

引力模型下多级供应链网络鲁棒性研究

郑添元, 何建佳

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要:收集了 2 000 家汽车供应链企业工商数据,基于引力模型建立多级供应链网络,根据企业间的流量建立“负载-容量”模型并提出多级有向网络模型的失效节点负载分配过程,而后模拟节点失效传播供应链网络的风险开展鲁棒性研究。实验结果表明:基于引力模型构建的供应链网络具有无标度特性;在基于引力模型的多级供应链网络模型中,节点的流量负载总和和可以作为识别节点系统重要性的衡量指标;可控系数和最大承载系数对供应链网络鲁棒性能具有重要的影响,为实际工作中保护网络重要节点、提高网络鲁棒性提供了研究思路。

关键词:供应链网络;鲁棒性;级联失效;引力模型

中图分类号:C931.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-1807(2022)01-0224-07

供应链网络是由原材料供应商、制造商、分销商、零售商、消费者等多实体构成的有向加权网络,由于供应链中企业的关联关系具有明确的指向性,因此,供应链网络整体呈现出显著的层级特征^[1]。在新冠疫情暴发的时代背景下,产品的供给和需求不确定性增加进而为供应链正常运转带来巨大的挑战,全球供应链面临供应短缺和需求萎缩,揭示了供应链中不可预见和前所未有的脆弱性。供应链的鲁棒性是衡量一个系统面临内部结构和外部环境变化时仍能维持系统正常运转功能的能力。在应对疫情等应急管理场景下,为了保障突发事件下供应链的正常运转,开展供应链网络的鲁棒性能的研究具有重要的理论意义。

随着物流行业的高速发展,供应链网络的研究也逐步成为学者研究的热点^[2],特别是在疫情期间,供应链的复杂性愈发凸显^[3],如何保证供应链稳健发展,规避“断链”风险成了供应链管理研究的重中之重。近年来,学者将复杂网络理论广泛应用于供应链网络的研究。Wang 等^[4]将供应链网络定义为一组企业节点相互交织而形成的网络,但由于企业间合作关系信息不可靠且部分信息具有保密性,不少学者从网络的性质入手重构供应链网络。Surana 等^[5]将供应商、制造商、分销商、零售商、客户和其他组件的异质行为抽象为连接关系从而构

建了供应链网络。王军进等^[6]通过链路预测的方法利用局部数据预测未来企业的合作关系。Modrak 和 Marton^[7]通过设置结构参数生成装配商的供应链网络,从而研究满足生产功能需求且管理成本低的网络结构。徐家旺等^[8]在供需不确定性下提出了一种单个供应商和制造商的多产品、多阶段的供应链模型,并以此研究供应链的鲁棒性。

网络的鲁棒性能与网络的结构以及受冲击节点的重要程度有着紧密的关联。Nair 和 Vidal^[9]研究在线性供应链网络下,随机故障和蓄意攻击情况下与网络鲁棒性之间的关系。Zhao 等^[10]通过适当的拓扑分析和网络优化设计来分析供应链网络对干扰的鲁棒性。Monostori^[11]提出了一种衡量供应链网络鲁棒性优劣的框架以及框架下风险应对策略。还有不少学者^[12-13]通过构建复杂网络模型研究不同攻击策略对网络鲁棒性的影响。

先前学者的研究从理论的角度解释了具有某些特性的供应链网络鲁棒性。然而,现有研究仍存在以下两点不足:①少部分学者^[14-15]基于上下游的供需关系研究多级供应链网络模型,却忽视了企业在合作过程中合作伙伴的选择不仅需要考虑企业的规模,更需考虑彼此间运输成本等问题;②传统的供应链网络级联失效模型以节点过载为企业失效的条件简化了模型,与实际企业案例背道而驰。

收稿日期:2021-10-08

基金项目:国家社会科学基金面上项目(71871144);上海理工大学科技发展项目(2020KJFZ046)。

作者简介:郑添元(1998—),女,黑龙江鸡西人,上海理工大学管理学院,硕士研究生,研究方向为管理科学与工程;通信作者何建佳(1981—),男,湖南道县人,上海理工大学管理学院,副教授,博士,博士研究生导师,研究方向为企业经济、宏观经济管理与可持续发展。

