



计算机科学

COMPUTER SCIENCE

新能源汽车供应链的关键风险节点识别方法

杨小博, 高海伟, 刘天越, 郭炳晖

引用本文

杨小博, 高海伟, 刘天越, 郭炳晖. 新能源汽车供应链的关键风险节点识别方法[J]. 计算机科学, 2023, 50(6A): 221100052-7.

YANG Xiaobo, GAO Haiwei, LIU Tianyue, GUO Binghui. [Key Risk Node Identification Methods in New Energy Vehicle Supply Chain](#) [J]. Computer Science, 2023, 50(6A): 221100052-7.

相似文章推荐 (请使用火狐或 IE 浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

[基于信息传播的致病基因识别研究](#)

Disease Genes Recognition Based on Information Propagation

计算机科学, 2022, 49(1): 264-270. <https://doi.org/10.11896/jsjx.201100129>

[用于多模态语义分析的嵌入共识自动编码器](#)

Embedding Consensus Autoencoder for Cross-modal Semantic Analysis

计算机科学, 2021, 48(7): 93-98. <https://doi.org/10.11896/jsjx.200600003>

[群智体系网络结构的自治调节:从生物调控网络结构谈起](#)

Autonomous Structural Adjustment of Crowd Intelligence Network: Begin from Structure of Biological Regulatory Network

计算机科学, 2021, 48(5): 184-189. <https://doi.org/10.11896/jsjx.210200161>

[基于图神经网络的金融征信研究](#)

Study on Financial Credit Information Based on Graph Neural Network

计算机科学, 2021, 48(4): 85-90. <https://doi.org/10.11896/jsjx.200500109>

[基于熵值模糊层次分析法的科技战略评价](#)

Science and Technology Strategy Evaluation Based on Entropy Fuzzy AHP

计算机科学, 2020, 47(6A): 1-5. <https://doi.org/10.11896/JsJkx.190700078>

新能源汽车供应链的关键风险节点识别方法

杨小博^{1,2,3,4,5,6} 高海伟⁷ 刘天越^{1,2,3,4,5,6} 郭炳晖^{1,2,3,4,5,6}

1 北京航空航天大学数学科学学院数学信息与行为教育部重点实验室 北京 100191

2 北京航空航天大学人工智能研究院 北京 100191

3 软件开发环境国家重点实验室 北京 100191

4 未来区块链与隐私计算高精尖中心 北京 100191

5 中关村实验室 北京 100094

6 鹏城实验室 广东 深圳 518055

7 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044

(yangxb@buaa.edu.cn)

摘要 以在新能源汽车行业中具有典型分析价值的特斯拉和小鹏汽车的公开数据为对象,分别构建了供应链网络模型,并针对供应链网络结构关联特征开展多维度融合的风险传播关键节点识别方法研究。首先,引入网络中心性指标,分析计算得到了中心性指标下的关键节点企业。同时,考虑到汽车供应链风险系统性传播的特点,引入风险免疫传播模型对网络中影响系统性风险传播的关键节点进行判定。最后,对两个网络分别进行级联失效模型分析,选出级联失效模型下在失效发生时对网络影响较大的关键节点。通过多维度的关键节点分析,发现新能源汽车供应链网络中对风险传播有很强影响力的关键节点不仅包含传统意义上的电池等核心企业,而且包含了具有行业隐形冠军属性的配件企业。通过提出的结构和传播属性综合分析方法,可以很好地发现新能源汽车供应链网络中潜在的隐性关键风险控制节点,具有很好的实践应用价值。

关键词: 汽车供应链; 风险传播; 关键节点识别

中图法分类号 O29

Key Risk Node Identification Methods in New Energy Vehicle Supply Chain

YANG Xiaobo^{1,2,3,4,5,6}, GAO Haiwei⁷, LIU Tianyue^{1,2,3,4,5,6} and GUO Binghui^{1,2,3,4,5,6}

1 Key Laboratory of Mathematics, Informatics and Behavioral Semantics, School of Mathematical Sciences, Beihang University, Beijing 100191, China

2 Institute of Artificial Intelligence, Beihang University, Beijing 100191, China

3 State Key Laboratory of Software Development Environment, Beijing 100191, China

4 Beijing Advanced Innovation Center for Future Blockchain and Privacy Computing, Beijing 100191, China

5 Zhongguancun Laboratory, Beijing 100094, China

6 Peng Cheng Laboratory, Shenzhen, Guangdong 518055, China

7 School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract In this paper, the open data of Tesla and XPENG, which have typical analytical value in the new energy automobile industry, are respectively used to construct networks of supply chain. And the key node identification method of risk transmission based on multi-dimensional fusion is studied according to the structural correlation characteristics of the network of supply chain. Firstly, the network centrality characteristics are introduced to analyze and calculate the key node. At the same time, considering the characteristics of systemic risk transmission in supply chain of automotive, the risk immune transmission model is introduced to determine the key nodes. Finally, the cascading failure model of the two networks is analyzed respectively, and the key nodes that have strong impact on network failure are selected. Through multi-dimensional key node analysis, it is found that the key nodes with strong impact include not only core enterprises such as batteries in the traditional sense, but also accessory enterprises with invisible leading position. Therefore, through the comprehensive analysis method of structure and transmission attribute proposed in this paper, the potential hidden key risk control nodes in the network of supply chain of new energy vehicles can be well found, which has good practical application value.

