

# 危险品运输选线的定量风险评价模型

任常兴<sup>1</sup>, 吴宗之<sup>2</sup>, 刘 茂<sup>1</sup>

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 天津 300071; 2. 中国安全生产科学研究院, 北京 100029)

**[摘要]** 定量化风险评价是危险品道路运输选线的重要决策依据,但在如何定量其风险方面往往存在分歧。系统地总结了常见的危险品运输定量风险评价模型,将其划分为传统风险评价模型及其特例、感知风险模型、条件风险模型、侧重后果的避灾风险模型以及改进后的传统风险模型5类,分析了风险评价模型的性质和原则,对将来的研究发展提出了建议。

**[关键词]** 危险品;选线;定量风险评价;道路运输

**[中图分类号]** X924 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2007)08-0072-05

## 1 引言

危险品道路运输选线涉及危险品生产经营单位、运输公司、保险公司、当地政府监管部门以及道路沿线受到影响的人员,往往是政府监管部门与危险品生产经营单位之间需要考虑风险与成本的两难决策。尽管单批次运输的事故率很低(一般 $10^{-6} \sim 10^{-8}/\text{km}$ ),但由于运输路线往往要经过城镇或高密度人群区,大量多批次长期运输经常发生事故,尤其是对沿线受影响的人员和生态环境的危害极其严重。

危险品运输优化选线是尽可能降低运输沿线的影响人员风险。公众、政府监管部门以及危险品生产经营单位等对事故后果很敏感,决策中这种风险厌恶态度很显著。由于危险品本身的风险特征,研究者都认为应与一般的选线问题区分开,但对于如何定量评价风险往往存在分歧<sup>[1-4]</sup>。其中 Erkut 等人<sup>[2,3]</sup>研究了多种风险评价模型,认为风险评价模型对于优化选线很敏感。我国在相关方面的研究起步较晚,作者回顾了文献中常见的定量风险评价模型,在此基础上分析了模型性质和优化原则,通过改变边权数可转化为最短路线问题。

## 2 危险品运输风险评价模型的性质

Erkut 等人<sup>[3]</sup>研究了多种危险品运输定量风险评价模型,描述了需要满足的3个性质:

性质1:选线评估函数单调性。设  $V$  表示危险品运输风险的非负路线评估函数,如果路线  $p$  在路线  $P$  上,那么  $V(p) \leq V(P)$ 。性质1表示当现有路线上增加一个或多个路段时,总的运输风险不会减少,路段的距离、时间、成本等属性均满足性质1。

性质2:风险评价模型单调性。设  $V$  为路段属性函数,  $V(P) = f(u_1(P), u_2(P), \dots, u_k(P))$ ,  $u_i(P)$  为路线  $P$  上所有路段的同维向量。如果,  $h_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, k$ , 那么

$$f(u_1(P), u_2(P), \dots, u_k(P)) \leq f(u_1(P) + h_1, u_2(P) + h_2, \dots, u_k(P) + h_k)。$$

性质2表示,当  $u_1(P)$  为事故概率,  $u_2(P)$  为事故后果,  $k=2$  时,危险品运输风险是事故概率和后果的非减函数。

性质3:选线优化原则(Bellman 最优原则),即优化路线的次路线也是最优的。

## 3 危险品运输的定量风险评价模型

基于经典风险理论,风险通常表示为事件发生

**[收稿日期]** 2006-06-15

**[基金项目]** 科研院所社会公益研究资助项目(2004DID2J06)

**[作者简介]** 任常兴(1979-),男,河北临城县人,南开大学环境科学与工程学院博士研究生

的概率与其不希望后果的乘积,危险品运输中不希望事件往往是泄漏事故,事故后果通常表示为运输沿线发生事故的影响人数,即为传统风险的表示形式,其特例为影响人数模型和事件概率模型<sup>[5-7]</sup>。考虑决策中的风险厌恶态度,Abkowitiz 等人<sup>[8]</sup>提出了感知风险模型(见表1,式4), $q > 1$ 表示主观感知的风险大于客观风险; $q = 1$ 表示主观感知和客观的风险程度相当,即为传统风险模型; $q < 1$ 表示主观感知的风险小于客观风险。事实上危险品运输灾难事故发生后往往中断运输,需要重新评估选择路线。Sivakumar 等人<sup>[9]</sup>提出了条件风险模型(见表1,式5),为发生首次事故的不希望后果。基于危险品运输事故后果的严重性和灾难性,Erkut 等人<sup>[10]</sup>提出了避免重大事故后果的3个避灾模型,充分考虑了

