

# 商业航天行业研究系列 6

买入 (维持评级)

行业深度研究

证券研究报告

电子组

分析师: 陈奕骄 (执业 S1130525100001) 分析师: 樊志远 (执业 S1130518070003)

chenyj@gjzq.com.cn

fanzhiyuan@gjzq.com.cn

## 平流层之上的掘金战：超低轨卫星产业深度

### 行业观点

- 在经历了以 SpaceX 星链为代表的低地球轨道跑马圈地之后，全球商业航天有望开始向更低处进发。超低轨道，这一曾被视为航天器禁区的轨道空间，正因材料科学、电推进技术及边缘计算的突破而成为新的战略制高点。
- **物理层面的降维打击：距离产生美，更产生价值。** VLEO 利用近地效应，将通信链路损耗呈几何级数降低，使得普通智能手机直连卫星成为可能；同时，在同等光学孔径下，对地观测分辨率提升数倍，使得商业卫星能够以极低成本获取国家级侦察精度的影像。
- **轨道资源的自清洁红利：随着太空垃圾问题日益严峻，VLEO 的气阻力成为天然的清洁工。** 失效卫星可在数周至数月内自然离轨烧毁，无需复杂的离轨系统。这不仅符合日益严苛的太空可持续性监管要求，如 FCC 的 5 年规则，更极大地降低了星座运营的碰撞风险和保险成本。
- **地缘战略的新圈地运动：2025 年末，中国向国际电信联盟提交了超过 20 万颗卫星的频轨申请，其中绝大多数集中在更低的轨道层。** 太空竞争已从单纯的技术比拼转向了对轨道空间这一不可再生资源的战略储备。以无线电创新院为代表的新型举国体制力量，正在重塑商业航天格局。
- **产业爆发前夜：类似于 2015 年的电动汽车行业，VLEO 正处于技术成熟度曲线攀升期。** 吸气式电推进-ABEP，和耐原子氧-AO 材料的商业化落地，有望攻克最后的工程障碍。预计未来十年，VLEO 市场将以超过 70% 的复合年增长率持续增长，从边缘实验走向万亿级信息基础设施的核心。随着 SpaceX 申请更低轨道壳层、中国乾坤一号、楚天星座的实质性推进，未来几年将是 VLEO 商业化落地的关键窗口期。

### 投资建议

- 我们认为，超低轨不是一个简单的概念炒作，而是物理规律和商业逻辑共同指向的必然方向。它用高度换性能，用快速迭代换长期可靠，极其符合摩尔定律下的现代科技产业特征。VLEO 代表了航天产业从贵族定制向工业消费品转化的最后一公里，我们建议关注：
- **锁定核心制造：**重点配置能够解决 VLEO 核心痛点的推进系统供应商，如电推进、霍尔/射频离子电推进和抗原子氧材料供应商，以及具备大规模低成本制造能力的卫星总装龙头。这是卖铲子的确定性机会。
- **布局下游应用：**关注拥有高频重访数据处理能力和直连卫星运营牌照的企业。
- **中国市场 Alpha：**紧跟国家队节奏，关注航天科工及中国卫星网络集团供应链中的核心民营配套企业。

### 风险提示

- 技术失败风险；发射产能瓶颈；频谱协调困难。

## 内容目录

1. 超低轨卫星：从飞行禁区到战略高地.....	7
1.1 重新定义太空边缘.....	7
1.2 市场空间：逐渐走向主流.....	8
2. 战略动因：为什么必须发展超低轨？.....	8
2.1 性能驱动：香农定理与瑞利判据.....	8
2.1.1 通信链路增益.....	8
2.1.2 对地观测的分辨率倍增器.....	9
2.2 成本驱动：摩尔定律在太空.....	10
2.3 可持续性驱动：天然的太空垃圾处理厂.....	11
3. 什么问题？怎么解决？是产业痛点也是护城河.....	12
3.1 大气阻力：与风的永恒博弈.....	12
3.1.1 高效电推进-相对成熟技术.....	12
3.1.1.1 离子电推进：当前主流，极致省油.....	12
3.1.1.2 霍尔电推进：兼顾推力与效率.....	12
3.1.2 吸气式电推进-打破燃料载荷约束.....	13
3.1.3 产业化进程与标杆案例：从极限验证到商业部署.....	15
3.1.3.1 离子电推进：完成大气拖曳补偿的极限能力验证.....	15
3.1.3.2 霍尔电推进：实现国内商业航天 VLEO 轨道的工程破局.....	16
3.1.3.3 吸气式电推进：军商融合加速，逼近工程化拐点.....	16
3.2 空间环境挑战：原子氧剥蚀效应与材料防护壁垒.....	17
3.2.1 被动阻隔：抗 AO 涂层技术的规模化工程应用.....	18
3.2.2 主动自愈：自钝化聚合物的价值跃升.....	19
3.2.3 产业化进程与标杆案例：柔性太阳翼是关键应用场景.....	20
3.3 热控系统重构：气动热效应下的冰火考验与硬件价值增量.....	21
3.3.1 被动热控升级：兼顾抗氧化与热光学的特种屏障.....	22
3.3.2 主动热控破局：环路热管成为 VLEO 零功耗散热标配.....	23
3.3.3 产业化进程与标杆案例：柔性太阳翼是关键应用场景.....	24
3.4 姿态控制系统：强气动扰动下的动态平衡与控制.....	25
3.4.1 感知层：敏感器.....	25
3.4.2 决策层：控制器.....	26
3.4.3 执行层：执行机构.....	27
4. 区域格局与中国现状：举国体制与商业活力的共舞.....	28
4.1 历史回溯：从军事侦察到商业重构，VLEO 轨道的价值演进.....	28

4.1.1 萌芽期: 军事侦察驱动, 确立以高度换性能的底层逻辑.....	28
4.1.2 验证期: 科学探测主导, 突破大气阻力与材料极限.....	29
4.1.3 爆发期: 商业航天入局, 开始从技术验证到规模化商业闭环的跨越.....	30
4.2 中国: 国家战略引导与商业航天先锋的双轮驱动.....	31
4.2.1 赛思倍斯: 中国超低轨商业航天的工程化先行者.....	32
4.2.1.1 公司简介: 聚焦超低轨, 对标国际前沿.....	32
4.2.1.2 核心产品矩阵: 构建超低轨卫星空间信息能力闭环.....	32
4.2.1.3 里程碑成就: 乾坤一号跑通 VLEO 工程化全流程.....	34
4.2.2 航天科工楚天星座: 国家队领航, 构建超低轨通遥一体化空间新基建.....	36
4.2.2.1 星座规划与建设路径.....	36
4.2.2.2 产品: 定义下一代空间感知标准.....	37
4.2.2.3 典型应用场景: 分钟级信息服务的蓝海.....	38
4.3 美国: 商业巨头与新锐势力共舞.....	38
4.3.1 SpaceX 阳谋: 以极致运力垄断直连通信.....	38
4.3.2 Albedo Space: 从遥感数据向通用 VLEO 平台升维.....	39
4.3.3 EOI Space: 极致气动构型创新, 魔鬼鱼卫星.....	41
4.3.4 Redwire: 并购重组铸就系统级交付, 军商双线领跑.....	43
5. VLEO 产业链标的梳理.....	45
5.1 卫星平台与制造.....	45
5.2 太空防护材料.....	45
5.3 卫星热管理.....	46
5.4 卫星姿态控制与星载计算机.....	47
5.5 核心通信载荷.....	48
5.6 下游应用及数据变现.....	49
6. 风险提示.....	49

## 图表目录

图表 1: GEO、LEO、VLEO-不同轨道特性对比.....	7
图表 2: 全球综合观测系统图.....	7
图表 3: VLEO 卫星市场空间预测.....	8
图表 4: 信号强度 S 与信号源距离 r 的平方成反比.....	8
图表 5: SpaceX 正在和 T-Mobile 开展手机直连合作.....	9
图表 6: 遥感领域, 地面分辨率 GSD 与轨道高度成正比.....	9
图表 7: Keyhole、WorldView 大型卫星基本参数与 Albedo、乾坤一号小型卫星参数对比.....	10
图表 8: VLEO 轨道辐射剂量远低于传统轨道.....	10

图表 9: 芯片不同层级的参数、价格对比.....	11
图表 10: 太空垃圾硬性法规-具有法律约束力.....	11
图表 11: 太空垃圾国际标准-软性约束.....	11
图表 12: 离子电推进系统示意图.....	12
图表 13: 霍尔电推进结构图.....	13
图表 14: 目前主流的高效电推进均可达 10mN 的超低轨道维持推力门槛.....	13
图表 15: 吸气式推进系统结构示意图.....	14
图表 16: 各国机构研发集气装置的性能概况.....	14
图表 17: 离子电推进: 欧洲航天局 GOCE 卫星电推进系统.....	15
图表 18: 离子电推进日本宇航研发机构 SLATS 卫星轨道飞行剖面.....	15
图表 19: 赛思倍斯 QK-1 效果图.....	16
图表 20: ABEP 技术验证与商业应用平台介绍.....	17
图表 21: 大气密度、组分比例与轨道高度关系图.....	17
图表 22: 无机涂层与有机涂层对比.....	18
图表 23: STS-8 航天飞机图.....	18
图表 24: PI 薄膜运用于太空柔性光伏原理图.....	19
图表 25: POSS 作为过渡层抵御 AO 侵蚀并实现自钝化的反应机理.....	19
图表 26: POSS-PI 杂化材料作为 MISSE-16 任务一部分被部署到国际空间站外部.....	20
图表 27: 抗原子氧技术研发的代表性企业.....	20
图表 28: 银河航天灵犀 03 星柔性太阳翼展开状态.....	21
图表 29: VLEO 卫星所处的复杂热力学环境模式图.....	21
图表 30: 天问一号采用低吸收-低发射热控涂层.....	22
图表 31: 航天级多层隔热组件 (MLI) 层状结构横截面示意图.....	22
图表 32: MLI 与传统隔热材料在真空/极端温差环境下的热阻隔性能对比验证数据.....	23
图表 33: VLEO 卫星环路热管核心组件与功能拆解.....	23
图表 34: 环路热管工作原理示意图.....	23
图表 35: 卫星主动热控系统架构图.....	24
图表 36: 银河航天灵犀 03 星柔性太阳翼展开状态.....	24
图表 37: 核心传感器类型介绍.....	25
图表 38: NanoSSOC-D60 太阳传感器示意图.....	25
图表 39: 控制器组成介绍.....	26
图表 40: 全球首个 AI 在轨卫星姿态控制器在德国 InnoCube 纳米卫星上应用.....	27
图表 41: 核心执行机构介绍.....	27
图表 42: 采用气动舵面控制的卫星示意图.....	28
图表 43: 科罗娜间谍卫星 (KH-4B) 拍摄的华盛顿.....	28

图表 44: GOCE 卫星流线型外形与气动阻力补偿示意图 .....	29
图表 45: 超低空试验卫星燕子 (SLATS) 已被认证为吉尼斯世界纪录 .....	29
图表 46: 欧盟 DISCOVERER 项目吸气式电推进原理示意图 .....	30
图表 47: 赛思倍斯乾坤一号高度演变轨迹 (268.13km→250km) 实测数据图 .....	30
图表 48: Albedo 卫星识别地面伪装 .....	31
图表 49: Starlink 宽带与直连终端 (D2D) 卫星星座分布图 .....	31
图表 50: 赛思倍斯位于诸暨的空天智能制造基地 .....	32
图表 51: 赛思倍斯平台-载荷-组网-应用的商业闭环 .....	32
图表 52: 赛思倍斯乾坤 (QK) 系列产品 .....	33
图表 53: 赛思倍斯光电遥感载荷产品 .....	33
图表 54: 赛思倍斯卫星组网通信产品 .....	34
图表 55: 赛思倍斯“双超星座项目”论证评审会, 标志着其由单星验证向星座化演进 .....	34
图表 56: 乾坤一号成功发射, 开启中国商业航天超低轨 .....	35
图表 57: “乾坤一号”卫星平台自主运行能力和高精度的轨道控制能力 .....	35
图表 58: 航天科工楚天星座孵化基地 .....	36
图表 59: 航天科工楚天星座首发试验星 (001 星) 由湖北箭搭载成功发射升空 .....	37
图表 60: 楚天星座星载监视相机在轨成像 .....	37
图表 61: 楚天星座应用场景 .....	38
图表 62: FCC 关于 SpaceX 部署 1.5 万颗 VLEO 卫星申请的审查文件 .....	38
图表 63: 10cm 全色与 40cm 多光谱分辨率的商业影像拍的照片 .....	39
图表 64: Albedo 官网 Clarity-1 卫星实物展示 .....	39
图表 65: Clarity-1 卫星相关参数 .....	40
图表 66: Clarity-1 卫星光学载荷图 .....	40
图表 67: Albedo Space 核心发展历程 .....	41
图表 68: EOI Space 魔鬼鱼卫星渲染图 .....	41
图表 69: EOI Space VLEO 卫星运行轨道示意图 .....	42
图表 70: EOI Space 卫星星座技术指标 .....	42
图表 71: EOI Space 发展历程 .....	43
图表 72: Redwire Phantom 卫星平台设计概览 .....	43
图表 73: Redwire 卫星平台相关参数 .....	44
图表 74: Redwire 收购梳理 .....	44
图表 75: Redwire 发展历程 .....	45
图表 76: 卫星平台与制造相关标的 .....	45
图表 77: 太空防护材料相关标的 .....	46
图表 78: 热控相关标的 .....	46

图表 79: 高功率载荷热管理与电子元器件相关标的.....	47
图表 80: 星载计算机芯片相关标的.....	47
图表 81: 敏感器与 MEMS 相关标的.....	48
图表 82: 反作用飞轮与姿控机构相关标的.....	48
图表 83: 核心通信载荷相关标的.....	49
图表 84: 下游应用相关标的.....	49

# 1. 超低轨卫星：从飞行禁区到战略高地

## 1.1 重新定义太空边缘

传统上，航天活动主要集中在地球同步轨道：GEO，36,000公里，和低地球轨道：LEO，500-2,000公里。而超低轨道（VLEO）并非一个严格的学术界限，但在商业航天语境下，通常指代160km至450km的轨道区域。

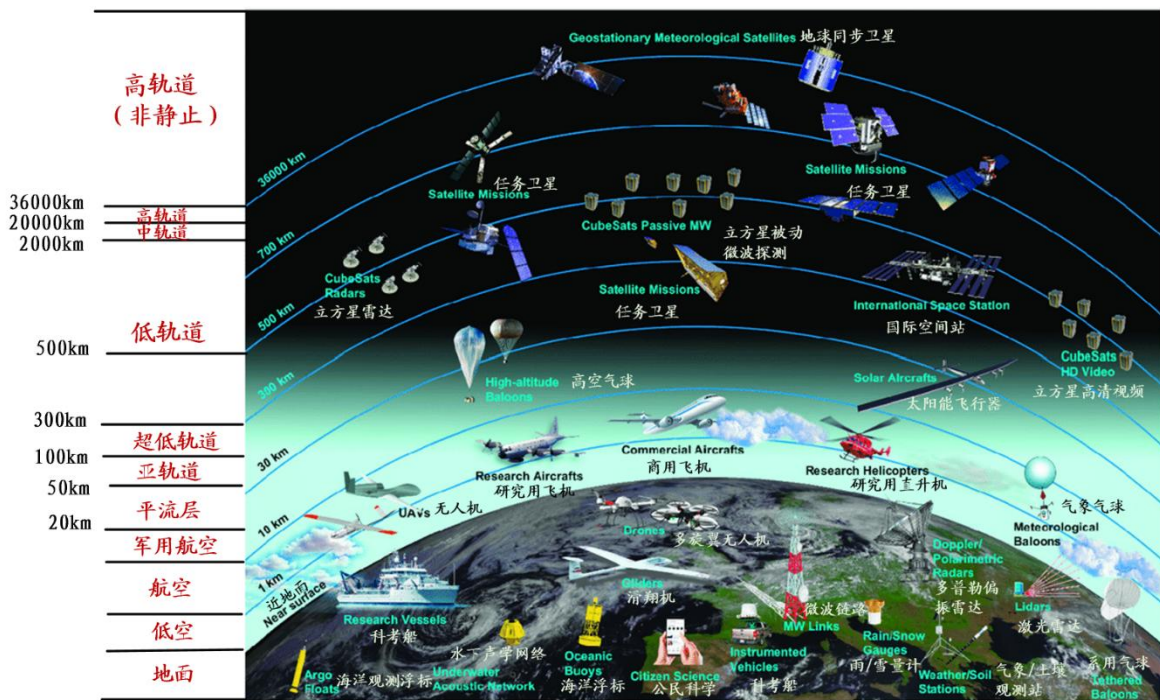
这一区域在物理上具有极其特殊的二元性：它既是太空，高于卡门线；又是大气层的延伸，处于热层。在这里，卫星不能再像在真空中自由漂浮，而是必须像飞机一样时刻对抗空气阻力。

图表1：GEO、LEO、VLEO-不同轨道特性对比

特征维度	GEO-地球静止轨道	MEO-中地球轨道	传统LEO-低地球轨道	VLEO-超低地球轨道
轨道高度	~36,000km	2,000-20,000km	500-2,000km	160-450km
典型代表	传统通信/广播卫星： 天通、中星、亚太	北斗、GPS	Starlink Gen1、 OneWeb、中国星网、 千帆星座	Starlink Gen3、Albedo 、乾坤一号、楚天一号
单星覆盖	全球1/3	约全球1/5	约全球1/40	约全球1/80
往返延迟	400-600ms	100-250ms	20-50ms	5-10ms
路径损耗	极大	中等	低	极低
观测分辨率	米级	非光学成像	0.3米	0.1米/10cm
轨道寿命	>15年	10-15年	1-7年	数天至数年（450km可达 3-4年无动力）
辐射环境	严酷	范艾伦辐射带核心	较强	较弱，大气屏蔽效应
碎片风险	永久存在	数百年以上	数十年以上自然离轨	数周/数月自然离轨
主要挑战	发射成本、时延	辐射、成本	拥堵、碎片	大气阻力、原子氧腐蚀

来源：国金证券研究所，NASA，灰机wiki，MDPI，FCC，陕西国防科技，Landinfo，New Space Economy，NSS，OECD，KMI，laser2cots，Albedo

图表2：全球综合观测系统图



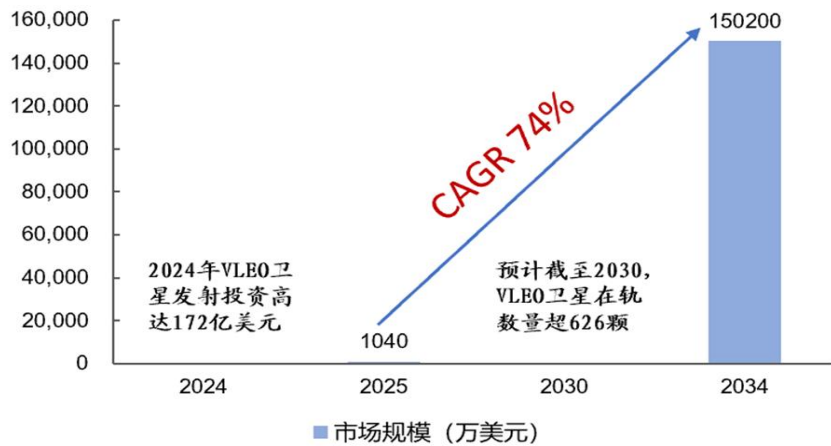
来源：国金证券研究所，MDPI

## 1.2 市场空间：逐渐走向主流

根据 BIS Research 及多家权威机构的预测，VLEO 卫星市场正处于爆发前夜。

- 市场规模预测：全球 VLEO 卫星市场规模预计将从 2025 年的约 1,040 万美元激增至 2034 年的 15 亿美元以上，复合年增长率高达 73.9%。若考虑到由 VLEO 赋能的下游数据服务（EO 影像、低延迟金融数据、手机直连通信），有望带动市场空间持续提升。
- 数量级跃升：截至 2030 年，预计在轨 VLEO 卫星数量将超过 626 颗。然而，考虑到中国近期申报的 20 万颗卫星计划中包含大量中低轨资源，以及 SpaceX Starlink Gen3 的低轨部署，实际数字可能远超保守预测，甚至达到万颗量级。

