

# 深空探测磁动力技术研究进展

王伟<sup>1,2</sup>, 马彦涵<sup>1,2</sup>, 周易倩<sup>1,2</sup>, 方宝东<sup>1,2</sup>

(1. 上海卫星工程研究所, 上海 200240; 2. 上海市深空探测技术重点实验室, 上海 200240)

**摘要:**开展深空探测对人类研究宇宙起源与发展、生命存在与进化等重大科学问题具有重要的意义。深空探测有很多关键技术有待突破,先进推进技术是其中最为重要的一个。而可用于深空探测的无需携带推进剂的磁动力推进技术,是利用太阳系和宇宙中广泛存在的等离子体流,使探测器所携带的低密度超导材料制作的线圈通电,在探测器周围形成一个磁场区域,通过该磁场与太阳风等离子流相互作用产生推动力的一种先进技术。文章介绍了磁动力技术的国内外发展现状、磁帆与等离子体流增强型磁帆的基本原理、技术特点以及在未来深空探测中的潜在应用,为我国未来深空探测任务的工程实施提供一种新的方法。

**关键词:**深空探测; 磁动力; 磁帆; 无工质推进

**中图分类号:** V19      **文献标识码:** A      **文章编号:** 2095-7777(2015)03-0203-05

**DOI:**10.15982/j.issn.2095-7777.2015.03.002

## 0 引言

开展深空探测对人类研究宇宙起源与发展、生命存在与进化等重大科学问题具有重要的意义。当前,人类已完成了对太阳系八大行星及其部分卫星、部分小行星和彗星的探测,其中,“旅行者1号”探测器已飞行到太阳系的边缘,距离地球约130 AU,首次获得太阳系边缘宇宙环境特征参数。

我国已于“十二五”中期制定了2030年前深空探测总体实施方案,规划对火星、金星、小行星、木星等天体开展探测任务。深空通信、导航与推进是制约我国乃至全世界深空探测发展的几项核心技术。

对于深空推进技术,对太阳系内行星探测总速度增量需求达到10 km/s左右,受当前推进技术水平限制,化学推进和电推进技术比冲分别为350 s和4 000 s,比冲较低,要求探测器携带燃料量较大,达到94.6%和22.5%,从而减少了探测器携带有效载荷的重量,降低了科学产出的效能<sup>[1]</sup>。

当前,先进的深空探测推进方式例如基于核裂变或聚变的推进、暗物质推进等被认为是解决人类未来深空探测革命性的几项推进技术,他们能够提供的比冲都高达 $10^6 \sim 10^7$  s,但是他们都需要携带聚变材料、暗物质等推进剂,且需要解决推进剂存

储、反应控制、推力转化等技术难点,这也导致推进系统本身质量大幅增加<sup>[2-4]</sup>。本文提出了一种可用于深空探测的无需携带推进剂的先进磁动力推进方式,探索一种新的未来深空探测器设计的方法,丰富我国未来深空探测的手段。

## 1 国内外发展现状及趋势

深空探测磁动力技术由Andrews和Zubrin于1988年首次提出<sup>[5]</sup>,文中提出利用超导电流环通电在探测器周围形成磁场与太阳风等离子场相互作用产生推力,探测器无需携带化学推进剂从而提升了探测器的质量利用率。但是为了获取足够的推力,超导电流环的直径将达到几十千米量级。概念提出之后,磁动力技术吸引了国外多个航天国家机构和学者的关注,逐步开始研究该项技术的基础理论、动力学特性、性能仿真、超导材料、试验方法等内容<sup>[6]</sup>。

2000年,Winglee等在研究的基础上首次提出了微小磁线圈等离子推进磁动力技术(mini-magnetospheric plasma propulsion, M2P2)<sup>[7-9]</sup>,该技术采用直径量级约米级的超导电流环加上探测器自身携带等离子体发生器的方式代替了之前需要几十公里量级的超导电流环,由于该方案体积和重量大幅减小,将该技术向深空探测工程化应用推进了

