

霍尔电推进空间应用现状及未来展望^{*}

杭观荣^{1,2}, 李诗凝^{1,2}, 康小录^{1,2}, 金逸舟^{1,2}, 孙雯熙^{1,2}

(1. 上海空间推进研究所, 上海 201112;
2. 上海空间发动机工程技术研究中心, 上海 201112)

摘要: 对霍尔电推进的空间应用现状进行综述, 并对其未来发展趋势进行展望。针对我国霍尔电推进在原始创新、研发效率、产品成熟度、在轨应用等方面与国外存在的差距, 提出加强需求分析和任务牵引、加强工作机理研究、加快产品迭代、加强天地差异研究、加快生产线建设等发展建议, 以更好地推动发展。

关键词: 航天器; 空间电推进; 霍尔电推进; 霍尔推力器; 高比冲; 空间应用; 综述

中图分类号: V439⁺.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4055 (2023) 06-2209006-14

DOI: 10.13675/j.cnki. tjjs. 2209006

Current Space Application Status and Future Prospect of Hall Electric Propulsion

HANG Guan-rong^{1,2}, LI Shi-ning^{1,2}, KANG Xiao-lu^{1,2}, JIN Yi-zhou^{1,2}, SUN Wen-xi^{1,2}

(1. Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China;
2. Shanghai Engineering Research Center of Space Engine, Shanghai 201112, China)

Abstract: The current status of space applications of Hall electric propulsion is reviewed, and then its future development trend is prospected. In view of the gap between China and foreign countries in terms of original innovation, R&D efficiency, product maturity and on-orbit application, this paper puts forward some development suggestions, such as strengthening demand analysis and task traction, strengthening work mechanism research, accelerating product iteration, strengthening the study of differences between work in space and work on the ground, and accelerating production line construction, so as to better promote development.

Key words: Spacecraft; In-space electric propulsion; Hall electric propulsion; Hall thruster; High specific impulse; Space application; Review

1 引言

霍尔电推进具有推力密度大、推力功率比高、系统简单可靠、效率高、功率覆盖范围宽、比冲接近于许多典型任务的最佳比冲^[1]、可使用多种推进剂等特点, 成为国际上应用最广泛的电推进技术。霍尔电推进利用电子在正交电磁场中的闭合漂移(即霍尔

漂移)来撞击、电离推进剂, 形成离子, 并利用轴向静电场来加速离子, 使其高速喷出, 产生推力。前苏联和美国在 20 世纪 50~60 年代起独立开展霍尔电推进技术研究。前苏联率先获得突破, 形成了放电区在放电室出口处径向磁场最强处的稳态等离子体推力器 (Stationary Plasma Thruster, SPT) (也称为磁层推力器)、放电区在阳极表面的阳极层推力器 (Thruster

^{*} 收稿日期: 2022-08-31; 修订日期: 2022-11-02。

基金项目: 国家自然科学基金重点支持项目 (U22B20130)。

通讯作者: 杭观荣, 博士, 研究员, 研究领域为电推进技术。E-mail: hanggr@163.com

引用格式: 杭观荣, 李诗凝, 康小录, 等. 霍尔电推进空间应用现状及未来展望[J]. 推进技术, 2023, 44(6): 2209006.
(HANG Guan-rong, LI Shi-ning, KANG Xiao-lu, et al. Current Space Application Status and Future Prospect of Hall Electric Propulsion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2023, 44(6): 2209006.)

with Anode Layer, TAL)两条主要技术路线^[2],两者都开展了空间验证,但空间应用以SPT为主。霍尔推力器于70年代在低轨卫星上开展了多次空间飞行验证^[3],于1994年实现了正式商业应用。前苏联解体后,美、法等引进霍尔推力器并实现国产化。本文将霍尔电推进按功率分为微功率($\leq 100\text{W}$)、小功率($100\sim 500\text{W}$)、中功率($0.5\sim 10\text{kW}$)、大功率($10\sim 100\text{kW}$)、超大功率($> 100\text{kW}$)。中小功率霍尔电推进已应用在卫星、深空探测、载人航天、在轨服务等领域。以色列^[4]、日本^[5]、印度^[6]、韩国^[7]、土耳其^[8]、新加坡^[9]等也在大力开展霍尔电推进研究和应用。我国于1994年开始霍尔电推进技术研究,2005年研制出首套霍尔电推进系统样机,2012~2013年完成国内首次霍尔电推进在轨飞行验证,成为第四个掌握霍尔电推进技术的国家。目前我国中小功率霍尔电推进已全面进入应用阶段,装备在天和核心舱、高轨卫星、低轨卫星上。

本文对霍尔电推进在高轨、中低轨、深空探测、载人航天、在轨服务和空间科学等领域的应用现状进行综述,对未来发展趋势进行分析,针对我国霍尔电推进的发展现状和存在的问题,提出发展建议。

2 霍尔电推进空间应用现状

2.1 总体情况

霍尔电推进系统的最主要作用是为航天器提供轨道转移、位置保持、大气阻力补偿等所需的动力。同时,霍尔推力器作为一种等离子体源,也被应用在人工等离子体空间实验中。

随着技术的逐渐成熟,霍尔电推进应用领域从最初的GEO(Geostationary Earth Orbit,地球静止轨道)卫星,拓展到深空探测器,中轨(Medium Earth Orbit, MEO)、低轨(Low Earth Orbit, LEO)卫星及其星座,超低轨(Very Low Earth Orbit, VLEO)航天器,载人航天,在轨维护等领域。霍尔电推进的应用,大幅提升了航天器的推进剂利用效率,使航天器可以获得更高的有效载荷承载能力,更长的寿命,更远的飞行距离,更小的扰动力^[10],更强的应急能力。

据统计,截至2022年7月,霍尔推力器已装备144颗GEO卫星、3334颗LEO卫星、1艘载人航天器、1颗深空探测器和2颗在轨服务卫星,累计数量4066台,推力器功率覆盖 $5\text{W}\sim 5\text{kW}$ 。表1为国际上主要的霍尔推力器及其性能^[11-16]。图1为俄、美、欧研制的 5kW 级霍尔推力器。表2给出了典型任务采用霍尔电推进情况。

下面结合不同领域的应用需求和典型应用案例,对霍尔电推进的空间应用现状进行表述。由于空间任务计划周期较长,对已明确但尚未发射的任务也一并表述。

2.2 高轨领域

高轨通常指轨道高度在 30000km 以上的轨道^[17]。高轨航天器通常指运行在GEO轨道上的航天器,如GEO卫星、空间太阳能电站。

GEO卫星是最早正式应用霍尔电推进的航天器,主要原因是:(1)GEO卫星发射成本高,全寿命周期速度增量 Δv 大,推进剂需求量大且对推进剂装载量敏感;(2)GEO卫星推进任务类型和速度增量 Δv 较为固

Table 1 Main Hall thrusters for space applications and their performance

Country	Organization	Hall thruster	Power/W	Thrust/mN	I_{sp}/s	Life/h	Total Impulse/ (MN·s)	Status
Russia	EDB Fakel	SPT-50M	225~300	14.8~18	930~1299	5000	0.324	FM*
		SPT-70	670	39	1470	3100	0.435	FM
		SPT-70M	600~1000	36~59	1430~1600	7000	1.49	EM**
		SPT-100B	1350	83	1540	9000	2.69	FM
		SPT-140D	4500	290	1750	15000	15.7	FM
USA	Busek	BHT-200	200	13	1390	3000	0.14	FM
	Aerojet	XR-5 (BPT-4000)	2000~4500	132~290	1676~2020	10400	8.7	FM
	GRC, JPL	HERMeS	6250~12500	310~680	1840~2950	50000	104	FM
France	Safran	PPS 1350-G	1500	89	1650	10500	2.23	FM
		PPS 5000	2500~5000	150~300	1730~2000	15000	15	FM
China	Shanghai Institute of Space Propulsion	HET-20	350	20	1200	2500	0.18	FM
		HET-40	660	40	1500	3000	0.5	FM
		HET-80	1350	80	1600	9240	2.6	FM
		HET-300M	2300~5000	120~320	1850~2350	15000	16.2	FM

FM*: Flight model EM**: Engineering model

定,快速变轨需求小,推进系统可以小推力长时工作的方式实现所需速度增量;(3)姿态稳定度要求高,霍尔电推进推力较小,有利于确保卫星姿态和载荷工作效果;(4)GEO 卫星以通信卫星为主,这些卫星

