

# 稳态等离子体电推进技术研究 现状及其关键技术

刘文一<sup>1</sup>, 白文平<sup>2</sup>, 王虹旋<sup>2</sup>

(1 西北工业大学 航天学院, 陕西 西安 710072;

2 中国人民解放军 91550 部队 91 分队, 辽宁 大连 116023)

**摘要:** 研究表明, 稳态等离子体推力器 (SPT) 具有比冲大、效率高、寿命长的优点, 是具有较高性能的先进空间推进系统之一, 已广泛应用于小卫星的姿态控制和轨道保持。概述了 SPT 的系统组成和工作原理, 重点介绍了 SPT 的研究进展、主要性能参数、关键技术及其在潜在应用领域中的性能优势, 指出其关键技术有空心阴极的热设计和结构设计以及弯曲磁场位形的设计。对我国 SPT 研究内容提出了建议。

**关键词:** 火箭发动机; 特种推进系统; 稳态等离子体推力器

**中图分类号:** V434

**文献标识码:** A

**文章编号:** (2007) 04-0036-05

## Development status of stationary plasma thruster and its key technologies

Liu Wenyi<sup>1</sup>, Bai Wenping<sup>2</sup>, Wang Hongxuan<sup>2</sup>

(1 College of Astronautics, Northwestern Polytechnic University, Xi'an, 710072, China;

2 Unit 91 of PLA 91550, Dalian, 116023, China)

**Abstract:** SPT is a kind of advanced space thruster with high specific impulse, high efficiency and long lifetime. It has been widely applied to satellite attitude control and orbit station keeping. The system components and working principle of stationary plasma thruster were briefly introduced. As the emphasis points, the research development, key technologies, performance parameters and advantages of SPT were also indicated. The key technologies of SPT include the thermal structure design of hollow cathode and the design of magnetic field configuration.

**Key words:** rocket engine; special propulsion system; stationary plasma thruster

收稿日期: 2007-01-15; 修回日期: 2007-05-15。

作者简介: 刘文一 (1982—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 研究领域为火箭发动机。

## 1 引言

稳态等离子体推力器 (SPT, Stationary Plasma Thruster) 是电磁式推力器的一种, 它利用电子在电磁场中运动时形成的霍尔效应使得推进工质 (一般是 Xe) 原子电离并使生成的离子在静电场中加速, 从喷管高速喷出后产生推力。SPT 具有比冲高 ( $10\text{kN}\cdot\text{s}/\text{kg}\sim 30\text{kN}\cdot\text{s}/\text{kg}$ )、效率高 (50%~70%)、工作寿命长 (>10kh)、放电电压低等优点, 被认为是一种极具应用前景的电推进技术<sup>[1]</sup>。

## 2 SPT 的系统组成及工作原理

如图 1<sup>[4]</sup>所示, 稳态等离子体推力器 (SPT) 系统由阴极系统、加速通道、磁极、磁线圈、阳极/气体分配器、电源系统、推进剂输送管路及支撑结构等组成。

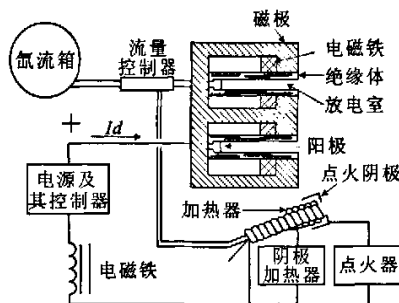


图 1 SPT 的系统组成示意图

Fig.1 Schematic diagram of SPT system compositions

如图 2<sup>[4]</sup>所示, 阴极发射的部分电子进入放电室, 在正交的径向磁场与轴向电场的共同作用下向阳极漂移, 在漂移过程中与从阳极/气体分配器出来的中性推进剂原子 (一般为 Xe) 碰撞, 使得 Xe 原子电离, 由于存在强的径向磁场, 电子被限定在放电通道内沿周向作漂移运动。而离子质量大, 其运动轨迹基本不受磁场影响, 在轴向电场的作用下其沿轴向高速喷出, 从而产生推力。与此同时, 阴极发射出的另一部分电子与轴向喷

