

应急救援物资多目标分配与调度问题建模与求解

张国富^{a,b†}, 王永奇^a, 苏兆品^{a,b}, 蒋建国^{a,b}

(合肥工业大学 a. 计算机与信息学院, b. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 合肥 230009)

摘要: 应急救援物资多目标分配和调度集成优化是灾害应急决策中的一个难点问题. 为此, 构建一种面向多储备点、多发放点、多种应急救援物资的并发分配与调度多目标优化模型, 提出一种基于二维 NSGA-II 与蚁群优化的混合智能搜索算法. 在所提算法中, 设计二维二进制编码、个体修正策略以解决多发放点之间潜在的应急救援物资冲突, 并改进蚁群优化中的信息素全局更新策略以实现多个调度路径的同时优化. 对比实验结果表明, 所提出的混合算法可以在合理的时间内给出更高质量的应急救援物资分配和调度方案.

关键词: 应急救援物资分配与调度; 多目标优化; NSGA-II; 蚁群优化; 个体修正

中图分类号: TP273

文献标志码: A

Modeling and solving multi-objective allocation-scheduling of emergency relief supplies

ZHANG Guo-fu^{a,b†}, WANG Yong-qi^a, SU Zhao-pin^{a,b}, JIANG Jian-guo^{a,b}

(a. School of Computer and Information, b. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology of Ministry of Education, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: The multi-objective allocation-scheduling of emergency relief supplies is a very challenging topic in the field of disaster emergency decision-making. Therefore, a multi-objective optimization model of allocation-scheduling is developed, taking reserve points, dispatch points, and emergency relief supplies altogether. A hybrid algorithm on the basis of NSGA-II and ant colony optimization(ACO) is proposed for solving the problem. Then NSGA-II with two-dimensional binary chromosome encoding and the corresponding strategy for individual repairs are designed to solve the potential conflicts over emergency relief supplies among multiple dispatch points. Moreover, an improved strategy is presented for updating the global pheromone in ACO to search for different scheduling routes at the same time. Finally, the experimental results show that the proposed hybrid algorithm can obtain higher quality schemes of emergency relief supplies allocation-scheduling in a reasonable time.

Keywords: emergency relief supplies allocation-scheduling; multi-objective optimization; NSGA-II; ant colony optimization; individual repairs

0 引言

近年来, 伴随着我国经济快速发展和城市化进程不断加快, 我国的资源、环境和生态压力加剧, 日益频发的自然灾害给社会造成了巨大的生命和财产损失. 应急救援物资分配和调度作为灾害应急管理的关键环节之一, 主要研究如何利用智能决策理论和计算机辅助工具制定可行的应急救援物资分配和调度方案, 使得各储备点的救援物资能够及时合理地运送到各

发放点^[1], 对减少生命财产损失、降低次生灾害影响以及维护社会稳定具有重要的现实意义, 已成为我国政府迫切需要解决的重要课题.

目前, 国内外学者已对应急救援物资分配与调度问题进行了大量研究. Chiu 等^[2]设计了一种基于 Web 的灾害识别与资源调度系统; Peng 等^[3]针对灾害发生时需求不确定的情况, 基于灰色预测和情景分析的方法对各发放点所需的应急资源进行预测, 但没有给出

收稿日期: 2015-12-08; 修回日期: 2016-03-23.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573125, 61174170, 61371155); 安徽省自然科学基金项目(1608085MF131, 1508085MF132, 1508085QF129); 安徽省科技攻关项目(1301b042023).

作者简介: 张国富(1979—), 男, 副教授, 博士, 从事演化计算和智能决策等研究; 王永奇(1992—), 男, 硕士生, 从事演化计算和灾害应急决策的研究.

†通信作者. E-mail: zgf@hfut.edu.cn

具体的应急资源分配方法. 而且, 上述研究一次只能处理单个物资发放点的应急请求, 而像地震、洪水等特大自然灾害影响范围非常广, 往往会波及多个区域, 因此, 在实际应急决策中, 往往需要考虑对多个发放点同时进行救援物资分配.

为此, Arora 等^[4]针对医疗应急资源分配展开研究, 建立了在费用约束的情况下以最大化救助率为目标的优化模型; Wex 等^[1]构建了一种针对多发点, 以最小化总完成时间为目标的应急救援设备分配模型; 于辉等^[5]运用局内决策方法设计了一种救援物资两阶段嵌套分配策略; Sung 等^[6]针对单一应急医疗资源, 考虑在资源有限的情况下如何分配使救助人数达到最大化, 涉及了医疗资源的分配和路径规划. 不过, 虽然上述研究开始考虑多个物资发放点的情况, 但是仍局限于单种救援物资的应急请求.

