

# 重复使用航天运输系统发展与展望

龙乐豪, 蔡巧言, 王飞, 马婷婷, 闻悦

中国运载火箭技术研究院, 北京 100076

**摘要** 航天运输系统的技术水平代表一个国家自主进出空间的能力, 体现一个国家利用空间和发展空间技术的能力, 维护国家的空间安全和空间利益, 也是综合国力的象征。重复使用航天运输系统是降低航天运输成本、提高安全可靠、缩短转场准备时间的理想运输工具, 是未来中国航天运输系统的重要组成部分。航天运输系统从一次性使用向重复使用发展是技术发展的必然趋势, 发展技术性能更先进、能重复使用的航天运输系统对于满足中国未来空间开发和降低发射成本等需求具有重要的意义。本文梳理了国外重复使用航天运输系统的发展情况, 围绕传统运载火箭构型重复使用、升力式火箭动力重复使用运载器和组合动力重复使用运载器3种技术途径, 分析了中国重复使用技术发展思路和路线。

**关键词** 重复使用; 航天运输; 火箭动力; 组合动力; 发展展望

随着近年来航天运输领域的快速发展, “重复使用”概念越来越受到重视。重复使用航天运输系统是可多次往返于地面与空间轨道、多次重复使用的航天运输系统, 具有“自由进出空间、按需返回地面、多次可重复使用”的典型特征, 是降低航天运输成本、提高安全可靠性的理想运输工具。从技术发展规律看, 航天运输系统从一次性使用向重复使用发展也是技术发展的必然趋势。因此发展技术性能更先进、能重复使用的航天运输系统对于满足中国未来空间开发和降低发射成本等需求具有重要的意义。

20世纪60年代以来, 以美国为代表的世界航天强国分别开展了重复使用航天运输系统的研究与探索, 研发了以航天飞机为代表的一系列重复使用运载器, 对运载火箭重复使用、带翼返回重复使用运载器及轨道转移飞行器等多种技术途径投入了大量的资金与人

力。航天飞机的退役, 代表着第一个重复使用航天运输时代的终结, 继而, X-37B的成功掀开了重复使用航天运输系统发展历史上的新一页。从重复使用道路的艰辛与曲折可以看出, 一味追求技术先进只能导致风险过高而失败, 重复使用航天运输系统的发展道路应该充分吸取半个世纪以来的经验教训, 以中国现有的技术基础为根本出发点, 分阶段、分步骤, 循序渐进向前推进, 探索出适合中国具体国情的航天运输向重复使用方向发展的特色之路。

重复使用航天运输系统的典型分类方式主要为3种: 第一, 按系统的级数分类, 包括多级入轨重复使用运载器和单级入轨重复使用运载器; 第二, 按起降方式分类, 包括垂直起飞水平着陆重复使用运载器、垂直起降重复使用运载器和水平起降重复使用运载器; 第三, 按所采用的动力形式分类, 包括火箭动力重复使用运

收稿日期: 2018-04-20

作者简介: 龙乐豪, 研究员, 中国工程院院士, 研究方向为运载火箭技术, 电子信箱: longlh@spacechina.com

引用格式: 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; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.10.009

载器和组合动力重复使用运载器。

总体来看,重复使用航天运输系统主要按照传统运载火箭构型重复使用火箭、升力式火箭动力重复使用运载器及组合动力重复使用运载器3条技术路径同步开展研究(图1)。

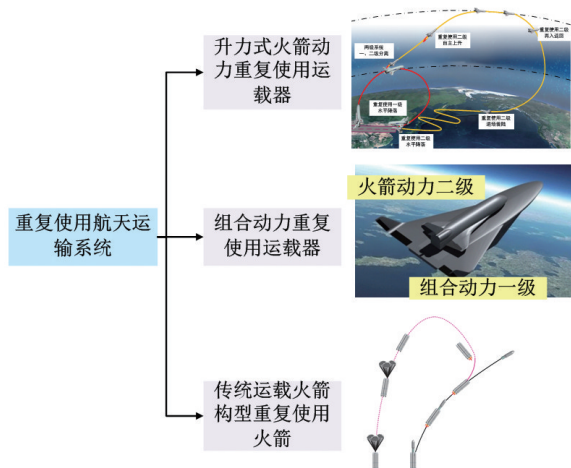


图1 重复使用航天运输系统3条技术途径  
Fig. 1 Three technical ways of reusable space transportation system

