arXiv:2304.05709v1 [astro-ph.IM] 12 Apr 2023

图文摘要

空间碎片清除动力学：综述 Mohammad Bigdeli, Rajat Srivastava, Michele Scaraggi

亮点

空间碎片清除动力学：综述

Mohammad Bigdeli、Rajat Srivastava、Michele Scaraggi

- 本文综述了地球轨道碎片的现状。

- 本文探讨了高效碎片捕获系统开发中的设计参数。

- 本文介绍了碎片清除的缓解策略。
- 讨论了有关尽量减少碎片产生的国际指南和预防措施。

空间碎片清除动力学：综述

Mohammad Bigdeli[a,b], Rajat Srivastava[a,b], Michele Scaraggi[a,b]

[a]意大利莱切萨伦托大学创新工程系，邮编 *73100*[b]意大利阿尔内萨诺意大利技术研究院（*IIT*）生物分子纳米技术中心，邮编 *73010*

摘要

空间碎片（也称“太空垃圾”）给所有太空探索活动带来了重大挑战，包括涉及载人航天器的活动，例如 SpaceX 的载人龙飞船和国际空间站。太空中的碎片数量正在迅速增加，已成为一个重大的环境问题。针对地球轨道上的空间碎片捕获机制，包括接触式和非接触式捕获方法，已有各种研究开展。电信、天气预报、高速互联网和 GPS 等技术进步虽然造福了社会，但不当且缺乏规划的使用却导致了碎片的产生。不断增多的碎片对国际空间站、航天飞机和高价值卫星构成了碰撞威胁，并分布于地球轨道的不同区域，其尺寸、形状、速度和质量各不相同。因此，捕获并清除空间碎片是一项艰巨任务。本文综述了空间碎片的统计数据和规格，重点介绍正在实施的缓解策略、预防措施以及清除碎片和防止碎片产生的法规指南，并强调空间碎片对航天机构及相关企业造成损害这一严重问题。

提交至《机械系统与信号处理》的预印本 *2023*年*4*月*13*日

关键词： 空间碎片，LEO，地球同步轨道，卫星
PACS： 0000，1111*2000 MSC*： 0000，1111

1. 引言

1957年10月，人造卫星“斯普特尼克1号”发射升空。这一出乎意料的成功激发了人们对太空探索的好奇心。然而，由于技术复杂，只有少数国家具备发射和运营卫星的能力。尽管如此，由于政府、商业和军事活动（电信、广播、天气预报、全球定位系统、间谍卫星等），太空交通量迅速增长，导致太空垃圾或碎片逐渐增多 [1–4]。太空碎片通常由废弃物体构成，例如废弃卫星、火箭和航天器的残骸，以及无数破损的机器部件，所有这些都对人类太空活动构成严重威胁。因此，国际空间站、航天飞机和许多卫星常常需要进行轨道机动，以避免与碎片发生碰撞 [5–9]。毫无疑问，随着太空技术的发展，人类在太空中的活动范围不断扩大。然而，这也带来了许多问题。例如，空间活动日益增多，也导致太空碎片增加，引发了对环境污染的担忧。 [10–14]。

自 1957 年太空时代开启以来，我们已向地球轨道发射了约 6200 枚火箭；在部署的 8410 颗卫星中，约有 5700 颗仍在运行[15]。这些卫星分布于不同的地球轨道，包括低地球轨道（LEO）和地球静止轨道

（GEO）。地球表面上方高度低于 2,000 km 的太空区域被视为低地球轨道（LEO）。这是距离地球最近的轨道，与其他地球轨道相比，其中的空间碎片最多。LEO 距离地球较近，有利于卫星捕获地球表面的高分辨率图像。该轨道通常可用于追踪物体的位置，以支持全球定位系统和军事应用。国际空间站也位于这一轨道，以便宇航员出行。地球静止轨道（GEO）位于地球表面上方 36,000 km 的高度 [16, 17] ，该轨道中物体的轨道周期与地球自转周期相同。因此，地球轨道中物体的速度与轨道周期有关。例如，LEO 和 GEO 中的卫星或其他物体（包括碎片）的速度分别约为 7.8 km/s 和 3.1 km/s [18]。轨道碎片的高速运动令人担忧，因为它们可能与航天器或卫星相撞，并造成严重损害 [19–21]。例如，在航天运输系统计划期间，STS-7 的舷窗上发现了一个 4 mm 深的凹坑（见图 1），这是由一片直径约 200 微米的油漆剥落物撞击造成的[22, 23]。在整个航天运输系统计划期间，该机队执行了 60 多次任务，其外舷窗遭受了 177 次撞击，其中 45 次需要更换舷窗 [23]。

研究还表明，火箭尾气中释放的氧化铝（Al_2O_3）也会形成微米级尘埃以及毫米至厘米级的熔渣颗粒。这些微小碎片（尘埃或熔渣颗粒）与卫星或轨道上的其他物体发生碰撞的风险很高 [25–28]。人们经常报告称，这些微小的

高速物体已损坏太空中的各种系统 [25, 29, 30]。图 2 报告了类似的损坏：碎片严重损坏了国际空间站（ISS）上的电源线 [31]。

在太空计划开始之初，普遍观点认为，太空足够辽阔，可以容纳一切而不会被填满。然而，这种看法是错误的，因为空间碎片正以惊人的速度增长，轨道中高速移动的碎片会与其他物体发生碰撞，导致产生更多碎片，从而以令人担忧的速度填满轨道空间。[32–34]。为了了解高速移动的碎片对在轨卫星和航天器的影响，国际空间局(ISA)进行了多项测试。在其中一项测试中，他们让一个直径和质量分别为1.2cm和1.7g、以约6.8 m/s的速度飞行的小铝球撞击一块厚18cm的铝块。研究报告称，由于小铝球的撞击，铝块上形成了一个直径和深度分别为9.0 cm和5.3 cm的撞击坑（见图3）。此次撞击还产生了约365 GPa的压力，并使铝块的温度升高至6000K[35, 36]。在国际空间局的另一项测试中（如图4所示），一枚以7 m/s速度飞行的铝弹（7.5mm）被发射向一种防弹背心式织物。这种织物类似于自动转移飞行器（ATV）的外层表皮，用于分析小型碎片与航天器碰撞的影响 [37, 38]。碎片与航天器和卫星发生碰撞的可能性取决于它们在轨道中停留的时间以及它们的尺寸。因此，在轨道中停留时间更长的大型航天器更容易受到损害。航天器的易受损性已经通过

将“长期暴露设施（LDEF）”置于低地球轨道上69个月。图5展示了微小碎片撞击“LDEF” [39, 40]上的银色特氟龙™ 毯所造成的损伤。同样，一项研究[41]报告并在图6中展示了一个1英寸、半盎司重的塑料圆柱体以约24462 km/h的速度撞击4英寸厚的铝块所造成的严重损伤。

如前所述，轨道碎片的存在会对人类太空活动产生重大影响。因此，追踪这些物体或碎片至关重要。追踪这些物体或碎片的方法有很多。太空监视网络（SSN）由雷达和光学望远镜组成，能够轻松追踪尺寸大于 10 cm 的较大碎片或物体 [25]。如今的先进技术通常能够追踪中等尺寸的碎片（尺寸介于 1 cm 和 10 cm 之间）。然而，探测小尺寸碎片（尺寸介于 1 mm 和 1 cm 之间）仍是一项艰巨的任务。小尺寸碎片的估算是通过分析并对返回航天器上的损伤进行统计评估来完成的，或者如前所述，使用长期暴露设施（LDEF）进行估算。

根据欧洲航天局发布的《空间碎片环境报告》（更新于2022年5月10日），所有空间物体的总质量超过9900吨 [15]。报告还指出，大尺寸碎片约有34000个，中等尺寸碎片约有90000个；统计估算的小尺寸碎片约有1.28亿个。

SSN 定期跟踪的物体超过 27,000 个，而且随着这些物体彼此碰撞或与航天器发生碰撞，其数量还在不断增加（图 7 展示了 LEO 和地球同步轨道上的空间碎片数量） [42]。在过去十年中，

轨道碎片的数量急剧增加，几乎翻了一番。促成这一增长趋势的两起重大事件是：(1) 2007 年，中国对风云一号C卫星进行了反卫星导弹试验，产生了单次事件造成的最大碎片云，使碎片数量增加了近 25%。(2) 2009 年，铱星33号与已停止运行的俄罗斯卫星宇宙-2251相撞，产生了 2296 块可追踪碎片，以及数十万块无法追踪的太空垃圾，对附近轨道上的其他卫星构成威胁 [43–50]。根据 Kessler 和库尔-帕莱（1978）的研究，如果轨道碎片持续增加，碎片数量终将达到一个临界密度，届时会发生连锁碰撞；即使未来不再发射航天器，这种连锁碰撞也可能自行持续，使太空环境在数百年至数千年间无法使用。许多研究人员讨论过这一问题，并将其称为“凯斯勒综合征”。

近年来，人们提出了多种捕获并清除空间碎片的方法 [51–60]。这些方法分为两大类：接触式捕获方法和非接触式捕获方法[56, 61]。图 8 展示了空间碎片捕获方法的框架。在非接触式碎片清除方法中，以受控方式施加外力，使碎片离轨，从而导致其再入大气层（见示意图 9）。例如，从航天器向碎片发射高能等离子体束。这会使碎片带上相反电荷，从而使其减速，进而促使空间碎片再入地球大气层并烧毁 [62–64]。其他非接触式捕获方法包括引力牵引器 [61, 66] 或静电牵引器 [61, 67],

它们利用引力或静电力等外力使空间碎片偏转。Lu 和 Love [66]提出了一种航天器概念设计，利用引力改变小行星的轨迹。在他们的设计中，航天器在小行星附近悬停，推进器朝向外侧，从而使小行星偏离原有轨迹。这种方法不受小行星结构、表面或自转状态的影响 [66, 68]。静电牵引器方法利用库仑力使空间碎片离轨。在该方法中，一艘航天器（拖船）接近空间碎片（火箭箭体或失效卫星），并向其发射电子束。目标（碎片）因储存额外电子而带负电，而发射电子的拖船则带正电。因此，两个带相反电荷的物体（拖船和碎片）之间产生的吸引力，可用于启动碎片离轨过程，且无需发生任何物理接触 [69–71]。

另一方面，用于移除空间碎片的接触式捕获方法（见图示 10）分为两大类：刚性连接方法和柔性连接方法 [51],[57],[72],[73]。触手捕获方法和机械臂捕获方法是刚性连接捕获方法的两大类别。触手捕获方法的特点是利用柔性附肢在多个点抓住碎片，而不是像机械臂捕获方法那样锁定单个点。触手捕获方法可以在使用或不使用机械臂的情况下进行。在机械臂触手捕获方法中，使用夹持机构捕获物体或碎片。随后，它将碎片受控地重新送入大气层，碎片最终在那里燃烧殆尽[74]。另一方面

相反，无机械臂的触手捕获基于对接机构。追踪器上的对接夹具根据目标碎片的形状设计[61]。因此，碎片被锁定在追踪器的夹具内，并最终离轨。触手捕获方法易于测试，且技术成熟度等级（TRL）较高。然而，这些方法成本效益不高 [61]。

采用机械臂捕获方法的卫星是定制设计的，并安装了标记物。这些标记物可以由机械臂的末端执行器轻松抓取。因此，该机构具有高度的可靠性和可重复使用性 [75]。机械臂的捕获机构按以下步骤工作（如图 11 所示）[76]：首先，摄像机从不同角度捕获碎片的图像。然后，对获得的信息进行处理，以分析目标碎片的物理特征、姿态和位置。获得物理信息后，定位已安装的标记物，并启动捕获阶段。机械臂抓住标记物处的目标，并使用消旋机构使其稳定[76, 77]。

对于系绳网和系绳抓手等柔性连接捕获方法，无需确定特定位置即可捕获物体。系绳网捕获方法因具备多种优势而成为最具前景的方法之一。这些优势包括能够捕获各种形状和尺寸的碎片；即使追踪卫星与目标相距较远，也能捕获碎片；以及能够以较低成本完成捕获。系绳网的捕获机制包括以下步骤：部署网、捕获目标以及离轨 [78–80]。在部署网的

阶段，网的四角会连接飞行配重块，并由一种称为“网枪”的弹簧系统将其射出。在网部署过程中，这些飞行配重块会撑开网，使其包裹住目标碎片。最后，将捕获的碎片离轨 [80]。另一种柔性连接捕获方法是系绳鱼叉法，追踪航天器在适当距离处向失效卫星或碎片发射鱼叉。鱼叉刺入碎片并将其锚定。随后，追踪航天器将碎片拖入大气层，使其在大气层中烧毁 [81]。由于鱼叉会刺入碎片，这种方法存在产生新碎片的高风险 [61, 82–84]。系绳抓手机制也是一种柔性连接捕获方法，与网捕获方法类似。在这种方法中，航天器在碎片附近机动，以确定最佳捕获位置。确定位置后，抓手会移向预定位置并抓住碎片。随后，航天器利用推力将碎片运送至处置轨道（见示意图 12） [85, 86]。

一些太空公司（例如Astroscale）正在致力于开发创新解决方案，以清除空间碎片[73, 87]。2021年8月25日，在测试的初始阶段，Astroscale成功展示了ELSA-d（Astroscale 末期服务-演示）使用基于对接的磁性捕-获方法捕获其客户卫星的能力 [88]。Astroscale的 ELSA-d测试阶段如示意图13所示。欧洲航天局（ESA）还计划于2025年发射一项任务，以捕获并清除空间碎片。欧洲航天局的 ClearSpace-1任务由瑞士初创企业 ClearSpace 与一组研究人员联合建造

来自洛桑联邦理工学院（EPFL）。ClearSpace-1 任务旨在使用触手捕获机制捕获 Vespa（织女星次级载荷适配器）。这一载荷适配器于 2013 年被欧洲航天局的织女星运载火箭遗留在太空中，重量约为 100 千克，位于地球上空约 800 千米处 [89]。除了各航天机构开展的这些工作外，碎片的实际清除尚未进行。太空清理器开发进程缓慢令人严重担忧，因为不断增加的碎片数量可能导致未来发射可用的轨道空间不足 [61, 90–92]。

本研究旨在阐明轨道空间碎片的严峻现状，并为高效碎片捕获与清除流程的设计和开发提供参考。本文分为以下几个部分：第 2 节讨论地球轨道碎片的现状。第 3 节介绍设计有效捕获与清除系统所需的重要参数。第 4 节进一步探讨清除碎片的各种方法和模型，以及作为缓解策略的相关措施。此外，第 5 节讨论了阻止轨道碎片数量增长的预防措施。最后，本文总结全文并得出总体结论。

2. 地球轨道碎片的当前状况

在本节中，我们将根据各航天机构提供的数据库，讨论目前记录的地球轨道空间碎片现状，其中包括位于德国达姆施塔特的欧洲航天局空间碎片办公室以及美国空间监视网。欧洲航天局提供的历史证据表明，物体的数量（数据受监视能-

（该时代的发射系统）在地球轨道中的数量持续增加（见图14），尤其是在低地球轨道[93]中。物体数量的增加导致碎片总质量稳步上升。图15报告了多年来地球轨道中质量的增长趋势 [93]。如图15所示，物体总质量约为10,000吨，主要分布在LEO和地球同步轨道中（超过6000吨）。这些物体所占据的面积多年来也呈指数增长，覆盖了地球轨道中近120,000 m^2（2022年）的区域（见图16）。

根据美国国家航空航天局轨道碎片项目办公室（ODPO）近期发布的报告（2022年3月）[42],[94],，2022年，LEO中编目物体的月度数量（> 10 cm）达到约25,500个（见图17）。如图17所示，载荷及其解体产生的碎片占编目物体总数的绝大多数。从图17还可以看出，近年来载荷数量大幅增加。NASA ODPO还报告了1957年至2021年编目物体月度质量的变化情况，如图18所示。从图中可以看出，编目物体的月度总质量约为11,000吨，其中载荷、火箭体及其解体碎片的质量分别约为7,000吨、4,000吨和2,000吨[95]。NASA ODPO提供了低地球轨道中编目物体的示意图（见图19），并报告称其中约95%为轨道碎片[96]。

3. Design parameters for debris removal system

为了设计高效的碎片清除系统，了解其物理属性（例如尺寸、质量和

碎片的平均横截面积）。与物理属性相关的原始数据可以在欧洲航天局的空间目标特征数据库与信息系统（DISCOS）[97]中找到。图20展示了碎片尺寸（深度、高度和直径）的概率分布。利用概率分布函数，我们可以分析不同姿态下碎片尺寸的分布。高度和深度的概率密度函数呈现出相似的趋势，在约6 m处达到最大概率，并在约1m、4m、9 m和15m处出现一些较小的峰值；而长度的概率分布表明，碎片最可能的长度约为2 m。因此，通过对深度、高度和长度的概率密度函数进行整体分析，我们可以得出结论：碎片最可能的尺寸为长度约2m、深度约6 m、高度约6m。不同姿态下尺寸的最大概率范围为0至7 m。此外，还观察到（图20），大尺寸碎片（¿20 m）的概率可以忽略不计。因此，为了高效设计碎片清除系统，我们需要重点开发一种能够轻松捕获尺寸小于20m碎片的系统。还需特别关注高效系统的设计，使其能够捕获尺寸范围为0至7 m的较小碎片。

利用欧洲航天局 DISCOSweb 上的数据库计算地球轨道中碎片质量的分布，并将结果展示在图 21 中。质量概率分布显示，质量小于 1 吨的碎片出现的可能性较高，而质量为 2、4、3 和 5 吨的碎片出现的可能性依次降低。质量大于 6 吨的碎片出现的可能性可以忽略不计。因此，设计碎片捕获系统时必须考虑到质量小于 1 吨的碎片出现的可能性较高，并且系统应能够处理质量处于

0–6 吨范围内的碎片。

碎片的横截面积也是碎片捕获与清除系统的重要参数之一。因此，我们分析了地球轨道中碎片横截面积的概率分布，并将其展示于图22中。约有21,000组数据用于计算概率分布函数。根据我们的结果，碎片横截面积的概率分布表明，横截面积小于10 m^2 的碎片出现概率最高。然而，我们还发现，所分析的概率密度函数在18和28 m^2附近出现峰值。对于横截面积超过50 m^2的大型碎片，其出现概率逐渐降低。根据我们的分析，碎片捕获系统应能够捕获横截面积小于50 m^2, 的碎片，并特别关注横截面积小于10.0 m^2的碎片。

图23展示了地球轨道中某个物体倾角的概率分布。根据碎片倾角的概率密度函数可以发现，该概率密度函数反映了碎片倾角的大部分分布范围，即约45至105度，且在约50度处达到峰值，表明50度是最可能出现的倾角。

图 24、25 显示了远地点和近地点处碎片位置（单位：千米）的概率密度函数图。根据我们的结果，远地点处碎片位置的概率分布范围为 0 至 2000 千米，近地点处则为 0 至 1500 千米。大多数碎片位于距远地点和近地点约 200 千米处；碎片出现概率第二高的区域，分别位于距远地点约 800 千米和距近地点约 700 千米处。计算这些概率分布函数时，考虑了约

32000 个数据集。此外，图 26 展示了物体在远地点和近地点处速度的概率分布。在远地点和近地点处的物体速度分布表明，碎片在远地点和近地点处最可能的速度分别为 7700 米/秒和 7800 米/秒。研究还发现，在远地点和近地点处，3000 米/秒都是第二可能的速度。总的来说，从概率密度函数图可以看出，远地点和近地点处速度的概率大致相同。

为了计算物体在远地点和近地点的动能（K.E.），需要获取物体在远地点和近地点的质量和高度信息。这些信息分别存储在两个不同的数据库中，即 ESA DISCOSweb 和 space-track。因此，首先根据编目 ID 合并这两个数据库。随后，利用合并数据库中获取的速度和质量计算动能（单位为焦耳）。此外，在对数刻度上计算远地点和近地点动能的概率分布函数（log_10）。物体在远地点和近地点的动能概率分布见图 27。远地点和近地点最可能的动能范围约为 10^9 至 10^{10}焦耳。

碎片质量与平均横截面积的联合概率见图 28。根据图中结果，碎片质量和平均横截面积的最可能分布范围分别约为 0-5 吨和 0-40 m^2, 。

上述讨论的参数包括尺寸、质量、横截面积、高度、倾角以及猫的动能。

alogued碎片，将有助于高效碎片清除系统的设计与开发。

4. 缓解策略

为保护地球轨道空间，尤其是 LEO，遏制空间碎片的增长已成为航天机构亟待解决的挑战 [99, 100]。发射活动和运行实践导致地球轨道中的碎片数量增加，对其他正常运行的卫星和航天器构成威胁。应采取离轨等措施，清除失效卫星，以降低碰撞率并限制碎片数量 [101]。开发用于高速碰撞测试的分析模型和数值模型，有助于降低卫星受损和碎裂的潜在风险。在这些模型中纳入速度、质量、形状、尺寸和碎片横截面积等参数，可以为测试损伤缓解技术提供更准确、更有用的信息 [40]。这些数值模型和分析模型有助于卫星防护罩的设计与开发。

