

远程空天运输系统总体设计与控制技术的科学挑战

宋征宇, 汪小卫, 陈蓉, 邓思超, 张烽, 任宽

(中国运载火箭技术研究院, 北京 100076)

摘要: 远程空天运输系统是一种利用航天运载技术实施全球极速运输的运载工具, 具有小时级洲际到达能力, 可作为陆海空传统运输方式的重要补充。具有现实的社会、科技、经济应用价值。分析了远程空天运输系统的发展需求与意义, 对标设计要求研究了技术实现途径, 在进一步分析系统的任务特点和技术特点分析基础上, 提出了远程空天运输系统总体设计与控制技术中的设计难点与科学挑战, 为未来远程空天运输系统设计提供参考。

关键词: 远程空天运输; 全球极速运输; 总体设计; 控制技术; 科学挑战

中图分类号: V475

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2023) 02-0035-07

Challenges of Long-Range Aerospace Transportation System Design and Control Technology

SONG Zhengyu, WANG Xiaowei, CHEN Rong, DENG Sichao, ZHANG Feng, REN Kuan

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

Abstract: Long-range Aerospace Transportation System (LATS) is a vehicle that uses space technologies to implement global express transportation service. It has hourly intercontinental arrival capacity and can be used as an important supplement to the traditional transportation by land, sea and air. It has practical social, scientific and economic application value. This paper analyzes the development needs and significance of LATS. According to the design requirements, based on the further analysis of the mission and technical characteristics of the system, difficulties and challenges of LATS design and control technology are presented. These works provide references for the future design of LATS.

Key words: Long-range aerospace transportation system; Global express transportation; System design; Control technology; Scientific challenges

0 引言

远程空天运输系统是一种利用航天运载技术实施全球极速运输的运载工具, 经由亚轨道可实现小时级内将人员和物资在地球表面任意两点之间实现快速运输。其具备航班化可复用能力, 具有可靠、安全、经济、便捷、环保等特点, 使用维护简便、可快速再次使用, 能够很好地满足大规模点对点运输、物资投送补给以及亚轨道太空

旅游等需求, 同时还可以执行天地往返任务。

远程极速运输的概念早在 20 世纪五六十年代就已提出, 因为当时复用技术不成熟和运营成本高等因素, 虽然不断有国家提出相关方案, 但都处在概念研究阶段。近年来随着运载火箭复用技术的发展, 特别是美国 SpaceX 公司 Falcon9 火箭通过子级多次复用实现了发射成本明显下降, 使得利用航天运载技术实施经济快速远程极速运输成为航天界的研究热点^[1-5]。当前, 美国 SpaceX 公司已投入数十亿美

收稿日期: 2022-12-19; 修订日期: 2023-02-14

基金项目: 国家自然科学基金 (52232014)

作者简介: 宋征宇 (1970-), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计。E-mail: yhztsj@163.com

元经费研制“超重-星舰”运载器，并研究利用其提供一小时全球极速运输服务^[2]。2020年，美国军事运输司令部与SpaceX和XArc公司签署协议，随后美国空军研究实验室也与SpaceX和Blue Origin等公司签订研发合同，研究将100 t物资在一小时内运输至全球任意地点。“超重-星舰”计划2023年入轨飞行，2025年实现全球运输。德国宇航中心(DLR)也提出利用运载火箭技术实现洲际远程运输的Spaceliner^[3]，并开展持续研究；意大利也提出了一种基于涡轮基组合动力的水平起降运输方案Hyplane^[4]。2021年，美国维珍银河和蓝源公司研制的太空船二号和新谢泼德火箭已初步实现亚轨道太空旅游的商业运营。2022年，火箭实验室(Rocket Lab)宣布与美国军事运输司令部签署联合开发协议，探索利用其运载火箭开展全球货物运输服务。

