

DOI: 10.7652/xjtuxb201712011

采用设计结构矩阵的突发事件 扩散预测及建模方法

曹岩, 韦婉钰, 乔虎, 白瑀
(西安工业大学机电工程学院, 710032, 西安)

摘要: 针对现代供应链系统中突发事件扩散路径的控制问题,提出了对突发事件扩散路径进行预测分析的算法,并建立预测结果存储模型。根据基本供应链网络是由供应商、制造商以及分销商组成的特点,首先利用图论的思想结合设计结构矩阵(DSM)对供应链网络系统各组成部分之间的关联关系进行描述,然后利用设计的聚类算法对 DSM 聚类分析,预测系统中的所有突发事件扩散路径和影响范围。在分析结果的基础上,建立了扩散路径的可扩展性标记语言存储模型,提高了系统对突发事件的反应速度,缩短了反应时间,当突发事件引起成员发生变化时,系统能得到快速响应。最后以某供应链网络为例,使用所提出的算法对其中 28 个成员的扩散路径进行分析,利用存储模型得到扩散路径的 3 种类型。试验结果表明,通过提出的优化的聚类算法,缩短了迭代次数,提高了计算效率,并为所提算法与模型对控制供应链系统突发事件的扩散路径分析提供了实际意义。

关键词: 供应链;设计结构矩阵;扩散路径;结构性存储

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)12-0068-08

Disruption Propagation Prediction and Modeling in Supply Chain System with DSM

CAO Yan, WEI Wanyu, QIAO Hu, BAI Yu

(School of Mechatronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710032, China)

Abstract: An analysis algorithm is proposed for predicting propagation paths of disruptions in a supply chain system, and these predicting results are stored into a storage model. A basic supply chain consisting of supplier, manufacturer and dealer is regarded as the research object. Graph theory and design structure matrix (DSM) are used to describe the relationships among the entities in this supply chain network system. And propagation paths and influence scope of a disruption can be predicted by clustering analysis of DSM. Following the analyzing results, the XML storage model is established to structurally store propagation paths and influence scope to improve the reaction rate of the supply chain system, and the system can quickly respond to a disruption. A supply chain with 28 entities is analyzed with the proposed algorithm and 3 types of propagation are obtained. This numerical example illustrates that the iteration times are reduced and the efficiency is improved via the optimized clustering algorithm, indicating the applying significance to control disruption propagation path in a supply chain.

Keywords: supply chains; design structure matrix; propagation path; structure storage

收稿日期: 2017-03-13。 作者简介: 曹岩(1970—),男,教授,博士生导师。 基金项目: 中国制造 2025 数字出版知识挖掘与服务创新平台及产业化项目(2230201);陕西省特种加工重点实验室资助项目(15JS041)。

网络出版时间: 2017-07-14 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170714.1919.012.html>

供应链系统是指直接参与从初始原料供应商到将产品送至最终客户过程的所有实体(组织或者个人)组成的网络结构系统,在此系统中,物流、资金流以及信息流进行传递与循环^[1]。供应链系统的稳定性是影响企业获利的至关重要的因素。

近年来,供应链系统的规模逐渐扩大,运行机制日益复杂,为了使供应链系统保持稳定且增强其竞争活力,对供应链系统中的突发事件进行及时响应是非常有必要的。系统中成员的关联关系使他们组成了一个利益共同体,当一个成员中具体参数突然发生变化,很有可能会导致与其相关的成员也发生改变,突发情况的影响甚至会扩散至更远,此时系统的复杂性会因扩散的影响不断扩大,控制难度也在不断增加。同样,供应商、制造商、经销商中任一成员的产品功能、制造工艺、安装方式、包装和营销等诸多方面有突发事件发生时,都会对其上下游关联成员造成影响。如果突发事件的扩散影响得不到快速、有效的控制,后果则不堪设想。

为防止扩散范围扩大,文献[2]在同时考虑需求方和供应方的不确定性下,建立需求不确定性分析模型,使需求变得具有可预见性,加强供应链系统对需求变化的管控。文献[3]综合考虑风险对产品开发 and 供应链的影响,在供应链设计和风险模型的基础上,建立风险缓解策略模型,当决策者面临潜在的供应商能力风险和需求风险时,风险缓解策略模型能选出最好的解决方案。文献[4]基于复杂网络理论研究供应链应急管理,运用复杂网络对供应链网络的结构进行评价,识别供应链网络中的重要节点,从而达到对供应链系统的防护。

