

空间资产风险评估与控制研究

张东江¹, 高智杰², 杨志涛^{3*}, 张馨文⁴, 蓝鼎⁵

(1. 北京理工大学人文与社会科学学院, 北京 100081; 2. 北京理工大学国家安全与发展研究院, 北京 100081; 3. 中国科学院国家天文台, 北京 100101; 4. 北京理工大学计算机学院, 北京 100081; 5. 中国科学院力学研究所, 北京 100084)

摘要: 空间资产是国家的重要战略资产, 有效控制其所面临的各类风险将有助于推动空间资产效益最大化, 提高对国家安全与发展的贡献率, 推动航天强国建设。本文首先讨论了空间资产的定义与内涵, 认为从狭义来讲空间资产主要包含我国所有的在轨航天器, 广义来讲还包括与其相关的一些关联资产和无形资产。其次, 从多个维度梳理了空间资产的潜在风险源, 并划分为技术、军事和管理三大类风险, 其中技术类风险包括碰撞解体、爆炸解体、载荷故障、凯斯勒效应等; 军事风险包括将航天器作为武器或武器平台等风险; 管理风险主要指管理制度不匹配、无形资产流失等; 之后针对技术类风险初步讨论了空间资产风险量化评估方法, 建立空间资产价值的量化评估模型, 并简要分析可能的风险控制方法。最后, 面向空间资产风险事件的处置应对问题, 提出初步的风险事件分级模型及处置应对需重点考虑的几个方面, 如体制机制的建立、应对预案的制定、责任主体的划分、处置行动的落实与监督等。

关键词: 空间资产; 风险评估; 价值模型; 风险控制; 风险分级

中图分类号: V11 **文献标识码:** A

Risk Assessment and Control of Space Assets

Zhang Dongjiang¹, Gao Zhijie², Yang Zhitao^{3*}, Zhang Xinwen⁴, Lan Ding⁵

(1. School of Humanities and Social Sciences, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Institute of National Security and Development Studies, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 3. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. School of Computer Science and Technology, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 5. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100084, China)

Abstract: Space assets are crucial resources for a nation, and effectively managing the various risks associated with them will help maximize their benefits, enhance their contribution to national modernization and security, and improve the strength of the space industry. First, this study clarifies the definition and scope of space assets. In a narrow sense, space assets encompass all spacecraft in orbit. Broadly speaking, space assets also comprise related physical and intangible assets. Second, potential risk sources are identified from multiple dimensions and categorized into technical risks (such as collision disintegration, explosive disintegration, and load failure), military risks (including the use of spacecraft as weapons or weapon platforms), and management risks (referring mainly to mismatches in management systems, leading to loss of intangible assets). Subsequently, this study explores a quantitative assessment method for the technical risks, establishes a model for quantifying space asset values, and briefly analyzes possible risk control methods. Furthermore, a preliminary classification model for risk events is proposed along with several considerations including establishment of systems and mechanisms, formulation of response plans, responsibility allocation, and implementation and supervision of disposal actions.

Keywords: space assets; risk assessment; value model; risk control; risk classification

收稿日期: 2023-12-22; 修回日期: 2024-02-07

通讯作者: *杨志涛, 中国科学院国家天文台高级工程师, 研究方向为天体测量与天体力学; E-mail: ztyang@nao.cas.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“新时代我国空间资产管理效益、风险控制与可持续发展研究”(2022-HZ-17)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

我国是世界第二空间资产大国，拥有天宫空间站、八百余颗卫星以及大量相关地面设施。有效控制风险是实现空间资产效益最大化和可持续发展、推动航天强国建设、提高空间资产对国家现代化高质量发展贡献率的重要技术基础。因而，开展空间资产风险控制研究，既具有重要的实践意义，又具有重要的理论价值。

1957年10月，世界上第一颗人造地球卫星发射成功，开创了人类航天新纪元，广阔无垠的宇宙空间开始成为人类活动的疆域。60多年来，全球累计发射的人造地球卫星超过10 000颗^[1]。人类航天活动日益频繁，人造卫星已成为日常生产生活不可或缺的一部分，其应用覆盖通信、导航、气象、遥感探测、科学研究等领域，航天技术通过卫星应用转化为直接生产力和国防实力。人造卫星是人类探索、开发和利用太空的最主要的工具之一，随着航天技术的不断发展以及人类需求的不断升级，未来还将有大量的卫星发射升空。

与此同时，与人造卫星相伴而生的空间碎片数量急剧增加，主要分布在高度为2000 km以下的低地球轨道（LEO）区域，20 000 km左右的中地球轨道（MEO）区域，以及36 000 km附近的地球同步轨道（GEO）区域，正对应当前在用航天器最多的空域。数量众多的空间碎片给正常工作的卫星带来极大的碰撞威胁，厘米级空间碎片碰撞便足以产生重大危害，而且大型空间碎片的陨落还会给地面人员财产及生态环境带来威胁。除空间碎片外，空间资产还可能面临另一种来自太空的威胁，即近地小行星的撞击。

空间资产这一概念首次由《开普敦公约》引入，在《空间资产议定书》中给出了具体定义^[2]，主要是指在轨飞行的航天器或载荷，如卫星、空间站、空间模块、空间舱、空间飞行器或可重复使用的发射载具等。但严格来讲，空间资产目前并没有公认明确的定义，这一概念仍会随着研究的深入而扩大或者缩小范围。本文主要研究空间资产面临的各种潜在风险，故对所论述空间资产的范围作了适当拓展，以运行于外太空的航天器（含载荷）为狭义的空间资产；与此同时，空间资产从广义概念来看，应同时包含与航天活动密切相关的无形资产，

如航天器测运控能力、管理制度、专利技术或法律法规等。因此，本文认为，空间资产风险是指对航天器等有形资产的存续形成威胁，或者对无形空间资产价值的实现形成不利的多种因素的统称。

二、空间资产的风险分类

人类探索宇宙的活动充满风险，空间资产及其管理也伴随着各种风险。从空间资产的内涵、相关技术与组织管理、航天器全生命周期、短期与长期等多个维度出发，详细梳理空间资产在发射和在轨运行阶段及寿命末期可能面临的风险因素，将风险源按类型划分为技术风险、军事风险和管理风险三大类。

