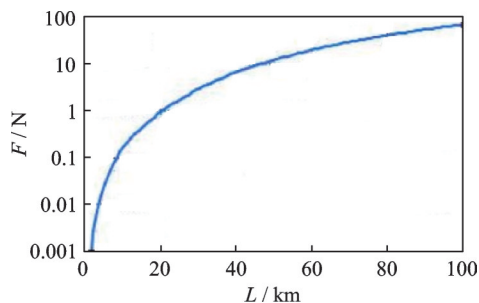


图3 传统磁帆的推力估算<sup>[2]</sup>

Fig.3 Estimated thrust characteristic of pure magnetic sail<sup>[2]</sup>

仍要几千安培,且线圈直径为1 km量级,这在目前的航天工程技术能力上较难实现。因此传统磁帆直到今日仍不具备工程应用的可行性,导致其在20世纪90年代提出后,较长时间内未有新的研究响应。

针对传统磁帆的缺陷,Winglee等<sup>[9]</sup>于2000年提出了迷你磁层等离子体推进(Mini magnetospheric plasma propulsion, M2P2)的概念,使用直径约几米,带有等离子体射流的小型线圈,来制造大范围磁场产生较大推力,以进一步接近航天应用。由于此次提出的M2P2硬件尺寸小,结构轻便,其工程可行性更高,重新引起了人们对磁帆的研究兴趣。

M2P2属于磁等离子体帆的范畴,主要通过安装在线圈内部的小型感应等离子体源(如:螺线管)向外喷射等离子体来膨胀原有磁场,等离子体源工质一般为氩气。在M2P2概念设计中,磁线圈的直径可以缩小到米量级。采用MHD方法模拟结果表明,M2P2概念可以实现设备质量小于50 kg和功率小于3 kW,满足低重量和低功率的要求<sup>[9]</sup>,但由于需要不断向外喷射等离子体,它丧失了无燃料推进技术的优势,成为需携带推进剂的电推进系统,与现有电推进技术相比,并不具备应用优势。

根据等离子体参数的差异,有两种喷射方式:一种是加速喷射出高密度和高速的等离子体射流,另一种是通过释放低速等离子体,使其在磁层内产生环形电流。M2P2采用的第一种方式,即喷射高速高密度的离子体射流。当等离子体射流被完全磁化时,此时注入等离子体如果满足 $r_{Li}$ 和 $r_{Le}$ 远小于 $L$ 的条件,则会扩大原有线圈的磁层。然而,如果注入等离子体,特别是离子没有磁化,出现有限拉莫尔效应( $r_{Li} \sim L$ 或 $r_{Li} > L$ ),等离子体将从磁层逃逸,膨胀效果甚微。

2003年,Slough在磁等离子体帆的基础上提出旋转磁场-磁等离子体系统(Rotating magnetic field, RMF)<sup>[10]</sup>。在他的设计中,一对多相线圈作

为定子驱动局部等离子体(转子)中的稳定环形电流。与传统磁帆概念不同,线圈电流在等离子体中而不是超导线圈中传导,该情况下产生相同的推力所需的磁帆质量会降低几个数量级。Slough通过实验证实了旋转磁场方式可以在太空中产生并维持一定数量的等离子体,并且可以产生足够大的电流( $>10\text{ kA}$ )使等离子体在10 s内膨胀千米量级用于拦截来自外部等离子体源的动量压力而不失去平衡<sup>[10]</sup>。

磁等离子体帆(Magneto plasma sail, MPS)的设计主要采用上述第二种喷射方式。它依赖于粒子运动引起的反磁性电流(漂移运动和集体运动引起的总电流)。电子的漂移运动形成的电流与线圈电流同方向,该感应电流将增大磁矩,使得推力增大;另一方面,电子的集体运动同样作用于线圈电流,因此总推力预计会进一步增大<sup>[11]</sup>。

通过计算推力稳定时最大增益比,可以发现磁等离子体帆的推力增益比存在最大饱和值,其最大值小于10。因此根据该推断,通过注入等离子体膨胀线圈磁场,理论上最大推力将增加到传统磁帆的10倍。

随后Ashida在2014年进行了Full-PIC模拟和Flux-tube模拟,其结果表明小型磁帆的推力分别与磁矩、太阳风密度和太阳风速近似成比例<sup>[7]</sup>,磁等离子体帆的加速度比传统磁帆推力大7.5倍,并且可以获得比现有电力推进系统更高的比冲( $38\,000\text{ s}$ )<sup>[12]</sup>。同时磁等离子体帆的加速度相较其他帆式推进系统更具竞争力,通过改进超导材料、优化超导线圈的设计,预计加速度将再在研究的基础上提高2~5倍<sup>[13-14]</sup>。因此即使与传统电推进方式相比,磁等离子体帆也具有一定技术优势,使其日益吸引研究者的兴趣。

