

震后应急物资配送的模糊动态定位—路径问题^①

代颖¹, 马祖军¹, 朱道立², 方涛¹

(1. 西南交通大学经济管理学院物流与应急管理研究所, 成都 610031;

2. 上海交通大学安泰经济与管理学院, 上海 200052)

摘要: 进行震后应急物资配送系统优化是提高其配送绩效的重要手段. 从系统集成优化的角度, 研究应急物资配送中心定位与配送车辆路径安排的联合决策问题. 综合考虑应急物资需求的模糊性、动态性和限制期, 震后受损路网的动态恢复状况, 不同类型有容量限制的配送车辆, 以及物资需求分割配送等特点, 以各物资需求点的应急物资运达时间之和最小为目标, 采用机会约束规划方法建立了一个模糊动态定位—路径问题优化模型, 并设计了一种两阶段启发式算法予以求解. 最后, 通过算例验证了该模型和算法的可行性及有效性.

关键词: 地震灾害; 应急物资; 定位—路径问题; 模糊需求; 动态决策; 启发式算法

中图分类号: F252; U116 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2012)07-0060-11

0 引言

近年来, 全球大规模地震灾害频发, 给人类造成了巨大的人员伤亡和财产损失. 如 2004 年 12 月 26 日里氏 9.3 级的印度洋地震及海啸夺去了 29 万余人的生命; 2010 年 1 月 12 日里氏 7.3 级的海地地震共造成 22 万余人遇难; 2011 年 3 月 11 日里氏 9.0 级的东日本大地震造成 2.4 万余人遇难. 而我国自古以来就是一个地震多发国家, 地震灾害十分严重. 20 世纪我国死于地震的人数达 50 多万人, 约占同期全世界地震死亡人数的一半. 其中, 1976 年 7 月 28 日里氏 7.8 级的唐山大地震和 2008 年 5 月 12 日里氏 8.0 级的汶川大地震都造成了极为重大的人员伤亡和经济财产损失, 震惊了全世界.

地震灾害应急救援是一项复杂的系统工程, 其中保障应急救灾物资的及时供应是救援工作的

重中之重, 是关乎人民群众生命安全和维持社会安定的重大问题. 为此, 需要建立一套科学、高效的震后应急物流系统, 从而在最短的时间内实现应急救灾物资供应, 以最大限度地降低自然灾害造成的损失和危害后果. 震后应急物流系统要在有限的时间、空间和资源约束下, 使用适当的运输方式将各种救灾物资(药品、帐篷、衣被、净水设备、食品等)从各级救灾物资储备库运往设置在灾区附近的救援物资配送中心, 再配送至灾区救助点. 因此, 救灾物资配送中心定位—分配和救灾物资运输路线安排是应急物流系统优化中的两个关键问题^[1-3], 且彼此之间存在相互依赖、相互影响的关系. 例如, 从不同的应急物资配送中心运送物资到灾区各需求点, 会导致不同的车辆路径及行驶时间和成本; 反之, 应急物资配送车辆路径安排也会影响应急物资配送中心选址的合理性. 因此, 从系统整体优化的角度看有必要对其进行集

① 收稿日期: 2010-05-22; 修订日期: 2011-11-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70771094; 90924012; 71090402); 教育部“长江学者和创新团队发展计划”创新团队项目(IRT0860); 教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-10-0706); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20090184110029); 四川省青年科技基金资助项目(09ZQ026-021); 四川省哲学社会科学研究规划项目(SC11B049); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SWJTU09CX066; SWJTU11CX152); 富士康科技集团“擢才创研计划”项目.

作者简介: 代颖(1975—), 女, 四川成都人, 副教授, 博士. Email: ydai@swjtu.cn

成优化与管理,即研究自然灾害应急物流系统中的定位—路径问题(location-routing problem, LRP)。

尽管国内外学者对商业物流系统中的LRP已进行了不少研究^[4-6],但对应急物流系统中LRP的研究还较少。文献[7]研究了自然灾害应急物资配送和伤员运送救治的协调优化问题,综合考虑了灾区临时医疗点的选择、医务人员指派、应急物资分配和车辆运输路径决策,建立了一种确定性条件下多周期混合整数网络流模型,并用CPLEX软件求解。该文虽然涉及设施选址和运输路径决策问题,但并非集成的LRP。文献[8]建立了一种以总成本最小为目标的减灾系统LRP模型,但将LRP分解成设施定位和运输路径两个子问题利用两阶段启发式算法进行串行求解,因而失去了LRP集成优化的意义。考虑应急物资需求及运输时间的不确定性,文献[9]以应急物资运达总时间最短和系统总成本最小为目标,建立了一个应急物资需求模糊的多目标LRP优化模型,并提出了一种多目标遗传算法;文献[10]考虑应急资源需求和应急救援时间范围均模糊的LRP,建立了一个以各资源需求点的应急救援时间满意度之和最大及系统总成本最小为目标的多目标优化模型,并提出一种混合多目标遗传算法。

地震灾害的突发性、破坏性和应急救援的紧迫性决定了其应急物资配送的LRP在问题属性、优化目标和约束条件等方面有别于一般商业物流系统中的LRP的特性,如商业物流系统中的LRP通常追求利润最大化或总成本最小化、车队规模最小化等目标,而震后应急物资配送强调时间的紧迫性,通常是以时间效益最大化、灾害损失最小化等为目标;应急物资需求、交通路网状况等方面具有很大的不确定性,且随时间发生变化,在灾害发生初期通常无法全面掌握有关信息,而要随着时间的推移根据收集到的实际数据进行动态更新,决策者据此进行应急设施选址和运输路径的动态决策,而商业物流系统中的LRP一般不考虑设施选址和车辆路径的实时动态决策;商业物流系统中的LRP通常假设需求点的物资需求小于车辆容量,并采用巡回配送方式,而震后受灾点对有些应急物资的需求很大,通常超过单车容量,需要采

用分割直接配送,而对另一些物资的需求可能较小且不那么紧迫,也可采用巡回配送,以充分利用紧缺的运输工具。但现有研究均未考虑应急物资需求的动态变化,并假设整个交通路网始终连通,配送车辆在各路段上的行驶时间固定,未考虑路网的损坏及动态恢复情况;限定每个灾点只由一辆车配送,未考虑其应急物资需求量可能大于车辆容量而需要分割配送的情形;假设车辆类型相同,也未考虑车辆数限制和应急物资需求限制期约束,因而未能很好地体现震后应急物资配送的特性。鉴于此,本文针对震后应急物资配送中心选址与配送车辆路径安排的集成优化决策问题,综合考虑应急物资需求的模糊性、动态变化和限制期,震后受损路网的动态恢复状况,不同类型有容量限制的配送车辆,以及应急物资需求分割配送等特点,以各物资需求点的应急物资运达时间之和最小为目标,建立一个模糊动态LRP优化模型,并设计一种两阶段启发式算法予以求解。

