

文章编号: 2095-2163(2023)02-0129-06

中图分类号: TP301.6

文献标志码: A

基于改进萤火虫优化算法的伤员救援车辆调度

朱惠如, 叶春明

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 本文以高效率调度伤员救援车辆为目标, 提出基于萤火虫优化算法的车辆调度方法。首先, 构建伤员救援车辆调度双目标数学模型, 设置约束条件, 将救援路径和救援时间最小的目标设为伤员救援车辆调度优化目标, 设置伤员救援车辆调度双目标函数; 引入生物学中多种群学习机制和高斯变异对标准萤火虫算法进行改进, 并采用改进萤火虫算法求解伤员救援车辆调度最优方案; 最后, 进行了伤员救援车辆调度优化的仿真实验。实验结果表明, 改进的萤火虫算法更有效, 能得到更好的调度结果。

关键词: 萤火虫优化算法; 双目标函数; 伤员救援; 车辆调度; 高斯变异

Scheduling of the injured rescue vehicles based on improved firefly optimization algorithm

ZHU Huiru, YE Chunming

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

【Abstract】 Aiming at efficiently scheduling the injured rescue vehicles, a method based on the firefly optimization algorithm is proposed. First, a dual-objective mathematical model is constructed for wounded rescue vehicle scheduling and constraints are set. The minimum rescue path and rescue time are set as the optimal target for scheduling according to the constraints. The dual-objective function for wounded rescue vehicle scheduling is established. Then the multi-group learning mechanism and Gaussian mutation are introduced to improve the standard firefly algorithm to solve the optimal plan for the wounded rescue vehicle scheduling. Finally, a simulation experiment of the wounded rescue vehicle scheduling optimization is carried out. The results show that the improved firefly algorithm is more effective and can get better scheduling results.

【Key words】 firefly swarm optimization algorithm; double objective function; wounded rescue; vehicle scheduling; Gaussian mutation

0 引言

各种重大自然灾害和意外灾害发生后, 受伤人数在短时间内迅速增加且分布广泛, 与受伤人数相比, 救护车明显短缺, 限时组织应急救援行动, 合理区分伤员受伤程度, 优化伤员救援车辆调度, 在有限时间内最大程度地将伤员送至医疗中心, 提升伤员救援效率, 减少人员伤亡, 显得尤为重要^[1]。

当前车辆调度模型所采用的优化方法有最优化算法和智能优化算法。最优化算法也称为精确算法, 包括分支定界算法、Dijkstra 算法、时间依赖网络 (Time Dependent Network, TDN) 算法以及动态规

划算法等; 智能优化算法包括遗传算法、模拟退火算法、禁忌搜索算法、蚁群算法等。大规模的车辆调度问题属于一种难度极大的组合优化问题, 最优化算法求解速度极慢^[2]。现有文献表明, 群智能优化算法——萤火虫算法在求解调度问题时, 算法步骤简单, 易于实现, 且全局搜索能力更强^[3]。但是在求解救援车辆调度问题时存在不足, 如对于初始解分布的依赖, 迭代过程收敛速度慢且求解精度较低, 同时系统易陷入局部最优解。针对这些问题, 通过对萤火虫算法的进一步研究, 提出了基于惯性权重的萤火虫算法及基于混沌算法的萤火虫算法。虽然性能要优于标准萤火虫优化算法, 但算法的收敛速度

基金项目: 上海市科委“科技创新行动计划”软科学重点项目(20692104300); 国家自然科学基金(71840003); 上海理工大学科技发展基金(2018KJFZ043)。

作者简介: 朱惠如(1996-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 智能算法、车辆调度; 叶春明(1964-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 智能算法、生产调度。

通讯作者: 叶春明 Email: yechm6464@163.com

收稿日期: 2022-04-09

及局部寻优能力等方面仍有待提高。

为获得更优的伤员救援车辆调度优化结果,将标准萤火虫优化算法从多种群学习机制和高斯变异规则两种优化内容着手,实现更加符合伤员救援特殊情况下的车辆调度。

1 伤员救援车辆调度数学模型

1.1 问题描述

某重大突发灾害的爆发使多个地点均受到不同程度影响,根据指挥中心预测确定各灾点位置、需求量及受灾程度,附近某大型医疗救援中心有 K 辆伤员荷载量一定的相同的救援车,车辆从该医疗中心出发,对各灾点伤员实施应急救援并载上伤员一同驶回医疗中心,且每个灾点只被一辆车救援,目标是 minimized 救援时间和救援路程。

