

- 问题 2：非理想工况下的运输系统综合分析与模型修正
 - 1. 总体思路
 - 2. 详细因素分析与建模
 - 2.1 太空电梯系统 (Space Elevator)
 - (1) 成本修正
 - (2) 时间/运力修正
 - 2.2 火箭运输系统 (Rocket System)
 - (1) 成本修正
 - (2) 时间/运力修正
 - 3. 数学模型的修正方案
 - 3.1 变量更新表
 - 3.2 修正后的混合规划模型
 - 4. 预期结论推演 (To what extent...)
 - 5. 计算实现计划

问题 2：非理想工况下的运输系统综合分析与模型修正

1. 总体思路

在问题 1c 中，我们建立了一个理想化的混合运输模型，假设系统完美运行（Perfect Working Order）。问题 2 要求我们在系统中引入不确定性（Uncertainty）、可靠性（Reliability）和额外运维成本（Maintenance & Operational Costs）。

这实际上是对 1c 模型进行鲁棒性分析（Robustness Analysis）和敏感性分析（Sensitivity Analysis）。我们需要将上述提到的实际因素量化为模型参数的修正项。

主要的影响分为两类：

- 对时间/运力的影响：故障、检修、天气等会导致有效工作时间减少，从而降低系统吞吐上限 T_{cap} ，延长完工时间 Y 。
- 对成本的影响：维护、故障修复、冗余备份等会导致固定成本和单位运输成本的增加。

2. 详细因素分析与建模

2.1 太空电梯系统 (Space Elevator)

(1) 成本修正

- 定期检修 (Periodic Maintenance):**
 - 性质：固定运营成本 (OPEX)。
 - 建模：设年检修成本为 $C_{E,maint}$ ，这通常与电梯建设成本成正比（例如 2% CAPEX/年）。
- 故障维修 (Breakdown & Repair):**
 - 性质：概率性成本。
 - 建模：引入故障率 λ_E (次/年) 和单次故障维修成本 $C_{E,fix}$ 。
 - 期望成本增加： $E[C_{E,fault}] = \lambda_E \times C_{E,fix} \times \text{年份}$ 。
- 缆绳晃动导致的能量损失 (Swaying & Energy Loss):**
 - 性质：单位运输成本增加。
 - 建模：缆绳晃动需要额外的阻尼控制或导致爬升效率下降。我们可以引入一个“效率因子” $\eta_{energy} < 1$ 。
 - 修正后的单位成本： $c'_E = c_E / \eta_{energy}$ 或 $c'_E = c_E + c_{loss}$ 。

(2) 时间/运力修正

- 不可用时间 (Downtime):**
 - 定期检修时间 t_{maint} (天/年)。
 - 天气停运时间 $t_{weather}$ (天/年)。
 - 故障维修耗时 t_{repair} (天/次)。
- 有效可用率 (Availability Factor):**

$$\beta_E = \frac{365 - t_{maint} - t_{weather} - (\lambda_E \times t_{repair})}{365}$$

- 修正后的吞吐能力:**

$$T'_E = T_E \times \beta_E$$

意味着电梯每年的最大运输量下降了。

2.2 火箭运输系统 (Rocket System)

(1) 成本修正

- **日常维护与基地维护 (Maintenance):**
 - 性质：固定成本 + 发射次数相关的变动成本。
 - 建模：每发射一次增加维护费 $C_{R,maint}$ 。基地每年固定维护费 $C_{Base,fix}$ 。
- **工程冗余与制造 (Redundancy & Manufacturing):**
 - 性质：资本支出 (CAPEX)。
 - 为了保证 L_{max} 的发射频率，在考虑故障和检修的情况下，需要更多的火箭储备。
 - 设需要 k 的冗余系数（如 1.2），则船队规模成本从 $N \times C_{rocket}$ 变为 $1.2N \times C_{rocket}$ 。
- **故障与发射失败 (Launch Failure):**
 - 性质：高额概率性成本。
 - 设火箭发射失败率为 P_f (如 1% - 5%)。
 - 失败成本包括：火箭本身的损失 C_{rocket} + 载荷损失 C_{cargo} + 发射台修复费用。
 - 期望风险成本（每吨）：
$$C_{risk} = \frac{P_f \times (C_{rocket} + C_{cargo})}{\rho_B}。$$

(2) 时间/运力修正

- **发射窗口 (Launch Windows):**
 - 限制了发射时间。如果错过窗口，必须等待。这导致实际的 L_{max} (年最大发射次数) 是受限的，不能无限增加。
- **故障导致的停飞 (Failure Stand-down):**
 - 一旦发生事故，通常需要数月的调查和归零 (Stand-down period)。
 - 设平均故障停飞时间为 $T_{down,R}$ 。
- **有效发射频率:**
 - 修正后的年最大发射次数 L'_{max} :

$$L'_{max} = L_{max} \times (1 - P_f \times \frac{T_{down,R}}{365}) \times \text{窗口限制系数}$$

