

水平起降天地往返运输技术发展展望

王 珏^{1,2}

(1. 中国运载火箭技术研究院, 北京, 100076; 2. 天地往返高效运输技术全国重点实验室, 长沙, 410073)

摘要: 面向航天运输规模化、高频次发展的迫切需求, 水平起降重复使用运载器 (Horizontal Takeoff and Horizontal Landing-Reusable Launch Vehicle, HTHL RLV) 无需依赖固定发射场, 可实现类似航空器的便捷化运行, 是构建未来航班化空天运输体系的重要发展方向。首先, 系统阐述水平起降重复使用运载器的技术特征与发展脉络, 对比分析技术途径的优缺点与适用性; 然后, 在此基础上, 重点剖析该领域面临的多学科耦合总体设计、宽速域气动布局、高性能组合动力、轻质化结构、自适应制导控制、重复使用与智能运维等关键技术挑战与突破方向; 最后, 对未来技术发展路径进行展望。

关键词: 天地往返; 水平起降; 重复使用运载器

中图分类号: V42

文献标识码: A

Future Prospects for Horizontal Takeoff and Horizontal Landing Space Transportation Technology

WANG Jue^{1,2}

(1. China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing, 100076; 2. National Key Laboratory of High-Efficiency Reusable Aerospace Transportation Technology, Changsha, 410073)

Abstract: In response to the pressing demand for the large-scale and high-frequency development of space transportation, horizontal takeoff and horizontal landing-reusable launch vehicle (HTHL RLV) which does not rely on fixed launch sites and can operate as conveniently as aircraft, represents a crucial development direction for establishing a future scheduled space transportation system. The technical characteristics and developmental path of HTHL RLV are systematically elucidated, providing a comparative analysis of the strengths, weaknesses, and applicability of different technical approaches. On this basis, it focuses on key technical challenges and potential breakthroughs in the field, including multidisciplinary-coupled overall system design, wide-speed-range aerodynamic configuration, high-performance combined-cycle propulsion, lightweight structures, adaptive guidance and control, reusability, and intelligent operation and maintenance. Furthermore, prospective pathways for future technology development are also outlined.

Keywords: space transportation; horizontal takeoff and horizontal landing; reusable launch vehicle

0 引言

自2018年开始, 星链等低轨组网任务逐渐兴起, 全球低轨发射量由2020年突破100次增加到2025年的300次以上。低轨互联网基础设施建设任务爆发式增长, 对航天运输系统在运载能力、效费比方面提出更高的发展要求, 以满足大规模进出空间需求^[1-2]。重复使用天地往返运输系统是航天运输向规模化、高频次应用的重要发展方向, 其研发在推动总体、动力、结构以及控制技术发展的同时, 也将带动材料科学、先进制造、人工智能等领域技术的突破, 形成技

术溢出效应, 促进新型航天产业生态发展^[3-4]。

1 天地往返运输系统发展现状与趋势

天地往返运输系统按照动力形式可分为火箭动力与组合动力两种类型, 按照起降方式可分为垂直起降 (Vertical Takeoff and Landing, VTVL) 重复使用运载器、垂直起飞水平着陆 (Vertical Takeoff and Horizontal Landing, VTHL) 重复使用运载器和水平起降 (Horizontal Takeoff and Horizontal Landing, HTHL) 重复使用运载器等^[5]。自20世纪80年代开始, 各国

围绕天地往返运输的各种技术路线开展了大量新概念、新方案、新技术的先期探索与攻关验证工作,并取得了许多重要的研究成果。

1.1 天地往返运输系统发展现状

低成本、安全可靠地进入空间是各国航天领域追求的目标,20世纪80年代初期,美国为提高航天运输的经济性,基于火箭动力技术路线相继实施了航天飞机、X-33火箭动力重复使用运载器等计划,试图进一步降低发射成本、提高可靠性和安全性。航天飞机于1981年成功首飞并运营,但其过度追求规模和功能的多用途,未达到预期经济指标,历时30年共飞行135次,于2011年遗憾退出历史舞台^[6]。1995年,美国启动冒险星计划,基于火箭动力构建单级入轨飞行器,由于其缩比验证机X-33的复合材料低温贮箱技术长期没有突破,并且预算大幅超支,该计划于2001年3月被迫终止^[7]。

