

新能源汽车供应链仿真网络与级联失效研究

刘雯月¹, 张笑笑², 杨康³

(1. 武汉科技大学管理学院, 武汉 430065;

2. 安徽建筑大学 建筑与规划学院, 合肥 230601;

3. 合肥工业大学管理学院, 合肥 230009)

摘要: 基于新能源汽车供应链网络多层次、供需复杂及动态拓扑的特点, 首先建立了能够高度模拟真实结构与风险传播机制的供应链虚拟网络, 为降低级联失效风险并提升网络鲁棒性提供新思路。综合节点度值、竞争优势系数等要素提出了多级供应链虚拟网络生成算法, 在网络演化过程中使用优先连接及优先退出机制模拟企业的进入与退出, 并通过级联失效算法和三种风险转移策略来揭示风险传播的微观机理。结果表明, 当核心节点失效时, 风险易于迅速传递并引发多节点级联失效, 剩余容量分配策略更有助于提升供应链网络的抗冲击能力; 所构建的虚拟网络在风险传播范围与冲击强度等指标上与真实网络高度相似, 能够准确反映节点失效在网络中的级联扩散过程。本文的研究为新能源汽车供应链网络的结构优化与协同防控提供了具有实用价值的新途径。

关键词: 供应链网络; 级联失效; 网络生成

中图分类号: F252

Research on Simulation Network and Cascade Failure of New Energy Vehicle Supply Chain

Liu Wenyue¹, ZHANG Xiaoxiao², Yang Kang³

(1. School of Management, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065;

2. School of Architecture and Urban Planning, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601;

3. School of Management, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Based on the multi-level, complex supply and demand and dynamic topology characteristics of the new energy vehicle supply chain network, a supply chain virtual network that can highly simulate the real structure and risk propagation mechanism is first established, providing new ideas for reducing the risk of cascade failure and improving network robustness. A multi-level supply chain virtual network generation algorithm is proposed based on node degrees, competitive advantage coefficients and other factors. In the network evolution process, priority connection and priority exit mechanisms are used to simulate the entry and exit of enterprises, and cascade failure algorithms and three risk transfer strategies are used to reveal the micro mechanism of risk spread. The results show that when a core node fails, risks are easy to pass quickly and cause multi-node cascade failures; the remaining capacity allocation strategy is more conducive to improving the impact resistance of the supply chain network; the built virtual network is highly similar to the real network in terms of risk spread range and impact strength, and can accurately reflect the cascade proliferation process of node failures in the network. The research in this paper provides a new approach with practical value for structural optimization and collaborative prevention and control of new energy vehicle supply chain networks.

Key words: supply chain network; cascade failure; network generation

作者简介: 刘雯月 (1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 供应链管理

通信联系人: 张笑笑 (1982-), 女, 副教授、硕导, 主要研究方向: 地域建筑保护. E-mail: 020045@ahjzu.edu.cn

45 0 引言

在全球化与信息化的推动下，物流网络、供应链网络与交通网络等复杂系统日益成为现代经济和社会的关键基础设施。这些网络不仅支撑着全球商品的流通，还通过供应链的紧密衔接推动了制造业和贸易的高效运行。然而，随着这些复杂网络的规模扩大和联系加深，网络在面对级联失效和外部攻击时也显得愈加脆弱。级联失效是指当物流网络或供应链中的某一节点发生故障时，故障可能沿着网络逐步扩展，导致整个物流系统的中断乃至崩溃。

物流网络的高效运行依赖于各节点和连边的正常运作，当某一关键节点出现问题，系统的连锁反应会迅速蔓延。例如，在一个供应链网络中，某一环节的断裂可能导致上下游企业的生产中断，进而影响整个产业链的稳定性。因此，如何提升物流网络的鲁棒性与恢复能力成为学术界和工业界关注的焦点。鲁棒性指的是系统在面对故障时维持正常运行的能力，而恢复能力则是系统在故障发生后迅速恢复到正常状态的能力。

为了应对物流网络中的这些挑战，研究者们提出了多种模型和方法，以分析和优化物流供应链中的鲁棒性和弹性。供应链网络由于其复杂的结构和全球化的运作模式，面临着巨大的级联失效风险。Li^[1]等人研究了农业食品供应链中的中断传播问题，提出通过加强现有业务关系和引入弱联系可以提高供应链网络的弹性和恢复能力。王文利^[2]则从汽车供应链的角度，提出通过分析网络的复杂特性来提升供应链的鲁棒性。Kang^[3]通过多层复杂网络模型研究了全球铜产业链中的供应风险传播，结果表明，供应链的上游节点，如秘鲁、中国和美国，在供应冲击中扮演着关键角色。Wang^[4]则使用 SIRS 传播模型，探讨了企业风险偏好、信息完整性等因素对供应链风险传播的影响，发现这些因素能够有效抑制风险的进一步传播，杨小博^[5]提出了一种多维度的新能源汽车供应链风险传播关键节点识别方法，为新能源汽车供应链级联失效研究提供了新思路。

在研究复杂网络级联失效的问题上，网络结构的特性对其鲁棒性具有重要影响。杨景峰^[6]通过基于复杂网络理论的研究指出，上海轨道交通网络具有小世界网络和无标度网络的特性，重要站点的失效对网络的整体影响更为严重。Vito Latora^[7]对波士顿地铁网络的研究表明，通过增加其他交通系统，如公交线路，可以有效提高地铁网络的全局和局部效率，使其更加符合小世界网络的特性。赖强^[8]通过对某市公交网络的分析，提出了低度数和低介数加边策略，这种策略能够有效提升公交网络的鲁棒性。程静^[9]则提出了针对地铁网络的级联失效恢复策略，研究表明，重要度优先的恢复方式在地铁网络失效后的恢复中表现最佳，尤其在关键节点失效时能够显著提升网络的恢复效果。

在应对级联失效的过程中，恢复策略的选择对网络的韧性至关重要。Wu^[10]则研究了电力网络与交通网络的耦合关系，提出电动汽车的频率调制特性能够削弱两者间的级联故障传播。李成兵^[11]采用多智能体模型对城市群客运网络的脆弱性进行了动态仿真，提出基于

迪杰斯特拉算法的最短路径算法在网络攻击后的恢复中具有较好的效果。封益航^[12]结合 NK 模型与复杂网络理论,提出了一种动态修复策略,通过调整网络规模和节点关系密度,提高了物流网络的抗毁性。此外,朱璋元^[13]通过引入 CML 模型,提出了一种基于恢复动力学的复杂网络恢复方法,考虑了现实中的资源约束与拓扑特征,帮助系统在级联失效后快速恢复。邓子玥^[14]基于改进的引力模型,提出了一种供需网络的鲁棒性评价方法,研究表明,当网络恢复能力较弱时,网络在故障传播中的受影响规模会更大。此外,朱文金^[15]研究了可重构网络中的级联失效行为,提出了一种基于信息载荷分配的多状态失效规则

80 密度,提高了物流网络的抗毁性。此外,朱璋元^[13]通过引入 CML 模型,提出了一种基于恢复动力学的复杂网络恢复方法,考虑了现实中的资源约束与拓扑特征,帮助系统在级联失效后快速恢复。邓子玥^[14]基于改进的引力模型,提出了一种供需网络的鲁棒性评价方法,研究表明,当网络恢复能力较弱时,网络在故障传播中的受影响规模会更大。此外,朱文金^[15]研究了可重构网络中的级联失效行为,提出了一种基于信息载荷分配的多状态失效规则

