

考虑中断重连的供应链网络韧性研究

许莹

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年12月25日; 录用日期: 2025年1月18日; 发布日期: 2025年1月24日

摘要

本文探讨了供应链网络在中断和重连情况下的韧性, 重点分析了网络在遭受干扰后的恢复能力。通过模拟攻击供应链网络的关键节点, 研究揭示了节点地位对网络性能变化的影响。采用度中心性等指标评估节点重要性, 并构建BA无标度网络模型进行仿真实验, 模拟节点失效与恢复过程。研究发现, 网络中度排名较高的节点失效会对网络恢复后的连边造成不可完全恢复的影响, 而其他节点的失效与恢复过程对网络性能影响较小。因此, 建议在真实企业供应链网络中应重点保护度较高的节点, 以降低网络中断对工作效率的负面影响。

关键词

供应链网络韧性, 中断重连, 网络恢复

Research on Supply Chain Network Resilience Considering Disruptions and Reconnections

Ying Xu

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 25th, 2024; accepted: Jan. 18th, 2025; published: Jan. 24th, 2025

Abstract

This article examines the resilience of supply chain networks in the face of disruptions and reconnections, with a focus on the network's capacity to recover following disturbances. By simulating attacks on key nodes within the supply chain network, the study highlights the influence of node status on changes in network performance. Node importance is evaluated using metrics such as degree centrality, and a BA scale-free network model is employed for simulation experiments to model the process of node failure and recovery. The research indicates that the failure of nodes with

higher degree rankings can result in irreversible impacts on the network's connectivity post-recovery, whereas the failure and recovery processes of other nodes have minimal effects on network performance. Consequently, it is recommended that in actual enterprise supply chain networks, nodes with higher degrees should be given priority for protection to mitigate the adverse effects of network disruptions on operational efficiency.

Keywords

Supply Chain Network Resilience, Disruptions and Reconnections, Network Recovery

Copyright © 2025 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

一般来说, 现代的“供应链”是指企业的产品或者服务从原材料供应商到最终消费者的全过程, 包括从原材料采购、生产加工、产品仓储、分销、零售直到消费者手中的各个流程, 以及有关的物流、信息流和资金流等方面的相互流动, 这些流动如果看作企业之间的联系, 就会构建出复杂的网状结构[1]。在高效供应链中, 企业的市场竞争力以及持续发展的潜力都高于单一供应链中的企业。在当前全球供应链中断的情况下, 企业间的合作关系日益紧密, 跨区域的供应链使得供应链供需关系日益复杂。供应链网络常处于各种不可抗拒的复杂的动态环境中, 使得供需关系发生中断, 但作为一个动态的整体, 供应链网络在发生中断或受到干扰时, 其并不会一直处于失效状态, 作为其节点的企业会采取各种“自救”措施以求恢复到原来的经营水平。因此, 对供应链网络受到干扰后的恢复过程进行研究, 对维持企业间的供应链网络稳定性, 保证供应链网络的工作能力, 提高网络的恢复能力具有实际意义。

供应链网络作为企业合作的物质表现, 面临着不同的中断风险来源。现有的研究对供应链网络的研究大多以度中心性, 中介中心性, 接近中心性和特征向量中心性等指标为基础, 进一步赋予权重, 对节点的重要性进行识别排序。对于供应链网络韧性, 沈曦[2]等建立了风险传播模型, 从全球贸易网络和产业链投入产出关系的角度出发, 基于多层复杂网络理论, 对全球关键矿产资源贸易网络以及紧急风险模拟的风险传导机制进行建模, 并利用多风险情景模拟结果, 提出了网络中节点的弹性测量方法。Mark [3]等开创性地将生产供应比和航运运输连通性这两个最相关的属性结合起来, 开发一种在国家层面评估粮食供应链复原力的新方法。Behzadi [4]等使用包括时间、成本和恢复水平等多个方面的综合指标, 在供应链中提供新的弹性衡量标准, 为供应链韧性的计算提供了可参考的量化指标。Vijaya [5]等将基于网络结构参数的供应链弹性(R)d 评估采用 CVaR 作为风险衡量标准, 以捕捉严重风险中最坏情况下的弹性。

