

文章编号:1671-5896(2026)04-0979-06

基于改进粒子群算法的应急资源动态调度方法

李晓曼, 李秀平

(延安大学西安创新学院 商学院, 西安 710100)

摘要: 由于传统粒子群算法在进化过程中具有较强随机性, 在搜索最优解阶段, 群体里一部分远离全局最优解的粒子会干扰进化过程的收敛走向, 致使算法容易陷入局部最优状态。为此, 提出了基于改进粒子群算法的应急资源动态调度方法。其以救灾调度总成本最小以及最大化满足物资实际需求为目标函数, 并建立对应的约束条件, 由此构建应急资源动态调度模型。使用混沌运动理论对传统粒子群算法进行改进处理, 获取全局最优解, 并使用改进后的粒子群算法对调度模型进行计算, 获取最佳调度方案, 实现受灾点应急资源的精准调度。实验结果表明, 利用该方法进行应急资源动态调度时, 物资调度数量与实际需求高度匹配, 且调度路径较短, 验证了其在实际应用中的高效性和可靠性。

关键词: 混沌运动理论; 应急资源动态调度; 粒子群优化算法; 动态调度模型

中图分类号: TP18

文献标志码: A

Dynamic Scheduling Method for Emergency Resources Based on Improved Particle Swarm Optimization Algorithm

LI Xiaoman, LI Xiuping

(Business School, Xi'an Innovation College of Yan'an University, Xi'an 710100, China)

Abstract: The traditional particle swarm optimization algorithm exhibits strong randomness during evolutionary process. In the stage of searching for the optimal solution, some particles in the population that deviate from the global optimum can interfere with the convergence direction of the evolutionary process, leading the algorithm to easily fall into a local optimal state. To effectively address this issue, an emergency resource dynamic scheduling method based on improved particle swarm optimization algorithm is proposed. The objective function aims to minimize the total cost of disaster relief scheduling and maximize the fulfillment of actual material demands, and corresponding constraint conditions are established to construct a dynamic scheduling model for emergency resources. Chaos motion theory is used to improve the traditional particle swarm algorithm, obtain the global optimal solution, and the improved particle swarm algorithm is used to solve and calculate the scheduling model to obtain the optimal scheduling plan, achieving precise scheduling of emergency resources in disaster stricken areas. The experimental results show that when using this method for dynamic scheduling of emergency resources, the quantity of material scheduling highly matches the actual demand, and the scheduling path length is relatively short, which verifies its efficiency and reliability in practical applications.

Key words: chaos motion theory; dynamic scheduling of emergency resources; particle swarm optimization algorithm; dynamic scheduling model

收稿日期: 2025-01-17

基金项目: 陕西省教育厅科学研究计划基金资助项目(22JK0223); 陕西省哲学社会科学重大理论与现实问题研究 2022 年度一般基金资助项目(2022HZ1307)

作者简介: 李晓曼(1980—), 女, 陕西咸阳人, 延安大学西安创新学院讲师, 主要从事复杂系统理论研究, (Tel) 86-15349253579 (E-mail) trina_lxm@126.com。

0 引言

由于各类自然灾害、公共卫生事件以及社会安全事故等突发事件的频繁发生,使应急救援工作面临巨大挑战,而应急资源的合理调度对有效应对突发事件、减少人员伤亡和财产损失至关重要^[1]。但因传统的应急资源调度方法通常基于静态的预案和固定的模式,难以适应突发事件发展过程中资源需求的动态变化,存在调度不及时、资源分配不合理等问题,无法充分满足复杂多变的应急救援需求^[2]。因此对应急资源动态调度方法进行研究具有重要意义。

