

轨道数据中心的政策考量

伊莉斯·谢勒与伊丽莎白·桑切斯 | 2026年9月

轨道数据中心可通过在太空中处理特定工作负载，补充地面基础设施，尤其是在轨道上生成数据的情况下。其价值将取决于技术性能、生命周期经济性、市场需求以及一个不会阻碍测试和部署的监管环境。

关键点

轨道数据中心更有可能补充而非取代地面数据中心，其近期潜力主要集中在专业化的基于太空的工作负载上。

在轨处理数据可以减少下行链路需求，并提高对地球观测、遥感以及航天器自主等应用的服务响应能力。

热管理、辐射、通信能力、有限维护、网络安全和发射成本仍然是重大的技术和经济限制因素。

政策制定者应确保频谱资源充足，简化卫星牌照发放流程，明确网络安全要求，扩建和更新发射基础设施，并解决轨道可持续性问题。

目录

要点概览.....	1
-----------	---

引言

轨道数据中心是专门用于通过处理数据来支持计算功能的卫星。这项新兴技术正随着空间数据量的增长、全球对计算能力需求的提升以及商业航天能力的进步而受到越来越多的关注。随着空间经济的持续增长以及更多数字服务依赖基于太空的基础设施，轨道计算可能对特定的基于太空的工作负载变得有用。目前，政府评估、技术研究和行业可行性研究正在探讨是否可以将选定的计算功能置于轨道上以用于特定应用，尽管仍然存在重大的工程和经济问题。

今天的轨道数据中心概念不应被视为近期替代地球上的4个数据中心的方案。地球上的数据中心受益于成熟的供应链、更易于管理的地面云基础设施、更短的维修和升级周期以及更低的运营复杂性。相比之下，轨道系统必须在更恶劣的环境中运行，包括辐射暴露、热管理挑战、通信限制以及高昂的部署和更换成本。⁵如果计算能力能够克服当前的技术和经济障碍，那么核心政策考量将不再是轨道系统是否能够替代地面超大规模数据中心，而是它们是否能够足够有效地执行专业计算功能，从而证明其运营复杂性的合理性。

轨道计算可以减少带宽需求，提高操作响应能力，尤其是在需要在轨道上而非地面做出决策的情况下。

轨道计算近期最有力的机遇在于那些能从处理在太空中产生数据的工作负载中获益的应用。这包括地球观测、遥感等。从更长远的时间尺度来看，机载或分布式计算以及航天器自主性也可能对某些月球和地月空间任务变得有用，尤其是在通信架构或操作需求倾向于本地处理的情况下。在这样的场景中，轨道计算可以减少带宽需求并提高操作响应能力，特别是在决策需要在轨道上而非在地面上做出时。

因此，轨道数据中心应被视为数字基础设施的一种补充层级，而非对地面系统的全面替代。公共政策应专注于确保现有的监管框架允许市场识别和发展那些轨道计算能提供真正比较优势的应用，这将使轨道系统成为更广泛数字基础设施生态系统中有意义的补充。

为什么轨道数据中心正变得日益重要

对计算密集型服务的需求与商业航天能力的提升同步增长，正引发对轨道数据中心的兴趣。政府问责署（GAO）2026年4月的“科学与技术聚焦”将基于太空的数据中心描述为“用于存放人工智能和其他计算需求的数据处理和存储系统的卫星”，可能减少对地面数据中心所需的土地、电力和水资源。在反对扩大地面数据中心设施建设的大背景下，这种描述有助于解释为什么该概念现在正获得政策关注，尽管其底层技术仍处于早期阶段。

轨道数据中心最终可能在特定用例中补充地面基础设施。

私营部门的研究强化了这一兴趣。谷歌的“阳光捕捉”项目是一项探索性举措，旨在研究利用太阳能卫星星座、专用处理器和自由空间光通信在太空中扩展机器学习计算能力的可行性。¹¹ 泰利斯阿莱尼亚太空公司的ASCEND项目同样将太空数据中心视为一个可行性问题，表明轨道计算已成为结构化技术和商业研究的主题。¹²

更广泛的相关性在于，轨道计算在成为与地面云具有竞争力之前，可能先成为特定工作负载的有用数字基础设施层。¹³ 一种适用于特定任务类型的基于太空的架构，可能仍然对通用计算而言是不经济的。特别是在延迟、维护、更换和规模经济持续青睐地面设施的情况下。因此，当前的证据支持审慎的关注，而非过高的期望。

