

doi: 10.3969/j.issn.1002-0268.2012.04.018

基于模拟退火算法的危险货物道路运输路径优化双层规划模型

查伟雄, 孙 敬

(华东交通大学 交通运输与经济研究所, 江西 南昌 330013)

摘要: 选择一条既能保运输安全, 又能满足经济需要的路线, 是危险货物道路运输过程中的重要问题。危险货物道路运输路径优化是解决这一问题的有效方法。在对危险货物道路运输进行系统分析的基础上, 根据危险货物运输的特点和广义阻抗函数的定义, 建立了危险货物道路运输路段阻抗函数模型; 为满足政府要求的运输安全性与运输企业要求的运输经济性, 根据 Wardrop 平衡原理, 建立了以 UE 模型为下层模型的危险货物道路运输路径优化的双层规划模型, 通过模拟退火算法和对双层规划模型进行求解; 最后, 进行了案例研究, 证明了模型和算法的有效性。

关键词: 交通工程; 危险货物; 模拟退火算法; 路径优化; 双层规划; 阻抗函数

中图分类号: U491.1⁺11; U492.8⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-0268 (2012) 04-0101-06

Bi-level Programming Model for Road Transport Route Optimization of Dangerous Goods Based on Simulated Annealing Algorithm

ZHA Weixiong, SUN Jing

(Institute of Transportation and Economics, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: Choosing the route that can ensure the transport safety needs and the economic needs of transport enterprises is an important issue for road transport of dangerous goods. Road transport path optimization of dangerous goods is an effective way to solve this problem. Based on systematic analysis of road transport of dangerous goods, according to the characteristics of transport of dangerous goods and the definition of generalized impedance function, the road impedance function model for road transport of dangerous goods was established. According to the Wardrop balance principle, taken UE model as the lower-level model, the bi-level programming model for road transport route optimization of dangerous goods, which can meet the government's requirement of transport safety and the transport enterprises' requirement of transport economy, was established. The bi-level programming model was solved by simulated annealing algorithm. Finally, a case study was conducted, which proved the validity of the model and algorithm.

Key words: traffic engineering; dangerous good; simulated annealing algorithm; route optimization; bi-level programming; impedance function

0 前言

危险货物, 是指具有爆炸、易燃、毒害、腐蚀、放射性等特性, 在运输、装卸过程中稍有不慎, 便可能造成人员伤亡、财产损失和环境污染, 从而需

要特别防护的货物^[1]。由于危险品常作为制造其他产品的原材料, 他们在国民经济中起着重要的作用, 并随着国民经济和工业的发展, 对危险货物的需求量也呈现出逐年上升的趋势, 危险品的运输量也随之增加^[2]。

收稿日期: 2011-10-24

作者简介: 查伟雄 (1963-), 男, 江西九江人, 教授. (1033723945@qq.com)

危险货物道路运输具有危险性,因此选择安全且经济的运输路径成为危险货物道路运输路径优化的主要研究重点^[3-5]。美国化学工程师协会化工过程安全中心(CCPS)的研究主要是对不同的路线方案进行定量风险评价,依据风险标准,比较不同路线方案的风险大小,从而确定风险最小的路线^[6]。沈小燕提出危险品道路运输优化的评价指标体系,用模糊综合评价方法建立优化模型^[6]。高清平在文章对危险货物配送问题引入了经典的TSP问题,给出了相应的启发式算法^[7]。

危险货物运输中如果发生的事故,不仅仅会造成车辆、人员的损害,更重要的是可能会对危险货物所在路径的周围环境和设施造成严重的污染和破坏,以及不良的社会影响^[8]。例如:2011年6月4日,晚间杭州市建德县装有化学品苯酚的槽罐车发生车祸导致部分苯酚流入新安江,致使水源污染。2011年5月26日清晨,浙江丽水松阳县,一辆载有15t液氮的槽罐车,发生事故导致液氮泄漏,事故导致4人被冻遇难,200多人被疏散。2011年4月8日凌晨,在兰临高速隧道内,2辆满载溶剂油的油罐车发生追尾事故,导致溶剂油燃烧爆炸,隧道内部分设施被损毁,事故导致4人遇难、1人受伤。