## 1 国外发展情况与趋势分析

20世纪50、60年代,首次出现重复使用概念后,美国先后实施了X-15和X-20发展计划,研究成果为美研制航天飞机提供了有益的经验;1981年,航天飞机首飞,第一次实现了运载器的部分重复使用,多次飞行试验成功后航天飞机实现“实用化”,与此同时,美国航天飞机无法满足人们在项目早期赋予它的种种期待,美国期待发展一种新的运载器以替代航天飞机。在此背景下,国家空天飞机计划项目(NASP)、“冒险星/X-33”项目等新一代运载器项目应运而生,且选择了“单级入

轨”可重复使用设计,但先后都因技术瓶颈、经费超支、进展滞后而被取消。

进入21世纪,美国转入多级入轨、部分重复使用运载器研究,由国家航空航天局(NASA)主导转由美国空军独立发展可重复使用军用空间飞机(MSP)系统,执行进入空间和空间作战任务。在MSP系统顶层规划下,美国先后成功完成了空间机动飞行器(SMV)技术验证机X-37B的4次飞行试验,验证了长期在轨飞行、大范围轨道机动、重复使用轨道再入等关键技术;2013年提出了火箭动力、垂直起飞、水平着陆的亚轨道运输飞行器(SOV)技术验证机XS-1计划,预计2020年首飞。X-37B和XS-1将形成MSP系统的雏形。此外,美国私营公司积极探索了垂直起降重复使用运载火箭之路,其中SpaceX公司的猎鹰9火箭一子级垂直回收已常态化。

欧洲、俄罗斯、印度、日本等国家或地区也在积极开展重复使用运载器的基础技术研究和验证工作,他们采取的普遍做法是近期发展效费比高的火箭动力两级入轨重复使用运载器,同时探索未来的单级入轨运载器技术。为此,正在研究利用火箭发动机发展重复使用运载器基础级以及开展轨道再入飞行试验验证。例如,印度在2016年5月成功发射了重复使用运载器技术验证机(RLV-TD)。这些国家还在开展吸气式发动机的探索研究和原理试验工作,如美国的涡轮基组合循环动力(TBCC)和英国的佩刀发动机(SABRE)。

### 1.1 国外发展情况

#### 1.1.1 传统运载火箭构型重复使用火箭

国外发展最为成功的是美国SpaceX公司的猎鹰-9运载火箭。自2011年开始,SpaceX公司开始发展运载火箭垂直回收与重复使用技术,截至目前,猎鹰-9运载火箭已经成功实现了15枚火箭一子级回收、2枚火箭再次发射重复使用。猎鹰-9运载火箭如图2所示,其一子级采用了9台Merlin-1D液氧煤油发动机,以实现垂直



图2 猎鹰-9运载火箭  
Fig. 2 Falcon 9 launch vehicle

返回。运载火箭一子级的长度为48 m,不包含着陆支撑装置的结构系数为4.5%;运载火箭二子级长度为22 m,结构系数为6%。SpaceX公司通过猎鹰-9运载火箭的多次回收试验的探索,验证了垂直起降相关关键技术,同时利用回收火箭再次进行发射,进一步降低了发射成本,在国际商业发射市场上获得了应用。

### 1.1.2 升力式火箭动力重复使用运载器

2003年,美国出台“空军转型飞行计划”,明确提出发展军用空间飞机(MSP)系统,其中亚轨道空间运输飞行器(SOV)与空间机动飞行器(SMV)是其重要的组成部分(图3)。

