

美国重复使用运载器技术发展路径研究

樊伟, 王姝雅, 杨开
(北京航天长征科技信息研究所, 北京, 100076)

摘要: 航天运输系统的发展始终以低成本、高频次、快速响应发射为核心目标。重复使用技术是实现这一目标的关键途径。自20世纪中期以来, 美国率先开启了重复使用运载器技术探索之路, 美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)、美国空军等机构组织开展了大量重复使用飞行试验项目和工程研制计划, 历经航天飞机时期、空天飞机时期和二代重复使用运载器研制时期, 直至以SpaceX为代表的商业航天企业实现了重复使用关键技术的突破, 其技术发展路径呈现出多轮次迭代、多路线并行的特征。系统梳理和分析美国重复使用运载器技术发展路线和关键项目, 可为中国重复使用运载器发展提供有针对性、有价值的客观参考, 支撑重大工程的发展规划和顺利实施。

关键词: 重复使用运载器; 航天飞机; 发展路径; 猎鹰9; 超重-星舰

中图分类号: V19 文献标识码: A

Research on the Development Route of Reusable Launch Vehicle Technology in America

FAN Wei, WANG Shuya, YANG Kai
(Beijing Institute of Aerospace Long March Scientific and Technical Information, Beijing, 100076)

Abstract: Achieving low cost, high frequency, and rapid-response launch remains the core objective of space transportation development. Since the mid-20th century, the United States pioneered reusable launch vehicle (RLV) development. Government agencies like NASA and the U.S. Air Force led numerous flight test programs and engineering initiatives, progressing through multiple phases: early exploration, the Space Shuttle era, spaceplane concepts, and second-generation RLV development. Breakthroughs in key reusable technologies were ultimately achieved by commercial entities, notably SpaceX. This evolution exhibits multiple iterative cycles and parallel development paths. Systematically analyzing the U.S. RLV development route, including key projects and technical strategies, offers valuable insights for China's reusable launch vehicle advancement, supporting the planning and execution of major national projects.

Keywords: reusable launch vehicle; space shuttle; development route; Falcon 9; Starship

0 引言

重复使用是航天运输系统的未来发展方向, 是实现安全、可靠、快速、自由、低成本进出空间的有效途径^[1]。美国作为航天强国, 重复使用运载器发展最为系统和全面, 借助持续的资金支持和一系列政策规划, 在组合动力水平起降、火箭动力带翼飞回和垂直起降等方向进行大量的理论研究、技术探索、工程应用和飞行试验。经过多年发展, 猎鹰9火箭动力垂直起降方案的突破和应用, 引领重复使用技术的发展, 增强了航天运输的经济性和灵活性。

目前, 美国已经开始频繁利用重复使用运载器装备执行多样化任务, 实现了大规模星座部署, 抢占近

地轨道资源; 完成了多次长期留轨任务, 开展空间对抗活动; 支撑载人登月国家战略, 抢占新高地。对美国重复使用运载器的发展路径、发展策略、技术方案和发展重点的研究分析, 可为后续重复使用运载器技术发展提供参考。

1 美国重复使用运载器发展历程

1.1 第一阶段(1952—1967): 从高超声速飞行起步, 探索重复使用运载器方案

在原理性研究方面, 二战结束后, 为推动航空航天领域装备研制, 美国利用X-1/2/15等火箭动力有人驾驶飞行试验平台^[2], 研究高超声速飞行的气动、

热、控制等原理性问题,投入3亿美元开展X-15飞行器项目并完成近200次飞行,最大速度达到6.7马赫,为重复使用运载器的研制奠定了坚实的高超声速飞行理论基础^[3]。此外,通过M2-F1/F2/F3和X-24A等升力体构型验证机项目的大量飞行验证活动,加深了对低空气动和操控问题的认识。

在工程研制方面,美国空军投入超过4亿美元经费开展戴纳-索尔项目,研制利用火箭顶推发射三角翼滑行的飞行器,入轨后可绕地球执行轰炸或侦察任务,再入大气层后,在大气层边缘靠空气反弹作用飞行,可以绕地球飞行数圈后水平着陆^[4]。美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)描绘的戴纳-索尔重返大气层如图1所示。虽然项目因为技术难度太高导致经费超支被迫终止,但在火箭助推段飞行控制、防热系统、结构设计等技术领域并没有立刻停止,部分技术应用到了航天飞机等飞行器上。