本文以汽车供应链为例收集了汽车行业零部件原材料供应商、车辆制造商、汽车批发商和汽车零售商各 500 家,总计 2 000 家企业,以企业的实缴资本表征企业的规模,企业所在省会城市间的距离表征企业间的距离间接刻画企业间的运输成本,建立了多级供应链网络模型。在此基础上,本文结合企业失效的实际,建立了供应链风险传播机制,并研究不同的攻击策略对多级供应链网络的鲁棒性的影响。

1 模型方法

1.1 多层网络模型

供应链网络包含了原材料供应商、制造商、分销商和零售商等多个实体,企业之间根据供销需求会建立起合作关系,从而构建出一个原材料供应商-制造商-分销商-零售商的多层供应链网络模型。本文基于复杂网络分析方法,将企业映射成节点,企业间的合作关系表征为连边,企业间交易的规模则用连边权重来表示,如图 1 所示。

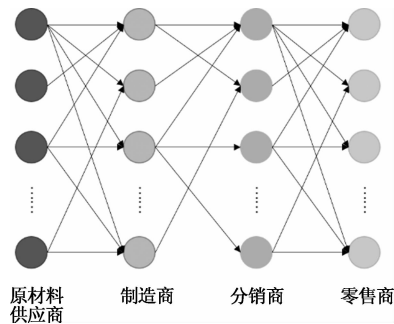


图 1 多级供应链网络示意图

供应链网络被划分为 4 个层级,由左至右分别为原材料供应商、制造商、分销商、零售商。假设企业的经营范围不会扩大,企业间的合作关系只会在上下两个层级中产生,而不同层级之间不存在合作关系,一家企业可以与多家企业建立联系。由于供应链网络难以获得实证数据支撑,先前学者的研究多从随机、无标度和小世界等网络理论开展供应链鲁棒性研究,然而,理论研究多基于无向图,无法体现供应链的层级结构对供应链的影响。基于此,本文以供应链上下游层级间相互作用的强度作为企业间是否存在联系的依据。Ma 等^[16]基于引力定律量化了节点间的相互作用并提出一种刻画网络生存能力的模型,Yan 等^[17]认为节点间的相互影响可以利用节点间的吸引力来体现,并根据节点间吸引力的强弱识别了最有影响力的作家。引力定律从物理学的概念逐步被拓宽至社会科学等各个领

域。本研究基于引力定律建立了企业间的吸引力强度并通过阈值法筛选并建立企业间的合作关系。其中,企业间的吸引力强度与两家企业的规模成正比,与企业间的空间距离成反比,建立了企业间的引力模型:

$$\begin{cases} A_{ij} = \frac{W_i W_j}{d_{ij}^2} \\ W_i = \frac{(RC_i - RC_{\min})}{(RC_{\max} - RC_{\min})} \\ d_{ij} = \begin{cases} \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \end{cases} \quad (1)$$

式中: A_{ij} 代表企业 i 与企业 j 的吸引力强度; W_i 代表企业的节点强度; d_{ij} 代表企业间的空间距离。考虑到企业注册资本数据分布偏差较大,对企业注册资本数据进行极差标准化,以处理后的数据刻画企业节点强度。其中, RC_i 表示企业的实缴资本规模, $RC_{\max}$ 表示该企业所在层级中最大的实缴资本规模, $RC_{\min}$ 表示该企业所在层级中最小的实缴资本规模。本文对企业间的空间距离 d_{ij} 通过企业所在省份省会城市间的空间距离进行刻画,其中, x 表示企业所在省份的经度, y 表示企业所在省份的纬度,同省份的企业间的距离为最小值 1。

以汽车供应链为例,收集了汽车行业多家原材料供应商、制造商、分销商和零售商的信息,构建具有多层级的供应链网络模型。具体构建方法如下:

1) 初始化企业节点数量,选择邻接的上下游两个层级,以原材料供应商和制造商为例,计算不同层级的企业间吸引力 A_{ij} , i 为原材料供应商层级的企业, j 为制造商层级的企业。

2) 根据阈值法,仅当两家企业之间的吸引力 A_{ij} 超过设定阈值 θ ,上游企业 i 与下游企业 j 之间建立合作关系。

3) 选取不同层级的企业节点,重复步骤 1)、2),建立原材料供应商-制造商、制造商-分销商、分销商-零售商的多级供应链网络。

1.2 供应链网络的鲁棒性

供应链网络的鲁棒性是指在受到外部冲击或者内部干扰的情况下,维持供应链运转,发挥正常功能的特性。当遭遇突发事件时使得部分节点失效,如疫情导致部分企业无法复工,导致了具有合作关系的企业需要从同一层级中具有合作关系的企业谋求更多的供销合作。对于寻求不到合作的企业即可能面临着经营困境,引发级联失效等问题。级联失效问题在现实生活中颇为常见,如电力

