

空间碎片问题的起源、现状和发展

汤靖师^{1,†} 程昊文²

(1 南京大学天文与空间科学学院 南京 210023)

(2 中国科学院国家天文台 北京 100101)

2021-03-16收到

† email: jstang@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210505

The origin, status and future of space debris

TANG Jing-Shi^{1,†} CHENG Hao-Wen²

(1 School of Astronomy and Space Science, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

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

摘要 字面意义上的空间碎片指的是解体产生的碎片，但一般也包含火箭残骸、废弃卫星等各类无功能人造物体。随着人类探索、利用太空的步伐，空间碎片逐渐开始成为影响并威胁人类空间活动不可避免的问题。文章主要介绍空间碎片问题的起源、当前的状况、人们如何应对以及未来可能遇到的问题。

关键词 空间碎片，空间环境，卫星碰撞，超大规模星座，凯斯勒效应

Abstract The concept of space debris, from the literal perspective, stands for the debris from breakup events, and has now been extended to various manmade objects in space, such as rocket bodies or satellites. Since the first day that human beings started to explore and utilize space, space debris has gradually become an unavoidable problem that affects and even threatens our future space operations. In this paper we describe the origin of the space debris, its current status, how we deal with it, and further problems that we may face in the future.

Keywords space debris, space environment, satellite collision, megaconstellation, kessler syndrome

1 什么是空间碎片

空间碎片有时又称为空间垃圾、空间目标等。从字面来看，这三者的含义并不相同。但从潜在的威胁、数据处理流程来看，特定的物体是卫星还是碎片、是工作卫星还是弃置卫星并没有十分显著的区别，而且逻辑上这三者之间也存在联系。因此，在空间碎片的问题上，三者的问题是相通的，有时也用空间碎片代指空间中所有在轨的物体，既包括卫星解体造成的碎片，一般也包括火箭末级、弃置卫星等废弃的航天器，而且非严格意义上有时也包括在轨正常工作的卫星。

目前编目在册“有迹可循”的空间碎片已超

过2万个，而受观测手段限制尚不能跟踪到的更小的碎片预计过亿。关于空间碎片的危害，在不少科普作品和流行文化中都有涉及，其中让人印象最为深刻的当属奥斯卡热门电影、2013年的《地心引力》。空间碎片先后撞毁了空间望远镜和国际空间站，女主人公最终借助中国的神舟飞船返回地球。这部电影有非常逼真的电脑特效，有评价戏称其中除了男女主人公的脸，其他的画面都是电脑特效。而相比之下，这部电影的科学背景则“真实”许多。