本文中模拟对供应链网络的关键节点进行攻击, 观察供应链网络的性能变化情况, 以寻找节点地位对供应链网络性能变化的影响规律。

2. 仿真实验

2.1. 指标选取

目前为止, 由于复杂网络具有重要的研究价值和广泛的应用场景, 在大多数研究中, 对网络性能提升以及恢复的研究占据大多数, 而网络中的关键节点很大程度上影响着网络的性能, 基于复杂网络关键节点的识别方法已经得到了广泛学者的研究成为一项热门研究课题, 传统的节点评估方法对复杂网络的

研究起到了关键的作用。

度中心性(DC)是复杂网络中最直接度量节点重要性的指标,节点的度越高,表明与其连接的节点越多,该节点越重要性;介数中心性(BC)是用来衡量一个节点在节点之间信息传播交流方面的重要性的指标,节点的介数中心性越高,表明该节点在所有节点之间的最短路径中出现的次数越高,起到的“桥梁”作用越大;接近中心性(CC)被看作衡量节点传播信息速度或敏捷性的指标,节点的接近中心性越高,表明从该节点出发到网络其他所有节点的距离更短,其传递信息的速度更快。

传统评估方法很多都忽视了供应链网络的动态性,只针对网络的静态性能进行研究。本文采用度中心性(DC)指标,研究节点受损对网络动态性能的影响,以更准确地反映实际供应链动态。目前有各种度量可以用于评估网络的工作性能,例如连通性、网络效率、可访问性与弹性,连通性与效率高的网络可以更快地传播信息,但越复杂精密的网络受到攻击后的影响也就越大,Tang (2006)认为网络性能的稳健性应该包括效率和弹性,有效性是指网络在受到攻击后能够更好的缓解冲击影响的能力,弹性是指不确定环境下网络受到强大攻击能够维持运行的能力。本文选用可访问性与连通性作为衡量网络工作性能的指标,其中,网络密度(ND)用于衡量可访问性,最大连通分量(SLCC)用于衡量连通性。

2.2. 网络构建

许多研究表明,现实的供应链网络都符合 BA 无标度网络的特征,即存在规模巨大的企业作为枢纽节点,并有很多几乎不相互关联的小型企业与其联系,使用 python 随机生成包含 100 个节点,平均度在 4 左右的完全连接的 BA 无标度网络。

初始网络为 50 个包含 2 个节点的全连接网络,每引入一个新节点,这个新节点就会与已存在的 2 个节点产生连边,并遵循“富者愈富”的效应,与已存在的节点 i 连接的概率 Π_i 与节点 i 的度成正比:

$$\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_j k_j}$$

每添加一个节点,都依据以上逻辑产生新的连边,并考虑到网络的增长性与优先连接机制,直至网络规模满足需求。

2.3. 仿真

由于 BA 无标度网络的分布遵循幂律分布,具有少量巨大的枢纽节点,而这一小部分枢纽节点对网络的影响远大于剩下的大部分节点,因此选择收集前十名重要节点的信息,将其分别做“失效”处理后观察网络性能变化情况。

设置节点 i 的失效阈值为 0.3,即当邻居节点失效数量占节点 i 所有邻居节点的 30%或以上时,节点 i 也变为失效状态,低于 30%时节点被赋予额外恢复概率。当网络随着失效的传播不再有符合失效条件的节点,也就是网络性能降至最低后,失效传播停止,启动恢复过程。根据每个节点的度赋予不同的基础自我恢复概率,但由于企业的恢复不仅取决于自身的“自救行动”,外在合作商的帮助也会帮助企业恢复,即外部邻居节点恢复到一定程度后该节点也会连带恢复正常状态。因此,同时考虑内在因素与外在因素,将恢复过程中每个时间步长下的失效节点恢复概率 P 设置为:

$$P_i = 0.5 * \frac{D_i}{D_{\max}} + 0.5 * p_i (p = 0.1)$$

在失效传播过程中,所有失效节点的邻居节点会被添加到“潜在失效节点”集合,并在每个时间步长进行更新,当“潜在失效节点集合”中有节点符合失效条件,该节点会被标记为“失效”状态,并移出“潜在失效节点”集合,同时,与失效节点相连的边会被添加到“失效边”集合,并从网络中移除。在网