对于多储备点、多发点 and 多种救援物资分配及调度问题而言, 应该考虑包括应急响应时间在内的诸多因素^[7]. 为此, 王旭坪等^[8]构建了以最小化公众心理风险感知程度和物资未满足度为目标的混合整数规划模型, 设计了基于分枝定界的多层搜索算法; Zhang 等^[9]建立了多种救援物资、多发点的应急调度模型, 并基于图论中网络优化和线性规划优化思想设计了一种启发式搜索算法; Wang 等^[10]提出了一种基于雪球效应和社会网络分析的资源分配和协作方法; Liu 等^[11]基于 Petri 网对考虑应急资源约束和不确定周期的应急响应过程进行了建模和分析. 此外, 文献 [12-13] 针对救援物资的路径规划构建了多目标优化模型, 并设计启发式算法或采用整数线性规划进行求解. 不过, 上述确定性方法在处理大规模样本时很难在合理时间内给出有效解, 为此文献 [14-16] 引入了遗传算法, 文献 [17-18] 利用粒子群算法进行了优化. 但是, 上述工作只考虑了分配问题或只针对如何调度, 很少将两者综合起来考虑. 然而, 在实际应急决策中, 分配环节和调度环节具有天然的内在关联性. 分配环节给出的储备点选择方案, 如救援物资量和储备点地理位置必然会影响到调度环节的运输时间, 从而影响整个应急过程的响应时间. 因此, 将应急资源分配和调度集成起来统一优化更加具有实际意义, 也能从整体上提高应急决策效率. 为此, 文仁强等^[19]在建模时同时考虑了分配和调度因素, 并利用蚁群优化两阶段搜索给出了分配与调度方案. 但其算法对多个发放点的需求仍然采用传统的串行优化, 下一个发放点只能在前一个发放点的需求得到满足时才能得到响应, 一旦中间某个发放点的需求得不到满足, 算法将不再优化后续的发放点. 而且, 前一个发放点的优化方案必然会影响到后续发放点的优化结果, 因而不能从宏观上统筹考虑各发放点的应急需求.

针对上述问题, 本文在整理和分析已有工作的

基础上, 构建多储备点同时响应多发点的多种救援物资并行分配模型, 并考虑物资调度过程中路径的优化问题, 基于二维 NSGA-II 设计一种应急救援物资多目标并行分配算法, 基于蚁群优化设计应急物资调度路径的优化算法, 将应急救援物资分配与调度问题 (ASERS) 集成起来加以考虑.

1 问题提出

假设有 n 个物资储备点 (reserve points), $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, 需响应 m 个物资发放点 (dispatch points) 的应急需求, $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$.

$\forall a_i \in A$ 均有一个救援物资持有量, $B_i = [b_1^i, b_2^i, \dots, b_r^i]$, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. 其中: $b_k^i \geq 0$ 为非负整数, 表示储备点 a_i 对第 k 种救援物资的持有量, $k \in \{1, 2, \dots, r\}$.

$\forall t_j \in T$ 均有一定的救援物资需求量, $D_j = [d_1^j, d_2^j, \dots, d_r^j]$, $j \in \{1, 2, \dots, m\}$. 其中: r 为救援物资种类; $d_k^j \geq 0$ 为非负整数, 表示发放点 t_j 对第 k 种救援物资的需求量.

$\forall t_j \in T$ 均有相应的应急响应时间要求, $\pi_j \in \Pi = \{\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_m\}$, 表示必须在 $\pi_j > 0$ (正整数) 时间内将应急救援物资运输到发放点 t_j .

$G = (N, E)$ 表示无向交通网络图. 其中: N 表示道路节点集, $E \in N \times N$ 表示路段. $e(p, q) \in E$ 表示从节点 n_p 到 n_q 仅存在一条边. 设 $S \in N$ 为道路起点, $D \in N$ 为道路终点. 路径 $P(S, D)$ 为连续的道路节点序列: $P(S, D) = \{n_1, n_2, \dots, n_m | n_1 = S, n_m = D, m > 1, e(n_l, n_{l+1}) \in E, 1 \leq l \leq m\}$. 此外, $t(e(p, q)) \in E$ 和 $r(e(p, q)) \in E$ 分别表示路段 $e(p, q)$ 的通行时间和通行可靠度, 则 $t(P(S, D)) = \sum_{l=1}^{m-1} t(e(n_l, n_{l+1}))$ 表示

路径 $P(S, D)$ 的通行时间, $r(P(S, D)) = \sum_{l=1}^{m-1} r(e(n_l, n_{l+1}))$ 表示路径 $P(S, D)$ 的通行可靠度.

$N(a_i) \subseteq N$ 表示储备点 a_i 所对应的道路节点, $N(t_j) \subseteq N$ 表示发放点 t_j 所对应的道路节点. 同理, $t(P(N(a_i), N(t_j)))$ 表示储备点 a_i 到发放点 t_j 之间路径的通行时间, $r(P(N(a_i), N(t_j)))$ 表示储备点 a_i 到发放点 t_j 之间路径的可靠度.

$z_{a_i t_j}$ 为一个二值变量, 表示储备点 a_i 到发放点 t_j 选择的路径时间与 t_j 限定时间之间的关系, 如果有 $t(P(N(a_i), N(t_j))) \leq \pi_j$, 则 $z_{a_i t_j} = 1$, 否则 $z_{a_i t_j} = 0$.

