



空间碎片监测移除前沿技术与系统发展

李明¹, 龚自正^{2*}, 刘国青²

1. 中国空间技术研究院, 北京 100094;

2. 中国空间技术研究院, 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094

* 联系人, E-mail: gongzz@263.net

2017-10-16 收稿, 2017-11-02 修回, 2017-11-02 接受, 2018-08-08 网络版发表

国家安全重大基础研究计划(613311)、国防科技工业局空间碎片专项(KJSP-20160401-03)、中国高技术研究发展计划(2015AA7046406)和中国空间技术研究院科技委发展研究课题资助

摘要 空间碎片是人类航天活动产生的太空垃圾。随着航天活动的日益频繁, 空间碎片数量快速增加, 已经对人类空间资产安全构成了严重威胁, 是全世界面临的重大挑战。开展空间碎片主动移除是国际社会的共识, 是构建人类命运共同体的重要内容之一, 对保障国家空间资产安全、维护国家安全和利益、确保国际外空事务主导地位和太空话语权、塑造航天大国责任和形象、引领高新科技创新发展、促进生成新兴太空经济和产业模式等具有十分重大的意义。本文深入分析了空间碎片环境现状及演化趋势, 系统评述了空间碎片监测与移除研究国内外现状与发展趋势, 梳理了涉及的关键技术和科学问题。围绕我国太空安全、空间事业可持续发展等重大需求, 分析了我国空间碎片监测与移除存在的问题与差距。提出了空间碎片环境治理概念、技术体系构成和以空间碎片“精准监测、高效移除、有效防护”为技术核心, 形成功能完备、性能先进、高效率、低成本、常态化、商业化、国际化的空间碎片环境治理业务能力为目标的系统工程发展建议。

关键词 空间碎片, 空间资产安全, 空间可持续发展, 空间碎片监测, 空间碎片主动移除, 空间环境治理工程

联合国和平利用外层空间委员会(the United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, UNCOPOUS)和国际机构间空间碎片协调委员会(the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, IADC)对空间碎片的定义是^[1,2]地球轨道上在轨运行或再入大气层的无功能的人造物体及其残块和组件。

由于空间对经济社会、国家安全、高科技等的巨大利益和推动作用, 越来越多的国家发展航天事业。迄今, 已有13个国家和机构有能力进行航天发射活动, 超过60个国家和实体在从事航天器运营活动。从1957年第一颗人造地球卫星升空以来, 截至2016年底, 人类共进行了5000余次航天器发射活动, 把6700余颗航天器送入地球轨道, 在所有发射的航天器中只有近

1400个航天器在有效服役, 而其他航天器因丧失功能而变成了空间垃圾^[3,4]。同时, 已发生过260余次在轨航天器或火箭解体/爆炸/撞击(破碎)事件, 产生了数量众多的太空垃圾, 形成了唯一一个人造的外层空间环境——空间碎片环境, 图1为真实的空间碎片在空间分布的示意图^[3], 图2给出了空间碎片的来源和比例。

1 空间碎片环境及其危害

1.1 空间碎片环境现状

截至2016年底, 美国空间监测网(US Space Surveillance Network, SSN)在地球轨道已经跟踪到42000个空间物体, 空间碎片的总质量达到了7400 t (这一数

引用格式: 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. 科学通报, 2018, 63: 2570–2591

Li M, Gong Z Z, Liu G Q. Frontier technology and system development of space debris surveillance and active removal (in Chinese). Chin Sci Bull, 2018, 63: 2570–2591, doi: 10.1360/N972017-00880

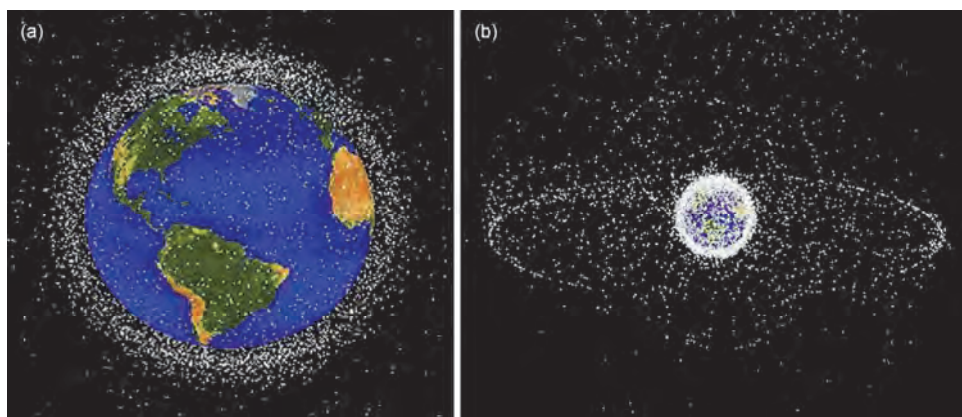


图1 (网络版彩色)空间碎片分布示意图^[3]. (a) LEO空间碎片分布; (b) GEO空间碎片分布

Figure 1 (Color online) Sketch map of debris distribution^[3]. (a) Debris distribution in LEO; (b) debris distribution in GEO

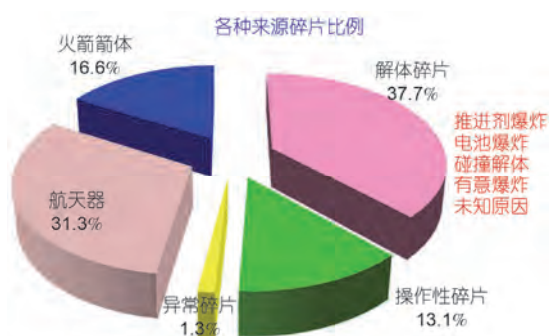


图2 (网络版彩色)空间碎片来源和比例

Figure 2 (Color online) Origin of cataloged objects in space and source

量在2015年为7000 t), 其中在低轨区域(low earth orbit, LEO, 轨道高度200~2000 km)的质量为2700 t^[4-6]. 各主要航天国产生的空间碎片重量比例如图3所示. 地球轨道中尺度在10 cm以上的空间碎片数量已达23000个; 尺度在1~10 cm的碎片数量约为50万个; 尺度在1~10 mm的碎片数量约为1亿个, 1 mm以下的碎片数量数以百亿计^[4-6].

空间碎片平均质量密度为2.7 g/cm³, 主要成分为铝/铝合金(占44%)、复合材料(占37%)、不锈钢(占12%)及钛合金和铜等. 空间碎片主要几何形状为板状、块状、杆状、薄片状, 绝大部分为不规则形状.

(i) 空间碎片在空间的高度分布. 空间碎片在空间的高度分布特性如图4所示^[4](<http://www.space-track.org>). 在低轨区域、中轨区域(medium earth orbit, MEO, 轨道高度为2000~20000 km)和高轨区域(地球同步轨道区域, geostationary earth orbit, GEO, 轨道高度36000 km)已编目的空间碎片数量比例分别为

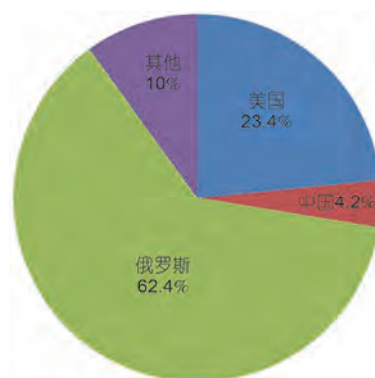


图3 (网络版彩色)各主要航天国产生的空间碎片重量比例

Figure 3 (Color online) The proportion of total debris weight by the major Country

75.2%, 8.3%, 9.4%. 其中, LEO区域的空间碎片在轨道高度700~1100 km之间有最大的分布密度, 如图5所示^[4], 本文关于空间碎片空间分布特性数据是依据SSN最新公布的10 cm以上空间碎片的轨道参数数据(参见<http://www.space-track.org>)进行分析后得到.

(ii) 空间碎片轨道的偏心率分布. 空间碎片轨道的偏心率的分布如图6所示. 以偏心率 $e \leq 0.1$ 和 $e \approx 0.7$ 为主. 其中, 偏心率 $e \leq 0.1$ 的近圆轨道空间碎片约占总数的87%, $e \approx 0.7$ 的大椭圆轨道约占8%. 两者之和达95%.

(iii) 空间碎片轨道的倾角分布. 空间碎片轨道倾角的分布如图7所示, 其分布范围在0°~145°. 其中相对集中的区域有5个, 即0°, 65°, 75°, 82°和100°, 所占比例分别为2.5%, 18%, 10%, 12%和40%, 共达82.5%. 在整个空间碎片中, 近80%的碎片轨道倾角大于65°, 其中相当一部分为100°倾角的太阳同步轨道.

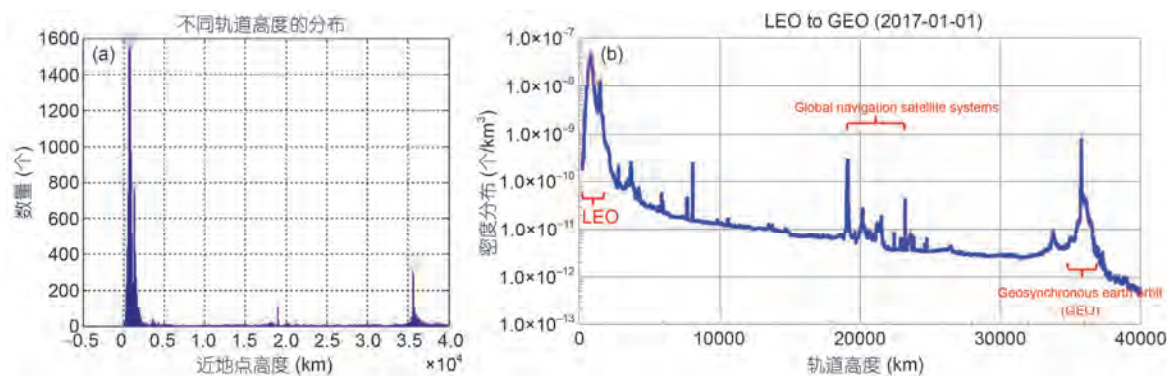


图4 (网络版彩色)空间碎片空间分布特性。(a) 不同轨道高度的碎片数量分布;(b) 不同轨道高度的碎片空间密度分布

Figure 4 (Color online) The distribution of the cataloged debris, LEO-to-GEO. (a) The quantity distribution of the cataloged debris vs. orbit altitude; (b) the spatial density distribution of the cataloged debris vs. orbit altitude

