

基于脆性理论的闭环供应链系统改善研究

邵瑞瑞¹, 方志耕¹, 徐新卫², 刘思峰¹, 陶良彦¹, 聂媛媛¹

(1. 南京航空航天大学经济与管理学院, 江苏南京 211106; 2. 安徽工业大学管理科学与工程学院, 安徽马鞍山 243032)

摘要: 对由制造商、零售商、需求市场组成的闭环供应链系统, 利用熵理论对闭环供应链系统作为一个整体向外界表现出的脆性度进行了量化计算, 研究当闭环供应链系统的整体脆性度超限, 致使系统面临崩溃的情况下, 如何在降低系统整体脆性度的同时减弱系统间的脆性关联, 维持系统稳定. 通过分析闭环供应链系统的脆性结构和特征, 建立脆性传播模型, 并求出系统的分层脆性图, 找出闭环供应链系统的脆性源. 从脆性源、脆性源的源头、与脆性源关联最大的子系统三个方面来降低系统脆性度. 通过实例说明当闭环供应链系统的整体脆性度超出系统阈值时, 为避免系统发生崩溃, 通过对脆性源的处理, 降低系统的整体脆性度, 可以实现对系统的改善.

关键词: 闭环供应链; 脆性源; 脆性度; 图论; 熵

中图分类号: F274 **文献标识码:** A doi: 10.3969/j.issn.0253-2778.2018.11.009

引用格式: 邵瑞瑞, 方志耕, 徐新卫, 等. 基于脆性理论的闭环供应链系统改善研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2018, 48(11):933-942.

SHAO Ruirui, FANG Zhigeng, XU Xinwei, et al. On the improvement of closed-loop supply chain systems based on brittle theory[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2018, 48(11):933-942.

On the improvement of closed-loop supply chain systems based on brittle theory

SHAO Ruirui¹, FANG Zhigeng¹, XU Xinwei², LIU Sifeng¹, TAO Liangyan¹, NIE Yuanyuan¹

(1. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, China)

Abstract: For the closed-loop supply chain system consisting of manufacturers, retailers and demand markets, entropy theory was used to quantify the brittleness of the closed-loop supply chain system as a whole, and it was studied that how, with the overall degree of brittleness of the closed-loop supply chain system exceeding the threshold, resulting in the collapse of the system, to weaken the brittle relationship between systems while reducing the overall brittleness of the system, so as to maintain the stability of the system. By analyzing the brittle structure and characteristics of the closed-loop supply chain system, the brittle propagation model was established, the hierarchical brittleness diagram of the system was obtained, and the brittle source of the closed-loop supply chain system was identified. The brittleness of the system was reduced from three aspects: the brittle source, the source of the brittle source, and the subsystem with the largest correlation with the brittle source. Through examples, it is shown that when the overall

收稿日期: 2017-08-20; 修回日期: 2017-12-07

基金项目: 国家自然科学基金(71671091)资助.

作者简介: 邵瑞瑞, 女, 1991年生, 博士. 研究方向: 复杂系统, 复杂装备. E-mail: 15252477151@163.com

通讯作者: 方志耕, 博士/教授. E-mail: zhigengfang@163.com

brittleness of the closed-loop supply chain system exceeds the system threshold, in order to avoid system crashes, the brittleness of the system is reduced through the treatment of brittle sources, thus improving the system.

Key words: closed-loop supply chain; brittle source; degree of brittleness; graph theory; entropy

0 引言

2003 年欧盟颁布的 WEEE 指令^[1],对废弃产品循环再利用问题进行了探讨.我国也于 2006 年制定了《再生资源回收管理办法》,2008 年通过了《中华人民共和国循环经济促进法》,越来越多的企业开始重视循环经济^[2].在此背景下,闭环供应链得到了发展.闭环供应链(closed-loop supply chain)是指企业从采购生产到销售的整个供应链,包含产品的回收及在生命周期内支持的逆向物流.闭环供应链的研究与应用不仅可以减少废旧物的污染,还能对产品进行再制造,以较低的成本为顾客提供服务,从而实现“经济与环境”综合效益,对可持续发展做出重要贡献.因此,闭环供应链已经成为物流与供应链管理中一个新的发展趋势.

已有很多的学者对闭环供应链系统的管理问题进行了研究.Govindan 等^[3]提出了闭环供应链系统中通过对产品回收的管理来实现制造业的可持续发展;Bhattacharya^[4]对闭环供应链系统中产品的收购价格进行了探讨;Rajkumar 等^[5]在汽车闭环供应链系统中考虑了回收汽车零部件时的不确定性,通过多目标多产品模型的建立,实现了对闭环供应链成本的优化;于春海等^[6]研究了闭环供应链系统下双渠道回收的策略问题;张汉江等^[7]考虑了政府财政补贴作用下的回收价格激励对闭环供应链系统的协调作用;张桂涛等^[8]探讨了由零售商负责回收的闭环供应链网络均衡问题,采用变分不等式和投影算法求出了系统的均衡解.一些学者对闭环供应链的脆性问题进行了研究.2007 年 Wang^[9]对供应链系统的脆性因素进行了分析,并对系统进行了脆性度测试;2010 年 Kang 等^[10]通过分析供应链系统的脆性因素,利用最大熵原理建立脆性风险模型来预测供应链的潜在风险;2012 年李新盛^[11]利用熵理论对农超对接模式下的果蔬供应链系统进行了研究;2013 年周永务等^[12]分析了供应商和不同零售商组成的供应链系统联盟之间的稳定性问题;2014 年公彦德^[13]运用博弈论的方法,研究供应链主导模式、回收模式的最优组合与供应链系统的均衡问题;

2015 年覃艳华^[14]分析了突发事件影响下的供应链系统协调问题,通过对收益共享契约的调整来应对突发事件;2017 年吕涛等^[15]通过 FDEMATEL 法分析了煤电供应链系统的脆性源.

