



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

# 控制与决策

CONTROL AND DECISION



## 跨界融合供应链网络风险传播建模及抗毁性研究

周欢, 郭红洁, 王坚强, 刘嘉

引用本文:

周欢, 郭红洁, 王坚强, 刘嘉. 跨界融合供应链网络风险传播建模及抗毁性研究[J]. 控制与决策, 2024, 39(9): 3126–3134.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2023.0491>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 风险规避制造商市场入侵策略

Market encroachment strategy of risk-averse manufacturer

控制与决策. 2021, 36(10): 2528–2536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1819>

#### 模糊环境下考虑零售商风险偏好的绿色供应链博弈模型

Modeling green supply chain games considering retailer's risk preference in fuzzy environment

控制与决策. 2021, 36(3): 711–723 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0646>

#### 平台品牌赋能情境下考虑信息不对称的供应链渠道冲突

Supply chain channel conflicts considering asymmetric information under platform brand empowerment

控制与决策. 2021, 36(9): 2123–2132 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0098>

#### PI补充策略下供应链牛鞭效应的 $H_{\infty}$ 控制

Reducing bullwhip effect in supply chain with PI replenishment rule via  $H_{\infty}$  control

控制与决策. 2021, 36(11): 2817–2824 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0441>

#### 双层相依网络化指挥信息系统级联失效研究

Cascading failure of double layer networked command information system

控制与决策. 2020, 35(12): 3017–3025 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0696>

# 跨界融合供应链网络风险传播建模及抗毁性研究

周欢<sup>1</sup>, 郭红洁<sup>1</sup>, 王坚强<sup>2†</sup>, 刘嘉<sup>1</sup>

(1. 湖南工业大学 商学院, 湖南 株洲 412007; 2. 中南大学 商学院, 长沙 410083)

**摘要:** 跨区域、跨行业、跨组织融合已成为重要的发展趋势, 分析跨界融合供应链网络的风险传播过程, 探讨跨界融合供应链网络抗毁性的提升策略, 对跨界融合供应链网络应对风险冲击、实现安全稳定发展具有重要意义. 对此, 基于分布在不同产业领域的企业开展跨界合作的现实情况, 从多层网络视角出发构建跨界融合供应链网络风险传播模型, 并从网络结构、恢复策略等方面对网络抗毁性进行仿真分析. 结果表明: 1) 部分相依模式下跨界融合供应链网络抗毁性更强; 2) 供应链核心企业或跨界团队企业受到风险冲击时, 网络抗毁性下降幅度更加明显; 3) 网络恢复策略的恢复效益存在边际递减效应; 4) 全相依模式下跨界融合供应链网络的抗毁性恢复效果优于部分相依模式; 5) 调整风险传播模型参数能在一定范围内提高网络抗毁性, 抑制风险大规模扩散.

**关键词:** 跨界融合; 多层供应链网络; 级联失效; 风险传播; 恢复策略; 网络抗毁性

中图分类号: F273.7 文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2023.0491

引用格式: 周欢, 郭红洁, 王坚强, 等. 跨界融合供应链网络风险传播建模及抗毁性研究 [J]. 控制与决策, 2024, 39(9): 3126-3134.

## Risk propagation modeling and invulnerability research of cross-boundary integrated supply chain network

ZHOU Huan<sup>1</sup>, GUO Hong-jie<sup>1</sup>, WANG Jian-qiang<sup>2†</sup>, LIU Jia<sup>1</sup>

(1. School of Business, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412007, China; 2. School of Business, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Cross-regional, cross-industry and cross-organization integration has become an important development trend. It is of great significance to analyze the risk propagation process and explore the strategies to improve the invulnerability of the cross-boundary integrated supply chain networks to cope with the risk shocks and achieve safe and stable development. Based on the reality of cross-boundary cooperation among some enterprises distributed in different industrial fields, this study constructs a risk propagation model of the cross-boundary integrated supply chain network from the perspective of multilayer networks, then simulates and analyzes network invulnerability based on network structure and recovery strategy. The results show that: 1) The cross-boundary integrated supply chain network under the partial dependency mode has stronger invulnerability; 2) When core supply chain enterprises or cross-boundary team enterprises are shocked by risks, the decline in network invulnerability is more obvious; 3) There is a marginal diminishing effect on the recovery benefit of network recovery strategies; 4) The invulnerability recovery effect of cross-boundary integrated supply chain network under the fully dependent mode is better than that of the partial dependent mode; 5) Adjusting the parameters of the risk propagation model can improve the network invulnerability and inhibit the large-scale spread of risks within a certain range.

**Keywords:** cross-boundary integration; multilayer supply chain network; cascading failure; risk propagation; recovery strategy; network invulnerability

## 0 引言

“跨界与融合”的概念最早源于经济学家 Coase, 在微观经济学视角下, 跨界被认为是两个以上企业联合经营且逐渐融合为一体的过程<sup>[1]</sup>. 随着大数据、人

工智能及物联网等数字技术的革命性突破, 跨区域、跨产业、跨组织的跨界融合现象愈加普遍, 创造了诸如智能建筑、智能家居、智能网联汽车等新兴复杂产品. 在开展跨界活动的过程中, 企业不仅需要跨越自

收稿日期: 2023-04-17; 录用日期: 2023-09-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71801090); 湖南省自然科学基金项目(2023JJ30220, 2023JJ50203).

责任编辑: 李登峰.

†通讯作者. E-mail: jqwang@csu.edu.cn.

身组织边界, 还需要嵌入合作方组织内部<sup>[2]</sup>, 将获取的新信息与已有知识联系起来激发创新或应对环境的变化, 进而形成一种多层次交互关联的跨界融合供应链网络。相比于传统的供应链网络, 跨界融合供应链网络与组织环境、社会环境的交互频率和交互强度更大, 因而在日益激烈的全球化竞争格局下, 其面临着更加复杂多样的风险因素。不少学者表示, 跨界融合在加深企业合作、实现资源互补的同时, 也增加了网络风险管理的复杂性<sup>[3]</sup>。

目前, 针对传统供应链网络风险管理的研究大多围绕集群式供应链展开。集群式供应链网络是指在集群特定地域中, 由产业集群与供应链耦合而成<sup>[4]</sup>且包含供应商层、制造商层及零售商层等多层次的复杂网络。众多学者运用渗流理论<sup>[5]</sup>、负载-容量模型<sup>[6]</sup>和沙堆模型等方法, 对集群式供应链网络的风险传播过程、网络恢复策略及网络抗毁性等方面展开了大量探讨。

