

震后伤员救援车辆两阶段规划模型及算法研究^①

王付宇^{1,2}, 叶春明¹, 王涛², 赵晶晶²

(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, 马鞍山 243032)

摘要: 不确定情景下的应急物资配送和车辆路径优化问题是目前国内研究的一大热点, 其中震后伤员运送车辆调度及路径优化问题随着近几年地震等自然灾害的频繁发生也逐渐引起人们的重视. 本文采用聚合优化算法对灾区进行应急救援区域划分, 建立了以总救援时间最短和相对综合救援权重值最大为目标的救援车辆两阶段数学规划模型, 设计了带三角函数变异的离散型萤火虫优化算法进行求解, 并与常规算法求解结果做了对比分析. 通过算例进行模拟实验表明, 所提出的模型和算法可以有效解决地震情景下的伤员救援车辆调度问题, 且改进算法的全局搜索性能更优.

关键词: 地震救援; 车辆调度; 路径优化; 改进萤火虫算法

中图分类号: F252; U116 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9807(2018)02-0068-12

0 引言

地震灾害由于具有突发性、破坏剧烈且无法有效提前预知等特点, 其往往会造成重大的人员伤亡和财产损失. 如: 2008年5月12日汶川8级地震造成69 225人死亡, 17 939人失踪, 受伤人数多达37.4万余人^[1]. 同时地震伤员存在着时效性强、数量众多等特点, 对应急救援的要求更为迫切. 目前抗震减灾的首要目标仍是减少人员伤亡, 即利用一切可用资源使地震中受伤的人员尽快得到救治. 因此, 如何在有限的时间段内组织高效、有序的应急救援活动, 合理区分伤员伤害程度, 优化调度伤员救援车辆, 提升伤员救援效率, 在伤员救援限制期内最大程度地将伤员运往救援中心, 显得尤为重要^[2,3].

对于灾后应急救援的调度问题, 国内外学者研究了不同灾害下应急救援的调度策略. 针对救援物资调运, Kemball等^[4]首先提出在进行救援

物资调运过程中采用物流管理的方法提高救援物资的运输效率. 汪寿阳等^[5]就单出发点物流运输问题提出了该研究领域应该关注的几个重要发展方向. Najafi等^[6]针对地震发生初期资源短缺的特点, 提出了一种多目标、多模式、多商品、多周期随机模型. Özdamar等^[7]对应急供应物资数量有限情况下的物资运输调度进行了探讨, 目标是使救援中心最大化满足救援需求. 刘长石等^[8]综合考虑应急物流网络中的应急物资模糊需求、时间窗限制等特性, 以应急物资总供应时间最短为目标, 构建了一个震后应急物资多方式供应的多周期模糊LRP优化模型. 石彪等^[9]针对大规模突发事件爆发后应急物资运输车辆不足, 建立了基于车辆紧缺假设的两阶段车辆调度模型. 阮俊虎等^[10]针对大规模灾害中医疗物资运送问题, 提出一种基于聚类的两阶段医疗物资联合运输方法. 针对医疗救护车辆调度, Fisher等^[11]考虑在

① 收稿日期: 2017-04-07; 修订日期: 2017-08-10.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71271138); 教育部人文社会科学青年基金资助项目(14YJC630119); 安徽省高校人文社科研究重大项目(SK2014ZD016); 住建部软科学研究项目(2015-R2-057).

作者简介: 王付宇(1977—), 男, 河南泌阳人, 教授, 硕士生导师. Email: xiaowang96@163.com

实时信息下通过多阶段协调各区域救援车辆的类型和数量. Juan 等^[12]通过构建仿真模型,提出了医疗救护车辆的调度和路径优化策略. Mohaymany 等^[13]研究基于生命损失减轻原则的应急救援车辆调度. Zhang 等^[14]针对震后需求随机的特点,提出了医疗救护车辆的调度和路径优化策略. 何建敏等^[15]提出了以应急开始时间最早为目标数学模型及相应解法. 杨善林等^[16]研究时变条件下带时间窗车辆调度问题,将车辆行驶速度考虑成时变分段函数,并利用模拟退火算法进行求解. 王旭坪等^[17]研究了带有模糊时间窗的车辆调度组合干扰管理模型及其混合遗传算法. 丁秋雷等^[18]运用干扰管理思想,构建字典序的物流配送多目标干扰管理模型并采用改进蚁群算法求解.

目前,对救援车辆路径的研究主要集中在不同模型下的车辆最短路径选择上. 针对车辆路径优化建模, Woensel 等^[19]考虑应用排队论的方法描述潜在的交通拥堵. Takeda 等^[20]建立了一个超立方体排队模型,以减少响应时间. Novoa 等^[21]从动态和重优化观点出发,构建了单车随机需求条件下最短路径问题的近似动态规划模型. 刘杨等^[22]考虑通行可靠性、道路条件限制等干扰因子,建立应急救援车辆路径选择的多目标优化模型. 代颖等^[23]综合考虑应急物资需求的模糊性、动态性和震后受损路网的动态恢复状况,以各物资需求点的应急物资运达时间之和最小为目标建立了一个模糊动态定位-路径问题优化模型. 王海军等^[24]以平均车辆运输时间最小化和系统总成本最小化为目标,建立了基于多车型、双目标的开放式选址-路径问题混合整数规划模型. 对于路径和行程安排策略, Topaloglu 等^[25]研究了带有时间窗的动态车辆路径和行程安排问题,同时考虑了实时客户需求和动态出行时间. 马祖军等^[26]考虑实时/时变路网环境下出救点选择与救援车辆路径的集成优化问题,设计了一种实时时变交通信息的结合策略,并提出了满足先进先出原则的路段行驶时间计算方法. 李妍峰等^[27]讨论了带有实时交通信息的动态网络车辆路径派送

问题,提出在关键点更新路线的调度机制. Wang 等^[28]将运行时间假定为联合概率质量函数的随机变量,讨论了交通网络中的最短路径约束问题.

