

## 运筹学与控制论

# 基于粒子群算法的带有运输衔接的应急物资运输路径优化问题

宫 华, 蒋家辉, 许 可

(沈阳理工大学 理学院, 沈阳 110159)

**摘要:** 针对应急物流时间紧迫性及物资需求的特殊性, 建立以灾区需求满意度最大和运输成本最小的应急物资运输路径优化调度模型。采用直升机运输与汽车运输分层处理的方式, 设计粒子群优化算法进行物资运输和分配决策。数值算例验证了模型及粒子群算法的有效性与稳定性。

**关键词:** 应急物流; 多目标决策; 粒子群算法

**中图分类号:** 0221

**文献标志码:** A

**文章编号:**

自然灾害或突发事件突发时, 对社会经济造成了极大破坏, 应急措施及应急物流的研究成为应对日益资由救援中心配送到受灾地, 以降低自然灾害带来的后继损失, 加快灾后重建工作。应急物流能否快速解决物资运输和分配实现其时间效应和空间效应, 在突发事件发生时如何有效地实现应急物流协调调度与优化是近年来应急管理中的重要课题之一。

应急物资分配决策的研究已经成为国内外应急物流管理学术界研究的热点问题。应急物流不同于常规的物流活动, 具有突发性、不可预知性、时间约束的紧迫性、弱经济性等特点。应急物资的运输与配送的路径选择与优化是应急物流系统中的重要环节。在现有的应急物资运输和分配研究中, 文献<sup>[1-2]</sup>从选址、救灾物资运输及分配等方面给出了应急物流问题的综述。文献<sup>[3]</sup>研究了应急物资配送的多品种物资、多种运输方式、带有时间窗的确定性网络流模型, 通过拉格朗日松弛法及迭代方法进行模型仿真。文献<sup>[4]</sup>以最小化运输成本、最小化运输时间和最大化物资需求满意度为目标, 构建了多目标救灾分配模型。文献<sup>[5]</sup>提出建立以减少物资运输延迟为目标的模型, 不考虑运输成本和车辆返回救援中心的时间等, 模型求解随时间变化的动态物资运输问题。文献<sup>[6-7]</sup>考虑种多品种物资、多种运输方式的双目标应急物资配送问题的研究。

应急物流中的救援物资以多种运输方式尽可能在最短时间内运输物资到救援需求点。将应急物资从救援物资储备中心运达各灾区需求点的满意度最大作为决策的第一目标。考虑灾区的物资、运输工具、人力等有限性, 将运输成本作为应急物流决策的第二目标。应急物流配送所追求的目标是在满足灾民需求和成本之间做出适当的平衡。本文针对应急物流系统中的物资运输与配送, 提出空运、陆运两种运输方式衔接的优化问题, 建立需求满意度最大与运输成本最小的多目标运输方案模型, 设计粒子群算法解决路径安排及物资调配决策问题。

收稿日期: 2014-08-16 修回日期: 2014-09-18

资助项目: 国家自然科学基金(No. 71101097); 辽宁省高等学校优秀人才支持计划资助(No. LJQ2012017); 辽宁省科学事业公益研究基金(No. 2012004003)

作者简介: 宫华, 女, 副教授, 博士, 研究方向为生产调度与物流优化; E-mail: gonghua1018@sina.com

# 1 模型描述

本文考虑自然灾害下从救援物资储存中心出发的物资运输与配送, 包括空运和陆运两种方式, 以直升机为主的空运可以对由于洪水、地震等灾害造成道路不通的灾区进行有效配送, 即只考虑救援物资储存中心和灾区救援点两点间的直线距离; 以卡车为主的陆运, 由于道路损坏或不通需要等待道路修复或绕路, 相应的行驶距离和时间都会增加 (假设道路系数来描述道路的情况)。在每个灾区救援点对某种物资的需求量一定, 每辆车或每架直升机于零时刻从应急救援中心出发只承担一次配送任务且载重量不小于灾区点需求量。完成任务后返回救援中心, 不考虑返回救援中心时的费用和时间。直升机和车辆的最大承载量不同, 需求量小于等于直升机容量的灾区需求点由直升机完成配送任务, 其他灾区需求点由车辆完成配送任务。

救灾物资必须在一定的时间段内配送至灾区

需求点, 且在这个时间段内存在救援时间满意度, 即在每个灾区需求点加上一个硬时间窗 (物流配送车辆必须在规定的时间内将货物送达, 晚于该时间段配送失败)。灾情发生的一段时间内能够及时配送, 救灾物资的配送成功满意度 1, 否则满意度将会下降。因此本文建立以灾区需求满意度最大为第一目

