

巨型星座、太空脆弱性与太空安全博弈^{*}

俞润泽 沈丁立

【内容提要】 作为新一轮太空竞争的热点,“星链”等巨型星座正对太空安全产生深刻影响。本文着眼于美国垄断巨型星座的时期,以太空脆弱性的分布为核心变量,分析了两种假设下的太空博弈形态。太空拥挤的严重程度可能成为影响太空脆弱性分布的关键。如果太空拥挤程度较弱,美国可能因具备单方面的太空弹性而采取更具进攻性的太空政策,此时太空中的稳定或遭破坏。如果太空拥挤恶化到一定程度,太空军事冲突或碰撞事故可能导致“凯斯勒效应”的极端后果迅速实现。此时中小国家或可借助技术难度较低的手段对大国进行威慑,而危机失控可能对全人类造成严重后果。因此,巨型星座虽然可能增强美国的太空弹性,但也可能使包括美国在内的各国处于比过去更严重的共同脆弱性中。

【关键词】 巨型星座 “凯斯勒效应” 太空脆弱性 “星链”

【作者简介】 俞润泽,东南大学马克思主义学院讲师。

电子邮箱:20110170035@fudan.edu.cn

沈丁立,复旦大学国际问题研究院教授。

电子邮箱:dlshen@fudan.ac.cn

^{*} 本文系上海市哲学社会科学规划课题“美国核武领域人工智能化研究”(2023EGJ001)的阶段性成果。感谢《国际政治科学》编辑部和匿名评审专家对本文提出的宝贵意见和建议,文责自负。

一、问题的提出

太空^①向来是充满战略意义和大国竞争的领域。伴随着航天技术革新、民商航天崛起、太空实力格局重组、太空军事化加速和太空国际制度竞争升温等系列事态,人类太空活动正进入一个新时代。^②在大国博弈和科技革命叠加共振的背景下,太空安全形势面临着比以往更复杂的局面。一方面部分国家在太空军事化、战场化和武器化上取得了一系列里程碑式的进展;另一方面以美国太空探索公司(SpaceX)“星链计划(Starlink)”为代表的低轨小卫星巨型星座^③技术正成为新一轮太空技术竞赛的焦点,并可能对太空中

① 中文中的“外层空间”“外空”“空间”和“太空”均指向英文中的“outer space”及其简称“space”,只是不同行业有不同的使用习惯。国际关系学界、新闻传媒和日常用语中习惯使用“太空”;国际法学界和外事部门一般使用“外空”;航天科技部门则一般使用“空间”。本文一般使用“太空”,但使用专业术语时也遵循相关领域的习惯表述。

② 有些学者称之为“第三太空时代”,也有人称之为“第二太空时代”。不论如何,他们均认同“新时代”的提法,参见郭晓兵等:《第三太空时代的安全挑战与规则构建》,载《当代世界》,2022年第2期,第47—51页;The White House,“A New Era for Deep Space Exploration and Development,”2020, <https://csps.aerospace.org/sites/default/files/2021-08/NSpC%20New%20Era%20for%20Space%2023Jul20.pdf>,访问时间:2024年7月30日;Bruce McClintock et al.,“Responsible Space Behavior for the New Space Era,”RAND Corporation,2021, <https://www.rand.org/pubs/perspectives/PEA887-2.html>,访问时间:2024年7月30日;Todd Harrison et al.,“Escalation and Deterrence in the Second Space Age,”Center for Strategic and International Studies (CSIS),2017, https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/publication/171109_Harrison_EscalationDeterrenceSecondSpaceAge.pdf,访问时间:2024年7月30日;Brad Townsend, *Security and Stability in the New Space Age: The Orbital Security Dilemma*, Pennsylvania: Routledge,2020;Malcom Davis,“Space 2.0—Enabling War in Space?” Australian Strategic Policy Institute, May 9,2019, <https://www.aspistrategist.org.au/space-2-0-enabling-war-in-space/>,访问时间:2024年7月30日;“国家宇宙會議が戦略ペーパー「深宇宙探査と開発の新時代」を発表”,日本科学技术振兴机构,2020年7月23日, <https://crds.jst.go.jp/dw/20200924/2020092424543/>,访问时间:2024年7月30日。

③ 低轨小卫星巨型星座有三项基本技术特征:一是轨道高度低,位于距地面200~1500km的低轨空间;二是组网规模巨大,星座规模一般在1000颗以上;三是卫星小,单颗卫星重量在几百千克级别。为行文简洁,同时参照国外目前流行的“mega-constellation”一词,后文使用“巨型星座”简称。

的稳定造成深刻影响。

长期以来,各国在太空普遍的脆弱性是影响太空安全博弈的重要机制。冷战时期,美国和苏联在高度依赖太空的同时也缺乏保护己方太空资产的能力,这是《外空条约》《部分禁止核试验公约》等国际制度得以建立的重要原因。冷战后的二十多年里,美国推行进攻性的太空政策,探索太空威慑和太空控制战略。但面对以地基动能反卫星为代表的非对称手段,美国无法确保自身的太空安全,其太空霸权企图受到一定程度的制衡。

巨型星座可能单方面改善美国的太空脆弱性,也可能导致美国及其他所有国家面临更严重的脆弱性。本文基于国际体系的视角,以太空脆弱性的分布为核心变量建立分析框架。本文的核心问题是:在美国垄断巨型星座的时间段,太空脆弱性的分布将如何变化,又会对国际太空博弈造成什么影响?如果参与博弈的各方具备大体相同且较为严重的太空脆弱性,那么便称其为“共同脆弱”状态;如果部分行为体具备太空弹性,另一些仍处于太空脆弱性中,便称其为“单边弹性”状态。^①

本文认为,由于地球轨道可容纳的物体数量尚不确定,巨型星座对太空中稳定的影响也存在两面性。一方面,率先建成巨型星座的国家有望摆脱太空脆弱性的制约,或因不畏惧对手的报复而采取更具进攻性的太空政策,没有巨型星座的国家恐将面临更严重的太空军事威胁。另一方面,当地球轨道物体的数量密度达到一定程度时,少数几次严重的空间碰撞事件(包括故意的动能反卫星活动和非故意的空间碰撞事故)所引发的“级联效应”(cascade effect)可能使地球被海量空间碎片包围,一些中小国家或可凭此灾难性后果对大国进行制衡。

二、研究综述

(一) 太空脆弱性的战略意义

太空系统天然存在脆弱性,这是各国长期面临的共同挑战,也为中小国

^① 由于本文只考虑美国垄断巨型星座的时期,因此不讨论“共同弹性”的状态。需要指出的是,脆弱性的分布是对体系而非个体的描述。在特定体系中,太空脆弱性的分布要么是均等的,要么是非均等的,可视为独立变量。

家制衡美国太空霸权提供了基础。^①

美国一般认为,太空脆弱性不利于其自身的安全。冷战后美国试图建立太空威慑和太空控制战略,但一直面临太空脆弱性的掣肘。虽然美国的太空实力最强大,但对太空的依赖程度也最高。由于太空脆弱性的存在,拒止性威慑在太空难以建立,美国只能用报复性威慑维持稳定。^②然而这种威慑对美国而言是不划算的,因为对手只需要很少的投入就可以对美国造成严重损失。即便美国可以大规模破坏对手的太空资产,后者也可能不在意,因为他们对太空的依赖度低于美国。^③过度的跨域报复承诺不仅缺乏可信

① 此类观点在太空安全研究中大量出现,较有影响力的文献有: Todd Harrison et al., “Escalation and Deterrence in the Second Space Age,”; Michael Krepon and Julia Thompson, eds., *Anti-satellite Weapons, Deterrence and Sino-American Space Relations*, Stimson Center, 2013; James P. Finch and Shawn Steene, “Finding Space in Deterrence: Toward a General Framework for ‘Space Deterrence’,” *Strategic Studies Quarterly*, Vol. 5, No. 4, 2011, pp. 10-17; Forrest E. Morgan, “Deterrence and First-Strike Stability in Space,” RAND, 2010, pp. 24-33, <https://www.rand.org/pubs/monographs/MG916.html>, 访问时间: 2024年7月30日; Rafał Kopeć, “Space Deterrence; in Search of a ‘Magical Formula’,” *Space Policy*, Vol. 47, 2019, pp. 121-129; Roger Harrison, Deron Jackson and Collins Shackelford, “Space Deterrence: The Delicate Balance of Risk,” *Space and Defense*, Vol. 3, No. 1, 2009, pp. 1-22; Damon Coletta, “Space and Deterrence,” *Astropolitics*, Vol. 7, No. 3, 2009, pp. 171-192; 李彬:《军备控制理论与分析》,国防工业出版社2006年版,第124—128页;何奇松:《脆弱的高边疆:后冷战时代美国太空威慑的战略困境》,载《中国社会科学》,2012年第4期,第183—204页;徐能武:《攻防理论视域下外空攻防对比态势的历史演变》,载《军事历史》,2015年第5期,第66—70页;张茗:《如何定义太空:美国太空政策范式的演进》,载《世界经济与政治》,2014年第8期,第84—106页。

② Steven Lambakis, “A Guide to Thinking about Space Deterrence and China,” National Institute for Public Policy, 2019; Todd Harrison et al., “Escalation and Deterrence in the Second Space Age,”; Michael P. Gleason and Peter L. Hays, “Getting the Most Deterrent Value from U. S. Space Forces,” The Aerospace Corporation, 2020; Dean Cheng and John Klein, “A Comprehensive Approach to Space Deterrence,” The Strategy Bridge, Mar. 31, 2021, <https://thestrategybridge.org/the-bridge/2021/03/31/a-comprehensive-approach-to-space-deterrence>, 访问时间: 2024年7月30日。

③ Forrest E. Morgan, “Deterrence and First-Strike Stability in Space,” pp. 24-33; Roger Harrison, Deron Jackson and Collins Shackelford, “Space Deterrence: The Delicate Balance of Risk,” *Space and Defense*, Vol. 3, No. 1, 2009, pp. 1-22.

