

## 空间碎片天基主动清除技术发展现状及趋势\*

曹喜滨<sup>1</sup>, 李峰<sup>1</sup>, 张锦绣<sup>1,2</sup>, Richard Muriel<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工业大学 卫星技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 洛桑联邦理工学院 瑞士空间中心, 洛桑 CH-1005)

**摘要:**随着国内外航天发射任务逐年增多,大量在轨滞留的失效航天器将成为未来空间资源有效利用所面临的一个严峻挑战。空间碎片天基主动清除技术是从根源上对空间资源化利用与安全处置的措施,将提升和加强近地空间的可持续循环利用。本文明晰了空间碎片天基主动清除的概念,分析了空间碎片天基主动清除技术的发展历程,提出了其发展过程中面临的非合作目标相对导航、协调控制和捕获方式及装置等主要问题,为我国空间碎片天基主动清除技术的发展提出了有益参考。

**关键词:**空间碎片;天基主动清除;非合作目标;离轨

**中图分类号:**V412.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-2486(2015)04-117-04

## Development status and tendency of active debris removal

CAO Xibin<sup>1</sup>, LI Feng<sup>1</sup>, ZHANG Jinxiu<sup>1,2</sup>, Richard Muriel<sup>2</sup>

(1. Research Center of Satellite Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China;

2. Swiss Space Center, Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne, Lausanne CH-1005, Switzerland)

**Abstract:** With the increase of domestic and foreign launching tasks, it is becoming a serious challenge that plenty of failure or invalid spacecrafts in the process of space resources recycling. The active debris removal can be regarded as an effective and fundamental means that can realize the reuse of space resources and safe disposal. The concept of active debris removal is clarified and its development process also is analyzed. Some key techniques, such as relative navigation, coordinated control, capture method and device for non-cooperative target, are proposed. It will provide some fruitful reference for our country's active debris removal in future.

**Key words:** space debris; active debris removal; non-cooperative target; de-orbit

目前在轨运行的航天器已达数千颗,预计10年内每年超过服役期的航天器将达到百颗以上。其中低轨失效航天器自然衰减至大气层烧毁将需要几十年甚至更长的时间,静止轨道航天器若在寿命末期不采取措施则会永久滞留于驻泊点,使得可安全利用的轨道资源,特别是静止轨道驻泊点,进一步减少。同时,失效航天器长期滞留过程中,地面难以对其行为进行干预,相互之间的碰撞将导致空间碎片的急剧增加。截至目前为止,已发生过240余次爆炸/撞击(破碎)事件,产生了数量众多的空间碎片。

通常而言,空间碎片涵盖了火箭上面级、失效卫星、航天任务抛弃物及航天器解体或相互之间碰撞后产生的衍生物等。如2009年铱星与俄罗斯卫星的碰撞致使10cm以上空间碎片增加了将近3000个,大大增加了在轨航天器的安全风险。

早在2007年,美国国家航空航天局(National

Aeronautics and Space Administration, NASA)空间碎片计划负责人Johnson<sup>[1]</sup>在分析未来200年内空间碎片的演化过程基础上,明确提出具备潜在威胁性的空间碎片主要为废弃卫星、火箭上面级及其解体后的衍生目标,其质量分布在1000~1500kg和2500~3000kg之间,轨道倾角在70°~75°,80°~85°和95°~100°的区间内。同时指出<sup>[1]</sup>自2020年起,每年清除5~20个上述大型空间碎片就可抑制空间碎片总量的增长,从而保证未来空间环境不再持续恶化。至此,空间碎片主动清除(Active Debris Removal, ADR)被提上了各国空间技术的发展日程。

### 1 空间碎片天基主动清除的概念

单纯从技术层面而言,空间碎片天基主动清除可以理解为,通过适当手段使得低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)碎片进入大气层烧毁;抬

