

航天器再入损害风险及未来技术发展

李洪波, 李宇飞, 胡超, 席福彪
(中国运载火箭技术研究院, 北京, 100076)

摘要: 随着人类航天活动日益频繁, 失效航天器及残骸再入大气层后时有残存坠落地面, 可能引发航天器再入损害事件, 并影响到航天器未来技术发展布局。对此, 首先分析引起较大社会关注的国外航天器再入损害典型事件及处置方式, 介绍再入损害风险预报的主要国际规范与标准, 研究再入损害预报方法和国外再入损害分析工具, 并展望主要航天大国在航天器主动离轨、辅助离轨、大规模批量再入、可重复使用等技术方向的发展布局以及存在的问题。研究显示, 虽然航天器再入损害风险尚难以非常精确地进行预报, 但有望随着技术发展从航天器的设计端开始给予适度管控。

关键词: 再入损害风险; 主动离轨; 辅助离轨; 自然再入; 再入损害风险评估

中图分类号: V42

文献标识码: A

Re-entry Casualty Risk of Space Vehicles and Future Technological Developments

LI Hongbo, LI Yufei, HU Chao, XI Fubiao
(China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing, 100076)

Abstract: With the increasing frequency of human space activities, there are surviving debris of re-entry spacecraft and debris that impact the Earth's surface, causing typical damage cases and affecting the future technological development of spacecraft. Firstly typical re-entry damage cases and disposal methods of foreign spacecraft that have attracted significant social attention are analyzed. Secondly the main international norms and standards for re-entry casualty risk are introduced. Then those assessment methods of re-entry casualty risk are studied together with re-entry risk analysis tools of NASA and ESA. Finally it's looked forward to the future development and existing problems of major space powers in the technical directions of active deorbit, assisted deorbit, large-scale reentry, and reusable spacecraft. Research shows that although the re-entry casualty risk of spacecraft and debris is still difficult to predict very accurately, it is expected to be moderately controlled by the design of risk-reduction measures along with technological development.

Keywords: re-entry casualty risk; active deorbit; assisted deorbit; natural re-entry; re-entry casualty risk assessment

0 引言

再入大气层的航天器包括可返回式航天器和失效的航天器及残骸。在可返回式航天器离开环地球轨道返回地面的全过程中, 其飞行轨迹和姿态完全受控, 不会对地面造成损害。而处于低地球轨道的失效航天器及其残骸, 在丧失了维持轨道飞行的动力后, 会由于极小的大气阻力的作用, 逐渐降低轨道高度, 最后坠入大气层。失效航天器及其残骸再入大气层时, 其大部分会解体烧蚀。但对大型航天器而言, 容易残留未烧蚀完全的部分, 若坠落到人口密集区或击中飞行中的航空器, 将造成人员伤亡和财产损失。特殊情况

下, 若可返回式航天器在返回过程中发生故障, 也可能成为失效航天器, 并造成损害。随着人类航天活动日益频繁, 大型航天器及其残骸再入大气层的潜在损害风险, 即失效航天器再入的未完全烧蚀部分的危害性, 越来越受关注, 并已影响到未来航天器的技术发展。

1 国外航天器再入损害典型事件与处置

1.1 引发赔偿申诉和罚款事件

迄今为止, 人类航天历史上有两次航天器陨落事件分别引发了赔偿申诉和罚款。这两次事件分别是苏

联宇宙954号卫星残骸坠落于加拿大和美国天空实验室空间站残骸坠落于澳大利亚境内。

a) 苏联宇宙954号卫星坠落。

1978年1月24日,苏联核动力卫星宇宙954号的残骸坠落在加拿大西北部。

1979年1月23日,加拿大对苏联提出赔偿要求。加拿大方面称,苏联卫星进入加拿大领空和危险放射性残骸散布在其领土上侵犯了其主权;卫星残骸具有放射性,部分残骸的放射性可致命,残骸使其部分领土不适宜使用。因此,加拿大方面要求苏联赔偿600万美元。

