

杂草-蚁群算法在应急管理中的应用

曹 磊, 叶春明

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘 要: 将杂草-蚁群算法应用于应急车辆配置, 用二段编码方式对杂草个体编码, 使之对应于唯一应急方案. 用蚁群算法优化车辆子路径, 并通过杂草蚁群信息交互机制将优良信息回传给杂草群体. 针对某区域内易于发生的两疫情分布及出现概率情况, 运用混合算法优化灾区车辆配置, 既满足救援需要又节约成本. 针对不同应急车辆问题, 此算法表现较优. 可以看出, 该算法对于此类问题的求解是有效的.

关键词: 杂草算法; 蚁群算法; 应急管理; 车辆配置

中图分类号: TP31

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2016)09-0150-05

The Application of Hybrid Algorithm of Invasive Weed Optimization and Ant Colony Algorithm in Emergency Management

CAO Lei, YE Chun-ming

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

Abstract: Hybrid algorithm of invasive weed optimization and ant colony algorithm is applied to solve emergency vehicle configuration problem. A double-section weed can be decoded into one emergency plan. Sub route is optimized by ants, and good local information is got by weed population. Hybrid algorithm is used to optimize an emergency problem of one area with two objectives (time and cost). The results show algorithm has an advantage in terms of different numbers of vehicles, and it's an effective tool to solve this kind of problem.

Key words: IWO; ACO; emergency scheduling; vehicle configuration

1 引言

灾害一般波及范围较大, 具有高度的突发性、不确定性. 在解决灾害情景下的优化问题时, 一些经典的计算技术(如分支定界法、动态规划以及拉格朗日松弛算法等)往往在寻优速度上欠佳. 智能计算技术是近些年来发展较为迅速的一种计算方法, 该方法可以在可接受的时间范围内求得问题最优解或近似最优解. 有研究表明^[1], 杂草算法在求解高维问题时较之诸多经典算法(遗传算法、粒子群算法等)有一定优势. 应急管理中的决策大部分是基于分配、路径以及时间的, 这与旅行商问题相似. 而蚁群算法是求

解 TSP 问题的经典算法^[2-7], 本文旨在结合两种算法的优势, 兼顾应急经济性以及社会性, 尝试将混合算法应用于某城市群疫情灾前分析中.

2 应急情景描述及模型构建

某地区发生大规模疫情, 主要受灾点有 n 个, 分为重灾区 and 轻微灾区, 重灾区 and 轻微灾区有效救援时间上限分别为 E_h 和 E_l . 疫情发生后, 政府需从该地区唯一的应急救援中心调拨医用救援物资, 该应急救援中心具有充足的应急物资储备, 并具有同型号应急车辆 m 辆, 运输速度均为 v . 接到救援命令后, 该救援中心向受灾点一次性调拨救援物资, 任务

收稿日期: 2015-11-03; **修回日期:** 2015-12-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71271138); 上海市一流学科项目资助(S1201YLXK); 沪江基金资助(A14006); 上海理工大学人文社科攀登计划(14XPB01)

完成后救援车辆返回应急中心待命。为防止疫情蔓延,要求应急救援中心尽可能快地调派救援车辆到灾区,认为灾情发生后的 E 时间内救援是有效的,对某城市救援有效度服从式(1)和图1。

$$C = \begin{cases} -\frac{(T-S)^2}{(E-S)^2} + 1, S < T < E \\ 1, T \leq S \\ 0, T \geq E \end{cases} \quad (1)$$

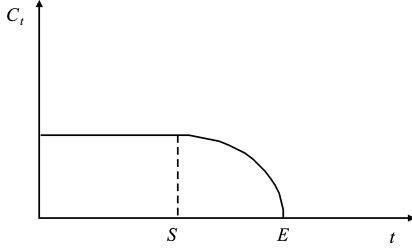


图1 救援有效度函数

其中, S 为灾情发生时刻; T 为救援车辆到达时刻; C 为救援有效度。

上述描述有如下假定:该类疫情发生未对交通产生影响,应急中心救援物资充足,一次救援即可完成对受灾点的援助。灾情发生后,一方面要尽可能地增加救援效用;另一方面,从经济性的角度讲,救援路线尽量短以降低出行成本。基于以上分析,构建数学模型如下:

Objective:

$$\max f_1 = \sum_{L=1}^n C_L \quad (2)$$

$$\min f_2 = \sum_{k=1}^m z_k p \quad (3)$$

式中, f_1, f_2 分别为应急救援有效度和应急成本函数; C_L 为城市 L 的救援有效度; z_k 为车辆 k 在应急救援中出行总距离; p 为单位距离出行成本。目标函数满足约束条件如下:

$$z_k = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \omega_{ij} x_{ijk}, k = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$m \in [A_{\min}, A_{\max}] \quad (5)$$

$$C_L = \begin{cases} -\frac{(T_L - S_L)^2}{(E_L - S_L)^2} + 1, S_L < T_L < E_L \\ 1, T_L \leq S_L \\ 0, T_L \geq E_L \end{cases} \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^m y_{ki} = \begin{cases} m, i = 0 \\ 1, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ijk} = y_{kj} \quad (8)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ijk} = y_{ki} \quad (9)$$

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, (i, j) \in \text{route}(k) \\ 0, \text{other} \end{cases} \quad (10)$$

$$y_{ki} = \begin{cases} 1, \text{city}(i) \in \text{ambulance_set}(k) \\ 0, \text{other} \end{cases} \quad (11)$$

$$X = (x_{ijk}) \in S \quad (12)$$

$$T_L = T_0 + \frac{\sum_{i=0}^L \sum_{j=0}^L \omega_{ij} x_{ijk}^*}{v_{k^*}} \quad \text{city}(i) \in \text{ambulance_set}(k^*) \quad (13)$$

式中, ω_{ij} 为受灾城市 i 和 j 之间的距离; $A_{\min}$ 和 $A_{\max}$ 分别为预计最小和最大应急救援车辆保有量; T_L 为救援车辆到 L 城市的时间; S_L 和 E_L 分别为城市 L 灾情发生时刻以及有效救援时间上限; $\text{route}(k)$ 和 $\text{ambulance_set}(k)$ 分别为应急救援车辆 k 行走路线以及救援城市集合。

在众多约束条件中:式(4)表示救援车辆 k 的救援总行程;式(5)约束了救援车辆的最小和最大保有量;式(6)定义了受灾城市 L 受到救援的程度;式(7)约束了每个受灾城市仅得到一次救助;式(8)和式(9)规定了救援车辆实施救援时,起点城市与终点城市均唯一;式(10)和式(11)规定了决策变量的取值范围;式(12)中, S 为支路消去约束,即消去构成不完整路线的解,具体含义见文献[3];式(3)为城市 L 获得救援的时刻。

3 杂草-蚁群算法

3.1 杂草算法

杂草算法是模拟杂草入侵扩张行为构造出的一类随机优化算法。杂草表示所求问题的可行解,杂草种群表示所求问题的可行解集。进化过程中,杂草通过繁殖产下种子,种子通过空间扩张,生长成杂草,如此循环,一直到种群中杂草的数量达到预先设定的最大种群规模,这样让所有个体都有自由繁殖的机会,一直到扩散完成后,再将所有的父代和子代一起,按适应度值排序进行适应性生存竞争。通常对环境适应较好的杂草有更多繁殖机会和生存空间,而相对那些环境适应性差的杂草只留有更少的生存和繁殖机会。

3.1.1 杂草算法的一般流程

杂草繁殖种子的数目与杂草的适应性成正比,通过如下定义对杂草算法进行描述。

定义1 杂草产生种子的公式为

$$\text{weed}_i = \frac{f_i - f_{\text{worst}}}{f_{\text{best}} - f_{\text{worst}}} (S_{\max} - S_{\min}) + S_{\min} \quad (14)$$

式中, f_{best} 和 f_{worst} 分别为种群中所生长的杂草的最好和最差适应度值; f_i 为当前杂草的适应度值, $S_{\max}$ 和 $S_{\min}$ 分别表示一个杂草能产生种子的最大值和最

小值.