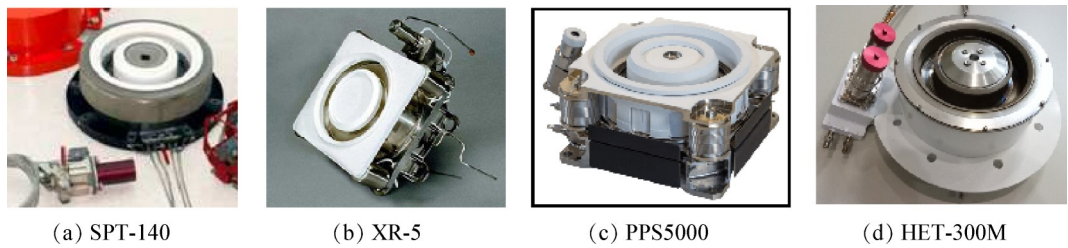


Fig. 1 5kW class Hall thrusters of Russia, USA, France and China

Table 2 Typical spacecraft employing Hall electric propulsion system

Application domain	Build nation	Platform/Spacecraft	Thruster	First launch year
GEO (Station keeping)	USSR / Russia	KAUR-3 bus	4×SPT-70	1982
		KAUR-4 bus	4×SPT-70	1985
		USP bus	8×SPT-70	1999
		MSS-2500-GSO bus	8×SPT-100	1994
	USA	SSL-1300 bus	4×SPT-100	2004
	France	Spacebus 4000C3 bus	4×SPT-100	2005
		Eurostar 3000 bus	4×SPT-100	2004
		@bus bus	4×PPS1350	2013
	Germany	SmallGEO bus	8×SPT-100 or HEMPT	2017
GEO (Partial orbit transfer and station keeping)	USA	A2100M bus	4×XR-5	2010
		GEOSTar-3 bus	4×XR-5	2018
		SSL-1300 bus	4×SPT-140	—
GEO (All electric propulsion)	Russia	Express-2000 bus	8×SPT-100	2013
	USA	GEOSTar-3 bus (All electric version)	4×XR-5	—
	France	Eurostar 3000 EOR bus	4×SPT-140	2017
		Eurostar NEO bus	4×PPS5000	2023 (Plan)
		Spacebus NEO bus	4×PPS5000	2020
	Germany	Electra bus	4×PPS5000	2023 (Plan)
LEO	USSR	Meteor 18	SPT-50	1971
		Cosmos-1818	6×SPT-70	1987
	Russia	Kanopus-V	2×SPT-50	2012
		EgyptSat 2	6×SPT-70	2014
	USA	STEX	1×D-55	1998
		TacSat-2	1×BHT-200	2006
		Starlink	1×Kr Hall thruster	2019
		OneWeb	1×SPT-50M	2019
	France/Israel	VENμS	2×IHET-300	2017
	China	SJ-9A	1×HET-40	2012
		KL-Beta A, B	1×HET-20	2021
VLEO	USA	X-37B OTV-4	XR-5A	2015
		Stingray	HET-X	2023 (Plan)
MEO	Europe	Galileo-2	PPS5000	2024 (Plan)
Deep space	Sweden	SMART-1	1×PPS1350-G	2003
	USA	Psyche	4×SPT-140D	2022 (Plan)
Manned Spaceflight	China	Tianhe-1	4×HET-80	2021
	USA	PPE	2×AEPS, 4×BHT-6000	2024 (Plan)

功率较大,能够支撑霍尔电推进所需的较大功率。

GEO卫星对霍尔电推进的需求主要是长寿命、多模式和中大功率,执行任务类型主要是发射后的轨道转移、在轨位保、姿控和寿命末期的离轨。对于寿命15年的GEO卫星,这四种任务的速度增量分别约为 3000m/s ^[18](小推力变轨导致速度增量较霍曼转移所需的约 $1800\sim 2000\text{m/s}$ 速度增量有所增大), 745m/s (其中南北位保 700m/s ,东西位保约 45m/s), 10m/s 和 9m/s 。在这四类任务中,发射后轨道转移、寿命末期离轨时,GEO卫星载荷不工作,卫星大部分电能可供应给霍尔电推进系统,同时,轨道转移一般需要能尽量缩短时间,要求霍尔电推进工作在大功率、大推力的模式;而在轨位保和姿控任务时,GEO卫星载荷工作,可提供给霍尔电推进系统的电能较少,此时要求尽量能减少推进剂应用,以延长卫星寿命,因此要求霍尔电推进工作在小功率、高比冲的模式。这两种典型工作模式,要求霍尔电推进具有功率、推力、比冲在一定范围内可调的多模式工作能力。

早期霍尔电推进在前苏联/俄罗斯GEO卫星上应用时,由于其运载火箭可直接将卫星送入GEO轨道,霍尔电推进只需执行在轨位保等较单一的任务,对多模式工作的需求不强烈;同时受限于技术发展,霍尔电推进最初以单一工作模式状态应用。这一阶段,典型的霍尔推力器包括SPT-70,SPT-100,推力器寿命约 $3000\sim 9000\text{h}$,总冲约 $0.4\sim 2.7\text{MN}\cdot\text{s}$ 。1982年,SPT-70霍尔推力器首次应用在前苏联GEO卫星上,执行在轨东西位保任务^[19]。1994年,SPT-100霍尔推力器首次应用在俄罗斯GEO卫星在轨位保任务中^[20]。美、欧引进俄罗斯SPT-100霍尔推力器后,将其应用在GEO卫星南北位置保持任务中,并研发出自主产权的霍尔推力器。

20世纪90年代末,美、欧由于GEO卫星发射程序与俄罗斯不同(先发射到转移轨道,再依靠卫星远地点发动机将卫星送入GEO轨道),希望霍尔电推进能进一步用于GEO卫星轨道转移任务,多模式霍尔电推进需求凸显。俄、美、欧均在21世纪初攻克了多模式霍尔电推进技术,形成了SPT-140,BPT-4000(后改名为XR-5),PPS1350-G,PPS5000等中功率霍尔推力器,应用在多种化电混合推进和全电推进GEO平台上^[21-26]。 5kW 级多模式霍尔推力器的寿命达到 10000h 以上,总冲达到约 $8\sim 16\text{MN}\cdot\text{s}$,这与GEO卫星采用的化学双组元远地点发动机的总冲在一个量级上^[27-29]。

多模式霍尔电推进的应用显著提升了航天器有效载荷承载能力和应急能力,下面以美国A2100M平台的首发星AEHF-1的拯救过程^[30]为例进行说明。A2100M平台由A2100平台演化而来,原有执行在轨位保的MR-510电弧加热推进系统升级为执行部分轨道转移、在轨位保的BPT-4000多模式霍尔电推进系统。采用霍尔电推进系统后,相对于全化学推进方案,该星节省了 907kg 以上的推进剂^[31]。该星于2010年8月14日发射,星箭分离后,其远地点发动机可能因上游氧化剂管路被多余物堵塞而未能正常工作^[32],原本要执行小部分变轨任务的霍尔电推进,最终执行了大部分的变轨任务,拯救了卫星。由于霍尔电推进的出色表现,该卫星进入工作轨道后,14年的寿命保持不变^[33-34]。这次拯救行动,体现了多模式霍尔电推进工作灵活的优势,增强了卫星的应急能力,直接促使了全电推进GEO卫星概念的产生。

2017年6月2日,基于Eurostar 3000 EOR平台的全电推进卫星Eutelsat 172B发射。该星质量 3500kg ,功率 13kW ,寿命15年。4台SPT-140D推力器安装在两个 3m 长的机械臂矢量调节机构上(图2)。该星在星箭分离后,进行了约4个月的电推进轨道提升,实现定点。

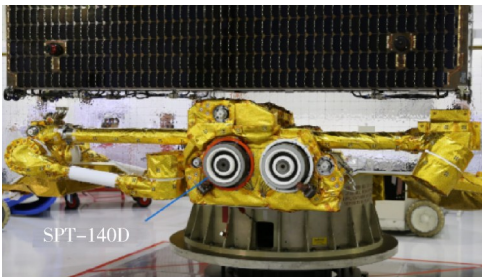
PPS5000作为目前在轨功率最大的霍尔推力器,应用于美、欧多款全电推进卫星。2019年5月,法国赛风公司向美国波音公司交付PPS5000多模式霍尔推力器,以用于波音公司的新一代全电推进卫星^[35]。截至2022年1月,各公司已订购了88台PPS5000推力器^[36]。

日本将在研的首颗 5t 量级的全电推进卫星ETS-9,采用4台SPT-140推力器,并将搭载验证自研的 6kW 级霍尔推力器^[37]。该推力器采用中置阴极布局,功率 $4\sim 6\text{kW}$,总冲约 $5\text{MN}\cdot\text{s}$,寿命初期额定推力 359mN ,比冲 1710s 。

