

升力式火箭动力航班化航天运输系统的关键技术挑战

蔡巧言, 吴莉莉, 孙健

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 航班化航天运输系统是重复使用航天运输系统的高级形式, 具有高可靠、低成本、智能化、规模化、产业化等特点。基于火箭动力发展航班化航天运输系统是切实可行的技术途径之一, 升力式火箭动力航班化航天运输系统具备实现类似飞机航班形式的快速周转发射能力, 同时对航天运输技术也提出了新的挑战。结合航班化航天运输系统的发展态势和技术方案, 重点分析了升力式火箭动力航班化航天运输系统面临的技术挑战, 提出了后续研究重点与发展建议。

关键词: 升力式; 航班化; 重复使用; 关键技术

中图分类号: V475.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 02-0042-10

Key Challenges of Lifting-Body Rocket-Powered Airline-Flight-Mode Space Transportation System

CAI Qiaoyan, WU Lili, SUN Jian

(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China)

Abstract: The airline-flight-mode space transportation system is an advanced form of reusable space transportation system, with features of high-reliability, low-cost, intelligent and industrialized. One of the feasible approach of airline-flight-mode space transportation system is based on rocket engines with lifting-body configuration, which can achieve fast turnover launch capability like commercial flights. It is challenging to develop such an advance space transportation system and therefore innovation in technologies are needed. In this article, combined with recent developments and technical solutions of the airline-flight-mode space transportation system, technical challenges faced in the development of reusable launch vehicles are analyzed, and research priorities and suggestions in the future are given.

Key words: Lifting-body; Airline-flight-mode; Reuse; Key technologies

0 引言

在政治多极化、经济全球化的大背景下, 各国不断拓展国家利益, 太空领域开发利用的需求日益增长, 对人类自由进出太空、开发和利用太空资源、寻求新的生存与发展空间^[1]的航天运输能力提出新的需求。包为民等^[1]专家提出航班化

航天运输系统的发展设想, 通过航天运载器自由进出空间、按需返回地面、多次重复使用, 实现航班化航天运输系统像飞机一样的航班化运营, 进而应用于大规模低成本进入空间、远程投送与快速交通运输等, 可大幅降低发射成本, 提高任务快速响应能力, 更好地服务于人类未来的生存与发展。建设航班化航天运输系统是建设航天强

收稿日期: 2022-12-11; 修订日期: 2023-03-07

基金项目: 技术基础科研项目 (JSZL2021203A008)

作者简介: 蔡巧言 (1968-), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为重复使用运载器总体设计。

E-mail: yhzts@163.com

国的重要内容，具有高可靠、低成本、多功能、重复使用、智能化、模块化、标准化、产业化等基本特征，是革命性提升航天运输系统能力的重要途径。目前，重复使用运载器技术尚无法支撑像飞机起落一样重复使用的要求。

当前，重复使用运载器按照起降方式可分为垂直起飞垂直着陆、垂直起飞水平着陆、水平起飞水平着陆等 3 条技术途径。升力式火箭动力重复使用运载器采用垂直起飞水平着陆飞行模式，飞行全程中，火箭发动机只需在上升飞行段点火一次，工作时间为 100 多秒，并只需在额定工况工作。返回飞行段为高升阻比无动力滑翔飞行，无需发动机多次启动与深度推力调节，低温阀门作动次数大为减少，在相同可靠性指标下，可大幅提高发动机重复使用飞行次数，降低发动机研制难度与发射成本。在运载器返回对运载效率影响方面，带翼的升力式飞回方式导致的运载能力损失与垂直起降返回方式相当，垂直起飞水平着陆的升力式火箭动力重复使用技术途径有利于尽快形成安全可靠、工程可实现的重复使用运载器，可快速打造形成一型便捷可靠的升力式火箭动力航班化航天运输系统。

未来，为实现人类高可靠、高安全、高效率、低成本自由进出太空的梦想，升力式火箭动力航班化航天运输系统需要达到快速运营、按需发射，小时级准备的目标水平，需要进一步探索和培育重复使用航天运输技术成果，解决关键技术瓶颈。本文在分析国内外重复使用航天运输系统发展态势和技术方案特点的基础之上，重点分析升力式火箭动力航班化航天运输系统（如图 1 所示）面临的技术挑战，并提出了后续发展建议。



图 1 升力式火箭动力航班化航天运输系统

Fig. 1 Lifting-body rocket-powered airline-flight-mode space transportation system

1 发展态势分析

世界各国高度重视重复使用航天运输技术的发展，针对垂直起降重复使用运载器、垂直起飞水平着陆重复使用运载器、水平起降重复使用运载器等多种技术途径开展了深入研究，形成了大量重复使用航天运输系统技术成果。

1.1 美国探索多种重复使用航天运输系统，垂直起降重复使用火箭进入商业应用阶段

美国对航天运输系统多种起降方式开展了技术探索，积累了一系列技术成果。水平起降方面，美空军 2016 年提出了基于佩刀（SABRE）^[2] 发动机的可重复使用第一级；垂直起飞水平降落方面，DARPA 2013 年启动了可重复使用助推器系统（XS-1）；垂直起降方面，蓝源公司完成了新谢泼德火箭^[3-5] 飞行试验，SpaceX 公司完成了猎鹰 9 号运载火箭^[6] 的多次重复使用。

