

9-23-2022

## Particle Swarm Algorithm for Solving Emergency Material Dispatch Considering Urgency

Li Zhang

*School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*  
15871731805@163.com

Huizhen Zhang

*School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*  
zhzywz@163.com

Dong Liu

*School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Yuxin Lu

*School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Particle Swarm Algorithm for Solving Emergency Material Dispatch Considering Urgency

## Abstract

**Abstract:** In the early stage of major public health events, medical supplies are rapidly consumed and severely insufficient. In order to distribute medical supplies in a reasonable and efficient manner, research on the distribution of emergency medical materials is carried out. *The entropy method is introduced to determine the urgency of demand points, thus could give priority to the demand points with high urgency and make the distribution routing as short as possible on that basis to realize the construction of a split delivery and multi-objective emergency medical materials scheduling model based on different urgency of demand points. Meanwhile the particle swarm optimization algorithm is improved by using dynamic inertia weight and adding particle disturbance term to solve the model.* The results show that this method can efficiently solve the problem of emergency material allocation and vehicle routing plan generation under the condition of resource shortage.

## Keywords

entropy method, demand urgency, emergency medical supplies scheduling, multi-objective particle swarm algorithm, path planning

## Recommended Citation

Li Zhang, Huizhen Zhang, Dong Liu, Yuxin Lu. Particle Swarm Algorithm for Solving Emergency Material Dispatch Considering Urgency[J]. Journal of System Simulation, 2022, 34(09): 1988-1998.

## 考虑紧迫度的应急物资调度及粒子群算法求解

张莉, 张惠珍\*, 刘冬, 陆雨欣

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

**摘要:** 重大公共卫生事件爆发初期, 医疗物资消耗迅速, 供给严重不足, 为了合理高效地分配医疗物资, 开展应急医疗物资配送问题研究。引入熵权法确定需求点的需求紧迫度, 优先配送紧迫度高的需求点, 在此基础上尽可能地使配送路径最短, 实现构建基于物资需求点紧迫度不同前提下的需求可拆分的多目标应急医疗物资调度模型; 并使用动态惯性权重和增加粒子扰动项等策略对粒子群算法进行改进用于求解模型。结果表明: 该方法可高效解决资源紧缺情况下应急物资调配及车辆路径方案生成问题。

**关键词:** 熵权法; 需求紧迫度; 应急医疗物资调度; 多目标粒子群算法; 路径规划

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-731X (2022) 09-1988-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.21-0362

## Particle Swarm Algorithm for Solving Emergency Material Dispatch Considering Urgency

Zhang Li, Zhang Huizhen\*, Liu Dong, Lu Yuxin

(School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**Abstract:** In the early stage of major public health events, medical supplies are rapidly consumed and severely insufficient. In order to distribute medical supplies in a reasonable and efficient manner, research on the distribution of emergency medical materials is carried out. *The entropy method is introduced to determine the urgency of demand points, thus could give priority to the demand points with high urgency and make the distribution routing as short as possible on that basis to realize the construction of a split delivery and multi-objective emergency medical materials scheduling model based on different urgency of demand points. Meanwhile the particle swarm optimization algorithm is improved by using dynamic inertia weight and adding particle disturbance term to solve the model.* The results show that this method can efficiently solve the problem of emergency material allocation and vehicle routing plan generation under the condition of resource shortage.

**Keywords:** entropy method; demand urgency; emergency medical supplies scheduling; multi-objective particle swarm algorithm; path planning

## 引言

重大公共卫生事件, 是指对社会公众健康具有严重危害的重大传染病疫情、群体性不明原因疾病、以及其他严重影响公众健康的事件。往往具有较强的潜伏性与传染性, 其对于物资的需求十分迫

切。应急医疗物资主要是指紧急的医药防护类物资以及为患者提供生命救助的医药器械等物资, 对时效性要求较高, 一定程度上直接关系到患者的生命以及疫情是否进一步扩散。因此, 如何在灾情发生初期快速支援灾区, 救援病患对于遏制灾情尤为重要。

收稿日期: 2021-04-21 修回日期: 2021-08-08

基金项目: 国家自然科学基金(71401106); 教育部人文社会科学基金(16YJA630037, 19YJAZH064)

第一作者: 张莉(1995-), 女, 硕士生, 研究方向为智能优化。E-mail: 15871731805@163.com

通讯作者: 张惠珍(1979-), 女, 博士, 副教授, 研究方向为运筹学及智能优化。E-mail: zhzywz@163.com

应急物资调度的车辆路径问题近年来成为研究的热点问题之一。文献[1]将总体未满足需求量最小和总体延误时间最少作为目标构建了多目标应急救援模型。文献[2]研究了道路交通受限前提下的时间满意度最大和总资源使用量最小的优化模型。文献[3]考虑到多种道路情况下的物资配送,以总的装载时间最短以及总运输成本最低为目标,并使用改进的飞蛾扑火算法用于求解模型,取得了不错的效果。文献[4]将时间满意度最大作为目标,建立了应急物流配送车辆调度模型,将遗传算法和蚁群算法结合起来进行模型求解,结果表明该算法和模型能有效提高应急物流配送效率。文献[5]将受灾点等待救援的平均时间最短以及应急救援总费用最小化设为目标,构建了救援物资联合运输多目标优化模型。文献[6]以需求满足率最大化为主要目标、车辆总行驶距离最小化为次要目标,构建应急医疗物资动态分配模型,并通过算例验证了模型的有效性和可行性。

