

DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.20211204001

文章编号: 1672-9331(2023)05-0163-08

引用格式: 王佳, 刘丰, 徐永敢, 等. 考虑风险阻抗的危险货物运输路径优化研究[J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2023, 20(5): 163-170.

Citation: WANG Jia, LIU Feng, XU Yonggan, et al. Study on optimization of dangerous goods transportation route considering risk impedance[J]. J Changsha Univ Sci Tech (Nat Sci), 2023, 20(5): 163-170.

考虑风险阻抗的危险货物运输路径优化研究

王佳¹, 刘丰¹, 徐永敢^{1,2}, 赵春笋¹

(1. 长沙理工大学 交通运输工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 景宁畲族自治县交通运输局, 浙江 丽水 323500)

摘要:【目的】在危险货物运输路径优化研究中, 同时考虑运输成本和沿途其他风险对运输的影响, 以期加强风险管控, 提升运输安全水平。【方法】采集各类影响危险货物运输的风险因素数据并通过地理信息系统 (geographic information system, GIS) 嵌入运输网络; 提出风险阻抗的概念, 将其作为路径风险大小的度量; 结合运输成本等构建运输总成本最小、运输路径风险总阻抗最小和局部路段风险过大的可能性最小的三目标路径优化模型, 并设计NSGA-III算法对其进行求解。【结果】与仅考虑总运输成本最小的方案相比, 虽然本文模型所得优化路径的运输总成本略微增加, 但运输路径风险总阻抗与局部路段风险过大的可能性显著下降; 与仅考虑路径总风险最小的方案相比, 虽然运输路径风险总阻抗与局部路段风险过大的可能性有一定增加, 但增幅较小, 而运输成本降低显著。【结论】上述优化模型很好地统筹考虑了运输的经济性与安全性, 还考虑了局部路段风险过高的情况, 因而具有良好的普适性与应用价值。

关键词: 运输路径优化; 危险货物; 风险因素; 风险阻抗; 多目标优化模型

中图分类号: U491.1⁺2

文献标志码: A

0 引言

随着经济的快速发展, 危险货物运量激增, 随之而来的是不断攀升的危险货物运输需求。由于危险货物的特殊性, 一旦在运输过程中发生事故, 将可能造成严重后果。为了降低危险货物运输风险, 减少经济损失, 本文开展运输路径优化研究, 为运输安全管理提供一定的理论支撑。

现有文献对道路危险货物运输做了大量研究, 并取得了许多有价值的成果, 主要集中在运输风险因素分析及运输路径优化两个方面。在运输风险因素分析方面, CONCA等^[1]、BULA等^[2]分析了路段发生事故的原因, 并综合多种因素对路段风险进行评价; 范宝文等^[3]、柳伍生等^[4]从道路交通安全层面分析, 制定评价指标并计算运输危险度; 邹宗峰等^[5]通过精确划分运输风险, 建立了不同种类的道路运输风险测量模型; ZHANG等^[6]、

VERTER等^[7]、BUBBICO等^[8]利用地理信息系统 (geographic information system, GIS) 对危险货物运输进行风险分析与评价; 马晓丽等^[9]使用有序Logit模型与基于菱形标签的事故后果评价模型, 完成了城市道路危险货物运输路线的风险评估; 李长龙等^[10]以槽罐车状态监测系统所监测的变量为依据, 采用Mamdani型模糊推理系统对危险货物运输风险进行了分析。在运输路径优化方面, 通常需要考虑不同风险对路径优化的影响。INANLOO等^[11]、CURRENT等^[12]从危险货物的影响区域、扩散情况和影响人口等方面进行建模。KUMAR等^[13]考虑成本最小目标, 建立了路径优化非线性模型。魏福禄等^[14]通过计算多条路径不同置信水平下的风险值, 分析得到最优路径。刘兰芬等^[15]结合路段特征与危险货物的风险度, 建立了风险度最小的路径优化模型。李立等^[16]收集道路相关数据, 并结合运输成本建立了危险货物最优路径模型。王云鹏等^[17]考虑风险、成本、发生事

收稿日期: 2021-12-04; 修回日期: 2022-05-11; 接受日期: 2022-05-29

基金项目: 湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(201920、202036、202134)