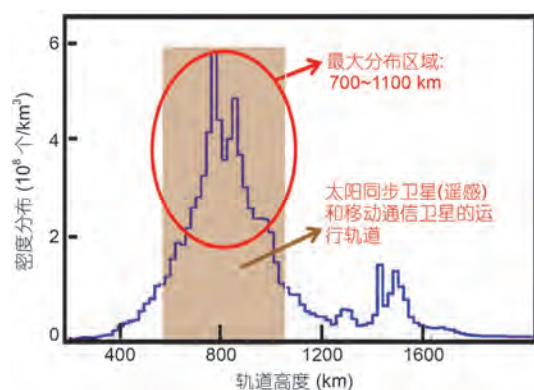


图5 (网络版彩色)空间碎片在LEO轨道区域的分布特性

Figure 5 (Color online) The distribution of debris in LEO

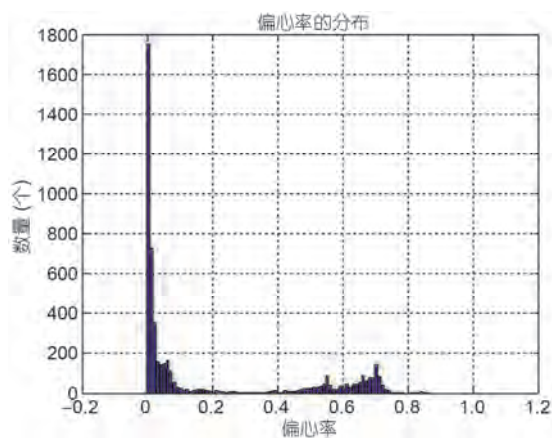


图6 (网络版彩色)空间碎片轨道的偏心率分布图

Figure 6 (Color online) The orbital eccentricity distribution of debris

总体上看,空间碎片在空间高度分布是不均匀的,90%以上的目标位于LEO, MEO, GEO 3个轨道高度区域。这3处正是人造卫星的主要分布区;87%的

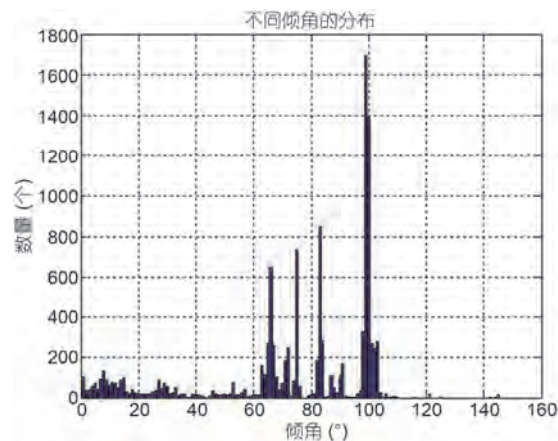


图7 (网络版彩色)空间碎片轨道的倾角分布图

Figure 7 (Color online) The orbital inclination angle distribution of debris

空间碎片轨道是偏心率小于0.1的近圆轨道,约8%的轨道是偏心率为0.7的大椭圆轨道;80%的空间碎片轨道倾角大于65°。

1.2 空间碎片危害

在距地面2000 km内的人类使用最频繁的低地球轨道上,碎片运行速度为7.8 km/s (第一宇宙速度),它们与航天器发生超高速撞击,其相对撞击速度范围在0~15 km/s,平均撞击速度为10 km/s。空间碎片撞击产生的极高压强超过航天器材料屈服强度的数十到数百倍,会穿透航天器表面,并形成大面积的高速碎片云,破坏内部的器件和系统,轻则导致航天器外露敏感表面性能衰退、功能丧失,重则对结构和载荷造成严重的机械损伤甚至使整个航天器彻底爆炸解体,对航天器安全和航天员生命造成巨大潜在威

觔^[7~12]. 航天器的体积越大、在轨飞行时间越长, 其遭遇空间碎片撞击的风险也就越大.

据美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)统计(截至1999年)^[13], 由空间环境引发的299起在轨卫星故障事件中, 碎片撞击占12%, 是四大原因之一.

超高速撞击实验表明^[12], 直径1 mm, 速度4.1 km/s的铝球就能击穿我国卫星常用的25.4 mm厚的蜂窝板, 对卫星内部设备造成严重威胁; 小于1 mm的碎片即可对卫星外部设备和蜂窝板中的预埋件(如电缆、数据线、热控管路等), 造成直接损伤.

10 cm以上的空间碎片撞击可导致航天器爆炸、解体、彻底失效; 此类碎片无法防护, 但可精准监测、编目管理, 航天器可对其实施主动规避. 1~10 cm以上的空间碎片撞击可引起航天器部组件、分系统、整器功能损失, 乃至整器爆炸、解体、彻底失效; 此类碎片目前尚不能精准监测, 尚无有效防护措施. 1 cm以下的空间碎片撞击可引起航天器部组件、分系统甚至整器功能损失或失效; 此类碎片无法监测、编目管理, 但可加装防护结构来被动防护. 表1给出了1 mm以上空间碎片对卫星的危害及对策, 其中毫米级空间碎片的特点是撞击概率高、损伤危害大、可以被主动防.

卫星各分系统/部组件遭受毫米级空间碎片撞击损伤和破坏程度不尽相同(图8), 详见表2.

除了造成在轨撞击威胁外, 在LEO区域大尺寸碎片受大气阻力作用逐渐降低轨道最终陨落到大气层中, 监测数据显示, 每年陨落的可跟踪碎片在400个左右, 总重量超过50 t^[4~6]. 大尺寸碎片陨落时可能有未烧毁的残骸落至地面, 对地面人员和财产安全造成威胁^[14,15].

1.3 空间碰撞事件频发

卫星、国际空间站、航天飞机、长期暴露装置和

哈勃望远镜均屡遭空间碎片撞击.

1.3.1 卫星

到2016年底, 国际上有公开报道的因碎片撞击而失效或异常的卫星超过15颗. 国际上为躲避碎片撞击而进行的卫星机动规避已达每年30余次. 1996年7月24日, 法国CERISSE电子侦察卫星与ArianeV16末级火箭残骸相撞. 撞击导致该侦察卫星的重力梯度稳定杆损坏, 最终卫星失稳.

北京时间2009年2月11日0时55分59秒, 美国1997年9月14日发射的通信卫星铱星33 (北美防空司令部代号24946)与俄罗斯1993年6月16日发射的已报废多年的“宇宙2251”号(北美防空司令部代号22675)军用通信卫星在西伯利亚上空发生激烈相撞, 撞击速度达11.6 km/s. 碰撞发生地点为97.88°E, 72.50°N, 高度788.57 km的空域. 这是人类历史上首次发生在太空的卫星与卫星之间的大撞击事故, 震惊了世界^[16]. 这一惊天大碰撞当时产生10 cm以上可编目碎片4400个、1 cm以上的碎片超过250000个、1 mm以上的碎片 2×10^6 个(数据基于NASA卫星解体模型计算), 至今仍有可跟踪编目碎片2200个^[5].

2002年3月16日, 厘米级碎片与靠近Jason-1地球海洋卫星主体结构的左侧太阳帆板发生撞击, 在卫星姿态出现扰动的同时, 伴随暂时的电流扰动. 2013年5月24日, 厄瓜多尔“飞马座”卫星在印度洋上空与一枚由苏联1985年发射升空的火箭燃料箱残骸发生“侧面撞击”, 导致卫星寿命终结. 2016年8月23日, 欧洲航天局(European Space Agency, ESA)“哨兵-1A”(Sentinel-1A)星太阳翼(SAW+Y)遭遇了尺度为1 cm、重量0.2 g的碎片以相对速度11 km/s的撞击, 卫星轨道产生了0.7 mm/s、姿态产生几度的变化, 一侧的太阳翼供电受损5%, 并产生了8个可跟踪的碎片, 如图9所示^[17]. 其他因碎片撞击导致卫星异常或失效的部分事件如表3所示.

表1 1 mm以上空间碎片对航天器的危害及对策

Table 1 Harm and countermeasures of debris large than 1 mm

尺寸 (mm)	数量 (万个)	数量百分比 (%)	撞击 概率	危害	对策
1~10	13500	99.62	很大	引起航天器部组件、分系统甚至整器功能损失或失效	无法监测、编目管理; 可加装防护结构防护
10~100	50	0.37	较小	引起航天器部组件、分系统、整器能损失, 乃至卫星爆炸、解体、彻底失效	目前尚不能监测、编目管理; 无有效防护措施
100以上	1.7	0.01	很小	导致航天器爆炸、解体、彻底失效	可监测、编目管理; 主动规避

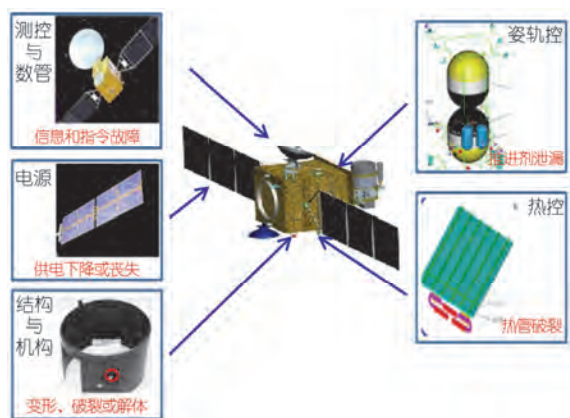


图8 (网络版彩色)毫米级空间碎片撞击下卫星易损组件
Figure 8 (Color online) Vulnerable components under the impact of debris of 1–10 mm

1.3.2 长期暴露装置

NASA的长期暴露装置(long duration exposed facility, LDEF)轨道高度400~286 km, 暴露面积约130 m², 在轨运行5.75 a, 可见撞击坑达3.4万个, 其中大于0.5 mm的撞击坑达5000个, 如图10所示。

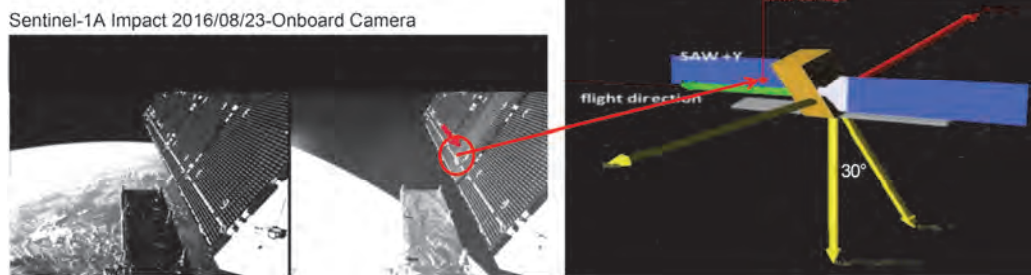


图9 (网络版彩色) ESA“哨兵-1A”在轨遭遇碎片撞击
Figure 9 (Color online) ESA Sentinel-1A satellite impacted by debris

表3 碎片撞击导致国外卫星异常或失效事件

Table 3 Failure or anomaly of foreign satellites caused by the debris impact

卫星	撞击时间	撞击后果	
日本太阳-A卫星Solar-A	1991-08	望远镜可视区损伤	失效
欧空局通信卫星Olympus	1993-08	服务中断	失效
美国绳系卫星SEDS-2	1994-03	实验终止	失效
美国军用卫星MSTI -2	1994-09	捆扎电缆短路	失效
法国CERISE电子侦察卫星	1996-07	重力梯度稳定杆断裂	异常
美法联合卫星Jason-1	2002-03	轨道异常, 电流扰动	异常
俄罗斯地理测绘卫星BLITS	2013-01	自旋稳定速度上升	异常
厄瓜多尔立方体卫星飞马座	2013-05	寿命终止	失效
ESA卫星Sentinel-1A	2016-08	轨道, 姿态变化, 太阳翼受损	异常

表2 毫米级空间碎片对卫星分系统撞击损伤效应

Table 2 Damage effect of satellite subsystem under the impact of debris of 1–10 mm

分系统级	损伤效应
电源	太阳能电池阵破损、穿孔或解体, 引起供电下降或功能丧失
姿轨控	姿态定位精度降低甚至姿态失控; 高压容器爆裂引起推进剂泄漏, 导致姿轨控失效
测控与数管	撞击产生的电磁脉冲引起信息和指令故障
热控	热控涂层开裂、剥落; 热辐射器穿孔、破裂; 引起热特性、光学特性的改变, 使热控系统功能下降或失效
有效载荷	性能下降或功能丧失

1.3.3 航天飞机

航天飞机在执行STS-86飞行任务(Atlantis)中遭受了最严重的一次撞击, 一个毫米级碎片击穿了热控管路外面的beta布, 在管路上留下一个0.8 mm大小、0.47 mm深的撞击坑。经检测, 管路内壁产生了崩落。距离管路泄漏只有一步之遥, 如图11所示。根据实验室模拟实验分析得知该碎片为一直径约0.4 mm

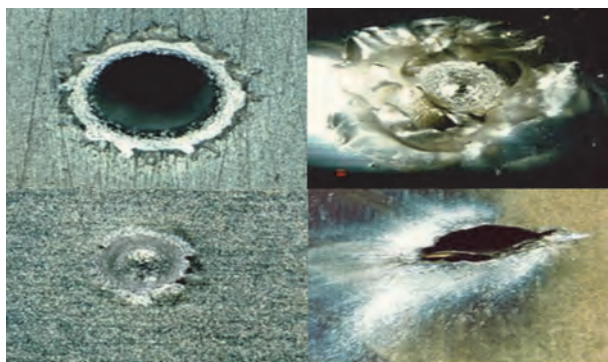


图 10 (网络版彩色) LDEF上的撞击坑

Figure 10 (Color online) Impact craters on LDEF

的不锈钢粒子。此次事件后, NASA对辐射器管路的设计采取了更加审慎的态度。“发现者号”航天飞机2000年10月执行和国际空间站的对接任务,在13 d飞行期间,被撞击38次,最大撞击坑达1 cm。“奋进号”航天飞机飞行11 d被撞击30次。