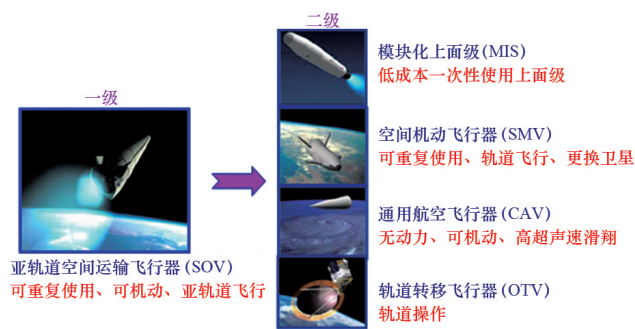


图3 军用空间飞机(MSP)系统

Fig. 3 Military space aircraft (MSP) system

1) 亚轨道空间运输飞行器(SOV)技术验证机——试验性太空飞机(XS-1)。

美国国防高级研究计划局(Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA)于2013年提出试验性太空飞行器(XS-1)项目。XS-1是美国空军军用空间飞机系统(MSP)的亚轨道运输飞行器(SOV)技术验证机,旨在验证快速响应、廉价进入空间的相关核心技术(图4)。其主要技术指标包括:10天10次飞行、最大飞行速度Ma10(即10倍的声速);单次任务500万美元;拟构建多任务载荷高峰发射能力。2017年5月24日, DARPA宣布选定波音公司作为主承包商。目前,该项目处于第二阶段,计划在2019年完成技术验证机研制、地面试验;第三阶段在2020年完成12~15次飞行试验。

2) 空间机动飞行器(SMV)技术验证机——X-37B。

X-37B是美国空军军用空间飞机系统(MSP)的空间机动飞行器(SMV)技术验证机,可往返于空间与地

面,无人驾驶、重复使用,能够自主离轨再入、水平着陆于机场跑道并自主滑停。X-37B飞行器长约8.9 m,翼展约4.57 m,上行有效载荷为227~454 kg(图5)。目前,X-37B已完成4次飞行试验,最长在轨时间717天。

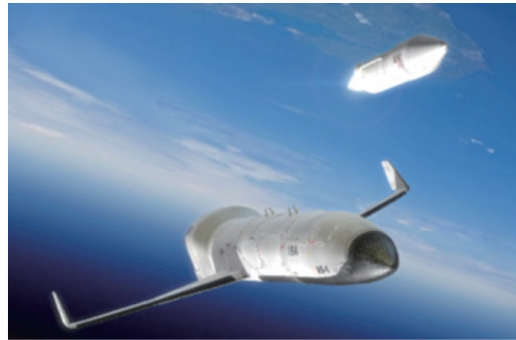


图4 XS-1概念图

Fig. 4 XS-1 concept map



图5 X-37B外形示意

Fig. 5 Sketch of X-37B

### 1.1.3 组合动力重复使用运载器

国外针对组合动力重复使用运载器开展了多种方案研究,包括国家空天飞机、X-43A、X-51A、SR-72、“云霄塔”等。

1) 国家空天飞机计划(NASP)。

国家空天飞机计划(NASP)是一项以研制X-30验证机为目标的组合动力单级入轨飞行器发展计划,如图6所示。由于当时试验手段、冲压发动机技术等尚不成熟,1995年,历时9年的NASP计划被迫终止。其发动机主要有4个工作模态:Ma0~3,以火箭+涡轮发动机组合而成的低速系统工作;Ma3~6,以亚燃冲压模态工作;Ma6~8,以超燃冲压模态工作;Ma8以上,以火箭发动机工作。

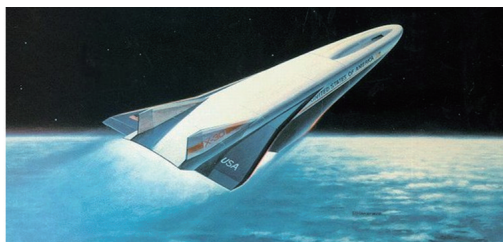


图6 国家空天飞机计划示意  
Fig. 6 National Aerospace Plan (NASP)

2) 超燃冲压发动机技术验证计划(X-43A、X-51A)。

NASP计划终止后,为弥补超燃冲压发动机技术短板,美国相继开展了X-43A、X-51A等计划(图7),分别实现了Ma7~10氢燃料、Ma5.1碳氢燃料超燃冲压发动机的有动力飞行,之后确定了高超声速导弹、高超声速飞机、空天飞行器三步走技术路线。



