

基于 CI-TOPSIS 模糊多准则群策略的 应急物流网络级联失效抗毁性评估研究

朱佳翔 蔡建飞 江涛涛 林徐勋
(常州大学商学院,常州 213164)

摘要:针对突发事件下动态网络拓扑结构的评价问题,提出基于 CI-TOPSIS 模糊多准则群策略的应急物流网络级联失效抗毁性评估方法。首先,界定了突发事件下应急物流网络级联失效抗毁性,以及给出相应评估指标。其次,考虑多准则群策略中评价准则之间的相应依存性,给出基于 Choquet 积分与区间直觉模糊集的聚类算子。最后,构建基于 CI-TOPSIS 模糊多准则群策略的应急物流网络级联失效抗毁性评估模型,并以南京应急物流网络评估为实例进行仿真分析,验证了该方法的可行性。仿真分析同时表明,该方法更适用于突发事件下动态网络拓扑结构评估的决策实践,是一种非常有效的科学方法,可应用推广到其他更多决策领域。

关键词:应急物流网络;级联失效抗毁性;模糊多准则群策略;CI-TOPSIS

引言

网络级联失效抗毁性,是指网络中的节点或边遭遇自然性突发性事件或人为的蓄意攻击继而失效后,网络维持其基本功能的一种能力。近年来,各类突发事件频繁发生,严重影响社会安定与人民生命财产安全,提高突发事件下应急物流网络的级联失效抗毁性成为研究热点之一。

国外来说,Nagurney 等^[1]率先将复杂超网络理论应用于应急物流、供应链领域。随后许多学者开展了突发事件下应急物流网络拓扑结构相关的级联失效抗毁性方面研究,如 Yamada 等^[2]对应急运输网络进行改进以显著提升其网络效率与级联失效抗毁性。Liu^[3]对应急物流网络优化提出很多决策建议,并给出应急物流网络抗毁性及其超网络的均衡问题。Farahani 等^[4]对应急物流网络及其级联失效抗毁性进行研究,指出超网络方法可用于刻画应急物流复杂网络的竞争环境。国内关于应急物流网络级联失效抗毁性的文献较少,更多是关于静态运输网络与物流网络相关方面的研究。如李勇等^[5]提出了物流保障网络级联失效抗毁性模型。种鹏云等^[6]针对复杂网络的级联失效特性,构建危险品运输网络在遭遇恐怖袭击后的级联失效抗毁性模型。谢程等^[7]指出,应从复杂系统的可靠性等动态视角对应急运输网络的级联失效抗毁性进行评价。综上所述,国外学者大多是针对突发事件下的动态网络拓扑结构开展相关研究,针对静态网络拓扑结构开展的相关研究较少。反之,国内学者大多针对静态网络拓扑结构进行研究,突发事件下的动态网络拓扑结构相关方面的研究较少,与之相关的评价研究更少。

基于此,本文提出模糊多准则群策略与 CI-TOPSIS 相结合的方法,开展突发事件下的应急物流网络级联失效抗毁性相关的评价研究,提出的方法既适用于动态网络拓扑结构评价,又适用于静态网络拓扑结构评价。经典的 TOPSIS 法是一种逼近于理想解的排序法,常用于解决脆值理论中质量、性能的评价决策问题,是多准则决策分析中一种常用的有效方法。Hwang 和 Yoon^[8]结合 TOPSIS 方法,提出一套脆值环境下经典的多准则决策方法。然而,在突发事件下的动态环境中决策者的判断与偏好往往不能用具体的数值来估计,因此,脆值环境下的许多决策在动态救灾环境下是不可行的。而模糊集理论^[9]考虑了决策者的偏好与主观因素,为解决动态救灾环境下不确定多准则策略问题提供了一个很好的工具,可克服脆值环境下的许多缺陷。当前,有学者^[10-13]应用模糊 TOPSIS 法去解决动态救灾环境下的不确定多准则策略问题。如 Atanassov 和 Gargov^[14]提

收稿日期:2016-05-03

基金项目:国家社科基金重点项目(16AGL011);国家自然科学基金项目(71662011);现代服务业发展与治理研究基地项目。

作者简介:朱佳翔,常州大学商学院副教授,硕士生导师,博士;蔡建飞,常州大学商学院副教授,硕士生导师,硕士;江涛涛,常州大学商学院副教授,硕士生导师,硕士;林徐勋,常州大学商学院副教授,硕士生导师,博士。

出直觉模糊集以及区间直觉模糊集 (IVIFS) 概念, 论证直觉模糊集是一种解决不确定或不精确信息下决策的适用工具。近年来, 有学者^[15-18]将直觉模糊集扩展应用到模糊 TOPSIS。Atanassov^[19]定义了区间直觉模糊集的运算律。有学者^[20,21]给出不确定环境下一种新的基于区间直觉模糊集及 TOPSIS 的多准则策略。Xu^[22]界定了区间直觉模糊权重几何均值算子及区间直觉模糊权重排序几何均值算子。Wei^[23]应用几何聚类函数处理动态多属性决策问题。然而, 上述模糊聚类方法均假设决策者评价准则与主观偏好是相互独立的, 忽略了动态网络拓扑结构的评价中准则之间的相互依存性, 且容易引起决策过程中信息的遗漏, 在评价过程中有违客观、公正。

针对上述问题, 本文提出基于 Choquet 积分与区间直觉模糊集 (IVIFS) 的 TOPSIS 方法, 即基于 Choquet-IVIFS 的 TOPSIS 评价法 (为便于表述, 简称为 CI-TOPSIS), 兼顾了决策者评价准则与主观偏好的独立性。基于 CI-TOPSIS 模糊多准则群策略方法充分考虑准则之间的相应依存性, 克服了动态决策过程中信息遗漏以保持信息的完备性。通过南京应急物流网络评估的模拟仿真分析, 验证了该决策方法的可行性与实用性, 对于突发事件下改善应急物流网络拓扑结构, 加强应急物流网络的修复能力, 具有重要的参考意义。

问题描述

应急物流网络实际上是突发事件下进行救灾而形成的应急物资配送网络, 其特殊性体现在如下三个方面: (1) 应急物流网络源于交通运输网络的“筛选”, 是交通运输网络的一个子系统; (2) 突发事件下的应急物流网络的运输流量负担沉重且复杂, 其不但要承担运输应急物资的任务, 还承担救援受灾人员及其他应急抢险任务; (3) 突发事件下应急物资配送与人员救援过程中, 应急物流网络任一节点的失效均可导致整个网络的级联失效, 即在应急突发危机事件的冲击下应急物流网络级联失效抗毁性非常差。

