仅供内部参考，请勿外传

股票研究

行业深度研究

证券研究报告

轻量柔性引领，面向商业航天的空间能源革命

新兴能源

■ 太空光伏行业深度报告

姓名	电话	邮箱	登记编号
徐强(分析师)	010-83939805	xuqiang@gtht.com	S0880517040002
庞钧文(分析师)	021-38674703	pangjunwen@gtht.com	S0880517120001
罗青(分析师)	021-23185966	luoqing2@gtht.com	S0880525070002

评级： 增持

相关报告

新兴能源《【国泰海通电新】新能源汽车数据库260621》2026.06.21

新兴能源《【国泰海通电新】动力电池数据库260619》2026.06.19

新兴能源《继续看好欧洲电新需求》2026.06.14

新兴能源《能效国标即将落地，光伏行业迈入高质量竞争新阶段》2026.06.12

新兴能源《SNEC展会指明新方向，行业迈入光储融合发展周期》2026.06.07

本报告导读：

人工智能算力需求催生太空数据中心建设，光伏发电确立了不可替代的航天器主能源地位，在发射成本与单星高功耗的双重约束下，太阳翼向轻量化、柔性化重构已成为必然趋势，辅材也将柔性化重构。在电池技术路线的演进上，三结砷化镓经 HJT、晶硅/钙钛矿叠层过渡，钙钛矿预计为终局路线。

投资要点：

- **人工智能算力需求的激增正加剧地面数据中心的能源瓶颈，太空算力中心成为解决高功耗计算的未来解决方案，太阳翼作为商业星座核心组件需求有望高速增长。**当前，受制于低轨空间资源的稀缺性与“先占先得”规则，全球正加速推进万颗级商业星座的规模化部署。高密度的组网节奏推动了卫星制造向工业化量产迈进，使太阳翼能源系统成为核心交付约束。尽管太空算力架构面临严苛的空间工程挑战，但国内外搭载 AI 芯片的算力卫星已初步实现在轨运行与模型验证。叠加国家政策对商业航天及先进光伏技术的系统性支持，我国商业航天产业规模预计于 2030 年达到 1.67 万亿元，市场的高速扩容将直接驱动太空光伏需求的规模化增长。
- **太空极端环境决定了光伏是航天器现阶段唯一可靠的长期能源方案。**能源系统造价占整星约 15%，是极具商业价值的核心环节。随着卫星嵌入 AI 算力等高性能载荷，单星功耗大幅攀升。在运载火箭单位发射成本的严格约束下，传统物理放大太阳翼面积的路径面临经济性瓶颈。为提升系统比功率，推动太阳翼向轻量化、柔性化及高收纳比方向重构，已成为商业航天电源系统迭代的必然趋势，目前国内外均已开展实质性工程验证。
- **太阳翼形态向柔性化演进，电池电路是太阳翼重要组成，封装辅材是影响柔性化发展的重要因素。**传统刚性虽技术成熟，但基板厚重，在“一箭多星”模式下受限于火箭整流罩包络，成为制约单星功率提升的瓶颈。柔性太阳翼采用超薄轻质材料，其质量与体积随面积呈非线性缓慢增长。凭借极高收纳比与高比功率，柔性阵列有效突破运载限制，高度适配低轨星座批量部署需求，是空间电源演进的必然趋势。电池电路组件构成了太阳翼发电核心，CPI 膜和 UTG 玻璃等柔性封装材料更好地适配大功率新一代太阳翼的紧凑收纳需求。
- **电池技术方面，短期内三结砷化镓是主流成熟路线，P 型 HJT 及晶硅/钙钛矿叠层是重要过渡路线，远期看钙钛矿电池技术是“终极方案”。**砷化镓电池性能优异但成本高，正向薄膜柔性化演进；晶硅电池和晶硅/钙钛矿叠层凭低成本与薄片化潜力，成为核心过渡路线；钙钛矿凭高比功率与抗辐射优势预计为远期核心方案。
- **风险提示：**商业航天增量需求落地不及预期的风险；技术演进和产业化落地不及预期的风险；产业链发展趋势变化的风险。

仅供内部参考，请勿外传

目录

1. 算力需求与政策驱动，轨道数据中心带来太空光伏新增量 3
1.1. 算力需求与低轨组网共振，商业航天扩容驱动太空光伏刚需 3
1.2. 极端环境确立光伏刚需地位，经济性驱动太阳翼柔性化重构 6
2. 柔性太阳翼发展趋势清晰，主导电池系统与关键辅材加速迭代 9
2.1. 太阳翼构型重构：柔性太阳翼有望突破发展瓶颈 9
2.2. 电池电路主导核心价值，极端环境驱动封装辅材柔性重构 11
3. 太空光伏电池演进路线：砷化镓主导，P 型 HJT 与晶硅/钙钛矿叠层过渡，钙钛矿引领远期增量空间 14
3.1. 技术演进：从高效砷化镓到高性价比晶硅电池的降本路径 14
3.2. 重要的中期过渡路径：P 型 HJT 与晶硅-钙钛矿叠层路线 15
3.3. 钙钛矿：高比功率与抗辐射显著优势，在轨验证稳步推进 18
4. CPI 与 UTG 构建新一代柔性封装体系 21
5. 风险提示 24



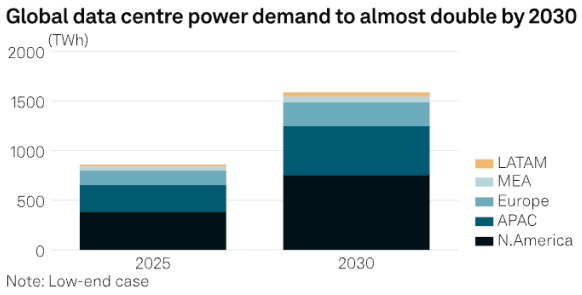
仅供内部参考，请勿外传

1. 算力需求与政策驱动，轨道数据中心带来太空光伏新增量

1.1. 算力需求与低轨组网共振，商业航天扩容驱动太空光伏刚需

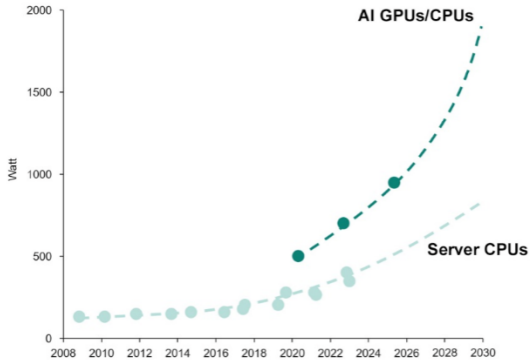
人工智能算力需求加剧地面能源瓶颈，轨道数据中心成为破局新范式。据 IEA 预测，到 2030 年，全球数据中心电力需求将达 945 太瓦时（TWh），大致与目前整个日本的年用电量相当；相比之下，2024 年全球数据中心电力需求为 415 TWh，约占全球总用电量的 1.5%。企业倾向于集中建立数据中心、新一代算力芯片功率飙升加剧地面能源紧缺态势。随着英伟达 Blackwell 等架构的问世，新一代 AI 芯片单机柜功率已攀升至 70kW 以上，部分场景甚至突破 100kW，叠加 AI 服务器 7*24 小时运行的特征，大幅推高用电需求。相对于地面算力中心面临的能源瓶颈，太空算力中心具备显著优势。在能源获取端，太空环境中的太阳辐射未受大气层吸收与散射，AM0 标准下的辐照强度达 1366.1 瓦特/平方米，与地球表面常见的 AM1.5 标准（考虑了穿过 1.5 个标准大气层厚度的太阳光）形成鲜明对比。同时，低轨环境的光照接收稳定，综合计算，同样面积的光伏板在太空的发电量可达地面的 6 至 10 倍，能为高功耗算力提供稳定电源。在热管理端，相较于传统地面数据中心的液冷路线的高额冷却能耗与用水成本，通过开发高效辐射热管理技术，设备热量可通过热辐射向深空排散。

图 1：2030 年全球数据中心能源消耗测算（较低情景）



资料来源：S&P Global

图 2：基于 x86 和 Arm®架构的服务器 CPU 与 GPU 和 TPU 的电力需求对比



资料来源：英飞凌，新浪科技

表 1：地面&太空数据中心成本对比

成本项目	40MW 地面数据中心	40MW 太空数据中心
能源（10 年）	1.4 亿美元（电价$0.04/kWh）	200 万美元（太阳能阵列成本）
发射	无	500 万美元/次（计算模块、太阳能与散热器）
制冷	700 万美元（占总能耗 5%）	利用太空中的高温差实现更高效的冷却架构
水耗	170 万吨（0.5L/kWh）	不需要
备用电源	2000 万美元（商业化设备）	不需要
辐射屏蔽	不需要	120 万美元（屏蔽材料按 1kg/kW、发射成本$30/kg）
总成本（10 年）	1.67 亿美元	820 万美元

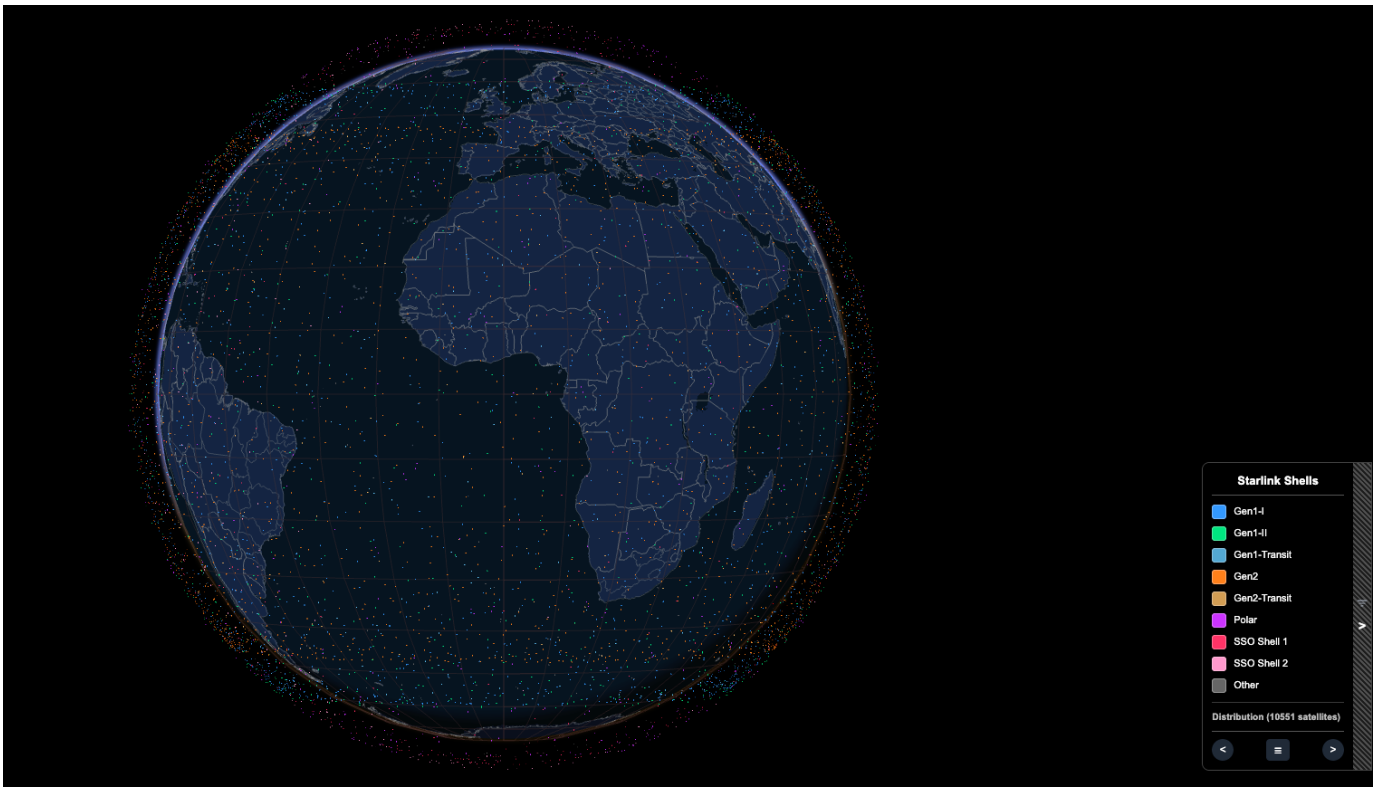
资料来源：Lumen Orbit 白皮书《Why we should train AI in space》，国泰海通证券研究

