

# 电子商务场景下带时间窗的危险品多容量车型运输路径优化研究

廖龙铠

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2026年3月28日; 录用日期: 2026年4月14日; 发布日期: 2026年6月24日

## 摘要

在电子商务持续渗透背景下, 危险品运输呈现订单驱动、小批量、多批次和时效要求增强等特征, 传统运输组织方式已难以兼顾安全、效率与履约需求。针对这一问题, 本文构建了考虑时间窗约束、多容量车型配置及多种类危险品运输的路径优化模型, 以运输阻抗、运输风险和时窗惩罚成本最小化为目标, 并设计了“Yen's K-shortest paths Algorithm备选路径生成 - 改进遗传算法分配”的两阶段求解方法。算例结果表明, 时间窗宽度与车型结构对调度效果具有显著影响; 适度放宽时间窗并采用多容量车型协同配置, 能够有效降低综合成本、提高车辆利用率, 增强运输方案的安全性、经济性与时效协调性。研究结果可为危险品运输企业的运力配置与路径决策提供参考。

## 关键词

电子商务, 时间窗, 多车型, 危险品, 路径优化

# Optimization of Hazardous Materials Transportation Routes with Time Windows and Heterogeneous Vehicle Capacities in an E-Commerce Context

Longkai Liao

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: March 28, 2026; accepted: April 14, 2026; published: June 24, 2026

## Abstract

In the context of the continued penetration of e-commerce, hazardous materials transportation has shown characteristics such as order-driven demand, small-batch shipments, high delivery frequency, and increasingly stringent timeliness requirements. Traditional transportation organization methods can no longer effectively balance safety, efficiency, and service fulfillment. To address this issue, this study develops a vehicle routing optimization model that considers time window constraints, heterogeneous vehicle capacity configurations, and the transportation of multiple categories of hazardous materials. The objective is to minimize transportation impedance, transportation risk, and time window penalty costs. A two-stage solution approach is proposed, combining alternative path generation based on Yen's K-shortest paths algorithm with allocation optimization using an improved genetic algorithm. The computational results indicate that time window width and vehicle fleet structure have significant effects on scheduling performance. Appropriately relaxing time windows and adopting coordinated configurations of vehicles with multiple capacity levels can effectively reduce total cost, improve vehicle utilization, and enhance the safety, economic efficiency, and timeliness coordination of transportation plans. The findings can provide practical support for fleet configuration and routing decisions in hazardous materials transportation enterprises.

## Keywords

E-Commerce, Time Window, Multi-Vehicle, Hazardous Goods, Route Optimization

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着电子商务、工业互联网以及平台化采购模式的快速发展，危险品流通组织方式正在发生深刻变化。尤其在化工原料、涂料、试剂及部分工业辅料等领域，B2B 电子商务平台不断推动交易撮合、订单生成与履约组织由线下转向线上。与传统计划性运输相比，电子商务环境下的危险品运输不仅要满足安全监管和运输合规要求，还需要兼顾订单响应速度、客户预约收货时间以及平台履约考核标准，这使得运输组织面临更为复杂的决策压力。与此同时，危险品本身具有易燃、易爆、有毒及腐蚀等特性，一旦在运输过程中发生事故，往往会造成严重的人员伤亡、环境污染及财产损失。因此，如何在电子商务订单驱动背景下，在满足时间窗与政策通行限制的前提下实现路径与车型协同优化，已成为危险品运输管理中的重要问题。

近年来，国内外学者围绕危险品运输路径优化开展了大量研究。在路径与成本优化方面，李立等[1]构建时空矩阵模拟事故率及后果并结合成本建立路径模型，Munaziza 等[2]与 Song 等[3]分别从运输路线与多式联运服务模式角度实现成本最小化。在运输风险量化方面，宋伟程等[4]建立点危险源风险评价模型，魏福祿等[5]引入风险价值理论构建路径风险价值模型，康蓉桂等[6]将驾驶员风险因素纳入评价体系；Revelle [7]和 Batta 等[8]提出人口覆盖风险模型，Liu 等[9]构建考虑人口密度变化的时变风险函数，Ke [10]和 Khan 等[11]从鲁棒与情境分析角度对风险模型进行拓展。在时间窗路径优化方面，张圣忠等[12]构建考虑服务时间窗的多目标模型并采用 NSGA-II 求解，孙岩等[13]将运输时间不确定性纳入建模，马天明

等[14]设计软时间窗惩罚函数, Moghaddam [15]提出随机多目标危险品车辆路径模型。在多车型路径优化方面, Teng 等[16]建立多类型车辆路径模型, 张海朋等[17]研究多车型配送问题, 滕玥等[18]将车型匹配策略引入危险品运输路径模型。