1.3.4 国际空间站

2007年6月,宇航员在国际空间站俄罗斯舱段进行舱外活动时,在FGB (Zarya control module)的外部热防护毯上发现了一个长67 mm,宽33 mm的撞击坑。据分析,该撞击坑由2~3 mm的碎片以大倾斜角度撞击造成,如图12所示。

2008年初,宇航员舱外活动时在国际空间站护栏和舱外活动工具上各发现一个撞击痕迹。护栏上的撞击坑直径为 (1.78 ± 0.25) mm、深度为 (1.27 ± 0.76) mm,据分析是被0.7 mm的碎片撞击产生。宇航员在这一区域作了标记,以防在以后的太空行走中刮伤手套,危及宇航员生命。舱外活动工具的撞击坑直径为5 mm,背部形成剥落,撞击碎片的直径估计为1.1 mm。

此外,国际空间站(International Space Station, ISS)迄今为止为了躲避空间碎片撞击进行了24次机

动规避,每次规避消耗推进剂约30 kg^[18]。

1.3.5 哈勃望远镜

2014年3月, NASA发布了哈勃望远镜宽场行星相机2(WFPC2)1.76 m²的表面在运行15 a中受到空间碎片撞击的最新数据: 大于0.7 mm的撞击坑有63个。而哈勃望远镜的太阳翼在运行8年中直径为3 μm~7 mm的撞击坑/孔多达6000个,其中完全穿透的撞击孔达150个。哈勃望远镜产生的碎片撞击坑如图13所示。

频繁发生的空间碰撞事件表明,空间碎片已对人类空间资产安全运行构成严重的现实威胁,严重影响人类航天活动的长期可持续发展。

2 碎片环境日趋恶化, 碎片移除势在必行

2.1 空间碎片数量急剧增长

在LEO区域,厘米级空间碎片由2005年的30万个增长到2015年的50万个,年增长率达15%^[5]。空间碎片研究之父——Kessler^[19]对2020年后无发射活动条件下LEO区域10 cm以上碎片数量增长预测,如图14所示,推算认为在LEO区域70年后碎片密度将达到一个临界值,将发生碎片链式撞击效应,近地空间将彻底不可用(Kessler灾难)^[20~22]。

在GEO区域,目前在轨空间物体为1396个,其中可编目物体1142个,其他254个,可控物体436个,非可控物体960个^[5,6]。原则上讲, GEO区域最多可容纳的在轨空间物体为1800个(0.2°一个轨位),按照目前的占位速度30年后轨位将饱和,无新的轨位资源可用。

2.2 空间碰撞风险不断攀升

空间碎片数量急剧增加的同时,在轨卫星数量也在不断增加,使得空间碰撞风险急剧上升。NASA统计结果显示^[13],空间碎片撞击占空间环境引发各

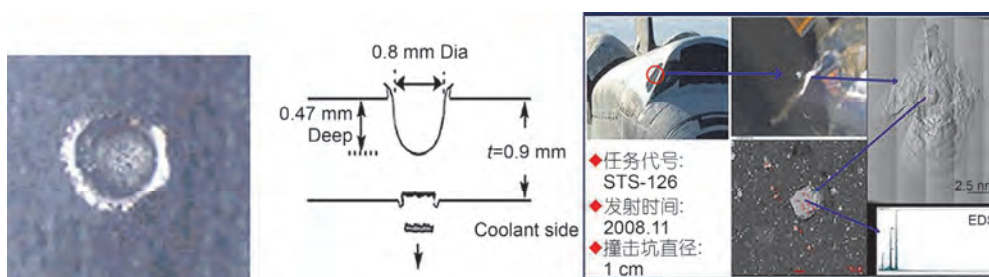


图 11 (网络版彩色)航天飞机被撞击情况

Figure 11 (Color online) Impact case of space shuttle

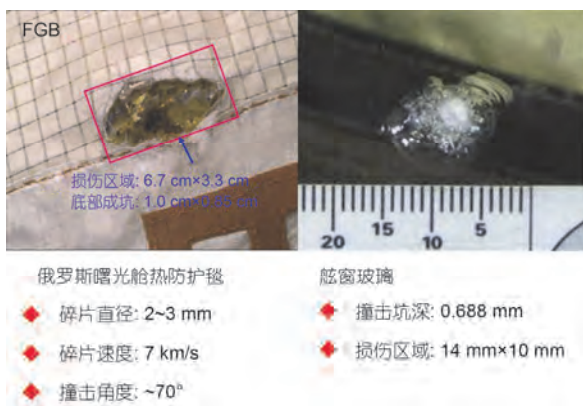


图 12 (网络版彩色)国际空间站的撞击情况
Figure 12 (Color online) Impact case of ISS

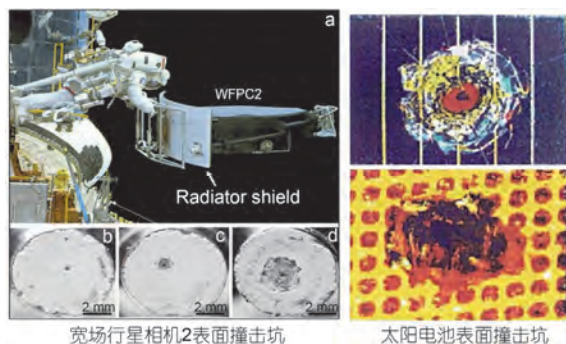


图 13 (网络版彩色)哈勃望远镜的撞击情况
Figure 13 (Color online) Impact case of Hubble space telescope

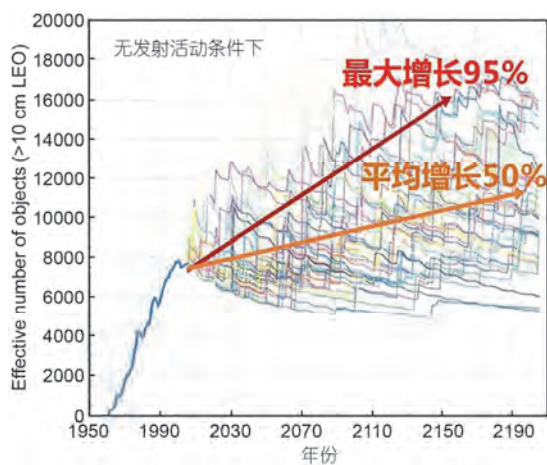


图 14 (网络版彩色) LEO区域 10 cm以上碎片数量增长预测^[19,20]
Figure 14 (Color online) Debris larger than 10 cm in the coming 200 years in LEO^[19,20]

类卫星在轨失效事件的比例, 已从早期(1960~1984年)25年内的10.6%上升到1990~1999年10年内的27.3%, 上升了2.5倍。

据ESA估算, 引起失效或丧失部分功能的碰撞次数从2015的每年2次将增长到2075年的每年10次, 2100年内每年的碰撞次数增长12%以上, 如图15所示^[17]。

对我国在轨卫星近年来碰撞预警分析显示, 红色预警(碰撞概率大于 10^{-4} 且交会距离小于1 km)次数上升了一倍, 如图16所示。2016年底, 我国已有170余颗在轨卫星, 100 m以内危险交会超过100余次/年。

2.3 现有的对策及面临的挑战

应对空间碎片撞击风险有3个途径: (1) 空间碎片减缓, 即控制、减少碎片产生; (2) 碰撞规避, 主动规避降低碰撞概率, 从而减少碎片产生; (3) 主动移除, 彻底控制碎片数量增长, 清洁外层空间。

(i) 任务后处置(PMD). 航天器钝化和任务后处置(post mission disposal, PMD)主要包括限制发射过程产生碎片、机动规避防止碰撞产生碎片、任务后钝化防止在轨爆炸解体产生碎片及任务后离轨。

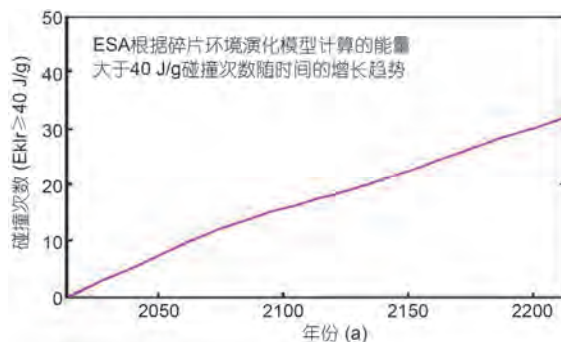


图 15 (网络版彩色)引起失效或丧失部分功能的碰撞次数^[17]
Figure 15 (Color online) The number of impact leading to the all or partial failure^[17]

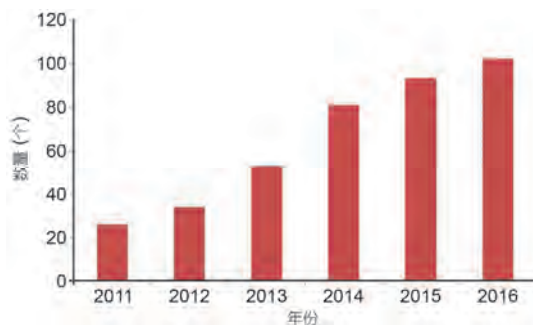


图 16 (网络版彩色)我国在轨卫星红色碰撞预警数量
Figure 16 (Color online) The number of red collision warning of Chinese satellite

UNCOPOUS^[23], IADC^[2], NASA^[24], ESA^[25], 中国^[26]等已经颁布的减缓指南都要求LEO区域航天器任务后在轨寿命不得超过25年, 25年后必须主动进入大气层烧毁; GEO区域航天器任务后主动抬高轨道近300 km, 进入坟墓轨道。

图17给出了NASA和ESA等机构对从2020年开始没有发射活动、正常发射但不进行任务后处置和进行90%任务后处置时空间碎片增长趋势对比。可见PMD能显著减少碎片产生, 显著降低碎片数量增长速度, 但却不能遏制碎片数量的增长趋势, 碎片数量在某个时间还是会达到临界值。任务后处置有用, 但不足以遏制碎片数量增长。

(ii) 碰撞规避。碰撞规避(collision avoidance, COLA)能够降低碰撞风险, 从而也能减少碎片产生, 能降低碎片数量增长速度。图18给出了NASA和ESA等机构分析的从2020年开始正常发射和进行90%任务后处置情况下, 有无碰撞规避时空间碎片增长趋势的对比, 可见碰撞规避能降低碎片数量增长速度, 但也不能遏制碎片数量增长趋势, 碎片数量在某个时间还是会达到临界值。碰撞规避有助, 但远不够有

效降低碎片数量增长趋势。

(iii) 主动移除。空间碎片主动移除(active debris removal, ADR)是指通过人为作用, 使LEO区域碎片进入大气层烧毁, 或使GEO区域碎片轨道抬高进入坟墓轨道, 从而达到保护在轨航天器不受碎片撞击。图19给出了从2020年开始每年不移除、移除2个和移除5个碎片时空间碎片增长趋势对比, 可见每年移除2个碎片可使碎片数量增长趋势显著下降; 每年移除5个碎片可使碎片数量增长趋势趋于平稳。因此, 只有主动移除才能彻底遏制碎片数量的增长。目前国际社会的普遍共识是空间碎片主动移除是确保空间长期可持续的必然选择和唯一出路。但是, 空间碎片主动移除不仅涉及技术问题, 而且涉及空间政策与法律法规和国际合作问题。

2.4 微小卫星星座带来的新挑战

重量在150 kg以下的微小卫星由于其技术新、响应快、应用灵活、成本低等特点, 1995年以来, 以Surrey大学、轨道科学公司为代表, 国外现代小卫星的发展风起云涌。2000~2004年, 工业界高性能小卫

