

DOI: 10.11918/j.issn.0367-6234.201704050

随机时间依赖路网中危险品运输路径多准则优化

代存杰^{1,2}, 李引珍², 马昌喜², 柴 获^{1,2}

(1. 兰州交通大学 机电技术研究所, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学 交通运输学院, 兰州 730070)

摘要: 为实现动态路网中的危险品运输路径优化, 以期为运输商的路径选择提供决策支持, 分析了运输网络的随机时间依赖(STD)特征, 对分段连续时间区间内各路段的行程时间和受影响人数进行曲线拟合. 考虑到达时间窗的约束, 以行程时间和运输风险的随机属性值为优化准则, 建立0-1整数规划模型. 结合STD网络的FIFO性质设计了两阶段多维标号修正算法, 得到不同出发时刻以给定置信水平满足时间窗约束的非支配路径集合, 并提出准则权重和阈值支配方法, 实现计算效率和求解质量的均衡. 研究表明: 危险品在STD路网中的行程时间和运输风险与到达时间窗的设置和出发时刻的选取有关; 生成的非支配路径取决于出发时刻和运输商的选择偏好, 非支配路径的数量取决于支配阈值的大小; 不同类型运输商可根据准时到达置信水平来选择出发时刻与运输路径的最优组合.

关键词: 危险品运输; 多准则优化; 随机时间依赖; 时间窗约束; 多维标号修正算法

中图分类号: U491

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2018)03-0156-09

Multi-criterion path optimization for hazardous materials transportation in stochastic time dependent road networks

DAI Cunjie^{1,2}, LI Yinzhen², MA Changxi², CHAI Huo^{1,2}

(1. Mechatronics T&R Institute, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. School of Traffic and Transportation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To optimize the hazardous materials (hazmat) transportation paths in dynamic road networks and make a decision on path selection for carriers, the stochastic time dependent (STD) characteristics of transport networks were analyzed, the travel time and the number of people affected around each link were fitted in piece-wise continuous time interval. The 0-1 integer programming model was formulated by taking the arrival time window as a constraint, and taking the stochastic attribute values of travel time and transport risk as optimization criteria. A two-stage multi-dimensional label correcting algorithm was designed with First-In-First-Out property of the STD road networks, and the non-dominated paths were generated at different departure time to meet the time window constraint with predetermined confidence level. The criterion-weight and threshold-dominate methods were proposed to balance computational efficiency and accuracy. Research results indicate that the travel time and transport risk of hazmat in STD road networks are related to the setting of arrival time window and the selection of departure time. The non-dominated path depends on the departure time and the choice of carrier's preference, and the amount of non-dominated paths depends on the dominated threshold value. Different types of carriers can choose the optimal combination of departure time and transportation path according to the confidence level of arriving on time.

Keywords: hazardous materials transportation; multi-criterion optimization; stochastic time dependent; time window constraint; multidimensional label correcting algorithm

随着各类危险化学品的社会需求量持续增加, 越来越多的危险品运输车辆在路网内行驶, 形成流动的危险源, 危及社会公共安全. 在城市非爆炸品类的危险品事故中, 由运输原因造成的事故数量占32%^[1], 对危险品运输路径优化是降低运输风险的重要途径之一^[2]. 对危险品运输风险评价是实施路

径优化的前提, 诸多学者对此进行了研究并建立数学模型^[3]. 其中传统风险模型以路段事故发生概率与潜在受影响人数的乘积作为路段风险值, 该模型满足经典风险理论和“运输风险评价定理”, 应用最为广泛^[4].

在危险品运输网络中, 不同路径上的行程时间和运输风险存在差异, 即使在同一路径上并采用相同车辆在不同时段经由运输, 由于交通流量和路段附近人数的变化, 车辆行驶时间和运输风险都会改变, 使运输时间和运输风险具有时间依赖特征. 在实际运输过程中, 各路段上的行程时间并不能准确

收稿日期: 2017-04-11

基金项目: 国家自然科学基金(51408288, 61563029);

兰州交通大学优秀科研团队资助计划(201604)

作者简介: 代存杰(1982—), 男, 博士研究生;

李引珍(1963—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 李引珍, liyz01@mail.lzjtu.cn

预测,通常设为服从具有某种随机分布特征的变量;同理,各路段附近的人口密度也可采用符合某种随机分布特征的函数表示^[5].因此,危险品是在具有随机时间依赖(stochastic time dependent, STD)特征的路网内运输,分析路径的STD特征,对降低运输风险和减少运输时间有重要现实意义.

危险品运输商在选择路径时需要综合考虑运输时间、运输费用以及运输风险大小,危险品的运输路径优化问题可归约为多准则优化问题,需结合路网的STD特征进行研究.文献[3]首次对STD路网中的路径优化问题进行了研究;文献[6-7]分别对时间依赖路网中危险品运输路径优化问题作了研究;文献[8]将危险品运输风险定义为具有时间依赖特征的模糊随机变量,建立了优化模型并提出求解算法;文献[9]对STD路网中的危险品运输问题提出一种逼近预期路径长度的启发式方法,并由[10]扩展到多准则路径优化问题;文献[11]对STD条件下危险品最短路径问题进行了研究;文献[12]研究了时间依赖路网中危险品运输路径的双准则优化问题.既有研究通常将路径随机属性的数学期望作为选择标准,而较少地考虑随机属性的方差对决策者的影响.计算随机属性的方差,可反映计算结果与期望值的偏离程度,以满足不同类型决策者的选择需求.针对STD路网内的危险品运输路径优化问题,计算各优化准则对应的随机属性的方差,可对各随机属性的稳定性和运输路径的可靠性进行分析.

在危险品运输过程中设置到达时间窗约束,既可满足企业的无库存生产需求,也可避免因重复装卸或再次存储带来的额外风险.文献[13]对静态路网中有时间窗约束的危险品运输路径优化问题进行了研究;文献[14]研究了STD路网中的危险品运输路径选择问题,建立有时间窗约束的多目标模型;文献[15]考虑时变条件对危险品运输事故率的影响,建立有运输时间约束的路径决策模型.既有研究中所建立的模型以到达时间窗或运输时间作为约束条件,但未界定运输网络的STD属性,也未分析到达时间窗的改变对运输路径的影响.

本文将研究STD路网内的危险品运输路径多准则优化问题,在分析路径STD特征的基础上,考虑到到达时间窗约束,分别以运输时间、运输风险的期望值和标准差为优化准则建立数学模型.设计两阶段多维标号修正算法,计算在不同时刻出发并以给定置信水平满足时间窗约束的非支配路径集合,为运输商在不同准则下的路径选择提供决策支持.

1 问题描述与分析

危险品在无向路网 $G = (N, A, I)$ 内运输, N 为

节点集合, i 和 j 为 G 中节点, $i \in N, j \in N$ 且 $i \neq j$; A 为路段集合, $(i, j) \in A$ 为 G 中路段, l_{ij} 为 (i, j) 的长度, $\rho_{ij, jk}$ 为 (i, j) 和 (j, k) 的行程时间相关系数; $I = \{I_1, \dots, I_k\}$ 为分段连续的时间段集合; $\Gamma(i)$ 为 i 在 G 中的邻接节点集合; $o \in N$ 为起点, $d \in N$ 为终点, 且 $o \neq d$; p_{od}^o 为 t_o 时刻从 o 出发到 d 的路径, $t_o \in I$; c_{ij}^o 为 t_o 时刻从 o 出发在 (i, j) 上的行程时间, t_i 为到达 i 的时刻; x_{ij}^o 为决策变量, 当 $(i, j) \in p_{od}^o$ 时取值为 1, 否则为 0; x 为多个 x_{ij}^o 组成的向量.

