

中文引用格式: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.

英文引用格式: MA Tianming, HUANG Chuyuan, CHEN Xianfeng. Heterogeneous vehicle routing problem of hazardous materials transportation considering carbon emissions[J]. China Safety Science Journal, 2024, 34(1): 193-199.

# 考虑碳排放的危险品运输异构车辆路径问题研究\*

马天明, 黄楚原, 陈先锋 教授

(武汉理工大学 安全科学与应急管理学院, 湖北 武汉 430070)

中图分类号: X932 文献标志码: A DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2024.01.1243

基金项目: 国家自然科学基金资助(52274224); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2023]一般186); 湖北省自然科学基金资助(2023AFA013)。

**【摘要】** 为满足危险品运输异构车辆路径问题(HVRP)的低碳需求,对易爆危险品运输过程中的总风险、总成本和总碳排放量进行最优化处理。首先,在模型构造阶段,改进总成本与总风险的度量方式,包括建立爆炸事故场景下考虑危险品装载量的风险量化模型,并设计一种用于惩罚成本计算的软时间窗函数,该函数可以优先减少装载量较大的车辆在客户处的等待时间;然后,在算法改良阶段从2方面改进非支配排序遗传算法(NSGA-II),设计一种带有改良交叉算子的混合交叉方法来提升全局搜索效率,并通过包含2个阶段的变邻域搜索(VNS)算法来提高局部搜索能力;最后,通过算例验证模型和算法的有效性。研究结果表明:相较于原始NSGA-II,改进的算法收敛曲线下降更快,使总成本、总风险和总碳排放量3个优化目标的平均值进一步减少3.36%、12.16%和6.96%;在车辆数目有限的车队中,承运人可以通过选择不同的车辆类型对各目标产生不同程度的影响。

**【关键词】** 碳排放; 危险品; 异构车辆路径问题(HVRP); 多目标优化; 非支配排序遗传算法(NSGA-II)

## Heterogeneous vehicle routing problem of hazardous materials transportation considering carbon emissions

MA Tianming, HUANG Chuyuan, CHEN Xianfeng

(School of Safety Science and Emergency Management, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei 430070, China)

**Abstract:** To fill the research gap, a HVRP for hazardous materials transportation was proposed in this study, aiming at optimizing the three objectives as total risk, total cost and total carbon emissions. Firstly, in the model construction stage, the measurement methods of total cost and total risk were improved, including establishing a loading-dependent risk quantification method for explosion scenarios, and designing a specific soft time window for penalty cost calculation, which could preferentially reduce the waiting time of vehicles with large loads at customers. Then, to better solve the above model, the NSGA-II was improved in two aspects. A hybrid crossover method with new crossover operators was designed to improve the global search efficiency, and a two-stage variable neighborhood search (VNS) algorithm was

adopted to improve the local search ability. Finally, a numerical example was given to verify the effectiveness of the model and algorithm. The results indicate that, compared with the original NSGA-II, the convergence curve of the improved algorithm decreases faster, and the average values of the three optimization objectives of total cost, total risk and total carbon emissions are further reduced by 3.36%, 12.16% and 6.96% respectively. In a fleet with limited number of vehicles, the carrier can have different degrees of influence on each target by choosing different vehicle types.

**Keywords:** carbon emission; hazardous materials; heterogeneous vehicle routing problem (HVRP); multi-objective optimization; non-dominant sorting genetic algorithm II (NSGA-II)

## 0 引言

危险品通常具有燃爆性、腐蚀性或毒性等危险特性,而我国大多数危险品需要通过道路运输,发生事故后极有可能造成人员伤亡、财产损失或环境污染等危害<sup>[1]</sup>。2021年,交通运输部发布了一系列改善交通运输服务业碳排放的政策,重点关注碳达峰和碳中和的总体目标。绿色车辆路径问题在普通商品的物流研究中取得一些进展,但在危险品运输领域的研究很少。此外,考虑到现实中许多危险品物流公司的车队包含多种类型车辆,因此,研究同时优化风险、成本和碳排放3种目标的绿色异构车辆路径问题(Heterogeneous Vehicle Routing Problem, HVRP),对危险品运输业的安全保障、成本控制和节能减排具有重要意义。