（一）技术风险

技术风险是指非军事、非人为因素的客观存在的风险，具体划分为航天器损毁、航天器失控再入危害、航天器测运控能力不足和近地小行星撞击等四种风险。

1. 航天器损毁风险

航天器在运行过程中会面临多重风险，包括空间碎片及其他在用航天器带来的碰撞解体风险、航天器自身的爆炸解体风险以及航天器内部的载荷故障风险等，均会造成空间资产的损失。此外，从空间环境的长期可持续利用角度而言，还存在一种凯斯勒效应构成的长期风险：即在达到一定临界条件时，航天器解体产生的大量解体碎片造成雪崩效应，新的碎片碰撞其他航天器从而导致空间碎片数量进一步大幅增加，使空间环境严重恶化甚至完全不可用。

（1）碰撞解体风险

航天器在发射阶段和在轨运行阶段均会面临大量空间碎片及其他在轨航天器的碰撞威胁，且随着近年来航天器发射数量的激增，尤其是国外大型星座（如“星链”）的发射，碰撞风险也在快速升高。

空间碎片的平均撞击速度超过10 km/s，碰撞能量巨大。一块1 cm的空间碎片所造成的破坏，与被一辆质量为1 t的轿车以50 km/h的速度撞击航天器的效果相当。对于尺寸大于1 cm的空间碎片，一旦与航天器撞上，轻则穿透舱壁或损坏关键器件，重则发生灾难性碰撞解体，而航天器产生的大量解

体碎片会进一步污染空间轨道资源，间接影响到其他在轨航天器的安全。

历史上已经发生过多起碰撞事件。例如，1996年7月24日，法国“樱桃色号”卫星与一块火箭残骸发生碰撞，导致卫星重力梯度杆遭到破坏（见图1）。2009年2月，美国“铱星33号”卫星与俄罗斯卫星“宇宙-2251”在788 km轨道发生碰撞，除跟踪编目的2134个大尺寸碎片外，还产生了超过 2×10^5 个5 mm以上难以监测且难以防护的危险碎片。2013年，厄瓜多尔的“飞马座”卫星与空中的火箭残骸相撞，导致卫星寿命终结。

（2）爆炸解体风险

自第一颗人造卫星进入太空以来，在航天技术不断取得一个个划时代突破的同时，灾难和事故便如影随形、接连不断。人造卫星从发射起至任务结束后的全生命周期中均会面临爆炸解体的风险，因电池或燃料问题而引起的卫星爆炸解体事件已发生多次。2021年3月以来发生了多起航天器解体事件，短时间内来自中国、美国、俄罗斯三个航天大国的卫星相继发生解体事件，这也引起了广泛的关注。2021年3月10日，美国已退役的气象卫星“诺阿-17”发生爆炸解体，此次解体产生了16个可跟踪的空间碎片；2021年3月18日，我国的气象卫星“云海一号”02星在轨发生解体，并产生了21个可跟踪的空间碎片。根据相关研究^[3]，已发生的在轨爆炸解体事件达560余次，平均每年发生约8.4次，近20年平均每年发生约12.2次。

（3）载荷故障风险

在轨执行任务的航天器数量逐年上升，种类不断丰富，航天器工程的高投入以及越来越重要的空间研究，致使航天器的设计与建造越来越复杂。虽



图1 航天器碰撞解体示意图

然航天器执行任务的能力与自身可靠性在不断提高，但由于自身结构复杂，运行环境易变，仍然很难避免故障的发生。2010年8月，美国发射的“先进极高频”星座首颗卫星在变轨时因发电机故障，使原设计90 d完成的变轨需10个月到1年才有可能到达目标轨道，卫星上有限的能量被大量消耗在变轨过程中，直接影响和缩短了卫星的有效寿命；2009年，俄罗斯发射的2颗“白鹤号”卫星发生损坏，影响到国际失事船卫星搜救系统COSPAS-SAR SAT的组网运行^[4]。

Tafazoli^[5]统计了1980—2005年在129颗卫星上发生的156次故障实例，其中电子故障占比为45%，机械故障占比为32%。卫星上最容易产生故障的部件是太阳能电池，41%的故障发生在卫星入轨的第1年，从分系统角度来看，姿态和轨道控制、指令和数据处理、测控与通信分系统、结构机构和有效载荷分系统发生故障的比例分别占32%、27%、15%和12%，其他故障占14%。由于航天任务的特殊性，对于大型复杂航天器而言，一个微小的故障都有可能引起系统性的问题，甚至产生灾难性后果。

（4）凯斯勒效应

1978年，Kessler就提出当近地轨道上的物体密度达到足够高时将会引发碰撞雪崩效应，即由碰撞解体产生的大量空间碎片，在碎片密度足够高的情况下，引发再次碰撞，碰撞碎片不断产生，导致空间碎片数量急剧增加，最终空间碎片将会在地球外层空间形成一个碎屑层，阻止人类进入太空，人类对太空的探索和利用将不得不终止，卫星轨道资源遭到永久性破坏^[6]。这种现象后来被称为“凯斯勒效应”。2006年，美国宇航科学家J.C. Liou再次提出，在当前的空间碎片减缓水平下，即使不再发射任何空间物体，空间环境也只能维持稳定50年，凯斯勒效应将会变成现实，届时地球周围的空间将失去利用价值，因而必须采取相关措施阻止或减缓空间碎片的生长，保护太空环境。图2为美国航空航天局（NASA）利用模型计算的空间物体数量长期演化情况。

