

文章编号: 1001-0920(2011)01-0096-05

应急物资混合协同配送模式研究

刘明, 赵林度

(东南大学 系统工程研究所, 南京 210096)

摘要: 为了寻求生物反恐体系中高效的应急物资配送方式, 首先对比分析了传统的点对点配送模式和枢纽辐射模式, 指出它们各自具有的优势; 然后构建一种混合协同配送模式以兼顾这两种模式的长处, 进而建立了混合协同配送模式函数模型并给出了具体求解的启发式搜索算法. 通过仿真表明, 采用该模式能形成更加高效的应急救援网络, 对实际应急救援工作具有一定的指导意义.

关键词: 混合协同配送; 启发式算法; 应急物资; 生物反恐; 时效性

中图分类号: N945.15

文献标识码: A

Mix-collaborative distribution mode of emergency materials

LIU Ming, ZHAO Lin-du

(Institute of Systems Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China. Correspondent: ZHAO Lin-du, E-mail: ldzhao@seu.edu.cn)

Abstract: To find more efficient emergency materials distribution mode in anti-bioterrorism system, the traditional point to point transport mode and hub-and-spoke distribution mode are analyzed and compared, and both of their own advantages are pointed out. Then, the mix-collaborative distribution mode, which combines the two advantages of those two pure modes, is proposed. Besides, a heuristic search algorithm for solving the mix-collaborative model is presented. According to the result of numerical simulation, a much more efficient emergency relief network can be formed by the mix-collaborative distribution mode. Thus, these works can give a certain guidelines for the actual emergency rescue work.

Key words: mix-collaborative distribution; heuristic algorithm; emergency materials; anti-bioterrorism; timeliness

1 引言

炭疽邮件、东京地铁毒气等事件用深刻的教训证明了当今世界生物恐怖威胁是现实存在的, 它对社会安定、经济发展和人民群众的身心健康都会产生巨大影响, 同时也暴露出各国紧急救援物资储备的不足和应急物资配送体系的不健全.

对于应急物资的配送, 国内外学者做了大量研究工作, 尤其是在 SARS 爆发后对此更加重视. 文献[1]将应急配送中的车辆和物资整合, 把全面应急物流配送问题分解成两个多目标网络子问题, 并运用拉格朗日方法求得最优解. 近年来, 我国台湾的一些学者也对洪水、地震等自然灾害环境下的应急物流展开了研究[2-4].

普通物流既强调物流效率又强调物流效益, 而应急物流在许多情况下是通过物流效率来完成其效益

的实现. 生物反恐所具有的一些特性(如生物危险源是逐渐扩散的、生物危险源扩散网络驱动着应急物流网络等), 使得生物反恐体系中的应急物流与自然灾害应急物流有着差异性^[5]: 如生物恐怖事件通常是在人群中释放某种生物危险源导致人群死亡, 却不会像自然灾害那样中断应急资源配送路径. 因此, 在生物反恐体系中, 既要考虑应急救援的时效性, 又要兼顾应急资源配送的规模性.

在应急条件下, 如果应急资源能全部采用点对点直接配送(PTP模式), 则虽然各需求点都能在尽可能短的时间获得应急资源, 但应急资源的配送缺乏规模效益性. 反之, 虽然传统的HUB模式具有较强的规模效益^[6]和竞争优势^[7-8], 但会导致时效性的相对降低. 因此, 是否可以构建一种混合协同模式, 使其兼顾两种模式之所长成为本文的研究目标.

收稿日期: 2009-11-09; 修回日期: 2010-02-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70671021); 东南大学优秀博士学位论文基金项目(YBJJ0910).

作者简介: 刘明(1983-), 男, 博士生, 从事应急物流网络协同优化的研究; 赵林度(1965-), 男, 教授, 博士生导师, 从事供应链与物流管理、应急系统优化与控制等研究.