进入21世纪后,美国于2005年成立商业乘员和货物项目办公室,由该办公室牵引支持SpaceX公司实现了运载火箭垂直起降和部分重复使用技术突破和工程应用。截至目前,猎鹰9 Block5最大重复使用次数达32次,大幅降低了发射成本^[8]。SpaceX公司为了进一步降低成本,提高运载效率,兼顾“地-月”“地-火”空间运输需求,推出了以全流量补燃液氧甲烷火箭发动机为主动力的超重-星舰运载系统,预期其运输成本较猎鹰9再降低一个数量级。截至目前,超重-星舰已完成了11次飞行试验,实现了一系列重要的技术突破,一旦服役应用,将依托“大当量运输+完全重复使用”模式,给天地往返运输带来革命性影响,并助力美国提升全球大当量物资点对点快速投送与“地-月”“地-火”往返运输能力,强化其在深空探索、太空资源开发领域的领先地位。

人类一直在追求安全、便捷、航班化的天地往返运输,基于吸气式组合动力的水平起降重复使用运载器是实现空天一体化的理想方式和重要途径。在1982年,英国就已提出霍托尔单级入轨运载器概念方案。1986年,美国启动国家空天飞机计划(NASP/X-30),目标是实现水平起降、单级入轨,将运输成本降至航天飞机的5%,但由于技术指标过高,超燃冲压发动机等核心技术一直未能突破,该项目于1995年被迫终止^[9-10]。2000年以后,美国在重复使用运载器发展的技术路线及政策上出现了两方面转变:一方面,技术途径由单级入轨转向多级入轨,发展策略更加务实;另一方面,吸气式动力技术的应用由天地往返转向高

超声速导弹等军事领域,以期先实现超燃冲压发动机的技术突破,再梯次发展应用于高超声速飞机和空天飞机中。美国依托X-51A等项目成功验证了超燃冲压发动机的工作性能^[11],在此基础上,ATRAX公司近期计划研发马赫5级高超声速验证平台,为后续小卫星发射与太空旅游的水平起降重复使用运载器奠定基础^[12]。Hermeus公司研制的高超声速原型机夸特马已完成多项地面试验以及首次飞行试验,并规划了未来的军民应用^[13]。英国REL公司在霍托尔空天飞机的基础上,提出了云霄塔单级入轨运载器方案,该运载器以氢燃料预冷组合动力发动机为主动力,成功突破了预冷器、换热器等关键技术瓶颈^[14]。尽管该公司由于研发周期过长与资金链断裂等问题于2024年宣布破产,但英国仍继续推进相关研究,2025年7月,由欧空局资助、Frazer-Nash公司牵头的无敌号计划正式启动,旨在基于氢燃料预冷组合动力发动机技术,研制马赫5级可重复使用空天飞行器^[15]。

1.2 天地往返运输系统发展趋势

结合天地往返运输系统发展现状与脉络,可以看出未来发展趋势如下:

a) 垂直起降火箭动力重复使用运载器是当前实现“大当量运载、高频次发射”的现实途径,已进入工程应用阶段。以全流量补燃猛禽发动机为主动力的两级完全重复使用运载器超重-星舰一旦投入应用,将对航天运输格局产生重大影响。

b) 水平起降重复使用运载器是实现“航空-临空-太空”一体化运输的理想形式,然而,其发展仍面临空天宽域高性能组合动力、高效轻质结构、极端环境重复使用等一系列关键技术挑战,目前尚处于关键技术攻关与系统验证阶段。未来,随着相关技术的逐步突破,有望推动空天运输产业实现重要变革。

c) 水平起降重复使用运载器的研制应遵循科学技术发展规律,采取渐进式发展策略,可按照“规模由小到大、先技术验证后能力验证、先两级入轨后单级入轨”的思路逐步推进,从而实现能力的持续提升与阶段跨越。

2 水平起降重复使用运载器技术特征

2.1 水平起降重复使用运载器

水平起降重复使用运载器(Horizontal Takeoff and Horizontal Landing Reusable Launch Vehicle, HTHL RLV)是采用组合动力,从机场水平起降,在稠密大气、临近空间、近地轨道自由跨域飞行的飞行

