

文章编号: 1671-6833(2021)05-0044-06

不确定环境下救灾部队驻地选址及搜救路径优化

黄茜¹, 王书勤², 邓少鸿³, 范林军⁴

(1.武警警官学院 基础部, 四川 成都 610213; 2.武警警官学院 分队指挥系, 四川 成都 610213; 3.长沙理工大学 经济与管理学院, 湖南 长沙 410114; 4.武警警官学院 部队管理系, 四川 成都 610213)

摘要: 不确定因素经常影响部队救灾行动和效果, 在资源有限、时间紧迫的情况下, 克服不确定因素影响, 科学进行部队驻地选址、救灾任务分配, 规划好各救灾分队的搜救线路, 实现救灾效果总体最优尤为重要。在假设部队行进时间和受灾点所需救灾时间均服从正态分布的基础上, 建立了以救灾总费用最少和总救灾时长最小为目标的选址路径(LRP)多目标随机规划模型。引入惩罚因子, 将随机约束转化成目标函数, 将各目标函数值归一化求和作为适应度函数值, 设计了一种改进遗传算法。通过算例实验发现, 改进遗传算法和基本遗传算法惩罚值均为0, 改进遗传算法总的救灾时间较短, 改进蚁群算法救灾总时间短, 救灾成本低, 但惩罚值较大, 从而验证了改进遗传算法的优越性。

关键词: LRP; 遗传算法; 优化; 随机规划; 时间窗

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.13705/j.issn.1671-6833.2021.05.015

0 引言

抢险救灾中, 灾区道路往往受到破坏, 救灾分队行进时间不确定, 受灾点所需救援时间也难以把握, 不确定因素给部队救灾行动带来了较大困难。在资源有限、时间紧迫的情况下, 科学地进行部队驻地选址、救灾任务分配, 规划救灾分队搜救线路, 实现救灾效果总体最优尤为重要。现有文献研究中地方应急物流系统中的LRP(location-routing problem)优化研究较多, 但对不确定环境下救灾部队驻地选址及救援路径优化研究较少。郑斌等^[1]以应急物资运达总时间最短和系统总成本最小为目标, 建立了LRP优化模型; 徐琴等^[2]针对城市突发公共事件应急物流系统中的LRP, 建立了一个应急救援时间满意度最大的LRP模型; Boyer等^[3]提出一个关于工业危险废物的LRP双目标混合整数规划模型。基于此, 本文考虑受灾点带时间窗, 受灾点所需救灾时间与救灾分队行进时间均服从正态分布, 救灾分队有有效救援时间约束等条件, 建立了救灾总成本和总时间最短的LRP多目标随机规划模型, 并设计

改进遗传算法成功求解。

1 问题建模

1.1 问题的提出

抢险救灾中, 在受灾点间的行进时间及其所需救援时间随机、各种资源有限的条件下, 救灾部队如何根据受灾点信息选择驻地, 确定救灾分队数量及其搜救路线。

1.2 模型假设

(1) 有多个备选驻地, 各驻地的建设费用已知。

(2) 救灾分队数已知, 救灾分队救灾效率、救灾固定成本和有效救灾时间相同, 运输成本与运输距离成正比。

(3) 每个受灾点只由一个救灾分队救援(若需多个将其分割), 救灾难度可用救灾时间衡量。

(4) 每个救灾分队完成任务后返回原驻地。

(5) 受灾点所需救灾时间及两受灾点间的行进时间均服从正态分布。

1.3 变量与符号说明

$A = \{r | r = m + 1, m + 2, \dots, m + n\}$: 受灾

收稿日期: 2020-12-21; 修订日期: 2021-03-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61803073); 国家社会科学基金军事学项目(2019-SKJJ-C-098); 四川省教育厅课题(18zb0694)

作者简介: 黄茜(1983—), 女, 河南正阳人, 武警警官学院副教授, 主要从事运筹优化研究, E-mail: wsq-goodluck@163.com。

点集;

$B = \{i | i = 1, 2, \dots, m\}$: 备选驻地集;

$S = A \cup B$: 受灾点及备选驻地集;

$V = \{k | k = 1, 2, \dots, K\}$: 救灾分队集;

F_i : 驻地 i 的建设成本;

c : 救灾分队单位运输成本;

d_{ij} : i 与 j 间的距离;