近期重大技术突破成果主要为新谢泼德火箭和 SpaceX 的猎鹰 9 号火箭。新谢泼德火箭完成多次载人亚轨道飞行任务，飞行高度约 100 km、单次任务时间约 11 min，掀起了亚轨道飞行的热潮。2022 年，猎鹰 9 号火箭共发射 60 次，超过全球火箭发射总数的 1/3，共将 2 009 个载荷成功送入轨道。60 次任务中 56 次采用了重复使用的一子级执行发射任务，一子级复用的平均间隔时间为 95 d，最短复用间隔时间为 21 d，最大复用次数达 15 次，创下子级复用记录^[6]。

SpaceX 公司近年来启动研制了一型面向未来航班化运输、两级完全重复使用的航天运输系统——超重-星舰^[7]，据此提出一小时全球快速运输的应用方向，向着为人类提供远程、洲际、地球表面“点到点”人员运输服务方向努力，向着航班化航天运输方向发展。

1.2 英国发展水平起降亚轨道飞行器，已接近商业运营

英国维珍银河公司发展太空船二号^[8] 水平起降亚轨道飞行器，由 NASA 通过飞行机会计划（Flight Opportunities Program）资助。2021 年 7 月 11 日，维珍银河公司创始人布兰森等 6 人搭乘太空船二号飞行器率先完成了载人亚轨道飞行，飞行高度距离地面约 80 km，引起了各界的高度关注，拉开了亚轨道商业太空旅游时代的序幕。

英国反应发动机公司 (REL) 持续推进云霄塔空天飞行器的研制, 其关键部件佩刀预冷空气涡轮火箭发动机于 2022 年 7 月完成集成氢预燃器系统地面试验。

1.3 德国开展长期探索, 垂直起飞水平降落和水平起降亚轨道飞行器均处于技术攻关阶段

德国宇航中心自 2007 年提出研发航天班机垂直起飞、水平降落亚轨道飞行器, 并得到了欧洲 FAST 计划支持。2015 年, 德国宇航中心制定了详细发展规划, 计划 2035 年生产 6 架样机进行试飞, 2017 年该项目进入初步概念评审阶段。后来, 因资金等原因该项目未得到欧盟后续资金支持, 至今未见进一步报道。

德国宇航中心于 2015—2018 年进行了极光水平起降飞行器的概念研发, 成立了北极星航天飞机公司, 进一步深化研发并商业化。2020 年 4 月, 该公司成功进行了一次缩比飞行器试飞。

1.4 日本同时发展垂直起飞水平降落和水平起降飞行器, 尚未取得实质进展

日本 PD 航空航天公司曾在 2007 年尝试开发水平起降的 PDAS-X 系列亚轨道飞行器, 动力采用当时在国际上还未取得重大突破的脉冲爆震发动机, 其技术方案先进、难度大, 因而进展缓慢。2017 年对发动机燃烧室进行了测试, 后续未见实质性进展。同年, 日本天空漫步者公司成立, 计划分三步发展 3 型太空漫步者亚轨道飞行器: 第一步, 面向科学实验任务, 开发垂直起飞水平降落的飞行器, 计划 2024 年首飞; 第二步, 面向小卫星发射任务, 同样开发垂直起飞水平降落的飞行器, 该飞行器携带上面级到达亚轨道, 并由上面级部署卫星, 预计 2026 年首飞; 第三步, 面向太空旅游, 开发水平起降亚轨道飞行器, 预计 2029 年首飞。

1.5 我国同步开展 3 条技术发展途径研究, 梯次形成能力^[9-15]

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^[1]。一次性运载火箭方面, 构建了较为完善的产品体系, 新一代运载火箭已开始多型应用发射, 正在持续推进重型运载火箭、新一代载人火箭等技术攻关。空间转移运输方面, 形成了“远征”系列上面级, 正在持续推动低温上面级关键技术攻关^[9]。重复使用航天运输系统方面, 按照多途径探索、梯次形成能力的思路, 围绕垂直起降、

垂直起飞水平着陆、水平起降等开展了关键技术攻关和飞行演示验证^[1], 重复使用技术取得了一定进展, 但目前均未进入应用发射阶段。

在升力式火箭动力重复使用运载器方面, 中国航天科技集团有限公司第一研究院自主研制了亚轨道重复使用运载器技术验证飞行器, 于 2021 年 7 月实现亚轨道重复使用运载器飞行演示验证试验的圆满成功, 有效验证了垂直起飞水平着陆亚轨道重复使用运载器核心关键技术, 并于 2022 年 8 月圆满完成了重复使用飞行试验, 对重复使用技术进行了飞行验证。这些进展为重复使用航天运输系统奠定了一定的基础, 但我国航班化航天运输系统的建设仍处于起步阶段^[1], 当前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。

2 技术方案分析

重复使用航天运输系统技术方案主要包括气动构型、动力型式、返回减速控制方式、起降方式等方面内容, 下面重点从这几方面入手分析各自技术特点。

2.1 气动构型

重复使用的航天运输系统主要采用面对称气动外形和轴对称气动外形两种气动构型。

升力式火箭动力航班化航天运输系统采用面对称气动外形, 如图 2 所示, 通过设计翼舵等气动部件, 提高气动升阻特性, 在飞行返回时充分利用气动部件实现姿态稳定控制、无动力滑行减速, 确保全运载器安全返回。