1 数学模型

1.1 问题描述

地震发生后需要在灾区建立若干应急物资配送中心,并在有限的时间、空间和资源约束下将应急物资从配送中心运送到各个需求点。假设有若干候选应急物资配送中心,其位置和容量已知,并拥有一些不同类型的车辆,用来承担应急物资配送任务。有一批位置已知的应急物资需求点,其需求量可用三角模糊数表示,并要求在一定的限制期内完成。

在应急物资配送过程中,可能出现新的应急物资需求信息和路网状况变化信息。对于新的需求信息而言,可能是出现了新的需求点,也可能是原有需求点的需求量出现增加、减少或未得到完全满足。至于新的路网状况信息,可能是某些道路已被部分或完全修复,也可能是某些道路由于震后次生灾害的影响又遭到破坏。上述信息变化后,根据变化的程度可能导致原先的决策方案不再最优,甚至不再适用,需要根据当前信息进行决策方案调整。

需要解决的问题是:在观测到不确定变量实

现之前,根据动态更新的应急物资需求信息和路网状况信息,在满足应急物资配送中心和配送车辆的容量限制下,动态地确定应急物资配送中心选址(假设配送中心一旦建立在整个救援期间不关闭,但允许在某次决策中不承担配送任务)以及从各选中配送中心到各需求点的运输路径,使所有需求点的物资需求在给定限制期内能得到满足,并使应急物资送达各需求点的时间之和最小.

由于在实际的应急物资配送过程中,物资需求信息和路网状况信息的动态变化一般是在一些离散的时间点发生,因此在不发生变化的时间段里可以把其看作是常量.假设从初始时刻 t_0 起,在 $t_1, t_2, \dots, t_m, \dots$ 等时刻发生了信息更新需要重新决策,则基于滚动时域(rolling horizon)策略可将上述动态决策问题 $P(t)$ 转化为一系列离散时间点的静态决策问题 $P(t_m)$.

1.2 符号说明

由于某些应急物资需求点的需求量较大,可能需要多次配送,在此将需求量超过和未超过每次拟派配送车辆容量的需求点分别定义为大需求点和小需求点,且大需求点的需求又分为两部分:用拟派车辆从离其行车时间最短的配送中心满载直接配送,其中每辆车对该大需求点满载配送一次所满足的那部分需求处理成一个虚拟大需求点;剩余不足一车容量的那部分需求,处理成一个虚拟小需求点,并和其它小需求点一起由巡回车辆进行配送.

在每次决策之后的方案执行过程中,每一配送车辆所处的位置将其配送路径分成三部分:已行驶路段、在途路段和将行驶路段,如图 1 所示.当出现新的信息时,已行驶路段无法再改变.对于在途路段,可引入关键节点的概念:设 τ 时刻车辆 k 处在从需求点 i 前往需求点 j 的途中或从需求点 i 出发已到达需求点 j ,令 d_i, d_j 分别为车辆离开需求点 i 和到达需求点 j 的时刻,若 $d_i < \tau \leq d_j$,则需求点 j 为关键节点.此时,要求在途车辆必须行驶至关键节点后才能对该车辆路线进行重新安排.对于将行驶路段,则由决策者根据当前信息进行重新决策.

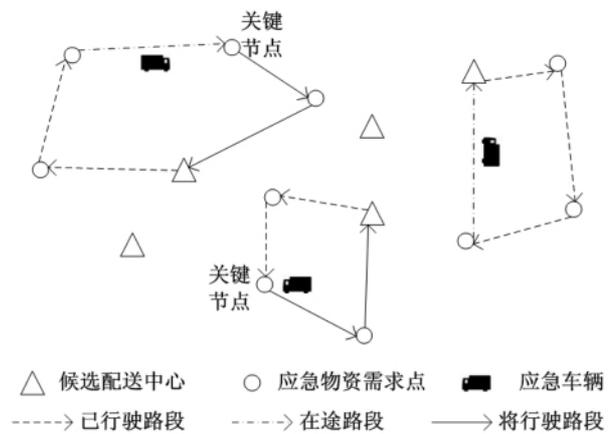


图 1 配送车辆路径及关键节点示意图

Fig. 1 Vehicle routes and critical nodes

在建模之前,定义如下参数和变量:

参数:

τ : 决策时刻, $\tau = t_0, t_1, t_2, \dots, t_m, \dots$;

$H_f(\tau)$: τ 时刻已建立的配送中心集合;

$H_{uf}(\tau)$: τ 时刻的候选配送中心集合;

$H(\tau)$: τ 时刻所有的配送中心集合,即 $H(\tau) =$

$H_f(\tau) \cup H_{uf}(\tau)$;

W_i : 配送中心 i 的容量, $\forall i \in H(\tau)$;

$G(\tau)$: τ 时刻未配送的需求点集合;

$\tilde{q}_r(\tau)$: τ 时刻需求点 r 的需求量,用三角模糊数 $(\alpha_r(\tau), \beta_r(\tau), \gamma_r(\tau))$ 表示, $\forall r \in G(\tau)$;

$G_s(\tau)$: τ 时刻的小需求点集合. 在 τ 时刻,若 $\text{Pos}\{\tilde{q}_r(\tau) \leq Q_k\} \geq \beta_1, \forall r \in G(\tau)$, 则 $r \in G_s(\tau)$, 其中 Q_k 为拟派用于配送需求点 r 的车辆的容量;

$G_b(\tau)$: τ 时刻的大需求点集合. 在 τ 时刻,对于 $\forall r \in G(\tau)$ 且 $r \notin G_s(\tau)$, 则 $r \in G_b(\tau)$;

$G'_b(\tau)$: τ 时刻的虚拟小需求点集合;

$G_{xb}(\tau)$: τ 时刻的虚拟大需求点集合;

$G_c(\tau)$: τ 时刻的关键节点集合;

$G_u(\tau)$: τ 时刻除关键节点外需求量小于其拟派车辆容量的需求点集合,即 $G_u(\tau) = G'_b(\tau) \cup G_s(\tau)$;

$G_{ub}(\tau)$: τ 时刻除关键节点外的需求点集合,即 $G_{ub}(\tau) = G_u(\tau) \cup G_{xb}(\tau)$;

$G_{cu}(\tau)$: τ 时刻的关键节点、小需求点和虚拟小需求点的集合,即 $G_{cu}(\tau) = G_u(\tau) \cup G_c(\tau)$;