能强、推重比高、系统复杂度适中的优点,对于重复使用航天运输任务的适用性较强。

表2 不同组合动力形式对比

Tab.2 Comparison of combined cycle engine types

动力形式	吸气模态速域	比冲/s	推重比	加速性	复杂度	技术难度
TBCC	$Ma=0\sim 6+$	碳氢:600~2 000	5~8	较强(涡轮模态), 弱(冲压模态)	中	较高
RBCC	$Ma=2\sim 8+$	碳氢:400~1 600 液氢:1 800~3 700	6~12	强(火箭模态), 弱(冲压模态)	低	较低
ATR	$Ma=0\sim 4+$	碳氢:700~1 100 液氢:2 500~3 500	8~12	强	中	较低
TRRE	$Ma=0\sim 7+$	碳氢:350~2 000	4~6	较强(涡轮模态), 弱(冲压模态)	高	高
深度预冷	$Ma=0\sim 6+$	液氢:3 500~5 000	4~8	强	高	高
适度预冷	$Ma=0\sim 5+$	液氢:3 000~3 500 甲烷:800~1 200	8~12	强	中	较低

2.2.3 推进剂类型分析

推进剂类型方面,重复使用运载器主要考虑采用液氧煤油、液氧液氢和液氧甲烷等推进剂。3类推进剂性能对比如表3所示,其中,煤油具有密度较高、易使用的优势,可采用常温异形贮箱,有利于减小飞行器整体尺寸规模,但其比冲相对较低,重复使用性较差。液氢比冲最高,适用于单级入轨等具有高比冲需求的航天运输任务,且重复使用性好,但是其低密度会导致运载器整体规模增大、结构效率下降,且需注意金属材料氢脆问题,使用难度大、要求高。甲烷的比冲、成本和易用性等性能均介于煤油和液氢之间,适合中等性能需求,同时甲烷理论上具备火星就地制造条件,未来执行星际任务潜力较大。

表3 不同推进剂对比

Tab.3 Comparison of propellants

推进剂	密度/ ($g\cdot cm^{-3}$)	比冲/s	贮存条件	成本	可重复 使用性
煤油	0.8~0.9	280~310	常温(易于贮存)	低	较差
液氢	0.42	330~360	-162℃(较难贮存)	较低	良好
甲烷	0.07	420~455	-253℃(难贮存)	高	良好

3 水平起降重复使用运载器技术挑战与关键技术

3.1 面向多物理场耦合、高运载效率的总体设计与评估

水平起降重复使用运载器兼具航空飞机、火箭、卫星、飞船等多种飞行器的特点,系统复杂,各专业间深度耦合,运载器设计需实现多学科强约束的权衡设计与总体性能全局最优。

a) 多场域下重复使用指标体系设计。多次重复

使用、高运载效率、快周转运行的使用需求对水平起降重复使用运载器各系统性能和指标提出了极致要求,应基于系统工程方法论,建立飞行性能关键参数的多场耦合分析模型。通过多学科协同优化框架,解析“气动-动力-轨迹-结构-控制”等专业参数的强非线性耦合规律,量化核心指标敏感性因子,构建指标评价体系,驱动全系统协同优化设计。

b) 飞发一体联合优化设计。水平起降重复使用运载器总体设计需以飞发一体化为核心,系统解决全域飞行条件下气动-推进耦合、进气道-发动机动态匹配及质心-稳定性协同等关键难题;需重点突破“宽域进气道-核心机-喷管”协同设计、“气动-动力-轨迹”联合优化技术,实现全剖面总体性能综合提升,通过飞发一体化结构设计和多源能源智能管控技术实现结构效率与能源利用率的双向提高,促进性能边界拓展。

c) 基于全系统数字样机的性能优化与评估。水平起降重复使用运载器高度复杂且多专业深度交叉耦合,迫切需要研究多专业紧耦合高协同的数字化评估方法,构建全系统数字化功能、性能样机,分别建立质量、能源、控制等虚实结合的仿真流程,实现飞行器性能的全系统仿真优化。