2. 航天器无控再入危害风险

航天器被送入太空，在服役期满或寿命末期，部分大型航天器（如“和平号”空间站等）会采取主动离轨再入策略；部分航天器（如同步轨道卫星

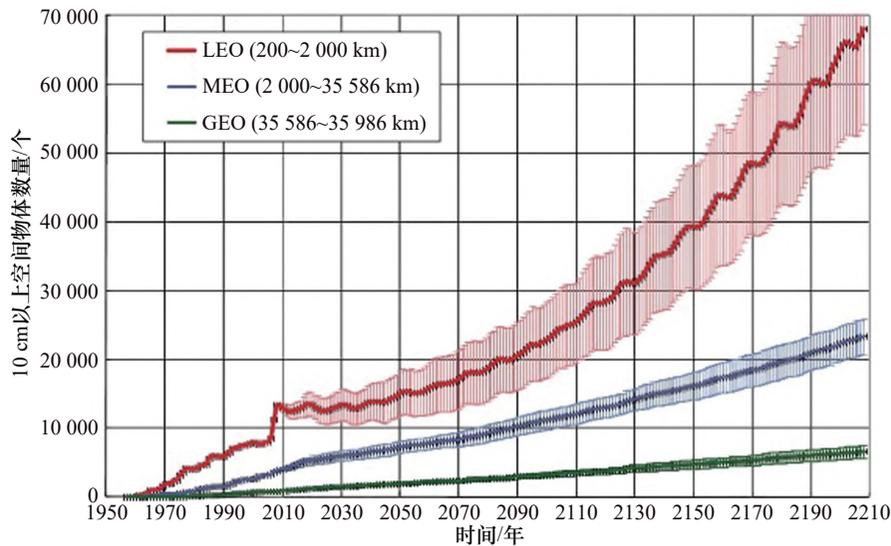


图2 空间物体数量长期演化情况

等)会进入坟场轨道,腾出宝贵的轨道资源,以免对正常轨道上的卫星构成威胁。从地球上发射进入太空,完成任务后再进入到地球大气层并在地球上着陆的航天器称为再入航天器,也可称为返回式航天器,如返回舱、航天飞机、空天飞机等。再入航天器的返回过程指再入航天器脱离原来的运行轨道,再入到地球大气层并在地面安全着陆的过程。再入航天器在返回过程中若发生故障,将在大气层解体坠毁;失效航天器按设定模式沿着螺旋型椭圆轨道衰减无控飞行,最终再进入大气层解体坠毁。

航天器的再入坠毁都意味着空间资产的损失,目前每年都会发生100次左右的航天器再入事件,除去有特殊热防护设计的返回式卫星/飞船等,大部分空间物体会在再入环境的强气动力/热作用下熔融/烧蚀/解体,大部分质量熔融/烧蚀殆尽,但一般仍有10%~40%的残余质量会到达地面,并可能导致地面人员伤亡与地面资产的损失。

3. 航天器测运控能力不足风险

太空资源的重要性日益突出,国际主要航天国家对空间碎片带来的威胁也已经达成共识,在满足自身发展需求的同时,努力开展合作以共同应对空间碎片构成的潜在威胁。

航天器的测运控能力是实现空间目标监测、航天器在轨机动规避、陨落预警等工作的基础与核心。若测运控能力不足,则会对空间资产带来风险,并可能导致空间资产的效能与价值无法充分

发挥。

(1) 与监测预警相关的测运控能力不足风险

因监测能力不足无法完成对所有空间目标的有效监测,在此情景下将会导致漏警,即未能对即将发生的碰撞风险提前发出预警;同时,监测能力不足还可能导致无法及时完成所有空间目标的编目更新,由此会导致轨道预报精度偏低,因而出现较多虚警,即对本不危险的交会事件也发出风险预警。虚警容易引起航天器不必要的机动规避,这将消耗航天器有限的燃料资源,造成其使用寿命的降低。因运控能力不足可使航天器无法及时有效地进行机动规避,导致航天器与其他空间目标发生碰撞解体的风险升高。

(2) 与空间交通管理相关软实力不足的风险

从广义上讲,空间交通管理也属于测运控能力的一种。在空间交通管理领域,相应国际规则的制定与落实进展缓慢,导致国际间对航天器间碰撞风险的预警和避碰事件沟通交流不够充分,因此造成我国航天器与他国航天器间的碰撞风险快速升高,尤其是在国外大型星座卫星的快速部署背景下,风险将进一步加大。

4. 近地小行星撞击风险

近地天体是指轨道近日点在1.3 AU以内的太阳系小天体,主要包含小行星和彗星两类天体,由于近地小行星的数量占绝大多数,因此通常称为近地小行星撞击威胁,不再专门注明包含近地彗星。历

史上也曾发生多起近地天体撞击事件。数量众多的近地天体对地球构成了潜在而巨大的撞击威胁，其原因主要在于：首先，近地天体的运行轨道与地球轨道接近，存在与地球发生碰撞的可能；其次，近地天体与地球的相对速度高达几十千米每秒，一旦碰撞会产生巨大的撞击能量，易造成较大的灾难；最后，近地天体数量很多且目前绝大部分尚未发现，潜在撞击风险较高。近地小行星同样是尺寸越小数量越多，据估计直径在米级以上的数量即可超过 100 万颗。而对于在轨航天器而言，即使被厘米级的微小天体撞击，其结果也会是严重损毁，因此在巨大数量的背景下，近地小行星同样对空间资产构成了很高的潜在撞击风险。

(二) 军事威胁与风险

自从第一颗卫星发射上天之后，太空就成为了人类的新战场。随着近年来的科技进步与发展，在气象、全球定位系统、网络通信、侦查和监视等领域，不论是民用还是军用，人类越来越倚重太空里的各种卫星。如果没有卫星，数字化、信息化军队将不能充分发挥战斗力，而导弹、战机等对信息依赖较高的武器装备也会失去战斗力。拥有强大的反卫星能力，将成为战时极具威慑力的撒手锏。

2015 年 8 月，俄罗斯将空军和空天防御军合并组建为俄罗斯空天军，受俄罗斯总参谋部领导，由空天军总司令部直接指挥，使命是战略预警、防空、反导、战略和战术打击、航天发射等。2016 年 6 月，美国空军航天司令部签发的《建设“航天任