图表3：VLEO 卫星市场空间预测



来源：国金证券研究所，BIS Research，Businesswire

## 2. 战略动因：为什么必须发展超低轨？

VLEO 的兴起并非偶然，而是由三大核心需求驱动的必然选择。

### 2.1 性能驱动：香农定理与瑞利判据

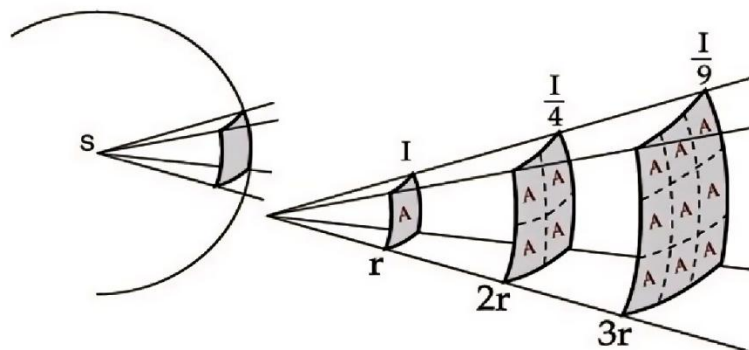
在通信与遥感领域，距离是核心变量。

#### 2.1.1 通信链路增益

在通信领域，信号强度与距离的平方成反比。例如，将卫星高度从 750 公里降低到 250 公里，距离缩短为原来的 1/3，自由空间路径损耗减少约 9.5dB。

这意味着卫星可以用更小的功率发射信号，地面终端可以用更小的天线接收信号。这正是 SpaceX 和 T-Mobile 敢于承诺手机直连的物理基础：卫星及卫星终端成本大幅下降，从而极大扩展了潜在用户群/降低自身制造成本。

图表4：信号强度  $S$  与信号源距离  $r$  的平方成反比



来源：国金证券研究所，Inverse Square Law for Light and Radiation: A Unifying Educational Approach

图表5: SpaceX 正在和 T-Mobile 开展手机直连合作



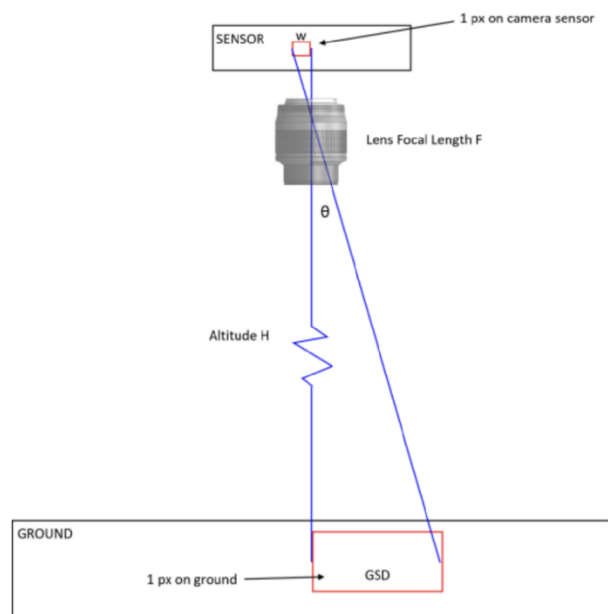
来源：国金证券研究所，T-Mobile 官网

### 2.1.2 对地观测的分辨率倍增器

在遥感领域，地面分辨率 GSD 与轨道高度成正比。将轨道高度由 600km 降低至 300km，理论上在同等光学口径条件下，GSD 可缩小约 50%，即成像分辨能力提升一倍。同理，在 VLEO 条件下实现同等地面分辨率时，光学载荷重量可减少约 50%量级，大幅降低发射重量成本。



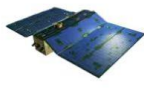
传统上要实现军用级 10cm 级分辨率，需要像 Keyhole 或 WorldView 那样的大型卫星，造价数亿美元。在 VLEO，利用几百公斤级的微小卫星即可实现同等指标。使得 Albedo 等商业公司能够以极低成本提供以前仅由国家情报机构掌握的数据能力。

图表6: 遥感领域，地面分辨率 GSD 与轨道高度成正比



来源：国金证券研究所，Eckhardt Optics

图表7: Keyhole、WorldView 大型卫星基本参数与 Albedo、乾坤一号小型卫星参数对比

卫星/平台	轨道高度	分辨率	质量/尺寸	寿命	技术特点	示意图
Keyhole(KH - 9)	145 - 320 km (典型轨道160km×260km)	< 0.61m(后期主全景相机)	11400kg	40 - 275天	双全景胶片相机 强调大范围覆盖	
WorldView - 4	617km	0.31m(全色)/1.24m(多光谱)	2600kg	10 - 12年 (设计)	商业高分辨率光学 遥感卫星, 太阳同步轨道	
Albedo Clarity - 1	272~320km(VLEO)	0.1m(可见光)/2m(红外)	小型卫星	5年	商业小卫星, VLEO 高分辨率	
乾坤一号	250~300km(VLEO)	<0.3m(预计)	小型卫星	>2年	中国超低轨道 试验卫星 验证高分成像技术	

来源: 国金证券研究所, Albedo, 赛思倍斯官网, space.skyrocket, NASA 等

## 2.2 成本驱动: 摩尔定律在太空

VLEO 允许使用更廉价的商业级元器件。

- **辐射环境改善:** VLEO 处于范艾伦辐射带之下, 且受残留大气层的保护, 辐射环境相对温和。这允许卫星大量采用工业级甚至消费级电子元器件, 而非昂贵的宇航级抗辐射器件, 大幅降低了 BOM 成本。
- **批产效应:** 由于单星成本降低, 使得运营商有望发射更大规模的星座以实现高重访率, 这也反过来推动了卫星制造的流水线化。

图表8: VLEO 轨道辐射剂量远低于传统轨道

轨道类型	辐射强度	辐射环境特征	典型年辐射剂量	对元器件的要求
VLEO	相对温和	处于内辐射带下方, 受地磁场强力保护, 且残留大气层吸收了部分被俘获的带电粒子	<1-5krad/year	工业级/汽车级, 通常无需专门抗辐射加固
LEO	中等	接近内辐射带边缘, 质子通量增加, 单粒子翻转概率上升	5-15krad/year	多数需抗辐射设计, 需要选用经过特定筛选的器件或进行软件纠错设计
MEO	极恶劣	位于范艾伦辐射带的核心区域, 高能电子和质子极其密集	>100krad/year	宇航级, 必须使用抗辐射加固芯片
GEO	恶劣	处于外辐射带, 受太阳耀斑和宇宙射线直接冲击, 且存在严重的表面充电效应	50-100krad/year	宇航级, 要求高可靠性和长寿命

来源: 国金证券研究所, ESA, AVNET, NASA

图表9: 芯片不同层级的参数、价格对比

特性维度	宇航级: ClassS/V	工业级/汽车级: ClassI/A	消费级: Commercial
	航天772所FPGA芯片	Microchip Technologys PIC33F 系列	Apple M5 芯片
芯片示意图			
典型应用	深空探测、GEO卫星、军用	VLEO/LEO卫星星座、新能源车	手机、家用电脑、玩具
工作温度	-55°C到+150°C	-40°C到+85°C/+125°C	0°C到+70°C
抗辐射能力	设计上抗总剂量>100krad 和抗单粒子锁定	不保证, 但许多工业芯片实测 抗10-20krad, 能够应对VLEO	未知, 通常弱, 批次间差异大
封装形式	陶瓷/金属气密封装	塑封	塑封
价格倍率	100x以上	1x-10x	1x

来源: 国金证券研究所, Microchip 官网, 北京微电子技术研究所, Apple 官网等

### 2.3 可持续性驱动: 天然的太空垃圾处理厂

随着 LEO 轨道日益拥挤, 凯斯勒效应带来的碎片连锁撞击成为悬在航天产业头上的达摩克利斯之剑。VLEO 的大气阻力是天然的清洁剂。失效卫星或碎片若无动力维持, 会在数周或数月内自然衰减并陨落烧毁。这一特性使得 VLEO 在满足 FCC 等监管机构日益严格的离轨规则方面具有天然优势, 降低了合规成本和第三者责任险费用。

过去几十年, 国际通用的标准是 25 年规则, 即卫星寿命结束后 25 年内离轨。但随着 Starlink 等星座的爆发, 这一标准正在逐渐趋于严苛。

图表10: 太空垃圾硬性法规-具有法律约束力

监管机构	要求	内容	VLEO优势
美国FCC: 联邦通信委员会	5年规则, 于2022年9月通过	要求所有低轨卫星在任务结束后, 必须在5年内离轨重返大气层销毁, 这是目前全球最严格且最具影响力的硬性门槛, 针对所有想在美国市场运营的卫星	VLEO卫星无需保留专门离轨燃料或推进剂, 一旦任务结束失去动力, 大气阻力会在几周/几月内自动将其拉入大气层烧毁
法国CNES: 法国国家太空研究中心	强制性离轨、责任险	世界上最早将空间碎片减缓写入国家法律的国家, 要求运营商证明其拥有受控离轨的能力, 且对地面风险有严格的概率限制: <1/10,000	高轨卫星需要复杂备份系统以防死星无法离轨, VLEO即使全系统失效, 物理学也能保证其安全离轨
英国UKSA/CAA: 英国航天局/民航局	许可条件、保险费率	在发放运营牌照时, 严格审查离轨计划, 近期趋势是将可持续性跟第三方责任险费率挂钩	VLEO滞留轨道时间短, 产生碰撞碎片概率低, 保险公司评估风险敞口小, 保费有望降低

来源: 国金证券研究所, FCC, CNES, ESA, CAA

图表11: 太空垃圾国际标准-软性约束

组织	国际标准名称	核心内容	VLEO优势
IADC 机构间空间碎片 协调委员会	空间碎片减缓指南	全球碎片治理的基石, 强调限制任务后轨道寿命和防止在轨解体, 目前正讨论将低轨离轨时间缩短至1年或即刻	VLEO能天然满足极短时间内离轨, 无需额外离轨
ESA 欧洲航天局	零碎片宪章	目标是到2030年, ESA任务不再产生任何空间碎片, 要求任务后处置成功率需达到99%以上	依靠推进系统进行主动离轨总有失效风险, VLEO依靠大气阻力100%可靠物理机制
ISO 国际标准化组织	ISO 24113	空间碎片减缓的国际标准 规定了避免碰撞、寿终处理的具体工程要求	VLEO可简化设计, 降低工程实现难度

来源：国金证券研究所，IADA, ESA, ISO 官网

### 3. 什么问题？怎么解决？是产业痛点也是护城河

VLEO 虽然前景广阔，但因为其环境特殊性，能够解决以下四大技术难题的企业，才能够构建起深厚的护城河。

#### 3.1 大气阻力：与风的永恒博弈

在超低轨区间，稀薄大气产生的持续气动阻力是卫星存活的最大威胁。传统化学燃料推进器燃料消耗快，无法满足 VLEO 卫星长达数年的轨道维持需求。因此，电推进系统凭借极高燃料利用效率，成为当前商业 VLEO 星座的务实选择。电推进系统能够以极小的推力连续数月乃至数年开机，用最少的推力工质换取最长的在轨寿命。

##### 3.1.1 高效电推进-相对成熟技术

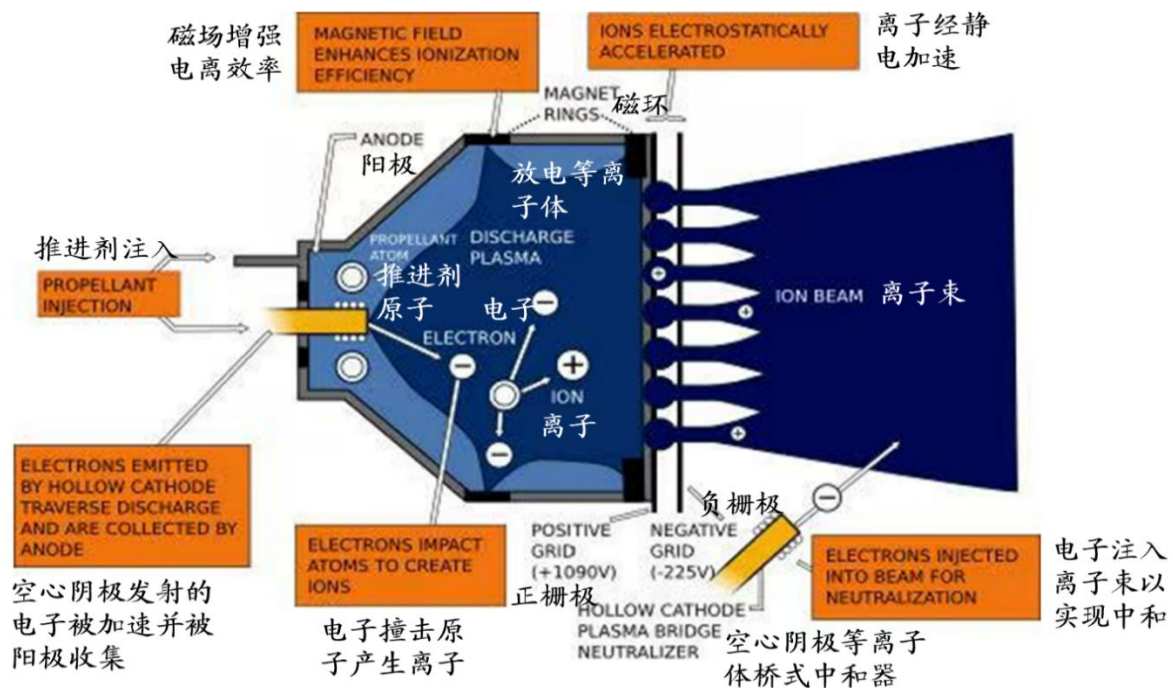
目前，商业航天领域应用最成熟的电推进技术主要分为两类：离子电推进与霍尔电推进。

###### 3.1.1.1 离子电推进：当前主流，极致省油

离子电推进是目前主流方案，核心原理是将工质气体（如氙气）电离后，利用两层带有数千伏高压的金属网建立强电场，将带正电的离子如过筛子一般高速抽出并喷射出去。该技术路线的最大优势在于极致的燃料利用率-比冲高。然而，物理属性决定了其局限性——带电离子必须排队穿过物理网眼，流量受限。这种限流机制导致其推力较小，如果卫星在 VLEO 轨道因太阳活动突发导致大气阻力激增，则推力将无法胜任，因此更适合轨道环境相对稳定的深空探测或中高轨任务。

当前成熟度较高的离子电推进产品有美国 NASA 的 NSTAR、英国 QinetiQ 的 T5 和中国兰州空间技术物理研究所的 LIPS-200 等。

图表12：离子电推进系统示意图



来源：国金证券研究所，NASA

###### 3.1.1.2 霍尔电推进：兼顾推力与效率

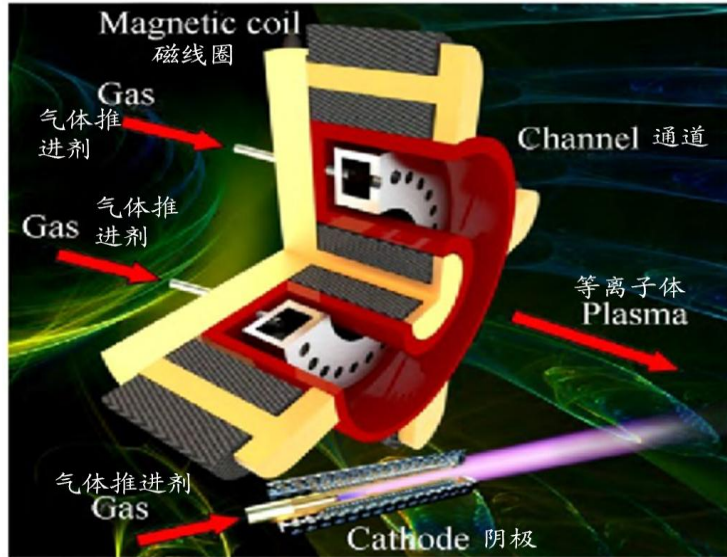
霍尔电推进摒弃了离子电推进的实体金属网，转而利用强大的正交电磁场在喷口处构筑了一道无形的漩涡束缚。气体在穿过这道磁场时被高效电离，并由电场大口径加速喷出。同时，外部的空心阴极会同步喷射电子中和废气，防止卫星本体被带电离子反噬拖拽。

霍尔电推进实现了敞口大流量喷射，从而具备更高的推力密度。当 VLEO 卫星面临急剧的轨道衰减风险时，霍尔电推进能迅速爆发出足够的推力。正是由于在推力响应、燃料效

率和结构可靠性之间取得了绝佳平衡，霍尔电推进已成为当前巨型低轨星座的绝对主流标配，如 SpaceX 的 Starlink 采用的低成本氙气霍尔电推进。

当前较为成熟的霍尔电推进产品有美国 BUSEK 的 BHT-200、俄罗斯 OKB Fakel 的 SPT-100 和中国兰州空间技术物理研究所的 LHT-100 等。

图表13: 霍尔电推进结构图



来源：国金证券研究所，《中国电推进技术发展展望》于达仁等

图表14: 目前主流的高效电推进均可达 10mN 的超低轨道维持推力门槛

	产品代号	国家	机构	功率/kW	推力/mN	比冲/ks	应用型号
离子推力器	NSTAR	美国	NASA	2.30	92	3.28	Dawn
	T5	英国	QinetiQ	60.59	20	3.50	GOCE
	T6	英国	QinetiQ	5.30	125	3.80	BepiColombo
	LIPS-200	中国	兰州空间技术物理研究所	1.00	40	3.00	CS-16
霍尔推力器	SPT-100	俄罗斯	OKB Fakel	1.35	83	1.60	LS1300
	BHT-200	美国	BUSEK	0.20	13	1.39	TacSat 2
	PPS-1350	法国	SNECMA	1.50	89	1.65	SMART1
	LHT-100	中国	兰州空间技术物理研究所	1.35	80	1.50	SJ-17

来源：国金证券研究所，《离子与霍尔电推进性能和质量的工程数据模型》张天平，NASA, ESA, 推进技术，兰州空间技术物理研究所，Busek

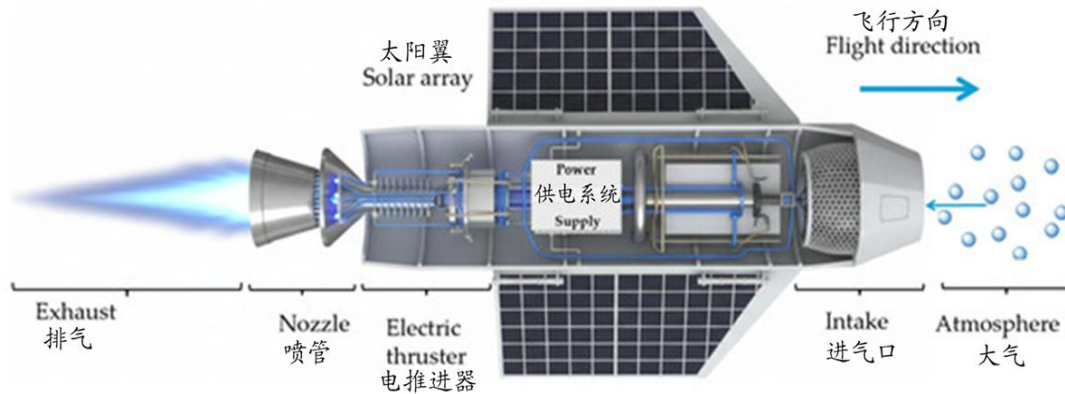
### 3.1.2 吸气式电推进-打破燃料载荷约束

VLEO 轨道虽然享有通信延迟极低、光学分辨率极高的物理红利，但也面临着稠密残余大气带来的致命阻力，传统卫星往往因燃料耗尽而快速陨落。吸气式电推进 (ABEP) 代表了 VLEO 动力系统的终极演进方向。就地取材的吸气式电推进工作原理类似于航空领域冲压发动机，完全摒弃了传统的自带推进工质，转而在轨道上直接捕获稀薄的游离态氮气、氧气，将其电离后，被高压电场加速喷射而出，从而化阻力为推力。目前该技术尚处于模拟和实验室验证阶段。

从商业价值来看，一旦该技术成熟，卫星将彻底摆脱燃料携带量的物理枷锁，理论上实现无限在轨寿命。

- 1、能成倍拉长单星资产的折旧周期，大幅提升商业回报率
- 2、将原本属于储气罐的重量和体积，全部释放给有效载荷：如高精度相机、通信天线。

图表15: 吸气式推进系统结构示意图



来源: 国金证券研究所, MDPI

核心卡脖子环节: 集气装置。集气装置就是整个 ABEP 系统的咽喉, 更是当前产业化的最大技术壁垒。在近乎真空的轨道环境下, 卫星以极高的速度飞行, 如何设计出能够高效铲入并压缩稀薄气体分子的进气道, 直接决定了推进器能否产生抵消自身气动阻力的净推力。由于在地面构建同时满足超高真空与超高速气流的物理风洞环境成本极高且难度极大, 目前全球主流机构对集气装置的研发主要依赖于复杂的计算机仿真建模。在跟踪该项前沿技术的突破节点时, 应重点关注两个核心工程化指标:

- 收集效率: 装置能够截留并捕获多少比例的迎面气体分子。
- 压缩倍率: 能够将捕获的极稀薄气体压缩到何种密度, 以满足后端推力器的电离点火需求。

图表16: 各国机构研发集气装置的性能概况

研究机构	收集效率 /%	压缩倍率	运行高度 /km	装置设计
JAXA	28-26	<180	150-200	
美国Busek公司	25-33	250	120-180	
意大利SITAEL研究所	28-32	95-140	190-240	
兰州空间技术物理研究所	41.7-57.9	(~0.82 atm)	150-240	
中国科学院力学研究所	>50	(~1 atm)	150	

来源: 国金证券研究所, 《超低轨道吸气式电推进技术研究进展与展望》孙安邦等

### 3.1.3 产业化进程与标杆案例：从极限验证到商业部署

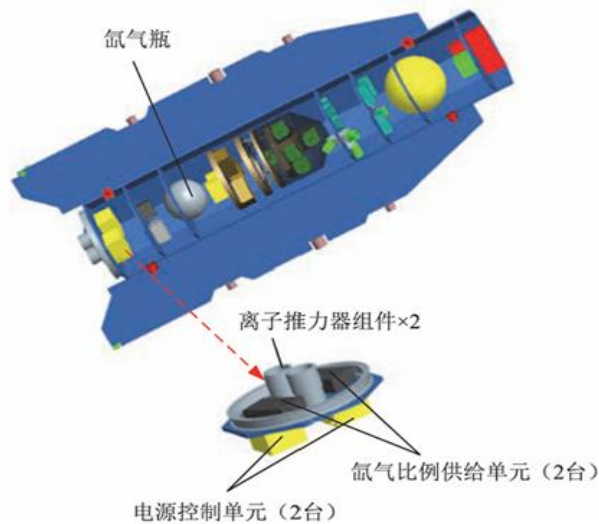
当前，超低轨动力技术的产业化正处于从国家级科学实验向星座级商业常态跨越的拐点。全球不同技术路线的标杆项目，清晰地勾勒出了 VLEO 动力系统的工程化进度。

#### 3.1.3.1 离子电推进：完成大气拖曳补偿的极限能力验证

在 VLEO 探索早期，国家航天机构率先使用高精度离子电推进系统探明了轨道维持的物理边界。

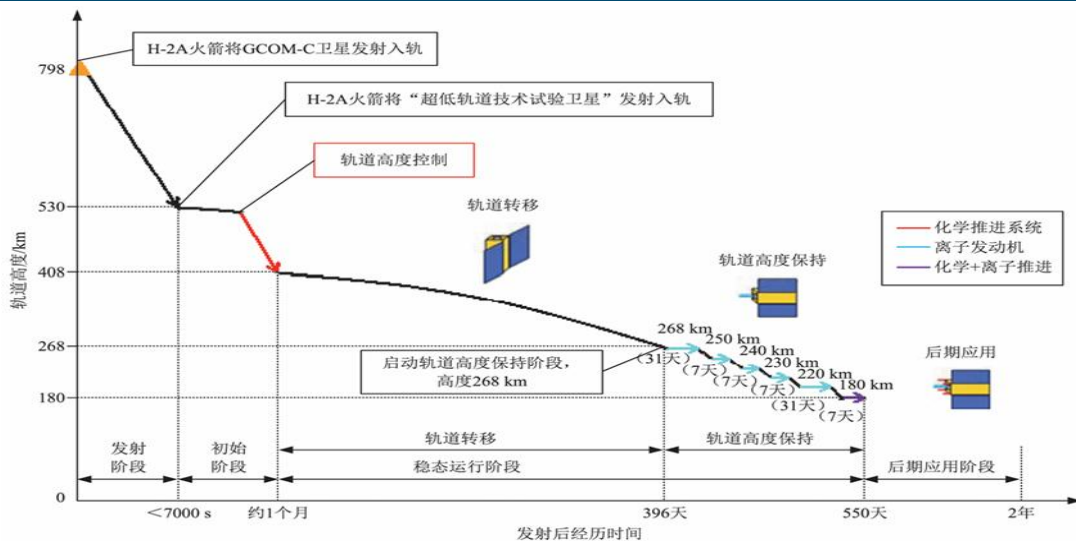
- 欧洲航天局 GOCE 任务：作为典型的科学探测卫星，GOCE 采用了超高精度的变推力离子电推进系统。该系统不仅实现了抵消大气阻力以维持绝对轨道高度，还能极其精细地控制星体加速度以保障重力场测量精度，并通过双推力器主备轮换设计，验证了系统的长期在轨可靠性。
- 日本宇航研发机构 SLATS 任务：又名燕卫星，旨在探究离子推力器进行低轨维持的绝对能力边界。其通过逐步降轨的飞行剖面设计，最终在极高的大气密度下，成功将卫星高度维持在约 180km 的极限位置。

图表17：离子电推进：欧洲航天局 GOCE 卫星电推进系统



来源：国金证券研究所，《超低轨道卫星技术与展望》袁春柱

图表18：离子电推进日本宇航研发机构 SLATS 卫星轨道飞行剖面



来源：国金证券研究所，《超低轨道卫星技术与展望》袁春柱等

### 3.1.3.2 霍尔电推进：实现国内商业航天 VLEO 轨道的工程破局

由于兼顾了推力密度与成本效益，霍尔电推进已成为当前商业 VLEO 星座率先落地的务实选择。

- 赛思倍斯乾坤一号 (QK-1)：作为国内商业航天的标志性节点，QK-1 是首个长期搭载并使用霍尔电推进系统的商业超低轨卫星。该星采用了易动宇航研制的宽范围霍尔电推系统：功率覆盖 100W-1350W，推力跨度 6.5mN-84mN。2026 年 1 月，QK-1 成功将轨道降至 250km 并稳定运行，刷新了中国航天器最低驻留轨道纪录，不仅完成了系统的长期稳定性验证，也为国内 A 股产业链后续的大规模批量化供应奠定了工程基础。

图表 19：赛思倍斯 QK-1 效果图



来源：国金证券研究所，灰机 wiki

### 3.1.3.3 吸气式电推进：军商融合加速，逼近工程化拐点

作为 VLEO 动力的最终方案，吸气式电推进技术正受到欧美政府资金与军方需求的催化，工程化进程显著提速。

- 原理验证阶段：欧盟 DISCOVERER 计划。作为 Horizon2020 (欧洲联盟历史上规模最大的科研与创新资助计划, 预算接近 800 亿欧元) 资助的前沿项目, 其搭载的 SOAR 实验卫星 (3U 立方星, 总质量仅 3.35kg) 已成功实现在轨验证。
- 商业星座规划：美国 Albedo。商业遥感公司 Albedo 计划部署由 24 颗卫星组成的 VLEO 星座, 以提供极具商业价值的可见光 10cm、红外 2m 极高分辨率影像。该星座明确计划引入 ABEP 技术以突破寿命瓶颈, 目标于 2027 年完成星座建设, 标志着该技术正试图切入商业闭环。
- 军方深度介入催化：Redwire 和 Viridian。2025 年 11 月, 商业航天企业 Redwire 获得 DARPA 水獭计划第二阶段 4400 万美元资助, 将利用其先进的 SabreSat 气动外形卫星平台, 专项攻坚 ABEP 系统的在轨集成与应用; 2026 年 2 月, Viridian Space 与美国空军正式签署为期五年合作研发协议共同开发 ABEP, 涵盖从地面攻关到在轨数据共享的全流程, 并锚定未来三年内实现首次在轨技术验证发射的明确催化节点。这表明 ABEP 技术的战略优先级正在被抬高。

图表20: ABEP 技术验证与商业应用平台介绍



来源：国金证券研究所，DISCOVERER, Albedo, eoPortal, businesswire, Redwire Space

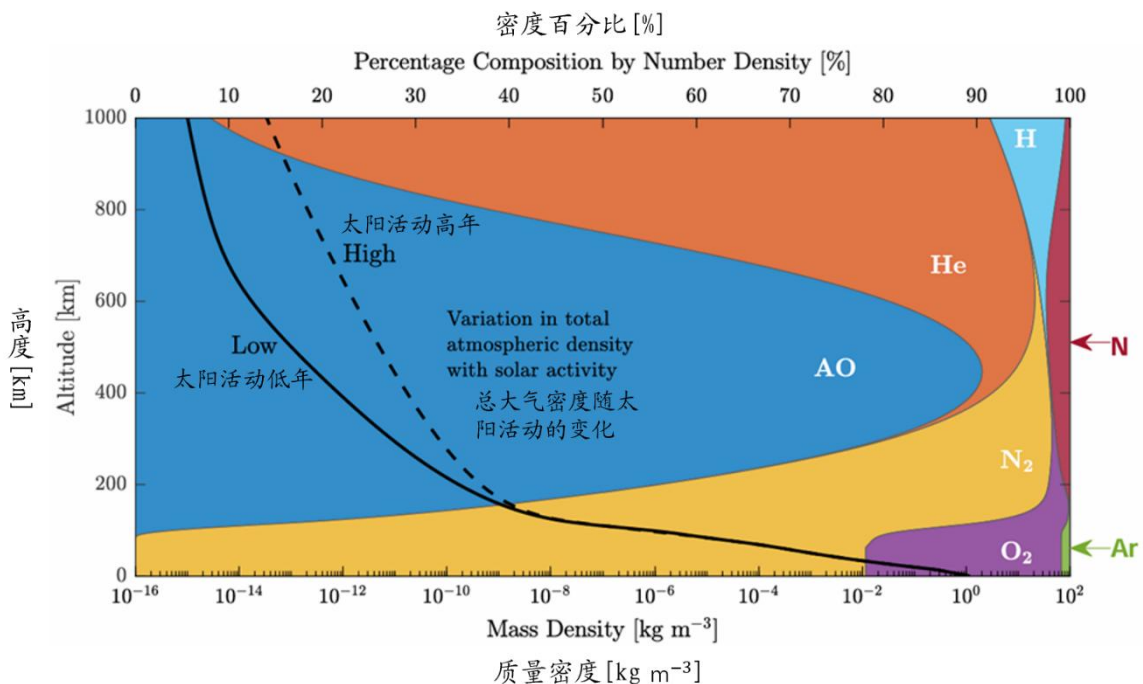
### 3.2 空间环境挑战：原子氧剥蚀效应与材料防护壁垒

VLEO 轨道的另一大痛点在于恶劣的化学腐蚀环境。在 150-300km 高度区间，残余大气中的核心组分为高活性原子氧（Atomic Oxygen, AO）。这些原子氧以约 8km/s 的相对轨道速度对卫星表面进行高能轰击，产生类似微观喷砂的剥蚀效应。

这种物理冲击+化学氧化的双重破坏，极易导致太阳能电池基板脆化、光学性能退化以及热控涂层失效，是导致 VLEO 卫星资产快速贬值乃至功能失效的核心要素之一。因此，攻克 AO 防护技术、延长整星在轨寿命，是 VLEO 星座实现商业闭环的先决条件，同时也为特种防护材料催生了极具确定性的增量市场。

目前，产业界应对 AO 侵蚀的主流技术路径已演化为两大阵营：被动式的抗 AO 涂层与主动式的自钝化聚合物材料。

图表21: 大气密度、组分比例与轨道高度关系图



来源：国金证券研究所，ScienceDirect

### 3.2.1 被动阻隔：抗 AO 涂层技术的规模化工程应用

在易受腐蚀的敏感基材表面涂覆惰性抗 AO 材料，进行物理隔绝，是目前商业航天最为广泛采用的降本防护方案。该路径工艺成熟、实施成本较低，具备大规模批产的基础。

按材料体系划分，传统涂层分为无机涂层（耐侵蚀能力极强，但脆性大、易开裂）和有机涂层（柔韧性与附着力优异，但抗氧化上限低）。当前产业链的研发与应用重心已全面转向有机/无机杂化涂层。

图表22：无机涂层与有机涂层对比

涂层类型	常见材料	优点	缺点	应用案例
无机涂层	二氧化硅、氧化铝等氧化物	表面能形成惰性保护层或稳定氧化物，可防侵蚀	硬度大、脆性大、与聚合物热膨胀系数不匹配，原子氧通过裂纹反应	“厦门科技壹号”卫星采用新型白色无机热控涂层，具有吸发比低、在轨性能稳定、适应性好等优点
有机涂层	聚硅氧烷、聚硅铝氧烷、聚氟化物等	制备简单、具有良好的柔韧性且与聚合物结合较好，可防侵蚀	化学键易受紫外辐射破坏，导致有机物分解，涂层破坏	“天问二号”探测器采用上海有机所研制的有机热控涂层，调节热平衡温度

来源：国金证券研究所，《低地轨道空间中原子氧对聚酰亚胺的侵蚀及其防护措施》崔智瑶等，灰机 wiki，国家航天局，中国航天科技集团，上海科协

杂化涂层通过有机组分与无机组分的化学键缩合反应，完美中和了前两者的优劣势。实验数据显示，采用有机硅/60%二氧化硅杂化涂层后，材料的 AO 反应系数较纯有机硅涂层呈数量级下降；而在国际空间站反射器中广泛使用的是 SiOx-PTFE（聚四氟乙烯）复合涂层材料，该涂层在利用 SiOx 的 AO 防护过程中，还通过含氟元素的 PTFE 材料降低内应力，提高整个涂层的柔韧性。

NASA Lewis 研究中心将 PTFE 与 SiOx 共溅射，在 Kapton 基底表面形成柔软的透明涂层。涂层在地面模拟试验和 STS-8 航天飞机飞行实验中都取得了成功，证实是性能较理想的大面积原子氧防护复合涂层。

图表23：STS-8 航天飞机图



来源：国金证券研究所，NASA

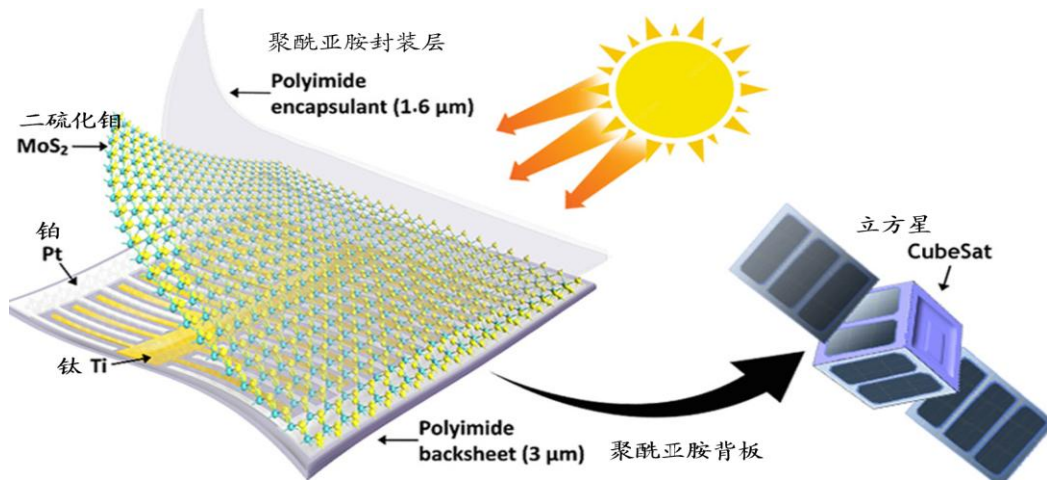
### 3.2.2 主动自愈：自钝化聚合物的价值跃升

对于大面积的柔性展开机构，如太阳能帆板基底而言，传统表面涂层一旦在太空微流星体撞击或热交变应力下产生微小裂纹，AO 便会趁虚而入，导致底部基材被彻底掏空。为解决这一问题，自钝化聚合物材料成为了材料科学端的重要突破口。

聚酰亚胺 (PI) 因其卓越的光学特性、耐高低温性、力学稳定性及绝缘性，本就是航天领域的黄金薄膜，但较易被 AO 深度侵蚀。

PI 薄膜运用于太空柔性光伏中的"三明治"封装：超薄透明 PI 层作为顶层封装保护二硫化钼 (MoS<sub>2</sub>) 光电转换层，同时允许太阳光穿透；较厚 PI 背板提供柔性机械支撑和绝缘；整体结构可卷曲收纳，部署于 CubeSat 等小型卫星展开成大面积太阳能帆板，实现轻量化、高比功率、耐太空环境的能源解决方案

图表24: PI 薄膜运用于太空柔性光伏原理图

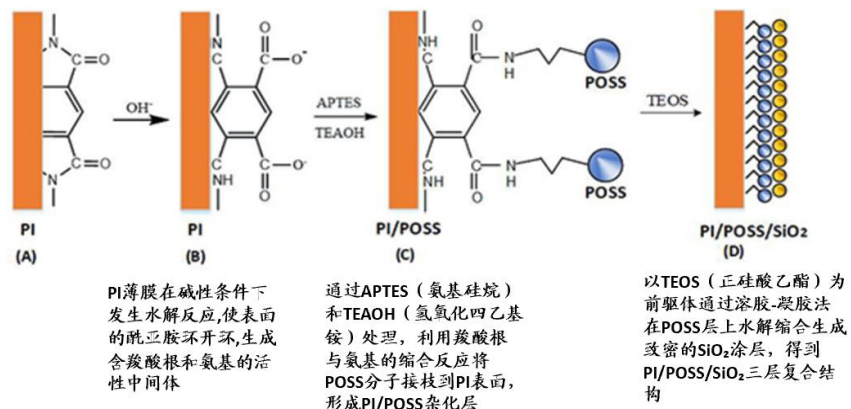


来源：国金证券研究所，ACS Publications

目前的前沿方案 POSS (多面体低聚倍半硅氧烷) 对 PI 进行分子级改性。研究发现含有 POSS 基团的 PI 薄膜，具有高含量的硅元素和环状分子结构，能发挥出出色的抗 AO 性能，同时保持热稳定性。当含 POSS 基团的 PI 薄膜 (POSS-PI) 暴露于 AO 环境时，表层聚合物虽被氧化，但高含量的硅元素和环状结构颗粒会迅速与 AO 发生反应，原位生成一层致密、坚固的玻璃态钝化层，彻底阻断 AO 的向下侵蚀。更具颠覆性的是其自修复特性：若该钝化层被微小碎片划伤，暴露出的新鲜基体材料会再次与 AO 发生反应，自动再生保护层。

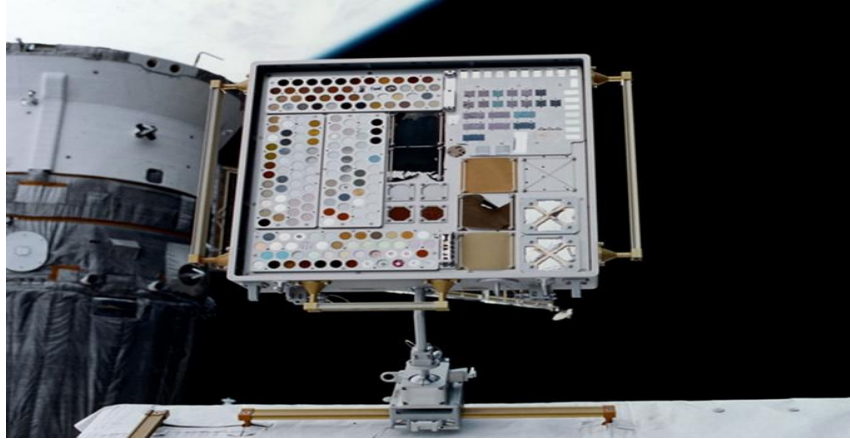
在实际航天器设计中，将 POSS 作为二氧化硅涂层与 PI 基底之间的过渡层，不仅能有效防治涂层裂纹和脱落问题，大幅增强界面附着力，更展现出惊人的防护效能。实验表明：历经 6 小时等效 AO 极端轰击后，经 POSS 材料过渡的基底侵蚀率，仅为未改性裸板基底的 3.6%，防护寿命实现数量级跃升。

图表25: POSS 作为过渡层抵御 AO 侵蚀并实现自钝化的反应机理



来源：国金证券研究所，Advances in Engineering

图表26: POSS-PI 杂化材料作为 MISSE-16 任务一部分被部署到国际空间站外部



来源：国金证券研究所，NASA

2022年8月，POSS-PI杂化材料作为MISSE-16（国际空间站材料实验-16）任务一部分被部署到国际空间站外部，进行真实空间环境暴露实验。材料样品被放置在航天器三个关键方位：迎风面-直接面对原子氧轰击、天顶面-接受紫外辐射以及背风面-电子轰击环境。经返回后分析，POSS-PI样品能够有效阻止了原子氧对基体的进一步侵蚀。

