



在地平线上

三种可能影响社会的科技趋势



目录表

1 前言

3 神经元植入用于人类增强

10 通用机器人技术

21 轨道碎片修复

32 脚注

35 GAO 联系与职员致谢

36 更多信息

封面：轨道碎片缓解、通用机器人技术和神经植入技术实例的插图展示。

来源：GAO。| GAO-26-108079

这是一部美国政府作品，不受美国版权保护。已发布的产品可以不经GAO进一步许可而完整复制和分发。然而，由于本作品可能包含受版权保护的图片或其他材料，如果您希望单独复制这些材料，可能需要获得版权所有者的许可。



斯特林·托马斯，博士
高首席科学家

前言

科学与技术（S&T）不断演变，有必要分析新兴趋势，以便为我们准备它们可能带来的利益和冲击。为了满足这一需求，我们编制了一份报告

关注于未来10年可能显著发展的科技系列。我们的目标是预见可能对美国人民产生重大影响的技术。我们处于理想的地位，可以向国会介绍科技（S&T），以帮助他们履行监督职责，同时也是通过我们的科技评估报告来评估技术。

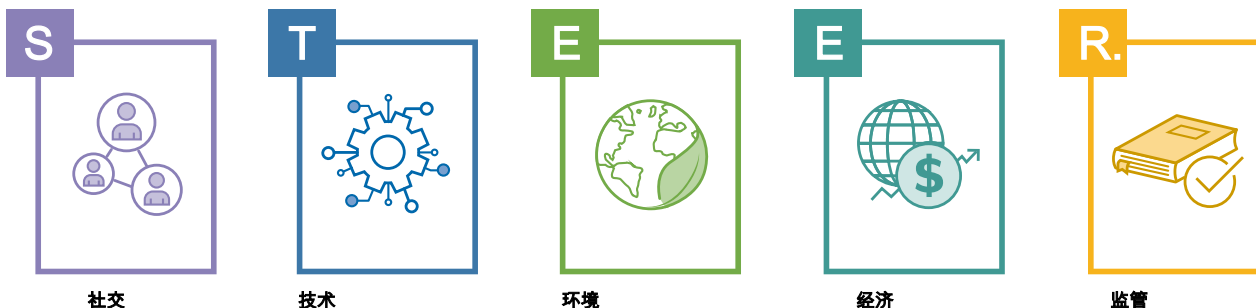
对于本年度的第二版科技趋势报告，我们识别并跟踪了美国持续创新过程中可能成长的科学、技术和工程领域的发展。由于未来趋势众多，我们没有采用详尽无遗的方法，但确定了三种我们认为正在展现出进步的重大技术。我们计划定期增加新技术的相关内容，这些技术显示出成熟的迹象，并且似乎正受益于不断改善的市场环境。

许多方法可用于识别新兴技术，但大多数方法对于我们的十年时间跨度来说效果不佳。在流行文献中常见的常用方法使用频率分析来识别趋势性术语。这些方法对于即将成熟的技术可能很有价值，但对于距离成熟还有十年之遥的技术则效果较差。

我们的特定方法利用了高科科学家的工程专业知识，以识别尚未受到广泛关注但成熟度显著加速的技术。为了指导我们对技术进行视野扫描和评估的方法，我们

遵循了STEER框架。对于我们所讨论的每一种三种技术，我们都关注了从STEER框架中技术推动因素关键要素。s 社会影响
e 环境影响 e 经济驱动力，以及 r 监管环境

图 1：STEER 框架



来源：GAO (图标)。| GAO-26-108079
来源：GAO (图标)。| GAO-26-108079

每个这些元素都在技术成熟和创造能够将创新带给美国公众的市场条件中扮演着重要角色。创新并非孤立存在，因此社会、环境、监管和其他因素也值得考虑和评估，以寻找加速创新的机会。

一种重要形式的技术创新是，将特定应用程序中的专门用途转化为更广泛的任务中的一般用途。本年度报告所选的三项技术——用于人类增强的神经植入、通用机器人技术和轨道碎片减缓系统——就是这类创新的例证。例如，神经植入已用于治疗特定条件，研究人员正在探索如何超出这个范畴以开发增强人类能力的植入物。同样，机器人领域已从执行重复性任务的专用工业机器人扩展到能够适应广泛环境的通用系统。轨道碎片减缓系统也是如此，它从开发用于减缓少数大物体的技术进步到可能减轻更多小型物体的 newer systems，而这些小型物体的数量却显著增多。随着从专门用途向更广泛应用转变的不断进行，政策制定者考虑到平衡技术应用与公众安全问题的监管方法将很重要。

在另一个领域。例如，轨道碎片减缓系统、机器人技术、神经植入物等所有这些都需要控制算法、传感器、材料科学和能源存储方面的进步。此外，人工智能 (AI) 的进步也影响了这三个领域的发展，使系统能够在不可预测的环境中完成任务，例如在灾区导航、实时解读大脑活动或在大拥堵的轨道中机动。

为了进行这项工作，我们参考了学术期刊和立场文件中的科学文献，并对11位来自三个识别出的技术领域的专家进行了半结构化访谈。专家的选择基于我们的文献综述、以前GAO的报告，以及GAO科学家和工程师的专业知识和判断。为了帮助识别趋势，我们咨询了具有广泛科学和技术背景的内部专家。我们依靠集体的判断和考虑收集到的信息来描述技术趋势的关键方面，包括识别技术发展、市场状况或规模经济，这些可能进一步加速这些新技术成熟，以及政策制定者（如立法机构、政府机构、学术界、工业界和其他群体）的考虑。然后，我们为三种技术如何在未来10年演变以及它们可能如何被使用制定了具体情景，这些情景的范围和程度可能因技术的性质而异。最后，我们根据这些情景为政策制定者推导出启示和政策考虑。

三种技术在其底层技术基础和发展轨迹上也存在共性，突出了在某一领域的突破可以加速能力的提升这一事实。



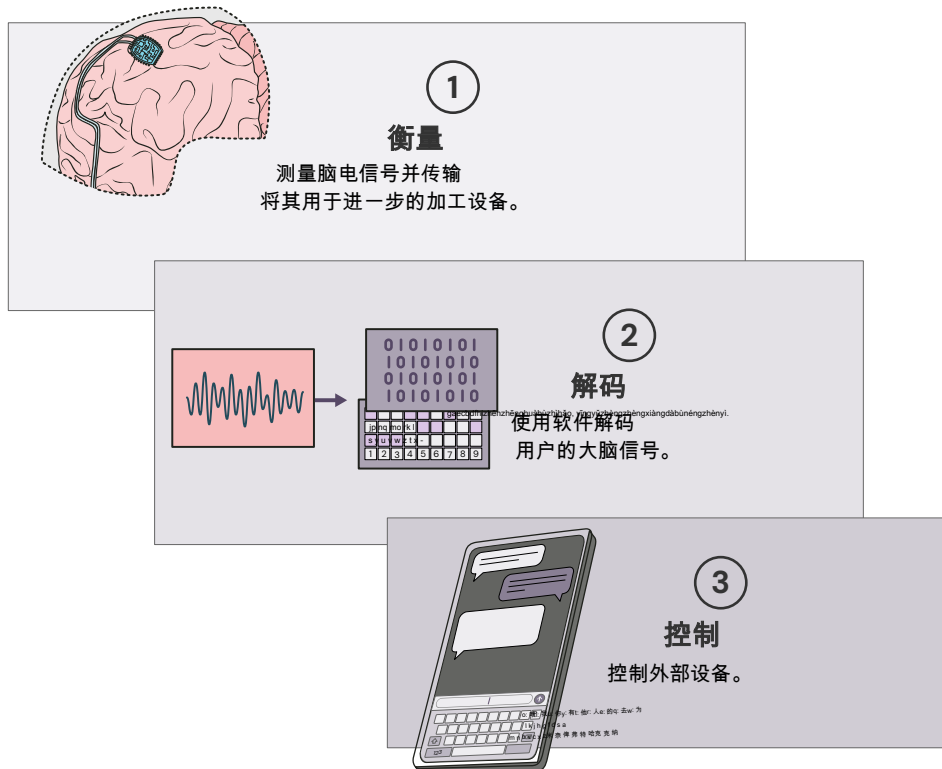
神经元植入用于人类增强

N

脑内植入物是手术放置在脑表面或其下方的装置。研究人员目前正在临床试验中测试神经植入物的医疗应用。这些植入物可能为因神经疾病、中风或伤害而生活受限的人们提供生活质量上的提升。例如，某些植入物可以测量用户的脑电波并解码这些电波的意义，从而实现设备免手操作。截至2024年9月，通过临床试验使用此类植入物的全球人数少于70人。其他类型的

神经植入装置可以向大脑的特定区域发送电信号，改变大脑活动以建立正常功能（例如，减少帕金森病患者的震颤）。相对于测量和解码用户大脑信号的神经植入装置，这类神经植入装置更为成熟，但其使用范围仅限于影响无法对其他治疗方法有反应的个体的病症（例如帕金森病或癫痫）。全世界已有超过20万人接受了此类植入装置的手术。

图2：神经网络植入工作原理示例



来源：GAO (插图)。| GAO-26-108079 来源：GAO (插图)。| GAO-26-108079

尽管神经植入器的应用目前仅限于有医疗需求的人，但通过克服技术难关，它们的发展可能使开发增强人类能力的神经植入器成为可能（见图3）。例如，神经植入器最终可能：

y 允许军人无手控制无人机

y 启用开发新型视频游戏，为神经植入用户带来竞争优势

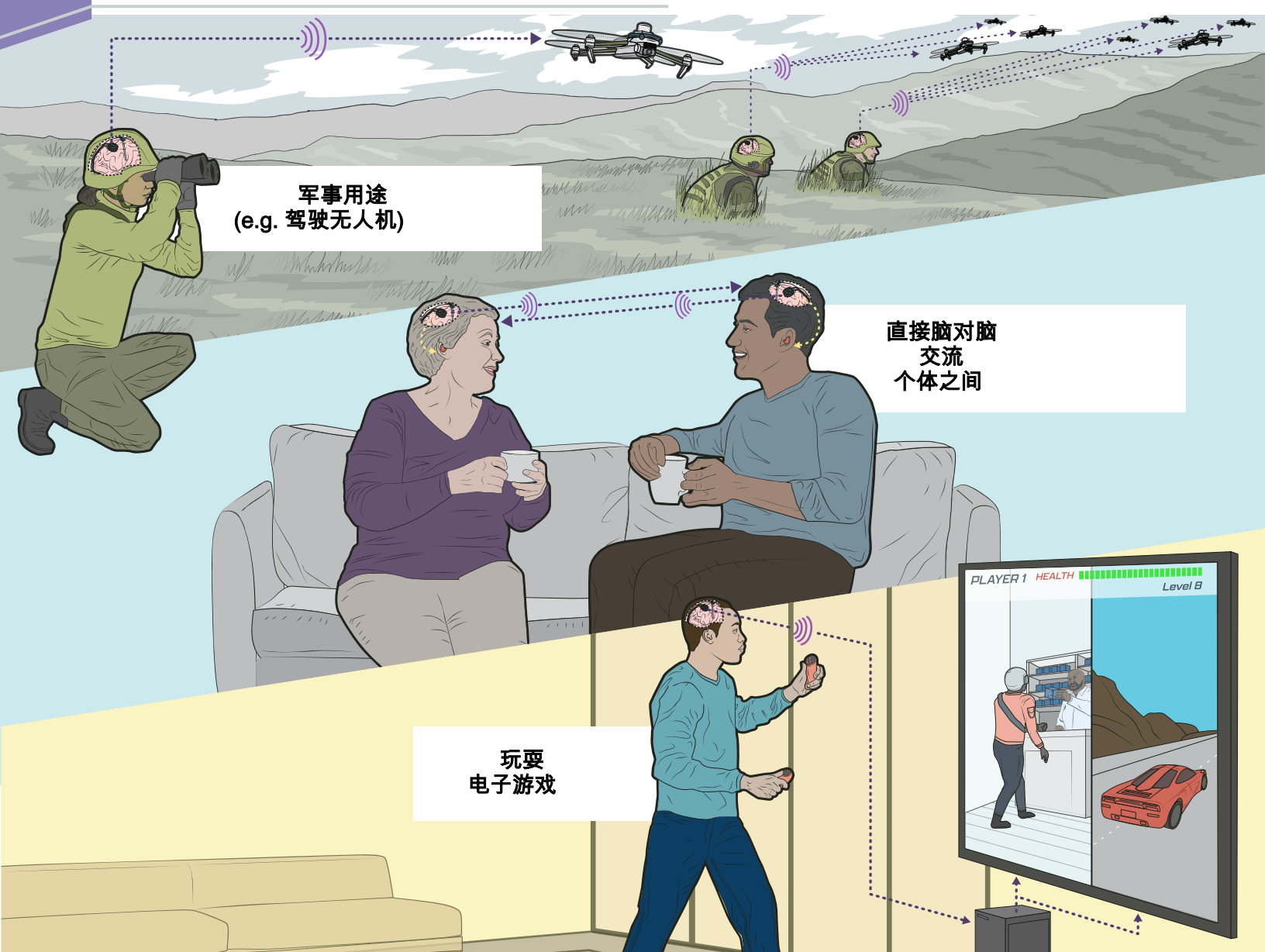
y 实现不同语言之间的实时无缝翻译，消除语言障碍，促进全球合作和商业发展。

y 使用户能够快速培养新技能和能力

y 启用个人间直接的大脑与大脑通信。

然而，政策、法规以及社会利益和关注可能会影响人们使用或接受他人使用增强人类能力的人脑植入的程度。

图3：神经植入的潜在未来应用



来源：GAO (插图)。| GAO-26-108079

来源：GAO (插图)。| GAO-26-108079

GAO-26-108079

在地平线上：可能影响社会的三个科技趋势

即将到来的发展

技术进步在以下三个领域的应用可能塑造人类增强型神经植入的未来：

1

研究人员正在利用人工智能通过用户的脑电信号实时预测用户的意图，从而实现设备更快速和灵活的控制。这与之前需要消耗更多时间来校准设备以适应用户特定脑电信号的神经植入方法形成鲜明对比。

人工智能

2

高级材料

先进材料使得神经植入物能够以更高的分辨率测量脑信号，同时降低用户风险。高分辨率测量脑信号使研究人员能够更准确地解码用户的意图动作。一些正在开发的神经植入物正变得更小，并且与其它植入物不同，不需要进行开放性脑部手术。柔软、灵有机材料降低了侵入性更大的植入物的风险。例如，2019年，一家公司开始进行通过颈部静脉植入神经植入物的人体研究。这个植入物由柔性材料制成，并以高分辨率测量脑信号。¹

3

通讯

虽然神经植入器需要通过有线连接到大型外置设备，研究人员正在开发可以无线连接到其他设备的神经植入器。

这些以及其他进步已经有助于神经植入在医学应用的发展。例如，通过参与一项临床试验，2025年，一位患有肌萎缩侧索硬化（ALS）的人能够通过脖子上的血管植入无线神经植入物来使用电脑、在智能手机上发送文本消息、在扬声器上播放音乐、喂狗、开灯以及启动机器人吸尘器。

除了技术进步外，其他因素也可能影响这项技术的发展。其中一个因素是监管审查。目前，FDA正在审查医疗器械的安全性和有效性。随着开发者和FDA审查人员就评估包括神经植入在内的新兴类型医疗器械的临床结果达成共识，其他类似神经植入也可能顺利通过监管审查。