这些传统的突发事件扩散控制方法大多建立在对成员间的因果逻辑关联关系比较明确的基础上,在实际生产生活中,无法准确掌握成员的关联关系,这就限制了以上方法有效应用。

为了使供应链系统中突发事件的扩散得到高效控制,首先要对变更传播路径进行合理预测。通过建立数学模型可对供应链系统中突发事件的扩散进行分析^[5-8],直观、清晰地预测可能的扩散路径。分析成员变化的数学模型主要有多目标决策模型^[9-10]、小世界网络模型^[11-12]、设计结构矩阵(DSM)模型^[13-14]等。DSM在对复杂结构分解以及表达因素之间的依赖、制约等关系方面拥有突出的优势^[15-18]。文献[13]在以往DSM研究中,在工程计划阶段,无法对活动重叠部分得到很好评估的背景下,提出用模糊集理论对DSM进行改进,从而计算

出每个活动的重要值,来评估重叠部分,解决不确定环境下,重叠信息的评价问题。在产品设计方案变更的背景下,文献[14]通过构建自适应模块,有效地解决了模块变更路径的可扩展性差等问题。与工程计划提前评估以及产品设计方案制定不同,本文利用DSM清晰表达元素间关系的优势,来对供应链成员关系进行分析。

本文利用图论对供应链系统进行分析,把突发事件中成员间的关系分别用有向图中的节点和有向边表示,然后对建立的DSM进行聚类分析,预测突发事件可能的扩散路径,最后将路径分类存储于XML结构中,可从整体上把握发生突发事件的成员以及传播路径和扩散范围,根据具体情况对供应链中突发事件的扩散进行有效控制。

1 突发事件扩散预测

供应链系统中引起突发事件产生的变更可以分为整体变更和部分变更。整体变更是通过外部环境或成员级级的改变引起成员的产品特性、库存量等发生改变;部分变更则直接对成员中包含的具体参数进行修改变化,引起成员改变。本文从部分变更角度,对供应商、制造商和经销商这3类成员组成的供应链系统进行分析,图1为某供应链网络图。

(1)供应商:直接为生产厂家提供原料、零部件、设备及其他资源的企业。

(2)制造商:又称为“生产厂商”,将原材料或零部件等(外购或自制)经过人工或者自动化的机器设备,进行大规模的生产加工过程。制造商是供应链系统中重要成员。

(3)经销商:是从供应商或者制造商企业进货,将所进货物产品送到经营范围每一角落的流通代理企业。

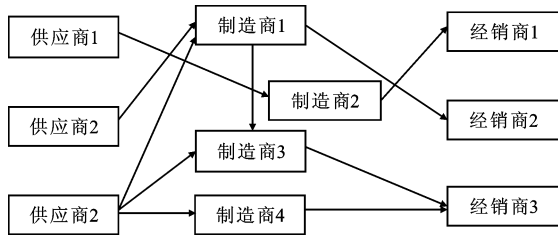


图1 某供应链网络图

设供应链系统中包含 w 个成员 $n_1, n_2, n_3, \dots, n_w$,将各成员之间的关系用 $w \times w$ 阶布尔矩阵 A 表示,将此矩阵定义为供应链系统的DSM。在DSM中,若成员 n_i 和 n_j 之间存在影响或者被影响的关系,则对应布尔矩阵中第 i 行第 j 列元素为“1”,其

中 $i \neq j$ 。

根据图1与上述描述,本文研究的供应链系统包含3类成员,分别为供应商、制造商和经销商。这里将供应商、制造商、经销商分别定义为 n_{sk} 、 n_{mk} 和 n_{dk} ($k=1,2,\dots,n$),其中 n 代表成员, s 代表供应商, m 代表制造商, d 代表经销商, k 为编号。那么,图1中的各成员关系可以用图2初始设计结构矩阵 A 来表示。

	n_{s1}	n_{s2}	n_{s3}	n_{m1}	n_{m2}	n_{m3}	n_{m4}	n_{d1}	n_{d2}	n_{d3}
n_{s1}					1					
n_{s2}				1						
n_{s3}				1		1	1			
n_{m1}						1			1	
n_{m2}								1		
n_{m3}										1
n_{m4}						1				1
n_{d1}										
n_{d2}										
n_{d3}										

图2 初始设计结构矩阵 A

1.1 DSM 聚类分析

在图论中,将连接节点间的每条边都加以方向,便构成了有向图。在有向图 $G=(V,E)$ 中, V 是图中非空结点集合, E 是有向图边的集合,边是由两个节点组成的有序对,所以由 $\langle v_i, v_j \rangle$ 表示有方向的边。由于在供应链的系统中突发事件扩散是有方向的,根据有向图的定义,将供应链中发生变化的成员看作 G 中的结点 V ,各成员之间的关系为 E 。如果成员之间存在可达关系,则结点 v_i 可达 v_j 。