标, 以总运输成本最小为第二目标函数的应急物流配送方案模型。

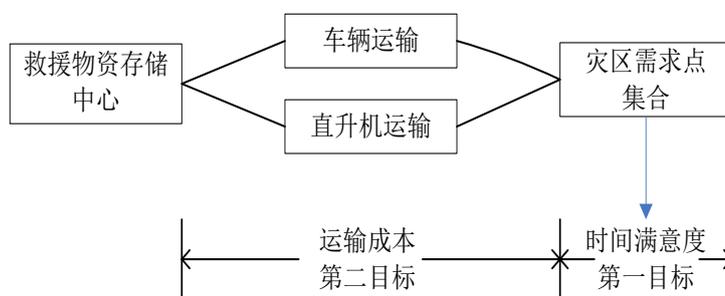


图 1 应急物流物资配送流程图

**符号说明:**  $O$  表示应急物流救援中心;  $V = \{k | k = 1, 2, \dots, K\}$  表示应急车辆集合;

$U = \{h | h = 1, 2, \dots, H\}$  表示应急直升机集合;  $N = \{d | d = 1, 2, \dots, D\}$  表示灾区需求点集合;  $c_k^f$  ( $c_h^f$ ) 表示应急车辆 (直升机  $h$ ) 的固定成本;  $c_k$  ( $c_h$ ) 表示应急车辆 (直升机  $h$ ) 单位路程成本;  $Q_k$  ( $Q_h$ ) 表示应急车辆  $k$  (直升机  $h$ ) 的容量;  $q_i$  表示灾区需求点  $i$  的容量;  $[0, l_i]$  表示灾区需求点  $i$  的时间窗;  $m_i$  表示满足灾区点  $i$  需求的配送临界时间点;  $d_{ij} = \gamma_{ij} \tilde{d}_{ij}$  表示节点  $i$  到节点  $j$  的实际路程距离,  $\gamma_{ij}$  为道路系数,  $\tilde{d}_{ij}$  为平面距离。

**决策变量:**  $t_{ik}$  ( $t_{ih}$ ) 表示应急车辆  $k$  (直升机  $h$ ) 到达节点  $i$  的时间;  $R(t_{ik})$  ( $R(t_{ih})$ ) 为车辆  $k$  (直升

机  $h$ ) 到达灾区需求点  $i$  的时间满意度;  $x_{ko} = \begin{cases} 1 & \text{救援中心车辆 } k \text{ 被启用} \\ 0 & \text{ } k \text{ 未启用} \end{cases}$ ,

$$x_{ho} = \begin{cases} 1 & \text{救援中心直升机}h\text{被启用} \\ 0 & \text{}h\text{未启用} \end{cases}, \quad y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{车辆}k\text{完成从}i\text{到}j\text{的配送任务, } i \neq j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

$$y_{ijh} = \begin{cases} 1 & \text{直升机}h\text{完成从}i\text{到}j\text{的配送任务, } i \neq j \\ 0 & \text{否则} \end{cases}$$

应急物资运输与配送模型描述为:

**目标函数:**

$$\max z_1 = \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} R(t_{ik}) + \sum_{h \in U} \sum_{i \in N} R(t_{ih}) \quad (1)$$

$$\min z_2 = \sum_{k \in V} x_{ko} c_k^f + \sum_{h \in U} x_{ho} c_h^f + \sum_{k \in V} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_k d_{ij} y_{ijk} + \sum_{h \in U} \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} c_h \tilde{d}_{ij} y_{ijh} \quad (2)$$

Subject to

$$\sum_{i \in N} \sum_{k \in V} y_{ijk} + \sum_{i \in N} \sum_{h \in U} y_{ijh} = 1, \forall j \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ijk} - \sum_{r \in N} y_{jrk} = 0, \forall k \in V, \forall j \in N \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N} y_{ijh} - \sum_{r \in N} y_{jrh} = 0, \forall h \in U, \forall r \in N \quad (5)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in V} y_{ojk} \geq 1 \quad (6)$$

$$\sum_{j \in N} \sum_{h \in U} y_{ojh} \geq 1 \quad (7)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} y_{ijk} q_j \leq Q_k, \forall k \in V \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in N} y_{ijh} q_j \leq Q_h, \forall h \in U \quad (9)$$

