

考虑伤情随机恶化的应急物资调度问题

李 艳^{1,2}, 叶春明¹, 曹 磊¹

(1. 上海理工大学管理学院, 上海 200093;

2. 安徽工业大学管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032)

摘要: 针对大规模灾难事件发生后伤员伤情严重、应急物流网络不确定、救援时效性强等特点, 考虑伤情随机恶化和运输时间不确定性情景下研究应急物资的调度问题. 基于马尔可夫过程刻画了伤员伤情演变规律, 引入转移概率计算出各灾区伤员不同伤情状态下的死亡率, 构建了以死亡率之和最小为目标的应急物资调度模糊机会约束规划模型, 并设计了一种带有混沌初始化和变邻域局部搜索的改进萤火虫算法. 通过数值算例验证了所提模型和算法的可行性和有效性.

关键词: 应急物资调度; 死亡概率函数; 模糊机会约束规划; 改进萤火虫算法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1000-5781(2020)06-0824-14

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2020.06.010

Scheduling problem for emergency materials considering random deterioration of injury

Li Yan^{1,2}, Ye Chunming¹, Cao Lei¹

(1. Business School, University of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'an'shan 243032, China)

Abstract: Aiming at the characteristics of the severity of the injuries, the uncertainty of the emergency logistics network and the demand of timely rescue after a large-scale disaster, the paper studies the emergency material scheduling problem by considering the random deterioration of the injury and the uncertain transport time. The paper describes the evolution of the injuries based on the Markov process and introduces the transfer probability to calculate the mortality rate under different injury conditions. A fuzzy opportunity constraint planning model of emergency material scheduling is established to minimize the sum of death probability. An improved glowworm swarm optimization algorithm with chaos initialization and variable neighborhood local search is designed to solve the model. Numerical experiment verifies the effectiveness of the model and the improved algorithm proposed in the paper.

Key words: emergency material dispatching; death probability function; fuzzy opportunity constrained programming; improved glowworm swarm optimization algorithm

1 引 言

近十多年来, 我国突发事件和自然灾害等大规模事件频繁发生. 例如 2003 年爆发的 SARS 疫情, 2008 年发生的汶川大地震, 2013 年发生的雅安地震与 2020 年突发的新冠肺炎疫情, 严重影响了人民群众的生命财

收稿日期: 2019-09-23; 修订日期: 2020-10-05.

基金项目: 教育部人文社会科学研究资助项目(19YJCZH091); 上海市科委软科学资助项目(20692104300); 国家自然科学基金资助项目(71872002); 安徽省高校人文社会科学研究资助项目(SK2017A0077).

产安全. 据相关数据统计, 截止 2020-03-02, 我国新型冠状病毒肺炎感染者累计达到 81 566 人, 造成 3 267 人死亡. 突发灾害发生后, 对应急物资的高效和有序调度是减少人员伤亡和维持社会安定的基础. 而应急物资供应又与各灾区伤员伤情密切相关, 且呈现出高度不确定性. 因此, 在不确定条件下基于灾区伤员的受伤程度和伤情演变特性, 制定应急物资调度方案, 对于提高应急物资救援价值和降低死亡率具有至关重要的作用.

应急物资调度是应急物流系统优化中的热点问题. 多年来国内外很多学者侧重于应急物资调度方案的优化目标函数设计, 并取得了一系列研究成果. 早期的研究主要以成本最小化为目标^[1]. 不同于一般商业物流, 灾后应急物流具有强时效性和弱经济性等特点, 而且初期物资供应量往往不能完全满足需求, 调度过程中应更加重视物资的响应时间和分配数量. 基于此, 很多文献以运输时间和应急物资分配量作为优化目标策划调度方案. 郭子雪等^[2]分析了应急物资调度具有不确定性特征, 并以调度时间最小化为目标, 建立应急物资调度模糊优化模型. Özdamar 等^[3]针对震后物资分配和人员输送车辆路径协同问题, 构建以总的运输时间最短为目标的数学模型. Afshar 等^[4]以受害者未满足需求量最小为优化目标函数, 建立一个救济物资混合整数规划调度模型. Chang 等^[5,6]以需求未满足量和调度时间最小为优化目标, 构建了应急物流调度模型. Zhou 等^[7]针对多时段动态应急资源调度问题, 建立了以物资未满足需求量和选择受损道路风险最小化为目标的调度模型. 这些文献在提高调度方案效率方面做出了一定的贡献, 但是灾后初期物资紧缺, 灾民在等待救援过程中会出现焦虑、绝望和恐慌等情绪, 同时物资分配不公易引起灾民公愤. 为了缓解灾民的这些负面情绪, 提高其对救援的满意度, 在应急物资调度时应考虑灾民的心理行为. 王旭平等^[8]认为公众对突发事件的心理风险感知是应急物资调度时重点考虑的因素, 并以公众心理风险感知程度和物资未满足度最小化为优化目标, 构建应急物资调度模型. 朱建明等^[9]借鉴行为运筹相关理论刻画灾民心理感知函数, 并以此为优化目标建立应急物资多阶段调度模型. Sheu 等^[10]以幸存者的心理成本最小化为优化目标, 构建了应急供应网络模型. 宋晓宇等^[11]以应急点满意度最大化和调度总费用最小化为优化目标, 建立了应急物资调度模型. 文献[12-15]基于灾民不公平厌恶心理视角, 以体现方案公平性的指标作为优化目标研究了应急物资调度策略.

上述文献从不同角度对应急物资调度问题做了有意义的研究, 为后续工作的开展奠定了基础, 但是这些优化目标不足以体现救援物资的真正价值. 灾后及时调配应急物资的最终目的是救治伤员, 最大程度减少人员伤亡. 基于此, 部分学者以伤员死亡人数或死亡概率最小化为优化目标, 设计调度方案. Fiedrich 等^[16]以搜救期间伤员死亡总数最小为目标函数, 研究了应急物资动态调度模型. 俞武扬^[17]以生存概率最大为优化目标构造了应急物资运输模型. 陈钢铁等^[18]以救援期内灾民死亡期望人数最小化为目标, 对地震后应急资源调度优化问题进行研究. 然而, 这些文献中多数基于各灾区伤员总数对其进行物资调配, 很少考虑伤员伤情演变的影响. 此外, 灾后物资运输时间通常是不确定的, 对于时效性要求高的应急物资调度有一定的影响. 因此, 本文在综合考虑车辆运输时间不确定和伤员伤情恶化情景下, 以各灾区死亡概率之和最小为优化目标, 研究应急物资的调度问题. 本文拟解决的几个关键问题: 1) 引入马尔科夫链刻画伤员伤情演变规律, 并将相关数量特征集成到目标函数中; 2) 采用与实际情形贴合度更高的不确定方法描述灾区路网间的通行时间; 3) 构建符合应急物资调度特点的数学模型并设计快速有效的智能优化算法.

2 应急物资调度模型

2.1 问题描述

本文研究的是大规模灾难事件发生后, 物流配送中心将应急物资调度到各个救助站的运输路径优化问题, 类似于典型的车辆路径规划问题. 该应急物流系统网络如图 1 所示. 具体问题描述为该物流系统有一个物资配送中心和多个救助站, 中心有多种不同型号的车辆配送应急物资, 各救助站的伤员人数、伤情和物资需求量已知, 救助站对应急物资的需求具有时间窗限制. 此情景下, 将应急物资从配送中心, 按照优化的救

援路径调度到救助站, 实现伤员死亡概率之和最小的目标.