务部队”，打造未来太空战士》白皮书指明：美国空军航天司令部必须转变自身文化，掌握相关知识和技能，从而使航天部队能够在全域太空公域中畅通无阻，并在必要时实施自卫。2018 年 6 月，美国宣布将建立“太空军”，成为继陆军、海军、海军陆战队、海岸警备队、空军之后，美国的第 6 支独立武装力量。此外，美国战略司令部至少与澳大利亚、日本、意大利、加拿大、法国、韩国、英国等 7 个国家的 44 家公司签署了空间监视数据共享协议，以加强空间态势感知能力^[7]。

基于航天器在军事威胁方面的不同作用方式，可将军事风险分为如下三类别。

1. 空间系统军事化风险

美国国防部在 2005 年提出了快速响应空间的发展战略，通过采用天地一体化的空间态势感知系统来监视航天器发射、返回和在轨运行，同时还能观测轨道碎片和自然天体的运行情况。通过分析目标信息来掌握空间态势，为军事活动提供空间目标物的信息态势保障。表 1 总结了美国空间态势感知天基系统的发展情况。

2021 年 7 月 1 日，美国“星链”1095 卫星从原 555 km 轨道，降低到距离地球 382 km 轨道，接近中国空间站。2021 年 10 月 21 日，美国“星链”2305 卫星经过复杂变轨，再次接近中国空间站。这种行为不仅对其他航天器带来极大的安全隐患，也会消耗航天器携带的工质，增加不必要的维护成本，降低使用寿命。

2022 年 12 月 2 日，SpaceX 公司宣布成立了一

表 1 美国空间态势感知天基系统发展情况

发展路线	任务使命	时间/年	项目名称
LEO 系统	LEO/MEO 监视	1996—2008	中段空间试验卫星 (MSX)
		2011—2018	天基监视系统-1 (SBSS1)
	2017	作战响应空间-5 (ORS5) 卫星	
	2021	SBSS 后续 3 颗卫星	
	LEO 监视	2012—2016	可操作精化星历表天基望远镜 (STARE) 第 1 阶段 3 颗卫星星座
GEO 系统	GEO 监视	2017—2020	STARE 第 2 阶段 15 颗卫星星座
		1996	微卫星技术实验-A/B (MiTex-A/B)
		2014	GEO 空间态势感知计划 1/2 (GSSAP-1/2) 星座
		2016	GSSAP-3/4 星座
感知 / 攻防两用系统	抵近监视 / 攻击	2016—2020	GEO 目标监视纳卫星星座
		2003	LEO 试验系统-10 (XSS10) 卫星
		2005	XSS11 卫星
		2012	GEO 局部空间自主导航与制导系统 (ANGELS) 卫星

个名为“星盾”的新业务部门，目标客户是美国国家安全机构和五角大楼。SpaceX公司宣称，“星盾”将利用近地轨道上的“星链”卫星星座满足美国国防和情报机构日益增长的需求。该公司明确宣称：“星链”最初是用于消费者和商业用途，而“星盾”设计用于政府服务，初步重点是三个领域，包括地球观测、安全通信和有效载荷托管。由此“星链”的军事意图和价值显现，给他国带来巨大的安全隐患。

2. 航天器武器平台化风险

在轨航天器同时可被用作天基武器的发射平台，而可支持的武器则是对天、对空、对地武器均有可能。今后一个时期在太空发生武力冲突的航天器主要是卫星，因此太空战争将主要围绕卫星与反卫星武器间的斗争展开。对卫星实施武力的目的是破坏目标卫星的功能或对其实施摧毁。在实施手段上分为软杀伤和硬杀伤。软杀伤主要通过电磁干扰、网络攻击等手段实施，对卫星不形成物理破坏，只使其在一定时间内失去部分或者全部功能。常用手段包括电磁干扰、网络攻击等。硬杀伤以对卫星形成物理破坏为目的，使得卫星功能永久丧失。目前，空间硬杀伤手段主要包括：动能武器、天基在轨操作、天基激光武器、天基微波等。

3. 太空战威慑

空间已经成为维护国家安全和利益至关重要的战略要地。以美国为核心的空间联盟日益扩大，2015年，美国继续推行综合控制空间的战略思想，强化与盟友的空间安全合作。2015年，美国与德国签订共享空间态势感知服务信息协议；与印度就维护外层空间环境的长期可持续性、安全性开展首次空间安全对话；与以色列航天局签署协议，共同开展空间监视与避碰工作；与日本举行第三次全面航天对话，明确双方将密切合作开展第二次空间态势感知桌面推演，推进双向数据共享、推进国际外层空间行为准则谈判工作的深入开展、推进空间活动的透明度与信任建立措施等议题。如美国牵头组织的“施里弗军演”，目的就是增强空间系统弹性，提高抗毁能力；为作战人员提供优化效应以支持其联合行动；保护多作战领域冲突下的空间实体。

2015年1月，日本发布第三版“航天基本计划”，明确将“保障空间安全”放在航天政策目标的首位，首次提出提高空间系统整体弹性等空间安

全措施，其中与盟国合作实现信息共享成为重要内容。在2015—2020财年预算中，欧盟为空间监视拨款7000万欧元。2015年6月，法国、德国、意大利、西班牙、英国签署协议，共同建造统一分发数据的空间监视与跟踪网络。

（三）管理风险

1. 管理制度不匹配风险

随着近年来我国商业航天的快速发展，在轨航天器数量激增，航天应用产品与模式也在快速迭代，同时航天工程的技术难度也随之升高，在此复杂背景下，相应的一些管理制度若与当前的快速发展阶段不匹配便会导致空间资产的实际效能无法充分发挥。

从航天应用和产业发展角度来看，商业航天作为航天领域的新兴力量，正以前所未有的速度和规模发展壮大。这不仅为人类探索宇宙提供了新的机遇，也为经济发展和科技创新带来巨大潜力^[8]。航天产业是当今世界最具挑战性和带动性的高科技领域之一，也是国家综合国力的集中体现和重要标志。目前全球商业航天市场呈井喷式增长，市场竞争日趋激烈，独角兽企业逐渐引领产业发展方向，卫星商业应用的需求带动了全球商业航天产业的全产业链发展。此外，商业航天还催生了新的太空经济形态，引发人们对商业航天更多应用场景的探索^[9]。