王雅杰等^[3]通过分析应急环境因素,确定以最小应急响应时间与最优资源调度满意度作为调度优化目标构建调度目标函数,由此建立一个多目标优化模型。利用混合启发式算法实现模型求解,完成资源的应急调度。但该方法在建立调度目标函数时,忽视了约束条件的影响,因此在资源应急调度时,调度效果较差。汤兆平等^[4]首先针对应急目标,使用层次分析法与聚类算法对事故发生地的救援优先权进行确定,同时联合总调度最小成本构建应急调度目标规划模型;然后将救援优先权引入模型中,联合遗传算法对模型进行计算,基于模型求解结果完成应急资源的调度。但该方法在构建调度规划模型时,忽视了环境影响因素的干扰问题,造成实际调度路径较长,影响应急救援效率。焦虹桥^[5]针对事故发生地,对资源调度过程中的瓶颈路段交通流特性进行具体分析,将路径最短与时间最少作为调度目标,构建调度优化目标函数;利用混合蛙跳算法对调度目标函数进行最优解计算,根据计算结果实现应急资源的调度规划。但该方法在使用蛙跳算法进行目标函数求解时,算法中参数存在过度冗余情况,导致其在资源调度时调度性能较差。Zhao等^[6]首先针对调度过程中的影响因素进行具体分析,明确调度目标,构建调度目标模型;然后利用深度强化学习算法构建应急资源分配系统框架,并利用深度Q网络路径规划算法对系统进行优化,达到优化升级城市应急资源高效调度的目的。但该方法建立的调度分配模型与Q算法间存在参数不适配问题,导致其在应急资源调度时调度效果不理想。

为解决上述问题,笔者提出基于改进粒子群算法的应急资源动态调度方法。

1 应急资源动态调度模型构建

在建立应急资源调度模型前,首先确定应急调度的目标函数,笔者在充分考虑应急调度需求的条件下,以救灾调度总成本最小及最大化满足物资实际需求为目标函数。其中救灾调度总成本最小化旨在合理规划资源调配路径、运输方式等,避免不必要的开支,确保资源分配的经济性与高效性。最大化满足物资实际需求,是为了精准满足受灾地区的实际需要,最大程度缓解受灾群众的困境,保障救援工作顺利进行,提供足够的食品、医疗用品等关键物资,使受灾地区尽快恢复稳定^[7-8]。这两个目标函数共同作用,能实现应急资源调度在经济与效益上的最优平衡。

在应急资源动态调度时,设定调度时某城市存在 m 个仓储应急资源储备中心($C_1, C_2, \dots, C_m$),而事故发生地存在 n 个受灾点($D_1, D_2, \dots, D_n$),资源储备中心提供的资源设为 o 种,表述成($E_1, E_2, \dots, E_o$)形式。

应急资源动态调度的目标函数如下:

$$\begin{cases} \min Z_1 = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} n_{ij} a_{ij} l_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n p x_{ij} [l_{ij}/(\varphi_{ij} v) - t_j], \\ \max Z_2 = d_{ij}/\varphi_{ij}, \end{cases} \quad (1)$$

其中 $\min Z_1$ 为成本最小调度目标函数, $\max Z_2$ 为最大化满足物资实际需求目标函数, n_{ij} 为资源储备中心 C_i 向受灾点 D_j 提供的资源总数量, x_{ij} 为资源变量, l_{ij} 为资源储备中心 C_i 与受灾点 D_j 之间的距离, φ_{ij} 为距离路线内的交通拥堵程度, p 为运送资源时的迟到惩罚系数, v 为运输车行驶速度, a_{ij} 为资源储备中心 C_i 向受灾点 D_j 调度资源时的单位成本, t_j 为受灾点的资源获取时间, d_{ij} 为受灾地实际物资需求量, φ_{ij} 为应急调度实际资源到达值。

基于调度目标函数,设定相关应急调度约束条件,如下:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m x_{ij} n_{ij} \leq d_{qj}, \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} n_{ij} \leq c_i; \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} \geq 1, \\ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n d_{qj} \leq \sum_{q=1}^n I_q. \end{cases} \quad (2)$$