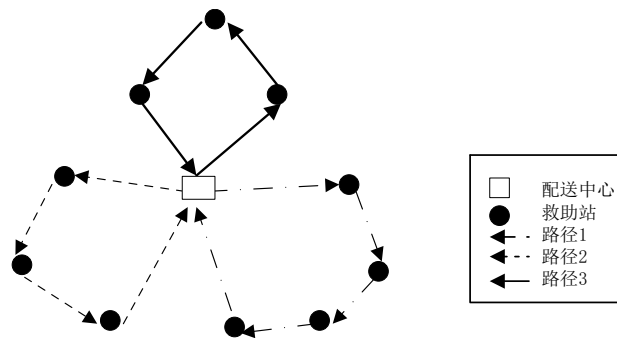


图 1 应急物流网络图

Fig. 1 Emergency logistics network

2.2 伤员的死亡概率函数

计算各救助站的伤员在等待应急物资过程中可能的死亡概率时, 需要分析伤员的初始伤情以及伤情演变规律. 本文根据 Baker^[19]的分类方法, 对伤员初始伤情进行分级, 将立即救治类和及时救治类的伤员看成重伤员; 延迟救治类的伤员看成是中伤员; 而轻微救治类的伤员一般只需要清洗、敷药和简单包扎, 不会发生死亡, 故对这类伤员不考虑. 由于缺乏应急物资, 这两类伤员伤情随着时间推移不断发生恶化, 可能会出现死亡状态, 所以伤员伤情状态分为中伤、重伤和死亡. 在等待应急物资过程中, 伤员的伤情状态以一定的概率朝着逐渐加重的方向演变, 或者继续保持原状态, 其中死亡是伤情演变的终点. 若当前时刻的伤员伤情是重伤, 在下一时刻如果得不到应急物资, 伤员伤情可能转移到死亡状态或继续保持重伤状态; 若当前时刻的伤员伤情是中伤, 在下一时刻如果得不到应急物资, 伤员伤情可能转移到重伤或继续保持中伤状态. 从伤情状态演变过程可知, 状态转移具有随机性, 且伤员在下一时刻的状态只取决于当前状态, 与历史状态无关, 该特征符合马尔科夫过程的无后效性. 因此, 伤员的伤情演变规律具有马尔科夫性. 已有相关学者基于马尔科夫方法描述大规模事件发生后伤员伤情的恶化过程. Wilson 等^[20]在研究大规模突发事件发生后解救, 现场治疗和转送被困伤员等决策问题时将初始时刻的伤员伤情分成立即救治类、紧急救治类、延迟救治类和死亡四个状态, 利用马尔科夫过程描述被困伤员在等待治疗过程中健康转移的随机过程, 并以马尔科夫链模型计算所有伤员的死亡人数. Chu 等^[21]以伤员死亡人数期望最小为目标函数研究震后救灾初期医疗救援队伍优化配置, 在构建伤员的死亡函数时利用了马尔科夫过程刻画不同伤情在等待医疗救援过程中的随机转移情况. 倪燕^[22]将应急医疗资源分配优化过程看成是一个马尔科夫决策过程, 在决策过程中考虑重伤、中伤、轻伤三类伤员, 并刻画了三类伤员在等待治疗过程中的伤势恶化转移过程.

基于伤员伤情演变特性符合马尔科夫过程的无后效性, 在文献[20–22]的研究基础上, 本文将伤情演变过程离散成中伤(L_2), 重伤(L_1)和死亡(D)三种有限状态的马可科夫过程. 当伤员死亡或应急物资送到伤员手中, 该演化过程结束, 如图 2 所示.

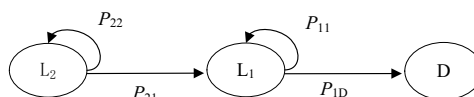


图 2 伤员伤情随机演化过程

Fig. 2 Random evolution process of injuries

由图 2 可知, 处于 L_1 状态的伤员在等待应急物资到达过程中每分钟可能以 P_{1D} 的概率死亡, 以 P_{11} 的概率保持 L_1 状态, 此时 $P_{1D} + P_{11} = 1$. 同理, 对于 L_2 状态的伤员, 每分钟可能以 P_{21} 的概率演化到状态 L_1 , 以 P_{22} 概率处于 L_2 状态, 此时, $P_{22} + P_{21} = 1$. 假设伤员未得到救治前, 伤情的恶化程度与时间呈线性关

系^[21]. 利用伤情状态之间的随机转移概率, 将初始伤情状态为 L_1 的伤员 j 可能死亡概率表示为

$$P_j^D(T_i^{sv}, Z_j) = P_{1D}T_i^{sv}, \quad (1)$$

其中 T_i^{sv} 是车辆类型为 s 的应急车辆 v 将物资送达到救助站 i 的时间, Z_j 表示伤员的初始伤情状态.

如果 $P_{1D}T_i^{sv}$ 大于 1 时, 伤员在等待过程中就会死亡. 因此, 本文用 $\min$ 函数表示重伤伤员在等待物资过程中可能发生死亡的概率, 即

$$P_j^D(T_i^{sv}, Z_j) = \min(1, P_{1D}T_i^{sv}). \quad (2)$$

当 $Z_j = L_2$ 时, 根据伤情演变规律可知, 伤员先由中伤 L_2 演变到重伤 L_1 , 最后演变成 D 状态. 因此, 在计算伤员的死亡概率时先判断伤员由 L_2 完全演变到 L_1 的时刻 T . 由图 2 可知, 状态 L_2 到 L_1 单位时间内的转移概率为 P_{21} . 令 $P_{21}T = 1$, 得出 L_2 演变为 L_1 的时刻 $T = 1/P_{21}$. 当应急物资的到达时刻 $T_i^{sv} \leq T$ 时, 该伤员的伤情未演变到死亡, 死亡概率为 0. 当应急物资的到达时刻 $T_i^{sv} > T$ 时, 该状态的死亡概率 $P_j^D(T_i^{sv}, Z_j) = \min(1, P_{21}P_{1D}(T_i^{sv} - T))$. 因此, 处于该状态下的死亡概率函数为分段函数, 即

$$P_j^D(T_i^{sv}, Z_j) = \begin{cases} 0, & 0 < T_i^{sv} \leq T \\ \min(1, P_{21}P_{1D}(T_i^{sv} - T)), & T_i^{sv} > T. \end{cases} \quad (3)$$

2.3 应急物资调度数学模型

本文以各救助站所有伤员的死亡概率之和最小为目标, 对应急物资调度进行优化研究. 为了构建合理有效的模型, 需要对问题进行如下假设:

- 1) 应急物资配送中心有若干个不同类型的运输车辆, 每种类型车辆数量已知, 最大载重不同;
- 2) 每个救助站只由 1 辆车在规定的时间内为其配送应急物资;
- 3) 每辆车从应急物流配送中心出发, 运送完物资后回到起点;
- 4) 该配送中心物资储备能力大, 每个救助站在应急物资数量上能够得到满足;
- 5) 道路交通运输网络可能出现毁坏、拥挤等多种状况, 造成车辆的运输时间不确定;
- 6) 物资配送到救助站, 伤员就能得到治疗, 伤情好转;
- 7) 伤员对应急物资的需求量与伤情有关, 伤情越严重, 需要的物资数量越多.

