

B题思路

1. 问题重述 (Problem Restatement)

本研究旨在为2050年建立并维持一个10万人规模的月球殖民地制定全局最优物流运输方案。核心任务是在多重约束下，将总质量为 $M_{tot} = 10^8$ 公吨 (MT) 的物资从地球表面高效运送至月球。我们面临两种技术路径的抉择与协同：

- 太空电梯系统 (Space Elevator System, SE)**：一种基于碳纳米管缆绳的革命性运输方式，包含赤道上的三个“银河港”。该系统需经由地球同步轨道 (GEO) 的中转，具有低边际成本但高昂固定成本的特征。
- 传统火箭系统 (Traditional Rockets, TR)**：基于现有的全球10个发射场网络，使用高频次的重型运载火箭（如Falcon Heavy），具有高灵活性但环境足迹巨大的特征。

为制定鲁棒且可持续的战略，我们需要建立复杂的数学模型解决以下四个层面的问题：

- 情景规划**：在单一模式（仅SE/仅TR）与混合模式下，权衡**建设成本** (CAPEX+OPEX) 与 **工期时间**。
- 扰动量化**：引入随机过程，模拟缆绳高空风摆动、火箭发射窗口天气关闭及机械故障对系统**可用度 的非线性影响。
- 生命周期维持**：量化殖民地运营期的水资源闭环缺口，并将未来50年的**维持成本折现** (NPV) 反馈至初期的建设决策中。
- 生态足迹**：建立多因子环境评估模型，量化不同方案对平流层臭氧、全球变暖潜势 (GWP) 的综合影响。



2. 模型假设与合理性说明 (Assumptions & Justifications)

为了将复杂的现实物理过程抽象为可解的数学问题，提出以下关键假设：

- 物资流体的连续性假设：**假设 10^8 吨物资可被视为准连续流体或标准化模块单元。
 - 理由：**在宏观物流规划中，物资的具体形态（结构件、流体、设备）对总运量的影响可由平均载荷密度平滑处理。
- 技术参数冻结：**假设2050-20XX建设期内，火箭比冲 (I_{sp}) 与碳纳米管抗拉强度保持恒定。
 - 理由：**避免因技术预测的不确定性引入过多变量，聚焦于物流调度本身的优化。
- 规模效应的线性分段：**在未达到物理极限前，单位质量运输成本和环境成本视为常数；一旦超过阈值，采用惩罚函数处理。
- SE系统瓶颈定义：**太空电梯的吞吐量受限于爬升器 (Climber) 的最大速度 v_{climb} 和缆绳的应力极限。
 - 理由：**文中给出的 $179,000 \text{ MT/Year}$ 是基于材料强度的物理上限，可作为硬约束。
- TR系统时空约束：**火箭发射能力不仅受限于发射台数量，还受限于特定地理位置的轨道发射窗口。

3. 符号说明 (Nomenclature)

符号	含义	单位/备注
*决策变量		

符号	含义	单位/备注
α	分配给太空电梯系统的物资比例	$\alpha \in [0, 1]$
\mathbf{y}_{TR}	火箭发射场启用状态向量	$\mathbf{y} \in \{0, 1\}^{10}$
I_{safe}	系统安全与维护投入系数	$I_{safe} \geq 1.0$
参数与状态		
M_{tot}	建设期总物资需求	10^8 MT
N_{SE}, κ_{SE}	银河港数量及其单体年运力	3, 179000 MT/yr
N_{TR}, f_{TR}	火箭发射场数量及单场年发射频次	10, Varied
$C_{fix}^{SE}, c_{var}^{SE}$	SE系统的固定建设成本与可变运营成本	USD, USD/MT
c_{launch}	单次火箭发射总成本	USD/Launch
$\eta(t)$	系统在时刻 t 的瞬时可用度	$[0, 1]$
E_{index}	综合环境影响指数	Dimensionless

4. 模型一：多模式物流规划的静态基准模型

本部分建立理想状态下的基准模型，旨在解析成本与时间的基本制约关系，为后续的动态仿真提供理论初值。

4.1 混合模式下的时间-流量耦合

在混合模式 (Hybrid Scenario) 中，总物资被分为两部分： αM_{tot} 由电梯运输， $(1 - \alpha)M_{tot}$ 由火箭运输。

