

# 航班化航天运输系统对动力的发展需求与技术挑战

包为民<sup>1</sup>, 汪小卫<sup>2</sup>, 董晓琳<sup>2</sup>

(1. 中国航天科技集团有限公司, 北京 100048; 2. 中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

**摘 要:**结合航班化航天运输系统的概念特征及后续发展思路, 首先研究了航班化航天运输系统动力技术的特征需求, 并从 1 h 全球抵达和天地往返运输系统建设以及空间转移运输系统建设两个方面提出对动力技术的总体发展需求, 最后从明确发展路线、转变设计理念、加强基础研究和发新型动力这 4 个方面, 提出我国发展航班化航天运输系统的动力技术挑战。

**关键词:**航班化; 航天运输系统; 航天动力

**中图分类号:**V475.1      **文献标识码:**A      **文章编号:**1672-9374(2021)04-0001-05

## Development demands and challenges of propulsion technology for space transportation system in airline-flight-mode

BAO Weimin<sup>1</sup>, WANG Xiaowei<sup>2</sup>, DONG Xiaolin<sup>2</sup>

(1. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;

2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

**Abstract:** Considering the conceptual characteristics and the development road-map of space transportation system in airline-flight-mode, the characteristic demand of the propulsion system for airline-flight-mode aerospace transportation are proposed firstly. Then, the overall development demand of propulsion technology are put forward from two aspects: the development of 1 h global arrival and space shuttle and the development of space transfer transportation system. Finally, the technical challenges of propulsion technology for aerospace transportation system in airline-flight-mode are summarized as four aspects, which include determining the development road-map, changing the design methodology, strengthening the fundamental research and developing the innovative propulsion technologies.

**Keywords:** airline-flight-mode; space transportation system; space propulsion

## 0 引言

我国航天动力技术经过 60 多年的发展, 取得了辉煌的成就, 有力支撑了长征系列运载火箭的创新发展, 特别是我国新一代运载火箭的首飞和工程应

用, 为我国各类航天重大工程的顺利实施奠定了坚实基础。

当前, 世界航天已进入以大规模互联网星座建设、空间资源开发、载人月球探测和大规模深空探测为代表的新阶段, 进入空间需求正在快速增长,

收稿日期: 2021-05-27; 修回日期: 2021-06-20

基金项目: 中国科学院学部咨询评议项目(2020-XX03-B-027)

作者简介: 包为民(1960—), 男, 中国科学院院士, 研究领域为制导与控制。

对航天运输系统提出了越来越高的要求<sup>[1-5]</sup>。航班化运输系统已成为航天运输系统的重要发展目标,以美国为代表的世界主要航天国家正在持续向航班化运输迈进<sup>[1]</sup>。

航班化航天运输采用定期定线路的航班化运营模式,具有可靠、安全、经济、便捷、舒适、环保的基本特点,其产品体系主要包括 1 h 全球抵达运输系统、天地往返运输系统和空间转移运输系统等,如图 1 所示,具有长寿命、智能化、模块化、标准化、产业规模化等技术特征<sup>[1]</sup>。

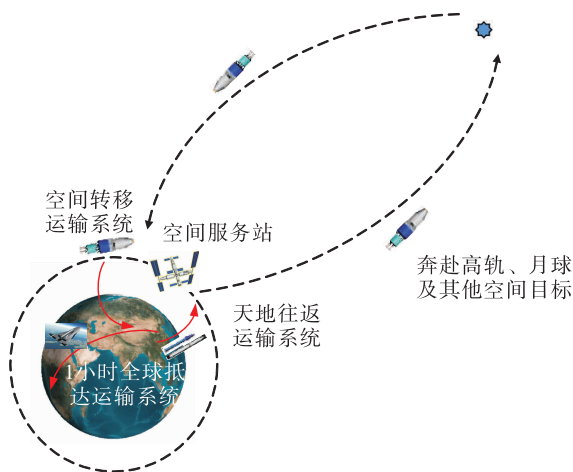


图 1 航班化航天运输系统功能及运行示意图

Fig. 1 Function and operation schematic of space transportation system in airline-flight-mode

发展航班化航天运输系统未来前景广阔,意义重大,其性能指标提升跨度大,对我国航天动力技术提出了更高的要求,也是我国航天动力技术实现跨越式发展,赶超国际先进水平的良好契机。本文结合航班化航天运输系统的概念特征及后续发展思路,提出了航班化航天运输系统对动力的发展需求与技术挑战。

