Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

News & Highlights

反卫星试验凸显太空碎片危害

Chris Palmer

Senior Technology Writer

2021年11月15日，俄罗斯的一枚PL19 Nudol反卫星导弹瞄准了距地面约486 km的高空轨道上运行的、现已报废的苏联时代的COSMOS 1408卫星[1]。击中目标后，导弹的动能拦截器直接撞击卫星，在近地轨道上产生了巨大的碎片场，触发了国际空间站上的紧急响应程序（图1）。试验后两个月检测到约1500块可追踪的轨道碎片和数十万块较小的、不可追踪的轨道碎片，这些碎片持续对空间站的运行和载人航天工程造成威胁。此外，这些碎片还扩大了不断增多的空间碎片的种类。尽管空间碎片问题有可能使国际空间站运行轨道在未来几十年变得十分危险且不可预测，但领先的太空机构也开始支持研发补救技术以解决这一问题[2]。

总部位于美国加利福尼亚州门洛帕克的太空垃圾追踪公司LeoLabs的高级技术研究员Darren McKnight说道："由于俄罗斯的反卫星试验，现在数千颗运行中的卫星发生碰撞的可能性翻了一倍多，而且这种情况将持续很多年。"

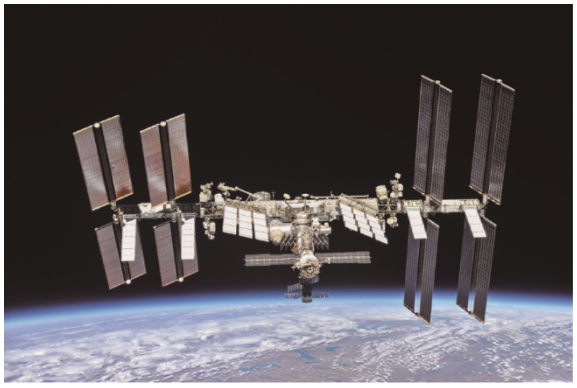

图1. 一枚俄罗斯反卫星导弹和一颗苏联时代卫星碰撞产生的碎片触发了国际空间站上的紧急响应程序（该图片显示的是一位艺术家绘制的空间站），国际空间站上的7名宇航员在两个相连的航天器中躲避了2 h。来源：NASA（公共领域）。

国际空间站位于距地面410 km的高空轨道上，随着俄罗斯反卫星试验产生的碎片不断逼近国际空间站，这些碎片对当时居住在国际空间站的7名宇航员（包括两名俄罗斯宇航员）的安全造成了威胁，迫使他们在两个能够重返地球大气层并将宇航员带回地球的航天器中躲避了2 h。这两个航天器分别是SpaceX公司的载人龙飞船（Crew Dragon）和俄罗斯的联盟号（Soyuz）载人飞船[1]。中国天宫空间站在距地面390 km的高空轨道上运行，这些碎片也会对天宫空间站上的3名中国宇航员产生威胁[1]。

尽管俄罗斯外交部声称这次试验没有违反1967年的《外层空间条约》（Outer Space Treaty），并坚称这些碎片不会对太空活动造成危害[3]，但美国国家航空航天局（NASA）的行政人员称这一行为既危险又不负责任[1]。美国国防部的官员还呼吁全球停止反卫星武器试验[4]。其他反对这次试验的人士包括澳大利亚、法国、德国、日本、韩国以及北大西洋公约组织的官员[5–10]。

2007年，中国向旧的风云-1C气象卫星发射了一枚导弹，制造了一个碎片群[11]。美国最近一次反卫星试验是在2008年，制造了由约175块碎片组成的轨道云，这些碎片后来都脱离了轨道[11]。印度2019年进行的一次试验产生了约130块碎片，其中两块到目前为止仍位于轨道上

2095-8099/© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).
英文原文：Engineering 2022, 12(5): 3–5
引用本文：Chris Palmer. Russian Anti-Satellite Test Spotlights Space Debris Danger. *Engineering*, https://doi.org/10.1016/j.eng.2022.03.005

