

时变条件下有害物品运输的路径选择与决策

李 飘, 于影霞

(华东交通大学交通运输与物流学院, 江西 南昌 330013)

摘要:为解决传统的路径规划中,目标少、静态性,无法真实模拟现实情境的问题。研究了时变条件下,同时考虑成本、环境风险、人口风险的多目标路径优化及选择问题。建立了时变条件下多个不同出发时间且有到达时间限制的有害物品运输的多目标最短路径选择的数学模型;设计了该模型下的相关算法;考虑到实际决策环境的复杂度以及决策者理性的有限性,提出了综合k-最短路径算法和逼近理想解排序法(TOPSIS法)的算法,用k-最短路径算法分别确定各单目标的有效路径,再用TOPSIS法计算各有效路径到正负理想解的欧氏距离以及贴近度,比较优选决策者满意的路径。最后通过一个算例,证明所提出的模型是有效的。

关键词:时变网络;有害物品运输;多目标优化;扩展型Dijkstra法;k-最短路径;TOPSIS法;路径选择

中图分类号:U16;X951

文献标志码:A

本文引用格式:李飘,于影霞.时变条件下有害物品运输的路径选择与决策[J].华东交通大学学报,2021,38(1):79-87.

Multi-Objective Optimization and Path Selection of Hazardous Materials Transportation Under Time-Varying Conditions

Li Piao, Yu Yingxia

(School of Transportation and Logistics, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to solve the problem of less target, static circumstance and real situation cannot be simulated in traditional path planning, under the background of the time-varying conditions, cost, environmental risk and population risk were considered in the multi-objective path optimization and selection. A mathematical model of multi-objective shortest path selection problem with time-varying conditions and multiple departure time (segmentation time) for hazardous goods transportation was established and designed. Considering the complexity of the actual decision-making environment and the limitation of the rationality of the decision-makers, the algorithm of comprehensive k-shortest path and approximating ideal solution sorting method (TOPSIS method) was proposed. The effective path of each single target was determined by k-shortest path algorithm. Then, the effective path to the positive and negative ideal solutions was calculated by TOPSIS method. Finally, an application example was given to prove the effectiveness of the proposed model.

Key words: time-varying network; transportation of hazardous materials; multi-objective optimization; extended Dijkstra method; k-shortest path; TOPSIS method; path selection

Citation format: LI P, YU Y X. Multi-objective optimization and path selection of hazardous materials transportation under time-varying conditions[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2021, 38(1): 79-87.

收稿日期: 2020-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(71861011)

作者简介: 李飘(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为危险品运输。E-mail: 462499742@qq.com。

通信作者: 于影霞(1964—), 女, 教授, 研究方向为危险品运输。E-mail: yyxhbl@163.com。

有害物品具有区别于其他一般物品的物理、化学、生物特性,是一种容易在生产、运输、储存等活动中发生爆炸、燃烧、中毒等灾害事故的某一类特殊物品^[1]。根据有关研究^[2-3]和数据发现,近年来,有害物品的生产和运输量都在逐年增加。Wang N等^[3]发现,在美国,在过去的十年中,每年有3亿多吨与有害物质相关的运输;在我国,以2015年为例,有害物品运输的相关车辆和人员分别达到310 000辆和120万人,而有害物品运输的企业达到11 000多家。这些企业运输了约10亿吨的有害物质,占有有害物质运输方式的60%以上,在全球排名第二^[2]。

由于有害物品运输车辆普遍呈现质心高、尺寸长、重量大和运载品危险性高等特点,导致其制动性能差,碰撞和被追尾的概率高于一般物品运输车辆,且危害性大^[4]。另外,在实际行车过程中,驾驶员是能否保证安全运输的重要因素。倘若驾驶员无法在行驶过程中获得及时、足量、合适的信息,或受知识经验所限无法对所获信息做出正确的判断和分析,身临险境却无警告提示时,比较容易发生事故^[5]。因为这些危害特性及发展现状,使有害物品的运输成为研究的热点。研究时变条件下有害物品运输的多目标路径选择问题,找出符合各利益相关者的有效路径并进行综合评价优选,将有助于降低前者的运输成本和潜在风险,建构愈加完善的公共安全系统。

