

救灾物资多阶段分配与调度问题建模与求解

刘 扬^{1,2}, 张国富^{1,3,4†}, 苏兆品^{1,3,4}, 蒋建国^{1,3,4}

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230601; 2. 安徽省经济信息中心
网络管理处, 合肥 230001; 3. 工业安全与应急技术安徽省重点实验室,
合肥 230601; 4. 安全关键工业测控技术教育部工程研究中心, 合肥 230601)

摘要: 救灾物资多阶段分配与调度问题是灾害应急决策中的一个难点问题. 首先, 基于三角模糊数描述发放点物资需求的不确定性, 并基于路段历史行程时间函数刻画交通路网的动态性, 构建应急救援物资多阶段分配与调度模型; 然后, 基于蚁群优化搜索各储备点到各发放点的通行时间矩阵, 引入NSGA-II搜索救灾物资分配和调度方案, 设计救灾物资多阶段分配与调度集成优化算法和编码调整策略; 最后, 通过仿真实验验证所提方法的有效性. 实验结果表明, 所提方法可为决策者提供多种不同偏好的方案, 从而为决策者提供更多的选择空间, 契合应急场景.

关键词: 灾害应急决策; 救灾物资分配与调度; 多阶段; 蚁群优化; NSGA-II; 编码调整

中图分类号: TP181

文献标志码: A

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

LIU Yang^{1,2}, ZHANG Guo-fu^{1,3,4†}, SU Zhao-pin^{1,3,4}, JIANG Jian-guo^{1,3,4}

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Network Management Office, Economic Information Center of Anhui Province, Hefei 230001, China; 3. Anhui Province Key Laboratory of Industry Safety and Emergency Technology, Hefei 230601, China; 4. Engineering Research Center of Safety Critical Industrial Measurement and Control Technology of Ministry of Education, Hefei 230601, China)

Abstract: The multi-phase allocation and scheduling of emergency relief supplies are a difficult problem in disaster emergency decision-making. Firstly, the triangular fuzzy number is used to describe the uncertainty of the material requirement of dispatch points, and the historical link-travel time function is used to characterize the dynamic of the traffic network, based on which the model of the dynamic multi-phase allocation and scheduling of emergency relief supplies is presented. Then, ant colony optimization is adopted to search for the travel time matrix of each reserve point to each dispatch point, and the non-dominated sorting genetic algorithm II (NSGA-II) is adopted to search for the allocation scheme of emergency relief supplies. On the basis of the above methods, the integration optimization algorithm for the dynamic multi-phase allocation and scheduling of emergency relief supplies and the corresponding strategy for encoding repairs are developed. Finally, the validity of the proposed model and algorithm is verified by simulation experiments. The experimental results show that the proposed approach can provide decision makers with a variety of different preferences and choices which are suitable for emergency scenarios.

Keywords: disaster emergency decision-making; allocation and scheduling of emergency relief supplies; multi-phase; ant colony optimization; NSGA-II; encoding repairs

0 引言

伴随着全球气候变化以及我国经济快速发展和城市化进程不断加快, 我国的资源、环境和生态压力日益加剧. 各种自然灾害和非常规突发事件频发, 对我国经济和商业社会造成的损害也日益严重. 为此,

国务院在2016年发布的《关于印发国家综合防灾减灾规划(2016-2020年)的通知》(国办发(2016)104号)中明确提出了“要提高防灾减灾救灾工作规范化、现代化水平, 强化科技创新, 有效提高防灾减灾救灾科技支撑能力和水平”.

收稿日期: 2018-01-22; 修回日期: 2018-09-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61573125); 安徽省自然科学基金项目(1608085MF131); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(JZ2018YYPY0288, JZ2017YYPY0232).

责任编辑: 赵珺.

†通讯作者. E-mail: zgf@hfut.edu.cn.

在灾害应急决策中,应急救援物资的分配和调度(Allocation and scheduling of emergency relief supplies, ASERS)是开展应急救援的一个重要环节,是应对突发事件和开展灾害救援的基础^[1],主要研究如何利用智能决策理论和计算机辅助工具挖掘高效合理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地输送到各发放点,为多种救援力量统筹调度和协同作战提供物质保障,对减少生命财产损失、降低次生灾害(如余震、化工污染等)影响以及维护社会稳定具有重要的现实意义.因此,国内外学者针对ASERS问题在静态和动态两种应急情景中开展了大量的研究.

在静态应急情景中,要求救援物资的分配、调度和消耗都是一次性完成的.例如,Zhang等^[2]建立了多种救援物资、多发放点的应急调度模型,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;Wex等^[3]构建了一种混合非线性整数规划模型来解决应急救援设备的分配;Su等^[4]提出了一种多约束整数线性规划模型来描述并发事件的多应急资源分配问题.此外,张汉鹏等^[5]探讨了应急物资配送中的两级车辆路径决策策略与配送绩效问题;苏兆品等^[6]构建了考虑应急资源冲突消解的多储备点、多发放点、多种救援物资的应急资源多目标优化模型,并提出了一种基于非支配排序差异演化和编码修正机制的应急资源多目标分配算法.然而,静态应急情景没有考虑灾害自身的演化过程和规律,其目标优化基于的灾情及相关信息是不充分的,尤其是在应急救援的初期,有些储备点的救援物资量虽然不能满足实际发放点的应急需求,但至少可以维持一段时间,而基于静态应急情景的救援物资分配和调度方案往往会忽略这些储备点的作用.