$\forall a_i \in A$ 对 $\forall t_j \in T$ 都有一个实际救援物资贡献量 $W^{ij} = [w_1^{ij}, w_2^{ij}, \dots, w_r^{ij}]$. 其中: $0 \leq w_k^{ij} \leq b_k^i$ 为非负整数, 表示储备点 a_i 向发放点 t_j 提供的第 k 种救援物资的实际贡献量. 显然, $W^{ij} = 0$ 表示储备点 a_i 没有响应发放点 t_j 的应急请求. 此外, $\forall a_i \in A$ 都有一个剩余救援物资量 $L_i = [l_1^i, l_2^i, \dots, l_r^i]$. 其中: $0 \leq l_k^i \leq b_k^i$ 为非负整数, 表示储备点 a_i 在第 k 种救援物资上

的剩余量. 显然, 初始时 $L_i = B_i$, 因为 a_i 未响应任何应急请求, 如果 a_i 响应了某些发放点的应急请求, 则有 $L_i + \sum_{j=1}^m W^{ij} = B_i$.

据此, 考虑多储备点、多发点点和多种救援物资的 ASERS 问题就是面向多个发放点 t_1, t_2, \dots, t_m , 在多个储备点 a_1, a_2, \dots, a_n 中同时进行救援物资的分配和调度, 即如下的 3 个目标优化问题:

$$\min U = \frac{\sum_{k=1}^r \left\{ \frac{\sum_{j=1}^m (d_k^j - z_{a_i t_j} \sum_{i=1}^n w_k^{ij})}{\sum_{j=1}^m d_k^j} \right\}}{r}, \quad (1)$$

$$\min T = \max_{\substack{i=1,2,\dots,n \\ j=1,2,\dots,m}} \{t(P(N(a_i), N(t_j)))\}, \quad (2)$$

$$\max R = \min_{\substack{i=1,2,\dots,n \\ j=1,2,\dots,m}} \{r(P(N(a_i), N(t_j)))\} \quad (3)$$

同时满足如下约束条件:

$$\sum_{i=1}^n W^{ij} = D_j, \quad 1 \leq j \leq m; \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n W^{ij} \leq B_i, \quad 1 \leq i \leq n; \quad (5)$$

$$t(P(N(a_i), N(t_j))) \leq \pi_j, \quad 1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq m. \quad (6)$$

其中: 式(1)表示最小化救援物资的未满足量; 式(2)表示使最大的储备点 a_i 到发放点 t_j 的路径时间最小; 式(3)表示使最小的储备点 a_i 到发放点 t_j 的路径可靠度最大; 约束条件(4)表示 T 中的每个发放点的应急救援物资需求都能得到满足; 约束条件(5)表示每个储备点向所有的发放点提供的实际救援量总和不能超过自身物资拥有量, 否则将会出现救援物资冲突; 约束条件(6)表示每个储备点到发放点选择的路径耗费时间不应超过发放点限制时间.

需要指出的是, 传统的单目标做法是单纯的追求某一个目标, 导致的结果是解方案在其他目标上偏离了实际需求. 比如, 单纯地追求响应时间可能会导致应急响应未满足度大大增加, 而上述多目标优化的好处是尽可能地在多个目标之间保持一个较好的平衡 (a good trade-off), 即 Pareto 最优解, 找到一个各个目标上都能接受的方案. 而且, 与单目标优化最后只给出单个解不同的是, 多目标优化最后给出的是一组 Pareto 解集, 增加了决策者的选择余地, 决策者可以根据实际需求从 Pareto 解集中选择合理的解方案.

2 基于混合算法求解 ASERS 问题

如图 1 所示, 混合算法基本思路如下: 采用二维 NSGA-II 和个体修正策略完成多个储备点到多个发放点的救援物资并行分配, 之后, 蚁群优化根据 NSGA-II 给出的最优解集, 完成对解集中每个分配方案的路径搜索, 然后将救援物资分配和调度方案代入式(1)~(3), 计算每个个体的目标值, 根据目标值选择

最优的一批个体进入新一代初始种群, 并更新路径上的全局信息素. 重复上述步骤, 直到满足终止条件.

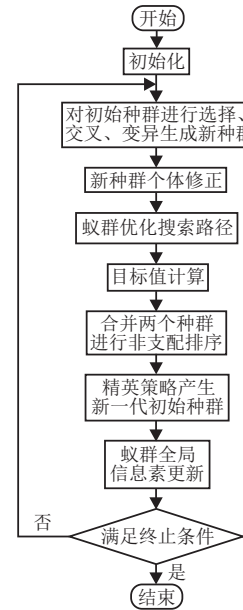


图 1 混合算法

2.1 NSGA-II 中个体编码

多年来, NSGA-II^[20] (第 2 代快速排序遗传算法) 不仅在众多测试函数上表现出强劲优势, 还在实际应用中取得了显著效果^[21]. 但其传统的染色体一维编码与本文探讨的 ASERS 问题的二维组合优化实质不太相符, 因此, 本文将 NSGA-II 中的每个个体扩充到二维二进制编码.