1.1 行程时间分析

在实际交通网络中,影响人们日常出行时间变化的主要因素是道路拥挤或交通管制等,这些因素导致各路段上的行程时间呈周期性变化,可采用正态分布、对数正态分布或移位正态分布等函数来描述变化特征^[16].考虑各路段行程时间分布曲线的非对称性,以及观察错误或样本缺乏而导致的估计分布不合理,可采用截断对数正态分布来描述路段行程时间.通过设置截断边界使概率密度曲线与实际分布曲线的贴切度更高,并可排除对数正态分布中右长尾产生的不合理值^[17].采用截断对数正态分布模型描述分段连续时间区间内的路段行程时间,可保证行程时间的连续性,使运输网络满足先进先出(first in first out, FIFO)性质^[18].

当路段行程时间服从截断对数正态分布时, (i, j) 上的行程时间 c_{ij} 的概率密度函数为

$$f(c_{ij}; \mu_{ij}, \sigma_{ij}, a_{ij}, b_{ij}) = \frac{-(\eta_{ij})^2}{2\sigma_{ij}\sqrt{2\pi}c_{ij}(\Phi(\alpha_{ij}) - \Phi(\beta_{ij}))}. \quad (1)$$

式中: μ_{ij} 和 σ_{ij} 分别为 $\ln(c_{ij})$ 的位置参数和尺度参数; a_{ij} 为 (i, j) 上自由流时的行程时间, b_{ij} 为 (i, j) 上最大行程时间, 通常设 $b_{ij} = 5a_{ij}$ ^[19]; α_{ij} 、 β_{ij} 和 η_{ij} 为临时变量, $\alpha_{ij} = \ln\left(\frac{a_{ij}}{\mu_{ij}}\right)\sigma_{ij}^{-1}$, $\beta_{ij} = \ln\left(\frac{b_{ij}}{\mu_{ij}}\right)\sigma_{ij}^{-1}$, $\eta_{ij} = \ln\left(\frac{c_{ij}}{\mu_{ij}}\right)\sigma_{ij}^{-1}$; $\Phi(\cdot)$ 为标准正态累积分布函数.

当 c_{ij} 服从标准对数正态分布时, c_{ij} 的期望值 $E[c_{ij}]$ 和方差 $V[c_{ij}]$ 为

$$E[c_{ij}] = \mu_{ij} + \exp(0.5\sigma_{ij}^2), \quad (2)$$

$$V[c_{ij}] = \mu_{ij}^2 + \exp(\sigma_{ij}^2) [\exp(\sigma_{ij}^2) - 1]. \quad (3)$$

在设定 c_{ij} 的左右截断边界后, 即 $a_{ij} \leq c_{ij} \leq b_{ij}$, 对 c_{ij} 修正后的期望值 m_{ij} 和标准差 v_{ij} 分别为

$$m_{ij} = E[c_{ij}] \frac{\Phi(\beta_{ij} - \sigma_{ij}) - \Phi(\alpha_{ij} - \sigma_{ij})}{\Phi(\beta_{ij}) - \Phi(\alpha_{ij})}, \quad (4)$$

$$v_{ij}^2 = (E[c_{ij}])^2 \left\{ \frac{\Phi(\beta_{ij} - 2\sigma_{ij}) - \Phi(\alpha_{ij} - 2\sigma_{ij})}{\Phi(\beta_{ij}) - \Phi(\alpha_{ij})} - \left[\frac{\Phi(\beta_{ij} - \sigma_{ij}) - \Phi(\alpha_{ij} - \sigma_{ij})}{\Phi(\beta_{ij}) - \Phi(\alpha_{ij})} \right]^2 \right\} + V[c_{ij}] \frac{\Phi(\beta_{ij} - 2\sigma_{ij}) - \Phi(\alpha_{ij} - 2\sigma_{ij})}{\Phi(\beta_{ij}) - \Phi(\alpha_{ij})}. \quad (5)$$

1.2 运输风险分析

采用传统风险评价模型计算各路段上的风险值,设 (i, j) 上可能发生事故的的概率为 r_{ij} ,潜在受影响人数为 P_{ij} ,则 (i, j) 上的风险值 z_{ij} 为

$$z_{ij} = r_{ij} P_{ij}. \quad (6)$$

若不考虑道路等级差异, r_{ij} 的取值可借鉴文献[20]中的取值方法,用 (i, j) 的长度数值乘以 10^{-6} 来近似表示 (i, j) 上的事故发生概率. 在实际运输环境中, r_{ij} 的值与车辆通过 (i, j) 的时间段有关,通常认为在夜间或交通高峰时段, r_{ij} 的取值较大^[7].

在实际运输网络中,由于各路段附近的用地类型、公共服务设施等存在差异,致使人口密度分布不同. 对于同一路段,不同时段的人口变化情况具有一定的规律性^[21]. 将 P_{ij} 的变化分布曲线按照峰谷分布划分,采用移位对数正态分布函数分段拟合,可得 P_{ij} 的估计数据,其计算表达式为

$$P_{ij} = \gamma_{ij} + \exp(\omega_{ij} + \chi_{ij} \delta_{ij}). \quad (7)$$

式中: γ_{ij} 为 P_{ij} 的最小取值(不变人口数量); ω_{ij} 为 P_{ij} 中波动人数取自然对数后的期望值; δ_{ij} 为 P_{ij} 中波动人数取自然对数后的标准差; χ_{ij} 为服从标准正态分布的随机变量.

由式(6)、(7)可计算 z_{ij} 的期望值 ε_{ij} 和方差 ψ_{ij} 分别为

$$\varepsilon_{ij} = E[z_{ij}] = \gamma_{ij} r_{ij} + \exp(\omega_{ij} + 0.5\delta_{ij}^2) r_{ij}, \quad (8)$$

$$\psi_{ij} = V[z_{ij}] = \exp(2\omega_{ij} + \delta_{ij}^2) (\exp(\delta_{ij}^2) - 1) r_{ij}^2. \quad (9)$$

2 模型建立与分析

在 STD 路网内运输危险品时,还需考虑运输网络的其他性质,给出如下假设:1) 运输网络为无向图结构,各路段均满足 FIFO 性质;2) 运输车辆选择最短路径行驶,不存在绕行或途中停靠现象;3) 在不同的时间段内,各路段附近人口密度服从独立的随机分布.

基于问题描述和条件假设, $p_{od}^{t_0}$ 上的行程时间 $T(p_{od}^{t_0})$ 和累积运输风险 $Z(p_{od}^{t_0})$ 分别为

$$T(p_{od}^{t_0}) = \sum_{(i,j) \in A} \eta_{ij}^{t_0} x_{ij}^{t_0}, \quad (10)$$

$$Z(p_{od}^{t_0}) = \sum_{(i,j) \in A} \zeta_{ij}^{t_0} x_{ij}^{t_0}. \quad (11)$$

式中: $\eta_{ij}^{t_0}$ 和 $\zeta_{ij}^{t_0}$ 分别为 $p_{od}^{t_0}$ 中 (i, j) 上行程时间和运输风险, $\eta_{ij}^{t_0}$ 和 $\zeta_{ij}^{t_0}$ 为随机变量.

