

规划层面的危险品运输路径优化模型

冯树民, 殷国强

(哈尔滨工业大学 交通科学与工程学院, 150090 哈尔滨)

摘要: 对危险品运输路径进行优化, 能够降低运输风险, 同时又能兼顾企业成本需求, 为政府决策提供依据. 在城市总体规划的基础上, 分析危险品运输的特征, 建立了危险品运输路径优化指标体系. 从可实施性及可量化角度, 选取规划道路的性质以及道路沿线的用地性质来评定路段风险, 同时将路段的应急能力作为校正因子, 改进风险模型; 以 BPR 路段阻抗函数来计算运输成本, 以江西萍乡为例给出运输风险和运输成本的计算过程; 以运输风险、运输成本为目标建立危险品运输路径双目标优化模型, 探讨了模型的求解方法. 所建模型简便、实用、可操作性强, 可为危险品运输网络的规划设计提供理论基础.

关键词: 危险品运输; 路径; 优化模型; 规划; 运输风险

中图分类号: U491.1

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)08-0053-04

Transport route optimization model of dangerous goods at the planning level

FENG Shu-min, YIN Guo-qiang

(School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: Transport route optimization of dangerous goods makes lower transportation risk and cost of the enterprise, meanwhile it provides basis reference for the government decision. On the basis of urban master planning, the characteristics of transport of dangerous goods was analyzed, and then the index system on transport of dangerous goods was established. In order to implement this research and quantify the indicators, road characteristics and nature of land along the section has been used to evaluate the risk, simultaneously, the emergency response capacity was considered as the correction factor to improve the risk model, and the BPR impedance function was applied to calculate the transportation costs, then the calculation process of transportation risk and costs was given with an example of Pingxiang, Jiangxi. On this basis, a bi-objective optimization model was created with the target of risk and cost, and method of solving the model was discussed. This model provides a theoretical basis for the transport network of dangerous goods planning and design for its simplicity, practicality and operability.

Key words: transport of dangerous goods; route; optimization model; planning; transportation risk

危险品运输路径优化不但能够减小危险品运输事故发生的可能性, 同时还能降低事故后果, 对城市危险品运输的安全保障有较为深远的意义. 在危险品运输路径优化问题上, 国内外科研工作者进行了大量研究. Miaou 等^[1] 利用最短路线算法求解运输成本、事故概率和暴露人口约束的最

佳路线; Erkut 等^[2-3] 通过研究多种危险品运输风险评价模型, 选用 6 个标准, 对选线问题“最优路径”的相似相异性进行系统分析; Zografos 等^[4] 提出了在考虑时间参数情况下的最小化运输风险和最低运输成本的混合整数规划; 吴宗之等^[5-8] 研究了危险品运输目标体系, 分别以运输风险、事故总概率、暴露人口数等为目标分别建立了危险品运输路径优化模型; 秦军昌等^[9] 考虑路径优化中的天气因素, 提出了危险品运输选线的鲁棒优化模型; 魏航等^[10-11] 将危险品运输风险分为人口风险、环境风险和财产风险 3 部分, 并考虑了危险品

收稿日期: 2011-11-04.

基金项目: 黑龙江省教育厅科技项目(11544027).

作者简介: 冯树民(1973—), 男, 副教授, 博士生导师.

通信作者: 冯树民, zlyfsm2000@sina.com.

运输过程人口风险的时间属性以及区域风险差异和个体风险差异,构建了运输风险平衡性模型。

危险品运输路径优化选线指标很多,在不同研究阶段有些选线指标获取存在困难,且各指标之间容易发生冲突,并且以往的优化模型多数偏重理论分析,实用性较差。

1 规划层面的危险品运输路径优化指标体系

危险品运输路径优化指标大致包括影响人员风险指标、道路特征指标、环境风险指标、成本指标等。其中影响人员风险指标包括影响人数、社会风险、避灾减灾风险、感知风险和条件风险等;道路特征指标包括路线长度、行驶时间、道路事故率等;环境风险指标主要考虑挥发性危险品事故发生后的挥发特性;成本指标主要指运输成本。

在危险品运输过程中影响因素较多,需要考虑的指标也很多,并且众多的路径优化标准之间容易发生冲突,如成本最小的运输路线的潜在运输风险通常较大,而较小的运输风险路线的运输成本可能会相对较高。因此在进行危险品运输路径优化时,应综合考虑各方面要求。