HVRP最早由TAILLARD<sup>[2]</sup>提出,异构表现为承运车队由多种具有不同特征如额定载重量、启用成本等的车辆组成。BULA等<sup>[3-4]</sup>首次将HVRP引入到危险品运输领域,随后建立了包含风险和成本的双目标优化模型,并提出一种 $\varepsilon$ 约束的局部搜索算法。与BULA等假设各类车辆数目无限不同,滕玥等<sup>[5]</sup>研究了危险品运输中的异构固定车队车辆路径问题,并提出 $\varepsilon$ 约束的禁忌搜索算法来求解运输风险与成本的双目标模型。JIANG Peng等<sup>[6]</sup>所建立的多目标优化模型在风险与成本的基础上加入了平均冗余度,但其所使用的惩罚函数是一种单边硬时间窗,没有考虑车辆迟到带来的延误成本。上述成果虽探究了异构车队对危险品运输的影响,但依然没有解决风险与成本度量上的有关问题:①部分研究没有量化装载量变化对危险品运输风险的影响,而考虑装载量变化的研究通常将装载量与事故后果之间的关系简化成线性或指数关系<sup>[4,7]</sup>,无法体现具体事故场景的危害特点;②没有考虑危险品车辆由于长时间停放可能会对客户带来的潜在安全隐患,所建立的惩罚成本时间窗函数无法体现危险

品装载量对客户安全的影响。

综上,笔者拟构建带有时间窗的绿色异构固定车队车辆路径问题的多目标优化模型:假设事故场景为易爆危险品泄漏后爆炸,提出一种基于爆炸超压的装载量依赖风险量化方法;设计新的双边软时间窗类型惩罚函数,使装载量较大的危险品车辆优先减少在客户处的等待时间;应用综合碳排放模型量化运输路径上的总碳排放量。在求解算法方面,改进车辆路径多目标优化问题中广泛使用的非支配排序遗传算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II, NSGA-II),包括设计新的交叉方式以及在局部搜索过程中增加2个阶段的变邻域搜索(Variable Neighborhood Search, VNS)算法,以期提高算法的全局搜索效率,并加快算法的收敛速度,改善最终优化结果质量。

## 1 模型构建

### 1.1 爆炸场景下装载量依赖的风险模型

考虑装载量变化的情况下,人口暴露模型的冲击区域边界会随载重量变化发生改变。对于易爆危险品,研究表明:蒸气云爆炸(Vapor Cloud Explosion, VCE)通常比沸腾液体膨胀蒸气爆炸(Boiling Liquid Expanding Vapor Explosion, BLEVE)对周围目标造成更大范围的影响<sup>[8]</sup>。因此,假设易爆危险品泄漏引起事故场景为VCE。基于三硝基甲苯当量的VCE冲击波超压估计方法已得到广泛应用<sup>[9]</sup>。文献[10]给出的冲击波超压与人员伤亡程度之间的关系,为保证人员不受任何影响,选取19.6 kPa作为超压临界值,得到的等效比例距离,记为 $Z$ 。

$$r = ZW^{1/3} \quad (1)$$

式中: $r$ 为危险品爆炸造成的最大冲击半径,m; $W$ 为蒸气云中燃料质量,kg。下式给出某一路段上的装载量依赖风险 $R_{ij}^k$ 的计算方法, $r_{ij}^k$ 表示类型 $l$ 的车辆 $k$ 在客户 $i$ 到客户 $j$ 之间路段 $(i,j)$ 上产生的最大冲

击半径,  $d_{ij}$  和  $u_{ij}$  分别表示路段的长度,  $m$  和两侧人口密度, 人/km<sup>2</sup>。不同路段的冲击区域随  $r_{ij}^{lk}$  改变而变化, 如图 1 所示。在客户 1 和客户 2 组成的路段(1, 2)上的最大冲击半径  $r_{12}^{lk}$  与路段(2, 3)上的  $r_{23}^{lk}$  不同。

$$R_{ij}^{lk} = (2r_{ij}^{lk}d_{ij} + \pi r_{ij}^{lk2})u_{ij} \quad (2)$$

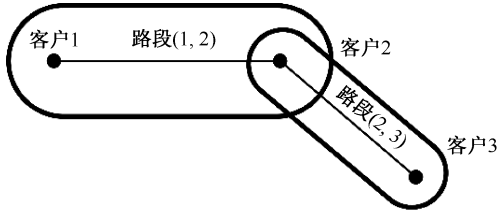


图 1 装载量依赖的冲击区域

Fig. 1 Load-dependent impact area

### 1.2 考虑危险品装载量的惩罚函数

所构建的惩罚函数为双边软时间窗类型, 每个客户的时间窗由四元数组  $[t_a^i, t_b^i, t_c^i, t_d^i]$  表示, 其中,  $t_a^i$  和  $t_d^i$  表示客户  $i$  可接受车辆的最早和最晚到达时间;  $t_b^i$  和  $t_c^i$  表示客户  $i$  接受车辆开始服务的最早和最晚时间。下式为类型  $l$  的车辆  $k$  在客户  $i$  处的惩罚成本  $Cp_i^{lk}$  (元) 计算公式:

$$Cp_i^{lk} = \begin{cases} \infty & a_i^{lk} < t_a^i \\ [(p_{\max} - p_{\min})\bar{q}_i^{lk}/Q_m + p_{\min}] (t_i - a_i^{lk}) & t_a^i \leq a_i^{lk} < t_b^i \\ 0 & t_b^i \leq a_i^{lk} \leq t_c^i \\ -p(a_i^{lk} - t_c^i) & t_c^i < a_i^{lk} \leq t_d^i \\ \infty & a_i^{lk} > t_d^i \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\bar{q}_i^{lk}$  和  $a_i^{lk}$  分别为类型  $l$  的车辆  $k$  在客户  $i$  处的装载量(t) 和到达时间(min);  $Q_m$  为所有车辆类型中的最大额定载重量, t。车辆被禁止在  $[t_a^i, t_d^i]$  以外的时间到达客户  $i$  处。当车辆在区间  $[t_b^i, t_c^i]$  内到达, 不会受到任何惩罚。当车辆在  $t_a^i, t_b^i$  (早到) 或  $[t_c^i, t_d^i]$  (晚到) 到达时, 都会产生一个随等待或延误时间线性增加的惩罚成本。晚到的单位惩罚成本为一个定值  $\bar{p}$ , 元; 为尽量减少危险品装载量较大的车辆在客户处的等待时间, 早到的单位惩罚成本在一个区间内随装载量的增加线性递增;  $p_{\min}$  和  $p_{\max}$  分别为早到单位惩罚成本的下限和上限。

### 1.3 碳排放量计算

BARTH 等<sup>[11]</sup>开发的综合排放模型可将车辆的速度、行驶距离和总重量等详细参数整合在一起, 其耗油量的计算结果更加真实:

$$F_{ij}^{lk} = \lambda(kNV + (M_l + \bar{q}_j^{lk})\gamma h_{ij}^{lk} v_{ij}^{lk} + \beta\gamma v_{ij}^{lk3}) d_{ij}/v_{ij}^{lk} \quad (4)$$

式中:  $F_{ij}^{lk}$ 、 $h_{ij}^{lk}$  和  $v_{ij}^{lk}$  分别为类型  $l$  的车辆  $k$  在路段  $(i, j)$  上的耗油量(kg)、加速度(m/s<sup>2</sup>)和速度(m/s)。为简化计算, 假设所有车辆在所有道路上均以 40 km/h 匀速行驶, 加速度为 0。可变参数有:  $M_l$  为类型  $l$  的车辆的自重, t;  $\bar{q}_j^{lk}$  为类型  $l$  的车辆  $k$  到达客户  $j$  之前的装载量, 即: 在路段  $(i, j)$  上的装载量, t;  $d_{ij}$  为路段  $(i, j)$  的长度, km。最终, 由下式可得到类型  $l$  的车辆  $k$  在路段  $(i, j)$  上的碳排放量  $E_{ij}^{lk}$ , kg, 其中,  $\varepsilon$  为碳排放系数。

$$E_{ij}^{lk} = \varepsilon F_{ij}^{lk} \quad (5)$$

### 1.4 问题描述与模型建立

建立的模型定义在一个完全图上  $G = (V, A)$ 。  $V = \{0\} \cup N$  由表示仓库的节点 0 和一组客户节点  $N = \{1, 2, \dots, n\}$  组成。  $A = \{(i, j) : i, j \in V, i \neq j\}$  是弧(路段)的集合。每个路段都有相应的长度和周围的人口密度。  $L = \{1, 2, \dots, l\}$  表示所有车辆类型的集合, 每类车辆都有相应的固定成本  $Cf_l$ 、单位距离的可变成本  $Cv_l$ 、额定装载量  $Q_l$  和空车质量  $M_l$ 。  $K = \{1, 2, \dots, k_l\}$  表示类型  $l$  的所有车辆集合, 其中,  $k_l$  为该类型的车辆总数。当类型  $l$  的车辆  $k$  从节点  $i$  到节点  $j$  时,  $x_{ij}^{lk}$  为 1; 否则为 0。当客户  $i$  接受类型  $l$  的车辆  $k$  服务,  $y_i^{lk}$  为 1; 否则为 0。完整的数学形式如下:

$$\min Z_1 = \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} \sum_{(i,j) \in A} Cv_l d_{ij} x_{ij}^{lk} + \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} \sum_{j \in N} Cf_l x_{0j}^{lk} + \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} \sum_{i \in N} Cp_i^{lk} y_i^{lk} \quad (6)$$

$$\min Z_2 = \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} \sum_{(i,j) \in A} R_{ij}^{lk} x_{ij}^{lk} \quad (7)$$

$$\min Z_3 = \sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} \sum_{(i,j) \in A} E_{ij}^{lk} x_{ij}^{lk} \quad (8)$$