目前，国内在远程极速运输研究方面还处于起步探索阶段，开展了相关方案研究和初步技术攻关^[5]，同时开展了大量可复用运载火箭的关键技术研究^[6-10]。此外我国自主研制的升力式亚轨道垂直起飞水平着陆运载器首飞和再次飞行均取得圆满成功，为远程空天运输系统的研究和建设奠定了良好的技术基础。

1 需求与意义

远程空天运输系统作为一种利用航天技术来实现远程极速运输的系统，具有小时级洲际到达能力，能够催生一小时全球极速运输、大众化太空旅游等新兴产业，引领科技发展，支撑科技强国、航天强国和交通强国建设，具有现实的社会、科技、经济应用价值。具体表现在以下几个方面。

1.1 加快航班化航天运输系统建设

全球极速运输系统是航班化航天运输系统的重要组成部分^[5]。当前全球极速运输系统尚处于离散型跟踪研究阶段。因此发展远程空天运输系统对于加快我国航班化航天运输系统建设具有重要意义；且开展远程空天运输系统的研究和攻关，不仅可以丰富和完善航班化航天运输系统建设，其相关技术的突破，也可以带动整个航天运输系统不断迈向航班化。

1.2 催生新兴产业，支撑经济高质量发展

远程空天运输系统的发展能够催生全球极速运输、大众化太空旅游等太空新业态，促进产业发展与融合，支撑经济高质量发展。同时，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，随着人类交通运输方式的改变，还将带来人类经济、文化、生活、观念上的变化，影响社会的方方面面。

1.3 引领科技发展，促进学科融合

开展远程空天运输系统的研究，能够推动新型飞行器总体与高马赫数非定常气动设计理论和方法、复杂极端飞行环境下制导控制理论与方法、材料的极端服役疲劳、多学科耦合与优化设计等基础科学问题的研究，带动可复用技术、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^[5]，促进空气动力学、固体力学、热力学、传热传质学、飞行动力学与控制等学科交叉融合发展，推动科技创新与技术变革。

1.4 助推航天强国和交通强国建设

随着文明的进步和生活水平的提高，人类对交通运输的速域和空域范围提出了更高的要求，远程空天运输系统以其极高速、极远程的特点实现从交通运输“快速”到“极速”的跨越，将航天技术与交通运输进一步融合发展和产业变革，探索未来新型原创交通运载模式，推动交通领域从“陆海空”三位一体到“陆海空天”四位一体的跨越，为航天强国和交通强国的建设提供强有力支撑。

2 技术途径与特点

为了更好地实现产业应用，从未来运输规模需求分析，远程空天运输系统需具备一定规模的运输能力，如SpaceX公司的“超重-星舰”具备70 t级以上的全球极速运输能力，美国空军更是提出100 t级的全球运输能力需求。

通过分析国外全球极速运输系统以及航空大型运输机等运载能力，经初步论证我国亚轨道运输系统的运载能力为60 t级，具有小时级洲际($\geq 10\,000$ km航程)到达能力，可复用100次以上，单位质量载荷运输成本不超过一次性运载火箭5%，可靠性不低于0.997。

作为一种未来面向航班化的全球点对点极速运输系统，亚轨道运输系统可采用垂直起降(VTVL)、垂直起飞水平着陆(VTHL)、水平起降(HTHL)3种技术途径^[8-13]。

2.1 垂直起降

该技术途径采用完全重复两级火箭构型，垂

直起飞、垂直降落, 该方案在传统运载火箭轴对称构型上, 两级均可增加翼面或舵面, 特别是二级级可采用可变构型鸭翼布局来满足大攻角再入和垂直着陆双重要求, 提高升阻比超过 3.0, 可充分利用气动力提升其机动性能。运载器垂直起飞后一二级分离, 一级受控返回原场, 二级点火继续爬升至 100 km 以上, 发动机关机后无动力滑行, 可利用波动弹道增程, 在接近目的地时, 利用二级级鸭翼布局和发动机再次启动实施大姿态机动、减速垂直着陆。

