

# 基于聚类遗传算法的应急物流选址研究

郭海峰<sup>1</sup> 宋骊颖<sup>1</sup> 李富强<sup>1</sup>

GUO Haifeng SONG Liying LI Fuqiang

## 摘要

针对重大突发事件的应急物资救援,研究了应急物流中心选址问题。首先考虑运输时间与运输成本,建立了双目标确定性选址模型;其次,考虑数量级变动等因素从而转换模型,并在此基础上引用成本偏好权重构建了单目标成本偏好模型;最后,在求解选址模型算法上,将K-means聚类算法与遗传算法结合,提出一种新的改进算法。在MATLAB上编写了算法程序,设计了一个确定环境下的算例,求解该算例并对比改进前和改进后的算法性能。结果表明,聚类遗传算法具备良好的可行性和有效性,能较好地求解应急物流中心选址问题。

## 关键词

应急物流选址;遗传算法;K-means;物资配送;改进算法

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.01.020

## 0 引言

一直以来,自然灾害和大规模公共卫生安全事件等突发事件威胁着人类的生命与财产安全以及生态环境安全。根据应急管理部发布的2022年全国自然灾害基本情况,我国全年各种自然灾害共造成1.12亿人次受灾,倒塌房屋4.7万间,不同程度损坏79.6万间,农作物受灾面积12071.6千公顷,直接经济损失2386.5亿元。因此,针对突发事件应急管理系统的研究工作具有十分重要的意义。但由于很多突发事件难以提前预测,对其造成的损害也无法准确估计,为了将救援物资尽快运输到受灾地点,需事先建立应急物流中心并存放应急物资,合理规划应急物流中心可以大幅度提高应急物资的调配效果和救援效率。

目前,国内外学者已经对应急物流选址模型方面和求解算法方面做了大量研究。曹琦<sup>[1]</sup>论述了5种类型应急设施选址模型的研究现状。赖志柱等人<sup>[2]</sup>同时考虑应急救援成本和应急救援时间两个目标,建立了多目标应急物流中心选址的确定型模型和鲁棒优化模型。姜冬青<sup>[3]</sup>从设施选址的战略性和服务水平角度出发,考虑到突发事件下需求的不确定性,建立了鲁棒优化选址模型。王付宇等人<sup>[4]</sup>构建最小化经济成本和最大化满意度的应急物资中心选址模型。高鑫宇等人建立以救援效率最大化和总成本最小化为目标的多阶段决策模型。在求解应急物流选址模型的方法上,各种算法层出不穷。Geng Jiabin等人<sup>[5]</sup>采用模拟退火算法对应急物资选址一分配模型进行求解。Bijan Nahavandi等人<sup>[6]</sup>针对NP难

的ELRP问题,提出了一种基于遗传算法(GA)和模拟退火算法(SA)的平衡探索-利用元启发式算法GASA。张爱琳等人<sup>[7]</sup>采用免疫优化算法完成求解应急物资储备库选址模型。杜浩国等人<sup>[8]</sup>采用智能蚁群优化算法求解应急避难场所选址模型。

通过上述研究,在构建应急物流中心选址模型方面,救援时间和成本是最主要的两个因素。智群算法在解决选址这类问题上应用较多,但将聚类算法和遗传算法结合解决应急物流中心选址问题的文章尚未见报。综上所述,本文构建较为简单的时间成本双目标确定性选址模型,在此基础上引入偏好权重系数<sup>[9]</sup>转化为单目标偏好模型。本文尝试使用K-means聚类算法改进遗传算法,改善算法性能,将其应用于算例中求解应急物流中心选址问题。

## 1 数学模型

### 1.1 问题描述

本文考虑将应急运输时间和运输成本两个目标函数线性组合为成本偏好模型,解决应急物流中心的选址建设问题。这里的应急物流系统是应急物流中心点和应急物流需求点构成的二级结构系统。为了更好地构建模型,做出如下假设。