各国实质性推进轨道算力部署，低轨卫星组网提速。由于低轨空间资源有限，先手发射率先“抢占”有重要的意义。SpaceX 已向美国联邦通信委员会提交了高达 100 万颗卫星的发射申请，根据该提案，SpaceX 将在大约

仅供内部参考，请勿外传

500-2000km 高度运行该卫星系统，并采用太阳同步轨道。与此同时，我国也在加速低轨卫星互联网与算力星座的规模化组网布局，目前国内已形成中国星网“国网星座”、上海垣信“千帆星座”以及“鸿鹄星座”等多个万颗级大型星座项目，规划发射数量均已超过 1 万颗。面对轨道与频谱资源稀缺的客观约束，我国在 2025 年底进一步向国际电信联盟（ITU）一次性提交了超 20 万颗的卫星部署计划，全面竞逐低轨空间资源。而在供给侧，以商业航天公司为代表的运载技术不断突破，极大降低了入轨成本与门槛，使得极高频次、超大规模的星座部署成为可能。据行业预测，到 2030 年低轨道活跃卫星数量将呈指数级攀升。这种高密度的组网节奏，正将卫星制造推向工业化量产阶段，而为每一颗卫星提供长期动力的太阳翼能源系统，已然成为商业航天加速落地的核心交付瓶颈。

图 3：Starlink 卫星星座分布情况



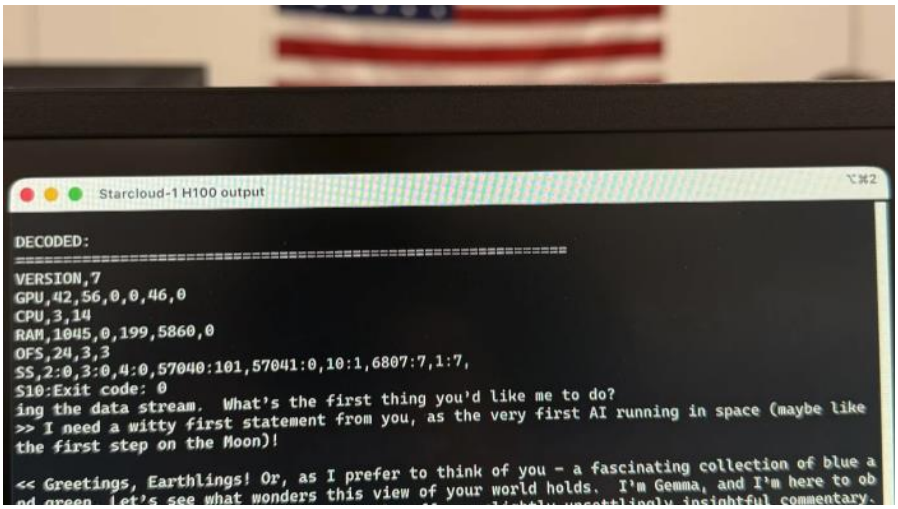
资料来源：Satellitemap.space

太空算力工程化实现存在诸多挑战，在轨工程实验稳步推进。将高性能计算节点规模化部署于低地球轨道，必须跨越严苛的空间工程约束，在轨运行太空算力基础设施面临许多挑战，仍在早期探索阶段。当前，关于太空算力的工程化实验正在稳步推进。据业内知名公司 Starcloud 披露，该公司已经实现人类首次在太空中训练大语言模型的尝试，该公司于 2025 年 11 月发射一颗搭载英伟达 H100 图形处理单元的卫星。据公司透露，这颗卫星目前正在轨道上运行基于谷歌开源模型 Gemma 的应用。作为英伟达加速计划成员，以及 YC 和谷歌云孵化器项目，Starcloud 计划建造一座基于太阳能面板的 5 吉瓦轨道数据中心，公司的目标是实现轨道数据中心能源成本比地面数据中心低 10 倍。通过 Starcloud-1 在轨运行，旨在验证构建太空数据中心的可行性，特别是那些需要大型计算集群的模型。国内方面，根据工业和信息化部信息通信发展司副司长赵策的介绍，近年来，我国逐步开展太空算力组网建设和先导验证，加速星载智算芯片和星间激光通信等技术攻关，多项星座组网计划有序开展，试验星在轨验证，大模型在轨部署

仅供内部参考，请勿外传

稳步推进，“产学研”深化合作，产业生态逐步构建。

图 4：Starcloud 卫星上的 H100 芯片运行后传回的信息



资料来源：Starcloud，财联社

商业航天已步入国家战略支持期，行业高速增长、规模扩容可期。近年来，商业航天迎来国家产业政策密集支持。2024 年商业航天首次被写入政府工作报告；2025 年政府工作报告提出“推动商业航天、低空经济、深海科技等新兴产业安全健康发展”；同年，国家航天局正式设立商业航天司，实现发射审批、频轨资源、安全监管一体化统筹管理。“十五五”规划纲要中，“航天强国”作为新增“强国”目标首次写入国家五年规划。在宏观规划推进的同时，政策引导正精准下沉至空间能源的制造与验证环节。2025 年 11 月工信部办公厅发布的《关于进一步加快制造业中试平台体系化布局和高水平建设的通知》聚焦钙钛矿光伏电池、叠层光伏电池等先进光伏技术，开展共性关键技术攻关、测试验证评价。2025 年 9 月国家能源局等部门发布的《关于推进能源装备高质量发展的指导意见》明确突破高效晶硅-钙钛矿叠层及异质结、背接触等光伏组件技术。在政策的大力支持下，中国商业航天行业增长可期。根据中国电子信息产业发展研究院最新发布的《我国商业航天高质量发展趋势研究》预计，“十五五”期间，我国商业航天核心产业规模年均复合增长率将达到 11%左右，2030 年商业航天核心产业规模预计达到 1.67 万亿元。

仅供内部参考，请勿外传

图5：中国商业航天政策支持体系的演进脉络

发展时期	发文时间	文件名称	发文单位	主要内容	政策性质
军民融合破冰期	2014年11月	《关于创新重点领域投融资机制鼓励社会投资的指导意见》	国务院	鼓励民间资本参与国家民用空间基础设施建设。完善民用遥感卫星数据政策，加强政府采购服务，鼓励民间资本研制、发射和运营商业遥感卫星，提供市场化、专业化服务。引导民间资本参与卫星导航地面应用系统建设	支持类
	2016年11月	《民用卫星工程管理暂行办法》	国家国防科技工业局、国家航天局	办法对民用卫星工程管理从论证到卫星退役全过程有关活动的管理做出统一规定。同时，办法中特别指出，商业卫星、国际合作卫星工程原则上参照本办法执行	规范类
	2017年12月	《关于推动国防科技工业军民融合深度发展的意见》	国务院办公厅	意见在支撑重点领域建设中指出，面向军民需求，加快空间基础设施统筹建设。在太空领域中，以遥感卫星为突破口，制定国家卫星遥感数据政策，促进军民卫星资源和卫星数据共享	支持类
产业生态培育期	2018年10月	《关于印发中国（海南）自由贸易试验区总体方案的通知》	国务院	引进国际深远海领域科研机构、高校等前沿科技资源，打造国际一流的深海科技创新平台。搭建航天科技开发开放平台，推动商用航天发展和航天国际合作	支持类
	2019年6月	《关于促进商业运载火箭规范有序发展的通知》	国家国防科技工业局、中央军委装备发展部	强调“引导商业航天规范有序发展，促进商业运载火箭技术创新”	规范类
	2020年11月	《关于推进对外贸易创新发展的实施意见》	国务院办公厅	积极推动航空航天等装备类大型成套设备开拓国际市场	支持类
	2020年12月	《关于加强科技创新促进新时代西部大开发形成新格局的实施意见》	科学技术部	优先布局建设阿秒光源等重大科技基础设施，培育建设稀有金属材料等国家技术创新中心，通过国家科技计划加大对电子信息、高端装备、航空航天、能源化工、先进材料等领域前沿核心技术攻关的支持力度，为解决国家战略领域和产业发展关键瓶颈问题提供支撑	支持类
战略地位升级期	2022年6月	《关于印发〈制造业技能根基工程实施方案〉的通知》	人力资源社会保障部、工业和信息化部、国务院国资委	各地可突出“高精尖缺”导向，结合新一代信息技术和自主信息技术产业、高端工业母机和机器人、航空航天装备、关键软件、数字技能等领域以及工业和信息化职业技能提升培训指导目录	规范类
	2023年4月	《工业和信息化部关于印发〈对地静止轨道卫星动中通地球站管理办法〉的通知》	工业和信息化部	一是明确天线口径及交叉极化隔离度等设备性能技术要求；二是明确偏轴最大等效全向功率谱密度等限值要求	规范类
	2024年3月	《政府工作报告》	国务院	打造生物制造、商业航天、低空经济等新增长引擎	支持类
系统治理深化期	2025年3月	《政府工作报告》	国务院	开展新技术新产品新场景大规模应用示范行动，推动商业航天、低空经济、深海科技等新兴产业安全健康发展	支持类
	2025年3月	《关于促进商业航天测控规范有序发展的通知》	国家国防科技工业局	国家有关部门建立国家航天测控站网资源数据库及信息平台，完善对商业航天测控站点资源的常态化监督，确保状态可知、信息准确	规范类

资料来源：中国科学院院刊

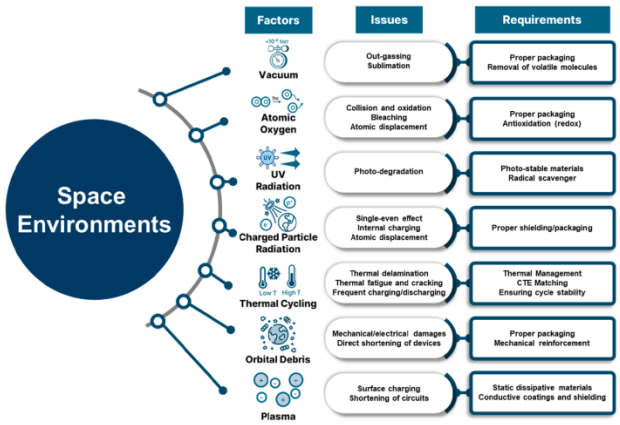
1.2. 极端环境确立光伏刚需地位，经济性驱动太阳翼柔性化重构

太空极端环境决定了光伏发电现阶段不可替代性，能源系统已成为卫星制造中极具价值的核心环节。航天器在轨运行面临极度严苛的物理条件，根据 Boonmongkolras 等人发表于 Advanced Functional Materials 上一篇文章“Challenges and Advances of Photovoltaic Power and Rechargeable Battery Systems for Space Applications”的归纳，在太空中工作的能源系统需长期承受高真空、剧烈的温度循环、高能带电粒子辐射、原子氧侵蚀以及微流星体撞击等多重空间环境应力的考验。在这种复杂的背景下，兼顾能源系统的在轨长时可持续运行，可供选择的能源极为有限。传统的化学电池受限于物理能量密度上限，无法实现自主的电量补充；核电源系统虽然具备持续供电能力，但整体造价极其高昂，且面临复杂的审批流程等因素限制，现阶段难以匹配商业航天追求低成本与批量化部署的诉求。相比之下，光伏发电系统配合一定容量的储能电池，能够直接将空间中丰富的太阳辐射持续转换为电能。从工程化实践的角度，光伏已成为维持航天器长期在轨运行唯一可行且可靠的能源供给方案。能源系统也已成为卫星制造中极具价值的核心环节。能源模块主要包括星内的电源控制器和蓄电池组、星外的太阳电池阵。能源模块的重量一般占到整星 30%左右、造价占整星 15%。