2.2 垂直起飞水平着陆

垂直起飞水平着陆采用两级升力式背驼构型, 垂直起飞、水平着陆, 采用火箭动力; 一级为助推级, 二级为载荷级, 均具备主动力, 两级均采用翼身组合体构型, 升阻比可达 3~6; 两级组合体垂直起飞后负小攻角上升, 降低飞行阻力, 助推级分离后返回, 载荷级主动力工作继续动力上

升, 上升段加速至高度 100 km 以上、速度 $Ma = 20$ 左右轨迹开始下压, 随后发动机关机, 二级无动力滑行再入返回, 可利用波动弹道增程, 再经过能量管理阶段, 最终水平着陆于目的地机场跑道, 全程采用襟副翼等实施姿态控制。

2.3 水平起降

水平起降采用两级升力式背驼构型, 水平起飞、水平着陆, 采用火箭动力运输大型载荷, 采用组合动力运输小型载荷, 配置高性能的低温动力系统能够减小运输系统规模。一级为助推级, 二级为载荷级, 均具备主动力; 两级组合体水平起飞后, 由助推级加速, 再分离, 当采用火箭动力时, 载荷级发动机点火继续爬升至 100 km 以上高度后下降, 随后发动机关机, 载荷级无动力再入滑翔水平着陆目的地; 当采用组合动力时, 一二级分离后, 载荷级在临近空间高速巡航, 最终在目的地水平着陆, 如图 1 所示。

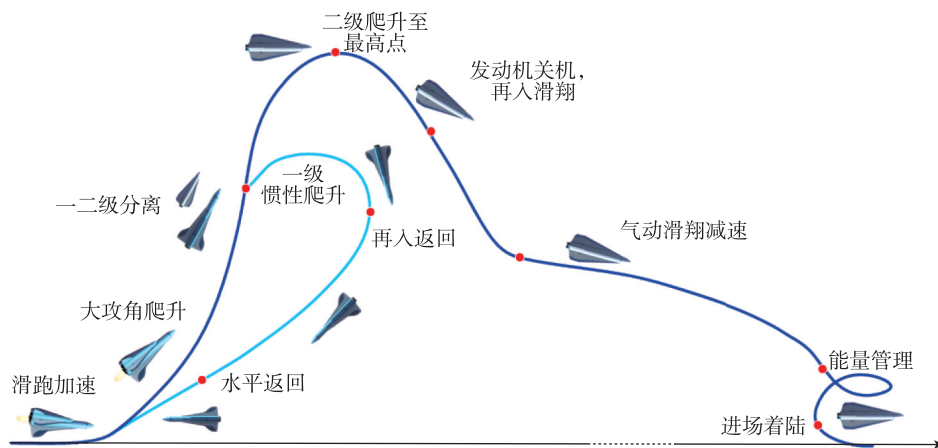


图 1 水平起降方式剖面图

Fig. 1 Profile of horizontal takeoff and horizontal landing mode

2.4 技术特点分析

垂直起降方式很大程度上可继承当前运载火箭技术, 技术相对成熟, 运载器整体结构效率较高; 对着陆点需求低, 着陆适应性强, 更适合中大型运输系统; 但着陆过程姿态变化大, 全程过载相对较大, 载人飞行时舒适性相对较差, 且载荷装卸高度较大, 难度较高, 不易操作。

垂直起飞水平着陆和水平起降方式技术成熟度相对较低, 尤其是对具有较大运载能力的运输系统。在返回大气层时需要设计较大的机翼来满足升阻比需求, 同时需配置起落架等复杂着陆机构, 其结构效率受到了影响; 水平着陆时需要建设跑道等设施,

对地面设施要求较多。但水平返回与着陆的机动性更强, 可以实现较大范围的自主机动, 在特殊场合能发挥更大的作用, 且全程过载可以较好地控制, 载人飞行时舒适性较好, 类似飞机的水平起降方式具有载荷装卸简单、易操作等优势^[8-10]。