[11]。美国安全世界基金会（Secure World Foundation）是一家总部位于华盛顿特区的智库，致力于研究太空可持续性问题。安全世界基金会的项目规划部主任Brian Weeden估计，自1959年以来，因反卫星试验共产生了约6700块可追踪碎片，其中约3800块到目前为止仍在轨道上运行。Brian Weeden表示，包括法国、以色列、日本和英国在内的几个国家可能也有反卫星计划，但这些国家还没开展过任何实际试验。

Brian Weeden表示："有人怀疑，俄罗斯是因为意识到禁止反卫星试验的国际压力越来越大，才会迫不及待地完成自己的试验。"他还在2022年2月中旬举行的联合国大会不限成员名额工作组会议（计划讨论太空活动的威胁）上表示，希望"至少能有几个国家提出建议，禁止这类极具破坏性的反卫星试验"。

反卫星试验不是太空碎片的唯一来源，被抛弃的火箭助推器和报废的卫星也使数量已非常庞大的太空垃圾越来越多[2]。专家还担心，私营企业[包括Starlink（美国华盛顿州雷德蒙）、OneWeb（英国伦敦）和Amazon（美国华盛顿州西雅图）]计划在未来几年发射多达6.5万颗卫星，形成一个"巨型卫星星座"（megaconstellations），向地球传送高速互联网服务[12]。

目前，美国国防部追踪的轨道上的残骸碎片仅有2.7万个[13]，此外，还有数以百万计直径小于10 cm的不可追踪的垃圾碎片在沿轨道运行。美国马萨诸塞州剑桥市哈佛-史密森天体物理中心（Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics）的天体物理学家Jonathan McDowell表示："虽然太空垃圾问题很严重，但还不至于成灾。太空垃圾就像气候变化一样，你可以看到它很严重，看到它在按着我们的预期演变，但对此，我们所采取的行动却很少。"

1978年，美国国家航空航天局的科学家Donald Kessler曾提出了一个假设，即卫星或其他轨道物体可能会发生一系列危险的级联碰撞，从而产生更多可能具有破坏性的碎片[2,14]。至少从那时起，政府官员就已意识到这个问题。1995年，美国国家航空航天局发布了第一份全面的轨道碎片减缓指南[15]。2002年，联合国发布了太空碎片减缓建议[16]。近几年来，人们开展的这类或类似工作主要集中在防止其他卫星（包括新的卫星）对轨道产生更多垃圾，而非清除轨道上的现有垃圾。Jonathan McDowell说道："但现实情况是任何国家都可以随心所欲地向任何轨道（包括太空垃圾已经很密集的轨道）发射任意数量的卫星。"

迄今为止，在太空碎片清除技术方面投资最大的企业之一是Astroscale（一家总部位于东京的初创公司），该公司由英国和日本联合资助，投资金额达3亿美元。2021年3月，这家公司宣布了"生命末期服务"（End-of-Life Services）技术（ELSA-d）（图2）[17]。ELSA-d采用两个航天器，一个是质量为175 kg、装有磁铁的迷你冰箱大小的服务方卫星，另一个是质量为3 kg的客户方卫星。ELSA-d将用于测试追踪较大卫星和磁捕获较小卫星的能力。2022年1月，虽然ELSA-d成功释放了其客户方卫星，但Astroscale公司报道称，由于一些异常原因，Astroscale公司未能捕获垃圾碎片[18]。如果计划的这两项试验能完成，两架航天器将进入一个联合轨道并在地球大气层中燃烧，这种燃烧不会造成任何危害。

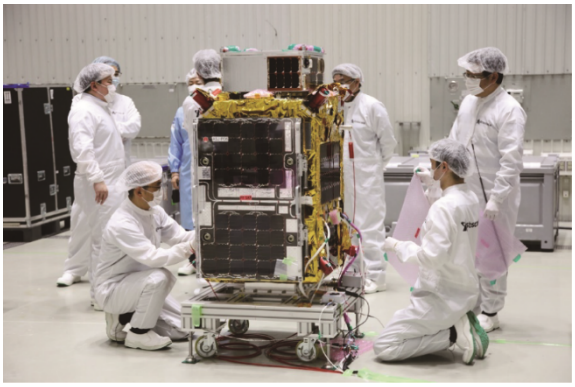

图2. Astroscale公司的空间碎片清除航天器，由一个质量为175 kg、装有磁铁的迷你冰箱大小的服务卫星和一个质量为3 kg的客户方卫星组成，客户方卫星位于顶部。ELSA-d将用于测试追踪较大卫星和磁捕获小卫星的能力。当这两个卫星进入联合轨道时，它们将立即在地球的大气层中燃烧，这种燃烧不会产生任何危害。来源：Astroscale（公共领域）。

