

空间推进技术需求与发展分析

韩泉东, 洪 鑫, 周海清
(上海空间推进研究所, 上海 201112)

摘 要: 在分析国内外空间推进技术 (内容涵盖了星、船、弹、箭、器等领域) 现状的基础上, 梳理了空间推进技术的发展趋势和对我国的启示。在对未来任务和技术需求分析的基础上, 对空间推进技术的发展趋势进行了预测, 对存在的差距进行了分析, 提出了发展思路 and 重点发展方向建议。

关键词: 航天器; 空间推进技术; 需求; 发展

中图分类号: V434-34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9374 (2012) 02-0009-07

Analysis on requirement and development of space propulsion technology

HAN Quan-dong, HONG Xin, ZHOU Hai-qing
(Shanghai Institute of Space Propulsion, Shanghai 201112, China)

Abstract: Based on the analysis of the current situation of space propulsion technology in the world, the development trend of space propulsion technology is summarized and the enlightenment for the technology development in China is shown. According to the spacecraft development requirements in China in the future, the development trend of space propulsion technology is predicted and the technology gap between homeland and overseas are analyzed. Some development ideas and suggestions, to which the first priority should be given, are proposed.

Keywords: spacecraft; space propulsion technology; requirement; development

0 引言

空间推进技术的应用领域主要有星、船、弹、箭、器等各种航天器, 涵盖了众多推进类型, 主要有冷气推进、化学推进、电推进、核推

进、电磁推进、激光推进、反物质推进、动量转换推进和无工质推进等, 在航天领域发挥着重要作用。

随着我国航天技术的发展, 空间推进技术也取得了一系列技术成就, 获得了以神舟七号、嫦娥二号等为代表的具有里程碑意义的重大工程的

收稿日期: 2011-05-10; 修回日期: 2011-09-13

作者简介: 韩泉东 (1981—), 男, 硕士, 研究领域为空间推进技术总体研发与工程设计

成功和以载人航天工程、探月工程、二代导航工程、高分辨率对地观测工程为代表的国家重大工程的立项和研制。目前高性能空间发动机技术、电推进技术、推进剂在轨补加技术、无毒化推进技术、微小推力推进技术、轻质快响应预包装动力系统技术、新型增压式动力系统技术研究进展顺利,核心技术相继取得突破,为新项目的立项和背景型号的论证奠定了基础。

空间推进技术从技术层面大致可分为常规化学空间推进技术、电推进技术、无毒化空间推进技术、微小推力精密空间推进技术以及新概念推进技术等几大类。本文在分析国内外空间推进技术现状和趋势的基础上,梳理了空间推进技术发展的趋势和对我国的启示,在对未来任务和技术需求分析的基础上,对国内推进技术的发展趋势进行了预测,对存在的差距进行了分析,提出了发展思路和重点发展方向建议。

1 高性能常规化学空间推进技术需求与发展

1.1 需求分析

化学推进是目前使用最广泛的推进方式,具有高比冲、可多次启动、脉冲工作、冲量控制精度高、易于调节推力等优势,广泛用于卫星、飞船、导弹、运载火箭以及深空探测器的姿轨控任务等。

化学推进技术从最初的单组元推进到双组元推进,再到双组元双模式推进,化学推进系统已经步入了相对成熟的阶段。但是对于航天器长寿命高可靠要求、航天器高精度姿态控制要求、微小航天器轻质化要求和武器系统轻质快响应要求,化学推进系统不可替代且仍有巨大的发展空间。

与国外先进水平相比,我们还存在不小的差距,具体叙述如下。

现有卫星用远地点 490 N 和姿控 10 N 发动机等比冲偏低。国内现有的 490 N 发动机比冲约 315 s,而国外同类发动机飞行产品的比冲已经达到 327 s,采用肼和四氧化二氮推进剂的远地点