综上,在闭环供应链的管理研究主要集中在在产品回收、库存等方面,而对闭环供应链系统脆性的相关研究很少,并且已有的对闭环供应链系统脆性的考察主要集中在对系统脆性源的分析上,并未对脆性源的解决提出形式化的改善措施.与此同时,对于系统整体脆性度的度量仅仅局限在供应链系统之中,闭环供应链系统的整体脆性度较大,系统面临崩溃风险的问题还没有得到解决.

闭环供应链系统是由不同参与方系统的叠加,是一个复杂系统.脆性作为复杂系统的一个基本属性,始终伴随着复杂系统的存在而存在.一旦闭环供应链系统存在脆性风险,就会进而影响与其相关联的系统,引发连锁性崩溃,造成闭环供应链的中断.因而本文从复杂系统脆性理论的角度来研究闭环供应链系统,同时以 A 汽车闭环供应链为例进行分析.利用熵理论对系统的整体脆性度进行求解,并对系统脆性度超限问题提出了具体的解决方法,将有向图和相关矩阵引入闭环供应链系统之中,用以分析系统的脆性源,并就脆性源的处理提出了三种措施,实现了对系统的改善.

1 闭环供应链系统脆性分析模型的构建

1.1 建立闭环供应链系统脆性结构

闭环供应链系统具有复杂性、层次性、开放性等特点,是一个复杂系统.本文将构建一个由制造商、零售商及需求市场构成的简易三级供应链,同时考虑由制造商承担对需求市场中产品的回收再制造过程,以此形成闭环供应链系统,如图 1 所示.

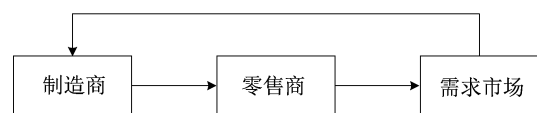


图 1 三级闭环供应链系统

Fig. 1 Three-stage closed-loop supply chain system

复杂系统脆性结构模型由脆性风险、脆性主体、脆性事件、脆性因子四个部分组成。其中脆性风险为供应链系统受到内外部打击而崩溃的风险，脆性主体为闭环供应链系统的各个参与方所在的子系统，脆性事件是以一定概率作用于闭环供应链系统上可

能导致供应链系统崩溃的随机事件，脆性因子是根据闭环供应链系统内外条件而辨析出来的，导致闭环供应链系统脆性被激发的根本因素^[16]。闭环供应链系统脆性结构模型如图 2 所示，图中的箭头仅表示各组成部分的关联关系，不表示脆性联系。

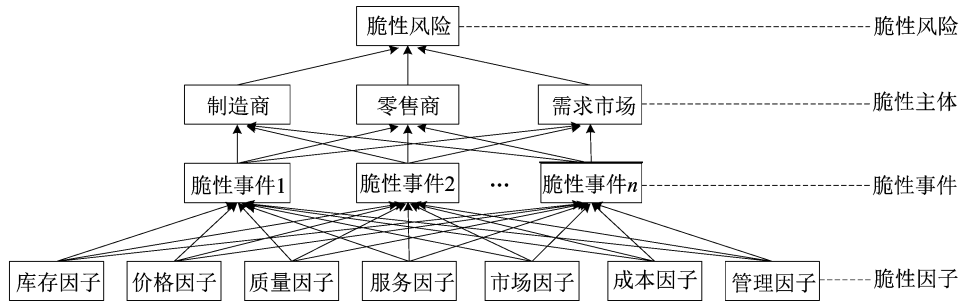


图 2 三级闭环供应链系统脆性结构

Fig. 2 The brittle structure of the tertiary closed-loop supply chain system

闭环供应链系统的脆性主体包括制造商、零售商、需求市场等子系统，脆性事件包括自然灾害、信息流、物流、资金流等内外部事件，闭环供应链系统的脆性因子包括库存、市场、管理、价格等。面临的系统越复杂，系统之间的关联性越多，要考虑的脆性因子也越多。

1.2 基于熵理论的闭环供应链系统脆性度求解

在由制造商、零售商、需求市场构成的一个彼此相互影响、相互作用的完全脆性单元内，利用熵理论来研究闭环供应链系统内各子系统间的脆性关联。假如闭环供应链系统的样本空间中有 n 个可能发生的事件 $I = \{I_1, I_2, \dots, I_n\}$ ，事件 $I_i (i=1, 2, \dots, n)$

发生的概率为 $P_i (0 \leq P_i \leq 1)$ ，即 $\sum_{i=1}^n P_i = 1, p_i (0 \leq p_i \leq 1)$ 为在事件 I_i 作用下系统崩溃的概率， dS 表示闭环供应链的系统熵，那么闭环供应链系统中子系统 X 的脆性熵：

$$dS_X = - \sum_{i=1}^n p_i P_i \log_2 P_i \quad (1)$$

任意两个子系统 X, Y 的联合脆性熵为

$$d(S_X \cup S_Y) = - \sum_i \sum_j p_{ij} P_{ij} \log_2 P_{ij} \quad (2)$$

式中， P_{ij} 表示子系统 X 和 Y 的可能性事件 $I_i, I_j (i, j=1, 2, \dots, n)$ 同时发生的概率， p_{ij} 表示在事件 I_i, I_j 作用下，子系统 X 和 Y 发生崩溃的概率。