其实早在20世纪70年代就有科学家提出，卫星等航天器因碰撞而解体，甚至由此引发连锁反应。1978年美国航天局(NASA)约翰逊航天中心

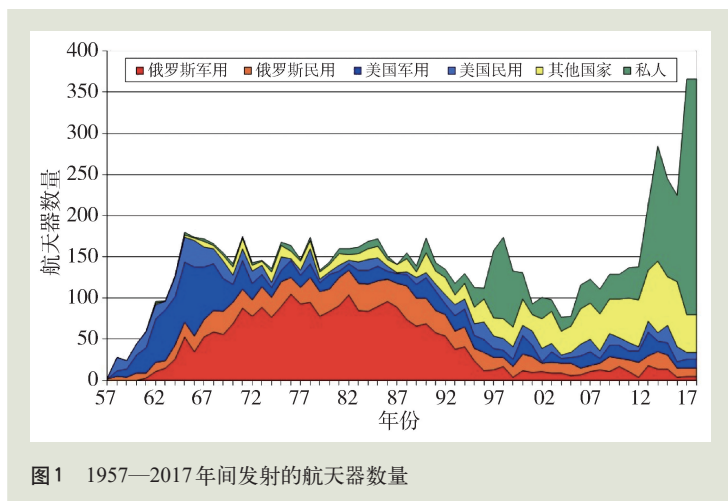


图1 1957—2017年间发射的航天器数量

(Johnson Space Center)的科学家 Donald Kessler 与同事提出了几点关于未来空间碎片演化的预测^[1]：

(1)在不远的将来，很可能在2000年以前，卫星碰撞解体将成为卫星碎片的新来源；

(2)在碰撞解体(持续)发生的情况下，即使保持零发射，从长期来看碎片流量也会随时间呈指数增长；

(3)卫星碰撞将产生更多的碎片，每个碎片都会增加未来碰撞的机率，最终形成环绕地球的碎片环带。

这一系列预测就是大家所熟知的“凯斯勒效应”(Kessler syndrome)。简单来说就是除非大尺寸废弃物体的数量显著降低，否则随着物体间随机碰撞的发生，碰撞产生的碎片将成为新碎片的重要来源。凯斯勒效应的一个极端场景，就是碎片等物体间的碰撞产生连锁反应，逐渐包围地球，使得新的航天发射无法进行。

虽然目前也有对凯斯勒效应的质疑，认为其夸大了空间碎片的演化趋势。但不管随机碰撞对碎片数量增加的定量贡献是否被夸大，人们一致认可的是，如果空间中废弃物体的数量不加以控制，那么空间碎片的数量一定会增加，“连锁反应”的出现很可能只是时间问题。

正因为空间碎片对空间中航天器存在致命的威

胁，并且可能会持续恶化空间环境，目前世界多国和国际机构都对空间碎片相关问题保持关注，包括对空间碎片的监测、碰撞的风险评估、预警等等。

2 空间碎片的起源和发展

2.1 空间碎片的产生

空间碎片伴随着人类空间活动的开展而产生。1957年，前苏联发射了第一颗人造卫星斯普特尼克一号(Sputnik 1，或称卫星一号)，由此拉开了人类空间活动的序幕。

自然地，斯普特尼克一号也被赋予空间物体的前两个编号。北美防空司令部(NORAD)将斯普特尼克一号的火箭和卫星分别编号为00001和00002。

斯普特尼克一号滞留太空的时间仅有三个月，但却打开了人类探索、利用空间的大门。截至2021年2月，NORAD对空间目标的编号已接近90000，这意味着从斯普特尼克一号至今，人们探测到的空间中的人造物体——无论是发射的火箭、卫星还是解体产生的碎片——已接近90000个。而这还只是“可探测”的物体。如果考虑现有探测能力尚不能及的小尺寸碎片，这个数目预计将指数增加。

为了保持对空间碎片的跟踪和监测，NORAD发布了用于编目空间碎片的轨道和目标特征的数据格式，称为两行根数或双行根数(two-line element, TLE)^[1]。2021年2月18日TLE数据中第一个物体是现有空间碎片中最“古老”的1958年发射的先锋一号(Vanguard 1)，而最后一个名称待定的物体从其轨道特征来看很可能和近期太空探索公司(SpaceX)发射的星链卫星(Starlink)有关。

2.2 空间碎片问题的发展

从1957年发射斯普特尼克一号开始，越来越多的人造物体被送入太空。图1展示的是截至2017年，美俄及其他国家和机构发射的航天器数量^[2]。关于空间碎片数量的统计，不同机构有不

1) <http://celestrak.com/columns/v04n03/>

2) <http://claudelafleur.qc.ca/Spacecrafts-index.html>

3) https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/Space_debris_by_the_numbers

同的统计口径和估计模型。据欧空局统计³⁾，从1957年至2021年1月，人类共成功发射火箭6000余次，送入地球轨道的卫星超过10000颗。这些卫星中，约有6250颗卫星仍然在轨，其中约有3600个仍在工作。据此统计，目前被空间碎片监测网络定期跟踪、编目的碎片超过28000个，近地轨道人造物体的总质量超过了9200吨。

根据统计模型估计，目前在轨的大小超过10 cm的碎片约为34000个，大小在1 cm至10 cm之间的碎片个数约为90万，而在1 mm至1 cm之间的碎片则超过1.2亿。

根据NASA约翰逊航天中心轨道碎片项目办公室(Orbital Debris Program Office)的统计^[2]，从1957年至2020年1月，各类空间碎片的数目随时间的变化如图2所示。从中不难看出，爆炸、碰撞等解体事件已经成为碎片等各类空间物体的主要来源。

2.3 空间碎片的解体和凯斯勒效应

在Kessler等人当年的研究文章中，在不同的碎片增长率下预测碎片间发生碰撞的几率和时间。在该文中，首次碰撞发生的时间随碎片增长率的不同而有差异，但总的来说大约发生在1990—2000年之间(图3)^[1]。

