

文章编号: 1001-0920(2012)06-0871-04

## 应急物资运输与分配决策模型及其改进粒子群优化算法

庞海云<sup>1,2</sup>, 刘南<sup>1</sup>, 吴桥<sup>1</sup>

(1. 浙江大学 管理学院, 杭州 310058; 2. 浙江科技学院 经济与管理学院, 杭州 310023)

**摘要:** 综合考虑我国应急管理实践、应急响应时间限制以及应急物资分配中的公平要求, 在三级应急物资运输网络的基础上, 建立了以系统损失最小为目标的应急物资运输和分配决策模型. 针对模型的整数非线性规划的特点, 提出了改进粒子群(PSO)算法, 通过在不同维度上确定不同学习对象, 加强了粒子的空间搜索能力. 数值算例验证了模型和算法的有效性.

**关键词:** 应急物资运输与分配; 系统损失; 应急响应时间; 公平约束; 改进粒子群优化算法

中图分类号: F224

文献标识码: A

## Decision-making model for transportation and distribution of emergency materials and its modified particle swarm optimization algorithm

PANG Hai-yun<sup>1,2</sup>, LIU Nan<sup>1</sup>, WU Qiao<sup>1</sup>

(1. School of Management, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. School of Economics and Management, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou 310023, China. Correspondent: PANG Hai-yun, E-mail: panghy2009@126.com)

**Abstract:** This paper presents a transportation and distribution model of emergency materials for a three-layer relief transportation network after analyzing the practice of emergency management. The model aims at minimizing the system losses and meets the constraints of emergency response time and fairness constraint. A modified particle swarm optimization algorithm is proposed for the integer nonlinear programming, the spatial search abilities of the particles are improved by determining different learning objects for different dimensions of the particles. Finally, a numerical example verifies the effectiveness of the model and the algorithm.

**Key words:** transportation and distribution of emergency material; system losses; emergency response time; fairness constraint; modified PSO

### 1 引言

在过去的20年, 全球严重自然灾害频发. 灾害一旦发生便急需大量的应急物资, 通过应急物流将各种应急物资(如药品、特殊救援设备、食品、帐篷等)分配到各个受灾点, 以降低自然灾害带来的后继损失, 加快重建工作. 若应急物资分配不当则影响社会组织机能恢复, 势必造成更加巨大的损失. 应急物资运输和分配是救灾减灾的前提, 决定着救灾减灾的效果, 因此对其研究非常重要.

在现有应急物资运输和分配研究中, 文献[1]针对灾害救援中的应急物资调运, 建立了一种多品种物资、多种运输方式、有时间窗的确定型网络流模型,

并分别用拉格朗日松弛法和迭代方法求解; [2]建立了一种多品种物资、多种运输方式的两阶段随机规划模型, 并用GAMS软件求解; [3]研究了自然灾害应急物流计划中时间依赖的确定型动态运输问题, 建立了多周期、多品种物资网络流问题; [4]提出了一种混合模糊聚类优化方法, 建立了一个应急物资配送的多目标规划模型, 并用LINGO软件求解; [5]用蚁群算法求解车辆路径选择和多商品调度问题的模型.

本文认为以下几个方面需要改进: 1) 灾后最重要的事情是以最有效的方式来减少生命和财产损失<sup>[1]</sup>, 所以物资分配要以系统损失最小为基本原则; 2) 在灾情无法完全控制的情形下, 应考虑如何通过全局优化

收稿日期: 2010-12-29; 修回日期: 2011-03-29.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70771100, 90924023); 杭州市哲学社科规划项目(A11GL02); 浙江省教育厅项目(Y201119417).

作者简介: 庞海云(1977-), 女, 讲师, 博士生, 从事应急物流、供应链管理的研究; 刘南(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理、数量经济分析等研究.

