

doi: 10.3969/j.issn.1007-7375.240174

不确定需求下的危险废物混合储运协同优化

潘晓杰, 蒋烨凝, 贺 琪, 赵佳虹

(广东工业大学 土木与交通工程学院, 广东 广州, 510006)

摘要: 为降低危险废物混合储运的风险和成本, 提出一类考虑需求不确定的危险废物混合储运多目标优化建模与求解问题, 旨在协同优化设施选址、堆存量控制和路线设计决策。考虑多类危险废物混合存储的危害性, 引入毒性系数和恶臭因子构建处理站的环境影响负效用函数; 考虑中转站的居民负效用影响, 设计危险废物混合存储风险的度量方法。根据储运需求的不确定性, 以分布函数拟合危险废物产量, 并计算设施的最大堆存量。以总风险最小和总成本最小为优化目标, 构建危险废物混合储运的选址-选线模型。根据模型的计算复杂度以及多目标特征, 设计改进 NSGA-II 算法的模型求解步骤。通过多个测试算例验证模型和算法的有效性。计算结果表明, 新模型和算法能够提供多个有效的选址-选线方案; 相较于传统的风险模型, 新建的风险模型能够提供成本和风险均摊度更优的方案, 实现人员安全和环境卫生的协同保障; 相较于常规的多目标优化方法, 新算法能够缩短 38.79% 的求解时间, 并能在 1 700 s 以内求解不同规模的优化问题, 且保持较高的计算稳定性。

关键词: 物流工程; 危险废物; 选址-选线; 不确定需求; 风险度量; 非支配排序遗传算法

中图分类号: U116.2; F406

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(XXXX)x-0001-09

Collaborative Optimization of Hazardous Waste Mixed Storage and Transportation under Uncertain Demands

PAN Xiaojie, JIANG Yening, HE Qi, ZHAO Jiahong

(School of Civil and Transportation Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: To reduce the total risk and cost related to the hazardous wastes mixed storage and transportation, a multi-objective optimization under uncertain demands is proposed, which aims to simultaneously decide facility location, inventory control and route design. Considering the risk derived from mixed storage, an environmental impact disutility function of the treatment station is formulated by introducing toxicity coefficient and odor factor. The resident disutility effect of transfer stations is considered to develop the corresponding risk assessment model. Considering the uncertain demand of hazardous waste inventory and transportation, a computation method of total generation amount is formulated according to the distribution function, and computing the standard line of facility inventory. Minimizing the total risk and cost, a location and transportation model for the hazardous wastes mixed storage and transportation is developed. Based on the improved NSGA-II algorithm, the solution procedure is designed according to the complexity and characteristics of the proposed model. Finally, several tests are provided to demonstrate the workability of the proposed model and algorithm. In which, the computational results show that, the new model and algorithm can provide multiple efficient plans. Comparing to the traditional risk model, the integrated assessment can provide a more economical plan of with great performance in risk equity, which achieving the cooperative guarantee of personnel safety and environmental protection. Comparing to general multi-objective optimization methods, the improved algorithm can shorten the computational time by at least 38.79%, and provide optimal plan within 1 700 seconds as well as keep stable performance in solving the problems of different scales

收稿日期: 2024-04-19

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61803091); 广东省自然科学基金资助项目 (2022A1515010192)

作者简介: 潘晓杰 (1999—), 男, 广东省人, 硕士研究生, 主要研究方向危险品运输, 应急管理和运输安全管理。

Email: 3207955218@qq.com。

通讯作者: 赵佳虹 (1986—), 女, 山西省人, 副教授, 博士, 主要研究方向为危险废物物流系统优化, 危险品运输安全管理。Email: angela.zhaojh33@gdut.edu.cn

Key words: logistics engineering; hazardous waste; location-routing; uncertain demand; risk assessment; non-dominated sorting genetic algorithm-II

近年来,全国工业危险废物的年产量已突破 7 282 万 t^[1]。大量危险废物在城市路网中进行混合储运,严重威胁着生态健康和公共安全。为降低危险废物混合存储和运输的综合风险,本文考虑存储和运输需求的不确定性,研究危险废物混合储运系统的设施选址、堆存量控制和运量分配决策的协同优化问题。

国内外学者通过风险评估、数学构建和算法设计等方式,研究了危险废物风险管理领域的设施选址、堆存量控制和路径优化问题。首先,在风险分析与度量方面,Ke 等^[2]整合模糊事件率、人口暴露及运输时间,构建风险度量模型;Govindan 等^[3]以人口数量的暴露为基础,设计风险度量模型;Taslimi 等^[4]建立医疗废物“运输-储存”风险模型;Zhao 等^[5]设计不同水体下改进的重油扩散风险模型。其次,在优化模型构建及其优化求解方法设计方面,由于危害性针对储运网络的选址、库存、路线设计等问题,遍布整个运输网络。周建勤等^[6]考虑拟建线路物资需求的不确定性,以运营总成本最小为目标,建立线状需求下的设施选址-库存模型。Erdem 等^[7]设计可持续危险医疗废物回收运输网络。熊浩等^[8]构建 6 种考虑不同安全库存设置的选址-库存模型。Hassanpour 等^[9]考虑随机释放日期的危险废物三级回收网络,并构建多阶段决策模型。Utku 等^[10]建立危险废物设施选址和路径问题的单目标、多产物混合整数规划模型。Hajghani 等^[11]提出一个包含经济、环境和社会责任 3 个方面的多目标混合整数线性规划模型。王冰怡等^[12]采用遗传算法求解多级快递网点选址多目标规划模型。邓明君等^[13]使用遗传算法验证需求不确定的多式联运路径鲁棒优化模型