轨道数据中心最终可能在特定用例中补充地面基础设施，但其近期重要性将取决于技术及经济约束是否能在可接受的成本内得到管理。政策制定者的作用是创造一个监管环境，以最大限度地减少测试和部署这项新技术的非必要障碍。一旦这些监管障碍减少，评估轨道数据中心的真实价值将更容易。

轨道计算的优点

轨道计算最有可能的近期应用场景是针对特定任务的现场数据处理。当数据在轨生成和处理，且仅将其中一小部分传回地球时，轨道数据中心可以减少传输数据量，并在某些任务中提升（效率/能力）。这一逻辑对于地球观测、远程操作响应、遥感、航天器自主以及其他原生航天任务尤其适用。

一种相关但更具偶然性的可能性是，轨道系统可以在特定应用中减轻某些特定地点的地面基础设施压力。GAO指出，太空数据中心可以减少地球数据中心的整体土地、电力和水资源需求，而谷歌的“捕光者”项目同样将太空计算框定为能够减轻对地面资源压力的一种方式。

这些潜在益处只有在特定的系统配置下才会实现，它们并不能证明轨道数据中心在通用云计算工作负载方面具有成本竞争力。这些优势在实践中是否重要，将取决于发射、维护、通信、更换和轨道运行等全生命周期的经济性。因此，相关的问题不在于抽象地讨论轨道计算是否更优越，而在于考虑了工程约束和全生命周期成本后，它是否为特定操作提供了净优势。

出于政策目的，关键启示在于，应逐个用例评估轨道数据中心，而不是将其视为一个单一整合的市场。如果监管合规成本被最小化且在各个用例中平等，那么每个用例的实际成本将仅限于技术本身，这有助于明确哪些用例真正受益于轨道计算。通过透明化的合规要求和简化的许可程序，可以降低监管成本，正如本报告后面详细讨论的那样。

围绕轨道计算的优势将因具体任务和任务类型而异；政策应当反映这些差异，而不是将这一领域视为单一市场。

轨道数据中心的技术与经济挑战

轨道数据中心面临重大的工程和经济限制。现有的技术研究表明，辐射暴露、热管理、通信能力、维护有限、网络安全和系统弹性是其在设计和运营中反复出现的挑战。

热管理是最大的工程制约因素。计算设备产生大量废热，必须将其移除以维持可接受的运行温度。地面数据中心可以通过空气和液体冷却系统来管理这种热量，最终将废热转移到周围环境中。在太空的真空环境中，航天器无法通过对流将热量排放到周围环境，必须通过热辐射来内部排放废热。这一工程挑战涉及散热器面积、航天器设计、质量和功率密度之间的权衡，这些因素可能限制系统规模和性能。即使轨道系统可以获得大量太阳能，散热仍可能成为主要的工程设计制约因素。

辐射是轨道数据中心面临的另一项工程挑战。根据轨道的不同，防护措施、组件选择和任务持续时间，暴露于电离辐射和高能粒子会增加故障风险，降低组件性能，并缩短硬件寿命。辐射硬化和其他缓解技术可以提高硬件的抗辐射能力，延长其使用寿命。

并限制损害。然而，辐射硬化会增加与卫星质量、功耗、性能、硬件资源和工程复杂性相关的成本。²⁴

轨道上的维护和升级周期与地面数据中心差异巨大。地面数据中心可以相对容易地进行维护、扩展和更新，而轨道系统虽然物理上存在，但维修和更换的机会有限，因此轨道上的维护工作仍然困难、昂贵，并且对许多架构而言并不可行。硬件故障在轨道系统上的修复难度可能远大于地面数据中心。此外，超大规模数据中心计算技术的快速变化，如果卫星部署计划与硬件进步不同步，可能导致技术过时。这种动态效应实质上缩短了轨道硬件相对于其地面对应物的可使用生命周期，这直接转化为比同等规模的地面部署更高的生命周期成本。

轨道上的硬件故障比地面数据中心更难处理，这大大增加了冗余、容错和系统弹性的重要性。

这些工程和经济限制，又因一套没有直接地球对应物的网络安全和数据治理问题而加剧。它们的攻击面可能涵盖航天器、通信链路、地面基础设施和云管理系统。指令通道和遥测数据可能易受欺骗攻击或未经授权的访问；射频链路可能受到干扰；此外，供应链的妥协、恶意固件或内部威胁（取决于架构）可能同时影响太空和地面组件。根据涉及的架构、任务、数据、技术和管辖区域，运营商还可能遇到出口管制和政府访问要求，以及隐私和数据治理方面的考量。