国内外学者在危险品运输路径优化方面已经取得了一定的研究成果, 涵盖了风险、成本、时效以及多车型的路径优化等方面。然而, 其一是现有研究大多聚焦于单一目标的优化或是某一特定因素的研究, 未能将风险、成本、时效、多车型等多重因素进行有效的综合考量。其二, 随着电子商务发展, 危化品运输任务越来越多地受到线上订单节奏、客户预约收货时间和履约考核要求的影响, 传统粗放的运输组织方式已难以适应实际运营需求。

基于此, 本文提出了一种新的协同决策方法, 旨在结合复杂的危险品运输路网、多类型车辆和多批次运输需求, 综合优化运输路径, 实现更为全面的运输管理与优化, 从而为危险品电商物流与相关企业运输组织优化提供理论支持与实践参考。通过这一方法, 既能有效控制运输成本, 又能确保安全性与时效性, 为危险品运输的优化提供理论支持与实践指导。

## 2. 模型构建

### 2.1. 问题描述

本文以危险品运输路网为基础, 考虑该路网中存在多个 OD 对节点, 各个 OD 对之间存在不同需求。考虑多种车型, 每种车型的容量上限不同。在道路维度, 每一个路段存在运输时间窗、运输阻抗和运输风险, 同时存在最大的运输上限。在此基础上, 进行运输决策, 即每个 OD 需求由何种车型进行运输, 运输量为多少, 并最小化运输阻抗、运输风险和运输时间窗违反惩罚。

### 2.2. 条件假设

本文的假设条件如下:

- (1) 存在多个运输需求, 每个运输需求的起点和终点不同、所运输的危化品种类及货物量也不同;
- (2) 不同类型的车辆的容量不同, 同一类型的车辆容量相同;
- (3) 一个运输需求可由一辆或多辆车辆来完成;
- (4) 在运输过程中, 一辆车只运输一种危险品, 不同类型的危险品不混装;
- (5) 每条路段具有运输时间窗, 时间窗描述的是车辆行驶该路段的“理想到达区间”。到达时间在区间之外将产生时间惩罚成本;
- (6) 不考虑车辆在节点处的装卸、等待、转运等时间;
- (7) 路段存在最大运输上限, 即单位时间内或某次行程中允许通过的最大货量。

### 2.3. 数学模型

模型以“最小化总综合成本”为核心, 包含运输阻抗、运输风险、时间窗违反惩罚三个可量化的子目标, 总目标为三者在全路段的累加和最小化。运输阻抗是指在运输过程中, 受到多种因素影响而导致的运输效率下降或成本增加的度量, 运输阻抗的构成包括出行费用部分和出行时间部分。如式(1)所示:

$$F_{ij} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \left( \lambda_1 m_0 c_{ij} d_{ij} + \lambda_2 \delta \frac{d_{ij}}{V_{0ij}} \left( 1 + \alpha_0 \left[ 4 \left( \frac{V_{ij}}{V_{0ij}} - \frac{V_{ij}^2}{V_{0ij}^2} \right) \right]^{\beta_0} \right) \right) \quad (1)$$

式中,  $V_{ij}$  是实际运输时的平均速度,  $V_{0ij}$  为路段不堵车时的平均速度,  $\alpha_0$  为量纲为一的参数, 取 0.15,  $\beta_0$

为量纲为一的参数，取 4.0。 $\lambda_1$  行费用的权重，取 0.015， $\lambda_2$  行时间的权重，取 0.0089。

车辆在各路段运输不同类型的危险品产生的运输风险不同，路段运输风险与危险品种类危险程度  $\omega$ 、路段  $(i,j)$  的风险加权  $\mu_{ij}$ 、路段  $(i,j)$  的平均每小时交通事故率  $\zeta_{ij}$ 、行人对运输时间的影响系数  $\delta$ 、驾驶员精神状态对运输风险的影响  $\varepsilon$  路两侧的人口密度  $\rho_{ij}$  路段  $(i,j)$  的长度  $d_{ij}$  有关。总运输风险为所有路段的运输风险之和，如式(2)所示：

$$R_{ij} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k (\omega \mu_{ij} \zeta_{ij} \delta \varepsilon \rho_{ij} d_{ij}) \tag{2}$$