从技术角度来看，当前航天重大工程研制系统呈现出复杂性、巨型性、高风险性、开放性、技术与管理紧耦合等特点，可视为航天复杂巨系统工程。为保证完成工程研制、实现技术突破并解决科学问题，需要适应与航天复杂巨系统特点构建相适宜的管理体系^[10]。

反观国外的情况，美国作为世界航天强国，也在不断创新其管理模式和工作机制。美国航天管理体制是一个由国防部、NASA进行宏观管理，以科研单位、承包商、大学为基础的公私结合、军民结合的综合体系。美国航天项目管理人员在组织管理过程中引入组织设计理念，按照不同层次确定合适的组织结构，并建立了科学的制度体系来规范其行为，如美国政府主要通过合同管理的办法对美国的航天企业进行管。在美国航天项目管理过程中，技术创新、制度创新及管理理念的创新思想和实践

不断涌现,如渐进式采办策略、系统互换管理、资格许可制度等。这些创新思维和实践蕴含在航天系统的战略规划中,并以国家政策作为支撑,为美国航天项目的有效管理注入了强大动力^[11]。

2. 无形资产流失风险

与航天相关的管理制度、专利或专项技术等均是无形的太空资产,而专业才是无形资产的重要载体。航天相关技术专业性强、进入门槛高、技术积累周期长,因此专业技术人才的流失是行业保持持续发展的损失。

2018年,西安某所由于专业技术人才的流失,最终导致关键项目的进度受阻。此外,在商业航天蓬勃发展的背景下,也可能由于民营企业的经营不稳定性造成专业技术人才流失,一个典型情况就是专业人才应聘至商业公司后因公司倒闭而失业。

3. 航天项目战略方向失误风险

与航天相关的项目及技术具有投入大、周期长、风险高等特点,因此在一些关键性项目的战略方向选择方面,其影响深远,需慎之又慎。本文基于历史事件总结,将航天项目战略方向失误风险分为发展路径选择和项目决策两方面。

(1) 发展路径选择的影响

据NASA统计,美国的航天飞机项目共花费1137亿美元,但最终不得已而被淘汰,属于技术发展路径选择失误,最终导致了巨大的损失,其原因主要包括以下四点。① 成本高昂:航天飞机的研制、生产和维护成本都非常高昂,每次发射都需要进行大量的检测和维护工作,使得航天飞机的成本远高于其他发射系统。② 安全隐患:航天飞机存在一定的安全隐患,如1986年“挑战者号”航天飞机发生爆炸事故,导致7名宇航员死亡。此后,航天飞机的安全性备受关注,但难以完全消除安全隐患。③ 运载能力有限:相比于其他发射系统,航天飞机的运载能力有限,只能搭载较小的负载,且搭载数量也有限制。④ 技术落后:随着科技的不断发展,其他发射系统的技术已经超越了航天飞机,如重型火箭、商业火箭等,它们具有更高的运载能力和更低的成本,逐渐取代了航天飞机。

(2) 项目决策的影响

在20世纪的登月竞争中,苏联失败的主要原因即是其项目决策的失误。美国在原本落后的态势下,宣告了登月的航天计划,凝聚力量取得一系列

科技成就。美国和苏联的登月竞争逐步激烈,双方科学家都选择在月球轨道完成交会,减少在太空中操作的步骤,降低登月难度。但是苏联却在这一需要集中力量办大事的项目中,拆分了三个设计局分别进行航空计划,同时推进N1火箭、UR-700火箭和R-56火箭,甚至计划都有所改变。一个典型的案例是:重达2800 t的N1火箭,装有44台发动机,运载能力达到了100 t,前后一共进行过4次试飞,却均以失败而告终,而失败原因几乎完全一致,那就是火箭的自动控制系统出现了错误动作,发出了错误的关机指令。事后来看,研发力量偏于分散,致使项目推进过程中缺少足够的技术积累以及发射失败后也未能实现有效的故障回归,多项决策失误导致了最终的失败。

三、空间资产价值与风险评估

(一) 风险事件识别

随着卫星应用领域的扩展,卫星种类与数量不断增加,形成了日趋完善的空间应用体系,包括对地观测、定位和导航、空间预警、通信与数据传输、气象探测、科研等多个方面。对于合作目标,卫星运行商根据实际任务需要对卫星进行轨道机动、轨道维持、碰撞规避、姿态控制等操作,然而大多数情况下这些信息是不公开的;对于非合作目标,即空间碎片和外方航天器,则需要通过对目标的轨道信息进行分析以及时识别与感知异常事件。

概括而言,合作目标自身出现风险事件时主要由卫星所有方或运营方及时感知到具体信息,对于非合作目标面临的风险事件的识别,仍需主要依靠轨道变化进行分析识别。本文总结给出三个典型事件的基本判识方法。① 解体事件。无论是碰撞解体还是爆炸解体,均会在短时间内突然多出大量新增碎片,并且各自的轨道比较接近。② 陨落事件。利用空间物体的编目轨道根数可预报计算其未来一段时间内的运行轨迹,从其轨道高度的变化情况即可判识出该空间目标是否会再入大气层并陨落。③ 载荷故障。对于一般的载荷故障,若不影响相应卫星的轨道运动,则难以从地面监测手段判识,通常需要根据载荷用户使用情况得知;对于较为严重的载荷故障,有可能会影响到卫星姿态保持或轨道维持等功能,此时通过分析其轨道变化情况有望识别出

相应故障的发生。

(二) 资产价值评估

航天器是空间资产的核心组成部分，同时也是其他空间资产贡献价值的重要载体。此处即以航天器为例评估我国空间资产的价值，其中既包含预定功能的价值，也包含一些潜在的隐性价值。

