

## 我国商业航天首颗清理验证星即将升空

## 空间碎片成隐患,中国企业勇当太空垃圾“清道夫”

► 本报记者 李洋

我国空间站天和核心舱太阳翼电缆,因空间碎片撞击导致部分供电能力损失,经神舟十七号乘组2次出舱活动完成我国首次舱外维修任务;神舟二十号返回前再次被空间碎片击中,造成飞船舷窗玻璃出现裂纹……

空间碎片也即“太空垃圾”,是指绕地球轨道运行但不具备任何用途的各种人造物体及其残骸。

这些被称为“太空高速公路隐形杀手”的碎片,正在以7.9公里/秒的第一宇宙速度运行,即使是芝麻粒大小的碎片,其撞击力也远超“子弹”。

可喜的是,我国即将有清理“太空垃圾”的利器。航天驭星控股子公司苏州三垣航天科技有限公司(以下简称“三垣航天”)总经理杨栋近日在接受记者采访时表示,该企业首颗技术验证星已完成研制,计划于近期发射,主要验证柔性机械臂在太空环境中的可靠性,后续将逐步推进卫星交会接近、目标捕获等关键技术验证,预计2027年左右实现真正意义上的“太空垃圾”清理操作。

## “太空垃圾”清理难

距离地面500公里以内的“太空垃圾”,有机会在一二十年内受大气阻力等因素影响,坠入大气层烧毁。而在稍远一些的大气层,如距离地面800公里、1000公里的“太空垃圾”,能“飘”几百年。

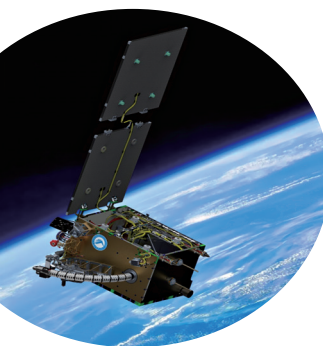
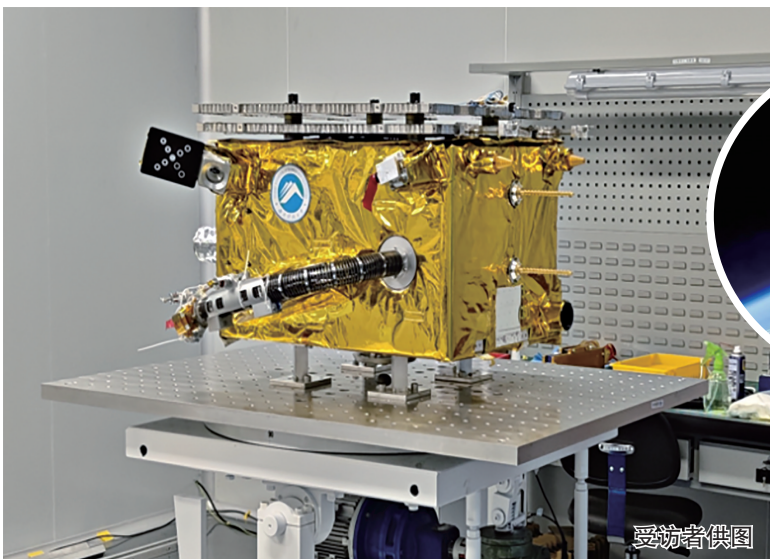
公开资料显示,仅长度在1毫米至1厘米之间的“太空垃圾”,就有1.3亿个;尺寸超10厘米的在轨碎片已超4万个。

“随着卫星发射数量增多,这些垃圾会大大增加航天器碰撞的风险,直接影响后续航天发射和在轨航天器的正常运行。”杨栋表示。

空间碎片撞击会带来哪些连锁反应?杨栋解释说,一方面,对载人飞船来说,碎片打穿船体可能导致漏气,无法维持宇航员生存所需的氧气和气压,后果致命;对其他航天器而言则有可能会造成设备损伤甚至完全失去工作能力。另一方面,大碎片可能会引发航天器碰撞,继而造成大量碎片。

然而,人类清理“太空垃圾”的能力刚刚迈出第一步。放眼全球,尚未听说任何一家商业公司成功执行“太空垃圾”清理任务。

杨栋表示,究其原因,首先



左图:测试中的西垣0号卫星

右图:西垣0号卫星在轨运行示意图

是成本高,涉及新卫星制造成本、发射成本、观测捕获成本等。其次是技术难度大。要在太空捕获比子弹快几十倍的碎片,需要与碎片保持方向、速度一致,实现相对静止才能抓取。此外,环境条件苛刻。需克服太空的极端环境,太阳直射时温度达100多摄氏度,阴影区达零下200多摄氏度,温差极大,对设备材质、散热、成像测量都有严苛要求。

据介绍,目前,多个航天发达国家已建立起较为完善的地面监测与跟踪体系,通过大型相控阵雷达、光学望远镜及激光测距系统对直径10厘米以上的轨道物体进行编目管理。例如,我国于1970年发射的“东方红一号”卫星虽早已失效,但因其结构完整且轨道明确,自发射起就被全球多个观测站持续跟踪,至今仍被记录在案,成为具有明确国家归属的历史性航天遗产。然而,对于由碰撞或爆炸产生的大量小型碎片,尤其是毫米至厘米级的微小残片,现有技术难以有效识别与归因。在此背景下,发展主动清除技术已成为各国研究重点。