85 和动态重连规则,该规则能显著增强网络的抗毁能力。

基于以上文献的研究,现有的研究多集中于复杂网络理论的应用,本文进一步聚焦于新能源汽车供应链网络,针对其节点间复杂的合作与竞争关系以及多层级结构的特点,探讨了风险传递与级联失效的内在机制,并且设计了虚拟网络生成方法,使得虚拟网络与真实的新能源汽车供应链网络保持高度相似,以填补当前研究中对新能源汽车供应链网络风险扩散规律及抗毁性优化不足

90 的空白。

1 新能源汽车供应链网络模型

1.1 新能源汽车供应链网络描述

汽车供应链网络是一个以少数整车制造企业为核心的复杂系统,涵盖了多层次的供应商、分销商和零售商。这一网络不仅具有多层级结构,还表现出供需关系的复杂性以及动态的网络拓扑结构。汽车供应链的网络具备核心节点数少、层级多、关系复杂等特征,根据现实情况可将汽车供应链网络分成五个层级:二级供应商、一级供应商、整车制造商、分销商和零售商。

95 汽车供应链的网络具备核心节点数少、层级多、关系复杂等特征,根据现实情况可将汽车供应链网络分成五个层级:二级供应商、一级供应商、整车制造商、分销商和零售商。

1.2 节点初始风险及最大容量

初始风险值的计算和自身节点的度值、邻居节点的度值相关,初始风险值体现出自身度值在邻居节点中的比重,形象的表示企业在周围有关系的企业中所占据的地位比重^[16]。使用节点的度与邻居节点度的乘积表示自身初始风险值,使用可调参数控制风险强度大小。初始风险的赋值的表达式如下式:

100 初始风险值的计算和自身节点的度值、邻居节点的度值相关,初始风险值体现出自身度值在邻居节点中的比重,形象的表示企业在周围有关系的企业中所占据的地位比重^[16]。使用节点的度与邻居节点度的乘积表示自身初始风险值,使用可调参数控制风险强度大小。初始风险的赋值的表达式如下式:

$$L_i(0) = \left(k_i \sum_{j \in \Theta_i} k_j \right)^\alpha, i = 1, 2, \dots, N \quad (1)$$

由于初始的网络连接是固定的,在设置初始风险值时,每个节点的初始风险取决于各自的节点连接数,因此,网络中所有节点的初始风险均可确定,其中, α 为调控初始负载强度的参数。

105 由于初始的网络连接是固定的,在设置初始风险值时,每个节点的初始风险取决于各自的节点连接数,因此,网络中所有节点的初始风险均可确定,其中, α 为调控初始负载强度的参数。

1.3 最大风险承受能力

在新能源汽车供应链网络中,企业都会承担超过一定风险的能力,根据 Motter^[17]等人的理论,企业的最大风险承受能力与其初始规模呈正相关关系,节点的最大承受能力表达如

110 下式:

$$C_i = (1 + \beta)L_i(0) \quad (2)$$

其中 β 是企业的风险承受系数($\beta > 0$)。最大风险承受能力表示企业允许风险在一定区间变化,并不是超过初始风险就会崩溃,最大风险承受能力才是判断的依据。

由上式可知,网络总体的风险能力 C 可以用下式表达:

$$C = \sum_{i=1}^n C_i = \sum_{i=1}^n (1 + \beta)L_i(0) \quad (3)$$

1.4 风险扰动与失效值

120 使用风险扰动表示企业在生产过程中因供应链内外部环境引起的风险增加,其原因往往具有不确定性,如自然灾害引起的企业停工、采购质量不合格等,均会引起企业的风险增加。节点的失效定义为:当风险扰动大于最大风险承受能力时,企业可能对面临亏损甚至停工,那么该企业节点失效,进而将风险扩散给周围邻居节点,失效节点退出物流网络,不再参与后续交互行为。风险扰动采用随机噪声值表示:

$$n_i(t) = \lambda r_i(t) \quad (4)$$

其中 $r_i(t)$ 是随机风险扰动值,在仿真中每一时刻的在 $[-0.5, 0.5]$ 之间取任一浮点数。 λ 是风险调节参数。

1.5 风险转移重分配策略

130 风险转移重分配是导致级联传播过程的根本原因,风险转移是指节点 j 失效后的风险向邻居节点 i 转移的负载流,负载流的大小由于转移策略不同而会有不同的值。在实际运营中,一旦新能源汽车供应链网络中的某个企业节点失效,它通常会依赖合作伙伴的资源进行补救,比如通过获取物料零部件、资金支持、人员调动以及贸易协作等多种方式来应对这一危机。为避免级联失效影响范围的进一步扩大,企业会根据一定的策略让负载合理转移,即风险承受能力强的企业多承接负载,风险能力弱的企业少承受负载。根据现实情况,设计了三种不同的风险转移重分配策略。

1.5.1 关系紧密度转移策略

135 在新能源汽车供应链网络中,当某个企业节点失效时,与其关系越紧密的企业受到的风险影响越大。关系紧密度的计算如下式:

$$W_{ij} = (K_i K_j)^\theta \quad (5)$$

其中 K_i 是失效节点的度值, K_j 是失效节点的某个邻居的度值, θ 是关于关系紧密度的可调节参数。将关系紧密度赋值给两节点之间的连边,当节点 i 失效时,按照关系紧密度转移策略分配给 j 的负载为:

$$L_{ij}(t) = \frac{W_{ij}}{\sum_{j \in v_i} W_{ij}} L_i(t) \quad (6)$$

其中 v_i 是节点 i 的邻居集合， $L_{ij}(t)$ 表示在 t 时刻， i 节点向 j 节点转移的负载量。关系紧密度转移策略意味着当某企业节点失效时，会按照关系紧密度的大小顺序将风险负载转移，关系越紧密的企业受到的风险影响越大，这与现实情况也是相吻合的。

1.5.2 容量分配策略

145 与关系紧密度类似，容量分配策略的原则是根据容量大小将失效节点 i 的风险负载分配给邻居节点，转移负载计算如下式：

$$L_{ij}(t) = \frac{C_j}{\sum_{j \in v_i} C_j} L_i(t) \quad (7)$$

150 从上式可以看出，容量分配策略是将风险负载优先转移给邻居企业中容量较大的企业，而企业容量和本身的度值有关，即与该邻居节点合作的企业较多。在新能源汽车供应链中，若某企业节点失效，优先向具有较多合作伙伴的企业寻求帮助，如原材料的供给、资金支持等。

1.5.3 剩余容量分配策略

与容量分配策略不同，剩余容量策略是将失效节点邻居中的企业节点当前时刻剩余容量作为转移量的指标，则邻居节点被转移的负载计算为下式：

$$155 \quad L_{ij}(t) = \frac{C_j - L_j(t)}{\sum_{j \in v_i} (C_j - L_j(t))} L_i(t) \quad (8)$$