根据式(1)和(2)，子系统 X, Y 的脆性联系熵为

$$d(S_X \cap S_Y) = dS_X + dS_Y - d(S_X \cup S_Y) \quad (3)$$

式中， $d(S_X \cap S_Y)$ 表示子系统 X 和 Y 所共有的脆性因子，其脆性同时被激发的熵值大小，也就是两者脆

性关联的程度。设 $d(S_X \cap S_Y)$ 表示子系统 X 和 Y 脆性因子的数量， dS_X, dS_Y 分别代表子系统 X 和 Y 的脆性因子数量，把式(3)两边同时除以 $d(S_X \cup S_Y)$ 就是子系统 X, Y 的脆性关联度系数 θ_{XY} ：

$$\theta_{XY} = \frac{d(S_X \cap S_Y)}{d(S_X \cup S_Y)} = \frac{dS_X + dS_Y}{d(S_X \cup S_Y)} - 1 \quad (4)$$

式中， $\theta_{XY} = \theta_{YX}$ ，那么由各子系统间的脆性关联系数组成的闭环供应链系统 S 的脆性关联系数矩阵为

$$U = \begin{bmatrix} 1 & \theta_{12} & \dots & \theta_{1n} \\ \theta_{21} & 1 & \dots & \theta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_{n1} & \theta_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

由脆性关联系数矩阵可以找到关联度强的子系统，从而便于采取有效的措施降低脆性关联，避免系统发生崩溃。如果求得矩阵 U 的特征值为 λ_i ，可以求出整个闭环供应链系统的脆性度为

$$C(S) = \sqrt{\max |\lambda_i|} \quad (6)$$

$C(S)$ 表征闭环供应链系统作为一个整体向外界表现出的脆性度，若系统的脆性度存在一个阈值区间 $[a, b]$ ，当 $C(S) > b$ 时意味着系统存在着崩溃风险，应该采取措施降低系统脆性度。若 $C(S) < a$ 意味着系统不会发生脆性风险，但是发展缓慢，比如存在库存过度问题，不利于系统的正常运转。因此，我们应该采取措施将脆性风险控制在此阈值之间，在控制整体脆性度的同时要兼顾系统之间的脆性关联，保障系统的健康快速发展。

1.3 基于图论的闭环供应链系统脆性分析

如果系统的整体脆性度超过阈值，要降低脆性

度,首先必须找到对系统脆性影响最大的子系统,因此对系统脆性源的辨识显得尤为重要,现引入图论对闭环供应链系统的脆性进行分析。

图论是将事物及事物之间的关系用图来描述的一种数学模型,该方法的基本思想是将系统等效为节点,系统之间的关联等效为有向边,以此来建立系统的脆性传播模型,求出系统的分层脆性图。

1.3.1 建立系统脆性分层模型的基础^[17]

定义 1.1 系统:由两个以上相互区别的要素组成,其数学表达为

$$X = \{x_i \mid x_i \in X\}, i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

定义 1.2 节点 J :表示系统的子系统. 设系统由 n 个子系统组成,对每个子系统进行编号,则系统可表示为

$$J = \{J_1, J_2, \dots, J_n\} = \{1, 2, \dots, n\} \quad (8)$$

定义 1.3 有向支路 Z :表征子系统之间是否存在影响关系,并且具有方向性,表示为

$$Z = \{(i, j) \mid i, j \in n\}, (i, j) \neq (j, i) \quad (9)$$

定义 1.4 脆性邻接矩阵 L :表示子系统间的脆性传播关系,即

$$L_{n \times n} = \{0, 1\} \quad (10)$$

当节点 i 对节点 j 有影响时, L 的值为 1, 否则为 0.

定义 1.5 脆性可达矩阵 K :有向图中的子系统经过一定的脆性传播后是否可以相互影响的度量,有

$$K = \{K_{ij} \mid K_{ij} \in 0, 1\} \quad (11)$$

当脆性关系可以由一个节点传递到另一个节点时,表明子系统之间具有脆性传递关系,此时矩阵的值为 1, 否则为 0.

定义 1.6 脆性强度 ω_{ij} :衡量子系统 i 崩溃的情况下,对与 i 存在脆性关联的子系统 j 的影响程度. 对它的度量表示为

$$\omega_{ij} \in [0, 1] \quad (12)$$

ω_{ij} 在 0~1 的范围内进行取值,此时 ω_{ij} 越大表示子系统 i 崩溃时对子系统 j 的影响越大,当 ω_{ij} 取 1 时说明子系统 i 崩溃时会引起子系统 j 的崩溃.

定义 1.7 传播概率 P :在脆性度的取值区间为 $[0, 1]$ 时,节点 i 发生崩溃是否能引起节点 j 崩溃,即 i 崩溃引起 j 崩溃的概率. 其表达式为

$$P = \{P_{ij} \mid i, j \in n\}, P_{ij} \in [0, 1] \quad (13)$$

定义 1.8 脆性传播矩阵 C :表示子系统之间

是否会发生连锁性崩溃的矩阵,其取值为

$$C = \{0, 1\} \quad (14)$$

定义 1.9 脆性传播阈值 Y :子系统 i 崩溃是否引起子系统 j 崩溃,其判断方法为

$$C = \begin{cases} 0, & \omega_{ij} P_{ij} < Y; \\ 1, & \omega_{ij} P_{ij} > Y \end{cases} \quad (15)$$

定义 1.10 可达集 $K(i)$:节点 i 能够到达的节点集合,是可达矩阵中第 i 行中所有为 1 的元素所在的列组成的集合,表示为

$$K(i) = \{j \in n \mid K_{ij} = 1\} \quad (16)$$

定义 1.11 先行集 $X(i)$:能够到达节点 i 的所有节点集合,是可达矩阵中第 i 列中所有为 1 的元素所在的行组成的集合,表示为

$$X(i) = \{j \in n \mid K_{ji} = 1\} \quad (17)$$

定义 1.12 级间划分:将所有的节点按照彼此间是否可达划分出层次结构. 其划分方法为:首先找出最高层元素,使其满足 $K(i) = K(i) \cap X(i)$. 找到最高层元素之后将其在脆性分层表中划去相应的元素,继续寻找满足条件的元素,直至找出所有的元素,按照找出的顺序将系统节点分成不同的层次.