度,^①还可能损害战略灵活性,^②毕竟反卫星活动并不像核袭击那样直接危及国家生存。

在意识到太空脆弱性缺陷后,美国推出了“弹性(resilience)^③太空战略”。自2013年美空军出台《弹性和分散太空架构》文件后,^④“弹性太空”概念反复出现在美国各层级战略文件中。2022年白宫发布的《国家安全战略》广泛使用“弹性”一词形容美国在各领域的国家安全目标。该文件在论述太空安全问题时指出:“美国将加强太空系统的弹性,这对国家安全和国土安全起到关键作用。”^⑤2020年美国国防部发布的《国防太空战略》指出:“为在太空营造全面军事优势,国防部必须转变其太空企划,包括改革组织机构,落实弹性架构以发展反制对手的能力,培训适应新威胁的专家、学说和作战概念。”^⑥2021年白宫发布的《美国太空优先事项框架》将国家安全太空架弹性建设构列为优先事项之一,文件要求“加速实现更具弹性的太空国家安全态势,增强对太空敌对行为的探测和归因能力”。^⑦美国参谋长联席会议出版物《JP 3-14 太空作战》开篇指出,“国防部的太空政策聚焦于威慑对手,应对威胁和追求弹性太空架构。”^⑧兰德公司等智库也纷纷指出,美国太空威慑战略

① Rafał Kopeć, “Space Deterrence: In Search of a ‘Magical Formula’,” p. 125.

② Francis Gavin, “The Myth of Flexible Response: United States Strategy in Europe during the 1960s,” *The International History Review*, Vol. 23, No. 4, 2001, pp. 847-875.

③ “resilience”最初是一个物理学概念,指物体或系统在遇到外力后恢复通常形态的能力。近年来美国国家安全战略中开始流行这一词语,中文可翻译为“弹性”或“韧性”。本文遵循太空安全领域的习惯翻译为“弹性”。

④ U. S. Air Force, *Resiliency and Disaggregated Space Architectures*, 2013, <https://spp.fas.org/military/resiliency.pdf>, 访问时间:2024年7月30日。

⑤ The White House, *National Security Strategy*, 2022, 2022, p. 45, <https://media.defense.gov/2022/Oct/27/2003103845/-1/-1/2022-NATIONAL-DEFENSE-STRATEGY-NPR-MDR.pdf>, 访问时间:2024年7月30日。

⑥ U. S. DoD, *Defense Space Strategy Summary*, 2020, 2020, p. 7, https://media.defense.gov/2020/Jun/17/2002317391/-1/-1/2020_defense_space_strategy_summary.pdf, 访问时间:2024年7月30日。

⑦ The White House, *United States Space Priorities Framework*, 2021, <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/AD1155604.pdf>, 访问时间:2024年7月30日。

⑧ U. S. Joint Chiefs Staff, *Joint Publication 3-14: Space Operations*, 2020, p. vii, https://irp.fas.org/doddir/dod/jp3_14.pdf, 访问时间:2024年7月30日。

应“三管齐下”，在巩固太空报复能力的同时，打造太空拒止能力，针对某些反卫星威胁塑造特定国际规范。^①可见，弹性太空对于美国而言不仅是一个技术概念，还渗透到了战略、组织、文化等各层面。

（二）巨型星座的安全影响

凭借巨大的卫星数量和电子信息技术的赋能，巨型星座有广泛的民用和军用潜能，^②可能深刻改变太空及其他领域的战略态势。

一，重塑太空实力格局。冷战结束后的二十多年里，“一超多强”的太空实力格局和多极化趋势对美国的太空霸权企图起到一定限制。由于巨型星座建设以强大的航天发射能力为前提，其商业运营需要全球市场的支持，未来太空实力格局可能出现垄断断化趋势。^③

① Elbridge Colby, “From Sanctuary to Battlefield: A Framework for a U. S. Defense and Deterrence Strategy for Space,” Center for New American Security (CNAS), 2016, <https://www.cnas.org/publications/reports/from-sanctuary-to-battlefield-a-framework-for-a-us-defense-and-deterrence-strategy-for-space>, 访问时间:2024年7月30日; Krista Langeland and Derek Grossman, “Tailoring Deterrence for China in Space,” RAND, 2021, https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA943-1.html, 访问时间:2024年7月30日; Stephen J. Flanagan, Nicholas Martin, Alexis A. Blanc and Nathan Beauchamp-Mustafaga, “A Framework of Deterrence in Space Operations,” RAND, 2023, https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA820-1.html, 访问时间:2024年7月30日; James P. Finch and Shawn Steene, “Finding Space in Deterrence: Toward a General Framework for ‘Space Deterrence’,” *Strategic Studies Quarterly*, Vol. 5, No. 4, 2011, pp. 10-17; Nathaniel A. Peace, “Space Denial: A Deterrence Strategy,” *Joint Force Quarterly*, Vol. 111, No. 4, 2023, pp. 58-66.

② 李德仁等:《论军民融合的卫星通信、遥感、导航一体天基信息实时服务系统》，载《武汉大学学报·信息科学版》，2017年第11期，第1501—1505页；邢强:《低轨巨型星座的建设及其影响分析》，载《中国航天》，2019年第12期，第43—47页；吴超、谢伟:《“星链”计划未来发展分析》，载《国际太空》，2020年第6期，第13—17页；徐帆江等:《软件定义卫星技术的概念及发展》，载《北京航空航天大学学报》，2021年第11期，第1—12页；丁冬等:《基于STK二次开发的导弹预警星座部署研究》，载《中国电子科学研究院学报》，2022年第7期，第664—669页；张昌芳、王文佳:《技术视角下低轨大规模星座武器化的国际规制》，载《国防科技》，2023年第4期，第75—80页。

③ 俞润泽、江天骄:《“星链”对太空军控的影响》，载《现代国际关系》，2022年第6期，第36—37页。

二,扭转太空攻防态势。太空系统具有天然的脆弱性,^①这造成了太空中进攻相对于防御的优势,也是美国太空威慑战略长期面临的障碍。^②凭借庞大的卫星数量、快速迭代升级的发展模式和军民结合的优势,巨型星座为太空脆弱性的改善提供了空前的技术条件。^③

三,恶化太空拥挤问题。巨型星座庞大的卫星数量增加了空间碰撞风险。“星链”大规模发射以来已造成多起在轨接近事件并引发国际纠纷。^④如果国际社会不能采取有效的应对措施,以后此类事件将更加频繁。另外巨型星座建设可能导致太空无线电频率和轨道资源(简称“频轨资源”)的枯竭,后来者可能面临无频轨资源可用的境地。^⑤

四,跨域冲突风险。由于巨型星座对导弹防御、网络安全、常规军事冲突和社会经济发展都具备重要意义,它可能使太空战略意义提升。而当某些国家在其他领域发生危机时,他们有可能为取得“先发制人”优势而在太空首先爆发冲突。^⑥

五,“灰色冲突”风险。民商航天在巨型星座中的领先优势和示范效应加剧了太空军民融合。美军方主导的扩增作战部队太空架构(Proliferated Warfighter Space Architecture,简称PWSA)项目在规划初期就强调要利用

① David Wright, Laura Grego and Lisbeth Gronlund, *The Physics of Space Security: A Reference Manual*, Cambridge: American Academy of Arts & Sciences, 2005, pp. 109-176.

② 何奇松:《脆弱的高边疆:后冷战时代美国太空威慑的战略困境》,载《中国社会科学》,2012年第4期,第188—189页。

③ 刘爱志、谢智歌、商哲然:《美国“弹性太空概念”:演进、战略举措与战略影响》,载《卫星与网络》,2021年第11期,第73页。

④ “2022年2月10日外交部发言人赵立坚主持例行记者会”,外交部网站,2022年2月10日,来源:https://www.mfa.gov.cn/web/wjdt_674879/fyrbt_674889/202202/t20220210_10640920.shtml,访问时间:2024年7月30日。

⑤ 王国语、卫国宁:《低轨巨型星座的国际空间法问题分析》,载《国际法研究》,2020年第2期,第84—97页;张轶男等:《巨型星座发展与太空现代化治理》,载《北京航空航天大学学报(社会科学版)》2021年第3期,第134—141页。

⑥ 张煌、杜雁云:《“星链”军事化发展及其对全球战略稳定性的影响》,载《国际安全研究》,2023年第5期,第39—91页;余南平、严佳杰:《国际和国家安全视角下的美国“星链”计划及其影响》,载《国际安全研究》,2021年第5期,第67—91页。

商业公司的成熟技术。^①太空探索公司在2022年12月也推出了专门服务军方的“星盾”(Star Shield)计划。传统上太空安全问题是战略意义明显的“高级政治”问题,太空安全国际机制的建设主体和约束对象是各国政府,然而商业航天的崛起及其造成的军民结合对这一体系构成了挑战。^②

(三) 巨型星座对太空脆弱性的影响

为实现弹性太空目标,美国曾投资过快速补网发射、卫星隐身等技术,但这些技术未从根本上扭转其太空脆弱状态。^③现在巨型星座的出现为太空脆弱性的改善提供了空前的技术条件。

巨型星座的出现恰逢美国弹性太空建设的关键阶段,因而被其视为改善太空脆弱性的重要技术途径。“星链”运营后,美军高层多次肯定其对弹性太空战略的价值,认为其不仅可以凭借庞大的卫星数量抵消少量动能反卫星武器的攻击,还可借助军民融合和快速升级能力,具备更强的受损后恢复能力。^④兰德公司在多份报告中建议,美军应利用商业卫星增强太空弹性,^⑤

