文章编号：1003-1421(2026)08-0180-08
引用格式：陈志新，冯艳玲，王敏. 轨道交通装备企业供应链网络脆弱性测度与去脆弱化策略研究[J]. 铁道运输与经济，2026，48(8)：180-187.
CHEN Zhixin，FENG Yanling，WANG Min. Research on Vulnerability Measurement and De-Vulnerability Strategies of Supply Chain Networks in Rail Transit Equipment Enterprises[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(8)：180-187.

轨道交通装备企业供应链网络脆弱性测度与去脆弱化策略研究

陈志新[1]，冯艳玲[2]，王　敏[1]

(1.北京物资学院 物流学院，北京　101149；2.北京邮电大学 经济管理学院，北京　100876)

摘　要：针对轨道交通装备供应链在随机故障与恶意攻击下的网络脆弱性问题，基于复杂网络理论构建由最大连通子图相对规模与全局网络效率变化组成的双指标脆弱性评估模型。以J企业为研究对象，分析其供应链网络拓扑特征，并在随机节点故障、蓄意节点攻击、随机连边故障、蓄意连边攻击4种情景下开展仿真模拟。结果表明，该供应链网络呈现明显的异构性和低聚类系数特征，节点分布较分散，鲁棒性较低；在节点蓄意攻击下，网络崩溃阈值显著降低；节点失效对网络脆弱性的影响明显高于连边失效。基于此，提出优化主体企业规模结构、提升节点间与模块间联结水平、完善供应商管理体系等去脆弱化策略，可为轨道交通装备企业的供应链韧性提升提供参考。

关键词：轨道交通；复杂网络；供应链网络；脆弱性；鲁棒性
中图分类号：U294.1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250811003

Research on Vulnerability Measurement and De-Vulnerability Strategies of Supply Chain Networks in Rail Transit Equipment Enterprises

CHEN Zhixin[1]，FENG Yanling[2]，WANG Min[1]

(1. School of Logistics, Beijing Wuzi University, Beijing 101149, China; 2. School of Economics and Management, Beijing University of Posts and Telecommunications, Beijing 100876, China)

Abstract: To address the network vulnerability of rail transit equipment supply chains under random failures and malicious attacks, this paper constructed a dual-indicator vulnerability evaluation model consisting of the relative size of the largest connected subgraph and the variation in global network efficiency based on complex network theory. Taking Enterprise J as the research object, this paper analyzed the topological characteristics of its supply chain network and carried out simulation experiments under four scenarios: random node failures, targeted node attacks, random edge failures, and targeted edge attacks. The results show that the supply chain network presents obvious heterogeneity and low clustering coefficient characteristics, with scattered node distribution and low robustness; under targeted node attacks, the network collapse threshold is significantly reduced; the impact of node failures on network vulnerability is significantly higher than that of

收稿日期：2025-08-11　　**修订日期**：2026-05-22
通信作者：冯艳玲(1987—)，女，山东济宁人，北京邮电大学经济管理学院副教授。
基金项目：国家自然科学基金项目(72101034)

edge failures. Based on this, de-vulnerability strategies including optimizing the scale structure of core enterprises, improving the connection level between nodes and modules, and improving the supplier management system were proposed, which can provide a reference for improving the supply chain resilience of rail transit equipment enterprises.

Keywords: Rail Transit; Complex Network; Supply Chain Network; Vulnerability; Robustnes

0　引言

当前城市公共交通市场广阔，轨道交通作为经济环保的出行方式，得到了迅速发展。轨道交通装备制造作为典型的安全性苛求系统，具有少量多样的定制化特征，产品复杂且涉及技术密集型零部件，其供应链网络系统呈现高度复杂性。轨道交通装备供应链涵盖上游原材料采购与研发设计，中游零部件、智能化系统及整车制造，下游系统集成和车体装配，各环节存在高度的依赖性与互联性。尤其是上游零部件供应商数量庞大、分布广泛，使得整个供应链容易受到内部管理、外部扰动及突发事件的影响，从而表现出较高的脆弱性。如何在复杂网络环境下识别供应链的脆弱点、评估风险传播机制并提升整体供应链效益，已成为轨道交通装备制造业亟待解决的重要问题。

