

国防军工

太空光伏深度报告：“九天揽日，万星生辉”，太空光伏迎来产业化拐点

报告摘要

商业航天加速发展，正在推动人类对太空的开发由单点任务迈向规模化基础设施建设。低轨卫星组网、可重复使用火箭持续降本，以及太空算力等新兴场景逐步进入工程验证阶段，使稳定、高效、低成本的空间能源供给成为产业发展的关键前提。近期长征十号乙运载火箭发射成功并完成回收验证，进一步强化国内可重复使用火箭加速成熟和发射成本下行的产业预期。太空光伏作为目前最成熟的在轨供能方式，正由传统航天器的配套电源，逐步升级为空间能源基础设施，并成为连接商业航天、光伏制造与 AI 算力的重要新兴产业方向。

◆ 太空光伏正由航天器专用配套电源向空间能源基础设施演进

太空光伏是光伏电池、空间级封装、太阳翼及电源管理等技术在航天场景中的延伸。低轨星座批量组网以及太空算力构想推动空间电源向标准化、规模化交付转变。太空光伏相比地面光伏具备光照稳定、就地供能、低储能依赖等诸多优势，但其规模化应用目前仍受发射成本、空间环境、在轨可靠性及热控能力制约。总体来看，行业正处于由航天器配套电源向空间能源基础设施演进的早期阶段。

◆ 低轨星座贡献增量，高可靠任务支撑基本盘，太空算力打开远期弹性

Starlink、Amazon Leo、中国星网和千帆星座等项目持续推进，低轨星座凭借数量规模和持续补网需求，构成太空光伏近期最具确定性的应用场景。中高轨通信、导航、气象卫星及深空探测任务数量相对有限，但对寿命、抗辐照和系统可靠性要求更高，是高价值空间电源的稳定需求来源。太空算力仍处于工程验证和产业规划阶段，但其单平台功率显著高于传统卫星，是决定行业长期空间的最核心变量。

◆ 技术路线并非简单替代，而是由任务场景决定分层渗透

GaAs/III-V 多结电池凭借高效率、强抗辐照能力和长期飞行履历，仍

投资评级

增持

维持评级

行业走势图



作者

梁晨 分析师
SAC 执业证书: S0640519080001
联系电话: 010-59562536
邮箱: liangc@avicsec.com

张超 分析师
SAC 执业证书: S0640519070001
联系电话: 010-59219568
邮箱: zhangchao@avicsec.com

相关研究报告

【中航证券军工】军工行业周报：公募基金军工持仓创 2023 年以来新低，外资军工持仓创新高 —2026-07-28
军工行业周报：公募基金军工持仓创 2023 年以来新低，外资军工持仓创新高 —2026-07-27
军工材料月报：2026 年下半年展望，开始乐观 —2026-07-27

股市有风险 入市需谨慎

中航证券研究所发布 证券研究报告

请务必阅读正文之后的免责声明部分

联系地址：北京市朝阳区望京街道望京东园四区2号楼中航产融大厦中航证券有限公司
公司网址：www.avicsec.com
联系电话：010-59219558 传真：010-59562637

将在高轨通信、深空探测、空间站等高可靠任务中占据重要地位；PERC、TOPCon、HJT 等晶硅路线依托成熟供应链、低成本和批量制造能力，有望率先在成本敏感的低轨星座中导入；钙钛矿及钙钛矿/晶硅叠层电池具备高效率、高比功率和柔性化优势，但仍需完成大面积良率、空间环境稳定性和在轨寿命验证。我们认为，太空光伏将沿着“GaAs 构筑高可靠基本盘、晶硅路线推动降本放量、钙钛矿叠层打开远期弹性”的方向演进，替代过程不会一蹴而就。

◆ 商业化拐点取决于发射成本、比功率和在轨寿命的共同改善

发射成本决定单位功率入轨门槛，轻量化与高比功率决定大型太阳翼的可扩展性，在轨寿命和可靠性则决定全生命周期经济性。2026—2030 年，低轨星座批量组网有望率先推动空间电源规模化交付；2030—2035 年，可重复使用火箭进一步降本、晶硅路线完成在轨验证，太空算力有望进入示范及早期商业化阶段；大型空间能源系统、月面基地和对地供能型空间太阳能电站的商业化时间相对更远。

◆ 多场景需求共振，市场空间有望随应用场景外扩而迅速增长

中性偏乐观情景下，2026 年全球太空光伏需求约 0.18GW，对应价值空间约 572 亿元；2030 年全球需求有望达到 20.90GW，对应价值空间约 1.32 万亿元；2035 年全球需求或达到 101.81GW，对应价值空间约 3.79 万亿元，其中国内需求约 25.60GW、价值空间约 0.95 万亿元，海外需求约 76.21GW、价值空间约 2.84 万亿元。需要强调的是，太空算力的部署规模、发射成本及技术进度仍存在较大不确定性，远期测算更适合作为情景空间，短期订单仍应以低轨星座实际发射节奏为主要依据。

◆ 投资主线聚焦系统入口、技术迁移与设备材料

投资层面，建议把握“系统入口、路线迁移、设备材料”三条主线。系统入口方面，重点关注掌握航天型号认证、飞行履历和空间电源系统交付能力的系统级供应商，代表企业有电科蓝天等；技术迁移方面，须把握技术演化节奏，短期 GaAs 高可靠路线仍将受益于高轨卫星、深空探测、空间站等高价值任务需求，建议关注云南锗业、乾照光电、三安光电等；中期晶硅降本路线有望凭借成熟供应链、低成本及批量制造优势，率先在成本敏感的低轨星座中实现渗透，建议关注东方日升、天合光能、晶科能源、钧达股份等；远期钙钛矿及叠层路线具备高效率、高比功率和柔性化潜力，有望适配太空算力及大型空间能源系统，建议关

注协鑫光电、极电光能、纤纳光电以及布局叠层技术的隆基绿能、天合光能等。设备材料方面，晶硅及钙钛矿路线的太空化将带动薄片化、HJT/TOPCon 设备、TCO、银浆、互联及空间级封装材料需求，建议关注迈为股份、捷佳伟创、金晶科技、聚和材料、鹿山新材等。

正文目录

一、 太空光伏：从航天器配套电源走向空间能源基础设施	7
(一) 概述：空间光伏并非全新技术，而是航天电源体系的持续升级 ..	7
(二) 趋势：发展太空大势所趋，航天发射有望迎来历史级增长	8
(三) 催化：AI 算力电力约束凸显，太空算力打开远期需求空间	9
(四) 优势：高辐照的空间部署属性，适配在轨连续功能	11
(五) 挑战：发射成本、空间环境、在轨维护仍是核心约束	13
二、 应用场景：低轨星座构成基本盘，太空算力打开第二增长曲线 ...	14
(一) 低轨星座：卫星互联网建设提速，太阳翼需求进入放量阶段 ...	14
(二) 高轨通信与深空探测：高可靠场景仍以成熟航天电源为主	16
(三) 空间站、月球基地与深空设施：长期任务推动高可靠能源系统升 级	17
(四) 太空算力数据中心：能源与散热约束重构算力中心部署逻辑 ...	18
三、 技术路线：由高可靠向低成本、轻量化、高比功率演进	19
(一) 太空光伏五大技术路线分类	19
(二) III-V 族化合物电池：当前航天主流，高可靠但成本约束突出 .	21
(三) 晶硅电池：地面成熟光伏路线，具备低成本太空化潜力	24
(四) 钙钛矿及叠层电池：效率比功率潜力最高，稳定性仍待验证 ...	26
(五) 太空光伏技术演进方向明确，但替代并非一蹴而就	29
四、 成本拆解测算：从“能用”走向“经济可用”	30
(一) 成本结构：单位功率成本是太空光伏商业化的核心约束	30
(二) 关键降本拐点：依赖发射成本、太阳翼比功率与寿命的共同优化	31

1、 发射降本：可重复使用火箭重塑太空光伏经济性边界.....	31
2、 轻量化与高比功率：系统减重放大发射降本效应	33
3、 在轨寿命与运维成本：可靠性决定全生命周期经济性	35
4、 商业化时间表：低轨星座率先放量，太空算力接力成长	35
五、 市场空间：低轨星座驱动短期放量，太空算力打开万亿市场空间	37
(一) 低轨星座：组网部署与持续补网构成太空光伏近期需求基本盘	37
(二) 太空算力：能源约束重塑算力基础设施，驱动太空光伏远期弹性放大	38
(三) 中高轨卫星：高价值长寿命任务支撑高可靠电源稳定需求.....	39
(四) 深空设施：月球基地、空间站与深空任务打开远期增量空间 ..	40
(五) 总结：多场景需求共振，太空光伏远期市场空间稳步迈入万亿级	41
六、 相关产业公司与竞争格局	42
(一) 上游材料与设备：高成本路线看材料壁垒，低成本路线看设备与工艺.....	43
1、 砷化镓链：衬底、外延和 MOCVD 构成高可靠路线的核心壁垒	43
2、 晶硅链：地面光伏成熟制造能力向低轨商业航天外溢.....	44
3、 钙钛矿链：远期高比功率路线，核心在材料稳定性和大面积制造	45
(二) 中游电池与组件：三类技术线并行，不同场景对应不同最优解	46
1、 砷化镓多结电池：高可靠任务基本盘，系统验证和飞行履历构成壁垒.....	46
2、 晶硅电池：低轨星座降本主线，关键在太空化封装与批量交付.	47

3、 钙钛矿电池：高比功率远期路线，先验证后放量	48
（三） 承上启下：太阳翼与电源系统集成连接中上游光伏产业与下游空 间应用	50
（四） 下游：低轨星座打开短期规模，太空算力增强中期弹性	51
（五） 价值分布与竞争格局	52
七、 投资逻辑	53
八、 风险提示	55

一、太空光伏：从航天器配套电源走向空间能源基础设施

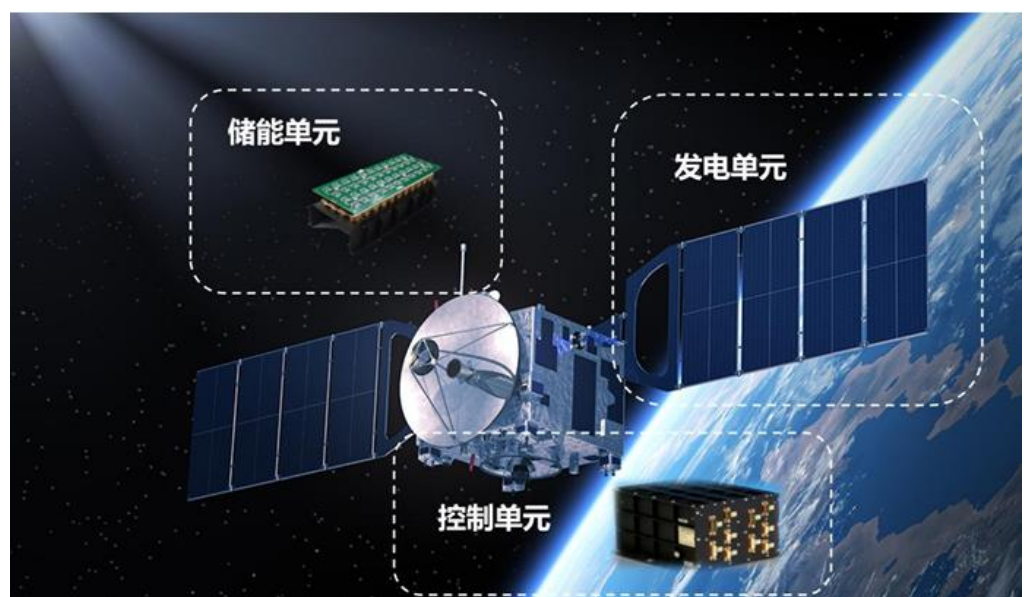
（一）概述：空间光伏并非全新技术，而是航天电源体系的持续升级

太空光伏是指在空间环境中利用太阳能电池阵列进行光电转换，并通过电源管理系统为卫星、空间站、深空探测器、在轨算力平台等航天器或空间设施提供电力的光伏发电系统。从产业链角度看，太空光伏并非独立于地面光伏之外的全新技术体系，而是光伏电池、组件封装、电源管理、展开机构、热控系统等环节在航天场景下的延伸与升级。

与地面光伏相比，太空光伏的核心差异并不只在于“发电”，而在于其所处环境和下游需求发生了根本变化。地面光伏主要服务于地面电力系统，需面对昼夜变化、天气扰动、土地资源、并网消纳和储能配套等约束；太空光伏则直接面向在轨载荷供电，需要在高真空、强辐照、剧烈温差、原子氧、空间碎片冲击等复杂环境下长期稳定运行。因此，太空光伏不仅考验电池转换效率，更考验单位质量功率、抗辐照能力、热循环稳定性、封装可靠性和系统集成能力。

从应用口径看，太空光伏可以分为狭义和广义两类。狭义太空光伏主要指卫星、空间站、深空探测器等航天器使用的太阳翼及空间级光伏电池，是当前已有成熟应用和可跟踪市场规模的领域。广义太空光伏则进一步延伸至太空算力平台、月球基地、深空基础设施以及天基太阳能电站等场景，其本质是从“航天器配套电源”向“空间能源基础设施”升级。

图1 卫星太阳翼示意图



资料来源：电科蓝天招股说明书，中航证券研究所整理

从技术溯源看，太空光伏并非全新体系，而是地面光伏产业链向太空场景的延伸与升级。依托我国在硅料、硅片、电池、组件、设备、材料全链条的全球领先优势，太空光伏可直接复用地面产业成熟产能与技术路线，使得我国成为全球少数具备大规模、低成本、高可靠落地条件的国家，这也是 SpaceX 团队密集访华、寻求中国光伏供应链合作的核心原因。

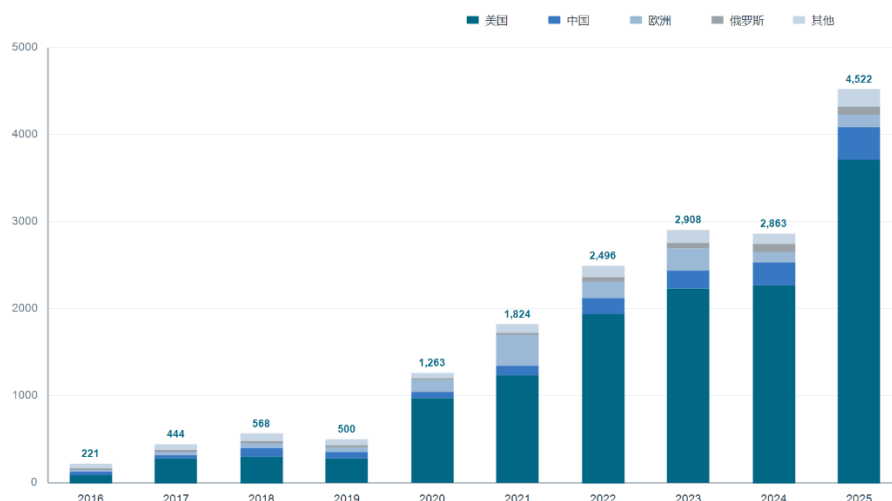
我们认为，太空光伏当前受到市场关注，核心并不在于其概念新颖，而在于下游需求结构正在发生变化。过去，空间光伏主要服务于少量高价值航天器，强调高可靠、长寿命和任务成功率，市场规模相对有限；随着低轨通信星座进入批量组网阶段，卫星制造逐步呈现批产化趋势，空间电源需求也有望从项目制、小批量向标准化、规模化方向演进。与此同时，AI 算力对电力和散热资源的需求快速增长，太空算力等新场景开始打开远期想象空间，进一步提升了市场对空间能源系统的关注度。

因此，太空光伏的产业逻辑可以概括为：**短期看**，是低轨卫星批量发射带来的太阳翼和空间电源需求增长；**中期看**，是地面晶硅、HJT、TOPCon 等成熟光伏技术向低轨商业航天场景迁移带来的降本机会；**长期看**，则是太空算力、月球基地和天基太阳能电站等空间基础设施建设带来的能源需求升级。太空光伏正处于从航天专用配套部件向空间能源基础设施演进的早期阶段。

（二）趋势：发展太空大势所趋，航天发射有望迎来历史级增长

太空已成为大国战略博弈的新战场，卫星部署规模呈爆发式增长，抢占轨道资源迫在眉睫。全球航天发射活动呈现高速增长态势，美国凭借商业航天优势，在发射数量与在轨存量上占据绝对主导，单年入轨载荷已突破 3500 颗量级；与此同时，中国正加速追赶，发射频次稳步提升。鉴于低轨频段与轨道位置具有“不可再生”属性，进军太空不仅是物理空间的争夺，更是抢占未来空天信息主权与国防安全的制高点。在资源竞争日趋激烈的背景下，加速构建自主可控的空间基础设施已成为国家战略的必选项，2025 年全球航天器发射超 4500 颗，同比增长超 50%。

图2 2016-2025 年全球卫星发射数量



资料来源：Jonathan's Space Report，中航证券研究所整理

可重复使用火箭技术的成熟，推动航天器入轨成本显著下降，彻底打破了进入太空的经济壁垒，高频次、大规模的发射有望成为行业确定性趋势，2025 年全球航天器发射次数超 300 次，相比 2021 年几乎翻倍；此外，太空经济场景增加重塑太空产业边界，太空经济向算力与制造延伸，低轨资源开发正从通信星座向更多元化的高价值场景演进，利用太空天然的低温散热优势，太空数据中心等新型基础设施正从概念走向现实，大大拓展了人类开发太空的商业版图。

另一方面，能源迭代始终是驱动文明进阶的核心动力。当前地面光伏和传统化石能源等发电模式，在规模化供能过程中，除了受制于地表的土地资源约束和昼夜光照间歇限制之外，在发电全生命周期的散热，资源开发和能耗排放环节上，还将持续对地球生态环境形成不可逆的负荷与污染。因此，地面能源开发利用的环境边际约束正日益凸显。

而广袤宇宙空间具备无昼夜阻隔、无大气损耗、零地表生态负担的优势，是现阶段人类技术可触及、能实现的永续清洁能源供给的重要远期方向。发展太空光伏，既是跳出地球资源与环境桎梏、维护地球生态的重要破局方向，更是人类迈向深空文明、拓展生存发展边界的关键战略布局。

（三）催化：AI 算力电力约束凸显，太空算力打开远期需求空间

AI 算力需求快速增长，正在使电力供给、土地资源、散热系统成为数据中心扩张过程中的重要约束。与传统互联网数据中心相比，AI 数据中心功率密度更高、连续运行时间更长，对稳定电力和冷却系统的依赖更强。随着大模型训练和推理需求持续提升，数据中心建设不再只是服务器、芯片和网络设备的扩张，更逐步演变为电力、制冷、土地、并网能力等综合资源的竞争。

在此背景下，太空算力开始从前沿概念进入产业讨论。2026 年达沃斯世界经济论坛期间，围绕 AI 基础设施、电力瓶颈、算力部署成本等话题的讨论显著升温，马斯克及 SpaceX 相关太空算力设想进一步强化了市场对“太空数据中心”的关注。虽然太空算力仍处于早期验证阶段，但其核心逻辑已经较为清晰：通过可复用火箭降低发射成本，依托低轨卫星平台实现算力部署，并利用太空太阳能为在轨计算平台提供持续电力来源。

从产业布局看，SpaceX 具备推动太空算力商业化的潜在闭环能力。一方面，星链（Starlink）已经验证了低轨卫星大规模组网、高频发射和在轨运营能力，为后续更高功率、更复杂载荷的平台化部署奠定基础；另一方面，星舰（Starship）若实现稳定复用和规模化发射，有望进一步降低大质量载荷入轨成本，为太空数据中心、在轨大功率平台等场景打开经济性窗口。对于太空光伏而言，SpaceX 的意义不只是潜在客户，更在于其有可能通过发射端降本和应用端牵引，同时推动空间电源系统进入更

高功率等级。

表1 马斯克关于太空光伏及太空算力相关观点的概括

马斯克的原话或核心表述	出处/背景
“未来可能出现这样的情况：Optimus 和太空 AI 的产出将大幅超过当前地球上的商品与服务总产出。”	2026 年 1 月 29 日 X, 平台原帖
“There is possible future where Optimus and space AI vastly exceed the current goods & services output of Earth.”	
“如果每年部署 100 万吨卫星、每颗卫星的功率为 100 千瓦，则每年可新增 100 吉瓦 AI 算力，且不产生持续运营或维护成本。”	2025 年 12 月 7 日，X 平台原帖
“1 megaton/year of satellites with 100kW per satellite yields 100GW of AI added per year with no operating or maintenance cost.”	
“成本最低的 AI 计算方式将是使用太阳能供电的 AI 卫星。”	2025 年 11 月 19 日，美沙投资论坛，马斯克与英伟达 CEO 黄仁勋对谈
“The lowest cost way to do AI compute will be with solar powered AI satellites.”	
“星舰很快将发射星链 V3 卫星，每次发射将为星链网络增加 60 Tbps 的通信容量。”	2024 年 12 月 31 日，X 平台 Starlink 官号
“Soon, Starship will launch our V3 Starlink satellites, which will add 60 Tbps of capacity to the network per launch.”	