1.3.2 系统脆性分层模型求解步骤

(I) 建立脆性关联有向图

主要是对整个系统进行分析,将系统中的各个子系统定义为节点,同时对系统中的脆性关联情况进行分析,得出系统脆性关联有向图.

(II) 系统脆性传播模型的求解

包括:分析系统的实际情况,根据实际的置信度评价得出脆性强度矩阵和传播概率矩阵;给出脆性传播阈值;根据邻接矩阵 L , 求出可达矩阵 $K = (L + I)^1 \cup (L + I)^2 \cdots \cup (L + I)^n$; 求出系统的脆性传播矩阵 C , 计算新的脆性可达矩阵 $R = (C + I)^1 \cup (C + I)^2 \cup \cdots \cup (C + I)^n$, 得出此系统最终的脆性传播模型.

(III) 求出分层的系统脆性模型

包括:求出系统的可达集、先行集,根据级间划分的方法对模型进行脆性分层,求得系统的脆性分层图.

1.4 闭环供应链系统脆性发生的机理分析

以木桶模型来说明闭环供应链系统脆性发生的机理,如图 3 所示. 图 3 中的木桶代表着闭环供应链系统,木桶中的水位代表闭环供应链系统的脆性度,木桶壁上的圆圈表示系统的脆性环节即脆性度阈值. 那么一旦闭环供应链系统的脆性度上升至脆性环节的高度,木桶中的水就会流出来. 这就是说,一

但闭环供应链系统的脆性度超过系统最大承受度(阈值),那么系统就会面临崩溃风险。

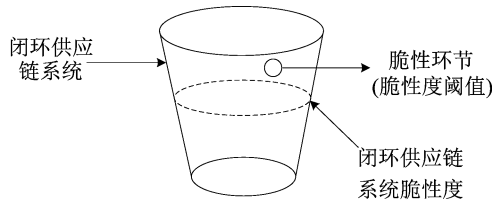


图 3 闭环供应链系统脆性发生机理分析

Fig. 3 Analysis on brittle mechanism of closed-loop supply chain system

1.5 闭环供应链系统脆性结构的处理

针对存在脆性风险的系统,利用图论求得其脆性源,针对求得的脆性源采取以下处理步骤:

(I)分析脆性源的源头。

通过分析诱发脆性源的因素,找出脆性源的源头,考虑其对系统的影响。

(II)找到与脆性源脆性关联性最大的子系统。

通过整体脆性度求解过程中的脆性联系熵和脆性关联系数的大小,找出与脆性源关联最大的子系统。采取相应措施,降低它们之间的脆性关联度。

(III)对脆性源节点根据系统实际情况进行裂解、合并、删除。

设系统 $G=(V,E), v_1 \in V, e_1 \in E$, 其中 V 表示系统中节点的集合, E 表示系统中有向边的集合, 现设 v_1 为系统的脆性源节点。

复杂系统脆性源节点的处理可以采取以下三种措施:

定义 1.13 裂解:将系统中的脆性源节点裂解

为两个或多个与原来节点功能相似的节点,裂解后重新与原系统组成新的系统,其数学表示为

$$G = \{v_{11}, v_{12}, \dots, v_{1n}, v_2, \dots, v_n, E' + E(v_1)\}.$$

定义 1.14 合并:将系统中两个或多个节点(子系统)合成一个节点(子系统),构建新的节点网络,即

$$G = (s_1 \cup s_2, s_3, \dots, s_n, e_1 \cup e_2, e_3, \dots, e_m).$$

定义 1.15 删除:在系统中删除一个或多个节点。删除一个节点时,当然也就删除了复杂系统网络中涉及该节点的所有有向边,此时有

$$G(-v_1) = (V - (v_1), E - E(v_1)).$$

2 实例分析

A 汽车供应链是由制造商、零售商、需求市场构成的正向销售链,以及由制造商对废旧汽车进行回收再制造形成的逆向物流所构成的一个三级闭环供应链系统。每个子系统都存在若干个脆性因子影响该系统的稳定性,如由于库存控制不合理导致制造商的资金周转不灵或是不能提供足量的供应,或者由于公司电子信息平台故障等导致不能灵敏反映市场供需等,都将导致子系统的崩溃,从而致使整条供应链断链。通过对汽车闭环供应链系统脆性风险的调研与相关文献的分析^[10,18],结合因子分析法得出系列脆性因子。概括而言,汽车闭环供应链系统的脆性因子包括:库存因子、价格因子、质量因子、服务因子、市场因子、成本因子、管理因子。现假设闭环供应链脆性相关数据如表 1 所示。

