

# 危险品集成物流管理系统选址—选线模型研究

张敏<sup>1</sup>, 杨超<sup>2</sup>, 杨珺<sup>2</sup>, 马云峰<sup>2</sup>

(1. 武汉大学信息管理学院, 武汉 430072; 2. 华中科技大学管理学院, 武汉 430074)

**摘要:** 以路网的危险度瓶颈限制为切入点研究了一类危险品集成物流管理系统选址—选线问题, 对应于路网危险度瓶颈限制引入安全费用非递减函数, 并根据运输工具的安全配置等级构造该等级下的子网络, 物流系统的选址—选线结果随着路网的调整而不断变化. 危险品集成物流系统的管理存在多个目标, 文中首先分析了成本、风险和风险公平性等优化目标, 在说明了建模的假设条件后, 建立了基于路网危险度瓶颈限制的危险品集成物流系统选址—选线的多目标模型, 并根据模型给出了一种启发式算法, 最后用一个算例对模型进行了数值演算.

**关键词:** 危险品; 集成物流系统; 危险度瓶颈限制; 选址—选线; 启发式算法

**中图分类号:** F506      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1007-9807(2008)01-0059-09

## 0 引言

危险品 (Hazardous Materials) 通常来源于消费品和工业副产品, 包括易燃、易爆、易腐蚀、易氧化、有毒、有害、传染性和放射性的物质, 如核废料、医疗垃圾等. 目前, 有超过 3 300 种物质属于危险品范畴. 世界范围内危险品的产量极大, 其中, 每年产生的有害危险品就在 40 亿吨左右<sup>[1]</sup>. 危险品存在着巨大的潜在危险性, 它们的储藏、运输、利用、处理等环节若不采取系统而科学有效的管理措施, 一旦发生事故, 将给人员、社会、环境造成严重的危害.

危险品的物流管理早已引起了各国政府、工业界及学术界的高度重视, 学者们借助管理运筹 (operation research)、网络技术和优化技术对这些问题展开建模优化工作, 并取得了一系列研究成果. 在危险品的物流管理决策中, 选址—分配问题 (location-allocation problems, LAP) 和车辆路径问题 (vehicle routing problems, VRP) 是得到广泛关注的两个方面, 在以往的研究中, 往往倾向于将它们分开研究, 实

际上, 这两个方面密不可分, 可以认为选址—分配问题属于战略性决策, 车辆路径问题属于战术性决策<sup>[1]</sup>. 近年来, 随着物质需求的多样性和不规则性的发展, 在 LAP、VRP 和其他物流决策模型的基础之上, 产生了集成物流管理系统的概念. 这种概念认为: 在设施 (制造厂、库存点或分销中心) 相对于客户的位置、货物的配给、运输货物的车辆路径安排之间存在相互依赖的关系, 应该根据这种关系来相应地进行综合优化与管理<sup>[2]</sup>. 应用这种集成物流管理系统的概念, 国外一批学者对危险品集成物流系统的选址—选线问题 (location-routing problems, LRP) 进行了综合研究<sup>[3~8]</sup>. 危险品物流系统的 LAP、VRP 和 LRP 问题的研究通常基于多项标准, 该领域的研究属于一个多目标优化决策问题, 文献 [9~11] 对此做了大量的研究, 成本最小化、风险最小化以及风险公平性最大化是考虑最为广泛的三个目标.

在以往危险品集成物流管理系统的布局规划工作中均未考虑所服务城市或区域的具体情况, 因为一定的适用条件而具有一定的局限性. 实际

收稿日期: 2004-11-25; 修订日期: 2007-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70271027; 70601011).

作者简介: 张敏 (1978—), 女, 湖北孝感人, 博士, 讲师, Email: ibananai@163.com.

上,危险品集成物流管理系统中的选址—选线问题与一般情况下的选址—选线问题存在着一定的区别,决定配送中心选址的因素除建站费用、启动费用、距离、运量、运价、潜在风险之外,还与物流网络的安全性(即路网的危险度瓶颈限制)有很大的关系. 研究中应当充分考虑路网危险度对选址—选线问题的影响:当路网的危险度增加时,若想要安全通过该路网,就必须对一系列的防护措施进行加强,如对运载工具的加强(更好的车型)、对人员配置的加强(更有经验、技术更强的人员)、对包装安全的加强(提高包装的科技含量、加强危险品包装检验)等,这一部分的开支均以安全费用的形式纳入到总成本中,安全费用在总成本中所占的比例越大,对最终选址—选线的影响也就越大. 本文以路网的危险度瓶颈限制为切入点展开研究,对应于路网危险度瓶颈限制引入安全费用非递减函数,根据运输装置安全配置等级构造该等级下的子网络,物流系统的选址—选线结果随着路网的调整而不断变化,并结合成本、风险、风险公平性这三个目标对一类基于路网危险度瓶颈限制的危险品集成物流管理系统多目标选址—选线模型展开了研究.

