重复使用航天运输系统设计及评估

闻悦, 马婷婷, 郑平军, 张静, 王飞, 蔡巧言*

中国运载火箭技术研究院, 北京 100076

* 联系人, E-mail: caiqy2019@163.com

航天运输技术是体现国家航天实力的重要标志, 是实现进出空间的重要基础。经过几十年的发展, 一次性运载火箭技术已经相对成熟, 但仍面临着高可靠、高安全、低成本、快速发射、提升运载能力等挑战。重复使用航天运输系统是指能够实现往返于宇宙空间和地球之间, 或在外层空间轨道之间飞行, 执行任务后可返回地面, 并可以多次使用的航天运输系统, 如图 1 所示。重复使用航天运输系统技术的发展一直是航天运输领域研究的热点和难点。通过采用重复使用设计理念和简易发射方式, 能够有效缩短发射周期、提高发射灵活性, 同时基于多次重复使用、费用均摊的原则, 可以大幅降低发射费用, 最终实现低成本自由进出空间、高效利用空间、和平开发空间。

开展重复使用航天运输系统设计及评估技术研究, 实现重复使用航天运输系统在全速域、全空域的自主飞行, 对进入空间、在轨飞行、返回地面等不同任务阶段的不同飞行环境具备自适应、高灵活、多次往返能力, 并在返回地面后通过对系统进行快速检测维护和健康状态评估, 有效降低维修保障的时间与费用, 具备航班化运营能力。发展重复使用航天运输系统设计及评估技术, 能够有力支撑未来自由进出空间、空间站建设、载人登月登火、深空探

蔡巧言 中国运载火箭技术研究院研究员、项目技术负责人兼副总研究师, 中国航天科技集团有限公司学术技术带头人, 中国空气动力学学会理事、专业委员会委员。2010 年获西北工业大学飞行器设计专业博士学位。获部级及军队科技进步奖二等奖 7 项。主要从事航天运载器总体设计、气动力/热设计等工作。

测等任务, 推动航天运输技术的革命性发展, 并对未来人类生活方式产生深远的影响。

1 重复使用航天运输系统发展分析

早在二十世纪五六十年代, 人类就已经开始了对重复使用航天运输系统相关技术的探索。长期以来, 世界航天强国高度重视重复使用技术的发展, 均将其作为国家重要战略方向持续给予支持。经过几十年的发展, 主要航天大国和地区已拥有不同程度的重复使用技术储备, 形成了多种典型的重复使用运载器方案。其中, 美国航天飞机已经积累了长达 30 年的运行使用经验。在此基础上, 美国持续开展重复使用技术研究, 具备了轨道再入及重复使用能力。俄罗斯/苏联成功完成过暴风雪号航天飞机的不载人飞行试验, 具备一定的重复使用技术能力。欧洲各国以及日本、印度等国家和地区也进行过多次技术级飞行试验, 为重复使用技术的应用奠定了一定的基础。

1.1 美国发展情况

美国航天飞机是目前唯一正式投入使用的重复使用航天运输系统, 取得了多项重复使用相关技术的重大突破, 既实现了有翼式飞行器水平着陆方式的重复使用, 也实现了助推火箭的海面伞降回收方式的重复使用。

可部分重复使用的飞行器, 美国国家航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 最初希望航天飞机能够重复使用 100 次。但实际上, 1972~2011 年期间, 5 架航天飞机共飞行 135 次, 平均每年少于 5

图 1 重复使用航天运输系统示意图

Figure 1 Concept of reusable space transportation system

次, 由于使用频率低于预想, 而维护费用和技术改进费用又高于预期, 航天飞机并没有体现出重复使用的优势。同时, 航天飞机的可靠性和安全性存在很大问题, 其风险是民航客机的 138 倍。究其原因, 主要是由于项目预算受限, 导致最终设计的航天飞机并不符合最初的设想, 而是折中后的产物^[1]。

由于航天飞机无法满足人们在早期赋予它的种种期待, 美国继续寻求新的技术突破, 期待发展新型运载器以替代航天飞机。先后发展了以“国家空天飞机计划”(National Aero-Space Plane, NASP)和“冒险星”/X-33 项目为代表的新一代运载器, 均为单级入轨可重复使用的设计, 得到了政府的大力支持。但这些项目后续都因技术瓶颈、经费超支、进展滞后等原因而被取消。

