

航班化航天运输系统发展展望

包为民¹, 汪小卫²

(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: 航班化运输已成为航天运输系统发展的重要目标。聚焦航班化航天运输系统未来发展, 首先分析了发展需求, 提出了航班化航天运输系统概念组成、发展目标和指标要求, 总结了国内外发展态势, 最后从重复使用航天运输系统建设和空间转移运输系统建设两个方面, 展望了我国航班化航天运输系统的未来发展。

关键词: 航班化; 航天运输系统; 概念组成; 发展展望

中图分类号: V475.1 文献标识码: A 文章编号: 2096-4080 (2021) 03-0001-06

Prospect of Airline-Flight-Mode Aerospace Transportation System

BAO Weimin¹, WANG Xiaowei²

(1. China Aerospace Science and Technology Corporation, Beijing 100048, China;
2. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: Currently, airline-flight-mode transportation has become an important development objective of aerospace transportation system. Firstly, the future development requirement is analyzed. The concept and architecture, the construction objective and index of airline-flight-mode aerospace transportation system are presented. The domestic and abroad development trends of aerospace transportation system are summarized, and in the end the development prospect of China airline-flight-mode aerospace transportation system are proposed, which includes the reusable aerospace transportation system and on-orbit transfer system.

Key words: Airline-flight-mode; Aerospace transportation system; Concept and architecture; Development prospect

0 引言

航天运输系统作为一个国家开展航天活动的支撑和基础, 是其综合国力的重要标志^[1]。经过60多年的发展, 我国长征系列运载火箭已经形成了较为完备的产品系列, 为我国载人航天、月球探测、火星探测等重大工程的顺利实施奠定了坚实基础。

人类对太空的依赖与日俱增, 太空领域是21

世纪世界大国争夺的重要疆域, 航天技术正发挥着越来越重要的作用。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, 对航天运输系统提出了更高要求^[2-3]。像飞机一样实现航班化运营, 是革命性提升航天运输系统能力的重要途径。

以美国为代表的世界主要航天国家正在持续提升航天运输系统性能, 发展重复使用、智能化、

收稿日期: 2021-03-19; 修订日期: 2021-05-10

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, 主要研究方向为制导与控制。E-mail: baoweimin@cashq.ac.cn

先进结构、高性能发动机、高性能空间转移运输等技术,不断向航班化运输迈进^[3-13]。

站在新的历史节点上,我国应抓住机遇,迎接挑战,发展航班化的航天运输系统,迎接航天运输发展的新时代。本文提出了航班化航天运输系统概念组成、发展目标和指标要求,并从重复使用航天运输系统建设和空间转移运输系统建设两个方面,展望了我国航班化航天运输系统的未来发展。

1 发展需求

1.1 能够满足人类生存与发展的需求

“地球是人类的摇篮,但人类不会永远生活在摇篮里。”航天科技的发展,能够帮助人类更好地认识地球、太阳系、宇宙以及探索生命之源等基础问题,能够帮助解决人类社会发展中遇到的贫穷、灾难、疾病以及人口快速增长带来的能源匮乏、资源短缺等各类问题。航班化航天运输系统是实现人类自由进出太空、开发和利用太空资源、寻求新的生存与发展空间的基础,能更好地服务于人类未来的生存与发展。

1.2 能够满足人民对未来美好生活向往的需求

每一次运输方式的变革都会带来人类生活方式和生活水平的革命,例如高铁、飞机的商业运行不仅带来人们出行方式的改变,还带来了经济、文化、生活、观念上的变化,并深刻影响着社会的各个方面。随着人民生活水平的提高,对交通运输的速度和范围提出了更高要求,例如人们对太空旅游关注度日益升高,“一小时全球抵达”已提上日程,航班化航天运输系统是实现以上需求的重要技术基础。

1.3 能够满足未来大规模探索与开发太空的需求

大规模探索与开发太空将为人类提供更广阔的活动空间、更丰富的物质资源,也是经济实现健康增长的新动能,将带动相关科学技术快速发展。预计到2045年进入空间载荷规模将达万吨级^[14],宝贵的太空轨道、频段、资产等太空资源将日趋紧张。发展航班化航天运输系统能够满足未来大规模进入空间需求,以更高效更大规模开发和利用空间资源,支撑未来大规模地月空间探索与开发、大规模深空探测、小行星探测与开发、火星移民等重大航天任务的实施。