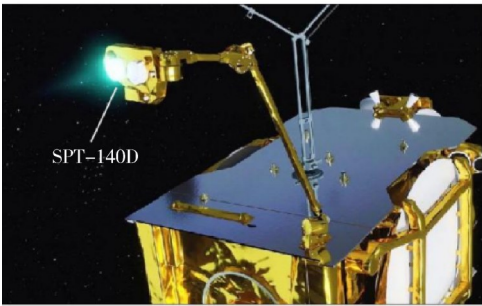
我国中功率霍尔推力器在GEO卫星上实现了验证和应用。2016年11月,两款千瓦级霍尔推力器,北京控制工程研究所和哈尔滨工业大学联合研制的HEP-100MF、兰州空间技术物理研究所LHT-100,搭载实践十七号GEO卫星发射入轨,完成了在轨试验。2017年7月,两款 5kW 级多模式霍尔推力器,上海空间推进研究所研制的磁屏蔽HET-300M,北京控制工程研究所研制的HEP-140MF搭载实践十八号GEO卫星发射,由于火箭失利,未能在轨验证^[38]。2018年9月,HET-300M和HEP-140MF随某全电推进卫星平

台完成了整星点火联试,是我国全电推进卫星发展的关键里程碑。目前,亚千瓦级 HET-40 霍尔推力器已应用于 GEO 卫星。

正在研发、预计 2040 年可投入商业应用的空间太阳能电站^[39-40],是一种运行在 GEO 轨道上的大型航天器,功率达到数百千瓦至百兆瓦量级,质量达到上百吨至上万吨,寿命长达数十年,其质量和寿命远高于现有航天器,必须采用高比冲、大推力的电推进作为主动力^[41],大功率霍尔电推进具有较大的综合优势。



(a) Being mounted on a satellite before launch



(b) On-orbit firing

Fig. 2 SPT-140D thrusters on Eutelsat 172B

2.3 中低轨领域

低轨是指高度在 2000km 以下的轨道。低轨航天器主要包括低轨卫星、超低轨卫星、轨道飞行器、载人飞船和空间站等。霍尔电推进在载人飞船和空间站等载人航天领域的应用将在后文论述。中轨是指高度介于低轨和高轨之间的轨道,运行在中轨上的航天器数量较少。超低轨一般是指高度 300km 以下的低轨^[42],是最近大力开发的轨道,本文对霍尔电推进在超低轨上的应用从低轨中分离,单独论述。

2.3.1 低轨领域

对于低轨卫星,霍尔电推进主要执行轨道提升、轨道控制、寿命末期离轨等任务。

霍尔电推进最初的空间验证就是在低轨卫星上开展的。1971 年 12 月 29 日,首套霍尔电推进系统 ÉOL-1(图 3)随前苏联 Meteor 18 气象卫星发射升空,在轨完成了短时间点火、推力测量、长时间点火三阶

段的试验^[43]。该系统功率 420~440W,放电电压 170~188V,推力 16~19mN,比冲 790~980s。在 1974~1981 年,前苏联又在 Meteor 和 Meteor-Priroda 系列卫星上开展了 5 次霍尔电推进低轨飞行试验,采用了 SPT-50 和 SPT-60 推力器^[44]。1974~1976 年,通过 2 次试验解决了霍尔推力器在轨工作的基础性问题。1977~1981 年,主要开展霍尔电推进执行轨道转移的优化试验。经过这些试验,前苏联基本攻克了霍尔电推进空间应用的难题。1987 年、1988 年,前苏联发射了两颗由 TOPAZ 核反应堆供电、由 6 台 SPT-70 霍尔推力器提供动力的核电推进卫星 Cosmos-1818, Cosmos-1867,电推进系统与核电系统显示出良好的兼容性^[45]。图 4 为这两颗卫星及其采用的霍尔电推进系统。

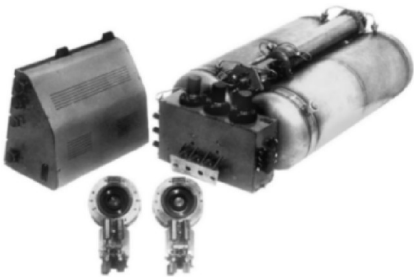
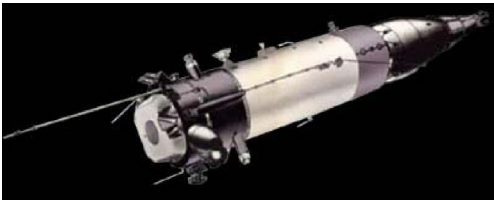
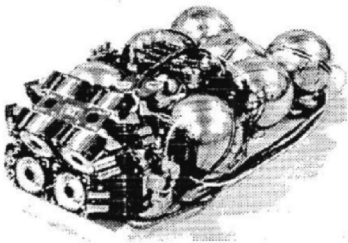


Fig. 3 The first on-orbit demonstrated Hall electric propulsion system ÉOL-1



(a) Satellite



(b) Hall electric propulsion system

Fig. 4 Hall electric propulsion system of Cosmos-1818 and Cosmos-1867 nuclear satellites

1998 年美国在 STEX 卫星上,利用引进的俄罗斯 D-55 阳极层推力器开展了首次霍尔电推进空间飞行,完成了轨道转移和在轨位保实验。D-55 额定功率 1.35kW,受制于星上功率,在轨工作时降至 600W,

对应推力38mN,比冲1550s^[46]。2006年,美国在TacSat-2卫星上首次实现了自研BHT-200小功率霍尔推力器的空间应用^[47],该推力器还应用于FalconSat-5, FalconSat-6卫星^[48]。

近年来低轨星座发展迅猛,卫星速度增量一般在每秒数百米^[49]。庞大的卫星数量意味着巨大的投资,采用比冲较高、简单可靠的霍尔电推进执行轨道转移任务成为大多数星座的首选。一网公司的低轨星座卫星采用了氙气推进剂SPT-50M小功率霍尔推力器,执行从发射后450km高度轨道到1200km工作轨道的轨道转移等任务。太空探索技术公司的星链星座则在国际上率先采用了氮推进剂霍尔推力器。

虽然采用氮推进剂相对于采用氙推进剂,霍尔推力器效率有所降低,但相同质量的氮推进剂价格仅是氙推进剂的1/10~1/6左右,因此采用氮推进剂的星链星座相对于其他采用氙推进剂的低轨星座,具有明显的推进剂成本优势。2021年1月-2022年7月,由于市场供需失衡、俄乌冲突等因素,氮、氙等稀有气体价格分别上涨了约8.5倍和5倍^[50]。推进剂的价格上涨,促使业内对采用碘、镁等新型低成本推进剂的霍尔电推进开展技术攻关^[51-53]。

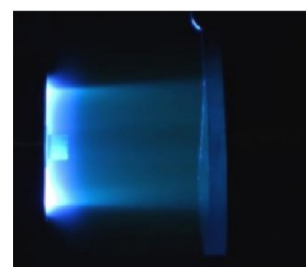
法国Exotrail公司研制的质量不足100g的ExoMG微型霍尔推力器^[54-55],成功使2020年11月发射的6U立方星R2的轨道半长轴改变了700m。这是霍尔推力器首次用于100kg以下的卫星^[56]。

新加坡南洋理工大学研制的HMT微牛级霍尔推力器(图5)于2019年随我国太极一号卫星发射,演示无拖曳控制任务。该推力器以冷气喷射和等离子体喷射模式工作,推力范围分别为0.1~150 μ N和5~100 μ N,在轨推力分辨率0.7 μ N,噪声小于0.6 μ N/Hz^{1/2}(0.01~0.1Hz)^[57]。推力器功率约5W,采用无阴极构型,羽流中和由内置的低逸出功材料释放的电子实现^[58]。该推力器刷新了霍尔推力器在轨应用的功率下限、推力下限和推力调节比。

我国首套霍尔电推进系统作为卫星核心实验系统之一,于2012年10月14日随实践九号A卫星发射升空^[59]。该霍尔电推进系统由上海空间推进研究所研制,采用1台660W功率的HET-40霍尔推力器,系统干重28.4kg,额定功率800W,推进剂1.5kg。电推进系统在11月7日开展首次点火并完成了系统参数优化,在9日进行性能参数测试,在轨推力38.32mN,相应比冲1495s,推力器功率621W,系统功率741.3W。至2013年12月16日,系统在轨累计点火达到200次,圆满完成预定在轨任务。本次在轨试验的