更快地审查。如果某些类型的医疗用途神经植入物在市场上可用，个人可能会出于医疗原因和增强目的而使用它们。未来，一些没有医疗需求的个人可能会单纯为了增强目的而使用神经植入物。

神经植入物的医疗费用也可能影响其在辅助用途方面的广泛应用的可行性。2024年，我们报道称，公共和私营医疗保健保险公司可能在做出自己的保险决策时参考医疗保险和医疗补助服务中心（CMS）的覆盖决策。² 授权用于医疗用途的神经植入器覆盖范围可能会激励投资者进一步资助其开发。这可能导致下游技术进步，既推动技术向前发展，又降低开发用于人类增强的神经植入器的成本。

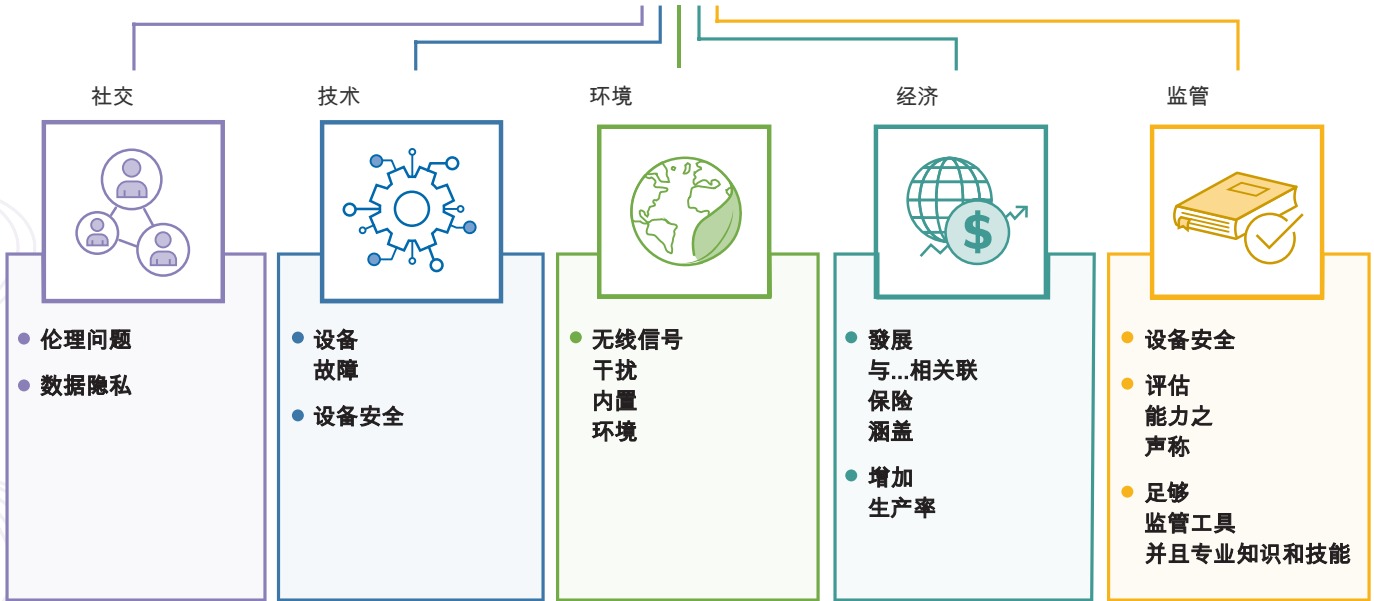


来源：Vadim/stock.adobe.com。| 高-26-108079

含义

我们在下文中强调了使用神经植入物进行人类增强的潜在影响，前提是这类植入物可用于大众消费者、职业和军事用途。

神经增强植入物



来源：GAO (图标)。| GAO-26-108079
 来源：GAO (图标)。| GAO-26-108079

以下更详细地探讨了这三个影响。



社交

当前隐私法可能无法保护神经植入用户

没有明确的隐私政策，与神经植入相关的数据可能会让组织获取用户私密信息以及关于用户情绪、注意力和思维的推断。神经数据可能不会受到现有法律的保护。在2024年，我们报道了1996年健康保险可携带性和问责法案 (HIPAA) 不包括在临床环境之外、出于非临床原因收集的数据。³ 尽管一些地区已经实施了州级数据隐私法律拼凑，但综合性的联邦隐私立法尚不存在。⁴ 如果一家机构获取用户神经植入的数据，它可能会将这些数据作为操纵和控制用户的一种工具。例如，根据情况和法律环境，雇主可能会利用神经数据惩罚效率低下的工人，甚至通过检测情绪作为解雇员工或拒绝晋升的依据。



技术

神经植入物可能容易受到各种攻击的威胁。

使用神经植入物可能会让用户面临新的脆弱性。2018年的一份关于军民两用神经技术的报告指出，包括神经植入在内的军事资助神经技术的最新进展，为滥用这些设备提供了新的机会，并突出了神经科学领域军民两用技术的固有问题。⁵ 如果敌手截获并解密了神经植入器发出的信号，可能会危及用户神经数据的安保和隐私，或造成损害。例如，如果敌手截获控制军事无人机的神经植入器用户的信号，那么敌手可能能够重新引导或接管该无人机。

可用的加密协议可能难以用于神经植入器传输的信号。例如，为用户提供感觉反馈（如触觉）的神经植入器必须以特定速度运行，以被大脑认为是自然的。对信号进行加密可能会延迟用户接收感觉反馈的速度。



监督

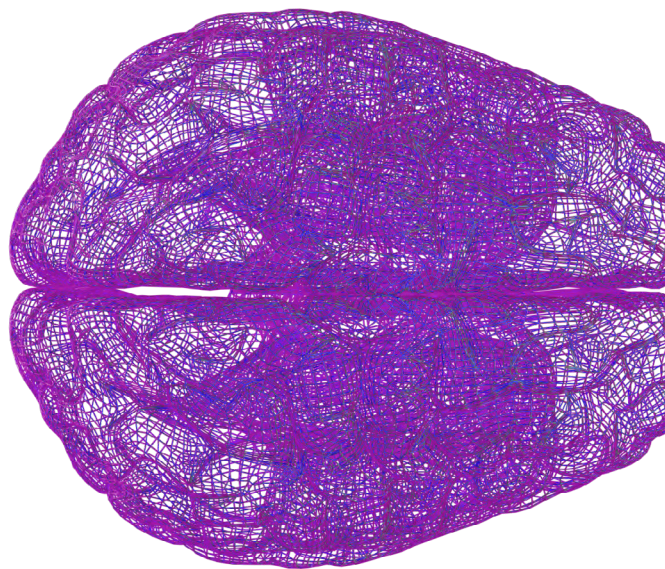
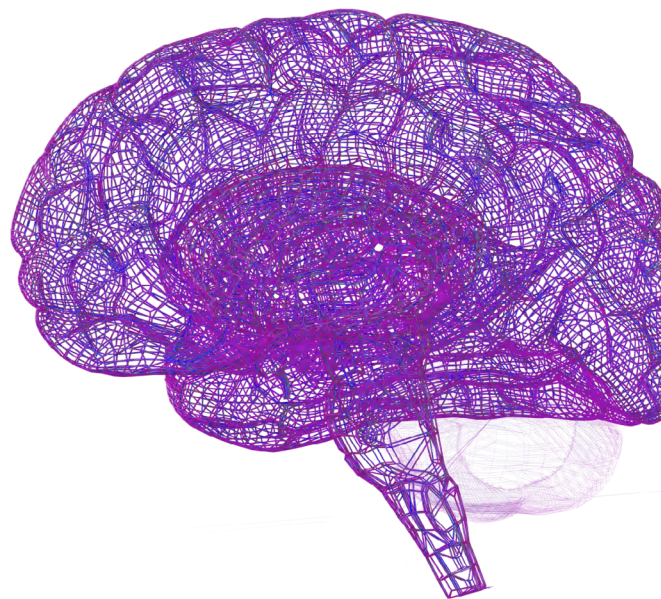
现有的医疗器械审查流程可能无法充分捕捉非医疗神经植入物的细微差别

美国食品药品监督管理局（FDA）审查符合医疗器械定义的产品，包括神经植入物。⁶ 然而，一些伦理学家表示，审查增强人类能力的植入物本身就需要进行主观价值判断的风险和收益评估，这超出了现有FDA设备审批评估的范围。⁷ 正如我们之前报道的那样，某些类型的神经植入物可以帮助残疾用户，并可能增强另一用户的机能。⁸ 例如，一种使用AI语言模型的神经植入器可以实现免手输入，帮助瘫痪的用户。然而，该植入器也可能使非瘫痪用户工作效率更高。

潜在的政策制定者考量

政策制定者在技术进步时可能需要考虑在广泛选项之间的权衡。例如，政策制定者可以制定关于神经植入器伦理使用的标准。开发过程可能包括设立一个临时机构或委员会，以提出神经植入器伦理开发和使用标准，以及潜在监管监督机制。利益相关者可以为委员会提供建议，以平衡个人权利与社会利益。一旦临时机构或委员会完成其工作，政策制定者可以考虑要求开发并植入神经植入器用于增强的实体使用委员会输出中的标准或监管机制要素。

政策制定者可以考虑采取措施以确保神经植入器足够安全。例如，他们可以考虑神经植入器是否应受到进出口控制，或者是否有必要采取额外的控制措施。美国已经在这一方向上采取初步步骤，商务部工业和安全局邀请了行业专家参加研讨会，以考虑某些类型神经植入器的国家安全影响，以及为保护国家安全需要实施多大程度的出口控制。⁹ 出口管制可能阻止对手获取和使用神经植入物来增强军事能力——例如，通过延长注意力持续时间。出口管制还可以阻止对手逆向工程植入物。例如，潜在的军民两用技术，如与神经植入物一起使用的传感器和加密软件，可能受到美国商务部出口管制的约束，以确保国家安全。进口管制可以阻止美国政府、开发人员和消费者从对手那里获取可能存在风险的组件或完全组装的植入物。



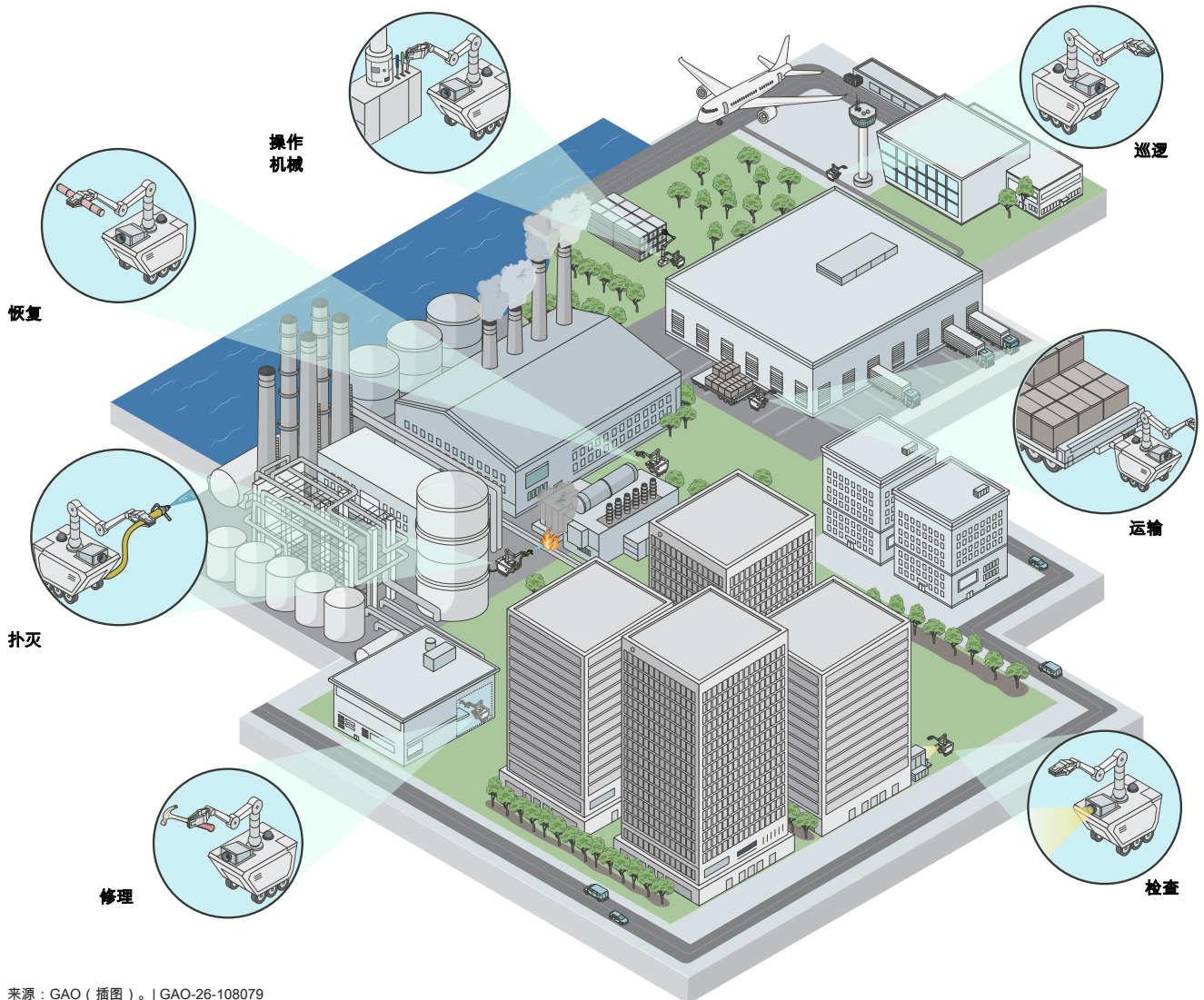
来源：Deor Designs/stock.adobe.com。 | GAO-26-108079

通用机器人技术

R.