定义 2 在杂草算法中,杂草产生的种子按平均值为 0,标准差为 σ 的正态分布,在父代周围扩张繁殖.种子生长位置与杂草的距离称为随机步长 $D \in [-\sigma, \sigma]$. σ 的变化公式如下:

$$\sigma = \frac{(\text{iter}_{\max} - \text{iter})^n}{(\text{iter}_{\max})^n} (\sigma_{\text{init}} - \sigma_{\text{final}}) + \sigma_{\text{final}} \quad (15)$$

式中, iter 为当前进化代数; $\text{iter}_{\max}$ 为最大进化代数; σ_{init} 和 σ_{final} 分别为标准差的最初值和最终值; σ 为当前标准差; n 为非线性调和因子. 在迭代初期 σ 较大,种子在父代杂草较远的区域扩散,算法表现为全局探索;随着迭代次数增加, σ 逐渐减小,种子在父代杂草较近的地方密集分布,算法表现为局部探索,此时如果进化种群无法摆脱局部极值的干扰,容易使杂草算法呈现收敛早熟.

算法寻优过程:随机初始化产生 n 颗杂草,对杂草种群进行初始化;每次迭代杂草按式(14)产生若干种子;杂草的种子按式(15)计算的随机步长,进行繁殖扩张;按照适者生存的原则选择优良种子,进行下一次迭代;在每一次迭代前,判断是否达到最大迭代次数,若满足则输出最优解,算法终止,否则重复迭代.

3.1.2 基于问题的杂草编码与译码

杂草算法本身是用来求解连续问题的,如何将杂草个体与可行出行方案对应、如何对杂草进行编码与译码是是关键.

(1) 编码过程

在本文的应急调度中,决策变量主要有应急车辆配置数目以及应急车辆救援路线.文中采用二段编码方式使得每一颗杂草携带上述信息.前段编码由一位组成,主要控制应急车辆数目;后端编码长度为 L ,主要携带应急车辆救援信息.首先根据式(16)生成首位基因 Y_1 :

$$Y_1 = m \quad (16)$$

根据首位基因,按照式(17)生成后端基因:

$$Y_{i+1} = 1 + (Y_1 - 1) \cdot \text{rand}() \quad (17)$$

以 2 救援车辆前往五城市救援为例,如图 2 所示.

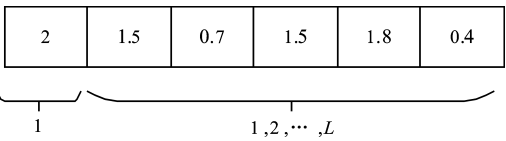


图 2 杂草编码示意图

(2) 译码过程

第 i 个城市由第 $\text{ceil}(Y_{i+1})$ 辆救援车辆实施救

援;对于同一救援车辆,城市救援顺序则由对应基因位置上的数值决定,数值小的先实施救援,数值相等时,近左优先.图 2 所示的救援车辆救援实施计划为:第一个救援车辆实施救援的城市及顺序为:0-1-3-4-0;第二辆为 0-2-5-0.

3.2 蚁群算法

经过杂草算法的初步分配,问题化解为多个单车辆应急调度,此时借助蚁群算法的优势,对救援路线进一步优化,以期挖掘杂草个体的局部信息,找到更加合适的邻域解.

设蚁群系统中有 m 只蚂蚁. $d_{ij}(i, j = 1, 2, \dots, n)$ 城市 i 与城市 j 之间的距离, $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻弧 (i, j) 上残留的信息素强度. $p_{ij}^k(t)$ 表示蚂蚁 k 在 t 时刻从城市 i 移动到城市 j 的概率,如式(18).其中, allow_k 为蚂蚁 k 下一步可选择的的城市集合; η_{ij}^α 为能见度因数,常取 d_{ij} 的倒数; α 为信息素启发式因子, β 为期望启发式因子.