在网络风险传播过程方面, 大多数研究认为供应链网络具备明显的小世界网络特性和无标度网络特性, 陆续研究了BA (Barabási-Albert) 单层网络、WS (Watts-Strogatz) 单层网络, 以及BA-BA<sup>[7]</sup>、BA-WS<sup>[5]</sup>、WS-WS<sup>[8]</sup>等完全相依模式下双层网络的风险级联传播过程, 发现供应链网络的风险大多遵循相依失效、非连通失效、过载失效及欠载失效<sup>[9-11]</sup>等级联传播规则。此外, 为了模拟网络发生风险后的实际情景, 现有研究将网络受到的风险冲击抽象为随机攻击和蓄意攻击两种攻击策略<sup>[12]</sup>, 通过探讨在不同攻击策略下网络抗毁性的变化, 判断不同风险类型对网络的危害情况。在网络恢复策略方面, 不少学者从网络结构优化的角度提出了负载随机分配策略<sup>[13]</sup>、介数相关加权策略<sup>[14]</sup>、剩余容量分配策略<sup>[15]</sup>以及阶段恢复策略<sup>[16]</sup>等方法对网络抗毁性进行恢复。在网络抗毁性评估方面, 当前研究主要将相对网络效率、最大连通子图的相对规模及网络聚集系数<sup>[17-19]</sup>等作为网络抗毁性的评价指标。

跨界融合供应链网络可以视为是集群式供应链网络的延申, 其跨越了集群区域的限制, 是一种以产业关联为界定的、产业集群与产业链相互耦合产生的复杂组织<sup>[20]</sup>, 网络中的企业通过彼此间的相互嵌入, 对工作流程、经营模式及组织结构等进行重构<sup>[2]</sup>, 使得跨界融合供应链网络的连接关系更加具有多重性<sup>[21]</sup>。一旦网络中某个企业发生风险, 该风险极易沿着复杂多样的网络关系级联扩散, 引发多个区域多个产业的级联瘫痪, 造成重大经济损失<sup>[22]</sup>。然而, 现有

跨界融合供应链网络相关研究大多是从产业融合<sup>[1]</sup>、技术融合<sup>[21,23]</sup>以及组织融合<sup>[2]</sup>等方面对社会经济领域的融合现象进行解释, 但针对跨界融合供应链网络风险传播过程及网络抗毁性的直接研究还较少。

通过以上分析可知: 1) 当前研究主要从理论分析角度对跨界融合的内在机理、组织形态及治理模式进行分析, 对跨界融合供应链网络风险管理的直接研究还较缺乏; 2) 当前全相依模式下集群式供应链网络的网络抗毁性已经拥有丰富的研究成果, 但针对企业部分相依模式下的网络抗毁性研究还较为缺乏, 通过理论分析和经验研究探讨部分相依模式下跨界融合供应链网络抗毁性提升策略的研究更加稀缺。因此, 存在如下2个问题有待解决: 问题1: 跨界融合供应链网络作为多个子网络耦合而成的复杂组织, 如何从多层网络视角出发准确刻画跨界融合供应链网络的风险传播过程? 问题2: 如何提高部分相依模式下跨界融合供应链网络的抗毁性?

跨界融合供应链网络在考虑企业运转状态时, 不仅需要考虑到同层级网络内部企业间的竞争与合作, 还需要考虑层间不同产业领域跨界合作企业的影响。因此, 为了回答问题1, 本文基于多个产业领域的部分企业开展技术、信息、组织等跨界合作的现实情况, 构建基于多层网络的部分相依模式跨界融合供应链网络, 并借鉴级联失效模型<sup>[11,24]</sup>, 在考虑网络中企业欠载和过载两种风险状态同时存在的基础上, 设计跨界融合供应链网络风险传播模型, 探究跨界融合供应链网络在遭受风险冲击后的风险传播过程。为了回答问题2, 本文基于不同外部冲击类型设计随机概率恢复和企业度恢复两种网络恢复策略, 分析不同外部冲击类型、不同网络结构、不同恢复策略及模型参数等因素对跨界融合供应链网络抗毁性的影响, 探究网络抗毁性的提升措施。本文以多层网络视角为出发点, 对部分相依模式下跨界融合供应链网络的风险传播和治理进行建模, 有利于明确风险不确定干扰对跨界融合供应链网络抗毁性的影响, 对于提升网络风险抵抗能力、促进跨界融合可持续发展具有一定的帮助和借鉴意义。

## 1 跨界融合供应链网络风险传播模型构建

区别于集群式供应链网络, 跨界融合供应链网络既有产业链供应链子网络内部企业间的合作竞争关系, 又有层间跨区域、跨产业链、跨界面的企业合作关系。因此, 跨界融合供应链网络既包含单个产业链供应链子网络的生产活动, 也包括跨产业链条的协同发展。为便于对跨界融合供应链网络中企业的耦合

关系及风险传播过程进行分析,本文针对不同产业领域部分企业或机构,通过技术融合、知识融合等手段开展跨界合作的现象,构建由两个产业链供应链网络组成且部分节点一对一依赖的跨界融合供应链网络,如图1所示.图1中:实线为同一产业链供应链子网络内部企业的上下游合作连接边,虚线为异层产业链间企业开展一对一跨界合作的连接边,网络A中的 $A_3$ 、 $A_6$ 分别与网络B中的 $B_2$ 、 $B_6$ 具有跨界合作关系,共同组成跨界团队.

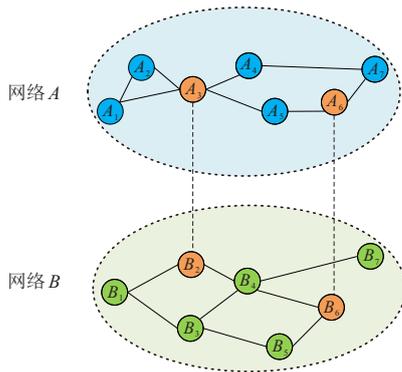


图1 跨界融合供应链网络示意

该跨界融合供应链网络可用 $G = (V, E)$ 表示.其中: $V$ 为跨界融合供应链网络的企业集合, $E$ 为跨界融合供应链网络的上下游合作连接边与层间跨界合作连接边集合.子网络A和子网络B的规模分别为 $N_A$ 和 $N_B$ ,跨界融合供应链网络总规模为 $N = N_A + N_B$ .用邻接矩阵可表示为

$$W = \begin{bmatrix} W_A & W_{AB} \\ W_{BA} & W_B \end{bmatrix}. \quad (1)$$

其中: $W_A$ 和 $W_B$ 分别为子网络A和子网络B的邻接矩阵, $W_{BA}$ 和 $W_{AB}$ 表示网络A和网络B的跨界合作关系<sup>[9]</sup>.

