

基于马尔可夫决策的应急物资动态分配模型

詹沙磊¹, 傅培华¹, 李修琳¹, 叶 永^{2†}

(1. 浙江工商大学 管理工程与电子商务学院, 杭州 310018;

2. 温州医科大学 公共卫生与管理学院, 浙江 温州 325035)

摘 要: 研究供需不平衡环境下的应急物资动态分配问题. 考虑到台风灾害演变导致应急物资需求不断增长与应急物资供应相对紧缺之间的矛盾, 将需求的演变设计成一个马尔可夫决策过程, 建立基于马尔可夫决策的应急物资动态分配模型. 通过二进制粒子群优化算法求解, 最后将所提出模型应用于某台风发生时的救灾实例. 实例分析表明, 马尔可夫决策方法可以动态地做出合适的需求扑灭策略, 使得整体的需求演变趋势保持平稳, 整体的需求水平降到最低.

关键词: 应急物流; 物资分配; 台风灾害; 马尔可夫决策; 粒子群算法

中图分类号: C934; X43

文献标志码: A

Dynamic programming approach for relief goods allocation based on Markov decision

ZHAN Sha-lei¹, FU Pei-hua¹, LI Xiu-lin¹, YE Yong^{2†}

(1. School of Management and E-Business, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China; 2. School of Public Health and Management, Wenzhou Medical University, Wenzhou 325035, China)

Abstract: This paper studies the relief-allocation problem for short-supply relief goods in humanitarian logistics. Considering the conflict between ever-increasing demand and short supply due to typhoon evolution, the Markov decision approach is employed to demonstrate the ever-varying demand, and a dynamic relief-allocation model is proposed. Then the model is solved using the binary particle swarm optimization algorithm. Finally, the proposed model is applied to a case study of a post-typhoon rescue. Computational results show the potential advantages of the Markov decision approach for its dynamic relief-allocation adjustments, resulting in gradual increase and minimum quantity of total demand.

Keywords: humanitarian logistics; relief goods allocation; typhoon disaster; Markov decision; particle swarm optimization

0 引 言

随着人口的增长和城市化进程的加快,生态系统的压力与日俱增,各种灾害的发生频率明显增加^[1]. 根据国际灾害数据库的统计,2000年~2010年全世界共发生8351个灾害^[2],在众多的自然和人为灾害中,台风是我国南方常见的自然灾害,它具有以下特点:与地震之类的非常规突发灾害不同,台风所致的需求是可以预测的^[3-4];虽然需求可以预测,但是各种不确定因素导致预测的难度增加^[5]. 随着台风的

演变,应急物资需求是动态变化的,从而使需求分布在时空二维网格中^[6-7]. 再者,台风灾害的应急物流运作包括灾前的准备和灾后的救援^[8],在灾后应急物资分配过程中,会出现供需的不平衡性^[9],这是因为应急物资多为非耐用品,在低概率灾害发生之前很难为其保持大量库存^[10]. 因此,准确把握需求的时空演变规律,并且利用有限的应急物资供应对动态变化的需求进行物资分配是当前救灾工作的难点,也是一项重要的研究课题.

收稿日期: 2017-03-31; 修回日期: 2017-10-11.

基金项目: 浙江省哲学社会科学规划课题项目(18NDJC198YB); 国家自然科学基金项目(71603237,71601146,91746202); 浙江省自然科学基金项目(LZ14G020001,LQ14E050001); 浙江省哲社重点研究基地课题项目(15JDLG02YB)

责任编辑: 马寿峰.

作者简介: 詹沙磊(1985—),男,讲师,博士,从事应急物流管理等研究;傅培华(1966—),男,教授,从事物流管理研究.

†通讯作者. E-mail: yong-ye@foxmail.com

在过去很长的一段时间内,有关应急物资分配的研究大多停留在单阶段不确定性决策和多阶段确定性决策的层面上. 近年来,部分学者开始关注需求的动态变化性质,使用模糊数方法来表达需求^[11-12],或使用两阶段随机规划来构建离散需求情景^[13-16],但没有充分展现出需求的多阶段时空动态演变特性. 詹沙磊等^[17-18]使用贝叶斯分析方法,利用历史经验数据对需求进行更新,但其模型实质上是确定最优物资分配时间,而不是确定物资的动态分配方案. 朱莉等^[19]利用传染病模型近似模拟灾害扩散过程,但对台风的适用性仍需验证.