资料来源：X 平台等，中航证券研究所整理

马斯克的太空算力设想，本质上将太空光伏从“卫星配套电源”推向“在轨算力能源底座”。传统低轨通信卫星的太阳翼功率多处于百瓦至数千瓦级，核心目标是保障通信载荷和卫星平台运行；而太空算力平台若逐步发展，其单平台功率需求有望向更高等级演进，对太阳翼面积、单位质量功率、储能系统、电源管理和热控系统均提出更高要求。由此，太空光伏的需求逻辑将从“跟随卫星数量增长”进一步升级为“跟随在轨功率需求增长”。

同时，Google、Starcloud 等企业围绕太空算力的探索，也验证了该方向并非单一企业的概念叙事。Google 于 2025 年提出 Project Suncatcher，计划探索在太空中建设由太阳能供电、搭载 TPU 芯片的机器学习计算系统，并计划通过试验卫星验证芯片在辐射、温度变化、在轨可靠性及星间通信等环境下的可行性。海外创业公司也在尝试将高性能计算载荷送入轨道，推动太空算力从概念讨论走向工程验证。

马斯克和 SpaceX 对太空算力的推动，对太空光伏产业的催化意义在于强化太空光伏的长期需求叙事。低轨通信星座构成当前最现实的需求基本盘，而太空算力则将空间电源需求从卫星配套件推向能源基础设施，使行业天花板不再局限于卫星数量。同时，推动空间电源向更高功率、更低成本方向演进。若太空算力平台逐步落地，

传统高成本航天级电池难以完全满足大规模部署需求，HJT、TOPCon、钙钛矿/叠层等低成本、高比功率路线的重要性将进一步提升。

总体来看，太空算力已从小众前沿概念进入资本市场视野。短期内，太空光伏的确定性需求仍主要来自低轨星座和传统航天器；中长期若太空算力实现从试验星向小规模集群演进，太空光伏有望从卫星电源进一步升级为在轨能源基础设施，成为连接商业航天、光伏制造和 AI 算力的新兴交叉赛道。

(四) 优势：高辐照的空间部署属性，适配在轨连续功能

太空光伏之所以具备长期产业化潜力，核心在于其能够突破部分地面光伏难以避免的物理和资源约束。地面光伏受昼夜交替、天气变化、季节波动、大气衰减、土地资源和并网消纳等因素影响，发电出力具有明显间歇性和波动性；而太空光伏部署于近地轨道、地球同步轨道或更高轨道空间，可在无遮挡或少遮挡环境下获得更稳定的太阳辐照条件，适合为卫星、空间站、深空探测器、在轨算力平台等空间设施提供连续电力来源。

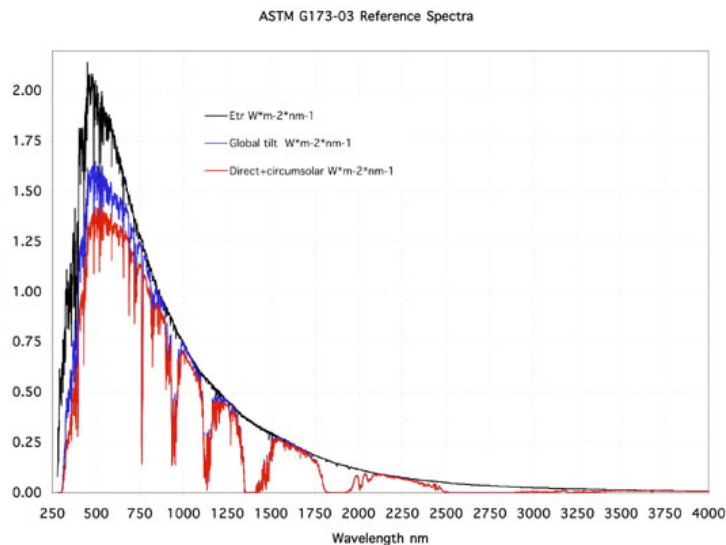
表2 太空光伏技术与传统地面光伏技术对比

类别	地面光伏	太空光伏（GEO 轨道）
辐照强度	受大气衰减，能量弱	真空下全波段 AM0 辐照，稳定光照和更高可用小时数
年发电时长	1000-2000h，受昼夜/天气/季节影响	>8000h，全天候持续发电
储能依赖	必须配置储能，增加成本负担	空间部署，闭环供给，储能需求低
冷却能耗	冷却能耗高	依托真空辐射散热，能耗大幅降低
资源占用	占用大量土地，水资源	无土地、水资源消耗
传输损耗	输电、并网损耗大	同轨闭环，减少输配电线路损耗

资料来源：中国气象局，NASA，中航证券研究所整理

从光照条件看，太空光伏能够直接利用大气层外 AM0 光谱，避免地面光伏在穿越大气层过程中受到散射、吸收和云层遮挡影响。根据美国国家可再生能源实验室（NREL）数据，AM0 条件下太阳辐照度约为 1366W/m^2 ，高于地面标准测试条件 AM1.5G 下的 1000W/m^2 。同时，在部分轨道条件下，航天器可获得更高比例的日照时间，从而提升年有效发电小时数。需要注意的是，太空光伏的优势并不仅仅在于“辐照强度为地面的数倍”，其真正优势更多来自更稳定的光照条件、更高的可用小时数以及在与在轨载荷的就近供能能力。

图3 AM0 与 AM1.5G、AM1.5D 光谱图对比



资料来源：美国国家可再生能源实验室（NREL），中航证券研究所整理

从资源约束看，太空光伏不占用地面土地资源，也不依赖地面水资源和大规模输电通道。地面光伏在集中式建设过程中，通常需要考虑土地指标、生态约束、消纳能力、特高压外送、储能配套等问题；而太空光伏直接服务于在轨载荷，能够在能源生产端与能源消费端之间形成更短链条的供能体系。对于低轨通信星座、空间站、月球基地和远期太空算力平台而言，能源需求本身发生在空间环境中，太阳翼供电是最直接、最成熟的解决方案。

从系统效率看，太空光伏在空间应用中具备“就地发电、就地消纳”的特点。传统地面新能源电力需要经过发电、升压、输电、并网、调峰、消纳等多个环节，系统效率和经济性受电网条件影响较大；而卫星、空间站等航天器主要依赖太阳翼和储能电池构成闭环电源系统，发电端、电源管理端和用电端集成在同一平台内，有利于提升能源供给的稳定性和可控性。对于未来太空算力平台而言，若计算载荷、电源系统、热控系统和通信系统能够实现一体化设计，空间光伏有望成为在轨平台的原生能源底座。

从产业链迁移看，太空光伏还具备承接地面光伏技术进步的条件。我国地面光伏产业在硅片、电池片、组件、设备等环节已形成较强的制造能力和成本优势，PERC、TOPCon、HJT 等路线的效率提升、薄片化、低温工艺和设备国产化成果，有望在低轨商业航天场景中实现外溢应用。相较于传统航天级 GaAs 电池，晶硅路线若能在抗辐照、热循环、封装可靠性等方面通过验证，将为低轨星座提供更低成本的空间电源选择。

从更宏观的能源利用角度看，散热问题也是太空光伏和太空算力具备长期战略意义的重要原因。无论是光伏发电、AI 算力还是其他高功率能源系统，电能最终在使用过程中都会转化为热量。若大规模能源生产和高功率算力设施持续集中部署在地面，

不仅需要消耗大量土地、水资源和冷却基础设施，也会在局部区域形成持续热排放压力，加重城市热岛、水资源消耗和生态环境负荷。太空环境则提供了不同的能源闭环路径：能源生产、计算消耗和废热排放均发生在地球生态系统之外，热量主要通过辐射方式向深空释放，从而减少对地表土地、水资源和局部生态环境的直接扰动。我们认为，从长期人类文明尺度看，太空光伏和太空算力的意义并不只是寻找新的发电方式或算力部署方式，更在于将部分高能耗、高散热需求的基础设施迁移至地球生态边界之外，为能源、算力与环境约束之间的矛盾提供新的解法。

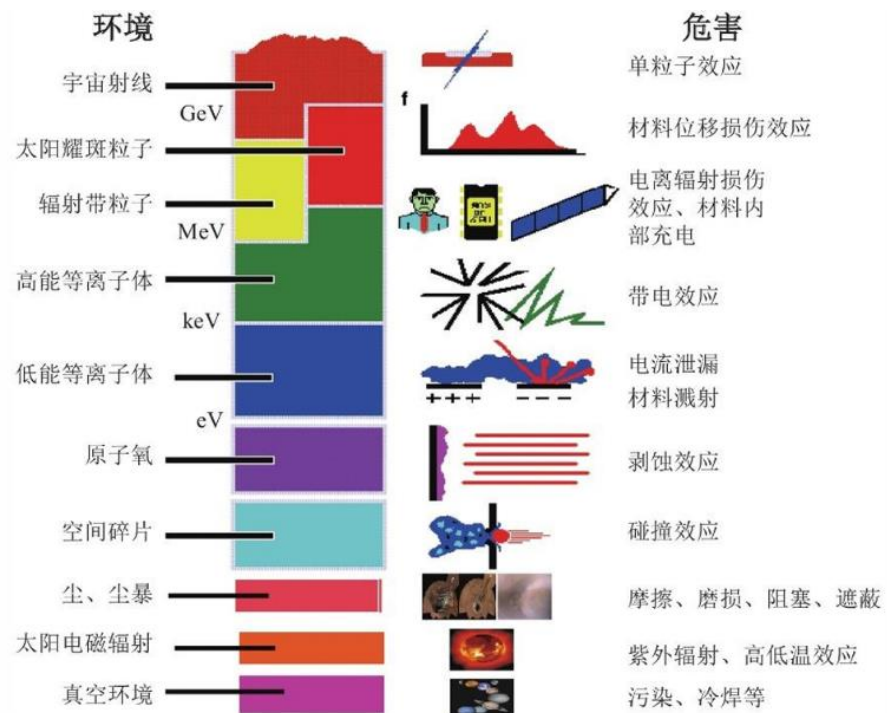
(五) 挑战：发射成本、空间环境、在轨维护仍是核心约束

虽然太空光伏具备高可用光照、空间就近供能和不占用地面资源等优势，但其产业化进程仍面临多重工程和经济约束。与地面光伏相比，太空光伏并不是简单将电池片部署到轨道空间，而是需要在发射、展开、姿态控制、热控、电源管理、在轨寿命和可靠性等多个环节形成系统性能力。我们认为，太空光伏能否从航天专用配套走向更大规模应用，核心取决于发射成本下降、空间环境适应性提升以及系统集成能力成熟。

发射成本仍是太空光伏经济性改善的首要变量。地面光伏电站的主要成本来自组件、支架、土地、并网和储能，而太空光伏除了电池和太阳翼本体成本外，还需要承担运载火箭发射、轨道部署、在轨展开、姿态调整 and 平台配套等成本。对于低轨卫星太阳翼而言，发射成本直接影响单位功率入轨成本；对于未来太空算力和天基太阳能电站等大功率平台而言，发射成本更是决定其能否从工程可行走向经济可行的关键前提。随着 Falcon 系列火箭高频发射和 Starship 等重型可复用火箭持续推进，发射端降本为太空光伏打开了想象空间，但大规模、稳定、低成本发射能力仍需持续验证。

复杂空间环境对光伏电池和太阳翼长期可靠性提出更高要求。空间环境存在高能粒子辐照、太阳耀斑、原子氧剥蚀、强紫外照射、极端温差、等离子体带电和空间碎片撞击等因素。高能粒子会造成电池电离损伤和位移损伤，导致转换效率衰减；低轨环境中的原子氧可能对聚合物封装材料和柔性基底产生侵蚀；轨道昼夜交替造成的温度循环会带来热胀冷缩和材料疲劳；空间碎片和微流星体撞击则可能导致局部损伤甚至阵列失效。因此，太空光伏不仅要追求高效率，更要在抗辐照、抗热循环、抗原子氧、抗冲击和低衰减方面形成可靠验证。

图4 太空环境对光伏设备构成的危害



资料来源：《低地球轨道空间环境与效应集成化监测装置设计》，中航证券研究所整理

轻量化与高可靠之间存在权衡。低轨星座和太空算力平台都希望降低单位功率重量，提高单位质量发电能力，从而减少发射成本；但轻量化往往意味着电池片、封装层、基底和支撑结构减薄，这可能削弱机械强度、抗辐照能力和长期可靠性。传统 GaAs 多结电池具备较高可靠性，但成本和产能约束突出；晶硅 PERC、TOPCon、HJT 等路线具备低成本和薄片化潜力，但需要更多在轨数据验证其长期稳定性；钙钛矿/叠层电池具备高效率和高比功率潜力，但稳定性、紫外耐久和封装可靠性仍是核心瓶颈。不同技术路线的竞争，本质上是成本、效率、重量和寿命之间的综合平衡。

热控系统是太空算力等大功率场景不可回避的约束。太空真空环境下缺乏空气对流，热量主要依靠辐射方式释放。对于普通通信卫星而言，热控系统已是卫星平台设计的重要组成部分；对于未来太空算力平台，计算载荷功率密度更高，热量排放需求更大，辐射散热器、热管、相变材料、导热结构和姿态控制均将影响平台质量和可靠性。因此，不能简单将太空环境理解为“天然低温、散热免费”。相反，随着在轨功率等级提升，热控可能成为制约太空算力和大功率太空光伏平台的重要工程瓶颈。

二、应用场景：低轨星座构成基本盘，太空算力打开第二增长曲线

（一）低轨星座：卫星互联网建设提速，太阳翼需求进入放量阶段

低轨通信星座是太空光伏当前最具确定性的下游应用场景。与传统高轨通信卫星相比，低轨通信卫星单星轨道高度更低、通信时延更短、组网数量更大，通常需要通过数百颗至数万颗卫星协同实现全球或区域覆盖。随着 Starlink、Amazon Leo、中国星网、千帆星座等低轨卫星互联网项目持续推进，卫星制造正由过去的项目制、小批量、高定制化模式，逐步向批产化、标准化、低成本方向演进，进而带动太阳翼和空间电源系统需求进入放量前夜。

海外进展方面，Starlink 已经率先验证了低轨通信星座的大规模组网能力。SpaceX 通过高频发射、批量卫星制造和星座运营，将低轨卫星互联网从概念推向商业化应用，也为后续全球低轨星座建设提供了产业范式。Amazon Leo（原 Project Kuiper）同样在加速推进，其官网披露的初始星座规划包括 3236 颗卫星，并已采购多家火箭公司的商业发射服务。海外头部企业持续加码，意味着低轨通信星座不再是单一公司试验，而是逐步成为全球通信基础设施建设的重要方向。

从国内进展看，中国低轨卫星互联网建设同样进入加速阶段。中国星网、千帆星座等项目构成国内低轨通信星座建设的主要抓手。其中，中国星网规划规模约 1.3 万颗卫星，千帆星座远期规划规模超过 1.4 万颗卫星，二者合计规划接近 2.8 万颗。与传统航天任务相比，低轨星座的建设节奏更快、批量制造属性更强，对低成本、高可靠、可持续交付的空间电源系统提出了更明确需求。

表3 主要低轨星座规划情况

星座/项目	规划情况	对太空光伏的意义
Starlink	已实现大规模在轨部署，后续仍有扩容及替换需求	验证低轨星座批量制造和高频发射模式
Amazon Leo	初始星座设计超过 3,000 颗卫星	海外低轨星座建设主体增加，带动太阳翼需求扩容
中国星网	公开规划约 12,992 颗卫星	国内卫星互联网国家队，提供国产空间电源需求牵引
千帆星座	远期规划约 1.4 万颗卫星	商业低轨星座代表，有望推动低成本电源方案导入

资料来源：Amazon、SpaceNews，中航证券研究所整理

低轨通信星座对太空光伏产业的拉动，首先体现在卫星数量提升带来的太阳翼需求扩容。传统 GEO 通信卫星和深空探测器数量相对有限，空间光伏市场更多体现为高可靠、小批量、高单价特征；低轨星座则以规模化组网为核心，单星功率虽然低于大型高轨卫星，但卫星数量远高于传统航天器，太阳翼、电源控制器、储能电池、展开机构等配套环节均有望受益于批量需求释放。

其次，低轨星座对单星成本更为敏感，有望推动空间光伏技术路线由高可靠优先向“可靠性+成本”并重演进。高轨通信、深空探测、军用高可靠任务仍将优先采用 GaAs 等成熟航天级电池；但低轨通信星座在轨寿命相对较短、卫星数量庞大、补网频率较高，天然具备导入低成本晶硅路线的动力。PERC、TOPCon、HJT 等地面成

熟光伏技术若能通过抗辐照、热循环、封装可靠性验证，有望在低轨商业星座中形成对传统高成本路线的补充。

此外，低轨星座并非一次性建设需求，而是具备持续替换和补网属性。低轨卫星通常运行在更低轨道高度，受大气阻力、轨道寿命、技术升级和网络维护等因素影响，需要持续补充和替换。随着星座规模扩大，后续新增、补网、替换和升级需求将共同构成空间电源系统的长期订单来源，使太空光伏由“跟随单个项目交付”逐步转向“跟随星座生命周期持续放量”。

我们认为，低轨通信星座是太空光伏产业化最先落地的基本盘。一方面，星座建设能够提供可测算的卫星数量和发射节奏，使太阳翼需求具备较强可跟踪性；另一方面，低轨星座的成本约束将推动空间光伏技术路线分化，高可靠任务继续由 GaAs 等成熟路线主导，低轨批量化场景则有望为 HJT 等晶硅路线提供导入空间。短期来看，低轨星座建设节奏将直接影响太空光伏订单释放；中长期来看，随着单星功率提升和低成本路线成熟，低轨通信星座有望成为太空光伏从航天小众市场走向规模化应用的关键场景。

表4 低轨星座对太空光伏需求的传导路径

变量	变化趋势	对太空光伏的影响
卫星数量	由百颗级向千颗/万颗级扩张	带动太阳翼和空间电源系统需求扩容
单星功率	通信载荷能力提升，单星用电需求增加	提高单位卫星太阳翼面积和电池功率需求
星座寿命	低轨卫星存在补网和替换需求	形成持续性订单，而非一次性建设需求
成本约束	批量星座更关注单星制造和发射成本	推动 HJT、钙钛矿等低成本路线验证

资料来源：中航证券研究所

（二）高轨通信与深空探测：高可靠场景仍以成熟航天电源为主

与低轨通信星座强调批量制造和成本控制不同，高轨通信卫星、深空探测器以及部分军用航天器更加关注长寿命、高可靠和任务成功率。此类航天器通常单星价值量高、任务周期长、在轨维修难度大，一旦电源系统失效，将直接影响整星任务执行。因此，在高轨通信和深空探测等场景中，太空光伏的核心要求并不是单纯追求低成本，而是在极端环境下实现长期稳定供电。

高轨通信卫星通常运行于地球同步轨道或地球静止轨道，轨道高度约 3.6 万公里，具备覆盖范围广、对地相对固定、通信服务连续性强等特点。与低轨卫星相比，高轨卫星单星平台规模更大、寿命更长、功率需求更高，对太阳翼效率、抗辐照能力、低衰减性能和电源系统可靠性要求更高。由于高轨轨道空间辐照环境更复杂，且卫星设计寿命通常可达 10 年以上，成熟航天级电池仍是当前主流选择。

深空探测任务对空间电源系统提出更严苛要求。一方面，深空探测器通常远离地球，任务周期长、通信延迟高、维护和更换几乎不可能；另一方面，探测器运行环境

复杂,可能经历强辐照、极端温差、姿态变化、远日距离光照衰减等多重挑战。因此,深空任务更加重视电源系统的冗余设计、长期可靠性和环境适应能力。对于火星探测、小行星探测、木星系探测等任务而言,电源系统不仅关系到平台运行,更直接决定科学载荷能否持续工作。