根据剩余容量策略的设定，出现故障的企业节点会将其超负荷的风险传递给邻近备用能力更强的企业，一旦某企业遭遇停产危机，应主动联系那些拥有充足冗余资源与备份能力的合作伙伴，该策略相比较于仅考虑容量的策略更具有现实意义。

1.6 节点实时风险值

160 结合上述分析，对于任一节点 j 的实时风险值可以表述为下式：

$$L_j(t) = L_j(t-1) + n_j(t) + L_{ij}(t)x_j(t) \quad (9)$$

165 从上式可以看出，任一节点 j 的实时风险值包括三部分，分别是上一时刻的实时风险值 $L_j(t-1)$ 、当前时刻的风险扰动值 $n_j(t)$ 和被转移的风险负载值 $L_{ij}(t)$ ，被转移的风险负载值 $L_{ij}(t)$ 由不同的转移策略决定。 $x_j(t)$ 为二元0/1变量，只有当 j 的邻居节点有 i 节点失效时，自身存在被转移负载值时， $x_j(t)=1$ ，否则为0。

2 模型构建与算法设计

2.1 基于偏好度的供应链虚拟网络模型描述

多级汽车供应链网络的生成不仅要考虑各个层级的关系，而且要考虑各个层级节点的比例和连接偏好，不同层级之间存在合作关系，同一层级之间存在竞争性合作，此外，在新生

170 成节点时还需要考虑当前企业节点在整体网络中占据的重要性，因此，考虑偏好度的网络连接关系更具有现实意义。

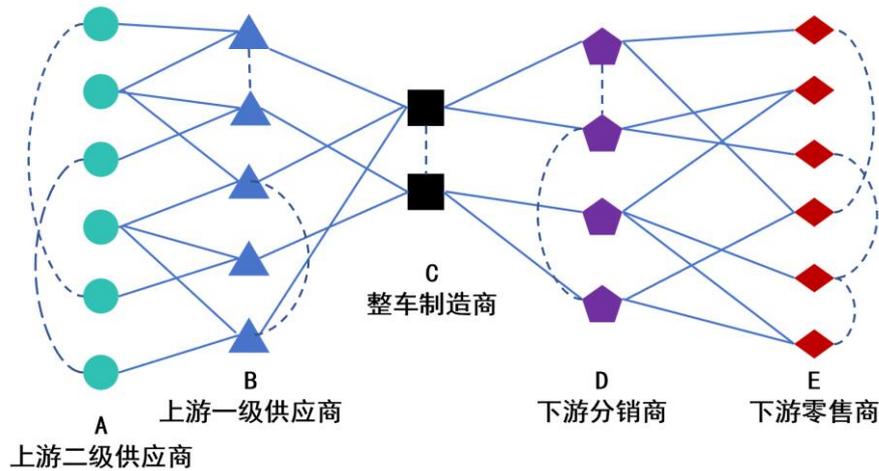


图1 多级新能源汽车供应链网络结构

Fig. 1 Multi-level new energy vehicle supply chain network structure

175 如图 1 所示为构建的基础多级新能源汽车供应链网络，图中的实线用于刻画相邻层级之间的合作关系，而虚线则代表同一层级的竞争关系。在该网络中，将上游二级供应商、上游一级供应商、整车制造商、下游分销商和零售商，从左至右分别用 A、B、C、D、E 表示。在该网络中，各层级的企业数量存在显著差异，各个层级企业数量距离整车制造商越远，数量越多，距离核心生产商的距离越近，数量越少。在后续生成新节点加入时，设置不同的节点加入概率，本文设置概率大小的关系为： $E > A > D > B > C$ ，各个层级的加入概率加和为 1。

185 此外，在真实的汽车供应链网络中，不仅企业的连接度会影响新入单元的合作意愿，节点企业的竞争实力也同样起到关键作用。基于此，本文提出了一种综合考虑连接度和竞争力参数的网络生成方法，当现存节点的连接度和竞争力越大，越有可能被连接，而面临退出的风险则相对较低。

190 网络模型可记为 $G = (V, E, U)$ ，其中， $V = \{V_1, V_2, \dots, V_5\}$ 代表各层级企业节点的集合，如 V^i 代表第 i 层级中的企业节点数量， $i = 1, 2, \dots, 5$ ， $E = \{E^1, E^2, \dots, E^5\}$ 则表示由各等级单元与其上下游及同级之间合作互动形成的边集， E^i 表示第 i 层级的连边集合； $U = \{U | U \in (0, 1], i \in V^i\}$ 定义了各等级中单元的竞争优势系数，数值越高意味着该企业在市场中越具优势，越有可能与新生成节点形成合作或竞争关系。

2.2 基于偏好度的供应链虚拟网络构建过程

195 在多级汽车供应链网络的建模与分析中，网络的演化过程是影响整个供应链结构和稳定性的关键因素。通过模拟不同层级节点的进入与退出，能够有效反映网络在实际运营中的动态变化。本节将详细描述该多级汽车供应链网络的演化算法，重点介绍如何通过一系列步骤，包括节点的初始设置、进入、优先连接、退出以及优先退出机制，以模拟和优化网络的变化过程。

第一步：初始化设定。

按照图 1 所示设置初始网络，在每一时刻生成一个 0-1 的随机数 H ，并且设定固定阈值 H_0 ， H_0 取值为 0.95，当 $H \leq H_0$ 时表示节点加入，反之表示节点退出。在执行节点加入程序

200 时, 随机生成一个新的节点, 并且根据设定的层级概率划分为其中某一层级, 具体操作为: 设定 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 的固定初始值, 满足 $0 < Q_1 < Q_2 < Q_3 < Q_4 < 1$, 并且满足 $1 - Q_4 < Q_4 - Q_3 < Q_3 - Q_2 < Q_2 - Q_1 < Q_1$, 在生成节点时随机生成 Q 值, 并且随机赋值竞争系数, 竞争系数取值为 $U_j^i \in (0, 1]$, 随后进入第二步, 执行节点加入程序。

第二步: 节点加入。

205 当 $H \leq H_0$ 时, 表示网络在扩展, 此时有五种情况:

- (1) 当 $Q < Q_1$ 时, 增加一个 E 层级节点;
- (2) 当 $Q_1 < Q < Q_2$ 时, 增加一个 A 层级节点;
- (3) 当 $Q_2 < Q < Q_3$ 时, 增加一个 D 层级节点;
- (4) 当 $Q_3 < Q < Q_4$ 时, 增加一个 B 层级节点;
- (5) 当 $Q_4 < Q < 1$ 时, 增加一个 C 层级节点。

210

当随机数 Q 落入某一特定区间时, 便会增加对应层级的节点。C 层级的概率区间较小, 新增节点数量也较少; 而 A 和 E 层级的概率区间较宽, 新增节点数量较多。在生成节点后执行第三步连接操作。

第三步: 优先连接。

215 新生成的节点需要寻找合作和竞争节点进行连接, 此时引入优先连接系数为 Π_j^i , 连接系数的计算公式如下:

$$\Pi_j^i = \frac{1}{2} \left(\frac{k_j^i}{\sum_j k_j^i} + \frac{U_j^i}{\sum_j U_j^i} \right) \quad (10)$$

k_j^i 表示第 i 个层级中某节点 j 的度值, $\sum_j k_j^i$ 表示第 i 层级节点所有度值之和。 U_j^i 是已存在节点的竞争系数, $\sum_j U_j^i$ 表示 i 层节点的竞争系数总和。遍历所有节点, 当满足该链接系数的概率时, 则形成连接, 否则不连接。通过连接系数的计算公式可以看出, 该方法同时考虑了连接度和连接偏好两种综合因素, 形成的网络更加符合现实情况。