该路网中的每段路均存在一个运输时间窗  $[s_{ij}, e_{ij}]$ ，该时间窗定义了车辆在该路段行驶的最佳时间范围。若车辆早于或晚于设定的时间窗行驶，则会产生时间惩罚成本，如式(3)所示：

$$P_{ij} = \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^k \left( \left( \varphi_0 \max \{s_{ij} - t_{ij}^0, 0\} \right) + \left( \varphi_1 \max \{t_{ij}^1 - e_{ij}, 0\} \right) \right) \tag{3}$$

式中， $\varphi_0$  为早于时间窗需要增加的惩罚系数， $\varphi_1$  为晚于时间窗需要增加的惩罚系数。

最小化总综合成本如式(4)所示：

$$\min \sum_{(i,j) \in A} (F_{ij} + R_{ij} + P_{ij}) \tag{4}$$

约束条件为：

$$\sum_{k \in K} z_{od}^k \geq q_{od}, \forall (o,d) \in OD \tag{5}$$

$$\sum_{j \in N} x_{ij}^k - \sum_{j \in N} x_{ji}^k = \begin{cases} y_{od}^k, i = o \\ -y_{od}^k, i = d \\ 0, i \in N / \{o, d\} \end{cases}, \forall k \in K, (o,d) \in OD, i \in N \tag{6}$$

$$z_{od}^k \leq Q^k y_{od}^k, \forall k \in K, (o,d) \in OD \tag{7}$$

$$y_{od}^k \leq \theta^k, \forall k \in K, (o,d) \in OD \tag{8}$$

$$\sum_{k \in K} x_{ij}^k z_{od}^k \leq M_{ij}, \forall (i,j) \in A \tag{9}$$

$$\sum_{(o,d) \in OD} y_{od}^k \leq 1, \forall k \in K \tag{10}$$

式(5)为 OD 运输需求约束，表述路网中任意起点至终点的危险品运输需求需被足额覆盖，所有承担该需求的车辆运输量之和不得低于总需求量。式(6)为节点流平衡约束。式(7)为车辆最大容量限制约束，车辆若承担某 OD 需求，其运输量不得超过其核定最大容量。式(8)为危险品可用车型约束。式(9)为每条道路最大的危险品通行量约束。式(10)为车辆一次装载一种类型的危险品约束。

### 2.4. 符号表

该模型所涉及的集合、参数与决策变量如表 1。

## 3. 算法设计

本文设计了两阶段算法来对该问题进行求解，其中一阶段生成  $k$  条较优的备选路径以供选择；二阶段对需求进行分配，生成具体的配送计划。

**Table 1.** Symbol table  
**表 1.** 符号表

集合	
$N = \{0, 1, 2, \dots, n\}$	节点集合
$A = \{(i, j)   i, j \in N, i \neq j\}$	路段集合
$K = \{0, 1, 2, 3, \dots, k\}$	车辆集合
$R = \{0, 1, 2, 3, \dots, r\}$	车型集合
$OD = \{(o, d)   o, d \in N, o \neq d\}$	运输需求集合
参数	
$\lambda_1$	出行费用的权重, 一般取 0.015
$\lambda_2$	出行时间的权重, 一般取 0.0089
$\delta$	为行人对运输时间的影响系数, 一般取 1
$m_0$	运输车辆核定载重
$c_{ij}$	路段( $i, j$ )的运输费用
$d_{ij}$	路段( $i, j$ )的长度
$V_{0ij}$	路段( $i, j$ )上不堵车时的平均速度
$V_{ij}$	在路段( $i, j$ )上实际运输时的平均速度
$\alpha_0$	量纲为一的参数, 取 0.15
$\beta_0$	量纲为一的参数, 取 4.0
$\varphi_0$	早于时间窗需要增加的惩罚系数
$\varphi_1$	晚于时间窗需要增加的惩罚系数
$s_{ij}$	路段( $i, j$ )的时间窗开始时间
$e_{ij}$	路段( $i, j$ )的时间窗结束时间
$\omega$	运输物品危险程度
$\mu_{ij}$	路段( $i, j$ )的风险加权
$\zeta_{ij}$	路段( $i, j$ )的平均每小时交通事故率
$E$	表示驾驶员精神状态对运输风险的影响, 一般取 1
$\rho_{ij}$	道路两侧的人口密度
$q_{od}$	需求( $o, d$ )的货物运输总量
$Q_k^r$	车型为 $r$ 的车辆 $k$ 的最大容量
$\theta_{od}^k$	1, 若危险品需求( $o, d$ )可被车辆 $k$ 运输; 否则为 0
$M_{ij}$	路段( $i, j$ )上的最大危险品通行量