文献检索可以看到,对灾后救援车辆调度和救援车辆路径选择的研究主要针对的是应急救援物资调度以及灾后不确定信息下的车辆调度问题,关于震后伤员应急救援车辆调度的研究相对较少,研究对象主要集中在物资调度而不是伤员的紧急运送上;救援车辆路径优化虽然考虑到了路网的动态特性,但是研究主要集中在找寻车辆行驶最短路径这个目标上,然而地震情况下应急救援的首要任务是伤员救援,且其救援车辆路径优化不同于普通的物流路径问题,最短的路径不一定就是最优的路径,应该优先考虑如何实现以最短的时间完成最大化的救援. 并且,在早期的救援过程中救援车辆是有限的,合理选择路径尤为重要. 所以,在应急救援管理中要想实现灵活的车辆调度不仅要合理安排车辆救援,同时还要选择最优的车辆路径方案,由此才能确保应急救援工作及时、有效的开展. 根据地震的特殊性,可以将伤员应急救援车辆调度及路径选择优化概括为两个重要特点: 1) 救援车辆调度更加重视救援时间. 应急救援是一个弱经济性过程,成本不再是研究的重点,相对于成本,行驶里程和行驶时间将是作为优化的主要目标; 2) 应急救援交通网络的不稳定性. 地震情境下突发事件破坏性极大,道路破坏严重,救援交通网络不稳定性增加,分区救援以及考虑动态变化条件的救援将是研究的主要目标.

针对地震伤员救援工作的上述特点,本文需要解决以下几个问题: 1) 救援区域划分问题,探讨分区救援和整体救援的优劣,以及如何合理划分救援区域; 2) 各受灾点救援需求预测问题,探讨伤员伤情合理分类方法,确定各灾点伤员需求综合权重; 3) 灾区路网联通问题,探讨直接连通灾点和非直接连通灾点之间的行车时间差异,确定两灾点之间的通行时间; 4) 伤员救援车辆调度模型构建及求解问题,探讨模型的最终目标和约束条件,构建贴合地震伤员救援特点的数学模型,

并设计性能优越的求解算法。

1 震后伤员救援车辆调度数学模型构建

1.1 问题描述

地震发生后,有 m 个救援中心,每个救援中心有 k 个救援车队,各救援车队荷载量一定,各灾点位置和需求根据指挥中心预测确定,救援中心的救援总量满足其所救援各灾点的需求量,要求安排合理的救援路径,使救援车队从各自所属的救援中心出发前往各灾点进行救援,完成救援后又回到救援中心,目标是最大救援时间最短和相对救援综合权重值最大,需同时满足如下几个条件: 1) 各救援中心救援的总人数不超过其最大救援能力; 2) 各救援路径上的救援车队救援的总人数不超过其荷载量; 3) 每个灾点都被救援,且只有一次; 4) 各救援车队从某救援中心出发最终回到该救援中心。

1.2 救援区域划分

采用聚合优化算法对灾区进行应急救援区域划分,将多救援中心问题简化为多个单救援中心问题,各救援中心和其所分配到的灾点就形成几个暂时独立的救援区域,即把整个灾区划分为若干个相对集中的救援小区域。算法的实施步骤如下:

步骤 1 计算所有灾点与各救援中心的欧式距离,形成一个距离集合

$$\{d_{ij} | i=1, 2, \dots, n; j=n+1, n+2, \dots, n+m\}$$

其中 i 对应的是灾点, j 对应的是救援中心。

步骤 2 各灾点的边缘系数值 $f_{ij} = d_{ij_{n+1}}/d_{ij_{n+2}}$, 其中 $d_{ij_{n+1}}$ 是灾点 i 和最近的救援中心的距离值, $d_{ij_{n+2}}$ 是灾点 i 和次近的救援中心的距离值。

步骤 3 设定 f 为边缘值,若 $f_{ij} < f$,则灾点 i 归属于救援中心 j_{n+1} ; 若 $f_{ij} > f$,则灾点 i 是救援中心 j_{n+1} 和 j_{n+2} 的边缘点,归入边缘点集合。

步骤 4 重复上述步骤,完成每一个灾点的划分。

1.3 各灾点救援需求分析

1) 伤员分类及预测

地震灾害具有突发性和延续性等特征,震后

伤亡人数处于“两期”动态变化阶段。历次重大事件的抢救经验表明^[29] 将大部分救援力量放在重伤员身上,往往会得不偿失,既不能挽救重伤员的生命也使轻伤员错失了稳定伤情的时机。本文从伤员接受救治的顺序角度出发将伤员分为以下四类:

一类伤员:立即治疗类,多数是重伤员,例如失血过多、重度休克等,该类伤员需要救援车辆及时将其送往医院接受手术治疗。

二类伤员:延迟治疗类,受伤程度中,暂时不会危及生命,该类伤员对救援需求略低于重伤员,只需在规定时间内送往医院接受治疗即可。

三类伤员:简单治疗类,受伤程度较轻,可采取自救互救等救治方式。

四类伤员:无救援机会类,该类伤员的救援需要使用到大量的救援物资,同时伤员存活下来的概率极低。

在震害初期,为应对救援物资短缺和伤员需求过大的问题,本文采用上述分类方法对伤员进行分类,同时只考虑将第一类和第二类伤员作为救援对象。在建立伤员救援需求模型的过程中,伤员种类对伤员救援顺序的影响较大,所以定义一类伤员的权重 $\beta_1 = 0.5$, 二类伤员的权重 $\beta_2 = 1$ 。

学者研究历次震害统计数据^[30] 得知:死亡人数、一类伤员和二类伤员的比例接近 1:2:5,所以震后一二类伤员人数预测模型如下所示

$$D_{ei} = \sum_{j=1}^4 S_j A_j d_j \times P_j \rho_j \tag{1}$$

$$D_{in} = \gamma_n D_{ei} \tag{2}$$

式中 D_{ei} 表示灾点 i 预估丧生的人数; S_j 表示 j 类建筑的总面积; A_j 表示在某震级条件下 j 类建筑的倒塌率; d_j 表示 j 类建筑完全倒塌面积内的人员死亡率; P_j 表示 j 类建筑的人员在室率; ρ_j 表示 j 类建筑内的人口密度; D_{in} 表示灾点 i 处第 n 类伤员的预测人数; γ_n 表示第 n 类伤员的比例系数。

2) 确定伤员需求综合权重值

在震后应急车辆调度过程中,考虑各灾点预估伤员情况、灾点到所属救援中心的距离这两个因素,同时为了便于安排救援顺序,给各灾点赋予综合救援权重值,使救援初期的车辆调度具有明确的参考依据,避免救援车辆分配不均。

从伤员情况角度出发,各灾点的应急救援权

重值计算公式为

$$D_{i1}\beta_1 + D_{i2}\beta_2 \quad (3)$$

为了便于比较各灾点救援次序,对各灾点的救援权重值作无量纲处理,得出各灾点的伤员因素相对权重值为

$$FW_i = \frac{D_{i1}\beta_1 + D_{i2}\beta_2}{\sum_{i \in I} D_{i1}\beta_1 + D_{i2}\beta_2} \quad (4)$$

地震灾害下,路网处于一种动态变化过程,各道路的震后通行时间已不能依据正常情况下的通行能力来计算,然而各灾点之间以及灾点与救援中心之间的欧式距离是不变的.因此,将各节点之间的欧式距离作为灾点救援需求权重值的影响因素,对任意灾点*i*,在其所属救援区域内,该灾点与救援中心的距离因素在所有灾点中的无量纲权重为

$$FL_i = \frac{L_i}{\sum_{i \in I} L_i} \quad (5)$$

其中*L_i*表示救援车辆从救援中心出发到灾点的欧氏距离,*I*表示所有灾点的集合.