220

第四步: 节点退出。

当 $H > H_0$ 时, 随机选择一个节点退出, 退出的节点从网络消失, 不参与后续计算, 同样的, 在选择节点退出时, 也分为五种情况:

225

- (1) 当 $Q < Q_1$ 时, E 层级节点退出;
- (2) 当 $Q_1 < Q < Q_2$ 时, A 层级节点退出;
- (3) 当 $Q_2 < Q < Q_3$ 时, D 层级节点退出;
- (4) 当 $Q_3 < Q < Q_4$ 时, B 层级节点退出;
- (5) 当 $Q_4 < Q < 1$ 时, C 层级节点退出。

230

在确定某一层级节点退出后, 需要选择具体该层级的节点, 此时执行第五步操作。

第五步: 优先退出。

在选择某一节点退出时, 遵循优先级系数计算规则, 引入参数 P_{ji} , 具体计算公式为:

$P_j^i = 1 - \Pi_j^i$ 。当满足该概率时，节点退出，否则计算下一节点，当该层级所有节点计算完毕后，第五步操作结束。

235 以上规则将循环执行，直到网络规模达到N。

综上所述，当度值和竞争系数较高的节点更容易存活，并且后续新生成节点更倾向于与该种类型节点相连，这与现实的汽车供应链网络中的企业合作关系选择相符，因为度值表示该企业的综合能力与业务数量更多，规模更大，并且竞争系数较高更具有市场竞争力，不容易被市场取代。

240 **2.3 级联失效算法**

物流网络中的各个节点可能会因为各种突发事件发生故障，当某一节点发生故障时，其原本风险和超过的风险量会转移给邻近节点，其中转移风险量由转移的策略决定。邻居节点可能会因为转移而来的风险导致自身也发生故障，因此再次发生一次新的风险转移过程，因此一个节点故障可能会导致多个节点或整个网络节点瘫痪。图2是风险转移过程示意图。以图2为例，在图2(1)中，是网络初始状态，节点i的邻居包括{j₁,j₂,j₃,j₄,j₅}，在i节点失效后，风险会转移给邻居节点，转移的规则按照风险负载转移策略进行，邻居节点在接收到转移而来的风险后，如果超过自身的最大风险负载能力，在下一时刻也会失效，如图2(3)，j₁、j₄、j₅变成失效节点，j₁由于自身变成失效节点，由于j₂同样也是j₁的邻居，则j₂也将会在下一时刻传播给j₂点，而j₂、j₃并没有失效，正常参与接下来的交互。

250

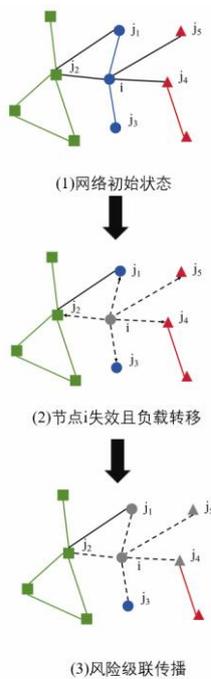


图2 风险负载转移过程示意图

Fig. 2 Schematic diagram of risk load transfer process

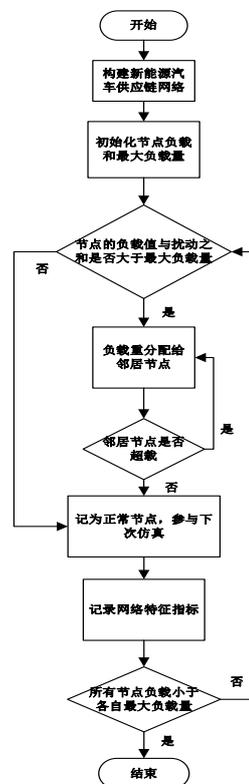


图3 级联失效过程

Fig. 3 Cascade failure process

在构建完新能源汽车供应链网络之后，网络中存在 n 个节点，m 条边，每个节点代表一

255 个企业，每个节点被赋予一定的初始风险值和最大风险耐受值。图 3 是级联失效的流程示意图。

在随后的仿真过程中，在下一时刻，每个节点 i 承受的风险值为上一时刻风险值加上此刻风险扰动值，若两者之和大于最大风险耐受值，则节点 i 会发生故障失效。节点 i 失效后，当前时刻的风险值会按照风险重分配具体的策略转移给邻居节点 j 。

260 风险重分配后，节点邻居节点 j 的当前风险量为自身原始风险量、风险扰动风险量和由节点 i 转移而来的风险量三者之和，若此刻的风险量大于节点 j 的风险量，那么节点 j 也会失效，在网络中体现出级联传播的过程。

在最后更新所有网络节点的风险值，超过风险量的节点退出网络，不参与后续的交互过程，与邻居节点断开连接。当网络中所有节点风险值小于最大耐受值时，级联失效过程停止。

265 2.4 鲁棒性评估指标

为了分析在不同转移策略和恢复策略情况下的网络鲁棒性，需要选取合适的指标进行评价。

2.4.1 风险传播范围

270 风险传播范围表示级联失效影响的程度，用失效节点的占比表示，具体的计算公式如下式：

$$P = \frac{N_d}{N} \quad (11)$$

其中 N_d 表示当前网络中失效节点数量， N 表示网络节点总数量。 P 表示失效节点的占比， P 的值越大，代表级联失效风险传播范围越大。

2.4.2 风险冲击强度

275 在网络中使用最大联通子图的节点数量表示当前网络的健壮性，最大联通子图的节点数量越少，说明原始网络被分解的越分散，对网络冲击越强。因此定义下式为风险冲击强度：

$$Q = 1 - \frac{M}{N} \quad (12)$$

280 其中 Q 表示风险冲击强度， M 为当前网络中最大联通子图的节点数量。风险冲击强度 Q 越大，最大联通子图的节点数量越少，网络越趋于“碎片化”；风险冲击强度 Q 越小，最大联通子图的节点数量越多，网络越完整。

2.4.3 网络效率

285 网络效率各节点之间连接的难易程度，对于任意一对节点 i 和 j ，其间的连接效率可通过最短路径距离的倒数来量化。若二者之间不存在可达路径，则最短路径趋于无限大，两节点间的网络效率为 0。对整体网络的所有节点对的效率取平均，即为全局网络效率，其表达式如下：

$$E = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} \frac{1}{d_{ij}} \quad (13)$$

其中 E 表示网络效率，其值越大表示网络中各节点之间的路径长度越短，网络效率越高，反之，网络效率越低。

3 结果分析

290 在结果分析中，首先采用真实汽车供应链网络数据作为案例分析，首先验证由风险扰动引起的网络风险级联传播，观察容限系数对结果的影响，然后攻击网络中不同度值的节点，观察级联传播效果，随后对比了三种转移策略对结果的影响。最后，为了验证虚拟网络和真实网络的对比，在设定同样的初始条件下生成虚拟网络，对比传播效果，以验证虚拟网络的有效性。