续表

决策变量	
$x_{ij}^k$	车辆 $k$ 访问路段 $(i, j)$
$y_{od}^k$	1, 车辆 $k$ 进行需求 $(o, d)$ 的运输; 否则为 0
$z_{od}^k$	车辆 $k$ 运输需求 $(o, d)$ 的货量

### 3.1. Yen's K-Shortest Paths Algorithm 生成备选路径

第一阶段使用 Yen's K-shortest paths Algorithm 生成成本最低的  $k$  条路径。其具体步骤如下:

步骤 1: 使用 Dijkstra 算法找到从起点  $O$  到终点  $D$  的第一条目标函数值最小的路径  $p_0$ 。将  $p_0$  添加到结果列表 A 中。

步骤 2: 获取上一步找到的第  $k - 1$  条路径  $P_{k-1}$ 。设  $P_{k-1}$  的节点序列为  $[O, v_1, v_2, \dots, v_i, v_{i+1}, \dots, D]$ , 这条路径上选择一个偏离点  $v_i$ , 从  $O$  到  $v_i$  的这部分子路径称为 Root。同时使用 Dijkstra 算法寻找从  $v_i$  到  $D$  的目标函数值最小的 Spur 路径。并将 Root 与 Spur 进行拼接, 从而生成候选路径。

### 3.2. 编码及解码

选取改进遗传算法作为两阶段算法的第二阶段, 决策每辆车选择的路径。本文选取一层整数编码的方式进行编码, 如图 1 所示。编码的长度为  $n$  ( $n$  为车辆总数), 每个基因位上的值随机赋值为  $[0, k]$  之间的整数, 其中,  $k$  为 Yen's K-shortest paths Algorithm 得到的备选路径数量。每个基因位代表一辆车, 每个基因位上的数字代表对应车辆选择的路径, 其中 0 表示虚拟路径, 代表对应的车辆不启用, 剩余  $[1, k]$  之间的整数则代表对应车辆选择的路径编号。编码设计见图 1。

车辆序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
路径选择	0	1	3	2	1	4	0	0	3	2

Figure 1. Design of code  
图 1. 编码设计

由上述编码描述可知, 车辆的路径分配可显性得到; 对本文的决策来说, 还需要为每一辆车分配具体的货量。本文算法解码过程按从左到右进行。假设需求 1 可选择路径 1 和 2 进行运输; 需求 2 可选择路径 3 和 4 进行运输。那么从左到右, 首先将需求 1 分配给车辆 2, 若需求 1 超出车辆 2 的最大容量, 则将剩余部分需求分配给车辆 4, 以此类推, 可得到所有车辆的运输量分配。

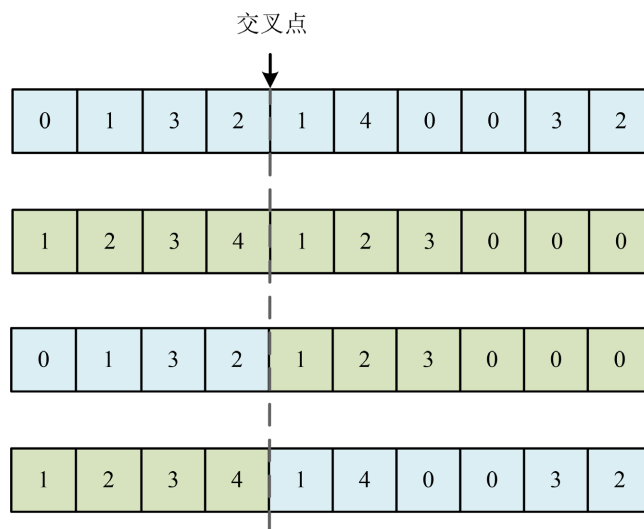
### 3.3. 遗传算子

#### ① 交叉算子

本文采用单点交叉的方式进行交叉, 该交叉方式选择两个染色体, 随机选择一个基因位作为交叉点, 交换两个染色体在交叉点两侧的基因。交叉方式见图 2:

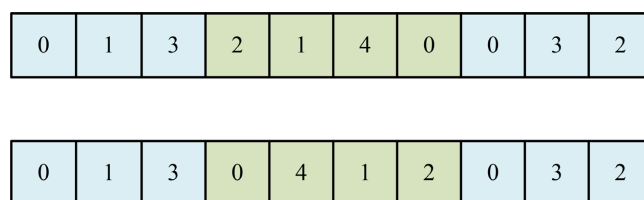
#### ② 变异算子

本文选取 2-opt 逆转变异的方式对编码进行变异, 2-opt 逆转变异通过局部交换来改进当前解, 其基本思想是选择染色体中的两个基因位, 交换它们之间的顺序。变异算子见图 3:



**Figure 2.** Single-point crossover

**图 2.** 单点交叉



**Figure 3.** 2-opt mutation

**图 3.** 2-opt 变异

### ③ 选择算子

本文采用精英保留策略作为选择操作。具体实施方式为：在每一代种群选择时，从子代种群中挑选出 80% 的个体进行交叉和变异，剩余的 20% 父代个体则被直接保留，并且不参与交叉或变异。随后，将从子代中选出的 80% 的个体与保留的 20% 父代个体进行整合，组成一个新的种群。

### 3.4. 领域搜索策略

本文设计了双点交叉和单点变异 2 种搜索算子作为邻域搜索结构。

#### ① 邻域结构一

第一种邻域结构参考双点交叉，通过两个交叉点，交换两条染色体中的基因结构，见图 4：

#### ② 邻域结构二

邻域结构二参考多点变异的方式，随机选择多个变异的基因位，并改变其基因值，从而生成新的染色体，见图 5：

通过按顺序遍历这些算子，逐一对每个个体进行邻域搜索，进而逐步提升解的质量。具体步骤如下：

步骤 1：选取两种算子作为邻域搜索算子，目的是增加种群的多样性，并增强全局搜索能力；

步骤 2：对种群中的每个个体，依次应用邻域搜索算子；

步骤 3：按照顺序选择邻域搜索算子，首先使用双点交叉算子，然后依次应用多点变异算子。在此过程中，每次都当前个体作为起点，逐步利用每个算子进行邻域搜索。

步骤 4：每次应用邻域搜索算子后，评估新生成个体的适应度。如果新个体优于当前个体，则保留该

更优解，并继续用当前算子进行更深层次的邻域搜索；若未找到更优个体，则放弃当前邻域搜索，切换到下一个邻域算子继续探索。

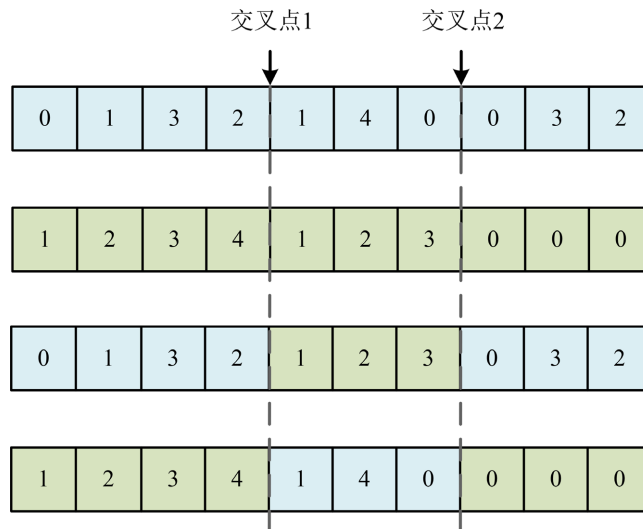


Figure 4. Neighborhood structure one  
图 4. 邻域结构一

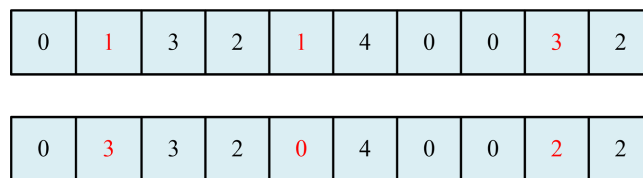


Figure 5. Neighborhood structure two  
图 5. 邻域结构二

## 4. 实验分析

### 4.1. 算法对比分析

为了验证本文提出的改进遗传算法的有效性，本文运用遗传算法、改进遗传算法以及 VNS 算法分别对节点 12、节点 24、节点 48、节点 96 的路网模型算例分别进行实验，实验的结果如表 2。

Table 2. Algorithm comparison data  
表 2. 算法对比数据

算例	节点数	遗传算法适应度值	VNS 算法适应度值	改进遗传算法适应度值
1	12	10,687.8153	15,686.2512	10,102.3726
2	24	122,359.4521	136,849.5781	114,418.7103
3	48	215,523.8526	223,576.1662	210,314.0235
4	96	412,335.2562	421,528.2682	407,522.7829

从表 2 的实验结果可以看出，随着节点规模的逐步增大，各算法的适应度值均呈现上升趋势，问题规模对求解难度具有显著影响。相较于传统遗传算法与 VNS 算法，本文提出的改进遗传算法在不同节点