1.2 数学模型

1.2.1 模型假设

为了简化实际救援过程中的复杂的约束,假设条件如下:

- (1) 灾害影响的受灾点位置、受灾害的影响程度、实际交通流量和待救伤员数量已知;
- (2) 救援车辆类型相同且荷载人数唯一并已知;
- (3) 每个灾点都被救援,且只有一次;
- (4) 受灾害影响不同灾点处的伤员的在途可坚持时间不同;
- (5) 各救援车辆从某救援中心出发,最终回到该救援中心。

1.2.2 模型的构建

针对应急救援对于时效性的强需求,可构建如下以救援时间最少和救援路径最短为目标的双目标调度模型,目标函数式(1)和式(2)表示最小化所有救援车辆总行驶时间和总路程:

$$f(1) = \min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k+1} T_{r_{k(i-1)}r_{ki}} * \text{sign}(n_k - 1) \right\} \quad (1)$$

$$f(2) = \min \left\{ \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{n_k+1} D_{r_{k(i-1)}r_{ki}} * \text{sign}(n_k - 1) \right\} \quad (2)$$

其中, K 为医疗中心救援车辆总量,任一救援车辆用 k 表示 ($k = 1, 2, \dots, K$); n_k 为第 k 辆车历经并救援受灾点的个数 ($n_k = 0$ 表示未使用第 k 辆车); r_{ki} 代表路线集合 R_k 中第 i 个途径的受灾点; r_{k0} 表示车辆从医疗中心出发; $r_{k(n_k+1)}$ 表示车辆回到医疗中心; T_{ij} 为车辆从受灾点 i 到 j 的行驶时间; D_{ij} 代表受灾点 i 到 j 的距离 ($i, j = 0, 1, \dots, N$), $i, j = 0$ 代表医

疗中心。

其中约束条件如下:

- (1) 任何车辆的伤员荷载数不得超过额定数

$$\sum_{i=1}^{n_k} q_{r_{ki}} \leq W, q_i \text{ 表示受灾点 } i \text{ 内待救伤员人数, } W \text{ 表示每辆车最多可荷载伤员人数;}$$

- (2) 每辆车在行驶路径上历经受灾点的个数限制 $0 \leq n_k \leq N, N$ 表示受灾点总个数;

- (3) 确保每个受灾点只能被一辆车前往救助,

$$\sum_{k=1}^K n_k = N \text{ 和 } R_{k1} \cap R_{k2} = \emptyset, \forall k_1 \neq k_2, R_k \text{ 表示第 } k \text{ 辆车行驶路线集合;}$$

- (4) 车辆抵达前后两受灾点处实施救援的时间关联表达式,如式(3)所示:

$$s_{r_{k(i-1)}} + uT_{r_{k(i-1)}} \cdot q_{r_{k(i-1)}} + T_{r_{k(i-1)}r_{ki}} = s_{r_{ki}} \quad (3)$$

其中, uT_i 表示在受灾点 i 处安排每位伤员上车所耗时间;

- (5) 救援车辆到达不同受灾点的时间窗约束, s_i 表示救援车辆到达受灾点 i 的时刻; $s_{r_{ki}} \leq b_i, [0, b_i]$ 表示救援车辆须到达受灾点 i 的时间窗;

- (6) 对各受灾点处伤员在途可坚持时间的约束 $c_i; s_{r_{k(n_k+1)}} - s_{r_{ki}} \leq c_i;$

- (7) 只有当第 k 辆车至少历经 1 个受灾点时才参与救援,此时取 $\text{sign}(n_k - 1) = 1$, 否则认为该车辆未实施应急救援,如式(4)所示:

$$\text{sign}(n_k - 1) = \begin{cases} 1, & n_k \geq 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

- (8) 所有车辆行驶路线集合如式(5)所示:

$$R_k = \{r_{k0}, r_{k1}, \dots, r_{ki}, \dots, r_{kn_k}, r_{k(n_k+1)}\} \quad (5)$$