D : 启用救灾分队的固定成本;

t_{ij} : i 到 j 的时间, 为正态分布随机变量;

T : 救灾分队有效救灾时间;

t_r : r 点所需救灾时间, 当 $r \in A$, t_r 为正态分布随机变量, 当 $r \in B$, t_r 为 0;

T_{kr} : 救灾分队 k 到达点 r 的时间;

$[0, LT_r]$: 受灾点 r 的救灾时间窗;

M : 足够大的正整数;

α_1, α_2 : 概率取值;

x_i : 0-1 变量, 备选驻地启用时为 1, 否则为 0;

z_{ik} : 0-1 变量, 备选驻地 i 的救灾分队 k 启用时为 1, 否则为 0;

y_{kij} : 0-1 变量, 救灾分队 k 由 i 到 j 时为 1, 否则为 0。

1.4 模型建立

根据以上思路, 建立救灾问题中 LRP 多目标随机规划模型如下。

$$\min z_1 = \sum_{i \in B} F_i x_i + \sum_{k \in V} \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} c y_{kij} d_{ij} + \sum_{k \in V} \sum_{i \in B} D z_{ik}; \quad (1)$$

$$\min z_2 = \sum_{k \in V} \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} y_{kij} (t_{ij} + t_j) \circ \quad (2)$$

s.t.

$$p \left\{ \sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} t_r \leq T \right\} \geq \alpha_1, \forall k \in V; \quad (3)$$

$$p \{ 0 \leq T_{kr} + t_r \leq TL_r \} \geq \alpha_2, \forall r \in A, \forall k \in V; \quad (4)$$

$$x_i \leq \sum_{r \in A} \sum_{k \in V} y_{kir} \leq M x_i, \forall i \in B; \quad (5)$$

$$y_{kij} = 0, \forall i, j \in B, \forall k \in V; \quad (6)$$

$$z_{ik} \leq x_i, \forall i \in B, \forall k \in V; \quad (7)$$

$$\sum_{r \in A} y_{kir} \leq z_{ik}, \forall i \in B, \forall k \in V; \quad (8)$$

$$\sum_{i \in S} y_{kij} - \sum_{i \in S} y_{kji} = 0, \forall k \in V, \forall j \in S; \quad (9)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{k \in V} y_{kij} = 1, \forall j \in A; \quad (10)$$

$$y_{kij} (T_{kj} - T_{ki}) \geq 0, \forall i, j \in S, \forall k \in V; \quad (11)$$

$$x_i \in \{0, 1\}, \forall i \in B; \quad (12)$$

$$y_{kij} \in \{0, 1\}, \forall i, j \in S, \forall k \in V; \quad (13)$$

$$z_{ik} \in \{0, 1\}, \forall i \in B, \forall k \in V. \quad (14)$$

其中, 式(1)为要求成本总和达到最小; 式(2)为要求救灾总时间最短; 式(3)表示救灾分队总救灾时间小于有效救灾时间的概率不小于 α_1 ; 式(4)表示救灾分队救灾完成时间位于受灾点时间窗内的概率不小于 α_2 ; 式(5)表示启用的备选驻地就有救灾分队进行救灾; 式(6)表示救灾分队不在驻地间来往; 式(7)表示启用的备选驻地才有救灾分队派出; 式(8)表示救灾分队从被分到的驻地出发; 式(9)表示救灾分队进入某受灾点, 也从该点出去; 式(10)表示受灾点只由一个救灾分队救灾; 式(11)表示到达受灾点的时间具有先后顺序; 式(12)、(13)、(14)为 0-1 变量约束^[4]。

2 改进遗传算法设计

为求解模型, 基于基本遗传算法, 提出了一种改进遗传算法。与基本遗传算法相比, 该算法主要在染色体编码、遗传操作设计及适应度函数的构造方面根据问题实际进行了针对性改进。在适应度函数上, 基本遗传算法使用式(15), 而改进遗传算法使用式(16):