在实际救援中, 应急物流网络不仅仅是单纯道路运输节点的组合, 而且还是由上、下两层的网络体系组成的系统, 上层为应急物资运输网络: $G=(V, E, W)$, 其中, V 是应急物资运输网络 G 的节点集合, 包括应急物资生产厂商、配送中心、仓储中心及道路交叉口等节点; 下层网络为运输道路网络: $G_T=(V_T, E_T)$, 其中, 道路交叉口节点集合记为 V_T , 运输道路网络边的集合记为 E_T 。

此外, 研究应急物流网络的级联失效抗毁性, 必须认真思索突发事件下诸多模糊不确定性因素的影响, 从网络拓扑结构及系统柔性视角, 构建应急物流网络模型及级联失效抗毁性评价指标体系, 在充分论证基于 CI-TOPSIS 模糊群策略的优势前提下展开对该问题的研究, 故作如下假设。

1、假设条件

(1) 假设突发事件下应急物流网络均为无向网络, 暂且不考虑它是有向网络。由于无向网络图能解决的问题都能用有向网络图表示, 但是无向网络图在对称的问题上往往更容易。因此, 简便起见, 本文将突发事件下的应急物流网络图用无向网络图表示, 暂且不作有向网络处理。

(2) 假设应急物流网络遭受剧烈承载流量冲击时, 由整个网络的所有节点平均分担运输网络的负载流量。

(3) 假定突发事件下的应急物流网络遭受冲击, 网络节点的自我修复能力极差, 需借助外部救援力量才能逐渐恢复, 且恢复的速度极慢。

2、应急物流网络级联失效模型

应急物流网络级联失效抗毁性的研究中, Motter 等人首先提出线性负载容量模型, 通过考察物流网络连通性的破坏程度来确定容量系数。参照文献[24]构建的应急物流网络负载容量模型为: $c(v_i) = \beta \cdot l(v_i)$, 其中, $c(v_i)$ 是应急物流网络节点 v_i 容量; β 为容量系数; $l(v_i)$ 为应急物流网络节点 v_i 初始负载。

命题一: 针对应急物流网络同时并存“正常”、“失效”“暂停”等状态的节点, 构建应急物流网络级联失效模型, 令运输道路网络 G_T 中存在应急物资配送网络 G , 节点 v_i 在突发事件下的运输负载量为 $l(v_i)$, 应急物资配送网络节点的容量为 $c(v_i)$, $i=1, 2, \dots, m$ 。给定 $c(v_i) = \alpha \cdot l(v_i^0)$, 其中, $l(v_i^0)$ 是应急物资配送网络节点的初始运输负载量。假定某时刻应急物资配送网络的某些节点失效, 可对网络节点承担的运输负载量进行平均分摊, 即 $l(v_i^0) = l(v_i) / d_i$, 其中, d_i 为应急物资配送网络上节点 v_i 的度。假定“暂停”状态的网络节点, 当恢复“正常”时, 将其剩余负载量分配给相邻节点。假定某个节点运输道路负载量超过其最大容量, 则该节点由

“正常”转为“暂停”状态,但若超过时间阈值(设定为 24 小时)则自动转化为“失效”节点。假定除失效节点外,应急物资配送网络上任意一个节点 v_i ,都存在 $l(v_i) \leq c(v_i)$,则突发事件、突发扰动等因素对应急物流网络的级联失效影响结束。

3、应急物流网络级联失效评估指标

参照文献[25],网络级联失效程度一般采用网络的抗毁性指标来表达。应急物流网络的抗毁性是指在模糊或随机不确定性环境下,应急物流网络服务功能得以恢复到一个可接受程度的能力。参照文献[24],给定应急物流网络抗毁性指标:正常运行节点数、节点存活率及相对二次级联失效数等三个指标。

(1) 正常运行节点数

遭受第一次冲击扰动情形下,应急物流网络仍然可以正常运行的节点数量 N_0 。

(2) 节点存活率

当应急物流网络遭受冲击扰动开始直到网络级联失效现象终止,网络中正常运行的节点个数占整个网络节点总量之比。表达式为: $F=N_0/N$, F 为应急物流网络节点存活率; N_0 为遭受第一次冲击扰动情形下,应急物流网络仍然可以正常运行的节点数量; N 为应急物流网络的节点总量。可以确定 F 的取值范围,本文假定 $F \leq 0.55$,应急物流网络处于瘫痪状态。

(3) 相对二次级联失效数

命题二:应急物流网络在初次冲击扰动情形下,一个节点 v_i 的失效从而导致另外一个节点 v_j 的失效,则称之为相对二次级联失效。当应急物流网络从遭受冲击扰动导致级联失效,再由失效转为功能恢复,将该过程中发生的二次级联失效次数之和称之为相对二次级联失效数 C_f 。给出的表达式为: $C_f = \sum_{i,j \in V} r_{ij}$,其中, r_{ij} 表示节点 v_i 是否是节点 v_j 的相对二次级联失效节点,如果是节点 v_j 的相对二次级联失效节点,则 r_{ij} 取值为 1,否则 r_{ij} 取值为 0。其中,网络功能恢复指的是包括上层网络中的应急物资生产厂商、配送中心、仓储中心及道路交叉口等网络节点的服务功能恢复到正常水平;下层网络中的运输道路网络也恢复到遭受冲击扰动之前的正常水平。

参照 Tan 等^[21]、种鹏云和帅斌^[24]、狄鹏等^[25],可构建 3 种情景对 C_f 值进行讨论。

情景一:某个节点遭受突发扰动冲击后引发级联失效,最终导致整个应急物流网络崩溃。这种情景下,相对级联失效数 C_f 值越大越好。因为此时 C_f 值越大,应急物流网络从正常到崩溃经历的“阶段”数也越多,延缓了网络崩溃的时间,因此,该情景下 C_f 值越大网络的级联失效抗毁性越好,反之,越小越差。

情景二:某个节点遭受突发扰动冲击后引发级联失效,但运输负载量经过重新分配后网络恢复正常。这种情景下,相对级联失效数 C_f 值越小越好。因为此时相对级联失效数 C_f 越小,应急物流网络从“暂停”到“正常”经过的“阶段”数也越少,以致应急网络恢复经历的时间较少,应急网络功能很快得到恢复,因此,该情景下 C_f 值越小,网络级联失效抗毁性越好,反之,越大越差。

情景三:某个节点遭受突发的扰动冲击后,应急物流网络没有出现级联失效现象,则此时 $C_f=0$ 。这是一种特殊的情景,在该情景下应急网络级联失效抗毁性极好,处于一种理想的状态。

