

化工园区应急物资多目标分配问题建模与求解

张国富^{1,2,3†}, 陆淑君¹, 苏兆品^{1,2,3}, 潘刚^{3,4}

(1. 合肥工业大学 计算机与信息学院, 合肥 230601; 2. 合肥工业大学 智能互联系统安徽省实验室, 合肥 230009; 3. 合肥工业大学 工业安全与应急技术安徽省重点实验室, 合肥 230601; 4. 合肥工业大学 基础部, 安徽 宣城 242000)

摘要: 化工园区应急物资分配是开展危化品事故应急救援的基础, 主要研究如何对化工园区周边的应急物资进行合理的调配以便让应急物资尽快从各储备站输送到事故点, 保障事故救援的顺利开展. 然而, 已有研究大都局限于单目标优化, 且过于强调应急响应的时效性而忽视物资消耗的连续性. 为此, 首先构建一种面向多储备站、多种应急物资、单事故点的应急物资多目标分配模型, 并分析推演了满足物资连续消耗的约束条件; 然后, 基于非支配排序遗传算法和启发式策略设计一种化工园区应急物资多目标分配算法; 最后, 通过仿真实验验证所提出方法的有效性. 实验结果表明, 所提出方法同时兼顾了化工园区应急响应的连续性和时效性要求, 可为危化品事故应急救援提供更多更好的应急物资分配方案.

关键词: 化工园区; 应急物资分配; 物资消耗连续性; 多目标优化; 非支配排序遗传算法; 启发式策略

中图分类号: TP181 **文献标志码:** A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.1597

引用格式: 张国富, 陆淑君, 苏兆品, 等. 化工园区应急物资多目标分配问题建模与求解[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 962-972.

Modeling and solving multi-objective emergency resource allocation in chemical industrial parks

ZHANG Guo-fu^{1,2,3†}, LU Shu-jun¹, SU Zhao-pin^{1,2,3}, PAN Gang^{3,4}

(1. School of Computer Science and Information Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 2. Intelligent Interconnected Systems Laboratory of Anhui Province, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 3. Anhui Province Key Laboratory of Industry Safety and Emergency Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China; 4. Department of Basic Courses, Hefei University of Technology, Xuancheng 242000, China)

Abstract: Emergency resource allocation in chemical industrial parks, which mainly focuses on how to reasonably allocate and quickly deliver the emergency resources of nearby reserve points to the incident point, is the foundation of emergency and rescue for hazardous chemical accidents and is important to ensure the smooth implementation of the emergency and rescue plans. However, most studies concentrate on the single-objective optimization and the timeliness of emergency response but ignore the continuity of resource consumption. In this paper, a multi-objective emergency resource allocation model is first constructed in terms of multiple reserve points, multiple emergency resources, and single incident point. Then, the constraint conditions for the continuous consumption of emergency resources are deduced. Additionally, an algorithm for multi-objective emergency resource allocation in chemical industrial parks is developed on the basis of the non-dominated sorting genetic algorithm and a heuristic strategy. Finally, the validity of the proposed algorithm is verified by simulation experiments. The experimental results demonstrate that the proposed algorithm considers both the continuity and timeliness requirements of emergency response in chemical industrial parks and can provide the emergency and rescue for hazardous chemical accidents with more and better emergency resource allocation schemes.

Keywords: chemical industrial parks; emergency resource allocation; continuity of resource consumption; multi-objective optimization; non-dominated sorting genetic algorithm; heuristic strategy

收稿日期: 2020-11-19; **录用日期:** 2021-02-10.

基金项目: 安徽省重点研究与开发计划项目(202004d07020011); 教育部人文社会科学研究青年基金项目(19YJC870021, 18YJC870025); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(PA2020GDKC0015, PA2019GDQT0008, PA2019GDPK0072, PA2020GDSK0078).

责任编辑: 王凌.

†通讯作者. E-mail: zgf@hfut.edu.cn.

0 引言

随着我国经济社会的快速发展,化工企业不断向化工园区集中,园区化已经成为我国化工行业发展的主要趋势.化工园区作为一个易燃、易爆、有毒重大危险源高度集中的区域,一旦发生火灾、爆炸或毒物泄漏扩散等事故,将造成一系列的连锁反应,并产生灾难性的后果^[1-2].

我国作为世界第一化工大国,整体安全条件差、管理水平低,在危化品生产、贮存、运输、使用、废弃处置等环节均存在较大的安全隐患,重特大事故时有发生.例如,2019年江苏响水“3·21”特别重大爆炸事故,造成78人死亡、76人重伤、640人住院治疗,直接经济损失达19.86亿元.为此,2020年2月,中共中央办公厅、国务院办公厅印发了《关于全面加强危险化学品安全生产工作的意见》,强调要利用大数据、人工智能等高新技术提高化工园区风险感知、监测预警、协同救援和应急处置的能力.

化工园区应急物资分配是开展危化品事故应急救援的基础,是体现化工园区应急管理能力的的一个基本要素.主要研究在危化品事故发生后,如何有效利用智能决策理论和计算机辅助工具,快速给出合理高效的应急物资分配方案,使得各储备站的应急物资能够及时、连续地送达事故救援现场,为应急救援和处置提供强有力的物资保障,最大限度地降低二次事故或多次事故发生的风险,对保护人民群众生命财产安全,保证经济高质量发展和社会稳定具有重要的现实意义.

遗憾的是,已有研究大都着眼于自然灾害领域的多储备站应急物资分配,如张国富等^[3]基于第2代非支配排序遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)^[4]最小化救援物资未满足量和通行时间、最大化路径的可靠度;刘扬等^[5]针对多阶段应急情景,致力于在每个应急阶段最大化物资需求的匹配度、最小化平均匹配度的方差和总行程时间.上述工作假设同一储备站可能会存储多种应急物资,而同一种应急物资也可能存放在不同的储备站,这种自然灾害领域多储备站同时响应应急请求的模式,主要针对如何在各储备站之间划分应急需求以尽可能地缩短总的应急响应时间、降低应急成本和提高输送效率.然而,化工园区是危化品重大危险源高度集聚区,安全风险叠加、放大效应非常明显,一家企业发生安全事故,会同时影响园区其他企业的安全与运行,这种多米诺效应风险对应急救援物资保障的连续性和时效性要求更加苛刻,要求能快速响应并充分保障应急物资补给的不中断,尽可能地将潜在风险

迅速控制在单一事故点.因此,上述传统的自然灾害应急物资分配很难适用于化工园区的危化品事故应急救援,研究立足于化工园区的应急物资分配显得尤为迫切.