通信作者: 王佳(1980—)(ORCID: 0000-0001-8488-5835), 男, 副教授, 主要从事交通运输规划与管理方面的研究。

E-mail: 67985839@qq.com

故后的补救能力3个方面,构建了危险货物城市道路运输路径优化模型。刘亿鑫等^[18]对需求量与人口数量这两个不确定因素进行灵敏度分析,构建了双重不确定条件下的危险品路径优化模型。张圣忠等^[19]考虑载货量的动态变化和配送时间窗,构建了危险品路径优化模型。

国内外学者在危险货物运输风险与运输路径的研究方面取得了一些成果,但仍存在不足之处,主要体现在以下几个方面:首先,在风险因素分析方面,侧重于分析方法研究,对风险因素考虑不全面,尤其是对沿途环境、地形地貌等考虑较少;其次,在运输路径优化方面,简单地将各路段风险值的和作为路径总风险,忽略了局部风险过大对整个运输路径的影响;此外,对大数据的利用不充分,手段较为单一,没有很好地利用GIS在数据处理与分析方面的强大功能。

首先,为全面考虑风险因素,本文以问题为导向,通过分析历史事故数据,确定主要风险因素,将GIS嵌入运输网络,提出风险阻抗作为路径风险大小的度量;其次,通过开源平台采集风险因素数据,充分利用大数据,并使用GIS对风险因素数据进行处理与分析;再次,为避免局部路段风险过大,在路径优化模型中增加了路段风险阻抗过大的可能性最小这一目标,同时考虑了运输总成本最小与路径总风险最小这两个目标,设计了NSGA-III算法对模型进行求解;最后,通过实例论证本文所建模型与所设计的算法的适用性。

1 风险阻抗的提出

1.1 路段风险阻抗的定义

道路交通阻抗通常是用车辆通过道路的平均行程时间、距离或费用等来度量道路通行的难易程度的。传统路径优化常以道路交通阻抗最小为优化目标。鉴于危险货物运输路径优化的特殊性,除考虑传统的道路交通阻抗外,还要考虑运输过程中人、车、路、环境等其他风险因素对交通安全的影响。危险货物运输通常会选择通行条件好、运输距离短、人口不很集中的路径。因此,本文采用GIS软件进行风险分析,将所有嵌入路网的风险定义为道路风险阻抗,其包括路段风险阻抗与路径风险阻抗。其中,路径风险阻抗是路径中

所有路段风险阻抗的和。

路段风险阻抗是指受路段自身属性以及运输过程中外部环境的影响,该路段在承担危险货物运输任务时所产生的阻力的大小。路段风险阻抗越大,说明该路段危险货物运输的风险越大,反之亦然。其中,路段自身属性主要包含道路等级、通行条件、长度等;外部环境主要包含沿途人口聚集程度、路况、设施分布、地形地貌等。

1.2 主要风险因素的选取

通过综合分析危险货物发生的历史事故数据^[20],本文使用以下6个关键风险因素来反映内外部环境对危险货物运输的阻力,即沿途建筑物分布、沿途人口分布、沿途设施分布、路网结构、地形地貌和交通路况水平。

1.3 数据来源

上述6个风险因素的表征及数据来源为:①沿途建筑物分布:主要描述沿途建筑物的分布情况,用从公开地图(open street map, OSM)网站获取的建筑物的投影面积数据来表征。②沿途人口分布:主要描述沿途人口的分布情况,用从LandScan全球人口动态统计分析数据库获取的人口分布栅格数据来表征。③沿途设施分布:主要描述沿途餐饮、购物等场所及风景名胜、企业、交通设施等的分布情况,用从百度地图、高德地图等开放端口获取的兴趣点(point of interest, POI)数据来表征。④路网结构:主要描述路网的形态结构、等级、宽度、长度等情况,用从OSM网站上的Geofabrik获取的路网属性数据来表征。⑤地形地貌:主要描述地面的起伏状况,用从地理空间数据云网站获取的高程栅格数据来表征。⑥交通路况水平:主要描述交通通行状况和服务水平,可从高德地图、百度地图等提供的可视化实时路况数据中提取。

1.4 数据嵌入

由于数据来源于不同开源网站,需要对数据进行预处理。首先,将数据转换到相同坐标系,并投影至同一坐标系统;然后,利用GIS裁剪工具得到所需路网数据,完成路网构建;最后,利用GIS软件中的相关工具完成数据的矢量化处理与分析,并将预处理后的风险因素数据嵌入路网。

