

## 有害危险品运输网络中的 检查站选址问题\*

王刊良 徐寅峰

**摘 要** 本文针对在有害危险品的运输网络中检查站设置的问题,建立了评价检查站系统效率的模型,该模型将漏检有害危险品车辆的吨公里数最小化作为优化目标,从而使得大多数有害危险品车辆尽可能早地接受检查;提出了一种求解此模型的启发式算法,并对该算法的时间计算复杂性进行了分析;给出了一个设计的计算实例;最后探讨了这一问题的进一步工作。

**关键词** 有害危险品; 检查站; 选址问题; 启发式算法

**中图分类号:** F224.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-6062(1999)00-0017-04

有害危险品(Hazardous Materials,以下简称 HAZMAT)运输对人类及其生存环境的影响已引起国际社会日益关注。为确保 HAZMAT 的无事故运输,许多国家、地区制订了与 HAZMAT 事故及其风险相关联的管理条例。然而,由于对条例破坏的情况屡见不鲜,在事故发生前难以找到破坏例者。在 HAZMAT 后勤管理方面的研究文献一直专注于运输工具的选线和安排,以及 HAZMAT 处理设施选址问题<sup>[1][2]</sup>,直到最近才出现了一些有关 HAZMAT 事件响应管理的研究<sup>[3][4]</sup>。本文将集中讨论这一新问题:对于条例破坏者,我们应采取什么样的检查策略才能防患于未然?我们的指导思想是“防止”事故比“响应”事故更好些。

与此问题密切相关的其它问题有:HAZMAT 运输中的检查站选址<sup>[4]</sup>;广告设施选址,目标是最大化暴露于交通的量<sup>[5]</sup>;选址自主服务设施以“截获”通过它的最大数量的顾客<sup>[6]</sup>。文献[4]从形式上证明了非限量检查站问题为一集合覆盖(Set covering)问题;对于限量检查站问题,作者给出了一个模型及启发式求解算法,其目标是 minimized 到达目的地节点的未经检查卡车的数目。文献[5]指出“设施可选址在节点或线段上的任何一处”,并将该“选址在节点上至少不会比选址在边上差”;也将该(非限量)流获取选址—分配模型建立为类似于最

大覆盖选址模型(MCLM)的 0—1 整形规划模型,并给出包含启发式的一些求解算法。文献[6]从形式上证明了对于同样 MCLM 问题结构,节点选址是最优的,并对求解该问题的贪婪启发式和分枝定界法进行了比较。

由于在现实的 HAZMAT 运输网络中,与源节点(即产生 HAZMAT 的节点)和中间节点(即运输 HAZMAT 到达目的地前所经过的节点)数目相比,宿节点很少,因而利用文献[4]中给出的启发式算法求解的结果必然是将检查站设置在宿节点附近,其直接后果是大多数 HAZMAT 运输车辆均经过很长的路程(和时间)才有可能接受检查。然而,为了预防运输风险,HAZMAT 运输车辆应尽可能在其运输的初期(即靠近源节点)接受检查。因而,上述模型的目标设置是不恰当的,这也是该模型的不足之处。

本文重新建立危险品检查站选址问题的模型,给出其求解的启发式算法,并给出了计算实例。

### 1 问题及其模型

HAZMAT 后勤管理中的选址问题不同于一般情况下的选址问题,其目标函数须同时考虑成本、风险和风险公平性。成本包括建设成本和运行成本,风险包括由 HAZMAT 储运引起的潜在的事故

\* 本文受中国加拿大管理教育项目资助。

风险和暴露风险,而风险公平性是指原则上不应将风险过多地强加在一部分人头上。本文将风险作为HAZMAT检查站选址的目标,问题描述如下:

有一组运输HAZMAT的车辆从源节点集合途经中间节点到达宿节点集合。对于每辆车来说,其运输路径(从某源节点途经某些中间节点到达某宿节点)是确定的。一般地,许多车辆亦可能有相同的路径,更普遍的一些路径具有某些共同的路段(边)或者节点。问题是在运输网络节点上如何设置指定数量的检查站,以检查尽可能多的HAZMAT运输车辆,从而可以最小化检查之前的HAZMAT吨公里数。在这种背景下,节点对应于线路交叉点,从操作角度来说,在边上选址不认为是有意义的,因而只考虑节点的选址。以下我们将讨论具有同等限量检查站的情形。

