

# 商业可重复使用火箭 关键技术与创新

■ 北京中科宇航技术有限公司 杨浩亮  
中国科学院力学研究所 杨毅强  
北京中科宇航技术有限公司 廉洁 邵旭东 王瑀宁

近8年来,美国太空探索技术(SpaceX)公司的“猎鹰”9火箭凭借着超高的运载效率和可重复使用技术,在世界运载领域独树一帜。随着航天产业的发展,研制低成本、高可靠、使用方便灵活的可重复使用运载器是下一阶段航天技术发展的重要方向之一,而突破可重复使用关键技术是发展可重复使用火箭的前提条件。本文将就目前典型可重复使用火箭的概况进行介绍,并论述可回收火箭的关键技术。

### 一、美国典型可重复使用火箭进展概况

各国和相关航天企业深刻意识到高效的运载效率和可重复使用技术已成为下一代火箭的重要研制目标。在可重复使用火箭方面，典型代表还是美国的“猎鹰”（Falcon）系列、“人族”（Terran）系列和“大猎鹰火箭”（BFR）系列。

“猎鹰”9是SpaceX公司的主力型运载火箭，其颠覆式的一子级和整流罩回收在全球引领了运载火箭研制模式的改变。截止到目前，“猎鹰”9已完成180多次发射，复用火箭发射也已超过10次。火箭的箭体直径为3.66m，高度为70m，火箭的总质量为550t，低地球轨道（LEO）的运载能力为22.8t，地球同步转移轨道（GTO）运载能力为8.3t，精细化的设计可使其一级的结构效率达到0.95，二级结构效率达到0.97。一级发动机“梅林”1D推力可达845kN，真空推力914kN，推重比可高达160:1，每千克有效载荷发射费用约为0.14万美元。2022年10月6日，SpaceX的两枚“猎鹰”9堪称真正的背靠背发射，发射间隔仅为7h10min，一举创下自家发射最短时间间隔纪录。

虽然SpaceX在复用一级助推器和整流罩情况下，单次发射成本降到了1500万美元，但在2022年出现了相对有竞争力的对手，那就是美国相对论空间公司开发的“人族”系列运载火箭。其即将首飞的“人族”1运载火箭高约33.5m，能将最大1250kg的有效载荷发射至185km的LEO，将900kg的标称有效载荷发射至500km

的太阳同步轨道（SSO）。发动机采用燃气发生器循环、自增压和燃气火炬式点火。每台发动机均由液氧和甲烷推进剂提供动力。一子级Aeon 1发动机推力可达110kN，二子级Aeon Vac发动机推力可达132kN。目前Aeon发动机完成了300多次点火试验。其可重复使用构型“人族”R火箭，配备了7台3D打印的Aeon R火箭发动机，每台发动机的推力为135kN，“人族”R将能向近地轨道发射20t以上的有效载荷。

目前，SpaceX公司正在研制BFR超级火箭，高度约为81m，直径12m，安装42台“猛禽”发动机，起飞质量超过8000t。BFR的开发测试理念是“测试、飞行、失败、修复、重复”，原型开发测试从2018年12月开始，至今已经建造并测试了20多个原型。其“猛禽”发动机是全流量循环发动机，使用液态甲烷+液氧，具有高可靠性和低成本的优势，推力面积比最高，1.3m喷管直径能提供2000kN以上的推力，且造价低于220万美元，是完全为重复使用优化的发动机。截至2022年11月，SpaceX公司的“星舰”S24和“超重型”B7终于再次“合体”。“合体”之后，首先是要对发射塔的快速断开（QD）接口进行测试，然后就是S24加注液氮的低温测试、燃料加注测试，最后就是静态点火。