发动机的比冲甚至达到了 335 s。对于地球同步轨道卫星而言,轨控发动机通常要消耗总推进剂量的 80%以上,该发动机的比冲性能直接影响卫星的最终寿命。此外,为满足较大地球同步轨道卫星等的需求,需要研制新一代 25 N 姿控发动机以及千牛级轨控发动机,进一步提高可靠性、提高比冲性能及进行轻小型化设计。

现有卫星用 10 N 推力器最小脉冲冲量偏高,现有 10 N 推力器的最小脉冲冲量大于 50 mN·s。为满足卫星调制控制时推力器的最短开启时间要求,必须将最小脉冲冲量降到 30 mN·s 以内,同时提高推力器稳态比冲,达到 295 s 以上。因此,研制 30 mN·s 最小冲量的 10 N 推力器是大型长寿命卫星和高精度、高稳定性控制的迫切要求,也是未来卫星平台的急需。

卫星推进系统推进剂剩余量测量精度偏低。国内此前开展了推进剂剩余量精确测量技术研究,但从研究进展来看,剩余量测量精度都取决于压力和温度传感器的精度,当前压力传感器的全量程精度和温度传感器的分辨率不足以实现±3个月的预报精度。另外,稳定性好且与推进剂相容时间长的压力传感器技术未完全突破,研制长寿命、高精度的压力和温度传感器刻不容缓。并联储箱的推进剂剩余量计算不同于原来的单贮箱,需要开发新的算法和模型。

推进系统的性能有待进一步优化。国内目前所使用的卫星、飞船及深空探测器的推进系统均采用了单一的化学推进,寿命相对有限,而国外已经广泛采用了双模式混合推进系统,即轨控发动机采用四氧化二氮/无水肼,姿控发动机采用无水肼。早期与双模式系统配套的电推力器主要是电阻加热无水肼推力器,它使姿控推力器的比冲从 220 s 提高到了 300 s,这已接近其物理上的极限。后来电弧加热推力器的研究和问世使推力器的性能又大大前进了一步,1 kW 功率以上的无水肼电弧加热推力器比冲达到了 650 s,500 W 左右的推力器比冲也达到了 500 s。双模式系统的优势非常突出。如果我国的 GEO 卫星采用双模式推进系统,很容易达到更长的设计寿命。此外,采用比冲更高(1 600 s 以上)的霍尔电推进

来完成卫星的南北位保,甚至姿态和轨道控制等任务,则卫星的寿命可进一步延长。国外很早就已将电推进系统作为大型卫星的标准配置。目前,国内研制的电推进系统即将开展工程应用。

推进系统在轨补加技术有待突破。推进剂的耗尽意味着航天器寿命的终结。世界上主要的航天大国都已经掌握了在轨补给技术。俄罗斯从1978年就已经实施了在轨补给,而美国从上世纪80年代初就开始了在轨补给技术的研究,对该技术进行了充分的发展,并提出了庞大的在轨补给计划。还有一些国家也开始了这方面技术的探索。从发展趋势上看,在轨补给技术的发展呈现多样化,补给对象也大大扩展。而国内该项技术起步较晚,有待加快研制进度。

空间推进用泵压式推进系统尚属空白。目前国内卫星、飞船及深空探测器等均采用挤压式推进系统,系统压力相对较低,制约着推进系统性能的进一步提高。随着空间平台和导弹武器等的进一步发展,迫切需要轻小型高性能的泵压式推进系统与之配套。

推进系统组件的性能和可靠性急需提高。此前,空间推进系统所使用的组件相对于国外技术水平存在着结构质量大、精度较低、可靠性不高不足,某些组件甚至是整个推进系统的单点故障源。

1.2 重点发展方向

1.2.1 长寿命、高可靠和高性能轨姿控发动机

提高现役的航天器轨姿控发动机(2500 N/490 N/150 N/25 N/10 N)的综合性能,对于延长航天器在轨寿命和提高航天器使用效能具有重大经济价值。此外,为满足大型卫星、空间实验室和探测器等的变轨需求,应尽快开展千牛级高性能轨姿控发动机研制。

