

COSMOS 1408 解体碎片云演化分析*

莫星健¹ 梁伟² 赵相雷¹
雷祥旭^{1,3,4} 赵有⁴

1(山东理工大学建筑工程与空间信息学院 淄博 255000)

2(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

3(中国科学院精密测量科学与技术创新研究院 精密大地测量与定位全国重点实验室 武汉 430071)

4(中国科学院国家天文台 北京 100101)

摘要 地球轨道的航天器越来越多, 近地空间密度不断增大. 据统计, 现有空间碎片主要来源于约 640 次的解体事件. 研究卫星解体事件对维持空间环境安全具有重要意义. 2021 年 11 月 15 日, 俄罗斯进行了一次反卫星试验, 摧毁了一颗报废卫星——COSMOS 1408 卫星. 事件产生了一片由约 1800 个可跟踪碎片组成的碎片云, 碎片云分布于 200~1400 km 高度区间, 随时间扩散演化, 对低地球轨道 (Low Earth Orbit, LEO) 卫星运行构成威胁. 本文基于美国空间监视网 (Space Surveillance Network, SSN) 发布的关于 COSMOS 1408 解体事件碎片的两行轨道根数 (Two Line Element, TLE), 利用简化广义摄动模型第四版 (Simplified General Perturbations 4, SGP4) 模型对该碎片云进行演化分析, 主要包括碎片云的编目数量和时空变化、主要轨道参数变化、解体碎片对空间环境的影响, 并以事件碎片导致的国际空间站 (International Space Station, ISS) 四次机动规避碎片事件为例, 探究其演化规律以及带来的影响, 初步还原了 COSMOS 1408 反卫星事件碎片云的演化过程以及造成的影响.

关键词 空间碎片云, 卫星解体, 碎片分布, 环境影响, 机动规避

中图分类号 V528, V419

Analysis of COSMOS 1408 Debris Cloud Evolution

MO Xingjian¹ LIANG Wei² ZHAO Xianglei¹
LEI Xiangxu^{1,3,4} ZHAO You⁴

1(School of Civil Engineering and Geomatics, Shandong University of Technology, Zibo 255000)

2(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing 100094)

3(State Key Laboratory of Precision Geodesy, Innovation Academy for Precision, Measurement Science and Technology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071)

4(National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

* 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2023MD098), 空间目标感知全国重点实验室 2024 年度开放基金项目 (STA2024ZCA0102) 和大地测量与地球动力学国家重点实验室开放基金项目 (SKLGED2024-3-5) 共同资助

2024-07-10 收到原稿, 2024-12-30 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Abstract The number of spacecrafts in Earth orbit continues to increase, leading to growing density in near-Earth space. Statistics show that existing space debris primarily originates from approximately 640 breakup events. Studying satellite breakup events is crucial for maintaining space environment safety. On 15 November 2021, Russia conducted an anti-satellite test, destroying a defunct satellite — COSMOS 1408. The event generated a debris cloud consisting of approximately 1800 trackable debris distributed across altitudes ranging from 200 km to 1400 km, which disperses and evolves over time, posing threats to Low Earth Orbit (LEO) satellite operations. Based on the Two-Line Element (TLE) data of COSMOS 1408 breakup event debris released by the U.S. Space Surveillance Network (SSN), this paper utilizes the Simplified General Perturbations 4 (SGP4) model to analyze the evolution of the debris cloud. The analysis primarily covers the cataloged quantity and spatiotemporal changes of the debris cloud, variations in main orbital parameters, and the impact of breakup debris on the space environment. Taking the International Space Station's (ISS) four debris avoidance maneuvers as examples, this study investigates the evolution patterns and resulting impacts, preliminarily reconstructing the evolution process of the COSMOS 1408 anti-satellite event debris cloud and its consequences.

Key words Space debris cloud, Satellite breakup, Debris distribution, Environmental impact, Maneuver avoidance

0 引言

空间碎片是指在地球轨道上运行的失效航天器、废弃火箭残骸以及因碰撞或爆炸等原因产生的各类碎片^[1]. 作为在轨空间目标的主要组成部分, 其中大部分源于航天器解体事件, 空间碎片已成为全世界各机构关注的重要问题^[2,3]. 随着人类对空间环境探索的不断深入, 空间碎片数量也在逐年增长. 截至 2024 年 11 月 24 日, 美国公开两行轨道根数 (Two-Line Element, TLE) 目标数量为 47000 个, 其中航天器 10700 个, 待确认目标 17200 个, 空间碎片 19100 个. 解体事件是空间碎片的主要来源之一^[4].

早在 20 世纪 70 年代, 人类就开始对解体事件及其产生的碎片进行深入研究. 世界多个国际机构相继开发了用于碎片分析的空间碎片环境模型, 包括美国的轨道碎片工程模型 (Orbital Debris Engineering Model, ORDEM)、欧空局的流星体与空间碎片地球环境参考模型 (Meteoroid and Space Debris Terrestrial Environment Reference, MASTER) 以及中国的空间碎片演化环境模型 (Space Debris Evolutionary Environment Model, SDEEM) 等^[5]. 这些模型为空间碎片环境评估提供了重要工具.