在2010年的一篇文章中，Kessler等学者回顾了之前的预测^[3]。图3中的曲线呈现约300个/年的增长率，同时该文整理了历来有记录的4次碎片(卫星)之间的碰撞。这些碰撞发生在确定的被编目物体之间，如表1所示^[3]。

将这些记录的碰撞以红色圆点的形式标记在图3中。不难看出，虽然碰撞发生的次数未必与300个/年的增长曲线严格吻合，但在不控制碎片增长的情况下，碎片等物体间的碰撞在所难免。

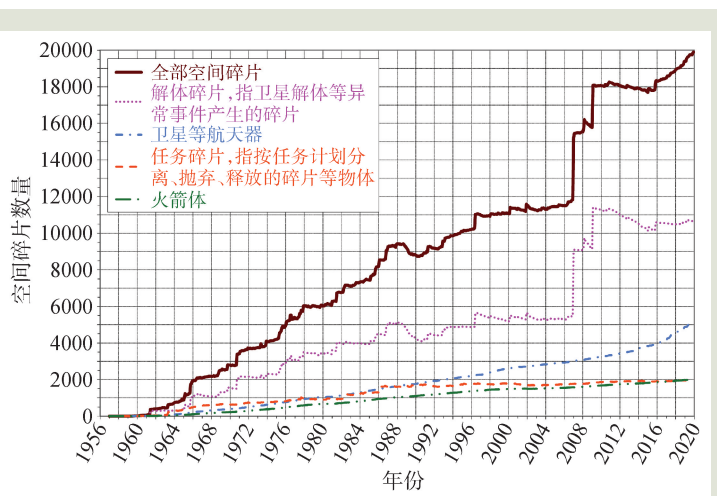


图2 截至2020年1月，NASA约翰逊航天中心轨道碎片项目办公室统计的各类型碎片的数目

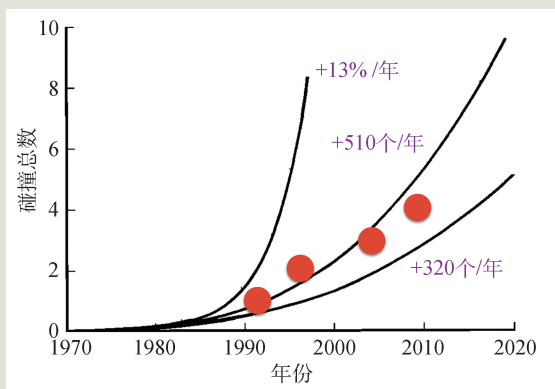


图3 曲线为Kessler等人预测的碎片间碰撞的总数。纵轴为1时对应的横轴位置即为不同的碎片数量增长率下首次碰撞发生的时间^[1]。红色圆点为实际空间物体碰撞事件^[3]

2.4 空间碎片的危害

空间碎片的直接危害来自于高速碰撞。尺寸为1 cm和10 cm的碎片，密度和速度分别为 10^3 kg/m^3 和7.5 km/s，不难计算其动能分别约为56 kJ和56 MJ。对于金属材质的碎片或者相向撞击的场景，碰撞产生的动能还将更大。相比之下，12号口径霰弹枪弹丸的动能约为4.5 kJ，而2010年美国公布的实验室阶段电磁轨道炮炮口动能约为33 MJ。一个大小在厘米尺度的空间碎片看似不起眼，但已足够摧毁整颗卫星。即使是毫米尺度的碎片，也有可能瘫痪卫星。

图4是航天飞机舷窗、哈勃空间望远镜天线遭受空间碎片撞击的图片。

除了碎片的直接撞击，更大的危险还来自于碰撞产生的大量的新碎片。2009年2月，废弃14年的宇宙2251和在役的铱星33两颗卫星在轨道上发生碰撞。这是首次两颗在轨卫星相撞，这次碰撞导致两颗卫星全毁，共产生超过2200个新的空间碎片。这次碰撞除了造成卫星的直接损毁，新产生的数千个空间碎片更加大了后续空间碎片撞击的风险。如果说在此之前卫星相撞、“凯斯勒效应”只存在纸面上的可能性，那么这次撞击无疑给人们敲响了警钟。