在确定危险品运输路径优化指标时,考虑到主要是用于比较不同运输路线之间的优劣,因此不考虑车辆、驾驶员等共同的因素,只考虑能反映不同路径优劣的指标。这些指标应能体现出危险品运输过程主要相关方的利益,同时确定的指标应可以量化。

危险品运输过程主要涉及两个部门的利益,政府部门主要关注危险品运输的风险大小,运输企业则主要关注经济成本问题。如果路线的选择只是满足政府对于风险控制的需求,而忽视了企业运输的成本要求,势必导致选线脱离实际,因此在路径优化过程中必须协调好二者关系,使危险品运输选线能够达到政府与企业间的双赢。因此将危险品道路运输路径优化指标分为两大类:运输风险和运输成本。

考虑到危险品运输事故属于低概率重后果事件,所以在危险品运输路径优化中必须将运输风险指放在第一位。对于运输风险指标,以往研究都考虑了路段事故率以及沿线暴露人口数等因素。在规划路网层面上,事故率无法得到,从可实施以及可量化角度考虑,选取规划道路的实际道路情况(道路等级、横断面形式)作为影响将来道路事故率的主要指标;暴露人口与用地性质密切相关,故选取道路沿线用地性质指标作为评估事故后果

的主要指标;考虑到应急能力对于危险品事故的重要性,将事故应急能力也作为运输风险的影响因素。

对于运输成本指标,结合交通领域的相关理论,以路段的时间阻抗为依据,主要考虑道路长度、设计车速、路段饱和度等影响因素。

综上,得到危险品运输路径优化指标体系见图1。

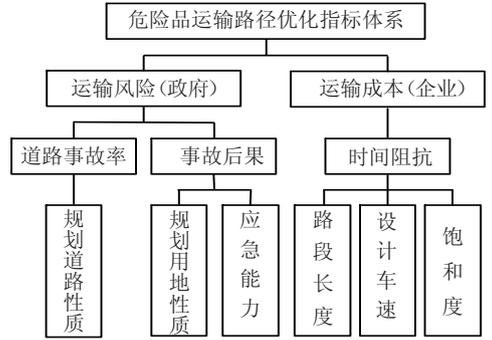


图1 危险品运输路径优化指标体系

2 危险品运输路径优化指标量化

2.1 运输风险指标量化

危险品运输风险通常定义为危险品运输过程事故率与潜在损失后果的乘积。事故发生概率往往受时段、天气状况、道路类型、车辆类型、装载形式和路况等方面的影响,而事故后果严重度与影响人数、财产损失以及气象条件和风向概率等有关。

以往研究都是在现有道路基础上进行的,结合以往数据得到相应危险品运输路段事故率,而在规划路网上路段的事故率无法得到,同时与事故后果相关的数据也无法得知。

在城市规划道路网上,考虑道路的特性以及道路沿线的用地性质,提出路段风险计算如下:

$$R = \frac{\sum_i \rho_i s_i}{A}$$

式中: R 为路段风险值; A 为路段的安全系数; ρ_i 为第 i 种用地所对应的人口密度; s_i 为路段沿线的第 i 种用地的面积。

对于一些具有挥发性的危险品运输泄漏事故和一些造成了重大人员伤亡的事故,救援工作刻不容缓。事故发生路段的应急响应能力,对于潜在的运输风险计算来说是一个不可忽视的因素,因此将事故应急能力作为补偿因子,加入到危险品运输的风险值计算当中,即

$$R' = \frac{\sum_i \rho_i s_i}{A} (1 + \lambda(E - E^*)/E^*)$$

式中: R' 为修正后的危险品运输路段风险; E 为路

段发生事故时的应急响应能力; E^* 为有效的应急响应能力下限值; λ 为调整参数, 表示应急能力对事故后果的影响程度。

由此得到危险品运输路径的风险值为

$$R_L = \sum_{j \in L} \frac{\rho_j s_j}{A_j} (1 + \lambda(E_j - E^*)/E^*).$$

式中: R_L 为危险品运输路径 L 的运输风险; A_j 为路段 j 的安全系数; E_j 为路段 j 的应急响应时间。

2.2 运输成本指标量化

从运输企业角度看, 危险品运输不同于一般货物, 运输成本比一般货物要高。综合考虑危险品运输的全过程, 将运输成本用行驶时间来近似描述。一般来说, 路段所需行驶时间并不是常数, 而是与路段的交通有关, 行驶时间的一般表达式为

$$t_i = f(q_i).$$

式中: t_i 为路段 i 的实际行驶时间; q_i 为路段 i 的交通量。

对于行驶时间函数的研究, 应用最广泛的是由美国公路局开发的函数, 称为 BPR 函数。

$$t_i = t_i^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q_i}{C_i} \right)^\beta \right].$$