由此可以看出,危险货物道路运输已经是一个十分重要的社会公共安全问题,并且也已引起公众和政府监管部门以及学者的广泛关注。选择一条既能保证政府对危险货物安全运输的需要,又能满足运输企业经济需要的路线,是政府和运输企业面临的一个重要问题。

1 危险货物道路运输阻抗函数的确定

交通阻抗(或称为路阻)是交通流分配中一个很重要并且经常提及的概念,是进行交通分配和路网规划的重要参数,是OD流拟合问题研究的重点。它直接影响到交通流路径的选择和流量分配。广义的交通阻抗要反应诸多可以影响径路选择的因素,例如交通时间、交通安全、交通成本、舒适程度等。

危险品道路运输过程中不仅仅要考虑时间问题、经济问题,安全性也是不能忽略的问题。运输时间越短,各方面消耗就越少,也就越经济;运输时间越长,运输成本增加,经济利益也就受到损害^[9-10]。时间和运输成本越低越好,所以,可以将二者一起考虑。所以本文的路段阻抗函数由时间阻抗和安全性阻抗2部分组成。这样做是为了便于确定在不同安全情况和交通负荷下所进行的交通流分配,进而

找出最适宜的路径。建立起适合危险品运输的综合路阻函数模型,要使路阻函数同时反映时间性、安全性与经济性,这样就更加切实地反映了危险品运输中道路阻抗的情况。

1.1 危险货物道路运输路段阻抗函数

本文所提出的危险货物道路运输路段阻抗函数模型由2部分构成^[11],一部分为时间阻抗,表达的是路段上消耗的时间,是时间与交通量的关系反映,选取BPR函数来实现。另一部分为安全性阻抗,表示车辆经过路段的安全性,是路段的安全性、与交通量的关系反映,通过危险货物道路运输路段的安全性评价来实现。可以看出,时间阻抗的单位是时间单位,而安全性阻抗由于是通过评价得到的,是没有单位的0~1之间的数值^[12],二者无法直接进行加减。所以对有单位的时间阻抗进行无量纲化处理,使其成为纯量后,时间阻抗和安全性阻抗之间的运算才有意义,这样危险货物道路运输路段阻抗也就能定量计算了。归一化处理后时间阻抗的结果在0~1之间。

根据危险货物道路运输的特点及性质,本文提出阻抗函数模型如下:

$$T_a = k_1 G(t_a) - k_2 t_f, \quad (1)$$

式中, t_a 为路段 a 上的时间阻抗(见1.2); $G(t_a)$ 是对 t_a 进行归一化处理,采用最大最小法进行归一化处理,函数形式为:

$$y = (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}),$$

式中, x 、 y 分别为转换前、后的值; x_{\max} 、 x_{\min} 分别为样本的最大值和最小值; t_f 为路段 a 上的安全性阻抗(见1.3); k_1 、 k_2 为参数,待标定。

t_f 为路段 a 上的安全性阻抗,是通过评价得到的介于0~1之间的数值,如果 t_f 越接近于1,说明该路段的安全性越好越安全。在模型中,如果时间阻抗一样的情况下,路段安全性评价结果越好的路段,通过该路段的阻力就越小,危险货物道路运输路段阻抗则应该越小。而当路段安全性评价结果一致时,时间阻抗越大,则通过该路段的阻力越大,危险货物道路运输路段阻抗则应该越大。由于路段安全性评价的结果是正数,所以归一化处理后的时间阻抗与安全性阻抗之间通过减法连接。模型中 k_1 、 k_2 可以采用极大似然法进行标定,本文不加以详细论述。