减少空间碎片增长的方法可分为两类：短期风险降低方法和长期风险降低方法[40]。短期风险降低方法包括通过改变卫星轨迹来实施规避碰撞机动，从而降低碰撞风险和产生更多碎片的可能性。然而，这并不能降低碰撞的长期风险。长期风险降低方法包括迫使失效卫星进入地球大气层并离轨、主动清除空间碎片，以及将物体或碎片转移到人口较少的

轨道 [40, 102]。

人们已经探索了众多碰撞风险降低研究和空间碎片减缓策略，例如将卫星从LEO 离轨。它们采用可展开的阻力帆[103], 或电磁系绳 [104]。阻力增强系统（DAS）通过利用储存的能量展开阻力帆，缩短卫星的离轨周期。因此，碰撞的可能性得以降低[105, 106]。

航天机构和公司正在参与解决捕获碎片的机制问题[107] ，其中的一些概念包括：欧洲航天局“e.Deorbit”项目的柔性设计 [108],、“地球静止轨道机器人修复器”（ROGER） [109], ，以及日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）提出的“太空垃圾猎手”计划 [110]。

网捕获方法是最有前景的碎片捕获方法之一，因为它具有诸多优势。例如，这种方法对碎片位置和尺寸的精度要求较低。由于网由弹性材料制成，因此可设计成覆盖大面积，并能适应形状不规则的物体。通过发射机构，可将网部署至远处的目标，以经济有效的方式捕获碎片 [74]。网捕获方法的其他优势包括重量轻、捕获后能够适应碎片的形状，以及追踪器能够与失控目标保持安全距离[111]。2018年，基于网捕获方法的在轨演示任务“RemoveDEBRIS”成功捕获了一颗立方体卫星，展现了该方法的潜力[111, 112]。因此，下一小节将探讨网捕获系统的动力学，介绍其诸多优势。

4.1 网捕获系统的动力学建模

柔性网有多种建模方法，包括质弹簧模型和绝对节点坐标公式（ANCF）模型[113]。在质弹簧模型中，如图 29 [113]所示，通过将缆绳离散为弹簧—质量—阻尼单元来表示网模型。为体现网的柔性，可在两对质点之间插入弹簧单元。通过在两个节点之间增加多个质弹簧段，可以提高缆绳的柔性。增加质点不仅能提升缆绳的运动自由度，也会增加仿真的复杂性[114]。网的部署通过发射附着在网角上的四颗子弹（质点）来完成[113]。

ANCF方法（一种非线性有限元公式 [116]）可用于分析具有大位移和大变形的多体问题。ANCF模型可以用较少的单元描述网的柔性[117, 118]。如图30所示，两个节点之间有一个单元（缆索）[113]。变形后缆索单元上的任意位置均可用形函数$\boldsymbol{S}$ 以及两个节点的坐标表示为 [117, 119]:

$$\mathbf{r} = \boldsymbol{S}\boldsymbol{e} = [S_1\boldsymbol{I}, S_2\boldsymbol{I}, S_3\boldsymbol{I}, S_4\boldsymbol{I}][\boldsymbol{e}_1, \boldsymbol{e}_2]^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

其中，$\boldsymbol{I}$是 3×3单位矩阵，$\boldsymbol{e}_i$是绝对节点坐标[117, 119]。

就节点坐标而言（见公式2），$\boldsymbol{r}^j$ 和$\boldsymbol{r}^{[j,x]}$ 是

单元的全局位移和斜率[113, 117, 119]。

$$\boldsymbol{e}_j = [\boldsymbol{r}_j, \boldsymbol{r}_{j,x}] \tag{2}$$

形函数 S_i 定义为:

$$\begin{aligned} S_1 &= 1 - 3\xi^2 + 2\xi^3 \\ S_2 &= l_0(\xi - 2\xi^2 + \xi^3) \\ S_3 &= 3\xi^2 - 2\xi^3 \\ S_4 &= l_0(-\xi^2 + \xi^3) \end{aligned} \tag{3}$$

其中 $\xi = x/l_0$，$\mathbf{x}$ 是单元[113, 117, 119]上任意一点的坐标。

为了推导系留网的系统运动方程，必须使用虚功率原理并引入拉格朗日乘子 [113]。

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{M}_b & \boldsymbol{0} & \boldsymbol{\Phi}_b^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{0} & \boldsymbol{M}_e & \boldsymbol{\Phi}_e^{\mathrm{T}} \\ \boldsymbol{\Phi}_b & \boldsymbol{\Phi}_e & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\boldsymbol{q}}_b \\ \ddot{\boldsymbol{e}} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{Q}_b \\ \boldsymbol{Q}_e \\ \boldsymbol{Q} \end{bmatrix} \tag{4}$$

其中，子弹的质量矩阵和作用于子弹的外力分别由$\boldsymbol{M}_b$和$\boldsymbol{Q}_b$给出。术语$\boldsymbol{M}_e$对应一个恒定的 ANCF质量矩阵，而$\boldsymbol{Q}_e$ 是与绝对节点坐标$\boldsymbol{e}$相关的广义力。这里$\boldsymbol{Q}_e$ 表示外力与弹性力之和。拉格朗日乘子定义为 $\boldsymbol{\lambda}$；与绝对节点坐标相关的约束的雅可比矩阵为$\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{e}}$； $\boldsymbol{\Phi}_b$ 表示由子弹质量和缆索单元耦合的约束；$\boldsymbol{Q}$ 是二次速度向量[80, 113]。

Kelvin-Voigt模型 [120] 是用于计算柔性网动力学的高效模型，并且足以准确地模拟大规模柔性网 [121]。由于缆绳材料的固有特性，缆索单元无法承受压缩，只有在缆绳伸长时才会产生张力。根据Kelvin-Voigt方法，柔性网中节点$\boldsymbol{f}_{ij}$之间的张力i和j可描述如下[122],

$$\boldsymbol{f}_{ij} = \begin{cases} f_{ij}\widehat{\boldsymbol{r}}_{ij} & r_{ij} > l_0 \quad and \quad f_{ij} < 0, \\ 0 & r_{ij} \leq l_0 \quad or \quad f_{ij} > 0, \end{cases} \tag{5}$$

$\widehat{\boldsymbol{r}}_{ij}$是该线段两个相邻节点的单位方向向量[121, 122]。f_{ij}的表达式为:

$$f_{ij} = \text{-}k(r_{ij} - l_0) - c\dot{r}_{ij}$$

其中，i^{th}节点与j^{th}节点之间的相对位移和相对速度分别为r_{ij}和$\dot{r}_{ij}$。网绳的刚度常数定义为$k = EA/l_0,$，其中（E）为弹性模量，会因材料而异；A为缆绳的横截面积，l_0为初始长度 [121, 122]。缆绳材料的阻尼系数 c 取决于刚度 k，其表达式为

$$c_i = 2\xi\sqrt{m_i k} \tag{6}$$

其中，ξ为阻尼比，m_i为i^{th}节点的集中质量。

发射网之前，追踪卫星应沿沿轨方向 [122, 123], 向目标移动，如图 31 所示。网捕获动力学的惯性参考系以地球为中心，而局部

参考框架以网发射系统的质心为中心 [122, 123]。质点在惯性参考框架中的绝对位置可表示为[122],

$$\boldsymbol{r}_i^e = \boldsymbol{r}_P + \boldsymbol{R}^o \boldsymbol{r}_i \tag{7}$$

其中，在惯性框架中，$\boldsymbol{R}^o$ 是将位置向量$\boldsymbol{r}_i$ 从局部系统转换到惯性系统的旋转矩阵，而$\boldsymbol{r}_i^e$ 表示i^{th}节点的绝对位置。最后，离散化的运动方程表示如下[122, 123],

$$m_i \frac{d\dot{\boldsymbol{r}}_i^e}{dt} = \sum_{j=1}^{N_i} \boldsymbol{R}^o \boldsymbol{f}_{ij} + \sum_{s=1}^{M_i} \boldsymbol{f}_{is}^e + \boldsymbol{g}_i, \tag{8}$$

在方程 8 中， N_i 是与i^{th} 节点相连的相邻缆绳数量，$\boldsymbol{f}^{ij}$ 是相连缆绳作用于 i^{th} 节点的力； M_i 表示作用于i^{th} 节点的外力数量。外力之和，如气动阻力或太阳辐射压，由$\boldsymbol{f}_{is}^e$表示。 i^{th} 节点上的微重力$\boldsymbol{g}^i$ 由[122, 123],给出

$$\boldsymbol{g}_i = -\frac{GMm_i \boldsymbol{r}_i^e}{|\boldsymbol{r}_i^e|^3}, \tag{9}$$

其中，GM是地球引力系数 [122,123]。

4.2. 捕获系统的接触动力学

捕获系统的动力学由网捕动力学和碎片动力学组成。网捕动力学包括柔性网的本构动力学以及

其与碎片之间的非线性接触动力学。碎片动力学包括碎片的平动和转动动力学[121]。如图 32 所示，当网与目标接触时，由于多个质点按照特定模式连接到弹簧阻尼单元上，因此多个质点会与目标表面接触[121]。接触点的数量和位置决定了对接触的响应 [123]。

根据接触建模方法的不同，接触响应分为基于罚函数的方法和基于冲量的方法。在基于罚函数的方法中，一旦检测到接触，就会立即计算作用于接触点的接触力。在基于冲量的方法中，则会计算接触冲量和速度变化。随后，将修正后的速度代入网的动力学方程。不过，这两种模型采用相同的接触检测方法 [122, 123]。

4.2.1. 基于罚函数的接触方法

在网接触动力学中，网被建模为多个质点按照特定模式由弹簧阻尼单元连接而成。因此，网与目标接触可视为多个质点与目标表面接触。质点被认为在目标空间之外运动，并且不得穿透目标。因此，根据这一约束，网捕获可视为一个不等式约束问题。基于罚函数的方法通常用于求解优化问题和不等式问题[121]。在优化问题中，不等式约束可表示为 [113],

$$\text{Minimize} \quad f(x), \quad \text{subject to } c(x) \geq 0 \tag{10}$$

其中， $f(x)$ 和 $c(x)$ 分别为目标函数和约束方程。不等式约束问题可转化为无约束问题，如下所示： [113],

$$\text{Minimize} \quad f(x) + \mu \min\{0, c(x)\}, \quad \text{subject to } x \in R^n \quad (11)$$

其中， $\mu \min\{0, c(x)\}$ 定义为罚函数。

若 $c(x) \geq 0$，则不会产生罚项，因为根据罚函数， $\mu \min\{0, c(x)\} = 0$。相反，若 $c(x) < 0$ ，则$\mu \min\{0, c(x)\} = c(x)$。将罚项纳入目标函数，以防止点穿透目标表面[113]。当点未与目标表面接触时， $c(x) \geq 0$，约束方程为 $\min\{0, c(x)\} = 0$。然而，当点穿透目标表面时， $c(x) < 0$。罚力（此处即接触力） $\mu c(x)$会被加入目标函数 $f(x)$，以将点推离表面并防止其进一步穿透 [113]。该定义将罚函数 $\mu \min\{0, c(x)\}$ 视为穿透深度的函数。当两个弹性物体发生接触时，碰撞物体会发生变形，接触力则表示为变形的函数。在接触情景仿真中，可根据碰撞物体之间的穿透深度对接触变形进行参数化。在基于罚函数的方法中，反作用力根据穿透深度计算：穿透越深，罚力越大 [113]。

4.2.2. 基于冲量的接触方法

在基于冲量的方法中，计算的是接触产生的冲量，而不是接触力。因此，在

在这种方法中，接触后计算速度变化 [123]。虚拟现实和游戏环境通常使用基于冲量的方法来处理两个独立物体之间的接触[124]。基于冲量的仿真的基本思想是，将物体之间的任何接触都建模为接触点处的碰撞；不存在不可穿透约束；不同物体之间的不可穿透约束通过碰撞来实现 [125]。这种方法适用于使用网清除翻滚空间碎片时的接触动力学。网被离散为按照特定模式连接的质点。因此，网与目标物体相遇时，可视为一个或多个质点与目标物体接触 [124]。

4.3. 空间碎片捕获系统的仿真与实验结果

基于质弹簧模型（见图 33）和 ANCF 模型（见图 34），进行了大量数值仿真，以研究物体接触和捕获的动力学特性[113, 122, 126]。为分析和比较接触动力学模型的有效性，研究了基于罚函数的方法和基于冲量的方法，并确定了这些接触动力学模型的优缺点[122]。根据仿真结果，这两种方法在模拟网的接触动力学方面均有效[118]。

在一些研究中，碎片捕获系统的结构受到自然界的启发，并被建模为蜘蛛网。有限元法和实验方法被用于碰撞分析和设计空间碎片捕获系统[79, 127]。在一项有限元仿真研究中，对物体与静止蛛网的碰撞进行了仿真。研究了若干种情况。

对物体进行仿真，并报告了物体的撞击导致网失效或破裂的影响 [79]。该研究还报告称，与径向网相比，螺旋网具有更高的强度。根据仿真的动力学结果，研究表明，与非旋转网不同，旋转网无法完全捕获物体。物体的缠绕程度很大程度上取决于其形状、数量、网的相对速度、自旋稳定网的旋转角速度以及其自旋方向 [79]。在另一项研究中，柔性网模型与传统的四边形网进行了比较。研究发现，与四边形网相比，仿生八边形柔性网具有更高的耗能性能、更强的容差能力和显著的力学性能 [127]。两种网构型的变形如图 35 [127] 所示。

Botta等人 [128] 开展了一项仿真研究，以深入了解空间碎片捕获的动力学特性。仿真器系统的主要组成部分包括追踪器、捕获网和闭合机构。在该仿真器中，采用多体动力学仿真平台Vortex Dynamics执行接触动力学计算。仿真器中实现了多种模型，例如标准集总参数模型、增强型集总参数模型以及基于缆绳的网模型。采用标准集总参数的模型如图36(a)所示。网的质量特性由网结处的小型球形刚体表示，而轴向刚度和阻尼特性则由小型刚体（节点）之间的无质量弹簧和阻尼器表示。在集总参数模型中，增加了线性弹簧、扭转弹簧和阻尼器，用于描述网中缆绳的弯曲刚度

。基于缆绳的模型虽然复杂，但比集总参数模型更为准确，如图36(b)所示。根据该模型，质量分散在网的绳股中，绳股被建模为通过棱柱关节连接在一起的细长刚体[128]。在本研究中，针对Zenit-2火箭第二级、Envisat、阿波罗航天器以及类似贝努的小型小行星，建立了一个逼真的碎片库。贝努小行星被建模为自由漂浮的翻滚刚体。贝努小行星的缩小模型如图37所示。基于贝努小行星的缩小三维模型，添加了凸网格碰撞几何体 [128]。

贝努小行星捕获序列的快照如图38所示。在 $t = 23$ s时（图38(b)），网开始捕获并包围小行星（图38(c)），随后锁定机构开始工作。在 $t = 26$s时几乎完成锁定，并于 $t = 30$ s时得到确认（图38(d)）。随着仿真的继续进行（图38(e)–(f)），即使经过60秒，仍观察到小行星的三维模型被困住 [128]。

此外，还开展了实验研究，以了解柔性网捕获碎片的机制。图39展示了碎片捕获装置的地面验证实验设置。该装置由一张柔性网（网角处连接有磁性质量块）、一个中央刚体、一根中心轴、传动单元、一台变速电机及其他部件组成[127]。网由聚乙烯纤维编织而成，呈八边形。聚乙烯纤维段的直径为0.3 mm，网的对角线直径为1.0 m。网角处连接的质量块由磁性铁制成，每个磁性质量块重五克[127]。柔性网与目标之间的碰撞过程

如图40所示。结果表明，柔性网与目标物体发生碰撞并将其包裹起来。由于重力的存在，地球上的外壳前端状态略有不同，地面测试还报告了柔性网的编织缺陷。总的来说，作者认为，仿生设计（类似蜘蛛网）的柔性捕获装置可以成为一种有效的碎片捕获系统 [127]。

在另一项用于测试碎片捕获系统的实验中，在实验室内建立了一个测试台，其地板到天花板的高度为 4m。该测试台由网和系绳组件（见图42）、碎片模型（氦气飞艇，见图 41）、将网保持在展开状态的框架、升高或降低网和系绳组件的机构，以及用于释放连接在网各个角上的配重的释放机构组成。为模拟碎片捕获机制，网最初保持在展开状态。网的展开通过释放角部配重来驱动，配重在重力作用下落下并包围目标碎片 [129]。

实验演示表明，网闭合系统具有适用性，是空间碎片清除系统的一个有前景的概念。本研究设计的实验测试台有助于验证网捕系统的动力学特性，尤其是网的展开 [129]。

作为清洁太空倡议的一部分，SKA Polska 在欧洲航天局的一项合同下开展了另一项实验。该实验使用系绳网捕获系统，验证 EVISAT 缩比模型的碎片捕获机制。实验在猎鹰20飞机内的微重力环境中进行。实验捕获了网展开以及网缠绕模拟碎片的轨迹

使用了两组高速立体摄影相机（共4台摄像机）。网捕实验的装置如图44所示。本实验测试了两种情况。第一种情况下，采用尺寸为 1×1 米、网孔尺寸为10厘米、尼龙线直径为1毫米、打结组装、间距为1.5米的网，并测试了两种不同速度：1.5米/秒和2.5米/秒（图45）。第二种情况下，采用尺寸为1 × 1米、网孔尺寸为6厘米、尼龙线直径为2毫米、无结组装、间距为1.5米的网，并测试了两种不同速度：1.5米/秒和2.5米/秒。（图45）[130]。较厚的16×16网（2^{nd}测试案例）的实验装置如图46所示。实验期间，猎鹰20飞机进行了22次抛物线飞行。其中20次成功捕获了目标，过程包括以下阶段：网展开并飘动、网撞击并缠绕目标，以及记录运动轨迹[130]。实验结果表明，较厚的 16×16 网（2nd 测试案例）的表现不如较薄的 10×10 网（1st 案例）。实验结果还验证了通过仿真 [130]获得的网捕获机制动力学。

5. 预防措施

2002年，机构间空间碎片协调委员会（IADC）制定了《空间碎片减缓指南》，旨在防止产生空间碎片。这些指南提出了预防策略，以控制热门空间轨道（如低地球轨道（LEO））日益增长的交通流量，并保护地球静止轨道免受不必要的空间拥堵。因此，可持续利用轨道有助于未来的科学和商业活动。2007年12月22日，

联合国通过了第62/217号决议，认可了联合国外层空间和平利用委员会的《空间碎片减缓指南》。这些技术内容和一系列减缓指南由机构间空间碎片协调委员会（IADC）制定。以下是这些指南 [131]:

指南 ***1***：限制正常操作期间释放的碎片。

指南 ***2***：最大限度地降低运行阶段发生断裂的可能性。

指南 ***3***：降低轨道上发生意外碰撞的概率。

指南 ***4***：避免蓄意破坏和其他有害活动。

指南 ***5***：最大限度降低因储存能量导致任务结束后的解体风险。

指南***6***：在任务结束后，限制航天器和发射运载火箭轨道级在近地轨道（*LEO*）区域的长期存在。

准则 ***7***：在航天器和运载火箭轨道级完成任务后，限制其对地球同步轨道（*GEO*）区域造成的长期干扰。

这些是关于新设计的太空任务规划与运行的自愿性指南，也适用于现有太空任务（条件允许时）。这些指南不属于国际法规定的强制要求。

2001年，美国政府制定了《轨道碎片减缓标准实践》（ODMSP），以应对地球轨道空间碎片不断增加的问题。ODMSP旨在通过控制运行期间释放的碎片、尽量减少意外碰撞或爆炸产生的新碎片，并选择安全的飞行轨迹以及在任务结束后处置卫星，来防止产生新的长期空间碎片[132]。该标准还规定，航天器和火箭体的设计必须尽量降低运行阶段产生碎片的风险 [132, 133]。

美国联邦航空管理局（FAA）也在努力减少空间碎片，并为美国发射行业制定了法规[134]。根据《联邦法规汇编》（CFR）第14篇第415.39条“发射结束时的安全”，FAA要求任何运载火箭发射都必须获得安全批准。下述要求（见《联邦法规汇编》第14篇第417.129条）适用于将进入地球轨道的运载火箭级段或部件：