考虑到马尔可夫决策方法已成功应用于天气预报、飓风路径跟踪、灾前疏散等场合^[20],且其诠释的“系统的演变取决于状态之间的随机转变”较符合台风灾害的需求动态演变特性,本文在灾后供需不平衡的现实环境下,将需求的演变设计成一个马尔可夫决策过程,在此基础上构建应急物资动态分配模型. 通过二进制粒子群优化算法求解,最后将本模型应用于某台风发生时的救灾实例. 实例分析表明,马尔可夫决策方法可以动态地做出合适的需求扑灭策略,使得整体的需求演变趋势保持平稳,整体的需求水平降到最低.

1 模型描述

1.1 需求状态演变的马尔可夫过程

马尔可夫决策过程是指决策者周期性地观察具有马尔可夫性的随机动态系统,序贯地做出决策,即根据每个时刻观察到的状态,从可用的行动集中选用一个行动做出决策,系统下一步(未来)的状态是随机的,并且其状态转移概率具有马尔可夫性. 决策者根据新观察到的状态,再做新的决策,依此反复进行. 马尔可夫决策过程比现有的灾害预测模型更简单、易懂,并且可以为灾害预期演化趋势提供一套量化的方案,适合本文的数学建模,因此将马尔可夫决策过程应用于本文的台风灾害背景.

台风灾害来袭导致不同的区域受灾,产生对应急物资的需求. 假设 J 为需求点 j 的集合, $J = \{j|1, 2, \dots, j_{\max}\}$. K 为应急物资 k 的集合, $K = \{k|1, 2, \dots, k_{\max}\}$. 将应急物资分配问题设计成一个多阶段动态决策问题,假设阶段的集合为 $T = \{t|1, 2, \dots, t_{\max}\}$. 灾害发生初期,应急物资的供应往往是不足的,在供需不平衡的现实环境下,任一阶段的应急物资分配方案都不可能满足所有需求点的需求. 将某需求点的需求完全被满足称为该需求点的需求被“扑灭”,假设在每个阶段,决策者面对每个需求点必须做出是否扑

灭的决定: 要么扑灭,要么暂时不扑灭,并推迟到下一个阶段再做是否扑灭的决定. 因此,决策架构是动态的“现在扑灭需求or将来扑灭需求”的决策架构,区别于传统静态的“现在扑灭需求or现在不扑灭需求”的决策架构. 将是否扑灭阶段 t 需求点 j 对应应急物资 k 的需求的决策变量记为 Z_j^t , 有

$$Z_j^t = \begin{cases} 1, & \text{阶段 } t \text{ 受灾点 } j \text{ 的需求被扑灭;} \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

在不同的阶段,决策者做出了是否扑灭需求的决策,其决策结果会改变下一阶段的需求状态以及影响下一阶段的决策,这显然是一个动态规划问题. 设需求状态集为 $\Theta = \{\theta|1, 2, \dots, \theta_{\max}\}$, 该状态代表需求的规模,也能反映需求被扑灭的迫切程度. 其中 1 表示灾害尚未发生,数值越大意味着累计需求越多,需求越需要优先被扑灭. 显然,状态因地点、物资,特别是因阶段(时间)的不同而异. 为了反映这种现象,设计参数 C_{jk}^t 表示阶段 t 需求点 j 对应应急物资 k 的需求状态. 如 $C_{jk}^1 = 3$ 表示阶段 1 需求点 j 对应应急物资 k 的需求状态为 3. 对于这样的状态,有如下性质.

性质 1 在需求未被扑灭的前提下,需求状态是阶段的不减函数.

假设灾民对应急物资的需求只能通过接收决策者提供的应急物资而得到扑灭. 在需求未被扑灭的前提下,根据灾害的演变规律,随着阶段(时间)的推移,需求规模只可能增加或停滞,不可能减弱,即在未被扑灭的前提下,有

$$C_{jk}^{t_1} \leq C_{jk}^{t_2}, \quad (2)$$

其中 $t_1, t_2 \in T, 1 \leq t_1 < t_2 \leq t_{\max}$.

性质 2 需求状态的变换是随机的.

因为需求的不确定性,两个相邻阶段间的需求状态转移是随机的,它仅依赖于当前阶段的需求状态以及将来的变化趋势,所以 C_{jk}^t 实质上是一个随机变量. 如果在某个阶段的需求状态为 θ_1 , 则灾害演化一个阶段后需求状态为 $\theta_2 (1 \leq \theta_1, \theta_2 \leq \theta_{\max})$ 的概率为 $R_{jk}(\theta_1, \theta_2)$, 称为状态转移概率. 由所有状态转移概率组成状态转移概率矩阵为

$$R_{jk} = \begin{bmatrix} R_{jk}(1, 1) & R_{jk}(1, 2) & \cdots & R_{jk}(1, \theta_{\max}) \\ & R_{jk}(2, 2) & \cdots & R_{jk}(2, \theta_{\max}) \\ & & \ddots & \vdots \\ & & & R_{jk}(\theta_{\max}, \theta_{\max}) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

根据性质 1 可以推断, R_{jk} 是一个上三角矩阵,即矩阵中对角线以下元素均为零.