出的离子中和, 保持了推力器羽流的宏观电中性。

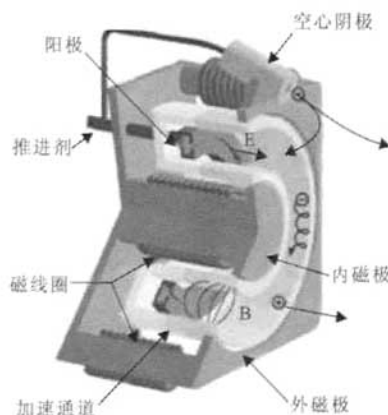


图 2 SPT 结构简图

Fig.2 Configuration figure of SPT

## 3 研究现状

目前, 国外主要有俄罗斯、美国、法国和日本等国家在进行 SPT 相关技术的研究。我国上海动力机械研究所和哈尔滨工业大学等单位正在研究该种电推进技术。

前苏联从 20 世纪 60 年代起开始研制 SPT, 已先后发展了 SPT-25, SPT-30, SPT-50/60, SPT-290 等不同规格。1971 年 12 月 29 日, 首次在流星号 (Meteor-18) 气象卫星上使用 2 台 SPT-60 进行了轨道调整试验。1976 年, SPT 首次应用于 GEO 卫星的东西位置保持和重新定位。随后 1982~2000 年期间, SPT-70 共 19 次应用于 Kosmos, Louch 等系列飞行器中。1994 年, 8 台 SPT-100 被装配在 Gals 卫星上同时用于南北位置保持和东西位置保持。1999 年, 8 台 SPT-70 实现了 Yamal-100 通信卫星从椭圆轨道至 GEO 轨道的转移。在 1994 年到 2000 年间, SPT-100 共 7 次应用于 Gals, Ekspress, Ekspress-A, SESAT 系列卫星上。据不完全统计, 从 1982 到 2001 年间, 大约有 68 台 SPT-70 和 48 台 SPT-100 分别用在 30 多颗气象卫星、资源卫星和通信卫星上, 用于位置保持或轨道转移。据报道, 仅 2004 年

一年,就有30多台SPT在卫星上应用。俄罗斯原定于2005年到2008年开展的“Phobos-Soil”工程也是准备采用3台SPT-140推力器<sup>[2]</sup>。

1992年,美国劳拉空间系统公司(SS/L)与俄罗斯法克尔设计局合作成立了国际空间技术公司(ISTI),旨在向欧洲和美国推广这种推力器。ISTI公司按照西方国家的航天标准,重点对SPT-100推力器进行再开发和测试评价。到2000年,这种推力器完成了多项测评和6kh以上的寿命验证。实验表明,推力器放电室的陶瓷材料被严重刻蚀,但性能仍保持稳定;担心的射流发散问题也不会妨碍SPT的应用。2001年到2002年间,美国共生产了67台飞行样机,其中至少42台已应用于2003年到2004年发射的卫星上<sup>[3]</sup>。美国在引进SPT推力器的基础上,不断发展用于卫星轨道转移主推进的大推力SPT和用于小卫星控制的低功率SPT。例如,Busek公司在为美国空军“21世纪技术卫星”研制的BHT-200稳态等离子体推力器(输入功率200W)做寿命试验。该公司还采用秘作推进剂,发展高功率SPT,比冲为 $30\text{kN}\cdot\text{s/kg}$ ,电效率为65%,输入功率为20kW。Aerojet公司研制的BPT-4000稳态等离子体推力器,有2种工作模式:放电电压为300V时的高推力模式和放电电压为500V时的高比冲模式,其性能指标:推力为168~294mN,比冲为 $18\sim 20\text{kN}\cdot\text{s/kg}$ ,输入功率为3.0~4.5kW<sup>[3]</sup>。

从1992年起,法国斯奈克码公司(Snecma)与俄罗斯法克尔设计局合作,在SPT-70的基础上加以改进,研制了PPS-1350稳态等离子体推力器,2台PPS-1350和2台SPT-100装在2001年12月发射的法国电信卫星上(STENTOR),进行了南北位置保持和偏心率控制任务。2003年9月27日,欧洲航天局发射了其第一颗月球探测器“智慧1号”(SMART-1)。探测器采用法国Snecma公司的PPS-1350型稳态等离子体推力器(推力为70mN)作主推进。探测器从地球赤道上空 $3.6\times 10^4\text{km}$ 高度开始缓慢提升,约花了14个月时间,于2004年11月15日进入近月点为3000km、远月点为10000km的绕月轨道,消耗约58kg氙推进剂(共携带推进剂82kg)<sup>[4]</sup>。

据悉,近几年将有10多颗欧洲商业卫星拟采用这种推力器。为了满足欧洲下一代高功率通信卫星位置保持的要求,现在已发展和试验评价具有比PPS-1350的总冲能力更高的SPT-ROS-2000和PPS-X000,其输入功率分别为1.5~2.5kW和5.0kW。