1.5 风险阻抗的计算

上述6个主要风险因素对运输形成的阻力的大小各不相同。本文采用Critic权重法确定不同

风险因素的权重,路段风险阻抗的表达式为:

$$R_{ij} = \sum_{\varphi} W_{\varphi} R_{ij}^{\varphi} \quad (1)$$

式中: R_{ij}^{φ} 为从节点*i*到节点*j*的路段所涉及的第 φ 类风险因素; W_{φ} 为第 φ 类影响因素的权重; R_{ij} 为路段的风险阻抗。

2 模型构建及求解

2.1 模型假设

本文模型假设如下:运输成本与运输距离正相关;道路中任意节点都是互通的;风险阻抗具有可加性,即路径的阻抗等于该路径中各路段阻抗的和;仅考虑危险货物从生产地配送至指定地点的单方向运输。

2.2 模型构建

$G=(N, A)$ 表示道路网,其中, N 为路网的节点集合, A 为路段弧集; (i, j) 表示节点*i*到节点*j*的路段,其中 $i, j \in N, (i, j) \in A$; C_{ij} 为节点*i*到节点*j*的运输成本; R_{ij} 为路段*(i, j)*的风险阻抗; $\max R_{ij}^{p_1}$ 与 $\min R_{ij}^{p_2}$ 为节点*i*到节点*j*之间*P*条可行路径中的最大路段风险阻抗(p_1 路段)与最小路段风险阻抗(p_2 路段)。

危险货物运输路径优化,不仅要考虑运输成本,还需考虑运输过程中的其他风险因素。本文提出3个危险货物路径优化目标:①运输总成本 Z_1 最小;②运输路径风险总阻抗 Z_2 最小;③局部路段风险阻抗过大的可能性最小。其中,目标①、②旨在选择运输成本和风险总阻抗最小的线路;目标③旨在避免局部路段风险阻抗过大,但整条运输路径的风险阻抗不大的极端情况的出现,故构造了使最大路段风险阻抗与最小路段风险阻抗之差 Z_3 最小化的目标函数。

该模型的目标函数为:

$$\min Z_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij} C_{ij} \quad (2)$$

$$\min Z_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{ij} R_{ij} \quad (3)$$

$$\min Z_3 = \max R_{ij}^{p_1} - \min R_{ij}^{p_2} \quad (4)$$

决策变量为:

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{运输车辆从节点}i\text{驶向节点}j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

约束条件为:

$$\sum_{j=1}^N x_{ij}^k \leq 1, \forall i \in N \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{ij} - \sum_{i=1}^N x_{ji} = \begin{cases} 1, & i \text{为起点} \\ -1, & i \text{为终点} \\ 0, & i \text{为其他节点} \end{cases} \quad (7)$$

约束条件中的式(6)表示每条路段只能经过一次;式(7)表示流量守恒。

2.3 模型求解

2.3.1 NSGA-III算法

求解多目标优化问题的方法较多,本文采用的是智能优化算法,其优点在于运算效率较高,求解时间较短。在分析比较了几种常用的智能优化算法后,确定采用遗传算法求解本文所建模型。在遗传算法中,当求解的问题为单目标问题时,一般采用经典的遗传算法,但当求解的问题以多目标形式存在时,使用非支配排序遗传算法比较合适。故本文采用NSGA-III算法,其为第三代非支配排序遗传算法,使用参考点法进行策略选择,可提高多目标函数的求解效率,也更容易得到更优的解集。

NSGA-III算法的计算步骤如下:

step 1:定义参考点集 Z^* ,并生成初始种群 P_1 。

step 2:对初始种群 P_1 进行选择、交叉、变异,生成数量为*N*的子代种群 Q_1 。

step 3:合并种群 P_1 和 Q_1 ,生成数量为 $2N$ 的新种群 R_1 ,其中, $R_1=P_1 \cup Q_1$ 。

step 4:使用快速非支配排序方法对种群进行分层,得到种群个体的排序结果;对同层个体使用参考点法计算每个个体的密度值;基于个体的排序结果和密度值对新种群 R_1 进行修剪,得到数量为*N*的用于下一轮循环的新种群。

step 5:判断是否达到终止条件,若达到,则输出种群分层后的第一层个体;若尚未达到,则转至step 2。

2.3.2 算法编码

不同于常规编码方式,基于十进制优先级的编码是一种间接的编码方式,更适合于基于遗传算法的路径优化问题。基于优先级编码的染色体,其每个元素都是互不相同的,即该种编码方式具有排列编码的特征。