图 2 升力式面对称气动构型

Fig. 2 Lifting-body symmetrical aerodynamic configuration

采用轴对称外形的重复使用运载器与一次性运载火箭构型基本相同, 上升段飞行方式和气动特性与传统运载火箭基本相同, 在返回时一般以垂直着陆方式返回。为了辅助姿态控制可增加栅格舵、着陆支腿等部件。目前美国新谢泼德、猎鹰 9 号和超重-星舰等火箭均采用此类构型。

2.2 动力型式

重复使用航天运输系统采用的主流动力形式包括火箭发动机和组合动力发动机。

火箭动力方面,采用液体火箭发动机的居多,如超重-星舰航天运输系统;其次,采用固液混合火箭发动机,如英国太空船二号飞行器。液体火箭发动机技术成熟度高,安全性可靠性强,可长期应用于运载火箭发射任务。固液混合火箭发动机兼顾了固体燃料和液体氧化剂的优点,但可靠性有待提高。

组合动力方面,美国开展了基于佩刀发动机为动力的两级入轨飞行器方案研究,该发动机为涡轮发动机、火箭发动机和冲压发动机组成的组合循环发动机,尚处于技术攻关阶段。德国极光亚轨道飞行器采用了自研的喷气发动机与火箭发动机组成的组合循环发动机,其发动机仍处于探索阶段。组合动力技术未来前景较好,但技术难度很大,离实用化还有很长的一段距离。

2.3 返回减速控制方式

重复使用航天运输系统返回地面时采用的减速控制一般包括气动力减速、动力减速和伞降减速等。气动力减速缓慢但可持续减速,动力减速可实现快速减速但需要燃烧额外的推进剂,气动力减速等专门用于返回的功能部件质量接近于动力减速在返回段燃烧的推进剂与其他返回专用的功能部件的质量。伞降方式可适用的运载器质量规模有限。

太空船二号飞行器充分利用了气动力减速技术,其尾翼设计为可变型结构,当尾翼为水平时进行正常飞行和爬升,当尾翼变型为竖直后实现阻力面积增加,提升减速效果;新谢泼德火箭的助推器使用可展开式减速板,在助推器发射和上升过程中处于收缩状态,在返回时展开增加阻力面积,实现减速,乘员舱采用伞降方式减速和降落。猎鹰 9 号火箭动力减速段通过发动机反推工作实现减速和姿态控制,气动减速段利用栅格舵气动力矩进行姿态控制。

2.4 起降方式

垂直起降方面,运载器与传统火箭构型相似,在发射架上垂直发射,在返回时依靠动力减速,垂直着陆,可充分借鉴一次性运载火箭和飞船的技术基础,技术继承性较好。但这种类型运载器主要通过发动机制动着陆,发动机需多次点火且

变推力工作,对发动机要求较高。

垂直起飞水平降落方面,典型剖面如图 3 所示,升力式运载器返回时充分利用无动力的气动飞行技术,在预定跑道水平着陆,飞行平缓,水平着陆冲击较小,力学环境较缓和。运载器兼具航天快速进入空间、升力式高速返回、航空低空滑行等技术特点,实现火箭动力垂直进入一大攻角可控返回—无动力水平着陆的剖面飞行,可实现整器多次完全重复使用的航班化运输目标。这种起降方式在一次飞行剖面中对发动机点火次数、发动机性能需求与一次性火箭基本一致,技术成熟度高,动力重复使用次数高,可更可靠地应用于地面点对点运输和发射卫星入轨。

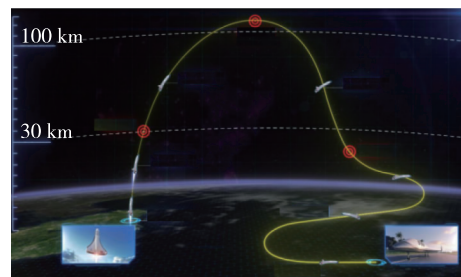


图 3 垂直起飞水平降落典型飞行剖面

Fig. 3 Typical flight profile of vertical takeoff and horizontal landing

水平起降方面,运载器可从地面滑行起飞、爬升及水平着陆,包括美国基于佩刀发动机的可重复使用第一级、德国极光飞行器、日本太空漫步者飞行器等。直接从地面起飞的方式无需载机配置、无载机分离操作,系统复杂度低,未来应用前景广阔,但这种飞行方式对动力要求高,执行入轨运输任务时会产生较多的攻角损失和阻力损失,降低运载效率。太空船二号飞行器则采用载机发射方式,这类方式可为飞行器提供初始速度和高度,降低飞行器动力要求,但系统剪复杂度较高,空中发射规模受限,技术难度也较高。

2.5 小结

升力式航班化航天运输系统基于液体火箭动力与升力式构型实现垂直起飞水平着陆,该方案高度交叉融合航天航空先进技术,既发挥了航天火箭动力快速进入空间的优势,又利用了高升阻比气动特性航空模式水平返回特征,尤其是在飞行过程中只需要主发动机工作一次,无须进行推力调节,可实现主发动机使用寿命内更多次的重