表1 截至2009年已编目物体间的碰撞

碰撞编号	碰撞物体	时间
1	宇宙1934卫星 宇宙926卫星碎片	1991/12/23
2	Cerise卫星 1986年阿丽亚娜火箭碎片	1996/7/24
3	Thor-Burner 2A火箭 2000年中国卫星碎片	2005/1/17
4	铱星33卫星 宇宙2251卫星	2009/2/10

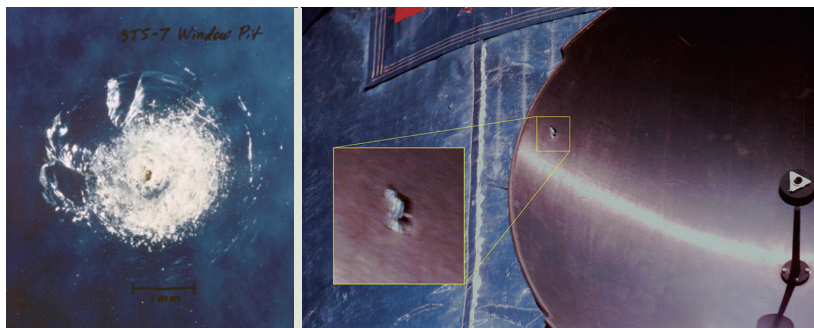


图4 左图：航天飞机舷窗上的撞击坑；右图：哈勃空间望远镜天线被击穿

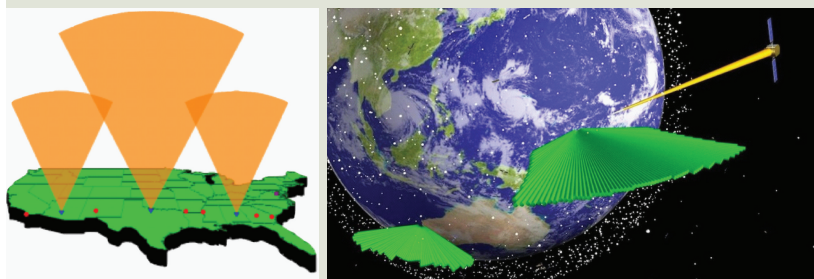


图5 美国两代“空间篱笆”。左图：部署在美国本土的第一代，右图：部署在海外的第二代

3 如何应对空间碎片

空间碎片对人类空间活动构成的切实威胁，让人们不得不认真考虑应对空间碎片的必要性和严肃性。1993年，世界主要航天国家成立了机构间空间碎片协调委员会(Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, IADC)，作为成员机构间交换空间碎片研究信息、推进空间碎片方面合作等活动的政府间平台。1999年，联合国和平利用外层空间委员会(United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space)发布了关于空间碎片的技术报告^[4]，阐述了空间碎片随着数量增长而对空间活动的威胁。

目前，人们关于空间碎片具体的应对措施主要集中在4个方面：监测和预警、碰撞规避和防护、离轨和弃置策略以及主动清除。其中前两个可看作是被动措施，而后两个则是主动、积极地减缓空间碎片的生长。

3.1 监测和预警

对空间碎片保持监测，并对其进行编目和碰撞预警是降低空间碎片撞击风险的第一步。以美国空间监测网络(Space Surveillance Network)为例，该网络既包括天基的卫星平台，也包括地面的雷达、光学望远镜。

从1961年开始，美国在其国土南侧沿经度方向布置了俗称为“空间篱笆”的连续波雷达，即美国海军空间监测系统(Navy Space Surveillance System, NAVSPASUR)，如图5左图所示。该雷达系统包含6个接收站，3个发射站，可探测到2000 km外截面为0.1 m²的目标或10000 km外截面为1 m²的目标，探测精度优于200 m。该系统2013年关闭，由第二代“空间篱笆”接替(图5右图)。第二代“空间篱笆”由美国空军负责，部署在太平洋夸贾林环礁(Kwajalein Atoll)

和西澳大利亚。从2015年开始建设,2020年开始初步运行。探测能力(尺寸)可由原先的76 cm提高至2—5 cm^[5, 6],编目数量由目前的约23000个提升至200000个。