定义1 在需求未被扑灭的前提下,需求状态是按照灾害演变规律自然发展的,称为“自然状态”,记 \tilde{C}_{jk}^t 为阶段 t 需求点 j 对应急物资 k 的需求的“自然状态”.

由 \tilde{C}_{jk}^t 按不同阶段组成的“自然状态”序列 $\tilde{C}_{jk}^1, \tilde{C}_{jk}^2, \dots$ 是一个马尔可夫链. 马尔可夫链具有无后效性,即下一阶段的“自然状态”仅与当前阶段的状态有关,与以前的状态无关. 将阶段 $t+1$ 的“自然状态”的期望值记为 $E\tilde{C}_{jk}^{t+1}$, 有

$$E\tilde{C}_{jk}^{t+1} = \sum_{\theta=\tilde{C}_{jk}^t}^{\theta_{\max}} \theta \cdot R_{jk}(\tilde{C}_{jk}^t, \theta). \quad (4)$$

显然 $E\tilde{C}_{jk}^{t+1}$ 不一定等于整数,前面已假设状态值是非负整数,因此 $E\tilde{C}_{jk}^{t+1}$ 不一定会落在状态值的取值点上,即 $E\tilde{C}_{jk}^{t+1} \neq \tilde{C}_{jk}^{t+1}$. 两者只有在相邻阶段的时间间隔趋向于0时才会相等,因此有如下定理.

定理1 设 H 为相邻阶段的时间间隔,则当 H 趋向于0时,有

$$\lim_{H \rightarrow 0} E\tilde{C}_{jk}^{t+1} = \tilde{C}_{jk}^{t+1}. \quad (5)$$

证明 当 $H \rightarrow 0$ 时,状态的取值是连续的, \tilde{C}_{jk}^{t+1} 的取值范围变为 $[\tilde{C}_{jk}^t, \theta_{\max}]$ 上的所有点,因此 $E\tilde{C}_{jk}^{t+1}$ 必然会落在状态值的取值点上.

现实中很难实现连续性决策,为了使等号成立,对式(4)等式右项取整,得到相邻阶段“自然状态”之间的状态转移方程如下:

$$\tilde{C}_{jk}^{t+1} = \text{round}\left(\sum_{\theta=\tilde{C}_{jk}^t}^{\theta_{\max}} (\tilde{C}_{jk}^t \theta \cdot R_{jk}(\theta))\right), \quad (6)$$

其中 $\text{round}(\cdot)$ 为对 \cdot 按照随机的方法取整,取整方法为

$$\text{round}(\cdot) = \begin{cases} [\cdot], & \text{rand} \geq \cdot - [\cdot]; \\ [\cdot] + 1, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)可以使 \cdot 尽量取到与自身数值最接近的整数. rand 表示随机生成 $[0, 1]$ 之间的随机数, $[\cdot]$ 表示 \cdot 的整数部分. 除式(6)外,还需规定一个初始值

$$\tilde{C}_{jk}^1 = \theta_{jk}^0, \quad (8)$$

其中 $\theta_{jk}^0 \in \Theta$. \square

性质3 若在某阶段需求被扑灭,则需求状态将回到初始值,然后重新开始“产生 \rightarrow 加剧”的过程.

为了与“自然状态”相区别,给出如下定义.

定义2 在需求可能被扑灭的前提下,需求状态的发展受到了干预,称为“干预状态”,记 \hat{C}_{jk}^t 为阶段 t 需求点 j 对应急物资 k 的需求的“干预状态”.

根据性质3,在式(6)和(8)中加入扑灭行为对需

求状态转移的影响,得到相邻阶段“干预状态”之间的状态转移方程为

$$\hat{C}_{jk}^t = \begin{cases} \theta_{jk}^0, & t = 1; \\ (\theta_{jk}^0)^{z_j^t} \left(\text{round}\left(\sum_{\theta=\hat{C}_{jk}^{t-1}}^{\theta_{\max}} \theta \cdot R_{jk}(\hat{C}_{jk}^{t-1}, \theta)\right) \right)^{1-Z_j^t}, \\ \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (9)$$

在求得需求的“干预状态”后,进一步求出需求的表达式. 因为需求与需求状态之间密切相关,所以定义一个需求的表达式,在该定义中,需求与需求状态是成正比的函数关系.