对各灾点因伤员因素和距离因素所产生的救援需求无量纲权重作求和处理,考虑伤员是本次救援的目标对象,行车距离是客观因素,所以赋予伤员因素权重值 $\omega_1 = 0.6$,距离因素权重值 $\omega_2 = 0.4$,各灾点救援需求综合权重为

$$F_i = \omega_1 FW_i + \omega_2 FL_i \quad (6)$$

1.4 路网通行分析

由于地震灾害是一种毫无征兆突然发生的重大自然灾害,道路两旁的建筑物也会在第一时间遭到破坏,继而影响道路上车辆的正常通行.而路网上的车辆运行是否顺畅,决定着救援车辆能否及时到达待救点对伤员进行救援,此时,研究路网通行情况变得十分重要.

对于各灾点之间不能直接连通的情况,从救援的角度出发,经过救援区域划分以后,任意一个救援区域内的灾点可能形成不了一条通路,即生成不了一条回路.因此,考虑加入一个不连通修正系数 π ,来修正任意两个不直接连通的节点之间的行车时间,不直接连通节点之间的行车时间计算公式为

$$\text{行车时间} = \frac{\text{两节点间的欧氏距离}}{v_{\text{修正}}} \times \pi$$

$$v_{\text{修正}} = 0.578 t_e r_e \times v_{\text{平均}}$$

则震后直接连通和非直接连通节点间行车时间预测公式可表示为

$$T_{ij\text{直接}} = \frac{l_{ij}}{v_{ij}} \times \frac{1}{q_e t_e l_e c_e r_e} \quad (7)$$

$$T_{ij\text{非直接}} = \frac{L_{ij}}{v_{\text{修正}}} \times \pi \quad (8)$$

式中各类道路对震后车速的修正为 q_e ,不同时间段地震对路网通行的影响程度修正为 t_e ,建筑物倒塌占路影响车速系数为 r_e ,路段长度对震后道路通行速度的影响系数为 l_e ,岔路口数量对震后道路行车速度影响系数为 c_e , $v_{\text{平均}}$ 是城市平均行车速度, T_{ij} 为救援车辆从节点*i*行驶到节点*j*的预测时间, l_{ij} 是直接连通的节点*i*到节点*j*的实际距离, L_{ij} 是非直接连通的节点*i*到节点*j*的欧式距离, v_{ij} 是正常情况下节点*i*到节点*j*的平均行驶速度.对于非连通节点无法明确两节点间车道类型、距离以及岔路口数量,因此取上述三个因素的综合影响值 0.578 来代替.

1.5 两阶段调度数学模型

针对救援车辆调度的特征,采用两阶段的数学规划模型:第一个阶段随机生成初始救援路径;第二阶段以总救援时间最短和相对综合救援权重值最大为目标,对初始救援路径进行优化.

救援区域划分后,单救援中心的数学模型如下:现有 *N* 个灾点向 1 个救援中心发出救援需求,记救援中心编号为 0,灾点编号为 $i(i \in \{1, 2, \dots, N\})$.救援中心车队编号为 $k(k = 1, 2, \dots, K)$,各车队救援量分别为 Q_1, Q_2, \dots, Q_K ,救援中心的救援总量为 Q ;各灾点的伤员救援需求量记为 q_i ,救援车队 k 到达灾点 i 的时间为 T_{ik} , D_j 表示每个伤员必须在最迟到达时间 D_j 之前送达医院,车辆运送伤员过程中,视伤员伤情考虑,一辆救援车辆在未达到荷载量的前提下,可以前往两个甚至多个灾点救援伤员,最后返回医院.目标是求最大救援时间最小,同时相对综合救援权重最大的救援方案.定义变量如下

$$d_{ij} = \begin{cases} l_{ij} & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 直接连通} \\ L_{ij} & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 非直接连通} \end{cases} \quad (9)$$

$$v_{ij} = \begin{cases} v_{ij}^0 \times q_e t_e l_e c_e r_e & \text{节点直接连通} \\ v_{i\text{平均}} \times 0.578 t_e r_e & \text{节点非直接连通} \end{cases} \quad (10)$$

$$t_{ij} = \frac{d_{ij}}{v_{ij}} \tag{11}$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{救援车队 } k \text{ 从 } i \text{ 和 } j \text{ 救援} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \tag{12}$$

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{受灾点 } i \text{ 由车队 } k \text{ 救援} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \tag{13}$$

建立数学模型如下:

目标函数

$$\min \max f_1 = \sum_i \sum_j \sum_k t_{ij} x_{ijk} \tag{14}$$

$$\max f_2 = \sum \frac{F_i}{T_{ik}} \tag{15}$$

式中 F_i 为灾点 i 的应急救援综合权重值.

约束条件为

$$\sum_k y_{ik} = 1 \tag{16}$$

$$\sum_k y_{ik} \times q_i \leq Q_k \tag{17}$$

$$\sum_i \sum_k y_{ik} q_i \leq Q \tag{18}$$

$$\sum_i \sum_k x_{ijk} = y_{jk} (j = 0, 1, \dots, N) \tag{19}$$

$$\sum_i \sum_k x_{jik} = y_{jk} (j = 0, 1, \dots, N) \tag{20}$$

$$T_{jk} = T_{ik} + t_{ij} \tag{21}$$

$$T_{jk} \leq D_j \tag{22}$$

式(16)表示每个灾点只由一个救援车队进行救援;式(17)表示救援车队的救援量不超过其荷载量;式(18)表示救援中心的救援总量不超过其最大救援能力;式(19)和式(20)表示任意车队的起始点相同;式(21)和式(22)表示伤员送到时间满足最晚时间窗约束.

2 改进萤火虫算法设计

2.1 基本萤火虫算法描述

萤火虫算法是由印度学者 Kaipa 和 Ghose 提出的一种新型仿生群智能优化算法^[31]. 萤火虫算法提出后,以其参数少、易实现、效率高等特点引起了国内外众多学者的关注,并在自动控制^[32]、态势预测^[33]、组合优化^[34]、路径规划^[35]等领域得到了理论研究和实践应用.