为方便探讨跨界融合强度与网络抗毁性的关系,将网络跨界融合强度 $r$ 定义为拥有一对一跨界合作关系的企业总数 $N_c$ 占跨界融合供应链网络总规模 $N$ 的比例,即跨界融合强度 $r$ 可表示为

$$r = N_c/N. \quad (2)$$

企业合作能力 $w_{ij}$ 为企业与网络中其他企业的合作程度, $w_{ij}$ 值越大,合作越密切<sup>[22,24]</sup>,有

$$w_{ij} = (k_i k_j)^\tau. \quad (3)$$

其中: $k_i$ 、 $k_j$ 分别为企业 $i$ 和企业 $j$ 的度, $\tau$ 为企业合作能力参数.

### 1.1 企业初始负载与容量定义

1) 初始负载.跨界融合供应链网络中企业的重要性受企业及其邻居企业的影响,将企业的初始负载定

义为节点度和邻居节点度的乘积<sup>[25]</sup>,即

$$L_i = \left( \sum_{h \in \Gamma_i} k_i k_h \right)^\theta. \quad (4)$$

其中: $L_i$ 为企业 $i$ 的初始负载; $\Gamma_i$ 为企业 $i$ 的邻居节点企业的集合; $k_h$ 为邻居节点企业的节点度; $\theta$ 为权重系数,用来调节企业间的负载差异.

2) 最大容量与最小存量.在实际的供应链跨界融合活动中,企业处理业务(负载)的能力与企业的规模有关,通常企业的最大容量、最小存量与企业负载呈非线性关系<sup>[24]</sup>,因此,企业 $i$ 的最大容量和最小存量可定义为

$$C_i^{\max} = L_i + \beta L_i^\alpha, \quad (5)$$

$$C_i^{\min} = L_i - \beta L_i^\alpha. \quad (6)$$

其中: $C_i^{\max}$ 为企业最大容量; $C_i^{\min}$ 为企业的最小存量; $\alpha \geq 0, \beta \geq 0$ 为容量系数,调节企业处理业务能力的大小.

### 1.2 企业状态评估

跨界融合供应链网络中的企业受到风险冲击时,一般不会立即失效,而是根据风险冲击的类型处于某种风险状态.当 $L_i(t) > C_i^{\max}$ 时,表示企业 $i$ 在 $t$ 时刻处于过载状态;当 $L_i(t) < C_i^{\min}$ 时,表示企业 $i$ 在 $t$ 时刻处于欠载状态.此时,企业将采取一系列措施对风险进行调控,而处于风险状态的企业恢复正常运营状态与否取决于企业自身的风险控制能力<sup>[24]</sup>,即企业的过载上限 $O_i$ 和欠载下限 $U_i$ .设 $\mu$ 为企业风险控制系数( $0 \leq \mu \leq 1$ ), $\mu$ 值越大表示企业风险控制能力越强,于是,过载上限 $O_i$ 和欠载下限 $U_i$ 分别为

$$O_i = (1+\mu)C_i^{\max}, \quad (7)$$

$$U_i = (1-\mu)C_i^{\min}. \quad (8)$$

当 $L_i \in [C_i^{\min}, C_i^{\max}]$ 时,企业处于正常运营状态;当 $L_i \in [U_i, C_i^{\min}]$ 或当 $L_i \in [C_i^{\max}, O_i]$ 时,企业处于欠载或过载状态,说明企业遭到风险干扰,当企业处于过载或欠载状态的时间超过其过载或欠载周期 $T$ 时,企业处于失效状态,风险将沿着合作关系继续扩散到其他企业;当 $L_i \in [0, U_i]$ 或 $L_i \in [O_i, +\infty)$ 时,负载超出企业最大风险控制能力,企业处于失效状态,风险将进一步蔓延.

### 1.3 跨界融合供应链网络风险传播过程分析

由于跨界融合供应链网络提供的产品和服务在技术创新、资金支持及顾客需求等方面都具备更高的要求,使得跨界融合供应链网络面临的风险和挑战也愈加复杂和激烈.其中:法规变动、突发事件等风险冲击引发的企业故障可以抽象为随机攻击策略;

资金链断裂、技术风险等风险冲击引发的企业故障可抽象为蓄意攻击策略。为了充分认识跨界融合供应链网络的风险传播过程,可将风险发生引发的风险传播过程视为网络中部分企业遭遇攻击失效后引发的级联失效动态行为。

与集群式供应链网络的风险传播相似,跨界融合供应链网络的风险传播同样受企业的业务范围、合作关系以及攻击策略的影响<sup>[11]</sup>,且过载失效与欠载失效同时存在,即当某侧子网络中的上级供应商企业遭遇产品研发中断、资金链断裂等风险事件后,该企业部分业务负载将会转移到同级的其他供应商企业,部分供应商企业因分配到的业务负载超过自身实力而处于过载状态,当企业过载状态长时间未得到有效处理时,该企业将产生过载失效;而因风险事件损失的业务负载,将导致部分下级零售商因产品供应减少或长期供应不足造成客源损失,使得企业无法正常盈利而亏损或倒闭,产生欠载失效。借鉴集群式供应链网络的级联失效规则<sup>[9-11]</sup>,在考虑供应链子网络内部企业间的上下游合作关系和层间企业的跨界合作关系的前提下,跨界融合供应链网络的失效规则可表示如下:

1) 相依失效。当企业*i*与企业*j*具有一对一跨界合作关系时,企业*i*失效,其跨界合作企业*j*失效。

2) 非连通失效。当企业*i*不与子网最大连通分支相连时,企业*i*失效。

3) 过载失效。当企业*i*上的负载超过其最大容量,且处于过载状态的时间超过其过载周期*T*时,企业*i*失效;或当企业*i*上的负载超过其过载上限时,企业*i*失效。

4) 欠载失效。当企业*i*上的负载低于其最小存量,且处于欠载状态的时间超过其欠载周期*T*时,企业*i*失效;或当企业*i*上的负载低于其欠载上限时,企业*i*失效。