关于供应链脆弱性的研究，国内外学者已从多个维度进行了系统探讨。近年来，理论研究强调结构暴露性、扰动传播性和系统功能衰减性对供应链脆弱性的综合作用，并指出应从网络拓扑结构、节点-边属性及恢复能力3个维度进行刻画，以弥补传统定性分析的不足[1-2]。在全球供应链面临疫情、地缘冲突及基础设施中断等频繁突发事件的背景下，供应链脆弱性呈现出“扰动触发—网络放大—系统偏离”的动态演化特征[3]。Wagner等[4]提出供应链特性决定其脆弱点及中断风险，Bak[5]将脆弱性界定为系统不稳定导致的潜在故障，而刘家国等[6]则强调脆弱性是供应链易受外界干扰的状态。总之现有研究普遍关注供应链关键节点、传导路径及经济后果，但大多停留于定性分析层面，缺少针对复杂制造业定量评估。

在影响因素方面，商业模式、地理聚集、精益库存策略及多层级依赖关系被认为是放大脆弱性的核心驱动因素[7]，信息系统安全、软件供应链脆弱性及数字平台依赖等新型风险也日益突出[8]。研究表明，少量关键节点或部件失效可能引发全局级联效应[9-11]。复杂网络理论在供应链关键节点识别、脆弱性测度及级联失效模拟中应用广泛，结合节点度、介数、关联模式等结构性指标与产能、流量、恢复时间等功能性指标，可构建定量脆弱性评估框架[12-18]。然而，现有研究多集中于粮食、电子、服装及农产品等传统制造业或快速消费行业，针对轨道交通装备行业的系统性、定量研究仍相对不足。尤其是轨道交通装备行业“强监管、高可靠、长周期、技术锁定”的特征，使其供应链在面临扰动时，脆弱性表现出独特的传导不对称性与结构-功能耦合特征[12]。

本研究以轨道交通装备供应链为研究对象，基于复杂网络中尺度分析理论，将供应链脆弱性解构为“结构脆弱性”(网络连通性损失)与“功能脆弱性”(效率衰减)2个可量化维度，构建最大连通子图相对规模与全局网络效率变化相结合的双指标脆弱性测度模型，以刻画供应链在随机与蓄意扰动下的动态演化特征。模型通过引入节点强度与边权值动态调整机制，实现对轨道交通装备供应链高定制、高技术锁定和强安全约束特性的适配。基于此，提出“优化主体结构—提升联结水平—完善供应商管理”三维去脆弱化策略，旨在为轨道交通装备行业提供可操作性强的供应链风险管理方案。

1　轨道交通装备企业供应链网络脆弱性测度

以轨道交通装备企业J(以下简称“J企业”)为例，该企业供应链上重要节点涵盖生产所需各个模块零部件(元器件、箱体、印制板等)的核心供应商及其业务关系，同时也包含供应链上其他业务运作模式，具有一定代表性。该企业供应链网络满足复杂网络特性，具有网络脆弱性。供应链网络中主要变量符号定义如下。$G(V, E, \boldsymbol{W})$表示由节点集V、边集E及权重矩阵$\boldsymbol{W}$组成的加权网络；$v_i(i=1, 2, \cdots, 37)$表示轨道交通装备供应链网络中的节点企业，网络初始节点共37个，其中1—13为二级供应

商，14—25为一级供应商，26—29为内部供应，30—31为核心节点企业，32—37为分销商；ε_{ij}表示节点v_i与v_j之间的业务信息传递效率；d_{ij}表示节点v_i与v_j之间的最短路径长度；V_N表示最大连通子图相对规模；V_E表示全局网络效率变化。

1.1　前提假设

供应链网络结构的脆弱性分析是在随机或蓄意2种攻击情况下，具体通过节点度、节点强度、边权值及节点或边的失效来评估供应链网络的静态脆弱性，并做出如下假设。

（1）供应链网络中某一节点或节点间边关系失效时，则该节点或边关系就不再是网络中的供应链成员和业务信息流，对其他节点企业不再提供任何业务。

（2）供应链网络中节点企业间的业务信息往来程度是不一样的，因而通过节点间边权值来反映节点间边关系程度，从而更好地反映连边对供应链网络脆弱性的影响程度。数值越大，对网络脆弱性的影响程度也就越大。

（3）供应链网络中节点企业的业务能力在仿真期内保持稳定，不考虑产能上限与资源约束因素，以突出网络拓扑结构对脆弱性的影响。

1.2　统计特征

采用的轨道交通装备供应链网络为有向加权网络。考虑到鲁棒性分析中主要关注连通性与效率指标，为便于计算，将有向网络在仿真阶段转化为无向加权网络。该简化不会改变网络连通性的统计特征，仅对方向性信息流产生微弱影响。对于统计特征部分，主要分析平均度$\langle k\rangle$、聚集系数C_i及最短路径L等指标，其计算方法参考文献[2]。