在混合配送方面,文献[9]对航空网络中的PTP网络和HS网络进行了比较研究.文献[10]从运输总成本的角度考虑研究了车辆运输系统的混合配送模式,指出混合后的网络无论从规模效益还是运输频率,都较混合前有所提高.受其启发,本文结合生物反恐体系下所需应急物资的特性,构建融合PTP模式以及HUB模式的混合协同配送模式,并给出求解这种模式的启发式搜索算法.

2 PTP应急物资配送模式与HUB应急物资配送模式效率比较分析

在PTP模式下,任意应急物资供应点可对任意应急资源需求点进行物资配送;在HUB模式下,HUB节点既负责对所有的应急资源供应点进行资源收集,又负责对所有的应急资源需求点进行物资配送.通常,为了提高应急救援的时效性,很多情况下均调用飞机来进行紧急物资运输.如果将航空客流运输看作应急救援的物资运输,则使得在传统航空网络中研究的HUB模式在应急救援过程中具有了现实借鉴意义.结合应急物资配送特点,将Brueckner^[11]提出的网络参数关系改进如下:在HUB应急物资配送模式中,从任一应急物资供应点*i*经HUB枢纽中转到达任一应急物资需求点*j*运输单位物资的时效价值 P_h 与运输物资数量 q_{hij} 和运输频率 f_h 之间满足

$$P_h = \alpha - \mu - \beta q_{hij} - \gamma / f_h. \quad (1)$$

在PTP应急物资配送模式中,从任一应急物资供应点*i*到达任一应急物资需求点*j*运输单位物资的时效价值 P_d 与直达物资数量 q_{dij} 和运输频率 f_d 之间满足

$$P_d = \alpha - \beta q_{dij} - \gamma / f_d, \quad (2)$$

其中 $\alpha, \beta, \gamma, \mu$ 是网络模型参数.这里: α 与直达运输的运输能力 G 成正比; β 与单位时间运输获得的时效价值成反比; γ 与单位时间的救灾延误损失成正比; μ 与物资在枢纽中转时损失的时效价值有关,损失的时效价值越大则 μ 越大,损失的时效价值越小则 μ 越小.式(1)和(2)说明,提高运输频率能使应急物资的时效价值增加.由以上可知,在具有*m*个应急物资供应点和*n*个应急物资需求点的应急物资配送网络中,采用HUB模式和PTP模式的总时效价值分别为

$$R_h = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n q_{hij} (\alpha - \mu - \beta q_{hij} - \gamma / f_h), \quad (3)$$

$$R_d = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n q_{dij} (\alpha - \beta q_{dij} - \gamma / f_d). \quad (4)$$

对于任意的 q_{hij} 和 q_{dij} ,求解 $\partial R_h / \partial q_{hij} = 0$, $\partial R_d / \partial q_{dij} = 0$,整理可得

$$f_h = \gamma / (\alpha - \mu - 2\beta q_{hij}), \quad (5)$$

$$f_d = \gamma / (\alpha - 2\beta q_{dij}). \quad (6)$$

根据前文说明可知, $q_{hij} = q_j$,由 $q_{dij} \leq q_j$ 有 $q_{dij} \leq q_{hij}$,再结合式(5)和(6),显然有 $f_h > f_d$,即HUB模式中的运输频率要大于PTP模式中的运输频率.从而可知,HUB应急物资配送模式相比PTP模式具有更好规模经济性.

3 应急物资混合协同配送模式

3.1 参数说明

如前文所述,HUB模式虽具有较好的规模经济性,但在应急救援的实际情况中,部分应急供应点与部分应急需求点之间没有必要通过HUB节点中转,它们在地理位置上也许靠得很近,可采用直接配送方式,从而形成了如图1所示的两种模式并存的混合协同配送模式.因此,在引言部分提出的问题可归结为确定应急物资配送网络中哪些点之间的配送采用HUB配送模式?哪些点之间的配送采用PTP模式?并且要求这种混合配送的效果要比两种单纯的配送模式更优.