络恢复过程中，将所有正常节点的处于“失效”状态下的邻居节点添加到“潜在恢复节点”集合，在每个时间步长中，当有“潜在恢复节点”中的节点恢复正常，则将其移出该集合，直到不再有新的节点恢复，网络达到新的稳定状态。

对于节点之间的连边，只有当其两端节点都恢复正常时，这条连边才会从“失效边”集合移出，并重新被添加到网络中。

整个实验流程见图 1：

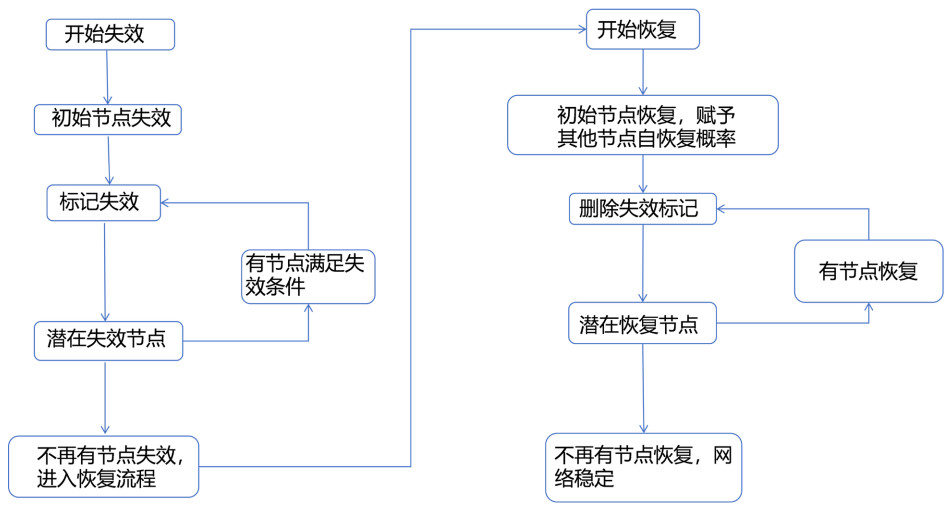


Figure 1. Network failure recovery process

图 1. 网络失效 - 恢复流程

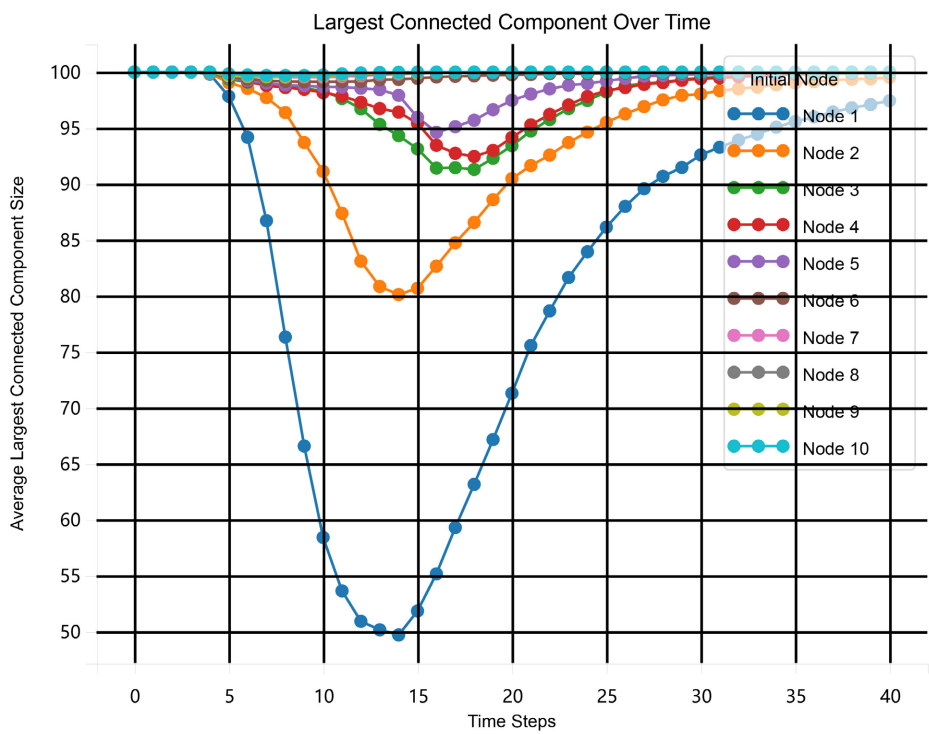


Figure 2. Change in the average maximum connected component

图 2. 平均最大连通分量变化情况