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in \text{allowed}_k} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)}, & j \in \text{allowed}_k \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (18)$$

$t + n$ 时刻在路径 (i, j) 上的信息量按照式(19)和(20)作调整.

$$\tau_{ij}(t + n) = \rho \times \tau_{ij}(t) + (1 - \rho) \times \Delta \tau_{ij} \quad (19)$$

$$\Delta \tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (20)$$

式中, ρ 为信息素挥发因子 ($0 < \rho < 1$), $\Delta \tau_{ij}(t)$ 为本次循环中信息素增量,第 k 只蚂蚁留下的信息素增量为

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{d_{ij}}, & \text{若在本次循环中蚂蚁 } k \text{ 经过路径 } (i, j) \\ 0, & \text{other} \end{cases} \quad (21)$$

$$\delta = \begin{cases} 0.5, & j \in \text{重灾区城市} \\ 1, & \text{other} \end{cases} \quad (22)$$

式中, Q 为信息素强度; δ 为调节因子,取 0.5 时意味着目的城市为重灾城市,以此控制蚂蚁在该路径上留下的信息素数量.

蚁群算法是一类智能多主体系统,其自组织机制使得蚁群算法不需要对所求问题的每一方面都有详尽的认识.对于论文中问题,蚁群算法具体实现步骤如下所示.

Step1 初始化参数.当前循环次数 $N_c = 0$,最大循环次数,当前时间 $t = 0$.将 m 只蚂蚁置于 n 个城市,每条弧 (i, j) 的初始化信息量 $\tau_{ij}(t) = \text{const}$,初始时刻信息量变化 $\Delta \tau_{ij}(t) = 0$.其中, const 为常数.

Step2 当前循环次数 $N_c = N_c + 1$.

- Step3 蚂蚁的禁忌表索引号 $k = 1$.
- Step4 蚂蚁数目 $k = k + 1$.
- Step5 根据式 (18), 选择目标城市, $j \in \{C - \text{tabu}_k\}$.
- Step6 蚂蚁向新城市移动, 新城市进入该蚂蚁的禁忌表.
- Step7 若 $k < m$, 跳转至 Step4, 否则下一步.
- Step8 根据式 (19) 和 (20) 更新路径上的信息量.
- Step9 若 $N_c \geq N_{c_{\max}}$, 输出结果并结束循环; 否则, 清空禁忌表, 并跳转至 Step2.

3.3 杂草-蚁群信息交互机制

本文设计了一种杂草-蚁群双层算法来解决本文中的应急调度问题. 为了充分发挥杂草和蚁群算法各自的优势, 建立如图 3 所示的杂草-蚁群信息交互机制. 杂草算法主要任务是负责任务分组, 蚁群算法负责对邻域信息的深度挖掘, 为救援车辆寻找更为合适的出行方案. 每次迭代后期, 选取当代最为优秀的杂草个体与蚁群进行信息交流. 通过译码, 可以得到每辆救援车辆救援计划, 蚁群对救援计划进一步优化, 并把更优方案映射回杂草解空间.

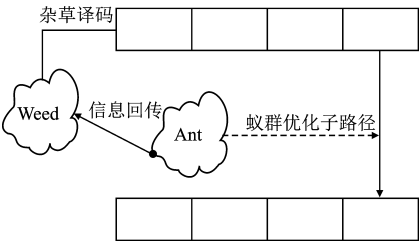


图 3 杂草-蚁群信息交互示意图

对于规模较小的子路径, 蚁群一般能够寻得该救援车辆的最优救援路径, 而待救援城市较多的救援车辆, 蚁群需要耗费更多的时间寻求最优值. 因此, 设计动态搜索因子来调节蚁群算法的搜索深度.

$$\delta = \lambda \cdot \text{subcity}_k \tag{23}$$

式中, λ 为基本搜索深度, 可解释为蚁群算法基本搜索迭代次数; subcity_k 为救援车辆 k 所要救援的城市个数.