例如，根据其架构和任务，美国运营商可能需要遵守联邦通信委员会（FCC）的许可要求；并且，只要系统运行受监管的遥感功能，就可能需要根据《美国法典》第15编第960部分（15 C.F.R. Part 960）获得国家海洋和大气管理局（NOAA）的许可。此外，根据技术、系统数据及其他特征，还可能适用出口管制限制或其他特定行业法律义务。

由于航天器一旦部署后往往难以甚至无法维修，因此应将网络安全和韧性贯穿于系统设计、开发和运行的全过程。

此外，联邦政策与指南，例如太空政策指令-5和国家标准与技术研究院（NIST）的网络安全指南，共同确立了与商业航天系统相关的网络安全原则。各机构针对航天运行、通信、遥感、出口管制和网络安全等不同方面进行管理，但尚无单一的、普遍适用的联邦框架将轨道计算作为综合的天地网络架构进行规范。

由于航天器一旦部署后往往难以甚至无法维修，因此应将网络安全和弹性能力贯穿于系统设计、开发和运行的全过程。相关措施包括强加密和身份认证、弹性规划，以及

供应链风险管理。现有的联邦网络安全框架可以为管理和控制空间和地面段的风险提供一个起点。

这些运营、安全和治理方面的负担共同表明，早期的轨道数据中心应用更有可能涉及专业、任务驱动的计算负载，而非通用云服务的替代。对于具有明确需求的工作负载而言，这种额外开销更容易得到辩护，而对于地面基础设施已经能够很好地处理的通用计算而言则不然。若轨道上的处理能够减轻下行链路负担、支持航天器自主性，或处理对单位计算成本的时间敏感度高于原始成本的工作负载，则可能具有商业价值。³³ 地面数据中心很可能仍然是广泛商业计算的首选平台，因为它们受益于成熟的基础设施、成熟的商业模式以及更简单的维护和升级周期。³⁴

图1：地面数据中心与轨道数据中心对比

维度	地面数据中心	轨道数据中心
位置	在近地空间（LEO、MEO、GEO）附近的设施地面；偏远 权力、网络 and 用户	从太空环境
力量	坚固、低成本的电力 来自地面电网	建筑依赖；太阳能 可以丰富，但产生 存储、分销和日食 周期限制了系统设计
冷却与热排放	成熟且经济实惠的空 液冷解决方案	必须排放废热 辐射地，散热器面积，质量 几何形状和功率密度可能会限制 系统设计
维护与升级	常规物理访问； 硬件可以修复或 定期更新	难以或无法进入； 硬件必须高度可靠。
用户延迟	低延迟（本地/区域） 地面网络上的用户	建筑依赖性；可降低 空间本地处理的延迟 但会增加某些方面的延迟 地面用户
带宽与数据链路	高带宽光纤网络 带有冗余	频谱和链路容量通常 有限的；条件多变和线路 不可见约束
环境与可靠性	受控环境 经过验证的运行历史	接触辐射和热量 骑行；可靠性要求 取决于轨道、任务持续时间 以及系统设计
规模与成本（今日）	大规模低成本 计算美元	早期；生命周期经济 保持不确定性和部署 成本很高
最适合	通用工作负载 云服务、人工智能/机器学习训练、自主性、空间科学、远程 以及存储	太空原生数据处理，ISR 感知，边缘处理
轨道数据中心并非地面数据中心的替代品，而是具有潜在可能。 针对利用空间处理优势的特定工作负载的补充。		

轨道数据中心的政策挑战与建议

政策制定者应减少实验中的非必要监管壁垒，以有效衡量轨道数据中心的效益。这种减少包括取消频谱接入限制、简化低效的许可流程、解决发射能力限制，并考虑轨道碎片和网络安全风险等外部性。

这些改革是必要的，因为频谱是使计算功能得以实现、从而使轨道数据中心具有实用价值所必需的资源。缓慢的许可流程和发射能力限制阻碍了轨道数据中心的频繁发射，进而妨碍了其提取关键性能数据的迭代测试能力。难以克服的网络安全漏洞以及过于拥挤的轨道环境，使得轨道数据中心在完成充分测试之前就面临成为无效方案的风险。