目前涉及到有害物品运输的路径选择问题,多集中在静态条件下的研究,较少考虑到道路网络的时变特性等动态特征^[6-7]。动态条件下的但相对较近的研究是魏航^[8-9]研究了有到达时间限制和允许在运输网络中等待的情况,以及考虑了有害物品运输过程中有宵禁限制(curfews)的情况。其次,需要同时考虑成本、风险等多个目标是有害物品运输区别于其他一般物品运输的重要特征^[10]。近年来,在多目标约束下的有害物品运输的研究几乎较少涉及到3个目标,几乎大部分都是双目标问题。Pamucar等^[11]在城市道路网络有害物质运输路径多目标选择的问题上,将成本和风险作为双目标进行考虑;Wei等^[12]将运输成本和受影响人数作为双目标,用基于模糊仿真的遗传算法(GA)来解决危险品运输路径问题。另外,多目标最短路径算法研究也多是在静态条件下进行的,并且相当

多的学者选择用线性加权的方式得到在有害物品运输的有效路径。

由上述研究成果可知:其一,目前对有害物的路径选择的研究,主要假设背景为静态环境,与现实复杂动态变化的情形有一定差距;其二,时变条件下的多目标优化问题中,有害物品的运输大多集中在双目标的问题上,较少涉及到三个目标,不太能满足实际场景中多种多样的目标需求;其三,在处理多目标最短路的建模问题时,一般考虑对多目标线性加权,但实际上线性加权中的权重的确定比较困难,因而会导致有效路径具有一定的主观性。

鉴于此,在时变条件下,同时考虑成本、环境风险和人口风险等因素,将动态规划的思想及扩展型Dijkstra法、k-最短路径算法、逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to ideal solution, TOPSIS)运用到这篇论文中;构建多个不同出发时间且有到达时间限制的有害物品运输的多目标最短路径选择的数学模型;设计多目标最短路径选择和决策的算法;最后给出一个算例,验证算法的可行性,以期对复杂动态情景中的有害物品运输的多目标路径决策提供策略支持。

1 问题描述

一般地,在静态网络运输路径问题中,车辆被假定在0时刻从车场出发,不考虑行驶成本、风险以及行驶时间的关系。但在有害物品动态网络运输路径问题中,现实生产生活中复杂多变的交通状况以及交通管制,往往导致行车时间、成本呈周期性变化。在时变网络运输问题中,考虑将运输车辆的出发时间优化和路径优化结合起来,才能得到比较有现实意义的优化方案。

在有害物品运输的多目标路径选择问题中^[11-15],因有害物品运输具有低概率高风险特性,故风险和成本作为主要影响因子一般要被考虑在内。但是,在实际运输情景中,有害物品运输对人以及环境的风险大小程度是不一样的,笼统的将其归为一类,不符合真实场景下的各利益方(承运商、运营商、终端用户、政府机构、监管机构等)的抉择。将风险划分为对人的风险以及对环境的风险,在这里将对人的风险量化为人口覆盖率(即该时段

的人口覆盖率越高,人口风险越高),而对环境的
 风险表现为可能造成的区域内基础设施、自然因
 素等的危害。最后,将成本、环境风险、人口覆盖率
 作为本文时变条件下多目标优化问题中的三大主
 要目标。

综上,时变条件下有害物品运输的多目标最
 短路问题的描述如下:给定运输网络 $G=(N,E)$,其
 中 E 为各个节点间的有向边的集合, N 为节点集。
 另外, $|N|=n, |E|=m$ 。接着,令 $c(i,j,t_i), r(i,j,$
 $t_i), p(i,j,t_i)$ 分别为在时间 t_i 从节点 i 出发,节点 i
 和节点 j 间的成本、环境风险和人口覆盖率,且三
 者均为非负实数。 $t(i,j,t_i)$ 为在时间 t_i 从节点 i 出
 发,节点 i 和节点 j 之间所需的时间, $t(i,j,t_i)$ 为
 一个整数。其中,节点 i 包括起点 O ,节点 j 包括终
 点 D 。 $U(O)$ 为车辆从起点 O 允许出发的离散时间的
 集合, $|U(O)|=U$ 。求在时间 T 之前(T 为整数),从
 起点 O 到终点 D 之间的最短路。

2 模型建立

建立时变条件下,关于有害物品运输的多目标
 最短路的数学模型(有到达时间限制),定义如下
 变量

$$y_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{从节点 } i \text{ 到节点 } j \text{ 之间存在运输任务} \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

这样,有到达时间限制的有害物品运输的多目标最
 短路模型可以描述为

$$\min C = \sum_{(i,j)} y_{ij} c(i,j,t_i) \quad (1)$$

$$\min R = \sum_{(i,j)} y_{ij} r(i,j,t_i) \quad (2)$$

$$\min P = \sum_{(i,j)} y_{ij} p(i,j,t_i) \quad (3)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_j y_{ij} - \sum_j y_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{若 } i=0 \\ -1, & \text{若 } i=D \forall i \in N \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (4)$$

$$\sum_j y_{ij} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (5)$$

$$y_{ij} \in 0, 1 \quad \forall (i,j) \in N \quad (6)$$

$$u + \sum_{(i,j)} y_{ij} t(i,j,t_i) \leq T \quad \forall (i,j) \in E, u \in U(O) \quad (7)$$