在空间碎片轨道预报方面, 北美防空司令部开发的 SGP4 模型被广泛应用. 该模型考虑了非球形引力、日月引力、太阳辐射压以及大气阻力等摄动力的

影响^[6]. 其中, 大气阻力作为精确轨道确定和轨道预测的最大误差源之一^[7], 对轨道预测结果有显著影响. SGP4 模型适用于两行轨道根数, 可对近地轨道上的空间目标进行轨道计算, 预测卫星未来几天内的轨道情况.

随着航天活动的日益频繁, 空间碎片防护需求也随之增长^[7]. 近年来, 我国空间碎片监测能力显著提升, 但对于数量庞大的小尺寸碎片, 监测能力仍需加强^[8]. 在空间目标机动规避方面, 研究人员设计了计算碎片云中不同碎片之间最小距离的方法. 通过利用碎片云的轨道信息并定义距离阈值, 可以确定碎片间的接近程度, 从而触发碰撞预警并实施主动规避.

2021 年 11 月 15 日 02:47 UTC, 俄罗斯进行了一次反卫星试验, 摧毁了苏联于 1982 年发射的退役卫星 COSMOS 1408. 该事件产生了 1800 多块大型可追踪碎片, 同时伴随着大量不可探测的微小颗粒. 截至 2024 年 12 月 6 日, 美国空间监视网 (Space Surveillance Network, SSN) 共编目了 1807 个碎片, 其中仍有 27 个碎片在轨, 持续威胁着低地球轨道上运行的航天器.

COSMOS 1408 卫星解体事件产生的密集碎片云给空间目标编目和维护带来了巨大挑战^[9,10]. 研究表明, 该事件可能导致未来数年内数千颗运行卫星的碰撞概率增加一倍以上^[10]. 事件发生后, 美国国家航空航天局 (NASA) 迅速开展了事件危害评估研究^[11].

国内外学者相继分析了本次事件解体碎片对国际空间站 (ISS) 的威胁, 近年来 ISS 已多次执行机动规避操作^[11]. 研究人员利用碰撞模拟工具 (Collision Simulation Tool Solver, CSTS) 设计了简化的卫星模型来模拟 COSMOS 1408 卫星解体^[12], 以更直观地观测卫星形态. 基于粒子群优化算法 (Particle Swarm Optimization, PSO) 模型的模拟结果显示, 受大气阻力影响, 90% 的解体碎片将在一年内重新进入大气层^[13].

鉴于空间碎片对在轨航天器和空间环境安全的潜在威胁, 本研究旨在通过分析 COSMOS 1408 卫星解体事件产生的碎片云, 深入理解碎片云的演化过程和对空间环境的影响, 为空间碎片监测、碰撞预警和主动规避等提供参考.

1 数据与方法

1.1 TLE 数据

本文基于 TLE 数据对 COSMOS 1408 卫星产生的碎片云进行分析. TLE 考虑的一般摄动项包括地球扁率、日月引力的长期和周期摄动影响, 以及大气阻力引起的轨道衰退. 通过 TLE 获取该事件碎片云的相关的参数、位置及轨道信息, 进而了解其运行状态及演化趋势.

1.2 SGP4 模型

本文采用 SGP4 模型作为碎片云轨道预测的核心工具. 该模型通过考虑非球形引力场、日月引力、太阳辐射压以及大气阻力等摄动力的影响, 可实现对近地轨道空间目标的精确轨道预测. 模型基于 TLE, 适用于近地轨道目标的轨道计算, 可预测未来数天内的轨道状态. 在本研究中, SGP4 模型主要用于分析 COSMOS 1408 碎片云的轨道演化特征, 包括碎片的空间分布、轨道参数变化以及与其他航天器的相对位置关系. 通过该模型, 能够对碎片云的整体演化趋势进行量化分析, 为评估空间碎片对在轨航天器的潜在威胁提供重要依据.

1.3 STK 可视化

STK (Systems Tool Kit) 软件作为碎片云演化的可视化工具, 能够实现空间目标轨道的精确计算和三维可视化展示. 在本研究中, STK 软件与 SGP4 轨道传播模型相结合, 用于直观展示 COS-

MOS 1408 碎片云在不同时间节点 (解体后 1 个月、6 个月、12 个月和 28 个月) 的空间分布特征. 通过 STK 的三维场景渲染功能, 本文清晰地呈现了碎片云从初始集中状态到逐渐弥散的整个演化过程. 软件的轨道分析功能还支持碎片与其他航天器的接近分析, 为评估碎片云对 ISS 等目标的潜在威胁提供了有力的工具支持. STK 的应用显著提升了研究结果的可视化效果, 使碎片云的时空演化特征更加直观和易于理解.

2 COSMOS 1408 碎片云演化

COSMOS 1408 卫星的国际代号为 1982-092A, 重达 1750 kg, 初始轨道高度为 666 km $\times$ 636 km, 倾角为 82.6°. 在反卫星实验 (Anti-Satellite Test, ASAT) 实验测试之前, COSMOS 1408 卫星高度已经衰减到 490 km $\times$ 465 km.