规模下均取得了更优的求解结果，且优势在中等及以上规模算例中表现得更为明显。

## 4.2. 计算结果

利用本文提出的改进遗传算法对问题模型进行求解，在程序运行之前，需要对算法的初始化参数进行设置，设置种群规模为 100、算法的最大迭代次数为 500、交叉概率为 0.9、变异概率为 0.1。以 PyCharm 2025.2.1.1 作为仿真平台。

利用本文提出的改进遗传算法运算得到的运输方案如表 3。

**Table 3.** Transportation scheme

**表 3.** 运输方案

运输车辆	运输任务	运输货物量	运输路线
13	1	148	4 → 3 → 8
7	2	85	11 → 6 → 1 → 2 → 7 → 8 → 3
19	3	230	5 → 10 → 15 → 20
2	4	48	10 → 5 → 6 → 1
14	5	120	11 → 12 → 13 → 18 → 23
6	6	96	0 → 5 → 10 → 11 → 16
17	7	188	8 → 13 → 18 → 23 → 24
8	8	35	7 → 12 → 13 → 18 → 23
9	9	93	23 → 18 → 13
15	10	168	11 → 12 → 13 → 18

该方案利用了 10 辆危险品运输车辆，完成了 10 个运输任务，各车辆选择的路线能够使得模型的运输阻抗、运输风险以及时间窗违反惩罚之和最小，为 114,418.7103。

## 4.3. 时间窗因素对比分析

为了验证时间窗因素对本文路径选择实验的影响，在使用多容量车型方案不变的前提下，时间窗长度为 2 小时、3 小时、4 小时、5 小时以及 6 小时、7 小时的 6 种方案进行平均车辆满载率以及总综合成本(运输阻抗 + 运输风险 + 时间窗惩罚成本)的对比，结果如表 4。

**Table 4.** Comparison of different time window schemes

**表 4.** 不同时间窗长度方案对比

序号	方案	时间窗长度	使用车辆数	车辆平均满载率	总综合成本(元)	运输阻抗	运输风险	时间窗惩罚成本
1	多容量车型	2 小时	12	75.69%	167,262.8964	122,345.67	21,123.46	23,793.77
2	多容量车型	3 小时	11	78.13%	135,082.9233	110,449.30	20,115.36	4518.26
3	多容量车型	4 小时	10	83.52%	124,991.3059	100,432.77	20,567.35	3991.19
4	多容量车型	5 小时	10	83.30%	114,418.7103	92,243.27	20,143.45	2031.99
5	多容量车型	6 小时	11	73.39%	135,871.9240	112,296.79	21,785.57	1789.56
6	多容量车型	7 小时	11	83.52%	136,091.9240	114,320.40	20,074.17	1697.32

从实验结果可以看出,尽管在不断放大时间窗长度的情况下,各方案的时间窗违反成本会相对降低,但综合来看,时间窗过快地缩短和增大都使得总综合成本增大。究其原因,一方面,过于严格的时间窗会导致车辆在某些节点等待或绕行,加大车辆准时通行难度,导致时间窗违反惩罚成本增加,迫使车辆选择次优路径甚至增加车辆数,从而增加整体的运输成本与风险。另一方面,时间窗过宽虽减少惩罚,但时间窗范围的扩大可能导致车辆等待时间增加或绕行距离加长,而路径选择未能充分利用时间窗优势,反而影响整体运输效率,从而使运输成本与风险累积效应增强。

#### 4.4. 多容量车型因素对比分析

为了验证多容量车型因素对本文实验的影响,在设置时间窗长度为 5 小时的前提下,将 10 个运输任务 20 辆车分别全部使用同一车型的及简单组合不同容量车辆进行实验,由于全部使用容量为 50 的车辆无法满足运输需求,全部使用容量 250 的车辆过于浪费,因此,本文将对全部使用容量为 100、150、200 的车型车辆、容量 100 + 容量 150 车辆以及容量 150 + 容量 200 车辆的方案进行平均车辆满载率及各目标函数即总综合成本(运输阻抗 + 运输风险 + 时间窗违反惩罚)的对比,结果如表 5。

Table 5. Comparison of schemes with different vehicle capacities

表 5. 不同容量车型方案对比

序号	方案名称	时间窗长度	使用车辆数	车辆平均满载率	总综合成本	运输阻抗	运输风险	时间窗违反惩罚
1	多车型	5 小时	10	83.30%	114,418.7103	92,243.27	20,143.45	2031.99
2	单容量 100 车型	5 小时	16	75.69%	327,365.9387	259,876.99	29,752.58	37,736.37
3	单容量 150 车型	5 小时	13	62.10%	176,595.6583	130,912.13	23,782.40	21,901.13
4	单容量 200 车型	5 小时	11	55.05%	137,191.9240	111,253.59	21,175.25	4763.08
5	容量 100 + 容量 150 车型	5 小时	13	80.73%	176,595.6583	136,421.65	22,671.53	17,502.48
6	容量 150 + 容量 200 车型	5 小时	11	59.07%	137,191.9240	113,637.27	21,012.79	2541.86