对此,苏联拒绝承担赔偿责任,并称,卫星残骸不具有严重危险,引起当地污染的可能性很小,且卫星坠落未造成人员伤亡和实际财产损失。苏联最后同意“善意性”支付300万美元清洁费用,但拒绝负有赔偿责任。

b) 美国天空实验室空间站坠落。

1979年7月11日,美国天空实验室空间站残骸坠落于澳大利亚境内。天空实验室残骸中没有放射性物质,但因为体积和质量太大,没有完全烧毁。

按预期,天空实验室空间站应坠落在南非开普敦以南的大海中。但美国对天空实验室的坠落位置和解体速度的估计均存在较大误差,空间站最终坠落在澳大利亚西部艾斯波兰斯郡。

对此,澳大利亚当地以“乱丢太空垃圾”为由,向美国提出了400美元罚款,但美国航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)未支付这笔赔偿。2008年,1名美国公民募集了400美元并把支票寄到了艾斯波兰斯郡。

1.2 再入前引发关注事件

自20世纪90年代末开始,各航天大国加强了大型航天器再入的事前通报,从而引发媒体关注。虽然有关典型事件最终均未造成实质损害,但在社会层面引发了恐慌和不安。

a) 俄罗斯和平号空间站坠落。

2001年3月23日,俄罗斯和平号空间站退役,按计划受控离轨,并再入大气层,最终坠落于南太平洋,未造成任何地面损害。

然而,西方媒体在事前对和平号空间站坠落的潜在损害风险进行了大力炒作,给俄罗斯航天局造成了极大的舆论压力。对此,俄罗斯航天局在事前与3家保险公司签订了一份价值2亿美元的保险协议,用于赔付和平号空间站坠入南太平洋时可能造成的对第三

方的损害。其中,法国保险商在伦敦的分公司和英国劳埃德财团的几家公司还为和平号坠海提供了再保险。

b) 美国高层大气研究卫星坠落。

2011年9月21日,NASA宣布,美国高层大气研究卫星(UARS)可能在失控状态下于当地时间9月23日坠落地球。虽然NASA预计卫星砸到人的概率很小,但碎片坠落的预报区域难以确定,在媒体的报道下引起了公众的不安。

在卫星坠落前数周,NASA开始每周发布动态信息。从卫星坠落前4天开始,NASA每天公布更新信息,之后逐渐缩短更新时间。NASA专家预测该卫星坠落后的碎片覆盖区域将达到纵向800 km左右。在重返地球前大约2 h,NASA才将坠落区域锁定在大约纵向10 000 km之内。最终该卫星于2011年9月24日坠落在南太平洋中,没有产生损害。

1.3 坠落后引发关注事件

有部分大型航天器的部组件,如运载火箭末级(也称入轨级或轨道级),其再入时可能有少量残余碎片坠落地面。在人类航天史上,该类情况较为普遍,并往往在碎片坠落后引发关注。

a) 美国德尔塔II火箭末级坠落。

1997年,作为大型火箭的代表,美国德尔塔II火箭的二级(即入轨级,AJ10-118k)再入大气层,在美国俄克拉何马州和得克萨斯州上空解体,其250 kg不锈钢燃料罐落入得克萨斯州,距离一户农舍仅50 m远。

2000年,另一枚德尔塔II火箭的二级再入南非海角省上空。根据找到的AJ10-118k二级残骸推断,直至2002年,美国德尔塔II火箭约280次发射中,其相同部位都可能在陨落过程中残存下来到达了地面。

b) 美国猎鹰火箭末级坠落。

2014年、2016年、2021年,美国太空探索公司(SpaceX)的猎鹰火箭二级再入大气层的残骸相继掉入巴西的牧场、印尼主岛爪哇岛的牲口棚和美国华盛顿州的农场。