(1) 每个应急物流中心候选点的建设成本、单位应急物资储存成本是已知的。

(2) 应急物资为某一固定大小重量的物资,便于应急物流中心储存和运输车辆装载。

(3) 当应急物资需求点发生需求时,应急物流中心能立即响应。

(4) 应急物资运输方式仅为公路运输。

1. 沈阳理工大学自动化与电气工程学院 辽宁沈阳 110000

(5) 各个应急物流中心拥有足够数量的运输车辆和足够的车辆运载容量。

(6) 运输时间限制为  $T$ ，当运输车辆的运输时间超过  $T$  时，产生延时费用。

(7) 中心点供应总物资量超出库存量时需额外收集，并且超出部分会产生收集费用。

### 1.2 符合说明

#### (1) 集合

$I$ : 应急物流中心候选点  $i$  的集合。

$J$ : 应急物资需求点  $j$  的集合。

#### (2) 变量

$t_u$ : 中心点  $i$  搜集物资的单位应急物资周转时间;  $v_{ij}$ : 从中心点  $i$  到需求点  $j$  的运输车辆速度;  $f_i$ : 第  $i$  个应急物流中心候选点的建设成本;  $c_{ij}$ : 中心点  $i$  和需求点  $j$  之间的应急物资单位运输成本;  $c_s$ : 应急物资单位储存成本;  $s_i$ : 应急物流中心候选点  $i$  的库存量;  $d_{ij}$ : 中心点  $i$  和需求点  $j$  之间的距离;  $D_j$ : 需求点  $j$  的物资需求量;  $T$ : 对运输车辆从中心点  $i$  到需求点  $j$  的运输时间限制;  $w_1$ : 中心点收集超量应急物资的单位应急物资成本费用;  $w_2$ : 当运输时间超过限制时间  $T$  的单位应急物资单位延时运输费用;  $M$ : 中心点的应急物资最大容量限制。

#### (3) 决策变量

$y_i \in \{0,1\}$ : 表示应急物流中心候选点  $i$  是否被选择为中心点。  $x_{ij} \in \{0,1\}$ : 表示应急物流中心候选点  $i$  是否向需求点  $j$  运输物资。

### 1.3 确定性选址模型构建

#### (1) 双目标确定性模型

考虑到应急物流的救援时间和运输成本，以及应急物流中心的库存量，式 (1) 是运输时间目标，包括了应急物资在中心点和需求点之间的总运输时间和对超出物流中心库存物资的收集时间。式 (2) 是运输成本目标，包括了应急物资中心的建设成本、物资储存成本、应急物资的总运输成本以及对超出物流中心库存物资的收集成本。

$$\min Time = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \frac{d_{ij}}{v_{ij}} x_{ij} + t_u \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (D_j x_{ij} - s_i) \quad (1)$$

$$\min Cost = \sum_{i=1}^I f_i y_i + \sum_{i=1}^I c_s s_i y_i + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij} D_j c_{ij} d_{ij} + w_1 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (D_j x_{ij} - s_i) \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j=1}^J (D_j x_{ij} - s_i) = \max \left\{ \sum_{j=1}^J (D_j x_{ij} - s_i), 0 \right\}, i \in I \quad (3)$$

$$0 \leq s_i \leq M \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ij} = 1, j \in J \quad (5)$$

$$x_{ij} \leq y_i, i \in I, j \in J \quad (6)$$

$$y_i, x_{ij} \in \{0,1\}, i \in I, j \in J \quad (7)$$

约束 (3) 表示若每个物流中心为满足需求点所提供的总应急物资超过了库存量，则对超出库存部分进行收集，若没有超出库存量则不需要收集。约束 (4) 表示应急物流中心库存量非负，且不能超过对应急物流中心的最大容量限制。约束 (5) 表示每个需求点只接受一个中心点供应的物资。约束 (6) 表示只有被选中的候选点才能给需求点供应物资。

#### (2) 成本偏好模型构建

为了构建偏好模型，首先需将式 (1) 时间模型转化为式 (8) 时间成本模型将模型转化可以消除两个目标之间计量单位和目标值的数量级差异。转化后的时间成本函数中的总成本包括应急物流中心建设费用、应急物资储存费用、应急物资运输时间超过限制时间的惩罚成本。超时惩罚成本包括未及时送达物资惩罚成本和搜集时间惩罚成本两部分。

$$\min Time = \sum_{i=1}^I f_i y_i + \sum_{i=1}^I c_s s_i y_i + w_2 \left\{ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left( \frac{d_{ij}}{v_{ij}} - T \right) D_j x_{ij} + t_u \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (D_j x_{ij} - s_i) (D_j x_{ij} - s_i) \right\} \quad (8)$$

$$\text{式中: } \frac{d_{ij}}{v_{ij}} - T = \max \left\{ \frac{d_{ij}}{v_{ij}} - T, 0 \right\},$$

$$\sum_{j=1}^J (D_j x_{ij} - s_i) = \max \left\{ \sum_{j=1}^J (D_j x_{ij} - s_i), 0 \right\}, i \in I.$$