- (9) 车辆行驶时间的预测如式(6)所示:

$$T_{r_{k(i-1)}r_{ki}} = \frac{D_{r_{k(i-1)}r_{ki}}}{V_{r_{k(i-1)}r_{ki}}} \quad (6)$$

其中, V_{ij} 表示车辆从 i 到 j 的通行速度。

2 改进萤火虫算法设计

2.1 标准萤火虫算法

2.1.1 算法原理

把搜索空间中每个可行解看作一个萤火虫个体,搜索过程可以看作萤火虫之间的吸引,将数学模型最优结果的求解模拟成萤火虫个体向最优萤火虫个体位置的移动。最优解的特性是使得目标函数值最小或者最大,处于最佳位置的萤火虫个体所表现出的特性是其携带的荧光素量最多。

2.1.2 算法数学描述

初始时刻,每一只萤火虫均携带相同数量的荧光素 l_0 , 随机的分布在搜索空间 V 中, $x_i(t)$ 代表第 i 只萤火虫在第 t 次迭代时在 V 中所处的位置, 则第 i 只萤火虫在第 t 次迭代后所携带的荧光素的值可由适应度函数 $f(x_i(t))$ 求得。通过每次迭代时更新萤火虫的位置, 得到迭代后每个萤火虫所携带的荧光素的量。一般的, 基本萤火虫算法 (GSO) 优化算法包括以下 5 个步骤:

(1) 个体所携带的荧光素的浓度求解: 通过适应度函数 $f(x_i(t))$ 可求得萤火虫处于位置 $x_i(t)$ 时所携带的荧光素的量, 之后利用公式 (7) 即可求出个体所携带的荧光素的浓度:

$$l_i(t) = (1 - \rho) l_i(t - 1) + \gamma f(x_i(t)) \quad (7)$$

其中, ρ 表示荧光素消失率, γ 表示荧光素更新率, $\rho, \gamma \in [0, 1]$ 。

(2) 萤火虫个体 i 的邻域集合 $N_i(t)$: 当算法进行到 t 迭代次数时, 在萤火虫个体 i 的动态决策域半径 $r_d^i(t)$ 内, 利用公式 (8) 计算邻域集合 $N_i(t)$:

$$N_i(t) = \{j: \|x_j(t) - x_i(t)\| < r_d^i(t); l_j(t) < (l_i(t))\} \quad (8)$$

其中, $\|x_i(t)\|$ 表示萤火虫个体间的距离。

(3) 萤火虫个体 i 向个体 j 移动的概率 $P_{ij}(t)$; 利用公式 (9) 计算 t 次迭代时邻域集合 $N_i(t)$ 内移动的概率 $P_{ij}(t)$:

$$P_{ij}(t) = \frac{l_j(t) - l_i(t)}{\sum_{k \in N_i(t)} (l_k(t) - l_i(t))} \quad (9)$$

(4) 萤火虫个体 i 位置的更新: 利用公式 (10) 计算萤火虫移动后的位置:

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + s \cdot \frac{x_j(t) - x_i(t)}{\|x_j(t) - x_i(t)\|} \quad (10)$$

其中, s 表示萤火虫个体移动步长。

(5) 萤火虫个体的动态决策域半径的更新: 利用公式 (11) 更新动态决策半径:

$$r_d^i(t + 1) = \min\{r_s, \max\{0, r_d^i(t) + \beta(n_i - |N_i(t)|)\}\} \quad (11)$$

其中, r_s 表示萤火虫个体的最大感知域半径; n_i 表示萤火虫个体邻域的阈值; β 表示动态决策域半径的更新率。

2.2 萤火虫算法的缺陷及改进

震后伤员救援车辆调度属于离散型问题, 而基本萤火虫算法 (GSO) 主要用于实数、连续型组合优化问题的求解, 无法有效更新此类离散型的救援路

径序列。本文采用离散化处理的基础上, 为避免算法过早收敛和陷入局部最优, 进一步采用了多种群学习机制和高斯变异规则来对算法进行优化。

2.2.1 多种群学习机制

种群是指同一时间生活在一定区域内的所有个体。在种群内, 个体之间相互竞争、适者生存; 在多个种群中, 种群间相互学习、共同进步, 本文结合多种群思想与标准萤火虫算法, 将萤火虫算法分为以下两个阶段:

阶段 1 以数量为标准, 将标准萤火虫算法中的萤火虫个体分为数量相同的多个萤火虫种群, 并对每个萤火虫种群设置不同的参数, 以对比每个种群的优化效果;

阶段 2 求解阶段 1 划分的不同萤火虫种群的最优值与最差值, 并用前一种群的最优值替换为下一种群的最差值, 根据替换得到的最优值重新定位各萤火虫种群中萤火虫个体的位置, 通过对所有种群最优解的比较即可得到全局最优解。

2.2.2 高斯变异

在萤火虫算法的迭代过程中, 萤火虫的收敛速度会随着密度的增高而减慢, 后期易陷入局部极值点的困境。为解决该问题, 本文在萤火虫个体的位置更新过程中引进高斯变异。过程如式 (12):

$$x_i = x_i \cdot [1 + k \cdot N(0, 1)] \quad (12)$$

其中, x_i 表示第 i 只萤火虫当前的状态; k 是在区间 $(0, 1)$ 之间的递减变量; $N(0, 1)$ 为服从均值为 1, 方差为 1 的正态分布的随机向量。

2.2.3 编码与解码

萤火虫算法只能用于连续领域中相关问题的解决, 针对离散组合优化问题, 本文对每个萤火虫个体进行离散化处理。在萤火虫算法的解空间中, 将萤火虫个体位置向量 $x_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}\}$ 的每个分量表示为一个受灾点, 其中每个分量均取自于 $(0, 1)$ 区间的随机数, 再将分量按照升序编码方式重新排列, 排列后将分量所在位置和分量所代表的灾点的被救援顺序关联起来, 以明确各灾点在救援路径中的被救顺序。

2.3 算法步骤

改进后的萤火虫算法实现步骤如下:

(1) 初始化参数。设置萤火虫个体数 m 及子群个数 n , 并为各子群分别设置初始荧光素 $l_i(0)$, 初始决策域半径 $r_d^i(0)$, 最大感知域半径 r_s , 荧光素消失率 ρ , 荧光素更新率 γ , 动态决策域半径的更新率 β 等; 设定最大迭代次数 G , 并随机生成各萤火虫的初始位置;

(2)计算萤火虫个体适应度值,并更新其荧光素值,并将各子群中的最佳适应度值记为 f_{ibest} , 计入子群记录板;

(3)依据萤火虫移动概率公式选择下一步移动的对象;

(4)更新移动后萤火虫个体的位置、邻域半径以及荧光素值;

(5)查询各子群记录板。当子群内有连续3次最优解及其位置没有更新时,则可判断为该子种群内的萤火虫已陷入局部极值点^[4],此时需判断各子群 f_{ibest} 是否连续3次不变化或连续变化幅度很小(小于 μ , μ 表示高斯变异的控制参数,数值在 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ 之间)。若是,则算法陷入局部极值范围内,此时必须开始进行变异操作,转(6),否则,转(7);

(6)利用高斯变异对该子种群添加扰动,令萤火虫跳出局部搜索空间;

(7)不同种群间相互学习,选择前一个种群的最优解替代下一个种群的最差解;