表5 太空光伏运行轨道类别

轨道	说明
低轨 (LEO)	160-2,000km 的轨道高度, LEO 卫星约 90 分钟绕地球一圈,日照占比超 60%;发射成本低, 适合分布式太空数据中心, 星链卫星采用此方案, 单星功率约 20kW。
中轨 (MEO)	2000-35,786km, 卫星在此轨道上受地球遮挡和大气影响较小, 能较稳定地接收太阳光照, 相比低轨卫星, MEO 卫星的覆盖范围更大, 适合为区域性或特定任务的太空设施提供电力支持和区域供电。
地球同步轨道 (GSO)	35786km, 卫星在此轨道上与地球自转同步, 几乎不受地球遮挡, 能持续接收太阳光照, 是太空光伏的理想环境, 可实现近乎连续的电力供应。适合大规模集中供电, 但发射成本高、需要大型运载火箭和复杂的部署技术, 传输距离远。
高轨 (HEO)	轨道呈椭圆形, 近地点距离地球较近 (多为低轨高度), 远地点距离地球较远, 部分远地点可延伸至 GEO 轨道高度附近。卫星在近地点运行速度快, 可快速完成低轨区域的观测或通信任务; 在远地点运行速度慢, 能长时间覆盖高纬度地区。此类轨道适用于高纬度地区通信、卫星无线电、深空探测中继及特定遥感任务。

资料来源: 前瞻研究院, 中航证券研究所整理

在此类高可靠场景中, GaAs/III-V 族多结电池仍具备较强竞争力。该类电池通过多结结构分段吸收太阳光谱, 具备较高转换效率和较强抗辐照能力, 已在通信卫星、导航卫星、空间站和深空探测任务中形成较成熟应用。尽管其成本显著高于晶硅路线, 但对于单星价值量高、任务可靠性权重更高的高轨和深空任务而言, 电池成本并非唯一决定因素, **效率、寿命和任务安全性往往具有更高优先级**。

太空光伏技术演进并不是简单的“低成本路线替代高成本路线”。低轨商业星座由于卫星数量大、成本约束强、寿命相对较短, 具备导入 PERC、TOPCon、HJT 等晶硅路线的动力; 而高轨通信、深空探测、军用高可靠任务则仍将长期依赖成熟航天级电池。未来太空光伏市场更可能呈现分层格局: GaAs/III-V 多结电池占据高可靠、高价值任务市场, 晶硅路线切入低轨批量化市场, 钙钛矿/叠层路线在完成长期验证后逐步进入更高比功率需求场景。

(三) 空间站、月球基地与深空设施: 长期任务推动高可靠能源系统升级

除低轨通信星座、高轨通信卫星和深空探测器外, 空间站、月球基地以及未来深空基础设施同样是太空光伏的重要应用场景。此类场景与低轨星座的核心差异在于,

其并不以“卫星数量放量”为主要驱动，而是以长期驻留、连续运行、可扩展建设和高可靠能源保障为核心需求。随着载人航天、月球科研站、深空探测和在轨大型平台建设逐步推进，空间能源系统的重要性有望持续提升。

空间站是当前最成熟的大型在轨能源应用场景之一。空间站长期运行需要持续为生命保障、科学实验、通信、姿态控制、热控系统等多类载荷提供电力，因此其太阳翼通常具备较大面积、高可靠性和较强冗余能力。我国空间站天和核心舱、问天实验舱、梦天实验舱均配置大面积柔性太阳翼，采用高效航天级太阳电池，为长期在轨运行提供能源保障。相较普通卫星，空间站平台更强调电源系统的连续性、安全性和可维护性，是检验大面积太阳翼展开、并网、功率管理和长期稳定运行能力的重要场景。

月球基地和行星表面设施则代表太空光伏从“在轨供电”向“地外表面能源系统”延伸。未来月面科研站、资源勘探、原位资源利用、通信中继和载人驻留等任务，均需要稳定、可扩展的能源供应。与近地轨道不同，月面环境存在昼夜周期长、温差大、月尘覆盖、辐照强、维护条件有限等问题，对光伏阵列、储能系统、微电网控制和防护材料提出更高要求。光伏系统需要与储能、核能或其他能源形式协同，形成适应月面长期运行的综合能源系统。

深空设施和太阳能电推进任务也将持续提升对高功率太阳阵列的需求。随着探测任务距离更远、载荷更复杂、推进系统功率更高，太阳翼不仅承担平台供电功能，还可能直接影响任务边界。高功率太阳能电推进系统需要更高单位质量功率、更高展开面积和更高可靠性的太阳阵列，以支撑深空转移、轨道机动和长期科学探测任务。

与低轨通信星座相比，空间站、月球基地和深空设施对太空光伏的拉动更偏长期。短期来看，此类任务数量有限，难以像低轨星座一样快速形成大规模装机需求；但从产业意义看，其对高可靠、大面积、可展开、可维护能源系统的要求更高，有助于推动太阳翼结构、电源管理、储能、热控、封装材料等系统能力升级。未来若月球科研站、商业空间站和深空基础设施建设加速，太空光伏有望从单一航天器配套电源，进一步升级为地外长期驻留和空间基础设施建设的能源底座。

（四）太空算力数据中心：能源与散热约束重构算力中心部署逻辑

太空算力成本在发射降价与效率提升推动下快速下行，预计建设成本 CAPEX 在 2032 年接近地面水平。根据 2026 年 1 月 14 日德意志银行发布的报告，当前太空数据中心在建设阶段成本显著高于地面方案。在 2026 年情景下，建设 1GW 太空数据中心的部署成本约 1070 亿美元，为同规模地面数据中心（约 160 亿美元）的 6.7 倍。不过，随着发射成本下降、算力卫星单位功率成本降低以及功率密度持续提升，太空部署成本预计快速收敛：2028 年差距缩小至 4.3 倍，2032 年降至 2.6 倍，在进一步优化假设下可降至 1.4 倍，基本接近地面水平。

从成本下降的驱动因素来看，核心变量主要包括三方面：发射单价显著下降、算

力载荷单位功率成本降低，以及电源系统功率密度持续提升。三者的持续优化对太空部署成本形成放大式的下行效应。

表6 地面与太空数据中心建设成本对比（1GW）

指标（单位）	2026 年	2028 年	2032 年	远期预测
发射成本（美元/千克）	1600	700	67	67
太空部署成本（十亿美元）	107	69	41	22
地面部署成本（十亿美元）	16	16	16	16
成本差距倍数	6.7	4.3	2.6	1.4

资料来源：Deutsche Bank Research，中航证券研究所整理

此外，依托在轨太阳能供电与辐射散热机制，太空数据中心在运行阶段不再产生持续性的电费、制冷能耗及用水成本，亦无需配置传统意义上的备用电源系统。由此可见，尽管太空算力在建设初期面临更高的前期投入，但从 10 年期乃至更长周期来看，其在能源与散热相关运营成本上的结构性优势十分显著。在算力规模持续扩张、运行周期不断拉长的背景下，长期视角下的成本对比有助于重新评估太空算力的经济可行性。

表7 地面与太空数据中心能源及散热成本对比（1GW）

成本项目（10 年）	地面	太空
能源成本	35 亿美元	5000 万美元
发射成本	无	1.25 亿美元
制冷成本	1.75 亿美元	无
用水成本	4250 万吨	无
备用电源	5 亿美元	无
辐射屏蔽	无	3000 万美元
成本合计	41.75 亿美元	2.05 亿美元

资料来源：《Why We Should Train AI in Space》（原文设定为 40MW，在此进行 25 倍缩放），中航证券研究所整理

三、技术路线：由高可靠向低成本、轻量化、高比功率演进

（一）太空光伏五大技术路线分类

从太空应用角度看，当前及未来较长时期内，太空光伏技术路线可分为五大类：

1. III-V 族化合物半导体电池路线，以 GaAs 多结电池为代表，包括单结 GaAs、三结 GaAs、四结/五结多结电池、柔性薄膜 GaAs 等。该路线是当前航天领域最成熟、可靠性最高的主流路线，具备高转换效率、强抗辐照能力、长寿命和充分在轨验证优势。其短板在于成本高、外延工艺复杂、锗衬底和 MOCVD 设备壁垒高、产能扩张

能力有限。我们认为，GaAs/III-V 族路线不会被低成本路线简单替代，仍将在高轨通信、深空探测、空间站、军用高可靠任务中长期占据重要地位。

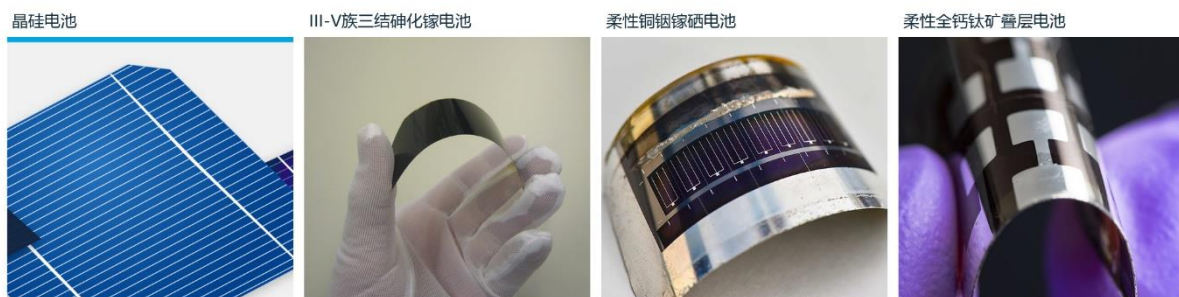
2.晶硅电池路线，包括传统硅电池、PERC、TOPCon、HJT 等。该路线的核心优势在于**成本低、产业链成熟、产能充足、设备国产化程度高**。其中，PERC 具备成熟低成本基础，但效率提升空间有限；TOPCon 是当前地面 n 型主流路线之一，兼具较高效率和量产基础；HJT 具备低温工艺、薄片化潜力、低温系数和双面率高等特点，更适合向轻量化、高比功率方向延伸。晶硅路线更适合低轨通信星座、短寿命商业卫星等成本敏感场景。

3.薄膜电池路线，包括非晶硅薄膜、CIGS、CdTe、柔性 III-V 薄膜等。薄膜路线具备轻量化、柔性化、可卷曲展开等特点，适合对收纳体积、展开面积和重量约束较高的特定空间任务。其中，柔性薄膜 GaAs 可视为传统 III-V 族路线的轻量化升级方向，CIGS 等路线则更多用于柔性太阳翼、小卫星和技术验证场景。整体来看，薄膜电池短期难以成为大规模主流，但在柔性展开和特殊结构场景中具备补充价值。

4.钙钛矿及叠层电池路线，包括单结钙钛矿、钙钛矿/晶硅叠层、全钙钛矿叠层、钙钛矿/III-V 叠层等。钙钛矿材料具备带隙可调、吸光系数高、低温制备、柔性潜力强等特点，钙钛矿/晶硅叠层则有望突破单晶硅效率上限，是当前地面光伏和太空光伏共同关注的下一代方向。该路线在太空场景中的核心吸引力在于高效率和**高比功率潜力**，但稳定性、紫外耐久、热循环可靠性、大面积一致性和长期在轨寿命仍是主要约束。我们认为，钙钛矿及叠层电池更适合作为远期太空算力、天基太阳能电站和大功率空间平台的重点储备路线。

5.其他新型电池路线，包括有机太阳能电池、量子点太阳能电池、染料敏化太阳能电池等。此类路线在柔性、轻量、特殊光谱响应和低温制备方面具备一定科研价值，但在转换效率、寿命、抗辐照能力和工程成熟度方面距离主流航天应用仍有差距，短期内更多处于科研探索和特定验证阶段。

图5 多种不同光伏技术



资料来源：NREL 等,中航证券研究所整理

太空光伏技术路线的演进并非单一路线替代，而是分场景并行发展。高轨通信、深空探测、空间站、军用高可靠任务仍以 GaAs/III-V 族多结电池为主；低轨通信星座、短寿命商业卫星更关注晶硅路线的低成本和批量交付能力；太空算力、月球基地、天基太阳能电站等远期大功率场景，则更关注钙钛矿/叠层这类高比功率路线。后续产

业竞争的核心，不是谁完全替代谁，而是在不同应用场景下实现效率、成本、重量、寿命和可靠性的综合最优。

表8 太空光伏技术分类

技术类别	细分路线	核心优势	主要短板	适配场景
III-V 族化合物电池	单结 GaAs、三结 GaAs、多结 GaAs、IMM、柔性薄膜 GaAs	效率高、抗辐照强、寿命长、在轨验证充分	成本高、产能有限、外延工艺复杂	高轨通信、深空探测、空间站、高可靠任务
晶硅电池	PERC、TOPCon、HJT、BC/IBC 等	成本低、供应链成熟、产能充足、设备国产化程度高	抗辐照、热循环和长期在轨寿命仍需验证	低轨星座、低成本商业卫星
薄膜电池	非晶硅、CIGS、CdTe、柔性 III-V 薄膜	轻量化、柔性化、可卷曲展开	效率和长期可靠性仍需提升	柔性太阳翼、小卫星、特定展开结构
钙钛矿及叠层电池	单结钙钛矿、钙钛矿/晶硅叠层、全钙钛矿叠层	理论效率高、比功率潜力大、低温制备、柔性潜力强	稳定性、封装、紫外耐久和大面积良率仍待验证	太空算力、天基太阳能电站、远期大功率平台
其他新型电池	有机、量子点、染料敏化等	柔性、轻量、特殊光谱响应具备科研价值	工程成熟度低，短期难以满足航天可靠性要求	科研验证、特殊任务储备

资料来源：硅酸盐学报，灼识咨询等，中航证券研究所整理

（二）III-V 族化合物电池：当前航天主流，高可靠但成本约束突出

III-V 族砷化镓太阳能电池为国内当前太空光伏主流技术路线。在航天器上，太阳翼发电要同时满足高效率、抗辐照、耐高温、长寿命等极端约束。砷化镓的带隙约 1.42eV，与太阳光谱匹配度高，因此在 AM0（太空光谱）下具备更高的光电转换潜力；同时其材料体系在耐高温、抗辐照方面表现更好，所以 20 世纪 90 年代开始逐步取代硅电池，成为航天器的核心发电单元。

三结砷化镓太阳能电池仍是当前主流选择。砷化镓太阳能电池可以分为单结和多结，多结砷化镓太阳能电池通过堆叠不同禁带宽度材料分段吸收太阳光谱，可显著提升光能利用率与功率密度，结数提升带动转换效率持续提高。随着由三结向四结、五结演进，效率上限不断抬升，但工艺复杂度、制造成本与良率压力同步上升，边际效率提升对应的成本增幅明显。在效率与成本的综合权衡下，三结砷化镓在性能、可靠性与经济性之间具备最优平衡，仍是当前太空光伏的主流技术路线。

图6 三结砷化镓结构示意图

	Au	负 极		
N-Al _{0.25} In _{0.5} Ga _{0.25} P	窗口层	0.03 μm	顶电池 GaInP $E_g > 1.85$ eV	
N-In _{0.5} Ga _{0.5} P	发射区	0.1 μm		
P-In _{0.5} Ga _{0.5} P	基 区	0.58 μm		
P-In _{0.5} Ga _{0.5} P	背面场	0.03 μm		
P-GaAs	隧穿结	0.03 μm	隧穿结	
N-GaAs	隧穿结	0.03 μm		
N-In _{0.5} Ga _{0.5} P	窗口层	0.03 μm	中电池 GaAs 1.85 eV $> E_g > 1.43$ eV	
N-GaAs	发射区	0.1 μm		
P-GaAs	基 区	2.5 μm		
P-In _{0.5} Ga _{0.5} P	背面场	0.03 μm		
P-GaAs	隧穿结	0.03 μm	隧穿结	
N-GaAs	隧穿结	0.03 μm		
N-In _{0.5} Ga _{0.5} P	窗口层	0.01 μm	底电池 Ge 1.43 eV $> E_g > 0.67$ eV	
N-Ge	发射区	0.05 μm		
P-Ge	衬 底	50 μm		
Au	正 极			

资料来源： GaInP/GaAs/Ge 三结太阳电池不同能量质子辐照损伤模拟，李俊炜、王祖军、石成英等，中航证券研究所整理

以三结砷化镓太阳电池为例，制备流程可大致分为五步:外延堆叠生长，光刻图形化与腐蚀隔离，金属化互连，衬底减薄，切割与引线键合。其中涉及的具体工艺与关键设备如下所示：

图7 三结砷化镓制备工艺流程图



资料来源：中航证券研究所整理

表9 三结砷化镓制备工艺流程

流程	具体工艺	关键设备
外延堆叠生长	自下而上依次生长衬底层、各级电池结及相邻电池结之间的隧道结，形成多结太阳能电池外延结构	MOCVD 外延设备
光刻图形化/蚀刻 隔离	在电池正面制备金属层，并通过图形化和腐蚀工艺形成正面电极及金属台面结构	光刻设备（涂胶/曝光/显影）与蚀刻设备
金属化与减反射膜制备	在太阳能电池正面涂覆减反射膜，以降低受光表面的光学反射损失	金属沉积设备（蒸镀/溅射）以及薄膜沉积设备
衬底减薄与背面金属化	对太阳能电池衬底进行减薄处理，并在电池背面制备金属层，形成背面电极结构	减薄设备及金属沉积设备
切割与引线键合	对完成正、背面加工的太阳能电池进行切割，并完成引线键合，形成独立的太阳能电池芯片	切割设备及引线键合设备

资料来源：国家知识产权局，CN105047762A《砷化镓太阳能电池制备工艺》，中航证券研究所整理

根据预测，国内 GaAs 电池片研发平均效率将由 2025 年的 36.9%稳步提升至 2030 年的 39.2%，反映出材料外延、器件结构和工艺制备持续优化下，已在太空领域成熟应用的砷化镓太阳能电池性能仍具备渐进提升空间。

表10 2025-2035 年国内砷化镓 GaAs 太阳能电池转换效率变化趋势

项目	2025 年	2026 年	2028 年	2030 年	2032 年	2035 年
GaAs 电池片三结研发平均效率	36.9%	37.4%	38.4%	39.2%	39.8%	40.5%

资料来源：《中国光伏产业发展路线图（2025-2026）》 中航证券研究所整理

GaAs 多结电池的投资价值主要来自高可靠航天任务基本盘和技术壁垒。其优势在于认证周期长、客户粘性强、可靠性要求高、竞争格局相对集中；约束在于市场规模受高成本和低轨替代影响，未来在低轨批量星座中的渗透率可能逐步下降。对于生态环境而言，锗衬底、MOCVD 外延、电池片、太阳翼集成和空间级测试认证仍是该路线的核心价值环节。

总体来看，GaAs 多结电池是太空光伏的“高可靠基准线”。短期内，其在高价值航天任务中仍难以被替代；中长期随着低轨星座批量化和低成本路线成熟，GaAs 市场将更多集中于高轨、深空、军用和长寿命平台等高可靠场景。

（三）晶硅电池：地面成熟光伏路线，具备低成本太空化潜力

晶硅电池是地面光伏产业中应用最成熟、生态链最完善、成本最低的技术体系。相较于航天级三结砷化镓电池，晶硅电池在抗辐照能力、单位面积效率和长期在轨验证方面仍存在差距，但其优势在于原材料供应充足、制备工艺成熟、产能规模庞大、设备国产化程度高，具备显著的低成本和规模化制造优势。随着低轨通信星座进入批量组网阶段，卫星电源系统开始从“高可靠优先”逐步向“可靠性与成本并重”演进，晶硅路线由此重新进入太空光伏应用视野。

从技术分类看，当前主流晶硅电池路线主要包括 PERC、TOPCon 和 HJT 三类。其中，PERC 是上一代地面光伏主流技术，具备成熟低成本优势，但效率提升空间有限；TOPCon 是当前 n 型电池主流扩产方向，在效率、产能和成本之间具备较好平衡；HJT 则凭借低温工艺、薄片化潜力、低温度系数和双面率高等特点，更适合向轻量化、高比功率太空应用方向延伸。

1. PERC 电池：成熟低成本路线，为硅基太空化的早期基础方案

PERC 全称为发射极钝化和背面接触电池，通过在电池背面引入钝化层和背反射结构，降低载流子复合并增强长波光吸收，从而提升电池效率。PERC 技术工艺成熟、设备投资低、产线存量，是地面光伏过去数年的主流路线。其优势在于成本低、供应链成熟、制造经验充分，但受制于 p 型硅片少子寿命、效率上限和抗衰减能力，未来在地面光伏中的份额正逐步被 n 型 TOPCon 和 HJT 压缩。对于太空场景而言，PERC 更适合作为低成本、短寿命、技术验证型任务的候选路线，但在高辐照、长寿命场景中的适配性仍需进一步验证。

