

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

徐大富^{①*}, 张哲^②, 吴克^③, 李红兵^①, 林剑锋^①, 张晓东^①, 郭筱曦^③

① 上海宇航系统工程研究所, 上海 201109;

② 探月与航天工程中心, 北京 100037;

③ 北京空间科技信息研究所, 北京 100086

* 联系人, E-mail: xudafu268@163.com

2016-04-29 收稿, 2016-05-26 修回, 2016-05-27 接受, 2016-07-19 网络版发表
上海市科技人才计划(14XD1423300)资助

摘要 可重复使用运载火箭技术是降低空间运输费用的重要手段, 也是提升空间快速响应能力的有效途径, 各主要航天强国都将其作为航天领域未来发展的重点方向之一。为验证垂直起降精确软着陆与箭体回收技术的可行性, 私营商业航天领域的代表者SpaceX公司开展了多次猎鹰-9火箭一子级海上平台和陆地回收试验, 再次掀起可重复使用火箭研究热潮。本文对SpaceX公司可重复使用运载火箭研究历程、回收试验情况等进行了简要回顾, 总结归纳了重复使用技术60多年的发展历程, 研究分析其发展特点、未来趋势和关键技术, 提出发展我国可重复使用运载火箭技术的启示和建议。

关键词 可重复使用运载火箭, 垂直起降, 精确软着陆, 发展趋势, 关键技术

可重复使用运载器(reusable launch vehicle, RLV)是相对于“一次性运载火箭”而言的概念, 指运载器从地面起飞完成预定发射任务后, 全部或部分返回并安全着陆, 经过检修维护与燃料加注, 可再次执行发射任务^[1]。重复使用的优点和终极目标是为了减少运载器一次性使用后抛弃昂贵的箭体、发动机及电气设备造成的浪费, 通过多次使用分摊费用来降低运载器的生产与发射成本。RLV根据不同的分类方法可以划分出很多类型, 按重复使用程度可分为部分重复使用和完全重复使用, 按入轨级数可分为单级入轨(SSTO)和两级入轨(TSTO), 按动力类型分为火箭动力和吸气式组合动力, 按起降模式可分为垂直起降、水平起降和垂直起飞/水平降落, 按外形可分为带翼构型(含翼身融合体、升力体、乘波体)和

火箭构型。RLV技术是降低空间运输费用的重要手段, 也是提升空间快速响应能力的有效途径, 具有成为潜在战略威慑的可能^[2~5]。另外, RLV技术代表了当今航天科技领域的最高水平, 其具有的技术溢出与产业升级效应将显著提升相关领域的技术水平和创新能力, 推动国民经济增长。因此, 各航天大国都把发展RLV技术作为未来发展重点。

1 猎鹰-9火箭近期实施的4次回收试验

1.1 试验概况

2015年12月22日, 美国太空探索技术公司(SpaceX)采用“猎鹰-9”(Falcon 9)火箭从卡纳维拉尔角发射场成功将11颗第二代Orbcomm卫星送入预定

引用格式: 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. 科学通报, 2016, 61: 3453–3463

Xu D F, Zhang Z, Wu K, et al. Recent progress on development trend and key technologies of vertical take-off vertical landing reusable launch vehicle (in Chinese). Chin Sci Bull, 2016, 61: 3453–3463, doi: 10.1360/N972016-00537

轨道. 本次飞行任务中, 火箭一子级在约80 km的高度与第二级分离, 惯性冲高飞行到达最高点后进行3次点火, 利用冷气反作用控制系统(RCS)、栅格舵等进行飞行姿态控制, 最终火箭一子级完成发射工作后首次实现在陆地发射场成功回收, 验证了150 km以上高度有动力的精确软着陆与回收技术, 在迈向重复使用的道路上具有重要的里程碑意义.

随后, 2016年1月18日和3月4日, 猎鹰-9火箭又进行了两次一子级海上平台回收试验, 遗憾的是, 两次海上平台回收试验分别因为着陆支腿失效、着陆速度控制不当等技术原因导致了失败. 但是, SpaceX公司也通过这两次试验再次对该型火箭的精确返回飞行控制等关键技术进行了充分验证, 并为后续产品的设计改进和技术发展积累了大量重要数据.

2016年4月8日, 猎鹰-9火箭完成国际空间站补给任务(CRS-8)之后, 火箭一子级精准降落在距离发射场约300 km外大西洋上、着陆面积仅为70 m × 50 m的海上浮吊回收平台(Autonomous Spaceport Drone Ship, ASDS). 整个降落过程非常完美, 着陆后箭体在海上回收平台上的状态如图1所示, 这是SpaceX公司经历4次失败后第一次成功完成海上回收试验, 证明了垂直起降重复使用模式的可行性. 与陆地回收相比, 海上平台回收可节省返回着陆时携带的推进剂用量, 将运载能力损失进一步减小, 提高了箭体回收的实用性.

1.2 回收试验意义

对于RLV而言, 实现箭体完整回收是第一步, 也是最为关键的步骤. SpaceX公司的一子级回收试验是在完成发射任务之后进行的, 成败与否不会增加火箭的发射成本^[6], 而且已经通过多次回收试验引起



图1 猎鹰-9火箭一子级成功完成海上平台回收试验
Figure 1 The first stage of Falcon 9 Rocket flight back and landed on ASDS

了广泛关注, 陆地与海上回收试验的相继成功更是激发了航天界对RLV技术的研究热情.

此前的RLV技术研究, 主流方向是采用类似航天飞机的带翼外形实现水平着陆^[7,8], 而近期猎鹰-9火箭陆地与海上平台相继回收成功, 证明了火箭外形的箭体也可以实现完整回收. 与带翼外形/水平着陆相比, 火箭外形/垂直起降充分继承了现有一次性火箭的技术基础, 无需新研复杂外形的翼舵等结构机构, 也无需增加复杂的防热结构, 且着陆时仅需面积较小的简易场坪, 不需要准备几千米长的跑道. 航天飞机作为带翼方案的典型代表, 虽然技术上实现了重复使用, 但极其高昂的研制与维护成本导致发射费用不降反升, 经济上无法承受的高成本是其退役的主要原因之一^[9]. 猎鹰-9火箭的回收成功表明, 垂直起降方案技术上是可行的, 而且研制成本较低, 具有广阔的商业应用前景^[10,11].