$G_{cub}(\tau)$: τ 时刻的关键节点、小需求点和虚拟小

需求点,以及虚拟大需求点的集合,即 $G_{cub}(\tau) = G_{cu}(\tau) \cup G_{xb}(\tau)$;

$S(\tau)$: τ 时刻所有节点的集合,即 $S(\tau) = G_{cub}(\tau) \cup H(\tau)$;

$L_i(\tau)$: τ 时刻需求点 $i(i \in G_{cub}(\tau))$ 要求的应急物资最晚到达时间,即限制期;

$V_w(\tau)$: τ 时刻未安排任务的车辆集合;

$V_r(\tau)$: τ 时刻在途的车辆集合;

$V_c(\tau)$: τ 时刻前往关键节点或已在关键节点的车辆集合,有 $V_c(\tau) \subset V_r(\tau)$;

$V(\tau)$: τ 时刻系统中拥有的所有车辆集合,即 $V(\tau) = V_w(\tau) \cup V_r(\tau)$;

z_{ki} : 车辆 k 隶属配送中心 i 为1,否则为0, $\forall k \in V(\tau), \forall i \in H(\tau)$;

Q_k : 车辆 k 的容量, $\forall k \in V(\tau)$;

$Q_k(\tau)$: τ 时刻车辆 k 中剩余的物资量, $\forall k \in V(\tau)$;

$T_{gk}(\tau)$: τ 时刻决策后车辆 k 到达节点 g 的时刻, $\forall k \in V(\tau), g \in S(\tau)$. 当 $g \in H(\tau)$ 时,若车辆是第一次出发,则 $T_{gk} = 0$; 若车辆不是第一次出发,则 T_{gk} 为车辆上次回到配送中心的时间;

$tr_{ghk}(\tau)$: τ 时刻车辆 k 从节点 g 到节点 h 的行驶时间,有 $tr_{ghk}(\tau) = tr'_{ghk}(1 + \rho_{gh}W_{gh}(\tau)) / (1 + W_{gh}(\tau))$. 其中, tr'_{ghk} 为日常情况下车辆 k 从点 g 到点 h 的行车时间(可根据交通时刻表、GIS 等技术获得);

$W_{gh}(\tau)$ 为 τ 时刻恢复节点 g 到节点 h 之间道路需要花费的作业单元数; ρ_{gh} 为大于1的系数,取决于点 g 与点 h 之间道路的性质及恢复难易程度^[11], $\forall k \in V(\tau), \forall g, h \in S(\tau)$.

决策变量:

$x_i(\tau)$: τ 时刻在 i 处建立配送中心为1,否则为0, $\forall i \in H_{uf}(\tau)$;

$y_k(\tau)$: τ 时刻车辆 k 被启用为1,否则为0, $\forall k \in V(\tau)$;

$p_{ghk}(t)$: $t(t \geq \tau)$ 时刻车辆 k 从节点 g 到节点 h 为1,否则为0, $\forall k \in V(\tau), \forall g, h \in S(\tau)$.

1.3 模型构建

对于每一次决策,可以采用机会约束规划方法将上述震后应急物资配送问题描述成如下的模糊 LRP 优化模型

$$\min Z = \sum_{k \in V(\tau)} \sum_{r \in G_{cub}(\tau)} T_{rk}(\tau) \quad (1)$$

$$\text{s. t. } \sum_{h \in S(\tau)} \sum_{k \in V(\tau)} \sum_{t \geq \tau} P_{rhk}(t) = 1, \forall r \in G_{cub}(\tau) \quad (2)$$

$$\sum_{g \in S(\tau)} \sum_{k \in V(\tau)} \sum_{t \geq \tau} P_{grk}(t) = 1, \forall r \in G_{ub}(\tau) \quad (3)$$

$$\sum_{g \in S(\tau)} \sum_{t \geq \tau} P_{grk}(t) - \sum_{h \in S(\tau)} \sum_{t \geq \tau} P_{rhk}(t) = 0, \forall r \in G_{cub}(\tau), \forall k \in V(\tau) \quad (4)$$

$$\sum_{h \in S(\tau)} \sum_{t \geq \tau} P_{rhk}(t) = 1, \forall k \in V_c(\tau), \forall r \in G_c(\tau) \quad (5)$$

$$\sum_{h \in S(\tau)} \sum_{t \geq \tau} P_{ihk}(t) = y_k(\tau) z_{ki}, \forall i \in H(\tau), \forall k \in V_w(\tau) \quad (6)$$

$$p_{ijk}(t) = 0, \forall i, j \in H(\tau), \forall k \in V(\tau), \forall t \geq \tau \quad (7)$$

$$\text{Pos} \left\{ \sum_{r \in G_{cub}(\tau)} \sum_{g \in S(\tau)} \sum_{t \geq \tau} \tilde{q}_r(\tau) p_{grk}(t) \leq Q_k(\tau) \right\} \geq \beta_1, \forall k \in V(\tau) \quad (8)$$

$$\text{Pos} \left\{ \sum_{k \in V(\tau)} \sum_{r \in G_{cub}(\tau)} \sum_{g \in S(\tau)} \sum_{t \geq \tau} \tilde{q}_r(\tau) p_{grk}(t) y_k(\tau) z_{ki} \leq W_i \right\} \geq \beta_2, \forall i \in H_j(\tau) \quad (9)$$

$$\text{Pos} \left\{ \sum_{k \in V(\tau)} \sum_{r \in G_{cub}(\tau)} \sum_{g \in S(\tau)} \sum_{t \geq \tau} \tilde{q}_r(\tau) p_{grk}(t) y_k(\tau) z_{ki} \leq W_i x_i(\tau) \right\} \geq \beta_2, \forall i \in H_{uf}(\tau) \quad (10)$$

$$T_{rk}(\tau) = T_{gk}(\tau) + tr_{grk}(\tau) \sum_{t \geq \tau} P_{grk}(t), \forall r \in G_{cub}(\tau), \forall h \in S(\tau), \forall k \in V(\tau), \forall t \geq \tau \quad (11)$$

$$p_{ghk}(t) (T_{hk}(\tau) - T_{gk}(\tau)) \geq 0, \forall g, h \in S(\tau), \forall k \in V(\tau), \forall t \geq \tau \quad (12)$$

$$T_{ik}(\tau) \leq L_i(\tau), \forall i \in G_{cub}(\tau), \forall k \in V(\tau) \quad (13)$$

$$p_{ghk}(t) = \{0, 1\}, k \in V(\tau), \forall g, h \in S(\tau), \forall t \geq \tau \quad (14)$$