定义3 设 μ_{jk} 是根据需求点地形、人口、发展水平等因素综合得到的基准需求,阶段 t 需求点 j 对应急物资 k 的需求为

$$d_{jk}^t = (\hat{C}_{jk}^t - 1)\mu_{jk}. \quad (10)$$

1.2 基于马尔可夫决策的应急物资动态分配模型

目标函数为

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} S d_{jk}^t, \quad (11)$$

其中 $S d_{jk}^t$ 为归一化后的阶段 t 需求点 j 对应急物资 k 的需求. 因为需求的产生和发展与需求扑灭策略有直接的关系,一个有效的需求扑灭策略可以尽量延缓需求的产生和发展过程,所以以最小化所有阶段需求的总和为目标.

除式(1)~(10)外,还需增加以下约束或公式:

$$S d_{jk}^t = \frac{d_{jk}^t - d_{jk}^{\Delta}}{d_{jk}^{\nabla} - d_{jk}^{\Delta}}, \quad (12)$$

$$\sum_{j \in J} (Z_j^t \cdot d_{jk}^t) \leq S_k^t. \quad (13)$$

因为不同物资需求量的量纲不同,且量级存在很大差异,因此需要通过式(12)的归一化方式进行整合,获得标准化的需求 $S d_{jk}^t$. 其中 d_{jk}^{∇} 和 d_{jk}^{Δ} 分别表示需求点 j 对应急物资 k 的需求的上限和下限. 式(13)表示每一阶段被扑灭的需求总和不能超过实际的应急物资供应量,其中 S_k^t 表示阶段 t 应急物资 k 的最大供应量.

2 模型求解

应急物流决策模型对求解时间的要求较高,而本文的决策变量涉及多个维度,当各维度的集合规模较大时,模型的求解会比较耗时. 粒子群优化算法(Particle swarm optimization, PSO)是一种基于群体智能的随机寻优算法,它采用速度-位移模型,避免了复

杂的遗传操作,通过群体中个体间的协作和信息共享进行寻优,在保持足够精度的同时能够快速完成求解,较为适合本文. 算法基本描述如下: 在 M 维空间有 I 个粒子,粒子的最大进化代数为 n_{\max} ,第 i 个粒子进化到第 n 代 ($n = 1, 2, \dots, n_{\max} - 1$) 的位置为

$$X_i^n = [X_{i1}^n, X_{i2}^n, \dots, X_{iM}^n],$$

速度为

$$V_i^n = [V_{i1}^n, V_{i2}^n, \dots, V_{iM}^n],$$

且每个粒子对应一个与优化目标函数相关的适应度函数. 对于单个粒子,其在“飞行”过程中的个体最优位置记为

$$P_i^n = [P_{i1}^n, P_{i2}^n, \dots, P_{iM}^n],$$

所有粒子的全局最优位置记为

$$P_g^n = [P_{g1}^n, P_{g2}^n, \dots, P_{gM}^n].$$

2.1 二进制编码下的粒子位置和速度更新

本文涉及的是离散空间的优化问题. 如何为粒子找到一个合适的表达方法,使粒子的位置和模型的解对应,是实现算法的关键. 因为决策变量 Z_j^t 是 0-1 整数变量,设计二进制编码的粒子维度为 ($j_{\max} \times t_{\max}$),即 $M = j_{\max} \times t_{\max}$. 记 X_{ijt}^n 为第 i 个粒子进化到第 n 代的位置矩阵的第 j 行第 t 列元素,同理,粒子速度、个体最优位置和全局最优位置矩阵内的元素分别记为 V_{ijt}^n 、 P_{ijt}^n 、 P_{gjt}^n . 为了保证粒子的初始位置和更新后的位置都是二进制,设计粒子初始位置和初始速度分别为

$$X_{ijt}^0 = \begin{cases} 0, & \text{rand} < 0.5; \\ 1, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (14)$$

$$V_{ijt}^0 = \text{rand}. \quad (15)$$

设计粒子速度的更新公式为

$$V_{ijt}^{n+1} = wV_{ijt}^n + c_1\text{rand}(P_{ijt}^n - X_{ijt}^n) + c_2\text{rand}(P_{gjt}^n - X_{ijt}^n). \quad (16)$$

其中: w 为惯性权重, c_1 、 c_2 为学习因子.