1.3 SpaceX可重复使用运载火箭研究历程

SpaceX公司由艾伦·马斯克于2002年创立, 其设计和生产的猎鹰-1、猎鹰-9系列火箭以及“龙”飞船等宇航产品相继投入使用, 并通过其低廉的发射成本、较高的飞行可靠性和多项技术创新等引起广泛关注, 在由联合发射联盟(ULA)垄断的美国大中型载荷发射市场中突围而出, 已成为国际航天发射市场的主力军, 正不断吸引着来自美国政府机构、军方及国外政府和商业公司的发射订单, 改变了国际发射服务市场的格局.

猎鹰-9火箭作为SpaceX公司的主力也是其目前唯一在役的运载火箭, 体现了该公司关注火箭低成本、高可靠的设计理念和创新意识, 其中自动发射及故障智能诊断技术、牵制释放发射技术、动力冗余与控制系统重构技术、静态点火测试技术和子级自主可控回收技术等均在传统一次性火箭研制领域里实现了重要技术创新和突破. 截至2016年4月, 猎鹰-9系列火箭共计发射了23次, 其中失败1次, 部分失败1次, 并以6000万美元/次的发射服务价格创造了商业发射低成本的奇迹, 成功赢得了45次发射订单. SpaceX公司致力于RLV技术研究, 其目标是将目前的发射服务费用再降低一个数量级.

SpaceX早期的思路是采用伞降方式在海面回收箭体, 在猎鹰-9火箭一子级中预留了降落伞安装空间. 遗憾的是, 在最早的两次飞行试验中, 一子级未

等到开伞即在再入大气层的过程中解体了,飞行情况显示箭体无法承受无控再入大气层时的气动载荷。随后SpaceX放弃了伞降方案,转向研究依靠发动机反推制动的垂直起降技术。为验证垂直起降的可行性,SpaceX在猎鹰-9火箭一子级的基础上,先后开发了“蚱蜢”(Grasshopper)、F9R Dev试验样机,如图2所示。2012年9月至2013年10月期间,Grasshopper完成了8次飞行试验,验证了低高度和低速条件下的精确返回和着陆能力。2014年,F9R Dev先后进行了5次飞行试验,设计上主要增加了栅格舵进行飞行稳定控制,对着陆缓冲支架进行了改进,进一步增强了飞行与着陆控制能力。

在积极开展试验样机低高度低速飞行着陆测试的同时,SpaceX还在实际发射任务中利用剩余运载能力验证第一级高速受控再入技术,截至目前已经进行了11次可控回收试验,陆地回收取得第1次圆满成功(图3分别为一子级在陆地回收场着陆时的照片和使用长曝光相机拍摄的飞行轨迹照片),海上平台回收试验连续实现3次圆满成功。虽然箭体回收试验经历过多次失败,但SpaceX通过总结经验教训不断

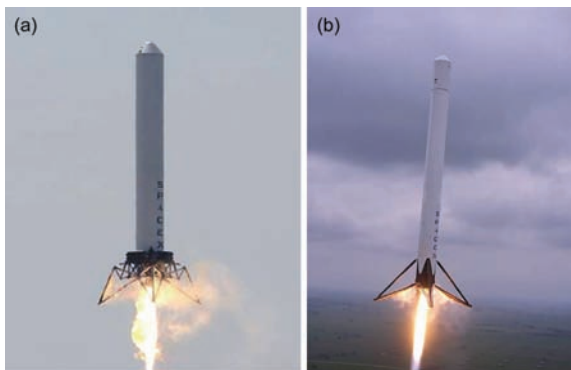


图2 “蚱蜢”(a)与F9R Dev试验样机(b)

Figure 2 The Grasshopper test vehicle (a) and F9R Dev test vehicle (b)



图3 Falcon 9火箭一子级成功完成陆地回收试验。(a) 箭体着陆;(b) 弹道轨迹

Figure 3 The first stage of Falcon 9 Rocket flight back and landed on Launch station. (a) Landing; (b) ballistic trajectory

取得技术进步,其通过垂直起降重复使用来降低发射成本的信心愈发坚定,最终取得了成功,回收技术日趋成熟。

2 可重复使用运载火箭的发展特点与未来趋势

RLV的研究起源于20世纪中期,纵观其发展历程,主要经历了以下几个阶段(图4)。

(1) 第一个时期(1950~1970年): 提出概念并初步验证关键技术。1952年,冯·布劳恩论述了可重复使用的大型助推火箭概念,提出近地轨道、可重复使用天地往返运输系统设想。随后,美国通过实施X-15、X-20等RLV关键技术验证计划,为航天飞机研制积累了经验。

(2) 第二个时期(1970~1980年),航天飞机研制与首飞。美国将航天运输发展方向由一次性火箭调整为RLV,启动航天飞机论证,并于1972年正式立项。1981年,哥伦比亚号首飞成功,实现了天地往返运输轨道器部分的重复使用。这一时期,各国相继开展研究,包括法国的“Hermes”号小型航天飞机研制计划等。

(3) 第三个时期(1980~2000年),单级入轨研制浪潮。在航天飞机成功的鼓舞下,各国陆续提出了更加先进的吸气式动力水平起降的空天飞机计划,如美国的国家空天飞机计划(NASP/X-30)、英国的“霍托尔”(HOTOL)等。空天飞机属于单级入轨完全重复使用航天器,技术难度远远超过当时的技术水平,尤其是吸气式组合动力发动机、轻质结构与材料等技术,因实际投资远超预期,在90年代初期相继下马。90年代中期,航天界认为吸气式单级入轨需要首先突破超燃冲压发动技术,因此将超燃动力作为一个研究方向,同时,RLV开始转向火箭动力单级入轨。美国启动吸气式高超音速试验飞行器Hyper-X计划(X-43)和以火箭发动机为动力的单级入轨计划“三角快帆”(DC-X)、“冒险星”(X-33),其中Hyper-X验证机X-43A试飞成功初步验证了超燃冲压发动机的可行性,而DC-X、X-33因技术难度太大而下马。随后RLV技术研究从单级入轨转向更为务实的两级入轨。