3 算法

3.1 基本定义

为了获得时变条件下多目标最短路的算法,这
 里参考文献[10]并给出如下两个定义:

定义 1 若 $r=(O=1,2,\dots,s=D)$ 为从起点 O 到终
 点 D 之间的一条路径,令 $t_1=s(O)$,令 t_1 为到达节点
 i 的时间, $t_i=t_{i-1}+t(i-1,i,t_{i-1}), t_{i-1}$ 为到达节点 $i-1$ 的时
 间, $2 \leq i \leq s, u \in U(O)$ 。

定义 2 若 $r=(O=1,2,\dots,s=D)$ 为从起点 O 到终
 点 D 之间的一条路径,令 z_i^k 到达节点 i 的目标 k 的
 值,并令 $z_i^k=0, z_i^k=z_{i-1}^k+z(i-1,i,t_{i-1}), z_{i-1}^k$ 到达节点 $i-1$
 的目标 k 的值, $2 \leq i \leq s, k=1,2,\dots,K$ 。

3.2 算法步骤

基于动态规划的思想分析时变条件下的多目
 标最短路:通过将每一到达时间的最短路不断迭代
 并向后推移,直到求得到达终点的最短路。另外,这
 里将运用到标号法,这是一种能在同一阶段状态
 下,同时给出不同因素、目标值的数学方法^[10]。由于
 这里探讨的是时变条件下的有害物品运输的最短
 路问题,故是在原始标号形式上进行扩展。逼近理
 想解排序法(TOPSIS 法)是一种多指标多方案的综
 合评价方法,它的原理是根据待评价对象和理想化
 目标的接近程度,对其进行相对优劣排序,具有概
 念简单、易于操作的特点^[16]。

算法步骤如下:

步骤 1:将运输网络进行划分,得到阶段数 Q ,
 令初始阶段 $q=0$ 。

步骤 2:对各个节点的标号进行初始化,选取 U
 (O) 中的最小值 u ,并对起点以临时标号 $[(I,0,\dots,$
 $0,u),(-,-,-)]_{1,0}$ 。

步骤 3:获得 $N_{\bar{y}}, N_q$ 为阶段 q 的所有节点集合。

步骤 4:对所有 $i=N_{\bar{y}}$ 依次进行以下步骤。

1) 搜索所有的 $j \in FS(i), FS(i)$ 为在节点的所有
 前向节点的集合, $(i,j) \in E$ 。

2) 通过计算分别获得 $t_{j,l}$ 和 $z_{j,l}^k$

$$t_{j,l} = t_{j,l} + t(i,j,t_i) \quad \forall (i,j) \in E, k=1,2,\dots,K \quad (8)$$

$$t_{j,l}^k = z_{j,l}^k + z^k(i,j,t_i) \quad \forall (i,j) \in E, k=1,2,\dots,K \quad (9)$$

式中: $z_{j,l}^k$ 表示节点 j 在阶段 q 的第 l 个标号的第 k
 个目标值; $z_{j,l}^k$ 表示节点 i 在阶段 $q-1$ 的第 l' 个标号
 的第 k 个目标值; $z^k(i,j,t_i)$ 表示在时间 t_i 从节点 i 出
 发,节点 i 和节点 j 之间的第 k 个目标值; t_i 表示节

点 i 在阶段 $q-1$ 的第 l' 个标号; $t_{j,l}$ 表示节点 j 在阶段 q 的第 l 个标号的时间; $t_{j,l'}$ 节点 i 在阶段 $q-1$ 的第 l' 个标号的时间; $t(i,j,t_i)$ 表示在时间 t_i 从节点出发, 节点 i 和节点 j 之间的所需的时间。

3) 对所有的 j 分别以标号 $[(j, z_j^1, z_j^2, \dots, z_j^k, t_j), (i, l', q-1)]_{l,q}, j \in N$ 。

4) 对任意节点 j 的标号 $[(j, z_j^1, z_j^2, \dots, z_j^k, t_j), (i, l', q-1)]_{l,q}$, 若 $t_j > T$, 则删去此标号。