表 1 脆性因子作用下的系统概率表示

Tab. 1 System probability representation under brittleness factors

项目		概率						
		库存因子	价格因子	质量因子	服务因子	市场因子	成本因子	管理因子
各脆性因子在子系统 X、Y、Z 中发生的概率	子系统 X	0.1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.2	0.3
	子系统 Y	0.3	0.2	0.1	0.3	0.2	0.3	0.2
	子系统 Z	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.2	0.1
各脆性因子作用下子系统 X、Y、Z 崩溃的概率	子系统 X 崩溃	0.4	0.2	0.6	0.3	0.2	0.3	0.1
	子系统 Y 崩溃	0.1	0.2	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2
	子系统 Z 崩溃	0.3	0.4	0.5	0.6	0.2	0.4	0.1
各脆性因子在任意两个子系统间同时发生的概率	子系统 X 与 Y 之间	0.03	0.02	0.02	0.09	0.02	0.06	0.06
	子系统 X 与 Z 之间	0.01	0.02	0.04	0.09	0.01	0.04	0.03
	子系统 Y 与 Z 之间	0.03	0.04	0.02	0.09	0.02	0.06	0.02
各个脆性因子的作用下两个子系统崩溃的概率	子系统 X 与 Y 崩溃	0.4	0.2	0.6	0.3	0.2	0.3	0.2
	子系统 X 与 Z 崩溃	0.4	0.4	0.6	0.6	0.2	0.4	0.1
	子系统 Y 与 Z 崩溃	0.3	0.4	0.5	0.6	0.2	0.4	0.2

2.1 系统脆性度的求解

根据式(1)~(4)计算出相应的结果,如表 2 所示.

表 2 整合计算结果

Tab. 2 Integrated calculation results

项目	子系统	数值
脆性熵	子系统 X	0.8921
	子系统 Y	0.6634
	子系统 Z	1.1157
联合脆性熵	子系统 X 与 Y 之间	0.3891
	子系统 X 与 Z 之间	0.4735
	子系统 Y 与 Z 之间	0.5064
脆性联系熵	子系统 X 与 Y 之间	1.1664
	子系统 X 与 Z 之间	1.5343
	子系统 Y 与 Z 之间	1.2726
脆性关联度系数	子系统 X 与 Y 之间	2.9973
	子系统 X 与 Z 之间	3.2400
	子系统 Y 与 Z 之间	2.5130

根据式(5)从而得到汽车闭环供应链系统的脆性关联度系数矩阵 U 为

$$U = \begin{bmatrix} 1 & \theta_{12} & \dots & \theta_{1n} \\ \theta_{21} & 1 & \dots & \theta_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \theta_{n1} & \theta_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2.9973 & 3.2400 \\ 2.9973 & 1 & 2.1530 \\ 3.2400 & 2.1530 & 1 \end{pmatrix}.$$

通过计算得出脆性关联度系数矩阵的特征值为: $-2.3518, -1.4919, 6.8437$.

根据式(6)计算出汽车闭环供应链系统的整体脆性度为 2.616.

现假设该汽车闭环供应链系统整体脆性度的阈值区间为 $[1, 2]$, 如果整体脆性强度低于 1, 则表明闭环供应链系统脆性过小, 系统过于稳定, 发展缓慢. 如果整体脆性度大于 2, 则表明系统脆性过大, 面临崩溃的危险, 应该采取措施降低整体脆性度.

2.2 系统的改善以及改善系统脆性度的求解

为了降低系统的整体脆性度, 首先要找出汽车闭环供应链系统的脆性源, 现利用图论对系统进行脆性分层.

三级闭环供应链系统中各个脆性主体都是一个复杂系统, 每个系统包含很多的子系统. 为了简便计算, 假设该闭环供应链系统中有 3 个制造商(1, 2,

3), 2 个零售商(4, 5)和 2 个需求市场(6, 7), 对它们进行了编号. 闭环供应链系统的运作模式是: 制造商将生产的产品交由零售商出售, 零售商将产品卖到需求市场, 需求市场的消费者将废旧产品卖给制造商进行再制造.

第一步: 根据闭环供应链系统的情况建立系统数学模型

将闭环供应链中的各个脆性主体等效为上述的 7 个节点, 各个主体间的脆性传播等效为有向边, 从而得出 7 节点闭环供应链系统如图 4 所示.

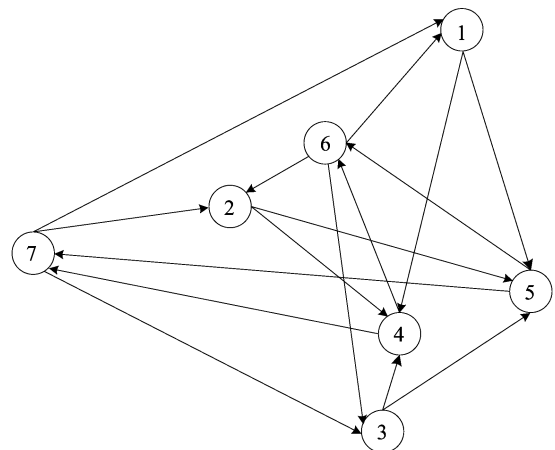


图 4 7 节点闭环供应链系统

Fig. 4 7 node closed-loop supply chain system

根据该汽车闭环供应链系统进行置信度评价, 得到脆性强度矩阵 ω_{ij} 和传播概率矩阵 P_{ij} .

$$\omega_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.9 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.9 & 0.5 \\ 0.8 & 0.9 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.9 & 0.8 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0.9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0.8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.8 & 0.9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.8 \\ 0.7 & 0.6 & 0.7 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.8 & 0.7 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

脆性传播阈值 $Y = 0.5$.