综上所述,以上研究成果应用在危险废物混合储运协同优化研究中,将存在如下不足:1) 没有考虑多种危险废物混合存储的风险;2) 忽略了需求等不确定条件对于设施选址及其最大堆存量的影响;3) 较少考虑设施选址、堆存量控制和路线设计等多个决策的协同优化建模与求解;4) 多目标组合优化建模及其求解方法的有效性验证与分析不足。鉴于

此,本文考虑危险废物混合储运需求的不确定性,提出一类多目标优化建模与求解方法,协同解决设施选址、堆存量控制和路线设计决策问题。引入毒性系数和恶臭因子构建处理站的环境影响负效用函数;考虑中转站的居民负效用影响,设计存储风险度量方法。根据分布函数拟合废物产量,计算设施点的最大堆存量;以总风险和总成本最小为目标构建数学模型,并改进 NSGA-II 算法设计求解步骤。最后,通过算例验证模型和算法有效性。

1 危险废物存储的风险分析与度量

各类危险废物在中转站和处理站进行混合处置,若突发泄露事故,会对周边居民和环境造成不同程度的有害影响。中转站主要是临时存储混合危险废物的中间节点,在整个储运流程中具有过渡属性,为方便混合危险废物的收集和累积,其建设位置通常会相对靠近居民区,因此,本文从居民感知的角度出发,采用负效用函数来描述中转站的存储风险。处理站的职能主要为处理混合危险废物,在此过程中难免会产生带有毒性的有害气体,为尽可能地减少处理过程中的有害影响,处理站的建设位置通常会相对远离居民区,因此,本文从有害气体的毒性角度出发,通过度量有害气体的毒性程度来评估处理站的存储风险。在中转站,本文主要考虑危险废物混合的综合危害性,以周边的常驻居民为影响对象,引入负效用函数^[14],将中转站的存储风险定义为在一定的影响半径内,中转站混合存储的危险废物对周边常驻居民带来的负效用影响。显然,混合存储的危险废物数量和居民人数是影响风险值的关键因素。在处理站,主要考虑危险废物的毒性和散发气体恶臭性,以周边的大气环境为影响对象,改进高斯烟羽模型,将处理站的存储风险定义为在一定的影响半径内,处理站混合存储的危险废物因有害气体释放,对周边环境造成的有害影响。其中,有害影响的估算主要考虑危险废物的毒性系数和恶臭因子。

1.1 中转站的存储风险

通常,中转站周边的常驻居民对于存储的危险废物具有厌恶情绪,且厌恶程度与中转站的线性距

离有关, 距离中转站越近, 居民的厌恶情绪越高。因此, 本文以暴露人口吨数模型^[14]描述中转站的有害影响, 借鉴文献^[15]中的负效用函数构造法, 将居民的厌恶程度描述为一个与中转站线性距离相关的负效用函数, 即中转站的存储风险用式 (1) 的负效用函数来表示, 该存储风险的大小与中转站的危险废物混合存储量和中转站周边 800 m 范围内的常驻居民数量的乘积成正比, 具体如式 (1) 所示。

$$R^{\text{中转}} = \frac{(Q^{\text{中转}} P^{\text{中转}})^q}{800^r} \quad (1)$$

式中, $R^{\text{中转}}$ 表示中转站的存储风险; $Q^{\text{中转}}$ 中转站的危险废物混合存储量; $P^{\text{中转}}$ 表示中转站周边 800 m^[16] 范围内的常驻居民数量; q 和 r 为反映负效用函数的影响程度的参数, 通常取 1。

1.2 处理站的存储风险

危险废物的处理过程中会产生含有毒性和恶臭性的有害气体, 以处理站的气体毒性系数 n 、气体恶臭因子 O 和气体浓度 e 的乘积来计算处理站的存储风险 $R^{\text{处理}}$, 即

$$R^{\text{处理}} = n \times O \times e \quad (2)$$

在不考虑排放源高度及气体扩散高度的条件下, 通过式 (3) 高斯烟羽模型推算气体浓度,

$$e = \frac{Q}{\pi u a b x^{c+v}} \quad (3)$$

式中, a 、 b 、 c 、 v 为大气环境稳定性参数^[17-18]; x 表示顺风时测算点与泄露源点之间的横向距离^[17-18]; u 为风速, 单位为 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; Q 为气体排放源的强度, 单位为 $\text{mg} \cdot \text{s}^{-1}$, 其具体计算公式为

$$Q = \frac{Q^{\text{处理}} \beta}{T^{\text{处理}}} \quad (4)$$

式中, $Q^{\text{处理}}$ 为处理站的危险废物量; β 为处理站危险废物处理过程的气体分解率; $T^{\text{处理}}$ 为排气时间。

2 问题描述

2.1 储运网络结构分析

危险废物混合储运系统是一个三层逆向网络, 网络节点包括废物生产点、中转站及处理站, 危险废物通过车辆运输在各层节点之间流转, 如图 1 所示。生产点的各类危险废物运输至对应的中转站进