磁等离子体帆膨胀的磁层会随太阳风动压变化而改变<sup>[2]</sup>,磁场的膨胀效果取决于注入等离子体的拉莫尔半径和注入点的等离子体能量<sup>[7]</sup>。要想使磁等离子帆实现高效推进,必须解决磁等离子体帆由于电子高注入速度导致的低推力功率比问题。因为等离子体的喷射功率与等离子体密度和注入速度的平方成正比,可以通过将高密度的离子配合高注入速度的电子进行喷射,有望获得更高的推力功率比<sup>[7]</sup>。

除磁等离子体帆以外,磁帆小型化的另一途径为多线圈组合方式。在2019年,Murayama等设计了由3个小线圈串联组成的多线圈磁帆,其总导线长度和总重量与单线圈的长度和重量大致相同,但

尺寸大幅缩小<sup>[15]</sup>。Murayama等探索了多线圈磁帆的磁场结构,通过地面实验得到 $L=1.6\text{ km}$ 时,磁帆的推力约为 $82\text{ mN}$ <sup>[15-16]</sup>,证明了非偶极磁场的磁帆也可以产生有效磁层结构。2023年,Arita等对两个薄膜印刷的柔性电路板(Flexible printed circuit, FPC)线圈配置的磁帆进行MHD分析<sup>[17]</sup>,考虑多线圈磁帆系统的可能性。该系统能够通过组装大量小型可部署线圈提供有效的推力。由此可见,小型、轻型、多线圈配置将是未来磁帆设计的新方向。

## 4 磁帆数值模拟与实验

### 4.1 数值模拟

磁帆的数值模拟与实验方法伴随着磁帆小型化设计而不断发展。表1总结了21世纪以来的对磁流体力学等数值分析方法的应用进展<sup>[5,8-9,11-12,17-31]</sup>。早期磁帆的数值模拟方式主要通过求解MHD方程,这在Zurbin的原始磁帆和Winglee的M2P2磁帆概念中均得以应用。

然而在2005年,Khazanov等<sup>[19]</sup>对20 cm直径小线圈和小螺旋等离子体源的M2P2进行仿真分析,结果表明M2P2设计不适合用MHD尺度参数描述;所采用的混合粒子网格模拟结果表明,M2P2提供的推力低于预期。上述结果原因是M2P2产生的磁泡大小远小于太阳风特征参数的尺度,离子流和磁场之间的耦合比较松散,导致最终产生的推力很小<sup>[19]</sup>。

随着磁帆尺寸进一步缩小,2010年Moritaka在研究等离子体膨胀时,采用了全粒子网格方法,将太阳风中的电子和离子视为独立的粒子运动,取得较好的模拟结果<sup>[23]</sup>。为了进一步提高计算效率,Ashida在2012年引入了通量管模型,取得同样的计算效果。在电子惯性尺度上,磁帆的推力与超导线圈的磁矩近似成比例( $F \propto M$ );在离子惯性尺度上,推力与磁矩的 $2/3$ 幂近似成比例( $F \propto M^{2/3}$ )<sup>[6-8]</sup>。Ashida的模拟表明电子惯性尺度和离子惯性尺度上的推力分别与数密度的1.15次方和0.67次方成正比,而太阳风平均等离子体密度与太阳-航天器距离的平方成反比。这些推力特性会导致磁帆执行星际任务灵活性的差异<sup>[7]</sup>。不过由于通量管模型较难以掌握,同时伴随计算机性能的提高,在后续的模拟分析中多采用全粒子网格法。

国内对磁帆的数值模拟研究上,主要通过磁流体力学模拟和混合粒子网格法。2008年,北京航空航天大学使用三维混合粒子网格法分析了等离

表 1 国内外磁帆数值模拟研究  
Table 1 Numerical simulation studies of magnetic sails at home and abroad

文献	模拟对象	维度	模拟方法	离子动力学	电子动力学	行星际磁场
文献[9]	M2P2	3D	MHD	无	无	无
文献[5]	传统磁帆	2D	MHD	无	无	无
文献[11]	M2P2/MPS	3D	MHD	无	无	无
文献[18]	传统磁帆	2D	MHD	无	无	包含
文献[19]	M2P2/MPS	3D	MHD、Hybrid-PIC	包含	无	无
文献[20]	等离子体膨胀	3D	Hybrid-PIC	包含	无	无
文献[21]	等离子体膨胀	3D	Hybrid-PIC	包含	无	无
文献[22]	M2P2/MPS	3D	Hybrid-PIC	包含	无	无
文献[23]	等离子体膨胀	2D	Full-PIC	包含	包含	无
文献[24]	传统磁帆	2D	MHD	无	无	包含
文献[8]	传统磁帆	3D	Flux-tube	包含	无	无
文献[12]	传统磁帆, M2P2/MPS	2D	Full-PIC、单粒子近似	包含	包含	包含
文献[25]	等离子体膨胀	3D	MHD	无	无	无
文献[26]	M2P2/MPS	3D	Full-PIC	包含	包含	无
文献[27]	M2P2/MPS	3D	Hybrid-PIC	包含	无	无
文献[28]	等离子体膨胀	3D	Full-PIC	包含	包含	无
文献[29]	传统磁帆	3D	单粒子近似	包含	包含	无
文献[30]	等离子体膨胀	3D	MHD	无	无	无
文献[31]	传统磁帆	3D	MHD	无	无	包含
文献[17]	多线圈磁帆	3D	MHD	无	无	无