1.3　脆弱性测度

复杂网络的脆弱性分析，即抗毁性分析，是研究网络在节点的随机和蓄意攻击下，计算其最大连通子图的相对规模V_N和全局网络效率变化V_E，二者构成“结构–功能”双维度脆弱性指数。

最大连通子图相对规模V_N，用于表征网络在节点或连边失效后剩余最大连通子图占原网络规模的比例变化，V_N计算公式为

$$V_N = \frac{N - N'}{N} = 1 - \frac{N'}{N} \tag{1}$$

式中：N表示网络节点初始规模；N'表示节点或节点间连边失效后最大网络连通子图中节点企业数量。

V_N越大，表明此类节点或连边的失效对剩余供应链网络所造成的连通性影响程度越大，可能导致供应链网络的分解，形成多个规模较小的网络连通子图；而V_N越小，则表明此类失效事件对供应链网络所造成的连通性影响程度越低。然而，最大连通子图的相对大小V_N只能一定程度上表明供应链网络遭受节点或连边等中断情况后的网络连通性程度变化的大小，因而，需要再结合全局网络效率的变化V_E指标来整体分析供应链网络脆弱性变化，V_E计算公式为

$$\begin{cases} V_E = \dfrac{E - E'}{E} = 1 - \dfrac{E'}{E} \\ E = \dfrac{1}{N(N-1)} \displaystyle\sum_{i \neq j \in G} \varepsilon_{ij} \\ \varepsilon_{ij} = \dfrac{1}{d_{ij}} \end{cases} \tag{2}$$

式中：E表示初始网络效率；E'表示节点或节点间连边失效后的网络效率。

V_E越大，表明此类节点或连边的失效对剩余供应链网络所造成的网络效率变化程度越大，导致供应链网络节点企业之间业务往来信息的交流成本越高，整体网络的脆弱性程度也就越大；而V_E越小，则表明此类失效事件对供应链网络所造成的网络效率变化程度越小，对节点企业间的运作成本影响也就越小，不会对整体供应链网络的正常运行造成显著影响。

2　轨道交通装备企业供应链脆弱性算例分析

2.1　网络结构统计特征分析

将J企业供应链网络视为无向网络，计算得平均度$\langle k\rangle$=1.945 9，度分布极度不集中，聚集性差。将该网络视为有向网络，仿真分析各节点度，得出平均入度$\langle k_{\text{in}}\rangle$=0.897 3，平均出度$\langle k_{\text{out}}\rangle$=0.897 3，出入度平衡验证了数据一致性。最大度$k_{\max}$=12，最小度$k_{\min}$=1，度分布的不均匀性，表明网络具有显著异构性：少数核心节点拥有高度数，构成网络骨架；大量叶节点供应商k=1形成脆弱末梢。该网络中核心节点企业与其他部分节点企业相比度数相差较大，存在较多度数为1的节点企业，最终平均度

较小，说明该企业供应链网络节点的分布较为分散，供应链运作效率不高，在面对内外界因素影响时具有较低鲁棒性。

J企业供应链网络各节点聚集系数C_i如表1所示，J企业供应链网络特征参数如表2所示。$C_i \to 0$，低聚集系数直接导致故障隔离能力弱，当核心节点失效时，其邻居无法通过替代路径维持连通。平均聚集系数为0.002 9≪1，表明网络缺乏横向连接，网络结构呈细长、分散状态，同级节点企业间基本没有业务连接，存在一定程度上的脆弱性。如果某一关键性节点企业失效，则整体供应链网络运作都受到严重影响。平均最短路径L为3.744 7，反映信息流平均需经3~4层级传递，效率低下。

表1　J企业供应链网络各节点聚集系数C_i

Tab.1　Clustering coefficients C_i of each node in supply chain network of Enterprise J