### 二、可回收火箭关键技术

与传统的运载火箭相比，可重复使用火箭主要有以下关键技术需要攻克。

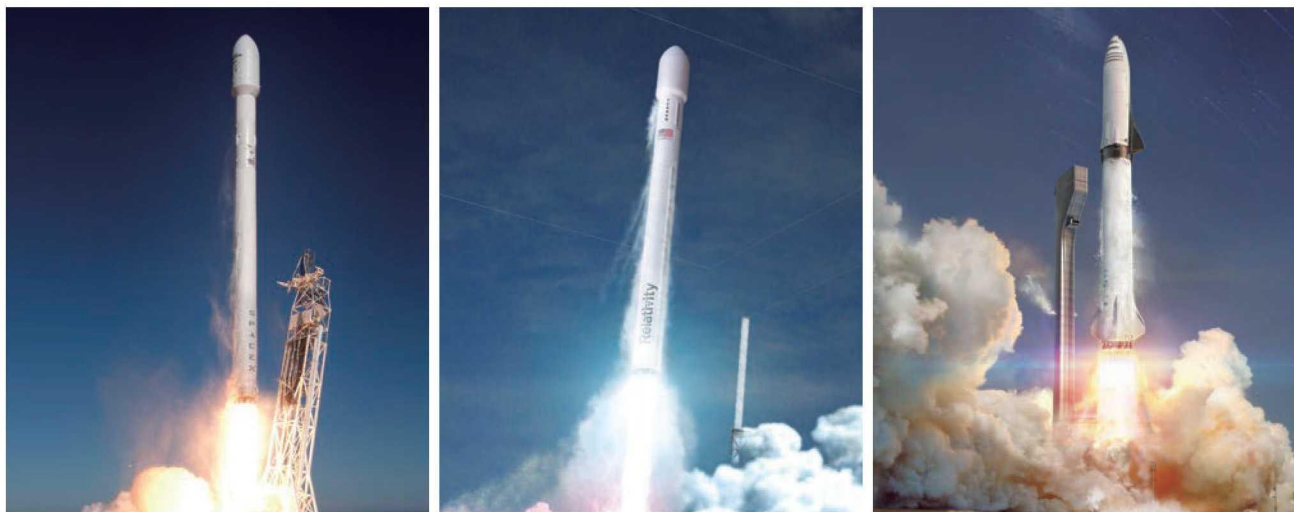


图1 “猎鹰”9、“人族”和“大猎鹰火箭”（从左到右）



### (一)可重复使用总体设计技术

全流程不仅涉及发射上升段，还涉及到回收返回段。返回过程涉及到总体、弹道、气动、控制、载荷、防热、结构等多个专业，各专业之间耦合强、相互约束，设计约束更严格。对于带控制子级回收过程，需要开展控制方案设计和一子级的辅助动力装置设计，如栅格舵。从趋势上看，总体设计还需考虑全寿命周期的系统融合设计，采用智能技术，提高火箭的智能化水平，有利于重复使用运载火箭结构效率的提升。同时，运载火箭在回收飞行过程中会承受复杂多变的力、热环境，特别是在一子级着陆、二子级再入大气层中都会经受严酷的飞行环境条件，精确辨识与预示从飞行过程到返回过程中的力、热环境对于加深可回收运载火箭的力学环境认识具有重要意义。

### (二)可重复使用火箭发动机技术

返回时发动机多次起动需克服失重、超重、高动压等复杂飞行环境带来的各种内、外部干扰，发动机多次起动及推力精确调节技术研究是实现火箭回收的基础。运载能力由发动机最大推力保证，为确保火箭平稳返回及着陆，需降低发动机推力。解决措施是采用发动机多机并联技术，起飞时全部发动机额定工况工作，返回时关闭部分发动机。在有限的箭体空间内进行多机并联，涉及箭体、结构、机构运动、热防护等多个专业协同设计，还需全面考虑着陆冲击、防火、返回后维护、检修等全寿命周期涉及的技术问题。多机并联总体布局优化可提高发动机推质比，有利于重复使用运载能力提高，降低维护、检修时间和费用。