① 该项目原名“NDSA”,规划内容参见“The National Defense Space Architecture (NDSA): An Explainer,” SDA, U. S. Space Force, Dec. 5, 2022, <https://www.sda.mil/the-national-defense-space-architecture-ndsa-an-explainer/>, 访问时间:2024年7月30日。

② 俞润泽、江天骄:《“负责任外空行为”议程与太空安全机制新动向》,载《国际安全研究》,2023年第3期,第133—156页。

③ “Resilience for Space Systems: Concepts, Tools and Approaches,” The Aerospace Corporation, 2018, <https://aerospace.org/sites/default/files/2018-05/Resilience%20for%20Space%20Systems.pdf>, 访问时间:2024年7月30日。

④ “US General: Starlink in Ukraine Showing What Mega-constellations Can Do,” *SpaceNews*, Mar. 8, 2022, <https://spacenews.com/u-s-general-starlink-in-ukraine-showing-us-what-megaconstellations-can-do/>, 访问时间:2024年7月30日; “SASC-Hearing-Transcript-8Mar2023,” U. S. Space Command, Mar. 8, 2023, <https://www.spacecom.mil/Newsroom/News/FY2024-Testimony/SASC-Hearing-Transcript-2023/>, 访问时间:2024年7月30日。

⑤ Jonathan Wong et al., “Leveraging Commercial Space Services Opportunities and Risks for the Department of the Air Force,” RAND, 2023, https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA1724-1.html, 访问时间:2024年7月30日; Alexandra Evans et al., “Space Strategic Stability Assessing U. S. Concepts and Approaches,” RAND, 2024, https://www.rand.org/pubs/research_reports/RRA2313-1.html, 访问时间:2024年7月30日。

设法改变对手关于美国太空脆弱性的认知。^①大西洋委员会也在一份报告中指出,商业小卫星正越来越多地替代传统军用卫星,美国军方和情报部门应拥抱这一变化。^②

不过,巨型星座加剧了太空拥挤和空间碰撞事故风险,这可能导致另一个层面的太空脆弱性加剧。“星链”大规模发射以来已造成多起在轨接近事件并引发国际纠纷。^③国际宇航学界正对巨型星座大规模部署后的空间碰撞风险开展大量研究。^④现有研究基本认同,如果国际社会不能采取有效的太空交管措施,太空拥挤威胁将日趋严重。太空拥挤问题的恶化不仅可能加剧美国的太空脆弱性,也不利于全人类和平、可持续地利用太空。

三、基本概念与分析框架

(一) 太空安全威胁的来源

中国外交部指出:“外空安全包含两个层面问题(即 safety 和 security):

① Krista Langeland and Derek Grossman, “Tailoring Deterrence for China in Space,” p. 31.

② Nicholas Eftimiades, “Small Satellites: The Implications for National Security,” Atlantic Council, 2022, https://www.atlanticcouncil.org/wp-content/uploads/2022/05/Small_satellites-Implications_for_national_security.pdf, 访问时间:2024年7月30日。

③ “2022年2月10日外交部发言人赵立坚主持例行记者会”,外交部网站,2022年2月10日, https://www.mfa.gov.cn/web/wjdt_674879/fyrbt_674889/202202/t20220210_10640920.shtml, 访问时间:2024年7月30日。

④ 此类文章已成为空间碎片研究的热点,代表性文献有:S. LeMay et al, “Space Debris Collision Probability Analysis for Proposed Global Broadband Constellations,” *Acta Astronautica*, Vol. 151, 2018, pp. 445-455; Aaron C. Boley and Michael Byers, “Satellite Mega-constellations Create Risks in Low Earth Orbit, the Atmosphere and on Earth,” *Scientific Reports*, Vol. 11, No. 1, 2021, pp. 1-8; Mark A. Sturza and G. Saura Carretero, “Mega-Constellations—A Holistic Approach to Debris Aspects,” Proceedings of the 8th European Conference on Space Debris (Virtual), Darmstadt, Germany, 2021; Yan Zhang et al, “An Analysis of Close Approaches and Probability of Collisions Between LEO Resident Space Objects and Mega Constellations,” *Geo-spatial Information Science*, Vol. 25, No. 1, 2022, pp. 104-120; Nathan Reiland et al, “Assessing and Minimizing Collisions in Satellite Mega-constellations,” *Advances in Space Research*, Vol. 67, No. 11, 2021, pp. 3755-3774; Haicheng Tao et al, “Impact of Mega Constellations on Geospace Safety,” *Aerospace*, Vol. 9, No. 8, 2022; 沈丹、刘静:《大型低轨星座部署对空间碎片环境的影响分析》,载《系统工程与电子技术》,2020年第9期,第2041—2051页;李翠兰等:《大型低轨航天器与星座卫星的碰撞风险研究》,载《宇航学报》,2020年第9期,第1158—1165页。

一是外空武器化和军备竞赛问题。……二是和平利用外空过程中产生的安全风险,包括空间轨道拥挤、碰撞风险、空间碎片等问题。”^①由于中文语境缺乏能准确区分上述两个层面的术语,下面以故意威胁和非故意威胁代指两个层面的安全威胁。

1. 故意威胁

对太空系统的故意威胁主要是各种反卫星活动和针对地基系统的破坏行为。^②反卫星手段按作用效果可分为破坏性手段和干扰性手段;按作用方式可分为动能手段、定向能手段、电磁手段和网络手段。这些手段的作用效果和技术难度(技术难度很大程度上决定了扩散程度)不同,需要分开讨论(见表 1)。

表 1 各类反卫星手段的技术难度

	破坏性	干扰性
动能手段	低	高
定向能手段	高	中
电磁手段	高	低
网络手段	高	低

资料来源:作者自制。

(1) 动能(kinetic)反卫星手段是指使用物理撞击或接触,破坏或干扰对方卫星的手段,它可分为破坏性手段和干扰性手段。据国外公开资料,苏联和美国早在上世纪六七十年代就进行了非核战斗部的动能反卫星试验;冷战后中国和印度也公开进行过这类试验。^③需要指出的是,动能反卫星和反导在技术上很类似,后者的难度还更大,因此装备有远程反导拦截弹的国家

① 《中国根据联大第 75/36(2020)号决议提交的文件》,中华人民共和国常驻联合国代表团,2021 年 4 月 30 日, http://un.china-mission.gov.cn/chn/zgylhg/cjyjk/ldyw/202105/t20210505_9126963.htm,访问时间:2024 年 7 月 30 日。

② 为控制研究范围,本文不讨论使用核武器的情况,也不讨论针对地基系统的行为。

③ “SWF Releases New Fact Sheets on Anti-satellite Testing in Space by Multiple Countries,” Secure World Foundation, 2022, <https://swfound.org/news/all-news/2020/08/swf-releases-new-fact-sheets-on-anti-satellite-testing-in-space-by-multiple-countries>,访问时间:2024 年 7 月 30 日。

也具备破坏性动能反卫星能力,包括日本、韩国和以色列。另外,一些具备航天发射能力的国家也被认为接近于拥有破坏性动能反卫星能力。^①可见这种反卫星手段较容易扩散。

干扰性动能手段以共轨伴飞技术为基础,旨在对目标航天器进行抵近侦察、在轨俘获、轨道干扰等操作。与破坏性动能手段相比,干扰性动能手段的技术难度大很多,一般依靠航天飞机、太空态势感知卫星等具备较强变轨机动和共轨伴飞能力的特殊航天器实现。据国外公开资料,目前美国、俄罗斯、中国、日本等国家都展示过与干扰性动能反卫类似的在轨维修、在轨燃料加注等技术,在一定程度上具备发展该能力的技术基础。^②

(2) 定向能(directed energy)反卫星手段是指使用激光、微波、离子束等具有良好指向性的能量束,在目标表面产生高密度能量,从而对目标卫星实施破坏或干扰的手段。定向能反卫星手段的效果是破坏还是干扰可由发射功率控制,发射功率越大,技术难度越大。因此干扰性定向能手段的技术难度较低,破坏性定向能手段的技术难度较大。由于这种反卫星活动的作用效果不容易观察,因此对于其扩散程度缺乏可靠资料。但基本可以确定,美国和苏联在冷战时期都发展过这类手段。

(3) 电磁(electronic)反卫星手段是指使用电磁波干扰(jamming)敌方卫星的通信,直接导致部分电子设备失能、失效或功能降级的手段。本质上,它属于暂时性的干扰手段,但也可能间接导致卫星受到不可逆的破坏。理论而言,最基础的干扰性电磁反卫星活动只需要合适的大功率无线电发射装置就可以开展,技术难度很低。但考虑到现代卫星普遍采用了不同程度的抗干扰措施,电磁手段要达到破坏效果并不容易。

(4) 网络(cyber)反卫星手段是指通过各种方式接入目标卫星或地面系统的计算机和通信网络,进而开展破坏通信、篡改软件、窃取数据等活动,造成信息或物理层面可逆或不可逆损失的手段。网络手段对硬件设备的要求非常低,因此干扰性网络手段的技术门槛很低。但网络手段要达成破坏效

① Todd Harrison et al., "Space Threat Assessment 2022," CSIS, 2022, pp. 16-22, https://csis-website-prod.s3.amazonaws.com/s3fs-public/publication/220404_Harrison_SpaceThreatAssessment2022.pdf, 访问时间:2024年7月30日。

② Ibid., pp. 8-21.