本文在萤火虫种群的繁衍过程中,为方便识别各萤火虫的特征,做如下定义:令 $x_j(t)$ 表示第

t 代的萤火虫 j 所在的位置, $l_j(t)$ 表示第 t 代的萤火虫 j 的荧光素的值^[36]. 算法每一次迭代过程如下:

步骤 1 荧光素的更新. 萤火虫算法中,每个萤火虫个体的荧光素值由初始值的剩余值及适应度函数的修正附加值两个部分组成,通过对目标函数值进行处理,使其和适应度函数值的变化保持同步,从而对每一次迭代的荧光素值产生影响,并最终朝荧光素最亮的个体靠近.

荧光素值更新法则为

$$l_i(t) = (1 - \rho) l_i(t - 1) + \gamma J(x_i(t)) \tag{23}$$

其中 $\rho \in (0, 1)$ 为荧光素挥发参数,每经过一次迭代荧光素值就相应减少; γ 为适应度函数修正系数, $J(x)$ 为适应度函数.

步骤 2 萤火虫运动阶段. 在这个过程中,萤火虫 i 以式(24)选择邻域范围内的目标个体 j 并朝其运动,第 t 代第 i 个萤火虫邻域内的萤火虫个数用表 $N_i(t)$ 示,计算如式(25)所示,萤火虫 i 由式(26)进行位置更新,在运动阶段结束时用式(27)进行决策域半径的更新.

路径选择概率公式

$$P_{ij} = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} l_k(t) - l_i(t)} \tag{24}$$

邻域范围内同伴个数计算公式

$$N_i(t) = \{j : \|x_j(t) - x_i(t)\| < R_d^i; l_i(t) < l_j(t)\} \tag{25}$$

位置更新公式

$$x_i(t+1) = x_i(t) + s \times \left(\frac{x_j(t) - x_i(t)}{\|x_j(t) - x_i(t)\|} \right) \tag{26}$$

其中 $\|\cdot\|$ 是计算欧氏距离的符号; $s (> 0)$ 表示移动步长.

决策域半径更新公式

$$r_d^i(t+1) = \min\{r_s, \max\{0, r_d^i(t) + \beta(n_i - |N_i(t)|)\}\} \tag{27}$$

其中 r_s 是给定的标准半径值; β 是一个给定的比例常数; n_i 是限制萤火虫邻居个体数量的修正系数.

2.2 基本萤火虫算法求解伤员救援车辆调度问题的局限性分析

1) 连续型组合优化的局限

基本萤火虫算法主要应用于实数、连续型的组合优化问题领域,在震后伤员救援车辆调度这一类离散型问题求解中无法对离散型的救援路径顺序进行有效的更新。

2) 求解过程过早收敛的局限

标准萤火虫算法通过设置萤火虫初始种群数,使得多个萤火虫同时参与寻找最优解,所以该算法的全局搜索能力很强。但是,有些问题的求解过程中往往会存在多峰值、多极点的状况,随着迭代次数的增加,萤火虫算法在运行后期容易出现过早收敛,陷入局部最优。

因此,本文通过离散化处理、三角函数扰动等对标准萤火虫算法进行改进设计。

2.3 基本萤火虫算法的改进设计

1) 离散化处理

基于常规萤火虫算法在求解车辆调度这一类离散型组合优化问题中的局限性,需要对萤火虫算法的每个个体进行离散化处理,使萤火虫个体的实数编码能够和离散调度序列相对应,使算法可以更好的求解离散类问题。

在萤火虫算法的解空间中,假定某萤火虫个体所处位置用向量 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$ 表示,每个分量均是 $(0, 1)$ 之间的随机数。用每个分量表示一个灾点,基于升序排列的编码方式对分量重新排列,排列后分量所在位置和分量所代表的灾点的被救援顺序相关联,从而明确各灾点在救援路径中的被救顺序。

萤火虫算法离散化处理过程:随机生成一个向量 $x_i = \{0.86, 0.12, 0.65, 0.43, 0.91, 0.05, 0.73, 0.56\}$,对每个分向量按从小到大的顺序重新进行排列,则新向量 $x_i = \{0.05, 0.12, 0.43, 0.56, 0.65, 0.73, 0.86, 0.91\}$ 。分量 0.05 在原始向量中的顺序为 6,分量 0.12 在原始向量中的顺序为 2,分量 0.43 在原始向量中的顺序为 4,分量 0.56 在原始向量中的顺序为 8,分量 0.65 在原始向量中的顺序为 3,分量 0.73 在原始向量中的顺序为 7,分量 0.86 在原始向量中的顺序为 1,分量 0.91 在原始向量中的顺序为 5。因此,编码后的救援顺序为 6→2→4→8→3→7→1→5,即先对原始灾点序列中的第 6 个灾点进行救援,接着是第 2 个灾点、第 4 个灾点、第 8 个灾点、第 3 个灾点、第 7 个灾点、第 1 个灾点,最后是第 5 个

灾点。

通过上述编码方式,赋予带连续型编号的灾点一个随机向量值,通过对向量值的升序排列,继而达到对灾点进行排序的目的,使萤火虫算法可以有效解决离散型问题。

2) 三角函数扰动

针对萤火虫算法存在早熟的问题,引入三角函数对当前解进行扰动,从而解决过早收敛问题。三角函数扰动过程如下

$$x_i = x_i [1 + k \times |\sin\theta|] \quad (28)$$

其中 x_i 是当前萤火虫个体所代表的解; k 是在区间 $(0, 1)$ 之间递减的变量; $\sin\theta$ 为正弦函数的随机值,通过对当前状态进行扰动,扩大算法的搜索范围,避免算法早熟,从而提高搜索的效率和准确度。

2.4 改进萤火虫算法的求解步骤

改进后的萤火虫算法求解伤员救援车辆调度问题的实现步骤为:

1) 初始化参数设定,例如荧光素增强因子 γ ,邻域半径初值 $r_d^i(t)$,个体最大感知半径 r_s ,邻域半径更新率 β ,迭代最大次数 G_{\max} 等;

2) 对车辆调度问题进行随机编码,产生 n 个萤火虫初始解;

3) 计算萤火虫个体适应度值,并更新其荧光素值;

4) 依据萤火虫移动概率公式选择下一步移动的对象;

5) 更新移动后萤火虫个体的位置、邻域半径以及荧光素值;

6) 观察萤火虫的状态更新,当出现连续三次状态不变或变化很小时,即 $|\Delta x| < \mu$ 时,判定算法陷入局部最优,用历史最优状态值取代当前较差的状态值,即 $x_{\text{now}} = x_{\text{max}}$; μ 为三角函数变异参数,一般在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 之间取值;