式(6)–(8)表明建立的模型用于解决多目标优化问题, 对所有类型车辆在危险品运输过程中的总成本、总风险和总碳排放量进行优化。其中, 式(6)中的总成本由行程成本、启用车辆的固定成本和惩罚成本组成。

$$\sum_{j \in N} x_{0j}^{lk} = \sum_{i \in N} x_{i0}^{lk} = 1 \quad \forall l \in L, k \in K_l \quad (9)$$

$$\sum_{p \in V} x_{pj}^{lk} - \sum_{p \in V} x_{ip}^{lk} = 0 \quad \forall i, j \in V, l \in L, k \in K_l \quad (10)$$

$$\sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} y_i^{lk} = 1 \quad \forall i \in N \quad (11)$$

$$\sum_{p \in V} x_{pj}^{lk} = \sum_{p \in V} x_{ip}^{lk} = y_i^{lk} \quad \forall i \in N, l \in L, k \in K_l \quad (12)$$

式(9)约束启用的车辆从车场出发必须返回车场;式(10)是流量约束;式(11)约束每个顾客只能由一辆车服务;式(12)约束车辆在服务一个客户后必须从该客户处离开。

$$\sum_{i \in N} y_i^{lk} q_i \leq Q_l \quad \forall l \in L, k \in K_l \quad (13)$$

式(13)要求任何车辆所服务的客户的总需求不能超过该车型的额定载重量,  $q_i$  为客户  $i$  的需求量。

$$y_i^{lk} (t_a^i - a_i^{lk}) (t_a^i - a_i^{lk}) \leq 0 \quad \forall i \in N, l \in L, k \in K_l \quad (14)$$

$$a_j^{lk} = [a_i^{lk} + \max(t_c^i - a_i^{lk}, 0) + ST_i] y_i^{lk} + t_{ij} x_{ij}^{lk} \quad \forall i, j \in N, l \in L, k \in K_l \quad (15)$$

$$[a_i^{lk} + \max(t_c^i - a_i^{lk}, 0) + ST_i] y_i^{lk} + t_{i0} x_{i0}^{lk} \leq T \quad \forall i \in N, l \in L, k \in K_l \quad (16)$$

式(14)表示车辆必须在顾客所能容忍的时间区间内到达,  $a_j^{lk}$  为类型  $l$  的车辆  $k$  到达客户  $j$  的时间;式(15)表示到达时间约束,  $t_{ij}$  为车辆在路段  $(i, j)$  上的行驶时长,  $\min; ST_i$  为车辆在客户  $i$  处的服务时长,  $\min$ 。式(16)约束车辆必须在车场关闭前返回,  $T$  为仓库的关闭时间。

$$\sum_{k \in K_l} \sum_{j \in N} x_{ij}^{lk} \leq k_l \quad \forall l \in L \quad (17)$$

式(17)约束每种类型启用的车辆数量不能超过该类型的车辆总数。

## 2 基于改进 NSGA-II 的模型求解

NSGA-II 作为一种多目标优化的元启发式算法,虽然在全局搜索上具有较好性能,但存在运行速度慢、后期难以快速有效收敛到真实 Pareto 边界附近的问题。为解决上述问题,对 NSGA-II 进行 2 方面改进:在全局搜索过程中,设计新的交叉算子随机路径保留交叉,与最大保留交叉一起构成混合交叉方法;在局部搜索过程中,对单点交换变异操作后生成的子代执行 2 阶段的 VNS 操作。

### 2.1 编码与解码

采用常见的无分隔符自然数编码策略,即使用  $1 \sim n$  的自然数序列表示车辆在其行驶路径上依次经过的客户。文中采用一种满载率优先的解码策略

来最大程度地减少 HVRP 中的车辆使用数量,在其启发下构建可以表示不可行解的解码算法,具体过程可被概括为 2 个阶段。

1) 路径生成阶段。假设当前路径由可用车型列表中额定载重量最大的车型服务,依次检查染色体中剩余客户是否满足载重量、时间窗和返回时间约束,若满足则将其加入当前路径;若不满足则结束当前路径生成,进入车辆分配阶段,待车辆分配阶段结束后创建不含任何用户的新路径,并再次进入该阶段。