假设有 n 个救助站, 其集合表示为 $A = \{i | i = 1, 2, \dots, n\}$, 应急物资配送中心拥有 S 种型号的车辆, 每种型号车辆数量分别为 $V_1, V_2, \dots, V_S$, $s \in \{1, 2, \dots, S\}$, 型号 s 的车辆集合 $B_s = \{v | v = 1, 2, \dots, V_s\}$; 车辆运输线路集合 $E = \{(k, i) | k \neq i \in A\}$; t_{ki} 表示车辆从救助站 k 到救助站 i 的配送时间; 救助站 i 共有 m_i 个伤员, 处于 Z_j 状态的伤员 j 在 T_i^{sv} 等待时间内的可能死亡概率为 $P_j^D(T_i^{sv}, Z_j)$, $j \in \{1, 2, \dots, m_i\}$. Inkyung 等^[23]利用所有伤员的生存概率之和表示预期存活人数, 概率之和越大, 预期存活人数越多. 本文借鉴文献[23]的思想, 采用所有伤员死亡概率之和表示预期死亡人数, 概率之和越小, 预期死亡人数越小. 救助站 i 的所有伤员死亡概率之和表示为

$$f_i^D = \sum_{j=1}^{m_i} P_j^D(T_i^{sv}, Z_j). \quad (4)$$

根据上述分析, 将所有救助站伤员的死亡概率之和表示为

$$F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} P_j^D(T_i^{sv}, Z_j) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \min(1, P_{1D}T_i^{sv}), & Z_j = L_1 \\ 0, & Z_j = L_2, 0 < T_i^{sv} \leq T \\ \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} \min(1, P_{21}P_{1D}(T_i^{sv} - T)), & Z_j = L_2, T_i^{sv} > T, \end{cases} \quad (5)$$

其中 $P_j^D(T_i^{sv}, Z_j)$ 取决于伤员伤情的初始状态, 以及伤员等待应急物资的时间.

令

$$x_{ki}^{sv} = \begin{cases} 1, & \text{型号 } s \text{ 的应急车辆 } v \text{ 从救助站 } k \text{ 到救助站 } i \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

$$y_i^{sv} = \begin{cases} 1, & \text{救助站 } i \text{ 被车型 } s \text{ 的应急车辆 } v \text{ 服务} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases}$$

综上所述, 该问题的数学模型为

$$\text{Min } F, \quad (6)$$

s.t.

$$\sum_{s=1}^S \sum_{v=1}^{V_s} y_i^{sv} = 1, \quad \forall i, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^{sv} q_i \leq Q_s, \quad \forall s, \forall v, \quad (8)$$

$$\sum_{k=0}^n x_{ki}^{sv} = y_i^{sv}, \quad \forall i, i \neq 0, i \neq k, \forall s, \forall v, \quad (9)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ki}^{sv} = y_k^{sv}, \quad \forall k, k \neq 0, i \neq k, \forall s, \forall v, \quad (10)$$

$$x_{ki}^{sv}(T_i^{sv} - T_k^{sv}) \geq 0, \quad \forall v, \forall s, \forall i, \forall k, \quad (11)$$

$$T_i^{sv} = T_k^{sv} + x_{ki}^{sv} t_{ki}, \quad \forall s, \forall v, \forall i, \forall k, \quad (12)$$

$$T_i^{sv} \leq LT_i, \quad \forall s, \forall v, \forall i, \quad (13)$$

其中式(7)表示每个救助站只能由一个救援车辆来进行运送物资; 式(8)表示应急车辆的最大载重量限制, 对于型号为 s 的应急车辆 v , 该路径中所有节点的需求量小于等于车辆的最大载重量; 式(9)和式(10)表示应急车辆服务完某个救助站后必须从该救助站离开; 式(11)表示车辆访问救助站的先后时间约束; 式(12)表示型号为 s 的应急车辆 v 到达救助站 i 的时间表达式; 式(13)是时间窗约束, 表示物资到达救助站 i 的时间应小于等于最晚到达时间 LT_i .

参数 t_{ki} 是不确定性的. 一般情况下, 用随机变量、模糊数等方法描述不确定参数. 由于突发事件的偶发性造成大量数据匮乏, 用随机规划方法处理该参数有一定的困难^[24]. 在实际突发事件中, 物资配送中心与救助站点以及救助站之间的路径通行时间常在某区间内变动. 针对救灾物资运输时间的不确定性特征, 本文采用三角模糊数描述该参数更为恰当.

以三角模糊数 $t_{ki} = (t_{ki}^1, t_{ki}^2, t_{ki}^3)$ 表示两个救助站之间的模糊运输时间, 其中 $t_{ki}^1, t_{ki}^2, t_{ki}^3$ 分别表示运输时间的最好值、最可能值和最差值. t_{ki}^2 表示模糊数 t_{ki} 的隶属度为 1 的点所对应的值. 运输时间的隶属度函数为

$$u_{ki} = \begin{cases} (t_{ki} - t_{ki}^1)/(t_{ki}^2 - t_{ki}^1), & t_{ki}^1 \leq t_{ki} \leq t_{ki}^2 \\ (t_{ki} - t_{ki}^3)/(t_{ki}^2 - t_{ki}^3), & t_{ki}^2 \leq t_{ki} \leq t_{ki}^3 \\ 0, & \text{其它.} \end{cases} \quad (14)$$

2.4 不确定模型转化

由于式(6)和式(13)中存在三角模糊数 t_{ki} , 传统的求解方法很难根据模糊的目标函数和约束条件对问题进行求解. 本文基于 Liu 等^[25,26]的研究成果, 将上述模型转化为模糊机会约束规划模型, 即

$$\text{Min } \bar{F}, \quad (15)$$

s.t.

$$\text{Pos} \left\{ \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} P_j^D(T_k^{\text{sv}} + x_{ki}^{\text{sv}} t_{ki}, Z_j) \leq \bar{F} \right\} \geq \beta, \quad (16)$$

$$\text{Pos} \{ (T_k^{\text{sv}} + x_{ki}^{\text{sv}} t_{ki}) \leq LT_i \} \geq \alpha, \forall s, \forall v, \forall i, \forall k, \quad (17)$$

$$\sum_{s=1}^S \sum_{v=1}^{V_s} y_i^{\text{sv}} = 1, \forall i, \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n y_i^{\text{sv}} q_i \leq Q_s, \forall s, \forall v, \quad (19)$$

$$\sum_{k=0}^n x_{ki}^{\text{sv}} = y_i^{\text{sv}}, \forall i, i \neq 0, i \neq k, \forall s, \forall v, \quad (20)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ki}^{\text{sv}} = y_k^{\text{sv}}, \forall k, k \neq 0, i \neq k, \forall v, \forall s, \quad (21)$$

$$x_{ki}^{\text{sv}} (T_i^{\text{sv}} - T_k^{\text{sv}}) \geq 0, \forall s, \forall v, \forall i, \forall k, \quad (22)$$

其中 $\bar{F}$ 为目标函数 F 在保证置信水平至少为 β 时的最小值; β 和 α 分别为达到给定目标函数和约束条件的置信水平. 约束条件(16)表示目标函数在置信水平为 β 条件下取最小值; 约束条件(17)表示应急物资到达各救助站的时间早于时间窗的置信水平不低于 α .