在实际救援中,应急需求应该是随机的或不确定的,而且是多周期的,根据灾害的各类即时信息进行救援物资分配和调度决策,更加符合灾害的演化规律和决策过程,也更能保证救援物资分配和调度的科学性、动态性和连续性,从而更好地为各项应急救援任务提供物质保障.在这种动态应急情景中,王旭坪等^[7]基于混合整数规划和遗传算法对运力受限情况下的救援车辆路径选择和应急物资分配进行综合决策;詹沙磊等^[8]针对台风灾害发生时的需求变化规律,提出了一种贝叶斯更新的需求更新方式来实现救灾物资配送的公平与效率;Liu等^[9]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建模和分析;王亮等^[10]根据前景理论中的价值函

数和权重函数对应急方案进行动态调整.然而,上述工作依旧没有摆脱静态应急情景研究方面的固有思想,大都局限于单种救援物资或多种救援物资单个发放点,或者多个发放点的串行分配,极大影响了救援物资分配或调度的效率,难以适应大规模复杂应急场景,而且会在一定程度上牺牲一些优先级较低的发放点的应急需求.

一个值得注意的问题是,现有的研究均是将应急救援物资的分配与调度分开进行求解,要么考虑分配问题,要么考虑如何调度,鲜有将分配和调度统一考虑.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.例如,分配环节对储备点选择需要优化的应急响应时间必然暗含着对救援物资运输时间的考虑,而这是调度环节需要考虑的首要因素.因此,将应急救援物资分配和调度问题进行集成考虑,更贴切应急实际,也能提高决策效率.针对此问题,文仁强等^[11]在建模的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,但这两个环节仍然是分开优化的,其算法首先利用蚁群算法搜索一个最佳分配方案,再根据这个分配方案利用蚁群搜索一条最优输送路径,并不是真正意义上的集成.此外,Chang等^[12]构建了应急救援物资多目标调度模型,并提出了一种基于贪心策略的多目标遗传算法(GSMOGA)搜索调度路径和分配方案;张国富等^[13]构建了一种面向多储备点、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,并提出了一种基于NSGA-II^[14]与蚁群优化^[15]的混合智能搜索算法.上述工作均是针对静态应急情景,没有考虑灾害应急响应的动态性.

基于上述背景,本文致力于研究多阶段应急情景下的ASERS,首先构建多阶段ASERS数学模型,然后设计有效的多阶段ASERS集成优化算法.

1 问题描述

设某地区突发灾害后,周边有 n 个物资储备点, $A = \{a_1, \dots, a_n\}$,需要响应灾区里 m 个物资发放点的应急需求, $G = \{g_1, \dots, g_m\}$.整个应急响应过程分为若干阶段,由于物资储备的有限性,在每个应急阶段 $k \in \{1, \dots, K\}$ (K 为最大阶段数),各储备点可用的救援物资总量不能满足所有发放点的物资需求(这在应急响应初期表现的尤为突出).

在救灾物资分配方面,第 k 个应急阶段, $\forall a_i \in A$ ($i \in \{1, \dots, n\}$)均拥有一个救援物资储备量, $\mathbf{B}_i(k) = [b_1^i(k), \dots, b_R^i(k)]$.其中: R 表示救援物资的种类; $b_r^i(k)$ ($r \in \{1, \dots, R\}$)表示储备点 a_i 在第 k 个应急

阶段对第 r 种救援物资的储备量. 此外, $\forall a_i \in A$, 对 $\forall g_j \in G$ 都有一个救援物资实际贡献量, $\mathbf{W}^{ij}(k) = [w_1^{ij}(k), \dots, w_R^{ij}(k)]$. $w_r^{ij}(k)$ 表示储备点 a_i 向发放点 g_j 提供的第 r 种救援物资的实际量, 满足 $0 \leq w_r^{ij}(k) \leq b_r^i(k)$, 即每个储备点 a_i 向其响应的每个发放点 g_j 提供的救援物资实际量不可能超过 a_i 的储备量.

发放点对救援物资的需求量一般可以通过灾情评估或发放点申请得到, 但初期灾情往往很难精确掌握, 因而物资需求量通常被描述为“大概3吨左右”或“3吨至4吨之间”等不确定性语言, 为了方便处理这类不确定性信息, 本文引入模糊理论来描述发放点的救援物资需求量. $\forall g_j \in G (j \in \{1, \dots, m\})$, 均有一定的救援物资需求量, $\mathbf{D}_j(k) = [d_1^j(k), \dots, d_R^j(k)]$. $d_r^j(k)$ 表示发放点 g_j 在第 k 个应急阶段对第 r 种救援物资的模糊需求, 为一个三角模糊数 $d_r^j(k) = \langle 0, d_{rp}^j(k), d_{ru}^j(k) \rangle^{[16]}$. 其中: 0 和 $d_{ru}^j(k)$ 分别为三角模糊数的左右边界, $d_{rp}^j(k)$ 为偏好量 (即 g_j 对第 r 种救援物资申报的需求量).