7) 对当前解进行三角函数变异,跳出局部最优解,算法继续运行直到取得满意解或者达到迭代次数;

8) 判断是否满足终止条件,如果满足则跳出循环,输出目标函数值和救援车辆行驶路径;否则回到步骤 3)。

改进萤火虫算法的求解流程如图 1 所示。

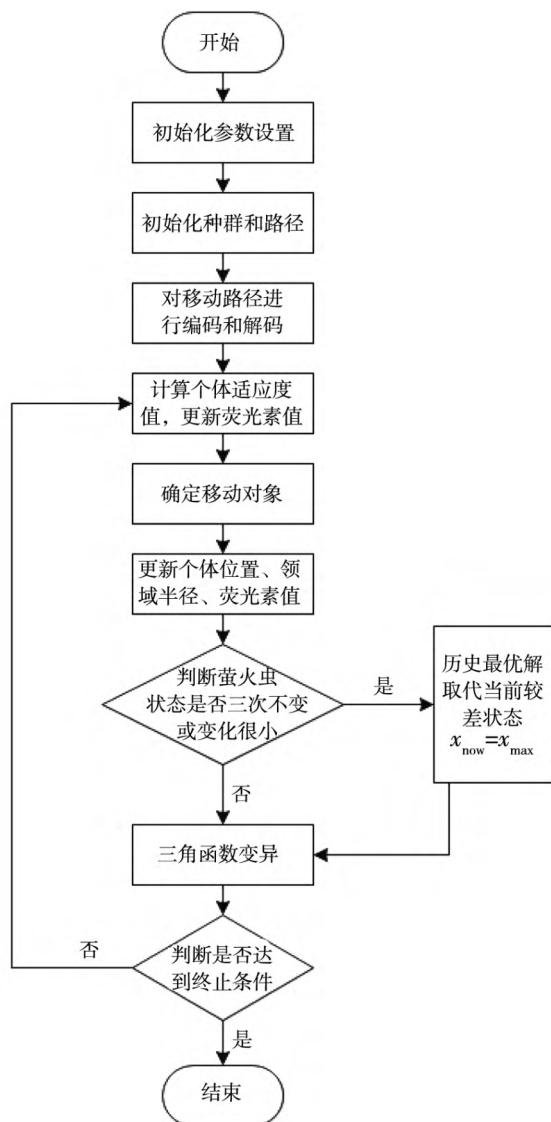


图1 改进萤火虫算法的求解流程图

Fig. 1 The solving flow chart of the improve GSO

3 模型的算例验证

3.1 算例背景

假定某日下午三点, A市发生5级地震. 则沿街建筑物倒塌对道路通行修正系数 $r_e = 0.65$, 地震发生时间对道路行车速度修正系数 $t_e = 1$. 现有三个救援中心, 节点编号分别为12、22、32, 每个救援中心有三个救援车队, 每个救援车队的荷载救援人数为30人, 各救援中心最大救援量均为90人. 各灾点坐标和伤员人数如表1所示.

3.2 求解结果

采用带三角函数变异的萤火虫算法进行求解, 设萤火虫数 $m = 50$, 荧光素挥发参数 $\rho = 0.4$, 光强吸收系数 $\gamma = 0.6$, 最大吸引度 $\beta_0 = 0.08$, 步长因子 $\alpha = 0.2$, 初始荧光素值 $l_0 = 5$; $\omega_{max} = 1$, $\omega_{min} = 0.4$. 算法在迭代次数 $T = 100$ 时, 独立运行10次. 以灾区A1为例, 求得三条路径的救援时间和救援权重值如表2所示.

鉴于灾区A1内各救援车辆同时出发进行救援, 因此最大救援时间取决于救援时间最长的救援线路, 则灾区A1的总救援时间为24.2min. 一次较优运行曲线图如图2所示, 灾区A1所派救援车辆的救援路径如图3所示. 分别对三个救援灾区进行计算, 得出综合救援路径如图4所示.

表1 灾区待救援节点信息表

Table 1 Rescue node information in the disaster areas

节点编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
横坐标 x/km	3	3.48	3.68	3.7	4.26	3.76	3.72	1.9	1.3	1.32	0.36
纵坐标 y/km	4.72	3.92	3.22	2.42	2.02	1.98	1	1	0.16	1	1.46
伤员人数	8	8	7	5	17	7	3	8	4	7	8
最迟时间/min	3	13	5	3	11	7	20	5	12	9	4
节点编号	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
横坐标 x/km	1.3	0.38	1.28	1.92	2.44	2.98	0.4	1.3	1.9	2.44	3.00
纵坐标 y/km	1.02	2	2.02	2	2.02	1.98	2.76	2.58	2.6	2.84	2.38
伤员人数	0	3	9	8	9	11	3	7	12	8	0
最迟时间/min	2	5	20	8	10	12	9	14	13	6	2
节点编号	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33
横坐标 x/km	0.42	1.32	1.92	2.46	3	0.54	1.04	0.86	1.26	2.14	2
纵坐标 y/km	3.2	3.2	3.24	3.22	3.24	3.7	3.74	4.24	4.64	4.6	5.84
伤员人数	4	4	9	8	8	4	11	8	7	0	15
最迟时间/min	9	20	20	10	8	13	23	11	13	3	10

表 2 灾区 A1 救援路径统计表

Table 2 Rescue path information of A1

救援线路	救援时间(min)	相对综合救援权重值	最终解
①12→15→20→19→12	24.2	0.757 9	24.2min
②12→11→13→18→23→14→12	22.6	1.570 0	
③12→8→10→9→12	17.6	0.619 6	