### 3.2.3 产业化进程与标杆案例：柔性太阳翼是关键应用场景

为应对VLEO极端的原子氧高速侵蚀挑战，全球空间材料企业正加速将抗AO防护技术从实验室的等效模拟，推向规模化的在轨商业应用。这一技术跨越不仅支撑了巨型星座的可持续部署，更为特种PI薄膜及高端镀膜设备产业链打开了确定的增量空间。

图表27: 抗原子氧技术研发的代表性企业



#### Acktar Ltd.

黑色涂层的世界领先者，能附着大多数基底材料，对空间原子氧有极大耐久性。广泛应用于ESA的航天项目。



#### 瑞华泰

CPI薄膜已获得头部商业航天企业应用，积极开展耐原子氧PI薄膜的研发。



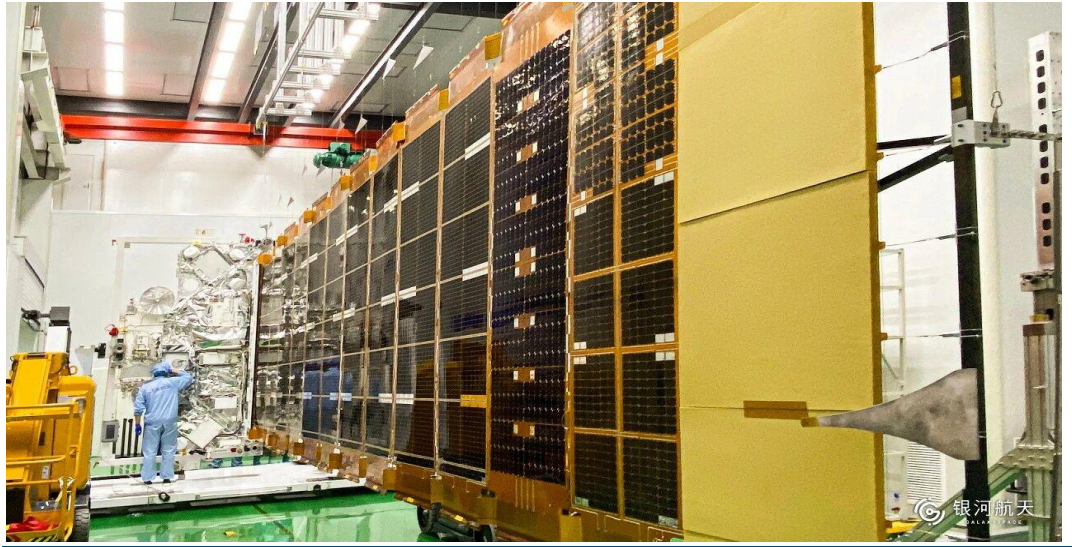
#### 沃格光电

形成“CPI浆料-制膜-镀膜”全链条，自主研发镀膜技术一直为核心优势。

来源：国金证券研究所，Actar，同花顺

柔性太阳翼是抗原子氧PI薄膜与特种防护涂层最核心的应用场景。抗原子氧PI薄膜与特种防护涂层的应用，能够有效解决低轨卫星柔性太阳翼既要轻薄柔韧，又要耐久防护这一核心矛盾。CPI能承受发射阶段剧烈的折叠与太空中的反复展收，极端条件下依然能保持尺寸稳定与力学性能。特种镀膜通过精准控制厚度与成分，一方面优化对太阳光特定波段的吸收与反射，提升太阳翼的光电转换效率，另一方面抵御太空高能粒子辐射和微小碎屑的撞击，抵御强烈紫外辐射以及原子氧的侵蚀，保护太阳能电池片，从而大幅延长整个太阳翼的工作寿命。

图表28：银河航天灵犀03星柔性太阳翼展开状态



来源：国金证券研究所，银河航天

灵犀03星是我国首款使用柔性太阳翼的卫星。单层柔性太阳板厚度仅1毫米左右，它可以像古代的奏折一样折叠，装在火箭里时，为折叠状态，主体厚度仅为不到5厘米。在轨工作时，拉开长度约9米，宽度超过2.5米。

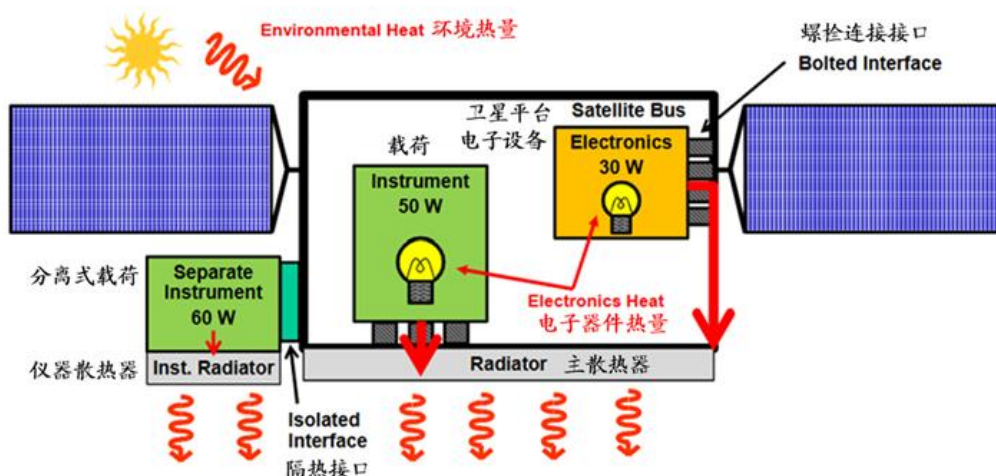
### 3.3 热控系统重构：气动热效应下的冰火考验与硬件价值增量

在传统中高轨卫星的设计框架中，热控系统（TCS）主要应对三大常规热源：太阳辐射、地球反照/红外辐射以及星内电子设备的自身发热。然而，VLEO卫星因处于极其稠密的残余大气中，必须直面第四大严峻热源——高频气动摩擦加热。

- 一方面，卫星在阳照区高速飞行时，气动热与太阳辐射叠加，极易导致表面及内部设备热量过载损毁；
- 另一方面，当卫星高速驶入地球阴影区时，由于缺乏大气层的保温缓冲，星体温度会呈断崖式骤降。

这种高频的冰火两重天式的热循环，导致了传统静态热控方案的失效。热管理能力已升级为决定VLEO卫星在轨存活率的核心壁垒，并由此催生了热控材料与主动散热组件的确定性增量需求。

图表29：VLEO卫星所处的复杂热力学环境模式图



卫星平台内部的载荷和电子设备产生热量，通过导热路径传递至主散热器向太空辐射散热；同时，分离式载荷通过独立的仪器散热器和隔热接口实现热隔离，避免热量相互干扰；外部环境热量通过散热面辐射散热。

来源：国金证券研究所，NASA

### 3.3.1 被动热控升级：兼顾抗氧化与热光学的特种屏障

被动热控是卫星的第一道防线，由于无需消耗电能，在 VLEO 极度受限的能源配给下显得尤为重要。

1、特种热控涂层：这是调节航天器表面热辐射特性的核心材料。在 VLEO 的特殊语境下，热控涂层的选型逻辑发生了质变——它必须同时满足优异的热光学性能：低吸收发射比；与极强的抗原子氧剥蚀能力。这促使产业链加速向新型杂化涂层迭代。

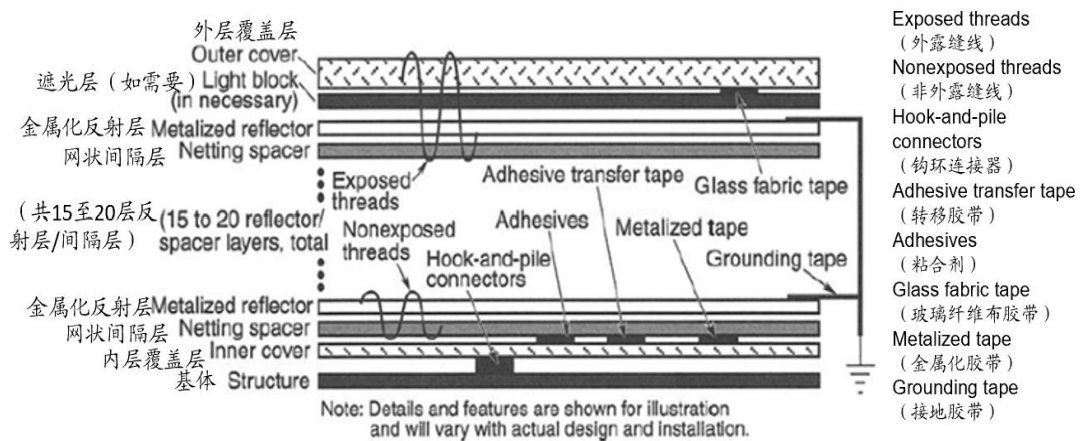
图表30：天问一号采用微弧氧化热控涂层



来源：国金证券研究所，eoPortal

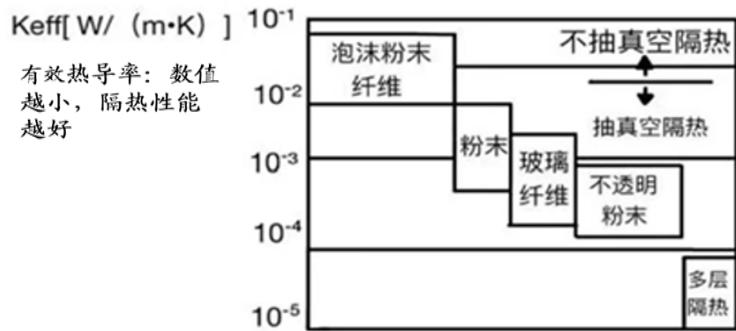
2、多层隔热组件 (MLI)：MLI 通常由高反射率的反射屏和低热导率的间隔层交替而成。在 VLEO 的极端温差下，MLI 的作用是双向的：既要在阳照区隔绝高达数百度的高温辐射，又要在阴影区锁住星内设备热量。地面等效实验数据表明，高性能 MLI 能够将 550°C 的外部极端气动高温，有效拦截并降至 160°C 的设备安全工作阈值以下，是 VLEO 卫星不可或缺物理屏障。

图表31：航天级多层隔热组件 (MLI) 层状结构横截面示意图



来源：国金证券研究所，NASA

图表32: ML1 与传统隔热材料在真空/极端温差环境下的热阻隔性能对比验证数据



抽真空技术能够将隔热性能提升1-2个数量级。从图中可看出，多层隔热组件热导率最低，仅为泡沫材料的千分之一

来源：国金证券研究所，江苏热管理研究院

### 3.3.2 主动热控破局：环路热管成为 VLEO 零功耗散热标配

面对星内高功率相控阵天线或高算力载荷的集中产热，单纯的被动防护已显不足，必须引入高效的主动热量传导机制。在众多方案中，环路热管（Loop Heat Pipe, LHP）凭借其独特的物理优势，正成为商业 VLEO 卫星热控架构的绝对标配。

LHP 是一种利用工质（如氨、丙烯）相变（蒸发、冷凝）潜热来远距离传输热量的封闭系统，且传输过程中的温降极小。

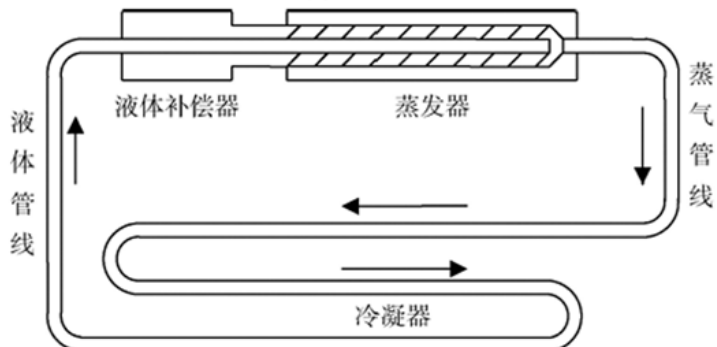
图表33: VLEO 卫星环路热管核心组件与功能拆解

组件名称	组件作用	实物图
蒸发器 (Evaporator)	热量由此输入、使工质蒸发	
蒸汽管路 (Vapor Line)	连接蒸发器和冷凝器，输送蒸汽	
冷凝器 (Condenser)	蒸汽在此冷凝放热，热量被排出	
液体管路 (Liquid Line)	冷凝后液体工质送回蒸发器	
补偿腔 (Compensation Chamber)	储存多余的液体工质，调节并设置 LHP 工作温度	

来源：国金证券研究所，ScienceDirect，NASA

LHP 运行过程：热负荷经蒸发器壁面传入毛细芯，液相工质受热蒸发，蒸汽经蒸汽管进入冷凝器冷凝为液体，再经液管流入补偿腔，最后在毛细力驱动下回流至蒸发器，完成循环。

图表34: 环路热管工作原理示意图



来源：国金证券研究所，《热管技术在航天器热控制中的应用》李德富等

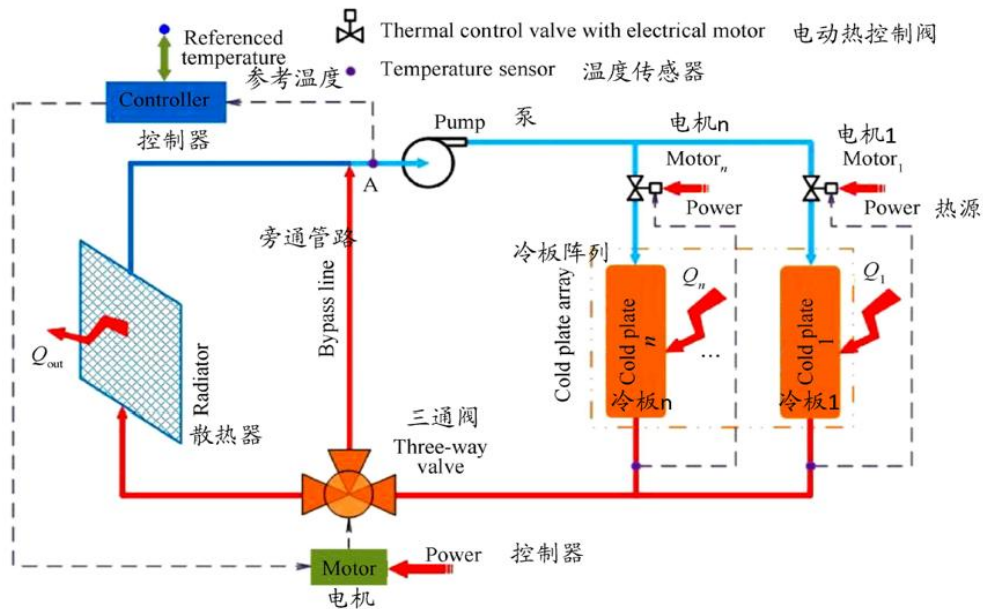
LHP 完美契合了 VLEO 星座的两大核心诉求：

- 1、突破功耗瓶颈-零电能驱动：为了降低气动阻力，VLEO 卫星必须缩减太阳能帆板的受风面积，导致整星发电功率较为紧张。LHP 完全依靠内部毛细芯产生的毛细抽吸力来驱动流体循环，全程无需机械泵或任何外部电力介入。其零功耗散热特性极大地缓解了卫星能源压力。
- 2、极宽域的被动热自适应能力：LHP 具备超高的热导率，等效热导率远超纯铜，只需极小的散热器面积即可维持组件温度。且具备天然的热二极管效应，当外部环境温度骤降时，激活旁路阀防止星内设备过度冷却，完美适应 VLEO 高频进出地球阴影区的极端温度剧变。

### 3.3.3 产业化进程与标杆案例：柔性太阳翼是关键应用场景

卫星热管理是保障航天器在极端空间环境下可靠运行的核心生命线。随着 VLEO 巨型卫星星座从单星定制迈入批量化组网阶段，产业链上下游企业正通过差异化的技术路径，加速打破传统航天体系的封闭格局，形成了一个覆盖系统设计-核心器件-前沿热材的多层次商业化供应体系。

图表35：卫星主动热控系统架构图



冷却液在泵的驱动下流经各冷板吸收热源产生的热量，温度升高后进入三通阀。控制器根据温度传感器反馈与参考温度的偏差，调节三通阀开度，控制高温冷却液流向散热器或旁通管路的比例，从而精确调控系统温度，实现主动热管理

来源：国金证券研究所，ScienceDirect

图表36：银河航天灵犀03星柔性太阳翼展开状态

 <p><b>航天环宇</b></p> <p>业务覆盖卫星结构与热控系统，产品和服务大多面向航天科技、中国电科、中科院等下属从事航天器产品研制的科研院所和总体单位。</p>	 <p><b>热数科技</b> THERMAL.AI</p> <p>聚焦高端热控及结构系统方案与产品研发制造，业务覆盖商业航天。掌握国内领先的结构热管理技术，持续推动相关技术的产业化革新。</p>	 <p><b>威铂驰</b></p> <p>威铂驰致力于高精密设备及移动互联终端产品的热管理技术、方案和相关热管理产品的研发、量产。具有丰富的热设计、热模拟等经验。</p>
---	---	---

来源：国金证券研究所，同花顺，热数科技，威铂驰

### 3.4 姿态控制系统：强气动扰动下的动态平衡与控制

在传统的高轨或纯真空环境中，卫星姿态控制主要应对微弱的太阳光压或重力梯度。但在大气相对稠密的VLEO轨道，卫星面临着严峻的气动扰动力矩挑战。



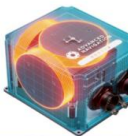

由于卫星的几何形心（压力中心）与质量中心往往难以完美重合，高达8km/s的相对风速会在这两个中心之间产生巨大的空气动力矩。这种力矩不仅量级大，且会随大气密度和卫星迎风面积的细微变化而高频波动。一旦姿态失控，卫星就会发生翻滚，可能导致星地通信链路中断或光学成像模糊。

因此，VLEO卫星必须对其姿态控制系统：包含敏感器、控制器、执行机构，进行全面升级，以实现强干扰环境下的高频动态稳定。

#### 3.4.1 感知层：敏感器

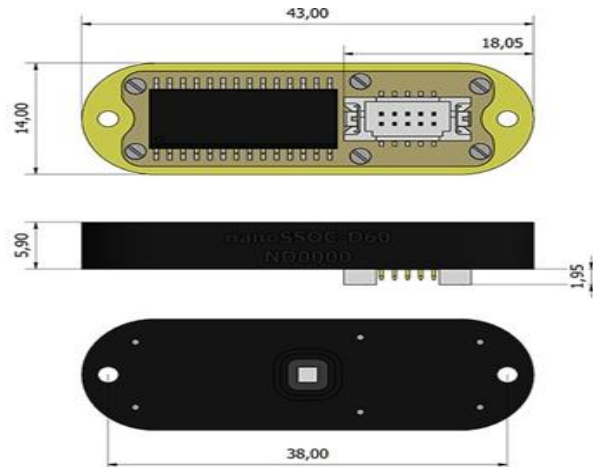
敏感器是卫星姿态控制的【眼睛】，负责实时获取卫星方位、角速度及环境参数，为姿态确定与控制提供关键输入数据。星敏感器、太阳敏感器、陀螺仪和磁强计是四种核心敏感器。各类敏感器在精度、功耗等关键指标上互补协同，克服单一敏感器的局限性。

图表37：核心敏感器类型介绍

类型	作用	代表产品	发展趋势	示意图
星敏感器	提供高精度绝对姿态参考	Jena Optronik公司的ASTRO APS、Ball Aerospace公司产品、天银星际的NST系列	更高精度、更小体积和更低功耗的发展方向	
太阳敏感器	辅助粗对准并验证星敏感器数据	NewSpace Systems公司的NFSS-411、Solar MEMS Technologies公司的NanoSSOC-D60、天银星际的SS-E高敏感太阳敏感器	提升精度和集成度，高灵敏度和分辨率	
陀螺仪	保障高频角速度测量	iXblue公司的PHINS Mini、Honeywell公司的HG1120、艾瑞科的ER系列	提高精度和降低成本，借助先进微加工技术发展MEMS陀螺仪	
磁强计	利用地磁场矢量实现低成本姿态辅助	NewSpace Systems公司产品、PNI公司的MicroMag3、中国航天科学集团公司的CPT原子磁力仪	提高测量精度和可靠性，采用新型磁性材料，优化结构和信号处理算法	