(a) X-43A



(b) X-51A

图7 X-43A和X-51A示意  
Fig. 7 X-43A and X-51A

3) TBCC组合动力巡航飞机计划(SR-72)。

2013年,洛克希德·马丁空间系统公司(Lockheed Martin Space Systems Company, LMT)开始SR-72高超声速飞机研究。SR-72是一种以涡轮基组合循环发动机(TBCC)为动力、设计巡航速度Ma6、飞行高度30 km

内的高超声速飞行器,可以在短时间内快速抵达全球任意空域,执行情报、监视、侦察和打击任务。SR-72的缩比尺寸验证机于2018年开始工程研制,而SR-72高超声速飞行器有望在2030年服役。图8为SR-72高超声速飞行器示意图。



图8 SR-72示意  
Fig. 8 SR-72

4) 单级入轨空天飞行器(“云霄塔”SKYLON)。

“云霄塔”(SKYLON)是英国喷气发动机有限公司(Reaction Engines Limit, REL)于1994年提出的一种水平起降、单级入轨空天飞行器,目前已取得预冷器技术突破,证明发动机原理可行。计划2019年开展动力验证飞行器的地面静态试验和飞行试验。云霄塔飞行器如图9所示,机体长约85 m,翼展约25 m,对称安装2台“佩刀”发动机(SABRE),起飞质量为325 t,低地球轨道(LEO)运载能力为15 t/300 km。

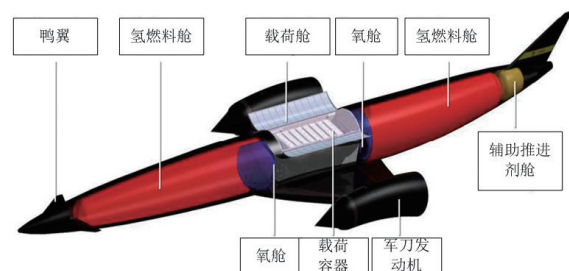


图9 “云霄塔”飞行器示意  
Fig. 9 SKYLON aircraft

2015年4月,美国空军研究实验室(Air Force Research Laboratory, AFRL)确认了“佩刀”发动机的技术可行性,但同时认为,基于“佩刀”发动机的“云霄塔”水平起降单级入轨飞行器在短期内仍存在较大技术风险,宜作为更远期的发展目标。因此美国空军研究实验室与美国SEI公司(Safety Equipment Institute Inc)合作,开始着手研究两级入轨等风险更低、周期更短的“佩刀”发动机应用方案。2016年9月,美国空军研究实验室在美国航空航天学会(AIAA)会议上公布了基于“佩刀”发动机的两级入轨应用方案,该方案提出将“佩刀”发动机应用于两级入轨的第一级,降低了“佩刀”发动机的使用要求,由单级入轨转到两级入轨更有利于实现工程应用。

## 1.2 国外发展趋势分析

归纳国外重复使用技术,具有以下发展趋势。

1) 重复使用运载器近期重点聚焦两级入轨方案,同时开展单级入轨方案探索。

2) 火箭动力是发展重复使用运载器的首选推进方式,已进入系统级集成演示验证阶段。

3) 组合动力重复使用运载器处于概念研究阶段,首先需要突破吸气式组合动力技术。

4) 重复使用运载器方案主流采用升力式水平着陆,垂直起降方式是商业化模式之一。

## 2 中国重复使用技术发展路线

### 2.1 传统运载火箭构型重复使用火箭

#### 2.1.1 现役运载火箭的回收。

对于现役有毒推进剂的运载火箭,尽管无法重复使用,可通过采用回收技术实现落区精确控制,解决航区安全问题。回收技术主要包括伞降回收与栅格舵返回2种方式。

##### 1) 助推器伞降回收。

返回段利用降落伞减速,最终实现陆地、海上和空中回收,技术成熟度最高,运载能力损失小。助推器与运载火箭分离后惯性飞行,再入过程中,由助推器自身气动性能和质量特性产生合适的姿态,当下落至预定参数状态时,启动安全回收系统,弹出稳定伞和减速伞进行减速,展开翼伞控制助推器机动飞行,将助推器导引至安全区域降落,可大幅度缩小落区范围。此外,整流罩也可采用伞降回收。