上述研究主要以救援的时效性为主,未考虑到各需求点的差异性以及分配的公平性。文献[7]提出了基于效用-优先-经济分配策略下的应急物资分配多目标优化模型,该模型能够有效地解决应急物资分配问题。文献[8]以震后物资短缺为背景,将灾害的等级、基础设施损毁程度等因素综合考虑,构建了单个受灾点的最大损失最小化和总配送时间最短为目标的优化模型。文献[9]以应急物资配送的时效性与公平性为目标,构建多时期动态条件下的应急物资配送中心选址配送路径优化的多目标规划模型。文献[10]利用组合赋权法,构建了受灾点需求紧迫性评价体系,对受灾点进行紧迫度分级,优先救援紧迫度高的受灾点,从而尽快遏制灾情。

目前,国内外对于应急物资调度的相关研究已经有了一定的基础,但是针对重大突发公共卫生事件爆发初期物资紧缺条件下考虑物资需求点需求紧迫度的研究仍然较为短缺,而且对物资调度的研究多为需求不可拆分的情况,也就是一个需求点只能由一辆车提供一次性配送,与现实情况有较大差

异。因此,文章在引入需求点物资需求紧迫度的前提下允许需求拆分,充分发挥车辆运输的灵活性,提高车辆利用率和配送效率。

## 1 医疗物资需求紧迫度

考虑到重大突发公共卫生事件的特殊性,如果仅根据受灾点的需求就近进行物资配送,可能会造成其他受灾点灾情救援不及时,导致灾情进一步恶化。因此,考虑各需求点紧急情况的差异性,根据需求点的需求紧迫程度有次序地进行物资配送具有重要意义。

### 1.1 物资需求紧迫度评价指标

从一般救援经验来看,需求紧迫度评价指标主要包括受灾人员的数量、基础设施的损坏程度及物资储备与需求等情况。结合此次新冠肺炎事件,可以将影响医疗物资需求点需求紧迫度的因素分为辖区人口数量、医院规模(开放床位数)、收治人数(使用床位数)和医疗物资需求量 4 个因素。

(1) 对于新冠肺炎的感染情况,辖区内人口数量越多,则一定程度上感染人数越多,则该区域医疗物资消耗必然增加,那么该医疗物资需求点的需求紧迫程度也就越高。

(2) 在重大公共突发卫生事件中,定点医院的规模可与开放床位数相联系,医院开放床位数越多,代表该医院可容纳的病人越多,因此对医疗物资的需求紧迫度就越高。

(3) 收治人数反映了病人的数量,收治人数越多,其对于医疗物资的消耗就越多,因此,需求紧迫度就越高。

(4) 物资需求点的物资需求量越大表明该需求点的需求缺口越大,因此紧迫度越高。

### 1.2 基于熵权法的需求点紧迫度权重确定

熵权法是一种相对客观的确定权重的方法,根据指标值的误差程度来确定权重,决策结果的可信度较高<sup>[11-12]</sup>。熵权法确定需求点紧迫度的基本步骤

如下:

步骤 1: 建立指标矩阵

将  $m$  个受灾点的集合设为  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_m\}$ , 集合中的每个受灾点具有  $n$  个评价指标, 设第  $i$  个受灾点  $x_i$  的第  $j$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) 个影响因素指标数据为  $x_{ij}$ , 则指标数据矩阵为

$$\mathbf{X} = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

步骤 2: 数据标准化

由于各指标的量纲不同, 数据无法直接进行比较, 需要将数据标准化处理, 标准化后的数值为

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj}\}} \quad (2)$$

步骤 3: 指标矩阵归一化

通过式(3)对指标矩阵  $\mathbf{X}$  进行归一化处理, 得到矩阵  $\mathbf{P}$ :

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^m x_{ij}^*}, i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\mathbf{P} = (p_{ij})_{m \times n} = \begin{bmatrix} p_{11} & \cdots & p_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ p_{m1} & \cdots & p_{mn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

步骤 4: 计算第  $j$  项指标的熵值  $e_j$

利用式(5)对第  $j$  项评价指标计算, 得到熵值:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln(p_{ij}), j = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中:  $k = 1 / \ln m$ .

步骤 5: 计算各指标的权重  $a_j$

$$a_j = \frac{1 - e_j}{n - \sum_{j=1}^n e_j}, j = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

步骤 6: 确定灾点需求紧迫度

采用一般加权求和法确定各需求点的需求紧迫度综合得分, 根据各需求点的紧迫度分值, 将分值最小的需求点作为基准, 把所有物资需求点的得分值与之对比, 得到各需求点的相对需求紧迫度系

数。具体为

$$D_i = \sum_{j=1}^n a_j \cdot p_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

$$\lambda_i = \frac{D_i}{D_{\min}}, i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

式中:  $\lambda_i$  为需求点  $i$  的需求紧迫度;  $D_i$  为需求点  $i$  的需求紧迫度得分;  $D_{\min}$  为需求紧迫度得分值的最小值。

## 2 医疗物资调度模型

重大突发公共卫生事件爆发初期, 配送中心应急物资有限, 无法满足所有需求点的物资需求。根据熵权法确定各需求点需求紧迫度, 依据紧迫度对各需求点进行配送, 同时保证一定的公平性, 有效防止灾情进一步扩散。因此文章在考虑紧迫度的基础上构建了以应急物资分配公平性最大化以及总的配送路径最短为目标的应急物资调度的多目标模型。

### 2.1 模型假设

为了便于模型建立与求解, 给定以下假设: ①救灾中心和所有物资需求点的位置已知, 各点之间的最短距离已知; ②应急物资配送中心的物资储备总量小于需求点的需求总量, 且各物资需求点对应急物资需求量已知; ③所有车辆从配送中心出发, 将所有医疗物资配送给各需求点后, 最后回到配送中心; ④应急物资储备中心运输车辆充足, 车辆的核定载重和行驶速度相同; ⑤每个需求点的需求可拆分, 一辆车可对多个需求点进行配送服务, 同时当一个需求点的需求无法由一辆车满足时, 可由多辆车配送; ⑥车辆都是单向运输, 由配送中心发放物资给需求点。