根据对结点间可达关系的定义,通过算法1寻找初始设计结构矩阵 A 的可达矩阵。

算法1:初始矩阵的可达矩阵

输入:初始矩阵 A

输出:可达矩阵 P

1: $M \leftarrow (A+I)$ // 成员对自身有影响 M 为 A 的邻接矩阵

2: $t \leftarrow 0$

3: While $M^t \neq M$ do

4: $t \leftarrow t+1$

5: End while

将初始 DMS 经过可达变换,得可达矩阵 P ,见图3。若矩阵中成员 n_{s1} 与 n_{d1} 存在关联关系,则表示成员 n_{s1} 与成员 n_{d1} 存在非零长度的通路,即当 n_{s1} 发生突发事件时候,经过一个或多个非零长度的通路,

该突发事件产生的影响会传播至成员 n_{d1} 。

	n_{s1}	n_{s2}	n_{s3}	n_{m1}	n_{m2}	n_{m3}	n_{m4}	n_{d1}	n_{d2}	n_{d3}
n_{s1}	1				1			1		
n_{s2}		1		1		1			1	
n_{s3}			1	1		1	1		1	1
n_{m1}				1		1			1	1
n_{m2}					1			1		
n_{m3}						1				1
n_{m4}						1	1			1
n_{d1}								1		
n_{d2}									1	
n_{d3}										1

图3 可达设计结构矩阵 $P=M^t=(A+I)^4$

为进一步确定突发事件扩散影响范围,现使用算法2对初始设计结构矩阵 A 进行聚类分析,得到DSM的聚类矩阵 C ,如图4所示。

算法2:初始设计结构矩阵聚类

输入:可达矩阵 P ,邻接矩阵 M

输出:聚类矩阵 C

1: $C \leftarrow M$

2: While $\exists P_r \in \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ and $P_r \neq 0$ do
// P_r 为可达矩阵 P 的列向量

3: If $\exists P_{sr} \in \{P_{1r}, P_{2r}, \dots, P_{nr}\}$ and $P_{sr} \neq 0$ and $s \neq r$ then

4: do $P_s \leftarrow P_s$ // 将 s 顺序存储为 s

5: do $P_r \leftarrow 0$

6: If $\exists P_s \in \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ and $P_{sr} \neq 0$ and $\forall s \neq r$ then

7: do $P_s \leftarrow P_t$ // 将 t 添加至 s

8: do $P_s \leftarrow 0$

9: End if

10: $\{C_1, C_2, \dots, C_r, C_s\} \leftarrow \{C_1, C_2, C_r, C_s, \dots, C_n\}$ // 将 C_r, C_s 调整至序列尾部

11: $\{C_1^T, C_2^T, \dots, C_r^T, C_s^T\} \leftarrow \{C_1, C_2, C_r, \dots, C_s, \dots, C_n\}$ // 将 C_r^T, C_s^T 调整至序列尾部

12: End if

13: End while

通过聚类分析,把相互间关系密切的成员归属于同一模块中,这里称之为子块,根据聚类分析结果可将该供应链系统 DSM 分为3个子块。当子块中的成员发生改变时,变化产生的影响可控制在该成员所属子块内,以防止突发事件大范围扩散对其他子块甚至成员产生影响。同时,不同子块之间存在相互重叠,这说明了两子块之间存在关联关系,重叠

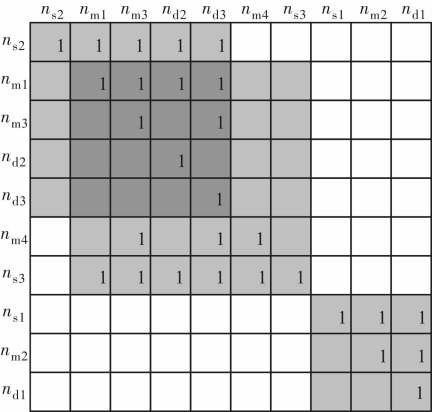


图 4 聚类矩阵 C

范围越大,子块间关联越强。若重叠范围中任一成员有突发事件发生,两个子块都有可能受到影响,所以对重叠范围成员的控制应更加严格,尽量减少这些成员中突发事件的发生。

通过聚类的方法我们将错综复杂的供应链系统初始设计结构矩阵转换成简单清晰的关联子块设计结构矩阵,接下来将对子块包含的成员进行关联分析。

1.2 扩散路径分析

在供应链系统中,由于成员所处层级的不同,突发事件的扩散方式也截然不同。对突发事件扩散的合理预测,有助于提前并准确地制定控制措施;当突发事件发生时,有效防止扩散范围增加。