(4) 第四个时期(2000年至今),火箭动力两级入轨成为主流。进入新世纪后,各航天大国提出循序渐进的RLV验证项目,同时向两个方向发展:一是基于火箭动力发展助推级和轨道级部分重复使用的两级



图4 重复使用运载器主要发展阶段

Figure 4 The history of Reusable Launch Vehicle (RLV)

入轨飞行器(ARES、RBS、X-37B等);二是基于吸气式推进技术发展高超音速巡航飞行器(X-51A等).2010年以后,RLV技术发展策略更趋务实,以单项关键技术突破为目标,开展持续研究.2013年,美国国防先进研究计划局(DARPA)启动了与RBS项目类似的XS-1项目,通过助推级重复使用降低发射费用,同时提高发射机动性.同一时期,英国单级入轨“云霄塔”(Skylon)空天飞机发动机的预冷器关键技术获得重大突破,德国“锐边飞行器”(Shefex-2)、欧洲太空局“过渡试验飞行器”(IXV)均成功进行无动力再入返回试验.同时,私营航天公司积极参与商业航天领域,提出了较多新颖的RLV方案,如美国SpaceX公司继DC-X、K-1^[12,13]之后再次提出了火箭外形RLV方案,并完成了多次回收试验.另外, Virgin Galactic、XCOR、Masten、蓝源、内华达山脉等公司也提出众多新方案,试图短期内向市场提供低成本运营的RLV.

2.1 发展特点

(1) 可重复使用运载火箭是航天运输发展的重要方向.经过半个多世纪的发展,运载火箭的功能特点、运载能力、成本效益、技术途径、研发模式等已完成了多次跃升与革新,经历了由进入空间向天地往返、由高污染向无污染、由高成本向低成本、由一次性使用向可重复使用、由政府研发向企业研发的转变.虽然传统一次性运载火箭在功能性、安全性和可靠性等方面基本能满足目前发射任务的需求,

但随着航天运输技术要求日益复杂、市场竞争日益激烈、太空探索任务的拓展以及商业发射任务的剧增,对发射成本、发射周期、机动性、可靠性及运载能力都提出新的要求,发展响应速度更快、成本更低、更安全可靠RLV成为必然选择.

(2) 可重复使用运载火箭研究难度高、风险大.与一次性火箭相比,RLV的技术难度要大得多^[14],涉及气动、热防护^[15~17]、动力^[18~24]和导航制导与控制(GNC)^[25,26]等方面的关键技术,且成本高,例如NASP项目因吸气式动力技术难以克服,最终在研制八年、消耗数十亿经费的情况下中止.几十年来,RLV项目多达上百个,发展道路跌宕起伏,从NASP、X-33、DC-X、RBS到XS-1,随着发展目标不断调整,各国更加认识到,发展目标和方案必须与关键技术的发展水平相适应,目标制定得过高、技术指标过于先进就会增加关键技术的难度,同时难以降低成本、提高可靠性,并且直接影响目标的可实现性,增加了研制风险.

(3) 市场需求和技术创新共同驱动可重复使用运载火箭发展.快速响应、宽适应性、经济性是航天运输系统追求的主要目标.运载火箭技术经过几十年的发展,逐渐成熟并趋向于产业化发展,航天动力、电子元器件、新材料、先进制造工艺等多个领域获得突破,技术创新使运载火箭能够像飞机返回发射场(航天港)一样往返空间,并在加注燃料和简单维护后再次发射成为可能.另外,为构建和维持体系化稳定运行的航天系统,需要降低进入空间的成本,

将一次性火箭发射单位载荷价格由目前的6000美元/公斤降到2000美元/公斤以下,以“轨道革命”的形式促进发射需求呈指数级增长.这种大幅度降低入轨价格的运载器是一次性火箭无法做到的,必须采用RLV技术.因此,RLV的技术发展是由航天技术创新的内在要求、用户与市场的外部需求共同驱动的.

2.2 发展趋势

2.2.1 路线选择

(1) 火箭动力是现实选择,吸气式组合动力是未来方向.在RLV的研制过程中,世界各国一般采取两条主线发展模式:一是火箭动力,另一条主线是吸气式组合动力.火箭发动机技术经过几十年发展已经相对成熟,并成功运用于一次性火箭和部分重复使用的航天飞机上,因而比较容易在短期内实现.与火箭动力相比,吸气式组合动力可以在不同的飞行高度和马赫数条件下启用最优的工作模式,达到最佳的加速和巡航要求,能够充分利用大气中的氧减轻自身的起飞重量,成为未来最有前途的动力系统.在20世纪90年代各国吸气式动力的单级入轨空天飞机计划因技术难度较大而夭折后,各国都采取了比较务实的做法,RLV先发展较为成熟的火箭动力,后发展技术难度更大的吸气式组合动力.

(2) 两级入轨是近期重点,单级入轨是终极目标.单级入轨RLV具有系统简单、高性能等潜在优势,但技术跨度较大,需攻克新型动力、轻质高效材料等瓶颈技术,短期内难以实现.在单级入轨RLV的发展史上,重点方案都因技术或资金问题而搁浅,遭遇了重大挫折,目前仅有Skylon空天飞机在进行相关研究,主要集中在“佩刀”发动机的关键技术攻关上.从主要航天国家的发展历程看,美国单级入轨项目X-30计划和X-33计划相继下马,预算花费超过40亿美元,使得各国发展RLV的策略上采取更加务实和慎重的态度,近期多以综合考虑了系统复杂程度和技术攻关难度的两级入轨RLV为发展重点.美国的试验性太空飞机(XS-1)、俄罗斯的“可重复使用太空火箭第一级系统”(MRKS-1)等,都是两级入轨RLV的典型代表.

