



Center for Education,
Innovation and
Sustainable Development

上海科技大学教育、创新和可持续发展研究中心

Tech Note | 技术系列

总 No.5 期/2026 年 9 月

天基算力：架构、技术突破与全球生态

执行摘要

随着全球数字化转型的深入与人工智能大模型的指数级爆发，算力基础设施的规模扩张正面临日益严峻的物理与环境约束。地面数据中心在电力供应、水资源消耗、土地占用及碳排放等方面的边界效应已然凸显。在此背景下，南洋理工大学（NTU）校长讲席教授、新加坡工程院院士文勇刚团队提出并系统性论证了“天基算力”与“太空数据中心”（Space Data Centres, SBDCs）的前瞻性构想。该研究将算力基础设施向近地轨道（LEO）延伸，旨在利用太空环境几乎不间断的太阳能和深空低温背景，重构计算系统的能源与热力学基础。

在上海科技大学信息科学与技术 2026 年度学术研讨会（ASSIST2026）上，文勇刚教授阐释了其研究成果。其研究已跨越宏观概念阶段，深入至跨学科工程底层，构建了从理论框架到在轨物理验证的完整闭环。该技术体系的核心支柱包含三大维度：一是突破发射质量与体积限制的柔性薄膜微通道辐射散热系统；二是摆脱重型硬件冗余依赖、基于软硬件协同设计的耐辐射智能计算模型；三是实现轨道、通

信、热控、能源与计算多物理场动态耦合仿真的天地一体数字孪生平台（OrbitWiz）。

同时，该研究在产学研转化与全球技术治理层面展现了深远的战略视野。依托 **Red Dot Analytics**、**Zero-Error Systems** 等硬科技衍生企业的生态协同，天基算力正加速从实验室走向商业实测。面对全球巨头在低轨卫星领域的封闭式扩张与巨型星座带来的凯斯勒现象（**Kessler Syndrome**）威胁，文勇刚教授提出了构建“六层开放架构”与“太空计算领域的 **CERN**（欧洲核子研究中心）”的全球倡议。该倡议旨在防范轨道资源垄断与生态灾难，为全人类提供清洁、开放、可持续发展的新一代算力底座。

第一章 算力基础设施的物理边界与天基重构

1.1 地面算力扩张的资源困境与刚性制约

人工智能大模型的迭代将数据、算力与模型规模推向了前所未有的高度，但随之而来的是地面算力网络对地球自然资源的极度消耗。数据表明，全球数据中心的能源需求正处于陡峭的上升曲线上。由于算力密度的提升，人工智能将驱动全球数据中心电力需求在 2030 年增加 165%。届时，全球数据中心的年用电量预计将接近 1,000 太瓦时（TWh），这一数字已与日本等工业大国的全国总用电量相当。

除了绝对能耗的激增，算力部署在物理空间与基础设施层面遭遇了严重的扩展迟缓。在美国等核心数据中心枢纽区域，新建大型算力集群接入主电网的排队等待时间已延长至 5 至 7 年，电网基础设施的建设周期远远滞后于算力需求的爆发。此外，传统数据中心在冷却过程中伴随着庞大的水资源消耗，在水资源短缺和气候变暖加剧的地区，数据中心的运营引发了日益严格的社区监管与政策限制。

对于新加坡等土地资源高度稀缺的国家而言，算力扩张的矛盾尤为尖锐。新加坡是全球建设成本第二高的数据中心市场，每兆瓦（MW）的建设成本高达 1,170 万美元，折合每瓦特 13.80 美元。目前，数据中心用电已占新加坡全国总用电量的约 7%，在人工智能算力需求的推动下，这一比例预计将在 2030 年攀升至 12%。严苛的土地限制、高昂的房地产成本与有限的电网容量，使得继续在地面大规模扩张算力面临难以逾越的经济与环境双重壁垒。

约束维度	地面数据中心现状与趋势	新加坡等高密度地区特有挑战
能源供应	2030 年耗电近 1000 TWh, AI 驱动用电增长 165%	占全国总用电量比例将从 7%增至 12%
电网接入	核心枢纽并网排队周期长达 5-7 年	基础电网扩容面临极高的城市改造成本
散热机制	依赖水冷与强制风冷, 耗水量大, 受环境温度影响	热带气候导致冷却能耗占比极高
空间与成本	占用大量土地, 面临社区与环保排斥	建设成本高达 \$13.80/W (\$11.7M/MW), 极度缺乏土地

