

# 国外全电推进卫星平台的发展及启示

胡 照, 王 敏, 袁俊刚

(中国空间科技研究院 通信卫星事业部, 北京 100094)

**摘要:** 介绍了国外典型全电推进卫星平台的主要技术参数和最新研制进展, 分析了这些卫星平台及其有关卫星的技术特点和发射情况/计划, 以及全电推进卫星平台的应用优势与市场机遇, 提出了对我国全电推卫星平台发展的启示和建议。

**关键词:** 全电推进; GEO 卫星平台; 发射重量; 姿态控制; 轨道控制; 通信卫星; 市场分析

中图分类号: V439

文献标志码: A

文章编号: 1673-1379(2015)05-0566-05

DOI: 10.3969/j.issn.1673-1379.2015.05.020

## A review of the development of all-electric propulsion platform in the world

Hu Zhao, Wang Min, Yuan Jungang

(Institute of Telecommunication Satellite, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** The technical specifications and the development strategies of main international all-electric propulsion satellite platforms and the corresponding satellites are reviewed in this paper, including the technological advantages, the market opportunities and the impact on the communication satellite industry. A strategy for developing China's all-electric propulsion platform is proposed.

**Key words:** all-electric propulsion; GEO satellite platform; launch weight; attitude control; orbit control; telecommunication satellite; market analysis

## 0 引言

全电推进卫星平台采用高比冲的电推进系统(如离子推力器或霍尔电推力器等)来实现星箭分离后的卫星变轨、入轨后的位置保持、姿态控制及离轨等操作任务<sup>[1]</sup>。全电推进卫星平台的最大优点是可大幅减少推进剂携带量,在携带同等重量有效载荷的情况下可使发射重量减轻约一半<sup>[2]</sup>,从而可实现一箭双星发射,有效降低研制和发射成本,显著提升卫星平台的市场竞争力。

2012年3月,波音公司推出702SP电推进平台,用于轨道转移变轨操作,并获得了4颗通信卫星的发射合同。2015年3月2日,用“猎鹰-9”火箭以一箭双星的方式将ABS-3A、Eutelsat-115WestB两颗全电推进卫星发射升空,预计于11月定点投入使用。截至目前,全球共订购了15颗全电推进卫星。除此之外,美国轨道科学公司、

劳拉空间系统公司、洛马公司,欧洲泰雷兹公司,德国OHB公司,俄罗斯卫星通信公司等都在开展全电推进卫星的研制。

全电推进卫星的发展势头强劲,正在改变通信卫星的市场格局。

## 1 国外全电推进卫星平台发展历程

分析 GEO 卫星飞行的各个阶段任务对速度增量需求,用于轨道转移的需求量最大,其次是南北位置保持。因此,将高比冲的电推进系统用于轨道转移,可以大幅降低卫星的推进剂携带量,从而降低卫星发射重量,提升卫星平台有效载荷承载能力。

国外电推进系统在卫星上的应用主要经历了三个发展阶段:第一阶段,应用于卫星轨道位置保持;第二阶段,应用于卫星部分轨道转移、轨道位置保持和动量轮卸载等<sup>[3]</sup>;第三阶段,应用于卫星全部轨道转移、轨道位置保持和动量轮卸载等<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2015-07-15; 修回日期: 2015-09-16

### 1) 第一阶段

自1995年俄罗斯在MSS-2500-GSO卫星平台上配置了霍尔电推力器以来,国际上主流的通信卫星平台均配置了电推进系统用以实现轨道位置保持,如波音公司的601卫星平台和702SP平台,洛马公司的A2100平台,劳拉空间系统公司的LS3000平台,Alcatel公司的Spacebus-4000平台,Astrium公司的EUROSTAR-3000平台,ESA的Artemis卫星,以及俄罗斯的Express、Seset通信卫星等<sup>[5]</sup>。其中,俄罗斯的Express卫星配置了一套包含8台SPT-100霍尔电推力器的电推进系统用于轨道位置保持,一套由12台无水肼单组元推进器组成的推进系统用于姿态调整。

### 2) 第二阶段

电推进系统的应用从在轨位置保持进一步扩展到轨道转移任务,但受限于电推力器推力较小,该应用方案将增加卫星变轨时间,因此只用于完成部分变轨任务<sup>[5]</sup>。对于发射重量超过5t的大型GEO卫星,先用化学发动机变轨到中间转移轨道,再用电推力器完成变轨,这样可以有效减少推进剂携带量,从而提升有效载荷的承载能力<sup>[6]</sup>。例如,基于A2100M平台的AEHF卫星采用了电推进系统进行部分变轨和南北位置保持,变轨时间增加为100天;虽然变轨时间增加了,但带来的益处是有效载荷承载能力提高到700kg。