Keywords Automobile supply chain, Risk transmission, Key node identification

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021ZD0201302); 国家自然科学基金(U20B2053); 广东省重点领域研发计划项目(2021B0101420003)

This work was supported by the National Key R & D Program of China (2021ZD0201302), National Natural Science Foundation of China (U20B2053) and Key R & D Program of Guangdong Province, China (2021B0101420003).

通信作者: 刘天越(liutianyue97@163.com)

1 引言

汽车供应链网络由于涉及的主体众多,因而呈现出典型的复杂网络特征。日渐复杂的汽车供应链网络中零部件供应节点可能遭受的不可控因素随着全球新冠疫情的不断加剧而增多,从而使得汽车供应链更加脆弱。因此,基于复杂网络的理论知识,从复杂汽车供应链网络的角度出发研究汽车供应链网络中风险因素产生及传播过程中对全局网络影响巨大的级联失效机制及相应的管理措施,对提高我国汽车供应链风险抵抗力和稳定性具有重要的现实意义。与此同时,新能源网联汽车概念及制造业的不断发展,使得新技术迭代速度不断加快、新商业模式不断涌现,因此在激烈的市场竞争背景下对汽车制造企业的复杂供应链网络稳定性的需求比以往任何时间都要迫切。

如今,汽车行业正朝着电气化、网络化、智能化和共享化的方向发展,这将导致供应链和供应商结构的巨大变化。因此,在新能源汽车行业的发展过程中,建立起安全、高效和可持续发展的供应链显得尤为重要。但是,新能源汽车供应链的特点与传统汽车行业有所不同,其集成的高度复杂性与组件的高成本性,使其在转型和创新阶段面临许多风险,因此,非常有必要预防和管理在此期间新能源汽车供应链面临的风险。然而,关于新能源汽车供应链风险管理的研究相对较少,大多数仅仅集中在单一风险因素的研究上。Mihalīs 和 Thanos 应用失效模式与影响分析技术对供应链的可持续性相关风险进行识别和评估,并对识别出的风险之间的潜在相关性进行测试,然后给出合理的建议^[1]。He 等提出了基于犹豫模糊决策与试验评价实验室和风险屋的供应链风险管理方法,将风险因素逐步转化为风险事件及处理方式^[2]。Han 等推导出零售商为制造商所有的垂直整合供应链的最优集中决策,并以此为基础发现经过精心设计的销售回扣/罚款合同可以促进新能源汽车销售,并实现新能源汽车制造商和零售商双赢的局面^[3]。

作为新能源驱动的一部分,纯电动汽车在减少环境污染方面具有巨大潜力,已成为未来可持续发展的重要战略方向^[4]。Pan 等将反向传播神经网络运用于汽车供应链中潜在风险因素的重要程度评价,结果显示高风险指标集中于供应商和制造商两段^[5]。Li 等开发了一个用于选择一组供应商并为每个供应商分配订单数量的新的两阶段综合数学模型,并将其用于新能源汽车行业,助力企业对供应链中的不确定性进行管理^[6]。然而,供应链管理侧重的是买卖双方的线性关系^[7],虽然从线性的视角出发可能有助于规划买卖双方之间某些固化的交易过程,但它不能反映企业战略行为所具有的复杂性。人们开始越来越多地讨论在供应链管理中采用网络视角的好处。目前,依赖网络主要分为物理网络和关联网络。Brunetti 等的研究表明,无论是物理网络还是关联网络,都能为企业有效的市场信息^[8]。

供应链的风险传播一直是许多研究的主题,如果一个企业中断供应,影响其合作伙伴无法正常生产,那么这种风险也会

接连传播至网络中的其他企业,因此对级联失效下网络鲁棒性的研究十分必要^[9-10]。Chen 等在节点重要度的基础上构建了系统化的级联失效检测方法,对供应链网络中的节点进行了重要性分析并评价了供应链的破坏情况^[11];Tang 等通过构建风险传播的级联故障模型,研究装配供应链网络在遭受巨灾中断事件时的鲁棒性^[12]。Zheng 等依据 2000 家汽车供应链企业的工商数据构建了基于引力模型的多级供应链网络,并通过模拟节点失效传播风险开展鲁棒性研究^[13]。Zhu 等建立了两个综合考虑网络中边缘的运行代价和网络鲁棒性的多目标优化模型,从智能优化的角度提高了网络的鲁棒性^[14]。Tan 等提出了一种改进的介数模型,基于可控系数定义节点的初始负载,通过理论推导与仿真实验得出使网络抗毁性更好的系数,能够在网络面对节点失效时具有最高的网络生存性^[15]。