1.2 近地轨道的物理禀赋与比较优势

跳出地球大气的限制，近地轨道（LEO）呈现出截然不同的资源禀赋。太空环境为实现无限清洁算力提供有两大核心比较优势：近乎绝对的持续太阳能与天然的极致深空冷源。

在特定轨道参数下，能源的获取效率远超地面。例如，在晨昏太阳同步轨道（Dawn-Dusk Sun-Synchronous Orbit）上，卫星面临的地影区（即地球遮挡阳光的无光照区）时间极短，每轨仅约 10 至 20 分钟甚至更短。这意味着部署在该轨道上的太阳能面板可以几乎不间断地捕获太阳能。更为关键的是，太空中没有地球大气层的反射、吸收与散射损耗，光伏面板的单位面积产能可达到地面同等设施的 8 倍以上，效率提升约 40%。这为高功率密度的 AI 计算硬件提供了稳定、无衰减且绝对

零碳的动力支撑。

在热力学环境方面，深空本身的平均背景温度约为 2.7 开尔文（-270.45°C）。尽管在真空中无法利用空气对流、水循环等介质进行常规传热，但深空作为一个无尽的巨大冷源，允许计算设备通过黑体辐射（Black Body Radiation）将废热直接排散至宇宙空间中。这种完全被动的辐射冷却机制不消耗任何淡水资源，从根本上解开了地面数据中心“耗电-耗水-排碳”的死结，为高密度计算提供了理想的热耗散终点。

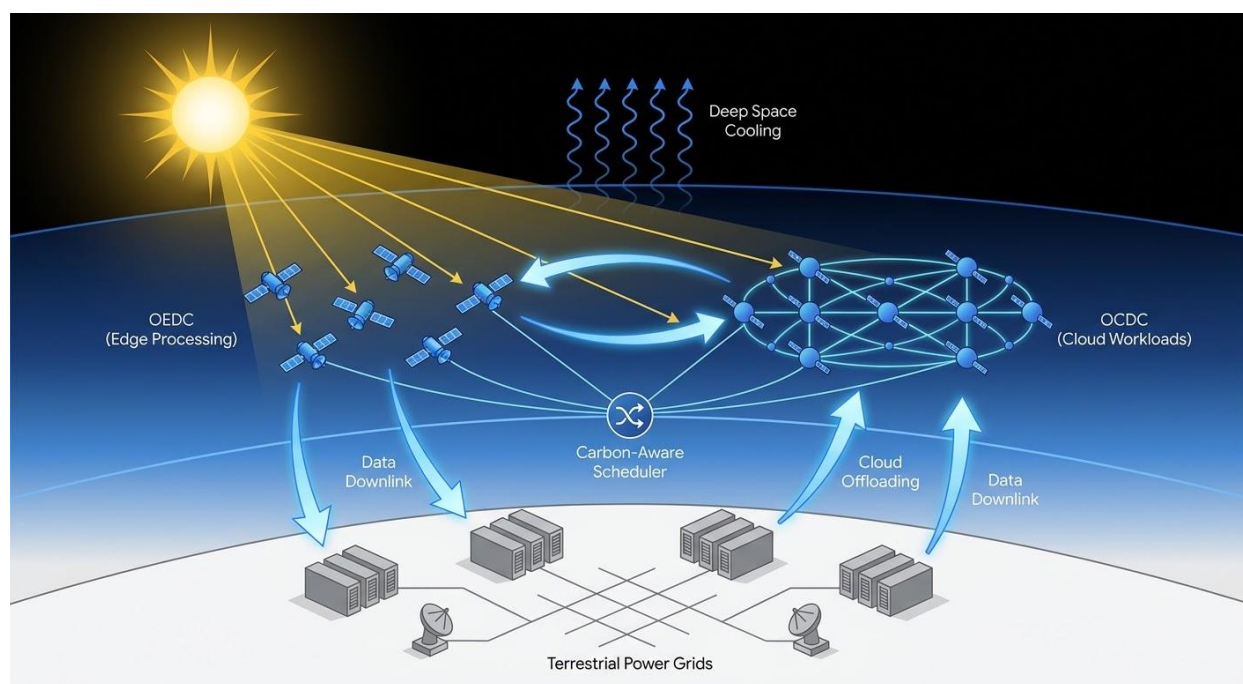
1.3 碳中和在轨数据中心的系统框架与全生命周期评估

基于上述物理禀赋，文勇刚教授团队于 2025 年 10 月在国际顶级学术期刊《Nature Electronics》发表了题为“The development of carbon-neutral data centres in space”的研究。该论文首次系统地界定了碳中和在轨数据中心的理论架构，将宏大的科幻概念转化为具备工程可行性与经济学量化评估的科学框架。

该架构将天基算力定义为一个由多种节点构成的“天地一体协同”网络，其物理承载主要分为两类形态：其一为在轨边缘数据中心（Orbital Edge Data Centre, OEDC）。随着遥感、对地观测卫星（如每天产生超过 100 TB 影像的单颗观测卫星）数量的增加，深空探测产生的数据量预计在未来十年将达到 566 Exabytes。OEDC 模式在卫星上直接集成传感器与 AI 加速器模块，使原始数据“天数天算”。卫星仅将高价值的处理结果、特征向量或警报信息通过微波或激光链路下传地球，这种端侧推理机制能够将下行带宽需求降低 100 倍以上，彻底改变了传统航天极其依赖下行链路带宽的运作模式。其二为在轨云数据中心（Orbital Cloud Data Centre, OCDC）。OCDC 不再依附于特定的传感任务，而是由搭载高密度服务器、星间激光通信网络、太阳能阵列与散热膜的专门计算卫星星座组成。它们构成一个分布式的轨道计算池，用于承接由地面数据中心上载的大规模 AI 模型训练、科学仿真等批处理工作负载，替代地面算力基础设施，减轻地面的能源与土地压力。