美国空间监测网由美国联合太空作战中心(Joint Space Operations Center, JSPOC)运行。以此为基础,JSPOC可以维持高精度的空间目标编目库,并为240个用户的1300颗卫星提供碰撞预警服务。

3.2 碰撞规避和防护

规避和防护是通过最直接的“躲”和“防”的方式应对可能出现的碰撞威胁。当在轨财产与碎片

或其他物体存在较高的碰撞风险时,通过变轨离开碰撞轨道是最简单直接的规避方法。但航天器的变轨是以消耗燃料、损失其工作寿命为代价的,因此规避碰撞也需要通过回答一系列问题来评估规避的必要性和有效性:交会最近距离有多少?可能发生碰撞的概率有多大?如何制定变轨策略并评估其规避碰撞的有效性?

目前人类在太空中价值最高的航天器莫过于载人的国际空间站,因此国际空间站对空间碎片的规避也格外谨慎。据统计^[7],从1999年部署至2020年9月,国际空间站为规避空间碎片共变轨28次,其中2020年1月至9月共执行3次碰撞规避变轨,最近一次发生在9月22日。

对于更小的碎片,可以通过提升航天器自身防护水平直接抵抗空间碎片的撞击。一般来说,单纯提高航天器外壳的厚度并不是高效的做法。一方面,更厚的外壳意味着需要损失部分有效载荷;另一方面,更厚的外壳并不一定意味着更好的防护效果。图6左图展示的是一颗直径12 mm、质量约2.5 g的铝球以大约7 km/s的速度撞击一块18 cm厚铝板的结果。除了撞击坑,撞击产生的冲击波在铝板的另一侧产生了显著的裂纹。

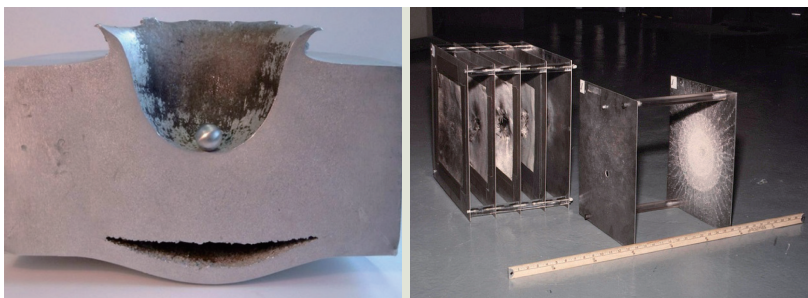


图6 不同的撞击试验⁴⁾。左图:铝板(图中小球用作示意,并非入射物);右图:Whipple防护

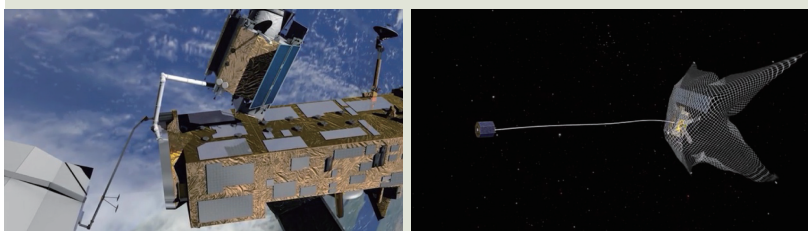


图7 两种常见的主动清除方案:附着后推离(左)和柔性网拖离(右)

现实中很多时候采用的是Fred Whipple早在1947年针对空间微流星体提出的多层防护措施^[8]。Whipple提出微流星体在击穿一块厚度与自身尺度相当的材料后会因高温而气化和电离,因此只需在航天器外1英寸的距离上包裹一层约0.25英寸(6—7 mm)厚的材料,即可防护空间微流星体的撞击。这一防护措施被称为Whipple防护(图6右图)。采用两层或多层防护材料,抑或加入填充材料的措施是目前常用的防护空间碎片的办法。

3.3 离轨和弃置

正如生活中无用的垃圾要及时分类处理,人们现在意识到工作寿命到期的卫星也要合理弃置。空间虽大,但在真正对人类有用的轨道上,卫星的密度并不低。如果寿命到期的卫星随意“丢弃”,它们将很长时间滞留在空间中,对其他航天器构成威胁。