2. TOPCon 电池：n 型主流路线，具备效率与量产平衡优势

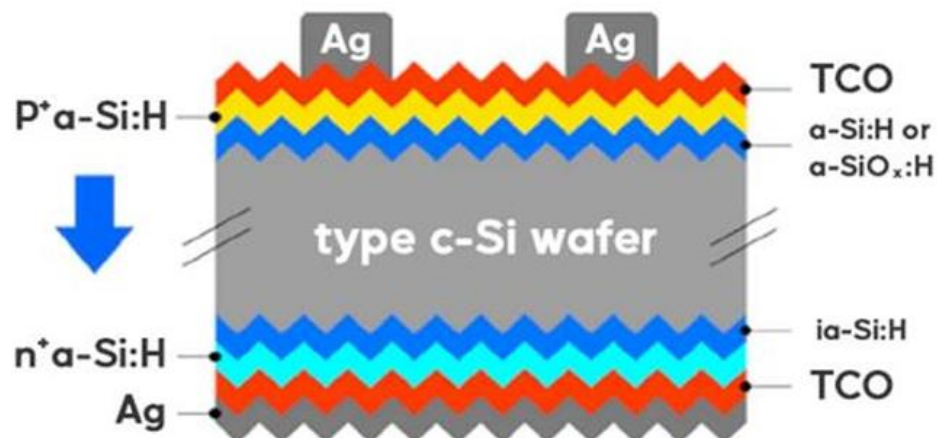
TOPCon 全称为隧穿氧化层钝化接触电池，其核心是在电池背面制备超薄氧化硅层和掺杂多晶硅层，形成钝化接触结构，在降低载流子复合的同时实现较好的载流子选择性传输。TOPCon 相比 PERC 具备更高转换效率、更低衰减和更好的弱光响应，且可在部分 PERC 产线基础升级改造，因此产业化推进速度较快。对于低轨星座而言，TOPCon 的优势在于效率、成本、量产基础和供应链成熟度之间较为均衡，有望成为晶硅太空化的重要候选路线之一。但 TOPCon 用于太空仍需解决抗辐照、热循环、封装可靠性和超薄化后的机械强度等问题。

3. HJT 电池：薄片化和低温度系数优势突出，具备最大的太空规模化部署潜力

HJT 全称为具有本征非晶层的异质结电池，通过在晶体硅片两侧沉积本征非晶硅薄层及掺杂非晶硅层，实现优异的表面钝化和载流子选择性收集。HJT 具备工艺温度低、温度系数优、双面率高、衰减低、薄片化潜力强等特点，较适合太空光伏对轻量化和高比功率的要求。尤其是在低轨卫星中，发射质量直接影响系统成本，HJT 若能

通过超薄硅片降低单位功率重量，并通过空间级封装提升抗辐照和抗热循环能力，有望成为中期低轨星座硅基电源的重要方向。其短板在于设备投资较高、低温银浆成本较高、空间长期在轨验证数据仍需积累。

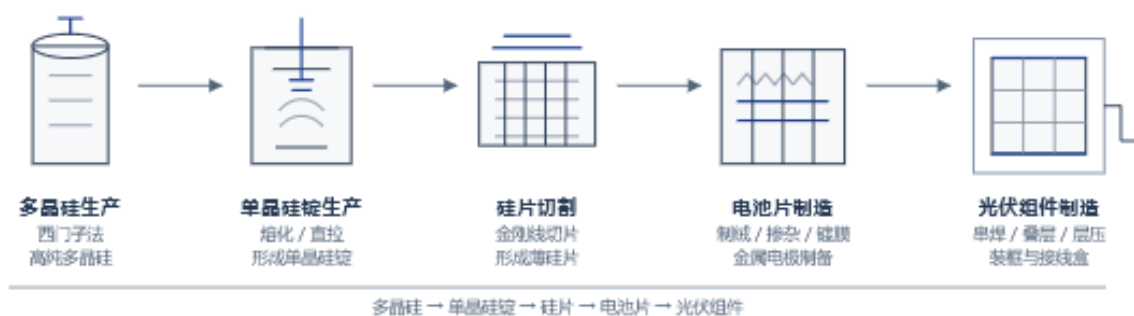
图8 HJT 异质结电池结构示意图



资料来源：MaySunsolar，中航证券研究所整理

晶硅电池的制备流程亦可大致概括为五步：硅料制备与拉晶成锭，硅棒切片与薄片化，电池片制备，空间级封装与互连，空间环境模拟测试。

图9 典型晶硅太阳能电池制备工艺流程图



资料来源：中航证券研究所整理

表11 晶硅电池制备工艺流程

流程	具体工艺	关键设备
多晶硅生产	以冶金级硅以及氢、氯等为原料，通过西门子法等工艺制备高纯多晶硅。西门子法通过含硅气体在加热硅芯表面发生反应并沉积硅，形成多晶硅棒	多晶硅还原炉及配套气体处理设备
单晶硅锭生产	将多晶硅加热熔化，采用直拉法使籽晶与熔体接触并缓慢向上提拉，生长形成圆柱形单晶硅锭	单晶炉及配套加热、提拉设备
硅片切割	采用金刚石涂层线锯将单晶硅锭切割成薄硅片，供后续太阳电	金刚线切片机及配套加工设

	池片制造使用	备
电池片制造	首先对硅片表面进行化学制绒,以去除切割损伤并提高入射光利用率;随后根据电池结构进行掺杂、表面功能膜制备和金属电极制备	清洗制绒、扩散或沉积、薄膜沉积及金属化设备
光伏组件制造	通过焊带将相邻电池片连接成电池串,将电池串与玻璃、聚合物封装材料和背板或背面玻璃叠层并进行层压,最后安装边框、密封材料和接线盒	串焊机、层压机、装框及测试设备

资料来源: U.S. Department of Energy, 中航证券研究所整理

根据预测,单晶异质结电池研发平均效率将由 2023 年的 25.2%提升至 2030 年的 26.8%,整体呈现稳步上行态势,反映出薄片化、钝化接触、金属化及封装工艺持续优化下,晶硅电池在效率提升和空间应用适配方面仍具备进一步改进空间。

表12 2023-2030 年单晶异质结 HJT 太阳能电池转换效率变化趋势

项目	2023 年	2024 年	2025 年	2026 年	2028 年	2030 年
单晶异质结电池研发平均效率	25.2%	25.8%	26.2%	26.4%	26.6%	26.8%

资料来源:《中国光伏产业发展路线图(2023-2024)》 中航证券研究所整理

总体来看,PERC、TOPCon 和 HJT 的适配节奏和定位不同:**PERC 更偏低成本基础路线,用于早期验证和成本敏感任务**;TOPCon 具备效率和量产平衡优势,适合低轨星座规模化导入;**HJT 则凭借薄片化、低温度系数和高双面率优势,更适合中期向轻量化、高比功率空间电源方向发展,有着最好的发展前景**。未来随着低轨星座批量化推进,晶硅路线有望在成本敏感型任务中逐步提升渗透率,但在高轨、深空和军用高可靠场景中,仍难以完全替代 GaAs 多结电池。

(四) 钙钛矿及叠层电池:效率比功率潜力最高,稳定性仍待验证

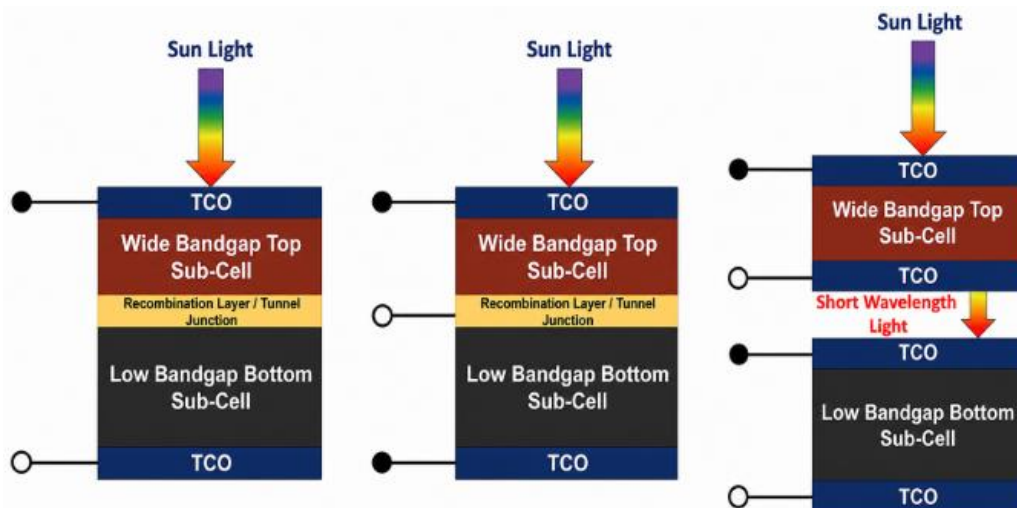
钙钛矿叠层突破晶硅理论效率极限,是唯一能让太空光伏 LCOE 与地面平价的技术。相较 GaAs 多结电池和晶硅电池,钙钛矿电池具备带隙可调、吸光系数高、低温制备、柔性化潜力强、理论效率高等特点,在太空场景中尤其契合轻量化、高比功率和大面积可展开需求。随着低轨星座向更高功率载荷演进,以及太空算力、天基太阳能电站等远期应用出现,钙钛矿及叠层电池被视为下一代空间能源系统的“重要远期方向”。

钙钛矿泛指具有 ABX_3 晶体结构的一类材料体系,其中 A、B、X 位元素可灵活调节,使材料带隙、吸收范围、载流子输运特性和器件结构具备较强可设计性。与晶硅电池相比,钙钛矿电池吸光系数更高,较薄的吸收层即可实现较强光吸收;与 GaAs 多结电池相比,钙钛矿材料体系理论上可通过低温涂布、蒸镀或印刷工艺制备,具备更低成本和柔性化潜力。

从技术路线看,钙钛矿及叠层电池主要包括单结钙钛矿、钙钛矿/晶硅叠层、全

钙钛矿叠层以及钙钛矿/III-V 叠层等方向。其中，单结钙钛矿具备结构简单、低温制备和柔性潜力，但效率上限、长期稳定性和大面积一致性仍需提升；钙钛矿/晶硅叠层通过宽带隙钙钛矿顶电池吸收短波光、晶硅底电池吸收长波光，实现对太阳光谱的分段利用，是当前产业界最关注的工程化路径；全钙钛矿叠层具备更高柔性和轻量化潜力，但产业成熟度仍较低；钙钛矿/III-V 叠层则更多面向高效率前沿探索。

图10 钙钛矿叠层电池结构示意图



资料来源：《Stronger together: perovskite: silicon tandem solar cells》，中航证券研究所整理

晶硅-钙钛矿叠层太阳能电池依据电学端子结构与子电池连接方式可分为两端（2T）、三端（3T）和四端（4T）三种基本架构。该分类方式决定了上下子电池的电学耦合程度、电流匹配要求、器件复杂度以及系统集成成本。

两端（2T）硅-钙钛矿叠层结构及特征：两端（2T）硅-钙钛矿叠层结构中，钙钛矿顶电池被直接沉积在硅底电池之上，上下子电池在电学上以串联方式连接。二端单体集成结构对器件提出了子电池之间良好电学耦合与合适光透过性的要求，其中电学耦合允许电子从钙钛矿顶电池的电荷传输层隧穿进入硅底电池的 p 型发射极。晶硅企业普遍选择 2T 路线，隆基、晶科、通威、正泰等研发效率均>32%，但量产仍受面积放大、钙钛矿长期稳定性以及电流匹配窗口窄等挑战。

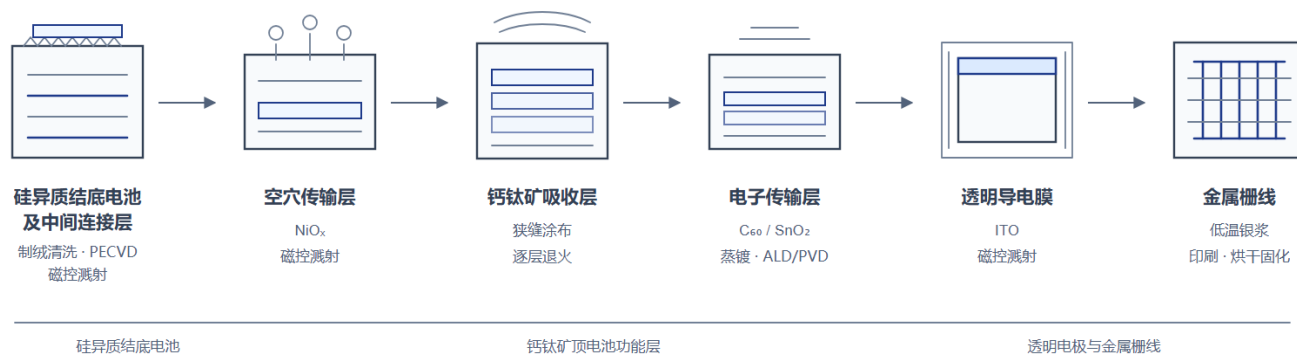
三端（3T）硅-钙钛矿叠层结构及特征：三端（3T）硅-钙钛矿叠层结构是一种在器件中引入三个电极端子的叠层构型。该结构中，顶电池与底电池在极性上既非反向，也非相同极性，器件前表面设有一个端子，后表面设有两个端子。爱旭、华晟等企业已跑通 100MW 级中试线，目标组件平均效率 28-30%，但设备与技术成本仍高于 2T，需要规模化验证经济性。

四端（4T）硅-钙钛矿叠层结构及特征：四端（4T）硅-钙钛矿叠层结构是通过将两种分别独立制备的太阳能电池进行机械堆叠而形成的叠层器件。该结构中，共设置四个电极作为输出端，电极材料需要在宽光谱范围内具备较低的寄生吸收。由于上下子电池的电能不能被独立提取，四端器件的一个重要特征是各子电池能够分别在其最大功率点下运行。协鑫、纤纳等钙钛矿初创公司率先推进 4T 组件，度电成本与高端晶

硅持平，市场仍以“钙钛矿玻璃+常规晶硅背板”轻量叠层示范为主。

以钙钛矿/晶硅叠层电池为例，其制备流程亦可大致概括为：底电池与 TCO 制备，传输/复合层制备，钙钛矿吸收层成膜，顶电极与栅线制备，封装与互连，空间环境验证。

图11 钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池制备工艺流程



资料来源：中航证券研究所整理

表13 钙钛矿/晶硅叠层太阳能电池制备工艺流程

流程	具体工艺	关键设备
硅异质结底电池及中间连接层制备	对 N 型单晶硅片进行制绒清洗；采用 PECVD 在硅片正、背面沉积本征及掺杂非晶硅层，并在正面形成纳米晶硅中间连接层；在背面沉积 ITO 透明导电膜	制绒清洗设备、PECVD 设备、磁控溅射设备
空穴传输层制备	在中间连接层表面采用磁控溅射方式沉积 NiO_x 空穴传输层	磁控溅射设备
钙钛矿吸收层制备	在空穴传输层表面采用狭缝涂布方式依次制备钙钛矿吸收层；各层涂布后分别进行退火干燥	狭缝涂布设备、退火设备
电子传输层制备	在钙钛矿吸收层表面依次制备 C_{60} 或其衍生物膜层以及 SnO_2 膜层，形成复合电子传输层	真空蒸镀设备、ALD 或 PVD 设备
透明导电膜制备	在电子传输层表面采用磁控溅射方式沉积 ITO 透明导电膜	磁控溅射设备
金属栅线制备	在正面 ITO 透明导电膜及电池背面印刷低温银浆，随后进行烘干和固化，形成正、背面金属栅线电极	丝网印刷设备、烘干及固化设备

资料来源：国家知识产权，《一种硅基异质结钙钛矿叠层太阳电池制备方法》，中航证券研究所整理

我国钙钛矿电池的太空验证在 2026 年取得重要进展。2026 年 5 月，神舟二十三号载人飞船将钙钛矿电池实验材料搭载上行至中国空间站，将首次在空间站开展钙钛矿电池动态服役实验，获取其在真实空间极端环境下的转换效率衰减数据，研究聚焦单结及叠层两类电池材料，为未来低轨卫星、深空探测和月球基地能源系统配置提供关键技术储备。尚翼光电（钧达股份参股）已完成太空环境下钙钛矿材料的第一性原理验证，烁威光电与紫微科技签署战略合作推进在轨验证，协鑫光电计划 2026 年 Q4 通过高空气球完成近太空环境验证。钙钛矿空间验证的加速推进，有助于缩短该路线从实验室效率到工程应用的转化周期。

总的来说，钙钛矿叠层电池的极限效率最高，三结钙钛矿叠层的转换效率理论可达 47%，实际实验室中的转换效率也达到了 35% 以上。其极致轻量化与柔性的特征允许其用于制备超薄、柔性、可卷曲组件，比功率远超砷化镓与 HJT。此外，钙钛矿制造成本更低，材料消耗少，规模化后成本可降至砷化镓的 1/30。

（五）太空光伏技术演进方向明确，但替代并非一蹴而就

总体来看，太空光伏技术路线的演进主线较为清晰：短期以砷化镓多结电池为高可靠基准，中期低轨星座有望带动 HJT 等晶硅路线渗透，长期钙钛矿及叠层电池凭借高效率、高比功率和柔性化潜力打开更大空间。但需要强调的是，太空光伏并不是简单的“新技术替代旧技术”，不同轨道、不同寿命、不同任务价值量和不同成本约束下，技术路线将长期呈现分层共存格局。

表14 三种光伏技术的重要指标对比

维度	砷化镓	HJT	钙钛矿叠层
量产效率	空间用 3—5 结电池标称约 30%，较高水平约 34%	2025 年量产平均效率约 25.9%	尚未形成统一量产效率；认证组件效率最高达到 35.5%
认证研发效率	四结电池在聚光条件下达到 47.6%；单结 GaAs 约 27%	常规大面积 HJT 电池达到 26.92%	晶硅—钙钛矿叠层电池达到 35.5%
成本及产业状态	当前制造成本约 40 美元/W 至 100 美元/W 以上，最低可持续价格约 70—170 美元/W	已实现规模化生产，成本显著低于 III-V，但仍受银浆、透明导电膜和设备投资影响	尚处产业化验证阶段；NREL 美国 3GW 产能模型的最低可持续价格约 0.423—0.428 美元/W
空间应用成熟度	已长期应用于航天任务，抗辐射能力和环境适应性较成熟	地面产业链成熟，但空间应用仍需针对任务环境进行验证	具有高比功率潜力，但长期稳定性和空间辐照耐久性仍待验证
核心优势	抗辐射强、寿命长	性价比高、技术成熟	效率/重量潜力最大
核心劣势	成本高、资源受限	效率上限低	稳定性仍待优化

资料来源：NASA, NERL, 中国光伏行业发展路线图等，中航证券研究所整理

砷化镓多结电池是当前航天领域最成熟的主流路线。其核心优势在于转换效率高、抗辐照能力强、长期在轨验证充分，能够满足高轨通信卫星、深空探测器、空间站、军用航天器等高价值任务对可靠性的严苛要求。对于此类任务而言，任务失败成本远高于电池采购成本，因此高可靠性仍是第一优先级。短期来看，砷化镓多结电池仍将是高轨、深空和长寿命任务的主力方案。

HJT 等晶硅路线则主要受低轨星座批量化需求推动。随着低轨通信星座进入规模化组网阶段，卫星数量快速增加，单星成本控制的重要性显著提升。相较砷化镓路线，晶硅电池具备成熟产业链、低成本、产能充足等优势，其中 HJT 凭借低温工艺、薄片化潜力、温度系数优和双面率高等特点，更契合低轨商业卫星对轻量化和成本控

制的需求。我们认为，HJT 并非在所有航天场景中替代砷化镓，而是更有可能率先在成本敏感、寿命相对较短、批量发射的低轨星座中提升渗透率。

钙钛矿及叠层电池代表太空光伏远期演进方向。钙钛矿材料具备带隙可调、吸光系数高、低温制备、柔性化潜力强等特点，钙钛矿/晶硅叠层则有望突破单晶硅效率上限。对于太空算力、天基太阳能电站、月球基地等远期大功率场景而言，电池的单位质量功率、可展开面积和制造成本将成为关键约束，钙钛矿及叠层路线具备较大潜力。但现阶段该路线仍面临长期稳定性、紫外耐久、热循环可靠性、大面积良率和在轨寿命数据不足等问题，距离大规模商业化仍需持续验证。

