

# 光伏设备行业深度： 太空算力中心具备颠覆性优势，HJT或为能源系统最优解

首席证券分析师：周尔双  
执业证书编号：S0600515110002  
[zhouersh@dwzq.com.cn](mailto:zhouersh@dwzq.com.cn)

证券分析师：李文意  
执业证书编号：S0600524080005  
[liwenyi@dwzq.com.cn](mailto:liwenyi@dwzq.com.cn)

2026年1月8日

# 投资要点：



## 1. 太空算力：AI时代算力供需失衡催生“轨道数据中心”新范式

在全球AI大模型推动下，数据中心电力缺口日益凸显，催生将高算力卫星部署于低/中轨的“太空算力”新形态。相比传统地面数据中心，太空算力具备部署效率高、能源效率佳、冷却成本低等颠覆性优势。以“之江实验室+国星宇航”推出的“三体计算星座”为例，首批已入轨12星，远期规划1000POPS算力规模；海外SpaceX、谷歌、英伟达投资的初创企业Starcloud加速推进百GW级太空算力集群建设。

## 2. 能源系统重量决定卫星综合成本，卷展式光伏阵列搭配柔性电池成发展关键。

太空算力系统能源系统成本占比高达22%，决定卫星整体经济性。卷展式结构凭借轻量化、高功率质量比，逐步取代传统Z型结构，成为LEO轨道主流方案；但卷展式阵列仅适配柔性化、薄片化电池。硅基HJT电池凭借低温工艺、柔性兼容性和减重优势，最适配新一代卷展式光伏系统，海外NexWafe、Solestial等厂商已加速布局。同时，HJT亦为钙钛矿叠层的最优底电池，具备长期演进潜力。

## 3. 轨道资源紧张，算力平台向大型母舰与多星集群两端演进

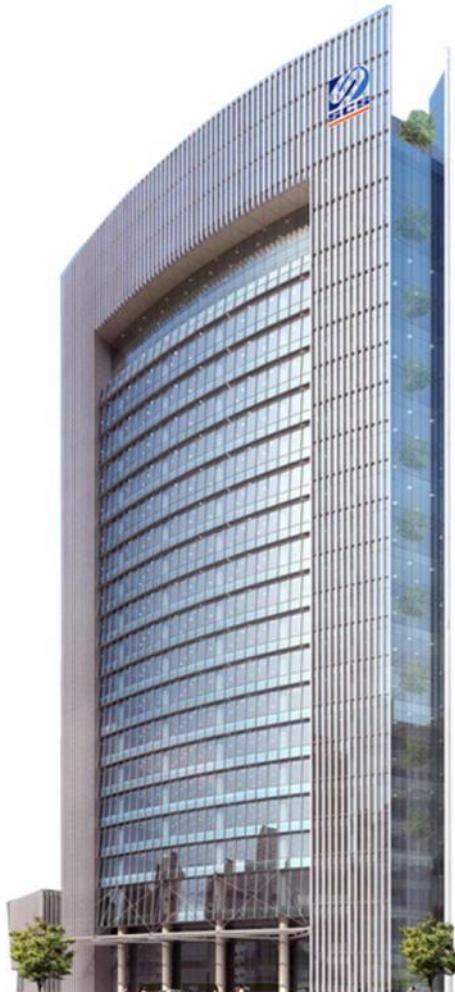
当前主流轨道以LEO与SSO为主，SSO可提供全年稳定日照，是高功率数据中心最优选择，剩余可用空间约9617颗星，资源宝贵。为解决轨道短缺问题，太空算力平台正沿两条路径发展，实现百GW级大规模部署：①大型化：如Starcloud构建4km×4km光伏母舰平台，集中部署算力模块；②集群化：如谷歌Suncatcher计划81~324星编队部署，提升单位轨道算力密度。根据测算，10GW光伏产能可对应448个谷歌Suncatcher星簇或2座Starcloud母舰，

## 4. 投资建议

重点推荐具备海外客户基础的HJT整线设备龙头【迈为股份】，具备60μm超薄硅片量产的【高测股份】。

## 5. 风险提示

行业受政策波动影响风险，新技术研发不及预期风险，太空算力发展不及预期风险。



1 太空算力中心有颠覆性优势，光伏能源系统为关键组件

2 硅基电池是大规模应用的最优解，其中HJT最适配

3 市场空间有多大？

4 投资建议

5 风险提示

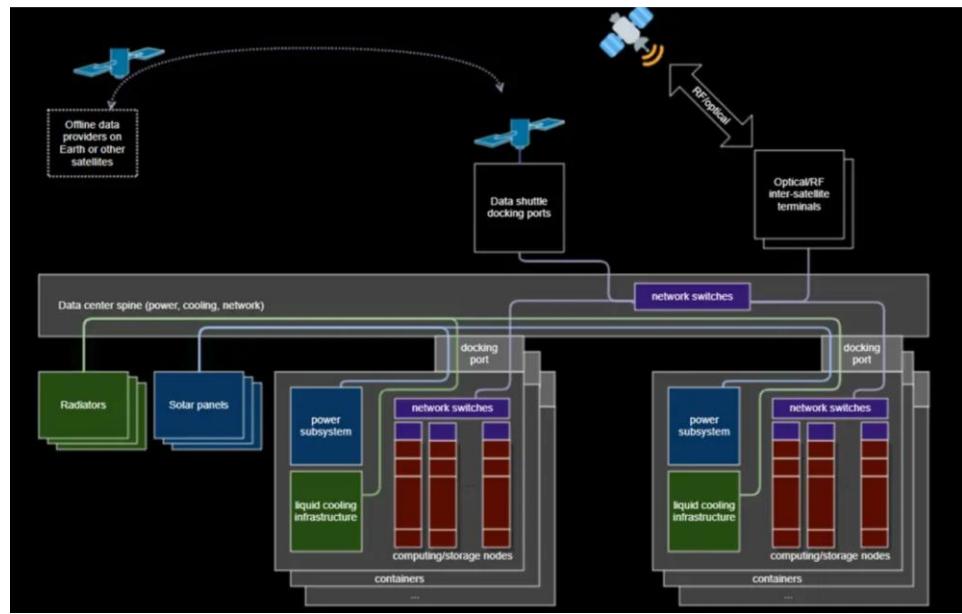
## 1.1 什么是太空算力？

- 太空算力是人工智能算力体系由地表向轨道空间拓展所衍生的新范式，其核心在于将具备训练与推理能力的模块化服务器节点部署于低轨或中轨卫星平台，进而构建“轨道数据中心”。该类节点可独立完成大规模人工智能计算，并通过分布式协同机制实现数据处理的实时化与智能化，显著突破传统卫星“感知一回传”的单一功能边界。典型案例为之一江实验室+国星宇航联合推出的“三体计算星座”，首批12颗AI卫星单星算力达744TOPs，星座综合算力可达5POPS；远期规划构建1000POPS量级的小型轨道超级计算阵列。

图：“三体计算星座”是由之江实验室协同全球合作伙伴共同打造的千星规模的太空计算基础设施



图：太空算力中心不仅可以处理地面数据，也可以处理空中通信、光学卫星数据



## 1.1 中美欧太空算力中心规划宏大，目前处于初期验证阶段



- 中美欧在太空算力均有布局，规划规模超百GW。
  - ①中国：国星宇航计划远期做到2800颗算力卫星升空；中科院计划达成单节点POPS级。
  - ②美国：SpaceX计划每年升空100GW太空算力卫星；Starcloud一期计划实现400颗5GW卫星。
- 中美两国现已完成验证星发射。
  - ①中国：国星宇航已入轨12颗星算卫星，稳定运行超200天；中科院“极光1000”32 TOPS星已稳态运行超1000天。
  - ②美国：SpaceX星舰首次成功入轨8颗模拟星；Starcloud已发射1颗搭载 $4 \times H100$ 的试验星，目前正在轨运行。

表：中美欧均布局太空算力，中美落地进度最快

国家/地区	运营/牵头主体	项目名称	目标规模	首星/首节点	状态/后续节点
中国	之江实验室+国星宇航	星算星座→三体计算星座	2027百星，2030千星，远期2800颗	2025-05-14一箭12星已入轨运行>200天	2026-27扩至百星；2030千星
中国	中科院计算所	极光1000	单节点POPS级	2022“极光1000”32TOPS星已稳态>1000天	2025完成下一代POPS级星载机
中国	星空院等	北京“太空数据中心”行动方案	>1 GW集中式（百万卡级）	2025-11-27发布方案，试验星2025-27	2028-30在轨组装；2031-35批量生产
美国	SpaceX	星链V3算力版+星舰部署	100 GW/年→1 TW/年	2025-08 星舰首次抛放8颗模拟星	2026起每年60-100发星舰，单发60颗V3算力卫星运力
美国	Google	Project Suncatcher	615 GW ( 2029 )	2027-Q1 发射2颗TPU-Trillium原型星	2029百星分布式集群
美国	Starcloud ( 初创，英伟达投资 )	Starcloud-1	5 GW ( 400颗 )	2025-11-02 已发1颗4×H100试验星在轨运行	2027推出“太空GPU云”
欧盟	ESA	太空数据中心计划	GW级低碳集群	尚未发射	2028前发射2颗技术验证星
中东	Madari Space	Madari-8000	8000节点 ( 2028 )	2026-Q4首发1颗试验数据中心星	2028完成8000颗遥感边算节点

## 1.2 为何要将算力中心送向太空？

- 太空算力中心相较于传统地面数据中心，在技术架构、成本结构、部署模式、能源效率及可扩展性等核心维度展现出颠覆性优势。①成本：太空用电成本显著低于地面算力中心，以40mw规模的算力集群为例，太空卫星10年期的总成本约820万美元，显著低于地面的1.67亿美元。②能源：太空中太阳能发电效率更高，且由于极冷环境，无需冷却塔；单位面积的发电量可达地面的五倍。相比之下，地面发电不仅耗水量大，还伴随较高的电力需求。③部署与扩展：太空不受土地规划和物理空间限制，轨道位置近乎无限，部署速度快，可大规模快速扩展，而地面受土地资源、周边设施和规划审批限制，建设周期长，扩展阻力大。

表：太空算力中心相较于传统地面数据中心有多方面优势（40MW算力集群，10年周期）

对比维度	天基（太空算力中心）	传统地面数据中心
技术架构	利用太空极冷环境高效运行	成熟商业与技术生态，通用托管服务
	无物理空间限制，可快速扩展	受机房面积、楼板承重等物理限制
	全球覆盖，普惠 AI 基础设施，尤其惠及偏远或干旱地区	散热逼近物理极限，能耗巨大
成本结构（40 MW 集群运行 10 年）	总成本 ≈ 820 万美元	总成本 ≈ 1.67 亿美元
	一次性发射成本 ≈ 500 万美元	能源消耗 ≈ 1.4 亿美元（电价 0.04 \$/kWh）
	太阳能电池阵列 成本 ≈ 200 万美元	冷却成本 ≈ 700 万美元
	长期能源成本 ≈ 0	备用电源、建筑、土地等额外支出
部署方式	不受土地规划和物理空间限制，部署速度快，可大规模快速扩展	受土地资源、电力配套和规划审批限制，建设周期长，扩展困难
能源与环境	纯太阳能供电，利用太空极冷环境（背阳面 -270 °C）辐射散热，无需冷却塔	40兆瓦集群10 年耗水约170万吨（0.5 L/kWh）
	单位面积发电量可达地面 5 倍	AIDC 电力需求指数级增长，加剧区域能源紧张
可扩展性	轨道位置近乎无限，可随星舰级火箭持续追加模块	扩展受限于机房空间、土地资源和周边配套设施

## 1.2 能源成本：是发展太空算力中心的核心因素



- 太空数据中心的全生命周期成本显著低于地面设施。以 40 MW 集群运行 10 年为例，地面方案的总运营成本约为 1.67 亿美元，而采用太空算力仅需约 820 万美元，10 年可节省约 1.59 亿美元。
  - ① 能源支出是成本下降的核心驱动：地面数据中心 10 年能耗费用高达 1.4 亿美元；相比之下，太空数据中心仅需一次性投入约 200 万美元部署光伏组件，能源环节即可减少 1.38 亿美元支出。
  - ② 冷却与用水成本：地面算力中心全生命周期需要约 700 万美元冷却费用，同时消耗 170 万吨水（按 0.5 L/kWh 计算）。太空则利用近 -270℃ 的太空极低温环境，可大幅降低散热需求，仅需配置液冷回路将舱内热量导出，即可满足冷却要求，从而几乎免去用水及冷却塔的持续开销。

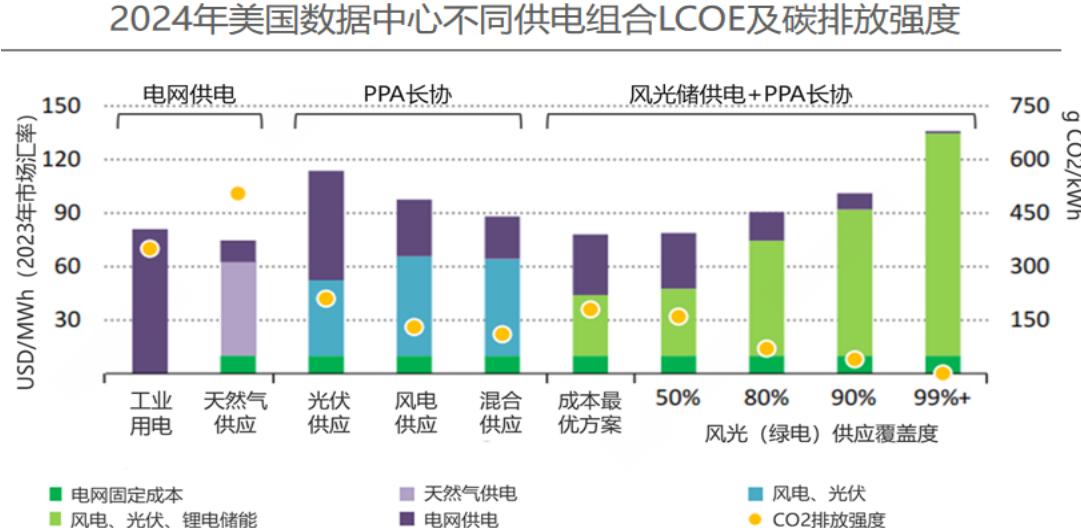
表：太空数据中心相较于地面数据中心有显著的成本优势

成本项	地面数据中心	太空数据中心	成本差异
能源 (10年)	1.4亿美元 (按0.04美元/千瓦时)	200万美元 (太阳能电池阵成本)	-13800万美元
发射费用	无	500万美元 (计算模块、太阳翼、散热舱单次发射)	+500万美元
冷却 (冷水机能耗)	700万美元 (占总能耗5%)	太空温差大，冷却架构更高效，能耗极低	能耗更低
用水	170万吨 (0.5升/千瓦时)	无需用水	无需用水
外壳/结构	建筑物成本	卫星平台成本	成本大致相当
备用电源	2000万美元 (商业级UPS)	无需备用电源	无需备用电源
其他硬件 (服务器、网络等)	二者大致相当	二者大致相当	-
辐射屏蔽	无需	120万美元 (每kW计算功率需1kg屏蔽，按30美元/kg发射价)	+120万美元
总成本	1.67亿美元	820万美元	-15880万美元

