

基于LP和MILP的原油管网循环调度优化： 从经济最优到系统鲁棒性分析

周一鸣, 张韫译萱, 顾啸宇

自动化学院

东南大学

南京, 中国

Abstract—针对原油管网调度中普遍存在的物理互斥约束与连续生产边界问题，本文在传统线性规划基础上构建了更为贴近工程实际的混合整数线性规划（MILP）模型。通过引入“大M法”处理阀门切换的逻辑互斥，并施加24小时循环稳态约束，克服了基础模型在物理可行性与生产连续性上的缺陷。进一步地，本文突破了单一的经济性视角，通过构建“主干道拥堵”与“枢纽库存危机”的极端工况，对系统进行了深度压力测试。实验结果表明，该模型不仅能在常规工况下输出经济最优解，更能在极端压力下自动激活备用码头（S4）与双向管道的反向回流机制，证明了双向流设施作为系统“安全冗余”的重要价值，验证了所提模型在复杂动态环境下的鲁棒性。

Index Terms—原油管网调度，混合整数规划，互斥约束，循环调度，鲁棒性分析

I. 基础问题分析

A. 问题描述

原油运输是石化工业生产的重要环节。本问题研究的原油运输网络基本结构如图1所示，由油轮码头、运油站（含储油罐）、输油管道和石化企业四部分组成。多种类型的原油从运油站的储油罐通过管道运输至各石化企业。

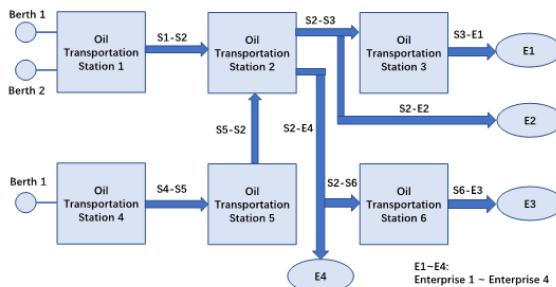


Fig. 1. 原油运输网络结构示意图：包含6个运油站（S1-S6）、4个石化企业（E1-E4）及连接管道

本问题的目标是制定原油运输的初步规划方案。已知条件包括：(a) 每吨原油通过每公里管道的运输成本；(b) 各节点（码头、运油站、企业）之间的管道长度；(c) 各企业对各类原油的需求量；(d) 各运油站各类原油的库存量。需要决策的是：从每个运油站向每个企业运输各类原油的数量，使得各企业的原油需求得到满足，同时总运输成本最小化。

1) 网络参数：管道网络的距离参数如表I所示。网络中共有9条管道，连接6个运油站和4个石化企业。

TABLE I
管道网络距离参数（单位：KM）

管道	距离	管道	距离
S1-S2	300	S2-S3	250
S3-E1	200	S4-S5	350
S5-S2	150	S2-E4	400
S2-S6	250	S2-E2	450
S6-E3	200		

2) 企业需求：各石化企业对6种原油（O1-O6）的需求量如表II所示。可以看出，不同企业对原油类型的需求存在差异：E1主要需要O1、O2、O5三种原油；E2需要O3、O4；E3需要O1、O4、O5、O6四种原油；E4需要O3、O4、O6。

TABLE II
各企业原油需求量（单位：10⁴吨）

企业	原油类型	需求量
E1	O1	5.0
E1	O2	9.0
E1	O5	8.5
E2	O3	9.3
E2	O4	10.0
E3	O1	4.2
E3	O4	9.1
E3	O5	3.4
E3	O6	3.5
E4	O3	3.4
E4	O4	10.0
E4	O6	2.8

3) 运油站库存：各运油站的原油库存情况如表III所示。各站点储存的原油类型和数量各不相同，这决定了运输方案的可行性约束。

B. 求解思路

1) 问题简化策略：为了降低问题的复杂度，我们采用以下策略对决策变量进行简化：

(1) 排除必然为零的决策变量：只有当运油站拥有某类原油的库存，且某企业需要该类原油时，对应的运输量变量才有意义。通过遍历库存表和需求表，筛选出所有有效的（运油站，企业，原油类型）组合，将原本 $6 \times 4 \times 6 = 144$ 个潜在变量缩减为实际有效的变量数。

(2) **Floyd**算法求解最短路径：由于运输成本与距离成正比，从任一运油站向任一企业运输原油时，必然选择最

TABLE III
各运油站原油库存量 (单位: 10^4 吨)