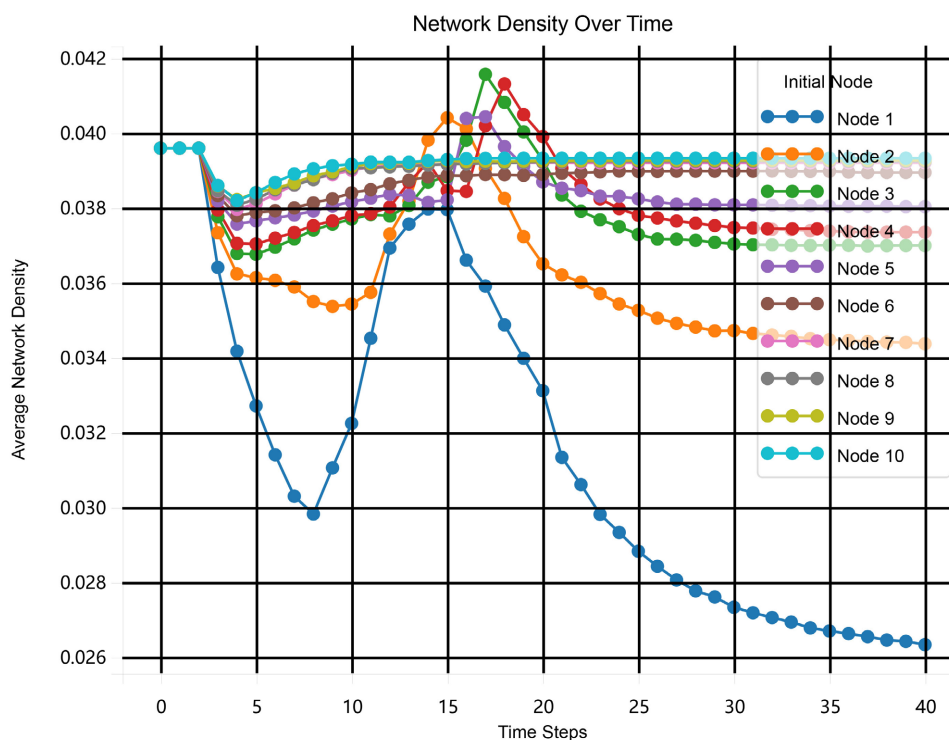


Figure 3. Changes in average network density
图 3. 平均网络密度变化

对 2.2 中构建的 50 个无标度网络分别进行模拟失效 - 恢复进程, 并取每个时间步长下五十个网络的平均网络密度(AND)与平均最大连通分量(ALCCS)的平均值进行记录, 结果见图 2、图 3。

3. 实验结论

3.1. 实验结果

图 1 显示了最大连通分量随时间步长的变化情况, 图中显示, 在网络的度前十的节点中, 排名 6~10 的节点中断扩散与恢复的过程并未对网络的连通性造成影响, 在实验过程中网络始终保持 100 的最大连通分量; 排名 1~5 的节点失效传播对网络最大连通分量影响程度依次加深, 且总体来看, 网络最大连通分量达到最小值的时间也随节点度的增加而变小; 开始恢复过程后, 都恢复至初始数值。

