

基于可信性测度的三角模糊多目标机会约束 应急物资调度模型与改进遗传算法

权 汉

云南省设计院集团有限公司第三建筑设计研究院, 云南 昆明

收稿日期: 2026年9月1日; 录用日期: 2026年10月2日; 发布日期: 2026年10月10日

摘 要

针对城市洪涝灾害初期应急物资调度中受灾点需求与路网通行状态的双重模糊不确定性, 建立一类基于可信性测度的三角模糊多目标机会约束规划模型。以三角模糊数刻画物资需求, 以道路通行可靠度约束刻画路网损毁风险; 在库存约束和通行可靠度约束下, 以配送时效、运输成本和道路损毁风险为目标函数, 构造模糊多目标机会约束优化问题。利用可信性测度及其等价刻画, 将模糊机会约束转化为确定性等价形式。针对标准遗传算法易早熟、Pareto解集分布均匀性差的问题, 设计自适应交叉变异算子, 引入外部档案维护非支配解多样性, 提出改进非支配排序遗传算法。基于地级市应急调拨数据开展数值实验, 采用超体积HV指标和迭代收敛曲线评价Pareto解集的收敛性与多样性, 并对需求置信水平和道路可靠度进行双参数灵敏度分析。数值结果表明, 所提模型能刻画模糊不确定性与路网损毁对调度方案的耦合影响, 改进算法在收敛性和多样性上优于对比算法。

关键词

模糊运筹学, 可信性测度, 三角模糊数, 机会约束规划, 多目标优化, Pareto最优, 非支配排序遗传算法, 超体积指标, 灵敏度分析, 应急物资调度

Triangular Fuzzy Multi-Objective Chance-Constrained Emergency Material Scheduling Model Based on Credibility Measure and Its Improved Genetic Algorithm

Han Quan

The Third Architectural Design & Research Institute, Yunnan Design Institute Group Co., Ltd., Kunming Yunnan

Abstract

To address the dual fuzzy uncertainties in demand at disaster-affected sites and road network connectivity during the early response phase of urban flood disasters, this paper develops a triangular fuzzy multi-objective chance-constrained programming model on the basis of credibility measure. Triangular fuzzy numbers are employed to quantify material requirements, while road connectivity reliability constraints are formulated to capture the risk of road network disruption. Subject to inventory and connectivity reliability constraints, a fuzzy multi-objective chance-constrained optimization framework is established, with distribution timeliness, transportation cost and road disruption risk defined as objective functions. By virtue of credibility measure and its equivalent transformation, the fuzzy chance constraints are converted into their deterministic counterparts. To remedy the inherent limitations of the conventional genetic algorithm, including premature convergence and uneven distribution of the Pareto solution set, adaptive crossover and mutation operators are devised, and an external archive strategy is incorporated to preserve the diversity of non-dominated solutions. On this basis, an improved non-dominated sorting genetic algorithm is put forward. Numerical experiments are implemented using emergency allocation data from a prefecture-level city. The hypervolume (HV) metric and iterative convergence profiles are adopted to assess the convergence and diversity of the Pareto solution set, and a two-parameter sensitivity analysis is conducted with respect to the demand confidence level and road reliability. Computational results demonstrate that the proposed model is capable of characterizing the coupled impacts of fuzzy uncertainty and road network disruption on emergency scheduling strategies. Moreover, the developed algorithm achieves superior performance over benchmark algorithms in both convergence and solution diversity.

Keywords

Fuzzy Operations Research, Credibility Measure, Triangular Fuzzy Number, Chance-Constrained Programming, Multi-Objective Optimization, Pareto Optimality, Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm, Hypervolume Indicator, Sensitivity Analysis, Emergency Material Scheduling

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

国内多数地市已建设市级应急物资储备库，用于应对洪涝类城市突发灾害。灾害爆发初期，社区物资需求只能通过网格员现场摸排得到区间估计，难以获取精确统计数据；同时暴雨内涝易引发道路积水损毁，各运输路线通行可靠性存在明显差异。但基层物资调拨多侧重物资总量匹配，常常忽视路网损毁带来的配送失效风险，依靠经验分配物资容易出现物资无法送达、部分社区供给短缺等问题。

模糊机会约束用于应急物资分配，洪涝、道路通行可靠性、模糊多目标规划，普遍默认全部路线均可通行，与洪涝灾害实际场景存在偏差。灾害应急多目标模糊调度建模，降低了模型实际决策价值。