(a) Operating with synthesis gas



(b) Operating with Xe

Fig. 5 HMT Micro Hall thruster of Taiji-1 satellite

圆满完成,使我国电推进从预研阶段转入工程应用阶段。

我国在2020年、2021年发射的银河航天首发星、多媒体贝塔试验A/B星分别采用了北京控制工程研究所、上海空间推进研究所研制的15mN、20mN推力的小功率霍尔推力器,多个在研的低轨星座也大都采用霍尔电推进系统。

2.3.2 中轨领域

中轨航天器对霍尔电推进的需求同低轨航天器。2022年初,计划2024年末开始发射的欧洲第二代伽利略导航卫星明确选用PPS5000霍尔推力器作为动力^[60],成为首款采用霍尔电推进的中轨道航天器。该卫星质量约2.3t,寿命15年,轨道高度约为23222km^[61]。

2.3.3 超低轨领域

由于在超低轨上,大气阻力和地球非球形摄动相对于更高轨道显著增大,加上大气密度随昼夜、季节、太阳活动变化剧烈,超低轨卫星受到的气动力要比传统低轨卫星高出两到三个数量级^[62]。若不进行轨道维持,卫星轨道会迅速衰减。根据文献[42]分析,200km高度轨道上,50d时间的轨道维持速度增量就达到1.271km/s,采用比冲300s的化学推进进行轨道维持,相应时间内推进剂消耗量占到卫星初始质量的34.6%。可见,化学推进轨道维持的推进剂消耗非常快,导致卫星难以长时间在轨。高比冲电推进的应用,使超低轨卫星长期在轨成为现实。

超低轨卫星具有很好的经济效益和工程应用价

值,主要体现在:(1)对于相同的通信载荷,在超低轨上时功率更小;(2)对于相同的遥感载荷,在超低轨上遥感分辨率更高;(3)发射成本低;(4)寿命末期依靠大气阻力快速离轨而不会产生太空垃圾等。超低轨航天器的轨道维持对霍尔电推进提出了大总冲、长寿命的需求。对于要求实时补偿大气阻力的重力梯度卫星等的无拖曳任务,进一步提出了宽范围、快响应、高精度调节的需求。

国外在成功进行利用电推进进行实时阻力补偿的欧洲 GOCE^[63]、日本 SLATS 任务的基础上,提出并正在研制多种超低轨卫星星座。

美国地球观察者公司(Earth Observant Inc.)正在美国空军支持下,研制 Stingray 超低轨光学遥感卫星(图6)及其星座,轨道高度约250km,计划2023年发射^[64]。卫星质量181kg,寿命5年,速度增量>2km/s,采用自研的 HET-X 霍尔推力器进行大气阻力补偿^[65]。HET-X 可采用氙气推进剂,也可采用新型的无需高压贮存的低成本推进剂^[66],采用中置阴极布局,在地面测试时,功率0.35~2.5kW,推力20~140mN,比冲1300~2200s^[67]。



Fig. 6 Stingray VLEO satellite concept

美国 Skeyeon 公司也提出了采用霍尔推力器等电推进器的超低轨卫星方案^[68]。

2015年,5kW级XR-5A霍尔推力器搭载在第四艘X-37B轨道飞行器上,在轨进行了空间环境适应性研究,以为改进推力器性能提供依据。X-37B运行在覆盖超低轨的241~805km轨道上,需要大范围机动,采用霍尔推力器有利于减少推进剂使用量,提升X-37B的在轨时间、操作灵活性和生存能力^[69]。

我国开展了电推进超低轨卫星的研究,但尚未开展在轨试验^[70]。

2.4 深空探测领域

霍尔电推进在深空探测领域主要执行深空探测器主推进任务。深空探测任务具有速度增量、功率变化大、环境恶劣等特点,对霍尔电推进提出了大总冲、长寿命、宽调节、高效率、高可靠等需求。

21世纪初,俄罗斯针对福布斯-土壤火星探测器,提出了基于SPT-100和SPT-140多模式霍尔推力器的电推进系统方案。该任务的速度增量3km/s,总冲约7MN·s,推力器工作时间超过10000h。该方案虽未正式实施,但指出了电推力器羽流长时间对深空探测器结构、设备、通信等的影响问题。

欧洲智慧一号(SMART-1)月球探测器是首颗采用霍尔电推进的深空探测器,也是欧洲第一次霍尔电推进在轨验证任务^[71]。该探测器于2003年9月27日发射,质量370kg,采用1台千瓦级PPS1350-G多模式霍尔推力器^[72]执行主推进和动量卸载任务,推进剂与探测器的质量比仅为22%。霍尔电推进系统先后完成了提升轨道、脱离地球轨道、进入地月转移轨道、进入月球轨道以及降低绕月轨道的任务,推力器放电功率462~1190W,平均推力9.1~65.7mN,平均比冲1540s,累计工作4958.3h,总冲1.2MN·s,提供了3.7km/s的速度增量。由于霍尔电推进系统的优异表现,智慧一号寿命延长1年,科学观测周期达到原计划的3倍。

美国研究表明,对于某些探索级科学任务,采用功率0.3~2.8kW,比冲1500~2800s的高比冲霍尔推力器时,在成本和性能方面比采用NSTAR, NEXT离子推力器有优势^[73-75],因此,在2004年开始研制高比冲霍尔推力器HiVHAc,最初指标为功率6~8kW,比冲2200~2800s,推力430mN,推进剂处理量400kg^[76],在工程样机阶段指标更改为功率0.3~3.5kW,3.5kW时比冲>2700s,效率>55%,推进剂处理量>300kg,图7为工程样机^[77]。2019年左右,该推力器升级为HiVHAc+,最大功率提升至4.5kW^[78]。



Fig. 7 HiVHAc-EM Hall thruster

美国计划于2022年发射首颗探测金属小行星的赛姬探测器^[79]。该探测器基于MAXAR公司成熟的SSL-1300卫星平台研制,采用全电推进方案,氙气装载量1030kg^[80]。该探测器由四台SPT-140霍尔推力

器提供轨道转移和姿控推力,推力器功率调节范围为0.9~4.5kW。该任务的实施,将霍尔电推进的使用范围从月球轨道扩展到距地球3个天文单位处。

2.5 载人航天领域

目前,载人航天任务局限在地球轨道,以空间站、载人飞船等为代表的载人航天器,运行轨道高度约400km。随着国际上载人登月等计划的开展,载人航天将从地球轨道扩展到月球轨道。在不远的将来,载人火星探测、小行星探测也将成为现实。

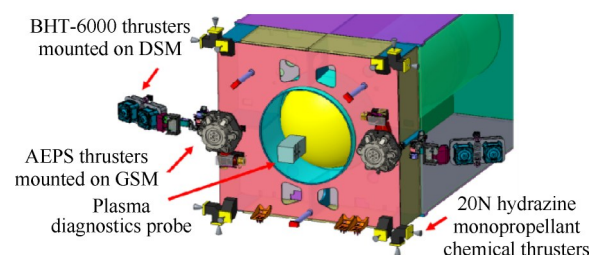
目前,地球轨道载人航天器对推进系统的主要任务需求是快速轨道转移、姿态控制、大气阻力补偿、时间要求不严格的轨道转移等。这些任务都可由化学推进来完成,其中后两种任务所需推力小,可由电推进来完成,从而大幅节省推进剂。质量约420t的国际空间站采用了化学推进,每月大气阻力补偿所需的速度增量约2m/s,若比冲为280s,每年该任务需消耗约3.66t推进剂。如果将化学推进换成比冲1600s的霍尔电推进,每年消耗推进剂最多可降至0.64t。

我国空间站在化学推进的基础上,采用霍尔电推进执行大气阻力补偿任务,每年可节省数百千克的推进剂需求量,显著提升整个载人航天任务的运维效率^[81]。该霍尔电推进系统可在轨更换霍尔推力器和气瓶,从而具备长期在轨工作的能力。2021年9月末,天和核心舱霍尔电推进子系统的四台霍尔推力器首次在轨点火,开启电推进用于载人航天的先河。该电推进子系统主要指标为:霍尔推力器额定功率不大于1350W,标称推力不小于80mN,标称比冲不小于1600s,在轨工作寿命不少于8000h,子系统随舱发射质量(含氙气)不大于151kg,2台推力器点火时系统稳态功率(含平均加热功率)不大于2990W。在电推进子系统研制过程中,在模样和初样阶段各开展了1次80mN霍尔推力器1:1寿命验证试验,累计点火时间分别达到9240h和8240h,初样产品在累计点火时间试验后,继续完成了3020次启动次数试验验证,试验后两台推力器各项功能性能均正常。霍尔推力器配套的空心阴极开展了28000h累计点火时间、15000次开关的点火试验^[82]。