## 1.2 能源成本：是发展太空算力中心的核心因素

- 太空数据中心相较于地基数据中心主要成本差异在能源成本，故我们在电价成本以外对比燃气轮机&光储方案成本，燃气轮机成本与电网供电成本相近，但绿电方案成本则显著高于电网供电成本。
- **混合绿电+市电组合方案：**根据IEA数据，相较于需要搭配更长时间配储的99%绿电，美国数据中心50%电网供电+50%绿电的LCOE成本最低，但其价格仍在60-90美元/MWh之间。若考虑到40MW数据中心年耗电量在35万MWh，40MW数据中心10年的能源成本也在2.1-3.2亿美元之间。
- **燃气轮机发电机组方案：**是目前海外数据中心供电的普遍方案，其核心成本在于初始设备投资&能源消耗，一个40MW的燃气轮机机组初始设备成本在3429万美元，10年的能源消耗在6715万美元，40mw算力中心10年电力合计成本在1亿美元，略低于电网购电模式，但显著高于太空算力方案。

图：美国数据中心供电组合LCOE成本（2024年数据）



表：40MW燃气轮机10年设备&能源成本在1亿美元

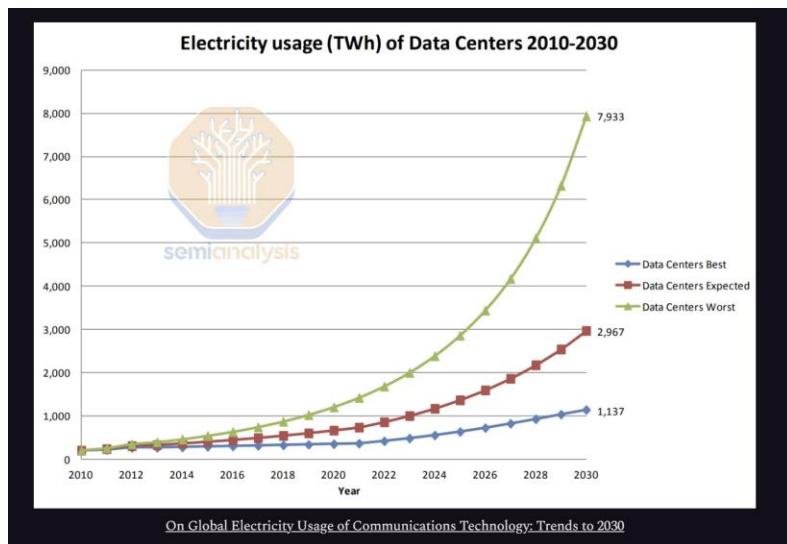
燃气轮机发电机组方案	
大型数据中心电力需求	40MW
年耗电量	$40\text{MW} \times 365 \times 24\text{h} = 350400\text{MWh}$
初始设备投资成本①	$40\text{MW} \times 600\text{万/MW} \div 7\text{元/美元} = 3428.6\text{万美元}$
电厂热效率	60%
10年消耗能源成本②	$350400\text{MWh} \times 3.412\text{MMBu/MWh}^* (1/60\%) \times 3.37\text{美元/MMBu} = 6715.1\text{万美元}$
③合计成本（万美元） =①设备投资成本+②能源成本	10143.7

\*注：10年消耗能源成本=年发电量×每单位电量对应热量/发电厂热效率×单位能源价格×10年

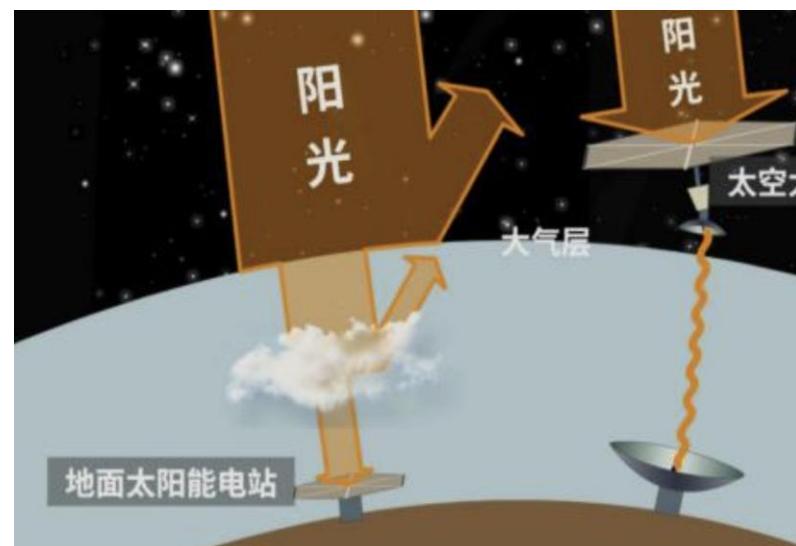
## 1.2 电力需求：电力缺口是发展太空算力中心的第二大因素

- AI发展驱动算力需求放量，同步推高电力需求。OpenAI、Anthropic等海外厂商及百度、阿里、字节跳动等国内企业相继发布新一代大模型，算力需求全面扩容；叠加“星际之门”“普罗米修斯”等超大规模算力项目落地与云服务商资本开支上调，全球算力基建进入加速期，电力消耗随之激增。
- 2030年全球算力中心电力需求将超3000TWh，电力缺口较大。根据Semi Analysis预测，2030 年全球数据中心用电量将升至约3000TWh（中性）。然而多国电网建设滞后、能源供给紧张、专业人才短缺及政策阻力导致电力缺口扩大，部分地区已出现能源紧急状态。
- 太空算力具备显著能源优势，能够通过光伏高效、稳定发电。无大气衰减使光伏转换效率较地面提升 2-3 倍；通过晨昏轨道设计，可接近 $7 \times 24\text{h}$ 持续供电，消除地面太阳能的昼夜与气候间歇性；同时，太空光伏为清洁可再生电源，无需燃料补给，零燃料维护成本。

图：全球数据中心的电力使用量增长趋势明显



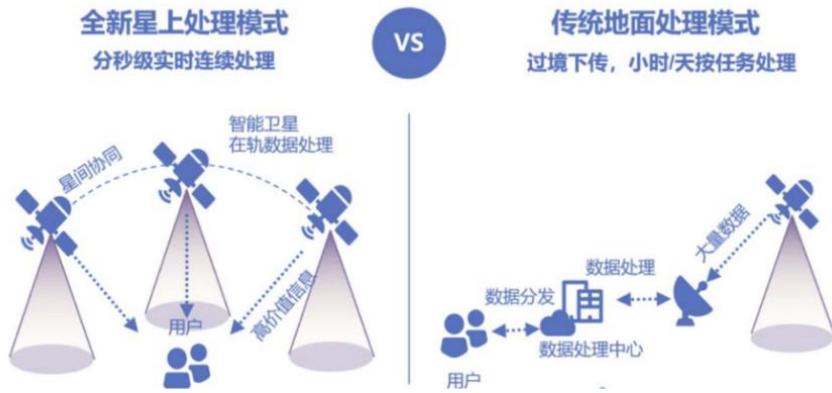
图：太空算力依托无大气层削弱的太阳能实现发电效率倍增



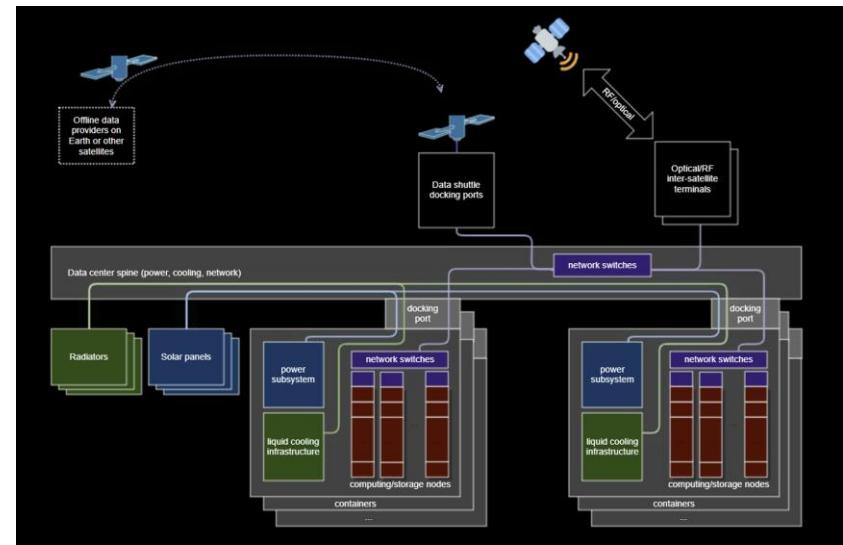
## 1.2 卫星利用率：太空算力可提高现有通信、光学卫星利用率

- 太空算力可将卫星工作模式从“天感地算”升级为“天感天算”，显著提升整体利用率。
- ① 传统“天感地算”：卫星必须把原始数据全部下传至地面站处理，受星-地链路带宽和传输时延限制，数据利用率不足 10%。以太阳监测科学卫星为例，每日生成 500 GB 数据，仅约 20 GB 可成功回传。
- ② 全新“天感天算”：传感或通信卫星把数据实时转发至同在轨的算力卫星，先行完成预处理、筛选或初步推理，再将精简结果下传地面，既缓解带宽压力，又提升信息时效，显著缩短决策响应时间。

图：全新“天感天算”模式相较于传统地面处理模式优势明显，效率显著提升



图：太空算力中心不仅可以处理地面数据，也可以处理空中通信、光学卫星数据



## 1.3 电力、散热、环境保护模块是算力卫星的核心部件

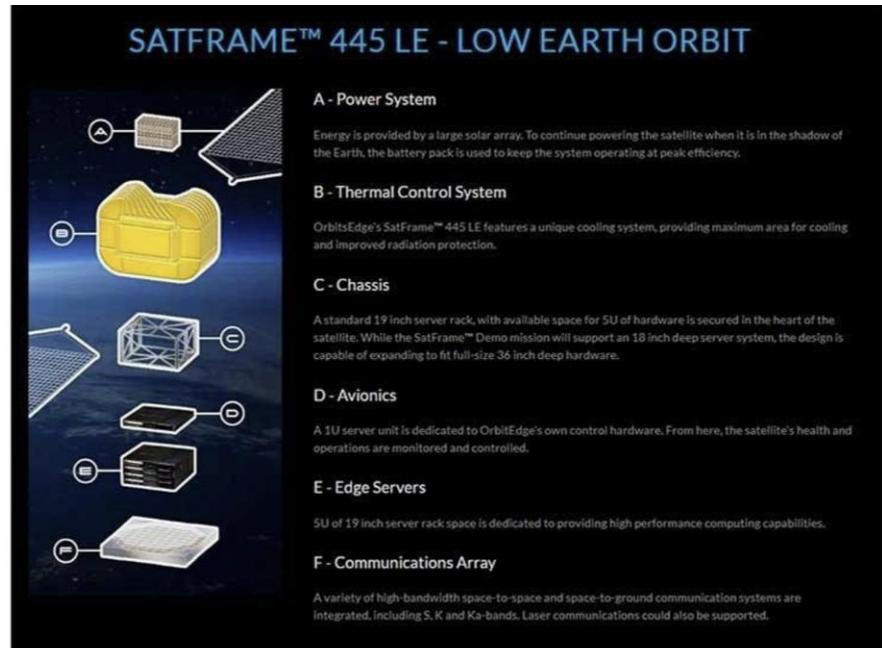


- 目前国内主流的太空算力中心均采用“单颗数据中心卫星”架构，硬件核心由电力、算力等六大模块构成；其中能源、散热和辐射保护为核心。
  - ①电力系统：大型太阳能电池阵列为主电源，配套储能电池，确保卫星在地球阴影区仍能高效运行。
  - ②热控系统：主动冷却回路结合扩展式散热器，提供充足辐射面积并强化辐射防护，适应太空极端热环境。
  - ③底盘：采用标准19寸服务器机架（5 U高度），当前支持18寸深度服务器，设计可扩展至36寸全尺寸硬件。
  - ④航空电子设备：通过1U服务器单元实现对卫星健康状态及平台运行的实时监测与控制。
  - ⑤边缘服务器：占用5U、19寸机架空间，提供高性能在轨计算能力。
  - ⑥通信阵列：集成S、K、Ka等多频段高带宽空-空/空-地链路，并兼容激光通信，满足大容量数据回传需求。