## 1 数学模型

### 1.1 系统优化目标分析

**成本:**成本是影响集成物流系统设计的一个重要因素. 本文主要考虑建站固定费用(包括土地租赁费用、建站费用及用于维护正常业务流程的运营费用等)、运输费用和因路网危险度瓶颈限制而带来的安全费用,文中将这三项成本之和最小化作为一个优化目标.

**风险:**风险广泛存在于危险品物流系统中,人们希望危险品设施和危险品配送路线离自己越远越好. 一般而言,需要考虑的是两类风险:一是存在于配送过程中的运输风险;二是设施选址时带来的选址风险. 已有的风险表示方法主要包括:传统风险、暴露人口数量风险、危险事件概率风险、感知风险、条件风险等<sup>[12-15]</sup>. 本文采用暴露人口数量最小化作为优化目标.

**风险公平性:**风险公平性是指让风险尽可能

公平地分摊开来,不能为了一部分人的利益而将额外的风险不公平地强加到另一部分人身上. 文中以加权欧氏距离和最小化作为优化目标,引入一个风险因子来表示距离远近对于风险大小的影响程度,该风险因子与距离呈反向增长关系.

### 1.2 模型建立

首先,给出危险度的定义:危险度是指在运输过程中因某些因素(如路况不佳、车辆配置、人员配置、包装安全性)导致的路网的危险性程度. 路网中每个路段的危险度均不同,一条通路中各路段的危险度中最高的那个危险度定义为该通路的危险度,同理,一个连通的路网中各路段的危险度中最高的那个危险度定义为该路网的危险度. 由此可知,危险品物流网络中存在着危险度瓶颈限制:当配送设备的安全配置等级高于或等于该路线(或路网)的危险度等级时,就可安全地选用该路线(或路网);当配置低于该路线(或路网)危险度等级时不能选用该路线(或路网),如果非要选择该路线(或路网),则必须将运输装备的安全配置增强到与之相匹配,配置的增强导致了总成本的增加. 本文的模型假设主要包括: 备选设施无容量和流量限制; 每个被配送点只由该危险度等级下路网距离最短的一个设施提供服务; 如果某备选设施被选中,则建立和经营该设施的固定费用已知; 设施选址风险的危害半径已知,运输风险的危害半径已知,且各被配送点到各备选设施和运输路段的欧氏距离已知; 各被配送点的配送量已知; 配送网络需要的设施数目已知; 路网每个路段的危险度等级已知.

危险品的独特性质使得危险品物流网络与其他产品的物流网络存在着明显的区别,该网络的设计规划原则是在充分保证安全性的前提下兼顾经济性. 为了保证安全性,避免服务设施因容量和流量的限制而使得需求点不得不接受交叉服务带来的安全隐患,在配送网络设计阶段,决策者往往根据需要对备选设施点进行扩建或新建,从而保证假设成立;假设重点考虑选线问题,路网中存在危险度瓶颈限制和运输风险导致了在选线时选择路网最短路并不能保证风险最小,文中选用综合选址—选线模型来解决这一困难,将路线选择与配送中心选址联合互动,且以运输风险的形式表现出来代入目标函数中,从而保证走路网最

短路是系统整体优化得到的最佳路线;假设是在符合实际情况的前提下为简化模型而做的一些假设.

有了危险度的定义,可对问题做如下描述: $G(V, E, L, R)$  是一个给定的网络,其中  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ , 是网络中点的集合; $M$  是网络中所有备选设施点的集合 ( $m \in M$ );  $N$  是网络中所有被配送点的集合 ( $n \in N$ );  $K$  是路网中所有居民点的集合 ( $k \in K$ );  $E$  是网络中边的集合 ( $e \in E$ );  $L$  为网络长度的集合;  $R$  为路网中危险度等级的集合 ( $r_s \in R$ );  $o_{mn}^{r_s}$  表示路网危险度等级  $r_s$  下,从设施点  $m$  到被配送点  $n$  的网络最短路. 在问题模型的建立过程中用到一些符号,主要包括决策变量符号、已知参数符号以及常数符号,现给出这些符号的具体含义如下:

1) 决策变量.  $x_m$  为 0, 1 变量,表示设施是否设置在  $m$  点,若设置则为 1,反之为 0;  $x_{mn}$  为 0, 1 变量,表示  $m$  点是否为  $n$  点服务,若  $m$  点为  $n$  点服务则为 1,反之为 0