已知HAZMAT运输网络 $G=(V,E)$ ,其中 $E=(e_i)$ 为边的集合, $w_i$ 为边 $e_i$ 上的权重; $V$ 为节点集合且由源节点集合 $V_s$ 、中间节点集合 $V_m$ 和宿节点集合 $V_d$ 组成,即 $V=V_s \cup V_m \cup V_d$ , $|V_s|=n_s$ , $|V_m|=n_m$ , $|V_d|=n_d$ 。

在 $G$ 中运输HAZMAT的路径集合为 $R=(R_1, R_2, \dots, R_p)$ ,路径路程集合为 $L=(L_1, L_2, \dots, L_p)$ ,其中 $p$ 为路径数量,显然 $p \geq s$ ;从某源节点到某宿节点沿 $R_i$ 运输HAZMAT的量为 $Q_i$ 。

对网络中任一节点 $j$ , $R(j)=(R_{j1}, R_{j2}, \dots, R_{jk})$ 为流经该节点的路径集合,显然 $k \leq p$ 且 $R(j) \subseteq R$ ;  $L_1(j)=(L_{1,j1}, L_{1,j2}, \dots, L_{1,jk})$ 为经过该节点的相应路径从相应源节点到达该节点的路程的集合,  $L_2(j)=(L_{2,j1}, L_{2,j2}, \dots, L_{2,jk})$ 为流经该节点的相应路径从该节点至相应宿节点的路程的集合;  $F_j$ 为流经节点 $j$ 的HAZMAT流量,即 $F_j = \sum_{i=1}^k Q_i$ 。

$M_j^s$ 为从源节点出发沿路径 $R_i$ 运输的HAZMAT至相应宿节点的吨公里数,称之为路径 $R_i$ 的初始漏检吨公里数,即 $M_j^s = \sum_{i=1}^k Q_i * L_{i,jk}$ 。

若在节点 $j$ 上设置了 $l_j$ 个检查站( $l_j \geq 0$ ),记 $M_{1,j}$ 为从源节点出发到达节点 $j$ 的所有漏检HAZMAT吨公里数之和,则节点 $j$ 的检前漏检吨公里数 $M_{1,j} = \sum_{i=1}^k Q_i * L_{2,jk}$ 。

$M_{2,j}$ 为从节点 $j$ 流出的所有漏检HAZMAT从节点 $j$ 至相应宿节点的吨公里数之和,则节点 $j$ 的检后漏检吨公里数 $M_{2,j} = \sum_{i=1}^k Q'_i * L_{2,jk}$ 。

$M'_{2,j}$ 为从节点 $j$ 流出的所有漏检HAZMAT从节点 $j$ 至相应宿节点的吨公里数之和,则节点 $j$ 的已检吨公里数 $M'_{2,j} = \sum_{i=1}^k (Q_i - Q'_i) * L_{2,jk}$ 。

若路径 $R_i$ 经过 $j^*$ ,则 $R_i$ 在 $j^*$ 上游的节点的下标记为 $i_{1,j^*}$ , $R_i$ 在 $j^*$ 下游的节点的下标记为 $i_{2,j^*}$ 。

假设:

1)  $V_s, V_m, V_d$ 互不相交,对于源节点、宿节点及中间节点存在交集的情形,按照与文献[4]相同的方法,增加哑节点(dummy nodes)作为中间节点,并增加源(宿)节点至哑节点的距离(权重)为0的边,即可使得三种节点不相交,此时可以令 $n_s + n_m + n_d = n$ ;

2) 已经检查过的车辆均作过标记,在后继行驶过程中不再进行第二次检查,风险也认为降至最小,可以忽略不计;

3) HAZMAT运输风险同HAZMAT的重及其行驶的路程成正比;

4) 车辆和检查站主体间不存在博弈行为,车辆主体必须按指定路径行驶;

5)  $m$ 个检查站容量相同,均为 $C$ 。

我们拟在 $G$ 上设置 $m$ 个检查站,如何设置这些检查站(即在各节点上的选址)才能使得HAZMAT运输车辆的检前漏检吨公里数最小?模型如下:

$$\min. z = \sum_{j=1}^n M_{1,j}$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n l_j \leq m, (l_j \geq 0, l_j \text{ 为整数})$$