Astroscale公司计划在2023年实施第二项任务，捕获日本的一级火箭助推器[19]。但Astroscale公司的碎片清理方案不适用于现有的报废卫星（要求卫星运营商在未来的航天器上安装一个磁片）。卫星互联网供应商OneWeb是第一家同意在其卫星编队中使用磁片的公司，其卫星编队中的几颗卫星已于2021年10月发射[20]。首先要清除的可能是在2021年11月出现故障的一颗OneWeb卫星[21]。

2021年5月，欧洲航天局邀请瑞士初创公司ClearSpace捕获来自欧洲航天局织女星（Vega）火箭上的一个高2.4 m的锥形适配器，该适配器从2013年以来一直在轨道上运行[22]。该公司计划于2025年发射ClearSpace-1碎片清除航天器，并将尝试在该航天器上使用一个由4个机械臂组成的装置，用于捕获织女星火箭碎片，然后将碎片带入大气层。ClearSpace-1和织女星火箭碎片都将在进入大气层后迅速分解（图3）。ClearSpace公司表示，未来的任务将采用可以在轨道中上下移动的航天器同时清除

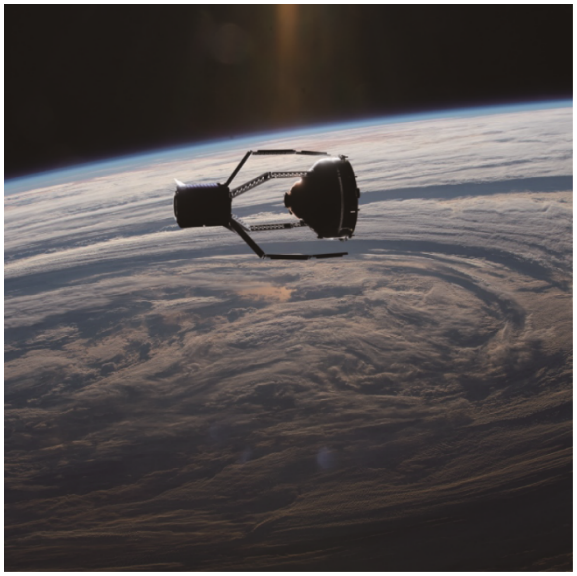

图3. ClearSpace-1碎片清除航天器将用它的4个机械臂捕获一个来自欧洲航天局织女星火箭的锥形碎片，然后将其带入大气层，ClearSpace-1碎片清除航天器和织女星火箭碎片都将在进入大气层后分解。来源：Wikimedia Commons（CC BY-SA 4.0）。

多块危险的碎片[22]。

Astroscale公司和ClearSpace公司的做法是清除碎片，而其他公司正在通过开发能使老化的卫星恢复活力的技术来解决这个问题。例如，美国国家航空航天局计划于2025年启动OSAM-1（On-orbit Servicing, Assembly, and Manufacturing 1）项目，尝试在美国拥有的卫星上切一个洞，然后在洞里填充上肼燃料[23]。加完燃料后，就可以从地面控制这个卫星并将它移动至更安全的轨道上。国防承包商Northrop Grumman公司（美国弗吉尼亚州福尔斯彻奇）已经通过其任务扩展飞行器（MEV）为陷入困境的卫星提供商业服务。2021年9月，两个任务扩展飞行器夹在两颗Intelsat卫星上，控制这两颗卫星并为它们提供使其保持在轨道上现有位置所需的动力[24]。接下来，该公司计划在2024年采用带有由美国国防高级研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）开发的机械臂的任务扩展飞行器，给6颗将要报废的卫星装上推进喷气背包，使它们在轨道上再运行6年[24]。

中国也加入了卫星恢复行动。2022年1月，中国于4个月前发射的实践-21航天器（Shijian-21 Spacecraft）似乎将一颗报废的北斗二号导航卫星拉入了“墓地轨道”（graveyard orbit）[25]。