为此,Liu等^[6]针对河流危化品泄漏事故,提出一种改进的遗传算法来最小化参与救援的储备站数和物资调配时间,并基于层次分析法根据危化品事故的严重程度对给出的应急物资分配方案进行情景分析.此外,Liu等^[7]还提出一种基于时变供需约束的应急物资分配方法,以最大限度地缩短应急响应总时间.Hu等^[8]构建了一个基于情景的模块化应急资源优化随机模型,寻求最大化物资满足度和最小化惩罚成本.为了评估危化品事故应急响应的效率,Du等^[9]设计了一种启发式物资调配算法来最小化死亡人数和多米诺效应造成的损失量.安霆^[10]在分析危化品事故应急救援的连续性和时效性要求基础上,利用粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)^[11]实现应急物资分配时应急开始时间最早、储备站数最少.王飞跃等^[12]引入区间数描述物资需求量和物资运输时间的不确定性,并利用分层序列表最小化应急物资总运输时间和物资总成本(包括储备站的建设成本和应急物资的运输成本)、最大化物资需求满意度.与自然灾害领域不同,上述化工园区许多储备站物资分配更加强调时效性,要求在满足应急需求的前提下,选择的储备站的应急响应开始时间应尽可能的快,其次,强调尽可能少地选择储备站,以减少中间环节、提高部署效率.

需要指出的是,虽然已有工作在其构建的应用场景中具有一定的合理性,但仍存在如下问题.

1)连续性和时效性是化工园区应急物资分配要达成的两个最迫切的目标,而已有方法很难同时兼顾,大都只考虑时效性,而忽视了应急物资补给的连续性.而危化品事故具有典型的多米诺效应,应急物资补给一旦中断会诱发二次事故、社会群体性事件等一系列严重问题.

2)已有工作均基于单目标优化算法来实现多个目标的求解,最终只能得到单个解,且带有明显的偏好性,均是以牺牲某些目标为代价而过于追求其他目标,不能在多个目标之间达到一个较好的平衡.因此,管理者往往会难以抉择.

基于上述背景,本文在总结和分析已有工作的基础上,针对危化品事故应急救援中应急物资分配的连续性和时效性要求,首先构建了一种面向多储备站、多种应急物资、单事故点的应急物资多目标分配模型,并分析推演了满足物资连续消耗的约束条件,在

此基础上设计了满足连续约束的启发式策略,然后基于NSGA-II和启发式策略设计了一种化工园区应急物资多目标分配算法,最后通过对比实验验证了所提出方法的有效性.

1 问题描述

一旦化工园区发生危化品事故,为了防止多米诺效应的扩大,降低事故影响,必须在第1时间启动应急响应,在尽可能早的时间开展应急救援^[10]. 应急救援活动结束后,应急物资会以一定的速率进行消耗. 为了避免二次事故,必须保障应急物资补给的不中断. 例如,在危化品仓库火灾爆炸事故处置中,一旦出现扑救物资短缺,就很有可能会引起火势反扑,造成事态更加严重. 因此,要保证当前已送达事故点的应急物资可以完全支撑到下一批应急物资的到来,不能出现应急物资补给中断的现象^[10]. 基于上述考虑,假设在化工园区内和园区周围部署了 $n \in \mathbf{N}$ 个应急物资储备站, $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. 当园区内发生危化品事故时,根据预估的应急物资需求^[13],需要抉择从哪些储备站调拨哪些应急物资才能契合应急救援的需求. 为了便于问题的描述,给出如下几个定义,涉及的变量符号及其含义见表1.

表1 模型中各符号的含义

符号	含义
n	储备站数
A	储备站集合
a_i	第 i 个储备站
D	物资需求量
r	物资种类数
d_j	第 j 种物资的需求量
V	物资消耗速率向量
v_j	第 j 种物资的消耗速率
S_i	储备站 i 的物资储备向量
s_j^i	第 i 个储备站在第 j 种物资上的持有量
T_i	储备站 i 的单位部署时间向量
t_j^i	第 i 个储备站在第 j 种物资上的单位部署时间
x_j^i	第 i 个储备站在第 j 种物资上的贡献量

定义1 事故点对应急救援物资的需求向量为 $D = [d_1, d_2, \dots, d_r]$, $r \in \mathbf{N}$ 为应急物资种类. 对于 $\forall j \in \{1, 2, \dots, r\}$, $d_j \in \mathbf{R}_0^+$ 表示事故点对第 j 种应急物资的需求量.

定义2 事故点对应急救援物资有一个消耗速率向量 $V = [v_1, v_2, \dots, v_r]$, 对于 $\forall j \in \{1, 2, \dots, r\}$, $v_j \in \mathbf{R}_0^+$ 表示事故点对第 j 种应急物资的单位时间消耗量.

定义3 每个储备站 $a_i \in A (i \in \{1, 2, \dots, n\})$ 均有一个应急物资储备向量 $S_i = [s_1^i, s_2^i, \dots, s_r^i]$. 对于 $\forall j \in \{1, 2, \dots, r\}$, $s_j^i \in \mathbf{R}_0^+$ 表示储备站 a_i 对第 j 种应

急物资的持有量,满足 $\sum_{i=1}^n s_j^i \geq d_j$.

定义4 储备站 a_i 的应急救援物资到达事故点的单位部署时间(包括物资的装卸时间和到达事故点的行程时间)向量为 $T_i = [t_1^i, t_2^i, \dots, t_r^i]$. 对于 $\forall j \in \{1, 2, \dots, r\}$, $t_j^i \in \mathbf{R}_0^+$ 表示储备站 a_i 的第 j 种应急物资到达储备站的单位部署时间.

基于上述定义,将面向多储备站、多种应急物资、单事故点的应急物资分配问题构建成如下一个约束多目标优化模型:

$$\min f_1 = \max_{j=1}^r \{\min_{i=1}^n \{x_j^i t_j^i\}\}, \quad (1)$$

$$\min f_2 = \max_{i=1}^n \{\max_{j=1}^r \{x_j^i t_j^i\}\}, \quad (2)$$

$$\min f_3 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r x_j^i t_j^i, \quad (3)$$

$$\min f_4 = \sum_{i=1}^n 1. \quad (4)$$

$$i=1 \wedge \sum_{j=1}^r x_j^i > 0$$

满足如下约束:

$$x_j^i \leq \min\{s_j^i, d_j\}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n\}, j \in \{1, 2, \dots, r\}; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n x_j^i = d_j, \quad j \in \{1, 2, \dots, r\}; \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n s_j^i \geq d_j, \quad j \in \{1, 2, \dots, r\}. \quad (7)$$

其中: $x_j^i \in \mathbf{R}_0^+$ 为决策变量,表示储备站 a_i 在第 j 种应急物资上的实际贡献量. 为了救援活动的宏观布局并考虑因某些物资的部署时效过大而可能引起的群体性恐慌等社会因素,目标函数 f_1 是从应急物资的角度,要求各种应急物资的最早服务时间要尽可能的早,从而避免有些种类的物资早早到达,而某些种类的物资(尤其是急缺物资)却迟迟未到^[10]; 目标函数 f_2 是从储备站的角度,要求各储备站的物资最迟服务时间(即最后一批物资到达的时间)要尽可能的小,从而在各储备站之间合理分配物资需求,让各储备站尽可能地快速联动响应; 目标函数 f_3 是最小化总的部署时间,从而尽可能地选取较近的储备站; 目标函数 f_4 表示参与救援的储备站数要尽可能地少,从而合理、充分利用每个储备站的人力物力资源,避免中间环节过多,提高应急物资的部署效率^[10]. 约束条件(5)表示每个储备站的每种应急物资的实际贡献量不能超过其自身储备量和事故点的需求量,避免出现过度供给; 约束条件(6)表示储备站贡献的每种应急物资

的总量应恰好等于事故点对该种物资的需求量,避免出现物资浪费;约束条件(7)表示所有储备站的应急物资量之和应该能够满足事故点的需求量,这是应急物资分配需要优化的前提条件,可以通过先期物资储备站的选址尽可能地实现^[4]. 注意,在重特大危化品事故的初期,这一条件不一定能严格满足,即存在个别或部分种类的物资不能满足供需,则对于不能满足供需的物资,可将各储备站的存贮量全部调拨到事故点,对于其他能够充分满足供需的物资再进行分配的优化.