进入 21 世纪后, 美国回归多级入轨、部分重复使用运载器研究。2009 年 5 月, 美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)向工业界发布了可重复使用助推系统(Reusable Booster System, RBS)方案征求书, 要求工业部门提交第一级可重复使用、上面级一次性使用的 RBS 方案, 用于满足从亚轨道飞行到重型发射任务的需求。RBS 系统包括一个火箭动力可重复使用的第一级和一个一次性使用的上面级, 采用垂直发射方式, 第一级与上面级飞行至分离点后返回发射场, 像飞机一样在跑道上着陆。RBS 周转周期 8 h, 其中 2 h 为发射准备时间, 6 h 为着陆后在机场跑道检查维修时间。

RBS 项目原计划目标是在 2017~2018 年进行缩比飞行器的试飞, 以演示低成本、快速响应的技术, 使技术成熟度达到 6 级, 为开展全尺寸飞行器研制做准备。美国空军原计划通过 RBS 两个不同的状态分别替代宇宙神 5(ATLAS V)和德尔它 4(DELT A 4)运载火箭。其中, 亚轨道发射任务由一个可重复使用第一级与一个低温上面级组合完成, 高轨及重型发射任务由两个可重复使用的低温芯级助推器和一次性使用上面级完成。初始应用能力计划于 2025 年形成, 并在 2030 年逐步淘汰一次性运载火箭^[2]。

2012 年 10 月, RBS 项目中止, 转向更加先进的概念方案研究。RBS 项目主要负责人在 2012 年 12 月加入美国国防预先研究计划局(Defense Advanced Research Project Agency, DARPA), 担任试验性太空飞机(Experimental Spaceplane, XS-1)项目经理。2013 年 11 月 12 日, DARPA 正式发布 XS-1 项目的广泛机构公告, 向工业界公开招标, 启动可重复使用太空飞机的方案研究。

XS-1 项目旨在发展验证低成本、持续快速地进入空间和全球到达的相关技术与操作, 该飞行器能够发射小型有效载荷并可以用做试验平台。XS-1 项目分为 3 个阶段: 第一阶段重点研究 XS-1 演示验证方案、攻关核心关键技术、降低风险和提升技术成熟度, 对系统能力进行飞行演示验证; 第二阶段主要通过关键设计评审细化 XS-1 演示验证方案, 通过组件地面试验充分降低风险, 进行制造、

总装, 并对第一级进行测试, 完成试验准备评审; 第三阶段重点进行 XS-1 系统的系统试验和演示验证。2016 年 4 月, DARPA 宣布 XS-1 项目进入第二阶段, 并计划在 2020 年左右实现首飞。

XS-1 演示验证的技术目标如下: (1) 完成可重复使用一子级的技术验证; (2) 10 天内飞行 10 次, 飞行速度至少有一次达到马赫数 10; (3) 至少有一次将典型有效载荷送入轨道; (4) 能够以低于 500 万美元的发射价格(估计每年发射 10 次以上)将 1.4~2.3 t 有效载荷送入近地轨道(low earth orbit, LEO)^[3]。

除国家层面支持的研究计划之外, 美国 SpaceX 公司、蓝色起源公司等私营公司也在积极探索垂直起降重复使用运载火箭之路。SpaceX 公司自 2012 年开始, 利用猎鹰(Falcon)9-1.0 一子级改造的验证机验证垂直起降技术, 2015 年成功完成陆地回收, 2016 年成功完成海上回收。目前, 猎鹰 9 火箭已成功实现了多次一子级回收和复用。此外, 猎鹰重型(Falcon Heavy)火箭于 2018 年 6 月完成首次成功发射, 并于 2019 年 4 月完成首次商业发射并成功回收了三枚助推器^[4]。