日本的Osaka大学建立实验室用于研究SPT的加速过程和不稳定现象,并用来评估推力器所引起的羽流污染问题,最终目标是开发高性能的SPT。

## 4 关键技术

### (1) 磁场设计

SPT是以电磁联合工作为基础的,因而合适的磁场是推力器正常工作的关键,从20世纪60年代至今,SPT已经经历的两代的发展历程。第一代SPT由A. I. Morozov发明,其标志是磁场方向沿环形通道径向以及磁场强度沿通道轴向的分布满足正梯度要求。到了20世纪90年代,A. I. Morozov和A. I. Bugrova研制成功第二代SPT,称为SPT-ATON,其特点为:ATON将推力器中心磁铁分为两部分设计,降低了放电通道前部的磁场强度(形成靠近阳极的零磁场区),使得磁场向通道后部聚集(形成出口处的大梯度磁场区)。实验结果表明,羽流束发散角由SPT的 $\pm 35^\circ$ 降低到ATON的小于 $\pm 10^\circ$ 同时ATON推力器在比冲等主要性能指标上也有所提升<sup>[6,7]</sup>。

ATON属于新一代推力器,目前尚未有国外空间应用的报道。至今其研究成果大多是实验性质的,关于其工作机理有待进一步深入研究。

### (2) 阴极技术

SPT工作是以阴极工作为前提的,阴极负责SPT的点火、工作过程中放电通道内部电子的补充及羽流区中和。高效、可靠工作的阴极是SPT稳定放电的基础。阴极的工作寿命和循环次数也是SPT寿命和点火次数的一大制约因素。目前SPT中使用得较多的是金属陶瓷阴极中的钨钨阴极、六硼化钨阴极和氧化物阴极等<sup>[9]</sup>。三种阴极中,美国使用的主要是钨钨阴极,目前它们的钨

钨空心阴极技术已趋成熟,工作寿命一般均超过一万小时。如 NASA 研制的空间站等离子体接触器用钨钨空心阴极,发射电流 12A 时寿命达到 27kh,循环次数超过 32000 次。欧洲(如德国)也有使用氧化物阴极的。俄罗斯使用的多是六硼化镧阴极,其性能在 SPT 的长期实验和应用过程中久经考验。目前已开发了一系列大小和功率不同的六硼化镧空心阴极,可满足 SPT-20~SPT-290 等各种功率 SPT 的需要。国内早期上海动力机械研究所针对 SPT 的需要开展过氧化物、钨钨和六硼化镧三种空心阴极的研制。

空心阴极的长寿命技术国外已获得突破,目前的难点是阴极寿命的快速试验与预估。影响阴极寿命的因素众多,情况复杂,尤其是发射体的制备工艺与环境因素对阴极的性能和寿命影响巨大。而这些因素的影响大多是非直观的,往往到阴极寿命末期才体现出来。目前的做法是开展长期寿命试验,但数千至上万小时的持续试验往往需要耗费大量的资源。采取新的快速可靠寿命试验与预估方法迫在眉睫。

### (3) 放电稳定技术

SPT 工作时存在较强烈的电流和电压振荡,该振荡主要是由于推力器内部电离振荡与等离子体参数紊乱造成的。关于 SPT 的放电不稳定现象,国内外开展了大量的研究工作,包括理论、实验和数值模拟。如 Bugrova 对 SPT 中各种频率范围的振荡进行了系统论述,指出频率从低到高主要有电离振荡、轴向等离子体输运振荡、电子周向漂移振荡、电子回旋振荡和 Langmuir 振荡等;Choueiri 针对推力器中 1kHz~60MHz 范围内的振荡进行了理论研究,分析了该范围内各型振荡的特征、产生根源及传播方式;Kimiya 和 Darnon F. 等人分别用光学诊断方法和高速摄像机对推力器中的放电振荡主要是低频振荡进行了实验研究;数值研究方面使用得最多的是混合模拟方法,如 Boeuf、Lentz 和 Fife 等人用混合模拟方法对 SPT 低频放电振荡现象均进行了较好的复现;此外混合-PIC 方法也是 SPT 放电振荡常用的数值研究手段<sup>[9]</sup>。

### (4) SPT 的寿命及预估

SPT 的寿命决定了推力器所能获得的最大总冲,及能否完成给定的空间推进任务。决定 SPT 寿命的主要有两个因素:加速器寿命和空心阴极寿命。

加速器寿命主要取决于两方面因素:离子对放电室壁的溅射及放电室壁材料的抗离子溅射能力。合理的磁场结构可以提高离子的聚焦性能,减小离子束的发散角和对壁的溅射;采取溅射率低的推力器工况和放电室结构有助于提高加速器寿命;适当将电离区和加速区外移也可以减少离子对放电室壁的溅射。关于耐溅射放电室壁材料国外开展了大量研究,包括  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、BN、 $\text{SiO}_2$ 、MgO 等及它们的混合物。研究表明综合性能最佳的是 BN 陶瓷材料,采用目前已知的其他各型材料时要么推力器的性能下降,要么放电室壁的溅射削蚀增加。目前采用 BN 陶瓷材料的 SPT 加速器寿命:SPT-70 略小为 4~5 kh<sup>[10]</sup>,SPT-100 已达 6~8kh。然而进一步提高 BN 材料加速器的寿命已十分困难。