网络、交通网络等有流量运输任务的网络。

考虑到本文基于引力模型所构建的供应链网络具有明显的层级性质,同一层级企业的危机会给同层级的企业带来机遇与挑战。在经典研究的“负载-容量”模型的基础上,对于节点的流入负载与流出负载予以区分。传统的供应链鲁棒性研究以企业负荷过载作为企业失效的成因,而实际生活中,企业的倒闭往往是由于原料缺乏亦或是货物滞销。因此,本文提出了一种新的负载分配模型,具体设置如下:

1.2.1 企业负载

以往的研究多从理论模型角度出发,以节点的度和介数衡量企业的负载能力。本文立足于引力模型,以企业节点间的吸引力衡量两家企业间的流量,即可根据企业节点流入量的大小计算企业的初始流入负载,流出量的大小计算企业的初始流出负载,计算公式为

$$\begin{cases} IL_i^0 = \sum_j A_{ji}, & A_{ji} > \theta \\ OL_i^0 = \sum_j A_{ij}, & A_{ij} > \theta \end{cases} \quad (2)$$

式中: IL_i^0 表示企业的初始流入负载; OL_i^0 表示企业的初始流出负载。对于原材料供应商层级的企业节点,其流入负载为0,而零售商层级的企业节点,其流出负载为0。当供应链网络中部分节点遭受外部冲击而失效时,该节点的流入和流出负载会分配到同一层级的其他企业中,因此,企业的负载是动态变化的。

1.2.2 企业容量

企业容量表示的是企业可以承受的最大负载能力,本实验通过一个线性关系来衡量企业的容量与其初始负载的关系,计算公式为

$$\begin{cases} IC_i = (1 + \beta) IL_i^0 \\ OC_i = \frac{IL'_i}{IC_i} OL_i^0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: IC_i 表示企业流入的容量,企业流入的容量与其初始状态的流入负载具有线性关系; β 为最大承载系数, β 的值越大,说明企业具有越大的流入容量;由于企业流出的容量由其当前流入的负载、初始流入负载以及初始的流出负载所决定, IL'_i 表示当前状态下企业的流入负载, OC_i 表示企业流出的容量,企业流入容量的最大峰值限制了 OC_i 的最大峰值为 $(1 + \beta) OL_i^0$ 。

1.2.3 负载分配策略

研究假设企业之间不因需求的变化而建立连

边,失效企业的负载即可通过供应链网络的连接关系进行分配。当企业节点 i 失效,会导致与其存在联系的上游或下游节点 j 从其他具有合作关系的企业中获取资源,负载分配策略为

$$\begin{cases} \Delta IL_{ij} \geq \sum_k \overline{IL}_{kj} \\ \Delta OL_{ji} \geq \sum_k \overline{OL}_{jk} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ΔIL_{ij} 表示企业节点 i 失效后造成下游节点 j 产生的资源缺口; $\sum_k \overline{IL}_{kj}$ 表示节点 j 向 i 的同级节点 k 购入资源的总量; ΔOL_{ji} 表示企业节点 i 失效后造成上游节点 j 的滞销资源; $\sum_k \overline{OL}_{jk}$ 表示上游节点 j 向 i 的同级节点 k 出售资源的总量。本文采取均匀分配的策略,将节点 j 的资源需求均匀分配给具有合作关系的上下游企业。一旦企业节点 j 的需求在分配后超出上下游节点 k 的容量,则节点 k 拒绝节点 j 分配的负载。过多的企业节点拒绝节点 j 的负载分配会导致节点 j 资源匮乏或产品滞销,进而企业倒闭形成级联失效。

1.2.4 级联失效条件

企业节点失效会使与该节点连接的上游企业供货不畅,下游企业需求不满,进而使供应链系统重新分配上下游节点的流量。在完成企业节点的负载分配后,若企业的流入负载或流出负载与其对应的流入流出容量的比值小于企业可以承受的范围 ϵ (可控系数)时,即 $IL'_i/IC_i < \epsilon$ 或 $OL'_i/OC_i < \epsilon$ 时,企业节点因出现供需问题经营不善从而导致失效,进而引发新一轮的风险传递。