## 将车规级产品引入太空

在大气层外的黑背景下,哪怕是长度超过10厘米的碎片,也很难被观测到。找到需要清理的“太空垃圾”,并把机器人送到目标附近,堪比“大海捞针”。

杨栋表示,清理“太空垃圾”,目前的技术路径本质上是“以星治星”——需发射新卫星捕获“太空垃圾”,再将其带入大气层烧毁,相当于“用一颗新卫星清理一个旧垃圾”。

“三垣航天已经可以实现让

‘太空垃圾’清理机器人从地球出发追到高速移动的目标,然后停下来看目标的真实情况,再进一步跟着走并趁目标不注意后抓着它拖出轨道扔进大气层焚毁。而这一系列操作不需要依赖钛合金等航天材料,可以用成本更低的工业材料实现。”杨栋说。

据介绍,三垣航天研究了3种捕获“太空垃圾”的方式。第一种捕获方式类似于捕鱼逻辑。传统捕鱼方法是使用渔网,这种方法直观且自然,但不可避免地存在一个问题:由于渔网是柔性物体,捕获目标后在太空中会晃动,严重影响机器人卫星的轨道控制。在严重情况下,双方都可能失去平衡,无法继续控制。第二种捕获方法是使用机械臂抓取,类似于给捕鱼船配备鱼叉或网爪。这种方式抓取牢固,因为机械臂是刚性结构。但其难点在于控制难度极大,尤其是要实现高精度控制,例如将机械臂的运动从单轴扩展到多轴,每增加一个轴就会多出3个自由度,控制难度呈指数级增加。第三种捕获方式是花瓣型包络方式,类似于章鱼用触爪包裹物体。这种方式结合了刚性材料的稳定性,同时采用类似网状捕获而非抓取的方式。即使目标物体存在自旋,由于被完全包裹,因而控制难度相对较小。

三垣航天创新性地将工业级、车规级产品引入太空领域,通过结构加固、优化散热、加固连接器等方式,适配太空极端环境。

“‘太空垃圾’清理是基础,技术要求相对低,只要能抓住目标并将其拖拽进大气层烧毁就行,对抓取精度要求不高。目前,除了空间碎片清理,三垣航

天还致力于提供航天器在轨延寿以及航天器在轨维修等在轨服务。”杨栋说。

太空加油最成熟的市场是地球同步轨道的通信卫星,需求明确且效益可观。

要维持定点运行,卫星必须时刻消耗燃料,一旦燃料耗尽,轨道就会偏移,像“画8字”一样越来越偏,最终导致地面天线无法对准,通信中断。

一颗地球同步轨道通信卫星造价通常在20亿元以上,设计寿命约15年,一年能创造1.5亿~2亿元的经济效益。加50公斤燃料大概能满足一年的定点维持需求,加油相关成本(卫星研制、发射等)不超过创造效益的一半。美国诺格公司子公司Space Logistics曾经给Intelsat(国际通信卫星组织)的两颗通信卫星各完成5年的延寿服务,技术和商业化都很成功,也带动很多国际航天企业涉足这一领域。

而航天器在轨维修和制造听起来像科幻,但并非遥不可及。现阶段可以考虑攻克一些标准化、相对简单的场景,未来几年也会逐步尝试解决更复杂的维修和零部件更换问题。

杨栋表示,清理垃圾、太空加油、太空维修3个任务,有望只用同一个机械臂就能够完成。技术有通用性,柔性臂可以通过不同组合实现多种功能。比如中空结构里走管路,就能当“加油枪”用;装上3根、4根或8根类似章鱼爪的结构,就能柔性抓取目标;前端替换不同工具(剪刀、相机、螺钉刀),就能完成维修操作。

## 西垣0号卫星即将首发

据悉,三垣航天由航天科技五院、西北工业大学、航天科工

集团等单位团队联合发起成立,其核心成员曾参与我国首个空间在轨操作机器人研发,这为其技术落地奠定了坚实基础。

三垣航天投融资总监姚亚鑫对记者表示,三垣航天能够大幅度降低“太空垃圾”清理成本,关键在于掌握如下核心技术:轨道追踪控制技术,可从远距离逐步接近目标并实现同轨飞行;未知环境多维多场信息融合重建方案,能通过近距离悬停观测确定目标状态;空间非合作目标视觉感知与定位系统,可实现与目标的同速相对静止跟踪;大容错范围被动消旋目标捕获机构,能够稳稳抓取目标并拖离轨道。

目前,三垣航天碎片清理技术已完成地面验证,即将具备商业化服务能力,其2026年清理200公斤LEO废弃卫星的报价仅6000万元,每公斤30万元,不足瑞士同类产品的1/20,且具备盈利空间。此外,该企业还将目标测量分系统等技术成果对外销售,近期以分系统销售为主,后续将面向星座计划推出整星产品。

姚亚鑫透露,三垣航天将于近日发射首颗技术验证星西垣0号。这颗卫星命名结合“西北工业大学”的“西”与“三垣航天”的“垣”,“0”体现程序员从零计数的习惯,将承担空间碎片清理、航天器在轨延寿前期验证、离轨方案验证3项任务,目前卫星已完成研发,进入最终测试阶段。

不过,从技术落地到商业化仍面临多重挑战。政策上,全球“太空垃圾”清理缺乏硬性约束,市场需求释放受限;资金上,太空在轨服务研发周期长、投入大,该企业虽已完成3轮融资,但后续验证仍需数千万元资金,且发射验证存在失败风险,一旦失败,前期投入将全部损失。

“三垣航天除了销售整颗机器人卫星外,还将机器人卫星研制过程中的一些技术成果进行转化。例如,企业的目标测量分系统已经实现了销售。此外,太空智算系统以及地面测试试验系统等成果也受到众多研究院所和高校的关注。”姚亚鑫说。

作为国内商业航天领域的首颗“太空垃圾”清理技术验证星,西垣0号即将发射,不仅是三垣航天技术落地的关键一步,更有望为我国乃至全球空间碎片治理提供低成本、可复制的解决方案,推动太空在轨服务产业迈向商业化阶段。