保证不同受灾点物资分配的相对公平性; 3) 运输网络的设计应建立在对我国现有应急实践的调研基础上, 使模型的应用性更强; 4) 研究模型的特点, 选择更适用的优化算法。

本文将沿着以上思路构建应急物流物资运输和分配决策模型, 并设计优化算法。

## 2 问题的描述及数学模型

### 2.1 问题的描述

我国各省、市、县特别是在自然灾害多发地区已经建立了比较健全的应急预案, 并建立了各级应急物资储备中心. 本模型借鉴文献[6]提出的体系, 假设在自然灾害发生前已经根据预案或者前期救灾经验, 在灾区外围位置重要、交通便利的地方建立了若干集散点, 在灾区的各县、乡镇确立了配送中心. 如图1所示, 救援物资集散点、配送中心和受灾点分别为第1, 第2, 第3层节点, 各节点之间是多对多关系. 决策问题是: 在满足供应量限制、各受灾点基本公平、配送极限时间等条件下, 确定一套应急物资运输路径和分配方案, 使总的系统损失最少。

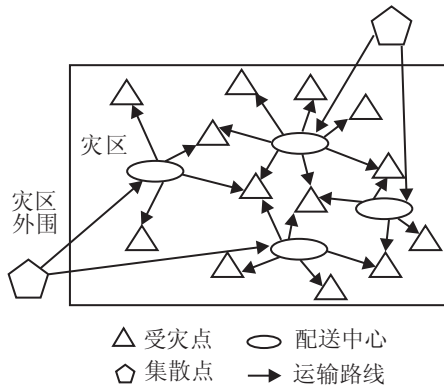


图1 应急物资运输网络

### 2.2 模型的建立

本文作如下假设: 1) 为提高救援效率, 将各种物资进行合理的商品组合化处理, 如“1顶帐篷+3床棉被+2箱矿泉水+1箱方便面”是一个组合; 2) 在组织物资配送时, 受灾点的净需求量(实际需求量-原有储备量)、集散点的可供应量(原有储备量+新接收的社会捐赠和企业订购)和配送中心原有的储备量, 这些救援信息已经及时获得; 3) 所建集散点和配送中心的最大物资处理能力和车辆配置能满足需求; 4) 如图1所示, 3级节点之间只有单向运输, 且同级节点间不能水平转运; 5) 运输方式有车辆运输和人工搬运两种。

参数和决策变量表示如下:

$O = \{O_i | i = 1, 2, \dots, l\}$  为集散点集合;

$P = \{P_j | j = 1, 2, \dots, m\}$  为配送中心集合;

$Q = \{Q_k | k = 1, 2, \dots, n\}$  为受灾点集合;

$a_i$ : 某时刻集散点  $O_i$  的物资总供应量;

$b_j$ : 某时刻配送中心  $P_j$  原有的储备量;

$c_k$ : 某时刻受灾点  $Q_k$  的净需求量;

$\omega_k$ : 受灾点  $Q_k$  对物资的需求紧迫程度可根据受灾人口的特点和受灾情况确定<sup>[7]</sup>;

$\alpha$ : 灾情指数;

$e$ : 公平系数, 即各受灾点最低保障率;

$M$ : 无穷大的正数;

$T_k$ : 受灾点  $Q_k$  的配送极限时间;

$D_1$ : 车辆运输的平均行驶速度;

$D_2$ : 人工搬运的平均速度;

$VT$ : 车辆组织或启用以及装卸物资所耗费的平均时间;

$\gamma_{ij}, \gamma_{jk}, \varphi$ : 节点之间的道路破坏率和修复单位距离平均耗费的时间;

$d_{ij}, d_{jk}$ : 节点之间的距离;

$u_{ij}, v_{jk}$ : 均为0-1变量, 分别表示: 若  $O_i$  向  $P_j, P_j$  向  $Q_k$  实施分配, 则为1, 否则为0;

$x_{ij}, y_{jk}$ : 分别表示  $O_i$  向  $P_j, P_j$  向  $Q_k$  的分配量。

则应急物资运输和分配的数学模型为

$$\min L = \sum_{k \in Q} \omega_k \left( c_k - \sum_{j \in P} y_{jk} \right)^\alpha, \alpha \geq 1. \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in P} x_{ij} \leq a_i, i \in O; \quad (2)$$