仿生学的发展趋势与计算机相似：从执行单一任务的设备发展到能够执行多项任务的设备。通用机器人代表从特定任务自动化到灵活、具有推理能力的机器人的根本转变，这些机器人能够在现实世界环境中执行广泛的任任务。如果该领域继续沿着目前的轨迹发展，通用机器人还将能够适应以前未编程到机器人中的新任务，并在多种环境中而非仅在一个孤立的环境中，如工厂或实验室中这样做。向更通用机器人研究和发展的工作正集中在结合执行器、电机、感知能力和人工智能的机器人上，以在多变的地形中导航、操纵物体并适应不同的任务。这些系统旨在匹配人类的敏捷性、灵巧性和

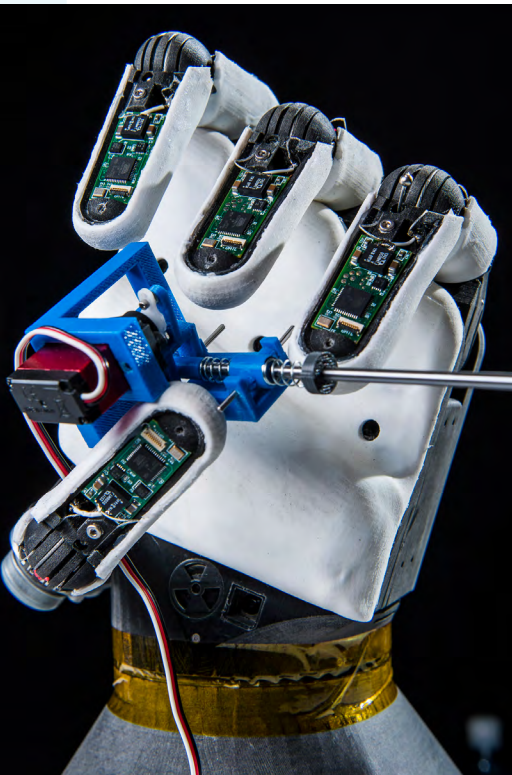
图4：通用机器人应用案例示例



来源：GAO (插图)。 | GAO-26-108079

来源：GAO (插图)。 | GAO-26-108079
GAO-26-108079

在地平线上：可能影响社会的三个科技趋势



《桑迪亚手》解决了阻碍其他机器人手广泛应用的一些挑战，包括成本、耐用性、灵活性和模块化。

来源：“[机器人手](#)” by [桑迪亚实验室](#)，
CC BY-NC-ND 2.0 照片由Randy Montoya
拍摄。| GAO-26-108079

多功能性。近年来人工智能的突破为这些努力增添了动力，尽管仍存在重大挑战。

沿着这些方向的成功开发能够生产出用途广泛的机器人。例如，具有适当能力的通用机器人可能能够提高基础设施维护和灾害响应的安全性、速度和效率。这是一个重要的应用领域，因为随着人口增长和恶劣天气事件的加剧，基础设施需求持续增加。通过将高级传感器、人工智能、机械能力与人类专业知识相结合，这些机器人可能能够提供持续的监控和维护，从而防止小问题变成大故障。此外，它们还能够自主应对危险环境中的发展情况，帮助搜救行动或协助大规模紧急情况下的协调工作。

即将到来的发展

以下四个技术发展领域可能显著推进通用机器人技术。

1 一个适应性强的通用机器人需要比单功能机器人收集更多关于其周围环境的信息。例如，一个能够操纵多种不同物体的机器人需要视觉传感器来定位物体，压力传感器来检测接触，以及力传感器来处理物体而不损坏它们。然后，它需要将这些多个传感器**传感器集成**起来。

半导体技术的近期进展使得这一能力成为可能，因为它使得生产性能更好、尺寸更小、成本更低的传感器成为可能。然而，今天的机器人仍然在准确感知和解释其环境方面存在困难。此外，一些传感器类型——如关节处的力传感器和机器人手上的压力传感器——仍然昂贵或大部分无效，无法让机器人完成相关任务，例如需要强大力量或轻柔触摸的任务。

2 由于它们能力的提升和适应性，通用型机器人也可能更多地与人类互动，并以比当前以任务为导向的机器人更丰富的形式进行互动。人机协作还要求提高社交沟通能力，以实现与人际协作相似的性能水平，因为解读人类意图、偏好和情境线索是一项复杂的**人与机器人协作**的工作。



在国际空间站的命运实验室中，展示了太空第一台类人形机器人Robonaut 2的测试场景。

来源：美国国家航空航天局（NASA）。| GAO-26-108079

此外，在人机共享空间中的人机协作带来了独特的安全风险。例如，如果机器人硬件或软件在握有重物时出现故障，可能会伤害或杀害附近的人。因此，机器人必须被设计为安全故障——例如，理解它永远不应该以某种方式握持大物体，以免失电导致其坠落。根据我们交谈的机器人研究人员，目前的研究更多地关注性能能力，而不是这一需求。

协作还需要通用型机器人适应人类行为和解决问题。例如，当与人类用户一起清理重型垃圾时，这些机器人需要迅速识别用户举起物体的请求，然后计划举起物体并将其放置在目标位置的移动。鉴于目前机器人灵巧度和问题解决能力的限制，一种策略是将简单任务分配给机器人。例如，人可以选择要移动的垃圾及其目的地，机器人则负责重物搬运。此外，此类机器人的操作自主水平可以根据任务中的安全性和风险因素灵活调整。有各种实现方式。一项研究描述了一种自主消防机器人如何根据情况调整其自主水平——例如，对于低风险任务自主操作，而对于高风险任务则等待人类操作员做出决策。¹⁰

3 硬件-软件协同开发

机器人的技术复杂度可以通过硬件和软件之间更紧密的联系而更有效地增长。为了加速通用机器人的发展，开发者很可能需要共同开发硬件和软件，通过设计、开发和部署的迭代循环。例如，新型机器人开发者可能希望在构建硬件之前，创建一个数字环境来模拟和评估特定硬件和软件组合的能力。开发者随后可以根据对机器人能力和局限性的更好理解，反复调整硬件和软件规范。这种方法也可能有助于避免后期硬件重设计的需要，从而可能降低开发成本。

共同开发也可以扩展机器人的能力；例如，开发者可以通过改变机器人的物理结构来减少完成复杂任务所需的计算量。¹¹ 在这种情况下，通过放弃人类身体的设计模板，可以简化在复杂地形上行走的计算密集型任务。具有两只刚性腿的机器人身体可能需要非常复杂的软件来处理所有可能的地形变化。替代设计和材料可以更高效地解决这些问题。例如，研究人员已经制造了一种“适用于所有地形”的（GOAT）机器人，通过改变

形状（见图5）。这种形状的改变使得它在下山时能够滚动，然后在平坦地面或爬山时切换回主动驾驶。这种设计提高了速度和效率，同时降低了软件的复杂性。

自主变形机器人领域的兴起源于三个新兴领域：模块化机器人、软体机器人和软硬件协同设计研究。在GOAT等概念验证系统方面，研究正取得进展，但广泛采用仍面临大量技术、计算和材料科学挑战。根据我们采访的两名研究人员表示，缺乏能够解决这些挑战的共享基础设施。

图5：实验型变形“适应所有地形（GOAT）”机器人



“全地形优秀者（GOAT）”机器人

来源：©洛桑联邦理工学院（EPFL）计算机人设计制造实验室（CREATE）；工程学校（STI）

<https://actu.epfl.ch/news/morphing-robot-turns-challenging-terrain-to-its-ad/> 此内容受Creative Commons许可协议的许可分发 CC BY-SA 4.0 许可协议 GAO（标签）。IG AO-26-108079

4 人工智能机器人软件开发

人工智能基础模型如大型语言模型（LLM）和视觉语言模型（VLM）融入机器人软件正在推动机器人通用能力快速转变。¹² 前一代机器人软件是针对特定任务的——分为针对特定任务（例如，感知、规划、动作模块）的模块。机器人软件可以通过两种方式利用基础模型：

独立使用现有模型

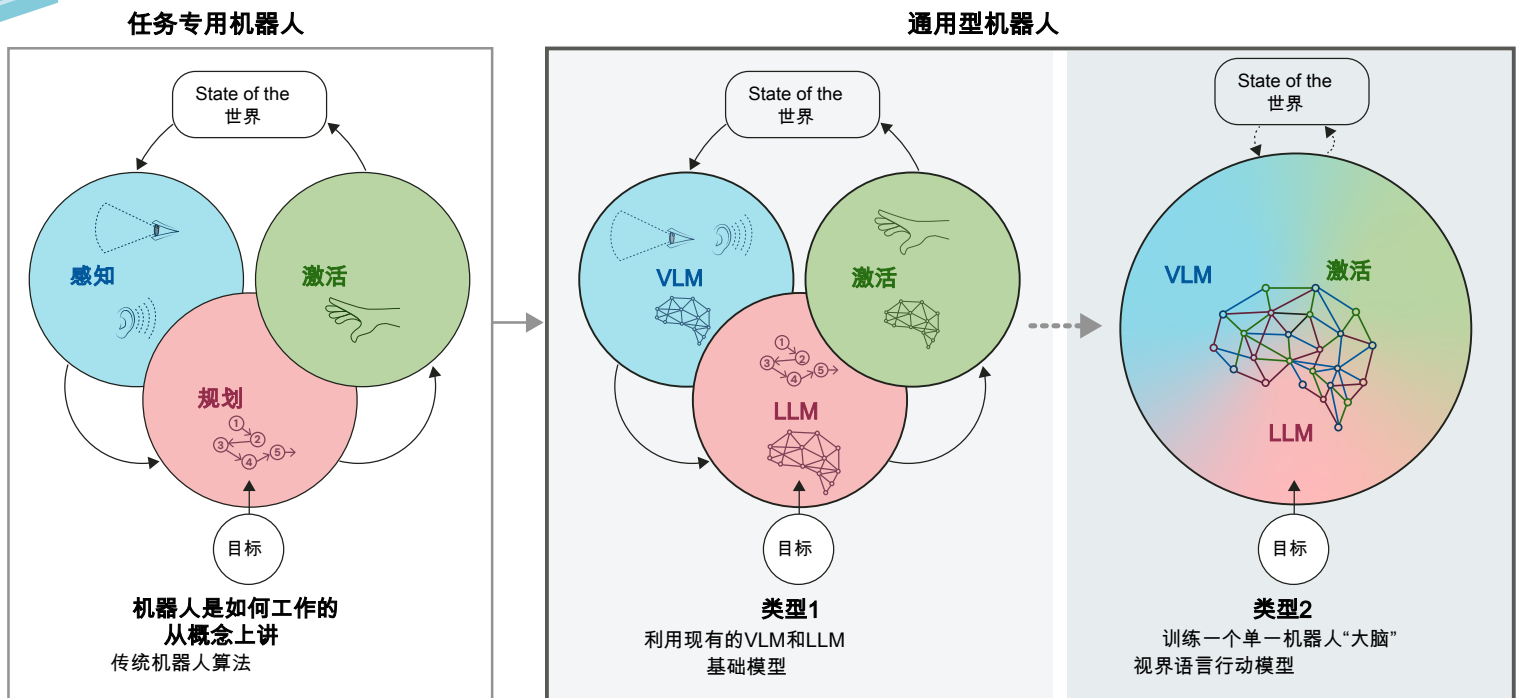
例如，一个用于感知的软件模块可以利用VLM使机器人通过视觉数据了解其周围环境（见图6，“类型1”）。一个致力于规划的模块随后可以使用LLM来充当大脑，使机器人能够根据自然语言提示进行交流和规划任务。例如，如果机器人接收到“给我从桌子上拿咖啡”的指令，它将使用其基于VLM的感知模块来了解桌子上有什么（例如，一瓶苏打水和一杯咖啡）。然后，它将使用其基于LLM的规划模块将任务分解为小的、可执行的步骤，例如拿起咖啡杯、避开苏打水瓶、把咖啡递给用户，并把它放在用户可触及的地方。然而，有效地将高级任务计划转换为在机器人硬件上生成低级动作命令仍然是一个挑战。现有的LLMs和VLMs并非专为机器人开发，这可能导致它们给出高级命令（例如，拿起咖啡杯），而没有指定更精确的动作或考虑机器人的当前状态（例如，由于抓地力不足导致咖啡杯滑落）。机器人需要将一些细节纳入其模型才能成功，例如杯子是否在臂展范围内，或者机器人是否应该……

等待咖啡杯冲泡完成后再抓取咖啡杯。此外，VLM、LLM和执行子模块之间的顺序通信可能会导致延迟。例如，软件可能会首先让VLM检测到杯子，然后让LLM制定计划，最后让执行模块使用机器人手臂来拿起杯子。在模型之间传递信息需要额外的处理。等到计划完成时，咖啡杯可能已经被其他人从桌子上拿走了。

创建统一的机器人基础模型

为了解决上述挑战，研究人员专门训练了面向机器人的基础模型。一组研究人员将视觉语言模块（VLM）、长语言模块（LLM）和驱动模块合并为一个视觉语言行动（VLA）模型。¹³ 此类模型使机器人能够共同感知、规划和行动，并利用实时反馈调整其行为（见图6，“类型2”）。VLA模型可以直接根据视觉和语言输入输出精确动作，解决了使用独立模型组合的机器人遇到的问题。例如，在咖啡取放场景中，如果杯子被移动，VLA模型可以直接获取实时更新并相应调整其抓取轨迹。这种行为模仿了人类的适应性，并克服了类型1机器人基于管道的延迟问题。

图6：机器人基础模型架构演进示例

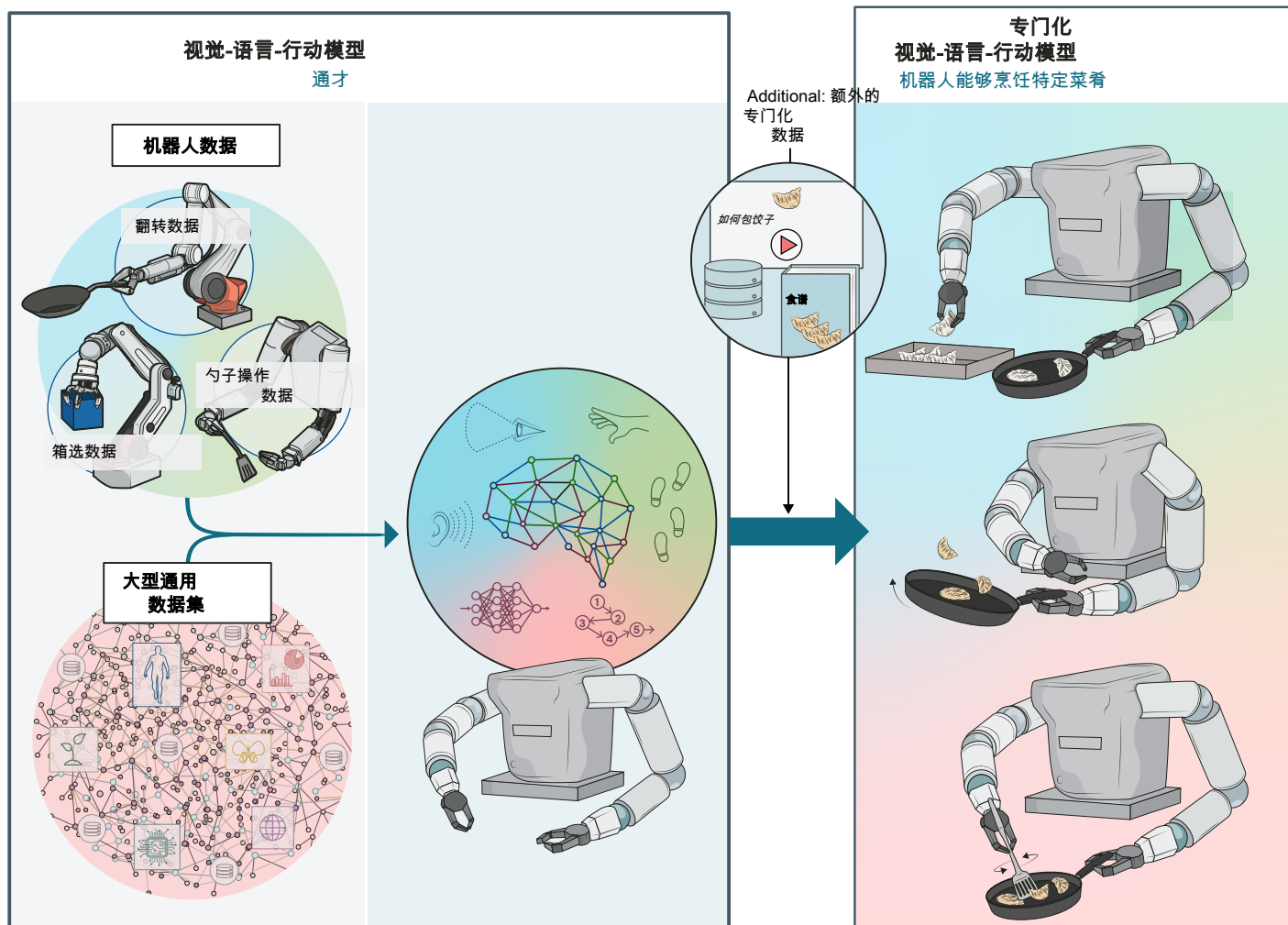


来源：高（GAO）根据Eleanor Tomlinson绘制的图表改编 机器人学习状态 由文森特·范霍克撰写，Medium，2024年3月6日 来源：高奥根据Eleanor Tomlinson的图表改编 机器人学习状态 由文森特·范霍克撰写，Medium，2024年3月6日
<https://vanhoucke.medium.com/the-state-of-robot-learning-639daffbcf8> GAO-26-108079 <https://vanhoucke.medium.com/the-state-of-robot-learning-639daffbcf8>. |
 GAO-26-108079 在地平线上：可能影响社会的三个科技趋势