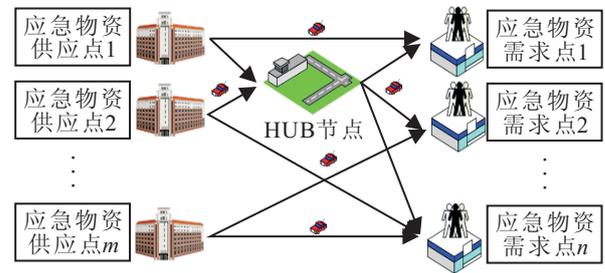


图1 应急物资混合协同配送模式

模式中涉及的参数说明如下: q_{ij}^d 为采用PTP模式从第*i*个应急物资供应点配送到第*j*个应急物资需求点的应急物资量; q_{ij}^h 为采用HUB模式从第*i*个应急物资供应点配送到第*j*个应急物资需求点的应急物资量; q_i^h 为第*i*个应急物资供应点通过HUB模式配送的应急物资总量; q_j^h 为第*j*个应急物资供应点通过HUB模式配送的应急物资总量; q_i 为第*i*个应急物资供应点所能提供的应急物资总量; q_j 为第*j*个应急物资需求点所需要的应急物资总量; D^d 为采用PTP模式进行应急物资配送的节线(弧)集合; D^h 为采用HUB模式进行应急物资配送的节线(弧)集合; t_{ij}^d 为单位应急物资通过PTP模式从第*i*个应急物资供应点配送到第*j*个应急物资需求点平均分配时间; t_{i0}^h 为单位应急物资通过HUB模式从第*i*个应急物资供应点收集到HUB节点平均消耗时间; t_{0j}^h 为单位应急物资通过HUB模式从HUB节点配送到第*j*个应急物资需求点平均消耗时间; t_{ij}^{dh} 为应急物资配送弧 (v_i, u_j) 从PTP模式转换到HUB模式后能节约的时间; t_{ij}^{hd} 为应急物资配送弧 (v_i, u_j) 从HUB模式转换到PTP模式后能节约的时间; $x_{ij}^d = 1$ 为PTP模

式下应急物资从第 i 个应急物资供应点配送到第 j 个应急物资需求点, 反之 $x_{ij}^d = 0$.

3.2 模式描述

设在应急物资配送网络 $N = (V, D)$ 中, 有

$$V = \{v_0\} \cup \{v_1, v_2, \dots, v_m\} \cup \{u_1, u_2, \dots, u_n\}.$$

其中: v_0 为应急配送中的 HUB 节点; $v = \{v_1, v_2, \dots, v_m\}$ 为应急物资的供应点集合; $u = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 为应急物资需求点集合; $D = \{(v_i, u_j) | i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n\}$ 为弧集, 每条弧代表一个应急物资供应点和一个应急物资需求点之间的路.

对于任意的 $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$, 应急物资配送满足以下基本关系:

$$q_i^h = \sum_{j=1}^n q_{ij}^h, \quad (7)$$

$$q_j^h = \sum_{i=1}^m q_{ij}^h, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^m q_i \geq \sum_{j=1}^n q_j, \quad (9)$$

$$D = D^d \cup D^h. \quad (10)$$

其中: 式 (7) 和 (8) 为应急资源流量守恒约束, 式 (9) 保证资源供应充足, 式 (10) 为网络配送弧集约束. 在满足以上基本关系的基础上, 若所有的应急物资配送均采用 PTP 模式, 则总的应急时间需求模型为

$$\begin{aligned} \min T^d &= \sum_i \sum_j t_{ij}^d q_{ij}^d. \\ \text{s.t. } \sum_{i=1}^m q_{ij}^d &= q_j, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n; \\ \sum_{j=1}^n q_{ij}^d &\leq q_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m; \\ q_{ij}^d &\geq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (11)$$

