

重复使用航天器发展趋势及若干思考

陈尚, 杨勇, 吴俊辉, 穆星科, 滑勇之

(北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 重复使用航天器具有快速、低成本的特性, 是自由进出空间的重要技术途径之一。自从20世纪50年代重复使用航天器的概念被提出以来, 历经70多年, 重复使用航天器的研制取得了很大的进步, 积累了丰富的经验和教训。基于国内外发展情况, 梳理了重复使用航天器的技术路线, 深入分析了其发展趋势, 从设计、制造、试验、运行维护4个方面探讨了重复使用航天器的特点和难点, 并提出了未来重复使用航天器发展的若干思考与建议。

关键词: 重复使用航天器; 技术路线; 发展趋势; 发展思路

中图分类号: V475

文献标志码: A

文章编号: 2096-4080 (2024) 03-0001-08

The Developing Trends of Reusable Spacecraft and Several Thoughts

CHEN Shang, YANG Yong, WU Junhui, MU Xingke, HUA Yongzhi

(Beijing Institute of Astronautical Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: Reusable spacecraft is characterized as a fast and cost efficient method for space access and return. Since the concept of reusable spacecraft was proposed in the 1950s, over 70 years have passed and significant progress has been made in the development of reusable spacecraft, accumulating rich experience and lessons. Based on the development worldwide, technical routes of reusable spacecraft are illustrated, and the developing trends are gained. Features and difficulties related to reusable spacecraft are discussed from four aspects including design, manufacture, test, operation and maintenance. Furthermore, several thoughts and suggestions on the future development of reusable spacecraft are provided.

Key words: Reusable spacecraft; Technical routes; Developing trends; Developing ideas

0 引言

以较低成本进出太空是人类长久以来的梦想。航天器通过重复使用可以有效降低运行成本, 大幅度提高进出空间的效率。

重复使用航天器是指可以多次往返于地球与太空, 可按需执行一定任务并返回地面的航天飞行器^[1]。重复使用航天器采用多次重复使用、费用均摊的原则, 利用新的设计理念和先进的发射

返回方式, 可以低成本、快速地进出空间, 实现大规模空间开发与利用。

本文对世界各国及地区重复使用航天器的发展历程进行系统梳理, 分析了当前主要技术路线以及从可重复使用到完全重复使用的发展趋势, 从设计、制造、试验、运行维护等方面探讨了重复使用航天器的技术特点和难点, 并提出了未来重复使用航天器发展的若干思考与建议。

收稿日期: 2023-07-01; 修订日期: 2024-03-25

基金项目: 国家自然科学基金 (92271102)

作者简介: 陈尚 (1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器总体设计

1 重复使用航天器发展历程

1.1 美国

美国重复使用航天器发展历程见图1。为了实现低成本和高效率地进出空间,美国在20世纪50年代就提出了重复使用的概念。之后,研制了以X-15和X-20为代表的高超声速飞行器,并实现了航天飞机及其助推器的部分重复使用,但其在重复使用性能、发射频率、经济效益等方面都没有达到预期的目标。1980—2000年,以X-30、X-33和X-43为代表的重复使用航天器兴起,试图通过

单级入轨和完全重复使用达到大幅度降低飞行成本的目的。但由于当时应用目标不明确、技术难度太大且耗资较高等因素,相关项目又都逐步进入沉寂状态。2000年之后,以X-37B、XS-1、Falcon-9火箭为代表的垂直发射水平返回和垂直起降等多种起降方式稳步推进,并成功实现了工程应用^[2-9]。当前美国主导以空间开发为目的,通过技术牵引,大力鼓励私营公司低成本研发重复使用航天器。在多年的研制中,美国积累了大量的试验数据,重复使用航天器的技术和项目得到较好的发展。

