

# 生产企业平行应急管理系统在受限条件下的资源调度方案

商秀芹<sup>1</sup>、熊刚<sup>1</sup>、刘希未<sup>1</sup>、韩峰<sup>2</sup>、朱宏林<sup>2</sup>

(1 中国科学院自动化研究所, 复杂系统智能控制与管理国家重点实验室,

北京市智能化技术与系统工程技术研究中心, 北京, 100190)

(2 中国石油化工股份有限公司齐鲁分公司, 山东省淄博市, 255411)

**摘要:**针对生产企业中突发事件存在时间有限、资源受限、信息不完全三方面的条件受限问题, 本文为基于 ACP 方法的平行应急管理系统, 构建综合性应急调度多目标优化模型, 并给出其优化求解算法, 最终形成一套应急资源调度解决方案。基于 GIS 技术得到最短安全路径, 以应对突发事件信息不完全的问题。以时间最短和资源消耗最少为优化目标, 解决时间和资源受限的问题。采用非支配排序多目标遗传优化算法对该模型进行求解。最后采用 AHP 方法对应急资源调度机制进行综合风险评估。

**关键词:** 受限条件, 应急调度, 多目标优化模型, 非支配排序遗传算法, AHP

## 引言

近年来, 我国乃至全球范围内自然灾害或人为因素引起的突发事件频发, 带来了严重的经济损失和人员伤亡。面对这种还不可预测的突发性事件, 快速、及时的应急处置和救援就显得尤为重要。现实中当突发事件发生时, 突发事件的处置往往由于难以得到准确的事件信息, 难以实现快速的应急响应和高效的应急资源调度, 造成了应急处置和管理的复杂性与现实困难。为了达到实时性和快速性的要求, 应急处置和管理还需加强事件检测设备投入以提高监控力度, 提高对突发事件的实时感知和快捷反应能力。近年来, 随着视频智能监测、GIS/GPS、物联网、ACP 方法、平行管理系统等理论和技术的快速发展, 提高应急处置水平面临新的发展契机。

在实际的突发事件发生时, 应急资源调度与决策是应急处置和救援的关键性问题, 受到业界的广泛关注。随着生产企业的突发事件逐渐向非常规化、复杂化、网络化、社会化方向发展, 应急资源调度时常面临条件受限的窘境, 其受限条件主要包括三方面: 第一是时间受限, 突发事件在不可预计情况下发生, 其救援时间非常宝贵。只有在有限的时间内, 提供必要的应急资源和救援物资, 才能减小或避免人员伤亡和经济损失, 具有重要实际意义。第二是物资资源受限。重大突发事件一旦发生, 需要的各类物资及数量复杂多变。因此, 在救援物资资源受限的条件下, 按照一定的轻重缓急标准, 做好合理调配等决策对应急处置工作至关

---

**基金项目支持:** 国家自然科学基金项目 70890084, 60921061, 90920305; 中国科学院项目 2F09N05, 2F09N06, 2F10E08, 2F10E10; 留学回国人员科研启动基金项目 4T05Y03 等的资助; 横向项目: 齐鲁公司烯烃厂平行管理系统研发与应用

**作者简介:** 商秀芹, 女(1983.10-), 博士, 助理研究员, 山东聊城人。研究方向: 复杂系统建模与优化, 过程控制, 化工应急管理, 单位: 中国科学院自动化研究所, 邮编: 100190, E-mail:xqshangster@gmail.com, 联系电话:010-62554288

重要。第三是信息受限。突发事件发生时，由于条件恶劣，通讯设施、监控设备等重要设备可能处于瘫痪状态，相关重要信息往往难以直接获得。面对信息不完全的突发事件处置，如何合理快速分配有限资源是一个技术性挑战和研究热点。

针对应急资源调度问题，各领域学者已经做出大量研究。文献[1]中提出了一种基于 GIS 和 Petri 网的城市火灾扑救调度决策方法。[2]提出一种多层的应急资源配置方法。[3]提出在应急资源的不确定调度模型。[4]提出了一种应急管理的多资源组合下多目标分配模型。这些研究针对不同背景下的应急调度问题从不同侧面进行研究，取得了一定成果和进展。