为了在系统层面实现资源的全局最优分配，研究团队设计了“碳感知的天地一体多云调度系统”（Carbon-aware multicloud）。该系统打破了太空与地面的调度壁垒，将所有在轨节点与地面的混合能源数据中心置于统一的资源池中管理。调度算法基于任务的时延要求、计算量、轨道节点的实时太阳能充放电状态以及各地面电网的实时碳排放强度，动态决定计算任务的物理执行位置，实现算力与清洁能源的时空匹配。

在验证该架构的长期可持续性时，必须直面火箭发射产生的大量温室气体排放。为此，该研究引入了“全生命周期碳使用效率”（Life-cycle Carbon Usage Effectiveness, CUE）这一创新评估指标。通过包含卫星制造、发射入轨、在轨运营以及最终脱轨的全链路碳足迹核算，研究证实，得益于轨道上几乎不间断的纯太阳能供电与零碳冷源，算力卫星在其长达数年的在轨运行期间所节省的地面化石能源碳排放，足以在几年内完全抵消其制造与火箭发射阶段产生的初始碳成本。这一指标从根本上回应了学界与工业界对航天发射碳排放的质疑，确立了天基算力系统“全生命周期净零排放”的科学基础。



第二章 核心技术底座一：质量约束下的极端热管理体系

理论架构的设计指明了方向，但在工程实践中，将高密度算力送入真空环境并维持稳定运行，面临着极为苛刻的物理挑战。热力学管理是界定天基算力容量的第一道物理红线，直接决定了单位火箭发射质量所能承载的算力上限。

2.1 真空环境中的热力学挑战与死重困局

在地面数据中心，芯片散发的高密度热量通常通过强制风冷或液冷转移至空气或冷却水中。但在太空中，缺乏传热介质的真空环境彻底阻断了对流与传导这两条传统散热路径，计算设备产生的热能只能依赖唯一的方式——黑体辐射排向深空。

根据斯特藩-玻尔兹曼定律，辐射散热功率与物体绝对温度的四次方及环境温度的差值成正比。为了确保高性能 AI 芯片维持在 40°C 至 50°C 左右的安全工作温区，散热表面每平方米的辐射排热能力大约仅为 400 至 500 瓦。由此推算，若要在轨道上维持一个 10 千瓦（kW）级的现代 AI 计算节点满载运行，至少需要提供约 25 平方米的巨大散热面积。

这种严苛的面积需求直接触发了航天工程中最敏感的质量与成本约束。传统航天器采用的刚性金属散热器（Radiator），其面密度通常高达 10 至 20 公斤/平方米（kg/m²）。这意味着，25 平方米的散热器单其自重（死重）就将超过 500 公斤。以当前商业航天 500 美元至 3,000 美元/公斤的发射标价计算，仅将这套冷却系统送入轨道的单项发射成本便高达 25 万美元至 150 万美元。这种高昂的冷却附加成本，使得传统刚性散热方案在商业规模的天基算力部署中完全失去了可行性。

2.2 柔性轻量薄膜微通道辐射散热系统

为打破热力学与发射质量的僵局，文勇刚教授团队引入了“AI 赋能

材料科学”（AI for Material Science）的研究范式，经过跨学科联合攻关，研发出了一种具备颠覆性面密度的“柔性轻量薄膜微通道辐射散热器”。

该冷却回路的运行机制由取热、主动液冷输运与被动排热三部分紧密衔接。首先，在 AI 芯片侧设置微通道冷板，高效率吸收芯片热量并将其传递给液态工质。随后，微型循环泵驱动高温液态工质通过内部管路，输送至外部展开的柔性薄膜辐射器中。

这一系统的核心创新在于其柔性薄膜材料的光学特性与流体结构设计： 其一，表面涂层具备高度的“光谱选择性”。该薄膜在太阳波段（波长 0.3-2 μm ）的吸收率极低（接近 0），能够像反射镜一样弹开太阳光，防止在日照区吸收额外的外部热量；同时，其在大气窗口及深空热辐射波段（波长 8-13 μm ）的发射率接近 1，完美对准了黑体辐射峰值，实现了高效的定向排热。 其二，极端的轻量化结构。这种聚酰亚胺柔性薄膜内部嵌有毫米级的平行微通道，其设计目标是将面密度压缩至每平方米 2 公斤以内（远期目标甚至低于 1 kg/m^2 ）。对于 25 平方米的散热需求，该方案能将散热器总质量从传统方案的 500 公斤削减至 25 至 50 公斤。在商业发射计价体系下，每部署 10kW 算力即可为项目节省约 100 万美元的发射成本。