基于 CI-TOPSIS 的模糊多准则群策略

1、区间直觉模糊集

定义 1 对于 $\mu: \mu: P(x) \rightarrow [0, 1]$, 论域 X 上的 ρ^- 的模糊隶属度测度公理须满足:(1) $\mu(\phi) = 0, \mu(x) = 1$; (2) $B \subseteq C, \mu(B) \leq \mu(C), B, C \subseteq X$; (3) $\mu(B \cup C) = \mu(B) + \mu(C) + \rho \mu(B) \mu(C), B, C \subseteq X, B \cap C = \phi, \rho \in (-1, +\infty)$ 。上述定义中,假定 $\rho=0$,则第三个条件降至该模糊测度公理的附加测度,即 $\mu(B \cup C) = \mu(B) + \mu(C), B, C \subseteq X, B \cap C = \phi$ 。 $\rho \neq 0$ 表明 ρ^- 的模糊隶属度 μ 是非附加测度, B, C 之间存在相关性。假定 $\rho > 0$ 时, $\mu(B \cup C) > \mu(B) + \mu(C)$,表明 ρ^- 的模糊隶属度 μ 是超附加测度; $\rho < 0$ 时, $\mu(B \cup C) < \mu(B) + \mu(C)$,则表明 ρ^- 的模糊隶属度 μ 是一个次生附加测度。如果 X 是有限集,则 $\bigcup_{i=1}^n x_i = X$,为避免计算复杂性,给出 X 集上 ρ^- 的模糊隶属度 μ 的计算公式,如式(1)所示。

$$\mu(X) = \mu\left(\bigcup_{i=1}^n x_i\right) = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \left\{ \prod_{i=1}^n [1 + \rho\mu(x_i) - 1] \right\}, & \text{当 } \rho \neq 0 \text{ 时;} \\ \sum_{i=1}^n \mu(x_i), & \rho = 0 \text{ 时。} \end{cases} \quad (1)$$

其中, $\mu(x_i)$ 为元素 x_i 一个子集上的模糊隶属度, 对于每个子集 $A \subset X$, 可得到式(2)。

$$\mu(A) = \begin{cases} \frac{1}{\rho} \left\{ \prod_{x_i \in A} [1 + \rho\mu(x_i) - 1] \right\}, & \text{当 } \rho \neq 0 \text{ 时;} \\ \sum_{x_i \in A} \mu(x_i), & \rho = 0 \text{ 时。} \end{cases} \quad (2)$$

根据式(1), ρ 的值由 $\mu(x) = 1$ 单独确定, 等价于求解式(3)。

$$\frac{1}{\rho} \left\{ \prod_{i=1}^n [1 + \rho\mu(x_i) - 1] \right\} = 1 \quad (3)$$

如果论域 X 上的集合 B 是独立的, 对于任意 $B \subset X$, 则有:

$$\mu(B) = \sum_{x_i \in B} \mu(x_i) \quad (4)$$

定义 2 区间直觉模糊集基本特征表现为: 隶属函数值及非隶属函数值并不是实际数值, 而是模糊数或区间值。在 $[0, 1]$ 区间上的模糊数可表示为 $Trap [0, 1]$, 其中, $m_1 \geq 0, m_4 \leq 1$ 。令 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是论域 X 上的映射, 则模糊集 A 的表达式为: $A = \{(x_i, t_A(x_i), f_A(x_i)) \mid x_i \in X\}$ 。当 $0 \leq \text{supt}_A(x_i) + \text{sup}f_A(x_i) \leq 1$ 时, $t_A: X \rightarrow Trap [0, 1], f_A: X \rightarrow trap [0, 1]$ 。区间直觉模糊数 $t_A(x_i), f_A(x_i)$ 分别表示集合 A 上元素 x_i 的隶属度与非隶属度。如两个区间梯形直觉模糊数 $(x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i})$ 和 $(x'_{1i}, x'_{2i}, x'_{3i}, x'_{4i})$, 且 $x_{4i} + x'_{4i} \leq 1$, 处在区间 $Trap [0, 1]$, 令 $t_A(x_i) = (x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}), f_A(x_i) = (x'_{1i}, x'_{2i}, x'_{3i}, x'_{4i})$, 则该区间梯形直觉模糊值为: $A = \{<x_i, ((x_{1i}, x_{2i}, x_{3i}, x_{4i}), (x'_{1i}, x'_{2i}, x'_{3i}, x'_{4i})) > \mid x_i \in X\}$ 。根据定义 1, 相应 $((1, 1, 1, 1), (0, 0, 0, 0))$, 及 $((0, 0, 0, 0), (1, 1, 1, 1))$ 表示最大区间梯形直觉模糊值及最小区间梯形直觉模糊值。

2、Choquet 积分

定义 3 区间直觉模糊数有梯形与三角等多种形式, 为便于描述, 本文均以区间梯形直觉模糊数为例进行表述。若 f 是论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 上正实数函数, μ 是 X 上 ρ^- 的模糊隶属度, f 与 μ 相关, 其离散 Choquet 积分可定义为: $C_\mu(f) = \sum_{i=1}^n f(x_{(i)}) [\mu(A_{(i)}) - \mu(A_{(i+1)})]$, 其中, (\cdot) 是论域 X 上区间梯形直觉模糊数的大小排序: $\bar{a}_{(1)} \leq \bar{a}_{(2)} \leq \dots \leq \bar{a}_{(n)}$, 也是 $A_{(i)} = ((i), \dots, (n)), A_{(n+1)} = \phi$ 等成立的置换条件。进而, 给出两个区间梯形直觉模糊数之间距离的 Choquet 积分定义如下。

定义 4 令 $\bar{a}_i = ((a_{1i}, a_{2i}, a_{3i}, a_{4i}), (a'_{1i}, a'_{2i}, a'_{3i}, a'_{4i})), \bar{b}_i = ((b_{1i}, b_{2i}, b_{3i}, b_{4i}), (b'_{1i}, b'_{2i}, b'_{3i}, b'_{4i}))$, 其中 $(i=1, 2, \dots, n)$ 为 X 上的两个区间梯形直觉模糊数集合, μ 是 X 上的 ρ^- 模糊隶属度, 令 $C(\bar{a}, \bar{b})$ 是基于 Choquet 积分的两个区间梯形直觉模糊数之间距离。给出 $C(\bar{a}, \bar{b})$ 的表达式: $C(\bar{a}, \bar{b}) = \sum_{i=1}^n d_{(i)}(\bar{a}, \bar{b}) (\mu(A_{(i)}) - \mu(A_{(i+1)}))$, 其中, $d_i(\bar{a}, \bar{b}) = l|a_{1i} - b_{1i}| + |a_{2i} - b_{2i}| + |a_{3i} - b_{3i}| + r|a_{4i} - b_{4i}| + l|a'_{1i} - b'_{1i}| + |a'_{2i} - b'_{2i}| + |a'_{3i} - b'_{3i}| + r|a'_{4i} - b'_{4i}|$, 则可计算出其距离并进行排序: $d_{(1)}(\bar{a}, \bar{b}) \leq d_{(2)}(\bar{a}, \bar{b}) \leq \dots \leq d_{(n)}(\bar{a}, \bar{b}), A_{(i)} = \{x_{(i)}, \dots, x_{(n)}\}, A_{(n+1)} = \phi$ 。