考虑赋予两个目标的重要程度，设  $\lambda$  为决策者根据实际情况赋予成本目标的重要程度值，成为成本偏好权重，满足  $0 \leq \lambda \leq 1$ ，则偏好模型为：

$$\min \lambda \left[ \sum_{i=1}^I f_i y_i + \sum_{i=1}^I c_s s_i y_i + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J x_{ij} D_j c_{ij} d_{ij} + w_1 \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (D_j x_{ij} - s_i) \right] + (1-\lambda) \left[ \sum_{i=1}^I f_i y_i + \sum_{i=1}^I c_s s_i y_i + w_2 \left[ \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \left( \frac{d_{ij}}{v_{ij}} - T \right) D_j x_{ij} + t_u \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J (D_j x_{ij} - s_i) (D_j x_{ij} - s_i) \right] \right] \quad (9)$$

$$\text{s.t.} \frac{d_{ij}}{v_{ij}} - T = \max \left\{ \frac{d_{ij}}{v_{ij}} - T, 0 \right\} \quad (10)$$

式中：约束 (10) 表示产生惩罚成本的运输时间是超过限制时间  $T$  的部分，若未超过  $T$  则不产生惩罚成本。

## 2 模型求解

### 2.1 改进算法思路

遗传算法虽全局搜索能力强，但易陷入早熟收敛。K-means 聚类算法简单、聚类效果较优、可解释度比较强，但  $K$  值的选取不好把握。因此，改进后的算法需要克服早熟收敛和选取  $k$  值这两个缺点。本文用 K-means 聚类算法改进遗传算法的种群初始化过程，改进的原理为：首先改进算法前，用遗传算法求解模型，得出中心选址个数，假设为  $x$ ；在初始化种群前，先使用 K-means 聚类算法对需求点分类，根据遗传算法得出的选址个数设置  $k$  值，比如将 K-means 聚类算法中的簇设为  $x-1$ （或  $x-2$ ）。聚类算法最终会将需求点分为  $x-1$ （或  $x-2$ ）类，并得到  $x-1$ （或  $x-2$ ）个质心。然后，进行聚类质心与遗传基因的转换，即先计算每个候选点与每个质心间的欧式距离。最后将每个质心最近的候选点设为中心点，将每个需求点所属的质心改为中心点。

### 2.2 聚类遗传算法步骤

#### (1) 编码处理

假设应急物流中心候选点数目为 10，需求点数目是 40，那么一条染色体可以用 40 个数字（每个数字为 0~10）表示一个选址方案，其中每个数字被称为“基因”。

#### (2) 种群初始化

①聚类算法分类：若根据遗传算法求解出的中心点个数 7，则将 K-means 聚类算法中的参数  $k$  设为 6，即把 40 个需求点分为 6 簇，得出 6 个质心。

②质心转换基因：计算 6 个质心与 10 个中心候选点的欧氏距离，将每个需求点所属的质心换为距离该质心最近的候选点。假设种群数目为 100，那么需要初始化 100 个个体（染色体），重复步骤①~② 100 次即完成对父代种群的初始化。

(3) 适应度函数：本文中  $Fitness=1/f$ ， $f$  是染色体对应的选址方案总成本，即上节的目标函数式（9）。可以看出，适应度值越大，表明染色体越优，即染色体所对应的选址方案总成本越小。