图：目前主流发射方式是依然是单颗数据中心卫星



图：算力卫星由电力、散热等核心部件组成



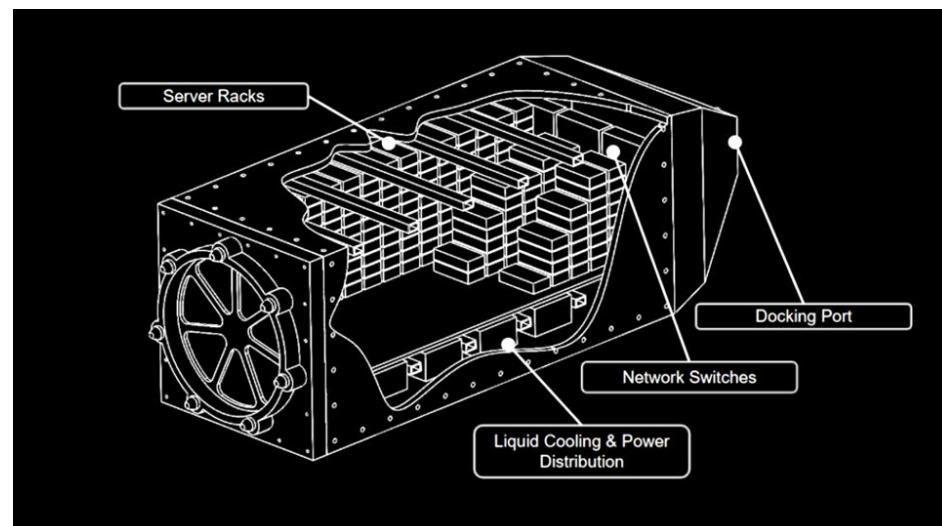
## 1.3 未来太空算力中心向大型母舰平台发展，能源组件仍是核心

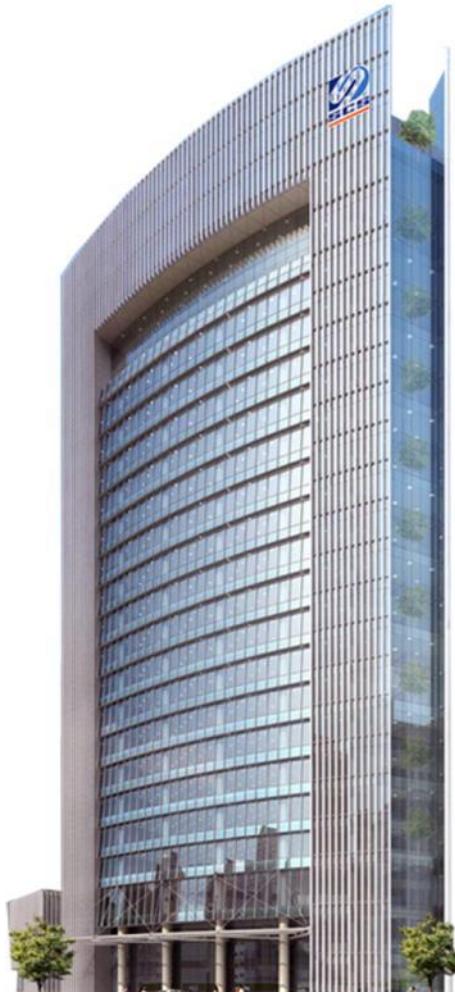
- 太空算力卫星后续将向大型化、平台化方向演进。美国初创企业Starcloud计划构建配备大型光伏能源系统的高功率母舰平台，将多个标准化算力模块集中部署于同一航天器，以替代现有分散部署的小卫星或空间站方案。
- 该架构具备多种优势。
  - ①轨道资源优化：同一轨道面内可高密度排列算力模块，无需为多个传统小卫星保留安全间隔，显著节省有限的太阳同步轨道资源。
  - ②运维成本降低：母舰统一供电、统一运维，显著减少运维成本。
  - ③模块化设计：算力模块寿命到期或出现故障时，可通过服务飞船整体回收，或指令其离轨再入大气层焚毁，降低系统级报废成本与空间碎片风险。
- 能源系统仍为大型太空算力中心的核心分系统。以Starcloud概念方案为例，其规划的5GW级算力母舰由单块4km×4km 超大型光伏阵列提供主电源，并在此基础上搭载多套热插拔式算力模块，形成集中式、可扩展的轨道数据中心。

图：多个小型独立算力模块集中搭载于大型光伏载体上，节省空间和运行成本



图：单个算力模块采用地面类似的Tray设计





1 太空算力中心有颠覆性优势，光伏能源系统为关键组件

2 硅基电池是大规模应用的最优解，其中HJT最适配

3 市场空间有多大？

4 投资建议

5 风险提示

## 2.1 光伏是卫星的唯一可再生能源，技术路径多样



- 光伏系统是太空算力中心的唯一主能源，其电池技术路线选择需综合权衡发射成本（组件面密度）、太空环境适应性、光电转换效率与全生命周期成本四大维度。远期钙钛矿&硅基叠层性能最优，短期硅基技术凭借显著的成本优势将成为主流技术路径，砷化镓仅保留于高功率密度或严苛轨道等特殊场景。
- 当前MW级以性能最优的砷化镓技术为主。MW级卫星以砷化镓（GaAs）三结技术为主。砷化镓组件量产效率≈30%，面密度400W/kg，20年轨内辐射功率衰减≤15%，寿命≥20年，性能指标最优；但组件采购价约12亿美元/GW，难以支撑GW级扩建。
- 后续规模化应用需采用成本&性能均衡的硅基技术，远期转向硅基+钙钛矿叠层。硅基组件成本2-3.5亿美元/GW，量产效率22-25%，面密度280-340W/kg，15年辐射衰减25-30%，寿命10-15年。虽然单瓦质量与效率略低，但可通过增大阵列面积补偿，且成本仅为GaAs的1/6-1/3，能够满足大规模应用，远期转向钙钛矿+硅基叠层电池。

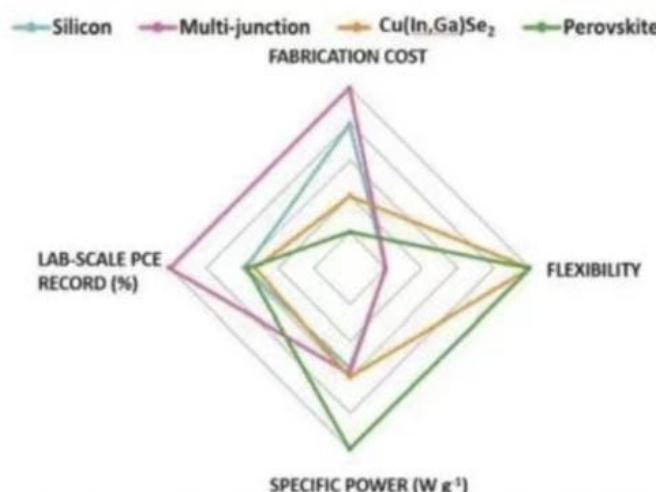
表：砷化镓性能指标最优，短期大规模应用需采用成本&性能更均衡的硅基技术

技术	量产效率 (%)	面密度 (W/kg, 含基板)	辐射功率损耗 (%)	在轨寿命 EOL	组件成本 (亿美元/GW, 美国成本, Infolink)	太空算力适配结论
TOPCon	22%	280	30%	10-12年	2	备选方案
HJT	24%	320	25%	15年	2.6	备选方案
BC	25%	340	26%	15年	3.5	备选方案
砷化镓 GaAs 三结	30%	400	15%	20年	12	当前主流，MW级首选
碲化镉 CdTe	14%	500	60%	<5年	1.8	寿命短板，只能当补充翼
钙钛矿	31-33% (硅基叠层, 量产效率)	600-800	10-15%	20-25年 (理论)	-	未来方案，技术尚未成熟

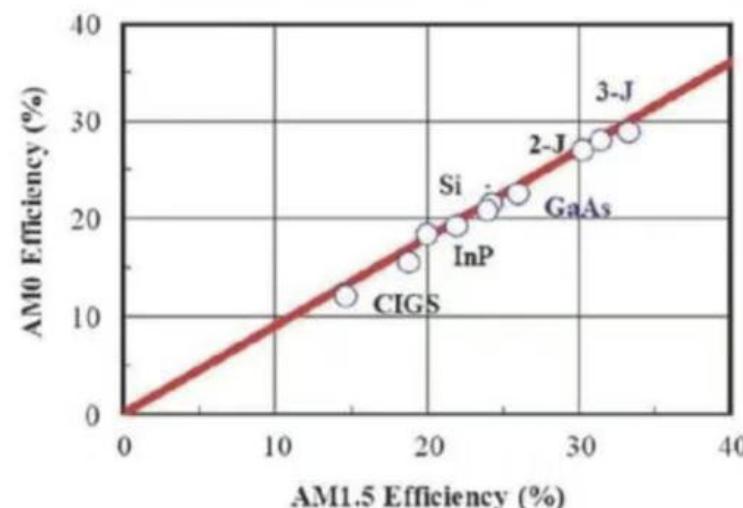
## 2.1 砷化镓多结电池具有高效率与耐久性优势

- 太空应用环境极端严苛，对电池提出更高要求。太空环境中， $1\text{MeV}$ 电子年辐照剂量高达  $10^4\text{e}^-/\text{cm}^2$ ，卫星需在  $-120^\circ\text{C}$  至  $120^\circ\text{C}$  温差范围内长期运行，且高轨通信卫星或算力卫星需服役达15–20年。在此背景下，光伏组件需兼具高效率、耐辐照、耐极端温差的综合性能。
- 砷化镓多结电池效率突出，具备优异空间适应性。 $\text{GaInP}/\text{GaAs}/\text{Ge}$  等多结砷化镓电池具备高转换效率（AM0下可达30%以上），并表现出优于硅和CIGS的抗辐照能力与稳定性，在AM1.5（代表地面标准照射条件）与AM0（代表太空环境的太阳辐照条件）环境下效率保持性显著优于其他材料，适用于高价值轨道卫星任务，如高轨通信与深空探测。

表：多结砷化镓综合性能领先



表：地面与太空光谱条件下，多结砷化镓技术效率领先



## 2.1 主流空间平台全面采用砷化镓，验证其高性能与可靠性



- 砷化镓是目前主流航天平台首选技术路径。当前国际空间站、天宫空间站均采用三结GaAs电池（效率28–30%），并实现多年稳定服役。美SpaceX、欧ESA、中空天、英Inmarsat等多个国家代表性卫星星座和遥感任务也广泛选用砷化镓电池，覆盖低轨通信、高轨遥感、中轨导航等多场景，充分验证其通用性与可靠性。

表：砷化镓性能指标最优，大规模应用需采用成本&性能更均衡的硅基技术

卫星/航天器名	入轨年份	所属国家/组织	光伏电池技术（转换效率）
国际空间站 (ISS)	1998 起 (滚动发射组装)	美国 + 多国	三结 GaAs (~29%)
天宫空间站 (天和+问天+梦天)	2021–2022	中国	三结 GaAs (国产, ~28%)
Starlink v1.0 批次	2019 起	美国	三结 GaAs (~29%)
Starlink v1.5 批次	2021 起	美国	三结 GaAs (~30%)
Sentinel-1A/1B	2014/2016	ESA	三结 GaAs (~29%)
Sentinel-2A/2B	2015/2017	ESA	三结 GaAs (~29%)
Pleiades-Neo 1/2/3/4	2021/2022	空客 (法国&德国)	三结 GaAs (~30%)
北斗家族-3 MEO/IGSO	2015 起	中国	三结 GaAs (国产, ~28%)
Gaofen-7/11/12 等	2018 起	中国	三结 GaAs (国产, ~28%)
Inmarsat-6 F1/F2	2021/2022	英国	三结 GaAs (~30%)
SES-17	2021	卢森堡	三结 GaAs (~30%)

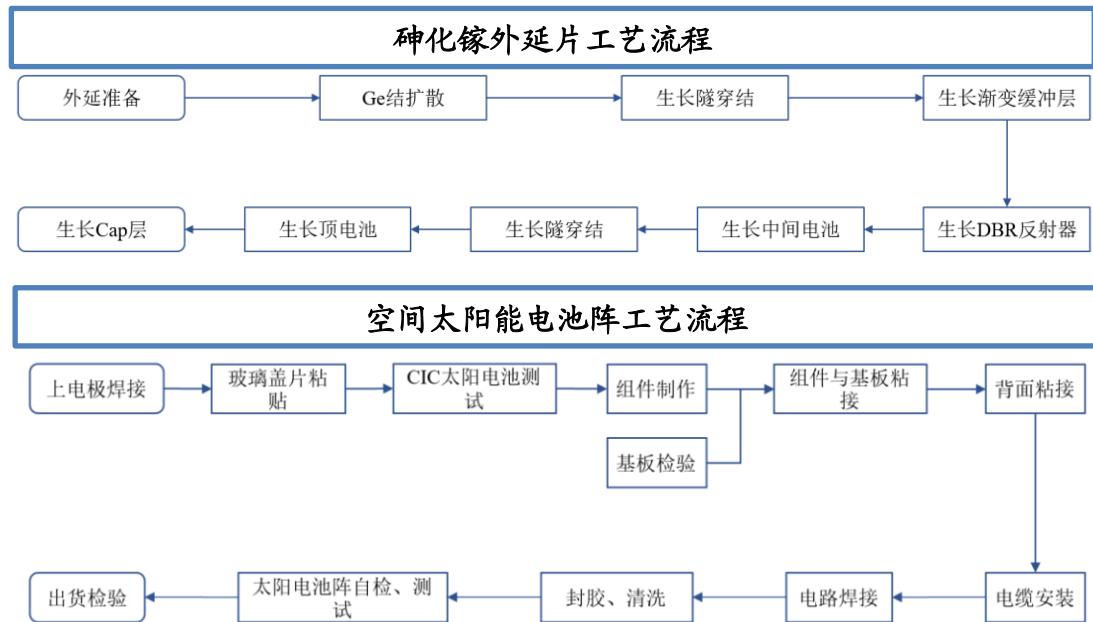
2.1 三结砷化镓电池性能最优，但工艺&成本限制大规模应用

- **三结砷化镓多层串联结构实现宽光谱高效吸收。**三结GaAs电池由三层不同带隙材料上下串联而成，依次吸收短波到长波太阳光，提升整体转换效率。结构上从上至下依次为：高带隙GaInP（吸收紫外）、中带隙GaAs（吸收可见光）、低带隙Ge（吸收近红外）。层间通过隧穿结导通电流，实现多结高效协同。该结构设计兼顾能量利用率与器件稳定性，适配复杂太空辐照环境。
  - **成本高、产能低，限制三结砷化镓电池大规模应用。**三结砷化镓需依赖高精度MOCVD设备与复杂沉积工艺，且材料中关键元素如镓、砷受制于中国稀土出口管制，导致成本持续高企。2025年单瓦成本约60–70美元，是硅基电池的3–4倍；尽管全球年产能已提升至100–150MW，仍难以支撑低轨星座等批量化部署需求。