系统的总工期 T_C 取决于两条并行链路中的“关键路径” (Critical Path)，即较慢者的完工时间：

$$T_C(\alpha) = \max \left(\underbrace{\frac{\alpha M_{tot}}{N_{SE} \cdot \kappa_{SE}}}_{T_{SE}(\alpha)}, \underbrace{\frac{(1-\alpha)M_{tot}}{\sum_{j=1}^{10} y_j \cdot f_{TR}^{(j)} \cdot m_{load}}}_{T_{TR}(\alpha)} \right)$$

最优配比推导：

为使总时间 T_C 最小化，理论上的最优策略是让两个系统同时完成任务，即令 $T_{SE}(\alpha) = T_{TR}(\alpha)$ 。解得理想比例 α^* ：

$$\alpha^* = \frac{N_{SE} \cdot \kappa_{SE}}{N_{SE} \cdot \kappa_{SE} + \lambda_{TR} \cdot m_{load}}$$

其中 λ_{TR} 为启用的火箭系统总发射频率。

4.2 成本函数的构成

总成本 C_{tot} 不仅包含显性运输费用，还隐含了基础设施的资本支出 (CAPEX)：

$$C_C(\alpha) = \underbrace{\mathbb{I}(\alpha > 0) \cdot C_{fix}^{SE}}_{\text{SE Infrastructure}} + \underbrace{\alpha M_{tot} \cdot c_{var}^{SE}}_{\text{SE Operations}} + \underbrace{\frac{(1-\alpha)M_{tot}}{m_{load}} \cdot c_{launch}}_{\text{Rocket Operations}}$$

注： $\mathbb{I}(\cdot)$ 为示性函数。该式表明，只要 $\alpha > 0$ ，就必须承担高达数千亿美元的太空电梯建设成本，体现了工程决策的非连续性。

5. 模型二：随机扰动下的动态修正

实际系统中，物理环境的不确定性将显著折损理论运力。我们引入随机变量对上述模型进行修正。

5.1 太空电梯的科里奥利力与风切变扰动

太空电梯缆绳在爬升过程中受科里奥利力 (Coriolis Force) 影响会产生摆动。设摆动幅度为 $\theta(t)$ 。当摆幅超过临界角 θ_{crit} 时，系统必须停运。

定义瞬时可用度函数 $\eta_{SE}(t)$ ：

$$\eta_{SE}(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } \theta(t) < \theta_{crit} \text{ and } W_{wind}(t) < v_{safe} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

其中风场 $W_{wind}(t)$ 服从韦布尔分布 (Weibull Distribution)。修正后的年有效运力为：

$$\kappa'_{SE} = \kappa_{SE} \cdot \frac{1}{T_{year}} \int_0^{T_{year}} \eta_{SE}(t) dt \cdot (1 - \beta_{maint})$$

β_{maint} 为常规维护导致的停机系数。

5.2 火箭系统的可靠性与发射窗

火箭发射服从伯努利试验过程。设单次发射失败概率为 P_{fail} 。

- 运力折损**：有效载荷期望值 $E[m] = m_{load} \cdot (1 - P_{fail})$ 。
- 成本激增**：考虑失败后的保险赔付与补发成本，等效单次成本为：

$$c'_{launch} = c_{launch} + P_{fail} \cdot (c_{launch} + c_{cargo_loss})$$

6. 模型三：基于全生命周期的水资源维持策略

不同于一次性建设，殖民地的长期生存依赖于持续的水资源补给。本模型的创新点在于将未来运维成本折现计入建设期的决策函数。

6.1 缺口计算

设 $t > T_{end}$ 为运营期。年净需水量 M_{water} 取决于循环效率 γ :

$$M_{water} = P_{pop} \cdot w_{per} \cdot (1 - \gamma)$$

6.2 净现值 (NPV) 反馈机制

如果在建设期末建成太空电梯（即 $\alpha = 0$ ），则未来每年需用高成本火箭运水。这种策略虽节省了初期投资，但长期极不经济。

定义 **运维成本差异惩罚项 (Maintenance Penalty)**，按贴现率 r 计算未来20年的差额净现值：

$$\Delta C_{sustain} = \begin{cases} \sum_{n=1}^{20} \frac{M_{water} \cdot (c_{launch}^{m_{load}} - c_{var}^{SE})}{(1+r)^n}, & \text{if } \alpha = 0 \\ 0, & \text{if } \alpha > 0 \text{ (SE Built)} \end{cases}$$

