

目录

导航： [开头](#) | [目录](#) | [末尾](#)

[1. 项目说明、主要特点、能力与理念](#)

[1.1. 项目核心理念](#)

[1.2. 能力](#)

[2. 技术、经济、地理和战略优势及其依据](#)

[2.1. 技术优势](#)

[2.2. 经济优势](#)

[2.3. 地理优势](#)

[2.4. 战略优势](#)

[3. 工业与技术基础](#)

[3.1. 磁悬浮与加速 \(Maglev\)](#)

[3.2. 超导技术与分布式架构](#)

[3.3. 脉冲电力](#)

[3.4. 真空工程](#)

[3.5. 高超声速空气动力学与热防护](#)

[3.6. 核动力装置](#)

[3.7. 隧道施工](#)

[3.8. 自主式地热热能系统](#)

[3.9. 超声速燃烧](#)

[3.10. 门户闭式燃料循环](#)

[3.11. 技术验证策略](#)

[4. StarRoad 各组成部分与技术的分阶段详细说明](#)

[4.1. 加速隧道及其基础设施](#)

[4.2. 大气门户 \(高海拔终端\)](#)

[4.3. 航天运输器 \(AstroLiner\)](#)

[5. 从发射准备到着水后维护的运行周期](#)

[5.1. 准备与发射](#)

[5.2. 隧道内加速](#)

[5.3. 驶出大气门户](#)

[5.4. 穿越大气层](#)

[5.5. 进入太空与在轨作业](#)

[5.6. 离轨与返回](#)

[5.7. 海上着水](#)

[5.8. 拖航与维护](#)

6. 项目实施、工期、要求与工业中心

6.1. 项目阶段

6.2. 工业中心

6.3. 总体工期

7. 所解决的问题与任务

7.1. 全球过热

7.2. 经济任务

7.3. 战略目标

7.4. 技术催化剂

7.5. 能源与热环境自主

7.6. 碳足迹

7.7. 水热主干渠的社会与环境潜力

7.8. 能源网络

7.9. 作为经济动脉的 StarRoad

7.10. 关键基础设施安全

7.11. 场址选择与扩展能力

7.12. 跨国项目的政治与法律协调

7.13. 货物流的渐进增长

8. 市场与轨道物流

8.1. 超重型发射的需求难题

8.2. 初始市场：空间太阳能与轨道数据中心

8.3. 空间太阳能电站的气候与产业逻辑

8.4. 轨道位置：GEO 与 EML4/5

8.5. 初始阶段：AstroLiner-S 直接飞行

8.6. 成熟阶段：微波中继与服务基础设施

8.7. 按工作环境划分运输职能

8.8. AstroLiner 在成熟物流体系中的作用

8.9. 轨道间运输器与拖船

8.10. 返回地球及其他行星

8.11. 标准化模块

8.12. 轨道基础设施的层级

8.13. 轨道造船厂

8.14. 轨道与月球定居点

8.15. 物流类比：把太空视作海运网络

8.16. 货物流经济学

8.17. 市场与物流的发展阶段

8.18. 演进前景：StarRoad 的后继系统

8.19. 行星工程潜力：把太阳系视作一个资源系统

[8.20. 战略结论](#)

[9. 项目经济模型](#)

[9.1. 方法与关键假设](#)

[9.2. 非洲条件下的隧道开挖成本](#)

[9.3. 采用自主生产的隧道掘进机机队](#)

[9.4. 自主式地热热能系统](#)

[9.5. 储能系统](#)

[9.6. 工业中心与物流](#)

[9.7. 研发与原型制造（第 0 阶段）](#)

[9.8. 项目最终 CAPEX 汇总](#)

[9.9. 各阶段分配（十亿美元）](#)

[9.10. 投资回收期与运载成本变化](#)

[9.11. 与替代方案比较](#)

[9.12. 经济结论](#)

[10. 安全与应急运行模式](#)

[10.1. 安全理念：任何单一故障都不致命](#)

[10.2. 主要风险与应对系统](#)

[10.3. 应急规程层级](#)

[10.4. 保障生存性的结构设计](#)

[10.5. 声学冲击与冲击波影响](#)

[11. 文化与心理影响](#)

[11.1. 作为景观的发射](#)

[11.2. 心理与象征共鸣](#)

[11.3. 社会经济影响](#)

[12. 结论](#)

1. 项目说明、主要特点、能力与理念

StarRoad 是一套超长距离地空干线运输综合体，其核心是一条超过 2,050 公里的真空磁悬浮加速器。它用于把质量最高达 15,000 吨、可重复使用并可自主运行的超重型航天运输器送入太空，起飞时无需在航天器上携带反作用推进剂。

1.1. 项目核心理念

改变航天发射范式：

- **依靠惯性穿越大气层。** StarRoad 不依赖推力和气动升阻性能来克服大气，而是利用航天运输器的质量所储存的动能；航天运输器在真空中被加速至约 11 公里/秒的高超声速。整个大气层在 50–60 秒内完全依靠惯性穿越。

- **质量成为优势。**数千吨的高质量不再是负担，而成为巨大动能的载体，同时允许结构和热防护采用超高强度、耐高温材料。
- **功能分离。**能源基础设施、加速和精密控制均由地面综合体承担，形成固定式工程系统。航天运输器则成为专用运输模块，针对货运、在轨机动和返回进行优化。
- **可扩展的工业化。**系统并非按一座孤立设施设计，而是太空“铁路”的首条线路。未来可平行建设备用隧道和新增隧道，使吞吐量呈指数增长并持续降低成本。

1.2. 能力

- **直接运送至地球同步轨道以外。**约 11 公里/秒的初速度，加上地球赤道自转带来的约 0.465 公里/秒增速，使航天运输器几乎可以直接抵达高能目标，包括日地系统或地月系统的 L1/L2 拉格朗日点，只需很少的轨道修正。由此可以完全取消在近地轨道的拖曳和加注。
- **载运能力。**单次即可运送数千吨有效载荷，从而使吉瓦级轨道电站、太空聚居地、资源开采、加工、装配和制造综合体、行星防御系统以及行星际飞船具备经济可行性。
- **成本。**系统满负荷运行时，送达高轨道的测算成本可降至每千克 1-10 美元，比现有和规划中的火箭系统低数个数量级。

2. 技术、经济、地理和战略优势及其依据

2.1. 技术优势

多数替代性轨道发射构想受限的并不是原则上能否建造，而是运行要求：必须连续工作、依赖主动动态支撑、需要不切实际的超高可靠性，而且一旦失效后果极其严重。主动式动能巨构必须不间断供能并持续动态稳定才能维持运行；失去供电或控制后，结构就会失去支撑，进入可能导致灾难的故障状态。长距离外置真空管道还对密封、分段隔离和热稳定提出极端苛刻的要求。StarRoad 的关键区别在于核心基础设施位于地下，可采用脉冲运行、局部隔离事故，并保持被动稳定。因此，它是把货物运离地球的干线系统中最低限度可实现的方案。真空运输、高超声速空气动力学、脉冲能源和超导等现有技术只需适配 StarRoad 的尺度，也进一步保证了方案的现实性。

2.2. 经济优势

主要成本来自建设资本和能源。没有一次性级段，起飞所需工质消耗极少，因而运行成本大幅降低。项目还会推动沿线地区发展，建设新型能源系统和高技术产业集群。

评估 StarRoad 的经济可行性时，必须放在全球运输和能源基础设施的尺度上考察。与全世界每年的货运量相比，数百万吨只占很小比例；而数千亿美元的资本投入，对于行星级基础设施并不罕见。因此，StarRoad 并不与现有运输系统争夺同一市场，而是占据高能运输干线这一新领域，在对全球总货流影响很小的情况下提供全新的能力。

2.3. 地理优势

从加蓬尼扬加河口通往刚果民主共和国莫希山及南部高原的线路接近理想状态：

- **赤道位置。**最大限度利用地球自转增速，并把轨道倾角修正降至最低。
- **直线通视。**线路较为平直，穿越中非人口稀少地区。

- **门户海拔。**3,400 米的高度使出口处大气密度降低 30%，从而减轻热载荷和冲击载荷。
- **地震稳定性。**东非大裂谷在这一地区活动很弱。
- **物流条件。**线路始于海边，便于制造和回收航天运输器；终点位于高地。
- **最佳线路与场址：**从加蓬尼扬加河口至刚果民主共和国莫希山，全长约 2,050 公里。从加蓬海岸起步可获得接近理想的赤道轨道倾角（约 3° ），直接通往地球同步轨道和拉格朗日点，并把行星际转移代价降至最低。门户综合体设在海拔约 3,400 米的莫希山，广阔的南部高原预留用于扩建。该场址兼具海拔高、地形平坦、距居民点超过 20 公里以及靠近坦噶尼喀湖和基伍湖等优点。
- **备选场址。**后备线路从刚果民主共和国基通布港通往莫希山，全长约 1,850 公里，全部位于一国境内，便于物流和法律协调。但它形成约 13° 的轨道倾角，向 0° 的地球同步轨道或拉格朗日点运送货物时需额外约 200–300 米/秒的速度增量，相当于每次发射损失约 2–4% 的有效载荷。因而，选择更复杂的跨国赤道线路（倾角约 3° ）是一项战略决策，目的是在干线全寿命期内获得最高经济效率，并直接抵达所有关键轨道基础设施节点。

2.4. 战略优势

建设一条不受天气影响、全天候运行的太空运输干线。长期来看，这类线路网络将成为全球基础设施和文明保障，并具备大规模撤离能力，同时为完整的太空工业化奠定基础，把高耗能、高排热工业迁出地球。

即使火箭系统实现其宣称的超低载荷运输成本，火箭发射仍是吞吐量有限的一次性离散事件。无论每千克价格多低，火箭系统在本质上都属于远征式物流。StarRoad 则是一条基础设施干线，其目标不仅是降低单次发射成本，更是建立稳定、连续的货流。

3. 工业与技术基础

StarRoad 不要求发现新的物理定律，而是对现有和新兴技术进行最高水平的工程集成：

3.1. 磁悬浮与加速（Maglev）

方案借鉴中国、日本和德国的经验。中国磁悬浮试验已实现把 1 吨物体在 2 秒内从静止加速到 700 公里/小时，证明快速加速大质量物体在原理上可行。

3.2. 超导技术与分布式架构

StarRoad 采用反置式架构：产生主悬浮场和稳定场的超导磁体安装在航天运输器上，由其低温系统冷却；隧道内则设置较为简单、廉价的铜或铝“轨道”绕组，作为被动导向装置和传递脉冲加速能量的次级回路。这样可把隧道的成本和复杂度降低数个数量级，并把主要技术复杂度转移到可重复使用、可集中维护的航天运输器上。

3.3. 脉冲电力

沿线分布的超级电容器站和蓄电池站由自主式地热热能系统网络充电，并向所需加速器区段提供吉瓦级脉冲。

3.4. 真空工程

大型强子对撞机（CERN）、SpinLaunch 和 Hyperloop 真空管道的工程经验。

3.5. 高超声速空气动力学与热防护

航天器、机动再入飞行器以及 SpaceX Starship 等项目积累的知识；主动冷却和相变储热装置。

3.6. 核动力装置

用于在轨供能的紧凑型机载反应堆——技术水平高于放射性同位素热电机——或 Helion Energy 等前景中的聚变模块。

3.7. 隧道施工

现代隧道掘进机每年可掘进数十公里，多条隧道可并行施工。

3.8. 自主式地热热能系统

项目将建设一套吉瓦级综合能源与气候基础设施，以改进型增强型地热系统（EGS）技术为基础。工质为通过直接空气捕集（DAC）获得的超临界二氧化碳（sCO₂）。系统承担三项关键功能：主动管理地热场，保证加速隧道温度稳定；提供基荷电力；长期移除大气中的 CO₂。

3.9. 超声速燃烧

门户的气体动力屏障采用环形超声速喷气发动机，燃用空气—氢气混合物。超声速燃烧形成稳定的锥形气流，沿隧道轴线向外喷出，排开大气并建立压力梯度，在航天运输器通过时保护加速器真空。

3.10. 门户闭式燃料循环

关键气动屏障使用清洁、可再生的燃料。电解水制取氢，发动机以空气中的氧作为氧化剂。屏障启动后，主要燃烧产物是过热水蒸气。这样无需向偏远高山地点运输和储存大量化学燃料，可提高可靠性并降低运行成本。

3.11. 技术验证策略

项目沿两条路线并行推进：数学建模以及关键部件的实物试验。这样可在早期确认构想可行性并获得精确工程数据，同时把主项目风险降至最低。

4. StarRoad 各组成部分与技术的分阶段详细说明

4.1. 加速隧道及其基础设施

- **长度：**约 2,050 公里。
- **断面。椭圆形（约 17.5 × 12.5 米）**，按航天运输器的气动外形和稳定磁悬浮要求优化。
- **隧道埋深：**最深约 8 公里；若地质和温度条件允许，还可进一步加深。允许埋深只能在详细地质勘探后确定，包括沿线钻探、建立温度剖面，以及评估岩体应力、裂隙和水文地质条件。深层岩体温度和热流越低——初步上限约为 200–250°C——可实施的埋深范围就越大，也越有余地优化曲率半径和过渡段，从而在保持目标速度的同时降低峰值过载和隧道内的动态载荷。
- **结构：**组合式。起始约 330 公里为坡度较缓的地下直线段，沿门户方向向下延伸，以简化初始加速。主体为深埋地下隧道，用于保持温度稳定、隔绝真空并提高安全性。

- **线路几何：**约 330 公里之后进入 S 形曲线。
 - **下行弧段：**半径约 6,300 公里，使隧道平缓下潜并形成所需角度。
 - **上行弧段：**半径 2,500–3,500 公里，使隧道以约 5–6° 的仰角抵达大气门户。曲率半径经过设计，使高超声速下的向心加速度不超过 4g。
- **真空系统：**分段设置。每个约 50 公里的区段独立运行，配有自己的真空泵、传感器和应急阀。

4.1.1. 加速系统

航天运输器依靠自身超导磁体与隧道内分布式直线电磁驱动装置（绕组）的相互作用完成加速和稳定。驱动装置由铜、铝等普通导体制成的分段无源绕组组成，无需低温冷却。

- **隧道起始段（0–330 公里）：**驱动装置主要布置在轨道下方，产生磁场以实现悬浮和 4g 的初始加速，同时主动补偿重力。
- **隧道中段（330 – 2,000 公里），尤其是 S 形曲线：**驱动装置环绕隧道布置，实现精确加速，在高超声速下以电磁力将航天运输器保持在隧道中心，并在弯道中稳定航向。末段径向载荷较高，底部绕组采用结构冗余且强度更高的材料。330–2,000 公里区间内，加速度按曲线从 4g 逐步降至 0g，航天运输器在轨迹末端达到约 11 公里/秒。
- **末段（2,000–2,050 公里）：**最后 50 公里用于在航天运输器经大气门户进入大气层前进行稳定和对中，本段不再加速。

自主地热系统变电站提供的脉冲能量严格按照航天运输器的位置同步送入指定绕组区段，**形成行波磁场**；该磁场与机载磁场相互作用，推动航天运输器加速。这样的架构降低了隧道复杂度、便于检修，并把高技术部件集中到可重复使用的航天运输器上。

4.1.2. 自主式地热热能系统

为保证温度稳定、能源独立和长期寿命，每条加速隧道都配有七条小直径服务隧道，共同组成自主式地热热能系统（下称“自主地热系统”）：

- **六条主干集热—能源隧道，直径均为 2 米：**位于加速隧道底板下方 30 米，轴线间距均为 7 米。隧道成对运行，可反向循环强制过冷至 +5°C 的超临界 CO₂，在整个加速器断面下方形成厚度超过 15 米的连续冷却岩层，消除热桥。
- **一条直径 3 米的技术服务隧道：**与加速隧道处于同一高度，侧向距离 3 米，可在不中断运行的情况下持续进行诊断和维修。自主地热系统隧道按最高 25 兆帕内压、围岩压力和动态载荷共同设计。**七条隧道全部由机器人化微型隧道掘进机群施工。自主地热系统在物理和功能上把能源设施与运输设施分开，从而获得很高的可靠性和可维修性。**

4.1.3. 自主式地热热能系统的冷却系统

- **深层冷却回路：**加速隧道下方的集热—能源隧道循环输送高压致密态或超临界态 CO₂ 工质。正常低温模式下，冷流进入深层集热隧道前的目标温度约为 +5...+15°C。吸收地热并经过深层区段后，CO₂ 温度可能超过

+100°C，具体取决于深度、岩体热流和发电模式。该回路排出地热，在主隧道下方形成冷却区，使线路能够安全铺设在约 5–8 公里的深度。

- **水热主干渠：**沿 StarRoad 线路修建，与服务公路、输电线和通信线路平行，把各终端连接成统一的地表散热系统。

水热主干渠宽约 5–8 米、深 2–3 米。渠底铺设多条相互独立的高压蛇形管道，在相邻终端之间输送 CO₂。渠水作为热缓冲和中间传热介质。

CO₂ 从涡轮、换热器或压缩机单元进入蛇形管时，温度约为 +50...+80°C。在约 50 公里的终端间区段内，它向渠水放热并冷却至约 +22...+35°C；具体温度取决于季节、湿度、暴雨强度、夜间辐射冷却和渠道运行方式。

正常运行时，渠水约保持在 +22...+32°C，热区局部升至 +35...+45°C。热流入口附近个别区域可能短时达到 +50...+80°C，并在一定程度上抑制生物活动，但未经处理的渠水仍不可饮用。