2.1 碎片云数量及空间分布特征

作为近地球轨道空间目标编目轨道, TLE 虽轨道预报精度有限, 但具有发布快速、信息全面、易于获得的优点^[14]. 空间碎片编目系统使用多种技术, 包括雷达、光学望远镜和卫星追踪器, 监测和识别轨道上的物体. 通过建立这些详尽的编目目录, 航天机构可以预测碰撞风险, 规划轨道操纵行动, 并保障在轨道操作的卫星和航天员的安全.

从公开的编目目标 TLE 可以获取事件产生的全部编目碎片和各自的 NORAD 编号. 基于从解体当天 (2021 年 11 月 15 日) 至 2024 年 6 月 15 日的 TLE 数据, 对比分析可得每天在轨和累计再入的目标, 如图 1 所示.

由图 1 可知, 截至 2024 年 6 月 15 日, 共编目了此次事件的 1807 个碎片, 其中在轨碎片呈现先增多后减少的趋势, 在 2022 年 2 月 17 日达到顶峰, 多达 1318 个, 再入碎片数量在一年内也急剧增多, 之后缓慢增加. 到目前仍有几十个碎片飞行在低地球轨道上, 对其他航天器的安全造成了一定威胁.

分析 TLE 可得每天新编目的 COSMOS 1408 事件的碎片. 图 2 为 COSMOS 1408 每天新编目的空间碎片数量变化情况, 在解体发生的半年内, NORAD 编目了 1724 个碎片, 占目前该事件总编目的 95% 以上.

图3为STK软件在SGP4轨道传播模型下展示的COSMOS 1408编目碎片在解体后1个月、6个月、12个月、28个月的2021年12月15日、2022年5月15日、2022年11月15日、2024年3月19日4个时间段的轨道分布情况。解体一年后,碎片已经较大范围地均匀分散在低地球轨道上。到2024年3月,编目在轨碎片已经相对稀少。

2.2 碎片云轨道参数变化

为深入分析碎片云的演化特征,这里重点研究碎片云轨道要素的动态变化规律。通过对不同时刻碎片云轨道参数的统计分析,可以清晰反映碎片云的整体演化趋势。

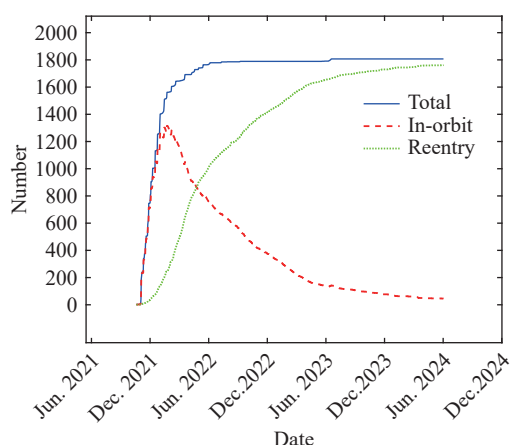


图1 公开编目的COSMOS 1408碎片数量变化

Fig. 1 Changes in the number of debris of COSMOS 1408 in public catalog

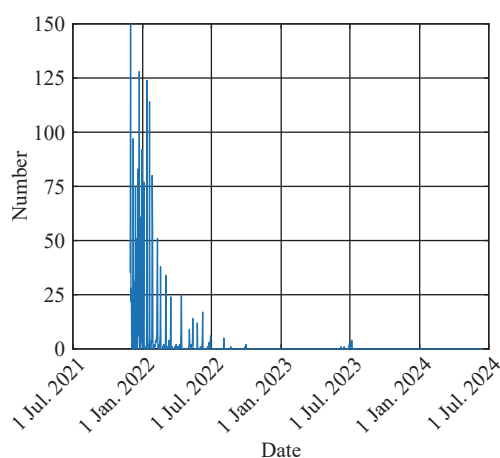


图2 COSMOS 1408每天新编目的空间碎片数量

Fig. 2 Number of the newly catalogued space debris of COSMOS 1408 everyday

图4给出了4个不同时刻碎片云的轨道周期随近、远地点轨道高度变化。

卫星解体后会残存一个体积较大的残骸,称为母体。如图4所示,碎片云大致围绕母体中心点轨道高度上下分布,聚集在其四周。随着时间的推移,数量逐渐减少,但分布规律大体不变,轨道周期主要在87~104 min,轨道高度主要在200~1400 km。结果表明,此次碰撞具有一定的强度,使得碰撞碎片飞离母体轨道高度上下几百千米。分散的碎片近、远地点轨道高度正在逐渐下降,这主要是大气阻力等因素导致其轨道逐渐变圆^[15]。分析COSMOS 1408母体的轨道参数变化,可以反映碎片云的大致演化规律。