5) 将 N_q 中的所有节点的标号进行对比, 计算并得到不同到达时间的有效路径及永久标号。

6) 令 $q=q+1$ 。

步骤 5: 若 $q > Q$, 对比终点 D 的所有标号, 然后按照目标值的大小对这些标号进行排序, 得到其中目标值最小的标号。然后根据这些标号逆向推导, 从而获得出发时间为的最短路; 否则, 转步骤 3。

步骤 6: 若 $Q = \emptyset$, 结束; 否则转步骤 2。

步骤 7: 获得最短路径集合 Π 。

步骤 8: 分别求出目标 $q (q=1, 2, \dots, Q)$ 的最小值 $\min A_q$, 并给出目标 $q (q=1, 2, \dots, Q)$ 的上限; $A_{upq} (q=1, 2, \dots, Q)$ 。

步骤 9: 得到上限为 $A_{upq} (q=1, 2, \dots, Q)$ 的路径集合 $\Omega_q (q=1, 2, \dots, Q)$ 。

步骤 10: 得到集合 $Q^* = \bigcap_{q=1}^Q \Omega_q$ 。

步骤 11: 得到 Q^* 的有效路径集合 Π^* 。

步骤 12: 分 3 种情形处理。

情形 1: 若 $|\Pi^*| = 0$, 则转步骤 14;

情形 2: 若 $|\Pi^*| \leq 2$, 若决策者对此路径满意, 结束; 否则转步骤十四;

情形 3: 若 $|\Pi^*| > 2$, 则此时备选路径不止 1 条, 转步骤 13。

步骤 13: 运用 TOPSIS 法求解各方案有效路径的贴近度。通过计算各个有效路径与正、负理想解的欧氏距离, 进而计算各个方案点的贴近度, 并在此基础上进行贴近度的排序, 从而判断方案的优劣。决策原则是贴近度越大越好。

1) 首先将决策矩阵化为规范化矩阵, 由原始数据经归一化处理后得到

$$Z_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_{ij}^2}} \quad (10)$$

2) 构造加权的规范化矩阵 G_{ij}

$$G_{ij} = Z_{ij} W_j \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (11)$$

其中 W_j 表示第 j 个指标的权重。

3) 确定正理想解 G_i^+ 和负理想解 G_i^- 。这里指标属性为成本型, 故 $G_i^+ = \min G_{1i}, G_{2i}, \dots, G_{mi} \quad i=1, 2, \dots, n$ 并且 $G_i^- = \max G_{1i}, G_{2i}, \dots, G_{mi} \quad i=1, 2, \dots, n$ 。

4) 计算各个方案点到正理想解和负理想解的欧式距离 G_i^+ 和 G_i^-

$$G_i^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (G_{ij} - G_i^+)^2} \quad (12)$$

$$G_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (G_{ij} - G_i^-)^2} \quad (13)$$

5) 计算各个方案点的贴近度 C_i^+

$$C_i^+ = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (14)$$

6) 方案优劣排序。将 C_i^+ 由大到小进行降序排列。

步骤 14: 调整目标 $q (q=1, 2, \dots, Q)$ 的上限 $A_{upq} (q=1, 2, \dots, Q)$, 转步骤 9。

3.3 算例

有害物品的运输风险受现实环境中各种外界因素的影响, 其运输过程是动态变化的。在现实情境中, 运输有害物品的路线可能是复杂多变, 运输途中也存在随时停靠的可能性(这就造成了对该区域潜在的风险), 过于复杂而不便模拟, 所以本文参考文献[10]中的经典运输网络模型。另外, 每个途径节点的人口覆盖率等数据将参考文献[8]中各时刻运输成本和风险, 引用文献[10]中的人口覆盖率和运输时间, 如表 1 所示。

以图 1 为例。假设在时刻 0 时, 车辆从起点 O 出发, 同时, 每隔一个小时整点出发一次, 最终在 24 时前到达终点 D 。求从起点 O 到终点 D 之间的最短路。

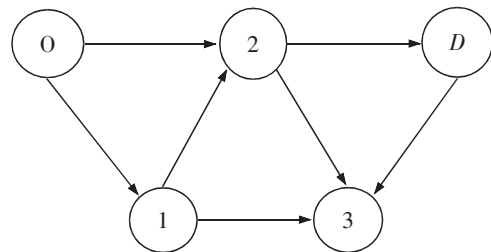


图 1 运输网络

Fig.1 Transportation network

表 1 各条有向边在不同时间条件下的运输成本、环境风险、人口覆盖率和运输时间

Tab.1 Transportation costs, environmental risks, population coverage and transportation time of each article with directional edges under different time conditions