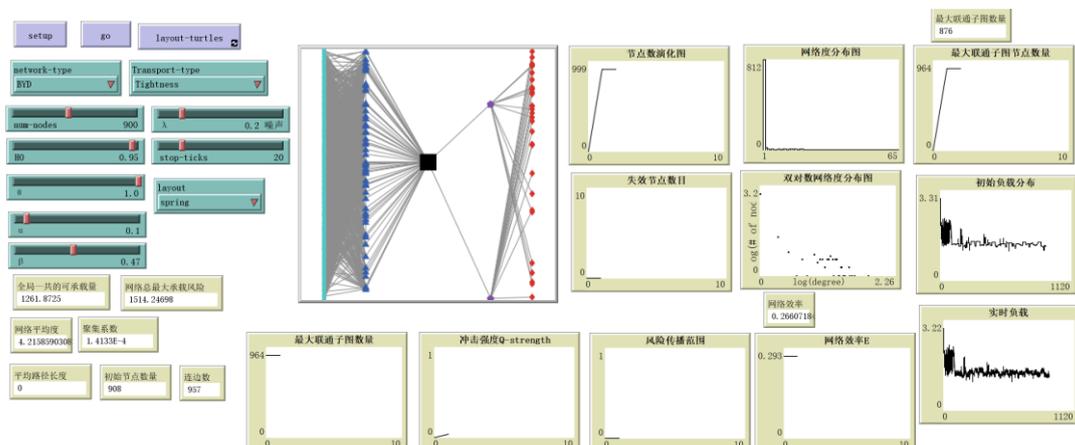
295 3.1 比亚迪供应链网络仿真结果分析

在本节中，我们引入了比亚迪真实供应链网络数据，探讨新能源汽车供应链网络中级联失效的典型特征。比亚迪作为国内新能源汽车领域的代表企业，其供应链网络涵盖了从上游零部件供应商、一级和二级供应商，到整车制造、分销及零售等多层次节点，具有结构复杂、节点间互动紧密且竞争与合作并存的特点。

300 本研究所使用的比亚迪数据均来源于 IFIND 金融数据平台，该平台作为专业的金融信息数据库，提供了大量上市公司的详实经营数据与供应链信息。通过对比亚迪股份有限公司的公开数据进行系统整理，我们收集了其上游供应商和下游客户的关键信息。这些数据不仅涵盖了比亚迪与各供应商及客户之间的交易记录和合作关系，而且能够较为真实地反映出比亚迪汽车供应链的上下游结构和动态演化特征。对数据进行清洗后导入至仿真软件，网络节点数为 908，957 条连边，网络平均度为 4.22，网络聚集系数为 0.00014。

3.1.1 网络特征分析

310 在仿真阶段采用了 NetLogo 仿真环境构建和分析比亚迪汽车供应链网络。将前期收集并清洗整理后的供应链数据导入后，根据各节点与边的实际属性、连接关系以及相关参数设定了网络结构，并在此基础上实现风险扰动、节点失效及级联传播的动态模拟。NetLogo 对各类模型参数及指标可视化支持良好，能够直观观察网络中节点度分布、最大连通子图数量、实时风险负载分布等关键指标的变化过程，为后续的鲁棒性评估与策略优化提供了高效便捷的仿真分析平台。仿真界面如图 4 所示。



315

图 4 Netlogo 仿真界面

Fig. 4 Netlogo simulation interface

如图 5(a)所示, 比亚迪汽车供应链网络的整体结构呈现出“中心-多层”特征: 中间的黑
 色方形节点代表核心制造企业, 左侧的节点则分别表示上游一级供应商和二级供应商, 右
 侧节点表示下游经销商与零售商, 各节点之间通过灰色连线表示业务或供应关系。图 5(b)
 给出了该网络的度分布情况, 横坐标为节点度, 纵坐标为具有相应度值的节点数量。观察
 结果表明, 多数网络个体的连结数量维持在较低水平, 只有少数个体具有较高的度值, 形
 成了明显的长尾分布趋势, 这充分揭示了比亚迪汽车供应链网络所具有的无标度特性。

320

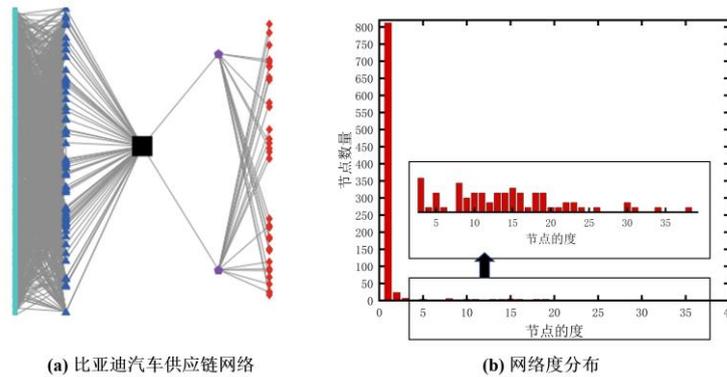


图 5 比亚迪汽车供应链网络特征

Fig. 5 Characteristics of BYD Auto Supply Chain Network

325

如图 6 所示, 本研究展示了网络中各节点的初始风险分布情况, 其中横轴表示节点编
 号, 纵轴则反映了各节点的初始风险值。

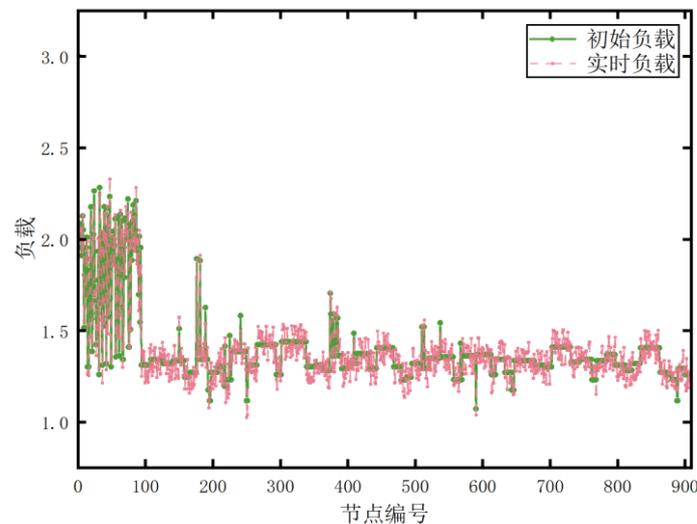


图 6 网络初始风险负载分布图

Fig. 6 Network initial risk load distribution diagram

330

为引入随机风险扰动, 对每个节点设定了随机噪声, 从而构造出随机风险负载图。风险
 分配采用容量分配策略, 在设定扰动参数 $\lambda=0.2$ 的条件下, 各节点的实时风险负载发生了
 显著变化, 相较于初始负载, 其在每一时刻均呈现出随机的上下波动趋势。

3.1.2 风险扰动级联传播

335

为探究关键参数对风险级联失效传播的影响, 每次实验使用容量分配策略进行仿真,
 当 $\alpha=0.1$, $\lambda=0.3$, β 分别取 0.04、0.08、0.12 时, 测试级联风险传播过程, 每种情况均

