

考虑应急保障的危化品道路运输 多目标路径优化方法

刘灿¹, 周荣义^{1,2*}, 石云霄¹, 杨璧帆¹, 姜子健¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;
2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要: 为进一步提高危化品道路运输路径优化的合理性, 将事故应急保障引入路径优化中. 分析应急保障对路径选择的影响及其确定方法, 并把应急保障水平引入风险目标函数中作为补偿系数; 在此基础上, 构建运输风险最小、运输时间最短、运输成本最低的危化品道路运输多目标路径选择模型, 然后应用遗传模拟退火算法进行求解. 结果表明: 该模型能更加合理科学地选择危化品运输路径, 满足运输企业对路径安全性以及经济利益的要求.

关键词: 危化品运输; 多目标; 应急保障; 遗传模拟退火

中图分类号: U492.8 文献标志码: A 文章编号: 1672-9102(2024)02-0049-06

On Multi-objective Path Optimization Method for Hazardous Chemical Road Transportation Considering Emergency Support

LIU Can¹, ZHOU Rongyi^{1,2}, SHI Yunxiao¹, YANG Bifan¹, JIANG Zijian¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal Mines, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: To further improve the rationality of optimizing the road transportation path for hazardous chemicals, accident emergency support is introduced into the path optimization. It analyzes the impact of emergency support on path selection and its determination methods, and introduces the level of emergency support into the risk objective function as a compensation coefficient. Based on this, a multi-objective path selection model for hazardous chemical road transportation with the minimum transportation risk, shortest transportation time, and lowest transportation cost is constructed, and then using genetic simulated annealing (GSA) to solve it. The calculation example shows that the model can more reasonably and scientifically select the transportation path of hazardous chemicals, meeting the requirements of transportation enterprises for path safety and economic benefits.

Keywords: transportation of hazardous chemicals; multiple objectives; emergency support level; genetic simulated annealing

随着我国经济的不断发展, 危险化学品的需求和运量在逐年增加. 在多种运输方式中, 道路运输凭借其经济、便捷、灵活等优点, 成为我国危化品运输的主要方式^[1]. 同时由于我国道路交通流量较大, 有的运输路径经过城市边缘, 甚至穿过人口密集区或环境敏感区等区域^[2], 危险货物在运输过程中一旦发生事故, 其易燃、易爆、毒害、辐射性等危害极易对沿线车辆、行人及周边环境造成重大的人员伤亡、财产损失和

环境破坏^[3]。因此,如何预防和控制危险货物道路运输事故成为政府和学者们关注的重要课题。其中,路径选择与优化被认为是降低危险货物道路运输风险的重要方法和手段之一,但路径选择涉及运输时效、风险、成本等多个目标因素,既要考虑运输过程中的风险,避免对路径周边的人民、环境和交通等造成危害,又要考虑运输时间和经济效益,需要多个目标因素之间合理妥协^[4],因此路径选择是一个典型的多目标规划问题^[5]。

针对上述问题,国内外诸多学者进行了有益的探索和研究。沈小燕^[6]讨论时变条件下带时间窗限制的多目标道路危险货物运输路线优化问题,并用灰色关联分析法求解多目标最优路线;曹罡^[7]建立时变条件下不同时段的多目标危化品运输路线选择模型,应用 ArcGIS 分析处理数据,并利用 Network Analyst 解决该路径选择问题;武小东^[8]结合运筹学和风险管理理论,研究危险货物运输选址选线的影响因素,建立数学表达式,通过定性与定量分析,得出危险货物运输选址和选线的步骤和解决措施;张敏等^[9]提出运输网络危险度瓶颈限制的概念,并以此为切入点建立危险品集成物流系统选址选线模型,利用启发式算法求解模型,并用算例进行数值演算;周伟丹^[10]对危化品运输选址-选线模型影响因素进行层次化分析,确定各指标权重,再对典型 LAP 和 VRP 模型整合创新,应用两阶段禁忌搜索算法求解实际案例,对比分析发现多目标规划模型的求解结果优于成本或风险单目标的求解结果;张凯月^[11]提出危化品配送系统数字孪生框架,并把驾驶者疲劳状态和车辆状态考虑进路径规划模型中,使用基于动态信息交互的遗传算法求解模型;HU 等^[12]基于道路交通限制的约束条件下提出一种新的多目标优化方法,同时建立多目标选址-路线模型来解决危险品运输中的风险、成本和客户满意度的问题,分别用单一遗传算法和自适应权重遗传算法来求解所提出的模型;MA 等^[13]在一定模糊或随机这 3 种不同环境下确定危险品运输路线,建立多目标模型,集成模糊仿真、神经网络、随机仿真和遗传算法来求解所提出的模型;WANG 等^[14]把运输路线周围的建筑物和应急设施等因素考虑进去,并用 GIS 量化各个因素,建立一个多目标混合整数线性规划优化模型,以寻求鲁棒稳定的运输优化解,通过案例分析,验证建筑因素的重要性和该模型的合理性;SONG 等^[15]考虑交通限制对于路径选择的影响,研究与危险货物运输事故相关的时变运输的风险和成本。