运油站	原油类型	库存量
S1	O1	7.1
S1	O4	6.5
S2	O1	0.9
S2	O2	8.6
S2	O3	11.6
S2	O4	8.4
S2	O5	11.7
S2	O6	3.2
S3	O3	0.4
S3	O4	29.5
S3	O6	4.9
S4	O3	4.5
S4	O4	10.4
S4	O5	3.4
S4	O6	3.8
S5	O1	5.0
S5	O2	2.2
S5	O4	38.4
S5	O6	6.1
S6	O4	2.5

短路径。因此，我们使用Floyd-Warshall算法预先计算所有运油站到所有企业的最短距离矩阵，将网络拓扑问题转化为简单的点对点运输问题。

Floyd-Warshall算法的核心迭代公式为 [2], [3]:

$$d_{ij}^{(k)} = \min\{d_{ij}^{(k-1)}, d_{ik}^{(k-1)} + d_{kj}^{(k-1)}\} \quad (1)$$

其中 $d_{ij}^{(k)}$ 表示从节点*i*到节点*j*、只经过编号不超过*k*的中间节点的最短距离。（若两点不可达，则距离为无穷大）

2) 线性规划模型：根据运筹学基本理论 [1], [8]，设 x_{ijk} 为从运油站*i*向企业*j*运输原油类型*k*的数量（单位： 10^4 吨）， d_{ij} 为运油站*i*到企业*j*的最短距离（单位：km）。

目标函数：最小化总运输成本

$$\min Z = \sum_{i \in S} \sum_{j \in E} \sum_{k \in O} d_{ij} \cdot x_{ijk} \quad (2)$$

约束条件：

(1) 供应约束：每个运油站每种原油的运出量不超过其库存量

$$\sum_{j \in E} x_{ijk} \leq Stock_{ik}, \quad \forall i \in S, k \in O \quad (3)$$

(2) 需求约束：每个企业每种原油的供应量满足其需求

$$\sum_{i \in S} x_{ijk} \geq Demand_{jk}, \quad \forall j \in E, k \in O \quad (4)$$

(3) 非负约束：

$$x_{ijk} \geq 0, \quad \forall i, j, k \quad (5)$$

综合上述目标函数与约束条件，原油运输优化问题的线性规划标准形式为：

$$\begin{aligned} \min \quad & Z = \sum_{i \in S} \sum_{j \in E} \sum_{k \in O} d_{ij} \cdot x_{ijk} \\ \text{s.t.} \quad & \sum_{j \in E} x_{ijk} \leq Stock_{ik}, \quad \forall i \in S, k \in O \\ & \sum_{i \in S} x_{ijk} \geq Demand_{jk}, \quad \forall j \in E, k \in O \\ & x_{ijk} \geq 0, \quad \forall i \in S, j \in E, k \in O \end{aligned} \quad (6)$$

其中， $S = \{S1, S2, S3, S4, S5, S6\}$ 为运油站集合， $E = \{E1, E2, E3, E4\}$ 为企业集合， $O = \{O1, O2, O3, O4, O5, O6\}$ 为原油类型集合。

3) 求解方法：使用MATLAB的linprog函数求解上述线性规划问题 [7]。该函数采用对偶单纯形法（Dual-Simplex）算法，能够高效求解大规模线性规划问题。

C. 求解结果

经过优化求解，得到最优运输方案的总成本为**39400**单位运输成本（ 10^4 吨·公里）。图2展示了最优运输方案的可视化结果。

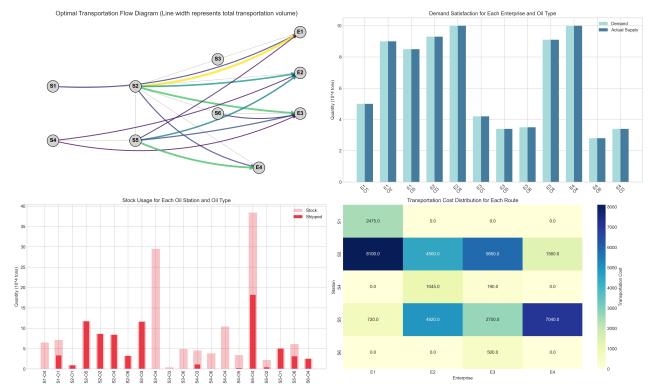


Fig. 2. 最优运输方案可视化结果

D. 结果分析

从图2的可视化结果可以得出以下分析：

(1) 运输路径选择：优化结果显示，运输方案充分利用了最短路径原则。例如，S2站点由于地理位置居中，成为重要的供油枢纽，向多个企业供应原油。S3站点主要服务于E1企业，因为S3-E1的直接距离最短（200km）。