3.2 面向空天全域飞行的多约束耦合、多目标协同气动设计

面对天地往返、水平起降带来的前所未有的多物理场耦合、多学科冲突及宽包线适应性等挑战^[26],需协调极宽速域飞行条件下性能与稳定控制的矛盾,实现气动与推进系统的深度一体化^[27-30],气动设计流程由传统各部件独立设计向高度集成化、智能化、数据驱动、多学科交叉融合方向演进。

a) 面向全域飞行性能的气动外形多目标优化。传统基于单一设计点优化的构型难以兼顾天地往返全域飞行性能要求,为此,需形成融合参数化建模、数据驱动降维、高效梯度求解与多目标协同搜索的智能化综合框架^[31]。在此基础上,深度学习与强化学习方法等智能手段,在提升自主探索最优优化路径的效率方面已展现出巨大潜力。

b) 宽域下进排气变构协同设计与智能控制。吸气式组合动力发动机在极宽飞行马赫数范围(通常为0~7以上)因气动-推进耦合特性剧烈变化导致进气不稳定、燃烧效率下降及推力波动等问题,需突破变构型进排气气动设计与智能变构型控制策略,以维持发动机在整个飞行剖面内的稳定工作与高效输出。

3.3 面向高性能、高推重比需求的重复使用组合动力设计

水平起降天地往返跨域飞行任务要求动力系统能够从零速开始一直工作到极高马赫数以上,动力系统不仅要能适应外界环境的剧烈变化,还需要通过多参数综合匹配保证最优性能产出,既要求极度轻质化的结构设计,还需要保证高可靠性和多次重复使用。必须通过航空航天动力技术、材料科学、控制工程等多学科交叉融合,利用跨越式的思维创新引导技术突破,实现动力系统综合性能的优化。

a) 多特征耦合下的动力协同匹配与高效热功转化。吸气式组合发动机中,多介质、多流路间能量梯级传递形成了复杂联合循环,换热、增压、燃烧及膨胀过程相互影响,热功传递频繁、流路耦合严重,全系统参数协调匹配和优化难度剧增。需要在跨域飞行中实现气动、传热、燃烧等多特征深度耦合下的协同匹配,保障核心部组件能稳定工作在安全阈值边界,实现完整任务剖面内动力系统安全可靠工作和高效率能量输出。

b) 全包线智能化全局寻优控制技术。根据跨域飞行任务需求,发动机控制系统既要能够在恶劣外界干扰环境中安全、可靠地工作,还需通过全局寻优充分发挥动力最优性能。发动机输入和输出参数以及控制变量较传统发动机大幅增加,各变量、回路之间都存在深度耦合的特性,需要借助人工智能和模型预测的新技术,实现强鲁棒性、高可靠性和抗干扰能力的发动机控制方案设计。

c) 高性能发动机轻质化结构设计。基于飞行器对发动机的宽域工作、高推重比与多次重复使用要求,发动机面临高温、高压、临氢及复杂力热载荷,

需实现高可靠、高性能与极致轻质化的平衡,必须通过“总体-动力-结构”一体化集成、拓扑优化与先进增材工艺结合、新型轻质耐热材料应用、极端多场耦合条件结构寿命精细化评估等途径来寻求突破。

3.4 面向极端服役环境下的高效轻质结构跨系统优化设计

极端复杂的飞行任务剖面和载荷环境,导致飞行器结构轻质化面临极大挑战,传统的各系统内部独立设计模式难以满足其严苛要求,需构建“冷-热”等多专业耦合技术体系与“结构-功能”等多系统集成架构,通过“材料-结构-工艺-功能”多维度协同设计,实现深度耦合的一体化设计范式,以攻克高效轻质化设计的技术瓶颈。

a) 多物理场耦合一体化分析。通过提升跨专业设计技术体系能力,开展流-固、力-热等多物理场耦合分析与优化,消除专业边界与保守系数,实现设计方案轻质优化。

b) “结构-功能”一体化设计。回归第一性原理,统筹分析各系统间组成部分设计的根本理念,整合系统间重叠功能结构,如承力贮箱的机身承载与容纳功能一体化设计、贮箱壁防热绝热材料一体化设计、贮箱增压需求与承载需求匹配设计,实现系统级减重^[32-33]。

c) “材料-构型-工艺-功能”一体化设计。充分利用多物理场耦合分析与优化技术,支撑舵翼前缘、驻点等高温承载区域的轻量化点阵结构应用,支撑机身非贮箱段空间桁架与多层热防护蒙皮一体化方案应用^[17, 34-35]。