目前国内外正在针对载人火星、载人小行星探测等任务,开展核动力航天器论证和方案设计,对霍尔电推进提出了大功率、大推力、高比冲的需求。美、俄、欧等正在研制10kW级HERMeS^[83-84],KM-10^[85],20kW级BHT-20k^[86],PPS 20k ML^[87],HT-20k^[88],百千

瓦级嵌套霍尔推力器X3^[89]等大功率霍尔推力器。

美国为了重返月球,提出了2024年载人登月的阿尔忒弥斯计划(Artemis Program),并配套提出了月球门户(Lunar Gateway)月球空间站,作为登陆月球和返回地球的中转站。月球门户的动力和推进元件(Power and Propulsion Element, PPE)由MAXAR公司研制,计划于2024年发射^[90]。PPE装备了迄今为止功率最大的50kW级电推进系统,以及采用20台单组元肼推力器的化学推进系统,执行轨道转移和绕月轨道控制任务^[91]。两个推进系统均具有推进剂补加能力。电推进系统采用两个825L气瓶,初始状态可装载2500kg氙气,通过补加最终将预计消耗4475kg氙气。霍尔推力器共6台,其中2台是由Aerojet公司基于HERMeS霍尔推力器改进的AEPS霍尔推力器^[92],4台是Busek公司的、安装在大角度双轴矢量调节机构上的BHT-6000霍尔推力器。图8为推力器布局



(a) Thruster layout



(b) Electric propulsion on-orbit operation

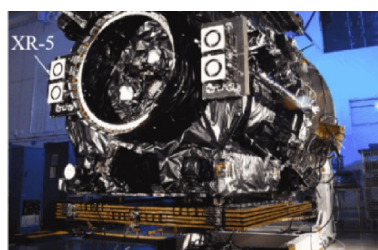
Fig. 8 Thruster layout and electric propulsion on-orbit working state of PPE

2.6 在轨服务领域

随着高价值载荷长期在轨服役,碎片清除,在轨检查、维修、重构、制造,巨型星座管理等需求日益迫切,在轨服务成为航天重点发展领域。承担在轨服务任务的航天器必须具备大速度增量、高任务灵活性和高可靠性,因此,霍尔电推进成为极具竞争力的动力方案。

轨道延寿器是较早提出的在轨服务航天器方案,其特征是装备高总冲性能的推进系统,在与被服

务航天器对接后,接管其推进系统,延长卫星工作寿命,使高价值载荷继续发挥作用。美国诺斯罗普·格鲁曼公司,针对 GEO 卫星延寿研制了任务扩展飞行器(Mission Extension Vehicle, MEV)。基于 GEOSTar 卫星平台研制^[94]的 MEV-1 和 MEV-2 任务扩展飞行器分别于 2019 年 10 月 9 日和 2020 年 5 月 18 日发射,并与 Intelsat 901 和 Intelsat 10-02 卫星进行了对接^[95],利用霍尔电推进系统执行轨道控制任务,实现 GEO 卫星在轨延寿任务验证。MEV 采用了 4 台 5kW 级 XR-5 霍尔推力器,执行主推进和位保任务,同时采用了化学单组元推力器,执行交会对接任务^[96]。MEV-1 和 MEV-2 发射质量分别为 2326kg, 2875kg。图 9 为发射前的 MEV 及其在轨工作状态。



(a) MEV-2 before launch



(b) Concept of MEV working status

Fig. 9 Northrop Grumman MEV spacecraft

诺斯罗普·格鲁曼公司正在研制新一代任务机器人飞行器(Mission Robotic Vehicle, MRV),计划 2024 年首飞。MRV 将携带多个任务扩展舱(Mission Extension Pod, MEP),两者均采用电推进系统。MEP 通过与 GEO 卫星对接,利用装在机械臂上的电推力器执行推进任务,可将 2t 质量的卫星延寿 6 年^[97]。

2.7 空间科学领域

霍尔推力器是以等离子体状态工作的,其等离子体羽流会与空间环境相互作用,从而激发空间等离子体。因此,霍尔推力器也被用作等离子源,用于产生人工空间等离子体,使科学家更深入地探索空间环境。

前苏联基于霍尔推力器研制了等离子体源。在

20 世纪 70 年代,一种产生 200eV 的氦离子束流的等离子体源,作为火箭电荷中和器^[98],应用于“Porcupine”国际合作项目^[99]。1991 年,两台等离子体源应安装在 INTERCOSMOS-25 卫星上,用于地球磁场测量研究所(Institute of Earth Magnetism Measurement, ISMIRAN)主导的“Apex”空间试验^[100],试验时发射电流 2.0~2.6A,离子能量 250eV^[101]。

美国在 2010 年发射的 Falcon 5 卫星上,安装了包括 500W 霍尔推力器和氨冷气推力器的空间等离子体表征源(Space Plasma Characterization Source, SPCS),用于开展空间天气探测演示任务^[102]。两种推力器用于激发空间环境等离子体,同时可用于轨道机动。

3 霍尔电推进未来发展趋势

根据霍尔电推进技术发展历程和空间应用现状,结合背景任务需求,从应用角度,对霍尔电推进未来发展趋势进行分析:

(1)载人登月、载人火星探测等载人深空探测、星际货物运输和太阳能电站等大型空间任务,对大功率霍尔电推进提出需求。比如,4~6 人乘组的载人火星探测飞船对电推进系统的功率需求达到 7~15MW^[103],即使采用迄今为止国际上研制的单台最大功率 140kW 的霍尔推力器^[104],也需要约 50~108 台推力器。因此,有必要进一步增大霍尔推力器的功率。分析表明,采用嵌套放电室方案,有望使单台霍尔推力器的最大功率扩展到兆瓦量级^[105],这样,只需数台推力器即可满足任务要求,有利于简化系统。相应的关键技术是:高电压条件下放电区域控制技术,大热载荷条件下散热技术,大放电流下稳定放电技术,大尺寸、耐高温、高强度特殊构型磁路技术,大电流空心阴极技术,基于同轴嵌套放电室的高推力密度技术,基于推力器簇的功率提升技术,高抽气速率的大型地面真空实验条件等。采用碘、铯等易凝结的固体推进剂,是降低对地面真空实验条件的抽气能力的有效途径。相同抽气能力的真空舱内,可实验功率提升一个数量级的电推力器。

(2)在轨维护、轨道机动飞行器、远距离深空探测等大速度增量任务对超高比冲、长寿命霍尔电推进提出需求。这些任务的速度增量将从目前的每秒数千米量级提升至 10~100km/s,对应的比冲将从目前的 1000~4500s 提升至 5000~8000s 甚至更高。例如,目前的无人火星探测,从低地球轨道至火星轨道需飞行约 8 个月,速度增量约 3~5km/s,而如果飞行时

间缩短至40天,速度增量将大幅增加至85km/s,按推进剂与航天器质量之比达到70%的工程实现上限计算,比冲需要达到7204s。双级阳极层霍尔推力器是霍尔推力器实现高比冲的可行方案。上述任务往往对推力器的寿命要求达到数万至数十万小时。对于上述85km/s速度增量的任务,假设航天器初始质量5t,采用一台功率20kW,推力340mN,比冲7204s,效率60%的霍尔推力器时,推力器需要累计工作201877h,远超过目前以HERMeS霍尔推力器为代表的50000h最高设计寿命。现有磁屏蔽技术能极大地减小放电室削蚀,空心阴极寿命将成为限制霍尔推力器寿命的主要瓶颈。相应的关键技术是:高电压加载技术、高效率电离和加速技术、长寿命空心阴极技术、高能离子对放电室壁面低削蚀技术、高电压绝缘技术、高效率长寿命评估技术、推进剂在轨补加技术、推进系统在轨更换与维护技术等。

(3)大型航天器、巨型星座等大规模空间任务,由于投资巨大,对氦、碘、铯、铷等低成本推进剂提出需求。以美国月球门户的动力和推进元件为例,氦气推进剂装载量2500kg,以2022年7月氦气价格每标准立方米52.5万元(8.96万元/kg)计算,氦气价格约2.2亿元。如果换用约0.07万元/kg的碘作为推进剂,推进剂价格仅175万元,效益十分明显。新型推进剂由于物理、化学特性等与目前采用的氦、氩等存在较大差别,对贮供系统、霍尔推力器阳极和阴极、控制系统等均提出了适应性改进甚至采用全新方案的需求。相应的关键技术是:固体推进剂气化及稳定供应技术,高温推进剂蒸汽流量测量技术,推进剂与材料、设备相容性技术,长寿命空心阴极技术,新型推进剂等离子体羽流与航天器的作用机理与防护方法等。