$T(p_{od}^{t_0})$ 的期望值 $f_e(\mathbf{x})$ 和标准差 $f_v(\mathbf{x})$, $Z(p_{od}^{t_0})$ 的期望值 $g_e(\mathbf{x})$ 和标准差 $g_v(\mathbf{x})$ 分别为

$$f_e(\mathbf{x}) = E[T(p_{od}^{t_0})] = \sum_{(i,j) \in A} \iota_{ij}^{t_0} x_{ij}^{t_0}, \quad (12)$$

$$f_v(\mathbf{x}) = \sqrt{V[T(p_{od}^{t_0})]} = \sqrt{\sum_{(i,j) \in A} \nu_{ij}^{t_0}{}^2 x_{ij}^{t_0} + \sum_{(i,j) \in A, (j,k) \in A} \nu_{ij}^{t_0} x_{ij}^{t_0} \nu_{jk}^{t_0} x_{jk}^{t_0} \rho_{ij,jk}}, \quad (13)$$

$$g_e(\mathbf{x}) = E[Z(p_{od}^{t_0})] = \sum_{(i,j) \in A} \zeta_{ij}^{t_0} x_{ij}^{t_0}, \quad (14)$$

$$g_v(\mathbf{x}) = \sqrt{V[Z(p_{od}^{t_0})]} = \sqrt{\sum_{(i,j) \in A} \vartheta_{ij}^{t_0} x_{ij}^{t_0}}. \quad (15)$$

式中: $\iota_{ij}^{t_0}$ 、 $\nu_{ij}^{t_0}$ 、 $\zeta_{ij}^{t_0}$ 和 $\vartheta_{ij}^{t_0}$ 分别为 $p_{od}^{t_0}$ 中 (i, j) 上 m_{ij} 、 v_{ij} 、 ε_{ij} 和 ψ_{ij} 的对应值.

给定到达时间窗为 $[T_e, T_l]$, 建立 STD 路网内有时间窗约束的多准则路径优化模型为

$$F(\mathbf{x}) = (\min f_e(\mathbf{x}), \min f_v(\mathbf{x}), \min g_e(\mathbf{x}), \min g_v(\mathbf{x})), \quad (16)$$

$$\text{s.t. } \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{t_0} - \sum_{(j,k) \in A} x_{jk}^{t_0} = \begin{cases} 1, & j = o; \\ 0, & j \neq o \ \& \ j \neq d; \\ -1, & j = d. \end{cases} \quad (17)$$

$$t_0 + T(p_{od}^{t_0}) \in [T_e, T_l]. \quad (18)$$

$$x_{ij}^{t_0} \in \{0, 1\}. \quad (19)$$

式(16)为不同优化准则的目标函数值构成的决策向量;式(17)为路径的无环约束;式(18)为到达时间窗约束;式(19)为决策变量取值空间.

2.1 路网的 STD 特征分析

危险品在有时间窗约束的 STD 路网内运输,选择不同的出发时间,既会影响车辆行程时间,也会使运输风险发生变化. 因此,计算不同出发时刻对应的行程时间是运输路径优化的必要条件,首先给出 STD 路网的相关命题.

命题 1 在 STD 的 FIFO 路网中,若 $p_{od}^{t_0}$ 为最短路径,则 $p_{od}^{t_0}$ 中任意 $i(i \neq o, i \neq d)$ 对应的子路径 $p_{oi}^{t_0}$ 也为最短路径.

证明 假设 $p_{od}^{t_0}$ 为最短路径,在 t_0 时刻从 o 出发到达 i 的时间为 t_i , 到达 d 的时间为 t_d . 若 $p_{oi}^{t_0}$ 非最短路径,则存在 $p_{oi}^{t_0'}(p_{oi}^{t_0'} \neq p_{oi}^{t_0})$, 到达 i 的时间为 t_i^* , 有 $t_i^* < t_i$. 则在 t_i^* 从 i 出发,到达 d 的时间为 t_d^* . 根据路网性质有 $t_i^* + T(p_{id}^{t_0'}) = t_d^* < t_i + T(p_{id}^{t_0}) = t_d$, 与 $p_{od}^{t_0}$ 为最短路径矛盾.

命题 2 在 STD 的 FIFO 路网中,对于任意节点 i 和 j 之间的最短路径 $p_{ij}^{t_0}$, 到达时间 t_j 是关于出发时间 t_i 的非减函数.

证明 任意节点 i 到 j 的行程时间关系式为 $t_j = t_i + T(p_{ij}^{t_i})$, $T(p_{ij}^{t_i})$ 为最短行程时间. 对于任意出发时刻 t'_i , 当 $t'_i > t_i$ 时, 有 $t'_j = t'_i + T(p_{ij}^{t'_i})$. 因为路网满足 FIFO 性质, 所以有 $t'_j \leq t_j$, 可得 t_j 是关于 t_i 的非减函数.

因为路径行程时间具有随机性, 设置准时到达置信水平 $\varphi (0 \leq \varphi \leq 1)$ 来满足时间窗约束, 表达式为

$$Pr(T_e \leq t_o + T(p_{od}^{t_o}) \leq T_l) \leq \varphi. \quad (20)$$

对于给定的 φ , 至少存在一个时刻 T_φ , 使 $Pr(T_e \leq T_\varphi \leq T_l) = \varphi$. 在 $[T_e, T_l]$ 内, T_φ 取值并不唯一.

命题3 当 T_φ 给定时 ($T_\varphi \in [T_e, T_l]$), 至少存在一个出发时间 t_o 和相应最短时间 $T(p_{od}^{t_o})$, 使 $T_\varphi = t_o + T(p_{od}^{t_o})$; 反之则不一定成立.

证明 由路网性质和命题2可知, 对于任意出发时刻 t_o , 因为 $T(p_{od}^{t_o})$ 非负, 且 $t_o + T(p_{od}^{t_o})$ 是关于 t_o 非减的. 当 $t_o \uparrow T_\varphi$ 时, 对于 $[T_e, T_l]$ 内的给定值 T_φ , 总存在 t_o 使 $T_\varphi = t_o + T(p_{od}^{t_o})$ 成立. 相反, 对于给定的任意 t_o 及其对应的最短行程时间 $T(p_{od}^{t_o})$, 结合假设条件(2)可知, $t_o + T(p_{od}^{t_o})$ 的值不一定在 $[T_e, T_l]$ 之内.

φ 值给定后, 可利用累积分布函数计算路径行程时间的近似值^[22]. φ 和 T_φ 的关系式为

$$\Phi\left(\frac{(T_\varphi - t_o) - f_c(\mathbf{x})}{\sqrt{f_v(\mathbf{x})}}\right) = \varphi. \quad (21)$$

利用累积分布函数的逆函数 $\Phi^{-1}(\cdot)$, 计算出出发时间 t_o 的表达式为

$$t_o = T_\varphi - \Phi^{-1}(\varphi)f_v(\mathbf{x}) - f_c(\mathbf{x}). \quad (22)$$

因此, 在 t_o 时刻出发并以置信水平 φ 准时到达的路径行程时间 $T(p_{od}^{t_o})$ 为

$$T(p_{od}^{t_o}) = T_\varphi - t_o = \Phi^{-1}(\varphi)f_v(\mathbf{x}) + f_c(\mathbf{x}). \quad (23)$$

同理, 在 t_o 时刻出发, 从 i 到 j 的行程时间为

$$c_{ij}^{t_o} = T(p_{oj}^{t_o}) - T(p_{oi}^{t_o}). \quad (24)$$

2.2 模型特征分析

对运输路径进行多准则优化, 需确定路径间的优劣关系, 可根据不同优化准则的目标值采用支配关系比较进行确定^[23].

通过路径间的支配关系比较, 可在计算过程中决定路径的取舍. 当路网规模较大或优化准则数量较多时, 完全列出非支配路径并不可取. 本文设计准则权重和阈值支配方法, 既体现运输商对优化准则的偏好, 也可避免对非支配路径的完全枚举. 假设各优化准则以取小为优, 准则 m 对应目标函数为 $h_m(\cdot)$, 各准则占优权重的计算过程如下.