考虑到垂直起降的研究已比较充分, 以 SpaceX 公司为代表的 Falcon9 运载火箭已经成功实现了商业化运营; 而垂直起飞、水平着陆也取得显著进展, 一些小规模飞行器已经实现了演示验证性飞行。相比较而言, 水平起降的研究相对薄弱, 尤其当运载能力的需求大幅度增加时, 其挑战非常巨大。为此, 本文后续重点针对水平起

降这种方式展开讨论。

与航空运输机、一次性高马赫数再入飞行器、一次性运载火箭和升力式天地往返运输系统相比，

水平起降的远程空天运输系统的飞行环境、能力特征、规模等特点具体如图2所示。

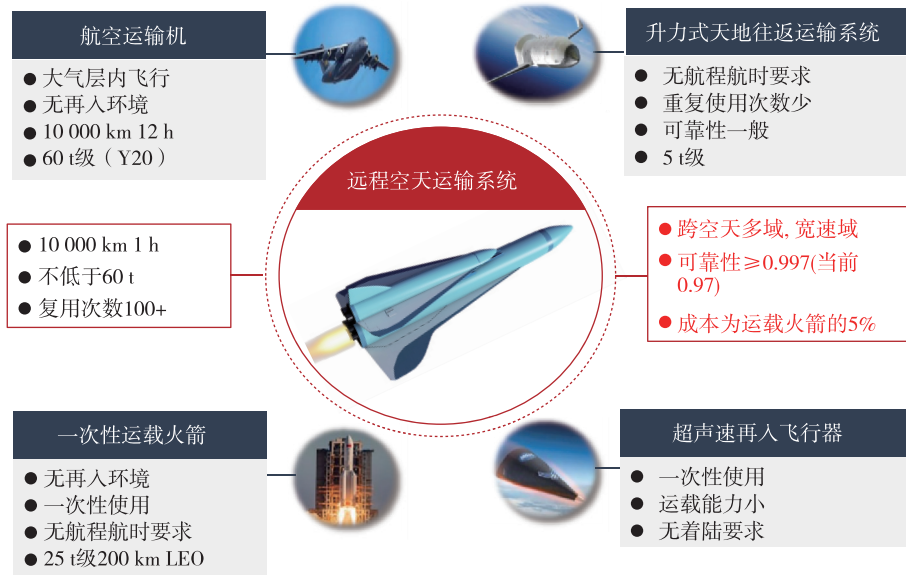


图2 远程空天运输系统与其他飞行器特点对比分析

Fig. 2 Comparison of the characteristics of LATS and other systems

根据上述特点，结合其任务需求和飞行剖面，分析梳理得出水平起降远程空天运输系统飞行过程和全寿命周期内具有跨空天多域、宽速域、航

程远、运载能力大、可复用次数多、可靠性要求高等任务特点，在总体设计和制导控制层面的技术难点如图3所示。

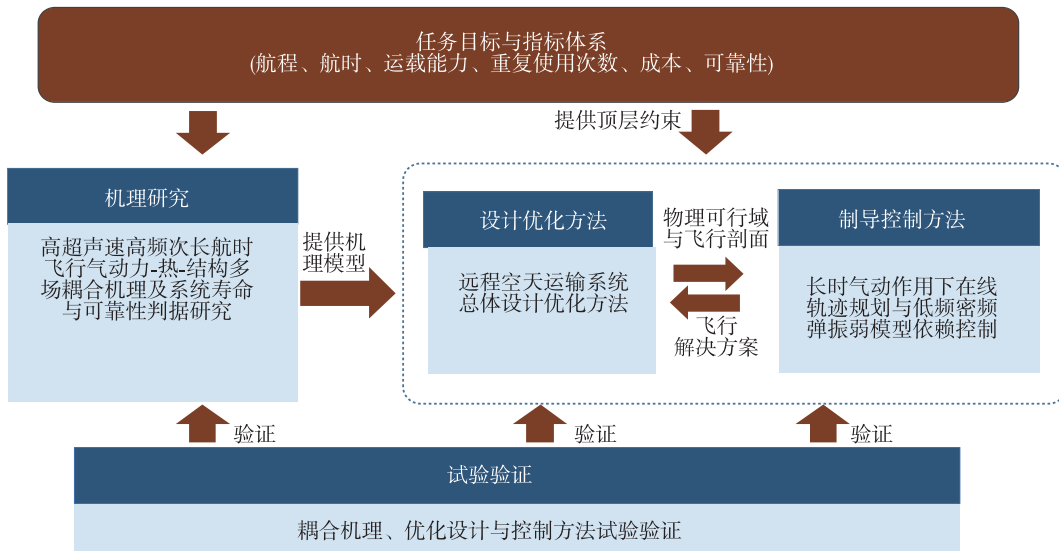


图3 远程空天运输系统的技术难点及相互影响

Fig. 3 Technical difficulties and mutual influence of LATS

1) 力-热-结构多场域耦合严重，变构型动边界非定常气动显著，复杂结构非线性交变应力环境严酷；

2) 设计和飞行试验子样少（极少），飞行环

境复杂极端，系统组成复杂；

3) 系统设计面临优化目标多，面向航班化的可复用需求，带来更加严苛的动压、过载、热流密度、强度、刚度等约束，设计约束多，设计变

量维度高，设计约束和变量之间耦合强；