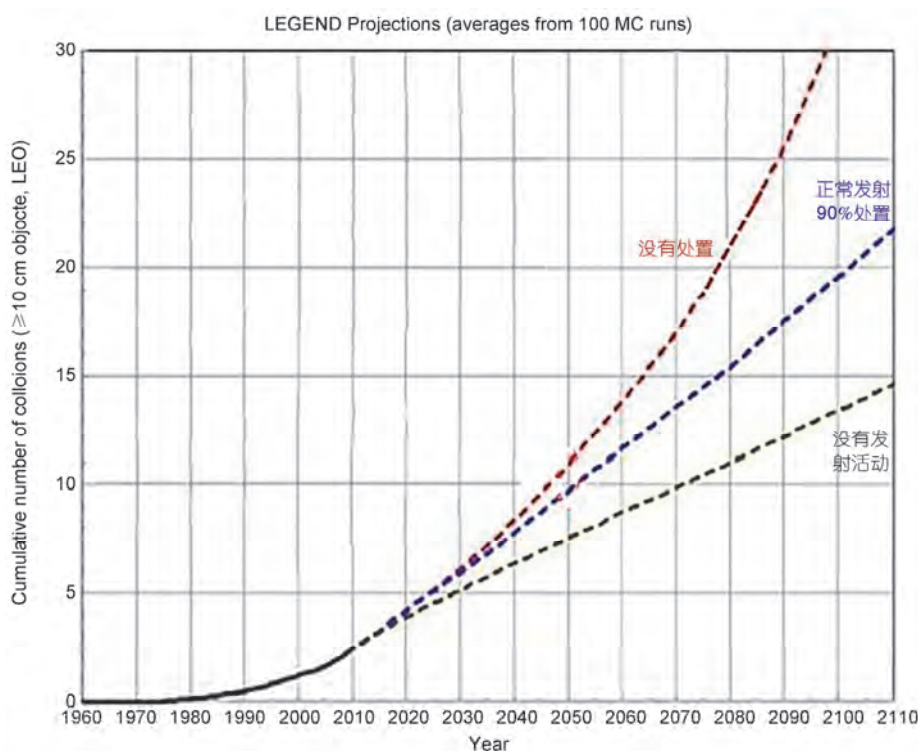


图 17 (网络版彩色)任务后处置(PMD)效果图^[27]

Figure 17 (Color online) Effect of post mission disposal (PMD)^[27]

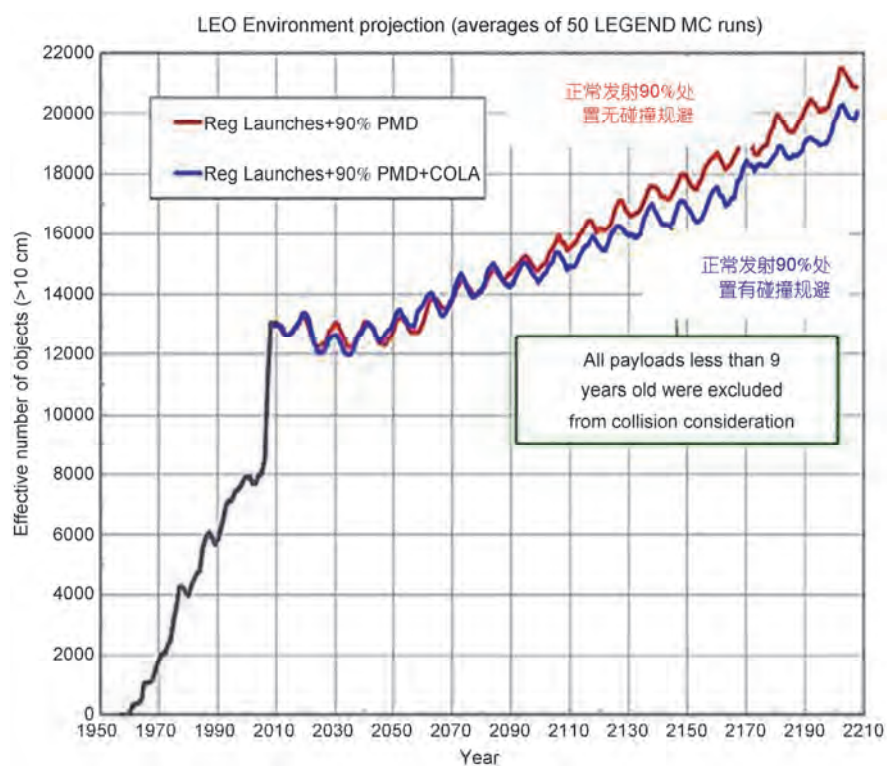


图 18 (网络版彩色)碰撞规避(COLA)效果图^[27]
Figure 18 (Color online) Effect of collision avoidance (COLA)^[27]

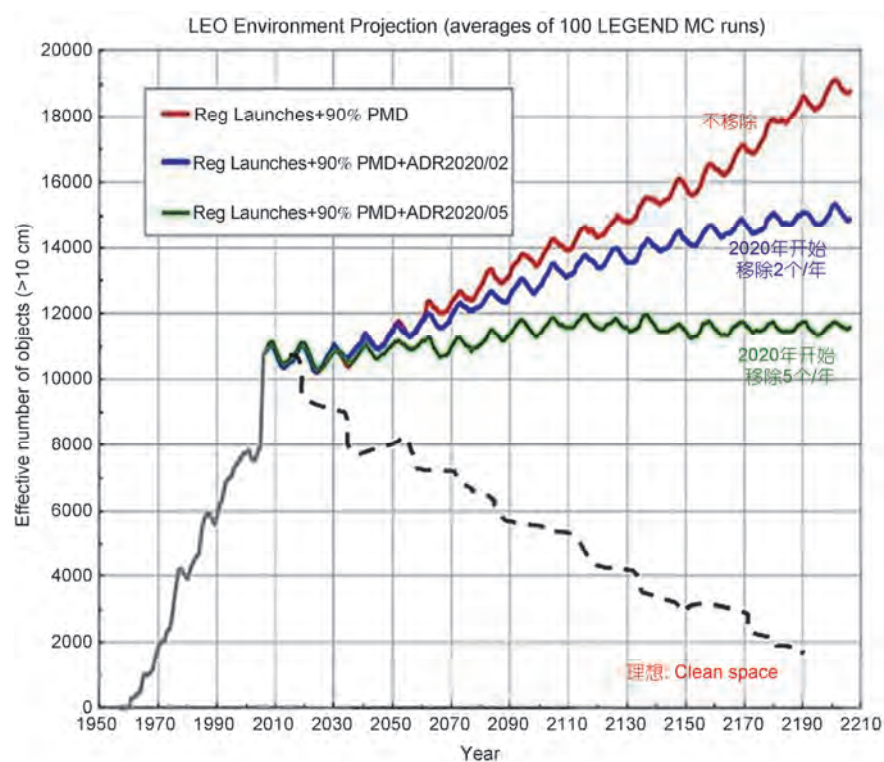


图 19 (网络版彩色)主动移除效果图^[27]
Figure 19 (Color online) Effect of active debris removal (ADR)^[27]

星和大学技术验证类微小卫星的发展并驾齐驱。2005~2009年,小卫星全面进入实用化,同时,微小卫星应用开始崭露头角。2010~2014年,形成小卫星体系化应用,并开辟快响卫星等新领域,同时皮纳卫星发展迅猛。2015年至今,国际上不断丰富拓展小卫星应用领域,微小卫星发射活动和发射计划爆炸式增长,仅2017年全球共发射500 kg以下小卫星312颗,占同期入轨航天器总数80%以上。

2015年英国One Web公司和美国SpaceX公司等启动了巨型微小卫星星座计划(giant small satellites constellations)。One Web公司计划在LEO区域1200 km高度部署720颗微小卫星,这些微小卫星分布在18个不同的轨道面上,用于全球高速通信。Space X公司计划在LEO区域1100 km高度部署12000颗微小卫星,用于全球高速网络通信。已知的全球微小卫星任务计划如表4所示。

IADC, NASA, ESA对巨型微小卫星星座数量激增带来的碎片环境分析指出^[4,17,28,29],按照目前的趋势,2050年10 cm以上碎片数量将超过5万个,2100年将超过10万个,使得LEO区域卫星碰撞数增加6倍^[29],如图20所示。微小卫星星座迅猛发展使得典型轨道区域内卫星密集度急剧增加,使轨道和频率资源日趋紧张,更重要的是微小卫星不具备主动离轨能力,其所处的轨道高度将使其任务后在轨超过数百年,将使空间碰撞概率剧增,给空间碎片减缓指南的実施和空间交通管理带来新的挑战。

2.5 空间碎片监测与移除的重大意义

2.5.1 小碎片大安全

截至2017年底,我国在轨卫星超过170余颗,

表4 小卫星星座计划

Table 4 Small satellite constellation programs

运营商	卫星数量	高度(km)	倾角(°)
LeoSat	140	1800	90
Spire	100	651	97.9
One Web	720	1200	90
SpaceX	12000	1100	90
Samsung	4600	1500	—
Skybox	28	576	97.8
Globalstar	40	1400	52
Iridium	72	780	86.4
Orbcomm	31	750	45
长光公司	13	600	—

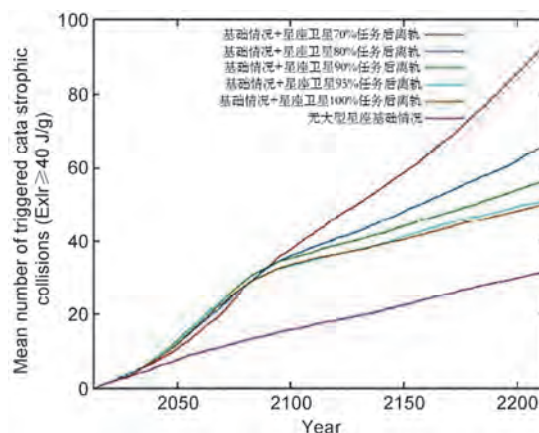


图20 (网络版彩色)微小卫星星座对LEO碰撞数的影响^[29]

Figure 20 (Color online) Influence of small satellite constellation on the impact number^[29]

2020年预计超过200颗。我国即将全面构建卫星遥感、通信广播、导航定位三大空间基础设施体系,正在实施载人航天工程第三阶段——长期运行的空间站计划,正在启动以月球探测为核心的深空探测计划等重大空间专项计划。这些航天器运行轨道大多数处于空间碎片密集区域,碎片撞击将直接导致航天器损伤或失效,造成巨大的经济、社会 and 军事损失,甚至危及空间系统安全乃至国家安全。发展空间碎片监测与移除技术与能力是确保我国空间资产安全运行、维护国家安全和利益的重要保证。

2.5.2 小碎片大形象

由于空间碎片对空间的长期可持续发展带来严重影响,空间碎片已成为国际航天界和国际社会面临的重大挑战,保护空间环境是全人类共同的责任和唯一选择,是构建人类命运共同体的重要内容,这已经成为各国的普遍共识,必将成为国际社会和联合国极为重要的基本准则。空间碎片也是联合国和平利用外层空间委员会(the United Nations Committee on the Peaceful Uses of Outer Space, UN-COPOUS)、国际机构间空间碎片协调委员会(the Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, IADC)等国际多边外交博弈中一个既具有长期性又具有紧迫性的主要议题,既涉及国际形象,又关系着国家利益和责任。发展独立自主的空间碎片监测与主动移除技术,既有助于塑造我国负责任的航天大国形象,同时,更是确保和维护我国在国际航天事务中的主导地位,争夺和提升我国太空话语权的根本保障。

2.5.3 小碎片大创新

空间碎片监测移除涉及的技术广泛,针对不同尺度、不同特性的空间碎片,需要天地一体化监测,移除技术手段更是丰富多样.发展空间碎片监测与主动移除技术与能力,将促进不同学科和技术的交叉融合,不仅带动天文学与天体物理、空间科学、光电子学、超高速碰撞动力学、材料科学等基础学科的发展,而且会引领空间遥感与原位感知、高精度探测、机械制造、先进控制与推进、新型材料应用等相关高新技术的创新发展,带动科技整体进步.

2.5.4 小碎片大经济

一方面,通过碎片移除降低在轨资产遭受空间碎片碰撞事件的可能性,提高在轨资产寿命,减少经济损失.另一方面,越来越多的空间碎片将逐渐占满有限的轨道资源,特别是地球同步轨道资源,目前资料显示,通过移除碎片获取一个轨位资源可赚取约2~5千万美元的利润.通过先进的技术手段移除特定区域的空间碎片,可为有需要的国家或机构提供必要的轨道,是空间技术在碎片移除领域的应用拓展,有助于占据潜在的、有限的空间轨道资源,具有广阔的国际市场,蕴含巨大的经济效益.发展空间碎片监测与移除技术与能力,将开辟空间业务新领域,促进生成新兴太空产业模式,孕育新的经济增长点.

总之,发展空间碎片监测与移除技术与能力,对保护空间资产安全、保障航天事业可持续发展、维护国家安全和利益、引领科技创新、抢占国际太空市场先机、促进太空经济发展、维护国家太空话语权、凸显航天大国责任和形象具有重要的战略意义.