## 1 航班化航天运输系统动力技术的特征需求

为支撑航班化航天运输系统的实现,其动力系统需要具备高可靠、低成本、高性能、易组装、易检测、易维护等基本特点,主要产品包括液体火箭发动机、组合动力和大功率电推进等类型,如图 2 所示,需具备长寿命、智能化、标准化、批产化等技术

特征,其中液体火箭发动机能够全面支撑航班化航天运输系统的建设,组合动力重点支撑 1 h 全球抵达和天地往返运输系统的建设,大功率电推进重点支撑空间转移运输系统建设<sup>[1]</sup>。

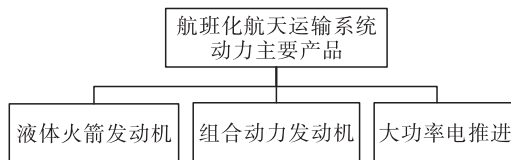


图 2 航班化航天运输系统动力主要产品组成

Fig. 2 Main propulsion product of space transportation system in airline-flight-mode

结合未来我国航班化航天运输系统总体性能指标需求<sup>[1]</sup>,提出如下我国航班化航天运输系统动力技术发展指标需求:

- 1) 飞行可靠性不低于 0.999;
- 2) 单次使用成本较当前下降 1~2 个量级;
- 3) 单发动机总飞行次数达百次及以上,工作寿命达数千小时及以上,具备 12 h 内快速检测维护、再次使用的能力。

### 1.1 1 h 全球抵达和天地往返运输系统动力技术特征需求

为适应航班化航天运输系统技术发展需求,发动机需具备更高的单次使用可靠性、更长的循环工作寿命;需要具备大范围连续变推力和全空域大速域宽过载域多次点火的能力,满足 1 h 全球抵达和天地往返运输系统复杂任务剖面的工作要求;发动机关键部件的工作状态要实现实时监测,薄弱环节的关键参数要实现全面可检可测,同时要具备自主健康监控与故障诊断能力,以满足长寿命工作的可靠性要求;发动机主要模块需易维修、易拆卸、易更换,且发动机要具备智能快速测发能力<sup>[6]</sup>,以支撑 12 h 内再次使用的要求。

### 1.2 空间转移运输系统动力技术特征需求

空间转移运输系统发动机同样需具备更高的单次使用可靠性、更长的循环工作寿命;还需具备在轨微重力真空环境下按需可靠点火能力;由于在轨工作条件下多处于自主状态,发动机关键部件的工作状态要实现实时自主监测,薄弱环节的关键参数要实现全面自主可测,具备自主健康监控与故障

诊断能力,以满足在轨条件下对动力系统执行任务能力及可靠性评估;发动机为具备长工作寿命下正常工作能力,需备故障冗余与切换功能,以实现在轨条件下全生命周期无人维护。

2 航班化航天运输系统对动力技术的总体发展需求

瞄准航班化航天运输系统发展路线和动力技术发展指标要求,结合我国当前动力技术发展现状,分析提出我国航班化航天运输系统动力技术总体发展需求,全面支撑航班化航天运输系统建设。

2.1 1 h 全球抵达和天地往返运输系统建设

近期,完成覆盖 120 t 级液氧烃类重复使用火箭发动机技术攻关,参与全系统飞行试验,具备工程应用条件。开展组合循环发动机技术攻关及原理性飞行试验验证。

中期,实现覆盖 200 t 级重复使用液氧甲烷火箭发动机工程应用,重复使用达 50 ~ 100 次,使用维护性能大幅提升,性能达到国际同期先进水平。实现组合循环发动机技术突破,支撑完成两级入轨组合动力运载器飞行试验,具备工程应用条件。

远期,重复使用火箭发动机性能不断提升。复合预冷组合循环发动机完成研制,具备支撑运载器单级入轨飞行能力。重复使用次数达 100 次以上,工作寿命达数小时以上,具备 12 h 内快速检测维护、再次使用的能力。

2.2 空间转移运输系统建设

近期,提升当前氢氧末级发动机性能,具备多次起动和在轨数天的滑行能力;完成液氧烃类上面级发动机关键技术攻关;支撑我国高性能低温空间运输系统发展。开展大功率电推进等新型空间推进技术研究和攻关。

中期,不断提升氢氧末级发动机性能,实现液氧烃类上面级发动机工程应用,具备在轨数周的滑行能力,技术成熟度与可靠性不断提高。完成 100kW 级电推进发动机飞行验证工作,具备工程应用条件。