图：GaInP/GaAs/Ge三结太阳电池结构模型

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

图：砷化镓外延片、空间太阳能电池阵工艺流程



## 2.2 大规模算力中心光伏技术将采用更具成本优势的硅基技术

- 硅基HJT、铜铟镓硒薄膜、钙钛矿都是太空光伏替代高价砷化镓的潜在技术，硅基HJT短期产业化潜力最大。

Table 3. Overview of conventional and emerging solar cell architectures for space applications

Technology, processing	Architectures	Qualities	Disadvantages
III-V MJ, <sup>79-81</sup> MOVPE, sometimes referred as MOCVD (metal-organic CVD)	lattice matched (LM) →InGaP/(In)GaAs/Ge (3J): CESI, Rocket Lab, AZUR Space, SPECTROLAB	<ul style="list-style-type: none"> <li>● mature, well-understood technology</li> <li>● proven spaceflight heritage</li> <li>● high reliability</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● the Ge substrate adds weight, compromising high specific power values</li> <li>● limited flexibility</li> <li>● efficiency constrained by lattice-matching</li> </ul>
	inverted metamorphic (IMM) →InGaP/GaAs/InGaAs (3J): Rocket Lab, SolAero, MicroLink, SHARP →InGaP/GaAs/GaInAs/InGaAs (4J): Rocket Lab	<ul style="list-style-type: none"> <li>● potential higher efficiencies above 33% BOL</li> <li>● high specific power</li> <li>● lightweight due to substrate removal by ELO process</li> <li>● potential integration in flexible array designs</li> <li>● better current matching than LM</li> <li>● reduced cost if the substrates can be used several times using ELO</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● complex fabrication process; long production time</li> <li>● substrate removal required</li> <li>● limited handling for very thin devices (&lt;50 μm)</li> </ul>
	upright metamorphic (UMM) →AlInGaP/AlInGaAs/InGaAs/Ge (4J): AZUR Space	<ul style="list-style-type: none"> <li>● potential higher efficiencies above 32% BOL</li> <li>● compatible with existing LM fabrication processes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● requires high-quality buffer layers</li> <li>● strain management challenges</li> <li>● expensive and slow processing</li> </ul>
Emerging technologies			
Silicon, <sup>82,83</sup> PECVD (plasma-enhanced CVD)	heterojunction (HTJ) →a-Si:H(n)/a-Si:H(i)/c-Si(p)/Si:H(i)/Si:H(p)←: Solestial	<ul style="list-style-type: none"> <li>● enhanced radiation hardness than bulk silicon solar cells</li> <li>● suitable for thin, lightweight substrates</li> <li>● self-healing solar cell</li> <li>● cost-effective devices</li> <li>● high flexible solar assembly</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● lower efficiencies compared with III-V technologies</li> <li>● low reliability for deep-space applications</li> </ul>
CIGS, <sup>84,85</sup> thermal evaporation, electrochemical and ion-beam deposition, nanoparticle printing	monolithic-single p-n junction →ZnO/CdS/CIGS/Mo: Ascent Solar	<ul style="list-style-type: none"> <li>● high compatibility with flexible substrates</li> <li>● low processing temperatures</li> <li>● high flexibility, better suited to micrometeoroid damage or vibration</li> <li>● potential high specific power</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● lower efficiencies compared with III-V and silicon technologies</li> <li>● less proven reliability compared with Si or III-V devices</li> <li>● needs robust encapsulation for space</li> </ul>
Hybrid perovskite, <sup>18,19,37,86</sup> roll-to-roll and blade coating, inkjet printing, thermal evaporation, pulsed laser deposition	monolithic-single p-i-n junction →PEDOT:PSS/ Cs <sub>0.05</sub> FA <sub>0.81</sub> MA <sub>0.14</sub> Pb <sub>2.55</sub> Br <sub>0.45</sub> /PCBM/PEIE →PEDOT:PSS/BA <sub>2</sub> MA <sub>3</sub> Pb <sub>4</sub> I <sub>3</sub> /PCBM/PEIE: CSIRO	<ul style="list-style-type: none"> <li>● low production cost</li> <li>● low processing temperatures</li> <li>● different options of processing</li> <li>● high compatibility with flexible substrates</li> <li>● potential large production scale</li> <li>● high specific power and potential hard radiation architecture</li> <li>● high integration in tandem devices with other technologies</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● less mature technology for space applications</li> <li>● very sensitive material under different ambient stressors</li> <li>● robust encapsulation is needed to ensure its reliability in space</li> </ul>

## 2.2 光伏系统重量大，柔性电池是减重的关键

- 发射成本&卫星制造成本是太空算力卫星的最大成本项，减重是大规模产业化的核心。根据初创太空算力公司Starcloud测算，规模化后的40MW算力集群的发射成本在500万美元，是太空算力成本模型的最大新增单项费用。根据SpaceX最新报价，Falcon 9和Falcon Heavy的每kg近地轨道（LEO）发射价格分别为3000、1500美元，算力卫星&其光伏能源系统的减重成为关键。
- 电源系统占比高，是卫星减重提效的关键环节。在卫星平台各系统中，电源分系统（主要为太阳翼）重量占比高达20–30%，成本占比约22%，是最重、最贵的子系统之一。考虑到当前发射价格按重量计费大规模部署下，太阳能系统的减重直接关系到整星成本控制与发射经济性，也是未来航天电池产业化突破的重点方向。

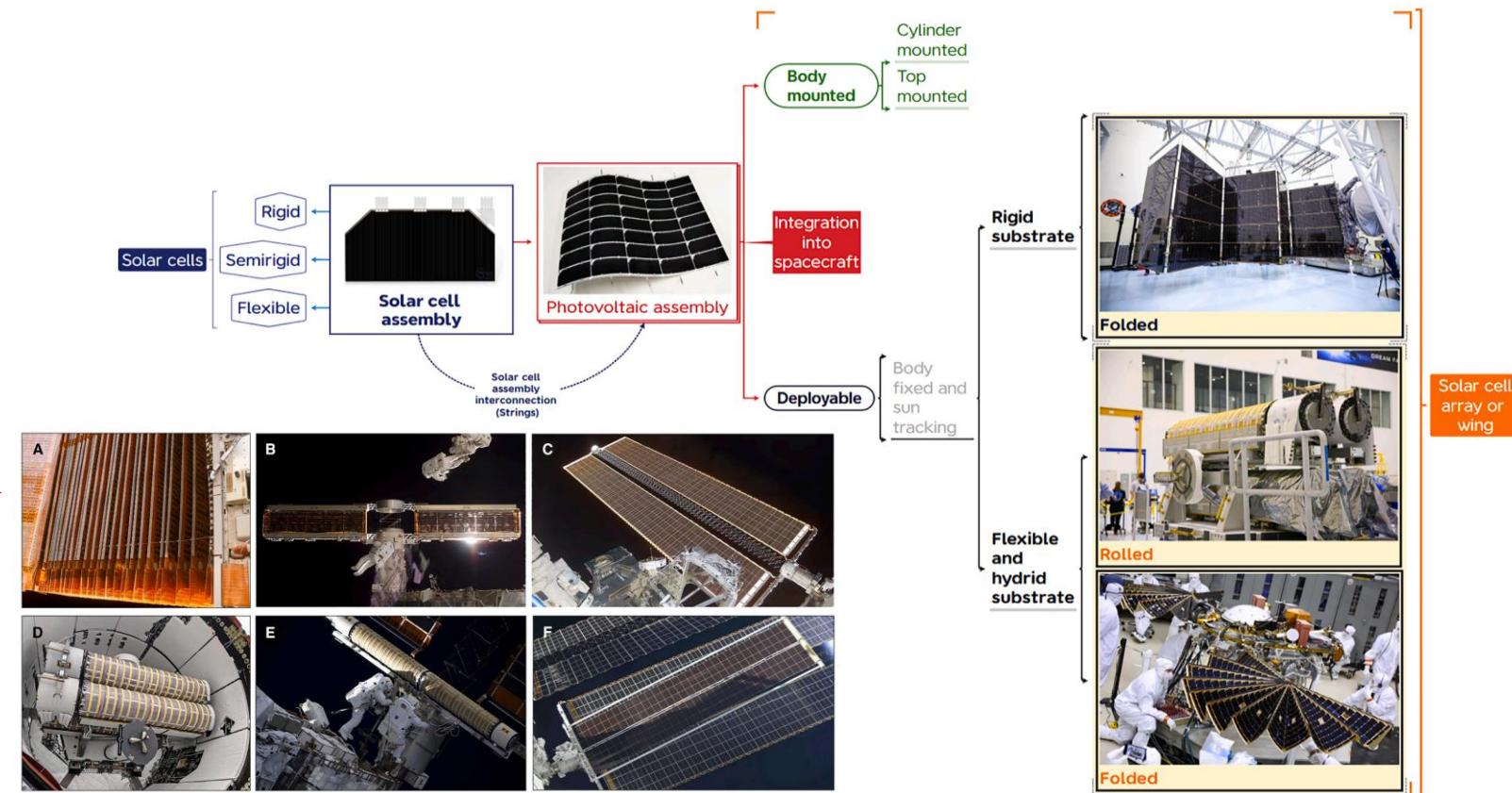
图：电源系统是卫星中重量与成本占比最高的核心单元之一



卫星组成	重量占比	成本占比	作用说明
有效载荷	30%–50%	/	实现通信功能，如天线系统负责发送和接收通信及测控信号，通信分系统对信号进行变频、放大和转发等处理
结构与结构分系统	10%–20%	~12%	为卫星提供支撑和保护，确保卫星在发射和在轨运行过程中的结构完整性
电源分系统（太阳翼）	20%–30%	~22%	采用太阳能电池板和蓄电池组成的电源系统，为卫星各系统设备供电（电池占比达50%）
热控分系统	5%–10%	~7%	通过被动热控和主动热控技术，控制卫星温度，确保设备在适宜温度范围内工作
姿轨控分系统	10%–20%	~40%	控制卫星的姿态和轨道，使卫星天线、太阳能电池板等设备对准目标方向，并保持预定轨道运行
测控与数传分系统	5%–10%	~19%	用于地面测控站进行通信、遥测、遥控，并将卫星获取的遥感数据或转发的数据传输到地面

## 2.2 卷展式光伏阵列最适配近地轨道，仅能搭载柔性电池

- 当前主流太空光伏阵列按电池刚性适配度分为三类：Z形折叠式（Folded）、卷展式（Rolled）和扇形/UltraFlex翼®。刚性较高的光伏电池必须采用Z形折叠，以避免卷绕或扇形折叠时造成电池损伤。
- 卷展式最早商业化应用，有望跟随柔性光伏电池发展再次成为主流。卷展式是最早实现规模化应用的阵列方案；然而，由于早期柔性电池转换效率和寿命偏低，国际空间站ISS于2000年12月通过STS-97任务部署了质量更大、机械结构更复杂的Z形折叠阵列。近年来，随着柔性光伏电池性能突破，卷展式阵列技术再次成为主流选择。扇形UltraFlex于2007年首飞，主要用于小型远轨（MEO、GEO）或月球/火星轨道探测卫星。



## 2.2 卷展式光伏阵列最适配近地轨道，仅能搭载柔性电池



- 卫星受发射成本与在轨寿命双重约束，卫星光伏阵列设计必须在功率质量比 (W/kg)、总重量、覆盖面积和机械稳定性之间取得最优平衡。近年来，星链、太空算力等大规模近地轨道应用场景涌现，对制造成本也提出更严苛要求。
- 当前主流的Z型折叠式 (Folded)、卷展式 (Rolled) 和扇形/UltraFlex翼®各有优劣；卷展式被普遍视为下一代低轨卫星的最优方案。①Z型折叠式：现主要用于中国天宫空间站和国际空间站。铰链与收放机构复杂，导致造价和重量显著增加；天宫空间站功率比  $\approx 40$  W/kg，ISS Legacy翼仅约 20 W/kg。②卷展式：采用卷绕收纳，省去了Z形折叠的大量铰链，机械结构简化带动成本更低、可靠性更高，且重量大幅减轻。ISS iROSA实测功率比  $> 100$  W/kg，是同级别最高纪录。③扇形/UltraFlex：功率比在三种设计中最高，地面验证平台MegaFlex功率比达 250w/kg。但扇形展开方式限制面积，仅适合小型阵列，Phoenix火星探测器翼面积仅 6.9 m<sup>2</sup>，典型应用于小型远轨或深空探测器。

图：三种主流光伏阵列技术各有优势，卷展式是大面积近地轨道的最优解

构型	名称	研制方	面积 (m <sup>2</sup> )	质量 (kg)	功率输出 (kW)	面密度 (kg/m <sup>2</sup> )	面功率 (W/m <sup>2</sup> )	功率质量比 (W/kg)
Z-折叠	ISS SAW	Boeing/SPECTROLAB	~420	~1 100	~31	2.93	~45.2-61.2	~15.5-20.9
Z-折叠	天宫	CMSA (中国载人航天工程办公室)	138	N/A	~18	N/A	~130.43	>40
卷展	iROSA	DSS (现为 Redwire)	119	~200	>20	~1.68	>169.5	>100
圆形/扇形 Ultraflex (Phoenix 着陆器)		AEC-Able Engineering (后并入 Northrop Grumman)	6.9	62	0.25	~8.99	~36.2	~112
圆形/扇形	MegaFlex	ATK (现为 Northrop Grumman)	32	~100	25	~3.13	~781.3	~250

数据来源：《Surveying the potential of flexible and high-specific-power photovoltaic assemblies and arrays for space applications》Algara et al., 东吴证券研究所