回收落地关键时刻，需要发动机快速变推力关机，

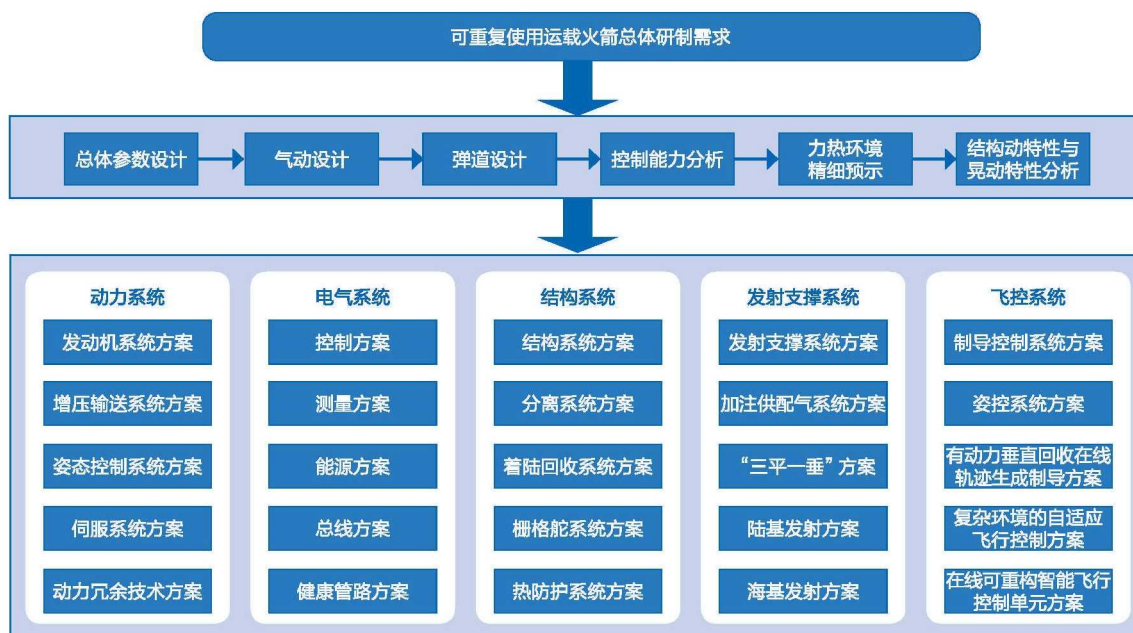


图2 可重复使用总体设计技术



(1)“猎鹰”9尾段发动机多机并联



(2)“人族”1尾段发动机多机并联

图3 发动机多机并联

以减小落地瞬间发动机后效冲量对箭体的冲击和扰动。“猎鹰”9完美实现可靠回收的关键技术之一就是采用了面关机针栓式喷注器技术。采用面关机针栓式喷注器可实现发动机起动过程氧燃推进剂零充填使氧燃推进剂完全同步进入燃烧室,避免氧燃充填时序偏差对发动机起动冲击影响,提高发动机起动工作可靠性;同时,面关机可实现发动机关机过程零容腔排空,显著提高关机响应特性,实现快速关机减小后效冲量,提高火箭回收工作可靠性;采用针栓式喷注器,发动机可进行大范围变工况,能够更好地适应火箭回收工作。

多次点火可重复使用发动机,在整个寿命周期内均需要进行不同级别的故障诊断和健康评估工作,主要研究内容包括:开展发动机试车及火箭飞行信号的速变信号先进分析技术,实现发动机典型系统的异常检测和故障判别;开展发动机速变与缓变信号的多物理场信息融合技术,有效减小故障误诊率和漏诊率,获取可重复使用发动机试车及火箭回收后的典型异常判别、故障定位和可重复使用决策;开展飞行试验阶段的发动机健康状态评判应用研究,能够基于遥测信号准确有效判别发动机全系统的健康状态;开展液体火箭发动机速变信号及缓变信号融合的健康评估软件开发,能够为发动机试车/火箭飞行后故障诊断及健康分析提供方法。

### (三)可重复使用控制制导关键技术

垂直起降运载器再入返回过程中经历多个飞行阶段,全程高精度导航系统的设计需要综合考虑导航精度、观测条件、安装位置及大气和发动机喷气尾焰扰动等使用环境限制,可采用天文导航、视觉辅助、激光雷达及卫星导航地面差分站相结合。在设计的时候,按



图4 某型商业火箭发动机二次启动60%节流工况试车

照返回飞行速度小于500m/s时,定位精度优于0.2m。

运载器再入落点精度要求高,需要针对伺服动态、操纵面特性等关键要素进行核心参数设计,上升段需要可在线更改关机条件,一定范围内变更着陆场信息,并结合推进剂约束实时评估可达区域、实现精确安全着陆。针对气动影响的模型补偿序列凸规划方法开展研究,并使其在大气层内火箭轨迹自主规划上开展应用,设计大气层内火箭动力学中非线性项的序列补偿策略,使得能够将其转化为凸规划问题。通过研究大气层内过程约束的序列凸化方法,能够较好地处理非凸过程约束,并且不会降低轨迹优化求解的计算速度。在此基础上,理论分析该序列凸规划方法的收敛性,保证该方法能够收敛原问题的局部最优解。设计建议采用不少于3个备选着陆场的动态重规划能力,在线计算时间不大于1.5s。