复杂汽车供应链网络具有供应链较长、参与企业众多、企业间关系复杂的特点,因此网络中的单个节点或者节点组失效时,网络容易发生级联失效,导致汽车供应链效率降低,无法完成应有的供应链功能。本研究首先构建了特斯拉汽车供应链网络和小鹏汽车供应链网络,并对两个网络的中心性指标进行了分析。同时,考虑到汽车供应链风险系统性传播的特点,引入风险免疫传播模型对网络进行分析并发掘关键节点。最后,对两个网络使用级联失效模型进行分析,从另一个角度对新能源汽车供应链网络失效时造成影响的关键节点进行分析。

2 新能源汽车供应链复杂网络分析

2.1 特斯拉汽车供应链网络分析

通过中国物流与采购联合会公开发布的《2022 年中国新能源汽车供应链行业概述》¹⁾获取特斯拉汽车供应链的数据构成邻接矩阵并进行网络构建,其供应链网络如图 1 所示。网络中共包含 127 个节点和 154 条边,网络的平均度为 2.425,平均路径长度为 2.671,平均聚类系数为 0.0833。

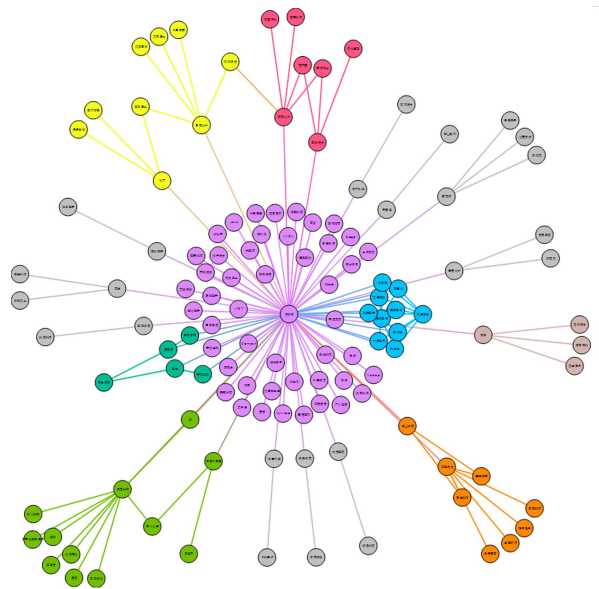


图 1 特斯拉汽车供应链网络示意图

Fig. 1 Tesla automobile supply chain network

¹⁾ <http://www.chinawuliu.com.cn/xsyj/202301/13/597476.shtml>

针对特斯拉汽车供应链的邻接矩阵数据,分别计算了度中心性、特征向量中心性、介数中心性和接近度中心性

等关键节点指标,其中排名前十一(因出现并列)的节点如表 1 所列。

表 1 特斯拉汽车供应链网络关键节点指标分析
Table 1 Analysis of key node indexes of Tesla automobile supply chain network

序号	度中心性		特征向量中心性		介数中心性		接近度中心性	
	名称	数值	名称	数值	名称	数值	名称	数值
1	特斯拉	0.6349	特斯拉	0.6852	特斯拉	0.9727	特斯拉	0.7325
2	长信科技	0.0793	横店东磁	0.1603	长信科技	0.1158	长信科技	0.4500
3	横店东磁	0.0714	万马股份	0.1004	沪电股份	0.0779	沪电股份	0.4421
4	天通股份	0.0634	国电南自	0.1004	日立化学	0.0623	住友化学	0.4390
5	沪电股份	0.0555	易事特	0.1004	住友化学	0.0546	日立化学	0.4390
6	住友化学	0.0476	特锐德	0.1004	宸鸿	0.0472	JDI	0.4375
7	日立化学	0.0476	科陆电子*	0.1004	麦格纳	0.0472	横店东磁	0.4375
8	松下	0.0317	科士达*	0.1004	松下	0.0390	松下	0.4329
9	东睦股份	0.0317	中恒电气*	0.1004	三菱化学	0.0316	东睦股份	0.4329
10	宸鸿	0.0317	奥特迅*	0.1004	高华	0.0316	宸鸿	0.4329
11	麦格纳	0.0317	长信科技	0.0923	东睦股份	0.0308	麦格纳	0.4329

在供应链网络中,度中心性是反映节点重要程度最直接的指标。节点的度中心性越大,表示与其有业务往来的节点越多,关系越广,该网络中度值较大的企业受到风险扰动时,会比其他节点更快速地造成风险级联传播,甚至导致整个汽车供应链网络的瘫痪。因此,供应链网络中度中心性排名较高的企业应作为风险防范的重点对象。表 1 中度中心性列的企业自身都具有较大规模,实力雄厚,抗风险能力更强,但一旦其出现问题无法与相连节点合作,将使风险迅速蔓延,提高这部分企业的风险抵抗能力,或在其已遭受风险冲击时对其进行扶持,能有效降低风险的扩散速度和影响规模,以更低成本实现理想的风险控制效果。