1.2.2 大型卫星双元推进系统推进剂在轨管理技术

突破推进剂剩余量精确测量技术,解决卫星推进系统在轨运行寿命预测问题;研究出推进系统混合比在轨调节方法,实现推进系统混合比在轨闭环调节,确保两种组元推进剂趋于同步消耗,延长卫星寿命;研究出实现并联贮箱均衡排放的方法,控制并联贮箱推进剂排放不均衡度。

此外,开展可靠性高、工艺简单且性能一致性好甚至可在轨补加的板式表面张力贮箱研制,满足大型卫星和探测器等的需求。

1.2.3 长寿命、高性能双模式推进系统

推进系统轨控采用MON/ N_2H_4 双组元发动机,姿控采用肼推力器或电弧加热肼推力器,实现推进剂的最大化利用,进一步提高卫星和空间平台等推进系统的性能。

1.2.4 航天器推进系统在轨补加技术

进行在轨补加方案优化及关键组件技术研究,突破关键技术,尽快实现在轨补加系统工程应用。

1.2.5 新型增压式推力可调高性能轨姿控动力系统

新型增压泵主要有电动泵、气动增压泵、无活塞泵及自由活塞泵等几种。结构简单、工作可靠、启动方便、无启动次数限制且易于实现发动机推力调节的适用于空间应用的新型增压泵可有效提升空间推进系统的综合性能。此外,还可采用化学反应生成高压气体的方式来对贮箱进行增压,从而实现推进系统的常压贮存。

1.2.6 深度节流单组元变推力推进系统

单组元变推力发动机具有推力可大范围调节、冲量控制精度高、可靠性高和系统相对简单等优点,能有效提高航天器的控制精度、增强航天器的机动能力、易于实现探测器的软着陆并使得完成相同的空间任务所需的推进剂量最少。

1.2.7 高性能双组元变推力推进系统

双组元变推力推进系统具有发动机推力大范围可变、比冲性能高等优点,在深空探测器软着陆和导弹武器突防领域具有突出的优点。

1.2.8 航天员废气组合电热推进技术

电热推进具有系统简单可靠、技术成熟度高、工作范围宽、适应性好、寿命长、配电简单、效率高(最高达80%)且羽流清洁等优点,是所有电推进中应用最为广泛的一种。针对载人航天的推进需求,开展以航天员产生的废气(H_2O , CO_2 , CH_4 , H_2 , N_2 , NH_3 等)为推进剂的电热推进技术研究,突破加热元件、高温换热器、热防护和液态水汽化等关键技术,研制出达到国外同类产品先进水平的电热推力器。

2 无毒化空间推进技术需求与发展

2.1 需求分析

现有的航天器推进系统基本上都采用 N_2O_4 /MMH 以及 N_2H_4 等推进剂。 N_2O_4 属三级中等毒物,吸入过量会对呼吸系统产生严重伤害;肼类推进剂毒性更高,有很大吸入致癌性,且易燃易爆。这些特性导致在产品生产、试验、使用和维护过程中不仅对人员生命和健康存在威胁,还可能使自然环境遭受污染。此外,推进剂加注时,必须在特定厂房进行,而为防止泄漏,还需复杂的加注设备、安全防护设备及泄漏检测设备,使用和维护操作复杂,成本昂贵。目前,国外正在积极寻求“绿色”推进技术来完全或部分替代目前的有毒推进系统,以使航天器推进系统易于维护操作,降低成本。航天推进系统采用无毒、无污染推进剂是未来的重要发展方向。

按照推进方式划分,目前无毒化推进主要有三大研究热点: HAN 基或 ADN 单组元推进、 $\text{N}_2\text{O}/\text{HC}$ 双组元推进以及 LOX/HC 双组元推进。

HAN 基推进剂是一种可以长期贮存的推进剂,在常压下不敏感,存贮安全,无着火与爆炸的危险,人员友好易维护操作,推进系统结构和肼系统相似。AND 也具有类似特性,欧空局已开展了飞行验证。对无毒单元推进系统可能的应用方向是:

- 1) 无毒化运载火箭上面级辅助动力系统;
- 2) 导弹武器姿轨控动力系统;
- 3) 卫星、飞船及其他空间推进系统。

$\text{N}_2\text{O}/\text{HC}$ 组合比冲性能适当,无毒可贮存,低危险性,人员友好易操作,适应可重复使用快速进出空间任务,同时也是无毒运载火箭上面级的解决方案之一。 $\text{N}_2\text{O}/\text{HC}$ 组合适应可贮存、可重复使用、高安全等级要求的推进需求,这一推进剂组合具有很高的综合性能,在以下几个方面更能显示出其优越性。

- 1) 可重复使用天地往返任务

这种任务往往需要频繁进出空间,执行天地往返,有毒推进系统的毒性和低温推进系统的低

温特性都与这种任务特点是不相适应的,而 $\text{N}_2\text{O}/\text{HC}$ 组合的优异综合性能非常适合这种可贮存和可重复使用频繁进出空间的推进任务。

- 2) 载人空间推进任务

这种空间任务推进系统的安全性是第一位的, $\text{N}_2\text{O}/\text{HC}$ 组合有适当的比冲性能,不存在毒性危险。另外, $\text{N}_2\text{O}/\text{HC}$ 推进系统相对简单,有较高的可靠性,适应载人空间推进任务。

- 3) 运载火箭及上面级轨姿控任务

对于该型任务,成本是一个重要的考虑因素, $\text{N}_2\text{O}/\text{HC}$ 组合具有很高的综合性能且成本相对较低,是这类任务的重要候选动力技术。

资料显示, LOX/HC 推进技术已成为国外空间推进技术的重要发展方向,尤其是 LOX/CH_4 (液氧/甲烷) 火箭发动机具有出色的比冲性能和可重复使用性,与液氢相比 LOX/CH_4 比较容易实现空间长期无损贮存,国外很多研究机构都倾向于采用这一组合执行高性能的空间推进任务,如载人登月任务、载人火星探测任务和空间站运输任务等。随着低温推进剂空间无损贮存技术的发展, LOX/HC 已经成为未来空间推进的重要发展趋势。

未来载人登月或载人火星探测任务或是其他的长周期空间轨道机动任务对高性能和无毒推进需求非常高,空间可贮存的 LOX/HC 推进系统将是一种可行的推进解决方案。

LOX/HC 推进技术的突破将大幅度提升空间化学推进能力,实现未来空间化学推进能力的跨越式提升,有效支撑未来深空探测任务以及近地轨道飞行任务。

2.2 重点发展方向

2.2.1 HAN 基单元推进技术

继续开展 HAN 基无毒单元推进关键技术攻关,研制出综合性能高的无毒可贮存单元推进系统,为运载火箭、导弹、卫星、载人飞船等航天器提供技术支撑。

2.2.2 $\text{N}_2\text{O}/\text{HC}$ 双元推进技术

继续开展 $\text{N}_2\text{O}/\text{HC}$ 推进剂推进系统方案优化、推进剂贮存供应技术、 $\text{N}_2\text{O}/\text{HC}$ 轨控发动机点火及有效冷却等关键技术研究。

2.2.3 高性能 LOX/HC 空间推进技术

建议以 LOX/CH₄ 推进剂组合为重点, 解决高性能 LOX/HC 推进系统两大核心关键技术: ①发动机点火技术; ②低温推进剂空间无损长贮技术, 为研制高性能且空间可贮存的低温推进剂推进系统奠定技术基础。

3 高性能电推进技术需求与发展

3.1 需求分析

电推进是空间推进技术的重要组成部分, 其主要特点就是通过电能的引入来增加推进剂的动能, 以获得很高的喷气速度。一般而言, 电推进系统可以使得推进剂的喷出速度比化学推进系统高出一个数量级。新的航天任务对电推进技术有明确的需求, 主要表现在三个方面。