表1列出了母体解体前后轨道参数变化,即母体在解体前后最近更新的TLE数据计算结果,包括母体的半长轴、偏心率和倾角。COSMOS 1408在解体后14 d接收到母体的第一次数据,在14 d数据之差中,半长轴约减小5 km,偏心率约增大0.001,倾角约增大0.008°。通过SSN公布的母体解体前三个月至2024年3月期间母体的TLE,分析了母体半长轴 a 、偏心率 e 和倾角 i 的变化情况。

由图5可知,遭遇撞击后的母体碎片,其轨道半长轴随时间推移不断减小,且减小趋势越来越快。母体轨道的偏心率相比解体之前增大到了一个最高点,但随着时间推移也在缓慢减小,轨道倾角也是如此。

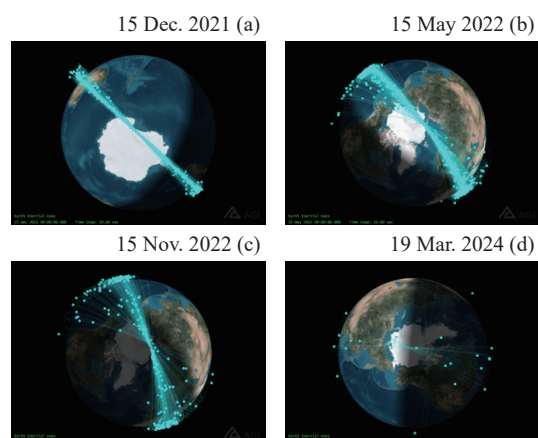


图3 STK软件展示COSMOS 1408编目碎片轨道的时空分布

Fig. 3 Spatio-temporal distribution of cataloged COSMOS 1408 debris cataloged simulated using STK

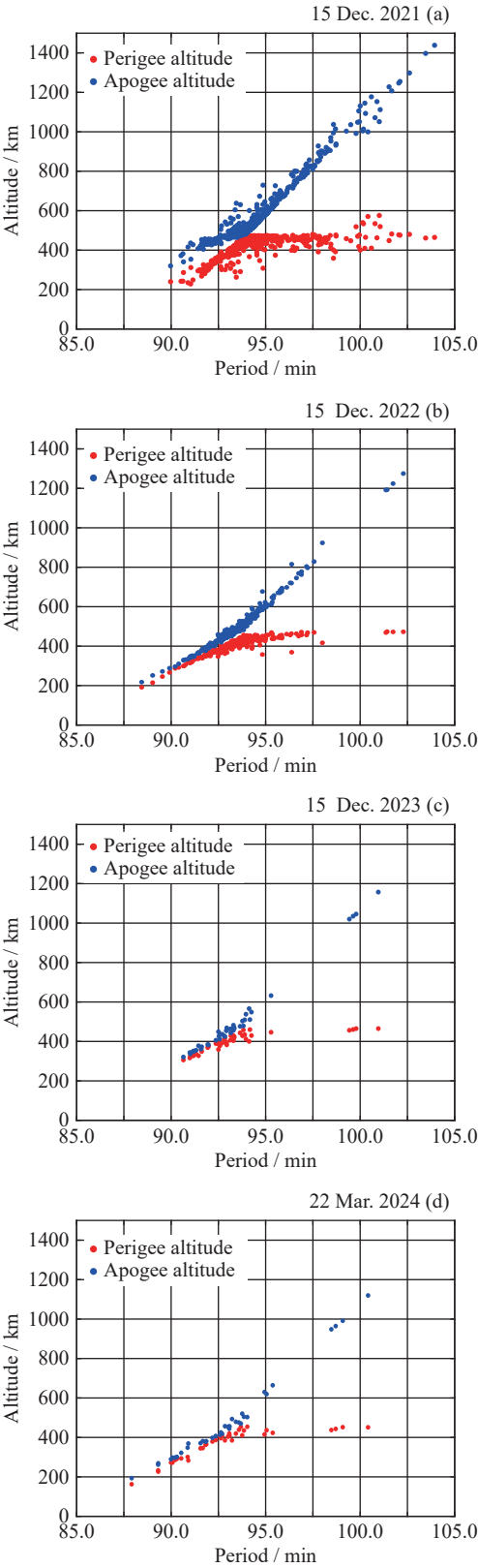


图 4 碎片轨道近、远地点变化
Fig. 4 Perigee and apogee altitude variations of debris orbits

表 1 母体解体前后轨道参数变化
Table 1 Orbital elements variations of the parent body before and after the breakup event

年-月-日	a/m	e	$i/(^{\circ})$
2021-11-15	6851122.7	0.003	82.563
2021-11-29	6845709.0	0.004	82.571
差值	-5413.7	0.001	0.008