复飞行,可提高航天运输系统的重复使用能力,从而大幅降低发射成本。

3 升力式航班化航天运输系统面临的关键挑战

通过前期技术攻关,对升力式火箭动力航班化航天运输系统的研究,积累了一定的技术基础,但距离实现航班化航天运输应用还有较大差距,亟须创新设计理念,应用新技术和新方法,解决相关基础问题和瓶颈技术,实现系统性技术指标的大幅提升。

3.1 气动布局技术面临的技术挑战

升力式重复使用运载器面临宽速域、大空域的飞行环境,面临复杂的气动力热环境剖面,见图4。经历垂直起飞、大攻角高速再入飞行、中小攻角能量管理飞行、低速水平着陆过程,不同飞行阶段产生复杂的流场结构变化,在高速飞行时还会产生高速流动压缩、膨胀效应及复杂波系干扰导致的横航向气动特性耦合现象,如图5所示。气动布局难点主要体现在两个方面。

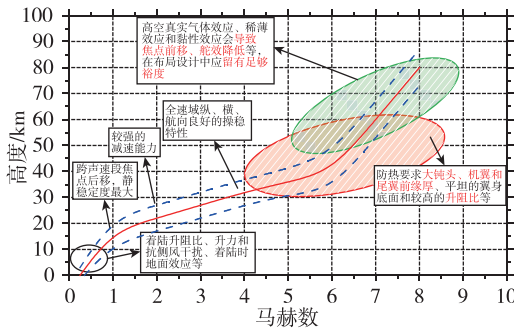


图4 复杂的气动力热环境剖面

Fig. 4 Complex aerodynamic thermal environment profile

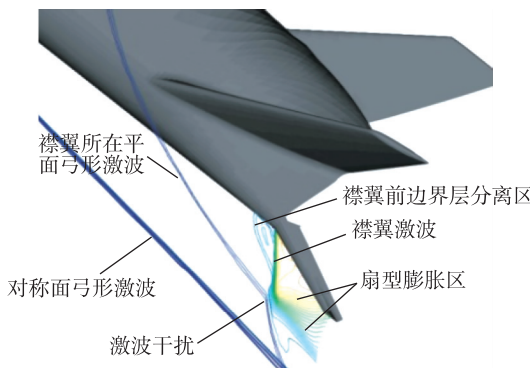


图5 舵面控制中的流动二次压缩、激波/膨胀波干扰

Fig. 5 Secondary compression of low in rudder control and interaction of shock wave/expansion wave

3.1.1 操稳特性匹配难

在超声速大攻角再入飞行和低速起降阶段对运载器的气动布局提出不同需求,布局设计需兼顾高、中、低马赫数下焦点移动剧烈导致的飞行稳定性大幅度变化,对操稳特性设计带来严峻挑战。现有的后掠翼、乘波体、边条翼等常规气动布局设计不能有效地解决这种矛盾。运载器主发动机安装在尾部,使得质心靠后,增加了纵向操稳设计难度;随着飞行马赫数的增大,航向稳定性急剧恶化,如图6所示。运载器质心偏后进一步增大了航向操稳设计难度;同时面对称外形具有强烈横航向特性交联耦合特点,纵向/航向/横向三通道操稳匹配面临极大挑战。

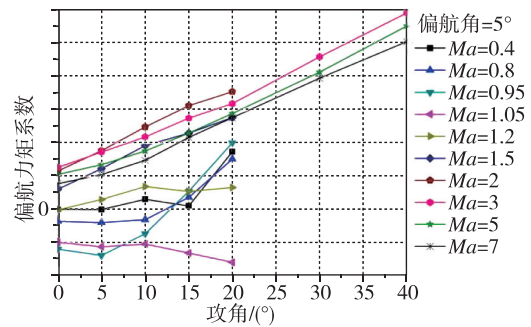


图6 偏航力矩系数随马赫数和攻角变化规律

Fig. 6 Variation of yawing moment vs. Mach number and attack angle

3.1.2 升阻匹配难

气动布局需全面兼顾垂直起飞、大攻角大阻力减速、中小攻角高升阻比纵横向机动和低速进场着陆高升力等升阻特性需求,这些均对气动布局增升减阻设计提出了较高要求。

因此,如何保证飞行全剖面内运载器具有良好的操稳特性及升阻特性,对升力式重复使用运载器气动布局设计提出了新需求和新挑战。

3.2 多耦合强约束的智能在线轨迹规划与制导技术面临的技术挑战

为提高航班化运输的安全性、可靠性,以应对飞行过程中可能出现的各种故障,需突破具有自适应及重构功能的先进制导控制技术。发展在线重构能力,增强应对控制舵面故障、气动不确定性以及各种扰动(比如强风)的能力,满足高安全性、高可靠性要求。可重构制导控制系统包含控制重构、制导重构和轨道重构3个方面,利用控制重构、制导重构、轨道重构以及在线任务/中止规划等技术,