该项将作为重要分量加入最终优化模型的目标函数中。

7. 模型四：多维度环境影响评估

环境影响指数 E_{total} 由两部分组成：

- 直接排放 (Direct Emissions)**: 火箭在平流层释放的黑碳 (BC) 和氧化铝 (Al_2O_3) 对臭氧层的耗损。

$$E_{direct} = N_{launch} \cdot (\omega_{BC} \cdot \epsilon_{BC} + \omega_{Al} \cdot \epsilon_{Al})$$

- 间接排放 (Indirect Emissions)**: 太空电梯运行消耗的巨量电力（假设由地面输送或空间太阳能采集）对应的碳排放。

$$E_{indirect} = M_{SE_load} \cdot e_{elec} \cdot \mu_{grid}$$

目标是最小化加权总环境成本: $Z_E = E_{direct} + E_{indirect}$ 。

8. 最终优化模型：元胞自动机与NSGA-II的耦合求解

为解决上述高度非线性、多目标且包含随机过程的优化问题，我们构建了 CA-NSGA-II 混合求解框架。

8.1 决策变量 (Decision Space)

$$\mathbf{X} = [\alpha, \mathbf{y}_{TR}, I_{safe}]^T$$

- $\alpha \in [0, 1]$: 物资通过SE运输的宏观配额。
- $\mathbf{y}_{TR} \in \{0, 1\}^{10}$: 全球10个发射基地的启用掩码。
- $I_{safe} \in [1.0, 1.5]$: 安全冗余系数。该系数越高，单次故障概率 P_{fail} 越低，但单次维护成本 C_{maint} 越高。

8.2 内层：元胞自动机 (Cellular Automata)

仿真核

将运输网络离散化为时空元胞系统。

- 元胞定义**: $Cell_i$ 代表第 i 个发射节点（港口或发射场）。
- 状态空间**: $S_{i,t} \in \{\text{Idle}, \text{Loading}, \text{Transit}, \text{WeatherHold}, \text{Repair}\}$ 。

关键状态转移规则 (State Transition Logic):

1. 装载激发 (Loading Trigger):

If $(S_{i,t} == \text{Idle}) \wedge (M_{acc} < \text{Quota}) \wedge (W_{local} < \text{Thresh}) \implies S_{i,t+1} = \text{Loading}$

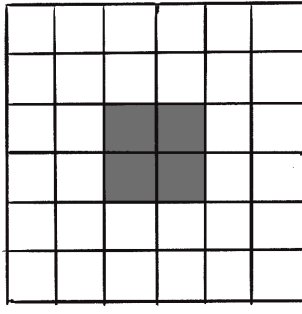
2. 故障演化 (Failure Dynamics):

在 Transit 状态下，生成随机种子 $\xi \sim U(0, 1)$ 。

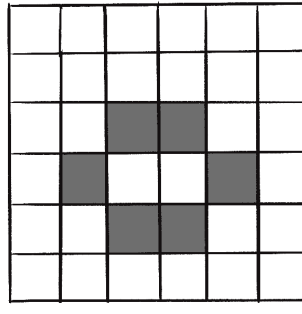
If $\xi < P_{base} \cdot e^{-\lambda(I_{safe}-1)} \implies S_{i,t+1} = \text{Repair}, \quad \text{Cost} \leftarrow \text{Cost} + C_{penalty}$

3. 累积量更新:

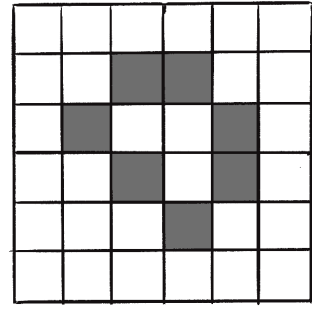
每完成一次运输，更新 $M_{acc}(t)$ 并检查是否达到 M_{tot} 。



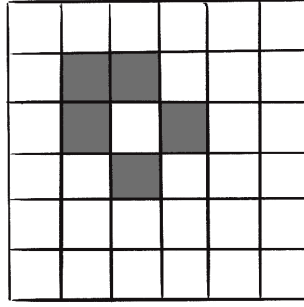
block



beehive



loaf



boat

8.3 外层：多目标优化模型 (Optimization Model)