当为发放点 g_j 贡献的救援物资量 x 远小于 $d_{rp}^j(k)$ 时, $d_{rp}^j(k)$ 和 x 的匹配度应该较小, 但是分配到一定物资总是优于不分配物资. 从应急救援的角度而言, 不分配物资会加剧发放点灾情的进一步恶化和社会的不稳定. 当 x 远大于 $d_{rp}^j(k)$ 时, 虽然 $d_{rp}^j(k)$ 得到了满足, 但会存在巨大的资源浪费, 而且救援物资本来就极为紧缺, 导致其他发放点的应急需求几乎很难得到满足, 这样便失去了应急救援的公平性. 因此, 在这种情形下, $d_{rp}^j(k)$ 和 x 的匹配度也应该是较小的. 只有当 x 和 $d_{rp}^j(k)$ 越接近, $d_{rp}^j(k)$ 和 x 的匹配度才会越大. 基于上述考虑, 将需求量 $d_r^j(k)$ 的隶属度设计如下:

$$\mu_{d_r^j(k)}(x) = \begin{cases} 0, & x > d_{ru}^j(k); \\ \frac{x}{d_{rp}^j(k)}, & 0 \leq x < d_{rp}^j(k); \\ \frac{d_{ru}^j(k) - x}{d_{ru}^j(k) - d_{rp}^j(k)}, & \text{其他.} \end{cases} \quad (1)$$

其中 $x = \sum_{i=1}^n w_r^{ij}(k)$. 由此, 发放点 g_j 在第 k 个应急阶段的救援物资需求的平均匹配度为

$$\bar{\mu}_j(k) = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \mu_{d_r^j(k)} \left(\sum_{i=1}^n w_r^{ij}(k) \right). \quad (2)$$

在救灾物资调度方面, 交通网络由一个无向路网 $G = (V, E)$ 表示. V 为道路节点集, $E = V \times V$ 为路段集, $e(v_{y_1}, v_{y_2})$ 为从节点 v_{y_1} 到 v_{y_2} 仅存在的一条边 (即路段). 假设储备点 a_i 为道路起点, 发放点 g_j 为

道路终点, 路径 $P(a_i, g_j)$ 为救援物资从储备点 a_i 到发放点 g_j 经过的连续道路节点序列集合 (即选择的一条完整通行路径), $P(a_i, g_j) = \{v_{y_1}, \dots, v_{y_S}\}$, $S > 1$. $v_{y_1} = V(a_i)$ 为储备点 a_i 所在的节点序号, $v_{y_S} = V(g_j)$ 为发放点 g_j 所在的节点序号. $\forall s \in \{1, \dots, S-1\}$, $e(v_{y_s}, v_{y_{s+1}}) \in E$ 为通行路径中的一条路段.

本文研究的救援物资分配和调度集成优化问题旨在从全局角度对救援物资的分配和调运给出一个评估方案, 从而为政府应急救援提供参考. 在制定评估方案时, 救灾物资的分配 (也牵涉到路网的交通特性, 因为需要预先考虑储备点到受灾点的响应时间) 本身就是一个先验性的决策问题, 决策时的实时路况信息是未知的 (因为还未发生), 鉴于应急响应及时性的要求, 很难也不现实去进行在线决策. 因此, 只能根据历史路况信息来模拟一个历史行程时间函数用于运输时间估计. 在现实中, 路段行程时间可分为高峰期与非高峰期. 在高峰期, 路段中车辆的速度变化显著, 而在非高峰期, 路段中车辆速度变化不显著. 通常, 路段行程时间的变化具有周期性, 一般为一周, 因为周末与非周末路段中车辆历史速度会存在差别. 因此, 与惯例一样, 采用路段历史 (即一周内每天的) 行程时间函数来评估各节点间的通行时间^[17]. 注意, 相同的路段在一周内不同的日子具有不同的历史行程函数, 可根据各路段的一周内每天的历史信息进行函数设计. 如图1所示, $f_{e(v_{y_1}, v_{y_2})}(t)$ 表示路段 $e(v_{y_1}, v_{y_2})$ 在一周中某一天的历史行程时间函数, 反映了这一天中路段 $e(v_{y_1}, v_{y_2})$ 的通行时间与时刻 t 的关系. 这里, t 为到达当前路段起点的时刻, 相应的, 路径 $P(a_i, g_j)$ 的通行时间为

$$f_{P(a_i, g_j)}(t) = \sum_{s=1}^{S-1} f_{e(v_{y_s}, v_{y_{s+1}})}(t). \quad (3)$$