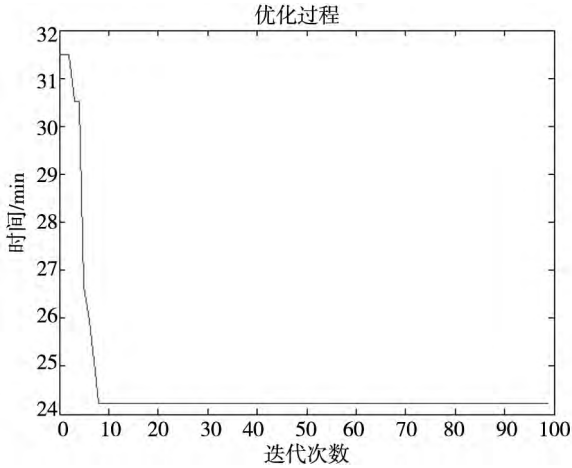


图 2 求解过程运行曲线

Fig. 2 The solving process operation curve

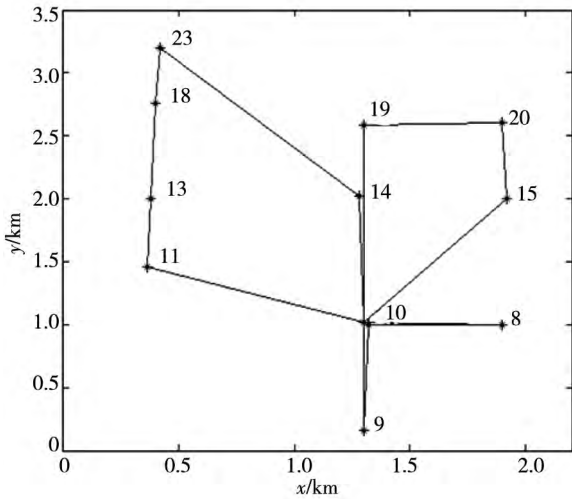


图 3 灾区 A1 的救援路径

Fig. 3 Rescue path information of A1

从算法求解过程运行曲线可以看出,用本文所提出的算法对应急救援车辆救援路径问题进行求解,在第 10 次迭代之前,算法进行收敛并趋向稳定.说明该算法求解效率较高,优化速度较快.

由灾区救援路径及时间统计表可知,灾区 A1 的总救援时间为 24.2min,三条救援路径的总相对综合救援权重值之和为 3.831 5;同理,可计算出灾区 B1 的总救援时间为 30.8min,三条救援路

径的总相对综合救援权重值和为 3.529 7;灾区 C1 的总救援时间为 34.8min,三条救援路径的总相对综合救援权重值和为 3.062 4.因此,本次救援的总时间为 34.8min.

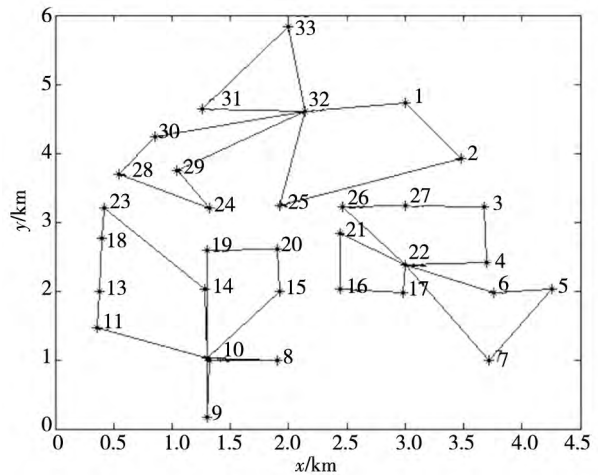


图 4 总救援路径

Fig. 4 The total rescue path

3.3 求解结果对比和分析

1) 以灾区 A1 的计算为例,改进后萤火虫算法与遗传(GA)算法的比较.

将案例数据带入相应算法单独运行 10 次,实验结果对比情况如表 3 所示,两种算法的优化过程对比如图 5 所示.

表 3 GA 与带三角函数变异 GSO 算法计算结果对比

Table 3 Results compared between GA and GSO with trigonometric function variation

迭代次数	目标函数值	遗传算法	GSO (三角函数)
T = 20	平均救援时间 min	26.41	24.20
	相对综合救援权重值	0.727 77	0.757 90
T = 50	平均救援时间 min	26.08	24.20
	相对综合救援权重值	0.734 42	0.757 90
T = 100	平均最大救援时间 min	25.41	24.20
	相对综合救援权重值	0.754 05	0.757 90

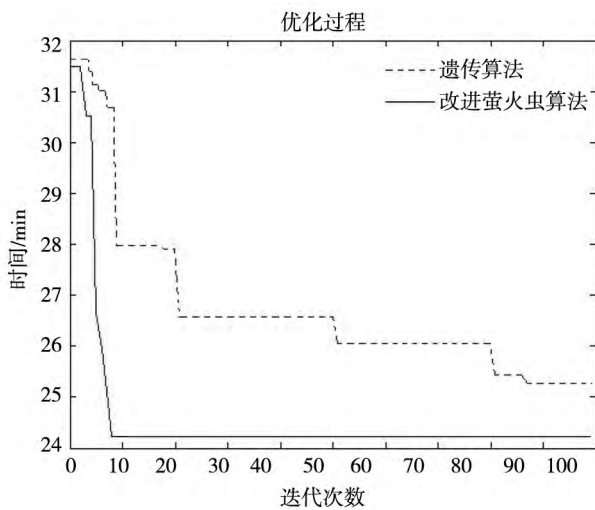


图5 算法优化过程对比图

Fig. 5 Comparison chart of optimize process

从表3及图5中的对比结果可以看出,在迭代次数相同的情况下,本文所提出的算法在优化速度、优化结果方面均优于遗传算法,说明算法可行性较高、适合求解此类优化问题。

2) 分区域救援与以整个灾区为整体进行救援的计算结果比较。

由上述计算结果可知,单就某一个灾区(节点数较少)的救援路径计算来说,改进后的萤火虫算法计算结果明显优于遗传算法。下面将分区域救援与以整个灾区为整体进行救援的计算结果进行对比。计算结果对比情况如表4所示。

表4 分区救援与整体救援的求解结果对比

Table 4 Results compared between partition rescue and whole rescue

类别	最大救援时间 (min)	参与救援车队总数
常规整体救援	40.4	8
聚合优化算法分区救援	34.8	9

由上表计算结果可知,在整个灾区范围内进行救援可以有效整合每个灾点的伤员数量,实现救援车队的最大单次装载量,最终救援车队使用数为8队,分灾区进行救援的车队使用

数为9队;但是,采用聚合优化算法对灾区进行划分以后,可以更快速的对各自灾区所覆盖的灾点进行救援,总救援时间(单次最大救援时间)为34.8min,以整个灾区为救援对象的救援过程所需时间为40.4min,前者时间明显小于后者,救援效率更优。

4 结束语

本文研究了地震情境下伤员应急救援车辆调度及路径优化问题。采用聚合优化算法对灾区进行应急救援区域划分;设定了兼顾伤员因素和救援距离因素的各灾点伤员需求综合权重计算规则;研究了直接连通灾点和非直接连通灾点之间的行车时间差异,确定了两灾点之间的车辆通行时间的计算方法。以此为基础,从总救援时间最短和伤员救援权重值最大两个角度出发,建立了震后伤员救援车辆应急调度两阶段数学规划模型,并对基本的萤火虫算法进行了离散化处理和带三角函数扰动的改进。