深入分析发现,上述建模对事故应急保障这一因素的考虑略显不足,进而不能对运输道路的风险情况进行较为准确和切合实际的评估。应急保障水平不仅可以在一定程度上影响危化品道路运输事故后果,进而影响运输时间和成本等问题,而且客观上还影响决策者对运输路径选择的偏好,从而对路径选择模型的准确性和科学性产生较大影响。因此,本文将应急保障引入路径优化模型中作为风险的补偿系数,构建运输路径风险、时间、成本最小化的多目标危化品运输路线优化模型,使路径选择更加完善和科学,并应用遗传模拟退火算法求解,通过算例验证模型的合理性,以期对危化品道路运输路径优化提供借鉴。

1 事故应急保障水平

危化品道路运输事故应急保障水平是指危化品在运输过程中发生事故时,事故点能在短时间内获得高效的应急救援,进而将事故后果的影响降到最小的能力。应急救援物资和应急救援人员的调度等救援工作是在运输网络中完成的,而运输网络是由运输节点和路段组成,所以量化某运输过程中的事故应急保障水平可以结合运输节点和路段,且其与应急救援站到事故点的距离密切相关,所以基于广义最大覆盖模型构建包含运输节点的事故应急保障水平模型。当应急救援站到事故点的距离 d 超过应急救援站的覆盖能力上限 R 时,则认为应急救援站的应急救援能力完全无法覆盖;当距离 d 小于应急救援站的覆盖能力下限 r 时,则认为完全覆盖;当距离 d 处于两者之间时,则认为应急保障水平符合一定的函数衰减。所以用分段函数表示运输节点 i 的应急保障水平 D_i ,如式(1)所示。

$$D_i = \begin{cases} 1, & d < r; \\ \frac{R-d}{R-r}, & r \leq d < R; \\ 0, & d \geq R. \end{cases} \quad (1)$$

式(1)是针对路网节点建立的,并不适用于路网中路段事故应急保障水平的计算,由于一条路段是由路网中的连续2个节点组成,所以需要综合考虑2个节点的应急保障水平,在运输节点事故应急保障水平模型的基础上,建立运输路段事故应急保障水平模型^[16],见式(2).

$$D_{ij} = \frac{D_i + D_j}{2}. \quad (2)$$

式中: D_{ij} 为危化品运输路段 ij 的事故应急保障水平; D_i 为运输网络节点 i 的事故应急保障水平; D_j 为运输网络节点 j 的事故应急保障水平.

危化品运输路线的应急保障水平越高,控制事故的能力越强,降低事故运输风险的能力越大,反之亦然.因此,可将应急保障水平对风险的抑制能力转化为一定的补偿系数,进而对危化品道路运输的实际风险进行一定的修正.鉴于应急保障水平与运输风险呈负相关关系,可以利用表示负相关关系的指数函数($0 < a < 1, a$ 为常数)、对数函数($0 < a < 1, a$ 为常数)、反比例函数等,其中指数函数的特性能更好地反映应急保障水平和补偿系数之间的关系,使修正后的风险结果更符合实际,所以本文采用指数函数(式(3))表示道路运输事故应急保障补偿系数,其中 a 取0.85,该取值更加贴合两者之间的关系.

$$H_{ij} = a^{D_{ij}}. \quad (3)$$

式中: H_{ij} 为危化品运输路段 ij 的事故应急保障补偿系数.