仅供内部参考，请勿外传

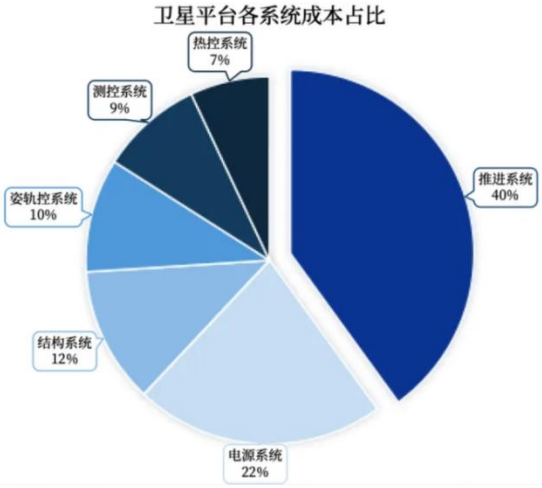
在巨型星座批量制造、整星造价大幅压缩的趋势下，为卫星提供长期动力的太阳翼及配套能源系统，已然成为商业航天产业链中的重要影响因素及价值量极高的核心交付环节。综上所述，我们认为：在商业航天产业链近期迎来产业+政策双重催化的背景下，作为重要价值环节的能源系统有望进一步放量。

图6：光伏系统在太空中面临的主要问题及所需性能



资料来源：Advanced Functional Materials

图7：卫星平台各系统成本占比



资料来源：你好太空

算力载荷叠加推高卫星功耗，发射经济性倒逼太阳翼向轻量柔性化重构。伴随着太空数据中心的概念逐步走向现实，卫星所承担的功能不再仅是单一通讯工具，更是具备高性能、高能效的 AI 推理、图像感知及加速数据处理能力的在轨边缘计算中心，支持 AI 等高性能计算需求，算力设施的嵌入对能源系统的功率提出了指数级升高的需求，为满足急剧攀升的功率需求，传统设计高度依赖物理放大太阳翼尺寸，此路线不可避免地造成重量的增长，进而对经济性形成一定掣肘。以 Starlink 为例，随着单星通信容量的显著上升，单星重量已由 V1.5 版本的约 295kg 大幅攀升至 V3.0 版本的约 1.8 吨。一般来说，能源模块的重量一般占到整星 30%左右，能源模块重量成为单星重量增长的重要组成部分。同时，火箭发射成本仍处于较高水平，重量直接影响卫星发射的经济性。根据公开信息梳理，目前国内主流商业发射报价集中于每公斤 5-10 万元，部分小型火箭或特殊轨道发射费用可达每公斤 15 万元，而 SpaceX“猎鹰九号”火箭的卫星发射报价约 3170 美元/公斤。在载荷与成本的双重限制下，面对高速增长的功率增长需要，大幅提升光伏系统的比功率是重要技术发展路线，推动太阳翼向轻量化、柔性化及高收纳比方向重构，已成为下一代空间电源系统迭代的必然趋势。在海外，SpaceX 的星链 V2 mini 采用双阵列柔性硅基太阳翼结构，单侧展开面积约为 52.5 平方米，长约 30 米，验证了柔性阵列在低轨巨型星座中的工程可行性。近日，马斯克与 SpaceX 火箭工程部门负责人共同参与的一场访谈中首次披露了 AI1 算力卫星的基本设计情况，根据官方公布的技术参数，单颗 AI1 卫星搭载的太阳翼两片总面积约 600m 平方米，该卫星两翼的太阳能板在空间轨道完全展开后，卫星总长度达 70 米。在国内，我国空间站已成功实现柔性三结砷化镓太阳翼的在轨运行，通过柔性基板大幅减轻了结构重量并提升了展开面积。同时，多款柔性超薄钙钛矿组件也已随运载火箭升空开展在轨实测，例如 2024 年 11 月馥昶空间的 ROSA 卷绕式柔性太阳翼搭载光传 01、02 试验星已完成首次在轨飞行并顺利展开，是国内 ROSA 卷绕式柔性太阳翼作为卫星主电源的首次成功在轨飞行。

仅供内部参考，请勿外传

图 8：不同版本星链卫星重量等参数对比

卫星版本	质量	每批发射卫星数	尺寸	单星通信容量	备注
V0.9	227kg	60	3.0*1.5*0.2m	下行 20 Gbps 上行 2~4 Gbps	不再发射
V1.0	270kg	60	3.0*1.5*0.2m	下行 20 Gbps 上行 2~4 Gbps	不再发射
V1.5	295kg	53	3.0*1.5*0.2m	下行 20 Gbps 上行 2~4 Gbps	不再发射
V2.0Mini	737kg	23	4.2*2.7*Xm	下行 96 Gbps 上行 8.3 Gbps	不再发射
V2.0Mini 改进版	575kg	28	4.2*2.7*Xm	下行 96 Gbps 上行 8.3 Gbps	发射中
V2.0	1250kg	NA	7*X*Xm	200Gbps	未发射 不再计划
V3.0	~1800kg	NA	NA	下行 1Tbps 上行 200Gbps	预计 2026 发射

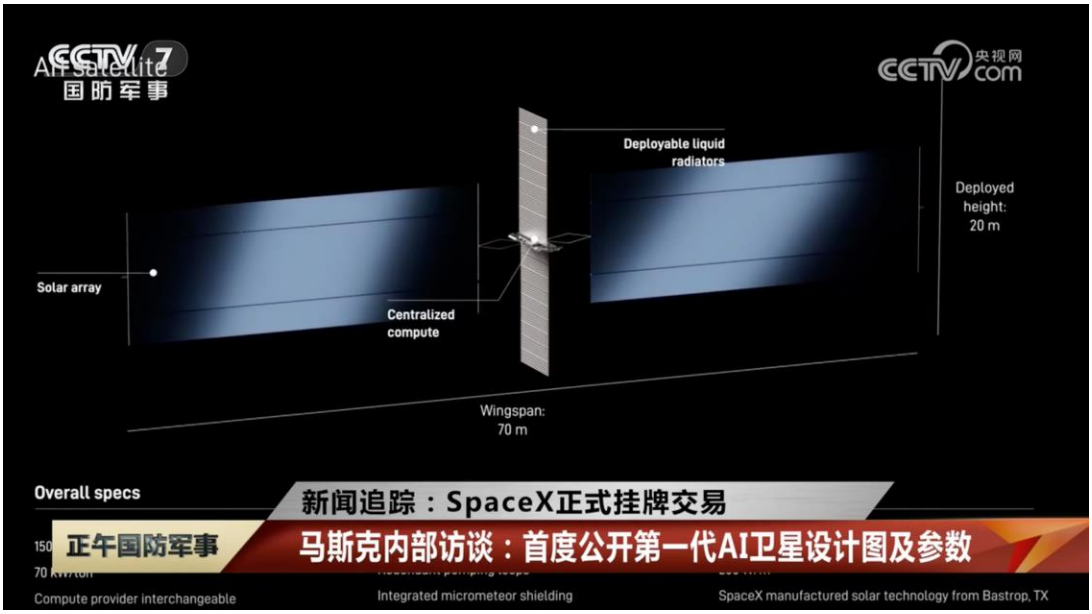
资料来源：未来天玑

图 9：馥昶空间 ROSA 卷绕式柔性太阳翼



资料来源：馥昶空间

图 10：SpaceX AI1 卫星主要设计参数一览



资料来源：央视七套节目

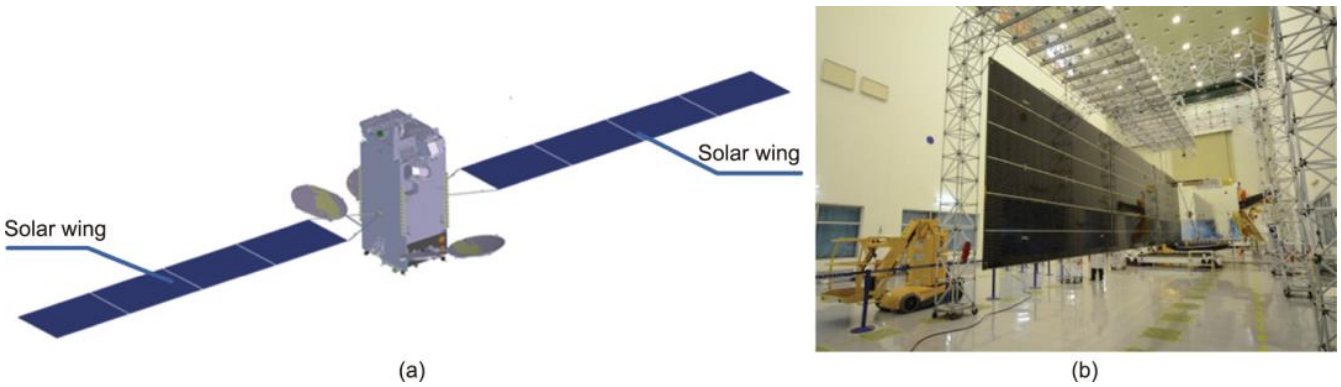
仅供内部参考，请勿外传

2. 柔性太阳翼发展趋势清晰，主导电池系统与关键辅材加速迭代

2.1. 太阳翼构型重构：柔性太阳翼有望突破发展瓶颈

传统刚性太阳翼具备成熟运行经验，但物理形态的固有局限正成为制约卫星功率提升的瓶颈。自 1958 年“先锋一号”卫星首次搭载光伏阵列入轨以来，刚性太阳翼已经历了 60 余年的工程演进，是目前航天领域技术最成熟、可靠性最高的能源解决方案。传统的刚性太阳翼采用刚性基板，电池粘贴在面板上，典型结构为碳纤维网格面板-铝蜂窝夹层板。这种物理形态为航天器提供了极高的结构刚度与运行稳定性。目前发射的航天器以一维刚性太阳翼为主。例如，中国东方红（DFH）四号平台太阳翼为大型一维二次展开刚性太阳翼。该太阳翼由连接架、基板（4 块）和一套机构（包括一次和二次压紧释放机构、一次和二次展开锁定机构）组成。然而，面对现代商业卫星对高功率的需求，传统结构太阳翼质量与体积带来的局限性日益凸显。在商业航天“一箭多星”的密集发射模式下，运载火箭的整流罩内部容积有着严格的物理上限。刚性太阳翼受限于基板自身的厚度以及复杂的折叠铰链机构，收拢状态下的体积占比极高。例如假设每层太阳板厚度为 2cm，十层太阳板总厚度为 20cm，考虑到折叠时每层板间间隙需 3cm 左右，整个太阳翼的厚度接近 50cm。在整流罩可用空间固定的客观约束下，过于厚重的面板导致卫星无法进一步扩大太阳翼的物理尺寸（即使考虑到可展开式产品的改进），这意味着在运输层面制约了当前主流运力水平下的单颗卫星功率，物理形态的固有局限已成为制约卫星功率进一步提升的瓶颈。