工程参数指标	传统在轨刚性金属散热器	NTU 柔性薄膜微通道散热器	性能提升与经济效益
面密度	10 - 20 kg/m^2	$\leq 2 \text{ kg/m}^2$ (最终目标 $\leq 1 \text{ kg/m}^2$)	质量减轻约 90%
单节点 (10kW) 散热面积需求	约 25 m^2	约 25 m^2	维持同等热辐射面积

单节点散热器总质量	≥ 500 kg	25 - 50 kg	大幅降低卫星死重
发射成本估算 (@ \$500-3000/kg)	\$0.25M - \$1.5M	\$12.5K - \$150K	每 10kW 算力节省约 \$1M
部署形态	刚性展开，占用大量整流罩体积	可卷绕/折叠，发射前高度收纳	提升单发火箭的运载算力密度

2.3 物理验证与能效平衡匹配

该方案的物理可行性不仅在理论推导中成立，更通过了地面材料测试与流体工况仿真的严格验证。研究表明，在深空由于缺乏大气层的吸收与干扰，辐射制冷在此环境下达到热平衡的效率远超地面。

团队在实验室搭建了微通道管路原型，结合流体动力学仿真发现：当高温液态工质以 0.566 毫米/秒（mm/s）的流速流入薄膜时，仅需经过约 2 米长的微通道路径，工质温度就能从 40°C 迅速冷却至 8°C。在此参考工况下，单位面积的散热通量稳定在约 420 W/m²。这一排热指标极具工程意义，因为它恰好与目前空间级光伏面板每平方米约 300 多瓦的接收发电功率实现了“完美匹配”（Perfectly Align）。这就意味着，在卫星平台的面积分配上，发电端与排热端达成了系统级的能量守恒与空间平衡，为在轨计算的长时间高负载稳定运行确立了物理依据。

第三章 核心技术底座二：强辐射环境下的容错智能计算

解决了计算设备“活下来”的温度问题后，天基算力系统必须攻克另一项致命威胁：确保 AI 模型在极端电磁与粒子辐射下“算得准”。在低地球轨道，高能宇宙射线与带电粒子的轰击对商用计算服务器具有毁灭性的破坏力。

3.1 单粒子翻转对大模型推理的物理破坏

当高能粒子穿透半导体芯片封装击中内存或寄存器单元时，其沉积的电荷会诱发逻辑状态的改变，导致数据比特发生非预期的翻转（从 0 变 1，或从 1 变 0），这一物理现象被称为单粒子翻转（Single Event Upset, SEU 或 Bit-flip）。在低地球轨道环境中，这种引发状态错误的误码率极高，大约是地面普通环境的 10 万倍（ 10^5 量级差距），其错误率高达 10^{-3} 级别，甚至劣于地面恶劣信道下的无线通信误码率。

在深度学习与大语言模型（LLM）的应用场景中，这种微小的硬件错误会被神经网络的非线性结构无限放大。研究（如 ICCV '23 提出的 One-bit Flip is All You Need）证明，如果在攻击者或辐射环境造成的随机概率下，一个关键权重或激活函数的控制参数发生了比特翻转，就足以导致整个 AI 模型输出完全错误的预测结果。更为严重的是，在基于参数规模为 1.5B 至 16B 的生成式语言模型测试中（如 BitHydra 攻击效应所示），仅仅 1 到 4 个比特的翻转，就会致使大模型陷入无限循环生成状态，直到达到输出长度上限。这不仅输出无效的“幻觉”文本，更在能源与算力极其宝贵的太空环境中，造成了无法挽回的能量浪费与计算延迟。

3.2 系统与算法协同设计的容错体系

传统航天工业应对辐射问题，通常采用基于特殊工艺的抗辐射加固（Radiation Hardening）或系统级的“三模冗余”（Triple Modular

Redundancy，即部署三套相同硬件进行表决）。然而，对于追求高算力密度与低成本的商用太空数据中心而言，纯硬件冗余方案不仅挤占了大量的发射质量与供电额度，且对上层应用不够透明，难以适应快速迭代的商用现货（COTS）器件。

文勇刚教授团队转换思路，提出了一种摒弃重型硬件冗余、依托“系统与算法协同设计”的新型容错计算架构。该架构将可靠性保障上移至软件与算法层，构建了三重纵深防御体系：

首先，在模型决策层引入**多出口机制（Aegis）**。该方法在标准神经网络推理流中增设多个前馈中间决策出口。在模型训练阶段，系统通过模拟故障注入的方式训练额外的分支路径。在在轨推理运行时，模型会根据当前层特征提取的置信度，随机动态地切换判定出口。由于决策路径不再单一，高能粒子引发的单点比特翻转极难定向控制最终答案，测试表明该机制可使针对关键比特的破坏成功率降低 5 到 10 倍。