为了使速度映射到 $[0, 1]$ 区间,采用 sigmoid 函数,使更新后的速度转换为位置取 1 的概率,即

$$SV_{ijt}^{n+1} = (1 + e^{-V_{ijt}^{n+1}})^{-1}. \quad (17)$$

进而设计粒子位置的更新公式为

$$X_{ijt}^{n+1} = \begin{cases} 1, & \text{rand} \leq SV_{ijt}^{n+1}; \\ 0, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (18)$$

2.2 适应度函数设计

如何将原目标函数、约束条件及其他公式整合成适应度函数,是实现算法的另一个关键. 所有公式

大致可以分成 3 类:

1) 式 (13) 是不等式约束,将其转换为惩罚函数,合并到原目标函数 (11) 中,有

$$\text{Fit}_i^n = \min \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Sd_{jk}^t + \sum_{k \in K} \sum_{t \in T} Q \left| \min \left(0, S_k^t - \sum_{j \in J} (X_{ijt}^n d_{jk}^t) \right) \right|. \quad (19)$$

其中: Q 为一个充分大的正数, Fit_i^n 为第 n 代第 i 个粒子的适应度函数.

2) 为了求出原目标函数中的 Sd_{jk}^t 而设计一系列推导公式,包括式 (2)~(10) 和 (12). 为了便于编程,采用元胞数组 (Cell array) 编码的方式,将原“自然状态”按照时间顺序排成一个数组 $\{\tilde{C}_{jk}^1, \tilde{C}_{jk}^2, \dots, \tilde{C}_{jk}^{t_{\max}}\}$,作为元胞数组,增设 L_{JK}^t 作为各“自然状态”的序号值,记 $\{\tilde{C}_{jk}^1, \tilde{C}_{jk}^2, \dots, \tilde{C}_{jk}^{t_{\max}}\}(L_{jk}^t)$ 为元胞数组中的第 L_{jk}^t 个元素,如 $\{\tilde{C}_{jk}^1, \tilde{C}_{jk}^2, \dots, \tilde{C}_{jk}^{t_{\max}}\}(1) = \tilde{C}_{jk}^1$, $\{\tilde{C}_{jk}^1, \tilde{C}_{jk}^2, \dots, \tilde{C}_{jk}^{t_{\max}}\}(3) = \tilde{C}_{jk}^3$. 则相邻阶段的 L_{jk}^t 之间有如下关系式:

$$L_{jk}^t = \begin{cases} 1, & t = 1; \\ L_{jk}^{t-1}(1 - X_{ijt}^n) + 1, & \text{Otherwise.} \end{cases} \quad (20)$$

求解“干预状态”等价于对元胞数组的元素进行选择,即

$$\hat{C}_{jk}^t = \begin{cases} \{\tilde{C}_{jk}^t, \tilde{C}_{jk}^2, \dots, \tilde{C}_{jk}^{t_{\max}}\}(L_{jk}^1), & t = 1; \\ \{\tilde{C}_{jk}^1, \tilde{C}_{jk}^2, \dots, \tilde{C}_{jk}^{t_{\max}}\}(L_{jk}^{t-1}(1 - X_{ijt}^n) + 1), \\ \text{Otherwise.} \end{cases}$$

进而由“干预状态”逐步求出 Sd_{jk}^t .

3) 其他公式. 式 (1) 是规定编码的取值范围,已通过式 (14) 和 (18) 解决.

2.3 算法步骤

用粒子群算法求解应急物资动态分配问题的具体步骤如下.

Step 1: 初始化 $n = 0$.

Step 2: 通过式 (14) 或 (18) 初始化或更新粒子的位置,通过式 (15) 或 (16) 初始化或更新粒子的速度.

Step 3: 通过式 (19) 计算适应度函数.

Step 4: 计算个体最优值和个体最优位置,计算全局最优值和全局最优位置.

Step 5: 比较 n 与 n_{\max} ,若 $n \neq n_{\max}$,则转至 Step 6;若 $n = n_{\max}$,则转至 Step 7.

Step 6: 置 $n = n + 1$,转到 Step 2.

Step 7: 停止计算,输出全局最优值和全局最优位置.

3 算例分析

3.1 算例描述

某台风严重影响了某市的南部地区,包括RA、PY、CN、WC和TS等5个县市成为受灾区域.随着灾情的发展,需求点对应急物资(主要是口粮和衣

被)的需求不断发生动态演变,假设需求有6个状态,其需求状态转移概率矩阵和基准需求数据分别如表1(单位%)和表2(单位1000 kg/unit)所示.假设应急物资分配活动有6个阶段,每个阶段应急储备仓库对口粮和衣被的供应分别为500 kg和20 kg.