- 有效载荷分离后，有效载荷与运载器或其任何部件之间不存在非计划的物理接触；
- 化学能、压力和动能等能源不会导致车辆或其部件碎裂，从而产生新的碎片。
- 通过耗尽剩余燃料、保持所有燃油管路阀门打开、释放任何加压系统中的压力，并使所有电池永久处于放电状态，来移除储存的能量。

2004年6月，美国联邦通信委员会（美国联邦通信委员会）发布了一套全面的规-

轨道碎片减缓法规。这些法规既适用于获准在美国提供服务的非美国卫星，也适用于美国商业卫星的授权。这些法规要求在获得授权[135]之前披露所有碎片减缓策略，包括寿命终止措施。美国联邦通信委员会提出的披露和运营要求分为三类[135]。

- 关于在执行例行操作时避免与其他大型物体碰撞的披露；
- 任务后处置披露；以及
- 关于日常操作期间碎片控制、防爆措施，以及航天器防护以避免因与小碎片碰撞而失控的披露。

国际宇航科学院（IAA）开展了多项研究，评估空间碎片的现状与稳定性，以探讨太空交通管理的可能性，并进一步研究如何缓解空间碎片[136]的产生。根据2001年国际宇航科学院的《空间碎片立场文件》，减少和消除空间碎片的管理阶段分为三类。第一类需要立即采取行动，这些行动包括[137]:

1. 不得蓄意使航天器解体，从而在轨道中产生碎片。2. 高效设计和开发航天器与卫星，以减少任务相关碎片。

3. 任务结束时，应从位于任何地球轨道上的上面级和航天器中移除内部能量。4. 优化地球同步转移轨道（GTO）参数，以缩短上面级的寿命。5. 将退役的地球静止卫星转移至处置轨道。6. 如果需要将远地点助推发动机（ABM）与地球静止航天器分离，则应在超同步轨道中进行。7. 用于运送地球同步卫星的上面级应进行钝化和处置，处置轨道应至少高于地球静止轨道300公里。

第二类需要改变操作程序或硬件，旨在移除LEO中的废弃火箭和航天器。这将显著减少空间碎片。第二类所需采取的措施包括：

1. 将上面级和失效卫星在 LEO 的轨道寿命限制为 25 年。
2. 任务完成后，将上面级和失效卫星转移至处置轨道。

第三类中的碎片管理方案通常需要进行新的开发，并证明其适用性（技术可行性、成本效益）。这些方案的实施是重点，指定的五个阶段如下[137–139]：

1. 具备推进器离轨能力的开发。

2.用于增加阻力以实现离轨的阻力增强系统。3.开发用于移除的抓取、翻滚和系留装置。4. 开发激光移除技术。5. 开发能够避免碰撞的有效清扫器。

各航天机构和监管机构提出的上述准则或建议，有助于防止产生新的碎片。

6. 讨论与结论

当初，人们认为“太空”为人类活动提供了无限机遇 [140]，如今空间活动所带来的威胁正源于此。现在，由于人类的干扰，这一问题已成为威胁太空环境的严峻问题。众所周知，只有少数国家有能力向太空发射火箭或卫星。然而，多年来，太空中的物体数量急剧增加，这归因于多种空间活动，包括卫星发射和反卫星导弹试验。因此，人们十分关注如何清除地球轨道上的物体（碎片），尤其是低地球轨道（LEO）上的物体。多位研究人员和航天机构一直在努力设计和开发有效的空间碎片清除系统。本文通过分析欧洲航天局（ESA）和美国国家航空航天局（NASA）提供的空间物体数据库，探讨地球轨道上空间碎片的现状。我们还研究了空间碎片的特征（例如数量、尺寸、速度、质量、位置，

如果能获得横截面积等信息，将有助于开发碎片清除系统。我们的研究表明，地球轨道上碎片的速度比其质量更重要，因为碎片的高动能会造成重大损害。研究还发现，将失效卫星离轨至更高轨道可以降低碰撞的可能性。本文重点介绍了限制空间碎片增长的缓解策略，并讨论了航天机构近期开展的空间碎片清除活动，包括美国国家航空航天局的“Clear Space-01”和欧洲航天局的“Elsa-D卫星”项目。我们分享了有关各种碎片捕获方法的信息，并发现网捕碎片是一种高效且经济实惠的方法。为支持此类系统的开发，我们介绍了网捕碎片方法建模活动的当前进展。最后，我们介绍了国际航天机构（包括机构间空间碎片协调委员会（IADC））提出的预防措施，以控制热门空间轨道上不断增加的交通流量。

致谢

作者（M.B.）感谢萨伦托大学提供资金支持。作者（R.S.）感谢Konstantinios Pagkalis所进行的富有成效的讨论。

参考文献

[1]VD Kuznetsov、VM Sinelnikov 和 SN Alpert。Yakov alpert：斯普特尼克1号与首次卫星电离层实验。《空间研究进展》，55(12):2833–2839，2015年。

[2]Marco M Castronuovo。主动清除空间碎片——初步任务分析与设计。《宇航学报》，69(9-10):848–859，2011年。[3] Claudio Bombardelli 和 Jesus Pelaez。用于非接触式清除空间碎片的离子束牧羊者。《制导、控制与动力学》，34(3):916–920，2011年。[4] JC Dolado-Perez、Carmen Pardini 和 Luciano Anselmo。影响空间碎片演化模型长期预测的不确定性来源综述。《宇航学报》，113:51–65，2015年。[5] Shinya Fukushige、Yasuhiro Akahoshi、Yukihito Kitazawa 和 Tateo Goka。空间碎片环境模型比较：ordem2000、master2001 和 master2005。《IHI工程评论》，40(1):31，2007年。[6] Hanspeter Schaub 和 Zolt´an Sternovsky。用于非接触式静电处置机动的主动空间碎片充电。《空间研究进展》，53(1):110–118，2014年。[7] J-C Liou。美国空间碎片环境、运行与测量更新。技术报告，2015年。[8] Hanspeter Schaub、Lee EZ Jasper、Paul V Anderson 和 Darren S McKnight。空间碎片环境导致的航天器运行决策的成本与风险评估。《宇航学报》，113:66–79，2015年。[9] Alessandro Rossi。地球轨道上的空间碎片。《塞尔维亚天文学杂志》，(170):1–12，2005年。

[10]Nodir Adilov、Peter J Alexander 和 Brendan M Cun- ningham。地球轨道污染的经济分析。《环境与资源经济学》，60(1):81– 98，2015年。[11]Nodir Adilov、Peter J Alexander 和 Brendan M Cun- ningham。轨道碎片产生、累积、缓解与修复的经济学。《空间安全工程杂志》，7(3):447–450，2020年。[12] VV Adushkin、O Yu Aksenov、SS Veniaminov、SI Kozlov 和 VV Tyurenkova。小型轨道碎片群体及其对空间活动和生态安全的影响。《宇航学报》，176:591–597，2020年。[13] Ram Jakhu。卫星电信、地球静止轨道与空间碎片的法律问题。《太空政治学》，5 (2):173–208，2007年。[14]Nodir Adilov、Peter J Alexander 和 Brendan Michael Cunningham。地球轨道碎片：一种经济模型。可在 *SSRN 2264915* 获取，2013年。[15] 空间环境统计数据，。网址 https://sdup.esoc.esa.int/discosweb/statistics/。[16]Nicholas L Johnson、JR Gabbard、GT Devere 和 EE Johnson。在轨卫星解体的历史。*NASA STI/Recon*技术报告，84:34461，1984年。[17] Daniel Hampf、Wolfgang Riede、Gabriel St¨ockle 和 Ivo Buske。低地球轨道空间碎片的地基光学位置测量。2013年。

[18] 轨道类型，。网址 https://www.esa.int/Enabling_Support/Space_Transportation/Types_of_orbits#LEO。[19]Tu Anh Tran。为 LEO 光学跟踪开发网络时间服务器。《电气工程与信息学通报》，11(3)，2022年。[20]安全世界基金会，“轨道碎片长期存在的问题”，2018年。网址https://swfound.org/space-sustainability-101/the-persistent-problem-of-orbital-debris。[21] Shaul Gordon。国际环境法原则：太空碎片问题的新解决方案？博士论文，麦吉尔大学（加拿大），2021年。[22] Loretta Hall。空间碎片的历史。2014年。[23] R.C. Reynolds。美国国家航空航天局约翰逊航天中心的轨道碎片研究，*1986-1988*年。美国国家航空航天局技术备忘录。美国国家航空航天局林登·B·约翰逊航天中心，1989年。网址 https://books.google.it/books?id=GCs2AQAAMAAJ。[24] 天体材料研究与探索科学（阿瑞斯），美国国家航空航天局轨道碎片项目办公室，。网址 https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photo-gallery/。[25] Mark Garcia。空间碎片与载人航天器，2015年4月。网址 https://www.nasa.gov/mission_pages/station/news/orbital_debris.html。[26] CC Celestino、OC Winter 和 AFB Prado。地球同步轨道高度空间碎片粒子云的轨道演化。

在 第*35*届*COSPAR*科学大会，第35卷，第3092页，2004年。[27]关于空间碎片，。网址 https://www.esa.int/Safety_Security/Space_Debris/About_space_debris。[28]网址https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv17i3.pdf。[29]撞击碎片，。网址https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/05/Impact_chip。[30] EL Christiansen、JLHyde 和RP Bernhard。太空航天器碎片和流星体撞击。《太空研究进展》，34(5):1097–1103，2004年。[31]Asa 通俗语言论文，美国声学学会第161届会议，载人居住舱航天器损伤检测系统，2011年。网址https://acoustics.org/pressroom/httpdocs/161st/Corsaro.html。[32] VladimirSAslanov。地球同步轨道中空间碎片的引力捕获。《航天器与火箭杂志》，56(4):1277–1281，2019年。[33]Hiroshi Oda、Toshifumi YANAGISAWA、HirohisaKUROSAKI和Makoto Tagawa。地球同步地球轨道中空间碎片的光学观测、图像处理和检测。第*40*届*COSPAR*科学大会，40:PEDAS–1，2014年。[34]Zhongping Zhang、Haifeng Zhang、MingLiang Long、HuarongDeng、ZhiboWu 和Wendong Meng。采用4.2 w双脉冲进行高精度空间碎片激光测距

532纳米、1千赫兹的皮秒激光器。*Optik*，179:691–699，2019年。[35] Brian Tarran。准备迎接撞击：空间碎片与统计学。*Significance*，18(3):18–23，2021年。[36] 超高速撞击样本（欧洲航天局（自动转移飞行器）），。URL https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2009/02/Hypervelocity_impact_sample。[37] 撞击测试后的自动转移飞行器防护罩，2014年6月。URL https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2014/06/ATV_shielding_after_impact_test#.Y9ergHXRXCw.link。[38] A.P.Pedrick。使用磁线圈产生周期性施加的力，以维持物体和车辆的高速运动，尤其是在抽空空气的管道中。英国专利文件1426580/B/，1976年3月。URL http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:07264115。[39] CynthiaABelk。流星体和轨道碎片：对航天器的影响，第1408卷。美国国家航空航天局，马歇尔航天飞行中心，1997年。[40] 美国国家研究委员会。《轨道碎片：技术评估》。美国国家科学院出版社，华盛顿哥伦比亚特区，1995年。ISBN978-0-309-05125-5。doi: 10.17226/4765。URL https://nap.nationalacademies.org/catalog/4765/orbital-debris-a-technical-assessment。[41]碎片如何袭击国际空间站，。URL https://masterok.livejournal.com/4194820.html。

[42]天体材料研究与探索科学（阿瑞斯），美国国家航空航天局轨道碎片项目办公室，。网址 https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/modeling/legend.html.[43] Fran¸cois LaPorte 和 Eloy Sasot。在*SpaceOps2008 Conference*上发表《法国国家空间研究中心 LEO 卫星碰撞风险的运行管理》，第 3409 页，2008 年。[44] T Payne。首次“确认”的两颗编目卫星之间的自然碰撞。在第二届欧洲空间碎片会议上发表，第 393 卷，第 597 页，1997 年。[45] Liina Kamm 和 Jan Willemson。安全浮点运算与私密卫星碰撞分析。国际信息安全杂志，14(6):531–548，2015年。[46]Denis Arzelier、Florent Br´ehard、Mioara Joldes、Jean-Bernard Lasserre 和 Aude Rondepierre。严谨推导 *Coppola* 公式：计算空间物体之间的碰撞概率。博士论文，LAAS-CNRS，2020年。[47]Ram S Jakhu。铱星-宇宙号碰撞及其对太空运行的影响。载于《*2008/2009* 年太空政策年鉴》，第 254–275 页。施普林格，2010 年。[48] Martha Mej´ıa-Kaiser。碰撞之路：2009 年铱星-宇宙号相撞事件。载于第 *52* 届国际空间法学会外层空间法律研讨会论文集，韩国大田，2009 年。[49] Steven A Hildreth 和 Allison Arnold。太空中的美国国家安全利益面临的威胁：轨道碎片减缓

和清除。美国国会图书馆 华盛顿特区 国会研究服务处，2014年。[50] TS Kelso 和 Adam Gorski。空间监视：从铱星-宇宙号碰撞中吸取的经验。载于 *Analytical Graphics Inc.* 韩国：国际宇航大会，2009年。[51] Riccardo Benvenuto、Samuele Salvi 和 Mich`ele Lavagna。空间碎片主动清除中柔性系统的动力学分析与制导、导航与控制设计。《宇航学报》，110:247–265，2015年。[52] Shin-Ichiro Nishida 和 Satomi Kawamoto。翻滚空间碎片捕获策略。《宇航学报》，68(1-2):113–120，2011年。[53] Eleonora M Botta、Inna Sharf 和 AK Misra。多种任务场景下空间碎片网捕的评估。载于第*26*届*AAS/AIAA*航天飞行力学会议，加利福尼亚州纳帕，第16–254页。AAS，2016。[54] Minghe Shan 和 Lingling Shi。通过系绳张力对翻滚空间碎片进行捕获后控制。《宇航学报》，180:317–327，2021年。[55] Jaime Reed 和 Simon Barraclough。用于捕获空间碎片的鱼叉系统开发。载于第*6*届欧洲空间碎片会议，第723卷，第174页，2013年。[56] Joana Ramos Ribeiro、Luciele Cristina Pelicioni、Ilmo Caldas、Carlos Lahoz 和 Mischel Carmen Neyra Belderrain。

基于文献计量和专利分析的空间碎片减缓政策与技术演进。《太空政策》，44:40–56，2018 年。

[57]翟光和张景瑞。用于捕获和清除碎片的空间系绳网系统。载于*2012*年第四届智能人机系统与控制论国际会议，第1卷，第257–261页。IEEE，2012年。

[58] Vera I Mayorova、GeorgyA Shcheglov 和 Mihail VStog- nii。由伸缩式机械臂处理的空间碎片物体喷嘴捕获动力学分析。《航天学报》，187：259–270，2021年。

[59] ErjiangLiu、YeYan 和Yueneng Yang。基于可达域的空间碎片清除捕获区域分析与确定。《空间研究进展》，2021年。[60] S Nishida、Daisuke Uenaka、Ryota Matsumoto和Shin-taro Nakatani。用于捕获大型空间碎片的轻型机械臂。《电气工程学报》，6(5):271–280，2018年。[61] Minghe Shan、Jian Guo和 Eberhard Gill。空间碎片主动捕获与清除方法的综述和比较。《航空航天科学进展》，80:18–32，2016。[62] VinodSaini和Rajaraman Ganesh。用于空间碎片清除的双向等离子体推进器数值模拟。《等离子体物理学报》，88(2)，2022年。[63] Kazunori Takahashi、Christine Charles、Rod W Boswell 和 Akira Ando。展示一项新技术

用于空间碎片清除的双向等离子体推进器。科学报告，8(1):1–10，2018年。

[64] Claude R Phipps, Kevin L Baker, Stephen B Libby, Du- ane A Liedahl, Scot S Olivier, Lyn D Pleasance, Alexan- der Rubenchik, James E Trebes, E Victor George, Bogdan Marcovici 等。利用激光清除轨道碎片。《空间研究进展》，49(9):1283–1300，2012。

[65]Trevor Bennett 和 Hanspeter Schaub。通过无接触静电方式对轴对称地球同步轨道物体进行消旋，并采用标称推送或拉拽。《空间研究进展》，62(11):2977–2987，2018。ISSN 0273-1177。doi: https://doi.org/10.1016/j.asr.2018.07. 021。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117718305830。

[66] Edward T Lu 和 Stanley G Love。用于拖曳小行星的引力牵引器。《自然》，438(7065):177–178，2005。

[67]Naomi Murdoch、Dario Izzo、Claudio Bombardelli、Ian Carnelli、Alain Hilgers 和 David Rodgers。《用于近地天体偏转的静电牵引器》。载于第*59*届国际宇航大会，第29卷，2008年。

[68] Claudio Bombardelli 和 Jesus Pelaez。用于小行星偏转的离子束牧者。《制导、控制与动力学》，34(4):1270–1272，2011年。doi: 10.2514/1.51640。[69] M Bengtson、K Wilson、J Hughes 和 H Schaub。静电牵引器用于使被动地球同步轨道空间物体变轨的研究综述。《天体动力学》，2(4):291–305，2018年。

[70] Hanspeter Schaub 和 Daniel F Moorer。地球同步轨道大型碎片变轨器：挑战与前景。《宇航科学杂志》，59(1-2):161–176，2012年。[71]Hanspeter Schaub 和 Zolt´an Sternovsky。用于非接触式静电清除操作的主动空间碎片充电。《空间研究进展》，53(1):110–118，2014年。doi: 10.1016/j.asr.2013.10.003。[72] Wigbert Fehse。与轨道上非合作物体交会并对其进行捕获／清除：技术挑战。《空间安全工程杂志》，1(1):17–27，2014年。[73]Chris Blackerby、Akira Okamoto、Y Kobayashi、K Fuji-moto、Y Seto、S Fujita、T Iwai、N Okada、J Forshaw、J Auburn 等。ELSA-d 寿命终止阶段碎片清除任务：为发射做准备。载于第*70*届国际宇航大会，2019年。[74] R Biesbroek。并行设计设施中的 e.deorbit 研究。载于清洁太空：研讨会，达姆施塔特，2012年。[75]Dong HAN、Gangqi DONG、Panfeng HUANG 和 Zhiqing MA。双臂空间机器人主动清除空间碎片的捕获与消旋控制。《中国航空学报》，2021年。ISSN 1000-9361。doi: https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.10.008。URL `https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936121003708`.[76] Angel Flores-Abad、Ou Ma、Khanh Pham 和 Steve Ulrich。用于在轨服务的空间机器人技术综述。《航空航天科学进展》，68:1–26，2014年。

[77] Zhuoman Wen、Yanjie Wang、Arjan Kuijper、Nan Di、Jun Luo、Lei Zhang 和 Minghe Jin。复杂背景下在轨实时鲁棒协同目标识别。《航空学报》，28(5):1451–1463，2015年。ISSN 1000-9361。doi: https://doi.org/10.1016/j.cja. 2015.08.006。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936115001533。

[78] Minghe Shan、Jian Guo 和 Eberhard Gill。使用网捕获空间碎片的接触动力学模型。《宇航学报》，158:198–205，2019年。

[79]Pavel M Trivailo 和 Hirohisa Kojima。网系统动力学：捕获空间碎片。《日本航空航天技术》，14(ists30):Pr 57–Pr 66，2016。

[80] Minghe Shan、Jian Guo 和 Eberhard Gill。用于空间碎片清除的系绳网部署动力学。《宇航学报》，132:293–302，2017年。[81] Roger Dudziak、Sean Tuttle 和 Simon Barraclough。用于空间碎片主动清除的鱼叉技术开发。《空间研究进展》，56(3):509–527，2015年。[82]C Billot、S Ferraris、R Rembala、F Cacciatore、A Tomassini 和 R Biesbroek。e. deorbit：主动空间碎片清除可行性研究。载于第三届欧洲空间碎片建模与修复研讨会，法国巴黎，法国国家空间研究中心，2014年。

[83] Jason Forshaw、Guglielmo Aglietti、Thierry Salmon、Ingo Retat、Christopher Burgess、Thomas Chabot、Aur´elien Pisseloup、Andy Phipps、Cesar Bernal、Alexandre Pollini 等。RemoveDEBRIS ADR任务：为从国际空间站发射做准备。载于第七届欧洲空间碎片会议，2017年。