(2) 库存利用效率：各运油站的库存得到了合理利用。部分站点的某些原油类型被完全运出（利用率100%），而另一些则有剩余，这取决于企业需求与运输成本的综合权衡。

(3) 需求满足情况：所有企业的原油需求均得到完全满足，验证了模型约束的正确性。每个企业获得的各类原油供应量恰好等于其需求量。

(4) 成本构成分析：总成本39400单位中，长距离运输（如S1-S2-E4路径，总距离700km）贡献了较大比例的成本，而短距离运输（如S3-E1，200km）的成本相对较低。这表明在实际运营中，优化网络拓扑结构、缩短关键路径距离具有显著的经济价值。

(5) 模型局限性：基础模型假设运输过程是静态的、单向的，未考虑时间因素、管道容量限制、阀门切换约束等实际工程问题。这些局限性将在后续的拓展模型中得到解决。

II. 拓展部分：建模与求解

A. 引言：从理论到工程实际

原油管作为现代能源系统的“动脉”，其调度方案的优劣直接决定了化工生产的连续性与经济性。然而，基础模型对物理约束进行了过度简化，且无法解释网络中冗余设施（如备用码头、双向管道）存在的必要性。为了弥补理论模型与工程实际之间的鸿沟，本文在基础运输问题的基础上进行了深度拓展，引入了逻辑互斥约束与循环稳态约束，并重点探究了系统在极端工况下的鲁棒性。

B. 互斥约束的数学表达

在实际的输油枢纽（如S2节点）中，物理管汇结构决定了同一泵站往往无法同时向两个相反的方向输油。为了在数学模型中精确描述这一物理限制，我们引入了二进制决策变量 $y_t \in \{0, 1\}$ 。

利用经典的“大M法”（Big-M Method），我们将逻辑上的互斥转化为代数上的线性不等式。例如，对于需要互斥的两组输油路径 A 和 B，我们构建约束：

$$\sum_{e \in A} x_{e,t} \leq M \cdot y_t \quad (7)$$

$$\sum_{e \in B} x_{e,t} \leq M \cdot (1 - y_t) \quad (8)$$

其中 M 为一个足够大的正数。这种建模方式确保了调度方案严格符合物理层面的阀门操作规范。

C. 循环稳态约束

为了避免优化算法利用有限的时间视窗进行“短视”优化，必须要引入循环边界约束。我们将 $t = 24$ 时刻的库存水平 I_{24} 强制约束为等于 $t = 0$ 时刻的初始库存 I_0 。这一约束虽然显著压缩了可行解空间，增加了求解难度，但它保证了生成的调度表可以按天为周期无限循环执行。

III. 极端工况下的鲁棒性分析

在基础参数设定下，优化求解器倾向于仅使用成本最低的主干线路，导致成本较高的S4码头和双向管道长期处于闲置状态。为了探究这些冗余设计的潜在价值，我们设计了一组“压力测试”实验。

A. 压力场景构建

我们构建了被称为“完美风暴”的极端工况组合：1. 主供油线路（S1至S2）突发故障，运力从 6.0万吨/小时 下跌至 2.0万吨/小时。2. 核心枢纽 S2 的储油罐区受限，库存上限从 40.0万吨 压缩至 1.5万吨。

这一场景旨在模拟“外部供应中断”与“内部缓冲失效”同时发生的灾难性时刻。

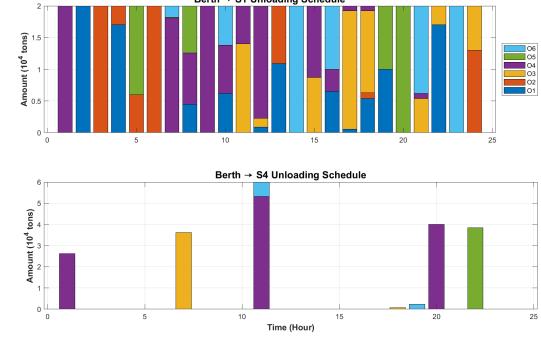


Fig. 3. 压力测试下S4码头的激活情况：S4（下图）不再闲置，承担了关键供油任务。

B. S4码头的备用激活机制

实验结果显示，在主干道受阻的压力下，原本因经济性差而被冷落的S4码头被系统自动激活。全天累计供油量达到20.4万吨，有效弥补了S1线路留下的供应缺口。这一结果证明了S4码头并非无用的“沉没成本”，而是系统应对主干线路故障时不可或缺的“热备份”。