3 空间碎片监测与移除技术的国内外现状与趋势

3.1 空间碎片监测国外发展现状及趋势

3.1.1 空间碎片监测发展现状

空间碎片监测是空间碎片研究的一个重要方面,也是移除、防护的基础,它主要指对空间碎片的探测、跟踪、识别和确认.其发展源自美国和前苏联的导弹预警系统.主要目的是尽早发现和跟踪导弹并确定其轨迹.空间碎片监测分为地基和天基两个部分,相关技术体系如图21所示.

(i) 美国. 美国空间监视网(US Space Surveillance Network, SSN)从20世纪60年代初开始组建,是

目前世界上最早且最大的观测系统.目前SSN可以观测到LEO区域直径大于5 cm和GEO区域直径大于13 cm的空间碎片.该监视网主要由地基雷达(Haystack, HAX, Millstone, Goldstone, AFSSS, Eglin, Cavalier等)、地基光学(GEODSS, AMOS, MCAT, MODEST等)和天基(SBSS, ODSI, GSSAP, SensorSat等)等多手段组成.其设备遍布全球,在全世界分别组建了25个观测站,可以连续跟踪观测LEO区域的空间碎片,具备低轨和高轨空间目标的搜索发现和编目能力.目前跟踪编目的在轨空间碎片超过23000个(其中约17000个识别到发射源)^[30,31].

美国空军从2009年开始计划研制新的地基空间碎片观测系统,称为“空间篱笆”(Space Fence) (<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/measurements/>).该系统主要由2~3部S波段地基雷达组成,通过高频率收发装置为美国空军探测跟踪和精确测量低轨道5 cm尺度目标并及时感知空间威胁事件.洛克希德马丁公司于2014年6月获得9.15亿美元的Space Fence雷达系统建设合同,2015年3月在Kwajalein开始建设,于2018年投入使用,预计整个Space Fence系统总价值将超过15亿美元(<https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/measurements/>).

为了实时、准确地跟踪空间更小、更远的目标,美国等正在发展天基空间目标监测系统.部署在低轨的天基监视系统(Space-based space surveillance, SBSS)和同步轨道上的深空成像系统(orbit deep space imager, ODSI)是其代表.

2010年部署天基低轨空间监视系统,主要用于向联合空间操作中心(Joint Space Operations Center, JSPOC)提供目标位置、轨道机动和识别数据^[32].2014年部署2颗GEO区域空间成像监测卫星“GSSAP”.2016年部署2颗GEO区域空间成像监测卫星“GSSAP”,

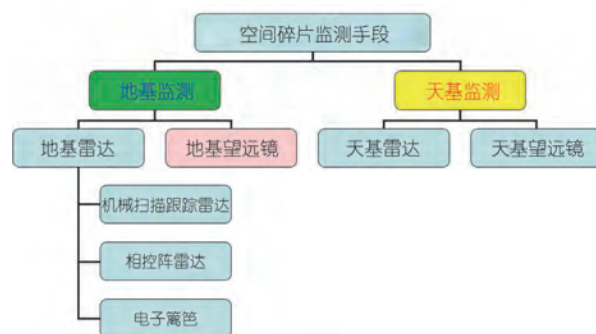


图21 (网络版彩色)空间碎片监测手段

Figure 21 (Color online) The monitoring means of debris

计划于2017年发射的小成本卫星(SensorSat)纳入SBSS后续计划^[33]。

未来,美国将继续推进完善其空间监测网,如表5所示。其中,地基方面,主要包括空间篱笆的进一步改进,以及新的空间监测望远镜和X-波段雷达空间监视雷达。天基方面,主要包括计划于2017年发射的小成本空间监测卫星SensorSat(ORS5)及新提出的地球同步太空态势感知(GSSAP)系统^[32,33]。该系统采用可机动的卫星在GEO轨道区域的上下方漂移,对GEO轨道卫星进行拍照。计划中的两颗卫星已于2014和2016年先后发射。

(ii) 欧洲。ESA于2008年投资4560万欧元启动了由14个成员国参加的空间态势感知系统建设计划,预计将于2019年完成(http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Debris/Scanning_observing)。该系统由电磁篱笆和4台望远镜组成,建成后可对1000 km轨道以下的物体进行监测,并提供空间搜索与跟踪数据处理、空间态势感知、近地天体数据及空间天气等相关服务。目前已跟踪编目的空间碎片超过17000个(http://www.esa.int/Our_Activities/Operations/Space_Debris/Scanning_observing)。

(iii) 俄罗斯。目前,俄罗斯已建成了由30套共100多台望远镜测站组成、遍及14个国家和地区的國際光学科学观测网(International Scientific Optical Network, ISON)^[34,35]。该系统提供中高轨空间碎片跟踪观测和搜索发现、碎片编目及碎片特征探测、中高轨卫星的碰撞预警、运动模型及轨道演化、小行星跟踪观测和搜索发现等服务。该系统的全球布站特性很好地弥补了美国空间目标编目系统的空缺,目前已跟踪编目的空间碎片超过16000个^[34,35]。

(iv) 商业公司。近年来,国外商业卫星公司迅猛发展,对空间目标的探测跟踪及空间态势感知的

需求愈来愈强烈。2009年,Inmarsat, Intelsat, SES和Eutelsat等多家商业卫星公司组织成立了空间数据协会(Space Data Association, SDA),提出了空间目标监测及空间态势感知的一种由参与者共享数据和分担运营成本的新模式。同时,ComSpoc公司基于AGI公司的支持推出了空间数据信息的付费服务,目前该公司已在全球布设28台望远镜,获取了5000多个空间物体轨道信息。可以预见,在微小卫星和商业航天迅速发展、空间目标撞击规避和空间碎片移除逐步规范化法律化的将来,机构间数据共享、成本共担、协调合作的新模式必将成为主流。

3.1.2 空间碎片监测发展趋势

现有的空间目标地基监测手段无法达到对空域、时域的无缝覆盖,不能达到全天域、全天候、全天时监测,如表6所示。在加强地基监测能力的同时,发展天基监测技术是空间目标跟踪与监视的大势所趋,最终形成天地系统一体化、全天时、全天域、全天候、广尺度、多手段对碎片的监视能力。美国在2018年具备5 cm以上10万个空间目标的监测编目能力和空间事件的快速感知能力,低轨定位精度10 m、高轨定位精度100 m (http://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html, http://www.nasa.gov/centers/johnson/pdf/584742main_Wings-ch5g-pgs444-458.pdf),可实时监视重要目标,如表7所示。

3.2 空间碎片移除国外发展现状及趋势

对空间碎片主动移除技术的一般要求是^[36]:避免产生更多的空间碎片、全区域可行的移除方案(LEO, MEO, GTO和GEO)、移除每个碎片的成本低、重返地球的可控性、移除效率高。

3.2.1 空间碎片主动移除技术

空间碎片主动移除技术可分为两大类^[36]:附着

表5 美国空间监测网改进计划

Table 5 The improvement plan of the US Space Surveillance Network

完成时间	设备	功能
2012	4个天基空间监测卫星星座	改进低轨、高轨的发现、定轨、轨道覆盖、及时性以及LEO和GEO的精度
2018	空间篱笆	改进低轨物体的发现、定轨、轨道覆盖和精度
2018	2台X-波段雷达	改进低轨物体的发现、定轨、轨道覆盖和精度

表6 美国现有地基对空间目标空监视能力

Table 6 The existing ground-based debris surveillance capability of USA

设备	探测方式	目标轨道高度	可探测目标尺寸
相控阵雷达	—	3000~5000 km	—
机械雷达	—	中高轨	0.25 m
干涉雷达空间篱笆	VHF S波段	中低轨 低轨	0.05 m
光电望远镜 (地基光电深空侦察系统)	3个站	高轨	0.2 m

表7 美国现有天基对空间目标空监视能力

Table 7 The existing space-based debris surveillance capability of USA

空间监视能力	1988	2012	2020
检测和跟踪能力	30 cm (LEO)	10 cm (LEO)	1 cm (LEO)
(目标大小)	30 cm (GEO)	20 cm (GEO)	10 cm (GEO)
位置精确度	1 km (LEO)	500 m (LEO)	10 m (LEO)
	5 km (GEO)	2 km (GEO)	100 m (GEO)
2020年拟采用新技术		天基光电网	
		S-波段篱笆	
		天基红外系统	

移除技术和遥操作移除技术,如图22所示,各种移除技术的对比见表8. 国外的空间碎片主动移除技术研究重心已经跨过了概念研究,正处于关键技术研究阶段,并部分向技术验证和在轨试验转移,但目前还没有实际部署的空间碎片移除系统. 目前,已经提出的主要的空间碎片主动移除技术主要有以下几类.

(i) 交会捕捉移除技术^[37,38]. 空间拖船利用自身的发动机进入作业轨道,将捕获工具展开或插入空间碎片(或失效航天器)实施抓捕,然后离轨,以达到移除目的,如图23所示. 机械臂、捕捉爪、系绳网等均属于此类. 这类技术较成熟、可操控性高,但可重复使用性较差、移除成本较高.

(ii) 电动力绳系移除技术^[39~41]. 电动力绳系移除技术(electrodynamics tether system, EDT)是移除系统接近要移除的碎片(或失效航天器),将其携带的金属绳索的一端安装在要移除的碎片上,释放金属绳索的另一端并通电流,利用地球磁场产生的拖拽力改变碎片轨道,从而达到移除目的,如图24所示. 这

一技术中绳索不易操控、移除成本较高且效率较低. 2017年1月28日,日本的“白鸛6号”(Kontori-6)因无法在空间释放700 m长的金属绳索而宣告清除行动失败,这是该技术的第二次在轨失败.

(iii) 充气阻尼移除技术. 该技术将充气装置安装在碎片上,并利用其形成气球或抛物面形状提高气动阻力,以降低碎片轨道,实现移除. 缺点是目标增大、容易破裂,可能会产生大量新碎片,且只适用于移除低轨碎片.

(iv) 液/气体、微粒云雾、离子束^[42]. 在碎片(或失效航天器)的运行轨道上喷射液体、气体、微粒云雾、离子束等来增加其阻力或产生反向推力,降低碎片速度,从而降低其轨道,达到移除目的,如图25所示. 这种技术的缺点是喷射出的粒子/离子束自由分散、可控性较差. 另外,存留的微粒云雾可能会影响

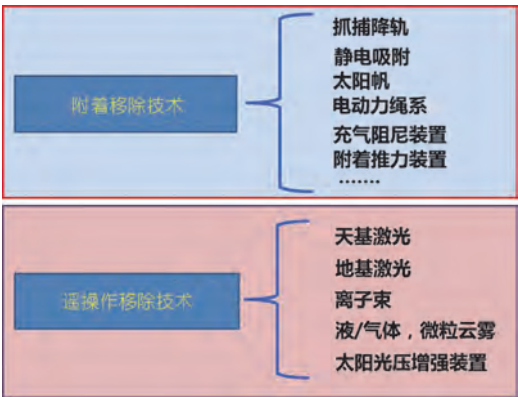


图22 (网络版彩色)空间碎片主动移除技术分类
Figure 22 (Color online) Classification of different means of ADR

表8 空间碎片主动移除技术对比

Table 8 Comparison of different means of ADR

碎片尺寸	移除方法	适用轨道	是否合理	存在的问题
米级以上空间碎片	交会捕捉	Any	是	捕获碎片
	充气阻尼	LEO	否	体积较大, 易跟其他碎片发生碰撞
	太阳帆	GEO	否	捕获碎片
	电动力绳系	LEO	否	控制复杂, 动态稳定性, 捕获碎片
	动量方法	Any	否	控制复杂, 动态稳定性, 捕获碎片
厘米级空间碎片	地基激光	LEO	是	交会时间, 激光系统, 监测, 跟踪
	天基激光	LEO	是	交会时间, 激光系统, 监测, 跟踪
毫米级及以下的空间碎片	交会捕捉	LEO	否	所需数量巨大
	液/气体, 微粒云雾	LEO	否	不可控, 影响其他航天器
	静电吸附	Any	否	体积巨大, 消耗能量