果较难,需要以一定的网络能力为基础,且网络攻防技术的发展速度很快。

总结上述各类手段可以发现,破坏性动能反卫星手段具有技术难度低、作战效果明确的特点,因此扩散程度较为严重,受关注度较高。其他反卫星手段的扩散程度不详,实战效果有待证明。

2. 非故意威胁

太空系统面临的非故意威胁可理解为各种事故,^①主要是各类空间物体^②与航天器碰撞事故。在过去较为宽松的空间环境下,空间碰撞事故的发生概率较低,因此受重视程度不及故意威胁。

过去的理论和经验认为,空间碰撞事故主要来自于中等尺寸(1~10cm)的空间物体(主要是碎片),^③碰撞产生的碎片后果也较小。因为较大尺寸(10cm 以上)空间物体(主要是碎片和现役航天器)的数量很少;较小尺寸(1cm 以下)的空间物体(主要是碎片和自然物体)数量虽然很多,但可以有效防护(见表 2)。截至 2017 年底,全世界公开报道过约 15 起空间碰撞事故,其中仅 2009 年“铱星”碰撞事故由较大尺寸碎片引发,其他碰撞事故均由较小尺寸碎片引发。^④ 两现役航天器之间的碰撞事故至今尚未发生过。

但随着太空拥挤的加剧,不仅空间碰撞事故的发生概率增加,而且较大尺寸空间物体(包括现役航天器和碎片)与现役航天器发生碰撞的事故风险已不容忽视。这种碰撞容易产生大量碎片,进一步恶化空间环境,造成恶性循环。因此,巨型星座不仅可能直接造成意外碰撞风险,如果发生严重碰撞事故,大量碎片还会产生间接威胁。

① 按照现代汉语的一般理解,事故意味着存在意外的人员和财产损失。因此空间碎片之间的碰撞不能被称为事故。

② 空间物体包括现役航天器、空间碎片和自然物体。根据机构间空间碎片协调委员会(IADC)的定义,空间碎片指“空间碎片是指地球轨道上或再入大气层的一切已失效人造物体,包括其碎块或部件”,参见 IADC Steering Group and Working Group, “IADC Space Debris Mitigation Guidelines, Rev. 3,” 2021, p. 8. 据此,完整的退役航天器也属于碎片。

③ 李彬:《军备控制理论与分析》,第 126 页。

④ 李明等:《空间碎片监测移除前沿技术与系统发展》,载《科学通报》,2018 年第 25 期,第 2573 页。

表 2 不同尺寸空间物体的数量及危害

尺寸 /cm	数量 /万件	数量 百分比/%	碰撞 概率	对航天器的危害	航天器的 应对策略	空间碎片 后果
0.1~1	13500	99.62	很大	部组件或分系统失效;关键部组件或分系统失效可能导致航天器失效;也可能在短期内无危害	无法监测,可防护	轻微,无法观测
1~10	50	0.37	较小	部组件、分系统失效;或航天器爆炸、解体和彻底失效	难以监测,无法防护	较小,不易观测
>10	1.7	0.01	很小	航天器爆炸、解体和彻底失效	可监测、规避;无法防护	很大,容易观测

资料来源:李明等:《空间碎片监测移除前沿技术与系统发展》,载《科学通报》,2018 年第 25 期,第 2573 页。

(二) 共同脆弱的成因

在巨型星座出现前,各国在太空处于共同脆弱的状态。即便某些国家可以通过政治手段减少故意威胁,也难以避免非故意威胁。

一方面,物理学法则决定了太空系统的天然脆弱性。^①首先,航天器绝大部分时间在固定轨道上依靠惯性飞行,变轨机动能力弱,光学、雷达特征明显。其次,航天器处于高速飞行状态且自身重量较轻,因而难以承受相对速度巨大的碰撞所产生的动能。因此在现有材料技术条件下,航天器加固措施只能抵御毫米尺寸级别空间物体(即较小的碎片和天然物体)的碰撞。^②最后,航天器的运行离不开地面系统的跟踪、遥测、遥控、授时和通信等服务,经过遥远距离传播的微弱电磁信号容易受到干扰。

^① David Wright, Laura Grego and Lisbeth Gronlund, *The Physics of Space Security: A Reference Manual*, pp. 109-176.

^② 汤靖师、程昊文:《空间碎片问题的起源、现状和发展》,载《物理》,2021 年第 5 期,第 319—321 页。

另一方面,太空具有全球公域属性。轨道动力学决定了地球轨道上的航天器必须不停地环绕地球运动才能克服引力。因此1967年《外空条约》第二条明确规定:“各国不得通过主权利要求,使用或占领等方法,以及其他任何措施,把外层空间(包括月球和其他天体)据为己有。”根据联合国的定义,全球公域是“不属于任一特定国家管辖、所有国家都有权出入的资源领域”。^①中国官方明确指出:“外空是全球公域,攸关全人类的安全与福祉。”^②虽然美国军方出于太空军事化、战场化和武器化的目的,已不再将太空定义为全球公域,但仍有民间智库认同太空的全球公域属性。根据新美国安全中心(CNAS)的观点,全球公域具备四条特征:一是不被任一实体拥有或控制;二是作为一个整体的效用大于分割后的效用;三是国家和非国家行为体在具备必要技术能力后能够出入其中并加以利用;四是能作为军事的机动和冲突空间。^③从这些描述可以看出,任何国家都无法通过对太空的独占、控制、分割而摆脱太空脆弱性。

(三) 单边弹性的成因

美国之所以认为巨型星座可以塑造单边弹性,主要是因为这项技术有利于抵御故意威胁。

根据《弹性与分散太空系统》白皮书,太空弹性有六方面指标:一,分离性(disaggregation),指战略、战役和战术级别的需求应该在不同的平台上得到满足,避免高级资产在低级冲突中受损;二,分布性(distribution),指一种功能应该由若干相互独立的节点承担,避免一种破坏因素造成整体性受损;三,多样性(diversification),指依靠军队、政府民事部门、商业公司国际伙伴

① “Report of the UN System Task Team on the Post-2015 UN Development Agenda,” https://www.un.org/en/development/desa/policy/untaskteam_undf/untt_report.pdf, 访问时间:2024年7月30日。

② “常驻联合国代表傅聪大使在安理会表决外空安全决议草案时的发言”,外交部网站,2024年4月24日, https://www.mfa.gov.cn/zwbd_673032/wjzs/202404/t20240425_11289043.shtml, 访问时间:2024年7月30日。

③ Abraham Denmark et al., “Contested Commons: The Future of American Power in a Multipolar World,” Center for a New American Security, 2010, p. 10.

等各类主体共同建设太空系统。巨型星座军民结合的特点提升了太空系统的多样性;四,防护性(protection)。防护性是指采取主动或被动措施提高太空系统的安全;五,扩散性(proliferation),与分布性类似,指一种功能应该由大量同样的平台、载荷或系统来满足,避免少数关键资产受损造成整项能力缺失;六,欺骗性(deception),即通过隐身、伪装等手段隐藏太空军用资产,增加被攻击的难度。

巨型星座的弹性优势首先体现在庞大的卫星数量上。庞大的卫星数量可以在一定程度上抵消对手反卫星武器的攻击,即便少量卫星受损也只影响到系统在部分地区或部分时间的运作能力,不至于造成大范围的系统瘫痪。其次,巨型星座的软件定义卫星功能有助于系统在遭受损失时的恢复。借助多波束成形相控阵雷达、星间数据融合、星上计算等功能,巨型星座可以更好适应复杂的电磁和网络环境,这一点在俄乌冲突中已经得到初步验证。再次,巨型星座也存在一定的防护性优势。巨型星座庞大的卫星数量、频繁的轨道机动和一定程度的光学隐身措施给现有太空态势感系统提出了挑战,增加了目标识别和跟踪难度。^①最后,巨型星座的军民结合不仅可以节省太空军力建设的成本,还可为军事资产提供备份。

四、巨型星座条件下的太空脆弱性分布

如前文所述,巨型星座可能导致太空中共同脆弱的加剧,也可能塑造美国的单边弹性。从目前的现实来看,这两种假设都存在一定依据。

(一) 巨型星座对共同脆弱的影响

共同脆弱主要来自于太空拥挤及其产生的空间碰撞风险。美西方为了转移太空军控焦点,常强调动能反卫星活动的碎片后果,并借助可信度存疑

^① Ryan Hiles et al., "Report on 2020 Mega-Constellation Deployments and Impacts to Space Domain Awareness," Proceedings AMOS Conference, 2021; "NSF and SpaceX Reach Agreement to Reduce Starlink Effects on Astronomy," *SpaceNews*, Dec. 12, 2023, <https://spacenews.com/nsf-and-spacex-reach-agreement-to-reduce-starlink-effects-on-astronomy/>.