渠道上方覆盖轻质选择性盖板，既反射太阳辐射，又允许以红外方式向外散热。

- **终端冷却：**每个终端设冷却塔、换热器、泵、增压压缩机、透平膨胀机和备用冷水机。正常运行时，大部分低品位热量通过水热主干渠被动排出。

冷却塔和终端换热器把通过主干渠后的 CO₂ 从约 +22...+35°C 降至 +15...+25°C。必要时，备用冷水机在工质进入深层集热隧道前将其降至 -5...+5°C。冷水机只在峰值、应急或季节性条件下使用，不作为长期主运行模式。

- **增压与透平膨胀：**CO₂ 冷却后以较高压力到达下一终端，随后可进入透平膨胀机，回收部分压缩能，并通过膨胀进一步降温至约 -10...+5°C；实际值取决于压力、流量和所需相态。

之后，CO₂ 以所需的温度、压力和相态进入自主地热系统集热隧道。这个循环不会产生“免费能源”：压缩机输入功，渠道排出压缩热，透平膨胀机只能回收部分能量。真正收益是以较低的主动制冷负荷获得更冷的工质。

- **冗余与双向流动：**蛇形管道采用双套、双向设计。一条回路受损时，流量转移到备用管道或相邻终端。CO₂ 流向可根据热负荷、应急状态和各区段状况改变。

- **可维修性：**水热主干渠约每公里设分段闸门。区段受损时将其隔离，用泵把水位降至最低工艺水位或局部排空。卸压后，维修人员或机器人可接近蛇形管，无需停运整条线路。维修期间由备用回路、改变流向、加强相邻终端换热和临时启用冷水机维持冷却。

- **有限的水务功能：**在稳定的东西向坡度下，水热主干渠可作为次要功能保持缓慢自流、冲洗区段并受控排放多余水量。

夜间赤道暴雨可通过集水设施、沉淀池、过滤装置和溢流口补充渠水。由于水不与 CO₂ 直接接触，经过当地处理后可用于有限灌溉、终端工艺用水、消防储备和绿色防护带。

水务用途始终处于次要地位，取水不得妨碍主干渠的首要任务：冷却 CO₂ 并维持自主地热系统的热稳定。

- **对 StarRoad 的意义：**深层集热隧道、水热主干渠、终端冷却器、冷却塔、增压压缩机、透平膨胀机和备用冷水机共同构成分布式热管理系统。它降低对局部制冷机组的依赖，提高容错能力，可在终端之间重新分配热流，使深埋加速隧道更具可实现性。

地表冷却系统还增强 StarRoad 的经济作用：沿线将形成由终端、服务道路、能源节点、水利设施、工业场地和灌溉农业区组成的线性发展带。

4.1.4. 自主式地热热能系统的战略意义

除供能和保持温度稳定外，该系统的关键作用，是从根本上使主加速隧道在 5–8 公里甚至更深处安全、经济地施工成为可能。主动控制热场并排出地热，可解除原本会阻止超深埋设的温度限制。由此可采用大曲率半径的最佳 S 形线路，使航天运输器在 2,050 公里的线路上平缓爬升，以约 5–6° 仰角出射，同时把货物和乘员承受的过载控制在约 4g。自主地热系统不仅是能源基础，也是 StarRoad 整体弹道优化的技术基础。全部隧道由机器人化微型隧道掘进机群施工。

4.1.5. 垂直线路方向的技术联络隧道系统

为满足施工、通风、维修和疏散需要，沿线每隔 50 公里建设一条斜向运输隧道，共 40 条，坡度 30°，椭圆断面约 17.5 × 12.5 米。它们使用与主隧道相同的隧道掘进机施工，把地面与最深达 8 公里的主干线连接起来。

- **物流：** 每条隧道在 Alarm-2 紧急停车后都为人员和乘员提供独立疏散通道。与竖井不同，斜向隧道可使用自行车辆，一次运出数十人。
- **安全：** 这些隧道为 Alarm-2 紧急停车后的人员和乘员提供第二条独立疏散路径。
- **可扩展性：** 斜向隧道是未来平行 StarRoad 线路的接入基础，可从中水平开挖支线连接新的加速隧道，使联络网络发展为不断扩展的运输骨架。
- **与自主地热系统整合：** 每条斜向运输隧道下方再向下 10–20 米开挖集热隧道，在施工阶段预先冻结并稳定岩体，建成后用于发电。
- **地面终端综合体：** 每条斜向隧道在地面均连接一个多功能终端。40 个终端各自独立，包含：
 - **通风和气体净化设施**，用于维持隧道空气条件并排出污浊空气；
 - **施工基地**，设有模块、渣土和建材的堆放、转运与临时储存场地；
 - **运行和生活楼**，为轮班人员提供控制室、休息室、车间和仓库；
 - **接入自主地热系统的地热电站和冷却设施**，用于管理深层集热隧道中的传热工质；
 - **CO₂ 捕集和处理站**，采用直接空气捕集（DAC），把捕集的 CO₂ 液化、净化后作为工质送入深层集热隧道，形成闭式循环；
 - **外部电网和通信接入点**，包括备用电源与宽带连接。
 - **连接区域交通网络的公路或铁路支线；**
 - **地面疏散点**，配有紧急医疗设施和直升机停机坪。
- **法律与环境适应性。** 倾斜技术隧道可把地面终端布置在国家公园、保护区和集水区等受保护土地之外，即使 StarRoad 主线从其地下深处通过也不例外。这样消除了保护区地下布线的主要法律障碍，无须在公园范围内建设设施。每座终端设在最近的非保护用地，并由斜井连接主隧道，简化审批、减轻环境压力，也完全避免对受保护生态系统的直接影响。

4.1.6. 供电与储能

StarRoad 加速器采用三级电力网络，提供：

- 可靠冗余，单个部件失效不会导致系统停运；
- 自适应放电时间，从起始段的秒级缩短到末段的微秒级；
- 尽量缩短大功率电缆，降低损耗和电感。

○ 拓扑层级

第 0 级：终端一次储能

- 40 个终端均配置重力储能、利用渠道微型水电设施的抽水蓄能，以及锂离子电池储能系统（BESS）。
- 每个终端总容量约 5–9 吉瓦时，全线路约 360 吉瓦时。
- 输出方式：最高 100 千伏的高压直流电，通过技术隧道内的主干电缆输送。

第 1 级：50 公里区段控制器

- 线路分为 41 个约 50 公里的区段，最后一个区段是通往门户的 50 公里。
- 每个区段设置主配电控制器，由相邻两个终端供能，形成交叉冗余。
- 区段控制器向各一公里能源单元分配电能，并同步其运行。

第 2 级：公里级能源单元。每个公里级单元配有一套本地控制器，用于：

- 接收区段控制器供电；
- 管理主隧道墙体下方的锂离子缓冲电池；
- 管理可切换绕组组；绕组通过飞轮和超级电容器供能，设备位于隧道墙后专用设备舱内。

区段控制器与每个一公里单元之间设两条独立通道，形成冗余。

○ 电缆线路架构

- **主干电缆（第 0→1 级）**：铺设在直径 3 米的技术服务隧道内；该隧道与主隧道平行，侧向距离 3 米。
- **沿线分配**：每个终端的电缆向两个方向各延伸 50 公里，总长 100 公里，并与相邻终端覆盖区重叠。因此，每个区段至少由两个相邻终端供电，实现 100% 冗余。
- **进入主隧道**：电缆每隔一公里通过密封穿墙件从技术隧道进入主隧道，并连接一公里单元控制器。
- **单元内分配**：控制器之后，电力分为两条并行路径：

路径 A：每个单元约 0.5–1 吉瓦时的锂离子缓冲电池，用于平滑秒级功率峰值。

路径 B：通过飞轮储能和超级电容器为可切换绕组组供电，设备安装在隧道墙后。

- **三区放电速率适配**。航天运输器的加速曲线经过优化，使单组绕组的峰值功率在起始区最高——此处不需要超短脉冲——并沿线路逐步下降。因此，三个区段可以采用不同类型的储能和开关设备：

区段	线路范围	放电时间尺度	储能与开关设备	原因
第Ⅰ区：低速	0–200 公里	秒至毫秒	锂离子电池和标准 IGBT 逆变器	航天运输器速度较低，穿越一公里需要 0.1 秒以上，可由 BESS 直接供电而无需中间缓冲。
第Ⅱ区：中速	200–1,000 公里	毫秒至微秒	锂离子缓冲电池、飞轮储能和 SiC 逆变器	航天运输器继续加速，需要更快的开关速度，但机械飞轮仍可使用。
第Ⅲ区：高速	1,000–2,000 公里	微秒脉冲	超级电容器和高速 GTO/IGCT 晶闸管开关	穿越一公里的时间降至 0.09 秒，只有纳秒级响应的超级电容器能够稳定脉冲。

重要说明： 由于加速度逐步下降，第Ⅲ区每公里所需能量低于第Ⅰ区。虽然放电速度要求更高，部件承受的能量载荷反而降低。

○ **冗余与应急韧性**

- **控制器双重设置：** 每个区段控制器和一公里控制器均有热备份，由两块相同且独立供电的电路板组成。
- **交叉供电：** 每个一公里单元既可从本区段控制器取电，也可通过技术隧道内的备用电缆从相邻控制器取电。
- **本地绕组冗余：** 每个一公里单元设三套独立切换的绕组。一套受损时，其余两套仍可继续工作，虽然加速效率降低，但无需停车。
- **应急隔离：** 检测到短路或过热时，一公里控制器切断本单元电源，并通过区段间密封门将其隔离，不影响相邻单元。

○ **设备布置与结论**

设备	位置	功能
一次储能	地面终端	长期储能，共 360 吉瓦时。
主干电缆	3 米技术隧道	把电能从终端冗余输送到各区段。
区段控制器	主隧道设备舱，每 50 公里一处	向十个一公里能源单元配电并进行同步。
锂离子缓冲电池	主隧道墙体下方	平滑第 I–II 区的秒级峰值。
飞轮	第 II 区隧道墙后	缓冲毫秒级脉冲。
超级电容器	第 III 区隧道墙后	微秒级稳定并补偿电压跌落。
本地一公里控制器	每公里一处的设备舱	控制绕组切换、状态监测和缓冲设备。
加速器绕组	隧道内表面	产生推动航天运输器加速的行波磁场。

○ **供电架构的优势**

- **负载平滑分配：** 无需在整条隧道同时提供峰值功率；起始段使用较慢脉冲，末段脉冲更短但能量更低。
- **各层级均有冗余：** 一个终端、控制器甚至整段 50 公里区段失效，都不会使系统停运，相邻终端和区段会补足功率。

- **扩展灵活：** 增加平行 StarRoad 线路无需重建供电系统，只需在现有技术隧道内增加主干电缆。
- **成本优化：** 昂贵的超级电容器和飞轮只用在真正需要的末段，线路起始段采用成本较低的锂离子电池。

4.2. 大气门户（高海拔终端）

由此解决末端出射的“最后一公里”问题。

4.2.1. 位置与结构

门户综合体位于刚果民主共和国莫希山山顶高原，海拔约 3,400 米。其南侧 16 公里的广阔高原预留给未来扩建，可布置数十座平行门户。综合体是一座大型固定设施，设有主机械密封门和气动屏障系统。它实际上类似一台三重环形喷口朝向天空的固定式地面喷气发动机，但目的不是给物体加速，而是排开空气，并在航天运输器进入大气层时形成缓冲区。

4.2.2. 气动屏障

这是门户的主要工作部件。航天运输器抵达前数秒，系统开始沿隧道轴线向外喷出锥形超声速气流。

- **来源与结构：** 气动屏障由三套相互独立、同心布置的环形喷气发动机带构成，也可采用相同三带式结构的高超声速冲压发动机。它们环绕门户出口，使用空气—氢气混合燃料；氢气通过现场电解制取。三重冗余保证容错能力：任意两套发动机带工作即可形成有效屏障，因此一套失效时系统仍能运行。每套发动机带都有独立的供料、控制和点火系统。三套发动机带在门户外侧由小到大逐级后退布置，机械密封门位于其后方的门户内部，因此无需预先开启机械门即可启动发动机带。

- **主要功能：**

- 1) **建立朝外的压力，在航天运输器通过期间保护隧道真空。**
- 2) 预先排开并加热门户出口前方的空气，在隧道真空与外界大气的分界处形成可控梯度。

气动屏障不是航天运输器的气动防护罩，也不会把它与大气隔开。它的作用是延长两种介质之间的过渡时间，把接触冷态静止空气时近乎瞬时的微秒级冲击，转化为接触加热同向气流时分散的毫秒级载荷。总气动力不会因此降低，但载荷变化率（jerk）和低频分量会大幅减小，从而降低局部结构破坏和热冲击的风险。

- **气流形态：** 与隧道和航天运输器断面相符的椭圆截面锥形气流，长度从数十米到数百米，由大气门户三排环形喷口向外喷出。

气动屏障不要求形成几何上完美、静止或严格轴对称的锥体。其工作状态本质上是动态的，允许气流形状、密度和速度随时间与空间波动。

门户能够工作的唯一刚性条件，是在整个出射过程中维持朝外的正压力和动量梯度，彻底阻止外界空气进入隧道；同时还要预先对出口区域的大气进行气动和热力准备。这两项条件显著提高系统的可靠性与可实现性。

因此，气流形态是一个自适应参数，而不是目标值。系统依据压力、质量流量和动量等整体参数实时优化，而不是追求固定几何形状。

- **可扩展性与试验：** 与数千公里的加速器不同，门户采用模块化设计，容易按比例放大。稳定超声速气动锥的形成、同步控制和喷气发动机带运行，都可以在 1:5 或 1:10 的全功能实体试验台上充分验证，从而在主线路全面施工前消除主要技术风险。

4.2.3. 安全系统

使用氢气对防火防爆提出更高要求。门户设施因此设置双重氢气泄漏探测、氮气惰化吹扫、防爆设备，并把电解除装置、储存设施和发动机带物理隔离；定向通风通道则把可能的泄漏安全排向远离人员和关键设施的位置。

4.3. 航天运输器（AstroLiner）

4.3.1. 尺寸与发射质量

全长约 150 米，椭圆断面约 10 × 15 米。外形为高超声速楔体，针对穿越大气层时的最小阻力和热载荷进行了优化。

- **最佳发射质量：约 15,000 公吨。**

15,000 公吨是工程与经济条件共同确定的最佳值，处于物理限制和工业可实现性之间的合理平衡点。

评价指标	下限（低于 8,000–10,000 吨）	最佳值（15,000 吨）	上限（高于 20,000–25,000 吨）
气动与过载	大气作用占主导。阻力 $F_d = \rho \cdot A \cdot v^2$ 会产生较大的加速度 $a = F_d/m$ ，需要复杂的主动稳定系统，并造成峰值热载荷。	惯性作用占主导。大气阻力只会在最初约五秒内产生约 3–6g 的短时过载 ，因此可采用较简单的缓冲和热防护系统。	过载只略有下降，其他因素却抵消了这一收益。
热状态	热容量低。较小的质量 m 会使温度按照 $\Delta T = Q \cdot t / (m \cdot c)$ 快速上升，必须采用极强的主动冷却。	热惯性高。大质量结构吸收并分散短时 穿越大气产生的峰值热量，可以组合使用被动和主动热防护。	热容量继续增大，但如何从庞大结构中排出热量会成为独立难题。
发射能量	所需能量 $E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$ 尚可承受，但不足以抵消其他缺点。	达到合理平衡。加速到 11 公里/秒 需要约 9×10^{14} 焦耳（约 252 吉瓦时），处于分布式自主地热系统和储能网络的能力范围内。	能耗随质量线性增加，却要求功率和储能容量以不成比例的幅度扩大，经济上不划算。
结构与物流	可以建造，但无法获得依靠质量直接穿越大气这一核心优势。	与现有技术兼容。尺寸和质量 处于现代造船坞、焊接工艺和运输能力的范围内。	结构刚度下降，固有振动、装配和运往发射地点都更困难，成本增长快于线性。
StarRoad 的设计理念	仍停留在易受大气影响的“轻型飞行器”范式。	实现“惯性突入”范式：大气不再是持续屏障 ，而是依靠质量和强度在短时间内克服的扰动。	任务规模超出工业承受能力，规模经济的收益被完全抵消。

- **从物理上看**，它高于约 10,000 吨的临界点；超过该点后，惯性开始压过气动作用。
- **从能源上看**，它不会使基础设施需求呈指数增长。
- **从技术上看**，它仍处于造船和重型机械等可扩展工业实践的范围内。
- **从经济上看**，它在规模化降低入轨成本和控制资本支出之间取得平衡。

因此，这一质量是经过计算的最佳值，使 **StarRoad 在物理上可实现、在经济上有依据。**

4.3.2. 内部布局与系统

内部采用多层纵向结构，按照船体高度对功能进行分区。

- **船体下部和后部全部**用于能源与动力系统，包括机载反应堆、换热器、主动冷却回路、功率变换器、储能装置、冷却剂主管和海上推进设备。这样的布置降低重心，提高航天运输器在高超声速飞行、滑翔和海上着水时的稳定性，也简化了上层舱室的隔热与辐射防护。
- **超导悬浮和稳定系统沿船体两侧及部分底部布置**。超导模块紧贴外蒙皮和热防护层内侧，尽量缩短机载磁场与隧道无源绕组之间的间隙。磁体布置在：
 - 船体两侧全长范围内，包括上部和中部，直至滑动舱门边界；
 - 底部中段和后段；
 - 避开主翼展开通道和机械设备舱。