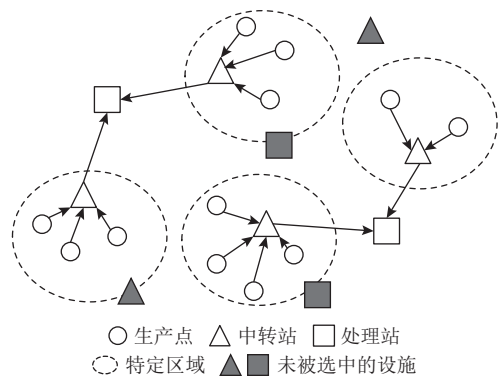


图 1 危险废物混合储运网络

Figure 1 Mixed storage and transportation network of hazardous wastes

行混合存储, 待中转站的危险废物量达到最大堆存量时, 将被全部转运至处理站。在运输过程中, 各类危险废物一直处于混合载运的状态。通常, 危险废物产量不稳定, 其储存与运输需求存在极大的不确定性, 对此, 本文以总风险和总成本最小为优化目标, 以分布函数拟合危险废物混合的生产总量, 计算中转站和处理站的最大堆存量, 并通过构建多目标优化模型, 协同解决中转站与处理站的选址、堆存量控制和运输路线设计问题。

2.2 优化问题分析

根据危险废物混合储运系统的特点, 由于生产点的危险废物产量不确定, 每个中转站的最大堆存量和处理站的处置能力也存在差异, 不同生产点的危险废物可以转运至特定的中转站, 而不同中转站的危险废物数量达到最大堆存量时, 则将被转运至特定的处理站, 即是说一个特定的中转站可以对应多个生产点, 一个特定的处理站可以对应多个中转站。如何使得危险废物在所选处理站和中转站之间高效转运并且风险更小是需要考虑解决的问题, 因此本文提出的选址-选线问题, 主要需要优化解决以下问题。

- 1) 选择危险废物中转站和处理站的位置, 并确定其建设数量;
- 2) 优化设计各节点之间运输路线;
- 3) 优化配置各中转站的最大堆存量。

2.3 储运需求不确定性分析

当生产点的危险废物产量超过其最大堆存量时, 则需要从中转站派遣车辆对该生产点的危险废物进行清运。假设生产点 i 的危险废物产量服从正态分布 $B(\mu_i, \sigma^2)$, 堆存量为 $V_i^{\text{生产点}}$, 堆存量的遥测周期为 $T^{\text{中转}}$, 本文将需求不确定的危险废物量拟合

到生产点最大堆存量上, 则生产点 i 的最大堆存量 V_i 最大为

$$V_i^{\text{最大}} = V_i^{\text{生产点}} - \frac{3}{2} T^{\text{中转}} \mu_i - k \sqrt{T^{\text{中转}} \left(\frac{3}{2} \sigma_i^2 + \frac{1}{12} \mu_i^2 T^{\text{中转}} \right)}. \quad (5)$$

式中, k 表示危险废物产量的不确定性程度。需要说明的是, 本文将生产点必须清运的最大堆存量视作中转站混合存储的危险废物量。

2.4 中转站和处理站的最大堆存量计算

1) 中转站的最大堆存量计算

确定生产点和中转站的运输分配关系, 即是说, 设定一个生产点的危险废物需要全部运往一个指定的中转站, 而一个中转站可以接收多个生产点的危险废物。当中转站接收的危险废物量超过其最大堆存量时, 须全部转运至处理站进行集中处理。本文将新建中转站的实际存储量作为该中转站的堆存量, 即确定了分配关系的所有生产点的废物产量之和。

2) 处理站的最大堆存量计算

根据构建的处理站存储风险度量模型, 计算处理站的最大堆存量。当处理站的有害气体浓度达到最大浓度 $e^{\text{最大}}$ 时, 则将处置的废物量计为处理站的堆存量 $Q^{\text{堆存}}$, 即

$$Q^{\text{堆存}} = \frac{\frac{2}{3} \pi x^3 e^{\text{最大}}}{\beta}. \quad (6)$$

3 数学模型

3.1 基本假设

具体假设如下。1) 各设施的固定建设成本已知, 不同区域的设施运营成本、运输成本以及容量有所不同; 2) 储运系统的安全等级符合混合处理危险废物的要求; 3) 中转站、处理站的期初和期末存储量都为 0; 4) 各节点周边的常驻居民数量相对稳定, 危险废物混合储运过程中的其他环境因素也相对稳定。