步骤1 根据运输商的路径选择偏好, 为每个准

则 m 设定权重 π_m , $\sum_{m=1}^M \pi_m = 1$, M 为优化准则总数.

步骤2 设 p_x 和 p_y 为待比较路径, $w(p_x)$ 和 $w(p_y)$ 分别为 p_x 和 p_y 的占优权重, 初始值为 0.

步骤3 对于任意准则 m , 若 $h_m(p_x) < h_m(p_y)$, 则 $w(p_x) = w(p_x) + \pi_m$; 若 $h_m(p_x) = h_m(p_y)$, 令 $w(p_x) = w(p_x) + \pi_m$, $w(p_y) = w(p_y) + \pi_m$; 否则 $w(p_y) = w(p_y) + \pi_m$.

得到 $w(p_x)$ 和 $w(p_y)$ 的值后, 设置支配阈值 Δ , 判定 p_x 和 p_y 的支配关系. 若 $w(p_x) - w(p_y) \geq \Delta$, 则称 p_x 支配 p_y ; 若 $w(p_y) - w(p_x) \geq \Delta$, 则称 p_y 支配 p_x ; 若 $|w(p_x) - w(p_y)| < \Delta$, 称 p_y 与 p_x 相互支配.

设计准则权重和阈值支配方法, 可实现求解质量和求解效率的有效均衡.

3 求解算法设计

由命题1和命题2可知, 静态网络中的 Bellman 最优原理同样适用于 STD 的 FIFO 网络. 在 FIFO 网络中, 可利用静态网络中的最短路径算法来求解动态网络的最短路径^[24]. 本文设计两阶段多维标号修正算法对模型求解, 首先根据各路段的随机行程时间、时间窗 $[T_e, T_l]$ 和准时到达置信水平 φ 来计算出发时间; 然后生成关于行程时间和运输风险的非支配路径集合.

命题4 在 STD 的 FIFO 路网中, 若给定 $[T_e, T_l]$ 和 φ , 则一定存在从 o 出发的最迟时刻 \bar{h}_o , 满足 $Pr(\bar{h}_o + T(p_{od}^{\bar{h}_o}) \leq T_l) \geq \varphi$, 且当 $\forall t_o > \bar{h}_o$ 时, $Pr(t_o + T(p_{od}^{t_o}) > T_l) > \varphi$ 不成立.

证明 假设 \bar{h}_o 不存在, 即对于 $\forall t_o \in I$, 有 $Pr(t_o + T(p_{od}^{t_o}) \leq T_l) \geq \varphi$ 恒成立. 则对于任意 φ , 若 $Pr(t_o + T(p_{od}^{t_o}) > T_l) = 1$, 则 $Pr(t_o + T(p_{od}^{t_o}) \leq T_l) \geq \varphi$ 恒成立. 所以, 假设成立的充分条件是在任意 t_o , 有 $t_o + T(p_{od}^{t_o}) \leq T_l$. 由命题2可知, $t_o + T(p_{od}^{t_o})$ 是关于 t_o 的非减函数, 且 $T(p_{od}^{t_o}) > 0 (o \neq d)$. 因此, 当 $t_o \uparrow T_l$ 时, 一定存在最迟出发时间 \bar{h}_o 使 $\bar{h}_o + T(p_{od}^{\bar{h}_o}) = T_l$, 当 $t_o > \bar{h}_o$ 时, $t_o + T(p_{od}^{t_o}) > T_l$, 与假设矛盾.

根据命题4, \bar{h}_o 的计算步骤如下.

步骤1 网络初始化, 给定 $[T_e, T_l]$ 和 φ , 设置出发时间区间 $[\lambda_o, \bar{h}_o] (\lambda_o \ll \bar{h}_o)$ 和终止判断值 $\bar{\omega}$, 初始化标号队列为空.

步骤2 令出发时间 $\kappa = 0.5(\lambda_o + \bar{h}_o)$, 将起点 o 从队尾插入队列, 并令 $t_o = \kappa$; 路网中其他节点 i 标号为 $t_i = \infty (i \in N \setminus \{o\})$.

步骤 3 从队头取节点 i , 并从队列中删除 i . 根据式 (21)、(22) 计算 $j \in \Gamma(i)$ 的到达时间 t_j , 与 j 的原标号 t'_j 比较, 若 $t_j \leq t'_j$, 更新 j 的标号为 t_j ; 若 j 已入过队列中, 则将 j 从队头插入, 否则从队尾插入.

步骤 4 若队列为空且 $t_d \neq \infty$, 根据到达时间 t_d 判断 t_o 是否为最迟的出发时间: 1) 若 $t_d \leq T_l$ 且 $h_o - \lambda_o > \bar{\omega}$, 说明存在大于 κ 的最迟出发时间, 令 $\lambda_o = \kappa$, 转步骤 2; 2) 若 $t_d \leq T_l$ 且 $h_o - \lambda_o \leq \bar{\omega}$, 可认为 κ 为最迟出发时间, 搜索终止, 输出 κ ; 3) 若 $t_d > T_l$ 且 $h_o - \lambda_o \leq \bar{\omega}$, 搜索终止, 输出 h_o ; 4) 若 $t_d > T_l$, 说明 κ 大于最迟出发时间, 令 $h_o = \kappa$, 转步骤 2. 若出发时间 t_o 小于 h_o , 可能存在多条有效路径 p'_{od} , 能在 T_l 前到达 d . 同理, t_o 应有一个下界 λ_o , 若要满足到达时间窗约束, t_o 不能早于 λ_o .

命题 5 在 STD 的 FIFO 路网中, 给定 $[T_e, T_l]$ 和 φ , 若 p'_{od} 为最短路径, 则一定有最早出发时间 λ_o , 满足 $Pr(\lambda_o + T(p'_{od}) \geq T_e) \geq \varphi$, 且 $t_o < \lambda_o$ 时, $Pr(\lambda_o + T(p'_{od}) \geq T_e) \geq \varphi$ 不成立.

证明 证明过程与命题 4 类似, 不再赘述.

当 $t_o < \lambda_o$ 时, 满足 $Pr(t_o + T(p'_{od}) \geq T_e) \geq \varphi$ 的路径可能存在多条, 但这些路径只是可行路径, 一定不是最短路径.

推论 1 在具有 STD 属性的 FIFO 路网中, 若存在最短路径 p'_{od} , 则对于给定的 $[T_e, T_l]$ 和 φ , 一定存在对应的出发时间窗 $[\lambda_o, h_o]$.

得到 h_o 后, 令 $t_o = h_o$, 设置调整步长 λ , 使 $t_o = t_o - \lambda$, 可计算不同出发时刻对应的路径, 并计算各路径运输风险的期望值和标准差, 构成多准则决策空间, 以满足运输商的路径选择需求.

在多维标号修正算法中, φ_e^i 、 φ_v^i 、 γ_e^i 和 γ_v^i 分别用来记录当前路径中从 o 到任意 i 的 $f_e(\mathbf{x})$ 、 $f_v(\mathbf{x})$ 、 $g_e(\mathbf{x})$ 和 $g_v(\mathbf{x})$ 的临时标号, $\ell(i)$ 为当前路径中 i 的前驱节点编号, $\partial(i)$ 标识 i 是否被访问. 路径生成步骤为 6 步.