的数据指责中俄破坏空间环境。然而巨型星座对空间环境恶化的作用已与历史上几次动能反卫星试验的总和相当。美国国家航空航天局提供的数据(图1)显示,历史上地球轨道发生过3次在编物体短期内急剧增长的事件。其中两次由动能反卫星试验导致。^①其中2007年中国动能反卫星试验在短期内产生了约3000件可观测碎片;2021年俄罗斯反卫星试验在短期内产生了约1500件可观测碎片;2009年“铱星”碰撞事故在短期内产生了约2500件碎片。作为对比,“星链”将在2027年前发射至少1.2万颗卫星,对空间物体增长的影响大于上述三期事件总和。

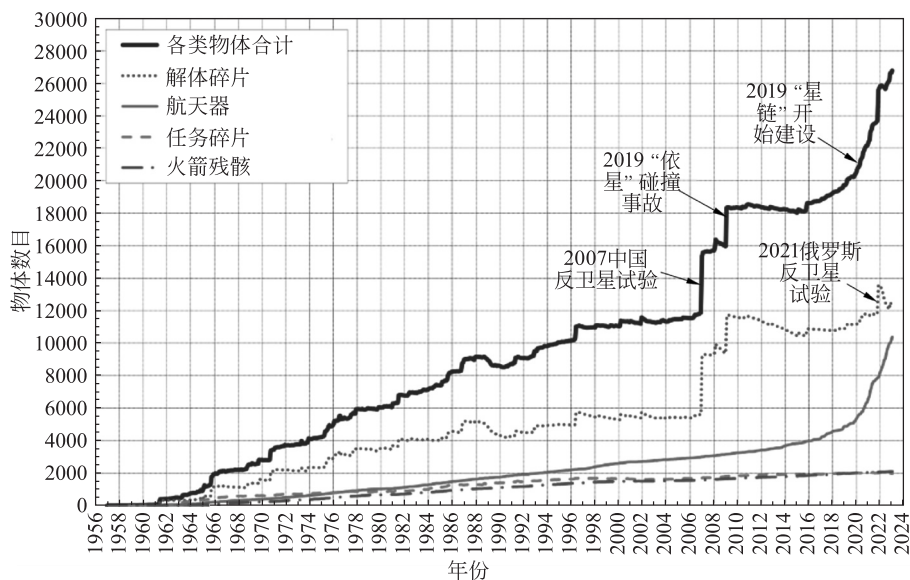


图1 地球轨道 10cm 以上物体历史增长情况

注:(1)图中数据截至2023年3月;(2)图中数据的时间分辨率为月。

资料来源:NASA Orbital Debris Program Office, *Orbital Debris Quarterly News*, Vol. 27, No. 1, 2023, p. 12, <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODQNv27i1.pdf>, 访问时间:2024年7月30日。

^① 需要指出的是,且不论统计标准的差异和故意隐瞒的可能,美国对其反卫星试验的碎片记录也存疑。因为冷战时期各国对空间碎片问题的关注度较低,当时的技术条件也有限,因此当时美国和苏联动能反卫星试验的碎片后果或已很难确认。

在更加拥挤的空间环境下,较大尺寸空间物体间的严重碰撞(包括故意的动能反卫星活动和非故意的碰撞事故)将加速空间碎片增长,产生严重间接后果。“凯斯勒效应”(Kessler's Syndrome)理论预言了空间环境恶化的极端后果。美国航空航天局科学家唐纳德·凯斯勒(Donald Kessler)及其合作者在上世纪70年代的一篇物理学论文中提出,随着空间物体增多,空间物体发生碰撞的频率增加,而碰撞产生的碎片又会增加未来发生碰撞事件的频率,这种级联效应将导致空间物体数目加速增长,且增长速率大于空间物体因稀薄大气阻力减速重返地球的速率。最终地球轨道将被海量碎片构成的“碎片带”所包围,处于碎片带(最先可能出现在低轨空间)和需要穿越碎片带的航天器安全将受到严重威胁(参见图2)。

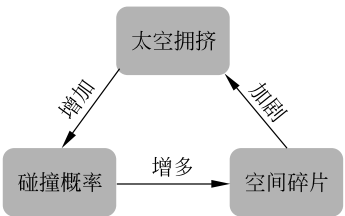


图2 “凯斯勒效应”的级联过程

资料来源:作者自制。

上述预言具有丰富的战略意义。首先,动能太空战会加速空间环境的恶化,对全人类太空安全构成严重威胁。中国学者李彬在21世纪初指出,大规模动能反卫星活动或导致地球被“碎片带”包围,就此而言,美国的太空武器化政策有违其自身利益。^① 美国有学者认为,从政策角度而言,动能太空战的严重碎片后果与“核冬天”理论类似,虽然前者对人类安全的影响不及后者,但对于这种后果的畏惧可能帮助太空威慑的建立。^②

其次,较大尺寸空间物体间发生碰撞事故并加速空间环境恶化的可能已经出现,虽然其加速效应不及大规模太空战。按 IADC 最新规则下25年

① 李彬:《军备控制理论与分析》,第128页。

② Karl Mueller, “The Absolute Weapon and the Ultimate High Ground: Why Nuclear Deterrence and Space Deterrence Are Strikingly Similar yet Profoundly Different,” pp. 51-52.

内 90% 离轨的标准,^①1.2 万颗“星链”中将有 1200 颗成为长期留轨的碎片。一项基于 1664 颗“星链”部署场景的研究指出,在采取一定离轨措施的情况下,“星链”在未来 50 年仍有 60% 的可能发生灾难性碰撞。^②何况避碰机动和寿终离轨措施本身也构成碰撞风险,因为这种行为导致轨道参数更加不规律,碰撞预警的难度加大。^③据太空探索公司透露,截至 2023 年 7 月,“星链”共进行过 25000 次避碰机动,且此类行为呈加速增长趋势。^④有研究指出,一颗低轨卫星发生碰撞事故风险最大的阶段正是其通过电推发动机缓慢降低轨道的时间段,因为这种机动提供了与更多高度轨道卫星发生交会的可能。^⑤中国空间站与“星链”的几次危险接近事件正是由后者的轨道提升机动造成。

最后,对于上述极端后果的共同畏惧或可为太空国际制度的建设供动力。中国学者借助“凯斯勒效应”,强调太空的全球公域属性,呼吁全球合作。^⑥美国也有学者认为,如果国际社会能就“凯斯勒效应”达成类似于“相互摧毁”的共识,那么将有助于建立基于国际制度的威慑。^⑦但制度合作中免不了竞争。中国官方背景的学者呼吁,太空环境治理涉及面广,具有战略意义;由于各国在此领域的能力存在差距,应该将其视为当前大国太空博弈

① IADC, *IADC Space Debris Mitigation Guidelines Rev. 3*, 2021, p. 14.

② S. Le-May et al., “Space Debris Collision Probability Analysis for Proposed Global Broadband Constellations,” *Acta Astronautica*, Vol. 151, 2018, pp. 445-455.

③ Carmen Pardini and Luciano Anselmo, “Environmental Sustainability of Large Satellite Constellations in Low Earth Orbit,” *Acta Astronautica*, Vol. 170, 2020, pp. 27-36.

④ “SpaceX Starlink Satellites Had to Make 25,000 Collision-avoidance Maneuvers in Just 6 Months—and It Will Only Get Worse,” Space. com, Jul. 7, 2023, <https://www.space.com/starlink-satellite-conjunction-increase-threatens-space-sustainability>, 访问时间:2024 年 7 月 30 日。

⑤ Jonas Radtke, Christopher Kebschull and Enrico Stoll, “Interactions of the Space Debris Environment with Megaconstellations—Using the Example of the OneWeb Constellation,” *Acta Astronautica*, Vol. 131, 2017, pp. 55-68.

⑥ 张茗:《如何定义太空:美国太空政策范式的演进》,第 103—104 页。

⑦ Surya G. Gunasekara, “Mutual Assured Destruction: Space Weapons, Orbital Debris, and the Deterrence Theory for Environmental Sustainability,” *Air and Space Law*, Vol. 37, No. 2, 2012, pp. 141-164.

中的一项紧迫任务。^①

不过从科学技术角度而言,“凯斯勒效应”的发生过程、发生速度及危害最严重时对航天器安全的实际影响尚无并无明确的结论。^②客观而言,很难确定多大威胁算是“不可接受”。地球轨道上现有数万在编物体,每个物体的轨道参数有六个(即“轨道六根数”),这些参数还受到地球引力分布不均、日月引力等因素而微小变化(即“摄动”),因此用计算机仿真的方法精确预报每个物体的碰撞风险非常困难。主观而言,各国面临的碰撞风险不同,因为他们卫星的轨道分布不同。例如俄罗斯的国土位于高纬度地区,比其他国家更多选择高倾角大椭圆轨道,^③这类轨道的卫星面临的碰撞风险可能小于 LEO 或 SSO 轨道,因为其穿越空间物体密集区域的时间较少。

(二) 巨型星座对单边弹性的影响

在单边弹性的状态下,巨型星座有望在总体上减少太空进攻相对于防御的优势。它可大幅降低动能反卫星手段的效能,在一定程度上降低电磁反卫星手段的效能,对网络反卫星手段效能的影响则不确定(见表 3)。下面将分别讨论现有非核反卫星手段面对巨型星座目标时的效能变化。

表 3 各类反卫星手段面对巨型星座目标的效能变化

反卫星手段	动能手段	定向能手段	电磁手段	网络手段
效能变化	大幅降低	有所降低	有所降低	不确定

资料来源:作者自制。

① 徐纬地:《太空安全博弈与国际航天合作——空间交通管理视角下的太空安全态势与中国对策思考》,载《空间碎片研究》,2021 年第 1 期,第 20 页;杜辉等:《太空环境治理领域发展:概念的演进》,载《空间碎片研究》,2023 年第 2 期,第 47 页。

② 为了探究空间物体、空间碎片与空间碰撞的复杂关系,科学家发展了两类在研究方法上相差较大但现实中又紧密关联的理论,即短期工程模型和长期演化模型。不过目前这两类理论的精度都不足。参见张景瑞等:《空间碎片研究导论》,北京理工大学出版社 2021 年版,第 49—58 页。

③ 这种轨道具有大倾角、大离心率的特点,在轨卫星在环绕地球一周的过程中大多数时间位于高纬度地区上空,故只需少数几颗卫星就可以实现对高纬度地区的全时覆盖,特别适合于俄罗斯的地理条件。