2) 已知参数.  $z_{mnk}^{r_s}$  取值为 0 或者 1,居民点  $k$  点在路线  $o_{mn}^{r_s}$  上时为 1,反之为 0(当居民点离该运输路段的最短距离小于  $R_2$  时,认为该居民点在线路上);  $J_{mk}$  取值为 0 或者 1,居民点  $k$  点在备选设施点  $m$  点的辐射半径  $R_1$  内为 1,反之为 0

3) 常数.  $C_m$  为在备选点  $m$  ( $m \in M$ ) 处建立危险品设施的固定费用;  $D_n$  为被配送点  $n$  ( $n \in N$ ) 处的配送量;  $(r_s)$  为安全费用,是一个关于可抵御最大危险度等级的非递减函数;  $W_k$  为居民点  $k$  ( $k \in K$ ) 处的居民数;  $R_1$  表示危害半径,当下标  $i$  取值为 1 时表示选址风险的危害半径,当  $i$  取值为 2 时表示运输风险的危害半径;  $L_{mk}$  为备选设施点  $m$  ( $m \in M$ ) 与各居民点  $k$  ( $k \in K$ ) 点之间的欧氏距离;  $f_{mk}$  为事故发生时备选设施点  $m$  ( $m \in M$ ) 对居民点  $k$  ( $k \in K$ ) 产生危害的风险因子 ( $f_{mk}$  为  $L_{mk}$  的递减凸函数,且当  $L_{mk} < R_1$  时  $f_{mk} = 0$  文中采用  $f_{mk} = 1 - (L_{mk}/R_1)$  的表达方式,幂指数的取值可根据实际情况确定,本文取  $\alpha = 2$ );  $o_{mn}^{r_s}$  表示危险度为  $r_s$  时,备选设施点  $m$  ( $m \in M$ ) 点与被配送点  $n$  ( $n \in N$ ) 点之间最短路的长度;  $\beta$  为将风险规避折算为经济指标的转化因子;  $\gamma$  为将风险公平折算为经济指标的转化因子;  $\delta$  为单位货

物运输单位距离时的运输费用.

要解决的问题是在路网存在危险度瓶颈限制时,综合考虑成本、风险、风险公平性,并从备选点集合中选出确定数目的设施来服务用户,并据此确定配送路线. 问题  $P_1$  建模如下:

$$\min_{m \in M} C_m x_m + \sum_{n \in N} D_n \sum_{m \in M} o_{mn}^{r_s} x_m + (r_s) \quad (1)$$

$$\min_{m \in M, n \in N, k \in K} W_k Z_{mnk}^{r_s} \quad (2)$$

$$\min_{m \in M, n \in N} W_k f_{mk} J_{mk} \quad (3)$$

$$s.t. \quad x_m = p (\forall m \in M) \quad (4)$$

$$\sum_{m \in M} x_{mn} = 1 (\forall m \in M, n \in N) \quad (5)$$

$$x_{mn} \leq x_m (\forall m \in M, n \in N) \quad (6)$$

$$x_m = 0, 1 (\forall m \in M) \quad (7)$$

$$x_{mn} = 0, 1 (\forall m \in M, n \in N) \quad (8)$$

$$r_s \in R \quad (9)$$

在上述模型中,式 (1) 表示物流系统成本最小化;式 (2) 表示配送网络风险最小化,主要针对运输风险;式 (3) 表示风险公平性最大化即将风险尽可能均匀地分摊开来,主要针对选址风险;式 (4) 表示需要确定选址决策的服务设施的个数为  $p$  个;式 (5) 表示对于每一个需求点有且仅有一个服务设施为其提供服务;式 (6) 表示只有当设施选定在某处之后,该处才存在为其他需求点提供服务的可能性;式 (7) — (9) 是对一些变量的限制.

这是一个多目标规划问题,可以用 Lagrange 乘子及 bender 分解法来求解,也可以将其转化为一单目标决策问题来求解,本文即采用这一方法,并设定三个变量  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ , 它们为三个目标间的权衡参量 ( $\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1$ ),  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  可采用德尔菲专家评定法根据实际情况确定. 此时,问题  $P_1$  转化为  $P_2$

$$\begin{aligned} \min z(p) = & \left( \lambda_1 \left( \sum_{m \in M} C_m x_m + \sum_{n \in N} D_n \sum_{m \in M} o_{mn}^{r_s} x_m + (r_s) \right) + \right. \\ & \lambda_2 \left( \sum_{m \in M, n \in N, k \in K} W_k Z_{mnk}^{r_s} \right) + \\ & \left. \lambda_3 \left( \sum_{m \in M, n \in N} W_k f_{mk} J_{mk} \right) \right) \quad (10) \\ s.t. & \text{式 (4) } \sim \text{(9)} \end{aligned}$$