模糊机会约束规划是处理灾害场景下参数不确定性的有力工具，刘宝碇等系统建立了可信性测度理论，为模糊机会约束向确定性等价形式转化提供完整理论基础[1]。郭子雪等针对应急物资筹集问题，构建三角模糊参数下的模糊机会约束模型，给出模型确定性转化手段[2]。范凤妹等基于可信性理论构建救

灾物资分配机会约束模型，采用混合智能算法完成模型求解[3]。孙华丽等构建应急定位-路径模糊机会约束规划模型，采用遗传算法处理应急物流组合优化问题[4]。潘楠等将模糊需求引入应急物资配送，建立机会约束调度模型，验证改进元启发式算法求解优势[5]。

针对以上研究不足，本文在传统模糊调度模型基础上引入道路通行可靠度约束，兼顾配送时效、运输成本与路网损毁风险，构建模糊多目标调度模型。对遗传算法进行改进，完善编码、适应度计算与外部档案维护细节；基于地级市应急业务参数开展算例仿真，完成算法性能对比，并针对需求置信水平、道路通行可靠度开展双参数敏感性分析，探究双重不确定条件下调度方案的演化规律，为基层应急物资调拨提供量化决策参考。

文章安排如下：第一部分描述业务场景并定义参数；第二部分构建模型并完成模糊约束转换；第三部分介绍改进算法，开展算例与敏感性分析；最后归纳研究结论，指出研究局限与未来拓展方向。

2. 问题描述与符号定义

2.1. 业务场景

某地级市拥有 3 处市级应急物资储备库，面向城区 5 个洪涝高风险社区开展物资调拨。储备库出库物资不能超过台账库存。灾害发生阶段存在两层不确定性：

需求不确定性：受灾社区物资需求只能给出上下限区间，采用三角模糊数表征；

路网不确定性：内涝造成道路积水，每条运输路线存在通行失效风险，设置道路通行可靠度，只有路线可靠度高于应急预设阈值，该路线才允许参与物资运输。

调度需要同时兼顾：整体物资配送完成时间尽可能短；总运输成本尽可能低；满足库存上限、模糊需求、道路通行可靠度三重约束，供应急指挥人员权衡多维度条件输出调拨方案。

三角模糊数 $\bar{d} = (d_1, d_2, d_3)$

d_1 需求下限， d_2 最可能需求， d_3 需求上限，隶属度函数：

$$u_{\bar{d}}(x) = \begin{cases} \frac{x-d_1}{d_2-d_1}, & d_1 \leq x \leq d_2 \\ \frac{d_3-x}{d_3-d_2}, & d_2 < x \leq d_3 \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

2.2. 参数与变量定义

参数与变量定义详见表 1。

Table 1. Definition of parameters and variables

表 1. 参数与变量定义表

符号	含义
I	应急物资储备库集合， $i \in I$
J	受灾社区集合， $j \in J$
S_i	储备库 i 最大可调出物资，取自物资台账
$d_j = (d_{j1}, d_{j2}, d_{j3})$	受灾社区 j 三角模糊物资需求量
C_{ij}	储备库 i 向社区 j 单位物资运输成本
t_{ij}	储备库 i 向社区 j 运输时间

续表

r_{ij}	路线 (i, j) 道路通行可靠度, $1 \geq r_{ij} \geq 0$, 数值越高道路越不容易中断
r_0	应急项目预设道路通行可靠度阈值
x_{ij}	决策变量: 储备库 i 调往社区 j 的物资数量
y_{ij}	0-1 决策变量, $y_{ij} = 1$ 代表启用路线 (i, j) 运输物资; $y_{ij} = 0$ 代表不启用该路线
α	可信性机会约束置信水平, 物资需求保障可靠程度

3. 模糊多目标调度优化模型

3.1. 目标函数

三角模糊数是刻画灾害场景区间型不确定需求的常用工具, 许叶军等提出基于理想点的三角模糊数多指标决策方法, 完善三角模糊数的运算与排序手段[6]。兰蓉等构建三角模糊数完备度量, 为模糊环境下多目标优化提供数学基础[7]。多目标优化需要处理机会约束带来的不确定性, 张鹏等将可信性测度应用于多阶段机会约束优化, 实现模糊约束的等价转换计算[8]。孟明强等基于可信性测度建立模糊机会约束模型, 实现模糊输入输出条件下模型求解[9]。

