

可重复使用火箭技术取得重大突破

我国首次实现海上网系回收运载火箭

日前,长征十号乙运载火箭在海南商业航天发射场发射升空,将卫星顺利送入预定轨道,火箭一二级分离约6分钟后,一子级垂直返回,在海上回收平台通过网系捕获方式成功回收,发射及一子级回收任务取得圆满成功。此次任务创下三项历史性纪录:中国首次成功实施运载火箭一子级可控回收、全球首次实现运载火箭网系回收、长征十号乙成为我国首型成功实施回收的重复使用运载火箭。这一突破标志着我国在可重复使用火箭技术领域取得历史性突破,中国航天正式迈入“可回收时代”。

>> 为什么要回收火箭

火箭从太空返回地面进行回收,需要从超过100公里的高度下落,温度、气压、速度不断变化,火箭要保持竖直、不能翻跟头,中间发动机还要择机点火,精准地把速度降到最低,整个过程不比把火箭送上天简单。既然技术难度这么高,我们为什么非要回收火箭呢?

长期以来,运载火箭都是按照“一次使用”的模式设计的。火箭在发射过程中,需要依靠一级、二级甚至多级发动机产生巨大推力,将卫星、飞船等有效载荷送入太空。当火箭完成任务后,大部分箭体结构便会按照预定轨迹坠落,无法再次使用。这种方式虽然技术成熟,但也存在明显不足。

首先,火箭制造成本极高。现代大型运载火箭包含大量高性能发动机、复合材料结构以及复杂电子设备,造价区间为数千万元至数亿元,根据火箭公司公开的资料,火箭的一级箭体成本大概占总成本的60%至70%。如果火箭只能执行一次任务,每一次发射都需要重新制造大量关键部件,就意味着大量昂贵设备被消耗掉。中国商业航天想要在国际市场有足够的竞争力,就必须把“一次性耗材”变成“可循环使用零部件”。

其次,人类太空探索需求持续增长。若每次发射均使用全新火箭,将承受高昂成本。2025年底,中国一次性向国际电信联盟

提交了20.3万颗卫星的频轨资源申请,根源在于轨道与频谱是太空经济核心战略资源,而该机构实行“先申报先使用”原则。中国部署的国网、千帆星座等低轨卫星组网规模也有2万多颗,但发射的卫星总量并不多,6月公开资料显示:千帆在轨卫星为200颗。按计划2030年需完成万星组网,卫星发射缺口巨大。即便我国已实现“一箭18星、20星”,仍难以填补缺口。在此背景下,可重复使用火箭成为全球航天发展主流方向,该类火箭完成任务后可控返回地面,检修翻新后复用,能大幅降低航天发射成本、提升发射效率,如同可多次运营的民航客机。

>> 什么是网系回收

海上网系回收是我国科研团队自主研发的创新型火箭回收技术,属于垂直起降回收的技术分支,也是全球第三条成熟的火箭回收技术路线。该技术秉持“简化箭上,箭地协同”的核心设计理念,将缓冲、捕获的核心功能从箭体转移至海上回收平台,通过箭体与平台的高度协同完成回收作业。

从原理来看,网系回收不再为火箭配备沉重的着陆腿结构,仅在箭体级间段设置轻量化的“人”字形专用挂钩,原理和舰载机在航母上着舰道理类似;同时在海上回收平台上搭建高塔架,布设“井”字形的高强度阻拦索系统。当火箭返回至回收平台上空

时,平台上的阻拦索对返回中的火箭一级进行接收和固定,最终将箭体稳稳悬挂固定在网系中央。网系回收为全球重复使用火箭技术发展提供了全新的中国方案。

全球范围内,火箭回收技术已演化出多条技术路线,不同路线各有其技术局限与适配场景。伞降回收结构简单但落点精度低,箭体易受环境腐蚀,复用价值有限,仅适合小型部件;水平回收着陆平稳但需要配备机翼、起落架等复杂结构,自重与维护成本高,未成为大型火箭的主流选择。垂直回收为当下主流,着陆腿垂直着陆方案技术成熟,但自带着陆腿会增加箭体重量,压缩

运载能力;塔架机械臂捕获方案周转效率高,但对火箭悬停控制精度要求达到极致,工程落地难度大。

我国结合自身技术基础与滨海发射场景,选用海上网系回收路线,综合优势突出:一是箭体结构轻量化,挂钩重量不足着陆腿十分之一,使火箭复用状态下的运力折损仅约16%,远优于着陆腿方案的23%至40%;二是落点容错窗口达±50米,制导控制难度与回收风险更低;三是柔性捕获缓冲撞击,减少箭体损伤,简化检修;四是抗风浪性能优异,4级海况仍可作业,适配海南等滨海发射场,减少气象条件制约。