$$f = z_1 + z_2 + z_3 + z_4; \quad (15)$$

$$f = z'_1 + z'_2 + z_3 + z_4. \quad (16)$$

式中: z'_1, z'_2 为 z_1, z_2 在种群内的归一化值^[5]。

2.1 编码设计

染色体由 3 段基因组成, 利用救灾分队、受灾点、备选驻地编号编码, 具体编码方式如表 1 所示。

表 1 染色体编码方式

Table 1 Chromosome coding method

第 1 段 n 位	第 2 段 n 位	K 位
救灾分队号	受灾点号	备选驻地号

表 1 中, n 为受灾点个数, K 为救灾分队数量, m 为备选驻地数, 第 1 段由自然数 $1 \sim K$ 排列而成, 第 2 段由自然数 $(m+1) \sim (m+n)$ 排列而成, 第 3 段由 $1 \sim m$ 中随机选择自然数排列而成。如: 若 K 为 4 ($1 \sim 4$), m 为 3 个, n 为 6 个 ($4 \sim 9$), 则染色体 244431-479856-2121 表示 1、2 号备选驻地启用, 2、4、3、1 号救灾分队的搜救路线分别为 2-4-2、1-7-9-8-1、2-5-2、1-6-1^[6-7]。

2.2 适应度函数构造

(1) 随机约束处理。利用罚函数思想, 将模型中的随机约束处理如下。

由于 $t_r \sim N(\mu_r, \sigma_r^2)$, 所以:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} t_r \sim N(\sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \mu_r, \sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \sigma_r^2); \\ p \left\{ \frac{\sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} t_r - \sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \mu_r}{\sqrt{\sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \sigma_r^2}} \leq \right. \\ \left. \frac{T - \sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \mu_r}{\sqrt{\sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \sigma_r^2}} \right\} \geq \alpha_1. \end{array} \right. \quad (17)$$

从而有

$$\frac{T - \sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \mu_r}{\sqrt{\sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \sigma_r^2}} \geq \Phi^{-1}(\alpha_1). \quad (18)$$

所以式(2)可以转化为

$$\Phi^{-1}(\alpha_1) \sqrt{\sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \sigma_r^2} + \sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \mu_r \leq T. \quad (19)$$

式中: $\Phi^{-1}(\alpha_1)$ 可由标准正态分布表查得。

由此可以构造罚函数:

$$z_3 = M_1 \times \max \left\{ \Phi^{-1}(\alpha_1) \sqrt{\sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \sigma_r^2} + \sum_{i \in S} \sum_{r \in A} y_{kir} \mu_r - T, 0 \right\}. \quad (20)$$

式中: M_1 是一个足够大的数。

同样,由于 $t_{ij} \sim N(\mu_{ij}, \sigma_{ij}^2)$, 则可构造罚函数:

$$z_4 = \sum_{r \in L} M_2 \times \max \left\{ \Phi^{-1}(\alpha_2) \sqrt{\sum_{i \in L'} \sum_{j \in L'} y_{kij} \sigma_{ij}^2} + \sum_{i \in L'} \sum_{j \in L'} y_{kij} \mu_{ij} + \sum_{i \in L'} \sum_{j \in L'} y_{kij} \mu_{ij} - TL_r, 0 \right\} \quad (21)$$

式中: L 是分段 k 搜救线路上的点(驻点及受灾点)集, L' 是线路上点 r 前的点集, M_2 是一个足够大的数。^[8-9]

此时,目标函数可转化为

$$\min f = z'_1 + z'_2 + z_3 + z_4. \quad (22)$$

(2) 适应度函数构造。改进遗传算法的适应度函数为 f 。

2.3 遗传操作的设计

求解过程中,采用了选择、交叉、变异3种遗传操作。

选择操作中主要采取精英法与轮盘赌法相结合的方法。用适应度函数的倒数构造轮盘赌法,每次依概率随机选择种群中的染色体;同时采用精英法,保留每次迭代的最好染色体,保证算法收敛。而基本遗传算法往往只采用轮盘赌法。