2 连续性约束条件的分析

可以看到式(1)~(4)是从时效性的角度综合考虑各种时间和效率目标,式(5)和(6)是从应急物资需求和供给的角度给出的约束条件. 正如前述,除了时效性,应急物资消耗的连续性也是化工园区的危化品事故应急救援中的一个非常重要的因素. 那么,如何在满足约束条件(6)的等式约束基础上满足连续性约束?为了回答这个问题,本文将重点分析连续性约束和物资供需约束之间的内在关联.

从决策变量 x_j^i 来看,对于同一种应急物资 j ,各储备站 i 到达事故点的部署时间 $x_j^i t_j^i$ 各不相同,首先对不同储备站的部署时间按照从小到大的递增顺序进行排序.不失一般性,为了便于后续的描述,满足约束条件(6)的情况下,假设对 $\forall j \in \{1, 2, \dots, r\}$,根据 $x_j^i t_j^i$ 排序后的应急物资分配量和对应的单位部署时间分别为 $X_j = \{x_j^1, \dots, x_j^i, \dots, x_j^n\}$ 和 $T_j = \{t_j^1, \dots, t_j^i, \dots, t_j^n\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ ($x_j^i = 0$ 的变量不参与排序),即

$$x_j^1 t_j^1 \leq \dots \leq x_j^i t_j^i \leq \dots \leq x_j^n t_j^n. \quad (8)$$

其中:储备站 a_1 的物资最先到达,储备站 a_n 的物资最后到达.对于中间任意一个储备站 a_i 来说,为了满足应急物资消耗的连续性,前期所有储备站运达事故点的应急物资总量可供消耗的时间应不小于 a_i 与 a_1 之间的物资部署时间间隔,即

$$\sum_{i^*=1}^{i-1} x_j^{i^*} / v_j \geq x_j^i t_j^i - x_j^1 t_j^1, \quad i \in \{2, 3, \dots, n\}. \quad (9)$$

综合考虑式(8)和(9),可得对 $\forall j \in \{1, 2, \dots, r\}, \forall i \in \{2, 3, \dots, n\}$,有

$$\text{low}_j^i \leq x_j^i \leq \text{up}_j^i, \quad (10)$$

$$\text{low}_j^i = \frac{x_j^{i-1} t_j^{i-1}}{t_j^i}, \quad (11)$$

$$\text{up}_j^i = \min \left\{ \frac{x_j^1 t_j^1}{t_j^i} + \sum_{i^*=1}^{i-1} x_j^{i^*} / (v_j t_j^i), s_j^i \right\}. \quad (12)$$

可以看出,若要满足在第 j 种应急物资上的连续消耗,则排序后的决策变量 x_j^i 应该在区间 $[\text{low}_j^i, \text{up}_j^i]$ 内,这个区间与前期储备站已经运达的应急物资量密切相关.

命题1 对 $\forall j \in \{1, 2, \dots, r\}$,式(10)是排序后的决策变量 $X_j = \{x_j^1, \dots, x_j^i, \dots, x_j^n\}$,满足连续消耗的充分必要条件.

证明 充分性:由式(10)可以轻松得到(9),即任意 a_i 与 a_1 的部署时间间隔没有超过前期抵达事故点的应急物资总量的维持时间,可以满足连续消耗.

必要性:已知排序后 $X_j = \{x_j^1, \dots, x_j^i, \dots, x_j^n\}$ 可以满足连续消耗.本文使用反证法,假设

$$x_j^i < \text{low}_j^i, \quad i \in \{2, 3, \dots, n\}, \quad (13)$$

或

$$x_j^i > \text{up}_j^i, \quad i \in \{2, 3, \dots, n\}. \quad (14)$$

由式(13)可得

$$x_j^{i-1} t_j^{i-1} > x_j^i t_j^i, \quad i \in \{2, 3, \dots, n\}.$$

这与式(8)的排序关系相矛盾.此外,因为在供需约束下 x_j^i 不可能大于 s_j^i ,由式(14)可得

$$\sum_{i^*=1}^{i-1} x_j^{i^*} / v_j < x_j^i t_j^i - x_j^1 t_j^1, \quad i \in \{2, 3, \dots, n\}.$$

即 a_i 与 a_1 的部署时间间隔超过了前期抵达事故点的应急物资总量的维持时间,不可能满足连续消耗,这与 X_j 满足连续消耗的初始条件相矛盾. □

可以看出,应急物资的供需约束只与储备站的应急物资储备量有关,而连续约束不仅与应急物资消耗的速率和部署时间有关,且与各储备站的应急物资储备量也相关,实现连续约束要远比供需约束困难得多.特别的,同时满足供需约束和连续约束的可行解的空间非常的小,给求解方法带来极大的挑战.因此,在规划化工园区的应急物资储备站时需要充分考虑上述各因素,才能在化工园区发生危化品事故时尽可能地满足供需约束和连续约束,从而保障快速有效地进行应急处置和救援.

3 应急物资多目标分配算法

本文引入NSGA-II算法^[4]求解式(1)~(4)的化工园区应急物资多目标分配问题.这是因为,NSGA-II算法是当前最流行的多目标进化算法之一,具有参数简单、运行速度快、解集收敛性好等优点,已成为评价众多其他多目标进化算法性能的一个基准.而且,NSGA-II可以利用约束违背程度来进行非支配排序(约束违背程度越大的解越容易被淘汰,约束违背程度越小的解越容易进入下一代种群),从而让种群

尽力探索可行解.