上述问题存在两个类似的目标,即如何设置这些检查站(即在各节点上的选址)才能使得HAZMAT运输车辆的检后漏检吨公里数最小( $M_1$ )或HAZMAT运输车辆的已检吨公里数最大( $M_2$ )?模型如下:

类似模型	$M_1$	$M_2$
目标函数:	$\min. z = \sum_{j=1}^n M_{1,j}$	$\max. z = \sum_{j=1}^n M'_{2,j}$
约束条件:	$\sum_{j=1}^n l_j \leq m, l_j \geq 0, l_j \text{ 为整数}$	

关于求解的讨论:

1) 如不考虑在某节点上设置超过一个检查站的情形,则可利用组合法来求解。此时,计算复杂性为 $O(p * m * n * C^n)$ ,且结果为最优解。说明如下:将 $m$ 个检查站分布到 $n$ 个节点上( $n \geq m$ ,且在各节点上的检查站不超过一个)共有 $C^n$ 种组合;对于每一种组合需要对 $m$ 个检查站所在节点进行计算;而对每一次计算,须涉及到通过该节点的所有路径(不超过 $p$ );对通过该节点的某一路径,计算须涉及上游或下游(不超过 $n$ )节点。因而,求该问题最

优解的组合方法的计算复杂性为  $O(\rho \cdot m \cdot n \cdot C_n^m)$ 。

2) 如考虑在某节点上设置超过一个检查站的情形, 则利用组合方法来求解的计算复杂性为  $O(\rho \cdot m \cdot n^{m+1})$ , 结果为最优解。说明如下: 将  $m$  个检查站分布到  $n$  个节点上 ( $n \geq m$ , 且在各节点上的检查站可超过一个) 共有  $n^m$  种组合; 对于每一种组合需要对各检查站所在节点 (不超过  $m$  个) 进行计算; 而对每一次计算, 须涉及到通过该节点的所有路径 (不超过  $\rho$ ); 对通过该节点的某一路径, 计算须涉及上游或下游 (不超过  $n$ ) 节点。因而, 求该问题最优解的组合方法的计算复杂性为  $O(\rho \cdot m \cdot n^{m+1})$ 。

利用组合方法求解可以得到最优解, 但是当  $n$  和  $m$  较大时, 计算工作量将成指数形式增长, 现实中几乎是不可能的。因而我们须考虑利用启发式方法来求解。

### 2 启发式算法

新算法的思路是利用贪婪原则: 尽可能使检后漏检吨公里数最小。对于运输网络中各节点  $j$ , 计算经过它的 HAZMAT 流量  $F_j$ , 以及它的检后漏检吨公里数; 将  $l$  个检查站设置在漏检吨公里数最大的节点上 ( $l \leq m$ ), 使得该节点漏检吨公里数不大于零; 更新有关网络参数; 重复该设置过程直到所有  $m$  个检查站设置完毕。该启发式算法描述如下

#### 算法 A1

步骤 1 初试化  $k_i = 0$ ;

对于网络中的所有节点, 计算经过它的 HAZMAT 漏检流量  $F_j$ , 以及漏检吨公里数  $M_{2j}$ ; 其中  $j = 1 \dots n$ ;

步骤 2 求  $M_{2j^*} = \text{Max } M_{2j}$ ,  $j = 1 \dots n$ ;  
令  $l = [F_{j^*} / C]$ ;

步骤 3 若  $k_i + l \leq m$ , then begin

将  $l$  个检查站分配至节点  $j^*$ ;  
更新节点  $j^*$  上的检后漏检吨公里数, 即  $M_{2j^*} := 0$ ;  
对流经节点  $j^*$  的路径的集合  $R(j^*)$  中的所有路径  $R_{i_1}$ ,  
更新节点  $j^*$  下游各节点  $i_{1,j^*}$  上的流量和漏检吨公里数:

$$F_{i_{1,j^*}} := F_{i_{1,j^*}} - Q_{i_1}$$

$$M_{2i_{1,j^*}} := M_{2i_{1,j^*}} - Q_{i_1} \cdot L_{2i_{1,j^*}}$$

更新节点  $j^*$  上游各节点  $i_{2,j^*}$  上的漏检吨公里数:

$$M_{2i_{2,j^*}} := M_{2i_{2,j^*}} - Q_{i_2} \cdot L_{2i_{2,j^*}}$$

end;

else (即  $k_i + l > m$ ), 则将  $m - k_i$  个检查站分配至节点  $j^*$ ;