命题三: 假定应急物流网络级联失效抗毁性三个指标: N_0, F, C_f , 其中任一指标均可部分测度网络的级联失效抗毁性, 但为综合评估整个应急物流网络级联失效抗毁性, 须构建一个模糊多准则群策略评估模型, 并兼顾多准则间的相互依存性及决策者主观偏好。令 $E = \{e_1, e_2, \dots, e_r\}$ 是应急物流网络级联失效评估、决策过程中涉及的专家集; $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$ 是所涉及的方案集; $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$ 是所涉及的指标集。以 Choquet 积分与区间直觉模糊集为基础, 给出基于 Choquet 积分与区间直觉模糊集 (IVIFS) 的 TOPSIS 方法, 称之为基于 CI-TOPSIS 的模糊群策略评估方法。

3、基于 CI-TOPSIS 区间直觉模糊多准则群策略

基于 CI-TOPSIS 的模糊多准则群策略评估算法步骤给定如下:

步骤 1. 基于突发的冲击扰动情景, 给出应急物流网络级联失效抗毁性评估方案集: $a_i = \{i = 1, 2, \dots, m\}$, 给定评估专家集: $e_k (k = 1, 2, \dots, r)$ 。给定评估准则集: $c_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 。专家个人主观偏好可由给定的区间直觉模糊数: $\tilde{a}_{ij}^k = ((a_{1ij}^k, a_{2ij}^k, a_{3ij}^k, a_{4ij}^k), (a'_{1ij}, a'_{2ij}, a'_{3ij}, a'_{4ij}))$, $(i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, r)$ 来表达。其中, $(a_{1ij}^k, a_{2ij}^k, a_{3ij}^k, a_{4ij}^k)$ 表示专家 e_k 认定应急物流网络级联失效抗毁性可选方案 a_i 满足准则 c_j 的不确定程度; $(a'_{1ij}, a'_{2ij}, a'_{3ij}, a'_{4ij})$ 表示专家 e_k 认定可选方案 a_i 不满足准则 c_j 的不确定程度。进而, 给出应急物流网络级

$$\text{联失效抗毁性评估决策矩阵为: } R^k = \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11}^k & \tilde{a}_{12}^k & \dots & \tilde{a}_{1n}^k \\ \tilde{a}_{21}^k & \tilde{a}_{22}^k & \dots & \tilde{a}_{2n}^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{a}_{m1}^k & \tilde{a}_{m2}^k & \dots & \tilde{a}_{mn}^k \end{bmatrix}。$$

步骤 2. 给出专家对各方案评估的模糊隶属度函数: $\mu_i = \mu(e_i)$, 进一步根据式(3) 确定每个专家的评估参数 ρ_1 。

步骤 3. 根据定义 2 与定义 3, 给出各专家主观偏好 \tilde{a}_{ij}^k 的排序: $\tilde{a}_{ij}^k \leq \tilde{a}_{ij}^{k+1}$ 。进而, 给出基于 Choquet-IVIFS 的算子, 即 CI 算子。

$$\begin{aligned} \tilde{a}_{ij} &= GTFGA_{\mu}(\tilde{a}_{ij}^1, \tilde{a}_{ij}^2, \dots, \tilde{a}_{ij}^r) = \left(\left(\prod_{k=1}^r (a_{1ij}^{(k)}) \right)^{\mu(A_{(k)}) - A_{(k+1)}}, \right. \\ &\quad \left. \prod_{k=1}^r (a_{2ij}^{(k)}) \right)^{\mu(A_{(k)}) - A_{(k+1)}}, \left(\prod_{k=1}^r (a_{3ij}^{(k)}) \right)^{\mu(A_{(k)}) - A_{(k+1)}}, \left(\prod_{k=1}^r (a_{4ij}^{(k)}) \right)^{\mu(A_{(k)}) - A_{(k+1)}}, \\ &\quad \left(1 - \prod_{k=1}^r (1 - (a'_{1ij})^{\mu(A_{(k)}) - A_{(k+1)})}, 1 - \prod_{k=1}^r (1 - (a'_{2ij})^{\mu(A_{(k)}) - A_{(k+1)})}, \right. \\ &\quad \left. 1 - \prod_{k=1}^r (1 - (a'_{3ij})^{\mu(A_{(k)}) - A_{(k+1)})}, 1 - \prod_{k=1}^r (1 - (a'_{4ij})^{\mu(A_{(k)}) - A_{(k+1)})} \right) \end{aligned}$$

进而, 对模糊决策矩阵 $R^k = (\tilde{a}_{ij}^k)_{m \times n} (k = 1, 2, \dots, r)$ 进行聚类分析, 给出其复杂形式的直觉模糊决策矩阵表达式: $R^k = (\tilde{a}_{ij}^k)_{m \times n}$ 。其中, $\tilde{a}_{ij}^k = ((a_{1ij}, a_{2ij}, a_{3ij}, a_{4ij}), (a'_{1ij}, a'_{2ij}, a'_{3ij}, a'_{4ij})) (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n)$, $A_{(k)} = (e_{(k)}, \dots, e_{(r)})$, $A_{(r+1)} = \emptyset$, 再进一步通过式(2) 计算出 R^k 。

步骤 4. 令 J_1 是应急物流网络节点连通性准则集合(即 c_j 越大网络越好), J_2 是应急物流网络节点级联失效准则集合(即 c_j 越小网络越差)。给出区间直觉模糊正理想解 $\tilde{\alpha}^+$ 与负理想解 $\tilde{\alpha}^-$ 的表达式。

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}^+ &= (((\max_i a_{1ij}, \max_i a_{2ij}, \max_i a_{3ij}, \max_i a_{4ij}) | j \in J_1, (\min_i a_{1ij}, \min_i a_{2ij}, \min_i a_{3ij}, \min_i a_{4ij}) | j \in J_2), ((\min_i a_{1ij}, \min_i a_{2ij}, \\ &\quad \min_i a_{3ij}, \min_i a_{4ij}) | j \in J_1), (\max_i a_{1ij}, \max_i a_{2ij}, \max_i a_{3ij}, \max_i a_{4ij}) |)。其中, $i = 1, 2, \dots, m$; $\tilde{\alpha}^+ = (\tilde{\alpha}_1^+ \tilde{\alpha}_2^+ \dots \tilde{\alpha}_n^+)$ 。 $\tilde{\alpha}_j^- = ((\alpha_{1j}, \alpha_{2j}, \alpha_{3j}, \alpha_{4j}), (\alpha'_{1j}, \alpha'_{2j}, \alpha'_{3j}, \alpha'_{4j})) (j = 1, 2, \dots, n)$ 。评估方案 $a_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 可用变量形式进行表述, 即 $x_i = (\tilde{a}_{i1}, \tilde{a}_{i2}, \dots, \tilde{a}_{in})$ 。$$

