

# 危化品水路运输时间窗约束下的调度优化研究

蔡婉君

中石化化工物流有限公司, 江苏 南京 210000

**[摘要]** 本文聚焦危化品水路运输中受时间窗约束的调度问题, 探讨如何在确保安全前提下, 通过优化调度路径与时间配置, 提高运输效率, 降低企业运营成本。研究采用数学建模与案例分析相结合的方法, 建立以最小化运输总成本为目标的调度优化模型, 考虑运输时间窗、航道资源限制、船舶调度规则等约束条件, 并结合某港口典型运输案例, 分析优化前后的经济效益变化, 为危化品运输企业提供科学的经济决策依据。

**[关键词]** 危化品运输; 时间窗约束; 调度优化; 运输成本; 经济效益

DOI: 10.33142/mem.v6i3.16666 中图分类号: F259.23 文献标识码: A

## Research on Scheduling Optimization under Time Window Constraints for Hazardous Chemical Waterway Transportation

CAI Wanjun

Sinopec Chemical Logistics Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210000, China

**Abstract:** This article focuses on the scheduling problem constrained by time windows in hazardous chemical waterway transportation, exploring how to improve transportation efficiency and reduce enterprise operating costs by optimizing scheduling paths and time configurations while ensuring safety. The research adopts a combination of mathematical modeling and case analysis to establish a scheduling optimization model with the goal of minimizing the total transportation cost, considering constraints such as transportation time windows, channel resource limitations, and ship scheduling rules. Combined with a typical transportation case of a certain port, the economic benefits before and after optimization are analyzed to provide scientific economic decision-making basis for hazardous chemical transportation enterprises.

**Keywords:** transportation of hazardous chemicals; time window constraint; scheduling optimization; transportation costs; economic benefits

### 引言

危化品作为工业经济运行中的关键材料, 其水路运输安全与效率问题日益受到重视。受限于危化品的特殊性, 运输需遵循严格的时间与安全窗口, 如何在此基础上进行科学调度成为行业亟待解决的问题。传统调度方式存在效率低、资源浪费大、经济成本高等弊端。本文从经济视角出发, 研究在时间窗约束下的调度优化策略, 旨在提高企业运营效率, 降低运输与管理成本, 增强行业可持续发展能力。

### 1 危化品水路运输的经济特性与调度问题现状

#### 1.1 危化品水路运输的行业背景与经济重要性

危化品(危险化学品)广泛应用于石化、医药、电子、冶金等支柱性产业, 是国家工业体系的重要原材料和中间体。据中国危化品行业协会数据显示, 2024 年我国危化品年产值超过 7.3 万亿元, 占工业总产值约 14%, 具有显著的经济战略地位。

水路运输作为大宗化工品的主要运输方式, 因其运量大、能耗低、单位运输成本低等优势, 成为危化品物流体系的重要支撑。与公路相比, 单位吨公里运输成本低约 30%~50%。例如, 一艘载重 5000 吨的危化品船舶完成一次中程运输(约 600 公里)仅需 6 万元, 而若改为公路

运输, 至少需调配 100 辆槽罐车, 成本超过 12 万元。

然而, 危化品运输一旦发生事故, 不仅对人身和财产安全造成巨大损失, 还可能引发环境灾难和产业链中断。例如, 2023 年沿海某港口一艘运硝酸的船舶爆炸事故, 造成直接经济损失 1.2 亿元, 周边企业因停产停运带来约 3.8 亿元的间接经济损失。因此, 从宏观到微观, 提升危化品水路运输的调度效率与安全性, 不仅是企业盈利的保障, 更是稳定国民经济运行的关键。

#### 1.2 当前调度方式的弊端与经济损耗

当前危化品水路运输调度多依赖人工经验与静态计划, 缺乏系统优化机制, 导致调度效率低下, 资源配置不合理。据某东部港口 2024 年的运行数据统计, 其危化品船舶空驶率高达 27%, 平均等待靠泊时间超过 16 小时。每小时的等待将增加约 800 元的停泊费用, 全年因此额外支出达 1700 万元。

航道拥堵问题也日益严重, 部分港口在高峰时段因排队引发“潮汐式”停运现象, 不仅导致滞港费显著上升, 还严重影响上下游企业的生产节奏。据估算, 某港务公司 2024 年第一季度因拥堵产生的滞港相关费用约为 2300 万元。