表1 需求点对口粮和衣被的需求状态转移概率矩阵

	RA						PY						CN						WC						TS					
口粮	20	50	20	5	5	0	10	50	15	15	10	0	50	25	15	10	0	0	25	30	20	15	10	0	20	35	20	10	10	5
	0	30	50	10	5	5	0	30	40	15	10	5	0	65	20	10	5	0	0	50	25	15	5	5	0	30	35	20	10	5
	0	0	65	20	10	5	0	0	35	35	20	10	0	0	35	35	20	10	0	0	35	35	20	10	0	0	35	35	20	10
	0	0	0	30	40	30	0	0	0	60	25	15	0	0	0	30	40	30	0	0	0	30	40	30	0	0	0	25	50	25
	0	0	0	0	10	90	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	10	90	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	5	95
	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	90	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100
衣被	30	50	10	5	5	0	30	50	10	10	0	0	45	25	15	10	5	0	25	25	25	15	10	0	30	20	20	15	10	5
	0	35	45	10	5	5	0	35	45	10	5	5	0	70	15	10	5	0	0	45	25	20	5	5	0	45	25	15	10	5
	0	0	25	55	15	5	0	0	25	55	15	5	0	0	40	30	20	10	0	0	40	30	20	10	0	0	35	35	20	10
	0	0	0	30	40	30	0	0	0	30	40	30	0	0	0	30	40	30	0	0	0	30	40	30	0	0	0	50	45	5
	0	0	0	0	5	95	0	0	0	0	2	98	0	0	0	0	5	95	0	0	0	0	50	50	0	0	0	0	3	97
	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100	0	0	0	0	0	100

表2 需求点的基准需求/状态初始值

	PA	PY	CN	WC	TS
口粮	150/2	75/3	150/2	50/3	70/4
衣被	12/1	10/1	12/2	6/3	5/2

3.2 算例求解

在CPU为3.2 GHz、内存为4 GB的计算机上,通过Matlab R2014a编程求解.设置最大进化代数数为200,粒子群个数为100,惯性权重取0.7298,两个学习因子均取1.49445,充分大的正数取 10^8 .连续运行程序20次,得到全局最优值在18.4~19.4之间,求解时间在6.5s~7s之间,表明求解结果和时间都具有较高的稳定性.选取其中一次求解结果作为最优结果,适应度函数的变化曲线(见图1)反映了适应度函数在进化初期快速收敛,显示了粒子群算法的快速寻优

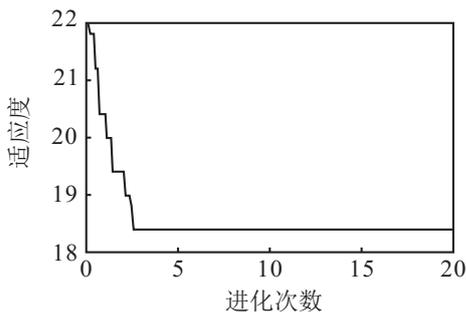


图1 适应度函数的变化曲线

能力.可见,作为本文模型的实现工具,粒子群算法可以迅速寻优,并且结果稳定,符合应急物流对响应时间的要求.

3.3 马尔可夫决策的灾害学意义

需求扑灭的最优策略如表3所示.因为供应的不足,每个阶段都无法全部扑灭需求,只能有选择地扑灭.相对而言,RA、PY和CN三地(后文简称“前三地”)获得扑灭需求的机会比WC和TS二地(后文简称“后二地”)更多.图2为这一现象给出了理由,其中实线箭头为自然状态变化曲线,虚线为干预状态变化曲线.

表3 需求扑灭的最优策略

阶段	1	2	3	4	5	6
RA	扑灭		扑灭	扑灭	扑灭	
PY		扑灭	扑灭		扑灭	扑灭
CN	扑灭		扑灭		扑灭	
WC		扑灭		扑灭		扑灭
TS		扑灭		扑灭		扑灭

在图2中,实线为需求状态在没有需求扑灭策略干预下的自然变化曲线,该曲线反映了需求状态演变的马尔可夫过程.显然,前三地的“自然状态”变化曲线比后二地的更陡峭,说明前三地的需求演变较快,其原因可能是前三地属人口稠密、经济发达的平原