### 2.2 符号说明

集合

$K$ : 应急医疗物资调度中心可用的车辆集合, ( $k \in K, k = 1, 2, \dots, m$ );

$D$ : 需求点的集合, ( $i \in D, i = 1, 2, \dots, n$ );

$V$ :  $0 \cup D$ , 表示应急医疗物资配送中心和所有需求点的集合,  $0$  为配送中心;

$S$ : 集合  $V$  的真子集。

### 参数

$Q$ : 应急医疗物资配送中心对医疗物资的可供量;

$\lambda_i$ : 需求点  $i$  的紧迫度系数;

$c_k$ : 车辆  $k$  的核定载重;

$q_i$ : 需求点  $i$  对应急医疗物资的需求量;

$d_{ij}$ : 需求点  $i$  到需求点  $j$  的距离;

$Y_{ik}$ : 车辆  $k$  为救援点  $i$  配送的应急医疗物资量。

### 决策变量

$x_{ijk}$ : 0-1 变量, 当  $x_{ijk} = 1$ , 车辆  $k$  经过需求点  $i$  到  $j$ ; 否则,  $x_{ijk} = 0$ 。

## 2.3 模型构建

根据以上分析, 可以建立考虑需求紧迫度的多目标物资调度优化模型:

$$\min z_1 = \lambda_i \left( q_i - \sum_{k=1}^m Y_{ik} \right) \quad (9)$$

$$\min z_2 = \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n d_{ij} x_{ijk} \quad (10)$$

s.t

$$\sum_{i=1}^n Y_{ik} \leq c_k, \forall k \in K \quad (11)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^n Y_{ik} \leq Q \quad (12)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{k=1}^m x_{ijk} \geq 1, \forall j \in V \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} - \sum_{j=0}^n x_{hjk} = 0, \forall j \in V, \forall k \in K \quad (14)$$

$$Y_{jk} \leq q_j \sum_{i=0}^n x_{ijk}, \forall j \in D, \forall k \in K \quad (15)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{i0k} = 1, \forall k \in K \quad (16)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ijk} \leq |S| - 1, S \subseteq V - \{0\} \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^m Y_{ik} \geq 0.6q_i, \forall i \in D \quad (18)$$

$$x_{ijk} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in D, \forall k \in K \quad (19)$$

$$q_i \geq Y_{ik} \geq 0, \forall i \in D, \forall k \in K \quad (20)$$

式(9)表示兼顾应急物资分配的紧迫性与公平性, 使分配方案能够实现公平最大化和效用最大化; 式(10)表示配送总路径最短, 以便及时地将物资配送到各需求点; 式(11)表示车辆载重限制; 式(12)表示所配送的物资总量不得超过配送中心总物资量; 式(13)保证各需求点至少有一辆车为其服务; 式(14)表示到达某需求点的车辆数等于从该点离开的车辆数; 式(15)表示需求点被某辆车访问后才可被其服务, 且对其配送的医疗物资量不得超过该需求点的需求量; 式(16)表示从配送中心发出的车辆最终需要返回配送中心; 式(17)表示消除车辆线路中的子回路(顶点间连通的边数之和小于等于顶点数减一, 即任意一辆车能够访问的客户节点之间的边数小于  $|S| - 1$ ); 式(18)表示必须满足需求点的需求量的 60%; 式(19)表示决策变量的取值范围; 式(20)表示需求点  $i$  的配送量不得大于需求量。

## 3 改进的多目标粒子群算法

多目标问题的求解方法大致可以归结为 2 类:

①先验法, 是指决策者在求解问题之前就有一定的偏好, 再根据偏好程度对各个目标分配权重, 通过线性加权、求理想点等方法将多目标问题转化为单目标问题求解, 从而简化计算; ②后验法, 指通过优化算法对多目标问题进行求解后得到一组帕累托解集, 根据帕累托解集来判断各个目标值的优劣, 决策者再结合实际情况对结果进行分析, 从一组解中选出决策者最满意的方案。针对应急医疗物资调度问题, 在灾害发生初期, 由于信息不完全, 决策者很难事先进行决策, 从而适合采用后验法。文章通过多目标优化算法对模型进行求解, 从求解出来的帕累托解集中抉择出最合适的方案。

粒子群算法是通过研究鸟群捕食行为设计出来的一种基于群体活动的智能优化算法<sup>[13]</sup>。粒子群算法利用粒子的运动速度和运动方向完成种群搜

索过程,同时对最优粒子不断更新。多目标粒子群算法(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)由粒子群算法改进而来,通过不断对新粒子进行评估,更新非支配解集,最终使得帕累托最优前沿均匀分布<sup>[14]</sup>。多目标粒子群算法目前已经比较成熟,通用性好,已广泛应用于解决各类型多目标问题以及车辆路径问题,取得了不错的效果。

根据所建立的多目标模型的具体特征,设计改进的多目标粒子群算法进行求解,改进策略主要有以下 3 个方面:①将网格法与拥挤距离评估法结合起来选取全局最优;②将惯性权重设置成动态调整的惯性权重,使其在算法前期,扩大全局搜索范围,后期加快算法收敛到最优值;③对粒子速度更新增加扰动操作,增加种群多样性和扩大搜索范围,避免出现早熟现象。