节点	聚集系数	节点	聚集系数	节点	聚集系数	节点	聚集系数
v_1	0.001 5	v_{11}	0.001 5	v_{21}	0.006 0	v_{31}	0.009 0
v_2	0.001 5	v_{12}	0.001 5	v_{22}	0.001 5	v_{32}	0.004 5
v_3	0.001 5	v_{13}	0.001 5	v_{23}	0.001 5	v_{33}	0.006 0
v_4	0.001 5	v_{14}	0.003 0	v_{24}	0.001 5	v_{34}	0.001 5
v_5	0.001 5	v_{15}	0.001 5	v_{25}	0.001 5	v_{35}	0.001 5
v_6	0.001 5	v_{16}	0.004 5	v_{26}	0.001 5	v_{36}	0.001 5
v_7	0.001 5	v_{17}	0.006 0	v_{27}	0.004 5	v_{37}	0.001 5
v_8	0.001 5	v_{18}	0.004 5	v_{28}	0.001 5	—	—
v_9	0.001 5	v_{19}	0.004 5	v_{29}	0.004 5	—	—
v_{10}	0.001 5	v_{20}	0.001 5	v_{30}	0.013 5	—	—

表2　J企业供应链网络特征参数

Tab.2　Characteristic parameters of supply chain network of Enterprise J

平均度	平均聚集系数	平均最短路径
1.945 9	0.002 9	3.744 7

2.2　供应链整体胁迫型脆弱性分析

胁迫型脆弱性评估综合考虑不同节点失效与连边失效2个方面，分析节点内部与外部故障。节点内部随机故障是基于随机节点的攻击，蓄意攻击是基于节点度数、节点强度的攻击；节点外部随机故障是基于随机边的攻击，蓄意攻击是基于边权值的攻击。

2.2.1　节点内部随机故障或蓄意攻击模拟分析

通过随机移除不同数量节点，计算剩余网络最大连通子图和全局网络效率，得到V_N与V_E变化曲线；同时依据节点度数和节点强度排序，对节点实施蓄意攻击，分析网络脆弱性。

（1）最大连通子图分析。节点攻击下网络连通性V_N演化曲线如图1所示。①节点内部随机故障分析。随机节点攻击后的V_N指标变化曲线并不符合小世界网络中相对平滑和近似线性的下滑曲线，这一现象主要是由于J企业供应链网络具有异构性，占比数量较大的供应商的度数大多数为1，而占比数量较小的核心节点企业和分销商节点的度数大多较高。若是随机目标节点攻击的是某一供应商，基本不会对供应链网络造成明显的扩散影响；若是随机目标节点攻击的是度数较高的核心节点企业或分销商节点，则会造成网络节点的块状中断，供应链网络具有明显的脆弱性。排除移除节点5~10范围内的块状中断情况，图中其他点连接起来基本处于直线状态，这种情况表明网络中节点的块状中断造成的影响基本可以控制在局部范围中，不会扩散到整个网络。而导致这种情况的节点可能是度数较高的节点企业等，容易造成网络节点的连接中断，这种现象的发生基本是因为J企业供应链网络各节点度数分布极其不均匀，因而在随机节点攻击时，具有明显的不稳定性。②节点内部蓄意攻击分析。基于节点度数和节点强度数值排序结果，蓄意攻击目标节点的仿真结果可以看出，网络最大联通子图的变化程度较为明显。度数较高的核心节点企业节点与供应商联结的数量较多，而供应商的出度数大多数为1，因此若是该节点受到蓄意攻击，则会直接影响到与之相连的供应商。