(3) 垂直起飞/水平返回是主流方向,垂直起降是有益补充.在目前条件下,垂直起飞/水平返回和垂直起降是火箭动力两级入轨方案中的两大主要研究方向.对于火箭动力的两级入轨RLV而言,采用垂

直发射方式,起飞和飞行时主要承受轴向载荷,结构设计简单,同时垂直起飞能够快速穿越大气层,气动阻力损失小.返回方式根据不同的气动外形,可以选择垂直降落或者水平降落:火箭外形采用垂直降落,结构设计简单,用于着陆的结构附加重量较小,但是要求发动机具备大范围推力调节能力;带翼外形可采用水平降落的模式,利用大气阻力进行着陆前减速,但是飞行中气动阻力和气动加热比垂直降落大,需要在机翼和机身部位采取防热措施,另外水平着陆还需要较长的跑道进行滑跑减速.水平返回的带翼重复使用运载器具备优异的高超声速飞行能力和快速响应能力,可发展成为具有战略威慑性的军用空间飞机,因而成为各航天大国和集团研究的主流方向;技术难度小、具备低成本特征的垂直起降则受到私营航天公司青睐,重点开发适应廉价商业发射需求的重复使用运载器.

2.2.2 后续重点研究项目

国外航天研究机构和私营公司提出了多种RLV方案并进行关键技术攻关,正在多途径、分阶段验证重复使用相关技术,主要项目包括两级入轨的升力体外形方案,如XS-1、追梦者;两级入轨的垂直起降方案,如新谢帕德号(New Shepard)、猎鹰-9;单级入轨的方案仅有Skylon空天飞机项目;另外一次性火箭部件回收也作为RLV技术的初步尝试,如发射联盟的新一代“火神”火箭的发动机和空客的“艾德林”发动机模块的回收复用.

2013年,DAPRA提出“试验性太空飞机(XS-1)”计划,概念设想如图5所示,旨在研发一子级返回式RLV(主方案为垂直起飞/水平降落),飞行速度达10马赫,其目标是在10天内执行10次飞行任务,可将不低于1.36吨的有效载荷送入近地轨道,发射成本控制500万美元以内.2014年,第一阶段合同分别授予了波音公司、诺格公司及马斯腾(Masten)航天系统公司.按照目前的计划表,预计XS-1将在2018年完成亚轨道飞行试验.

蓝源公司于2000年成立后开始研制亚轨道高度飞行的RLV,用于商业太空旅游.2015年11月,该公司成功发射可回收的“新谢帕德号”火箭,并成功实现软着陆,首次完成亚轨道垂直起降RLV助推级的安全着陆与定点回收.“新谢帕德号”火箭发射起飞状态与着陆状态如图6所示.两个月后,回收的箭体再次发射,并成功完成返回软着陆,率先实现同一箭体

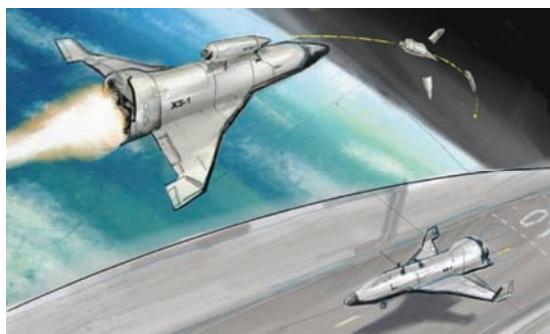


图5 XS-1 概念设想图

Figure 5 The concept image of XS-1

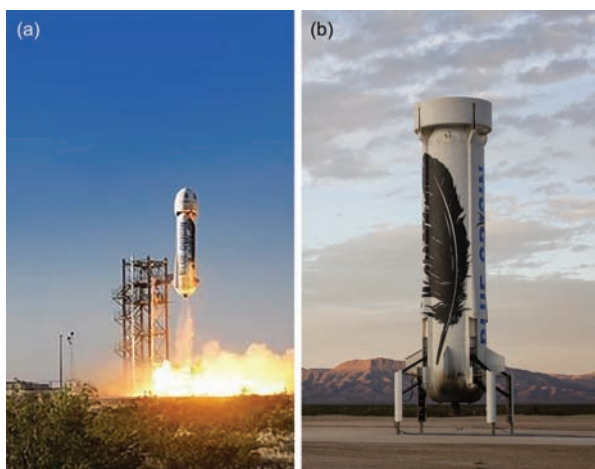


图6 蓝源公司“新谢帕德号”. (a) 起飞状态; (b) 着陆状态

Figure 6 New Shepard Reusable Launch Vehicle of Blue Origin. (a) Take-off; (b) landing

发射到“卡门线”(100 km)高度回收后再次复用. 2016年4月, 回收的箭体进行第三次飞行测试, 飞行高度1000 m, 再次对箭体回收后的检修维护等关键技术进行了验证, 并为后续研究积累了重要数据. 目前, 蓝源公司正在研制规模更大的RLV, 与SpaceX在卫星商业发射市场上展开激烈竞争.

3 垂直起降可重复使用运载火箭的关键技术

3.1 精确返回飞行与安全着陆控制技术

RLV一二级分离后, 一子级实施返回着陆飞行, 经历从亚轨道高度逐渐下降到地面的过程, 飞行环境复杂且存在较多随机性的扰动因素. 在此过程中, 发动机多次工作, 使用推力矢量控制(TVC)、RCS、气动栅格舵面等多种控制机构, 克服各种内外部干扰,

进行姿态、位置、减速机动控制, 精确返回并安全着陆至指定着陆场. 为达到精确返回、安全着陆目标, 必须对运载器自身特性、飞行环境与扰动进行精确数学描述, 进行多轮GNC控制算法仿真和原理性飞行试验, 实现控制算法和执行机构之间的优化匹配. 精确返回飞行与安全着陆控制技术可以转化应用于现役火箭残骸飞行控制, 解决落区安全问题; 或者应用于航天器地外天体定点软着陆. NASA喷气推进实验室研究了一套燃料优化转移制导算法(G-FOLD), 为RLV返回着陆、月球/火星定点软着陆提供技术储备. 我国在探月工程嫦娥三号任务中成功实施了月面软着陆^[27~29], 初步掌握了控制方法.