图1 戴纳-索尔重返大气层概念图

Fig.1 Dyna-Soar reentering the earth's atmosphere

在技术积累方面,美国空军和NASA分别支持开展液化空气循环发动机和高超声速冲压发动机的研发^[5],对组合动力技术进行了初步研究。

1.2 第二阶段(1968—1982):研制航天飞机,首次实现运载器的重复使用

在对重复使用基础原理认知程度加深的同时,阿波罗计划显著提升美国航天运输基础能力。作为阿波罗计划后的航天发展方向之一,NASA于1968年启动航天飞机方案论证,初期设想两级完全重复使用,但受预算削减、空军需求差异影响,方案历经多次调整,最终确定为固体助推器、一次性外置贮箱搭配复用轨道器的架构^[6]。1972至1982年间,NASA与空军协同推进航天飞机研制,累计投入106.6亿美元。1981年航天飞机成功首飞,标志着技术重大突破并开启应用阶段。从研制到2011年退役,美国在近40年

间投入超2000亿美元,建造了6架航天飞机,建设2个配套发射工位和1个配套着陆设施,共执行135次任务,涵盖载人飞行、军事载荷发射及空间站建设等^[7],大幅提升美国重复使用运载器关键技术,并在维护操作、运营管理等方面积累了丰富的经验,培育出大量人才和企业,也为其他类型的重复使用运载器发展奠定了良好的基础。

在理论认知和飞行试验方面,美国空军牵头的X-24B飞行器作为最后一型采用火箭动力的研究型飞行器,为航天飞机验证了着陆能力,而空军继续开展的飞行速度达到6马赫的X-24C飞行器能够对吸气式组合动力技术进行飞行验证^[8],在X-15飞行器飞行速度的基础上进一步拓展了高超声速飞行验证的速度范围,但项目后最被取消。另外,美国空军还提出了机动再入研究飞行器,利用航天飞机的载荷舱从轨道上发射再入地球,在7~23马赫之间的速度区间上开展高超声速飞行试验,实现对全速域范围内相关理论的准确认知,后相关技术验证活动转化到美国空军牵头的跨大气层飞行器(Transatmospheric Vehicle, TAV)和国家空天飞机(National Aerospace Plane, NASP)计划下。

1.3 第三阶段(1983—1993):探索组合动力单级入轨方案,开展国家空天飞机工程研制

在航天飞机实现火箭动力路线的重复使用技术突破后,美军通过TAV研究分析替代航天飞机的后续方案,在组合动力技术研究方面支撑了杜邦的冲压发动机循环研究,基于冲压动力的类飞机单级入轨飞行器得到军方广泛关注,促成美国国防部高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)于1983年启动铜峡谷项目,深入研究单级入轨方案。1986年,挑战者号航天飞机失利后,NASP研制计划得到政府支持,将研制水平起降X-30试验型空天飞机,目的是利用吸气式发动机达到入轨速度,能以8马赫的速度飞行。同时,TAV和铜峡谷等项目也并入NASP计划下。虽然NASP在铜峡谷项目下完成了可行性验证,进入到技术成熟阶段,但由于目标需求不明确、技术路径过于超前、项目多方管理等诸多因素,尽管在十年内总投入超过17亿美元,最终还是没有研制出X-30验证机及其所需的超燃冲压动力。X-30第2阶段设计概念图如图2所示,缩减规模后的X-30X项目也未能获得政府的支持,但NASP计划在结构材料(含热防护)、超燃冲压发动机试验设施、气动和气动热等关键技术和能力方面取得很大进展,一定程度上证明了在国家大力支持的前提下确实