## 2 网络恢复策略设计及抗毁性评估

当跨界融合供应链网络遭遇风险冲击时,网络将采取企业业务调整、加强信息交流与共享、建立更加紧密的战略合作伙伴关系等措施,对网络展开修复与补救。根据随机攻击和蓄意攻击两种外部冲击策略,设计相应的随机概率恢复策略和企业度恢复策略,探究跨界融合供应链网络在不同网络恢复策略下的恢复效果。

### 2.1 随机概率恢复策略

跨界融合供应链网络面临的内外部风险具有复杂不确定性及动态不可预测性,在风险发生初期,跨

界融合供应链网络因无法立即掌握整个网络中全部企业的信息,而选择利用故障企业的局部信息随机选取故障企业的邻居企业进行业务负载重新分配,即在跨界融合供应链网络中,依据随机恢复概率 $p_1$ 选取相应比例数量的未失效邻居企业,将失效企业的负载均匀分配给被选中的邻居企业。各个被选中的邻居企业分配到的负载 $\Delta L_n$ 为

$$\Delta L_n = \frac{L_i(t)}{p_1 q}. \quad (9)$$

其中: $L_i(t)$ 为失效企业*i*在时刻*t*的负载, $q$ 为失效企业的邻居企业总数。

由于企业满负荷运行时的负载并不会超过企业的业务能力上限,假设某邻居企业*j*能够额外承担的最大容量为 $\alpha L_j$ ,则分摊给企业*j*的负载为 $\min\{\alpha L_j, \Delta L_n\}$ <sup>[24]</sup>,有

$$\alpha L_j = C_j^{\max}(t) - L_j(t). \quad (10)$$

在*t*+1时刻,邻居企业*j*的负载为

$$L_j(t+1) = L_j(t) + \min\{\alpha L_j, \Delta L_j\}. \quad (11)$$

假设企业*i*失效后,被选中的邻居企业为*j*和*h*,在*t*+1时刻,根据上述规则进行负载重新分配后的企业负载分别为 $L_j(t+1)$ 和 $L_h(t+1)$ 。若 $L_j(t+1) + L_h(t+1) \geq L_i$ ,则说明失效企业*i*的业务负载被完全分配完毕,风险传播得到抑制;若 $L_j(t+1) + L_h(t+1) < L_i$ ,则说明失效企业*i*的部分负载未被其他企业全部吸收,失效企业*i*的某一下级企业*g*将面临供应不足或者供应中断的风险。

在*t*+1时刻,下级企业*g*的供应量将减少 $\Delta L_g$ ,有

$$\Delta L_g = L_i - (L_j(t+1) + L_h(t+1)). \quad (12)$$

此时,下级企业*g*的负载为

$$L_g(t+1) = L_g(t) - \Delta L_g. \quad (13)$$

当 $C_g^{\min} \leq L_g(t+1) \leq C_g^{\max}$ 时,风险处于可控范围内,下级企业*g*可以正常经营;当 $L_g(t+1) < U_g$ 时,企业*g*的负载低于其欠载上限,下级企业*g*直接失效,并进一步加剧跨界融合供应链网络中的风险传播现象;当 $U_g \leq L_g(t+1) \leq C_g^{\min}$ 时,下级企业*g*处于欠载状态,当该企业处于欠载状态的时间超过欠载周期*T*时,企业*g*欠载失效,风险会在跨界融合供应链网络中继续扩散。

当下级企业*g*处于欠载状态时,企业*g*为了控制或解除风险,将对其上级的其他正常企业发送更多的业务需求。假设企业*g*向企业*h*发送的多余订单需求为 $\Delta L_g$ ,则在*t*+2时刻,企业*h*的供应负载为

$$L_h(t+2) = L_h(t+1) + \Delta L_g. \quad (14)$$

当  $C_h^{\min} \leq L_h(t+2) \leq C_h^{\max}$  时, 风险处于可控范围内, 企业  $h$  可以正常经营; 当  $C_h^{\max} \leq L_h(t+2) \leq O_h$  时, 企业  $h$  处于过载状态, 当该企业处于过载状态的时间超过过载周期  $T$  时, 企业  $h$  过载失效, 风险将在跨界融合供应链网络中继续扩散; 当  $L_h(t+2) > O_h$  时, 企业  $h$  的负载大于其过载上限, 企业  $h$  直接失效, 并进一步加剧跨界融合供应链网络中的风险扩散.

## 2.2 企业度恢复策略

跨界融合供应链网络中的跨界团队以及子网络中的核心企业在维护网络健康运行、促进跨界活动高效开展等方面起到了关键作用, 不少学者也表明优先保护网络中的重要节点能够有效抑制风险蔓延<sup>[13]</sup>, 利用企业度恢复策略优先恢复跨界融合供应链网络中重要的企业, 如跨界团队企业、供应链中的核心企业等, 具体步骤如下:

1) 设置度恢复比例为  $p_2$ , 将失效企业  $i$  的邻居企业按节点度降序排序.

2) 选取度序列中第 1 个度数值最大的邻居企业, 按照如下企业度恢复规则进行负载重分配:

$$\Delta L_j = \left( k_j / \sum_{h \in \Gamma_i} k_h \right) L_i(t). \quad (15)$$

其中:  $k_j$  为度序列中第 1 个企业  $j$  的节点度,  $\Gamma_i$  为按照度恢复比例  $p_2$  选中的邻居企业集合,  $k_h$  为邻居企业集合中企业  $h$  的节点度,  $L_i(t)$  为失效企业  $i$  在时刻  $t$  的负载.

3) 将余下邻居企业重新按节点度降序排序, 重复步骤 2), 直到失效负载或待分配的企业全部分配完毕后结束.

关于风险是否进一步沿着网络扩散的判断过程与上述随机概率恢复的判断过程一致, 不再赘述.

## 2.3 网络抗毁性评估

当跨界融合供应链网络受到攻击后将被分割为互不连通的多个子网络, 可用最大连通子图在风险传播前后的变化来反映跨界融合供应链网络抵御风险传播的能力<sup>[25]</sup>, 具体公式如下:

$$CF = S'/S. \quad (16)$$

其中:  $S'$  为攻击后网络最大连通子图的企业总数,  $S$  为初始最大连通子图的企业总数.