\* 收稿日期:2014-09-10

作者简介:曹喜滨(1963—),男,黑龙江肇东人,教授,博士,博士生导师,E-mail:xbcao@hit.edu.cn

高或降低静止轨道 (Geostationary Earth Orbit, GEO) 碎片使其进入坟墓轨道, 从而实现空间环境的清理, 降低在轨航天器碰撞风险。整个系统任务所涵盖的内容一般包括: 快速发射入轨、快速/燃料最省调相至清理目标、非合作目标的识别与接近、机动目标的巡视与捕获以及离轨五个阶段。如图 1 所示, 其表征五个阶段各自完成的任务和相对应的操作。

然而除技术、成本因素外, 空间碎片天基主动清除系统的发展还受到政治和法律层面因素的影响。技术方面主要包括快速开发和部署、最大限度采用成熟技术、保证新入轨质量最小。经济上则要有合理的费效比, 使得空间碎片环境得到显著改善。政治层面则要求系统开发、部署和运行过程的透明性, 以使得其他航天国家相信碎片移

除系统不会用于攻击在轨正常工作的卫星。法律层面则应确保符合已有国际法律法规, 特别是满足联合国外层空间公约规定的框架。

通常而言, 为节省燃料消耗, 在远程调相阶段, 采用一次机动多圈缓慢调相, 即改变半长轴小量, 依靠自然漂移实现同轨相位调整。当接近至目标 4~5km 处时, 采用激光雷达完成对目标的识别和状态确定, 通常采用 1 个推力弧段接近到距离目标 300m 左右的位置。在 300m 左右的位置, 采用红外相机或激光雷达实现对目标的全方位观察, 进一步确认目标的状态, 如失速旋转角速度等参数。当接近至 20m 左右时, 采用光学相机实现对目标的巡视, 确认捕获点, 完成相对目标的状态同步。之后, 实施捕获, 完成稳定控制后, 执行离轨动作, 移除航天器与目标共同离轨。

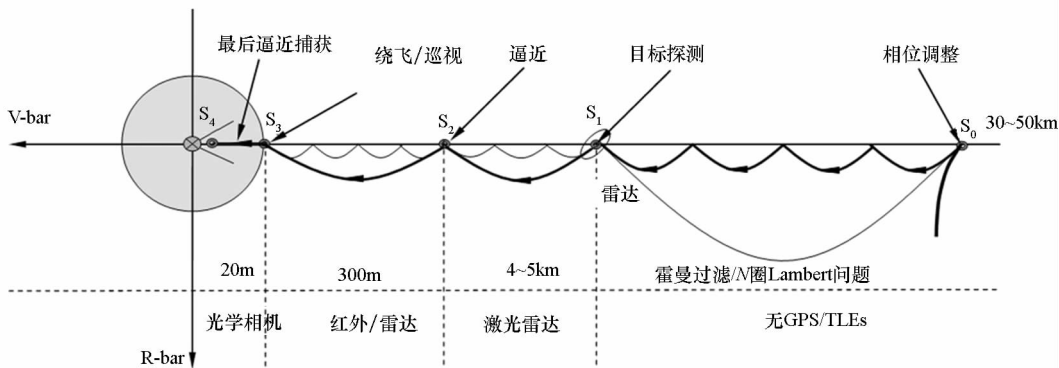


图 1 系统各阶段任务与操作

Fig. 1 different operation of each phase

## 2 空间碎片清除计划概况

空间碎片清除正面临着重大挑战的认识已经引发了众多机构和学者去寻求创新解决方案。2009 年 9 月 17 日, 美国国防部先进研究计划局 (Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA) 公布了其需求, 试图寻找一种实现低成本创新轨道碎片清除系统概念的可行技术途径<sup>[2]</sup>, 同时要求应标单位提出各自概念的创新性, 如移除每千克碎片的成本估计、符合碎片减缓国际目标的途径以及大致的响应时间。此外, DARPA 与 NASA 在 2009 年联合组织了第一届轨道碎片清除国际会议<sup>[2]</sup>。中国也于 2014 年 3 月 4—5 日在天津首次召开了空间碎片移除技术研讨会<sup>[3]</sup>, 正式将空间碎片主动移除提上了日程。目前已经提出的空间碎片主动移除计划主要包括如下几个。