$$x_i(\tau) = \{0, 1\}, \forall i \in H_{uf}(\tau) \quad (15)$$

$$y_k(\tau) = \{0, 1\}, \forall k \in V(\tau) \quad (16)$$

目标函数式(1) 是使应急物资运达各需求点的总时间最短. 约束式(2) 表示有一辆车从关键节点或未配送的需求点离开; 约束式(3) 表示有

一辆车到达未配送的需求点; 约束式(4) 表示到达每个未配送需求点的车辆要从该点离开; 约束式(5) 表示前往关键节点或处于关键节点的车辆要从该关键节点离开; 约束式(6) 表示被启用的配送车辆只能从所属的配送中心出发; 约束式(7) 表示任意两个配送中心不直接相连; 约束式(8) 表示满足配送车辆容量的可能性不小于 β_1 , 且 $\beta_1 \in [0, 1]$; 约束式(9) 和(10) 分别表示满足已建立配送中心和将被建立配送中心的容量的可能性不小于 β_2 , 且 $\beta_2 \in [0, 1]$; 约束式(11) 给出了 $T_{rk}(\tau)$ 的数学表达式; 约束式(12) 保证行车路线时间的顺序性; 约束式(13) 表示各需求点的应急物资需求限制期约束; 约束条件(14) - (16) 为 0 - 1 整数变量约束.

1.4 模型转化

由于约束式(8)、(9) 和(10) 中具有模糊参数 $\tilde{q}_r(\tau)$, 需要进行适当的处理以便计算. 给定 τ 时刻需求点 r 的模糊需求量为 $\tilde{q}_r(\tau) = (\alpha_r(\tau), \beta_r(\tau), \gamma_r(\tau))$, 令 $t(t \geq \tau)$ 时刻救援车辆 k 配送完所服务需求点之后剩余的物资量为 $\Delta\tilde{Q}_k$, 则 $\Delta\tilde{Q}_k \leq Q_k(\tau)$; 令已建立的配送中心 i 和将被建立的配送中心 i' 服务完所覆盖需求点之后剩余的物资量分别为 $\Delta\tilde{W}_i$ 和 $\Delta\tilde{W}_{i'}$, 则 $\Delta\tilde{Q}_k, \Delta\tilde{W}_i$ 和 $\Delta\tilde{W}_{i'}$ 也是三角模糊数.

$$\begin{aligned} X &= \sum_{r \in G_{cub}(\tau)} \sum_{g \in S(\tau)} \sum_{t \geq \tau} p_{grk}(t), \\ Y &= \sum_{k \in K} \sum_{r \in G_{cub}(\tau)} \sum_{g \in S(\tau)} \sum_{t \geq \tau} p_{grk}(t) y_k(\tau) z_{ki}, \\ Y' &= \sum_{k \in K} \sum_{r \in G_{cub}(\tau)} \sum_{g \in S(\tau)} \sum_{t \geq \tau} p_{grk}(t) y_k(\tau) z_{ki'}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{Q}_k &= (\Delta Q_{k1}, \Delta Q_{k2}, \Delta Q_{k3}) \\ &= (Q_k(\tau) - \gamma_r(\tau) X, Q_k(\tau) - \beta_r(\tau) X, \\ &\quad Q_k(\tau) - \alpha_r(\tau) X) \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{W}_i &= (\Delta W_{i1}, \Delta W_{i2}, \Delta W_{i3}) \\ &= (W_i - \gamma_r(\tau) Y, W_i - \beta_r(\tau) Y, \\ &\quad W_i - \alpha_r(\tau) Y) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \Delta\tilde{W}_{i'} &= (\Delta W_{i'1}, \Delta W_{i'2}, \Delta W_{i'3}) \\ &= (W_{i'} x_{i'}(\tau) - \gamma_r(\tau) Y', \\ &\quad W_{i'} x_{i'}(\tau) - \beta_r(\tau) Y', W_{i'} x_{i'}(\tau) - \\ &\quad \alpha_r(\tau) Y') \end{aligned} \quad (19)$$

且

$$\text{Pos}(\Delta\tilde{Q}_k \geq 0) = \begin{cases} 1 & \Delta Q_{k2} \geq 0 \\ \frac{\Delta Q_{k3}}{\Delta Q_{k3} - \Delta Q_{k2}} & \Delta Q_{k2} < 0 < \Delta Q_{k3} \\ 0 & \Delta Q_{k3} \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$\text{Pos}(\Delta\tilde{W}_i \geq 0) = \begin{cases} 1 & \Delta W_{i2} \geq 0 \\ \frac{\Delta W_{i3}}{\Delta W_{i3} - \Delta W_{i2}} & \Delta W_{i2} < 0 < \Delta W_{i3} \\ 0 & \Delta W_{i3} \leq 0 \end{cases} \quad (21)$$

$$\text{Pos}(\Delta\tilde{W}_{i'} \geq 0) = \begin{cases} 1 & \Delta W_{i'2} \geq 0 \\ \frac{\Delta W_{i'3}}{\Delta W_{i'3} - \Delta W_{i'2}} & \Delta W_{i'2} < 0 < \Delta W_{i'3} \\ 0 & \Delta W_{i'3} \leq 0 \end{cases} \quad (22)$$

则约束式(9)、(10) 和(11) 分别等价于

$$\text{Pos}(\Delta\tilde{Q}_k \geq 0) \geq \beta_1, \forall k \in V(\tau) \quad (23)$$

$$\text{Pos}(\Delta\tilde{W}_i \geq 0) \geq \beta_2, \forall i \in H_f(\tau) \quad (24)$$

$$\text{Pos}(\Delta\tilde{W}_{i'} \geq 0) \geq \beta_2, \forall i' \in H_{uf}(\tau) \quad (25)$$

2 算法设计

震后应急物资配送过程中需要对上述动态决策问题进行快速处理, 而 LRP 又属于 NP-hard 问题, 因此本文将动态 LRP 转化为一系列不同决策时刻的静态 LRP, 并将转化后的静态 LRP 分解为定位 - 分配和路径安排这两个子问题, 再设计一种结合 Sweep 算法、节约算法、Cross-exchange 方法和 2-Opt 方法的两阶段启发式算法进行迭代求解.

对于初始时刻 t_0 的决策问题 $P(t_0)$, 其中车辆路径安排子问题(VRP) 可以直接用节约法求解, 但对于信息更新后 t_m 时刻的决策问题 $P(t_m)$, 由于此时配送车辆的起点不一定都在配送中心, 故不能直接用节约法求解. 在此, 引入上文所述的关键节点对问题 $P(t_m)$ 加以转化.