2 路径优化多目标模型构建

在危化品运输过程中,既要考虑运输风险,避免对人员、环境和社会造成严重损害,又要考虑运输企业的经济利益,因此在多目标路径规划模型中,把路径风险、运输时间和成本最小化作为决策目标.衡量事故的风险常考虑事故概率和事故后果,当危化品运输事故发生时,往往会对周围人口和环境造成巨大影响,所以结合事故概率、事故影响范围内人口建立运输风险目标函数,并引入应急保障补偿系数使其更加贴合实际.运输时间为所有经过的路段长度除以平均行驶速度,然后对每段路径进行求和.运输路径的成本主要考虑驾驶员的成本、收费站的收费以及路上行驶的油耗.

设 $G(E, A)$ 为危险品道路运输网络, E 为网络中的点集合,即危险品运输的起止点和道路交叉点构成的集合, A 为路段的集合.危险品运输车辆可在网络中任意路段上行驶,运输企业需要在网络 G 中将危险货物从某起点运输到某终点.基于上述分析,优化模型可构建为

$$Z = \min \sum_{(i,j) \in A} P_{ij}^k C_{ij}^k H_{ij} \delta_{ij}; \quad (4)$$

$$T = \min \sum_{(i,j) \in A} \frac{L_{ij}}{V_{ij}} \delta_{ij}; \quad (5)$$

$$U = \min \sum_{(i,j) \in A} (b + m + f) L_{ij} \delta_{ij}; \quad (6)$$

$$C_{ij}^k = S \rho_{ij} p_{\text{暴露}}; \quad (7)$$

s.t.

$$\sum_{(i,j) \in A} R_{ij} \leq R_{\text{lim}}. \quad (8)$$

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{危化品运输车辆经过路段}(i,j), i \neq j; \\ 0, & \text{else.} \end{cases} \quad (9)$$

式中: Z 为运输路径风险; P_{ij}^k 为车辆运输第 k 种危险品通过路段 ij 时的事故概率; C_{ij}^k 为第 k 种危险品经过路段 ij 时的事故后果; δ_{ij} 为0~1相关变量, $\delta_{ij} = 1$ 表示运输路径包含从节点 i 到节点 j 的路段, $\delta_{ij} = 0$ 表示不包含; T 为运输路径耗费的时间; L_{ij} 为路段 ij 的长度; V_{ij} 为路段 ij 的平均行驶速度; U 为运输路径所需费用; b 为每千米危化品运输驾驶员成本; m 为每千米危化品运输的高速过路费用; f 为每千米危化品运输车辆所需油耗费用; S 为事故影响范围,参考文献[17],取 $S = 0.01308 \text{ km}^2$; $p_{\text{暴露}}$ 为暴露概率,取0.2^[18]; ρ_{ij} 为运输路段所属区域的人口密度,采用 ρ_{ij} 与 $p_{\text{暴露}}$ 相乘; R_{ij} 为路段风险值; R_{lim} 为社会风险值.

3 遗传模拟退火算法

解决多目标优化问题的方法有传统优化算法和智能优化算法,使用传统算法时需要人为设置权重或主观提出每个目标函数的期望值,这些因素都可能导致结果存在误差,而智能算法采用迭代的方式寻求整体最优解或接近最优解,具有很强的通适性和全局最优性,这使得它们在解决多目标问题时更具优势.智能算法中,遗传算法利用遗传因子,能启发式地自适应搜索到具有全局最优解的较小区域并以较大的概率趋向于全局最优解,适用于复杂的多目标优化问题,虽然收敛性能不佳,局部搜索能力弱,但具有很强的鲁棒性和全局搜索能力^[19];模拟退火算法基于概率突跳特性,将个别的个体视为最优目标,虽整体的搜索能力不佳,但收敛速度和跳跃性较好,具有优秀的局部寻优能力^[20].结合 2 种算法的优势,采用遗传模拟退火算法求解模型,从一组随机产生的初始解开始搜索全局最优解,通过选择、交叉、变异等遗传操作产生一组新的个体,然后对所产生的各个个体进行模拟退火算法,以其结果作为下一代群体中的个体^[21].此算法不仅可以提高解的精度,还可以提高算法求解优化问题的搜索性能和运算速率.