机器人基础模型开发正在迅速推进，并显示出增加机器人能完成的任务泛化能力的潜力。研究人员使用LLM和VLM的相同成功技术训练机器人基础模型。首先，它们在规模庞大、多样化的数据集上接受训练，以支持不同机器人形态的广泛泛化任务。例如，这些模型可以在移动机器人和非移动机器人等机器人形态上接受训练，用于在多样化的环境中移动或操作各种对象。之后，它们针对特定的下游应用进行微调（见图7）。正如一个

一个人可以凭借一生的经验迅速学习一项新技能，这样的机器人基础模型可以通过少量高质量数据进行调整，以专门从事新任务。最近推出的机器人基础模型已经采用了这种方法，并成功证明了其在未知布局的新环境中的任务泛化能力，例如清洁厨房或卧室。

图7：机器人基础模型训练示例



来源：高某改编自幻灯片 机器人基础模型 Sergey Levine, 加州大学伯克利分校, 2025年3月24日, 演讲

来源：高某改编自幻灯片 机器人基础模型 Sergey Levine, 加州大学伯克利分校, 2025年3月24日, 演讲 <https://www.youtube.com/> <https://www.youtube.com/watch?v=EYLd->

C330NHw7 | GAO-26-108079

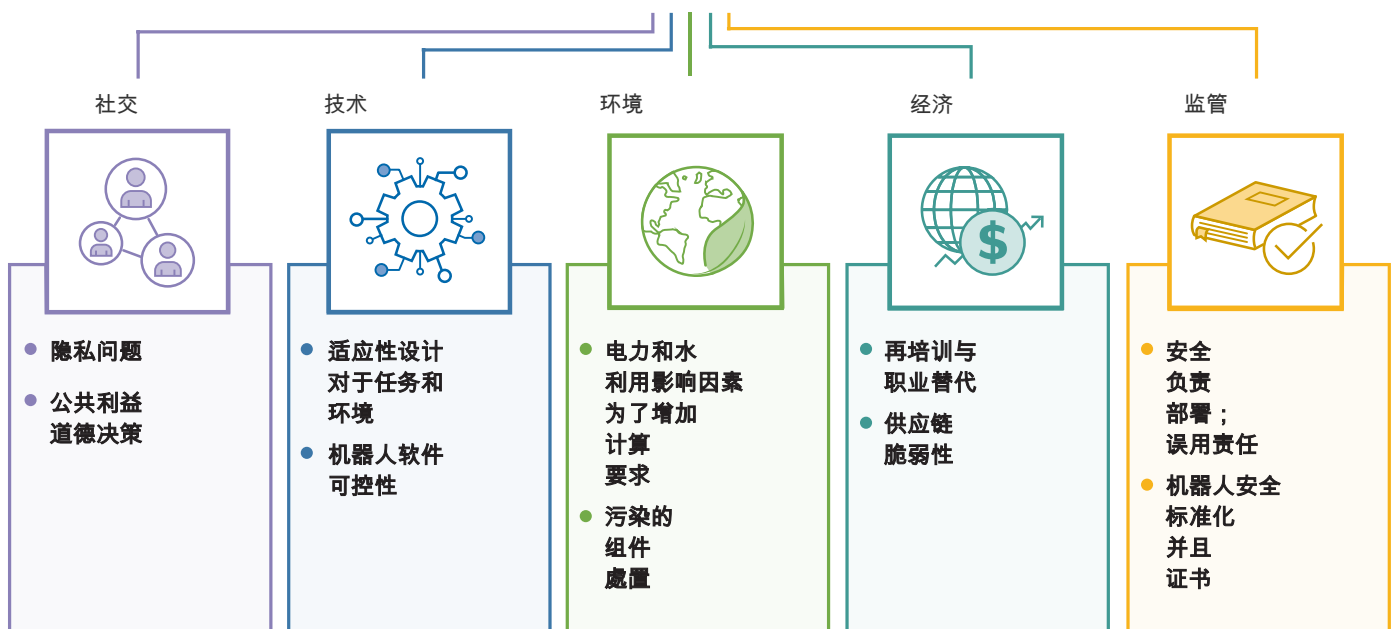
GAO-26-108079

含义

通用型机器人的应用可能对社会的各个方面产生深远影响。我们通过考虑通用型机器人应用于公共基础设施维护和灾难响应的场景，确定了以下影响。我们从这一场景中提供了例子，但我们的分析也适用于其他场景。

通用机器人可以自主检查和维修基础设施，例如电网或地下管道。此外，通用机器人可以支持灾害响应，包括评估损害、清理杂物、进行维修以及建立临时通信网络。这些机器人还可以分类回收物，监控并解决污染问题。它们能够在正常或异常（包括危险）环境中工作。它们可以部署在多种物理和软件平台上，共同完成任务。

通用机器人学



来源：GAO (图标)。| GAO-26-108079 来源：GAO (图标)。| GAO-26-108079

以下将对这些影响进行更深入的分析。



社交

通用型机器人可能会对社会产生重大影响

首先，由于人类对机器人进行的故障维修缺乏意识和监管，可能导致对财产或人类生命的风险或损害，这可能会削弱那些提供服务和管理（例如政府或承包公司）的信任。其次，在正在发生的灾难情况下，人类的监管可能受到限制或无法实现。这种结合可能导致以下情况：

随着自主性的增加，最终可能会导致人们的日常生活受到机器人所作决定的直接影响。

为了降低此类风险，了解机器人增加使用所带来的关键风险将至关重要。例如，利用基础模型如LLMs和VLMs的机器人继承了传统基础模型所具有的风险。因此，机器人学习和决策可能继承现有AI系统的问题，包括：（1）难以将机器人输出与人类价值观对齐，（2）潜在的未预见偏见，以及（3）由于对系统生成输出的理解不足而评估安全性的挑战。与现有的基础模型一样，使用这些模型或以类似方式训练的新模型可能在训练数据中未代表的情况下的表现不佳。此外，它们可能会由于幻觉（例如，在感知或规划中）偏离期望行为。如果机器人失去控制，例如由于对基础AI的控制丢失，这些挑战可能会变得特别危险。



技术

用于不同环境中的灾害响应机器人可能直接对人类有益。

例如，如果机器人能够成功进入并工作于危险环境中，它们就可以在危险废物泄露事件后救出被困人员，而这种事件可能限制了人类行动。此外，如果机器人编队被动员起来应对灾难，它们可以配备网格网络功能，这样即使在传统电信基础设施可能离线的情況下，也能使紧急人员保持点对点通信网络。

此外，开发和通用机器人进行基础设施应用的推进行为可能会要求对结构的设计和建造进行调整和变化。例如，如果一支由机器人维护工人组成的舰队将成为摩天大楼维护的主要手段，建筑师可能设计建筑环境以允许机器人更高效地访问和使用。为了适应这些变化，建筑规范可能需要作出调整。



环境

机器人使用量的增加可能会导致重大的环境影响。

正如我们之前报道的那样，训练和使用生成式人工智能可能导致大量能源消耗、碳排放和水资源使用。¹⁴ 例如，有一篇学术论文估计，训练一个特定的生成式AI模型所消耗的水量可以直接蒸发掉70万升淡水，用于冷却一个最先进的数据中心。¹⁵

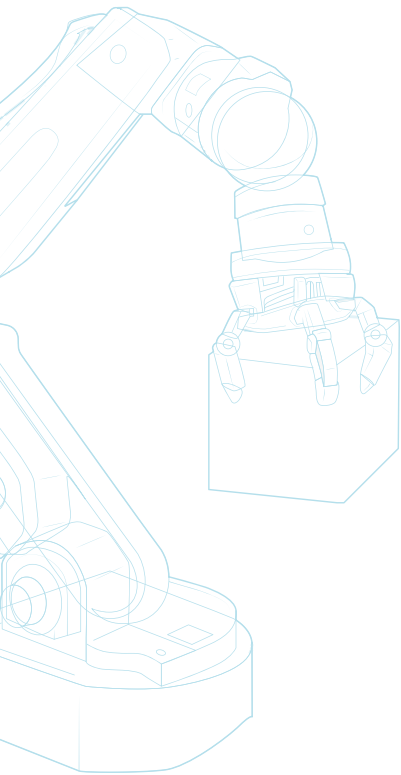
正如我们上面所描述的，为机器人使用的机器人基础模型正在以一种类似于目前可用的生成式AI的方式进行训练。为了随着新数据和算法的出现而融入，这些模型将需要定期重新训练，这需要稳定的能源和水资源供应，并排放碳。此外，正如我们之前所报道的，电子废物的处理可能具有挑战性，电子设备需要更复杂的拆解和分离水平。¹ 处理越来越多的机器人废弃物可能会进一步加剧这个问题。例如，锂离子电池可能被用来为通用机器人供电，而目前这类电池只有10%被回收。其余90%的时间，电池被纳入传统垃圾流中，这可能导致火灾。



经济

大规模部署通用型机器人可能导致不确定的经济后果。

机器人部署的分布可能会对经济韧性构成风险。例如，不均匀的部署可能会扩大韧性差距，使富裕司法管辖区能够负担得起这些先进技术，而较贫穷的社区可能会面临更大的损害、较慢的恢复和长期的经济停滞。此外，这些机器人将创造多少新的任务和角色；通过将任务转移到更安全、技能更高和更高效的岗位上，以增强人工劳动力的作用；或者完全取代劳动力，目前尚不清楚。新角色、增强和替代之间的平衡可能部分取决于劳动力转型速度。此外，快速部署可能会增加风险，因为目前通用型机器人依赖于全球网络化的供应链，这些供应链对半导体和关键矿物的出口管制、自然灾害和物流中断较为脆弱。这些脆弱性可能会削弱依靠机器人作为公共服务和灾难响应的可靠性和有效性，而随着对公共服务和灾难响应的需求不断上升，这些问题可能会变得更加突出。



潜在的政策制定者考量

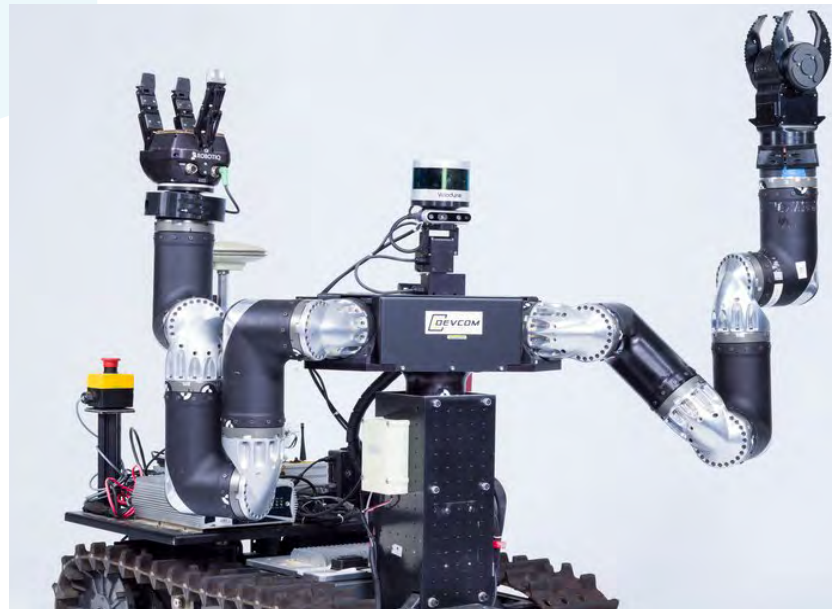
政策制定者必须考虑在社会影响管理、硬件和软件协同开发以及安全标准化等方面的各种行动之间的权衡，以及随着这项技术在社会中更广泛地使用，哪些行动（如果有必要）将是必需的。

社会影响

政策制定者必须考虑对通用机器人各种应用中的使用进行监督的方式和程度，例如在应对灾难时，机器人进行高风险决策。监督要求可以是全面风险管理框架和风险评估流程的一部分。它们可能包括详细说明需要监督或人工干预的类型的情况（例如，超过风险阈值的损害或事件）以及此类监督的及时性（例如，即时响应或接管）。根据风险特征，调整报告频率和监督检查点的次数可能是有必要的。在通常的通信或控制系统不可用的情况下，也应考虑这种情况。人工监督或审查的报告可能以安全报告和警报的形式呈现。对于自主决策，机器人可以就其行为（透明度）、其做出决策的方式（可解释性）以及用户如何理解这些决策（可解释性）进行沟通。前沿科技的发展可能会增加不确定性的种类和程度，从而导致知识和技术方面的潜在更大差距。因此，围绕这些监督要求和它们将构成的部分风险管理框架达成共识可能对政策制定者来说是一项挑战。

硬件与软件联合开发

政策制定者需要考虑协助硬件和软件开发的双重利益与成本。例如，激励创建共享基础设施可能是解决开发可能对个别机构来说过于昂贵的机器人测试和训练环境需求的一种方式。这可以使学术和私营部门合作伙伴共享现有基础设施，并在需要时建设新基础设施，但需要在其他科学技术发展和优先事项上做出权衡。成员还可以创建和共享用于公共使用的培训数据集，发布技术指南和论文以分享他们的进展，这有助于鼓励机器人软硬件社区的更紧密合作。监管机构还可以与共享开发环境成员合作，开发监管沙盒，让监管机构探索现实或感知的监管障碍、潜在的安全措施和认证机制，以及考虑当前的或未来的监管定位。