有向边	时段					
	[0,2)	[2,4)	[4,6)	[6,8)	[8,10)	[10,12)
(0,1)	40/20/30/4	40/20/30/4	60/15/30/4	60/15/30/4	80/10/30/3	60/10/30/3
(0,2)	120/40/100/8	150/40/100/8	150/40/100/8	170/42/100/8	170/42/80/6	130/45/80/6
(1,2)	60/20/110/4	60/20/110/4	80/25/100/4	80/25/100/4	60/25/90/5	60/30/90/5
(1,3)	30/15/20/3	30/15/20/3	20/15/20/3	10/20/20/3	10/20/40/3	20/20/40/3
(2,3)	80/30/120/6	80/30/120/6	80/30/120/6	120/25/120/6	120/25/100/6	140/20/100/6
(2,D)	50/15/60/3	50/15/60/3	50/10/60/3	30/10/60/3	30/10/50/2	20/10/50/2
(3,D)	40/25/120/5	40/25/120/5	50/25/120/5	50/30/120/5	60/30/150/5	60/30/150/5

有向边	时段					
	[12,14)	[14,16)	[16,18)	[18,20)	[20,22)	[22,24)
(0,1)	70/10/45/3	30/15/45/3	30/15/65/2	40/20/65/2	40/20/30/1	40/20/30/1
(0,2)	130/50/80/8	150/45/80/8	150/45/90/8	130/45/90/8	130/42/70/9	120/42/70/9
(1,2)	80/30/80/5	60/25/80/5	80/25/80/5	60/20/80/5	80/20/90/6	80/20/90/6
(1,3)	20/30/40/4	20/20/40/4	30/20/30/4	30/20/30/4	30/15/30/3	30/15/30/3
(2,3)	140/20/80/5	160/20/80/5	160/25/80/5	12/25/80/5	100/20/80/4	80/20/80/4
(2,D)	20/10/50/2	20/10/50/2	20/10/80/2	30/15/80/2	40/15/80/3	40/20/80/3
(3,D)	80/40/150/6	80/30/150/6	60/30/130/5	40/25/130/5	40/25/130/6	40/25/130/6

运用动态规划和扩展的 Dijkstra 标号法,可以获得从不同时间点出发的各个节点的相关标号,如表 2 所示。

接着,选取不同的出发时间,在上文所给算法和表 2 的基础上分别求得不同出发时间下的最短路径,结果如表 3 所示。

表 2 各个节点的标号
Tab.2 Labels of each node

节点	1	2	3	4	5
<i>O</i>	[(0,0,0,0, (-,-,-))]P _{1,0}				
1	[(1,40,20,30, 4),(0,1,0)]P _{1,1}				
2	[(2,120,40,100, 8),(0,1,0)]P _{1,1}	[(2,120,45,130, 8),(1,1,1)]P _{1,2}			
3	[(3,60,35,50, 7),(1,1,1)]P _{1,2}	[(3,240,65,200, 14),(2,1,1)]P _{2,2}	[(3,240,70,230, 14),(2,1,2)]P _{1,3}		
<i>D</i>	[(D,150,50,150, 10),(2,1,1)]P _{1,2}	[(D,150,55,180 10),(2,1,2)]P _{1,3}	[(D,110,65,170 12),(3,1,2)]P _{2,3}	[(D,320,95,350, 20),(3,2,2)]P _{3,3}	[(D,320,100,380, 20),(3,1,3)]P _{1,4}

表3 考虑成本、环境风险和人口覆盖率3个目标的最短路
 Tab.3 Considers the short-circuit of the three objectives of cost, environmental risk and population coverage