将供应链网络中发生突发事件的成员划分为 3 个变更层级:吸收层,传播层和发起层。

(1)发起层:该层的成员发生改变时,会使其他相关成员也发生变化,但其本身不会受到其他成员变化的影响,如图 1 中的供应商 1、2、3。

(2)传播层:该层成员发生变化时,会使相关成员改变,自身也会受到其他成员变化的影响,如图 1 中制造商 1、2、3、4。一般情况下,该层成员若发生变化,极易造成整个供应链产生很大变化。

(3)吸收层:该层成员只受相关成员变化的影响,其变化不会对任何成员产生影响,如图 1 中的经销商 1、2、3。

不同成员所属层级不同,决定了其在扩散路径中所处位置不同,根据各层成员对初始变更的接收方式,将突发事件扩散路径划分为 3 类。

(1)1 类:初始变更被吸收层成员完全接收,如图 5 所示。

(2)2 类:初始变更被传播层成员传播和吸收层成员联合接收,如图 6 所示。

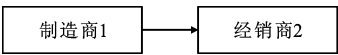


图 5 1 类突发事件扩散路径

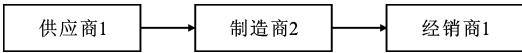


图 6 2 类突发事件扩散路径

(3)3 类:初始变更被传播层成员拆分后被吸收层多个成员接收,如图 7 所示。

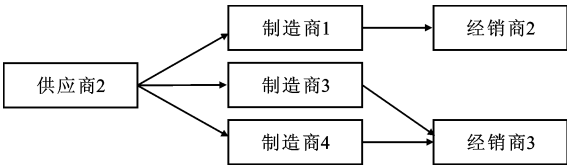


图 7 3 类突发事件扩散路径

2 突发事件扩散路径信息的存储

可扩展标记语言(XML)作为一种标记性语言具有自我描述的特性,可以自主对变量进行标签定义,从而达到数据快速传输的效果。本文在获得突发事件扩散路径以及其各成员包含的具体信息后,将 XML 作为存储介质,进行突发事件扩散路径存储。为了达到快速响应和高效控制,在 XML 中,以 DSM 聚类后的子块为单位,将子块中包含的所有的扩散路径分类储存,一个成员可能存在于多条路径中,所以在 XML 中仅存储路径节点信息和与发生变化的成员有直接关联关系的节点。图 8 为扩散路径信息的 XML 存储结构。

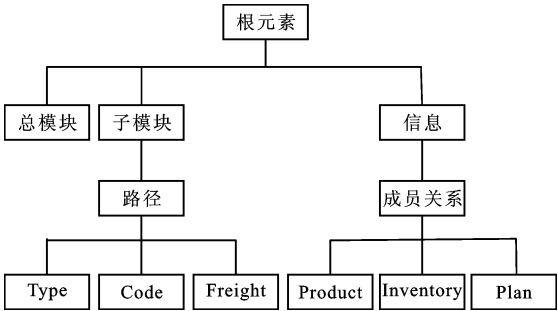


图 8 扩散路径信息 XML 存储结构

在图 8 中,第 1 层为 XML 的根元素,其他元素均为子元素;在第 2 层的元素中,总模块为 DSM 中各子块的名称,子模块代表扩散路径属于的子块,信息记录下了发生变化的子块中的供应链系统成员和成员中涵盖的具体信息;第 3 层中,路径存储于子块中所有可能的扩散路径,成员关系记录的是供应链系统中成员的名称;最后一层元素中,Type 元素表示

发生变化的成员的类型,Code 元素代表预测扩散路径的节点代号,Freight 元素表示发生变化的成员节点到相关节点间的运输费用,Product 元素指的是具体某一成员中的产品具体信息,Inventory 元素描述了成员中产品的库存情况,Plan 元素则是生产计划。扩散路径 XML 存储模型的计算实现见算法 3。