面对生产企业的突发事件应急处置难题，中国科学院自动化研究所团队采用国际著名学者王飞跃研究员国际首创 ACP 方法，即人工社会(Artificial Societies)-计算实验(Computational Experiments) - 平行执行(Parallel Execution)，基于该方法的平行管理系统<sup>[5-7]</sup>，来研究应对非常规突发事件的平行应急处置关键技术，研制综合性的平行应急处置方案及系统。在平行应急处置方案中，首先根据现有实际系统建立与之对应的人工系统。然后基于人工系统进行计算实验。最终实现人工系统和实际系统间虚实互动的平行执行。本文研究内容为平行应急处置方案的部分工作，目的是建立符合生产企业实际状况的综合性的应急调度方案。

针对时间有限、资源受限、和信息受限三方面的条件受限问题，本文结合基于 ACP 方法的平行管理系统现有成果，构建综合性应急调度多目标优化模型，并给出其优化求解算法，最终形成一套符合生产企业实际需求的综合性应急资源调度解决方案。

## 1. 问题表述

当突发事件发生时，决策者面临信息不完全、时间紧迫等问题的严峻考验。为了帮助决策者制定快速、有效的应急决策，建立应急资源调度模型，并提供有效优化求解方法，在此基础上建立相应的应急处置和决策支持系统，有重要意义。

实际应急管理中，资源调度面临三方面的受限问题：时间受限、资源受限和信息受限。其中，信息受限对应急处置影响巨大，准确可靠的信息能提高救援效率和效果，错误的信息可能加剧灾难带来更大的损失。因此，本文把信息受限问题作为优化模型中的限制条件，运输时间最短和消耗资源与实际需求资源差距最少作为优化模型。

## 2. 应急资源多目标优化调度模型

### 2.1 多目标优化调度模型

以运输时间最短和资源消耗与实际需求资源差距最少作为优化目标，建立受限条件下的多目标应急资源调度模型，如下所示：

假设，现有突发事故发生地点有  $M$  处，分别为  $A_i, i=1,2,\dots,M$ ；后方应急资源库有  $N$  处，分别为  $B_j, j=1,2,\dots,N$ ；每一个资源库储备有资源总量为  $C_j, j=1,2,\dots,N$ ；每一个资源库到  $B_j$  到事发处  $A_i$  的安全最短路径长度为  $x_{ji}$ ；每个资源库  $B_j$  分配给事故发生地  $A_i$  的资源为  $c_{ji}$ ，事故地所需的资源为  $\bar{c}_j, j=1,2,\dots,M$ 。基于以上假设，建立模型如下：

$$\min T = \sum_{(j,i)=(1,1)}^{(N,M)} \delta_{ji} x_{ji} \quad (1)$$

$$\min \Delta = \sum_{i=1}^M \left( \sum_{j=1}^N \delta_{ji} c_{ji} - \bar{c}_i \right)^2 \quad (2)$$

s.t.

$$\delta_{ji} \in \{0,1\}$$

$$\sum_{i=1}^M \delta_{ji} c_{ji} \leq C_j$$

其中，最短安全路径是一个不确定变量，它的获取采用 GIS（Geographic Information System, 地理信息系统）技术，其结果的路径长度为  $x_{ji}$ 。