$$\begin{matrix} & a_1 & \cdots & a_i & \cdots & a_n \\ t_1 & \begin{bmatrix} 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_j & 1 & \cdots & 0 & \cdots & 1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ t_m & 0 & \cdots & 1 & \cdots & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

图 2 二维二进制个体编码

如图 2 所示, 个体的每一行表示一个发放点 t_j , 每一列表示一个储备点 a_i . 个体的每个基因位即为 γ_{ij} , $\gamma_{ij} = 0$ 表示储备点 a_i 没有参与 t_j 的救援, $\gamma_{ij} = 1$ 表示储备点 a_i 参与了 t_j 的救援. 但是, 从图 2 中只能判断出某个储备点是否响应了 T 的请求, 而并不知道每个储备点到底在其响应的发放点中贡献了多少救援物资. 而且, 对于每一行而言, 如果 $\exists j \in \{1, 2, \dots, m\}$ 和 $\exists k \in \{1, 2, \dots, r\}$, 使得 $\sum_{i=1}^n (\gamma_{ij} \cdot b_k^i) < d_k^j$, 则候选储备点拥有的救援物资总量不能满足发放点 t_j 的应急需求. 对于每一列而言, 如果 $\exists i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 和 $\exists k \in \{1, 2, \dots, r\}$, 使得 $\sum_{j=1}^m (\gamma_{ij} \cdot w_k^{ij}) > b_k^i$, 则储备点 a_i 为响应 T , 在各个发放点中贡献的救援物资总量超出了其自身的拥有量, 这时就会产生救援物资冲突, 这正是并行分配的难点所在. 而且, 只要存在上述问题中的任何一个, 个体就会是一个不可行个体

(infeasible individuals). 而大量的不可行个体不利于解的探索, 会大大延缓算法的进化, 降低算法的效率.

2.2 不可行个体修正策略

不可行个体修正的目的是为了确保个体中的每一行对应的发放点的应急需求都能被满足, 同时个体中的每一列对应的储备点不存在任何救援物资冲突. 因此, 在修正策略中必须明确每个储备点 a_i 对其响应的发放点 t_j 的实际救援物资贡献量 \mathbf{W}^{ij} , 以及 a_i 还剩余的救援物资量 \mathbf{L}_i , 一旦 a_i 的应急救援物资全部贡献完毕 (即 $\mathbf{L}_i = 0$), 则 a_i 将不再响应其他发放点的应急请求.

据此, 不可行个体修正策略的具体流程如下:

Step 1: 初始化. 对于 $\forall a_i \in A, \mathbf{L}_i \leftarrow \mathbf{B}_i$; 对于 $\forall a_i \in A$ 和 $t_j \in T, \mathbf{W}^{ij} \leftarrow 0$.

Step 2: 应急救援物资并行分配. 从个体中随机选择一个未检查的行 j (即发放点 t_j):

1) 对第 j 行每个满足 $\gamma_{ij} = 1$ 的 i 执行 $\forall k \in \{1, 2, \dots, r\}, w_k^{ij} \leftarrow l_k^i, l_k^i \leftarrow 0$.

2) 若 $\exists k \in \{1, 2, \dots, r\}, \sum_{i=1}^n (\gamma_{ij} \cdot w_k^{ij}) > d_k^j$, 则挑选第 k 维上最小的 $w_k^{ij} > 0$ 对应的储备点 a_{i^*} , 执行

$$l_k^{i^*} \leftarrow \min \left\{ w_k^{i^*j}, \sum_{i=1}^n (\gamma_{ij} \cdot w_k^{ij}) - d_k^j \right\}, \quad (7)$$

$$w_k^{i^*j} \leftarrow \max \left\{ 0, d_k^j - \sum_{i=1 \wedge i \neq i^*}^n (\gamma_{ij} \cdot w_k^{ij}) \right\}. \quad (8)$$

重复上述步骤, 直到满足 $\forall k \in \{1, 2, \dots, r\}, \sum_{i=1}^n (\gamma_{ij} \times w_k^{ij}) = d_k^j$ 为止.

3) 如果 $\exists k \in \{1, 2, \dots, r\}, \sum_{i=1}^n (\gamma_{ij} \cdot w_k^{ij}) < d_k^j$, 则挑选 $\gamma_{ij} = 0$ 和 $l_k^i > 0$ 对应的储备点 a_{i^*} , 让其贡献其剩余资源, 执行

$$w_k^{i^*j} \leftarrow \min \left\{ l_k^{i^*}, d_k^j - \sum_{i=1}^n (\gamma_{ij} \cdot w_k^{ij}) \right\}, \quad (9)$$

$$l_k^{i^*} \leftarrow l_k^{i^*} - w_k^{i^*j}, \quad (10)$$

$$\gamma_{i^*j} \leftarrow 1. \quad (11)$$

重复上述步骤, 直到满足 $\forall k \in \{1, 2, \dots, r\}, \sum_{i=1}^n (\gamma_{ij} \times w_k^{ij}) = d_k^j$ 为止.