式 (11) 是一个容易求解的线性规划问题, 追求 PTP 模式下应急总时间最小, 约束条件为资源量守恒约束. 类似地, 在满足上述基本关系的基础上, 若所有应急物资配送均采用 HUB 模式, 则应急物资首先从各个应急物资供应点被收集到 HUB 节点, 然后从该节点出发配送到各应急物资需求点. 总的时间需求模型为

$$\begin{aligned} \min T^h &= \sum_{i=1}^m t_{i0}^h q_i^h + \sum_j t_{0j}^h q_j^h. \\ \text{s.t. } q_i^h &\leq q_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m; \\ q_j^h &= q_j, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n; \\ q_i^h, q_j^h &\geq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (12)$$

式 (12) 也是一个容易求解的规划问题, 追求

HUB 模式下总的应急时间最小, 约束条件为资源量满足约束. 如前文所述, 混合模式的实质是确定应急物资配送中哪些点之间的配送采用 HUB 配送模式, 哪些点之间的配送采用 PTP 模式, 因此, 构建混合模式的目标函数如下:

$$\min T = f(T^d, T^h).$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^n q_{ij}^d + q_i^h \leq q_i, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m;$$

$$\sum_{i=1}^m q_{ij}^d + q_j^h \leq q_j, \quad \forall j = 1, 2, \dots, n;$$

$$q_{ij}^d, q_i^h, q_j^h \geq 0, \quad \forall i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \quad (13)$$

式 (13) 为混合模式的目标函数模型, 追求混合后的应急总时间最小, 约束条件为流量守恒与需求满足约束. 不同的是, 该模型为 NP 问题, 需要设计相应的算法来求解.

3.3 模式求解算法

结合上述解释和说明, 将文献 [10] 中的启发式搜索算法进行改进, 以求解本文所构造的问题模型. 算法的核心思想是利用计算机的快速重复计算功能, 将应急物资配送弧集逐次枚举, 以寻找出可能改进的地方, 具体步骤如下:

Step 1: 假设所有的应急物资配送均采用 PTP 模式, 通过求解规划模型 (11) 得出总的应急物资配送时间, 记为 T^d .

Step 2: 假设所有的应急物资配送均采用 HUB 模式, 通过求解规划模型 (12) 得出总的应急物资配送时间, 记为 T^h .

Step 3: 比较 T^d 和 T^h , 若 $T^d < T^h$, 则 $D^d = D, D^h = \emptyset$, 记为情况 1; 否则, 若 $T^d > T^h$, 则 $D^h = D, D^d = \emptyset$, 记为情况 2. 记 $T = \min\{T^d, T^h\}$, 且 $T^m \leftarrow T$.

Step 4: 若出现情况 1, 则对于任意 $(v_i, u_j) \in D^d$, 计算 t_{ij}^{dh} . 若 $t_{ij}^{dh} \geq 0$, 表示将应急物资配送弧 (v_i, u_j) 从 PTP 模式转换到 HUB 模式后, 应急物资配送时间能减少, 则改变应急物资配送弧集, 即

$$D^d \leftarrow D^d \setminus \{(v_i, u_j) | t_{ij}^{dh} > 0\},$$

$$D^h \leftarrow D^h \cup \{(v_i, u_j) | t_{ij}^{dh} > 0\}.$$

若出现情况 2, 则对于任意 $(v_i, u_j) \in D^h$, 计算 t_{ij}^{hd} . 若 $t_{ij}^{hd} > 0$, 表示将应急物资配送弧 (v_i, u_j) 从 HUB 模式转换到 PTP 模式后, 总的应急物资配送时间减少, 则改变应急物资配送弧集, 即

$$D^h \leftarrow D^h \setminus \{(v_i, u_j) | t_{ij}^{hd} > 0\},$$

$$D^d \leftarrow D^d \cup \{(v_i, u_j) | t_{ij}^{hd} > 0\}.$$

Step 5: 求解具有混合协同配送模式 $\{D^d, D^h\}$ 的应急物资配送总时间, 记为 T' .