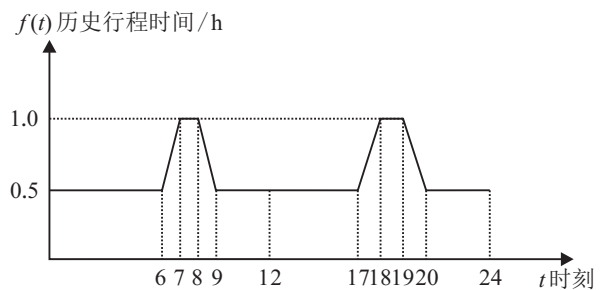


图1 路段 $e(v_{y_1}, v_{y_2})$ 在某一天的历史行程时间函数

基于上述考虑, 多阶段 ASERS 问题就是考虑在不同的应急救援阶段 $k = 1, \dots, K$, 面向多个发放点 g_1, \dots, g_m 的应急需求, 对多个储备点 a_1, \dots, a_n 的 R 种应急救援物资同时进行分配和调度, 即如下的动态多目标约束优化问题:

$$\max U = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \bar{\mu}_j(k), \quad (4)$$

$$\min D = \sum_{j=1}^m \left\{ \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \bar{\mu}_j(l) - \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \left[\frac{1}{k} \sum_{l=1}^k \bar{\mu}_j(l) \right] \right\}^2, \quad (5)$$

$$\min T = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m f_{P(a_i, g_j)}(t). \quad (6)$$

满足如下约束:

$$\sum_{i=1}^n b_r^i(k) < \sum_{j=1}^m d_{rp}^j(k), \quad \forall r; \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^m w_r^{ij}(k) = b_r^i(k), \quad \forall r, i. \quad (8)$$

在上述模型中,目标函数(4)表示最大化当前阶段各发放点应急需求的匹配度,目的是为了尽可能多地给发放点分配应急物资;目标函数(5)表示最小化前 k 个阶段发放点应急需求的平均匹配度的方差,目的是为了尽量让各个发放点的需求匹配度接近,这样才能保证救援物资发放的公平性,避免某些发放点的应急需求始终得不到响应;目标函数(6)表示最小化调度路径的总行程时间,使得参与救援的各储备点到各发放点的行程总时间尽可能的小,这里之所以用调度总时间作为优化目标,原因在于尽可能让储备点就近救援,否则总调度时间会比较大,影响应急响应效率.此外,约束条件(7)表示救援活动中,各储备点各类救援物资拥有总量不能满足各发放点的应急需求,即应急活动处于有限资源约束下.这是因为,灾害发生具有不可预测性,当灾害发生时,在应急响应初期,各发放点提出的应急救援物资需求明显会大于储备点的储备物资,发放点一般总是处于未满足状态,即使储备点的储备物资通过后续社会购买、捐赠等方式增多,也很难达到所有发放点都被一次性满足.同时,如果没有约束条件(7),目标函数(5)和(6)将失去意义,因为在各个应急阶段每个发放点的应急需求都能得到充分满足,其匹配度均为常量1.约束条件(8)表示储备点分配给各发放点的物资总量应正好等于其拥有量,以在资源受限下尽可能地让每个储备点竭尽全力参与应急救援,提高发放点的需求匹配度.

2 多阶段集成优化算法

在动态应急场景中,约束(7)和约束(8)中的一些矢量会发生变化,从而导致优化函数的约束条件发生变化.已有静态算法遇到这些具有动态特性的问题时,往往拙荆见肘、力不从心,需要引入一定的策略让算法适应环境的变化,如保留部分历史解、对编

码进行修正以满足新的约束等.基于此,本文提出一种多阶段ASERS集成优化算法.灾害救援活动结束后,根据收集到的发放点需求量、储备点储备量和道路交通状况等,首先初始化应急数据;然后由蚁群优化^[15]根据历史交通状况搜索出每个储备点到每个发放点的最佳通行时间矩阵,以确定每个储备点到每个发放点的最优输送路径;最后基于通行时间矩阵,用第二代快速排序遗传算法NSGA-II^[14]优化目标函数(4)~(6),输出救灾物资分配和调度方案.在NSGA-II中,采用二维整数向量编码,给出满足约束条件的一组Pareto解集,并将解集反馈给决策者,决策者从Pareto解集中选取合适的解作为应急方案实施当前阶段的应急活动;算法将继续等待下一阶段的救灾活动开始,直到所有救灾活动结束.

本文工作可以看作是对文献[13]的进一步深入和拓展,与文献[13]相比,本文加入了变化的约束条件和路段历史行程时间函数.此外,在优化方法上,也与文献[13]有很大不同,文献[13]是将蚁群优化嵌入在NSGA-II中,而本文则利用蚁群优化给NSGA-II传递先验参数,不参与NSGA-II的进化.

2.1 蚁群优化中的启发式信息

在本文的路网结构中,物资的调度是根据路径的通行时间而非长度,而通行时间又与起始时刻密切相关,具有典型的动态特性.传统的最短路径确定性算法(如Dijkstra算法)难以适应时刻的动态变化.此外,在路网节点规模较大时,确定性算法往往耗时较大,求解效率较低.蚁群优化^[15]在求解基于图结构的优化问题时具有先天的契合性,比其他算法更加简单、灵活和高效.因此,首先基于蚁群优化和路网信息搜索每个救灾物资储备点 a_i 到每个发放点 g_j 的最短通行时间矩阵.