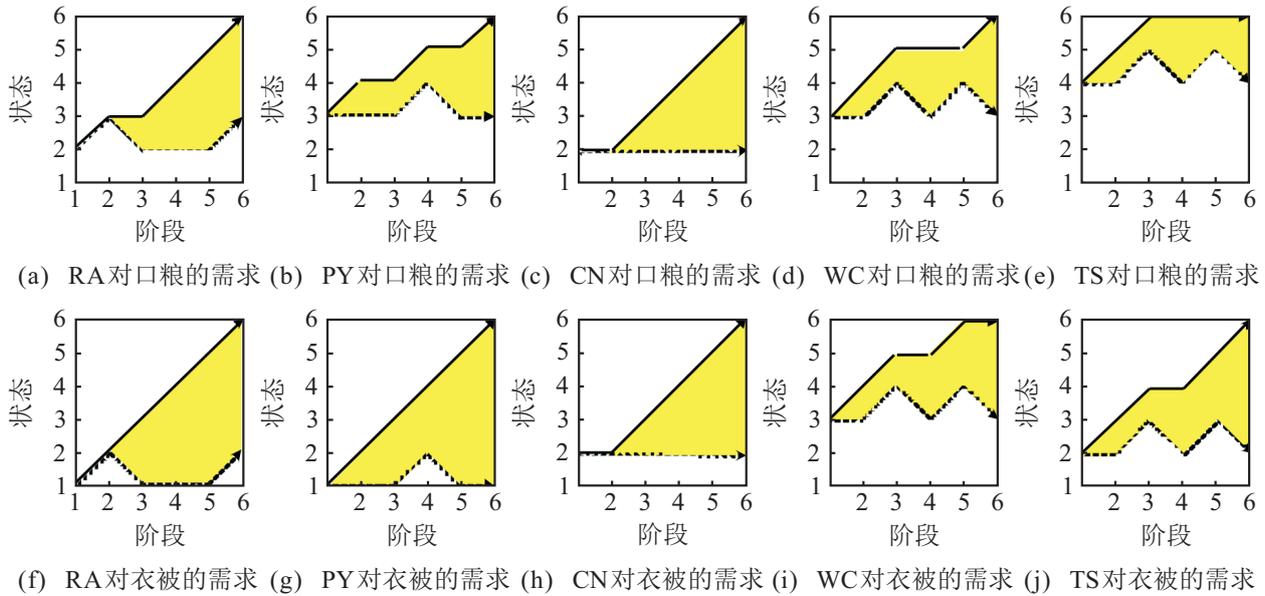


图2 “自然状态”和“干预状态”的变化曲线

地区,本身的基准需求较大,而后二地则人口较少. 针对需求演变较快、基准需求较大的区域,需求扑灭策略应优先支持,表3的结果也显示了这一点.

扑灭需求的效果也是前三地更好些,包括:

1) 需求扑灭策略使总需求显著减少,前三地更甚. 图2显示的“有色”面积是两种需求状态变化曲线与坐标轴围合面积之差,代表需求扑灭策略使总需求(状态)的减少量,显然前三地的“有色”面积更大.

2) 需求扑灭策略使需求变化曲线趋向平缓,前三地更甚. 图2虚线为需求状态经需求扑灭策略干预后的变化曲线. 所有需求点的虚线总体走势都趋于平缓,但后二地波动次数较前三地多.

可见,本文的马尔可夫决策方法可以动态地做出合适的需求扑灭策略,使得整体需求状态走势保持平稳,整体需求水平降到最低. 在供应不足的环境下,本文的决策方法选择需求演变较快、基准需求较大的区域作为优先救灾对象,并随时间的推移动态调整策略,使得应急物资分配的公平性和效率性从整个救灾计划期的角度来看保持平衡. 需求的马尔可夫过程很好地演示了需求状态的演变规律,使得决策有理有据.

4 结论

本文研究了供需不平衡环境下的应急物资动态分配问题. 考虑到台风演变导致应急物资需求不断增长与应急物资供应相对紧缺之间的矛盾,建立了应急物资分配动态协调模型. 主要创新是,为需求状态的演变设计了一种符合其演变规律的马尔可夫决策过程. 在此基础上提出了需求扑灭的最优策略,然后

将其应用于某台风的救灾实例,最后分析了马尔可夫决策对需求扑灭最优策略的影响,探讨了需求扑灭最优策略的灾害学意义.

本文的模型仍较理想化,现实决策时面对的情况更为复杂,考虑的因素亦更多. 有待进一步研究的方向包括:研究更复杂的应急物资分配网络、研究需求点定位之后的车辆路径规划问题等.

参考文献(References)

- [1] Tofighi S, Torabi S A, Mansouri S A. Humanitarian logistics network design under mixed uncertainty[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 250(1): 239-250.
- [2] Liberatore F, Ortuño M T, Tirado G, et al. A hierarchical compromise model for the joint optimization of recovery operations and distribution of emergency goods in humanitarian logistics[J]. *Computers and Operations Research*, 2014, 42(3): 3-13.
- [3] Lodree E J, Taskin S. Supply chain planning for hurricane response with wind speed information updates[J]. *Computers and Operations Research*, 2009, 36(1): 2-15.
- [4] Taskin S, Lodree E J. Inventory decisions for emergency supplies based on hurricane count predictions[J]. *Int J of Production Economics*, 2010, 126(1): 66-75.
- [5] Taskin S, Lodree E J. A Bayesian decision model with hurricane forecast updates for emergency supplies inventory management[J]. *J of the Operational Research Society*, 2011, 62(6): 1098-1108.
- [6] Garrido R A, Lamas P, Pino F J. A stochastic programming approach for floods emergency logistics[J]. *Transportation Research Part E*, 2015, 75(1): 18-31.
- [7] Zhang X, Zhang Z, Zhang Y, et al. Route selection for emergency logistics management: A bio-inspired algorithm[J]. *Safety Science*, 2013, 54(2): 87-91.