图 11：东方红四号增强型平台太阳翼展开状态构型。（a）东方红四号平台配置；（b）刚性太阳翼原理



资料来源：Engineering

柔性太阳翼凭借非线性的质量增长特征突破了运载包络限制，极高的收纳比与超高比功率使其成为空间电源演进的必然趋势。柔性太阳翼的核心优势在于基板采用了超薄型轻质复合材料，单板厚度可薄至 0.3 毫米。不同于刚性/半刚性太阳翼自身收拢包络、质量与其展开面积近似成正比，柔性太阳翼的收拢包络、质量与其展开面积呈显著的非线性特点，即随着展开面积的增加，其质量、收拢包络增长缓慢。与传统刚性结构相比，柔性薄膜基板的收纳体积被极大压缩。2021 年 4 月 29 日，我国首套柔性太阳翼空间站核心舱发射并成功展开。单翼发电功率达 9 kW、展开面积为 67 m^2、展开长度为 12.6 m。与传统的刚性和半刚性太阳翼相比，柔性太阳翼收拢厚度约为 16.8 mm，仅为刚性太阳翼的 1/60。柔性基板采用超薄型轻质复合材料，单板厚度约为 0.3 mm，而在同等阵列功率下柔性太阳翼比功率可能超出刚性太阳翼超 30%。据发表于 Joule 期刊上的综述文章分析，部署于国际空间站的卷展式阵列（iROSA）已在轨实现了超过 100 W/kg 的系统级高比

仅供内部参考，请勿外传

功率。2026 年 4 月，上海航天空间技术有限公司为专门为互联网技术试验卫星研制的高刚度立体桁架折叠展开式柔性太阳翼随卫星入轨后顺利展开，初期可为整星提供超过 5000W 功率，产品各项指标达国际领先水平。此外，柔性太阳翼的机械结构能够更好适配低轨星座“小包络、低成本、批量化”的工业部署需求。随着柔性材料的持续迭代，下一代柔性太阳翼功率有望进一步提升，进一步在发射端和能源系统方面从根本上改善商业航天大规模组网的综合经济性。

表2：柔性太阳翼技术优势

	简析
重量轻	采用柔性基板和轻质材料制造，相比传统刚性翼，面密度降低 50%以上，大幅减轻了航天器重量，使得发射时更节省成本，且可减少燃料消耗以执行更多任务。
体积小	发射时可以压缩成极小体积，同等面积下相比刚性翼体积缩小 60%以上，极大优化了整流罩空间运用，让航天器能够携带更多的设备和物资。
适应性	能够灵活地贴合航天器的外形，如球形、锥形等，充分利用航天器的表面空间，增加太阳电池的安装面积，从而提高供电能力。
抗振抗冲击	在航天器发射和运行过程中受到振动和冲击时，能够更好地吸收能量，减少损坏的可能性，提高太阳翼的可靠性。
设计灵活	在航天器设计阶段可以根据不同需求，方便地进行扩展和调整，例如增加太阳电池的数量或改变太阳翼的形状，以满足不同任务对供电能力的需求。

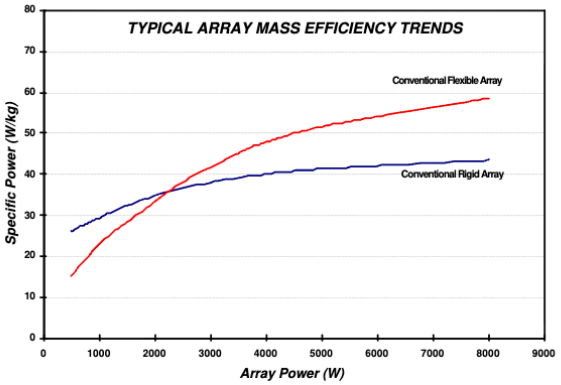
资料来源：上海卫星工程研究所公众号，国泰海通证券研究

图12：在研柔性太阳翼-圆形太阳翼



资料来源：Engineering

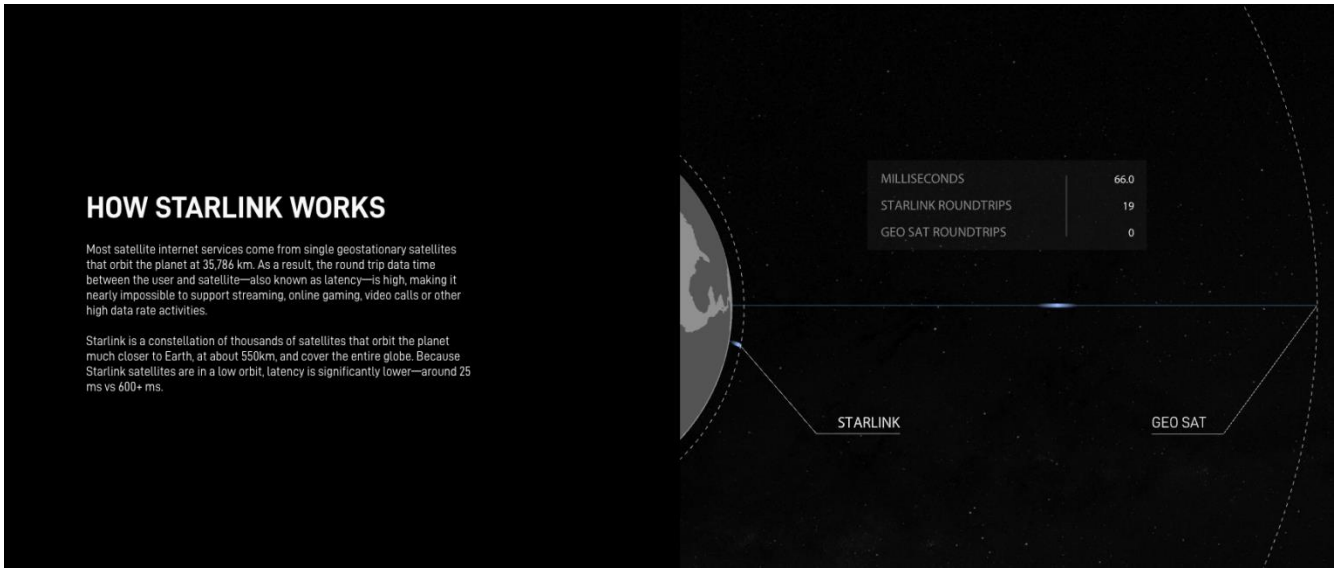
图13：典型太阳翼阵列效率演变趋势



资料来源：AEC-Able Engineering Company

仅供内部参考，请勿外传

图 14：Starlink 卫星是如何工作的



资料来源：Starlink 官网

2.2. 电池电路主导核心价值，极端环境驱动封装辅材柔性重构

电池电路组件构成了太阳翼的发电核心，在系统成本、在轨寿命与减重经济性中均有重要影响，电池技术响应需求持续迭代。太阳翼的物理结构决定了卫星的收纳包络，而其内部的微观发电单元则决定了航天器的生命周期与核心造价。在航天工程中，设计柔性太阳能阵列是一个复杂的过程，太阳翼不是一块简单的光伏电池，而是光伏电池与电气连接、辅材的结合。需要根据每次航天任务需求进行调整，一些工艺从裸露的太阳能电池出发，加入覆盖玻璃、旁路二极管和互联连接器，形成太阳能电池组件（SCA）。从物料成本拆解来看，光伏电池板占据了绝对的价值重心。据研究文献，三结砷化镓电池片占太阳翼总成本 50-65%，部分场景下电池板及相关电路可能占太阳翼系统总成本高达 70%。电池电路是抵抗极端空间环境的最前沿防线，也是整个系统使用寿命、运行稳定性的重要决定因素。在轨运行期间，CIC 单元必须直接承受高能带电粒子辐照、原子氧侵蚀以及剧烈的高低温交变热循环等严苛考验。互联电路与封装材料的可靠性直接决定了卫星的在轨寿命。为应对这些挑战与商业降本诉求，当前核心电池组件正向多种技术路线演进，主要包括晶硅（如 PERC 与 HJT）、三结砷化镓、单结钙钛矿以及晶硅-钙钛矿叠层电池等。我们认为下一代光伏电池电路的技术演进路径，应以系统视角看待，响应整体系统低成本、高寿命、重量减轻、柔性化的需求。

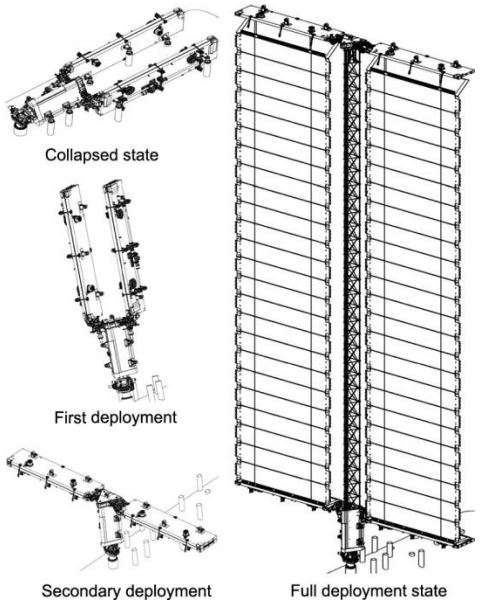
仅供内部参考，请勿外传

图 15：部分具有代表性的太阳能阵列信息

Architecture	Name	Developer	Area (m^2)	Mass (kg)	Power output (kW)	Mass per unit area (kg/m^2)	Power per unit area (W/m^2)	Specific power (W/kg)
Z-folded	ISS SAW[216]	Boeing/SPECTROLAB	~420	~1,100	~31	2.93	~45.2–61.2	~15.5–20.9
	CSS[217,224,225]	CMSA (China Manned Space Agency)	138	N/A	~18	N/A	~130.43	>40
Roll-out	iROSA[212,224,225,226]	DSS, (now Redwire)	119	~200	>20	~1.68	>169.5	>100
Circular	Ultraflex (Phoenix lander)[218,219]	AEC-Able Engineering (later acquired by Northrop Grumman)	6.9	62	0.25	~8.99	~36.2	~112
	MegaFlex[227]	ATK (now Northrop Grumman)	32	~100	25	~3.13	~781.3	~250