3.5 面向多模态、跨域飞行的自适应制导控制

针对高动态跨域飞行面临的非定常气动效应、多约束任务耦合及强扰动等复杂工况,传统分层制导控制架构难以满足跨声速突变、推力骤降等场景下的响应需求,需构建“集群智能决策-实时轨迹重构-自演进容错控制”一体的制导控制体系,最终形成终端精度百米级、控制重构毫秒级的全自主闭环制导控制能力。

a) 动态任务协同规划与决策方法。构建分布式多智能体决策架构,发展时空约束下的动态可达域在线预测技术,融合深度强化学习与多智能体协调策略,突破大规模集群资源分配与航迹冲突消解瓶颈,实现分钟级在线协同响应与自主任务分配。

b) 跨域实时轨迹优化重构方法。建立气动/推进/控制耦合的数字孪生模型,开发故障特征驱动的轨迹

预测网络,结合参数凸优化与硬件加速技术,突破非线性动力学跳变与故障轨迹重构的耦合优化瓶颈^[36],实现跨声速突变等极端工况下的秒级在线轨迹生成。

c) 智能容错控制自主演进理论。构建环境感知-策略演进的闭环控制架构,发展多源扰动融合观测与执行机构健康评估技术,创新非线性预测控制与人工智能算法融合策略^[37],突破强扰动与双舵卡死等极端工况下的稳定性保持瓶颈,实现毫秒级控制重构与策略实时进化。

3.6 面向高任务效率的重复使用设计与运行维护

水平起降重复使用运载器需要解决极端服役环境下,重复使用寿命正向设计以及运行监测与维护的难题,保证严酷环境下运载器重复飞行的可靠性,创建运维保障中心,在检修、维护、发射、值守、管理等多方面提供重要保障。

a) 多场耦合环境定义与表征。相比传统飞机载荷谱^[38-39],重复使用运载器载荷环境呈现力-热-声-振多物理场强耦合特征,其精确预示面临多项关键力学问题^[40],包括跨域非流线体构型气动热环境与结构传热双向耦合建模、多源气动噪声的多尺度传播机制、多场耦合机理与振动疲劳行为表征、宽域可调进排气非定常载荷机理及高精度仿真等。

b) 结构重复使用寿命正向设计。当前轻质结构、热防护与热结构材料的热物理特性和热疲劳特性数据库需进一步完善,通过损伤机理和失效模式研究,建立低频次高载荷结构使用寿命评估方法,实现结构损伤容限分析与耐久性设计。

c) 智能健康监测与运维管理。基于先进传感器集成组网,依托人工智能和数字孪生技术,对服役期间运载器关键部件进行实时监测,结合地面仿真环境高精度数字孪生模型,实现对结构健康状态的精准评估和剩余寿命的科学预测,支撑运维策略快速制定。

4 结束语

水平起降重复使用运载器具有任务响应灵活、运营维护经济、飞行环境缓和、运输效率高等特点,是推动航空与航天技术深度融合、实现航班化天地往返高效运输的重要发展方向。尽管当前在飞发一体化设计、宽速域高性能组合动力、高效轻质结构与热防护、极端服役环境下重复使用可靠性等方面仍面临一系列关键技术挑战,但其持续攻关与突破将有力推动天地往返运输系统的创新发展。

展望未来,水平起降重复使用运载器应坚持渐进

式发展策略,稳步推进关键技术攻关与集成验证工作。随着组合动力、轻质结构、智能控制等关键技术的不断突破与工程化落地,水平起降重复使用运载器有望实现从技术验证到能力构建的跨越,为空天一体化运输提供可行技术方案。其在航班化航天运输、临空高速投送、洲际高速货运、太空旅游等多样化任务场景中展现出的应用潜力,也将为构建新型空天产业生态、提升空间进出能力提供重要支撑。