2.1 问题转化

对于问题 $P(t_m)$, 那些在 $[t_0, t_m]$ 时段内已经

得到配送且配送车辆已经离开它的需求点,可以将其从需求点集合中去除,并认为配送车辆在该时段内直接从所属配送中心出发到达 t_m 时刻该车辆所处的位置.但由于这些需求点的物资配送量会对 $P(t_m)$ 中的一些约束条件产生影响,下面通过对关键节点的参数进行调整来解决.

设配送车辆 k 在 t_m 时刻对应关键节点 j ,此前已完成配送任务的需求点集合为 C_j ,需求点 $r(r \in C_j)$ 的实际需求量为 $q_r(t_{m-1})$, l 为 C_j 中最晚得到配送的需求点, t_m 和 t_{m-1} 时刻路段 d_{lj} 上的车辆行驶时间分别为 t_{lj} 和 t'_{lj} ,则将 t_m 时刻关键节点 j 的需求量调整为 $\tilde{q}_j(t_m) + \sum_{r \in C_j} q_r(t_{m-1})$,其时间窗调整为 $[s_j, s_j]$.在 t_m 时刻,若车辆 k 正在驶向关键节点 j 的途中,则 $s_j = t_m + \left(1 - \frac{t_m - T_{lk}}{t'_{lj}}\right) t_{lj}$,其中 T_{lk} 表示车辆 k 到达需求点 l 的时刻;若车辆 k 正好处在关键节点 j ,则 $s_j = t_m$.可见,关键节点 j 的时间窗区间缩为一个点,即车辆到达关键节点的时刻为 s_j .

至此,问题 $P(t_m)$ 转化为一个类似于 $P(t_0)$ 的静态决策问题,可用下述两阶段启发式算法予以求解.

2.2 两阶段启发式算法

算法的基本思路是:阶段一采用先定位—分配、后安排路径的方法求得初始解;阶段二采用启发式方法搜索更优解.

1) 求初始解

设集合 $GH = \emptyset$,当前候选配送中心的个数为 N_h .首先,用Sweep算法^[12]根据时间最短原则,将各需求点分配给各个候选配送中心.即通过计算每个需求点与各候选配送中心的最短行车时间与次短行车时间的比值,按比值从小到大的顺序,并在满足各配送中心设施容量的前提下,将各个需求点的配送任务分派给若干配送中心.

其次,采用带时间窗VRP的改进节约算法^[13]求解从各个已选配送中心出发遍历其所覆盖需求点的VRP,得到初始解,并计算目标函数值.

2) 改进解

计算已选配送中心的数目 NOD .然后逐一关闭当前已选配送中心,重新用上述Sweep算法和

改进节约算法求解从当前已选配送中心出发遍历各个需求点的带时间窗的VRP,记录目标函数值.找到这一轮迭代中目标函数值最小的关闭方案 P_{\min} ,并关闭对应的配送中心,令 $NOD = NOD - 1$.

当 $NOD > 1$ 时,重复上述操作;否则,迭代结束.在此多轮迭代过程中,设目标函数值最小的方案为 P'_{\min} ,将 P'_{\min} 中所有关闭的配送中心存入集合 GH 中.随机选取集合 GH 中的一个配送中心和 P'_{\min} 中一个开放的配送中心交换开关状态,重新计算并记录目标函数值.总共交换 $[N_h/2]$ 次后结束,找到其中目标函数值最小的方案 P''_{\min} .

再用Cross-exchange方法^[14]对方案 P''_{\min} 中的车辆路径执行一定次数的两两交换操作,进行路径间的进一步优化,在此要满足配送中心容量、配送车辆容量和各需求点的限制期约束.在此基础上,用基于2-Opt交换法实现邻域操作的禁忌搜索算法^[15]对方案 P''_{\min} 中的每条路径进行路径内的进一步优化,在此要满足各需求点的最迟到达时间约束.

2.3 多车型的处理

上述改进节约算法中要考虑车辆容量约束,需要对多车型问题进行处理.设当前已选配送中心集合为 H ,它们拥有的车辆集合为 V ,共有 U 种车型,且不同车型的优先权不同(如容量越大的车辆或数量越多的车型优先级越高),设车型 $u(u = 1, 2, \dots, U)$ 的容量为 Q_u ,配送中心 $h(h \in H)$ 中车型 u 的数量为 n_{hu} ,在决策时刻 τ 尚未配送的需求点集合记为 G ,需求点 $g(g \in G)$ 的需求量为 $\tilde{q}_g(\tau)$,并初始化集合 $DN = \emptyset$ 和 $GN = \emptyset$.

对于每个已选配送中心,在安排配送车辆时从优先级最高的车型开始,依次到最低的车型,每次考虑一种车型.具体步骤如下:

① 选择当前优先级最高的车型 u ,根据车辆容量 Q_u 判断集合 G 中非关键节点的需求点 g 是否为大需求点(即 $\text{Pos}\{\tilde{q}_g(\tau) \leq Q_u\} < \beta_1$),并计算用该类型车辆为大需求点 r 配送的次数 N_u ,则可得 N_u 个虚拟大需求点和一个虚拟小需求点.对集合 G 中所有非关键节点的需求点进行判断后,将得到的所有虚拟大需求点和虚拟小需求点以及本身就是小需求点的需求点存入集合 DN 中.之后,再考虑集合 G 中关键节点的车型安排:在前一

次决策方案中,若集合 G 中的某些关键节点是由车型 u 进行配送,则将这些关键节点存入集合 DN 中,其它关键节点则存入集合 GN 中,等待安排后续车型.

② 根据车型 u , 用上述改进节约算法计算各个已选配送中心出发遍历其所覆盖需求点 $g(g \in G)$ 的带时间窗 VRP. 设已选配送中心 h 负责 n' 条路径, 当前未安排任务的车型 u 的数量为 n'_{hu} . 若 $n'_{hu} \geq n'$, 则直接派 n' 辆车型为 u 的车辆对这 n' 条路径进行配送; 否则, 将这 n' 条路径按时长 $\sum t_k$ 从小到大顺序排列, 将排在前面的 n'_{hu} 条路径用车型为 u 的车辆进行配送.

③ 由于车型 u 的数量有限, 因而集合 DN 中的某些需求点可能未被安排车辆配送. 对于由同一个大需求点通过上述方法得到的 N_u 个虚拟大需求点和一个虚拟小需求点, 将其中未被安排车辆配送的那些需求点的需求量汇总还原为一个需求点. 此外, 将已经安排车辆进行配送的需求点从集合 DN 中删除, 将集合 GN 中的关键节点放入集合 DN 中, 再令 $G = DN, GN = \emptyset, DN = \emptyset$, 并删除车型 u .