2) 车辆分配阶段。选择当前可用车型列表中额定载重量刚好满足生成路径上所有客户需求总量的车型,并使该车型的车辆数减 1,当车辆数为 0 时从可用车型列表中删除该车型。检查可用车型列表是否为空,若是,则向其中添加额定载重量最小的车型,并假设该车型可用车辆数为无限。

当染色体中没有剩余客户时,上述解码过程终止。需要说明的是,在车辆分配阶段加入可用车型检查操作,即当所有类型车辆都已被使用后通过添加无限个额定载重量最小的车型来解决没有车辆可分配的情况(即不可行解)。

### 2.2 混合交叉操作

传统交叉算子通常是基于随机选择的连续基因片段进行操作的,如顺序交叉、部分匹配交叉和最大保留交叉等<sup>[12]</sup>。这种不依赖具体问题的随机性较强的交叉算子可以充分保证子代的多样性,但同时增加了全局搜索的盲目性。为解决上述问题,在最大保留交叉算子(Maximal Preservative Crossover, MPX)的基础上设计一种新的交叉算子,并将其命名为随机路径保留交叉(Random Route Preservative Crossover, RRPX)。

所提出的 RRPX 的操作过程如图 2 所示。与 MPX 有 2 点不同:①要保留的基因片段不是直接从父代染色体中随机截取得到,而是在父代染色体解码后形成的所有路径中随机选择一个代表某条路径的基因片段;②被保留的基因片段的放置位置被固定在子代染色体头部,而不是随机选取。RRPX 的目的是尽可能保留路径中潜在的优良子路径,如果将代表某一路径的基因片段放在子代染色体中间,则根据 2.1 节的解码方法,该路径上的部分客户可能被分离出来加入前面的路径中。在迭代过程中若本轮交叉操作使用 MPX,则下一轮使用 RRPX,然后再次使用 MPX,交替循环。这种混合交叉方法可以充分发挥 2 种交叉算子的优势:首先利用 MPX 的随

机性快速扩大搜索范围,然后利用 RRPX 的指向性来保护潜在的优良子路径,从而更高效的对解空间进行全局搜索。

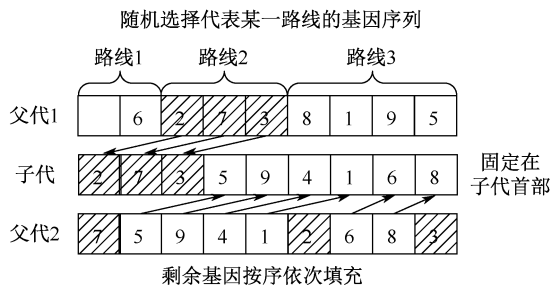


图 2 随机路线保留交叉算子 (RRPX)

Fig. 2 Random route preservative crossover (RRPX)

### 2.3 2 阶段 VNS

为防止算法过早收敛,陷入局部最优,选择对变异操作后的个体进一步使用 VNS 来改善局部搜索效率。Insert、Swap 和 Inverse 算子是常见的邻域算子<sup>[13]</sup>,但这些算子都是以基因为单位插入、交换和反转操作染色体,具有较大的不确定性。因此,提出基于路线的 Insert、Swap 和 Inverse 算子,如图 3 所示。与 2.2 节提出的 RRPX 算子类似,每个算子的操作对象都是染色体被解码后形成的代表路线的基因片段。部分路线在基于路线的邻域算子的操作下会被保留下来,也可能被拆散或者被延长。VNS 过程包含 2 个阶段:变异操作后生成的子代在经过使用 3 个基于基因的邻域算子的 VNS 后(阶段 1)再经过使用 3 个基于路线的邻域算子的 VNS(阶段 2),最终得到 2 阶段 VNS 后的子代。阶段 1、2 中的 VNS 索次数为  $M_1$  和  $M_2$ 。