### 2.1 瑞士清洁太空计划

瑞士空间中心于 2012 年提出一项 30kg 量级

微卫星发展计划, 旨在清除所发射 Cubesat 卫星的计划, 即为清洁太空 (Clean Space One, CSO) 计划<sup>[4]</sup>。

该计划由瑞士 S3 公司采用空射运载的方式将卫星送入轨道, 采用小型机械臂或形状记忆材料装置 (如图 2 所示) 对 Swisscube 实施抓捕, 进而通过微推力装置完成离轨。值得一提的是, 在 2014 年 6 月 12 日, 编号为 26306 的长征四号火箭残片在瑞士空间中心 Cubesat 前方 142m 处擦肩而过, 两者最近距离不足 1km。该事件的发生进一步坚定和促进了瑞士空间中心清洁空间计划的发展。

### 2.2 欧盟主动清除计划

在欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 支持下, 众多欧盟成员国基于 ROGER<sup>[5]</sup> 等空间在轨服务演示验证计划的研究基础, 也相继提出了多个空间碎片天基主动清除计划, 如飞网捕获、机械手抓取, 甚至可展开薄膜帆/发泡装置

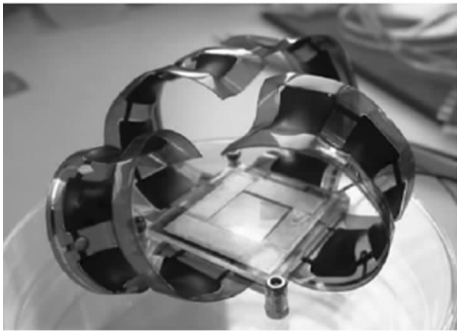


图2 基于介电弹性材料的捕获机构<sup>[4]</sup>

Fig.2 Capturing mechanism based on dielectric elastic materials<sup>[4]</sup>

增加面质比、高能粒子阻尼自旋碎片等<sup>[6]</sup>。

同时,英国 Surrey 大学空间中心以太阳帆技术为研究基础,在欧盟第七框架计划支持下提出了一种基于可展开薄膜帆的 Gossamer<sup>[7]</sup> 离轨器。采用 25m<sup>2</sup> 的太阳帆,增加 LEO 大型空间碎片的阻力面积,实现其快速离轨。后续还将陆续发展 InflatSAIL 等主动清除计划。

### 2.3 美国主动清除计划

早在 2009 年, DARPA 即提出了其空间碎片清除技术验证计划——电动碎片清除器<sup>[8]</sup>。该计划综合了电动力系绳、飞网捕获等技术,拟在近地轨道布置 12 套该系统,可实现 5 年内低地球轨道空间碎片环境的稳定。

在此之前的 1998 年,美国 Tethers Unlimited 公司就提出了基于电动力系绳的航天器离轨计划,以带电系绳切割地磁场产生的洛伦兹力作为离轨动力实现空间碎片的离轨。该公司当前正在 NASA 的支持下开展基于 3U - 立方体卫星的绳系式离轨器验证项目的研究<sup>[9]</sup>。

### 2.4 其它国家主动清除计划

日本早在 1997 年就完成了 ETS - VII 项目的空间验证,具备了对空间合作目标的捕获、维修等在轨操作能力。日本宇宙航空研究开发机构 (Japan Aerospace Exploration Agency, JAEA) 正在研究一种基于电动力系绳的空间碎片微型清除器 (Space Debris Micro Remover, SDMR)。除此之外,其所属创新技术研究中心 (Innovation Technology Research Center, ITRC) 在 ETS - VII 技术基础上,也在发展基于机械臂抓取的空间碎片移除计划<sup>[10]</sup>。

除上述计划外,俄罗斯萨马拉航空航天大学<sup>[11]</sup>、意大利泰雷兹阿莱尼亚宇航公司<sup>[12]</sup>等单位也纷纷提出基于绳系拖船等空间主动清除计划。