交叉操作分3个基因段进行,在选中的2个父代中分段随机选择2点 k_1 、 k_2 确定交叉点或匹

配交叉基因串,然后再双点交叉与部分匹配交叉。若交叉后不合法,变更未参与交叉的基因使其合法,保存优秀染色体,具体操作如图1及图2所示。

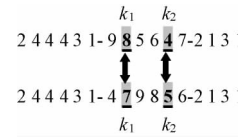


图1 双点交叉示意图

Figure 1 Diagram of two points crossing

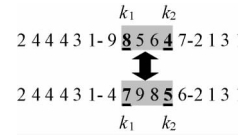


图2 部分匹配交叉示意图

Figure 2 Diagram of partial matching crossing

变异操作在同一条染色体中分段进行,先随机选择2点,选址基因采用对换变异法,路径基因采用逆转变异法,具体操作如图3及图4所示^[10-12]。

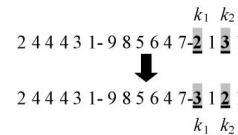


图3 选址基因对换变异法示意图

Figure 3 Diagram of swap mutation

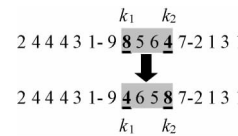


图4 路径基因逆转变异法示意图

Figure 4 Diagram of reverse mutation

2.4 改进遗传算法流程

改进遗传算法设计流程如图5所示。

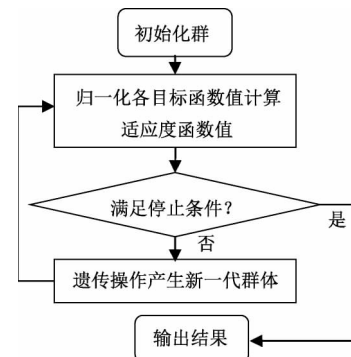


图5 改进遗传算法设计流程图

Figure 5 Flow chart of the improved genetic algorithm

3 算例分析

3.1 算例陈述

某部队在抗震救灾中的救灾部队备选驻地坐

标及建设成本如表2所示,受灾点信息如表3所示,受灾点间行进时间的均值和方差如表4和表5所示。救灾分队最大救灾时间为10 h,固定成本为0.5万元,单位运输成本为0.01万元,惩罚系数 M_1 、 M_2 均设为30,救灾分队到达受灾点的时间位于受灾点救灾时间窗的概率及救灾分队耗时位于最大有效救灾时间内的概率均为95%。

表2 救灾部队备选驻地数据

Table 2 Data of alternative stations of earthquake relief troops

编号	坐标/km	固定成本/万元
1	(40,5)	2.0
2	(55,80)	2.5
3	(20,50)	3.0

表3 受灾点数据

Table 3 Data of disaster sites

编号	坐标/km	期望救灾时间/h	救灾时间方差/h ²	时间窗/h
4	(20,85)	2.0	0.5	[0,15.6]
5	(5,45)	3.0	0.3	[0,6.8]
6	(42,15)	2.5	0.4	[0,10.5]
7	(38,5)	2.4	0.1	[0,12.5]
8	(95,35)	1.6	0.4	[0,20]
9	(85,25)	3.8	1.0	[0,7.5]
10	(62,80)	2.0	0.3	[0,8.3]
11	(58,75)	1.9	0.5	[0,18.8]
12	(55,82)	2.1	0.6	[0,3.8]
13	(18,80)	2.2	0.8	[0,16.8]
14	(25,30)	2.7	1.0	[0,10.5]
15	(15,10)	2.9	0.6	[0,7.5]
16	(45,65)	1.4	0.7	[0,18.5]
17	(65,20)	3.0	1.0	[0,15.2]
18	(31,52)	3.2	0.5	[0,6.8]
19	(2,60)	1.7	0.1	[0,14.8]
20	(5,5)	1.4	0.2	[0,13.5]
21	(57,29)	2.3	0.3	[0,9.5]
22	(4,18)	3.0	0.8	[0,9]
23	(26,35)	3.1	0.2	[0,6.8]

3.2 改进遗传算法求解

在MATLAB中设置交叉概率 $pc = 0.8$,变异概率 $pm = 0.35$,置信度为0.95,最大迭代次数

表4 部分受灾点间行驶期望时间/h

Table 4 Expected travel time between some disaster sites

受灾点编号	1	2	...	22	23
1	0	0	...	1.954 0	1.806 9
2	0	0	...	0.175 0	0.145 8
...
22	0.956 9	2.007 0	...	0	0.695 1
23	0.827 6	1.338 4	...	0.695 1	0

表5 部分受灾点间行驶时间方差/h²

Table 5 Variance of travel time between some disaster sites

受灾点编号	1	2	...	22	23
1	0	0	...	1.954 0	1.806 9
2	0	0	...	0.175 0	0.145 8
...
22	0.824 6	0.531 7	...	0	0.214 1
23	0.453 0	0.521 1	...	0.214 1	0