(4)微纳卫星的蓬勃发展,要求霍尔电推进朝微小功率方向发展,追求功率下限。霍尔推力器功率达到数瓦或数十瓦时,放电室面容比增大,等离子体与放电室壁面作用增强,会加剧放电室削蚀,减少寿命,同时由于体积小而热量易积聚,比冲和效率显著降低,需要开展高效率、长寿命技术攻关。电推进系统的微型化要求在系统层次上实现高度集成设计,推力器、贮供系统、功率处理单元和控制器集成到一个微型模块中,最大程度地减小体积和质量。相应的关键技术是:小尺寸条件下三维磁路设计技术、小电流空心阴极技术、新型羽流中和技术、大面容比条件下等离子体与壁面作用控制技术、高效率散热技术、微型化贮供技术、一体化系统设计技术等。

(5)巨型低轨星座,要求从设计、生产、试验等角度开展低成本、通用化、批产化霍尔电推进系统研制,如一款推力器可适应更广的任务,零部件通用化,产品设计上适合通过机器人装配测试等,不同厂家研制的电推进系统,具有相同的机电接口,从而可相互替换使用等。相应关键技术是:适合批产化的霍尔推力器及系统设计技术、零部件通用化技术、敏捷化生产与自动化装配测试技术、推进剂高可靠预包装技术、低成本推进剂技术、研制流程优化技术等。

(6)工作环境变化大的远距离深空探测、要求宽范围快速调节的无拖曳任务等,要求霍尔电推进实现宽范围、高精度、快响应、高稳定度调节。如引力波探测器对推力器的要求为:推力在1~100 μ N连续可调,分辨率达到0.1 μ N,响应时间小于50ms,寿命达到10000h,比冲高于200s,推力噪声小于0.1 μ N/Hz ^{$\frac{1}{2}$} 。相应的关键技术是:宽调节电磁场设计技术,极端工况放电振荡抑制技术,高精度、快响应、宽范围、高稳定的压力、流量、电能调节、测量技术,抗干扰高精度地面测试技术等。

4 结束语

我国霍尔电推进在2012~2013年完成首次在轨验证以来,取得了长足的进步:霍尔推力器的最大验证功率从1kW提升至100kW,最高验证比冲从1600s提升至5300s^[106],最大推力从80mN提升至5N,工作模式从单模式扩展为多模式,霍尔推力器型号数量从几种提升至几十种,完成了最长9240h的多次霍尔推力器寿命验证、最长28000h的多次空心阴极寿命验证,霍尔电推进系统地面联试最大功率达到50kW量级,实现了在包括空间站、低轨卫星、GEO卫星在内的十多个航天器上的工程应用,研发条件也大大增强。

同时,也要看到,我国霍尔电推进在原始创新、研发效率、产品成熟度、在轨应用上还与国外存在着很大的差距。为了更好地推动我国霍尔电推进的发展,提出如下建议:

(1)加强需求分析和任务牵引,提升霍尔电推进预先研究的针对性,为后续加快工程化研发奠定基础。美国HiVHAc霍尔推力器的研发,就是通过理论分析发现利用比冲低于离子推力器的霍尔推力器,在某些任务中仍然能够获得优于离子推力器的任务收益,成为牵引霍尔电推进技术研发的范例。

(2)加强工作机理研究,实现原始创新,引领霍尔电推进技术方向。充分发展高校理论优势强、科

研院所工程实力强的优势,持续加强产学研合作,加快创新步伐。

(3)加快产品迭代,满足不断提高的任务要求。霍尔推力器研发过程中存在的一个问题是实验周期长,产品方案迭代慢。建议结合设计经验,开发专用仿真设计软件,提升霍尔推力器的设计能力,逐步减小实验量,加快方案迭代,提升研发效率和产品性能。

(4)加强天地差异研究,实现在轨可靠应用。由于在轨测量手段的局限,空间环境对霍尔电推进工作的影响因素、作用机理尚不清晰,需要进一步开展研究,以提高天地测试结果的一致性和在轨工作的可靠性,并为霍尔电推进改进优化提供依据。

(5)加快生产线建设,提高产品研制配套能力。巨型低轨星座将是影响未来空间格局的重要因素,敏捷生产的低成本霍尔电推进系统是实现低轨星座的重要支撑,需要各总体单位和各霍尔电推进研发单位通力协作,从研发流程、设计方法等层面开展相应霍尔电推进系统的研发、生产,提高生产效率,提高总装测试效率,降低成本。

致 谢:感谢国家自然科学基金重点支持项目的资助。

参考文献

- [1] (意)克劳迪奥·布鲁诺, (法)安东尼奥·G·阿塞图拉. 先进的推进系统与技术: 从现在到2020年[M]. 侯晓等译. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- [2] Goebel D M, Katz I. Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters[M]. USA: John Wiley & Sons, Inc., 2008.
- [3] Kim V, Kozubsky K N, Murashko V M. History of the Hall Thrusters Development in USSR [C]. Florence: 30th International Electric Propulsion Conference, 2007.
- [4] Ashkenazy J, Appelbaum G, Ram-Cohen T, et al. VEN μ S Technological Payload the Israeli Hall Effect Thruster Electric Propulsion System[C]. Tel-Aviv & Haifa: 47th Israel Annual Conference on Aerospace Sciences, 2007.
- [5] IHI Corporation. Spacecraft Propulsion Products [EB/OL]. <https://www.ihico.jp/ia/en/products/space/satproplindex.html>, 2022-8-31.
- [6] Hakke T, Vishal L B, Nandagopalan P. Applicability of Iodine as a Propellant for Hall Effect Thrusters; Performance Parameters Prediction[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 47(4): 894-900.
- [7] Seon J, Park J, Lee J, et al. Development of 10-mN Class Hall Thruster and Its Performance Optimization Through Numerical Analysis[C]. Gyeongju: Asian Joint Conference on Propulsion and Power, 2008.
- [8] Tsybulnyk A, Neugodnikov S. Development of High Efficiency Power Processing Unit for Hall Thruster[C]. Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference, 2019.
- [9] Xu S. Miniature Hall Effect Thruster and Gradually Expanding Rotamak Thruster for Space Propulsion [C]. Kanazawa: 2nd Asia-Pacific Conference on Plasma Physics, 2018.
- [10] Corey R L, Gascon N, Delgado J J, et al. Performance and Evolution of Stationary Plasma Thruster Electric Propulsion for Large Communications Satellites [C]. Anaheim: 28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2010.
- [11] EDB Fakel. Plasma Thrusters [EB/OL]. <https://fakel-russia.com/en/productions>, 2022-10-31.
- [12] Busek Co. Inc.. Hall Thrusters [EB/OL]. <https://www.busek.com/hall-thrusters>, 2022-10-31.
- [13] SatCatalog. Electric Propulsion [EB/OL]. https://satcatalog.s3.amazonaws.com/components/927/SatCatalog_-_Aerojet_Rocketdyne_-_XR-5_Hall_Thruster_-_Data-sheet.pdf?lastmod=20210710015615, 2021-07-10.
- [14] Hofer R, Polk J, Mikellides I, et al. Development Status of the 12.5kW Hall Effect Rocket with Magnetic Shielding (HERMeS) [C]. Atlanta: 35th International Electric Propulsion Conference, 2017.
- [15] Vial V, Godard L, Cornu N, et al. PPS®1350-G Performance Assessment with Permanent Magnets [C]. Wiesbaden: 32nd International Electric Propulsion Conference, 2011.
- [16] Safran. PPS®5000 [Stationary Plasma Thruster] [EB/OL]. <https://www.safran-group.com/sites/default/files/2022-09/PPS5000%20-%20Safran%20Spacecraft%20Propulsion%20-%20Datasheet.pdf>, 2022-10-18.
- [17] GB/T 29079-2012, 航天器轨道分类及常用参数符号 [S].
- [18] Loghry C S, Oleson S, Woytach J, et al. LEO to GEO (and Beyond) Transfers Using High Power Solar Electric Propulsion (HP-SEP) [C]. Atlanta: 35th International Electric Propulsion Conference, 2017.
- [19] Bober A, Maslennikov N, Day M, et al. Development and Application of Electric Propulsion Thrusters in Russia [C]. Seattle: 23rd International Electric Propulsion Conference, 1993.
- [20] Pal D, Inamdar A, Thakur N, et al. Hall-Effect Thruster (HET) [J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2021, 8(3): 260-265.
- [21] Hollingsworth T, Walter Gelon W, Szeto A, et al. 25-kW Bus Platform for Communications Satellites [C]. Anaheim: 28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference, 2010.
- [22] 杭观荣, 邱 刚, 余水淋, 等. 霍尔电推进在 AEHF 卫