3.1.1 GEO 卫星

对于地球同步轨道卫星, 如“东四”、“东五”平台, 仅采用电推进完成卫星寿命期间的南北位保 (NSSK) 任务, 就可以节省上百公斤的质量; 如果采用电推进完成整个 GEO 卫星的轨道转移和位置保持任务, 节省的质量将达上千公斤, 效益更是可观。

3.1.2 深空探测飞行器

采用高比冲的电推进来完成深空探测飞行器的主推进任务, 可以完成某些化学推进难以实现的星际航行任务。随着人类对深空探测的热情越来越高, 对具有高比冲、大总冲特点的电推进技术的需求将更加迫切。

3.1.3 星座及卫星编队飞行

重力场测量卫星及卫星星座和编队飞行, 对具有精确冲量控制的电推进技术有着明确的需求, 需要发展具有精确冲量控制能力的电推进技术。

3.2 重点发展方向

我国已经具备亚千瓦级霍尔和千瓦级离子推进技术基础, 但对于大功率多模式、大推力 (1~100 N)、小功率电推进等技术尚未开展深入研究, 其中涉及到新的关键技术需要解决。重点发展方向叙述如下。

3.2.1 大功率双模式电推进技术

双模式霍尔电推进系统充分利用航天器上的电功率, 在给定电功率下有两个工作模式: 一个是**大推力模式**，在此模式下单台推力器的推力可以达到数百毫牛至数牛, 比冲超过 1 200 s, 特别适合于 GEO 卫星、探测器等的慢速轨道转移和机动; 另一个是**高比冲模式**，在此模式下推力器的比冲可以达到 3 000 s 以上, 推力在数十毫牛到上百毫牛, 特别适合于 GEO 卫星、探测器等的轨道、姿态及位置保持等空间推进任务。

3.2.2 大推力 (1~100 N) 电推进技术, 重点为超声波辅助电推进

超声波辅助电推进是从超声波辅助电喷技术转化而来的一种新型的静电式胶体推进技术。通过集成现有的超声波电喷技术、电推进的离子光学系统、大功率电源技术以及液体推进剂供给技术, 超声波辅助电推进技术成功地吸取了以上技术的精华, 具有高推力密度 (直径为 30 cm 的推力器的推力可以达到数十牛)、高能量效率、高质量利用率、高系统可靠性、可变比冲、易于按比例放大等优点。超声波辅助电推进的关键技术主要涉及推进剂供应、大功率电源与控制、超声波电喷和带电粒子加速等方面。超声波辅助电推进能够为大型航天器空间轨道转移和快速机动提供高效的推进动力, 从而使空间平台可以节约大量的资源 (主要是推进剂), 进一步提高快速机动能力, 延长平台在轨时间, 降低发射质量。

3.2.3 微功耗脉冲等离子体推进技术

研究功耗在 10~50 W 的脉冲等离子体推力器以及相关的电源控制器、测量和诊断系统, 采用新的研究思路, 使推力器的效率达到 25% 以上, 实现在微小卫星组网位置保持和高精度大卫星上的姿态控制应用。

3.2.4 FEED 推进技术

针对微小卫星对高精度姿轨控推进系统的需求, 开展场发射电推进 (FEED) 技术研究。突破场发射电推进相关理论及工程研制上的关键技术, 完成 PEU 功率 20 W、比冲 6 000~8 000 s、最小冲量小于 $1 \times 10^{-8} \text{ N} \cdot \text{s}$ 、推力范围在 1~100 N 级场发射电推力器及推进系统的研制, 为我国微小卫星的工程研制奠定基础。

4 微小推力精密空间推进技术需求与发展

4.1 需求分析

航天器微小型化是航天技术重要发展方向之一。小型化对推进技术的需求主要体现在：小到几公斤重的微小航天器的姿控，完成干涉测量任务所需的航天器星座的精确定位，以及用于补偿大型挠性航天器太阳光压引起的扰动力矩等。当然，微小航天器对推进技术提出了不仅是小冲量、小推力的苛刻要求，还包括质量、体积、功率的限制。