算法 3:扩散路径分析算法

输入:聚类矩阵 C

输出:扩散路径 r 与对应的种类 type 的数据字典 r_dict

```
1:For cluster in  $C$  do// cluster 为聚类后的模块
2:  For  $n_w$  in cluster do//  $n_w$  为每个模块中结点
3:     $Ni.to\_path \leftarrow \{n_{s1}, n_{s2}, n_{m1}, \dots, n_w\}$ 
    //得到每个结点可达结点列表
4:  End for
5:  For  $n_w$  in cluster do
6:    If  $n_w.type$  is ‘Supplier’ do
7:       $r.head \leftarrow n_w$ 
8:      While lastNode.next.to_path is not None do //如果 n.to_path[0]加入
        路径只能产生 ABAB 序列,说明产生环路,路径生成结束;否则进入
        ABAC 序列。
9:         $r.lastNode \leftarrow n.to\_path[0]$ 
10:       lastNode  $\leftarrow r.lastNode$ 
11:      End while
12:    End if//根据经销商数量判断路径类别
13:     $r\_dict[r]=path\_type$ 
14:  End for
15:End for
```

通过 XML 对路径信息进行存储,极大地提高了扩散路径信息的获取速度。首先,当成员中没有突发事件发生时,可以提前从聚类后的子块中获得所有可能的扩散传播路径、各节点间的关系以及各个成员的具体信息等。然后,通过已知信息对突发事件发生时子块中扩散路径以及成员变化进行预测,提前制定应对不同突发状况的应对方案,尽可能地把突发情况转化在可控范围内,将突发事件发生将造成的损失控制到最小。

在实际情况中,当供应链系统中的成员发生改变时,我们调用提前存储好的预测信息,迅速捕捉可能扩散路径与发生变化的成员,采取科学合理的应对方案,调整子块中成员的具体信息,如改变生产计

划、重新制定最佳库存或是对产品外观、性能等做出改变,快速有效地控制供应链系统成员中突发事件所带来的影响。

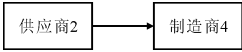
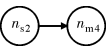
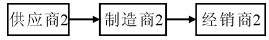
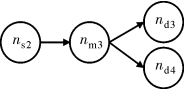
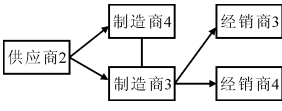
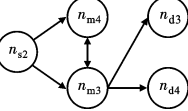
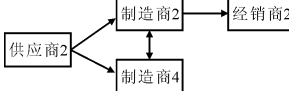
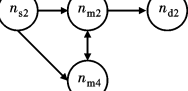
3 实例验证

在实际供应链系统中,供应链网络的组成相对复杂,现以一个 28 位成员组成的供应链网络为例,对本文提出的突发事件扩散预测与存储的优势和可行性进行验证。

根据供应链系统中包含的成员间的关联关系建立 DSM,如图 9 所示。用算法 1 和算法 2 对初始 DSM 聚类后,得到聚类后的 DSM,如图 10 所示。

对图 10 进行分析可知,经过聚类后,成员 $\{n_{s2}, n_{m2}, n_{m3}, n_{m4}, n_{d2}, n_{d3}, n_{d4}\}$ 被划分到一个子块,其中 $\{n_{s2}\}$ 为发起层成员, $\{n_{m2}, n_{m3}, n_{m4}\}$ 为传播层成员, $\{n_{d2}, n_{d3}, n_{d4}\}$ 为吸收层成员。根据成员不同类型得到表 1 中 3 类可能的扩散路径,并用结点与结点间连线作为路径表示方式,便于进行 XML 存储。其他子块中突发事件扩散路径的分析方式与此类似,得到所有可能变更路径后,按照图 8 的存储结构进行存储。最后,通过对扩散路径的合理分析,制定出突发事件应对策略,尽可能的将供应链系统中突发事件引起的变化控制在可控范围内。

表 1 子块 2 中变更路径分析表

路径种类	路径描述	路径表示方式
1 类		
2 类		
3 类		
3 类		
3 类		

实现 DSM 聚类结果的计算方法有很多,如原始的手工计算、模糊聚类分析以及使用智能化算法的聚类运算。文献[19-20]分别采用改进的粒子群算法和遗传算法,对供应链中 DSM 进行智能聚类。