1.4 能够满足我国航天运输系统“从全到强”的历史跨越

航天运输系统是一切航天活动的基础,也是航天强国的重要标志。自1970年长征一号运载火箭发射半个世纪以来,我国运载火箭已经走过了“从无到有”“从有到全”的历史进程,正迈入“从全到强”的时代;着眼于未来发展,发展航班化航天运输系统,能够实现我国航天运输系统“从全到强”的历史转变,支撑航天强国建设,实现近地空间运输便捷经济、地月空间运输高效可靠、星际空间运输自主可达。

1.5 能够带动我国国防、科技、经济全方位发展

发展航班化航天运输系统,能够带动设计理论和方法、动力与能源问题、智能控制问题、高超声速气动问题、材料的极端服役疲劳问题、多学科耦合与优化问题等基础科学问题的研究,带动重复使用技术、高性能发动机、先进热防护、复杂大型结构、高精度制导控制等重大关键技术的突破,引领科技创新发展新方向;也将带动诸多传统产业的创新发展,并促进以太空资源开发、太空旅游、太空制造等为代表的新型产业的兴起,推动我国国防、科技、经济全方位发展。

2 概念组成

航班化航天运输含全球快速运输,地面与轨道间运输,以及轨道与轨道间运输,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,能够满足未来大规模进出空间、探索空间和开发空间的任務需求,促进航天产业的发展。

航班化航天运输系统产品体系主要由1h全球抵达运输、天地往返运输和空间转移运输等3类系统组成,具有重复使用、智能化、模块化、标准化、产业规模化等技术特征。

1h全球抵达运输系统主要负责人/货往返地球表面与亚轨道之间的高超声速运输,技术途径主要为可重复使用运载+高超声速技术;天地往返运输系统负责地面与地球轨道之间的人/货往返的运输,技术途径主要为可重复使用运载+高超声速技术;空间转移运输系统主要负责地球轨道、在轨服务站以及月球轨道之间的往返运输,兼顾更远深空转移运输任务,技术途径主要为轨道间转移运载器+自主交会对接技术、新型空间动力

技术、在轨加注和维护技术等。

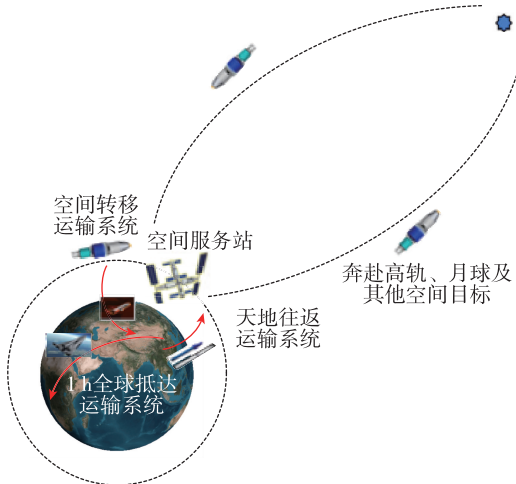


图 1 航班化航天运输系统功能及运行示意图

Fig. 1 Architecture of airline-flight-mode aerospace transportation system

航班化是航天运输系统发展的高级形式，规划到 2045 年，实现 1 h 全球抵达、地面与轨道间以及轨道与轨道间航班化运输，按需发射，每年总飞行次数达千次量级，总货运万吨级，总客运万人次。形成体系化能力和规模化产业，总体性能水平达到世界一流，全面建成我国航班化航天运输系统，满足我国航天重大任务和商业化运营需求。

未来我国航班化航天运输系统需具备以下能力，具体指标如下：

- 1) 载货飞行可靠性不低于 0.995，载人飞行安全性不低于 0.999 9；
- 2) 单位有效载荷发射成本较当前下降 1~2 个量级；
- 3) 单运载器可重复飞行次数达百次及以上，周转时间不大于 12 h。