[84] J Reed、J Busquets 和 C White。用于捕获大型空间碎片的抓捕系统。载于第二届欧洲主动空间碎片清除研讨会，第 18–19 页。法国国家空间研究中心，法国巴黎，2012年。[85]Christophe Bonnal、Jean-Marc Ruault 和 Marie-Christine Desjean。主动空间碎片清除：最新进展与当前趋势。《宇航学报》，85：51–60，2013年。[86] Cheng Jia、Zhongjie Meng 和 Panfeng Huang。执行器和动力学不确定性下系绳拖曳碎片的姿态控制。《空间研究进展》，64(6)：1286–1297，2019年。[87]Jason L Forshaw、Guglielmo S Aglietti、Simon Fellowes、Thierry Salmon、Ingo Retat、Alexander Hall、Thomas C habot、Aur´elien Pisseloup、Daniel Tye、Cesar Bernal 等。主动空间碎片清除任务 RemoveDebris。第一部分：从概念到发射。《宇航学报》，168：293–309，2020年。[88]Astroscale 的 ELSA-d 成功演示了重复磁捕获，2021年8月。网址https://astroscale.com/astroscales-elsa-d-successfully-demonstrates-repeated-magnetic-

[89]欧洲航天局委托开展全球首个空间碎片清除项目，。URLhttps://www.esa.int/Safety_Security/Clean_Space/ESA_commissions_world_s_first_space_debris_removal。[90] Stijn Lemmens 和 Francesca Letizia。《欧洲航天局年度空间环境报告》。技术报告，技术报告编号 GEN-DB-LOG-00288-OPS-SD，欧洲航天局空间碎片办公室，2020年。[91] Jan F Busche、Gereon Starke、Saskia Knickmeier 和 Andreas Dietzel。基于双光子聚合与复制模塑的可控干式黏附技术，用于清除空间碎片。微纳工程，7：100052，2020年。[92] Hugh G Lewis、Graham G Swinerd、Rebecca J Newland 和 Arrun Saunders。利用损伤方式主动清除在轨碎片的研究。载于第五届欧洲空间碎片会议论文集，德国达姆施塔特，*2009*年*3*月*30*日至*4*月*2*日，2009年。[93]欧洲航天局年度空间环境报告。欧洲航天局，2022年4月。URL https://www.sdo.esoc.esa.int/environment_report/Space_Environment_Report_latest.pdf。[94]轨道碎片。美国国家航空航天局（*NASA*）季度新闻，第26期，2022年3月。URLhttps://www.orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv26i1.pdf。[95]轨道碎片。美国国家航空航天局（*NASA*）季度新闻，第25期，2月

2021年。URLhttps://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/odqnv25i1.pdf.[96]天体材料研究与探索科学。美国国家航空航天局轨道碎片项目办公室，2019年1月。URL https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/photo-gallery/.[97] URL https://discosweb.esoc.esa.int/.[98] S. a. i. c.（无日期）。track.org。太空。检索于2022年6月29日，。URL https://space-track.org/auth/login.[99]阿瑞斯，。URL https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/mitigation/.[100]Alex Ellery。空间碎片减缓用空间机械臂教程综述。机器人学，8(2):34，2019年。[101]H Klinkrad、P Beltrami、S Hauptmann、C Martin、H Sdunnus、H Stokes、R Walker 和 J Wilkinson。欧洲航天局2002年空间碎片减缓手册。太空研究进展，34(5):1251–1259，2004年。ISSN 0273-1177。doi: https://doi.org/10.1016/j.asr.2003.01.018。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117704001061。空间碎片。[102]Barren S McKnigh。解体初始条件的确定。《航天器与火箭杂志》，28(4):470–477，1991年。[103]Lourens Visagie、Vaios Lappas 和 Sven Erb。用于空间碎片减缓的阻力帆。宇航学报，109:65–75，2015年。ISSN 0094-5765。doi: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2014.12.013。URL

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576514005190。

[104]Sonja Caldwell. 13.0 离轨系统，2021年10月。网址 https://www.nasa.gov/smallsat-institute/sst-soa/deorbit-systems.[105]Zaria Serfontein、Jennifer Kingston、Stephen Hobbs、Ian E. Holbrough 和 James C. Beck。用于空间碎片减缓的阻力增强系统。《宇航学报》，188:278–288，2021年。ISSN 0094- 5765。doi: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.05. 038。网址 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576521002757.[106] Zaria Serfontein、Jennifer Kingston、Stephen Hobbs、Ian E Holbrough 和 James C Beck。用于空间碎片减缓的阻力增强系 统。《宇航学报》，188: 278–288，2021年。[107] Shuang Li 和 Yuchen She。组合航天器接触动力学与捕获后控制的最新进展。《航空航天科学进展》，120:100678，2021年。[108] Juergen Telaar、Stephane Estable、Marco De Stefano、Wolfgang Rackl、Roberto Lampariello、Finn Ankersen 和 J Gil Fernandez。E. Deorbit 任务中追踪器平台与机械臂的耦合控制。载于第十届欧洲航天局制导、导航与控制系统国际会议（*GNC*），*2017*年*5*月，2017年。[109] Bernd Bischof。Roger——地球静止轨道恢复器。载于第*54*届国际宇航大会

国际宇航联合会、国际宇航科学院和国际空间法研究所，第 IAA–5 页，2003年。

[110]Nicholas Zinner、Austin Williamson、Kristen Brenner、John Curran、Ahna Isaak、Matthew Knoch、Adam Lep- pek 和 Jenae Lestishen。太空垃圾猎手：轨道碎片的自主交会、捕获与离轨。载于*AIAA SPACE 2011*会议暨展览会，第7292页，2011年。

[111]Charles M. Barnes 和 Eleonora M. Botta。《空间碎片网捕质量指数》。《宇航学报》，176:455–463，2020年。ISSN 0094-5765。doi：https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2020.06. 044。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576520304100。

[112]Guglielmo S. Aglietti、Ben Taylor、Simon Fellowes、Thierry Salmon、Ingo Retat、Alexander Hall、Thomas Chabot、Aur´elien Pisseloup、C. Cox、Zarkesh A.、A. Maf- ficini、N. Vinkoff、K. Bashford、Cesar Bernal、Fran¸cois Chaumette、Alexandre Pollini 和 Willem H. Steyn。主动空间碎片清除任务 RemoveDEBRIS。第二部分：在轨操作。《宇航学报》，168:310–322，2020年。ISSN 0094-5765。doi：https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2019.09.001。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576519312500。

[113]用于空间碎片清除的网的柔性建模分析。《太空研究进展》，65(3):1083–1094，2020年。ISSN 0273-1177。doi: https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.10.041。URL

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273117719307914.[114] Kevin Stadnyk 和 Steve Ulrich。验证一种新型系绳设计在基于网的轨道碎片清除任务中的部署。在*AIAA Scitech 2020* 论坛，第 0719 页，2020年。[115]Minghe Shan、Jian Guo 和 Eberhard Gill。用于空间碎片清除的系绳网部署动力学。《宇航学报》，132:293–302，2017。ISSN 0094-5765。doi: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.01.001。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576516309961.[116] Ahmed Shabana。多体系统动力学。剑桥大学出版社，2020年。[117] A Recuero 和 D Negrut。Chrono 对 ANCF有限元的支持: formulation 与验证方面。技术报告，2016。[118]Panfeng Huang、Fan Zhang、Lu Chen、Zhongjie Meng、Yizhai Zhang、Zhengxiong Liu 和 Yongxin Hu。空间系绳在新应用中的综述。《非线性动力学》，94(1):1–19，2018。[119] Euiyoung Kim 和 Maenghyo Cho。基于逐单元刚度评估流程的 ANCF 梁单元平面多体动力学系统设计。《结构与多学科优化》，58 (3):1095–1107，2018。

[120]A Cemal Eringen. 连续介质力学。亨廷顿，1980年。[121] Man Ru、Ying Zhan、Bin Cheng 和 Yu Zhang。用于清除空间碎片的柔性网捕获动力学与控制。《航空航天》，9(6):299，2022年。[122]Minghe Shan、Jian Guo 和 Eberhard Gill。使用网捕获空间碎片的接触动力学模型。《宇航学报》，158:198–205，2019年。ISSN 0094-5765。doi: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2017.12.009。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576517311979。[123] Minghe Shan、Jian Guo 和 Eberhard Gill。翻滚空间碎片网捕获的接触动力学。制导、控制与动力学杂志，41(9):2063–2072，2018年。[124] Minghe Shan、Jian Guo 和 Eberhard Gill。翻滚空间碎片网捕获的接触动力学。制导、控制与动力学杂志，41(9):2063–2072，2018年。doi: 10.2514/1.G003460。URL https://doi.org/10.2514/1.G003460。[125] Brian Vincent Mirtich。刚体系统的基于冲量的动力学仿真。加州大学伯克利分校，1996年。[126] Jiyue Si、Zhaojun Pang、Zhonghua Du 和 Jie Fu。系绳网捕获用收网机构的动力学建模与仿真。《国际航空航天工程杂志》，2021年，2021年。

[127] Boting Xu、Yueneng Yang、Bin Zhang、Ye Yan 和 Zhiy- ong Yi。《空间柔性网捕获系统的仿生设计与实验研究》。《IEEE Access》，8:45411–45420，2020年。

[128] Eleonora M. Botta、Inna Sharf 和 Arun K. Misra。用于捕获空间碎片和小型小行星的系绳网仿真。《宇航学报》，155:448–461，2019年。ISSN 0094-5765。doi: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.07.046。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576518303953。

[129]Inna Sharf、Benjamin Thomsen、Eleonora M Botta 和 Arun K Misra。用于系绳网捕获空间碎片的网闭合机构的实验与仿真。《宇航学报》，139:332–343，2017年。

[130]Wojciech Golebiowski、Rafal Michalczyk、Michal Dyrek、Umberto Battista 和 Kjetil Wormes。经过验证的网式空间碎片清除仿真器及其他柔性系绳应用。《宇航学报》，129:229–240，2016。ISSN 0094-5765。doi: https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2016.08.037。URL https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S009457651630008X。

[131]联合国外层空间和平利用委员会《空间碎片减缓指南》。联合国外层空间事务厅，2010年。

[132]美国政府轨道碎片减缓标准实践——11月22日.....（无日期）。检索于2022年6月10日，来源：URL https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/

library/usg_orbital_debris_mitigation_standard_practices_november_2019.pdf.[133] Michael R Migaud。《保护地球轨道环境：应对空间碎片的政策工具》。《太空政策》，52：101361，2020年。[134]2002年第二季度f——联邦航空管理局。（无日期）。检索于2022年6月10日，来源：URL https://www.faa.gov/about/office_org/headquarters_offices/ast/media/q22002.pdf.[135] K Kensinger、S Duall 和 S Persaud。《美国联邦通信委员会关于轨道碎片减缓的法规》。载于《第四届欧洲空间碎片会议论文集》，第18–20页，2005年。[136] Heiner Klinkrad 和 Nicholas L Johnson。《空间碎片环境修复概念》。载于《*NASA-DARPA* 轨道碎片清除国际会议，弗吉尼亚州尚蒂伊》，第8–10页，2009年。[137]W. Flury 和 J. M Contant。《IAA 关于轨道碎片的立场文件更新版》。载于《第三届欧洲空间碎片会议》，2001年。[138]Karl-Heinz B¨ockstiegel 和 Marietta Benk¨o。《空间法：基本法律文件》，第1卷。Eleven International Publishing，1990年。[139] Christophe Bonnal。《碎片减缓要求》。载于《*II SL-ECSL* 空间法研讨会》，2014年。

[140] Mohsen Abdollahi 和 Seyed Mohamad Hoseini. 国家对空间碎片造成损害的国际责任及其争端解决机制。公法研究季刊，45(4):533–562，2016。