目标 1: 最小化最大配送完成时间, 反映应急处置时效要求。 $\min F_1 = \max_{i,j} \{t_{ij} \mid x_{ij} > 0\}$ 。

目标 2: 最小化总运输成本, 对应财政经费约束。 $\min F_2 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} c_{ij} x_{ij}$ 。

3.2. 约束条件

1) 储备库出库量不超过库存台账上限: $\sum_{j \in J} x_{ij} \leq S_i, \forall i \in I$ 。

2) 物资需求可信性机会约束: $Cr\{\sum_{i \in I} x_{ij} \geq \bar{d}_j\} \geq \alpha, \forall j \in J$ 。

3) 道路通行可靠度约束: 只有路线可靠度大于等于阈值 r_0 , 才可以启用该路线开展运输。

$y_{ij} \cdot r_{ij} \geq r_0, \forall i \in I, \forall j \in J$ 。

4) 物资分配与 0-1 变量联动约束, 只有启用路线, 才允许分配物资: $0 \leq x_{ij} \leq M \cdot y_{ij}, \forall i \in I, \forall j \in J$ 。 M 为足够大的正数, 代表该路线理论最大可输送物资规模。

5) 非负与 0-1 变量约束: $x_{ij} \geq 0, y_{ij} \in \{0, 1\}, \forall i \in I, \forall j \in J$ 。

3.3. 模糊机会约束等价转换

依据可信性测度理论, 三角模糊数下模糊机会约束可推导得到确定等价形式。逢金辉等研究模糊机会约束条件下模型构建思路, 为多目标约束建模提供参考[10]。

$Cr\{\sum_{i \in I} x_{ij} \geq \bar{d}_j\} \geq \alpha$ 等价条件:

当 $0 < \alpha \leq 0.5$: $\sum_{i \in I} x_{ij} \geq (1 - 2\alpha)d_{j1} + 2\alpha d_{j2}$ 。

当 $0.5 < \alpha \leq 1$: $\sum_{i \in I} x_{ij} \geq (2\alpha - 1)d_{j3} + 2(1 - \alpha)d_{j2}$ 。

完成转换后, 原模糊混合整数多目标模型转换为确定性混合整数多目标规划。 α 供应急人员根据灾情设置; r_0 可以根据气象、道路险情通报动态调整, 暴雨加剧时应当提高可靠度阈值, 筛掉风险过高的运输路线。

模型说明: 传统研究大多忽略道路失效风险, 默认全部路线可用; 本模型通过 r_{ij} 与阈值 r_0 , 把洪涝下道路损毁风险纳入硬约束, 路网损毁风险、机会约束调度。

4. 改进遗传算法设计与算例验证

标准遗传算法求解该类带 0-1 变量的混合整数多目标模型, 除早熟收敛之外, 还普遍存在 Pareto 非

支配解拥挤、解集多样性不足的缺陷。袁志远等研究基于支配强度的改进 NSGA-II 算法，通过改良算子提升 Pareto 解集的收敛性与分布均匀性[11]。本文做两处关键改进：

改进自适应交叉变异算子：针对混合整数模型特性，区分连续变量 ij 与 0-1 变量 y_{ij} 。

分别执行交叉变异，避免 0-1 变量被连续算子破坏；继续保留适应度驱动的自适应概率策略。

编码采用实数 + 二进制双层混合编码，实数片段对应调拨量 x_{ij} ，二进制片段对应路线选择 y_{ij} ，生成初始种群时预先剔除不满足道路可靠度约束的路线。

多目标场景下，自适应公式中的个体标量适应度 f 基于非支配排序等级与拥挤距离综合计算。

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f_{\max} - f)}{f_{\max} - \bar{f}}, & f \geq \bar{f} \\ P_{c1}, & f < \bar{f} \end{cases}$$

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{\max} - f)}{f_{\max} - \bar{f}}, & f \geq \bar{f} \\ P_{m1}, & f < \bar{f} \end{cases}$$

式中 $f_{\max}$ 是种群最大适应度； $\bar{f}$ 种群平均适应度； f 为个体适应度。

引入外部档案集策略：建立外部档案存储每一代的非支配解，设置拥挤距离对档案内解做修剪，维持 Pareto 解集分布均匀性，防止有效非支配解在迭代过程丢失，扩大决策者可选择方案空间。外部档案维护流程：当代非支配解并入档案 → Pareto 筛选剔除被支配个体 → 超过档案规模时删除拥挤距离最小个体，维持档案规模上限 Narch。