需要指出的是,NSGA-II算法中传统的一维实数编码与本文探讨的化工园区应急物资多目标分配问题的二维组合特征并不太相符,且式(6)的供需约束和式(9)的连续消耗约束均是非常苛刻的约束条件,NSGA-II算法中的个体在进化过程中很容易违背这些约束导致个体不可行.虽然NSGA-II可以利用约束违背程度来增大不可行解被淘汰的机率,但在双重约束的极小可行域下,NSGA-II仅仅依靠约束违背度来探索可行解,其效率和效果都会大打折扣.因此,本文在原始算法的基础上设计了二维实数编码方案和个体启发式修正策略以期提升NSGA-II算法求解本文化工园区应急物资多目标分配问题的性能.需要指出的是,如果在实际应用中要求决策变量 x_j^i 为离散型变量(如整数变量),则在种群初始化、交叉和变异操作中对产生的 x_j^i 值进行相应的向上或向下取整即可.本文所提出的基于启发式的NSGA-II算法(heuristic based NSGA-II, HNSGA-II)的基本流程描述如下:

step 1: 采用二维实数编码并根据约束条件(5)随机生成初始种群.

step 2: 对初始种群中的每个个体的编码进行启发式修正.

step 3: 根据式(1)~(4)计算初始种群中每个个体的目标函数值.

step 4: 根据目标函数值对初始种群进行快速非支配排序并计算每个个体的拥挤距离.

step 5: 对初始种群进行交配选择、模拟二进制交叉和多项式变异生成进化种群.

step 6: 对进化种群中的每个个体的编码进行启发式修正.

step 7: 计算进化种群中每个个体的目标函数值.

step 8: 将初始种群和进化种群合并为一个组合种群,并对组合种群进行环境选择,根据目标函数值对组合种群进行快速非支配排序并计算每个个体的拥挤距离,根据个体的非支配等级和拥挤距离选取最好的若干个体组成新的初始种群.

step 9: 如果算法达到终止条件(如最大迭代次数),则停止进化并输出当前的初始种群,否则转step 5继续初始种群的进化.

关于NSGA-II算法进化机制的具体细节可以查看文献[4],这里不再赘述.下面为了进一步说明本文的工作,将详细介绍二维实数编码方案和个体启发式修正策略.具体来说,将尝试回答以下两个问题:

1) 如何设计个体的编码来清晰地表征候选解?

2) 如何对不可行个体进行修正从而确保每个个体尽可能地满足式(6)的供需约束和式(9)的连续消耗约束?

3.1 二维实数编码与种群初始化

由式(1)~(4)很容易看出,本文所提出的化工园区应急物资多目标分配主要考虑如何在 n 个储备站中分配 r 种应急物资,具有典型的二维组合优化特征.因此,对于种群中的个体,本文设计如下的二维实数编码来表征候选解:

$$\begin{matrix} a_1 \\ \vdots \\ a_i \\ \vdots \\ a_n \end{matrix} \begin{bmatrix} x_1^1 & \cdots & x_j^1 & \cdots & x_r^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^i & \cdots & x_j^i & \cdots & x_r^i \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^n & \cdots & x_j^n & \cdots & x_r^n \end{bmatrix}.$$

在上述的个体编码中,每一行代表一个储备站 a_i ,每一列表示第 j 种应急物资,每一个基因位表示一个决策变量 x_j^i ,即储备站 a_i 在第 j 种应急物资上的实际贡献量.对种群中的每个个体进行初始化时,对于 $\forall i \in \{1, 2, \dots, n\}$ 和 $\forall j \in \{1, 2, \dots, r\}$,执行

$$x_j^i \leftarrow \text{rand}(0, \min\{s_j^i, d_j\}), \quad (15)$$

其中 $\text{rand}(0, \min\{s_j^i, d_j\})$ 表示在 $[0, \min\{s_j^i, d_j\}]$ 之间服从均匀分布的随机数.

显然,产生的每一个 x_j^i 均满足约束条件(5),但是并不一定满足约束条件(6)和(9),即使个体满足了约束条件(6)和(9),在个体经过交叉和变异之后每个 x_j^i 都可能发生改变,这时个体可能再次违背约束条件(6)和(9),导致个体不可行.如果种群中出现大量的不可行个体,则会大大降低算法的收敛性和搜索效率.为此,在下一节,将设计一种启发式策略对每个不可行解进行修正,以驱使每个个体快速接近可行域,提高算法探索可行解的能力.

3.2 启发式修正策略

对于任何一个待评估的个体,需要明确两个方面: 1) 对于每个 d_j ,所有响应它的储备站的资源贡献总量应该恰好等于需求,即满足约束条件(6); 2) 这种分配方案能否满足物资的连续消耗,即满足约束条件(9).为此,需要对每个个体的编码进行检查.如果有违背约束的情形,则需要进一步对个体编码进行修正,使其成为可行个体或者尽可能地减小个体的约束违背程度,从而驱使种群快速地向可行区域收敛.也就是说,在编码检查中,需要明确每个决策变量的值并使其尽可能地满足式(6)和(9).

基于上述思想,对于 $\forall j \in \{1, 2, \dots, r\}$,设计个体

编码启发式修正策略如下.

step 1: 如果 $\sum_{i=1}^n x_j^i > d_j$, 决策变量值之和超过了事故点的应急物资需求, 则需要对该列的决策变量值进行缩减. 在第 j 列随机选择一个 $x_j^{i^*} > 0$, 执行

$$\bar{x}_j^{i^*} \leftarrow \max \left\{ 0, x_j^{i^*} - \left(\sum_{i=1}^n x_j^i - d_j \right) \right\}. \quad (16)$$

重复这个步骤, 直到满足式(6).

step 2: 如果 $\sum_{i=1}^n x_j^i < d_j$, 决策变量值之和不能满足事故点的应急物资需求, 则需要对该列的决策变量值进行放大. 在第 j 列随机选择一个 $x_j^{i^*} < s_j^i$, 执行

$$\bar{x}_j^{i^*} \leftarrow \min \left\{ s_j^i, x_j^{i^*} + \left(d_j - \sum_{i=1}^n x_j^i \right) \right\}. \quad (17)$$

重复这个步骤, 直到满足式(6).

step 3: 计算第 j 列中每一储备站 a_i 的应急物资到达事故点的部署时间 $x_j^i t_j^i$, 再按照部署时间由小到大进行排序(部署时间为0的不参与排序), 得到 $X_j = \{x_j^1, \dots, x_j^i, \dots, x_j^n\}$ 和 $T_j = \{t_j^1, \dots, t_j^i, \dots, t_j^n\}$.

step 4: 依据 X_j 和 T_j , 对每个 $i = 2, 3, \dots, n(x_j^1$ 保持不变)按照排序执行如下的连续约束修正.

step 4.1: 如果满足约束条件(10), 则可以满足连续消耗, 保持 x_j^i 不变;

step 4.2: 如果 $x_j^i > \text{up}_j^i$, 不能满足连续条件, 则令

$$\bar{x}_j^i \leftarrow \text{up}_j^i. \quad (18)$$

这时决策变量值总和已不能满足供需约束, 可将缺失的 $x_j^i - \bar{x}_j^i$ 平均分摊到后面的每个储备站. 对于后面的每一个 $i^* = i + 1, \dots, n$, 执行

$$\bar{x}_j^{i^*} \leftarrow x_j^{i^*} \frac{\sum_{i'=i+1}^n x_j^{i'} + x_j^i - \bar{x}_j^i}{\sum_{i'=i+1}^n x_j^{i'}}. \quad (19)$$

需要指出的是, 经过上述策略修正后的决策变量一定会满足连续约束(见下文中的命题2), 但不一定满足供需约束, 因为前面检查过的 x_j^i 不再改变, 可能需要对后面到达的 x_j^i 进行适当放大, 并且后面达到的储备站物资足够充分. 上述修正策略的目的是在满足连续约束的前提下尽可能地满足供需约束, 从而大大减小个体的约束违背程度甚至把不可行个体修正为可行个体, 以提升种群对可行解的探索能力, 加速种群的收敛.