在蚁群优化中,优化的目的是为了寻找每个储备点 a_i 到每个发放点 g_j 的最短通行时间,通行时间矩阵中每个值没有关联,均是独立搜索,因此,优化目标函数设计为

$$\min f_{P(a_i, g_j)}(t), \quad \forall i, j. \quad (9)$$

当蚂蚁搜索路径时,会优先选择距离当前所在节点耗时比较小的道路节点.在选择前,蚂蚁需要回溯当前自己所走过的路径来计算已经花费的时间,再根据起始时刻计算出当前时刻;然后以当前时刻 t_c 为基础,计算当前道路节点与即将选择道路节点之间的通行时间,并以该通行时间的倒数作为启发式信息.例如,当前蚂蚁在道路节点 v_{y_1} ,则路段 (v_{y_1}, v_{y_2}) 之间的启发式信息为

$$\eta_{v_{y_1}v_{y_2}} = \frac{1}{f_{v_{y_1}v_{y_2}}(t_c)},$$

其中 $f_{v_{y_1}v_{y_2}}(t_c)$ 为道路节点 v_{y_1} 与 v_{y_2} 之间的通行时间, 可根据式(3)和相应的历史行程函数计算得到。

举例说明, 假设时刻8时 ($t_c = 8$) 从节点 v_{y_1} 处搜索路径, 并找到了节点 v_{y_2} , 根据图1的路段 (v_{y_1}, v_{y_2}) 的历史行程时间函数可得 $\Delta t = 1$ h。但是, 从图1可以看出, 从时刻8到时刻9, 路段 (v_{y_1}, v_{y_2}) 的通行时间在逐渐减小, 这时需要在时刻8与时刻9之间进行等时抽样, 取各次抽样的平均值作为该路段当前的通行时间, 即 $\Delta t^* = 0.75$ h。因此, 可以估计出到达 v_{y_2} 的时刻为8.75 h。以此类推, 当蚂蚁从一个储备点 a_i 出发并最终找到一个发放点 g_j 后, 完成一次路径搜索, 将通过蚁周模型更新整条路径上的信息素, 这里信息素的更新以及蚂蚁转移策略与传统蚁群优化^[15]方法一致, 不再赘述。

蚁群优化的目的是以式(9)为目标, 找到每个救灾物资储备点 a_i 到每个发放点 g_j 的最短通行时间矩阵, 也对应着每个 a_i 到每个 g_j 的最优调度路径。同时也为后面的物资分配(即储备点的选择)提供了时间衡量依据, 因为对于同一个发放点 g_j 而言, 不同的储备点其响应时间是不同的。

2.2 NSGA-II编码方案与调整策略

在主流的多目标优化算法中, NSGA-II^[14]是目前最流行的多目标遗传算法之一, 它降低了非劣排序遗传算法的复杂性, 具有运行速度快、解集收敛性好的优点, 已广泛应用于很多两目标和三目标优化问题。而本文所研究的多阶段 ASERS 集成优化问题仅有(4)~(6)三个优化目标, 优化函数数目较少, 因此本文基于 NSGA-II 和蚁群优化给出的最短通行时间矩阵搜索救灾物资最优分配方案。注意, 这里 NSGA-II 以式(4)~(6)为优化目标, 并考虑(7)和(8)两个约束条件。此外, 需要指出的是, 在搜索分配方案时, 式(6)中的 $f_{P(a_i, g_j)}(t)$ 均是蚁群优化给出的已知量(即最短通行时间矩阵)。只有当 a_i 响应了 g_j , 实际的 $f_{P(a_i, g_j)}(t)$ 才参与 T 的计算, 如果分配方案中 a_i 没有参与 g_j , 则按照 $f_{P(a_i, g_j)}(t) = 0$ 计算 T 。

为了适应应急场景, 本文将 NSGA-II 扩充到二维整数向量编码。二维整数向量编码的每一行代表一个物资发放点 g_j , 每一列代表一个物资储备点 a_i 。第 i 列第 j 行的整数向量 $\mathbf{W}^{ij}(k)$ 代表储备点 a_i 向发放点 g_j 分配的应急物资量, $\mathbf{W}^{ij}(k) = [w_1^{ij}(k), \dots, w_R^{ij}(k)]$ 。如果 $\mathbf{W}^{ij}(k) > 0$, 则说明储备点 a_i 参与到发放点 g_j 的救援, 并且储备点 a_i 贡献给发放点 g_j

的资源量为 $\mathbf{W}^{ij}(k)$ 。相反, 若 $\mathbf{W}^{ij}(k) = 0$, 则说明储备点 a_i 没有参与发放点 g_j 的救援, 没有给其提供任何救灾物资。本文设计的应急物资调度模型中允许一个储备点同时参与到多个发放点的救援中, 因此, 在编码中可能会出现以下两种情况:

1) 对于每一行发放点 g_j 而言, 如果存在任一维物资, 各储备点向其提供的物资总量大于发放点的实际偏好时, 则会造成其他发放点的该救灾物资分配量的减少, 削弱了其他发放点的分配物资接近水平, 使得发放点之间的物资分配缺乏公平性, 当储备点拥有物资量严重受限时, 这种方案肯定是不可取的。

2) 对于每一列储备点 a_i 而言, 如果存在任一维物资, 储备点为其参与救援的发放点提供的物资总量超出其自身拥有量, 这时就会产生应急物资的冲突, 这种方案显然也是不可行的。