能够推动技术的跨越式发展。

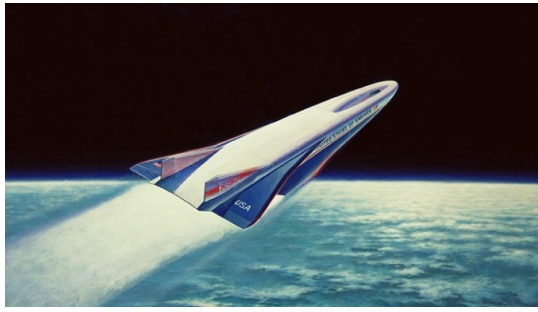


图2 X-30 第二阶段设计概念图
Fig.2 X-30 design in phase II

除了NASP计划以外，冷战背景下，1983年美国提出了战略防御倡议，开展智能卵石项目，需要低成本进入空间能力发射大量轻质、低成本、单体动能杀伤器构建自主天基防御拦截系统，由战略防御倡议办公室牵引带动火箭动力垂直起降单级入轨验证机德尔塔快帆验证机（Experimental Delta Clipper, DC-X）^[9]。美国空军与DARPA启动了航天飞机技术与研究计划，探索火箭顶推发射的载人航天飞机方案，用于军事侦察与打击，类似X-3B轨道飞行器。冷战结束后，航天飞机技术与研究计划及战略防御倡议办公室相关项目相继终止，但DC-X因低成本航天运输前景得以保留，成为第四阶段重要项目之一。

1.4 第四阶段(1994—2003):大规模投入资源,发展第二代重复使用运载器

在NASP计划结束后，美国政府在维持航天飞机运营的基础上，在1994年的《国家航天运输政策》中明确指出由NASA牵头开展重复使用运载器（Reusable Launch Vehicle, RLV）的研制计划^[10]，开启了美国历史上重复使用技术研制和验证最为广泛的一个历史时期，涵盖升力式火箭动力单级入轨验证机X-33及其工程型号冒险星、火箭动力单级入轨垂直起降验证机DC-X/XA、空射升力式火箭动力验证机X-34、Hyper-X吸气动力验证机、火箭动力升力式轨道飞行器X-37/37B等重点项目。

期间，在国家政策指引下，NASA继续推动火箭动力垂直起降验证机DC-X的飞行试验^[11]，并启动X-33验证机的研制。但由于技术路线与X-33不一致，在第二架验证机损毁后，德尔塔快帆验证机项目因未得到进一步的经费支持而停止。X-33瞄准火箭动力垂直起飞水平返回的单级入轨方案（概念图如图3所示）作为RLV计划下的主项目，该飞行器采用塞式发动机、复合材料贮箱等新技术，并在1995年至2001

年间投入了13亿美元^[12]。但X-33由于研制过程中遭遇较多的技术问题，首架飞行器研发和制造进度严重滞后。到1999年，NASA在RLV计划进展受阻的情况下开始调整发展路线，不再急于完成重复使用运载器的工程应用，明确了如图4所示的总体发展路径，重新规划了四代重复使用运载器，强调支撑后续发展的基础研究，等到关键技术得到突破后，再开展工程研制，X-33项目被迫终止。此后，美国先后开展了先进航天运输计划、综合航天运输计划、航天发射倡议、轨道航天飞机、下一代发射技术、军用航天飞机等发展重复使用技术的开发和研制。尽管美国在这一时期未能成功完成第二代重复使用运载器的研制和应用，但是开展的各类计划项目积累了丰富的经验，为下一阶段重复使用运载器的突破奠定了良好基础。



图3 X-33概念图

Fig.3 An artist's conception of X-33



图4 NASA在ISTP计划下确定的重复使用运载器划代
Fig.4 Reusable launch vehicle generation determined by NASA under ISTP

1.5 第五阶段(2004年至今):军商并行发展,突破重复使用运载器技术

2004年底，美国政府宣布“太空探索新构想”计划，并在同年发布的新版《国家航天运输政策》中明确要求NASA发展重型运载火箭，要求军方发展快速响应进入空间能力，指出政府机构要让商业航天力量参与到政府所需的航天运输技术开发活动中。在新版

航天运输政策的指导下, NASA不再直接研制重复使用运载器, 而是以国际空间站的人员及货物运输需求为牵引, 通过设立商业轨道运输服务计划, 吸引商业航天力量参与, 发展新的航天运输系统及能力, 以此替代航天飞机。美国军方则是以快速响应进入空间需求为牵引, 基于此前NASA对重复使用运载器的大量研究, 发展军用重复使用运载器, 重点发展火箭动力升力式加一次性上面级构型方案。