来源：国金证券研究所，《国外微卫星姿态控制系统发展综述》祁首冰等，艾瑞科，中国科学院，天银星际，上海卫星

图表38：NanoSSOC-D60 太阳敏感器示意图




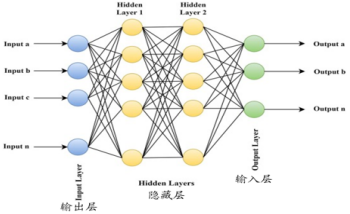
来源：国金证券研究所，CubeSatShop

VLEO 卫星所处的太空环境更为复杂多变，对传感器的质量、体积和功耗等关键指标都提出了更高的要求。VLEO 卫星需要选择更高精度和更小体积的传感器。Jena Optronik 公司的 ASTROAPS 已经实现了优于 1"精度，Solar MEMS 公司开发的 NanoSSOC 系列太阳传感器体积已缩小至 4 立方厘米以内，为 VLEO 卫星更高精度控制提供可能。

### 3.4.2 决策层：控制器

控制器是卫星姿态控制的【大脑】。承担着传感器数据融合、姿态解算与控制指令生成等核心职能。其通过硬件算力与软件算法协同，构建了实时响应、长期自主优化的控制体系，其设计优劣直接决定姿态控制系统在 VLEO 环境的鲁棒性与任务完成能力。

图表39：控制器组成介绍

组成	作用	典型代表	发展趋势	示意图
集成控制模块	将分散电子设备集成到一个单元中，以提高可靠性、减小质量并简化系统设计	美国Blue Canyon Technologies公司的XACT系列、加拿大Sinclair Interplanetary公司的产品IMTQ-3、航天科技五院502所的CAST2000	提高集成度和智能化水平，集成更多传感器和执行机构，引入AI和机器学习算法，提升自主决策和自适应能力	 XACT-15
控制算法	作为智慧中枢，连接感知与执行	黄金分割智能自适应控制、Lyapunov约束优化PID	经历智能化转型。神经网络容错控制展现出强大的抗干扰能力、强化学习在线优化使姿态控制系统具备了持续学习进化的可能	 神经网络控制

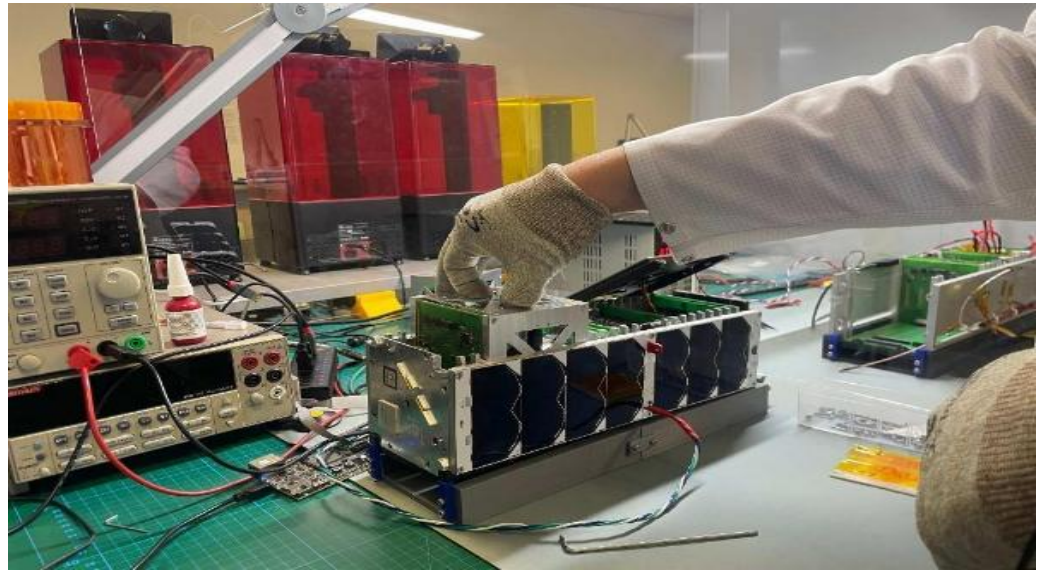
来源：国金证券研究所，《国外微卫星姿态控制系统发展综述》祁首冰等，ScienceDirect，Blue Canyon Technologies，《组合体航天器姿态的智能自适应控制方法》于欣欣等，中国航天科技集团，工大卫星

传统高轨卫星多采用经典的 PID（比例-积分-微分）线性控制算法：通过比例 P 环节对瞬态姿态偏差进行线性力矩补偿；利用积分 I 环节消除系统稳态误差以保障绝对指向精度；并引入微分 D 环节提供系统阻尼以抑制动作过冲与高频震荡。在传统高轨近乎绝对真空的【弱扰动、强确定性线性环境】中，PID 算法凭借优异的稳健性成为行业标配。

然而，VLEO 卫星需长期抵御高达 8km/s 的相对气流冲刷，且高层大气密度受太阳活动等因素影响，呈现高频、剧烈的非线性时变特征。在此种【强气动耦合、强外部扰动、高度非线性】的极端环境下，传统固化参数的 PID 算法暴露了响应滞后、动态调节鲁棒性差的短板，面临姿态发散甚至翻滚失控的风险。因此，VLEO 卫星平台的姿态控制面临刚性的技术演进需求：

- 自适应控制算法：能够依据系统实时状态及外部干扰量的大小，动态在线整定控制器参数。这种算法赋予了卫星在未知的突发气动湍流中迅速恢复平衡的鲁棒性。
- AI 与神经网络控制：随着星载算力芯片的升级，智能控制算法正被加速引入。神经网络具备强大的非线性映射与自学习能力，能够有效逼近并预测极其复杂的卫星气动动力学模型。这一趋势将推动卫星平台的“边缘计算”需求大幅提升。

图表40：全球首个AI在轨卫星姿态控制器在德国InnoCube纳米卫星上应用



来源：国金证券研究所，德国维尔茨堡大学

### 3.4.3 执行层：执行机构

执行机构是卫星姿态调整的【肌肉】，负责将控制指令转化为物理动作，实现卫星姿态的精确调整与轨道维持。核心执行机构包括：电推进、角动量交换装置和环境型执行机构。

图表41：核心执行机构介绍

类型	作用	代表产品	发展趋势	示意图
推力器 (化学推进/电推进)	卫星姿态控制和轨道调整的关键执行机构	Busek公司的BIT-3离子发动机、 Empulsion公司的IFM Nano Thruster、 中国兰州空间技术物理研究所的LHT-100	大比冲、低功耗、小型化方向发展，通过研发新型推进剂和技术、优化结构设计和材料应用来实现	 霍尔推力器
角动量交换装置 (反作用轮和控制力矩陀螺)	利用角动量守恒原理实现高精度姿态调节	Rocket Lab公司的RW-0.003、 NewSpace Systems公司的NRWA-T005、 易动宇航的CMG	改进结构设计、优化控制算法和采用新型材料提高控制精度和响应速度	 控制力矩陀螺
环境型执行机构 (如磁力矩器)	通过与环境场相互作用生成控制力矩	ISIS公司的iMTQ、 Sinclair Interplanetary公司 的TQ-15、北京控制工程研究所的大型磁力矩器	结合先进算法和智能决策系统，利用环境力矩降低能耗和成本，提升姿态控制系统整体性能	 磁力矩器

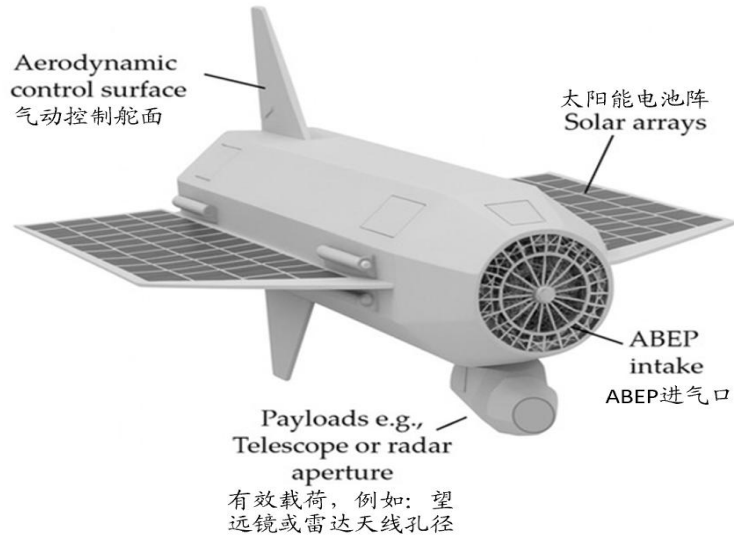
来源：国金证券研究所，《国外微卫星姿态控制系统发展综述》祁首冰等，《LHT-100霍尔电推进系统集成测试研究》田立成等，国际科技创新中心，陕西省国防科技工业办公室，上海卫星

传统的反作用飞轮或控制力矩陀螺在VLEO面临长期抗衡大阻力矩的局面，极易因转速饱和而失效，且频繁卸载会极大消耗极其宝贵的电推工质。在VLEO环境下，除了优化传统飞轮和磁力矩器的性能外，产业界正在演进出一种颠覆性的创新模式——气动舵面控制。

正如飞机在稠密大气中依靠副翼和尾翼转向，VLEO卫星通过在外部加装可偏转的微型阻力板或尾翼，主动改变卫星表面的气压分布，利用迎面而来的大气直接产生可控的气动力

矩。这种方式不仅彻底免去了由于频繁姿态调整带来的燃料消耗，更以极低的功耗实现了长效的姿态镇定。

图表42：采用气动舵面控制的卫星示意图



来源：国金证券研究所，CubeSatShop

## 4. 区域格局与中国现状：举国体制与商业活力的共舞

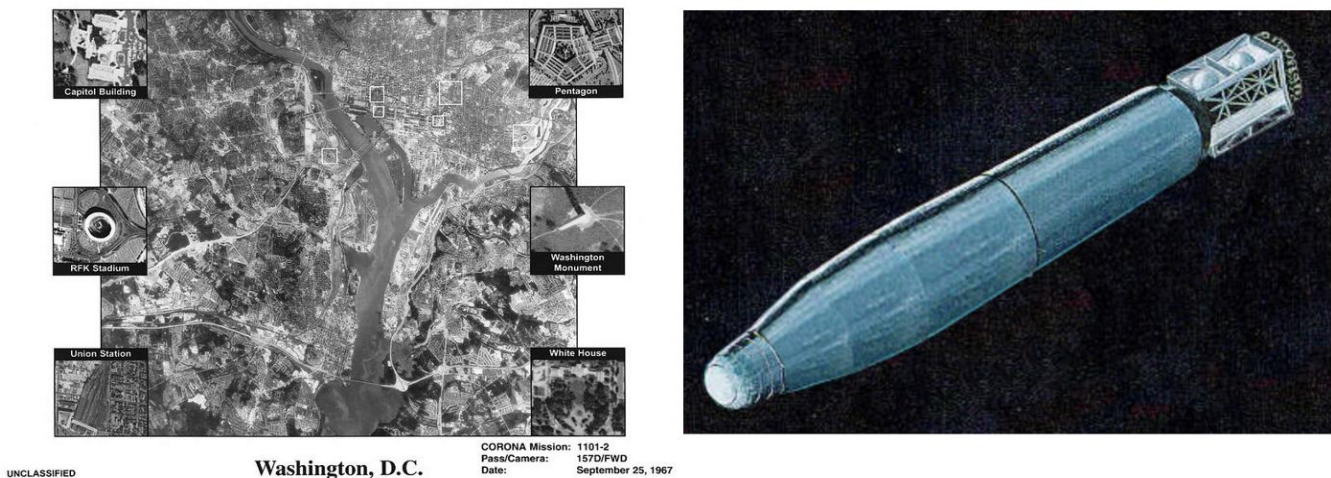
### 4.1 历史回溯：从军事侦察到商业重构，VLEO 轨道的价值演进

超低轨的研究探索并非一蹴而就，其发展轨迹是技术突破与战略需求相互催化的产业演进史。纵观全球航天发展历程，VLEO 经历了从【高成本、短寿命】的军事实验轨道，向【高经济附加值、强合规属性】的商业必争之地的跨越。

#### 4.1.1 萌芽期：军事侦察驱动，确立以高度换性能的底层逻辑

VLEO 的初步探索始于对极致光学分辨率的渴求。在冷战时期，美国为了获取战略情报，主导了科罗娜 CORONA 间谍卫星计划。该计划史无前例地将卫星近地点压低至约 160km 的极端高度。尽管受限于当时的动力与材料技术，卫星寿命极短，但其成功获取的高清晰度影像，奠定了 VLEO 轨道以绝对物理高度换取极致载荷性能的底层商业逻辑。

图表43：科罗娜间谍卫星 (KH-4B) 拍摄的华盛顿



来源：国金证券研究所，Picryl, space.skyrocket

#### 4.1.2 验证期：科学探测主导，突破大气阻力与材料极限

进入 21 世纪，随着电推进等核心技术的突破，VLEO 的发展重心由军事侦察转向精密科学与系统工程验证。各大国家航天局相继入局，旨在探明该轨道的驻留极限。

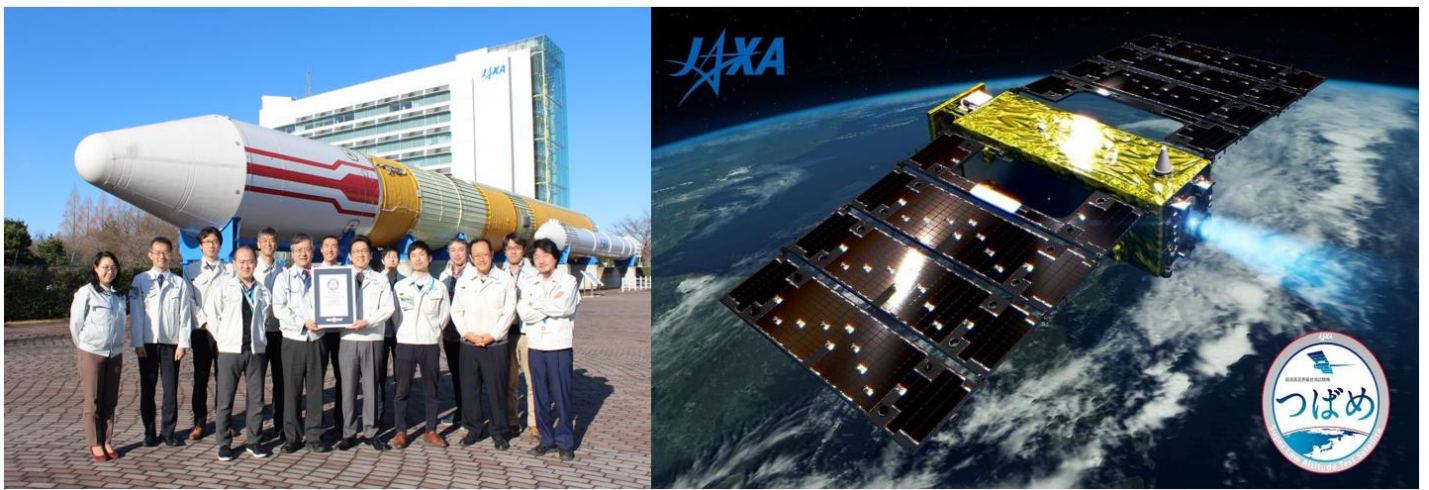
- 欧洲空间局 GOCE 卫星-工程可行性验证：欧洲空间局将重力场探测卫星 GOCE 部署至约 255km 轨道。该星首次采用流线型气动外形设计与精密离子电推进系统来动态补偿大气阻力，向业界证明了 VLEO 长期稳定运行的工程可行性。
- 日本宇宙航空研究开发机构 SLATS 驻留极限探底：日本宇宙航空研究开发机构的超低空试验卫星燕子 (SLATS)，通过逐次降轨，将运行高度进一步压低至 170km 量级。此举不仅验证了极端原子氧环境下的材料耐受度，更被吉尼斯世界纪录认证为在轨运行高度最低的地球观测卫星。
- 欧盟 DISCOVERER 项目-前沿动力预研：该项目率先提出了吸气式电推进 (ABEP) 等零燃料概念，标志着 VLEO 开始试图打破燃料携带量的物理枷锁，向可持续运行迈出关键一步。

图表44：GOCE 卫星流线型外形与气动阻力补偿示意图



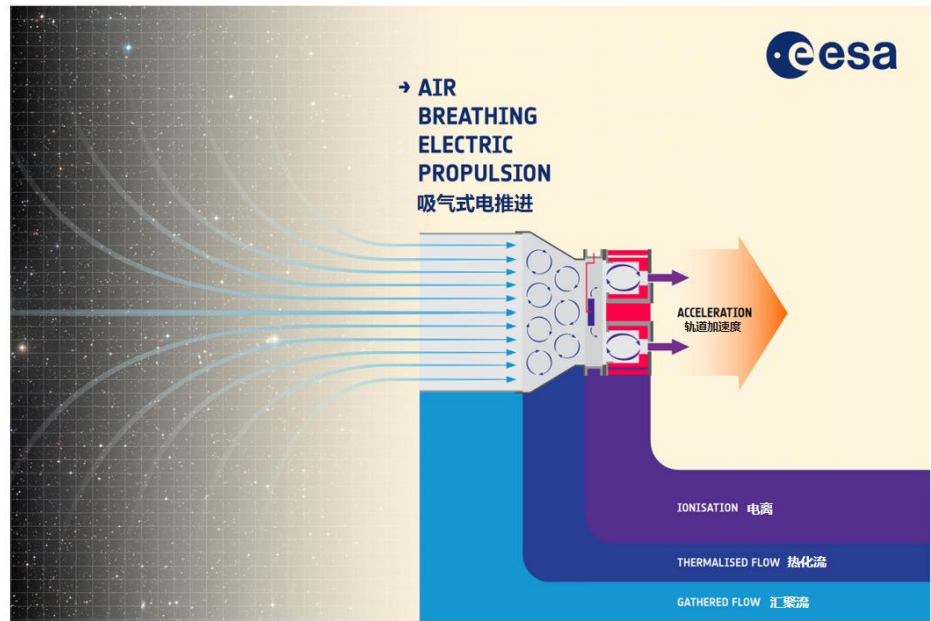
来源：国金证券研究所，ESA

图表45：超低空试验卫星燕子 (SLATS) 已被认证为吉尼斯世界纪录



来源：国金证券研究所，日本宇宙航空研究开发机构

图表46: 欧盟 DISCOVERER 项目吸气式电推进原理示意图



来源: 国金证券研究所, ESA

#### 4.1.3 爆发期: 商业航天入局, 开始从技术验证到规模化商业闭环的跨越

随着商用工业级元器件的普及与低成本发射的常态化, VLEO 正全面跨入规模化商业应用的前夜。中美两国商业力量在此轨道展开了密集布局, 试图重塑传统通信与遥感产业格局。

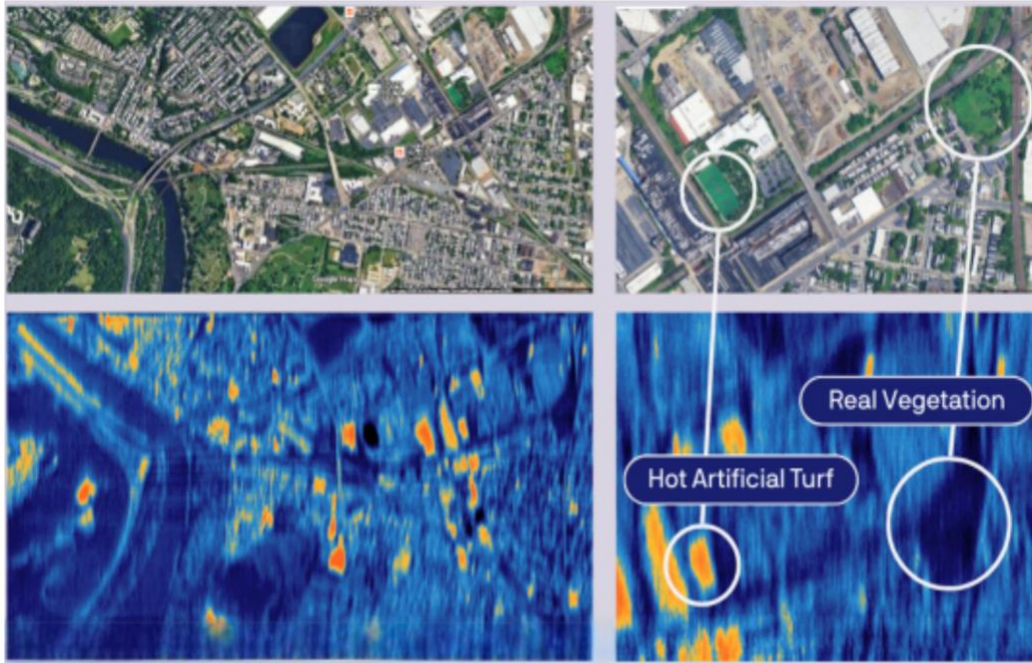
- 中国商业力量的平台化突破: 以赛思倍斯为代表的国内商业航天企业率先完成了关键实践。其研制的乾坤一号卫星实现了在约 270km 超低轨的长期稳定运行。2026 年 1 月 15 日, 该星主动实施高难度阶梯式可控下探, 依次闯入 260km、255km, 最终稳稳驻留于 250km 轨道高度。这一标志性动作不仅刷新了中国航天器最低驻留纪录, 更彻底验证了国内商业 VLEO 卫星平台的变轨控制与长期维稳能力。
- 美国巨头的场景重塑: 在遥感端, 商业公司 Albedo 正规划全 VLEO 星座, 旨在提供前所未有的可见光 10cm、红外 2m 极高分辨率影像, 其识别伪装与微小细节的能力将颠覆现有的商业遥感市场。在通信端, SpaceX 大举申请 1.5 万颗 VLEO 卫星频段与轨道, 意图利用该轨道的极低路径损耗, 建立手机直连卫星的绝对护城河。