$$\sum_{k \in Q} y_{jk} \leq b_j + \sum_{i \in O} x_{ij}, j \in P; \quad (3)$$

$$\sum_{j \in P} y_{jk} \leq c_k, k \in Q; \quad (4)$$

$$\sum_{j \in P} y_{jk} \geq e c_k, k \in Q; \quad (5)$$

$$x_{ij} \leq M u_{ij}, i \in O, j \in P; \quad (6)$$

$$y_{jk} \leq M v_{jk}, j \in P, k \in Q; \quad (7)$$

$$\min \left\{ \frac{d_{ij}}{D_1} + \varphi \gamma_{ij} d_{ij} + VT, \frac{d_{ij}}{D_2} \right\} \leq$$

$$\max \{ T_k, k \in Q \} + M(1 - u_{ij}), i \in O, j \in P; \quad (8)$$

$$\min \left\{ \frac{d_{ij}}{D_1} + \varphi \gamma_{ij} d_{ij} + VT | u_{ij} = 1, i \in O, \frac{d_{ij}}{D_2} \right\} +$$

$$\min \left\{ \frac{d_{jk}}{D_1} + \varphi \gamma_{ij} d_{jk} + VT, \frac{d_{jk}}{D_2} \right\} \leq$$

$$T_k + M(1 - v_{jk}), j \in P, k \in Q; \quad (9)$$

$$u_{ij}, v_{jk} \in \{0, 1\}, i \in O, j \in P, k \in Q; \quad (10)$$

$$x_{ij}, y_{jk} \geq 0 \text{ 且为整数}, i \in O, j \in P, k \in Q. \quad (11)$$

目标函数(1)表示救灾系统总的损失为最少, 与需求紧迫程度、灾情指数及受灾点的未满足量有关;

式(2)表示从集散点运到各配送中心的量不超过其总供应量; 式(3)表示从配送中心运到各受灾点的量不超过其原有的储备量与从各集散点调拨的总量之和; 式(4)表示各受灾点的需求量约束; 式(5)表示各受灾点的公平约束; 式(6)和(7)表示只有0-1变量取1时, 相应的运输量才可能取正; 式(8)表示只有 $O_i$ 到 $P_j$ 的运输总时间小于与 $P_j$ 相通的各受灾点的最大配送极限时间时, 才能在 $O_i$ 和 $P_j$ 之间实施配送; 式(9)表示只有从各集散点到 $P_j$ 再到 $Q_k$ 的运输总时间小于该受灾点的配送极限时间时, 才能在 $P_j$ 和 $Q_k$ 之间实施配送; 式(10)表示0-1决策变量约束; 式(11)表示非负约束。

### 3 改进粒子群优化算法

#### 3.1 算法设计

该模型是整数非线性规划(INLP)模型, 同时存在整数规划问题和非线性规划问题的难点, 具有极大的挑战性。因传统的解决INLP问题的方法存在较大的局限性, 所以采用演化计算方法解决约束优化问题被证明是有效的<sup>[8]</sup>。粒子群优化算法(PSO)是演化计算方法中的一种, 目前已广泛应用于函数优化、神经网络训练等应用领域。但PSO中的粒子容易形成粒子种群的快速趋同效应, 出现陷入局部极值、早熟收敛或停滞现象<sup>[7,9-10]</sup>; 同时, PSO的性能也依赖于算法参数<sup>[11]</sup>。为了克服上述不足, 本文借鉴文献[12-14]对粒子群优化算法进行了改进, 使新算法在解决INLP问题时效率更高、结果更优。

在使用粒子群算法之前, 对模型先进行如下处理:

1) 因为粒子群的优化目标是使目标函数最大化, 所以需要把式(1)加一个负号, 并求其最大值, 即 $\max(-L)$ ;

2) 对式(6)~(9), 编写程序确定0-1变量取值;

3) 对其他约束条件, 利用罚函数法来处理, 则目标函数转化为

$$\max \left( -L - M \left( \max \left( \sum_{j \in P} x_{ij} - a_i (i \in O), 0 \right) + \max \left( \sum_{k \in Q} y_{jk} - b_j - \sum_{i \in O} x_{ij} (j \in P), 0 \right) + \dots \right) \right). \quad (12)$$

通过以上处理, 使该模型适用于粒子群算法求解, 其中每个粒子的适应值按照式(12)得出。在设计粒子群算法时, 为了使每个粒子都能够找到有利于快速收敛到全局最优解的学习对象, 采取既可以进行 $D$ -维空间搜索, 又能在不同维度上选择不同学习对象的新的学习策略, 即为全面学习PSO, 具体步骤如下:

**Step 1** 微粒初始化。随机在问题定义域中产生 $N$ 个粒子的初始位置和速度, 并计算其适应值。

**Step 2** 停机判断。如果停机条件满足, 则停止运行并输出结果; 否则, 继续。

**Step 3** 速度更新。微粒群中的微粒 $m$ 在第 $d$ 维的速度按照下式进行更新:

$$v_{md}(t+1) = wv_{md}(t) + c_1 r(\text{pbest}_{f_i(a),d} - x_{md}(t)) + c_2 r(\text{gbest}_d - x_{md}(t)). \quad (13)$$

其中:  $w$ 为惯性常数, 文献[14]建议随着更新代数从0.9递减至0.4, 则 $w(n) = 0.9 - 0.5n/\text{max\_gen}$ ,  $n$ 为当前迭代数,  $\text{max\_gen}$ 为最大迭代数;  $c_1, c_2$ 为学习因子, 通常取1.49445;  $r$ 为[0,1]内的均匀随机数;  $f_m(d)$ 为粒子 $m$ 在第 $d$ 维的学习对象, 可通过下面的策略确定, 即先按照下式确定每个粒子的学习概率:

$$P_{c_m} = 0.05 + 0.45 \times \frac{\left( \exp\left(\frac{10(m-1)}{\text{ps}-1}\right) - 1 \right)}{(\exp(10) - 1)},$$

其中 $\text{ps}$ 为种群规模。然后产生[0,1]内的均匀随机数, 如果该随机数大于粒子 $m$ 的学习概率, 则学习对象为自身历史最佳位置; 否则, 从种群内随机选取两个个体, 按锦标赛选择策略选出两者中最好的历史最佳位置作为学习对象。

**Step 4** 位置更新。微粒群中微粒 $m$ 在第 $d$ 维度的位置更新方式如下:

$$x_{md}(t+1) = x_{md}(t) + v_{md}(t+1). \quad (14)$$

**Step 5** 适应值评价。评价适应值, 转Step 2。

#### 3.2 数值算例

设某地震灾区有5个受灾点, 因受灾点离震中的距离、地质结构、建筑结构、人口分布、天气情况都有差异, 所以受灾程度和受灾人口也不一样。在某时刻各受灾点对救援物资的净需求量 $c$ 分别为1000, 2000, 2500, 1500, 3000个商品组合, 设定 $\omega$ 分别为1.0, 1.3, 1.1, 1.2, 1.5。3个配送中心的原有储备量 $b$ 分别为200, 500, 300个商品组合。两个物资集散点供应量分别为3300和3500。从现有信息看, 救灾系统总共提供7800, 而总需求为10000, 总的满足率为0.78, 由此可设公平系数 $e$ 为0.7。

再设 $T$ 分别为20, 30, 25, 28, 31, 单位为h,  $\varphi$ 为3h/km,  $D_1, D_2$ 分别为50 km/h和5 km/h, VT为2h, 其他参数为

$$d_{ij} = \begin{bmatrix} 100 & 120 & 70 \\ 90 & 150 & 50 \end{bmatrix}, \gamma_{ij} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.3 & 0.01 \\ 0.04 & 0.01 & 0.4 \end{bmatrix},$$

$$d_{jk} = \begin{bmatrix} 110 & 70 & 130 & 90 & 80 \\ 30 & 60 & 120 & 70 & 50 \\ 30 & 70 & 110 & 60 & 40 \end{bmatrix},$$

$$\gamma_{jk} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.02 & 0.4 & 0.5 & 0.1 \\ 0.3 & 0.03 & 0.4 & 0.05 & 0.08 \\ 0.1 & 0.5 & 0.01 & 0.6 & 0.1 \end{bmatrix}.$$

当  $\alpha = 2$  时, 在 Windows XP 环境下, 按照以上算法利用 Matlab7.9 编程, 设最大迭代次数为 1000, 粒子群规模为 40, 运行程序 20 次求得目标函数值均值为 1267324. 分布情况如图 2 所示, 可以看出该算法具有较强的稳定性.