轨道数据中心需要可靠的频谱接入，用于天地、地天以及空间与空间之间的通信。美国联邦通信委员会（FCC）的“为奇异太空事物提供频谱丰富度”项目正在考虑采取措施，以明确现有频谱分配的接入权，并为遥测、跟踪和指令以及其他新兴航天应用提供额外的频谱。更普遍而言，频谱权利和协调程序方面的不确定性会增加交易成本并阻碍投资。更清晰的规则和更高效的许可或许能减少监管不确定性以及不必要的行政壁垒。FCC已采取改革措施，以现代化其卫星和地面站许可框架，并正在研究为发射、再入和轨内活动创造更多频谱的方法。随着卫星技术将通信、计算、存储等功能相结合，某些轨道数据中心架构仍可能引发疑问：现有许可和频谱要求将如何适用于新兴的混合系统。监管机构应主动确定轨道数据中心等新兴技术将如何融入现行合规体系，或开始制定考虑下一代系统的全新法规。这样做将防止监管阻碍轨道数据中心的测试和部署。

轨道数据中心需要可靠的频谱接入，以支持天地、地天以及天地之间的通信。

美国联邦通信委员会（FCC）可利用其现有的行政管理权，确保监管不落后于创新——并且应当主动采取这一措施。此外，国会可通过《简化卫星授权法案》等立法，补充这些努力，该法案设立了旨在提高卫星授权可预测性和及时性的额外法定要求。³⁷

若发射能力无法支持部署，仅进行许可改革将不足够，因为一些提议的大型架构可能需要重型运载发射能力和高发射频率才能部署到轨道。国会应结合已证明的能力需求、更广泛的政府基础设施限制、商业发射需求及公共利益，评估航天发射场现代化和发射基础设施投资。一旦能力需求得到证明，政策制定者应优先考虑扩大能力的相关投资和监管改革。

在考虑预算权衡的同时，保持商业发射服务提供商之间的竞争，并提升发射能力。

轨道计算可能会测试现有监管类别在航天系统日益整合通信、计算、存储和其他功能时的适用性。

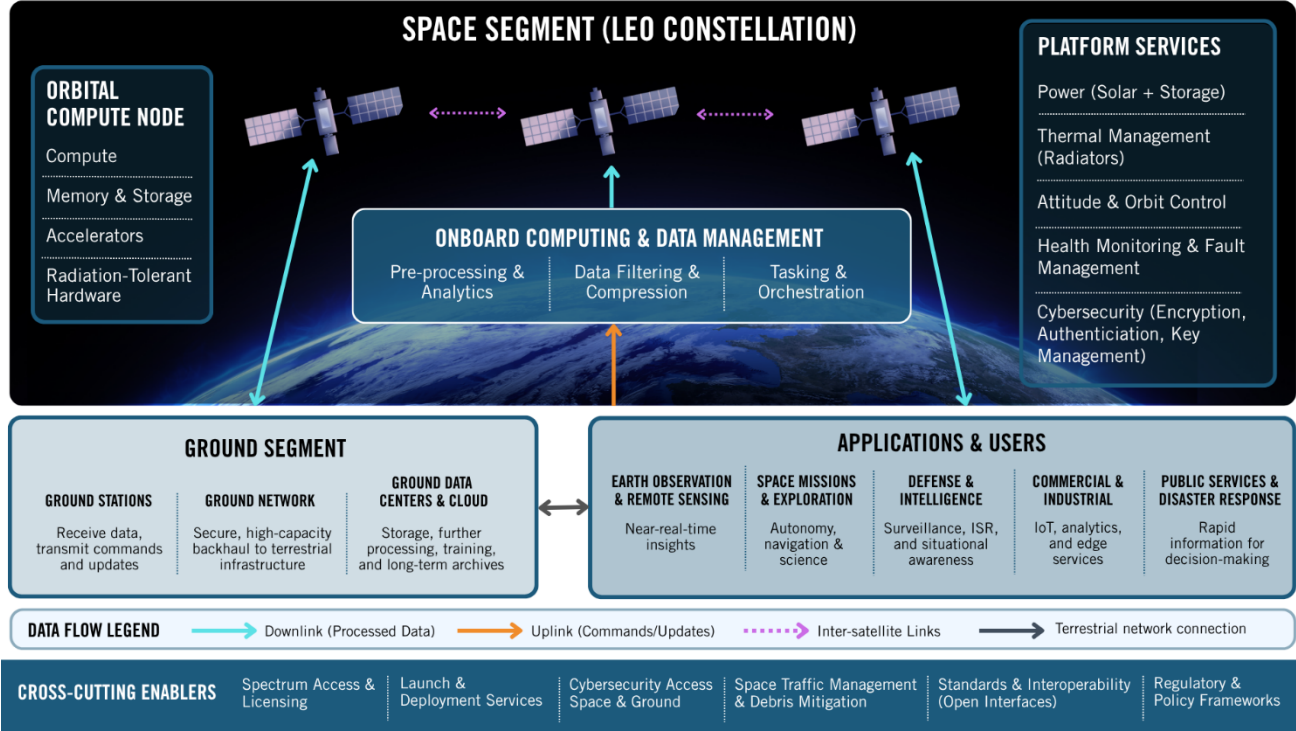
更多发射也意味着轨道上卫星数量增多，从而引发独立的可持续性问题。随着太空生态系统的持续发展，轨道数据中心会将更多卫星投入日益拥挤的轨道区域，这进一步凸显了碎片减缓、轨道碎片跟踪、交会风险评估以及太空交通协调的重要性。像《轨道空间交通管理法案》（ORBITS Act）这样的政策将解决主动碎片清理和相关可持续性实践问题。在机构层面，美国国家海洋和大气管理局（NOAA）的商业太空办公室正在部署太空交通协调系统（TCS），为民用和私营部门提供基础太空态势感知和航天器安全服务。改善碎片减缓、太空交通协调和交会操作员意识等措施，可以提高轨道环境对持续太空运营的安全性和可预测性。