$$R(t_{ik}) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t_{ik} < m_i \\ (l_i - t_{ik}) / (l_i - m_i) & m_i \leq t_{ik} < l_i \\ 0 & t_{ik} = l_i \end{cases} \quad (10)$$

$$R(t_{ih}) = \begin{cases} 1 & 0 \leq t_{ih} < m_i \\ (l_i - t_{ih}) / (l_i - m_i) & m_i \leq t_{ih} < l_i \\ 0 & t_{ih} = l_i \end{cases} \quad (11)$$

$$t_{ik}, t_{ih} \leq l_i, \forall i \in N, \forall k \in V, \forall h \in U \quad (12)$$

$$x_{ko}, x_{ho}, y_{ijk}, y_{ijh} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in N, \forall k \in V, \forall h \in U \quad (13)$$

其中, (1) 式为第一目标函数, 表示应急物资从应急救援中心运达各应急物资需求点的需求满意度; (2)

式为第二目标函数,表示运输方案的总支出成本,包括固定的发车成本、路程配送成本、直升机成本。(3)式表示每一个需求点至少有一辆车或一架直升飞机进行服务,每个需求点只被服务一次,所规划的车辆线路必须覆盖所有的需求点。(需求量多于一辆车载量或一架直升机承载量时,单独派车处理,这与车辆调度优化没有关系,在此简化处理)。(4-5)式表示路径连续性约束,每辆车(直升机)进入救援需求点后须从该需求点离开。(6-7)式表示应急救援中心与需求点之间的连通性。(8-9)式分别表示分配给卡车  $k$  和直升机  $h$  的所有救援点需求量之和不超过该卡车和直升机的最大载货量(容量)。(10-11)式表示需求点满意度计算方法。(12)式表示需求点的运输时间窗要求约束。(13)式表示 0-1 整数变量约束。

## 2 粒子群算法设计

物资运输路径选择问题属于 NP 难解问题,物资配送包括直升机运输、车辆运输两部分才能决策出物资运送策略问题,精确求解的计算量会随着问题规模的增大而呈指数增长。因此,本文选择粒子群算法<sup>[8]</sup>进行求解,粒子群优化算法是一种群智能优化算法,是通过在二维空间模拟鸟群的飞行习性而发展的。算法设计分为两层决策:直升机运输、车辆运输决策。

### 2.1 编码策略

采取每一个粒子表示一个可能的配送方案,粒子的维度定义为需求点数  $D$  和车辆数量  $K$  (或直升机数量  $H$ ) 的总和再减 1,即  $L = D + K - 1$  ( $L = D + H - 1$ )。粒子的位置矢量直接表示车辆(或直升机)的运输路线的行驶顺序,每一维的位置矢量  $x_{ij}$  ( $j = 1, 2, \dots, L$ ) 只能取 0 到  $D$  的整数值,遇 0 则表示下一辆车(或直升机)可能的运输路线。

初始化:粒子由  $K - 1$  个 0 加上从 1 到  $D$  总共  $(D + K - 1)$  个元素组成的一维数组的随机排列,该排列表示一种配送方案。

例如,假设一个救援中心,4 个灾区需求点和 2 辆运输车辆,粒子的维度  $L = D + K - 1 = 5$ 。现有一个粒子  $i$  的表达形式是  $x_i = \{4, 1, 0, 2, 3\}$ ,该粒子表示车辆 1 从救援中心依次到需求点 4 和需求点 1,车辆 2 从救援中心依次到需求点 2 到需求点 3。

### 2.2 适应度函数的计算

目标函数时间满意度最大与运输成本最小在求解中需要整合成为一个适应值函数。首先求出单目标规划的最优解和非劣解。在计算满意度时,为使满意度最大,将  $(l_i - t_{ik})/l_i$  转换为  $1 - ((l_i - t_{ik})/l_i)$ ,即  $t_{ik}/l_i$  最小。令其和为  $M$ ,可得极大值极小值分别为:  $M_{\max}$ , (所有灾区需求点全满意),  $M_{\min} = 0$  (灾区需求点全不满意)。令每辆车从救援中心---需求点---中心---下一个需求点的方案中的运输费用为  $C_{\max}$ ,忽略时间窗的前提下通过最短路方法求得的最小运输成本  $C_{\min}$ 。目标函数整合如下:

$$Z = \rho_1 \frac{M - M_{\min}}{M_{\max} - M_{\min}} + \rho_2 \frac{C - C_{\min}}{C_{\max} - C_{\min}}$$