RLV返回着陆还涉及轨迹最优规划问题, 主要研究RCS系统何时工作及持续时间、发动机工作时间和推力大小、不同飞行阶段分段控制时如何确定每段起点与终点的速度与位置约束, 以及栅格舵和着陆缓冲机构打开时间的确定等. 轨迹优化的目的是使推进剂消耗最少, 同时减弱气动加热影响, 并保证实现高精度着陆. 在多种约束条件下, 轨迹最优规划采用传统的理论和方法会遇到无法收敛或者收敛到一个次优解的问题. SpaceX公司GNC首席工程师Lars Blackmore和德克萨斯大学Acikmese^[30]提出了一种无损凸优化理论, 具有快速收敛、对初值不敏感、所得解即为全局最优解等优点. Masten公司的Xombie飞行器在垂直返回制导控制上采用无损凸优化方面的研究成果, 取得了NASA发起的“月球着陆器挑战计划”大奖赛的第一名. SpaceX公司未公开一子级回收相关技术细节, 据推测可能也使用了无损凸优化的研究成果.

猎鹰-9火箭一子级分离后返回原发射场的弹道仿真曲线如图7所示, 返回弹道设计时, 受到箭体承受载荷限制、返回点火推进剂消耗量限制等约束, 需进行级间分离高度、惯性调姿速率和返场发动机工作时间等多项参数协同优化设计, 根据仿真结果, 返回原场的回收模式与不回收相比, 运载能力损失约30%.

3.2 变推力可重复使用发动机技术

实现RLV返回着陆要求发动机具备多次启动能力; 同时返回过程中贮箱推进剂剩余量不足10%, 贮箱压力降低, 发动机点火启动条件(入口压力、温度条件)也偏离正常范围, 要求发动机必须具备在宽入

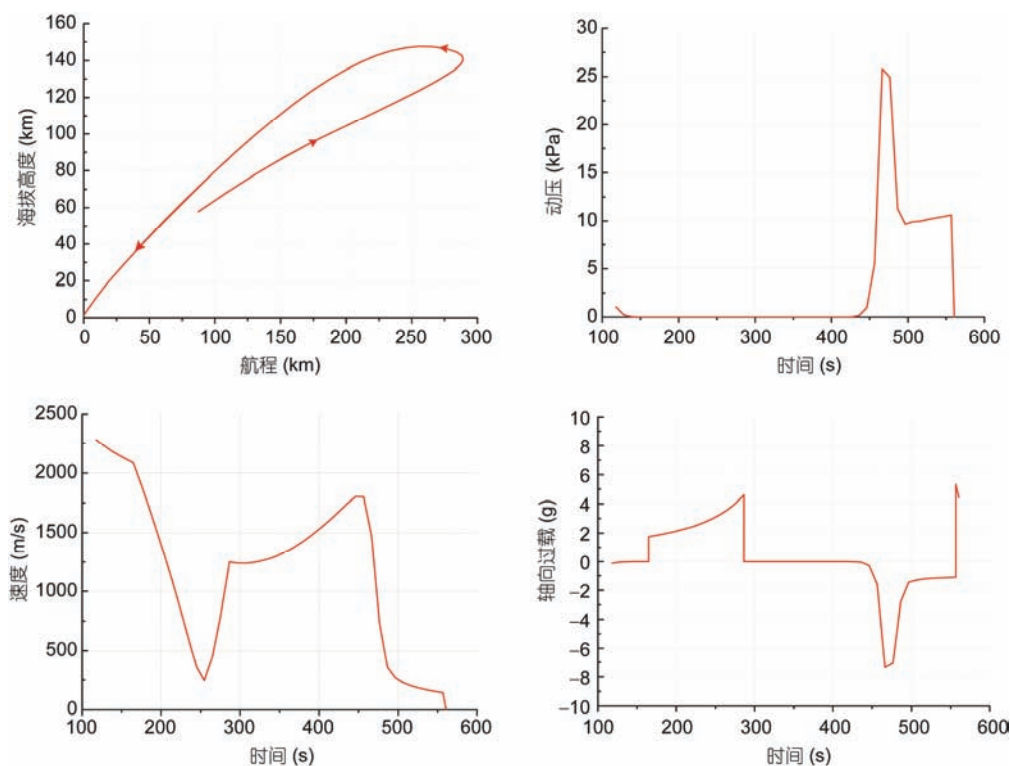


图7 Falcon 9 火箭一子级原场返回弹道仿真曲线

Figure 7 Simulation results of recovery trajectory of Falcon 9's first stage

口条件下的点火启动能力。在着陆段,要求通过发动机推力调节,使速度降低到着陆所允许的条件。发动机大范围变推力需要通过多个调节元件来实现,调节控制规律复杂,同时喷注器、再生冷却身部、涡轮泵等关键组件也要具备相应条件下可靠工作的能力,需要开展大量研究、试验工作。另外,传统液体火箭发动机均为一次性使用,无需考虑重复使用相关的健康监测与剩余寿命评估问题。而垂直起降提出的重复使用技术要求,需要开展发动机健康监测与剩余寿命评估技术,涉及到发动机数据采集处理、故障诊断与控制、智能减损和寿命评估等相关技术。例如蓝源公司新谢帕德号火箭助推级采用了50吨推力的BE-3液氢液氧发动机,如图8所示,该发动机能够在18%~98%范围内进行连续推力调节,并具备多次重复使用能力。该公司正在研制性能更优异的250吨级推力的BE-4发动机,采用分级燃烧、液氧甲烷推进剂,已经进行热试车试验。