### (5) SPT 羽流与航天器的相互作用效应

SPT 应用存在一个推力器羽流与航天器的相互作用效应的问题。SPT 的羽流束发散角较大,且大部分为等离子体,与航天器发生作用时将产生多种不利影响,包括力矩干扰、溅射与沉积污染、表面电位及电磁通讯影响等。航天器羽流效应研究是一项复杂的工程,涉及多个课题和领域,包括羽流场形成分布规律研究、羽流场与航天器的相互作用研究及前述作用对航天器产生的影响效应研究,三方面缺一不可。在 SPT 羽流的几个主要影响效应中,溅射沉积污染与力矩干扰占主导支配地位,关于其研究,除了进行各种地面和空间试验外,在理论研究方面国际上也开展了大量工作。

## 5 结束语

四十多年的成功应用经验表明,SPT 电推进是一种先进的空间推进技术,可以完成航天器的多种在轨任务,其比冲远远高于传统化学推进,应用于航天器上它能大幅降低航天器携带的推进

剂质量,增加航天器的有效载荷,或延长航天器的在轨寿命,从而大量节约成本,产生可观的经济效益。相对其它类型电推进而言,SPT具有结构和配电系统比较简单、推力密度高、功率推力比小、技术成熟度高、飞行应用经验丰富、空间适应性好等特点。

针对目前国内电推进研究仍处于基础研究和总体设计研究的发展现状,应充分利用国际电推进技术迅猛发展的良好时机,重点发展国外成熟应用、国内基础较好的SPT技术,加快系统集成和飞行试验研究步伐,建议在以下几个关键方面深入研究:

(1) 推力器的结构,如:加速腔的几何结构,尺寸,材料物性和阳极的类型;

(2) 磁场在加速腔内外的大小和分布;

(3) 推力器的工作点,如:放电电压、阳极和阴极工质的质量流率、磁路线圈的电流大小和匹配关系;

(4) 推力器的供电,如SPT和PPU之间的电路和参数,滤波器的类型和参数选择;

(5) 阴极类型及其工作模式和发射特性,阴极与推力器本体的相对安装位置与角度;

(6) 推力器的工作过程,如放电通道表面微观结构及宏观几何形状随工作时间的改变,加速器部件的污染程度等。

#### 参考文献:

- [1] 康小录,汪兆凌,汪南豪.稳态等离子体推力器低功率工作模式实验研究[J].推进技术,2001,22(4):326.
- [2] 毛根旺.GSO卫星先进推进系统的现状与发展[J].推进技术,1999,20(1):106.
- [3] Gascon N, Dudeck M, Barral S. Wall material effects in stationary plasma thrusters.I. Parametric studies of an SPT-100[J]. Physics OF Plasmas, 2003, 10(10): 4124.
- [4] 吴汉基,周顺林,蒋远大.走向国际化的静态等离子体推力器[J].中国航天,1998,(4):29~31.
- [5] Morozov A I, Esipchuk Y V, Tilinin G N, et al. Plasma accelerator with closed electron drift and extended acceleration zone [J]. Soviet Physics-Technical Physics, 1972, 17(1):38~45.
- [6] Morizov A I, Esipchuk Y V, Kapulkin A M, et al. Effect of the magnetic field on a closed-electronic-drift accelerator[J]. Soviet Physics-Technical Physics, 1972, 17(3): 612~619.
- [7] 于达仁,武志文, Bugrova A I, 等. 稳态等离子体发动机磁场设计的发展及其展望 [J]. 中国工程科学, 2005, 7(4): 22~24.
- [8] Kozubskii K N, Murashko V M, Rylov Yu P, et al. Stationary Plasma Thrusters Operate in Space [J]. Plasma Physics Reports, 2003, 29(3): 251~266.
- [9] 陈琳英,宋仁旺,邱家稳.离子推进技术及其发展状况[J].火箭推进,2005,31(4):30~35.

(编辑:侯早)

## 简讯

### 等离子体火箭发动机达成首个商业应用协议

可变比冲磁等离子体火箭(VASIMR)发动机是一种高能高比冲的等离子体火箭发动机,Ad Astra公司目前正在开展相关研发工作以满足太阳能和核电太空推进系统的需求。

VASIMR概念一直得到NASA前宇航员张福林(Franklin Chang Diaz)的支持,张福林现任美国Ad Astra火箭公司的CEO。Ad Astra火箭公司与英国Excalibur探索有限公司签署了首个VASIMR商业应用协议。据此协议,Excalibur公司拥有优先取舍权,获取VASIMR发动机用于太空资源的回收。此外,该协议还将为一项Excalibur公司投资的为期6个月的研究做准备,以支持利用VASIMR发动机进行概念化小行星任务的研发。

(摘自www.spacechina.com)