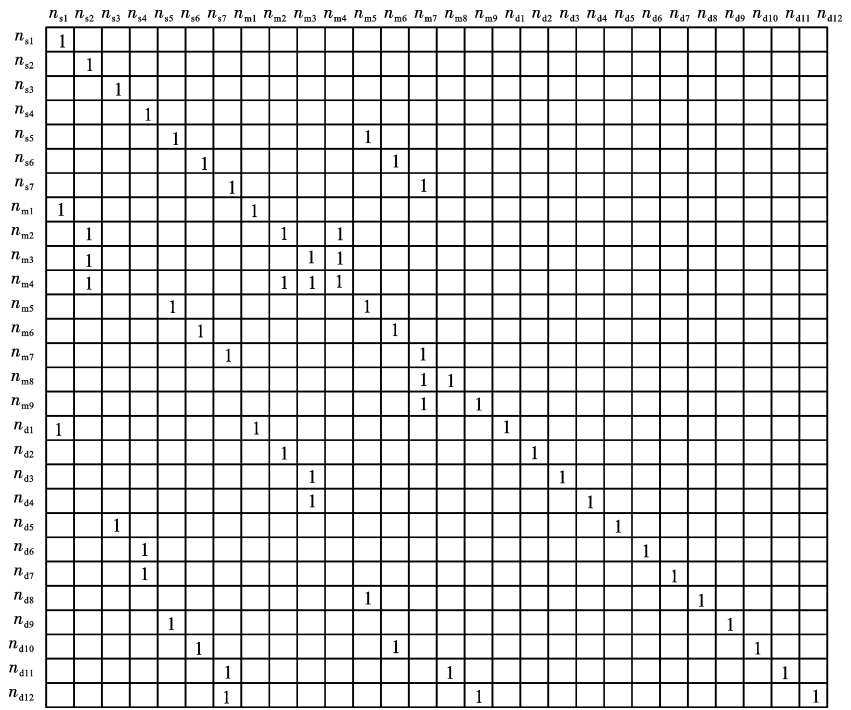


图 9 初始 DSM

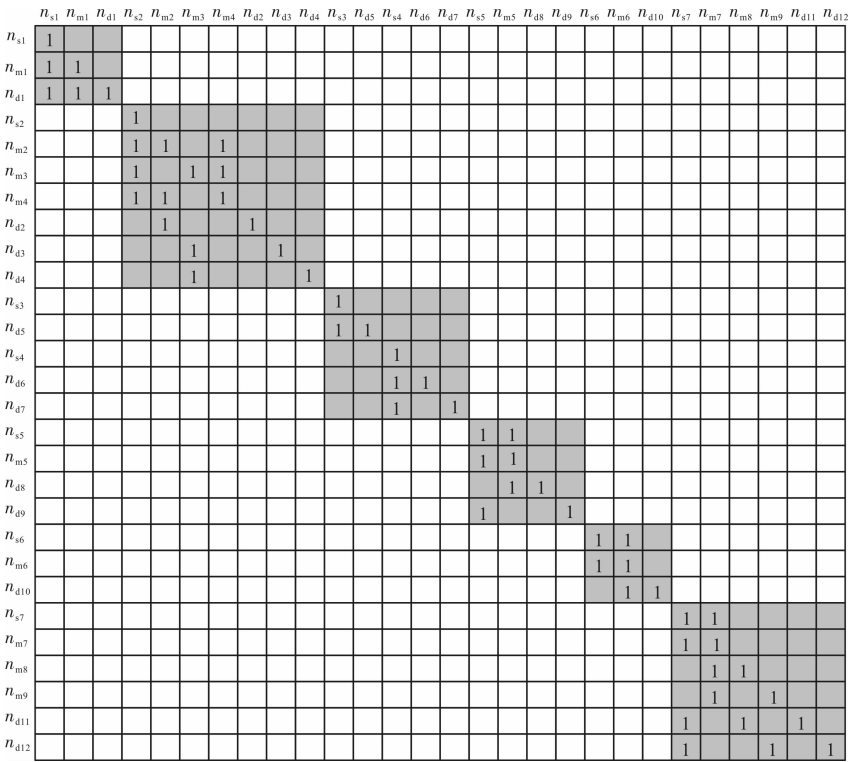


图 10 聚类后的 DSM

文献[19]为了使得供应商网络更加协调有序,促进供应商之间的有效交流,运用改进的粒子群算法对 DSM 进行聚类分析。文献[20]为对应急任务流程进行模块化管理,利用 DSM 进行模块化管理的优势,通过改进的遗传算法对 DSM 进行聚类分析,快

速实现模块的重组。本文通过 DSM 对供应链中突发事件扩散路径的研究,将文中所采取的 DSM 的层次聚类分析方法与文献[19-20]方法进行对比,分别利用文献[19-20]的数据结合本文方法,得到迭代次数曲线,如图 11、图 12 所示。

