

- 问题 2：非理想工况下运输系统的增强版综合分析
 - 1. 总体框架与核心思想（增强版）
 - 2. 电梯系统（Space Elevator）修正
 - 2.1 成本修正
 - 2.2 时间/运力修正
 - 3. 火箭系统（Rocket）修正
 - 3.1 成本修正
 - 3.2 时间/运力修正（对称化）
 - 4. 失败风险对“时间”的影响（新增）
 - 方式 A：需求放大
 - 方式 B：发射次数放大
 - 5. 单点故障的显式化
 - 6. 修正后的混合模型（核心公式）
 - 6.1 目标函数
 - 6.2 时间约束
 - 6.3 可行性判别（新增）
 - 7. “To what extent” 的结论增强版
 - 7.1 成本变化
 - 7.2 时间变化
 - 7.3 最优分配偏移
 - 7.4 系统韧性
 - 8. 计算实施建议（简化版流程）
 - 9. 小结

问题 2：非理想工况下运输系统的增强版综合分析

本文在原有分析基础上补强“量化框架、对称化修正、失败风险对时间的影响、单点故障显式化、可行性失效判别”等内容，便于回答“To what extent...”

1. 总体框架与核心思想（增强版）

我们将“非理想因素”统一转化为两类修正：

- 有效运力折减（Availability Factor）：用可用率 β 折减理论吞吐能力。

2. 成本上升 (OPEX + 风险成本): 把维护、失败、冗余引入固定成本与单位成本。

在此基础上, 引入三类量化指标来回答 “To what extent” :

- 成本增幅率

$$\Delta C / C_{ideal} = \frac{C_{real} - C_{ideal}}{C_{ideal}}$$

- 时间增幅率

$$\Delta Y / Y_{ideal} = \frac{Y_{real} - Y_{ideal}}{Y_{ideal}}$$

- 最优分配偏移

$$\Delta x^* / M_{tot} = \frac{x_{real}^* - x_{ideal}^*}{M_{tot}}$$

2. 电梯系统 (Space Elevator) 修正

2.1 成本修正

- 定期检修成本: 年化固定成本 $C_{E,maint}$ 。
- 故障维修成本:

$$E[C_{E,fault}] = \lambda_E \cdot C_{E,fix} \cdot Y$$

- 能耗损失 (缆绳晃动): 通过效率因子 η_{energy} 修正单位成本:

$$C_E^{real} = \frac{C_E}{\eta_{energy}} + C_{fault,alloc}$$

其中 $C_{fault,alloc}$ 为故障成本按吨分摊后的期望值。

2.2 时间/运力修正

引入统一的可用率:

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

修正后的吞吐能力：

$$T_E^{real} = T_E \cdot \beta_E$$

3. 火箭系统（Rocket）修正

3.1 成本修正

- 发射维护成本： $C_{R,maint}$
- 基地维护成本： C_{Base}
- 冗余与制造成本（工程冗余系数 k ）：

$$F_R^{real} = F_R(1 + k) + C_{Base}$$

- 失败风险成本（期望值）：

$$C_{risk} = \frac{P_f(C_{rocket} + C_{cargo})}{\rho_B}$$

最终单位成本：

$$C_R^{real} = C_R + C_{R,maint} + C_{risk}$$

3.2 时间/运力修正（对称化）

火箭侧也引入统一可用率 β_R ：

$$\beta_R = 1 - (\delta_{window} + \delta_{maint} + \delta_{down})$$

其中：

- δ_{window} ：发射窗口限制导致的损失比例
- δ_{maint} ：维护带来的可用率损失
- $\delta_{down} = P_f \cdot \frac{T_{down}}{365}$ ：故障停飞比例

修正后的年最大发射次数：

$$L_{max}^{real} = L_{max} \cdot \beta_R$$

修正后的火箭年吞吐能力：

$$T_R^{real} = N_{sites} \cdot L_{max}^{real} \cdot \rho_B$$

4. 失败风险对“时间”的影响（新增）

失败率不仅增加成本，还会导致任务需要重复发射，从而增加实际运输时间或需求量。
可用两种等价方式建模：

方式 A：需求放大

$$M_{eff} = \frac{M_{tot}}{1 - P_f}$$

方式 B：发射次数放大

$$N_{launch}^{eff} = \frac{N_{launch}}{1 - P_f}$$

这会进一步拉长 Y 或要求提升 T_R 。

5. 单点故障的显式化

电梯系统为单点故障（Single Point of Failure），一旦发生灾难性事故（如缆绳断裂），整个分支失效。

可引入灾难停运概率 P_{cat} ：

- 期望可用率修正：

$$\beta_E^* = \beta_E \cdot (1 - P_{cat})$$

- 或引入可靠性约束：

$$P_{system} = P_E \cdot P_R \geq P_{conf}$$

这使得电梯分支在高可靠性要求下被“降权”，混合方案更稳健。

6. 修正后的混合模型（核心公式）

6.1 目标函数

$$\min E[Cost] = yF_E^{real} + xC_E^{real} + (M_{tot} - x)C_R^{real}$$

6.2 时间约束

$$\max(\frac{x}{T_E^{real}}, \frac{M_{eff} - x}{T_R^{real}}) \leq Y_{max}$$

6.3 可行性判别（新增）

当

$$T_E^{real} + T_R^{real} < \frac{M_{eff}}{Y_{max}}$$

则原方案不可行，必须扩大运力或放宽 Y_{max} 。

7. “To what extent” 的结论增强版

7.1 成本变化

- 引入维护、冗余、失败风险后，总成本增幅 $\Delta C/C_{ideal}$ 可明显高于 30%，尤其火箭失败成本巨大。
- 若 P_f 较高， C_R^{real} 增长显著，最优解偏向电梯侧。

7.2 时间变化

- β_E 和 β_R 同时降低时， Y 增幅明显。
- 若 $(T_E^{real} + T_R^{real})$ 低于阈值，则原解无可行性，必须扩建基础设施。

7.3 最优分配偏移

- 电梯可靠性高、火箭失败率高 $\rightarrow x^*$ 增大（电梯占比提升）。
- 电梯停运频繁、火箭窗口受限较小 $\rightarrow x^*$ 减小（转向火箭）。

7.4 系统韧性

- 电梯：高效率但“脆弱”；
- 火箭：成本高但“分布式冗余”。
- 混合方案在高可靠性要求下更优。

8. 计算实施建议（简化版流程）

1. 设定 β_E, β_R, P_f 等惩罚参数。
2. 计算 C_{real}, Y_{real} 并与理想值对比。
3. 计算 $\Delta C, \Delta Y, \Delta x^*$ ，量化 “To what extent”。
4. 做敏感性分析：对 P_f, β_E, β_R 做 $\pm 20\%$ 扫描。

9. 小结

本增强版本将“非理想因素”从定性描述提升为可量化参数修正，并补充了失败率对时间的直接影响与可行性失效判别。这样不仅能回答“是否改变”，还能回答“改变的程度”。