- 星上应用对我国霍尔电推进发展的启示[J]. 真空电子技术, 2013(3): 5-11.
- [23] Glogowski M J, Kodys A D, Pilchuk J W, et al. Design, Qualification, and Initial Flight Operations of the GEO-Star-3TM Electric Propulsion System [C]. *Cincinnati: AIAA Propulsion and Energy Forum, 2018 Joint Propulsion Conference*, 2018.
- [24] Autric J, Escourrou P, Laine I. Telecom Spacecraft Mission Design: Electric Orbit Raising for Airbus Communications Satellites [C]. *Marseille: 2018 SpaceOps Conference*, 2018.
- [25] European Space Agency. Next Generation Platform (NEOSAT) [EB/OL]. <https://artes.esa.int/next-generation-platform-neosat>, 2022-08-25.
- [26] Neugebauer C, Janu P, Pammer J. Electric Propulsion Pointing Mechanism (EPPM) for the Spacebus NEO Platform [C]. *Munich: European Space Mechanisms and Triboology Symposium 2019*, 2019.
- [27] 王 明. 我国首台 490N 发动机通过寿命考核热试车 [J]. 中国设备工程, 2016(3): 10.
- [28] IHI Aerospace Co., Ltd.. Bipropellant Thruster [EB/OL]. <https://www.ihl.co.jp/ia/en/products/spacelthruster/li/Bipropellant.pdf>, 2022-8-15.
- [29] Ariane Group GmbH. Bipropellant Apogee Motors [EB/OL]. <https://www.space-propulsion.com/spacecraft-propulsion/apogee-motors/index.html>, 2022-08-28.
- [30] Dudley R S. Rescue in Space [J]. *Air Force Magazine*, 2012(1): 38-41.
- [31] SpaceRef Editor. Aerojet's High-Power Hall System Providing Orbit-Raising Propulsion for Air Force's Advanced Extremely High Frequency Satellite [EB/OL]. <https://spaceref.com/press-release/aerojets-high-power-hall-system-providing-orbit-raising-propulsion-for-air-forces-advanced-extremely-high-frequency-satellite>, 2010-11-22.
- [32] Mueller M J. Lessons from the AEHF-1 Bipropellant Maneuver Anomaly with Recurring Themes [C]. *Orlando: 51st AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2015.
- [33] Ray J. The Fight to Save AEHF 1 Produces Remarkable Rescue [EB/OL]. <https://www.spaceflightnow.com/atlas/ar019/120103rescue.html>, 2012-01-03.
- [34] Ray J. Fight to Save US Military Satellite Ends in Remarkable Rescue [EB/OL]. <https://www.space.com/14144-military-satellite-miraculous-rescue.html>, 2012-01-06.
- [35] Safran. Safran Delivers First PPS®5000 to Boeing [EB/OL]. <https://www.safran-group.com/pressroom/safran-delivers-first-ppsr5000-boeing-2019-05-09>, 2019-05-09.
- [36] Safran. Safran PPS®5000 Plasma Thruster Chosen for New Galileo Satellites [EB/OL]. <https://www.safran-group.com/pressroom/safran-ppsr5000-plasma-thruster-c>
hosen-new-galileo-satellites, 2022-01-26.
- [37] Funaki I, Sano T, Fukatsu T, et al. Development Status of 6-kW-class Hall Thrusters at JAXA [C]. *Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference*, 2019.
- [38] 于达仁, 乔 磊, 蒋文嘉, 等. 中国电推进技术发展及展望 [J]. 推进技术, 2020, 41(1): 1-11. (YU Da-ren, QIAO Lei, JIANG Wen-jia, et al. Development and Prospect of Electric Propulsion Technology in China [J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2020, 41(1): 1-11.)
- [39] Wang L. Overview on Space Solar Power Station [J]. *Advances in Astronautics Science and Technology*, 2022(5): 1-2.
- [40] 侯欣宾. 不同空间太阳能电站概念方案的比较研究 [J]. 太阳能学报, 2012, 33: 63-69.
- [41] 李庆军, 邓子辰. 空间太阳能电站及其动力学与控制研究进展 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(10): 1-19.
- [42] 温生林, 闫 野, 易 腾. 超低轨道卫星摄动特性分析及轨道维持方法 [J]. 国防科技大学学报, 2015, 37(2): 128-134.
- [43] Kozubskiy K N, Murashko V M, Rylov Y P, et al. Stationary Plasma Thrusters Operate in Space [J]. *Plasma Physics Reports*, 2003, 29(3): 251-266.
- [44] Bober A S, Malennikov N A. SPT in Russia-New Achievements [C]. *Moscow: 24th International Electric Propulsion Conference*, 1995.
- [45] Arhipov B A, Vinogradov V N, Kozubsky K N, et al. Development and Application of Electric Thrusters at EDB "FAKEL" [C]. *Cleveland: 25th International Electric Propulsion Conference*, 1997.
- [46] Lynn P R Jr, Osborn M F II, Sankovic J M, et al. Electric Propulsion Demonstration Module (EPDM) Flight Hall Thruster System [C]. *Cleveland: 25th International Electric Propulsion Conference*, 1997.
- [47] Fineley C J, Peck N. TacSat-2: A Story of Survival [C]. *USA: 21st Annual AIAA/USU Conference on Small Satellite*, 2007.
- [48] Busek Co. Inc. BHT-200 [EB/OL]. <https://www.busek.com/bht200>, 2022-08-10.
- [49] Oleson S R, Sankovic J M. Electric Propulsion for Low Earth Orbit Constellations [R]. *NASA/TM-1998-208821*.
- [50] 周 泉. 2021 年全球及中国稀有气体行业现状分析, 氦气、氙气价格已涨十倍 [EB/OL]. <https://m.huaon.com/detail/822011.html>, 2022-07-26.
- [51] Benavides G F, Kamhawi H, Mackey J A, et al. Iodine Hall-Effect Electric Propulsion System Research, Development, and System Durability Demonstration [C]. *Cincinnati: AIAASAEASEE Joint Propulsion Conference*, 2018.
- [52] 徐宗琦, 田雷超, 叶展雯, 等. 碘工质霍尔推力器原