对于上述情况1)而言, 其目标函数 U 和 D 的值会比较差, 在算法进化的过程中会逐渐被丢弃, 这种情况会随着算法的迭代逐渐呈现在各个发放点之间均分物资, 算法中不需人为干预, 否则会影响算法进化中个体的多样性。对于情况2), 会演化出不同的非法编码, 即使各个目标值比较优, 但是分配总量会超出储备点自身拥有量, 这样的分配方案对于储备点来说是不可行的, 这也是物资严重受限与物资充足调度的根本区别。这时, 需要调整储备点在发放点之间的分配物资量, 确保储备点提供的物资总量不超出其自身的拥有量; 同时, 为了提高发放点的救灾物资匹配度, 要将储备点拥有的物资全部贡献出来。因此, 经过物资调整, 储备点贡献的物资总量应该等于其自身拥有量, 即满足约束条件(8)。

经过上述分析, 在个体经过初始化、交叉和变异操作^[14](具体细节这里不再赘述)后, 个体的基因值会发生变化。因此, 需要对个体编码进行调整, 已保证每个个体都是可行解, 从而确保算法的搜索效率。具体调整步骤如下。

Step 1: 随机选取一个未检查的列 i , 代表储备点 a_i 。

Step 2: 随机选取一个该储备点未检查的物资种类 r 。

Step 3: 针对编码的每一行 j , 计算储备点 a_i 对发放点 g_j 提供的物资量总和 $\sum_{j=1}^m w_r^{ij}(k)$ 。如果 $\sum_{j=1}^m w_r^{ij}(k) > b_r^i(k)$, 则挑选在第 r 类物资中储备点贡献量最少的发放点 g_{j^*} , 置 $w_r^{ij^*}(k) = 0$ 。这样处理的目

的,一是为了让 a_i 退出某些发放点的响应,从而解决资源冲突;二是为了尽量避免过于零碎的物资分配,因为这些很小的资源贡献量也会带来一定的通行时间开销.从应急角度而言,耗费相应的通行时间开销去输送很少的物资,显然响应效率较低.重复上述步骤直到 $\sum_{j=1}^m w_r^{ij}(k) \leq b_r^i(k)$.

Step 4: 如果 $\sum_{j=1}^m w_r^{ij}(k) < b_r^i(k)$,则随机选取一个发放点 g_{j^*} ,让储备点 a_i 继续为其贡献物资;若 $w_r^{ij^*}(k) < d_{rp}^{j^*}(k)$,则执行

$$w_r^{ij^*}(k) = w_r^{ij^*}(k) + \text{rand}(0, 1) \times \min \left\{ b_r^i(k) - \sum_{j=1}^m w_r^{ij}(k), d_{rp}^{j^*}(k) - w_r^{ij^*}(k) \right\}. \quad (10)$$

重复上述步骤,直到 $\sum_{j=1}^m w_r^{ij}(k) = b_r^i(k)$.

Step 5: 如果还有某种物资没有检查,则转入Step 2.

Step 6: 如果所有列均已检查,则调整结束,否则转入Step 1.

从约束条件(8)可以看出,这种等式优化的可行域非常小,上述编码调整操作的目的是为了种群始终在这个狭小的可行域中进化,从而确保最终解集的质量.

2.3 历史解的保留

对于应急这种特殊场景,应急方案在各个应急阶段间一般不会出现重大变化.因此,前一阶段的解集(历史经验)对于当前应急阶段的优化应该具有一定的借鉴意义.为此,在NSGA-II算法的种群初始化中,将种群中70%的个体设为上一阶段的解集,其余30%的个体仍然根据约束条件随机初始化.采用这种保留历史解的策略是为了在有限的迭代次数内进

一步提高动态优化的最终解的质量.

3 实验结果与分析

以汶川地震为背景,根据事后各地受灾严重情况,选取8个较严重的受灾点和3个储备点进行实验.在灾害应急这个特殊场景,周期性交通特性的使用具有明显的地域特征.救灾物资分配和调度的一个重要要素是响应及时,因此主要考虑那些离受灾点较近的储备点.在构造仿真实验时,需要考虑每个储备点响应的区域尽量小,从而满足响应的及时性要求.

基于百度地图提供的各路段的历史通行状况,得到路段在不同时间段的通行时间函数,根据约束条件(7)生成测试样本,并设定阶段一的起始时刻为7时,阶段二的起始时刻为14.此外,算法参数设置如下:在蚁群优化中,蚂蚁数为50,迭代次数为500,转移概率为0.6,信息素挥发因子为0.1,信息素启发式因子为1,期望启发式因子为3,初始信息素值为1,信息素总量为10;在NSGA-II算法中,染色体数目为200,迭代次数为200,交叉概率为0.8,变异概率为0.05.

3.1 有效性验证

表1给出了蚁群优化得到的不同时刻点从节点0至最远的节点37的最优路径与通行时间.由于道路通行时间的动态变化,必然导致不同时刻点开始搜索路径的结果不一样.从表1可以看出,在7时搜索路径时,最优路径绕开了比较拥堵的路段而选择了路程相对较远的路线;而在14时,原本拥堵的路段已经畅通,行程较短的路径通行时间也比较短,从而路径耗时比7时相对较少.