## 2.2 最短安全路径



图 1. 最短安全路径示意图

本文采用 GIS 技术，搜索最短安全路径。GIS 具有记录所有地理元素的位置，并建立他们之间的拓扑关系的特性<sup>[8]</sup>。根据这一特性，可以利用最佳路径分析功能，选择出最短安全路径。同时，生产企业的应急资源调度中，最短安全路径的选取影响因素相对复杂。一般存在危险性的生产企业，尤其是化工、核电等企业，多建在远离市区、人口密度不大的工业园区。最短安全路径的选取，不仅受交通拥挤度的影响，而且受风向等自然条件的影响。另外，随着交通拥挤度、风向等因素的变化和突发事件现场信息的不断更新，最短安全路线是一个不确定变量。因此，最短安全路线的搜索是一个动态的过程。例如在石化企业毒气泄漏事故中，最短安全路径受风向、气体扩散浓度、是否靠近火源等因素影响；随着影响因素的变化和事故的发展，最短安全路径随时可能出现变化。为解决这个问题，需要在 GIS 系统中针对不同应急问题建立专业的最短安全路径模型，并采取动态刷新风向等参数和反复优化的策略，提高系统对不确定因素的灵敏度，从而及时提高应急处置水平。最短安全路径显示如下图 1 所示，图中为某石化企业烯烃厂，易燃易爆气体泄漏后，消防人员紧急救援的最短安全路径优化图，红色曲线为当前时段（西北风，无靠近火源点）优化得到的最短安全路径。

## 3. 多目标优化算法与求解

### 3.1 多目标优化算法选择

多目标优化问题(Multi-objective Optimization Problems, MOPs), 因在实际应用中广泛存在而备受关注。该问题可以归结为: 寻求一组决策变量, 使其在满足约束的条件下, 同时优化多个目标函数<sup>[9]</sup>。在求解多目标优化问题中, 多目标进化算法显示了强大的优势。多目标进化算法可分为三类方法<sup>[10]</sup>。第一类方法是把多目标问题转化为单目标问题。有加权和方法,  $\varepsilon$ -约束法, 目标规划法<sup>[10,11]</sup>等; 第二类方法是非基于 Pareto 解的多目标优化方法, 如: VEGA 等; 第三类方法是基于 Pareto 解的多目标优化方法, 有 MOGA、NPGA、NSGA、NSGAII 等<sup>[10]</sup>。其中 NSGAII 与其他算法相比有一定优越性: 快速非支配排序降低计算复杂度; 拥挤度和拥挤比较算子保证 Pareto 解均匀分布。

本文采用 NSGAII 算法(Non-dominated Sorting Genetic Algorithm), 对上述多目标优化问题进行求解, 并得到一组 Pareto 前沿解, 以便决策者选择。

### 3.2 算法流程设计

本文采用 NSGAII<sup>[12]</sup>算法, 算法中采用快速非支配排序, 拥挤度比较算子, 和精英保留策略等技术。具体算法流程描述如下:

- (1) 随即生成初始化种群  $P_0$ , 个体数为  $N$ , 并按照上述偏好的定义和快速非支配排序的方法对其排序。
- (2) 采用竞标赛选择、交叉、变异算子, 产生子代种群  $Q_0$ , 个体数为  $N$ 。
- (3) 合并种群的  $R_t = P_t \cup Q_t$ , 个体数为  $2N$ , 然后对  $R_t$  进行非支配排序, 并算出拥挤度比较算子。
- (4) 排序后, 从  $2N$  个个体中选出最优的  $N$  个个体, 组成下一代父代种群  $P_{t+1}$ , 然后采用竞标赛选择、交叉、变异算子, 产生子代种群  $Q_{t+1}$ 。
- (5) 若不满足结束条件, 则令  $t=t+1$ , 并返回步骤 (3)。

### 3.3 算法的优化结果

算法最终得到的不是唯一最优解, 而是 Pareto 前沿上或最趋近 Pareto 前沿的一组优化结果。Pareto 前沿解是基于 Pareto 最优的概念寻优得到的最优解。如图 2 所示, Pareto 前沿上的解 A、B 分别优于解 C、D。但是 A 与 B 之间不具有可比性。决策者可以根据优化目标的优先级决定最终结果。