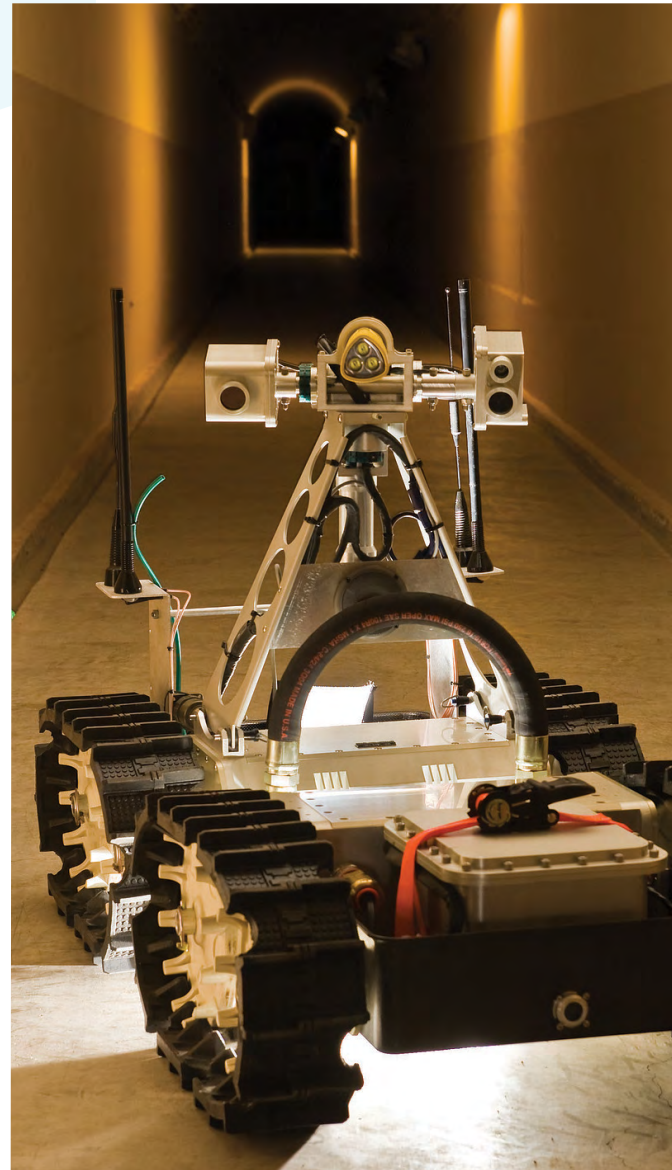
RoMan被构建以提升自主机器人与人类尺度环境中可能遇到的各类物体互动的能力，无论是小而难以抓取，还是大而沉重、难以移动。

来源：NASA/JPL-Caltech 提供 | GAO-26-108079

安全标准化

政策制定者必须考虑解决安全问题的选项，特别是针对测试机器人在可能部署的所有环境中不切实际的可行性。例如，政策制定者可以选择激励私营部门、国际标准化组织和相关政府机构共同开发机器人可观察性框架。机器人可观察性框架是一个软件系统，它不仅超越了监控（发生了什么），还通过分析从每个机器人组件收集的日志和实时性能数据来理解（为什么发生），从而为机器人的规划和行为提供洞察。这个可观察性框架可以作为支持嵌入在风险管理框架中的高级要求的底层。这个可观察性框架可以通过指标和日志支持访问机器人系统（或机器人系统群）的实时信息。它将支持实时监控机器人任务规划和行动，检测和预测机器人安全问题，并在人工监督和反馈下采取主动的风险缓解措施。政策制定者可以激励学术界和私营部门团体开展机器人安全和监管研究，以提供这个框架。这项研究可以涵盖机器人监控、安全控制、风险缓解和自主水平分类。这个框架将允许监控机器人的人更快、更有效地关闭机器人，如果机器人偏离可接受的行为或变得不安全。一旦完成，政策制定者可以考虑要求开发或使用这些类型机器人的实体使用框架的某些要素。

除了可观察性框架之外，政策制定者还可以鼓励机器人系统设计人员和最终用户就一种平衡多种因素（如最终用户、安全和法规要求）的人机交互模式达成一致。例如，即使是为了基础设施维护而设计的机器人具备在管道修复过程中自主规划、评估和采取行动的能力，系统设计人员也可以添加一个软件控制层，要求对计划的每一步行动进行人工确认。政策制定者可以规定在何种情况下需要这种控制层。



桑迪亚的双子座侦察矿难救援机器人配备处理任何数量障碍的能力，包括废墟堆和洪水房间，以帮助救援人员安全高效地到达被困矿工。

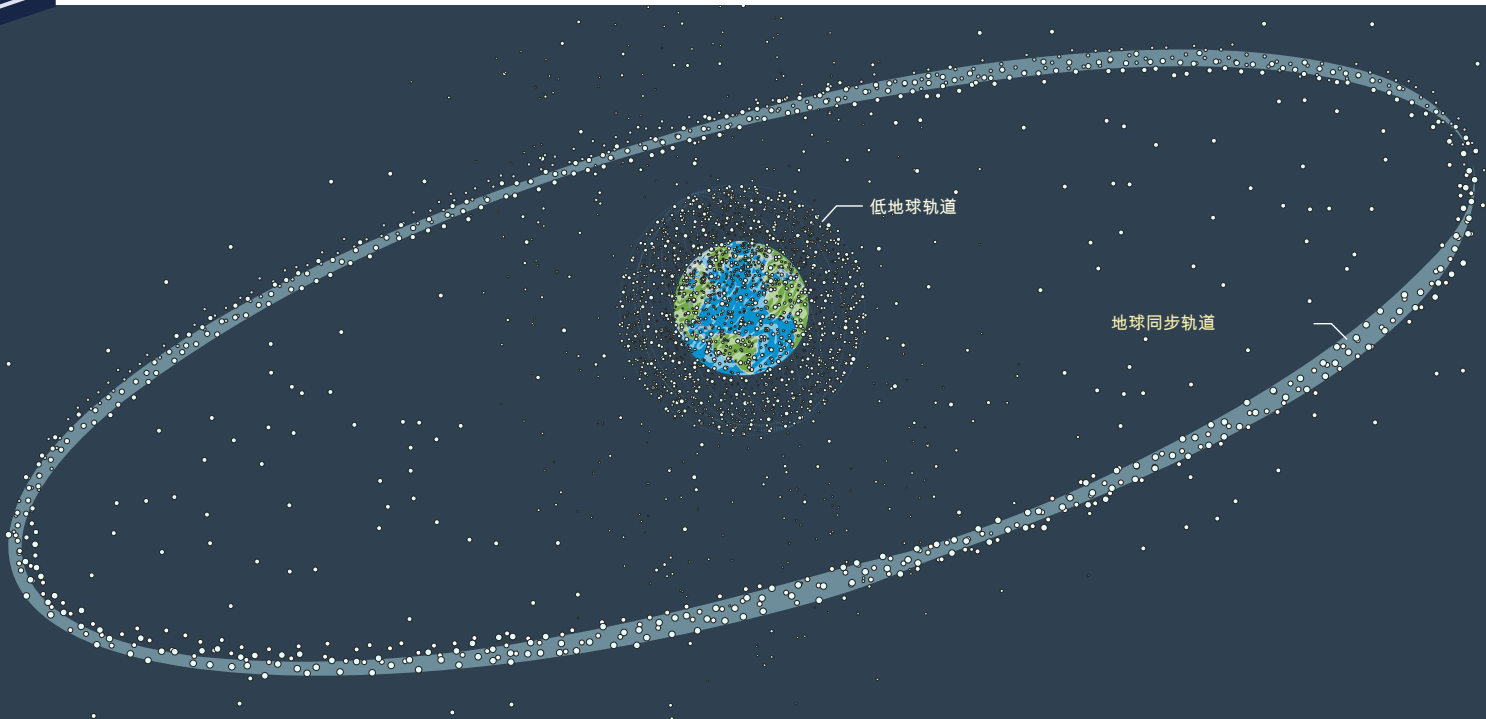
来源：“双子座侦察矿难救援机器人” by 桑迪亚实验室，CC BY-NC-ND 2.0 照片由Randy Montoya拍摄。| GAO-26-108079

轨道碎片修复

哦

轨道碎片清理技术指的是正在发展中的减少太空碎片的技术和方法。目前轨道上运行的数千颗卫星，以及未来几年计划发射的卫星，提供了关键的通信、导航、定时和观测服务，这些服务用于天气预报。然而，这些关键资产正面临日益增长的轨道碎片威胁——包括失效卫星和火箭碎片等“太空垃圾”。现在已追踪到超过30000个轨道物体，其中超过一半是碎片。¹⁷ 额外估计有100万或更多的小型太空碎片难以可靠追踪——大小在1到10厘米之间——但仍有可能损坏航天器。¹⁸ 即使是漆点在轨道速度下也可能变得危险，这种速度可能超过每小时25,000公里（约合每小时15,500英里）。未受控制的碎片增长可能会威胁到支撑我们经济、安全和日常生活的空间基础设施。减轻轨道碎片带来的风险的一种方式是在主动移除、重新安置或重新利用碎片。这类活动被称为碎片修复。修复技术的发展正在进行中，但这些技术的有效利用面临着各种经济和监管障碍。

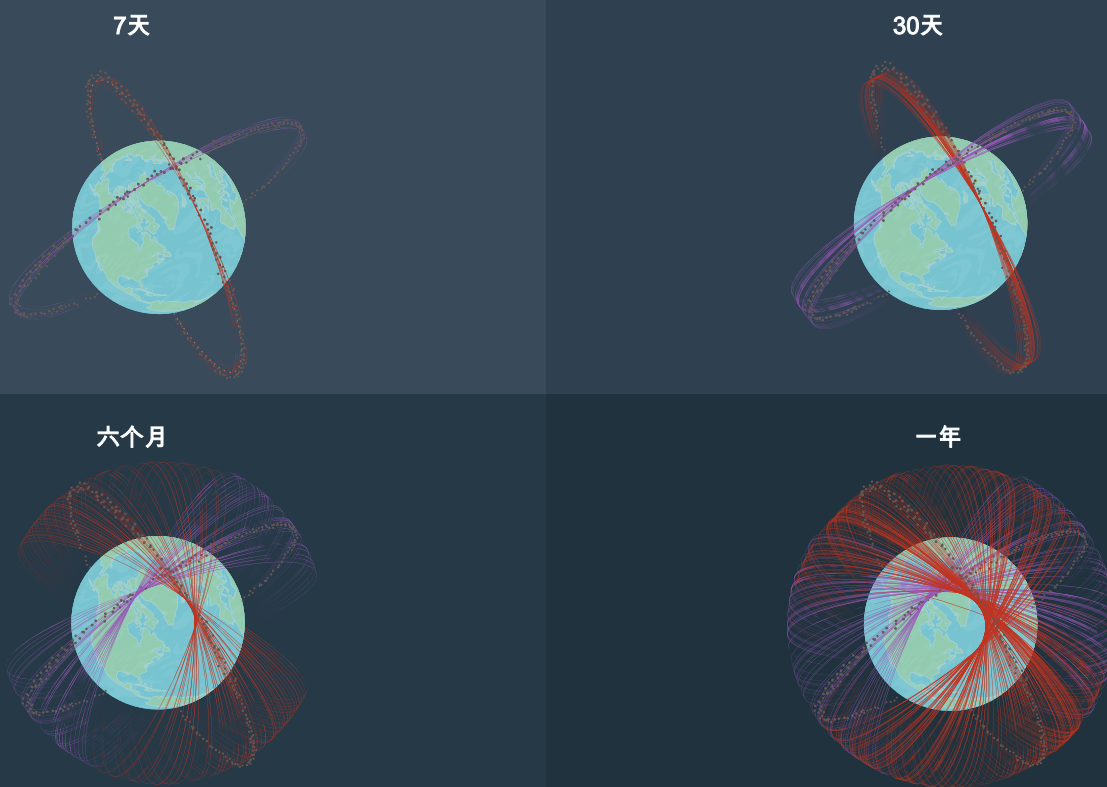
图8：不同轨道上 debris 分布的直观表示



图像比例不正确。
来源：GAO (插图)。 | GAO-26-108079

近距离碰撞和碎片相关的撞击事件正变得越来越频繁，这对无人驾驶卫星和载人航天站都构成了风险。例如，由于一块碎片损坏了他们的返回舱，三名中国宇航员被迫延长在空间站内的停留时间。一项对特定轨道子集的分析显示，2015年至2023年之间，近距离相遇事件的数量大致翻了一番。¹⁹ 每次太空碰撞都可能产生一片碎片云。这些碎片会逐渐漂入其他轨道，引发更多碰撞（见图9）。例如，2009年，一颗失效的俄罗斯卫星撞击了一颗活跃的商业卫星，产生了数千片碎片，至今仍停留在轨道上。我们采访的五位轨道碎片专家表示，如果不采取干预措施，碎片碰撞可能会加剧，使得某些宝贵的轨道无法使用。²⁰ 一种常被称为凯斯勒综合征的情景。²¹

图9：2009年太空碰撞后碎片估计分布



图像比例不正确。



碎片来自宇宙2251

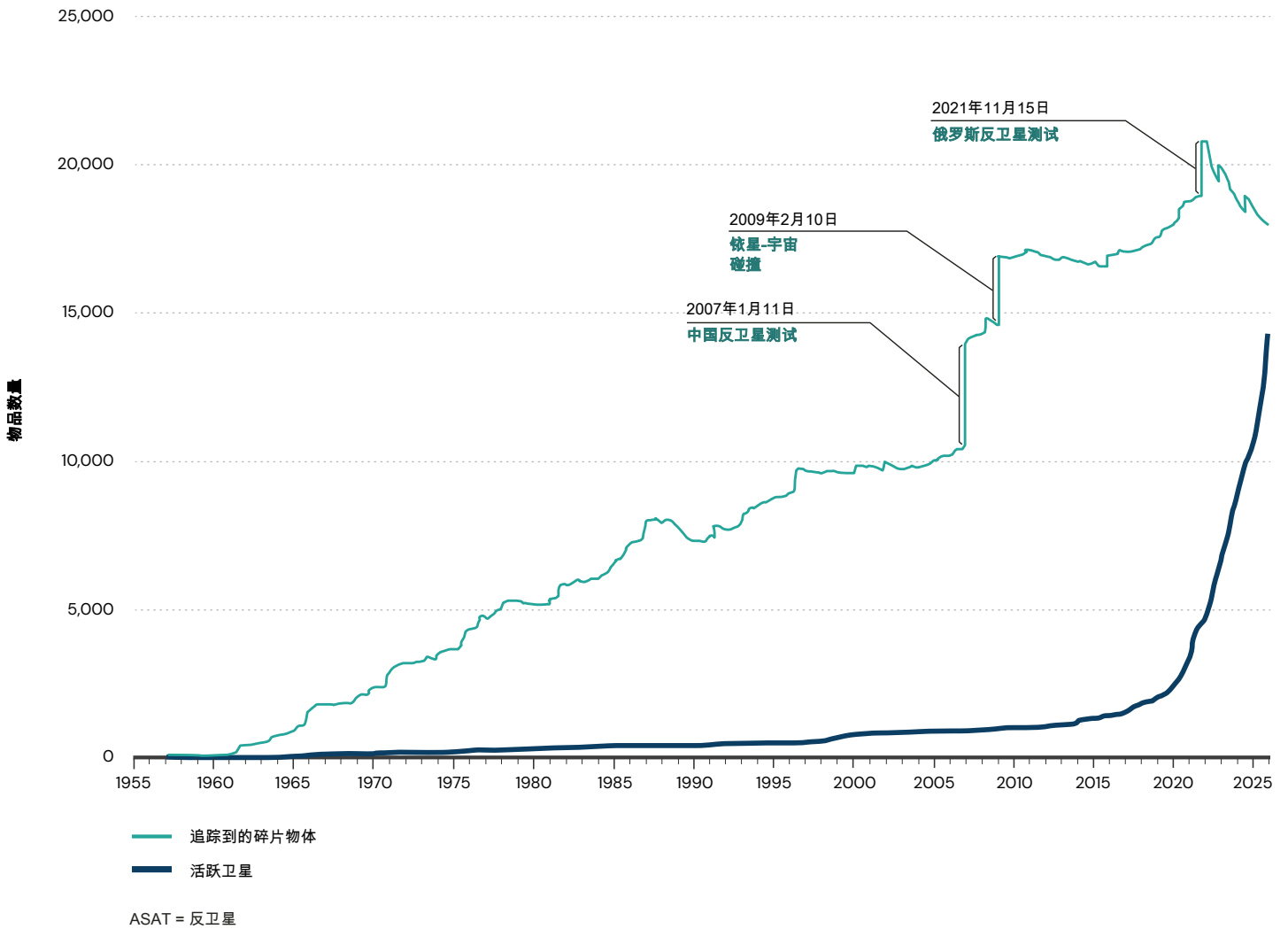


碎片来自铱33

来源：GAO对NASA的改编。来源：GAO对NASA的改编《铱33号与宇宙2251号相撞：未来事态的轮廓》，2009年10月16日。| GAO-26-108079 《铱星33号与宇宙2251号相撞：未来事态的轮廓》，2009年10月16日。| GAO-26-108079