助推器伞降回收基于传统火箭构型,采用火箭发动机,总体设计变化小,技术成熟度高,短期内可实现,但其回收过程中存在对箭体的冲击。其技术难点体现在超音速条件下降落伞研制难度高、大质量箭体降落伞的设计、仿真和试验技术要求高、大风区箭体姿态稳定困难等方面。

目前,伞降回收多项关键技术成熟度已达到较高水平,如大型群伞技术、超音速开伞技术、大型气囊技术、回收过程姿态稳定技术等。伞降回收技术将应用到现役运载火箭助推器、一子级回收,主要解决助推器、一子级落区精确控制及航区安全问题。

##### 2) 芯级栅格舵返回。

随着高度不断下降,利用栅格舵将子级姿态调整为稳定状态飞行,导航制导控制系统导引子级向目标落区飞行并定点着陆。运载火箭一、二级分离之后,一子级进行无动力飞行。安装在一、二级级间段上的栅格舵按预定指令展开。随着高度下降,动压不断增加,箭体姿态将进入自稳定阶段,即飞行状态为发动机朝前(向下)飞行,此时导航制导控制系统开始工作,导引一子级向目标落区飞行及定点着陆,可缩小落区范围。

芯级栅格舵回收基于传统火箭构型,利用栅格舵保持箭体姿态稳定,对火箭箭体改变较小,技术难度较低。其技术难点体现在子级栅格舵气动特性复杂、子级栅格舵组合体返回段姿态具有多通道耦合特性、子级再入防解体难度大等方面。

目前栅格舵回收多项关键技术成熟度已达到较高水平。栅格舵系统作为高集成度的独立系统,成本低、适应性强、对箭体改动量少,未来可推广作为现役运载火箭一子级(或芯级)残骸落区控制。

#### 2.1.2 未来新型运载火箭的垂直回收和复用

开展未来新型运载火箭垂直起降研究具有重要意义。新型运载火箭采用了液氧烃类发动机,选择基于该类发动机的构型进行垂直回收研制,可以起到以点带面的效果,突破的火箭关键技术即可迅速推广到其他新一代运载火箭型号,应用前景广泛。

对于未来新型运载火箭,从立项研制开始就开展垂直起降关键技术研究,一方面避免了在已有型号中的重复性研究工作,提升了研制效率,另一方面将垂直起降关键技术与型号研制工作并头发展,可以充分保证相关关键技术的工程应用前景。

未来新型运载火箭将采用芯级与助推捆绑整体垂

直降落回收方式:以捆绑助推的未来新型运载火箭构型为基础,两个助推器与芯一级捆绑后作为一个整体进行垂直着陆、重复使用,芯二级一次性使用。在级间分离后,采用整体垂直降落的返回方式,实现减速和着陆,保证捆绑火箭整体可控回收,并根据不同任务需求返回原发射场或其他发射场。

芯级与助推捆绑整体回收垂直起降基于传统火箭构型,采用火箭发动机,技术成熟度较高,总体设计变化小。为满足垂直返回发动机工作要求,需预留推进剂,运载能力损失较大。其技术难点体现在失重条件下发动机多次启动技术、返回过程子级箭体在线轨迹规划与制导导航控制控制技术、着陆过程箭体着陆支腿设计技术等方面。

目前除泵压式发动机大范围推力调节技术成熟度较低外,着陆支撑机构设计技术、返回过程高精度控制技术、重复使用子级箭体结构设计技术等成熟度较高。未来可以应用于基于传统运载火箭的垂直回收,包括子级+助推捆绑整体回收,或者子级回收。

## 2.2 升力式火箭动力重复使用运载器

国外发展情况表明重复使用运载器近期重点聚焦两级入轨方案,单级入轨方式作为终极目标可先期探索。采用两级入轨方式,可在一级工作结束后抛掉无用重量,相比单级入轨,其运载效率明显提高。

在两级入轨方案中,升力式火箭动力重复使用运载器的第一级相对于航天飞机轨道器或入轨级(第二级),由于再入返回速度大幅降低使得再入返回热环境大幅度改善,主发动机工作时间可大幅缩短,更有可能实现低成本目标。因此,升力式火箭动力重复使用运载器一级可作为中国重复使用航天运输技术发展的切入点,先期构建具有实际应用能力的重复使用进出空间基础平台。