事故后果对危险品运输选线的影响,着重降低沿线的影响人员风险。由于传统风险模型不适合起点一终点间的多批次危险品运输,也没有考虑事故中断运输的情形,Erkut 等人<sup>[11]</sup>对传统风险模型进行了改进,研究了运输路段事故率的准确性问题,更适合于实际的多批次危险品运输。

根据上述分析,相关的危险品运输风险评价模型可以划分为下列5类:传统风险模型及特例、感知风险模型、条件风险模型、侧重后果的避灾风险模型以及改进后的风险模型(见表1)。违背性质的风险评价模型理论上带来问题,也会产生一些不合理的选线结果。性质3将选线问题转化为最短路线问题,任何包含回路的路线一定不是最优路线,Erkut 等人<sup>[3]</sup>也对此做了论证。

表1 危险品运输路线风险评价模型<sup>[3,5-7]</sup>

Table 1 A summary of the eleven path evaluation functions for hazardous materials transport risk

类别	名称	风险表达式	性质满足情况		
			原式	近似	
传统风险模型及特例	传统风险	$TR(P) = \sum_{i \in P} p_i C_i$	(1)	否	是
	影响人员数	$PE(P) = \sum_{i \in P} D_i$	(2)	是	否
	事件概率	$IP(P) = \sum_{i \in P} p_i$	(3)	是	是
感知风险		$PR(P) = \sum_{i \in P} p_i C_i^q$	(4)	否	是
条件风险		$CR(P) = \sum_{i \in P} p_i C_i / \sum_{i \in P} p_i$	(5)	否	否
侧重后果的避灾风险模型 <sup>[10]</sup>	最小化最大影响人数	$MM(P) = \max_{i \in P} C_i$	(6)	是	否
	均值-一方差组合	$MV(P) = \sum_{i \in P} (p_i C_i + k p_i C_i^2)$	(7)	否	是
	负效用模型	$DU(P) = \sum_{i \in P} p_i (\exp(k C_i) - 1)$	(8)	否	是
改进后的传统风险模型 <sup>[11]</sup>		$TR'(P) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{i-1} (1 - p_j) p_i C_i$	(9)		否
		$TR''(P) = \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^{i-1} \exp(-p_j) (1 - \exp(-p_i)) C_i$	(10)		否
		$TR'''(P) = \sum_{i=1}^n q_i C_i \prod_{j=1}^n (1 - q_j)^{-1} q_i = 1 - \exp(-p_i)$	(11)		不满足性质3

注: $P$ 为源节点到目的节点的路径集合; $p_i$ 为路段*i*发生事件的概率; $q_i$ 为路段*i*发生一次或多次事故的概率; $C_i$ 为路段*i*发生事件的后果损失,通常为影响区暴露人数; $D_i$ 为路段*i*沿线矩形区内的总人数, $D_i = 2\lambda l_i \rho(i)$ ,式中, $l_i$ 为路段*i*的长度, $\lambda$ 为危险圈的半径, $\rho(i)$ 为路段*i*影响区人口密度; $C_i$ 为以路段*i*任意点为圆心周围危险圈内的总人数, $C_i = \pi \lambda D_i / (2l_i)$ 。

### 3.1 侧重后果的避灾模型

侧重后果的避灾风险模型中 $MM(P)$ 模型很直观,最小化运输沿线的最大影响人数,可以在运输网最小生成树中寻找最佳路径,边权数为影响人数,但多数情况下为约束条件,最优化其它选线指标。在适当假设下最小化事故后果方差可以转化为最短路线问题,边权数为事故概率与影响人数平方的乘积,最下化方差问题是感知风险模型的特例。 $MV(P)$ 模型也可转化为最短路线问题,边权数是事故概率、

影响人数和风险厌恶度的简单函数。 $DU(P)$ 模型为后果指数负效用函数,可转化为最短路线问题,但仅在限定风险厌恶度常数范围内有意义。

最大影响人数是危险品运输后果分布的一个度量手段,如 $C_{\max}(P) = \max\{C_{ij}; (i, j) \in P\}$ ,可以与其它标准 $w(P)$ 一起优化选线。 $MM(P)$ 模型可以搜索不希望后果 $E[X(P)]$ 和方差 $Var[X(P)]$ 的Pareto-优化路线,即最小化不希望后果和最小化潜在灾难,这里 $X$ 表示沿路线*P*运输的影响人数变