太空机构报告称，轨道中的碎片数量正在快速增加（见图10），目前缺乏足够的激励措施来控制风险以解决这个问题。更多卫星

图10：随着时间的推移，跟踪的太空碎片和活跃卫星



来源：高分析来自乔纳森·麦克道威尔的《人造太空物体总目录》数据，<https://planet4589.org/space/stats/active.html> 来源：GAO对乔纳森·麦克道威尔的《人造太空物体总目录》中数据的分析 <https://planet4589.org/space/stats/active.html>

(追踪目标与时间)| GAO-26-108079 (追踪目标与时间)| GAO-26-108079

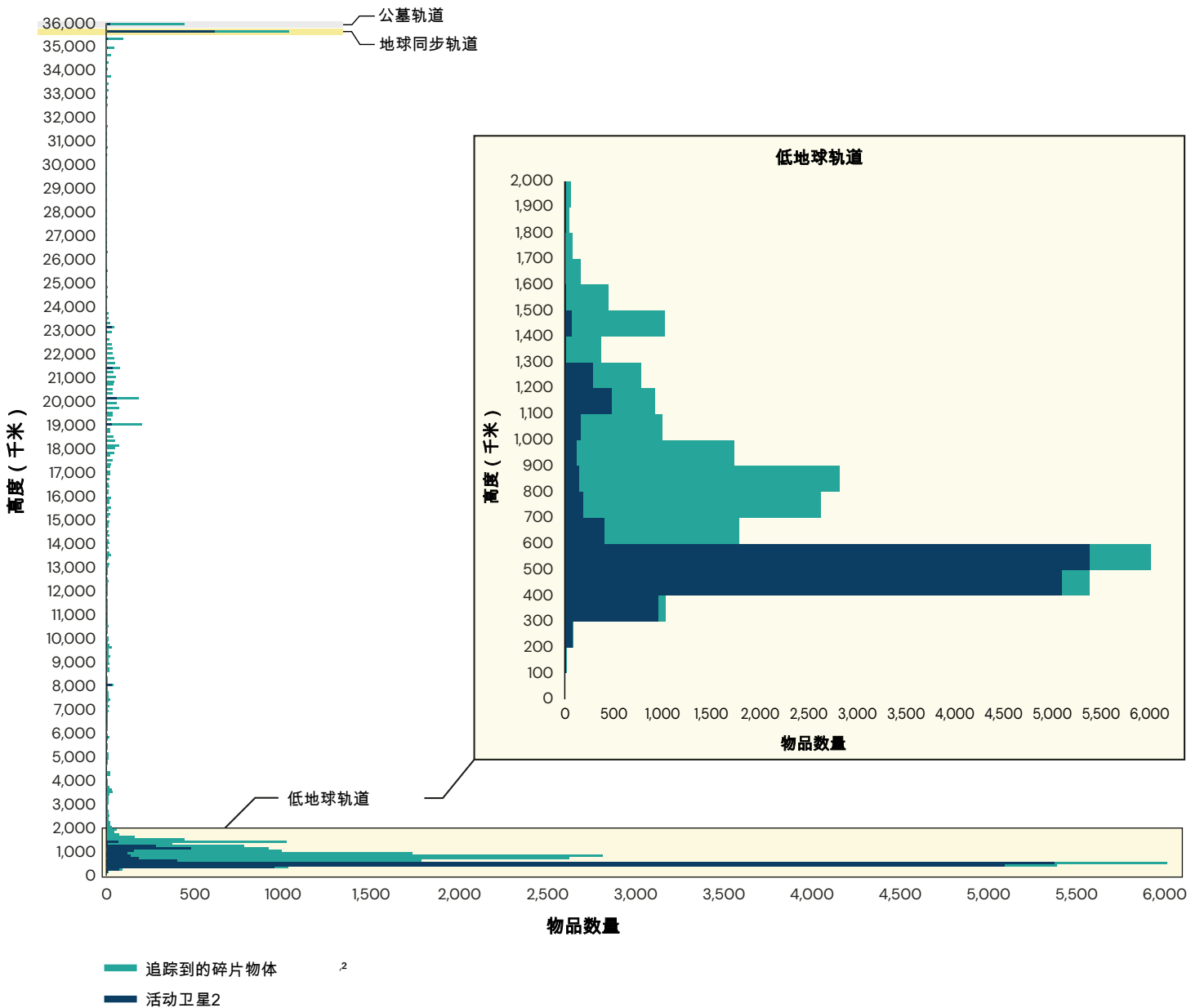
注：跟踪碎片物体仅占轨道上所有危险碎片物体的一小部分。

¹ 跟踪碎片物体仅占轨道上所有危险碎片物体的一小部分。

标注的事件是导致碎片数量显著增加的例子。 标记的事件是导致碎片数量显著增加的事例。

比以往任何时候都更多卫星正在发射，尤其是地球表面上方400至800公里的热门轨道（见图11）。尽管当前卫星运营商在很大程度上正在及时退役新型卫星，但老旧卫星、火箭机体和其他碎片的处理速度并没有跟上新卫星发射和投入运营的步伐。

图11：截至2026年1月7日，不同高度的轨道碎片和活跃卫星跟踪情况



来源：GAO对乔纳森·麦克道威尔的《人造太空物体总目录》中数据的分析 <https://planet4589.org/space/stats/satht.html> (物体与高度)
来源：高翔对乔纳森·麦克道威尔的《人造天体总目录》数据进行分析，<https://planet4589.org/space/stats/satht.html> | 高-26-108079 (对象与高度)。 | GAO-26-108079

注：
跟踪碎片物体仅占轨道上所有危险碎片物体的一小部分。

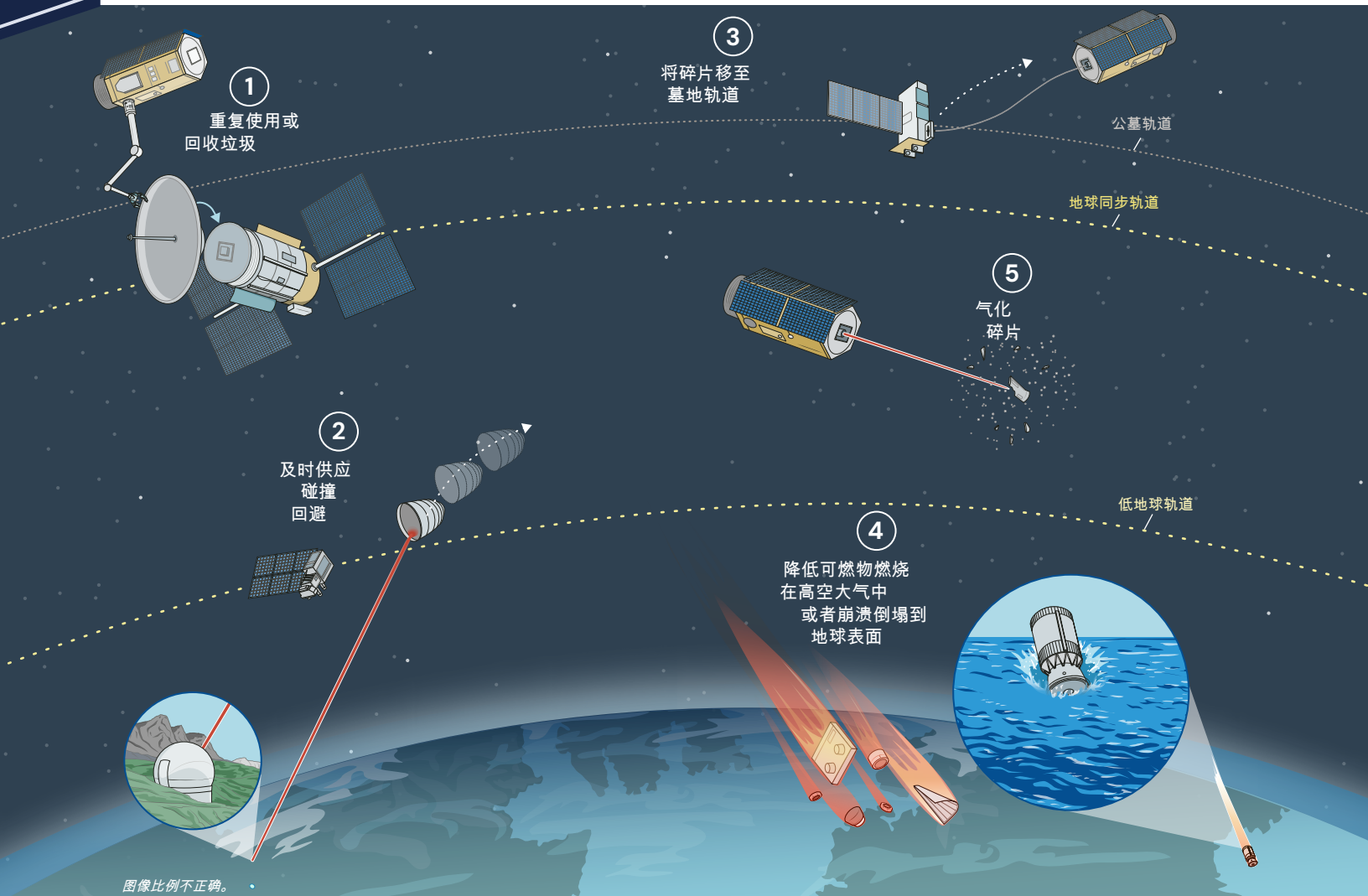
¹ 跟踪碎片物体仅占轨道上所有危险碎片物体的一小部分。

截至2026年1月7日的对象计数。

² 截至2026年1月7日的对象数量。

轨道垃圾清理不仅涉及预防措施，如要求卫星在25年内降轨，而且包括积极移除现有垃圾以减轻其风险。在地球上，根据废弃物的类型和可用的技术，废弃物可以采取多种路径（例如，运送至垃圾填埋场、回收、修复再利用、堆肥化）。同样，根据轨道垃圾的位置、类型以及未来几年中成熟的技术，也可能有多种清理方法。例如，欧洲航天局（ESA）正在资助其首次轨道垃圾移除任务，名为ClearSpace-1。该任务旨在与一大块垃圾对接、捕获并将其拖入地球大气层进行销毁。图12显示了政府和私营行业在太空航行国家中正在追求或考虑的主要路径。

图12：各种清理废墟方法的示例



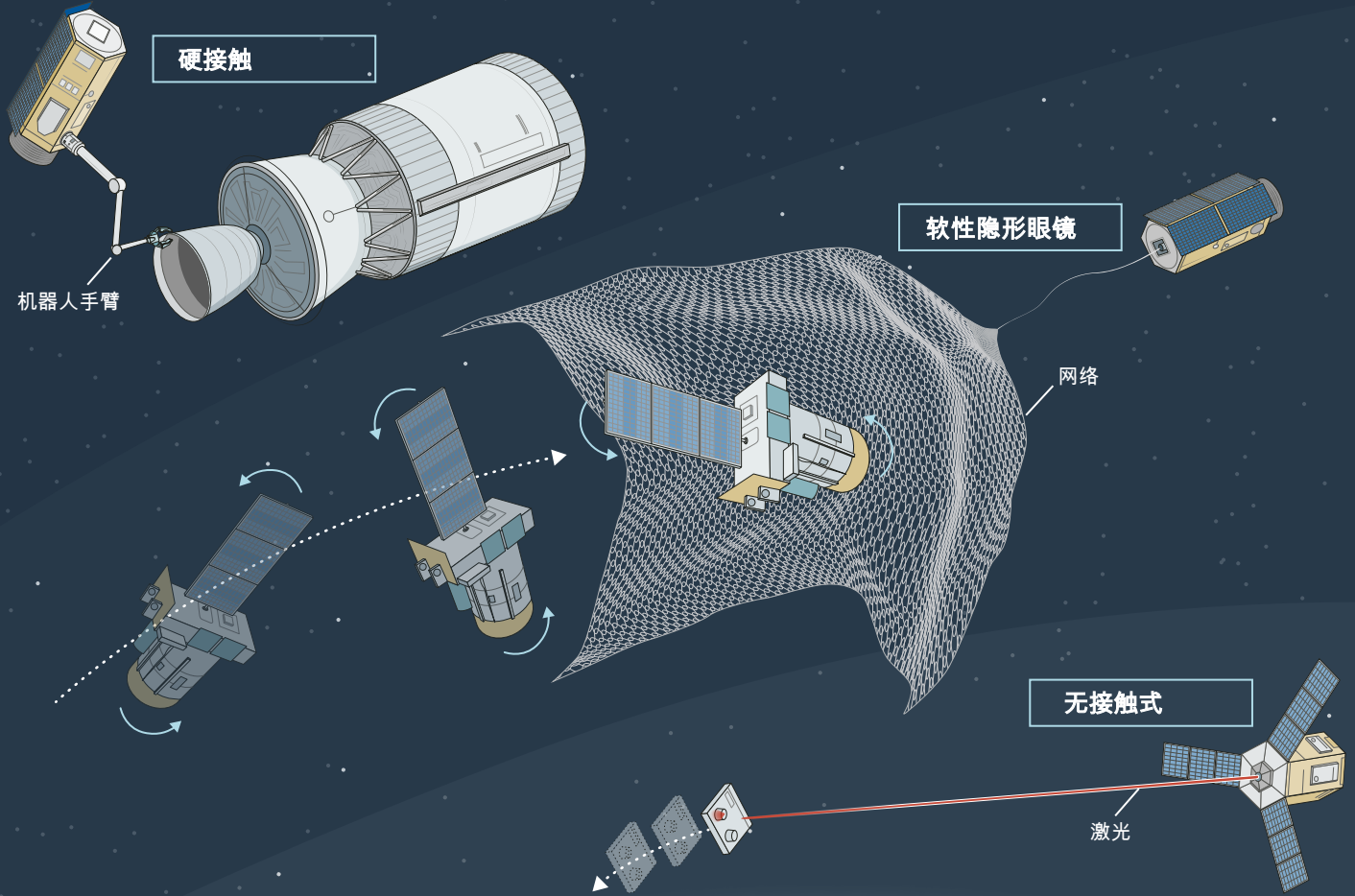
图像比例不正确。

来源：GAO (分

析和说明)。| GAO-26-108079

每种处理方法都需要不同的技术。例如，将地球同步轨道的碎片转移到未使用的、偏僻的轨道（通常称为墓地轨道）需要一种运输碎片的方式，例如抓取和拖曳。将低轨道卫星拖入大气层可以通过拖曳完成，也可以通过增加碎片的空气阻力来实现。图13展示了这类技术的一些例子。