出发时间	最短路	成本、环境风险和人口覆盖率	出发时间	最短路	成本、环境风险和人口覆盖率
0	<i>O-2-D</i>	150,50,150	7	<i>O-2-D</i>	190,52,150
	<i>O-1-2-D</i>	150,55,180		<i>O-1-2-D</i>	140,55,200
	<i>O-1-3-D</i>	110,65,170		<i>O-1-3-D</i>	160,65,220
1	<i>O-2-D</i>	150,50,150	8	<i>O-2-D</i>	190,52,130
	<i>O-1-2-D</i>	150,55,180		<i>O-1-2-D</i>	160,50,200
	<i>O-1-3-D</i>	120,65,200		<i>O-1-3-D</i>	180,60,220
2	<i>O-2-D</i>	170,50,150	9	<i>O-2-D</i>	190,52,130
	<i>O-1-2-D</i>	150,55,180		<i>O-1-2-D</i>	180,50,190
	<i>O-1-3-D</i>	130,80,200		<i>O-1-3-D</i>	160,70,200
3	<i>O-2-D</i>	170,50,150	10	<i>O-2-D</i>	150,55,160
	<i>O-1-2-D</i>	140,55,180		<i>O-1-2-D</i>	170,55,190
	<i>O-1-3-D</i>	110,70,200		<i>O-1-3-D</i>	140,70,200
4	<i>O-2-D</i>	170,50,150	11	<i>O-2-D</i>	150,55,160
	<i>O-1-2-D</i>	140,50,170		<i>O-1-2-D</i>	150,50,190
	<i>O-1-3-D</i>	130,65,220		<i>O-1-3-D</i>	120,55,200
5	<i>O-2-D</i>	170,50,150	12	<i>O-2-D</i>	170,65,160
	<i>O-1-2-D</i>	140,50,170		<i>O-1-2-D</i>	170,50,205
	<i>O-1-3-D</i>	150,75,220		<i>O-1-3-D</i>	130,55,215
6	<i>O-2-D</i>	190,52,150	13	<i>O-2-D</i>	170,65,160
	<i>O-1-2-D</i>	140,55,170		<i>O-1-2-D</i>	190,50,205

由表3可知,考虑3个目标时,一方面不同的出发时间对应有多条有效路径可供选择。另一方面,各个有效路径各个目标值亦会随出发时间的不同而不同。倘若出发时间超过13时,则到达时间超过24时,不符,则此时无可行路径。

在考虑3个目标时,每一个时间点($0 \leq T \leq 13$)出发情况下的有效路径的数量大于等于2条,这使得决策者具有符合自己实际需求的多种选择。但也增加了决策者决策的困难。这里假设决策者决策具

有偏好性,即每个目标在决策者进行决策时分别占有不同的重要程度,设3个目标:

目标1为成本;

目标2为环境风险;

目标3为人口覆盖率。

假设根据决策者的需求偏好,3个目标对应的权重分别为0.2,0.3,0.5。

由表3得出各个目标的k-最短路径及目标值见表4。

表 4 与目标对应的不同出发时间下的 k-最短路径及相应的目标取值
Tab.4 K-shortest paths corresponding to different departure times and corresponding target values

出发时间	成本		出发时间	环境风险		出发时间	人口覆盖率	
	最短路	取值		最短路	取值		最短路	取值
0	$O-1-3-D$	110	0	$O-2-D$	50	8	$O-2-D$	130
3	$O-1-3-D$	110	1	$O-2-D$	50	9	$O-2-D$	130
1	$O-1-3-D$	120	2	$O-2-D$	50	0	$O-2-D$	150
11	$O-1-3-D$	120	3	$O-2-D$	50	1	$O-2-D$	150
2	$O-1-3-D$	130	4	$O-2-D$	50	2	$O-2-D$	150
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
8	$O-2-D$	190	5	$O-1-3-D$	75	6	$O-1-3-D$	220
9	$O-2-D$	190	6	$O-1-3-D$	75	7	$O-1-3-D$	220
13	$O-1-2-D$	190	2	$O-1-3-D$	80	8	$O-1-3-D$	220

由表 4 可以得到目标 1,2,3 在不同出发时间下的最短路径以及对应的最小目标值分别为 110,50,130。接着取不同的目标上限,得到集合,见表 5。当

$$A_{up1}=110, A_{up2}=50, A_{up3}=130$$

集合 $|\Pi^*|=0$, 该情况下无有效路径,则需要增加目标 1 和目标 3 的上限。当

$$A_{up1}=150, A_{up2}=50, A_{up3}=150$$

集合 $|\Pi^*|=2$, 该情况下有 2 条有效路径,分别为出发时刻为 0 时刻和 1 时刻的路径 $O-2-D$ 。当

$$A_{up1}=150, A_{up2}=65, A_{up3}=170$$

集合 $|\Pi^*|=8$, 此时有 8 条有效路径,分别为出发时刻为 0,1,10,11 的路径 $O-2-D$, 出发时刻为 4,5,6 的路径,以及出发时刻为 0 的 $O-1-3-D$ 。由分析可知,随着不同目标的上限的增加,有效路径的数量也随之增加。在获得了这些有效路径的集合之后,决策者可以按照其对各目标的重视程度,通过综合比较分析,在其中选择出相对满意的路径。这里运用 TOPSIS 法,对多个方案进行比较选择分析,以帮助决策者做出合理的决策。

表 5 不同目标的上限下的有效路径集
Tab.5 Effective path sets under the upper limit of different targets