Step 6: 比较 T 和 T' , 若 $T' < T$, 说明总的应急物资配送时间进一步减少, 则 $T \leftarrow T'$, 并记录下此时的混合模式 $\{D^d, D^h\}$; 否则, 继续交换配送模式中的弧. 此时, T 为新的应急物资配送总时间, 若 $T < T^m$, 则 $T^m \leftarrow T$. 当经过 $M = i \times j$ 次搜索后 T^m 值不再发生改变时, 输出最优解.

Step 1~Step 3 给出了模型的初始解, Step 4~Step 6 对初始解进行改进, 从而将求解的问题转化为如何确定参数 t_{ij}^{dh}, t_{ij}^{hd} 的值, 以进行 Step 4~Step 6 的改进操作.

3.4 参数 t_{ij}^{dh} 和 t_{ij}^{hd} 的判定

应急物资从供应点 i 配送到需求点 j 所需时间如图 2 所示. 假设出现情况 2, 则对于任意 $(v_i, u_j) \in D^h$, 从 HUB 模式转换到 PTP 模式后, 可节约的应急物资配送时间 t_{ij}^{hd} 的算法如下:

Step 1: 给定 i 初始值, 根据 PTP 模式下的初始解判定 x_{ij}^d , 对于所有 $x_{ij}^d = 1$ 的初始解按 j 从小到大排序, 并记为集合 $\varphi = \{\varphi_k(v_i, u_j) | x_{ij}^d = 1\}, k = 1, 2, \dots, J$.

Step 2: 取初始值 $k = 1$, 分别计算 $\varphi_k(v_i, u_j)$ 在 HUB 模式和 PTP 模式中单位应急物资配送平均分配时间, 记为 φ_k^h 和 φ_k^d .

Step 3: 若 $\varphi_k^h \leq \varphi_k^d$, 则说明 $\varphi_k(v_i, u_j)$ 从 HUB 模式转换到 PTP 模式时不可节约时间, 即 $t_{ij}^{hd} \leq 0$, 保持 $\varphi_k(v_i, u_j)$ 为 HUB 模式, 转至 Step 5.

Step 4: 若 $\varphi_k^h > \varphi_k^d$, 则说明 $\varphi_k(v_i, u_j)$ 从 HUB 模式转换到 PTP 模式时可节约应急配送时间, 此时 $t_{ij}^{hd} = q_{ij}(t_{i0}^h + t_{0j}^h - t_{ij}^d)$, 同时改变初始集合

$$\varphi \leftarrow \varphi \setminus \{\varphi_k(v_i, u_j) | x_{ij}^d = 1\}.$$

Step 5: 令 $k = k + 1$, 重复 Step 2 和 Step 3, 直到 $\varphi = \emptyset$.

Step 6: 令 $i = i + 1$, 重复 Step 1~Step 5, 当 $i > n$ 时, 搜索完毕, 输出结果.

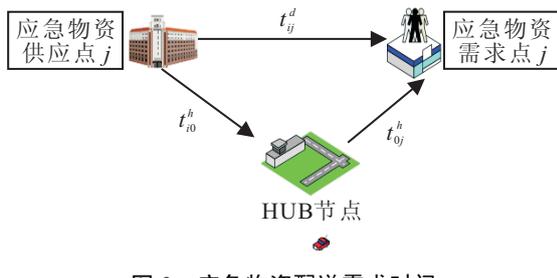


图 2 应急物资配送需求时间

类似地, 如果出现情况 1, 则对于任意 $(v_i, u_j) \in D^d$ 从 PTP 模式转换到 HUB 模式后, 可节约的应急物

资配送时间计算如下:

$$t_{ij}^{dh} = -t_{ij}^{hd}. \tag{14}$$

4 算例仿真分析

假设某区域发生生物恐怖应急事件, 区域内各点的相关地理位置信息如图 3 所示, 其中应急物资供应点集合为 $v = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$, 应急物资需求点集合为 $u = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8\}$, 各供应点能提供的应急物资量及各需求点所需求的应急物资量见表 1, 单位应急物资从各供应点到达各需求点平均分配时间见表 2.