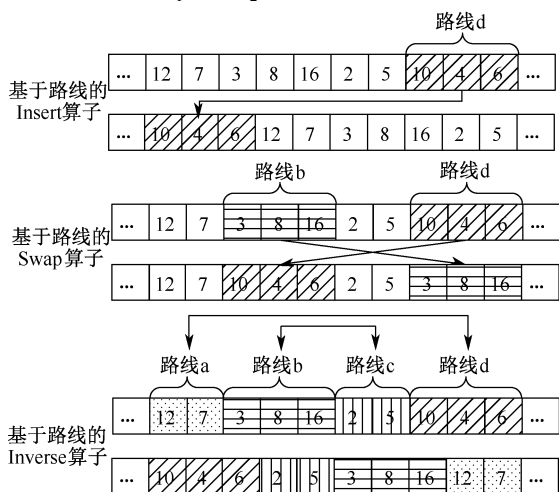


图 3 3 种基于路线的邻域算子

Fig. 3 Three route-based neighborhood operators

## 3 算例分析

Solomon 数据集是目前被广泛应用于 VRPTW 的标准数据集。考虑到实际危险品运输场景,化工企业的位置分布不一定呈现明显的集群特征,且允许车辆进行装卸作业的时间跨度较长,选择从客户位置分布随机、时间窗较宽(30 个单位)的 R105 算例中随机挑选 50 个客户作为原始算例,进行以下调整得到所需算例:在原始算例中每个客户的  $t_b^i$  与  $t_c^i$  的基础上随机减去或加上 10~30 之间的任意数字得到  $t_a^i$  与  $t_d^i$ ;将原始算例中客户的需求量调整至 3~12 t。与惩罚成本相关的式(6)中参数设置为:  $p_{\min} = 30, p_{\max} = 50$  和  $p' = 50$ 。为简化计算,假设式(6)中每种车辆行驶单位距离的危险品为液化石油气(Liquefied Petroleum Gas, LPG),爆炸热为 46 000 kJ/kg。最后,以某危险品物流公司的 LPG 运输车队为例,假设有 A、B、C 等 3 种车型,每种车型与本研究优化目标值计算有关的参数见表 1。

表 1 各类车辆特征参数

Tab. 1 Characteristic parameters of various vehicles

| 特征       | 类型 A | 类型 B | 类型 C |
|----------|------|------|------|
| 额定装载量/t  | 30   | 20   | 15   |
| 可用车辆数    | 6    | 6    | 8    |
| 每辆固定成本/元 | 600  | 500  | 400  |
| 空车质量/t   | 16   | 12   | 8    |

参考 NSGA-II 的常见参数设置,将交叉概率和变异概率分别设置为 0.9 和 0.1,种群规模设置为 60。为使算法结果具备一定的稳定性,将对比试验中所有算法的迭代次数设置为 1 000 轮,并重复 20 次。通过多次运算结果对比发现,2 阶段 VNS 的最佳搜索次数  $M_1$  和  $M_2$  分别被设置为 3 和 5 时,改进的 NSGA-II 算法可以得到质量最好的解集。为验证第 2 节中提出的所有改进措施效果,图 4 为原始 NSGA-II、使用混合交叉的 NSGA-II、使用混合交叉和一阶段 VNS 的 NSGA-II 以及使用混合交叉和 2 阶段 VNS 的 NSGA-II 这 4 种算法的 3 个优化目标每轮最小值在 20 次试验中的平均值变化趋势。可以看到,相对原始 NSGA-II,其他 3 种算法的曲线下速度更快且停止在更低位置。表 2 为改进 NSGA-II 最终得到的解集相对于原始 NSGA-II 在 3 个目标上的平均值和最小值减少的占比。