子体注入参数对磁场膨胀效果的影响<sup>[21]</sup>,结果表明,等离子体入射时间和速度的增大均会增大磁场膨胀的程度。文献[31]使用三维 MHD 法系统研究了太阳风来流速度、密度以及攻角对磁帆推进性能的影响,并发现线圈尾部的磁重联现象。

上述数值研究多数未计入行星际磁场(Interplanetary magnetic field, IMF),特别是磁重联现象对磁帆的影响。实际上大尺度磁帆( $L \gg r_{Li}$ )的磁层动力学主要是由磁重联过程控制,当 IMF 和太阳风都随时间变化时,磁重联过程将变得非常复杂。Ashida 等对 IMF 影响磁层结构的结果表明,随着磁层尺寸的变小,IMF 的影响逐渐减弱,且在较小的磁层( $L/r_{Li} < 0.1$ )中可被忽略<sup>[7]</sup>。因此小尺度磁帆在数值模拟过程中可以不计入行星际磁场。

4.2 地面实验

磁帆地面实验主要验证磁帆推进原理的可行性、关键材料的性能和仿真计算结果。由于传统磁帆尺度巨大,在地面上很难完全复现其与太阳风的整个作用过程,通常采用缩比实验(Scale-model experiment)来进行模拟。在考虑较大尺度磁帆的磁流体力学作用过程时,离子回旋半径与人工磁场的特征长度比值应满足  $0.1 < r_{Li}/L < 2$ ,以对应空间应用中 10~100 km 磁层长度的磁帆。表 2 总结了典型参数对比<sup>[32-33]</sup>。地面等离子体的束流密度和能量

表 2 磁帆实验的典型参数<sup>[32-33]</sup>  
Table 2 Typical and scaling parameter of magnetic sails<sup>[32-33]</sup>

太阳风参数	空间环境	地面试验
密度 / $m^{-3}$	$10^6$	$>10^{18}$
速度 / $(km \cdot s^{-1})$	400	$<60$
电子/离子温度 / eV	10	1
操作时间 / ms		0.8
线圈参数		
磁矩 / $(T \cdot m^3)$	10~100	$\sim 10^{-5}$
磁层长度 / m	$10^4 \sim 10^5$	$\sim 0.1$
磁场强度 / T	$4 \times 10^{-8}$	$8 \times 10^{-4}$
推力 / N	10~100	0.1~1
无量纲参数		
离子马赫数	$\sim 8$	$>1$
$r_{Li}/L$	$\sim 1$	$\sim 1$
磁雷诺数 $R_m$	$\sim 10^8$	$\sim 10$
磁膨胀尺度 ( $L_{mf}/L_{mag}$ )	0.02~0.05	0.25~0.55
磁场膨胀率 ( $L_{mag}/L_{mps}$ )	4~7	1~2

相比太阳风更高,因此对应实验模拟的太阳风动压往往较高( $P_{sw}=1 \text{ Pa}$ ,空间中  $P_{sw}=10^{-9} \text{ Pa}$ )。此外由于真空罐体大小限制,相比于空间的情况,地面实验中磁等离子体帆的磁膨胀率仅为  $1 \sim 2^{[13]}$ 。

即使排除上述因素影响,推力测试结果与仿真结果往往存在一定误差。这是由于地面模拟环境中实验中的雷诺数远小于空间中实际的雷诺数,离





M2P2/MPS进行了首次实验,成功演示了磁膨胀过程,但未获得MPS产生的推力<sup>[32-34]</sup>。2013年,Ueno等为了测量小型MPS的推力,开发了一种平行四边形摆锤式推力台。当磁层尺寸为115 mm时,小型MPS获得4 N的推力,该推力可能包括用于磁层膨胀的MPD电弧喷射产生的推力<sup>[35]</sup>。其结果还表明,相较目前用于NASA太空任务的离子发动机(推力为200 mN,效率在20~30 mN/kW之间<sup>[36]</sup>),小型MPS功率4 kW时可获得1 N的推力<sup>[37]</sup>。2014年,Oshio等研究了等离子体注入参数对MPS推力增益影响的地面试验。结果发现,推力增益随着 $\beta_k$ (注入等离子体动压与磁压之比)的增加而增加,在 $\beta_k \sim 1$ 的高 $\beta_k$ 条件下观察到推力饱和,获得最大推力增益比4.1,验证了理论推力的准确性<sup>[38]</sup>。