1.2.5 鲁棒性衡量指标

供应链网络的鲁棒性作为衡量供应链系统运转能力的指标,不仅需要受冲击后网络正常运转的节点数量,还需考虑供应链网络运转的效率。因此,鲁棒性能可以从两个方面进行刻画,一是网络结构的弹性,二是网络结构的效率。本文沿用网络结构弹性指标和网络结构效率指标对网络鲁棒性进行衡量。

1) 网络结构弹性。网络结构弹性以企业之间连接的情况来衡量,在供应链网络中,企业节点失效后会与其他企业节点断开联系形成孤立的节点,如果网络中正常运转的节点数量越多,则网络的弹性则越好。最大联通子图的规模是指网络在受到攻击后,维持供应链网络正常运转的企业节点的数量。最大联通子图的规模与企业的最大承载系数、可控系数以及冲击强度具有密切的关系,常用于衡量网络在受到冲击时的鲁棒性能,具体公式为

$$R = \frac{n}{N} \tag{5}$$

式中： n 表示受到冲击后供应链网络最大联通子图的企业节点数量； N 表示初始供应链网络的企业节点数量。

2)网络结构效率。网络结构效率可以反映供应链网络发生级联失效时网络正常运转并发挥功效的能力,本文参考赵志刚等^[18]的研究,计算网络结构效率,具体计算公式为

$$\eta_E = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j \in G} \frac{1}{d_{ij}} \tag{6}$$

式中： d_{ij} 为企业节点 i 到企业节点 j 的最短距离； G 为供应链网络的最大联通子图。由式(6)可知,最短距离 d_{ij} 越长,传输效率则越低;反之,网络的传输效率则越高。

2 实验设置及结果

2.1 数据准备

本文收集了天眼查数据库的汽车行业零部件原材料供应商、车辆制造商、汽车批发商和汽车零售商各 500 家企业的工商信息数据,并对这些企业的数据进行了预处理。由于天眼查所收集的企业实缴资本数据包含人民币、美元和日元 3 种,本文按照 2021 年 5 月 7 日 1 美元折合为 6.460 1 人民币,1 日元约等于 0.059 2 人民币的汇率进行换算。数据收集、供应链网络构建及鲁棒性分析的研究工作均基于 Python3.6 展开。

2.2 仿真实验结果

2.2.1 供应链网络模型

基于天眼查数据库中 2 000 家汽车行业相关企业的工商信息数据,通过引力模型刻画企业间的吸引力,并通过设定连边阈值选取企业间吸引力超过阈值的两家企业建立连边,从而构建多层的汽车供应链网络。实验中通过反复实验确定连边阈值为 $\theta=0.000\ 1$,可使得所有企业节点存在连边关系。基于引力模型构建的网络的度分布如图 2 所示。图 2 为双对数坐标下供应链网络中企业的度分布,呈现出厚尾的分布特征,近似拟合幂律分布,表明通过引力模型构建的供应链网络具有无标度特性,与前人的结论相符。企业间在寻求合作对象时通常会考虑对方企业的能力、货物运输时间和成本等问题,研究以企业的实缴资本等数据。因此,通过引力模型构建的网络相比于纯粹的理论模型具有更强的可解释性,在一定程度上能反映真实企业间的合作情况。

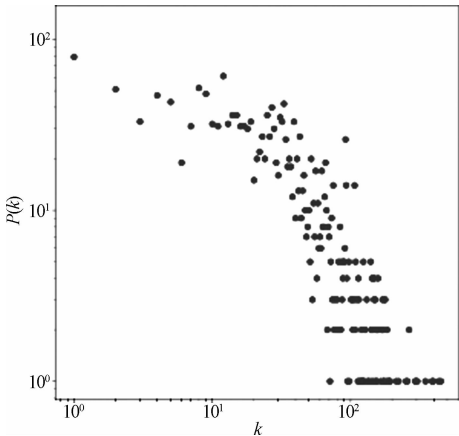


图 2 供应链企业节点的度分布图

2.2.2 供应链网络鲁棒性

基于引力模型所构建的供应链网络具有无标度特性,不同节点的失效对供应链的影响也不尽相同。本文选取了 4 种攻击策略,研究在供应链受到外部冲击导致节点失效时,初始冲击强度、最大承载系数和可控系数对供应链网络模型鲁棒性的影响。