各目标的上限 (成本、环境风险、 人口覆盖率)	出发时间/ 有效路径集	各目标值	各目标的上限 (成本、环境风险、 人口覆盖率)	出发时间/ 有效路径集	各目标值
(150,50,170)	0/ $O-2-D$	(150,50,150)	(150,65,170)	0/ $O-2-D$	(150,50,150)
	1/ $O-2-D$	(150,50,150)		1/ $O-2-D$	(150,50,150)
	4/ $O-1-2-D$	(140,50,170)		4/ $O-1-2-D$	(140,50,170)
	5/ $O-1-2-D$	(140,50,170)		5/ $O-1-2-D$	(140,50,170)
(150,55,170)	0/ $O-2-D$	(150,50,150)	(150,50,150)	6/ $O-1-2-D$	(140,55,170)
	1/ $O-2-D$	(150,50,150)		10/ $O-2-D$	(150,55,160)
	4/ $O-1-2-D$	(140,50,170)		11/ $O-2-D$	(150,55,160)
	5/ $O-1-2-D$	(140,50,170)		0/ $O-1-2-D$	(110,65,170)
	6/ $O-1-2-D$	(140,55,170)		0/ $O-2-D$	(150,50,150)
	10/ $O-2-D$	(150,55,160)		1/ $O-2-D$	(150,50,150)
	11/ $O-2-D$	(150,55,160)			
			(110,50,130)	无	无

这里选取表5中集合 $|\Pi^*|=8$ 的情况,此时有8条有效路径,根据TOPSIS法,选取3个目标的目标值建立决策矩阵 A_{ij}

$$A_{ij} = \begin{pmatrix} 150 & 50 & 150 \\ 150 & 50 & 150 \\ 140 & 50 & 170 \\ 140 & 50 & 170 \\ 140 & 55 & 170 \\ 150 & 55 & 160 \\ 150 & 55 & 160 \\ 110 & 65 & 170 \end{pmatrix}$$

根据式(10)建立规范化决策矩阵 Z_{ij}

$$Z_{ij} = \begin{pmatrix} 0.374 & 0.328 & 0.326 \\ 0.374 & 0.328 & 0.326 \\ 0.349 & 0.328 & 0.369 \\ 0.349 & 0.328 & 0.369 \\ 0.349 & 0.360 & 0.369 \\ 0.374 & 0.360 & 0.348 \\ 0.374 & 0.360 & 0.348 \\ 0.374 & 0.426 & 0.369 \end{pmatrix}$$

根据式(11)建立加权的规范化决策矩阵 G_{ij}

$$G_{ij} = \begin{pmatrix} 0.075 & 0.098 & 0.163 \\ 0.075 & 0.098 & 0.163 \\ 0.070 & 0.098 & 0.185 \\ 0.070 & 0.098 & 0.185 \\ 0.070 & 0.108 & 0.185 \\ 0.075 & 0.108 & 0.174 \\ 0.075 & 0.108 & 0.174 \\ 0.055 & 0.128 & 0.185 \end{pmatrix}$$

由于上述3个指标都为成本型指标,则加权的规范化决策矩阵可得 D^+ 和 D^- :

理想点 $D^+=0.055, 0.098, 0.0163$;

负理想点 $D^-=0.075, 0.128, 0.185$ 。

由式(12)式(13)可分别求得:

$D_1^+=0.020, D_2^+=0.020, D_3^+=0.027, D_4^+=0.027, D_5^+=0.028, D_6^+=0.025, D_7^+=0.025, D_8^+=0.037$;

$D_1^-=0.037, D_2^-=0.037, D_3^-=0.030, D_4^-=0.030, D_5^-=0.021, D_6^-=0.023, D_7^-=0.023, D_8^-=0.020$ 。

由式(14)确定贴近度 D_i^+ :