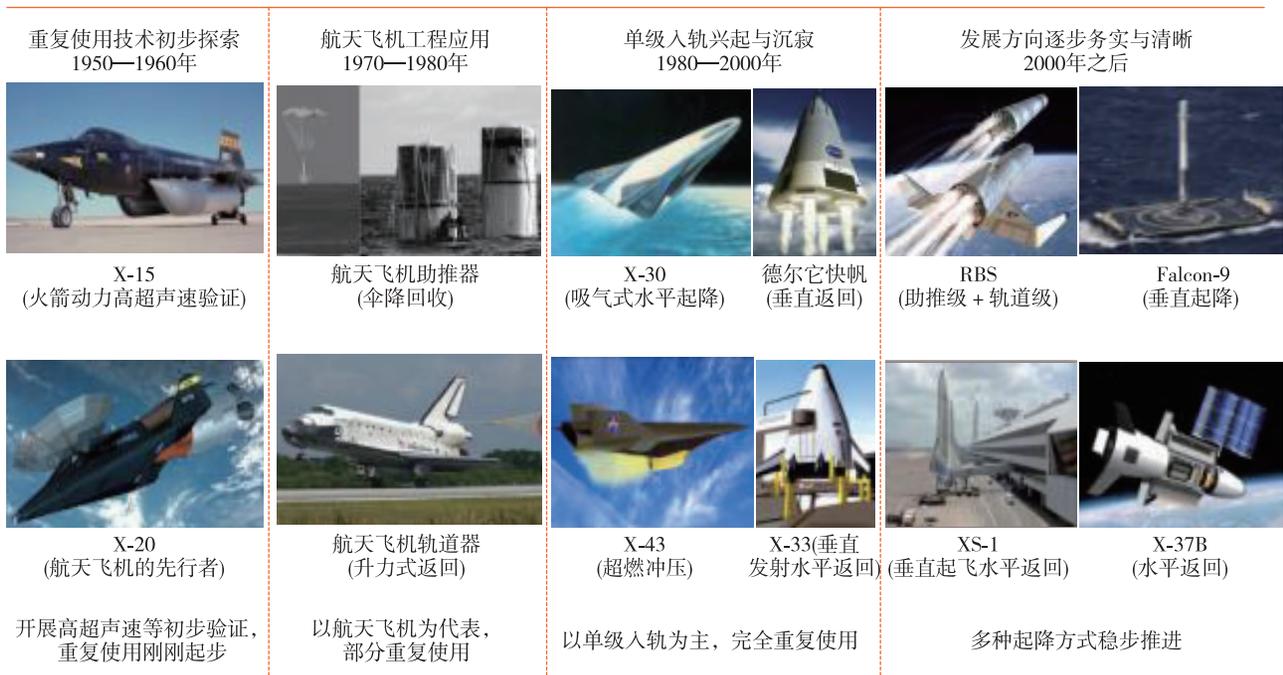


图1 美国重复使用航天器发展历程

Fig.1 The development history of America reusable spacecraft

1.2 欧洲

欧洲重复使用航天器发展历程见图2。20世纪80年代以来,欧洲启动了多项大型的重复使用航天器研制计划。早期提出了使神号空间运载器和森格尔飞行器,但过于追求方案和技术的先进性导致计划一再拖延、方案废弃而被迫停止。

欧洲航天局通过整合欧洲航天技术力量,采取循序渐进的发展思路。1994年提出“未来欧洲空间运输研究计划”(FESTIP);1999年又提出了“未来运载器技术计划”(FLTP),研究重点主要在动力技术、结构技术和重复使用性能等方面;紧接着在2003年提出了“未来运载器准备计划”

(FLPP)。

近年来欧洲的典型项目包括IXV飞行器、Skylon飞行器等。当前欧洲的航天技术重点主要体现在技术推动方面,同时在一定程度上满足其经济发展的需求,但尚未落实并发展形成国家级航天计划^[10]。

1.3 俄罗斯

俄罗斯重复使用航天器发展历程见图3。早期研制了可部分重复使用的暴风雪号航天飞机,并在1988年成功进行了首次飞行试验,但因航天飞机操作费用过高而未获得最终的实际应用。20世纪90年代,俄罗斯提出另一种航天飞机方案,称



图 2 欧洲重复使用航天器发展历程
Fig. 2 The development history of Europe reusable spacecraft



图3 俄罗斯重复使用航天器发展历程

Fig. 3 The development history of Russia reusable spacecraft

为“多用途宇宙系统”（MAKS），由于财政困难而停止。贝加尔号航天飞机是苏联暴风雪计划的一部分，是带翼飞回式重复使用航天器，但没有正式开展地面试验验证和相关工程研制。21世纪以来，俄罗斯提出“快船号”计划。按规划，“快船号”设计有升力式飞船和带翼式航天飞机两个方案。但由于研制经费不足，“快船号”被迫下马。