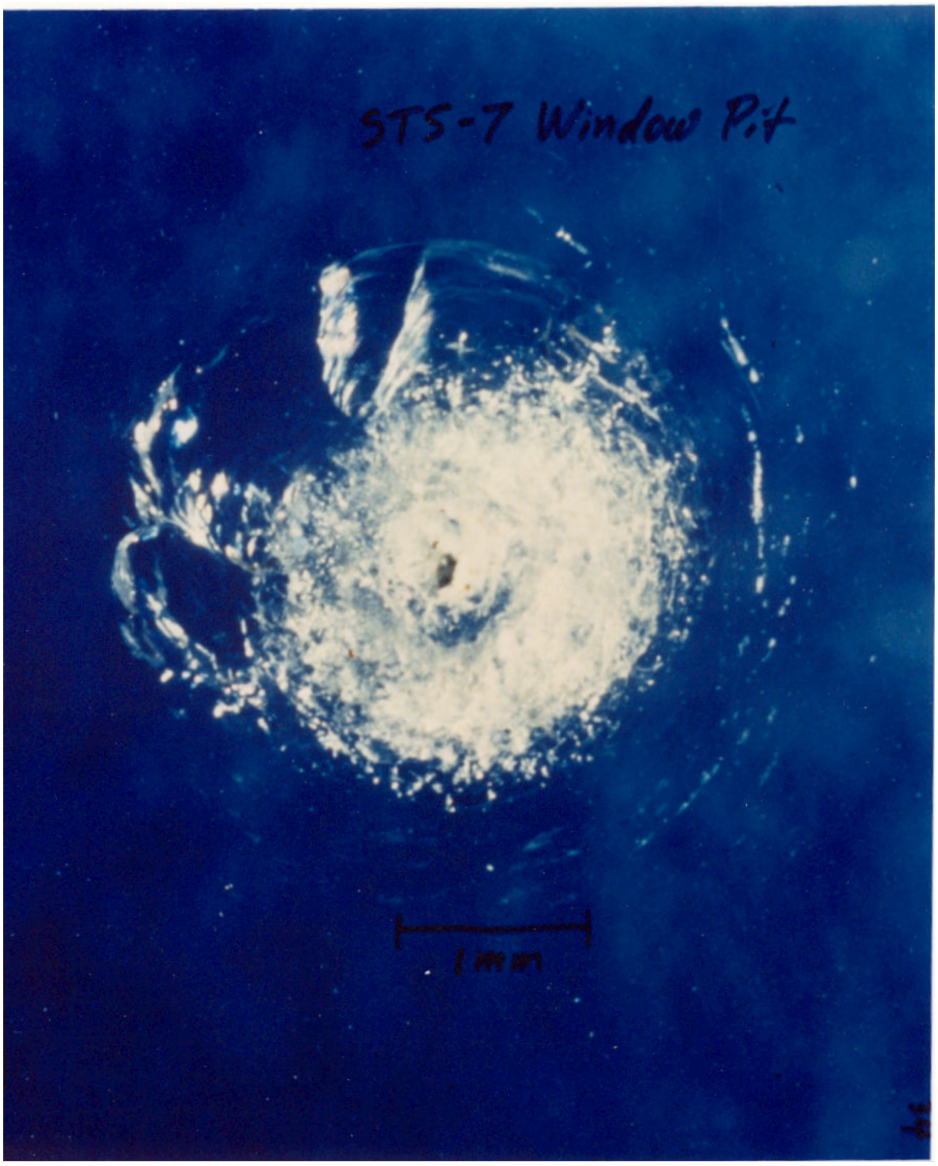

图 1：200 微米油漆剥落物对 STS-7 舷窗造成的损坏。图片来源：美国国家航空航天局 [24]。



图 2：国际空间站的电源线因碎片碰撞而受损 [31]。

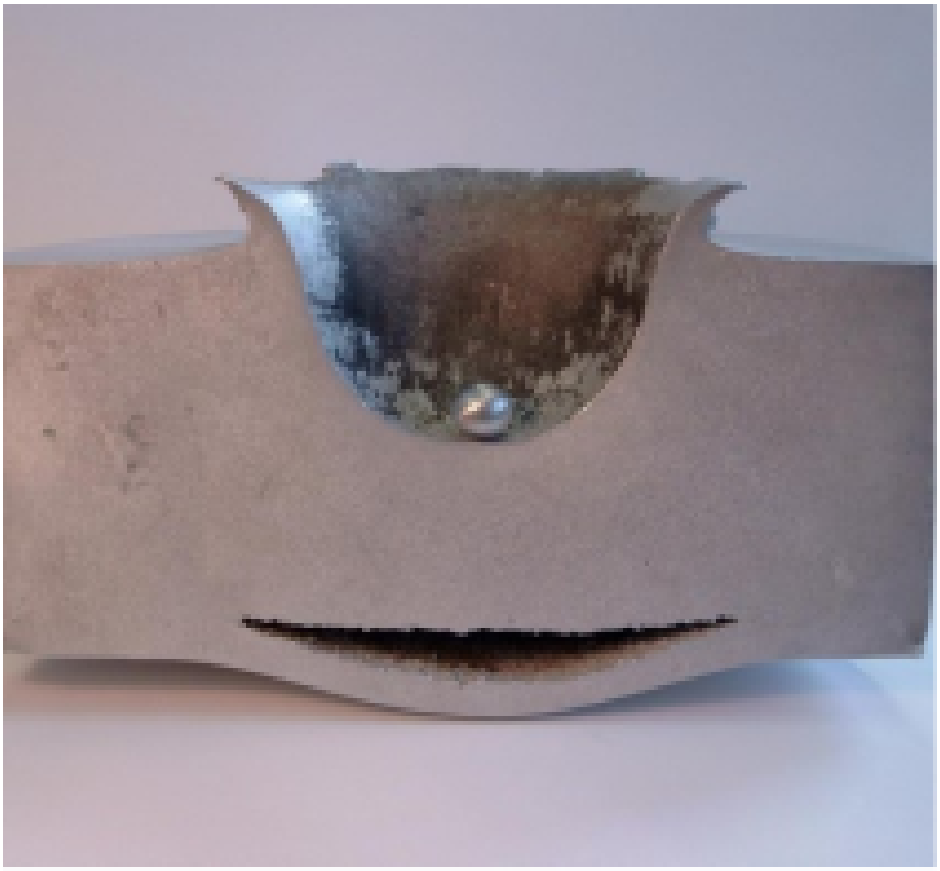

图 3：铝制小球与铝块碰撞造成的损伤。图片来源：欧洲航天局照片[36]。

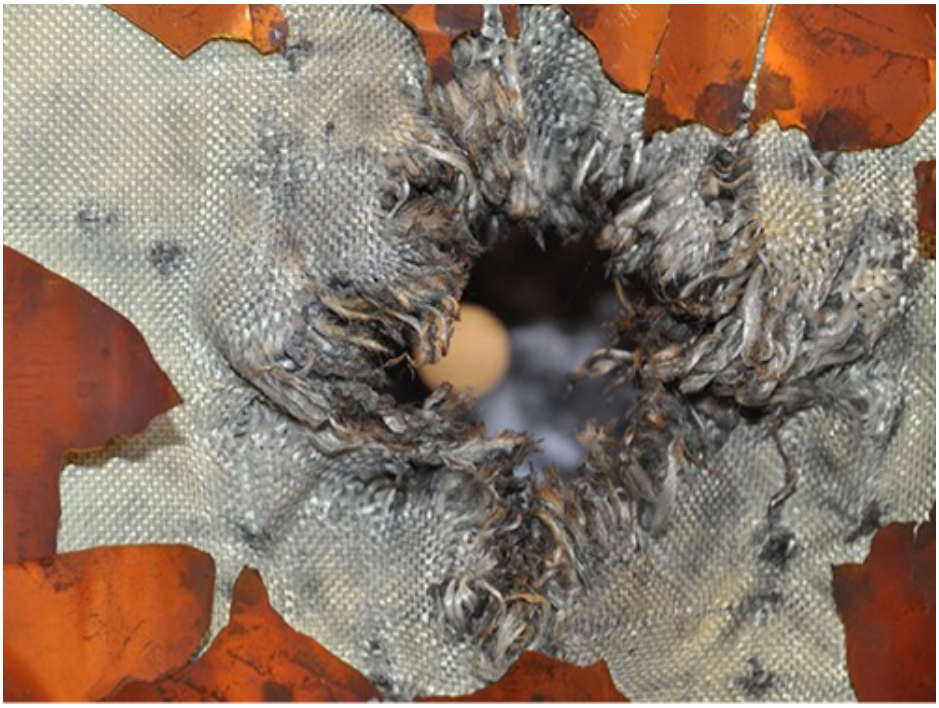

图4：测试显示子弹撞击自动转移飞行器的 Kevlar-Nextel 织物造成的损伤。图片来源：ESA 照片 [37]。

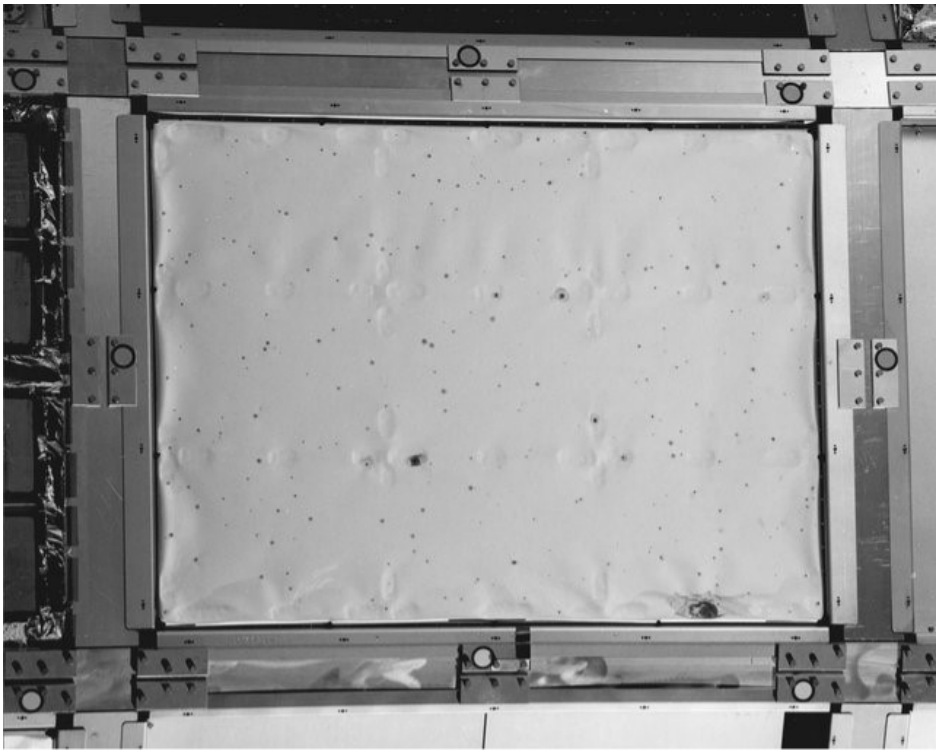

图 5：微小物体撞击“LDEF”上的银色特氟龙毯所造成的影响。图片来源：美国国家航空航天局约翰逊航天中心 [24]。

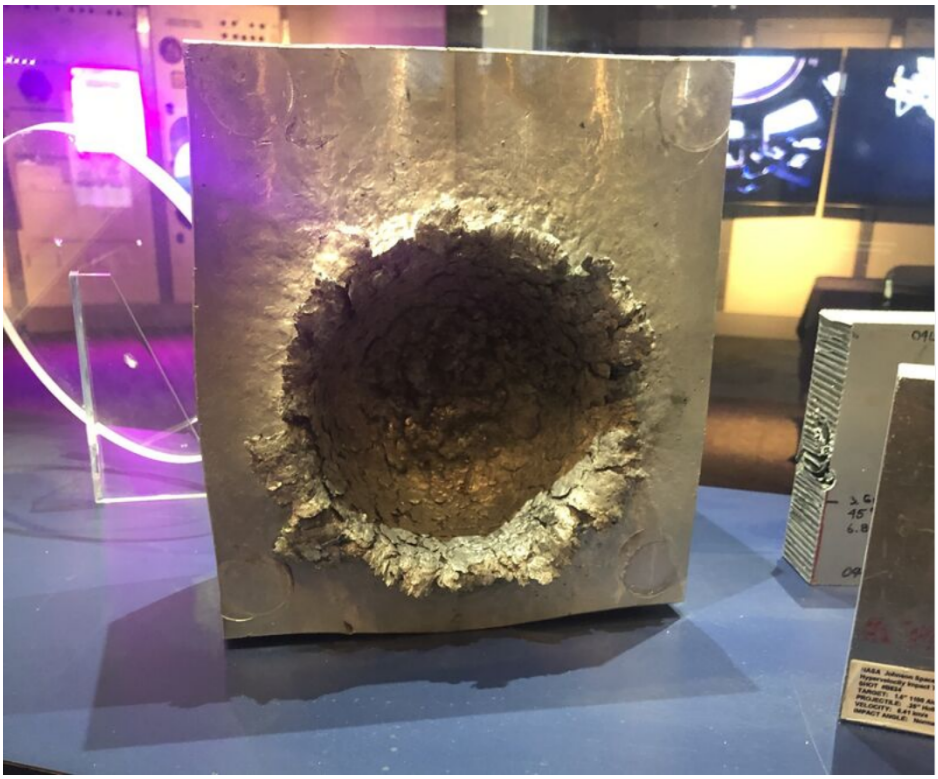

图6：一个1英寸、半盎司重的塑料圆柱体在轨道中与一块4英寸厚的铝块相撞，形成了一个撞击坑。来源：美国国家航空航天局[41]。

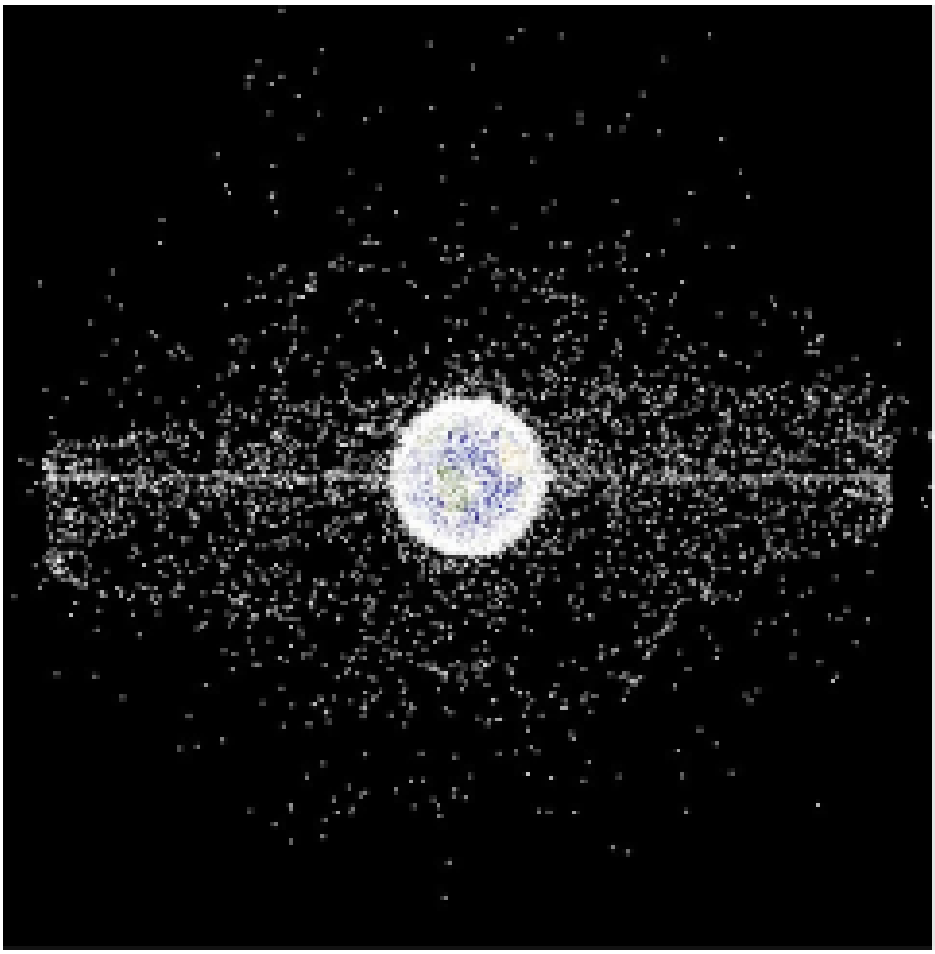

图 7：LEO 和地球同步轨道上的碎片数量。图片来源：NASA ODPO[42]。

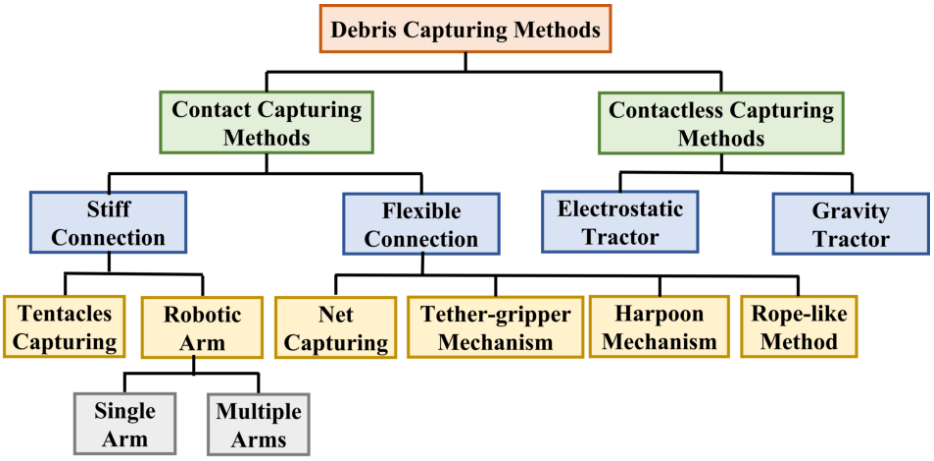

图 8：空间碎片捕获方法。改编自《航空航天科学进展》第 80 卷，Minghe Shan、Jian Guo 和 Eberhard Gill，《空间碎片主动捕获与清除方法的综述和比较》，第 18–32 页。版权所有 (2016)，经爱思唯尔许可。 [61]。

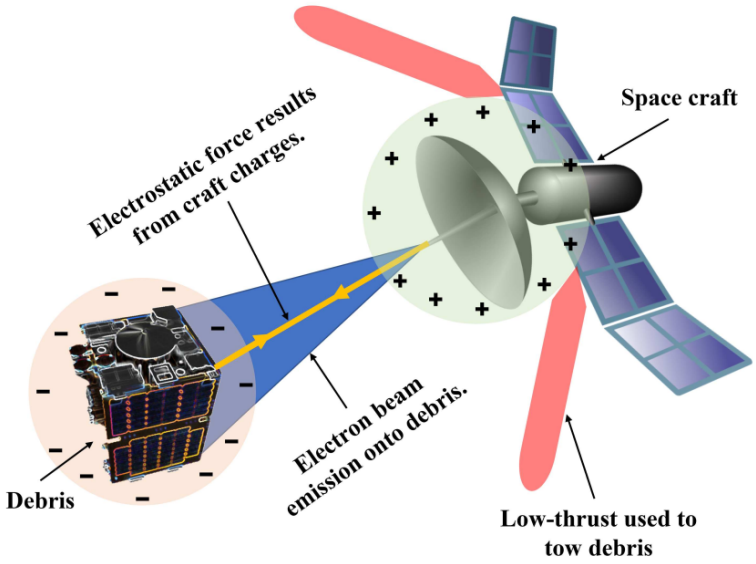

图 9：清除空间碎片的非接触式方法示意图。改编自《空间研究进展》第 62 卷，Trevor Bennett 和 Hanspeter Schaub，《通过标称推送或拉拽对轴对称地球同步轨道物体进行非接触式静电消旋》，第 2977–2987 页。版权所有 (2018)，经爱思唯尔许可。 [65]。

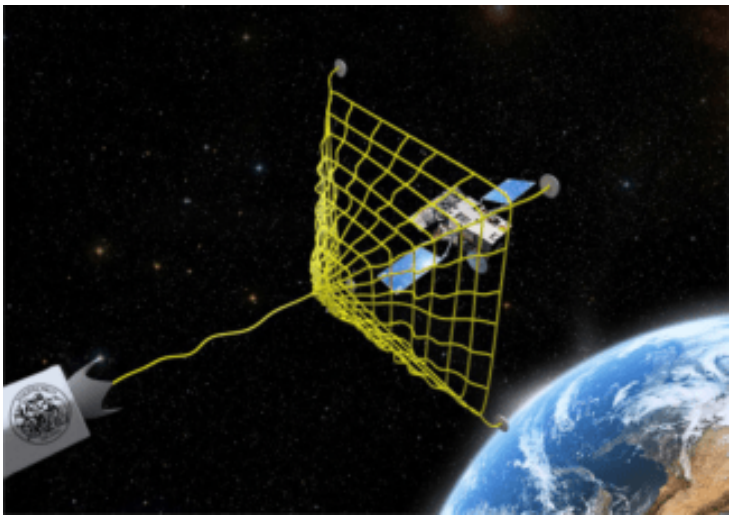

图10：使用系绳网清除空间碎片的接触捕获方法示意图。”转载自《宇航学报》第110卷，Riccardo Benvenuto、Samuele Salvi 和 Mich`ele Lavagna，《空间碎片主动清除中柔性系统的动力学分析与制导、导航与控制设计》，第247–265页，版权所有（2015年），经爱思唯尔许可”[51]。

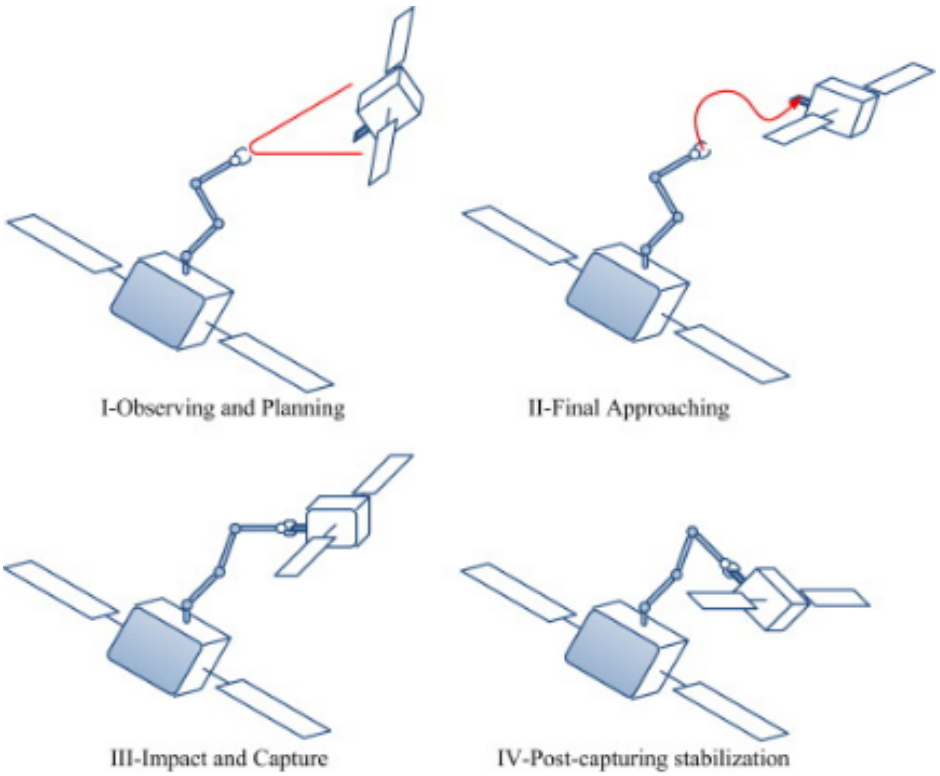

图 11：展示机械臂捕获机制的步骤。“转载自《航空航天科学进展》第 68 卷，Angel Flores-Abad、Ou Ma、Khanh Pham 和 Steve Ulrich，《在轨服务的太空机器人技术综述》，第 1–26 页，版权归属（2014），经爱思唯尔许可”[76]。

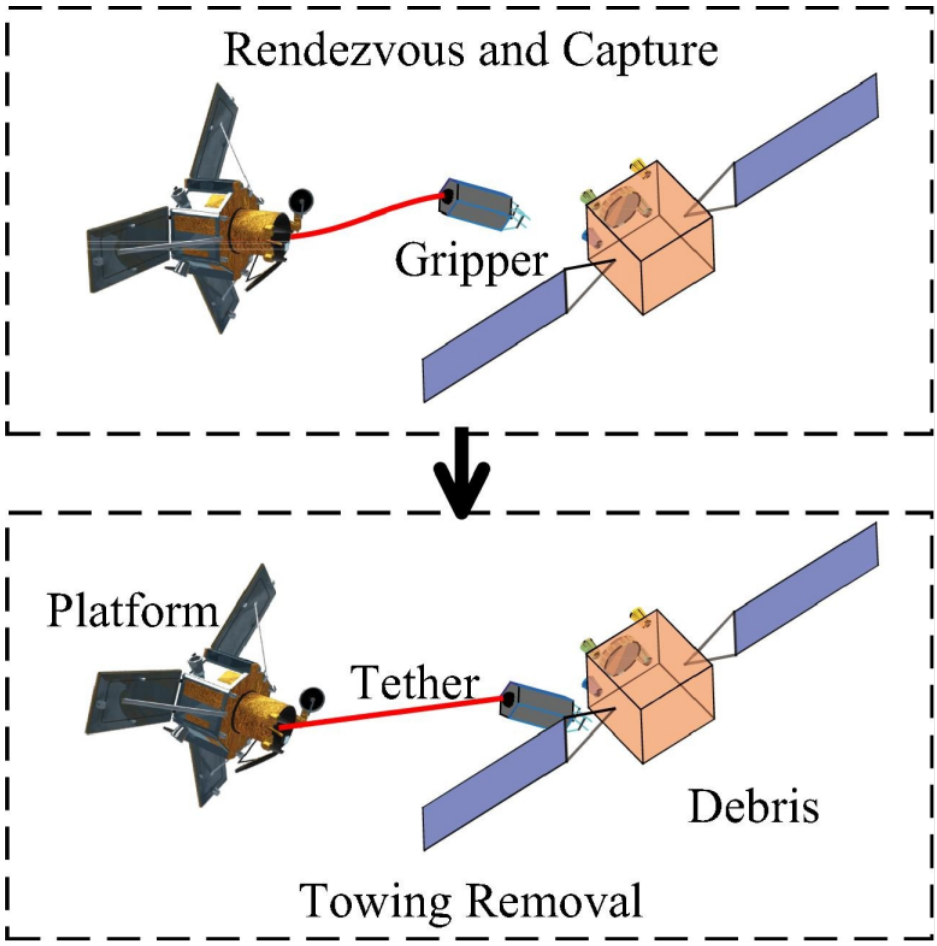

图12：系绳式抓取器碎片捕获与清除机构示意图。 ”转载自《空间研究进展》第64卷第6期，Cheng Jia、Zhongjie Meng 和 Panfeng Huang，《执行器和动力学不确定性条件下系绳拖曳碎片的姿态控制》，1286–1297页，版权所有（2019年），经爱思唯尔许可”[86]。