仿真 100 次取平均值，以消除随机因素的影响。结果如图 7 所示。

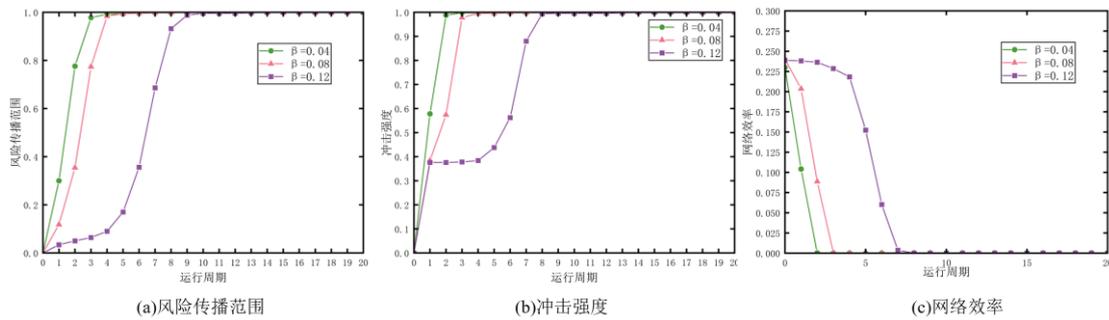


图 7 容限系数对网络的影响

340 Fig. 7 Influence of tolerance coefficient on network

图 7(a)展示了在不同容限系数 β 下，风险传播范围随时间演化的过程。可以观察到， β 较小时，网络的风险耐受能力显著降低，失效节点数量迅速增加并在较短时间内达到饱和值；而当 β 较大时，风险在网络中的传播速度明显放缓，失效节点的累积增速也相对平缓，表明更高的容限系数有助于抑制风险级联效应。

345 图 7(b)则描绘了风险传播过程中冲击强度随迭代次数的变化。随着风险不断蔓延，网络的整体连通性逐渐被削弱，最大连通子图规模持续缩减。与此同时， β 越大，网络维持较大连通规模的时间越长，说明在容限系数提升后，网络对风险冲击的抵御能力增强，延缓了网络结构崩溃的进程。

350 图 7(c)给出了全局网络效率随演化时间的变化曲线。可以看到，当风险在网络中加剧传播时，网络效率会随之下降，并最终在某个时间点出现崩溃失效的情况。对于较小的 β 值，网络效率在初期就迅速衰减至零；而当 β 取值较大时，网络保持较高效率的时间被显著延长，说明适当提高容限系数能够在一定程度上减缓网络效率的损失并推迟整体崩溃的发生。

3.1.3 节点失效仿真分析

355 通过攻击固定节点类型引起级联传播的方式，对网络特征数据进行分析。以下是攻击网络中度值不同节点时的仿真情况。其它参数取值分别为： $\alpha = 0.1$ ， $\lambda = 0.1$ ， $\beta = 0.1$ ，攻击网络中三个度值分别小于等于 2、4、6 的节点时指标传播范围、冲击强度、网络效率的变化图。

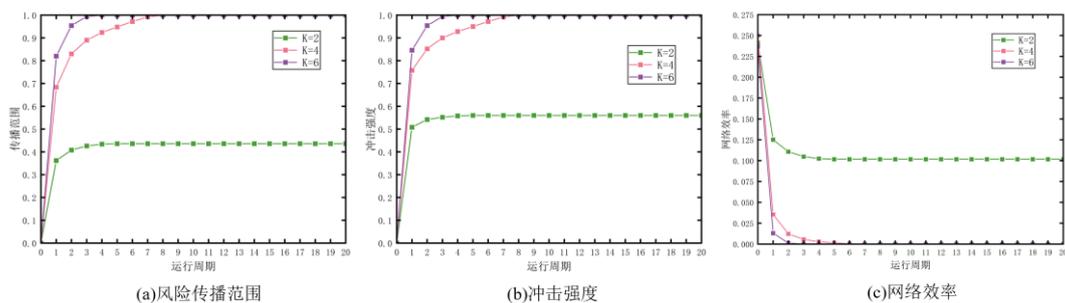


图 8 攻击不同度值的节点对网络的影响

360 Fig. 8 Impact of attacking nodes with different metrics on the network

从图 8(a)可以看出，当攻击目标是度值为 6 的节点时，网络中失效节点的比例在极短时间内便大幅上升，风险传播迅速波及整个网络，远超攻击度值为 2 或 4 时的影响。图 8(b)进一步表明，度值较高的节点一旦遭到攻击，会引发更剧烈的级联效应，使得网络效率急剧下

滑，节点之间维持互联的难度随之增大；相比之下，度值较低的节点失效对网络整体效率的冲击相对有限，说明高连接度节点的失效会使网络更早地分化为若干没有外部连接的孤立子节点。

从图 8(c)中可以看出，当攻击节点的度值较高（ $K=4$ 或 $K=6$ ）时，网络效率在初期即迅速衰减至近乎为零，并在后续时段维持在极低水平；相比之下，度值 $K=2$ 时，尽管网络效率也经历了明显下跌，但在短暂的波动后仍能保持在一定的正值上。这表明高度连接节点的失效会对网络整体协作能力造成严重冲击，使得系统效率在极短时间内崩溃，而低度节点的失效则带来的影响相对有限，网络尚能维持部分功能。

3.1.4 转移策略分析

设定参数的取值分别为： $\alpha=0.1$ ， $\lambda=0.3$ ， $\beta=0.1$ ， $\theta=1$ ，分析不同的风险分配策略对在级联失效过程中对网络的影响。

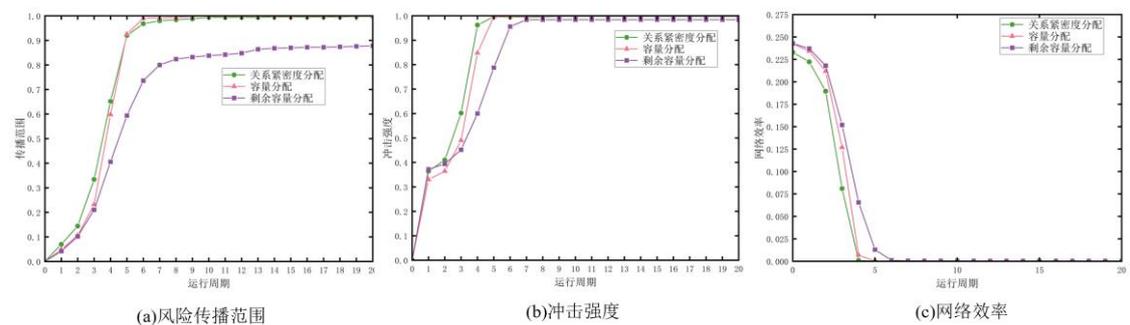


图 9 不同转移策略对比结果

Fig. 9 Comparison results of different transfer strategies

图 9(a)显示，不同风险分配策略在抑制风险传播范围方面存在明显差异。其中，“剩余容量分配策略”所导致的风险级联传播速度最为缓慢，能够在一定程度上减轻大规模风险扩散的威胁。