返回步骤 ①, 继续用上述方法在集合 v 中选择下一优先级的车型进行安排, 直至为所有未配送的需求点安排车辆配送.

3 算例分析

假设有 7 个配送中心, 拥有 4 种类型的车辆, 如表 1 和表 2 所示. $\tau = 0$ 时有 20 个应急物资需求点, 如表 3 所示. 模拟在 $\tau = 24$ 时应急物资需求信息和路网状况信息都发生了变化. 路网状况信息变化情况反映在参数 $W_{gh}(\tau)$ 取值的变化, $W_{gh}(\tau)$ 、 tr'_{ghk} 和 ρ_{gh} 的取值见附录表 10—表 13. 表 4 给出了 $\tau = 24$ 时应急物资需求信息变化情况: 编号为 31—35 的需求点是新增需求点; 编号为 21—25 的需求点与原来的 16—20 需求点对应, 但新增了需求量; 编号为 26—30 的需求点与原有 15、7、8、1、10 需求点对应, 拟表示原有需求量减少的情形, 但这取决于 $\tau = 24$ 时该点是否还是尚未配送的点: 若是, 则用来表示原有需求量减少了; 否则, 也用来表示是新增了需求量. 在 $100 \text{ km} \times 100 \text{ km}$ 的平面坐标上随机产生各个节点的位置.

表 1 配送中心 i 的参数

Table 1 Parameters of distribution centers i

i	坐标(km)	W_i (件)	拥有车型及数量(辆)			
			车型 1	车型 2	车型 3	车型 4
I	(40,5)	1 500	4	4	4	6
II	(70,60)	2 000	3	5	4	4
III	(20,50)	1 800	3	5	5	5
IV	(25,85)	1 800	4	4	4	4
V	(12,24)	2 000	3	3	6	5
VI	(60,12)	1 700	5	4	3	4
VII	(64,42)	1 600	4	5	4	4

表 2 配送车辆 k 的参数

Table 2 Parameters of delivery vehicles k

k	Q_k (件)	优先级排序
1	200	1
2	150	2
3	120	3
4	100	4

表 3 $\tau = 0$ 时应急物资需求点 r 的参数

Table 3 Parameters of demand nodes r for relief materials at $\tau = 0$

r	坐标(km)	$\bar{q}_r(\tau)$ (件)	$L_r(\tau)$ (min)	$q_r(\tau)$ (件)
1	(20,85)	(129,135,150)	261	130
2	(5,45)	(369,375,387)	285	370
3	(42,15)	(66,75,84)	298	76
4	(38,5)	(141,153,165)	304	154
5	(95,35)	(128,135,150)	306	130
6	(85,25)	(69,75,82)	316	78
7	(62,80)	(180,195,212)	263	190
8	(58,75)	(129,135,150)	240	130
9	(50,50)	(64,75,82)	287	65
10	(18,80)	(269,275,280)	222	270
11	(25,30)	(63,69,72)	245	66
12	(15,10)	(129,135,143)	239	137
13	(45,65)	(60,69,78)	266	70
14	(65,20)	(245,251,257)	289	249
15	(31,52)	(165,177,186)	297	178
16	(2,60)	(39,45,52)	309	46
17	(5,5)	(105,111,117)	233	112
18	(57,29)	(119,123,138)	279	124
19	(4,18)	(159,165,171)	278	166
20	(26,35)	(296,305,308)	266	306

表4 $\tau = 24$ 时应急物资需求点 r 的参数

Table 4 Parameters of demand nodes r for relief materials at $\tau = 24$

r	坐标(km)	$\bar{q}_r(\tau)$ (件)	$L_r(\tau)$ (min)	$q_r(\tau)$ (件)
21	(2,60)	(24,28,32)	361	29
22	(5,5)	(78,85,92)	285	85
23	(57,29)	(108,112,116)	331	111
24	(4,18)	(107,116,124)	330	115
25	(26,35)	(250,260,270)	318	263
26	(31,52)	(77,86,94)	359	87
27	(62,80)	(36,45,53)	369	44
28	(58,75)	(213,223,234)	348	222
29	(20,85)	(162,170,174)	352	171
30	(18,80)	(82,90,95)	326	88
31	(72,35)	(142,157,162)	233	155
32	(50,35)	(250,257,263)	272	254
33	(35,40)	(236,240,259)	383	235
34	(65,55)	(119,123,132)	222	125
35	(15,80)	(237,246,250)	223	240

采用 Matlab 7.4 编程实现上述两阶段启发式算法,在 AMD 4000 + 2.1GHz CPU 和 1G 内存的微机进行了算例求解,平均计算时间不到 10s,表明该算法运行效率较高.结果如下:目标函数值 $\tau = 0$ 时, $Z = 774.1 \text{ min}$; $\tau = 24$ 时, $Z = 947.9 \text{ min}$. $\tau = 0$ 时决定建立配送中心 I、II、III、IV, $\tau = 24$ 时建立新的配送中心 VII. 其路径安排情况如表 5—表 9 所示. 表中给出了各车辆的车型、行驶的路径、到达各个节点的对应时刻,以及 $\tau = 24$ 时的关键节点编号. 例如表 5 中的车辆 1, 在 $\tau = 0$ 时的路径为 I-6-5-I, 对应时刻为 0-73.6-97.4-129, 表示该车辆在 73.6 时刻将到达需求点 6. 但由于在 $\tau = 24$ 时进行了重新决策, 车辆 1 的新路径为 X-6-18-I, 对应时刻为 24-70.4-111.1-156. 其中, X 表示 $\tau = 24$ 时车辆 1 所处的在途位置.

图 2 和图 3 分别为 $\tau = 0$ 和 $\tau = 24$ 时的决策结果示意图(节点间的配送车辆路径用直线简化表示). 其中,图 3 中的虚线表示从配送中心直接到达关键节点的线路.