1.2 时间阻抗

在一类关于时间的阻抗函数研究中,被应用的最广泛的是BPR函数^[13]。这一函数,是美国公路局开发的,它是关于行走时间的函数,其主要形式为:

$$t_a = t_0 [1 + \alpha (q_a / c_a)^\beta], \quad (2)$$

式中, t_a 为路段 a 上的时间阻抗, 或者说是路段 a 的行使时间; t_0 为交通量为 0 时路段 a 的车辆行驶所需要的时间; q_a 为路段 a 上的交通量; c_a 为路段 a 的实际通过能力, 即单位时间内路段 a 上实际可通过的车辆数; α 、 β 为阻滞系数, 在美国公路局交通分配程序中, 参数的取值分别为 $\alpha=0.15$ 、 $\beta=4$ 。

由于 BPR 函数比较成熟, 应用广泛, 所以本文的时间阻抗将采用 BPR 函数。

1.3 安全性阻抗

这里所说安全性, 仅指运输危险品货物车辆所选路径的安全性。这样做是因为阻抗乃影响路径选择的一个重要因素。所以为了进行路径选择, 这就要求安全性阻抗与时间阻抗相统一。时间阻抗就是反应路段的行走时间与路段上通过流量之间的关系函数。所以, 仿照时间阻抗, 定义安全性阻抗为反应路段安全性与路段上通过流量之间的关系函数。

由于安全性与交通流量的关系十分复杂, 交通流量是路段安全性众多影响因素中十分重要的因素之一, 不能简单地建立二者之间的函数来体现其关系, 并且没有学者给出过一个合适的且成熟的函数体现二者之间的关系, 所以, 本文通过综合评价方法将二者建立联系。这样, 就可以说明道路的安全性与交通流量之间的关系, 并且方便计算和实现。根据危险货物道路运输路段安全性评价的评价值, 给出路段的安全性阻抗, 即:

$$t_f = F(q_a), \quad (3)$$

式中, t_f 为路段 a 上的安全性阻抗; q_a 为路段 a 上的交通量; $F(q_a)$ 为路段 a 在交通量为 q_a 时, 对路段 a 进行危险货物道路运输路段安全性评价的评价结果 (通过综合评价得到)。

2 危险货物道路运输路径优化双层规划模型分析及建立

2.1 模型分析

危险货物运输过程中, 政府要考虑公众生命健康权, 要求运输全过程的安全; 运输企业要考虑企业的经济效益, 要求运输过程的经济性。这就要求在进行危险货物道路运输路径优化时, 要从不同的角度出发, 考虑不同的因素^[14]。

从政府管理部门的角度出发, 主要考虑的是: 如何保证危险货物运输过程中不发生事故, 特别是在运输途中的安全问题, 做到保证危险货物道路运输车辆所经道路周围的居民生命健康权不受到侵害; 国家财产不受到损失; 环境不受污染。然而为了保

证运输途中的安全性, 运输时间上就会有所损失, 企业的经济效益就会受损。

从运输企业经营者的角度出发, 企业经营者希望运输过程更加具有效率, 运输时间越短, 运输过程越具有效率, 企业的经济效益则越好。如果在运输途中, 单纯地追求运输时间短, 则很可能不能顾及到运输过程的安全性。

由于政府管理部门和运输企业经营者在危险货物道路运输路径优化上的要求、决策地位和作用不同, 上层选择危险货物道路运输路径所在路段总安全性最大为目标函数; 下层模型从路网中的用户角度出发, 期望单个用户出行时间最少, 危险货物运输车辆作为路网中用户之一, 也就达到了出行时间最少的目的。根据 Wardrop 原理, UE 模型达到平衡状态时, 路网中每个 OD 对各条被使用的路径具有相等而且最小的行驶时间。为此, 下层模型将采用 UE 均衡模型。