磁帆地面模拟装置的出现大幅推动了磁帆实验技术发展,对各种类型磁帆性能的实验评估有助于更快地找到适合工程应用的有效设计方式。例如在2019年和2020年的实验当中,Murayama等使用3个直径22 mm、高度20 mm、圈数20的小线圈组成外径为50 mm的大线圈结构,在实验中发现了330 mm的多极磁层,并测量了空间电流分布,得到峰值方向相反的150 mm环电流和300 mm磁层顶电流。实验等效空间中磁层大小 $L=1.6$  km时,获得等效推力82 mN<sup>[15-16]</sup>,为磁帆的小型化设计提供了新思路。

在磁帆超导材料设计与测试上,也取得了一些研究结果。文献[39-40]利用钇钡铜氧YBCO高温超导材料制作双饼线圈作为磁帆的缩小模型,并对线圈在线调节进行可行性分析,证实YBCO涂层导体在高磁场中具有高临界电流,使得超导线圈的应用前景进一步提高。

Higashikawa等基于渗透脱钉模型(Percolation depinning model)评估了高温超导线圈的传输特性<sup>[40]</sup>。Nagasaki等制作了长度200 m的Bi2223/Ag的双饼线圈进行低温测试<sup>[41]</sup>,如图5所示。实验过程中使用GM低温制冷机使真空室最低温度达到4 K,并通过筒式加热器来控制温度。制冷机在4 K时制冷量为1.5 W,验证了传导冷却实验系统的有效性<sup>[41]</sup>。

以上材料实验中未考虑高温超导电缆临界电流的纵向不均匀性,而对于较长的高温超导电缆电流传输该因素十分重要。同时对于行星际空间航行的磁帆,数十至数百米的超导电缆对应的冷却机受制冷量限制,降温速度慢、温度均匀性差、抗热扰动能力低的缺点也十分明显<sup>[42]</sup>。因此超导技术在磁帆上应用仍有较漫长的距离。JAXA曾提出了



图5 Bi-2223/Ag双饼线圈模型<sup>[41]</sup>

Fig.5 Bi-2223/Ag double-pancake coil (Scale-down model for magnetic sail)<sup>[41]</sup>

小型磁等离子体帆的飞行演示模型,如图6所示<sup>[14,43-44]</sup>。在该模型中,除了研究航天器径向加速度控制方法外,还可以对电磁系统进行了分析。不过由于经费等原因,该模型仍停留在实验室评估上<sup>[14,43-44]</sup>。

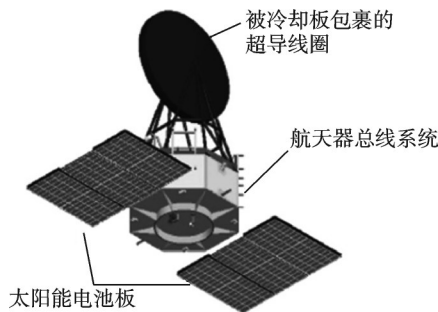


图6 JAXA提出的小型磁等离子体帆空间演示飞行器<sup>[14,43-44]</sup>

Fig.6 M2P2/MPS spacecraft model proposed by JAXA<sup>[14,43-44]</sup>

## 5 磁帆的应用

在行星际飞行任务中,磁帆可作为辅助推进或主推进系统,用于制动或加速航天器。由于太阳风在整个太阳系存在,Winglee在研究中提到M2P2系统将有可能应用到太阳系边缘探测<sup>[9]</sup>。Ashida等研究表明,利用磁帆和磁等离子体帆进行星际飞行和拉格朗日点制动任务在现有技术下可行<sup>[7]</sup>。

小型磁帆可以在太阳风等离子体密度高的内行星轨道上获得最大加速度;相反,随着距离变远,太阳风等离子体的密度和光压变小,使得大型磁帆更适合外行星探测。通过对攻角进行控制,单线圈磁帆可以实现轨道倾角的改变<sup>[27]</sup>,其变轨时间取决于磁帆设计(面积,质量和其动力学力系)、磁帆攻角和螺旋角大小等<sup>[13]</sup>。

大量模拟和实验测试提供了关于磁帆理论性能的重要信息。根据早期Zubrin和Andrews<sup>[4]</sup>进行的理论分析、数值模拟<sup>[8,12,15,45]</sup>以及实验结果数据<sup>[32-35]</sup>,2013年Quarta等<sup>[46]</sup>提出了一个简单的磁



帆推力数学模型。该模型已用于基于磁帆的绕太阳位移非开普勒轨道分析<sup>[47]</sup>和日心转移分析<sup>[48]</sup>等。2023年,Bassetto等根据近10年的模拟和实验数据对磁帆推力模型进行了更新,主要讨论了粒子尺度下小型磁帆的推力模型,并将此推力模型用于分析圆形共面日心轨道间最小时间转移问题<sup>[49]</sup>,可见对磁帆轨道应用的研究重心已经逐渐转移至小型磁帆。