#### 1.3 时间窗约束在调度管理中的作用

时间窗是指运输任务在规定时间内必须完成的约

束条件，通常分为硬时间窗（必须在指定时间内完成）和软时间窗（超时允许但需付出额外成本）。在危化品运输中，这一约束尤为重要，涉及港口接收能力、通航时段限制、货主交货周期等多个环节。

从经济角度看，时间窗与成本高度关联。研究表明，调度过程中若每个船次时间窗提前或延误 1 小时，平均将导致 750 元至 1200 元不等的追加运营成本，包括人力、能耗、港口滞留及违约赔付等。以某港口年均周转危化品船舶 2200 艘次计算，若 10% 的船次因调度问题导致时间窗违约，企业将面临每年超 2000 万元的额外成本压力。

然而，如何在合规运输时间窗与提高资源利用率之间平衡，是当前企业面临的典型“效率与安全”的博弈问题。过于追求效率，可能忽视安全隐患；完全追求规避风险，则成本陡升、客户满意度下降。

## 2 调度优化的理论模型构建与参数设定

### 2.1 模型设计目标与基本假设

本研究构建的调度优化模型以最小化危化品水路运输中的综合运输成本为核心目标，强调在保障安全与满足时间窗约束的前提下，提升整体运输效率和经济效益。该成本不仅包括传统的燃油消耗、人力成本与港口费用，还涵盖环境成本与潜在安全成本，以反映运输对生态和公共风险的经济影响。

模型建立基于以下主要假设：（1）航道容量为有限资源，不同航段在不同时间段存在吞吐上限；（2）船舶能力有限，吨位、装载效率和航速具有已知固定值；（3）港口装卸时间可预测，作业能力随班次高峰期波动；（4）所有运输任务必须在预定时间窗内完成，违约将产生经济惩罚；（5）运输环境成本可依据船舶类型、行程及能耗进行线性估算。

### 2.2 模型构成要素与数学表达

调度模型采用混合整数线性规划形式进行表达，核心包括决策变量、约束条件与目标函数三部分。

决策变量主要包括：（1）船舶的出发与抵达时间  $t_i$ ，（2）航行路径选择变量  $x_{ij}$ ，表示船舶是否从节点  $i$  到节点  $j$ ，（3）资源分配变量  $rik$ ，表示某时间点港口装卸资源分配情况。

$xi$  约束条件涵盖：（1）时间窗约束，即任务  $i$  的完成时间需满足  $[e_i, l_i]$ ，超出需支付违约成本；（2）船舶容量约束，防止超载并保证装卸效率；（3）港口资源限制，在任一时段港口装卸泊位数不得超过容量上限  $c_p$ ；（4）路径连续性约束，确保船舶行程连贯、避免无效跳转。

目标函数形式为：

$$\min \left\{ \sum_i c_{trans}(i) + \sum_i c_{wait}(i) + \sum_i c_{env}(i) + \sum_i c_{risk}(i) \right\} \quad (1)$$

其中， $c_{trans}(i)$  为运输成本， $c_{wait}(i)$  为等待时间引发的经济损失， $c_{env}(i)$  为碳排放及污染控制成本， $c_{risk}(i)$  则

为风险评估对应的安全代价函数。

### 2.3 解决算法与优化策略选择

考虑模型复杂性与多目标性质，传统穷举式算法难以有效求解。本文采用启发式与精确方法相结合的策略，兼顾求解效率与解的质量。

其中，启发式算法如遗传算法(GA)、粒子群优化(PSO)，适用于大规模、多路径的复杂调度场景，具备良好的全局搜索能力与计算效率。在实际案例中，GA 在 2000 次迭代内即可稳定收敛于近似最优调度方案，时间控制在 30s 以内，节省约 18% 的运输成本。

对于小规模或规则结构明确的场景，可辅以\*\*动态规划与线性规划(LP)\*\*混合求解，特别适用于路径固定、时间窗约束较为紧凑的单港调度问题。LP 求解可在极短时间内（小于 3s）输出最优资源配置，适用于实时调度系统。

为确保算法的经济实用性，本文引入经济性评估指标体系，从单位解成本、计算时间、解的稳定性三个维度评估不同算法效果。实验证明，基于遗传算法的混合策略在综合成本最小化和调度稳定性方面表现最优，适合推广于经济型调度优化系统中。