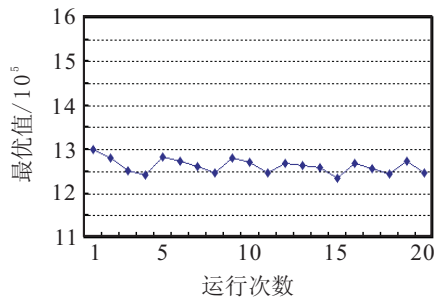


图 2 目标函数最优值的分布图

为了进一步研究改进 PSO 算法的优化性能, 将改进 PSO, 基本 PSO 和遗传算法在不同的迭代次数下各运行 20 次, 进行性能比较: 1) 表 1 给出了最优解的均值和标准差这两项评价指标, 从仿真结果看, 改进 PSO 的两项指标值最理想; 2) 图 3 给出了最优解平

均值的收敛曲线, 可以明显看出, 改进算法的收敛速度最快, 而且迭代次数 600 次以上时计算结果相当稳定. 综合以上两点可使每个粒子在不同维度上确立不同的学习对象, 大大提高了粒子群算法的搜索能力, 无论是收敛的速度、稳定性还是最优解的精度, 改进 PSO 都明显优于基本 PSO 算法和遗传算法.

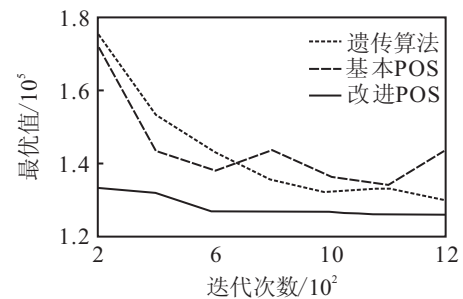


图 3 改进 PSO 与其他算法收敛曲线比较

取一组接近平均值的最优解并计算各受灾点的满足率

$$\eta = (0.71 \ 0.71 \ 0.76 \ 0.70 \ 0.89).$$

从最后结果看, 在灾情不能全部消除的情况下, 各受灾点的满足率都在公平系数之上, 说明本文提出的分配模型在确保系统损失最小的基础上能够保证各受灾点的相对公平, 即达到效率与公平的统一.

表 1 改进 PSO 与其他算法优化性能比较

迭代次数 比较指标	200		400		600		800		1000	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
遗传算法	1757380	293456	1534278	154632	1432186	81654	1356283	22456	1321456	24043
基本 PSO	1637160	284220	1362336	174269	1285476	43862	1273246	28872	1283841	25081
改进 PSO	1333590	53952	1319516	41661	1268212	35036	1258169	14712	1267324	22037

## 4 结 论

本文构建了以受灾点系统损失最小为目标, 考虑公平约束和应急响应时间约束的应急物资分配决策模型, 并针对模型的特点提出了 PSO 算法的改进策略. 数值算例表明, PSO 改进算法比其他算法表现出较好的有效性和稳定性. 但在本文所构建的模型中, 假设各个参数是确定的, 事实上有些参数(如需求量、供应量、运力条件等)可能是随机的, 需要研究各种参数的动态演化规律, 建立随机规划模型, 作进一步研究.

### 参考文献(References)

- [1] Haghani A, Oh S C. Formulation and solution of a multi-commodity, multi-modal network flow model for disaster relief operations[J]. Trans on Research Part A, 1996, 30(3): 231-250.
- [2] Barbarosoglu G, Arda Y. A two-stage stochastic

programming framework for transportation planning in disaster response[J]. J of the Operational Research Society, 2004, 55(1): 43-53.

- [3] Özdamar L, Ekinci E, Küçükyazici B. Emergency logistics planning in natural disasters[J]. Annals of Operations Research, 2004, 129 (1): 217-245.
- [4] Sheu J B. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters[J]. Trans on Research Part E, 2007, 43(1): 687-709.
- [5] Wei Yi, Arun Kumar. Ant colony optimization for disaster relief operations[J]. Trans on Research Part E, 2007, 43(6): 660-672.
- [6] 李阳, 李聚轩, 腾立新. 大规模灾害救灾物流系统研究[J]. 资源与环境, 2005, 23(7): 64-67.  
(Li Y, Li J X, Teng L X. Study on disaster relief logistics system design[J]. Resource & Environment, 2005, 23(7): 64-67.)

(下转第 880 页)