量。 $E[X(P)]$ 和 $Var[X(P)]$ 是可追加的,标准最短路线算法可以找到最小 $E[X(P)]$ 或 $Var[X(P)]$ ,对于给定的常数 $k$ ,可以找到最小 $E[X(P)] + kVar[X(P)]$ ,即为 $MV(P)$ 模型,不同的 $k$ 值可产生多条非占优路线。危险品运输后果指数负效用函数 $u(X) = \exp(kX)$ ,有灾难厌恶特性,第 $i+1$ 个生命失去的成本比第 $i$ 个生命失去的成本高。常数 $k > 0$ ,为灾难厌恶度, $k$ 值越大,灾难厌恶度越高。

### 3.2 基于事故率改进的传统风险评价模型

危险品运输过程中事故中断运输,第 $i$ 路段的事故率受前面路段影响,即为 $(1-p_1)(1-p_2)\cdots(1-p_{i-1})p_i$ ,式(1)可转化为式(9)。如果沿路段 $i$ 运行,长度为 $l_i$ ,根据空间泊松过程单位长度为 $\lambda_i$ ,设 $p_i = l_i\lambda_i$ ,事故可导致运输在路段 $i$ 的任意位置中断,式(9)可转化为式(10)。

传统风险评价模型通常量化单车辆特定路线运输风险,实际上可能需要多次运输。对于满足需求的可能多次运输,设 $IP(P)$ 为沿路径 $P$ 运输的泄漏事故概率,其准确表达式为 $IP''(P) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i)$ ,表示至少一次事故的概率。如果每次运输是独立的,事故不能中止运输,成功概率为 $1 - IP''(P)$ 。运输次数符合几何分布,期望值为 $1/(1 - IP''(P))$ 。假设事故中止运输,每次运输的不希望后果为 $TR''(P)$ ,完成任务所有运输批次的总不希望后果为式(11),式中 $q_i, C_i$ 为路段 $i$ 的运输风险, $\prod_{j=1}^n (1 - q_j)^{-1}$ 为运输到达终点前路段 $i$ 的期望运输次数。该式减去第一项或最后一项,减少风险值均不小于0,满足性质1;其非负的偏导值不小于0,满足性质2。此外,基于事故率的改进模型可以与侧重后果的避灾模型结合,既准确评估运输事故率,又反映灾难性事故后果,式(7)改进如下:

$$MV(P) = \sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^{i-1} \exp(-p_j) \times (1 - \exp(-p_i))(C_i + kC_i^2) \quad (12)$$

### 3.3 改进模型的最优化处理

与式(9),式(10)相比,式(11)明显优点是没有违背危险品运输风险函数的前两个性质,但均不能使用简单的标号算法最优化,这些模型都违背性质3最优化原则。Erkut等人<sup>[3]</sup>认为所有危险品风险模型应该满足最优化原则,但优化原则限制把准确的事事故率嵌入风险评价模型中,而违背原则评价模型产生的算法优于满足原则的模型。如图1论证式(9)和式(11)违背路线选择优化原则,线上面数

据为事故概率,下面为影响人数。

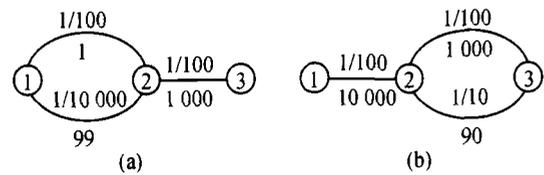


图1 (a)实例论证模型式(9)违背优化原则;  
(b)实例论证模型式(11)违背优化原则<sup>[11]</sup>

Fig.1 (a) Example demonstrating that model (9) violates the path selection optimality principle; and (b) Example demonstrating that model (11) violates the path selection optimality principle