4) 运动模型复杂，环境与运动模型参数不确定，大尺度翼展带来气动弹性严重，振动频率低，显著的弹性模态时变特性，装定气动参数与真实值天地不一致性进一步加大，易导致自身执行机构触及饱和边界；

5) 长时显著大气作用使得飞行轨迹规划非线性特征与扰动效应显著，宽域多飞行阶段的运动轨迹难以精确快速预示。

3 研究重点与科学挑战

远程空天运输系统给总体设计和控制技术带来了新的设计难点和科学挑战。如以下各节所述。

3.1 远程空天运输系统总体设计优化方法

1) 多目标强耦合多约束高维度条件下复杂系统总体设计优化难度大。

作为一种复杂系统，远程空天运输系统总体设计面临气动力热、弹道、动力、结构、控制等多专业/多场域耦合极强，总体设计参数/气动外形参数/发动机参数/弹道参数等设计变量维度极高，飞行全过程动压/过载/热流密度/总加热量/刚度/强度/发动机性能以及可复用次数/可靠性等设计约束极多，最大航程/运载能力/运载成本等优化目标繁多且相互矛盾等情况。在满足以上诸多条件的情况下实现不同设计指标的综合优化是所面临的科学挑战。

高保真仿真模型近似降阶预示是解决复杂系统总体设计与近似优化的重要途径之一。充分利用远程空天运输系统总体设计中存在的多源模型/数据信息，揭示设计参数与系统响应映射规律，实现高精度小样本条件下的复杂远程空天运输系统非线性响应特性保精度快响应预示，建立竞争神经网络效能评估方法，获取综合效能最佳的远程空天运输系统总体设计方案。

2) 跨空天域、多速域下兼顾上升、再入滑翔和水平着陆需求的气动布局设计难度大。

远程空天运输系统起飞、再入返回和水平着陆阶段面临的飞行环境复杂，经历的空域跨度大 (100+~0 km)、马赫数变化范围大 ($Ma = 20+ \sim 0$)、攻角变化范围大 ($0^\circ \sim 90^\circ$)，导致气动性能在整个飞行过程中变化大，涉及全速域气动外形优化、操稳特性匹配、高速与低速气动性能的匹配等众多气动设计难题，对远程空天运输系统气