组合动力技术方面, 美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)从 2014 年 1 月开始对英国佩刀发动机(Synergistic Air-Breathing Rocket Engine, SABRE)进行技术考察。2015 年 4 月, AFRL 确认了 SABRE 发动机的技术可行性, 同时也认为基于 SABRE 发动机的云霄塔(SKYLON)水平起降单级入轨飞行器在短期内仍存在较大技术风险, 更适宜作为远期的发展目标, 而近期应基于 SABRE 发动机, 开展风险更低、研制周期更短的两级入轨应用方案的研究。2016 年 9 月, AFRL 在美国航空航天学会(American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA)会议上公布了两套基于 SABRE 的水平起降两级入轨飞行器概念方案。其中一型的第一级可重复使用, 另一型的第一级和第二级均可重复使用^[5]。

1.2 欧洲发展情况

欧洲太空局(European Space Agency, ESA)当前正在执行未来运载器准备计划(Future Launcher Preparatory Programme, FLPP), 该计划包括 4 个研究项目: 过渡性试验飞行器(Intermediate eXperimental Vehicle, IXV)、低温上面级技术验证机、大推力发动机验证机和固体推进验证机。其中, 过渡性试验飞行器(Intermediate Vehicle, IXV)于 2015 年 2 月 11 日完成轨道再入飞行试验, 演示并验证了重复使用运载器的高速、无动力机动再入飞行的能力。2016 年, 完成了 IXV 防热系统等的飞行后评估。后续, 欧洲将基于已有的飞行试验技术基础, 进一步开展重复使用轨道验证机的研究^[6]。

此外, 英国喷气发动机有限公司(Reaction Engines Limited, REL)开展了“云霄塔”(SKYLON)单级入轨重复使

用运载器研究. 该项目源于20世纪80年代初英国提出的单级入轨“霍托尔”(HOTOL)空天飞机计划. 由于英国政府不再为该计划投资, 部分HOTOL计划的发起者和相关研究人员共同成立了喷气发动机有限公司(Reaction Engines Limit, REL), 继续开展改进研究, 即云霄塔(SKYLON)项目.

云霄塔(SKYLON)是一种类似于航空飞机的空天飞机, 可从跑道上水平起飞、入轨, 执行发射卫星、向空间站运送成员或物资等任务后, 采用滑翔返回并水平着陆于机场跑道, 具有低费用、高可靠性、完全重复使用等优点. SARBE是云霄塔飞行器的核心, 其技术方案在2012年经过了ESA和NASA等机构的评估, 空气预冷技术、进气道技术、对转涡轮机技术等均得到了不同程度的验证. 目前计划2020年完成约9 t推力的发动机核心机地面验证; 2023年完成集成样机的技术验证; 2025年开展飞行演示; 2028年进行两级入轨一级发射任务的演示^[7].

1.3 发展趋势分析

总结美国、俄罗斯等国家和地区的发展情况, 可以归纳为以下发展趋势.

第一, 重复使用航天运输系统近期重点聚焦两级入轨方案, 同时开展单级入轨方案探索. 纵观各种世界主要航天国家的重复使用航天运输系统发展历程, 对于单级入轨重复使用运载器, 已经出现的代表性方案, 如美国的X-30计划和X-33计划等, 都因技术瓶颈或资金问题而搁浅, 目前仅有英国“云霄塔”计划在进行相关研究, 且其精力主要集中在发动机的技术攻关上. 因此, 目前各国在发展重复使用航天运输系统的策略上, 采取更加务实和慎重的态度, 结合自身特点与技术基础, 强调技术可实现性, 近期多以两级入轨重复使用航天运输系统为发展重点.

第二, 火箭动力是目前发展重复使用航天运输系统的主流推进方式. 火箭发动机技术经过几十年的发展, 已经相对比较成熟, 并已被成功应用于一次性运载火箭和部分重复使用的航天飞机上. 同时, 已经有多个具有重复使用设计特征的火箭发动机投入使用, 包括航天飞机主发动机、俄罗斯的NK-33和RD-180等. 此外, 还有多个重复使用火箭发动机正在研制中, 包括美国蓝色起源公司的BE-4液氧/甲烷发动机、SpaceX公司的猛禽液氧/甲烷发动机, 以及欧洲的普罗米修斯液氧/甲烷发动机等. 因此, 火箭发动机的重复使用在近期较容易实现, 在未来一段时间内将是重复使用航天运输系统的首选动力方案.