### 3.1 解的表示方式

组合优化问题在利用智能优化算法进行求解时,为了避免二进制数或其他进制数与实数之间转换存在精读及耗时的问题,一般采用实数编码方式。同时,实数编码比较直观,不需要解码,能够清晰地表达出解的含义,实数编码目前在求解车辆路径问题中已经有了较为广泛的应用<sup>[15-17]</sup>。解的构成主要有两部分,长度分别为  $n$ ,因此可以形成长度为  $2n$  的解。前  $n$  个编码表示各需求点所分配的物资量,后  $n$  个编码表示需求点的服务次序,假设  $n=8$ ,则解的长度为 16。例如,图 1 为一条初始解。



图 1 解的表示

Fig. 1 Representation of the solution

由解可知,8 个需求点的具体物资配送量以及各需求点的服务次序,配送中心可以根据物资分配量和服务次序安排车辆进行配送。当车辆到达某个需求点而余下的装载量无法满足该点的配送量时,则将车辆剩余的物资量配送给该点,同时增加一辆车继续对该点进行配送,并由增加的车辆继续按顺序进行配送。例如当车辆载重为 8 时,

有 3 条配送路径: 0-4(3)-7(5)-0; 0-2(3)-5(4)-8(1)-0; 0-8(1)-1(2)-3(1)-6(2)-0, 其中 0 是配送中心,括号里面是该需求点由此路径车辆配送的物资量。

### 3.2 种群初始化

在生成初始种群的过程中,随机生成每个粒子的位置和速度值,此时生成的初始值可能会落在不可行区域,为了避免这种情况发生,均匀随机初始化可行域范围,这样既可以保证初始群体的随机性又能增加种群的多样性。

### 3.3 外部档案的更新

对支配解和非支配解的处理是多目标优化的一大重点。在 MOPSO 中,外部档案用于存放非劣粒子,如果新一代种群中有粒子支配外部档案中的某个粒子,则用该粒子替换被支配的那个粒子,因此我们需要根据每次迭代来不断更新外部档案。其更新策略如下:①当此时产生的新解与外部档案中存放的非支配解互不支配,且外部档案中解的数量没有达到最大限制,可直接将新解放入外部档案;②当新解被档案中的某个解支配,则忽略新解;③当新解支配外部档案中存放的某个历史解,则替换掉外部档案中的历史解;④当外部档案中解的数量已经达到其最大限制,新解与档案中的所有历史解互不支配,则删除拥挤距离最小的非占优解。中间粒子  $i$  的拥挤距离计算公式为

$$C_i = \frac{F_{i+1,1} - F_{i-1,1}}{\max F_1 - \min F_1} + \frac{F_{i+1,2} - F_{i-1,2}}{\max F_2 - \min F_2} \quad (21)$$

式中:  $F_1$ 、 $F_2$  分别为 2 个目标函数的值,边界粒子拥挤距离为  $Inf$ ,这种定义方式简单,便于计算。

### 3.4 全局最优的选取

在多目标应急物资调度优化问题中,采取网格法和拥挤距离综合作用的方式调整外部档案中非劣粒子的排序,以达到使性能较好的非劣解作为全局最优解的目的。当外部档案中非劣粒子的数量少于最大限制时,通过网格法可以将粒子目标函数的解空间均等划分,快速筛选出网格中最合适的粒子

作为全局最优解。但是在算法迭代后期, 当档案中非支配解的数量达到最大限制时, 容易出现多个粒子存在于一个网格中的情况, 此时通过网格法很难筛选出合适的粒子, 于是使用式(21)拥挤距离评估法对外部档案中的粒子进行拥挤距离降序排列, 然后根据遗传算法中精英法策略在外部档案排序前 20% 的非支配解中随机选取一个作为全局最优位置。

### 3.5 个体最优的选取

个体最优值是每个粒子自身从最初迭代的位置到当前迭代的所有历史位置中的最优位置。如果粒子当前位置优于它的个体最优位置时, 那就将当前位置作为粒子的个体最优值, 否则保持原来的个体最优值不变。具体表达为

$$pbest_i(t+1) = \begin{cases} x_i(t+1), x_i(t+1) \leq pbest_i(t) \\ pbest_i(t), x_i(t+1) > pbest_i(t) \end{cases} \quad (22)$$

### 3.6 增加扰动的粒子的位置和速度更新策略

速度和位置是“粒子”的 2 个重要属性。速度和位置的更新是通过追踪个体最优值和全局最优值来进行的。标准粒子群中的速度与位置更新公式为

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (pbest_i - x_i(t)) + c_2 r_2 (gbest_i - x_i(t)) \quad (23)$$

$$x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (24)$$

式中:  $c_1$  为个体学习因子;  $c_2$  为社会学习因子;  $r_1$ 、 $r_2$  为[0,1]范围内均匀分布的随机数;  $pbest_i$  和  $gbest_i$  分别为粒子  $i$  的个体最优取值和全局最优取值;  $\omega$  为惯性权重。

为了进一步增强算法搜索能力, 将  $\omega$  设置为动态递减的惯性权重, 使其在算法迭代前期取值较大, 扩大全局搜索范围, 增加种群的多样性, 随着迭代次数的增加, 惯性权重值将逐渐减小, 便于算法进行局部搜索。此外, 在速度更新过程中增加了扰动策略, 如式(25)所示:

$$v_i(t+1) = \omega v_i(t) + c_1 r_1 (pbest_i - x_i(t)) + c_2 r_2 (gbest_i - x_i(t)) + a \left( \frac{gen}{max\_gen} \right)^2 + b \left( \frac{gen}{max\_gen} \right) \quad (25)$$

式中:  $a$  和  $b$  为[0.001,0.01]中的随机数;  $gen$  和  $max\_gen$  分别为算法当前的迭代次数和算法最大迭代次数;  $a \left( \frac{gen}{max\_gen} \right)^2 + b \left( \frac{gen}{max\_gen} \right)$  为扰动项, 位置更新公式保持不变。

### 3.7 算法流程

本文采用的算法流程如下:

步骤 1: 初始化算法基本参数。

步骤 2: 更新种群的初始位置, 筛选非劣解集。

步骤 3: 根据 3.3 节的策略进行档案更新。

步骤 4: 根据 3.4 节的策略从外部档案中选取全局最优值。

步骤 5: 根据 3.5 节的策略更新个体最优。

步骤 6: 根据 3.6 节的扰动策略来更新粒子的位置和速度。

步骤 7: 更新粒子的位置, 判断粒子的位置是否超出边界, 如果  $x_i > x_{max}$ , 则令  $x_i = x_{max}$ ; 若粒子位置  $x_i < x_{min}$ , 则令  $x_i = x_{min}$ 。

步骤 8: 检查迭代次数是否满足终止条件, 如果满足, 算法结束; 如果未满足, 则返回步骤 2。

## 4 算例分析

### 4.1 医疗物资需求点需求紧迫度

新冠肺炎爆发初期, 武汉市新冠肺炎感染人数骤升, 各定点医院的医疗物资消耗迅速, 医疗物资严重短缺, 在政府的统筹与调控下医疗物资从全国各地及海外运往武汉。本文以武汉天河机场作为物资集散中心, 以武汉市公布的前十五家定点医院为物资需求点, 即物资通过天河机场运往各定点医院。开放床位数和使用床位数根据武汉市卫健委于 2020-02-03 发布的统计数据获得, 辖区人口数主要是定点医院所在辖区的人口数量, 该数据由第六次全国人口普查户籍人口数得到, 物资需求点的需求量根据文献[18]的 SEIR (Susceptible, Exposed, Infectious, Recovered)模型计算得出, 以维持一周内基本物资需求为依据。



各物资需求点的紧迫度系数通过 1.2 节计算得到。两点之间的最短距离通过高德地图所查询到的实际行驶最短距离所得。假设武汉天河机场现有物资 80 t, 每辆车的载重是 10 t, 车辆数不限。需求点的基本信息如表 1 所示。

## 4.2 算法参数设置与分析

合理设置算法的参数对算法的有效性和效率有着重要的影响。根据文献[19-20]将自我学习因子  $c_1$  和社会学习因子  $c_2$  设置为 2, 惯性权重设置为  $\omega_{\max}=0.9$ ,  $\omega_{\min}=0.4$ 。此外, 对算法中 4 个关键参数(种群规模  $N_p$ , 外部档案集的容量  $N_R$ , 最大迭代

次数  $G$ , 惯性权重  $\omega$ )通过 Taguchi 实验设计方法 (design of experiment, DOE)<sup>[21]</sup>进行参数设置和灵敏度分析。

### 4.2.1 参数正交实验

文章利用 Taguchi 实验设计方法对 4 个参数 5 种不同水平的取值作了分析, 表 2 是 4 个实验参数的 5 个合理水平值。利用正交实验表 L25 进行实验, 对每个参数组合独立运行 30 次, 取其目标函数的平均值(AVG)作为响应变量。所选取的正交组合及其响应值如表 3 所示。

表 1 各医疗物资需求点信息  
Table 1 Information of each medical material demand point

编号	定点医院	物资需求量/t	需求点规模 (开放床位)	收治人数 (使用床位)	辖区人口 (万人)	紧迫度系数 $\lambda_i$
1	金银潭医院	12.30	720	685	829.27	1.895 5
2	武汉市肺科医院	5.60	122	119	68.60	1.021 9
3	武汉市汉口医院	6.70	389	422	72.30	1.268 1
4	市红十字会医院	4.60	304	304	59.60	1.131 3
5	市七医院	3.60	193	196	87.80	1.072 2
6	市四医院西院区	5.90	319	343	68.60	1.189 4
7	市九医院	7.80	405	502	44.00	1.325 3
8	市武昌医院	8.40	504	520	126.37	1.410 9
9	市五医院	5.60	430	424	50.70	1.103 2
10	市中心医院后湖院区	10.70	525	525	59.60	1.457 6
11	市三医院光谷院区	7.00	300	316	87.80	1.207 1
12	武钢二医院	5.60	102	103	44.00	1.000 0
13	同济中法新城	5.90	280	271	51.20	1.140 6
14	协和西院	4.80	247	247	59.60	1.093 5
15	省人民医院(东院)	5.50	270	270	63.40	1.130 5

表 2 参数水平  
Table 2 Parameter levels

参数水平	$N_p$	$N_R$	$G$	$\omega$
1	50	10	200	$\omega_1 = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})(gen / \max\_gen)$
2	100	15	300	$\omega_2 = \omega_{\max} - \omega_{\min} \left( 2 \cdot \frac{gen+1}{\max\_gen} - \left( \frac{gen+1}{\max\_gen} \right)^2 \right)$
3	150	20	400	$\omega_3 = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \left( 2 \cdot \frac{gen}{\max\_gen} - \left( \frac{gen}{\max\_gen} \right)^2 \right)$
4	200	25	500	$\omega_4 = \omega_{\min} (\omega_{\max} / \omega_{\min}) \wedge 1 / (1 + 10gen / \max\_gen)$
5	250	30	600	$\omega_5 = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})(gen / \max\_gen)^2$