引理 1 设三角模糊数 $r = (r_1, r_2, r_3)$, 其中 $r_1 < r_2 < r_3$, 对任意给定的置信水平 α ($0 \leq \alpha \leq 1$), 当且仅当 $Z \geq (1 - \alpha)r_1 + \alpha r_2$ 时, 有 $\text{Pos}\{r \leq Z\} \geq \alpha$.

由于 t_{ki} 为三角模糊数, 又由于目标函数 F 是关于 t_{ki} 的线性函数, 因此, 目标函数也为三角模糊数. 根据引理 1, 将模糊机会约束式(16)转化为如下等价表达式

$$(1 - \beta) \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} P_j^D(T_k^{\text{sv}} + x_{ki}^{\text{sv}} t_{ki}^1, Z_j) + \beta \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} P_j^D(T_k^{\text{sv}} + x_{ki}^{\text{sv}} t_{ki}^2, Z_j) \leq \bar{F}. \quad (23)$$

式(17)转化为如下等价表达式

$$(1 - \alpha)(T_k^{\text{sv}} + x_{ki}^{\text{sv}} t_{ki}^1) + \alpha(T_k^{\text{sv}} + x_{ki}^{\text{sv}} t_{ki}^2) \leq LT_i. \quad (24)$$

将约束式(23)和式(24)分别替代模糊机会约束式(16)和式(17), 完成对不确定模型的转化.

3 改进的萤火虫算法设计

3.1 基本萤火虫算法求解应急物资调度问题的局限性分析

萤火虫算法(GSO)是一种新型群智能优化算法, 它是仿照萤火虫觅食、求偶和警戒等社会性行为来求解优化问题, 该算法最早由 Kaipa 等^[27]提出. 因其具有参数少、易实现和全局搜索能力强等优势而在很多优化问题上被研究和应用. 但是标准萤火虫算法主要用来求解实数连续型优化问题, 而应急物资调度问题属于离散的组合优化问题, 且算法在运行后期表现出易陷入局部最优和收敛速度变慢等缺陷. 为了更好利用萤

火虫算法求解本文问题, 本文从编码机制、初始解的混沌操作和局部最优解的变邻域扰动等方面对标准萤火虫算法提出改进.

3.2 编码机制

基于标准萤火虫算法在求解离散型组合优化问题的局限性, 需要设计恰当的编码方式, 将萤火虫个体位置与离散调度解相对应, 从而求出各应急车辆对各救助站配送物资顺序的离散解. 该问题包含应急车辆分配和配送任务排序两个问题. 在算法中, 为了表达两个子问题的解, 本文利用两段式编码对萤火虫个体进行编码, 其中两段长度相等, 分别对应车辆分配方案和配送物资路径方案. 用 $X = \{X(1), X(2), \dots, X(N), X(N + 1), \dots, X(2N)\}$ 表示萤火虫的位置, 其中每个个体位置向量的长度为 $2N$, 向量中各元素均是 $(-b, b)$ 之间的随机数. 假设有 6 个救助站需要应急物资, 则个体位置向量的总长度为 12, 各元素在 $(-1, 1)$ 中任意取值, 并按照一定的顺序存储, 如图 3 所示.

救助站编号	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
个体位置向量	-0.91	0.02	0.68	0.74	-0.52	0.37	0.26	-0.32	0.83	-0.55	0.46	0.59

图 3 萤火虫个体位置向量

Fig. 3 The position vector of a glowworm

由图 3 可知, 萤火虫算法中个体位置均为连续值, 而应急物资调度解为离散值, 需要将连续个体位置向量向离散调度解进行转换.

1) 车辆分配

针对个体位置的前段部分, 本文采用文献[28]中的转换方法. 按照式(25)将个体位置向量元素值转换成服务救助站的车辆序号,

$$u(i) = \text{round} \left(\frac{x(i) + b}{2b} (c(i) - 1) + 1 \right), \quad 1 \leq i \leq n, \quad (25)$$

其中 $c(i)$ 表示救助站 i 可选的车辆数; $u(i) \in [1, c(i)]$ 表示所选车辆在车辆集中的序号, 也就是为救助站 i 分配的车辆.

2) 车辆配送物资路径

对于个体位置向量的后段部分, 采用升序排列 ROV(ranked orde value)规则^[27]. 首先升序排列位置元素, 依次为这些位置元素设置一个 ROV 值, 然后根据 ROV 值即可构造车辆配送物资路径方案. 如图 4 所示.

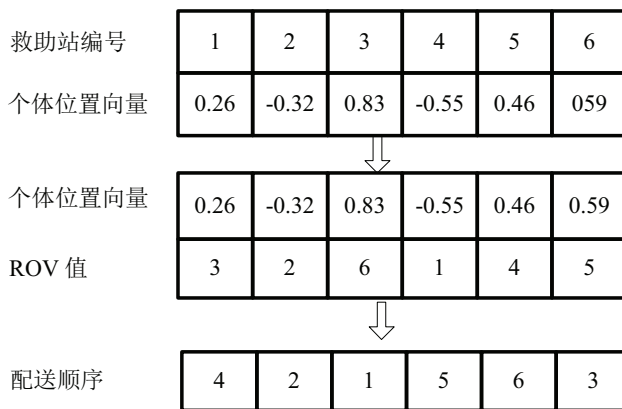


图 4 萤火虫个体位置向量转换为车辆配送物资路径的过程

Fig. 4 The process of transforming glowworm position vector into distribution route

3.3 混沌初始化种群

Syafaruddin^[30]等指出, 初始种群的质量在一定程度上决定了群智能优化算法的全局寻优效果. 标准萤火虫算法的初始解是随机产生的, 种群多样性较差. 为了提高种群的多样性, 增强萤火虫算法的全局寻优性和收敛性, 本文基于混沌的遍历性、随机性等特点, 采用逻辑自映射函数^[31], 混沌初始化萤火虫种群, 保证了初始种群的多样化. 逻辑自映射函数的数学表达式为

$$L_{t+1,w} = 1 - 2L_{t,w}^2, \quad t = 1, 2, \dots; \quad L_{t,w} \in (-1, 1), \quad (26)$$

式中映射变量 $L_{t,w}$ 的定义域为区间 $(-1, 1)$, 但不能取 0 和 0.5, w 是搜索空间的第 w 维.

基于逻辑自映射函数混沌初始化种群步骤如下:

步骤 1 在 $(-1, 1)$ 之间随机生成一个 W 维的随机向量, $\mathbf{L}^0 = (L_1^0, L_2^0, \dots, L_W^0)$, $w = 1, 2, \dots, W$. 根据逻辑自映射函数, 依次产生向量 $\mathbf{L}^m = (L_1^m, L_2^m, \dots, L_W^m)$, $m = 1, 2, \dots, M$.

步骤 2 将产生的混沌变量 L_w^m 映射到决策空间 $(x_{\min,mw}, x_{\max,mw})$ 内, 得到初始种群中第 m 个萤火虫位置向量 $\mathbf{x}_m = (x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mW})^T$, 第 w 个分量 x_{mw} 为

$$x_{mw} = \frac{1}{2}(x_{\min,mw} - x_{\max,mw})L_w^m + \frac{1}{2}(x_{\max,mw} + x_{\min,mw}), \quad (27)$$

其中 $x_{\min,mw}$ 和 $x_{\max,mw}$ 分别表示萤火虫 m 个体第 w 维变量的搜索上下界.