收稿日期:2015-03-14 修回日期:2015-06-01

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2014CB74420);上海市重点实验室项目(13DZ2260100);上海市科学技术委员会项目(13XD1423300)

一大步。

经过 20 多年的发展,深空磁动力技术已经在实验室里进行了伴物理仿真试验,验证了其技术的理论可行性。21 世纪之后,由于科学探测的牵引,深空探测又逐渐进入了一个新的高潮,NASA、ESA、JAXA 和俄航局都制定了面向 2030 年的深空探测长远发展计划,且非常重视开展制约深空探测未来发展核心技术的先期攻关,其中已将磁动力技术列为深空未来发展先进技术概念,给予支持。特别是日本航天局在深空探测创新技术领域尤为重视,来自日本航天局、东京大学、京都大学等机构的 Funaki、Shinohara、Fujita、Yamakawa、Ogawa 等学者从 2005 年至今发表了大量关于深空磁动力技术深入研究的论文,研究水平和成果已位居世界前列<sup>[10-11]</sup>。

国内国家空间中心、国家天文台、南京大学等单位对太阳爆发—近地空间环境影响系统进行了多年的研究,其本质也是地磁场与太阳风等离子体流相互作用,但是对于探测器主动携带线圈等装置产生磁场与太阳风相互作用产生推力,从基本原理、实施方案、工程应用等各个方面都比较少。

深空探测磁动力技术未来发展主要以微小磁线圈等离子推进磁动力技术为主,解决超导材料、动力标定、工程化等难题,未来面向太阳系及系外行星探测的工程应用。

## 2 磁动力技术基本原理

### 2.1 磁帆基本原理

太阳风是从恒星上层大气射出的超声速等离子体带电粒子流,主要由质子和电子等基本粒子组成,以 200~800 km/s 的速度向外辐射。磁动力技术的基本原理是深空探测器携带低密度超导材料制作的线圈,发射入轨之后展开线圈并通电,线圈中的电流将在探测器的周围形成一个磁场区域,其磁场形状与特性等效为偶极子场。通过该偶极子场与空间中的等离子体相互作用产生动量交换从而形成使探测器飞行的动力。利用该项技术在深空探测中提供推动力的深空探测器也被称为磁帆(MagSail)。磁帆的典型构型如图 1 所示。

磁动力原理可以近似为真空中偶极子场与等离子体流的相互作用。偶极子形成的磁场受到太阳风等离子体流的挤压,在交界处形成磁场球边界。在边界的内部,认为仅存在磁场没有等离子体流动态压;

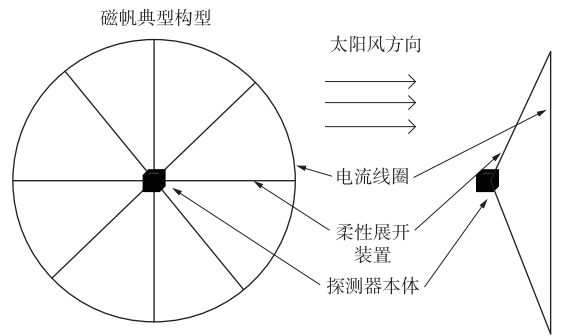


图 1 深空探测磁帆构型示意图  
Fig. 1 Principle illustration of magsail

然而,在边界外部,正好相反,认为仅存在等离子体流动态压而不存在磁场。

偶极子场与等离子体流相互作用如图 2 所示。

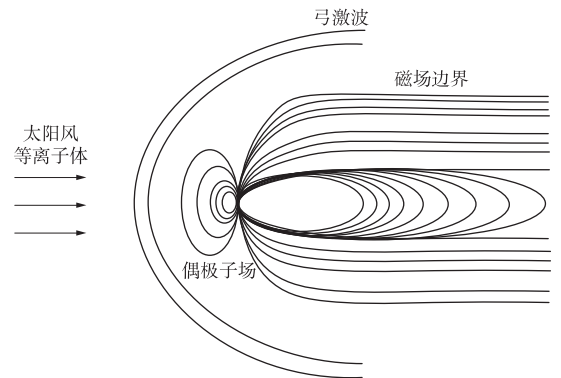


图 2 偶极子场与等离子体流相互作用  
Fig. 2 Interaction between dipole field and plasma flow of solar wind