通过算例进行模拟实验,分别对改进萤火虫算法与遗传算法、分区救援与整体救援进行了对比分析。研究表明在迭代次数相同的情况下(如 $T=50$),带三角函数变异的萤火虫算法能够迅速趋稳,收敛速度更快,救援效率提升7.76%;同时基于聚合优化算法的分区救援策略较整体救援时间大大缩短,效率提升了13.86%。综合来看,本文所构建的两阶段数学规划模型和改进萤火虫算法相对于传统算法更优。

然而,本文仅仅研究了地震伤员救援车辆的调度和路径优化问题,而没有将后续伤员的手术调度结合进来,因此,如何在不确定环境下进行地震伤员救援车辆和手术调度集成优化问题也是未来的研究方向。

参考文献:

[1]张洁,高惠瑛,刘琦. 基于汶川地震的地震人员伤亡预测模型研究[J]. 中国安全科学学报,2011,21(3): 59-64.
 Zhang Jie, Gao Huiying, Liu Qi. Study on earthquake casualty forecasting model based on Wenchuan earthquake [J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(3): 59-64. (in Chinese)

- [2]李双琳,马祖军.震后交通管制下多出救点应急物资调运问题[J].管理科学学报,2014,17(5):1-13.
Li Shuanglin, Ma Zujun. Post-earthquake multi-depot relief distribution under traffic control [J]. Journal of Management Sciences in China, 2014, 17(5): 1-13. (in Chinese)
- [3]王付宇,叶春明.地震伤员配送及手术调度优化问题研究进展[J].计算机应用研究,2017,33(3):653-657.
Wang Fuyu, Ye Chunming. Review and prospect of optimization on earthquake wounded distribution and operation scheduling [J]. Application Research of Computers, 2017, 33(3): 653-657. (in Chinese)
- [4]Kemball-Cook D, Stephenson R. Lessons in logistics from Somalia [J]. Disasters, 1984, 8(1): 57-66.
- [5]汪寿阳,赵秋红,夏国平.集成物流管理系统中定位运输路线[J].管理科学学报,2000,3(2):69-75.
Wang Shouyang, Zhao Qihong, Xia Guoping. Research on combined location-routing problems in integrated logistics systems [J]. Journal of Management Sciences in China, 2000, 3(2): 69-75. (in Chinese)
- [6]Najafi M, Eshghi K, Dullaert W. A multi-objective robust optimization model for logistics planning in the earthquake response phase [J]. Transportation Research Part E Logistics & Transportation Review, 2013, 49(1): 217-249.
- [7]Özdamar L, Ertem M A. Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 244(1): 55-65.
- [8]刘长石,寇纲,刘导波.震后应急物资多方式供应的模糊动态LRP[J].管理科学学报,2016,19(10):61-72.
Liu Changshi, Kou Gang, Liu Daobo. Fuzzy dynamic LRP for post-earthquake multimodal relief delivery [J]. Journal of Management Sciences in China, 2016, 19(10): 61-72. (in Chinese)
- [9]石彪,池宏,祁明亮,等.应急物资运输的两阶段车辆调度模型[J].系统工程,2012,30(7):105-111.
Shi Biao, Chi Hong, Qi Mingliang, et al. A two-stage vehicle scheduling model of transportation of emergency resources [J]. Systems Engineering, 2012, 30(7): 105-111. (in Chinese)
- [10]阮俊虎,王旭坪,杨挺.大规模灾害中基于聚类的医疗物资联合运送优化[J].中国管理科学,2014,(10):80-89.
Ruan Junhu, Wang Xuping, Yang Ting. A clustering-based approach for medical supplies intermodal transportation in large-scale disasters [J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, (10): 80-89. (in Chinese)
- [11]Fisher M L, Jaikumar R, Van Wassenhove L N. A multiplier adjustment method for the generalized assignment problem [J]. Management Science, 1986, 32(9): 1095-1103.
- [12]Juan A A, Faulin J, Jorba J, et al. Using parallel & distributed computing for real-time solving of vehicle routing problems with stochastic demands [J]. Annals of Operations Research, 2013, 207(1): 43-65.
- [13]Mohaymany A S, Hosseini M, Habibi H M. Obtaining the Emergency Transportation Network for Rescue and Relief Activities in Large Cities Based on the Life Loss Mitigation Criteria [C]//Proc of the 6th Work-Shop on Lifeline Earthquake Engineering, 2003, 231-240.
- [14]Zhang Y, Haghani A. A gradient boosting method to improve travel time prediction [J]. Transportation Research Part C Emerging Technologies, 2015, 58: 308-324.
- [15]何建敏,刘春林.限制期条件下应急车辆调度问题的模糊优化方法[J].控制与决策,2001,16(3):318-321.
He Jianmin, Liu Chulin. Fuzzy programming problem for vehicle dispatch under time restriction [J]. Control and Decision, 2001, 16(3): 318-321. (in Chinese)
- [16]杨善林,马华伟,顾铁军.时变条件下带时间窗车辆调度问题的模拟退火算法[J].运筹学学报,2010,14(3):83-90.
Yang Shanlin, Ma Huawei, Gu Tiejun. Simulated annealing algorithm for vehicle routing problem with time window under time-dependent [J]. Operations Research Transactions, 2010, 14(3): 83-90. (in Chinese)
- [17]王旭坪,阮俊虎,张凯,等.有模糊时间窗的车辆调度组合干扰管理研究[J].管理科学学报,2011,14(6):2-15.
Wang Xuping, Ruan Junhu, Zhang Kai, et al. Study on combinational disruption management for vehicle routing problem with fuzzy time windows [J]. Journal of Management Sciences in China, 2011, 14(6): 2-15. (in Chinese)
- [18]丁秋雷,胡祥培,姜洋.基于前景理论的物流配送干扰管理模型研究[J].管理科学学报,2014,17(11):1-9.
Ding Qiulei, Hu Xiangpei, Jiang Yang. A model of disruption management based on prospect theory in logistic distribution