图 23 (网络版彩色)空间拖船追赶抓捕碎片技术示意图

Figure 23 (Color online) Concept of towboat to capture debris

正常运行的航天器。

(V) 激光主动移除空间碎片技术。激光主动移除空间碎片技术^[36,43~46]是使用强激光束照射碎片表面,使辐照区材料产生熔融、汽化、电离,形成等离子体反喷羽流,反喷羽流的冲量耦合使碎片获得反向速度增量,从而驱动碎片运动,改变碎片初始轨道,如图26所示。激光主动移除空间碎片技术因其可同时进行探测和跟瞄,操作简单、响应时间短、可重复使用且成本较低,因而被认为是最有前景的方法。早在20世纪80年代末,美国、德国等就提出了用强激光移除空间碎片的概念^[44~46]。1996年,美国NASA推出了地基强激光移除空间碎片的ORION计划^[47~49],该计划设计能够在1500 km范围内、以直径60 cm的光斑驱动尺度1~20 cm、质量在100 kg以下的碎片。从2012年起地基激光移除计划因激光大气传输问题而受阻,NASA转向天基激光方案。国外的激光移除空间碎片技术已经进入关键技术攻关^[50,51]和系统演示验证阶段^[52,53]。

3.2.2 天基主动移除系统

目前主动移除系统都是基于机械抓捕手段搭配不同的离轨方式,技术成熟度较高,均已开始实际工程化的方案设计。ESA的Clean Space计划中针对主动移除系统技术研究的e.Deorbit计划,是目前公布的最大规模的主动移除系统跨国合作研究计划,除ESA各成员国外包括空客防务宇航事业部, OHB Munchen, ThalesAlenia, KAYSER-THREDE等多家商业公司深度参与其中。其研究内容包括机械抓捕技术、制导导航和控制系统(the guidance, navigation and control system, GNC)、碎片特征识别系统三个方面。目前飞

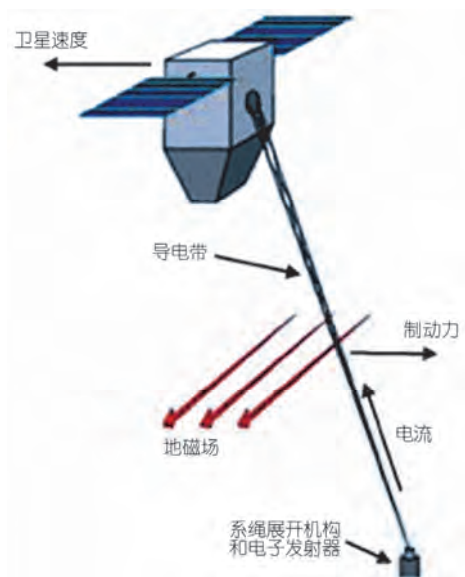


图 24 (网络版彩色)电动力绳系主动移除碎片原理示意图

Figure 24 (Color online) Principle of electro-dynamic tether for ADR

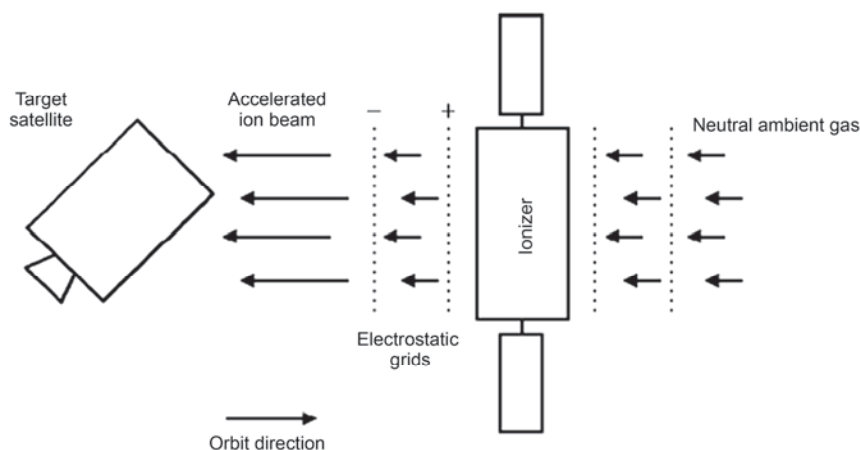


图 25 离子束移除碎片技术原理示意图

Figure 25 Schematic diagram of ion beam shepherd satellite deorbiting space debris

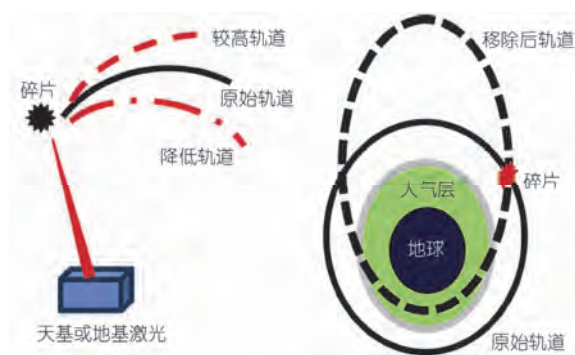


图 26 (网络版彩色)激光移除空间碎片原理示意图

Figure 26 (Color online) Schematic diagram of removing orbital debris with lasers

网/鱼叉抓捕技术、太空机器人技术、GNC及碎片识别等方面已展开或完成初步研究计划,后续研究将集中在所涉及的一系列关键技术攻关上.其中空客防务宇航事业部公布了他们在碎片主动移除系统领域主要的3个研究方面,分别是在轨移除系统总体设计、主动移除关键技术研发、太空多用途运载工具研发.首先是以Envisat为目标设计的在轨抓捕移除系统,该系统基于专门设计的非通用平台,采用机械臂进行抓捕固定,通过被动光学相机实现视觉导航控制,离轨动力则来自抓捕平台自身的推进系统.其次是主动移除关键技术研究,该研究主要针对了飞网、鱼叉两种抓捕手段,阻力帆式增阻离轨技术及用于非合作目标交汇的制导导航控制系统.其中多项关键技术均已制定了独立的演示验证方案,针对Envisat的抓捕系统(图27)太空多用途运载工具计划则是设计研发一套可用于地月运输、卫星变轨递送、卫星在轨服务、大碎片离轨等功能的通用平台.

日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)提出的主动移除系统是以实现低成本碎片移除为主要目标,因而其制定的移除系统方案中采用不需要额外燃料消耗、能通过小尺寸航天器移除大尺寸目标的电动力绳系技术进行离轨,抓捕则采用一套连接电动力绳系的可展开的机械抓捕机构,并制定了对其进行在轨演示验证的kite方案.

意大利AVIOSPACE公司也提出了一套完整的大尺寸碎片主动移除系统解决方案,采用专门设计的天基卫星平台并包括机械抓捕机构、视觉控制系统、非合作目标交汇GNC系统等.其中,机械抓捕机构采取的是带皮带的机械手式结构(图28),该结果具有抓捕

过程无刚性撞击、不需要专用的对接界面、抓捕过程自动实现目标消旋、能建立稳定刚性连接等优点.

俄罗斯在联盟号飞船的基础上设计了用于移除碎片的太空拖船Volga,其抓捕机构采用的是专门针对火箭发动机锥形喷管的自动对接系统,如图29所示.该系统首先通过抵近观测获得目标的自旋情况,之后根据计算选择合适的时机角度进行对接,并借助目标自身的旋转将探针锁死与目标形成稳固连接,最后对目标进行消旋并拖牵至拖船处与拖船对接完成抓捕过程.

3.2.3 空间碎片移除的国外发展趋势

综上所述,美国、欧洲和日本的空间碎片主动移除研究起步较早,已制定了一系列的碎片移除计划,发展了一系列的碎片移除技术,部分关键技术已开展在轨演示验证,尤其以美国推出的针对GEO卫星

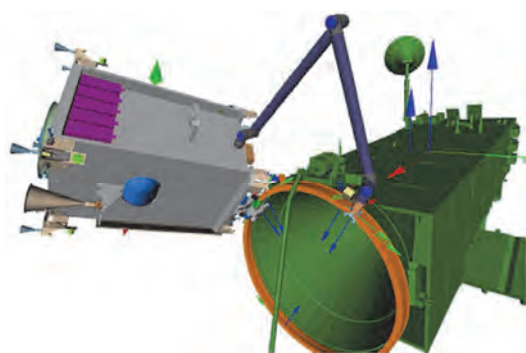


图 27 (网络版彩色)针对Envisat的抓捕系统

Figure 27 (Color online) Capture systems for Envisat



图 28 (网络版彩色)皮带式机械手

Figure 28 (Color online) Robotic tentacles with belts

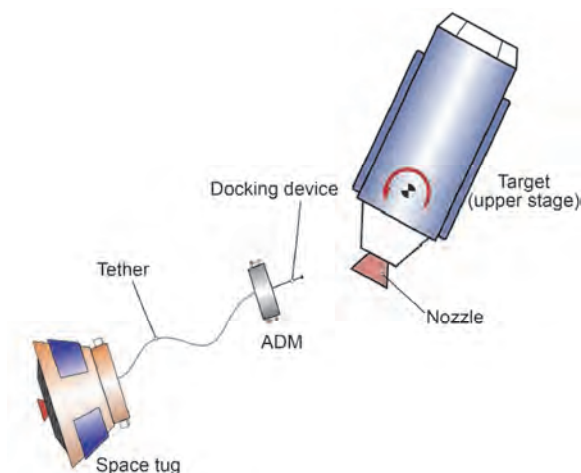


图 29 (网络版彩色)太空拖船和自动对接系统

Figure 29 (Color online) Space tug and autonomous docking system

重用计划(凤凰计划)更是集成了空间碎片移除的诸多关键技术。但总的来说,当前的发展水平距在轨应用尚有差距,仍处于关键技术突破和验证阶段。美、日等已基本实现了对合作目标的机动、绕飞与接近抓捕能力。

3.3 国内发展现状

3.3.1 空间碎片监测

在我国重大航天工程任务牵引下,国内有关部门相继建设了无线电、光电望远镜、相控阵雷达、精密跟踪雷达、光电阵等空间目标监测设备,初步形成了光电观测、雷达监测、无线电侦测等3种手段构成的空间目标监视系统。

国内已具备在轨风险评估、航天器发射预警、航天器载荷效能评估、空间物体再入安全、航天器解体分析、减缓效果评估、地球同步轨道轨位安全性分析、空间碎片环境评估等能力。

在数据库及仿真评估方面,已建立了我国低轨卫星和空间碎片轨道数据库,研制了监测网效能评估系统,能对各类雷达和光电设备进行效能评估,并对监测网的整体性能进行仿真和评估。在探测硬件系统方面,已经突破了电磁篱笆、Ku频段雷达、光电篱笆和高精度激光雷达等空间碎片地基监测网主要设备关键技术。同时,针对中高轨道空间碎片搜索优化策略、厘米级空间碎片监测管理策略等监测设备运行优化技术进行了深入的研究,并正在开展天基监测手段研究部署。

3.3.2 空间碎片主动移除

(i) 天基移除系统技术。2016年6月25日开展了“傲龙一号”机械臂抓捕合作目标在轨演示验证;开展了多个在轨飞行任务和新技术验证型号任务,具备了近距离逼近和高精度停靠空间目标、利用空间机械臂释放回收空间目标、人在回路中操控空间目标、空间机器人系统对空间合作目标进行在轨操作、自主交会和天地协同控制等技术和能力;验证了高轨空间非合作目标远距离捕获识别与成像观测能力、绕飞、悬停与抵近等空间操作能力。

(ii) 主动移除关键技术。开展了空间机械臂、飞网抓捕技术研究,研制了原理样机,进行了数值仿真和在轨演示验证,开展了天基激光移除空间碎片系统方案与可行性研究^[54],正在进行关键技术攻关和验证试验。

3.4 与国外及工程需求的差距

3.4.1 空间碎片监测

尽管近年来我国空间碎片监测能力得到了很大发展,但针对小尺寸、庞大数量空间碎片的监测能力仍然薄弱。主要表现为“小的看不清、大的看不全”;高精度探测设备缺乏,监测数量、精度距离航天工程需求存在差距。缺乏专用的空间碎片探测设备,没有形成空间碎片连续观测机制,系统化空间碎片编目管理研究难以开展,空间碎片常态化数据服务能力不足。大部分空间碎片监测需要依赖美国常规更新的数据引导,一旦美国的数据库关闭,我国空间碎片的编目管理将受到很大影响。空间碎片监测数据动态更新频率低、时效性差,难以满足预警要求和应对空间突发事件的要求。设备基础和能力与工程需求仍有一定差距。