$nc = 50$,种群规模 $popsize = 50$,计算耗时487.313 3 s,得到如下结果。

最优路径为3-21-18-3,3-19-5-3,1-22-15-1,1-6-1,1-17-7-20-1,3-14-23-3,3-10-11-16-3,3-12-3,1-8-9-1,3-4-13-3;费用成本为108.027 3万元;2种惩罚值为0;总救灾时间值为73.268 3 h;最小归一化目标函数值为 $7.715e-23$ 。部队选择了1号和3号驻地,救灾任务分配给10个救灾分队,各分队均能在受灾点的时间窗内完成救灾,且不超过其最大有效救灾时间。

3.3 基本遗传算法及改进蚁群算法的求解

为检验改进遗传算法的优越性,本文同时利用基本遗传算法及文献[13]中的改进蚁群算法对问题进行求解,结果如表6及图6~9所示。

3.4 结果分析

由结果可知,改进遗传算法总救灾时间较短且惩罚值为0,而基本遗传算法的总救灾时间稍长,改进蚁群算法救灾总时间短,救灾费用成本低,但其2种惩罚值较大,难以完成救灾任务。综上所述,改进遗传算法与其他2种算法相比,具有较好的性能。

表6 本文算法与其他算法结果比较

Table 6 Comparison results with other algorithms

算法	计算耗时/s	费用成本/万元	总救灾时间/h	受灾点时间窗惩罚值	救灾队超时惩罚值
改进遗传算法	487.313 3	108.027 3	73.268 3	0	0
基本遗传算法	489.547 3	104.850 4	77.826 3	0	0
改进蚁群算法	25.390 1	94.455 6	70.511 7	972.803 5	146.518 5

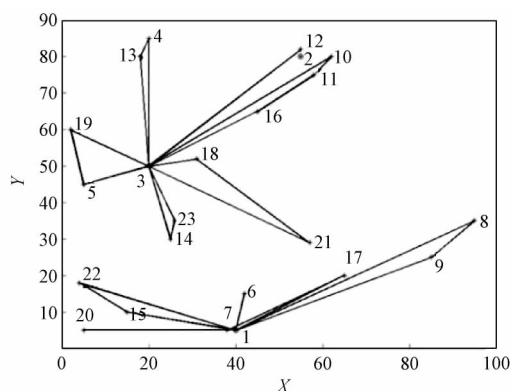


图6 改进遗传算法救灾分队搜救路径图
Figure 6 Roads of disaster relief teams of the improved genetic algorithm

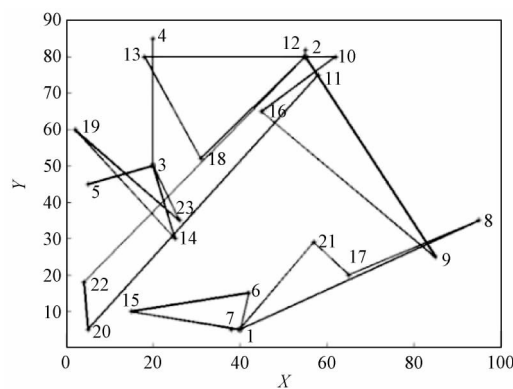


图7 基本遗传算法救灾分队搜救路径图
Figure 7 Roads of disaster relief teams of the basic genetic algorithm

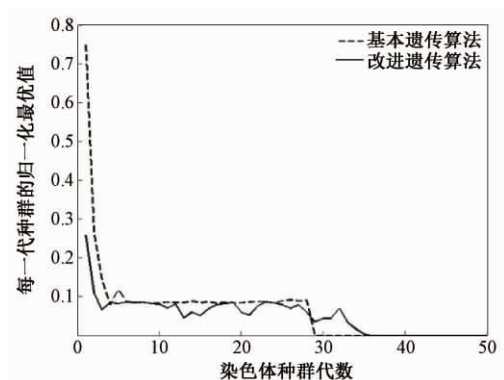


图8 2种遗传算法最优值进化图
Figure 8 Evolution graph of optimal value of the two genetic algorithms

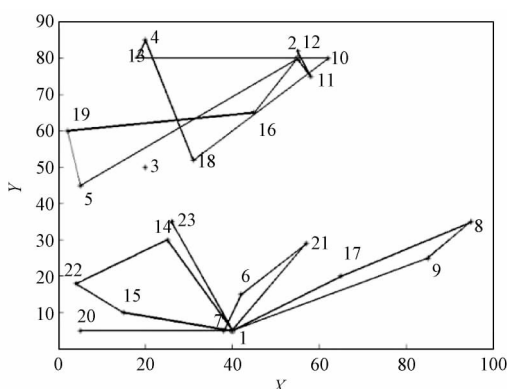


图9 改进蚁群算法救灾分队搜救路径图
Figure 9 Roads of disaster relief teams of the improved ant colony algorithm