在出现故障致使飞行器性能受到严重影响的情况下，最大限度完成任务并实现安全返回。

航班化运输系统飞行剖面极其复杂，需要解决两端固定（起飞和着陆机场）的多阶段、多控制变量和多约束的最优控制难题，需要突破适应大范围机动的能量管理与制导技术。约束条件包括总体指标、过程约束（动压、过载、热流）、航区安全、进场方式等，还需兼顾安控、故障重构、备降返回等故障工况，需对全程飞行轨迹进行合理规划和设计，对能量（高度和速度）进行合理分配，保证在较大位置偏差、能量偏差、大气偏差、气动偏差、风干扰等因素影响下，运载器均可安全到达进场着陆窗口，之后根据实时能量情况，在线轨迹规划并选择进场方向，如图 7 所示。无动力水平进场着陆时，为提高运载效率采用机翼最小化设计，运载器升力、舵效受限，对接地时刻速度、位置、姿态、角速度等参数的控制精度均提出了苛刻的着陆约束。

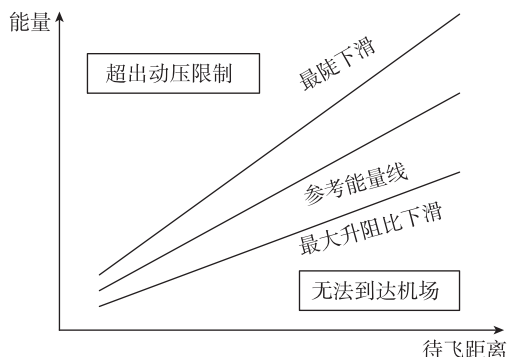


图 7 返回能量走廊

Fig. 7 Reentry energy corridor

3.3 复杂异构执行机构的高精度控制技术面临的技术挑战

航班化航天运输经历发射、分离、返回等多个阶段，飞行全程面临复杂力学环境、宽域操稳特性、大范围不确定性散布等多约束问题，面临的主要问题包括主动力、辅助动力、多气动舵面以及起落架等复杂异构执行机构的分配和融合使用问题，如图 8 所示。主要包括：发射上升过程复杂的刚弹晃动力学响应、大动压区减载控制、大功率伺服非线性及伺服弹性耦合效应问题，返回过程中热流/过载/动压等约束、部分功能性能下降后多执行机构异构自主在线分配控制问题，高速高动态环境下的高精度导航、高速水平着陆的精准控制和可靠减速问题

等。以上技术难题对控制技术均提出了新的功能、性能要求。因此，如何实现复杂异构执行机构的高精度控制是运载器面临的一大技术挑战。

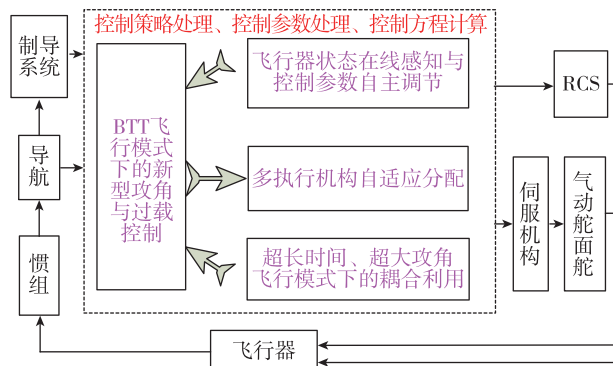


图 8 异构分配控制策略

Fig. 8 Heterogeneous allocation control strategy

同时，升力式重复使用运载器返回以气动力为主实现轨迹与姿态控制，面对称构型运载器大跨度空域速域飞行过程中发生严重的气动耦合、运动学耦合和惯性耦合，极易导致飞行失稳和失控，特别是大攻角飞行使飞行器的气动舵面操纵交联严重，且运动引起的通道耦合使得飞行可控性要求更加难以满足，稳定性和可控性是升力式运载器面临的关键问题。

因此，针对升力式运载器飞行特点，需要基于空气动力学、飞行动力学等多学科理论，研究多种耦合效应作用机理与运动特征，探寻耦合与稳定性的内在关系，从物理特性建模入手，揭示多源耦合内在规律，形成耦合失稳判据，在此基础上将耦合失稳判据和耦合控制策略融入总体设计，形成新的总体设计流程，建立引入利用耦合理念的总体指标参数分配方法，驱动总体方案不断优化改进，实现运载器高可靠的稳定可控飞行。

3.4 升力式水平着陆回收技术面临的技术挑战

水平着陆回收是升力式航班化航天运输系统重要技术特征，升力式运载器借助气动力或自身动力等方式实现返回段能量耗散，通过着陆回收装置，运载器像飞机一样完整水平着陆，有效缓冲降低着陆冲击，实现无损回收，支撑运载器的航班化周转运行。着陆回收装置主要用于着陆飞行段，其结构干重却会影响运载效率，如何综合利用地面缓冲和减速装置，减小运载器上着陆回收装置的质量，通过设计轻量化的器上高密度吸收装置及新型地面着陆辅助装置等，实现水