其次，在层级传播控制上开发了**抗辐射网络（RedNet）**。神经网络的一个显著弱点是微小的浅层错误会在深层网络中呈雪崩式累积放大。RedNet 引入了一种名为 LogClip 的异常激活限制机制，强制为神经元的激活值设定物理上界。一旦某个神经元因辐射导致数值异常激增，LogClip 会立即将其裁剪至安全阈值内，直接掐断错误在后续网络层中的传播路径。结合多出口机制，模型在遭遇局部辐射干扰时能够提前输出绕开脆弱深层。在卫星载荷硬件模拟测试中，该算法体系在强辐射下仍能保持高达 94% 的推理准确率，同时将吞吐量维持在 95.8 至 103.9 Mbps 的高位，并将时延控制在 10.2 至 12.3 ms 之间。

最后，在底层内存布局上实施**脆弱位置混淆（ObfusBFA）**。借鉴无线通信中信源信道分离与扰码（Scrambling）的原理，该团队针对内存中存储关键权重的脆弱物理地址，在模型的可执行文件与底层计算库中故意插入对最终计算无害的冗余操作。这种动态偏移使得重要数据在

物理存储器中的排布呈现随机打散状态。高能粒子盲目击中连续关键数据位并导致系统崩溃的概率随之呈指数级下降。值得注意的是，该方法属于系统级后处理，无需对耗资巨大的大模型进行重新训练，极大提升了商用模型的在轨部署效率。

3.3 衍生企业与硬件级加固实践

在算法层提供强大容错能力的同时，保证 COTS 硬件底层不发生灾难性的永久性烧毁同样不可或缺。在这一领域，由南洋理工大学资深学者主导创立的衍生企业 **Zero-Error Systems (ZES)** 扮演了关键的生态协同角色。

ZES 针对太空电子器件的核心痛点，研发了基于设计加固 (**Radiation-Hardened By Design, RHBD**) 的专利半导体技术。其核心产品之一是单粒子门锁检测与保护集成电路 (**LDAP - Latchup Detector & Protector**)。当商用芯片在轨道上遭遇重离子撞击引发大电流门锁效应时，该芯片能够瞬间检测异常并切断电源，防止微型短路烧毁整个芯片元件。此外，**ZES** 开发的超低软错误率 (**ULSE**) 单元库，能够在保持低功耗与小面积的优势下，将硬件的软错误率控制在极低水平（例如约 **10 FITs**，即每十亿小时运行仅出现十次错误），确保了系统数据的底层完整性。

这种硬件级底层保护与 **NTU** 团队的算法级容错形成了闭环互补。目前，**ZES** 的技术已获得 **1,000** 万美元的累计融资（含 **750** 万美元 **A** 轮），并成功搭载于多颗日本及欧洲商用卫星上，成为全球低成本商用元器件 (**COTS**) 进入苛刻辐射环境的重要使能者。

第四章 核心技术底座三：多物理场耦合的天地数字孪生

即便解决了散热材料与辐射容错，天基算力平台作为一个高度集成的航天器，其复杂的系统内部依然存在着牵一发而动全身的物理耦合关系。如果缺乏有效的系统级仿真环境，任何局部的硬件升级或参数调整都可能导致不可预见的在轨任务失败。

4.1 系统级设计的迭代失配与仿真工具碎片化

计算硬件的发展遵循摩尔定律，GPU 微架构每 1 至 2 年就会发生重大迭代；而传统的卫星平台从设计、制造、验证到发射，往往需要数年时间。这种迭代节奏的严重不匹配，导致航天平台难以直接吸收最新的算力配置。

更为严重的是传统仿真工具链的碎片化。轨道力学、空间通信、算力调度、电源管理和热控这五大核心子系统，在传统工业界掌握在不同的专家团队手中。轨道工程师使用 STK（Systems Tool Kit），热控工程师使用 COTE 等专有软件。这些工具独立运行，无法在一个统一的时间轴上进行多物理场的实时联动推演。因此，当设计人员尝试用最新一代的 GPU 替换老旧芯片时，无法快速评估发热量的改变是如何传导至散热面积裕度、进而影响太阳电池阵的供电调度以及最终的算力吞吐表现的。这种缓慢的多方重算流程，使得工程设计中充满了难以追踪的盲区。