一个节点的特征向量中心性表示其相邻节点的重要性,更加强企业所处的合作环境,即连接的企业越重要,该企业的重要程度越高。一个特征向量中心性低的节点,其度中心性不一定低,可能该节点连接了很多不重要的节点;反之,度中心性低的节点,其特征向量中心性不一定低,可能它连接了很少但重要的节点。所以在汽车供应链网络中,在制定策略时除关注度中心性高的节点外,特征向量中心性高的节点由于掌握着重要的合作关系,也应作为关键节点进行评估。在表 1 中,特征向量中心性排名前十一的企业中,标记“*”表示企业未出现在度中心性排名前十一,也就是这部分企业有业务联系的企业较少,但其合作方在汽车供应链网络中具有较核心的地位,因此它们之间的商品流、资金流等业务往来对供应链网络的影响不容忽视。

介数中心性也是评价节点在网络中影响力的重要指标之一,它反映着一个节点位于其他节点之间最短路径上的情况。介数中心性较高的节点,对其他节点的信息传播有更强的控制力。在供应链网络中,这一信息通常代表着资金流动,因此具有更高介数中心性的企业,作为供应链网络中的资金枢纽节点,其财务状况应被着重关注,避免出现财务风险而使整个网络中的企业陷入资金流断裂的困境。

接近度中心性需要考量每个节点到其它节点的最短路径的平均长度,即一个节点距离其它节点越近,则其中心度越高。从表 1 中可以看出,接近度中心性与介数中心性

排名靠前的企业基本同时出现。

2.2 小鹏汽车供应链网络分析

通过 2.1 节所述数据获取小鹏汽车 P7 供应链的邻接矩阵并进行网络构建,其供应链网络如图 2 所示。网络中共包含 72 个节点和 73 条边,网络的平均度为 2.028,平均路径长度为 2.234,平均聚类系数为 0.0556。

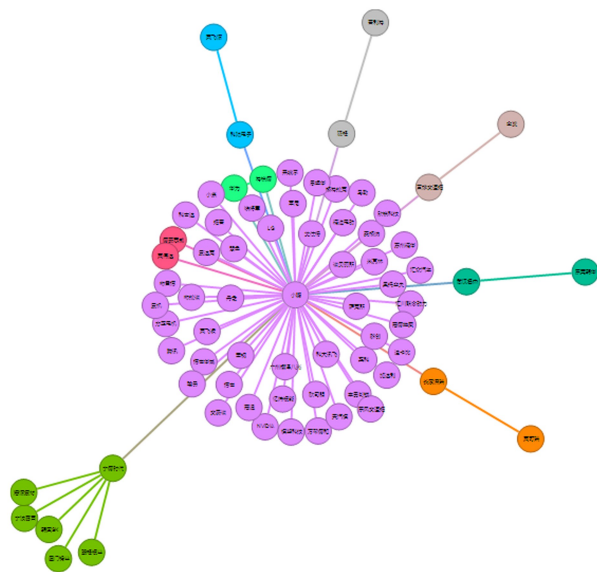


图 2 小鹏汽车供应链网络示意图

Fig.2 XPENG auto mobile supply chain network

针对小鹏汽车供应链的邻接矩阵数据,分别计算了度中心性、特征向量中心性、介数中心性和接近度中心性,其中排名前十一(因出现并列)的节点如表 2 所列。

对于度中心性、特征向量中心性和接近度中心性指标的分析与 2.1 节中一致。值得注意的是,在小鹏供应链网络中。介数中心性的值从排名第八位的韩国 SK 开始均为 0,这是由供应链网络的结构所导致的。介数中心性较小以及为 0 的企业在网络中的角色多为供应商和销售商;而介数中心性大的企业为生产商,作为供应链的枢纽掌握着上下游企业间的资金流动,这也解释了供应链网络中的核心企业多数为生产商。

