

# 火箭垂直回收 啥“姿势”最正确

## 收火箭,过程复杂挑战多

谈到火箭回收,谁能比 SpaceX 更有发言权?但自从它开始研究火箭回收技术以来,一直将其视为关乎公司竞争力的核心机密,从不申请专利,也不发表任何技术性论文。2016年,SpaceX 火箭着陆技术主管拉斯·布莱克默“破天荒”地发表一篇题为《太空火箭自主精确着陆》的综述性文章,才初步揭开了该公司火箭回收技术神秘面纱的一角。

布莱克默总结了火箭回收面临的四大挑战:首先是环境极端复杂,火箭从高空返回速度快,大气阻力和气动加热明显;其次是任务容错率低,返回必须一次成功,几乎没有二次尝试的机会;第三是着陆困难,需要设计可折叠着陆缓冲装置等复杂的辅助机构;最后是要克服风力等扰动精确到达回收场地。

火箭回收过程也比较复杂。一级火箭分离后,由于惯性会继续上升,到达一定高度时姿态控制系统使一级火箭倒转,重启发动机反推使其进入返回轨道;进入大气层后,一级火箭上安装的4个钛合金格栅将展开,以控制其飞行姿态,使其飞向着陆点;当接近着陆点一定距离时,发动机再次重启,着陆缓冲装置展开,进入末端着陆段。

## 技术多,哪个才是最核心

对火箭垂直回收而言,哪个技术最关键?

北京理工大学宇航学院特聘研究员刘新福告诉记者,在发动机推力可调及着陆缓冲机构等硬件条件的基础上,火箭回收最大的难点是,在着陆段怎样根据火箭的当前位置、速度、姿态等信息,在线实时计算出发动机推力的大小和方向,以实现安全精确着陆,其最核心的技术是着陆段的制导算法。

SpaceX 用了什么制导算法?布莱克默在文中披露,这个秘密武器叫做“凸优化”。刘新福介绍,2007年,NASA 下属的喷气推进实验室(JPL)在国际权威期刊《制导、控制与动力学杂志》上率先提出了基于凸优化的着陆段制导算法(简称凸优化制导算法)。后来该算法被多次用在美国 Masten 公司的 Xombie 小火箭上进行测试,使其具备了垂直着陆能力。

“火箭回收对着陆制导算法的要求一是可靠,二是计算速度快,箭载计算机要能在两三百毫秒以内计算出满足多约束条件的最优飞行轨迹。”刘新福表示,之前做不

到回收火箭,主要是因为没有满足要求的制导算法。凸优化制导算法通常可靠性高、收敛速度快,为实现火箭回收提供了可能。

刘新福谈到,低速状态、忽略大气阻力状况下的凸优化制导算法及其在飞行器上的验证实验已在公开文献中发表。但实际任务中火箭返回速度极快,在着陆段的大气阻力不可忽略且对飞行轨迹影响较大。如何在考虑气动力的情况下设计凸优化制导算法,保证算法的可靠性与快速性,才是 SpaceX 的独门秘籍之一。



## 先上天再落地,什么“姿势”才正确

众所周知,SpaceX 在回收“猎鹰9”号火箭之前,曾使用“蚱蜢”火箭以及“F9R Dev”火箭开展低空飞行回收试验,而“F9R Dev”火箭几乎就是“猎鹰9”号火箭的一级火箭部分。

“这种试验的目的之一,就是验证着陆制导与控制算法的可行性。”刘新福介绍,比如“蚱蜢”火箭曾专门进行侧向机动试验,让火箭飞到一定高度的同时横向机动一定距离,然后让火箭返回发射点。后来“猎鹰9”号火箭实际回收任务中在着陆段确实有明显的横向机动过程,“蚱蜢”试验在一定程度上仿真了这一情况,并证明着陆制导与控制算法能够满足横向机动要求。前期进行的“直上直下”的回收试验,技术难度则相对低不少。

“此外,火箭试验过程中的速度变化情况也很关键。”刘新福补充,如果火箭基本上匀速缓慢着陆,这样的试验难度相对较低,也不符合实际的飞行情况。此外,火箭着陆要同时精确控制位置和速度,当高度降为零时,速度也要几乎降到零,而且几乎没有修正的机会,任何悬停都会导致燃料的浪费,这样的任务采用离线轨迹跟踪方法很难实现。

刘新福指出,难度比较高的试验方式可以是火箭飞起来后进行大范围横向机动并精确着陆,制导算法需在线实时计算出“燃料最优”的着陆轨迹及相应的控制量,然后控制算法跟踪该轨迹实现着陆,必要时该着陆轨迹需在线重新规划。这种情况下对该轨迹计算的可靠性与实时性提出了极高的要求,且火箭速度较大并一直变化。如 Xombie 火箭的飞行试验中最大横向速度高达 30 米/秒(即每小时 108 公里),最大下降速度也高达 20 米/秒。最省燃料对火箭回收也很重要,因为预留的燃料越少,火箭的运载能力损失越小。(胡定坤)

百灵市民科学

# 我的科学梦 开始啦!



## 武汉市第六届中小學生科普征文

主办单位 武汉市科学技术协会 武汉市教育局  
承办单位 武汉科技报  
活动时间 2019年3月—2019年6月

1  
获奖作者将有机会参加  
由政府资助的武汉市  
**科普国际  
夏令营**

2  
获奖作品将在  
《武汉科技报·少年科普》  
周刊选登并  
**结集出版**

3  
凡获奖作者将  
成为武汉科技报  
**科学少年  
俱乐部会员**

更多详情,请加入QQ群 465610664

访问网站:长江网“江城科普”频道 <http://kp.cjn.cn>

科星网 <http://www.kexing100.com>

微信公众号:江城科普、科技大武汉

联系人:徐老师(13971312951)

联系电话:027-82359677

联系地址:江岸区天津路30号(武汉科技报)