3.4 变邻域搜索扰动机制

萤火虫算法的全局搜索能力很强, 但是在运算后期容易出现早熟, 陷入局部最优问题. 针对该问题, 本文引入变邻域搜索机制对每次迭代结束后的前 K 个最佳调度解进行扰动. 该扰动机制的基本思想是在由不同动作构成的邻域结构, 结合相应的局部搜索算法求得局部最优解^[32].

为了扩大搜索空间, 增加解的多样性, 本文在变邻域搜索算法中设置插入、交换两大类邻域结构.

1) 插入 在车辆配送物资序列中选择除了配送中心点之外的任何一个救助站, 将该救助站插入到除了原位置中的其他所有可能位置. 如图 5 所示, 救助站 3 移动救助站 6 和 4 之间.

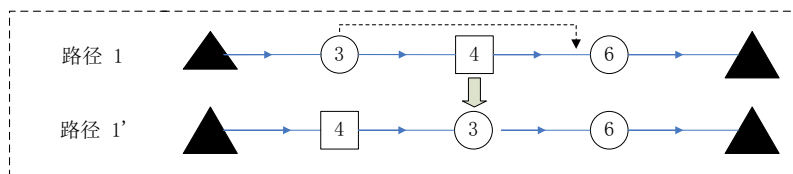


图 5 插入操作

Fig. 5 Insert operation

(2) 交换 从车辆配送物资序列中随机选择两个救助站, 将两点之间的位置交换. 如图 6 所示, 救助站 3 和救助站 6 的位置进行交换.

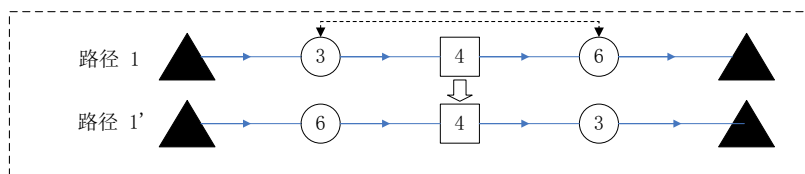


图 6 交换操作

Fig. 6 Switching operation

3.5 改进萤火虫算法流程

综上所述, 求解应急物资调度问题的萤火虫算法流程如下:

步骤1 初始化萤火虫种群规模数量 M , 最大迭代次数 T , 荧光素初值 l_0 , 荧光素挥发因子 ρ , 荧光素增强因子 γ , 邻域半径初值 r_0 , 个体最大感知半径 r_s , 邻域半径更新率 ξ , 变邻域搜索次数 c . 令当前迭代次数 $t = 0$. 按照编码机制对萤火虫个体进行编码, 并进行种群初始化.

步骤2 利用 3.3 节描述的基于逻辑自映射函数的方法混沌初始种群, 产生 M 个萤火虫个体.

步骤3 计算萤火虫个体 m 的适应度值 $f(\mathbf{x}_m(t))$, 更新萤火虫个体 m 的荧光素值 $l_m(t)$, 即

$$l_m(t) = (1 - \rho)l_m(t-1) + \gamma f(\mathbf{x}_m(t)), \quad (28)$$

其中 $\mathbf{x}_m(t)$ 表示第 t 代的萤火虫个体 m 的位置.

步骤4 确定萤火虫个体 m 的邻域集合 $N_m(t)$

$$N_m(t) = \{q : d_{mq}(t) < r_d^m(t); l_m(t) < l_q(t)\}, \quad (29)$$

其中 $d_{mq}(t)$ 是萤火虫个体 m 和 q 之间的距离; $r_d^m(t)$ 是第 t 代萤火虫 m 个体的邻域半径.

步骤5 计算萤火虫个体 m 向邻域集合内萤火虫个体 q 移动的概率 $P_{mq}(t)$, 采用轮盘赌的方式选择移动目标, 概率公式为

$$P_{mq}(t) = \frac{l_q(t) - l_m(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} (l_k(t) - l_m(t))}. \quad (30)$$

步骤6 更新萤火虫个体 m 的位置, 并调整不可行解, 位置更新公式为

$$\mathbf{x}_m(t+1) = \mathbf{x}_m(t) + s \left(\frac{\mathbf{x}_p(t) - \mathbf{x}_m(t)}{\|\mathbf{x}_p(t) - \mathbf{x}_m(t)\|} \right), \quad (31)$$

其中 s 是移动步长.

步骤7 更新萤火虫个体 m 的邻域半径, 邻域半径更新公式为

$$r_d^m(t+1) = \min \{r_s, \max \{0, r_d^m(t) + \xi(n_t - |N_m(t)|)\}\}, \quad (32)$$

其中 n_t 是萤火虫个体邻域集合里的最大个数.

步骤8 更新所有萤火虫个体的位置, 计算新的萤火虫个体的适应度值, 取性能最好的 K 个精英个体进行局部变邻域搜索; 将变邻域搜索得到的优良个体代替原萤火虫个体.

步骤9 判断是否满足终止条件, 如果满足则运行结束, 输出最优应急物资调度方案及目标函数值, 否则返回步骤 3.

4 仿真实验

4.1 算例背景

为了验证本文模型和算法的有效性和优越性, 模拟一个自然灾害发生情境如下: 某市发生 7 级地震, 应急管理部门组织 16 个医院参与临时救助. 为了最大程度地减少伤员的死亡率, 需要在尽量短的时间内将物资运送到 16 个医院.

由于缺乏标准算例, 鉴于文献[33]的研究与本文具有一定相似性. 以文献[33]中的算例为基础, 根据本文所研究的应急物资调度问题特点对车辆、应急物资需求等数据进行修改并补充相关数据, 在本文案例中, 假设配送中心有 300 个单位的应急医疗物资, 有两种车型参与应急医疗物资配送, 它们的最大装载量分别是 50 个单位和 25 个单位, 大型有 5 辆车, 中型有 3 辆车. 16 家医院待救治的受伤人数、应急药品的需要量和到货时间限制期如表 1 所示; 医院与配送中心以及医院与医院之间的运输时间如表 2 所示; 单个重伤与中伤伤员需要应急医疗物资分别是 3 个单位和 2 个单位(该数据来源于参考文献[34]); $P_{1D} = 0.016$, $P_{21} = 0.008$, $\alpha = 0.9$, $\beta = 0.95$.

4.2 算例求解与结果分析

运用 MATLAB 软件编写算法程序, 改进萤火虫算法的基本参数值设置, 萤火虫算法的最大迭代次数为 1 000, 种群的大小为 50, 荧光素初始值 $l_0 = 5$, 萤火虫挥发因子 $\rho = 0.5$, 荧光素增强因子 $\gamma = 0.5$, 邻域半径初始值设为 $r_0 = 8$, 个体最大邻域半径 $r_s = 16$, 邻域半径更新率 $\xi = 0.09$, 变邻域搜索次数为 20. 为了验证改进萤火虫算法的性能, 本文将改进萤火虫算法与标准萤火虫算法以及粒子群算法进行对比分析. 在同等种群规模和迭代次数下, 将三种算法分别运行 20 次, 运行结果如图 7 所示.