C. 双向管道的反向回流效应

更为精彩的现象发生在双向管道的调度上。由于S2枢纽的库容被极限压缩，面对夜间突发的用油高峰，模型展现出了惊人的智能：它利用低谷期将油品逆向输送至邻近的S3和S6站点暂存（如图4中时刻1-6的反向流），并在高峰期回抽。

我们的数据监控捕捉到了 $S3 \rightarrow S2$ 和 $S6 \rightarrow S2$ 的流量。这种“反向回流”机制通过利用邻居节点的剩余库容，构建了一个虚拟的“体外蓄水池”，成功化解了S2节点的库存危机。

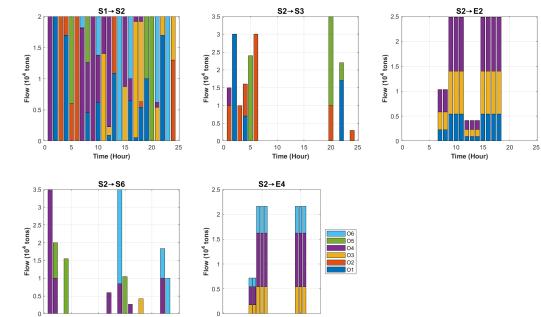


Fig. 4. 关键管道流量分析：在极端工况下，由于库存和运力限制，管网呈现出复杂的动态流向（含反向回流）。

同时，图5展示了各节点库存的剧烈波动，S2的库存曲线长期在极低水平震荡，证明了系统确实在极限边缘通过精细调度维持了平衡。

IV. 总结

通过对原油管网调度问题的拓展建模与压力测试，本文不仅实现了一个物理均可行的工程调度方案，更深入挖掘

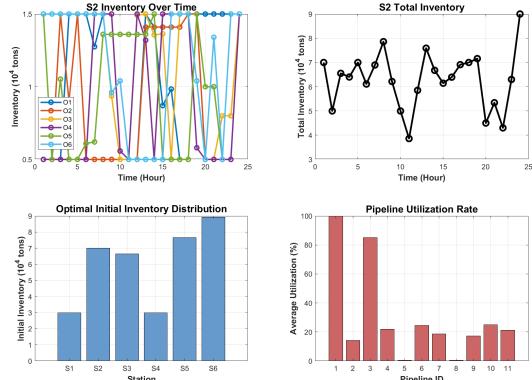


Fig. 5. 枢纽S2在极限库存约束下的运行状态：库存始终在低位徘徊，通过快速周转维持供应。

了管网系统中冗余设计的内在价值。研究表明，看似多余的S4码头和复杂的互斥双向管道，实则是系统应对不确定性与突发故障的“保险丝”。

APPENDIX A

思考过程：从一道习题到工程现实

回顾本项目的研究历程，我们经历了从“教科书习题”到“工程化建模”，再到“系统级反思”的三个阶段。

A. 第一阶段：基础模型的建立

最早接触到的原始问题（详见附录B.1）是一个标准的最小费用流问题，网络结构简单，约束条件单一。我们通过MATLAB求解出满足需求的最优调度。然而，这种“理想化”的解在面对真实世界的复杂性时显得过于单薄。

B. 第二阶段：工程约束的引入（课程汇报版本）

为了让模型更“真实”，我们在课程汇报阶段引入了大量实际约束：

- 考虑到泵站无法同时双向输油，增加了互斥约束。
- 考虑到化工生产的连续性，增加了24小时循环边界。
- 为了增加调度的灵活性，我们在S2与S3/S6之间设计了双向管道。