在不同的攻击策略下,冲击强度的增加会造成网络鲁棒性能的下降,且蓄意攻击策略使得鲁棒性能的下降程度要显著大于随机攻击策略。图 3 展示了不同初始冲击强度对网络鲁棒性能的影响。其中,4 条曲线度优先攻击、流入负载优先攻击和流出负载优先攻击等 3 种蓄意攻击策略以及随机攻击策略。图 3 显示,随着初始冲击强度的增加,级联失效规模也在逐渐扩大。其中,流入负载优先攻击策略最先使得网络完全崩溃,其次是流出负载优先攻击策略,度优先攻击策略稍差于前两种策略。由于供应链网络具有分层结构,位于网络中间层级的制造商层和分销商层的企业节点的度值会高于其他层级的节点,度优先策略无法准确识别到每个层级中的重要节点,流入负载优先和流出负载优先两种策略虽然无法完全识别所有层级的重要节点,但在具有指向性的层级结构网络中,识别重要节点的效果要优于度优先攻击策略。在随机攻击策略下,由于受到攻击的大部分节点是随机选取的,很难选取到网络中的关键节点,因此,节点失效对供应链的影响较小,在初始冲击强度达到 0.5 的条件下才使得网络接近崩溃。综上,无论采取什么攻击策略,整个供应链网络的鲁棒性都会受到影响,相比于随机选择节点,有针对性地选取重要节点的攻击策略会使得网络更早地陷入崩溃。

本文进一步分析了最大承载系数的变动对网络鲁棒性的影响。研究发现,提高最大承载系数能够有效提升网络鲁棒性能。从图 4 中可见,对于蓄意攻击策略(流入负载优先、流出负载优先和度优先 3 种攻击策略),随着最大承载系数的增大,网络结构弹性和效率方面都取得了较好的提升,说明企业承载能力的提升对网络的鲁棒性具有正向作用。由于冲击强度不足以使随机攻击策略下引发严重的级联失效,因此,最大承载系数对随机攻击策略的影响不显著。图 4 中,流出负载

优先、流入负载优先和度优先策略分别在 β 介于 1.1~1.2、1.3~1.5 和 1.6~1.7 获得较为显著提升,且在 $\beta > 1.7$ 的条件下,度优先攻击策略的效果则要优于流出负载优先和流入负载优先策略,说明最大承载系数的提升对流入负载优先和流出负载优先策略的鲁棒性提升要优于对度优先策略的提升。最大承载系数衡量了失效企业节点的同层级节点的承受能力。实验结果可以说明,竞争越激烈的行业,企业失效对供应链鲁棒性能的影响越微弱。

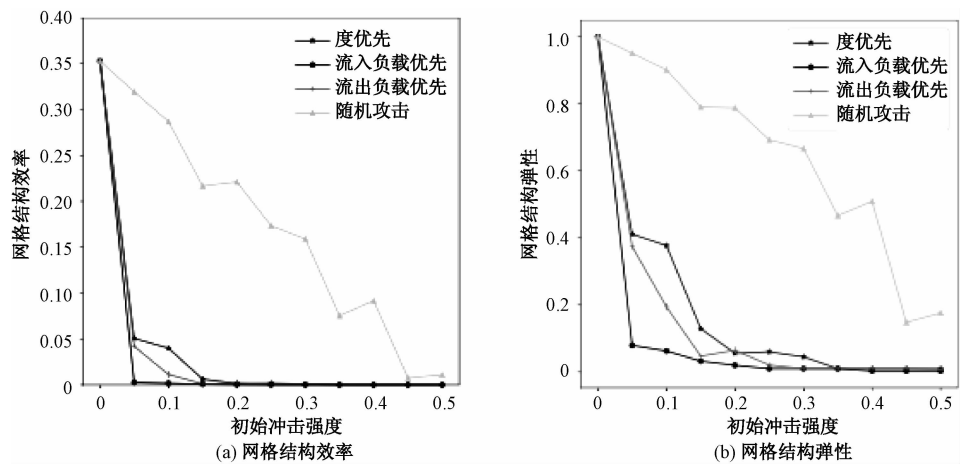


图 3 初始冲击强度对供应链网络鲁棒性的影响 ($\beta=1.3, \epsilon=0.6$)