根据地球大气密度随高度的变化,不难估计卫星从600 km高度轨道自然陨落约需数年至数十年,从800 km高度陨落约需数十年至数百年,而从1000 km高度自然陨落的时间则长达数百年甚至数千年。导航卫星、通信卫星、中继卫星等使用中轨和高轨的卫星,在空间运行的轨道则更加

4) <http://wordpress.mrreid.org/2013/01/28/whipple-shielding/>

复杂而持久。这些对人类有较高使用价值的轨道资源,合理弃置废弃卫星,既可以腾出轨道,也是卫星安全工作的保证。

目前IADC对低轨卫星和静止轨道卫星的离轨给出了指导方针^[9]。对于地球静止轨道卫星,建议工作寿命结束后抬高轨道至“坟墓轨道”(graveyard orbit)。坟墓轨道可以保证被弃置的卫星不与正常的静止轨道相交,确保静止轨道工作卫星的安全。此外,建议低轨卫星在工作寿命结束后25年内再入大气陨落。如果轨道高度不太低,需要采取适当的离轨措施降低轨道,遵照25年内陨落的建议。

除此以外,为了进一步减缓空间碎片,减少不必要的解体事件,IADC还在指导方针中提出了航天器寿命估计结束后的钝化措施^[10]。简单来说,航天器或火箭体在弃置时需要耗尽内部能源,包括:(1)排空或燃尽推进剂;(2)电池放空电量;(3)释放舱内压力。

3.4 主动清除

对于近地空间已经存在的空间碎片,比较合适的处置方式是主动将其清除。主动清除一般是在物体密集区域选择质量较大、解体可导致严重后果的废弃卫星。

目前主动清除尚在理论研究和实验阶段,常见的方案包括附着后推离轨道、柔性网拖离轨

5) https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Videos/2016/05/ESA_active_debris_removal_mission_e.Deorbit

6) <https://www.surrey.ac.uk/surrey-space-centre/missions/removedebris>

7) <https://www.msn.com/en-us/news/technology/spacex-s-starlink-everything-you-need-to-know-about-elon-musk-s-internet-service/ar-BB1dEhhp>

8) <https://www.oneweb.world/media-center/oneweb-streamlines-constellation>

9) <https://www.aboutamazon.com/news/company-news/amazon-receives-fcc-approval-for-project-kuiper-satellite-constellation>

10) https://www.esa.int/Safety_Security/ESA_spacecraft_dodges_large_constellation

表2 部分现有“常规”卫星星座和未来计划的大规模低轨卫星星座,其中星链、一网和柯伊伯均采用最新公布的卫星数目

星座	所有者/运营商	高度	卫星数
GPS	美国空军	20180 km	24~32
铱星	铱星公司	781 km	80~90
国际海事卫星	国际海事卫星组织	静止轨道	13
星链(Starlink)	太空探索	340 km/550 km/1150 km	42000 ⁷⁾
一网(OneWeb)	一网	1200 km	6372 ⁸⁾
柯伊伯(Kuiper)	亚马逊	590 km/610 km/630 km	3236 ⁹⁾

道等,如图7所示⁵⁾。2018年,英国Surrey大学联合波音等公司进行了空间碎片的捕获实验“Remove DEBRIS”⁶⁾。

4 空间碎片问题面临的难点

空间碎片的问题涉及多个学科、领域和部门,这里仅从作者的研究领域出发,提出一些空间碎片的相关研究和执行中的难点。

4.1 大气密度模型及影响

大气阻力是影响低轨碎片和航天器的重要动力学因素之一,长久以来大气密度一直是制约低轨目标轨道预报精度的主要因素之一,近几十年来也鲜有突破性进展。

大气密度是多种因素共同作用的结果,受太阳辐射、地磁活动及各因素相互作用的影响,而这些因素本身也都有不确定性。目前关于大气密度模型的改进仍在探索中,如文献[10]提出建立动态大气模型以提高短期预报精度,可作为参考。

4.2 误差评估及预报

没有误差的物理量是没有意义的,在空间碎片监测、预警中,这一原则更是如此。轨道的误差直接关系到碰撞风险的评估进而决定规避策略,同时轨道误差对跟踪目标的优先顺序、目标的识别和关联有重要的作用。准确、定量给出轨道的误差并且预报轨道误差随时间的变化具有重