将目标函数与调度约束条件整合,构建应急资源动态调度模型 $F(x)$,如下:

$$F(x) = \omega_i (\min Z_1 \max Z_2) + \zeta_i + b, \quad (3)$$

其中 ω_i 为权重, ζ_i 为惩罚因子, b 为偏置项。

2 应急调度模型求解

使用改进的粒子群算法对上述调度模型进行求解,获取应急资源最佳调度方案,实现应急资源的精准调度^[9-10]。

粒子群算法是依据鸟类捕食行为设计的智能搜索算法,其中每个基本粒子都代表一个可能解即调度最佳方案。

确定构建的应急资源动态调度模型为 b 维空间,设定粒子群在 b 维空间进行求解,粒子群由若干基本粒子构成,如下:

$$S_{\text{Swarm}} = \{y_1^{(k)}, y_2^{(k)}, \dots, y_n^{(k)}\}, \quad (4)$$

其中 $y_i^{(k)}$ 为粒子群在 k 时刻个体粒子。

获取 k 时刻粒子 i 在调度模型搜索空间的速度与位置向量 $\mathbf{v}_i^{(k)}$ 和 $\mathbf{y}_i^{(k)}$,如下:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_i^{(k)} = \{v_{i1}^{(k)}, v_{i2}^{(k)}, \dots, v_{id}^{(k)}\}, \\ \mathbf{y}_i^{(k)} = \{y_{i1}^{(k)}, y_{i2}^{(k)}, \dots, y_{id}^{(k)}\}. \end{cases} \quad (5)$$

在粒子群中单体粒子进化时,需要对基于粒子的局部最优 p_{best} 与粒子群群体的全局最优 g_{best} 进行求解,粒子的速度与位置向量 $\mathbf{v}_{ij}^{(k+1)}$ 和 $\mathbf{y}_{ij}^{(k+1)}$ 的更新结果如下:

$$\begin{cases} \mathbf{v}_{ij}^{(k+1)} = \omega \mathbf{v}_{ij}^{(k)} + \gamma_1 r_1 [P_{ij} - y_{ij}^{(k)}] + \gamma_2 r_2 [P_{gj} - y_{ij}^{(k)}], \\ \mathbf{y}_{ij}^{(k+1)} = y_{ij}^{(k)} + \mathbf{v}_{ij}^{(k+1)}, \end{cases} \quad (6)$$

其中 γ_1, γ_2 为学习因子, r_1, r_2 为 $[0,1]$ 范围内随机数, ω 为惯性权重。

由于传统粒子群算法在搜索最优解时,群体中一部分远离全局最优解的粒子会影响进化过程的收敛,陷入局部最优状态。因此在传统粒子群算法基础上,引入混沌化思想优化粒子群算法。具体优化过程如下:

1) 利用混沌运动自身初值高敏感特性,在随机生成的初始解中择优获取初始群体,提升种群多样性^[11-12];

2) 针对粒子的惯性权值,使用适应度值对其进行自适应调整,提升算法的全局探测及局部挖掘能力;

3) 随机在粒子群中选取适应值较大的粒子进行混沌优化,进一步规避粒子群快速进入局部最佳的收敛能力^[13]。

在混沌优化时,设定 $k=0$,在 $[0,1]$ 区间内计算混沌变量 s_j^k ,如下:

$$s_j^k = \frac{y_j^k - y_{\min,j}}{y_j^k - y_{\max,j}}, \quad (7)$$

其中 $y_{\max,j}, y_{\min,j}$ 为种群中 j 维变量的搜索上下界。

通过上述计算混沌变量 s_j^{k+1} ,并将结果转换成决策变量 y_j^{k+1} ,如下:

$$\begin{cases} s_j^{k+1} = s_j^k (1 - s_j^k), \\ y_j^{k+1} = y_{\min,j} + s_j^{k+1} (y_{\max,j} - y_{\min,j}). \end{cases} \quad (8)$$

通过确定的决策变量 y_j^{k+1} 计算新解的适应值,找出全局最优解(即最佳调度方案),完成应急资源调度。改进粒子群算法作为资源动态调度的关键,其收敛性能的优劣能直接决定应急资源动态调度性能,因此,对改进粒子群算法的收敛性能进行测试,并与传统粒子群算法进行对比,测试结果如图1所示。