远期,空间低温发动机性能不断提升,具备在轨自主快速检测维护、智能任务规划和智能飞行能力;实现兆瓦级电推进发动机工程应用,空间核热

推进技术实现突破,与空间低温推进技术搭配使用。

3 动力技术发展的挑战

3.1 明确发展路线

一是实施火箭发动机型谱优化。我国已形成由液氢液氧、液氧煤油发动机组成的新一代运载火箭主力发动机型谱,包括 YF-75、YF-75D、YF-77、YF-100、YF-115 等。液氢液氧发动机推力覆盖 50 t 级,液氧煤油发动机推力覆盖 120 t 级,当前正在开展覆盖 480 t 级液氧煤油发动机、覆盖 220 t 级液氢液氧发动机以及覆盖 200 t 级液氧甲烷发动机等多型发动机的研制或技术攻关工作,亟需结合我国航班化航天运输系统未来发展需求,开展型谱优化,明确发展路线,实现梯度合理、指标先进、使用灵活、工作可靠。

二是明确重复使用发动机发展路线。在重复使用火箭动力类型的选择方面,当前主要考虑液氧煤油和液氧甲烷两种动力类型<sup>[7-9]</sup>。表 1 给出了液氧煤油和液氧甲烷发动机性能对比情况,可以看出,液氧甲烷发动机比冲相较液氧煤油发动机高 3% 左右,且由于其含碳量较低,不易积碳,重复使用性能更好。

表 1 液氧煤油与液氧甲烷发动机性能对比  
Tab. 1 Performance comparison of liquid oxygen/kerosene and liquid oxygen/methane engines

项目	液氧煤油发动机	液氧甲烷发动机
组合密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.037	0.823
理论比冲/(m·s <sup>-1</sup> )	3 367	3 481
理论密度比冲/(m·s <sup>-1</sup> )	3 448	2 881
燃料冷却性能	较好,但易积碳	好,不易积碳
重复使用性能	较好,但需要清洗	好

表 2 给出了国际上重复使用运载火箭动力类型的选择情况,可以看出两种类型发动机均有应用,但重复使用液氧甲烷发动机更加广泛。在组合动力发动机类型方面,当前研究类型多样,包括 RB-CC、TBCC、ATR、TRRE、PATR 等<sup>[10]</sup>,也需在近几年研究的基础上,提出具有中国特色的发展路线。

表 2 国际上重复使用火箭动力类型选择  
Tab. 2 Propulsion type selection of reusable launch vehicle in the world

国家/地区	液氧煤油重复使用火箭	液氧甲烷重复使用火箭
	Falcon-9/H (SpaceX)	星舰 (SpaceX)
美国	电子号 (火箭实验室)	新格伦 (蓝源)
	-	火神 (ULA)
欧洲	-	下一代阿里安 (空客)
俄罗斯	-	阿穆尔号 (俄航天集团)

动力的选择对航班化航天运输系统未来的发展具有重要意义,影响深远,需明确动力类型在航班化航天运输系统中的应用和发展规划。

### 3.2 转变设计理念

动力系统功率密度大、工作参数高、工作环境恶劣,是制约航天运输系统寿命提升的关键所在,发动机的重复使用和工作寿命是实现航天运输系统航班化运营的重要影响因素。目前我国液体火箭发动机采用一次性使用设计,工作寿命在数百秒到数千秒,要实现百次及以上的重重复使用和数小时以上的工作寿命充满挑战,需打破传统、大力创新,转变设计理念,实现从一次性使用到重复使用、从性能设计到寿命设计、从粗放式设计到精细化设计、从不易检测到智能健康管理的转变,不断构建我国发动机重复使用和长寿命设计标准体系。

在重复使用和长寿命设计方面:

1) 提升满足重复使用任务需求的能力。实现发动机大范围推力深度调节及性能保持、多次点火等能力,以满足重复使用航天运输系统的工作任务需求。

2) 改进发动机系统设计。通过选择固有重复使用性能高和工作寿命长的系统方案,并开展系统方案创新设计,从设计源头为发动机重复使用和长寿命工作创造条件;在此基础上,瞄准目标指标要求,适当降低发动机系统工作参数,为组件工作创造更良好的工作环境,提升发动机工作寿命。

3) 建立发动机全寿命周期设计方法。以疲劳寿命、耐久性与损伤容限设计为基础,制定发动机寿命设计模型及准则,形成全寿命周期设计方法。

4) 建立重复使用和长寿命发动机寿命评估验证方法。研究发动机部件损伤机理,开展微细观力

学本构模型研究,形成跨尺度仿真评估方法;建立寿命试验评估方法,通过模拟工作环境,试验考核零部件的有效寿命。

5) 大量应用新材料、新工艺和新技术。应用新材料提升部组件在恶劣环境下的工作性能,应用增材制造等新工艺来降低消除非均质材料缺陷,并采用一体化精细化设计方法,提升发动机重复使用性能及长寿命工作能力。