步骤 5. 确定每个网络失效抗毁性评估准则的模糊隶属度 $\mu_i = \mu(c_i)$, 再根据式(3) 确定相关参数 ρ_2 。

步骤 6. 根据基于距离的 Choquet 积分, 分别计算变量 x_i 与区间直觉模糊正负理想的解 $\tilde{\alpha}^+, \tilde{\alpha}^-$ 之间的距离, 如式(5) 所示:

$$d_i(x_i, \tilde{\alpha}^+) = \sum_{j=1}^n d_{i(j)}(\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\alpha}_j^+) (\mu(A_{(j)}) - \mu(A_{(j+1)})) \tag{5}$$

其中, $d_{i(j)}(\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\alpha}_j^+) = |\alpha_{1j} - \alpha_{1ij}| + |\alpha_{2j} - \alpha_{2ij}| + |\alpha_{3j} - \alpha_{3ij}| + |\alpha_{4j} - \alpha_{4ij}| + | \alpha'_{1j} - \alpha'_{1ij} | + | \alpha'_{2j} - \alpha'_{2ij} | + | \alpha'_{3j} - \alpha'_{3ij} | + | \alpha'_{4j} - \alpha'_{4ij} |$ 。可推导出区间直觉模糊正负理想的

解 $\tilde{\alpha}^+, \tilde{\alpha}^-$ 之间距离的排序:

$d_{i(1)}(\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\alpha}_j^-) \leq d_{i(2)}(\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\alpha}_j^-) \leq \dots \leq d_{i(n)}(\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\alpha}_j^-)$, $A_{(j)} = \{c_{(j)}, \dots, c_{(n)}\}$, $A_{(n+1)} = \emptyset$, 根据式(2) 则推导出式(6)。

$$d_i(x_i, \tilde{\alpha}_j^-) = \sum_{j=1}^n d_{i(j)}(\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\alpha}_j^-) (\mu(A_{(j)}) - \mu(A_{(j+1)})) \quad (6)$$

其中, $d_{i(j)}(\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\alpha}_j^-) = |\alpha_{1j} - \alpha'_{1j}| + |\alpha_{2j} - \alpha'_{2j}| + |\alpha_{3j} - \alpha'_{3j}| + |\alpha_{4j} - \alpha'_{4j}| + |\alpha'_{1j} - \alpha'_{1j}| + |\alpha'_{2j} - \alpha'_{2j}| + |\alpha'_{3j} - \alpha'_{3j}| + |\alpha'_{4j} - \alpha'_{4j}|$, 则可推导出式(7)。通过式(2)则可

计算得到: $d_{i(1)}(\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\alpha}_j^-) \leq d_{i(2)}(\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\alpha}_j^-) \leq \dots \leq d_{i(n)}(\tilde{\alpha}_{ij}, \tilde{\alpha}_j^-)$, $A_{(j)} = \{c_{(j)}, \dots, c_{(n)}\}$, $A_{(n+1)} = \emptyset$ 。

步骤 7. 计算各可选方案评估变量的接近度系数:

$$r(x_i) = \frac{d_i(x_i, \tilde{\alpha}^-)}{d_i(x_i, \tilde{\alpha}^+) + d_i(x_i, \tilde{\alpha}^-)}, i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

步骤 8. 根据接近度系数 $r(x_i)$ 对所有可选评估方案 a_i 进行排序, $r(x_i)$ 的值越大, 应急物流网络级联失效抗毁性评估方案 a_i 越好。其中, 关于应急物流网络级联失效抗毁性指标 N_0, F, C_f , 通过上述基于 CI-TOPSIS 群策略评估方法, 已充分融合在梯形直觉模糊正负理想的解 $\tilde{\alpha}^+, \tilde{\alpha}^-$ 信息之中, 充分保留评价过程中信息的完备性, 不会导致信息的遗漏与遗失。

仿真实例分析

1、仿真场景构建

在突发事件下的实际救援中, 应急物流网络不仅仅是单纯的道路运输节点的组合, 而且还是由上、下两层的网络体系组成的系统, 本文以南京市运输道路网络为背景, 作为应急物流网络双层模型的下层网络, 具体包括 25 个节点, 39 个路段。为便于评估, 又将南京运输道路网络分成 5 个子网络: A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 , 进行级联失效抗毁性评估的仿真分析, 测度如下三种情景下应急物流网络级联失效抗毁性的影响, L_1 : 不同冲击扰动次数; L_2 : 不同节点的容量系数及度; L_3 : 不同优化方式。首先, 参照南京物流网络实际相关数据, 决策者在突发救灾环境下, 给出的模糊决策矩阵为: R_1, R_2, R_3 , 分别列示在表 1、表 2 和表 3 中。此次, 假定应急物流网络容量系数为 $\beta = 1.2$, 失效节点数虽然存在模糊不确定性, 但可控制在 5 个以下。假定评估专家集为: e_1, e_2, e_3 。

表 1 决策矩阵 R_1

应急物流网络抗毁性	准则		
	正常运行节点数	节点存活率	相对二次级联失效数
A_1	[0.4, 0.45, 0.45, 0.5]	[0.3, 0.35, 0.35, 0.4]	[0.4, 0.45, 0.55, 0.6]
A_2	[0.6, 0.65, 0.65, 0.7]	[0.2, 0.25, 0.25, 0.3]	[0.6, 0.65, 0.65, 0.7]
A_3	[0.6, 0.65, 0.65, 0.7]	[0.1, 0.15, 0.15, 0.2]	[0.6, 0.65, 0.65, 0.6]
A_4	[0.3, 0.35, 0.35, 0.7]	[0.2, 0.25, 0.25, 0.3]	[0.6, 0.65, 0.65, 0.7]
A_5	[0.7, 0.75, 0.75, 0.8]	[0.1, 0.15, 0.15, 0.2]	[0.3, 0.35, 0.35, 0.5]