表 3 正交表和 AVG 统计  
Table 3 Orthogonal array and AVG statistics

序号	参数				AVG	
	$N_P$	$N_R$	$G$	$\omega$	目标函数数值 1	目标函数数值 2
1	1	1	1	1	22.688	787.678
2	1	2	2	2	23.171	741.935
3	1	3	3	3	22.392	692.876
4	1	4	4	4	23.884	695.435
5	1	5	5	5	22.258	684.353
6	2	1	2	3	22.675	672.876
7	2	2	3	4	22.543	686.353
8	2	3	4	5	21.948	688.369
9	2	4	5	1	22.894	716.603
10	2	5	1	2	22.983	690.744
11	3	1	3	5	22.547	701.256
12	3	2	4	1	22.594	692.283
13	3	3	5	2	22.515	691.571
14	3	4	1	3	22.595	698.564
15	3	5	2	4	23.048	679.312
16	4	1	4	2	22.165	685.966
17	4	2	5	3	22.696	687.539
18	4	3	1	4	22.213	684.446
19	4	4	2	5	22.542	672.621
20	4	5	3	1	23.869	717.954
21	5	1	5	4	22.793	697.235
22	5	2	1	5	23.458	691.677
23	5	3	2	1	23.782	709.851
24	5	4	3	2	22.136	685.878
25	5	5	4	3	22.542	703.282

根据表 3 可以得出不同参数水平组合条件下的响应值, 通过对参数响应值的分析可以得到影响因子的水平趋势图, 如图 2, 3 所示。

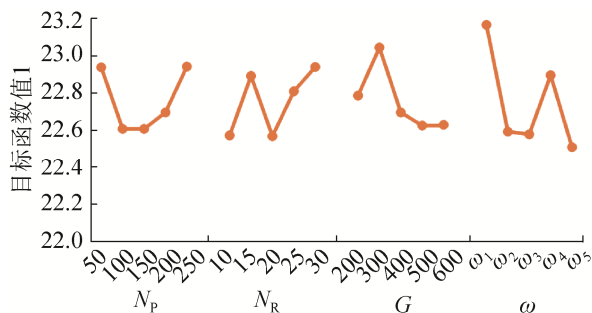


图 2 影响因子对目标函数值 1 的影响  
Fig. 2 Influence of the impact factor on objective function 1

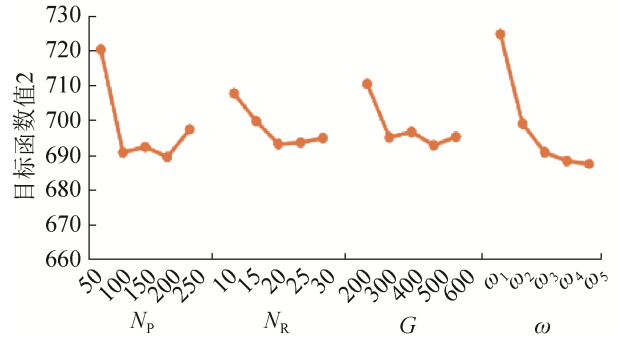


图 3 影响因子对目标函数值 2 的影响  
Fig. 3 Influence of the impact factor on objective function 2

由图 2, 3 可见, 惯性权重  $\omega$  的取值对算法的性能影响最大, 而外部档案集的容量  $N_R$  的取值对算法性能影响相对而言最小。综合考虑这四种影响因子对两个目标函数值的影响, 文章最终选取的参数组合为  $N_P=100$ ,  $N_R=20$ ,  $G=500$ ,  $\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min})(gen / \max\_gen)^2$ 。

#### 4.2.2 结果分析

利用 Matlab2017a 对 MOPSO 算法进行编程实现, 实验所用硬件环境为 Intel®Core(TM)i5-8265U CPU @1.6GHz, 8.00GB 内存, 64 位 Windows10 操作系统。

通过上述算法对算例进行求解, 可以得到一组帕累托前沿解集, 如图 4 所示。图 5 为标准多目标粒子群算法的求解结果。

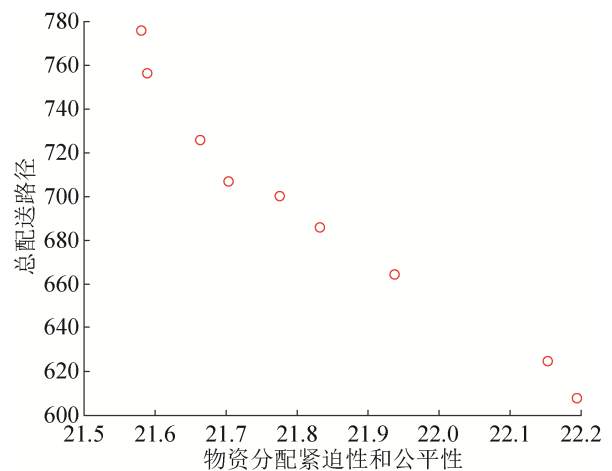


图 4 改进多目标粒子群算法帕累托前沿图  
Fig. 4 Pareto frontier diagram of improved multi-objective particle swarm optimization algorithm

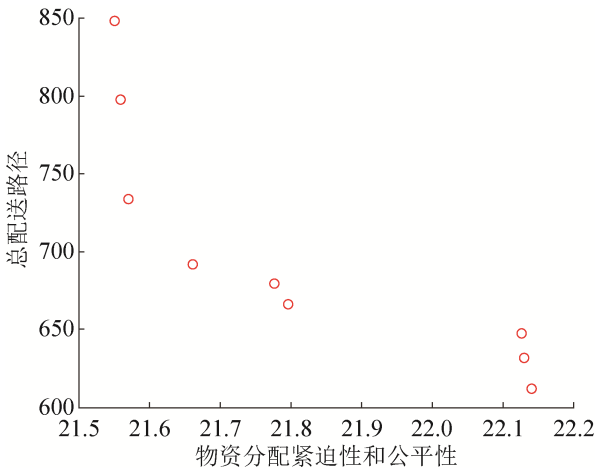


图5 标准多目标粒子群算法帕累托前沿图

Fig. 5 Pareto frontier diagram of standard multi-objective particle swarm optimization algorithm