2022年,美国SpaceX的载人飞船龙飞船,在再入大气层后,残余的碎片掉到澳大利亚农场,成为澳大利亚自1979年以来发现的最大的空间碎片。

1.4 击毁高损害风险卫星事件

迄今为止,人类航天史上还发生过一次以消除再入损害风险为名,击毁失效卫星的事件,即美国使用

反导弹摧毁其废弃卫星。

美国USA193卫星于2006年底发射后与地面失去联系。2008年1月26日,美国宣布该卫星将在数周后坠落地球。美国联邦应急管理局(Federal Emergency Management Agency, FEMA)表示卫星携带了剧毒燃料,如果发生泄漏,会对人体生命健康安全构成极大威胁。随后,时任总统布什于2008年2月12日批准击毁该卫星。五角大楼称,将用导弹摧毁该卫星,并保证在其再入大气层之前摧毁卫星燃料箱,使有毒燃料在空中燃烧干净。2008年2月20日,美国从太平洋发射1枚标准-3型反导弹,击毁了经过海平面上空的USA193卫星。大部分卫星碎片在24~48 h内坠落,其余碎片在40天内全部坠落。

1.5 再入事件处置方式

为了减缓失效航天器的在轨碎片威胁,通常推荐对失效航天器进行钝化处理,避免在轨爆炸产生更多碎片,对于处于高价值轨道的中高轨航天器,还会有进入坟墓轨道的处置措施,但这些处置措施主要针对在轨阶段。低地球轨道的航天器失效后将不可避免地自然陨落,再入大气层。

因此,失效航天器及残骸再入大气层,并坠落地球表面,是航天活动的常态。从历次航天器再入损害的典型事件来看,可归纳为以下处理方式。

a) 事前通报。

由航天有关部门通报空间物体即将返回地球的消息,表明无法准确预测陨落的具体时间和具体地点,同时向公众传达该空间物体对地面造成的损害概率较低的信息。

在陨落前数周,每周通报信息;临近陨落前1周,每天通报信息。通报内容包括预计的陨落过程、时间、区域、碎片数量成分、是否含有有毒及放射性物质等信息,并提醒陨落区域附近人员陨落残片的危险性。

b) 事后处置。

航天器再入陨落造成损害或污染的事例较少,参考宇宙954号卫星陨落事例中苏联和加拿大的实践,可见航天器再入陨落如果造成损害或污染,双方可通过双边方式协商安排事后处置。

c) 事前击毁。

作为事前处置的一种手段,对于具有潜在高损害风险的航天器,在其再入前进行主动摧毁,使其裂解为更易被烧蚀完全的小碎片。美国对USA193卫星的处置是这一方式的典型案例。

未来,技术层面还可在再入过程中对航天器实施结构自毁,更早形成更小碎片,以便充分烧蚀,也可在设计环节采用更易烧蚀的材料或结构形状,但这些措施不影响对再入事件本身的处置方法。

2 再入损害风险预报

2.1 国际规范与标准

较早关注到再入损害风险问题,并提出原则性预报要求的是由13个航天国家发起的政府间组织——机构间空间碎片协调委员会(Inter-Agency Space Debris Coordination Committee, IADC)。在工程界,则通过国际标准化组织对有关问题进行了相对更具有技术操作性的推荐性约定。

2.1.1 原则性要求

2002年,IADC在联合国的倡议下,起草了《IADC空间碎片减缓指南》,指南为原则性指导意见。在2021年的最新版指南中,对低轨航天器和轨道级提出了寿命末期进行离轨或直接再入的要求;且残存到达地面的碎片不应对人体或财产造成不适当的风险;推荐将 10^{-4} 作为再入前预期的人员伤亡概率的上限;限制残存碎片数,限定碎片落到无人区,如广阔的海洋;并强调在受控再入的情况下,操作者应通知有关的空中交通和海上交通当局再入时间、航迹和相关的地面区域。

在2021年版《IADC空间碎片减缓指南》基础上,IADC对指南提供了更详尽的支持报告。支持报告指出将 10^{-4} 作为伤亡概率上限是推荐的经验值,这个值可能会随时间演变。

2017年,IADC发布了针对低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)大型星座的减缓指南《IADC关于LEO大型星座的声明》。2021年,该声明修订时在航天器设计方面专设“地面风险”条款,并对火箭末级设计提出了避免引起地面安全问题的指导要求。