这种布置形成均匀磁场，在高超声速下保持高度稳定，并能容忍局部损伤。

- **船体中部设置折叠主翼舱和承力安装框架**。主翼收回船体内部，并与能源舱和货舱隔离。机鼻中部前段容纳小型可伸缩控制翼，用于过渡飞行状态下的轨迹修正和稳定。
- **船体上部容纳通用可更换有效载荷模块**。模块的外形尺寸、安装点、质量和允许重心位置均标准化，可配置为货运、加注、载人或混合用途。模块可在发射前于船坞中装卸，也可在上部舱门开启后于轨道上取出。货舱设有液压或机电升降机和导轨，可在微重力下自动推出和取出模块，无需乘员介入。
- **滑动上舱门不承担主体结构载荷**，其功能是气动整流和在轨通道。热控系统的折叠散热板集成在舱门内；舱门完全开启并锁定后，散热板自动展开，冷却剂随后流入板内，把多余热量辐射到真空中。
- **航天运输器机鼻采用多层功能布局**：
 - 机鼻上层：驾驶台、飞行控制、导航和通信系统；
 - 机鼻中层：小型伸缩翼和控制面的机械装置；
 - 机鼻下层：低温燃料和冷却剂储箱；其管路阻力尽可能小，以便穿越大气时把冷却介质迅速送到机鼻主动冷却系统。

这种布局缩短了热力和液压回路，降低机鼻热滞后，并提高最严苛飞行阶段的热防护可靠性。总体而言，航天运输器采用结构明确、可扩展、模块化的架构，适用于高超声速发射、在轨作业、自主海上航行和无需大规模拆解船体的反复使用。

4.3.3. 船体热防护

机鼻和船体底部采用多层复合材料—金属热防护系统，能够承受高超声速飞行及随后海上着水时的极端热载荷和动态载荷。系统结合被动与主动部件，包括：

- 耐热外层，可短时承受数千摄氏度的温度和强烈辐射加热；
- 承力金属基层，用于承受机械和振动载荷；
- 主动冷却回路，从机鼻和底部前缘等载荷最重区域排出热量；

- 关键局部区域的可更换烧蚀部件，以受控消耗方式保护主体结构。

系统还考虑了高温船体接触海水时的热冲击，包括剧烈温度梯度和循环热应力。载荷最大的部件采用分段和模块化设计，可在定期维护中更换，从而提高可维修性和重复使用寿命。

4.3.4. 机翼

航天运输器配有两对可伸缩机翼，用于稳定、滑翔和着陆控制；到达稀薄大气层后展开。

- **前翼用于**修正轨迹、稳定俯仰和滚转并抑制动态扰动，在进入稀薄大气层后展开以支持滑翔。

每片前翼参数：

- 根部至翼尖长度约 35 米；
- 根部/翼尖弦长约 14/7 米；
- 面积约 360–400 平方米。

- **后翼是**航天运输器的主要气动翼面。

每片后翼参数：

- 根部至翼尖长度约 100 米；
- 根部/翼尖弦长约 14/7 米；
- 面积约 1,000–1,100 平方米。

机翼总面积约 2,800–2,900 平方米。机身自身具有升力体外形，使有效气动面积再增加约 20–30%。

在亚声速状态下，整体构型的估算升阻比 L/D 约为 9–13，可稳定滑翔并受控选择着水点。典型滑翔和着水速度约为 90–120 米/秒（约 320–430 公里/小时）。在这一速度范围内，安全性主要取决于接触水面时的垂直速度、迎角和下滑轨迹，而不是绝对水平速度。

4.3.5. 降落伞系统

可重复使用的降落伞—翼伞系统用于降低海上着水冲击并扩大允许的着陆窗口，只在条件需要时作为软着陆回路启用。

- **结构与位置：**系统设有两个翼伞位置：

- 一处位于**船体后部上方**；
- 一处位于船体前部上方，紧邻机鼻后方。

每个位置采用 N+1 配置，即一具主翼伞和一具备用翼伞，分别包装并设独立拉出索。翼伞不是单点连接船体，**而是通过横向**连接线把载荷传入承力框架，从而降低局部峰值载荷并改善俯仰和滚转稳定性。两处伞位沿纵轴分开，避免伞衣相互影响或缠绕。

- **面积与工作方式：**翼伞并不承担飞行器全部重量，而是在末段降低垂直速度并形成平缓接触过程。初步参数为：

- 单具主翼伞面积约 4,500–6,000 **平方米**；

- 两具翼伞同时工作时的总有效面积约 9,000–12, 000 平方米。

接触瞬间的目标垂直速度为—— $V_z \approx 1 \text{ m/s}$ 。

- **启用条件：** 降落伞—翼伞系统只在需要时使用。着陆算法评估气动、惯性和流体动力分量的矢量和，即总过载：
 - 若预计接触时的总过载不超过 **4g**，则不使用翼伞，**依靠机翼完成着水**；
 - 若存在超过 4g 的风险，系统展开翼伞，将垂直速度降至目标值，使着水转为柔和滑翔接触。
- **重复使用：** 翼伞、伞绳和连接件均按多次使用设计，只需检查、干燥和更换易损件等定期维护，无需拆解船体承力结构。

4.3.6. 自主能源与推进装置

航天运输器配有完全自主的能源和推进系统，可覆盖从轨道机动到数月独立海上航行的整个任务周期。

- **基本能源：机载核反应堆。**
 - **类型：** 紧凑型快谱熔盐反应堆，或新一代高温气冷堆。远期可采用紧凑型聚变模块，例如 Helion Energy 所采用的场反位形方案。
 - **功率：** 电功率 10–20 兆瓦，热功率 50–100 兆瓦。
 - **用途：** 为所有机载系统、磁悬浮系统的超导部件、电磁等离子体推进器、主动冷却系统和自主海上推进装置供能。**反应堆按航天运输器 5–10 年的完整寿命设计，中途无需换料。**
- **机载超导悬浮与稳定系统：** 船体沿线集成低温模块，内部采用高温超导磁体，由机载液氮或液氢系统冷却。磁体产生用于悬浮和主动稳定的主磁场，即“磁悬挂”系统。即使隧道外部供电完全失效，超导磁体与无源绕组“轨道”的感应作用仍可通过“磁镜”效应维持悬浮。

稳定控制采用分层架构：

- 1) **无源回路（微秒级）：** 超导体与隧道绕组之间的感应耦合会在任何偏移发生时自动产生恢复力，无需电子控制。
- 2) **硬件回路（微秒至毫秒级）：** 专用 FPGA 和 ASIC 电路按照确定性逻辑检测失衡并切换绕组区段。
- 3) **软件回路（毫秒至数十毫秒级）：** 机载计算机在有限人工智能辅助下重新分配各超导区段的电流，补偿缓慢漂移和局部失衡，无需纳秒级反应。

这一架构可在毫秒内响应扰动，比质量 15,000 吨的航天运输器在高超声速下维持稳定所需的响应速度快多个数量级。

- **主推进器：大推力电磁等离子体推进器。**
 - **原理：** 由机载反应堆供能的磁等离子体动力（MPD）推进器，或可变比冲磁等离子体火箭（VASIMR）。
 - **推力：** 脉冲模式下最高 50–100 千牛（5–10 吨力），足以完成轨道修正、离轨和轨道间转移。
 - **工质：** 储存的液态氦、氦或氢；氢也可供冷却系统使用。

- **自主性：** 机载人工智能可独立计算并执行与轨道站对接、卸载和返航所需的机动。

- **热控系统：**

- **可展开散热器：** 带液体回路的面板在太空展开，把反应堆和设备的多余热量辐射到真空中。
- **相变蓄热装置：** 这是关键部件，布置在机鼻和其他关键节点，在发射和再入穿越大气时吸收兆焦级峰值热量，防止结构过热。进入太空或海上着水后，热量再通过散热器或周围环境缓慢释放。
- **主动冷却：** 液氦或液氢闭式回路在飞行中为热防护屏和关键部件提供应急冷却。

- **冗余与安全：** 反应堆控制系统双重设置，冷却回路相互独立，并配有应急散热装置。设计覆盖包括坠入海洋在内的各种事故情形。

4.3.7. 自主着陆与海上系统

航天运输器在大西洋指定区域着水后转为完全自主的海上船舶，使用以下系统：

- **海上推进：** 两套可伸缩全回转推进器或喷水推进器，在低速下提供较强机动能力。
- **海上能源：** 标准机载核反应堆或聚变装置以最低功率为推进器和船上系统供电，堆芯寿命足以支持数月自主航行。
- **导航与通信：** 卫星导航（GPS/GLONASS）、惯性导航、雷达和激光雷达用于识别海面环境；地球静止轨道卫星提供稳定通信。
- **最终减速：** 接触水面前，系统先用小面积减速伞稳定飞行并从残余的 100–150 公里/小时开始减速，再由主等离子体推进器短时脉冲精确消除垂直速度。**着水后抛弃减速伞。**

着水后，航天运输器无需立即救援即可自行驶向母港或拖船会合点。它能独立应对风浪、完成长距离航行并按计划进入指定船坞维护，从航天器转变为机器人海船。

4.3.8. AstroLiner-S：初始简化型

StarRoad 实施初期将采用 AstroLiner-S (Simplified/Start) 作为基础型号。它在技术上更简单、运行方案更保守。

该型号功能完整，但能源和系统配置经过简化，用于线路初期运行、早期货运和载人发射，并逐步降低技术、运行和监管风险。

- **核心思路：** AstroLiner-S 保留依靠质量和强度迅速穿越大气的基本原理，并完全保持完整版的发射质量和尺寸，但不配备机载核能或聚变能源。

加速、悬浮和隧道内稳定等全部高能耗操作都由地面基础设施承担。

AstroLiner-S 是：

- 自主运输飞行器；
- 完全可重复使用；
- 能够自行入轨、离轨并返回；
- 在隧道外只使用化学推进；

- 机上不含大功率电离辐射源。

○ 能源与超导系统：AstroLiner-S 完全取消：

- 核能和聚变能源装置；
- 与其相关的辐射、热和事故风险；
- 隧道或门户区段受到不可逆污染的情形。

用于悬浮、稳定和与线路相互作用的超导部件：

- 发射前预先通入电流；
- 转入持续电流模式；
- 彼此隔离并由机载系统管理。

机载电子、控制和保护系统由电池和飞轮储能供电，容量覆盖整个隧道加速周期并留有时间余量。

加速过程中，超导回路的主动控制仅使用小幅修正电流和应急模式，因此无需持续的大功率机载能源。

进入轨道后，可展开太阳能板作为主动能源。

○ 隧道外推进系统

AstroLiner-S 的全部在轨操作都使用化学推进。

航天运输器配有：

- 使用液氧/液氢或液氧/液化甲烷的中等推力主化学发动机；
- 双重姿态控制和应急控制系统（RCS）。

推进系统能够：

- 穿出大气层后继续加速并进入目标轨道；
- 修正轨道参数；
- 离轨；
- 受控再入大气并返回。

该型号不采用电推进和磁等离子体推进，是因为机上没有大功率电源，并不构成 StarRoad 总体架构的限制。

○ 返回与重复使用

AstroLiner-S 能够：

- 自主离轨；
- 以较平缓的轨迹受控进入大气层；
- 进行气动滑翔；
- 借助机翼和降落伞—翼伞系统在海上着水。

取消反应堆可大幅简化：

- 海上运行；
- 定期维护；
- 非正常着陆后的飞行器回收。

○ AstroLiner-S 在 StarRoad 发展中的作用

AstroLiner-S 将作为：

- StarRoad 航天运输器的首个量产型号；
- 积累发射和故障数据的平台；
- 使系统尽早投入运行的工具；
- 早期轨道基础设施的基础运输工具。

随着紧凑型大功率能源成熟并积累运行经验，AstroLiner-S 可逐步由配备大功率机载能源和电磁等离子体推进器的完整版 AstroLiner 补充或替代。

因此，AstroLiner-S 不是妥协方案，而是合理的初始层级：它不改变线路根本架构，却能让 StarRoad 更早、更安全、以更低系统风险投入运行。

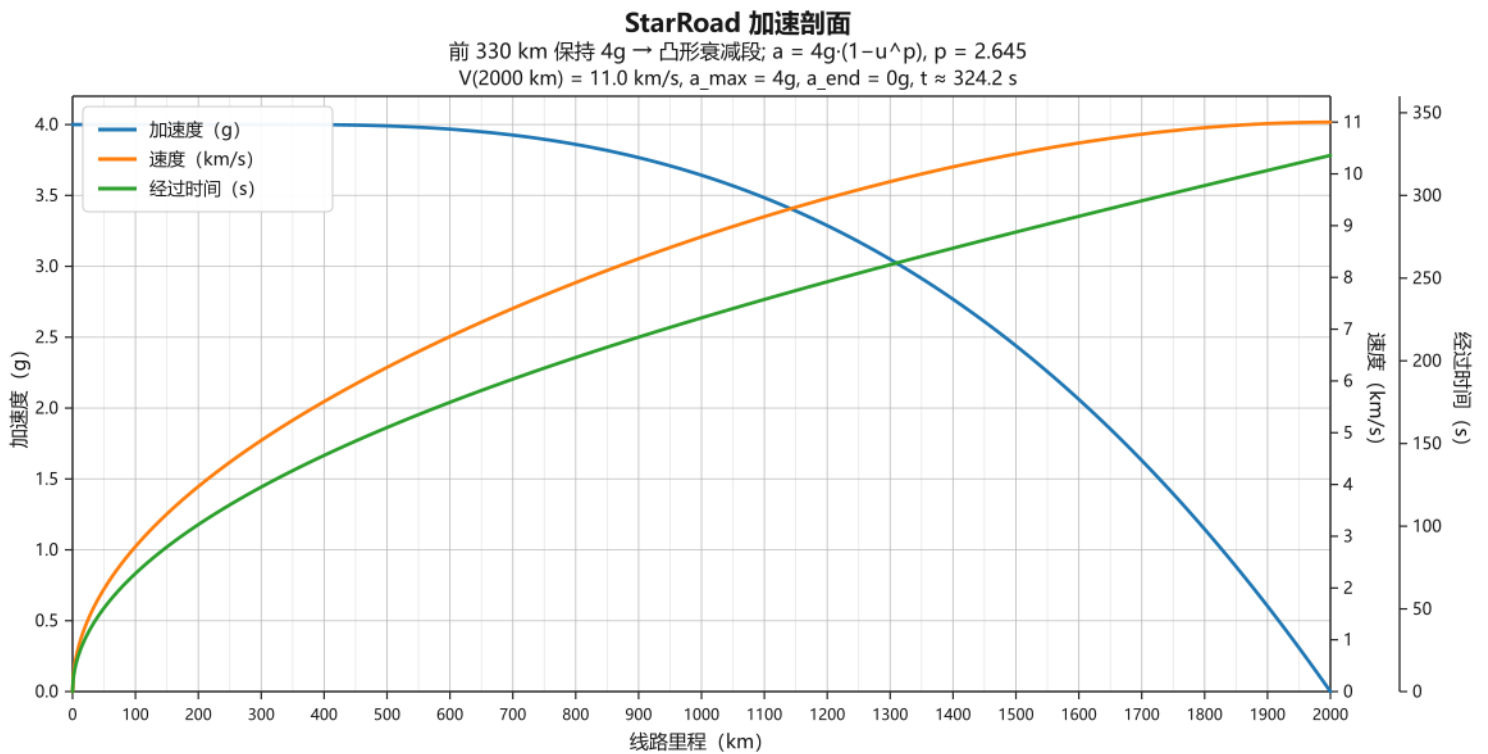
5. 从发射准备到着水后维护的运行周期

5.1. 准备与发射

装载后的运输器被送入巴坦加附近的发射舱。先测试运输器的机载系统，再测试加速器系统，并进行气动门户的发射前试验。随后为机载超导体励磁，启动并检查磁悬浮系统，将隧道抽成真空。接到指令后，脉冲电能开始送入加速器的初始区段。

5.2. 隧道内加速

- **0–330 km**。初始纵向加速度约为 4g。相当一部分能量用于悬浮和克服重力。
- **330–约 1,800 km**，S 形曲线的下降段。纵向加速度从初始 4g 平稳降至 0。运输器沿地下曲线运行，承受最高约 4g 的过载，周围的电磁元件负责稳定轨迹。
- **约 1,800–2,050 km**，S 形曲线的上升段。接近门户时加速度降为零。最后 50 km，运输器以约 11 km/s 的速度依靠惯性滑行。



5.3. 驶出大气门户

- 由于发射点海拔较高，运输器离开门户约 30 km 时已高于海平面 10 km，从而尽量减小冲击波对地面的影响。运输器发射前一分钟，在不打开机械闸门的情况下试运行气动门户的环形推力带。运输器通过隧道全程的 45% 后，末端区段抽真空时积存的压缩空气经推力带形成超声速气流。运输器到达前约 10 秒，系统供入氢气，气动屏障进入主要燃烧工况，产生稳定、锥形、炽热且部分电离的超声速气流。推力带成功启动并形成热态屏障梯度锥 3 秒后，机械闸门开启。
- 屏障还可防止隧道真空被破坏，并缓和最初的热冲击。运输器在数毫秒内穿过预先形成的稀薄热气区。这项关键技术改变了初始气动力随时间的分布，消除了介质转换时极短的冲击前沿。
- 气动屏障不会降低气动力总量，而是把冲击过载从微秒尺度延长到毫秒尺度，从而显著降低运输器结构的局部应力、振动和热冲击。
- 航天运输器通过后，机械闸门立即开启，随后喷气环带随即关闭。