在军用重复使用运载器方面, 美国空军在国防部作战快速响应空间 (Operational Responsive Space, ORS) 概念的牵引下, 在2005年发起经济上可负担的快速响应航天运输 (Adaptive Responsive Space Technology, ARES) 计划, 发展重复使用一子级加一次性上面级的混合运载器方案。但由于美国国会对ORS的概念内涵进行了重新界定, ARES计划因此遭遇终止。2006年到2009年间, 空军研究实验室发起完全重复使用进入空间技术计划, 重点关注液氧甲烷动力的重复使用运载器。2009年到2012年间, 美国空军启动重复使用助推项目, 但由于需要投入太多经费未能得到政府支持。2013年, 由DARPA接力空军, 开展了试验性太空飞机 (XS-1) 计划, 由波音 (Boeing) 公司作为主承包商, 第一阶段概念图如图5所示。基于航天飞机主发动机等已有硬件, 研制单次发射成本500万美元, 近地轨道运载能力1.4~2.3 t, 一子级重复使用、二子级为一次性上面级的重复使用运载器^[13]。尽管完成了一子级主要结构的制造和主发动机10天内完成10次试车的里程碑, 但到2020年因为项目严重超支, 未达到预期目标, 波音公司退出研制计划, XS-1项目被迫终止。

在商业航天方面, 新兴商业航天公司在这一阶段开始自筹资金进行重复使用运载器的研制, 多家公司

得到NASA的商业轨道运输服务计划、商业乘员计划、载人着陆系统, 以及美国军方国家安全航天发射计划、火箭货运等政府项目的经费支撑。通过改变以往政府主导重复使用项目的方式, 在新模式下, 政府部门提出需求并提供部分经费支持, 商业公司自主投入资金, 发展相应的方案和技术满足政府需求, 由此一来, 研制风险在很大程度上转移到了商业公司方。这一阶段, 很多公司因方案、技术、能力和资金等各类因素无法得到政府的持续支持而破产。SpaceX公司也是在其猎鹰1小型火箭3次发射连续失利, 命悬一线的危险境地中, 依靠NASA的支持发展猎鹰9火箭后, 才逐步走向成功。



图5 波音XS-1第一阶段概念图

Fig. 5 Boeing's XS-1 phase I concept

随着商业重复使用运载器越来越成熟, 美军也在转变发展路线, 一方面逐步接受使用猎鹰9火箭执行重要的军事航天发射任务; 另一方面, 借助商业航天力量进一步发展重复使用技术以获得更先进的能力。

2 美国重复使用运载技术发展分析

美国重复使用运载器的发展自1952年至今共经历了五个阶段, 见表1。

表1 美国重复使用运载器项目

Tab.1 Reusable launch vehicle project

阶段	名称	类型	开始年份	结束年份	经费/亿美元	主导机构	项目方案/研究内容
第一阶段	X-15	原理研究	1954	1968	3	NASA	研究高超声速飞行相关的气动、热、控制和稳定性等
	X-20	工程应用	1957	1963	4.1	美国空军	火箭顶推发射, 三角翼滑翔飞行器
	液化空气循环发动机	技术积累	1958	1961	—	美国空军	演示使用热交换器的液化空气循环发动机设计方案
第二阶段	航天飞机方案研究	方案论证	1968	1972	0.256	NASA	使用一次性火箭助推+轨道器贮箱外置方案
	X-24B	技术积累	1971	1975	0.011	美国空军	验证升力体构型
	机动再入飞行器研究	方案论证	1971	1977	—	美国空军	开展高超声速飞行试验
	航天飞机计划	工程应用	1972	2011	—	NASA	研制部分重复使用的航天运载器
	X-24C	技术积累	1973	1977	0	美国空军	验证吸气动力技术