命题2 经过修正后的 X_j 一定能够满足连续消耗约束条件.

证明 由命题1已经证明, 式(10)是排序后的决策变量 $X_j = \{x_j^1, \dots, x_j^i, \dots, x_j^n\}$ 满足连续消耗条件

的充分必要条件, 因此, 只需证明经过修正后的决策变量, $X_j = \{x_j^1, \dots, x_j^i, \dots, x_j^n\}$ 满足式(10)即可.

首先, 经过step 3的排序后, 可知 X_j 满足式(8). 经过step 4.1和step 4.2的判断和修正, 容易验证 \bar{x}_j^i 满足约束条件(10), 并且保持 \bar{x}_j^i 之前的排序不变. 此后, 利用式(19)对 \bar{x}_j^i 之后的各个储备站对应的决策变量值同时放大相同的倍数, 并不会改变决策变量值的排序, 即可继续利用前面决策变量的值来计算当前决策变量的上下限, 并继续判断修正, 以此类推直至最后一个决策变量, 从而确保修正后的决策变量值满足约束条件(10), 实现连续消耗. □

命题3 个体修正策略的时间复杂度至多为 $O(n^2r)$.

证明 首先, 对于任一列需要检查修正的物资而言, step 1在最坏的情况下所有决策变量都要缩减, 共有 n 个储备站, 时间复杂度最大为 $O(n)$. 同理, step 2的时间复杂度也为 $O(n)$. 在step 3, 本文采用冒泡排序方法, 时间复杂度为 $O(n^2)$. 对于step 4, 最坏情况下, 每个决策变量都要被修正, 每修正一个决策变量, 后面所有的决策变量均要被更新, 因此step 4的时间复杂度也至多为 $O(n^2)$. 综上, 修正每一列决策变量的时间复杂度至多为 $O(n^2)$. 由于编码中总共有 r 列需要检查修正, 整个个体修正策略的时间复杂度至多为 $O(n^2r)$. □

上述结果说明本文所提出的启发式修正策略的时间复杂度至多是多项式级的, 并不会给算法带来巨大的计算负担.

4 实验结果与分析

为了验证本文所提出方法的有效性, 首先选择与文献[10]的单目标优化模型与PSO进行对比, 这是因为文献[10]也考虑了连续性约束. 不同的是, 文献[10]仅考虑目标 f_1 和 f_4 的加权, 并在PSO中使用罚函数法解决约束问题. 而本文方法还考虑了目标 f_2 和 f_3 , 并采用改进的HNSGA-II算法进行求解. 为了对比的公平性, 根据PSO获得的最优解换算出 f_2 和 f_3 , 比较HNSGA-II获得的最优解集与PSO最优解的支配关系.

其次, 为了进一步评估HNSGA-II算法的性能, 选择基本NSGA-II算法和近期两种比较有代表性的约束多目标进化算法: 1) MOEA/D-IEpsilon (multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition and improved epsilon)算法^[15], 该算法提出了一种改进的epsilon约束处理方法, 并用于基于分解的多目标进化算法, 可根据当前种群可行解比例自适应调节epsilon值, 以增强种群在进化过

程中收敛性和多样性保持. 2) CCMO(coevolutionary constrained multi-objective optimization)算法^[16], 该算法提出了一种协同进化的约束多目标优化框架并嵌入NSGA-II中, 通过同时进化两个不同的种群, 分别求解原问题和由原问题派生出的辅助问题, 并在两个群体之间共享有用的信息来提升算法探索可行解的能力.

4.1 参数设置和评价指标

化工园区危化品事故波及范围一般没有自然灾害区域大, 需要部署的物资储备站数目相对较少. 小型化工园区事故基本只调动化工园区内部和周边的一些物资储备站, 大型化工园区事故可能要调动全市的物资储备站, 很少出现跨市级或跨省级调动物资的情形^[14]. 此外, 化工园区应急物资种类大致可分为消防物资、医疗物资, 以及一些堵漏工具等, 比自然灾害应急物资种类要少得多^[13]. 因此, 本文在总结和分析相关工作的基础上, 考虑了4种不同规模的实验参数: $n = 10, r = 15$ (环境1); $n = 10, r = 30$ (环境2); $n = 20, r = 15$ (环境3)和 $n = 20, r = 30$ (环境4). 通过逐步增加问题规模, 以期考察不同算法对问题规模的鲁棒性. 此外, $t_j^i \in [1, 3], v_j \in [0.25, 0.35], d_j = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^n s_j^i$; 在环境1和环境2中 $s_j^i \in [50, 70]$, 在环境3和环境4中 $s_j^i \in [30, 40]$. 每种实验环境均根据上述参数和取值区间随机生成20个不同的测试实例, 且满足约束条件(7). 每个测试实例在AMD Ryzen 7 CPU 1.8 GHz、16 GB内存、Windows 10操作系统的计算机上独立运行30次, 并根据30次不同结果进行统计分析.

对比算法的核心参数设置如下:

1) 在PSO中, 粒子数为20, 最大迭代次数为500, 粒子最大速度为0.15, 两个学习加速因子均为2.0, 惯性权重的最大值和最小值分别为0.9和0.4, f_1 和 f_4 的加权系数均为0.5;

2) 在NSGA-II和HNSGA-II中, 种群规模为250, 最大评估次数为125 000, 交叉概率为0.9, 变异概率为0.002;

3) 在MOEA/D-IEpsilon和CCMO中, 双种群中的每个种群的规模均为250, 最大评估次数为125 000, 交叉概率为0.9, 变异概率为0.002. 此外, MOEA/D-IEpsilon中的缩放因子为0.5, 其他参数与文献[15]一致, CCMO中的辅助问题为式(1)~(4)的无约束优化问题.

为了对比不同算法所得到的应急物资分配方

案的优劣, 本文采用经典的容量值指标和覆盖值指标^[17]. 容量值指的是算法最终得到的非支配可行解的个数, 即满足所有约束条件的非支配解数目, 可以直观地体现算法的探索能力. 此外, 如果一个解的所有目标值都不比另一个解的所有目标值差, 则认为前者可以覆盖后者. 假设两个对比算法获得的解集分别为 A 和 B . $v(A, B)$ 表示 B 中能被 A 覆盖的解的个数与 $|B|$ 的百分比. 显然, 若 $v(A, B)$ 大于 $v(B, A)$, 则 A 的方案质量要优于 B . 对于每个测试实例, 将每个算法30次独立运行的解合并在一起并去掉重复解, 计算对比算法的合并解集的容量值和合并解集之间的覆盖值.

4.2 与已有方法的对比

在本节实验中, 将本文所提出的多目标优化模型和HNSGA-II算法与文献[10]的单目标优化模型和PSO进行对比分析.