第三, 组合动力目前仍处于技术攻关和验证阶段. 组合动力技术能够显著拓展运载器的高度和速度, 是未来重复使用航天运输系统的重要动力方案. 现阶段, 涡轮、火箭发动机技术较为成熟, 组合发动机攻关重点聚焦于冲压模态. 将涡轮、冲压、火箭多模态高度融合设计而成的组合动力发动机应用于重复使用航天运输系统, 技术难度较大. 根据国外研制进展, 初步推测国外组合动力推进技术

可能在2030年左右得到突破, 2040年后才能真正具备完全重复使用能力.

第四, 垂直起飞、带翼水平返回方案是重复使用航天运输技术发展的主线. 美国航天飞机在二十世纪七八十年代就已经验证了水平带翼返回方案的可行性, 成功突破了热防护、气动、制导控制以及进场着陆等各个领域的关键技术, 为该类飞行器的后续发展奠定了良好基础. 此后美国空军依靠航天飞机的技术和研制经验, 分别论证和研制了带翼水平返回的亚轨道级和轨道级飞行器. 尽管亚轨道级飞行器RBS项目因经费问题被迫终止, 但是DARPA后续接力空军开展XS-1项目, 继续开展研究工作. 欧洲各国以及日本、印度等国家和地区也针对带翼水平返回方案开展了技术验证工作. 因此可以看出, 带翼水平返回方案一直是各国重复使用航天运输系统的发展主线.

第五, 垂直起降技术趋于成熟, 持续开展降低发射成本和缩短发射周期的研究. 美国SpaceX公司和蓝色起源公司在运载火箭一子级垂直起降技术方面均取得了显著的成果. 但也应当看到, 对于火箭助推级的重复使用, 其降低发射成本的程度, 取决于是否能够成功回收, 以及回收的部件是否能够复用. 同时, 还需要考虑重复使用所带来的运载能力损失问题. 以猎鹰9火箭一子级为例, 其第一次进行再次发射前, 大约经历了8个月的检修、维护和试验, 同时一子级的重复使用也造成了约40%的运载能力损失. 因此, 目前对于垂直起降方案, 正在通过多次发射任务, 持续探索如何进一步降低发射成本、缩短发射周期.

综上, 我国应结合自身技术基础, 综合考虑技术可实现性和经济可承受性, 制定循序渐进的发展策略. 遵循从火箭动力到组合动力, 从多级入轨到单级入轨, 从部分重复使用到完全重复使用的发展思路, 通过尽快实现运载火箭的精确回收, 解决航区安全问题; 通过采用垂直起降技术, 实现运载火箭子级/助推级的回收和复用, 发展绿色航天; 通过优先发展火箭动力垂直起飞、带翼水平返回一级, 先期构建低成本、高可靠、重复使用进出空间基础平台; 通过同步开展组合动力技术攻关, 为最终实现单级入轨奠定坚实的技术基础^[8].

2 重复使用航天运输系统设计与评估探讨

2.1 重复使用航天运输系统技术特点及难点

从世界主要航天大国的发展脉络可以看出, 重复使用航天运输系统的发展, 按照传统运载火箭轴对称式重复使用、升力式火箭动力重复使用、组合动力重复使用3条技术发展途径同步开展研究, 典型代表如猎鹰-9运载火箭、试验性太空飞机XS-1、组合动力云霄塔飞行器等.

对于传统运载火箭轴对称式重复使用技术, 目前技术成熟度较高, 包括伞降回收和垂直返回两种方式. 伞降回收主要利用降落伞减速, 实现陆地、海上或空中回收. 垂

直回收主要利用发动机重启反推减速,结合高精度控制手段,实现陆地或海上精确着陆回收。其技术难点主要体现在伞降回收系统设计、垂直返回高精度控制、垂直返回发动机大范围深度推力调节等方面。