## 2.2 HJT薄片化兼具减重与柔性设计，适配下一代能源系统异形结构

- HJT可以薄片化生产，不仅减重也能适配卷展式光伏阵列的柔性设计。HJT电池可制备成超薄硅片（如 $60\text{ }\mu\text{m}$ 、 $80\text{--}110\text{ }\mu\text{m}$ 规格），仅为传统硅基电池厚度的几分之一，不仅能大幅降低卫星载荷重量，还可实现柔性设计，适配曲面卫星等特殊结构。例如德国NexWafe开发的 $70\text{ }\mu\text{m}$ 超薄HJT电池，在保证性能的同时显著提升功率重量比，已获得 $250\text{MW}$ 的超薄电池太空相关合同，用于近地轨道卫星供电。同时，美国太空光伏公司Solestial也已实现 $60\text{ }\mu\text{m}$ HJT电池连续化生产，且后续可以加装钙钛矿叠层电池达到 $30\%+$ 转换效率。

图：法国国家太阳能研究所已研发出 $60\text{ }\mu\text{m}$ 柔性太空用HJT电池可实现柔性设计，满足特殊卫星结构



Home / Latest news / Ultra-thin heterojunction photovoltaic cells for space

### Ultra-thin heterojunction photovoltaic cells for space

图：德国Nexwafe可以量产 $50\text{--}150\text{ }\mu\text{m}$  HJT电池硅片，其超薄HJT电池已获得 $250\text{MW}$ 太空用途订单

**Thin & Ultra-Thin Wafers:** Available in thicknesses from  $150\text{ }\mu\text{m}$  down to  $50\text{ }\mu\text{m}$

- Exceptional uniformity for ultra-thin wafers for space and aerospace applications
- Tunable surface morphology for superior flatness/topology

**Low Oxygen Content:** Up to  $40\times$  lower than CZ wafers

- Enhances thermal stability during processing
- Reduces efficiency loss in emitter formation
- Eliminates the root cause of light-induced degradation (LID)

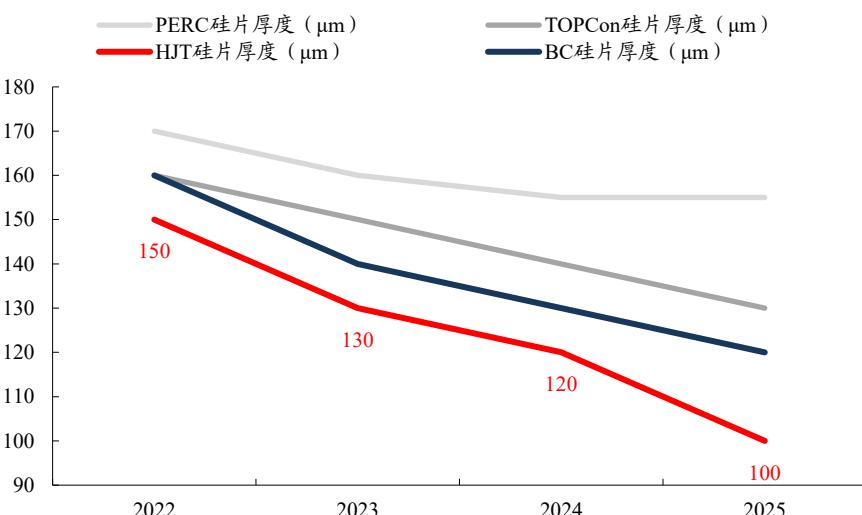
**Precision Process Control:**

- Enables engineered dopant profiles for optimized junctions

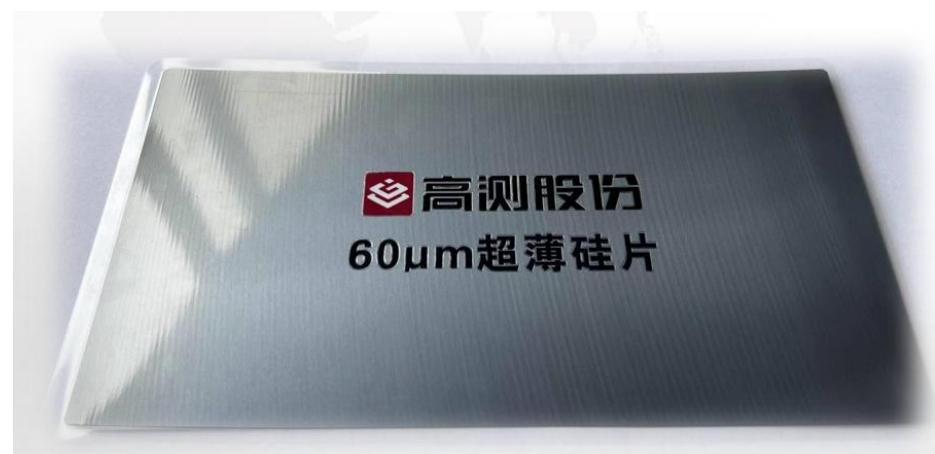
## 2.2 HJT低温工艺适配更薄硅片，相关产业链成熟

- HJT低温工艺&板式设备满足超薄硅片量产，目前已量产地用100-110 μm厚度硅片电池。HJT采用低温全流程工艺和板式镀膜设备，能够避免硅片加热后带来的翘起或碎片。HJT目前硅片厚度显著薄于TOPCon&BC且有更大的硅片减薄潜力，目前HJT、TOPCon、BC量产厚度分别在100/130/120 μm。
- 太空用超薄硅片可通过钨丝切割、激光切割或直接外延生长等方式制备，相关产业链已较为成熟。
  - ① CZ拉晶 + 钨丝切割：这是目前地面光伏组件主流的硅片制造方式，切片龙头企业高测股份于2023年已发布60 μm超薄硅片。
  - ② CZ拉晶 + 激光切割：激光切割同样可用于超薄硅片加工，关键在于效率与成本的平衡。
  - ③ CVD外延生长：德国NexWafe公司采用CVD外延技术制备单晶硅片，可直接成型50-150 μm厚度的硅片。不过，该工艺目前量产成本较高，且NexWafe仅具备约1 GW的量产产能。

图：HJT的低温工艺适配更薄的硅片厚度，目前地面用HJT组件硅片厚度普遍在110-100μm



图：高测股份于2023年发布60μm钨丝金刚线切的60μm超薄硅片

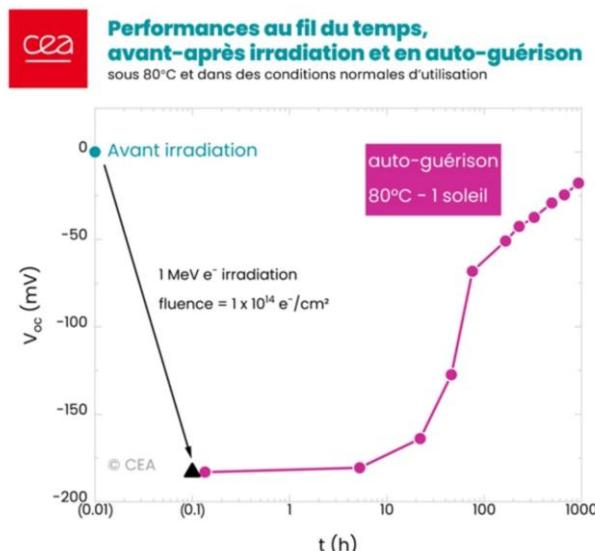


## 2.3 HJT更适配钙钛矿叠层，是终局太空光伏的最优底电池



- **HJT电池实现抗辐照后自我修复，适配低轨短期任务。** 法国国家太阳能研究所（INES）与CEA联合发布超薄HJT电池自愈技术突破，在1MeV电子辐照后，于80° C/标准日照条件下能恢复97%以上初始性能。该类电池具备成本低、辐射损伤恢复能力强、厚度薄（60–110 μm）等优势，适用于低轨通信、纳米星等成本敏感、功率需求中小型（<10kW）任务，有望成为太空硅基电池的主力候选。
- **HJT电池与钙钛矿叠层兼容性优于TOPCon。** ①低温适配性：由于HJT全程采用低温沉积工艺，生产端更加适配钙钛矿的热敏特性。②HJT-钙钛矿叠层工艺更短：HJT表面覆盖的透明导电氧化物（如TCO/ITO）可直接作为钙钛矿底部电极及复合导通层，无须额外开孔或掺杂工艺。而TOPCon结构前表面为绝缘氧化层（如SiO<sub>x</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>），必须经过激光开孔等复杂图案化处理，存在额外界面复合与均匀性控制难题，制约其与钙钛矿高效耦合。

图：法国国家太阳能研究所已研发出60 μm柔性太空用HJT电池可实现柔性设计，满足特殊卫星结构



图：美国太空光伏公司Solestial的太空用HJT电池可加装钙钛矿叠层

The screenshot shows the Solestial website. The top navigation bar includes 'Mission', 'Company', 'Products', 'Careers', and 'Newsroom'. The main content area features a section titled 'Silicon heterojunction technology' with the following text:  
Solestial is leveraging three decades of progress in terrestrial silicon heterojunction technology to mass produce ultrathin solar cells. Silicon heterojunction technology allows us to make cells at very low temperatures, and without introducing stress, enabling cells that are 60 microns. Silicon heterojunction technology achieves the best possible surface passivation, enabling high efficiency on very thin wafers.  
Below this, two circular icons are shown: one for '20%\* beginning-of-life efficiency' and another for 'Potential for over 30% efficiency'. At the bottom, a note states: 'The next step for silicon solar technology is two-junction tandem integration. Recently, perovskite has been developed as a perfect top cell partner for silicon. We expect that perovskite technology will mature over the next 5-10 years to give our silicon technology a 10% absolute efficiency boost.'

## 2.3 钙钛矿硅基叠层电池是终局太空光伏的最优底电池



- 钙钛矿具备高光电转换效率、极轻量、柔性可变形的结构优势，是空间光伏第三代材料的核心方向。在叠层结构中可与HJT/CIGS等材料实现光谱互补，显著提升效率上限。其可溶液工艺支持低成本制备，单位功率成本潜力优于GaAs与硅基，有望在低轨短期卫星、纳米星、柔性平台中实现更优性价比。
- 钙钛矿产业化仍需数年爬坡验证，远期晶硅+钙钛矿叠层电池是太空光伏的最优电池方案。尽管钙钛矿在性能上表现亮眼，但其在太空环境下仍面临辐照稳定性不足、极端温差易剥离、封装难度高等工程难题。目前多项技术仍停留在试验星验证阶段，商业化仍需3-5年攻关周期。结构复杂的钙钛矿叠层（如钙钛矿/钙钛矿）则面临良率与一致性控制问题，但未来搭配晶硅电池叠层后是太空光伏的最优电池技术。

图：钙钛矿基空间光伏代表未来趋势

维度	钙钛矿单结	钙钛矿/CIGS叠层	钙钛矿/晶硅叠层	钙钛矿/钙钛矿叠层
应用场景	低轨、热控友好场景、小型任务，适配柔性载体	相比之下成本略低	大功率地面衍生技术，适配高功率中轨任务	极轻量小载荷任务、短期试验星
环境适应性	抗辐照能力增强，温漂系数优秀	已实现68MeV质子照射保持80%性能	抗辐射强化，晶硅较硬，需额外结构设计	极端稳定性差，辐射数据不足
优势	高效轻薄，柔性结构兼容性好，成本潜力大	光谱互补性佳，性价比适中	电学性能优、成熟产业链配套	极致轻量，但产业链/稳定性均不足
劣势	转换效率仍低于叠层上限，封装要求高	模组化能力弱、效率上限受限	极端温差适应性不强，装配复杂	稳定性差、制备良率低、均匀性控制难
当前进展	多颗试验星在轨验证，2023起启动商业验证	已开始在轨示范	验证数据逐步积累，但仍早期	数据少、尚属前沿探索阶段

## 2.4 受益于较短工艺流程，硅基HJT电池最适合在美生产



- 中美光伏制造最大区别是成本要素不同，美国光伏生产成本结构与中国存在显著差异。中国的主要成本为设备CAPEX，美国则更加注重OPEX与设施成本。主要系：（1）美国单GW工厂（greenfield，即在未开发土地上新建）的投资额高达8000万美元，是中国工厂的8至10倍，且建设周期更长，通常需要1至2年时间才能完成建设；（2）美国污水处理成本高昂；（3）美国人工成本较高，招聘困难，尤其是工厂通常位于乡村地区，这进一步增加了劳动力成本和招聘难度。
- HJT凭借其更少的水电与人力需求，成为最适合美国本土扩产的光伏技术。相比较TOPcon，HJT可降低20%的碳排放（全流程低温工艺）、节约70%的用电量（工序少&低温工艺）、节约60%的人工数量（仅4道工序）、节约20%-60%的用水量，因此是最适合美国本土扩产的光伏技术路线。

◆ 图：HJT在人力、厂房水电用量上均有较高成本优势



## 2.4 受益于较短工艺流程，硅基HJT电池最适合在美生产



- HJT在美国的成本优势主要得益于其生产工艺相对简单，流程较TOPCon显著缩短。HJT生产只需要4大类设备，分别是制绒清洗设备、非晶硅沉积设备、透明导电薄膜设备和印刷设备，相比于PERC/TOPCon电池少了扩散、激光和刻蚀等步骤。
- 受益于较短的工艺流程，HJT相比TOPCon具备较低的人力、厂房投资、水电耗量和维护成本。考虑到美国更高的人力与资源成本，降本优势更具迫切性。

◆表：HJT生产工序仅需四步

工艺环节	对应设备	主要厂商
清洗制绒	清洗制绒设备	捷佳伟创、启威星（迈为股份参股30%）、京山轻机、YAC
非晶硅薄膜沉积	PECVD设备	迈为股份、金辰股份、捷佳伟创、理想万里晖、钧石能源
	PVD设备	迈为股份、钧石能源、捷佳伟创
TCO膜沉积	RPD设备	捷佳伟创、日本住友、精耀科技
电极设备	丝网印刷设备	迈为股份、金辰股份、捷佳伟创