3. 数学模型的修正方案

我们需要将上述定性分析转化为 1c 模型中的具体参数变更。

3.1 变量更新表

原始参数	修正后参数 (考虑非理想因素)	说明
电梯链路		
吞吐能力 T_E	$T_E^{real} = T_E \cdot \beta_E$	β_E 为电梯时间可用率
固定成本 F_E	$F_E^{real} = F_E + C_{E,maint} \cdot Y$	包含每年的检修OPEX
单位成本 C_E	$C_E^{real} = C_E \cdot (1 + \alpha) + E[cost_{fault}]$	包含能耗损失 α 和故障期望分摊
地面火箭		
单场年发射数 L_{max}	$L_{max}^{real} = L_{max} \cdot (1 - P_{loss})$	扣除故障停飞、窗口期损失的时间
固定成本 F_R	$F_R^{real} = F_R \cdot (1 + k_{redundancy}) + C_{Base}$	增加冗余火箭购置和基地维护
单位成本 C_R	$C_R^{real} = C_R + C_{R,maint} + C_{risk}$	增加单次维护费和失败风险期望成本

3.2 修正后的混合规划模型

目标函数（总成本）变更为期望值形式：

$$\min E[Cost] = y \cdot F_E^{real} + x \cdot C_E^{real} + (M_{tot} - x) \cdot C_R^{real}$$

约束条件变更：

1. 时间约束（更严格）：

$$\max \left(\frac{x}{T_E^{real}}, \frac{M_{tot} - x}{N_{sites} \cdot L_{max}^{real} \cdot p_B} \right) \leq Y_{max}$$

由于 $T_E^{real} < T_E$ 且 $L_{max}^{real} < L_{max}$ ，原有方案可能不再满足时间要求，或者需要建设更多的发射场/电梯。

2. 成功率/风险约束（新增）： 用户可能要求任务的总成功率达到一定标准。

$$(1 - P_f)^{N_{\text{launches}}} \geq P_{\text{confidence}}$$

或者要求针对失败预留足够的额外载荷 M_{buffer} :

$$M_{\text{real_needed}} = M_{\text{tot}} / (1 - P_f)$$

(这意味着如果火箭有 5% 失败率, 我们需要多运输 5% 的货物)

4. 预期结论推演 (To what extent...)

基于上述分析, 如果我们将这些实际因素加入模型, 预期的结论变化如下:

1. 总成本显著上升:

- 理想模型忽略了巨大的维护成本和风险成本。考虑后, 总预算可能增加 30%-50% 甚至更多。
- 特别是火箭的风险成本 (炸机成本) 极高, 可能会让火箭运输的经济性在通过电梯对比时进一步下降。

2. 完工时间延长 / 需要更多基建:

- 由于 $\beta_E < 1$ 和 L_{max} 缩水, 原定 5 年能运完的货, 现在可能需要 7 年。
- 为了维持 Y_{max} 不变, 必须增加 N_{sites} (建设更多发射场) 或者 提升电梯的基础运力设计。

3. 最优解 (x^*) 的偏移:

- 如果火箭故障率 P_f 较高: 火箭的真实单位成本 c_R^{real} 会激增 (包含保险和赔偿)。这将导致最优策略更大幅度地向太空电梯倾斜 (即 x 增大)。
- 如果电梯维修停运频繁 (β_E 低): 电梯的“时间可靠性”变差。为了保证 Y_{max} , 不得不将更多货物分配给火箭, 尽管火箭更贵, 但多发射场并行可以提供更好的冗余度 (Distributed Redundancy)。

4. 系统脆弱性:

- 电梯是**单点故障 (Single Point of Failure) **系统。一旦缆绳断裂或发生重大维修, 整条链路中断。
- 火箭是分布式系统。一枚火箭爆炸不影响其他发射场的运行。
- 结论: 在追求高可靠性而非纯这一成本的场景下, 混合方案 (Mixed Strategy) 比纯电梯方案更优, 因为火箭提供了应急备份通道。

5. 计算实现计划

为了回答 "To what extent" (在多大程度上改变), 我们需要编写代码计算:

1. 定义一组“惩罚系数”(如: 电梯只有 90% 时间可用, 火箭有 2% 失败率)。
2. 代入修正后的公式计算新的 总成本 和 最短完工时间。
3. 对比 Scenario 1 (Ideal) 和 Scenario 2 (Real) 的结果:
 - 成本增加了多少?
 - 时间延长了多少?
 - 最优分配比例 x/M_{tot} 变化了多少?