第二步: 求出系统的脆性可达矩阵

(i) 分析系统的可达矩阵

由系统的 7 节点闭环供应链系统图可以得到邻

接矩阵 L :

$$L = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

根据图论的相关知识,此时系统的可达矩阵 $K = (L + I)^1 \cup (L + I)^2 \cup \dots \cup (L + I)^n$,

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix} = E_7.$$

从系统的脆性可达矩阵可以看出,闭环供应链系统中只要有一个节点崩溃,在系统的脆性强度和脆性传播足够大时,都可以造成整个系统的崩溃,由节点的处处可达也验证了供应链系统的闭环性.

(ii) 求解脆性传播矩阵

$$C = \begin{cases} 0, & \omega_{ij}P_{ij} < Y; \\ 1, & \omega_{ij}P_{ij} > Y. \end{cases}$$

$$\omega_{ij}P_{ij} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0.72 & 0.63 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0.35 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.64 & 0.56 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.64 & 0.54 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.45 & 0.4 \\ 0.56 & 0.54 & 0.28 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.72 & 0.56 & 0.42 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

所以

$$C = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

(iii) 求解系统的脆性可达矩阵 $R = (C + I)^1 \cup (C + I)^2 \cup \dots \cup (C + I)^n$, 即

$$R = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

根据求得的可达矩阵,系统最终的脆性模型图如图 5 所示.

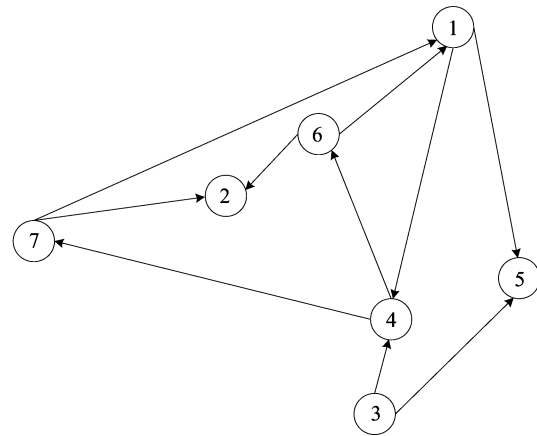


图 5 系统脆性模型图

Fig. 5 System brittleness model

第三步: 求出分层系统脆性模型

根据相关的定义,得到系统的可达集 $K(i)$ 、先行集 $X(i)$ 、 $K(i) \cap X(i)$, 相关数据如表 3 所示.

表 3 脆性分层表

Tab. 3 Brittle stratification table

节点	可达集 $K(i)$	先行集 $X(i)$	$K(i) \cap X(i)$
1	1,2,4,5,6,7	1,3,4,6,7	1,4,6,7
2	2	1,2,3,4,6,7	2
3	1,2,3,4,5,6,7	3	3
4	1,2,4,5,6,7	1,3,4,6,7	1,4,6,7
5	5	1,3,4,5,6,7	5
6	1,2,4,5,6,7	1,3,4,6,7	1,4,6,7
7	1,2,4,5,6,7	1,3,4,6,7	1,4,6,7

根据脆性分层表,依次找出满足 $K(i) = K(i) \cap X(i)$, 对系统进行级间划分, 找出最高层:

$$K(2) = K(2) \cap X(2),$$

$$K(5) = K(5) \cap X(5);$$

$K(i)$ 中划去 2, 5, 有

$$K(7) = K(7) \cap X(7),$$

$$K(1) = K(1) \cap X(1),$$

$$K(4) = K(4) \cap X(4),$$

$$K(6) = K(6) \cap X(6);$$

$K(i)$ 中划去 7,1,4,6,有

$$K(3) = K(3) \cap X(3).$$

可以看出,划分后的分层脆性模型为 3 层,如图 6 所示.

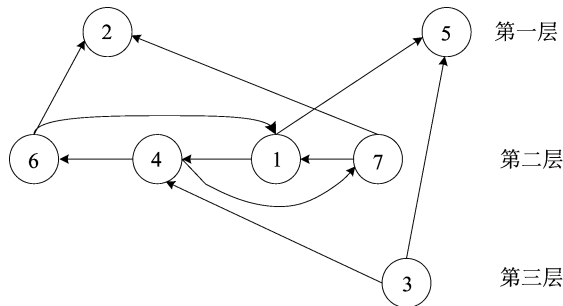


图 6 系统脆性分层图

Fig. 6 System brittleness stratification diagram

根据对系统级间划分的结果,同时结合图 5 的脆性模型图中的脆性可达关系得到图 6 的脆性分层图. 在系统脆性分层图中,最高层相当于系统的目标层,第二层相当于准则层,最后一层相当于方案层,方案层往往是系统的脆性源. 由此可知此系统的脆性源为节点 3. 如果节点 3 崩溃,那么会引发整个闭环供应链系统的崩溃.

现在对闭环供应链系统的脆性源进行处理,具体步骤如下:

(I) 分析脆性源的源头

通过上述分析我们知道节点 3 所对应的制造商为整个闭环供应链系统的脆性源. 闭环供应链系统中与制造商有直接关联的:一是与需求市场产品回收之间的脆性关联,另一个无非是制造商的源头即(材料)供应商. 制造商与需求市场的脆性关联作为目前闭环供应链网络中脆性关联度最大的关系,将在下面专门进行探讨. 因此为了减弱闭环供应链系统中制造商的脆性度,将供应商纳入闭环供应链系统之中.