◆表：TOPCon生产工序繁杂

工艺环节	对应设备	主要厂商
清洗制绒	清洗制绒设备	捷佳伟创、尚德、聚晶
硼扩	扩散炉	拉普拉斯、捷佳伟创、赛瑞达、北方华创
刻蚀	刻蚀机	捷佳伟创、北方华创
	LPCVD	拉普拉斯、红太阳、赛瑞达
SiO <sub>2</sub> /Poly-Si LP/PE/PVD	PECVD	捷佳伟创、金辰股份、红太阳、理想
	PVD	江苏杰太
	PEALD	江苏微导
磷掺杂	扩散炉	捷佳伟创、红太阳、丰盛、拉普拉斯、北方华创
	离子注入机	凯世通、Intevac、日本真空
退火	退火炉	捷佳伟创、江苏微导
清洗	湿法设备	捷佳伟创、北方华创、丰盛装备
正面Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ALD	江苏微导、理想
正反面SiN <sub>x</sub> 膜	PECVD	捷佳伟创、北方华创、丰盛装备
印刷烧结	丝网印刷	迈为股份、东莞科隆威

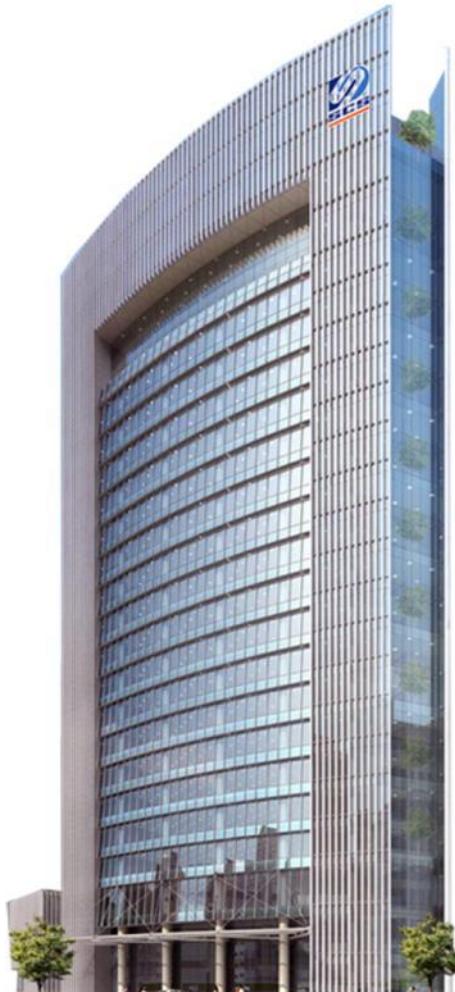
## 2.4 美国专利保护机制完善，TOPCon与BC有较大专利风险



- 随着海外产能的陆续布局和出货，2023年以来海外开启大量光伏专利诉讼，主要涉及TOPCon与BC专利；HJT海外生产没有专利风险。
- (1) TOPCon相关诉讼主要由美国公司First Solar、Maxeon和韩华Q Cells等发起，First Solar的TOPCon相关专利主要来自2013年收购的TetraSun公司，Maxeon和韩华 Q Cells也拥有大量TOPCon专利，一方面三者在美国就TOPCon专利存在纷争，如Maxeon2024年4月就TOPCon专利问题起诉韩华Q Cells，另一方面First Solar也向中国的阿特斯、晶澳、隆基、晶科和天合发起TOPCon专利诉讼。
- (2) BC相关诉讼主要由TCL中环的子公司Maxeon提起，Maxeon是BC技术的开创者，全球布局了超过百项BC相关专利，同时Maxeon也拥有其前母公司SunPower的部分TOPCon专利。
- 相较于TOPCon和XBC，HJT技术没有专利风险。HJT技术最早由日本三洋公司1987年研发取得专利后并于1997年开始商业化生产，松下收购三洋后继续推进该技术方向并进行HJT+IBC (Interdigitated Back Contact) 叠加工艺的研发。2015年随着松下的HJT技术专利保护期结束，更多的光伏企业进入到该技术领域的研发序列。故目前HJT电池无专利风险，相比于TOPCON电池也是一大优势。

### ◆ 表：2023年底以来出现大量BC及TOPCon专利诉讼

日期	相关技术	起诉方	被诉方	受理法院	涉及专利
2023/11	xBC	Maxeon	爱旭股份	德国地方法院、荷兰海牙地方法院	EP2297788B1
2024/03	TOPCon	Maxeon	Canadian Solar (阿特斯子公司)	美国得克萨斯州东区联邦法院	US8222516、US8878053、US11251315
2024/04	TOPCon	Maxeon	韩华 Q Cells	美国得克萨斯州东区联邦法院	TOPCon 电池技术相关专利
2024/05	TOPCon	天合光能	润阳新能源	美国特拉华州地方法院	US9722104、US10230009
2024/09	TOPCon	晶澳科技	正泰新能	慕尼黑法院	EP2787541B1
2024/09	TOPCon	天合光能	润阳新能源	加州中区地方法院	US9722104、US10230009
2024/09	TOPCon	天合光能	润阳新能源、印度Adani集团	美国ITC	US9722104、US10230009
2024/10	TOPCon	天合光能	阿特斯	美国特拉华州地方法院	US9722104、US10230009
2024/10	TOPCon	First Solar	阿特斯、晶澳科技、隆基绿能、晶科能源、天合光能	法律团队致函	TOPCon 晶体硅光伏技术专利
2025/1	TOPCon	韩华 Q Cells	“几家全球光伏制造商”	发起知识产权纠纷中	TOPCon LECO技术专利



1 太空算力中心有颠覆性优势，光伏能源系统为关键组件

2 硅基电池是大规模应用的最优解，其中HJT最适配

3 市场空间有多大？

4 投资建议

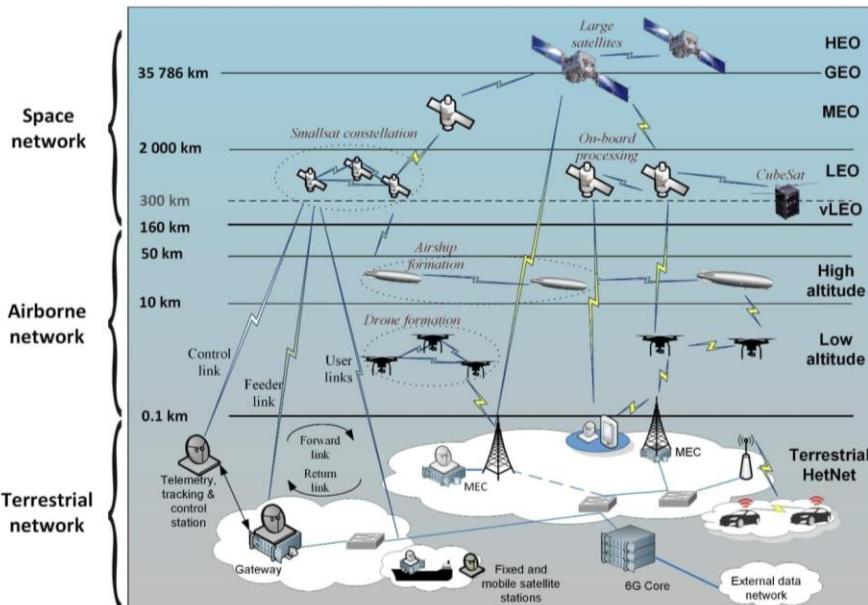
5 风险提示

### 3.1 主流卫星轨道分为LEO、MEO、GEO，LEO低地球轨道性价比最优



- 主流卫星轨道根据距离地面高度分为LEO、MEO、GEO，低地球轨道LEO卫星数量最多且延迟最小。
  - ①GEO卫星（高轨道约35,786公里）：同步地球自转，地面观察卫星位置固定不动，可持续覆盖固定区域。优点是覆盖范围广（单星覆盖约三分之一地球）、地面天线无需跟踪；缺点是距离远导致单程信号延迟约0.24秒，往返近0.5秒，对时延敏感业务不利。
  - ②MEO卫星（中轨道约2,000–35,785公里）：高度和覆盖介于GEO与LEO之间，信号延迟和覆盖范围适中，绕地一周约需2–12小时。典型如GPS导航卫星（约2万公里），通信领域中也有03b等中轨卫星用于互联网接入。MEO卫星所需数量比LEO少，但延迟和信号损耗较LEO大。
- 发射成本随轨道距离增加而上升，载荷则随发射距离增加而减少。由于远距离发射需要更多燃料，火箭在载重有限的情况下必须减少载荷重量；导致单次发射的载荷更少、燃料更多，进而导致远距离发射不仅成本远高于近地轨道，且载荷重量更低。

◆图：主流卫星主要分布在LEO、MEO、GEO轨道



◆图：轨道越高发射成本越高，载荷越小

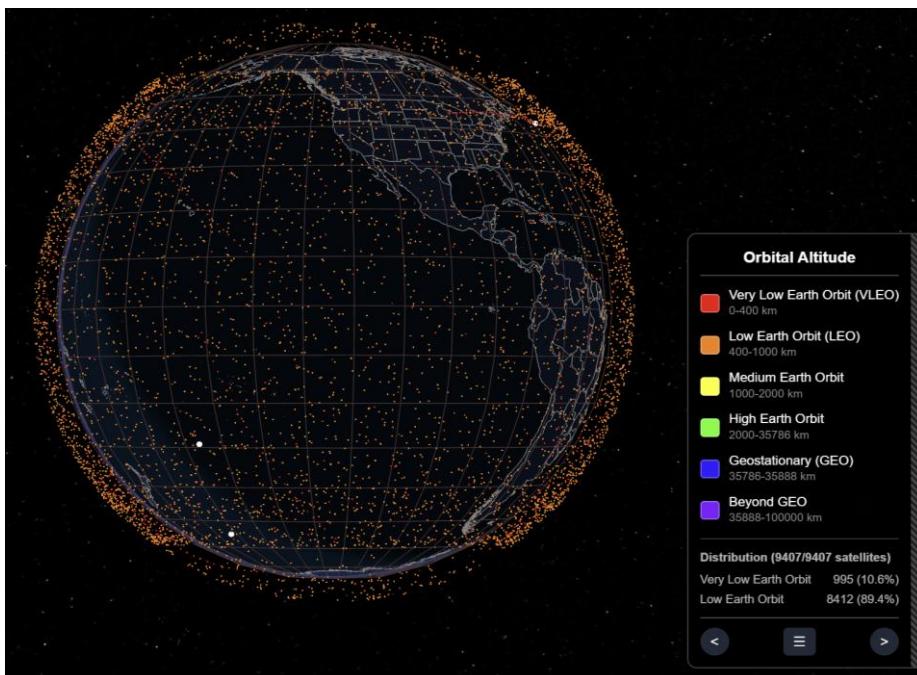
轨道类型	典型高度 / 倾角	每公斤价格 (2025年, 美元)	Falcon 9 有效运力 (kg, 2025年block5)
LEO (基准)	200–500 km / 28–53°	1 500–2 500	17 000
LEO-SSO	600 km / 97–98°	2 500–4 000	11 000
MEO	20 000 km / 55° (GPS)	8 000–15 000	4 500
GEO	35 786 km / 0°	12 000–20 000	2 600

根据2025年6月SpaceX Falcon9成本价计算

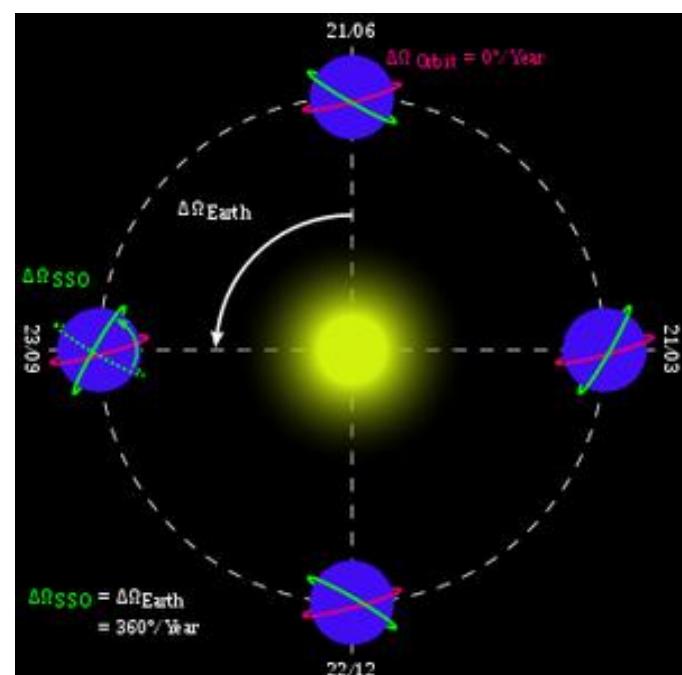
### 3.1 主流卫星轨道分为LEO、MEO、GEO，LEO低地球轨道性价比最优

- ③LEO卫星（低轨道约300–2,000公里），发射成本低，是大规模部署的最主流轨道：离地近，绕行一周约90分钟，单星覆盖范围小且相对于地面高速移动。需大量卫星组成星座实现不间断覆盖，但由于距离近，信号延迟很低、通信质量好。近年兴起的卫星互联网星座（如Starlink）大多属于LEO类型，截至2025年12月26日全球在轨的9407颗卫星中89.4%为LEO卫星。
- LEO-SSO卫星（太阳同步轨道，高度约600–800km）是算力中心的最优轨道：其轨道面与地球晨昏线同步进动，每天几乎在相同地方时穿越赤道，可维持恒定光照条件，既利于对地观测，也适合高功耗卫星。该轨道成像光照角稳定、阴影时间短，全年日照时长超过8300h，是高功耗数据中心的最优轨道。