因此，太空光伏未来更可能形成 **“高可靠场景 GaAs 主导、低轨批量场景晶硅渗透、远期大功率场景钙钛矿/叠层突破”的分层格局**。技术替代的节奏将取决于三个核心条件：一是新路线能否通过空间环境验证，证明其抗辐照、抗热循环和长期低衰减能力；二是发射成本能否持续下降，使低成本、轻量化路线的系统经济性进一步凸显；三是下游星座、太空算力和空间基础设施能否形成足够规模的真实需求。

表15 光伏技术演进路径

阶段	细分路线	核心驱动	应用场景	技术定位
高可靠阶段	GaAs/III-V 多结电池	高效率、强抗辐照、长寿命	高轨通信、深空探测、空间站、军用航天器	当前航天主流路线
降本渗透阶段	HJT、TOPCon 等晶硅路线	低成本、批量化、薄片化	低轨通信星座、短寿命商业卫星	中期低轨星座重点路线
高比功率阶段	钙钛矿/晶硅叠层、全钙钛矿叠层	高效率、高比功率、柔性化	太空算力、天基太阳能电站、月球基地	远期高潜力路线

资料来源：光伏科学与技术全国重点实验室等，中航证券研究所整理

四、成本拆解测算：从“能用”走向“经济可用”

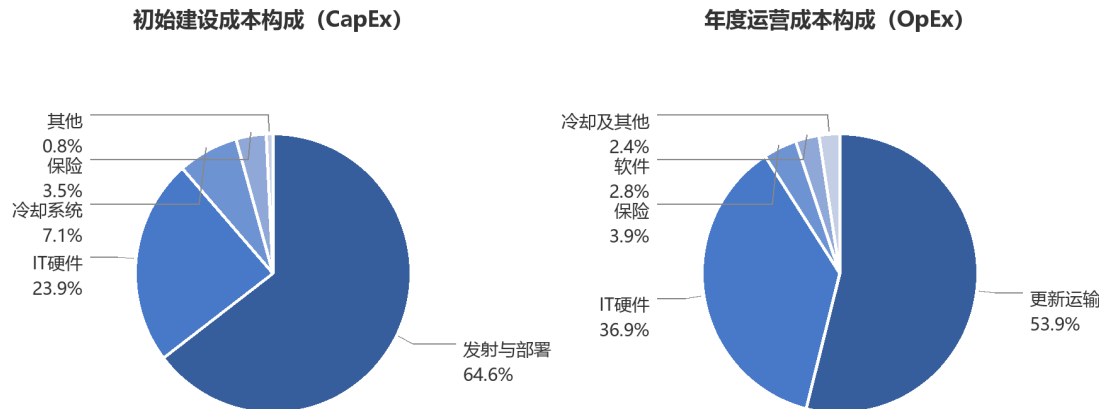
（一）成本结构:单位功率成本是太空光伏商业化的核心约束

太空光伏能否从航天器配套电源走向更大规模应用，核心在于全生命周期经济性能否持续改善。与地面光伏相比，太空光伏并不是简单比较电池片效率或组件价格，而是需要综合考虑发射成本、太阳翼成本、空间平台配套、电源管理、热控系统、在轨寿命和维护替换等因素。我们认为，**太空光伏的商业化拐点，本质上取决于“单位功率入轨成本”和“全生命周期发电/供电成本”能否下降到下游可接受区间。**

从成本构成看，太空光伏系统成本主要包括五部分：第一是发射与轨道部署成本，即将太阳翼、电池、电源管理单元和相关结构送入目标轨道的成本；第二是太阳翼本体成本，包括电池片、柔性或刚性基板、互连片、封装材料、盖片、防护层、展开机构和支撑结构等；第三是电源管理与储能系统成本，包括 PCDU、BMS、变换器、配电柜、储能电池和电缆网等；第四是热控与平台配套成本，包括散热器、热管、导热材料、姿态控制和平台结构适配；第五是在轨测试、冗余、维护和替换成本，主要体

现为长期可靠性、衰减、补网和故障冗余带来的全生命周期成本。

图12 太空光伏成本拆解



资料来源：ESPI，中航证券研究所测算整理

总体来看，太空光伏经济性不能简单以电池片单瓦价格判断，而应以系统级全生命周期成本衡量。发射成本决定部署门槛，太阳翼成本决定技术路线选择，电源管理和热控决定系统稳定性，在轨寿命和运维能力决定长期经济性。后续商业化拐点的出现，将依赖发射降本、轻量化、高比功率、可靠性提升和系统集成能力的共同改善。

（二）关键降本拐点：依赖发射成本、太阳翼比功率与寿命的共同优化

太空光伏的商业化由发射成本、技术路线、组件比功率、在轨寿命、批量制造和应用场景共同决定。对于卫星、空间站、月球基地和太空算力等空间能源闭环使用场景，电力在空间端直接消纳，不需要与地面电价直接竞争；对于太空太阳能电站向地面供能场景，则需要额外承担无线输电、地面接收和并网消纳成本，最终仍需回到度电成本口径与地面能源比较。因此，商业化节奏分为三层：低轨星座率先落地，太空算力中期验证，对地供能远期推进。

总体来看，太空光伏经济性不能简单以电池片单瓦价格判断，而应以系统级全生命周期成本衡量。发射成本决定部署门槛，太阳翼成本决定技术路线选择，电源管理和热控决定系统稳定性，在轨寿命和运维能力决定长期经济性。后续商业化拐点的出现，将依赖发射降本、轻量化、高比功率、可靠性提升和系统集成能力的共同改善。

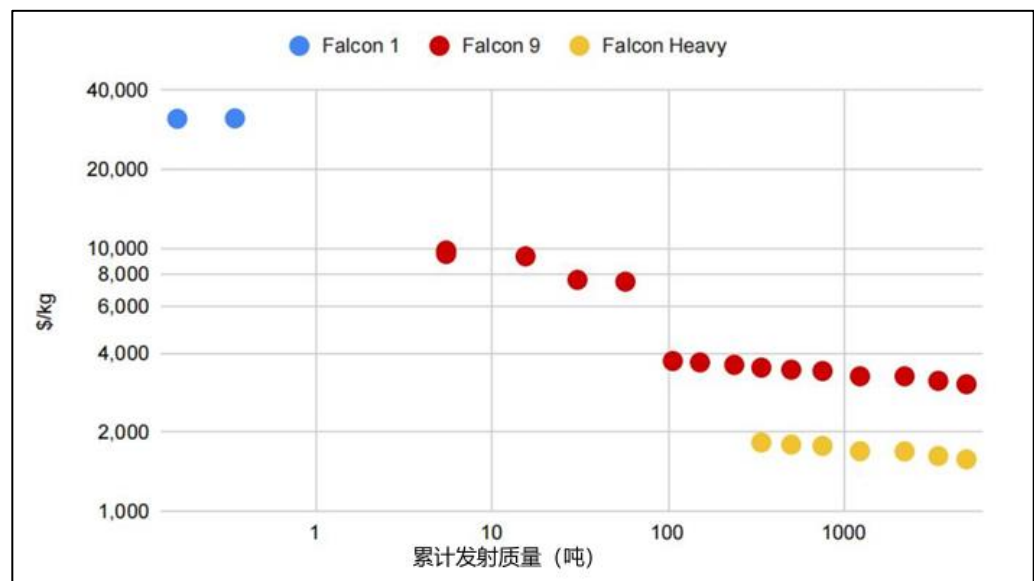
1、发射降本：可重复使用火箭重塑太空光伏经济性边界

发射成本是太空光伏区别于地面光伏的核心变量。地面光伏的成本主要由组件、支架、土地、并网和储能决定，而太空光伏首先要解决“把系统送上去”的问题。对于卫星太阳翼、太空算力平台和远期空间能源系统而言，电池片价格只是成本的一部分，发射质量、折叠体积、展开面积和平台适配能力都会通过发射环节被放大。因此，

发射降本并不是单纯降低运输费用，而是直接改变太空光伏的技术路线选择和商业化边界。

发射成本下降是太空光伏实现规模化的第一性变量。在发射成本较高阶段，航天器更倾向于选择效率高、寿命长、抗辐照能力强的砷化镓多结电池，即使其单瓦成本较高，也可以通过更高效率和更低系统风险抵消部分成本压力。但随着可重复使用火箭成熟、单位入轨成本下降，低轨星座和太空算力平台对“极致可靠性”的要求边际下降，对“低成本、可批量、可快速交付”的要求上升，HJT、TOPCon、钙钛矿/晶硅叠层等低成本路线的经济性开始显现。

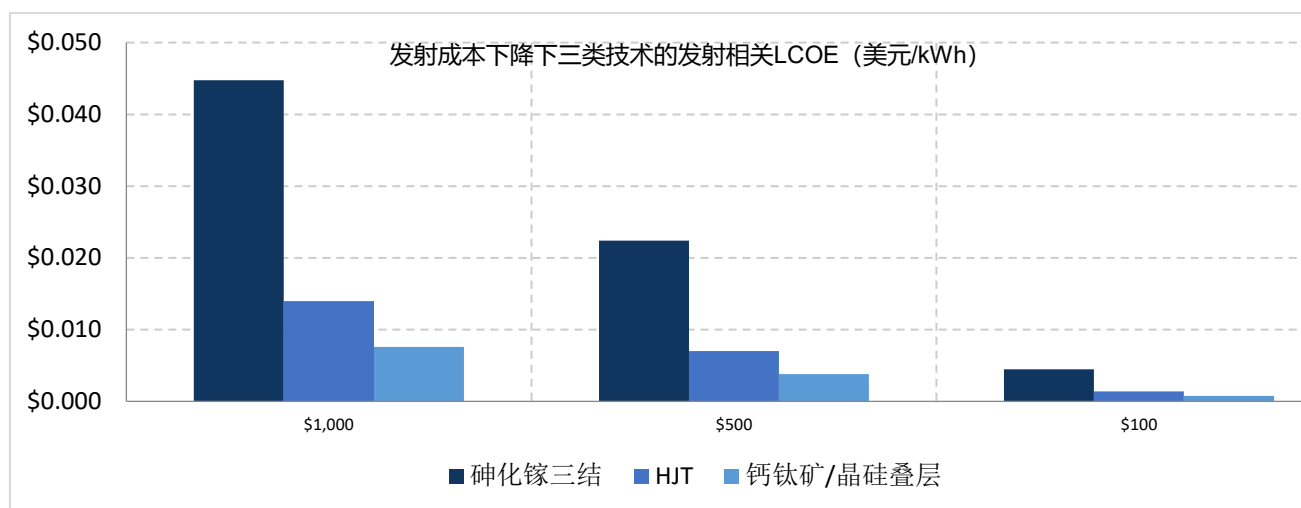
图13 目前 Falcon 系列火箭发射成本



资料来源：《Towards a future space-based, highly scalable AI infrastructure system design》，中航证券研究所整理

从测算结果看，发射成本下降对三种技术路线的发射相关度电成本均具有显著推动作用。在发射单价为 1,000 美元/kg 时，砷化镓三结、HJT 及钙钛矿/晶硅叠层技术的发射相关 LCOE 分别约为 0.045、0.014 和 0.008 美元/kWh；当发射单价降至 500 美元/kg 时，分别下降至约 0.022、0.007 和 0.004 美元/kWh；进一步降至 100 美元/kg 时，则分别约为 0.0045、0.0014 和 0.0008 美元/kWh。总体而言，发射成本每下降 50%，三种技术的发射相关 LCOE 亦近似同比下降；与此同时，更高的比功率能够显著降低单位装机容量对应的发射质量，使 HJT 和钙钛矿/晶硅叠层技术展现出更明显的成本优势，其中钙钛矿/晶硅叠层的发射成本分量最低。需要说明的是，上述结果仅反映发射成本对应的度电成本分量，尚未包含光伏阵列制造、结构、储能、电源管理、热控、平台及运维等成本，因此不代表完整在轨供电系统的 LCOE。

图14 发射成本下降带动典型光伏技术度电成本下行



资料来源：NASA, university of surrey 等，中航证券研究所测算整理

从海外进展看，SpaceX 仍是可重复使用火箭技术演进的核心推动者。Starship 正处于持续迭代验证阶段，后续版本在近地轨道运力、复用频次和发射成本方面均被寄予较高预期。若完全复用能力逐步兑现，重型火箭的单位入轨成本有望较传统一次性火箭显著下降，并使大规模空间基础设施部署具备经济可行性。对于太空光伏而言，低成本、高频次运力并非单纯的运输环节优化，而是决定空间能源系统能否规模化铺开的关键前提。只有当大质量载荷能够以更低成本持续送入轨道，低轨星座补网、太空算力平台和远期大功率空间能源系统对太阳翼及电源系统的需求才有望真正释放。

国内方面，可重复使用火箭也已进入从试验验证走向工程化突破的关键阶段。以蓝箭航天朱雀三号、长征系列可重复使用火箭以及多家民营商业火箭为代表，国内中大型液体火箭正围绕垂直起降回收、发动机重复使用、箭体结构轻量化和低成本批量制造展开密集验证。长征十号乙发射成功并完成回收验证，进一步强化了我国可复运载能力加速成熟的产业预期。随着国内可复用火箭技术持续推进，发射成本下降和发射频次提升有望为低轨星座组网提供更强运力支撑，并通过降低单位功率入轨成本，打开太空光伏从小批量航天配套走向批量化空间能源系统的应用空间。

总体来看，发射降本将对太空光伏产生三重影响：第一，降低单位瓦入轨成本，使低轨星座太阳翼从“小批量高可靠”走向“批量化交付”；第二，改变技术路线权衡，使 HJT、TOPCon 等晶硅路线在低轨星座中具备更强性价比；第三，打开太空算力和大型在轨平台的功率需求，使太空光伏从卫星配套电源升级为空间基础设施底座。

2、轻量化与高比功率：系统减重放大发射降本效应

轻量化与高比功率是连接“技术降本”和“发射降本”的核心桥梁。当发射成本处于高位时，高效率、高可靠的砷化镓路线具备优势，因为其可以在有限面积和质量约束下提供更稳定的功率输出；而随着低轨星座和太空算力对大面积、批量化太阳翼需求提升，单纯追求最高效率并不一定是最优选择。若某一技术路线能够在满足任

务寿命和环境适应性的前提下显著降低质量，即使其初始效率略低，也可能通过节省发射质量和结构件重量实现系统层面的成本优势。

从技术路线看，三类方向分别对应不同的轻量化逻辑。砷化镓多结电池效率高、抗辐照强，传统刚性方案可靠性突出，但受衬底、盖片和支撑结构影响，系统轻量化空间有限；柔性砷化镓通过薄膜外延、衬底剥离和柔性基底，可显著提升单位质量输出能力，适合高价值、长寿命且对比功率要求高的任务。晶硅路线中，HJT 和 TOPCon 可依托地面光伏产业链实现规模制造，其中 HJT 具备低温工艺、对称结构和薄片化优势，硅片厚度可向 50-100 μm 方向压缩，更适合柔性太阳翼和低成本大面积部署。钙钛矿及钙钛矿/晶硅叠层电池则具备薄膜化、柔性化和高理论效率潜力，是远期高比功率路线的重要候选。

表16 典型太空光伏技术轻量化与比功率特征对比

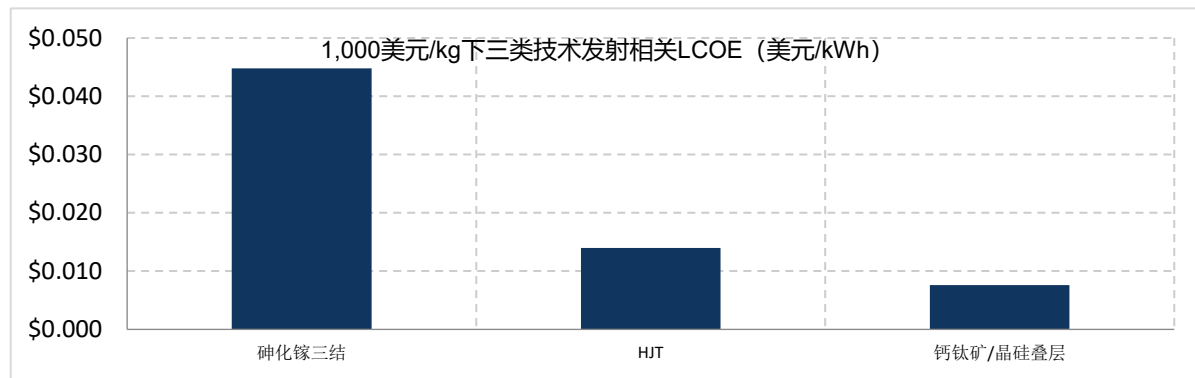
技术类别	轻量化特征	比功率
刚性砷化镓多结电池	结构可靠，但衬底和盖片带来重量约束	中等，系统可靠性优先
柔性砷化镓电池	薄膜外延、柔性基底、可卷展	高，兼具效率和可靠性
PERC/TOPCon 晶硅	成本低、供应链成熟，但轻量化能力取决于薄片化和封装	中等，适合成本敏感任务
HJT 晶硅	低温工艺、薄片化潜力强，可适配柔性太阳翼	较高，兼具成本和轻量化优势
钙钛矿/晶硅叠层	薄膜化、柔性化、高理论效率	高，是远期高比功率候选路线

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》，王凯、王训春、钱斌、马聚沙、陆剑峰，《减薄柔性三结砷化镓太阳能电池》，赵宇、肖志斌、许军、韩志刚等，中航证券研究所整理

高比功率的意义体现在降低发射摊销成本。对于同样 1kW 功率需求，如果太阳翼系统质量下降，则发射成本、展开机构重量和平台结构负担同步下降。以柔性砷化镓太阳翼为例，维持 1kW 卫星在轨运行所需太阳翼和制造成本约 125 万元，对应单瓦太阳翼成本 1200 元以上。该结果说明，当前高可靠空间电源系统仍具备较高成本属性，若未来通过更轻的基底、更薄的电池、更高效率叠层和更少结构件实现系统减重，单位功率成本仍有较大下降空间。

高比功率决定大型平台和太空算力的可扩展性。传统卫星功率需求多在百瓦至千瓦级，太阳翼面积和重量尚可由整星平台承载；但太空算力、空间站扩展舱、月面基地和远期空间能源系统的功率需求可能提升至兆瓦级。此时，系统重量和展开面积将成为约束条件。钙钛矿及钙钛矿/晶硅叠层电池 AMO 效率远期可达 30%-45%，并具备柔性、折叠和高能质比潜力，更契合太空场景对高功率密度和大面积展开的长期需求。

图15 比功率提升带动典型光伏技术度电成本下行



资料来源：NASA，university of surrey 等，中航证券研究所测算整理

3、在轨寿命与运维成本：可靠性决定全生命周期经济性

太空光伏不是一次性发电设备，而是航天器电源系统的核心组成部分。在轨运行期间，太阳翼需要长期暴露于高能粒子辐照、紫外照射、冷热循环、原子氧侵蚀和微流星体冲击等复杂环境中，任何衰减超预期或局部失效都可能影响卫星平台、空间站、深空探测器或太空算力平台的任务寿命。因此，太空光伏降本不能只看初始成本，必须同时考量在轨寿命和可靠性。

在轨寿命是决定技术路线替代节奏的核心约束。砷化镓多结电池之所以长期占据航天主流，并非仅因效率更高，更重要的是其在空间环境中积累了充分的飞行验证数据，具备较强抗辐照能力和低衰减特征。对于高轨通信卫星、深空探测和空间站等高价值任务，太阳翼一旦失效将难以维修，任务损失远高于电池初始成本，因此成熟可靠的砷化镓路线仍具备不可替代性。

从现有技术特征看，HJT 具备一定空间适配潜力。其低温工艺有利于薄片化和柔性化，对称结构和较低温度系数有助于提升复杂温度环境下的输出稳定性。此前光伏产业路线图显示，HJT 地面量产效率持续提升，且硅片薄片化趋势明确，为其向太空场景迁移提供了产业基础。但需要看到，地面可靠性并不等同于空间可靠性，太空 HJT 仍需通过带电粒子辐照、热真空循环、紫外暴露、原子氧侵蚀和长期在轨试验，才能真正进入大规模星座供应体系。

而钙钛矿及钙钛矿/晶硅叠层电池的寿命验证更为关键。该路线具备高比功率、柔性化、低成本和高理论效率等优势，但稳定性仍是产业化主要短板。因此，钙钛矿技术在太空光伏中的落地趋势更可能是先从低风险、短寿命、技术验证型在轨任务切入，再逐步走向更高价值、长寿命平台。