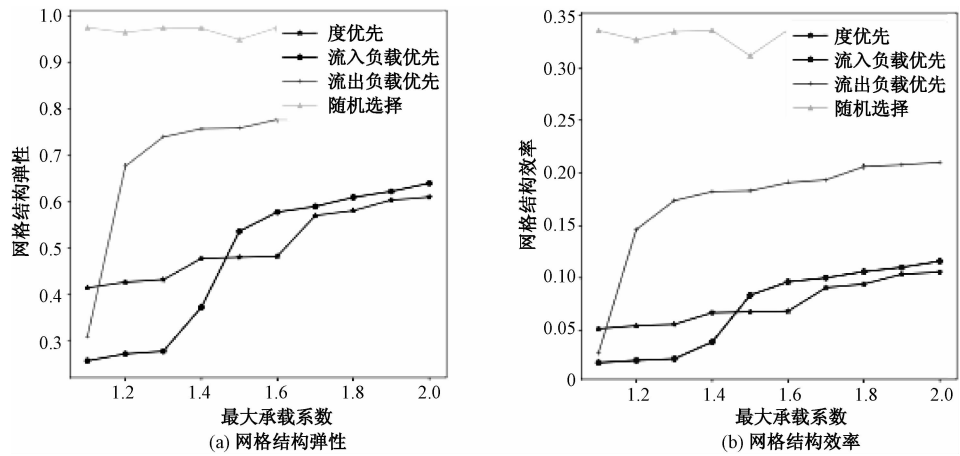


图 4 最大承载系数对供应链网络鲁棒性的影响 ($\epsilon=0.6$, 冲击强度为 2.5%)

最后,本文探讨可控系数对供应链网络鲁棒性能的影响。可控系数表征企业自身抵抗风险的能力,是影响网络鲁棒性能的重要参数,企业资源要匮乏至 ϵ 以下才会导致失效,可控系数越小 ϵ 则企业的承受能力越强。 ϵ 的取值对实验结果具有显著的影响。从图 5 中可见,流入负载优先和度优先策略在 ϵ 为 0.2 逐步增至 0.6 的过程中,网络的鲁棒性能迅速下降,

而后在 $\epsilon > 0.6$ 后逐步趋于平稳;流出负载优先策略则在 ϵ 为 0.2 逐步增至 0.7 时具有一个缓慢的下降趋势,在 ϵ 为 0.7 增至 1 时迅速下降直至网络完全瘫痪。流出负载优先策略所选出的企业节点中,具有较多的零售商企业节点,零售商节点的失效会对同级节点造成冲击,零售端的需求减少会对供应链造成沉重的打击,导致供应链网络完全瘫痪。

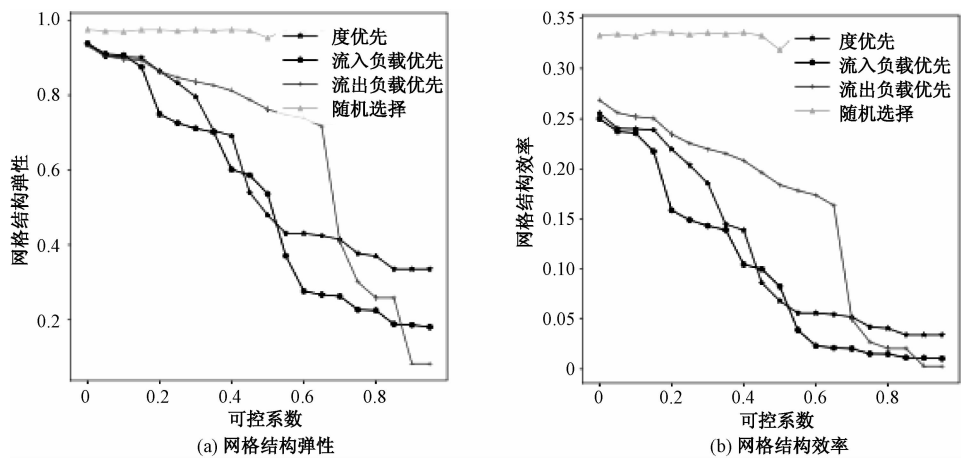


图5 可控系数对供应链网络鲁棒性的影响($\beta=1.3$,冲击强度为2.5%)

3 结论

本文旨在研究多级供应链网络的鲁棒性能,收集了2 000家汽车供应链上下游企业的工商信息数据,基于引力模型构建了多级供应链网络模型,并根据“负载-容量”模型设计了遭受外部冲击时网络的级联失效机制,进而研究冲击强度、最大承载系数以及可控系数对供应链网络鲁棒性的影响。实验结果表明,基于引力模型构建的供应链网络具有无标度特性;在有向加权的多级供应链网络中,流量负载总和最大的节点更具有系统重要性,提升最大承载系数以及降低可控系数能有效增强网络的鲁棒性能。研究为如何识别并保护供应链重要节点,提升企业自身风险承担能力等方面提供了研究方法思路。

参考文献

[1] IVANOV D,DOLGUI A. OR-methods for coping with the ripple effect in supply chains during COVID-19 pandemic: Managerial insights and research implications[J]. International Journal of Production Economics, 2021, 232:107921.