从实验结果可以看出,采用多容量车型运输方案能够使目标函数值达到最小,也即运输阻抗、运输风险以及时间窗违反惩罚之和最小,不论是从运输阻抗、运输风险以及时间窗惩罚成本来看都显著低于其余五种方案,其总综合成本为 114,418.7103,同时仅需 10 辆车即可完成配送任务,车辆平均满载率达到 83.30%,在所有方案中处于最高水平。其原因在于,多车型配置能够根据不同运输需求灵活分配车辆,既提高了车辆利用率,又降低了总综合成本。因此,在危化品道路运输策略中,应运用多容量车型策略根据运输任务的货量差异灵活匹配车型,避免“大车小用”或“小车多趟”导致的资源浪费与成本上升,更贴合实际运输场景中需求多样化的特点。

综合分析表明,在考虑时间窗约束的危险品运输场景中,采用多容量车型并设置适中的时间窗,更有利于提升车辆利用效率,降低综合运输成本,实现运输组织的协同优化。实验结果验证了基于成本拆分视角的多车型 - 时间窗协同优化策略在复杂危险品运输网络中的有效性与现实应用价值,同时也为危险品运输企业提供了兼顾经济性与安全性的可行方案。

## 5. 结论与展望

### 5.1. 主要研究结论

本研究针对现实运输过程中普遍存在的时间窗限制、多车型车队结构以及成本与风险并存等复杂因

素, 本文对如何在电子商务履约场景下实现安全、高效、准时的运输组织进行了系统研究。

(1) 在传统危险品路径优化模型基础上, 本文将运输阻抗、运输风险与时间窗惩罚成本进行统一刻画, 构建了考虑时间窗约束与多车型车辆配置的危化品运输路径优化模型。该模型不仅反映了不同路段通行时间限制对路径选择的影响, 也体现了不同容量车型在运输任务匹配中的作用, 使路径决策更加贴近电子商务环境下危化品订单分散、到货节点多样以及履约节奏加快的实际运营情景。

(2) 本文设计的两阶段求解方法能够在备选路径生成与运输任务分配之间建立有效衔接, 针对 24 节点的典型算例, 算法在 0-85 代内即完成了总优化量的 97.5%, 适应度值从初始约 489,444.4920 快速收敛至最终的 114,418.7103 左右, 展现了强大的全局搜索与局部精细优化平衡能力。为复杂运输网络下的协同调度提供了可行的求解思路。

(3) 通过算例分析对模型进行了验证, 并对比了不同情况下的结果。结果表明, 在引入时间窗与多车型因素后, 优化路径在运输成本、风险水平及到达时效之间形成了更合理的平衡, 其中本文采用的多容量车型运输方案使得车辆平均满载率达到了 83.30%, 总综合成本 114,418.7103, 有助于提高车辆利用率, 减少运力浪费与超载风险, 并增强运输方案的可实施性与履约稳定性。

## 5.2. 管理启示

综上, 本文所建立的危险品运输路径优化模型能够在复杂路网和严格监管环境下, 为电商平台、危险品供应链企业及第三方物流企业提供兼顾安全性、经济性与时效性的路径决策支持。本文研究表明, 在电子商务背景下, 时间窗管理与多车型协同配置是影响危险品运输履约质量的重要因素, 合理的路径选择与运力匹配策略能够有效提升危险品线上订单的配送效率与服务水平。本文研究结论对危险品运输管理的优化具有一定的理论价值, 也对电子商务环境下危险品物流履约体系的完善具有现实参考意义。

## 5.3. 研究展望

本研究对于考虑时间窗约束与多容量车型的危化品运输路径优化问题进行了有益的探索, 并取得了预期的研究成果。然而, 受限于研究问题的复杂性与个人能力, 本研究仍存在一些可进一步深化和拓展的方面:

(1) 本文的研究基于静态路网环境, 即路段通行时间、风险系数等参数被视为固定值。然而, 实际运输环境是动态变化的, 未来的研究可以考虑时变路网下的路径优化问题, 将交通拥堵、天气条件、昼夜人口密度变化等动态不确定性因素纳入模型, 从而增强优化方案的鲁棒性和实际适用性。