这一版本的模型在数学上更加严谨，也更有工程味道。

C. 第三阶段：深度反思与再升级（课后完善）

在完成课程汇报后的复盘中，我们发现了解的一个“反常”现象：

- 1) S4码头为什么一直闲置？
- 2) 双向管道为什么从未出现反向回流？

这让我们意识到：在常规参数下，由于S1路径成本最低且S2库容充足，优化算法理所当然地选择了最简单的“单主干+本地囤货”策略。在这种情况下，我们辛苦设计的双向管道和S4码头沦为了摆设。

为了验证这些设计并非多余，我们在汇报之后进行了新一轮的压力测试升级。我们调整了模型参数（降低核心节点容量，制造瓶颈），模拟了主干道故障和库存受限的极端场景。正是在这一版本中，S4码头和反向回流终于被“激活”，证明了它们作为系统安全冗余的关键价值。这一过程让我们深刻理解了：鲁棒性往往是以牺牲经济性为代价的，而优化模型正是权衡二者的工具。

APPENDIX B 问题描述详情

A. 原始问题描述 (Original Problem)

原油运输是石化工业生产的重要环节。初步规划问题旨在最小化运输成本。网络参数如表 IV 所示。

TABLE IV
原始问题管道网络参数

管道	距离(km)	管道	距离(km)
S1-S2	300	S2-S3	250
S3-E1	200	S4-S5	350
S5-S2	150	S2-E4	400
S2-S6	250	S2-E2	450
S6-E3	200		

各企业的原油需求（不分时段）及各储运站的初始库存如原始作业数据所示，此处不再赘述详细数值矩阵。

B. 拓展问题描述 (Extended Problem)

为了贴近工程实际，我们在原始问题基础上进行了全面细化，构建了一个更为复杂的动态调度环境。

- 1) 时变需求模式：各企业不再是恒定需求，而是具有特定的生产节奏，如表 V 所示。

TABLE V
企业需求的时间分布特性

企业	生产时段特征
E1	平稳型：全天24小时均匀生产（每小时4.17%）
E2	日间型：集中在9-11时（10%）和15-18时（8%），夜间停产
E3	夜间型：集中在1-6时和22-24时（约11%），白天停产
E4	双峰型：9-11时与19-21时出现双高峰（12%）

- 2) 拓展版总需求表：我们将企业的原油需求进行了更新，以适应新的场景设定（单位：10⁴吨）：

TABLE VI
各企业分油品总需求量

企业	O1	O2	O3	O4	O5	O6	合计
E1	6	8	0	0	6	0	20
E2	5	0	8	10	0	0	23
E3	0	0	0	8	4	5	17
E4	0	0	4	8	0	4	16

3) 关键约束集：

- 1) 互斥约束：针对 S2 枢纽的物理限制。
 - 组A：S2→S3 与 S2→E2 不能同时进行。
 - 组B：S2→S6 与 S2→E4 不能同时进行。
- 2) 循环稳态： $I_{i,k,24} = I_{i,k,0}$ ，保证可持续生产。
- 3) 非对称供油：S4码头无法处理 O1/O2 原油。
- 4) 压力测试参数（仅在第三阶段应用）：
 - S1→S2 管道容量由 6.0 降至 2.0（模拟故障）。
 - S2库存上限由 40.0 降至 1.5（模拟库容受限）。

REFERENCES

- [1] 《运筹学》教材编写组. 运筹学（第五版）[M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.
- [2] R. W. Floyd. Algorithm 97: Shortest path[J]. Communications of the ACM, 1962, 5(6): 345.
- [3] S. Warshall. A theorem on boolean matrices[J]. Journal of the ACM, 1962, 9(1): 11-12.
- [4] M. Cafaro, J. Cerdá. A Mixed-Integer Optimization Strategy for Oil Supply in Distribution Complexes[J]. Journal of Optimization Theory and Applications, 2003, 117(2): 273-294.
- [5] V. G. Cafaro, D. C. Cafaro, J. Cerdá. An MILP approach for detailed scheduling of oil depots along a multi-product pipeline[J]. Petroleum Science, 2017, 14(1): 179-193.
- [6] G. L. Nemhauser, L. A. Wolsey. Integer and Combinatorial Optimization[M]. New York: Wiley-Interscience, 1988.
- [7] MathWorks. Optimization Toolbox User's Guide[M]. Natick, MA: The MathWorks Inc., 2023.
- [8] F. S. Hillier, G. J. Lieberman. Introduction to Operations Research (11th Edition)[M]. New York: McGraw-Hill Education, 2021.