从图 9(b)可以看出，这三种策略对网络的冲击强度也不尽相同。采取“容量分配策略”或“关系紧密度分配策略”时，最大连通子图的节点数量会迅速减少，对网络结构的冲击最为明显；而采用“剩余容量分配策略”则能较好地维持网络的完整性，显示出更好的防护效果。因此，在应对较大风险扰动时，优先使用剩余容量分配策略能够有效地减弱网络崩溃的可能性。

结合图 9(c)可见，三种策略对网络效率的影响趋势较为相近，但剩余容量分配策略依旧能够延缓网络效率的衰减速度。综合来看，无论是从风险传播范围、网络冲击程度，还是网络效率的角度，剩余容量分配策略都能在更大程度上抑制风险蔓延，保护供应链网络的稳定性。对失效节点而言，向具备富余产能、安全库存或更强信息处理能力的合作企业寻求支持，能显著提升网络的抗风险能力并加快恢复进程。

就失效企业本身而言，若想快速的将自身风险转移，应该选择容量分配策略，而不是关系紧密策略，然而该策略由于没有考虑级联传播的影响，往往会导致大面积的节点失效。为了减小级联失效的影响，企业应该优先选择剩余容量分配策略。

3.2 虚拟网络与真实网络仿真结果对比

3.2.1 指标选取与参数设置

395 为了对比虚拟网络和真实网络的传播特征相似度，由于风险传播范围和风险冲击强度可以呈现出网络全局特征。因此，选取网络的风险传播范围和风险冲击强度作为对比指标，观察在各自参数一致时的变化情况。

参数设置操作具体如下：根据真实网络中不同层级的数量比例设置 Q1、Q2、Q3、Q4 的大小,在真实网络中，A 层级节点为 810 个，B 层级节点为 63 个，C 层级节点为 1 个，D 层级节点为 2 个，E 层级节点为 32 个，因此 Q1 取值 $32/908=0.035$ ，Q2 取值为 $0.035+810/908=0.927$ ，Q3 取值为 $0.927+2/908=0.929$ ，Q4 取值 $0.929+63/908=0.998$ 。由于真实网络中仅存在比亚迪公司一个 C 层级节点，因此在仿真的最后，为了确保 C 层级的数量和真实网络一致，添加调整操作，随机消除 C 节点使得 C 层级节点只能为 1 个，并且使该消除的 C 层级节点原有的邻居均连接至另外一个 C 层级节点。在两种网络中，设置的参数保持一致，虚拟网络节点数和真实网络数量一致，其中参数具体设置为： $\alpha=0.1$ ， $\theta=1$ ， $\lambda=0.2$ ，观察 β 在 $[0,0.1]$ 之间变化时，对风险传播范围和风险冲击强度的影响

3.2.2 结果对比

在设置完参数后，进行 100 次单独实验，取最终平均值，真实网络与虚拟网络的容限系数对冲击强度的影响如图 10 (a) 所示，x 轴坐标为时间，y 坐标为容限系数，z 坐标为冲击强度，图 10 (b) 和图 10 (c) 分别为虚拟网络和真实网络的冲击强度投影热力图；图 11 (a) 为虚拟网络和真实网络对传播范围的影响结果；图 11 (b) 和图 11 (c) 分别为虚拟网络和真实网络的传播范围投影热力图。在衡量曲面相似度的指标上，选取均方误差、相关系数和余弦相似度作为衡量指标。

415

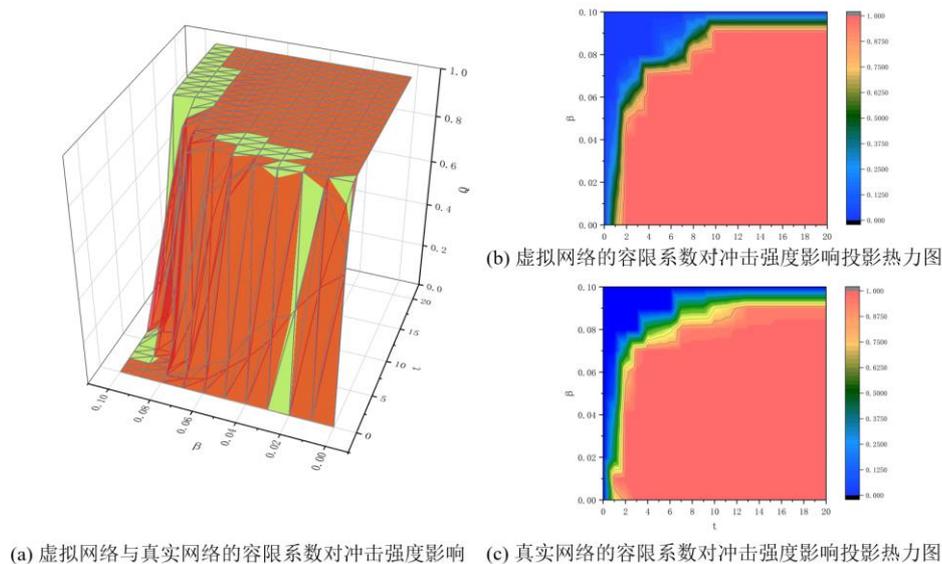


图 10 两种网络的容限系数变化对冲击强度的影响

Fig. 10 Effect of changes in tolerance coefficients of two networks on impact strength

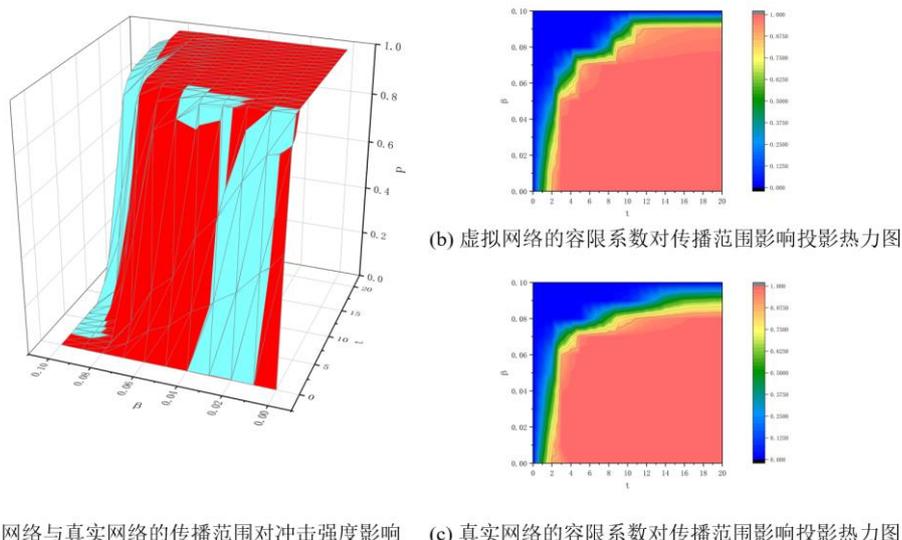


图 11 两种网络的容限系数变化对传播范围的影响

Fig. 11 Influence of changes in tolerance coefficients of two networks on propagation range

均方误差 (Mean Squared Error, MSE) 是计算两个数据集之间差异的常用方法。它通过计算每个对应坐标点的差异的平方并取其平均值来量化误差。MSE 的值越小, 意味着两个曲面在相同位置上的差异越小, 因此曲面更相似。