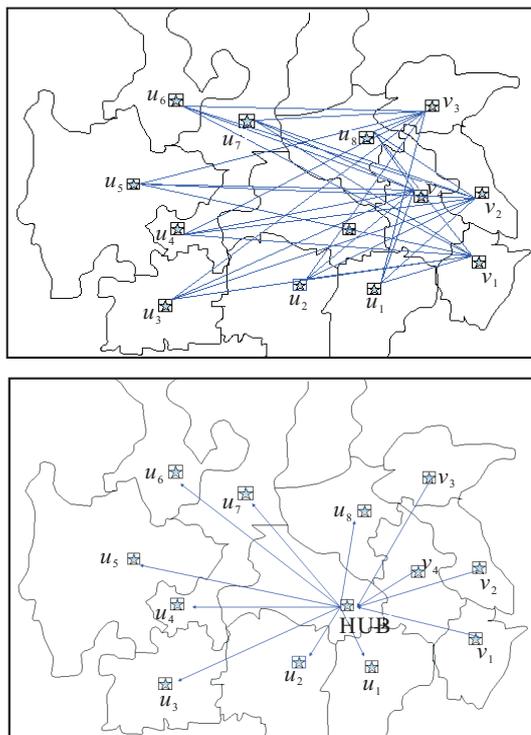


图 3 PTP 配送模式和 HUB 配送模式

表 1 各节点提供(需求)的应急物资量

供应	v_1	v_2	v_3	v_4				
	150	178	202	120				
需求	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8
	70	72	102	84	75	80	77	90

表 2 应急物资从各供应点到各需求点平均分配时间 h

时间	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8
v_1	2	3	8	5	10	10	5	4
v_2	4	5	8	5	10	10	5	4
v_3	5	5	10	8	10	6	3	2
v_4	3	4	8	5	8	8	4	3

若完全采用 PTP 模式进行应急物资配送, 则根据式(11)以及表 1 和表 2 中各参数取值, 运用 LINGO 软件包容易求得一个全局最优解. 此时, 应急物资配送

总时间为 3 128 h. 由第 2 节可知, HUB 模式具有较高的运输频率, 设 HUB 模式下各参数取值如表 3 所示, 求解模型 (12) 可得 HUB 模式下应急物资配送总时间为 2 780.5 h, 应急物资配送效率同比 PTP 模式增长了 11.1%, 具有较好的规模效益性.

表 3 单位应急物资从 HUB 节点到各点之间平均分配时间

时间	v_1	v_2	v_3	v_4
HUB	2	2	2.5	1.5

时间	u_1	u_2	u_3	u_4	u_5	u_6	u_7	u_8
HUB	1	1	3	2.5	3	3	2.5	1.5

进一步地, 应用本文提出的启发式算法求解混合配送模式下应急物资配送总时间, 得到迭代结果变化如图 4 所示. 从仿真结果分析可知 (见图 5), 在混合网络中, 应急物资配送弧 $(v_1, u_1), (v_3, u_7), (v_3, u_8)$ 从 HUB 模式转换为 PTP 模式, 能节约总应急配送时间; 应急物资配送弧 $(v_1, u_2), (v_4, u_7)$ 在 HUB 模式与 PTP 模式下所需应急配送时间相同, 但 HUB 模式下更具有规模效益; 混合配送模式下的应急物资配送总需时间为 2 376.5 h, 应急物资配送效率同比 HUB 模式进一步增长了 14.5%, 说明混合协同配送模式同两种单纯配送模式相比具有更加明显的效率优势.