表 1 十六家医院的需求以及伤员参数

Table 1 Demand and casualty parameters of sixteen hospitals

需求点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
物资需求量	18	22	23	27	20	9	9	17	20	22	7	9	13	16	29	21
时间限制期 / min	77	62	89	44	68	55	83	57	75	43	58	65	62	69	72	46
重伤人数	2	2	1	3	3	1	1	1	2	3	1	1	1	2	3	3
中伤人数	6	8	10	9	7	3	3	7	7	8	2	3	5	5	10	6

表 2 配送系统中两节点之间的运输时间(min)

Table 2 Transportation time between two nodes in the distribution system

节点对	运输时间 / min	节点对	运输时间 / min	节点对	运输时间 / min	节点对	运输时间 / min
0-1	[26.36,31.63,39.54]	0-2	[22.67,27.20,34]	0-3	[27.5,33,41.25]	0-4	[23.91,28.69,35.87]
0-5	[23.73,28.69,35.86]	0-6	[29.4,35.28,44.1]	0-7	[27.72,33.27,41.58]	0-8	[27.73,33.28,41.59]
0-9	[28.94,34.73,43.41]	0-10	[26.81,32.17,40.22]	0-11	[35.79,42.95,53.69]	0-12	[32.63,39.16,48.95]
0-13	[32.12,38.54,48.18]	0-14	[37.24,44.69,55.86]	0-15	[37.29,44.75,55.94]	0-16	[32.34,38.81,48.51]
1-2	[8,9.6,12]	1-3	[1.2,1.44,1.8]	1-4	[10.6,12.72,15.9]	1-5	[5,6,7.5]
1-6	[2,2.4,3]	1-7	[12.8,15.36,19.2]	1-8	[5.7,6.84,8.55]	1-9	[8.4,10.88,12.6]
1-10	[7.5,9,11.25]	1-11	[9.1,10.92,13.65]	1-12	[6.3,7.56,9.45]	1-13	[5.4,6.48,8.1]
1-14	[10.4,12.48,15.6]	1-15	[10.1,12.12,15.15]	1-16	[21.94,26.33,32.91]	2-3	[8.8,10.56,13.2]
2-4	[4.4,5.28,6.6]	2-5	[7.8,9.36,11.7]	2-6	[8.2,9.84,12.3]	2-7	[7.7,9.24,11.55]
2-8	[8.8,10.56,13.2]	2-9	[9.8,11.76,14.7]	2-10	[8,9.6,12]	2-11	[16.6,19.92,24.9]
2-12	[13.8,16.56,20.7]	2-13	[13,15.6,19.5]	2-14	[21.6,25.92,32.4]	2-15	[18.4,22.08,27.6]
2-16	[16.63,19.95,24.95]	3-4	[12,14.4,18]	3-5	[5.8,6.96,8.7]	3-6	[3,3.6,4.5]
3-7	[13.8,16.56,20.7]	3-8	[6.6,7.92,9.9]	3-9	[9.5,11.4,14.25]	3-10	[8.4,10.08,12.6]
3-11	[9.4,11.28,14.1]	3-12	[5,6,7.5]	3-13	[4.4,5.28,6.6]	3-14	[9,10.8,13.5]
3-15	[9.5,11.4,14.25]	3-16	[24.26,29.11,36.39]	4-5	[7.1,8.52,10.65]	4-6	[4.4,5.28,6.6]
4-7	[7.8,9.36,11.7]	4-8	[5,2.6,24,7.8]	4-9	[6.2,7.44,9.3]	4-10	[4.35,16.6,45]
4-11	[13,15.6,19.5]	4-12	[12.5,15,18.75]	4-13	[11.2,13.44,16.8]	4-14	[20,24,30]
4-15	[14.9,17.88,22.35]	4-16	[17.15,20.58,25.73]	5-6	[5.1,6.12,7.65]	5-7	[14.4,17.28,21.6]
5-8	[7.8,4,10.5]	5-9	[9.8,11.76,14.7]	5-10	[8.8,10.56,13.2]	5-11	[13.8,16.56,20.7]
5-12	[11.2,13.44,16.8]	5-13	[10.4,12.48,15.6]	5-14	[15.3,18.36,22.95]	5-15	[16.1,19.32,24.15]
5-16	[19.32,23.18,28.98]	6-7	[11,13.2,16.5]	6-8	[3.7,4.44,5.55]	6-9	[6.5,7.8,9.75]
6-10	[5.4,6.48,8.1]	6-11	[9.2,11.04,13.8]	6-12	[6,7.2,9]	6-13	[5.3,6.36,7.95]
6-14	[10.8,12.96,16.2]	6-15	[11.2,13.44,16.8]	6-16	[21.21,25.45,31.82]	7-8	[7.5,9,11.25]
7-9	[5.8,6.96,8.7]	7-10	[6,7.2,9]	7-11	[12.6,15.12,18.9]	7-12	[17,20.4,25.5]
7-13	[14.3,17.16,21.45]	7-14	[17.8,21.36,26.7]	7-15	[16,19.2,24]	7-16	[11.83,14.19,17.75]
8-9	[2.8,3.36,4.2]	8-10	[1.7,2.04,2.55]	8-11	[8.5,10.2,12.75]	8-12	[8,9.6,12]
8-13	[7.6,9.12,11.4]	8-14	[11.1,13.32,16.65]	8-15	[9.34,11.21,14.01]	8-16	[17.73,21.28,26.60]
9-10	[3.4,4.08,5.1]	9-11	[6.8,8.16,10.2]	9-12	[11.6,13.92,17.4]	9-13	[9,10.8,13.5]
9-14	[3.6,4.32,5.4]	9-15	[8.77,10.52,13.15]	9-16	[5.66,6.79,8.49]	10-11	[9.4,11.28,14.1]
10-12	[8.2,9.84,12.3]	10-13	[8.8,10.56,13.2]	10-14	[16,19.2,24]	10-15	[9.94,11.93,14.91]
10-16	[16.49,19.78,24.74]	11-12	[12,14.4,18]	11-13	[8.7,10.44,13.05]	11-14	[13.1,15.72,19.65]
11-15	[7.2,8.64,10.8]	11-16	[24.65,29.58,36.98]	12-13	[1.8,2.16,2.7]	12-14	[4.9,5.88,7.35]
12-15	[4.6,5.52,6.9]	12-16	[26.86,32.23,40.29]	13-14	[6.5,7.8,9.75]	13-15	[4.88,5.86,7.32]
13-16	[24.28,8,36]	14-15	[4.8,5.76,7.2]	14-16	[27.58,33.09,41.37]	15-16	[24.56,29.47,36.84]

由图 7 中可知, 三种算法独立运行 20 次后, 改进萤火虫算法获得的平均值、最大值和最小值分别

是 16.63, 16.81 和 16.57; 标准萤火虫算法的平均值、最大值和最小值分别是 17.43, 17.67 和 17.00; 粒子群算法的平均值、最大值和最小值分别是 17.42, 17.73 和 17.24. 由此可知, 本文改进的萤火虫算法获得的优化方案从三项指标上均优于标准萤火虫算法和粒子群算法运行的结果, 说明该算法具有良好的性能.