主要操作步骤如下:

步骤一:输入模型参数(路段长度 L_{ij} , 车辆运行速度 V_{ij} , 事故概率 P_{ij} 等);设置算法参数(群体规模 n , 最大遗传代数 N , 交叉概率 P_c 、变异概率 P_m , 初始温度 $t=t_0$).

步骤二:初始化温度更新次数 $l=0$, 产生初始种群 $P_l(k), k=0$.

步骤三:对现有种群实施如下 4 个操作,直到产生下一代种群.(1)根据选择的适应度函数计算种群中个体的适应度函数值,确定每个个体被选中的概率,并从中选择 r 个染色体形成种群 $P_{l_s}(k+1)$;(2)按一般遗传算法对被保留下的种群 $P_{l_s}(k+1)$ 依次进行交叉变异操作,得到种群 $P_{l_y}(k+1)$;(3)进行退火降温操作,对变异后的种群按照模拟退火算法的接受准则判断是否接受新个体,形成新种群 $P_{l_z}(k+1)$;(4) $P_l(k) = P_{l_z}(k+1), k=k+1$ ($P_l(k)$ 表示经过迭代后的种群),判断遗传迭代数是否达到最大,如果达到转到步骤五,没有则转向步骤四.

步骤四:更新温度 $t_{l+1} = ut_l, u$ 为降温系数, $P_l(k+1) = P_l(k), l=l+1, k=0$.若满足收敛准则,则停止计算输出最优解,否则又转向步骤一.

步骤五:输出最优解.

4 算例

本文以某油库运输 10 t 液化石油气到某加油站为例,通过分析引入和未引入应急保障补偿系数后选择的最优路径结果,验证多目标路径优化模型的可行性.运输网络如图 1,其中起点为节点 1,终点为节点 14,路网中共有 14 个节点,20 条路段,路网中三角形表示应急救援站的位置.各个节点的应急保障水平如表 1,根据应急保障水平模型可以计算出各路段的应急保障水平以及应急保障补偿系数.运输路网中各路段的参数如表 2 所示,其中事故概率参考文献[22]中研究的美国 3 大州的重型运输车辆事故率得出的不同区域和道路类型的运输车辆事故率,通过查询交通数据平台、人口普查数据网站等可以得到路段的其他参数.

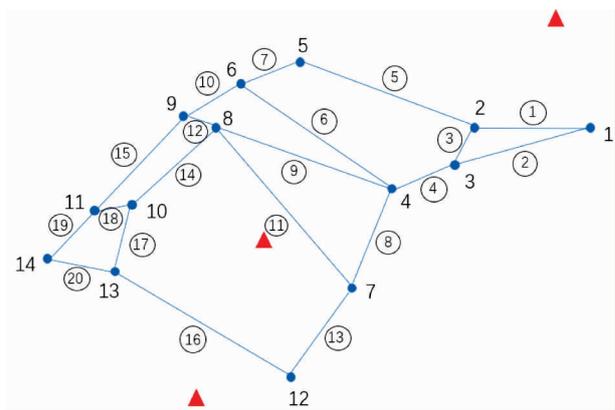


图 1 运输网络

表 1 各节点的应急保障水平

节点	1	2	3	4	5	6	7
应急保障水平	1.000	0.807	0.715	0.507	0.678	0.722	0.874
节点	8	9	10	11	12	13	14
应急保障水平	0.832	0.617	0.524	0.511	1.000	0.998	0.943