其中  $\rho_1$ 、 $\rho_2$  为表示满意度和运输成本的权重。

将目标函数与相应的约束条件整合到适应值函数中，建立适应度函数如下：

$$Fit_i = \min(Z) + R \times \left( \sum_{k=1}^k \max\left(\sum_{i \in N} \sum_{j \in D} y_{ijk} q_j - Q_k, 0\right) + \sum_{k=1}^k \max(t_{ik} - l_i, 0) \right),$$

其中  $R$  为惩罚系数。在更新粒子状态之前先判断更新后得到的新位置是否符合约束条件，对于产生的不满足定义域约束条件的解，进行剔除后继续后续步骤。

计算每个粒子的初始适应值，迭代过程中找到每个粒子的个体极值  $pbest$ 。找寻当前群体中的最好的全局极值  $gbest$ 。粒子通过跟踪这两个极值来更新自己的速度和新的位置：

$$v_{id}^{i+1} = wv_{id}^i + c_1 r_1 (pbest_{id}^i - x_{id}^i) + c_2 r_2 (gbest_{id}^i - x_{id}^i),$$

$$x_{id}^{i+1} = x_{id}^i + v_{id}^{i+1}.$$

$v_{id}^i$  记录粒子前一次迭代时的飞行方向。认知部分  $c_1 r_1 (pbest_{id}^i - x_{id}^i)$  引导粒子向着自身的经验最优值附近位置搜索。社会部分  $c_2 r_2 (gbest_{id}^i - x_{id}^i)$  引导粒子向种群中所有粒子搜索到的最优值的方向靠近。加速系数  $c_1$  和  $c_2$  为常数，表示粒子对其自身和对整个种群的依赖程度。 $r_1$  和  $r_2$  为 [0, 1] 内的均匀随机数。每个粒子  $i$  在第  $d$  维的学习概率为：

$$p_{ci} = 0.05 + 0.45 \times \frac{\exp\left(\frac{10(i-1)}{ps-1}\right) - 1}{\exp(10) - 1}$$

其中  $ps$  为种群规模。 $w$  为惯性权重，随着更新代数采用权重递减策略<sup>[9]</sup>，以减缓粒子的运动过程，防止粒子产生振荡现象，即

$$w(k) = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k_{\max}} \times k,$$

式中  $w_{\max}$  和  $w_{\min}$  分别为最大和最小权重， $k$  为当前迭代次数， $k_{\max}$  为最大迭代次数。

### 3 实例分析

以 2010 年巴基斯坦历史上最严重的一次洪灾为例。借助 DigitalGlobe 卫星公司所拍摄的关于巴基斯坦瑙谢拉水灾地区以及周边地区的卫星图像，确立受灾点和救援应急点。

#### 3.1 数据选取

建立平面坐标轴, 应急物资储存中心坐标 (36, 38), 物资储备量为 800, 需要向 14 个灾区需求点供应物资, 相应的需求量  $Q_i (i = 1, 2, \dots, 14)$ 。运输交通工具具有 3 辆车、2 架直升机, 即  $K=3, H=2$ 。算法采用 Matlab 软件编程, 设置粒子群规模为 100, 惯性系数  $w$  取  $w_{max}=0.9, w_{min}=0.4$ 。学习因子取 1.50, 惩罚系数  $R = 10^{10}$ , 粒子的最大迭代次数为 100。

表 1 救援需求点

| 灾区需求点编号 $D$ | 需求点需求量 $Q_i$ | 坐标       | 时间窗      |
|-------------|--------------|----------|----------|
| 1           | 20           | (1, 33)  | [0, 3.6] |
| 2           | 30           | (7, 36)  | [0, 4]   |
| 3           | 18           | (10, 44) | [0, 5]   |
| 4           | 30           | (21, 47) | [0, 2.9] |
| 5           | 70           | (22, 34) | [0, 3.2] |
| 6           | 20           | (31, 36) | [0, 5.1] |
| 7           | 30           | (28, 26) | [0, 3.3] |
| 8           | 85           | (43, 28) | [0, 2.8] |
| 9           | 135          | (34, 15) | [1, 4.4] |
| 10          | 86           | (45, 13) | [0, 5.6] |
| 11          | 103          | (32, 7)  | [0, 7.2] |
| 12          | 98           | (11, 3)  | [0, 8.2] |
| 13          | 89           | (27, 5)  | [0, 4]   |
| 14          | 108          | (38, 2)  | [0, 4.3] |