- 理样机设计与实验研究[J]. 真空科学与技术学报, 2022, 42(6): 456-461.
- [53] Hopkins M A, King L B. Magnesium Hall Thruster with Active Thermal Mass Flow Control[J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2014, 30(3): 637-644.
- [54] Nyirady A. Exotrail Completes In-Orbit Demonstration Mission[EB/OL]. <https://www.satellitetoday.com/launch/2021/01/15/exotrail-completes-in-orbit-demonstration-mission>, 2021-01-15.
- [55] Lascombes P, Henri D. Electric Propulsion for Small Satellites Orbit Control and Deorbiting: The Example of a Hall Effect Thruster[C]. *Marseille: SpaceOps Conferences*, 2018.
- [56] Werner D. Exotrail Demonstrates Miniature Hall-Effect Thruster in Orbit[EB/OL]. <https://spacenews.com/exotrail-demonstrates-miniature-hall-effect-thruster-in-orbit>, 2021-01-12.
- [57] Xu S Y, Xu L X, Cong L X, et al. First Result of Orbit Verification of Taiji-1 Hall Micro Thruster[J]. *International Journal of Modern Physics A*, 2021, 36(11/12): 2140013.
- [58] Potrivitu G C, Sun Y F, Rohaizat M W A B, et al. A Review of Low-Power Electric Propulsion Research at the Space Propulsion Centre Singapore [J]. *Aerospace*, 2020, 7(6).
- [59] 刘一薇. “实践9号”卫星电推进首次在轨试验验证[J]. 深空探测学报, 2017, 4(3): 245-251.
- [60] Safran PPS®5000 Plasma Thruster Chosen for New Galileo Satellites[EB/OL]. <https://www.safran-group.com/pressroom/safran-pps5000-plasma-thruster-chosen-new-galileo-satellites-2022-01-26>, 2022-01-26.
- [61] Airbus. Serving People 23, 222 Kilometres above Earth[EB/OL]. <https://www.airbus.com/en/newsroom/stories/2022-03-serving-people-23222-kilometres-above-earth#:~:text=Planned%20to%20be%20launched%20onboard%20an%20Ariane%2062,Galileo%20satellite%20constellation%20that%20went%20live%20in%202016>, 2022-03-08.
- [62] Krueger J K. Closesat: Perigee-Lowering Techniques and Preliminary Design for a Small Optical Imaging Satellite Operating in Very Low Earth Orbit[D]. *Cambridge: Massachusetts Institute of Technology*, 2010.
- [63] Corbett M H, Edwards C H. Thrust Control Algorithms for the GOCE Ion Propulsion Assembly [C]. *Florence: 30th International Electric Propulsion Conference*, 2017.
- [64] Earth Observant Inc.. Earth Observant Inc(EOI) Unveils Re-branding to Align with Company's Mission and Accelerated Growth [EB/OL]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/earth-observant-inc-eoi-unveils-re-branding-to-align-with-companys-mission-and-accelerated-growth-301571762.html>, 2022-06-21.
- [65] Tegler E. How Low Can Satellites Go? Air Force Bets Very Low Earth Orbit Will Give It More Capabilities[EB/OL]. <https://blog.geogarage.com/2020/09/how-low-can-satellites-go-air-force.html>, 2020-09-04.
- [66] Earth Observant Inc. Successfully Tests Next-Generation Propulsion Technology to Support Future Very Low Earth Orbit Missions [EB/OL]. <https://www.prnewswire.com/news-releases/earth-observant-inc-successfully-tests-next-generation-propulsion-technology-to-support-future-very-low-earth-orbit-missions-301230606.html>, 2021-02-18.
- [67] Patton T. HET-X Thruster Technology Tested by EOI [EB/OL]. <https://ltxterrajsc.com/het-x-thruster-technology-tested-by-eoi/2021/02/23/>, 2021-02-23.
- [68] Reedy R E, Schwartzentruber T E. Satellite System[P]. *US: 10351267B2*, 2019-07-16.
- [69] 康开华. X-37B 第4次飞行试验情况及其分析评论[J]. 国际太空, 2015(10): 69-73.
- [70] 袁春柱, 张 强, 傅丹膺, 等. 超低轨道卫星技术发展及展望[J]. 航天器工程, 2021, 30(6): 89-99.
- [71] Estublier D, Saccoccia G, Amo J G D. Electric Propulsion on SMART-1-A Technology Milestone [J]. *ESA Bulletin*, 2007, 129: 40-46.
- [72] Koppel C R, Marchandise F, Prioul M, et al. The SMART-1 Electric Propulsion Subsystem Around the Moon: In Flight Experience [C]. *Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005.
- [73] David Y Oh. Evaluation of Solar Electric Propulsion Technologies for Discovery-Class Missions [J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2007, 44(2): 399-411.
- [74] Witzberger K E, Manzella D, Oh D, et al. NASA's 2004 In-Space Propulsion Refocus Studies for New Frontiers Class Missions [C]. *Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005.
- [75] Manzella D, Oh D, Aadland R. Hall Thruster Technology for NASA Science Missions [C]. *Tucson: 41st AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2005.
- [76] Jacobson D T, Manzella D H, Hofer R R, et al. NASA's 2004 Hall Thruster Program [C]. *Fort Lauderdale: 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2004.
- [77] Kamhawi H, Manzella D, Pinero L, et al. In-Space Propulsion High Voltage Hall Accelerator Development Project Overview [C]. *Nashville: 46th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit*, 2010.
- [78] Kamhawi H, Pinero L, Mackey J. Development of the High Voltage Hall Accelerator System [C]. *Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference*, 2019.
- [79] Oh D Y, Collins S, Goebel D, et al. Development of the Psyche Mission for NASA's Discovery Program [C]. *At-*

- lanta: 35th International Electric Propulsion Conference*, 2017.
- [80] John Steven Snyder, Dan M Goebel, Vernon Chaplin, et al. Electric Propulsion for the Psyche Mission [C]. *Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference*, 2019.
- [81] 金广明, 康亮杰. “天和”核心舱霍尔电推进子系统设计[J]. *中国航天*, 2021(8): 22-27.
- [82] 杭文. 我国电推力器空心阴极寿命达国际先进水平[J]. *太空探索*, 2016(9): 4.
- [83] Frieman J D, Kamhawi H, Peterson P Y, et al. Impact of Facility Pressure on the Wear of the NASA HERMeS Hall Thruster [C]. *Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference*, 2019.
- [84] Frieman J D, Kamhawi H, Mackey J, et al. Expanded Performance Characterization of the NASA HERMeS Hall Thruster [C]. *San Diego & Virtual: AIAA SCITECH 2022 Forum*, 2022.
- [85] Shashkov A S, Lovtsov A S. Laboratory Tests of 10.5kW Hall Thruster with External Layer [C]. *Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference*, 2019.
- [86] Szabo J, Pote B, Hruby V, et al. A Commercial One Newton Hall Effect Thruster for High Power In-Space Missions [C]. *San Diego: 47th AIAA/ASME/SEA/ASEE Joint Propulsion Conference*, 2011.
- [87] Samukawa S, Hori M, Rauf S, et al. The 2012 Plasma Roadmap [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2012, 45(25): 253001.
- [88] Leporini A, Giannetti V, Andreussi T, et al. Development of a 20kW-Class Hall Effect Thruster [C]. *Rome: Space propulsion 2016*, 2016.
- [89] Hall S J, Jorns B A, Cusson S E, et al. Performance and High-Speed Characterization of a 100kW Nested Hall Thruster [J]. *Journal of Propulsion and Power*, 2021, 38(1): 40-50.
- [90] WordDisk. Power and Propulsion Element [EB/OL]. https://www.worddisk.com/wiki/Power_and_Propulsion_Element, 2022-09-16.
- [91] Herman D A, Gray T, Johnson I, et al. The Application of Advanced Electric Propulsion on the NASA Power and Propulsion Element(PPE) [C]. *Vienna: 36th International Electric Propulsion Conference*, 2019.
- [92] Herman D A, Tofil T A, Santiago W, et al. Overview of the Development and Mission Application of the Advanced Electric Propulsion System(AEPS) [C]. *Atlanta: 35th International Electric Propulsion Conference*, 2017.
- [93] Messier D. The Propulsion We're Supplying, It's Electrifying [EB/OL]. <http://www.parabolicarc.com/2020/10/25/the-propulsion-were-supplying-its-electrifying>, 2020-10-25.
- [94] Glogowski M J, Pilchuk J W, Kodys A D, et al. Electric Propulsion Systems Development & Integration Activity at Orbital ATK [C]. *Atlanta: 35th International Electric Propulsion Conference*, 2017.
- [95] Sheetz M. Northrop Grumman Robotic MEV-2 Spacecraft, in a First, Catches Active Intelsat Satellite [EB/OL]. <https://www.cnn.com/2021/04/12/northrop-grumman-mev-2-spacecraft-services-intelsat-1002-.html>, 2021-04-12.
- [96] Anderson J. Delving Deeper into... In-Orbit Satellite Servicing [J]. *NewSpace International*, 2018(5): 18-21.
- [97] Anderson J. Mission Extension Pod (MEP) [EB/OL]. <https://www.northropgrumman.com/wp-content/uploads/Mission-Extension-Pod-MEP-fact-sheet.pdf>, 2022-08-15.
- [98] Kintner P M, Kelley M C. Ion Beam Produced Plasma Waves Observed by the $\delta n/n$ Plasma Wave Receiver During the Porcupine Experiment [J]. *Advances in Space Research*, 1981, 1(2): 107-115.
- [99] Bober A, Maslennikov N, Day M, et al. Development and Application of Electric Propulsion Thrusters in Russia [C]. *Seattle: 23rd International Electric Propulsion Conference*, 1993.
- [100] Oraevsky V N, Triska P. Active Plasma Experiment-Project APEX [J]. *Advances in Space Research*, 1993, 13(10): 103-111.
- [101] Baranets N, Ruzhin Y, Erokhin N, et al. Acceleration of Energetic Particles by Whistler Waves in Active Space Experiment with Charged Particle Beams Injection [J]. *Advances in Space Research*, 2012, 49(5): 859-871.
- [102] eoPortal. Falconsat-5 [EB/OL]. <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/ff/falconsat-5,2012-05-29>.
- [103] 吴小宁, 夏薇, 韩京军. 俄罗斯火星载人探测技术现状 [J]. *航天器环境工程*, 2008, 25(5): 485-491.
- [104] Zakharenkov L, Seminkin A, Tverdokhlebov S, et al. Development and Study of the Very High Specific Impulse Bismuth TAL [C]. *Florence: 30th International Electric Propulsion Conference*, 2019.
- [105] Florenz R, Gallimore A D, Peterson P Y. Developmental Status of a 100-kW Class Laboratory Nested Channel Hall Thruster [C]. *Wiesbaden: 32nd International Electric Propulsion Conference*, 2011.
- [106] 余水淋, 徐亚男, 张岩, 等. 大功率霍尔电推进研究进展与分析 [J]. *中国航天*, 2022(6): 47-52.

(编辑:白 鹭)