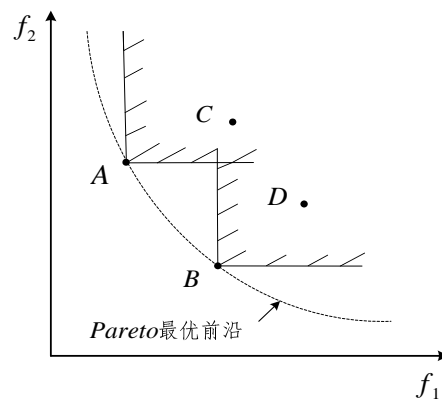


图 2. Pareto 最优解

## 4. 风险评估

针对上述资源受限、时间受限、非确定信息的应急处置解决方案，建立相应的风险评估机制，为决策提供量化的决策依据，对提高整体的应急处置和管理工作具有重要意义。本文采用-AHP方法（Analytical Hierarchy Process）<sup>[13-14]</sup>，它是美国运筹学家 T L Saaty 教授提出的一种指标权重分析的常用方法，是一种定性和定量相结合的多目标决策方法。把复杂系统的各个因素分解，并通过因素间的两两比较，确定因素之间的支配关系，以便建立有序的递阶层次结构，然后结合专家经验判断各因素相对重要的总顺序，从而为决策制定提供定性和定量的评价依据。本文将该方法用于石化企业烯烃厂产品灌区气体泄漏突发事件的资源调度问题决策风险评估如下，其主要步骤如下：

1) 建立层次结构模型。在某石化企业烯烃厂产品灌区气体泄漏突发事件中，应急资源调度风险评估层次结构模型如下所示：

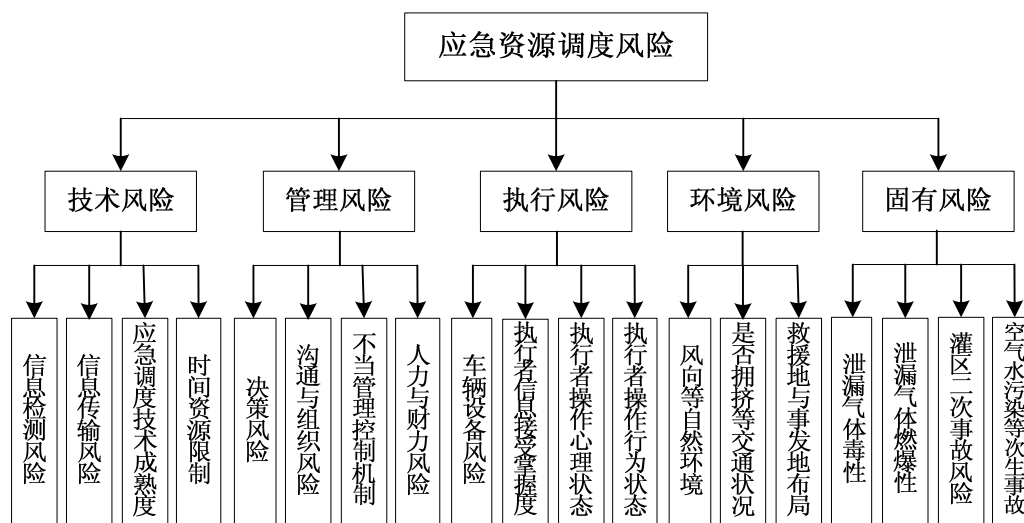


图 3. 应急资源调度风险评估层次结构

- 2) 构造判断矩阵。T L Saaty 教授建立了 1-9 级的判断矩阵标准度，在因素重要性两两比较时量化重要性差异，结合专家经验便可得到所有因素的两两比较的支配关系。
- 3) 判断矩阵一致性。
- 4) 得到各影响因素重要性总排序。

通过 AHP 方法，就能够得到资源调度问题的综合风险分析结果，为决策制定提供定性和定量参考。在救援过程中，对于重要的影响因素，采用针对性措施，增强救援方案的可行性和时效性，为应急处置方案的顺利实施提供有力的技术支持。

## 5. 总结

为解决高危型生产企业在突发事件应急处置中面临着时间紧、资源有限、信息不完全等问题，本文提出了一套基于多目标优化模型的平行应急管理方案，为应急资源调度提供决策支持。该方案采用 GIS 技术搜索最短安全路径，建立时间最短和资源消化最少的多目标优化模型，并提供采用先进的 NSGAI 优化算法。本文提出的整套解决方案，还将根据石化等高危型生产企业应急处置与和管理的实际需求，在以后的研发工作中不断完善。