续表1

阶段	名称	类型	开始年份	结束年份	经费/亿美元	主导机构	项目方案/研究内容
第三阶段	铜峡谷	方案论证	1984	1986	—	DARPA	研究单级入轨方案
	X-30	技术积累	1986	1994	17	美国空军	研制水平起降试验型空天飞机
	第二代航天飞机	方案研究	1986	1988	—	NASA	涵盖了单级入轨、两级入轨等各种方案
	HL-20	演示验证	1989	1991	—	NASA	乘员发射系统研究设计及全尺寸飞行器研究
	DC-X/DC-XA	方案论证	1990	1996	1.25	NASA	德尔塔快帆1/3缩尺型验证机,演示和验证单级入轨
第四阶段	X-33	工程应用	1995	2001	13	NASA	美国RLV计划的主力计划
	X-34	技术研究	1996	2001	2.05	NASA	研制可重复使用的空中发射系统
	X-37/X-37B	工程应用	1999	2006	1.81	NASA	可入轨并能再入返回的可重复使用验证飞行器
第五阶段	超重-星舰	工程研制	2010	至今	—	美国空军/ NASA	全箭复用,超重助推级垂直返回着陆,星舰飞船级升力结构进行再入滑行
	新格伦火箭	工程研制	2012	至今	—	美国空军	采用BE-4液氧甲烷发动机,垂直起降方案
	XS-1	演示验证	2013	2020	2.3	DARPA	RBS项目取消后,先做低成本小规模演示验证
	火神火箭	工程研制	2015	至今	—	—	发动机部段伞降回收,利用降落伞技术和充气式热防护技术降落到海上回收

a) 早期技术积累与沉淀。1952至1967年,通过大量飞行试验,不断对高超声速飞行原理进行验证,为后续重复使用运载器的研制奠定了坚实基础。

b) 航天飞机的发展与成功实践。1968年至1982年,集中资源发展航天飞机,重复使用运载器首次得到应用,大幅提升热防护等关键技术,并在维护操作、运营管理等方面积累了丰富经验,为重复使用运载器的进一步发展注入了强大信心。

c) 目标调整下的探索与技术储备。1983至2003年,为寻求低成本的替代方案,启动NASP计划,研制组合动力单级入轨飞行器以取代航天飞机,但因预期目标过高技术无法实现而终止。随后调整目标,开展X-33飞行器研制,但因单级入轨对结构质量要求高,技术受限而终止。虽然NASP和X-33两个重大项目均未达成最终目标,但这一长达二十年的探索期是美国重复使用技术研制与验证最为广泛的时期,还进行了垂直起降等技术方案验证,积累了宝贵的技术、经验和能力,为重复使用运载器技术的发展提供了深厚储备。

d) 商业航天引领突破与创新。2004年以后,在美国政府的大力支持下,商业航天迎来了快速发展期。在前期深厚技术积累的基础上,借助政府提供的资金、人才、技术转移和先进管理模式支持,商业航天力量(以SpaceX为代表)实现了重复使用运载器技术的重大突破。商业航天公司不拘泥于政府原有技术路线,在继承中大胆创新,实现了猎鹰9火箭、新谢波德飞行器、太空船二号、追梦者飞行器等典型型号的突破和应用,而以超重-星舰为代表的新型重复使用运载器,更是基于此前美国在垂直起降构型和升

力式构型的基础上进行了融合创新,将重复使用运载器的发展推向一个新的高度。

总的来说,美国重复使用技术的发展路径可概括为,在初期利用飞行试验平台等方式奠定坚实的理论基础,再以国家大型工程带动技术突破、工程应用和经验积累,通过政府在新方案研制计划项目上的持续投入,探索和尝试多种技术路线,在试错过程中积淀基础能力,再依靠新生商业力量的创新活力充分发挥航天工业能力的效能,最终达成重复使用运载器发射成本降低、进入空间能力提升以及支撑军事航天活动的目标。

3 美国重复使用运载器发展现状

近年来,在SpaceX等商业航天企业的推动下,美国航天重复使用技术已实现工程化应用,形成以部分重复使用为主,完全重复使用和升力式重复使用并行发展的态势。

3.1 部分重复使用火箭研制应用提速

部分重复使用火箭的研制与应用在全球范围内持续提速,已成为各个机构、企业发展新型火箭的必由之路。2024年,SpaceX的猎鹰系列火箭年度完成了134次发射^[14],猎鹰9火箭不断刷新一子级复用纪录,一子级的最短周转时间由21天缩短至13天12小时,SpaceX在探索快速、可重复使用火箭技术方面取得了显著进展。但高频次的发射也带来了相应的挑战,2024年,猎鹰9火箭发射任务出现了3次质量问题^[15]。

另外,其他商业航天公司重复使用运载器研制进度加快。蓝色起源(Blue Origin)的新格伦火箭也已

完成首飞任务, 虽未成功实现一子级回收^[16], 但仍是研制进度最快的可重复使用火箭。火箭实验室(Rocket Lab)等公司也在积极推进部分重复使用火箭的研制与应用, 中子号有望在2026年首飞。