1.4 中国

我国从20世纪80年代开始小型航天飞机的论证以来，一直在稳步推进重复使用航天器的技术探索与研究^[11]。当前，我国在传统火箭构型重复使用航天器、升力式火箭动力重复使用航天器、组合动力重复使用航天器、重复使用飞船等技术途径上均取得了许多重要的技术进步^[12]。

在升力式重复使用航天器方面，首次开展了亚轨道重复使用航天运载器飞行演示验证^[1]。开展了大量组合动力技术研究，包括涡轮基组合循环（TBCC）、火箭基组合循环（RBCC）、涡轮辅助火箭增强冲压组合循环（TRRE）、预冷空气涡轮火箭组合循环（PATR）等^[13]。新一代载人飞船按具备可重复使用能力设计，利用群伞进行减速回收，可实现舱体主结构、电子设备、推进系统等产品重复使用，大幅降低飞行运营成本^[14]。

2 重复使用航天器技术路线分析

纵观国内外重复使用航天器发展历程，其主要分类可总结为以下几个类型。按入轨级数，分为单级入轨和两级入轨。按主动力类型，分为火箭动力和组合动力。按飞行器外形，分为传统火箭构型和升力式。按回收方式，分为垂直返回、水平返回、伞降回收。按重复使用程度，分为部分重复使用和完全重复使用。按起降模式，分为

垂直起飞/水平着陆、垂直起降、垂直起飞/伞降着陆和水平起降。按起降模式对当前主要的技术路线进行梳理，见表1。

表1 重复使用航天器主要技术路线

Tab. 1 The main technical routes of reusable spacecraft

序号	类型	主要技术路线	国外典型代表
1	垂直起飞/ 水平着陆	升力式火箭动力 重复使用航天器	XS-1、RBS
		升力式重复使用 轨道机动航天器	航天飞机、X-37B
		升力式组合动力 重复使用航天器	X-33
2	垂直起降	基于传统火箭构 型重复使用航天器	Falcon-9、新谢泼德火箭
		传统火箭构型+ 升力式重复使用航 天器	超重-星舰
3	垂直起飞/ 伞降着陆	伞降式重复使用 航天器	IXV、航天飞机助 推器、飞船
4	水平起降	水平起降两级重 复使用航天器	森格尔、MAKS
		组合动力单级重 复使用航天器	Skylon

在上述4种起降类型中，伞降着陆的落点精度和操作回收性等方面存在一定的不足。SpaceX公司在猎鹰火箭的早期发射任务中曾尝试采用伞降方式进行验证，但效果并不理想。后来SpaceX公司将伞降方式成功应用在整流罩的重复使用中，其箭体的回收方式转到垂直起降方向上。由于技术难度较大，水平起降目前还没有取得全面成功。重点对当前采用火箭动力的垂直起飞/水平着陆与垂直起降两种主流技术路线进行对比，见表2。

表 2 两种主流技术路线的对比
Tab. 2 The comparison of two main technical routes

序号	对比类型	垂直起飞/水平着陆	垂直起降
1	对发动机要求	对重复使用次数要求低	对性能要求更高, 重启发动机多次, 需大范围推力调节, 重复使用次数要求高
2	技术先进性	1) 理论上再入返回性能更优, 低过载再入条件; 2) 重复使用次数性能更优	1) 理论上上升段性能更优; 2) 对着陆场设施要求相对较低
3	技术带动性	航空和航天领域高度融合, 可带动总体、气动、动力、材料等技术发展	
4	应用前景	兼顾天地间航天运输和在轨应用	可方便拓展至地外行星的着陆与起飞
5	综合分析	近期实现航天运输技术跨越的两个重要方向	

重复使用航天器发展技术路线的趋势有: 垂直起飞/水平着陆和垂直起降是当前重复使用航天器的两条主要技术路线; 两级入轨重复使用航天器是当前航天发展的主要方向, 单级入轨是未来发展的目标; 火箭动力为近期目标, 组合动力代表未来发展方向; 部分重复使用在多条技术路线上已成功应用, 并将逐步实现完全重复使用。