◆ 图：全球约90%卫星均为LEO卫星



◆ 图：SSO轨道不覆盖地球阴影面，全年日照时长最高



## 3.2 SSO是算力卫星的最优轨道，仍有约9616个轨道空间

- SSO是算力卫星的最优轨道。**日照时间最长的太阳同步轨道（SSO）集中在600–800km高度、96–99° 倾角，可全年几乎不间断受晒，2023–2024年在该区域运行约780颗卫星，主要为光学遥感、雷达遥感与气象科研星。由于24h持续光照能满足高功耗散热需求，该轨道也被视为算力卫星的首选；谷歌的Suncatcher计划与英伟达参股的Starcloud均拟在此部署大型算力星座。
- SSO在30KM卫星间距下仍可容纳9616个新增卫星集群。**可用SSO轨道主要分布在600–800km高度。若按当前主流的50km层间隔，共得5个轨道层；若压缩至30km（接近25km黄色预警限），则可增至7层，对应22万km与31万km的有效轨道长度。再假设同一层内卫星平行间隔分别为50km与30km，减去在轨的780颗卫星后整个SSO带仍可再容纳3662颗（50km间隔）或9616颗（30km间隔）卫星或集群。

◆ 图：最优部署轨道-太阳同步轨道在50KM间距和30KM间距下仍有3662/9616颗卫星空间

卫星间距 50KM	高度 (KM, 对应倾角 96–99°)	半径R (KM, R=地球平均半径+轨道高度)	周长C (KM, C = 2πR)	卫星间距 30KM	高度 (KM, 对应倾角 96–99°)	半径R (KM, R=地球平均半径+轨道高度)	周长C (KM, C = 2πR)	
	600	6971	43800		630	7001	44000	
	650	7021	44110		660	7031	44190	
	700	7071	44420		690	7061	44380	
	750	7121	44730		720	7091	44570	
	800	7171	45040		750	7121	44730	
	总轨道长度 (KM, =区间轨道周长总和) ①		222100		780	7151	44920	
	对应卫星数量 (个, 间距50KM) ②=① /50km				810	7181	45110	
	现在轨卫星数量 (个) ③		4442	总轨道长度 (KM, =区间轨道周长总和) ①		311900	10396.7	
	剩余卫星空间 (个) ④=②-③			对应卫星数量 (个, 间距30KM) ②=① /30km		780		
	现在轨卫星数量 (个) ③			现在轨卫星数量 (个) ③		780		
剩余卫星空间 (个) ④=②-③				剩余卫星空间 (个) ④=②-③		9616.7		

### 3.2 LEO也可兼容算力卫星，仍有约7.9万个轨道空间



- 除SSO之外，轨道速度更高的LEO也是算力卫星的可行选项。以500km、7.6km/s的轨道为例，卫星每24h可绕地球15.2圈；53°倾角下，每圈阴影仅8.7min，全天累计130min，日照比例达91%，只需配置小型电池即可满足数据中心连续供电。
- LEO在30KM卫星间距下仍可容纳7.9万个新增卫星集群。可用LEO主要集中在300-2000KM高度，可以用倾角包括53-97°，按当前主流的50km层间隔，共得34个轨道层；若压缩至30km（接近25km黄色预警限），则可增至56层，对应160万km与268万km的有效轨道长度。再假设同一层内卫星平行间隔分别为50km与30km，减去目前在轨的1万颗卫星后整个LEO带仍可再容纳2.2万颗（50km间隔）或7.9万颗（30km间隔）卫星或集群。

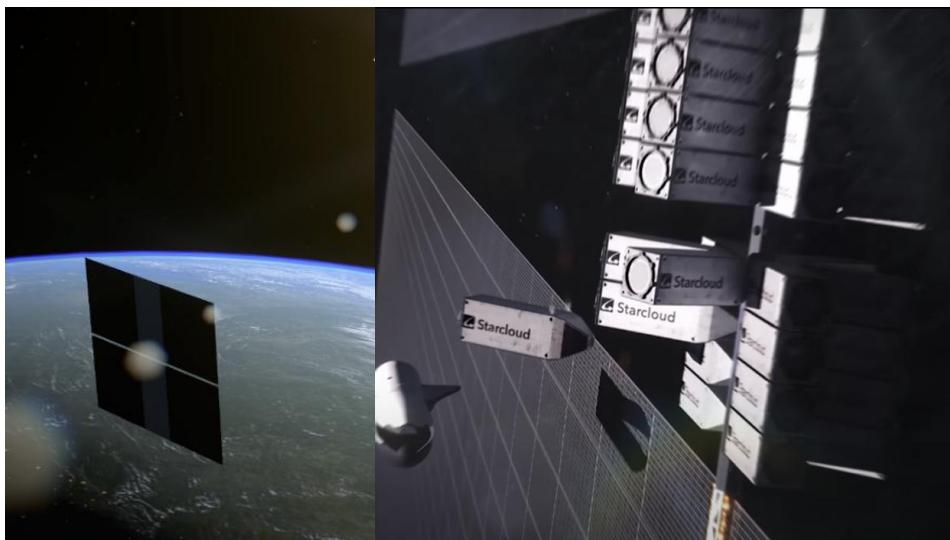
#### ◆ 低地球LEO轨道在50KM间距和30KM间距下仍有2.2/7.9万颗卫星空间

50KM间距-LEO (300-2000KM高度, 53-97°倾角, 50KM卫星间距)		30KM间距-LEO (300-2000KM高度, 53-97°倾角, 30KM卫星间距)	
轨道数（个, 1700KM/50KM）①	34.0	轨道数（个, 1700KM/30KM）①	56.7
周长（万KM, 中位数1150KM轨道）②	4.7	周长（万KM, 中位数1150KM轨道）②	4.7
总轨道长度（万KM, =区间轨道周长总和）③ =①*②	160.8	总轨道长度（万KM, =区间轨道周长总和）③ =①*②	268.0
对应卫星数量（个, 距离50KM）④=③ /50km*10k	32164.0	对应卫星数量（个, 距离50KM）④=③ /30km*10k	89344.4
现在轨卫星数量（个）⑤	10200.0	现在轨卫星数量（个）⑤	10200.0
剩余卫星空间（个）⑥=④-⑤	21964.0	剩余卫星空间（个）⑥=④-⑤	79144.4

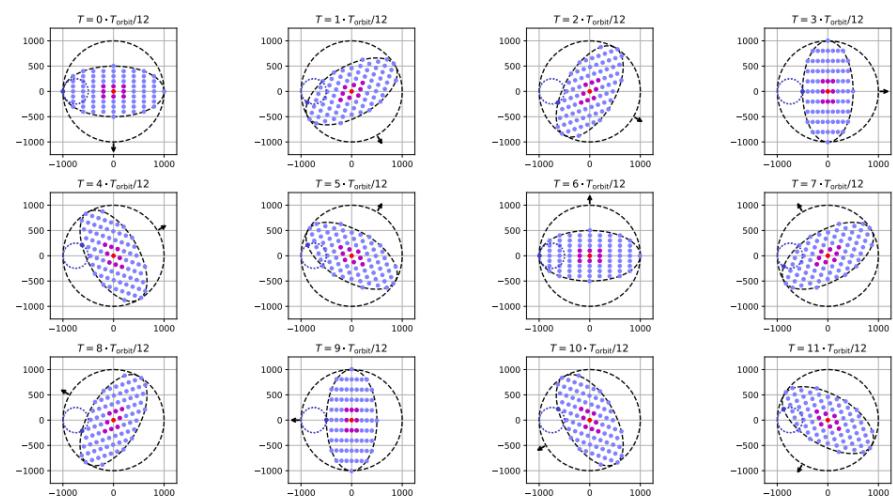
### 3.3 高质量轨道空间有限，未来将走向大型单星或多星集群

- 受轨道空间限制，未来大功率太空算力将走向单星大型化或多星集群化两条路径。
- ①Starcloud：在 SSO 轨道部署  $4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$  光伏阵列母舰，算力模块通过标准接口对接母舰，该系统能够形成 5 GW 级算力集群。
- ②谷歌Suncatcher：在同一轨道位置用自主动力控制 81 颗卫星组成椭圆编队，只占一条轨道席位即可把算力放大 81 倍；技术成熟后可扩展至 324 星，按单星 100 kW（当前中大型卫星主流功率）估算，整簇功率 32.4 MW。

◆ 图：Starcloud 16万 m<sup>2</sup>光伏母舰可搭载多个算力模块



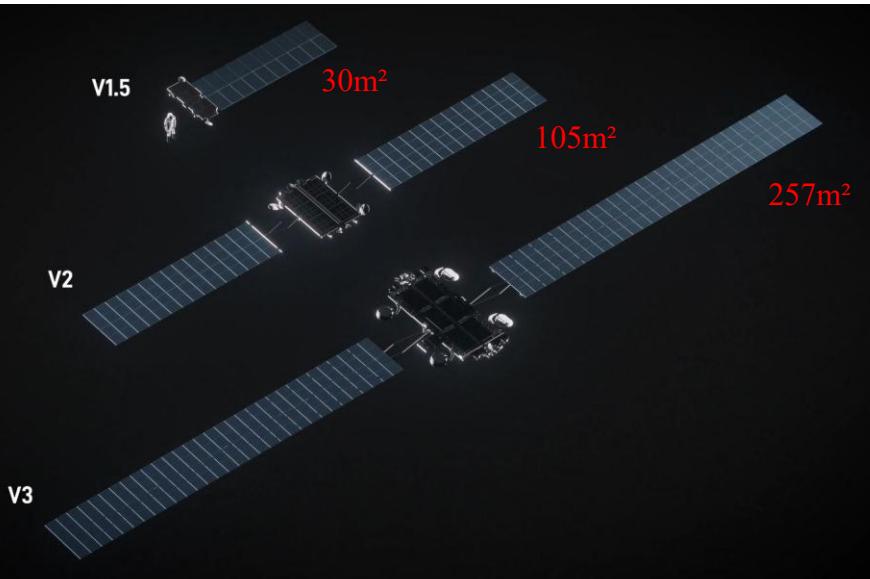
◆ 图：谷歌通过卫星编队来节省轨道空间，初期方案计划81颗星椭圆编队



### 3.3 光伏阵列持续放大，且单星可搭载多个太阳翼

- 卫星太阳翼持续放大，Starcloud5GW太空算力中心光伏组件面积 $4\text{km} \times 4\text{km}$ 。SpaceX星链卫星已从V1.5代 $30\text{m}^2$ 提升至V3代 $257\text{m}^2$ ，后续算力卫星光伏面积有望继续扩大。Starcloud5GW太空算力中心设计光伏组件面积 $4\text{km} \times 4\text{km}$  ( $1600\text{万 m}^2$ )。
- 单颗卫星也可搭载多个太阳翼，ISS8个主太阳翼对应 $2500\text{m}^2$ 。以初代国际空间站为例，其拥8个主要太阳翼，合计面积超 $2500\text{m}^2$ 。

◆ 图：SpaceX 星链卫星光伏面积持续放大



◆ 图：初期国际空间站拥有8个太阳翼，合计面积 $2500\text{m}^2$

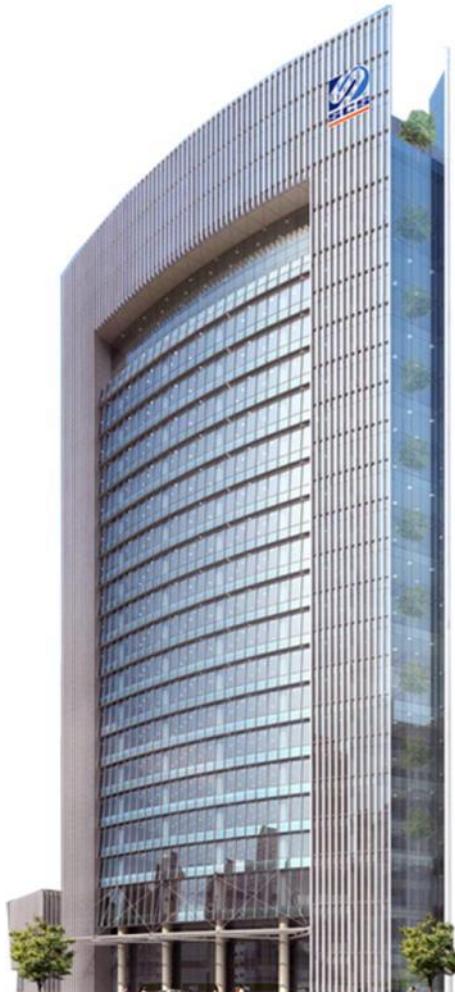


### 3.4 当前10GW电池产能对应约448个谷歌324算力星编队

- 10GW对应多少颗算力卫星？我们以现有StarlinkV3与Starcloud太空母舰的光伏组件尺寸为基准，并假设采用地面G12-132组件的面积与功率密度（ $2.6\text{m}^2$ , 约 $0.69\text{kW}$ ），则10GW光伏电池产能对应：
- ①14.5万颗StarlinkV3卫星
- ②448个谷歌Suncatcher324星编队
- ③2座Starcloud太空母舰。
- ④后续SpaceX太空算力卫星因算力电力需求，其光伏面积有望进一步放大。若SpaceX算力卫星的光伏组件增至 $800\text{m}^2/\text{颗}$ ，则10GW产能可支持约4.6万颗此类卫星。

◆ 图：10GW对应约448个谷歌Suncatcher324星编队

	Starlink V2	Starlink V3	Space X 太空算力卫星（假设）	Starcloud 太空母舰	谷歌Suncatcher（324星编队）
光伏组件面积 ( $\text{m}^2$ ) ①	105	257	800	16000000	83268 (324星* $257\text{m}^2$ )
G12-132地面HJT组件面积 ( $\text{m}^2$ ) ②	2.61	2.61	2.61	2.61	2.61
卫星组件对应HJT组件数量 (个) ③=②/ ①	40.2	98.5	306.5	6130268.2	31903.4
普效G12-132组件功率 (w) ④	700	700	700	700	700
单个卫星光伏系统功率 (mw) ⑤=④*③/ 1000000	0.03	0.07	0.21	4291.19	22.33
<b>10GW产能对应多少个算力卫星 (个) ⑥ =10GW/⑤</b>	<b>355102</b>	<b>145081</b>	<b>46607</b>	<b>2</b>	<b>448</b>