2.2 模型建立

危险货物道路运输路径优化双层规划模型建立的思路是, 在各条路段危险货物道路运输路段安全性评价确定的情况下, 通过下层模型可以求出均衡状态下路网中所有路段的流量, 保证了运输路径具有最短运输时间, 从而达到运输企业经济利益最大的目的。根据下层模型求出均衡状态下的路网中所有路段的流量, 进行所有路段的危险品道路运输路段安全性评价, 可以找出安全性最高的运输路径, 达到政府部门对危险货物道路运输安全性最大的要求。上层模型目标值是根据下层目标的变化而不断发生变化的, 当达到平衡状态时, 各条路段的阻抗值一定, 则可以找到路网中起点和终点间的最优路径, 从而找出既符合政府部门对运输安全性最高的要求, 又满足运输企业经济利益最大的危险货物道路运输路径。

为了便于问题的解决, 减少人为因素, 使问题更具有一般性, 提出以下假设: 假定运输危险货物的车辆性能、驾驶车辆的驾驶员、驾驶员的操作行为因素均符合有关国家法规标准。主要考虑具有代表性的危险货物运输品种, 不讨论非常特殊的危险货物运输^[15]。

2.2.1 上层模型

作为政府管理部门, 在危险货物道路运输路径优化时, 其目的在于运输路径的安全性最高。上层目标函数是危险货物道路运输车辆选择路径所在路段的总安全性最高。路段安全性是通过危险货物道

路运输路段安全性评价得到的,将其量化后,方便分析研究,也对优化计算提供了帮助。

综合考虑后,建立上层规划模型如下:

$$\begin{aligned} \max M &= \sum_i F_i(x), \\ \text{s. t. } &\begin{cases} F_{\min} \leq F_i(x) \leq 1, \\ x_i \geq 0, \end{cases} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, M 为起终点间运输路径的安全性,为在运输路径上的所有路段的安全性评价之和; L 为网络中路段的集合, $i \in L$; x_i 为运输路段 i 上的流量; $F_i(x)$ 为运输路径所经路段 i 在路网交通量为 x 时的危险货物道路运输路段安全性评价 (通过综合评价得到); F_{\min} 为运输路径所经路段安全性的最低标准 (确保运输安全的最低标准)。

2.2.2 下层模型

下层规划模型采用 UE 均衡模型^[13],可以得到路网中所有用户出行时间为最小行驶时间,进而危险货物道路运输的时间也最少。危险货物道路运输路段的安全性问题可以在阻抗函数上得以体现,即作为阻抗的一部分。所以这里的阻抗函数由时间阻抗和安全性阻抗 2 部分组成,即:

$$\begin{aligned} \min Z(X) &= \sum_a \int_0^{x_a} T_a(\omega) d\omega, \\ \text{s. t. } &\begin{cases} \sum_k f_k^{rs} = q_{rs}, & \forall r, s, \\ f_k^{rs} \geq 0, & \forall k, r, s, \end{cases} \\ x_a &= \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs}, \forall a, \end{aligned} \quad (5)$$

式中, L 为路网中路段的集合; R 为路网中出发点的集合; S 为路网中目的地的集合; x_a 为路段 a 上的交通流量; $T_a = k_1 G(t_a) - k_2 t_f$ (具体过程见 1.1); W_{rs} 为出发地 r 与目的地 s 之间所有路径的集合,且有 $k \in W_{rs}$; f_k^{rs} 为出发地 r 与目的地 s 间的第 k 条路径的流量; $\delta_{a,k}^{rs}$ 为路段-路径相关变量,即 0~1 变量,如果路段 a 属于从出发地 r 与目的地 s 间的第 k 条路径,则 $\delta_{a,k}^{rs} = 1$,否则 $\delta_{a,k}^{rs} \neq 1$; q_{rs} 为出发地 r 与目的地 s 间的交通流量。

3 模型的求解

3.1 模拟退火算法

双层规划问题是一个 NP-hard 问题,模拟退火算法是智能算法的一种,是当前求解 NP-hard 问题中常用且有效的方法之一。模拟退火 (Simulated Annealing, SA) 算法的基本思想是:由一个给定的初始高温开始,利用具有概率突跳特性的 Metropolis