步骤 1 网络初始化, 起点 o 的标号为 ($\varphi_e^o = 0$, $\varphi_v^o = 0$, $\gamma_e^o = 0$, $\gamma_v^o = 0$, $t_o = 0$, $\ell(o) = -1$), 将 o 插入队列, $\partial(o) = 1$; 其他 $i (i \in N \setminus \{o\})$ 标号为 ($\varphi_e^i = 0$, $\varphi_v^i = 0$, $\gamma_e^i = 0$, $\gamma_v^i = 0$, $t_i = \infty$, $\ell(i) = -1$), $\partial(i) = 0$.

步骤 2 根据 $[T_e, T_l]$ 计算 h_o , 设置各准则权重 π_m 和支配阈值 Δ , 初始化节点队列和路径链表为空.

步骤 3 从队列中取头节点 i , 并从队列中删除. 取节点 $j \in \Gamma(i)$, 扩展当前路径 p'_{oi} , 生成路径 p'_{oj} . 由式 (12) ~ (15), (21)、(22) 计算节点 j 的多维标号, 令 $\ell(j) = i$, $\partial(j) = 1$, 将 j 存入路径链表.

步骤 4 根据 π_m 和 Δ , 将 p'_{oj} 与路径链表中以 j 为终点的所有 p'_{oj}' 进行比较, 分 3 种情况: 1) 若 p'_{oj} 支配 p'_{oj}' , 则从队列、链表中删除 p'_{oj}' 及其子路径, 并将 p'_{oj} 存入链表和队列; 若节点 j 已在队列中, 将 j 从队头插入, 否则将 j 从队尾插入; 2) 若 p'_{oj} 被 p'_{oj}' 支配, 则删除 p'_{oj} ; 3) 若 p'_{oj} 与 p'_{oj}' 相互支配, 将 p'_{oj} 存入链表; 若 j 已入过队列, 将 j 从队头插入, 否则插入队尾.

步骤 5 如果队列非空, 转步骤 3; 否则检查链表中节点 d 对应的各 p'_{od} 的属性值, 删除 t_d 不在 $[T_e, T_l]$ 内的路径, 剩余路径构成非支配路径集合.

步骤 6 调整 t_o 的取值, 执行步骤 1~5, 直至无可行路径生成, 得到满足 $[T_e, T_l]$ 约束的路径集合.

4 实验及结果分析

某市部分区域的危险品运输网络结构及路段长度 l_{ij} 见图 1, 并设危险品运输事故发生后波及范围的半径为 1.0 km.

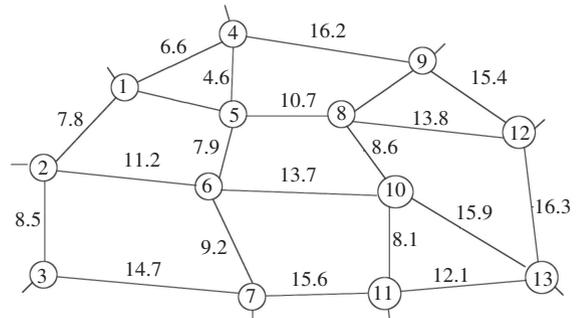


图 1 路网结构图 (km)

Fig.1 Structure of road networks (km)

各路段可双向通行, 在同一时段内不同方向上的行程时间和路段附近受影响人数相同. 按照实际交通流量获取各路段在整个时间区间内行程时间的变化曲线, 根据峰谷分布将时间区间 I 分为 6 段, 分别定义为 $I_1 = (00:00, 05:30]$, $I_2 = (05:30, 10:30]$, $I_3 = (10:30, 14:30]$, $I_4 = (14:30, 17:00]$, $I_5 = (17:00, 21:30]$, $I_6 = (21:30, 24:00]$. 基于各路段上的行程时间变化曲线, 对不同时段内的行程时间数据整理, 利用截断对数正态分布函数和最小二乘法进行数据拟合, 得到各时段内 c_{ij} 的相关参数值见表 1.

考虑 I_1 和 I_6 处于夜间时段, I_2 和 I_5 为交通流量高峰时段, 将这 4 个时段的 r_{ij} 修正为 $r'_{ij} = r_{ij} \cdot (1.0 + \text{rand}(0.28, 0.51))$ [25].

利用手机网络数据动态感知技术来获取各路段附近可能受影响人数, 得到给定区域内分人口数量在整个时间区间内的变化曲线. 利用最小二乘法对各时段内人口数据变化曲线进行移位对数正态分布拟合, 计算出 P_{ij} 的估计参数值见表 2.

表 1 不同时段内的路段行程时间参数

Tab.1 Travel time parameters of each link in different time intervals

路段	$\mu_{ij}, \sigma_{ij}, a_{ij}$					
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
1-2	0.18,0.12,0.15	0.32,0.29,0.20	0.22,0.36,0.18	0.22,0.48,0.21	0.36,0.39,0.26	0.27,0.15,0.16
1-4	0.16,0.29,0.13	0.24,0.33,0.16	0.19,0.24,0.15	0.19,0.44,0.16	0.22,0.42,0.21	0.16,0.21,0.14
1-5	0.28,0.11,0.25	0.36,0.49,0.31	0.27,0.48,0.26	0.30,0.43,0.29	0.39,0.28,0.35	0.30,0.16,0.26
2-3	0.22,0.17,0.20	0.20,0.51,0.22	0.24,0.36,0.25	0.22,0.35,0.24	0.18,0.49,0.32	0.19,0.22,0.22
2-6	0.26,0.15,0.31	0.32,0.41,0.36	0.25,0.21,0.39	0.36,0.18,0.35	0.26,0.37,0.36	0.25,0.18,0.32
3-7	0.30,0.09,0.32	0.22,0.48,0.35	0.29,0.27,0.38	0.36,0.11,0.37	0.29,0.42,0.38	0.28,0.19,0.32
4-5	0.13,0.21,0.10	0.18,0.44,0.13	0.16,0.22,0.13	0.15,0.33,0.14	0.21,0.29,0.15	0.13,0.25,0.10
4-9	0.30,0.19,0.27	0.45,0.36,0.30	0.36,0.19,0.35	0.41,0.29,0.36	0.45,0.32,0.30	0.32,0.26,0.28
5-6	0.20,0.32,0.18	0.28,0.52,0.21	0.22,0.43,0.19	0.21,0.15,0.18	0.25,0.36,0.27	0.20,0.41,0.16
5-8	0.25,0.13,0.19	0.32,0.46,0.23	0.29,0.39,0.27	0.31,0.13,0.28	0.35,0.52,0.30	0.26,0.35,0.25
6-7	0.18,0.21,0.16	0.29,0.45,0.24	0.28,0.47,0.24	0.29,0.11,0.24	0.32,0.48,0.28	0.25,0.19,0.22
6-10	0.30,0.11,0.23	0.42,0.39,0.36	0.40,0.42,0.36	0.38,0.17,0.38	0.45,0.34,0.35	0.36,0.15,0.35
7-11	0.29,0.15,0.26	0.45,0.28,0.39	0.43,0.39,0.40	0.41,0.20,0.41	0.49,0.41,0.40	0.34,0.22,0.27
8-9	0.17,0.22,0.12	0.26,0.37,0.18	0.25,0.32,0.21	0.26,0.14,0.22	0.34,0.47,0.21	0.22,0.29,0.15
8-10	0.20,0.13,0.16	0.38,0.45,0.22	0.35,0.41,0.25	0.35,0.11,0.26	0.38,0.42,0.29	0.24,0.17,0.17
8-12	0.26,0.11,0.23	0.45,0.52,0.39	0.40,0.37,0.38	0.38,0.16,0.36	0.47,0.39,0.36	0.38,0.22,0.35
9-12	0.30,0.19,0.36	0.40,0.55,0.38	0.38,0.35,0.35	0.36,0.21,0.35	0.43,0.32,0.36	0.32,0.15,0.30
10-11	0.18,0.10,0.16	0.35,0.42,0.21	0.32,0.41,0.25	0.30,0.11,0.25	0.36,0.39,0.26	0.22,0.13,0.20
10-13	0.30,0.15,0.28	0.48,0.36,0.45	0.45,0.51,0.40	0.42,0.23,0.40	0.48,0.32,0.42	0.32,0.16,0.30
11-13	0.25,0.14,0.21	0.36,0.49,0.32	0.32,0.36,0.30	0.32,0.19,0.30	0.35,0.29,0.30	0.31,0.15,0.28
12-13	0.30,0.11,0.28	0.49,0.34,0.40	0.45,0.37,0.42	0.44,0.13,0.40	0.48,0.51,0.42	0.36,0.22,0.30