1. 动能反卫星手段的效能变化

(1) 针对巨型星座目标,破坏性动能反卫星手段效能大幅削弱的主要原因有两点。第一,一枚动能拦截弹的价格远高于一颗小卫星,进行数量上的军备竞赛并不经济。与传统的结构加固、隐身、机动变轨等防御思路不同,巨型星座仅凭巨大的卫星数量和低廉的卫星价格就可以降低动能反卫星武器的效能。单颗“星链”卫星在2020年的制造和发射成本合计约100万美元,每年可以发射两千多颗。^①作为对比,美国2008年反卫星试验使用的“标准-3”海基中段拦截弹单价约970~2800万美元(出口价格更高),目前美国及其盟友装备约300枚;射程更远的陆基中段反导拦截弹价格7000万美元,目前美国装备了不到60枚。^②

第二,轨道力学决定了动能手段难以在短时间内全面瘫痪所有低轨卫星。大多数巨型星座卫星位于LEO轨道中,一般需数天至数周时间才能重访特定地域,且不会机动至高纬度地区;另一些高轨道倾角(如SSO)卫星虽然重访间隔较短,但它们在星座中的数量占比较少。而地基拦截弹只能在很小范围内(相较于整个地球表面而言)拦截卫星,不论作战反应速度多快,都无法在短时间内全面瘫痪巨型星座。

(2) 与破坏性动能反卫星活动相比,干扰性动能反卫星活动操作更复杂、行动更缓慢,大规模开展的成本更高,针对巨型星座目标的效能也更低。与地基动能拦截弹相比,执行干扰性动能反卫活动的航天器需要经过较长时间的机动才能靠近轨道相差较大的目标,且其携带的燃料所允许的变轨次数和范围有限。如果长期保持对目标的抵近伴飞就不存在上述问题,但要对上万颗目标卫星保持一一跟踪在成本上难以接受。

2. 定向能反卫星手段的效能变化

定向能反卫星手段效能下降的主要原因也来自于轨道力学。地基定向

① “Musk’s SpaceX Plans a Spinoff, IPO for Starlink Business,” Bloomberg, Feb. 2, 2020, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2020-02-06/spacex-likely-to-spin-off-starlink-business-and-pursue-an-ipo>, 访问时间:2024年7月30日。

② “Missile Interceptors by Cost,” Missile Defense Advocacy Alliance, Feb. 2024, <https://missiledefenseadvocacy.org/missile-defense-systems-2/missile-defense-systems/missile-interceptors-by-cost/>, 访问时间:2024年7月30日。

能手段和地基动能手段一样存在作战范围有限的缺点,地基定向能手段还容易受到天气影响。如要在短时间内全面瘫痪大量低轨卫星,就需要在全球范围内建设多个基地。天基定向能手段虽然作战范围更大,且不易受大气层内的天气影响(可能受到空间天气的影响,如太阳风暴),但目前没有公开资料证实了这种武器的部署。即便有国家已秘密部署少数天基定向能武器,在部署规模很小的情况下也难以在短时间内瘫痪整个巨型星座。

但与动能手段相比,定向能反卫星手段的效能下降程度较小,主要原因在于其在大规模作战中的非线性效费比优势。在拦截成功率一定的条件下,动能反卫星手段的作战效果(拦截卫星数)大体上与拦截弹数量成正比。而定向能手段的成本主要在于研发、部署和运维,发射成本很低,主要是电能和一些零部件的维修、更换。因此,定向手段的发射次数越多,单次发射的平均费用越低,在大规模作战中的效费比理论上要高于动能手段。

3. 电磁反卫星手段的效能变化

电磁反卫星手段面对巨型星座目标时的效能下降程度比定向能手段更严重,但不及动能手段。与动能手段相比,电磁手段存在效费比优势,原理与定向能手段类似。与定向能手段相比,电磁反卫星手段更容易被巨型星座防御,因为电磁手段的破坏作用是间接的。与传统卫星相比,巨型星座卫星可以通过软件快速升级更好地对抗电磁干扰,如针对特定信号及时关闭易受损电子设备、经过特定区域时自主关闭通信、通过软件升级后不依赖部分受损电子设备等。2022年俄乌冲突初期,俄罗斯曾使用制式电子战装备干扰“星链”系统,导致乌克兰地区的“星链”服务一度中断。太空探索公司则通过软件升级的方式,在数日内化解了俄方干扰。^①

4. 网络反卫星反手段的不确定性

网络反卫星手段在面临巨型星座目标时的效能变化存在不确定性。一方面,网络反卫星手段的效能可能上升。第一,网络手段的作用范围不受物理空间限制,可以在短时间内攻击大量卫星。如果网络攻击的成本不变,那

^① Alex Horton, “Russia Tests Secretive Weapon to Target SpaceX’s Starlink in Ukraine,” *The Washington Post*, Apr. 18, 2023, <https://www.washingtonpost.com/national-security/2023/04/18/discord-leaks-starlink-ukraine/>, 访问时间:2024年7月30日。

么目标卫星数量越多,其效费比越高。第二,巨型星座比传统卫星更加依赖星间通信,星地间通信接口也更普及。在巨型星座终端普及后,网络攻击的发起者可能不需要借助大型地面站,仅通过一个民用消费级终端就能入侵巨型星座的网络。

另一方面,巨型星座可以通过软件升级的方式应对网络攻击,且有能力建设巨型星座的国家通常也具备较强的网络能力。随着网络技术的复杂化,网络攻击的规模越大、后果越严重,其对技术能力和技术队伍的要求也越高,“网络珍珠港”式的非对称袭击越来越难以发生。^①

五、巨型星座条件下的太空博弈

巨型星座可能导致太空出现共同的且比过去更严重的脆弱性,也可能导致单边脆弱的局面。下面将分别针对两方面的极端情况,对巨型星座时代的太空博弈形态进行推测。

(一) 共同脆弱的博弈

如果巨型星座导致了太空共同脆弱的加深,美国不仅无法实现基于太空弹性的霸权目标,还可能面临更多的制衡。

1. 大国间双边博弈

在共同脆弱条件下,太空或形成一种类似于核领域“相互脆弱”的状态,进而产生所谓的“稳定/不稳定悖论”。

美国学者格伦·斯奈德(Glenn Snyder)在二十世纪六十年代基于美苏“相

^① Erik Gartzke, “The Myth of Cyberwar: Bringing War in Cyberspace Back Down to Earth,” *International Security*, Vol. 38, No. 2, 2013, pp. 41-73; Adam Liff, “Cyberwar: A new ‘Absolute Weapon’? The Proliferation of Cyberwarfare Capabilities and Interstate War,” *The Journal of Strategic Studies*, Vol. 35, No. 3, 2012, pp. 401-428; 沈逸、江天骄:《网络空间的攻防平衡与网络威慑的构建》,载《世界经济与政治》,2018年第2期,第49—70页;张耀、许开轶:《攻防制衡与国际网络冲突》,载《国际政治科学》,2019年第3期,第90—124页。

互摧毁”态势提出,战略层面的“恐怖平衡”可能导致低水平层面冲突的增多。^①由于美苏都意识到了“相互摧毁”的严重后果,因此双方在面对危机时发起核冲突的冲动减少。但当他们都知道对方的这一谨慎态度后,可能更频繁地发动低水平冲突。“稳定/不稳定悖论”似乎解释了苏联在当时的地缘政治扩张行为,因而在西方有一定影响力。虽然该理论存在一些逻辑漏洞,^②但却基本比较符合太空中的情况。首先,在巨型星座出现前,太空并非处于严重的不稳定中。其次,太空中的高水平冲突可对应为产生严重碎片后果的动能太空战;低水平冲突可对应为不易产生严重碎片后果的其他冲突形态。最后,太空高、低层面的不稳定都可以用相关冲突事件的频率和后果来衡量。

如果太空存在“稳定/不稳定悖论”的状态,一方面,大国间动能太空战的风险可能降低。假如中美都能充分认识到太空共同脆弱的状态,并达成一定程度的共识,任何保持理智的一方都应该对动能太空战的风险进行自我控制,或许还可以进行协商。^③因为动能太空战可能产生的大量空间碎片将对己方构成严重威胁,不会帮助获得军事上的相对优势。除非两国的战略冲突严重到可以为此牺牲所有太空资产,动能太空战不应该是任何一方的优先选择。另一方面,当双方都意识到对方畏惧于动能太空战时,他们可能更倾向于开展后果较轻的干扰性反卫星行动,特别是不易产生大量碎片的定向能、电磁和网络手段。

在“稳定/不稳定悖论”的状态下,太空稳定的主要风险在于误判和冲突升级。在更加拥挤的环境下,太空危机管控的复杂性比核领域更大。首先,“凯斯勒效应”的级联的过程可能不受政治领导人的控制。^④其次,即便在冲突手段上克制,太空军民融合容易导致错误的目标设定,引发对手误判。最

① Glenn Snyder, *Deterrence and Defense Toward a Theory of National Security*, Princeton: Princeton University Press, 1961.

② 胡高辰、李彬:《稳定—不稳定悖论的批判与美国的安全研究范式分析》,载《国际论坛》,2018年第7期,第53—54页。

③ Michael Krepon, “Space and Nuclear Deterrence,” pp. 15-40.