在行星际任务中,磁帆的类型的使用对于缩短行程时间十分关键。Perakis等的研究表明,传统磁帆实现向内变轨任务约1年,而从向外变轨任务大概需要6.5年<sup>[29]</sup>。图7为这两种任务的设计轨道,蓝色箭头代表磁帆推力<sup>[27]</sup>。当航天器从地球引力层逃逸时,传统磁帆最终会在59年后到达木星,向内发射时,传统磁帆能够在4.2年内到达水星<sup>[13]</sup>。

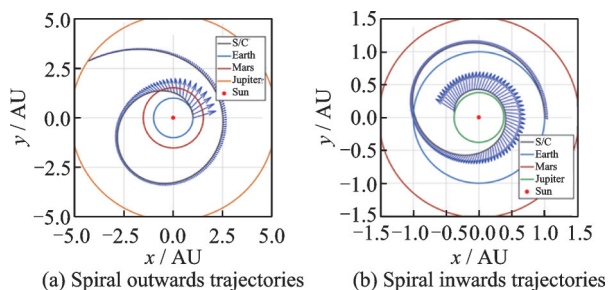


图7 航天器变轨道平面机动的飞行轨迹<sup>[27]</sup>

Fig.7 Trajectory of the spacecraft during plane change maneuver<sup>[27]</sup>

如果使用小型磁等离子体帆,Djojodihardjo曾对给定火星和金星的星际转移 $40^\circ$ 俯仰角条件下轨道转移时间进行计算,地火转移时长约744天,地金转移时长约325天<sup>[2]</sup>。Yamakawa等研究表明,使用磁等离子体帆由地球直接转移至木星轨道,飞行时间将缩短为2年3个月<sup>[50]</sup>。

Bassetto等通过数值计算评估了地球-金星行星际转移优化方案和局部最优太阳系逃逸轨迹的任务分析:假设特征加速度为 $1\text{ mm/s}^2$ ,地球-金星转移可在380天内完成<sup>[49]</sup>。对于火星往返任务,美国宇航局(NASA)使用化学火箭的火星任务参考时长为2.4年(879天)。M2P2系统考虑仅有径向推力的情况,必须越过火星然后回落到该行星,由M2P2系统提供制动。假设有效载荷和电力系统是分布式的,采用多个小电流源系统产生所要求的小磁层,每200 kg磁帆质量适用每1 kW功率可以产生1 N的推力。在这种最坏情况下,总任务时间将比美国宇航局火星参考任务短7个月<sup>[49]</sup>。

这些研究结果均表明使用相同的初始发射条件的磁帆,向内行星飞跃将拥有以比向外行星飞跃更短的飞行时间。除距离影响外,太阳风在内行星

有更高的密度,使得磁帆推力明显增加。

Perakis等还提出将磁帆和电帆相结合来执行星际任务的提议,并评估了组合减速系统对不同航天器质量和巡航速度最佳总体任务架构的影响<sup>[51]</sup>。这种组合帆可以发挥两种技术的优势:磁帆在高速度下比电帆更有效,而电帆在低速下显示出优异的性能<sup>[49-50]</sup>。当目标行星在局部气泡结构内,也可以对低速航天器进行磁制动,即当星际介质的粒子密度低至 $0.005\text{ cm}^{-3}$ 时,质量1.5 t的磁帆可执行长时间在轨制动任务<sup>[48]</sup>。

在拉格朗日点,小推力磁帆同样能够维持人造晕轨道。晕轨道作为轨道力学三体问题中在拉格朗日点附近的周期性三维轨道,几乎不受重力影响,维持轨道只需要较低的推力。现有技术可以支持小型磁帆产生所需的推力及推力矢量控制(加速度 $3.3\times 10^5\text{ mN/kg}$ )<sup>[7]</sup>。因此磁帆可以作为在日地拉格朗日点维持晕轨道的机动系统。

需注意上述研究均是基于低特征加速度、恒定推力角和圆形停泊轨道的简化假设。如果偏航角变化,将带来更复杂的推力矢量变化,因此在实际设计中,行星际和星际飞行任务时应引入更多自由度来实现期望轨道的控制。

## 6 展望与结论

磁帆作为一种新型空间推进技术,具有比冲高、无工质或少工质等优点,在未来行星际任务中具有重要的应用前景。目前磁帆技术实现航天应用仍有较多技术瓶颈需要克服。

### (1) 小型化设计

相比太阳帆,磁帆一直未有在轨测试,其原因之一在于磁帆结构庞大,成本高昂。磁等离子体帆等概念的提出有效地缩减了磁帆的尺寸,但离工程应用还有较长距离。不过Funaki等通过实验证实,磁等离子体帆在4 kW时即可以提供1 N的推力,这相比常规电推进技术又有部分优点<sup>[45]</sup>。磁帆的主要优势在于无燃料推进,当其支撑系统重量达到或超过常规推进所需的燃料重量时,就已丧失了其主要优势。因此未来磁帆技术还需要继续从小型化设计进行突破,如模块化连接线圈结构、薄膜线圈或可展开结构等<sup>[17]</sup>,以摆脱对于超导电缆的依赖,实现常规供电和高可靠性。