## 参考文献

- [1] Zhu JP, Fan WC, Xue HS, Liao GX. GIS and petri nets based decision-making methodology for the dispatching process of urban fire-fighting [J]. Journal of University of Science and Technology of China (in Chinese), 35(6), Dec.2005:849-855.
- [2] Wang J, Zhu JM, Huang J, Zhang M. Multi-level emergency resources location and allocation [C]. 2010 IEEE International Conference on Emergency Management and Management Sciences (ICEMMS): 202-205.
- [3] Li D, Liu GL, Gao YJ. Uncertainty optimization model for emergency resource scheduling [C]. 2009 Second International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling: 55-58.
- [4] Xiong GQ; Yang JL. Multi-objective dispatch model of emergency management under multi-resource combinations. Business Management and Electronic Information (BMEI), 2011 International Conference on . Volume: 5, 2011:216 - 219
- [5] Wang FY. Parallel system methods for management and control of complex systems [J]. Control and Decision (in Chinese), 2004. 19(5):485-489.
- [6] Wang FY. Artificial societies, computational experiments, and parallel systems: a discussion on computational theory of complex social-economic systems [J]. Complex Systems and Complexity Science (in Chinese), 2004,(4): 25-35
- [7] Gang X, Wang FY. Parallel Management theory and method [C]. The First Chinese Parallel Management Conference (in Chinese), 2009, Beijing:
- [8] Bian FL, etc. Principles and Applications of Geo-Information System [M]. Mapping Press (in Chinese), Beijing, 1995.
- [9] Osyczka A. Multicriteria optimization for engineering design. Design Optimization, Gero JS, editor, Academic Press 1985: 193-227.
- [10] Coello C A C. An updated survey of GA-based multi-objective optimization techniques. ACM Computing Surveys, 2000, 32(2): 109-119.
- [11] Syawerda G, Palmucci J. The application of genetic algorithms to resource scheduling. Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms, USA, Morgan Kaufmann Publishers, 1991: 502-508.
- [12] Deb K, Pratap A, Agrawal S, Meyarivan T. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. Proc of the Parallel Problem Solving from Nature VI Conf, 2000: 849-858.
- [13] Saaty T L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, 48(1990):9-26.
- [14] Hahn E D. Decision making with uncertain judgments: a stochastic formulation of the analytic hierarchy process. Decision Sciences, summer 2003, 34(3):443-466.

## **Resource Scheduling Solution on Limited Conditions for Parallel Emergency Management System of Manufacturing Enterprises**

Xiuqin Shang<sup>1</sup>, Gang Xiong<sup>1</sup>, Xiwei Liu<sup>1</sup>, Feng Han<sup>2</sup>, Honglin Zhu<sup>2</sup>

(1 The State Key Laboratory of Intelligent Control and Management of Complex Systems, Beijing  
Engineering Research Center of Intelligent Systems and Technology, Institute of Automation,  
Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100190)

(2 China Petrochemical Corporation (Sinopec Group), Qilu Company, Zibo city, Shandong, 255411)

**Abstract:** For the limited conditions problems, such as limited time, constrained

resource, and incomplete information, existing in emergency management of manufacturing enterprises, the integrated multi-objective optimization models are created for parallel emergency management system based on ACP approach, and one algorithm is proposed to solve the existing optimization problem. GIS technique is adopted to search the shortest safe path to reduce the damage of the incomplete information. The shortest transporting time and the minimum resource consumption are the optimization objectives in order to solve the problems of the limited time and constrained resource. In addition, the non-dominated sorting genetic optimization algorithm is used to solve the multi-objective optimization problem. Finally, AHP (Analytic Hierarchy Process) is adopted to evaluate the mechanism of emergency parallel management.

**Keywords:** limited conditions; emergency resource scheduling; multi-objective optimization; the non-dominated sorting genetic optimization; AHP