4) 对于第 j 行每个满足 $\gamma_{ij} = 1$ 的 i , 如果 $\mathbf{W}^{ij} = 0$, 则 a_i 对于发放点 t_j 没有任何贡献, 所以 a_i 不应该响应 t_j 的应急请求, 此时执行 $\gamma_{ij} \leftarrow 0$.

Step 3: 如果所有行均检查完毕 (即所有发放点均完成分配), 则修正完毕, 否则转 Step 2.

在上述修正策略中, Step 2 对于后续列的检查均基于各储备点的剩余救援物资量 \mathbf{L}_i , 因此可有效避免救援物资冲突. 同时, 节省下来的剩余救援物资可以

竞争其他发放点, 从而尽可能满足更多的应急需求.

2.3 蚁群优化中的全局信息素更新策略

完成救援物资的分配后, 需要为 Pareto 解集中每个分配方案找到一条可行的运输路径. 在求解基于图结构的优化问题时, 如 TSP、网络路由、车辆路径等, 蚁群优化^[22]具有先天的契合性, 因为其本身就是一种用来在图中寻找优化路径的机率型算法, 大量的文献验证表明, 蚁群优化在处理图结构优化问题时要比其他算法更加简单、灵活和高效^[23], 因此, 本文选用蚁群优化搜索储备点与发放点之间的路径.

在处理每个储备点到每个发放点的路径节点选择时, 优先选择路段可靠度最高、距离发放点路程最短的节点, 换言之, 启发式信息应该与路段的可靠度呈正比, 与发放点的路程距离呈反比. 为此, 定义弧段 (p, q) 上的启发式信息

$$\eta_{pq} \leftarrow \frac{1}{t(P(N(q), D))} \cdot r(P(p, q)). \quad (12)$$

此外, 定义道路节点的全局信息素浓度

$$\tau \leftarrow \begin{bmatrix} \tau_{11} & \cdots & \tau_{1N} \\ \vdots & \tau_{pq} & \vdots \\ \tau_{N1} & \cdots & \tau_{NN} \end{bmatrix}. \quad (13)$$

其中: τ_{pq} 表示边 $e(p, q)$ 之间的信息素浓度, 当蚂蚁完成一个救援方案的路径搜索后, 路径上的各条边的信息素浓度按原有方式局部更新, 即

$$\tau_{pq}(t) \leftarrow (1 - \xi) \cdot \tau_{pq}(t) + \xi \cdot \tau_0. \quad (14)$$

当 NSGA-II 中进行非支配排序和精英选择策略产生新一代初始种群后, 对各条边的信息素浓度进行全局更新, 即

$$\tau_{pq}(t+1) \leftarrow \begin{cases} (1 - \rho) \cdot \tau_{pq}(t) + \rho \cdot \Delta\tau, & \text{rank} = 1; \\ \tau_{pq}(t) - t \cdot \delta, & \text{否则}. \end{cases} \quad (15)$$

其中: rank = 1 表示个体在非支配排序后属于第 1 层, 即该个体是一个非支配解, 为了增加此路径在以后选中的概率, 加强蚁群中的正反馈机制, 将这个非支配解对应路径上的信息素浓度适当增加; 反之, 若该个体不属于第 1 层, 则是一个支配解, 应该相应减少其对应路径上的信息素浓度, 从而降低其被选中的几率.

综上, 蚂蚁从节点 p 到节点 q 的转移策略如下:

$$q \leftarrow \begin{cases} \arg \max_{s \notin \text{Tabu}()} \{(\tau_{ps})^\alpha \cdot (\eta_{ps})^\beta\}, & \text{rand}() \leq \lambda; \\ \text{轮盘赌选择}, & \text{否则}. \end{cases} \quad (16)$$

其中: Tabu() 为禁忌表, 表示该蚂蚁已经走过的节点集合; α 和 β 为控制系数, 决定两个启发式信息的影响程度. 如果生成的随机数 rand() 小于等于转移概率 λ , 则选择 $(\tau_{ps})^\alpha \cdot (\eta_{ps})^\beta$ 最大的节点 s 赋给 q ; 否则, 在可选节点中利用轮盘赌选择法 (roulette wheel selection) 随机挑选一个 q 节点. 轮盘赌选择策略中每个候选节

点 q 的概率为

$$\varphi_q \leftarrow \begin{cases} \frac{(\tau_{pq})^\alpha \cdot (\eta_{pq})^\beta}{\sum_{s \notin \text{Tabu}()} (\tau_{ps})^\alpha \cdot (\eta_{ps})^\beta}, & q \notin \text{Tabu}(); \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (17)$$

3 实验结果与分析

为了验证本文混合算法 (NSGA2-ACO) 的有效性, 分别设计两种实验环境: 在应急环境 1 中, $\sum_{i=1}^n B_i > \sum_{j=1}^m D_j$, 所有储备点拥有物资总量略大于所有发放点需求物资总量, 应急救援物资不是很充分, 但基本可以响应发放点的应急需求; 在应急环境 2 中, $\sum_{i=1}^n B_i = \sum_{j=1}^m D_j$, 所有储备点拥有物资总量恰好等于所有发放点需求物资量, 应急救援物资储备比较紧张。

正如前述, 目前大部分已有工作都是单独讨论应急资源分配或应急资源调度, 只有文仁强等^[19]将两者综合起来考虑, 具有一定的代表性. 此外, 粒子群优化也在单目标应急资源分配中得到了较好的应用^[17-18]. 因此, 选择如下两种代表性算法进行对比实验分析: 文仁强等^[19]提出的双蚁群多目标优化算法 (Two-ACO), 将 Coello 等^[24]提出的经典多目标粒子群优化 MOPSO 与本文 ACO 相结合, 即 MOPSO-ACO.