综合国内外研究结果,对于两级入轨航天运输系统,当级间分离马赫数降低时,二级重量会急剧增加,两级系统最佳的分离点条件为速度  $Ma6\sim 8$ ,高度  $60\sim 80$  km。要满足大范围高效工作要求,组合动力面临巨大的技术挑战,火箭动力是现阶段的现实选择。

升力式火箭动力重复使用运载器一级兼具航空器和航天器技术特点,采用升力式构型,火箭发动机,垂直起飞水平着陆,能够通过自动进场着陆方式实现精确着陆与完全重复使用。它将以重复使用液氧甲烷发动机作为主动力,采用翼身组合体构型,可实现多次重

复使用,地面垂直起飞、在机场跑道水平着陆,背驮一次性运载火箭二级形成有效载荷快速、低成本入轨能力(图10)。

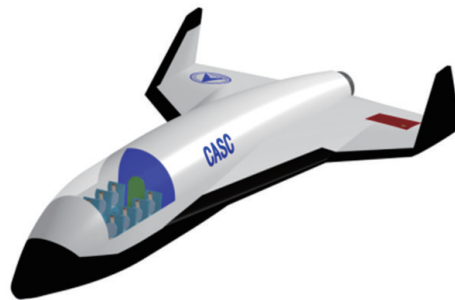


图10 垂直起飞水平着陆的升力式火箭动力重复使用运载器示意

Fig. 10 Indication of lift-body rocket reusable launch vehicle with vertical take-off and horizontal landing

通过优先发展升力式火箭动力重复使用运载器一级,加快推进演示验证,构建中国重复使用进出空间基础平台。

## 2.3 组合动力重复使用运载器

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,能在宽广的飞行包线内为飞行器提供所需动力,主要有3种组合方式:第1种为火箭发动机与冲压发动机的组合,称之为火箭基组合发动机(RBCC);第2种为涡轮喷气发动机与冲压发动机的组合,称为涡轮基组合循环发动机(TBCC),第3种为涡轮喷气发动机、冲压发动机、火箭发动机三者组合,称之为三组合发动机(图11)。对于TBCC而言,其难点在于解决  $Ma2\sim 3$  之间的推力鸿沟问题;对于RBCC而言,其难点在于解决  $0\sim Ma2$  的火箭引射推力增益不足问题。SABRE发动机创新的采用氦气工质作为第三流体循环,通过预冷空气和高压比压缩,使火箭推力室能用空气作为氧化剂,从而使发动机具备吸气和火箭两种工作模式,解决了“推力鸿沟”与“引射增益不足”问题,是组合动力应用于重复使用运载器的一条有效途径。目前组合动力技术发展正在尝试多种途径解决重复使用运载器应用存在的问题。

组合动力发动机优势在于如何充分利用大气,减少氧化剂携带量。其最佳工作范围为大气稠密的空间,约为  $0\sim 30$  km,而  $30$  km 以上组合动力发动机需自身携带氧化剂和燃料,与火箭发动机完全相同(图12)。天地往返航天运输要达到  $200$  km 以上的轨道高

度,30 km 以上大气密度下降至1%,主要依靠火箭动力实现推进。30 km 以下能量占比为 20%~30%,组合动力的优势主要体现在此区间。

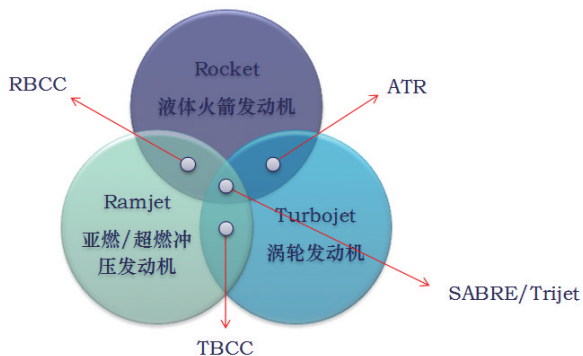


图 11 组合动力发动机的不同组合方式  
Fig. 11 Different combinations of combinatorial power engines