3 国内外发展态势

3.1 国外发展态势

美国 SpaceX 公司依托其高运载效率、高可靠性的运载火箭优势技术基础，不断开展重复使用技术验证，其 Falcon-9 火箭垂直起降重复使用技术日趋成熟，截至 2021 年 5 月，其一子级单模块已实现 10 次重复利用；SpaceX 公司“超重-星舰”运输系统面向未来航班化运营需求，可全面提供全球快速抵达运输、进出空间、太空资产回收和

空间转移等服务，正持续开展飞行验证；美国火神、新格伦火箭都计划采用重复使用技术；俄罗斯国家航天集团公司公布了其一子级重复使用的“阿穆尔”火箭方案；欧空局计划在下一代阿里安火箭上采用重复使用技术，并持续开展“普罗米修斯”发动机和“塞弥斯”垂直起降验证机的研制，同时英国持续开展组合动力“佩刀”发动机和“云霄塔”空天飞机的技术攻关；日本和印度也在不断开展重复使用技术的试验验证工作^[3-7]。

同时，国外主要航天国家还通过应用智能化设计、轻质结构设计、高性能发动机等新技术，不断提升航天运输系统可靠性和运载效率。智能技术的快速进步为航天领域发展带来新动能，成为研究的重点方向。全生命周期数字化管理、基于数字样机的虚拟设计、快速生产制造、智能飞行和自主返回控制等技术不断取得突破^[8]。各国不断发展铝锂合金和复合材料轻质结构技术，降低结构系数；不断发展高性能液氧煤油、液氧甲烷和氢氧发动机技术，具备高比冲、高推重比和推力深度调节能力。

美国持续开展以“先进半人马座”为代表的长时间在轨高性能低温上面级的研制工作，通过应用先进的低温推进剂在轨蒸发量控制等新技术，使其在轨时间最长可延长到数周，可执行近地和深空探测等空间运输任务以及在轨服务、空间碎片清理等任务，通过在轨加注实现重复使用，大幅拓展了现有空间运输系统的设计理念和应用模式；ULA 公司已计划将“先进半人马座”上面级作为其未来大规模开发和利用地月空间资源、建立地月空间经济圈的重要基础设施之一^[3,9-13]。

3.2 我国发展态势

我国航天运输系统经过 60 多年的发展，取得了举世瞩目的成绩。进入空间方面，构建了较为完善的一次性运载火箭产品体系，新一代运载火箭陆续开始应用发射。空间转移运输方面，形成了“远征”系列上面级。目前，我国正在持续开展新一代载人运载火箭、重型运载火箭和低温上面级等技术攻关。重复使用、新型动力等关键技术攻关取得显著进展，围绕垂直起降、垂直起飞水平返回、水平起降等开展了方案论证和部分飞行演示验证。同时，我国正在持续积极推进智慧火箭技术研究，通过智能技术赋能，进一步提升航天运输系统综合能力^[3]。

所取得的这些成就为建设航班化航天运输系统奠定了一定的基础,但针对航班化航天运输系统的建设仍处于起步阶段。

天地往返运输方面,我国新一代运载火箭在飞行可靠性、发射成本以及发射准备时间等方面距航班化目标差距明显,尚且不具备重复使用能力。重复使用航天运输系统重点突破重复使用技术,能够发展成为满足未来我国航班化航天运输系统能力需求的重要组成,但目前处于预研阶段,发展进度与航班化航天运输系统的预期目标要求还存在差距。空间转移运输方面,当前仍以常规有毒推进剂上面级为主力,低温等高性能空间转移运输系统尚未工程立项,距离设定的空间转移运输的预期目标差距较大。

4 未来发展展望

针对航班化的任务能力指标实现,结合我国当前发展现状,提出相关发展设想。面向1 h全球抵达、天地往返运输任务目标,提出开展重复使用航天运输系统建设;面向轨道间转移运输任务目标,提出开展空间转移运输系统建设。

转变设计理念、革新设计研发体系,大力提升我国航天运输系统性能和设计研制水平,不断突破重复使用为代表的新型技术,拓展空间转移运输能力,增加新功能、融入新要素,最终建成航班化航天运输系统。