动布局设计提出了非常大的挑战。

建立远程空天运输系统的气动布局设计原理和方法，对乘波体式气动布局、机体/推进一体化气动布局、翼身组合体等气动布局方案进行遴选、融合，获得适用于远程空天运输系统的气动布局方案。开展基于不确定性量化分析的气动布局稳健优化设计方法研究，结合外形参数化方法、不确定性量化方法、灵敏度分析方法、网格自动生成技术、高精度 CFD 求解器、替代模型技术和优化算法，构建出一套适用于远程空天运输系统的多目标稳健优化策略，获得宽马赫数、多飞行高度、多攻角下的总体性能最优的气动布局方案。

本研究拟采取的技术途径见图 4。

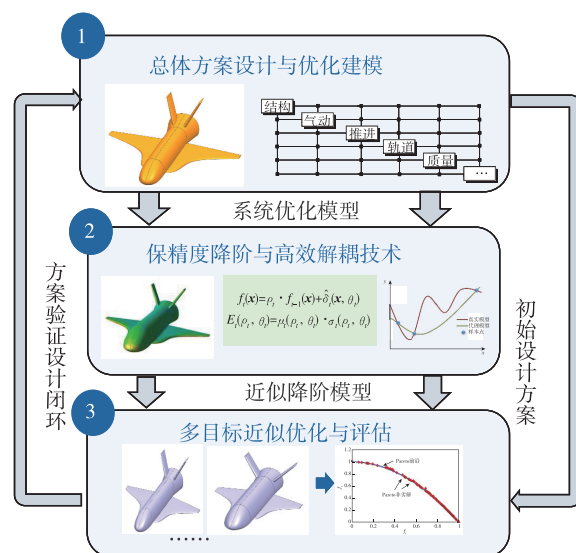


图 4 总体设计优化方法研究

Fig. 4 Optimization methodology of overall design

3.2 超声速高频次长航时飞行气动力-热-结构多场耦合机理及系统寿命与可靠性判据研究

1) 跨空天多域长时极端飞行环境下气动力-热-结构多场耦合机理认识不清、力热结构疲劳寿命预测不准确。

由于特殊的任务特点和技术特点，远程空天运输系统在跨空天域、多速域飞行条件下，气动力、热具有强烈的时间非线性，结构表面的辐射散热、对流换热以及内部的热传导等热量传递现象，导致气动力-热-结构多场耦合机理十分复杂。同时，热应力会引起大面积薄壁、大尺度变形翼等结构的严重形变，加之气动弹性引起的结构振动问题，给结构-材料的疲劳损伤模式分析及寿命评估带来显著挑战。

建立气动力、热耦合作用下结构的力学和热学

性能分析及评估方法,澄清结构材料、尺寸以及通道构型、尺寸等对气动热防护性能的影响机理;针对翼面、舵面、起落架等可动部件,开展适用于高温高压来流下的热密封设计,澄清复杂工作模式下的热密封机理;深入揭示异频交变载荷作用下的结构疲劳机理,厘清在高频次交变应力、快速温变条件下结构疲劳损伤规律和失效模式。

2) 基于小(极小)子样的复杂系统再次发射评估与面向航班化长航时寿命预测难度大。

远程空天运输系统故障模式复杂,系统间故障耦合程度高,飞行、试验和仿真数据样本极少,可靠性特征量提取数据缺乏,面向全系统全信息数据融合困难,可靠性和重复使用评估难度大;在复杂恶劣飞行环境中高频次长航时使用的经济和技术寿命矛盾突出,综合设计难度大。

融合全寿命周期数据,构建考虑故障发生随机因素的小子样多层超先验网络融合的可靠性评估方法,探索各分系统性能维持与退化对整机可靠性的影响规律,设计基于分系统和整机满足可复用可靠性要求的RMS(可靠性、维修性、保障性)判据技术准则,实现长航时技术寿命和经济寿命综合预测。