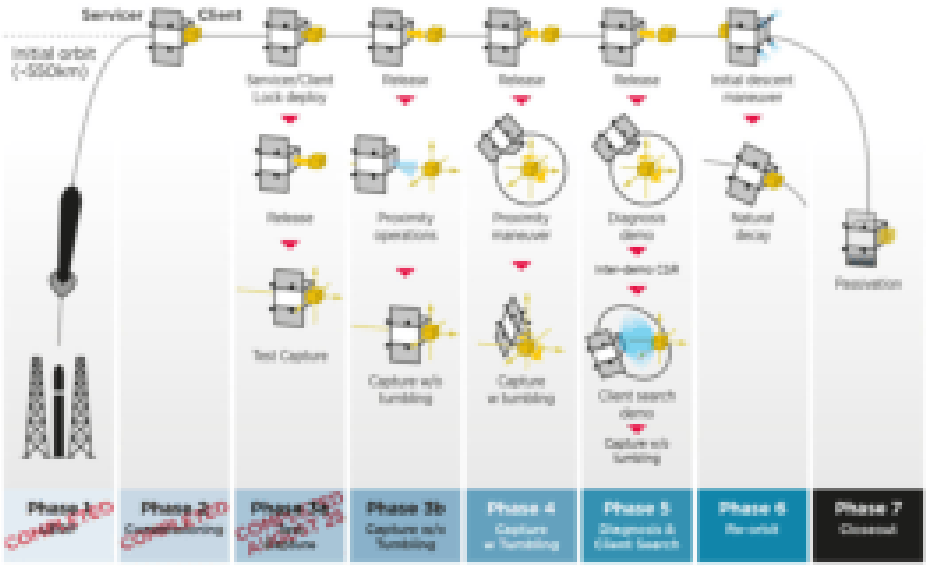

图 13：展示 ELSA-d [88] 测试阶段的示意图。

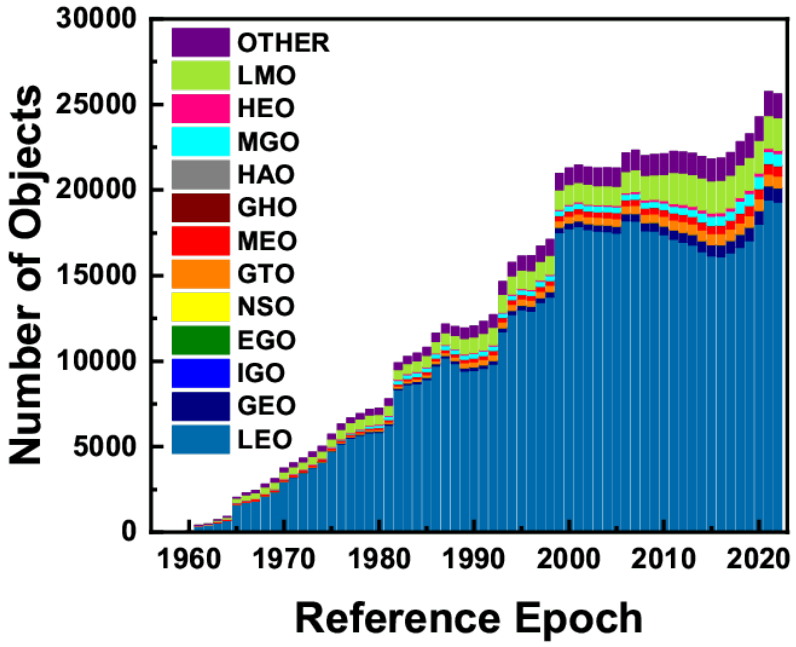

图 14：轨道中的物体数量的变化。

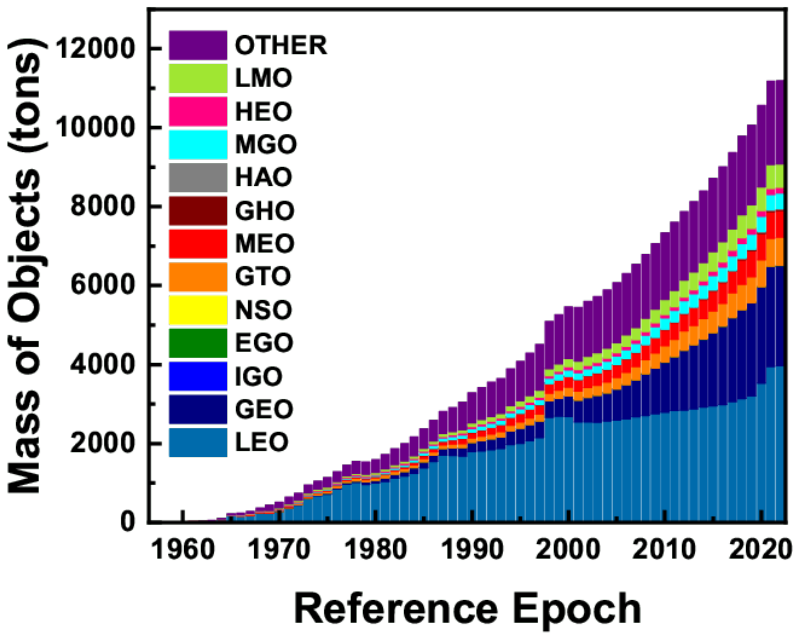

图 15：地球轨道中物体质量的演变[93]。

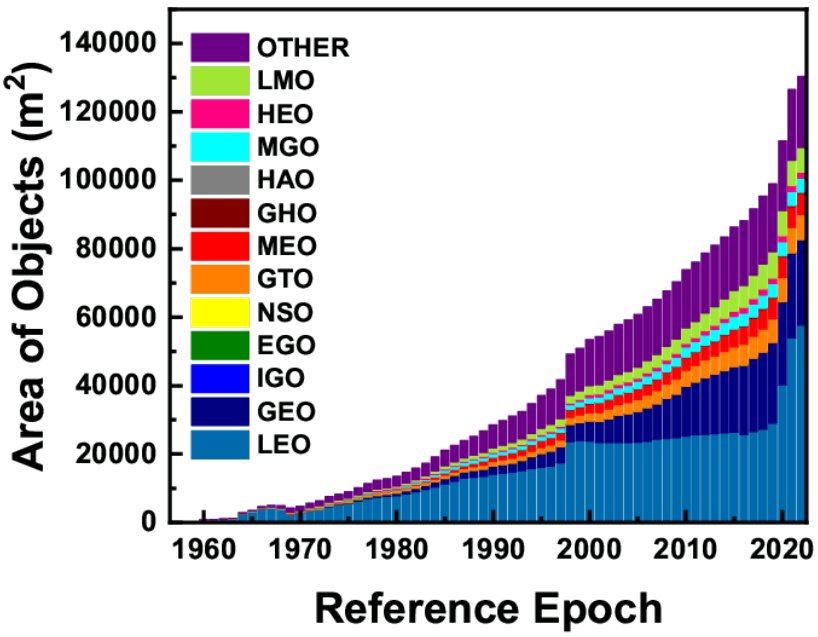

图 16：欧洲航天局报告的地球轨道面积演变[93]。

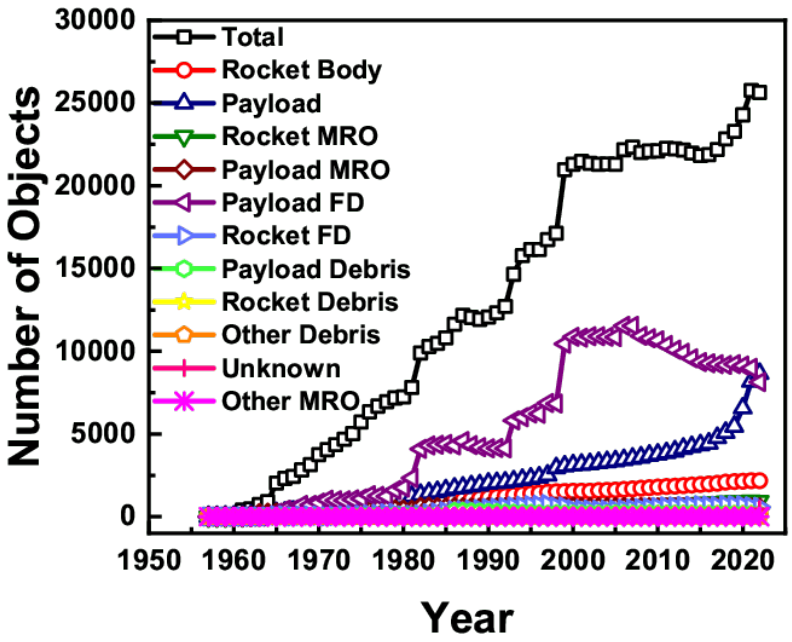

图17：轨道上编目物体的月度数量。此处，MRO 和 FD 分别代表“任务相关物体”和“碎片残骸”[94]。

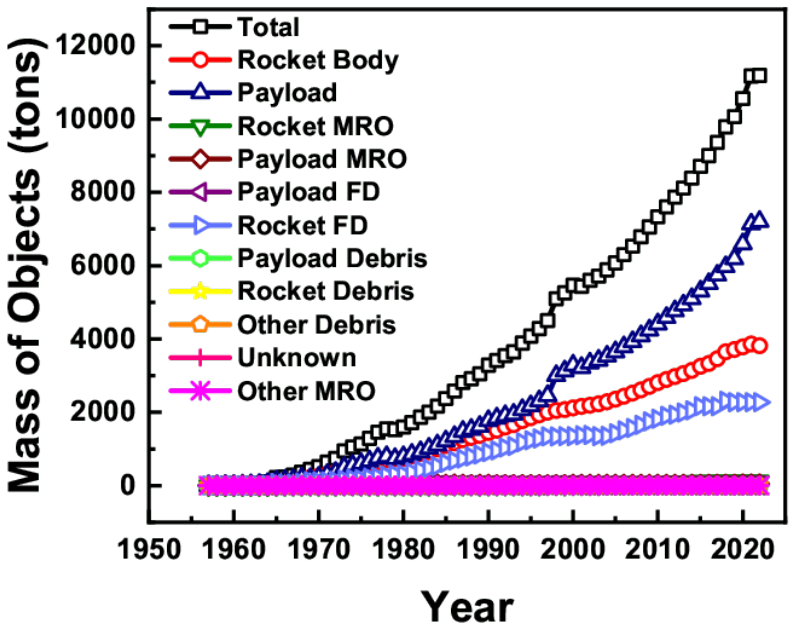

图18：美国国家航空航天局[95]按物体类型统计的轨道物体月质量，统计截至2021年。

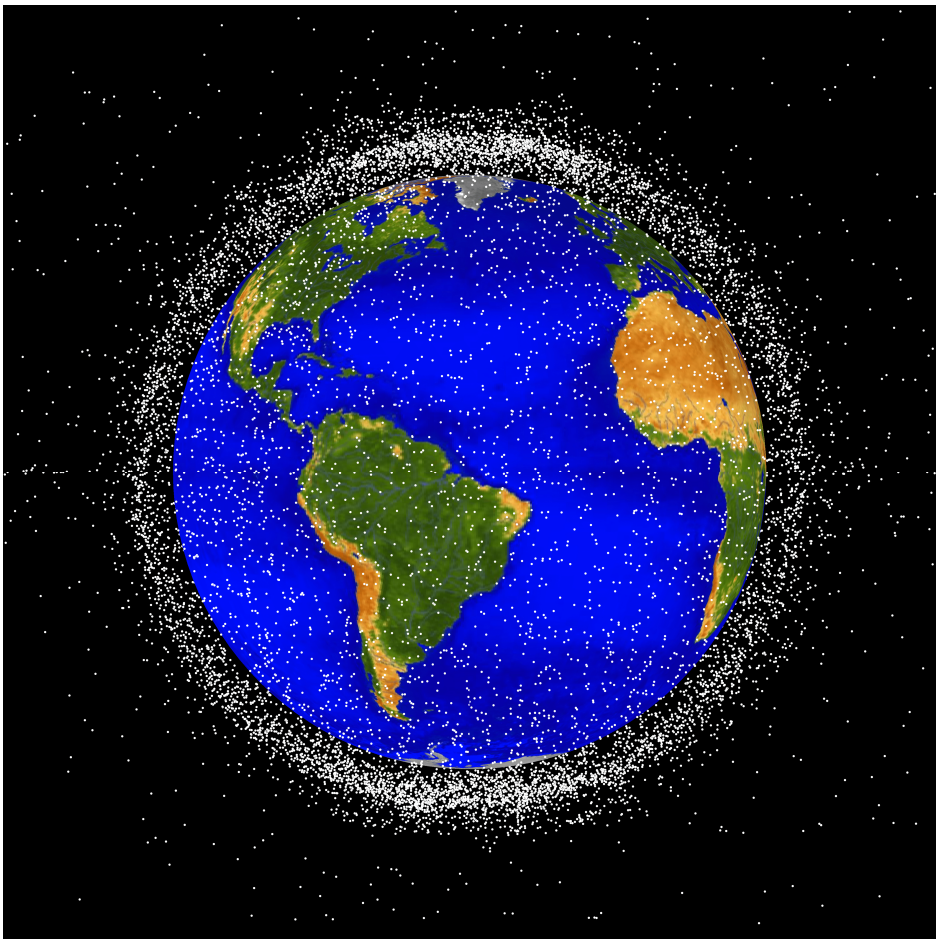

图19：低地球轨道中存在的物体示意图（致谢：美国国家航空航天局）[96]。

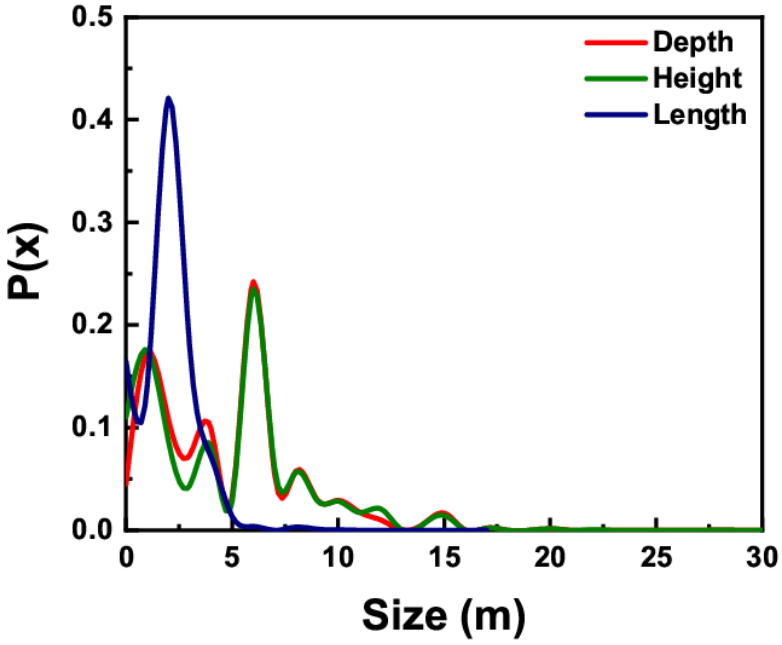

图20：地球轨道中碎片尺寸的概率分布。[97]

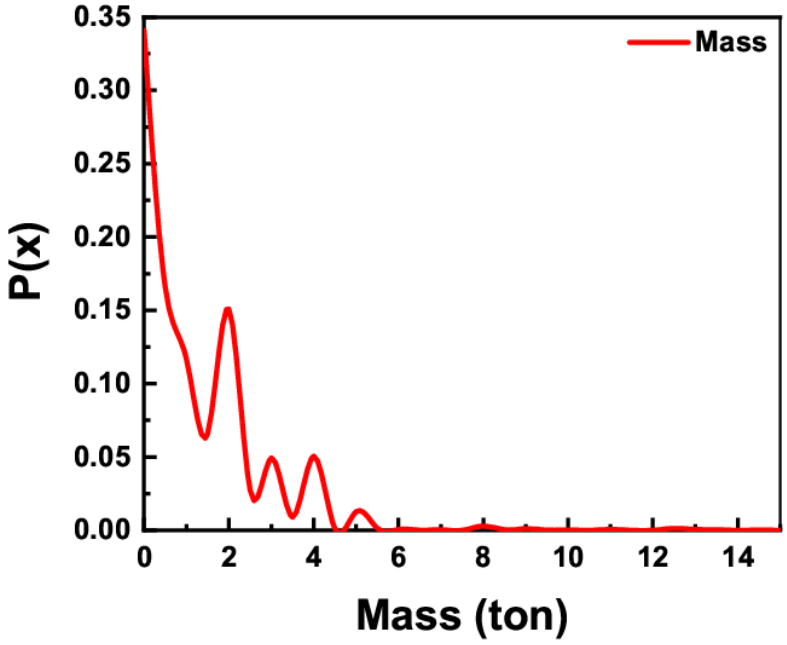

图 21：地球轨道上碎片质量的概率分布 [97]。

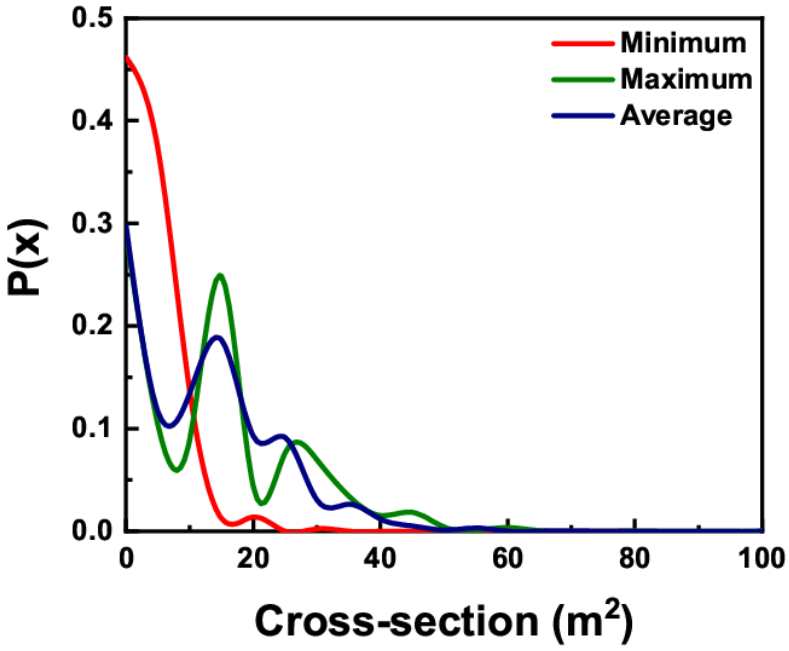

图 22：地球轨道中碎片横截面面积的概率分布[97]