图1(a),节点1到2的优化路线是下面路段,1到3的优化路线是上面路段。采用式(9),节点1到3上面路线风险值为: $0.01 \times 1 + 0.99 \times 0.01 \times 1\ 000 = 9.91$ ,下面路线风险值为 $0.000\ 1 \times 99 + 0.999\ 9 \times 0.01 \times 1\ 000 = 10.01$ 。最优路线包含一个次路线不是最优路线。图1(b),节点2到3的最优路线是下面路段,节点1到3的优化路线是上面路段。式(11)计算上面路线风险值为: $(0.01 \times 10\ 000 + 0.99 \times 0.01 \times 1\ 000)/(0.99 \times 0.99) = 112.13$ ;下面路线风险值为: $(0.01 \times 10\ 000 + 0.99 \times 0.1 \times 90)/(0.99 \times 0.9) = 122.23$ 。最优路线包含的次路线不是最优路线。如果起点在2,2到3之间选择风险值低的路线;起点在1,问题就不同了,1到2路段的风险值在所有路段占优势,安全到达2后,余下最小化事故概率路线为最优。路线选择最优化原则对于单次运输是合理的,对于多批次运输不合理。因此,可采用策略迭代随机最短路线算法寻找最优路径,分为策略评估和策略改进两步,最小化式(1)和式(11)。

## 4 算例

运输危险品LPG从当前所处位置①到目的地④,25 t罐车1辆,道路等级二级,运输网拓扑结构如图2所示,影响半径取0.5 km,各节点的长度、人口密度以及道路类型、事故率等基本信息参见表2。应用上述不同风险评价模型选择最小风险路径,结果显示:最短路线是路线3,最长路线是路线4,影响人数模型选择路线1,事故概率模型选择路线2,最小最大化影响人数模型排除了路线2和3。三个避灾风险评价模型数值较大,尤其是负效用模型,需要绕开高密度人群。传统风险模型改进前后相比,其相对误差在 $\pm 0.02\%$ (见图3)。感知风险、条件风险与影响人数风险评价模型结果对比如图4所示。

其中,路线 1:1—4;路线 2:1—2—4;路线 3:1—2—3—4;路线 4:1—3—4,感知风险  $k=2$ ;均值-方差模型中, $k=0.001$ ;负效用模型, $k=0.001$ 。

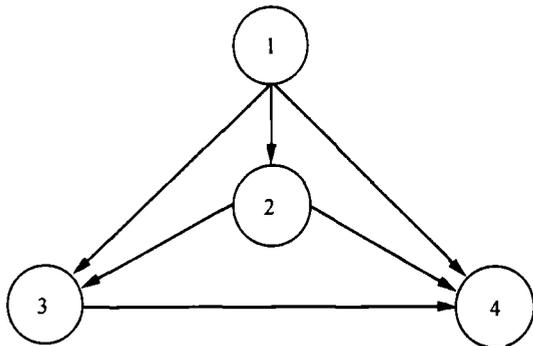


图2 道路拓扑图  
Fig.2 The topology of road

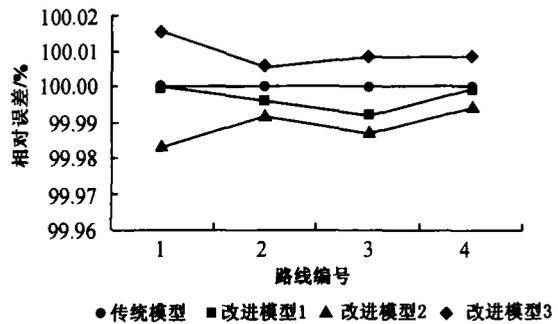


图3 传统风险模型与改进模型的相对误差比较  
Fig.3 The relative error comparison of between  $TR(P)$  and three modified  $TR(P)$

表2 道路基本信息

Table 2 The general condition of road

类别\路段	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,3)	(2,4)	(3,4)
区域	城市	城市	农村	城市	农村	农村
路面	多车道 (已划分)	高速公路 (限制通行)	多车道 (未划分)	多车道 (未划分)	双车道	多车道 (已划分)
长度/km	5	68	115	15	74	38
年事故率/ $10^{-6} \cdot \text{km}^{-1}$	7.75	1.35	2.79	8.65	1.36	1.34
人口密度/ $\text{人} \cdot \text{km}^{-2}$	2 000	1 200	400	1 000	500	700

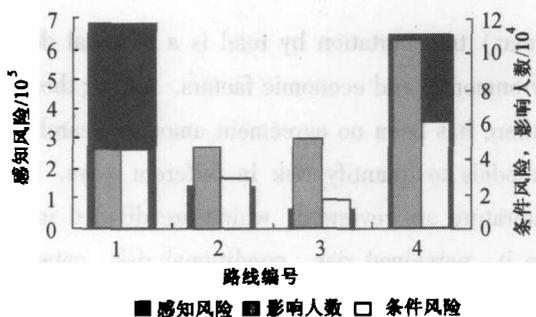


图4 感知风险、条件风险与影响人数模型比较  
Fig.4 The comparison of among  $PR(P)$ ,  $CR(P)$  and  $PE(P)$