2.3.3 算子选择

算法中有3个算子,分别是初始种群生成时的选择算子、交叉算子和变异算子。

遗传算法需要生成初始种群,考虑种群的多样性,本文采用随机生成的方法生成初始种群;选择算子的确定是遗传算法的关键,本文采用无约束随机选择方法对其进行确定。

本文在算子交叉时采用的是部分匹配交叉方法,其步骤为:①取两条染色体作为父代染色体;②随机产生两个交叉点,匹配区域为两个交叉点之间的基因片段;③对步骤②中取到的片段进行交换;④将匹配区域外的重复部分根据映射关系进行替换,得到两条新染色体。

本文在遗传算法的变异过程中,选用逆转变异算子,其原理是对染色体上随机选择的两个位置上的基因进行交换。

本文对“不允许经过重复节点”的处理方式为:在对用优先级编码的染色体解码时,在剩余网络节点下一步的可达集合中,去除已解码路径节点的对应值。

3 案例分析

本文以长株潭城市群危险货物运输为例,构建模型并进行运输路径的优化求解。在长株潭核心区域内,共有212条路段,141个节点,并已知路段和节点的相关属性数据,路网如图1所示。在求解模型时,给定如下运输任务:从开福区霞凝港运送一批危险货物(石油)至湘潭市岳塘区双马镇。

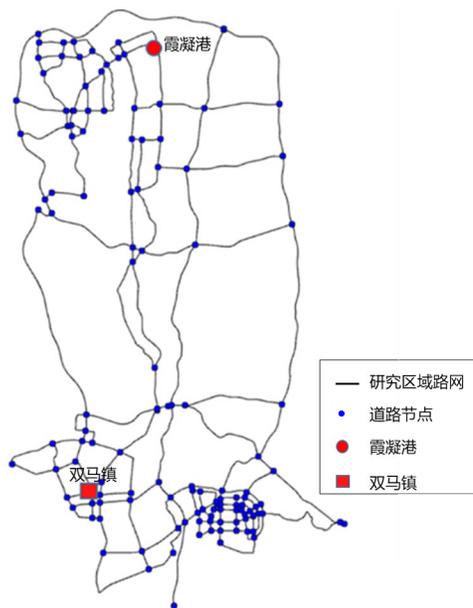


图1 实例路网

Fig. 1 The road network diagram of the case study

3.1 数据嵌入

根据前文所述收集途径,得到6个风险因素的相关数据,对其进行GIS分析处理并嵌入运输网络。根据Critic权重法得到各风险因素的权重,结果见表1。

表1 各风险因素的权重

Table 1 The weight of each risk factor

风险因素	风险因素的表征	权重
沿途建筑物分布	建筑物投影面积	0.125 46
沿途人口分布	人口分布栅格数据	0.227 36
沿途设施分布	POI数据	0.248 97
路网结构	路网属性数据	0.120 74
地形地貌	高程栅格数据	0.185 83
交通路况水平	实时路况数据	0.091 64

根据表1中的权重,利用式(1)可得各路段的风险阻抗,结合路段的自身属性及实际调研结果,获得各路段危险货物运输成本阻抗,见表2。通过GIS对区域内路网的阻抗进行可视化处理,结果如图2~3所示。

表2 路段阻抗

Table 2 The road impedance

路段编号	路段风险阻抗	运输成本阻抗
1	0.311 31	7.840 31
2	0.222 53	2.421 60
3	0.243 08	3.175 09
⋮	⋮	⋮
210	0.214 85	9.231 47
211	0.086 62	0.028 63
212	0.251 66	16.457 49