④ 张煌、杜雁云:《“星链”军事化发展及其对全球战略稳定性的影响》,第44—45页。

后,即便各方对太空拥挤恶化的最极端后果存在共识,但由于该问题客观上的不确定性,不能排除对手采取机会主义的可能。

从一些迹象看来,美国或许已在一定程度上意识到了空间环境新形势下动能太空战的灾难性后果,甚至流露出一定的自我约束意愿。美国太空军第二任作战部长钱斯·萨尔茨曼(Chance Saltzman)在2023年3月称:“与其他领域不同,我们在太空的控制不能依赖压倒性的摧毁力量。可行的目标是在持续的竞争中维持稳定,既不驱使对手打破态势,又不使之绝望。”^①同年11月,他在大西洋委员会举办的研讨会上指出:“(中国的反卫星武器)带来双重问题,它可以消灭我们的卫星,该行动产生的碎片在轨道上还会造成其他麻烦。这是我们需要分辨的复杂问题。”^②2024年4月,美国太空司令部司令史蒂芬·怀廷(Stephen Whiting)透露,中国军队在过去六个月“积极”与美国讨论了太空问题。^③虽然怀廷未透露议题内容,但他在讲话中借机表达了对太空拥挤问题的担心。

2. 大国与小国间双边博弈

更加严重的共同脆弱可能对美国的太空威慑战略构成重大挑战,甚至造成战略被动,因为小国可以凭借动能太空战的灾难性后果对美国进行威慑。对于太空低依赖的小国而言,如果双方的太空资产都大规模受损,己方在太空领域的劣势可以被消除。如果小国要对大国进行威慑,可采取多种技术手段。除了技术门槛较低的地基动能反卫星导弹,甚至可以考虑采取技术难度更低的卫星“自爆”等手段。而对大国而言,对于“凯斯勒效应”的

① “Saltzman Outlines ‘Theory of Success’ Guiding Space Force in Fulfilling Its Essential Missions,” U.S. Space Force, Mar. 7, 2023, <https://www.spaceforce.mil/News/Article-Display/Article/3322198/saltzman-outlines-theory-of-success-guiding-space-force-in-fulfilling-its-essen/>, 访问时间:2024年7月30日。

② “Saltzman: China’s Anti-satellite Weapons Are ‘Compounding Problem We Have to Figure Out’,” *Air and Space Forces Magazine*, Nov. 15, 2023, <https://www.airandspaceforces.com/saltzman-china-anti-satellite-weapons-compounding-problem/>, 访问时间:2024年7月30日。

③ 《美太空司令:中国过去六个月“积极”与美讨论太空安全问题》,载《联合早报》,2023年4月15日,来源:<https://www.zaobao.com/news/china/story20240414-3422032>, 访问时间:2024年7月30日。

担忧将限制其采取进攻性行动。

实际上,美国方面早已提出对这种场景担忧。兰德公司在2010年的一份研究报告中指出,当一个太空低依赖的对手使用低烈度手段攻击美国太空资产以抵消美国太空优势,美国采取对等报复行动并不会削弱其军事能力。^①2022年一篇英国期刊的文章甚至认为,太空劣势的一方可利用“凯斯勒效应”反制太空优势的一方。^②

3. 多边博弈

在多维博弈的复杂态势中,小国之间、大国与小国、大国之间的关系比双边博弈更难以管控。在太空共同脆弱加深的条件下,多维博弈失控的后果更加严重。

以朝鲜半岛的多方博弈为例,其涉及中国、美国、朝鲜、韩国、俄罗斯和日本六个国家。有观点认为,该地区小国与大国的关系比较复杂。某些时候,朝鲜半岛的政治势力大体分为两大阵营;另一些时候,小国可能与传统友好的大国存在分歧。^③因此,或为更加激进地对抗传统对手,或为增强战略自主性,小国可以利用“凯斯勒效应”向大国发起战略要挟。如果大国无法控制小国间的冲突,也可能因此蒙受意外的损失。2023年朝鲜三次进行卫星发射后,朝韩双方发生了激烈的言语冲突。韩国联参作战本部长姜浩弼(音)称:“若朝方不顾韩方警告强行发射军事侦察卫星,韩军将采取必要措施以维护国民生命安全。”^④朝鲜方面的回应更加强烈,2024年1月15日朝鲜领导人金正恩在朝鲜第十四届最高人民会议第十次会议上称:“北南关系已不再是同族关系、同质关系、而是敌对的两国关系,完全是战争中的两个

① Forrest E. Morgan, “Deterrence and First-Strike Stability in Space,” pp. 26-27.

② Bohumil Doboš and Jakub Pražák, “Master Spoiler: A Strategic Value of Kessler Syndrome,” *Defence Studies*, Vol. 22, No. 1, 2022, pp. 123-137.

③ 杨原、曹玮:《核边缘、信号博弈与小国的“自我孤立”》,载《当代亚太》,2018年第6期,第69—105页;钟振明:《美朝之间强压型互动的分化联盟逻辑——一种“楔子”战略的分析》,载《教学与研究》,2018年第11期,第50—58页;曹金绪:《实力与决心的较量——三方不对称军事威慑博弈分析》,载《国际政治科学》,2013年第2期,1—34页。

④ 韩联社:《详讯:韩促朝停止军事侦察卫星发射活动》,2023年11月20日,来源:<https://cn.yna.co.kr/view/ACK20231120002200881>,访问时间:2024年7月30日。

交战国关系。”^①可见,朝韩爆发太空冲突的可能并非不存在。

总之,随着动能反卫星能力的扩散,非对称威胁可能成为美国需要面临的重大挑战,且这种威胁未必来直接来自于对手。因此美国有理由强化太空国际合作。这种合作不仅需要在大国间开展,可能还需要国际社会形成广泛的动能太空战“禁忌”。

(二) 单边弹性的博弈

在美国独具太空弹性的情况下,其与航天大国和小国的博弈本质上相同,只是程度上存在差异。此时,国际政治多极化力量的非对称手段很可能难以发挥制衡作用,美国的太空战略可能更具进攻性。

1. 大国间双边博弈

巨型星座一方面减少了美国对遭受太空报复的顾虑;另一方面可通过通导遥一体化、智能指挥控制和太空态势感知能力,增强美国“先发制人”的效率。^②借助这种优势,美国的太空威慑(deterrence)战略可能朝太空驱使(compellence)战略演变,即以改变现状而非维持现状为目的。^③

对于美国的对手而言,一方面过去依赖的非对称制衡手段很可能被削弱;一方面自身的太空资产处于脆弱中。据国外公开资料,美国之外的其他国家虽然进行了多次动能反卫星试验和具有技术共通性的中段反导试验,但拦截器的部署数量少于美国,也远少于“星链”等巨型星座计划部署量。^④面对美国的太空军事威胁,这些国家如果采取太空“先发制人”策略,不仅无

① 《朝鲜决定废除祖国和平统一委员会等朝韩事务机构》,新华网,2024年1月16日,来源:<http://www.news.cn/world/20240116/0cadbcb4841f4e4cad671e5552b5e9c0/c.html>,访问时间:2024年7月30日。

② 张煌、杜雁云:《“星链”军事化发展及其对全球战略稳定性的影响》,第38—39页。

③ 严格意义上而言,威慑和驱使的重要区别在于前者谋求维持现状,后者谋求改变现状。参见李彬:《中美对“核威慑”理解的差异》,载《世界经济与政治》,2014年第2期,第9—13页。

④ “Military and Security Developments Involving the People’s Republic of China,” U. S. DoD, 2023, p. 99; Todd Harrison, “Space threat assessment 2022,” CSIS, 2022, p. 10.

法有效削弱对手基于巨型星座的太空进攻能力,还可能导致己方太空资产遭受大规模报复。如果采取“后发制人”策略,军事上的后果可能更严重。因为太空作战离不开卫星提供的太空态势感知、指挥控制等信息支援能力,这些能力在“后发制人”时很可能已经遭到削弱。

上述态势正是美国弹性太空战略的目标。美国太空军首任作战部长约翰·雷蒙德(John W. Raymond)2022年明确表示,增强太空弹性是太空军未来十年的首要任务。^①鉴于“国防支援系统”(DSP)、“宽带全球卫星通信系统”(WGS)、“锁眼”(Keyhole)系列卫星等传统战略卫星价格昂贵且数量稀少的缺点,美国太空军高层已明确表示未来不会再采购这类卫星,^②替代选择正是“PWSA”和“星链”等项目。^③2019年版《导弹防御评估》重新将天基导弹拦截器研发重新纳入计划,^④此举可能将太空的武器化和战场化推向新的高度。据《南华早报》披露,美国太空态势感知卫星在2020—2021年间曾14次靠近中国高价值GEO卫星,或进行抵近侦察或干扰行动。中国航天领域的一位科学家指出,双方之所以未披露此类事件是因为可能会加剧国家之间的紧张关系,并导致外交甚至军事冲突。”^⑤国际制度领域,美国正积极参与太空军控议程的竞争,拉拢盟友加入中止“破坏性直升式反卫星试验”的国际承诺,意在削弱中国动能反卫星武器效能,划定报复性威慑的“红线”。^⑥

① “Space Force’s Top Priority for Next Decade: Resiliency, Says CSO Raymond,” *Defense News*, Mar. 3, 2022, <https://breakingdefense.com/2022/03/space-forces-top-priority-for-next-decade-resiliency-says-cso-raymond/>, 访问时间:2024年7月30日。

② “Space Force Not Buying Large Satellites for the Foreseeable Future,” *SpaceNews*, Jan. 24, 2023, <https://spacenews.com/space-force-not-buying-large-satellites-for-the-foreseeable-future/>, 访问时间:2024年7月30日。

③ 不过太空军与其他军种和情报机构间还存在部门利益冲突,如导弹防御局、国家侦察办公室等机构就希望保留属于自己的重型卫星。

④ “Missile Defense Review 2019: Executive Summary,” U. S. DoD, 2019, p. XIV.