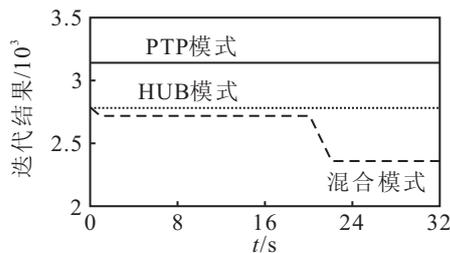


图 4 启发式搜索过程

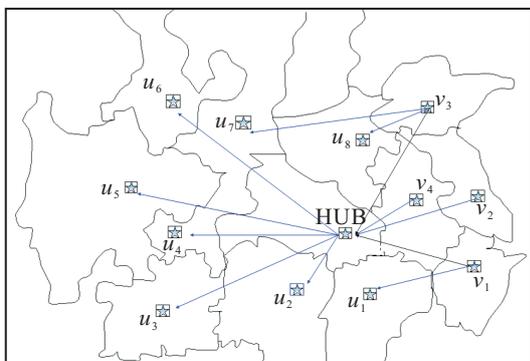


图 5 混合配送模式结果

5 结 论

本文分析了 PTP 模式和 HUB 模式的应急物资配送时间效率和规模效益, 提出了一种兼顾两种模式优势的混合协同配送模式, 并给出了模式求解的启发式

搜索算法. 仿真分析表明, 本文提出的混合协同配送模式具有较好的实际应用价值, 设计的启发式搜索算法也可应用于较复杂的大规模混合模式求解. 但本文仅考虑了应急物资供应和需求均为确定性且只有一个 HUB 节点的简单情形, 对于应急物资供应和需求随生物危险源扩散而导致的动态变化性、以及存在多个 HUB 节点从而形成双层规划模式等情况, 有待进一步研究.

参考文献(References)

- [1] Ozdamar L, Ekinici D, Kucukyazici B. Emergency logistics planning in natural disasters[J]. *Annals of Operations Research*, 2004, 129(3): 217-245.
- [2] Tzeng G H, Cheng H J, Tsung D H. Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems[J]. *Transportation Research*, 2007, 63(6): 673-686.
- [3] Wei Yi, Ozdamar L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 179(3): 1177-1193.
- [4] Sheu J B. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters[J]. *Transportation Research*, 2007, 43(6): 687-709.
- [5] Liu M, Zhao L D. Optimization of the emergency materials distribution network with time windows in anti-bioterrorism system[J]. *Int J of Innovative Computing, Information and Control*, 2009, 5(11A): 3615-3624.
- [6] O'Kelly M E. The location of interacting hub facilities[J]. *Transportation Science*, 1986, 20(2): 92-106.
- [7] Claudio B Cunha, Marcos Roberto Silva. A genetic algorithm for the problem of configuring a hub-and-spoke network for a LTL trucking company in Brazil[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 179(3): 747-758.
- [8] 李红启, 刘鲁. Hub-and-Spoke 型运输网络改善方法及其应用[J]. *运筹与管理*, 2007, 16(6): 63-68.
(Li H Q, Liu L. Improvement and application of the hub-and-spoke transportation network[J]. *Operations Research and Management Science*, 2007, 16(6): 63-68.)
- [9] 柏明国, 朱金福. 全连通航线网络和枢纽航线网络的比较研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(9): 113-117.
(Bai M G, Zhu J F. Comparative study on fully-connected and hub-and-spoke airline networks [J]. *System Engineering Theory and Practice*, 2006, 26(9): 113-117.)
- [10] Liu J Y, Li C L, Chan C Y. Mixed truck delivery systems with both hub-and-spoke and direct shipment[J]. *Transportation Research*, 2003, 39(4): 325-339.
- [11] Brueckner J K. Network structure and airline scheduling[J]. *J of Industrial Economics*, 2004, 52(2): 291-312.