表 2 决策矩阵 R_2

应急物流网络抗毁性	准则		
	正常运行节点数	节点存活率	相对二次级联失效数
A_1	[0.3, 0.35, 0.35, 0.4]	[0.4, 0.45, 0.45, 0.5]	[0.5, 0.55, 0.55, 0.6]
A_2	[0.3, 0.45, 0.45, 0.5]	[0.2, 0.25, 0.25, 0.4]	[0.5, 0.65, 0.65, 0.7]
A_3	[0.6, 0.65, 0.65, 0.7]	[0.1, 0.15, 0.15, 0.2]	[0.3, 0.45, 0.45, 0.6]
A_4	[0.1, 0.35, 0.35, 0.3]	[0.3, 0.45, 0.45, 0.5]	[0.6, 0.65, 0.65, 0.8]
A_5	[0.4, 0.45, 0.45, 0.5]	[0.2, 0.15, 0.15, 0.4]	[0.4, 0.35, 0.35, 0.6]

表 3 决策矩阵 R_3

应急物流网络抗毁性	准则		
	正常运行节点数	节点存活率	相对二次级联失效数
A_1	[0.2, 0.45, 0.45, 0.4]	[0.3, 0.35, 0.35, 0.6]	[0.4, 0.45, 0.45, 0.5]
A_2	[0.2, 0.35, 0.35, 0.6]	[0.2, 0.25, 0.25, 0.4]	[0.3, 0.45, 0.45, 0.6]
A_3	[0.5, 0.55, 0.55, 0.6]	[0.3, 0.35, 0.35, 0.5]	[0.7, 0.75, 0.75, 0.8]
A_4	[0.3, 0.35, 0.35, 0.6]	[0.2, 0.25, 0.25, 0.7]	[0.5, 0.65, 0.65, 0.6]
A_5	[0.5, 0.75, 0.75, 0.6]	[0.2, 0.15, 0.15, 0.3]	[0.3, 0.35, 0.35, 0.4]

2、计算结果

(1) 根据给定的模糊隶属度函数,确定各个专家主观偏好的模糊隶属度及相关评估参数 ρ 。可得到:
 $\mu(e_1) = \mu(e_2) = \mu(e_3) = 0.4, \rho_1 = -0.46$, 根据式(2)得到: $\mu(e_1, e_2) = \mu(e_1, e_3) = \mu(e_2, e_3) = 0.72, \mu(e_1, e_2, e_3) = 1$ 。

根据定义2与定义3,若 $\tilde{\alpha}_{ij}^k$ 满足 $\tilde{\alpha}_{ij}^k \leq \tilde{\alpha}_{ij}^{(k+1)}$, 将模糊矩阵 $R^k = (\tilde{a}_{ij})_{m \times n} (k=1, 2, 3)$ 聚类成复杂的直觉模糊矩阵 $R = (\tilde{a}_{ij})_{m \times n}$ 。进一步将评估方案 a_i , 设定为变量: $x_i = (\tilde{a}_{i1} \tilde{a}_{i2} \tilde{a}_{i3} \tilde{a}_{i4})$ 。由于 $((1, 1, 1, 1), (0, 0, 0, 0))$ 及 $((0, 0, 0, 0), (1, 1, 1, 1))$ 分别是最大和最小的梯形直觉模糊数, 则进一步给出成本矩阵 c_1, c_4 的区间直觉模糊正理想解 $\tilde{\alpha}^+$ 与负理想解 $\tilde{\alpha}^-$, 以及效益矩阵 c_2, c_3 。

$$\tilde{\alpha}^+ = (((0, 0, 0, 0), (1, 1, 1, 1)) ((1, 1, 1, 1), (0, 0, 0, 0)) ((1, 1, 1, 1), (0, 0, 0, 0)) ((0, 0, 0, 0), (1, 1, 1, 1)))$$

$$\tilde{\alpha}^- = (((1, 1, 1, 1), (0, 0, 0, 0)) ((0, 0, 0, 0), (1, 1, 1, 1)) ((0, 0, 0, 0), (1, 1, 1, 1)) ((1, 1, 1, 1), (0, 0, 0, 0)))$$

(2) 确定直觉模糊矩阵的模糊隶属度及相关参数。设定: $\mu(c_1) = 0.45, \mu(c_2) = 0.30, \mu(c_3) = 0.35, \mu(c_4) = 0.25$ 。根据式(3)可确定: $\rho_2 = -0.46$, 根据式(2)可确定: $\mu(c_1, c_2) = 0.55, \mu(c_1, c_3) = 0.75, \mu(c_1, c_4) = 0.55, \mu(c_2, c_3) = 0.65, \mu(c_2, c_4) = 0.48, \mu(c_3, c_4) = 0.57, \mu(c_1, c_2, c_3) = 0.87, \mu(c_1, c_2, c_4) = 0.79, \mu(c_2, c_3, c_4) = 0.71, \mu(c_1, c_3, c_4) = 0.82, \mu(c_1, c_2, c_3, c_4) = 1$ 。

(3) 根据式(6)可计算出:

$$d_1(x_1, \tilde{\alpha}^+) = 3.1517, d_1(x_1, \tilde{\alpha}^-) = 3.062, d_2(x_2, \tilde{\alpha}^+) = 3.3803, d_2(x_2, \tilde{\alpha}^-) = 3.1619,$$

$$d_3(x_3, \tilde{\alpha}^+) = 2.8816, d_3(x_3, \tilde{\alpha}^-) = 2.153, d_4(x_4, \tilde{\alpha}^+) = 3.2634, d_4(x_4, \tilde{\alpha}^-) = 3.1339,$$

$$d_5(x_5, \tilde{\alpha}^+) = 3.4837, d_5(x_5, \tilde{\alpha}^-) = 3.2522。$$

(4) 根据式(7), 可计算出南京应急物流网络各个子网络的接近度系数为: $r(x_1) = 0.5135, r(x_2) = 0.4939, r(x_3) = 0.5581, r(x_4) = 0.4988, r(x_5) = 0.4836$ 。再根据接近度系数对所有应急物流子网络进行评估, 应急物流子网络接近度系数的排序如下: $\alpha_3 > \alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_4 > \alpha_5$, 则最理想的应急物流子网络应该是 A_3 。还需进行可靠性分析与仿真实验, 以及探讨随机扰动次数与容量系数对应急物流网络级联失效抗毁性的影响, 进一步验证该模糊多准则群策略评估方法的科学性与实用性。

3、可靠性分析

应急物流网络抗扰动冲击的可靠性分析: 由于应急物流网络系统是个复杂的超网络系统, 在进行模拟仿真之前必须对相关参数的设定进行可靠性检验。应急物流网络在突发事件扰动冲击下的可靠性, 即随着扰动冲击次数的增多以及容量系数及节点度等相关参数的变化而表现出的鲁棒性。假定应急物流网络在扰动冲击下, $c(v_i), \beta, N_0, F, C_f$ 等相关参数的可靠性取决于步长 l , 适当的步长可采用收缩加扩张的寻优步骤得到。