3.2 参数说明

本文涉及的相关参数和决策变量见表 1。

3.3 多目标选址-选线优化模型

以总成本和总风险最小为优化目标, 分别设计目标函数, 如式 (7)、式 (8) 所示。

表 1 参数和决策变量

Table 1 Parameters and decision variables

参数	含义
$N(V, E)$	储运网络; $V=G \cup T \cup D$ 为网络节点, E 为网络弧
$G\{1, 2, \dots, g\}$	危险废物生产点集合
$T\{1, 2, \dots, t\}$	中转站候选点集合
$D\{1, 2, \dots, d\}$	处理站候选点集合
$Z\{1, 2, \dots, z\}$	区域集合
$W\{1, 2, \dots, w\}$	危险废物种类集合
$L\{1, 2, \dots, l\}$	危险废物混合存储时排放的气体种类集合
$C_{zi}^{\text{固定}} / \text{元}$	区域 z 内建设设施 i 的固定建设成本, $z \in Z, i \in T \cup D$
$C_{ziw}^{\text{处理}} / (\text{元} \cdot \text{kg}^{-1})$	区域 z 内建设设施 i 的单位处理成本; $z \in Z, i \in T \cup D$
$C_{zijw}^{\text{中转}} / (\text{元} \cdot \text{km}^{-1})$	区域 z 的危险废物 w 在弧 (i, j) 上的单位运输成本, $z \in Z, w \in W, (i, j) \in E$
$V_{zi}^{\text{最大}} / \text{kg}$	区域 z 内生产点 i 的最大存储量, $z \in Z, i \in G$
Q_{ziw} / kg	区域 z 内设施 i 的废物 w 混合存储量, $z \in Z, i \in T \cup D, w \in W$
$Q_{zvw}^{\text{堆存}} / \text{kg}$	区域 z 内设施 i 的废物 w 最大堆存量, $z \in Z, i \in T \cup D, w \in W$
$H_z^{\text{中转}}$	区域 z 内建设中转站的最大数量, $z \in Z$
$H_z^{\text{处理}}$	区域 z 内建设处理站的最大数量, $z \in Z$
D_{ij}	弧 (i, j) 的长度, $(i, j) \in E$
$P_{zi}^{\text{中转}}$	区域 z 内设施 i 周边的常驻居民数量, $z \in Z, i \in T$
n_l	处理站排放气体 l 的毒性系数, $l \in L$
O_l	处理站排放气体 l 的恶臭因子, $l \in L$
β_l	处理站排放气体 l 的分解率, $l \in L$
Y_{ziw} / kg	区域 z 内生产点 i 的废物 w 产量, $z \in Z, i \in G, w \in W$
M	一个趋近无穷大的正整数
γ	中转站的风险量纲转换系数
λ	处理站的风险量纲转换系数
o_{zi}	0-1 变量, 若在区域 z 内建设设施 i , 则为 1; 反之, 为 0, $z \in Z, i \in T \cup D$
p_{zijw}	0-1 变量, 若在区域 z 内的弧 (i, j) 上运输废物 w , 则为 1; 反之, 为 0, $z \in Z, (i, j) \in E, w \in W$
q_{zijw}	区域 z 内的弧 (i, j) 上运输废物 w 的数量, $z \in Z, (i, j) \in E, w \in W$

$$\begin{aligned} \min C = & \sum_{z \in Z} \sum_{i \in T \cup D} C_{zi}^{\text{固定}} o_{zi} + \\ & \sum_{z \in Z} \sum_{i \in G \cup T, i \neq j} \sum_{j \in T \cup D, j \neq i} \sum_{w \in W} D_{ij} C_{zijw}^{\text{中转}} p_{zijw} + \\ & \sum_{z \in Z} \sum_{i \in G \cup T, i \neq j} \sum_{j \in T \cup D, j \neq i} \sum_{w \in W} Y_{ziw} C_{ziw}^{\text{处理}} p_{zijw}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$\min R = \gamma \sum_{z \in Z} \sum_{i \in T} \sum_{w \in W} \frac{(Q_{ziw} P_{zi}^{\text{中转}})^q}{800^r} + \lambda \sum_{z \in Z} \sum_{i \in D} \sum_{w \in W} \sum_{l \in L} R_l O_l \frac{Q_{ziw} \beta}{\pi uab \chi^{c+v} T^{\text{中转}}} \quad (8)$$

式 (7) 表示总成本最小化, 主要包括中转站和处理站的固定建设成本、废物运输成本、中转站的存储成本以及处理站的处理成本。式 (8) 表示最小化中转站和处理站的综合风险。