#### (4) 基本操作

①选择操作：将个体的适应度值从小到大排列，按照轮盘赌的方法从上一代群体中选择出一些优良的个体遗传到下一代种群中。

②交叉操作：本文采用单点交叉，将群体中的所有个体搭配成对，对每一对个体以交叉概率  $P_{cc}$  交换它们之间的某个基因。

③变异操作：对种群中的每一个个体，以变异概率  $P_{mm}$  改变某一个或多个基因座上的基因值为其他的等位基因。

## 3 算例分析

### 3.1 数据描述

下面通过数值实验模拟一个突发事件，其应急物流系统有 10 个中心候选点（编号为 1~10）、40 个需求点（编号为 1~40），这 50 个节点的坐标已知。中心点物资库存量为 5000 件；中心点建筑费用为 2000 万元；物资运输费用为 5 元/(km·件)；物资存储费用为 100 元/件； $w_1$ : 4000 元/件； $w_2$ : 50000 元/(h·件)；运输车辆运输速度：50 km/h； $T$ : 3h； $t_u$ : 0.1 h/件；物资需求量  $D_j$  为：

[750, 300, 890, 450, 570, 950, 1350, 670, 470, 550, 760, 800, 350, 950, 670, 500, 550, 530, 750, 800, 450, 380, 490, 560, 430, 850, 870, 390, 800, 550, 450, 300, 650, 790, 950, 600, 470, 550, 1060, 800]

### 3.2 遗传算法求解

取  $\lambda=0.5$ ；设迭代次数为 4000 次；种群规模为 100 个；选择方式为轮盘赌方法；交叉概率为  $P_{cc}=0.8$ ；变异概率为  $P_{mm}=0.05$ ；每一次进化将种群中 5% 的适应度最低的个体抛弃。求解结果如图 1 和图 2 所示，最小目标函数值约为  $1.45 \times 10^8$ ，最大救援时间 3 265.56 s。

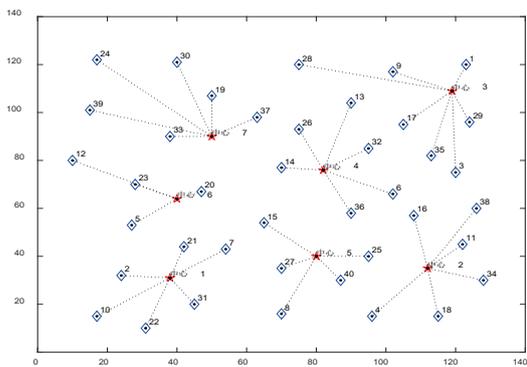


图 1 遗传算法选址方案

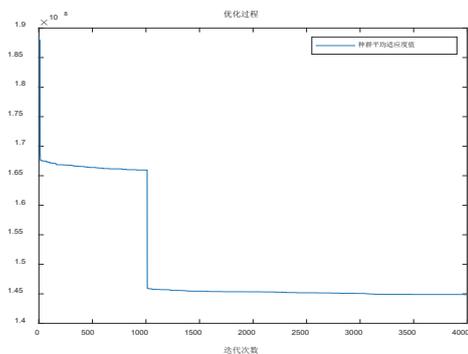


图 2 遗传算法优化过程曲线

### 3.3 聚类遗传算法求解

根据 3.2 结果可知，遗传算法共选择了 7 个中心点，因此， $k$  可设为 6。取  $\lambda=0.5$ ， $k=6$ ；其他参数与遗传算法参数相同。