(II) 找到与脆性源脆性关联性最大的子系统
在降低系统整体脆性度的同时考虑与脆性源脆

性关联性最大的子系统. 通过表 2 中对脆性联系熵的求解,制造商(X)与零售商(Y)的脆性联系熵为 1.1664,制造商(X)与需求市场(Z)的脆性联系熵为 1.5343,因而制造商与零售商间的脆性联系熵小于制造商与需求市场间的脆性联系熵. 该结果表明,如果系统 X(制造商)发生崩溃,系统 Z(需求市场)受到的影响更大,也就是说制造商与需求市场的脆性关联性较大. 表 2 中的脆性关联系数中也是两者的关联最大,进一步验证了制造商与需求市场的脆性关联性是最大的. 然而制造商与需求市场之间的关联是由于需求市场与制造商之间的逆向物流引起的,也就是废旧品的回收. 为了降低彼此之间的脆性关联,闭环供应链系统可以设置专门的回收商,回收商将需求市场的废旧品回收之后出售给制造商. 因此,需要考虑回收商对闭环供应链系统的影响.

(III) 处理系统脆性源

通过对系统的分析,制造商 3 为闭环供应链系统的脆性源,对于选取何种措施处理脆性源节点本文不再讨论. 为达到降低系统整体脆性强度的目的,现假设直接将制造商节点 3 删除,也就是制造商变成 2 个.

根据以上对脆性源的分析,将原来的三级闭环供应链系统改进为图 7 所示的五级闭环供应链系统.

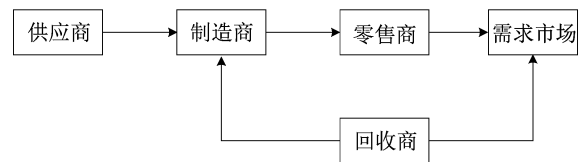


图 7 改进的闭环供应链系统

Fig. 7 Improved closed-loop supply chain system

将脆性源删除后的三级闭环供应链系统看成一个新的子系统 X,那么子系统 X 与供应商 Y、回收商 Z 组成一个脆性基元,它们之间相互影响. 对改进后的闭环供应链系统求解其整体脆性度,相关数据如表 4 所示.

表 4 改进系统在脆性因子作用下的概率表示

Tab. 4 The probability representation of the improved system under the action of brittleness factors

项目		概率						
		库存因子	价格因子	质量因子	服务因子	市场因子	成本因子	管理因子
各脆性因子在子系统 X、Y、Z 中发生的概率	子系统 X	0.5	0.6	0.5	0.6	0.4	0.6	0.7
	子系统 Y	0.2	0.3	0.2	0.2	0.3	0.2	0.1
	子系统 Z	0.3	0.2	0.2	0.4	0.1	0.3	0.2

续表 4

项目		概率						
		库存因子	价格因子	质量因子	服务因子	市场因子	成本因子	管理因子
各脆性因子作用下子系统 X、Y、Z 崩溃的概率	子系统 X 崩溃	0.4	0.7	0.8	0.6	0.5	0.7	0.5
	子系统 Y 崩溃	0.2	0.1	0.2	0.1	0.2	0.3	0.1
	子系统 Z 崩溃	0.1	0.3	0.1	0.3	0.2	0.1	0.2
各脆性因子在任意两个子系统间同时发生的概率	子系统 X 与 Y 之间	0.1	0.18	0.1	0.12	0.12	0.12	0.07
	子系统 X 与 Z 之间	0.15	0.12	0.1	0.24	0.04	0.18	0.14
	子系统 Y 与 Z 之间	0.06	0.06	0.04	0.08	0.03	0.06	0.02
各个脆性因子的作用下两个子系统崩溃的概率	子系统 X 与 Y 崩溃	0.4	0.7	0.8	0.6	0.5	0.7	0.5
	子系统 X 与 Z 崩溃	0.4	0.7	0.8	0.6	0.5	0.7	0.5
	子系统 Y 与 Z 崩溃	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2	0.3	0.2

根据式(1)~(4)可以得到如表 5 所示的改进后闭环供应链系统的相关计算结果。

表 5 改进后系统的相关计算结果

Tab. 5 The related results of the improved system

项目	子系统	数值
脆性熵	子系统 X	1.9288
	子系统 Y	0.5611
	子系统 Z	0.6079
联合脆性熵	子系统 X 与 Y 之间	1.5053
	子系统 X 与 Z 之间	1.5865
	子系统 Y 与 Z 之间	0.3724
脆性联系熵	子系统 X 与 Y 之间	0.9846
	子系统 X 与 Z 之间	0.9502
	子系统 Y 与 Z 之间	0.7966
脆性关联度系数	子系统 X 与 Y 之间	0.6540
	子系统 X 与 Z 之间	0.5989
	子系统 Y 与 Z 之间	2.1394

根据式(5)得知此时闭环供应链系统的脆性关联度系数矩阵 U 为

$$U = \begin{bmatrix} 1 & \theta_{12} & \cdots & \theta_{1n} \\ \theta_{21} & 1 & \cdots & \theta_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \theta_{n1} & \theta_{n2} & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.6540 & 0.5989 \\ 0.6540 & 1 & 2.1394 \\ 0.5989 & 2.1394 & 1 \end{pmatrix}.$$