资料来源：Joule

图 16：柔性太阳翼在轨展开过程

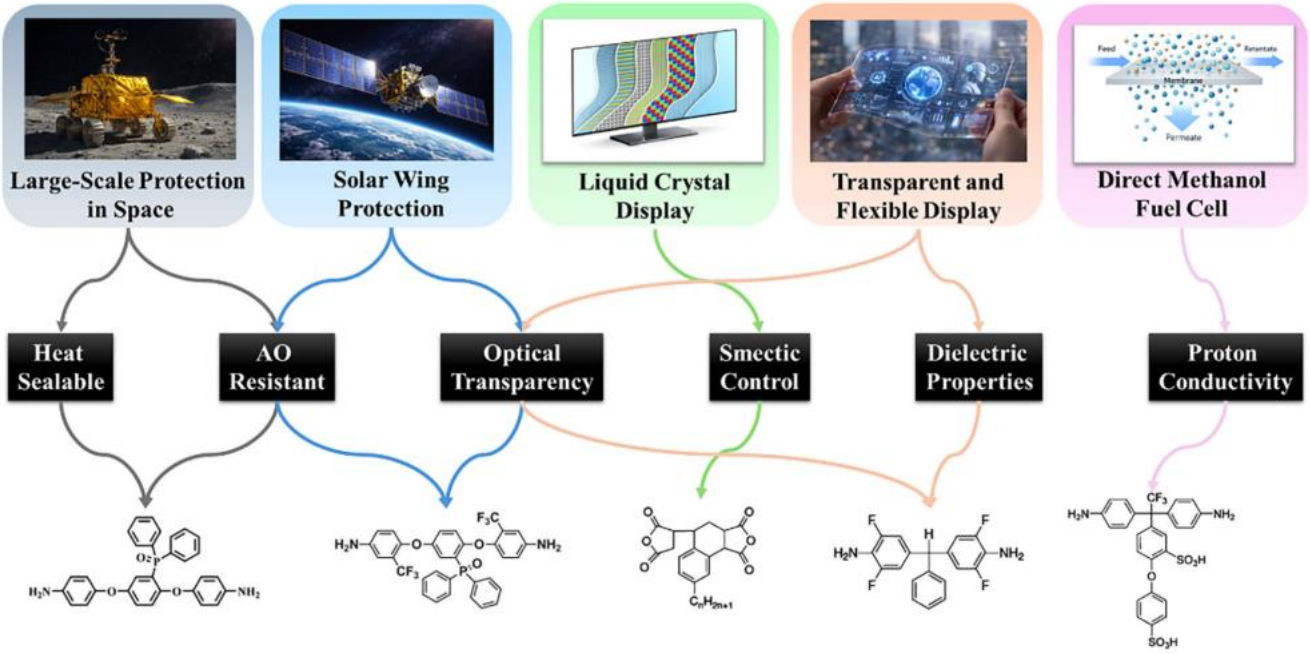


资料来源：Engineering

太空极端环境与柔性化趋势，共同驱动太阳翼辅材体系发生跨代重构。在电池电路之外，辅材构成了组件的物理骨架与防护屏障，主要包括封装系统、底层基板，以及实现物理粘接的胶黏剂等。传统刚性太阳翼的辅材高度依赖厚重的掺铈玻璃盖板、铝合金蜂窝基板与空间级硅胶。在轻量化诉求下，新一代封装材料正全面向超薄柔性玻璃（UTG）、无色透明聚酰亚胺（CPI）薄膜方向演进。这种材料学演进必须首先跨越太空极端环境对辅材的底线约束。在低地球轨道（LEO）中，太阳翼辅材是抵御极端环境的“第一道防线”，一方面，含量极高的原子氧会产生强烈的氧化与剥蚀作用，直接导致材料变质、性能退化甚至失效；另一方面，封装辅材还需长期承受高能粒子辐射、高达正负 150 摄氏度的剧烈高低温热循环、空间碎片冲击等问题。为了抵御上述侵蚀，封装系统的核心功能需要包括抗辐照和环境保护、高光学性能及稳定性、热管理能力、符合要求的机械支撑及保护等。传统组件普遍采用掺铈玻璃，但因其刚性固有属性无法用于柔性太阳电池。面对太阳翼柔性化趋势，新一代辅材必须在满足航天级物理耐受性的前提下，选用或开发柔性、耐高温的保护层材料，主要有超薄柔性玻璃（UTG）和透明聚酰亚胺（CPI）薄膜两类封装材料。当前材料领域进展较快，例如蓝思科技 2026 年 3 月表示其针对太空极端环境研发的 UTG 柔性玻璃薄至 30-60 微米，弯折半径低至 1.5mm，而部分企业研发的透明聚酰亚胺（CPI）薄膜的弯折半径则可达 1mm 以下，这使得辅材系统能够更好地适配下一代大功率卷展式太阳翼的紧凑收纳需求。

仅供内部参考，请勿外传

图17：应用需求驱动的聚酰亚胺薄膜化学结构演变



资料来源：高分子科学前沿

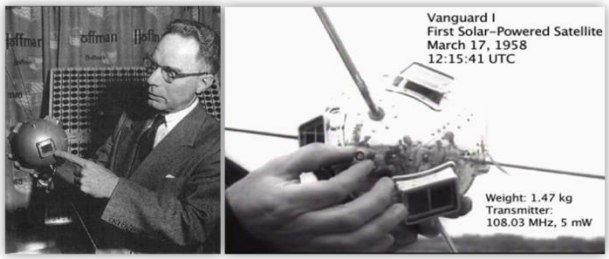
仅供内部参考，请勿外传

3. 太空光伏电池演进路线：砷化镓主导，P 型 HJT 与晶硅/钙钛矿叠层过渡，钙钛矿引领远期增量空间

3.1. 技术演进：从高效砷化镓到高性价比晶硅电池的降本路径

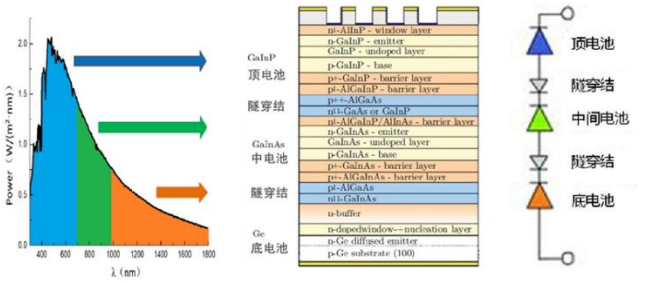
从早期单晶硅到现代三结砷化镓，具备高转换效率与强抗辐射能力是成熟太空光伏电池技术核心特征。自 1958 年美国“先锋一号”卫星首次将单晶硅太阳电池引入太空以来，光伏组件正式确立了其作为航天器基础能源的地位。美国贝尔实验室 1954 年研发的单晶硅太阳电池，首次采用“扩散和掺杂”现代半导体技术，转换效率只有 6%，是世界上第一个有实用价值的太阳能电池。“先锋一号”卫星的单晶硅组件单组件功率 50mW，持续工作七年（此前卫星全部采用化学电池，寿命约两星期）。然而，随着航天器对功率与运行寿命要求的不断提升，到了 20 世纪 80 至 90 年代，砷化镓（GaAs）材料凭借更优异的光电转换效率与抗空间辐照性能，逐步替代传统晶硅，开始成为地球同步轨道卫星、深空探测等任务的卫星主力电源，中国自 1970 年代开始研制此类电池，至九十年代末单结 GaAs/Ge 电池实现量产。当前，中国的卫星和航天器主要采用三结砷化镓电池，其结构为 GaInP/GaAs/Ge，由 Ge 底电池、GaInAs 中电池和 GaInP 顶电池构成。

图 18：首次将晶硅太阳电池用于小型通讯空间卫星



资料来源：中国可再生能源学会光伏专委会

图 19：卫星用三结 GaAs 太阳电池结构示意图

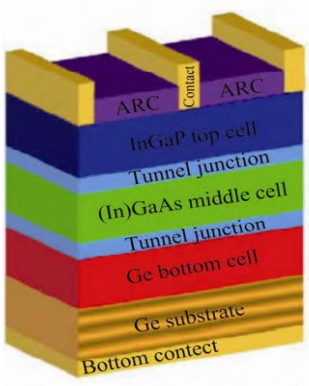


资料来源：中国可再生能源学会光伏专委会

三结砷化镓在传统航天任务中表现优异，但其复杂的制造工艺与高昂成本掣肘大规模应用。砷化镓电池的制备高度依赖单晶锗（Ge）或砷化镓作为衬底，且核心环节必须使用金属有机化学气相沉积（MOCVD）设备进行外延生长。这种外延工艺不仅生产周期长、能耗大，且设备及原材料成本极高，推高了最终组件的造价。在早期高轨卫星与空间站应用中，其价格曾高达每平方米 100 万元以上；即使经过近年来产业化降本，目前市场价格仍处于每平方米 20 万元左右。为突破性能与成本的物理边界，当前产业界与学术界主要围绕多结化提效与薄膜柔性化降本两个方向展开技术攻关。在提效方面，业内通过倒装失配外延与半导体直接键合技术，积极向四结、五结甚至六结架构演进，理论转换效率达到 50%以上，四结电池最高效率达到 35.3%，五结电池最高效率达到 36.0%，但是，四结和五结电池都未达到量产实用状态。例如，国内外机构研发的倒装失配多结砷化镓太阳能电池，将电池叠层在硅基底上其实验室光电转换效率已突破至约 35%，国内上海空间电源研究所、天津电源研究所自 2010 年起也在持续跟进此方向。此外，柔性薄膜砷化镓技术成为降本关键破局路径。该技术主要采用低应力倒装多结设计与解键合（外延剥离）工艺，以 GaAs 为基底，采用低应力倒装多结太阳电池外延结构设计和生长，通过解键合剥离，制备三结柔性薄膜砷化镓太阳电池，而 GaAs 衬底可多次重复利用，从而在物理形态与制造经济性上显著拓宽了砷化镓路线的应用边界。

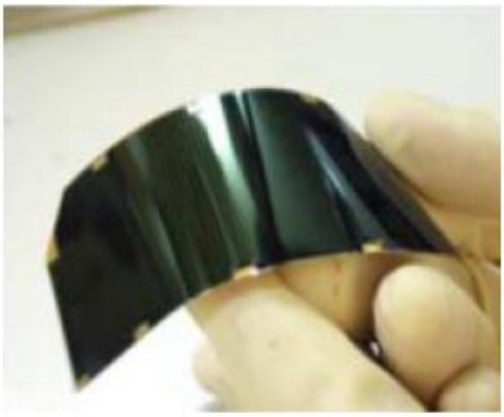
仅供内部参考，请勿外传

图 20：典型三结砷化镓电池(GaInP/Ga(In)As/Ge)结构



资料来源：《高效太阳电池及其阵列技术的空间应用研究进展》（本文作者：王凯等）

图 21：薄膜砷化镓太阳电池

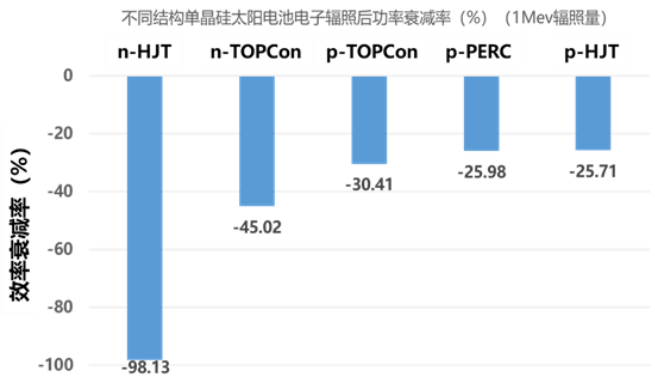


资料来源：《高效太阳电池及其阵列技术的空间应用研究进展》（本文作者：王凯等）

3.2. 重要的中期过渡路径：P 型 HJT 与晶硅-钙钛矿叠层路线

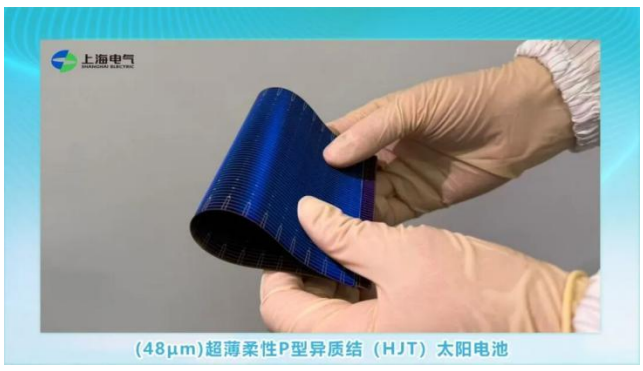
面对三结砷化镓的高昂成本，部分商业航天企业（如 SpaceX）在早期星链组网中采购了 PERC 晶硅电池，P 型 HJT 等晶硅电池仍是太空光伏重要的过渡路线。晶硅电池在太空中应用正越发受到关注，其中 p-HJT 和 p-PERC 表现出较好的抗辐照性能。P 型晶硅异质结（P-HJT）电池是当前最重要的商业化过渡路线，具有较高的光电转换效率。而在太空应用中，P-HJT 展现出两大重要性能优势。一方面是较优的抗辐射与自修复机制。由于 P 型硅衬底采用空穴作为多数载流子，其迁移率对辐射引发的晶格缺陷敏感度较低，具有较强的抗辐照性能且硼掺杂结构引入的缺陷在退火条件下具备自我修复能力，在太空环境-150 摄氏度至 200 摄氏度的剧烈温差循环中 P 型硅的缺陷动力学行为有利于维持较为稳定的电学性能。另一方面是以薄片化实现轻量化应用的潜力。HJT 电池将硅片厚度从 180 微米降低至 50-70 微米并以轻质柔性封装代替传统结构，可将能质比提升至接近砷化镓电池的水平。在产业化进程上，目前 P 型 HJT 电池被视为中短期内的重要技术路线，基于 HJT 电池地面光伏的庞大制造基础实现快速降本，据业内人士，按照太空光伏产品为地面光伏的 20-40 倍溢价计算，HJT 太空电池的价格区间在数十元/W 水平，相较于砷化镓价格仍有较大降幅。