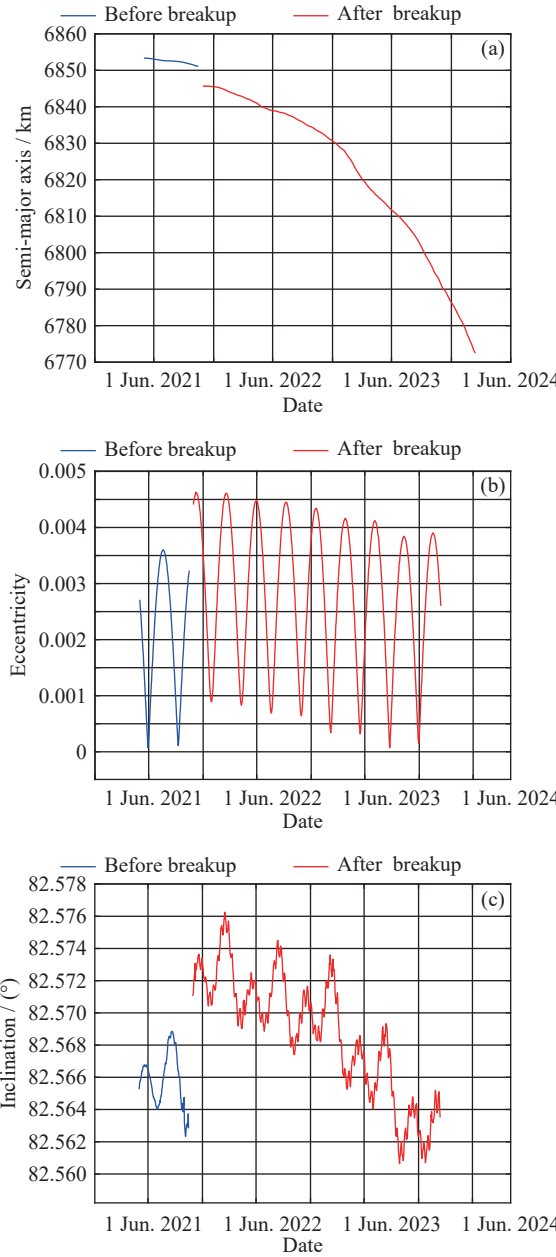


图 5 母体解体前后主要轨道参数变化
Fig. 5 Main orbital elements variations of the parent body before and after the breakup event

3 解体碎片云对空间环境的影响

COSMOS 1408 卫星解体后碎片云经过长期演化,会在地球周围形成均匀的弥散带,给空间环境和空间站等带来长期影响^[16].探究解体碎片对公开编目目录的增长比值变化,简单评估在轨解体碎片对典型航天器 ISS, CSS, StarLink-1007 的风险,并分析在轨碎片迫使空间站机动的过程.

3.1 对近地空间环境的影响

随着航空航天技术的提升,空间目标编目数量也在增长.如图 6 所示,编目目标数量在 2020—2023 年急剧上升, COSMOS 1408 解体事件产生的碎片在这一期间对此占有一定比例.在 2021 年底,占比达 3.21%,尽管占比较小,但是在轨碎片仍有 856 个.

对解体碎片进行实时跟踪和轨道预测,可有效降低对其他航天器的碰撞风险,加强空间环境安全监测,为航天工作提供支持.

3.2 对典型目标的影响

事件发生时, COSMOS 1408 卫星所在轨道高度

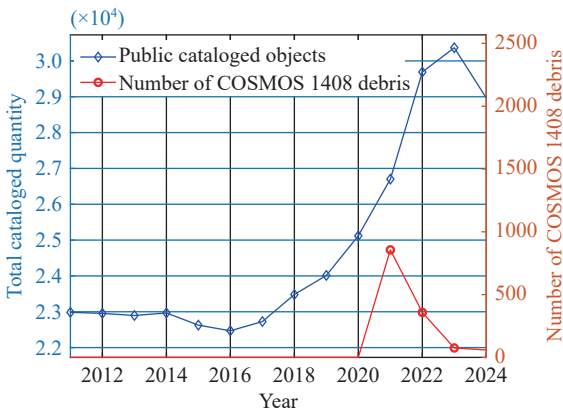


图 6 COSMOS 1408 碎片数量与 SSN 公开的编目目标数量变化

Fig. 6 Changes in the number of COSMOS 1408 debris and public cataloged objects by SSN

约 490 km×465 km,虽然这个高度并不在 800 km 的主要卫星轨道区域,但仍然有很多应用卫星.特别是 ISS, StarLink-1007, CSS 恰好处于 COSMOS1408 碎片云的分布范围内.解体后产生的碎片云对 ISS 及其机组人员构成了威胁,迫使航天员在事件发生后的一段时间内进行安全检查,同样的还有 CSS 和其他卫星等^[11].这里简单分析 COSMOS 1408 解体在轨碎片对空间站及星链卫星的影响风险,可以在一定程度上评估风险.

如表 2 所示,通过 Space-track 网站在 2024 年 6 月 22 日更新的空间站、星链和碎片数据,下载相应时间碎片的 TLE 数据,对空间站与在轨碎片在同一时刻轨道高度随周期变化的关系进行分析.

如图 7 所示,图中三条不同颜色垂直线对应的点代表了 3 个卫星周期所对应的轨道高度,高度单位为 km,周期单位为 min,其中蓝色圆点表示 COSMOS 1408 母体.可以看出,空间站仍处于事件碎片云的轨道高度范围内,影响范围有所差异,ISS 和 CSS 轨道高度上下存在较多的碎片,且轨道高度相近,相比来看,StarLink-1007 处在较为安全区域,但随时间的推移,仍会受到碎片云带来的影响.