式中: t_i^0 为路段 i 的自由流行驶时间; C_i 为路段 i 的交通容量; α, β 为参数, 通常 $\alpha = 0.15, \beta = 4$ 。

由于研究从规划路网的层面出发, 故各条路段的饱和度 (q/C) 为规划路网需求预测下的饱和度, 并非实际的饱和度。

由此得到危险品运输路径的运输成本为

$$T_L = \sum_{j \in L} t_j^0 \left[1 + \alpha \left(\frac{q_j}{C_j} \right)^\beta \right].$$

式中 T_L 为危险品运输路径 L 的运输成本。

3 指标量化实例分析

图 2 为萍乡市 2020 年规划的城市主要货物运输通道, 危险品运输通道的选取都是基于干道考虑的, 对于支路的运输并没有考虑在内。该规划路网共涉及 21 个节点, 37 条路段, 这些路段均由主干道、快速路以及高速路改建段构成。大圆点表示危险品的产生吸引的区域, 十字表示医疗卫生部门。

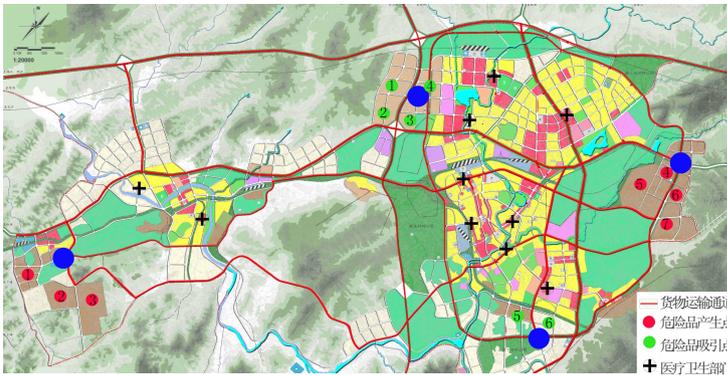


图 2 萍乡市货物运输通道

路段安全系数 A 由路段长度、路面宽度以及道路横断面形式决定, 考虑危险品运输属于特殊货物运输, 运输通道的选取只考虑主要干道。文献 [12] 发现, 当路面宽度 > 30 m 时, 路段的事故率变化并不明显, 在研究对象上只是根据道路等级以及横断面形式来研究, 横断面形式只考虑有无中央分隔带。确定道路安全系数见表 1。

表 1 道路安全系数评定标准

道路类型	有无中央分隔带	安全系数
高速公路	—	1
快速路	—	0.95
主干道	有	0.90
	无	0.85

道路沿线暴露人口密度由道路沿线的规划用地性质来计量, 用地面积按照危险品运输事故影响范围半径 800 m 和路段长度计算。各类用地所对应

的暴露人口密度考虑采用各类性质的用地所占吸引权重比来确定, 结合以往研究成果^[13], 确定各类用地的吸引权重比见表 2。结合萍乡当地情况取道路沿线居住用地人口密度为 500 人/km², 则其他各类用地的人口密度就可以推算出来。

表 2 各类用地的吸引权重

土地利用类型 (i)	吸引权重 α_i
居住用地	0.516
公用设施用地	0.432
工业用地	0.046
仓储用地	0.002
市政设施用地	0.003
绿地	0.001
合计	1.000

统计各路段沿线的用地性质, 结合道路等级以及横断面形式即可得到各个路段初步的风险值, 应用风险校正模型, 加入应急能力作为校正因子, 取有效响应时间为 5 min, 即 $E^* = 5$ min, 取 $\lambda = 0.25$ 。计算得到各个路段校正后的风险 R

值,见图3.

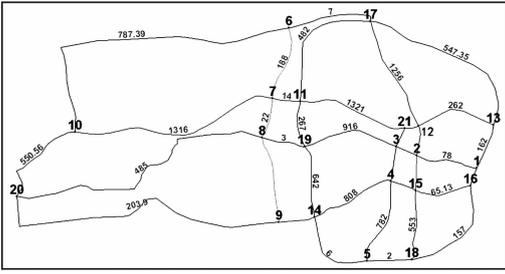


图3 路段危险品运输风险

对于成本指标的量化,需要统计各个路段的长度,设计车速以及预测的饱和度. 在成本计算中,对于设计车速,高速公路按照 120 km/h,快速路按照 90 km/h,主干道按照 70 km/h 计算. 路段饱和度按照需求预测结果给出. 路段成本计算结果见图4.