图 22：各种单晶硅电池高能电子辐照衰减比较



资料来源：中国可再生能源学会光伏专委会

图 23：上海电气恒羲光伏开发超薄柔性 P 型 HJT 电池



资料来源：上海电气恒羲光伏

仅供内部参考，请勿外传

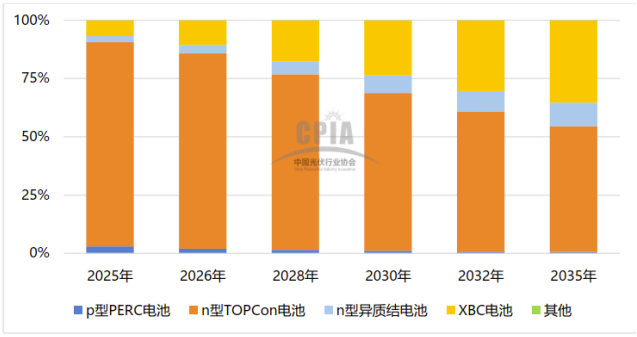
制造方面，P 型晶硅异质结（HJT）电池生产工艺特征带来较好的柔性化潜力和降本优势。在制造环节，HJT 电池相较于传统晶硅电池繁杂的高温工序，生产流程仅包含硅片制绒清洗、PECVD 沉积正反面本征非晶硅膜层和掺杂微晶硅膜层、PVD 沉积正反面 TCO 薄膜、丝网印刷正反面栅线电极及低温固化等工艺流程等核心步骤，结构决定性质、工艺影响性能。一方面，低温工艺意味着对于柔性物理形态的更大适配潜力，更容易与柔性封装技术相结合。传统的晶硅高温扩散工艺通常在 700 摄氏度以上的环境中进行，要求硅片具有一定厚度以承受热应力，无法真正制成柔性结构。而 HJT 电池生产全过程处于低温环境，使得超薄硅片得以在维持较高良率的前提下进行生产，物理厚度可安全减薄至 50 至 70 微米级别，确保了底层组件具备优异的抗形变能力，更好地适配下一代大面积卷展式（ROSA）太阳翼的紧凑收纳需求。另一方面，HJT 路线能够有效利用当前地面光伏产业已有的庞大且成熟的供应链基础设施，并且得益于较短的工艺流程，HJT 产线具有极高的自动化率，其制造过程相比其他复杂晶硅路线可大幅节约能源与人工消耗。综上所述，工艺特征带来了更好适配柔性形态的潜力，而更充分利用当前地面光伏产业已有基础设施也意味着更大的降本空间。

图 24：2025-2035 年不同类型组件功率变化趋势

晶硅电池组件平均功率（W）		2025 年	2026 年	2028 年	2030 年	2032 年	2035 年
p 型单晶	PERC p 型单晶组件（182mm 方片）	555	555	557	557	557	557
	PERC p 型单晶组件（210mm 方片）	665	665	667	667	667	667
n 型单晶	TOPCon 单晶组件（182mm 方片）	595	600	606	609	612	615
	TOPCon 单晶组件（182*210mm）	630	640	650	655	660	665
	TOPCon 单晶组件（210mm 方片）	720	730	740	745	755	760
	异质结组件（210mm 方片）	728	738	746	751	755	760
	XBC 组件（182*210mm）	650	655	665	670	675	680

资料来源：CPIA

图 25：2025-2035 年电池技术路线市场占比变化趋势

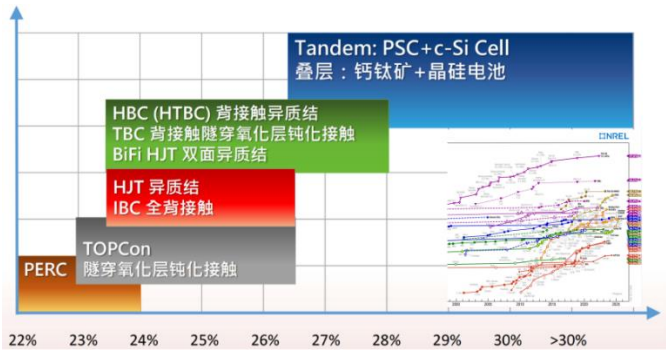


资料来源：CPIA

商业化方面，P 型 HJT 在太空光伏领域应用进展快速，是中短期内的重要选项。在海外市场，部分光伏企业在太空 HJT 领域已斩获大额商业订单并实现量产突破。例如，美国太空光伏公司 Solestial 通过 HJT 技术在典型的轨道工作温度（80 摄氏度）下获得了较高的绝对效率，在太空中有更好的效率表现。在国内市场，相关电池制造企业已具备实质性的海外出货与打样测试经验。例如，金刚光伏基于其深耕多年的异质结（HJT）技术，开发了针对太空辐射和极端温差的 P 型超薄 HJT 电池，目前已获得国内外多家太阳翼制造商及卫星公司的送样需求，正处于紧密的环境可靠性测试与对接阶段；东方日升异质结技术已有多年技术积累，旗下超低碳 210HJT 伏羲系列产品累计出货已超 10GW，公司的 p 型超薄异质结系列产品为特种产品，具备根据客户需求批量交付 p 型超薄 HJT 产品的能力，并且该系列产品在海外地区已有小批量出货经验。我们认为，这一系列海内外 HJT 在太空光伏领域应用的进展，在一定程度上说明了 P 型 HJT 是中期内非常重要的太空光伏技术路线选项，未来有望进一步转化为订单放量。

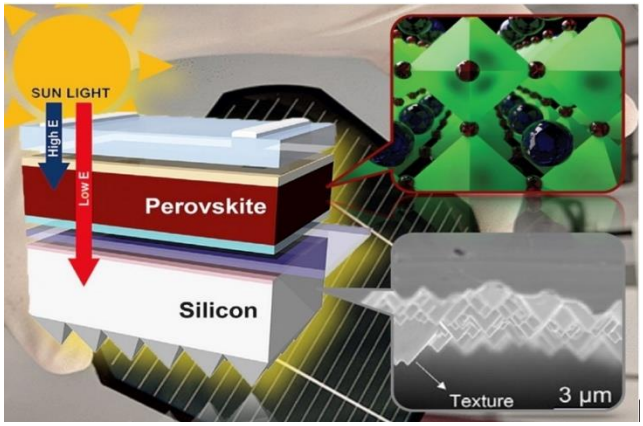
仅供内部参考，请勿外传

图 26：2025-2035 年不同类型组件功率变化趋势



资料来源：中国三峡能源

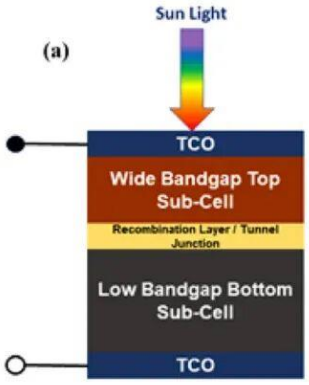
图 27：钙钛矿/晶硅叠层电池示意图



资料来源：中科院宁波材料所

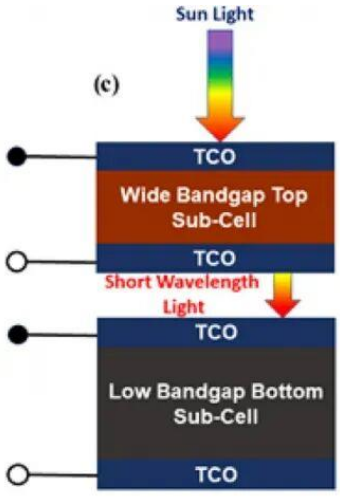
尽管晶硅电池在当前展现出良好的商业化潜力，但理论转换效率难以突破上限，钙钛矿叠层有望突破瓶颈。为进一步提升光电转换性能，晶硅-钙钛矿叠层电池成为突破单结效率极限的核心技术方向。当前，业界普遍认为主流晶硅太阳能电池转换效率已接近理论极限，发展接近技术瓶颈。单结钙钛矿电池的 Shockley-Queisser 极限约为 33%，与晶硅电池相当，但若与晶硅电池形成两层叠层结构时理论极限可逼近 45%。在微观物理机制上，叠层技术通过“光谱互补”实现了对太阳光谱的梯级吸收：采用带隙较宽（约 1.68 至 1.80eV）的钙钛矿材料作为顶电池，负责吸收高能的紫外和可见光光子；采用窄带隙的晶硅作为底电池，吸收透射的近红外长波光子，二者相互配合能够避免单结器件中高能光子的热化损失，进一步提升了太阳能利用率和光电转化效率。晶硅-钙钛矿叠层电池主流结构主要包含两端（2-T）单片集成结构、四端（4-T）结构等，光学和电学的耦合与独立性有所差异，制备工艺和对光谱变化的敏感度亦有所差异。目前在实验室中，钙钛矿/晶硅两端叠层电池的认证效率已超 33%，成功突破了单结电池的 29.4%理论极限。

图 28：晶硅/钙钛矿叠层电池两端单片集成结构



资料来源：美能光伏

图 29：晶硅/钙钛矿叠层电池四终端机械堆叠结构



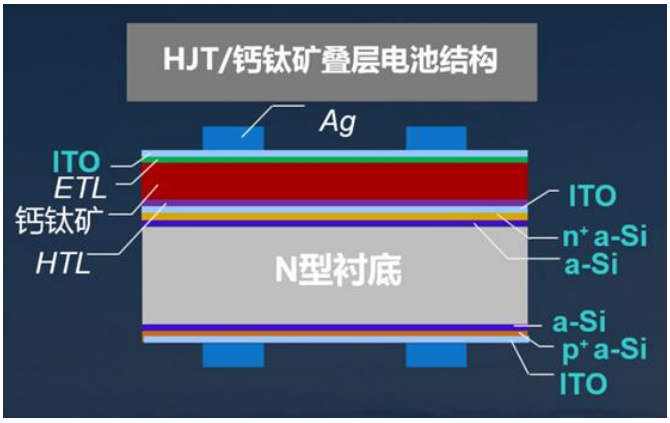
资料来源：美能光伏

在底层晶硅电池中，HJT 电池被认为是钙钛矿叠层理想的底座选项，当前 HJT/钙钛矿叠层路线产业化进程加速演进。一方面，HJT 结构优异的开路电压能够更好地与钙钛矿电池的特征相匹配，减少电池之间的电压损失、

仅供内部参考，请勿外传

提升整体效率；另一方面，HJT 电池的制造工艺相对成熟、与钙钛矿制造流程的兼容性更强，本身采用低温料浆和低温烧结工艺，适合与钙钛矿叠层后金属电极固化。在原 HJT 电池生产线上生产晶硅/钙钛矿叠层电池，只需增加部分钙钛矿设备，且一部分材料和设备可以通用，这为基于现有基础设施的大规模生产和应用提供便利。当前，晶硅-钙钛矿叠层电池的产业化进程正呈现加速态势。在效率端，国内企业在晶硅-钙钛矿（尤其是 HJT/钙钛矿领域）屡创纪录，例如隆基绿能的钙钛矿/晶硅叠层电池实现了 34.6%的国际认证效率，安徽华晟的 HJT/钙钛矿叠层效率突破 34.02%等。在产能落地方面，国内头部厂商稳步推进量产，例如 2026 年 3 月，协鑫光电中标华能清能院 1.2MW 商用钙钛矿/晶硅 HJT 叠层组件采购项目。我们认为，叠层技术正跨越基础实验阶段，实验室阶段已展现出的性能显著优势和当前产业化发展阶段具备了逐步确立走向 GW 级规模量产的工程基础。