### (2) 推力的提升

由于磁场无法对太阳风粒子做功,磁帆从太阳风粒子中获得的推力是有限的。磁帆尺寸难以缩减的原因在于太阳风等离子体密度小,只有足够庞大的磁场结构才能提供可观的推力。只有突破这

一限制,磁帆的技术前景才会更加明亮。Perakis等提出的将磁帆和电帆相结合的建议就是突破上述限制的一种尝试<sup>[51]</sup>。电场可以有效地加速带电粒子,获得更多的推力。不过简单地将电帆和磁帆相结合并不能解决其工程应用问题,庞大的结构会让航天设计者望而止步。后续可考虑同时利用电场加速的小型化磁帆设计<sup>[52]</sup>,以实现磁帆推力的再次突破。

### (3) 动力学与控制技术

由于磁帆航天器存在姿态与轨道强耦合问题,精确的动力学模型和推力模型是数值研究的关键。此外,深空中太阳风参数的不确定性将导致磁帆推力的波动。只有在大量模拟和实验数据支撑下,才能获得更准确的小型磁帆数学模型及控制律。但目前对磁帆的研究结果多集中于针对理想太阳风假设的数值研究,还缺乏实际应用价值。因此,后续需要对粒子模型下磁帆的姿态-轨道耦合动力学进行深入研究,寻找在等离子体参数实时变化条件下有效的控制策略。

### (4) 实验技术

磁帆的地面实验技术依赖于太阳风等离子体环境的模拟。由于真空罐空间尺寸和等离子体参数限制,地面模拟结果与空间实际应用的等效性一直是悬而未决的问题。目前地面实验主要用于验证仿真计算结果,2018年后基于粒子模型更新的磁帆数值结果还未得到进一步的实验证实。因此,后续可开展实验测试,模拟小型磁帆面临的太阳风等离子体环境并测量其推力,实验的进步将会促进更多创新性磁帆设计的诞生。

综上所述,本文系统阐释了磁帆的基本技术原理、小型化设计、实验和仿真进展。近几十年的研究表明,磁等离子体帆相比常规电推进有更高的比冲和推功比,在外太空探索中具有重要的应用前景。不过由于磁帆的尺寸仍然十分庞大,目前磁帆技术还未达到工程应用的要求,仍需要进一步进行小型化设计,提升其推力值,最终才能实现在轨实验验证。结合我国未来深空探测任务需求,本文建议首先突破磁帆的小型化瓶颈,提出符合航天工程应用要求的低成本小尺度磁帆设计方案,在此基础上,建立有效的地面实验评估和仿真方法,为深空探测任务应用奠定基础,以此推动我国新型航天动力技术的发展。

### 参考文献:

- [1] KERR R A. It's official-voyager has left the solar system[J]. Science, 2013, 13(6151): 1158-1159.
- [2] DOJODIHARDJO H, AZIZ N. An exploratory study of magnetic sailing[C]// Proceedings of the 6th CSA-IAA Conference on Advanced Space Technology. Shanghai, China: [s.n.], 2015.
- [3] LEWANDOWSKI E J. Testing of the advanced stirring radioisotope generator engineering unit at nasa glenn research center[C]//Proceedings of the 10th International Energy Conversion Engineering Conference. Atlanta, Georgia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [4] ZUBRIN R M, ANDREWS D G. Magnetic sails and interplanetary travel[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1991, 28(2): 197-203.
- [5] NISHIDA H, OGAWA H, FUNAKI I, et al. Verification of momentum transfer process on magnetic sail using MHD model[C]//Proceedings of the 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Tucson, Arizona: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2005.
- [6] ASHIDA Y, FUNAKI I, YAMAKAWA H, et al. Two-dimensional particle-in-cell simulation of magnetic sail[J]. Journal of Propulsion and Power, 2013, 30(1): 233-245.
- [7] ASHIDA Y. Study on propulsive characteristics of magnetic sail and magneto plasma sail by plasma particle simulations[D]. Kyoto: Kyoto University, 2014.
- [8] ASHIDA Y, FUNAKI I, YAMAKAWA H, et al. Thrust evaluation of a magnetic sail by flux-tube model [J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(3): 642-651.
- [9] WINGLEE R M, SLOUGH J, ZIEMBA T, et al. Mini magnetospheric plasma propulsion: Trapping the energy of the solar wind for space craft propulsion[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105(A9): 21067-21077.
- [10] SLOUGH J. The plasma magnet for sailing the solar wind[J]. AIP Conference Proceedings, 2005, 746: 1171-1187.
- [11] NISHIDA H, NAKAYAMA Y. Two-dimensional magnetohydrodynamic simulation of a magnetic sail[J]. Journal of Space craft and Rockets, 2006, 43(3): 667-672.
- [12] ASHIDA Y, FUNAKI I, YAMAKAWA H, et al. Numerical model for thrust evaluation of a magnetic sail[J]. Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 2011, 59(688): 126-131.
- [13] DOJODIHARDJO H. Review of solar magnetic sailing configurations for space travel[J]. Advances in Astronautics Science and Technology, 2018, 1(2): 207-219.
- [14] DOJODIHARDJO H. Overview of solar magnetic sailing configurations for space travel[C]//Proceed-