(8)若达到迭代次数,则输出结果,否则返回第2步。

改进后的算法流程如图1所示。

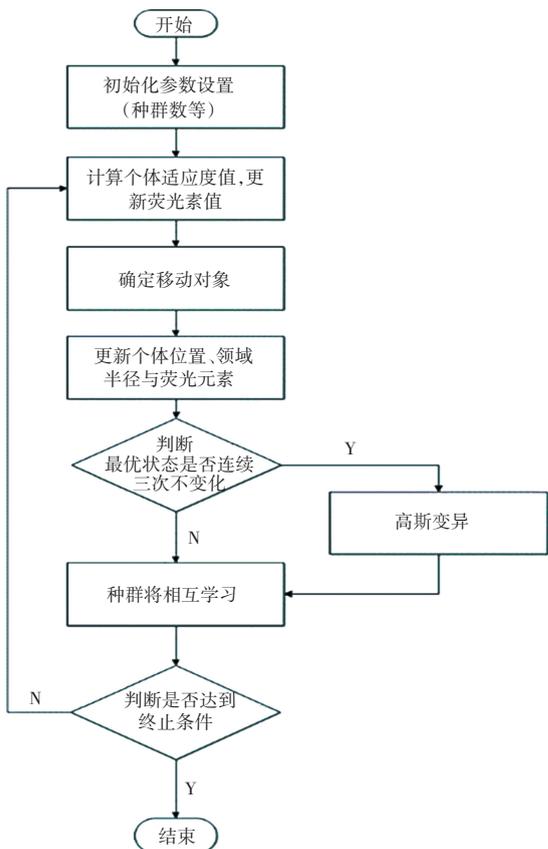


图1 改进萤火虫优化算法流程图

Fig. 1 Improved firefly optimization algorithm flow chart

3 算例

3.1 算例背景

现假设某地突发大规模自然灾害,导致20个受灾点有不同程度人员伤亡,位于中心的医院分派5个救援车队分别将20个受灾点的伤员接回医院接受救治,每个车队最多可以运载13个伤员,且一次运输的最大行程是60 km,车辆的行驶速度统一为40 km/h。随机产生待救点坐标、伤员人数、受灾程度等信息,并根据受灾程度级别为每个受灾点设置不同的时间窗和伤员在途可坚持时间窗,受灾等级1~受灾等级4表示受灾害影响程度越来越小,见表1。现利用新建立的模型合理协调各救援车辆行驶路径,使伤员得到高效迅速的救援。

表1 各受灾点信息及时间窗设置

Tab.1 Information and time window settings of each disaster site

受灾点/编号	横坐标/x	纵坐标/y	伤员人数/个	受灾程度/级别	时间窗/ b_i	在途可坚持时间窗/ c_i	停留时间/ uT_i
1	32	21	3	3	4.5	3.5	3
2	3	17	2	1	2	1	2
3	16	43	3	4	6	6	3
4	21	15	1	2	3	1.5	1
5	41	18	4	3	4.5	3.5	4
6	7	25	1	1	2	1	1
7	1	12	2	2	3	1.5	2
8	45	26	1	4	6	6	1
9	42	13	1	1	2	1	1
10	20	35	2	2	3	1.5	2
11	2	32	4	2	3	1.5	4
12	26	36	3	3	4.5	3.5	3
13	16	16	1	4	6	6	1
14	32	26	3	2	3	1.5	3
15	42	21	2	3	4.5	3.5	2
16	16	35	1	2	3	1.5	1
17	26	39	2	4	6	6	2
18	10	39	1	3	4.5	3.5	1
19	12	8	3	2	3	1.5	3
20	10	38	1	4	6	6	1
21	25	25	0	4	10 000	10 000	0

3.2 求解结果

实验的运行环境为 Intel (R) Core (TM) i5-7200U CPU,主频 2.50 GHz, Win10 64 位操作系统,仿真软件为 Matlab R2015a。输入初始参数:萤火虫

总数 $m = 100$, 子种群个数 $n = 4$, 最大迭代次数 $G = 200$, 初始荧光素 $l_i(0) = 5$, 初始决策域半径 $r_d^i(0) = 4$, 最大感知域半径 $\gamma_s = 20$, 荧光素消失率 $\rho = 0.04$, 荧光素更新率 $\gamma = 0.6$, 动态决策域更新率 $\beta = 0.08$, 个体邻域集合内种群数量的阈值 $n_t = 5$ 。对算例求解 10 次后, 路径最短的 3 组方案结果见表 2。其中方案 3 的救援路径最短, 方案 1 的救援时间最短且在可接受路径长度 $[d, d + 5]$ 范围内, 所以得到最优应急救援方案为方案 1。改进萤火虫算法优化过程和救援车辆行驶路径如图 2 和图 3 所示。

表 2 算例求解结果

Tab. 2 Solving results of calculation examples

序号	方案	距离/km	时间/min
1	(1)21, 2, 7, 21	254.7	2 693.9
	(2)21, 9, 5, 15, 8, 14, 21		
	(3)21, 10, 16, 20, 18, 3, 17, 12, 21		
	(4)21, 13, 19, 4, 1, 21		
	(5)21, 11, 6, 21		
2	(1)21, 16, 18, 20, 11, 6, 21	251.9	2 756.7
	(2)21, 10, 3, 17, 12, 21		
	(3)21, 4, 19, 1, 21		
	(4)21, 13, 7, 2, 21		
	(5)21, 14, 8, 15, 5, 9, 21		
3	(1)21, 1, 5, 9, 15, 8, 21	250.3	2 801.2
	(2)21, 4, 19, 13, 21		
	(3)21, 2, 7, 21		
	(4)21, 3, 17, 12, 14, 21		
	(5)21, 10, 16, 18, 20, 11, 6, 21		