分析改进的 NSGA-II 在 20 次重复试验中得到的结果。表 3 为在总成本、总风险和总碳排放量上分别取得最小值时对应的解 1,解 2 和解 3 的信息。

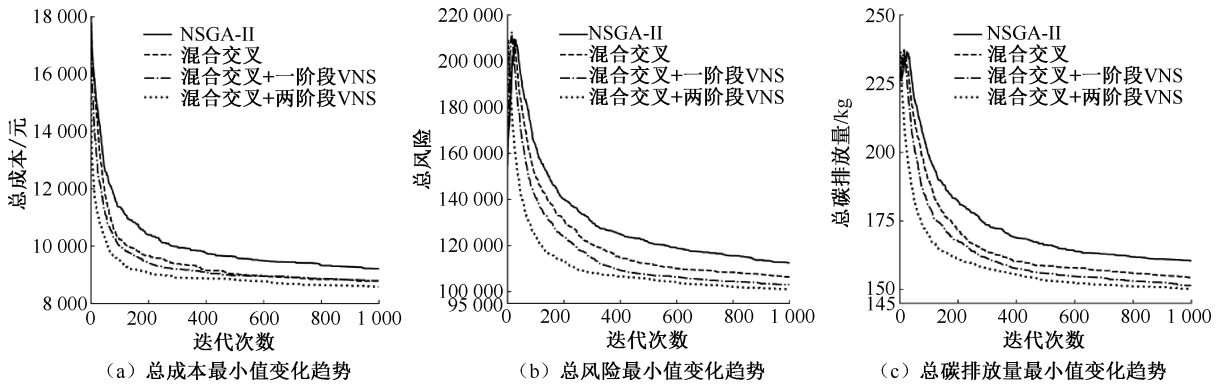


图4 不同算法的各优化目标最小值变化趋势

Fig. 4 Variation trend of minimum value of each objective in different algorithm

表2 改进的NSGA-II在各目标值上的减少占比

Tab. 2 Percentage reduction of improved NSGA-II

on each objective %

| 统计项目  | 总成本  | 总风险   | 总碳排放量 |
|-------|------|-------|-------|
| 平均值减少 | 3.36 | 12.16 | 6.96  |
| 最小值减少 | 6.89 | 10.17 | 6.40  |

表3 各最小目标值对应解的信息

Tab. 3 Information of solution corresponding to each minimum objective value

| 统计信息                   | 解1      | 解2     | 解3      |
|------------------------|---------|--------|---------|
| 总风险                    | 8 069   | 15 039 | 12 259  |
| 总成本/元                  | 166 191 | 97 891 | 116 164 |
| 总碳排放量/kg               | 182     | 159    | 146     |
| 使用车辆数(A车型/<br>B车型/C车型) | 6/4/3   | 6/6/8  | 5/4/8   |
| 总距离/km                 | 1 184   | 1 262  | 1 103   |
| 总等待时间/min              | 0.75    | 69.63  | 53.69   |
| 总延误时间/min              | 1.83    | 49.87  | 37.67   |

通过对比看到,解1使用的车辆数是3个解中最少的;解2和解3有较长的总等待时间和总延误时间;解3的行驶总距离是3个解中最短的。

针对本文所研究的多目标优化问题,为探索不同目标之间潜在关系,将解集中所有非支配解形成的Pareto前沿映射到3个二维平面,如图5所示。从图5中可以看出,减少总成本将导致总风险与总碳排放量的增加,减少总碳排放量的同时也将减少总风险。相较于皮尔逊系数,斯皮尔曼系数能够用于非正态数据的关联强度分析,本文经计算得出总风险与总成本之间、总碳排放量与总成本之间、

总风险与总碳排放量之间的斯皮尔曼系数  $S_p$  分别为-0.9, -0.58和0.53,且  $p$  值<0.01。因此,可以验证:总成本与总风险之间存在较强的负相关关系,和总碳排放量之间存在中等负相关关系;总碳排放量和总风险之间存在中等正相关关系。

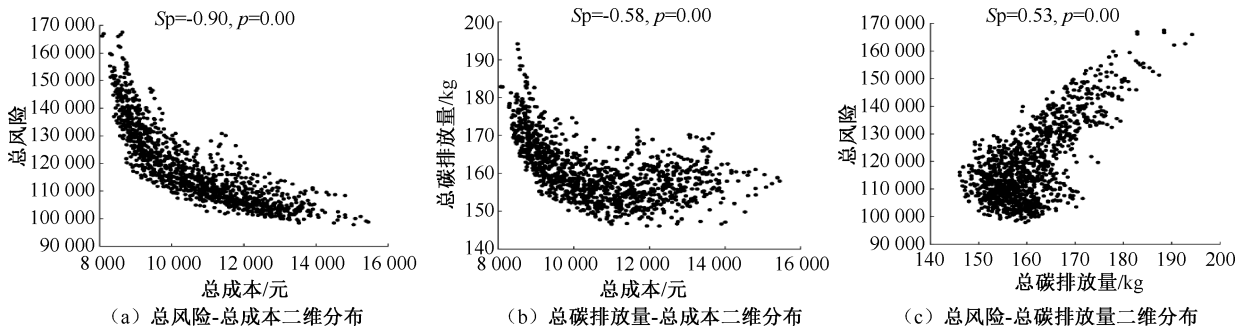


图5 Pareto前沿的二维分布

Fig. 5 Two-dimensional distribution of Pareto frontier

表3中不同解的车辆使用情况差距较大,因此我们猜测不同类型的车辆使用数量可能与各目标之间也存在影响关系。表4为不同类型车辆使用数与各目标之间的斯皮尔曼系数。其中,所有结果  $p$  值

均<0.01。从表4可以得出结论:使用车型B和车型C会较大幅度增加总成本,但可以减少总风险;车型B对总碳排放量的影响较小,为减少总碳排放量,应更多的使用车型C,尽量避免使用车型A。