比较图 4, 5 可以明显发现, 改进后的算法求得的帕累托解集分布更加均匀, 求解结果更优。

由图 4 可见 2 个目标很难同时实现最优。决策者需要从一组帕累托解中选择最满意的解作为最优解。本文根据文献[22]构建了 2 个损失指标, 帮助决策者选择最合适的方案, 分别是  $Z_1$  损失指标  $LE_{1i}$  和  $Z_2$  损失指标  $LE_{2i}$ 。计算公式为

$$LE_{1i} = \frac{\max Z_1 - Z_{i,1}}{\max Z_1 - \min Z_1} \quad (26)$$

$$LE_{2i} = \frac{\max Z_2 - Z_{i,2}}{\max Z_2 - \min Z_2} \quad (27)$$

式中:  $\max Z_1$ 、 $\max Z_2$ 、 $\min Z_1$  和  $\min Z_2$  分别为目标函数  $Z_1$  和  $Z_2$  的最大值和最小值;  $Z_{i,1}$  和  $Z_{i,2}$  分别为第  $i$  个方案的 2 个目标函数的值。

表 4 为各种方案的损失程度值, 决策者可根据自身对两个损失指标的接受程度选择相应的方案。如果决策者最多接受  $Z_1$  45% 的损失, 则在  $LE_{2i}$  低于 45% 的方案中选择  $Z_2$  损失最小的方案, 即方案 5。同理, 假如决策者希望  $LE_{2i} < 55%$ , 则决策者可以在  $LE_{2i} < 55%$  的方案中选择  $Z_2$  损失最小的方案, 即决策者可选择方案 9, 如表 5 所示。

通过这种损失指标的方法能够直观地反映出不同方案下的目标函数值的损失程度, 即优劣程度, 帮助决策者合理地选择最满意的方案。

表 4 各种方案损失程度值

Table 4 Loss degree value of various schemes

方案	$Z_1$	$Z_2$	$LE_{1i}/\%$	$LE_{2i}/\%$
1	21.664	725.7	86.48	29.76
2	21.581	775.7	100.00	0
3	21.590	756.2	98.53	11.61
4	21.699	705.2	80.78	41.96
5	21.938	664.3	41.86	66.31
6	21.704	706.8	79.97	41.01
7	22.195	607.7	0	100.00
8	22.154	624.4	6.68	90.06
9	21.833	685.8	58.96	53.51

表 5 方案 9 结果

Table 5 Results for option 9

t		t	
定点医院	总配送量	定点医院	总配送量
金银潭医院	12.3	市五医院	3.4
武汉市肺科医院	3.4	中心医院后湖院区	10.7
武汉市汉口医院	6.7	市三医院光谷院区	4.2
市红十字会医院	2.8	武钢二医院	3.4
市七医院	2.2	同济中法新城	4.0
市四医院西院区	4.8	协和西院	2.9
市九医院	7.8	省人民医院(东院)	3.3
市武昌医院	8.1	总计	80

## 5 结论

本文结合应急物资调度的特点, 使用熵权法对受灾点进行紧迫度分析, 考虑了供应量不足以及需求可拆分的情况下, 根据受灾点紧迫度对受灾点进行有主次有重点的物资调度, 同时尽可能使总配送路径最短, 构建了基于受灾点紧迫度条件下的应急医疗物资调度的多目标模型。设计了改进的多目标粒子群算法对武汉市在新冠肺炎疫情下的应急物资调度问题进行求解, 具有较大的实用性和应用价值。后续研究中为了跟实际应急物资配送的情况更贴合, 将进一步考虑物资的装卸时间, 将总距离最短转换为总的配送时间最短, 同时还可以考虑多品种物资、多配送中心条件下的应急物资调度。

## 参考文献:

[1] 朱建明, 黄钧, 刘德刚, 等. 突发事件应急医疗物资调度的随机算法[J]. 运筹与管理, 2010, 19(1): 9-14.