图2 运输风险阻抗

Fig. 2 The transportation risk impedance

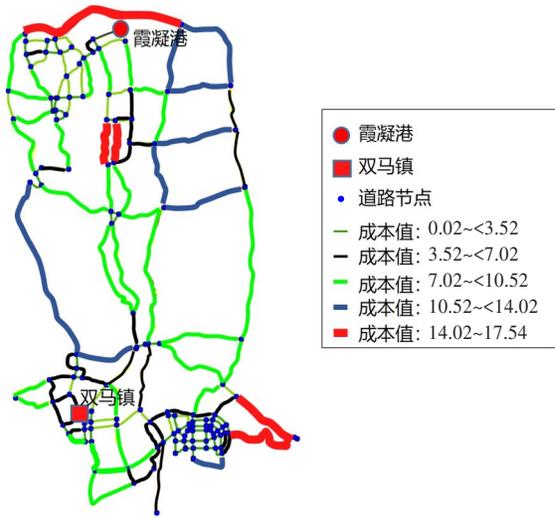


图3 运输成本阻抗

Fig. 3 The transportation cost impedance

3.2 模型求解

本文设计 NSGA-III 算法对优化模型进行求解。其中,种群数量 $N=400$,交叉概率 $P_c=0.9$,变异概率 $P_m=0.8$,迭代次数 $M=200$ 。经过多次调试、计算霞凝港至双马镇的危险货物路径,最终求得的路径优化解如图4所示。

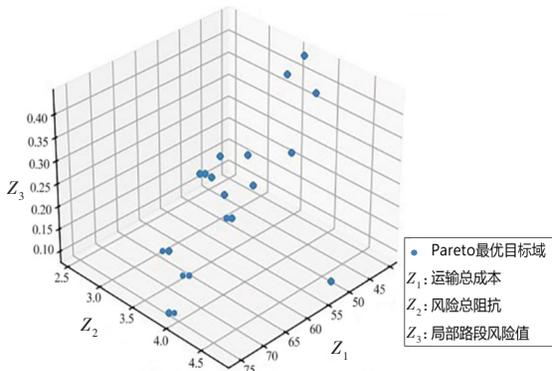


图4 霞凝港至双马镇优化线路求解结果

Fig. 4 Solution result of optimized route Xianing Port to Shuangma Town

求解多目标优化问题得到的是 Pareto 解集,本文依据以下3个原则在 Pareto 解集中选取最优结果:① 危险货物运输路径的风险尽量低;② 尽量降低危险货物运输路径中路段风险阻抗过大的可能性;③ 允许在一定程度上增加运输成本,但增加的不能过多。本文模型优选求解结果见表3。

表3 本文模型解的优选结果

Table 3 Optimal result of the model solution

起讫点	路径	Z_1	Z_2	Z_3
霞凝港至双马镇	136-123-121-104-90-84-81-78-76-74-63-60	43.566	2.574	0.153

3.3 对比分析

在 GIS 中利用网络分析工具,得到霞凝港至双马镇运输成本最低线路(方案1)、风险最低线路(方案2)及本文模型优化求解线路(方案3)的计算结果,见表4及图5~7。

表4 各方案计算结果的对比

Table 4 Result comparison of each scheme

方案	运输成本	路径风险	路段风险阻抗最大差值
运输成本最低线路(方案1)	40.404	3.884	0.244
风险最低线路(方案2)	51.068	2.549	0.147
本文模型求解线路(方案3)	43.566	2.574	0.153

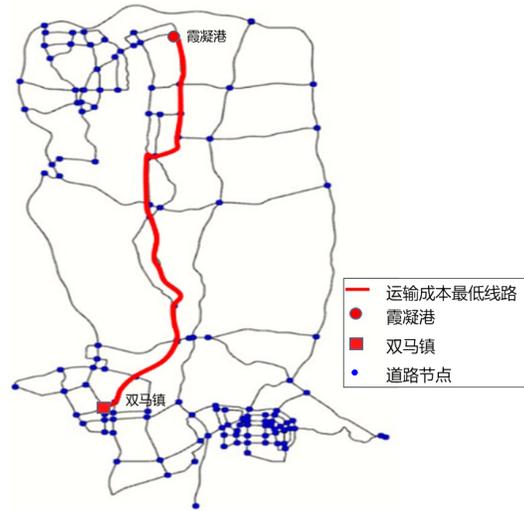


图5 方案1(运输成本最低)

Fig. 5 Scheme 1 (the lowest transportation cost)