表1 节点0至节点37的最优路径与通行时间

起始时刻	路径	通行时间/h
7时	0-7-8-9-10-11-18-22-28-31-37	3.79
14时	0-6-5-4-11-18-22-28-31-37	3.33

表2 两阶段内的发放点物资分配方案和平均接近水平

发放点	平均接近水平		储备点0		储备点18		储备点23	
	阶段一	阶段二	阶段一	阶段二	阶段一	阶段二	阶段一	阶段二
16	0.67	0.96	[4, 46, 90]	[1, 76, 2]	[0, 6, 0]	[47, 0, 0]	[0, 0, 0]	[0, 0, 116]
29	0.19	0.93	[0, 0, 0]	[42, 74, 101]	[11, 7, 0]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]
21	0.68	0.92	[0, 0, 0]	[0, 0, 1]	[0, 9, 0]	[0, 58, 60]	[20, 40, 60]	[52, 19, 44]
37	0.29	0.97	[24, 0, 0]	[48, 80, 111]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]
17	0.97	0.63	[0, 0, 0]	[0, 1, 0]	[29, 58, 80]	[43, 88, 120]	[0, 0, 0]	[0, 81, 0]
35	0.81	0.57	[14, 19, 39]	[28, 0, 55]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]
25	0.97	0.60	[10, 19, 29]	[21, 0, 58]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]	[0, 0, 0]
15	1.00	0.97	[8, 16, 22]	[10, 29, 52]	[0, 0, 0]	[0, 4, 0]	[0, 0, 0]	[8, 0, 0]

表2给出了两阶段内各发放点的物资分配方案和平均接近水平. 可以看出, 在阶段一内物资分配平均接近水平较低的发放点在阶段二内的平均接近水平明显提高, 而在阶段一内, 物资分配平均接近水平较高的发放点在阶段二内的平均接近水平都会相应地降低, 从而确保每个发放点的需求在整个应急活动中都能均衡地得到较好的响应. 随着动态调度的进行, 最终各个发放点的分配物资接近水平会近似相等, 体现了本文方法在抑制各阶段物资分配不均方面的有效性.

3.2 与已有方法的对比

正如前文所述, GSMOGA 算法是 Chang 等^[12]最近提出的一种用于求解救援物资分配和调度问题的多目标算法, 其求解思路与本文极其相近, 因此这里选择与 GSMOGA 算法进行对比实验与分析.

GSMOGA 将贪婪策略用于解码过程, 从而可以同时获得救援物资分配方案和调度路径. 虽然 GSMOGA 在搜索过程中始终产生多目标解集, 但是在解集的评估阶段采用 NSGA-II 的快速非支配排序方法, 即先按照非支配关系进行排序产生 Pareto 前沿面, 然后对 Pareto 前沿面上的解集按照拥挤算子进行排序, 算法结束时只挑选 Pareto 前沿面中拥挤度最小的解作为最优分配和调度方案输出. 这样处理有如下弊端: 首先, 利用贪婪策略产生救援物资分配方案

虽然可以提高求解效率, 但没有从应急整体上考虑救援物资的分配, 解的质量得不到保证; 其次, 按照上述的固定处理策略挑选一个解输出, 失去了多目标优化的初衷和优势; 再次, Pareto 前沿面中拥挤度最小的解有可能是接近两端的近似边缘点, 这时多目标函数值之间往往很不均衡, 从应急决策视角来看, 这种固定策略难以满足实际复杂多变的应急需求. 图2给出了两种算法在两个阶段内得到的物资分配的解, 可以看出: GSMOGA 算法只输出一个最终解, 而本文方法可以得到一个解集, 且得到的解集明显可以支配 GSMOGA 得到的解. 因此, 本文方法不仅能够获得质量更好的应急方案, 而且可以为决策者提供多种不同偏好的方案, 从而为决策者提供更多的选择空间, 更加契合应急场景.

4 结 论

本文首先用模糊三角数描述发放点物资需求的不确定性, 用路段通行时间函数刻画输送路网的动态性, 构建了救灾物资多阶段分配和调度模型; 然后, 设计了基于蚁群优化和 NSGA-II 的多目标求解算法, 并针对储备点救灾物资严重受限时可能出现的物资分配冲突设计了相应的编码调整策略, 以保证储备点分配的物资总量不超出自身拥有量; 最后, 通过仿真实验验证了所提模型与算法的有效性. 本文方法可以确保各个应急阶段发放点物资分配的公平性, 为救灾物资多阶段分配和调度集成优化提供有益的尝试.

然而, 本文仍有如下问题需要在未来的工作中进一步加以考虑: 本文并没有考虑阶段之间的时间耦合约束, 也就是下一阶段何时开始才能保持受灾点的物资满足度, 这是一个值得深入研究的问题; 此外, 在实际的物资调运中, 应该根据实时的交通特性来进行决策, 因此在后续的研究中, 将研究基于实时交通特性的救援物资调度问题.

参考文献(References)

[1] 董庆兴, 李赛, 张大斌, 等. 基于匹配属性相似度的应急决策方案推荐方法[J]. 控制与决策, 2016, 31(7): 1247-1252.
(Dong Q X, Li S, Zhang D B, et al. Emergency decision response plan recommendation method based on similarity of matched attributes[J]. Control and Decision, 2016, 31(7): 1247-1252.)

[2] 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.