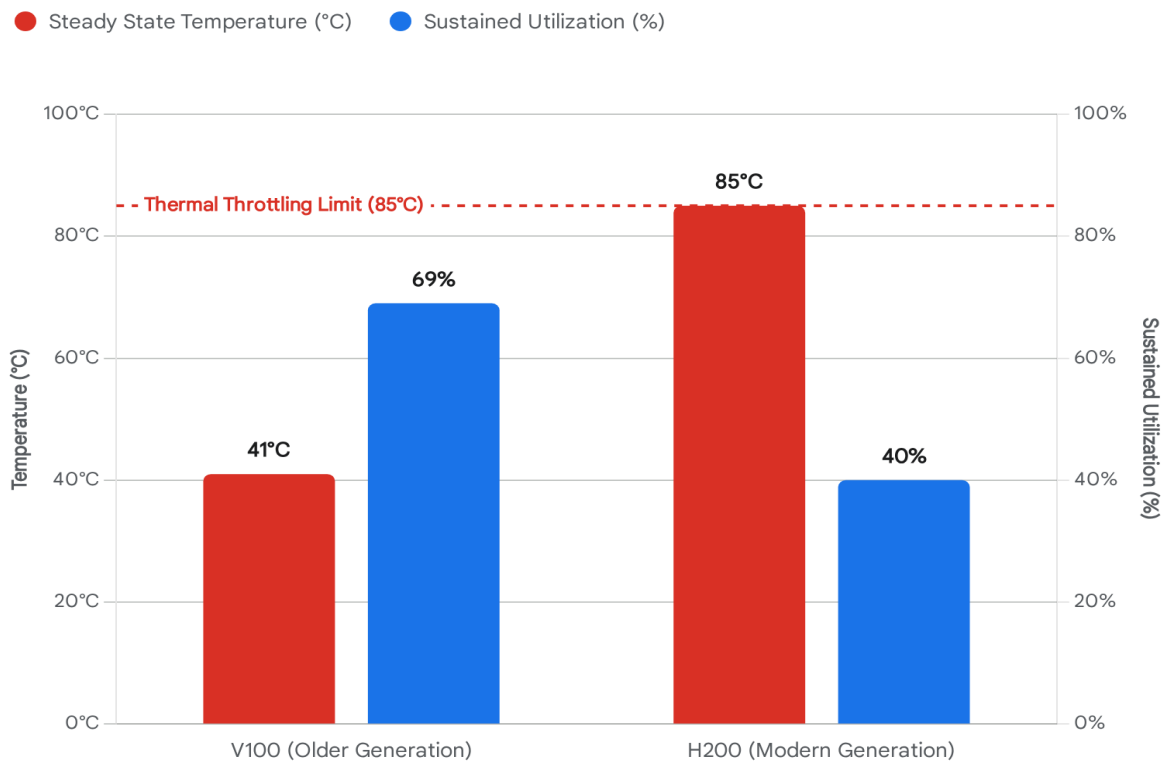
4.2 OrbitWiz 平台架构与反直觉物理规律揭示

为打破这一工程瓶颈，文勇刚教授团队基于物理驱动模型，开发了专为太空数据中心设计的天地一体数字孪生仿真平台——OrbitWiz（该成果已被移动计算领域顶级国际会议 ACM MobiCom '26 接收并作展示）。

OrbitWiz 采用四层架构设计（实体功能插件层、场景与核心引擎

层、服务层、应用层），首创性地将 **SGP4** 轨道外推、星间/星地网络拓扑、**GPU 硬件 DVFS**（动态电压频率调整）、电池全生命周期放电模型以及散热面动态辐射模型纳入同一个时间一致的系统动力学引擎中。平台支持关键的“热重载”（**Hot-reload**）功能：当设计人员修改某个组件参数（如替换 **GPU 型号**）后，引擎仅需重建受影响的耦合子模型，并保留历史状态，从而实现了参数修改后的极速“**What-if**”评估与实时场景渲染。

Thermal Throttling Reverses GPU Performance Hierarchy in Space



Simulation results from OrbitWiz reveal that while the H200 has a higher theoretical peak compute, its massive heat output in a vacuum quickly pushes it to an 85°C thermal throttling threshold. Consequently, its sustained utilization drops to 40%. Conversely, the older V100 stabilizes at 41°C, maintaining a 69% utilization rate, ultimately delivering higher effective throughput in orbit.

Data source: OrbitWiz Simulation

OrbitWiz 最卓越的贡献在于其能够通过耦合仿真揭示出太空中反直觉的系统级性能反转现象。通过仿真对比发现，在完全相同的卫星体积与供电约束条件下，如果系统盲目装载纸面参数更强、功耗更大的英伟达 H200 芯片，其巨大的发热量在受限的散热排面上无法及时排散，芯片温度将迅速飙升并触及 85°C 的降频保护阈值（Thermal Throttling）。这导致 H200 的高负载持续可用率断崖式跌落至仅 40%。相反，如果换装理论峰值算力较弱的旧款 V100 芯片，由于其功耗与系统散热能力更为匹配，其最高温度稳定在 41°C 的安全区间，持续高负载运转率高达 69%，最终产出的有效算力反而超越了 H200。这一结论深刻表明，脱离太空苛刻的热力学约束去评估组件参数是毫无意义的，峰值算力优势极易被热控短板无情抹平。