4、商业化时间表：低轨星座率先放量，太空算力接力成长

太空光伏商业化的本质，是在不同应用场景下找到“性能、成本、寿命、可靠性”的最优组合。前文从成本结构、发射降本、轻量化与高比功率、在轨寿命与可靠性四

个维度展开分析，可以看到太空光伏并不存在统一的商业化时间点，也不存在单一技术路线能够覆盖全部市场。低轨星座、高轨卫星、太空算力、月面基地和对地供能型空间太阳能电站，对成本和可靠性的要求不同，因此落地节奏也将明显分化。

我们认为，太空光伏商业化将遵循“低轨星座先行、太空算力接力、空间能源基础设施远期打开”的路径。低轨通信星座是当前最现实的放量场景，核心逻辑是卫星数量快速增长、单星寿命相对较短、成本敏感度高，HJT 等晶硅路线有望在满足任务寿命的前提下，通过低成本和规模化制造提升渗透率。太空算力则是中期最具弹性的增量场景，其能否落地取决于发射成本、功率密度、算力载荷效率和在轨热控能力共同改善。对地供能型空间太阳能电站则因需要无线输电、地面接收和并网消纳，商业化时间更靠后。

第一阶段为 2026-2030 年，低轨星座推动太空光伏从“小批量高可靠”进入“批量化交付”。在该阶段，中国星网、千帆星座、Starlink、Kuiper 等低轨星座建设进入密集窗口，太阳翼需求由型号配套向批产交付转变。砷化镓多结电池仍将服务高轨、深空和高可靠任务，但在低轨星座场景中，HJT、TOPCon 等晶硅路线有望凭借成本优势率先导入。商业化标志不是度电成本低于地面光伏，而是低成本路线完成在轨验证，并在批量星座订单中形成稳定交付。

第二阶段为 2030-2035 年，太空算力带动功率需求从千瓦级向兆瓦级提升。与通信卫星相比，太空算力平台对电力需求更大，对轻量化、高比功率和系统集成能力要求更高。在发射降价和功率密度提升推动下，1GW 太空数据中心部署成本有望由 2026 年的地面数据中心 6.7 倍下降至 2032 年的 2.6 倍，优化情景下接近 1.4 倍。若该阶段 HJT/TOPCon 的在轨可靠性得到验证，钙钛矿/晶硅叠层完成更长周期在轨试验，太空光伏需求有望由卫星配套电源升级为空间算力基础设施电源。

第三阶段为 2035-2040 年，大型在轨平台、月面能源和空间能源系统进入示范应用窗口。该阶段的关键不只是电池片降本，而是模块化能源系统、在轨组装、在轨维护、储能协同和电源管理体系成熟。月球基地、商业空间站、大型在轨制造平台等场景需要长期、稳定、可扩展的能源供给，对寿命、冗余和可维护性要求更高。砷化镓、HJT、钙钛矿/晶硅叠层可能长期并存：砷化镓负责高可靠和极端任务，HJT/TOPCon 负责成本敏感和批量化需求，钙钛矿叠层则在高比功率和大面积展开场景中逐步提高渗透率。

表17 太空光伏商业化落地时间表

时间	商业化状态	核心降本变量	主导技术路线	主要应用场景
2026-2030 年	低轨星座批量交付	晶硅路线降本、星座批量制造、发射成本下降	砷化镓+HJT/TOPCon	LEO 通信星座、短寿命商业卫星
2030-2035 年	太空算力经济性验证	发射成本接近数百美元/kg, 功率密度提升，系统集成成熟	HJT/TOPCon+钙钛矿叠层验证	太空算力、在轨数据中心、大功率平台

2035-2040 年	大型空间能源系统示范	发射成本大幅降低, 寿命提升、在轨维护、模块化能源系统协同进步	砷化镓、HJT、钙钛矿叠层并存	月面基地、商业空间站、大型在轨平台
-------------	------------	---------------------------------	-----------------	-------------------

资料来源：国际科技创新中心，新华网，中航证券研究所整理

总体来看，太空光伏降本的关键不在于某一年突然实现商业化，而在于应用场景逐步外扩：先在低轨星座中证明低成本路线可批量交付，再在太空算力中验证高功率空间闭环能源经济性，最后才有望走向对地供能型空间能源基础设施。短期看，低轨星座是确定性基本盘；中期看，太空算力是弹性来源；长期看，SBSP 是远期天花板。对投资人而言，现阶段更应关注能够在 2026-2030 年兑现订单的设备、材料和低成本电池环节，同时跟踪 2030 年前后发射成本、在轨寿命和太空算力项目进展三大验证信号。

五、市场空间：低轨星座驱动短期放量，太空算力打开万亿市场空间

当前及未来发射的高价值卫星（GEO 通信、深空探测）仍以砷化镓为主；而规模急剧增长的低轨星座（如星链）和太空算力星座，主要采用 HJT 或其他晶硅电池技术路线（星链 V1 至 V3 卫星据报道部分采用基于地面商用晶硅电池进行抗辐射、耐温差等太空适应性封装的方案）；再远期钙钛矿电池市场渗透率则有望明显提高。

（一）低轨星座：组网部署与持续补网构成太空光伏近期需求基本盘

目前各国向国际电信联盟 ITU 提交的星座计划总规模非常庞大，全球已申报低轨卫星总数超 10 万颗，其中美国约 4.5 万颗，SpaceX 规划 4.2 万颗领跑；中国约 5.3 万颗，规模靠前的有千帆、国网、鸿鹄三号、吉利未来出行等星座。而当前近地轨道在轨活跃卫星仅 1.2-1.3 万颗，这意味着未来五年全球或将有超过 7 万颗低轨卫星发射升空，数万颗规模的星座申报及发射入轨将直接转化为对高性能光伏电池的刚性需求，未来空间可观。

国内低轨卫星发射量预计由 2026 年的 2,000 颗提升至 2030 年的 6,000 颗、2035 年的 1 万颗，海外同期分别达到 5,000 颗、1.4 万颗和 2 万颗；伴随通信载荷升级，单星功率由 25kW 提高至 45kW 和 60kW。据此，国内需求由 0.05GW 提升至 0.60GW，海外需求由 0.125GW 提升至 1.20GW，对应 2035 年市场空间分别约 223.56 亿元和 447.12 亿元。海外市场凭借 Starlink、Amazon Leo 等星座的领先部署仍占主导，但中国星网、千帆星座加速组网，有望推动国内占比持续提升。

表18 全球主要低轨星座（LEO）发射计划

项目名称	公司/运营方	总规划	发射计划	在轨卫星数
国网	中国星网集团	约 1.3 万	GW-A59:6080 颗 GW-2:6912 颗	136
千帆（G60）	上海垣信卫星科技有限公司	超 1.4 万	2027:1296 颗 2030:1.2 万颗	108
HONGHU-3	蓝箭鸿擎科技集团公司	1 万	2024 年提交申请	0
吉利未来出行	吉利	6012	第一阶段 72 颗 第二阶段 264 颗 第三阶段 5676 颗	64
Starlink	SpaceX	历史申报目标约 42,000 颗	持续分批部署	约 9400
Amazon Leo	Amazon	3236	2029:完成部署	180
Outernet	Rivada Networks	约 600	2027 年底完成部署	0

资料来源：FCC，人民日报、证券时报、吉利控股、Rivada Space Networks 等，中航证券研究所整理

（二）太空算力：能源约束重塑算力基础设施，驱动太空光伏远期弹性放大

太空算力场景下，SpaceX/xAI 是最激进的推动者，其 AI1/Gigasat 方案被媒体披露为单星计算载荷平均功率约 120kW、峰值约 150kW，并规划建设 Gigasat 工厂，目标在 2027 年底形成约 1GW/年的太空 AI 算力部署能力，远期向 2030 年百 GW 级扩张。国内方面，国星宇航、之江实验室等已发射“三体计算星座”首批 12 颗卫星，其远期规划约 2800 颗卫星，目标形成 POPS 级在轨计算能力。总体来看，海外以 SpaceX 为代表推进更激进，国内则以星上智能、遥感数据在轨处理和示范星座为切入点，太空算力若从验证走向规模化部署，将显著抬升太空光伏的远期功率需求。

2030 年预计算力卫星单星功率约 100kW，国内、海外分别等效部署 5 万颗和 15 万颗，对应能源需求 5GW 和 15GW；到 2035 年单星功率提升至 200kW，国内、海外分别等效部署 12.5 万颗和 37.5 万颗，对应需求 25GW 和 75GW。由此测得 2030 年国内、海外市场空间约 3,160.50 亿元和 9,481.50 亿元，2035 年分别达到 9,315 亿元和 2.79 万亿元。

表19 全球主要算力卫星部署计划

项目名称	公司/运营方	部署规划	发射计划	验证进展
三体计算星座	之江实验室	规划约 2,800 颗卫星，远期目标 1,000POPS 级太空计算能力	2025 年 5 月 14 日发射首批 12 颗太空计算卫星；后续批次节奏尚未完全披露	136 颗

星算计划	国星宇航	2,800 颗 AI 智算卫星	公司招股书披露计划 2028 年前发射首批 100 颗	0
SpaceX Gigasat/AI1	SpaceX/xAI	向 FCC 申请最多 100 万颗	计划 2027 年末开展验证, 正式部署最早 2028 年	未公开披露入轨数量
Project Suncatcher	Google	未披露总规划	2027 年发射两颗验证星	0
Starcloud	Starcloud/Crusoe/NVIDIA	向 FCC 申请最多 88,000 颗; 远期待约 5GW	向 FCC 申请 8.8 万颗轨道数据中心卫星	0
TeraWave	Blue Origin	5,408 颗	2027 年第四季度开始部署	0

资料来源：路透社，Google 官方公告，FCC，Starcloud，Blue Origin 官方公告等 中航证券研究所整理

(三) 中高轨卫星：高价值长寿命任务支撑高可靠电源稳定需求

高轨通信、导航与气象等卫星后续补网、技术试验卫星、深空探测器等每年新增数量有限。若按未来 10 年累计 50-100 颗高价值航天器、单星功率 5-15kW、单位功率价值量 500-1000 元/W 测算，对应累计光伏功率约 0.25-1.5MW，累计价值量约 1-15 亿元，该部分市场规模明显低于低轨星座。

表20 全球主要中高轨卫星（MEO&GEO）发射计划

项目名称	公司/运营方	总规划	发射计划	在轨卫星数
卫星互联网高轨卫星	中国星网集团	总规模未披露，作为卫星互联网高轨补充层	2024 年已发射 01 星、02 星、03 星，后续节奏未完全披露	3
中星系列通信广播卫星	中国卫通	滚动替换与扩容，覆盖通信、广播电视、高通量宽带等	2025 年发射中星 10R，2027 年规划中星 27 等后续星	多颗中星系列 GEO 卫星在轨
北斗四号	中国卫星导航系统	2035 年前后建成下一代北斗系统，延续“中轨+高轨”混合架构	2027 年规划北斗四号试验星，2029 年前后开始组网星发射	北斗三号全球系统在轨共约 30 余颗
风云四号后续星	中国气象局/航天科技	地球静止轨道气象卫星滚动组网	FY-4F 规划 2030 年前后，FY-4G 规划 2033 年前后	风云四号系列多颗在轨
SES O3b mPOWER	SES	规划 13 颗 MEO 高通量卫星	已发射多批，剩余卫星计划 2026 年底前后完成部署	已有多颗投入服务，向 13 颗扩展
GPS IIIF	USSF	最多 22 颗 GPS IIIF 下一代导航卫星	2027 年起开始发射，预计持续至 2030 年代后期	0

Galileo Second Generation	欧盟/ESA/EUSPA	12 颗二代 Galileo 卫星	2027 年前后开始部署	0
---------------------------------	--------------	----------------------	--------------	---

资料来源：国家航天局、工信部、国家卫星气象中心、SES、ESA 等，中航证券研究所整理

（四）深空设施：月球基地、空间站与深空任务打开远期增量空间

更远期的，空间站扩展、载人登月、月球科研站及深空探测任务方面。该类项目仍以示范和阶段性建设为主，整体来看，市场短期体量不大，但代表太空光伏从“卫星配套电源”走向“空间设施能源系统”的长期方向。

对空间站、月球基地和深空探测任务，本报告采用等效项目数量测算。假设单项目光伏功率由 2026 年的 100kW 提升至 2030 年的 500kW 和 2035 年的 1MW，国内等效部署数量分别为 2、2 和 3 个，海外分别为 5、6 和 10 个。据此，2035 年国内、海外需求分别达到 3MW 和 10MW，对应市场空间约 1.12 亿元和 3.73 亿元。海外在商业空间站和 Artemis 计划方面布局更早，市场规模相对领先；国内载人登月、空间站扩展及深空探测任务则构成稳定增量。

表21 全球主要深空设施部署计划

项目名称	牵头方	规划/建设内容	时间表/进展	意义
中国空间站扩展	中国载人航天工程/航天科技集团	现有三舱基本构型 后续可扩展至六舱，远期规模可达约 180 吨；	中国空间站已建成运行；后续扩展舱段、巡天望远镜等按任务节奏推进	属于长期在轨高可靠电源需求，太阳翼、储能、电源控制和在轨维护价值量较高
载人登月工程	中国载人航天工程	研制梦舟载人飞船、揽月着陆器、长征十号等系统，支撑载人月球探测	目标 2030 年前实现中国人首次登陆月球	从一次性探测向月面能源基础设施过渡，推动高可靠轻量化太阳翼和月面储能需求
天问二/三/四号	中国国家航天局	小行星采样/火星采样/木星系及外行星探测	计划 2027 年返回/计划 2028 年前后发射/计划 2029 年前后发射	高价值深空任务，对电源系统可靠性和冗余设计要求高，偏向成熟高可靠路线
商业近地空间站	NASA CLD、Axiom、Starlab、Orbital Reef、Vast 等	NASA 推动商业空间站接替 ISS 部分科研和商业功能；	NASA 支持商业空间站分阶段开发；Haven-1、Axiom、Starlab 等计划在 2027-2030 年前后陆续验证	近地空间站是高可靠太阳翼和电源系统持续需求来源，平台级功率高于一般卫星
Artemis 月球基地	NASA 及 Artemis 伙伴	围绕月球南极建设载人登月、月面交通、栖居舱、月面电力和科研设施	2028 年前后重启载人月面任务，2030 年代推进半永久月面存在	月面基地对能源系统需求长期化，太阳翼、储能、核电/光伏互补、热控和电源管理需求提升

Russian Orbital Station	Roscosmos	俄罗斯后 ISS 时代独立空间站规划	规划 2028-2035 年分阶段建设，节奏存在不确定性	若按计划推进，将形成高可靠空间站电源需求
Dragonfly	NASA/APL	核动力旋翼探测器，研究土卫六有机化学和宜居性	计划 2028 年发射，2034 年抵达土卫六	该任务主要依靠核电，但体现深空设施对长期能源系统的高可靠需求

资料来源：中国载人航天工程，国防部，国家航天局，NASA 等，中航证券研究所整理

（五） 总结：多场景需求共振，太空光伏远期市场空间稳步迈入万亿级

产品价格和销售额层面，随着三结砷化镓和 HJT 产能扩大、钙钛矿电池技术成熟，各技术路线电池价格均有望显著降低。但由于砷化镓电池价格远远高出晶硅和钙钛矿电池价格，未来市场可能呈现晶硅电池装机量和销售额占优、砷化镓电池在高可靠高价值任务中保持较高单瓦价值的格局。

整体来看，2026 年太空光伏需求仍主要来自低轨星座和中高轨卫星，全球总需求约 0.18GW，对应市场空间约 572 亿元；2030 年后，随着太空算力进入规模化验证阶段，全球需求有望提升至约 20.90GW，对应市场空间约 1.32 万亿元；到 2035 年，若太空算力进一步放量，全球太空光伏需求有望达到约 101.81GW，对应市场空间约 3.79 万亿元，其中国内市场约 9539.74 亿元，海外市场约 2.84 万亿元。

表22 太空光伏市场空间估算

项目	2026E	2030E	2035E
低轨卫星			
国内需求 (GW)	0.05	0.27	0.6
海外需求 (GW)	0.125	0.63	1.2
全球需求(GW)	0.175	0.9	1.8
中高轨卫星			
国内需求 (GW)	0.00006	0.00012	0.00018
海外需求 (GW)	0.00038	0.00063	0.00090
全球需求	0.00044	0.00075	0.00108
深空设施			
国内需求 (GW)	0.00020	0.00100	0.00300
海外需求 (GW)	0.00050	0.00300	0.01000
全球需求	0.00070	0.00400	0.01300
算力卫星			
国内需求 (GW)	0	5	25
海外需求 (GW)	0	15	75
全球需求(GW)	0	20	100
国内总需求(GW)	0.05026	5.27112	25.60318

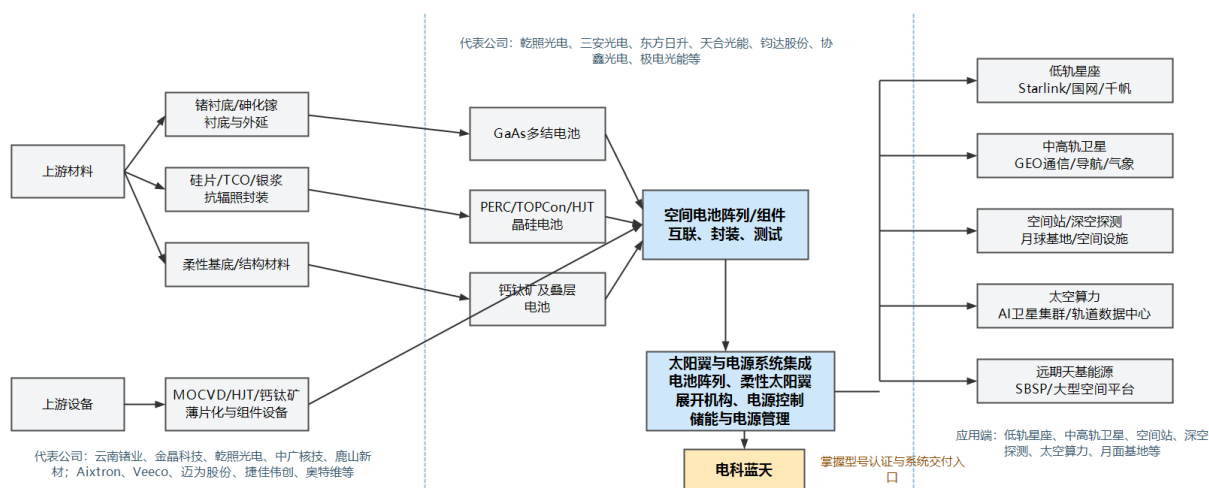
海外总需求(GW)	0.12588	15.63363	76.21090
全球总需求(GW)	0.17614	20.90475	101.81408
砷化镓渗透率	25%	3%	2%
HJT 电池渗透率	75%	90%	85%
钙钛矿渗透率	0%	7%	13%
砷化镓单价(元/W)	1000	300	150
HJT 单价(元/W)	100	60	40
钙钛矿单价(元/W)	5	3	2
砷化镓价值 (亿元)	440.35	1,881.43	3,054.42
HJT 价值 (亿元)	132.11	11,288.57	34,616.79
钙钛矿价值 (亿元)	0.00	43.90	264.72
国内总价值 (亿元)	163.35	3,331.87	9,539.74
海外总价值 (亿元)	409.11	9,882.02	28,396.18
总价值 (亿元)	572.46	13,213.89	37,935.93

资料来源：中航证券研究所测算整理

六、相关产业公司与竞争格局

太空光生态环境与地面光伏具有一定相似性，但航天场景对可靠性、轻量化、抗辐照、热循环和在轨寿命提出更高要求，使其在材料、设备、封装和系统集成环节形成明显技术壁垒。整体来看，太空光伏相关公司可分为上游核心材料与设备、中游电池片和太阳翼系统、下游卫星及空间基础设施应用三大部分。