通过上述对 COSMOS 1408 碎片云整体演化特征的分析,对其时空分布规律有了基本认识.然而为更准确评估这些碎片对在轨航天器的威胁程度,需要进一步研究碎片云与重要航天器之间的相对关系.因此,下面将重点分析碎片云对 ISS 的潜在威胁.

4 解体碎片云对 ISS 的影响

4.1 机动规避事件

自 2021 年 11 月俄罗斯实施 ASAT 试验以来,ISS 多次与 COSMOS1408 碎片发生危险接近事件.截至 2024 年,ISS 共进行了 38 次机动,多数为避免

表 2 ISS, CSS, StarLink-1007, COSMOS 1408 的基本信息
Table 2 Basic information of ISS, CSS, StarLink-1007 and COSMOS 1408

名称	国际代号	周期/min	倾角/(°)	远地点高度/km	近地点高度/km
COSMOS-1408	1982-092 A	91.92	82.56	376	362
ISS (ZARYA)	1998-067 A	92.93	51.64	425	411
CSS (TIANHE-1)	2021-035 A	92.17	41.47	384	378
STARLINK-1007	2019-074 A	95.59	53.05	548	546

与碎片碰撞, ISS 共对 COSMOS 1408 碎片进行了 4 次机动规避^[17]. 第一次机动在 2022 年 6 月 16 日, 这也是 ISS 的第 31 次机动, 此后相继再对该事件碎片进行了 3 次机动规避^[16,18]. 相关信息列于表 3.

假设 ISS 未对解体碎片进行机动规避, 后续几天内两者间距离将会接近, 威胁到 ISS 的正常飞行. 进行机动规避之后, ISS 轨道高度发生变化, 将远离解体碎片, 解除碎片带来的碰撞风险.

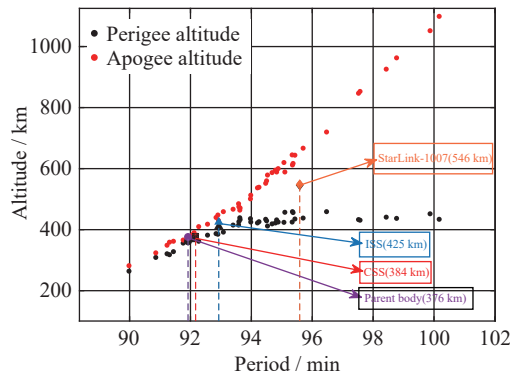


图 7 解体碎片、ISS、CSS、StarLink-1007 轨道高度与运行周期分布

Fig. 7 Distribution of orbit height and period of breakup debris, ISS, CSS and StarLink-1007

表 3 ISS 机动规避 COSMOS 1408 碎片的 4 次历史事件

Table 3 Four historical events of ISS maneuvering to avoid COSMOS 1408 debris

NORAD ID	机动时间 (UTC)
52590	2022年6月16日 (估计)
51561	2022年10月24日 19:25
49982	2023年3月14日 11:54
52808	2023年8月6日 02:03

表 4 基于机动前 TLE 计算的 ISS 与 COSMOS 1408 碎片距离

Table 4 Distance between ISS and COSMOS 1408 debris based on pre-maneuver TLE

NORAD ID	机动时间 (UTC)	TCA (UTC)	接近距离/km	
			机动前TLE	机动后TLE
52590	2022年6月16日 00:00	2022年6月17日 09:50:40	4.178	6812.028
51561	2022年10月24日 19:25	2022年10月25日 10:10:36	11.589	6184.815
49982	2023年3月14日 11:54	2023年3月15日 13:53:01	7.078	8354.855
52808	2023年8月6日 02:03	2023年8月6日 18:11:07	16.744	8941.203

以其中 4 次典型的规避过程为例, 运用 SGP4 轨道传播模型, 对 ISS 与 COSMOS 1408 碎片云的接近事件进行分析. 通过对规避机动前后的接近距离演化特征进行定量评估, 初步研究了空间碎片规避策略的有效性.

4.2 基于 SGP4 模型的 ISS-COSMOS 1408 碎片潜在碰撞风险分析

表 4 给出了 ISS 在未进行机动规避的情况下, 与 4 个 COSMOS 1408 碎片在两天内的相对距离变化情况. 接近时间为预测的 ISS 在未机动规避碎片情况下, 未来两天内二者最接近时刻 (Time of Closest Approach, TCA). 其中编号为 52590 的碎片在轨道碎片季报中尚未报道具体时间.

通过 SGP4 模型预测未来几天 ISS 与四个碎片之间的最小距离, 由图 8 可以看到, 编号为 52590 的碎片在 2022 年 6 月 17 日 09:50 UTC, 以步长为 1 s 计算一次得到的两者间最小距离仅有 4.178 km. 其他三次的机动规避也是如此, ISS 与 NORAD ID 为 51561, 49982 和 52808 的碎片以步长 1 s 计算的最小距离分别达到了 11.589 km, 7.078 km 和 16.744 km, 可见 ISS 机动的必要性.