抽样策略,在解空间中随机进行搜索,伴随温度的不断下降重复抽样过程,最终得到问题的全局最优解。简单来说,模拟退火算法就是在以一定的概率来接受一个比当前解要差的解,因此有可能会跳出这个局部的最优解,达到全局的最优解。

模拟退火算法 (Simulated Annealing, SA) 最早由 Kirkpatrick 等应用于组合优化领域,它是基于 Monte-Carlo 迭代求解策略的一种随机寻优算法,其出发点是基于物理中固体物质的退火过程与一般组合优化问题之间的相似性。Metropolis 准则的领域移动方法,是依据一定的概率来决定当前解是否向新解移动。具体表示为:设 i 为当前解, j 为其领域中的一个解,它们的目标函数值分别为 $f(i)$ 和 $f(j)$,用 Δf 来表示它们的目标值增量, $\Delta f = f(j) - f(i)$ 。若 $\Delta f < 0$,则算法无条件从 i 移动到 j (此时 j 比 i 好);若 $\Delta f > 0$,则算法依据概率 p_{ij} 来决定是否从 i 移动到 j (此时 i 比 j 好),这里 $p_{ij} = \exp(-\frac{\Delta f}{T_k})$,其中 T_k 是当前的温度。

3.2 算法具体步骤

根据模拟退火思想,对危险货物道路运输路径优化双层规划模型的算法进行设计。

第 1 步 初始化。设定路网各路段的初始安全评价值 A^0 ,以及初始路径方案编号 i^0 , A^0 代入下层规划模型进行求解 (求解过程的算法在下一小节介绍),得到 x^0 (平衡状态下路网中所有路段的流量),将 x^0 代入上层规划,通过调用危险货物道路运输路段安全性评价过程,计算起终点间该路径的安全性 M^0 。确定内层循环次数 m ,给定初始温度 T_0 和终止温度 T_f ,令外层循环次数 $n=0$, $T_n = T_0$ 。

第 2 步 对温度 T_n ,进行如下步骤:

(1) 内层循环次数 $k=1$ 。

(2) 产生新状态,根据流量评价的各路段的安全性评价值 \hat{A} ,选择其他路径方案为 \hat{i} 。

(3) 将 \hat{A} 代入下层规划进行求解,得到 \hat{x} (新的平衡状态下路网中所有路段的流量)。将 \hat{x} 代入上层规划,调用危险货物道路运输路段安全性评价过程,得到所路网中路段交通量为 \hat{x} 时,各个路段安全性评价的评价值,并计算得到起终点间新路径的安全性 \hat{M} 。

(4) 令 $\Delta f = M - \hat{M}$,因为 M 越大越好,若 $\Delta f < 0$,接受 \hat{i} (接受该路径方案);若 $\Delta f > 0$,根据概率

来决定是否接受 \hat{i} ,即产生一个随机数 $\varepsilon = U(0, 1)$,计算 $\exp(-\Delta f/T)$, T 为当前温度,若 $\exp(-\Delta f/T) > \varepsilon$,接受新解 \hat{i} ,即接受该路径方案。

(5) 若 $k = m$,转第3步;否则 $k = k + 1$,转第2步。

第3步 判断是否终止。若 $T_n < T_f$,算法终止,根据最终状态的 M 找出最优路径方案;否则根据前文介绍的降温函数($T_{k+1} = T_k \cdot r$,其中 $r \in (0.95, 0.99)$)进行降温,降低 T_n , $n = n + 1$,转到第2步。

4 算例

根据算例说明算法的有效性,网络图见图1,

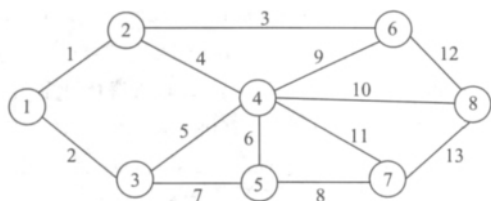


图1 网络1

Fig.1 Network 1

网络1共有3个起点(1,2,3),3个终点(6,7,8),OD矩阵 Q 为:

$$Q = \begin{bmatrix} 1400 & 1150 & 1380 \\ 1360 & 1280 & 1210 \\ 1520 & 1450 & 1120 \end{bmatrix}$$