4.3 物理先验机器学习与生态企业的技术支撑

在构建天地一体数字孪生底座的过程中，文勇刚教授参与创立的另一家深科技衍生企业——Red Dot Analytics（RDA），为项目提供了强大的底层模型支撑。RDA 致力于利用工业 AI 开发认知数字孪生（Cognitive Digital Twin）解决方案，旨在优化数据中心与微电网的运营效率与碳排放。在空间验证中，研究团队利用 RDA 开发的物理先验机器学习（Physics-informed Machine Learning）算法，精确构建了在轨计算设施与深空冷源之间的传热模型。该平台实时模拟了不同轨道参数、日食交替下的太阳能充电效率与电池深度放电循环，精准证明了深空极寒真空环境在废热排散上优于地球大气的结论，并为量化全生命周期 CUE 指标提供了仿真数据。此外，依托该孪生平台，NTU 团队与新加坡空间计算基础设施初创企业 BC Space 正将仿真算法转化为在轨实装的系统级控制策略。BC Space 提供中立轨道的硬件测试平台，而研究团队则通过数字孪生下发的预测算法，动态预判长达 36 分钟的地影区（日食）能量亏空，自动节流非关键 AI 推理负载，并在卫星星座之间调配通信功率与可再生燃料电池，为从代码仿真到真实的在轨测试铺平了道路。

第五章 国际竞争格局、生态治理与开放倡议

天基算力系统作为一个关乎全球数据流量、通信信道与顶尖计算资源的新型基础设施，早已超越了纯粹的工程学范畴。当前，该领域的控制权正逐渐成为地缘政治与科技寡头激烈博弈的焦点。若任由封闭体系蔓延，整个近地轨道不仅将面临资源垄断的阴霾，更将不可避免地滑向空间生态破坏的深渊。

5.1 欧美天基算力战略布局与巨头的跑马圈地

全球主要经济体与商业巨头正以前所未有的速度介入在轨计算领域。欧洲从战略安全与数据主权出发，通过欧盟“地平线欧洲”（Horizon Europe）计划拨款 3 亿欧元，启动了名为 ASCEND（Advanced Space Cloud for European Net zero emission and Data sovereignty）的宏大项目。该项目由 Thales Alenia Space 牵头，旨在通过太空太阳能为欧洲争取独立的净零排放数字基础设施，其远期目标是在 2050 年内部署高达 1 吉瓦（GW）的在轨计算容量，这预示着千亿欧元级别的空间基建市场。

与此同时，以美国为代表的商业航天力量则依靠巨额资本采取了激进的拓展策略。不仅贝索斯（Blue Origin）、马斯克（SpaceX）以及谷歌等科技巨头相继公布了相关在轨运算计划，诸如 Starcloud 等新兴企业更是急迫地在近期发射搭载 Nvidia H100 显卡的商业卫星以进行在轨散热试验。SpaceX 更是被披露正在谋求通过一轮高达 1.5 万亿美元的惊人估值融资，来支持其名为“Heart of the Galaxy”的轨道数据中心野心。美国政府问责局（GAO）在向国会呈递太空数据中心可行性报告时，直接将 NTU 在《Nature Electronics》上发表的研究作为公共政策核心参考，足见这一领域在国家战略层面的受瞩目程度。

主导方/项目	核心战略动机与背景	当前规划与目标节点
欧洲 ASCEND (Thales Alenia Space 等)	实现数据主权、摆脱化石能源依赖、响应欧盟绿色新政（Green Deal）	2028 年开展在轨模块演示，2050 年目标部署 1 GW 容量
美国 商业巨头 (SpaceX, Starcloud 等)	占据商业制高点，构建封闭生态，争夺太空算力定价权	Starcloud 验证 H100，SpaceX 谋划“Heart of the Galaxy”
新加坡 NTU (文勇刚教授团队等)	以开放技术打破垄断，构建多物理场验证体系，造福全人类	2025.12 发射概念验证星，提出开放标准与架构体系

文勇刚教授指出，如果在缺乏国际统筹的环境下任由巨头展开封闭式的商业圈地，势必导致全球算力鸿沟进一步加剧。更危险的是，由于掌握了超过 80%运载能力的个别寡头企业拥有绝对的发射优势，其建立的封闭生态极易将全球的人工智能演进路径锁定在私有基础设施内。

5.2 巨型星座的负外部性与凯斯勒现象的迫切威胁

除了技术垄断，野蛮扩张带来的最严峻问题是低地球轨道的物理承载力正被推向崩溃边缘。根据欧洲航天局（ESA）的追踪，目前近地轨道上已漂浮着超过 1.4 亿个直径大于 1 毫米的太空碎片，它们以每秒约 7 公里的高速度运行，即便是极其微小的碎片撞击，也足以摧毁卫星的关键部件。