步骤 4  $k_i := k_i + l$ ;

如  $k_i \geq m$ , 则终止算法; 否则继续步骤 2。

定理 启发式算法 A1 的时间计算复杂性为  $O(m \cdot n^2 \cdot \rho)$ 。

证明 上述算法的步骤 2—步骤 4 循环执行  $k_i$  ( $k_i \leq m$ ) 步; 而在每次循环中, 步骤 2 求  $\text{Max } M_{2j}$  需要  $O(n)$  计算时间; 步骤 4 对流经节点  $j^*$  的路径集合  $R(j^*)$  中的所有路径  $R_{i_1}$  (最多  $\rho$  条路径) 更新节点  $j^*$  下游各节点  $i_{1,j^*}$  (最多  $n - 1$  个节点) 上的流量和漏检吨公里数需要不超过  $O(\rho \cdot n)$  的计算时间, 更新节点  $j^*$  上游各节点  $i_{2,j^*}$  (最多  $n - 1$  个节点) 上的漏检吨公里数需要不超过  $O(\rho \cdot n)$  的计算时间; 这样, 每次循环的计算时间为  $O(n^2 \cdot \rho)$ 。

因而, 启发式算法 A1 的计算复杂性为  $O(m \cdot n^2 \cdot \rho)$  证讫。

### 3 例子

图 1 是一简单的 HAZMAT 运输网络, 各节点间的距离 (或各边的权重) 为  $D$ , 源节点集合为  $V_s = (1, 2)$ , 宿节点集合为  $V_d = (4, 5)$ , 中间节点集合为  $V_m = (3)$ , 运输路径集合为  $R = (R_1, R_2, R_3, R_4)$ , 其中

$$R_1 = ((1, 3), (3, 5)), \quad R_2 = ((1, 3), (3, 4)),$$

$$R_3 = ((2, 3), (3, 5)), \quad R_4 = ((2, 3), (3, 4)).$$

各路径上的运输量为  $Q = (Q_1, Q_2, Q_3, Q_4) = (5, 15, 5, 15)$ 。在此网络中要设置 2 个检查站, 其容量均为 20。

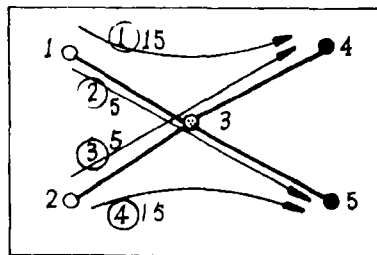


图 1 一个简单的 HAZMAT 运输网络

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

利用算法 A1 来求解该问题的计算过程如表 1。计算结果表明，应将两个检查站设置在节点 3 上。事实上这个解是最优解。

表 1 算法 A1 对实例 1 的计算步骤

项 目	初 始	迭代 1	迭代 2	迭代 3
$k_c$	0	0	2	2
$F_j$	(20,20,40,20,20)	(20,20,40,20,20)	(20,0,20,15,5)	(0,0,0,0,0)
$M_{2j}$	(55,65,60,0,0)	(55,65,60,0,0)	(55,0,35,0,0)	(0,0,0,0,0)
$Max M_{2j}$		65	55	0
$j^*$		2	1	
$l_j^*$		1	1	
$\Sigma M_{2j}$		185	90	0

#### 4 小结

针对 HAZMAT 运输网络中如何设置检查站才能更大限度地降低 HAZMAT 运输网络风险这一问题，本文在风险同 HAZMAT 的运输量及其行驶的路程成正比、车辆和检查站主体间不存在博弈行为的前提下，提出了将漏检 HAZMAT 运输车辆行驶的吨公里数作为目标的优化模型，并构造了求解该模型的启发式算法。显然，在 HAZMAT 后勤管理中单独考虑风险这一因素是不够的，实际问题中常常要考虑成本因素，有时与风险相关的风险公平性也要作为考虑的因素。本文假定所有的 HAZMAT 运输路径均是事先指定的，从而回避了风险公平性这个问题。