基于 CA 仿真的输出统计量，构建多目标规划：

目标函数：

$$\min \mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} f_{\text{cost}}(\mathbf{X}) \\ f_{\text{time}}(\mathbf{X}) \\ f_{\text{env}}(\mathbf{X}) \end{bmatrix}$$

1. 全生命周期成本函数：

$$f_{\text{cost}}(\mathbf{X}) = \underbrace{\mathbb{I}(\alpha > 0)C_{\text{fix}}^{SE} + \sum_{t=0}^T \text{OpsCost}_t}_{\text{Construction Phase}} + \underbrace{\Delta C_{\text{sustain}}(\alpha)}_{\text{Future Phase (NPV)}}$$

2. 动态仿真工期函数：

$$f_{\text{time}}(\mathbf{X}) = \Phi_{CA_Sim}(\mathbf{X}) \mid_{M_{acc} \geq M_{tot}}$$

3. 综合环境影响函数：

$$f_{\text{env}}(\mathbf{X}) = \alpha M_{tot} E_{SE}^{unit} + (1 - \alpha) \frac{M_{tot}}{m_{load}} E_{TR}^{unit} + \sum_{k=1}^{N_{fail}} E_{\text{accident}}$$

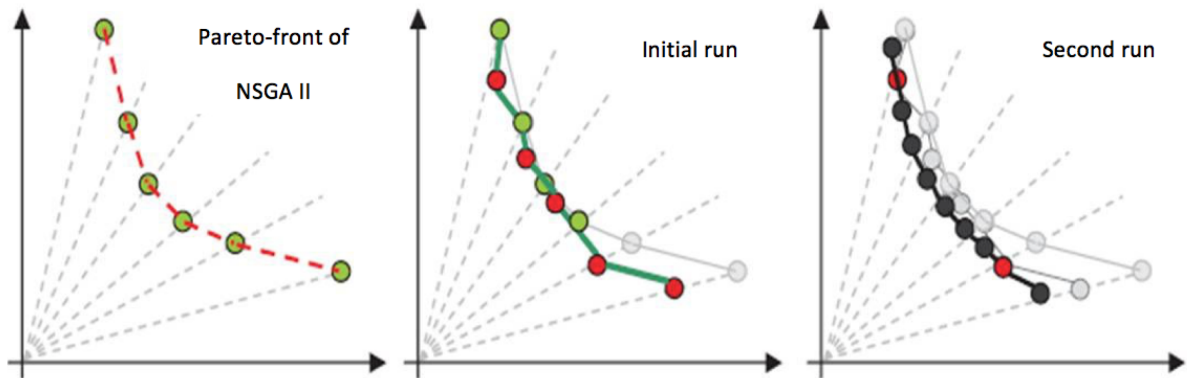
最后一项表示因发射失败（如爆炸、泄漏）导致的额外环境惩罚。

约束条件：

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^{10} y_j \geq 1 & (\text{至少保留一种运输能力}) \\ P(T_{sim} > 50 \text{ years}) < 0.05 & (\text{时间风险约束}) \\ \text{Simulated Availability} \leq \text{Theoretical Limit} \end{cases}$$

9. 模型求解 (Implementation Strategy)

采用带精英策略的非支配排序遗传算法 (NSGA-II) 进行求解, 流程如下:



- 种群初始化:** 随机生成 $N = 200$ 个个体, 每个个体编码向量 \mathbf{X} 。
- 仿真评估 (Evaluation):**
 - 将每个个体解码。
 - 并行运行 CA 仿真器 (Monte Carlo Simulation, 重复 $k = 50$ 次取均值) 以消除随机性偏差。
 - 输出该个体的 $(Cost, Time, Env)$ 向量。
- 快速非支配排序 (Fast Non-dominated Sort):** 根据三个目标值的支配关系, 将种群划分为 F_1, F_2, \dots 等级。
- 拥挤度距离计算 (Crowding Distance):** 在同等级个体中优先保留解空间稀疏区域的个体, 维持种群多样性。
- 进化算子:**
 - 选择: 二元锦标赛。
 - 交叉: SBX 模拟二进制交叉。
 - 变异: 多项式变异。
- 收敛判据:** 当帕累托前沿 (Pareto Front) 在连续 50 代内无显著变化时停止。
- 决策点选择:** 利用 TOPSIS 方法 或 拐点法 (Knee Point Identification) 从 Pareto 前沿中选出最终推荐方案。