表 2 不同时段内的路段运输风险参数

Tab.2 Transport risk parameters of each link in different time intervals

路段	$\gamma_{ij}, \omega_{ij}, \delta_{ij}$					
	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6
1-2	1 420,6.13,0.26	760,5.26,0.62	806,4.38,0.47	786,6.18,0.39	1 120,5.39,0.66	1 380,5.88,0.31
1-4	946,4.27,0.31	1 020,5.85,0.51	860,3.26,0.21	850,6.14,0.41	1 030,6.18,0.26	820,0.67,0.42
1-5	1 560,5.27,0.35	1 720,6.93,0.62	1 680,4.47,0.66	1 680,5.21,0.33	1 690,5.89,0.53	1 580,5.38,0.42
2-3	1 120,6.21,0.18	1 240,5.47,0.52	896,6.13,0.32	820,5.35,0.49	1 280,6.22,0.47	1 150,5.85,0.24
2-6	1 750,5.83,0.39	1 530,6.28,0.72	1 210,5.44,0.35	920,6.13,0.52	1 480,5.31,0.44	1 620,5.15,0.33
3-7	965,4.16,0.42	1 360,5.11,0.47	1 450,4.86,0.39	1 390,6.07,0.29	1 220,6.34,0.65	940,6.12,0.46
4-5	720,4.86,0.48	960,4.82,0.39	1 120,5.27,0.42	980,4.89,0.33	1 150,5.87,0.44	680,5.39,0.40
4-9	1 048,5.82,0.33	1 260,5.94,0.41	930,6.16,0.52	850,6.07,0.45	1 320,4.96,0.41	960,5.77,0.32
5-6	1 650,4.19,0.42	1 320,5.75,0.47	1 360,6.04,0.39	1 280,5.25,0.32	1 440,5.88,0.37	1 660,4.82,0.36
5-8	1 076,4.45,0.85	1 210,4.93,0.72	890,5.38,0.46	880,4.94,0.62	1 170,5.39,0.48	990,5.13,0.38
6-7	974,5.47,0.48	1 160,5.12,0.36	1 080,4.68,0.42	1 020,4.82,0.31	1 210,5.63,0.42	940,5.82,0.27
6-10	2 160,3.88,0.39	1 570,5.83,0.42	1 220,4.41,0.48	1 170,4.92,0.33	1 480,5.93,0.41	1 820,4.31,0.32
7-11	460,5.42,0.33	690,5.13,0.48	530,5.84,0.47	550,5.29,0.42	720,5.56,0.39	460,4.88,0.47
8-9	1 040,5.22,0.36	1 170,4.83,0.49	1 210,5.25,0.36	820,4.38,0.44	1 250,5.27,0.46	960,5.38,0.44
8-10	1 156,4.25,0.37	940,5.36,0.52	1 040,5.33,0.39	980,4.92,0.41	1 100,5.69,0.48	990,5.77,0.52
8-12	630,4.33,0.48	990,5.27,0.41	1 120,4.95,0.58	1 080,4.36,0.62	1 030,5.44,0.39	700,5.22,0.37
9-12	880,5.21,0.52	1 160,4.83,0.39	1 240,5.27,0.42	1 110,5.64,0.27	1 280,4.39,0.41	900,5.02,0.28
10-11	846,5.32,0.33	920,6.18,0.52	820,5.65,0.44	790,6.04,0.32	810,5.33,0.46	860,4.98,0.31
10-13	1 240,4.62,0.31	1 410,5.21,0.32	1 180,5.67,0.38	1 020,4.49,0.32	1 360,5.15,0.47	1 160,5.36,0.27
11-13	730,5.32,0.28	820,5.39,0.46	980,5.97,0.45	790,5.20,0.39	890,5.37,0.44	750,4.33,0.29
12-13	690,4.71,0.35	920,5.42,0.46	960,5.39,0.41	950,4.92,0.63	920,5.87,0.44	720,4.96,0.53

危险品运输时间区间是连续的, 根据不同的时间窗来计算 t_o 时, 若 $t_o < 00:00$, 则令 $t_o = t_o + 24:00$. 以节点 1 为起点, 节点 13 为终点, 设 $f_e(\mathbf{x})$ 和 $f_v(\mathbf{x})$ 的权重分别为 $\pi_1 = 0.4$ 和 $\pi_2 = 0.15$, $g_e(\mathbf{x})$ 和 $g_v(\mathbf{x})$

的权重分别为 $\pi_3 = 0.35$ 和 $\pi_4 = 0.1$, 支配阈值 $\Delta = 0.4$; $\rho_{ij,jk}$ 取值为 $(-0.2, 0.2)$ 内均匀分布的随机数; 调整步长 $\lambda = 30 \text{ min}$. 设置不同场景 s_1 和 s_2 , 在 s_1 中设置 $[T_e, T_l] = [16:00, 18:00]$, s_2 中 $[T_e, T_l] =$

[21:00,22:00] ,准时到达置信水平均为 $\tau = 0.95$.

首先计算各场景中的出发时间窗,设 $\lambda_o = 00:00, h_o = T_L$,搜索终止判断值 $\hat{\omega} = 0.01$,可计算出 s_1 和 s_2 中的出发时间窗分别为 $[\lambda_o, h_o] = [12:46,$

14:41] 和 $[\lambda_o, h_o] = [16:49, 17:50]$. 当 t_o 分别取 λ_o 和 h_o 时,得到不同 t_o 对应的最短路径及其属性值见表 3.

表 3 不同场景下的最早/最迟出发时间及路径

Tab.3 Path and the earliest/latest departure time under different scenes

场景	t_o	p_{od}^t	$f_e(\mathbf{x}) / \text{h}$	$f_v(\mathbf{x}) / \text{h}$	$g_e v(\mathbf{x}) / 10^{-3} \text{人}$	$g_v(\mathbf{x}) / 10^{-3} \text{人}$	$T(p_{od}^t) / \text{h}$	t_d
s_1	12:46	1-4-9-12-13	1.57	1.00	52.04	6.25	3.23	16:00
	14:41	1-5-6-10-13	1.58	1.03	55.92	1.76	3.27	17:57
s_2	16:49	1-2-6-10-13	1.89	1.39	69.88	8.36	4.19	21:00
	17:50	1-5-6-10-13	1.94	1.36	74.45	6.92	4.18	22:00

由表 3 可知,运输车辆在不同时刻出发,对应的路径及其属性值不同. 在同一场景内,路径间的随机属性值变化较小,不同场景间的对应属性值变化较大,因为两种场景的到达时间窗不同,决定了出发时间的可选范围不同. 在 s_2 中,危险品的运输需经过交通晚高峰时段,其行程时间、运输风险的期望值

和标准差均高于 s_1 中路径的对应值. 因此危险品运输商应尽量避免车辆经由交通高峰时段,以减少运输风险并缩短行程时间.