步长表达式给定: $l_j = 2.5 \sqrt{\sum_{i=1}^n (\beta_{ij} - \bar{\beta}_j)^2 / n} (j=1, 2, \dots, m; i=1, 2, \dots, n)$, 其中 j 为上述模型中 m 个参数之一, n 为上一寻优渡点数量。可靠性检验的临界值 D 的大小可由式(8)反馈调节。

$$D^{(k)} = D^{(k-1)} \exp\left(-\frac{2(n - n_e)}{n_e}\right) \quad (8)$$

其中 n_e 是期待的渡点数量, 一般约为最优解搜索空间所有有效步点数的 $1/3$ 。通过反馈调节后进行 20-500 次迭代试验, 计算出残差 RSS 进行数据拟合检验, 可验证模型的可靠性。

基于 CI-TOPSIS 模糊多准则群策略的应急物流网络级联失效抗毁性评价模型的可靠性检验结果, 如表 4 所示。可靠性检验表明: RSS 值和上述已经设定的参数计算结果基本吻合。同时也清楚表明: 基于 CI-TOPSIS 模糊多准则群策略的应急物流网络级联失效抗毁性评价模型达到全局最优。

分别迭代 20、50、100、500 次, 参数拟合的 RSS 值都很小, 说明参数拟合度较高, 应急物流网络抗扰动冲击的可靠性通过检验。在可靠性分析的基础上, 再讨论随机扰动次数对应急物流网络级联失效影响, 以及容量系数对应急物流网络级联失效影响。

表 4 可靠性检验结果

扰动冲击次数	$\tilde{c}(v_i)$	β	\tilde{N}_0	\tilde{F}	\tilde{C}_f	RSS
20	2.3724e+0	5.4167e-8	-5.552e-3	-	-	3.6842e+0
50	2.4561e+0	5.6136e-9	-5.553e-2	-	-	3.6718e+0
100	3.5322e-1	1.6514e+0	1.3429e+0	1.1852e-2	2.1239e-2	5.2957e-5
500	3.87548e-1	1.8762e+0	1.3455e+0	1.16532e-2	2.2268e-2	5.4578e-5

4、仿真讨论

以南京应急物流网络为例进行“过程”与“结果”的仿真实验,仿真讨论如下。

(1)随机扰动次数对应急物流网络级联失效影响。通过随机扰动实验发现,随着冲击扰动次数的增加, A_1 - A_5 等5个子网络的节点存活率都呈现下降趋势,如图1所示。当随机扰动次数小于10时,节点存活率下降的越快,但在大于10次之后,出现了分化,究其原因:到超过一定的扰动次数情形下,如果节点为相邻,则可部分疏散到对方节点,以致减轻应急物流网络失效压力,故出现了分化现象。此外,发现分化的原因,是由于冲击扰动的网络节点大多是相邻网络,因此,可以通过对道路网络节点的调整,增强应急物流网络的级联失效抗毁性。

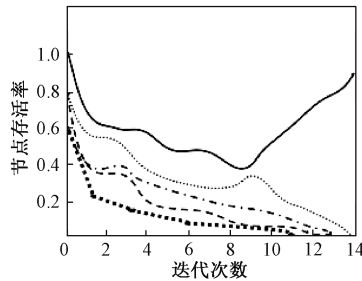


图 1 随机扰动次数对节点存活率的影响

(2)容量系数对应急物流网络级联失效影响。容量系数对应急物流网络的影响,主要体现在运输道路网络的疏散能力,通过仿真实验,发现:随着容量系数的调整,节点存活率出现分化的走势。如图2所示,当容量系数 $\beta=1.2$ 时,对应急物流网络进行了四次实验,发现:随着随机扰动次数增加而进行多次迭代,节点存活率随之下降,若加大应急物流网络节点的度,则下降的速率更快,最终的存活率均为0;如图3所示,当容量系数为 $\beta=1.4$ 时,应急物流网络的节点存活率出现先下降后上升的趋势,若增大应急物流网络节点的度,则曲线下下降的速率大于其上升的速率;如图4所示,当容量系数为 $\beta=1.6$ 时,应急物流网络的节点存活率恒为1。如图5所示,随着网络节点的度越大,相对二次级联失效数量越小。

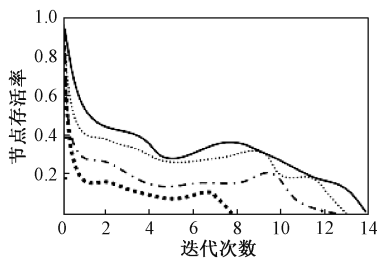
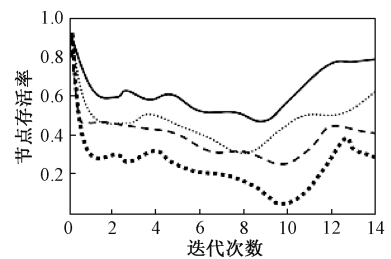
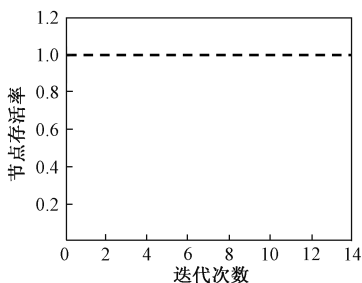
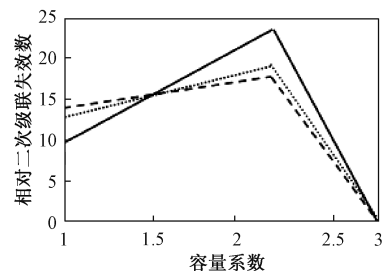
图 2 容量系数对节点存活率的影响($\beta=1.2$)图 3 容量系数对节点存活率的影响($\beta=1.4$)图 4 容量系数对节点存活率的影响($\beta=1.6$)

图 5 节点的度对节点存活率的影响

通过上述实验发现,扰动冲击下应急物流网络级联失效的节点数量 N_0 的增加,节点存活率曲线下落的也越快,级联失效抗毁性也越低。实验中还发现,当其中一个或多个节点收到扰动冲击,则可疏散到相邻的其余节点,以致网络级联失效的抗毁性要高于不相邻的情形。此外,随着节点度的增大,应急物流网络的集成性与复杂性也会提高,当某一节点失效,则会迅速传播到其他节点,故应急物流网络的级联失效抗毁性也越低。