3.4.2 空间碎片主动移除

我国在空间碎片主动移除方面进行了很多前期研究,整体技术正在从概念研究向关键技术攻关过渡,并部分向天基技术验证转移,在个别方向具有国际领先性。但是,我国空间碎片移除总体技术水平与国外还有一定差距,主要表现为,我国空间碎片主动移除技术基础薄弱,一些关键技术尚未开展演示验证试验;缺乏明确的项目计划和工程牵引;离形成可常态化运行的系统要求差距明显,难以实施碎片环境治理任务。亟需以形成常态化、业务化碎片移除能力为目标,深入开展碎片治理关键技术研究与在

轨演示验证试验。

4 空间碎片监测与移除前沿技术与关键科学问题

4.1 前沿和关键技术

4.1.1 顶层架构设计与系统优化技术

开展地面集成仿真试验和在轨飞行验证试验,稳步推进空间碎片监测、移除技术能力提升。其关键技术包括系统总体设计与优化、空间碎片态势分析评估、移除效能评估与任务规划、空间碎片监测移除任务仿真、空间碎片移除试验评估、空间碎片移除卫星载荷模块在轨更换等。

4.1.2 空间碎片监测系统关键技术

(i) 天基厘米级空间碎片跟踪监测技术。开展宽视场甚高灵敏度空间微弱高速动目标监测总体技术、高时空分辨成像电子学技术、高时效数据处理与高精度目标检测定位技术、基于天基光学测角数据的短弧段定轨技术等研究,实现对厘米级空间碎片跟踪监测。

(ii) 星载空间碎片复合一体化监测技术。开展天基多模复合一体化厘米级空间碎片探测监测技术研究,突破多模共口径复合一体化系统设计、高动态目标积累检测、高灵敏度接收机、轻小型大视场多模复合天线、多模信息融合等技术,实现星载空间碎片复合一体化监测。

(iii) 空间目标特征获取与识别技术。准确获取空间目标的特征包括光电谱学特性、运动特性及材料特性,为空间碎片定轨、态势感知及空间碎片移除提供基础信息。重点研究空间目标对雷达波和可见光的反射特性、运动状态对光电反射特性的影响及碎片的材质构成,为空间目标数据库及空间碎片移除提供基础数据支持。

(iv) 空间碎片定轨与轨道预报技术。根据空间碎片的实时监测数据对碎片实施定轨及轨道预报,研究不同的测量数据和定轨方法对碎片定轨精度的影响,以优化定轨及预报对数据采样时段及弧段的要求,提高碎片定轨和预报精度及系统效率。

(v) 低轨道空间碎片工程模型建模技术。突破2000 km区域内轨道历史解体事件反推技术、地固坐标系下空间碎片环境建模技术,开展模型的误差及敏感因素分析,建立基本功能及通量预报精度优于

ORDEM系列最新版本ORDEM 3.0的自主空间碎片工程模型。研究巨型微小卫星星座、突发事件对空间碎片环境的影响,提升我国航天器空间碎片风险评估自主化能力,为空间碎片防护工程设计提供基础。

(vi) 高轨道空间碎片工程模型建模技术。把低轨道空间碎片工程模型延伸至36000 km区域内,为GEO区域撞击风险评估提供基础,指导该区域寿命末期大型航天器的离轨操作,提高GEO区域轨位资源利用率,降低该区域碎片撞击概率。

(vii) 航天器再入预报和风险评估技术。根据航天器姿态、轨道、外形及材质信息,研究再入过程中航天器的气动力、气动热和解体问题,预报准确的再入轨迹、实时位置及落点信息。依据落点位置的人员和资产分布评估再入过程风险,指导再入管控,降低对地面的安全威胁。

4.1.3 空间碎片移除系统关键技术

(i) 空间碎片特性测量与三维重构技术。突破空间碎片的形状特征、表面状况、材料特性、质量特性、转速大小以及飞行姿态的测量与分析技术,掌握对目标特征的快速匹配、高精度位姿测量以及多参数辨识方法,获取空间碎片的几何与力学等方面信息,实现对目标的三维重构,为移除提供基础。

(ii) 变质量特性组合体自适应控制技术。对组合体质量特性、动力学特性和姿态轨道状态信息进行在轨辨识,根据辨识结果对组合体进行自主控制,使组合体位姿状态符合任务预期,满足碎片移除任务要求。

(iii) 标准化可重用/可更换载荷技术。研制可重用、可更换的抓捕载荷,如宽适应性模块化抓捕与操作机构、柔性机械臂及末端工具、可重复收放的飞网等,并采用统一的模块接口建立系列化的、可以相互替换的抓捕工具集,形成标准化的、适用于各类大尺度碎片移除任务的载荷型谱。

(iv) 空间碎片激光探测移除技术。针对天基激光移除空间碎片方式,开展高功率激光输出、光束质量控制、高精度跟踪瞄准与指向、激光驱动碎片动力学行为等研究,包括高效轻量化激光光源设计与集成、亚微弧度精度目标快速捕获跟踪指向、大口径光学系统、高功率激光器材料等技术。

(v) 先进碎片移除与利用技术。包括类太阳帆空间碎片原位探测与移除、充气展开式、磁效应等先进空间碎片移除技术。

(vi) 主动移除技术地面集成试验方法. 开展对各种单一技术的系统集成及可行性、可靠性验证试验, 包括地面验证试验平台的构建等.

(vii) 主动移除技术在轨验证技术. 对各种主动移除关键技术开展在轨演示验证, 为工程化奠定基础.

(viii) 主动移除效能评估技术. 针对特定的空间区域、空间碎片或者特定的航天器, 基于空间碎片模型、定轨和预报数据, 评估空间碎片的撞击概率、时间及位置, 分析这一特定目标移除后对空间碎片环境的影响, 筛选优先移除的目标碎片. 通过分析各种目标、移除手段的移除成本和移除效率, 给出移除手段的效能评估, 据此选择移除技术途径与策略.

4.2 关键科学问题

空间碎片监测与移除主要涉及的关键科学问题有: (1) 空间结构多维度/跨尺度拓展过程中的动力学理论与方法; (2) 空间变结构多柔性体/全柔性动力学与控制理论与方法; (3) 空间碎片搜索、跟踪、识别、编目一体化理论; (4) 空间碎片定轨与轨道预报理论与方法; (5) 量子、激光、太赫兹等新型空间碎片探测的科学问题; (6) 空间伴飞、接近、停靠的GNC理论; (7) 隔热、抗辐照、高抗撞击多功能一体化防护材料设计理论与方法; (8) 空间可修复材料设计理论与方法; (9) 空间碎片环境及演化建模理论与方法; (10) 航天器超高速撞击解体建模理论与方法; (11) 太阳风对微小碎片的作用规律与机理等.

5 空间碎片环境治理发展思路与目标建议

5.1 空间碎片环境治理的概念与内涵

空间碎片环境治理是指在对空间碎片精准监测的基础上, 以某种技术手段对空间碎片进行离轨操作, 实现对空间碎片的高效主动移除, 达到净化空间碎片环境(Clean-Space)的目的, 保障空间长期可持续使用.

空间碎片精准监测是指在完善地基各种监测手段的基础上, 发展天基智能监测系统, 形成天地系统协同、全天时、全天域、全天候、广尺度、多手段监测能力, 实现对空间碎片轨道和目标特性的高精度、高灵敏度和快速反应感知.

空间碎片主动移除是指利用附着技术或遥操作技术, 人为改变空间碎片原有轨道, 使LEO区域碎片

的近地点低于200 km高度, 逐渐进入大气层烧毁; 使GEO区域碎片轨道高度抬高200 km以上, 进入坟墓轨道.

5.2 发展思路

以“保护我国空间资产安全、维护我国外空权益、保障空间长期可持续发展”为发展目标; 遵循“主动移除为主、监测防护为辅; 先大后小, 大小兼顾; 先高后低, 高低并举”的技术原则; 坚持“问题和创新导向, 广泛参与、集智攻关”, 系统开展空间碎片监测与移除关键与前沿技术攻关, 加强国际合作, 促进空间碎片监测与移除技术水平提升, 形成全天域、多手段的天地一体化空间碎片环境治理技术能力. 同时制定空间碎片移除实施规范和标准流程, 在有关国际事务中力争主导, 提升国际规则制定话语权, 有力维护我国外空发展权益和外交利益.

5.3 发展目标

通过实施“空间碎片环境治理专项工程”, 实现有效牵引, 突破捕获离轨、推移离轨、增阻离轨、天基监测等关键技术; 研制空间碎片天基监测与移除飞行器, 开展在轨飞行试验; 构建空间碎片环境治理空间基础设施, 形成全天域、不同尺度、多种手段的天地一体化空间碎片环境治理技术能力, 在2030年前形成独立自主、功能齐备、性能先进、高效率、低成本的空间碎片环境治理任务工程实现能力, 达到国际先进/领先水平.

阶段目标分为以下三个方面.

(i) 2020年目标: 开展飞行演示验证, 形成大碎片移除能力. 突破大视场高灵敏度探测载荷技术, 为高轨碎片移除系统捕获10 cm以上碎片目标提供1 km精度的位置引导信息; 突破捕获离轨、推移离轨等技术; 研制空间碎片监测试验卫星, 形成以高低轨抓捕米级非合作目标试验卫星、高轨10 cm以上碎片监测卫星为标志的演示验证系统, 开展高轨废弃卫星移除试验, 形成米级大碎片移除能力.

(ii) 2025年目标: 多种手段并举, 拓展大小碎片移除能力. 重点突破小碎片定向能激光移除技术, 发展充气展开增阻装置、太阳帆等空间碎片推移离轨技术; 突破类太阳帆空间碎片原位探测技术, 研制低轨微小碎片探测卫星, 形成微小碎片感知应用系统, 低轨厘米级碎片定轨精度优于100 m; 开展厘米级小

碎片移除试验,形成厘米级小碎片激光移除试验、低轨厘米级碎片监测卫星为标志的示范应用系统,具备大小碎片监测和移除能力。

(iii) 2030年目标:构建完备体系,具备业务化运行能力。发射建立空间碎片监测卫星星座,研制航天器空间碎片自感知产品,形成天地一体化的空间碎片监测系统,具备对低轨厘米级、高轨10 cm以上空间碎片高精度探测编目能力。构建由高低轨空间碎片移除卫星星座组成的天基碎片移除系统,具备对1 cm以上高低轨空间碎片移除的业务应用能力,其中对10 cm以上空间碎片具备捕获移除能力,对1~10 cm空间碎片具备推移移除能力。研制自主离轨通用化产品,全面具备航天器任务末期的自主离轨能力。

最后,形成功能齐备、性能先进、高效率、低成本、高可靠、常态化、业务化碎片移除运行系统,具备空间碎片监测和移除业务应用能力。

5.4 实施建议

(1) 超前谋划、统一部署、尽快行动。空间碎片

环境治理体系庞大,内容繁多,建议成立国家专项领导小组,统筹全国在空间碎片监测、移除与防护研究已有的技术基础,凝聚全国优势力量,尽快建立国家空间碎片环境治理中心,全国一盘棋,全面、系统、尽快抢占空间碎片监测移除技术制高点。

(2) 紧紧围绕高效清除、精准监测、有效防护目标,尽快实施空间碎片环境治理工程建设,经过2~3个五年计划,形成功能齐备、性能先进、高效率、低成本的空间碎片环境治理任务工程实现能力,达到国际先进/领先水平。

(3) 在专项工程建设过程中,探索政府注资、民间商用投资等多元化融资渠道;以发展中国家为主体用户大力开展国际合作,为其提供轨道空间资源清理业务服务和技术支持,开拓碎片移除国际市场。

(4) 国际空间竞争态势日益严峻,外层空间的争夺将成为国家战略竞争新的制高点,系统、深化空间碎片国际政策法规研究,深度参与空间碎片事务国际合作,提升空间碎片事务国际标准规范规则制定能力,提升航天软实力。