拟采取的技术途径如图5所示。

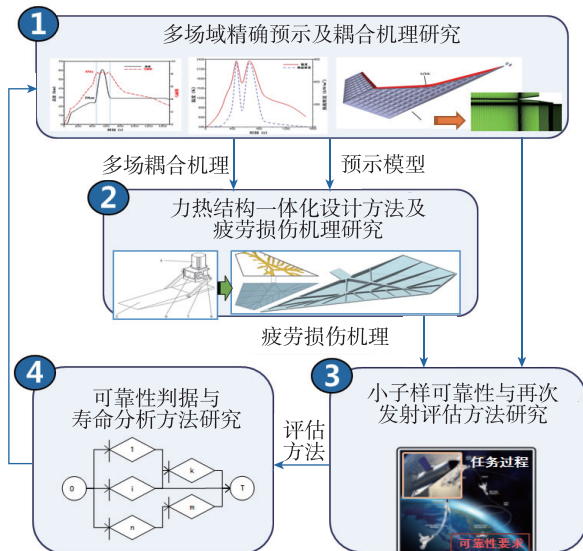


图5 多场耦合机理及系统寿命研究

Fig. 5 Multi-field coupling mechanism and system life study methodology

3.3 长时气动作用下在线轨迹规划与低频密频弹振弱模型依赖控制

1) 多飞行阶段性能指标互异、高气动不确定

性强约束下轨迹在线规划难收敛。

大尺度远程空天运输系统长时大气作用使得轨迹规划模型动态特性显著,升力式外形与高动压、大特征面积共同作用,导致轨迹规划约束复杂,控制可行域狭窄,求解效率低。同时飞行末段稠密大气作用不确定性强、性能指标约束与飞行中段有较大差异,飞行轨迹难以精确、快速预示。

针对大规模升力式外形及宽速域特点,开展高粒度轨迹规划求解模型构建、小规模高精度模型凸化处理及再入轨迹凸规划问题高效求解算法研究,突破过程约束易达到容许边界、规划可行域狭窄等难点问题,提升算法收敛速度及鲁棒性。针对飞行末段能量约束要求苛刻的特点,开展精确快速末段轨迹规划方法研究,实现飞行大偏差或状态异常情况的能量管理与进场着陆段轨迹可靠在线精准规划。

2) 大尺度箭体低频密频振动参数难以准确估计、复杂飞行剖面下全流程气动参数难以精确预示带来控制性能降低。

远程空天运输系统大翼展结构下箭体低阶振动频率密集且与刚体振动频率相近,在气动力/热/结构耦合等复杂作用下呈现显著的弹性模态时变特性,离线装定的气动参数与真实数据存在显著的天地不一致性,进一步加大了运输系统快响应需求下所需的控制力矩,使得运输系统易触及自身执行机构的饱和边界,引起姿态振荡甚至失稳。在线更新运输系统气动参数和振动信号,研究对模型依赖程度低的快响应、抗饱和控制方法是所面临的科学挑战。

探索气动参数在线辨识与低频密频下弹性振动抑制方法,研究运输系统在线最优协调控制分配策略,开发弱模型依赖条件下预定时间控制方法,降低控制系统对地面模型参数依赖程度,显著提升在快时变、强耦合、强非线性、强不确定性等复杂动力学特性下姿态的收敛速度,实现姿态快速收敛与执行机构饱和边界易触及之间的协调控制。拟采取的技术途径如图6所示。

综上所述,远程空天运输系统的设计给总体和控制技术带来了极大的挑战,需要解决的问题已经触及及相关学科在飞行器设计领域的极限能力。开展相关理论和关键技术研究,不仅是要探索采用水平起降形式大运载能力的远程空天运输系统的总体方案的可行性,也可拓展相关学科的研究