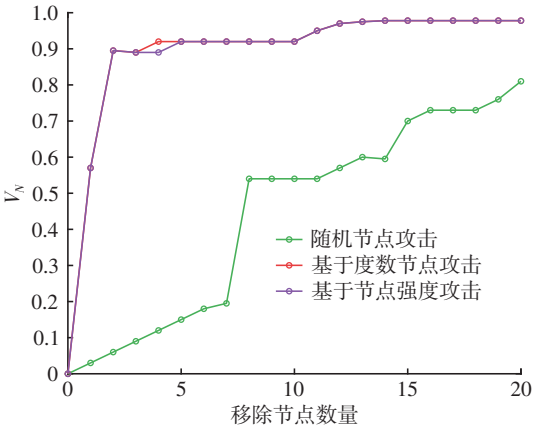

图1　节点攻击下网络连通性V_N演化曲线

Fig.1　Evolution curve of network connectivity V_N under node attacks

（2）全局网络效率分析。节点攻击下网络效率损失 V_E 演化曲线如图2所示。①节点内部随机故障分析。随机节点攻击后的 V_E 指标变化情况表明，在随机移除少数节点时，并未造成网络效率的明显变化，一定程度上是因为移除节点多是度数为1，并且只有出度数，因而对网络中其他节点企业的影响程度较小。在移除节点数5~10范围中，网络效率大幅度变化，多是由于节点企业或分销商节点的移除造成，这种情况会对整体供应链网络造成较大程度的毁坏。同时，也可以发现网络中节点对联结情况单一，各层级结构具有一致性，从而使得整体网络也具备一种单一、有序的内部结构特点，但这种一致性使得该供应链网络较为僵化且柔性差。若是网络节点局部受到故障影响，则没有办法直接和其他节点相互作用以此来消化掉这种影响。②节点内部蓄意攻击分析。基于节点度数和节点强度数排序结果，蓄意攻击目标节点的仿真结果可以看出，全局网络效率变化程度明显。该供应链网络主要零件供应商经由节点企业制作出需求产品，经分销商或直接面向客户，节点企业是网络中的重要节点企业，若是该类型节点受到蓄意攻击，则会导致供应商与分销商、或与客户的节点对联结失效。另外，由于供应商经由节点企业与分销商间的连接类型大致一样，因而在移除节点企业节点后剩余网络的平均最短路径并不存在较大变化，仿真结果图中曲线整体呈近似线性。

2.2.2　节点外部随机故障或蓄意攻击模拟分析

通过随机移除节点间连边，计算剩余网络最大连通子图和全局网络效率，绘制 V_N 与 V_E 变化曲线；同时依据边权值排序，对关键连边实施蓄意攻击，分析网络抗毁性。

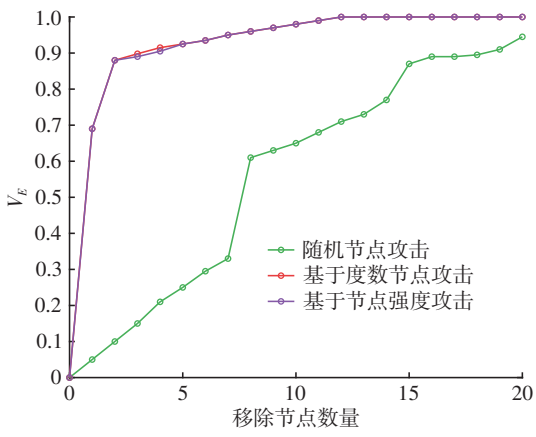

图2　节点攻击下网络效率损失 V_E 演化曲线

Fig.2　Evolution curve of network efficiency loss V_E under node attacks

（1）最大连通子图分析。边攻击下网络连通性 V_N 演化曲线如图3所示。①节点外部随机故障分析。随机移除某边后而独立的节点数占比与移除掉的边数量基本相同。另外从分析结果可以了解到，大量网络节点度数为1的供应商为某连边一端点时，若此连边遭到随机故障则基本对网络其他节点企业运作没有影响；但若是较大节点度数的核心制造商，此连边的移除会造成下游节点企业与网络的直接脱离，并且影响会扩散至整个网络，直接造成该供应链 V_N 显著上升、网络最大连通图规模大幅度降低。②节点外部蓄意攻击分析。依据边权值的大小排序依次移除节点连边，该企业供应链 V_N 急剧上升而网络连通性大幅度降低。边权值较大的节点连边两端一般是供应商与核心节点企业，或是制造商与代理商，针对这种节点对进行蓄意攻击时，会造成整体网络块状分散，而剩余的网络连通子图规模大大缩减。

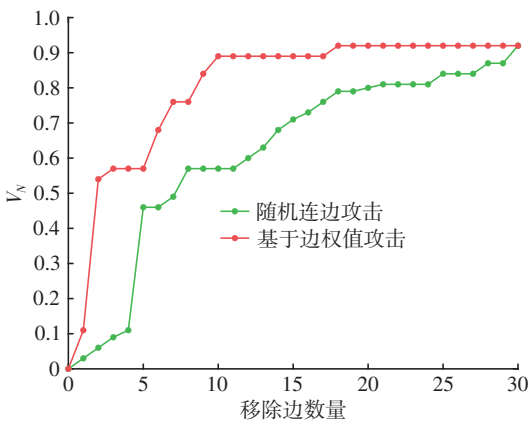

图3　边攻击下网络连通性 V_N 演化曲线

Fig.3　Evolution curve of network connectivity V_N under edge attacks

（2）全局网络效率分析。边攻击下网络效率损失 V_E 演化曲线如图4所示。①节点外部随机故障分析。当部分供应商、制造商的连边中断时，该供应链网络效率 V_E 仍较大程度得到保留，主要是因为随机连边攻击主要针对的是供应商为其中一端点的连边，对供应链横向、纵向网络效率均没有较大的影响。而关键连边失效时，一方面连边的移除影响被控制在该网络局部的同层级结构