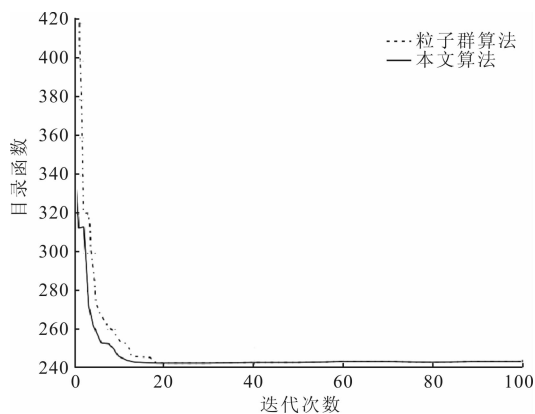


图 11 本文算法与文献[19]粒子群算法迭代次数对比

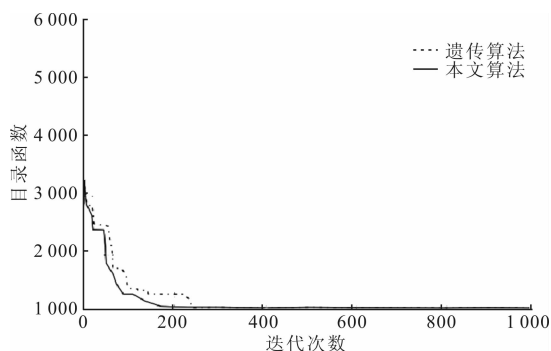


图 12 本文算法与文献[20]遗传算法迭代次数对比

文献[19]中的目标函数为总体联系信息流量最小,并采用粒子群算法进行求解,通过对比可以发现,在相同迭代次数下,本文算法得到目标函数值小于用粒子群算法得到的目标函数值。同理,与文献[20]中遗传算法求解目标函数对比,求解相同目标值时,本文算法迭代次数远远小于遗传算法。

通过对比发现,本文方法不仅可以提高聚类效率,还可以得到更好的聚类结果。随着供应链成员数量的增加,本文方法将进一步提高突发事件扩散路径分类和涉及成员提取的准确性与智能化。

4 结 语

突发事件扩散的预测对于提高供应链系统对突发情况的控制具有十分重要的意义。与传统的建立指标评价体系的方法对供应链系统中突发事件扩散预测相比,本文运用设计结构矩阵,通过成员聚类,可在未知因果关联关系的条件下,预测最大扩散范围与扩散路径。该方法拥有明确的数学机理,得到清晰直观的结果,同时对聚类过程进行改进,大大减少了迭代次数,提高运算效率。在 XML 理论上,用文中建立的存储模型,简化了存储结构。当扩散路径中成员的具体参数信息发生替换,添加或减

少操作时,供应链系统尽可能地快速调整适应方案。但是,利用 DSM 对成员进行聚类后发现,当供应链网络过于复杂时,其成员中的变量数量会呈爆发式增长,这不仅降低算法效率,也增加了控制反应时间。为了能更好地控制成员中突发事件的影响,可将 DSM 进一步划分成多个子模块,通过控制各个子模块的影响范围,提高算法的效率。所以,实现变更的自适应模块将是后续工作的重点。

参考文献:

- [1] MENTZER J T, DEWITT W, KEEBLER J S, et al. Defining supply chain management [J]. *Journal of Business Logistics*, 2001, 22(2): 1-25.
- [2] BAGHALIAN A, REZAPOUR S, FARAHANI R Z. Robust supply chain network design with service level against disruptions and demand uncertainties: a real-life case [J]. *European Journal of Operational Research*, 2013, 227(1): 199-215.
- [3] CLAYPOOL E, NORMAN B A, NEEDY K L S. Modeling risk in a design for supply chain problem [J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2014, 78: 44-54.
- [4] 朱冰心, 胡一竑. 基于复杂网络理论的供应链应急管理研究 [J]. *物流技术*, 2007, 26(11): 147-150.
ZHU Bingxin, HU Yihong. Study on supply chain disruption management based on complex network theory [J]. *Logistics Technology*, 2007, 26(11): 147-150.
- [5] GHADGE A, DANI S, CHESTER M, et al. A systems approach for modeling supply chain risks [J]. *Supply Chain Management*, 2013, 18(5): 523-538.
- [6] SNYDER L V, ATAN Z, PENG P, et al. OR/MS models for supply chain disruptions: a review [J]. *IIE Transactions*, 2016, 48(2): 89-109.
- [7] 唐敦兵, 徐荣华, 唐吉成, 等. 基于设计结构矩阵的工程变更影响分析 [J]. *机械工程学报*, 2010, 46(1): 154-161.
TANG Dunbing, XU Ronghua, TANG Jicheng, et al. Analysis of engineering change impacts based on design structure matrix [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(1): 154-161.
- [8] PAUL S K, SARKER R, ESSAM D. A quantitative model for disruption mitigation in a supply chain [J]. *European Journal of Operational Research*, 2017, 257(3): 881-895.
- [9] WALLENIUS J, DYER J S, FISHBUM P C, et al. Multiple criteria decision making, multiattribute utility