### 3) 第三阶段

随着高效电源技术和大推力长寿命电推进技术的发展,可采用电推进系统执行全过程变轨、轨道位置保持和动量轮卸载、离轨等任务,因而实现全电推进。全电推进平台可大大提高有效载荷携带能力或有效减轻卫星发射重量:对于GEO通信卫星,可使卫星发射重量减轻约一半,使卫星平台承载效率从约0.1提升至约0.25;对于深空探测器,如“黎明号”深空探测器,可使推进剂/卫星干重之比从约2.5降至近0.47<sup>[7]</sup>。

## 2 国外全电推进卫星平台研制进展

### 2.1 波音公司的702SP平台

702SP平台尺寸1.8m×1.9m×3.5m;发射重量不超过2t,其中氙气400kg,有效载荷500kg(51

路转发器),有效载荷功率3~8kW;卫星设计寿命15年。该平台采用4台XIPS-25氙离子推力器,单台推力165mN,比冲3500s,功率4.5kW,变轨时需要2台氙离子推力器同时工作。平台采用全电推进实现变轨和位置保持等任务,取消了双组元化学推进系统,有效减轻了卫星发射重量。电推进的变轨机动时间很长,卫星从GTO变轨到GEO需要4~6个月时间<sup>[8]</sup>。

该平台充分继承了702HP平台成熟技术,如超三结砷化镓太阳能电池阵、锂离子蓄电池、零动量三轴控制技术,还采用了创新技术,如新一代综合电子系统,简化了数据管理并增强了卫星健康管理能力<sup>[9]</sup>。

702SP平台卫星由于质量小,从而可采用一箭双星发射,节省发射成本。“猎鹰-9”火箭可发射2颗702SP平台卫星;“阿里安娜-5”火箭具有9t的发射能力,可同时发射1颗大型通信卫星和1颗702SP平台卫星。

### 2.2 OHB公司的Electra平台

2013年10月,ESA及德国OHB公司与全球第二大卫星运营商卢森堡SES公司签订协议,联合开发全电推进卫星平台——Electra平台,首颗SES公司的卫星计划在2018年发射。

Electra平台基于OHB公司的SGEO平台进行开发,发射重量达3000kg。初步考虑配置6台电推力器,其中2台用于变轨,其余4台主要用于轨道位置保持等任务。

SGEO平台采用了经过在轨飞行验证的新技术(包括锂电池、三结砷化镓太阳能电池片)和多频段(S、C、X或Ku)测控技术,可根据具体任务需求改变配置规模,携带了霍尔电推力器和高效率多模式离子推力器,发射重量为1600~3000kg,其中有效载荷200~400kg,有效载荷功率2~4kW。首发星为2009年签订合同的西班牙Hispaat AG1卫星,可采用多种运载火箭发射直接入轨。

### 2.3 轨道科学公司的STAR-3平台

2014年2月,轨道科学公司(卫星和火箭制造商)表示,除了推出Antares新型火箭之外,还将投资2500万美元开发新型商业通信卫星平台——GEO STAR-3全电推进平台。

## 2.4 欧洲的 Eurostar-3000 平台及其电推进卫星

Eurostar-3000 平台是欧洲空客公司研制的大型通信卫星平台,同时又在该平台基础上推出了 Eurostar-3000EOR 扩展平台<sup>[10]</sup>。欧洲的宇航公司正在基于 Eurostar-3000 平台开发新型全电推进卫星。

### 1) Eutelsat 172B 卫星

欧洲通信卫星公司 (SES) 提出了首颗全电推进卫星——Eutelsat 172B 的研制计划,由空客防务与航天公司负责建造,拟在 2017 年上半年用“阿里安娜-5”火箭发射。

Eutelsat 172B 卫星基于 Eurostar E3000 平台开发,配备了等离子体推力器(由法国飞机引擎公司制造),发射重量 3500 kg,有效载荷功率 13 kW,设计寿命 15 年。利用 11 个 Ku 波段点波束实现 1.8 GByte/s 的大吞吐量容量,用于全球航空宽带的服务。除大吞吐量点波束外,还配备 36 路常规 Ku 转发器和 14 路 C 波段转发器。Eutelsat 172B 为第一个使用动态分配功率的卫星,在降低发射成本的同时,希望将轨道转移时间控制在 4 个月内。