4 应急案例及其优化

实验环境为: PC 计算机处理器主频 2.1 GHz, 内存 2 GB, Windows7 操作系统, MATLAB R2010b 编程软件. 杂草算法参数设置如下: 最小杂草数 10、最大杂草数 15、非线性因子 n 为 3、最小最大种子数分别为 0 和 3、最大和最小步长分别为 1 和 0.000 01. 蚁群算法参数设置如下: 基本搜索深度 $\lambda = 2$, 信息素启发因子 $\alpha = 0.5$, 期望启发式因子 $\beta =$

2, 信息素挥发因子 $\rho = 0.8$.

4.1 应急案例

以文献[4]附录中城市规模为 50 的问题为基础, 构建应急案例. 根据统计数据和经验分析, 该城市群所在区域极易发生 D_1 和 D_2 两种疫情, 发生概率分别为 0.4 和 0.6. 灾情分布及救援时间上限如表 1 所示. $C_0(50, 50)$ 为该区域的唯一的应急救援中心, 应急车辆型号和救援速度 (80 km/h) 一致, 单位出行成本 $p = 1$, 可接受的应急车辆数目区间为 1 ~ 9.

表 1 区域灾情分布表

灾情	灾情分布	救援时间上限	概率
D_1	重灾 $C_1, C_3, C_5, C_9, C_{10}$	5	$\omega_1 = 0.4$
	轻微 其他城市	10	
D_2	重灾 C_1, C_2	8	$\omega_2 = 0.6$
	轻微 其他城市	15	

4.2 仿真及优化

为研究杂草-蚁群算法的有效性, 分别计算在不同应急车辆数目下总出行时间和救援有效度 (独立运行 20 次平均值), 如图 4、图 5 所示.

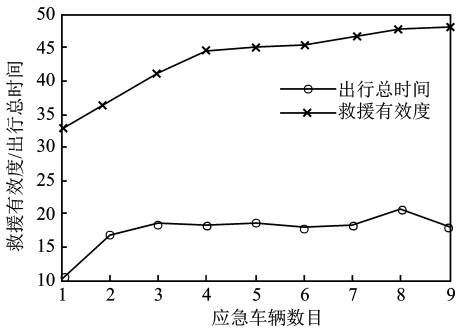


图 4 疫情 1 车辆配置示意图

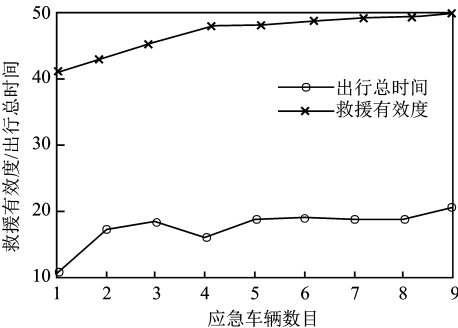


图 5 疫情 2 车辆配置示意图

从图 4、图 5 可以看出: 应急车辆数量不同, 响应结果有所差异; 随着应急车辆数目增加, 救援有效度及总出行时间均有增加的趋势; 在救援车辆较大的情况下, 救援有效度变化不大, 并接近 50.