3.3 高可靠着陆缓冲机构技术

在火箭回收过程中,必须使用高可靠的着陆缓

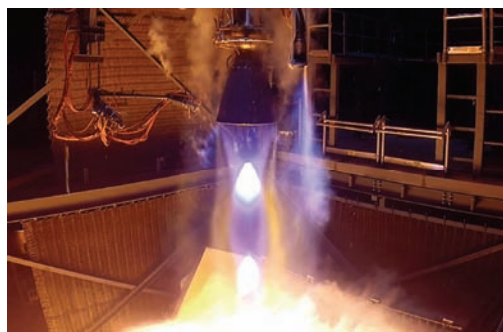


图8 蓝源公司BE-3 液氢液氧发动机

Figure 8 BE-3 Engine of Blue Origin

冲机构减缓着陆瞬间冲击过载,使箭体平稳着陆。着陆缓冲机构要有较好的强度和缓冲功能以及对倾斜姿态、残余速度的适应能力,从而保证着陆的稳定性。由于着陆支架靠近火箭发动机,还需具有承受反侵热流的热防护能力。着陆缓冲机构采用支腿式软着陆机构,具有可收放、可重复使用、缓冲效率高、着陆稳定性好、占用空间少等优点。猎鹰-9火箭所采用的支腿式着陆缓冲支架如图9所示。目前地外行星探测器软着陆探测时广泛采用支腿式探测器^[31],其中



图9 猎鹰-9火箭着陆缓冲支架。(a) 展开状态; (b) 收拢状态
Figure 9 Landing legs of Falcon 9 rocket. (a) Deployed; (b) undeployed

最为关键的吸收着陆冲击载荷的缓冲器技术已得到工程验证。RLV回收所使用的着陆缓冲机构需要承受箭体几吨甚至十几吨的着陆重量,技术难度远远超过几百公斤的探测器所采用的着陆缓冲机构。

3.4 返场快速检测与维护技术

RLV回收后只需经过简单维修和加注燃料就能再次使用是降低成本、提高快速响应能力的关键。返场后需要在短时间内对箭体状态进行检测分析与维修,但传统手段主要通过拆卸箭上产品进行逐个检测,出现故障主要通过依靠人力进行故障分析定位,且通常为了复现问题需要做大量的重复试验,对发射周期与成本造成较大影响。为了缩短发射周期和降低成本,RLV的返回复测需要按快速、智能、高效的原则,采用无拆卸快速检测与维护技术。通过结合箭上专家系统快速复测,对运载器的全箭健康状态和预期寿命进行自动评估分析,并对出现故障或寿命预期较低的部件进行及时维修或更换,在短期内给出箭体可再次发射的结论。箭上各系统在设计中需要融入健康管理理念,统筹设计。

4 启示与建议

4.1 我国航天发射的现状和机遇

我国航天运输技术在多项国家重大航天工程的牵引下取得了跨越式发展。运载火箭综合性能不断提升,CZ-5, CZ-6, CZ-7, CZ-11等新一代运载火箭的首飞或研制成功将大幅度提高我国火箭运载能力、快速响应能力和可靠性水平。但受长期以来整体投入不足和国内工业水平的限制,我国航天运输技术距离航天强国建设要求和国外同类产品技术水平仍然

存在较大差距。其中,动力技术与国外相比仍然存在推力偏小、比冲偏低、结构偏重的不足,亟需发展一系列高性能发动机,支撑和推动我国航天运输技术的持续发展;长期制约我国运载火箭进一步发展的落区控制技术、自主飞行控制技术、国产化电子系统等问题仍未彻底解决,亟需集中力量重点突破;此外,重复使用等前沿技术研究投入不足,相关技术亟需工程牵引推动。

根据航天领域发展需求,后续航天运输技术应以“构建低成本、高可靠的航天运输系统”为总体目标,按照“提升总体能力、填补领域空白、布局未来发展”为总体思路,谋划技术发展。瞄准先进动力技术升级,解决未来航天运输技术的瓶颈制约;实施可重复使用关键技术攻关,利用其响应快、高频次、高可靠的特性,满足高密度发射需求,降低进入空间的成本。

4.2 可重复使用运载火箭的发展建议

RLV是航天运输系统未来的重要发展方向,也是继新一代运载火箭之后我国运载火箭发展的主要方向。国外的发展历程清楚表明,RLV技术难度大,需要制定一个系统的长远发展规划,循序渐进实施;需要开展总体方案深化论证,牵引关键技术攻关,实现技术积累和储备;需要大胆创新、求真务实和坚持不懈的努力,才能够最终实现“廉价、快速、机动、可靠”自由进出空间的目标。

(1) 兼顾技术先进性、经济性和可靠性。纵观RLV技术60多年的发展历程,主流的技术途径是研制新型的RLV,采用全新的技术、全新的构型,与传统一次性运载火箭差别较大,但技术先进同时也带来了巨大的风险,美国的航天飞机在举全国之力的

背景下研制成功,技术非常先进,但由于系统复杂,为保证其可靠性又导致使用维护成本高昂.过度追求技术先进性是造成国外RLV技术方案不断反复的主要原因.从吸气式动力退回火箭动力,从单级入轨退回两级入轨,从完全重复使用退回部分重复使用,正是将发展重点从追求技术先进转移到追求高可靠、低成本的现实方案上来.

(2) 聚焦关键技术预研,重视飞行演示验证. RLV涉及许多重大的关键技术,直接影响项目的成败.在工程型号的立项研制前,要首先突破关键技术,并通过飞行演示试验验证关键技术的解决情况和技术成熟度,检验总体方案的可行性、充分暴露潜在问题.根据关键技术发展阶段和演示验证目标的不同,演示验证又可以分为技术级演示验证与系统级演示验证.技术级演示验证主要验证考核单项或部分关键技术,系统级演示验证通常在研究的中后期,主要针对多项关键技术及关联的系统级技术开展综合集成演示验证.建议根据我国在该领域技术

发展水平与关键技术特点,在不同的研究阶段开展相应的飞行演示验证试验.