3 从可重复使用到完全重复使用的趋势分析

重复使用将大幅度减小航天器生产压力, 缩短地面调试周期, 提高快速运行维护能力, 满足运输需求。综合国外重复使用航天器的研制经验, 要成功实现技术可重复使用到工程完全重复使用, 需重点关注技术的可实现性、经济的可承受性, 以及复用率和快速复用性。

3.1 技术的可实现性

航天飞机首飞成功以后, 美国认为单级入轨的空天飞机时代已经来临, 开展了目标极为超前的吸气-火箭组合动力的空天飞机计划 X-30, 这在技术上是冒进的。而在 X-30 计划下马之后, 美国又提出研制以火箭发动机为动力的单级入轨火箭飞机 X-33, 在技术、经费、进度等条件的制约下这种跳跃式的发展失败了。重复使用航天器的总体技术方案要与当前航天技术的可实现性接近并相匹配, 技术方案过于先进并不利于工程目标的顺利实现。

当前各国普遍采用主力发展部分重复使用, 同时努力实现完全重复使用的“两条腿走路”模式, 从技术上实现从可重复使用向完全重复使用的迈进。

完全重复使用包括火箭动力完全重复使用和组合动力完全重复使用。

当前的火箭动力技术基本成熟, 并在传统火箭构型的部分重复使用航天器上成功实现了应用。如美国的 Falcon-9 一级、航天飞机、X-37B 等均在火箭动力技术上成功实现部分可重复使用。

未来 Falcon-9 的二级重复使用与已实现重复使用的一级、整流罩等将构成完全重复使用航天器。在升力式构型方面, 通过研制升力式火箭动力重复使用航天器的一级和二级, 可以实现垂直发射、两级入轨、水平着陆的完全重复使用航天器^[12]。此外, SpaceX 公司的“超重-星舰”采用垂直发射垂直回收的方式, 具备完全重复使用的能力。“超重”火箭采用垂直起降的方式。“星舰”在设计上融合了二级火箭、轨道机动飞行器、再入返回飞行器三者的功能, 在再入返回过程中利用其升力式构型进行气动减速, 着陆时刻利用发动机制动和辅助回收机构来实现垂直着陆。此外, “星舰”采用类似航天飞机和 X-37B 的重复使用有效载荷舱门替代了传统的整流罩方案, 以便于其再入返回和完全重复使用^[15-16]。

在组合动力完全重复使用方面, 在技术可实现性上, 当前主要以组合动力为主开展基础研究和飞行验证。中远期的目标是重点突破组合动力两级关键技术, 其中, 一级以组合循环发动机为主动实现水平起降, 二级以升力式火箭动力重复使用航天器实现整体完全重复使用。远期以组合动力单级入轨为发展目标, 可以实现航天器的水平起降, 完全重复使用^[12]。

3.2 经济的可承受性

大幅降低进出空间成本一直是各国持续发展重复使用航天器技术的主要驱动力, 关注经济性挑战与追求技术进步具有同等重要的意义。

航天飞机近 40 年间实际总共花费了约 1 960 亿美元 (按 2011 年美元值衡量), 平均每次发射耗费

约 15 亿美元^[17]，远远高于计划费用。相比一次性运载火箭，一般来说重复使用航天器的经济性有以下典型特征：设计、开发、制造费用及制造周期超过同级别的一次性火箭；两次任务间用于检查维修的运行费用是减小收入损失的关键；极高的初期投资和较长的投资周期，增加了前期投资财务风险。

表 3 以宇宙神-5 一次性运载火箭为基数，综合对比不同飞行次数重复使用航天器的制造费用、制造周期、操作费用和有效载荷运载能力。

表 3 重复使用航天器的部分性能对比

Tab. 3 The performance comparison of reusable spacecrafts

序号	对比类型	宇宙神-5 运载火箭	部分重复 使用航天器	完全重复 使用航天器
1	制造成本/万美元	6 500	16 300	39 000
2	制造成本比率	1	2.5	6
3	制造周期/年	1	2	3
4	操作成本/万美元	300	3 000	1 200
5	操作成本比率	1	10	4
6	有效载荷能力/t	12.47	9.34	7.48
7	有效载荷减小 百分率/%	0	25	40
8	总飞行次数/次	1	20	100