约束条件如式 (9)~式 (23) 所示。

$$\sum_{j \in T} \sum_{w \in W} p_{zijw} = 1, \forall z \in Z, \forall i \in G; \quad (9)$$

$$\sum_{j \in D} \sum_{w \in W} p_{zijw} = 1, \forall z \in Z, \forall i \in T; \quad (10)$$

$$\sum_{i \in G} \sum_{w \in W} Y_{ziw} = \sum_{i \in G} \sum_{j \in T} \sum_{w \in W} q_{zijw}, \forall z \in Z; \quad (11)$$

$$\sum_{i \in G} \sum_{j \in T} \sum_{w \in W} q_{zijw} = \sum_{i \in T} \sum_{w \in W} Q_{ziw}, \forall z \in Z; \quad (12)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{w \in W} Q_{ziw} = \sum_{i \in T} \sum_{j \in D} \sum_{w \in W} q_{zijw}, \forall z \in Z; \quad (13)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{j \in D} \sum_{w \in W} q_{zijw} = \sum_{i \in D} \sum_{w \in W} Q_{ziw}, \forall z \in Z; \quad (14)$$

$$\sum_{w \in W} q_{zijw} \leq M \sum_{w \in W} p_{zijw}, \forall z \in Z, \forall i \in G, \forall j \in T; \quad (15)$$

$$\sum_{w \in W} q_{zijw} \leq M \sum_{w \in W} p_{zijw}, \forall z \in Z, \forall i \in T, \forall j \in D; \quad (16)$$

$$\sum_{i \in T} o_{zi} \leq H_z^{\text{中转}}, \forall z \in Z; \quad (17)$$

$$\sum_{i \in D} o_{zi} \leq H_z^{\text{处理}}, \forall z \in Z; \quad (18)$$

$$\sum_{w \in W} Y_{ziw} \leq V_{zi}^{\text{最大}}, \forall z \in Z, \forall i \in G; \quad (19)$$

$$\sum_{i \in G} \sum_{w \in W} q_{zijw} \leq Q_{zj}^{\text{堆存}} o_{zj}, \forall z \in Z, \forall j \in T; \quad (20)$$

$$\sum_{i \in T} \sum_{w \in W} q_{zijw} \leq Q_{zj}^{\text{堆存}} o_{zj}, \forall z \in Z, \forall j \in D; \quad (21)$$

$$o_{zi}, p_{zijw} \in [0, 1], \forall z \in Z, \forall i \in G \cup T, \forall j \in T \cup D, \forall w \in W; \quad (22)$$

$$q_{zijw} \geq 0, \forall z \in Z, \forall (i, j) \in E, \forall w \in W. \quad (23)$$

式 (9) 表示各生产点只能被一个中转站服务; 式 (10) 表示各中转站只能被一个处理站服务; 式 (11)~(14) 为流量守恒约束, 表示生产点、中转站和处理站之间的危险废物流量守恒; 式 (15) 和 (16) 为决策变量的逻辑约束, 表示只有被选定的路径才能运输混合危险废物; 式 (17) 和 (18) 是中转站和处理站的建设数量约束; 式 (19) 是生产点的最大存储能力约束; 式 (20) 是中转站的最大存储能力约束; 式 (21) 是处理站的最大能力约束; 式 (22) 和 (23) 为决策变量定义域。

4 算法设计

本文构建的数学模型含有总成本和总风险最小两个量纲不同的优化目标, 包括 0-1 离散型和连续型两类决策变量。考虑多目标组合优化问题的目标冲突性, 采用实数编码方法, 基于 NSGA-II 算法^[19]设计的求解步骤如下。

步骤 1 染色体编码。染色体结构设计为 $I+J+K$, 其中, I 为生产点数量; J 为已选定的中转站数量; K 为已选定的处理站编号。各层级设施的序号按照从小到大排列, 同级节点间不进行交叉变异操作。

步骤 2 生成初始种群。

首先, 计算各生产点的最大堆存量, 判断是否需要对该点的危险废物进行清运, 生成染色体中的生产点至中转站的基因序列。其次, 统计各中转站的存储量, 判断其是否需要进行清运。按照如前规则, 生成染色体的中转站至处理站的基因序列。

例如, 随机产生 m 个生产点和 p 个中转站候选点, 若在第 s 个生产点需要进行清运, 且第 $s-1$ 个生产点不需要进行清运时, 则将染色体的第 s 至 m 个基因位均向后移动 1 个位置, 空出第 s 个基因位, 再从 p 个中转站候选点中随机选择一个插入该空出的基因位。同时, 将原来的第 s 个生产点的堆存量计入该插入的中转站堆存量, 并判断其是否超过中转站的最大堆存量, 若超过, 则重新挑选新的中转站插入; 若不超过, 则搜索新的待清运的生产点。

步骤 3 适应度计算。对所有的染色体进行快速非支配排序和拥挤度计算。

1) 快速非支配排序。

分别计算每个染色体的成本和风险 A^C 、 A^R ，种群中任意两条染色体 X 和 Y ，若有 $A_X^C < A_Y^C$ ， $A_X^R < A_Y^R$ ，则表示 X 支配 Y ，若有 $A_X^C < A_Y^C$ ， $A_X^R > A_Y^R$ ，或 $A_X^C > A_Y^C$ ， $A_X^R > A_Y^R$ ，则表示 X 非支配 Y ，以此准则得到 f 个层级中的个体 h 的非支配序 n_{rank} 。