为量化评估其价值，选取航天器的多项属性，从不同角度来表征航天器的价值大小。用矢量 $\vec{X}=(X_1, X_2, \dots, X_m)$ 来表示该属性集合 (m 表示元素个数)，其中， X_1 为航天器从研发制造到发射入轨的成本价值； X_2 为通信、导航、遥感、军用、商用、科研等用途属性； X_3 为卫星的预期（或设计）使用寿命和轨道寿命； X_4 为影响科技创新价值及其潜在的技术外溢价值； X_5 为与其他卫星组网协作的能力，是影响潜在价值提升力的重要因素； X_6 为航天器自身可实现功能的拓展性。

1. 单个航天器的价值评估

单个航天器的价值用评价函数 $F(\vec{X})$ 来表示，具体形式可有两种方案：

一种是对各属性对应的价值进行相互独立评估，航天器的价值是各属性价值的总和，此时有如下表达形式，其中 $\vec{W}=(W_1, W_2, \dots, W_6)$ 用来表征属性价值系数。

$$F(\vec{X})=\vec{W} \cdot \vec{X}=\sum_{j=1}^6 W_j X_j \quad (1)$$

另一种是以成本价值 X_1 为基础，对其余属性分别评估来确定各自的增益系数 $\vec{k}=(k_1, k_2, \dots, k_6)$ ，此时考虑如下表达形式：

$$F(\vec{X})=X_1(1+k_2+k_4+k_5+k_6)k_3 \quad (2)$$

此处自然地应有 $k_1=1$ ，而卫星寿命与其他属性并不独立。相关系数 k_3 主要考虑卫星剩余寿命的影响，参照较为常用的剩余寿命指数分布模型，取值为：

$$k_3=e^{-\lambda t} \quad (3)$$

式 (3) 中， λ 为卫星期望寿命（即设计寿命）的倒数， t 表示卫星已运行的时长。

2. 空间资产整体价值

空间资产整体价值（记为 S ）的基本盘是其核心资产（即所有在轨航天器）的价值 S_0 ，可表示为

$$S_0=\sum_{i=1}^n F(X_i)$$

其中 n 表示我国在轨航天器的个数。

S_0 可认为是当前 T_0 时刻的空间资产静态价值，

除此之外还需评估空间资产价值的变化趋势，如此才能为空间资产管理提供参考依据。因此，对于未来时刻 T 的空间资产价值 S 的估计值可表示为：

$$S(T)=S_0\left[1+\frac{\dot{n}(T-T_0)}{n}\right] \quad (4)$$

式 (4) 中，增加考虑了估计参量航天器数量增长率 \dot{n} 。

(三) 风险评估与分析

空间资产技术风险较为客观，适于量化地评估其风险大小。风险事件发生的概率及其可能造成的价值损失是评估风险大小的两个关键要素。

1. 航天器损毁风险评估

航天器损毁风险的评估整体思路是以所有空间目标的数量和轨道数据为基础，基于轨道运动理论进行建模分析。

对于碰撞解体风险，发生碰撞事件的概率近似正比于航天器的交会次数，故近似正比于空间物体（含航天器与空间碎片）数量 N_{all} 的二次方，我国航天器发生碰撞解体事件的风险概率 P_1 即有如下关系：

$$P_1=A_1 N_{\text{all}} N_{\text{China}} \quad (5)$$

对于航天器自身发生爆炸解体的风险事件，其概率 P_2 应正比于卫星数，故事件概率应有如下关系：

$$P_2=A_2 N_{\text{China}} \quad (6)$$

式 (5)、(6) 中， A_1 和 A_2 分别表示碰撞解体风险系数和爆炸解体风险系数。

对于载荷受损事件，发生该风险的概率 P_3 可认为正比于我国的航天器数量，故考虑采用下式评估，其中 A_3 表示我国的卫星故障率，具体数值则需通过对历史事件的统计分析得到。

$$P_3=A_3 N_{\text{China}} \quad (7)$$

对于凯斯勒效应，其发生概率主要取决于总体目标数，应近似正比于总目标数的二次方，故考虑用下式进行评估，其中 A_4 表示凯斯勒风险系数。

$$P_4=A_4 N_{\text{all}} N_{\text{all}} \quad (8)$$

2. 大型航天器无控再入危害风险评估

国际上有较多软件可针对单个航天器的再入风险进行分析。目前主要的空间物体再入预测软件包括美国的 DAS、ORSAT 和欧洲的 SCARAB 等。本文以空间资产为着眼点，更多地从整体角度考虑再入风险发生的概率 P_5 ，这主要决定于我国所有低轨航天器（或火箭末级）的数量 N_{LEO} ，而陨落系数 A_5

则与具体的轨道分布和太阳活动水平等多种因素相关。

$$P_5 = A_5 N_{LEO} \quad (9)$$

3. 空间资产整体风险

严格来讲，各类风险源引起的风险事件并非严格独立事件，但因各类风险事件发生的概率通常均较小，因此从宏观研究角度而言，风险事件的相关性可以暂且忽略，故整体来看，空间资产发生风险事件的概率 P 为：

$$P = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - P_j) \approx \sum_{j=1}^m P_j \quad (10)$$

并且在各风险事件发生概率均较小时上式右侧的近似表达成立。

此处暂只考虑航天器损毁风险和大型航天器无控再入风险，后续可随着研究工作的深入逐步增加对其他风险的量化模型。故综合上文中对多类风险的量化评估模型，即有：

$$P = \sum_{j=1}^5 P_j \quad (11)$$

式 (11) 中， P_1 至 P_5 依次为前文所述的碰撞解体事件概率、爆炸解体事件概率、载荷故障概率、凯斯勒风险概率和航天器无控再入事件概率。

从空间资产整体价值而言，价值增长主要包括新部署航天器的增量价值、载荷的单性价值、组网的复合价值以及复杂任务的潜在价值等多个方面。

与此同时，空间资产面临的多种风险则是制约空间资产效益的潜在因素，有可能导致空间资产整体价值的降低。主要不利因素包括三方面。

一是航天器损毁风险。航天器无论是受到空间碎片撞击导致碰撞解体，还是因自身故障导致爆炸解体，此类风险事件发生的后果均是相应航天器的严重或彻底损毁，资产价值消失，甚或成为负资产（因其解体后的碎片将对其他航天器构成撞击威胁）。