表 2 小鹏汽车供应链网络关键节点指标分析

Table 2 Analysis of key node indexes of XPENG automobile supply chain network

序号	度中心性		特征向量中心性		介数中心性		接近度中心性	
	名称	数值	名称	数值	名称	数值	名称	数值
1	小鹏	0.8591	小鹏	0.7041	小鹏	0.9911	小鹏	0.8765
2	宁德时代	0.0845	华为	0.1026	宁德时代	0.1368	宁德时代	0.5035
3	华为	0.0281	英飞源	0.1026	科陆电子	0.0281	科陆电子	0.4765
4	科陆电子	0.0281	德赛西威	0.1026	长园深瑞	0.0281	长园深瑞	0.4765
5	英飞源	0.0281	英伟达	0.1026	武汉名杰	0.0281	武汉名杰	0.4765
6	长园深瑞	0.0281	宁德时代	0.0975	富维安道拓	0.0281	富维安道拓	0.4765
7	德赛西威	0.0281	科陆电子	0.0910	延锋	0.0281	延锋	0.4765
8	英伟达	0.0281	长园深瑞	0.0910	韩国 SK	0	华为	0.4733
9	武汉名杰	0.0281	武汉名杰	0.0910	宁波容百	0	英飞源	0.4733
10	富维安道拓	0.0281	富维安道拓	0.0910	厦门钨业	0	德赛西威	0.4733
11	延锋	0.0281	延锋	0.0910	赣锋锂业	0	英伟达	0.4733

2.3 实验结果分析

通过生成的汽车供应链网络(见图 1 和图 2)可以看出,两个网络分别是以特斯拉和小鹏为核心生成的,大部分节点的度较小,而特斯拉和小鹏的度值很大,在供应链网络中起到绝对主导作用,两个网络均具有无标度特性。这两个企业由于规模更大、经营稳定、实力雄厚,在受到风险扰动时内部消化的能力较强,能够避免在网络上扩散;而一旦风险程度超出它们的承受能力,进而发生企业失效时,其无标度特性可能会直接导致整个网络的崩溃。

对比表 1 和表 2 可以看出,在特斯拉供应链网络和小鹏供应链网络度中心性排名前十一的企业并未重复出现,由此认为,这两个供应链网络中的核心企业具有差异,彼此较为独立,一个网络中节点的管理风险、技术风险等内部风险难以扩散至另一个网络。特锐德与科陆电子两家企业在两个供应链网络中的特征向量中心性均排在前十,说明它们在两个网络中都与核心企业合作,其产品质量等经营状况的好坏会同时对两个供应链网络产生影响,因此在风险防范中应给予更多关注。对于介数中心性,两个网络排名前十一的企业中也并无相同,说明这两个供应链网络中的主要资金枢纽节点不同,一个供应链中的财务风险通常不会对另外一个网络造成影响。

3 风险免疫传播模型分析

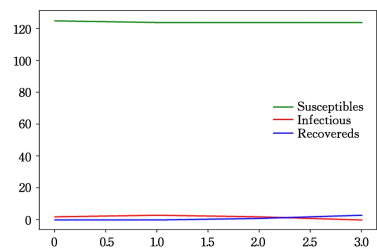
3.1 特斯拉汽车供应链 SIR 模型

供应链网络中的风险传播过程与病毒扩散在扩散环境、扩散过程、扩散对象以及扩散方向上都具有很强的相似性,这为 SIR 模型应用于汽车供应链网络风险免疫传播提供了依据^[6]。

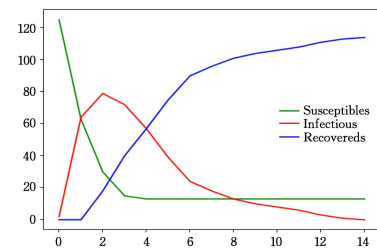
针对特斯拉汽车供应链网络构建 SIR 模型。根据 SIR 模型的参数设定方法,设定该 SIR 模型的感染率为 0.3,恢复率为 0.1。通过随机选取某个初始节点作为易感染节点进行模拟发现,由于网络的结构特性,大部分情况下的风险传播如图 3(a)所示,经过多次模拟后的 SIR 风险传播如图 3(b)所示。

为探究初始风险点位对网络风险传播的影响,将网络中每一个节点作为初始感染节点进行分析。将“(受到感染节点数量+已恢复节点数量)/节点总数量”作为衡量每个节点造成的传播情况的评价指标。根据图 3(b)的情况设定,实验的感染率为 0.3,恢复率为 0.1,实验步数为 10 步。每个节点

实验 100 次,取平均值作为最终评价指标,最终选取 127 个节点中排名前二十的节点,结果如表 3 所列。



(a)



(b)

图 3 特斯拉汽车供应链网络风险传播情况

Fig. 3 TESLA automobile supply chain network risk transmission

表 3 特斯拉汽车供应链网络关键节点指标分析

Table 3 Analysis of key node indexes of Tesla automobile supply chain network

序号	名称	数值	序号	名称	数值
1	富卓	0.7877	11	米其林	0.7758
2	拓普集团	0.7866	12	大富科技	0.7742
3	横店东磁	0.7861	13	国电南自	0.7704
4	特斯拉	0.7858	14	天通股份	0.7700
5	科陆电子	0.7834	15	福耀玻璃	0.7676
6	贸联	0.7812	16	宜安科技	0.7633
7	科士达	0.7806	17	旭硝子	0.7633
8	NVIDIA	0.7786	18	许继电气	0.7621
9	鸿特精密	0.7774	19	汉拿伟世通	0.7620
10	奥特迅	0.7763	20	云海金属	0.7604