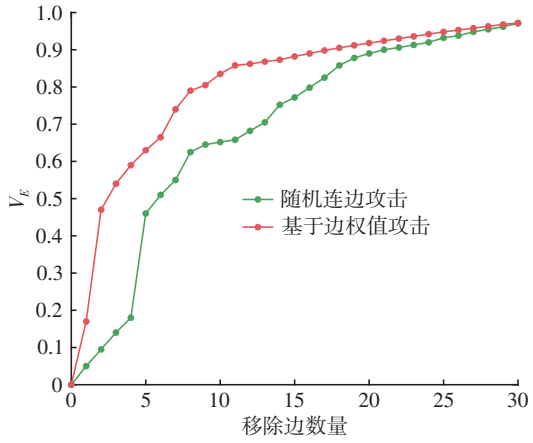

图4　边攻击下网络效率损失 V_E 演化曲线

Fig.4　Evolution curve of network efficiency loss V_E under edge attacks

内，未延伸到整个网络，横向网络效率变化不大；另一方面连边的移除会使大量节点脱离企业网络布局，造成边的随机故障影响在网络全局纵向上延展开，从而纵向网络效率大大降低。②节点外部蓄意攻击分析。由于在J企业供应链网络样本中，大部分供应商仅与少数节点企业保持直接业务联系，而下游节点间的连接关系也相对单一，因此当关键节点或关键连边受到蓄意攻击时，网络容易分解为多个孤立子网络，从而导致整体供应链网络运行效率显著下降。

2.3　仿真结果与失效机理深度分析

（1）节点攻击下的结构–功能脆弱性演化。①结构脆弱性 V_N 分析。由图1可知，随机攻击下 V_N 整体呈逐步上升趋势，当移除少量节点时网络连通性保持相对稳定；随着移除节点数量增加，网络连通性出现明显衰减。蓄意攻击下 V_N 上升速度远快于随机攻击，网络崩溃阈值显著降低，仅需移除少量核心节点即可使网络快速分裂，充分体现该供应链网络在蓄意攻击下的结构脆弱性。其内在机理为：网络中少数高强度核心节点承担大量业务连接，构成网络骨架，此类节点失效会引发大量叶节点供应商孤立，形成“骨架坍塌”效应，印证轨道交通装备供应链技术锁定型核心节点带来的结构性风险。②功能脆弱性 V_E 分析。由图2可知，蓄意攻击下 V_E 显著高于随机攻击峰值，功能脆弱性先于结构连通性崩溃显现。即便网络仍保持整体连通，核心节点失效已导致平均最短路径大幅延长，业务与信息传导成本急剧上升。对轨道交通装备行业而言，即使存在替代供应商，长达18~24个月的技术认证与样件试制周期，仍会造成实质性供应链中断，功能效率损失的实际影响远大于结构连通性表征的结果。

（2）边攻击下的差异化影响。相对于节点攻击，边攻击对 V_N 影响较弱，如图3所示。蓄意移除大量边后，网络仍能保持一定连通规模，主要原因是叶节点供应商可通过临时采购、技术豁免等流程实现迂回连接，网络整体结构不易快速分裂。但边攻击对 V_E 影响显著，如图4所示。高权边多为核心节点企业与一级供应商之间的唯一技术认证通道，此类连接断裂会直接形成信息孤岛、导致业务中断。综上可知，节点失效对网络脆弱性的影响权重明显高于边失效，印证轨道交通装备供应链“节点中心性>连接冗余性”的核心风险特征。该结论与汽车行业供应链“边重要性>节点重要性”的研究结果相反，根源在于轨道交通装备行业强技术锁定、高安全认证、长周期配套的特性，与汽车行业成熟模块化设计存在本质差异。

3　轨道交通装备供应链去脆弱性策略

3.1　网络组成要素方面：优化主体企业经营规模

轨道交通装备供应链网络由供应商、制造商、分销商及客户等多层级企业构成，不同节点的重要度及其对网络脆弱性的影响存在明显差异。J企业下游市场较成熟，但上游供应商分散，本地化配套能力不足，部分关键零部件仍存在技术水平和可靠性短板。建议：①发展适度规模经营。核心节点企业在巩固主业基础上，逐步向研发制造、系统集成、运维服务、项目总包等环节延伸，推动“生产型制造”向“服务型制造”转型，增强核心竞争力。②促进多层次主体协同发展。一是加强同层级企业间的信息共享与协同合作，提升行业资源整合能力；二是支持核心节点企业通过并购、产业扶持等方式扩大规模；三是依托核心节点企业产业影响力，引进轻量化材料、胶粘剂等领域的成熟配套企业，提升产业链本地化水平。