参 考 文 献

- [1] BAO W M, WANG X W. Develop highly reliable and low-cost technology of access to space, embrace new space economy era[J]. *Aerospace China*, 2019, 20 (4): 23-30.
- [2] 李东,张津泽,朱海洋. 重复使用航天运输系统技术与展望[J]. *航天技术与工程学报*, 2025, 2(3): 1-12.
LI Dong, ZHANG Jinze, ZHU Haiyang. Technical development and prospect of reusable space transportation system technology[J]. *Journal of Space Technology and Engineering*, 2025, 2(3): 1-12.
- [3] 包为民. 可重复使用运载火箭技术发展综述[J]. *航空学报*, 2023, 44(23): 629555.
BAO Weimin. A review of reusable launch vehicle technology development[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2023, 44(23): 629555.
- [4] 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*, 2020(9): 7-13.
LONG Lehao, WANG Guoqing, WU Shengbao, et al. Current status and prospects of China's reusable space transportation systems[J]. *Space International*, 2020(9): 7-13.
- [5] 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.
LONG Lehao, CAI Qiaoyan, WANG Fei, et al. Development of reusable space transportation technologies[J]. *Science & Technology Review*, 2018, 36(10): 84-92.
- [6] 黄志澄. 美国发展重复使用运载器的重大转折及其经验教训[C]. 北京: 中国空气动力学学会高超声速前沿问题研讨会, 2002.
HUANG Zhicheng. Major turning points and lessons learned in the development of reusable launch vehicles in the United States[C]. Beijing: Symposium on Frontier Issues in Hypersonics, Chinese Society of Aerodynamics, 2002.
- [7] 牛文,李文杰,叶蕾. 美国X-33空天飞行器项目回顾与总结[J]. *飞航导弹*, 2014(7): 13-17.
NIU Wen, LI Wenjie, YE Lei. Review and summary of the U.S. X-33 spaceplane project[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2014(7): 13-17.
- [8] 牟宇,孙冀伟,秦旭东. 猎鹰9火箭Block5构型首次飞行任务解析[J]. *宇航总体技术*, 2018, 2(5): 1-7.
MOU Yu, SUN Jiwei, QIN Xudong. The analysis of Falcon 9 Block 5's maiden flight[J]. *Astronautical Systems Engineering Technology*, 2018, 2(5): 1-7.
- [9] 杨勇,余梦伦. 空天飞行器 翱翔天地间——谈重复使用运载器的