3.2 小鹏汽车供应链 SIR 模型

针对小鹏汽车 P7 的供应链网络构建 SIR 模型,设定该 SIR 模型的感染率为 0.3,恢复率为 0.1。通过随机选取某个初始节点作为易感染节点进行模拟发现,由于网络的结构特性,大部分情况下的风险传播如图 4(a)所示,经过多次模拟后的 SIR 风险传播如图 4(b)所示。

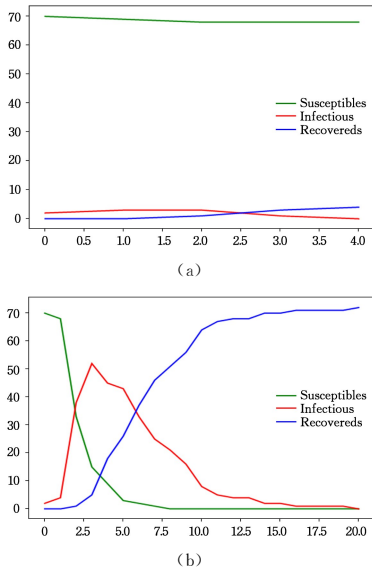


图4 小鹏汽车供应链网络风险传播情况

Fig.4 XPENG automobile supply chain network risk transmission

为探究初始风险点位对网络风险传播的影响,将网络中每一个节点作为初始感染节点进行分析。根据图4(b)的情况,设定实验的感染率为0.3,恢复率为0.1,实验步数为10。每个节点实验100次,取平均值作为最终评价指标,最终选取72个节点中排名前十的结果,如表4所列。

表4 小鹏汽车供应链网络各节点的SIR模型指标结果

Table 4 SIR model indicators at each node of XPENG

automobile supply chain network		
序号	名称	数值
1	小鹏	0.7272
2	特锐德	0.7141
3	科士达	0.6638
4	华为	0.6631
5	汇众汽车	0.6544
6	英伟达	0.6501
7	LG	0.6493
8	拓普	0.6455
9	科大讯飞	0.6452
10	米其林	0.6423

对比表1和表3、表2和表4可以看出,通过中心性指标选取的大部分节点也存在于由SIR模型筛选出的感染力较强的节点中,这从另一方面验证了方法筛选关键节点的准确性。

4 级联失效模型验证与对比分析

4.1 级联失效模型建立

本节建立了节点失效的负载分配模型,该模型遍历各节点进行攻击,通过将失效节点的负载分配给其邻接节点中负载容量大的节点来达到再平衡网络负载的目标。对比攻击不同节点后网络中依然存在的有效节点比例,评估企业对级联失效的影响程度。模型建立过程如下:

节点的初始负载为:

$$L_n(0) = (1+q)B_n^* \quad (1)$$

其中, $q \geq 0, \alpha \geq 0$ 是用于控制初始负载分配的参数, B_n^* 是节点 n 的介数。根据文献[15]的结论,在 $\alpha = 0.6$ 的情况下,介数

较大或较小的节点面对攻击时对网络造成的影响程度差异最小,网络更为鲁棒,因此本文取 $q = 0.5, \alpha = 0.6$,筛选在网络抗毁性能更为稳定的情况下失效时依然对网络产生更大影响的节点。节点的容量 $C_n(0)$ 由其初始负载决定,定义为:

$$C_n(0) = (1+\beta)L_n(0) \quad (2)$$

其中, $\beta > 0$ 表示节点的容忍系数,节点的 β 值越大,其拥有的额外容量越多,则在级联失效时具有更好的抗毁性能,但其网络成本也会越大,因此需要在二者中找到一个折中值。经多次实验,本文取 $\beta = 0.5$ 。节点的负载分配策略如下:当节点 n 失效时,将其负载分配给邻接节点中容量大的节点,则此时每个节点所分配的负载百分比为:

$$\Pi_e = \frac{C_e}{\sum_{i \in F_n} C_i} \quad (3)$$

失效节点的邻接节点 e 所分配到的负载为:

$$\Delta L_{en} = \Pi_e L_n \quad (4)$$

若邻接节点 e 接收到分配负载后,累加负载超过其容量时,即:

$$L_e(t) = L_e(t-1) + \Delta L_{en} \geq C_e \quad (5)$$

则会引起邻接节点失效,因此使用节点失效前后整个网络中依然存在的有效节点的比值 S 来对攻击不同节点时网络的抗毁性能进行衡量。

$$S = \frac{N'}{N} \quad (6)$$

其中, S 的值越小,代表其失效时对网络的影响越大,其重要性越高。

4.2 实验结果及分析

4.2.1 模型实验结果

分别对小鹏和特斯拉供应链网络中的各节点进行攻击,得到其 S 值并进行对比。在特斯拉供应链网络中, S 值最小(并列)的13个企业为:中科三环、诺德股份、京山轻机、英博尔、得润电子、新宙邦、东华科技、长园集团、新疆天业、科森科技、河北宣工、保隆科技、银邦股份,如图5(a)所示。在小鹏供应链网络中, S 值最小(并列)的5个企业为:英飞源、金发科技、英可瑞、东莞韩华、普利特,如图5(b)所示。