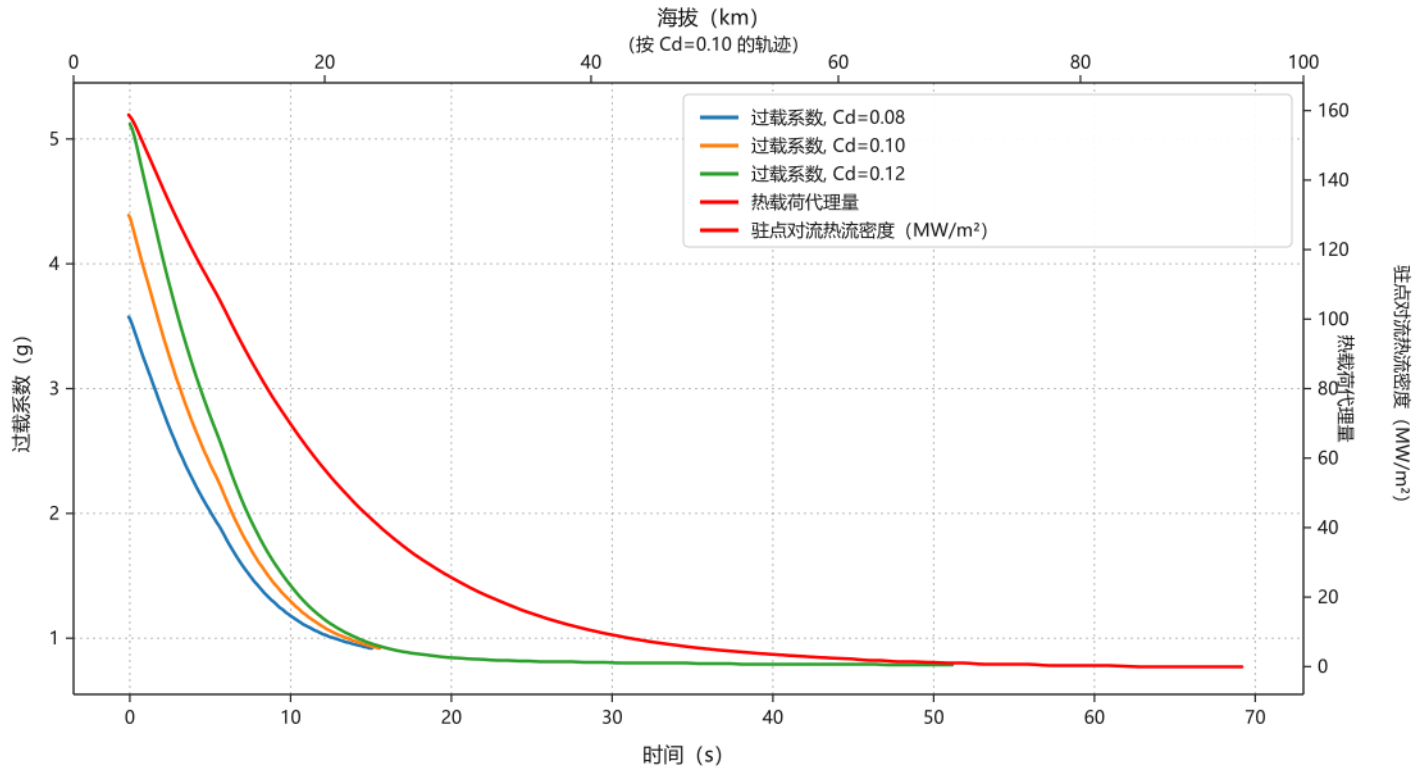
5.4. 穿越大气层

运输器沿弹道轨迹，依靠自身惯性质量和坚固结构穿越稠密大气层。热载荷和动态载荷的峰值出现在最初 10–20 秒。

- **重要说明。** 运输器离开气动屏障后，立即与指定高度约 3,400 m 处的正常大气发生作用。所有轨迹、热流和过载计算都以与大气的完整气动作用为基础，不假设存在“气体护盾”“通道”或随行的稀薄空间。

StarRoad：机械载荷与热载荷随时间和高度的变化

$C_d = 0.08, 0.10, 0.12$ (C_d 为气动阻力系数)



5.5. 进入太空与在轨作业

离开大气层后，散热器展开并排出热量。随后运输器启动机载电磁等离子体发动机，精细修正轨迹并进入目标轨道，通常可直接前往地球静止轨道以外或拉格朗日点。之后部署有效载荷。AstroLiner-S 构型使用化学推进系统完成末段入轨和轨道修正。

5.6. 离轨与返回

完整版 AstroLiner 使用电磁等离子体发动机离轨。AstroLiner-S 则由化学推进系统完成离轨制动、修正和最终机动。

5.7. 海上着水

在加蓬附近的大西洋上空，制动降落伞系统展开以降低速度。运输器以较小迎角用加固底部着水，底部专为炽热表面接触冷水而设计。着水后展开螺旋桨或喷水推进器。

5.8. 拖航与维护

运输器正常时由机载反应堆供电的自有推进器驶往港口；系统故障时由值班拖船拖带。港口设施负责检查、维护、修复热防护并准备下一航次。AstroLiner-S 依靠蓄电池、辅助动力装置或值班拖船返回港口。

6. 项目实施、工期、要求与工业中心

6.1. 项目阶段

StarRoad 的建设被规划为一系列技术上相互衔接、经济上各有依据的阶段。每个阶段都有明确目标和成功标准，并为下一阶段建立所需基础设施，从而尽量降低技术与财务风险。

6.1.1. 第0阶段：概念与试验（2–5 年）

○ **目标：** 验证物理原理，在实验室条件下攻克关键技术，并形成后续工程设计所需的技术储备。

○ **关键工作**

1. 对全部过程开展详细的数学与 CFD 建模，包括加速、门户运行和气动冲击。
2. 组建国际联合体，并达成初步的政治与法律协议。
3. 沿整条线路开展地质与环境勘察。
4. 在主场址以外建设研究试验场：

对超导悬浮模块和脉冲供能系统进行台架试验；

建造并测试 1:10 比例的气体动力门户原型，以确认能够形成稳定的梯度屏障；

开挖一条 1–2 公里长的短真空示范隧道，验证真空系统、轻型试验体磁加速和安全系统的集成。

○ **成功标准：** 获得试验数据，确认门户、悬浮和稳定等关键方案可行，并完成第 1 阶段详细工程设计。

6.1.2. 第1阶段：基础设施与能源锚点（5–7 年）

○ **目标：** 建立项目的“能源骨架”，并在现场条件下验证机器人化施工。

○ **关键工作**

1. 建立直径 2 米的标准化机器人隧道掘进机小批量生产线。
2. 沿全长约 2,050 公里的线路并行开挖第一对自主式地热热能系统主集热隧道，形成初始热稳定回路。
3. 在线路关键节点建设首批地热电站，以直接空气捕集（DAC）获得的超临界 CO₂ 作为工质。
4. 在地热集热隧道上方开挖一条小直径试验原型隧道——D=2 米、L=2,050 公里——并配备基础真空、通信和维护系统。

○ **成功标准：** 自主式地热热能系统的最小配置实现完整运行和能源自给；高速机器人掘进流程得到验证，并形成后续扩展的基础。

6.1.3. 第2阶段：小尺度验证（“科学与仪器综合体”状态）（4–6 年）

○ **目标：** 在接近实际的速度下验证各系统的同步与安全，并取得独特的试验数据。

○ **关键工作**

1. 在小型试验隧道中，对质量最高数吨的惰性试验体进行加速和制动，速度范围为 1–11 公里/秒。
2. 对 1:5 比例的气体动力门户原型进行全系统试验，并让小型试验航天运输器穿越门户。
3. 对“惯性冲锤”假说进行实验验证：发射采用不同结构和热防护的试验质量体，测量过载和热流。
4. 开始对全尺寸航天运输器的关键系统进行详细设计并制造原型，包括超导磁体和储热装置。

- **成功标准：** 所有同步系统稳定、安全运行；气体动力门户的有效性得到确认；试验证明质量增大时单位载荷下降；完成运输器初步设计。

6.1.4. 第 3 阶段：全功能区段和航天运输器原型（4–7 年）

- **目标：** 在较长区段内集成并测试最终构型的系统，制造可飞行原型。
- **关键工作**
 1. 建设一段 50–200 公里长、断面为最终尺寸 17.5×12.5 米的全功能主加速隧道，包括全部绕组、储能装置和服务隧道。
 2. 把该区段下方的自主式地热热能系统扩展为完整的七隧道构型。
 3. 在地面条件下制造并全面测试不含推进系统的全尺寸运输器原型，包括低温系统、结构强度和热防护。
 4. 开展隧道集成试验：以最高 8g 的过载和最高约 4 公里/秒的速度，对模拟航天运输器质量的试验体进行加速和制动；验证全部 Alarm 1–3 应急规程。
 5. 为全功能版 AstroLiner 研制紧凑型机载核反应堆，完成地面试验和认证。
- **成功标准：** 多次完成加速和紧急停车循环且无严重损伤；能量回收效率得到确认；飞行型运输器和反应堆具备最终集成条件。

6.1.5. 第 4 阶段：延长线路并投入运行（10–15 年）

- **目标：** 完成第一条线路建设，集成运输器并达到工作速度。
- **关键工作**
 1. 通过多台隧道掘进机并行施工，分阶段把加速隧道延伸到设计全长 2,050 公里。
 2. 沿全线扩建自主式地热热能系统基础设施和脉冲储能装置。
 3. 在莫希山建设最终的高空大气门户综合体。
 4. 集成运输器的机载系统，并完成地面试验和隧道内低速试验。
 5. 分阶段发射，逐步提高速度和质量，直至达到 15,000 吨和约 11 公里/秒的设计参数。
- **成功标准：** 运输器首次成功以极超音速发射，把有效载荷送入目标轨道；达到每月 1–2 次的设计发射频率。

6.1.6. 第 5 阶段：扩展与工业化运行（持续进行）

- **目标：** 把 StarRoad 发展为持续扩张的全球基础设施。
- **关键工作**
 1. 运营第一条线路，并完善装载、维护和返回等物流循环。
 2. 开工建设第二条及更多平行线路，以提高货运能力。
 3. 依托项目工业中心部署轨道造船和加工设施。

4. 发展“支线”网络，即用于运送人员和特殊货物的较短加速器。

- **成功标准：**入轨运输成本降至每公斤 10 美元以下；实现每日发射；后续干线已有获批方案并已开工。

6.2. 工业中心

- **沿海综合体（加蓬尼扬加河口）：**建造航天运输器，生产隧道初始区段模块，并作为航天运输器的主要母港和维护基地。
- **高地综合体（刚果民主共和国莫希山及南部高原）：**生产高速区段和末端 S 形弯道模块，并负责门户机构的装配和维护。场址配备三通道氢气电解与储存系统；即使处于应急状态，每条通道也能为门户气体动力屏障的全部三道发动机环带供气。电解所需能源来自接入项目电网的当地电源，包括自主式地热热能系统、水电、太阳能和核能。

6.3. 总体工期

项目需要大量先进但目前原则上可实现的技术和工程方案，还需多台隧道掘进机并行作业、铺开基础设施并建设两个制造中心。因此，从第 0 阶段开始到第 4 阶段首次商业发射，第一条隧道约需 25–40 年。这与 ITER、LIGO 等大型科学工程的建设周期相当。在这种条件下，进度主要取决于资金以及外交和法律协调，而不是根本技术可行性。目标虽雄心勃勃，但全球联合体有望实现。

7. 所解决的问题与任务

7.1. 全球过热

把高耗能工业迁入太空，以减少地球的热污染和生物圈负担。

7.2. 经济任务

从根本上降低进入太空的成本，使太阳能、小行星、月球资源以及最终的行星资源具备经济可行性。

7.3. 战略目标

建立一套坚韧、不受天气影响的提升系统，既能支撑轨道工业化，也能服务于行星防御。

7.4. 技术催化剂

项目将推动脉冲功率、超导、超高声速、核推进和机器人隧道施工技术的发展。

7.5. 能源与热环境自主

自主式地热热能系统同时解决这两个问题。它可提供约 15 GW 稳定电力，完全满足加速器需求并产生可销售余量；同时为主隧道维持可预测的低温环境，使其能够在深部地热活跃地层中建设和运行，从而摆脱脆弱的外部电源和不可预测天气的制约。

7.6. 碳足迹

StarRoad 采用主动环境治理模式。超临界 CO₂ 是自主地热系统闭式回路中的长期工质，使项目成为全球最大的固定式大气二氧化碳利用设施。数百万吨 CO₂ 将从大气循环中移出，并在技术回路内保存数百年，从而把 StarRoad 变成一项能够抵消整个工业部门排放的气候工程工具。

7.7. 水热主干渠的社会与环境潜力

水热主干渠不仅是自主地热系统的冷却设施，也是惠及当地的跨大陆两用基础设施：

- **灌溉：** 分水设施可把渠水用于沿线农田，使干旱地区形成非洲“绿色带”。
- **自然补水：** 频繁的赤道暴雨自动为渠道补充水量。
- **水的热处理。** 经过地热换热器后，水温升至+60°C，相当于完成巴氏消毒，可安全用于灌溉和工业；过滤后还可用于生活和饮用。
- **重力自流：** 地势从东部 3,400 米降至西部海平面，渠水无需水泵即可自流，实现近乎无额外能耗的循环。
- **微型水电：** 沿线高差可布置一系列小型水电站，为地方电网和线路自身提供额外可再生能源。

因此，StarRoad 不仅是运输基础设施，也成为融入区域可持续发展的农业—能源平台。

7.8. 能源网络

自主地热系统和发电网络不仅为加速器供能，还向邻近城市、工业企业和农场提供富余清洁电力。

7.9. 作为经济动脉的 StarRoad

作为经济动脉的 StarRoad。一方面，StarRoad 将成为开发太阳系的行星级货运门户；另一方面，它也将成为非洲的主要经济动脉，推动工业化、能源自主与粮食安全。线路并不是一项深埋地下、通向荒芜之地的孤立工程。其地面基础设施——40 座终端、分别位于加蓬和刚果民主共和国的两个工业中心、一条水热干渠和一套公路网——共同构成一个自西向东贯穿中非的线性可持续发展集群。在整条 2,050 公里的沿线地区，将形成一种独特的生态、技术与农业交替分布景观。这个线性集群会成为一个自给自足的经济区，其中：

- 利用地热、小型水电和太阳能发电；
- 通过灌溉农业生产粮食；
- 制造工业产品，包括航天飞机部件、隧道模块与设备；
- 通过公路和铁路运输货物；
- 运营由发射综合设施和高空大气门户组成的航天港；
- 在直接空气捕集站从大气中去除 CO₂。

7.10. 关键基础设施安全

项目从一开始就纳入安全处理大量氢气、超声速运行和吉瓦级能量的措施。除被动防护外，还包括主动监测和自动响应系统，为大型能源设施和氢能系统建立新的安全标准。

7.11. 场址选择与扩展能力

门户场址必须同时满足高度、物流、安全、扩展和法律等数十项相互制约的要求。莫希山及其相邻高原提供了独特条件：先建设紧凑的高山场址，再原地扩展为全球最大的航天港。

7.12. 跨国项目的政治与法律协调

线路穿越三个国家的问题，将通过一个参照 CERN 和 ITER 等大型项目组建的国际联合体来解决。地下基础设施以及自主式地热热能系统的能源资产将获得特殊法律地位，各参与方的收益也会得到明确划分。项目并不是一项以政治稳定为先决条件的负担；相反，通过相互依存以及优先获得未来机会和建设过程中开发的技术，它本身会成为一种创造并维持稳定的宝贵工具。

7.13. 货物流的渐进增长

发射频率与轨道工业同步增长。先驱阶段每月发射 1 次，用于建设轨道造船厂；工业阶段每周发射 1-3 次，用于形成各类资产；成熟阶段每日发射，以维持太空经济的指数增长。

8. 市场与轨道物流

本节回答 StarRoad 经济可行性的核心问题：究竟要发射什么，才能形成足以充分利用这条超重型发射走廊的运输规模。StarRoad 不应被视为只服务于少数一次性任务的系统；它面向的是地球与高轨道之间大规模、常态化、工业化的货物流。

StarRoad 最初的主要市场不是低地球轨道卫星星座，也不是单独的科学航天器，而是大规模轨道能源、计算基础设施、轨道间物流、轨道定居点、造船厂以及随后发展起来的地外产业。

8.1. 超重型发射的需求难题

传统火箭经济不仅受每千克成本限制，也受发射方式本身限制：火箭只能把货物分成许多小批次运送，辅助质量占比高，轨道组装复杂，而且需要大量彼此独立的操作。因此，即使发射价格下降，火箭运输依然是一种远征式物流。

StarRoad 创造的是另一类市场。它的目的不仅是以更低成本发射今天已有的载荷，更是让那些在火箭物流条件下永远无法具备经济可行性的载荷成为现实。

这些载荷包括：

- 完整或接近完整的吉瓦级空间太阳能电站；
- 大型轨道数据中心；
- 微波输电模块；
- 大型桁架、散热器、反射镜和面板；
- 轨道造船厂与自动化装配线；
- 供 EML4/5 使用的居住与工业模块；
- 轨道间拖船与运输器；

- 推进剂、能源与服务模块；
- 未来小行星与行星际基础设施的部件。

因此，StarRoad 并不依赖现有的航天发射市场。它会创建一个新市场，正如铁路、集装箱航运和电网不只是满足已有需求，也围绕自身催生了新的经济体系。

8.2. 初始市场：空间太阳能与轨道数据中心

在第一阶段，StarRoad 的主要商业和战略货物应是吉瓦级空间太阳能电站。这些大型能源平台能够自行展开或部分自行展开，由 AstroLiner-S 直接送往目标轨道或工作地点。

空间太阳能电站可同时满足多项需求：

- 为超重型发射创造大规模、可重复的需求；
- 形成不受昼夜周期和绝大多数天气影响的能源市场；
- 让新增发电能力中相当大的一部分部署到地球表面之外；
- 为轨道工业供能奠定基础；
- 为建设轨道物流、造船厂和服务型定居点提供经济理由。