最后，监管机构应阐明现有网络安全期望如何适用于轨道计算架构，包括软件保证、加密和认证、身份管理、供应链风险管理以及跨太空和地面的事件响应。对于面向政府的系统，联邦采购流程可以为将网络安全和软件供应链风险管理考虑因素纳入采购决策提供机制。对于商业系统，自愿性指南和基于风险的框架可能有助于运营商管理网络安全风险，而不会过早锁定僵化的技术要求。跨境协调也很重要，因为数据路由、发射服务、组件采购和地面站接入通常跨越具有不同安全、出口管制和数据治理规则的不同司法管辖区。

政策应鼓励探索，同时允许技术性能、经济性和市场需求来决定轨道计算在何处能创造真正价值。

这些建议反映了一个普遍原则：在保留必要的安全保障以进行安全实验的同时，尽量减少不必要的监管摩擦。目标并非补贴轨道数据中心使其出现，也并非假定它们将广泛扩展；而是要确保监管框架避免对测试造成不必要的障碍，同时保留对频谱、安全、网络安全、国家安全和轨道可持续性的合法保障。

图2：一种潜在轨道数据中心系统的渲染图



随着轨道数据中心技术的发展，政策制定者应着力于减少不必要的监管不确定性，提高频谱接入和许可的可预测性，明确网络安全预期，并提升日益拥挤的轨道环境的安全性和可预测性。这些措施可以在维护竞争、国家安全、轨道可持续性和关键通信基础设施可靠运行所必需的适当安全措施的同时，降低实验的门槛。轨道数据中心最终能否成为数字基础设施的有机组成部分，应取决于已证明的技术性能、生命周期经济性、客户需求和运营可靠性，而非监管僵化或政策驱动偏好。

致谢

感谢同事Mina Kim为这份报告所做出的周到而深入的贡献。她在建立对轨道数据中心政策讨论中形成的相关技术、工程和经济挑战的清晰理解方面发挥了关键作用。

关于作者

埃利斯·谢勒（Ellis Scherer）是信息技术与创新基金会（ITIF）的政策分析师，负责宽带、频谱和太空政策。他此前曾在国家电信与信息管理局（NTIA）实习，并担任过网络安全顾问。他拥有美国大学（American University）的恐怖主义与国土安全政策硕士学位，以及加州大学圣克鲁斯分校（University of California, Santa Cruz）的政治学与历史学学士学位。