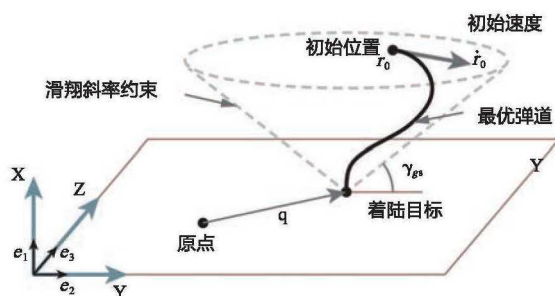


图5 动力下降制导问题的最小着陆偏差约束曲面

### (四)结构轻质化技术

运载能力取决于结构效率,轻质化的结构设计是提升结构效率的重要途径。“猎鹰”9虽为一款二级火箭,但其运载能力非常可观,对应其超高的结构系数:一级0.95、二级0.97。结构轻质化的前提条件是火箭飞行和返回过程中力/热环境的精细化辨识,针对重复使用,需兼顾结构材料的强度、疲劳、损伤容限。结构的能力提升则取决于轻质化比强度高材料的应用、先进制造工艺的应用。在材料结构应用方面,二级结构、常温贮箱采用碳纤维复合材料结构。

特殊工艺和复杂结构则可采用3D打印技术,减少零件和工艺非必要结构,例如“人族”火箭的结构和发动机使用专门的3D打印合金制造,与传统火箭相比,部件数量减少了99%。3D打印技术还通过最大限度地减少触控点和前置时间来提高系统整体的可靠性和运



图6 “猎鹰”9 复合材料级间段

营成本，例如“电子”火箭的发动机所有主要部件都是3D打印的，包括其发动机腔室、泵、主推进剂阀和喷射器等。

### (五) 一体化综合电子技术

传统的航天电子系统按控制系统、测量系统、推进剂利用系统、总体网系统等开展独立系统研制，存在计算、供电、通信等资源重复，电子设备功能单一，CPU计算资源利用率低等问题。因此，需要统筹考虑飞行控制、测量、测发控等功能需求，突破传统的设计约束，解决各功能存在交叉重叠等现象。技术涉及系统功能划分、系统架构、系统布局、系统集成、系统传输、接口规划与设计等众多方面，主要通过基于标准架构的VPX 6U导冷标准的综合电子技术，实现分散功能的集成化和组合化，简化系统设备间电气接口及连接关系；采用系统总线和高速机内总线实现信息一体化，全面提升运载火箭数字化水平。