二是航天器内部载荷发生故障的风险。在发生太阳辐射异常、微小碎片撞击、宇宙射线轰击、卫星轨道或姿态操控失误等情形下，可能导致航天器内部载荷的部分或完全失效。在关键载荷发生故障时相应航天器的资产价值将大幅缩水，其原有效益将大幅降低。

三是低轨航天器在大气阻力作用下有可能最终会无控再入大气层，而较大型目标无法在大气层中

完全烧蚀，则有可能对地面人员财产安全构成撞击危害。在此情形下，航天器的再入陨落本身构成其资产价值的灭失，同时其带来的潜在负面影响也可视为一种负资产。

总体而言，空间资产价值随空间物体（航天器+空间碎片）数量的变化趋势如图 3 所示。只有当空间物体数量接近绕地轨道空间容纳上限时，空间资产效益才会明显降低或下降。由于此处所述航天器发生损毁的风险仍然属于小概率事件，新发射少量航天器并不会显著提升相应风险，目前应仍然处于前中期的快速增长阶段。当空间物体数量超过可容纳上限时，触发凯斯勒效应的风险将会大幅增加，并且一旦发生则整体空间资产价值必然急剧下降。

(四) 风险事件分级

为合理有效地应对可能出现的风险事件，有必要按照危害程度对潜在风险进行量化分级，并分别制定应对预案，尽量避免风险事件的发生或降低其危害损失。

为此，参照近地小行星撞击风险的都灵风级模型，提出如图 4 所示的分级方法。风险事件的威胁程度主要从风险事件可能发生的概率和可能造成的价值损失两个维度进行衡量。目前主要考虑价值损失在 100 万元以上且风险概率在万分之一以上的风险事件，并将其主要划分为三级。

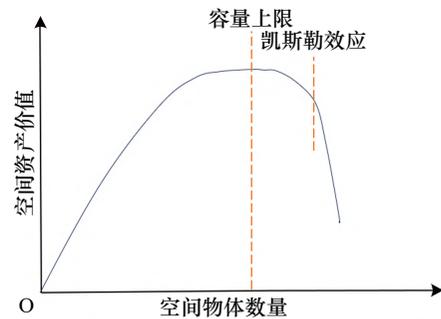


图 3 空间资产价值与空间物体变化数量变化示意图

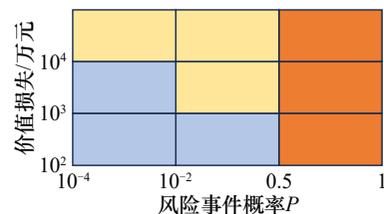


图 4 空间资产风险事件分级示意图

(1) 三级风险（红色预警）：风险事件发生的概率达到50%以上。

(2) 二级风险（黄色预警）：价值损失在1亿元以上但发生概率在1%以内，或价值损失在1000万元以上且发生概率为1%~50%。

(3) 一级风险（蓝色预警）：价值损失在1000万元至1亿元之间但发生概率在1%以内，或价值损失在1000万元以内且发生概率在50%之内。

四、空间资产风险控制及风险事件处置应对

（一）风险控制方法

1. 加强技术能力建设

对于空间资产面临的技术类风险，监测预警是最为基础且至关重要的手段，进而需要具备足够的处置应对能力。

(1) 要看得见。即通过望远镜、雷达等设备监测到航天器和空间碎片，这是开展空间物体轨道编目和碰撞预警工作的基础。

(2) 要算得准。通过精确计算航天器和空间碎片的运行轨道，才能准确预测各自在未来一段时间内的运行状态，分析和计算相互之间是否存在碰撞风险、大型空间物体是否存在再入陨落风险、同时也可通过分析识别轨道异常变化来判断航天器是否发生故障。

(3) 要防得住。即针对预警计算发现的风险事件，需要有足够的能力进行处置应对，如针对碰撞风险航天器进行机动规避。

厘米级空间碎片碰撞即可对航天器造成严重破坏，而目前的监测预警能力主要覆盖10厘米级及以上空间物体的搜索发现跟踪监测，因此仍然需要加强相应的能力建设。与此同时，通过加强编目和预警算法的研究，精进相关技术则有助于降低虚警率和漏警率，更准确地判识风险事件。

2. 迭代提升管理制度

由于航天相关技术专业性强，进入门槛高，技术积累周期长，因此专业技术人才的流失是行业无形资产的一种流失。同时由于很多航天项目均具有高投资、长周期的特点，一旦出现重大失误，造成的损失也是巨大的。

有鉴于此，从风险控制角度而言，对相应管理制度在一定时期内的效果进行评估，并不断地迭代

优化将有助于降低此项风险带来的损失。优化管理既注重航天工程和科学目标，也注重需求牵引与质量效益，准确把握航天事业发展方向、路径选择和质量效益，不断提升空间资产管理使用效益。

3. 加强国际合作与博弈

凯斯勒效应将是对空间环境长期可持续利用的一大威胁。尤其是在美国“星链”卫星星座计划提出并不断部署以来，威胁事件的发生概率大幅提升。严峻的空间碎片环境问题得到了国际上的广泛关注，未来空间碎片环境长期演化也成为该领域的研究热点之一。空间碎片环境长期演化模型是从宏观角度研究整个空间碎片环境的长期演化情况，通过预测空间碎片密度分布情况、碰撞事件的发生频率等来评估未来一两百年空间环境的稳定性，并且通过对不同的碎片减缓和清除方案的模拟分析，为碎片减缓和清除提供合理有效的策略与建议。

机构间空间碎片协调委员会（IADC）是协调全球有关空间碎片问题和空间活动的国际组织，已推出《IADC空间碎片减缓指南》，并在积极推动空间交通管理规则的制定，这将对未来各国空间活动的发展带来重大影响。

为避免或减弱国际规则对我国未来航天活动及产业发展的不利影响，需要加强国际合作，积极参与相关国际规则的制定，并从技术、国际法、外交等多方面展开博弈，以最大限度维护我国的合理发展权益。