结论与启示

本文提出了基于 CI-TOPSIS 的应急物流网络级联失效抗毁性模糊多准则群策略评估方法,充分保留决策过程中信息的完备性,不会导致信息遗漏,在突发事件下应急物流网络拓扑结构的评价决策实践中非常有效,可应用推广到其他更多决策领域。此外,本文给出应急物流网络级联失效抗毁性及节点存活率等相关概念,充分考虑模糊多准则之间的相应依存性,并以南京应急物流网络为实例进行仿真分析,充分验证该群策略评估方法不仅适用于应急物流网络级联失效抗毁性评估,也适用于普通的静态物流网络,是一种非常科学与实用的方法。此外,通过南京应急物流网络失效的“过程”与“结果”仿真实验,可得到如下结论:(1)随机扰动次数小于10时,节点存活率下降的越快,但在大于10次之后,出现了分化现象。可以通过对道路网络节点的调整,增强应急物流网络的级联失效抗毁性。(2)随着容量系数的调整,节点存活率出现分化的走势。(3)随着网络节点的度越大,相对二次级联失效数量越小。(4)扰动冲击下应急物流网络级联失效的节点数量增加,节点存活率曲线下落也越快,级联失效抗毁性也越低。上述结论说明,应急物流网络节点容量系数比普通物流网络的容量系数要高很多,且在实际救灾环境下,应急物流网络系统中的每个容量系数在突发事件下的模糊环境中并不完全相同,而且容量系数与交通负载之间呈现出一种非线性关系。文中的许多假设也是在理想环境下设定,在现实应急救援中并不一定实现,因此,采用不同的网络负载容量模型以及构建不确定环境下的级联失效情景决策,将是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] Nagrney A., Dong J., Zhang D. A Supply Chain Network Equilibrium Model[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2002,38(5):281-303
- [2] Yamada T., Imai K., Nakamya T. A Supply Chain Transport Super Net Work Equilibrium Model with the Behavior of Freight Carriers[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2011,47(6):887-907
- [3] Liu Z. A Supply Chain Networks with Global Outsourcing and Quick-response Production under Demand and Cost Uncertainly[J]. Annals of Operations Research, 2013,208(1):251-289
- [4] Farahani R. Z., Rezapour S., Drezner T., et al. Competitive Supply Chain Network Design: An Overview of Classifications, Models, Solution Techniques and Applications[J]. Omega, 2014,45(2):92-118
- [5] 李勇,谭跃进,吴俊. 基于任务时间约束的物流保障网络级联失效抗毁性建模与分析[J]. 系统工程, 2009,27(5):7-12
- [6] 种鹏云,帅斌,陈钢铁. 恐怖袭击下危险品运输网络级联失效抗毁性建模与仿真[J]. 计算机应用研究, 2013,30(1):107-110
- [7] 谢丰程,苏琦,陈冬青,等. 基于级联失效的复杂网络抗毁性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011,51(10):1251-1257
- [8] Hwang C. L., Yoon K. Multiple Attributes Decision Making Methods and Applications[M]. Berlin: Springer Press, 1981
- [9] Zadeh L. A Fuzzy Sets[J]. Control, 1965,22(8):338-356
- [10] 林宏伟,邵培基. 基于混合多属性决策的网络广告投放媒体的评价与应用[J]. 管理评论, 2012,24(12):53-63
- [11] 任静. 提高多指标决策客观性的赋权方法[J]. 管理评论, 2012,24(5):160-169
- [12] 裴植,鲁建厦,郑力. 广义区间值直觉模糊数及其在工位评估中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2012,32(10):2198-2206
- [13] 刘政敏,刘培德,金芳. 基于直觉语言数集成算子的多属性群决策方法研究[J]. 管理评论, 2014,11(26):39-47
- [14] Atanassov K., Gargov G. Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. Fuzzy Sets Syst, 1989,31(3):343-349
- [15] Liu P. D. Some Generalized Dependent Aggregation Operators with Intuitionistic Linguistic Numbers and Their Application to Group Decision Making[J]. Journal of Computer and System Sciences, 2013,79(1):131-143
- [16] Liu P. D., Wang Y. M. Multiple Attribute Group Decision Making Methods Based on Intuitionistic Linguistic Power Generalized Aggregation Operators[J]. Applied Soft Computing, 2014,17(1):90-104
- [17] 周文坤,王成付. 供应链融资模式下中小企业信用风险评估研究——基于左右得分的模糊 TOPSIS 算法[J]. 运筹与管

- 理, 2015, 24(1):209-215
- [18] 徐洋, 于丽英, 林晨艳. 基于改进的 α 截集模糊 TOPSIS 的高校公共危机预警分级[J]. 上海大学学报(自然科学), 2016, 8(12):19-26
- [19] Atanassov K. Operators Over Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. Fuzzy Sets Syst, 1994, 64(2):159-174
- [20] Tan C., Zhang Q. Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Based on Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Sets[J]. Man and Cybernetics, 2006, 10(2):1404-1407
- [21] Tan C. A Multi-Criteria Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Group Decision Making with Choquet Integral-Based TOPSIS[J]. Expert Syst. Appl, 2011, 38(11):3023-3033
- [22] Xu Z. S. Methods for Aggregating Interval-Valued Intuitionistic Fuzzy Information and Their Application to Decision Making[J]. Control and Decision, 2007, 22(2):215-219
- [23] Wei G. W. Some Geometric Aggregation Functions and Their Application to Dynamic Multiple Attribute Decision Making in the Intuitionistic Fuzzy Setting[J]. International Journal of Uncertainty Fuzziness Sys, 2009, 17(2):179-196
- [24] 种鹏云, 帅斌. 连环恐怖袭击下危险品运输网络级联失效建模[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(4):1059-1065
- [25] 狄鹏, 胡涛, 胡斌, 等. 基于复杂网络的作战网络模型抗毁性研究[J]. 系统仿真学报, 2011, 23(1):56-59

Study on the Evaluation of Emergency Logistics Network Cascading Failure Invulnerability Based on CI-TOPSIS Fuzzy Multi Criteria Group Decision Making Tactics

Zhu Jiexiang, Cai Jianfei, Jiang Taotao and Lin Xuxun
(Commercial College, Changzhou University, Changzhou 213164)

Abstract: An evaluation method based on CI-TOPSIS fuzzy multi-criteria group strategy is proposed to assess the cascading failure invulnerability of emergency logistics network in order to evaluate the dynamic network topology under emergent events. Firstly, the definitions of emergency logistics network cascading failure invulnerability and its evaluation indexes are given. Secondly, the clustering operator based on Choquet integral and interval-valued intuitionistic fuzzy set is given considering the interdependence of evaluation criteria in multi-criteria group strategy. Finally, the evaluation model to assess the cascading failure invulnerability of emergency logistics network based on CI-TOPSIS fuzzy multi-criteria group strategy is constructed, and the feasibility of this method is verified by the simulation analysis of Nanjing emergency logistics network evaluation. The simulation results show that the proposed method is more suitable for decision-making of dynamic network topology under sudden events. It is a very effective scientific method and can be applied to other decision-making fields.

Key words: emergency logistics network, cascading failure invulnerability, fuzzy multi-criteria group strategy, CI-TOPSIS