得到出发时间窗口后,可根据 λ 来计算不同 t_o 对应的非支配路径,生成运输路径集合. 以 s_1 为例,生成不同 t_o 对应的非支配路径及各条路径的属性值见表 4.

表 4 不同出发时间对应的非支配路径

Tab.4 Non-dominated paths with different departure time

t_o	p_{od}^t	$f_e(\mathbf{x}) / \text{h}$	$f_v(\mathbf{x}) / \text{h}$	$g_e(\mathbf{x}) / 10^{-3} \text{人}$	$g_v(\mathbf{x}) / 10^{-3} \text{人}$	$T(p_{od}^t) / \text{h}$	t_d
14:41	1-5-6-10-13	1.58	1.03	55.92	1.76	3.27	17:57
14:11	1-2-6-10-13	1.61	0.99	42.63	2.46	3.25	17:26
14:11	1-5-6-10-13	1.56	1.04	55.47	1.84	3.26	17:26
14:11	1-5-8-10-13	1.57	1.03	45.31	1.47	3.27	17:27
14:11	1-5-8-12-13	1.62	0.98	45.25	2.09	3.24	17:25
14:11	1-4-5-6-10-13	1.55	1.08	56.08	2.88	3.33	17:31
14:11	1-4-5-8-10-13	1.57	1.07	45.92	2.51	3.34	17:31
13:41	1-4-9-12-13	1.51	0.89	49.72	5.03	2.97	16:40
13:41	1-4-5-8-10-13	1.55	1.04	42.83	1.12	3.27	16:57
13:41	1-4-5-8-12-13	1.59	0.99	42.78	1.74	3.23	16:55
13:11	1-4-9-12-13	1.51	0.89	49.72	5.03	2.98	16:10
13:11	1-4-5-8-10-13	1.62	1.19	43.81	1.33	3.37	16:45
13:11	1-4-5-8-12-13	1.66	1.14	43.75	1.94	3.55	16:44

由表 4 可知,在出发时间窗内对 t_o 取不同值时,存在多条满足 $[T_e, T_l]$ 约束的非支配路径,由多个 t_o 和 p_{od}^t 组成决策矩阵,使运输商根据优化准则进行有偏好的路径选择.

为直观表示不同优化准则下运输路径属性差异,取 $t_o = 13:11$ 时的路径 $p_1(1, 4, 9, 12, 13)$ 和 $p_2(1, 4, 5, 8, 12, 13)$, 以及 $t_o' = 14:11$ 时的路径 $p_1'(1, 4, 5, 6, 10, 13)$ 和 $p_2'(1, 2, 6, 10, 13)$ 进行数据对比分析,得到各路径的属性值如图 2 所示.

在图 2(a)中, p_2 与 p_2' 相比较,两者的 $f_e(\mathbf{x})$ 的值相差甚小,但 p_2 的 $f_v(\mathbf{x})$ 值变化较大. 对保守型运

输商来说, p_2' 的行程时间更为可靠.

由图 2(b)可知,如果运输商以风险值最小为优化准则, p_1 明显优于 p_1' , p_1 上的运输风险在最坏情况下也低于 p_1' 上的风险. 若在 p_2 与 p_2' 中进行选择,两者的 $g_e(\mathbf{x})$ 值近似相等,但 p_2 的 $g_v(\mathbf{x})$ 值较小,说明 p_2 上风险值的稳定性更好.

在给定 $[T_e, T_l]$ 后, τ 值的改变会影响不同类型(保守型、中间型和冒险型)运输商的出发时间选择. 以 s_1 为例,令 τ 分别取值 0.95、0.5 和 0.2,计算 h_o 和对应的路径属性值,计算结果见表 5.

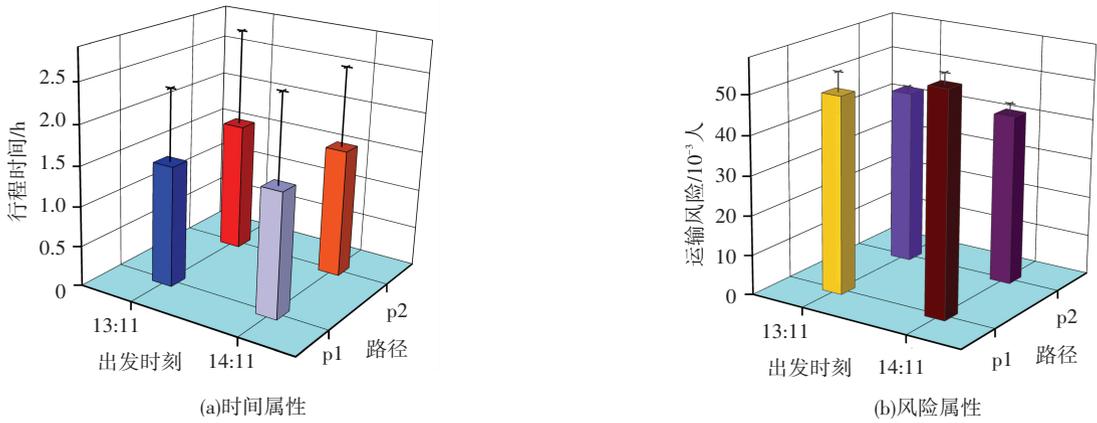


图 2 不同出发时间的路径属性

Fig.2 Path attributes with different departure time

表 5 不同置信水平下的最迟出发时间及路径

Tab.5 Paths and the latest departure time with different arrival confidence level

τ	t_o	p_{od}^l	$f_e(\mathbf{x}) / \text{h}$	$f_v(\mathbf{x}) / \text{h}$	$g_e(\mathbf{x}) / 10^{-3} \text{人}$	$g_v(\mathbf{x}) / 10^{-3} \text{人}$	$T(p_{od}^l) / \text{h}$	t_d
0.95	14:41	1-5-6-10-13	1.58	1.03	55.92	1.76	3.27	17:57
0.5	16:19	1-5-6-10-13	1.68	1.12	33.11	3.21	1.68	18:00
0.2	16:51	1-4-5-8-10-13	1.94	1.36	45.47	6.92	1.14	18:00

由表 5 可知,保守型运输商的出发时间较早,路径行程时间的标准差较小,表明其可靠性较好,能以较大的置信度准时到达;而冒险型运输商的出发时间较晚,路径行程时间的标准差较大,说明行程时间的可靠性较差,准时到达的可信度较低. 计算结果符合实际运输过程中不同类型运输商对出发时间的选择方式.

考虑运输商的路径选择偏好,改变 π_m 和 Δ 的取值,分 6 种场景来分析参数变化对运输路径的影响,所有场景中令 $\tau = 0.95, t_o = 14:30$. 在场景 1 和场景 2 中,假设运输商追求 $f_e(\mathbf{x})$ 和 $f_v(\mathbf{x})$ 取值最小,给出各 π_m 的值为 (0.45, 0.30, 0.15, 0.10), Δ 分别为 0.5 和 0.1 时,得到 2 种场景下的非支配路径集合及路径属性值见表 6.