4.1.1 微小卫星及其星座

微小卫星及星座对推进系统具有特殊的要求：微小推力、微小冲量、脉冲或连续工作方式、高的推进剂贮存密度、微小功率、微小体积和质量。如激光干涉测量任务，要求推力 $2\sim 20\ \mu\text{N}$ ，控制冲量为 $0.1\ \mu\text{N}\cdot\text{s}$ ；对星座而言需要推力 $1\sim 10\ \text{mN}$ ，姿控冲量 $10\ \mu\text{N}\cdot\text{s}$ 左右，传统的化学推进不能满足要求。国外的微功耗 PPT 和 FEEP 已经得到工程应用，国内还在进行原理研究。

4.1.2 航天器高精度、高稳定度控制

甚高精度成像卫星、激光通信卫星、中继卫星、空间望远镜以及空间干涉仪等都要求非常高的姿态稳定度或指向精度，有的要求卫星处于完全的寂静模式，传统化学推力器的最小冲量受结构的限制不能做的很小并保持很高的一致性，卫星很难达到非常高的控制精度，微推进是唯一的选择。此外，微小型自动寻的飞行器对动力系统也提出了微小推力的需求。国外的液体双元推力器推力目前最小可达到 $0.4\ \text{N}$ ，我国为 $2\ \text{N}$ ，因此迫切需要开展更小推力（冲量）的液体双组元发动机及微小推力推进系统的研制。

4.1.3 特殊航天任务的需要

如补偿大挠性卫星因为太阳光压引起的扰动、补偿稀薄大气阻力、补偿大型偏置天线引起的扰动、重力波测量卫星的位置保持等，这些任务需要的推力也只在毫牛级甚至更低，只有微推进才能完成，常规化学推进不能满足要求。

4.2 重点发展方向

4.2.1 微小超高压冷气推进系统

针对航天器超静超稳精确控制等推进需求，研制出微小超高压冷气推进系统，使得该系统具备根据控制指令实时调整推力大小，实时调整微脉冲大小，并且重复精度高的能力，为航天器高精度姿态与轨道控制奠定基础。重点突破毫牛级冷气推力器及推力调节技术、大减压比高精度减压阀技术以及微小推力测量技术。

4.2.2 微小推力双元推进技术

研究 $2\ \text{N}$ 级以下的微小推力双元推力器，提高航天器的冲量控制精度，满足有高精度和高稳定度控制要求的航天器的姿态控制需求。

4.2.3 电热肼增强推力器技术

研究 $1\ \text{N}$ 级以下的电热肼增强推力器，将单元肼推力器的比冲从 $220\ \text{s}$ 提高到 $300\ \text{s}$ 左右，用于低轨道卫星平台的轨道提升和轨道机动。

4.2.4 电阻加热推力器技术

研究 $100\ \text{mN}$ 级以下的电阻加热推力器，作为冷气推力器的升级换代产品将比冲从 $60\ \text{s}$ 提高到 $100\ \text{s}$ 以上，用于小卫星平台的姿态控制系统。

4.2.5 基于 MEMS 的固体升华微推进技术

研究具有结构简单、成本低、高可靠性等优点的毫牛级和微牛级的固体升华微推力器，用于天基组网的微小卫星。

5 新概念推进技术需求与发展

5.1 需求分析

推进技术具有很好的继承性，因此不仅要吃透现有技术，还应不断进行新技术的探索。

对于深空探测和宇宙航行，传统的推进方式需要自身携带大量的推进剂，如要快速进行探测和超长时间探测需要的推进剂量将是巨大的，因此必须采用新型推进技术。

5.2 重点发展方向

新概念推进主要有三种基本途径：极高的比冲（如聚变核推进、反物质推进）、动量交换（动量交换绳系、太阳帆、等离子体帆、束能推进等）以及无工质推进。

尽管国内外对新概念推进进行了长时间的广泛研究,但成果并不明显,主要是投入太高且难以验证。因此,应对新概念推进技术进行充分论证,重点发展。建议现阶段重点发展空间核推进技术、太阳热推进技术及太阳帆推进技术。