[8] Özdamar L, Ertem M A. Models, solutions and enabling technologies in humanitarian logistics[J]. *European J of Operational Research*, 2015, 244(1): 55-65.

[9] Sheu J B. Post-disaster relief-service centralized logistics distribution with survivor resilience maximization[J]. *Transportation Research Part B*, 2014, 68(10): 288-314.

[10] Yi W, Özdamar L. A dynamic logistics coordination model for evacuation and support in disaster response activities[J]. *European J of Operational Research*, 2007, 179(3): 1177-1193.

[11] 田军, 马文正, 汪应洛, 等. 应急物资配送动态调度的粒子群算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(5): 898-906.
(Tian J, Ma W Z, Wang Y L, et al. Emergency supplies distributing and vehicle routes programming based on particle swarm optimization[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2011, 31(5): 898-906.)

[12] 王海军, 黎卜豪, 刘康康. 应急救援下需求分配与网络配流研究[J]. *系统工程理论与实践*, 2015, 35(6): 1457-1464.
(Wang H J, Li B H, Liu K K. Demand allocation and network flow assignment under emergency rescue circumstance[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2015, 35(6): 1457-1464.)

[13] 詹沙磊, 刘南. 基于灾情信息更新的应急物资配送多目标随机规划模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(1): 159-166.
(Zhan S L, Liu N. Multi-objective stochastic programming model for relief allocation based on disaster scenario information updates[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(1): 159-166.)

[14] Zhan S, Liu N, Ye Y. Coordinating efficiency and equity in disaster relief logistics via information updates[J]. *Int J of Systems Science*, 2014, 45(8): 1607-1621.

[15] 葛洪磊, 刘南. 复杂灾害情景下应急资源配置的随机规划模型[J]. *系统工程理论与实践*, 2014, 34(12): 3034-3042.
(Ge H L, Liu N. A stochastic programming model for relief resources allocation problem based on complex disaster scenarios[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2014, 34(12): 3034-3042.)

[16] 陈涛, 黄钧, 朱建明. 基于信息更新的两阶段鲁棒-随机优化调配模型研究[J]. *中国管理科学*, 2015, 23(10): 67-77.
(Chen T, Huang J, Zhu J M. Two-stage robust-stochastic decision model for relief allocation based on disaster scenario information updata[J]. *Chinese J of Management Science*, 2015, 23(10): 67-77.)

[17] 詹沙磊, 刘南, 陈素芬, 等. 基于需求更新的救灾品配送公平与效率协调模型[J]. *控制与决策*, 2014, 29(4): 686-690.
(Zhan S L, Liu N, Chen S F, et al. Coordination between efficiency and equity in relief allocation problem via demand updates[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(4): 686-690.)

[18] Zhan S, Liu N. Determining the optimal decision time of relief allocation in response to disaster via relief demand updates[J]. *Int J of Systems Science*, 2016, 47(3): 509-520.

[19] 朱莉, 曹杰. 面向灾害扩散的模糊需求下应急调配优化研究[J]. *系统科学与数学*, 2014, 34(6): 663-673.
(Zhu L, Cao J. Emergency resources allocation optimization under disaster spreading with fuzzy demand[J]. *J of Systems Science and Mathematical Sciences*, 2014, 34(6): 663-673.)

[20] Regnier E. Public evacuation decisions and hurricane track uncertainty[J]. *Management Science*, 2008, 54(1): 16-28.

(责任编辑: 郑晓蕾)

下 期 要 目

时间序列数据挖掘中的动态时间弯曲研究综述 李海林, 等

基于多小组协同学习教学算法的车间作业调度问题 张 梅, 等

差异容量平行批机器环境下基于弱选择约束的调度算法 贾兆红, 等

基于斐波那契树优化算法的切削参数多方案优化方法 王 霞, 等

独立局部搜索与多区域渐近收敛的新型PSO算法 王玉昆, 等

基于无线传感网络和超声波的室内定位系统的设计与实现 漆 军, 等

考虑边端效应的直线感应电机投影自适应指令滤波反推控制 颜文旭, 等

基于聚类离散化和变精度邻域熵的属性约简 陈迎春, 等

基于最大反馈线性化的TORA系统非奇异镇定控制 张 宇, 等