地球轨道处的太阳常数约为 1,361.6 瓦/平方米。因此，在集光面始终保持最佳朝向的理想条件下，1 吉瓦入射太阳能约对应 0.74 平方公里的集光面积。计入 25–35% 的光伏效率、转换和传输损耗、结构间隙、散热器、电力电子设备、冗余与衰减后，要获得 1 吉瓦可用电力，实际集光面积将达到数平方公里。按传统航天器的尺度看这很庞大，但对 StarRoad 而言却很自然，因为质量、面积和结构尺寸不再是首要约束。

8.2.1. 吉瓦级空间太阳能电站的质量参照

吉瓦级电站并不是小型卫星。即使采用当代较为乐观的方案，一座 2 吉瓦电站的质量也要达到数千吨。CASSIOPeiA 等最轻量化构想估计约为 2,000 吨，而 NASA 较为保守的研究则认为，同等 2 吉瓦系统的质量为 5,900–10,000 吨。

项目 / 研究	功率	质量	与 StarRoad 的相关性
CASSIOPeiA / Space Energy Initiative / Frazer-Nash	向电网输送最高 2 吉瓦	约 2,000 吨	与 StarRoad 最为相关的参照：部署于 GEO/GSO，发电系数为 99.7%，采用“1 颗卫星对应 1 座整流天线”的架构；在最优情况下，比功率可接近约 1 兆瓦/吨。
NASA 2024 RD1 / Innovative Heliostat Swarm	向电网输送 2 吉瓦	约 5,900 吨	较保守的估算。NASA 把系统统一按向电网输送 2 吉瓦计算；RD1 的太阳能电池板面积约为 11.5 平方公里。
NASA 2024 RD2 / Mature Planar Array	向电网输送 2 吉瓦，但由多个系统共同完成	约 10,000 吨	NASA 给出的质量约为 1,000 万千克，太阳能电池板面积约为 19 平方公里。由于 RD2 的发电时间较短，要获得与一套 RD1 大致相同的能源产出，需要五套 RD2 系统。
JAXA / Sasaki Tethered-SPS	平均 0.75 吉瓦 / 峰值 1.2 吉瓦	每套约 20,000 吨	一种重型参照方案。若粗略换算为 2 吉瓦平均输出，质量约达 50,000 吨以上，因此需要一系列飞行并在轨组装，而不是一次发射完成。

项目 / 研究	功率	质量	与 StarRoad 的相关性
加州理工学院 SSPP / 轻质模块化单元	并非完整的 2 吉瓦电站，而是技术单元	若要向地面输送 2 吉瓦，仅有源层理论质量就约为 1,700–3,400 吨	按 160 克/平方米、端到端效率 7–14% 计算，该估算只涵盖有源层。完整电站还需要结构、输电装置、姿态控制、散热器、电缆、电子设备、维护设施与储备。

表格揭示了核心结论：**质量为 2,000–10,000 吨的 2 吉瓦空间太阳能电站，几乎恰好对应 AstroLiner 的能力区间**。对 StarRoad 而言，它只需一次超重型发射，或少数几次飞行并进行最低限度的轨道组装。若采用火箭物流，则需要数十乃至数百次超重型火箭发射，还要建立加注链、进行轨道组装，并把电站拖往 GEO 或 EML，运行复杂度会急剧上升。

8.2.2. 一座 2 吉瓦空间太阳能电站的能源产出

采用以下基准假设：

- 向电网输送功率：**2 吉瓦**；
- 可用率 / **发电系数**：**99.7%**；
- 设计寿命：**30 年**；

一座电站可产生：

- **每年约 17.47 太瓦时**；
- **30 年约 524 太瓦时**。

这使每千克运输成本成为根本性因素。在火箭物流中，发射仍是首要障碍；采用 StarRoad 后，运输部分会迅速降至未来能源价格中的很小比例。

8.2.3. 空间太阳能电力成本中的运输部分

以下计算只涵盖平准化度电成本中的运输部分：把电站质量的运送费用除以其 30 年寿命周期内的总发电量。计算不包括电站制造、整流天线、维护、保险、模块更换、地面基础设施和运营方利润。

公式：

LCOE 的运输部分 = 电站质量 × 运送成本 / 寿命周期总发电量

对于可用率 99.7%、寿命 30 年的 2 吉瓦电站，其全寿命发电量约为 5,240 **亿千瓦时**。

阶段 / 运输系统	运送成本	类 CASSIOPeIA 电站，2,000 吨，美分/千瓦时	NASA RD1，5,900 吨，美分/千瓦时	NASA RD2，10,000 吨，美分/千瓦时
当前火箭物流：前往 GTO 的较低参考值	3,600–5,600 美元/千克	1,37–2,14	4,05–6,31	6,87–10,69
StarRoad，第 1–2 年	80–120 美元/千克	0,0305–0,0458	0,0901–0,1351	0,1527–0,2290
StarRoad，第 3–5 年	30–50 美元/千克	0,0114–0,0191	0,0338–0,0563	0,0572–0,0954

阶段 / 运输系统	运送成本	类 CASSIOPeiA 电站, 2,000 吨, 美分/千瓦时	NASA RD1, 5,900 吨, 美分/千瓦时	NASA RD2, 10,000 吨, 美分/千瓦时
StarRoad, 第 6–10 年	10–20 美元/千克	0,0038–0,0076	0,0113–0,0225	0,0191–0,0382
StarRoad, 第 11–15 年	3–8 美元/千克	0,0011–0,0031	0,0034–0,0090	0,0057–0,0153
StarRoad, 第 16–25 年	0.8–3 美元/千克	0,0003–0,0011	0,0009–0,0034	0,0015–0,0057
StarRoad, 第 26 年以后	0.3–1 美元/千克	0,0001–0,0004	0,0003–0,0011	0,0006–0,0019

相比之下，现代新建地面发电设施的 LCOE 为每千瓦时数美分：陆上风电约 3–4 美分，公用事业规模光伏约 4–5 美分，水电约 5–6 美分。NASA 估计，2050 年地面替代方案约为 2–5 美分/千瓦时。

由此可得一个重要结论：即使在试运行阶段，StarRoad 在空间太阳能电力中的运输成本也比地面发电的 LCOE 低一个数量级；系统成熟后，这一成本几乎不再是主要价格因素。这并不意味着空间太阳能的总成本会低至千分之几美分。电站和整流天线的制造、维护、电子设备、散热器、模块更换、保险和运营利润依然存在。它意味着 StarRoad 消除了火箭物流条件下使空间太阳能难以具备经济性的那一道特定障碍。

对当今的火箭方案而言，实际情况比单纯的 3,600–5,600 美元/千克更糟。大型电站不仅要送入轨道，还要运往工作位置、完成组装并接受维护，同时还要为拖船补充推进剂并维持基础设施。因此，NASA 估算 RD1 的基准 LCOE 约为 61 美分/千瓦时，RD2 约为 159 美分/千瓦时，远高于地面替代方案。StarRoad 不只是降低发射成本：它用一次或少数几次超重型基础设施运输，取代数千次火箭操作，从而改变了问题的类别。

8.2.4. 轨道数据中心：第二个初始市场

轨道数据中心可以成为第二个初始市场。人工智能、云计算和数字基础设施的发展，正使数据中心成为全球能源需求的重要组成部分。国际能源署估计，它们目前每年已消耗数百太瓦时电力，未来十年内年耗电量可能接近约 1,000 太瓦时。

把一部分计算基础设施部署在空间太阳能电站附近具有多项优势：

- 直接使用持续不断的轨道发电；
- 减轻地面电网的负担；
- 可在真空中建设大型散热器阵列；
- 较少受土地、水资源和电网容量等当地条件限制；
- 与太阳能电站共用能源、通信和维护基础设施。

在初始阶段，轨道电站和数据中心既可作为独立平台发射，也可组合为能源—计算综合体，其中包括太阳能电站、电力电子设备、散热器、计算模块、通信天线和微波输电回路。

8.3. 空间太阳能电站的气候与产业逻辑

不应只从狭义上把空间太阳能电站称作“绿色”技术。其意义更广：它不是靠降低生活舒适度和强制限制消费来替代碳基发电，而是建立更强大的能源体系。

传统气候议程常被理解为要求社会牺牲部分舒适度来减少排放。StarRoad 提出另一条道路：不削弱文明能力，而是把大部分新增发电转移到太空，在不增加电力行业碳足迹的前提下扩大可用能源。

在这一模式中，碳氢化合物无须作为工业资源消失。更合理的做法是逐步退出大规模发电和供热，同时转向化工、材料、碳复合材料、合成产品等产业链，让碳继续作为原料，而不是燃料。

这对现有碳基能源行业不仅是威胁，也是转型路径。与石油、天然气和煤炭基础设施相关的企业、国家和基金可优先投资空间太阳能、轨道能源、碳氢化合物化工和碳材料。StarRoad 由此不仅是旧能源的竞争者，也是其有序转型机制。

8.3.1. 能源替代规模

1 GW 连续电功率每年产生约 8.76 TWh 电量。2 GW 空间太阳能电站在 99.7%可用率下，年发电量约 17.47 TWh。

因此：

- 100 GW 轨道发电每年约 876 TWh；
- 1 TW 轨道发电每年约 8,760 TWh；
- 3 TW 轨道发电每年约 26,280 TWh，接近当今全球年用电量。

2024 年全球发电量约为 30,800 TWh，其中化石能源发电约 18,200 TWh。这说明任务的尺度：即使只替代一部分碳基发电，也需要数百乃至数千吉瓦新增稳定电源，而不是几十吉瓦。

8.3.2. StarRoad 用于部署空间太阳能电站时的潜在替代速度

下表给出技术上限估算：如果 StarRoad 相当一部分发射每次把一座 2 GW 空间**太阳能电站送入并网**状态，会发生什么。这不是预测或承诺；只有在电站量产、整流天线建成、接入电网、政治法律认可、融资、维护，以及能源市场能够吸收新增电量等条件成立时，才表示可能的速度。

StarRoad 运行阶段	经济模型中的年发射次数	每年新增空间太阳能容量	部署后的新增年发电量	占 2024 年化石燃料发电量的比例，约 18,200 太瓦时/年	占 2024 年全球总发电量的比例，约 30,800 太瓦时/年
第 1–2 年	12–24	24–48 GW/年	210–419 TWh/年	1,2–2,3%	0,7–1,4%
第 3–5 年	50–100	100–200 GW/年	873–1,747 TWh/年	4,8–9,6%	2,8–5,7%
第 6–10 年	200–300	400–600 GW/年	3,493–5,240 TWh/年	19–29%	11–17%
第 11–15 年	500–700	1,000–1,400 GW/年	8,734–12,227 TWh/年	48–67%	28–40%
第 16–25 年	1000+	2,000+ GW/年	17,467+ TWh/年	96%+	57%+
第 26 年及以后	1500+	3,000+ GW/年	26,201+ TWh/年	144%+	85%+

该表说明空间太阳能电站为何是 StarRoad 天然的首要市场。若每次发射部署一座 2 GW 电站，即使早期运营也能形成可观能源流；成熟运营则成为行星尺度的工具。

但不能把该表当成有保证的脱碳时间表。实际替代速度不仅受 StarRoad 发射能力限制，还取决于：

- 空间太阳能电站的生产速度；

- 功率电子设备、散热器、桁架、微波发射器和控制系统的产能；
- 地面整流天线建设；
- 电网输送能力；
- 微波输能的政治许可；
- 各国之间利益与风险的分配；
- 轨道能源的保险与监管；
- 电站维护、维修和退役处置；
- 与地面太阳能、风能、核能、水电和地热发电的竞争。

因此准确表述是：**StarRoad 在技术上可实现与全球化石电力规模相当的替代速度，但真实转型速度由电站制造、电网、整流天线、政策和市场共同决定。**

8.3.3. 碳基能源产业转型

如果空间太阳能电站产量能跟上 StarRoad 发射速度，一两个十年内即可建成太瓦级轨道能源。这不会完全取代地面能源，却会改变其角色：地面电网、核电、水电、可再生能源、地热电站和储能共同组成混合系统，轨道发电承担基荷、工业和出口负荷。

在这一情景中，碳基能源并非简单“落败”，而是获得转型路径：

- 煤电和燃气电站逐步退出基荷发电；
- 天然气基础设施部分转向备用、化工和合成用途；
- 油气企业投资空间太阳能、整流天线、碳氢化合物化工和碳材料；
- 煤炭行业可转向碳复合材料、还原剂、化工原料和材料；
- 部分传统能源企业转型为轨道发电、整流天线和电网配电运营商。

这一模式的政治经济核心，不是要求强大行业立即自我消灭，而是为其提供转型路径。如果碳基能源产业能通过参与空间太阳能和化工来保持甚至提高利润率，转型阻力会显著降低。

8.3.4. 它与通常的“绿色议程”有何不同

StarRoad 倡导能源扩张，而不是能源苦行。其气候逻辑不是削弱文明能力，而是把这种能力转移到更可持续的基础设施中。

这不同于被公众理解为“为了气候而生活得更差”的方案。空间太阳能与 StarRoad 结合，可描绘另一种未来：

- 能源更多，而非更少；
- 排放更少，而非工业更少；
- 可用算力更多，而非限制数字经济；
- 交通、生产和生活电气化程度更高；
- 发展中地区拥有更多机会；

- 降低化石资源作为燃料的依赖，同时保留碳作为工业原料。

这一思路更符合 StarRoad 的文明逻辑：项目不是要求人类缩小规模，而是建设允许人类增长、又不延续旧有碳足迹的基础设施。

8.3.5. 结论：空间太阳能作为首要市场

吉瓦级空间太阳能电站不是 StarRoad 的次要用途，而是其经济必要性的核心依据之一。

它们同时能够：

- 形成对超重型发射的大规模需求；
- 通过售电产生明确的商业收入；
- 为未来轨道工业供能；
- 推动整流天线、中继器、拖船、船厂和服务型定居点建设；
- 为碳基能源产业开辟新的投资领域；
- 提供行星尺度的真实气候干预机制。

在火箭物流体系下，空间太阳能电站仍然过重、昂贵且运营复杂；在 StarRoad 物流体系下，它们成为天然的系列化货物，不再是“特殊任务”，而是大型基础设施工业的能源产品。

8.4. 轨道位置：GEO 与 EML4/5

空间太阳能电站及相关基础设施的主要部署位置是地球静止轨道和地月拉格朗日点 EML4/5。

地球静止轨道非常适合向地面固定区域输送电力。位于 GEO 的卫星或能源平台相对于地表几乎保持不动，可简化微波波束指向、地面整流天线选址以及与区域电网的并网。地球静止轨道位于赤道上空约 35,800 公里处。

EML4 和 EML5 适合部署大型定居点、造船厂、工业节点和能源集群。它们位于地月系统等边三角形的两个顶点，长期稳定性高于共线的 L1/L2 点。这一点对大规模工业至关重要：大型电站、仓库、造船厂、装配桁架和居住综合体可以部署于此，而无须持续消耗大量推进剂维持位置。

使用 GEO 和 EML4/5 还能减少与低地球轨道之间的冲突。太阳能电站和其他大型平台无须把巨型阵列部署在 LEO，从而避免光污染、碰撞风险、稀薄大气阻力以及对天文观测的干扰。低轨道仍可作为返回舱下降、中间作业、检查及特定低轨任务的服务区。

8.5. 初始阶段：AstroLiner-S 直接飞行

初始阶段采用 AstroLiner-S，即起步型、简化且风险更低的航天飞机版本。它不搭载核能或聚变能源装置，使用化学推进完成最终入轨、轨道修正、离轨与返航。

初始阶段的首要目标，是在不等待全部轨道基础设施成熟的情况下建立最初的货物流。因此，AstroLiner-S 必须能够把大型模块直接送往：

- 地球静止轨道，用于建设太阳能电站和能源中继设施；
- EML4/5 能源集群；

- 用于部署太阳能电站与数据中心的高能轨道。

这一阶段的货物主要是完整或接近完整的结构：

- 可自行展开的空间太阳能电站；
- 输电模块；
- 大型散热器面板；
- 数据中心计算模块；
- 桁架结构；
- 机器人装配设备；
- 首批服务站；
- 推进剂和工质储备；
- 通信、导航与交通管制模块。

EML4/5 和 GEO 相比 LEO 的优势：

- 不存在低轨卫星造成的光污染问题。
- 太阳能电站几乎可持续受光，不经历规律性的昼夜循环。
- 相对于地球和月球的位置稳定。

本阶段的关键指标：

- 发射频率：每月 1-2 次，即每年 12-24 次。
- 单次有效载荷：10,000 吨。
- 年货运量：120,000-240,000 吨。
- 运送成本：80-120 美元/千克。
- 目标轨道：EML4/5 与 GEO。

这种方法避免了一个陷阱：必须先把全部太空基础设施建成，之后才能获得收入。最初的商业载荷本身就是未来基础设施的组成部分。

8.6. 成熟阶段：微波中继与服务基础设施

当电站、数据中心和大型平台的数量足以让轨道网络持续运行时，系统便进入成熟阶段。此时，任务将从发射新设施扩展到维护已经部署的设施。

成熟阶段的主要组成部分：

- GEO 微波中继网络；
- 主要能源集群附近的永久服务节点；
- 维修与检查飞行器；

- 仓储站；
- 轨道拖船；
- EML4/5 的首批永久定居点和轮换工作人员；
- 自动化和半自动化造船厂；
- EML1 运输枢纽。

微波中继能够在地球不同地区之间更灵活地调配能源，降低对电站与整流天线直接几何关系的依赖，并建立能源网络，而不是一组彼此孤立的轨道电站。地面系统则必须包括接收整流天线、变电设施、缓冲储能以及与区域电网的连接。