- theory: recent accomplishments and what lies ahead [J]. *Management Science*, 2008, 54(7): 1336-1349.
- [10] KASPRZYK J R, NATARAJ S, REED P M, et al. Many objective robust decision making for complex environmental systems undergoing change [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2013, 42: 55-71.
- [11] LAGO-FERNÁNDEZ L F, HUERTA R, CORBA-CHO F, et al. Fast response and temporal coherent oscillations in small-world networks [J]. *Physical Review Letters*, 2000, 84(12): 2758.
- [12] NOGAWA T, HASEGAWA T. Transition-type change between an inverted Berezinskii-Kosterlitz-Thouless transition and an abrupt transition in bond percolation on a random hierarchical small-world network [J]. *Physical Review: E*, 2014, 89(4): 042803.
- [13] SHI Q, BLOMQUIST T. A new approach for project scheduling using fuzzy dependency structure matrix [J]. *International Journal of Project Management*, 2012, 30(4): 503-510.
- [14] 乔虎, 莫蓉, 向颖. 变更路径预测支持的自适应模块建模 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2015(12): 2358-2366.
- QIAO Hu, MO Rong, XIANG Ying. Adaptive module modeling by predicting change path [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2015 (12): 2358-2366.
- [15] HELMER R, YASSINE A, MEIER C. Systematic module and interface definition using component design structure matrix [J]. *Journal of Engineering Design*, 2010, 21(6): 647-675.
- [16] BROWNING T R. Applying the design structure matrix to system decomposition and integration problems: a review and new directions [J]. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 2001, 48(3): 292-306.
- [17] CHEN L, DING Z D, LI S. A formal two-phase method for decomposition of complex design problems [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2005, 127(2): 184-195.
- [18] TANG D, ZHU R, TANG J, et al. Product design knowledge management based on design structure matrix [J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2010, 24(2): 159-166.
- [19] 徐兰, 方志耕, 刘思峰. 基于设计结构矩阵的复杂产品供应链管理优化 [J]. *运筹与管理*, 2013, 22(1): 106-111.
- XU Lan, FANG Zhigen, LIU Sifeng. Optimization of management for complex products' supply chain based on DSM [J]. *Operations Research and Management Science*, 2013, 22(1): 106-111.
- [20] 田军, 李莉芳, 白剑, 等. 基于 DSM 的应急任务流程模块化设计研究 [J]. *中国管理科学*, 2014, 22(8): 100-107.
- TIAN Jun, LI Lifang, BAI Jian, et al. Modular design of emergency task executive processes based on DSM [J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2014, 22(8): 100-107.
- (编辑 杜秀杰)
- (上接第 7 页)
- [17] 冯斌, 梅雪松, 杨军, 等. 数控机床摩擦误差自适应补偿方法研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(11): 65-70.
- FENG Bin, MEI Xuesong, YANG Jun, et al. Adaptive compensation of friction error for numerical control [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(11): 65-70.
- [18] WANG Shuang, FU Junyong, YANG Ying. An improved predictive functional control with minimum-order observer for speed control of permanent magnet synchronous motor [J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 2017, 12: 272-283.
- [19] MARTON L, LANTOS B. Modeling, identification and compensation of stick-slip friction [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2007, 54(1): 511-515.
- [本刊相关文献链接]
- 刘星, 梅雪松, 陶涛, 等. 一种零耦合滚齿全误差模型及其预测方法. 2016, 50(10): 42-48. [doi: 10.7652/xjtuxb201610007]
- 韩振华, 石万凯, 肖洋轶, 等. 新型复合摆线外啮合圆柱齿轮副的传动特性分析. 2016, 50(9): 10-19. [doi: 10.7652/xjtuxb201609002]
- 李应刚, 陈天宁, 王小鹏, 等. 外部动态激励作用下齿轮系统非线性动力学特性. 2014, 48(1): 101-105. [doi: 10.7652/xjtuxb201401017]
- 申建广, 陶涛, 梅雪松, 等. 一种任意比率电子齿轮分频器的实现方法. 2014, 48(1): 96-100. [doi: 10.7652/xjtuxb201401016]
- (编辑 杜秀杰)