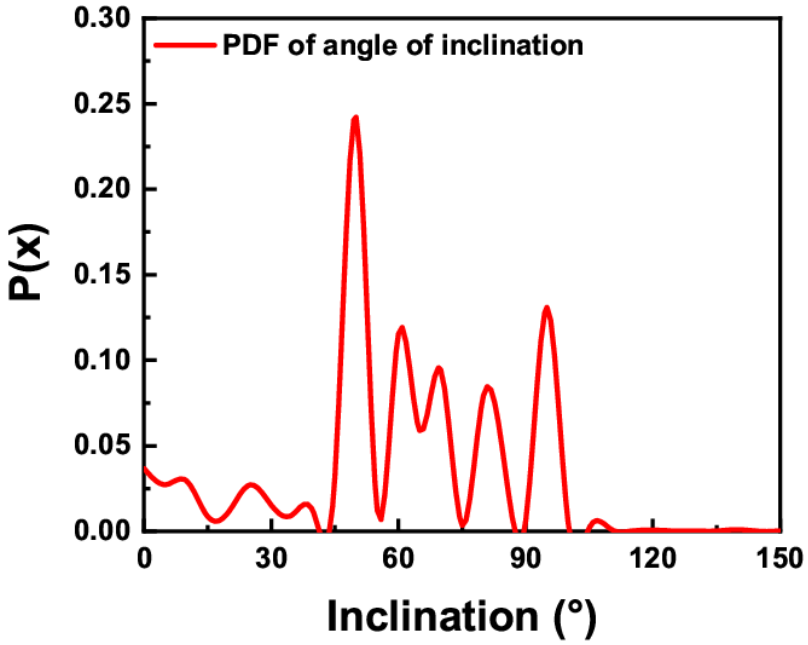

图23：地球轨道中物体倾角的概率分布[98]。

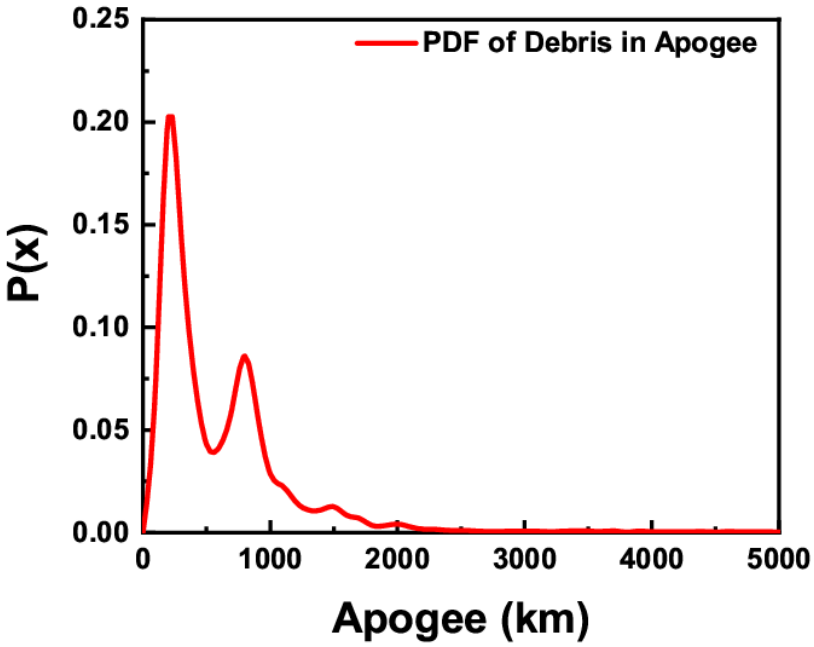

图24：远地点处碎片位置的概率分布。

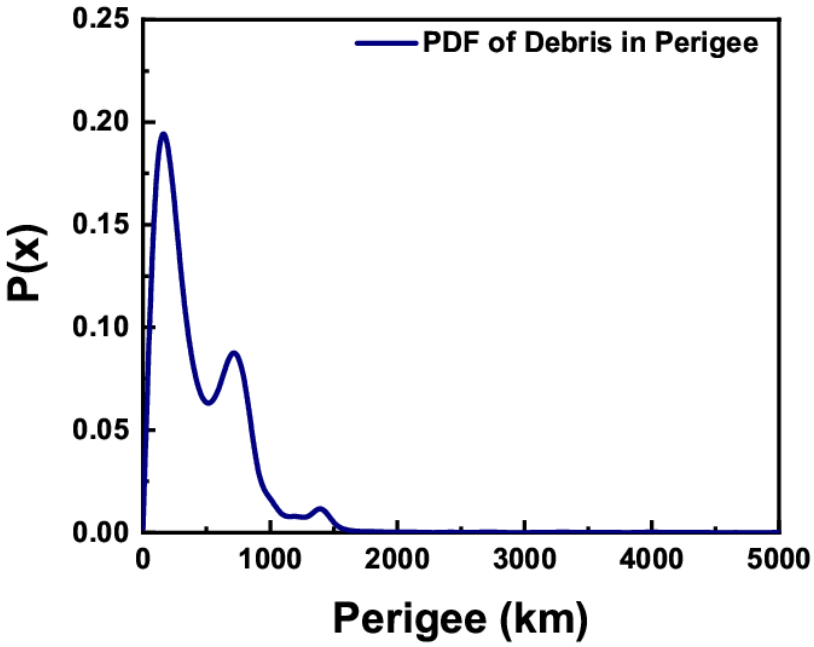

图25：碎片在近地点位置的概率分布。

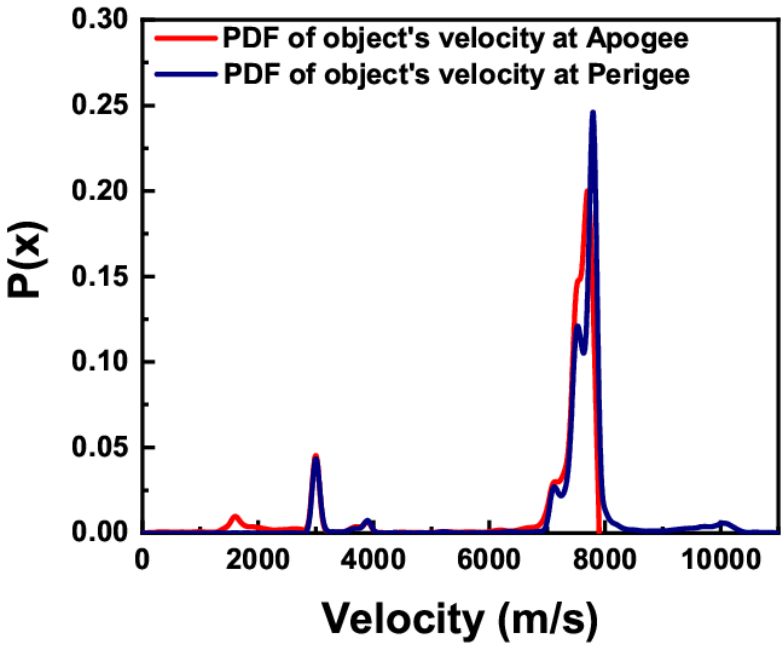

图 26：地球轨道中物体速度的概率。

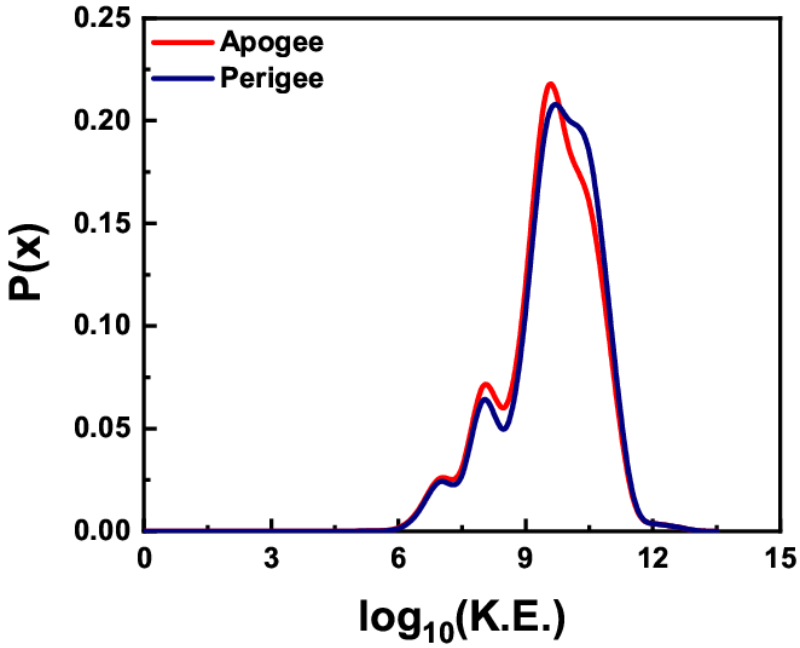

图 27：物体在远地点和近地点的动能（单位：焦耳）概率分布。

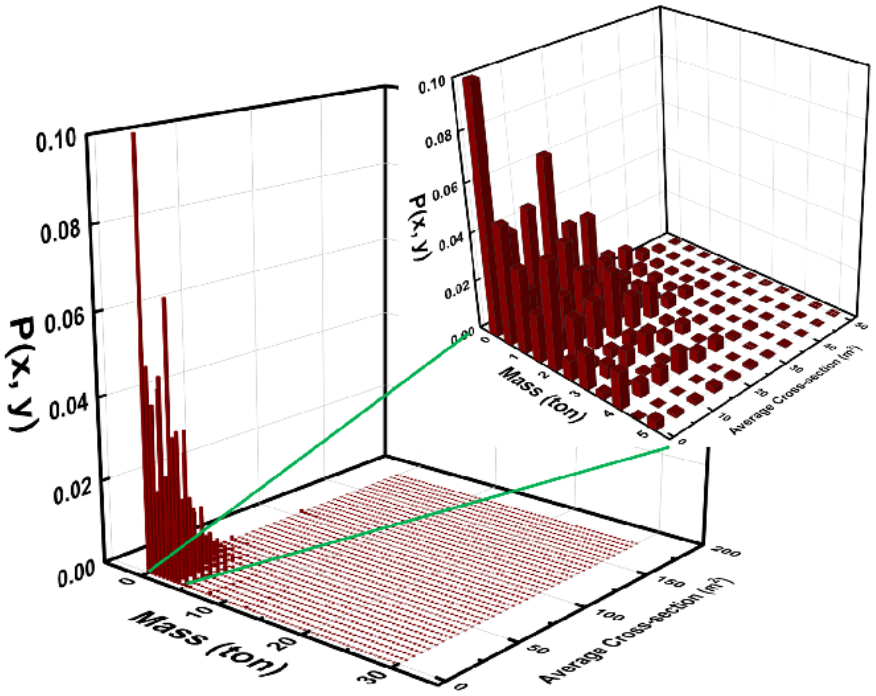

图 28：地球轨道中碎片的质量与平均横截面积的联合概率分布[97]。

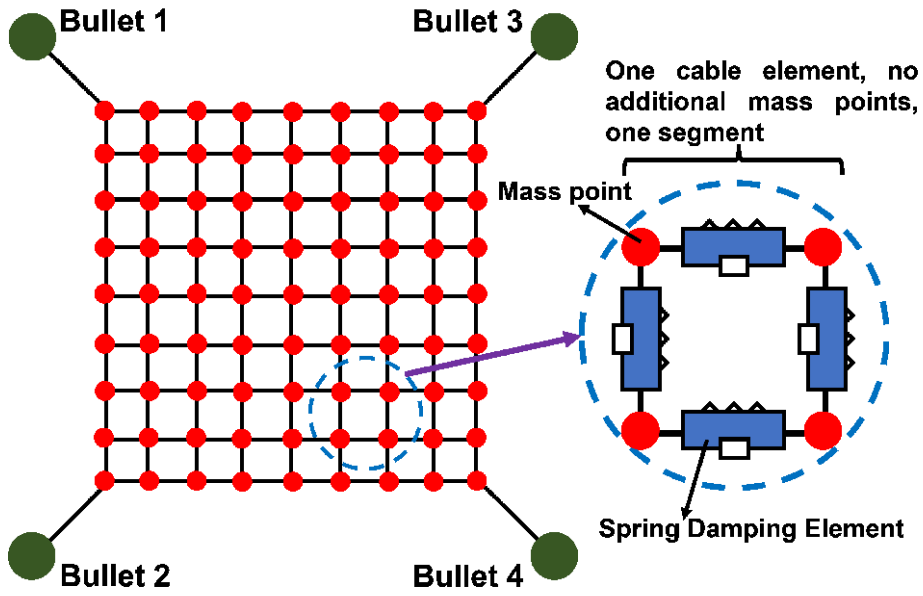

图29：质弹簧模型。“改编自《宇航学报》第132卷，Minghe Shan、JianGuo 和Eberhard Gill，《用于空间碎片清除的系绳网部署动力学》，第293–302页，版权所有（2017），经爱思唯尔许可”[115]。

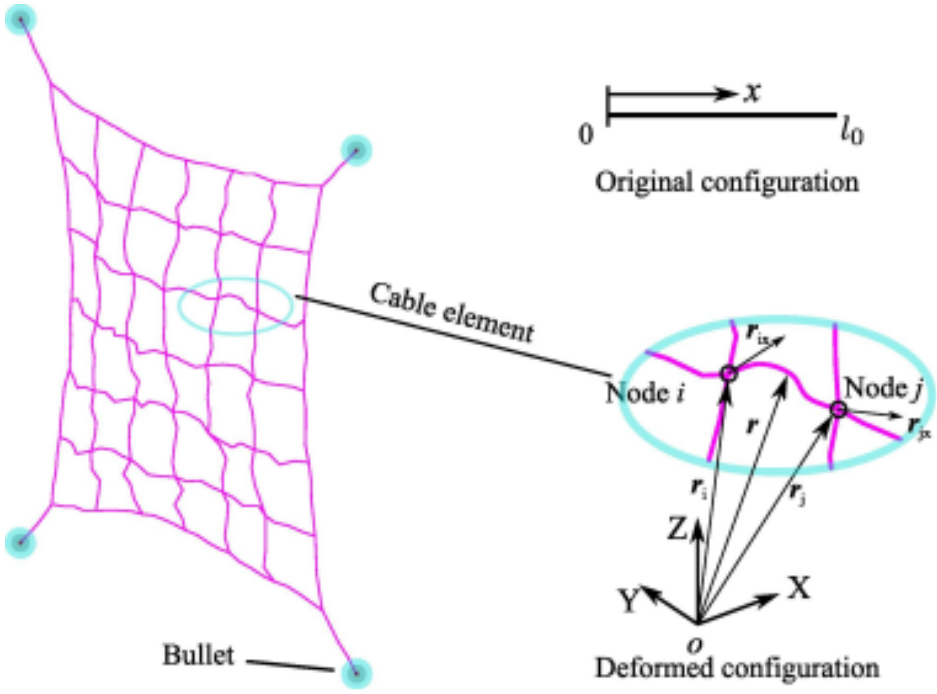

图30：基于 ANCF模型的网建模。”转载自《空间研究进展》第65卷第3期，Minghe Shan、Jian Guo 和 Eberhard Gill，《用于空间碎片清除的网的柔性建模分析》，1083-1094，版权（2020年）归爱思唯尔所有，经许可转载” [113]。

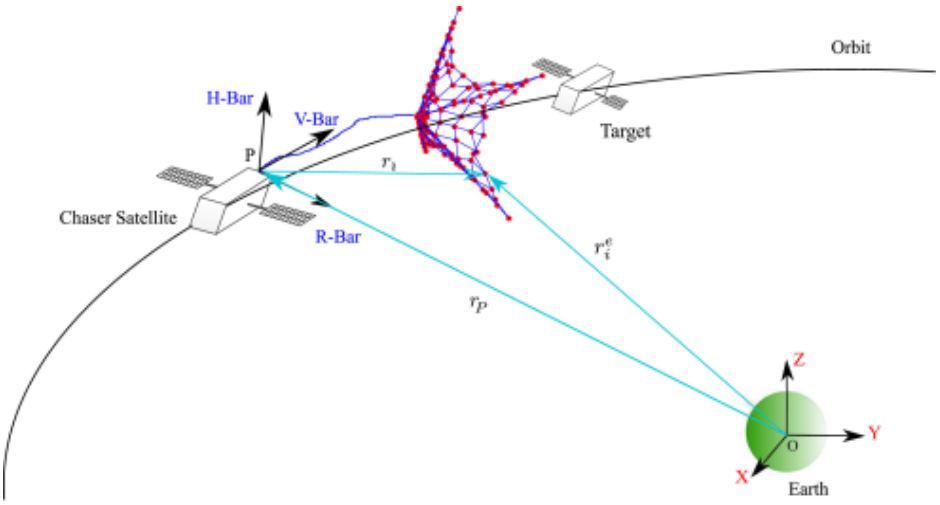

图31：追踪卫星正沿轨道方向（V-Bar）接近目标。“转载自《宇航学报》第158卷，Minghe Shan、JianGuo 和EberhardGill，《使用网进行空间碎片捕获的接触动力学模型》，第198–205页，版权所有（2019年），经爱思唯尔许可”[122]。

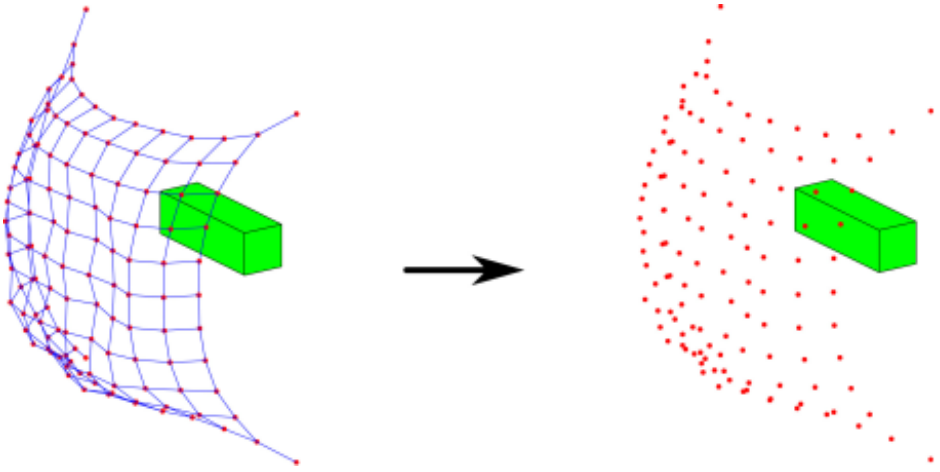

图 32：网与左侧物体接触，以及右侧的简化接触场景。“转载自《宇航学报》第158卷，Minghe Shan、Jian Guo 和 Eberhard Gill，《使用网捕获空间碎片的接触动力学模型》，198–205页，版权所有（2019年），经爱思唯尔许可”[122]。

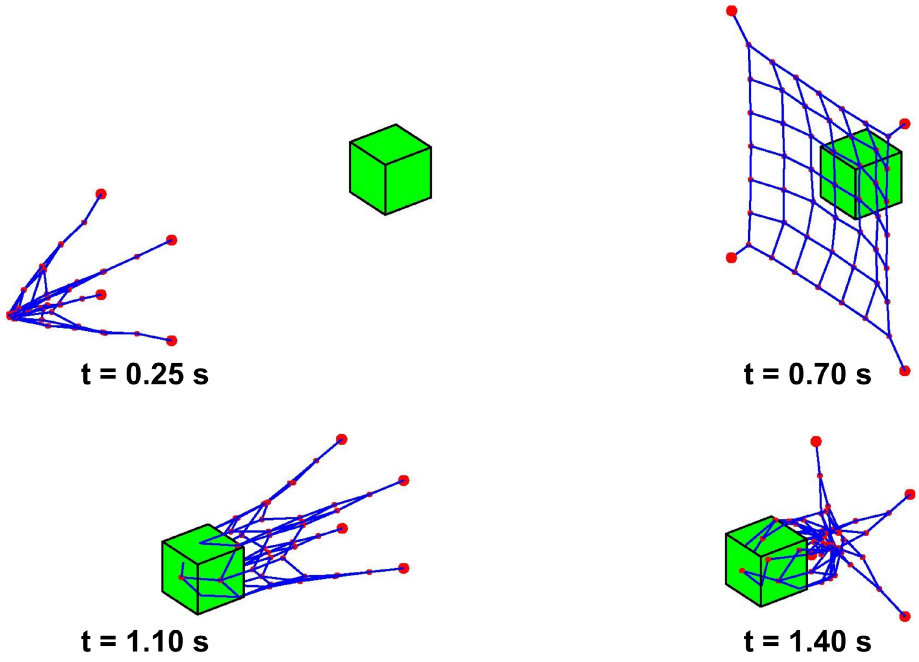

图33：基于质弹簧模型的捕获分析。“转载自《空间研究进展》第65卷第3期，Minghe Shan、Jian Guo 和 Eberhard Gill，《用于空间碎片清除的网的柔性建模分析》，第1083—1094页，版权所有（2020年），经爱思唯尔许可。”[113]

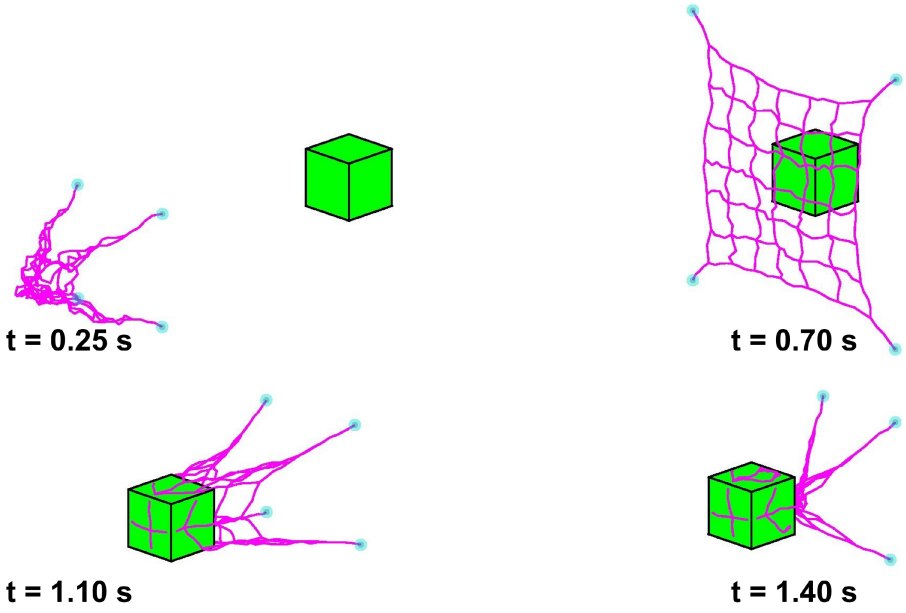

图34：基于ANCF模型的捕获分析。“转载自《空间研究进展》第65卷第3期，Minghe Shan、Jian Guo和Eberhard Gill，《用于空间碎片清除的网的柔性建模分析》，第1083—1094页，版权归2020年所有，经爱思唯尔许可。”[113]。

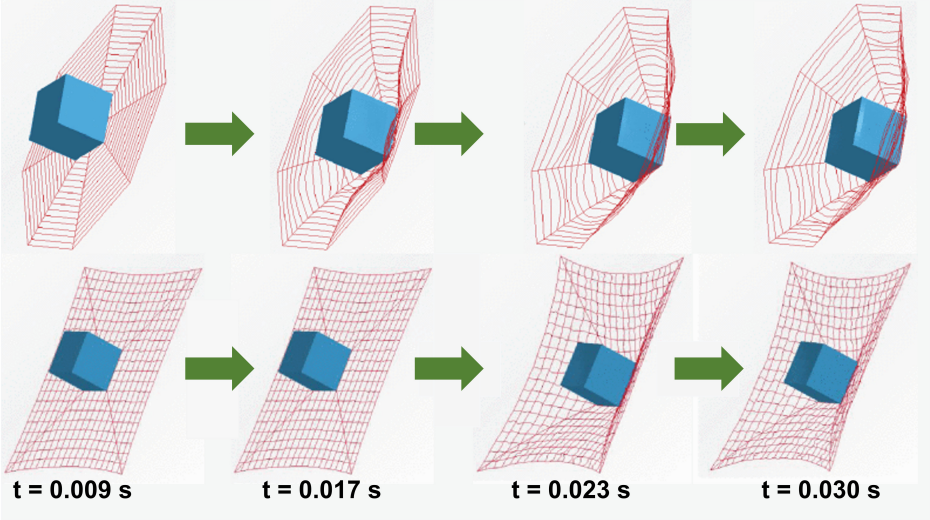

图35：两种网构型的变形。“转载自IEEE Access，第8卷，Xu,Boting、Yang,Yueneng、Zhang,Bin、Yan, Ye 和 Yi, Zhiyong，《空间柔性网捕获系统的仿生设计与实验研究》，第45411–45420页，版权所有（2020年），遵循知识共享许可协议”[127]。