- [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2014, 17(11): 1–9. (in Chinese)
- [19] Woensel T V, Kerbache L, Peremans H, et al. Vehicle routing with dynamic travel times: A queuing approach [J]. *European Journal of Operational Research*, 2008, 186(3): 990–1007.
- [20] Takeda R A, Widmer J A, Morabito R. Analysis of ambulance decentralization in an urban emergency medical service using the hypercube queuing model [J]. *Computers & Operations Research*, 2007, 34(3): 727–741.
- [21] Novoa C, Storer R. An approximate dynamic programming approach for the vehicle routing problem with stochastic demands [J]. *European Journal of Operational Research*, 2009, 196(2): 509–515.
- [22] 刘 杨, 云美萍, 彭国雄. 应急车辆出行前救援路径选择的多目标规划模型 [J]. *公路交通科技*, 2009, 26(8): 135–139.
Liu Yang, Yun Meiping, Peng Guoxiong. A multi-objective programming model of route choice of emergency vehicles before travel [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2009, 26(8): 135–139. (in Chinese)
- [23] 代 颖, 马祖军, 朱道立, 等. 震后应急物资配送的模糊动态定位—路径问题 [J]. *管理科学学报*, 2012, 15(7): 60–70.
Dai Ying, Ma Zujun, Zhu Daoli, et al. Fuzzy dynamic location-routing problem in post-earthquake delivery of relief materials [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2012, 15(7): 60–70. (in Chinese)
- [24] 王海军, 杜丽敬, 马士华. 震后应急物流系统中双目标开放式选址: 路径问题模型与算法研究 [J]. *管理工程学报*, 2016, 30(2): 108–115.
Wang Haijun, Du Lijing, Ma Shihua. Model and algorithms for integrated open location and routing problem in emergency logistics under earthquake [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2016, 30(2): 108–115. (in Chinese)
- [25] Topaloglu H, Powell W B. Sensitivity analysis of a dynamic fleet management model using approximate dynamic programming [J]. *Operations Research*, 2007, 55(2): 319–331.
- [26] 马祖军, 胡 萍. 实时/时变路网环境下城市出救点选择与救援车辆路径的集成动态优化 [J]. *管理工程学报*, 2014, (4): 165–171.
Ma Zujun, Hu Ping. Dynamic optimization of combined emergency response facility selection and vehicle routing problem in real-time and time-dependent road networks in urban environments [J]. *Journal of Industrial Engineering and Engineering Management*, 2014, (4): 165–171. (in Chinese)
- [27] 李妍峰, 高自友, 李 军. 动态网络车辆路径派送问题研究 [J]. *管理科学学报*, 2014, 17(8): 1–9.
Li Yanfeng, Gao Ziyou, Li Jun. Dynamic vehicle routing and dispatching problem [J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2014, 17(8): 1–9. (in Chinese)
- [28] Wang L, Yang L, Gao Z Y. The constrained shortest path problem with stochastic correlated link travel times [J]. *European Journal of Operational Research*, 2016, 255(1): 43–57.
- [29] Galindo G, Batta R. Review of recent developments in OR/MS research in disaster operations management [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 230(2): 201–211.
- [30] 初 翔, 仲秋雁, 曲 毅. 大规模伤亡事件应对流程的前摄性调度优化 [J]. *运筹与管理*, 2014, (6): 7–11.
Chu Xiang, Zhong Qiuyan, Qu Yi. Proactive scheduling optimization of emergency response in mass casualty incident [J]. *Operations Research and Management Science*, 2014, (6): 7–11. (in Chinese)
- [31] Kaipa K N, Ghose D. *Glowworm Swarm Optimization* [M]. Berlin: Springer International Publishing, 2017.
- [32] 顾忠伟, 徐福缘. 一种新颖的萤火虫算法求解 PID 控制器参数自整定问题 [J]. *系统管理学报*, 2017, (1): 101–106.
Gu Zhongwei, Xu Fuyuan. A novel glowworm swarm optimization algorithm for solving the PID parameters self-tuning [J]. *Journal of Systems & Management*, 2017, (1): 101–106. (in Chinese)
- [33] 李纪真, 孟相如, 温祥西, 等. 萤火虫群算法优化高斯过程的网络安全态势预测 [J]. *系统工程与电子技术*, 2015, 37(8): 1887–1893.
Li Jizhen, Meng Xiangru, Wen Xiangxi, et al. Network security situation prediction based on gaussian process optimized by glowworm swarm optimization [J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2015, 37(8): 1887–1893. (in Chinese)

- [34] Venkata Rao , Dhiraj P , Rai J B. Multi-Objective Optimization of Machining and Micro-Machining Processes Using Non-Dominated Sorting Teaching-Learning-Based Optimization Algorithm [C]. Journal of Intelligent Manufacturing , DOI 10.1007/s10845 -016 -1210 -5.
- [35] Marinaki M , Marinakis Y. A Glowworm swarm optimization algorithm for the vehicle routing problem with stochastic demands [J]. Expert Systems with Applications , 2016 , 46(C) : 145 - 163.
- [36] 徐震浩 , 李继明 , 顾幸生. 基于 GMOGSO 的多目标流水车间调度问题 [J]. 控制与决策 , 2016 , 31(10) : 1772 - 1778.
- Xu Zhenhao , Li Jiming , Gu Xingsheng. Multi-objective flow shop scheduling problem based on GMOGSO [J]. Control and Decision , 2016 , 31(10) : 1772 - 1778. (in Chinese)
- [37] 李 彤 , 王众托. 模拟植物生长算法与知识创新的几点思考 [J]. 管理科学学报 , 2010 , 13(3) : 87 - 96.
- Li Tong , Wang Zhongtuo. Plant growth simulation algorithm and the thinking in knowledge innovation [J]. Journal of Management Sciences in China , 2010 , 13(3) : 87 - 96. (in Chinese)
- [38] 叶一芄 , 张小宁. 基于随机运输路径选择的物流中心选址模型 [J]. 管理科学学报 , 2017 , 20(1) : 41 - 52.
- Ye Yipeng , Zhang Xiaoning. Distribution centers location model with stochastic traffic assignment [J]. Journal of Management Sciences in China , 2017 , 20(1) : 41 - 52. (in Chinese)

Research on two stage planning model and algorithm of wounded rescue vehicle after earthquake

WANG Fu-yu^{1,2} , YE Chun-ming¹ , WANG Tao² , ZHAO Jing-jing²

1. School of Management , University of Shanghai for Science and Technology , Shanghai 200093 , China;
2. School of Management Science and Engineering , Anhui University of Technology , Ma' anshan 243032 , China

Abstract: Emergency supplies distribution and vehicle routing optimization in the uncertain environment is a hot topic currently , and vehicle scheduling of transporting of the earthquake-wounded and path optimization are more attractive since earthquakes are frequent. This paper divides multi-depot vehicle routing into single-depot by using polymerization optimization algorithm , builds a two-phase mathematical programming model of rescue vehicles with the shortest total rescue time and maximum relatively comprehensive rescue weight , and designs a discrete glowworm swarm optimization algorithm with trigonometric function variation to solve the problem. The simulation experiment shows that the proposed model and algorithm can effectively solve the rescue vehicles scheduling of the earthquake-wounded.

Key words: earthquake rescue; vehicle scheduling; path optimization; glowworm swarm optimization algorithm