$$T \subseteq M, |T| = p \tag{11}$$

### 1.3 危险度瓶颈限制下的子网络构造问题

假设危险度  $R$  包含  $t_0$  个不同的取值, 这  $t_0$  个值按上升次序排列

$$r_1 < r_2 < \dots < r_{t_0}$$

对于每一个给定的危险度  $r_s (s = 1, 2, \dots, t_0)$ , 根据原网络  $G(V, E, L, R)$  进而可以构造出一个带权重的辅助网络  $N^{r_s}(V^{r_s}, E^{r_s}, L^{r_s})$ , 其中

$$E^{r_s} = \{ (v_i, v_j) \mid (v_i, v_j) \in E, r_{ij} \leq r_s \}$$

权重  $L_{mn}^{r_s} = L_{mn}$ . 换句话说, 除去原网络中危险度大于  $r_s$  的所有的边即构成网络  $N^{r_s}(V^{r_s}, E^{r_s})$ . 令  $s_0 = \min\{s \mid \{v_0, v_1, \dots, v_t\} \subset V^{r_s}, \text{网络 } N^{r_s} \text{ 连通}\}$ , 因原网络中各个路段的危险度已定, 定义  $s_0$  的意义就在于给出危险度等级最低的值, 当危险度值低于  $r_{s_0}$  时, 除去原网络中危险度大于  $r_{s_0}$  的边而得到的网络并不存在通路, 只有当装备的安全配置不小于  $r_{s_0}$  时才能保证网络连通. 当  $s_0 \leq s \leq t_0$  时, 网络  $N^s$  中所有的被配送点均能得到设施的服务.

## 2 算法

求解 LRP 问题可采用精确算法和启发式算法这两类算法. 精确算法可以得到问题的最优解, 但是 LRP 问题通常是 NP 困难问题, 应用精确算法的时候对网络节点的数目有严格的限制, 存在一定的局限性. 目前, 多采用启发式方法来解决 LRP 问题, 启发式算法可提高解题的效率, 适于处理实际中较大规模的问题, 并有利于对问题进行灵敏度分析. LRP 是 LAP 和 VRP 这两个问题的组合, 因此, 在 LRP 启发式算法处理上常采用多阶段分解步骤, 即将问题分解为若干个子问题, 对各个子问题依次采用启发式方法或精确方法来加以解决, 这种方法可以使复杂的问题简单化, 避免产生局部最小化的结果. LRP 的启发式解题方法通常由四种算法的组合使用构成, 它们是: 定位—配给首先, 行程安排次之; 行程安排首先, 定位—配给次之; 降低成本/插入; 巡回路线的改进/交换<sup>[2]</sup>.

本文选用算法组合, 并采用基于局部搜索替代的贪婪启发式算法求解. 启发式算法种类繁多, 模拟退火算法, 遗传算法等都属于此范畴. 采用启发式算法求解问题只能得到满意解, 并不能得到最优解, 此外, 各种算法都有各自一定的适用范围, 因此, 算法之间并没有绝对的优劣之分. 本文选用基于局部搜索替代的贪婪启发式算法求解主要是基于以下几点考虑: 算法有效性: 贪婪启发式算法是求解 P-median 问题最为常用的一种算法, 并已证明它是求解此类问题的有效算法;

求解可行性: 局部搜索替代算法的接受准则使算法进程方向单驱直入, 即从初始解开始, 沿逐次更优的方向直至停止准则限定的某个局部最优解, 最终解的质量与初始解的质量间存在某种相依关系, 在随机选初始的情况下, 最终解的质量虽然是无从保证的, 但是可以保证可行解; 求解速度: 贪婪启发式算法比较简单, 求解速度较快, 尤其是遇到大规模问题时这种优势更为明显. 而其他一些启发式算法如模拟退火算法返回一个高质量近似解的时间花费较多, 当问题规模不可避免地增大时, 准予承受的运行时间将使算法丧失可行性; 求解质量: 贪婪算法不需要过多的参数, 也就不存在参数选择对求解质量的影响. 而另外一些算法则对参数有较高的要求, 参数选择直接关系到算法的精度、可靠性和计算时间等诸多因素, 并且影响到结果的质量和系统性能如收敛性等, 如遗传算法等.