图 30：HJT/钙钛矿叠层电池结构示意图



资料来源：龙源设计院

图 31：Topcon/钙钛矿与 HJT/钙钛矿叠层的主要差异

项目	N 型 Topcon/钙钛矿叠层	HJT/钙钛矿叠层
底电池最高效率	26%	26.81%/27.1%（BC 结构）
叠层最高效率	31%	（2T）33.9%（3T）29%
参数预测	现有工艺结构，提升 4~5%	现有工艺结构，提升 6~7%
效率受限原因	叠层缺少 n+的钝化和减反	暂无
器件结构匹配性	结构暂未确定，会导致晶硅 pn 结置后	已经确定 pin HJT/pin Perovskite
工艺匹配性	不太匹配（开压不够，电流高），TOPCon 正面的氮化硅和氧化铝（绝缘体）	完全匹配（自带 TCO，开压高，电流低）
工艺步骤	17=12+5（钙钛矿）	9=4+5（钙钛矿）
工艺路线	暂未确定	基本确定，2 选 1
工艺难点	①绒面晶硅保角沉积钙钛矿 ②缺少晶硅钝化 ③无法高温金属化	①绒面晶硅保角沉积钙钛矿
核心设备	TOPCon：硼扩散炉、LPCVD	HJT：PVD、PECVD
	Perovskite：蒸镀、PVD、ALD	Perovskite：蒸镀、PVD、ALD

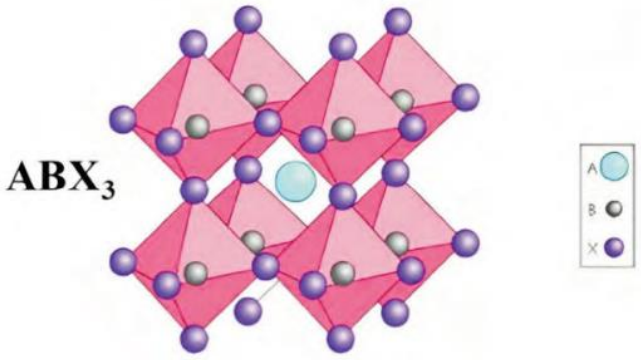
资料来源：龙源设计院

3.3. 钙钛矿：高比功率与抗辐射显著优势，在轨验证稳步推进

钙钛矿材料凭借独特的微观晶体结构与物理机制，能够更好地适配太空极端环境。从定义来看，金属卤化物钙钛矿是一类通式为 ABX_3 的三维立方晶体材料，A 位通常为一价阳离子（如甲脒、甲铵或无机铯离子），B 位为二价金属阳离子（如铅或锡），X 位为单价卤族阴离子（如碘、溴、氯）。这种丰富的离子组合赋予了其极高的缺陷耐受性与灵活可调的光电特性。钙钛矿电池的特性使其在太空场景极端环境的适配上具有显著优势，一方面在传统地表环境中，水分和氧气极易溶解和氧化其功能组分是导致器件降解的重要影响因素；然而在超高真空的太空环境中水氧分子几乎不存在。另一方面，文献表明，钙钛矿材料面对辐射展现出固有的缺陷容忍性和自愈特性，面对太空高能粒子（如质子、电子）辐照的极端环境挑战，相较于传统共价键合的晶硅或砷化镓材料在受粒子轰击后易产生不可逆损伤，钙钛矿表现出独特的“软晶格”特性，可以通过晶格振动和离子重排吸收和耗散辐射能量。由于其内部缺陷形成能较低，辐射产生的晶格畸变与空位，能够在光照或适度热退火条件下，通过微观离子的动态迁移与重排实现自我修复，有效抑制了辐射缺陷的持续积累。

仅供内部参考，请勿外传

图 32：钙钛矿材料的一般化学式和晶体结构



资料来源：电源技术

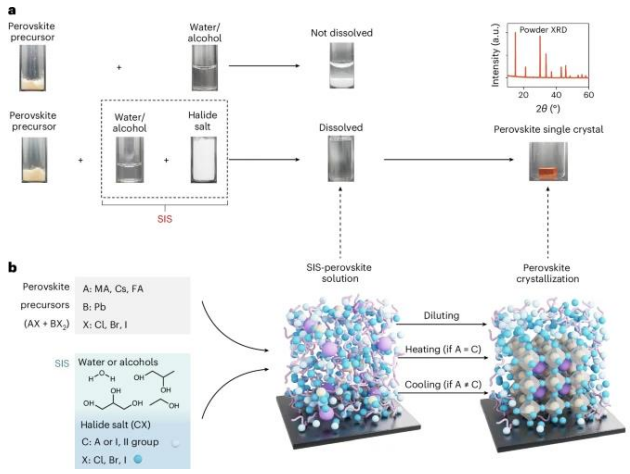
图 33：影响空间钙钛矿电池性能和稳定性的因素



资料来源：电源技术

钙钛矿电池具备超轻、超薄、原材料丰富、易制备、天然适配柔性化结构等核心优势。一方面，钙钛矿具备相较于传统晶硅材料高出一到两个数量级、与砷化镓基本处于一个水平的光吸收系数，这意味着在工程应用形态上仅需几百纳米级别的极薄光吸收层即可实现高效的光子收集；另一方面，制备工艺上钙钛矿可以通过溶液合成、气相沉积等灵活的工艺手段制备获取，其中溶液合成方法具备工艺简单、成本低廉等显著优势，有效降低单位面积成本；此外，溶液加工特性支持柔性基底制备，采用柔性衬底（PET, PEN, PI 等）制备钙钛矿电池能够获得比刚性基底更高的比功率。在可调节性方面，相较于传统晶硅、砷化镓等钙钛矿材料往往具有很高的缺陷耐受性和掺杂灵活性，掺杂或添加不同的阳离子、阴离子能够有效调节物化性质。我们认为，钙钛矿电池的柔性+轻量化是有利于大批量、高频次卫星能源系统运输和获得更高的能源效率，有利于显著降低巨型星座系统的单位发射成本，而适配极端环境挑战的更优性能也进一步放大了上述优势，钙钛矿电池路线将是太空光伏的“终极”解决方案。

图 34：基于溶剂-在-盐（SIS）体系的钙钛矿合成流程图



资料来源：Nature Synthesis

图 35：极电光能 GW 级钙钛矿光伏组件生产线

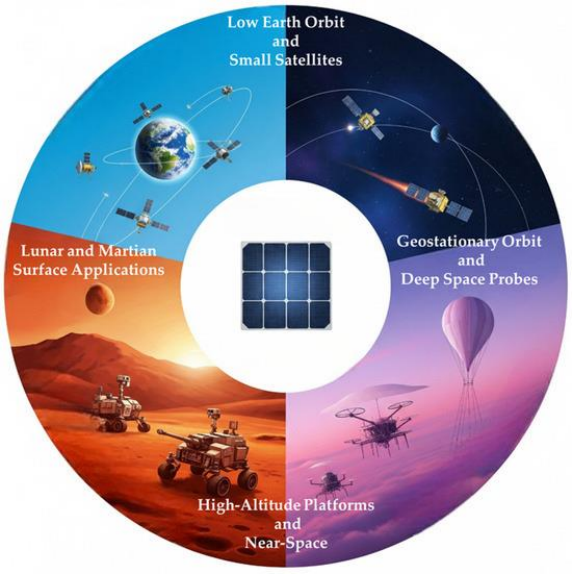


资料来源：中国电子报

仅供内部参考，请勿外传

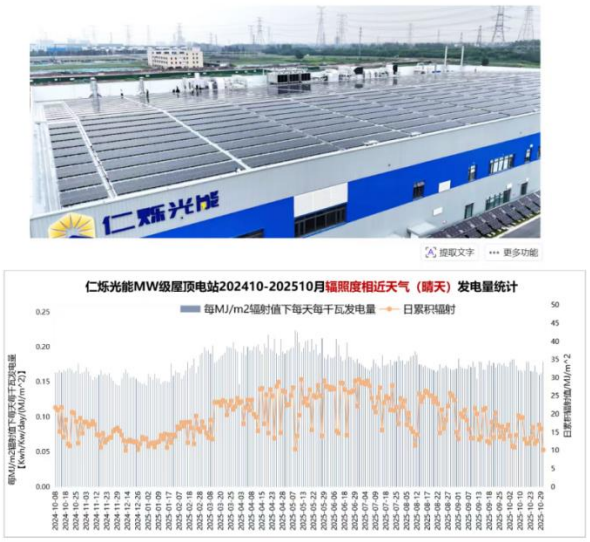
尽管纯钙钛矿光伏组件在理论上具备极佳的空间适配性，但其大面积制备仍面临诸多工程挑战，当前产业界正通过持续的在轨实测与产线扩容稳步推进其商业化进程。在制造端，理论上优异的钙钛矿材料在大批量制备时面临挑战。一方面是大面积模块的均匀性，当前大多数高效钙钛矿电池的制造尺寸不超过 1 平方厘米，而当组件面积扩展至典型太阳能电池板组件的几十平方米量级，受限于大面积涂布工艺的成膜均匀性，其光电转换效率会出现显著下降。另一方面是模组尺度下的封装良率，钙钛矿材料结晶的工艺窗口时间极短，微小的微粒或成膜不致密都会导致大面积组件失效，对产线良率控制提出了极高要求。在应用端，钙钛矿需面对高真空释气、紫外降解以及剧烈热循环等复合应力，且目前行业尚未建立统一的空间可靠性认证体系与测试标准，制约了其作为主能源的规模化搭载。与此同时，产业界正在积极推进在轨实测，以获取更多实际运行结果供进一步迭代优化。例如，上海港湾旗下伏曦炘空公司自主设计、研发的的钙钛矿电池已搭载于“天雁 24 星”等卫星进入太空在轨稳定运行 9 个多月，对比入轨初期遥测数据，在同等光照条件下，钙钛矿太阳电池输出电压较为一致，约 2.8V~3.0V，输出电压几乎无衰降。初步证明了纯钙钛矿在真实太空极端环境下的短期生存能力，但距离证明其能满足航天器 5 至 10 年的全寿命周期可靠性仍有一定距离。在产业化进度方面，钙钛矿电池正处于从实验室到量产的跨越期，部分量产关键技术正在被攻克，例如 2025 年 12 月南京大学团队与仁烁光能联合发表于 Science 的工作，通过开发一种策略使得在 1.2×0.6 平方米的基板上制备出从中心到边缘都非常均匀的高质量钙钛矿薄膜，解决了规模化制造中的核心痛点。我们认为，长期以来制约钙钛矿技术从实验室走向产业化的三大瓶颈——大面积制备时的薄膜质量、环保工艺与长期可靠性在中远期有望被逐步攻克。

图 36：钙钛矿电池在航天应用中的未来



资料来源：Energies

图 37：仁烁光能 MW 级钙钛矿组件示范项目及组件发电量同辐照关系



资料来源：南京大学

仅供内部参考，请勿外传

图 38：大面积钙钛矿涂层及模块集成面临的关键挑战

Large-Area Coating Challenge	Description
Defect Formation Risk	Pinholes, incomplete coverage, and compositional inhomogeneity can arise, especially across meter-scale substrates.
Yield Reduction	Increased probability of device failure as the area scales up; even minor defects can lead to significant yield loss in large modules.
Crystallization Uniformity	Achieving uniform crystallization requires precise control of ink rheology, temperature, and coating speed across large areas.
Encapsulation Difficulty	Edge and seam sealing become more critical in large modules to prevent environmental ingress and electrical breakdown.
Need for Process Monitoring	In situ defect detection and quality control are essential to maintain low defect density and high yield.