[2] SAWIK T. Two-period vs. multi-period model for supply chain disruption management[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(14):4502-4518.

[3] IVANOV D, DAS A. Coronavirus (COVID-19/SARS-CoV-2) and supply chain resilience: A research note[J]. International Journal of Integrated Supply Management, 2020, 13(1):90-102.

[4] WANG J,DOU R,MUDDADA R R,et al. Management of a holistic supply chain network for proactive resilience: Theory and case study[J]. Computers & Industrial Engineering, 2018, 125:668-677.

[5] SURANA A,KUMARA S,GREAVES M,et al. Supply-chain networks: a complex adaptive systems perspective

[J]. International Journal of Production Research, 2005, 43(20):4235-4265

[6] 王军进,刘家国,李竺珂. 基于复杂网络的供应链企业合作关系研究[J]. 系统科学学报, 2021, 29(3): 110-115,130.

[7] MODRAK V,MARTON D. Modelling and complexity assessment of assembly supply chain systems[J]. Procedia Engineering, 2012, 48:428-435.

[8] 徐家旺,黄小原. 市场供求不确定供应链的多目标鲁棒运作模型[J]. 系统工程理论与实践, 2006(6): 35-40.

[9] NAIR A,VIDAL J M. Supply network topology and robustness against disruptions-an investigation using multi-agent model[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(5):1391-1404.

[10] ZHAO K,SCHEIBE K,BLACKHURST J,et al. Supply chain network robustness against disruptions: Topological analysis, measurement, and optimization[J]. IEEE Transactions on Engineering Management, 2018, 66(1):127-139.

[11] MONOSTORI J. Supply chains robustness: Challenges and opportunities[J]. Procedia CIRP, 2018, 67:110-115.

[12] YIN R R,LIU B,LIU H R,et al. Research on invulnerability of the random scale-free network against cascading failure[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 444:458-465.

[13] CHAOQI F,YING W,XIAOYANG W,et al. Multi-node attack strategy of complex networks due to cascading breakdown[J]. Chaos, Solitons & Fractals, 2018, 106: 61-66

[14] 郑英杰,周岩. 基于横向和纵向公平偏好的二层供应链网络均衡决策[J]. 中国管理科学, 2019, 27(4):136-148.

[15] 戚佛兰,周岩. 考虑渠道公平的双渠道二层供应链网络均衡策略[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(5): 1469-1482.

[16] MA L,MA C,ZHANG H F,et al. Identifying influential spreaders in complex networks based on gravity formula [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2016, 451:205-212.

[17] YAN X L, CUI Y P, NI S J. Identifying influential spreaders in complex networks based on entropy weight method and gravity law[J]. Chinese Physics B, 2020, 29 (4): 048902.

[18] 赵志刚, 周根贵, 李虎雄. 复杂加权供应链网络攻击策略和鲁棒性研究[J]. 计算机科学, 2019, 46(8): 138-144.

Research on Robustness of Multi-level Supply Chain Network under Gravity Model

ZHENG Tianyuan, HE Jianjia

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Business data was collected from 2000 automotive supply chain companies, establishes a multi-level supply chain network based on the gravity model, and establishes a “load” based on the flow between enterprises “capacity” model and proposed a multi-level directed network model for the load distribution process of failed nodes, and then simulate the risk of node failure propagation in the supply chain network to carry out robustness research. The experimental results show that the supply chain network constructed based on the gravity model has scale-free characteristics; in the multi-level supply chain network model based on the gravity model, the total traffic load of the node can be used as a measure of the importance of the node system; controllable coefficient And the maximum load factor has an important influence on the robust performance of the supply chain network. This paper provides research ideas for protecting important network nodes and improving the robust performance of the network in actual work.

Keywords: supply chain network; robustness; cascading failure; gravity model