伊丽莎白·L·桑切斯（Elizabeth L. Sanchez）是信息技术与创新基金会（ITIF）的政策研究员，负责宽带、频谱和太空政策。她曾就职于私人执业、跨国公司以及国际组织。她是一位在墨西哥获得资格认证的律师，并持有乔治城大学法学院（Georgetown University Law Center）的技术法与政策理学硕士（LL.M.）学位。

关于ITIF

信息技术与创新基金会（ITIF）是一家独立的501(c)(3)非营利、无党派的研究和教育机构，屡获认可为全球领先的科技政策智库。其使命是制定、评估和推广能够加速创新、提高生产力，从而促进增长、机遇和进步的政策解决方案。欲了解更多信息，请访问itif.org/about。

脚注

凯伦·霍华德，《科学与技术聚焦：太空数据中心》（美国政府问责局，2026年4月），<https://www.gao.gov/assets/gao-26-109012.pdf>。

2. 特拉维斯·比尔斯，《探索基于太空的可扩展人工智能基础设施系统设计》（谷歌研究，2025年11月4日），<https://research.google/blog/exploring-a-space-based-scalable-ai-infrastructure-system-design/>。

3. 泰利斯阿莱尼亚航天公司，“泰利斯阿莱尼亚航天公司公布ASCEND太空数据中心可行性研究结果”，新闻稿，2024年6月27日，<https://www.thalesaleniaspace.com/en/press-releases/thales-alenia-space-reveals-results-asce-nd-feasibility-study-space-data-centers-0>。

4. 霍华德，“科学与技术聚焦”。

5. Nathan Bleier 和 Rakesh Kumar，《太空数据中心》，《计算机》（2026年6月），<https://www.computer.org/csdl/magazine/co/2026/06/11540007/2gT40ZL8NvG>；Nathan Bleier 等人，《太空微数据中心》（在2023年10月28日至11月1日于加拿大安大略省多伦多举行的第56届IEEE/ACM国际微架构研讨会上的论文），<https://passat.crhc.illinois.edu/micro23.pdf>；Nathan Bleier 等人，《太空微数据中心架构：系统级方法》（在2025年3月1日至5日于美国内华达州拉斯维加斯举行的第2025届IEEE高性能计算架构国际研讨会上的论文），<https://ieeexplore.ieee.org/document/10946786>。

6. Bleier 和 Kumar，《空间数据中心》

7. 国家航空航天局, “LunaNet数据服务在轨处理”
(2025); 布拉德利·登比和布兰登·卢西亚, “轨道边缘计算: 纳米卫星星座作为一种新型计算机系统” 第二十五届国际会议录
编程语言与操作系统支撑技术 (ASPLoS '20) (2020).
8. 达维德·达姆布罗西奥等 能源与人工智能 (国际能源署, 2025年4月)
<https://iea.blob.core.windows.net/assets/de9dea13-b07d-42c5-a398-d1b3ae17d866/EnergyandAI.pdf>霍华德, “科学与技术聚焦”。
9. 霍华德, “科学与技术聚焦”。
10. 罗宾·加斯特, “美国需要数据中心, 数据中心需要能源, 但这只是”
“未必是问题” (ITIF, 2025年11月) <https://itif.org/publications/2025/11/24/united-nations-demand-data-centers-data-centers-need-energy-but-this-is-not-a-problem>
11. 比尔斯, “探索基于太空的可扩展人工智能基础设施系统设计。”
12. 泰勒斯·阿莱尼亚航天公司, “太空数据中心ASCEND可行性研究”。
13. 霍华德, “科学与技术聚焦”。
14. 登比和卢西亚, “轨道边缘计算”; 布莱尔和库马尔, “太空数据中心”。
15. 霍华德, “科学与技术聚焦”; 比尔斯, “探索基于太空的可扩展人工智能基础设施”系统设计。
16. 卢卡·贝尼奇和菲利普·约翰斯顿, 《太空数据中心的价值主张》, 麦肯锡公司, 五月8, 2026, <https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/the-case-for-data-centers-in-space#/>诺夫辛格等, 《计算的代价: 7美元》
“万亿数据中心规模竞赛”, 麦肯锡公司, 2025年4月28日
<https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/the-cost-of-compute-a-7-trillion-dollar-race-to-scale-data-centers>.
17. Bleier 等人, “空间微数据中心架构”。
18. Ibid.
19. 阿什利·J·劳森等, 《数据中心及其能耗: 常见问题解答》
(美国国会研究服务局, 2026年5月12日),
https://www.congress.gov/crs_external_products/R/PDF/R48646/R48646.8.pdf.
20. 安德鲁·凯维利尔, “为什么轨道数据中心比硅谷认为的更难,” IEEE Spectrum, 2026年6月11日, <https://spectrum.ieee.org/orbital-data-centers-heat>.
21. Ibid.
22. Ibid.
23. 比尔斯, “探索基于太空的可扩展人工智能基础设施系统设计。”
24. Bleier 等人, “空间微数据中心架构”。
25. Ibid.
26. 比尔斯, “探索基于太空的可扩展人工智能基础设施系统设计。”
27. 特朗普总统: “关于太空政策指令-5——网络安全原则备忘录”
“空间系统” (2020年9月4日), <https://www.transportation.gov/sites/dot.gov/files/2023-11/Memorandum%20on%20Space%20Policy%20Directive-5%E2%80%9494Cybersecurity%20Principles%20for%20Space%20Systems.pdf>马修·斯科尔和瑟瑞莎·苏洛维, “商业卫星运营的网络安全导论”, 美国国家标准与技术研究院内部报告IR 8270
(美国国家标准与技术研究院, 2023年7月)
<https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2023/NIST.IR.8270.pdf>.
28. 美国商务部 工业和安全局 出口管理条例
《美国联邦法规》第15编第730至774条; “云法案资源”, 司法部, 数据访问日期为2019年9月15日

