

11月18日,美国太空探索技术公司新一代重型运载火箭“星舟”实施第二次试验发射,火箭升空后一二级成功分离,但随后助推器和飞船先后发生爆炸,未能按计划实现回收。此前,“双曲线二号”于11月2日完成了我国首次液体火箭全尺寸一子级垂直起降与复用飞行试验,“天龙三号”等可回收复用火箭的首飞计划也陆续公布。可回收复用火箭需要解决哪些技术难题?纵观国内外型号,有望选用哪些设计方案?它们各自具备怎样的优缺点呢?

回收复用 破解难题

火箭回收复用可以显著降低综合成本,受到了国内外航天科研人员青睐。不过,这个目标对于火箭发展思路转变和技术手段升级都提出了更高的要求,需解决一系列难题。

可回收复用火箭的构型倾向于简化设计,大致可分为两类:第一级(起飞级)回收以及第一级、第二级(轨道级)全回收。其中,火箭第一级的关机速度约为2000米/秒~3000米/秒,承受气动加热相对没那么严重,而且自身结构尺寸较大,高价值元器件较多,实现回收复用的代价较小,有望带来更大的收益。而火箭第二级高速入轨的过程中,气动加热剧烈,受到较严苛的质量限制,实现回收复用的难度和代价要远远大于第一级。因此,各方研究的火箭回收复用方案多数针对第一级。

当然,火箭第一级回收复用仍不是简单的工作。首先需要明确,火箭回收复用不是目的,而是节约成本的手段,必然会付出损失运力的代价,因此科研人员需要认真权衡设计方案的效费比,满足一定的效益标准,并且尽量缩短火箭复用发射周期。

其次,火箭回收复用对于构型、动力系统等都提出了更高的要求。比如,为了降低复杂性,大多数可回收复用火箭选择两级“光杆”设计,第一级将多台发动机集成到一个模块中,希望简化制造、组装过程,因此对发动机的可包络性和承力结构提出了新要求。猎鹰9火箭第一级的8台发动机环绕1台布局就属于新尝试。

再比如,传统火箭第一级对质量不太敏感,而可回收复用火箭为了获得较大收益,要求第一级进行较大幅度的减重。受限于第一级的返回速度限制,火箭第二级需要提供的速度增量更多,因此必须同步提高性能,为此增加的成本不宜超过第一级回收复用的收益。

最后,火箭第一级有必要在反推力发动机、降落伞等技术手段辅助下精确返回预定落区,高精度导航必不可少,克服气动加热的耐烧蚀筒体材料不可或缺,对箭载计算机、推进剂分配系统等性能也提出了更高的要求。



我国“双曲线二号”进行一子级回收试验

三路并进 各有优劣

当前,国内外在火箭第一级回收方案上主要有3种技术途径:降落伞回收、滑翔回收和垂直起降回收。三者各有优劣,具体选择哪种方式,科研人员需根据技术积累和追求目标而定。

事实上,降落伞回收是最传统的火箭回收复用方案。火箭第一级分离后,通过气动加热、振动等重重考验,展开降落伞减速,最终或在海上溅落,或借助着陆腿和气囊,安稳落地,或由直升机从空中抓取。美国火箭实验室公司的电子号火箭是商业化应用降落伞回收方案的典型案例。

该方案的优点是系统简单,火箭运力损失较小。缺点是开伞后火箭第一级控制能力较差,导致着陆地区域的随机性较大。此外,海上溅落需克服盐雾腐蚀难题,陆上着陆需配备质量、冲击力较大的着陆腿,直升机空中抓取则极大限制了火箭尺寸,导致大中型火箭难以采用该方案。

此前,该方案多用于回收固体火箭和航天飞机助推器。电子号火箭得益于碳纤维箭体和电泵发动机,质量控制较好,受海水影响相对较小,因此使用了降落伞回收方案。

带翼火箭回收在20世纪90年代一度成为热门,被视为航天飞机或空天飞机的过渡方案,性能优势明显。但该方案要求发射国家拥有广袤的国土,以便火箭返回机场,综合成本较高,而增装的可折叠机翼质量较大,难免会给火箭结构研制带来挑战,可靠性面临考验。另外,该方案需同时兼顾传统火箭和飞机两种运行状态,导致系统复杂,始终未成为火箭主流回收方式。俄罗斯曾经提出过多种类似的火箭滑翔回收方案,但均未实用化。



▲美国电子号火箭第一级利用降落伞回收

◀“星舟”火箭



“脑洞”大开 追求极限

为了追求更高的性能和更大的收益,一些航天企业提出了更加激进的火箭两级全复用方案。考虑到轨道返回速度高达25马赫,使用类似回收火箭第一级的直接再入模式显然是行不通的,必须通过增设非烧蚀隔热结构,保障火箭第二级安全地高速再入。

其实,科研人员设计火箭第二级回收复用方案时,可以适当参考航天飞机和空天飞行器的经验教训。航天飞机累计134次轨道再入,133次成功返回,但其使用的增强型碳-碳隔热瓦耐撞击性、可替换性差,成为致命缺陷。X-37B空天飞行器吸取教训,选择了整体增韧抗氧化复合材料,拥有更高的耐受温度和强度。

不过,火箭的大部分容积和质量用于推进剂,第二级返回时近似“空载”状态,如果配备机翼和大量防热结构,运载效率将难以接受。因此,一些小尺寸的火箭第二级可以考虑带翼滑翔返回方案,大多数新一代火箭必须应用新体制的耐热和返回结构。

火箭回收 各显神通



猎鹰火箭的助推器垂直着陆回收

关于甬莞高速 AK1045+740-AK1045+810 路基掏空处治工程 封闭施工实施交通管制的公告

因G1523甬莞高速AK1045+740-AK1045+810段因路基掏空沉降,路面出现严重开裂,严重危害路面通行运营安全,需封闭施工,根据《中华人民共和国道路交通安全法》及《中华人民共和国道路交通安全法实施条例》的有关规定,决定自2023年11月27日至2023年12月14日期间,对G1523甬莞高速AK1045+740-AK1045+810段实施交通管制,现就有关事项公告如下:

1、11月27日至12月14日,G1523甬莞高速上行漳州往广东方向AK1045+740-AK1045+810(A道)实施封闭,禁止车辆通行。管制期间,G1523甬莞高速上行漳州往广东方向的车辆从灵通山收费站下高速后调头上高速。

2、总体施工时间不变的情况下,因天气等原因需要对施工时间进行临时调整的,由漳州高速交警支队五大队和福建省高速公路集团有限公司漳州管理分公司共同决定,并通过福建交通广播FM100.7频道发布。

3、交通管控期间途经上述路段,车辆请减速慢行,自觉服从交通指挥人员的指挥并严格按照现场交通标志标线行驶,请社会各界和广大群众给予支持配合,自觉遵守执行,确保通行安全,施工造成不便敬请谅解。

福建省高速公路集团有限公司  
漳州管理分公司

福建省公安厅交警总队  
漳州高速公路支队五大队  
2023年11月22日