2) 拥挤度计算。

对同一等级的非支配解进行排序，以成本和风险为解的空间坐标，将任意两个染色体在解空间的相对距离计为拥挤度。

步骤 4 选择。随机选择两个个体，比较非支配排序和拥挤度算子，评价其优劣性。

步骤 5 交叉、变异。使用单点交叉方法和随机基因位变异，产生新个体。

步骤 6 合并种群。合并种群规模均为 U 的父代和子代，形成规模为 $2U$ 的种群。

步骤 7 非支配排序和拥挤度计算。对规模为 $2U$ 的种群进行快速非支配排序，分层排序可行解，得到不同优劣程度的解。从分层的个体中筛选出符合下一代种群规模为 U 的个体，并比较分层后的个

体拥挤度，获得解的优劣程度。

步骤 8 更新种群。从规模为 $2U$ 的种群中筛选 U 个个体作为新的父代种群。

步骤 9 终止条件。判断是否达到最大迭代次数，若是，则转至步骤 10；反之，迭代次数加 1，转至步骤 3。

步骤 10 采用一种新的多属性决策方法^[20]，选择帕累托前沿最优解，计为最终结果。

5 算例

5.1 基本信息

假设某危险废物混合运输网络有 50 个生产点 (节点 1~50)、14 个中转站 (节点 51~64) 和 8 个处理站 (节点 65~72)。各生产点的危险废物产量在区间 [100, 290] 内随机生成，各生产点周边的居民数量在区间 [3 000, 8 000] 内随机生成。中转站和处理站的相关参数如表 2 和 3 所示。处理站排气时间为 1 800 s；考虑 4 种有害气体，其分解率分别为 0.04、0.02、0.05。

表 2 中转站最大存储量

Table 2 Maximum storage of transfer station candidate

中转站编号	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
最大存储量/kg	1 369	1 299	1 420	1 350	1 250	1 388	1 400	2 112	2 200	2 312	2 300	2 250	2 111	2 189

表 3 处理站的最大处理能力

Table 3 Capacity of treatment station candidate

处理站编号	65	66	67	68	69	70	71	72
最大处理能力/kg	4 108	3 989	4 200	4 050	5 299	5 297	5 300	5 311

5.2 计算结果

设置种群规模为 150，最大迭代次数为 40，交叉和变异概率分别为 0.9 和 0.1，所有计算都在 CPU 为 11th Gen Intel (R) Core (TM) i5-11320H @ 3.20 GHz 3.19 GHz 环境下，利用 Python 编程调用 Gurobi 10.0.2 求解。根据设计的算法，可求得多个有效的选址-选线方案，各方案的成本和风险目标值及其 trade-off 曲线如图 2 所示。由图 2 可知：1) 曲线较平缓，得到的结果较为普适和精确，其求解结果相对优良；2) 各优化方案的成本和风险存在此消彼长的态势，即随着成本值的增加，风险值逐渐减小，两者变化幅度相对均衡；3) 对比各方案的具体决

策，因为其地理位置远离居民区，且建设成本相对较小，处理站 69、中转站 62 和 63 的选址概率较高，可实现成本和风险的双重最小化。通过对比分析了该曲线中各有效解的成本与风险值的变化幅度，本文推荐总成本和总风险分别为 1.23×10^{11} 元和 5.65×10^9 人·t·km⁻³ 的选址-路线方案，具体如表 4 所示。

5.3 测试对比

5.3.1 风险度量模型

沿用算例的参数设置，分别以传统风险模型和综合风险模型为风险目标函数，通过计算风险最小化的单目标优化问题，对比分析两个风险模型所求方案的应用效果。需要说明的是，本文整合所有中

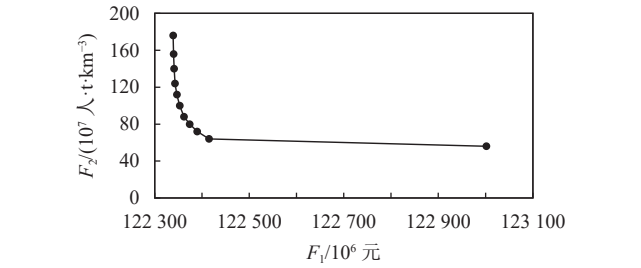


图 2 有效解的 trade-off 曲线

Figure 2 Trade-off curves for efficient solutions

转站和处理站的风险值, 并计算其对应的风险标准差, 以此作为风险均摊程度的衡量标准。显然, 该数值越低, 各中转站和处理站的风险差异越小, 风险的均衡性越大。因为本文在求解风险最小化时,