2026年, <https://www.justice.gov/criminal/cloud-act-resources>; 美国国家标准与技术研究院, NIST隐私框架: 通过企业风险管理提升隐私的工具, 1.0版(2020年1月16日)。29. 联邦通信委员会, 报告与命令及进一步拟议规则制定通知, 21世纪太空现代化, SB卷宗号25-306, FCC 26-47(2026年7月22日); 私人遥感太空系统许可, 15 CFR 第960部分。30. 美国商务部, 工业和安全局, 出口管理条例, 15 CFR 第730-774部分。31. 特朗普, “太空政策指令-5”; 施奥尔和苏洛维, “商业卫星运营网络安全导论”。32. 施奥尔和苏洛维, “商业卫星运营网络安全导论”; 美国国家标准与技术研究院, “供应链中的软件安全”(2022年5月5日), <https://csrc.nist.gov/pubs/other/2022/05/05/software-security-in-supply-chains/final>。33. 布莱尔和库马尔, “太空数据中心”; 比尔斯, “探索基于太空的可扩展人工智能基础设施系统设计”。34. “数据中心需求”, 麦肯锡公司, 2025年5月20日, <https://www.mckinsey.com/featured-insights/charts/data-center-demands>; 布莱尔和库马尔, “太空数据中心”; 霍华德, “科学与技术聚焦”; 诺夫辛格等, “计算的成本”。35. “拟议规则制定通知, 奇异太空事物的频谱丰富度”, SB卷宗号26-54, FCC, 2026年3月27日, <https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-26-13A1.pdf>。36. “报告与命令及进一步拟议规则制定通知, 21世纪太空现代化”, SB卷宗号25-306, FCC, 2026年7月22日; FCC, “拟议规则制定通知, 奇异太空事物的频谱丰富度”。SAT简化法案, S. 3639, 第119届国会(2026年)。37. 38. 埃利斯·谢勒, “政策改革以启动美国太空创新”(ITIF, 2026年1月), <https://itif.org/publications/2026/01/05/policy-reforms-to-launch-us-space-innovation/>。39. 轨道法案, S. 1898, 第119届国会(2025年), <https://www.congress.gov/bills/119th-congress/senate-bill/1898/text>; 美国国家海洋和大气管理局, “太空交通协调系统(TraCSS)”, 访问于2026年8月12日, <https://www.space.commerce.gov/traffic-coordination-system-for-space-tracss/>。40. 美国国家航空航天局, “轨道碎片减缓”, 访问于2026年8月12日, <https://orbitaldebris.jsc.nasa.gov/mitigation/>。41. 特朗普, “太空政策指令-5”; 施奥尔和苏洛维, “商业卫星运营网络安全导论”。42. 施奥尔和苏洛维, “商业卫星运营网络安全导论”; 美国国家标准与技术研究院, NIST网络安全框架(CSF) 2.0(2024年2月26日), <https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/CSWP/NIST.CSWP.29.pdf>。