要的实际意义。同时, 由于空间碎片包含大量的目标, 仅计算两两碰撞风险就涉及大量的计算, 如何在保持计算精度的同时保证计算效率也是实际工作中的难点之一。

4.3 大规模低轨星座的影响

随着大规模低轨商业卫星星座的提出和部署, 这类星座对空间环境的影响越来越受到关注。表2列出了目前一些“常规”的卫星星座(GPS、铱星、国际海事卫星)和代表性的大规模低轨卫星星座(星链、一网、柯伊伯)。不难看出, 这些大规模星座占据的都是低轨常用的轨道高度, 且卫星数量远远多于现有卫星星座, 甚至单是“星链”最新计划部署的卫星数就超过了目前所有编目目标。

尽管IADC在2017年针对大规模低轨卫星星座专门发布了声明^[1], 从星座设计、卫星制造、碰撞规避、任务后弃置等都提出了建议, 但和以往的指导方针一样, 这些建议是没有约束力的。是否遵守、如何执行, 具体的实施过程完全在卫星运营商。如何规范大规模星座的部署和运行是

未来空间活动的一个难题, 这一问题在2019年8月欧空局对风神卫星(Aeolus)实施碰撞规避机动, 以躲避和星链卫星可能发生的高风险交会后显得尤其重要^[10]。

5 总结与展望

空间碎片问题起源于人类对太空的探索和利用, 也必将伴随着人类的太空活动持续下去。要保证未来太空活动可持续地开展, 人们必须面对和解决一系列问题, 比如如何有效处置、弃置寿命末期卫星等废弃物, 如何跟踪、监测和管理空间碎片等目标。这些问题虽是太空活动不可避免的, 但也不必惊慌或悲观。在本文最终成稿时, 担负发射“天和”核心舱的长征五号B遥二运载火箭末级残骸在经历过一阵“火箭撞地球”的喧闹之后刚刚再入大气层烧蚀销毁。这个普通的火箭末级弃置和再入因为各种原因吸引了全世界的目光。若能由此喧嚣引起大众对空间碎片问题的关注, 意识到无序地太空管理、掠夺地卫星发射带来的危害, 或许不失为一件好事。

参考文献

- [1] Kessler D, Cour-Palais B. J. Geophys. Res., 1978, 83(6):2637
- [2] NASA Orbital Debris Program Office. Orbital Debris Quarterly News, 2020, 24(1)
- [3] Kessler D, Johnson N, Liou J C *et al.* The Kessler Syndrome: Implications to Future Space operations, AAS 10-016. 33rd Annual AAS Guidance and Control Conference, Breckenridge, February 2010
- [4] Text of the Report adopted by the Scientific and Technical Subcommittee of the United Nations Committee on the Peaceful uses of Outer Space. Technical Report on Space Debris. New York, 1999
- [5] Muelhaupt T J, Sorge M E, Morin J *et al.* The Journal of Space Safety Engineering, 2019, 6:80
- [6] Gonzalo J L, Colombo C, Lizia P D. J. Guidance Control Dynamics, 2021, 44(3):469
- [7] NASA Orbital Debris Program Office. Orbital Debris Quarterly News, 2020, 24(4)
- [8] Whipple F L. Astron. J., 1947, 52:131
- [9] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. IADC Space Debris Mitigation Guidelines, IADC-02-01, Revision 2, IADC-15-03, Mars 2020
- [10] Storz M F, Bowman B R, Branson M J I *et al.* Adv. Space Res., 2005, 36(12):2497
- [11] Inter-Agency Space Debris Coordination Committee. IADC Statement on Large Constellations of Satellites in Low Earth Orbit, IADC-15-03, September 2017



设备检漏好帮手

—安捷伦干式检漏仪

- 干式无油方便运输
- 全触屏中文操作，并预置多种应用设置，简单易上手
- 一分钟快速关机，两万帕粗真空检漏
- 超强氦气本底抑制，环境氦气浓度高达 1000ppm 时仍能达到最高精度
- 多种抽速型号可选，丰俭由己



安捷伦科技（中国）有限公司真空事业部

800 820 6778（固定电话拨打）

400 820 6778（手机拨打）

下载样本或了解更多，请扫描上方二维码，
或登陆安捷伦官方网站：www.agilent.com
(点击“产品”选择“真空产品”)。