图13：轨道碎片修复技术示例类别



图像比例不正确。

来源：GAO (分析和说明)。| GAO-26-108079 来源：GAO (分析和说明)。| GAO-26-108079

即将到来的发展

世界各地不同太空组织的工程师展示了这些技术的一些原型。2018年，一个欧洲测试任务用网捕获了一颗模拟卫星，2019年又用鱼叉捕获了一颗。2025年，一家美国公司通过机器人锁住了一颗卫星并将其拖入墓地轨道。同年，另一家美国公司在国际空间站内测试了一种充气式碎片捕获装置。据我们采访的专家表示，最成熟的技术包括直接捕获一块碎片（通常使用某种机器人机制），然后将碎片拖到指定目的地。例如，美国商业卫星任务延长车1号在2025年初使用机器人抓捕器将一颗地球同步通信卫星移动到墓地轨道。据报道，中国的卫星实践-21号在2021年或2022年通过机器人抓捕器捕获了一颗地球同步导航卫星并将其拖入墓地轨道。最近，美国太空部队表示，另一颗中国卫星可能在加油任务中捕获了实践-21号，新闻来源报道称这是通过机器人臂完成的。展望未来，欧洲航天局的ClearSpace-1任务计划使用机器人臂捕获其目标，而日本宇宙航空研究开发机构目前正在计划一项任务，通过机器人臂将火箭体移动到大气层中，以进行处置。

然而，仅使用机器人的“抓取和拉扯”方法只适用于相对较大且不翻滚的碎片。其他类型的碎片需要采用不同的方法，例如基于空间或地面的激光，慢慢推动较小的或翻滚的碎片。这些其他方法显示出一定的潜力，但尚未在太空中得到证明，并且通常比机器人的“抓取和拉扯”方法更不成熟。

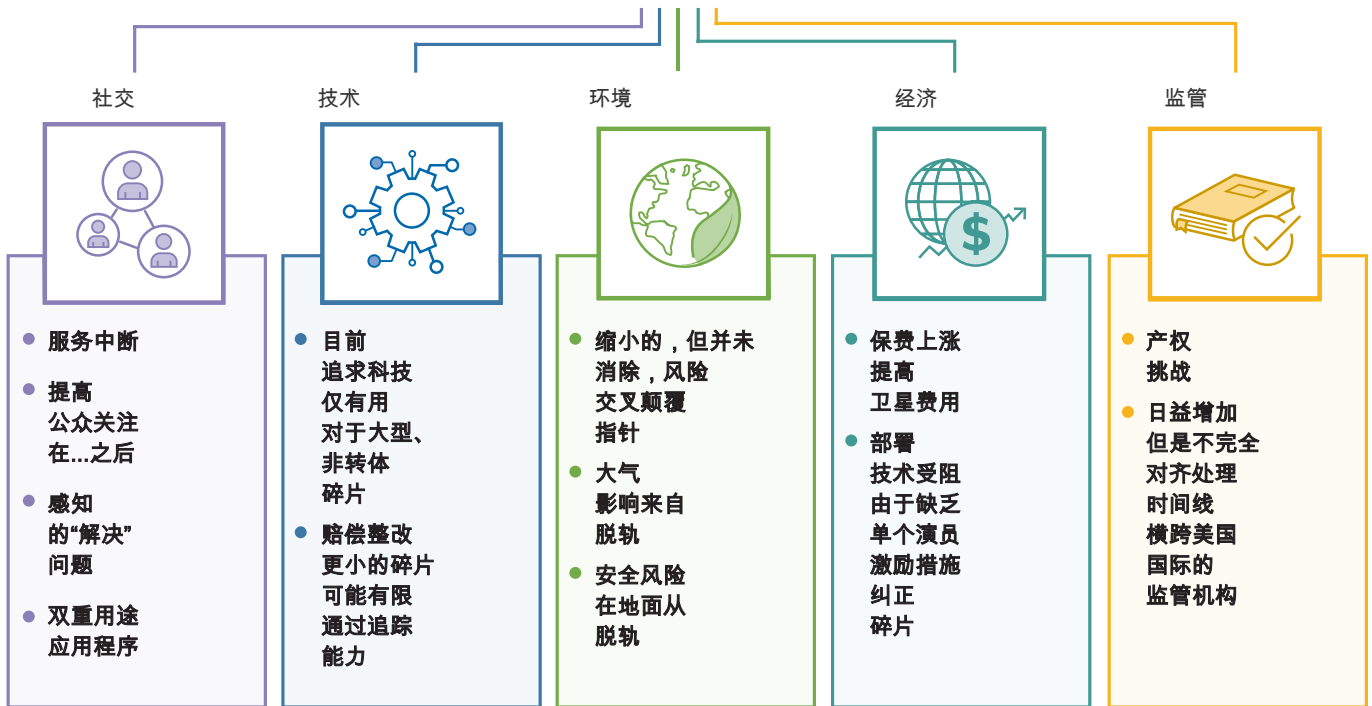
制定一套经济实惠的垃圾清理常规能力在技术上复杂且昂贵，迄今为止，尚无系统投入实际运营。²² 尽管如此，越来越多的人认为，积极的修复对于稳定轨道环境至关重要。主要太空机构和公司越来越多地投资于追踪和清除技术的开发，认识到仅依靠自愿遵守碎片指导方针可能不足以控制碎片数量。

含义

我们的STEER预测情景假设废弃物增长，清理废弃物技术进步但应用受限，太空活动持续进行且没有任何灾难性事件发生。可以使用机械臂或类似方法清理某些大型废弃物，从而使得太空旅行国家每年定期清除五到十个废弃飞船，因此保持在400-800公里的轨道壳层（地球轨道最繁忙的部分）的废弃物质量相对于2025年保持稳定。²³ 应对坠落或小型碎片的其他技术可能在接下来的10年内无法成熟，可能需要扩展太空态势感知（SSA）能力以追踪小型但危险的碎片。²⁴

并列（潜在碰撞）警报可能增加，卫星突然失效的比率也可能上升，这很可能是由于与小型未追踪到的碎片相撞造成的。相应的，保险费率可能会上升，尽管对卫星运营商来说可能仍然可控。²⁵ 在这种情况下，轨道环境虽然足以支持商业，但可能只相差一次事故就会导致一连串碰撞事件，这突出了虽然渐进措施很有价值，但还未真正确保长期可持续性。这一情境引发了一系列的后果。

有限的轨道碎片去除和修复



源：GAO (图标)。| GAO-26-108079源：GAO (图标)。| GAO-26-108079

以下将更详细地探讨上述情景的后果。



技术

即将到来的技术可以处理一些大型碎片，但在处理小型或滚动碎片方面的能力有限。

今天的硬接触解决方案，如机器人格斗，仅针对大型非滚动碎片，这仅占危险碎片的很小一部分。将修复能力扩展到滚动碎片或数百万小于10厘米的碎片，可能取决于软接触或非接触技术，如激光轻推，这些技术目前处于早期发展阶段。修复比大型碎片能以更广泛的速度和方向移动的小碎片，可能还需要提高SSA能力，目前这种能力还不能可靠地追踪小于10厘米的物体。由于修复小或滚动碎片的有限能力，碰撞可能会增加，这可能导致卫星服务用户的停电以及卫星运营商的突然成本冲击。此外，如果风险继续增加，保险公司可能会提高保险费率，或者完全退出市场。



经济

技术部署可能主要由政府资助，私营部署有限。

资助垃圾清理技术的发展和受到所谓的公共品问题的阻碍：没有任何一个运营商有足够的动力去支付他们未创造出的垃圾清理费用，而这些风险和费用则落在整个行业身上。²⁶ 因此，目前尚缺乏一个明确的私人市场来进行废弃物清理。



法律

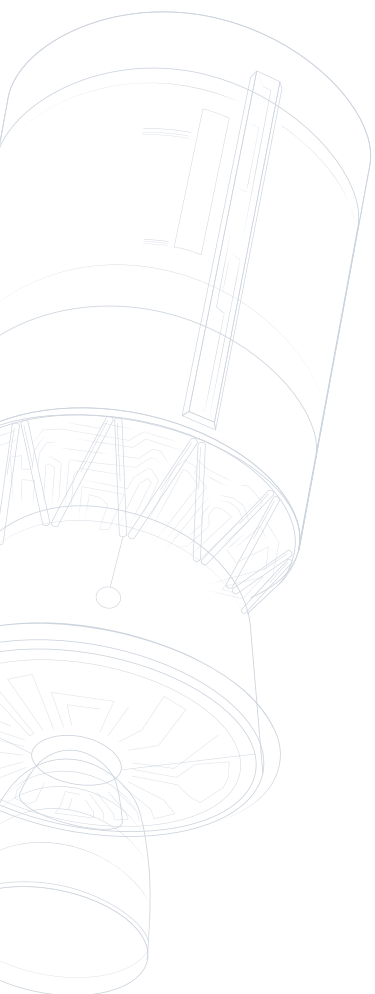
新型技术可能存在，但受到法律挑战的制约

根据外层空间条约，国家对其在太空的活动负有责任，无论这些活动是由政府或非政府实体实施的。²⁷ 许多利益相关者认为，这一责任也延伸到失效的卫星以及卫星碎片。这一要求可能会阻碍回收（其中一块碎片被再利用或回收）；小型碎片的修复（其来源国家可能难以或无法识别）；以及已知但外国来源的碎片的修复（可能需要外交谈判）。某些美国法律和法规



可能会抑制美国公司采用更新颖的垃圾清理形式，例如激光微推技术。²⁸ 行业利益相关者还告诉我们，现有的联邦航空管理局法规可能抑制激光助推。²⁹

增加垃圾清理技术使用的潜在负面影响可能包括安全或环境风险。较大的垃圾可能无法在空气中完全燃烧，从而引入地面受伤、死亡或损坏的风险。³⁰ 此外，碎片再入可以将颗粒物注入高层大气。这些颗粒物可能会改变平流层的温度、加剧恶劣天气事件，或耗尽臭氧层，从而增加到地球的有害紫外线辐射量。然而，关于这些效应的规模和性质仍存在较大不确定性。



潜在的政策制定者考量

政策制定者必须考虑在各种行动之间的权衡，因为太空碎片问题持续演变。这些需要考虑的行动可以分为四个领域：（1）预防，（2）监控，（3）碎片追踪技术进步，（4）修复技术进步。

政策制定者在解决消除小型或坠落碎片的技术缺乏方面有多种选择。例如，他们可以支持针对可扩展激光微推和自主交汇能力等技术的靶向研发，使一颗脱轨卫星能跟随碎片并逐步将其推出轨道。这种支持可以体现在一系列政府资助的地基测试和在轨演示，这些展示将使这些技术成熟到足以由私营企业采用并进行进一步开发。这样的努力可能耗资数亿美元，并可能涉及多个联邦机构的协调。

政策制定者还可以考虑支持新的监测基础设施和能力。实现这一目标的一种方式部署或资助创建更先进的碎片探测系统。这些系统的数据可以输入到如空间民事SSA项目的交通协调系统等监测程序中，该程序目前正在开发中，将追踪大于10厘米的碎片，以便更好地追踪1到10厘米大小的小但危险的碎片。这些数据还可以用于启用人工智能联合预测，预测这些较小的碎片物体何时可能与在轨卫星相撞。³¹ 这样的系统和能力将使轨道飞行器能够确定飞行目的地以及哪些碎片需要优先处理。

政策制定者可以考虑通过选择一系列更好地将私人激励与低地球轨道的长期可持续性相一致的工具，来解决缺乏明确的私营市场进行碎片清理的问题。政策制定者可以考虑的其中一个选项是资助一个项目，以支付私人公司清理碎片。这笔资金可以通过征收适度轨道使用费来获得，卫星运营商在发射时支付一次性费用，或在其卫星运行期间支付持续费用。这些费用可以类似于目前任何发射航天器或航天器重返大气层的人所支付的费用进行结构化。³² 或者，政策制定者可以在发射前要求卫星运营商提供债券。如果运营商在规定的使用寿命内5年内成功将卫星降轨，如目前所要求的，³³ 担保金将被退还。如果不还，担保金将用于资助修复那颗卫星或更高风险的碎片。然而，我们与一些专家交流时，他们指出，当前的卫星运营商大多已经遵守这一5年的时间框架。因此，保证金机制可能无法筹集足够的资金来解决历史活动产生的现有碎片，这些碎片在越来越拥挤的空间环境中仍构成日益增长的风险。

太空条约遵守中的挑战。例如，政策制定者可以支持调查“通知-等待”程序是否符合条约。在这样的程序下，补救服务提供商会公开识别一块具有高碰撞风险的碎片，等待指定的时间，然后，如果没有提出异议，就假定他们获得了（未知）原籍国移除目标碎片的授权。

在已知但外国来源的碎片情况下，政策制定者可以考虑是否根据条约规定，与其他已经将物体送入轨道的国家签订一系列双边或多边协议，授予全面修复属于特定国家的碎片的许可，并评估此举可能带来的潜在风险。我们采访的空间政策专家们表示，一旦美国或其他国家开始认真追求碎片清理，这样的法律挑战的解决方案是可以找到的。

目前，如果一块太空碎片来源不明，外层空间条约可能对修复工作造成挑战，因为该条约将太空中的物体（无论是运行中的还是碎片）的责任分配给物体来源国。因此，碎片修复提供商可能会受到阻碍，因为需要识别来源国并提供后续的授权和监管修复活动。

政策制定者可以考虑多种方法，如果他们决定尝试缓解潜在的合法挑战。例如，政策制定者可以考虑提议对条约进行修订以解决这个问题，同时权衡任何潜在的二级效应。或者，政策制定者可以启动或支持法律分析，探讨其他缓解这些问题的方法。



来源：Pincio/stock.adobe.com | 高26-108079

脚注

1 更多信息，请参阅：“SWITCH：用于控制数字设备的植入式脑机接口Stentrode首次人体试验研究”，访问时间：2025年9月16日。 <https://clinicaltrials.gov/study/NCT03834857>。

2 高 脑-机接口：应用、挑战和政策选项，GAO-25-106952（华盛顿特区：2024年12月17日）。

3 [GAO-25-106952](#)。

4 根据隐私专业国际协会的信息，一些其他州已经制定或提出法案，旨在采取全面方法来管理个人信息的使用。参见“美国各州隐私立法跟踪器”，访问于2025年9月18日。 <https://iapp.org/resources/article/us-state-privacy-legislation-tracker/> 例如，一些州的法律，如加利福尼亚消费者隐私法和科罗拉多隐私法，可能将这些司法管辖区捕获的某些神经植入数据纳入保护范围。

5 马塞洛·伊恩卡，法布里斯·约特兰，伯尼斯·埃尔格。“从医疗保健到战争及其逆向：我们应如何监管双重用途神经技术？”《神经元》。2018年1月17日；97（2）：269-274 <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.12.017>。

6 美国食品药品监督管理局（FDA）目前将符合《食品、药品和化妆品法案》第201(h)节定义的医疗设备的产品视为医疗器械，并受FDA监管。此定义包括但不限于旨在影响身体结构或任何功能的此类设备。

7 是否由FDA监管可植入式脑机接口设备？谁，如果无 <https://journalofethics.ama-assn.org/article/who-if-not-fda-should-regulate-implantable-brain-computer-interface-devices/2021-09>，访问于2026年3月23日

8 [GAO-25-106952](#)

9 公告：脑机接口（BCI）两天混合会议，88联邦法规第7655号（2023年2月6日）。

10 鲁本·S·弗哈根、马克·A·尼尔辛克斯和米尔特·L·蒂尔曼，《消防机器人团队中的有意义的人类控制和可变自主性》 *前沿机器人与人工智能*，第11卷（2024年）：1-4 <https://doi.org/10.3389/frobt.2024.1323980>。