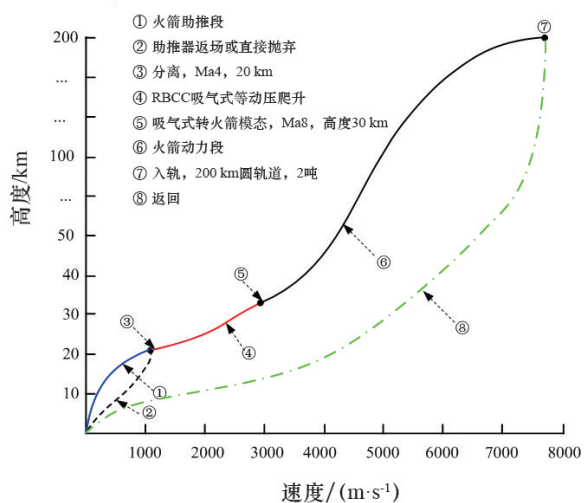


图 12 组合动力飞行高度和速度示意  
Fig. 12 Combined dynamic flight height and velocity

将组合动力发动机应用于重复使用运载器,需充分利用大气,延长组合动力发动机在大气中的飞行时间,将飞行器的速度增加到一个“极值”。目前来看,较多的总体方案是将组合动力应用于两级入轨重复使用运载器的一子级,一、二级的分离点高度通常为 25~30 km,分离点速度通常为 Ma6~10。

组合动力重复使用运载器为两级构型,一级以组合循环发动机作为主动力,采用水平起降方式。二级可以是一次性运载火箭,也可以是升力式火箭动力重复使用运载器(图 13)。组合动力重复使用运载器一级采用升力式构型,新型组合动力发动机,具有起降灵活、高比冲和高效率、适应大空域飞行等显著特点。技术难点体现在总体/气动/推进高度一体化设计技术、高性能组合动力发动机设计技术、轻质结构与热防护技术等方面。

目前国内已完成组合循环发动机原理考核试验,以机体/推进一体化为代表的关键技术具备一定的成熟度水平。现阶段,组合动力重复使用运载器的攻关重点在于确定组合动力技术主攻方向。

### 2.4 后续发展路线

基于对国内外发展情况的分析,结合中国重复使用运载器研究现状及技术基础,充分汲取国外在发展重复使用运载器过程中的经验教训,中国重复使用运载器应遵从部分重复使用到完全重复使用、从火箭动力到组合动力、从两级入轨到单级入轨的战略发展思路(图 14)。

中国重复使用运载器发展路线图如图 15 所示,按照基于运载火箭构型的重复使用、升力式火箭动力重复使用运载器、组合动力重复使用运载器 3 条技术途径同步开展研究,梯次形成能力。



图 13 组合动力两级入轨重复使用运载器示意  
Fig. 13 Schematic diagram of combined power two stage to orbit reusable launch vehicle