求解结果如图3和图4所示,最小目标函数值约为 $1.24 \times 10^8$ ;最大救援时间为3207.96 s。

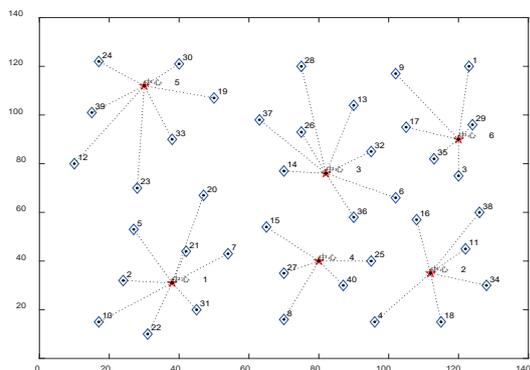


图3 ( $k=6$ ) 聚类遗传算法选址分配

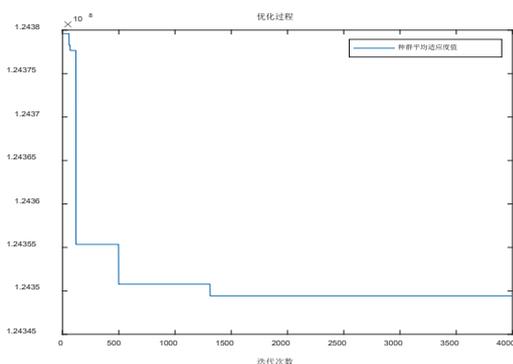


图4 聚类遗传算法优化过程曲线

### 3.4 结果与分析

将3.2与3.3的实验结果进行对比,可得出以下结论。

(1) 遗传算法求解选址模型,最终选择了7个中心点,库存利用率最高为96%,最低为53.2%,两者相差了42.8%,库存利用率均值约为75.4%。而聚类遗传算法求解选址模型,最终选择了6个中心点,库存利用率最高为97.2%,最低为68.8%,两者相差了28.4%,库存利用率均值约为86.7%。因此,用聚类遗传算法得到的选址方案,对大部分库存的利用率更高,也更为合理。

(2) 根据图1遗传算法选址分配存在“舍近求远”的现象,需求点28距离中心点7(候选点9)更近,却选择了中心点3(候选点3),明显不合理,而图3聚类遗传算法选址分配图中无明显不合理的现象。因此,用聚类遗传算法得到的选址方案就救援时间这一因素而言更为合理。

(3) 根据图2、图4两者的优化曲线可知,遗传算法收敛较快,在迭代约1000次,便找到了最优解,优化过程曲线较为顺利。聚类遗传算法收敛速度比遗传算法慢一些,在迭代约1300次找到最优解,但优化过程曲线较为波折,与遗传算法相比,更不容易陷入局部最优解。

(4) 根据最小目标函数值可知,由聚类遗传算法求出

的选址方案成本更低,救援速度更快,较遗传算法求出的选址方案成本低约14.5%。另外,在实验过程中发现,虽然给出了具体的 $k$ 值,但由于改进遗传算法变异环节,染色体编码会自动调整基因数,因此 $k$ 值只是一个参考值,最优解会判断 $k$ 值是否合理从而进行自适应调整。

综上所述,用改进后的聚类遗传算法求解选址问题具有效益更高、救援时间更快、成本更低等优点。

### 参考文献:

- [1] 曹琦,陈闻轩. 应急设施选址问题研究综述[J]. 计算机工程,2019,45(12):26-37.
- [2] 赖志柱,王铮,戈冬梅,等. 多目标应急物流中心选址的鲁棒优化模型[J]. 运筹与管理,2020,29(5):74-83.
- [3] 姜冬青. 基于鲁棒优化的应急物资中心选址与应急调度策略的研究[D]. 北京:北京化工大学,2015.
- [4] 王付宇,王欣蕊. 突发自然灾害下的两阶段多目标应急物资中心选址问题研究[EB/OL].(2023-03-17)[2023-04-24]. <https://doi.org/10.13637/j.issn.1009-6094.2023.2782>.
- [5] GENG J X,HOU H P,GENG S Q.Optimization of warehouse location and supplies allocation for emergency rescue under joint government-enterprise cooperation considering disaster victims' distress perception[J]. Sustainability,2021,13(19):31-35.
- [6] NAHAVANDI N,HOMAYOUNFAR M,DANESHVAR A, et al. Hierarchical structure modelling in uncertain emergency location-routing problem using combined genetic algorithm and simulated annealing[J]. International journal of computer applications in technology,2022,68(2):50-55.
- [7] 张爱琳,刘晓佳,何利军. 基于免疫优化算法的应急物资储备库选址[J]. 集美大学学报(自然科学版),2021,26(3):234-239.
- [8] 杜浩国,林旭川,张方浩,等. 基于蚁群优化算法的应急避难场所选址模型研究[J]. 自然灾害学报,2021,30(2):89-101.
- [9] 刘卓. 基于鲁棒优化的应急物流中心选址模型研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2020.

### 【作者简介】

郭海峰(1970—),男,教授,博士,硕士生导师,研究方向:系统工程与供应链管理、鲁棒控制理论与应用。

宋骊颖(1998—),女,硕士,研究方向:系统工程与应急物流规划、智能控制应用等。

李富强(1998—),男,硕士,研究方向:物流管理与物流网络优化、逆向物流等。

(收稿日期:2023-09-07)