⑤ “Study Says US Spy Satellites Approaching China’s High-value Space Assets a ‘Threat to Security’,” *South China Morning Post*, May. 5, 2023, https://www.scmp.com/news/china/science/article/3219350/too-often-too-close-study-says-us-spy-satellites-approaching-chinas-high-value-space-assets-threat?campaign=3219350&module=perpetual_scroll_0&pgtype=article, 访问时间:2024年7月30日。

⑥ 俞润泽、江天骄:《“负责任外空行为”议程与太空安全机制新动向》,第133—156页。

2. 大国与小国的双边博弈

单边弹性还可能导致美国与其他小国间的关系更加紧张。因为小国对太空依赖度很低,美国即便具备了太空弹性,恐怕也难以成功威慑对手;美国更具进攻性的政策反而可能激怒对手。

这里以美朝太空关系为例进行一个推测。自上世纪 90 年代以来,朝鲜一直致力于发展远程导弹和运载火箭技术并进行多次“和平目的”的卫星发射活动。每当朝鲜进行卫星发射活动后,美国方面一般以“违反联合国相关决议”“掩盖其洲际弹道导弹开发项目”“可能用于携带核弹头威胁地区和全球安全”“升级地区紧张局势”“不利于朝鲜半岛和平和无核化”为由进行强烈谴责。迄今为止,联合国针对朝鲜远程导弹和运载火箭开发的制裁决议已达近十份,美国和一些西方还发起了单边制裁活动。但近年来朝鲜的太空开发却在加速,美朝围绕朝鲜发射卫星问题的言语冲突正愈发激烈。2023 年 11 月 22 日,朝鲜使用“千里马-1”型火箭发射“万里镜-1”卫星后,美军太空司令部官员进行了罕见的言语威胁,称可使用多种可逆及不可逆方法削减敌国太空领域运用能力,暗示对朝卫星实施军事攻击的可能。^①此前美国官方虽然屡次谴责朝鲜的卫星发射活动,但并由没有明确威胁要使用军事手段对其进行拦截。而朝方予以了同样强硬的回应。朝鲜国防省发言人在 2023 年 12 月对上述威胁发表强硬回应称:“针对朝鲜卫星的任何形式的侵犯(比如干扰),都将被认为是对朝方的宣战”。朝方还称:“如果美方企图干涉朝方的航天活动,朝方将考虑削减或摧毁美国侦察卫星的生存能力,以此作为回应。”^②这是朝鲜首次阐明其在太空使用武力的立场。

可见,美国即便增强了太空弹性,也不能有效威慑朝鲜。对于朝鲜而言,国家和政权的生存是其对外战略的首要动机,而美国对朝鲜的太空军事行动不足以威胁其生存。来自美国的核报复可能威胁到朝鲜的生存,但美国基本不可能因太空资产受损而采取核报复。因此,对于一个缺乏太空资

① “North Korea Launches Spy Satellite, Violating UN Security Council Resolution,” *USNI News*, Dec. 4, 2023, <https://news.usni.org/2023/11/22/north-korea-launches-spy-satellite-violating-un-security-council-resolution>, 访问时间:2024 年 7 月 30 日。

② 《朝鲜国防省:侵犯朝鲜太空资产将被视为宣战行为》,新华网,2023 年 12 月 2 日, http://www.news.cn/world/2023-12/02/c_1130005468.htm, 访问时间:2024 年 7 月 30 日。

产和太空活动的对手而言,美国太空威慑战略的作用有限。

3. 多边博弈

在美国垄断巨型星座的时期,多极化力量或可考虑合力制衡,可能的手段包括三类。

一,联合开展巨型星座建设,塑造对称的太空弹性。但除中国外的其他国家即便联合起来仍与美国有较大实力差距。以英国“一网”(OneWeb)项目为例。2022年前,该项目曾规划超千颗的低轨卫星计划,被认为是“星链”的主要竞争对手。然而2022年俄乌冲突爆发后,“一网”失去了唯一的发射服务供应商,面临破产危机。2023年9月,“一网”公司与法国主导的欧洲第一大卫星通信公司欧洲卫通(Eutelsa)合并,以继续“一网”建设。^①然而合并后的“一网”仍然发展乏力。由于欧洲缺乏发射能力,2024年2月欧洲卫通公司取消了原定的“一网”二代计划,“一网”前途堪忧。^②

二,加强国际太空交通管理制度,限制巨型星座建设规模。太空交通管理是对信息主动通报、太空态势感知合作、频轨资源分配、空间碎片减缓、避让协调机制、主动碎片移除等系列措施的总称。由于这些措施存在递进关系,全面、系统的解决方案很难在短期内形成。^③简单的卫星数量控制也难免和气候谈判一样充满争议,因为如前所述,地球轨道可容纳卫星的上限尚无明确客观的标准。

三,开展太空军控合作,限制美国的太空军事化动作。中俄太空军控过去长期未能取得实质性成果,现在由于巨型星座的出现,中俄方案中的定义模糊、核查困难等缺点变得更加明显。^④与此同时,美国中止“破坏性直升式

① “Eutelsat and OneWeb Combine to Create European Satellite Giant as Musk’s Starlink Pressures Sector,” CNBC, Sep. 28, 2023, <https://www.cnbc.com/2023/09/28/eutelsat-oneweb-merge-to-create-satellite-challenger-to-musks-starlink.html>, 访问时间:2024年7月30日。

② “Eutelsat Scales Back OneWeb Gen 2 Upgrade Plan,” *SpaceNews*, Feb. 16, 2024, <https://spacenews.com/eutelsat-scales-back-oneweb-gen-2-upgrade-plan/>, 访问时间:2024年7月30日。

③ 龙杰、张韬:《低轨大型星座下空间交通管理的安全挑战与应对》,载《国际安全研究》,2024年第3期,第126—156页。

④ 徐能武、龙坤、孟鑫:《国际安全视角下太空军控的缘起、演进和发展动向》,载《国际安全研究》,2022年第5期,第107—129页。

反卫星导弹试验”的倡议也对各方起到分化作用,进一步阻碍了国际太空军控共识的达成。^①

总之,鉴于太空实力格局重组的态势和太空拥挤问题的复杂性,其他国家对美国进行合力制衡面临重重困难。

六、结论与讨论

太空脆弱性一直是影响太空安全博弈的重要因素。过去各国在太空共同的脆弱性对太空稳定性起到了一定积极作用。巨型星座的出现则可能改变这一历史。

本文的核心问题是,在美国垄断巨型星座的时间段,太空脆弱性分布将如何变化,又会如何影响国际博弈的形态?为此本文提出了两种假设:一是巨型星座恶化太空拥挤,加深各国在太空的共同脆弱;二是巨型星座帮助美国抵御反卫星武器威胁,使其具备单边弹性优势。目前两种假设都存在一定的现实依据,但何种场景会成为现实,还取决于未来太空拥挤的严重程度。而关于太空拥挤“不可接受”的标准,尚无明确客观的答案。

基于两种假设,本文进一步分析了巨型星座条件下的太空博弈形态。在极端的共同脆弱条件下,美国不仅难以实现弹性太空的目标,其太空威慑还可能面临更多的掣肘。美国与大国间的动能太空战的风险可能因“相互脆弱”的共识而减小,但低级别冲突的风险或增加。此时对美国面临的更大挑战可能在于,太空低依赖的小国或通过较简单的动能手段对美国进行威慑。在复杂的多边博弈中,如果某一方失控,还可能对全人类造成灾难性后果。在单边弹性的条件下,美国可能因不再畏惧报复而采取更具进攻性的太空政策,太空中的稳定可能受到破坏。如果美国的对手不具备太空弹性,或将处于被动;如果他们进行合力制衡,也存在一定困难。

中国官方指出:“(外空)两个层面的安全问题不在同一层次,二者的解决路径也应有所区别,应避免混淆、以偏概全、主次不分。如果不能防止外

^① 俞润泽、江天骄:《“负责任外空行为”议程与太空安全机制新动向》,第133—156页。

空军备竞赛、确保外空的和平性质,任何安全都无从谈起。”^①即便未来太空拥挤程度非常严重,大规模动能太空战对空间环境恶化的加速效应也大于偶发的空间碰撞事故。因此中国一贯反对太空武器化和军备竞赛,积极推进太空人类命运共同体建设。

同时,中国也需要更加重视太空拥挤问题的战略意义。习近平主席2021年9月16日在视察部队时指出:“要开展太空安全国际合作,提高太空危机管控和综合治理效能。”^②中国主张从更宽、更广的视角理解当代战略问题;^③倡导共同、综合、合作、可持续的新安全观。^④从某些角度来看,加强太空拥挤的国际治理对包括中国在内的全人类有积极作用。首先,中国和美国一样高度依赖太空,保证太空资产安全和太空能力良好应是中国太空安全战略的首要目标。因此中国既要抵御太空军事化、武器化和战场化的威胁,也应防范太空意外碰撞事故风险,甚至或需警惕太空拥挤发展到极端情况的可能。其次,鉴于巨型星座的重要战略价值,在积极开展外空军控活动的同时,或需更多考虑广义国际制度的作用。在空间碰撞风险日益严重的将来,关于巨型星座总量控制和交管规则的国际治理可能对保护中国巨型星座安全有重要价值。最后,适度强调太空拥挤问题严重性有助于制约部分国家过度抢占频轨资源的“不负责”行为,维护全人类平等、可持续利用太空的权利。

① 《中国根据联大第75/36(2020)号决议提交的文件》,中华人民共和国常驻联合国代表团,2021年4月30日,来源:http://un.china-mission.gov.cn/chn/zgylhg/cjyjk/ldyw/202105/t20210505_9126963.htm,访问时间:2024年7月30日。

② 《习近平在视察驻陕西部队某基地时强调 聚焦备战打仗 加快创新发展 全面提升履行使命任务能力》,载《人民日报》,2021年9月17日,第1版。

③ 《中华人民共和国主席和俄罗斯联邦总统关于加强全球战略稳定的联合声明》,载《人民日报》,2016年6月24日,第3版。

④ 《全球安全倡议概念文件(全文)》,中国政府网,2023年2月21日,来源:https://www.gov.cn/xinwen/2023-02/21/content_5742481.htm,访问时间:2024年7月30日。