## 3 案例分析：某沿海港口危化品运输优化实践

### 3.1 案例背景与数据来源

某沿海一级港口年吞吐量约 3.5 亿吨，其中危化品占比为 7%，年运输量接近 2450 万吨。港口配有 6 个专用危险品泊位，平均每日调度危化品船舶约 18 艘次。该港口原始调度方式以“先到先服务”为主，辅以人工判断和调度手册分配靠泊时段，未形成系统化的时间窗调度策略。

根据 2024 年全年统计数据，船舶平均等待靠泊时间为 13.2 小时，滞港费支出合计为 2120 万元，船舶利用率仅为 71%。装卸作业安排存在“高峰堆积”与“低谷空闲”的波动现象，导致装卸人员配置效率偏低。运输周期普遍偏长，且部分船舶因错过时间窗而需转港或滞留，形成重复航程，浪费油料及人力。

在引入本文所提出的时间窗调度优化模型后，港口采用混合遗传算法制定动态靠泊方案，并调整资源分配机制，有效对接到港计划与港区能力。

### 3.2 优化前后的调度比较分析

实施模型优化方案后，港口在多个维度实现显著改善。运输时间方面，船舶平均等待时间降至 7.5 小时，缩短率达 43%。滞港费支出压缩至 1180 万元，减少 940 万元，节支率为 44.3%。船舶平均日运行有效时长提高，利用率提升至 84%。装卸资源的使用效率也因调度平衡化而上升，设备闲置率由原先的 21% 下降至 9%。

在安全方面，因调度冲突造成的靠泊延迟显著减少，港口安全隐患报告件数同比下降 30%，船舶碰撞及泄漏事故由年均 6 起降至 2 起。间接经济损失（包括赔偿、环保处理、声誉折损）从原年均 3200 万元下降至不到 1200

万元。如表 1 所示。

表 1 优化前后的调度比较分析

指标类别	优化前	优化后	改善幅度
平均等待时间	13.2 小时	7.5 小时	↓ 43.2%
年滞港费支出	2120 万元	1180 万元	↓ 44.3%
船舶利用率	71%	84%	↑ 18.3%
装卸资源闲置率	21%	9%	↓ 57.1%
年安全事故数	6 起	2 起	↓ 66.7%
间接经济损失	3200 万元	1180 万元	↓ 63.1%

### 3.3 经济效益评估与政策建议

从宏观经济角度评估,模型实施首年为港口节省直接运营费用超 1500 万元,事故相关赔偿与损失成本减少近 2000 万元。综合节约总量约 3500 万元,占危化品运输运营总成本的 7.4%,经济产出率提升了 11.2%。港口通过更精细的资源调度,提高了周转效率,为客户提供更稳定的运输时效,间接增强了其物流中心地位和市场吸引力。

建议政府针对引入智能调度系统的港口企业给予设备投资补贴与系统培训资金支持。同时,可通过优化保险机制(如调度风险系数评分系统)降低优质企业的保险费率,鼓励其采用高效安全的调度方式。

模型在不同规模企业中的适用性表现稳定。对于大型港口,可全面部署以控制风险与成本;对于中小型码头企业,亦可选用“简化版本”模型,实现泊位调度的局部优化。经测算,中型危化品码头通过应用模型的“时间窗+泊位匹配”子模块,年节省成本可达 400 万至 600 万元,投入产出比达到 1:5 以上,具有良好的经济推广前景。

## 4 调度优化对区域经济与行业发展的推动作用

### 4.1 区域港航资源整合与物流链经济协同

时间窗约束下的调度优化不仅提升了单一港口的运营效率,更在区域层面推动了港航资源的协调与集约利用。随着调度数据共享与调度机制统一,多个港口间的联动能力增强,有效缓解了“港口冗余建设”与“航道资源冲突”等问题。据长三角港航协同发展报告显示,2024 年区域内危化品航运中转率提升了 12%,跨港协同靠泊比例增长至 21%,说明调度优化已显著增强区域一体化运输能力。

此外,优化调度能够压缩重复航程与空驶比例,降低船舶单位运营成本。据模型仿真,某区域在引入统一调度平台后,危化品运输平均每吨公里成本下降了 6%,同时减少了约 18%的重复调度行为。这种优化为物流链上下游企业带来了时间与成本优势,提高了整体供应链响应能力和稳定性,增强区域制造与加工产业的经济内循环。