在分析 ISS 与 COSMOS 1408 碎片未机动规避时发生的距离变化之后, 还需将机动规避后第一次发布的 TLE 进行计算比较分析, 以验证机动事件是否使其降低了碰撞风险. ISS 与碎片进行机动规避之后, 根据最新发布的 TLE 分析得出, 最新数据发布当日两者之间的距离最近已到 300 km 左右, 以 1 s 步长计算的结果足以验证机动规避后 ISS 降低了碰撞风险. 再加上以此预测的未来几天距离中, 二者最接近距离也达到 300 km 以上, 避免了碎片可能带来的风险.

ISS 与 COSMOS 1408 碎片机动规避后在最小距

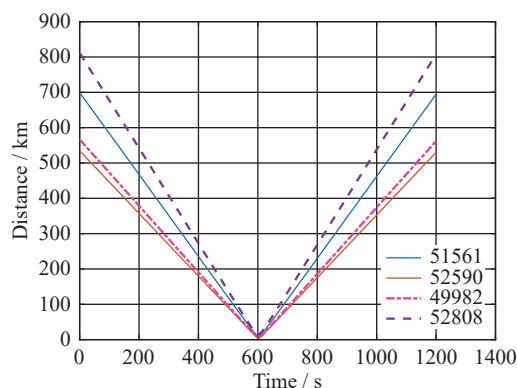


图 8 机动前 ISS 与碎片在 TCA 前后 10 min 相对距离的变化

Fig. 8 Relative distance changes between ISS and debris 10 minutes before TCA pre-maneuver

离时刻前后 10 min 距离的变化情况如图 9 所示. 同图 8 相比, 最小距离达到了 323 km, 在机动规避之后再次计算的最小距离已达到安全范围.

4.3 碎片规避效果综合分析与讨论

通过对 ISS 的 4 次规避 COSMOS 1408 碎片机动的详细分析, 得出以下主要结论.

(1) 规避必要性分析, 在未进行规避机动的情况下, 最小接近距离仅为 4.178 km (NORAD ID 52590) 四次接近事件中, 未规避时的最小距离分别为 4.178, 11.589, 7.078, 16.744 km, 均构成潜在威胁.

(2) 规避效果评估, 规避机动后, ISS 与碎片的最小距离显著增加, 最近距离也达到 300 km 以上, TLE 数据分析表明, 所有规避机动均有效降低了碰撞风险, 确保了 ISS 的安全运行.

本研究表明, ISS 针对 COSMOS 1408 碎片的 4 次规避机动均取得了预期效果, 为 ISS 安全运行提供了有力保障. 同时, 这些案例分析也为未来类似情况下的碎片规避决策提供了重要参考. 后续研究建议关注碎片云的长期演化特征, 以及改进轨道预测模型精度.

5 结论与展望

卫星解体产生的碎片云对空间环境的安全性造成了显著影响. 研究卫星解体事件有助于理解碎片云的演化趋势, 从而确保空间活动的持续进行, 并最大限度地减少碎片对航天器及航天员的潜在威胁. 本文基于 SSN 发布的 COSMOS 1408 事件碎片云的 TLE

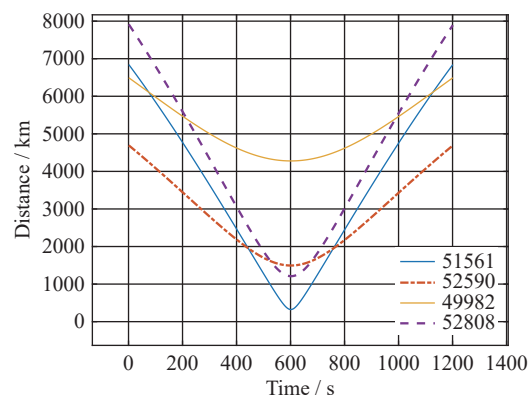


图 9 机动后 ISS 与碎片在 TCA 前后 10 min 相对距离的变化

Fig. 9 Relative distance changes between ISS and debris 10 minutes after TCA post-maneuver

数据, 对其产生的碎片云进行了分析, 初步重建了 COSMOS 1408 碎片云的演化过程, 为相关工作提供了参考和启示.

本文研究尚存在一定局限性, 目前仅能获取公开的 TLE 数据, 无法全面追踪所有碎片. 此外, SGP4 模型在进行预测时也存在一定的误差. 未来的研究将致力于开展更为精细的碎片云演化模型研究, 以提高轨道预测的精度, 并加强对小尺寸碎片的监测与分析能力, 同时发展更为有效的空间碎片监测与防护技术.