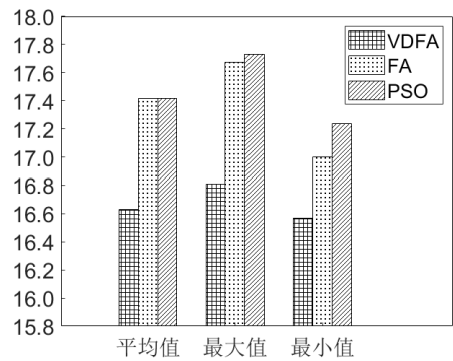


图 7 三种算法运行结果

Fig. 7 The results of three algorithms

为了更直观的看出各个算法的收敛速度, 从 20 次运行的算法收敛曲线图中随机选择一次, 如图 8 所示.

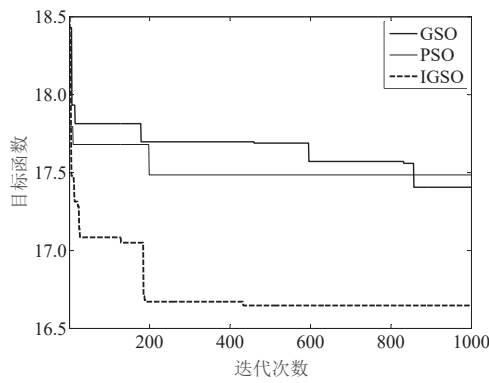


图 8 三种算法寻优过程图

Fig. 8 Three algorithm optimization process diagrams

从算法寻优过程曲线图中可以看出, 用本文改进的萤火虫算法(IGSO)对应急物资调度问题进行求解时, 与萤火虫算法(GSO)和粒子群算法(PSO) 相比, 能够避免陷入局部最优, 且以更快的收敛速度找到更优解, 进而验证了该算法求解问题的快速性和有效性.

根据设计的优化算法, 得到应急物资调度的运输路径优化方案如下图 9 所示.

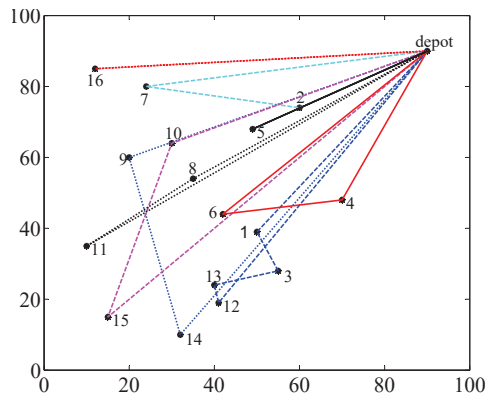


图 9 物资运输路径优化方案示意图

Fig. 9 Schematic diagram of optimization material transportation route

应急中心各车辆的配送路径如表 3 所示, 车辆配送路线中的数字 0 表示应急物流中心, 其他数字表示救助站点序号. 该方案对应的伤员死亡概率之和为 16.57, 相对于标准萤火虫算法和粒子群算法求解的最优解均有所降低, 该指标越小表示救援效果越好. 因此, 按照本文的模型和算法, 总的救援效果相对较好.

表 3 各车辆的配送路径
Table 3 Delivery route for each vehicle

车辆序号	车辆路线
1	0-1-3-13-12-0
2	0-2-7-0
3	0-16-0
4	0-9-14-0
5	0-10-15-0
6	0-4-6-0
7	0-8-11-0
8	0-5-0

5 结束语

本文在综合考虑伤员伤情随机恶化和运输时间的不确定情景下对应急物资调度问题进行了研究. 利用马尔可夫过程描述了伤情恶化规律, 以伤员死亡总概率之和最小为优化目标建立了模糊机会约束规划模型, 引用三角模糊相关定理对模型进行确定化处理, 并设计了一种改进萤火虫算法进行仿真实验, 结果表明 IGSO 算法能快速收敛到精度更高的解, 平均救援效果相对于 GSO 和 PSO 算法分别提升了 2.53% 和 3.89%, 验证了模型的正确性和算法的稳定性与有效性.

本文研究的伤员伤情恶化程度只与伤情状态和物资到达时间有关. 事实上, 灾后应急物资可能存在供不应求的情况, 这也会影响伤情恶化程度. 如何同时考虑物资到达数量和时间对伤员伤情恶化的影响程度可能是未来的研究方向.

参考文献:

- [1] Haghani A, Oh S C. Formulation and solution of a multi-commodity, multi-modal network flow model for disaster relief operations. *Transportation Research, Part A: Policy and Practice*, 1996, 30(3): 231-250.
- [2] 郭子雪, 郭 亮, 张 培, 等. 应急物资调度时间最小化模糊优化模型. *中国安全科学学报*, 2015, 25(10): 174-178.
Guo Z X, Guo L, Zhang P, et al. Time minimization model for emergency material dispatching based on triangle fuzzy information. *China Safety Science Journal*, 2015, 25(10): 174-178. (in Chinese)
- [3] Özdamar L, Demir O. A hierarchical clustering and routing procedure for large scale disaster relief logistics planning. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2012, 48(3): 591-602.
- [4] Afshar A, Haghani A. Modeling integrated supply chain logistics in real-time large-scale disaster relief operations. *Socio-Economic Planning Sciences*, 2012, 46(4): 327-338.
- [5] Chang F S, Wu J S, Lee C N, et al. Greedy-search-based multi-objective genetic algorithm for emergency logistics scheduling. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(6): 2947-2956.
- [6] Chi H, Li J, Shao X, et al. Timeliness evaluation of emergency resource scheduling. *European Journal of Operational Research*, 2016, 258(3): 1022-1032.
- [7] Zhou Y W, Liu J, Zhang Y T, et al. A multi-objective evolutionary algorithm for multi-period dynamic emergency resource scheduling problems. *Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review*, 2017, 99: 77-95.
- [8] 王旭坪, 马 超, 阮俊虎. 考虑公众心理风险感知的应急物资优化调度. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(7): 1735-1742.
Wang X P, Ma C, Ruan J H. Emergency supplies optimal scheduling considering the public psychological risk perception. *Systems Engineering: Theory & Practice*, 2013, 33(7): 1735-1742. (in Chinese)