表5 配送中心 I 出发的配送车辆路径

Table 5 Vehicle routes originating from distribution center I

配送车辆		$\tau = 0$	$\tau = 24$	关键节点
1	车型 1	路径 I-6-5-I	X-6-18-I	6
	时刻	0-73.6-97.4-129	24-70.4-111.1-156	
2	车型 1	路径 I-14-I	X-14-I	/
	时刻	0-44.2-88.4	24-42.9-85.8	
3	车型 1	路径 I-17-I	I-17-I	/
	时刻	0-52.8-105.6	24-48.3-96.6	
4	车型 1	路径 I-14-18-I	X-14-I	14
	时刻	0-44.2-63.7-109	24-42.9-85.8	
5	车型 2	路径 I-3-I	/	/
	时刻	0-16-32	/	
6	车型 2	路径 I-4-I	/	/
	时刻	0-2.8-5.5	/	
7	车型 2	路径 I-12-I	X-12-I	/
	时刻	0-38.5-77.1	24-34-68	

表6 配送中心 II 出发的配送车辆路径

Table 6 Vehicle routes originating from distribution center II

配送车辆		$\tau = 0$	$\tau = 24$	关键节点
8	车型 3	路径 II-13-II	X-13-II	/
	时刻	0-39.1-78.2	24-38.5-77.1	
9	车型 3	路径 II-9-II	X-9-II	/
	时刻	0-31.9-63.7	24-31.9-63.7	
10	车型 1	路径 /	II-34-II	/
	时刻	/	24-32-40	
11	车型 1	路径 /	II-28-II	/
	时刻	/	24-50-76	
12	车型 1	路径 /	II-32-II	/
	时刻	/	24-73.5-122.9	
13	车型 2	路径 /	II-27-28-II	/
	时刻	/	24-55.5-65.4-91.4	

表 7 配送中心 III 出发的配送车辆路径

Table 7 Vehicle routes originating from distribution center III

配送车辆		$\tau = 0$	$\tau = 24$	关键节点
14 车型 1	路径	III - 19 - III	X - 19 - III	/
	时刻	0 - 50.4 - 100.8	24 - 48.3 - 96.6	
15 车型 1	路径	III - 15 - III	/	/
	时刻	0 - 19.2 - 38.4	/	
16 车型 1	路径	III - 20 - III	X - 20 - III	/
	时刻	0 - 25.6 - 51.2	0 - 25.2 - 50.4	
17 车型 2	路径	III - 11 - III	X - 11 - 26 - III	11
	时刻	0 - 30.5 - 60.9	24 - 30.3 - 63.3 - 81.3	
18 车型 2	路径	III - 2 - III		
	时刻	0 - 22 - 44		
19 车型 2	路径	III - 20 - III	X - 20 - 33 - III	20
	时刻	0 - 25.6 - 51.2	24 - 25.2 - 41.5 - 66.5	
20 车型 2	路径	III - 2 - III		
	时刻	0 - 22 - 44		
21 车型 2	路径	III - 2 - 16 - III	X - 16 - III	2
	时刻	0 - 22 - 44.8 - 77	24 - 52 - 80	
22 车型 1	路径	/	III - 33 - III	/
	时刻	/	24 - 49 - 74	

表 8 配送中心 IV 出发的配送车辆路径

Table 8 Vehicle routes originating from distribution center IV

配送车辆		$\tau = 0$	$\tau = 24$	关键节点
23 车型 1	路径	IV - 1 - 10 - IV	/	/
	时刻	0 - 5.7 - 15.1 - 26.5	/	
24 车型 1	路径	IV - 7 - IV	X - 7 - IV	/
	时刻	0 - 66.2 - 132.3	0 - 66.2 - 132.3	
25 车型 1	路径	IV - 8 - IV	X - 8 - IV	/
	时刻	0 - 55 - 110	0 - 55 - 110	
26 车型 1	路径	IV - 10 - IV	/	/
	时刻	0 - 11.3 - 22.7	/	
27 车型 1	路径	/	IV - 29 - IV	/
	时刻	/	0 - 6 - 12	
28 车型 1	路径	/	IV - 35 - IV	/
	时刻	/	24 - 40.3 - 56.7	
29 车型 2	路径	/	IV - 35 - 30 - IV	/
	时刻	/	24 - 40.3 - 42.6 - 54.1	

表 9 配送中心 VII 出发的配送车辆路径

Table 9 Vehicle routes originating from distribution center VII

配送车辆		$\tau = 0$	$\tau = 24$	关键节点
30 车型 2	路径	/	VII - 32 - VII	/
	时刻	/	24 - 45 - 66	
31 车型 2	路径	/	VII - 31 - VII	/
	时刻	/	24 - 37 - 50	
32 车型 2	路径	/	VII - 5 - VII	/
	时刻	/	24 - 70 - 116	

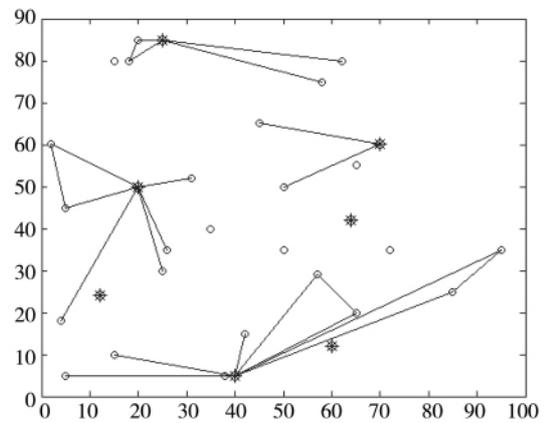


图 2 $\tau = 0$ 时的决策结果示意图

Fig. 2 Results of the decision made at $\tau = 0$

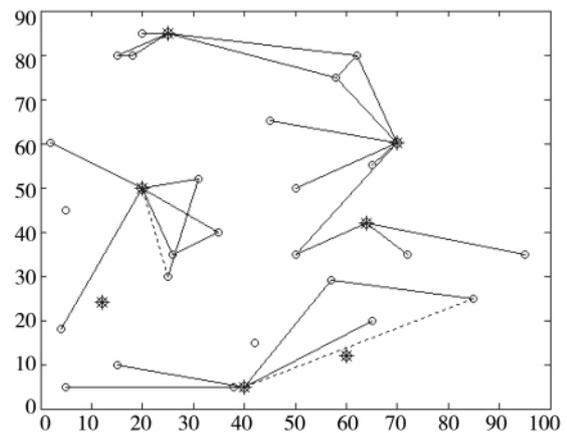


图 3 $\tau = 24$ 时的决策结果示意图

Fig. 3 Results of the decision made at $\tau = 24$

4 结束语

震后保障应急物资的及时供应是救援工作的重中之重,而研究震后应急物资配送系统优化问题可为提高应急物资配送绩效提供有益的指导。

本文针对震后应急物资配送系统,采用机会约束规划方法建立了应急物资配送中心选址与配送车辆路径安排问题的集成优化模型.该模型不仅表达了上述两个问题之间的相互联系,而且综合考虑了应急物资需求的模糊性、动态性和时间窗限制,震后受损路网的动态恢复状况,不同类型有容量限制的配送车辆,物资需求分割配送等特点,以

及应急物资配送时间最短的目标,从而较好地反映了震后应急物资配送的实际情况.此外,文中设计了一种结合 Sweep 算法、节约算法、Cross-exchange 方法和 2-Opt 方法的两阶段启发式算法.算例分析结果表明,该算法运行效率较高.