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

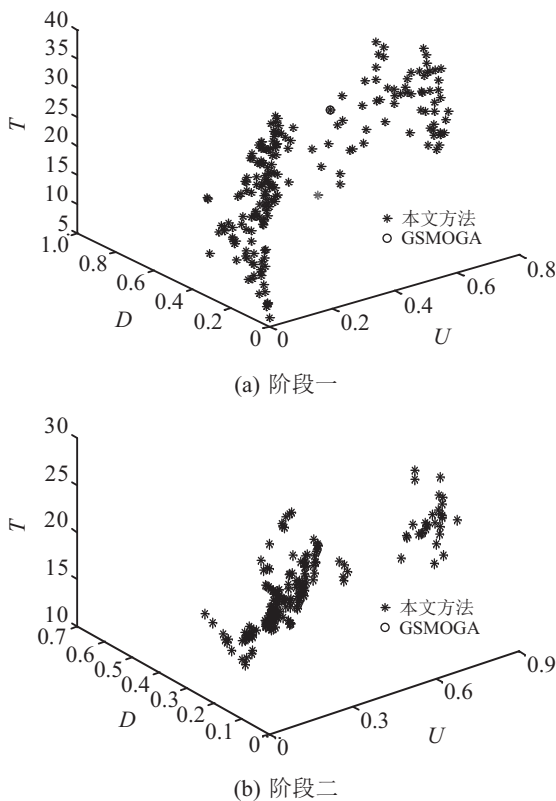


图2 两种算法得到的救灾物资分配解

- scheduling of rescue units[J]. *European J of Operational Research*, 2014, 235(3): 170-188.
- [4] Su Z, Zhang G, Liu Y, et al. Multiple emergency resource allocation for concurrent incidents in natural disasters[J]. *Int J of Disaster Risk Reduction*, 2016, 17: 199-212.
- [5] 张汉鹏, 廖毅, 邱苑华. 两级车辆路径问题下的应急物资配送策略与绩效[J]. *控制与决策*, 2015, 30(2): 266-270.
(Zhang H P, Liao Y, Qiu W H. Method for generating emergency alternative based on case-based reasoning[J]. *Control and Decision*, 2015, 30(2): 266-270.)
- [6] 苏兆品, 张国富, 蒋建国, 等. 基于非支配排序差异演化的应急资源多目标分配算法[J]. *自动化学报*, 2017, 43(2): 195-214.
(Su Z P, Zhang G F, Jiang J G, et al. Multi-objective approach to emergency resource allocation using none-dominated sorting based differential evolution[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2017, 43(2): 195-214.)
- [7] 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.)
- [8] 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 X F, et al. Coordination between efficiency and equity in relief allocation problem via demand updates[J]. *Control and Decision*, 2014, 29(4): 686-690.)
- [9] 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.
- [10] 王亮, 王应明, 胡勃兴. 基于前景理论的应急方案动态调整方法[J]. *控制与决策*, 2016, 31(1): 99-104.
(Wang L, Wang Y M, Hu B X. Dynamic adjusting method of emergency alternatives based on prospect theory[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(1): 99-104.)
- [11] 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.)
- [12] 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.
- [13] 张国富, 王永奇, 苏兆品, 等. 应急救援物资多目标分配与调度问题建模与求解[J]. *控制与决策*, 2017, 32(1): 86-92.
(Zhang G F, Wang Y Q, Su Z P, et al. Modeling and solving multi-objective allocation-scheduling of emergency relief supplies[J]. *Control and Decision*, 2017, 32(1): 86-92.)
- [14] 栗三一, 李文静, 乔俊飞. 一种基于密度的局部搜索NSGA2算法[J]. *控制与决策*, 2018, 33(1): 60-66.
(Li S Y, Li W J, Qiao J F. A local search strategy based on density for NSGA2 algorithm[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(1): 60-66.)
- [15] 游晓明, 刘升, 吕金秋. 一种动态搜索策略的蚁群算法及其在机器人路径规划中的应用[J]. *控制与决策*, 2017, 32(3): 552-556.
(You X M, Liu S, Lv J Q. Ant colony algorithm based on dynamic search strategy and its application on path planning of robot [J]. *Control and Decision*, 2017, 32(3): 552-556.)
- [16] Teodorovic D, Radivojevic G. A fuzzy logic approach to dynamic Dial-A-Ride problem [J]. *Fuzzy Sets & Systems*, 2000, 116(1): 23-33.
- [17] Ichoua S, Gendreau M, Potvin J Y. Vehicle dispatching with time-dependent travel times[J]. *European J of Operational Research*, 2003, 144(2): 379-396.

作者简介

刘扬(1983—), 男, 博士生, 从事演化计算及其应用等研究, E-mail: lyy673@163.com;

张国富(1979—), 男, 教授, 博士, 从事多智能体系统和演化计算等研究, E-mail: zgf@hfut.edu.cn;

苏兆品(1983—), 女, 副教授, 博士, 从事灾害应急决策和机器学习的研究, E-mail: szp@hfut.edu.cn;

蒋建国(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 从事分布式人工智能和复杂智能决策等研究, E-mail: jgjiang@hfut.edu.cn.

(责任编辑: 齐 霖)