3.3 复用率和快速复用性

快速再次飞行是重复使用航天器的重要目标。复用率和快速复用性关系到复用次数和复用周期与效率，同时也决定了重复使用航天器的快速响应效能。

以美国部分重复使用的航天飞机为例，航天飞机设计单次飞行时间 30 天、飞行次数 100 次，飞行间隔 2 周。而在航天飞机实际飞行的 135 次任务中，实际单次飞行最长 17 天，单架最多飞行了 39 次，飞行频率每年只保持 6~8 次。美国航天飞机受制于繁琐的轨道器返回维护需求、转运程序以及其不能完全重复使用的特性，在复用率和快速复用性上都没有达到预期的目标。

SpaceX 公司充分吸取了航天飞机的经验教训，一直很注重重复使用航天器在重复使用准则方面的探索，重点主要落在发射间隔和回收速度两个方面。SpaceX 公司建立 3 级重复使用维护维修策略^[18]，其火箭的垂直起降重复使用技术逐渐成熟，从单次使用逐步发展到单箭体最高 19 次重复使用。

4 研制的特点与难点分析

完全重复使用航天器任务剖面包括运载火箭的发射上升段、航天飞机及飞船的离轨制动段和再入返回段，以及近期逐步成熟的重复使用航天器垂直回收段，对于水平着陆的航天器来说还涉及类似飞机的进场着陆段。与传统航天器和飞机相比，重复使用航天器在设计、制造、试验和运行维护等方面具有明显的特点和难点。

在设计方面，重复使用航天器全任务剖面力学环境更加复杂，还要考虑各种环境下多次重复使用带来的疲劳问题等^[19]。完全重复使用航天器更侧重于“有限重复使用”条件下的上升在轨再入着陆运行、高峰值重复环境载荷条件，以及该条件下的任务可靠度、基本可靠性、寿命指标，既要考虑火箭的快速响应、发射，同时又要兼顾飞机的安全可控返回着陆和航班式运行。

在结构制造方面，升力式重复使用航天器结构具有大尺寸、大开口、高曲率、高精度等特点，需满足耐高温和复杂力学环境条件，并具备较好的耐久性和重复使用性等，其对材料的轻质化、重复使用性能有更高的要求。重复使用航天器需满足高温隔热、热结构舵面、防隔热一体化、高效隔热以及高温透波等多种功能。超高温陶瓷(UHTC)^[20-22]、抗氧化 C/C 和 C/SiC 复合材料^[23]、超细纤维毡/气凝胶轻质高效隔热材料是最有希望的材料体系^[24]。重复使用航天器具有严格的气动外形要求，且结构复杂，舱内空间紧凑，零部件多，因此装配协调过程复杂，装配过程是很大的挑战^[25]。

在试验方面，重复使用航天器飞行剖面新，面临的环境条件新，面临的技术问题新，设计过程中存在很多难点和不确定点，给方案设计、试验实施等环节提出了新的挑战。重复使用飞行器需要补充耐久性试验和损伤容限试验以检验其重复使用性能。典型难点如下：一是试验设计能力，如在航天器疲劳载荷谱设计、重复使用空间环境效应谱设计等方面难度较大，制约着相关试验设计；二是需要特殊的试验设备，如开展大尺寸部组件热噪声、力热联合试验等的设施设备；三是试验经验，如全尺寸全复合材料结构静力试验、航天器疲劳试验以及冷热结构匹配试验等。

在运行维护方面，重复使用航天器的维护维

修费用较高,这也是美国航天飞机在飞行135次之后停止运行的一个重要原因。既要安全可靠、航班化运行,又要快速简便低成本地完成地面运行维护的相关工作。重复使用航天器需要将可靠性工作的重点体现在设计、制造和装配过程中,并在地面试验中验证,减少地面运行维护的检测要求,提高复用率和快速复用性。同时,引进全寿命周期健康管理技术,以高效满足重复使用的需求。

5 若干思考与建议

重复使用航天器是航天领域未来发展的重要方向,综合国内外发展历程与发展趋势,提出下列建议。

1) 分步验证,采取样机战略,坚持“小步快走”的快速试错验证模式。重复使用航天器应着眼于未来的长远发展,按轻重缓急形成一个“样机”的发展系列,通过“小步快走”的快速试错验证模式研制试验样机,逐步突破关键技术,同时确保重复使用航天器的整体研制速度和经济性在可控范围内。

2) 重视研制体系建设,完善能力要素,制定标准规范。重复使用航天器技术难度大,研制体系复杂。在现有航天型号研制体系的基础上,加强航天与航空领域的融合,提炼出重复使用航天器新的特征要素、紧缺短板。通过关键技术攻关和技术验证,突破和掌握核心技术,科学编制,统筹发展,完善设计、制造、试验、运维等基础能力建设,逐步制定相应的标准规划,不断推动我国重复使用航天器领域的发展。

3) 加强重复使用经济性分析与研究。综合处理好重复使用次数与市场需求、成本、可靠性的关系。

参考文献

[1] 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.