图 14 中国重复使用运载器发展思路

Fig. 14 Development of the reusable launch vehicle in China

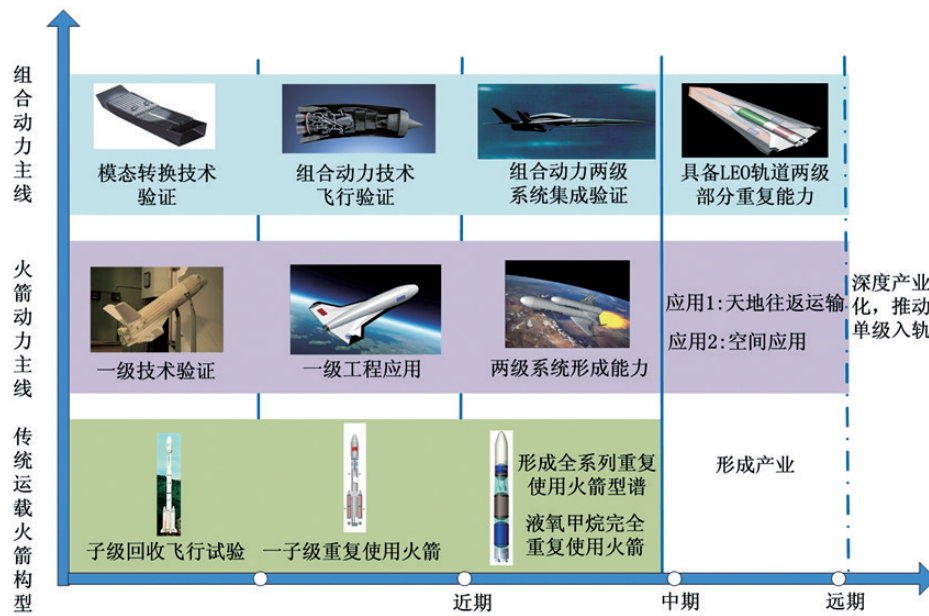


图 15 中国重复使用运载器发展路线

Fig. 15 Road map for the development of reusable launch vehicles in China

### 3 结论

发展重复使用航天运输系统,能够支撑未来大规模开发和利用空间,形成廉价的天地往返运输工具,推动空间应用产业快速发展,牵引需求与需求牵引形成良性循环。发展重复使用航天运输系统,将实现中国航天运输由一次性使用向重复使用、由单一航天运输向航天运输与空间操作相结合的重大跨越,也将加速航天航空技术的深度融合,带动高超声速空气动力学、高精度制导控制、先进空天动力、耐高温轻质材料与结构制造、重复使用评估标准等一大批学科和技术的发展,促进中国基础学科和工程技术水平的整体提升,走

适合中国国情的重复使用航天运输技术发展之路,支撑中国航天强国建设。

### 参考文献 (References)

[1] 龙乐豪. 我国航天运输系统发展展望[J]. 航天制造技术, 2010 (3): 5-10.  
Long Lehao. Development prospect of China aerospace transportation system[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2010 (3): 5-10.

[2] 龙乐豪, 王小军, 果琳丽. 中国进入空间能力的现状与展望[J]. 中国工程科学, 2006, 8(11): 25-28.  
Long Lehao, Wang Xiaojun, Guo Lili. The present situation

- and prospect of China's space-entering capacity[J]. Engineering Science, 2006, 8(11): 25-28.
- [3] 秦旭东, 龙乐豪, 容易. 我国航天运输系统成就与展望[J]. 深空探测学报, 2016, 3(4): 315-322.  
Qin Xudong, Long Lehao, Rong Yi. The achievement and future of China space transportation system[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3(4): 315-322.
- [4] 韩鹏鑫, 王宁宇, 王飞, 等. 可重复使用助推器系统 RTLS 飞行的风险评估[J]. 中国航天, 2017(2): 18-22.  
Han Pengxin, Wang Ningyu, Wang Fei, et al. Risk assessment of reusable booster system RTLS flight[J]. Aerospace China, 2017(2): 18-22.
- [5] Tactical Technology Office. Broad Agency Announcement Experimental Spaceplane(XS-1)[R]. Virginia: DARPA, 2013: DARPA-BAA-14-01.
- [6] Vozoff M, Couluris J. SpaceX products—advancing the use of space[C]//AIAA SPACE 2008 Conference & Exposition. New York: AIAA, 2013.
- [7] Skylon[EB/OL]. [2018-03-31]. [https://en.wikipedia.org/wiki/Skylon\\_\(spacecraft\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Skylon_(spacecraft)).

## Development of reusable space transportation technologies

LONG Lehao, CAI Qiaoyan, WANG Fei, MA Tingting, WEN Yue

China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

**Abstract** The level of the space transportation technologies is closely related with the ability of accessing the space, utilizing the space, and ensuring security and protecting interests in the space. It symbolizes the comprehensive national strength. The reusable space transportation system is an ideal mean to reduce the space launch costs, to improve reliability and safety, and to shorten the turn-around time, as an important component of the future space transportation system. It is an inevitable tendency that the future space transportation system will turn from expendable to reusable. Developing an advanced and reusable space transportation system is of great significance for meeting the needs for the future space exploration and the low cost launch. This paper reviews the development trend of the reusable space transportation technologies. The development route of the future reusable space transportation in China is also discussed from three aspects, including the traditional launch vehicle configuration, the rocket-powered lifting-body configuration and the combined propulsion configuration.

**Keywords** reusable; space transportation; rocket propulsion; combined-propulsion; development prospect ●



(责任编辑 刘志远)