在联合国层面,2018年,联合国外空委发布的《外层空间活动长期可持续性准则》作为各国自愿实施的原则性指导,在已通过条款中特别包括了“采取化解空间物体失控再入大气层相关风险的措施”。

2.1.2 技术性预报标准

2018年底,国际标准化组织通过ISO 27875《空间系统——无人航天器及运载火箭轨道级再入风险管理》。该标准参照了美国NASA的《轨道碎片减缓流程》标准,提供了较为详尽的人员伤亡和危害等级模型。

ISO 27875 围绕“自然再入”和“受控再入”的危害评估方法进行规范。标准还提及了“辅助自然再入”(assisted natural re-entry)和“半受控再入”(semi-controlled re-entry)等折中方式。

此外,2011年,ISO通过的空间碎片减缓系列国际标准的顶层标准ISO 24113《空间系统——空间碎片减缓要求》^[1]和2021年ISO正式发布的ISO 20893《航天系统——运载火箭轨道级空间碎片减缓详细要求》^[2]也对航天器再入损害问题有原则性规范。

ISO 24113最为顶层,旨在通过适当的方式设计、运行和处置航天器和运载火箭轨道级,防止其在整个轨道寿命期产生碎片。

ISO 20893针对航天器的安全再入要求,提出:鼓励采用材料替换、优化布局等消亡设计措施,并且允许再入过程中对轨道级实施结构自毁,以便更早形成更小碎片并充分烧蚀,进一步降低碎片对地面人员的伤亡率。

2.2 再入损害预报方法

航天器再入损害预报的核心问题是:失效航天器及部组件再入大气层后,是否会有残存物件落地或进入民航飞行区域。若有,则需提前准确预知残存物体陨落的时间和地点或者区域范围,以及可能对人群、地面建筑物和生态环境造成的危害。

再入损害预报的基本逻辑步骤包括:航天器再入过程建模、计算获得残存碎片质量及分布、评估损害风险。其预报技术包括了再入物体建模、气动力-热计算、动力学模型、烧蚀解体模型和危害评估等。

2.2.1 再入物体建模方法

目前,常用的再入物体建模方法包括面向物体法(Object-Oriented Method, OOM)和面向航天器法(Spacecraft-Oriented Method, SOM)。在结构建模时,会对航天器或单独组件定义形状、特征尺寸、材料、质量等参数。

a) 面向物体法。

OOM将复杂的航天器及其部件简化为若干基本外形物体,如圆球、圆柱、箱体等,利用基本外形的气动力、气动热和烧蚀模型进行再入仿真,具有建模简单、计算快速的优点,能够在数分钟的量级完成实时快速预报,适用于大量碎片再入的快速预报,缺点是影响计算精度的不确定因素较多。

b) 面向航天器法。

SOM对航天器真实外形进行建模,并采用工程算法计算航天器的气动力和气动热。优点是能准确地

模拟目标再入烧蚀和解体等过程,计算模型导致的不确定性较小;缺点是建模复杂、计算量大、计算时间较长。从理论上讲,该方法的预测结果更接近目标再入的真实情况。

2.2.2 气动力-热计算方法

航天器再入损害预报的一项基础技术是兼顾效率和精度的气动力-热计算方法,需要给出大气环境下复杂形状几何体在各种姿态下的气动力、热数据。传统的研究手段是构造三维网格进行非定常CFD仿真,但对计算时间和算力消耗巨大。目前常用的气动力-热计算方法为工程快速算法。对应面向物体法和面向航天器法两种不同的建模方式,所选取的气动力-热计算方法也各有差异。

2.2.3 其他预测模型

航天器再入损害预报还需要烧蚀与解体模型、动力学模型及危害评估模型等。除危害评估模型外,其余模型对应面向物体法和面向航天器法两种不同的建模方式存在不同的对应建模方法。

目前,解体的常用准则包括:高度准则(到达某高度即解体)、温度准则(零部件达到某温度即解体)、烧蚀准则(质量衰减率/烧蚀率降低到设定值即解体)、应力准则(飞行器结构内应力超过材料强度极限即解体)及综合判据等。