Jonathan McDowell表示，虽然“生命末期服务”、任务扩展飞行器、实践-21航天器和其他恢复项目的出发点看似是好的，但一些专家观察到，同样的技术也可用于攻击卫星。因此，这些技术的广泛采用面临着诸多挑战，因为这些技术可能会让人怀疑各国正在以碎片恢复的名义测试反卫星武器。无论如何，Jonathan McDowell认为在更广泛地实施补救措施之前需要克服技术、法律和财务方面的障碍。他表示：“碎片捕获工作一定要在合法的情况下进行，这很重要，因为所有这些空间碎片在法律和责任方面仍然归发射国所有。你不能简单地上去捕获一块碎片。你还需要获得许可。”

此外，资金需求也是巨大的。Jonathan McDowell问道：“资金从哪里来？资金必须来自某种形式的税收，可能来自当前太空用户缴纳的税费。”但他还说道，Starlink公司已建立了先进的防撞系统，并就卫星使用寿命结束后制定了卫星安全处置计划。要求Starlink这类公司为美国和俄罗斯等超级大国在太空时代前半个世纪对碎片减缓所持的自由放任态度买单是不公平的。

尽管最近进行了成功的展示，但空间碎片恢复问题仍然未受到政策制定者的高度重视。Darren McKnight说道：“导致这种后果的原因是我们未能及时传达空间碎片恢复的紧迫性。有很多人都只是在学习、等待，希望不花钱就能解决这个烂摊子。或许我们已经等太久了。”

至于仍在接收由COSMOS 1408碎片引发的防撞警告的国际空间站，美国国家航空航天局最近表示，一旦国际空间站停止运行，美国国家航空航天局不会让国际空间站阻塞其所在的轨道。美国国家航空航天局计划最晚于2031年将这个拥有23年历史的国际空间站撞向太平洋，使其退役[26]。

References

[1] Roulette J. Debris from test of Russian antisatellite weapon forces astronauts to shelter [Internet]. New York City: The New York Times; 2021 Nov 15 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www.nytimes.com/2021/11/15/science/russia-anti-satellite-missile-test-debris.html.

[2] Palmer C. Space trash removal. Engineering 2019;5(4):607–8.

[3] Zakharova MV. Commentary by the official representative of the Russian Foreign Ministry M.V. Zakharova on a number of aspects of the space activities of Russia and other states [Internet]. Moscow: Russian Foreign Ministry; 2021 Nov 16 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://archive. mid. ru/ru/foreign_policy/news/-/asset_publisher/cKNonkJE02Bw/content/id/4944761.

[4] Sheetz M. Pentagon calls for stop to anti-satellite weapons testing after Russian demo debris threatened ISS [Internet]. Englewood Cliffs: CNBC; 2021 Dec 1 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www.cnbc.com/2021/12/01/pentagon-calls-for-stop-to-anti-satellite-weapons-testing.html.

[5] Dutton P. Russian anti-satellite weapons testing [Internet]. Canberra: Australia Department of Defence; 2021 Nov 17 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www.minister.defence.gov.au/minister/peter-dutton/media-releases/russian-anti-satellite-weapons-testing.

[6] Thomas L. France says Russian anti-satellite test is ‘destabilising, irresponsible’ [Internet]. London: Reuters; 2021 Nov 16 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www.reuters.com/article/usa-russia-space-france/france-says-russian-anti-satellite-test-is-destabilising-irresponsible-idUKL8N2S76OM.

[7] The Federal Foreign Office on the destructive test of a ground-based antisatellite missile by Russia [Internet]. Berlin: Germany Federal Foreign Office; 2021 Nov 16

[cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www.auswaertiges-amt.de/en/newsroom/news/ffo-destructive-test-missile-russia/2496412.

[8] Tomoyuki Y. An anti-satellite test conducted by the Government of Russia [Internet]. Tokyo: Ministry of Foreign Affairs of Japan; 2021 Nov 18 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www. mofa. go. jp/press/release/press3e_000270.html.

[9] Si-soo P. China silent, South Korea 'concerned' over debris created by Russia's anti-satellite missile test [Internet]. Alexandria: Space News; 2021 Nov 17 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://spacenews. com/china-silent-south-korea-concerned-over-debris-created-by-russias-anti-satellite-missile-test/.