考虑的是总成本与总风险多目标的最小化, 所以在本文中采取了风险均摊程度来进行风险最小化衡量。总风险的减小与设施选址远离居民区是相关的, 但随着设施选址距离增大, 总风险减小, 相应总成本会增大, 而本文将考虑选取在总成本适当的情况下总风险最小化, 以此将风险保持在可控的水平的风险最小化, 以此将风险保持在可控范围内。

根据表 5 的对比结果可知: 1) 相较于传统风险模型, 本文的综合风险模型推荐的设施建设位置远离居民区, 因此方案的总成本增加了 28.60%; 2) 综合风险度量模型能够提供风险均摊程度更优的方案, 其风险均摊值提升了 49.60%。

表 4 推荐的选址-选线优化方案			
Table 4 Recommended location- inventory-routing optimization scheme			
选址-最大堆存量		运输路线	
(中转站, 最大堆存量/kg)	(处理站, 最大堆存量/kg)	生产点-中转站	中转站-处理站
(58, 2 112); (59, 2 200); (62, 2 250); (63, 2 111); (64, 2 189)	(69, 5 299); (71, 5 300)	(1, 5, 18, 22, 23) -63; (7, 12, 15, 16, 31, 35) -58; (20, 21, 26, 37, 41, 43, 44) -64; (14, 17, 19, 24, 27, 36, 46, 50) -59; (6, 8, 11, 13, 25, 28, 29, 30, 42, 45) -62	63-69; 58-71; 64-69; 59-71; 62-71

表 5 风险度量模型对比结果						
Table 5 Comparison of risk assessment models						
项目	总成本/ 10 ⁴ 元	总传统风险值/ (10 ⁴ 人·t·km ⁻³)	总综合风险值/ (10 ⁴ 人·t·km ⁻³)	设施建设数量/个		风险 均摊度
				中转站	处理站	
传统风险模型	9.51	16.79	21.25	4	1	2.52
综合风险模型	12.23	26.19	7.84	5	2	1.27
变化率 /%	+28.60	+55.99	-63.11	+25	+50	-49.60

5.3.2 求解方法分析

基于算例的参数设置, 分别采用常规多目标优化方法 (如线性加权法、切比雪夫法和 TOPSIS 方法) 和改进 NSGA-II 算法进行算例求解。其中, 常规多目标优化方法设定两个子目标的权重系数均为 0.5。根据表 5 的对比结果可知, 本文设计的算法能够至少缩短 38.79% 的求解时间。

5.3.3 计算稳定性

为测试算法的计算稳定性, 参考算例参数设置, 随机生成 3 种不同规模的测试组, 每组包含 30 个测试算例, 除设施数量不同外, 其他参数都不变。

测试结果如表 7 所示, 所有结果都是各测试组计算结果的平均值。可见, 改进算法具有较强的计算稳定性, 能在 1 700 s 内求得不同计算规模问题的最优

表 6 求解方法对比结果					
Table 6 Comparison of different solution procedures					
求解方法	总风险/ (10 ⁴ 人·t·km ⁻³)	总成本/ 10 ⁶ 元	Gap 值/ %	求解时间/ s	变化率/ %
线性加权优化法	10.38	14.61	11.65	51.27	67.15
切比雪夫	8.27	13.52	8.52	98.47	82.89
TOPSIS	13.83	18.36	15.38	27.51	38.79
改进 NSGA-II 算法	7.84	12.23	6.47	16.84	—

表 7 计算规模测试结果

Table 7 Computational results of tests of different scales				
节点数量 (生产点, 中转站, 处理站)/个	总风险/ (10 ⁴ 人·t·km ⁻³)	总成本/ 10 ⁶ 元	Gap/ %	求解时间/ s
72 (50,14,8)	7.84	12.23	6.47	16.84
144 (100,28,16)	16.72	25.96	10.62	312.08
288 (200,56,32)	35.29	52.17	18.93	1 679.32

解, 且平均 Gap 值稳定在 18.93% 以内。

6 结论

为降低危险废物混合储运风险和成本, 提出考虑需求不确定的危险废物混合储运多目标优化建模与求解问题, 主要考虑多类危险废物混合存储危险性, 设计了混合存储风险度量方法。考虑废物储运需求的不确定性, 采用分布函数拟合危险废物的产量, 以总成本和总风险最小为优化目标构建危险废物混合储运多目标选址-选线优化模型。根据模型计算复杂度以及多目标特征, 基于改进 NSGA-II 算法设计了求解步骤。最后, 通过多个测试算例验证模型和算法的有效性和计算稳定性。根据计算结果, 可得到如下主要结论。

- 1) 相较于传统风险模型, 综合风险度量模型能够提供风险均摊程度更优的方案。
- 2) 新模型能够提供多个有效选址-选线方案。
- 3) 相较于常规多目标优化方法, 改进 NSGA-II 算法所得 Gap 值为 6.47%, 在多种求解方法中最小, 且能够至少缩短 38.79% 的求解时间。
- 4) 改进的算法能在 1700s 内求得不同计算规模问题最优解, 具有较高的计算稳定性。

参考文献:

[1] TANG J, WANG Q, LI Z, et al. Coupling coordination degree of industrial solid waste prevention and treatment efficiencies and its driving factors in China[J]. Ecological Indicators, 2024, 158(1): 111395.