### 2) SES-12 卫星

SES 公司选择空客防务和宇航公司研制一颗覆盖东亚的大型 Ku/Ka 频段宽带卫星,卫星将使用电推进系统进行位置保持和轨道转移。

SES-12 卫星是 SES 公司在 Eurostar-3000 平台上研制的电推进卫星,计划于 2017 年年底发射,使用寿命将达 15 年以上,发射重量为 5.3 t。若采用传统的化学推进,则发射重量将超过 6 t,使发射成本大增。星上携带了 68 路大功率 Ku 频段转发器和 8 路 Ka 频段转发器,同时配备 8 副反射器天线,有效载荷功率为 19 kW。根据运载火箭的不同,SES-12 卫星将花费 3~6 个月的时间完成转移定点,而采用传统的化学推进方式,则仅需数周的时间。

## 2.5 NextStar 卫星

卫星服务商阿尼亚拉空间通信公司已同卫星制造商道里亚宇航公司签订了 2 颗全电推进的 Ku 波段静止轨道通信卫星 (NextStar-1 和 NextStar-2) 的研制合同,总造价 2.1 亿美元,每颗发射重量不到 1 t,使用寿命 10~15 年。其中有效载荷 300 kg (12~16 路 Ku 波段转发器),总功率 3 kW。

该卫星采用了由 Dauria 公司与西班牙 Elecnor

Deimos 公司以及其他制造商共同研制的平台,其中电推进系统和多项创新技术经过了飞行验证,旨在实现卫星的高性能、低成本和长寿命。卫星计划在 2017 年年底用 GSLV 火箭 (最新型号) 以一箭双星方式进行发射<sup>[11]</sup>。

## 2.6 Express-AM5 卫星

RSCC 公司研制的 Express-AM5 卫星采用了 Express-2000 平台 (是 Express 系列中承载能力最强、功率最大的平台),使用霍尔电推力器实现轨道提升。卫星有 2 种全电推进的配置类型,它们的指标为:第一种,发射重量 3400 kg,其中有效载荷 1100 kg,功率 13 kW,设计寿命 15 年;第二种,发射重量 4500 kg,其中有效载荷 1500 kg,功率 16 kW,设计寿命 15 年。

卫星于 2013 年 12 月由“质子号”运载火箭发射升空,2014 年 3 月到达工作位置,并且验证了电推进系统的轨道提升机动。

## 3 全电推进卫星平台的应用优势

### 3.1 减轻卫星发射重量,提高承载效率

以某中等容量 GEO 通信卫星为例,假设有效载荷重量为 500 kg,功率 8 kW,设计寿命 15 年,分别对比全化学推进、混合推进和全电推进 3 种方案的卫星发射重量和承载效率 (有效载荷重量和发射重量之比),如图 1 所示。在有效载荷重量和在轨寿命相同的情况下,电推进系统应用的程度越高,发射重量越轻,而承载效率越高<sup>[12]</sup>。

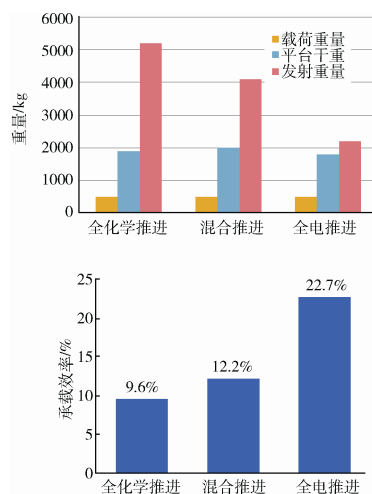


图1 不同推进方案对卫星发射重量和承载效率的影响  
Fig. 1 Effect of different propulsion modes on the launch weight and carrying efficiency

### 3.2 降低卫星综合成本, 提高市场竞争力

由于全电推进平台的承载效率提高, 从而可减少卫星的研制费用。另一方面, 全电推进平台卫星由于重量轻, 所以可以采用中小型火箭或一箭双星发射, 降低运载火箭费用。

以基于 702SP 平台研制的 ABS-3A 卫星为例, 采用“猎鹰-9”火箭一箭双星发射, 发射费用 6500 万美元低于“阿里安娜-5”火箭(约 1 亿美元)和“质子号”火箭(约 8000 万美元)的。ABS-3A 卫星装载了 51 个 C 频段和 Ku 频段的转发器, 单星造价约 1 亿美元, 每颗卫星的火箭费用 3250 万美元, 分摊至每路转发器仅为 300 万美元(考虑研制成本和发射成本等折合后的价格), 远低于目前国际市场上每路转发器 500 万美元的平均价格, 竞争优势非常显著。