- Zhu Jianming, Huang Jun, Liu Degang, et al. A Stochastic Algorithm for Emergency Medical Supplies Scheduling[J]. *Operations Research and Management*, 2010, 19(1): 9-14.
- [2] 徐浩, 李佳川, 韩传峰. 震后运速受限条件下的多目标定位: 路径问题研究[J]. *管理工程学报*, 2017, 31(4): 147-155.
- Xu Hao, Li Jiachuan, Han Chuanfeng. Multi-objective Localization under Speed Constraints after Earthquake: A Path Problem Study[J]. *Chinese Journal of Pipeline Engineering*, 2017, 31(4): 147-155.
- [3] 贺体龙, 楼文高. 基于改进飞蛾扑火算法求解多需求点的应急物资调度[J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(6): 1334-1339.
- He Tulong, Lou Wengao. Emergency Material Scheduling Based on Improved Moth Fire Algorithm[J]. *Journal of Small and Micro Computer Systems*, 2020, 41(6): 1334-1339.
- [4] Chang Q. Vehicle Scheduling Model of Emergency Logistics Distribution Based on Internet of Things[J]. *International Journal of Applied Decision Sciences (S1755-8077)*, 2018, 11(1): 36-54.
- [5] 薛星群, 王旭坪, 韩涛, 等. 考虑通行约束和运力限制的灾后应急物资联合调度优化研究[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(3): 21-30.
- Xue Xingqun, Wang Xuping, Han Tao, et al. Research on the Joint Scheduling of Post-Disaster Emergency Supplies Considering Traffic Constraints and Transportation Capacity[J]. *China Management Science*, 2020, 28(3): 21-30.
- [6] 胡晓伟, 宋浪, 杨滨毓, 等. 重大突发公共卫生事件下城市应急医疗物资优化调度研究[J]. *中国公路学报*, 2020, 33(11): 55-64.
- Hu Xiaowei, Song Lang, Yang Binyu, et al. Research on Optimal Scheduling of Urban Emergency Medical Supplies under Major Public Health Emergencies[J]. *China Journal of Highways*, 2020, 33(11): 55-64.
- [7] Chen D Q, Ding F, Huang Y, et al. Multi-objective Optimisation Model of Emergency Material Allocation in Emergency Logistics: A View of Utility, Priority and Economic Principles[J]. *International Journal of Emergency Management (S1471-4825)*, 2018, 14(3): 233-253.
- [8] 盛虎宜, 刘长石, 鲁若愚. 震后初期应急物资短缺情景下的定位-路径问题研究[J]. *运筹与管理*, 2019, 28(6): 41-47.
- Sheng Huyi, Liu Changshi, Lu Ruoyu. Research on the Location-Route Problem under the Situation of Emergency Supplies Shortage in the Initial Stage after Earthquake[J]. *Operations Research and Management*, 2019, 28(6): 41-47.
- [9] 曲冲冲, 王晶, 黄钧, 等. 考虑时效与公平性的震后应急物资动态配送优化研究[J]. *中国管理科学*, 2018, 26(6): 178-187.
- Qu Chongchong, Wang Jing, Huang Jun, et al. Research on Optimization of Dynamic Distribution of Post-Earthquake Emergency Supplies Considering Time and Equity[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2018, 26(6): 178-187.
- [10] 王英, 苏柏林, 闫鹏, 等. 基于改进 TOPSIS 的受灾点需求紧迫性分级研究[J]. *安全与环境学报*, 2019, 19(1): 140-146.
- Wang Ying, Su Bolin, Yan Peng, et al. Study on the Urgency of Disaster-Affected Points Based on Improved TOPSIS[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(1): 140-146.
- [11] Zhang W Y, Ding J P, Wang Y, et al. Multi-perspective Collaborative Scheduling Using Extended Genetic Algorithm with Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Entropy Weight Method[J]. *Journal of Manufacturing Systems (S0278-6125)*, 2019, 53(2): 249-260.
- [12] Alireza M, Fathollah O. Numerical and Experimental Study of Twin-Fluid Two-Phase Internal-Mixing Atomizer to Develop Maximum Entropy Method[J]. *Chinese Journal of Aeronautics (S1000-9361)*, 2020, 33(9): 2281-2294.
- [13] Kennedy J, Eberhart R C. Particle Swarm Optimization[C]// *IEEE International Conference on Neural Networks Piscataway*. New Jersey, USA: IEEE, 1995: 1942-1948.
- [14] Rabbani M, Bajestani M A, Khoshkhou G B. A Multi-Objective Particle Swarm Optimization for Project Selection Problem[J]. *Expert Systems with Applications (S0957-4174)*, 2009, 37(1): 315-321.
- [15] Anubha A, Nitish G, Shiv P, et al. Evolutionary Algorithm Hybridized with Local Search and Intelligent Seeding for Solving Multi-objective Euclidian TSP[J]. *Expert Systems with Applications (S0957-4174)*, 2021, 181(12): 1-13.
- [16] 王道平, 徐展, 杨岑. 基于两阶段启发式算法的物流配送选址-路径问题研究[J]. *运筹与管理*, 2017, 26(4): 70-75, 83.
- Wang Daoping, Xu Zhan, Yang Cen. Research on Logistics Distribution Site-Path Problem Based on

- Two-stage Heuristic Algorithm[J]. *Operations Research and Management*, 2017, 26(4): 70-75, 83.
- [17] 张明伟, 屈晓龙, 李波. 考虑碳排放的多产品多目标供应链协同优化[J]. *计算机集成制造系统*, 2018, 24(4): 1024-1033.  
Zhang Mingwei, Qu Xiaolong, Li Bo. Collaborative Optimization of Multi-product Multi-objective Supply Chain Considering Carbon Emissions[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(4): 1024-1033.
- [18] 辜勇. 基于传染病疫情防控机理的应急物资需求分析[J]. *武汉理工大学学报(交通科学与工程版)*, 2010, 34(4): 707-711.  
Gu Yong. Demand Analysis of Emergency Supplies Based on Prevention and Control Mechanism of Infectious Diseases[J]. *Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering)*, 2010, 34(4): 707-711.
- [19] 黄松, 田娜, 纪志成. 基于自适应变异概率粒子群优化算法的研究[J]. *系统仿真学报*, 2016, 28(4): 874-879.  
Huang Song, Tian Na, Ji Zhicheng. Research on Particle Swarm Optimization Algorithm Based on Adaptive Mutation Probability[J]. *Journal of System Simulation*, 2016, 28(4): 874-879.
- [20] 唐红亮, 吴柏林, 胡旺, 等. 基于粒子群优化的地震应急物资多目标调度算法[J]. *电子与信息报*, 2020, 42(3): 737-745.  
Tang Hongliang, Wu Bolin, Hu Wang, et al. Multi-objective Scheduling Algorithm for Earthquake Emergency Supplies Based on Particle Swarm Optimization[J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2020, 42(3): 737-745.
- [21] Xia X, Liu J, Hu Z. An Improved Particle Swarm Optimizer Based on Tabu Detecting and Local Learning Strategy in A Shrunk Search Space[J]. *Applied Soft Computing (S1568-4946)*, 2014, 23: 76-90.
- [22] 陈刚, 付江月. 兼顾公平与效率的多目标应急物资分配问题研究[J]. *管理学报*, 2018, 15(3): 459-466.  
Chen Gang, Fu Jiangyue. Research on Multi-Objective Emergency Material Allocation Considering Equity and Efficiency[J]. *Journal of Management*, 2018, 15(3): 459-466.