结合网络结构分析,我们一般认为对新能源汽车供应链网络影响最大的应是生产充电桩、电池、电机、电控等核心部件的企业。在特斯拉供应链网络中,诺德股份在国内动力电池领域市场的占有率超过35%,为全国第一;新宙邦作为特斯拉的二级供应商,为松下锂电池提供电解液,是国内电解液龙头之一,市场份额约占17%;英博尔主营产品为新能源汽车动力总成、电源总成、驱动电机等新能源汽车动力领域的核心零部件,市场占有率约为27.5%。通过级联失效模型得到这部分企业均为新能源汽车核心部件供应商,且市场规模大,在供应链网络风险传播中具有重要影响。

在小鹏供应链网络中,英飞源作为专业从事新能源行业电源及系统解决方案的企业,在汽车供应链系统中具有重要地位,其度中心性、特征向量中心性及接近度中心性也均排在前列。英可瑞虽在网络中并不处于核心地位,但其作为二级供应商,主业是生产新能源汽车充电桩的核心配件,间接在网络风险传播中产生重要影响。

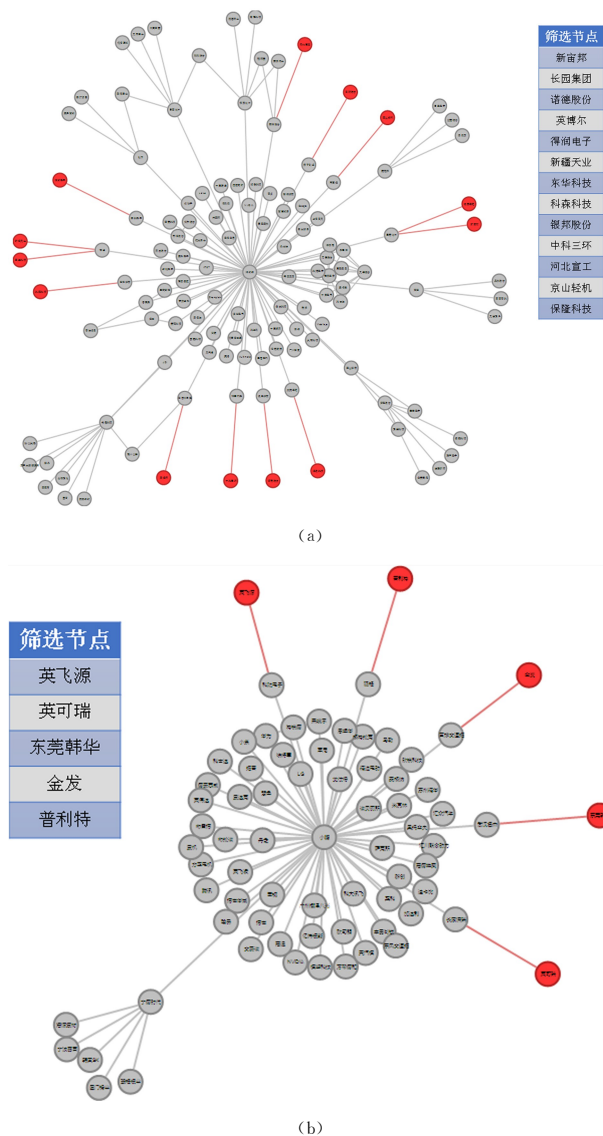


图5 网络中选取的节点

Fig. 5 Selected nodes in each networks

4.2.2 风险传播分析

在对通过本文级联失效模型筛选得到的余下企业进行调查分析后发现,虽然从结构上看,在汽车供应链网络中这部分企业不如直接供应充电桩、电池等新能源汽车核心部件的企业重要,但其大部分为所在行业的龙头,占据大量的市场份额。

在特斯拉供应链网络筛选出的企业中,中科三环新能源汽车用钕铁硼市场占有率超过30%;京山轻机生产特斯拉系统上控制臂,其铸造分公司更是特斯拉部分型号配件的独家供应商;得润电子在汽车供应链中负责汽车连接器与线束业务,是国内连接器的龙头制造商,为国内最具规模与实力的专业电子连接器制造企业;东华科技为生产乙二醇的企业,是新能源汽车防冻液的主要成分,其市场占有率高达60%。

同样地,在小鹏汽车供应链网络中,东莞韩华、金发科技、普利特皆为生产工程塑料的企业。经过调查我们发现,新能源汽车追求轻量化,车用改性塑料普遍应用在汽车内外装饰如仪表盘总成、门板、保险杠、车灯、轮罩等多个部件中,因此一旦节点失效,涉及到的众多汽车部件均无法生产,对相关企业的正常经营造成负面影响,引发网络的级联失效。尤其