HAZMAT 运输网络中检查站设置问题还需要大量的进一步的工作，例如：

- 1) 同时将风险、成本和风险公平性这三个因素作为目标的问题建模与启发式算法设计；
- 2) 同时将风险、检查站利用率作为目标的问题建模与启发式算法设计；
- 3) 假定  $m$  个检查站的容量不同情形下的建模与启发式算法设计；
- 4) 就算法而言，本文所提问题还存在其它启发式算法，将本文所构造的启发式算法与其它启发式算法进行比较也是一项极有意义的工作。

本文所建模型在某种程度上同样适用于现实中的许多其它问题，例如：进城车辆清洁检查问题、警察盘查行人找罪犯问题、堵截洪水问题等。因而对 HAZMAT 运输网络中的检查站设置问题的研究必将加深我们对其它类似问题的认识与求解。

#### 参 考 文 献

- 1 E Erkut, V Verter. Hazardous materials logistics: a review [C]. Working Paper, 95-4. University of Alberta, Dept. of Finance and Management Science.
- 2 G F List, et al. Modeling and analysis for hazardous materials transportation: risk analysis, routing/scheduling and facility location [J]. Transportation Science, 1991 25(2): 100~114
- 3 G F List, et al. Multi-objective methodology for siting hazmat incident response teams [C]. Presentation at TIMS/ORSA Meeting, Orlando, Florida, Apr. 1992.
- 4 P B Mirchandani, et al. The inspection station location problem in hazardous materials transportation: some heuristics and bounds [J]. INFOR 1995, 33(2): 100~113
- 5 M J Hodgson. A flow-capturing location-allocation model [J] Geographical Analysis, 1990, 22: 270~279.
- 6 O Berman, et al. Optimal location of discretionary facilities [J]. Transportation Science, 1992, 26: 201~211.

责任编辑： 劳建芳

systematically analysis. The methods, characteristics and influence of these problems are discusses, and the improvement pattern is built.

**Keywords:** strategy

### **Location of Inspection Stations on Hazardous Materials Transportation Networks** ..... (17)

By **WANG Kanliang XU Yinfeng** (Management School, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract:** With the development of industrialization of our society, the deposit and transportation of hazardous materials (HAZMAT) becomes more and more dangerous to human beings and their environments. Strict regulations to the deposit and transportation of HAZMAT has been accepted as an effective way. Meanwhile, some measures should be taken to enforce such regulations. This paper considers the problem of the location of inspection stations on HAZMAT network. First, a model to evaluate the efficiency of the location of inspection stations is established, which takes the ton—miles of the none inspected vehicles as the objective and can results in that most of HAZMAT vehicles be inspected as early as possible. Second, an heuristic algorithm to solve this problem is presented, the relation between the heuristic solution and the optimal solution is discussed. Meanwhile, a devised example is given. Some further researches on this problem are presented as a conclusin.

**Keywords:** Hazardous materials (HAZMAT); Inspection stations; Location; Heuristic algorithm

### **Sustainable Development Mechanism of City Environmental Protection** ..... (21)

By **YUE liang, ME hong, CHEN benliang, WANG Yinglou** (Xi'an An Jiaotong university Xi'an 710049)

**Abstract:** It is now a critical question to build a sustainable development mechanism of city environmental protection. Proceeding from the analysis of the history of sustainable development of city environmental protection, this paper proposes the feather of environment in the period of industry, post—industry and sustainable development. Then, by analyzing the principle of the sustainable development mechanism of city environmental protection, the paper builds, the cooperation mechanism. Finally, the paper analyzes the application of the sustainable development mechanism proposed in this paper.

**Keywords:** city; sustainable development; mechanism; environmental protection

### **Connotation and the Model of the Firm's Flexible Strategy** ..... (25)

By **LI Yuan, ZHAO Qiang** (Management School, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract:** This paper, based on the strategic formation and the connotation of the firm's flexible strategy, analyzes the objectives and roles of firm implementing flexible strategy, and gives the main points of systematically designing flexible strategy. Meanwhile relative analysis model is built.

**Keywords:** Strategy, Flexibility, Model

### **The Analysis of Seeking Entrepreneurial Abilities** ..... (31)

By **ZHANG Wanding, LI Yuan** (Management school, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049)

**Abstract:** This paper discussed the distinction of entrepreneurial abilities by application of information Economics. It proposes a model of seeking such abilities, and demonstrates the seeking conditions and the existence of optimum seeking. Based on these, the adaptability of the two seeking procedures, consequential seeking and fixed sample size seeking, to different dimensions of enter preneurial abilities is discussed.