## 5 结束语

危险品运输选线是政府监管部门与危险品生产经营单位考虑风险与成本、事故概率与影响人数等因素的一项非常重要的两难决策。基于运输过程定量风险评价优化选线可降低运输沿线影响人员风险,建议在以下方面进行深入研究。

1) 风险评价模型 危险品种类繁多,对人类和

环境带来的风险形式存在较大差别,根据具体危险品类型风险特征进一步研究适合的准确风险评价模型是发展的趋势。同时,应考虑道路特征、天气条件、交通状况以及应急能力的风险扩大或减缓作用。

2) 多因素综合发展 危险品运输中涉及运输时间和成本因素,运输时间越长,运输风险越高,运输成本越大。进一步探讨危险品运输的成本、风险、风险平衡性以及时间之间的关系,采用启发式算法优化指标之间的冲突问题。

3) 全局风险管理 危险品运输要形成运输风险分析、选线和行程安排、应急响应、疏散规划和事故管理一体化体系,加强政府监管部门的多品种全局风险决策管理。

## 参考文献

- [1] List G F, Mirchandani P B, Turnquist, et al. Modeling and analysis for hazardous materials transportation: risk analysis, routing/scheduling and facility location [J]. Transportation Science, 1991, 25(2):100~114
- [2] Erkut E, V Verter. Hazardous Materials Logistics. In Drezner Z (Ed). Facility Location: A survey of applications and methods

- [M]. Springer Series in Operations Research, New-York: Springer-Verlag, 1995
- [3] Erkut E, Verter V. Modeling of transport risk for hazardous materials[J]. *Operations Research*, 1998, 46(5): 625 ~ 642
- [4] 吴宗之,多英全,刘茂,等. 危险品道路运输过程风险分析与评价方法研究[J]. *应用基础与工程科学学报(增刊)*, 2004, 12(S1):36 ~ 44
- [5] Alp E. Risk-based transportation planning practice: overall methodology and a case example[J]. *INFOR*, 1995, 33(1): 4 ~ 19
- [6] ReVelle C, Cohon J, Shobrys D. Simultaneous siting and routing in the disposal of hazardous wastes[J]. *Transp Sci*, 1991, 25(2):138 ~ 145
- [7] Saccomanno F F , Chan A. Economic evaluation of routing strategies for hazardous road shipments[J]. *Transp Res Record*, 1985 (1020):12 ~ 18
- [8] Abkowitz M, Lepofsky M, Cheng P. Selecting criteria for designating hazardous materials highway routes[J]. *Transp Res Rec*, 1992 (1333): 30 ~ 35
- [9] Sivakumar R A, Batta R, Karwan M H. A network-based model for transporting extremely hazardous materials [J]. *Oper Res Lett*, 1993,13 (2):85 ~ 93
- [10] Erkut E, Ingolfsson A. Catastrophe avoidance models for hazardous materials route planning [J]. *Transportation Science*, 2000, 34(2): 165 ~ 179
- [11] Erkut E, Ingolfsson A. Transport risk models for hazardous materials: revisited[J]. *Operations Research Letters*, 2005, 33(1):81 ~ 89

## On Quantitative Risk Assessment Models of the Routing Problem of Hazardous Material Transportation by Road

Ren Changxing<sup>1</sup>, Wu Zongzhi<sup>2</sup>, Liu Mao<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineer, Nankai University, Tianjin 300071, China;

2. China Academy of Safety Sciences and Technology, Beijing 100029, China)

**[Abstract]** Selecting route for hazardous materials (Hazmat) transportation by road is a bilateral decision between local government and the carriers, involving safety, environmental and economic factors. Among them, the quantitative risk assessment is an important method. However, there has been no agreement among researchers on the proper model of the associated transport risk and different models to quantify risk in different ways. In this paper, the most common Hazmat transport risk models in the literature are reviewed, which are divided into five classes including traditional risk model and models derived from it, perceived risk, conditional risk, catastrophe avoidance models and modified traditional risk models. Moreover, it is discussed in detail on multiple trips multi-accident. Finally, an example used by these models is evaluated, and the challenging development of risk model is proposed.

**[Key words]** hazardous materials; routing; road transportation; quantitative risk assessment