>> 火箭如何实现网系回收

从一二级分离到成功挂网,火箭一子级要在约6分钟完成一套完整的返回动作,全程实现全自主控制,不用人工干预,整个过程堪称一场极限“空中体操”。分离之后,箭体依靠惯性继续向上飞行,首先进入滑行调姿阶段,在空中完成姿态调整,同时箭体上的栅格舵逐步展开,像方向盘一样精准控制箭体姿态,为后续减速与返回做好准备。

完成姿态调整后,火箭进入动力减速阶段,发动机二次启动产生反推力,快速抵消箭体的高速动能。这一阶段需要在极短时间内完成推进剂沉底管理、贮箱增压、发动机预冷等一系列复杂准备,保障发动机在高空环境下

能够稳定点火工作。一子级的7台液发100系列液氧煤油发动机中,5台支持二次启动,返回动力减速段先启动2台发动机进行初减速,为后续的气动减速和精准着陆打下基础。

随着高度降低,火箭进入气动减速阶段,箭体上的栅格舵打开,如同张开一对小翅膀,帮助火箭调整姿态。依靠栅格舵产生的气动阻力进一步降低飞行速度,同时箭体底部要承受大气层带来的严苛气动加热与复杂气动载荷,发动机推力脉动、跨声速气动载荷、再入减速等环节都会产生复杂的振动激励,考验着箭体的防热设计与结构强度,也对箭上电子设备的环境适应性提出了极

高要求。

抵达低空区域后,回收进入最关键的着陆捕获阶段。发动机调整推力实现节流控速,着陆段再启动3台发动机完成反推减速,箭体精准调整飞行位置,逐步对准回收平台的网系靶心。当箭体下降至索网高度时,箭上的“人”字形挂钩与平台上的阻拦索精准挂合,索网系统通过缓冲结构吸收箭体剩余的下落动能与势能,最终让箭体平稳悬停在网系中央,完成整个回收过程。整个300余秒的回收流程环环相扣,每一个动作都经过精密设计,任何一个环节出现偏差,都可能导致最终的回收失败。



海上回收平台通过网系捕获方式成功回收长征十号乙运载火箭一子级。

>> 网系回收背后的关键技术

高精度制导与导航技术。火箭返回过程中,必须准确知道自身位置、速度和姿态,并根据实时情况调整飞行轨迹。这需要综合利用惯性导航系统、卫星导航系统以及多种传感器,实现厘米级甚至更高精度的控制。火箭不仅要“飞回来”,还要准确进入回收平台上方的指定区域。

可重复启动发动机技术。返回阶段需要发动机再次点火,对火箭进行减速和轨迹修正。因此,火箭发动机必须具备多次启动能力,并能够在极端环境下保持稳定工作。发动机不仅要承受发射阶段的高温高压,还要满足重复使用要求,这是重复使用火箭发展的核心技术之一。

智能控制与自主飞行技术。火箭返回过程速度快、环境变化复杂,无法完全依靠地面人员实时操作。因此,需要先进的软件系统进行自主判断和控制。智能控制系统能够根据飞行状态实时调整发动机推力、箭体姿态和运动轨迹,提高回收成功率。

高强度轻量化材料技术。

重复使用火箭需要经历多次飞行循环,因此箭体材料必须同时满足轻量化、高强度和耐高温要求。新型复合材料、耐热材料以及先进制造工艺的发展,为火箭多次使用提供了重要保障。

海上回收平台与捕获系统技术。网系回收的核心装备就是海上捕获平台。平台不仅要保持稳定,还需要具备快速响应能力。捕获网需要精准判断火箭进入时机,并通过缓冲、固定等机构吸收冲击力,确保火箭安全回收。这一系统实际上融合了机械工程、自动控制和材料科学等多个领域技术。

长征十号乙运载火箭完成网系回收,意味着我国在重复使用火箭领域迈出了重要一步。从发射升空,到精准返回,再到被回收平台捕获,火箭完成的不只是一次飞行任务,更是航天技术发展理念的一次转变。网系回收技术的突破,将推动我国商业航天、卫星组网以及深空探索向更高效率、更低成本方向发展,为人类更加频繁、更便捷地进入太空提供新的可能。