贪婪算法的基本思想是先对各备选点进行比较, 找出能使目标函数取得最小(大)值的一个点, 并把它确定下来, 然后在剩余的备选点集合中依次选点, 每次选入的点也是在该情况下能使目标函数取到最小(大)值的点, 直到选全  $P$  个点才停止. 但是, 每次贪婪得到的只是单个最优选址点, 它们的组合并不一定是整体最优选址组合. 针对这个问题, 本研究在贪婪的基础上引入局部搜索替代进行修正, 即在贪婪的结果中将选址组合中的已选点用未选点组合中某个邻域中的点来替代, 并比较它们的目标函数值, 如果目标函数的取值有所改善, 则保留替代后的选址组合, 否则仍选

用贪婪得到的组合. 局部搜索替代的方法根据实际问题来确定, 可以是随即选取的, 也可以顺序选取, 本文选用后者. 具体步骤如下<sup>[16~18]</sup>:

**步骤 1** 在网络  $N$  中以上升的次序安排所有不同的危险度  $r_s (s = 1, 2, \dots, t_0)$ , 根据 1.3 小节中危险度瓶颈限制下子网络构造方法构造出每一个危险度  $r_s (s_0 \leq s \leq t_0)$  对应的网络  $N^{r_s}$ ;

**步骤 2** 在网络  $N^{r_s}$  中, 运用 Dijkstra 算法求各备选设施点到各被配送点的最短路;

**步骤 3** 令选址点集合  $P^{r_s} = \emptyset$ , 已选点个数  $k = 0$ ;

**步骤 4**  $k = k + 1$  从备选设施点集合  $M - P^{r_s(k-1)}$  中按顺序依次选取一个新设施点, 计算各新选点对应的目标函数值并比较这些函数值, 若选取点  $i$  对应的目标函数值  $z(P^{r_s(k-1)} \cup \{i\})$  最小, 则将点  $i$  放入已选点集合中, 并令  $P^{r_s(k)} = P^{r_s(k-1)} \cup \{i\}$ ;

**步骤 5** 判断  $k$  值, 若  $k = p$ , 就转向步骤 6, 否则, 转向步骤 4;

**步骤 6** 应用 Teitz 与 Bar 的局部搜索法, 将目前未选址点集合  $M - P^{r_s(k)}$  中的一个点与已选址点集合  $P^{r_s(k)}$  中的一个点置换, 若目标函数值  $z(P^{r_s(k)})$  有所改善, 则保存置换后的选址点集合  $P^{r_s(k)} = P^{r_s(k)}$ , 否则, 仍保存前一次的存储方案;

**步骤 7** 按照危险度等级上升的次序重复步骤 2 至 5, 比较危险度  $r_s (s = 1, 2, \dots, t_0)$  对应的  $z(P^{r_s(p)})$ , 求出最小值  $z(P^{r_s^*(p)})$ , 此值即为在所有安全等级下目标的最优值.

由此, 得出了基于危险度瓶颈限制的危险品配送中心选址模型的解, 即装备的配置等级定为  $s^*$ , 配送中心选址点集合为  $P^{r_s^*(p)}$ , 已选网络中各配送中心到各被配送点的最短路即为运输工具所选择的路线.

### 3 计算实例

某石化公司因业务发展需要, 计划在市区内建立 2 个大型服务站, 经初步考察已有 5 个地点被

列为候选地址, 各候选点的建站及初始启动费用已知, 见表 1. 另外, 根据需求分析可将市场分解为 12 个区, 各区的需求量已知, 见表 2. 路网中受到危险品潜在危害的居民点有 30 个, 各居民点的人口数量已知. 问题可描述为: 存在一个 14 个节点, 31 条边的网络图 (如图 1 所示), 路网中各边的长度及危险等级均在图中表示出来. 图中点 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12 为需求点, 4、8、12、13、14 为配送中心备选点. 由网络图可看出: 居民点中只有序号前 10 位的居民点在备选点的危害辐射半径内, 受到危险品设施潜在危害的威胁, 具体数据见表 3, 其余各居民点仅受到运输风险的威胁, 具体数据见表 4. 其余各参数值见表 5.

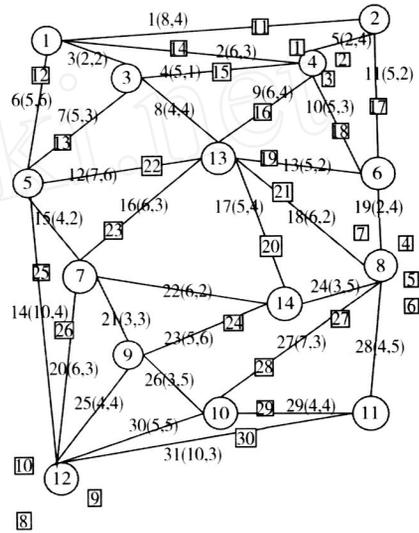


图 1 算例网络图 (○ - 节点, □ - 居民点)

Fig. 1 Distribution Network (○ stands network nodes, □ stands residential area)

表 1 备选设施点建站固定费用 (单位: 万元)

Table 1 Fixed costs (unit: ten thousand Yuan)

|        |     |     |     |     |     |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 候选点    | 4   | 8   | 12  | 13  | 14  |
| 建站固定费用 | 250 | 310 | 350 | 400 | 380 |

表 2 需求点的需求量 (单位: 万单位)