参考文献

- [1] TANG Jingshi, CHENG Haowen. The origin, status and future of space debris[J]. *Physics*, 2021, **50**(5): 317-323. DOI: 10.7693/wl20210505 (汤靖师, 程昊文. 空间碎片问题的起源、现状和发展 [J]. *物理*, 2021, **50**(5): 317-323. DOI: 10.7693/wl20210505)
- [2] MUCIACCIA A, FACCHINI L, MONTARULI M F, *et al.* Radar observation and reconstruction of Cosmos 1408 fragmentation[J]. *Journal of Space Safety Engineering*, 2024, **11**(1): 143-149
- [3] ANZ-MEADOR P, OPIELA J, LIOU J C. History of on orbit satellite fragmentation, 16th Edition[R]. Houston: Johnson Space Center, 2022
- [4] PANG Baojun, WANG Dongfang, XIAO Weike, *et al.* The influence of US satellite DMSP-F13 breakup event on space debris environment[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2015, **32**(4): 349-356 (庞宝君, 王东方, 肖伟科, 等. 美国 DMSP-F13 卫星解体事件对空间碎片环境影响分析 [J]. *航天器环境工程*, 2015, **32**(4): 349-356)
- [5] DIAO Ninghui, LIU Jianqiang, SUN Congrong, *et al.*

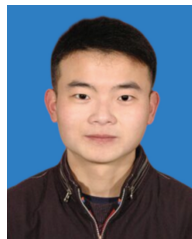
- Satellite orbit calculation based on SGP4 model[J]. *Remote Sensing Information*, 2012, **27**(4): 64-70 (刁宁辉, 刘强, 孙从容, 等. 基于 SGP4 模型的卫星轨道计算 [J]. *遥感信息*, 2012, **27**(4): 64-70)
- [6] HE C Y, LI W, HW AD, *et al.* Thermospheric mass density modelling during geomagnetic quiet and weakly disturbed time[J]. *Atmosphere*, 2024, **15**(1): 72
- [7] GONG Zizheng, ZHAO Qiuyan, LI Ming, *et al.* The frontier problem and prospect of space debris protection research[J]. *Space Debris Research*, 2019, **19**(3): 2-13 (龚自正, 赵秋艳, 李明, 等. 空间碎片防护研究前沿问题与展望 [J]. *空间碎片研究*, 2019, **19**(3): 2-13)
- [8] LI Ming, GONG Zizheng, LIU Guoqing. Frontier technology and system development of space debris surveillance and active removal[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, **63**(25): 2570-2591 (李明, 龚自正, 刘国青. 空间碎片监测移除前沿技术与系统发展 [J]. *科学通报*, 2018, **63**(25): 2570-2591)
- [9] PASTOR A, SIMINSKI J, ESCRIBANO G, *et al.* Early cataloguing of fragments from break-up events[J]. *Advances in Space Research*, 2023, **71**(10): 4222-4238
- [10] PALMER C. Russian anti-satellite test spotlights space debris danger[J]. *Engineering*, 2022, **12**(5): 3-5
- [11] NASA International space station maneuvers to avoid Russian ASAT fragment[J]. *Orbital Debris Quarterly News*, 2022, **26**(3): 2-4
- [12] OLIVIERI L, GIACOMUZZO C, LOPRESTI S, *et al.* Simulation of in-space fragmentation events[J]. *Aerotecnica Missili & Spazio*, 2024, **103**(3): 225-232
- [13] LIU Y Y, CHI R Q, HU D Q, *et al.* The consequences of Cosmos 1408 breakup: the optimization of the breakup model and the influence of debris clouds[J]. *Acta Astronautica*, 2023, **206**: 156-167
- [14] ZHAO Guangyu, SANG Jizhang, CHEN Junyu, *et al.* Improving the orbit prediction accuracy for NORAD objects using sparse angles data[J]. *Journal of Geomatics*, 2021, **46**(S1): 301-304 (赵广宇, 桑吉章, 陈俊宇, 等. 利用稀疏角度数据改进空间目标 TLE 轨道预报精度 [J]. *测绘地理信息*, 2021, **46**(S1): 301-304)
- [15] WANG R L, FENG S, YANG X H, *et al.* Breakup analysis of Cosmos 1408 satellite[J]. *Journal of Space Safety Engineering*, 2024, **11**(2): 335-341
- [16] NASA. International space station maneuvers to avoid another Russian ASAT fragment[J]. *Orbital Debris Quarterly News*, 2022, **26**(4): 2-8
- [17] NASA. ISS maneuvers twice in a week's span to avoid potential collisions[J]. *Orbital Debris Quarterly News*, 2023, **27**(2): 2-8
- [18] NASA. ISS maneuvers to avoid potential collisions twice in August 2023[J]. *Orbital Debris Quarterly News*, 2023, **27**(4): 1-2

作者简介



莫星健 男, 2001 年 1 月出生于贵州省黔南布依族苗族自治州, 山东理工大学测绘工程专业 2024 届本科生. 研究方向为空间态势感知.

E-mail: 2861767932@qq.com



雷祥旭 (通信作者) 男, 山东泰安人, 博士, 现为山东理工大学测绘工程系硕士生导师, 主要研究方向包括空间态势感知、空间目标监测数据关联/定轨/编目和空间目标机动探测等.

E-mail: xxlei@whu.edu.cn