3.2　节点间、模块间联结方面：提升整体物流能力

节点间与模块间联结体现为企业间的业务合作

关系，其形成依赖物流、资金流与信息流的流动，对供应链脆弱性具有重要影响。建议：①建设轨道交通装备制造示范区。依托现有产业资源，布局技术研发、智能制造、智慧服务及高端配套等功能板块，推动产业集聚，构建开放协同的轨道交通装备制造与创新网络，提升区域物流与资源配置效率。②打造智慧柔性供应链系统。各节点企业应优化物流运营模式，通过智能制造平台、智慧物流系统等实现供应链信息共享与资源协同，强化业务数据采集、分析及全过程监控，提升供应链整体运行效率与协同能力。

3.3　企业采购策略方面：完善供应商管理体系

J企业采购具有零部件需求量大、频次高、供应商数量多等特点，供应链管理难度较高。为此，应推进集中化采购，强化整体效益与成本控制，完善采购费用评价体系，加强内外部资源整合；科学划分供应商等级，建立准入、评价、激励与退出机制，并实施分级管理；加强供应过程管理，实现原料及配件信息共享，定期评估并优化核心供应商；重点解决单一供货、本地化及材料短缺等问题，对核心供应商开展专项评估，逐步建立战略合作与联盟关系；同时持续优化供应链体系，提高资源配置效率，推动企业间协同供应链建设。

4　轨道交通装备供应链的行业特异性与方法适用边界

为阐明研究方法的行业针对性，对比分析了轨道交通与汽车、电子、农产品行业装备供应链的脆弱性特征差异。不同行业装备供应链脆弱性特征对比如表3所示。

由表3可知，本方法特别适用于技术锁定型、认证刚性、长链条的轨道交通装备供应链。其适用边界为：①适用于静态网络结构分析，不适用于快速迭代型供应链；②需具备完整供应商层级数据；③适用于评估安全风险传导，而非成本优化问题。该方法对航空航天、大型船舶等同类安全性苛求系统具有可迁移性，但对快消品等柔性供应链需扩展动态演化模块。

此外，模型中的V_N与V_E计算框架可普适应用于任意层级型供应链，但边权w_{ij}的设定需行业特化。本研究将w_{ij}定义为“年度采购额占比×技术不可替代性系数”，该设计体现了轨道交通装备的技术锁定特性，其他行业可据此调整权重维度，如汽车业可替换为“库存周转率×模块化耦合度”。

5　结束语

基于复杂网络理论构建轨道交通装备供应链网络脆弱性评估框架，通过最大连通子图相对规模与全局网络效率变化双指标，对供应链在不同扰动情景下的结构演化与失效特征进行了系统分析。研究表明，轨道交通装备供应链因高度定制化、关键节点集中及网络联结稀疏等特征，更易受到关键节点失效的冲击，其脆弱性具有显著的结构敏感性与传导效应。本研究不仅验证了复杂网络方法在高端装备制造供应链研究中的适用性，也为识别关键风险节点、优化供应链结构及提升系统韧性提供了参考。同时，研究进一步表明，高端制造供应链韧性的形成已不仅依赖静态网络结构优化，还与节点间动态协同能力密切相关。未来可在此基础上进一步引入时变网络、多层互依关系，以及节点产能、库存与恢复能力等运营参数，构建兼顾结构脆弱性与功能韧性的综合分析模型，从而更真实地刻画轨道交通装备供应链在复杂扰动环境下的动态演化与恢复机制。

表3　不同行业装备供应链脆弱性特征对比

Tab.3　Comparison of supply chain vulnerability characteristics in different industries

对比维度	轨道交通	汽车	电子消费品	农产品
网络结构特征	层级深(4~6级)、异构性强、核心节点极化	模块化、节点度分布较均匀	扁平化、高度全球化	季节性强、地域集聚
关键节点类型	认证壁垒型供应商(牵引、制动系统)	模块化总成商	芯片/屏幕供应商	生产基地/物流枢纽
脆弱性驱动主因	技术锁定(83%核心部件进口依赖)+安全认证刚性	库存成本高	技术迭代快	自然风险+供需波动
失效传播模式	级联中断(下游需求波动→上游刚性传导)	模块化隔离	快速替代	区域缓冲
本方法适用性	高：V_N捕捉结构断裂，V_E量化认证延迟成本	中：需增加库存维度	低：需引入动态博弈	不适用：需引入季节性模型

参考文献：

[1] MA C H，ZHANG L，YOU L，et al. A Review of Supply Chain Resilience：A Network Modeling Perspective[J]. Applied Sciences，2025，15(1)：265.