Table 2 Demands (unit: ten thousand units)

|     |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 需求点 | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 | 12 |
| 需求量 | 10 | 12 | 15 | 25 | 18 | 20 | 13 | 20 | 10 | 20 | 13 | 22 |

表 3 与备选点之间存在风险关系的居民点居民数及风险因子数值

Table 3 Risk influence parameter

| 居民点 | 居民数<br>(万人) | 与备选点的风险关系<br>(是否在备选点辐射半径内) | 与对应候选点欧氏距离 $L_{mk}$ | 风险因子<br>$r_{mk} = 1 - (L_{mk}/R_1)$ |
|-----|-------------|----------------------------|---------------------|-------------------------------------|
| 1   | 2.0         | 与备选点 4 存在风险关系              | 0.5                 | 0.97                                |
| 2   | 1.0         |                            | 1.5                 | 0.75                                |
| 3   | 2.0         |                            | 0.5                 | 0.97                                |
| 4   | 0.8         | 与备选点 8 存在风险关系              | 1.0                 | 0.89                                |
| 5   | 0.6         |                            | 1.0                 | 0.89                                |
| 6   | 2.0         |                            | 1.5                 | 0.75                                |
| 7   | 0.5         | 与备选点 12 存在风险关系             | 2.0                 | 0.56                                |
| 8   | 0.8         |                            | 2.5                 | 0.03                                |
| 9   | 3.0         |                            | 1.0                 | 0.89                                |
| 10  | 2.0         |                            | 0.5                 | 0.97                                |

表 4 运输风险威胁的各居民点的人口数 (单位:万人)

Table 4 Population endangered by leaking risk (unit: 10 thousand)

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 居民点 | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16  | 17  | 18  | 19  | 20  |
| 居民数 | 1.0 | 0.5 | 3.0 | 2.0 | 0.5 | 0.9 | 0.8 | 1.6 | 1.8 | 2.0 |
| 居民点 | 21  | 22  | 23  | 24  | 25  | 26  | 27  | 28  | 28  | 30  |
| 居民数 | 0.6 | 0.9 | 1.5 | 2.0 | 0.4 | 0.8 | 1.7 | 1.2 | 0.7 | 1.9 |

表 5 模型中各因子的取值

Table 5 Parameter values

| 参数 | $R_1$ | $R_2$ |    |     | 1 | 2   | 3   |     |
|----|-------|-------|----|-----|---|-----|-----|-----|
| 取值 | 3     | 1     | 50 | 100 | 2 | 0.5 | 0.3 | 0.2 |

网络中危险度  $R$  的各个级别按照上升的次序安排如下:

$$1 < 2 < 3 < 4 < 5 < 6$$

假定安全费用的函数是一个线性递增函数:

$(r_s) = 40 * r_s$  (单位:万元). 根据计算得到当且仅当安全配置等级  $r_s = 3$  时, 网络才连通. 当安全配置等级  $r_s = 6, 5, 4, 3$  时, 子网络如图 2, 3, 4, 5 所示.

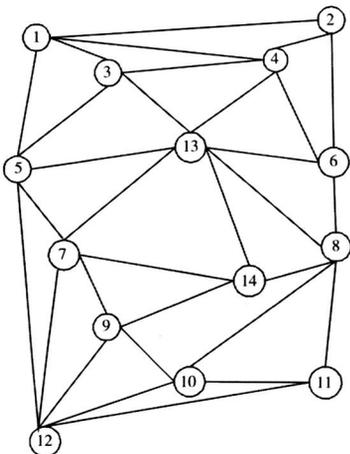


图 2  $r_s = 6$  时的网络图  
Fig 2 Sub-network ( $r_s = 6$ )

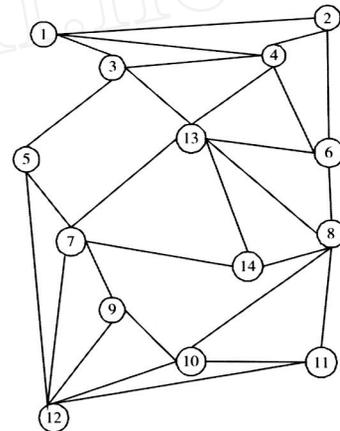


图 3  $r_s = 5$  时的网络图  
Fig 3 Sub-network ( $r_s = 5$ )

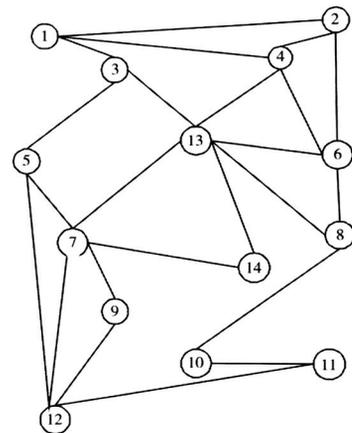


图 4  $r_s = 4$  时的网络图  
Fig 4 Sub-network ( $r_s = 4$ )