由于这两种算法的优化目标数目不同, 在表2中给出了两种算法得到的最佳分配方案对应的目标值. 为了对比的公平性, 对于HNSGA-II和PSO, 最佳分配方案由偏好顺序 f_1, f_4, f_2, f_3 确定, 即在解集中首先考虑更小的 f_1 , 如果 f_1 值相等, 再比较 f_4 , 以此类推. 可以看出, 在80个测试实例中, HNSGA-II在60个实例上获得的最佳分配方案可以支配PSO, 在14个实例上获得的分配方案在4个目标上全面占优, 在56个实例上有3个目标占优, 在11个实例上有两个目标占优; 而PSO在每个测试实例上都不能支配HNSGA-II的分配方案, 仅在20个实例上有一个目标占优. 此外, 单就PSO优化的 f_1, f_4 来说, HNSGA-II在80个实例上均能支配PSO, 在38个实例上要显著优于PSO. 特别的, HNSGA-II方案对应的最早应急服务开始时间 f_1 要远远好于PSO, 更能贴合化工园区危化品事故的应急处置和救援场景的需求. 这是因为, HNSGA-II中的个体修正策略总是将决策变量排序后保持最小的部署时间不动, 而只针对后面的决策变量进行修正以尽可能地满足应急服务时间最早并连续; 在另一方面, PSO在优化目标时为了能够让决策变量满足连续消耗, 即使有应急物资到达也不开始应急救援, 需要等后面到达的应急物资量满足连续时才能开始应急服务, 无形中造成应急开始时间的滞后. 也就是说, PSO过于追求连续性而忽视了时效性, 而HNSGA-II同时兼顾了时效性和连续性. 上述实验结果表明, 尽管HNSGA-II处理了所有4个目标, 具有更大的求解负担, 但HNSGA-II比PSO能更好地在多个目标之间寻求一个合理的平衡.

表2 HNSGA-II和PSO得到的最佳分配方案的目标值

实例	算法	环境1				环境2				环境3				环境4			
		f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4	f_1	f_2	f_3	f_4
1	HNSGA-II	18	84	1415	10	22	90	3199	10	5	72	1821	20	6	72	3889	20
	PSO	51	114	2011	10	63	156	4435	10	22	78	2254	20	33	99	4820	20
2	HNSGA-II	18	82	1367	10	22	76	3086	10	4	68	1672	20	6	72	3448	20
	PSO	47	99	1859	10	62	114	4051	10	22	87	2376	20	33	93	4779	20
3	HNSGA-II	18	105	1564	10	21	88	3088	10	4	102	1874	20	6	76	3642	19
	PSO	54	114	1944	10	63	132	3950	10	21	66	2156	20	36	81	4737	20
4	HNSGA-II	20	93	1289	10	21	80	3127	10	4	70	1719	20	6	75	3881	20
	PSO	41	90	1728	10	56	111	4073	10	24	78	2434	20	33	72	4835	20
5	HNSGA-II	14	100	1356	10	24	105	2994	10	3	99	1672	19	6	96	3770	19
	PSO	51	102	1905	10	62	138	3960	10	20	72	2119	20	30	69	4472	20
6	HNSGA-II	18	105	1458	10	24	87	3194	10	4	76	1850	20	6	75	3836	20
	PSO	42	123	1779	10	60	123	3975	10	24	84	2260	20	34	96	5019	20
7	HNSGA-II	20	93	1572	10	24	105	3567	10	5	111	1954	20	6	93	4100	19
	PSO	50	108	2091	10	78	141	4405	10	24	93	2510	20	34	75	4627	20
8	HNSGA-II	24	102	1380	9	27	99	2820	10	4	76	1725	19	6	99	4133	19
	PSO	48	108	1843	10	69	123	3990	10	20	78	2201	20	36	96	4776	20
9	HNSGA-II	27	102	1473	9	27	96	3026	10	4	74	1575	19	6	75	3961	19
	PSO	59	126	2001	10	72	129	3966	10	19	87	2137	20	33	78	4622	20
10	HNSGA-II	24	102	1382	9	24	120	3154	10	4	75	1875	19	6	69	3414	20
	PSO	48	105	1896	10	65	120	4150	10	20	66	2242	20	29	84	4508	20
11	HNSGA-II	24	108	1548	9	21	87	2821	10	4	99	1837	19	6	96	4204	19
	PSO	52	120	2063	10	59	108	3873	10	20	69	2311	20	36	78	4692	20
12	HNSGA-II	27	99	1528	9	19	96	2887	10	4	60	1679	20	7	87	4269	20
	PSO	53	111	2118	10	57	108	3605	10	22	69	2240	20	38	75	5015	20
13	HNSGA-II	16	82	1353	10	21	108	3385	10	4	60	1733	20	6	76	3923	19
	PSO	42	84	1719	10	60	156	4059	10	24	84	2267	20	36	90	4834	20
14	HNSGA-II	20	102	1705	10	24	93	2898	10	6	90	1908	18	6	84	3786	20
	PSO	54	123	2117	10	66	99	4004	10	21	90	2356	20	39	90	5007	20
15	HNSGA-II	24	99	1669	10	21	81	3097	10	6	96	2003	18	6	72	3828	20
	PSO	55	120	2131	10	74	114	4189	10	21	69	2379	20	35	93	4942	20
16	HNSGA-II	18	82	1498	10	20	114	3321	10	4	102	2077	20	6	68	3386	19
	PSO	45	111	2011	10	74	129	4213	10	23	66	2187	20	34	81	4683	20
17	HNSGA-II	20	105	1467	10	24	102	3199	10	4	84	1807	20	6	93	4304	19
	PSO	48	105	1975	10	67	129	4073	10	21	69	2227	20	36	81	4897	20
18	HNSGA-II	21	80	1370	9	27	99	3628	10	4	108	1871	19	6	99	3803	19
	PSO	48	105	1975	10	72	123	4590	10	21	87	2333	20	30	93	4562	20
19	HNSGA-II	18	90	1502	10	24	94	3134	10	4	93	1817	19	6	87	4199	19
	PSO	46	111	1892	10	72	126	3978	10	22	102	2261	20	30	84	4653	20
20	HNSGA-II	18	78	1531	10	24	84	3243	10	3	96	1850	20	6	75	3682	19
	PSO	50	111	1884	10	70	135	4450	10	21	81	2196	20	33	84	4601	20

为了更加直观地理解HNSGA-II和PSO两种算法所得解的优劣,在每个实验环境下挑选一个测试实例,将每种算法在挑选的每个测试实例上30次运行的解集合并,然后去掉重复解和支配解,得到每种算法在相应测试实例上的非支配解集.图1给出了2种算法在4种实验环境下的非支配解集的平行坐标图.平行坐标图可以将高维空间中的解集映射到二维图形上,每条折线对应于原始空间中的一个

解.平行坐标图可以在一定程度上反映解集在收敛性、分布性和均匀性方面的质量^[18].为了便于比较,图中的每个目标值均通过最小最大归一化方法转换到[0, 1]之间.可以看出,PSO找到的可行解非常的少,HNSGA-II可以提供比PSO更加多样化的分配方案.对于某些目标,如 f_4 ,PSO只获得一个值,相比之下,HNSGA-II总是能够在任何目标上提供不同的选择.此外,HNSGA-II看起来要比PSO具有更好的收

敛性,在所有目标上都探索到了最佳分配方案,且找到大量可以支配PSO的分配方案.上述实验结果表明,HNSGA-II的表现明显优于PSO,HNSGA-II在个体启发式修正策略的驱动下,能够在收敛性和多样性之间实现良好的平衡,可以为决策者提供更好、更多样化的应急物资分配方案.