永久维护可以延长太阳能电站的寿命。这一点至关重要：如果没有维护能力，其经济性就会受单个模块寿命限制。若能在轨更换电池板、发射器、散热器、电子设备和桁架，电站就不再是一次性卫星，而会成为可维护的能源设施。

8.7. 按工作环境划分运输职能

成熟的 StarRoad 物流体系依据不同工作环境划分运输职能，而不是依赖一种万能航天器。

AstroLiner 负责地球至轨道及轨道至地球的运输。它是轨道重型运输器、可返回滑翔器和重型集装箱运载工具，但不应成为万能的行星际航天器。

轨道间运输器只在太空运行。它们不进入大气层，因此无需携带着陆防热盾、机翼、海上系统或为水上着陆加固的船体。由于专门针对轨道节点之间的航行优化，其干质量更低，使用寿命也更长。

专用返回舱负责在行星上下降，并把人员或货物送回地表。它们不应成为 AstroLiner 主体的一部分：为了运送少量人员或货物而把数千吨结构带回地面并不合理。

运输体系的层级如下：

工作环境	主要运载工具	功能
地球 → 轨道	AstroLiner / AstroLiner-S	超重型货物与模块提升
高轨道与拉格朗日点	轨道间运输器与拖船	LEO、GEO 与 EML1/2/4/5 之间的运输
轨道 → 地表	载人舱与货运舱	人员与货物下降
轨道节点	空间站、仓库与造船厂	储存、装配、维修与转运

这种分工可降低每一类飞行器的干质量，减少设计妥协，并使太空物流更接近海运体系，其中包括集装箱船、拖船、港口、仓库、造船厂和专用船舶。

8.8. AstroLiner 在成熟物流体系中的作用

AstroLiner 不是万能航天器。它的主要作用是作为循环运行的超重型提升工具和可重复使用的返回运输器。

它向上运送：

- 货运集装箱；
- 载人模块；

- 推进剂模块；
- 建筑部件；
- 面板、桁架、电缆与散热器；
- 整机或分件状态的轨道间拖船；
- 返回舱；
- 轨道站模块；
- 电站与数据中心的部件。

它返回时通常为空载，或只携带有限的回程货物：

- 乘员；
- 样品；
- 昂贵且可维修的组件；
- 退役电子设备；
- 失效或拆除的部件。

返回构型应尽可能轻。完成任务后，AstroLiner 的返回质量必须显著低于发射质量，因为安全滑翔、再入大气层和水上着陆都要求尽量减小剩余质量。把数千吨有效载荷带回地球并不是常规任务；这类工作应由专用返回舱或独立返回模块完成。

AstroLiner 自身仍保留有限的速度增量能力，原因有四：

1. 在基础设施尚未全部部署时保持独立运行能力；
2. 能够采用替代航线；
3. 应对紧急情况；
4. 在早期运行中保持灵活性。

不过，在成熟系统中，大部分轨道间速度增量由专用拖船和运输器提供。这可降低 AstroLiner 的负担，延长船体寿命，并缩短发射—卸载—返回—维护—再次发射的循环周期。

8.9. 轨道间运输器与拖船

轨道间运输器是 StarRoad 的常驻太空船队。它们往返于 LEO、GEO、EML1、EML2、EML4/5 及其他节点之间，不进入大气层，也不返回地球。

它们的任务包括：

- 把模块从 AstroLiner 的卸载点送往目标轨道；
- 拖曳太阳能电站、数据中心和大型桁架；
- 运送推进剂与工质；
- 运输载人模块；

- 维护并更换电站部件；
- 把返回舱送到下降服务轨道；
- 把空载拖船送回 EML1 或 EML4/5；
- 支援轨道造船厂。

这些飞行器可 adopt 电推进、磁等离子体动力推进、核电推进、太阳能电推进或混合推进。由于它们永远无须进入大气层，可以进行高度专业化设计：配备大型散热器、轻质桁架、大容量工质储箱、可更换推进单元，并能在轨道造船厂维护。

在成熟架构中，正是轨道间运输把 StarRoad 从发射系统转变为太空运输网络。

8.10. 返回地球及其他行星

下降任务由专用返回舱执行，因此 AstroLiner 无须成为适用于所有任务的万能再入飞行器。

主要类型：

载人舱 (PC) ——用于运送人员，具备安全再入、应急处置和自主着陆能力，并可与载人模块对接。

货运舱 (CCap) ——用于运送需要返回地表的贵重货物、样品、设备、生物材料、电子器件和部件。

工业返回舱 (IRC) ——若后期出现相应市场，用于批量回运材料的强化型货运舱。

AstroLiner 把返回舱送入轨道。轨道间拖船，或早期阶段的 AstroLiner 本身，再把返回舱转移到适合下降的服务轨道。分离后，每个返回舱独立再入并着陆。

月球、火星、金星和小行星分别使用适应各自环境的着陆系统。由于这些天体的大气、重力、热流、尘埃条件和起飞要求差异过大，不可能用一种万能下降飞行器服务太阳系中的所有天体。

8.11. 标准化模块

标准化是 StarRoad 物流的基础。正如海运集装箱化改变了世界贸易，标准化轨道模块也应改变太空经济。

基本模块类型：

载人模块 (PM) ——一种加压载人模块，可用于 AstroLiner、轨道间运输器、轨道站或载人舱。它包含生命保障系统、座椅或舱室、应急储备、对接接口和标准连接点。

货运集装箱 (CC) ——用于装载面板、桁架、散热器、电缆、设备、机器人系统、备件与消耗品的加压或非加压集装箱。

推进剂模块 (PrM) ——为拖船和空间站储存推进剂、工质、水、氧、氢、氦、氙或其他消耗介质的模块。

公用系统模块 (UM) ——电力、散热、通信或控制模块，可包括太阳能电池板、电池、散热器、天线、变换器、换热器和控制电子设备。

建造模块 (CM) ——装有桁架、梁、框架段、机器人装配设备、紧固系统、系索、电缆线路和可展开结构的建造模块。

输电模块 (PTM) ——装有微波天线、相控阵、电力电子设备以及波束指向与控制系统的电力传输模块。

每一种模块都应对以下项目实行标准化：

- 尺寸等级；
- 结构接口；
- 机器人抓取点；
- 对接接口；
- 电气与热控接口；
- 数字身份与维护记录；
- 允许的质量与重心范围；
- 紧急固定与分离模式。

这样，空间站、航天器、电站和工业综合体便可由标准模块组合而成，无须每次都设计成独一无二的飞行器。

8.12. 轨道基础设施的层级

StarRoad 的轨道物流由分层节点组成。

地球 / StarRoad。负责生产、装配、发射、AstroLiner

维修、模块制造、推进剂制备、能源供应与货物流控制。

LEO。用于返回舱下降、检查、应急处置、临时作业以及返回舱再入前分离的服务区。在成熟系统中，LEO
既不是主要仓库，也不是拥挤的工业带。

GEO。用于微波中继、能源平台、通信以及向地球固定区域输电。GEO

很适合把轨道能源接入地面电网。

EML1。地月系统的主要运输枢纽。当载荷无须直接飞往最终目的地时，AstroLiner

可直接抵达这里卸载模块。此处设有仓库、拖船、交通管制、维修节点和月球太空电梯换乘站。

EML1 应高度自动化。这里无须长期驻留大量人员：工作人员可居住在防护更好的月球熔岩管、EML4/5 或大型空间站，仅在需要时前往 EML1。

E

ML2。科研与观测区，用于无线电静默观测站、深空望远镜、试验站、深空通信以及月球背面及其附近的科研设施
。

EML4

/ EML5。成熟轨道文明的主要中心：造船厂、定居点、工业站、大型电站、行星际航天器装配设施、仓库、维修基地以及进一步扩张的控制中心。

8.13. 轨道造船厂

轨道造船厂主要设在 EML4/5。其任务是组装那些即使使用 StarRoad，也不适合或不应整体发射的结构。

AstroLiner 以扁平化包装货物的形式向造船厂运送材料和结构：

- 面板；

- 桁架；
- 结构型材；
- 电缆；
- 散热器；
- 反射镜；
- 薄膜；
- 储箱；
- 承力组件；
- 机器人装配系统。

组装工作由机器人和遥操作设备完成。人员负责维护、监督、复杂维修和特殊决策，但绝大多数危险装配作业不应由人工完成。

造船厂建造：

- 新的空间太阳能电站；
- 大型散热器阵列；
- 轨道间运输器；
- 行星际航天器；
- 居住空间站；
- 小行星资源处理综合体；
- 未来巨型结构的部件。

到这一阶段，StarRoad 不再只是从地球发射物体的系统。它成为生产链的底层环节：地球提供复杂部件，而太空逐步承担装配、维护和一部分制造工作。

8.14. 轨道与月球定居点

永久定居点并非为了定居本身而出现，而是源于维护大型基础设施的需要。当电站、造船厂、拖船、中继设施、月球生产节点和工业平台数量不断增加，仅靠完全远程维护将不再足够。

大型轨道定居点的主要形态是具有人工重力的旋转空间站，例如斯坦福环或其衍生方案。这类空间站主要部署在 EML4/5 等适合长期发展的稳定位置，并作为轨道工业的居住、服务、医疗、维修与管理中心。

月球基地和工业定居点的常驻人员不应长期生活在月面，而应居住在 EML4/5 的人工重力空间站。这可减轻月球低重力对健康的长期影响，同时让人员保持在月球基础设施附近。月球本身则主要作为工业作业区，由轮班人员在月面工作。

EML1 将成为月球系统的中央换乘与物流枢纽。这里集中设置仓库、码头、拖船、加注模块、维修设施和交通管制，管理地球、月球、EML4/5 及其他轨道区域之间的运输流。与反复从地球派遣人员相比，把人员部署在月球附近可简化轮班、应急响应、维修以及对月球生产的控制。

连接月面与 EML1 区域的月球太空电梯是这一架构的重要组成部分。它在月面和轨道基础设施之间提供常态化的货物与人员运输：风化层、氧、金属、建筑材料和工业模块向上运输，设备、消耗品和轮换工作人员则向下运输。借助这条电梯，月球工业可永久连接轨道造船厂、定居点和轨道间物流，无须持续从月面进行火箭发射。

由于月球重力较低，月球定居点将主要是由轮班人员运营并具备防护的工业基地。它们支撑采矿、加工、能源与建设综合体、自动化设备、制氧、风化层处理、月球太空电梯部件装配以及发往 EML1 的货物准备工作。

轨道与月球定居点的辐射防护分为多层：

- 使用水、聚乙烯、月球风化层、燃料或技术储备物资进行被动屏蔽；
- 把防护等级最高的区域布置在中央和内部位置；
- 利用主动磁防护减少带电粒子通量；
- 设置应对太阳质子事件的应急避难舱。

水、氢、聚乙烯、燃料和月球风化层既是有用物资，也是辐射屏蔽质量。只要把它们纳入空间站、月球基地、月球太空电梯或 EML1 节点的运行循环，防护材料就不必成为毫无用途的“死重”。

8.15. 物流类比：把太空视作海运网络

成熟的 StarRoad 系统更像海运物流，而不是一项发射计划。

在这一类比中：

- **AstroLiner** 是往返地球与轨道的超重型集装箱运输船；
- **轨道间拖船**相当于港作拖轮和远洋拖船；
- **轨道间运输器**相当于远程航线船舶；
- **EML1** 是中转港与配送枢纽；
- **GEO** 是能源与通信锚地；
- **EML4/5** 是工业港、造船厂和城市；
- **返回舱**是专用登陆艇；
- **PM、CC、PrM、UM、CM** 和 **PTM** 模块则是集装箱与功能模块。

这种方法也会改变航天活动本身的文化。独一无二的任务将让位于时刻表、集装箱周转、维修、保险、标准、仓库、港口交通管制和工业货运量。

8.16. 货物流经济学

StarRoad 颠倒了太空经济的一条核心规律。在火箭物流中，每一千克都很昂贵，因此减轻质量更划算；在 StarRoad 物流中，实行标准化、批量生产并成批发射才更经济。

这将改变工程选择：

- 结构可以更坚固、更易维修；

- 设备可留出更大裕量；
- 空间站可按可维护设施设计，而不是一次性卫星；
- 散热器、防护层和框架的质量不再是绝对约束；
- 大型平台会比许多寿命短暂的小型飞行器更经济。

最重要的经济效应是，StarRoad 创造的是轨道设施市场，而不仅是发射市场。收入不仅可以来自货物运送，也可来自电站、数据中心、中继设施、拖船、造船厂和能源网络的制造、持有与运营。

可采用的商业模式包括：

- 向外部客户出售发射服务；
- 签订能源基础设施长期合同；
- 持有并运营空间太阳能电站；
- 与能源企业设立合资项目；
- 出租轨道数据中心算力；
- 通过地面整流天线售电；
- 为轨道设施提供服务合同；
- 收取轨道间运输物流费用；
- 为空间站提供保险、维修和延寿服务。

这种模式可降低对任何单一市场的依赖。如果外部发射需求不足，StarRoad 可以通过能源和轨道工业计划自行创造货物流。

8.17. 市场与物流的发展阶段

市场需求和轨道物流的发展分为四个阶段。

I. 基础阶段（10–20 年）——能源货流。AstroLiner-S

发射完整或接近完整的空间太阳能电站、数据中心、中继站、服务模块和第一批拖船。主要目标是证明发射可以常态化，建设第一批商业能源设施，并形成轨道发电市场。

II. 成熟阶段（20–50 年）——轨道服务网络。将出现地球同步轨道中继站、EML1

枢纽、服务站、维修飞行器、拖船，以及位于 EML4/5 的首批永久聚居地和造船厂。AstroLiner 将逐步从直飞所有目的地，转变为在网络节点卸货的重型提升系统。

III. 工业阶段（50–100

年）——地外制造。开始大规模建造行星际飞船、小行星加工综合体和大型轨道栖居地。系统逐步使用地外材料，减少对从地球运送大宗原料的依赖。

IV. 演进与潜力阶段（100 年以上）——太阳系基础设施。EML4/5

将成为向太阳系扩展以及建造巨型结构、太阳帆群、奥尼尔圆柱体、深空望远镜和星际飞船的出发点。

这种先后次序很重要：StarRoad 并不要求一开始就具备完整的太空文明。它先从明确的能源和计算需求起步，随后才逐步发展出完整的太空经济。

8.18. 演进前景：StarRoad 的后继系统

StarRoad 未必是行星运输基础设施的最终形态。它可以被视为从火箭时代迈向成熟天体工程巨型结构过程中一个过渡性但不可或缺的阶段。

在常见的设想系统中——太空电梯、发射环、StarTram、轨道环和太空塔——最终只有先进轨道环的货运能力可能超过 StarRoad。然而，建造这种结构需要已经成熟且强大的轨道工业、大量材料、造船厂、能源、机器人装配能力以及运行巨型结构的经验。

StarRoad 的一种可能后继方案由两个相连的环组成：

- 一个环绕地球、最低点与地表相接的运输环；
- 一个位于 GEO 高度的地球同步港口环与太空船坞；
- 若干条在运输环密封轴道内运动的缆索转子；
- 运输环在轨迹最高点与地球同步港口环连接。

与发射环类似，运输环在密封通道内设有高速运动的转子，但安全性可以更高。与发射环不同，它的移动缆索转子不会急转弯，承受的径向载荷也小得多；发生断裂事故时，可把它们设计成远离地球运动，而不致摧毁整个结构。运输环将成为一座动态环形太空塔，从地表一直延伸到地球同步港口环。

这套系统并不是第一代 StarRoad 的替代方案，而是可能的后继者。没有 StarRoad 或能力相当的干线系统，就无法以足够低的成本把轨道环所需的材料、设备、造船厂和能源能力送入太空。

8.19. 行星工程潜力：把太阳系视作一个资源系统

StarRoad 最终可能开启如今难以想象的可能性，包括大规模天体工程和行星改造。这些属于文明发展的晚期情景，只有在成熟的太阳系基础设施建成后才会出现：从地球低成本提升货物、空间太阳能、EML4/5 轨道造船厂、小行星采矿、行星际运输器、运输物质的罐式船队，以及为深空任务提供自主能源的系统。

核心思想不是把金星与火星视为两个彼此独立的计划，而是把它们作为同一个资源系统。火星缺少氮、氢、稠密大气和磁防护。金星拥有巨量 CO_2 和氮，质量与重力也接近地球，但这些资源被困在极端环境中：温度约 460°C 、气压约 92 个大气压、以 CO_2 为主的大气、硫酸云、没有磁场，而且自转极慢并呈逆行。

8.19.1. 前置阶段：太阳系基础设施

在行星改造开始之前，必须先具备：

- 作为地球低成本质量提升通道的 StarRoad；
- 作为能源来源的空间太阳能电站和太阳能集群；
- 设在 EML4/5 的轨道造船厂；
- 能够开采金属、水和挥发物的先进小行星采矿业；
- 数十乃至数百个先进、自给自足的太空定居点及为其供能的能源节点；

- 运输氢、水、氮和 CO₂ 的罐式船队；
- 适合长途航行的核电推进或聚变推进运输系统。

这类计划的合理启动时间不会早于 StarRoad 投入运行后 100 年以上；如果太空基础设施呈指数增长，进度则可能提前。

8.19.2. 金星：行星改造阶段

从大规模长期定居的角度看，金星或许比火星更合适：其重力约为 0.9g，质量接近地球，而且太阳能充足。核心问题在于极高的初始门槛。

1. 降温与 CO₂

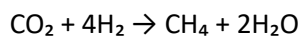
沉积。在金星—太阳 L1 点部署大型遮阳屏，减少进入金星的能量。在深度降温后，很大一部分 CO₂ 会变成液态或固态并沉降到地表。气压随之大幅下降，金星将从地狱般的环境转变为工程建设能够进入的世界。