3.2 超重-星舰初步验证完全重复使用技术趋势

超重-星舰作为完全重复使用火箭的代表, 其快速发展引领了下一代火箭复用技术的发展趋势。截至目前, 超重-星舰已完成9次全箭飞行试验, 成功完成了入轨速度、级间分离、热分离适配器分离以及两级海上软着陆等多项关键技术验证。不过, 9次试飞中有5次遭遇失利, 接连的故障和解体表明, 虽然SpaceX通过快速迭代展现了工程突破能力, 但完全重复使用技术核心问题的解决和发展路线的成熟仍面临严峻挑战^[17]。

随着超重-星舰试飞进程加速, 更多商业航天公司开始追逐完全重复使用火箭的新趋势。蓝色起源在发展新格伦火箭的同时启动重复使用二子级方案的论证, 并重点关注热防护系统的研发。斯托克航天(Stoke Space)也在积极探索完全重复使用火箭技术, 为航天领域的发展注入了新的活力^[18]。

3.3 升力式重复使用飞行器应用目标进一步拓宽

升力式重复使用飞行器作为另一种重要的重复使用运载器形式, 在快速响应、精确着陆和任务灵活性方面展现出显著优势, 得到多家商业航天公司的青睐。美军的X-37B成功验证了新型空气制动技术, 完成第7次飞行任务返回地球^[19]。弧度宇航(Radian Aerospace)的弧度一号已完成首轮地面测试, 验证了起飞/着陆操控性等基础性能。泰坦航天(Titan Aerospace)也提出百吨级单级入轨方案^[20], 探索轨道快速周转和点对点运输的商业潜力。

4 总结与展望

由美国重复使用运载器发展路径可以看出, 美国通过早期开展的众多重复使用技术验证和工程研制项目, 积累了丰富的数据, 发展了先进航天技术, 为航天飞机研制奠定了基础。之后美国继续深入探索重复使用运载器技术, 启动NASP和第二代重复使用运载器计划, 虽然是以工程研制为目标, 但时间、技术、成本面临巨大挑战时, 退而求其次转向开展技术研发和储备, 变成一种新技术和方案的探索。进入21世纪, 美国转变发展模式, 积极鼓励发展商业航天, SpaceX等企业异军突起, 逐渐突破重复使用运载器技术。美国重复使用运载器技术的突破看上去是商业

航天的巨大进步, 但其根本是美国国家政策和资金的支持以及美国长期对重复使用运载技术的不懈探索。面向未来太空作战、深空探测、大型星座组网等需求, 美国重复使用运载器发展主要呈现以下趋势:

a) 部分复用向完全复用快速演进。美国已经实现了一子级回收与重复使用, 正积极攻关轻质耐高温材料、发动机多次起动与长寿命等关键技术, 推动重复使用从“部分回收”向“完全重复使用”发展。不断提高复用次数和缩短发射周期, 实现重复使用运载火箭敏捷发射。

b) 发展重型重复使用运载器是必然选择。面向深空运输、军用物资快速投递和大规模太空建设等未来发展需求, 同时, 为支撑国家太空战略和商业航天产业以及发展太空经济, 发展百吨以上大运力、低成本、高可靠的重型重复使用运载器成为必然选择。

c) 组合动力飞行器仍具有较大的发展前景。涡轮基组合循环、火箭基组合循环在模态转换、宽域燃烧、热管理以及发动机与机体等方面面临很大的技术挑战, 短期内很难投入应用。但长远来看, 依靠预冷式组合动力有望突破组合动力技术, 实现两级甚至单级入轨, 将真正实现飞行器水平起降、完全可重复使用和快速周转, 革新现有的航天运输模式。

d) 重复使用运载器多路径发展。未来升力式和垂直起降重复使用运载器并行发展, 以满足不同任务场景。垂直起飞/垂直降落已成为当前最成熟且广泛应用的商业发射方案; 垂直起飞/水平降落模式继承了航天飞机的设计理念, 通过翼身融合体滑翔降落实现更灵活的返回着陆, 可以满足大范围机动返回的任务场景; 水平起飞/水平降落模式则依托空天飞机概念, 是实现机场化、航班化运营的终极方向。

参 考 文 献

- [1] 祁振强, 吴莉莉. 航班化航天运输重复使用的技术发展思考[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(4): 79-86.
QI Zhenqiang, WU Lili. The development of reusable technologies in airline-flight-based space transportation[J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(4): 79-86.
- [2] PETTY Chris. Beyond blue skies the rocket plane programs that led to the space age-university of nebraska press[M]. Lincoln: University of Nebraska Press, 2020.
- [3] MACK P E. From engineering science to big science: the NACA and NASA Collier Trophy research project winners[M]. Washington: Government Publishing Office, 1998.
- [4] SMITH T. The dyna-soar X-20: a historical overview[J]. Quest: The Magazine of Spaceflight, 1994(3): 13-18.