表 2 道路系数  $\gamma_{ij}$

| $r$ | 0   | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 0   | 1   | 2.0 | 2.0 | 1.7 | 1.4 | 1.2 | 1.1 | 2.0 | 1.3 | 1.6 | 1.6 | 1.7 | 2.8 | 2.5 | 2.2 |
| 1   | 2.0 | 1   | 1.1 | 1.2 | 1.4 | 1.8 | 1.7 | 2.4 | 2.0 | 2.9 | 2.8 | 3.2 | 4.2 | 4.0 | 4.2 |
| 2   | 2.0 | 1.1 | 1   | 1.2 | 1.4 | 2.0 | 2.1 | 2.5 | 2.2 | 3.0 | 3.0 | 3.2 | 4.2 | 4.0 | 4.2 |
| 3   | 1.7 | 1.2 | 1.2 | 1   | 1.2 | 1.7 | 1.6 | 2.2 | 1.8 | 2.4 | 2.6 | 3.2 | 4.2 | 4.0 | 4.2 |
| 4   | 1.4 | 1.4 | 1.4 | 1.2 | 1   | 1.3 | 1.2 | 1.9 | 1.6 | 2.0 | 2.0 | 3.0 | 3.8 | 3.6 | 3.2 |
| 5   | 1.2 | 1.8 | 2.0 | 1.7 | 1.3 | 1   | 1.1 | 1.6 | 1.4 | 2.0 | 1.9 | 2.2 | 4.2 | 4.0 | 4.0 |
| 6   | 1.1 | 1.7 | 2.1 | 1.6 | 1.2 | 1.1 | 1   | 1.5 | 1.1 | 1.3 | 1.4 | 1.6 | 2.2 | 2.0 | 2.0 |
| 7   | 2.0 | 2.4 | 2.5 | 2.2 | 1.9 | 1.6 | 1.5 | 1   | 1.4 | 1.4 | 1.3 | 1.4 | 1.9 | 1.6 | 1.6 |
| 8   | 1.3 | 2.0 | 2.2 | 1.8 | 1.6 | 1.4 | 1.1 | 1.4 | 1   | 1.3 | 1.2 | 1.4 | 1.8 | 1.4 | 1.5 |
| 9   | 1.6 | 2.9 | 3.0 | 2.6 | 2.0 | 1.9 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1   | 1.2 | 1.1 | 1.4 | 1.3 | 1.3 |
| 10  | 1.6 | 2.8 | 3.0 | 2.6 | 2.0 | 1.9 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1   | 1.1 | 1.3 | 1.2 | 1.3 |
| 11  | 1.7 | 3.2 | 3.2 | 3.2 | 3.0 | 2.2 | 1.6 | 1.4 | 1.4 | 1.1 | 1.1 | 1   | 1.3 | 1.2 | 1.2 |
| 12  | 2.8 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 3.8 | 4.2 | 2.2 | 1.9 | 1.8 | 1.4 | 1.3 | 1.3 | 1   | 1.2 | 1.2 |
| 13  | 2.5 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 3.6 | 4.0 | 2.0 | 1.6 | 1.4 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1   | 1.2 |
| 14  | 2.2 | 4.2 | 4.2 | 4.2 | 3.2 | 4.0 | 2.0 | 1.6 | 1.5 | 1.3 | 1.3 | 1.2 | 1.2 | 1.2 | 1   |

表 3 交通工具的速度容量和费用

| 车辆编 | 速度 | 容量 $Q_k$ | 固定 | 单位距离运 | 直升机编 | 速度 | 容量 | 固定 | 单位距离运 |
|-----|----|----------|----|-------|------|----|----|----|-------|
|-----|----|----------|----|-------|------|----|----|----|-------|

| 号 | $v_k$ | 成本  | 送成本 $c_k$ | 号 | $v_h$ | $Q_h$ | 成本  | 送成本 $c_h$ |
|---|-------|-----|-----------|---|-------|-------|-----|-----------|
| 1 | 60    | 180 | 100       | 1 | 80    | 80    | 300 | 100       |
| 2 | 60    | 180 | 100       | 2 | 80    | 80    | 300 | 100       |
| 3 | 60    | 180 | 100       |   |       |       |     |           |

### 3.2 空中运输路径优化

分层考虑两种运输方式，直升机的容量不小于灾区需求点需求量才能够进行运输，因而选择 1, 2, 3, 4, 6, 7, 对这 6 个灾区需求点重新进行排序。由于直升机可以避免道路的拥堵程度和损坏程度，故计算路程距离直接是坐标点之间的欧氏距离。