## 3 ADR 发展面临的主要问题

目前来看,尚无空间碎片移除系统在轨运行,国外的研究起步较早,正处于关键技术研究及部分技术验证阶段,而国内正处于概念研究阶段。就当前研究来看,主要面临着如下问题。

### 3.1 非合作目标的相对导航

通常而言,作为清除目标的失效航天器及其衍生碎片等均已失去轨道机动能力,可视为空间自由漂浮目标,同时由于故障或本身无定位装置,亦不具备空间定位能力。在清除航天器接近目标过程中的导航就成为亟待解决的问题之一。

#### 3.1.1 中远距离目标识别与定位

尽管地面观测网是实现此类目标空间定位的一种手段,然而在实际操作过程中,为了降低系统运行成本,通常对清除航天器提出空间自主探测的需求。当前情况下,有必要有效利用先验观测数据,如北美防空司令部 (North American Aerospace Defense Command, NORAD) 发布的 TLEs 数据,来解决空间碎片清除过程中远中段目标的定位与导航问题。

#### 3.2.2 近距离相对状态确定

在在轨服务、交会对接等合作目标为对象的空间应用中,该项技术已经相对成熟,如 PRISMA 任务已经演示了基于主动光学系统和射频系统的相对导航技术。在空间碎片清除中,主要以非合作目标为清除对象,且可能面临着碎片特征复杂 (二次碰撞形成残片) 或无明显特征 (Cubesat)、目标无规律旋转等问题。

### 3.2 非合作目标的协调控制

在空间环境等非主动力作用下,自由漂浮物体的旋转速度通常可以达到 6°/s,对于携带推进系统的航天器来说,在控制系统失效无法控制推进系统的情况下,其旋转速度可能在短期内增加到几十甚至上百 (°)/s。

#### 3.2.1 近距离逼近及自主绕飞

当前相对成熟的逼近及绕飞技术主要针对合作目标,如神舟飞船交会对接、TanDEM - X 编队等。关于非合作目标的自主绕飞尚未进一步开展,在相对位置姿态可测情况下,可将稳态非合作目标视为合作目标;对于高速旋转目标的逼近和绕飞,则面临着逼近路径的优选、自主绕飞过程中的位姿实时确定和绕飞风险实时监控等问题。

#### 3.2.2 失稳旋转目标的同步与阻尼

为了降低在捕获过程中对捕获装置和系统的

冲击,依据捕获方式的不同,主动清除航天器相对目标的同步方式也会存在较大差别,如不同步、仅同步旋转主轴、完全同步等,例如在 CSO 任务中仅需同步旋转主轴。

此外,成功捕获目标或将离轨装置安装到目标后,形成了由清除航天器/模块和目标碎片复合而成的新航天器。鉴于目标碎片存在不稳定性,为了保证离轨的顺利进行,复合体航天器(特别是当清除航天器或模块的质量小于或远小于目标碎片)的阻尼也是 ADR 过程中面临的难题之一。在 CSO 任务中,清除航天器质量远大于目标碎片<sup>[4]</sup>,故其阻尼相对简单。

### 3.2.3 安全离轨

实现复合体航天器稳定阻尼后,其离轨策略依然受到离轨装置、剩余燃料量、与在轨航天器碰撞风险、离轨时间等的约束。采用电力或太阳帆方式离轨,由于系统不易控制,面临如何规避与在轨航天器的碰撞风险的问题;若清除航天器剩余燃料,则需解决剩余燃料、离轨时间、风险规避约束下的离轨窗口优化及控制等问题。同样,在 CSO 任务中,其离轨为不受控再入,目标仅为将 Swisscube 的自然衰减年限降低到 25 年<sup>[4]</sup>。