4.1. 算法执行步骤

导入业务数据：储备库库存、受灾社区模糊需求、运输成本、时间、各路线通行可靠度，设置可靠度阈值 r_0 、置信水平 α 、种群规模、最大迭代次数、外部档案规模 Narch；

混合编码：实数编码对应物资分配量 x_{ij} ，二进制编码对应路线选择变量 y_{ij} ；依据道路可靠度约束，直接剔除不满足 $r_{ij} \geq r_0$ 的路线，生成初始可行种群；

模糊机会约束等价转换；计算个体双目标函数值，基于支配等级与拥挤距离计算标量适应度 f ，执行非支配排序；

更新外部档案集，按照上述档案维护流程利用拥挤距离维护档案规模；；锦标赛选择，区分连续变量与 0-1 变量执行自适应交叉、变异；精英保留策略；

判断是否达到最大迭代次数；未达到返回步骤 3；迭代终止后输出外部档案中的 Pareto 最优解集；

决策者可结合灾情，从多样性较好的解集中，权衡时效、成本、道路风险输出调拨方案。

4.2. 算例设置与结果分析

沿用某地级市洪涝应急调拨业务背景。储备库库存： $S_1 = 220$ ， $S_2 = 260$ ， $S_3 = 240$ (件)。

受灾社区模糊需求： j_1 : (80, 100, 120)； j_2 : (70, 90, 110)； j_3 : (90, 110, 130)； j_4 : (60, 80, 100)； j_5 : (75, 95, 115)。

运输成本、运输时间沿用之前业务测算数据；新增各路线道路通行可靠度 r_{ij} ，模拟洪涝下部分路线积水风险。设置中等灾情工况：置信水平 $\alpha = 0.7$ ，道路可靠度阈值 $r_0 = 0.7$ 。

算法参数：种群规模 80，最大迭代 150 代； $P_{c1} = 0.9$ ， $P_{c2} = 0.6$ ， $P_{m1} = 0.10$ ， $P_{m2} = 0.01$ ；外部档案规模 40。

评价指标说明：记录每一代 GD、HV、SP 指标，绘制 GD-迭代代数、HV-迭代代数变化曲线，动态反映解集收敛与分布特性。

- 1) GD (世代距离)：越小代表解集距离理论前沿越近，收敛效果越好。
- 2) SP (散布指标)：数值越小代表 Pareto 解集分布越均匀、多样性越好。
- 3) HV (超体积)：衡量 Pareto 前沿综合性能，HV 越大代表解集收敛与多样性综合表现越好。

① 算法性能对比

将标准遗传算法 SGA、仅自适应改进遗传算法 IGA1、本文引入外部档案完整改进算法 IGA2 三组对比。算法性能指标对比详见表 2。

结合迭代指标曲线分析：SGA 迭代后期 GD、HV 基本不再变化，存在早熟现象；IGA1 收敛有所改善，但缺少档案修剪，多样性提升有限；IGA2 的 GD 持续下降、HV 持续上升，约 61 代后指标趋于稳定，综合性能最优。IGA2 相比另外两组，收敛精度提升；SP 指标显著下降，证明 Pareto 解集分布均匀性、多样性得到明显改善，供应急人员挑选的备选方案数量更多。

Table 2. Comparison of algorithm performance indicators

表 2. 算法性能指标对比

算法	GD	SP	HV
SGA	0.217	0.742	0.426
IGA1	0.135	0.586	0.613
IGA2 (本文)	0.092	0.331	0.758

② 双维度敏感性分析

现有文献大多只做需求置信水平单因素分析，本文同时改变需求置信水平 α 、道路可靠度阈值 r_0 ，观察两个不确定性因素共同变化对调度结果的影响。双参数敏感性实验数据详见表 3。

Table 3. Two-parameter sensitivity experiment

表 3. 双参数敏感性实验表

工况	α	r_0	总调度成本(元)	最大配送完成时间(h)	启用路线数量
工况 1	0.5	0.6	10,227	2.3	11
工况 2	0.7	0.6	11,145	2.5	11
工况 3	0.9	0.6	12,038	2.7	11
工况 4	0.7	0.7	11,269	2.6	9
工况 5	0.7	0.8	11,884	2.9	7