### (六) 缓冲着陆技术

火箭着陆过程中会受到冲击载荷，其内部缓冲器

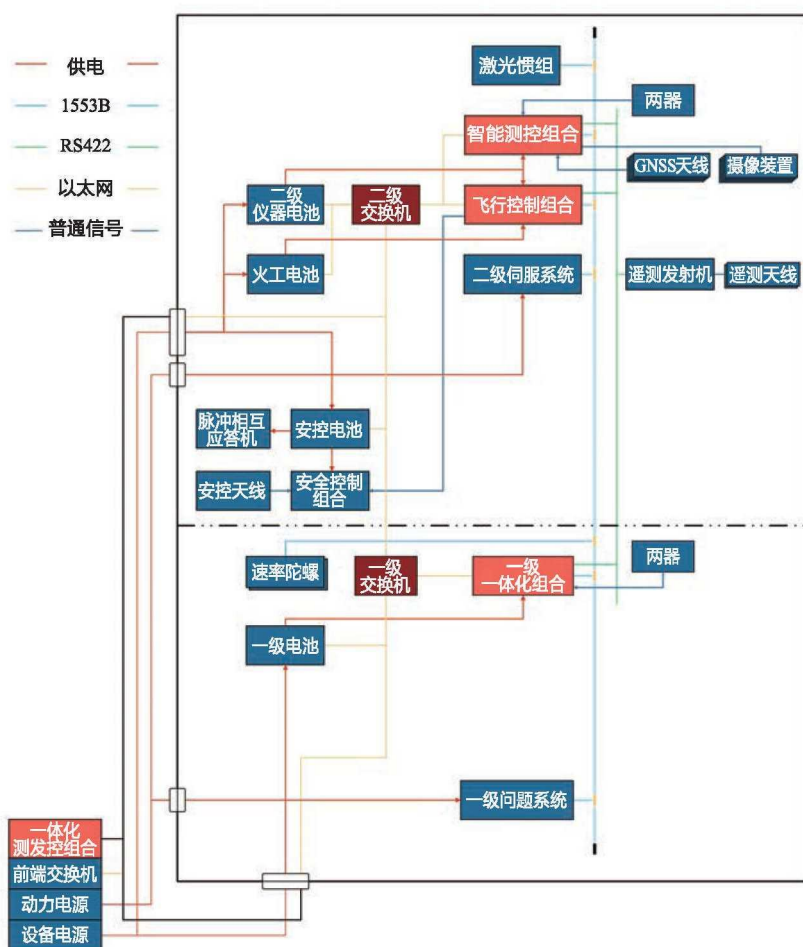


图7 一体化综合电子技术架构图



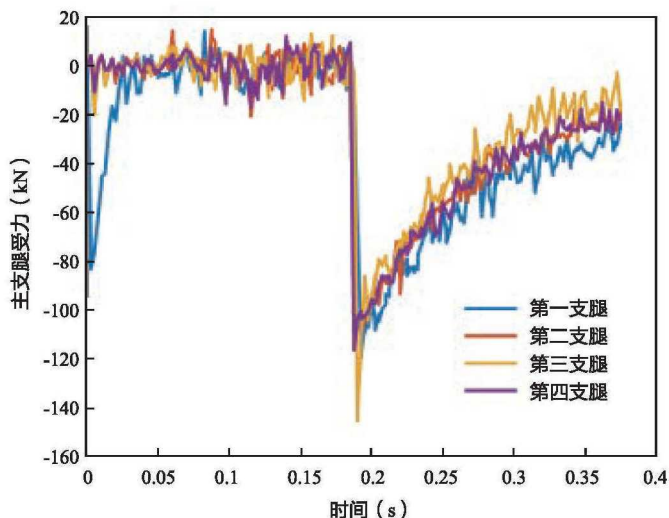
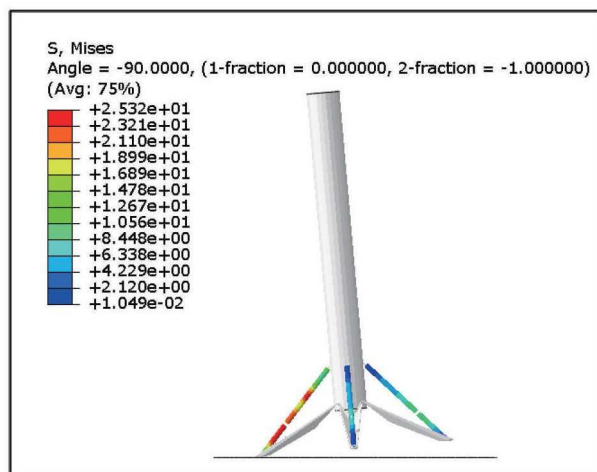


图8 某型商业运载火箭缓冲结构回收仿真



图9 “猎鹰”9火箭发射 / 回收全过程

设计是着陆支腿的关键组成部分，用于吸收火箭着陆期间的动能。其次，支腿具有足够的刚度和强度，保证碰撞过程中不被损坏，并经过简单检测维修后能够重复使用。

着陆支腿一般由着陆腿、缓冲装置、展开锁定机构及足垫等组成。火箭着陆支撑机构的作用是：能够在火箭起飞上升阶段收拢、压紧，返回软着陆前展开、锁定，能够缓冲着陆瞬间的冲击力，碰撞时能够调整适应火箭姿态，以防侧翻，着陆完成后承担火箭的重量。运载火箭发射飞行过程中，着陆支腿收拢压紧于火箭箭身上，并设计成流线型气动外壳以降低空气阻力；在着陆时，利用高压氦气气动系统打开4个着陆支架。它的辅助着陆腿由碳纤维材料和铝合金蜂窝板制

成，主着陆腿内装有液压缓冲器，用于减缓着落瞬间的冲击力，提高着陆稳定性，从而在回收着陆平台上实现软着陆。

### 三、结论

目前，世界上只有SpaceX公司的商业可回收火箭实现了成功入轨，并引领着运载前沿技术的发展。对于我国商业运载而言，应直面差距，充分辨识可重复使用火箭的关键技术，不断深入学习，推动新的技术创新和尝试，全面突破可重复使用技术，向着航天强国不断迈进。中国航天