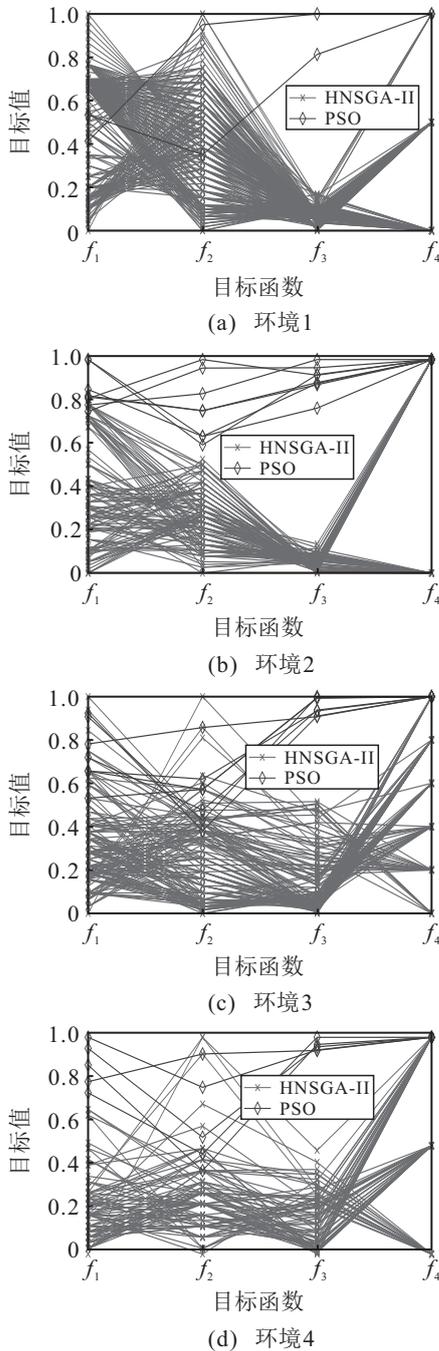


图1 HNSGA-II和PSO所得非支配解集的平行坐标

4.3 与其他多目标进化算法的对比

为了进一步评估本文HNSGA-II算法的性能,基于本文所提出的多目标模型以及4个实验环境各30个测试实例,将HNSGA-II和NSGA-II、MOEA/D-Iepsilon、CCMO进行对比实验.这4种算法均采用本文的二维实数编码,不同的是HNSGA-II还嵌入了

启发式修正策略,而MOEA/D-Iepsilon、NSGA-II以及CCMO仅依靠自身的约束处理机制来解决约束问题.此外,上述4种算法在计算约束违背程度时均进行了归一化处理,以消除不同数量级引起的误差.为了方便后续的描述,分别用A、B、C、D表示HNSGA-II、MOEA/D-Iepsilon、NSGA-II和CCMO获得的非支配解集.

表3给出了4种算法在4种环境下的容量值结果,即每种算法在4种环境下每个测试实例上30次运行找到的可行解的个数,其中较优值加粗显示.由表3可以看出,HNSGA-II在4种环境下都能探索到数量可观的可行解;MOEA/D-Iepsilon只能找到少量的可行解;NSGA-II在环境1和环境3中能够得到稀少的可行解,但在环境2和环境4中几乎找不到可行解;CCMO则在4种环境中都很难找到可行解.上述实验结果表明,随着问题规模的不断增大,HNSGA-II对可行解的探索能力要远好于其他3种算法,具有更好的稳定性.这是因为,MOEA/D-Iepsilon可以通过可行解的比例动态调整epsilon的值,从而快速跨越较大的不可行区域,向可行域迈进.但是本文的多重约束多目标优化模型由于连续消耗约束条件的极其苛刻性,可行域相当的微小,导致种群中大部分的个体直接跨过了可行域.而NSGA-II只能通过自身的约束违背度来探索可行解,对微小可行域来说效果非常有限.对于CCMO,其辅助问题是式(1)~(4)的无约束优化问题,产生的大量不可行解很难给主问题的优化提供有用的信息.HNSGA-II中嵌入的启发式修正策略充分利用了问题本身的知识(见命题1),可以让不可行解通过修正快速接近可行解区域,大大提升算法挖掘可行解的能力.

由于NSGA-II和CCMO几乎找不到可行解,为了进一步评估算法的收敛性,表4给出了HNSGA-II和MOEA/D-Iepsilon两种算法在4种实验环境下的覆盖值结果.可以看出,在4种环境中的每个测试实例下,HNSGA-II得到的解可以全部覆盖MOEA/D-Iepsilon的解集,而MOEA/D-Iepsilon得到的解集根本无法覆盖HNSGA-II的解,也就是说,MOEA/D-Iepsilon得到的解可以全部被HNSGA-II的解支配.上述实验结果表明,仅仅依靠自身的epsilon约束处理机制,MOEA/D-Iepsilon解的质量很难得到保证,而HNSGA-II在启发式修正策略的驱动下,个体的约束违背度大大减小,驱使个体向可行域快速进化,其收敛性得到了明显的提升,解的质量要远好于MOEA/D-Iepsilon.

表3 4种算法的容量值结果

实例	环境1				环境2				环境3				环境4			
	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D	A	B	C	D
1	1632	47	13	3	858	28	1	0	2318	38	12	0	1179	4	0	0
2	1553	43	9	0	768	24	1	0	2479	35	7	0	1263	6	0	0
3	1232	34	8	1	696	27	1	0	2432	45	11	0	1179	3	1	0
4	1186	32	16	1	748	29	1	0	2561	34	6	0	1198	7	0	0
5	1502	39	13	0	765	32	0	0	2458	36	9	0	1014	11	1	0
6	1167	56	13	2	807	43	1	0	2425	39	7	0	808	11	1	0
7	1729	39	13	2	821	24	2	0	2544	33	8	0	1349	7	0	0
8	209	30	9	0	1062	28	2	0	2388	41	7	0	1079	6	1	0
9	946	39	14	1	807	26	1	0	2418	42	7	0	1260	5	1	0
10	1099	37	8	4	717	34	0	0	2428	37	4	0	1232	7	0	0
11	1020	36	7	0	637	42	1	0	2342	37	9	4	1216	8	0	0
12	1414	32	7	0	902	48	0	0	2312	35	6	0	1076	4	1	0
13	1840	33	13	4	843	23	0	0	2152	42	4	0	1205	4	0	0
14	2847	53	13	1	843	23	0	0	2344	34	6	1	1220	10	1	0
15	1128	44	15	0	710	29	0	0	2684	35	8	0	1123	2	0	0
16	1946	36	9	3	684	31	1	0	2394	33	4	0	1403	12	0	0
17	1343	31	7	0	782	29	1	0	2114	37	3	0	1153	0	0	0
18	1023	37	8	0	734	32	1	0	2610	43	9	0	1082	15	0	0
19	2442	39	12	0	512	23	0	0	2762	37	5	0	1051	4	0	0
20	1883	32	9	0	773	28	0	0	2232	35	10	1	1097	5	2	0