4.1 重复使用航天运输系统建设

(1) 发展思路

重复使用航天运输系统由垂直起降运载火箭(VTVL)、垂直起飞水平着陆运载器(VTHL)和水平起降运载器(HTHL)等3大类组成,构成未来1 h全球抵达和天地往返运输的主体。

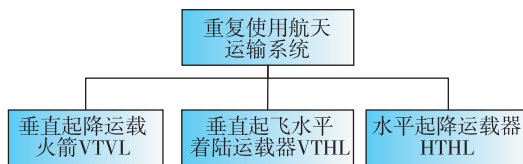


图2 重复使用航天运输系统组成

Fig.2 Composition of reusable aerospace transportation system

采用重复使用设计理念,开展长航时、长寿命设计,从根本上解决当前运载火箭一次性使用带来的费用高昂问题,最终实现像飞机一样重复使用和航班化运营,全面完成1 h全球抵达和天地

往返的任务目标。同时,实现我国天地往返运输系统从单次使用到多次使用、从定制化到批量化、从性能设计到寿命设计、从使用性设计到维护性设计的转变。

2025年,完成重点项目关键技术攻关,先期开展技术验证飞行试验。垂直起降运载火箭实现一级垂直回收。升力式火箭动力运载器具备小规模入轨的技术能力。组合动力一级完成原理性技术飞行验证。

2035年,实现重复使用航天运输系统工程应用。研制小型升力式全球快速抵达运载器,具备单次10人级全球快速抵达能力;研制小型升力式完全重复使用运载器、中型垂直起降部分重复使用运载火箭等产品,具备中等规模天地往返运输能力。飞行可靠性达到0.99,1 h全球抵达和天地往返运输系统单运载器可重复使用次数达到50~100次,周转时间不大于1周,单位载荷运输成本下降50%以上。

2045年,重复使用航天运输系统全面工程化应用,技术不断升级,单级入轨实现技术突破。研制大型垂直起降全球快速抵达运载器,具备单次100人级全球快速抵达能力;研制小型组合动力重复使用运载器、大型垂直起降完全重复使用运载火箭,具备大规模天地往返运输能力。飞行可靠性不低于0.995,载人飞行安全性达到0.999 9,重复使用次数100次以上,具备12 h内重复使用快速检测维护、智能发射和智能飞行控制能力,单位载荷运输成本降低1~2个量级以上。

(2) 技术难点

重复使用航天运输系统与一次性运载火箭相比,从任务剖面角度看,除上升段外还涉及返回、维护维修和再次发射等过程,未来航班化运营重复使用次数多,周转周期短,且从起降方式角度还分为多种方式,这就导致重复使用航天运输系统设计技术难度大、难点多,主要涉及总体设计与优化、高精度着陆控制、长时间高超声速飞行复杂气动力热设计与精确预示、轻质耐疲劳着陆支撑机构设计、大尺寸升力式运载器轻质结构与制造、复杂气动外形组合体高速级间分离、发动机大范围推力调节、长寿命重复使用火箭发动机设计、长寿命高性能组合循环动力设计、跨域高动态智能控制与导航制导、重复使用轻质长寿命热防护及综合热管理设计等。

4.2 空间转移运输系统建设

(1) 发展思路

空间转移运输系统主要由低温空间运输系统和大功率电推进空间运输系统组成。建立空间转移运输系统设计新理念新方法,采用高性能绿色动力技术、在轨加注和模块组合等途径,解决当前上级推进剂有毒、能力有限、一次性使用等问题。最终实现空间转移运输的重复使用和航班化运营,全面完成空间转移运输的任务目标。实现空间转移运输系统从常规有毒动力到高能绿色动力,从单次使用到多次使用,从短航时飞行到长航时飞行的转变。



图3 空间转移运输系统组成

Fig.3 Composition of on-orbit transportation system

2025年,完成低温推进剂在轨被动蒸发量控制、大功率电推进等关键技术攻关,开展试验验证。

2035年,实现空间转移运输系统工程应用,研制低温空间运输系统和大功率电推进空间运输系统,进一步突破低温推进剂在轨准零蒸发、在轨加注和超大功率空间能源设计等关键技术,实现地月空间中等规模转移运输能力,飞行可靠性不低于0.99,在轨加注重复使用50~100次,一次加注可在轨数周。