表 2 各路段参数

路段号	区域	道路类型	事故概率/(次/辆·10 ⁶ km)	道路长度/km	人口密度/(人/km ²)	应急保障水平	应急保障补偿系数
①	城市	多车道	7.75	9.8	1 000	0.913 5	0.862 0
②	市郊	高速	1.35	10.5	550	0.857 5	0.869 9
③	农村	多车道	1.34	2.3	400	0.771 0	0.882 2
④	农村	高速	0.40	4.4	300	0.611 0	0.905 5
⑤	农村	高速	0.40	13.8	300	0.752 5	0.884 9
⑥	农村	多车道	1.34	12.5	400	0.614 5	0.905 0
⑦	市郊	高速	1.35	4.5	500	0.700 0	0.892 5
⑧	市郊	高速	1.35	4.4	550	0.690 5	0.893 8
⑨	城市	多车道	7.75	11.4	950	0.669 5	0.896 9
⑩	城市	多车道	7.75	6.5	1 000	0.669 5	0.896 9
⑪	城市	多车道	7.75	13.2	750	0.853 0	0.870 6
⑫	城市	单车道	6.03	2.8	700	0.724 5	0.888 9
⑬	城市	单车道	6.03	8.4	700	0.937 0	0.858 7
⑭	农村	高速	0.40	11.7	300	0.678 0	0.895 7
⑮	农村	高速	0.40	9.5	350	0.564 0	0.912 4
⑯	农村	多车道	1.34	10.2	400	0.999 0	0.850 1
⑰	农村	多车道	1.34	6.7	400	0.761 0	0.883 7
⑱	市郊	高速	1.35	2.0	400	0.517 5	0.919 3
⑲	城市	多车道	7.75	6.7	850	0.727 0	0.888 6
⑳	城市	多车道	7.75	7.2	900	0.970 5	0.854 1

通过调用 MATLAB 编写遗传模拟退火算法,设置参数:种群规模 $n=200$,交叉概率 $P_c=0.95$,变异概率 $P_m=0.000 5$,初始温度为 $t=5 500\text{ }^\circ\text{C}$,降温系数 0.9,最大迭代次数 200 次^[23],可以得到引入应急保障补偿系数后的最优路径(图 2a)和未引入应急保障补偿系数的最优路径(图 2b),两者的结果对比如表 3。

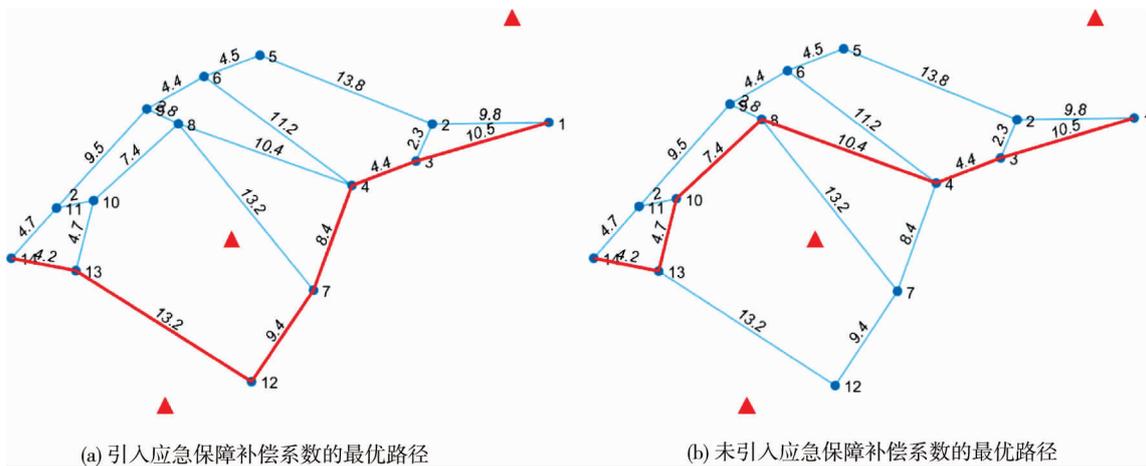


图 2 引入和未引入应急保障补偿系数的最优路径

表 3 引入和未引入应急保障补偿系数的最优路径结果

运输任务	运输路径	运输时间/min	运输成本/元	应急保障水平	运输风险值/(人/10 ⁶ km)
引入应急保障补偿系数的最优路径	1-3-4-7-12-13-14	45.1	225.5	0.844	29.97
未引入应急保障补偿系数的最优路径	1-3-4-8-10-13-14	51.9	259.5	0.758	36.35

由结果可以看出:引入应急保障补偿系数后选择的最优路径在运输风险、时间和成本方面,均优于与未引入应急保障补偿系数选择的最优路径.引入后所选择的路线经过城市道路和高速较多,路况更好,道