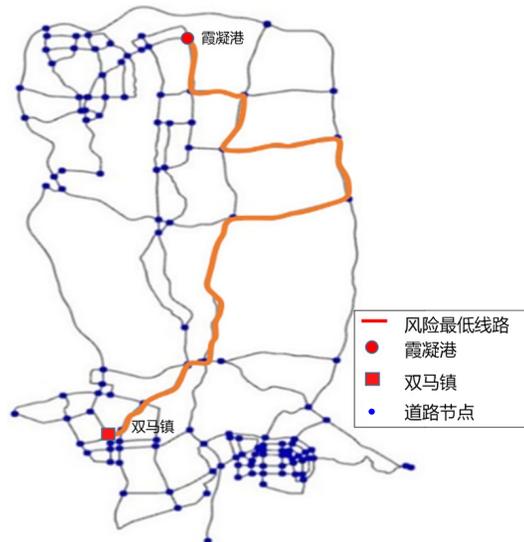


图6 方案2(运输风险最低)

Fig. 6 Scheme 2 (the lowest transportation risk)



图7 方案3(本文构建模型)

Fig. 7 Scheme 3 (model built in this paper)

由表4可知,本文模型所得优化线路的各项指标值均在其他两条线路对应指标值之间。与方案1相比,虽然方案3的运输成本增加了7.83%,但路径风险与路段风险阻抗最大差值显著下降,降幅均超过了30.00%;与方案2相比,虽然方案3的路径风险与路段风险阻抗最大差值有一定增加,但增幅较小,均未超过4.10%,而运输成本降低显著,为14.69%。由此可见,虽然本文模型得到的路径风险与路段风险阻抗最大差值略微增加,但在基本保证安全运输的情况下,其运输成本得以有效降低。

总体来说,总运输成本最低线路以追求经济效益为目的,而对危险货物来说,需要对其运输路径进行风险管控,尽量确保运输安全;路径总风险最低线路忽略运输成本,且即便路径整体风险最低,也存在局部路段风险较高的可能性,适用范围较小;本文模型在上述两种情况的基础上,兼顾运输成本与运输风险,引入路段风险阻抗最大差值最小这一目标,可有效避免路径风险较小而局部路段风险较大的问题,也能更好地权衡危险货物运输成本与运输风险之间的关系,实际可操作性也更强。

4 讨论

1) 本文梳理了影响危险货物运输的各种风险因素,并充分利用大数据分析技术,获得更多的风险因素数据,最终通过可视化分析计算找到最优路径。该方法应用效果较好,考虑因素也更加全面。同时,在传统模型仅考虑成本或仅考虑风险的优化目标中,加入了局部路段风险阻抗过大的可能性最小的优化目标,更具有现实意义。但在求解结果中

并未出现风险最小的单目标模型下局部路段风险过大的情况,这可能与所选取的风险因素种类与数量以及路网的复杂程度有关。因此,在后续的研究中可针对某一类危险货物运输的风险因素进行量化分析,以得出更具有普适性的结论。

2) 本文是在所有路段风险阻抗可相加的假设下进行模型求解的。但在实际应用中,存在某些路段危险货物运输限行的情况,同时路网交通情况的不确定性也会使道路节点互通的假设得不到满足^[21-22]。在后续的研究中,将考虑路段的通行限制及通行情况等因素,设计出更符合实际的危险货物运输路径。

5 结论

本文利用GIS技术将风险因素数据嵌入路网,提出路段风险阻抗的概念,以路段风险阻抗衡量路段危险货物运输风险的大小;提出了局部路段风险过大的可能性最小的目标,设立这样的优化目标可有效避免路径整体风险低而局部路段风险高的情况。

本文全面考虑了多种风险因素的共同影响,同时避免了路径整体风险低而局部路段风险高的情形,得到了更加安全合理的优化路径,研究结果与现实危险货物运输的路径选择结果十分接近,这将为后续的危险货物路径研究提供一定参考。

[参考文献]

- [1] CONCA A, RIDELLA C, SAPORI E. A risk assessment for road transportation of dangerous goods: a routing solution [J]. *Transportation Research Procedia*, 2016, 14: 2890-2899. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.407.
- [2] 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. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.015.
- [3] 范宝文, 向红艳. 山区高速公路路段危险度计算模型 [J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2013, 10(3): 39-43.
FAN Baowen, XIANG Hongyan. Calculation model of mountainous highway risk [J]. *Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science)*, 2013, 10(3): 39-43.
- [4] 柳伍生, 肖必弘. 基于模糊机会约束规划和鲁棒优化的绿色多式联运路径优化研究 [J]. *长沙理工大学学报(自然科学版)*, 2022, 19(1): 96-104. DOI:

- 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.012.
- LIU Wusheng, XIAO Bihong. Research on green multimodal transportation route optimization based on fuzzy chance-constrained programming and robust optimization [J]. Journal of Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2022, 19(1): 96-104. DOI: 10.19951/j.cnki.1672-9331.2022.01.012.
- [5] 邹宗峰, 张保全. 危险化学品道路运输安全管理现状及发展趋势研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(6): 129-134. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2011.06.011.
- ZOU Zongfeng, ZHANG Baoquan. Research status and development trend of hazardous materials transportation safety management [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(6): 129-134. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2011.06.011.
- [6] ZHANG J J, HODGSON J, ERKUT E. Using GIS to assess the risks of hazardous materials transport in networks [J]. European Journal of Operational Research, 2000, 121(2): 316-329. DOI: 10.1016/S0377-2217(99)00220-9.
- [7] VERTER V, KARA B Y. A GIS-based framework for hazardous materials transport risk assessment [J]. Risk Analysis, 2001, 21(6): 1109-1120. DOI: 10.1111/0272-4332.216179.
- [8] BUBBICO R, FERRARI C, MAZZAROTTA B. Risk analysis of LPG transport by road and rail [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2000, 13(1): 27-31. DOI: 10.1016/S0950-4230(99)00057-1.
- [9] 马晓丽, 刘禹杰, 陆键. 城市道路危险货物运输风险评估[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(5): 179-184. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.05.030.
- MA Xiaoli, LIU Yujie, LU Jian. Research on assessment of risk in hazardous materials transportation on urban road [J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(5): 179-184. DOI: 10.16265/j.cnki.issn1003-3033.2018.05.030.
- [10] 李长龙, 刘伟, 周邵萍. 基于 Mamdani 模糊推理的槽罐车运输安全评价[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2017, 43(4): 591-596. DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.2017.04.021.
- LI Changlong, LIU Wei, ZHOU Shaoping. Transportation safety assessment of tank vehicle based on mamdani fuzzy inference [J]. Journal of East China University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2017, 43(4): 591-596. DOI: 10.14135/j.cnki.1006-3080.2017.04.021.
- [11] INANLOO B, TANSEL B. A transportation network assessment tool for hazardous material cargo routing: weighing exposure health risks, proximity to vulnerable areas, delay costs and trucking expenses [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2016, 40: 266-276. DOI: 10.1016/j.jlp.2016.01.002.
- [12] CURRENT J, REVELLE C, COHON J. The minimum-covering/shortest-path problem [J]. Decision Sciences, 1988, 19(3): 490-503. DOI: 10.1111/j.1540-5915.1988.tb00282.x.
- [13] KUMAR A, ROY D, VERTER V, et al. Integrated fleet mix and routing decision for hazmat transportation: a developing country perspective [J]. European Journal of Operational Research, 2018, 264(1): 225-238. DOI: 10.1016/j.ejor.2017.06.012.
- [14] 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. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2020.03.003.
- WEI Fulu, LIU Pan, LI Zhibin, et al. A optimal routing method of hazardous materials transportation based on VaR [J]. Journal of Transport Information and Safety, 2020, 38(3): 17-23. DOI: 10.3963/j.jssn.1674-4861.2020.03.003.
- [15] 刘兰芬, 杨信丰, 何瑞春, 等. 基于路段风险度的城市危险品运输路径优化选择[J]. 兰州交通大学学报, 2013, 32(6): 129-133. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4373.2013.06.028.
- LIU Lanfen, YANG Xinfeng, HE Ruichun, et al. Transportation route selection for urban hazard material transportation based on risk degree of link [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2013, 32(6): 129-133. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4373.2013.06.028.
- [16] 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. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2021.01.016.
- LI Li, DENG Yutong, MU Lingling. Path optimization of dangerous goods transportation based on improved NSGA-II algorithm [J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(1): 111-117. DOI: 10.13578/j.cnki.issn.1671-1556.2021.01.016.
- [17] 王云鹏, 孙文财, 李世武, 等. 基于 Arc GIS 的危险品城市运输路径优化模型[J]. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(1): 45-49. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxgbx2009.01.036.
- WANG Yunpeng, SUN Wencai, LI Shiwu, et al. Route optimization model for urban hazardous material transportation based on Arc GIS [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2009, 39(1): 45-49. DOI: 10.13229/j.cnki.jdxgbx2009.01.036.
- [18] 刘亿鑫, 朱小林. 双重不确定条件下危险品运输的多目标优化[J]. 计算机集成制造系统, 2020, 26(4): 1130-1141. DOI: 10.13196/j.cims.2020.04.026.
- LIU Yixin, ZHU Xiaolin. Multi-objective optimization of hazardous materials transportation under double uncertainty conditions [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2020, 26(4): 1130-1141. DOI: 10.13196/j.cims.2020.04.026.
- [19] 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. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3852.2020.04.002.
- ZHANG Shengzhong, CHEN Tingting, SUN Rongting, et al. Research on optimization of hazardous materials transportation vehicle route considering load capacity [J]. Journal of Wuhan University of Technology (Information & Management Engineering), 2020, 42(4): 290-297. DOI: 10.3963/j.issn.2095-3852.2020.04.002.
- [20] 王能民, 张萌, 何正文. 危险品运输车辆路径优化问题研究综述[J]. 河北工业大学学报, 2021, 50(2): 60-68. DOI: 10.14081/j.cnki.hgdxb.2021.02.010.
- WANG Nengmin, ZHANG Meng, HE Zhengwen. A review of researches on vehicle routing optimization for hazardous materials transportation [J]. Journal of Hebei University of Technology, 2021, 50(2): 60-68. DOI: 10.14081/j.cnki.hgdxb.2021.02.010.
- [21] 郭权, 周和平, 欧阳瑞祥, 等. 动态信息下的机场定制巴士路径优化[J]. 交通科学与工程, 2021, 37(2): 85-90. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.013.
- GUO Quan, ZHOU Heping, OU-YANG Ruixiang, et al. Route optimization of customized airport bus based on dynamic information [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2021, 37(2): 85-90. DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2021.02.013.
- [22] 刘津洋. 区间阻抗下无人驾驶接驳出租车合乘路径优化[J]. 公路与汽运, 2021(3): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.008.
- LIU Jinyang. Optimization of carpooling path of unmanned connecting taxi under interval impedance [J]. Highways & Automotive Applications, 2021(3): 35-38. DOI: 10.3969/j.issn.1671-2668.2021.03.008.