表4 HNSGA-II vs MOEA/D-IEpsilon的覆盖值结果

%

实例	环境1		环境2		环境3		环境4	
	$v(A, B)$	$v(B, A)$						
1	100	0	100	0	100	0	100	0
2	100	0	100	0	100	0	100	0
3	100	0	100	0	100	0	100	0
4	100	0	100	0	100	0	100	0
5	100	0	100	0	100	0	100	0
6	100	0	100	0	100	0	100	0
7	100	0	100	0	100	0	100	0
8	100	0	100	0	100	0	100	0
9	100	0	100	0	100	0	100	0
10	100	0	100	0	100	0	100	0
11	100	0	100	0	100	0	100	0
12	100	0	100	0	100	0	100	0
13	100	0	100	0	100	0	100	0
14	100	0	100	0	100	0	100	0
15	100	0	100	0	100	0	100	0
16	100	0	100	0	100	0	100	0
17	100	0	100	0	100	0	100	0
18	100	0	100	0	100	0	100	0
19	100	0	100	0	100	0	100	0
20	100	0	100	0	100	0	100	0

通过上述实验可以发现,传统的罚函数法^[10]、epsilon约束处理^[15]、协同进化^[16]等约束处理技术,无论与之组合的多目标进化算法多么先进,在求解本文的化工园区多储备站应急物资分配问题时都表现得捉襟见肘、力不从心.这是因为,本文的应急物资多目标分配问题具有极苛刻的约束条件,供需约束和连续性约束导致解的可行域极其微小,仅仅依靠多目标进化算法本身的约束处理和探索能力很难找到可行解,需要挖掘问题本身的知识来指导算法的进化.

5 结论

化工园区应急物资分配是危化品事故发生后开展应急处置和救援的基本前提.本文在分析和总结相关工作的基础上,从时效性和连续性角度构建了一种面向多储备站、多种应急物资、单事故点的应急物资多目标分配模型,重点分析满足应急物资连续消耗的约束条件,并基于NSGA-II和个体启发式修正策略设计了一种应急物资多目标分配算法HNSGA-II.与相关已有方法的对比实验结果表明,本文所提出的个

体启发式修正策略能够驱使个体迅速满足应急物资的供需约束和连续消耗约束,显著增强HNSGA-II的探索能力,为决策者提供更多更好的应急物资分配方案,为化工园区智慧应急管理提供了一个有益的尝试. 在后面的研究工作中,将考虑潜在的多米诺事故,研究应急物资需求动态变化下的应急物资分配问题.

参考文献(References)

- [1] 王起全, 刘志刚, 杨鑫刚, 等. 化工园区重大危险源风险情景构建分析[J]. 中国安全科学学报, 2020, 30(8): 63-69.
(Wang Q Q, Liu Z G, Yang X G, et al. Scenario construction analysis of major hazard sources in chemical industry Parks[J]. China Safety Science Journal, 2020, 30(8): 63-69.)
- [2] 王飞跃, 王维. 化工园区应急管理评估研究[J]. 中国安全科学学报, 2017, 13(6): 132-138.
(Wang F Y, Wang W. Research on evaluation of emergency management capability for chemical industrial park[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2017, 13(6): 132-138.)
- [3] 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.)
- [4] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.
- [5] 刘扬, 张国富, 苏兆品, 等. 救灾物资多阶段分配与调度问题建模与求解[J]. 控制与决策, 2019, 34(9): 2015-2022.
(Liu Y, Zhang G F, Su Z P, et al. Modeling and solving multi-phase allocation and scheduling of emergency relief supplies[J]. Control and Decision, 2019, 34(9): 2015-2022.)
- [6] Liu J, Guo L, Jiang J P, et al. Emergency material allocation and scheduling for the application to chemical contingency spills under multiple scenarios[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(1): 956-968.
- [7] Liu J, Guo L, Jiang J P, et al. Emergency material allocation with time-varying supply-demand based on dynamic optimization method for river chemical spills[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(18): 17343-17353.
- [8] Hu X, Wang F, Wei J. Optimal decision model for emergency resource reserves in chemical industrial parks in China: A risk perception perspective[J]. Process Safety Progress, 2019, 38(4): 12048.
- [9] Du Y J, Sun J H, Duan Q L, et al. Optimal assignments of allocating and scheduling emergency resources to accidents in chemical industrial Parks[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2020, 65: 104148.
- [10] 安霆. 基于WebGIS的化工园区危险化学品事故应急资源调度研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015: 43-53.
(An T. Research on emergency resources scheduling for chemical accidents in chemical industry park based on WebGIS[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015: 43-53.)
- [11] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks. Perth, 1995: 1942-1948.
- [12] 王飞跃, 郭换换, 裴甲坤, 等. 不确定条件下应急资源分配区间规划模型研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 15(10): 107-113.
(Wang F Y, Guo H H, Pei J K, et al. Study on interval programming model for allocation of emergency resource under uncertain conditions[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2019, 15(10): 107-113.)
- [13] 陈国华, 安霆, 陈培珠. 危险化学品多米诺事故应急资源需求量估算模型[J]. 中国安全科学学报, 2015, 25(4): 87-93.
(Chen G H, An T, Chen P Z. Estimation model of emergency resource demands for chemical accidents involving Domino effect[J]. China Safety Science Journal, 2015, 25(4): 87-93.)
- [14] 郭换换, 王飞跃, 裴甲坤, 等. 化工园区应急设施区间规划选址模型研究[J]. 运筹与管理, 2020, 29(5): 67-73.
(Guo H H, Wang F Y, Pei J K, et al. Study of site selection model for interval programming of emergency facilities in chemical industry park[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(5): 67-73.)
- [15] Fan Z, Li W J, Cai X Y, et al. An improved epsilon constraint-handling method in MOEA/D for CMOPs with large infeasible regions[J]. Soft Computing, 2019, 23(23): 12491-12510.
- [16] Tian Y, Zhang T, Xiao J H, et al. A coevolutionary framework for constrained multiobjective optimization problems[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2021, 25(1): 102-116.
- [17] Li M Q, Yao X. Quality evaluation of solution sets in multiobjective optimisation[J]. ACM Computing Surveys, 2019, 52(2): 1-38.
- [18] Li M Q, Zhen L L, Yao X. How to read many-objective solution sets in parallel coordinates[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2017, 12(4): 88-100.

作者简介

张国富(1979—), 男, 教授, 博士, 从事应急智能决策、进化计算等研究, E-mail: zgf@hfut.edu.cn;

陆淑君(1996—), 女, 硕士生, 从事智慧应急、计算智能的研究, E-mail: 1017659186@qq.com;

苏兆品(1983—), 女, 副教授, 博士, 从事灾害应急决策、信息安全等研究, E-mail: szp@hfut.edu.cn;

潘刚(1982—), 男, 讲师, 博士, 从事化工园区智慧应急的研究, E-mail: dagang4030@126.com.