表 4 救援中心和各个灾区需求点及相互间的距离

| 距离 $d_{ij}$ | $i$   |       |       |       |       |       |       |  |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|
|             | 0     | 1     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |  |
| 0           | 0     | 35.36 | 29.07 | 26.68 | 17.49 | 5.39  | 14.42 |  |
| 1           | 35.36 | 0     | 6.71  | 14.21 | 24.41 | 30.15 | 27.89 |  |
| 2           | 29.07 | 6.71  | 0     | 8.54  | 14.04 | 24    | 23.26 |  |
| 3           | 26.68 | 14.21 | 8.54  | 0     | 11.40 | 22.47 | 25.46 |  |
| 4           | 17.49 | 24.41 | 14.04 | 11.40 | 0     | 14.87 | 22.14 |  |
| 5           | 5.39  | 30.15 | 24    | 22.47 | 14.87 | 0     | 10.44 |  |
| 6           | 14.42 | 27.89 | 23.26 | 25.46 | 22.14 | 10.44 | 0     |  |
| 需求量 $Q_i$   |       | 20    | 30    | 18    | 30    | 20    | 30    |  |

6 个灾区需求点和 2 架直升机，粒子的维度为  $L=7$ 。因此，粒子的位置阈值范围是  $[0,7]$ ，而速度阈值则限定在  $[-6,6]$  之间。粒子群算法的迭代次数如图 2 所示。运行程序 20 次后，得到 8 次最优解集 Solution = [5 4 3 0 6 2 1]，最终算法找寻到的全局最优粒子的适应值为 76.05。具体的配送方案是：

- 直升机 1：救援中心——节点 5——节点 4——节点 3
- 直升机 2：救援中心——节点 6——节点 2——节点 1。

应急物流空中满意度为 4.95；运输方案的总费用为 9513.5。

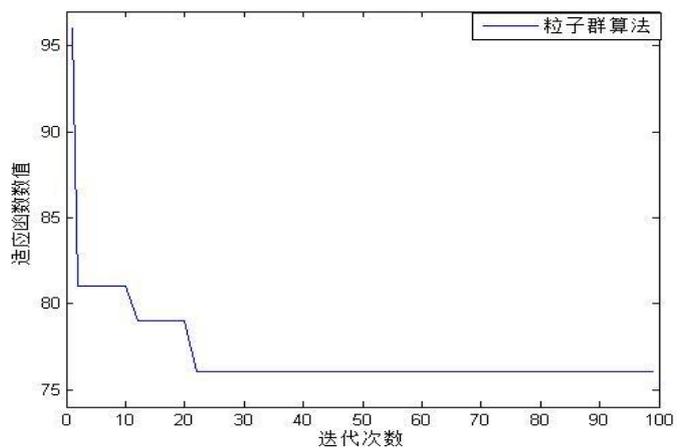


图 2 空中运输决策求解的迭代过程

### 3.3 地面运输路径优化

上述空中运输满足了 6 个救援的物资需求，剩下的 8 个救援点  $D = 8$  由 3 辆车来完成配送任务，即  $K = 3$

且每辆车的最大载重量均为 180；8 个救援点的物资需求量为  $Q_i(i=1,2,\dots,8)$ 。救援物资储备中心  $O$  到各位灾区需求点  $\gamma_{oi}d_{oi}(i=1,2,\dots,8)$  和需求点之间的距离  $\gamma_{ij}d_{ij}(i=1,2,\dots,8)$ 。

表 5 救援中心和各个灾区需求点及相互间的距离

| 距离              | $i$   |        |        |       |       |       |        |        |        |  |
|-----------------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--|
|                 | 0     | 1      | 2      | 3     | 4     | 5     | 6      | 7      | 8      |  |
| $\gamma d_{ij}$ |       |        |        |       |       |       |        |        |        |  |
| 0               | 0     | 17.47  | 15.87  | 38.24 | 42.51 | 53.16 | 120.43 | 85.53  | 79.33  |  |
| 1               | 17.47 | 0      | 30.58  | 44.94 | 59.17 | 63.36 | 138.14 | 117.72 | 143.12 |  |
| 2               | 15.87 | 30.58  | 0      | 18.81 | 18.16 | 33.19 | 73.10  | 39.23  | 39.72  |  |
| 3               | 38.24 | 44.94  | 18.81  | 0     | 13.42 | 9.08  | 36.32  | 15.87  | 17.68  |  |
| $j$             | 4     | 42.51  | 59.17  | 18.16 | 13.42 | 0     | 15.75  | 46.07  | 23.64  |  |
|                 | 5     | 53.16  | 63.36  | 33.19 | 9.08  | 15.75 | 0      | 27.79  | 7.00   |  |
|                 | 6     | 120.43 | 138.14 | 73.10 | 36.32 | 46.07 | 27.79  | 0      | 19.34  |  |
|                 | 7     | 85.53  | 117.72 | 39.23 | 15.87 | 23.64 | 7.00   | 19.34  | 0      |  |
|                 | 8     | 79.33  | 143.12 | 39.72 | 17.68 | 18.06 | 9.372  | 32.42  | 13.68  |  |
| 需求量 $Q_i$       |       | 82     | 85     | 135   | 86    | 103   | 98     | 89     | 108    |  |