通过计算得出脆性关联度系数矩阵的特征值为: $-1.1402, -0.6815, 3.4587$ 。

根据式(6)计算出改进后汽车闭环供应链系统的整体脆性度为 1.8596。

根据以上的计算结果可以看出改进后闭环供应

链系统的整体脆性度小于改进前的,并且系统的整体脆性强度控制在脆性阈值[1,2]之间,保证了系统的有效运转。

3 结论

(I) 本文构建了闭环供应链系统的脆性分析模型,首先求解系统的脆性度,其次分析系统的分层脆性结构,由此找出系统的脆性源,最后通过对系统脆性结构的处理达到改善系统的目的.以 A 汽车闭环供应链系统脆性结构为例,分析了当系统面临崩溃的情况下,用有向图和相关矩阵对系统脆性结构进行分层,找出系统脆性源,通过对脆性源的处理,使系统的整体脆性度由 2.616 降至 1.8596,使系统性能得到极大改善.说明本文提出的处理方法是可行的,有一定的借鉴意义。

(II) 由于闭环供应链系统的脆性问题呈现复杂网络结构的特征,因此本文所提出的对于系统脆性整体风险的度量和对闭环供应链系统脆性源的处理方式具有普遍适用性。

(III) 本文的研究尚存在不足之处,如系统脆性源处理时裂解、合并、删除三种措施的选择问题.与此同时,评估的准确性取决于系统之间相互影响概率的获得,随着闭环供应链系统的不断发展和完善,其数据库会得到逐步完善,那么模型的评价结果会更加准确。

参考文献(References)

[1] HIERONYMI K, SCHNEIDER A. How the European Union's WEEE Directive will change the market for electronic equipment: Two scenarios[C]// Computers and the Environment: Understanding and

- Managing Their Impacts. Dordrecht, Netherlands: Springer, 2003:73-86.
- [2] 钟卫红. 中国废弃电器电子产品回收处理进程及法制建设[EB/OL]. [2017-08-01] http://www.cn-hw.net/html/sort068/201109/29751_9.html.
- [3] GOVINDAN K, JHA P C, GARG K. Product recovery optimization in closed-loop supply chain to improve sustainability in manufacturing [J]. International Journal of Production Research, 2016, 54 (5): 1-24.
- [4] BHATTACHARYA R. A closed loop supply chain game between a supplier and a manufacturer in a two-stage scenario [J]. International Journal of Logistics Systems & Management, 2016, 23(4): 445.
- [5] RAJKUMAR N, KUMAR R M S. Automotive closed loop supply chain with uncertainty[C]// International Journal of Applied Engineering Research, 2015, 10: No. 55.
- [6] 于春海, 李想. 闭环供应链双渠道回收系统定价机制与协调策略[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2014, 35(9):1360-1368.
YU Chunhai, LI Xiang. Pricing mechanisms and coordination strategies of closed-loop supply chain with dual-channel recycling systems [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2014, 35 (9):1360-1368.
- [7] 张汉江, 余华英, 甘兴. 再制造补贴下闭环供应链协调的最优价格激励方式[J]. 系统工程, 2016, 34(8): 123-128.
ZHANG Hanjiang, YU Huaying, GAN Xing. The optimal price incentives contract of the remanufacturing closed-loop supply chain coordination with the government subsidy[J]. Systems Engineering, 2016, 34(8): 123-128.
- [8] 张桂涛, 胡劲松, 孙浩, 等. 由零售商负责回收的多期闭环供应链网络均衡[J]. 运筹与管理, 2015, 24(1): 57-66.
ZHANG Guitao, HU Jinsong, SUN Hao, et al. Multi-period closed-loop supply chain network equilibrium with retailer collection[J]. Operations Research and Management Science, 2015, 24(1): 57-66.
- [9] WANG Y. Study of supply chain's brittleness based on the complex system brittle theory [C]// IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services. IEEE, 2007:1199-1203.
- [10] KANG Y, LIU C, XU L. Supply chain brittle risk analysis based on maximum entropy theory [C]// International Conference of Logistics Engineering and Management 2010. New York: American Society of Civil Engineers, 2010: 4604-4610.
- [11] 李新盛. 基于熵理论的农超对接模式下果蔬供应链脆性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [12] 周永务, 肖旦, 汤勤深, 等. 分销供应链中竞争零售商联盟的稳定性[J]. 运筹与管理, 2013, 22(4):50-59.
ZHOU Yongwu, XIAO Dan, TANG Qinshen, et al. Stability of coalitions with competitive retailers in distribution supply chains[J]. Operations Research and Management Science, 2013, 22(4): 50-59.
- [13] 公彦德. 主导模式和回收方式最优组合与供应链稳定性[J]. 系统工程学报, 2014, 29(1):85-95.
GONG Yande. Optimal combination of dominant mode and recovery mode for supply chain stability [J]. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(1): 85-95.
- [14] 覃艳华. 销售市场和回收市场同时扰动下的闭环供应链协调应对[J]. 运筹与管理, 2015, 24(5): 52-56.
QIN Yanhua. Closed-loop supply chain coordination under selling market and recycling market disruptions [J]. Operations Research and Management Science, 2015, 24(5): 52-56.
- [15] 吕涛, 李肖肖. 煤电供应链脆性关键影响因素辨识[J]. 煤炭技术, 2017(1):224-226.
LYU Tao, LI Xiaoxiao. Identification of key factors influencing coal-electricity supply chain vulnerability [J]. Coal Technology, 2017(1): 224-226.
- [16] 李琦, 金鸿章, 林德明. 复杂系统的脆性模型及分析方法[J]. 系统工程, 2005, 23(1):9-12.
LI Qi, JIN Hongzhang, LING Deming. The model and analyzing method for complex system's brittleness[J]. Systems Engineering, 2005, 23(1): 9-12.
- [17] 张美荣. 基于图论的电力系统脆性分析及仿真[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2012.
- [18] 梁晨灵. 逆向供应链的综合绩效评价体系研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2011.