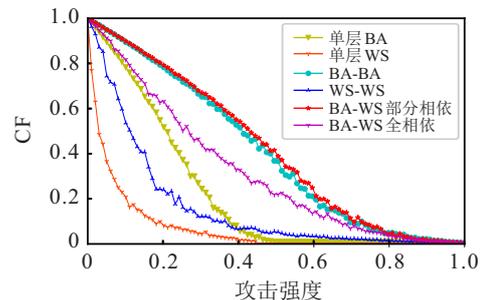
## 3 风险传播下跨界融合供应链网络抗毁性仿真与分析

现实世界中供应链网络具有明显的小世界网络特性和无标度网络特性, 网络结构大多接近 WS 网络

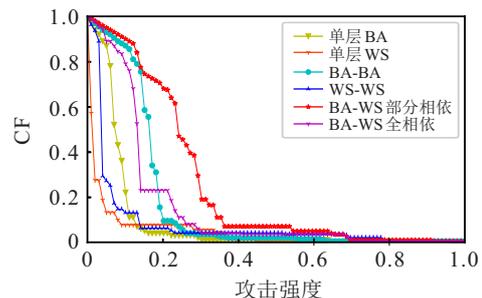
或 BA 网络. 因此, 将跨界融合供应链网络的两侧子网络设为 WS 网络和 BA 网络. 为探究网络结构、外部冲击类型、网络恢复策略以及跨界融合强度对跨界融合供应链网络抗毁性的影响, 默认参数设置为:  $N_A = N_B = 500$ , BA 网络和 WS 网络的平均度  $\langle k \rangle = 4$ , BA 网络  $m_0 = 2, m = 2$ , WS 网络的断边重连率为 0.2, 过载及欠载周期  $T = 3$ , 独立仿真实验 30 次取平均值.

### 3.1 网络结构仿真分析

为对比非跨界融合供应链网络与跨界融合供应链网络抗毁性的异同, 对随机攻击和蓄意攻击下不同网络结构的抗毁性进行分析. 因以往研究大多用单层 BA 网络模型或单层 WS 网络模型对集群式供应链网络抗毁性进行分析, 故将单层 BA 网络、单层 WS 网络作为非跨界融合供应链网络, 将 BA-BA 部分相依、WS-WS 部分相依、BA-WS 部分相依、BA-WS 全相依网络作为跨界融合供应链网络, 取部分相依网络跨界融合强度  $r = 5\%$ , 容量系数  $\alpha = \beta = 1.5$ , 企业风险控制系数  $\mu = 0.2$ , 企业合作能力参数  $\tau = 1.5$ , 仿真分析攻击强度和网络抗毁性的关系, 具体见图 2.



(a) 随机攻击下不同网络结构抗毁性变化



(b) 蓄意攻击下不同网络结构抗毁性变化

图 2 网络结构对网络抗毁性的影响情况

从图 2 可以看出, 随着攻击强度不断增加, 非跨界融合供应链网络和跨界融合供应链网络的抗毁性均不断下降, 当随机攻击的攻击强度大于 0.4, 蓄意攻击的攻击强度大于 0.36 时, BA-BA 部分相依、WS-WS 部分相依、BA-WS 部分相依、BA-WS 全相依的跨界融合供应链网络抗毁性均高于非跨界融合供应链网络.

此外,无论是实施随机攻击还是蓄意攻击,相较于BA-WS全相依的跨界融合供应链网络,BA-WS部分相依的跨界融合供应链网络均具有更强的风险抵抗能力.这可能是由于网络跨界融合强度 $r$ 越大,网络中具有跨界合作关系的企业越多,更利于企业过欠载失效和相依失效的发生,引发层间风险级联传播.这与文献[8]的结论相似,从而再次验证了跨界融合强度对跨界融合网络抗毁性的影响.因此,通过控制网络跨界融合强度可以避免跨界融合供应链网络跨层崩溃进而提高整个网络抵抗风险的能力.为了进一步探讨跨界融合供应链网络抗毁性的提升路径,下面将从外部冲击类型、网络恢复策略和模型参数3个方面对网络抗毁性更强的BA-WS跨界融合供应链网络展开分析.

### 3.2 外部冲击类型及强度仿真分析

为探究外部冲击类型对跨界融合供应链网络抗毁性影响的差异性,对BA-WS部分相依网络分别实施随机攻击、蓄意攻击和非关键节点攻击,其中,非关键节点攻击是指对跨界融合供应链网络中的边缘企业进行攻击,旨在探究边缘企业对开展跨界融合活动的作用,即选取节点度数最小的企业进行攻击.取部分相依网络跨界融合强度 $r = 5%$ ,容量系数 $\alpha = \beta = 1.5$ ,企业风险控制系数 $\mu = 0.2$ ,企业合作能力参数 $\tau = 1.5$ ,仿真分析外部冲击类型、外部冲击强度和网络抗毁性的关系,具体见图3.

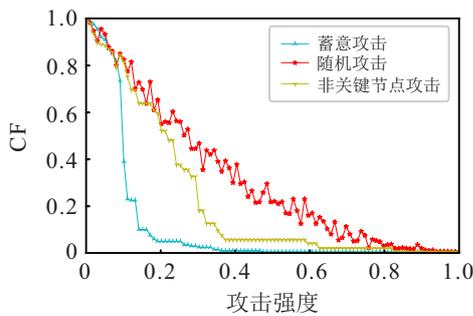


图3 外部冲击类型及强度对网络抗毁性的影响情况

图3显示:在攻击强度小于0.2时,非关键节点攻击与随机攻击下的网络抗毁性差异较小;但在攻击强度大于0.2后,非关键节点攻击下网络抗毁性下降速度大于随机攻击.可见,边缘企业虽不在网络的核心位置,但当边缘企业故障失效达到一定范围后,网络整体性能将受到明显冲击.此外,由图3可知,蓄意攻击对跨界融合供应链网络的破坏作用远大于随机攻击及非关键节点攻击,由于蓄意攻击是攻击业务负载较大、网络中占据核心位置的企业或者是跨界团队企业,这类企业受到风险冲击更容易引发跨界融合

网络的级联崩溃,当攻击网络中核心企业超过10%时,网络抗毁性便大幅度下降,可见,网络中重要企业一旦遭受风险冲击,将对网络安全稳定造成重大伤害.因此,在网络日常运营过程中要时刻关注供应链核心企业、跨界团队企业的运行状态,防止风险产生及迅速蔓延.