假设磁场的作用半径为  $L$ ,则基于偶极子场与等离子体流相互作用原理的磁帆的工作原理如图 3 所示。

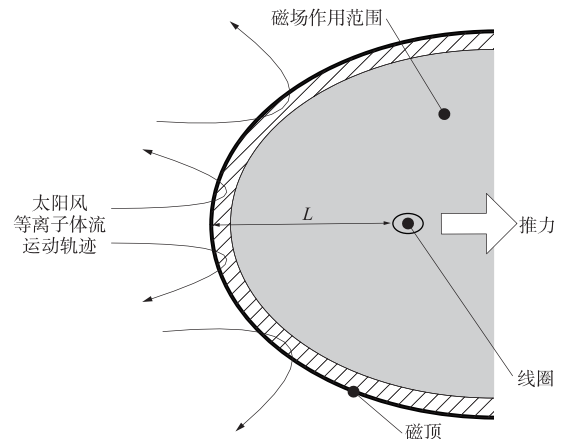


图 3 磁帆基本原理  
Fig. 3 Basic principle of MagSail

对于传统磁帆,在偶极子场与等离子体流相互作用的边界上,动压  $q$  和磁场强度  $B$  可表述如下

$$q = \frac{1}{2} \rho_i \mathbf{V}_{sw}^2 \quad (1)$$

$$\frac{B^2}{2\mu} = q \cos^2 \omega \quad (2)$$

其中:  $\rho_i$  为太阳风中的等离子体流密度;  $\mathbf{V}_{sw}$  是等离子体流相对探测器的飞行速度;  $\mu$  为真空系数;  $\omega$  为等离子体流向与磁场球边界方向的夹角。

假设深空中探测器携带半径为  $R_m$  的线圈,线圈密度为  $\rho_m$ ,通过线圈的电流大小为  $I$ ,电流密度为  $J$ ,则结合式(1)和式(2),在磁场球边界产生的推力  $F$  可以表示为

$$F = C_D \pi (\rho_i \mu^{1/2} I R_m^2 \mathbf{V}_{sw}^2)^{2/3} \quad (3)$$

线圈的质量  $M_s$  可以表示为

$$M_s = 2\pi R_m \rho_m I / J \quad (4)$$

因此,磁动力对探测器产生的加速度  $a_s$  可以计算如下

$$a_s = F / (M_s + M_d) \quad (5)$$

其中,  $M_d$  为深空探测除线圈质量之外有效载荷及平台的质量。

从式(5)中可以看出,磁动力的性能与环境中的等离子体流密度、探测器相对于等离子体流运动的速度以及探测器自身产生的电流强度、线圈等发生装置的质量等因素密切相关。

式(3)中的推力系数  $C_D$  可表述如下<sup>[12]</sup>

$$C_D = 0.36 \exp(-0.28 R_L^2), \quad R_L < 1 \quad (6)$$

$$C_D = \frac{3.4}{R_L} \exp(-\frac{0.22}{R_L^2}), \quad R_L \geq 1 \quad (7)$$

其中:  $R_L = \frac{r_{Li}}{L}$  表示离子的拉莫尔半径与磁场作用半径之比。

从微观的角度,由于太阳风等离子体流的密度一般比较低(1 AU 处,等离子体流的密度约为  $1.674 \times 10^{-20} \text{ kg/m}^3$ ),其运动特征可以看作稀疏碰撞的电子和离子流,而电子和离子流在与同一个磁场发生相互作用时,它们的运行轨迹会分离,如图 4 所示。如果一束包含电子和离子的太阳风流撞击在磁场的边界上,由于离子的质量更高,相比电子将进入磁场的距离更深,从而离子和电子的运动轨迹将分离。由于等离子体流整体上要保持电中性,从而产生极化的电场,抑制离子的运动。而电子则在极化的电场中受到洛伦兹力并获得能量。