对 8 个救援需求点，3 辆车，粒子的维度为  $L=10$ ，显然对粒子的初始化是对包含  $\{0,0,1,2,3,4,5,6,7,8\}$  这 10 个元素的数组的随机排列。且粒子的位置阈值范围为  $[0,10]$ ；而速度的阈值范围则在  $[-8,8]$  之间。迭代过程见图 3。程序运行 20 次后，5 次得到最优解集： $Solution = [2\ 4\ 8\ 0\ 3\ 6\ 0\ 1\ 5\ 7]$ ，最终算法找寻到的全局最优粒子的适应值为 214.48。车辆运输方案的满意度为 6.57；总费用为 17158.4。运输方案如下：

- 车辆 1：救援中心——节点 2——节点 4——节点 8
- 车辆 2：救援中心——节点 3——节点 6
- 车辆 3：救援中心——节点 1——节点 5——节点 7

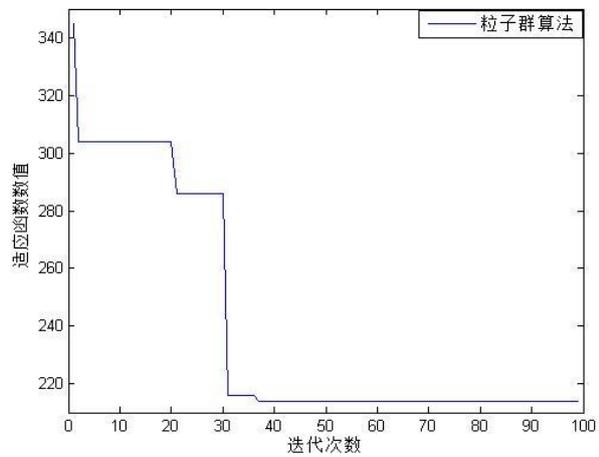


图 3 地面运输决策求解的迭代过程

因而，应急物流物资的运输与配送方案如图 4 所示，满意度为 11.52；运输成本为 26671.9。

为进一步验证 PSO 算法的性能，运用遗传算法对空中运输路径决策中的数据进行求解，采用一条染色体两条子串的编码方式，令两条子串分别具有  $n$  个基因位置，一条由 1 到  $k$  之间自然数随机排列表示访问的车辆，第二条表示一条路径上的访问顺序。适应度函数为  $Fit(f(x)) = c_{min} / f(x)$ 。为了对比粒子群算法，设置相同的种群规模为 100，迭代次数为 100；交叉率为 0.8，变异率 0.8，经过 Matlab 的进行 20 次计算，搜索到 4 次最优解，和粒子群得到的最优解相同，遗传算法的成功率为 20%，而粒子群算法 20 次中搜索到 7 次，其成功率为 35%。在每次搜索中，两种算法的适应值变化不同，如图 5 所示。

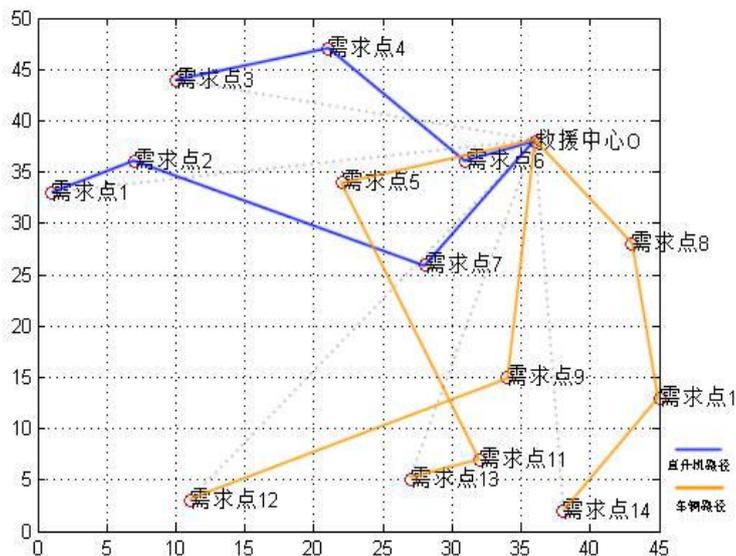


图 4 应急物流多目标决策运输方案

通过比较结果发现，粒子群算法收敛于最优解的速度更快，迭代次数在 30 次以上时计算结果相当稳定。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。PSO 算法的收敛速度、稳定性都明显优于遗传算法。