图表47: 赛思倍斯乾坤一号高度演变轨迹(268.13km→250km)实测数据图



来源: 国金证券研究所, 赛思倍斯公众号

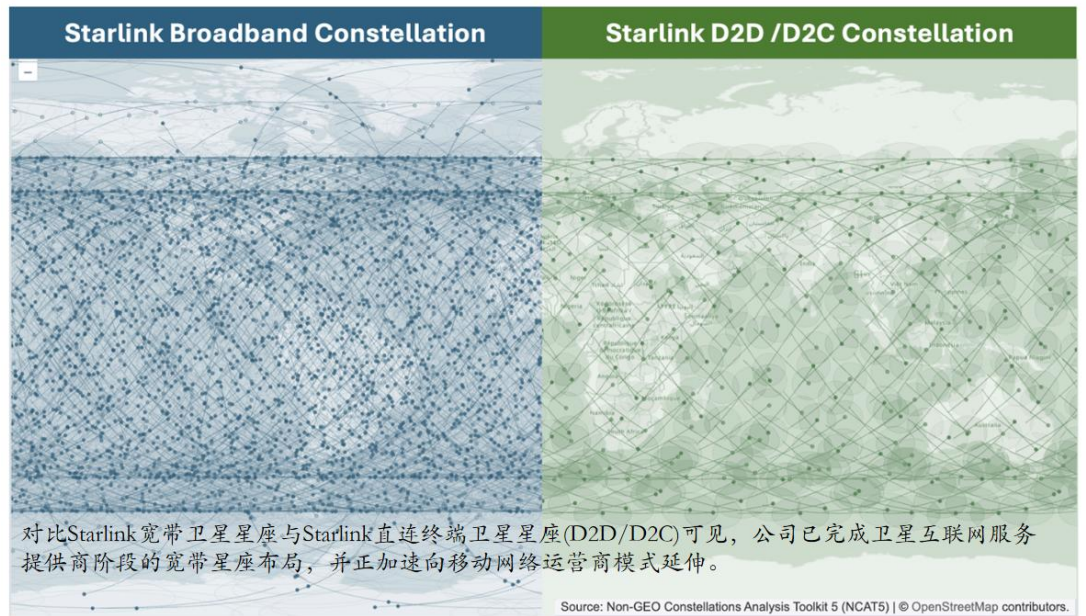
图表48: Albedo 卫星识别地面伪装



Albedo卫星通过高分辨率热红外成像能力，能够捕捉地表材料在热辐射特征上的差异，从而识别人工覆盖物与自然植被之间的物理属性差异。

来源：国金证券研究所，Albedo 官网

图表49: Starlink 宽带与直连终端 (D2D) 卫星星座分布图



来源：国金证券研究所，Starlink's bold move: from ISP to satellite MNO

## 4.2 中国：国家战略引导与商业航天先锋的双轮驱动

中国已将卫星互联网正式纳入新基建范畴。VLEO 作为颠覆性前沿科技，呈现出国家战略顶层引导，民营商业航天率先破局的特征。未来 5 年将是中国低轨星座的密集部署期。虽然当前的国家级巨型星座（如中国星网、垣信千帆星座等）主要聚焦于传统 LEO 轨道，但针对 VLEO 的战略卡位战已然打响。目前，VLEO 的专项规划已在航天科工等国家队集团层面加速推进，同时工信部也已向部分具备硬科技实力的商业企业颁发了超低轨技术试验卫星的无线电频率使用许可，政策红利与频谱资源正加速向该领域倾斜。

## 4.2.1 赛思倍斯：中国超低轨商业航天的工程化先行者

### 4.2.1.1 公司简介：聚焦超低轨，对标国际前沿

赛思倍斯 (Cspace) 成立于 2020 年 9 月，总部位于浙江杭州，是国内最早且最专注聚焦 VLEO 卫星平台技术的商业航天企业。公司不仅具备卫星设计研发能力，更在诸暨经济开发区重金前瞻性布局了空天智能制造与试验基地，率先打通了【卫星设计制造-在轨交付-星座级解决方案】的一体化全产业链服务能力。在商业模式与技术演进路线上，赛思倍斯全面对标美国 VLEO 遥感巨头 Albedo，体现出清晰的国际化视野与极高的技术天花板。

图表50：赛思倍斯位于诸暨的空天智能制造基地

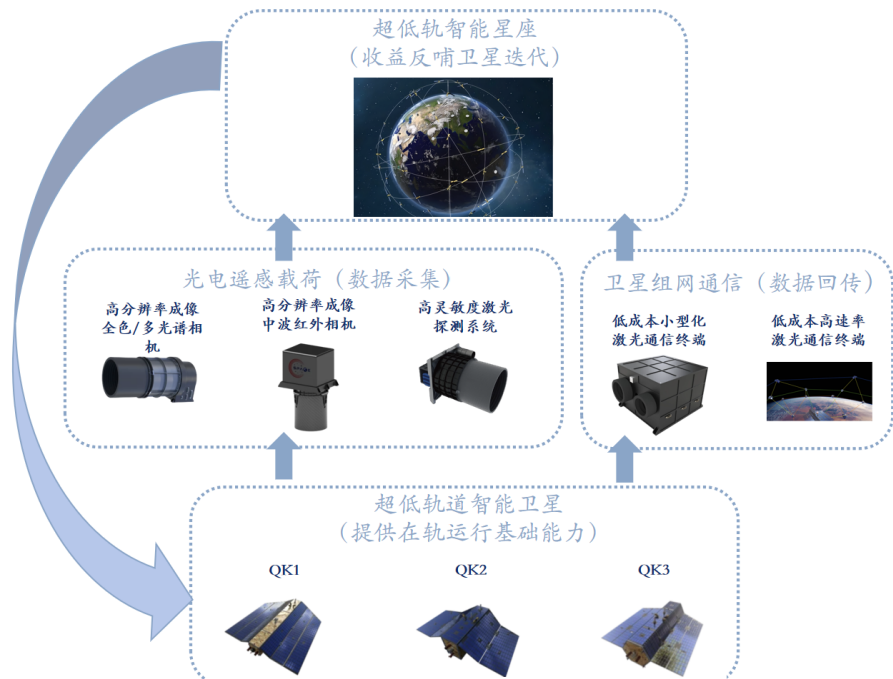


来源：国金证券研究所，赛思倍斯官网

### 4.2.1.2 核心产品矩阵：构建超低轨卫星空间信息能力闭环

针对 VLEO 极端的大气阻力与复杂的原子氧环境，赛思倍斯跳出了传统卫星的改型思路，正向研发了涵盖平台、载荷、通信到星座运营的完整产品矩阵，构筑了极深的商业护城河。

图表51：赛思倍斯平台-载荷-组网-应用的商业闭环

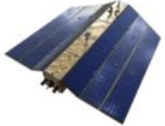
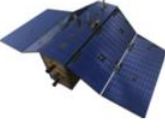
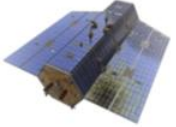


来源：国金证券研究所，赛思倍斯官网

### 1、卫星平台-乾坤(QK)系列卫星系统

乾坤(QK)系列是赛思倍斯面向 VLEO 环境研制的超低轨卫星，采用颠覆性的极简气动减阻外形设计，深度耦合高效电推进系统。具备强抗原子氧腐蚀与高频轨道维持能力。为后续 VLEO 星座化部署提供标准化、低成本、高可靠的通用工程化平台基础。

图表52：赛思倍斯乾坤(QK)系列产品



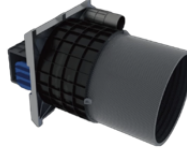
型号	质量级别	业务定位	典型应用和能力	卫星示意图
QK-1	200kg级	技术试验平台 基本技术平台 200kg级业务平台原型	关键技术轨验证 超低轨运行技术验证 小型业务载荷搭载	
QK-2	500kg级	高性能业务平台 复杂技术验证平台	高性能遥感卫星 宽带通信卫星 综合功能卫星	
QK-3	1000kg级	大型综合平台 高端任务平台	高性能遥感卫星 宽带通信卫星 综合功能卫星 科学探测卫星	

来源：国金证券研究所，赛思倍斯官网

### 2、光学载荷-光电遥感载荷产品

光电遥感载荷以超低轨+超高分辨率为核心设计目标，突破 VLEO 强气动扰动下的高精度姿态稳定成像技术。充分利用轨道高度减半，分辨率翻倍物理红利，实现低成本下的超高分辨率对地精细化观测，获取高价值商业遥感数据。

图表53：赛思倍斯光电遥感载荷产品

产品名称	特点	应用场景	示意图
高分辨率成像 全色/多光谱相机	国内法规允许的商业遥感最高分辨率 (0.5m分辨率), 可识别车辆类型、人员数量、 单个树冠及交通灯等精细场景	环境监测、农林产业、 矿产资源、城市管理、 热点追踪、国土规划等	
高分辨率成像 中波红外相机	突破低能见度的图像获取限制， 热对比度，能够更好地区分不同温度的物体， 空间分辨率高， 目前仍属空白	水污染检测、 森林火险、环境监测等	
高灵敏度激光 探测系统	主动探测， 全天时， 高灵敏度， 高精度，轻量化	森林和植被碳汇、 高程测量、海冰高度测量、 空间目标探测等	

来源：国金证券研究所，赛思倍斯官网

### 3、通信载荷-卫星组网通信产品

卫星组网通信产品聚焦星间协同与星座级运行需求，适配超低轨高动态特征的星间链路协同算法，支撑多星协同工作与海量遥感数据的高效、低延迟回传，为 VLEO 网络的业务化运行提供底层 IT 架构。

图表54：赛思倍斯卫星组网通信产品

产品名称	指标	特点	应用场景	示意图
低成本小型化激光通信终端	速率：0.125~1.0Gbps 通信距离：1000km 体积：200×200×250mm	低成本 体积小 高速率 抗干扰 保密性好	低轨星间数据传输	
低成本高速率激光通信终端	相干光通信体制 通信速率：100M~5Gbps 通信距离：7500km	高速率 轻量化 抗干扰 保密性好	低轨星间数据传输 遥感数据中继传输	

来源：国金证券研究所，赛思倍斯官网

#### 4、星座服务-剑指“双超星座”

超低轨道智能星座以乾坤系列平台为基础，融合遥感载荷、组网通信与在轨智能管理能力，构建【超低轨+超高分辨率】的可规模化部署星座。定位于向政府及企业端提供持续的在轨智能管理与空间信息服务。

公司计划于 2027 年前完成 8 颗卫星的在轨组网部署，远期规划规模达约 48 颗。随着该星座的逐步落地，赛思倍斯有望在国内 VLEO 高分辨率商业遥感市场占据绝对的先发垄断优势。

图表55：赛思倍斯“双超星座项目”论证评审会，标志着其由单星验证向星座化演进



来源：国金证券研究所，赛思倍斯公众号

赛思倍斯从卫星平台、遥感载荷、星间通信到智能星座，形成完整的超低轨空间信息能力闭环，为高价值遥感数据采集、快速传输及应用服务提供可规模化的商业与战略支撑。

##### 4.2.1.3 里程碑成就：乾坤一号跑通 VLEO 工程化全流程

2023 年，赛思倍斯成功发射乾坤一号超低轨技术试验卫星。这是中国首颗由民营企业主导研制并成功发射的 VLEO 验证星。它的成功运行不仅填补了国内空白，更在技术端完

成了多项极限测试,标志着中国商业 VLEO 平台正式从理论可飞迈向了商业化可用阶段:

- 极限轨道的长期驻留: 自 2025 年以来, 该星在显著的大气阻力环境下, 自主维持在 300km 以下超低轨稳定运行 (截至目前已在约 268km 轨道稳定运行超 2 年)。该星于 2026 年 1 月 15 日主动实施了高难度阶梯式可控下探, 依次闯入 260km、255km, 最终稳稳驻留于 250km 极限高度, 以实测数据证明了平台的卓越性能。
- 动力与气动设计的双重验证: 在轨期间, 系统性验证了多模态混合霍尔电推进技术在 VLEO 的长期可靠性; 同时验证了首创的减阻构型设计在强扰动环境下的静稳定性飞行特性。
- 攻克服强扰动高精成像难题: 在强大气阻力与外部干扰力矩下, 成功完成高精度姿态控制与对地成像, 证明了 VLEO 商业化数据获取的可行性。

图表56: 乾坤一号成功发射, 开启中国商业航天超低轨



来源: 国金证券研究所, 赛思倍斯官网

图表57: “乾坤一号”卫星平台自主运行能力和高精度的轨道控制能力



来源: 国金证券研究所, 赛思倍斯公众号

#### 4.2.2 航天科工楚天星座：国家队领航，构建超低轨通遥一体化空间新基建

随着 VLEO 平台技术的日益成熟以及下游对极致空间数据需求的爆发，中国航天国家队正加速抢占这一前沿轨道资源。作为中国航天科工集团（CASIC）倾力打造的核心战略工程，楚天超低轨通遥一体星座旨在通过低轨道遥感与通信的深度融合，构筑具备高分辨率、高重访率、高实时性的新一代对地观测基础设施。

该星座由航天科工集团二院空间工程总体部牵头实施，是集团在超低轨空间服务能力的重要布局，也标志着中国 VLEO 产业迈入国家队与民营商业航天共舞的繁荣生态。

图表58：航天科工楚天星座孵化基地



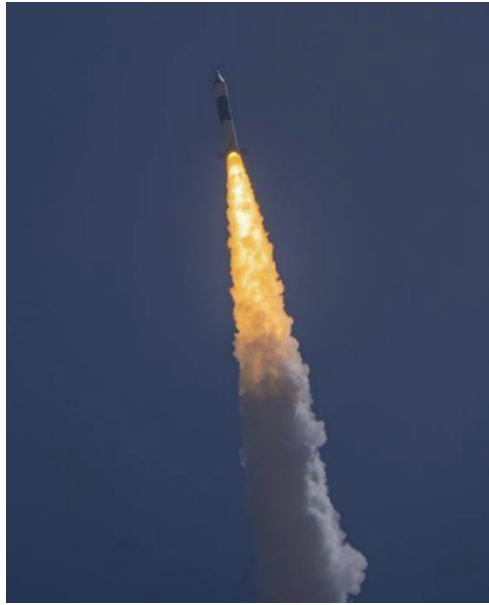
来源：国金证券研究所，航天科工官网

##### 4.2.2.1 星座规划与建设路径

楚天星座整体规划规模约 300 颗卫星，采取小步快跑、分层递进的建设策略，提供了清晰的预期与技术演进时间表：

- 第一阶段：技术验证与业务示范（2023–2025 年）
  - 2023 年：全面启动项目并完成体系架构定义。
  - 2024 年-关键节点：成功发射首颗超低轨技术试验卫星（001 星）。该星重点验证了星载光学遥感、在轨智能处理算法以及至关重要的 VLEO 原子氧（AO）防护等底层卡脖子技术。
  - 2025 年：完成 9 颗业务验证星簇的发射，初步构建业务示范系统，率先实现全球 1 天级的服务响应能力。
- 第二阶段：规模组网与全天候覆盖（2026–2030 年）
  - 目标在 2030 年前全面完成约 300 颗卫星的在轨组网。
  - 完成可见光、合成孔径雷达（SAR）、高光谱、热红外等多传感器体系的搭载。
  - 核心指标：最终实现全球范围内 10-15 分钟的即时响应能力，光学观测分辨率直达 0.5 米级。
- 第三阶段：全面融合与即时感知（2030 年以后）
  - 进入系统业务融合的深水区，目标是将全球即时感知响应时间进一步压缩至 10 分钟以内，彻底重塑人类对地表的实时感知能力。

图表59: 航天科工楚天星座首发试验星(001星)由湖北箭搭载成功发射升空



来源: 国金证券研究所, 湖北日报

#### 4.2.2.2 产品: 定义下一代空间感知标准

楚天星座之所以称为新一代基础设施, 在于其利用 VLEO 极低轨道的物理优势, 对传统卫星技术架构进行了全面革新:

- 物理红利与工程难题的平衡: 卫星贴近大气层边缘飞行, 大幅缩短了观测距离与通信链路。针对随之而来的致命大气阻力与原子氧腐蚀, 系统深度集成了先进的气动减阻外形与特种原子氧防护材料, 实现了寿命与性能的平衡。
- 半米级光学分辨率: 星座核心对地观测空间分辨率高达约 0.5 米。这一指标在快速获取精细地物(如车辆、微小建筑物)信息方面具备极强能力, 性能接近甚至超越现役高昂的中高轨高分辨率观测系统。
- 感传算一体化与边缘计算: 卫星不再是单纯的数据搬运工, 而是采用了在轨智能图像处理与变化检测技术。结合星间激光链路与快速下传机制, 系统能在太空直接剔除无效数据, 将经过处理的高价情报近实时反馈给地面用户。

图表60: 楚天星座星载监视相机在轨成像



来源: 国金证券研究所, 湖北日报

#### 4.2.2.3 典型应用场景：分钟级信息服务的蓝海

楚天星座旨在打造一个覆盖广泛的全场景空间信息服务生态。凭借 0.5 米级的高清慧眼与 10 分钟级的反应速度，配合可见光与 SAR 雷达的全天候穿透能力，该星座有望直接赋能自然灾害即时预警与评估、全球高频环境监测、大宗商品（如农作物长势、原油储罐监测）高频追踪等高价值行业应用。从天级到分钟级的数据时效性跨越，将催生出海量之前无法实现的商业遥感变现场景。

图表61：楚天星座应用场景

应用领域	主要功能	应用说明
自然灾害与应急响应	快速响应	对洪涝、地震等突发事件进行分钟级响应，为一线指挥机构提供实时现场影像与分析
环境与资源监测	长期监控	支持流域综合治理、生态环境动态监控、农业/渔业资源管理等持续性监测任务
产业与民生服务	智能服务	通过智能终端和地面应用体系，为无人驾驶导航、场景风险预警、旅游景区流动监测等提供数据支持

来源：国金证券研究所，中国新闻网

### 4.3 美国：商业巨头与新锐势力共舞

以美国为首的海外 VLEO 发展呈现出鲜明的商业驱动特征，技术迭代极快。相关企业具备敏锐的市场嗅觉与快速的技术迭代。在资本支持与相对宽松的监管环境下，头部企业不再局限于单一的技术验证，而是试图在极早期就建立起垄断性的生态壁垒。

#### 4.3.1 SpaceX 阳谋：以极致运力垄断直连通信

SpaceX 并未满足于第一代 Starlink 在 550km 轨道取得的成功，正在进行一场针对全球通信手机直连市场的重要布局。

- 监管突破：在其第二代与第三代星链网络规划中，SpaceX 明确划分了大量运行在约 300km 极限超低轨的子星座。2025 年 12 月，美国联邦通信委员会正式公开审查 SpaceX 关于部署高达 15,000 颗 VLEO 卫星的修改申请。扩容的核心诉求明确——为 T-Mobile 等传统电信运营商提供无死角的手机直连卫星服务。
- 运力护城河：在 300km 的 VLEO 轨道，大气阻力呈指数级上升，卫星即使配备电推进，其寿命也极短。要维持一个 1.5 万颗规模的 VLEO 星座，意味着每年必须发射数千颗替换卫星。这对于任何采用传统商业火箭发射的竞争对手而言，都是很大的现金流压力。而 SpaceX 凭借其猎鹰 9 号及未来星舰所带来的超大运力与超低发射成本，能够以极低边际成本填补卫星损耗。

图表62：FCC 关于 SpaceX 部署 1.5 万颗 VLEO 卫星申请的审查文件

Comments/Petitions Due: January 5, 2026  
Response to Comments/Oppositions to Petition Due: January 15, 2026  
Replies to Responses/Oppositions Due: January 22, 2026

By this Public Notice, the Space Bureau (SB) and the Wireless Telecommunications Bureau (WTB)<sup>1</sup> (together, the Bureaus) announce that the application for a new non-geostationary orbit (NGSO) system and the requests to provide supplemental coverage from space (SCS), to perform mobile-satellite service (MSS) operations, and to perform related fixed-satellite service (FSS) and telemetry, tracking, and control operations (TT&C) filed by Space Exploration Technologies Corp. (SpaceX) has been found, upon initial review, to be acceptable for filing. The Bureaus seek comment on the application, as amended, and the associated requests for waivers.