平着陆减速与垂直下沉率的缓冲，是未来升力式水平着陆回收技术面临的主要技术挑战，器地联合着陆回收系统如图9所示。

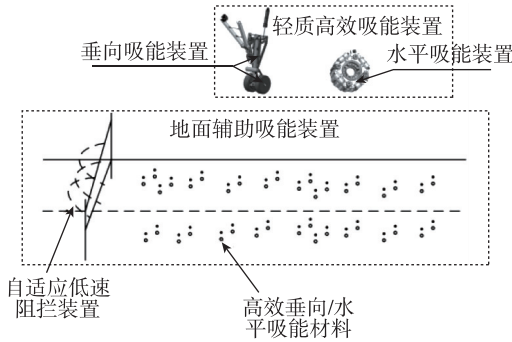


图9 器地联合着陆回收系统

Fig. 9 Joint landing recycling system

3.5 大空域宽速域飞行剖面气动弹性设计面临的技术挑战

升力式构型在某些飞行剖面会出现复杂流动分离和由分离引起的抖振、颤振等气动弹性响应，在跨声速最大动压阶段和大攻角再入飞行阶段，此类问题尤其突出。

传统的基于工程方法的气动弹性分析技术基于线性假设，以远场来流状态作为基准分析状态，无法准确预示非线性流动诱导的气动弹性现象。在大攻角再入段，背风区内的控制面处于分离流场干扰区内，相对保守的工程分析方法可能会误判颤振模式和参与模态，误导总体设计；在跨声速飞行段，厚翼型引起的沿展向和弦向的激波振荡产生非对称干扰力矩，易与控制系统耦合，激励起全运载器的抖动。

如何辨识大空域宽速域全飞行剖面气动弹性问题的易发点，并借助以高精度CFD方法为代表的流场分析技术，实现气动弹性问题的准确预

示，是气动弹性设计面临的重要技术挑战，典型CFD的耦合时域仿真如图10所示。

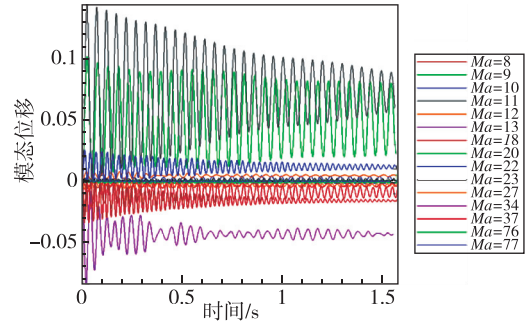


图10 基于CFD的耦合时域仿真

Fig. 10 Coupled time domain simulation based on CFD

3.6 基于低温燃料为热沉的主动热防护技术面临的技术挑战

以航天飞机为代表的升力式重复使用运载器的防热设计一般采用“阻隔”的被动热防护思想，这种厚重的被动防热方案为运载效率提升带来了极大负担，成为制约升力式重复使用航天运输系统发展的重要瓶颈。升力式火箭动力运载器的低温推进剂占据85%以上的质量，是运载器的重要冷源。通过能源/结构/防热/热控一体化轻量化设计，对低温推进剂进行深度过冷，显著提升推进剂密度和蓄冷量，进而将低温燃料及贮箱结构直接作为热沉，降低气动加热影响，实现运载器降热减载。利用剩余低温燃料对机身冷结构/热防护层进行对流及蒸发冷却或直接将剩余低温燃料引流至舱外进行气膜冷却，也能够大幅降低防热代价。基于低温燃料为热沉的主动热防护技术（见图11）既可提高运载器的过冷性能，又能减小防热结构质量。如何进一步减小基于中间介质进行间接冷却带来的额外代价，实现面向直接冷却的

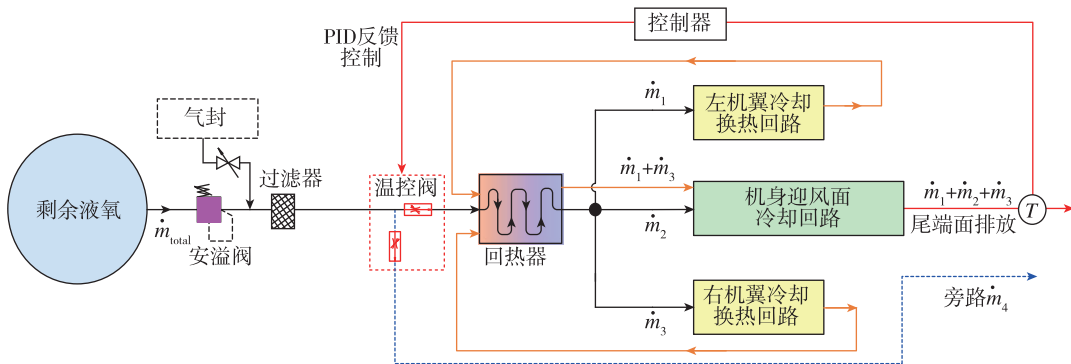


图11 基于低温燃料为热沉的主动热防护方案

Fig. 11 Active thermal protection system based on cryogenic fuel utilized as heat sink