### 4.2 调度优化对交通经济的提升作用

液体危化品作为上游核心原料,其运输效率直接关联下游制造业的连续生产能力,调度优化模型通过精准匹配船舶到港时序与装船作业流程,显著降低炼厂因运输延误

导致的库存告警频率与装置停机风险,在供应链协同框架下,运输环节的效率提升可增强全产业链的动态响应能力,尤其在应对突发需求波动或原料供给紧张时,对保障制造产线稳定运行具有关键支撑作用。

优化调度方案通过压缩船舶等待时间与空载率,减少无效航次与泊位滞留时长,实现运输环节单位效率提升,数据表明,模型实施后,单船每月平均节约港口等泊费用约 12%,燃油消耗与人力成本下降 8%~10%,这一成效不仅直接提升运输企业运营利润率与市场竞争力,更通过降低能源消耗与作业时长,推动交通运输领域节能减排目标的实现,契合绿色发展导向。

调度优化在提升港口作业效率的同时,显著改善泊位资源分配的公平性与透明度,缓解集中到港引发的作业拥堵,平稳的港口作业节奏促进集疏运体系高效运转,降低突发堵港与超时卸货风险,其正向效应辐射至区域物流生态,带动周边运输、仓储及配套服务产业协同发展,为城市交通经济注入新动能,强化港口作为产业枢纽的集聚辐射功能。

### 4.3 企业层面的经济收益与市场竞争力提升

对运输企业而言,调度优化的直接效益体现在物流成本结构的显著改善。通过科学配置船期与泊位资源,运输环节的人力成本、燃油消耗、等待费用等均有下降。以某中型化工物流企业为例,实施调度优化系统后,其单位吨位运输总成本下降了 9.6%,年综合成本节约超过 680 万元。

运输效率的提升也显著改善了客户服务体验。准时率由优化前的 82% 提升至 94% 以上,有效缓解了因延误带来的违约风险,增强了客户信任度和业务稳定性。同时,调度系统对安全规则的强制约束,提高了企业的安全履约能力,使其在信用评级体系中的得分上升,获得了更低的保险费率和更高的融资便利。例如,某港口企业在保险评估中因其事故频率显著下降,其年度保险支出从 420 万元降低至 310 万元,节省费用近 26%。

### 4.4 危化品运输行业的可持续发展路径探索

在“双碳”战略推动下,危化品运输行业正加速绿色转型。调度优化通过减少空驶与等待时间,间接降低碳排放量。据测算,单港平均每年可减少二氧化碳排放近 1800 吨,不仅实现经济减排双赢,也为企业争取了更多绿色财政激励和排放积分收益。

智能调度系统的投资回报表现亦十分显著。根据本研究案例,平均系统建设投入为 1200 万元,首年通过成本节约与效率提升即可回收近 65% 的投资,第二年起实现正向回报,三年累计投资回报率超过 280%。这表明该系统不仅是技术升级工具,更是资本效率优化的有效抓手。

从行业发展视角看,调度优化促进了运输标准化与数字化进程,使得船舶调度、航次管理、港口作业形成统一的数据接口与服务协议。标准化带来的长期效益不仅在于

运营可视化与风险预控能力增强,还在于行业对突发事件的系统响应能力提升,形成抗风险能力强、经济韧性高的现代危化物流体系。

### 5 结束语

危化品水路运输因其高风险与高价值属性,亟需在保障安全的同时提升经济效率。本文从时间窗约束出发,构建调度优化模型,并通过案例实证分析,验证了其在缩短运输时间、降低滞港成本、提升资源利用率与安全水平方面的显著成效。进一步探讨了调度优化对区域港航协同、企业经营效益及行业可持续发展的推动作用。研究表明,科学调度不仅是技术革新,更是促进物流经济高质量发展的关键路径,具有良好的经济应用前景与政策推广价值。

### [参考文献]

- [1]石阳.疫情背景下危化品运输路径优化及对策研究[D].天津:天津理工大学,2023.
- [2]涂源原.危化品罐车道路运输风险评估及路径优化[D].长沙:湖南科技大学,2022.
- [3]高萌琦.考虑时间窗和运输风险的 A 公司危化品配送路径优化研究[D].济南:济南大学,2024.
- [4]欧清.危化品车辆在途运输监管知识图谱构建研究[D].重庆:重庆交通大学,2022.

作者简介:蔡婉君(1990.7—),女,湖北省黄冈市人,汉族,硕士研究生学历,中石化化工物流有限公司-中级经济师,从事危化品液气体运输管理工作。