3.1 实验参数和评价指标

对于优化算法而言, 算法参数取值不同可能会导

致算法性能的波动. 本文采用实验法, 即结合已有工作与通过大量测试获得结果相对较好的一组参数组合, 这也是目前常用的确定参数的方法. 具体如下: 1) NSGA-II: 染色体数 100, 迭代次数 500, 交叉概率 0.8, 变异概率 0.05. 2) ACO: 蚂蚁数 100, 迭代次数 500, 转移概率 0.6, $\alpha = 1$, $\beta = 1$, $\rho = 0.1$, $\delta = 0.01$, $\xi = 0.1$, $\tau_0 = 1$, $\Delta\tau = 1.3$. 3) MOPSO: 粒子数 100, 迭代次数 500, 变异概率 0.05, 自适应网格数 30.

此外, 每个测试样本均是根据输入的问题规模和约束条件随机生成的, 并在 Pentium Dual-Core CPU 2.2 GHz、内存 3.5 GB、操作系统 Windows 7 的个人计算机上独立运行 30 次.

与单目标优化不同的是, 多目标优化给出的是的一组 Pareto 最优解集. 在多目标优化领域, 超体积指标^[25]是一种最常用的评价解集质量的标准, 有如下典型特征: 当一个解集 A 支配 (Pareto 支配关系) 另一个解集 B 时, A 的超体积一定优于 B ; 当两个解集互不支配时, 解集 A 中的 Pareto 最优解越多越分散 (即多样性越好), A 的超体积指标越突出. 因此, 选择超体积指标衡量不同算法给出的解集质量.

3.2 不同应急规模下的性能对比

为了分析算法在不同应急规模 (储备点和发放点的数量) 下的性能, 分别考虑不同储备点数、不同发放点数两种情形. 为了方便分析, 上述两种情形均在环境 1 中进行, 并考虑存在 3 种救援物资. 表 1 给出了 3 种算法在不同 n 时, $m = 5$ 和 $r = 3$ 下的实验结果.

表 1 不同储备点数下的实验结果

n	平均超体积 (e+05)			平均运行时间 /s		
	NSGA2-ACO	Two-ACO	MOPSO-ACO	NSGA2-ACO	Two-ACO	MOPSO-ACO
5	1.85	1.84	1.85	8.6	8.4	6.4
10	1.81	1.8	1.79	13.6	11.6	9.2
15	1.8	1.74	1.71	18.7	16.1	13.1
20	1.74	1.62	1.59	23.3	21.4	16.3
25	1.65	1.57	1.52	28.5	27.9	19.8
30	1.61	1.49	1.43	32.4	33.5	23.1

由表 1 可以看出, 在每个给定的储备点数量下, 本文 NSGA2-ACO 得到的超体积值均优于 Two-ACO 和 MOPSO-ACO 算法, 其运行时间在三者中稍大, 但与 Two-ACO 较为接近, MOPSO-ACO 最快, 但超体积最小. 而且, 随着储备点数量的增加, 3 种算法的超体积呈下降趋势, 而运行时间呈上升趋势. 这是因为随

着 n 的增加, 解空间逐渐增大, 路径规模也相应扩大, 算法的进化代价越来越大, 而且 NSGA2-ACO 还要对每个不可行个体进行修正. 但就实验效果而言, 个体修正可以促使算法找到更高质量的解, 因此, 这点时间开销对 ASERS 问题是值得的. 表 2 给出了 3 种算法在不同 m 时, $n = 10$ 和 $r = 3$ 下的实验结果.

表 2 不同发放点数下的实验结果

m	平均超体积 (e+05)			平均运行时间 /s		
	NSGA2-ACO	Two-ACO	MOPSO-ACO	NSGA2-ACO	Two-ACO	MOPSO-ACO
5	1.79	1.78	1.77	14.7	12.5	10.7
10	0.87	0.86	0.85	22.8	18.8	16.2
15	0.55	0.53	0.52	29.5	25.7	21.5
20	0.46	0.43	0.42	38.5	32.6	27.4
25	0.34	0.33	0.31	46.8	40.5	33.9
30	0.27	0.24	0.23	52.4	44.7	36.7

由表2可以看出,在每一个给定的发放点数下,NSGA2-ACO得到的超体积分值均大于Two-ACO和MOPSO-ACO算法,3种算法的运行时间相比表1则有较大增幅,但NSGA2-ACO的运行时间仍然与Two-ACO接近.具体而言,随着发放点数的增加,3种算法的超体积下降较快,而运行时间迅速上升.这是因为储备点物资有限,随着 m 的增加,救援物资冲突越来越激烈,冲突消解也就变得越来越棘手.同时,需要搜索的路径规模也迅速增加,从而导致算法性能下降.