2045年,空间转移运输系统全面工程化应用,技术不断升级,空间核推进技术实现突破,研制地月空间运输系统等系列化产品,实现地月空间大规模转移运输能力,飞行可靠性不低于0.995,载人飞行安全性达到0.9999,在轨加注重复使用100次以上,一次加注可在轨数月,具备在轨快速检测维护、智能任务规划和智能飞行能力。

(2) 技术难点

低温空间运输系统采用高比冲的液氢液氧或液氧烃类推进剂组合,能够有效提升空间运输能力。面向未来在轨航班化运营,需要解决如低温推进剂蒸发量控制、微重力环境气液分离设计、

蒸发气体排放利用、高效轻质结构设计、微重力环境下低温推进剂输送设计、适应长期在轨的可重构软件定义电气系统等技术难点。

大功率电推进空间运输系统采用大功率太阳能或核能作为能源供给,并应用大功率高效率电推力器,技术难度大,涉及的技术难点主要有:轻质高效太阳能电池阵设计、大功率长期在轨高效热电转换系统设计、轻质高安全核反应堆设计、高效空间散热系统设计、在轨长寿命电推力器设计、高效轻质多模式推力器设计等。

5 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,站在新的历史节点上,面对新的需求、机遇和挑战,我们要把握机遇,迎接挑战,立足我国战略发展需要,发展航班化航天运输系统,创新设计理念,探索新技术新方法,科学规划产品体系;开展运载火箭性能提升优化专项研究,夯实基础,赋能升级;建设重复使用航天运输系统和空间转移运输系统,谋篇长远,构建体系;实现我国航天运输系统的跨越式发展,建成世界一流水平的航班化航天运输系统。

参考文献

- [1] 吴燕生.中国航天运输系统的发展与未来[J].导弹与航天运载技术,2007(5):1-4.
- [2] Bao W M, WANG X W. Develop high reliable and low-cost technology of access to space, embrace new space economy era[J].Aerospace China,2019,20(4):23-30.
- [3] 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.
- [4] 王辰,王小军,张宏剑,等.可重复使用运载火箭发展研究[J].飞航导弹,2018(9):18-26.
- [5] 鲁宇,蔡巧言,王飞.临近空间与重复使用技术研究[J].导弹与航天运载技术,2018(3):1-9.
- [6] 鲁宇,汪小卫,高朝辉,等.重复使用运载火箭技术进步与展望[J].导弹与航天运载技术,2017(5):1-7.
- [7] Wang X W, Wu S B, Gao Z H, et al. Recovery technology of launch vehicle stage[C]. IAC-16.D.2.5.1, 67th International Astronautical Congress (IAC), Gradalajara, Mexico, 2016.
- [8] 李洪.智慧火箭发展路线思考[J].宇航总体技术,2017,1(1):1-7.
- [9] Scott D W, Curreri P A, Ferguson C K. et al. Germin-

- nating the 2050 cis-lunar econosphere[R]. NASA Report, M15-4452, 2015.
- [10] Kutter B F, Sowers G F. Cislunar-1000: transportation supporting a self-sustaining space economy[C]. SPACE Conferences and Exposition, Long Beach, California, 2016.
- [11] Bennett T, Cain C, Campbell N, et al. Engineering the cislunar economic system based on ULA's cislunar-1000 vision[C]. SPACE Conferences and Exposition, Long Beach, California, 2016.
- [12] Melissa S. The next frontier: Innovative launch services [C]. Proceedings of the International Astronautical Congress, Adelaide, Australia, 2017.
- [13] WANG X W. Long-term space propellant depot[C]. IAC-17.D2.8-A5.4.4. 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 2017.
- [14] Swan P A, Raitt D I, Swan C W. Space elevators: An assessment of the technological feasibility and the way forward [M]. ISBN/EAN IAA: 9782917761311. International Academy of Astronautics Press, 2013, 10.

引用格式: 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.

Citation: Bao W M, Wang X W. Prospect of airline-flight-mode aerospace transportation system[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(3): 1-6.