(3) 进一步加大研发支持与投入.我国将RLV作为航天运输系统的发展重点之一,持续开展概念研究和关键技术攻关.我国RLV研究经历了跟踪调研、概念方案研究、关键技术攻关等阶段,已形成了大量的研究成果,具备了开展集成飞行试验的条件.但迄今为止,只有个别项目进行了演示验证,尚未经过系统级的飞行演示验证试验考核,建议进一步加强整体推进,扩大资源投入.

面对各类卫星发射需求,RLV将与一次性运载火箭互为补充共同构成进出空间的航天运输系统,逐步发展成为航天运输领域革命性产品.将降低系统复杂度、提高可靠性和经济性的理念融入到RLV总体设计中,是适合我国国情、易于工程实现的发展选择.为此,建议加快RLV总体方案优化论证和关键技术攻关,在低成本航天运输新纪元里抢占技术发展制高点,不断提升航天发射市场竞争力.

参考文献

- 1 Wang Z G, Luo S B, Wu J J, et al. Recent progress on Reusable Launch Vehicle (in Chinese). Changsha: National University of Defense technology Press, 2004 [王振国, 罗世彬, 吴建军, 等. 可重复使用运载器研究进展. 长沙: 国防科技大学出版社, 2004]
- 2 Long L H. Complete Volume on Launch Vehicle in the World (in Chinese). 2nd ed. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2007 [龙乐豪. 世界航天运载器大全. 第2版. 北京: 宇航出版社, 2007]
- 3 Deneu F, Malassigne M, Le-couls O, et al. Promising solutions for fully reusable two-stage-to-orbit configurations. Acta Astronaut, 2005, 56: 729-736
- 4 Fujii K, Ishimoto S. Research activities to realize advanced space transportation system. 15th AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. AIAA 2008-2575, 2008. 1-7
- 5 Cao Z J. Recent progress on Reusable Launch Vehicle abroad (in Chinese). Space Int, 2005, 10: 20-25 [曹志杰. 国外可重复使用运载器近期进展. 国际太空, 2005, 10: 20-25]
- 6 Musk E. Why the US can beat China: The facts about SpaceX costs. 2012. www.spaceref.com/news/viewpr.html?pid=33457
- 7 Guo L L, Liu Z S, Zhu W Z, et al. Method options and conceptual design of a future fully reusable rocket (in Chinese). Missiles Space Vehicles, 1998, 6: 1-6 [果琳丽, 刘竹生, 朱维增, 等. 未来运载火箭重复使用的途径选择及方案设想. 导弹与航天运载技术, 1998, 6: 1-6]
- 8 Cai M R. Recent progress on Reusable Launch Vehicle (in Chinese). Missiles Space Vehicles, 1999, (2): 56-61 [才满瑞. 重复使用运载器的近期发展. 导弹与航天运载技术, 1999, (2): 56-61]
- 9 Zhi H. Reflections on the retirement of the Space Shuttle (in Chinese). Space Int, 2011, (9): 30-36 [志豪. 对航天飞机退役的反思. 国际太空, 2011, (9): 30-36]
- 10 SpaceX. Falcon 9 Launch Vehicle Payload User'S Guide. Hawthorne: Space Exploration Technologies Corporation, 2009
- 11 Ding W H, Kang K H. Falcon 9 launch vehicle and its application (in Chinese). In: The 23rd academy meeting of Space exploration professional committee of China space science society, Beijing. 2010 [丁文华, 康开华. 猎鹰9运载火箭及其应用. 第二十三届全国空间探测学术交流会, 北京. 2010]
- 12 Meyerson R E, Taylor A P. A status report on the development of the Kistler Aerospace K-1 reusable launch vehicle. AIAA 2001-2069, 2001
- 13 Shen Z W. Recovery system design of the K-1 reusable launch vehicle (in Chinese). Spacecraft Recovery Remote Sensing, 2000, 21: 6-11 [沈祖炜. 可重复使用运载器 K-1 的回收系统设计概况. 航天返回与遥感, 2000, 21: 6-11]