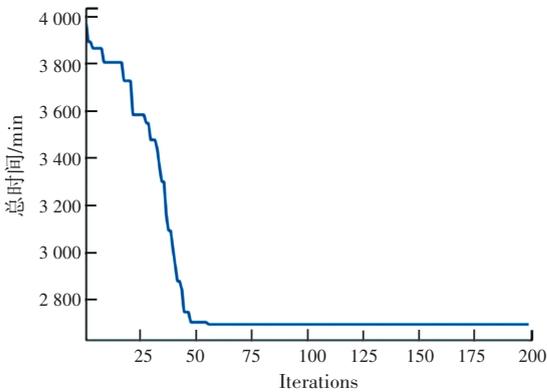


图 2 改进萤火虫算法优化过程

Fig. 2 The optimization process of the improved firefly algorithm

3.3 结果对比

利用调度中经典遗传算法对本文算例求解, 设置交叉概率、变异概率分别为 0.9、0.1, 求解 10 次后选择最优值的寻优过程如图 4 所示, 对比结果见表 3。由表 3 可知本文提出的改进萤火虫算法在求解本文算例时优化速度更快。

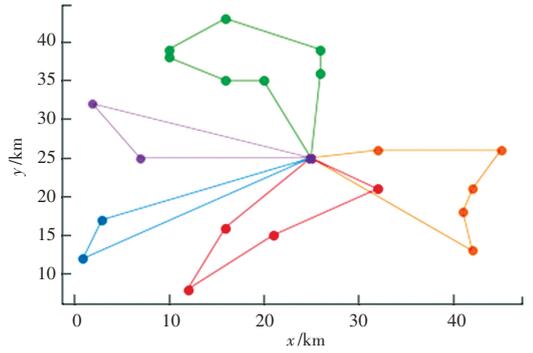


图 3 救援车辆行驶路径

Fig. 3 Rescue vehicle driving path

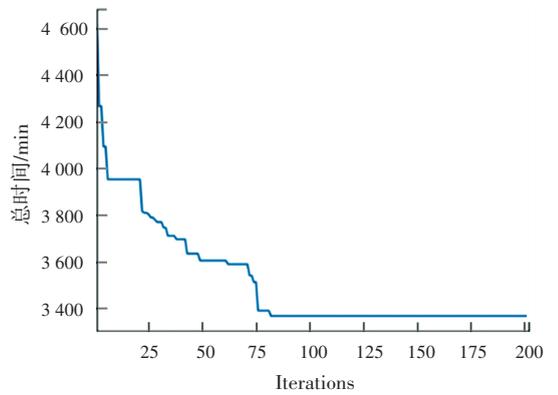


图 4 遗传算法寻优过程

Fig. 4 Genetic algorithm optimization process

表 3 算法结果对比

Tab. 3 Comparison of algorithm results

	方案	距离/km	时间/min
改进萤火 虫算法	(1)21, 2, 7, 21	254.7	2 693.9
	(2)21, 9, 5, 15, 8, 14, 21		
	(3)21, 10, 16, 20, 18, 3, 17, 12, 21		
	(4)21, 13, 19, 4, 1, 21		
	(5)21, 11, 6, 21		
遗传算法	(1)21, 16, 18, 20, 11, 21	273.9	3 312.1
	(2)21, 14, 8, 15, 5, 9, 21		
	(3)21, 12, 17, 3, 10, 21		
	(4)21, 7, 2, 6, 21		
	(5)21, 1, 4, 19, 13, 21		

4 结束语

灾后伤员救援车辆是有限的, 且伤员最佳救援时机受伤情轻重影响, 因此选择最优的车辆调度方案, 才能确保伤员有效及时地救治。

本文对改进的萤火虫优化算法和遗传算法的寻优过程进行了对比, 得到如下结论:

(下转第 138 页)