表4 不同类型车辆使用数与各目标之间的  
斯皮尔曼系数

Tab. 4 Spearman's coefficients between the number of different types of vehicle and each objective

| 目标       | 类型 A  | 类型 B  | 类型 C  |
|----------|-------|-------|-------|
| 总成本/元    | -0.21 | 0.58  | 0.77  |
| 总风险      | 0.15  | -0.55 | -0.74 |
| 总碳排放量/kg | 0.38  | -0.08 | -0.60 |

## 4 结论

1) 考虑易爆危险品在爆炸事故场景下影响范围的风险模型更加真实、准确;考虑危险品装载量的

软时间窗惩罚函数不仅能最小化延误时间,还可以优先减少装载量较大的车辆的等待时间。

2) 对于 NSGA-II, 提出新的交叉算子随机路线保留交叉, 并用混合交叉方式替代原有交叉操作;在变异操作阶段后添加包含 2 个阶段的变邻域搜索过程。经验证上述改进措施能够提高算法收敛速度,且在各目标上取得更好优化结果。

3) 算例测试结果表明:总成本分别与总风险、总碳排放量之间存在较强的和中等的负相关关系;总碳排放量与总风险之间存在中等的正相关关系;不同车辆类型的使用数量会对 3 个优化目标产生不同程度的影响。

## 参考文献

- [1] 郑时求,周荣义,杨璧帆,等. 危化品槽罐车运输事故关键致因及传递路径研究[J]. 中国安全科学学报, 2023, 33(4): 172-178.  
ZHENG Shiqiu, ZHOU Rongyi, YANG Bifan, et al. Research on key causes and transmission paths of hazardous chemicals tank truck transportation accidents[J]. China Safety Science Journal, 2023, 33(4): 172-178.
- [2] TAILLARD E D. A heuristic column generation method for the heterogeneous fleet VRP[J]. Rairo-Operations Research, 1999, 33(1): 1-14.
- [3] BULA G A, PRODHON C, GONZALEZ F A, et al. Variable neighborhood search to solve the vehicle routing problem for hazardous materials transportation[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 324: 472-480.
- [4] BULA G A, MURAT H, GONZALEZ F A, et al. Bi-objective vehicle routing problem for hazardous materials transportation[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 206: 976-986.
- [5] 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.  
TENG Yue, SUN Lijun, ZHOU Yaxian. Multi-vehicle routing optimization method considering the risk of dangerous goods transportation[J]. Systems Engineering, 2020, 38(1): 93-102.
- [6] JIANG Peng, MEN Jinkun, XU Huan, et al. A variable neighborhood search-based hybrid multi-objective evolutionary algorithm for hazmat heterogeneous vehicle routing problem with time windows[J]. IEEE Systems Journal, 2020, 14(3): 4344-4355.
- [7] 张萌,王能民. 重大事故规避的危险品运输车辆路径优化研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(8): 1-9.  
ZHANG Meng, WANG Nengmin. Research on vehicle routing for hazardous materials transportation based on catastrophe avoidance[J]. Operations Research and Management Science, 2018, 27(8): 1-9.
- [8] LYU Shan, ZHANG Shuhao, HUANG Xiaomei, et al. Investigation and modeling of the LPG tank truck accident in Wenling, China[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 157: 493-508.
- [9] 路强. 危险化学品企业装卸车作业安全风险分析及安全对策研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2018.  
LU Qiang. Study on safety risk and countermeasures of loading and unloading in storage and transportation of hazardous chemicals[D]. Qingdao: China University Of Petroleum (East China), 2018.
- [10] 岳承军,陈力,李展,等. 温岭“6·13”液化石油气槽罐车爆炸事故灾害效应分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(5): 928-935.  
YUE Chengjun, CHEN Li, LI Zhan, et al. Power and consequence analysis of "6·13" explosion accident of LPG tank truck in Wenling[J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(5): 928-935.
- [11] BARTH M, BORIBOONSOMSIN K. Energy and emissions impacts of a freeway-based dynamic eco-driving system[J]. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2009, 14(6): 400-410.
- [12] İLHAN I. An improved simulated annealing algorithm with crossover operator for capacitated vehicle routing problem[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021, 64: DOI: 10.1016/j.swevo.2021.100911.
- [13] 陆科苗. 大型服装企业多目标柔性作业车间调度问题研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2022.  
LU Kemiao. Research on multi-objective flexible job shop scheduling problem in large garment enterprises [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Science and Technology, 2022.

作者简介: 马天明 (1995—),男,黑龙江哈尔滨人,博士研究生,研究方向为危险品运输风险评价与危险品车辆路径优化。E-mail: mtm19950501@whut.edu.cn。