电子和离子分离的距离差  $\delta$  是衡量磁帆性能的

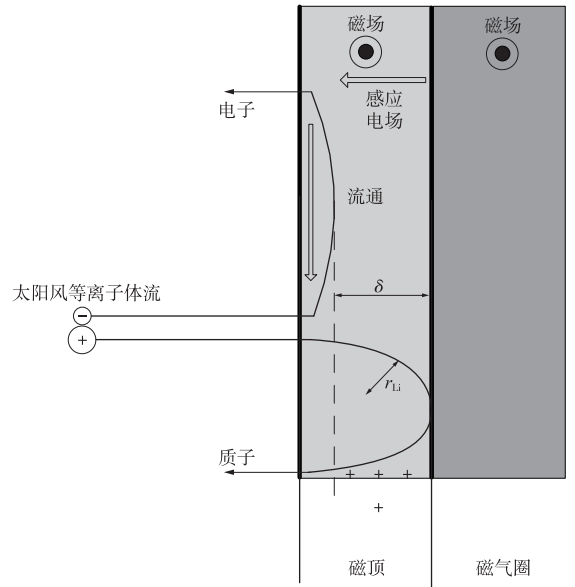


图 4 等离子体流与磁场相互作用的微观尺度分析  
Fig. 4 Interaction between plasma and magnetic field in microscopic view

一个重要参数,表述如下

$$\delta = \frac{c}{\omega_p} \quad (8)$$

其中:  $c$  为光速;  $\omega_p$  为等离子体流的频率。离子的拉莫尔半径  $r_{Li}$  表述如下

$$r_{Li} = \frac{m \mathbf{V}_{sw}}{e B_{mp}} \quad (9)$$

其中:  $B_{mp}$  为磁场边界处磁场强度;  $e$  为电子电荷;  $m$  为太阳风等离子体流的平均质量。

则可获得衡量磁帆性能的另外一个重要参数  $r_{Li}/L$ 。为了最大程度地偏转离子,探测器产生的磁场顶层应该越薄越好,即  $\delta/L \ll 1$ 。在较薄的磁场顶层中,所有的离子被极化电场偏转,磁帆获得较大的推力和性能;如果磁场顶层很厚,几乎所有的离子直接进入磁场内部靠近线圈的位置,则离子仅通过洛伦兹力交换动量,性能较差。

## 2.2 等离子体流增强型磁帆基本原理

等离子体流增强型磁帆基本原理如图 5 所示。

等离子体流增强型磁帆的基本原理与传统磁帆相似,只是通过探测器自身携带等离子体发生器注入等离子体流使磁场膨胀,改变了原有磁场球边界处太阳风等离子体流流动压与磁场压的平衡点,增大了磁场的作用半径  $L$ ,从而改善了磁帆的性能。这种增强型磁帆是建立在理想磁流体动力学的基础上,如果在非理想磁流体动力学中,由于磁场和等离子体流的弱耦合关系,离子的回旋半径很大,无法产