Study on optimization of dangerous goods transportation route considering risk impedance

WANG Jia¹, LIU Feng¹, XU Yonggan^{1,2}, ZHAO Chunzheng¹

(1. School of Traffic and Transportation Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;
2. Transportation Bureau of Jingning She Autonomous County, Lishui 323500, China)

Abstract: [Purposes] In the study of dangerous goods transportation route optimization, the impact of transportation cost and other risks along the route on transportation are considered simultaneously to strengthen risk control and improve the transportation safety level. [Methods] The data of various risk factors affecting dangerous goods transportation are collected and embedded into the transportation network through a geographic information system (GIS). Then, the concept of risk impedance is proposed as a measure of the risk size of the path. Moreover, a three-objective path optimization is constructed with the minimum total transportation cost, the minimum total risk impedance of the transportation path and the minimum possibility of excessive risk in the local section, which is solved by the designed NSGA-III algorithm. [Findings] Compared with the solution considering only the minimum total transportation cost, although the total transportation cost of the optimized path from this model increases slightly, the total risk impedance of the transportation path and the possibility of excessive risk of the local road section decrease significantly. Compared with the solution that only minimizes the total risk of the route, the total risk impedance of the route and the possibility of excessive risk of the local section have increased. However, the increase is minor, while transportation costs are reduced significantly. [Conclusions] The proposed model has well considered the economic and safety of transportation and the case of excessive risk in local sections, so it has good generalization and application value.

Key words: transportation route optimization; dangerous goods; risk factor; risk impedance; multi-objective optimization model

Manuscript received: 2021-12-04; **revised:** 2022-05-11; **accepted:** 2022-05-29

Foundation item: Projects (201920, 202036, 202134) supported by Science and Technology Progress and Innovation Program of Hunan Provincial Department of Transportation

Corresponding author: WANG Jia (1980—) (ORCID: 0000-0001-8488-5835), male, associate professor, research interesting: transportation planning and management. E-mail: 67985839@qq.com

(责任编辑:石月珍;校对:刘平;英文编辑:刘至真)