2. 准同步环与轨道港。降温后，

在距地表约 33,400 公里的高度建造一个动态支撑环；这里正是金星未来 24 小时同步轨道的高度。该环周长约 248,000 公里，当地重力约 0.021g，自由圆轨道速度约 2.87 千米/秒。在金星自转仍过慢时，由主动转子支撑该环；它同时充当轨道港、能源节点和接收罐式运输器的地点。

3. 大气处理与输入氢。

把已经沉积的 CO₂ 提升到处理综合设施。氢则来自太阳系外部区域、冰质天体和小行星资源。固定 CO₂ 的基本反应为：



水用于形成海洋和氧气；甲烷用作燃料和化工原料；碳被固定在材料和长期储存设施中；硫化物则转化为矿物形态。多余的氮和一部分 CO₂ 可运往火星。

4. 宜居金星。

当海洋、氮氧大气、可控气候、磁防护或磁层防护以及初步生物圈形成后，首要的行星改造工作即可视为完成。即使金星仍处于约 120 小时的中间自转周期，它也可以宜居：海洋、云层、1.3–1.6 巴的大气、热量输运以及反射镜和遮阳屏系统，可以缓和约 60 小时长夜带来的影响。

5. 从轨道修正自转并实现 24 小时昼夜周期。

让金星达到 24 小时自转周期并非宜居的先决条件，而是一项长期工程优化。从当前逆行自转改为 24 小时顺行自转，需要增加约 4.3×10^{33} 千克·平方米/秒的角动量。若工质喷射速度约为 100 千米/秒，则需要约 1.1×10^{21} 千克工质。理想喷射能量接近 5×10^{30} 焦耳；在 300 EW 功率下，所需时间约为 500–600 年。计入工程损耗并按 10^{31} – 3×10^{31} 焦耳计算后，在 300 EW 下需约 1,000–3,000 年，在 100–200 EW 下则需数千年。两个运输环分别在行星和准同步环两侧对称连接，把旋转动量从环传递到地表。地球和火星构型只采用一个环，而这里采用两个环，可在动量传递过程中提供额外的动态稳定性。达到 24 小时周期后，该环将成为真正同步的金星船坞。

8.19.3. 火星：行星改造阶段

火星更容易建立早期基地，却更难改造为完整的行星环境。其局限包括约 0.38g 的重力、稀薄大气、氮含量过低、易获取挥发物稀少以及磁防护薄弱。因此，火星不仅需要本地工程，还需要从金星、小行星和外太阳系输入物质。

1. 人工磁层。

磁防护是长期行星改造的首要条件：需要类似地球同步环和运输环的轨道环、能源与反射平台，以及集成到同步环内的磁系统。没有这种防护，新形成的大气仍会受到太阳风侵蚀并逐渐流失。火星同步环与金星准同步环一样，兼具运输、轨道、能源和磁层功能。集成式太阳能电池板与储能装置为环上的磁层回路、电力电子设备和控制基础设施供能，以维持行星的人工磁场。

2. 输入大气与水

。氮和一部分 CO₂ 来自金星；水来自小行星、冰质天体和外太阳系。火星改造并不是一个孤立过程：共享资源网络会补充它所缺少的挥发物。与完全依靠火星自身资源制造并加热大气相比，输入金星大气可使火星更早获得温和而稳定的气候。

3. 增厚大气与气候增温。

建立磁防护后，逐步增加 CO₂、氮、水蒸气和其他温室气体。更稠密的大气可弥补一部分火星低温问题，加强热量输运并提高气压，扩大液态水能够存在的区域。

4. 水、土壤与生物圈

。建设水库，处理风化层，降低土壤毒性，并建立微生物和植物生态系统。发展分阶段推进：先形成受保护的局部生物圈，再建立区域气候带，最后才尝试实现全球环境稳定。

5. 行星尺度的可用环境

。在输入足够的氮、CO₂ 和水之后，火星可以获得稠密且受控的大气、人工磁防护、水资源、生物活跃区和大型工业基础设施。由于重力只有 0.38g，火星可能仍不如金星适合大规模、长期、近似地球环境的居住，但低重力也带来独特优势：起飞与着陆成本更低，轨道物流便利，适合建造巨型结构和开展低重力制造，并可作为连接太阳系内区与小行星带的工业、科研和交通枢纽。

8.19.4. 联合方案的优势

金星—火星—外太阳系联合方案比任何单独方案都更有力。单独改造火星会受到氮、水、能源和磁防护不足的制约；单独改造金星则需要处理巨量 CO₂ 大气，却没有外部用户消纳多余物质。共享模式把一颗行星的难题变成另一颗行星的资源：金星的氮和 CO₂ 支持火星，外太阳系的氢和水支持金星，小行星工业则提供金属和建筑材料。

按照这一逻辑，StarRoad 并不是直接改造行星的工具，而是因果链的第一环：StarRoad 实现低成本质量提升；空间太阳能电站提供能源；EML4/5 提供造船厂场址；小行星采矿提供原料；罐式船队在行星之间交换物质；只有在这些条件具备之后，行星工程才成为可能。

8.20. 战略结论

StarRoad 和 AstroLiner 建立的是永久性太空经济，而不是一项发射计划。

初始市场是空间太阳能、轨道数据中心和能源基础设施；成熟市场是维护、修理、能源中继、轨道间物流、造船厂和定居点；工业阶段将形成小行星经济与行星际经济；演进阶段则为巨型结构、远程任务和文明的长期扩展打开道路。

本节的核心思想是：StarRoad 不会在旧有航天模式中寻找市场。它将创建一个新市场，使大规模货物流、轨道能源、计算基础设施和太空工业结合成同一个物流系统。

9. 项目经济模型

9.1. 方法与关键假设

经济模型建立在以下原则之上：

- **批量化与自主生产——依靠规模化**，使隧道掘进机、发电设备和储能设施的成本降低 30–50%。
- **本地化——使用非洲当地资源、劳动力和建筑材料**；Spon's African Construction Cost Handbook 提供了相应依据。
- **采用当前市场价格——**储能系统（BESS）与地热电站按 2025–2026 年的数据计算。
- **汇率——1 美元**约合 100 卢布或 0.90 欧元，仅供理解背景。所有计算均使用不计通胀的 2025 年不变价美元。±30%的估算误差符合预可行性研究标准。

9.2. 非洲条件下的隧道开挖成本

Spon's African Construction Cost Handbook 提供 13 个非洲国家的劳动力和材料成本明细。由于地质条件差异很大，该资料没有给出超大断面隧道的直接单位造价，但可用于校准本项目估算。

工程类型	工程量	平均每公里成本	总成本（十亿美元）	估算依据
主隧道（17.5 × 12.5 米）	2,050 公里	1,200 万–1,800 万美元	\$24.6–36.9	依据全球大断面隧道数据外推，并按非洲条件修正。
集水隧道（6 × 2,050 公里，直径 2 米）	12,300 公里	300 万–500 万美元	\$36.9–61.5	以非洲矿山小断面巷道每米 3,500 美元的实际数据为基础。
服务隧道（直径 3 米）	2,050 公里	400 万–600 万美元	\$8.2–12.3	与集水隧道估算方式相同，并按更大断面修正。
斜向隧道（40 × 16 公里，17.5 × 12.5 米）	640 公里	1,200 万–2,200 万美元	\$7.7–14.1	与主隧道估算方式相同，并计入 30°坡度的附加成本。
隧道开挖合计	17,040 公里		\$77.4–124.8	

9.3. 采用自主生产的隧道掘进机机队

批量订购 40 台主隧道掘进机、240 台集水隧道掘进机和 40 台服务隧道掘进机，并在加蓬与刚果民主共和国建设自主装配线，可降低 30–50%的成本。

盾构机类型	直径	数量	单价（批量、自主生产）	合计（十亿美元）
主隧道掘进机（SR-Main）	约 18 米	40 台	3,500 万–6,000 万美元	\$1.4–2.4
集水隧道掘进机（SR-Collector）	2 米	240 台	80 万–150 万美元	\$0.19–0.36

盾构机类型	直径	数量	单价 (批量、自主生产)	合计 (十亿美元)
服务隧道掘进机 (SR-Service)	3 米	40 台	120 万–200 万美元	\$0.05–0.08
装配厂 (2 座)	—	—	10 亿–20 亿美元	\$1–2
隧道掘进机合计				\$2.64–4.84

9.4. 自主式地热热能系统

肯尼亚 Menengai 一座 35 兆瓦地热电站的实际造价约为 3,500 万–4,000 万美元，即每千瓦 1,000–1,250 美元，包含钻井和蒸汽井。若批量建设 40 座电站并实现生产本地化，单位成本可估为每千瓦 800–1,200 美元。

- 单座 2.5 吉瓦电站造价：20–30 亿美元。
- 40 座电站造价：800–1,200 亿美元。

这一范围下限参考俄罗斯地热电站成本——据伊图鲁普岛项目约为 650 美元/千瓦——上限采用复杂项目的 1,500 美元/千瓦。

计算采用自主地热系统总功率 100 吉瓦的上限估计。实际可用功率只能在地质勘探后确定，可能低得多，甚至只有数吉瓦；届时节省的资金将用于建设其他发电设施。

9.5. 储能系统

储能系统分为三个层级：

9.5.1. 第一层——终端的长时储能

布置在 40 座终端，为一次发射储存带有余量的 360 吉瓦时能量。按当前价格，优先技术包括：

储能类型	单位成本	依据
重力储能	每千瓦时 50–100 美元	Energy Vault 实践项目：25 兆瓦/100 兆瓦时系统造价 770 万美元，即每千瓦时 77 美元；往返效率 75–85%，使用寿命 30–40 年。
利用水热主干渠的抽水蓄能和小型水电	每千瓦时 80–150 美元	利用沿线天然高差。
锂离子电池储能系统 (BESS)	完整安装每千瓦时 125 美元	据 Ember (2025)：中国设备每千瓦时 75 美元，安装每千瓦时 50 美元。规模达到 215 吉瓦时后，成本可能降至每千瓦时 100 美元。

第一层总容量为 360 吉瓦时，覆盖完整加速周期。若采用 70%重力/抽水蓄能与 30% BESS 的组合系统，成本为：

组成部分	容量	单位成本	成本
重力储能 + 抽水蓄能	250 吉瓦时	每千瓦时 60 美元	150 亿美元
BESS	110 吉瓦时	每千瓦时 125 美元	137.5 亿美元
第一层合计	360 吉瓦时		287.5 亿美元

计入不确定性后的范围：220 亿–350 亿美元。

9.5.2. 第二层——绕组附近及隧道内的缓冲储能

飞轮储能装置直接布置在绕组附近，用于平抑瞬态变化。单位成本为每兆瓦时 50 万–100 万美元；1–5 吉瓦时缓冲容量的成本为 5 亿–50 亿美元。

9.5.3. 脉冲层——微秒级稳定

超级电容器只负责补偿微秒级脉动，并在负载突变时稳定电压。总容量低于一次发射能量的 1%，即 1–3 吉瓦时。按脉冲系统每千瓦时 300–500 美元计算，成本为 3 亿–15 亿美元。

9.5.4. 储能总成本

层级	技术	容量	成本（十亿美元）
第一层	重力储能 + 抽水蓄能 + BESS	360 吉瓦时	\$22–35
缓冲层	飞轮	1–5 吉瓦时	\$0.5–5
脉冲层	超级电容器	1–3 吉瓦时	\$0.3–1.5
储能合计			\$22.8–41.5

9.6. 工业中心与物流

成本项目	成本（十亿美元）	估算依据
加蓬工业中心——生产航天飞机与发射模块	\$3–6	造船坞、工厂和起重机
刚果民主共和国工业中心——高空大气门户与高速模块	\$2–4	山地工业集群与电解系统
加蓬及坦噶尼喀湖港口建设	\$1–3	码头、起重机与仓库
沿 2,050 公里路线的输电线路与道路	\$4–8	220 千伏输电线路、公路和桥梁
水热主干渠	\$2–5	土方开挖、衬砌与船闸
合计	\$12–26	

9.7. 研发与原型制造（第 0 阶段）

成本项目	范围（十亿美元）	估算依据
数学与计算流体力学建模	\$0.01–0.03	参照案例：超级高铁数字孪生开发，费用 450 万瑞士法郎。
2,050 公里路线的地质勘探	\$0.015–0.025	偏远地区详细勘探每公里 7,000–12,000 美元。
工程设计与 BIM 文件	\$0.02–0.05	编制技术任务书、方案设计与施工设计。
高空大气门户与超导系统试验场	\$0.01–0.03	用于高空大气门户舱原型与磁悬浮模块的试验台。
组建联合体并签订法律协议	\$0.005–0.015	国际谈判、注册与保险。
第 0 阶段合计	\$0.06–0.15	

0.6 亿–1.5 亿美元的研发预算并非固定值。若进一步深化设计、制造全尺寸高空大气门户原型或开展大型试验台测试，成本可能达到 5 亿–30 亿美元。因此，CAPEX 汇总表采用 1 亿–30 亿美元的范围，中位值取 15 亿美元。

9.8. 项目最终 CAPEX 汇总

成本项目	范围（十亿美元）	中位值（十亿美元）	占 CAPEX 比例（%）
隧道开挖	\$77.4–124.8	\$101.1	41%
隧道掘进机机队与生产	\$2.64–4.84	\$3.74	1.5%

成本项目	范围（十亿美元）	中位值（十亿美元）	占 CAPEX 比例（%）
自主式地热热能系统——40 座 2.5 吉瓦电站	\$80–120	\$100	40%
三级储能系统	\$22.8–41.5	\$32.2	13%
工业中心与物流	\$12–26	\$19	8%
研发、许可证与管理	\$0,1–3	\$1.5	0.6%
不可预见费（15%）	\$31–49	\$40	16%
CAPEX 总计	\$225–365	\$295	100%

关键结论：StarRoad 项目成本的中位估算约为 3,000 亿美元。

9.9. 各阶段分配（十亿美元）

成本项目	第 0 阶段	第 1 阶段	第 2 阶段	第 3 阶段	第 4 阶段	第 5 阶段
隧道开挖	—	—	\$5	\$20	\$70	\$6
隧道掘进机	—	\$2	\$0.7	\$0.8	\$0.2	\$0.1
自主式地热热能系统	—	\$60	\$20	\$20	—	—
储能设施	—	\$10	\$10	\$8	\$3	\$1
工业中心与物流	—	\$5	\$3	\$3	\$5	\$3
研发与许可证	\$1.5	\$0.2	\$0.1	\$0.1	\$0.05	\$0.05
预备费（15%）	\$0.23	\$11.6	\$5.8	\$7.8	\$11.7	\$1.5
各阶段合计	\$1.73	\$88.8	\$44.6	\$59.7	\$90	\$11.7
累计总额	\$1.73	\$90.5	\$135.1	\$194.8	\$284.8	\$296.5

9.10. 投资回收期与运载成本变化

本小节所有数据均为严格意义上的理论估算。

9.10.1. 发射频率与每公斤成本的演变

StarRoad 不会立即达到满负荷。随着新线路投运、航天飞机机队扩大和轨道基础设施展开，发射频率及有效载荷运载成本会逐步变化。

运往 GSO 及更高轨道的成本模型（美元/公斤）：

时期	线路数	每年发射次数	频率	运载成本（美元/公斤）	说明
第 1–2 年（试运行）	1	12–24	每月 1–2 次	\$80–120	首批商业发射。完善操作流程，管理成本较高，生产批量较小。
第 3–5 年	1	50–100	每周 1–2 次	\$30–50	开始批量运营。机队扩大到 3–5 架航天飞机，通过规模效应降低成本。
第 6–10 年	1	200–300	约每天 1 次	\$10–20	第一条线路达到设计能力，维护实现全自动化。
第 11–15 年	2	500–700	约每天 2 次	\$3–8	第二条线路投运，两台加速器分摊固定成本。
第 16–25 年	3–4	1000+	每天 3–5 次	\$0.8–3	扩展到 3–4 条并行线路。部署功率超过 1 吉瓦的空间太阳能电站，为轨道机动和货物处理供能。

时期	线路数	每年发射次数	频率	运载成本（美元/公斤）	说明
第 26 年及以后	5+	1500+	每天 5–10 次	\$0.3–1	基础设施成熟。空间电站为加速器与轨道工厂供电，边际能源成本接近于零。

9.10.2. 单次发射成本计算（美元/公斤）

各时期的公式为： $C_{\text{公斤}} = (C_{\text{能源}} + C_{\text{维护}} + C_{\text{折旧}} + C_{\text{运营}}) / M_{\text{有效载荷}}$ ，其中：

- $C_{\text{能源}}$ ——电力成本，包括冷却和辅助系统。
- $C_{\text{维护}}$ ——航天飞机与基础设施的维护成本。
- $C_{\text{折旧}}$ ——3,000 亿美元 CAPEX 按 50 年折旧。
- $C_{\text{运营}}$ ——人员、物流和保险等其他运营支出。
- $M_{\text{有效载荷}}$ ——每次发射的有效载荷质量：10,000 吨。

各时期最终参数：

时期	每年发射次数	能源（美元/公斤）	维护（美元/公斤）	折旧（美元/公斤）	运营（美元/公斤）	总成本（美元/公斤）
第 1–2 年	12	1.8	6.63	50	3.57	62
第 3–5 年	50	1	1.25	12	0.67	14.92
第 6–10 年	250	0.36	0.23	2.4	0.13	3.12
第 11–15 年（2 条线路）	600	0.12	0.113	1	0.061	1.29
第 16–25 年（3–4 条线路）	1200	0.045	0.049	0.5	0.026	0.62
第 26 年以后（5 条以上线路 + 空间太阳能电站）	2000	0.015	0.015	0.3	0.008	0.34