对于升力式火箭动力重复使用技术,近期发展重点为两级入轨方案。对于两级入轨系统,最佳的分离点条件为马赫数6~10,高度60~100 km,一旦级间分离马赫数降到6以下,会导致二子级重量急剧增加。由于该类运载器在宽速域和大空域飞行,因此兼具航空器和航天器技术特点。速度变化剧烈、飞行空域跨度大等特点,带来了飞行器攻角变化范围大、大气密度变化剧烈等问题。同时飞行器承载特性复杂,上升段承受轴向过载,返回段承受法向过载。飞行器气动力热环境也具有特殊性,历经连续流、滑移流、过渡流和稀薄流区。其技术难点主要体现在气动力热、飞行控制、轻质高强结构、重复使用评估等方面。

组合动力技术是将涡轮、火箭、冲压多种先进动力进行有机融合形成一种新型动力,其优势在于能够充分利用大气,从而减少氧化剂携带量。因此,组合动力的最佳工作范围为大气稠密的空间,约为0~30 km。将组合动力发动机应用于重复使用航天运输系统,需要尽可能延长组合动力发动机在大气中的飞行时间,将运载器的速度增加到一个极值。目前,正在尝试采用多种不同的组合动力技术途径解决其应用存在的问题,技术难点主要体现在总体/推进一体化设计、不同动力之间的协调匹配、大范围进排气技术、组合动力飞行器机体结构/防隔热/动力一体化等方面^[9]。

2.2 重复使用航天运输系统设计与评估关键点

目前,上述三类重复使用航天运输系统技术途径要进入实际应用,真正实现空天一体化运输和航班化运营,还存在多项问题有待解决。一方面是设计问题,需要解决总体、控制、动力、结构、防热、材料、制造等各个专业的问题,以确保重复使用航天运输系统能够飞得起来;另一方面是评估问题,需要对设计结果进行评估、对试验结果进行评估,以及对飞行后的状态进行评估,以确保重复使用航天运输系统能够多次使用。设计是基础和起点,而评估是重要保障。

因此,基于重复使用航天运输系统的技术特点及难点,梳理提出以下5项与重复使用设计与评估密切相关的关键点:

(1) 重复使用设计准则与评估技术。航天运输系统的重复使用,不同于传统航空器的超长寿命重复使用和传统航天器的一次性使用,属于有限次数和有限寿命的重复使用,因此亟须探索建立适用于重复使用航天运输系统的设计准则和评估体系,具备在两次飞行期间准确判断其是否可再次可靠完成飞行任务的能力。

(2) 预测与健康管理技术。重复使用航天运输系统面临着提高安全性、提高可靠性以及控制维修保障费用的问

题,因此需要开展预测与健康管理技术研究,借助智能推理算法来评估重复使用运载器自身健康状态,能够在故障发生前进行预测,并结合可利用的资源合理规划一系列的维修保障措施,最终实现全寿命周期健康管理。

(3) 结构热防护重复使用无损检测技术。重复使用航天运输系统飞行之后,其结构材料会经历复杂的热力环境,材料性能、表面状态、结构尺寸均会发生细微的改变,与首次飞行前的状态存在区别。如何采用无损检测手段对不同部位、不同结构的材料进行有效检测,在此基础上评价下一次飞行的结构材料可靠性,直接关系到航天运输系统重复使用的成败。

(4) 高精度全速域气动力/热预示技术。重复使用航天运输系统跨越从低速至高速、从地面至空间轨道的速域和空域范围,涵盖了高温真实气体、稀薄、黏性、转捩和湍流、激波/激波和激波/边界层干扰等所有复杂空气动力学效应以及气动多学科耦合问题。这些问题的存在及各类预示手段的自身缺陷,使得气动力/热的精确预示仍然面临着诸多世界级难题。

(5) 先进火箭推进与组合推进技术。重复使用航天运输系统对推进系统提出了可重复使用、低成本、无毒、无污染、高可靠、使用维护方便的需求。先进火箭推进与组合推进技术需要利用先进材料、智能制造、大数据与故障检测等科技发展成果,实现从一次性使用拓展到多次使用,从单一模态发展为火箭、涡轮、冲压多模态融合。

2.3 对重复使用航天运输系统设计与评估的思考

综合美国航天飞机的经验和世界各航天大国的发展趋势,可以看出,发展重复使用航天运输系统,必须同时兼顾技术可实现性和经济可承受性。因此,一方面需要突破核心关键技术,另一方面需要创新重复使用设计理念,确保以最优的经济性实现最好的系统性能,最终达到缩短发射周期、降低发射成本的目的。