图 2 显示了网络密度随时间步长的变化情况, 图中显示, 在网络的度前十的节点中, 所有节点恢复后的网络密度都低于初始状态, 符合网络中断恢复后的一般规律; 其中 6~10 名的节点的失效 - 恢复传播过程中, 网络密度只存在下降 - 上升的变化, 并基本符合节点度越大, 网络密度波动越大的规律; 排名 1~5 的节点失效传播过程中都出现下降 - 回升 - 下降的变化情况, 最后网络密度趋向稳定的数值也随度的增大而减小。

3.2. 分析

结合网络性能的两个指标变化情况来看有如下内容。

排名 6~10 的节点失效传播并不会对网络造成大范围的影响, 在图 1 的失效 - 恢复过程中网络始终保持全连接的状态, 图 2 说明网络密度的下降时间也小于排名 1~5 的节点, 可以得出结论: 由度排名 6~10 的节点开始失效并进行传播并不会对整个网络造成很大影响。

对于排名 1~5 的节点,网络失效传播过程中,最大连通分量下降至最低点的时间在 $t = 14 \sim 18$ 的范围内,且度越大的节点失效传播速度越快,在最大连通分量下降的过程中,所对应时间的网络密度则呈现下降-上升的变化趋势,下降是因为最开始的失效传播期间网络的失效节点较少,受影响连边较多,随后上升至高于初始值是因为网络中失效节点的数量增加,网络密度受到节点数量的影响从而短暂升高,在失效过程结束时达到最高点。恢复时间段内网络密度反而下降的原因可能是随着恢复过程的进行,网络中正常节点的数量逐渐上升至稳定状态,但很少一部分节点始终未恢复正常,且这部分的节点所关联的边的数量随初始节点度的增大而增大。

总体来看,整个供应链网络中,度排名前五的节点对网络的性能变化影响比其余节点更大,造成的不可逆损伤更多,网络在经历变化后的性能比初始状态下降更大,可以认为这些节点是影响网络性能的重要节点。

4. 总结及建议

本文通过对建立的仿真供应链网络进行有针对性的破坏,并模拟失效-恢复过程,得出结论:对于无标度网络中度排名较前的节点(1~5 名),在失效后即便恢复到了新的稳定状态,也会零星有度比其小的节点始终不能恢复,说明在无标度网络中,这些节点的失效传播会对网络恢复后的连边造成不可完全恢复的影响,对于其他的节点,失效与恢复的过程不会对网络前后的性能造成影响。

对于真实的企业供应链网络,无论是从网络连通性还是从可访问性来看,要提升网络的整体韧性,都应该针对度较大的节点进行保护,如提高抗风险意识与加强企业间的沟通,着重保护度较高的节点与其连边,网络在经受针对这些节点的蓄意攻击后的新稳定状态相比原始状态,网络中的合作某个区域的连边显著减少,即便企业基本都恢复正常,连边的减少也会使网络的工作效率降低。后续可以寻找除节点度值外的其他属性对网络波动过程中性能变化状况的影响,并考虑有向加权网络中失效传播对网络性能的影响以及非单个节点失效下的网络变化情况。

参考文献

- [1] 崔俊英, 徐舒琪, 那旭, 等. 基于复杂网络理论的供应链研究[J]. 物理学报, 2024, 73(19): 161-183.
- [2] 沈曦, 郭海湘, 成金华. 突发风险下关键矿产供应链网络节点韧性评估——以镍矿产品为例[J]. 资源科学, 2022, 44(1): 85-96.
- [3] Poo, P.C.M., Wang, T. and Yang, Z. (2024) Global Food Supply Chain Resilience Assessment: A Case in the United Kingdom. *Transportation Research Part A*, **181**, Article No. 104018. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2024.104018>
- [4] Golnar, B., Michael, O.J. and Lennon, T.O. (2020) On Metrics for Supply chain Resilience. *European Journal of Operational Research*, **287**, 145-158. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.04.040>
- [5] Dixit, V., Verma, P. and Tiwari, K.M. (2020) Assessment of Pre and Post-Disaster Supply Chain Resilience Based on Network Structural Parameters with CVaR as a Risk Measure. *International Journal of Production Economics*, **227**, 107655-107655. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107655>