在高效便捷使用维护方面,当前为了提高推质比、减小结构尺寸,火箭发动机结构设计紧凑,且装配完成后很多组件难以或无法独立拆解,使得发动机使用维护难度大、代价高。针对未来航班化航天运输系统的发展目标,一是考虑发动机易组装和易拆卸设计,特别是涡轮泵、推力室这样的关键部件应用增材制造等先进工艺大幅减少或消除焊缝,采用模块化设计,能够方便地独立快速拆卸,或在尽可能少影响其他部件的前提下实现快速拆卸,提高发动机的快速维护性能;二是采用超声波、X 光等先进检测技术提高重复使用发动机可检程度;三是采用智能化技术提升快速测试发射和检测维护的效率、准确度及全面性,全面提高发动机使用维护快速性、便捷性和有效性。

### 3.3 加强基础研究

当前我国主力液氧煤油和液氢液氧发动机在推力、比冲、推质比等关键性能方面与美国、俄罗斯等国际先进水平还存在明显差距<sup>[7]</sup>,需大力提升我国主力发动机设计研制水平,为航班化航天运输系统动力技术发展指标的奠定坚实基础。存在差距的重要原因之一在于大量长期制约我国液体火箭发动机性能提升的基础问题尚未得到根本解决,因此亟需加强相关基础问题研究,包括高效燃烧组织及燃烧不稳定性问题、高压大热流环境传热与可靠冷却问题、涡轮泵高速转子动力学及异常振动问题、微重力环境低温推进剂气液两相流问题、复杂流动精细组织及优化设计、复杂过渡过程系统动力学特性及参数精准预示以及全过程载荷环境预示与复杂结构疲劳失效机理等。

### 3.4 发展新型动力

发展以组合动力、爆震推进和大功率电推进技术为代表的新型动力技术,加快突破核心关键技术,提升性能和技术成熟度,尽早具备工程应用条

件,更好地支撑航天运输系统实现航班化运营。同时,需进一步探索以激光推进、核推进等为代表的未来新型动力技术。

## 4 结论

世界航天即将迎来大规模进出空间的“航班化航天运输时代”,建设航班化航天运输系统对动力技术提出了更高的要求。发展航班化航天运输系统动力技术,机遇与挑战并存,诸多难题有待解决。需立足我国现状基础,明确发展路线,转变设计理念,加强基础研究,发展新型动力,应用新技术,探索新方法,解决新问题,构建新体系,大力支撑建成世界一流水平的航班化航天运输系统。

### 参考文献:

- [1] 包为民,汪小卫. 航班化航天运输系统发展展望[J]. 宇航总体技术,2021,5(3):1-6.
- [2] BAO W M, WANG X W. Develop high reliable and low-cost technology of access to space, embrace new space economy era[J]. China Aerospace, 2020(1):1-6.
- [3] SCOTT D W, CURRERI P A, FERGUSON C K, et al. Germinating the 2050 cis-lunar econosphere[C]//2015 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT:IEEE, 2015:1-16.
- [4] KUTTER B F, SOWERS G F. Cislunar-1000:Transportation supporting a self-sustaining space economy [C]//AIAA SPACE 2016. Long Beach, California. Reston, Virginia: AIAA, 2016.
- [5] 王小军. 中国航天运输系统未来发展展望[J]. 导弹与航天运载技术, 2021(1):1-6.
- [6] 李洪. 智慧火箭发展路线思考[J]. 宇航总体技术, 2017, 1(1):1-7.
- [7] 谭永华, 李平, 杜飞平. 重复使用天地往返运输系统动力技术发展研究[J]. 载人航天, 2019, 25(1):1-11.
- [8] 李斌, 张小平, 高玉闪. 我国可重复使用液体火箭发动机发展的思考[J]. 火箭推进, 2017, 43(1):1-7.
- [9] 郑大勇, 颜勇, 孙纪国. 液氧甲烷发动机重复使用关键技术发展研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(2):31-35.
- [10] 张蒙正, 张玫. 航天运载器重复使用液体动力若干问题探讨[J]. 火箭推进, 2019, 45(4):9-15.
- [11] LI B, ZHANG X P, GAO Y S. Consideration on development of reusable liquid rocket engine in China[J]. Journal of Rocket Propulsion, 2017, 43(1):1-7.
- [12] ZHANG M Z, ZHANG M. Discussion on some problems of reusable liquid-propellant engine [J]. Journal of Rocket Propulsion, 2019, 45(4):9-15.