路总长度较短,油耗少,且与应急救援站距离较短,更加符合运输企业对于运输路径的安全与经济要求,所以考虑应急保障的多目标路径优化模型具有科学合理性,符合实际需求。

5 结论

1)在危化品道路运输风险模型中,将运输路径的事故应急保障水平考虑在内,可以降低事故后果的影响,使风险模型更加合理科学。

2)建立的运输风险最小、时间最短、成本最低的危化品路径多目标优化模型应对突发事件的应急水平更高,风险得到改善,具有合理性和可操作性,更加符合运输企业对于运输路径的安全与经济要求。

3)本文对运输路径优化的研究仅考虑道路畅通的情况,未考虑在道路上的其他危化品车辆以及社会车辆对路径的影响,而在实际运输过程中,可能会出现道路拥堵或无法通行的情况,对运输时间以及应急响应时间都有一定影响,未来可以更加深入研究。

参考文献:

- [1] 伍江乐,鲁义,施式亮,等.危化品道路运输风险管控现状分析[J].能源与环保,2021,43(2):5-9.
- [2] 周荣义,林金玉,刘勇.危险货物道路运输风险概率模型及应用[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2019,34(1):21-27.
- [3] 梁帅,武彧.危化品交通运输安全风险管控策略探讨[J].中国储运,2022,267(12):137-138.
- [4] 肖博.基于多目标优化的震后应急物流路径规划研究[D].西安:长安大学,2019.
- [5] 许冬明.基于风险分析的危化品运输路径优化研究:以南通市为例[D].北京:清华大学,2017.
- [6] 沈小燕.道路危险货物运输风险分析及路线优化研究[D].西安:长安大学,2009.
- [7] 曹罡.时变条件下危险品城市运输路线选择模型研究[D].长春:吉林大学,2008.
- [8] 武小东.危险化学品物流中心选址问题研究[D].成都:西南交通大学,2007.
- [9] 张敏,杨超,杨珺,等.危化品集成物流管理系统选址—选线模型研究[J].管理科学学报,2008,11(1):59-67.
- [10] 周伟丹.基于多目标规划的危化品物流选址—选线模型研究[D].北京:北京交通大学,2016.
- [11] 张凯月.面向危化品运输车辆的动态路径优化算法及应用研究[D].太原:中北大学,2023.
- [12] HU H, LI X, ZHANG Y Y, et al. Multi-objective location-routing model for hazardous material logistics with traffic restriction constraint in inter-city roads[J]. Computers and Industrial Engineering, 2019, 128: 861-876.
- [13] MA C X, LI Y Z, HE R C, et al. Routeoptimisation models and algorithms for hazardous materials transportation under different environments[J]. International Journal of Bio-Inspired Computation, 2013, 5(4): 252-265.
- [14] WANG Y, ROY N, ZHANG B. Multi-objective transportation route optimization for hazardous materials based on GIS[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2023, 81: 104954.
- [15] SONG L Y, YU L T, LI S W. Route optimization of hazardous freight transportation in a rail-truck transportation network considering road traffic restriction[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 423: 138640.
- [16] 祁磊.危险货物运输网络优化双层规划模型与算法[D].兰州:兰州交通大学,2017.
- [17] 刘犀子.气体类化学品道路运输事故风险评价[D].北京:北京交通大学,2017.
- [18] 曾小红.危险化学品泄漏事故风险评估模型及应用研究[D].重庆:重庆大学,2011.
- [19] 萧秋兰.遗传模拟退火算法的优化研究[J].信息记录材料,2022,23(12):95-98.
- [20] YANG T, WANG W X, WU Q Q. Fuzzy demand vehicle routing problem with soft time windows[J]. Sustainability, 2022, 14(9): 5658.
- [21] 周明,孙树栋.遗传算法原理及应用[M].北京:国防工业出版社,1999.
- [22] HARWOOD D W, VINER J G, RUSSELL E R. Procedure for developing truck accident and release rates for hazmat routing[J]. Journal of Transportation Engineering, 1993, 119(2): 189-199.
- [23] 张莉.城市公交车辆调度优化研究[D].西安:长安大学,2018.