- 发展与应用[J]. 现代军事, 2002(9): 9-12.
- YANG Yong, YU Menglun. Spaceplanes soaring high: development and applications of reusable launch vehicles[J]. *Conmilit*, 2002(9): 9-12.
- [10] 张登成, 唐硕. 美国重复使用运载器的发展历史、现状及启示[J]. 导弹与航天运载技术, 2003(5): 20-27.
- ZHANG Dengcheng, TANG Shuo. Development history, current status and revelation of RLV in USA[J]. *Missiles and Space Vehicles*, 2003(5): 20-27.
- [11] 王长青. 组合动力运载器发展与展望[J]. 中国航天, 2022(1): 9-16.
- WANG Changqing. Development and prospects of combined cycle launch vehicles[J]. *Aerospace China*, 2022(1): 9-16.
- [12] ATRX. ATRX-Cummings aerospace partnership[EB/OL]. (2025-02-12)[2025-12-23]. https://www.atrx.space/news_posts/atrx-cummings-aerospace-partnership.
- [13] The War Zone. First flight for quarterhorse prototype that aims to lead to a reusable hypersonic jet[EB/OL]. (2025-05-27) [2025-12-23]. <https://www.twz.com/air/first-flight-for-quarterhorse-prototype-that-aims-to-lead-to-a-reusable-hypersonic-jet>.
- [14] 邓帆, 谭慧俊, 董昊, 等. 预冷组合动力高超声速空天飞机关键技术研究进展[J]. 推进技术, 2018, 39(1): 1-13.
- DENG Fan, TAN Huijun, DONG Hao, et al. Progress on key technologies of hypersonic aerospace plane with pre-cooled combined propulsion[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(1): 1-13.
- [15] ESA. INVICTUS-Europe's new hypersonic test platform[EB/OL]. (2025-07-16) [2025-12-23]. https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Engineering_Technology/Shaping_the_Future/INVICTUS_Europe_s_new_hypersonic_test_platform.
- [16] BARRY M H. Two stage to orbit conceptual vehicle designs using the SABRE Engine[J]. AIAA SPACE Forum, 2016. DOI: 10.2514/6.2016-5320.
- [17] MARK H. SKYLON user's manual[M]. Abingdon: Reaction Engines Limited, 2014.
- [18] BREVAULT L, BALESIDENT M, WUILBERCQ R, et al. Conceptual design of a two-stage-to-orbit vehicle using SABRE engines[C]. Madrid: 8th European Conference for Aeronautics and Aerospace Sciences, 2019.
- [19] 唐硕, 龚春林, 陈兵. 组合动力空天飞行器关键技术[J]. 宇航学报, 2019, 40(10): 1103-1114.
- TANG Shuo, GONG Chunlin, CHEN Bing. The key technologies for aerospace with combined cycle engine[J]. *Journal of Astronautics*, 2019, 40(10): 1103-1114.
- [20] 李俊杰, 胡秋晨, 刘鹏超, 等. TBCC发动机的典型方案及试验技术发展分析[J]. 火箭推进, 2022, 48(6): 26-34+68.
- LI Junjie, HU Qiuchen, LIU Pengchao, et al. Analysis of typical scheme and test technique development of TBCC engine[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2022, 48(6): 26-34+68.
- [21] 林威全, 许航瑞, 兰旭东. TBCC发动机的发展历程及关键技术分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2024, 64(9): 1521-1535.
- LIN Weiquan, XU Hangrui, LAN Xudong. Development and key technology analysis of turbine-based combined cycle engine[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2024, 64(9): 1521-1535.
- [22] 南向军, 李斌, 何国强. RBCC发动机火箭及火箭冲压模态热力循环分析[J]. 火箭推进, 2023, 49(5): 39-45.
- NAN Xiangjun, LI Bin, HE Guoqiang. Thermodynamic cycle analysis of RBCC engine rocket and rocket-scrumjet mode[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2023, 49(5): 39-45.
- [23] 刘昊, 王春民. 不同燃料RBCC发动机性能分析[J]. 火箭推进, 2021, 47(6): 33-38+54.
- LIU Hao, WANG Chunmin. Analysis of RBCC engine performance with different fuels[J]. *Journal of Rocket Propulsion*, 2021, 47(6): 33-38+54.
- [24] 南向谊, 刘轶, 马元, 等. 空气涡轮火箭发动机热力过程及工作特性[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(1): 181-189.
- NAN Xiangyi, LIU Yi, MA Yuan, et al. Thermodynamic process and operating characteristics of air turbo rocket engine[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2022, 40(1): 181-189.
- [25] 韦宝禧, 凌文辉, 江强, 等. TRRE发动机关键技术分析及推进性能探索研究[J]. 推进技术, 2017, 38(2): 298-305.
- WEI Baoxi, LING Wenhui, JIANG Qiang, et al. Analysis of key technologies and propulsion performance research of TRRE engine[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2017, 38(2): 298-305.
- [26] 张阳, 韩忠华, 张科施, 等. 高超声速飞行器宽速域气动布局设计与优化研究进展[J]. 空天技术, 2024(2): 1-14.
- ZHANG Yang, HAN Zhonghua, ZHANG Keshi, et al. Progress in the research on aerodynamic layout design and optimization for wide-speedrange hypersonic vehicles[J]. *Aerospace Technology*, 2024(2): 1-14.
- [27] 许耀宇, 黄河峡, 谭慧俊, 等. 高超声速飞行器前体/进气道一体化气动设计回顾与展望[J]. 空天技术, 2024(2): 15-38.
- XU Yaoyu, HUANG Hexia, TAN Huijun, et al. Retrospect and prospect on the aerodynamic integration of hypersonic aircraft forebody/inlet[J]. *Aerospace Technology*, 2024(2): 15-38.
- [28] 罗世彬, 孙雨航, 刘俊, 等. 高超声速乘波前体/进气道一体化设计综述[J]. 空天技术, 2022(6): 24-48.
- LUO Shibin, SUN Yuhang, LIU Jun, et al. Review of hypersonic wave rider forebody/inlet integrated design[J]. *Aerospace Technology*, 2022(6): 24-48.
- [29] 王子运, 于航, 张悦, 等. 空天飞行器可调进气系统关键问题研究进展[J]. 航空学报, 2024, 45(11): 529440.
- WANG Ziyun, YU Hang, ZHANG Yue, et al. Research progress on key issues of adjustable inlet system for aerospace vehicles[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2024, 45(11): 529440.
- [30] 王振国, 梁剑寒, 范晓樯, 等. 吸气式高速飞行器一体化方案: 回顾与展望[J]. 空气动力学学报, 2023, 41(8): 13-25.
- WANG Zhenguo, LIANG Jianhan, FAN Xiaoliang, et al. Integrated scheme of air-breathing high-speed aircraft: review and prospect[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2023, 41(8): 13-25.
- [31] 高昌, 李正洲, 黄江涛, 等. 基于连续伴随方法的高超声速飞行器高精度气动优化[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 124490.