On September 19, 2025, SpaceX filed an application seeking to launch and operate a new NGSO MSS system of up to 15,000 satellites operating at altitudes ranging between 326 km to 335 km at various inclinations to provide connectivity to mobile devices.<sup>2</sup> On November 25, 2025, SpaceX amended its initial application to add a request and make certain conforming changes.<sup>3</sup> SpaceX filed its initial application the day after SpaceX, Spectrum Business Trust 2025-1, and EchoStar Corporation and its wholly own subsidiaries filed applications seeking Commission consent to the proposed assignment of certain spectrum licenses and authorizations held by EchoStar to SpaceX, and these assignment

来源：国金证券研究所，FCC

#### 4.3.2 Albedo Space: 从遥感数据向通用 VLEO 平台升维

SpaceX 的 starlink 代表其在通信领域的野心，成立于 2020 年的 Albedo Space 则是 VLEO 卫星在商业遥感领域的代表。公司由 Topher Haddad (CEO)、Ajjay Lasater (CTO) 和 Winston Tri 联合创立，团队成员具备深厚的航天工程与遥感系统研发背景。

物理红利的极致变现：10cm 民用影像的突破。作为 VLEO 技术的先行者，Albedo 规划了由 24 颗卫星组成的超低轨星座。得益于 VLEO 极近的观测距离，2021 年 12 月公司成功获得了美国国家海洋和大气管理局颁发的商业遥感许可，获准销售 10cm 全色与 40cm 多光谱分辨率的商业影像。这一精度已逼近航空无人机级别观测能力，直接打开了农业精准估产、能源基础设施巡检、国防情报侦察等高净值应用市场。

图表63：10cm 全色与 40cm 多光谱分辨率的商业影像拍的照片



来源：国金证券研究所，Albedo 官网

Clarity-1 成功入轨：完成工程实战闭环。2025 年 3 月 15 日，Albedo 迎来重要催化节点——首颗 VLEO 实测卫星 Clarity-1 搭乘 SpaceX Transporter-13 任务成功发射。该卫星在 VLEO 轨道的成功操作，兑现了 10cm 可见光与 2m 热红外影像采集能力，验证了公司在超低轨平台气动设计、精密姿态控制与海量数据快速上传等方面的实战化工程能力。

图表64：Albedo 官网 Clarity-1 卫星实物展示



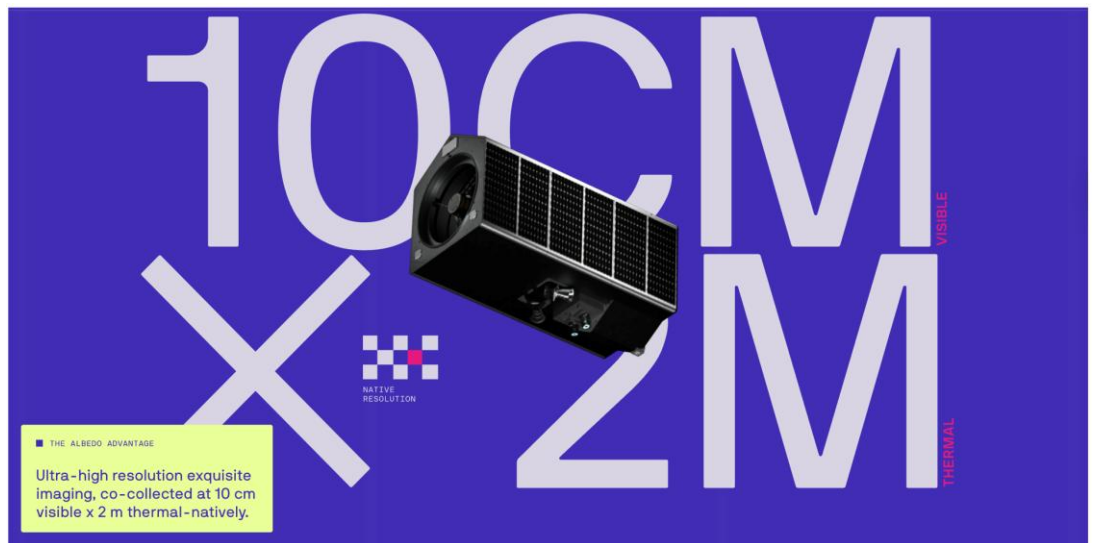
来源：国金证券研究所，Albedo 官网

图表65: Clarity-1 卫星相关参数

指标	参数项	数值
质量参数	总质量	530.00 kg
	干质量	485.00 kg
结构尺寸	本体长度	2.30 m
	本体直径	1.10 m
	最大展开尺度(Span)	2.30 m
载荷类型	光学遥感载荷	可见光 / 多光谱 / LWIR
成像性能	全色分辨率	10 cm
	多光谱分辨率	40 cm
	热红外(LWIR)分辨率	2 m
轨道与状态	轨道类型	VLEO
	状态	In Orbit

来源: 国金证券研究所, Albedo 官网

图表66: Clarity-1 卫星光学载荷图



来源: 国金证券研究所, Albedo 官网

商业模式重构: 进入 2026 年后, 公司的战略重心已明确从单一的【商业遥感数据服务商】, 向上游延展为【VLEO 卫星平台制造商与技术输出方】。Albedo 识别到了防务、通信及其他多轨道任务对高性能、强抗扰 VLEO 卫星平台的需求, 开始将经过 Clarity-1 飞行验证的成熟卫星平台, 直接供应给下游的各类载荷运营商。

图表67: Albedo Space 核心发展历程



来源：国金证券研究所, Albedo 官网

### 4.3.3 EOI Space: 极致气动构型创新，魔鬼鱼卫星

EOI Space 成立于 2017 年，总部位于美国科罗拉多州。有别于传统卫星制造商的改型思路，EOI Space 是全球少数从零开始，完全基于 VLEO 极端空气动力学环境进行正向研发的商业航天企业。其核心战略是通过部署专用的 VLEO 星座，为国防、公共安全及资产监测等应用场景提供远超传统低轨的高分辨率与低时延情报服务。

#### 1、核心产品：Stingray（魔鬼鱼）卫星

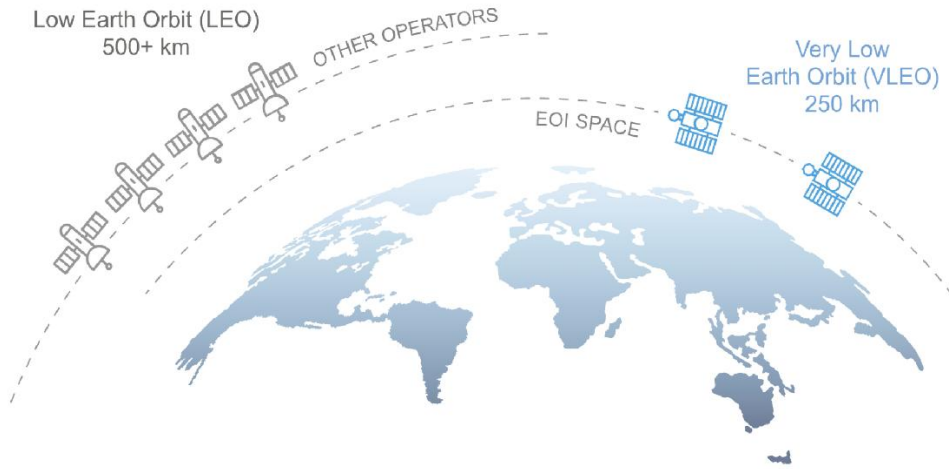
- EOI Space 的核心产品是其正在研发的魔鬼鱼 VLEO 卫星系列。该系统规划由约 60 颗卫星组成，目标运行轨道极低，仅为 250km。
- 飞梭形气动设计: Stingray 卫星摒弃了传统的方盒子+大太阳翼造型，采用了飞梭形，如同魔鬼鱼一般的流线型设计。这种气动外形能将迎风面的空气阻力降至最低，是其维持极低轨道寿命的核心。
- 自研 HET-X 电推进系统: 为配合特殊的气动外形，公司自主研发了 HET-X 霍尔电推进系统，以提供持续且精确的阻力补偿。
- 极致的载荷性能: 依托 250km 的物理距离与在轨边缘智能处理能力，该星座能够提供 15cm 的超高分辨率光学影像。

图表68: EOI Space 魔鬼鱼卫星渲染图



来源：国金证券研究所, EOI Space 官网

图表69: EOI Space VLEO 卫星运行轨道示意图



来源: 国金证券研究所, EOI Space 官网

图表70: EOI Space 卫星星座技术指标

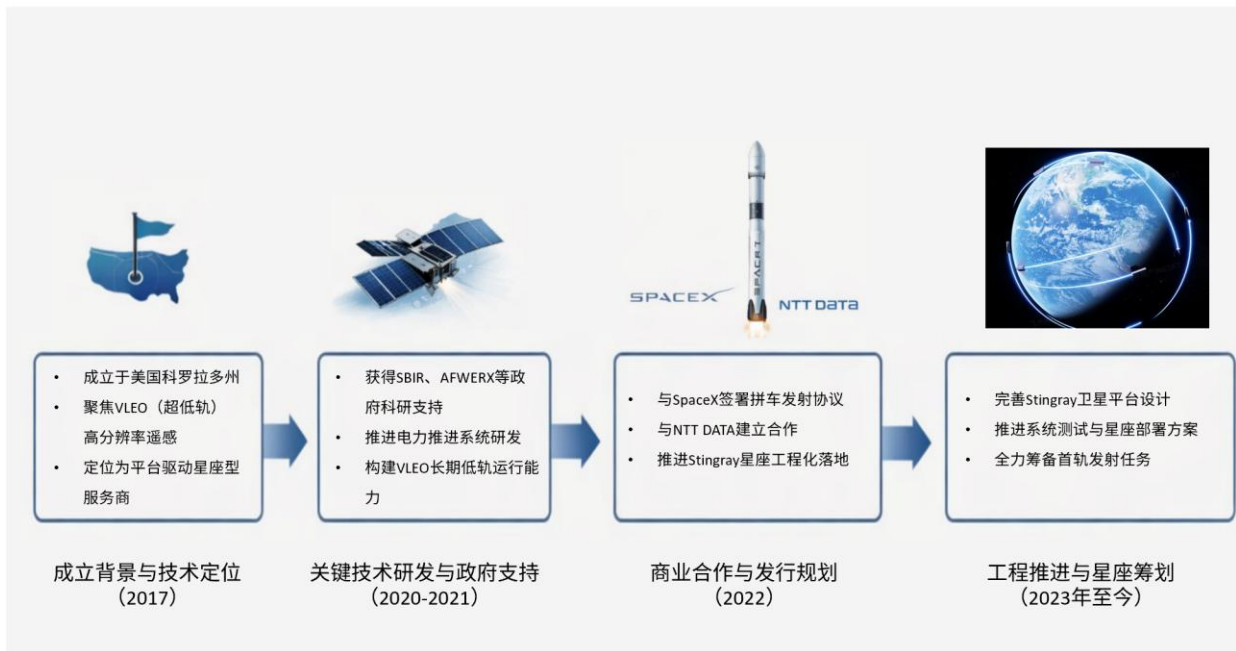
维度分类	关键参数项	具体描述与数值
轨道与星座构型	运行轨道	250 km
	星座规模	计划部署多达 60 颗卫星
卫星平台技术特性	重访周期	单星 1.5 天, 全星座组网后可达 10 - 15 分钟
	卫星质量	约 330 kg
	设计寿命	计划在轨运行 5 年
载荷性能与数据服务	核心推进系统	HET-X 电推进系统
	空间分辨率	0.15 米 (15cm), 覆盖全色及蓝、绿、红、近红外波段
	光谱波段	4 波段多光谱 (450 - 800 nm 范围)
	最大成像幅宽	5 km × 50 km
	通信频率	Ka 波段高带宽传输
	在轨处理能力	集成 GPU 计算集群, 支持在轨图像处理与边缘计算

来源: 国金证券研究所, EOI Space 官网

EOI Space 正沿着政府科研支持→关键技术验证→商业拼车发射的清晰路径稳步推进:

- 2017-2021 年 (技术孵化期): 公司成立初即锚定 VLEO 赛道, 并迅速获得美国政府科研项目 (如 SBIR、AFWERX 空军创新中心) 的资金支持, 重点攻克电推进与气动平台技术。
- 2022 年 (商业破冰期): 与 SpaceX 正式签署拼车发射协议, 锁定发射运力; 同时与日本 NTT DATA 等国际巨头建立合作, 提前锁定下游数据应用与分发渠道。
- 2023 年至今 (工程冲刺期): 持续推进 Stingray 卫星的地面系统级测试与推进系统点火验证, 全力筹备首轨发射任务。

图表71: EOI Space 发展历程



来源: 国金证券研究所, EOI Space 官网

#### 4.3.4 Redwire: 并购重组铸就系统级交付, 军商双线领跑

Redwire Corporation 是 VLEO 产业链中的底层卫星平台供应商。公司成立于 2020 年, 总部位于佛罗里达州, 其诞生伴随着美国航天产业密集的兼并重组(整合了 Adcole Space、Deep Space Systems 等多家老牌航天企业)。

Redwire 的核心商业模式为不直接参与数据运营, 通过提供模块化卫星设计(平台固定、子系统可替换、工业流程和发送接口标准化)、先进推进系统(含吸气式电推)和数字工程解决方案, 成为美国军方及国际 VLEO 项目的核心卖水人。

图表72: Redwire Phantom 卫星平台设计概览

## Budget-friendly Design 预算友好设计

Phantom is tailored for cost-effectiveness and reliability. Phantom的设计兼顾了成本效益和可靠性

**Aerodynamic design uses less propellant** 空气动力学设计减少推进剂的使用

**Compatible with small satellite launchers** 与小型卫星发射器兼容

**Standardized off-the-shelf elements reduce manufacturing cost** 标准化的现成元件可降低制造成本

**Does not require fuel to deorbit** 无需燃料即可脱离轨道

来源: 国金证券研究所, Redwire 官网

#### 1、核心产品矩阵: 双线并行的平台战略


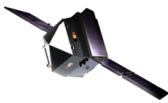
Redwire 在 VLEO 领域推出了两款标准化卫星平台, 分别卡位军用与商用市场:

**SabreSat 平台-主打军用:** 深度绑定美国国防部与军方需求。最大特点是模块化与可批量化生产能力。该平台兼容了吸气式电推进等革命性动力技术, 旨在极低轨道实现隐蔽侦察、

快速重访与低延迟通信。Redwire 凭借该平台，成功斩获了美国国防高级研究计划局专项资助，成为军用 VLEO 技术的关键链主企业。

Phantom 平台-主打商用/国际合作：面向广阔的国际市场与民用商业客户。延续了 SabreSat 的模块化设计理念，具备极强的平台可扩展性与多载荷即插即用能力，目前正在广泛拓展欧洲空间局（ESA）及其他国际商业 VLEO 应用项目。

图表73: Redwire 卫星平台相关参数

产品	尺寸	载荷尺寸	载荷质量	整星质量	可用功率	推进方式	轨道高度	任务寿命	任务应用	示意图
SabreSat	模块化结构	100×80×40cm	200kg	400kg	取决于轨道与配置，最高约5000W（寿命末期）	电推进或吸气式推进	>150 km	最长7年	ISR、通信、导航、地球科学	
Phantom (仍在开发中)	1.8×1.3×1.3 m (收纳状态)	40×40×60 cm	50kg	<300kg	>25W (寿命末期)	电推进	<300 km	最长5年	地球科学、ISR、SDA、射频监测、通信	

来源：国金证券研究所，Redwire 官网

## 2、商业壁垒：并购整合带来的系统级交付能力

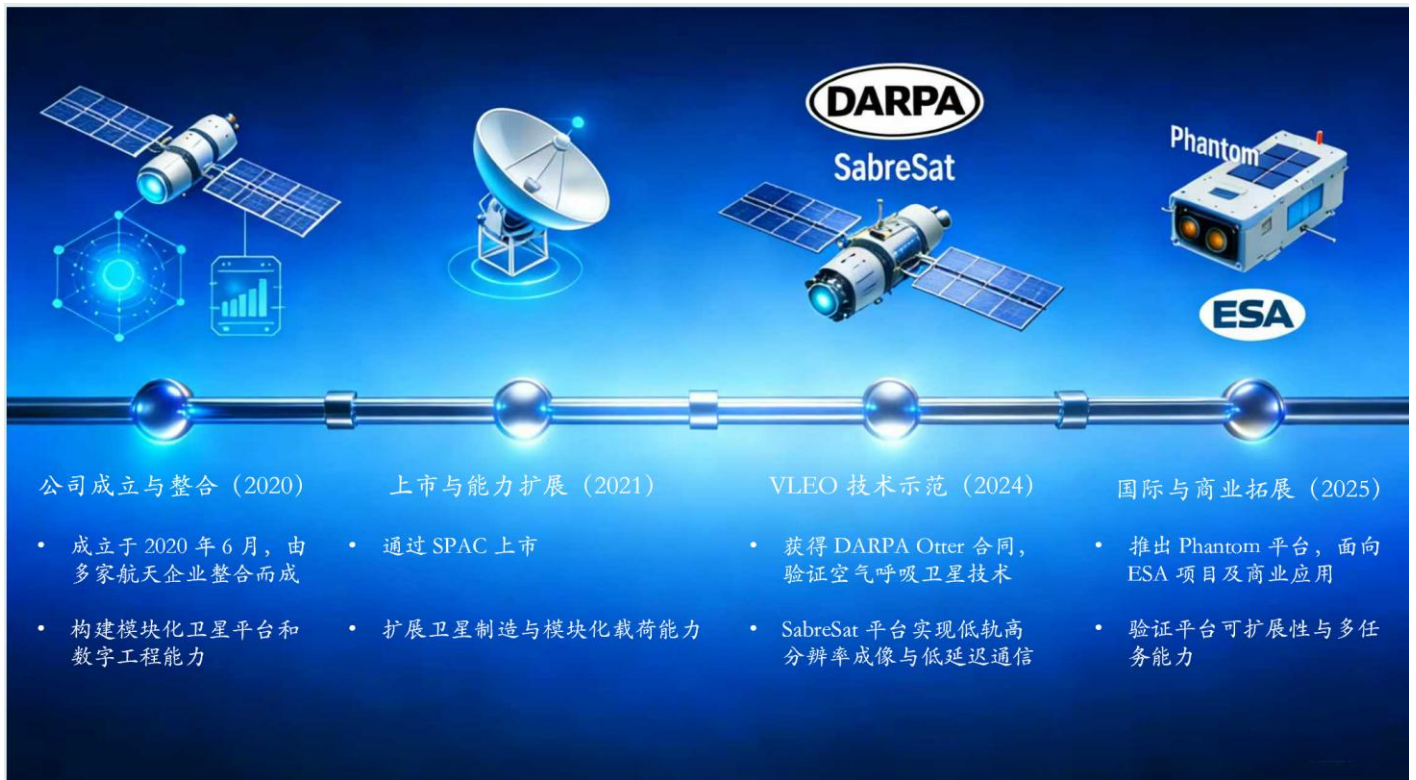
自 2020 年成立以来，Redwire 将分散在各子公司的姿态控制（太阳敏感器、星敏感器）、可展开空间结构、3D 打印与热控技术进行了深度整合。这种系统级的交付能力，使其能够快速响应 DARPA 及商业客户对 VLEO 星座快速响应、低成本组网、规模化部署的诉求，确立了其在美国乃至全球极低轨道卫星制造供应链中的领先地位。