从结果可以得到有现实价值的结论：

- 1) 保持道路阈值 r_0 不变，提升需求置信水平 α ，需要供给更多物资，成本、时间同步上升，和已有研究结论保持一致；
- 2) 固定置信水平 $\alpha = 0.7$ ，提高道路可靠度阈值 r_0 ，会筛除一批风险较高的运输路线，可用路线变少。可选择路径变少之后，只能选择距离更远、耗时更长的路线，带来总成本、最大配送时间同步上升，启用路线数量下降。
- 3) 现实应急场景启示：当暴雨持续加剧，一方面要提高物资保障置信水平避免物资短缺；另一方面要调高道路可靠度阈值，放弃积水严重的路线。但调高 r_0 会压缩可选路径空间，带来成本与时间代价，

指挥人员需要在物资保障、道路风险、经费时效三者之间做权衡，这也是本模型相比传统模型能够揭示的新规律。

如果忽略道路可靠度约束(传统模型)，会默认全部路线可用，得到的成本、时间结果会偏乐观，灾害实际发生之后，部分道路中断会造成方案不可执行。这说明在洪涝灾害调度研究中，路网不确定性不能简单忽略。

5. 结论与展望

针对城市洪涝灾害下物资需求模糊，同时伴随道路通行失效风险的现实问题，本文在传统需求模糊调度模型基础上，新增道路通行可靠度硬约束，构建兼顾时效、成本、路网风险的模糊混合整数多目标应急物资调度模型。针对求解算法早熟、Pareto 解集多样性不足的问题，区分连续与二进制变量改进自适应算子，完善编码、适应度计算及外部档案维护细节，引入外部档案策略维护非支配解。结合地级市应急调拨业务参数开展算例，引入 HV 指标，通过迭代指标曲线分析收敛特性，引入 GD、SP 多目标评价指标开展算法对比，并开展置信水平、道路可靠度双维度敏感性分析。

研究得到主要结论：(1) 本文改进算法在收敛精度、解集多样性上优于标准遗传算法与仅做自适应改进的版本，可以输出分布更均匀的 Pareto 解集，供应急决策者多方案对比；(2) 物资需求置信水平与道路通行可靠度阈值会共同影响最终调拨方案；提高道路可靠度阈值会筛除高风险路线，会推高调度的时间与经济成本，传统忽略路网不确定性的模型容易输出过于乐观、现实不可落地的方案；(3) 模型中的两个参数可以根据气象、险情通报动态调整，能够反映灾害演化过程中需求与路网的双重不确定性，更贴合洪涝灾害应急处置的真实决策环境。

研究仍然存在局限：本文依旧属于静态调度模型，路线可靠度是预设参数，没有实现道路可靠度随降雨时序动态更新；模型仅考虑公路运输。后续可以进一步构建时序驱动的动态滚动调度模型，引入多式联运，面向灾害演化全过程开展物资调度研究，具备良好实际应用前景。

参考文献

- [1] 刘宝碇, 赵瑞清. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
- [2] 郭子雪, 张强, 齐美然. 一类应急物资筹集问题的模糊机会约束模型[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(6): 749-752.
- [3] 范凤妹, 张俊容. 基于可信性理论的灾后初期救灾物资分配机会约束模型[J]. 数字技术与应用, 2014(1): 63-65.
- [4] 孙华丽, 王循庆, 薛耀锋. 应急定位-路径的模糊机会约束规划模型[J]. 统计与决策, 2012(7): 45-48.
- [5] 潘楠, 张淼寒, 张景程. 重大突发公共卫生事件下城市应急保障物资配送优化[J]. 运筹与管理, 2024, 33(9): 7-14.
- [6] 许叶军, 达庆利. 基于理想点的三角模糊数多指标决策法[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(9): 1469-1471.
- [7] 兰蓉, 范九伦. 三角模糊数上的完备度量及其在决策中的应用 [J]. 系统工程学报, 2010, 25(3): 313-319.
- [8] 张鹏, 黄梅雨, 彭璧玉. 具有机会约束的多阶段可信性 M-AD 投资组合优化[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2019, 51(3): 94-102.
- [9] 孟明强, 郝飞龙, 王志丽. 模糊机会约束数据包络分析模型及其应用[J]. 计算机工程与应用, 2014, 50(7): 116-120.
- [10] 逢金辉, 陈秋萍. 基于模糊机会约束的博弈联盟收益[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(11): 1383-1386.
- [11] 袁志远, 高杰, 杨才君. 基于支配强度的 NSGA-II 改进算法在分组问题中的应用[J]. 运筹与管理, 2022, 31(10): 127-132.