空间核推进技术包括核电/核热一体化推进技术和基于核电的大功率霍尔推进技术。

核电/核热一体化推进技术要研究空间核热推进与核电推进的可能形式、工作原理、主要技术瓶颈及可能解决方案,提出可行的系统及主要关键部组件方案并通过理论分析计算及适当规模组件级及分系统级的模拟试验,获得这些方案的工作性能并据此提出对材料、工艺、加工能力等综合需求,为下一步开展工程研制和应用奠定基础。

基于核电的大功率霍尔推进技术要以深空探测器主推进为应用背景,结合空间核电源的发展,开展基于核电的大功率霍尔电推进技术研究,突破10 kW级霍尔电推进技术关键技术,形成10 kW级霍尔推力器、二次转换电源的原理样机,为深空探测技术的发展奠定技术基础。

6 结束语

推进技术是一项相对传统的技术,又是一些战略任务的使能技术,注重技术的成熟性,可牵引新概念、新原理及新方法的应用,研制难度大,需要循序渐进。

近年来,我国的空间推进技术取得了很大发展,其中有些已接近世界先进水平,但是总体上与国外相关技术仍存在着较大的差距。因此,为更好地满足我国未来航天技术发展对空间推进技术的需求,提出以下几点建议。

1) 加快化学推进的产品更新换代。我国空间推进技术研究开始较早,目前的大部分技术和产品是很早以前开发的,已经无法满足长寿命、高可靠、高性能和以轻质化、集成化、快速响应、微纳卫星星座等为代表的领域需要,必须加快新产品的开发和老产品的更新换代。

2) 加快无毒推进技术研发进程。随着人类环保意识的提高以及科技的进步,无毒化是化学

推进技术的必然趋势。

3) 加大电推进研究的投入和支持力度,尽早启动大功率电推进技术等的预先研究,尽快形成新技术研发能力,同时努力解决制约电推进发展的瓶颈问题,如长寿命阴极、耐溅射栅极、高效大功率电源等。

4) 微推进研究必须尽快纳入工程研发体系。微推进是一项具有巨大潜力的牵引技术,能广泛带动产品小型化和微型化,将许多前沿技术引入到传统专业技术中,要改变微推进只为微小卫星服务的理念,尽早将它纳入工程产品研发体系。

5) 联合国内优势单位尽早开展新概念推进技术研究。新概念推进具备高风险高回报的特点,需要长期的钻研和投入,单纯依靠一家或几家单位难以胜任。建议由空间推进技术工程应用单位牵头,国内优势单位共同开展工作,同时注重投入的持续性。

参考文献:

- [1] 陈杰. 卫星推进技术发展趋势分析 [J]. 空间推进, 2008 (2): 34-38.
- [2] WILSON F C. Recent advances in satellite propulsion and associated mission benefits AIAA 2006-5307 [R]. USA: AIAA, 2006.
- [3] HAESELER D. Non-toxic propellants for future advanced launcher propulsion systems, AIAA 2000-3687 [R]. USA: AIAA, 2000.
- [4] LI Ping. Affordable upper stage propulsion systems for various space launch vehicle architectures in China[C]// Proceedings of 2007 International Symposium on Space Propulsion. Beijing, China: ISSP, 2007: 10-15.
- [5] MILLS G A, RIESCO M E. Propellant selection for the lunar lander ascent stage, AIAA 2008-7906 [R]. USA: AIAA, 2008.
- [6] SABATHIER Vincent. Propulsive combinations for a simple Mars sample return mission, AIAA 2007-6260 [R]. USA: AIAA, 2007.
- [7] BARNHART D J. Very-small-satellite design for distributed space missions [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2007, 44(6): 1294-1306.

(编辑: 陈红霞)