烧蚀一般有零维烧蚀模型与一维烧蚀模型。动力学模型常用三自由度模型,个别采用六自由度模型。在烧蚀模型计算时调用已录入的航天器结构材料物性数据库,计算航天器碎片的表面热流、温度和烧蚀率,从而估算残存质量。

危害评估模型考虑残存碎片坠地的尺寸、速度、质量等参数,常用等效伤亡面积、人口伤亡概率等作为损害评价指标。评估需要选用地理信息系统数据,包括全球人口密度分布等。

2.2.4 材料和特殊部组件对残存质量的影响

在完成失效航天器再入损害预报的全部建模后,除用以评估残存碎片的损害风险外,还可以用于分析材料和特殊部组件对残存质量的影响。

在中国航天相关部门提出的ISO 20893中指出,在设计端开展材料替换、优化布局等有利于残存碎片消亡的设计措施。相关分析研究的结论有利于指导在设计环节主动降低失效航天器再入的损害风险。

一般而言,失效航天器的残存质量与碎片的材料、形状、大小等均有关联。在常用的航天器材料中,钛材料残存的可能性最大,其次是不锈钢,然后

是镍铬合金,再次是铜等,铝材料残存的可能性最低。并且,面质比相对较小的碎片残存可能性一般更高。

2.3 国外再入损害分析工具

自20世纪90年代以来,美国和欧洲地区国家相继开发了多种航天器与碎片再入预测方法与工程软件,作为再入损害的分析工具,目前已成为有关国际标准及IADC的主要推荐方法。但受技术能力限制,目前仍难以进行非常精确的预报。在中国,胡锐锋等^[3]在“十一五”期间开发了空间碎片再入烧蚀预测与地面安全评估软件系统。在“十三五”期间,本文作者团队开发了运载火箭末级再入损害风险评估软件。

2.3.1 DAS和ORSAT

美国主要的再入分析工具包括空间碎片评估软件(Debris Assessment Software, DAS)^[4]和空间目标再入生存分析工具(Object Re-entry Survival Analysis Tool, ORSAT)^[5]。

DAS由美国洛克希德公司于1988年研发,用于满足NASA对航天器再入风险快速分析的需求,计算再入物体完全烧蚀的消失高度或对地面的损伤面积,主要用于航天器再入预报的初步分析。DAS提供简单形状碎片模型、采用三自由度弹道模型和零维烧蚀模型。

ORSAT软件由NASA约翰逊空间中心于1993年发布,是NASA目前用于空间碎片再入分析的主要工具,提供简单形状的航天器和碎片模型。其动力学模型采用三自由度弹道模型,烧蚀模型提供了零维热传导模型和一维热传导模型,并采用高度准则判断空间物体是否解体。在连续流和过渡流区域中,分别采用牛顿流模型和正弦平方桥函数来计算阻力系数,使用Detra-Kemp-Riddell(或Fay-Riddell)公式和对数(或Matting桥)函数计算气动热。

2.3.2 SCARAB和DRAMA

欧洲地区国家开发了航天器再入大气层与气动热分解(Spacecraft Atmospheric Re-entry and Aero-thermal Breakup, SCARAB)^[5]及空间碎片风险评估与减缓分析系统^[6-7](Debris Risk Assessment and Mitigation Analysis, DRAMA)。

SCARAB软件由德国宇航院HTG中心于1995年开发,具有类似于CAD的操作界面,采用六自由度动力学模型、一维或二维热传导模型,通过监视预先定义截面的局部等效应力来判断结构在危险点是否发生解体,可适用于大型复杂航天器的再入预报。

DRAMA软件是欧洲空间碎片减缓标准的支持工具,其航天器再入生存分析模块(Spacecraft Entry Survival Analysis Module, SESAM)采用与ORSAT软件类似的模型和方法,但只采用零维热传导模型,运动模式中仅考虑物体的翻转和旋转矢量,在亚声速过程中采用简化的大气阻力系数。