内嵌通道的大面积轻质耐热承载结构，提升适应复杂飞行过载的能力，保障低温燃料作为直接热沉的安全性等成为该项关键技术面临的重要挑战。

3.7 健康管理与管理检测维护技术面临的技术挑战

航班化航天运输系统可实现小时级全球到达和往返。如何达到小时级周转，对运载器免维护、

快检测、耗材更换、器上健康状态监测提出了较高的要求，需要攻克智能检测、快速维护、高效加注、健康管理等多项技术难题。

航班化航天运输系统健康管理与管理检测维护系统的构建，需要实现器地一体化智能诊断与维修保障体系架构，提升航天运输系统的安全性、可靠性以及自主保障能力，如图 12 所示。

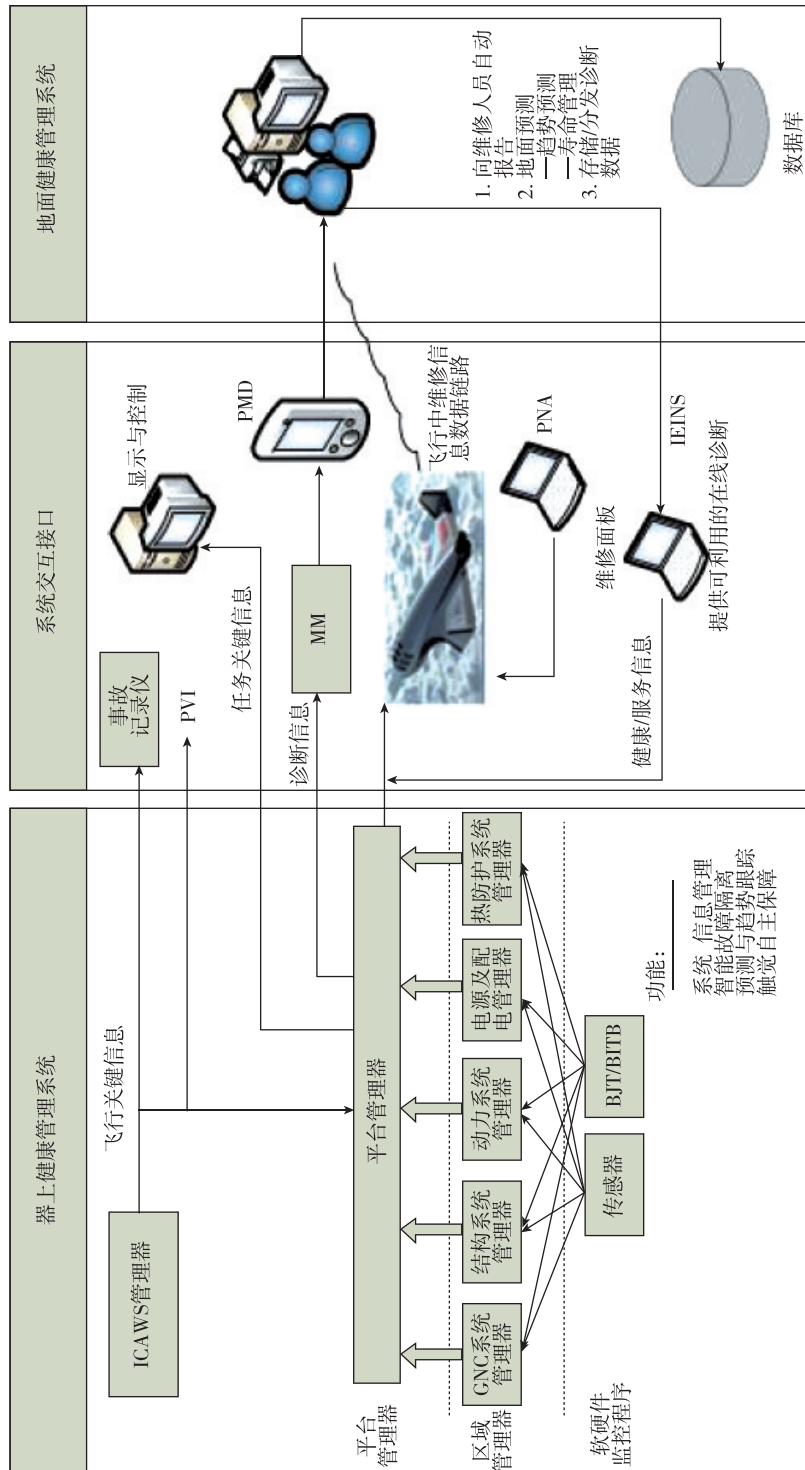


图 12 健康管理架构

Fig. 12 Health management structure

航天运输系统交联耦合故障演变机理复杂、耦合性强,并且器上计算资源受限,地面故障难模拟验证。要实现智能检测与快速周转,需要突破基于深度感知的故障智能诊断与重构、基于模型与数据双驱动智能快速评估以及故障模拟与仿真评估等核心技术。同时,航天运输系统包括了动力、航电、机电、热防护与热控等多种产品,产品种类、功能、性能以及维修保障需求各不相同,实现重复使用的维修保障规模大、周期长、费用高,需要突破全寿命周期信息配置管理、维修辅助决策以及便携化快速检测与维修保障等核心技术。