分析图1可知,所提方法设计的混沌优化粒子群算法在应急资源调度模型求解过程中,令适应度值快速收敛,主要是因为所提方法设计的粒子群算法在传统粒子群算法中引入了混沌搜索方法,使传统粒子群算法的粒子个体局部挖掘以及全局最佳搜索性能都有了显著提升。

基于上述改进后的粒子群算法,对应急资源动态调度模型求解过程如下。

1) 初始化粒子群 P_{zq} ,并将粒子群中每个粒子看作一个调度方案;设定粒子群规模为 N , T 、 ω 为惯性权重以及迭代次数, γ_1 、 γ_2 为学习因子。

2) 基于式(5)初始化种群粒子位置与速度值,将上述建立的目标函数看作适应度函数,并计算粒子适应度值 $f(x)$,对每个粒子个体极值 p_{best} 与种群极值 g_{best} 给出初始赋值。

3) 更新粒子的位置与速度向量值(式(6)计算结果),并重新获取粒子个体极值 p'_{best} 与种群极值 g'_{best} ,如下:

$$\begin{cases} p'_{best} = (v_{ij}^{(k+1)} y_{ij}^{(k+1)}) p_{best}, \\ g'_{best} = (v_{ij}^{(k+1)} y_{ij}^{(k+1)}) g_{best} \circ \end{cases} \tag{9}$$

4) 找出最优粒子,利用式(7)实施局部混沌搜索,并根据搜索结果,更新下一代种群中粒子的个体局部最优值与全局最优值。

5) 判断是否满足迭代条件,若满足则直接将结果输出(即调度模型最佳调度方案),完成应急资源动态调度。

3 实验与结果分析

为验证上述应急资源动态调度方法的整体有效性,需对其进行实验测试。分别对所提方法、王雅杰等^[3]提出的基于混合启发式算法的应急资源调度方法、汤兆平等^[4]提出的基于优先权的应急资源调度方法进行测试。

实验选取 Windows 10 操作系统,使用 Python 3. x 实验编程语言,实验过程中改进粒子群算法运行参数设置如下。

- 1) 粒子群数量: 15;
- 2) 维度: 15(3 个受灾点×5 个仓储应急资源储备中心);
- 3) 最大迭代次数: 300;
- 4) 惯性权重: 0.9;
- 5) 学习因子: 2;
- 6) 混沌因子: 4;
- 7) 扰动强度: 0.1。

测试过程中,将受灾点设定为 3 个(D_1 、 D_2 、 D_3);资源储备中心设为 5 个(C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 、 C_5),应急资源设为药品、食品以及帐篷,储备中心相关资源量设置如下。

- 1) C_1 : 药品 25 kg、食品 28 t、帐篷 15 000 顶;
- 2) C_2 : 药品 23 kg、食品 36 t、帐篷 0 顶;
- 3) C_3 : 药品 33 kg、食品 30 t、帐篷 18 000 顶;

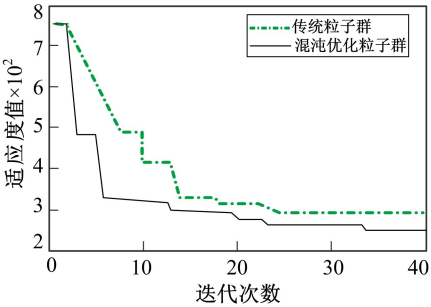


图1 改进粒子群算法的收敛性能测试结果
Fig.1 Test results of improved particle swarm algorithm's convergence performance

4) C_4 : 药品 26 kg、食品 32 t、帐篷 20 000 顶;

5) C_5 : 药品 22 kg、食品 16 t、帐篷 30 000 顶。

在应急资源动态调度时,若调度数量与实际需求间存在较大偏差会直接影响资源调度效果。为此,利用所提方法、混合启发式算法和优先权方法进行应急资源动态调度,测试 3 种方法能否最大化满足物资实际需求,测试结果如表 1 所示。