（二）风险事件处置应对

1. 优化运营管理机制

空间资产从资产所有者来讲涉及多家的航天器用户，从运营角度来讲还涉及管理、设计、制造、发射、测运控等多家单位，因此，针对空间资产的风险事件应对必然涉及多家单位、部门和企业，而组织和落实风险事件的处置应对方案是一项复杂的系统性任务，这就必然需要建立相应的体制机制，包括明确处置应对任务的决策者与决策流程。

2. 制定相应的应对预案

不同等级风险事件可能造成的危害程度差异显著，需要分别针对不同情况制定应对预案，以此及时有效地消除或降低相应风险事件带来的危害。

3. 确定不同的责任主体

不同类型的风险事件以及不同阶段的应对措施

施, 均可能需要多家不同企业、单位、部门的行动和配合, 因此详细划分各类事件、各个阶段的责任主体, 有利于推动风险事件处置应对方案的有效落实。

4. 跟踪处置应对行动全过程

按照不同风险事件、不同应对阶段和不同责任主体划分好处置任务后, 仍然需要关注处置应对行动的具体落实效果, 尽量避免某一重要环节的疏漏导致整体行动的失败。

五、结语

本文对空间资产的内涵进行了界定, 全面梳理了空间资产在发射、在轨运行阶段和寿命末期可能面临的风险源, 针对技术类风险初步讨论了可能的空间资产风险量化评估方法, 从航天器的多种不同属性角度考虑建立了空间资产价值的量化评估模型, 并以此为基础简要分析了可能的风险控制方法。面向空间资产风险事件的处置应对问题, 提出了初步的风险事件分级模型, 并讨论了处置应对的重点工作。基于上述研究与讨论, 围绕加强我国空间资产风险评估与控制提出以下五点建议。

(1) 加强和落实我国航天器的登记管理工作, 通过摸清家底进一步实现优化管理和提升效益, 做好资产保护与管理使用的协调, 提高容灾备份、抗毁生存和信息防护能力, 增强太空危机管控和综合治理效能。

(2) 加强我国空间资产管理和风险控制研究的顶层规划, 落实职责部门或单位, 并引导科研人员开展相关方向的研究。

(3) 推进空天一体化管理, 建立国家空间交通管理中心, 提高空间交通治理水平, 确保能够自由进入太空、高效利用太空、有效管控太空。

(4) 增强我国太空防卫力量建设, 加快提升太空态势感知能力、太空突发事件应对能力、机动避碰能力、太空取证溯源能力, 确保太空系统稳定有序运行。

(5) 积极参与国际空间合作, 增强太空国际治理的话语权。学习借鉴国外先进经验, 既要重视航天项目、技术与科学合作, 也要注重太空安全领域的合作, 积极参与太空环境治理、太空安全与军备控制等领域规则的制定, 提出中国方案, 推动国际

社会共建外空领域人类命运共同体。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: December 22, 2023; **Revised date:** February 7, 2024

Corresponding author: Yang Zhitao is a senior engineer from National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences. His major research fields include astrometry and celestial mechanics; E-mail: ztyang@nao.cas.cn

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Research on the Efficiency, Risk Control and Sustainable Development of China’s Space Assets Management in the New Era” (2022-HZ-17)

参考文献

- [1] 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.
Tang J S, Cheng H W. The origin, status and future of space debris [J]. Physics, 2021, 50(5): 317–323.
- [2] 郑派. 论《开普敦公约》项下的空间资产概念 [J]. 北京航空航天大学学报(社会科学版), 2015, 28(2): 49–54.
Zheng P. On the concept of space asset under the *cape town convention* [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics (Social Sciences Edition Edition), 2015, 28(2): 49–54.
- [3] 龚自正, 宋光明, 李明, 等. 空间活动长期可持续: 从空间交通管理到空间环境治理——第 683 次香山科学会议评述 [J]. 空间碎片研究, 2021 (1): 5–12.
Gong Z Z, Song G M, Li M, et al. Long-term sustainability of space activities: From space traffic management to space environment governance—Review on the 683rd Xiangshan science conference [J]. Space Debris Research, 2021 (1): 5–12.
- [4] 胡绍林, 肇刚, 郭小红, 等. 航天安全与健康管理技术研究述评 [J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2015, 15(3): 286–292, 298.
Hu S L, Zhao G, Guo X H, et al. Review on spaceflight safety and health management [J]. Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science), 2015, 15(3): 286–292, 298.
- [5] Tafazolli M. A study of on-orbit spacecraft failures [J]. Acta Astronautica, 2009, 64(2): 195–205.
- [6] Kessler D J, Cour-Palais B G. Collision frequency of artificial satellites: The creation of a debris belt [J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1978, 83(A6): 2637–2646.
- [7] 韩洪涛, 王友利. 国外空间攻防能力现状与趋势分析 [J]. 中国航天, 2015 (9): 21–25.
Han H T, Wang Y L. Present situation and trend analysis of foreign space attack and defense capability [J]. Aerospace China, 2015 (9): 21–25.
- [8] 耿秋. 基于模糊贝叶斯网络的航天器生存力评估专家系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学(硕士学位论文), 2019.
Geng Q. Research of spacecraft survivability assessment expert systems based on fuzzy bayesian network [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology(Master’s thesis), 2019.

- [9] 田瑞颖. 中国商业航天拉近现实与梦想的距离 [N]. 中国科学报, 2023-6-21(03).
Tian R Y. China's commercial aerospace has narrowed the distance between reality and dreams [N]. China Science Daily, 2023-6-21(03).
- [10] 李明华. 航天复杂巨系统工程管理体系及实施初探 [J]. 工程研究 - 跨学科视野中的工程, 2020, 12(2): 155-163.
Li M H. Preliminary exploration of engineering management system of complex giant aerospace system and implementation [J]. Journal of Engineering Studies, 2020, 12(2): 155-163.
- [11] 李锴, 陈国玖, 刘志强, 等. 美国航天工业管理模式分析及启示 [J]. 航天工业管理, 2021 (11): 73-76.
Li K, Chen G J, Liu Z Q, et al. Analysis and enlightenment of American space management model [J]. Aerospace Industry Management, 2021 (11): 73-76.