随着由数万颗卫星组成的巨型星座（Megaconstellations）不断升

空，太空物理学家 Donald Kessler 在 1978 年预言的“凯斯勒现象”（Kessler Syndrome）正在逼近。当轨道物体密度超过临界阈值，任何一次微小的撞击都将产生更多的碎片，进而引发持续数十年的级联碰撞连锁反应，最终导致特定海拔的轨道空间在几代人的时间内彻底无法通行。

学术界独立研究发出的一项最新警告显示，在应对避撞机动的反应时间上，业界所能仰赖的安全冗余（被称为 CRASH Clock 指标）正呈断崖式下跌。在巨型星座部署前的 2018 年，这一缓冲时间尚有 164 天；而到了 2025 年 6 月，该指标已骤降至 5.5 天。更严峻的模型显示，如果轨道空间遭遇太阳风暴袭击导致高层大气膨胀、阻力增加以及通信定位丢失，只要地面失去对星座控制长达 24 小时，就有约 30% 的概率触发导致凯斯勒效应的灾难性初始碰撞。

在这种命悬一线的轨道生态下，文勇刚教授团队开发的极端环境容错控制与天地孪生调度技术不再仅仅是算力效率提升的工具，更成为卫星在脱离地面指令期间，维持自我轨迹稳定与防碰撞计算底座最后防线。获取清洁天基算力的进程不能以制造不可逆转的太空垃圾灾难为代价。

5.3 构建“六层开放架构”与全球治理倡议

面对垄断风险与生态危机，文勇刚教授强调，近地轨道资源、空间频谱以及来自太阳的能量皆属于全人类的公域（Global Commons），不能成为极少数寡头私有化的数字资产。因此，天基算力系统须坚持开源开放的建设路径，而非赢家通吃的零和博弈。

为将“开放工程”的理念转化为可操作的技术规程，文教授创造性地提出了天基算力系统的“六层开放参考架构”，为全球协作提供了标准化的底座。这一架构包括：

1. **应用层（Application）**：面向全球特别是 Global South（全

球南方) 国家提供气候建模、防灾减灾等普惠性质的科学计算与推理服务。

2. **编排层 (Orchestration)** : 开源的轨道操作系统 (OS) 与天地调度软件, 实现多云环境下的负载智能分配。

3. **网络层 (Network)** : 采用通用公开协议规范的微波星地链路与激光星间网络, 确保异构星座之间的互联互通。

4. **计算层 (Compute)** : 设立标准化接口规格的耐辐射 GPU/TPU 计算模组, 允许厂商自由迭代硬件。

5. **热控层 (Thermal)** : 提供开源的轻质、高发射率柔性辐射散热板参考设计及其控制算法。

6. **能源层 (Power)** : 标准化的模块化太阳能充放电管理系统。

通过在架构各层建立完全开放的接口标准, 全球顶尖的科研机构与航天企业得以跨界协同, 规避了由于各自为战导致的系统不兼容与轨道拥堵。为此, 文教授呼吁联合全球力量成立类似于“CERN (欧洲核子研究中心)”的国际太空计算开放联盟, 通过设立公开的技术基准 (Benchmarks)、共享数据集以及提供共用在轨测试平台, 分阶段推进从 10 千瓦级概念验证到吉瓦级天地算力网的宏大愿景。这种依托开放协议的技术制衡力量, 是确保人类社会在未来不被超级公司掌控命脉的可行途径。

结语

文勇刚教授对天基算力与太空数据中心的研究，体现了一场由计算机科学向热力学、材料科学、辐射物理及航天工程纵深拓展的宏大跨学科实践。在地面计算网络不可避免地触碰土地、能源与碳排放物理红线之际，该研究体系将人类求解算力困局的视野投向了深空，通过理论论证与严密的工程实验，确认了利用无尽太阳能与深空冷源突破物理极限的科学可行性。

在这场科技远征中，柔性薄膜辐射器破解了死重与发射成本的经济枷锁，软硬件协同容错架构确保了高能粒子轰击下的计算准确率，而 OrbitWiz 多域数字孪生平台则在地球上提前规避了复杂的在轨失效风险。这些硬核技术展示了团队对前沿系统工程的驾驭能力，也为后续全球航天技术生态提供了宝贵的基础性参照。

更为深远的是，隐藏在冰冷技术参数背后的，是防范技术霸权与维护人类公地（Commons）可持续性的温暖哲学内核。在商业寡头试图封锁轨道算力霸权的今天，文勇刚教授发出的“六层开放架构”与“太空计算 CERN”的全球倡议，为天基算力的未来指明了普惠与向善的方向。正如其核心主张所述：“太阳不属于任何一个国家，用太阳驱动的智能也不应只属于少数人。”在迈向人工智能更高文明的征途中，依托全人类协作与开源精神构建的天地一体算力网络，将成为照亮人类可持续发展未来的崭新基座。

联系我们: CEISD@Shanghaitech.edu.cn