以起点1到终点8之间的危险货物道路运输路径优化为例,选择出起点1到终点8之间可以兼顾安全性和经济性的危险货物道路运输的路径方案。通过调用Matlab编写模拟退火算法(设置初始温度为120℃,终止温度为20℃,内层循环次数为100),得到网络中各路段交通量解,见表1,得到各路段的安全性评价结果见表2,各路段的费用见表3。

表1 网络1平衡状态下各路段交通量

Tab.1 Traffic volume of each section of Network 1 in equilibrium state

路段号	交通量/(pcu·h ⁻¹)	路段号	交通量/(pcu·h ⁻¹)
1	2 751.1	8	2 578.9
2	1 145.9	9	2 618.9
3	5 320	10	11.093 8
4	1 271.1	11	1 261.1
5	2 620	12	3 678.9
6	0	13	173
7	2 588.9		

起点1到终点8之间进行危险货物道路运输的最优路径方案为(兼顾安全性和经济利益):1-2-

表2 网络1平衡状态下各路段安全评价结果

Tab.2 Safety evaluation result of each section of Network 1 in equilibrium state

路段号	安全性评价	路段号	安全性评价
1	0.49	8	0.35
2	0.85	9	0.70
3	0.34	10	0.96
4	0.51	11	0.70
5	0.44	12	0.43
6	0.86	13	0.64
7	0.38		

表3 网络1平衡状态下各路段费用

Tab.3 Cost of each section of Network 1 in equilibrium state

路段号	费用/CNY	路段号	费用/CNY
1	4 764.2	8	129.33
2	102.39	9	183.84
3	40 443	10	100
4	100.4	11	102.82
5	174.09	12	34 104
6	120	13	100
7	148.5		

4-7-8,行走路径为:1-4-11-13。该方案各路段的安全性评价之和为2.34;费用值为5 067.42 CNY。

通过与起点1到终点8其他方案的对比,可以看出最优方案的优越性。

方案1:1-2-6-8。行走路径为:1-3-12。

该方案各路段的安全性评价之和为:1.26。费用值为:79 311.2 CNY。

方案2:1-2-4-6-8。行走路径为:1-4-9-12。

该方案各路段的安全性评价之和为:2.13。费用值为:39 152.44 CNY。

通过方案1、2与最优方案作比较可以看出,最优方案(1-2-4-7-8)的安全性评价最高,费用最低。

5 结论

本文根据广义阻抗函数建立了危险货物道路运输阻抗函数,结合该函数,建立了危险货物运输路径优化双层规划模型,通过模拟退火算法对该模型进行了求解,最后通过算例说明了算法和模型的可行性。本文针对危险货物道路运输路径优化展开了深入的研究。政府管理部门和运输企业对危险货物道路运输路径优化的要求不同,且有一定的相对性,这和双层规划的思想相契合,用双层规划来解决比

较合理。

本文建立的危险货物道路运输路径优化双层规划模型,能满足政府管理部门对安全性的要求和运输企业对经济利益的要求,但模型比较简单,有待进一步完善。另外,在算法方面,本文采用的是模拟退火算法,还可以采用改进的模拟退火算法或者其他智能算法对双层规划模型进行求解,从而可以更好地降低算法的运算时间,提高求解效率,这是以后的又一工作重点。

参考文献:

References:

- [1] 刘敏文,范贵根,魏振中.危险货物运输管理教程[M].北京:人民交通出版社,2008.
LIU Minwen, FAN Guigen, WEI Zhengzhong. Tutorial of Transport Management of Dangerous Goods [M]. Beijing: China Communications Press, 2008.
- [2] 赵来军,吴萍,许科.我国危险化学品事故统计分析及其对策研究[J].中国安全科学学报,2009,19(7): 165-170.
ZHAO Laijun, WU Ping, XU Ke. Statistic Analysis and Countermeasures on Dangerous Chemical Accidents in China [J]. China Safety Science Journal, 2009, 19 (7): 165-170.
- [3] GHATEE M, HASHEMI S M, ZAREPISHEH M, et al. Preemptive Priority - based Algorithms for Fuzzy Minimal Cost Flow Problem: An Application in Hazardous Materials Transportation [J]. Computer and Industrial Engineering, 2009, 57 (1): 341-354.
- [4] 张丽,柏萍.2006—2007年危险化学品运输事故分析研究[J].中国安全生产科学技术,2008,4(6): 74-78.
ZHANG Li, BAI Ping. Analytic Study on Transportation Accidents of Dangerous Chemicals from 2006 to 2007 [J]. Journal of Safety Science and Technology, 2008, 4 (6): 74-78.
- [5] 晏远春,刘浩学,张永,等.基于模糊TOPSIS的道路危险货物运输企业安全评价方法[J].中国安全科学学报,2010,20(9): 32-36.
YAN Yuanchun, LIU Haoxue, ZHANG Yong, et al. A Methodology for Safety Assessment of Hazardous Material Road Transport Enterprises Based on Fuzzy TOPSIS [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20 (9): 32-36.
- [6] 沈晓燕.道路危险货物运输风险分析及路线优化研究[D].西安:长安大学,2009.
SHEN Xiaoyan. On the Risk Analysis and Multi-objective Route Optimization of Road Hazardous Materials Transportation [D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [7] 高清平.不确定条件下危险货物公路运输风险分析、路径选择与网络优化研究[D].成都:西南交通大学,2010.
GAO Qingping. Risk Analysis, Routing and Network Optimization for Road Transportation of Hazardous Cargo under Uncertain Condition [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2010.
- [8] 张景林.危险化学品运输[M].北京:化学工业出版社,2006.
ZHANG Jinglin. Transport of Dangerous Chemicals [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006.
- [9] 钟志新,薛茂炎,黄武国.灾害情况下应急运输路径选择问题研究[J].公路与汽车,2010(4): 37-40
ZHONG Zhixin, XUE Maoyan, HUANG Wuguo. Transport Routing in Emergency Disaster State [J]. Highways & Automotive Applications, 2010 (4): 37-40.
- [10] 周春丽,田宏.危险品道路运输路线优化研究及其实现[J].工业安全与环保,2008,34(6): 34-37.
ZHOU Chunli, TIAN Hong. Research and Realization of Route Optimization of Dangerous Goods Transporting [J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2008, 34 (6): 34-37.
- [11] 陈冬栋,杨超.交通分配中阻抗函数的研究和应用[J].交通与运输,2010(12): 17-20.
CHEN Dongdong, YANG Chao. Impedance Functions of Urban Transportation Networks for Traffic Assignment [J]. Traffic & Transportation, 2010 (12): 17-20.
- [12] 霍娅敏,何湘锋,陈坚,等.道路危险货物运输企业安全性评价研究[J].中国安全科学学报,2010,20(6): 88-92.
HUO Yamin, HE Xiangfeng, CHEN Jian, et al. Safety Evaluation Model for Road Dangerous Goods Transportation Enterprises [J]. China Safety Science Journal, 2010, 20 (6): 88-92.
- [13] 邵春福.交通规划原理[M].北京:中国铁道出版社,2004.
SHAO Chunfu. Traffic Planning [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2004.
- [14] 董子刚.双层规划性质及若干算法研究[D].济南:山东科技大学,2006.
DONG Zigang. Study on the Properties and Algorithms of Bi-level Programming Problems [D]. Shandong University of Science and Technology, 2006.
- [15] 周春丽.危险货物道路运输路线优化研究[D].沈阳:沈阳航空工业学院,2008.
ZHOU Chunli. Research on Route Optimization of Hazardous Materials Transportation [D]. Shenyang: Shenyang Aerospace University, 2008.