### 3.3 网络恢复策略效果仿真分析

为探究不同网络恢复策略对网络风险级联传播的控制效果,根据文献[11]提出的失效企业的邻居节点中节点度越大的企业分配到的负载越多这一重分配规则,将该文提出的恢复方法与本文提出的两种恢复策略进行对比分析.其中,跨界融合相依网络为BA-WS部分相依、BA-WS全相依的网络结构,非跨界融合的集群式供应链网络为单层BA网络结构.取部分相依网络跨界融合强度 $r = 5%$ ,容量系数 $\alpha = \beta = 1.5$ ,企业风险控制系数 $\mu = 0.2$ ,企业合作能力参数 $\tau = 1.5$ ,风险攻击强度为0.1,初始移除企业比例为10%,得到3种恢复策略对网络抗毁性的影响情况,具体见图4.

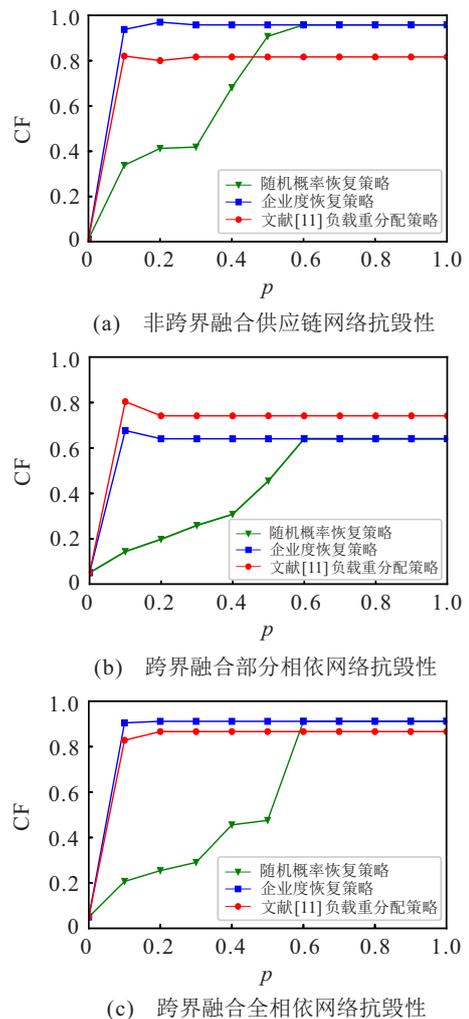


图4 不同恢复策略对网络抗毁性的影响情况

对比图4(a)、(b)和(c)可知,实施恢复策略后,在相同企业恢复比例 $p$ 下,非跨界融合的集群式供应链网络抗毁性恢复效果优于跨界融合供应链网络.这可能是由于在实施网络恢复措施时,非跨界融合的集群式供应链网络只需要与网络内部的企业进行信息、技术、资金、人才等资源的交互和协助,相比于需要跨越组织结构进行资源交互的跨界融合供应链网络,非跨界融合的集群式供应链网络企业间具备更高的信任度和更强的响应力,使得网络可以更加快速地对突发风险做出反应并控制风险蔓延.

此外,从图4中可以看出,在实施随机概率恢复策略、企业度恢复策略和文献[11]负载重分配策略后,非跨界融合的集群式供应链网络、跨界融合部分相依供应链网络和跨界融合全相依供应链网络的抗毁性均有所提升,但当企业恢复比例 $p$ 达到一定值时,网络抗毁性提升幅度将逐渐变缓,即以上3种恢复策略均能够提升网络抗毁性,但随着企业恢复数量的增加,这3种恢复策略对网络恢复效果的边际递减效应逐渐显现.可见:在实施恢复策略初期,网络将对企业业务往来关系及网络组织结构进行调整,网络性能得到改善;但当网络恢复成本过高时,网络恢复效益开始下降,网络性能恢复速度逐渐变缓.因此,在跨界融合供应链网络遭受风险冲击时,跨界融合供应链网络中的核心领导企业应制定合理的资源分配计划,引导成员企业实行差异化发展战略.

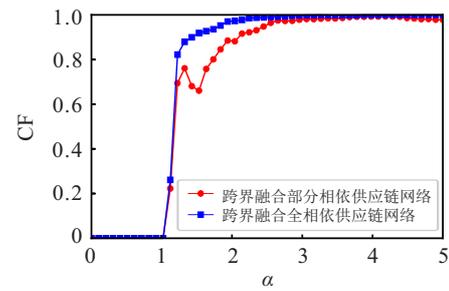
### 3.4 模型参数分析

本节主要探究容量系数 $\alpha$ 、 $\beta$ ,企业风险控制系数 $\mu$ 和企业合作能力系数 $\tau$ 对BA-WS部分相依、BA-WS全相依的跨界融合供应链网络抗毁性影响的差异性.因蓄意攻击比随机攻击更容易导致跨界融合供应链网络风险传播现象产生,故对跨界融合供应链网络采取蓄意攻击策略和企业度恢复策略:依据节点度的降序排列移除跨界融合供应链网络中前10%的企业,并在实施蓄意攻击策略后的跨界融合供应链网络中,依据节点度的降序排列选取前50%的正常企业进行负载重分配.

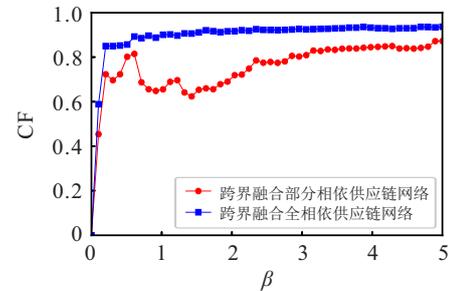
#### 3.4.1 容量系数仿真分析

为探究容量系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 对风险冲击的管控效果,取部分相依网络跨界融合强度 $r = 5\%$ ,企业风险控制系数 $\mu = 0.2$ ,企业合作能力参数 $\tau = 1.5$ ,得到容量系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 变化对网络抗毁性影响的仿真结果,如图5所示.