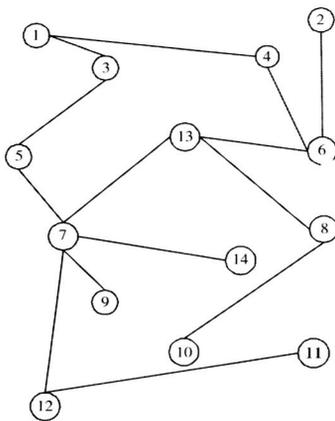


图 5  $r_s = 3$  时的网络图

Fig 5 Sub-network ( $r_s = 3$ )

表 6 计算结果 (单位: 万元)  
Table 6 Results (unit: 10 thousand Yuan)

| 安全配置等级 | $p = 1$ |           | $p = 2$  |           |
|--------|---------|-----------|----------|-----------|
|        | 候选点     | $z(1)$    | 候选组合     | $z(2)$    |
| 3      | 4       | 3 670 600 | (4, 13)  | 2 565 100 |
|        | 8       | 3 330 326 | (8, 13)  | 2 917 520 |
|        | 12      | 3 744 180 | (12, 13) | 2 696 680 |
|        | 13      | 2 885 000 | (14, 13) | 3 015 000 |
|        | 14      | 3 990 500 | —        | —         |
| 4      | 4       | 2 640 100 | (4, 13)  | 2 309 600 |
|        | 8       | 2 342 326 | (8, 13)  | 2 114 020 |
|        | 12      | 3 229 180 | (12, 13) | 2 104 680 |
|        | 13      | 2 244 000 | (14, 13) | 2 466 500 |
|        | 14      | 3 054 500 | —        | —         |
| 5      | 4       | 2 371 100 | (4, 8)   | 1 930 620 |
|        | 8       | 2 026 326 | (12, 8)  | 1 799 200 |
|        | 12      | 2 759 180 | (13, 8)  | 2 023 020 |
|        | 13      | 2 069 000 | (14, 8)  | 2 130 020 |
|        | 14      | 2 076 000 | —        | —         |
| 6      | 4       | 2 586 600 | (4, 8)   | 1 928 620 |
|        | 8       | 2 273 026 | (12, 8)  | 1 844 200 |
|        | 12      | 2 892 180 | (13, 8)  | 1 984 520 |
|        | 13      | 2 951 500 | (14, 8)  | 2 117 020 |
|        | 14      | 3 862 500 | —        | —         |

表 7 最优选址点在 8 和 12 时的最佳运输路线

Table 7 Optimal routing results

| 选址点 | 需求点 | 线 路            |
|-----|-----|----------------|
| 8   | 1   | 8 - 13 - 3 - 1 |
|     | 2   | 8 - 6 - 2      |
|     | 3   | 8 - 13 - 3     |
|     | 4   | 8 - 6 - 4      |
|     | 6   | 8 - 6          |
|     | 11  | 8 - 11         |
| 12  | 5   | 12 - 5         |
|     | 7   | 12 - 7         |
|     | 9   | 12 - 9         |
|     | 10  | 12 - 10        |

表 6 为根据文中给出的算法计算得到的结果. 由表 6 可以看出当装备安全配置为 5 级, 配送中心选址点选在 8 点和 12 点时得到问题的最优解, 此时目标函数值为 1 799. 200 万元, 配送路线在表 7 中给出.

对表中所列数据进行分析, 可得到以下结论:

危险度方面. 配送装置的危险度等级并非越高越好, 也不是越低越好. 安全配置过高会因安全成本不必要的增加而带来很大的浪费, 当安全配置过低时许多路段不能安全通行, 运输车辆只能采取绕行的方式, 这样就导致了运输成本急剧上升. 因此, 要想达到系统最优配置必须根据实际情况取一个系统最优值; 选址—选线方面. 对于具有一定规模的危险品配送网络来说, 即使配送中心无容量限制, 合理地选用多个配送中心也往往比选择一个配送中心更经济. 建立多个配送中心需要投入更多的建站费用和初始启动费用, 但综合考虑运营过程中各方成本之和时会发现这样规划经济效益更佳, 同时也可以选择更便捷、更安全的路线.