3 未来技术发展

为尽量降低大型航天器及大规模残骸再入的损害风险,主要航天大国也在进行未来工程技术上的发展布局。对处于低地球轨道的失效航天器进行主动离轨、运载火箭末级可重复使用等技术方向,已逐步进入主要航天大国未来的技术发展规划,并逐步推动实施。

3.1 美国

3.1.1 大型航天器辅助离轨

美国处于低地球轨道的主要大型航天器是国际空间站。按照原定设计寿命,国际空间站应于2024年退役,但NASA计划将其延寿使用至2030年。以国际空间站的设计能力,正常情况下可以主动离轨再入。但考虑到国际空间站延寿可能存在的风险,不排除因意外故障发生在失控状态下再入的情况。

对此,2024年6月,NASA与SpaceX公司签订了一份总价8.43亿美元的合同,要求SpaceX公司提供一款“离轨飞行器”,在国际空间站退役后,对其进行移除,帮助其离轨再入,坠入太平洋。

3.1.2 航天器大规模批量主动离轨

除单体大型的航天器外,美国处于低地球轨道的巨型星座——星链卫星互联网星座,也存在数量上大规模再入的问题。

受到设计寿命和地磁暴的影响,星链首批型号卫星已陆续陨落。由于星链卫星以小卫星为主,残骸陨落地面的问题并不显著,但大规模自然再入可能对飞行过程中的飞机航班带来碰撞风险。近期,为降低损害风险,星链卫星开始进行批量化主动离轨再入大气层。

然而,由于巨型星座预期的再入卫星数量庞大,环保组织质疑星链卫星大规模再入大气层烧毁将破坏臭氧层,对大气造成不可预计的破坏。美国通信卫星运营商卫讯公司甚至以此作为理由之一,请求美国联邦通信委员会下令暂停星链星座发射。巨型星座失效卫星的大规模无害化处理技术仍面临争议。

3.1.3 运载火箭末级主动离轨和可重复使用

美国未来的主力火箭，如猎鹰系列、火神火箭和预期的星舰等，均在发展末级主动离轨或可重复使用技术。

猎鹰火箭目前实现了一级重复使用，但末级尚未实现回收，并多次出现火箭末级残骸坠落在人类居住区的情况。近年来，猎鹰火箭末级已设计启用了主动离轨再入系统，但仍时有发生残骸掉落居民点以及离轨点火失败的情况，其末级主动离轨技术尚有待完善。

火神火箭是美国传统的运载火箭主力研制力量，即联合发射联盟公司全力开发的新一代大型运载火箭。该公司提出了敏感模块自主返回技术，计划对一子级的发动机进行回收。火神火箭的二级发动机则具备多次启动能力，具有主动离轨的设计潜力。但由于该火箭一直事故不断，其末级主动离轨能力尚有待观察。

星舰是SpaceX正在布局的未来完全可重复使用运载器。由于两级皆可回收使用，理论上将不再存在火箭末级残骸坠落的问题。但由于星舰自身体积庞大且防烧蚀，如果发生故障，再入大气层时反而会成为对地面更具威胁的难以烧蚀的大型碎片。目前，星舰的试验飞行均未进行离轨点火，美国联邦航空管理局也未批准星舰试验入轨，以免星舰入轨后失控威胁地面安全。

3.2 欧洲

3.2.1 大型航天器辅助自然再入

与美国一致，欧洲航天局对低地球轨道航天器有主动离轨的设计要求，但也允许特定情况下的豁免。对于没有主动离轨设计的航天器，欧洲航天局曾采用自然轨道衰减与部分轨道控制相结合的辅助离轨技术。

2023年7月，欧洲航天局对没有主动离轨设计的风神卫星实施了辅助离轨。该案例虽然作为欧洲航天局“负责任行为”的典型进行宣传，但并未成为固定的通行做法。

3.2.2 运载火箭末级主动离轨

欧洲航天局最新主力火箭阿里安6的末级发动机可以重启，具备主动离轨的潜在能力。

2022年，欧洲阿里安集团在国际宇航联大会上曾提出“全复用上面级”总体方案，既适用于阿里安6火箭，又适用于下一代可重复使用火箭，但这一方案的具体研制计划和投入还有待观察。