4 结论

本文分析了救灾环境中的不确定因素,建立了救灾部队驻地选址和救灾分队搜救路径问题的随机多目标规划模型,通过构造适应度函数、设计编码方法等手段,提出了一种改进遗传算法。实验结果表明,改进遗传算法能在稍微增加费用成本的前提下,实现惩罚值为0且救灾总时间较短(73.2683 h)的优越综合性能。研究结果对抗震救灾行动组织具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 郑斌,马祖军,方涛.应急物流系统中的模糊多目标定位-路径问题[J].系统工程,2009,27(8):21-25.
- [2] 徐琴,马祖军,李华俊.城市突发公共事件在应急物流中的定位:路径问题研究[J].华中科技大学学报(社会科学版),2008,22(6):36-40.
- [3] BOYER O, HONG T S, PEDRAM A, et al. A mathematical model for the industrial hazardous waste location-routing problem [J]. Journal of applied

mathematics, 2013, 2013: 1-10.

- [4] 李珍萍,周文峰.物流配送中心选址与路径优化问题:建模与求解[M].北京:机械工业出版社,2014.
- [5] 王楠,李世其,王峻峰.带时间窗的汽车总装线物流配送路径规划[J].工业工程,2012,15(2):94-99,120.
- [6] 程赐胜,蒲云虎,吴颖.集成化物流选址-路径问题优化模型的算法研究[J].中南林业科技大学学报,2008,28(5):113-118.
- [7] 李桃迎,吕晓宁,李峰,等.考虑动态需求的外卖配送路径优化模型及算法[J].控制与决策,2019,34(2):406-413.
- [8] 刘长石,彭怡,寇纲.震后应急物资配送的模糊定位-路径问题研究[J].中国管理科学,2016,24(5):111-118.
- [9] 方涛.震后应急物资配送中的模糊定位-路径问题研究[D].成都:西南交通大学,2010.
- [10] 穆瑞杰.基于遗传算法的地铁站引导标识布点探析[J].郑州大学学报(工学版),2018,39(1):73-77,89.
- [11] 蒋佩华,华冰,黄宇,等.基于遗传算法的变质量航

- 天器姿态控制方法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2019, 40(4): 1-7.
- [12] GOLDBERG D E. Genetic algorithms in search, optimization and machine learning [M]. Hoboken: Addison-Wesley Professional, 1989.
- [13] 王书勤, 黄茜. 军事定向越野路径优化问题建模及混合蚁群算法求解[J]. 运筹与管理, 2018, 27(4): 105-111.

Study on Location-routing Problem of Earthquake Relief Troops in Uncertain Environment

HUANG Qian¹, WANG Shuqin², DENG Shaohong³, FAN Linjun⁴

(1. Department of Basic Courses, Officers College of PAP, Chengdu 610213, China; 2. Department of Military Command, Officers College of PAP, Chengdu 610213, China; 3. College of Economics and Management, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 4. Department of Military Management, Officers College of PAP, Chengdu 610213, China)

Abstract: Uncertain factors often affect the rescue operations and effects of troops. In the conditions of limited resources and urgent time, it is very important to select the locations of the troops, allocate the tasks of disaster relief, plan the rescue routes, organize efficient rescue, and achieve the overall optimal effect of disaster relief, overcoming the influences of uncertainty. Assuming that the time of troops' movement and the time required for disaster relief are all in normal distribution, a multi-objective stochastic programming model of location routing problem (LRP) with the minimum total cost and time of disaster relief is established. The random constraints are transformed into the objective function by introducing the penalty factors. The normalized sum of each objective function value is taken as the fitness function value. Based on this, an improved genetic algorithm is proposed. The experimental results show that the total rescue time of the improved genetic algorithm is shorter than the one of basic genetic algorithm, and the improved ant colony algorithm has shorter total relief time and lower disaster relief cost, but the penalty value is very big, which verifies the superiority of the improved genetic algorithm

Key words: location-routing problem; genetic algorithm; optimization; stochastic programming; time window