[2] KE G Y, ZHANG H, BOOKBINDER J H. A dual toll policy for maintaining risk equity in hazardous materials transportation with fuzzy incident rate[J]. International Journal of Production Economics, 2020, 227(1): 107650.

[3] GOVINDANK, NASR A K, MOSTAFAZADEHP, et al. Medical waste management during coronavirus disease 2019 (COVID-19) outbreak: A mathematical programming model[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 162(1): 107668.

[4] TASLIMI M, BATT A R, KWON C. Medical waste collection

considering transportation and storage risk[J]. Computers & Operations Research, 2020, 120(1): 104966.

[5] ZHAO J, VERMA M, VERTER V. Pipeline transportation of crude oil in Canada: Environmental risk assessment using modified diffusion models[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2020, 27(5): 1206-1226.

[6] 周建勤, 李敏, 隋雨函. 考虑横向转运的线状需求物流节点选址研究[J]. 工业工程, 2020, 23(5): 82-87.

ZHOU Jianqin, LI Min, SUI Yuhan. Study on the location of linear demand logistics nodes considering transverse transshipment[J]. Industrial Engineering Journal, 2020, 23(5): 82-87.

[7] ERDEM M. Designing a sustainable logistics network for hazardous medical waste collection a case study in COVID-19 pandemic[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 376(1): 134192.

[8] 熊浩, 鄢慧丽. 考虑多种安全库存策略的选址-库存问题研究[J]. 中国管理科学, 2021, 29(1): 72-81.

XIONG Hao, YAN Hui Li. Six location-inventory models with risk pooling in two-echelon logistics system[J]. Chinese Journal of Management Science, 2021, 29(1): 72-81.

[9] HASSANPOUR S T, KE G Y, ZHAO J, et al. A multi-stage decision framework for managing hazardous waste logistics with random release dates[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 232(1): 120750.

[10] UTKU D H, EROL S. The hazardous waste location and routing problem: an application in Marmara Region in Turkey[J]. SN Applied Sciences, 2020, 2(2): 299.

[11] HAJGHANI M, FORGHANI M A, HEIDARI A, et al. A two-echelon location routing problem considering sustainability and hybrid open and closed routes under uncertainty[J]. Heliyon, 2023, 9(3): e14258.

[12] 王冰怡, 张锦. 考虑网点共享与变更的多级快递网点选址问题[J]. 工业工程, 2021, 24(2): 155-165.

WANG Bingyi, ZHANG Jin. Considering the location of multi-level express outlets for network sharing and change[J]. Industrial Engineering Journal, 2021, 24(2): 155-165.

[13] 邓明君, 代玉珍, 李响. 需求不确定下低碳多式联运路径鲁棒优化[J]. 工业工程, 2023, 26(4): 104-113.

DENG Mingjun, DAI Yuzhen, LI Xiang. Robust optimization of low-carbon multimodal transport routes under uncertain demand[J]. Industrial Engineering Journal, 2023, 26(4): 104-113.

[14] ZHAO J, WU B, KE G Y. A bi-objective robust optimization approach for the management of infectious wastes with demand uncertainty during a pandemic[J]. Journal of cleaner production, 2021, 314(1): 127922.

[15] 马艳芳, 张文, 李宗敏, 等. 考虑负效应的垃圾回收两级选址-路径模型与算法[J]. 计算机应用, 2023, 43(1): 289-298.

MA Yanfang, ZHANG Wen, LI Zongmin, et al. Two-echelon location-routing model and algorithm for waste recycling considering obnoxious effect[J]. Journal of Computer Applications, 2023, 43(1): 289-298.

[16] WENG J, GAN X, ZHANG Z. A quantitative risk assessment model for evaluating hazmat transportation accident risk[J].

- Safety science, 2021, 137(1): 105198.
- [17] PEREZ I A, GARCIA M Á, SANCHEZ M L, et al. Key points in air pollution meteorology[J]. [International Journal of Environmental Research and Public Health](#), 2020, 17(22): 8349.
- [18] WANG W, CHERSTVY A G, LIU X, et al. Anomalous diffusion and nonergodicity for heterogeneous diffusion processes with fractional Gaussian noise[J]. [Physical Review E](#), 2020, 102(1): 012146.
- [19] YUAN M, LI Y, ZHANG L, et al. Research on intelligent workshop resource scheduling method based on improved NSGA-II algorithm[J]. [Robotics and Computer-Integrated Manufacturing](#), 2021, 71(1): 102141.
- [20] RAO R V, LAKSHMI R J. Ranking of Pareto-optimal solutions and selecting the best solution in multi-and many-objective optimization problems using R-method[J]. [Soft Computing Letters](#), 2021, 3(3): 100015.

(责任编辑: 郑穗华)