参考文献

- Liou J C, Krisko P. An update on the effectiveness of post mission disposal in LEO. In: 64th International Astronautical Congress, IAC-13-A6.4.2. Beijing: International Astronautical Federation, 2013
- IADC Space Debris Mitigation Guidelines, IADC-02-01. 2002
- ASTRO-H Spacecraft Fragments During Payload Check-out Operations. Orbital Debris Quarterly News. 2016, 20: 4
- Liou J C. USA space debris environment, operations, and research updates. In: 54th Session of the Scientific and Technical Subcommittee, Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Vienna: UNCOPOUS, 2017
- Liou J C. USA space debris environment, operations, and research updates. In: 53th Session of the Scientific and Technical Subcommittee, Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Vienna: UNCOPOUS, 2016
- Liou J C. USA Space Debris Environment, Operations, and Research Updates. Houston: NASA Johnson Space Center, 2016
- Schonberg W P. Hypervelocity impact response of Space composite material structures. Inter J Impact Eng, 1990, 10: 509–523
- Poe R F, Rucker M A. Evaluation of pressurized vessels following hypervelocity particle impact. In: Proceedings of the First European Conference on Space Debris, Darmstadt, 1993. 441–446
- Drolshagen G. Hypervelocity impact effects on Spacecraft. In: Proceedings of the Meteoroids Conference (ESA-SP-495), European Space Research and Technology Centre. Noordwijk, 2001. 533–541
- Gurule A P, Yates K W, Evans R M. Impact of Space debris on solar photovoltaic array performance. In: 43th International Astronautical Congress. Washington DC, 1992
- Pang H W, Gong Z Z, Tong J Y, et al. Hypervelocity impact damage of fused silica glass and M/OD impact risk assessment of spacecraft windshield. Spacecr Environ Eng, 2007, 24: 137–145
- Gong Z Z, Yang J Y, Tong J Y, et al. M/OD hypervelocity impact tests carried out in CAST (in Chinese). Spacecr Environ Eng, 2009, 26: 301–306 [龚自正, 杨继运, 童靖宇, 等. CAST空间碎片超高速撞击试验研究进展. 航天器环境工程, 2009, 26: 301–306]
- Koons H C, Mazyr J E, Selesnick R S, et al. The impact of the space environment on space system. Aerospace Report, TR-99 (1607)-1, 20 July, 1999
- Klinkrad H. Assessments of the on-ground risk during re-entries. In: 3rd European Conference on Space Debris, ESA-ESOC, Darmstadt, 2001. Noordwijk: ESA Publications Division, 2001. 507–514

- 15 Klinkrad H. Space Debris-Models and Risk Analysis. Chichester: Springer and Praxis Publishing, 2006. 241–287
- 16 Gong Z Z, Li M. The giant collision of US-Russia satellites in space and its influences on spaceflight activities (in Chinese). *Spacecraft Environ Eng*, 2009, 26: 101–106 [龚自正, 李明. 美俄卫星太空碰撞事件及对航天活动的影响, *航天器环境工程*, 2009, 26: 101–106]
- 17 Krag H. Space debris mitigation activities at ESA in 2016. In: 54th Session of the Scientific and Technical Subcommittee, Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Vienna: UNCOPOUS, 2017
- 18 Corley B. International space station debris avoidance process. *Orbit Debris Quart News*, 2016, 20: 7–8
- 19 Kessler D A. Brief history of orbital debris programs and the increasing need for debris removal. In: the 4th International Workshop on Space Debris Modeling and Remediation. Noordwijk: ESA Publications Division, 2016
- 20 Liou J C, Johnson N L. Risks in space from orbiting debris. *Science*, 2006, 311: 340–341
- 21 Kessler D J. Collision cascading: The limits of population growth in low Earth Orbit. *Adv Space Res*, 1991, 11: 63–66
- 22 Kessler D J. Critical density of spacecraft in low earth orbit. Technical Report, JSC#28949/LMSEAT#33303, NASA
- 23 UN Space Debris Mitigation Guidelines, A/62/60, December 2007
- 24 NASA Safety Standard. Guidelines and Assessment Procedures for Limiting Orbital Debris, NSS1740.14, August 1995
- 25 ESA Space Debris Mitigation Handbook. 2 ed. European Space Agency, 21 Feb 2003
- 26 China National Industry Standard. QJ3221-2005 Requirements for Orbital Debris Mitigation (in Chinese). Beijing: The Commission of Science, Technology and Industry for National Defense, issued in 2006 and revised in 2015 [中华人民共和国航天行业标准“空间碎片减缓要求(QJ3221-2005)”. 北京: 国防科学技术工业委员会, 2005-04-11 发布, 2015 年 12 月修订]
- 27 Liou J C, Johnson N L, Hill N M. Controlling the growth of future LEO debris populations with active debris removal. *Acta Astron*, 2010, 66: 648–653
- 28 IADC Statement on Large Constellations of Satellites in LEO Earth Orbit, IADC-15-03, February 2016
- 29 Virgili B B, Dolado J C, Lewis H G, et al. Risk to space sustainability from large constellations of satellites. *Acta Astron*, 2016, 126: 154–162
- 30 Settecrrri T J, Stansberg E G, Hebert T J. Radar measurement of the orbital debris environment: Haystack and HAX Radars October 1990–October 1998. Technical Report, JSC-28744, NASA, Johnson Space Center, 1999
- 31 Lu Z. History and status of US space situational awareness (in Chinese). *J Ordnance Equip Eng*, 2016, 1: 1–8 [陆震. 美国空间态势感知能力的过去和现状. *兵器装备工程学报*, 2016, 1: 1–8]
- 32 Ma L. A study on space-based ISR Technology and system development (in Chinese). *Modern Radar*, 2008, 30: 1–6 [马林. 天基情报、监视、侦察技术与系统发展研究. *现代雷达*, 2008, 30: 1–6]
- 33 Tang Z Y, Huang X F, Cai Z B. Development status and enlightenment of foreign space-based space surveillance systems (in Chinese). *Aerospace Elec Warfare*, 2015, 31: 24–30 [汤泽滢, 黄贤锋, 蔡宗宝. 国外天基空间目标监视系统发展现状与启示. *航天电子对抗*, 2015, 31: 24–30]
- 34 Molotov I, Voropaev V, Borovin G. Recent developments within the ISON project. In: the 53th Session of the Scientific and Technical Subcommittee, Committee on the Peaceful Uses of Outer Space. Vienna: UNCOPOUS, 2017
- 35 Dai K X, Feng Z L, Wan X R. Study on developments of space situation awareness system in Russia (in Chinese). *J China Acad Electron Inf Technol*, 2016, 3: 233–238 [代科学, 冯占林, 万歆睿. 俄罗斯空间态势感知体系发展综述. *中国电子科学研究院学报*, 2016, 3: 233–238]
- 36 Gong Z Z, Xu K B, Mou Y Q, et al. The space debris environment and the active debris removal techniques (in Chinese). *Spacecraft Environ Eng*, 2014, 31: 129–135 [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. *航天器环境工程*, 2014, 31: 129–135]
- 37 Felicetti L, Gasbarri P, Pisculli A, et al. Design of robotic manipulators for orbit removal of spent launchers' stages. *Acta Astron*, 2016, 119: 118–130
- 38 Eichler P, Bade A. Removal of debris from orbit. In: *Orbital Debris Conference: Technical Issues and Future Directions*. Baltimore, 1990. 90–1366
- 39 Chen H, Wen H, Jin D P, et al. Progress in orbit test and ground physical simulation of tethered satellite (in Chinese). *Adv Mech*, 2013, 43: 174–184 [陈辉, 文浩, 金栋平, 等. 绳系卫星在轨试验及地面物理仿真进展. *力学进展*, 2013, 43: 174–184]
- 40 Cai H, Yang Y W, Guo C F. Review of electrodynamic tether system (in Chinese). *J Astron*, 2014, 11: 1225–1232 [蔡洪, 杨育伟, 郭才发. 电力绳系研究进展. *宇航学报*, 2014, 11: 1225–1232]
- 41 Ishige Y, Kawamoto S. Study on electrodynamic tether system for space debris removal. *Acta Astmn*, 2004, 55: 917–925
- 42 Bombardelli C, Pelaez J. Ion beam shepherd for contactless space debris removal. *J Guidance Control Dyn*, 2011, 34: 916–920
- 43 Phipps C R. Removing orbital debris with lasers. *Adv Space Res*, 2012, 49: 1283–1300
- 44 Schall W O. Orbital debris removal by laser radiation. *Acta Astron*, 1991, 24: 343–351
- 45 Cho M. Removal of orbital debris from low earth orbit by laser-generated drag. *J Spacecr Rockets*, 1994, 31: 920–922
- 46 Phipps C R. LISKBROOM: A laser concept for clearing space junk. In: *Proceedings of the AIP Conference*. New York: AIP, 1994. 466–468

- 47 Phipps C R, Albrecht G, Friedman H, et al. ORION: Clearing near-earth space debris using a 20 kW, 530 nm, earth-based, repetitively pulsed laser. *Laser Particle Beams*, 1996, 14: 1–44
- 48 Phipps C R. Project ORION: Orbital debris removal using ground-based sensors and lasers. NASA Marshall Spaceflight Center Technical Memorandum, 108522, 1996
- 49 Phipps C R. ORION: Physics overview. In: Corcoran V J, Goldman T A, eds. *Proceedings of the International Conference On Lasers*. McLean: STS Press, 1997. 604–611
- 50 Phipps C R. ORION: Challenges and benefits, high power laser ablation. In: *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers*, Bellingham, 1998. 575–582
- 51 Phipps C R. L'ADROIT—A space borne ultraviolet laser system for space debris clearing. *Acta Astron*, 2014, 104: 243–255
- 52 Phipps C R, Bonnal C. A spaceborne pulsed UV laser system for re-entering or nudging LEO debris and re-orbiting GEO debris. *Acta Astron*, 2016, 118: 224–236
- 53 Ebisuzaki T. Demonstration designs for the remediation of space debris from the International Space Station. *Acta Astron*, 2015, 112: 102–113
- 54 Yang W L, Cao Y, Yu Z J, et al. Active removal of space debris by space-based laser system and its feasibility analysis (in Chinese). *Spacecraft Environ Eng*, 2015, 32: 361–365 [杨武霖, 曹燕, 于兆吉, 等. 天基激光清除空间碎片方案与可行性研究. *航天器环境工程*, 2015, 32: 361–365]

Summary for “空间碎片监测移除前沿技术与系统发展”

Frontier technology and system development of space debris surveillance and active removal

Ming Li¹, Zizheng Gong^{2*} & Guoqing Liu²

¹ China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China;

² Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China

* Corresponding author, E-mail: gongzz@263.net

Space debris is space junk of human space activities. With space activities becoming more frequent, the number of space debris is rapidly increasing, and have formed actual serious threat to human space assets security. It was the consensus of the international community that space debris is one of the major challenges to all human beings, space debris environment remediation is the only choice and only way out. It has important strategic significance to carry out space debris environment remediation for ensuring the space assets safety, maintaining national security and interests, ensuring the international outer space affairs leading position and discourse power, standing the space powers responsibility and image, leading the high and new science and technology innovation and development, promoting the growth of emerging space economy and new industrial patterns. However, the active debris removal is one of the major technical challenge for the entire international space industry.

The current situation and the evolution trend of space debris environment, and its harms are analyzed in detail. The present technique status, research frontier and development trends about space debris surveillance and active debris removal are deeply reviewed. Analysis indicates that the existing ground-based space object monitoring method cannot cover the whole sky seamless all the time, and can not work all-weather. Space-based monitoring techniques is an irresistible trend of space object tracking and monitoring, and the final solution of space object surveillance is the integration of space-based and ground-based means. A series active debris removal techniques and plans have been developed, some key techniques have been demonstrated on orbit. However, there is still a distance for active debris removal on-orbit application.

The key technique and scientific problems related to space debris surveillance and active debris removal are addressed. The gaps between China and the world level on space debris surveillance and active debris removal are analyzed. Around China national great strategic requirements for security and long-term sustainability of space career, the existing problems about space debris surveillance and active debris removal are pointed out. The connotation of the concept or space debris environment remediation is proposed and is further defined. The corresponding technical system are constructed.

Finally, the development suggestions and roadmap of China space debris environment remediation project until 2030 is proposed. Its technical core is forming the ability of space debris precise surveillance, efficient removal, and effective protection. The mission and vision for China is to gradually possess the service capability for space debris environment remediation with characteristics of all functions, advanced performances, high efficiency, lowcost, routinization, commercialization and internationalization.

space debris, space assets safety, long-term sustainability of space, space debris surveillance, active debris removal, space debris environment remediation

doi: 10.1360/N972017-00880