金发科技,该公司在改性塑料行业中是国内也是亚太地区最大的改性塑料生产企业,市场份额占10%。由于金发科技为小鹏提供改性塑料的角色具有不可替代性,所以一旦其失效,网络更容易受到影响。

结束语 本文通过公开数据分别构建了特斯拉汽车供应链网络和小鹏汽车供应链网络,通过分析二者的网络中心性指标判断不同中心性指标下在网络中可作为关键节点的供应链关联企业。同时,考虑到汽车供应链风险系统性传播的特点,使用风险免疫传播模型分析传染病模式下网络中的关键节点。此外,在新能源汽车供应链网络中不能仅从网络结构的视角关注中心性较高的关键节点,通过本文级联失效模型筛选出的新的节点有特斯拉汽车供应链中的中科三环、京山轻机、得润电子和东华科技等企业,小鹏汽车供应链中的东莞韩华、金发科技、普利特等企业。虽然这些企业在网络中没有高中心性节点连接的企业多、关系广,但由于其在所处行业中市场占比高,当其失效中断供货时,网络中能分担其负载且不继续传播风险的企业更少,因此在风险传播方面更应受到关注。通过综合性、多维度融合的风险传播关键节点识别,能够发现新能源汽车供应链网络中潜在的隐性关键风险控制节点。本文应用模型得到的结果,丰富了以往对新能源汽车供应链网络中风险传播重要节点的认识,对于新能源汽车供应链网络的风险防范具有重要意义。

参考文献

- [1] GIANNAKIS M, PAPADOPOULOS T. Supply chain sustainability: A risk management approach[J]. *Int. J. Prod. Econ.*, 2016, 171: 455-470.
- [2] HE L N, WANG G T, LIU J. Supply chain risk management based on hesitant fuzzy DEMATEL and house of risk[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(5): 1459-1468.
- [3] HAN S, XU X. NEV supply chain coordination and sustainability considering sales effort and risk aversion under the CVaR criterion[J/OL]. *PLoS ONE* 2018, 13: e0199005. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0199005>.
- [4] JIN L N, LU Y Y, XIE J Y, et al. Environment and economy analysis on entire life circle of new energy vehicles based on GREET model[J]. *Resources & Industries*, 2019, 21(5): 8.
- [5] PAN M, ZHANG J T, CHEN X D, et al. Risk assessment in automobile supply chain based on neural network[J]. *Shanghai Management Science*, 2019, 41(1): 8.
- [6] LI F, WU C H, ZHOU L, et al. A model integrating environmental concerns and supply risks for dynamic sustainable supplier selection and order allocation[J]. *Soft Computing*, 2021, 25(1): 535-549.
- [7] COX A, SANDERSON J, WATSON G. Supply chains and power regimes: toward an analytic framework for managing extended networks of buyer and supplier relationships[J]. *Journal of Supply Chain Management*, 2006, 37(2): 28-35.
- [8] BRUNETTI C, HARRIS J H, MANKAD S, et al. Interconnectedness in the interbank market[J]. *Journal of Financial Econo-*

mics,2019,133(2):520-538.

- [9] WANG Y C,ZHANG F P. Modeling and analysis of under-load-based cascading failures in supply chain networks[J]. Nonlinear Dynamics,2018,92(2):1-15.
- [10] LI X L. Robustness of supply chain network considering cascading failure[D]. Dalian:Dalian University of Technology,2019.
- [11] CHEN H D,ZHU Z F,LIU D Z. Cascading failure detection method of supply chain based on importance of nodes[J]. Prices Monthly,2022(8):87-94.
- [12] TANG L ,JING K ,HE J ,et al. Robustness of assembly supply chain networks by considering risk propagation and cascading failure[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,2016,459:129-139.
- [13] ZHENG T Y,HE J J. Research on Robustness of Multi-level Supply Chain Network under Gravity Mode[J]. Science Technology and Industry,2022,22(1):224-230.
- [14] ZHOU Q,ZHU Z L,QI Y,et al. Optimization of cascading failure on complex network based on NNIA [J]. Physica A Statistical Mechanics and its Applications,2018,501:42-51.
- [15] TAN X H,WANG Y,LI B Q,et al. A Research on the Load Re-

distribution Based on the Cascading Failure Model of Scale-free Network[J]. Journal of Air Force Engineering University(Natural Science Edition), 2016,17(6):5.

- [16] YANG K,ZHANG Z Y. The research on mechanism of supply chain network risk based on complex network theory[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences,2013,33(10):1224-1232.



YANG Xiaobo, born in 1994, Ph.D candidate, is a member of China Computer Federation. His main research interests include data science and complex networks.



LIU Tianyue, born in 1997, Ph.D candidate, is a member of China Computer Federation. Her main research interests include supply chain finance and privacy computing.