相关系数是衡量两个变量之间线性关系强度和方向的统计量。对于两个曲面来说, 相关系数可以用来量化两个曲面之间的线性相似性。它的值在 -1 和 1 之间: 1 表示完全正相关, -1 表示完全负相关, 0 表示没有线性关系。

余弦相似度是衡量两个向量之间夹角的度量。它基于两个向量的方向相似性来计算, 而不是它们的大小。对于曲面来说, 我们将其重塑为一维向量, 计算它们之间的夹角的余弦值。余弦相似度的值范围是 [-1, 1]: 1 表示两个向量完全相同, 方向完全相同; -1 表示两个向量的方向完全相反; 0 表示两个向量的夹角为 90°, 即没有方向上的相似性。值越接近 1 表示两个曲面在相同坐标上的方向相似, 即它们的形状非常接近。值越接近 -1 表示两个曲面方向相反 (例如一个上升一个下降), 形状完全不相似。值为 0 表示两个曲面在空间中互相垂直, 没有相似性。

分别计算图 10 和图 11 各自两个曲面的相似度, 具体结果如表 1 所示。

表 1 曲面相似度结果

Tab. 1 Surface similarity results

	冲击强度相似性	传播范围相似性
均方误差	0.0106	0.0134
相关系数	0.9680	0.9611
余弦相似度	0.9931	0.9905

根据表中结果, 可以看出两张曲面在数值幅值上的差异非常小, 0.01 左右的均方误差表示两个曲面的整体数值水平十分接近, 几乎没有明显偏差。说明它们整体偏差几乎可以忽略不计; 相关系数高于 0.96, 表示它们在变化趋势上高度线性正相关, 二者随同上升或下降的趋势十分吻合; 余弦相似度均高于 0.99, 表明二者在形状和方向上几乎完全一致, 综合上述三项指标可得出结论: 虚拟网络和真实网络得出结果曲面的相似度非常高, 无论从幅值、趋势还是方向来看都表现出高度一致性, 可认为虚拟网络传播特征与真实网络传播特征具有高度相似性, 进一步证实了本文提出的虚拟网络生成具有重要的现实意义和研究价值。

445 4 结论

本文以复杂网络理论为指导,构建了适用于新能源汽车供应链的多层级网络模型,对供应链中各节点风险传递与级联失效的内在机制进行了深入探讨。本文围绕新能源汽车供应链网络的复杂结构与动态风险特征,提出了一种结合偏好度与竞争优势的虚拟网络生成与级联失效分析框架。通过多层级网络建模、节点进入与退出机制、三种风险转移策略以及鲁棒性评估指标的综合运用,实现了对真实供应链网络的有效模拟,并在比亚迪供应链实证数据的对比中验证了虚拟网络的高度相似性和可行性。

在此基础上,设计了关系紧密度转移策略、容量分配策略和剩余容量分配策略三种风险转移重分配方案,构成了完整的风险传播和级联失效模型。通过仿真,并结合比亚迪供应链网络的实际数据进行动态模拟,研究揭示了以下主要结论:

455 (1) 当供应链中的核心节点发生故障时,风险会迅速通过网络扩散,导致多个节点出现连锁失效,从而对整个供应链系统的稳定性产生严重冲击;

(2) 不同的风险转移策略对级联失效过程和网络鲁棒性具有显著影响,其中剩余容量分配策略在延缓风险传播、减缓网络碎片化以及保持网络整体运行效率方面表现出较大优势;

460 (3) 容限系数等关键参数对网络风险扩散的程度具有决定性作用,适当提高企业的风险承受能力和优化节点间的风险转移机制,能够有效增强新能源汽车供应链的抗冲击能力。

总体而言,本文不仅丰富了复杂网络理论在供应链风险管理中的应用研究,也为新能源汽车供应链在面对突发风险时的韧性优化提供了理论依据和策略支持。未来的工作可进一步结合动态环境下的实时数据,探索多维度因素对供应链鲁棒性和恢复机制的影响,以期在实际供应链管理和决策提供更为全面和精准的指导。

465

[参考文献] (References)

- [1] LI Z, ZHAO P, HAN X. Agri-food supply chain network disruption propagation and recovery based on cascading failure[J/OL]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2022, 589: 126611[2024-09-16].
- 470 [2] 王文利, 李杰. 基于复杂网络的突发事件下汽车产业供应链韧性研究[J/OL]. *供应链管理*, 2024, 5(4): 63-77.
- [3] KANG X, WANG M, CHEN L, 等. Supply risk propagation of global copper industry chain based on multi-layer complex network[J/OL]. *Resources Policy*, 2023, 85: 103797[2024-09-16].
- [4] WANG J, ZHOU H, JIN X. Risk transmission in complex supply chain network with multi-drivers[J/OL]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2021, 143: 110259[2024-09-16].
- 475 [5] 杨小博, 高海伟, 刘天越, 等. 新能源汽车供应链的关键风险节点识别方法[J/OL]. *计算机科学*, 2023, 50(S1): 846-852.
- [6] 杨景峰, 朱大鹏, 赵瑞琳. 城市轨道交通网络特性与级联失效鲁棒性分析[J/OL]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(7): 250-258.
- 480 [7] LATORA V, MARCHIORI M. Is the Boston subway a small-world network?[J/OL]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2002, 314(1-4): 109-113[2024-09-16].
- [8] 赖强, 张宏昊, 王徐盱. 基于复杂网络理论的城市公交网络鲁棒性分析与优化[J/OL]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(10): 249-254.
- [9] 程静, 卢群, 吴同政, 等. 地铁网络级联失效恢复策略韧性评估方法[J/OL]. *交通信息与安全*, 2023, 41(4): 173-184.

- 485 [10] WU F, YANG J, JIANG H, 等. Cascading failure in coupled networks of transportation and power grid[J/OL]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 140: 108058[2024-09-16].
- [11] 李成兵, 李云飞, 吴鹏. 基于多智能体的城市群客运网络脆弱性动态仿真[J/OL]. 系统仿真学报, 2023, 35(6): 1183-1190.
- 490 [12] 封益航, 胡斌, 王莉丽, 等. 基于 NK 模型的动态修复策略下物流网络抗毁性研究[J]. 系统工程理论与实践, 2024, 44(4): 1405-1420.
- [13] 朱璋元, 王秋玲. 考虑级联失效与恢复接续性的复杂网络恢复动力学[J/OL]. 计算物理, 2024, 41(2): 258-267.
- [14] 邓子玥, 何建佳. 考虑故障恢复的产业互联“智造”供需网级联失效模型[J/OL]. 计算机系统应用, 2024, 33(7): 222-229.
- 495 [15] 朱文金, 王罗昊佳, 蔡志强, 等. 考虑级联失效的可重构网络抗毁性研究[J/OL]. 西北工业大学学报, 2021, 39(4): 839-846.
- [16] 王建伟, 荣莉莉, 王铎. 基于节点局域特征的复杂网络上相继故障模型[J/OL]. 管理科学学报, 2010, 13(8): 42-50.
- 500 [17] MOTTER A E, LAI Y C. Cascade-based attacks on complex networks[J/OL]. Physical Review E, 2002, 66(6): 065102[2024-09-28].