3.3 俄罗斯

俄罗斯中高轨大型卫星的主动离轨再入问题并不十分突出。其新近发布的低地球轨道星座，规模仅为数百颗，且吨位有限。俄罗斯的空间站仍在设计阶段，再入问题也较为遥远。目前比较存在风险的是火箭末级，尤其是未来发射俄罗斯空间站的末级。

俄罗斯新一代主力火箭是安加拉系列运载火箭。安加拉火箭是模块化设计，有轻型、中型、重型多种组合，具有可重复使用的一子级和不可重复使用的一子级两种设计模式，其末级的发动机具有多次启动的能力，具备主动离轨的设计潜力。

2022年安加拉-A5重型火箭发射失利后，火箭末级再入大气层坠入太平洋，引起了西方媒体关注。CNN报道援引了专家观点，认为俄罗斯火箭残骸此次坠落属于意外，并比较称，“中国的火箭残骸再入大气层是经过设计的”。

4 结束语

迄今为止，人类历史上已发生的航天器再入损害典型事件虽均未造成实质性的重大损害，但已越来越受到国际关注，并已形成事前通报、事后处置和事前摧毁等多种处理模式。围绕航天器再入损害风险预报，已形成了一定的原则性国际规范与推荐标准，工程界还开发了具有一定预报能力的技术方法和工具。但总体而言，对于航天器再入损害风险尚难以进行非常精确的预报。

为从根源上管控航天器的再入损害风险，主要航天大国均在一定程度上布局低地球轨道的主动离轨和可重复使用等技术方向。作为控制再入损害风险的技术路径之一，美欧和俄罗斯的新一代火箭均留有轨道级主动离轨的设计能力。可重复使用是解决末级残骸坠落的一种方式，但在故障情况下，可重复使用的航天器也可能成为更加危险的残骸。而巨型星座失效卫星大规模再入的潜在损害风险和解决方式也有待研究。

参 考 文 献

- [1] 泉浩芳, 张小达, 周玉霞, 等. 空间碎片减缓策略分析及相关政策和标准综述[J]. 航天器环境工程, 2019, 36(1): 7-14.
QUAN Haofang, ZHANG Xiaoda, ZHOU Yuxia, et al. Analysis of space debris mitigation strategies and overview of its related policies and standards[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2019, 36(1): 7-14.
- [2] 唐明亮, 古艳峰, 王颖. 《ISO 20893: 航天系统——运载火箭轨道级

- 空间碎片减缓详细要求》历程回顾与解读[J]. 空间碎片研究, 2021, 21(3): 34-38.
- TANG Mingliang, GU Yanfeng, WANG Ying. Process review and interpretation of “ISO 20893: Space Systems—Detailed Space Debris Mitigation Requirements for Launch Vehicle Orbital Stages” [J]. Space Debris Research, 2021, 21(3):34-38.
- [3] 胡锐锋, 吴子牛, 曲溪, 等. 空间碎片再入烧蚀预测与地面安全评估软件系统[J]. 航空学报, 2011, 32(3): 390-399.
- HU Rui Feng, WU Ziniu, QU Xi, et al. Debris reentry and ablation prediction and ground risk assessment software system[J]. Acta Aeronaut ET Astronaut Sinica, 2011, 32(3): 390-399.
- [4] REYNOLDS R C, SOTO A. Debris assessment software: operators manual[G]. NASA Johnson Space Center, 2001.
- [5] FRITSCH B, KLINKRAD H, KASHKOVSKY A, et al. Spacecraft disintegration during uncontrolled atmospheric re-entry[J]. Acta Astronaut, 2000, 47(2/9): 513-522
- [6] PONTIJAS FUENTES I, BONETTI D, LETTERIO F, et al. Upgrade of ESA's debris risk assessment and mitigation analysis (DRAMA) tool: spacecraft entry survival analysis module[J]. Acta Astronautica, 2017, 158(5): 148-160.
- [7] BONETTI D, FUENTES I P, LETTERIO F, et al. Upgrade of the spacecraft entry survival analysis module (SESAM) of the ESA's debris risk assessment and mitigation analysis (drama) tool[C]. Milan: 7th European Conference for Aeronautics and Space Sciences, 2017.