9.10.3. 发射成本的绝对金额构成

以各时期的一个代表年份为例，按 10,000 吨有效载荷计算：

时期	发射次数	每次发射能源成本（百万美元）	维护（百万美元）	折旧（百万美元）	运营支出（百万美元）	每次发射合计（百万美元）
第 1–2 年	12	18	66.3	500	35.7	620
第 3–5 年	50	10	12.5	120	6.7	149.2
第 6–10 年	250	3.6	2.34	24	1.26	31.2
第 11–15 年	600	1.2	1.13	10	0.61	12.93
第 16–25 年	1200	0.45	0.49	5	0.26	6.2
第 26 年以后	>2000	0.15	0.146	3	0.079	3.38

9.10.4. 计算的关键假设

1. **能源：**最初几年的基准电价为每千瓦时 0.05 美元；到第 26 年以后，凭借空间太阳能电站和自有地热发电能力降至每千瓦时 0.005 美元。
2. **维护：**试运行期较高，包括维修、调试和冗余人员；到第 10 年转为自动化流水线式维护。

3. **折旧：3,000 亿美元 CAPEX 按 50 年分摊，即每年 60 亿美元。**若每年发射 250 次，每次为 2,400 万美元。这是未用其他收入抵扣 CAPEX 的保守估算。另一种理解是把每年回收的 60 亿美元 CAPEX 视为持续增长的投资流，用于建设 StarRoad 新支线。
4. **空间太阳能电站：自第 16 年起为轨道工厂和部分加速器供能，使能源成本下降，并令售电收入提高若干数量级。**

9.10.5. 综合变化：收入与成本

时期	每年发射次数	平均市场价格 (美元/公斤)	发射收入 (十亿美元/年)	成本 (十亿美元/年)	毛利润 (十亿美元/年)
第 1–2 年	12	\$100	12	7.44	4.56
第 3–5 年	50	\$39	19.5	7.45	12.04
第 6–10 年	250	\$9.6	24	7.8	16.2
第 11–15 年	600	\$3.9	23.4	7.76	15.64
第 16–25 年	1200	\$1.6	19.2	7.44	11.76
第 26 年以后	2000	\$0.5	10	6.75	3.25

注：本表不含自主式地热热能系统每年 350 亿–440 亿美元的售电收入；该收入是独立现金流，用于覆盖折旧和基础设施运营支出。

9.10.6. 成本变化结论

StarRoad 初期运往 GSO 及更高轨道的价格为每公斤 80–120 美元，已比 Falcon Heavy 运往 LEO 的每公斤 1,400 美元低 10–15 倍，也与 Starship 运往 LEO 每公斤 200 美元的目标相当。第 10 年降至每公斤 10 美元，第 25 年降至 1 美元；到第 30 年，在 5 条以上线路和空间太阳能电站支持下，低于 0.5 美元。届时，太阳能和小行星金属等空间资源可被地面工业经济地利用。

关键结论：即使在试运行期，StarRoad 也具备竞争力。规模化及与空间太阳能电站的能源协同，可在 30 年内使价格平稳下降两个数量级。

9.11. 与替代方案比较

项目	类型	投资 (CAPEX / 研发)	投资回收期	成本 / LCOE	说明
StarRoad 能源部分：自主式地热热能系统 + 储能	能源	1,000 亿–1,500 亿美元	5–7 年 (来自售电收入)	每千瓦时 0.05 美元	仅包含地热发电与储能系统，可作为独立电力项目收回投资。
StarRoad 运输部分：隧道、高空大气门户与航天飞机	运输	1,500 亿–2,000 亿美元	8–12 年 (计入货运收入)	每公斤 1–10 美元	加速器、高空大气门户与航天飞机。依靠货物运载回收投资，同时使用能源部分提供的电力。
StarRoad 完整系统	能源 + 运输	约 3,000 亿美元	8–12 年 (综合收入)	每千瓦时 0.05 美元及每公斤 1–10 美元	能源与货运共同产生收入的一体化项目。
Falcon Heavy (研发)	运输	研发约 50 亿美元	在商业发射频率下约 10–15 年	约每公斤 1,400 美元	现役火箭。此处 CAPEX 指研发费用，而非永久性基础设施。

项目	类型	投资（CAPEX / 研发）	投资回收期	成本 / LCOE	说明
Starship（研发）	运输	研发约 100 亿美元	在目标市场规模下约 10–15 年	目标每公斤 200 美元，远期每公斤 50–100 美元	仍在研发。投资用于研发，而非永久性基础设施。
刚果民主共和国大英加水电项目	能源	800 亿–1,000 亿美元	15–25 年	每千瓦时 0.03–0.05 美元	大型水电项目，仅提供能源。
大型核电站（2 台机组，约 2.4 吉瓦）	能源	150 亿–200 亿美元	20–30 年	每千瓦时 0.05–0.08 美元	典型核电站，仅提供能源。

9.12. 经济结论

经济模型表明，StarRoad 具有可实施性，CAPEX 中位值约为 3,000 亿美元。关键因素包括：

1. **自主式地热热能系统需 800 亿–1,200 亿美元**，是最昂贵的部分，但作为独立能源项目可在 5–7 年内收回投资。
2. **隧道开挖需 770 亿–1,250 亿美元**；通过批量生产隧道掘进机和自主制造，在技术上可以解决。
3. **储能需 230 亿–420 亿美元**，依据降至每千瓦时 125 美元的 BESS 价格及采用全球最佳实践的重力储能系统。
4. **研发需 1 亿–30 亿美元**，对应原型研制的实际成本，而非全尺寸工程建设。

经济吸引力：按每千瓦时 0.05 美元的基准电价，StarRoad 仅售电每年即可获得 350 亿–440 亿美元收入。这足以覆盖运营支出，并在大规模太空发射开始前，就通过能源出口支持资本回收。

10. 安全与应急运行模式

StarRoad 按极高的**失效后仍可运行原则设计**：任何一个部件、甚至往往多个部件同时失效，都不会导致灾难。系统通过**物理冗余、功能分离和多层规程保障安全**，覆盖从准备到飞行的整个周期。

10.1. 安全理念：任何单一故障都不致命

- **关键系统冗余。**航天运输器的机载反应堆、加速器各段电源以及门户的喷流环等关键设备均采用三重或四重冗余。
- **分段与隔离。**隧道划分为 50–200 公里的自治区段，各段拥有独立供电、真空系统，**并由机械应急隔离闸分开**。相邻区段失去真空时，只有确认其中没有**航天运输器**，**隔离闸才会关闭**，从而避免连锁破坏。
- **主动与被动悬浮控制。**主要稳定和失衡补偿系统位于**航天运输器上**。大规模超导回路和机载动力装置可在微秒内重新分配能量，抵消地面系统的局部故障。在超声速弯道中，运输器的椭圆截面和离心力还会使其贴近导向面，进一步稳定姿态。
- **航天运输器和乘员优先。**发射过程中发生事故时，规程首先保全运输器，即使这会造成隧道基础设施的局部损坏。

10.2. 主要风险与应对系统

风险	成因	应对系统与规程
超声速下悬浮中断或磁场不对称	供电区段失效或绕组损坏。	1. 机载稳定系统，纳秒级响应。 2 .感应制动效应：超声速下，运输器在隧道无源绕组中自行感

风险	成因	应对系统与规程
		生电流，形成稳定作用。3. 分段设计把撞击和破坏限制在一个区段内。
门户气动屏障失效	一个或多个喷流环失效。	1. 三环冗余系统，每个环均有防爆保护。 2. 发射前 60 秒测试：不打开主闸门，只检验气体锥的形成；故障环被隔离。3. Alarm-1：发现故障即取消发射。
隧道失去真空	事故或损坏导致失压。	1. 全线压力传感器网络。2. 区段间应急隔离闸用于封锁失压区。3 若在运输器前方检测到失压，自动启动 Alarm-1 或 Alarm-2 紧急停车规程。
已无法停车后才发现故障	在加速线路后段，即全程 60–100%处发现关键故障。	Alarm-3：以最高制动力、最高 8g 降低速度；即使门户失效，也优先把运输器送入亚轨道应急轨迹。抛弃有效载荷以减轻结构，随后在海上安全着陆。

10.3. 应急规程层级

- Alarm-1，发射前事故。若发射前发现真空异常、磁场故障、任一门户喷流环失效或气体锥形成异常，则立即取消发射，用隔离闸封锁故障区段，再进行诊断与维修。
- Alarm-2，线路前中段事故，0–60%。运输器出发后，如在前方轨迹发现故障，则紧急制动并停在隧道内。若事故位于前方，运输器可自行返回起点；否则停车后由隔离闸封闭在当前区段。该区段充入空气，乘员和乘客经技术隧道与竖井撤至地面。
- Alarm-3，线路后段事故，60–100%。当隧道内无法停车，且门户或末端区段可能失效时启动。措施如下：
 - 1) 以最高 8g 实施最大紧急制动，降低速度。
 - 2) 优先保持运输器结构完整；门户保持开启。
 - 3) 进入应急亚轨道轨迹，并在最高点抛弃货物以减轻运输器。
 - 4) 利用全部主用和备用系统，在印度洋或太平洋预定海域应急着陆。运输器结构按过载和门户局部破坏工况设计。

10.4. 保障生存性的结构设计

- 航天运输器。远期配置两台独立机载反应堆、分布式超导悬浮系统，以及可承受极端过载和热冲击的加强壳体。
- 高空大气门户。三台彼此独立的环形喷流发动机置于防爆外壳内。机械闸门可承受气动屏障局部失效产生的冲击波。门户内壁集成漏斗状泄压孔，可瞬间卸压并把气体被动导入备用真空室，尽量减少大气进入隧道和门户。即使门户系统完全失效，也能限制损坏，并避免超声速运输器通过时的压力脉冲撕裂门户。
- 隧道。分段结构、应急隔离闸、双重供电，以及用于紧急疏散和维修的技术服务隧道。

10.5. 声学冲击波影响

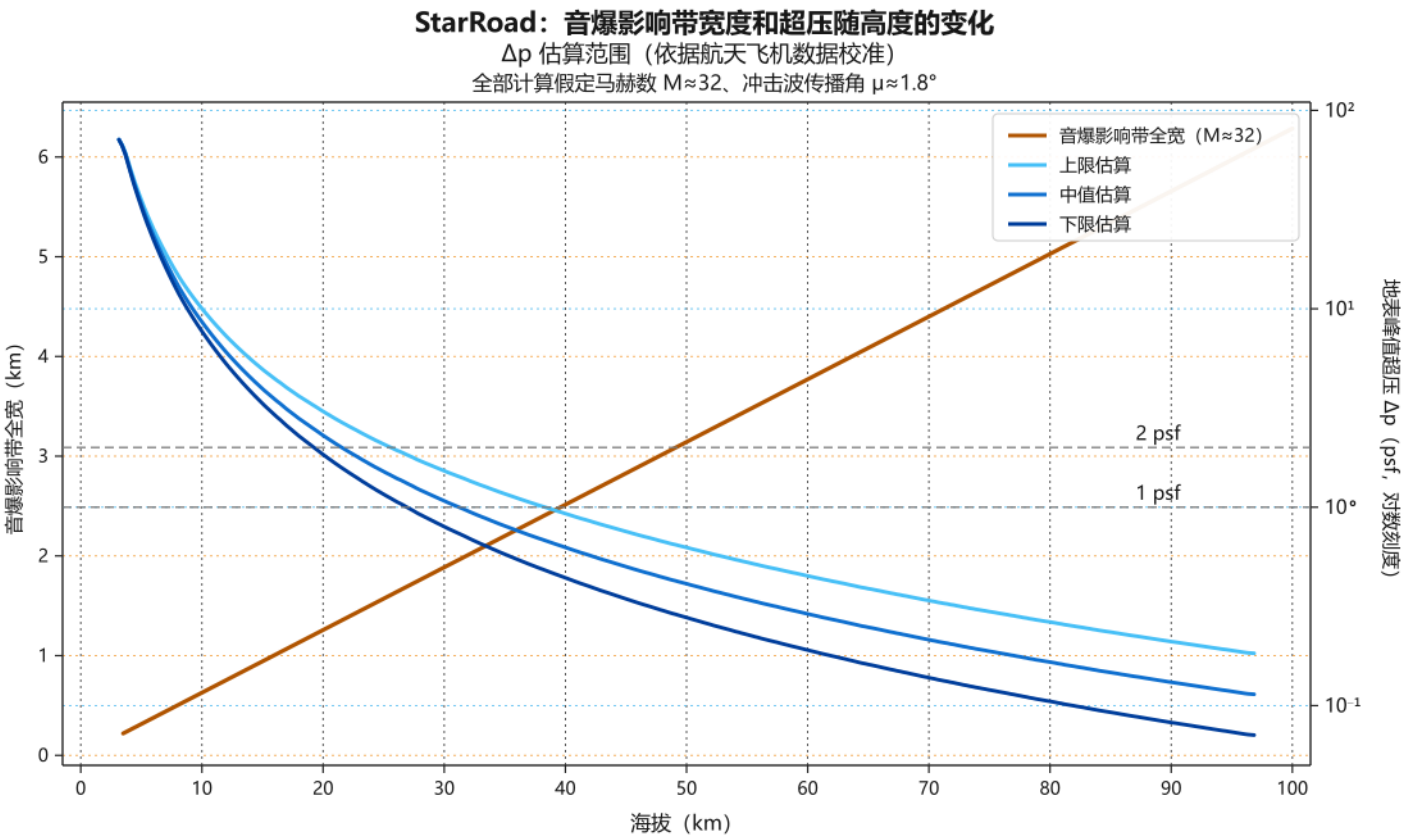
航天运输器以超声速离开门户会产生强烈的 N 波音爆。冲击波的大部分能量沿轨迹在狭窄带内传播，从而减小对门户周边地面基础设施的影响。门户周围仍须设置封闭的卫生防护区，其半径由模型计算确定，并由实地试验验证。

地面可接受冲击波影响采用两个峰值超压 Δp 阈值：

$\Delta p \leq 2 \text{ psf}$ ，约 96 Pa：建筑物和玻璃受损的可能性很低。

$\Delta p \leq 1 \text{ psf}$ ，约 48 Pa：居民区目标值，对应极低投诉风险且不造成损坏。

线路设计和运行限制，包括隔离走廊、天气窗口和高度限制，均留有足够裕量以确保满足这些阈值。



结论：StarRoad 的安全并不依赖“绝不发生故障”的假设，而是承认所有故障均有可能，并为每种情况预设自动化应对方案。它因此不再只是设想中的线路，而成为审慎、可靠且最重要的是值得信赖的工程系统。

11. 文化与心理影响

除了技术与经济影响外，StarRoad 还会深刻影响文化和人类的集体意识。每一次发射都将从一项技术操作转变为规模宏大、面向公众，甚至近乎神圣的事件。

11.1. 作为景观的发射

航天飞机以超高声速冲出大气时，将创造一种独特的人造天文现象——“太阳之箭”。安全区域内的观察者会先看到地平线上瞬间闪光，随后是一道耀眼的等离子体轨迹迅速上升，在天空中划出笔直线条。数十秒后传来的不是熟悉的发动机轰鸣，而是震撼的双重音爆——那是整座飞行城市，而不只是一台机器，穿越声障与热障时带来的切身冲击。夜间发射将像一颗移动彗星照亮大地，宛如不合自然常理的技术极光。

11.2. 心理与象征共鸣

- **可感知的尺度。** 抽象的太空计划将成为每天或每周都能出现、在数百公里外可见的景象，使太空扩张不再只是图表中的内容，而成为生活中**真实可感的事实**。
- **新的原型意象。** 一支由地球射向太空的巨型光箭，将成为进步、意志与追求的强大原型。在大众文化中，它会取代古老的垂直火箭形象，象征人类进入**太空运输走廊时代**。
- **团结与自豪。** 正如联盟号和阿波罗发射曾让全世界聚集在电视屏幕前，StarRoad 的常态化飞行也会成为全球媒体事件，展示人类为宏伟目标开展合作的能力。

11.3. 社会经济影响

- **旅游。** 在**禁区**安全边界建设专门的观景综合设施，将催生一种新的太空旅游中心。观看发射的吸引力可与造访古代世界奇观相媲美。
- **教育推动力。** 这一壮观景象将成为无可比拟的职业启蒙工具，鼓励数以百万计的儿童学习物理、工程与航天技术。
- **让太空回归日常。** 发射的常态化、可预测和工业化特征，将消除航天活动作为特殊壮举、随时伴随致命风险的光环，把它**呈现为一种正常但规模巨大的物流作业**。

因此，StarRoad 不仅会建立通往太空的物质基础设施，**也会塑造人类接受新角色所需的文化叙事与情感基础**：成为一个主动在摇篮之外建设未来的文明。“太阳之箭”的定期出现将每天提醒人们，通往群星的道路不仅已经敞开，而且正在使用。

12. 结论

StarRoad 不只是一项工程巨构，更是一条通往工业型太空文明的战略路径。项目以“干线”范式取代“火箭”范式，为跨越载荷运输成本和低货运吞吐量这两大障碍提供了途径。

高超声速干线将成为连接能源、农业、工业、物流和太空技术的骨干。非洲也有机会利用自身地理和资源实现工业与技术跃升，不再只是出口原料，而是修建一条通往太空的道路。

StarRoad 通过整合并扩大成熟技术，为一种新的经济奠定基础：太阳系资源可用于解决地球问题，而基础设施本身也成为人类未来的保障和跳板。项目实施需要前所未有的国际合作、长期投资和工程意志；回报则是开启真正太空时代的钥匙，以及近乎无限的地外资源和能源。