由图5可知,随着容量系数 $\alpha$ 和 $\beta$ 取值的不断增加,企业具备的资源冗余逐渐增多,网络抗毁性CF值



(a) 容量系数 $\alpha$ 对网络抗毁性的影响



(b) 容量系数 $\beta$ 对网络抗毁性的影响

图5 容量系数对网络抗毁性的影响情况

呈波浪式上升态势.这表明增加企业的冗余能力,能够延长跨界融合供应链网络应对风险冲击的“窗口期”,延缓跨界融合供应链网络抗毁性的下降速度和下降幅度.从总体上看,实施恢复策略后,全相依模式下跨界融合供应链网络的网络抗毁性恢复效果优于部分相依模式,因为网络跨界融合强度 $r$ 越大,网络间信息沟通和传输的渠道越多,在实施网络恢复措施时,信息、技术、知识等资源能够借助紧密的跨界合作关系更加快速地传播至整个跨界融合网络,进而提升网络对风险冲击的管控效果.

#### 3.4.2 风险控制系数仿真分析

为探究企业风险控制系数 $\mu$ 对网络风险冲击的管控效果,取 $r = 5\%$ ,容量系数 $\alpha = \beta = 1.5$ ,企业合作能力参数 $\tau = 1.5$ ,得到风险控制系数 $\mu$ 变化对网络抗毁性影响的仿真结果,如图6所示.

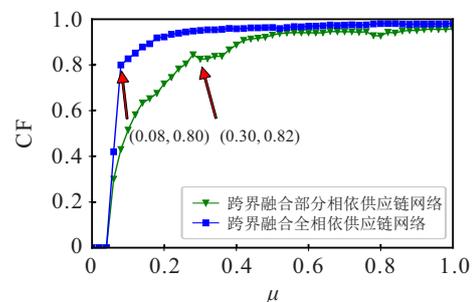


图6 风险控制系数 $\mu$ 对网络抗毁性的影响情况

从图6可以看出,随着风险控制系数 $\mu$ 值的增加,全相依模式及部分相依模式的跨界融合供应链网络的抗毁性均呈上升趋势,但当风险控制系数 $\mu$ 值分别增加至0.08及0.3时,全相依模式及部分相依模式的

跨界融合供应链网络抗毁性上升幅度逐渐变缓,可见,企业风险控制能力增加与网络抵抗风险能力提升并非呈严格的正向关系.这是由于企业风险控制能力过低,会导致企业应对风险冲击柔性不足;但过度提高企业的风险控制能力,又极易导致跨界融合供应链网络结构和功能僵化,对整个网络的健康发展起到逆向作用.

### 3.4.3 企业合作能力参数仿真分析

为探究企业合作能力参数对网络风险冲击的管控效果,取部分相依网络跨界融合强度  $r = 5\%$ ,容量系数  $\alpha = \beta = 1.5$ ,企业风险控制系数  $\mu = 0.2$ ,得到企业合作能力参数  $\tau$  变化对网络抗毁性影响的仿真结果,如图7所示.

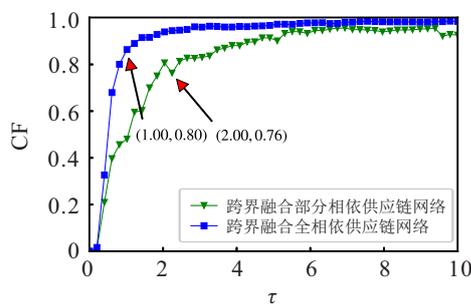


图7 企业合作能力参数  $\tau$  对网络抗毁性的影响情况

由图7可知,随着企业合作能力参数  $\tau$  值的增加,跨界融合供应链网络抗毁性呈现上升趋势,这表明建立或者增强企业间的合作关系,可以使企业在面临突发风险时及时做出响应,提升网络抵抗风险的能力.然而,当企业合作能力参数  $\tau$  值大于2时,两种相依模式下的跨界融合供应链网络抗毁性增加幅度均愈发变缓,这表明当供应链上下游合作关系、层间跨界合作关系过度密切时,过度依赖的企业合作关系将会产生关系依赖风险,网络逐渐变得封闭,导致组织间壁垒、业务流程难以衔接等问题产生,使得网络对风险的应对能力下降.

## 4 结论

本文基于不同产业领域部分企业开展跨界合作的实际情况,构建了基于多层网络的部分企业具有一对一跨界合作关系的跨界融合供应链网络风险传播模型,并基于外部冲击类型设计了两种网络恢复策略,利用 Python 和 Netlogo 工具探究了网络结构、恢复策略以及模型参数等对跨界融合供应链网络抗毁性的影响,得到如下结论:

1) 相比于非跨界融合供应链网络,跨界融合供应链网络具有更强的网络抗毁性,且部分相依模式下的网络抗毁性高于全相依模式;

2) 当供应链核心企业或跨界团队企业受到风险冲击时,跨界融合供应链网络抗毁性将大幅度降低;

3) 网络恢复策略存在边际递减效应,当企业恢复数量达到一定时,网络抗毁性提升幅度将逐渐变缓;

4) 全相依模式下跨界融合供应链网络的抗毁性恢复效果优于部分相依模式;

5) 调整风险传播模型参数能在一定范围内提高网络抗毁性,抑制风险大规模扩散.

其中:增加企业冗余能力能够延缓跨界融合供应链网络抗毁性的下降速度和幅度;适当的风险控制投入能够提升企业风险控制能力,阻碍风险大规模扩散,但过高的企业风险控制能力将导致跨界融合供应链网络结构和功能僵化;增强企业间的合作关系可以使企业在面临突发风险时及时做出响应,但过度依赖的企业合作关系也将产生组织路径锁定,导致网络保守封闭.因此,网络中的跨界团队可以从整体网络角度出发,合理设计网络组织结构,调整网络跨界融合强度,实现网络资源合理配置,并根据网络内外部环境变化对企业合作关系、运行机制和管理模式等不断进行优化.

本文提出的网络恢复策略在一定程度上能够为现实世界的跨界融合供应链网络企业应对风险冲击提供借鉴和帮助.但由于跨界融合供应链的真实数据难以获得,本文并未将所提出的模型进行实际数据检验,这将是后续研究的方向之一.