11 机器人软件由三个主要模块组成：感知、规划和执行。感知模块使用传感器感知世界，如同人的眼睛、耳朵和皮肤。规划模块类似于人脑，将感知模块提供的信息与既定的目标相结合，生成行动计划。执行模块则如同人的肌肉和肢体，通过移动机器人硬件来执行行动计划。

12 基础模型是训练在庞大、多样化的数据集上，能够完成广泛一般性任务的规模化AI模型。不同于为单个任务构建一个模型，一个基础模型可以通过微调适应许多下游任务。基础模型的训练过程类似于学生通过高中（广泛学习）然后主修一个特定领域的大学专业。大型LLM和VLM都是基础模型的例子。

13 Anthony Brohan等，《RT-2：视觉-语言-动作模型将网络知识转移至机器人控制》，谷歌DeepMind（2023年7月28日） <https://robotics-transformer2.github.io>。

14 高 人工智能：生成式AI的环境和人类影响，GAO-25-107172（华盛顿特区：2025年4月22日）。

15 李鹏飞，杨建毅，艾哈迈德·伊斯拉姆，任少雷。“让AI更‘节水’：揭示并解决AI模型的秘密水足迹。”《美国计算机协会通讯》，第68卷，第7期（2025年）：第56页 <https://doi.org/10.1145/3724499>。

16 高 科技聚焦：消费电子产品回收，GAO-20-712SP（华盛顿特区：2020年8月31日）。

17 约翰·麦克道尔，“追踪物体与时间”，人造太空物体总目录1.8.0版，2026年1月14日查阅 <https://planet4589.org/space/stats/active.html>。

18 小型碎片的普遍程度通过雷达系统短暂探测到的小型物体的外推、从轨道回收物体的碎片撞击证据，以及基于轨道环境和解体事件的物理模型相结合来估计。有关轨道碎片类型及其行为的更多信息，请参阅美国国家航空航天局轨道碎片计划办公室，“常见问题解答”，天文物质研究和探测科学，访问日期：2025年8月27日。 <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/faq/#> 航天公司，“太空碎片101”，轨道再入碎片研究中心，访问日期：2025年8月27日 <https://aerospace.org/article/space-debris-101> 关于近期对太空环境的详细评估，包括轨道上各种大小碎片数量的估算，请参阅欧洲航天局太空碎片办公室发布的《2025年欧洲航天局太空环境报告》，访问日期：2025年8月27日。 https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/ESA_Space_Environment_Report_2025。



脚注 (续)

¹⁹ 这次分析特别针对的是太阳同步轨道 (高度在400至1000公里之间) 中的连接词 (“两个物体之间的几何接近”)。更多信息, 请参阅欧洲空间局太空碎片办公室, 《2025年欧洲空间环境报告》, 访问日期为2025年8月27日。 https://www.esa.int/Space_Safety/Space_Debris/SA_Space_Environment_Report_2025 .

²⁰ 并非所有轨道都同等使用 (见图11)。专家认为, 低地球轨道中最繁忙的部分面临的最高风险是碎片雪球问题, 尽管我们采访的一位专家认为, 地球静止轨道中碰撞的风险通常被低估。有关低地球轨道各部分连锁碰撞风险的信息, 请参阅美国航空航天学会《理解被误解的凯塞尔综合症》, 航空航天美国, 2025年8月27日查阅。 <https://aerospaceamerica.aiaa.org/features/understanding-the-misunderstood-kessler-syndrome/> 关于地球静止轨道碰撞风险的相关信息, 请参阅Oltrogge, D. L. 等人撰写的《地球同步轨道碰撞可能性综合评估》。《宇航学报》 147 (2018): 316-345, doi.org/10.1016/j.actaastro.2018.03.017

²¹ Kessler, Donald J. 和 Burton G. Cour-Palais. “人造卫星碰撞频率: 碎带的形成。”《地球物理研究: 空间物理学报》 83.A6 (1978) : 2637-2646 doi.org/10.1029/JA083iA06p02637

²² 有关各种轨道碎片修复形式成本和效益的更多信息, 请参阅美国国家航空航天局, 技术、政策和战略办公室。《轨道碎片清除的成本效益分析》 (Washington, D.C. : 2023年3月); 美国宇航局, 科技政策战略办公室, 《成本与效益分析: 缓解、跟踪和修复轨道碎片》 (华盛顿特区: 2024年5月)。

²³ 尽管小型未追踪的碎片直接撞击并损坏卫星的风险最大, 但在特别繁忙的轨道上, 大型碎片可能会发生碰撞或自发断裂事件, 产生数百或数千个更小的碎片。因此, 我们采访的专家将大型碎片物体识别为主要的长期风险, 研究人员已经确定了特别“令人担忧”的碎片。例如, 参见McKnight, Darren, 等人。“在近地轨道中识别出50个统计上最令人担忧的废弃物体。”《宇航学报》 181 (2021): 282-291, [doi: 10.1016/j.actaastro.2021.01.021](https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2021.01.021) 五至十年的估计基于研究结果, 表明通过每年移除至少五艘报废航天器, 可以减缓低地球轨道 (LEO) 垃圾的增长。更多信息, 参见NASA总监察长办公室。《NASA减少轨道碎片风险的努力》, IG-21-011 (华盛顿特区: 2021年1月27日)。

²⁴ 国防部 (DOD) 将太空态势感知 (SSA) 定义为“关于空间物体及其依赖的操作环境 (包括物理、虚拟、信息和人文维度) 所必需的基础、现状和预测性知识及特征, 以及所有实体执行或准备执行太空操作的各个方面、活动和事件。”太空态势感知在一定程度上得益于雷达系统追踪空间物体位置的能力。有关美国太空态势感知现状的更多信息, 请参阅GAO。《空间态势感知: 国防部应评估其如何利用商业数据》. [GAO-23-105565](https://www.gao.gov/products/GAO-23-105565) (华盛顿特区: 2023年4月24日)。

²⁵ 空间行业的人员可以根据需要选择是否为自己的各种活动和资产投保, 在某些情况下还可能被要求进行投保。例如, 太空港运营商和发射服务提供商可以投保以防止在事故中造成财产或旁观者的损害。卫星运营商则可能投保以防止发射前的事故、发射和初始阶段或运行过程中出现的故障。据行业利益相关者和我们采访的专家表示, 卫星运营商在发射阶段大约为半数卫星投保, 但在运行阶段很少这样做。轨道碎片在卫星的发射和运营阶段都构成风险。

²⁶ 轨道碎片被描述为公共资源的悲剧: 存在一个共享资源, 广泛的环境危害, 以及对减轻和修复投资的不足。更确切地说, 轨道碎片在全球化公共资源中表现为污染的外部性。每一次卫星发射都会逐渐增加所有未来用户的潜在风险, 但单个运营商并不需要承担所有由此碎片产生的社会成本。随之而来的是对低地球轨道的过度使用和修复投资的不足, 遵循公共资源的悲剧逻辑; 然而, 这种机制是碎片随着时间的推移而积累, 而不是简单的轨道过度使用。

²⁷ 《关于各国在探索和利用外层空间包括月球和其他天体活动的原则条约》, 1967年1月27日, 美国官方条约汇编第18卷第2410页 (通称《外层空间条约》)。《外层空间条约》将外层空间的人造物体, 包括运行中的物体和碎片, 的责任分配给原产国。这意味着如果一家美国公司发射一颗卫星, 美国政府对此卫星负责。具体而言, 该条约规定: “本条约各缔约国应对其在外层空间的国家活动承担国际责任……无论这些活动是由政府机构还是非政府实体进行的, 并确保国家活动符合本条约规定的条款。非政府实体在外层空间的活动……需要得到本条约适当缔约国的授权和持续监督。”

脚注 (续)

²⁸ 例如请参见49 U.S.C. § 40103条款,“领空主权的行使”和“过境的公共权利”,以及21 C.F.R.第1040部分性能标准对于发光产品。目前的联邦通信委员会(FCC)卫星许可程序可能会阻碍去除太空垃圾的服务 providers 接近并及时去除多块太空垃圾。有关FCC监管挑战的更多信息,请参见GAO。 *空间服务、组装和制造:益处、挑战和政策选项* . [GAO-25-107555](#) 华盛顿特区:2025年7月10日。

²⁹ 关于业界对地面激光助推系统法律和法规的担忧的更多信息,请参见空间政策与战略中心。 *政策合规路线图:小型卫星* (弗吉尼亚州阿灵顿:航天公司,2022年)。 <https://aerospace.org/paper/policy-compliance-roadmap-small-satellites> .

³⁰ 关于物体重新进入地球大气层所造成的环境和安全危害的更多信息,请参见GAO。 *大型卫星星座:缓解环境和其它影响* . [GAO-22-105166](#) (华盛顿特区:2022年9月29日)。

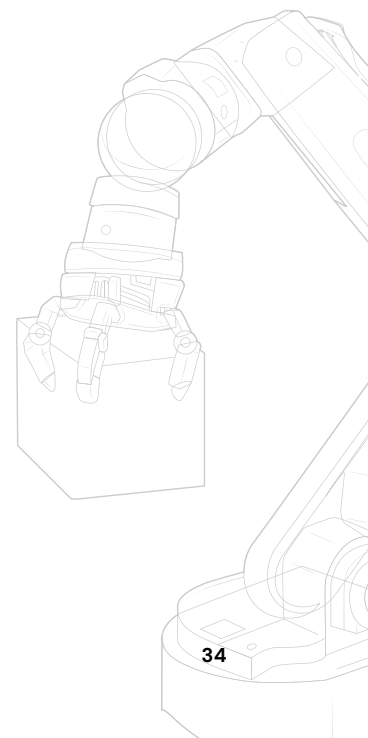
³¹ 关于AI在追踪碎片和预测潜在碰撞中的应用的更多信息,请参见美国国家航空航天局轨道碎片项目办公室。 *项目评审-支持ODPO的机器学习应用* 轨道碎片季度新闻,访问于2025年8月25日 <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/quarterly-news/pdfs/ODQNV29i1.pdf> ;以及 Ma ssimi, Federica, Pasquale Ferrara, 和 Francesco Benedetto。“针对巨蟹座卫星物联网网络的太空态势感知的深度学习方法。” *传感器* 卷23, 期号124 (2022年)。

³² 第 51 美国法典 § 5092

³³ 第47号联邦法规 § 25.114, 25.283。

图片来源

除非另有说明,本报告中所有其他图表均由高(GAO)创建。





GAO 联系与职员致谢

GAO联系列表

斯特林·托马斯，博士，科学与技术评估与分析（STAA）的首席科学家，Thomas.S2@gao.gov。

员工致谢

除此之外，以下STAA员工也对这份报告做出了重要贡献：

黄海登，博士，助理总监兼高级工程师

Jon Menaster，硕士，主管分析师

辛迪·科尔里-莫里森，博士，高级生物科学家

尼科尔·C·卡塔兹拉蒂，博士，高级生物科学家

克里斯托弗·M·库珀，硕士 工程师（人工智能）

杰克·B·瑞德，博士，高级工程师

丹尼尔·辛顿，博士，高级分析师

徐王，博士，高级技术专家

这些员工也为此工作做出了贡献：

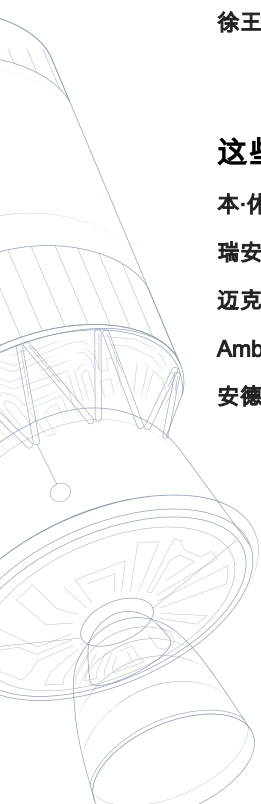
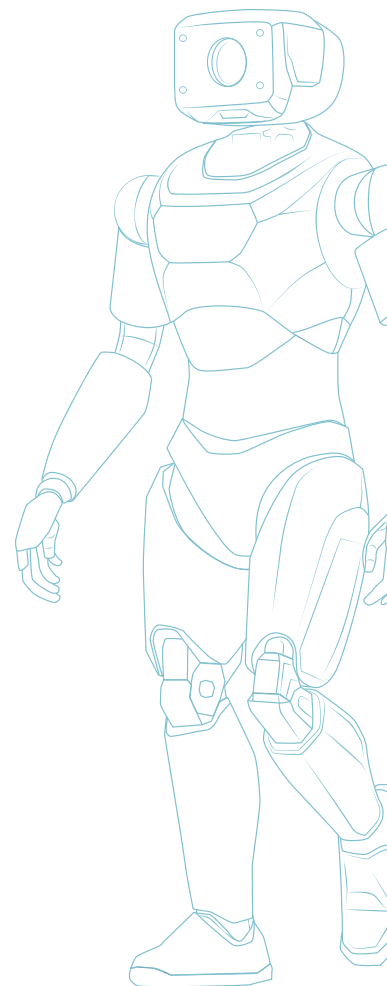
本·休斯，首席通信分析师

瑞安·韩，视觉通讯分析师主管

迈克尔·史密斯，博士，高级经济学家

Amber Sinclair，博士，助理主任兼高级研究方法学家

安德鲁·斯塔维斯基，博士，助理总监兼高级研究方法论学家



更多信息

高先生的使命

美国政府问责办公室，作为国会审计、评估和调查部门，旨在支持国会履行宪法职责，并帮助提高联邦政府对美国人民的绩效和问责制。问责办公室审查公共资金的使用；评估联邦项目和政策；并为国会提供分析、建议和其他帮助，以协助其做出明智的监管、政策和资金决策。问责办公室对良好政府的承诺体现在其核心价值观——问责、诚信和可靠性中。

获取GAO报告和证词副本

最快的获取GAO文件副本且不收取费用的方式是通过我们的网站。每个工作日下午，GAO会在其网站上发布：<https://www.gao.gov> 最新发布的报告、证词和信函。您还可以 [订阅](#) 订阅高先生的电子邮件更新，以获取新发布产品的通知。 没有

电话订购

每份GAO出版物价格反映了GAO的实际生产和分发成本，并取决于出版物的页数以及出版物是否彩色或黑白印刷。价格和订购信息已在GAO的网站上公布。 [https:// www.gao.gov/ordering.htm](https://www.gao.gov/ordering.htm) .

请通过拨打 (202) 512-6000，免费拨打 (866) 801-7077或TDD (202) 512-2537下单。

订单可以使用美国运通卡、发现卡、万事达卡、维萨卡、支票或汇票支付。如需更多信息，请致电咨询。

与高连接

与高连接 [X](#)，[领英](#)，[Instagram](#)，并且 [油管](#) .

请订阅我们的 [邮件更新](#) 请听我们 [播客](#) .

访问GAO网站，请访问<https://www.gao.gov>。

举报联邦项目中的欺诈、浪费和滥用行为

联系FraudNet：

网站：
<https://www.gao.gov/about/what-gao-does/fraudnet>

自动应答系统：(800) 424-5454

媒体关系

Sarah Kaczmarek，总经理
[媒体 @高政府](#)

国会关系

David A. Powner，代理总经理
CongRel@gao.gov

一般咨询

<https://www.gao.gov/about/contact-us>



美国政府问责办公室
441 G街西北，华盛顿特区，20548