3.3 不同应急环境下的性能对比

给定 $m = 5, n = 10$ 和 $r = 3$,分别测试3种算法在两种应急环境中的性能.

图3给出了3种算法在两种应急环境中的超体积分值对比曲线.

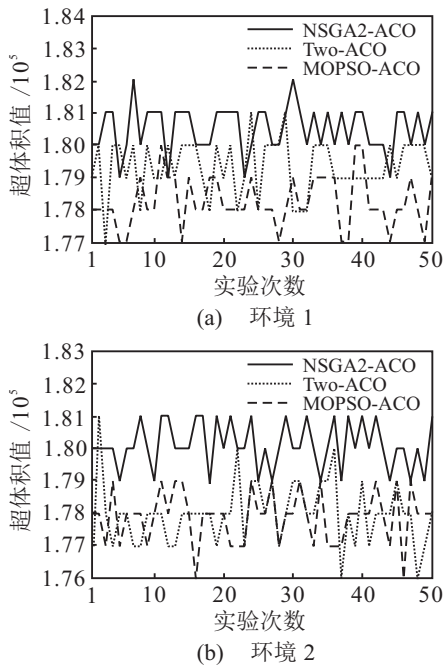


图3 两种环境下的超体积结果

从图3可以看出,NSGA2-ACO的性能明显优于Two-ACO和MOPSO-ACO算法,尤其在应急环境2中优势更为明显,说明本文提出的个体修正和全局信息素更新等改进措施可以在一定程度上提高算法的搜索能力.而Two-ACO每次迭代要同时优化两个蚁群系统中的信息素,且算法中不包含变异操作,种群的多样性难以维持.MOPSO-ACO在确定个体历史最优粒子与全局最优粒子时需要多次使用随机操作,虽然保持了种群的多样性,但这种随机操作在一定程度上降低了算法的收敛性.

为了进一步说明,图4给出了3种算法在每次迭代后的超体积分值结果.

由图4可知,NSGA2-ACO在200代左右就能收敛到一个较好的解集,而Two-ACO和MOPSO-ACO在400代左右才收敛到一个较好的解集,说明NSGA2-ACO具有更快的收敛速度和更好的探索性能.

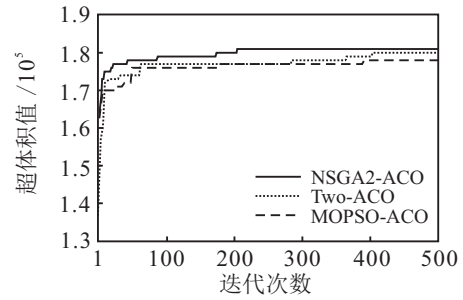


图4 环境1中各算法收敛性对比

表3给出了3种算法在两种应急环境中的平均运行时间.

表3 两种应急环境中的平均运行时间 s

环境	NSGA2-ACO	Two-ACO	MOPSO-ACO
环境1	13.8	12.1	9.6
环境2	13.7	12.9	10.8

由表3可以看出,虽然NSGA2-ACO耗时比Two-ACO和MOPSO-ACO略多,但三者之间的差距并不明显,说明本文提出的个体修正和全局信息素更新等改进措施并没有给NSGA2-ACO算法带来极大耗时,可以在一定程度上提高NSGA2-ACO算法的性能,保证NSGA2-ACO算法在一个可接受的时间范围内给出更高质量的解集.

4 结 论

本文针对应急救援物资并发分配和调度集成这一难点问题,构建了多储备点、多发放点、多种救援物资分配与调度数学模型,设计了一种基于二维NSGA-II与蚁群优化的应急救援物资并发分配与调度NSGA2-ACO混合优化算法,并提出了不可行个体修正和全局信息素更新策略以提高算法的搜索效率.与已有经典工作在两种应急环境中的对比测试表明,NSGA2-ACO算法能在一个可接受的时间内为决策者提供更高质量的应急救援物资并发分配和调度方案.但是,本文只是对应急救援物资并发分配和调度问题在集成视角下的一个初步探索,旨在能为政府的灾害应急响应决策提供有益的技术支撑.本文仍有诸多工作需要进一步探索:与文仁强等^[19]的工作一样,本文也是两种演化算法相结合的两步优化(先分配再调度),这就带来一个新课题,能否在一种演化算法中同时实现救援物资的分配和调度.此外,在一些特大自然灾害(如地震)中,一般会伴随着很多次生灾害(如山体滑坡、泥石流),这时发放点的数目和救援物资需求很可能是动态变化的,因此,应急救援物资动态分配和调度问题也是一个非常有意义的研究课题.