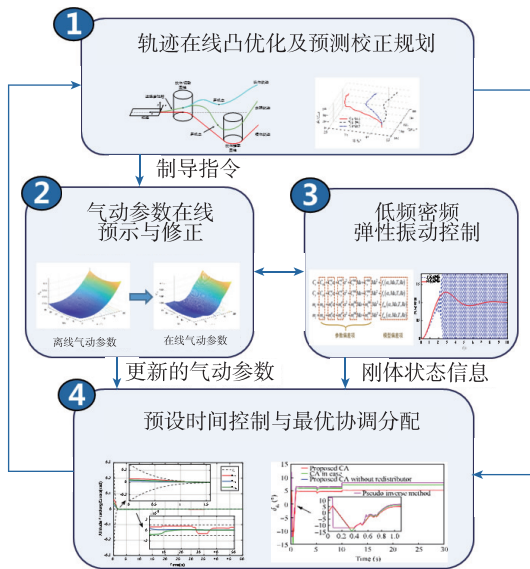


图 6 制导与控制技术研究

Fig. 6 Guidance and control technology methodology

边界，带来新的学科发展增长点。

4 结论

远程空天运输系统突破传统航空和航天运载器设计理念，具有跨空天多域、宽速域、航程远、运载能力大、使用次数多、可靠性要求高、升力起飞、滑翔着陆等任务特点，以及飞行环境复杂极端、复杂结构非线性交变应力环境严酷、多场域耦合严重、系统组成复杂、设计和飞行试验子样少、优化设计指标多、全过程复杂边界多因素强约束、运动模型复杂、环境与运动学模型参数不确定、规模大、气动弹性严重、振动频率低等技术特点；由于可复用需求，面临更加严苛的动压、过载、热流密度、强度、刚度等约束。不同于航空飞行、一次性高马赫数再入飞行和运载火箭入轨飞行等，远程空天运输系统总体设计与控制具备新的设计难点和科学挑战，在促进科技进步、产业融合、经济发展中将发挥重要的作用。

远程空天运输系统的研发极具探索性。通过总体和控制技术的研究，以期确定相关的飞行方案、飞行剖面，实现总体指标和各参数的闭环。

参考文献

- [1] 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.
- [2] Musk E. Making life multi-planetary[J]. New Space, 2018, 6(1): 2-11.
- [3] Sippel M, Stappert S, Koch A. Assessment of multiple mission reusable launch vehicles[J]. Journal of Space Safety Engineering, 2019, 6(3): 165-180.
- [4] Savino R, Russo G, D'Oriano V, et al. Performances of a small hypersonic airplane (HyPlane)[J]. Acta Astronautica, 2015, 115: 338-348.
- [5] 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.
- [6] Song Z Y, Wang C, Theil S, et al. Survey of autonomous guidance methods for powered planetary landing[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2020, 21(5): 652-674.
- [7] Song Z Y, Wang C. Powered soft landing guidance method for launchers with non-cluster configured engines[J]. Acta Astronautica, 2021, 189: 379-390.
- [8] 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.
- [9] 宋征宇, 黄兵, 汪小卫, 等. 重复使用运载器回收技术现状与挑战[J]. 深空探测学报(中英文), 2022, 9(5): 457-469, 455.
- [10] Wang X, Wu S, Gao Z, et al. Recovery technology of launch vehicle stage[C]. 67th International Astronautical Congress, Guadalajara, Mexico, 2016.
- [11] Hellman B M, Bradford J E, St Germain B D, et al. Two stage to orbit conceptual vehicle designs using the SABRE engine[C]. Proceedings of AIAA SPACE 2016. Long Beach, California. Reston, Virginia: AIAA, 2016.
- [12] Mehta U B, Aftosmis M J, Bowles J V, et al. Skylon aerodynamics and SABRE plumes[C]. Proceedings of 20th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Glasgow, Scotland. Reston, Virginia: AIAA, 2015.
- [13] 张楠, 孙慧娟. 低温液体火箭发动机重复使用技术分析[J]. 火箭推进, 2020, 46(6): 1-12.

引用格式: 宋征宇, 汪小卫, 陈蓉, 等. 远程空天运输系统总体设计与控制技术的科学挑战[J]. 宇航总体技术, 2023, 7(2): 35-41.

Citation: Song Z G, Wang X W, Chen R, et al. Challenges of long-range aerospace transportation system design and control technology[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2023, 7(2): 35-41.