## 4 结束语

危险物品事故往往会产生灾难性的后果, 研究科学的、系统的危险物品管理方法和模型具有十分重要的意义. 危险品集成物流系统的 LRP 问题是一个非常复杂的问题, 文中对此做了一些有益的探讨, 模型的变形或扩展形式具有进一步研究的价值. 本文的研究只涉及了确定情形下的危险品集成物流系统优化研究, 而实际生产中面对的往往是未知的、不确定的情形, 如何从优化的角度严格描述这些不确定现象, 研究不确定现象中的数量规律性, 并且结合目前多产品体系、高频次及小批量的物流配送模式展开的集成优化决策研究将是未来一段时间内需要深入探讨的问题, 通过这些问题的研究来不断完善危险品配送系统设计理论和方法.

## 参考文献:

- [1] 王刊良. 有害危险物品后勤学的研究动态 [J]. 系统工程理论与实践, 2000, 7: 112—117.  
Wang Kanliang Progress in hazardous materials logistics research [J]. System s Engineering—Theory & Practice, 2000, 7: 112—117. (in Chinese)
- [2] 汪寿阳, 赵秋红, 夏国平. 集成物流管理系统中定位—运输路线安排问题的研究 [J]. 管理科学学报, 2000, 3(2): 69—75.  
Wang Shouyang, Zhao Qiu hong, Xia Guoping Research on combined location-routing problems in integrated logistics systems [J]. Journal of Management Sciences in China, 2000, 3(2): 69—75. (in Chinese)
- [3] Chakraborty J, Armstrong M P. Using geographic plume analysis to assess community vulnerability to hazardous accidents [J]. Computers, Environment and Urban Systems, 1995, 19(5,6): 341—356
- [4] Drezner A, Weslowsky G O. Location of obnoxious route [J]. Journal of Operational Research Society, 1989, 40(11): 1011—1018
- [5] 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
- [6] List G F. Modeling and analysis for hazardous materials transportation: Risk analysis, routing/scheduling and facility location [J]. Transportation Science, 1991, 25(2): 100—114
- [7] Current J. A model to assess risk, equity and efficiency in facility location and transportation of hazardous materials [J]. Location Science, 1995, 3(3): 187—201.
- [8] Karkazis J, Boffey T B. Optimal Location of routes for vehicles transporting hazardous materials [J]. European Journal of Operational Research, 1995, 86: 201—215.
- [9] Giannikos I. A multi-objective programming model for locating treatment sites and routing hazardous wastes [J]. European Journal of Operational Research, 1998, 104: 333—342
- [10] Erkut E. On the credibility of the conditional risk model for routing hazardous materials [J]. Operations Research Letters, 1995, 18: 49—52.
- [11] Leonelli P, Bonvicini S, Spadoni G. Hazardous materials transportation: A risk-analysis-based routing methodology [J]. Journal of Hazardous Materials, 2000, 71: 283—300.
- [12] 毕军, 王东华. 有害废物运输环境风险研究 [J]. 中国环境科学, 1995, 4: 241—246  
Bi Jun, Wang Donghua Study on the environmental risk of the hazardous wastes transportation [J]. China Environmental Science, 1995, 4: 241—246 (in Chinese)
- [13] Glickman T S. Benchmark estimates of release accident rates in hazardous materials transportation of rail and truck [J]. Transportation Research Record, 1988, 1193: 270—279.
- [14] Drezner Z. Facility Location: A Survey of Applications & Methods [C], Springer, 1995. 467—516
- [15] Cassini P. Road transportation of dangerous goods: Quantitative risk assessment and route comparison [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, 61: 133—138.
- [16] D'Áz B A, Rodríguez F. A simple search heuristic for the MCLP: Application to the location of ambulance bases in a rural region [J]. Omega, 1997, 25(2): 181—187.
- [17] Hansen P, Mladenovic N. Variable neighborhood search for the p-median [J]. Location Science, 1997, 5(4): 207—226
- [18] Ghosh D. Neighborhood search heuristics for the uncapacitated facility location problem [J]. European Journal of Operational Research, 2003, 150: 150—162

## Research on combined location-routing problems in integrated hazardous materials logistics systems

ZHANG Min<sup>1</sup>, YANG Chao<sup>2</sup>, YANG Jun<sup>2</sup>, MA Yun-feng<sup>2</sup>

1. School of Information Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

**Abstract:** In this paper, a class of combined location-routing problems in integrated hazardous materials (HAZMAT) logistics systems is studied, and the risk bottleneck of the network is especially considered. A non-decreasing safety cost function is constructed. New networks form based on the security degree of transportation vehicles. The results of location-routing vary with the changing networks. Several objectives need to be considered in HAZMAT logistics management, and cost, risk and risk equity are considered in the programming. After listing the assumptions for modeling, a multi-objective location-routing model of HAZMAT integrated logistics systems based on network risk bottleneck is built. According to the model, a heuristic algorithm based on greedy which can find the globally optimal solution is developed. At the end of this paper, a numerical example was given.

**Key words:** hazardous materials; integrated logistics system; risk bottleneck; location-routing problem; heuristic algorithm