作者简介

李洪波 (1979—), 女, 博士, 研究员, 主要研究方向为飞行器总体设计、空间态势评估、航天战略与体系研究。

李宇飞 (1978—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为飞行器总体设计。

胡超 (1988—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为空间目标特性分析、空间态势感知。

席福彪 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为体系设计与评估、地理信息与空间态势分析。

(上接第58页)

- [17] HE K, GKIOXARI G, PIOTR D, et al. Mask R-CNN[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2017. DOI: 10.1109/TPAMI.2018.2844175.
- [18] HE Y, LOU Z, ZHANG L, et al. Bivit: Extremely compressed binary vision transformers[EB/OL]. (2022-12-20)[2024-10-10]. <https://arxiv.org/abs/2211.07091>.
- [19] DOSOVITSKIY A. An image is worth 16×16 words: transformers for image recognition at scale[EB/OL]. (2020-10-22)[2024-10-10]. <https://arxiv.org/abs/2010.11929>.
- [20] XIAO G, LIN J, SEZNEC M, et al. Smoothquant: accurate and efficient post-training quantization for large language models[EB/OL]. (2022-11-18)[2024-10-10]. <https://arxiv.org/abs/2211.10438>.
- [21] CHEN T, MOREAU T, JIANG Z, et al. TVM: an automated end-to-end optimizing compiler for deep learning[EB/OL]. (2018-12-12)[2024-10-10]. <https://arxiv.org/abs/1802.04799>.
- [22] ZHENG L, JIA C, SUN M, et al. Ansor: generating high-performance tensor programs for deep learning[EB/OL]. (2020-06-11)[2024-10-10]. <https://arxiv.org/abs/2006.06762>.
- [23] ZHU H, WU R, DIAO Y, et al. ROLLER: fast and efficient tensor compilation for deep learning[C]. Carlsbad: 16th USENIX Symposium on Operating Systems Design and Implementation (OSDI 22), 2022.
- [24] LIU H, DIAO B, YANG Y, et al. Gensor: a graph-based construction tensor compilation method for deep learning[EB/OL]. (2025-02-17)[2025-03-03]. <https://arxiv.org/abs/2502.11407>.
- [25] ALAPARTHI S, MISHRA M. Bidirectional encoder representations from transformers (BERT): a sentiment analysis odyssey[EB/OL]. (2020-07-02)[2024-10-10]. <https://arxiv.org/abs/2007.01127>.
- [26] RADFORD A, WU J, CHILD R, et al. Language models are unsupervised multitask learners[J]. OpenAI Blog, 2019, 1(8): 9.
- [27] LIU A, FENG B, XUE B, et al. DeepSeek-V3 technical report[EB/OL]. (2024-11-27)[2025-03-02]. <https://arxiv.org/abs/2412.19437>.
- [28] DONG D, JIANG H, DIAO B. AKGF: automatic kernel generation for DNN on CPU-FPGA[J]. The Computer Journal, 2024, 67(5): 1619-1627.
- [29] YANG A, YANG B, ZHANG B, et al. Qwen2.5 technical report[EB/OL]. (2025-01-13)[2025-02-25]. <https://arxiv.org/abs/2412.15115>.
- [30] RONNEBERGER O, FISCHER P, BROX T. U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation[C]. Munich: Medical Image Computing and Computer-assisted Intervention—MICCAI, 2015.
- [31] BADRINARAYANAN V, KENDALL A, CIPOLLA R. Segnet: a deep convolutional encoder-decoder architecture for image segmentation[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(12): 2481-2495.
- [32] LIU H, DIAO B, CHEN W, et al. A resource-aware workload scheduling method for unbalanced GEMMs on GPUs[J]. The Computer Journal, 2025, 68(3): 273-282.

作者简介

徐勇军 (1979—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为智能计算系统。

刘杭达 (1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能计算系统。

安梓嘉 (1998—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为智能计算系统。

刁博宇 (1989—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为智能计算系统。