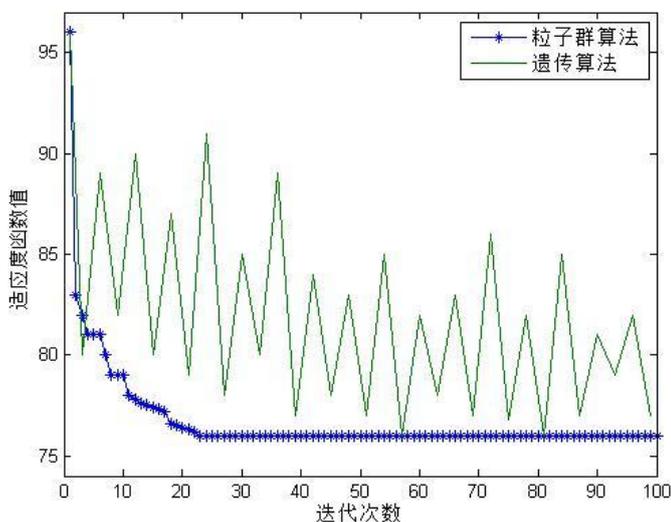


图 5 粒子群算法与遗传算法适应值变化比较

#### 4 结束语

本文构建了直升机与汽车两种运输方式衔接的应急物资运输路径优化问题，目标函数为最大灾区满意度与最小运输成本，针对直升机运输与汽车运输的分层策略的特点，提出粒子群算法进行求解。数值算例表明，PSO 算法具有较好的收敛性和稳定性。本文所构建的模型中，运输相关参数是确定的，实际应急物资运输与分配中的许多参数是随机的，如道路系数、运输时间、需求量等，这类带有随机参数的规划模型

有待于深入研究。

### 参考文献:

- [1] Caunhye A M, Nie X F, Pokharel S. Optimization models in emergency logistics: A literature review, Socio-Economic Planning Sciences[J]. 2012, 46(4): 4-13.
- [2] 韩继业, 刘德刚, 朱建明. 运筹学在应急物流中的一些应用[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2011, 28(5): 1-6.
- [3] Haghani A, Oh S C. Formulation and solution of a multi-commodity, multi-model network flow model for disaster relief operation[J]. Transportation Research, 1996, 30(3): 231-250.
- [4] Tzeng G W, Cheng H J, Huang T W. Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems[J]. Transportation Research Part E, 2007, 43(6): 673-686.
- [5] Ozdamar L, Ekinici E. Emergency logistic planning in natural disasters[J]. Annals of
- Operations Research. 2004, 129(1): 217-245.
- [6] Barbarosoglu G, Arda Y. A two-stage stochastic programming framework for transportation planning in disaster response[J]. Journal of the Operational Research Society, 2004, 55(1): 43-53.
- [7] Sheu J B. An emergency logistics distribution approach for quick response to urgent relief demand in disasters[J]. Transportation Research Part E, 2007, 43(1): 687-709.
- [8] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]//Proc of IEEE Int Conf on Neural Networks. Piscataway, 1995: 1942-1948.
- [9] 黄少荣. 基于随机参数的粒子群优化算法[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2013, 30(6): 123-127.

## Operations Research and Cybernetics

# A Transportation Routing Problem of Emergency Materials Based on Particle Swarm Optimization Algorithm

GONG Hua, JIANG Jiahui, XU Ke

(College of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang 100159)

**Abstract:** This paper provides a transportation routing problem of the emergency materials motivated by the time urgency and the demand particularity in the emergency logistics. The objective is to maximize the time satisfaction of the disaster area and minimize the transportation cost. A particle swarm optimization algorithm is proposed to determine the material transportation and distribution by using hierarchical processing for helicopter transportation

and vehicle transportation. Finally, a numerical example verifies the effectiveness and stability of the model and the PSO algorithm.

**Key words:** emergency logistics; multi-objective decision; PSO

(责任编辑 游中胜)