- [9] 朱建明, 王 瑞. 灾害救援中基于民众心理感知的应急物资多阶段分配问题研究. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(2): 5–10.
Zhu J M, Wang R. Study on multi-stage distribution of emergency materials in disaster rescue based on people's psychological perception. Journal of Safety Science and Technology, 2020, 16(2): 5–10. (in Chinese)
- [10] Sheu J B, Pan C. A method for designing centralized emergency supply network to respond to large-scale natural disasters. Transportation Research, Part B: Methodological, 2014, 67: 284–305.
- [11] 宋晓宇, 王建国, 常春光. 非线性连续消耗应急物资调度问题研究. 系统工程学报, 2017, 32(2): 163–176.
Song X Y, Wang J G, Chang C G. Nonlinear continuous consumption emergency material dispatching problem. Journal of Systems Engineering, 2017, 32(2): 163–176. (in Chinese)
- [12] Ferrer J M, Martín-Campo F J, Ortuño M T, et al. Multi-criteria optimization for last mile distribution of disaster relief aid: Test cases and applications. European Journal of Operational Research, 2018, 269(2): 501–515.
- [13] 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. 中国管理科学, 2018, 26(6): 178–187.
Qu C C, Wang J, Huang J, et al. Research on dynamic distribution optimization of emergency materials after earthquake considering timeliness and fairness. Chinese Journal of Management Science, 2018, 26(6): 178–187. (in Chinese)
- [14] Tzeng G H, Cheng H J, Huang T D. Multi-objective optimal planning for designing relief delivery systems. Transportation Research, Part E: Logistics and Transportation Review, 2007, 43(6): 673–686.
- [15] 郑 斌, 马祖军, 李双琳. 基于双层规划的震后初期应急物流系统优化. 系统工程学报, 2014, 29(1): 113–125.
Zheng B, Ma Z J, Li S L. Integrated optimization of emergency logistics systems for post-earthquake initial stage based on bi-level programming. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(1): 113–125. (in Chinese)
- [16] Fiedrich F, Gehbauer F, Richers U. Optimized resource allocation for emergency response after earthquake disasters. Safety Science, 2000, 35(1): 41–57.
- [17] 俞武扬. 基于生存概率函数的救援物资运输模型. 统计与决策, 2013(15): 73–75.
Yu W Y. Rescue material transportation model based on survival probability function. Statistics and Decision, 2013(15): 73–75. (in Chinese)
- [18] 陈钢铁, 贺政纲, 黎青松. 考虑公众期望的震后应急资源调度优化研究. 中国安全科学学报, 2014, 24(6): 171–176.
Chen G T, He Z G, Li Q S. Study on emergency resources dispatch optimization considering public expectation after earthquake. China Safety Science Journal, 2014, 24(6): 171–176. (in Chinese)
- [19] Baker M S. Creating order from chaos: Part II: Tactical planning for mass casualty and response at definitive care facilities. Military Medicine, 2007, 172(3): 237–243.
- [20] Wilson D T, Hawe G I, Coates G, et al. A multi-objective combinatorial model of casualty processing in major incident response. European Journal of Operational Research, 2013, 230(3): 643–655.
- [21] Chu X, Zhong Q Y, Khokhar S G. Triage scheduling optimization for mass casualty and disaster response. Asia-Pacific Journal of Operational Research, 2015, 32(6): 1–20.
- [22] 倪 燕. 考虑伤员受伤程度的应急医疗资源分配优化决策研究. 南京: 东南大学, 2015.
Ni Y. Research on emergency medical resource allocation optimization decision considering the extent of the injured. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [23] InKyung S, Taesik L. Optimal allocation of emergency medical resources in a mass casualty incident: Patient prioritization by column generation. European Journal of Operational Research, 2016, 252(2): 623–634.
- [24] 王 昱, 唐加福. 医院手术调度问题的两阶段鲁棒优化方法研究. 系统工程学报, 2016, 31(4): 431–440.
Wang Y, Tang J F. A two-stage robust optimization method for solving surgery scheduling problem. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(4): 431–440. (in Chinese)
- [25] Liu B, Iwamura K. Chance constrained programming with fuzzy parameters. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 94(2): 227–237.
- [26] Liu B, Iwamura K. A note on chance constrained programming with fuzzy coefficients. Fuzzy Sets and Systems, 1998, 100(1/3): 229–233.
- [27] Kaipa K N, Ghose D. Glowworm Swarm Optimization. Berlin: Springer International Publishing, 2017.
- [28] Yuan Y, Xu H, Yang J. A hybrid harmony search algorithm for the flexible job shop scheduling problem. Applied Soft Computing, 2013, 13(7): 3259–3272.
- [29] 王 凌. 微粒群优化与调度算法. 北京: 清华大学出版社, 2008.
Wang L. Particle Swarm Optimization and Scheduling Algorithm. Beijing: Tsinghua University Press, 2008. (in Chinese)
- [30] Syafaruddin, Narimatsu H, Miyauchi H. Optimal energy utilization of photovoltaic systems using the non-binary genetic algorithm. Energy Technology and Policy, 2015, 2(1): 10–18.

- [31] 叶春明, 李永林, 刘长平. 新型仿生群智能算法及其生产调度应用. 北京: 科学出版社, 2015.
Ye C M, Li Y L, Liu C P. New Bionic Swarm Intelligence Algorithm and Its Application in Production Scheduling. Beijing: Science Press, 2015. (in Chinese)
- [32] Hansen P, Mladenović N. Variable neighborhood search: Principles and application. *European Journal of Operational Research*, 2001, 130(3): 449–467.
- [33] 朱建明, 韩继业, 刘德刚. 突发事件应急医疗物资调度中的车辆路径问题. *中国管理科学*, 2007, 15(10): 711–715.
Zhu J M, H J Y, Liu D G. Vehicle routing model for medical supplies in large-scale emergencies. *Chinese Journal of Management Science*, 2007, 15(10): 711–715. (in Chinese)
- [34] 张晨晓, 祝 蕊, 刘海月, 等. 考虑伤员心理状况的应急医疗救护问题研究. *中国管理科学*, 2017, 25(10): 187–196.
Zhang C X, Zhu R, Liu H Y, et al. The Emergency victims rescue problem considering psychological condition. *Chinese Journal of Management Science*, 2017, 25(10): 187–196. (in Chinese)

作者简介:

李 艳(1984—), 女, 安徽亳州人, 博士生, 讲师, 研究方向: 应急资源调度, 智能算法, Email: liyan4@ahut.edu.cn;

叶春明(1964—), 男, 安徽宣城人, 博士, 教授, 研究方向: 工业工程, 生产调度, Email: yechm6464@163.com.

曹 磊(1989—), 男, 山东潍坊人, 博士生, 研究方向: 进化算法, 行为运作管理, 生产调度, Email: caolei7752@hotmail.com.

(上接第 823 页)

- [13] Ordóñez A, Corrales J C, Falcázar P H. Auto: Automated composition of convergent services based in HTN planning. *Ingeniería e Investigación*, 2014, 34(1): 66–71.
- [14] Kornienko S, Kornienko O, Priesse J. Application of multi-agent planning to the assignment problem. *Computers in Industry*, 2004, 54(3): 273–290.
- [15] Samadidana S, Mailler R. Solving DCSP Problems in Highly Degraded Communication Environments//2017 IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence. Leipzig, 2017: 23–26.
- [16] 王秦辉, 陈恩红, 王煦法. 分布式约束满足问题研究及其进展. *软件学报*, 2006, 17(10): 2029–2039.
Wang Q H, Chen E H, Wang Y F. Research and Development of Distributed Constraint Satisfaction Problem. *Journal of Software*, 2006, 17(10): 2029–2039. (in Chinese)
- [17] Wahbi M, Ezzahir R, Bessière C, et al. Nogood-based asynchronous forward checking algorithms. *Constraints*, 2013, 18(3): 404–433.

作者简介:

王 喆(1980—), 男, 湖北武汉人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 应急管理, 应急决策指挥, 人工智能, HTN规划, Email: wangzhe@whut.edu.cn;

蒋 壮(1995—), 男, 湖北天门人, 硕士生, 研究方向: 公共安全与应急管理, HTN 规划, Email: jiangzhuang1711@163.com;

王世昌(1994—), 男, 河南信阳人, 硕士生, 研究方向: 公共安全与应急管理, HTN 规划, Email: 694014557@qq.com;

刘 丹(1985—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向: 应急决策理论与方法, 复杂系统建模与仿真, Email: liudan8575@whut.edu.cn.