(1) 突破核心关键技术,提升重复使用航天运输系统固有性能。总体方面,重复使用航天运输系统的技术指标先进,设计难度大,总体、气动、结构、防热、动力、控制等多个专业间存在强耦合性,为了获得性能优化的总体方案,必须全面开展多学科耦合的一体化设计工作。同时,由于重复使用航天运输系统在不同任务阶段的物理环境特性和任务不同,需要开展分段设计、综合优化。综合考虑多个任务阶段的约束条件,对其总体性能进行优化迭代分析,最终给出优化的总体方案。

气动力/热方面,重复使用航天运输系统飞行剖面历经连续流、滑移流、过渡流和稀薄流区,涵盖了几乎所有复杂空气动力学效应和气动多学科耦合问题,需要采用先进数值模拟、风洞试验、参数辨识等方法,同时结合大数据和人工智能等前沿技术的发展,对作用于天地往返飞行器上的气动力/热及气动多学科耦合特性进行准确预示。

结构和热防护方面,针对重复使用航天运输系统低成本、高可靠、高可维护性、可重复使用目标,必须在大过载、气动力热、高频噪声、振动、着陆冲击等使用载荷和复杂环境条件下,保证结构和热防护的完整性,需要开展先进的轻质、耐高温的结构防热一体化材料研究,通过分析其耐久性机理,建立适用的疲劳寿命评估方法.同时,在完成飞行任务之后,需要采用无损检测手段对飞行器不同部位的结构和热防护材料进行有效检测,明确其材料性能、表面状态、结构尺寸等是否满足再次飞行的要求.

动力方面,重复使用液体火箭发动机技术、组合循环动力技术等先进动力技术,是航天运输系统实现重复使用的主要瓶颈.重复使用动力技术除了要求高性能、高可靠、长寿命之外,还需具备多次点火、大范围工况调节等功能,以及全任务剖面故障检测、全寿命周期使用维护等特点,这就要求动力系统按照重复使用的设计理念开展设计,同时进一步提高比冲、推质比,具备大范围变推力能力.

控制方面,由于重复使用航天运输系统通常采用翼身组合体构型,其俯仰通道、滚转通道、偏航通道之间存在强耦合关系,飞行全程面临大范围攻角变化、大热流、变载荷、复杂力学环境、不确定性控制等多约束条件,实现全程稳定控制是其面临的主要挑战.此外,为了实现重复使用航天运输系统从发射准备、执行任务、安全返回全过程的智能自主控制,控制系统需要具备应对典型预期故障和非典型预期故障的能力,通过在线自主智能规划,在故障条件下最大限度确保任务的完成^[9].

(2) 创新重复使用设计理念,权衡重复使用航天运输系统性能和经济性.航天运输系统的重复使用是在规定寿命内有限次数的重复使用,传统航天器以一次任务成功为目标的设计理念难以满足重复使用航天运输系统的要求,而与传统航空器相比,又存在任务环境复杂、样本数量有限、历史数据缺乏等问题.

目前,我国还没有形成针对重复使用航天运输系统的设计准则,对其经济性问题也还没有形成准确的分析结论.对于重复使用航天运输系统,需要从结构、热防护、动力、运行维护、健康管理等不同技术专业的角度,提出适用于航天运输系统有限次重复使用的设计准则,建立总体和各分系统的核心技术指标体系,并明确核心技术指标的评估方法,真正具备重复使用设计能力.此外,还需要在设计过程中有效融入低成本设计理念,在设计初期建立全寿命周期费用模型,完成从方案设计、生产制造、考核测试、发射运行以及使用维护等全寿命周期费用成本测算,明确影响成本的制约因素,在保证高可靠和长寿命的前提下,进一步优化改进设计.

在此基础上,需要进一步明确对重复使用航天运输系统的评价方法,主要包括技术指标的评价和经济指标的评价.其中,技术指标的评价应包括其功能指标和性能指标的检测及评估,在此基础上,对其环境适应性、可靠性、

寿命等开展分析、评估、预测;经济指标应包括成本、利润、投资额、市场寿命、社会效益、技术带动性等多个不同方面.通过综合权衡技术指标和经济指标,对重复使用航天运输系统开展客观评价,才能保证通过重复使用实现低成本.