$D_1^+=0.650, D_2^+=0.650, D_3^+=0.533, D_4^+=0.533, D_5^+=0.420, D_6^+=0.478, D_7^+=0.478, D_8^+=0.350$ 。

由于 $D_1^+=D_2^+>D_3^+=D_4^+>D_6^+=D_7^+>D_5^+>D_8^+$, 所以方

案的优劣排序为 $A_1=A_2>A_3=A_4>A_6=A_7>A_5>A_8$ 。

A_1 和 A_2 的环境风险和人口覆盖率最小,且这两个指标所占权重也最大;虽然成本指标排序较为靠后,按数值大小排第3位,但因由于其权重不大,并且成本排第2的数值与排第3的数值相差不大,所以综合评价后排在第1位。方案 A_3 和 A_4 的环境风险和 A_1, A_2 相同,但其权重最大的人口覆盖率比 A_1, A_2 大;虽然其成本 A_1, A_2 略小,但由于其所占权重较小,因此综合评价后排在第2位。方案 A_6 和 A_7 的成本和环境风险都比 A_3, A_4 大,且上述两个指标的权重之和达到0.5,虽然人口覆盖率同样比重也达到0.5,但与方案 A_3, A_4 数值相差不大,故综合评价后排在第3位。方案 A_5 的环境风险和人口覆盖率都比 A_6, A_7 大,并且以上两个指标的权重最大;虽然成本比 A_6, A_7 略小,但因其比重最小,故综合评价后排在第4位。 A_8 的环境风险和人口覆盖率最大,这两个影响因子所占的比重也最大,虽然其成本最小,但由于其所占比重最小,因此综合评价后排在第5位。

4 结论

1) 通过动态规划的思想 and 扩展型的Dijkstra法,根据不同的运输阶段和状态,给出不同的因素和目标值,算出不同出发时间下的多目标限制条件下的有效路径集。有效地克服了时变条件下用线性加权解决有害物品运输的多目标路径选择问题具有主观性的局限,能得出更为客观的有效路径集。同时,将风险细分为环境风险和人的风险,是对有害物品运输过程中人的因素的重视。

2) 综合运用k-最短路径和TOPSIS法的综合评价算法对多目标有效路径集进行比较和优选,有效的克服了决策环境的复杂度以及决策者理性的有限性的问题,最终得到符合决策者的意志的满意路径。

3) 从动态的角度研究时变条件下的有害物品运输问题,能更真实模拟现实情境中受交通事故、天气变化、交通管理等因素影响,使路网中各路段的安全性、运行成本等具有差异性的情景。

参考文献:

- [1] 李继兵,李军. 基于风险的有害物品运输的线路选择分析[J]. 中国安全科学学报,2006,16(9):84-88.
- [2] HUANG X F, WANG X H, PEI J J, et al. Risk assessment of the areas along the highway due to hazardous material transportation accidents [J]. Natural Hazards, 2018,93(3): 1181-1202.
- [3] WANG N, ZHANG M, CHE A, et al. Bi-Objective vehicle routing for hazardous materials transportation with no vehicles travelling in echelon[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems,2018,19(6):1867-1879.
- [4] 牛成勇,苏占领,吴昆仑,等. 危险品运输车主动防撞系统性能测试分析[J]. 华东交通大学学报,2019,36(4):32-38.
- [5] 于影霞,曾致桓,龙丹. 基于事故树分析的货运驾驶员失误研究[J]. 华东交通大学学报,2018,35(1):55-62.
- [6] 郭晓林,李军,潘立亚,等. 路径既定条件下有害物品运输策略选择研究[J]. 数学的实践与认识,2010,40(5):9-15.
- [7] 魏航,钟智龙,陈静. 有害物品运输网络设计与运输路径优化研究[J]. 管理工程学报,2016,30(2):233-242.
- [8] 魏航,李军,蒲云,等. 时变条件下有害物品运输的路径问题研究[J]. 系统工程理论与实践,2006,26(10):107-112.
- [9] 魏航,李军,魏洁,等. 时变条件下有宵禁限制的有害物品运输最短路研究[J]. 管理工程学报,2007,21(3):79-85.
- [10] 李军. 有害物品运输问题研究[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [11] PAMUČAR D, LJUBOJEVIĆ S, KOSTADINOVIĆ D, et al. Cost and risk aggregation in multi-objective route planning for hazardous materials transportation—A neuro-fuzzy and artificial bee colony approach[J]. Expert Systems with Applications,2016,65:1-15.
- [12] WEI M Y, YU L, LI X. Credibilistic Location-Routing Model for Hazardous Materials Transportation [J]. International Journal of Intelligent Systems,2015,30(1):23-39.
- [13] CURRENT J, REVELLE C, COHON J. The minimum-covering/shortest-path problem[J]. Decision Sciences, 2010,19(3):490-503.
- [14] KAZANTZI V, KAZANTZIS N, GEROGIANNIS V C. Risk informed optimization of a hazardous material multi-periodic transportation model[J]. Journal of Loss Prevention In the Process Industries,2011,24(6):767-773.
- [15] VERMA M. A cost and expected consequence approach to planning and managing railroad transportation of hazardous materials[J]. Transportation Research Part D-Transport And Environment,2009,14(5):300-308.
- [16] 黄文成,帅斌,孙妍,等. 熵-TOPSIS-耦合协调法评价铁路危险品运输系统风险[J]. 中国安全科学学报,2018,28(2):134-138.