1 太空算力中心有颠覆性优势，光伏能源系统为关键组件

2 硅基电池是大规模应用的最优解，其中HJT最适配

3 市场空间有多大？

4 投资建议

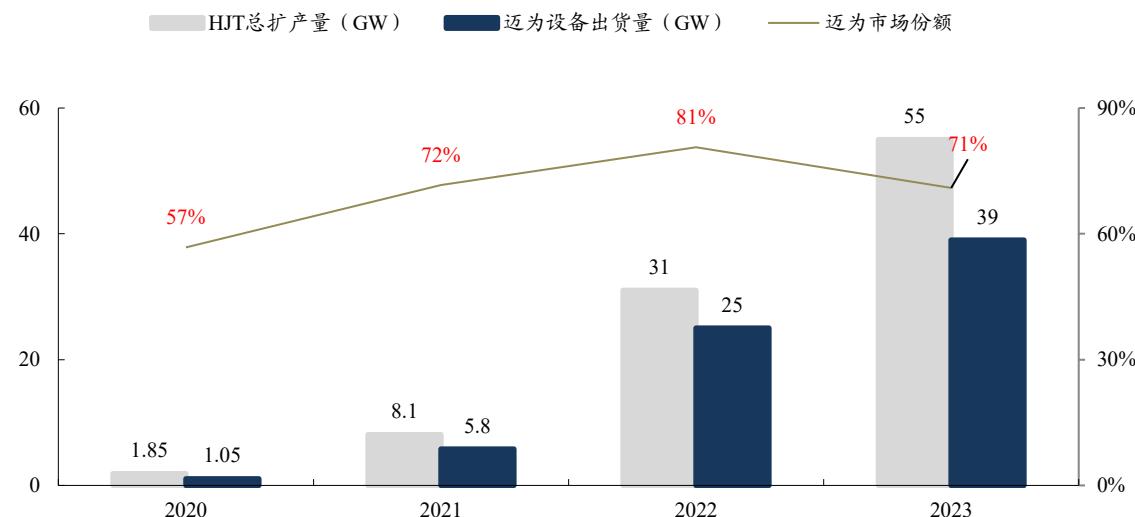
5 风险提示

## 4.1 迈为股份：美国客户HJT整线首选迈为，HJT整线龙头先发优势显著



- 迈为行业龙头地位稳固，2021年以来HJT设备市场占有率超70%，先发优势显著。2020年市场约1.85GW订单，公司中标量1.05GW，市占率57%；2021年市场约8.1GW订单，公司中标量为5.8GW，市占率72%；2022年市场31GW订单，公司中标量25GW，市占率81%；2023年国内市场招标量55GW，迈为股份中标量达39GW，市占率71%。
- (1) 量产经验充足，设备在客户端持续得到反馈并加以改进。迈为客户主要包括通威、华晟、REC、金刚玻璃、日升等HJT电池龙头企业。公司通过客户反馈以及产线数据不断积累经验，加速技术改进，形成专利壁垒。
- (2) 迈为积极推进设备迭代优化。清洗制绒环节推出背抛技术，CVD环节推出1GW大产能的设备，PVD环节推出RPD+PVD结合的PED设备，丝网印刷环节推出钢网印刷，并持续迭代至第三代。

◆ 图：2021年以来迈为股份HJT电池设备市占率超七成

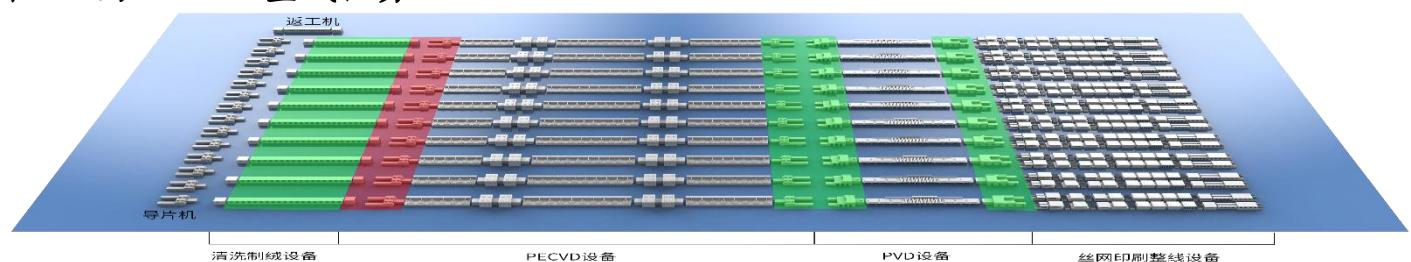


## 4.1 迈为股份：美国客户HJT整线首选迈为，HJT整线龙头先发优势显著



- 迈为1.2GW设备提升生产节拍，适合OPEX敏感的美国客户。（1）场地：1.2GW设备能够节省厂房空间约30%，在470m\*125m的厂房内，可以容纳12GW产线，同时由于产线中道均为真空环境，洁净厂房的需求减少到原来的1/3，大量节省产线耗电量，还降低洁净厂房维护费用。（2）人工：预计整体降低30%，特别清洗制绒、PECVD、PVD等人工需求可以减少一半，印刷人工需求可降低80%。（3）用电：整线设备用电降低20%-30%，厂房设施用电可降低40-50%。（4）靶材：预计能够降低到1.5mg/W。（5）稳定性：迈为的HJT整线设备经过市场长时间的验证和不断的反馈迭代，性能及稳定性更好。
- 迈为设备交付周期更快。其在2024年建成的吴江新基地，每年能够生产70-80GW HJT设备。

图：迈为4.0 HJT整线优势



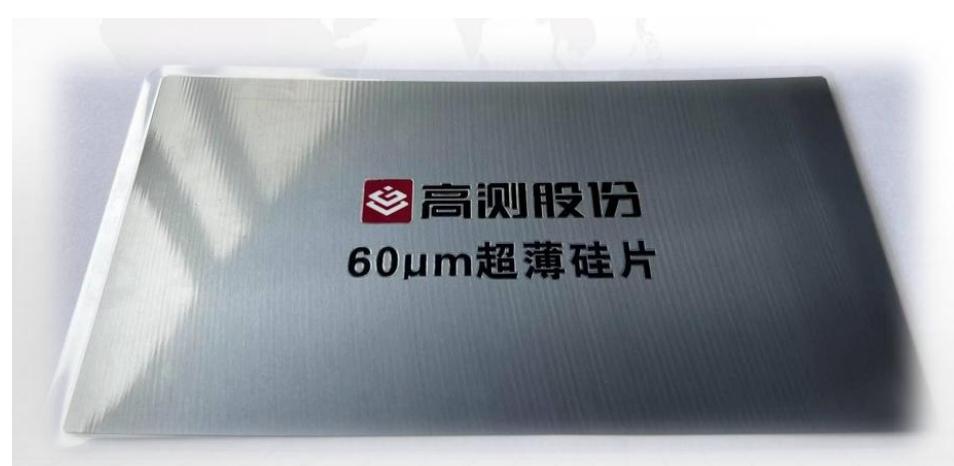
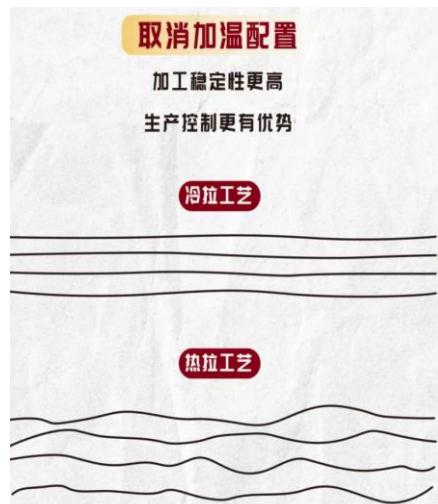
### 4.0 整线较上一代 3.0 整线降低非硅成本2.5-3分/W

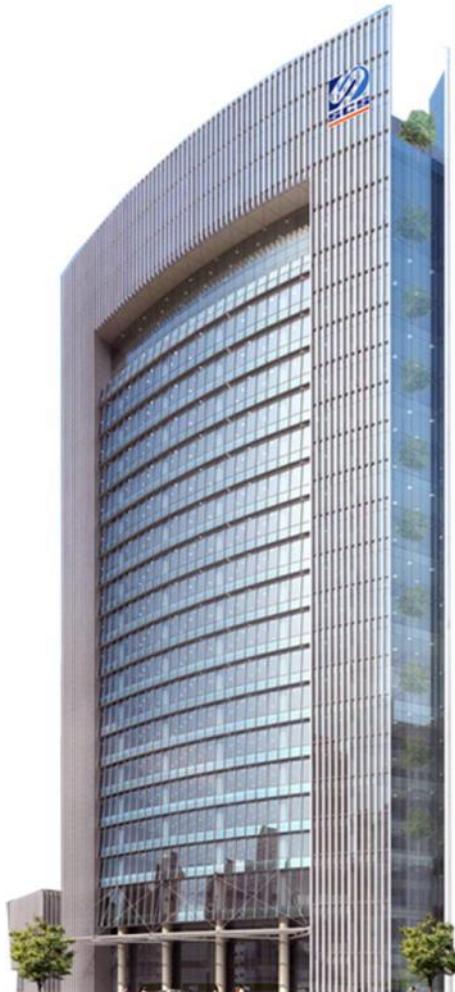
- 设备占地（470m\*125m摆放12GW设备）面积节省 34%+
- 现场人员数量降低 25%+
- 设备用电量降低20%+，设施用电量降低30%+
- 厂务设施投资降低30%+
- 靶材消耗量降低1.5mg/W

## 4.2 高测股份：切割工艺与薄片化能力助力薄片太空电池



- 高测股份在硬脆材料切割设备与金刚线耗材领域持续领先，支撑光伏产业薄片化发展。公司早在2020年前后即完成对钨丝母线冷拉装备的布局，通过高强度钨丝替代传统碳钢丝，实现线径持续细化、张力控制更稳定，适配P型、N型等各类硅片切割。2022年起，公司细线化金刚线批量进入头部客户，搭配自主多线切割机设备，形成“设备+耗材”一体化优势，支持高效稳定切割多种硬脆材料（包括光伏硅片、蓝宝石等）。
- 推进超薄硅片制造进程， $60\mu\text{m}$ 硅片已实现量产突破。2023年公司正式实现 $60\mu\text{m}$ 超薄硅片切割验证，成为业内首批具备此能力的企业之一。薄片化不仅提升光伏发电效率、减轻整组件重量，也为未来空间光伏与轻质柔性组件奠定基础。
- ◆ 图：相比传统热拉法，高测“钨丝冷拉”工艺是细金刚线→薄硅片的核心
- ◆ 图：高测股份于2023年发布 $60\mu\text{m}$ 钨丝金刚线切的 $60\mu\text{m}$ 超薄硅片





1 太空算力中心有颠覆性优势，光伏能源系统为关键组件

2 硅基电池是大规模应用的最优解，其中HJT最适配

3 市场空间有多大？

4 投资建议

5 风险提示

## 风险提示

1. **行业受政策波动影响风险：**目前，光伏电价与发电侧的平价上网仍有一定差距，因此该行业受政策及补贴影响较大，弃光限电和政府拖欠问题依然较为突出；其次，在未实现平价上网前，光伏行业对政府补贴仍有一定的依赖性。
2. **新技术研发不及预期风险：**光伏新技术，工艺成熟是一个多维度均达标的系统工程，量产取决于包括设备、耗材在内的多因素，由于技术创新受各种客观条件的制约，存在失败的风险。
3. **太空算力发展不及预期风险：**太空算力目前处于初期验证阶段，产业化存在较多不确定因素，存在失败的风险。

# 免责声明



东吴证券股份有限公司经中国证券监督管理委员会批准，已具备证券投资咨询业务资格。

本研究报告仅供东吴证券股份有限公司（以下简称“本公司”）的客户使用。本公司不会因接收人收到本报告而视其为客户提供。在任何情况下，本报告中的信息或所表述的意见并不构成对任何人的投资建议，本公司及作者不对任何人因使用本报告中的内容所导致的任何后果负任何责任。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。

在法律许可的情况下，东吴证券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并进行交易，还可能为这些公司提供投资银行服务或其他服务。

市场有风险，投资需谨慎。本报告是基于本公司分析师认为可靠且已公开的信息，本公司力求但不保证这些信息的准确性和完整性，也不保证文中观点或陈述不会发生任何变更，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。

本报告的版权归本公司所有，未经书面许可，任何机构和个人不得以任何形式翻版、复制和发布。经授权刊载、转发本报告或者摘要的，应当注明出处为东吴证券研究所，并注明本报告发布人和发布日期，提示使用本报告的风险，且不得对本报告进行有悖原意的引用、删节和修改。未经授权或未按要求刊载、转发本报告的，应当承担相应的法律责任。本公司将保留向其追究法律责任的权利。

## 东吴证券投资评级标准

资评级基于分析师对报告发布日后6至12个月内行业或公司回报潜力相对基准表现的预期（A股市场基准为沪深300指数，香港市场基准为恒生指数，美国市场基准为标普500指数，新三板基准指数为三板成指（针对协议转让标的）或三板做市指数（针对做市转让标的），北交所基准指数为北证50指数），具体如下：

### 公司投资评级：

- 买入：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在15%以上；
- 增持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于5%与15%之间；
- 中性：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于-5%与5%之间；
- 减持：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准介于-15%与-5%之间；
- 卖出：预期未来6个月个股涨跌幅相对基准在-15%以下。

### 行业投资评级：

- 增持：预期未来6个月内，行业指数相对强于基准5%以上；
- 中性：预期未来6个月内，行业指数相对基准-5%与5%；
- 减持：预期未来6个月内，行业指数相对弱于基准5%以上。

我们在此提醒您，不同证券研究机构采用不同的评级术语及评级标准。我们采用的是相对评级体系，表示投资的相对比重建议。投资者买入或者卖出证券的决定应当充分考虑自身特定状况，如具体投资目的、财务状况以及特定需求等，并完整理解和使用本报告内容，不应视本报告为做出投资决策的唯一因素。

东吴证券研究所  
苏州工业园区星阳街5号  
邮政编码：215021  
传真：(0512) 62938527  
公司网址：<http://www.dwzq.com.cn>



东吴证券 财富家园