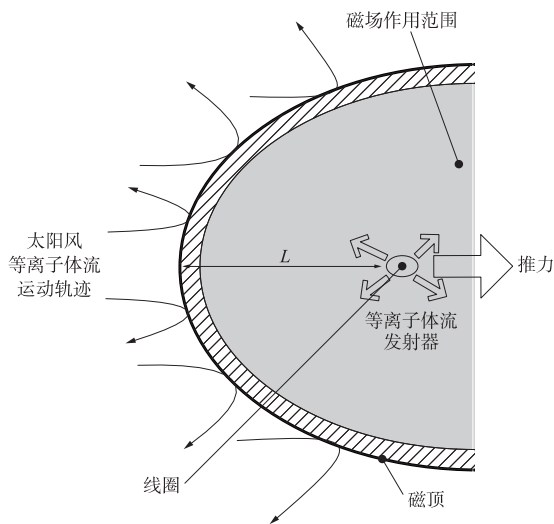


图 5 等离子体流增强型磁帆基本原理

Fig. 5 Basic principle of plasma enhanced magsail

生磁场膨胀的效果<sup>[13]</sup>,相关的理论在进一步完善之中。

### 3 磁动力特点分析及其未来应用

采用传统化学推进、电推进作为推动力的火星、小行星等深空探测任务,探测器携带推进剂所占的比重在 50% 以上,严重制约了平台的设计,降低了探测的效率,而且当推进剂消耗完毕,探测器也就基本结束寿命,无法继续开展科学观测任务。相对比,采用磁动力技术的深空探测器由于通过自身携带装备产生磁场与太阳风产生相互作用提供动力,仅需要电源系统提供充足的能源保障,不需要消耗推进剂,从而节省了燃料的携带量,是一种无工质损的深空探测动力形式。

由于磁动力需要借助与太阳风等离子体流相互作用产生动力,因此磁动力的作用范围基本上在太阳系以内,用于对太阳系内火星、小行星、太阳系边界等目标的探测任务,出了太阳系由于太阳风强度非常弱,磁动力的作用非常微弱,而且由于太阳风的强度与到太阳距离的平方成反比,距离太阳越远磁动力的初始性能就越差。在距离太阳 1 AU 处太阳风等离子体流的密度约为  $1.674 \times 10^{-20} \text{ kg/m}^3$ ,产生的推力比较小,探测器加速需要很长的时间。另外,据研究宇宙中广泛存在着稀薄的离散等离子体云团,密度约为  $6.2 \times 10^{-24} \text{ kg/m}^3$ ,因此通过与宇宙中存在的等离子体云团相互作用,磁动力技术也可用于星际飞行减速制动的过程<sup>[14]</sup>。

与当前已工程化应用的太阳帆推进技术相比,

两者的共性都是借助与太阳风相互作用产生动力,都是一种无工质损的深空探测推进形式,不需要携带额外的推进剂。区别在于太阳帆直接利用太阳对外辐射的太阳光压产生动力,而磁动力推进利用主动磁场与太阳风中的等离子体流相互作用实现动量交换产生推力。两者的作用范围都主要局限于太阳系内,磁动力还可用于星际探测减速制动过程;两者的作用力都比较小,加速需要很长的时间,距离太阳越远,则初始动力性能就越差,磁动力可以通过主动增加等离子体流密度增强作用的效果;而且,磁帆相对于太阳帆无需在轨展开大面积的帆板,可进一步减轻探测器的质量,降低探测器姿轨控分系统的设计与实现难度。

目前,磁动力技术的实现还存在很多技术难点。探测器携带线圈需要提供很大的电流才能产生较强的磁场,进而与等离子流相互作用产生较大的作用力,这对探测器的能源供应提出了苛刻的要求。很多研究者希望通过使用超导线圈来减少电流的损失,但是低温超导技术目前成熟度仍然比较低。控制方面,如何通过调整电流强度、线圈构型等各种参数改变推力的大小和方向,实现对探测器的高精度控制也是研究的重点。根据 NASA 技术成熟度的定义,磁动力当前的技术成熟度约为 2 级<sup>[15]</sup>。

综上所述,磁动力技术可应用于未来太阳系内各目标天体小规模探测任务,也可作为行星际探测的一种辅助减速制动方式。磁动力与其他化学、核能推进相结合的综合动力形式也是未来研究的热点。

### 4 结束语

文章介绍了一种新的无推进剂消耗的磁动力技术,并分析了此技术的研究进展和发展趋势。此种推进技术可以缩小深空探测器的规模,降低探测成本,缩短研制周期,对于推动我国太阳系及系外行星探测的进程,帮助人类解决宇宙起源、生命存在、暗能量等重大前瞻性问题的具有一定的意义。虽然该项技术目前成熟度比较低,很多技术难点有待研究,但是该项技术的在深空探测领域的应用前景非常的广阔。

### 参 考 文 献

- [1] Liewer P C, Mewaldt R A, Ayon J A, et al. NASA's interstellar probe mission [C] // Space Technology and