- GAO Chang, LI Zhengzhou, HUANG Jiangtao, et al. High accuracy aerodynamic optimization of hypersonic vehicles based on continuous adjoint[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(7): 124490.
- [32] 马忠辉, 孙秦, 王小军, 等. 热防护系统多层隔热结构传热分析及性能研究[J]. *宇航学报*, 2003, 24(5): 543-546.
- MA Zhonghui, SUN Qin, WANG Xiaojun, et al. TPS multi-layer insulation thermal analysis and performance study[J]. *Journal of Astronautics*, 2003, 24(5): 543-546.
- [33] 刘欣, 张晓屿. 低温推进剂长期在轨蒸发量主动控制技术发展分析[J]. *深空探测学报*, 2017, 4(3): 203-211.
- LIU Xin, ZHANG Xiaoyu. Development analysis of active long-term on-orbit cryogenic propellant boil-off control technology[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2017, 4(3): 203-211.
- [34] XU N X, XU Y J, ZHANG W H, et al. Design and analysis of multi-layer integrated thermal protection system based on ceramic matrix composite and titanium alloy lattice sandwich[J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 531: 012059.
- [35] XU Y J, XU N X, ZHANG W H, et al. A multi-layer integrated thermal protection system with C/SiC composite and Ti alloy lattice sandwich[J]. *Composite Structures*, 2019, 230: 111507.
- [36] 宋征宇. 推动航天运输系统持续创新的控制技术与挑战[J]. *航空学报*, 2025, 46(6): 531446.
- SONG Zhengyu. Promoting continuous innovation in space transportation systems: control technologies and challenges[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025, 46(6): 531446.
- [37] 黄旭, 柳嘉润, 贾晨辉, 等. 强化学习控制方法及在类火箭飞行器上的应用[J]. *宇航学报*, 2023, 44(5): 708-718.
- HUANG Xu, LIU Jiarun, JIA Chenhui, et al. Reinforcement learning control and its application on rocket-like vehicle[J]. *Journal of Astronautics*, 2023, 44(5): 708-718.
- [38] 孙侠生, 苏少普, 孙汉斌, 等. 国外航空疲劳研究现状及展望[J]. *航空学报*, 2021, 42(5): 524791.
- SUN Xiasheng, SU Shaopu, SUN Hanbin, et al. Current status and prospect of overseas research on aeronautical fatigue[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(5): 524791.
- [39] 李玉海, 王成波, 陈亮, 等. 先进战斗机寿命设计与延寿技术发展综述[J]. *航空学报*, 2021, 42(8): 525791.
- LI Yuhai, WANG Chengbo, CHEN Liang, et al. Overview on development of advanced fighter life design and extension technology[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2021, 42(8): 525791.
- [40] 操小龙, 肖志祥. 组合动力空天飞行器极端服役环境下的关键力学问题[J]. *空天技术*, 2023(2): 1-9.
- CAO Xiaolong, XIAO Zhixiang. Key mechanical problems of combined power aerospace vehicles in the extreme service environment[J]. *Aerospace Technology*, 2023(2): 1-9.

作者简介

王 珏 (1961—), 男, 博士, 研究员, 中国科学院院士, 主要研究方向为液体运载火箭技术。