(2) 本文研究的多车型仅从危化品运输车辆的容量不同进行区分, 并假设车队中的多容量车型车辆均适用于所有类型的危化品。在未来, 可以进一步细化车型 - 货物的适配性约束, 深入研究在拥有严格专业分工的异构车队(如易燃品专用车、腐蚀品专用罐车等)情况下, 如何实现更精细化的车辆调度与路径规划, 使模型更贴近大型危化品物流集团的复杂运营实际。

## 参考文献

- [1] 李立, 邓雨桐, 牟玲玲. 基于改进 NSGA-II 算法的危险品运输路径优化研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(1): 111-117.
- [2] Munaziza, F.A., Farizal, and Gabriel, D.S. (2020) Optimization of Dimethyl Ether (DME) Transportation Routes Using the Multi-Objectives Model. *Proceedings of the 3rd Asia Pacific Conference on Research in Industrial and Systems Engineering* 2020, Depok, 16-17 June 2020, 64-68. <https://doi.org/10.1145/3400934.3400948>
- [3] Song, L., Yu, L. and Li, S. (2023) Route Optimization of Hazardous Freight Transportation in a Rail-Truck Transportation Network Considering Road Traffic Restriction. *Journal of Cleaner Production*, **423**, Article ID: 138640. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138640>

- [4] 宋伟程, 帅斌, 陈钢铁. 基于点危险源的危险品运输路径优化研究[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(2): 116-121.
- [5] 魏福祿, 刘攀, 李志斌, 等. 基于风险价值的危险品运输路径优化方法[J]. 交通信息与安全, 2020, 38(3): 17-23.
- [6] 康蓉桂, 柴获, 张艺铭, 等. 考虑司机驾驶风险的危险品运输路径双目标优化[J]. 武汉理工大学学报, 2021, 43(1): 43-52.
- [7] ReVelle, C., Cohon, J. and Shobrys, D. (1991) Simultaneous Siting and Routing in the Disposal of Hazardous Wastes. *Transportation Science*, **25**, 138-145. <https://doi.org/10.1287/trsc.25.2.138>
- [8] Batta, R. and Chiu, S.S. (1988) Optimal Obnoxious Paths on a Network: Transportation of Hazardous Materials. *Operations Research*, **36**, 84-92. <https://doi.org/10.1287/opre.36.1.84>
- [9] Liu, L., Tian, T., Wang, R., et al. (2025) Time Varying Route Optimization of Hazardous Materials Transportation Considering Risk Equity.
- [10] Ke, G.Y. (2022) Managing Rail-Truck Intermodal Transportation for Hazardous Materials with Random Yard Disruptions. *Annals of Operations Research*, **309**, 457-483. <https://doi.org/10.1007/s10479-020-03699-1>
- [11] Khan, M.A. and Mehran, B. (2023) Hazardous Materials Facility Siting Optimization and Ranking: A Transportation Risk Mitigation Framework. *PLOS ONE*, **18**, e0290723. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0290723>
- [12] 张圣忠, 陈婷婷, 孙荣庭, 等. 考虑载货量的危险品运输车辆路径优化[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2020, 42(4): 290-297.
- [13] 孙岩, 虞楠, 董坤祥. 危险品公铁联运模糊多目标路径优化研究[J]. 河南科学, 2021, 39(5): 772-781.
- [14] 马天明, 黄楚原, 陈先锋. 考虑碳排放的危险品运输异构车辆路径问题研究[J]. 中国安全科学学报, 2024, 34(1): 193-199.
- [15] Moghaddam, K.S. and Azadian, F. (2020) Chance-Constrained Multi-Objective Approach for Hazardous Materials Routing and Scheduling under Demand and Service Time Uncertainty. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, **27**, 318-336. <https://doi.org/10.1002/mcda.1718>
- [16] Teng, J., Ren, C., Wang, X., Fu, F., Ding, F. and Zhou, G. (2023) Path Optimization of Multi-Type Vehicle Mixed Distribution. *Eighth International Conference on Electromechanical Control Technology and Transportation (ICECTT 2023)*, Hangzhou, 19-21 May 2023. <https://doi.org/10.1117/12.2689588>
- [17] 张海朋, 梁坤, 张浩. 多车型多温区冷链物流配送路径问题优化研究[J]. 物流技术, 2025, 44(8): 34-45.
- [18] 滕玥, 孙丽君, 周雅娴. 考虑危险品运输风险的多车型车辆路径优化方法[J]. 系统工程, 2020, 38(1): 93-102.