## 3.3 捕获方式及装置的设计与实现

目前已经提出的包括电力系绳、太阳帆、阻力增强装置、小型机械臂、绳网等在内的多种在轨捕获装置,均存在各自的优势和不足,尚难找到一种合理的主动移除装置。如采用电力系绳实现主动离轨的航天器,面临姿态失稳直接导致系绳缠绕等问题;太阳帆离轨则需解决轻质大面积薄膜展开问题;相对较成熟的小型机械臂则需直面高速旋转目标抓取过程及后续阻尼过程带来的力学问题。CSO 任务正在论证的捕获装置包括小型机械臂、基于介电弹性材料的捕获机构<sup>[4]</sup>(见图 2)等。

## 4 结论

在当前已具备对合作目标实施在轨捕获和维修技术的基础上,空间碎片天基主动清除将主要解决火箭上面级、失效卫星及其相互碰撞后产生的衍生物体的离轨问题。研究将针对不同类别目标特征/动力学、不同的捕获/移除方式所面临的不同问题而展开,同时也需要解决系统的成本、寿命设计、开发与部署等问题。

中国目前对于包含失效航天器在内的空间碎

片的安全处置研究尚处于起步阶段,相关理论、方法和技术手段与国际先进水平相比尚存在较大差距。综合成本与效益等多方面的考虑,发展基于微纳卫星的空间碎片主动清除系统,演示验证对潜在威胁航天器发起攻击和干扰的能力、监测轨道容量超标对在轨航天器的威胁、验证空间失效目标快速离轨、入轨故障情况下二次入轨等缓解策略与关键技术,将为解决中国未来有效利用空间的瓶颈问题提供技术保障,同时也将彰显中国和平利用空间的理念及作为负责任的航天大国的地位。

## 参考文献(References)

- [1] Johnson N L. Debris removal: an opportunity for cooperative research [C]//Proceedings of Space Situational Awareness Conference, 2007.
- [2] Ansdell M. Active space debris removal: needs, implications and recommendations for today's geopolitical environment [J]. Journal of Public and International Affairs, 2010, 21:7-22.
- [3] 龚自正,徐坤博,牟永强,等. 空间碎片环境现状与主动移除技术[J]. 航天器环境工程, 2014, 31(2): 129-135. GONG Zizheng, XU Kunbo, MU Yongqiang, et al. The space debris environment and the active debris removal techniques [J]. Spacecraft Environment Engineering, 2014, 31(2): 129-135. (in Chinese)
- [4] Richard M, Kronig L G, Belloni F, et al. Uncooperative rendezvous and docking for MicroSats [C]//Proceedings of the 6th International Conference on Recent Advances in Space Technologies, 2013.
- [5] Bischof B, Kronig L G. ROGER-Robotic geostationary orbit restorer [C]//Proceedings of the 34th International Astronautical Congress of the International Astronautical Federation, 2002.
- [6] Reed J, Busquets J, White C. Grappling system for capturing heavy space debris [C]. The 2nd European Workshop on Active Debris Removal, CNES Paris, 2012.
- [7] Lappas V, Fernandez J, Visagie L, et al. Demonstrator flight missions at the Surrey space centre involving Gossamer sails [M]. Advances in Solar Sailing, Springer Praxis Books, 2014:153-167.
- [8] Pearson J, Carroll J, Levin E, et al. Electrodynamic debris eliminator (EDDE) for active debris removal [C]. NASA-DARPA International Conference on Orbital Debris Removal, 2009.
- [9] Hoyt R P, Forward R L. The terminator tether: autonomous deorbit of LEO spacecraft for space debris mitigation [C]. 38th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 2000.
- [10] Report on Space Debris Related Activities in Japan [EB/OL]. [2008-12-05]. <http://www.unoosa.org/pdf/nactact/sdnps/2008/2008-japan E.pdf>.
- [11] Aslanov V S, Yudin V V. The removal of large space debris using tethered space tug [C]. 5th EUCASS European Conference for Aerospace Science-Munich, Germany, 2013.
- [12] Billot C, Ferraris S, Ratti J F, et al. Deorbit: feasibility study for an active debris removal [C]. 3rd European Workshop on Debris Modeling and Remediation, 2014.