### 3.3 突破化学推进比冲限制, 增加卫星在轨服务寿命

以平台干重为 1300 kg 的卫星为例, 采用电推进进行轨道位置保持和姿态控制, 平均每年氙气的消耗量约为 7 kg; 而化学推进每年推进剂的消耗量约为 55 kg。另外, 卫星寿命末期利用电推进实施离轨所需的推进剂消耗量较少。

根据上述消耗, 若携带与化学推进相同的推进剂量, 则显然可增加卫星在轨服务寿命<sup>[13]</sup>, 甚至使卫星寿命突破 20 年。寿命的延长, 可使得卫星的产出/投入之比大幅增加。

### 3.4 实施小推力推进, 有助于有效载荷的精确控制

卫星的轨道倾角和偏心率快要超出控制范围时, 需要执行轨道位置保持操作。对于化学推进, 通常每周或每 2 周点火 1 次; 对于电推进, 可以每天自主进行倾角和轨道偏心率控制, 每次的控制幅度很小, 有助于保持很高的轨道控制精度, 这对于高精度轨道控制任务尤其是多星共轨任务是非常有利的。

在进行卫星轨道位置保持或动量轮卸载时, 由于化学推进的推力较大, 有时会引发卫星的姿态扰动, 不能满足部分高精度有效载荷的控制需要。而电推进的推力较小, 一般为几十 mN 的量级, 产生的姿态干扰非常小, 甚至可以忽略不计, 这对于带有大型挠性天线的通信卫星或者对于姿态稳定度

有特殊要求的激光通信卫星是非常有利的。

## 4 全电推进卫星平台的市场机遇

2013 年 6 月, 美国商业航天运输管理协会和商业航天运输咨询委员会联合发布了《2013 年商业航天运输预测报告》, 对国际通信卫星市场发射情况进行了统计, 对未来发射数量作出了预测(见图 2)。据统计, 2015 年—2022 年, 国际市场质量 4200 kg 以下的中小型通信卫星市场需求将占到 41%。可见, 低成本中型通信卫星将在国际市场上占据重要地位。

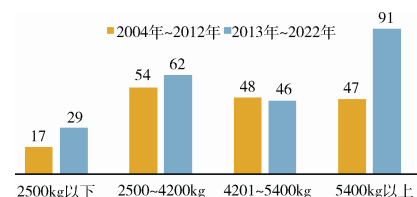


图2 未来商业卫星发射需求

Fig. 2 Market demand of telecommunication satellites in the future

据统计, 2026 年前预计将有 310 颗卫星退役, 年均退役数量为 21 颗(如图 3 所示)。同样, 我国 2000 年年初发射的多颗中等容量通信卫星, 也将陆续达到服务寿命。

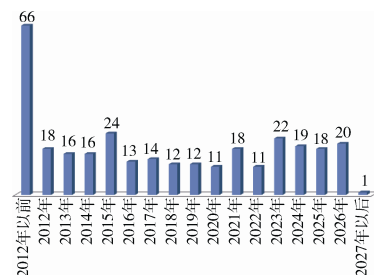


图3 全球在轨 GEO 民商用通信卫星未来每年退役数量统计

Fig. 3 The number of civil and commercial telecommunication satellites to be retired in orbit per year

从未来通信卫星市场的发展来看, 中小型卫星越来越有取代大型通信卫星的趋势。2011 年, 全球四大通信卫星运营商完成了大型、超大型通信卫星的更新换代; 之后, 全球大型、超大型通信卫星的需求趋于平稳, 并有逐年递减的趋势<sup>[14]</sup>。与此同时, 中、小型通信卫星以其较低的成本、较短的研制周期和较高的灵活性更加受到青睐。全电推进卫星平台十分契合未来市场需求, 既可以用于新兴市场的开拓, 也可以用于退役卫星的补充发射市场。

空客公司卫星部总裁 Beranger 在 2014 年 9 月 3 日的《Space News》上指出: 在过去一年中, 将

近 1/4 的运营商发出了全电推进卫星的招标需求。法国航天局 (CNES) 在 2015 年 3 月 9 日的《Space News》上宣称: 到 2020 年 50% 的商业通信卫星都将是全电推进卫星。

## 5 启示与建议

全电推进卫星已成为通信卫星领域发展的热点方向之一。为适应快速发展的通信卫星市场, 我国应积极研发全电推进卫星。具体建议如下:

1) 充分论证全电推进卫星市场需求, 并进行合理的全电推进卫星能力定位和总体技术指标分析, 做好相应的型谱设计与发展规划。全电推进卫星平台要以替代现有卫星平台产品为目的, 突出自身优势, 丰富和增加我国现有卫星平台型谱及配置灵活性, 增强在通信卫星市场的竞争力, 为用户提供多种方案选择空间。2) 全电推进卫星以高承载能力和高性价比占优, 在进行方案设计时要充分考虑经济性指标, 控制卫星发射重量, 保证其在市场上的竞争力。同时, 要充分利用国内低成本运载工具, 采用一箭双星或与其他卫星搭载发射, 尽量降低运载成本。3) 对于全电推进卫星而言, 运营商将会顾虑由于采用电推进变轨而导致卫星延迟在轨交付用户的问题。解决方案之一是优化平台研制流程, 压缩卫星研制周期; 之二是充分利用多余运载能力和电推进高比冲特点, 增加卫星设计寿命。4) 须具备较强的载荷适应能力。比如, 对于 Ka 频段有效载荷, 其特点为重量轻, 但功率需求大, 要求全电推进卫星平台能够有较高的载荷功率; 而对于具有星上处理能力的载荷, 要求全电推进卫星平台有较大的载荷承载能力和设备布局空间。5) 对于我国全电推进卫星平台发展路线, 建议先着眼于中小型通信卫星市场, 发展 2.5 t 级发射重量的基本型, 突破电推进、电源、结构、轨道转移与位置保持等关键技术, 支持“长征三号乙”火箭的一箭双星发射, 提升我国卫星平台市场竞争力, 形成基本能力后再着眼发展后续增强型谱和扩展型谱。

### 参考文献 (References)

- [1] 周志成, 高军. 全电推进 GEO 卫星平台发展研究[J]. 航天器工程, 2015, 24(2): 1-6  
Zhou Zhicheng, Gao Jun. Development approach to all-electric propulsion GEO satellite platform[J]. Spacecraft Engineering, 2015, 24(2): 1-6
- [2] Konstantinov M. The analysis of influence of electrical propulsion characteristics on efficiency of transport maneuvers[C]//Proceedings of the 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, IEPC-2007-212. Florence, Italy, 2007: 1-18
- [3] 温正, 王敏, 仲小清. 多任务模式电推进技术研究[J]. 航天器工程, 2014, 23(1): 118-123  
Wen Zheng, Wang Min, Zhong Xiaoqing. Multi-task mode electric propulsion technologies[J]. Spacecraft Engineering, 2014, 23(1): 118-123
- [4] 边炳秀, 魏延明. 电推进系统在静止轨道卫星平台上应用的关键技术[J]. 空间控制技术与应用, 2008, 34(1): 20-24  
Bian Bingxiu, Wei Yanming. Key techniques for the application of electric propulsion system in the geostationary satellite platform[J]. Aerospace Control and Application, 2008, 34(1): 20-24
- [5] Tarantonio A. Final stage of ARTEMIS orbit raising[C]//2<sup>nd</sup> AIAA “Unmanned Unlimited” Systems, Technologies, and Operations. San Diego, California, 2003
- [6] 刘悦. 全电推进卫星平台未来发展前景分析[J]. 国际太空, 2014(7): 11-15
- [7] 段传辉, 陈荔莹. GEO 卫星全电推进技术研究及启示[J]. 航天器工程, 2013, 23(6): 99-104  
Duan Chuanhui, Chen Liying. Research and inspiration of all-electric propulsion technology for GEO satellite[J]. Spacecraft Engineering, 2013, 23(6): 99-104
- [8] Feuerborn S A, Neary D A, Perkins J M. Finding a way: Boeing's all electric propulsion satellite[C]//Proceedings of the 49<sup>th</sup> AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. Washington DC, 2013: 1-5
- [9] Ocampo C. Geostationary orbit transfer using electric propulsion for the Hughes HS-702 Satellite[C]//49<sup>th</sup> International Astronautical Congress. Melbourne, Australia, 1998-09-28
- [10] 周志成, 王敏, 李烽, 等. 我国通信卫星电推进技术的工程应用[J]. 国际太空, 2013(6): 40-45
- [11] Dutta A, Libraro P, Kasdin N J. Design of next-generation all-electric telecommunication satellites[C]//31<sup>st</sup> AIAA International Communication Satellite System Conference. Florence, Italy, 2013-10-14
- [12] Rathsmann P. ELECTRA: The implementation of all-electric propulsion on a geostationary satellite[C]//64<sup>th</sup> International Astronautical Congress. Beijing, 2013-09
- [13] Monika A K. Optimization of electric thrusters for primary propulsion, AIAA-2001-3347[R]
- [14] Henri Y. Brief overview of space market[G]. ITU Radiocommunication Bureau, 2010-02-03

(编辑: 肖福根)

作者简介: 胡 照 (1984—), 男, 主任设计师, 从事航天器系统总体设计工作。E-mail: huzhao1984@aliyun.com。