同时,为了进一步保证重复使用航天运输系统高可靠、低成本以及快速维修保障的需求,需要发展自主检测与航班化运营技术,通过构建基于高可靠性基础上的健康管理自主保障综合体系架构,形成一套完整的技术攻关方法与流程,实现系统的重复使用与快速发射.在飞行过程中,利用先进传感器与底层程序采集结构、热防护、动力、电气等系统的各种数据信息,经过智能数据分析与融合后,通过智能推理算法开展故障诊断、定位、隔离以及预测,并对系统器件/组件的使用寿命进行评估,通过系统自主重构技术消除飞行故障.在返回地面后,通过对系统进行快速检测,并结合系统飞行信息以及地面历史维修数据,采用智能评估算法对系统的健康状态进行评估,自主生成维修保障方案,合理规划保障资源,实现视情维修,并能够判断系统是否具备进行再次飞行能力.自主检测与航班化运营技术能够极大提高系统的可靠性和安全性,有效降低维修保障的时间与费用,通过提高系统运行的效能,最终实现重复使用航天运输系统的航班化运营.

3 总结和展望

重复使用航天运输系统设计与评估技术的关键突破点在于如何解决由一次性使用向有限次重复使用转变的问题.从运载器的固有性能出发,突破运载器设计中的总体、气动、结构、热防护、动力、控制等核心关键技术,明确飞行过程经历的复杂环境条件,并有针对性地开展面向有限次重复使用的设计和分析,解决结构、热防护、动力等重复使用设计问题.在此基础上,权衡性能和经济性,构建重复使用技术指标体系,明确重复使用性能和经济性评估标准和方法,具备全寿命周期自主保障能力和健康管理能力,保证高可靠、长寿命、低成本要求的落地.

开展重复使用航天运输系统设计与评估技术研究,是实现重复使用航天运输系统可靠、安全运行的重要保障,同时有助于以更加经济有效的方式满足航天运输系统对使用效能和保障能力的需求,从而进一步提升航天发射的任务成功率.基于重复使用航天运输系统设计与评估技术,发展航班化运营的重复使用航天运输系统,是降低航天发射成本的有效途径,是实现低成本、快速、可靠、环保地进出空间的重要手段,能够有力支撑未来航天高密度发射任务,有效服务国民经济建设,大幅推动社会经济快速发展.

航天运输系统作为航天技术发展的重要基础,发展重复使用航天运输系统设计与评估技术,将有力带动先进空天动力、耐高温轻质材料、先进制造与检测、先进空气动力学等基础学科进入世界先进水平.这不仅将推进航天领

域的跨越式发展,而且将促进高等学校、科研院所和工业部门的联合攻关,带动科技创新能力的整体提升,促进基

础学科和工程技术水平的整体提升,实现航天技术从跟随式发展向跨越式发展的重大转变,支撑航天强国建设。

推荐阅读文献

- 1 Peng X B. Design and Implementation of the US Space Shuttle (in Chinese). Beijing: China Astronautic Publishing House, 2015 [彭小波. 美国航天飞机的设计与实现. 北京: 中国宇航出版社, 2015]
- 2 Hellman B M, Ngo A D. Technical challenges for an integrated reusable booster system flight demonstrator. In: Proceedings of AIAA Space 2010 Conference & Exposition. AIAA, 2010-8668
- 3 Zhang J N, Shan W J, Dai K, et al. DARPA's experimental spaceplane project carries out scheme research (in Chinese). Aerosp China, 2014, (7): 46-49 [张京男, 单文杰, 代坤, 等. DARPA 试验性空天飞机预研项目开展方案研究. 中国航天, 2014, (7): 46-49]
- 4 Guo J C. Enlightenment of the development of SpaceX (in Chinese). Space Int, 2017, (3): 22-28 [郭今昌. 美国太空探索技术公司发展启示. 国际太空, 2017, (3): 22-28]
- 5 Hellman B M, Bradford J E, St Germain B D, et al. Two stage to orbit conceptual vehicle designs using the SABRE engine. In: Proceedings of AIAA Space 2016 Conference & Exposition. AIAA, 2016-5320
- 6 Billing G, Gallego J M, Bellomo A, et al. The ground segment and operations of ESA's Intermediate eXperimental Vehicle (IXV). In: Proceedings of SpaceOps 2016 Conference. AIAA, 2016-2504
- 7 Hemsell M. Progress on SKYLON and SABRE. In: Proceedings of 64th International Astronautical Congress, Beijing, 2013. IAC-13, D2.4, 6x19609
- 8 Long L H, Cai Q Y, Wang F, et al. Development of reusable space transportation technologies (in Chinese). Sci Technol Rev, 2018, 36: 84-92 [龙乐豪, 蔡巧言, 王飞, 等. 重复使用航天运输系统发展与展望. 科技导报, 2018, 36: 84-92]
- 9 Lu Y, Cai Q Y, Wang F. Near space and reusable technology (in Chinese). Missiles Space Veh, 2018, (3): 1-9 [鲁宇, 蔡巧言, 王飞. 临近空间与重复使用技术研究. 导弹与航天运载技术, 2018, (3): 1-9]