[2] 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)：290-312.
CUI Junying，XU Shuqi，NA Xu，et al. Supply Chain Research Based on Complex Network Theory[J]. Acta Physica Sinica，2024，73(19)：290-312.

[3] ZARGHAMI S A，DUMRAK J. Evaluating Vulnerability of Supply Chain Networks to Capacity Reduction[J]. Global Journal of Flexible Systems Management，2024，25(3)：629-646.

[4] WAGNER S M，BODE C. An Empirical Investigation into Supply Chain Vulnerability[J]. Journal of Purchasing and Supply Management，2006，12(6)：301-312.

[5] BAK O. Supply Chain Risk Management Research Agenda：From a Literature Review to a Call for Future Research Directions[J]. Business Process Management Journal，2018，24(2)：567-588.

[6] 刘家国，周粤湘，卢　斌，等. 基于突发事件风险的供应链脆弱性削减机制[J]. 系统工程理论与实践，2015，35(3)：556-566.
LIU Jiaguo，ZHOU Yuexiang，LU Bin，et al. The Reduction Mechanism of Supply Chain Vulnerability Based on Supply Chain Disruption Risk[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2015，35(3)：556-566.

[7] ZHU X X，ZHU J H，REGAN D，et al. Exploring Cascading Failures in Supply Chain Risk Management：A Systematic Review，2013—2024[J]. Journal of Safety Science and Resilience，2026，7(2)：100234.

[8] CAI H，XIONG Q，LIAN S. Research on Network Security Vulnerability Risk Contagion in Software Supply Chain Based on System Dynamics[J]. PLoS One，2025，20(11)：e0335128.

[9] LAHMAR A，CHABCHOUB H，GALASSO F，et al. The VESP Model：A Conceptual Model of Supply Chain Vulnerability[J]. International Journal of Risk and Contingency Management，2018，7(2)：42-66.

[10] FREE C，HECIMOVIC A. Global Supply Chains after COVID-19：The End of the Road for Neoliberal Globalisation?[J]. Accounting，Auditing & Accountability Journal，2021，34(1)：58-84.

[11] EKANAYAKE E M A C，SHEN G Q P，KUMARASWAMY M M，et al. Identifying Supply Chain Vulnerabilities in Industrialized Construction：An Overview[J]. International Journal of Construction Management，2022，22(8)：1464-1477.

[12] LI H Y，ZHOU W L，ZHAO L J，et al. Vulnerability Analysis of the China Railway Express Network under Emergency Scenarios[J]. Applied Sciences，2025，15(15)：8205.

[13] HABIBI F，CHAKRABORTTY R K，ABBASI A，et al. Investigating Disruption Propagation and Resilience of Supply Chain Networks：Interplay of Tiers and Connections[J]. International Journal of Production Research，2025，63(17)：6229-6251.

[14] MAJUMDAR A，SINHA S K，SHAW M，et al. Analysing the Vulnerability of Green Clothing Supply Chains in South and Southeast Asia Using Fuzzy Analytic Hierarchy Process[J]. International Journal of Production Research，2021，59(3)：752-771.

[15] 陈　诚，林秋婷，邱荣祖. 基于随机规划模型的弹性木材供应链网络优化[J]. 森林与环境学报，2021，41(1)：88-95.
CHEN Cheng，LIN Qiuting，QIU Rongzu. Cost Optimization of Resilient Timber Supply Chain Networks Based on Stochastic Programming[J]. Journal of Forest and Environment，2021，41(1)：88-95.

[16] 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 Shu，YANG Hua，SONG Bo. 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.

[17] CHEN J K，WEN H Y. The Application of Complex Network Theory for Resilience Improvement of Knowledge-Intensive Supply Chains[J]. Operations Management Research，2023，16(3)：1140-1161.

[18] LEI Z M，CUI L，TANG J，et al. Supply Chain Resilience in the Context of I4.0 and I5.0 from a Multilayer Network Ripple Effect Perspective[J]. Annals of Operations Research，2024，342(2)：1149-1192.

(责任编辑　李丹丹)