- [5] HEPPENHEIMER T A. The space shuttle decision: NASA's search for a reusable space vehicle[M]. Washington: Government Publishing Office, 1999.
- [6] NASA Space Shuttle Task Group. NASA space shuttle summary report[R]. NSTS-08308, 1969.
- [7] PATÉ-CORNELL E, DILLON R. Probabilistic risk analysis for the NASA space shuttle: a brief history and current work[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2001, 74(3): 345-352.
- [8] COMBS H G. Configuration development study of the X-24C hypersonic research airplane, phase 2[R]. SP-4534, 1977.
- [9] SMITH, DANE. Materials testing on the DC-X and DC-XA[R]. A-975439, 1997.
- [10] NASA. 2nd RLV-second generation reusable launch vehicle development and global competitiveness of US space transportation industry critical success factors assessment[R]. A-975493, 2002.
- [11] CHARETTE R O, STEINMEYER D A, SMILJANIC R R. Delta clipper lessons learned for increased operability in reusable space vehicles[J]. American Institute of Physics, 1998, 420(1): 969-978.
- [12] MURPHY K J, NOWAK R J, THOMPSON R A, et al. X-33 hypersonic aerodynamic characteristics[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2001, 38(5): 670-683.
- [13] WIERZBANOWSKI S, RAMASUBRAMANIAN V. Correction: the DARPA experimental spaceplane program (XSP): observations, findings, and recommendations for future reusable launch systems[C]. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020.
- [14] JONATHAN McDowell. Jonathan's Space Home Page[EB/OL]. (2025-01-01)[2025-07-03]. <https://planet4589.org/space/>.
- [15] 郑凯旋, 龙云, 汪彬, 等. 海上垂直回收运载火箭发展现状与关键技术分析[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(2): 36-53.
- ZHENG Kaixuan, LONG Yun, WANG Bin, et al. Development status and key technology analysis of sea-based vertical recovery launch vehicles[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(2): 36-53.
- [16] SANDRA Erwin. Blue Origin's New Glenn Reaches Orbit[EB/OL]. (2025-01-16) [2025-07-03]. <https://www.blueorigin.com/zh-CN/news/new-glenn-ng-1-mission>.
- [17] 吴佳林, 盛英华, 程川, 等. 星舰-超重体系与开发的范式变革探究[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(3): 87-94.
- WU Jialin, SHENG Yinghua, CHENG Chuan, et al. Evolution and Intelligent Technology Prospect of Starship-superheavy System[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(3): 87-94.
- [18] 李利群, 马翀, 王二亮. 国内外航天发射技术现状与未来发展综述[J]. 上海航天(中英文), 2024, 41(2): 1-6+170.
- LI Liqun, MA Chong, WANG Erliang. Overview on the current situation and future development of space launch technology at home and abroad[J]. Aerospace Shanghai (Chinese & English), 2024, 41(2): 1-6+170.
- [19] IRENE Klotz. Titans Spaceplanes-Titans Space Industries Inc[EB/OL]. (2024-05-28) [2025-07-03]. <https://titansspace.com/titans-spaceplanes/>.
- [20] Secretary of the Air Force. X-37B Orbital Test Vehicle concludes seventh successful mission[EB/OL]. (2025-03-13) [2025-07-03]. <https://www.spaceforce.mil/News/Article-Display/Article/4112259/x-37b-orbital-test-vehicle-concludes-seventh-successful-mission/>.

作者简介

樊伟(1996—), 男, 工程师, 主要研究方向为重复使用运载器和升力式飞行器。

王姝雅(1999—), 女, 工程师, 主要研究方向为一次性运载火箭和宇航领域政策。

杨开(1987—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为国外一次性和重复使用运载器技术。