- 14 Feng S W, Ma Z H, Wu Y T, et al. Survey and review on key technologies of reusable launch vehicle abroad (in Chinese). *Misiles Space Vehicles*, 2014, (5): 82–86 [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. *导弹与航天运载技术*, 2014, (5): 82–86]
- 15 Wu G T. The TPS of Space Shuttle Columbia (in Chinese). *Space Int*, 2003, (6): 26–28 [吴国庭. 哥伦比亚号防热系统概貌. *国际太空*, 2003, (6): 26–28]
- 16 Li Y. Research on high-temperature ablation resistant repair agents for TPS of spacecraft (in Chinese). Dissertation for Master Degree. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011 [李阳. 航天器 TPS 用耐高温烧蚀修复剂研究. 硕士学位论文. 南京: 南京航空航天大学, 2011]
- 17 Wu X H, Lu X H, Li T, et al. A review of researches of light-weight ablators (in Chinese). *Spacecraft Envir Eng*, 2011, 28: 313–317 [吴晓宏, 路小龙, 李涛, 等. 轻质烧蚀材料研究综述. *航天器环境工程*, 2011, 28: 313–317]
- 18 Jue F, Kuck F. Space shuttle main engine (SSME) options for the future shuttle. AIAA-2002-3758, 2002
- 19 Wiseman M W, Guo T H. An investigation of life extending control techniques for gas turbine engines. 2001 Proceedings of the American Control Conference, 2001. 176–181
- 20 Li S Y, Chang X Q, Zhou J, et al. Liquid rocket engine system of the reusable spacecraft (in Chinese). The Academy Meeting of Reusable Orbital Maneuver Flight Technology, Beijing. 2011 [李淑艳, 常小庆, 周军, 等. 可重复使用航天器液体火箭动力系统技术方案探讨. 可重复使用轨道机动飞行技术研讨会, 北京. 2011]
- 21 Ding F N, Zhang E Z, Zhang X P, et al. Propulsion system design of China reusable launch vehicle (in Chinese). *J Rocket Propulsion*, 2004, 30: 13–18 [丁丰年, 张恩昭, 张小平, 等. 论我国重复使用运载器推进系统方案. *火箭推进*, 2004, 30: 13–18]
- 22 Wu J J, Wei P F. Intelligent damage-mitigating control techniques for reusable liquid-propellant rocket engines (in Chinese). *J Rocket Propulsion*, 2005, 31: 8–14 [吴建军, 魏鹏飞. 可重复使用液体火箭发动机智能减损控制技术. *火箭推进*, 2005, 31: 8–14]
- 23 Yang E P, Zhang Z P, Cui D J. Study on Fault Monitoring and Diagnosis Techniques for Thrust Chamber and Turbo pump Systems of Liquid Rocket Engines (in Chinese). *J Beijing Univ Aeron Astron*, 1999, 25: 619–622 [杨尔辅, 张振鹏, 崔定军. 液发推力室和涡轮泵故障检测与诊断技术研究. *北京航空航天大学学报*, 1999, 25: 619–622]
- 24 Xie G J. Research on real-time fault detection technology and system for liquid rocket engine turbo pump (in Chinese). Dissertation for Doctor Degree. Changsha: National University of Defense technology Press, 2006 [谢光军. 液体火箭发动机涡轮泵实时故障检测技术及系统研究. 博士学位论文. 长沙: 国防科学技术大学, 2006]
- 25 Han P X. Research on the navigation guidance and control of reusable boost vehicle (in Chinese). Dissertation for Doctor Degree. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011 [韩鹏鑫. 可重复使用助推器的导航、制导与控制研究. 博士学位论文. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011]
- 26 Tang Y H, Yu M L, Yang Y, et al. Second generation reusable launch vehicle and its reentry guidance technologies (in Chinese). *Misiles Space Vehicles*, 2010, (1): 26–31 [汤一华, 余梦伦, 杨勇, 等. 第二代可重复使用运载器及其再入制导技术. *导弹与航天运载技术*, 2010, (1): 26–31]
- 27 Wu W R, Wang D Y, Li J, et al. Research of the pinpoint landing navigation method in the hazard avoidance phase of lunar landing (in Chinese). *Sci Sin Inf*, 2011, 41: 1054–1063 [吴伟仁, 王大珩, 李骥, 等. 月球软着陆避障段定点着陆导航方法研究. *中国科学: 信息科学*, 2011, 41: 1054–1063]
- 28 Huang X Y, Huang J C, Li J, et al. Research and test of autonomous navigation method at approach phase based on image measurement data (in Chinese). *Sci Sin Technol*, 2013, 43: 748–754 [黄翔宇, 黄江川, 李骥, 等. 基于图像测量数据的目标接近段自主导航方法研究与试验. *中国科学: 技术科学*, 2013, 43: 748–754]
- 29 Liu B, Di K C, Wang B F, et al. Positioning and precision validation of Chang'E-3 Lander based on multiple LRO NAC images (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2015, 60: 2750–2757 [刘斌, 邸凯昌, 王保丰, 等. 基于 LRO NAC 影像的嫦娥三号着陆点高精度定位与精度验证. *科学通报*, 2015, 60: 2750–2757]
- 30 Acikmese B, Carson J M, Blackmore L. Lossless convexification of nonconvex control bound and pointing constraints of soft landing optimal control problem. *IEEE Trans Control Syst Technol*, 2013, 21: 2104–2113
- 31 Raftery M, Fox T. The crew exploration vehicle (CEV) and the next generation of human spaceflight. *Acta Astron*, 2007, 61: 185–192

Recent progress on development trend and key technologies of vertical take-off vertical landing reusable launch vehicle

XU DaFu¹, ZHANG Zhe², WU Ke³, LI HongBing¹, LIN JianFeng¹, ZHANG XiaoDong¹ & GUO XiaoXi³

¹ Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China;

² Lunar Exploration and Aerospace Engineering Center, Beijing 100037, China;

³ Beijing Space Science and Technology Information Research Institute, Beijing 100086, China

As the Reusable Launch Vehicle can reduce the launching cost, and improve the ability of Operationally Responsive Space (ORS), many aerospace powers in the world consider the Reusable Launch Vehicle as a main development tendency of space transportation system. Recently, Space Exploration Technologies Corporation (SpaceX), as the spokesman of private aerospace corporations, has attracted all the world's attention to the Reusable Launch Vehicle. SpaceX has been developing technologies for rockets' fully and rapid reusability, and several recovery tests have been conducted on technology-demonstrators and post-mission controlled-descent tests on Falcon 9 rockets' first stages, both touchdown on the ocean platform and the land. On 22 December 2015, a Falcon 9 FT rocket of SpaceX, carrying 11 Orbcomm communications satellites, lifted off from Cape Canaveral. After cutoff and stage-separation, the Falcon 9's first stage flight back into the atmosphere and pulled off a powered landing on Landing Zone 1, which is about 10 km far away from the Launch Site of SLC-40, settling to a smooth tail-first touchdown, making it a significant space "first". After already celebrated a successful booster landing, SpaceX had decided to attempt a landing at sea on this flight despite available margins for a return to land. This decision was prompted by the need to master the landing sequence for sea-based recoveries which will be needed for about half of Falcon 9's flights when lifting heavy satellites to high-energy orbits. On 8 April 2016, SpaceX's Falcon 9 FT rocket, carrying CRS-8 Dragon cargo, lifted off from Cape Canaveral. The Falcon 9's first stage has accomplished the first ever successful returning rocket on the Autonomous Spaceport Drone Ship (ASDS). This is considered a landmark accomplishment on the road to economical interplanetary and asteroid-to-planet space travel because it enables expensive launch vehicles to be reused. In this paper, based on the experiments of Falcon 9, and analyzing the main projects of the Reusable Launch Vehicle abroad in the past 60 years, the critical technologies will be researched and the results will provide references for the research of new type of space transportation systems.

reusable launch vehicle (RLV), vertical take-off vertical landing, precision landing, development trend, key technologies

doi: 10.1360/N972016-00537