Summary for “重复使用航天运输系统设计与评估”

Design and assessment of reusable space transportation system

Yue Wen, Tingting Ma, Pingjun Zheng, Jing Zhang, Fei Wang & Qiaoyan Cai*

China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

* Corresponding author, E-mail: caiqy2019@163.com

With decades of development, disposable launch vehicle technology has reached to a high maturity level. However, launch vehicles are still faced with problems of increasing reliability, decreasing launch preparation time and decreasing launch cost. Reusable launch vehicle transports between the ground and the orbit or between orbits for multiple times. It is one of the major directions for the development of space transportation system, and it is a cost efficient way for accessing to space. Therefore, design and assessment of reusable space transportation system must be studied. By analyzing the existing reusable space transportation systems worldwide, the development tendency can be concluded as follows. (1) Currently major countries and areas are mainly focusing on Two-Stage-To-Orbit (TSTO) system while still exploring the possibility of Single-Stage-To-Orbit (SSTO) system. (2) Rocket engine is the mainstream propulsion plan for TSTO system due to its maturity level. (3) Combined cycle engine will be at concept study phase for years since it is still seeking for technology breakthrough. (4) Vertical take-off and horizontal landing (VTHL) plan with lifting body configuration is widely applied. (5) Vertical take-off and vertical landing (VTVL) plan with axial-symmetrical configuration is mainly chosen by commercial corporations. According to the tendency and the current technical base, trading off between the technical feasibility and the economic affordability, the development strategy can be concluded. In short-term, it is suggested to achieve a reusable launch vehicle based on axial-symmetrical configuration, in order to solve the safety issue of launch vehicles. Meanwhile, it is also suggested to achieve a reusable launch vehicle based on lifting body configuration and rocket engine, in order to build the airplane-like reusable space transportation system. In long-term, it is suggested to achieve TTSO or STSO system using combined cycle engines. The design and assessment methodology of reusable space transportation system differs from traditional astronautical method, for it is reusable instead of disposable. It also differs from traditional aeronautical method, because of the harsh flight environment and the limited data size. Therefore, two major aspects, breaking through key technologies and innovating design philosophy, must be considered. On one hand, challenges such as aerodynamics and aerothermodynamics throughout the complex flight path, reusability of light-weight and heatproof structure, reusability of rocket engine must be solved. On the other hand, indicator system, design and assessment criteria specifically for reusable launch vehicles must be built. The design of reliability, maintenance, testability, supportability as well as prognostics and health management must be integrated into the R&D procedure. In conclusion, design and assessment of reusable space transportation system are of significance for solving problems occurred during the transition from disposable to reusable. Based on the reasonable development strategy and key technology breakthrough, the inherent capability of the launch vehicle can be guaranteed. Weighing the feasibility and the affordability based on advanced design philosophy, advantages of reusability can be insured. Furthermore, the study and application of the reusable space transportation system can not only be beneficial for future space transportation but can also be helpful for improving people's livelihood as well.

space transportation, reusable launch vehicle, test and maintenance, prognostics and health management

doi: 10.1360/TB-2019-0553