[2] 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.

[3] 张国成,姚彦龙,王慧.美国两级入轨水平起降可重复使用空天运载器发展综述[J].飞机设计,2018,38(2):1-6.

[4] 谭永华,李平,杜飞平.重复使用天地往返运输系统

动力技术发展研究[J].载人航天,2019,25(1):1-11,41.

- [5] 徐大富,张哲,吴克,等.垂直起降重复使用运载火箭发展趋势与关键技术研究进展[J].科学通报,2016,61(32):3453-3463.
- [6] 高朝辉,张普卓,刘宇,等.垂直返回重复使用运载火箭技术分析[J].宇航学报,2016,37(2):145-152.
- [7] 崔乃刚,吴荣,韦常柱,等.垂直起降可重复使用运载器发展现状与关键技术分析[J].宇航总体技术,2018,2(2):27-42.
- [8] 冯韶伟,马忠辉,吴义田,等.国外运载火箭可重复使用关键技术综述[J].导弹与航天运载技术,2014(5):82-86.
- [9] 于霞,孙伶俐,单文杰.国外可重复使用运载器发展现状和趋势[J].国际太空,2012(12):2-6.
- [10] 林一平.航天器的二级水平起/降发射系统[J].飞航导弹,1991(3):17-22.
- [11] 杨勇.我国重复使用运载器发展思路探讨[J].导弹与航天运载技术,2006(4):1-4.
- [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] 张蒙正,张玫.航天运载器重复使用液体动力若干问题探讨[J].火箭推进,2019,45(4):9-15.
- [14] 张柏楠,杨庆,杨雷,等.我国新一代载人飞船及其研制进展[J].科学通报,2021,66(32):4065-4073.
- [15] 胡冬生,刘楠,刘丙利,等.美国重复使用运载火箭发展分析[J].国际太空,2020(12):38-45.
- [16] 李志文,张磊,李亮,等.星舰气动布局性能特点分析[J].空气动力学学报,2022,40(5):1-14.
- [17] 杨海峰,俞进.可重复使用航天器全寿命周期成本及经济性评估[J].载人航天,2021,27(1):81-85.
- [18] 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(2):25-30.
- [19] 王俊峰,韩增尧,张玉梅,等.可重复使用航天器力学试验方法及试验条件设计综述[J].航天器环境工程,2020,37(5):464-472.
- [20] Fenter J R. Refractory diborides as engineering materials [J]. Sampe Quart, 1971, 2(3): 1-15.
- [21] Strauss E L, Clougherty E V, Boensch F D. Structural characteristics of a zirconium diboride composition for application to hot leading edges[J]. Health Physics, 1971, 31(4): 380-382.
- [22] Wuchina E J, Opeka M M. The oxidation of HfC, HfN and HfB [J]. Electrochemical Soc Proceedings, 2001(12):136-143.
- [23] Sato K, Morozumi H, Funayama O, et al. Developing interfacial carbon-boron-silicon coatings for silicon nitri-

- de-fiber-reinforced composites for improved oxidation resistance[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2002, 85(7): 1815-1822.
- [24] 周印佳, 张志贤. 航天器可重复使用热防护技术研究进展与应用[J]. 航天返回与遥感, 2019, 40(5): 27-40.
- [25] 李虹琳, 陈杰. X-37B 轻质低成本可重复使用防热系统简析[J]. 战术导弹技术, 2013(4): 13-16.

引用格式: 陈尚, 杨勇, 吴俊辉, 等. 重复使用航天器发展趋势及若干思考[J]. 宇航总体技术, 2024, 8(3): 1-8.

Citation: Chen S, Yang Y, Wu J H, et al. The developing trends of reusable spacecraft and several thoughts [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2024, 8(3): 1-8.