表 6 不同准则权重和支配阈值对应的路径

Tab.6 Paths with different criterion weight and dominate threshold value

场景	$(\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4; \Delta)$	p_{od}^l	$f_e(\mathbf{x}) / \text{h}$	$f_v(\mathbf{x}) / \text{h}$	$g_e(\mathbf{x}) / 10^{-3} \text{人}$	$g_v(\mathbf{x}) / 10^{-3} \text{人}$	t_d
1	(0.45, 0.30, 0.15, 0.10; 0.5)	1-4-9-12-13	1.58	0.99	48.76	4.83	17:43
		1-5-6-10-13	1.56	1.04	55.47	1.84	17:46
		1-5-8-10-13	1.58	1.03	45.31	1.47	17:46
		1-5-8-12-13	1.62	0.98	45.26	2.09	17:44
		1-4-5-6-10-13	1.55	1.08	56.09	2.88	17:50
2	(0.45, 0.30, 0.15, 0.10; 0.1)	1-5-8-12-13	1.62	0.98	45.26	2.09	17:44
		1-4-5-6-10-13	1.55	1.08	56.09	2.88	17:50

同理,采用相同的计算方式,分别计算以下 4 种场景下的非支配运输路径. 在场景 3 和 4 中假设运输商追求 $g_e(\mathbf{x})$ 和 $g_v(\mathbf{x})$ 最小,各 π_m 取值为 (0.15, 0.10, 0.45, 0.30), Δ 分别为 0.5 和 0.1; 在场景 5 和 6 中假设运输商无选择偏好,各 π_m 取值为 (0.25, 0.25, 0.25, 0.25), Δ 分别为 0.5 和 0.1.

由 6 种场景下的计算结果可知,改变 π_m 和 Δ 的取值,可生成不同的非支配路径. 当 Δ 值相同时, π_m 的取值越平均,各准则之间的占优关系越不明显,产生的非支配路径数量较多. 当 π_m 取值不变时, Δ 值越小,路径间的支配关系越明确,但是计算

过程中被删除的可行路径数量增多,导致最终的非支配路径数量减少,求解效率提高. 因此,调整 π_m 和 Δ 的取值,可为不同偏好的运输商提供路径选择决策支持,并实现求解质量和求解效率的有效均衡.

5 结 论

1) 根据危险品运输网络的动态特征,对运输路径的行程时间和运输风险的 STD 属性进行了分析,建立了基于到达时间窗约束和准时到达置信水平的多准则路径优化模型.

2) 根据 STD 路网的 FIFO 性质,设计了两阶段

多维标号修正算法对模型求解. 首先根据各路段的随机属性值、准时到达置信水平和给定的到达时间窗, 利用可信性理论求解出发时间区间, 并设定调整步长得到多个出发时刻; 然后设计准则权重和阈值支配方法, 计算不同出发时刻对应的非支配路径集合, 并实现求解质量和求解效率的均衡.

3) 文中假设危险品运输网络为非可等待的 FIFO 网络, 具有一定的局限性. 在具有 STD 属性的 FIFO 网络或非 FIFO 网络中设置可等待节点, 是下一步要研究的内容.

参考文献

- [1] 杨信丰, 李引珍, 何瑞春, 等. 多属性时间依赖网络的城市危险品运输路径优化[J]. 中国安全科学学报, 2012, 22(9): 103-108.
YANG Xinfeng, LI Yinzhen, HE Ruichun, et al. Route optimization for urban hazardous material transportation in time-dependent networks with multi-attributes [J]. China Safety Science Journal, 2012, 22(9): 103-108.
- [2] 冯树民, 殷国强. 规划层面的危险品运输路径优化模型[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(8): 53-56.
FENG Shumin, YIN Guoqiang. Transport route optimization model of dangerous goods at the planning level[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2012, 44(8): 53-56.
- [3] HALL R W. The fastest path through a network with random time dependent travel times[J]. Transportation Science, 1986, 20(3): 182-188.
- [4] 任常兴, 吴宗之, 李晋. 基于风险分析的危险品道路运输多目标 Pareto 最优选线[J]. 中国安全生产科学技术, 2008, 4(2): 9-13.
REN Changxing, WU Zongzhi, LI Jin. Risk analysis based Pareto-optimal paths of hazardous materials transportation by road[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2008, 4(2): 9-13.
- [5] DESAI S, LIM G J. Solution time reduction techniques of a stochastic dynamic programming approach for hazardous material route selection problem[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 65(4): 634-645.
- [6] SUBRAMANIAN S. Routing algorithms for dynamic, intelligent transportation networks[D]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [7] TOUMAZIS I, KWON C. Routing hazardous materials on time-dependent networks using conditional value-at-risk[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2013, 37(3): 73-92.
- [8] WEI M, LI X, YU L. Time-dependent fuzzy random location-scheduling programming for hazardous materials transportation[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 57: 146-165.
- [9] FU L, RILETT L R. Expected shortest paths in dynamic and stochastic traffic networks[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 1998, 32(7): 499-516.
- [10] CHANG T S, NOZICK L K, TURNQUIST M A. Multi-objective path finding in stochastic dynamic networks, with application to routing hazardous materials Shipments [J]. Transportation Science, 2005, 39(3): 383-399.
- [11] MILLER-HOOKS E, MAH, ASSANI H. Optimal routing of hazardous materials in stochastic, time-varying transportation networks[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1998, 1645(1): 143-151.
- [12] ANDROUTSOPOULOS K N, ZOGRAFOS K G. Solving the bi-criterion routing and scheduling problem for hazardous materials distribution[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2010, 18(5): 713-726.
- [13] CHANG T S, WAN Y, OOI W T. A stochastic dynamic traveling salesman problem with hard time windows[J]. European Journal of Operational Research, 2009, 198(3): 748-759.
- [14] 魏航. 时变随机网络下有时间窗的有害物品运输路径选择研究[J]. 中国管理科学, 2009, 17(3): 93-100.
WEI Hang. Hazardous materials transportation path problem in stochastic, time-varying network with constrain of time windows[J]. Chinese Journal of Management Science, 2009, 17(3): 93-100.
- [15] 贺政纲, 宋金玉. 时变条件下危险废弃物运输路径选题研究[J]. 中国安全科学学报, 2014, 24(12): 44-50.
HE Zhenggang, SONG Jinyu. Route planning for hazardous waste transportation as time varies[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2014, 24(12): 44-50.
- [16] SRINIVASAN K K, PRAKASH A A, SESHADRI R. Finding most reliable paths on networks with correlated and shifted Lognormal travel times[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2014, 66(8): 110-128.
- [17] WANG Y, DONG W, ZHANG L, et al. Speed modeling and travel time estimation based on truncated normal and log-normal distributions[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2012, 2315(1): 66-72.
- [18] NIE Y, WU X, DILLENBURG J F, et al. Reliable route guidance: A case study from Chicago[J]. Transportation Research Part A: Policy & Practice, 2012, 46(2): 403-419.
- [19] SETAK M, HABIBI M, KARIMI H, et al. A time-dependent vehicle routing problem in multigraph with FIFO property[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2015, 35(35): 37-45.
- [20] ABKOWITZ M, CHENG P D M. Developing a risk/cost framework for routing truck movements of hazardous materials[J]. Accident Analysis & Prevention, 1988, 20(1): 39-51.
- [21] 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.
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.
- [22] ZENG W, MIWA T, WAKITA Y, et al. Application of Lagrangian relaxation approach to α -reliable path finding in stochastic networks with correlated link travel times[J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2015, 56: 309-334.
- [23] LIU L, MU H, YANG J. Simulated annealing based GRASP for Pareto-optimal dissimilar paths problem[J]. Soft Computing, 2017, 21(18): 5457-5473.
- [24] WU J, JIN S, JI H, et al. Algorithm for time-dependent shortest safe path on transportation networks[J]. Procedia Computer Science, 2011, 4(4): 958-966.
- [25] LOZANO A, ANGELES M, MACIAS L, et al. Hazardous materials transportation in Mexico City: Chlorine and gasoline cases [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 2011, 19(5): 779-789.