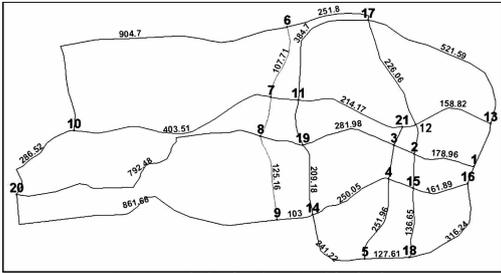


图4 路段危险品运输成本

4 危险品运输路径优化模型

以运输风险最小和运输成本最小为目标,建立危险品运输路径双目标优化模型

$$\begin{cases} \min Z_1 = R_L, \\ \min Z_2 = T_L. \end{cases}$$

对于双目标路径优化选择问题,一般情形下,选线不太可能同时使两个目标达到最优,所以理论上讲并不存在绝对最优路径.

由于运输风险与运输成本之间存在冲突,准确评估目标间的冲突问题非常困难,通常做法是采用权重法将多目标问题转化为单目标问题,形成单一的线性评估函数. 也可构建多个冲突指标,生成一组 Pareto 优化路线,由决策者选择最佳路径^[14]. 还可以采用灰色关联度投影法求取最优路径^[15].

5 结论

1) 规划层面的危险品运输路径优化建立在规划路网上,不同于以往的路径优化,提出适合规划层面的危险品运输路径优化指标体系.

2) 从可量化、可实施角度选取以规划路网的性质以及道路沿线的用地性质来量化路段运输的风险,同时将医疗卫生点到路段的最快响应时间作为应急能力,并将应急能力作为补偿因子加入到风险

计算当中,改进了传统风险模型. 以车辆行走时间 BPR 阻抗函数作为路段运输成本.

3) 以萍乡市总体规划为背景,根据规划道路的性质以及沿线用地性质,对危险品运输的各路段运输风险和运输成本进行量化,给出具体计算过程.

4) 以运输风险最小和运输成本最小为目标,建立双目标危险品运输路径优化模型,探讨了模型的求解方法.

参考文献:

[1] MIAOU S P, CHIN S M. Computing *k*-shortest path for spent nuclear fuel highway transportation[J]. European Journal of Operational Research, 1991, 53: 64-80.

[2] ERKUT E, INGOLFSSON A. Catastrophe avoidance models for hazardous materials route planning[J]. Transportation Science, 2000, 34(2): 165-179.

[3] ERKUT E, INGOLFSSON A. Transport risk models for hazardous materials: revisited[J]. Operations Research Letters, 2005, 33(1): 81-89.

[4] ZOGRAFOS K G, ANDROUTSOPOULOS K N. A heuristic algorithm for solving hazardous materials distribution problems[J]. European Journal of Operational Research, 2004, 152(2): 507-519.

[5] 师立晨, 魏利军, 吴宗之. 危险品道路运输多目标路径优化方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2006, 10: 60-63.

[6] WU Zongzhi, DUO Yingquan, LIU Mao, et al. A study on the methods of risk assessment of hazardous materials during road-transportation[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2004, 12: 36-44.

[7] 任常兴, 吴宗之. 危险品道路运输选线问题分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(2): 84-88.

[8] 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(2): 10-13.

[9] 秦军昌, 张金梁, 王刊良. 危险品运输线路问题的鲁棒优化模型[J]. 统计与决策, 2009(20): 25-26.

[10] WEI Hang, LI Jun. Analysis of population risk in hazardous material transportation as time varies[J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(10): 95-98.

[11] WEI Hang, LI Jun, WANG Hao. Analysis of total risk of hazardous material during transportation[J]. China Safety Science Journal, 2004, 15(12): 97-101.

[12] 景天然. 城市道路条件与交通事故率的关系[J]. 同济大学学报, 1992(3): 35-40.

[13] 韩春燕, 殷国强, 冯树民. 赣州市道路网规划研究[J]. 公路, 2010(6): 163-167.

[14] 魏航, 蒲云, 李军. 一种求解双目标最短路的方法[J]. 系统工程, 2005(7): 113-117.

[15] 吕锋, 崔晓辉. 多目标决策灰色关联投影法及其应用[J]. 系统工程理论与实践, 2002(1): 103-107.

(编辑 赵丽莹)