3.8 重复使用设计和评估面临的技术挑战

航班化是重复使用的高级形式,航班化需要重复使用常态化、时效化、自由化。升力式航班化重复使用复杂力热环境剖面相对传统航空器更加严酷,更不同于传统火箭及飞机等飞行器,尚未形成统一的技术规范和评价验证体系。针对未来升力式航班化运输系统大规模、低成本、高可靠重复使用需求,亟须在现有航空航天相关技术基础上系统开展重复使用全寿命周期设计与验证技术研究,从顶层开展面向寿命的重复使用运载器设计技术体系研究,为可重复使用敏捷设计、关键性能分析评价、试验验证等技术提供理论指导,支撑形成工程可用的可重复使用设计能力。

升力式航班化运输系统对运载器提出了高载荷、高周数抗疲劳、数万次百吨级疲劳载荷的要求,需要发展升力式航班化运输系统重复使用寿命评估的方法,针对不同结构特征,构建可无缝集成的多元素智能传感单元,实现特定区域特定物理量/损伤量的模块化分区传感;建立主/被动监测方法协同的损伤识别方法与面向大规模损伤参数的高效高精度辨识方法,实现实时损伤的时空尺度量化表征,建立起多学科载荷-损伤特征-性能退化规律-寿命模型的映射关系。建设基于时变可靠性的覆盖航班化航天运输系统的寿命预测系统,构建动态监测与实时寿命评估模型,成为支撑航班化航天运输系统快速周转与航班运营的关键技术挑战。

4 发展建议

目前,多个航天大国均在开展航班化航天运输系统研究,航班化航天运输已成为发展的热点

之一,航天运输系统的发展正迎来航班化新时代。

面向一小时全球到达、太空旅游等航班化任务目标,针对升力式航天运输模式技术发展提出以下建议:

1) 推进总体、气动、载荷环境、控制、动力等核心专业技术向一体化、精细化发展,基于飞行环境及系统特征,从总体设计源头开展以提升运载效率为核心的关键技术攻关,从升力式航班化航天运输系统总体设计、力热载荷精细化设计、载荷谱优化、重复使用轻质冷热结构设计等关键技术出发,建立面向寿命的升力式航班化航天运输系统总体设计体系,进一步提升重复使用航天运输系统基础性能。

2) 通过创新设计理念,研究有限次数重复使用寿命、损伤容限设计方法,建立重复使用设计方法准则,性能指标评价与动态寿命评估体系,提升关键部组件重复使用、长寿命工作能力,实现由基于性能设计到基于可靠性设计的转变。

3) 积极应用大数据、人工智能、超材料等新技术,形成智能化、低成本、高可靠的新型研制和维护手段,建立航班化航天运输系统检测维护技术体系,提升安全性、可靠性、检测维护便捷性等,开展智能诊断、易维护设计,提高使用维护快速性、便捷性,缩短测试发射周期,提升航班化任务快速周转的适应能力。

发展航班化航天运输系统,可实现安全、快速、机动、环保地进出空间,支撑我国航天高密度发射任务,有效服务国民经济建设,推进航天强国建设,满足人民对快速全球抵达和太空旅游等美好生活向往的需求。

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] Hemptell M. Progress on SKYLON and SABRE[C]. Proceedings of 64th International Astronautical Congress, Beijing, 2013.
- [3] 杨开,才满瑞. 蓝色起源公司“新谢泼德”飞行器及其未来发展分析[J]. 国际太空, 2018(7):69-71.
- [4] 赵琪,何慧东,宋国梁. 国外亚轨道旅游最新发展分析[J]. 国际太空, 2022(2):54-59.
- [5] 刘琳. 国外两型亚轨道旅游方案对比分析[J]. 国际太空, 2022(4):64-68.
- [6] 樊伟,王林,龙雪丹,等. 2022年国外重复使用运载器

- 发展综述[J]. 中国航天, 2023, 538(2):25-29.
- [7] 焉宁, 胡冬生, 郝宇星. SpaceX公司“超重-星舰”运输系统方案分析[J]. 国际太空, 2020(11):11-17.
- [8] 张涛, 马婷婷, 闻悦, 等. 世界航天拉开亚轨道商业太空飞行大幕[J]. 中国航天, 2021(9):22-26.
- [9] 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.
- [10] 闻悦, 张涛. 发展重复使用航天运输系统究竟有多难? [N]. 中国航天报, 2021-08-20(003).
- [11] 龙乐豪, 蔡巧言, 王飞, 等. 重复使用航天运输系统发展与展望[J]. 科技导报, 2018, 36(10):84-92.
- [12] 龙乐豪, 王国庆, 吴胜宝, 等. 我国重复使用航天运输系统发展现状及展望[J]. 国际太空, 2019(9):4-10.
- [13] 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.
- [14] 闻悦, 马婷婷, 蔡巧言, 等. 重复使用航天运输系统设计及评估[J]. 科学通报, 2020(9):764-770.
- [15] 宋征宇, 黄兵, 汪小卫, 等. 重复使用航天运载器的发展及其关键技术[J]. 前瞻科技, 2022, 1(1):62-74.

引用格式: 蔡巧言, 吴莉莉, 孙健. 升力式火箭动力航班化航天运输系统的关键技术挑战[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(2):42-51.

Citation: Cai Q Y, Wu L L, Sun J. Key challenges of lifting-body rocket-powered airline-flight-mode space transportation system [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(2):42-51.