表 1 物资实际需求测试结果

Tab. 1 Actual material demand test results

受灾点	资源类别	实际需求	调度数量		
			所提方法	混合启发式算法	优先权方法
D_1	药品/kg	335	335	336	334
	食品/t	542	542	540	545
	帐篷/顶	28 000	28 000	28 100	27 800
D_2	药品/kg	287	287	289	285
	食品/t	597	596	600	590
	帐篷/顶	25 000	25 000	25 200	25 400
D_3	药品/kg	366	363	369	362
	食品/t	633	633	630	635
	帐篷/顶	35 000	35 000	34 800	34 600

分析表 1 可知,在应急资源动态调度时,所提方法在大多数情况下都能实现物资调度数量与实际需求的精准匹配,误差极小,表现出极高的调度精度和可靠性。混合启发式算法在各受灾点的调度数量与实际需求间存在一定偏差,虽然偏差不大,但其调度精度稍逊于所提方法。优先权方法的调度数量与实际需求间的偏差相对较大,尤其在帐篷调度方面偏差较为明显,表明其调度效果不如所提方法和混合启发式算法。由此可知,所提方法在满足物资实际需求方面表现最优,满足上述设定的目标函数,说明其应用效果较好。

继续使用所提方法、混合启发式算法和优先权方法进行应急资源动态调度,并将调度路径长度作为实验指标,测试不同方法的实际调度效果,结果如表 2 所示。

表 2 不同方法的实际调度路径长度测试结果

Tab. 2 Actual scheduling path length test results for different methods

受灾点	实际调度路径长度测试结果/km		
	所提方法	混合启发式算法	优先权方法
D_1	368.166	369.281	372.165
D_2	796.873	802.294	813.789
D_3	459.122	489.667	501.323

分析表 2 可知,在应急资源动态调度时,混合启发式算法由于建立调度目标函数时,忽视了约束条件的影响,因此其调度路径较长,效果较差;优先权方法由于在构建调度规划模型时,忽视了环境影响因素带来的干扰问题,因此其调度效果不佳;而所提方法由于在资源动态调度时,引入混沌运动优化粒子群算法提升算法的寻优能力,因此其资源调度效果较好。

4 结 语

随着突发事件的不断增加,对突发事件的应急资源调度就显得尤为重要。为此,笔者提出基于改进粒子群算法的应急资源动态调度方法。确定调度目标函数以及约束条件,建立动态调度模型,使用混沌优化后的粒子群算法对调度模型进行求解,实现应急资源的动态调度。实验结果表明,所提方法在应急资源动态调度中表现出色,不仅物资调度数量与实际需求高度匹配,并且调度路径长度最短,显著优于混合启发式算法和优先权方法,验证了其在实际应用中的高效性和可靠性。

参考文献:

- [1] 马帅豹, 张健钦, 沈博, 等. 面向汛期道路突发事件的多阶段应急资源动态调度方法 [J]. 公路, 2024, 69(11): 236-245.
MA S B, ZHANG J Q, SHEN B, et al. A Multi-Stage Emergency Resource Dynamic Scheduling Method for Road Emergencies in Flood Season [J]. Highway, 2024, 69(11): 236-245.
- [2] 赵宏伟, 赵西珂, 王阳阳, 等. 化工园区突发事故应急资源调度策略 [J]. 沈阳大学学报(自然科学版), 2023, 35(5): 449-458.
ZHAO H W, ZHAO X K, WANG Y Y, et al. Emergency Resource Dispatching Strategy for Sudden Accidents in Chemical Industry Parks [J]. Journal of Shenyang University (Natural Science), 2023, 35(5): 449-458.
- [3] 王雅杰, 樊建春. 南海海域应急资源存储选址及调度方案研究 [J]. 安全与环境学报, 2023, 23(1): 178-185.
WANG Y J, FAN J C. Research on Storage Location and Scheduling of Emergency Resources in South China Sea [J]. Journal of Safety and Environment, 2023, 23(1): 178-185.
- [4] 汤兆平, 余时钧, 宫素萍, 等. 基于优先权的铁路多事故点应急资源调度多目标优化研究 [J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2022, 41(1): 29-37.
TANG Z P, YU S J, GONG S P, et al. Multi-Objective Optimization of Railway Emergency Resource Dispatching for Multiple Accident Points Based on Priority [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2022, 41(1): 29-37.
- [5] 焦虹桥. 考虑瓶颈路段交通流特性的高速公路应急资源双目标调度方法 [J]. 微型电脑应用, 2023, 39(11): 164-167.
JIAO H Q. A Bi-Objective Scheduling Method of Expressway Emergency Resources by Considering the Traffic Flow Characteristics of Bottleneck Sections [J]. Microcomputer Applications, 2023, 39(11): 164-167.
- [6] ZHAO X, WANG G. Deep Q Networks-Based Optimization of Emergency Resource Scheduling for Urban Public Health Events [J]. Neural Computing & Applications, 2023, 35(12): 8823-8832.
- [7] 陈骏伟, 张继权, 阿鲁思, 等. 基于 PSO-AHP 方法的山区泥石流灾害风险评价——以吉林省蛟河市为例 [J]. 东北师大学报(自然科学版), 2019, 51(3): 152-160.
CHEN J W, ZHANG J Q, ALUSI, et al. Risk Assessment of Debris Flow in the Mountain Areas Based on the PSO-AHP: A Case Study in Jiaohe City of Jilin Province [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2019, 51(3): 152-160.
- [8] 李云锋, 郑勇平, 刘洋. 基于模糊信息聚类的应急管理资源调度模型 [J]. 智能计算机与应用, 2020, 10(2): 255-258.
LI Y F, ZHENG Y P, LIU Y. Resource Scheduling Model for Emergency Management Based on Fuzzy Information Cluster [J]. Intelligent Computer and Applications, 2020, 10(2): 255-258.
- [9] 邵泽军, 陈凡红, 吕晓娜, 等. 基于改进粒子群算法的多资源应急调度研究 [J]. 价值工程, 2020, 39(10): 243-245.
SHAO Z J, CHEN F H, LÜ X N, et al. Research on Multi-Resource Emergency Scheduling Based on Improved Particle Swarm Optimization [J]. Value Engineering, 2020, 39(10): 243-245.
- [10] 张小艳, 许慧. 基于改进粒子群算法的气化配煤模型求解 [J]. 煤炭技术, 2021, 40(2): 196-199.
ZHANG X Y, XU H. Solution of Gasification Coal Blending Model Based on Improved Particle Swarm Optimization [J]. Coal Technology, 2021, 40(2): 196-199.
- [11] 杨俊义, 高骞, 洪宇, 等. 基于改进粒子群算法的电力系统短期负荷预测 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2022, 40(3): 394-399.
YANG J Y, GAO Q, HONG Y, et al. Short-Term Load Forecasting of Power System Based on Improved Particle Swarm Optimization [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2022, 40(3): 394-399.
- [12] 金林, 王小涛, 周成林, 等. 基于混沌粒子群算法的有轨电车车辆布局优化 [J]. 交通工程, 2024, 24(3): 81-84, 90.
JIN L, WANG X T, ZHOU C L, et al. Tram Layout Optimization Based on Chaotic Particle Swarm Optimization [J]. Journal of Transportation Engineering, 2024, 24(3): 81-84, 90.
- [13] 蒋大锐, 徐胜超. 基于改进 PSO-Means 算法的大数据聚类处理方法 [J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2024, 42(3): 430-437.
JIANG D R, XU S C. Method of Large Data Clustering Processing Based on Improved PSO Means Clustering Algorithm [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2024, 42(3): 430-437.

(责任编辑: 刘东亮)