- ings of the AIAA SciTech Forum. San Diego, California, America; 2019.
- [15] MURAYAMA Y, UENO K, OSHIO Y, et al. Preliminary results of magnetic field measurements on multi-coil magnetic sail in laboratory experiment[J]. Vacuum, 2019, 167(2): 509-513.
- [16] MURAYAMA Y, UENO K, OSHIO Y, et al. Relationship of current distribution of magnetopause and thrust characteristics in multipole magnetic sail[C]//Proceedings of the AIAA Propulsion and Energy Forum. [S.l.]:AIAA, 2020.
- [17] ARITA S, YAMAGIWA Y. Three-dimensional magnetohydrodynamic analysis of a magnetic sail using a deployable modular structure[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2022, 60(2): 1-11.
- [18] NISHIDA H, FUNAKI I. Analysis of thrust characteristics of a magnetic sail in magnetized solar wind[J]. Journal of Propulsion and Power, 2012, 28(3): 336-342.
- [19] KHAZANOV G, DELAMERE P, KABIN K, et al. Fundamentals of the plasma sail concept: magnetohydrodynamic, and kinetic studies[J]. Journal of Propulsion and Power, 2005, 21(5): 853-861.
- [20] WINSKE D, OMIDI N. Plasma expansion in the presence of a dipole magnetic field[J]. Physics of Plasmas, 2005, 7(12): 251-259.
- [21] 姚杰,汤海滨,王海兴,等. 膨胀磁场和太阳风粒子相互作用三维数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 584-586.
- YAO Jie, TANG Haibin, WANG Haixing, et al. Three-dimension numerical simulation of working process of space plasma sail[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2008, 34(5): 584-586.
- [22] KAJIMURA Y, FUNAKI I, SHINOHARA I, et al. Thrust evaluation of magneto plasma sail by using three-dimensional hybrid PIC code[C]//Proceedings of the 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. Nashville TN, USA: [s.n.], 2010.
- [23] MORITAKA T, USUI H, NUNAMI M, et al. Full Particle-in-cell simulation study on magnetic inflation around a magneto plasma sail[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2010, 38(9): 2219-2228.
- [24] MATSUMOTO M, KAJIMURA Y, USUI H, et al. Two-dimensional hybrid-PIC simulation of magnetic sail including interplanetary magnetic field[J]. Journal of the Japan Society for Aeronautical & Space Sciences, 2012, 60(1): 31-39.
- [25] OSHIO Y, UENO K, SANO T, et al. Experimental and numerical investigation of magnetosphere inflation of magneto plasma sail[C]//Proceedings of the 34th International Electric Propulsion Conference. Kobe-Hyogo: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [26] YAMASHITA R, KAJIMURA Y, FUNAKI I, et al. Thrust evaluation of magneto plasma sail injecting thermal plasma by using 3D hybrid PIC code[C]//Proceedings of the 34th International Electric Propulsion Conference. Kobe-Hyogo: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015: 11-16.
- [27] KAJIMURA Y, HAGIWARA T, OSHIO Y, et al. Thrust performance of magneto plasma sail with a magnetic nozzle[C]//Proceedings of the 34th International Electric Propulsion Conference, Kobe-Hyogo: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [28] USUI H, UMEZAWA M, MIYAKE Y, et al. PIC Simulation on plasma flow response to a mesoscale magnetic dipole in space[C]//Proceedings of the 53rd AIAA Aerospace Sciences Meeting. Kissimmee, Florida: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2015.
- [29] PERAKIS N. Maneuvering through solar wind using magnetic sails[J]. Acta Astronautica, 2020, 177(1): 122-132.
- [30] PENG Zhong, PENG Yuchuan, DING Liang, et al. Global MHD simulation of the magnetic sail expansion by plasma injection[C]//Proceedings of International Conference on Signal and Information Processing, Networking and Computers. [S.l.]: Springer, 2020: 190-197.
- [31] 蔡静媛,李来,朱桂平. 太阳风磁帆推进性能数值研究[J]. 航空动力学报, 2023, 38(4): 45-52.
- CAI Jingyuan, LI Lai, ZHU Guiping. Numerical study on propulsion performance of solar wind magnetic sail[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(4): 45-52.
- [32] FUNAKI I, KOJIMA H, YAMAKAWA H, et al. Laboratory experiment of plasma flow around magnetic sail[J]. Astrophysics and Space Science, 2007, 307(1/2/3): 63-68.
- [33] UENO K, FUNAKI I, YAMAKAWA H, et al. Laboratory simulation of magnetoplasma sail[C]//Proceedings of the 44th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Hartford, America: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2008.
- [34] FUNAKI I, YAMAKAWA H, KAJIMURA Y, et al. Experimental and numerical investigations on the thrust production process of magnetoplasma sail[C]//Proceedings of the 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE



- Joint Propulsion Conference & Exhibit. Nashville TN, USA: [s.n.], 2010.
- [35] UENO K, OSHIO Y, FUNAKI I, et al. Experimental simulation of magnetoplasma sail for thrust measurement[J]. *Fusion Science and Technology*, 2013, 63(1): 392-394.
- [36] DOMONKOS M T, PATTERSON M J, JANKOVSKY R S, et al. Ion engine and hall thruster development at the NASA Glenn Research Center: NASA/TM-2002-211969 [R].[S.l.]:NASA, 2002.
- [37] FUNAKI I, YAMAKAWA H. Research status of sail propulsion using the solar wind[J]. *Plasma Fusion*, 2009, 8(1):1580-1584.
- [38] OSHIO Y, FUNAKI I, UENO K. Experimental investigation of magnetoplasma sail with high  $\beta$  plasma jet [C]//Proceedings of the 50th AIAA / ASME / SAE / ASEE Joint Propulsion Conference. Cleveland, America: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [39] NAGASAKI Y, FUNAKI I, NAKAMURA T, et al. Increase in thrust of magneto plasma sail using solid or deployable superconducting coil [C]//Proceedings of the 34th International Electric Propulsion Conference. Kobe, Japan: Indo Engineering Project Corporation, 2015.
- [40] HIGASHIKAWA K, KISS T, INOUE M, et al. Significant reduction in volume, stored energy and magnetization loss of high-field magnet coil based on the improvement of critical current characteristics in GdBCO coated conductor[J]. *Physica C Superconductivity & Its Applications*, 2009, 469 (15/16/17/18/19/20): 1776-1780.
- [41] NAGASAKI Y, NAKAMURA T. Coupled-analysis of current transport performance and thermal behavior of conduction-cooled Bi-2223/Ag double-pancake coil for magnetic sail spacecraft[J]. *Physica C: Superconductivity*, 2013, 492 (25): 96-102.
- [42] 汪巧文. 太空中制冷机冷却高温超导电缆的传热特性研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2018.
- WANG Qiaowen. Study on heat transfer characteristics of high-temperature superconducting cable cooled by refrigerator in space[D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology, 2018.
- [43] KAJUMURA Y, FUNAKI I, MATSUMOTO M, et al. 3D hybrid simulation of pure magnetic sail on ion inertial scale in laboratory[J]. *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Aerospace Technology Japan*, 2012, 10(28): 51-57.
- [44] KAJIMURA Y, USVI H, FUNAKI I, et al. Hybrid particle-in-cell simulations of magnetic sail in laboratory experiment[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2010, 26(1): 159-166.
- [45] FUNAKI I, KAJIMURA Y, UENO K, et al. Experimental and numerical investigations on the thrust[C]//Proceedings of the AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. [S.l.]: AIAA, 2010.
- [46] QUARTA A A, MENGALI G, ALIASI G. Optimal control laws for heliocentric transfers with a magnetic sail[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 89: 216-225.
- [47] BASSETTO M, QUARTA A A, MENGALI G. Magnetic sail-based displaced non-Keplerian orbits[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2019, 92 (1): 363-372.
- [48] BASSETTO M, QUARTA A A, MENGALI G. Generalized sail trajectory approximation with applications to MagSails[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2021, 118(1): 1-9.
- [49] BASSETTO M, QUARTA A A, MENGALI G. Refined magsail thrust model for preliminary mission design and trajectory optimization[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2023, 133(1): 108-113.
- [50] YAMAKAWA H, FUNAKI I, NAKAYAMA Y, et al. An engineering satellite concept and its application for outer planet missions [J]. *Acta Astronautica*, 2006, 59(8/9/10/11): 777-784.
- [51] PERAKIS N, HEIN A M. Combining magnetic and electric sails for interstellar deceleration[J]. *Acta Astronautica*, 2016, 128: 13-20.
- [52] QUAN Ronghui, XU Mingwei, YAO Yunjia. Three-dimensional particle tracing analysis of a rotational magnetic sail[J]. *AIAA Journal*, 2024, 62(2): 2214-2221.

(编辑:孙静)