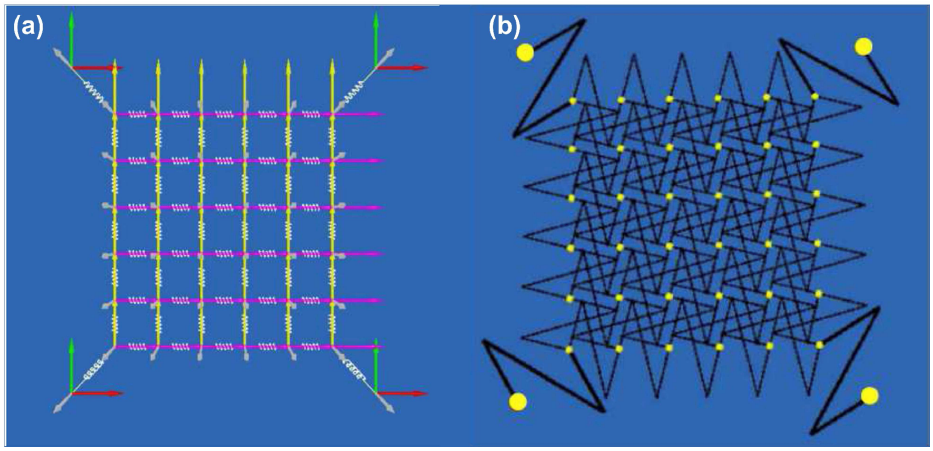

图36：（a）网模型的标准集中参数模型，以及（b）基于缆索的网模型。“转载自《宇航学报》，第155卷，Eleonora M. Botta、InnaSharf和Arun K. Misra，《用于捕获空间碎片和小型小行星的系绳网模拟》，448–461页，版权归2019年所有，经爱思唯尔许可”[128]。

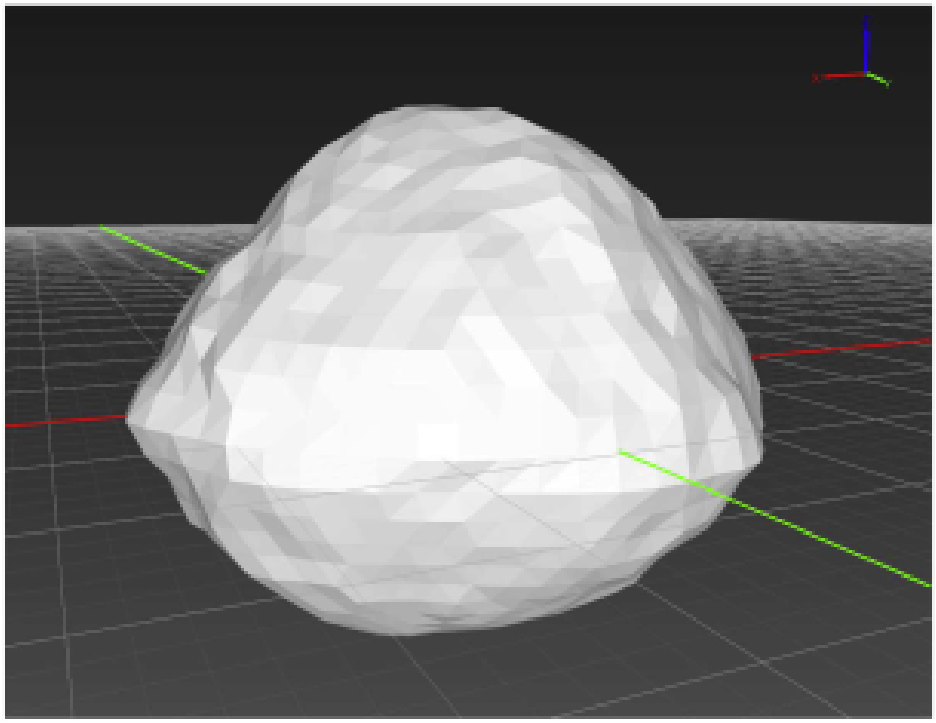

图37：贝努小行星的三维模型及其碰撞几何体。”转载自《宇航学报》第155卷，Eleonora M. Botta、Inna Sharf 和 Arun K. Misra，《用于捕获空间碎片和小型小行星的系绳网仿真》，448-461，版权所有（2019年），经爱思唯尔许可”[128]。

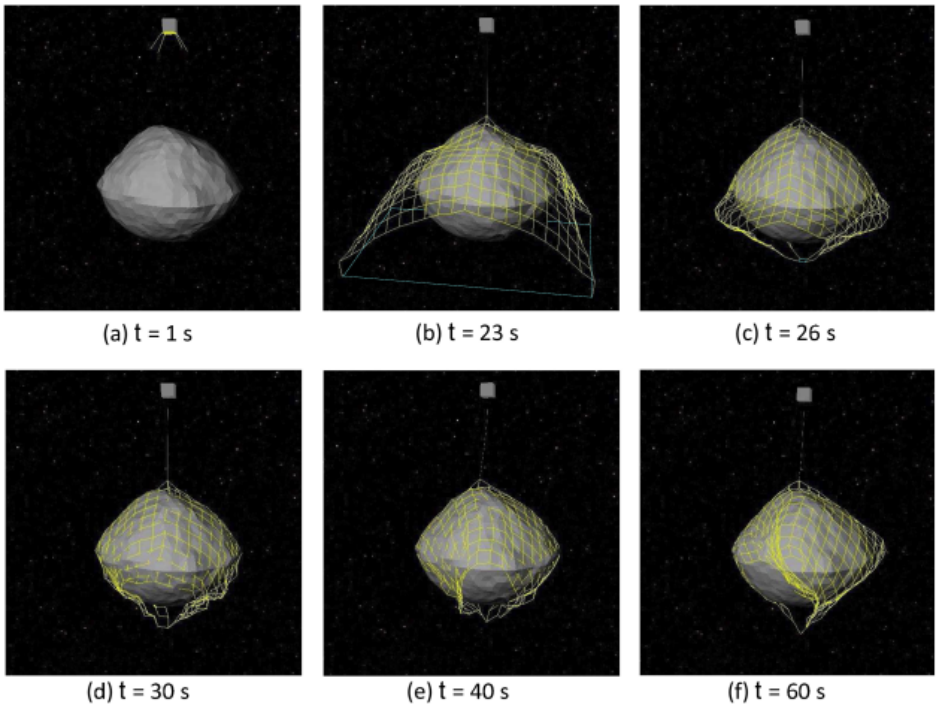

图38：采用标准闭合机制的网捕仿真：（a）网的展开，（b）闭合机制的启动，（c）完成闭合，（d）捕获小行星，以及（e）—（f）维持捕获状态。“转载自《宇航学报》第155卷，Eleonora M. Botta、Inna Sharf 和 Arun K. Misra，《用于捕获空间碎片和小型小行星的系绳网模拟》，第448—461页，版权所有（2019年），经爱思唯尔许可转载”[128]。



图39：“蛛网状”柔性网捕获装置的地面测试系统。”转载自 IEEE Access，第8卷，Xu, Boting、Yang, Yueneng、Zhang, Bin、Yan, Ye 和 Yi, Zhiyong，《空间柔性网捕获系统的仿生设计与实验研究》，45411-45420，版权（2020年），依据知识共享许可协议”[127]。

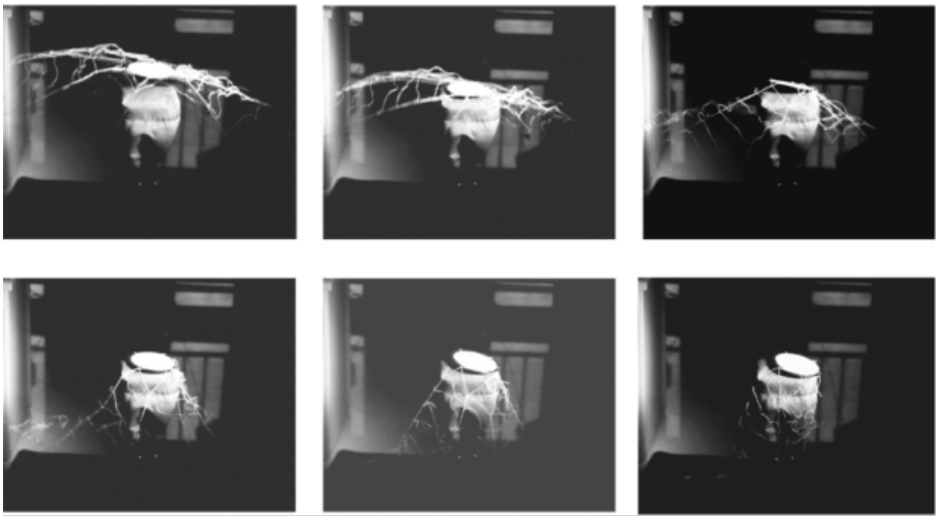

图40：柔性网与目标物体的碰撞。”转载自 IEEE Access，第8卷，Xu, Boting、Yang, Yueneng、Zhang, Bin、Yan, Ye 和 Yi, Zhiyong，《空间柔性网捕获系统的仿生设计与实验研究》，45411-45420，版权（2020年），依据知识共享许可协议”[127]。

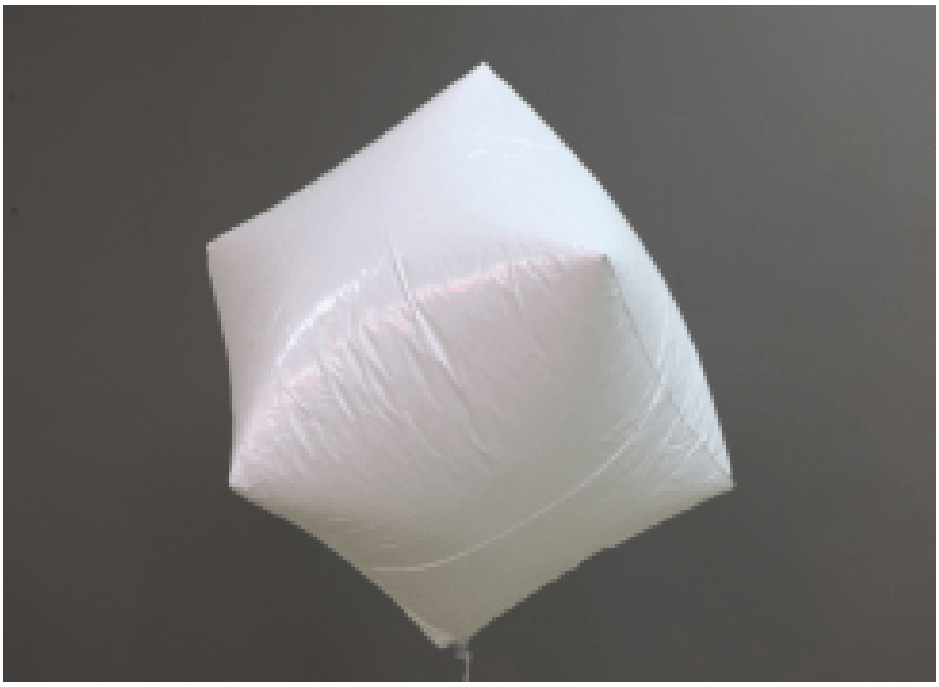

图41：测试中使用立方体飞艇作为碎片。“转载自《宇航学报》第139卷，Inna Sharf、Benjamin Thomsen、Eleonora M. Botta 和 Arun K. Misra，《用于系绳网捕获空间碎片的网闭合机构的实验与仿真》，332-343页，版权所有（2017），经爱思唯尔许可”[129]。

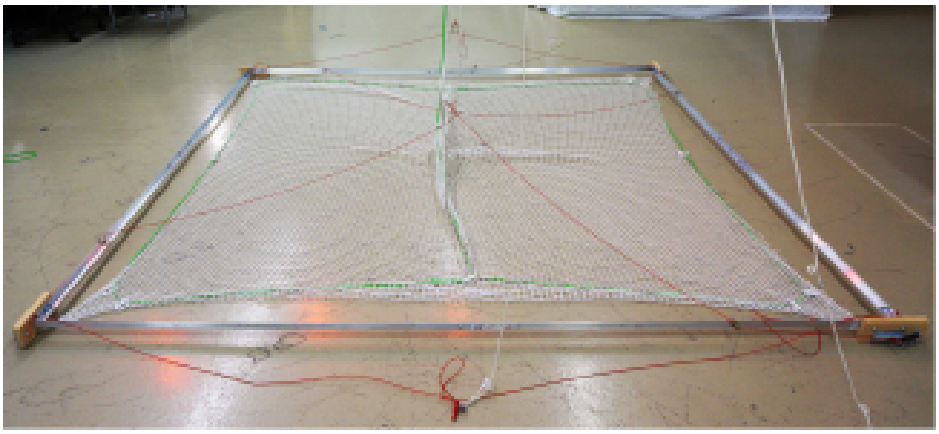

图42：连接到框架上的网捕系统。“转载自《宇航学报》第139卷，Inna Sharf、Benjamin Thomsen、Eleonora M. Botta 和 Arun K. Misra，《用于系绳网捕获空间碎片的网闭合机构的实验与仿真》，332-343页，版权所有（2017），经爱思唯尔许可”[129]。

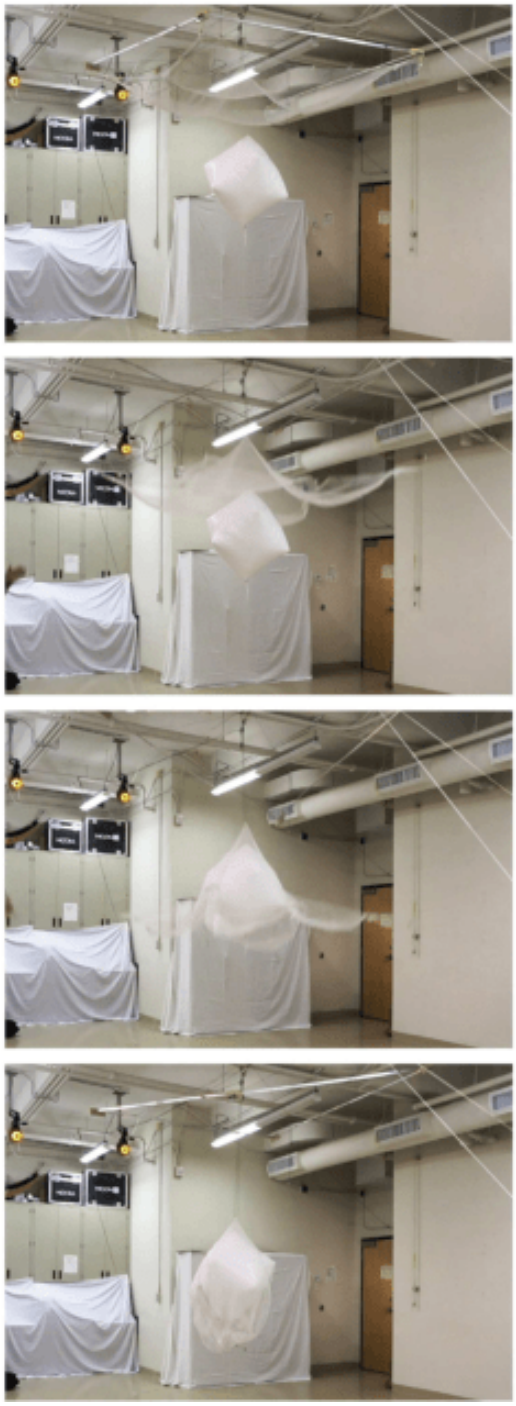

图43：展示使用系绳驱动网闭合系统捕获碎片的实验。“转载自《宇航学报》第139卷，Inna Sharf、Benjamin Thomsen、Eleonora M. Botta 和 Arun K. Misra，《用于系绳网捕获空间碎片的网闭合机构的实验与仿真》，332-343，版权所有（2017），经爱思唯尔[90]许可” [129]。

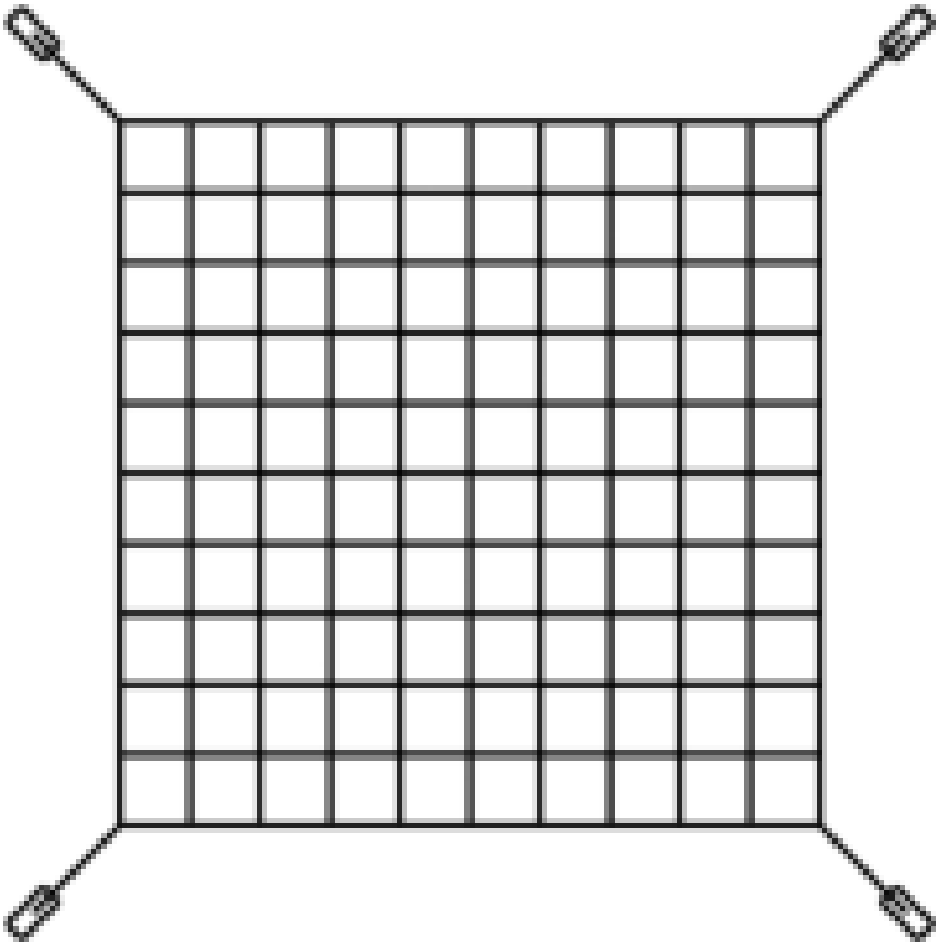

图44：角部附有质量块的网示意图。“经许可转载自《宇航学报》第129卷，Wojciech Golebiowski、Rafal Michalczyk、Michal Dyrek、Umberto Battista 和 Kjetil Wormnes，《用于网及其他柔性系绳应用的空间碎片清除验证仿真器》，第229-240页，版权所有（2016），经爱思唯尔许可”[130]。

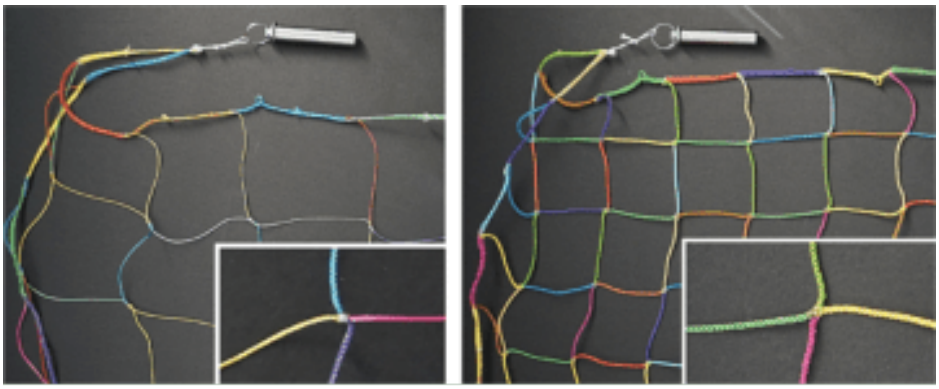

图45：有结网和无结网的组装技术（左图和右图）。“转载自《宇航学报》第129卷，Wojciech Golebiowski、Rafal Michalczyk、Michal Dyrek、Umberto Battista 和 Kjetil Wormnes，《用于空间碎片清除的网及其他柔性系绳应用的经验证仿真器》，第229–240页，版权所有（2016），经爱思唯尔许可”[130]。



图46：摄像机在零重力阶段记录使用较粗的 16×16 网（2nd 情况）进行实验的快照。）。“转载自《宇航学报》第129卷，Wojciech Golebiowski、Rafal Michalczyk、Michal Dyrek、Umberto Battista 和 Kjetil Wormnes，《使用网及其他柔性系绳开展空间碎片清除的经验证仿真器》，第229–240页，版权所有（2016年），经爱思唯尔许可”[130]。