图16 太空光伏生态环境



资料来源：中航证券研究所整理

表23 太空光伏生态主要环节

环节	主要内容	代表公司
----	------	------

上游材料	锗衬底、砷化镓外延材料、TCO、低温银浆、抗辐照封装材料、柔性基底	云南锗业、金晶科技、乾照光电、中广核技、鹿山新材等
上游设备	MOCVD、HJT/TOPCon/钙钛矿设备、薄片化设备、串焊设备	Aixtron、Veeco、蓝河科技、中微公司、迈为股份、捷佳伟创、奥特维、高测股份等
中游电池	GaAs 多结电池、PERC/TOPCon/HJT 晶硅电池、钙钛矿及叠层电池	乾照光电、三安光电、东方日升、天合光能、钧达股份、协鑫光电、极电光能等
太阳翼集成	电池阵列、柔性太阳翼、展开机构、电源管理系统	电科蓝天
下游应用	低轨星座、高轨卫星、空间站、深空探测、太空算力、月面基地	Starlink、Kuiper、中国星网、千帆星座、空间站及深空任务等

资料来源：云南锗业，迈为股份，三安光电，东方日升等公司官网，中航证券研究所整理

（一）上游材料与设备：高成本路线看材料壁垒，低成本路线看设备与工艺

太空光伏上游并非单一材料体系，而是随电池技术路线不同呈现明显分化。砷化镓多结电池依赖锗衬底、III-V 族外延和 MOCVD 设备，供应链更接近传统航天高可靠半导体材料体系；PERC/TOPCon/HJT 等晶硅路线依托地面光伏的成熟度，核心在于硅片薄片化、低温工艺、抗辐照封装和空间级可靠性验证；钙钛矿及叠层路线则更依赖 TCO、低温制备设备、阻隔封装、柔性基底和面积一致性控制。我们认为，三类路线的上游差异决定了其产业化节奏：砷化镓胜在成熟可靠，晶硅胜在成本和产能，钙钛矿胜在远期高比功率潜力。

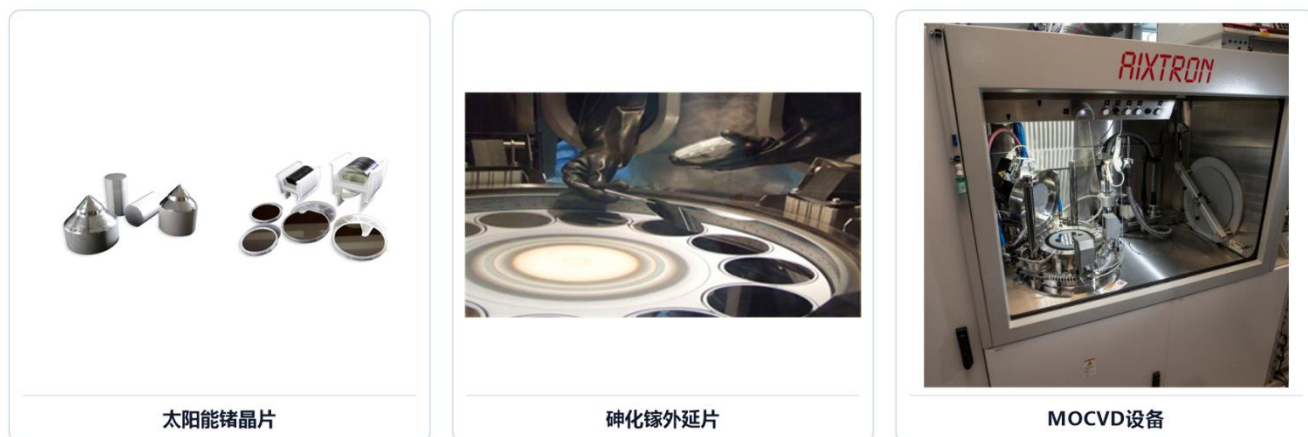
1、砷化镓链：衬底、外延和 MOCVD 构成高可靠路线的核心壁垒

砷化镓/III-V 多结电池是当前航天光伏主流路线，其上游核心包括锗衬底、砷化镓外延材料、MOCVD 外延设备以及空间级盖片、互联片、封装胶膜等材料。该路线本质上是半导体材料体系与航天可靠性体系的结合，技术难点不在于单纯扩大产能，而在于长期保持外延质量、电池一致性、抗辐照能力和批次稳定性。

锗衬底是传统三结砷化镓电池的重要基底，材料纯度、晶体质量和位错控制直接影响后续外延质量及电池转换效率。锗资源本身具备一定稀缺性，且航天级衬底对晶体完整性要求更高，使得衬底环节具备资源和工艺双重壁垒。国内相关企业包括云南锗业等，海外则有 Umicore 等成熟供应商。

外延环节是砷化镓电池性能的核心。多结电池通常通过 GaInP/GaAs/Ge 等多层结构分段吸收太阳光谱，外延层厚度、组分、界面质量和晶格匹配均会影响最终效率和抗辐照性能。乾照光电、三安光电等企业在 III-V 族半导体外延和电池制造方面具备布局，电科蓝天、上海空间电源研究所等则在宇航电源产品和系统应用方面具备长期积累。

图17 砷化镓上游原材料及加工设备



资料来源：云南锗业，乾照光电，MIT Lincoln Laboratory 官网，中航证券研究所整理

设备端，MOCVD 是 III-V 族外延生长的关键设备，长期由 Aixtron、Veeco 等海外厂商占据主要份额。国产设备企业正在推进相关领域替代，但从航天级产品角度看，设备稳定性、批次一致性和客户验证周期仍是关键约束。因此，砷化镓链条的投资逻辑更偏“高可靠、小批量、高壁垒”，适用于高轨通信、导航卫星、深空探测、空间站等对任务成功率要求高的场景。

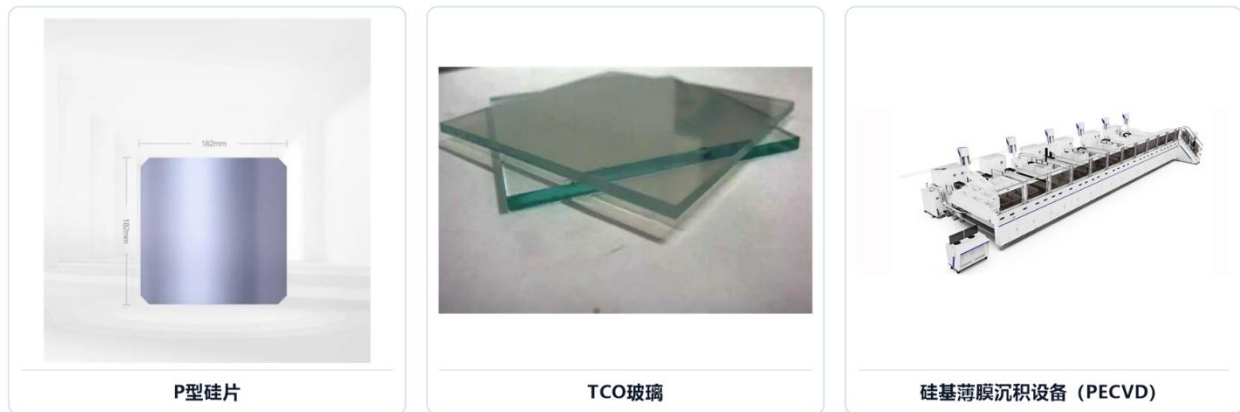
2、晶硅链：地面光伏成熟制造能力向低轨商业航天外溢

晶硅路线的上游基础来自地面光伏生态链，包括硅片、电池设备、TCO、银浆、焊带、封装胶膜、抗辐照材料和薄片化加工设备等。与砷化镓链条相比，晶硅路线最大的优势在于产业基础成熟、设备国产化程度高、供应链规模大、成本下降路径清晰。其进入太空场景的关键不在于“能不能制造”，而在于能否通过抗辐照、热循环、原子氧、紫外暴露和长期在轨稳定性验证。

PERC、TOPCon 和 HJT 均属于晶硅体系，但太空化潜力存在差异。PERC 作为地面光伏成熟路线，成本低、供应链充分，但效率和长期升级空间相对有限；TOPCon 具备较高效率和现有产能基础，适合承接部分低成本空间应用；HJT 则因低温工艺、对称结构、低温度系数和薄片化潜力，受到太空晶硅路线关注。尤其在低轨星座场景中，卫星寿命相对较短、批量化属性强、成本敏感度高，为晶硅路线导入提供了较适合的验证环境。

上游设备方面，HJT/TOPCon 的太空化将带动低温沉积、薄片化、激光加工、串焊、封装和测试设备需求，相关企业包括迈为股份、捷佳伟创、奥特维、高测股份等。材料端，TCO 导电材料、低温银浆、抗辐照封装材料、柔性基底和轻量化结构材料的重要性提升，相关企业包括金晶科技、聚和材料、鹿山新材、中广核技等。硅片和电池环节则可依托隆基绿能、TCL 中环、晶科能源、天合光能、东方日升、钧达股份等地面光伏龙头的制造基础。

图18 晶硅电池上游原材料及加工设备



资料来源：TCL 中环，金晶科技，迈为股份官网，中航证券研究所整理

我们认为，晶硅链条的核心价值在于“低成本制造体系太空化”。若 HJT/TOPCon 等路线能够通过低轨在轨验证，其上游设备和材料企业有望先于电池大规模放量受益，并推动太空光伏从航天专用高价产品逐步走向低轨批量应用。

3、钙钛矿链：远期高比功率路线，核心在材料稳定性和大面积制造

钙钛矿及钙钛矿/晶硅叠层电池是太空光伏远期最具弹性的技术路线之一。相较砷化镓和晶硅电池，钙钛矿材料具备带隙可调、吸光系数高、低温制备、柔性化潜力强和理论效率上限高等特点，尤其适合高比功率、大面积可展开和轻量化太阳翼场景。对于未来太空算力、月面基地、大型在轨平台和空间能源系统而言，钙钛矿路线具备较强想象空间。

但从上游环节看，钙钛矿路线仍处于材料体系和工程化工艺持续验证阶段。其核心上游包括钙钛矿前驱体材料、TCO 导电基底、电子/空穴传输层材料、阻隔封装材料、柔性基底、低温涂布/蒸镀设备、激光划线设备和组件封装设备等。与晶硅不同，钙钛矿不仅要解决效率问题，更要解决水氧稳定性、紫外稳定性、热循环可靠性、大面积均匀性和长期封装失效问题；在太空环境下，还需进一步面对高能粒子辐照、原子氧和真空热循环等约束。

国内钙钛矿生态链已有协鑫光电、极电光能、纤纳光电、万度光能等企业推进中试和产业化，天合光能、隆基绿能等地面光伏企业也在叠层方向持续布局。设备和材料端，TCO、激光设备、封装材料和柔性基底有望成为早期受益环节，金晶科技、捷佳伟创、奥特维、鹿山新材等企业具备相关产业关联。

图19 钙钛矿电池上游原材料及加工设备



资料来源：万度光能，乾照光电，捷佳伟创官网，中航证券研究所整理

我们认为，钙钛矿链条短期更适合视为“远期技术储备”和“在轨验证主题”，不宜过早按照大规模确定性收入测算。但若其在空间环境下完成长期稳定性验证，并与晶硅形成叠层路线，未来有望在太空算力和大型空间能源平台中承担高比功率方案的重要角色。

（二）中游电池与组件：三类技术线并行，不同场景对应不同最优解

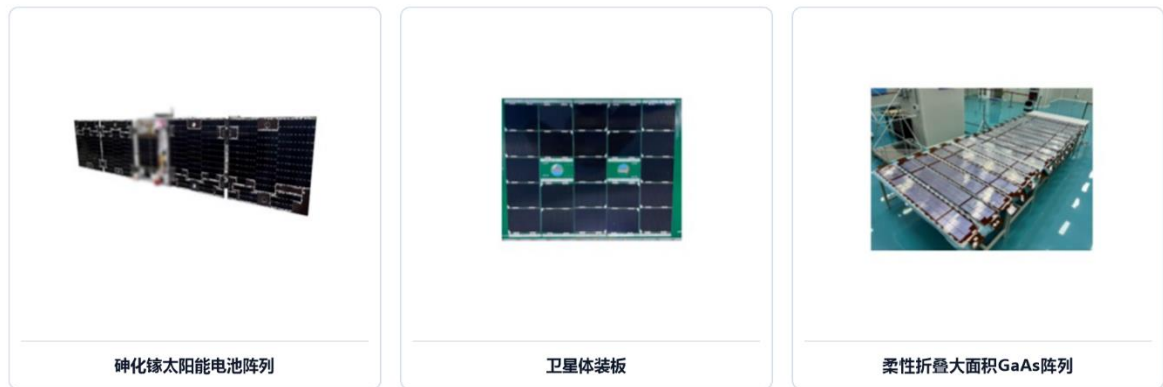
太空光伏中游包括电池制造、空间组件封装、太阳翼集成、展开机构、电源管理和测试验证等环节。与地面光伏不同，太空光伏中游交付的不是普通组件，而是能够适配航天器平台的太空电源系统。电池片效率只是第一步，真正决定能否进入下游型号体系的，还包括抗辐照能力、热循环稳定性、封装可靠性、展开机构可靠性、功率保持率和系统级验证能力。

从技术路线看，中游竞争将呈现三类路线分层格局：砷化镓多结电池继续占据高可靠任务市场；PERC/TOPCon/HJT等晶硅路线率先在低轨批量星座中验证；钙钛矿及叠层电池则面向太空算力和大型空间能源系统提供远期高比功率弹性。

1、砷化镓多结电池：高可靠任务基本盘，系统验证和飞行履历构成壁垒

砷化镓多结电池目前仍是航天器电源系统中最成熟、最可靠的技术路线之一。其优势在于转换效率高、抗辐照性能强、在轨验证数据充分，适用于 GEO 通信卫星、导航卫星、深空探测、空间站、军用高价值卫星等任务。对于此类场景而言，电池成本并非唯一变量，任务寿命、功率保持率和失效风险往往更重要。

图20 砷化镓电池组件



资料来源：上海港湾（伏羲折空）官网，中航证券研究所整理

中游环节中，砷化镓电池制造需要经过外延片加工、电池制备、减薄、互联、盖片粘接、抗辐照封装和空间环境测试等流程。由于航天器长期处于不可维修或难维修环境，客户对产品一致性和飞行履历要求较高，认证周期较长，新进入者难以快速突破。国内相关参与者包括乾照光电、三安光电、电科蓝天、上海空间电源研究所等，海外则包括 Spectrolab、SolAero、AZUR SPACE 等。

从全球竞争格局看，空间用砷化镓光伏电池长期由少数海外头部企业主导，行业集中度较高。Spectrolab、SolAero、AZUR SPACE 等企业凭借长期飞行验证、稳定交付能力和航天客户资源，在高可靠空间太阳能电池市场占据重要份额。其中，Spectrolab 作为波音旗下空间电源核心供应商，已形成大规模多结空间太阳能电池制造与交付经验，其三结砷化镓电池效率处于行业领先水平。值得关注的是，海外龙头企业并未局限于传统 III-V 族路线，SolAero 等厂商已开始向硅基及混合太阳翼方案延伸，以适配巨型星座和远期太空数据中心等成本敏感、大功率场景需求，这也表明空间光伏技术路线正在从单一高可靠路线向“高可靠+低成本+高比功率”并行演进。

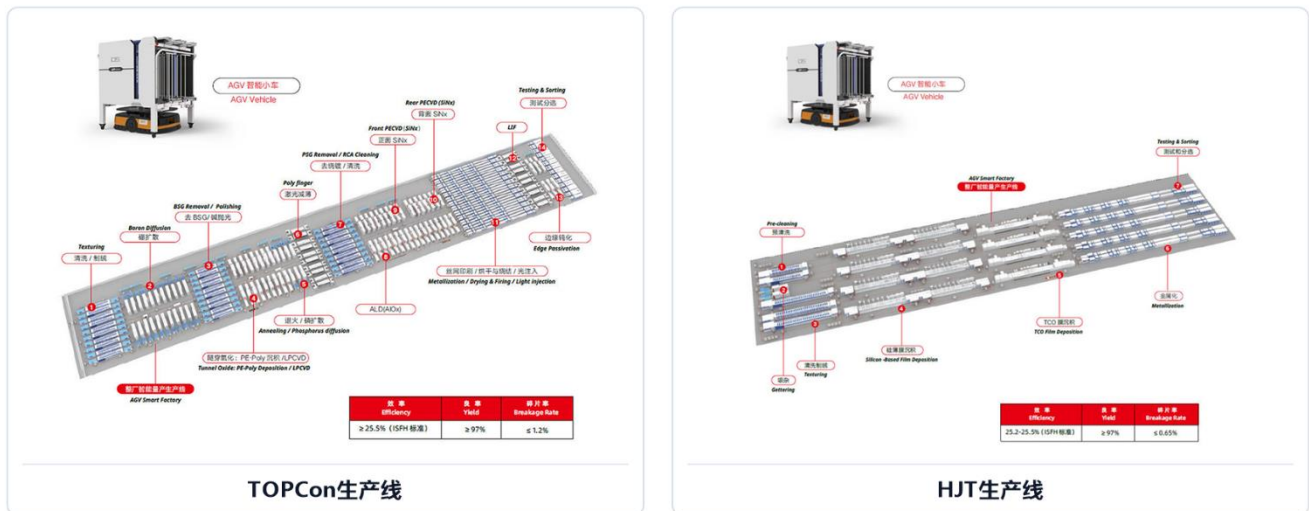
国内方面，空间砷化镓电池及电源系统长期以航天体系内单位为主导，天津电源研究所、上海空间电源研究所等机构承担了大量国家重大航天工程配套任务，在型号认证、飞行履历和系统集成方面具备深厚积累。与此同时，乾照光电、三安光电等企业也在化合物半导体外延、电池制造及商业航天配套中逐步形成补充力量。展望“十五五”期间，国家队预计仍将在高可靠、高价值航天任务中占据主导地位；而随着低轨星座、商业卫星和太空算力等应用对成本和交付效率提出更高要求，具备效率、成本和工程化能力优势的民营企业有望在增量市场中获得更多成长机会。

砷化镓路线中游的投资价值在于高可靠任务基本盘和较高技术壁垒。其约束在于成本高、扩产慢、产能弹性有限，在低轨商业星座大规模部署中难以承担全部需求。未来该路线更可能从低轨批量星座中逐步收缩，继续聚焦高轨、深空、空间站和高可靠任务。

2、晶硅电池：低轨星座降本主线，关键在太空化封装与批量交付

晶硅中游的核心逻辑是将地面成熟电池路线改造为空间可用产品。PERC、TOPCon、HJT 等电池本身具备大规模制造和低成本优势，但进入太空场景后，需要重新完成抗辐照设计、薄片化加工、空间级封装、互联结构优化、热循环验证和在轨寿命验证。换言之，晶硅路线的中游壁垒不在于常规电池制造，而在于“地面电池太空化”的工程能力。

图21 晶硅电池整线构成



资料来源：捷佳伟创官网，中航证券研究所整理

低轨星座是晶硅路线最适合率先切入的场景。该类卫星数量大、寿命相对较短、成本敏感度高，具备持续补网和快速迭代特征。若 HJT/TOPCon 能够在 5-7 年低轨任务周期内证明功率保持率和可靠性，其低成本和供应链优势将转化为渗透率提升。东方日升、天合光能、晶科能源、钧达股份等地面光伏企业具备晶硅电池制造基础，迈为股份、捷佳伟创等设备企业则有望受益于相关产线和工艺导入。

在晶硅路线内部，HJT 的太空化潜力相对突出。其低温工艺有利于薄片化和柔性化，对称结构和低温度系数有助于提升复杂温度环境下的输出稳定性，适配低轨卫星和远期太空算力对轻量化、批量化太阳翼的需求。但需要强调的是，地面光伏可靠性不等于空间可靠性。晶硅路线能否从低轨验证走向大规模应用，仍取决于在轨辐照、热循环、封装稳定性和长期衰减数据。