图表74: Redwire 收购梳理

时间	收购公司	获得核心能力
2020年6月	Adcole Space + Deep Space Systems (合并成立Redwire)	太阳敏感器与星敏感器； 空间工程系统能力；ISS与猎户座任务经验
2020年6月	Made In Space	轨道制造与机器人技术
2020年10月	Roccor	太阳能电池阵列；可展开结构； 轻量化空间结构设计
2020年12月	Load Path	有效载荷发射适配器
2021年1月	Oakman Aerospace	模块化开发系统架构
2021年2月	Deployable Space System	Roll-Out太阳能电池阵列技术
2021年11月	Techshot	3D生物打印；多用途变重力平台技术
2022年10月	QinetiQ Space	小型卫星设计； ESA项目入口；欧洲市场拓展
2024年8月	Hera Systems	网络安全地球同步轨道航天器架构； 国家安全航天器系统，正式进军航空航天与国防领域
2025年6月	Edge Autonomy	实战无人机系统；美国及盟军国防渠道

来源：国金证券研究所，Redwire 官网

图表75: Redwire 发展历程



来源: 国金证券研究所, Redwire 官网

## 5. VLEO 产业链标的梳理

目前纯粹的 VLEO 标的初创公司居多, 但 VLEO 的爆发将对供应链产生溢出效应, 我们可以在二级市场寻找 VLEO 增量逻辑环节。

### 5.1 卫星平台与制造

VLEO 环境恶劣, 卫星寿命短, 这意味着更高的补网频率。卫星变成了类似手机的快消品, 利好卫星制造商, 应该寻找具备大规模、流水线化生产能力的卫星总装企业。

- 中国卫星: 航天五院旗下小卫星龙头。作为国家队卫星总装平台, 构建覆盖卫星平台研制、总装集成到地面应用与数据运营的“天地一体化”产业链, 在北斗终端与遥感数据领域具备较强工程与资质壁垒。

图表76: 卫星平台与制造相关标的

代码	名称	核心业务标签	核心看点
600118.SH	中国卫星	小卫星总装平台、天地一体化布局、北斗终端与遥感数据	国家队小卫星总装平台。航天五院旗下企业, 构建覆盖卫星平台标签、总装集成地面应用与数据运营的天地一体化产业链, 在北斗终端与遥感数据领域具备工程能力与资质壁垒。

来源: 国金证券研究所, 中国卫星官网

### 5.2 太空防护材料

A 股核心链主企业随着国内千帆星座、GW 星座等巨型低轨网络进入密集发射期, 卫星太阳能电池阵列全面向轻量化的柔性太阳翼迭代。这要求基底薄膜不仅要极度轻薄, 还必须具备极强的抗 AO 侵蚀能力。目前, A 股多家企业已在此领域实现了关键的身位领先:

- 瑞华泰(688323.SH), 航天级 PI 薄膜龙头。瑞华泰是国内高性能 PI 薄膜领军者。在商业航天领域, 公司是国内头部商业航天企业认证的无色聚酰亚胺 CPI 薄膜供应商。公司目前正积极开展耐原子氧 PI 薄膜的定向研发, 旨在从材料基底层面提升低轨卫星及飞行器的耐受冲击能力。

- 沃格光电(603773.SH),掌握制膜+防护镀膜全链条工艺。区别于单纯的材料供应商,沃格光电成功打通了CPI浆料→制膜→镀膜的全产业链条。其自主研发的特种防护镀膜,不仅能抵御高能粒子辐射和极紫外线照射,更在原子氧防护镀膜技术上取得了实质性突破。公司的CPI膜材搭配特种抗AO防护镀膜,目前已携手头部商业航天客户,成功实现了卫星柔性太阳翼的在轨应用,完成了从技术验证到商业交付的闭环。
- 国风新材(000859.SZ):作为国内PI薄膜产能的另一大主力,随着航天级PI/CPI薄膜因抗AO需求爆发而出现供需缺口,公司具备凭借庞大产能切入商业航天供应链、享受行业Beta红利的潜力。

图表77:太空防护材料相关标的

代码	名称	核心业务标签	核心看点
688323.SH	瑞华泰	航天级PI薄膜、CPI材料、耐原子氧材料研发	航天级PI薄膜国产替代核心标的。国内高性能PI薄膜领军者,是头部商业航天企业认证的无色聚亚胺(CPI)薄膜供应商,并积极推进耐原子PI薄膜定向研发。
603773.SH	沃格光电	CPI制膜、特种防护膜、原子氧防护技术	制膜+镀膜一体化布局的航天防护材料厂商。打通CPI浆料至镀膜全链条,在抗辐射与航天子氧(AO)防护技术上已实现突破,产品实现卫星柔性太阳翼在轨应用。
000859.SZ	国风新材	PI薄膜产能、商业航天潜在供应商	具备承接航天级PI/CPI放量需求的产能平台。作为国内PI薄膜重要产能方,在子氧(AO)带动需求趋紧的背景下,有望凭借规模优势切入商业航天供应链,享受行业贝塔红利

来源:国金证券研究所,瑞华泰&沃格光电&国风新材官网,财联社等

### 5.3 卫星热管理

根据在卫星热控产业链中的价值量分布与核心壁垒,A股市场的核心标的可划分为以下三大板块:

#### 1、热控系统设计及结构件总装—Tier1 系统级供应商

这类企业具备星箭一体化的设计与制造能力,直接对接卫星总体单位,受益于整星批产带来的规模效应。

- 航天环宇(688523.SH):公司业务深度覆盖卫星结构与热控系统,能够为卫星提供热控设计、热控部件等全套产品和服务。目前,公司已深度参与了多个商业卫星和国家重点卫星项目的热控系统建设。在卫星轻量化趋势下,其结构与热控一体化制造能力构筑了较高的竞争壁垒。

图表78:热控相关标的

代码	名称	核心业务标签	核心看点
688523.SH	航天环宇	卫星结构件、热控系统、结构热控一体化	卫星结构与热控一体化核心供应商。深度覆盖热控设计与热控部件制造,参与卫星商业及国家重点卫星项目,在卫星轻量化趋势下形成结构+热控和谐制造壁垒。

来源:国金证券研究所,航天环宇官网

#### 2、高功率载荷热管理与电子元器件——细分卡脖子环节

聚焦于卫星内部发热量最大的通信载荷与微波组件,解决其局部的热-功率耦合问题。

- 国光电气(688776.SH):在热控领域的行波管等空间微波电真空产品方面具有技术优势。在VLEO卫星复杂的电磁与热环境下,其产品可应用于卫星热控系统和通信系统的功率放大等高发热核心环节,是保障载荷在极端热循环下稳定功率输出的关键。
- 中石科技(300684.SZ):国内导热界面材料龙头。在VLEO卫星中,芯片与冷板之间的微观缝隙需要极高可靠性的导热垫片、导热凝胶或高定向石墨膜来填充,公司在此领域具备国产替代逻辑。

图表79：高功率载荷热管理与电子元器件相关标的

代码	名称	核心业务标签	核心看点
688776.SH	国光电气	行波管、空间微波电真空器件	空间微波电真空核心器件供应商。公司在行波管等产品上具备技术优势，可实现卫星热控与通信系统功率放大，是保障VLEO卫星在复杂电磁与热环境下稳定输出的关键。
300684.SZ	中石科技	导热界面材料、导热垫片/电流、高电位诱导膜	热管理材料国产替代受益标的。作为国内导热界面材料龙头，对VLEO卫星中功率器件与冷板之间提供高可靠性导热方案，在高功率密度解决方案下具备国产替代逻辑。

来源：国金证券研究所，国光电气&中石科技官网等

#### 5.4 卫星姿态控制与星载计算机

在 VLEO 星座大规模组网的催化下，卫星姿态控制系统及底层的星载计算机正经历从宇航级向工业级/车规级的范式转换。掌握核心抗辐照芯片设计、MEMS 高精度封装以及微型执行机构量产能力的企业，将享有产业 Beta 溢价。

##### 1、决策层：星载计算机芯片

VLEO 卫星面临极其复杂的非线性气动扰动，传统静态算法往往失效。为引入自适应或 AI 神经网络算法以实现动态平衡，卫星对边缘算力：高算力 SoC、可编程 FPGA 的需求有望爆发。

- 航宇微(300053.SZ)：国内星载 SoC 与 AI 芯片的领军企业。公司聚焦星载计算与控制解决方案，其核心产品：星载处理器、AI 加速芯片通过抗辐照设计与宇航级验证。填补了国内商用星载算力芯片缺口，广泛服务于国内通信及遥感卫星项目。
- 复旦微电(688385.SH)：国内高端 FPGA 技术龙头。FPGA 作为一种硬件可重构芯片，具备高灵活性、高并行和低延时的物理特质。在低轨卫星通信及复杂的姿态控制等需要频繁迭代升级、且对延时要求极高的场景中，其亿门级抗辐照 FPGA 是国内商业航天重要底层算力底座。

图表80：星载计算机芯片相关标的

代码	名称	核心业务标签	核心看点
300053.SZ	航宇微	星载SoC、AI加速芯片、抗辐射照设计	国内星载算力芯片核心厂商。聚焦星载计算与控制解决方案，星载处理器与AI芯片通过抗辐射照设计及宇航等级验证，解决星载算力缺口，服务通信与遥感卫星项目。
688385.SH	复旦微电	抗辐射照FPGA、可重构芯片、低轨卫星算力底座	国内抗辐射照FPGA龙头。依托亿门级抗辐射照FPGA产品，在低轨卫星通信与姿态控制等高实时性场景中提供可重构算力底座，是商业航天关键基础芯片供应商。

来源：国金证券研究所，航宇微&复旦微电官网

##### 2、感知层：传感器与 MEMS 惯导

为了适应 VLEO 极端的 SWaP-C (小体积、轻量化、低功耗、低成本) 要求，姿态感知传感器正全面向 MEMS 固态化和微型光学方向演进。

- 天银机电(300342.SZ)：商业星传感器核心龙头。其控股子公司天银星际是专业生产恒星敏感器的商业公司。凭借精度高、交期短、可靠性强的优势，公司深度参与了国内重大星座工程，2024 年度千帆星座批产发射的卫星均应用了其星传感器产品。目前该核心部件已具备年产 2000 台/套的批量化生产能力，构筑了高产能与工艺壁垒。
- 芯动联科(688582.SH)：高性能 MEMS 惯性传感器稀缺标的。公司的核心产品：高性能 MEMS 陀螺仪和加速度计主要技术指标与国际主流厂商处于同一梯队，性能已达到导航级精度。填补了国内高性能硅基 MEMS 在商业航天姿态控制与轨道确定领

域的空白。

图表81：敏感器与MEMS相关标的

代码	名称	核心业务标签	核心看点
300342.SZ	天银机电	星敏感器、商业星座配套、批量化产能	商业星敏感器核心供应商。子公司天银星际敏感器研发制造，产品具备台与高可靠性，深度涉及重大星座工程，已形成约2000/套年产能，构筑批量生产与工艺壁基地。
688582.SH	芯动联科	MEMS陀螺仪、MEMS转速计	高性能MEMS惯性传感器稀缺标的。核心MEMS陀螺仪转速与技术指标对标国际主流厂商梯队，性能达到导航级精度，弥补国内在商业航天姿态控制与轨道确定领域的空白。

来源：国金证券研究所，天银机电&芯动联科官网等

### 3、执行层：微型反作用飞轮与姿控机构

VLEO 卫星需要高频对抗气动扰动力矩，对执行机构的扭矩输出精度、疲劳寿命及微缩化提出了较高要求。

- 航天智装(300455.SZ)：背靠中国航天五院 502 所（北京控制工程研究所，中国航天姿轨控系统国家队）。在微型反作用飞轮、控制力矩陀螺等高精度姿控执行机构方面拥有较深技术积累，是商业微小卫星执行机构潜在受益者。

图表82：反作用飞轮与姿控机构相关标的

代码	名称	核心业务标签	核心看点
300455.SZ	- 航天智装	姿态控制执行机构、微型反作用飞轮、控制力矩陀螺	航天姿轨控执行机构国家队背景标的。依托航天五院502所技术积累，在微型反作用飞轮、控制力矩陀螺等高精度姿控执行机构领域具备深厚基础，有望受益商业微小卫星放量，切入执行机构国产化供应链。

来源：国金证券研究所，航天智装官网，国家航天局等

### 5.5 核心通信载荷

- 价值链重构：低轨通信卫星时代，卫星平台标准化、货架化，成本大幅下降；而为了实现高通量和多波束跳变，载荷（天线、转发器、星上处理）复杂度和成本占比逆势上升，目前已接近整星 BOM 成本的 50%。投资载荷，就是投资卫星价值量最大的部分。
- 技术要求：低轨卫星相对地面高速运动，传统机械天线无法满足快速波束切换的需求。有源相控阵天线是较优解。
- 量价齐升：量→随着千帆星座进入二期组网，单星波束数量要求从早期的个位数增加到几十甚至上百个，直接带动 T/R 组件（收发通道）数量指数级增长。价→虽然单通道价格在降，但对抗辐照、高频段（Ku/Ka/Q/V 频段）芯片的性能要求在提升，具备宇航级射频芯片设计能力的企业拥有较强的定价权。
- G60/GW 组网：从打样转入批产，载荷厂商的业绩将不再依赖单一研发合同，而是有望呈现类似消费电子供应链的线性出货特征。

图表83: 核心通信载荷相关标的

代码	名称	核心业务标签	核心看点
300762.SZ	上海瀚讯	宽带载荷、G60主力	G60星座核心供应商。深度参与千帆星座建设，研制并供给卫星通信载荷、信关站、终端等关键设备。随着千帆星座有望进入密集组网期，业绩有望从研发样机转向批量交付，确定性高。
688270.SS	臻镭科技	抗辐照芯片、电源	相控阵雷达与电源管理的底层基石。低轨卫星对电源管理芯片和射频收发芯片的抗辐照要求极高，公司在宇航级芯片领域具备稀缺性，受益于单星电子元器件价值量占比提升。

来源：国金证券研究所，上海瀚讯&臻镭科技官网，同花顺

### 5.6 下游应用及数据变现

随着产业由建设期迈入运营期，运营、测控、核心网与关键器件环节的商业价值将同步释放。

测控 SaaS 化：随着在轨卫星数量从几百颗迈向几千颗，依靠人力进行测控已不可能。自动化测控软件、轨道防碰撞系统将成为空中交通管制基础设施。这是一门边际成本极低、客户粘性极高的软件生意。

互联互通基建：

- 硬件端：高频、高速数据传输要求连接器具备极高的抗振动和信号完整性。在火箭分离、级间分离等关键动作中，特种连接器是不允许失败的单点，客户一旦认证很难更换。
- 软件端：要实现手机直连卫星，必须在地面建设强大核心网来处理鉴权和漫游。这是 5G NTN 落地必经之路。

图表84: 下游应用相关标的

代码	名称	核心业务标签	核心看点
601698.SH	中国卫通	卫星运营服务	卫星通信运营主平台。国内唯一基础电信卫星运营商，拥有通信广播卫星资源与频轨优势，直接受益于低轨卫星互联网建设与手机直连卫星应用放量，是商业航天应用端最核心的流量入口与资源平台。
920116.BJ	星图测控	航天测控软件	商业测控稀缺标的。布局全产业链，受益于星座组网带来的太空交通管理、测控数传等需求。
688418.SS	震有科技	卫星核心网	卫星互联网的大脑。受益于手机直连卫星技术有望普及及卫星地面站/信关站建设，是5GNTN架构落地的软件核心。获得中国电信天通一号卫星通信核心网扩容项目，支撑500万用户，具备2G/3G/4G/5G全系列核心网能力，受益于卫星通信用户规模放大
301306.SZ	西测测试	第三方检测	商业航天的卖水人。拥有全套军用/航天级测试资质，产能释放恰逢商业卫星批产大年，承接商业航天外包测试需求。
301517.SZ	陕西华达	高频连接器	火箭通用的血管接口。高可靠性射频连接器广泛应用于卫星传输和火箭分离机构，国产替代份额稳固。配套星网、千帆星座等国家重点航天项目。
688568.SH	中科星图	空天信息服务、数字地球与测控平台	数字地球领军者。公司以 GEOVIS 数字地球平台为基础，覆盖卫星测运控、遥感数据处理和空间资产管理，能够为 VLEO 星座运营提供高频次运行监控和数据服务支持。

来源：国金证券研究所，中国卫通&星图测控&震有科技&西测测试&陕西华达&中科星图官网等

## 6. 风险提示

### ■ 技术失败风险：

VLEO 卫星一旦推进系统故障，可能会迅速坠毁，容错率较低。吸气式电推进的工程

化进度若不及预期，将限制卫星寿命和经济性。

■ 发射产能瓶颈：

大量卫星申请需求对目前的火箭发射能力构成一定挑战。如果可回收火箭研发受阻，发射成本将压垮商业模式。

■ 频谱协调困难：

巨型星座带来的频谱干扰问题可能导致国际监管机构限制，甚至引发地缘政治摩擦。

**行业投资评级的说明:**

买入: 预期未来 3-6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 15%以上;

增持: 预期未来 3-6 个月内该行业上涨幅度超过大盘在 5% - 15%;

中性: 预期未来 3-6 个月内该行业变动幅度相对大盘在 -5% - 5%;

减持: 预期未来 3-6 个月内该行业下跌幅度超过大盘在 5%以上。

**特别声明:**

国金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。

本报告版权归“国金证券股份有限公司”（以下简称“国金证券”）所有，未经事先书面授权，任何机构和个人均不得以任何方式对本报告的任何部分制作任何形式的复制、转发、转载、引用、修改、仿制、刊发，或以任何侵犯本公司版权的其他方式使用。经过书面授权的引用、刊发，需注明出处为“国金证券股份有限公司”，且不得对本报告进行任何有悖原意的删节和修改。

本报告的产生基于国金证券及其研究人员认为可信的公开资料或实地调研资料，但国金证券及其研究人员对这些信息的准确性和完整性不作任何保证。本报告反映撰写研究人员的不同设想、见解及分析方法，故本报告所载观点可能与其他类似研究报告的观点及市场实际情况不一致，国金证券不对使用本报告所包含的材料产生的任何直接或间接损失或与此有关的其他任何损失承担任何责任。且本报告中的资料、意见、预测均反映报告初次公开发布时的判断，在不作事先通知的情况下，可能会随时调整，亦可因使用不同假设和标准、采用不同观点和分析方法而与国金证券其它业务部门、单位或附属机构在制作类似的其他材料时所给出的意见不同或者相反。

本报告仅为参考之用，在任何地区均不应被视为买卖任何证券、金融工具的要约或要约邀请。本报告提及的任何证券或金融工具均可能含有重大的风险，可能不易变卖以及不适合所有投资者。本报告所提及的证券或金融工具的价格、价值及收益可能会受汇率影响而波动。过往的业绩并不能代表未来的表现。

客户应当考虑到国金证券存在可能影响本报告客观性的利益冲突，而不应视本报告为作出投资决策的唯一因素。证券研究报告是用于服务具备专业知识的投资者和投资顾问的专业产品，使用时必须经专业人士进行解读。国金证券建议获取报告人员应考虑本报告的任何意见或建议是否符合其特定状况，以及（若有必要）咨询独立投资顾问。报告本身、报告中的信息或所表达意见也不构成投资、法律、会计或税务的最终操作建议，国金证券不就报告中的内容对最终操作建议做出任何担保，在任何时候均不构成对任何人的个人推荐。

在法律允许的情况下，国金证券的关联机构可能会持有报告中涉及的公司所发行的证券并进行交易，并可能为这些公司正在提供或争取提供多种金融服务。

本报告并非意图发送、发布给在当地法律或监管规则下不允许向其发送、发布该研究报告的人员。国金证券并不因收件人收到本报告而视其为国金证券的客户。本报告对于收件人而言属高度机密，只有符合条件的收件人才能使用。根据《证券期货投资者适当性管理办法》，本报告仅供国金证券股份有限公司客户中风险评级高于C3级(含C3级)的投资者使用；本报告所包含的观点及建议并未考虑个别客户的特殊状况、目标或需要，不应被视为对特定客户关于特定证券或金融工具的建议或策略。对于本报告中提及的任何证券或金融工具，本报告的收件人须保持自身的独立判断。使用国金证券研究报告进行投资，遭受任何损失，国金证券不承担相关法律责任。

若国金证券以外的任何机构或个人发送本报告，则由该机构或个人为此发送行为承担全部责任。本报告不构成国金证券向发送本报告机构或个人的收件人提供投资建议，国金证券不为此承担任何责任。

此报告仅限于中国境内使用。国金证券版权所有，保留一切权利。

上海	北京	深圳
电话: 021-80234211	电话: 010-85950438	电话: 0755-86695353
邮箱: researchsh@gjzq.com.cn	邮箱: researchbj@gjzq.com.cn	邮箱: researchsz@gjzq.com.cn
邮编: 201204	邮编: 100005	邮编: 518000
地址: 上海浦东新区芳甸路1088号 紫竹国际大厦5楼	地址: 北京市东城区建国内大街26号 新闻大厦8层南侧	地址: 深圳市福田区金田路2028号皇岗商务中心 18楼1806