- Applications International Forum. New York: American Institute of Physics, Melville, 2000.
- [2] Czysz P A, Bruno C. Future spacecraft propulsion systems; enabling technologies for space exploration [M]. Berlin: Springer, 2009.
- [3] Borowski S K. Comparison of fusion/antiproton propulsion systems for interplanetary travel [C] // Fusion Energy in Space Propulsion; AIAA Progress in Astronautics and Aeronautics. [S. l.]: AIAA, 1995.
- [4] Gaidos G, Lewis R A, Smith G A, et al. Antiproton-catalyzed microfission/fusion propulsion systems for exploration of the outer solar system and beyond [C] // 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Cleveland, OH: [s. n.], 1998.
- [5] Andrews D, Zubrin R. Magnetic sails and interstellar travel [J]. JBIS, 1988(43): 265 - 272.
- [6] Frisbee R H, Leifer S D. Evaluation of propulsion options for interstellar missions [C] // 34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Cleveland, OH: [s. n.], 1998.
- [7] Winglee R M, Slough J, Ziemba T, et al. Mini-magnetospheric plasma propulsion: tapping the energy of the solar wind for spacecraft propulsion [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2000, 105 (A9): 21067 - 21077.
- [8] Winglee R M, Ziemba T, Euripides P, et al. Computer modeling of the laboratory testing of mini-magnetospheric plasma Propulsion [C] // Proceedings of 27th International Electric Propulsion Conference. Pasadena: [s. n.], 2001.
- [9] Winglee R. Simulation of mini-magnetospheric plasma Propulsion (M2P2) [C] // 39th AIAA IASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit. [S. l.]: AIAA, 2003.
- [10] Yamakawa H. Magneto-plasma sail; an engineering satellite concept and its application for outer planet missions [J]. Acta Astronautica, 2006, 59(8 - 11): 777 - 784.
- [11] Funaki. Laboratory experiment of magnetoplasma sail, part 2: magnetic field inflation [C] // 30th International Electric Propulsion Conference. Florence: [s. n.], 2007.
- [12] Futjita K. Particle simulation of moderate-sized magnetic sails [J]. The Journal of Space Technology and Science, 2004, 20(2): 26 - 31.
- [13] Funaki. Feasibility study of magnetoplasma sail [C] // 29th the International Electric Propulsion Conference. Princeton: Princeton University, 2005.
- [14] Crawford I A. Project icarus: a review of local interstellar medium properties of relevance for space missions to the nearest stars [J]. Acta Astronautica, 2011, 68 (7 - 8): 691 - 699.
- [15] Mankins. Technology readiness levels [J]. Advanced Concepts Office of Space Access and Technology. NASA, 1995.

作者简介:

王伟(1983—),男,高级工程师,主要研究方向:深空探测总体设计技术。

通信地址:上海市闵行区华宁路251号,上海卫星工程研究所(200240)

电话:(021)34054518-6400

E-mail:wweibhu@126.com

## Research Progress on Magnetic Propulsion in Deep Space Exploration

WANG Wei<sup>1,2</sup>, MA Yanhan<sup>1,2</sup>, ZHOU Yiqian<sup>1,2</sup>, FANG Baodong<sup>1,2</sup>

(1. Shanghai Institute of Satellite Engineering, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Deep Space Exploration Technology, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** Deep space exploration plays a significant role in answering some basic scientific questions puzzled human like universe origin and life evolution. However, many key technologies without un-mastered including advanced propulsion technology limit future exploration activities. In this paper, a new magnetic propulsion method without propellant consumption applying to the deep space exploration is described. It creates the thrust by the interaction between the plasma fluid of solar wind and the magnetic field created by the spacecraft itself with carrying a loop of superconducting cable electrifying. Firstly, the domestic and foreign development present situation of magnetic propulsion are summarized. Secondly, the basic principles of magnetic propulsion are explained. Finally, the technology characteristics and potential applications in deep space exploration are analyzed.

**Key words:** deep space exploration; magnetic propulsion; MagSail; no-propellant consumption propulsion

[责任编辑:宋宏]