[10] Statement by the North Atlantic Council on the recent anti-satellite missile test conducted by the Russian Federation [Internet]. Brussels: NATO; 2021 Nov 19 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www. nato. int/cps/en/natohq/news_188780.htm.

[11] Smith M. NASA confirms Russian ASAT test doubled debris risk to ISS [Internet]. Arlington: Space Policy Online; 2022 Jan 18 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://spacepolicyonline.com/news/nasa-confirms-russian-asat-test-doubled-debris-risk-to-iss/.

[12] Skibba R. As SpaceX's Starlink ramps up, so could light pollution [Internet]. San Francisco: Wired; 2021 Oct 01 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www.wired.com/story/as-spacexs-starlink-ramps-up-so-could-light-pollution/.

[13] Space debris and human spacecraft [Internet]. Washington, DC: NASA; 2021 May 26 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html.

[14] Kessler DJ, Johnson NL, Liou JC, Matney M. The Kessler syndrome: implications to future space operations. Adv Astronaut Sci 2010;137(8):47–61.

[15] NASA's efforts to mitigate the risks posed by orbital debris [Internet]. Washington, DC: NASA; 2021 Jan 27 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://oig.nasa.gov/docs/IG-21-011.pdf.

[16] Space debris mitigation guidelines of the committee on the peaceful uses of outer space [Internet]. New York City: United Nations; 2010 Jan [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www.unoosa.org/pdf/publications/st_space_49E.pdf.

[17] Astroscale celebrates successful launch of ELSA-d [Internet]. Tokyo: Astroscale; 2021 Mar 23 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://astroscale.com/astroscale-celebrates-successful-launch-of-elsa-d/.

[18] Astroscale statement on our ELSA-d demonstration [Internet]. Tokyo: Astroscale; 2022 Jan 26 [cited 2022 Feb 10]. Available from: https://astroscale.com/astroscale-statement-on-our-elsa-d-demonstration/.

[19] Astroscale selects rocket lab to launch phase I of JAXA's debris removal demonstration project [Internet]. Tokyo: Astroscale; 2021 Sep 21 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://astroscale. com/astroscale-selects-rocket-lab-to-launch-phase-i-of-jaxas-debris-removal-demonstration-project/.

[20] Pultarova T. Commercial space clean-up service could be ready in 2024 [Internet]. New York City: Space.com; 2021 May 26 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www.space.com/commercial-space-debris-removal-2024-astroscale.

[21] Rainbow J. OneWeb mulls debris-removal service for failed satellite [Internet]. Alexandria: Space News; 2021 Nov 24 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://spacenews.com/oneweb-mulls-debris-removal-service-for-failed-satellite/.

[22] Mathewson S. ESA partners with startup to launch first debris removal mission in 2025 [Internet]. New York City: Space. com; 2021 May 16 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www. space. com/esa-startup-clearspace-debris-removal-2025.

[23] Jenner L. NASA's On-orbit servicing, assembly, and manufacturing 1 mission ready for spacecraft build [Internet]. Washington, DC: NASA; 2021 May 5 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www. nasa. gov/image-feature/goddard/2021/nasa-s-on-orbit-servicing-assembly-and-manufacturing-1-mission-ready-for-spacecraft.

[24] Erwin S. Northrop Grumman to launch new satellite-servicing robot aimed at commercial and government market [Internet]. Alexandria: Space News; 2021 Sep 23 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://spacenews. com/northrop-grumman-to-launch-new-satellite-servicing-robot-aimed-at-commercial-and-government-market/.

[25] Tingley B. A Chinese satellite just grappled another and pulled it out of orbit [Internet]. Miami: The Drive; 2022 Jan 27 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://www. thedrive. com/the-war-zone/44054/a-chinese-satellite-just-grappled-another-and-pulled-it-out-of-orbit.

[26] Hunt K. NASA plans to retire the International Space Station by 2031 by crashing it into the Pacific Ocean [Internet]. Atlanta: CNN; 2022 Feb 2 [cited 2022 Feb 4]. Available from: https://edition. cnn. com/2022/02/02/world/nasa-international-space-station-retire-iss-scn/index.html.