## 参考文献(References)

- [1] 张艳. 数字化背景下我国零售业跨界与融合创新发展研究[J]. 北京工商大学学报: 社会科学版, 2022, 37(4): 22-32.  
(Yan Z. Research on the cross-sector and integrated development of China's retail industry in the context of digitalization[J]. Journal of Beijing Technology and Business University: Social Sciences, 2022, 37(4): 22-32.)
- [2] 王涛. 组织跨界融合: 结构、关系与治理[J]. 经济管理, 2022, 44(4): 193-208.  
(Wang T. The fusion of organizational cross-boundary: Structure, relationship and governance[J]. Business and Management Journal, 2022, 44(4): 193-208.)
- [3] Zheng K X, Liu Y, Wang Y, et al. K-core percolation on interdependent and interconnected multiplex networks[J]. Europhysics Letters, 2021, 133(4): 48003.
- [4] Li J Z, Liu C L. Study of specification and features for cluster supply chain[J]. Soft Science, 2006, 20(5): 4-8.
- [5] Cao Y Y, Liu R R, Jia C X, et al. Percolation in multilayer complex networks with connectivity and interdependency topological structures[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical

- Simulation, 2021, 92: 105492.
- [6] Zhang H, Zhou J, Zou Y, et al. Asymmetric interdependent networks with multiple-dependence relation[J]. *Physical Review E*, 2020, 101(2): 022314.
- [7] 高彦丽, 梁崇生, 陈世明. 基于边耦合的双层网络鲁棒性优化[J]. *控制与决策*, 2023, 38(9): 2714-2720.  
(Gao Y L, Liang C S, Chen S M. Robustness optimization of two-layer network based on edge coupling[J]. *Control and Decision*, 2023, 38(9): 2714-2720.)
- [8] Cheng Z S, Cao J D. Cascade of failures in interdependent networks coupled by different type networks[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2015, 430: 193-200.
- [9] 刘凤增, 肖兵, 陈施思, 等. 负载作用下相依网络择优恢复方法研究[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(7): 1694-1701.  
(Liu F Z, Xiao B, Chen S S, et al. A preferential recovery method of interdependent networks under load[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(7): 1694-1701.)
- [10] 蒋文君, 刘润然, 范天龙, 等. 多层网络级联失效的预防和恢复策略概述[J]. *物理学报*, 2020, 69(8): 258-268.  
(Jiang W J, Liu R R, Fan T L, et al. Overview of precaution and recovery strategies for cascading failures in multilayer networks[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(8): 258-268.)
- [11] 李姝, 杨华, 宋波. 多层供应链网络中欠载失效和过载级联失效的协同演化研究[J]. *计算机科学*, 2021, 48(10): 351-358.  
(Li S, Yang H, Song B. Study on Co-evolution of underload failure and overload cascading failure in multi-layer supply chain network[J]. *Computer Science*, 2021, 48(10): 351-358.)
- [12] Wang Y C, Xiao R B. An ant colony based resilience approach to cascading failures in cluster supply network[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 2016, 462: 150-166.
- [13] Lehmann J, Bernasconi J. Stochastic load-redistribution model for cascading failure propagation[J]. *Physical Review E*, 2010, 81(3): 031129.
- [14] 丁琳, 张嗣瀛. 面向级联失效的复杂网络加权策略[J]. *控制与决策*, 2013, 28(9): 1399-1402.  
(Ding L, Zhang S Y. Cascading failures-oriented weighting strategies on complex networks[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(9): 1399-1402.)
- [15] 邢积超, 陈楚湘, 朱兆梁, 等. 双层相依网络化指挥信息系统级联失效研究[J]. *控制与决策*, 2020, 35(12): 3017-3025.  
(Xing J C, Chen C X, Zhu Z L, et al. Cascading failure of double layer networked command information system[J]. *Control and Decision*, 2020, 35(12): 3017-3025.)
- [16] 唐亮, 焦鹏, 李纪康, 等. 带恢复策略的复杂网络级联失效机理及鲁棒性研究[J]. *控制与决策*, 2018, 33(10): 1841-1850.  
(Tang L, Jiao P, Li J K, et al. Cascading failure mechanism and robustness of complex networks with recovery strategy[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(10): 1841-1850.)
- [17] Bellingeri M, Bevacqua D, Scotognella F, et al. A comparative analysis of link removal strategies in real complex weighted networks[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 3911.
- [18] 刘浩然, 崔梦頔, 尹荣荣, 等. 无标度网络的级联失效缓解策略[J]. *控制与决策*, 2018, 33(6): 1087-1092.  
(Liu H R, Cui M D, Yin R R, et al. Mitigation strategy for scale-free network against cascading failures[J]. *Control and Decision*, 2018, 33(6): 1087-1092.)
- [19] Chen S M, Pang S P, Zou X Q. An LCOR model for suppressing cascading failure in weighted complex networks[J]. *Chinese Physics B*, 2013, 22(5): 626-631.
- [20] Yan B Z. Study on the internal mechanism of the formation and evolution of cluster industrial chain[J]. *Economist*, 2011(1): 78-85.
- [21] Cao X, Xu Y, Zhao Q K, et al. Mechanism and empirical study of cross-border convergence of emerging technologies from the perspective of multi-layer networks[J]. *China Soft Science*, 2022(12): 102-111.
- [22] Zhou W W, Zhang Q. Resilience of supply-chain systems under perturbations: A network approach[J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2022, 32(9): 093123.
- [23] Caferoglu H, Elsner D, Moehrl M. The interplay between technology and pre-industry convergence: An analysis in the technology field of smart mobility[J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2022, 70(4): 1504-1517.
- [24] 张钦, 雷世豪, 王海. 过载及欠载情形下产业链网络风险级联失效的建模与仿真[J]. *系统工程*, 2021, 39(2): 50-60.  
(Zhang Q, Lei S H, Wang H. Modeling and simulation of industrial chain network risk cascading failure under over-load status and under-load status[J]. *Systems Engineering*, 2021, 39(2): 50-60.)
- [25] 陈世明, 庞少鹏, 邹小群, 等. 面向级联失效的加权网络负载容量非线性模型鲁棒性优化[J]. *控制与决策*, 2013, 28(7): 1041-1045.  
(Chen S M, Pang S P, Zou X Q, et al. Robustness optimization of load-capacity nonlinear model in weighted network for cascading failure[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(7): 1041-1045.)

## 作者简介

周欢(1982—), 女, 副教授, 博士, 从事供应链风险管理、复杂系统建模与分析等研究, E-mail: huanzhou@hut.edu.cn;  
郭红洁(2000—), 女, 硕士生, 从事供应链风险管理、复杂系统建模与分析等研究, E-mail: 2914189816@qq.com;  
王坚强(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能决策、系统可靠性建模及优化等研究, E-mail: jqwang@csu.edu.cn;  
刘嘉(1998—), 男, 硕士生, 从事社会计算、复杂系统建模与分析等研究, E-mail: 3396699523@qq.com.