参考文献(References)

[1] Wex F, Schryen G, Feuerriegel S, et al. Emergency response in natural disaster management: Allocation and

- scheduling of rescue units[J]. *European J of Operational Research*, 2014, 235(3): 697-708.
- [2] Chiu D K W, Lin D T T, Kafeza E, et al. Alert based disaster notification and resource allocation[J]. *Information Systems Frontiers*, 2010, 12(1): 29-47.
- [3] Peng Y, Hu Z, Guo X. Research on the evolution law and response capability based on resource allocation model of unconventional emergency[J]. *J of Computers*, 2010, 5(12): 1899-1906.
- [4] Arora H, Raghu T S, Vinze A. Resource allocation for demand surge mitigation during disaster response[J]. *Decision Support Systems*, 2010, 50(1): 304-315.
- [5] 于辉, 刘洋. 应急物资的两阶段局内分配策略[J]. *系统工程理论与实践*, 2011, 31(3): 394-403.
(Yu H, Liu Y. Two-stage online distribution strategy of emergency material[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2011, 31(3): 394-403.)
- [6] Sung I, Lee T. Optimal allocation of emergency medical resources in a mass casualty incident: Patient prioritization by column generation[J]. *European J of Operational Research*, 2016, 252(2): 623-634.
- [7] Holguín-Veras J, Pérez N, Jaller M, et al. On the appropriate objective function for post-disaster humanitarian logistics models[J]. *J of Operations Management*, 2013, 31(5): 262-280.
- [8] 王旭坪, 马超, 阮俊虎. 考虑公众心理风险感知的应急物资优化调度[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(7): 1735-1742.
(Wang X P, Ma C, Ruan J H. Emergency supplies optimal scheduling considering the public's psychological risk perception[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(7): 1735-1742.)
- [9] Zhang J, Li J, Liu Z. Multiple-resource and multiple-depot emergency response problem considering secondary disasters[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(12): 11066-11071.
- [10] Wang D, Qi C, Wang H. Improving emergency response collaboration and resource allocation by task network mapping and analysis[J]. *Safety Science*, 2014, 70: 9-18.
- [11] Liu C, Zeng Q, Duan H, et al. E-net modeling and analysis of emergency response processes constrained by resources and uncertain durations[J]. *IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2015, 45(1): 84-96.
- [12] Rath S, Gutjahr W J. A math-heuristic for the warehouse location - routing problem in disaster relief[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 42: 25-39.
- [13] Abounacer R, Rekik M, Renaud J. An exact solution approach for multi-objective location-transportation problem for disaster response[J]. *Computers & Operations Research*, 2014, 41: 83-93.
- [14] 王新平, 王海燕. 多疫区多周期应急物资协同优化调度[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(2): 283-291.
(Wang X P, Wang H Y. Optimal multi-period collaborative scheduling of emergency materials for multiple epidemic areas[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2012, 32(2): 283-291.)
- [15] 王旭坪, 马超, 阮俊虎. 运力受限的应急物资动态调度模型及算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2013, 33(6): 1492-1500.
(Wang X P, Ma C, Ruan J H. Model and algorithm of relief materials dynamic scheduling without sufficient vehicle quantity[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2013, 33(6): 1492-1500.)
- [16] Chang F S, Wu J S, Lee C N, et al. Greedy-search-based multi-objective genetic algorithm for emergency logistics scheduling[J]. *Expert Systems with Applications*, 2014, 41(6): 2947-2956.
- [17] 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.
- [18] 庞海云, 刘南, 吴桥. 应急物资运输与分配决策模型及其改进粒子群优化算法[J]. *控制与决策*, 2012, 27(6): 871-874.
(Pang H Y, Liu N, Wu Q. Decision-making model for transportation and distribution of emergency materials and its modified particle swarm optimization algorithm[J]. *Control and Decision*, 2012, 27(6): 871-874.)
- [19] 文仁强, 钟少波, 袁宏永, 等. 应急资源多目标优化调度模型与多蚁群优化算法研究[J]. *计算机研究与发展*, 2013, 50(7): 1464-1472.
(Wen R Q, Zhong S B, Yuan H Y, et al. Emergency resource multi-objective optimization scheduling model and multi-colony ant optimization algorithm[J]. *J of Computer Research and Development*, 2013, 50(7): 1464-1472.)
- [20] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(2): 182-197.
- [21] Li H, Zhang Q. Multiobjective optimization problems with complicated pareto sets, MOEA/D and NSGA-II[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2009, 13(2): 284-302.
- [22] Dorigo M, Birattari M, Stutzle T. Ant colony optimization[J]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006, 1(4): 28-39.
- [23] Mohan B C, Baskaran R. A survey: Ant colony optimization based recent research and implementation on several engineering domain[J]. *Expert Systems with Applications*, 2012, 39(4): 4618-4627.
- [24] Coello C A C, Pulido G T, Lechuga M S. Handling multiple objectives with particle swarm optimization[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2004, 8(3): 256-279.
- [25] Zitzler E, Thiele L, Laumanns M, et al. Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2003, 7(2): 117-132.