资料来源：Energies

图 39：当前在航天领域应用或正在研究的主要光伏技术比较

	Multijunction	Silicon	$Cu(In,Ga)Se_2$	Perovskite
Efficiency	High	Medium	Medium	Medium
Lab-scale record	47.1%	26.1%	23.4%	25.5%
Commercially available for space	Up to 32%	≈17%	Not available	Not available
Radiation hardness	High	High	Excellent	High
Specific power	Low – Medium	Low	Medium	High
	0.4–3.8 W g^{-1}	0.38 W g^{-1}	3 W g^{-1}	23 W g^{-1}
Flexibility	Low	Low	High	High
Fabrication cost	High	High	Low	Low

资料来源：Advanced Energy Materials

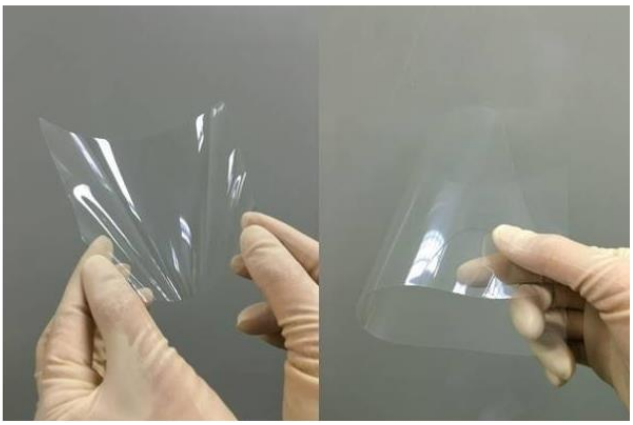
4. CPI 与 UTG 构建新一代柔性封装体系

CPI 膜：轻量化、柔韧性等指标优异，是柔性太阳翼正面封装材料的优选方案。无色透明聚酰亚胺（CPI）薄膜凭借底层的分子改性机制与优异的物理性能，已成为突破太空组件轻量化与高收纳比瓶颈的核心选项。CPI 作为轻量化、高透光、耐极端环境的柔性封装材料代表，已成为国际航天领域的重要选择。一方面，CPI 膜具有接近光学玻璃的超高透光率，可见光透过率提升至 90%至 95%。另一方面，在太空极端环境中，CPI 薄膜具有超轻量化特征，密度仅为传统光学玻璃的五分之一至六分之一，能显著降低卫星整星质量；其工作温度覆盖-269 摄氏度至+400 摄氏度，可有效应对低轨空间的剧烈昼夜温差。在柔韧性极限方面，CPI 膜具有相当优异的机械强度与柔韧性，发表于《高分子学报》的一篇文章中相关力学测试表明，经过改性的 CPI 薄膜经历高达 40 万次的反复弯折后，光学性能基本不变，力学性能保持率超过 92%且未出现断裂损伤，适配卷展式太阳翼的严苛收纳需求。此外，CPI 薄膜还可集成转光功能，将太空有害的短波紫外线（250-300nm）转化为电池可吸收的可见光，在保护组件的同时能额外提升输出功率 0.3-0.5%，同时保护背板材料免受紫外降解。目前 CPI 薄膜市场的生产厂商较少，主要集中于日、韩两国，且发展速度较为缓慢，已知实现量产的 CPI 薄膜厂商主要包括：韩国可隆 KOLON、日本住友化学、SKI。国内 CPI 薄

仅供内部参考，请勿外传

膜生产厂商由于起步较晚，主要生产商包括瑞华泰、长阳科技、道明光学等，目前处于研发和测试验证阶段。

图 40：透明聚酰亚胺薄膜（CPI 膜）



资料来源：艾邦高分子

图 41：KOLON 公司商品化透明聚酷亚胺薄膜产品性能

性能	型号 A	型号 B	型号 C	型号 D
厚度/μm	30	30	20	20
透光率/%	88	90	88	88
黄度指数	<4.5	0.7	1.8	2.9
CTE/($\times10^{-6}$/℃)	10	11	28	45
T_g/℃	>330	>330	>300	>300
$T_{d1\%}$/℃	>470	470	>450	>450
表面硬度	1H	2H	>1H	>1H
拉伸强度/MPa	>300	>300	170	130
伸长率/%	<30	30	25	25
模量/GPa	>6	>6.5	5.3	4.5
应用领域	TFT 基板	透明盖板	TSP 基板	柔性电路板

资料来源：艾邦高分子

超薄柔性玻璃（UTG）：空间环境免疫力与物理性能优势，聚焦高可靠、长寿命柔性太阳翼正面封装。UTG 的主要成分为无机二氧化硅。一方面，UTG 玻璃具有更轻量化+高机械强度属性，厚度低至 20 微米，重量相较传统刚性玻璃降低 80%以上，弯曲寿命超过 20 万次；另一方面，UTG 玻璃具有高透光+光学稳定性，其可见光透光率可达 92%至 94%，接近玻璃本体光学性能，且在长期太空服役中几乎无光学衰减。在稳定性上，其主要成分系二氧化硅，热膨胀系数较低，可耐受极端高低温循环、高活性原子氧侵蚀、太空紫外辐照等因素。在制造端，UTG 的制备工艺可采用一次成型（如狭缝下拉、微浮法、溢流下拉法等）或二次成型（玻璃原片减薄）工艺制造。与工序更加复杂、良率更低的二次成形法相比，一次成形法减少了化学减薄的环节，可以大幅提升整体良率，降低制造成本，虽然技术难度大，利润率也更高。在商业化格局方面，全球高端 UTG 原片的生产技术长期由德国肖特、美国康宁以及日本 NEG 等少数海外企业主导。近年来，国内产业链正加速追赶，部分头部电子玻璃制造企业已在瀑布流等一次成型工艺及航天级精密加工环节取得突破，部分航天级 UTG 产品已进入在轨稳定运行或核心商业航天客户的紧密送样验证阶段。

仅供内部参考，请勿外传

图 42：蓝思科技发布航天级 UTG 光伏封装解决方案



资料来源：潇湘晨报

图 43：CPI 与 UTG 的比较

特性	CPI（透明聚酰亚胺）	UTG（超薄柔性玻璃）
厚度	<50μm	30-100μm
透光率%	可见光87%-90%	可见光91.5%~92%
硬度	软	硬
防刮划	易刮伤	耐刮
表面附加膜	不需要	需要
弯折性能	好	较好
平整度	正常	好
是否有折痕	易产生折痕	不易产生折痕
温度	>420℃	耐高温，>600℃
触感/外观	中等	高端
抗冲击	好	不好
抗老化	中等	很好
折叠半径	较小	较大
是否已量产	已量产	已量产
成本	高	更高
代表供应商	住友化学、韩国科隆、SKC等	德国肖特、美国康宁、日本NEG、韩国Dowinsys、赛德半导体、长信科技、凯盛科技等

艾邦智造资讯

资料来源：艾邦智造资讯

仅供内部参考，请勿外传

5. 风险提示

商业航天增量需求落地不及预期的风险。太空光伏市场的爆发预期依赖于低轨通信卫星星座与太空算力中心的规模化部署。若全球巨型星座的建设规划因宏观融资环境恶化、运载火箭发射能力遭遇瓶颈，或国际频轨资源监管政策发生变动而出现显著放缓，将直接导致航天器发射数量和组网节奏不及预期。作为卫星核心配套的太阳翼及其内部的电池、辅材组件，其市场订单的实质性释放与产值扩容也将随之受到严重压制，进而影响产业链相关企业的业绩增长空间。

技术演进和产业化落地不及预期的风险。太空极端环境对光伏组件的长期可靠性与耐久性提出了极其严苛的约束要求。无论是 P 型晶硅电池的薄片化过渡，还是钙钛矿及叠层电池的远期替代，均需要跨越从实验室走向大面积量产的工程化鸿沟。若新兴光伏技术在应对高能粒子辐射、剧烈热循环及原子氧侵蚀等极端应力时的长期在轨表现未能通过验证，或相关大面积制备良率、核心量产设备的优化进度受阻，将导致下一代太空光伏技术的商业化落地与规模化交付进程大幅延后。

产业链发展趋势变化的风险。随着卫星太阳翼加速向轻量化、柔性化和高收纳比方向重构，配套的封装盖板、导电浆料与胶粘剂等辅材体系正处于关键的技术路线交汇与跨代期。若未来航天器在整体能源系统设计上出现其他颠覆性替代方案，或者现有的柔性关键材料在规模化降本路径上遭遇难以逾越的壁垒，可能导致产业链的核心价值分布环节发生转移。此外，国际供应链格局的复杂演变亦可能对关键原材料的稳定供应与上下游协同造成冲击，从而改变国内相关产业链的预期发展轨迹与竞争格局。

仅供内部参考，请勿外传

本公司具有中国证监会核准的证券投资咨询业务资格

分析师声明

作者具有中国证券业协会授予的证券投资咨询执业资格或相当的专业胜任能力，保证报告所采用的数据均来自合规渠道，分析逻辑基于作者的职业理解，本报告清晰准确地反映了作者的研究观点，力求独立、客观和公正，结论不受任何第三方的授意或影响，特此声明。

免责声明

本报告仅供国泰海通证券股份有限公司（以下简称“本公司”）授权客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为本公司的当然客户。本报告仅在相关法律许可的情况下发放，并仅为提供信息而发放，概不构成任何广告。

本报告的信息来源于已公开的资料，本公司对该等信息的准确性、完整性或可靠性不作任何保证。本报告所载的资料、意见及推测仅反映本公司于发布本报告当日的判断，本报告所指的证券或投资标的的价格、价值及投资收入可升可跌。过往表现不应作为日后的表现依据。在不同时期，本公司可发出与本报告所载资料、意见及推测不一致的报告。本公司不保证本报告所含信息保持在最新状态。同时，本公司对本报告所含信息可在不发出通知的情形下做出修改，投资者应当自行关注相应的更新或修改。

本报告中所指的投资及服务可能不适合个别客户，不构成客户私人咨询建议。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见均不构成对任何人的投资建议。在任何情况下，本公司、本公司员工或者关联机构不承诺投资者一定获利，不与投资者分享投资收益，也不对任何人因使用本报告中的任何内容所引致的任何损失负任何责任。投资者务必注意，其据此做出的任何投资决策与本公司、本公司员工或者关联机构无关。

本公司利用信息隔离墙控制内部一个或多个领域、部门或关联机构之间的信息流动。因此，投资者应注意，在法律许可的情况下，本公司及其所属关联机构可能会持有报告中提到的公司所发行的证券或期权并进行证券或期权交易，也可能为这些公司提供或者争取提供投资银行、财务顾问或者金融产品等相关服务。在法律许可的情况下，本公司的员工可能担任本报告所提到的公司的董事。

市场有风险，投资需谨慎。投资者不应将本报告作为作出投资决策的唯一参考因素，亦不应认为本报告可以取代自己的判断。在决定投资前，如有需要，投资者务必向专业人士咨询并谨慎决策。

本报告版权仅为本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制、发表或引用。如征得本公司同意进行引用、刊发的，需在允许的范围内使用，并注明出处为“国泰海通证券研究”，且不得对本报告进行任何有悖原意的引用、删节和修改。

若本公司以外的其他机构（以下简称“该机构”）发送本报告，则由该机构独自为此发送行为负责。通过此途径获得本报告的投资者应自行联系该机构以要求获悉更详细信息或进而交易本报告中提及的证券。本报告不构成本公司向该机构之客户提供的投资建议，本公司、本公司员工或者关联机构亦不为该机构之客户因使用本报告或报告所载内容引起的任何损失承担任何责任。

评级说明

投资建议的比较标准

投资评级分为股票评级和行业评级。

以报告发布后的 12 个月内的市场表现为比较标准，报告发布日后的 12 个月内的公司股价（或行业指数）的涨跌幅相对同期的沪深 300 指数涨跌幅为基准。

	评级	说明
股票投资评级	增持	相对沪深 300 指数涨幅 10%以上
	谨慎增持	相对沪深 300 指数涨幅介于 5%～10%之间
	中性	相对沪深 300 指数涨幅介于-5%～5%
	减持	相对沪深 300 指数下跌 5%以上
	无评级	对于个股未来市场表现与基准指数相比无明确观点
行业投资评级	增持	明显强于沪深 300 指数
	中性	基本与沪深 300 指数持平
	减持	明显弱于沪深 300 指数

国泰海通证券研究所

地址 上海市黄浦区中山南路 888 号 邮编 200011 电话 （021）38676666