进一步的研究将考虑多品种应急物资,以及多种运输方式联运等问题.

参考文献:

- [1] Altay N, Green W G III. OR/MS research in disaster operations management [J]. *European Journal of Operational Research*, 2006, 175: 475 - 493.
- [2] Barbarosoğlu G, Özdamar L, Cevik A. An interactive approach for hierarchical analysis of helicopter logistics in disaster relief operations [J]. *European Journal of Operational Research*, 2002, 140(1): 118 - 133.
- [3] Özdamar L, Ekinçi E, Kûçûkyazici B. Emergency logistics planning in natural disasters [J]. *Annals of Operations Research*, 2004, 129(1-4): 217 - 245.
- [4] Min H, Jayaraman V, Srivastava R. Combined location-routing problems: A synthesis and future research directions [J]. *European Journal of Operational Research*, 1998, 108(1): 1 - 15.
- [5] Nagy G, Salhi S. Location-routing issues, models and methods [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 177(2): 649 - 672.
- [6] 汪寿阳, 赵秋红, 夏国平, 等. 集成物流管理系统中的定位—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 QiuHong, Xia Guoping, et al. Research on combined location: Routing problems in integrated logistics systems [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2000, 3(2): 69 - 75. (in Chinese)
- [7] Yi W, Özdamar L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities [J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 179(3): 1177 - 1193.
- [8] 曾敏刚, 崔增收, 余高辉. 基于应急物流的减灾系统 LRP 研究 [J]. *中国管理科学*, 2010, 18(2): 75 - 80.
Zeng Mingang, Cui Zengshou, Yu Gaohui. Research on location-routing problem of relief system based on emergency logistics [J]. *Chinese Journal of Management Science*. 2010, 18(2): 75 - 80. (in Chinese)
- [9] 郑斌, 马祖军, 方涛. 应急物流系统中的模糊多目标定位—路径问题研究 [J]. *系统工程*, 2009, 27(8): 21 - 25.
Zheng Bin, Ma Zujun, Fang Tao. Fuzzy multi-objective location: Routing problem in emergency logistics systems [J]. *Systems Engineering*, 2009, 27(8): 21 - 25. (in Chinese)
- [10] 代颖, 马祖军, 郑斌. 突发公共事件应急系统中的模糊多目标定位—路径问题研究 [J]. *管理评论*, 2010, 22(1): 121 - 128.
Dai Ying, Ma Zujun, Zheng Bin. Fuzzy multi-objective location: Routing problem in emergency systems for public emergency [J]. *Management Review*, 2010, 22(1): 121 - 128. (in Chinese)
- [11] 苏幼坡. 城市生命线系统震后恢复过程优化的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2001.
Su Youpo. The research on optimizing post-earthquake recovery process of urban lifeline systems [D]. Tianjin: Tianjin University, 2001. (in Chinese)
- [12] Gillett B, Miller L. A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem [J]. *Operations Research*, 1974 (22): 340 - 349.
- [13] 李兵, 郑四发, 曹剑东, 等. 求解客户需求动态变化的车辆路径规划方法 [J]. *交通运输工程学报*, 2007, 7(1): 106 - 110.
Li Bing, Zheng Sifa, Cao Jiandong, et al. Method of solving vehicle routing problem with customers' dynamic requests [J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2007, 7(1): 106 - 110. (in Chinese)
- [14] Taillard É, Badeau P, Gendreau M, et al. A tabu search heuristic for the vehicle routing problems with soft time windows [J]. *Transportation Science*, 1997, 31(2): 170 - 186.

[15] 郎茂祥, 胡思继. 车辆路径问题的禁忌搜索算法研究 [J]. 管理工程学报, 2004, 18(1): 81 - 84.

Lang Maoxiang, Hu Siji. Study on the tabu search algorithm for vehicle routing problem [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2004, 18(1): 81 - 84. (in Chinese)

Fuzzy dynamic location-routing problem in post-earthquake delivery of relief materials

DAI Ying¹, MA Zu-jun¹, ZHU Dao-li², FANG Tao¹

- 1. Institute for Logistics and Emergency Management, School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;
- 2. Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200052, China

Abstract: Optimizing the delivery system for post-earthquake relief materials is an important way to enhance its operational performance. From the view point of integrated optimization, the joint decision problem of locating distribution centers and scheduling routes of delivery vehicles was studied. A chance-constrained programming model for the fuzzy dynamic location-routing problem was developed by considering the following characteristics: fuzzy and dynamic demand of relief materials, time window constraints, dynamic rehabilitation of affected road networks, heterogeneous capacitated delivery vehicles, and split deliveries. The goal is to minimize the total time in delivering relief materials to all affected areas. A two-phase heuristic algorithm was proposed to solve the model. Finally, the feasibility and validity of the model and algorithm was demonstrated by a numerical example.

Key words: earthquake disasters; relief materials; location-routing problem; fuzzy demand; dynamic decision; heuristic algorithm

~~~~~  
(上接第 59 页)

State Statistical Bureau's report. Compared with the traditional forecasting methods, the model also has the predictive power for a certain turning point.

**Key words:** web search data; CPI forecasting; consumer price index; co-integration analysis; turning point forecasting

附录: 关键词列表

|             |             |          |            |            |
|-------------|-------------|----------|------------|------------|
| 1. 通胀       | 11. CPI     | 21. 央行   | 31. 粮食     | 41. 旅游景点   |
| 2. 物价       | 12. CPI 是什么 | 22. 中国投资 | 32. 中国粮食   | 42. 携程网    |
| 3. 货币政策     | 13. CPI 指数  | 23. 央行加息 | 33. 猪肉     | 43. 瘦身减肥   |
| 4. 美元汇率     | 14. 物价上涨    | 24. 股票   | 34. 花生油价格  | 44. 中国物价上涨 |
| 5. 物价指数     | 15. 准备金     | 25. 基金   | 35. 花生价格   |            |
| 6. 中国银行外汇牌价 | 16. 央行准备金   | 26. 证券投资 | 36. 液晶电视价格 |            |
| 7. 中行外汇牌价   | 17. 存款      | 27. 证券股票 | 37. 冰箱价格   |            |
| 8. 外汇牌价表    | 18. 上证指数    | 28. 中国股市 | 38. 按摩床    |            |
| 9. 通货膨胀     | 19. 加息      | 29. 货币流动 | 39. 按摩价格   |            |
| 10. 存款利率    | 20. 股票行情    | 30. 利息   | 40. 按摩     |            |