我们认为，晶硅中游是太空光伏从“高价航天品”走向“规模化工工业品”的核心载体。其投资机会不仅在电池片，还包括薄片化、封装、互联、测试、组件集成和设备材料等环节。

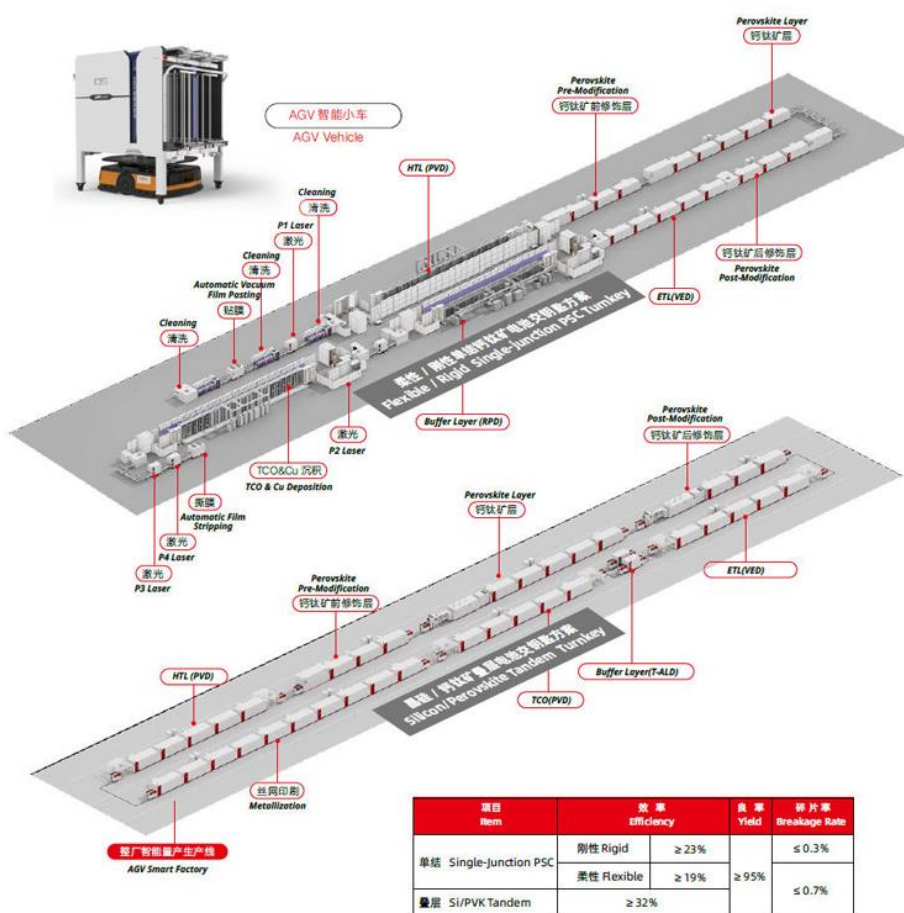
3、钙钛矿电池：高比功率远期路线，先验证后放量

钙钛矿及叠层电池中游的核心是从实验室效率走向空间环境可靠性。该路线具备高效率、高比功率、柔性化和低温制备优势，理论上适合大面积、轻量化、可折叠太

阳翼，也适合未来太空算力、月球基地和天基能源系统等高功率场景。但目前其在太空应用中仍处于早期验证阶段，尚未形成成熟商业闭环。

中游制造环节包括钙钛矿薄膜制备、叠层结构设计、激光划线、大面积组件封装、阻隔层处理、柔性组件制备和空间环境验证。相比晶硅，钙钛矿对水氧、热、紫外和机械应力更敏感；相比砷化镓，其在轨飞行数据仍不足。因此，钙钛矿中游企业短期需要重点突破的是稳定性和一致性，而不是单纯追求实验室最高效率。

图22 钙钛矿叠层电池整线构成



资料来源：捷佳伟创官网，中航证券研究所整理

国内协鑫光电、极电光能、纤纳光电、万度光能等企业已推进钙钛矿组件中试和产业化，天合光能、隆基绿能等龙头企业在晶硅/钙钛矿叠层方面持续布局。若未来钙钛矿电池在空间环境中验证其抗辐照、低衰减和封装可靠性，其在太空算力、大型在轨平台和空间能源系统中的价值弹性将显著提升。

我们认为，钙钛矿中游短期更偏技术验证和主题弹性，中长期则取决于三个条件：一是大面积组件效率和良率能否稳定提升；二是空间环境下寿命和衰减数据能否满足任务要求；三是能否与柔性太阳翼、大面积展开结构和空间电源系统形成系统级适配。若上述条件逐步兑现，钙钛矿/叠层路线有望成为太空光伏远期高比功率场景的重要增量方向。

总体来看，太空光伏中游并不是单纯的电池片制造竞争，而是“电池效率、单位质量功率、封装可靠性、在轨寿命和系统集成能力”的综合竞争。砷化镓路线提供高可靠基本盘，晶硅路线承担低轨降本放量，钙钛矿/叠层路线打开远期大功率平台弹性。对投资人而言，判断中游企业价值的关键，不只是看当前电池效率和单瓦成本，更要关注其是否具备空间环境验证、太阳翼集成、型号认证和批量交付能力。

(三) 承上启下：太阳翼与电源系统集成连接中上游光伏产业与下游空间应用

处于这一重要枢纽位置的是国内宇航电源领域的重要企业电科蓝天，其在太空光伏生态中的位置并非单纯电池片供应商，而是空间电源系统核心供应商。公司产品主要包括空间太阳电池阵、空间锂离子电池组、电源控制设备及其构成的电源系统，应用于航天器和临近空间飞行器。换言之，电科蓝天覆盖了从“发电、储能、控制、配电”到“电源系统总成”的链接环节，是连接上游电池材料与下游卫星平台的枢纽型公司。

我们认为，电科蓝天的核心价值在于掌握航天器电源系统的型号交付入口。对卫星客户而言，采购太阳翼并不是简单购买电池片，而是要求供应商提供满足整星设计、发射冲击、热真空环境、在轨寿命和任务冗余要求的完整电源解决方案。电科蓝天长期服务国家级重点型号，具备系统设计、总装集成、测试验证、客户认证和飞行履历积累，这类能力是普通地面光伏企业短期难以复制的。

从下游应用看，电科蓝天已深度参与我国多个重点航天工程。公司宇航电源产品已为神舟系列飞船、天舟系列飞船、空间站“天和”核心舱、“问天/梦天”实验舱、北斗导航、嫦娥系列探月卫星、探火工程、千帆星座、国网星座等多个国家级重点型号工程提供电源产品。该类飞行履历意味着公司不仅具备产品能力，也具备长期型号认证和高可靠任务交付经验。

图23 系统集成处于全链的重要地位



资料来源：中航证券研究所整理

总体来看，太空光伏生态链不能只按照地面光伏逻辑理解。地面光伏的核心是规模制造和成本下降，而太空光伏的核心是航天可靠性、系统集成和型号交付。电科蓝天作为宇航电源系统核心供应商，处于从电池材料到卫星平台之间的重点位置，其价值不只是某一类电池技术，而是完整电源系统交付能力。

（四）下游：低轨星座打开短期规模，太空算力增强中期弹性

下游需求决定太空光伏产业放量节奏。短期看，低轨通信星座是太空光伏最确定的增量来源。Starlink、Amazon Leo、中国星网、千帆星座等进入批量建设阶段，将推动太阳翼需求从小批量项目制走向标准化、规模化交付。该场景对成本和交付能力更敏感，因此低成本晶硅路线具备导入空间。

太空算力是远期弹性最大的应用方向。若 SpaceX、Google、Starcloud 以及国内国星宇航、星枢天算等项目从验证星走向规模化部署，太空光伏需求将从“跟随卫星数量增长”转向“跟随在轨功率增长”。该场景对太阳翼高比功率、轻量化、电源热控一体化和批量制造能力提出更高要求，可能成为 HJT/TOPCon、钙钛矿及叠层路线的重要牵引。

此外，高轨通信、导航卫星、深空探测和空间站任务虽然数量有限，但对可靠性和寿命要求更高，仍是 GaAs 多结电池和宇航电源系统的重要基本盘。该类任务不会贡献类似低轨星座的数量弹性，但价值量高、验证壁垒强，对高可靠路线形成长期支撑。

图24 国内太空光伏生态链公司



资料来源：中航证券研究所整理

（五）价值分布与竞争格局

相关公司利润呈"上游最高、中游技术溢价、下游规模驱动"的递减结构：

当前锗衬底与 GaAs 外延合计攫取砷化镓路线全链过半利润池，但 HJT 渗透率提升将触发结构性迁移。受损方：锗衬底（硅片替代锗，云南锗业高毛利逻辑面临釜底抽薪）、MOCVD 设备（HJT 产线无需 MOCVD 外延）、传统 GaAs 封装材料。受益方：硅片厂（太空级硅片高溢价）、HJT/TOPCon 设备商（迈为股份、捷佳伟创）、TCO 导电玻璃（金晶科技主导，无论 HJT 还是钙钛矿均不可或缺）。这一迁移的本质是太空光伏供应链从"航天专属体系"（锗→MOCVD→GaAs）向"地面光伏体系"（硅片→HJT/TOPCon 设备→晶硅电池）的系统性重构。

太空光伏则具有强型号属性、强认证属性和强系统工程属性，竞争不仅发生在电池片环节，更发生在太阳翼、电源控制、储能、电源系统总成和航天客户认证环节。因此，判断太空光伏竞争格局，不能简单套用地面光伏“电池片龙头”的逻辑。

我们认为，太空光伏行业将形成“三类技术路线并存”的格局。三类技术路线分别为：以砷化镓多结电池为代表的高可靠成熟路线，以 HJT/TOPCon 为代表的低成

本晶硅路线，以钙钛矿及钙钛矿/晶硅叠层为代表的远期高比功率路线。

GaAs 高可靠路线企业，核心壁垒是衬底、外延、电池制造和空间级验证能力，代表企业包括云南锗业、乾照光电、三安光电等。该路线仍将受益于高轨通信、深空探测、空间站和高可靠任务，但在低轨批量星座中的份额可能随晶硅路线成熟而下降。

低成本和高比功率新路线企业，包括 HJT/TOPCon 电池、设备、薄片化、TCO、封装材料和钙钛矿/叠层企业，代表企业包括东方日升、天合光能、晶科能源、钧达股份、迈为股份、捷佳伟创、金晶科技、协鑫光电、极电光能、纤纳光电等。这类企业的优势在于地面光伏生态成熟、成本下降快、扩产能力强，但太空环境验证和客户认证仍是关键门槛。

此外，掌握航天型号与系统总成能力的宇航电源企业，其核心壁垒是型号认证、飞行履历和系统集成能力，代表企业包括电科蓝天、上海空间电源研究所等。该类企业直接面对卫星平台和航天型号，能够在电池、储能、电源控制和太阳翼集成之间进行系统级协调，短期确定性最强。

总体来看，太空光伏竞争不会简单复制地面光伏“电池片成本竞争”模式，而是呈现“系统入口优先、路线分层渗透、材料设备先行”的格局。短期看，具备航天型号认证和系统交付能力的企业更具确定性；中期看，低轨星座放量将推动晶硅路线和相关设备材料受益；长期看，太空算力和大型空间设施若进入规模化阶段，高比功率太阳翼、钙钛矿/叠层、电源热控一体化等环节有望打开更大弹性。

七、投资逻辑

太空光伏的投资逻辑，本质上不是单一电池路线的效率竞争，而是低轨星座批量组网、空间电源降本、技术路线迁移和太空算力远期放量共同驱动的产业链重估。与地面光伏相比，太空光伏更强调航天可靠性、型号认证、系统集成和在轨寿命；与传统航天电源相比，低轨星座和太空算力又对成本、重量和批量交付提出更高要求。因此，投资判断需要同时把握“短期确定性”和“长期弹性”两条主线。

低轨星座构成短中期确定性需求，太空算力打开长期空间。2026-2030 年，太空光伏需求的核心来源仍是 Starlink、Amazon Leo、中国星网、千帆星座等低轨通信星座建设。低轨星座卫星数量大、寿命相对较短、迭代频率高，对太阳翼成本、交付效率和轻量化提出更高要求，将推动空间电源系统从小批量高可靠向批量化、标准化方向演进。2030 年以后，太空算力若从验证星走向规模化部署，单平台功率需求有望显著高于传统通信卫星，太空光伏需求逻辑将从“跟随卫星数量增长”升级为“跟随在轨功率增长”，行业天花板进一步打开。

系统入口是短期最确定的产业链位置。太空光伏最终交付给卫星客户的不是单纯电池片，而是包含太阳翼、电源控制、储能系统、展开机构和可靠性验证的空间电源系统。电科蓝天等宇航电源系统企业处于产业链中枢位置，连接上游电池与材料、下游卫星平台和空间应用场景。其核心壁垒不只是产品制造能力，更在于型号认证、飞行履历、系统集成和长期客户关系。无论未来上游电池路线从 GaAs 向 HJT/TOPCon、

钙钛矿/叠层演进, 卫星仍需要完整电源系统解决方案, 系统总成环节具备较强确定性。

技术路线分层渗透, 带来产业链价值迁移。GaAs/III-V 多结电池凭借高效率、高可靠和长期飞行验证, 仍将在高轨通信、导航卫星、深空探测、空间站和高可靠任务中保持重要地位。HJT/TOPCon 等晶硅路线具备成熟产业链、低成本和批量制造优势, 若在抗辐照、热循环和封装可靠性方面持续验证, 有望在低轨商业星座中提升渗透率。钙钛矿及叠层路线具备高效率、高比功率和柔性化潜力, 更适合作为太空算力、月面基地和大型空间能源系统的远期储备。技术路线切换将带来利润池从“航天专属链条”向“地面光伏能力太空化”迁移。

设备和材料具备先行属性。在新技术路线放量前, 设备和关键材料往往先于电池企业兑现产业趋势。HJT/TOPCon 太空化需要薄片化、低温工艺、抗辐照封装和高可靠互联; 钙钛矿及叠层路线需要 TCO、阻隔封装、柔性基底和专用设备。由此看, 迈为股份、捷佳伟创、金晶科技、聚和材料、中广核技、鹿山新材等设备与材料企业, 可能在产业导入早期率先受益。相比单纯电池片企业, 设备材料环节受技术路线扩产和工艺验证驱动, 具备较强前置弹性。

表24 投资主线与代表公司

投资主线	重点环节	代表公司	核心逻辑
系统总成	太阳翼、电源控制、储能、电源系统	电科蓝天	掌握航天客户认证和型号交付入口
GaAs 高可靠路线	衬底、外延、电池、太阳翼	云南锗业、乾照光电、三安光电、电科蓝天	高轨、深空、空间站等高价值任务支撑
HJT/TOPCon 降本路线	电池片、设备、薄片化、封装	东方日升、天合光能、晶科能源、钧达股份、迈为股份	低轨星座成本敏感, 晶硅路线具备放量潜力
钙钛矿/叠层远期路线	叠层电池、TCO、设备、封装	协鑫光电、极电光能、纤纳光电、金晶科技、捷佳伟创	高比功率和低成本潜力, 等待在轨验证
材料加工设备	HJT 设备、TCO、银浆、胶膜	迈为股份、金晶科技、捷佳伟创	新路线产业化前设备材料率先受益

资料来源：中航证券研究所整理

投资节奏：2026-2030 年看星座订单，2030 年后看太空算力：

第一阶段，2026-2030 年：低轨星座批量建设。

重点关注宇航电源系统总成、GaAs 供应链、HJT/TOPCon 导入、设备和封装材料。该阶段订单确定性相对较强, 主要来自中国星网、千帆星座、Starlink、Kuiper 等低轨星座建设。

第二阶段，2030-2035 年：太空算力经济性验证。

重点关注高比功率太阳翼、HJT/TOPCon 放量、钙钛矿叠层验证、模块化电源系统。若发射成本持续下降, 太空算力平台有望带动功率需求大幅提升。

第三阶段，2035 年以后：大型空间能源系统远期打开。

重点关注钙钛矿/晶硅叠层、大型太阳翼、在轨组装、储能协同和空间能源系统集成

成。该阶段空间大，但不确定性也更高。

同时，建议重点跟踪四类验证信号：

一是下游发射节奏，包括低轨星座年度发射量、算力卫星验证星和大功率平台进展；二是技术验证节点，包括 HJT/TOPCon、钙钛矿/叠层电池的在轨寿命、抗辐照和热循环数据；三是产业链订单，包括太阳翼系统、电池片、设备和关键材料订单；四是发射成本变化，尤其是 Starship 等重型可复用火箭的稳定复用和单位入轨成本下降。

总体来看，太空光伏短期应关注低轨星座带来的确定性订单，中期关注晶硅路线太空化带来的降本和产业链迁移，长期关注太空算力和大功率空间平台带来的需求弹性。投资上不宜简单押注单一电池路线，而应围绕“系统入口、设备材料、路线切换、远期高比功率”构建组合化观察框架。

八、风险提示

- ① 太空光伏产业技术迭代及产业化落地进度不及预期风险；
- ② 行业入局者增多，太空光伏市场竞争加剧风险；
- ③ 商业航天、卫星星座等下游需求拓展不及预期风险；
- ④ 太空算力商业化应用不及预期风险；
- ⑤ 轨道与频谱资源审批、国际协调及空间碎片治理不及预期风险；
- ⑥ 出口管制、关键材料及高端设备供应链受限风险；
- ⑦ 太空算力平台热控、通信链路和在轨寿命验证不及预期风险；
- ⑧ 监管政策不确定性风险。

公司的投资评级如下:

买入: 未来六个月的投资收益相对沪深 300 指数涨幅 10%以上。

增持: 未来六个月的投资收益相对沪深 300 指数涨幅 5%~10%之间。

持有: 未来六个月的投资收益相对沪深 300 指数涨幅-10%~+5%之间。

卖出: 未来六个月的投资收益相对沪深 300 指数跌幅 10%以上。

行业的投资评级如下:

增持: 未来六个月行业增长水平高于同期沪深 300 指数。

中性: 未来六个月行业增长水平与同期沪深 300 指数相若。

减持: 未来六个月行业增长水平低于同期沪深 300 指数。

研究团队介绍汇总:

中航证券军工团队: 资本市场大型军工行业研究团队, 依托于中国航空工业集团强大的军工央企股东优势, 以军工品质从事军工研究, 以军工研究服务军工行业, 力争前瞻、深度、系统、全面, 覆盖军工行业各个领域, 服务一二级资本市场, 同军工行业的监管机构、产业方、资本方等皆形成良好互动和深度合作。

销售团队:

陈艺丹, 18611188969, chenyd@avicsec.com, S0640125020003

李裕洪, 18674857775, liyuq@avicsec.com, S0640119010012

李友琳, 18665808487, liyoul@avicsec.com, S0640521050001

李若熙, 17611619787, lirx@avicsec.com, S0640123060013

分析师承诺:

负责本研究报告全部或部分内容的每一位证券分析师, 再次申明, 本报告清晰、准确地反映了分析师本人的研究观点。本人薪酬的任何部分过去不曾与、现在不与、未来也将不会与本报告中的具体推荐或观点直接或间接相关。

风险提示: 投资者自主作出投资决策并自行承担投资风险, 任何形式的分享证券投资收益或者分担证券投资损失的书面或口头承诺均为无效。

免责声明:

本报告由中航证券有限公司(已具备中国证券监督管理委员会批准的证券投资咨询业务资格)制作。本报告并非针对意图送发或为任何就送发、发布、可得到或使用本报告而使中航证券有限公司及其关联公司违反当地的法律或法规或可致使中航证券受制于法律或法规的任何地区、国家或其它管辖区域的公民或居民。除非另有显示, 否则此报告中的材料的版权属于中航证券。本报告仅供中航证券客户使用, 未经中航证券事先书面授权, 不得更改或以任何方式发送、复印本报告的材料、内容或其复印本给予任何其他人或其他渠道。未经授权的转载, 本公司不承担任何转载责任并有权追究转载方的法律责任, 包括但不限于立即停止未经授权的转载行为, 通过公开声明或其他方式消除因侵权行为造成的不良影响、要求承担赔偿责任等。

本报告所载的资料、工具及材料只提供给阁下作参考之用, 并非作为或被视为出售或购买或认购证券或其他金融票据的邀请或向他人作出邀请。中航证券未有采取行动以确保于本报告中所指的证券适合个别的投资者。本报告的内容并不构成对任何人的投资建议, 而中航证券不会因接受本报告而视他们为客户。

本报告所载资料的来源及观点的出处皆被中航证券认为可靠, 但中航证券并不能担保其准确性或完整性。中航证券不对因使用本报告的材料而引致的损失负任何责任, 除非该等损失因明确的法律或法规而引致。投资者不能仅依靠本报告以取代行使独立判断。在不同时期, 中航证券可发出其它与本报告所载资料不一致及有不同结论的报告。本报告及该等报告仅反映报告撰写日分析师个人的不同设想、见解及分析方法。为免生疑, 本报告所载的观点并不代表中航证券及关联公司的立场。

中航证券在法律许可的情况下可参与或投资本报告所提及的发行人的金融交易, 向该等发行人提供服务或向他们要求给予生意, 及或持有其证券或进行证券交易。中航证券于法律容许下可于发送材料前使用此报告中所载资料或意见或他们所依据的研究或分析。

联系地址: 北京市朝阳区望京街道望京东园四区 2 号楼中航产融大厦中航证券有限公司

公司网址: www.avicsec.com

联系电话: 010-59219558

传 真: 010-59562637