救援车辆的增加会提高救援中心对受灾点的救援有效度. 受情景影响,救援有效度并不能随应急车辆的增加而无限增大. 同时,总出行时间的增加会增加救援的成本. 应急决策不同于其他成本型决策,应急效果是一个十分重要的决量,兼顾成本与救援效果定义救援效率 η ,如式(24). 表 2 为针对两种灾情不同应急车辆情形下的救援效率统计表.

$$\eta = \frac{f_1}{f_2}$$

(24)

表 2 救援效率统计

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9
η									
η_1	3.18	2.19	2.22	2.44	2.41	2.53	2.54	2.31	2.68
η_2	3.92	2.56	2.55	3.05	2.60	2.59	2.62	2.65	2.43
$\omega_1 \eta_1 + \omega_2 \eta_2$	3.47	2.34	2.35	2.69	2.49	2.56	2.58	2.44	2.58

从表 2 可以看出,应急车辆保有量为 1 时救援效率最高. 应急车辆保有量为 4 时,救援效率也相对较高. 由于虚拟案例中城市间隔并不是很大,所以单车车辆能够较为出色地完成救援任务,但相对于 4 辆应急车,救援有效度明显不足.

5 结束语

针对应急管理中的应急车辆配置问题,本文构建了杂草蚁群算法求解该类问题. 对杂草个体进行两段编码,生成可行救援方案,迭代后期蚁群对子方案进一步优化. 仿真实验表明模型构建以及算法是有效的,混合算法可以用于应急车辆配置问题. 今后可将其应

用于规模更大、约束更多的应急车辆配置问题.

参考文献:

[1] Mehrabian A R, Lucas C. A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization [J]. Ecological Information, 2006, 1(4):355-366.

[2] 吴华锋,陈信强,毛奇凰,等. 基于自然选择策略的蚁群算法求解 TSP 问题[J]. 通信学报,2013, 34(4): 165-170.

[3] 李军,郭耀煌. 物流配送车辆优化调度理论与方法[M]. 北京:中国物资出版社,2001.

[4] 王凌. 车间调度及其遗传算法[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[5] Ronchi E, Colonna P, Capote J, et al. The evaluation of different evacuation models for assessing road tunnel safety analysis[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012, 30(4): 74-84.

[6] 张玲,董银红,张敏. 基于情景分析的应急资源布局决策[J]. 系统工程,2014,20(3):137-142.

[7] 孙平,朱伟,王剑,宋瑞,等. 基于灾害评估的社区应急救援资源调配及模拟[J]. 中国安全科学学报,2014, 24(3):172-176.

作者简介:

曹磊男,(1989-),博士研究生. 研究方向为智能算法、生产调度. E-mial:mnbxcaolei@163.com.

叶春明男,(1969-),博士,教授,博士生导师. 研究方向为工业工程、管理科学.

(上接第 149 页)

[3] 陆兴华,陈平华. 基于定量递归联合熵特征重构的缓冲区流量预测算法[J]. 计算机科学,2015,42(4):68-71.

[4] Patcharamaneerakron P, Armour S, Doufexi A. Coordinated beamforming schemes based on modified signal-to-leakage-plus-noise ratio precoding designs[J]. IET Communications, 2015, 9(4): 558-567.

[5] 童峥嵘,郭尊礼,曹晔,等. 小波包变换对 CO-OFDM 系统高峰均比的抑制性能研究[J]. 光子学报,2015, 44(12): 1-6.

[6] 谭营军,王俊平. 基于 MEACO 的无线传感器网络路由光通信算法研究[J]. 激光杂志,2016, 37(2): 131-133.

[7] 陈海燕,刘威,李莉. 相对相位噪声对相干光通信系统性能影响[J]. 激光技术,2016, 40(1): 94-98.

[8] 杨石,王艳玲,王永利. 云计算环境下基于蜜蜂觅食行

为的任务负载均衡算法[J]. 计算机应用,2015,35(4): 938-943.

[9] 杨照峰,王启明,吕海莲. 基于任务延迟的云计算资源调度算法研究[J]. 计算机测量与控制,2014,22(2): 499-502.

作者简介:

陈仁太男,(1976-),讲师. 研究方向为教育信息化、计算机网络、数据挖掘技术、云计算. E-mail:chenrentai_dz@163.com.

钟帅男,(1983-),硕士,讲师. 研究方向为计算机网络、云计算.

卿波男,(1977-),讲师. 研究方向为计算机应用技术、软件工程、云计算.