

文章编号:1000-582X(2012)06-021-07

# 企业协同生产网络的拓扑特性分析

张 峰<sup>1</sup>, 杨 育<sup>1</sup>, 贾建国<sup>1,2</sup>, 王家天<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 重庆化医控股(集团)公司, 重庆 401121)

**摘 要:**深入研究企业协同生产网络的拓扑结构与功能特征的关系,是提升协同生产效率、系统鲁棒性的重要途径。针对国内外典型企业协同生产模式的特点,建立了企业协同生产网络的拓扑学模型,并应用图论中复杂网络方法,分析讨论了典型的重化工企业协同生产系统网络结构和功能特征。研究结论表明:企业协同生产网络具备小世界特性、无标度特性、节点中心性,复杂网络拓扑结构特性对实际系统的效率和功能存在影响。

**关键词:**协同生产; 图论; 拓扑; 小世界; 无标度; 节点中心性

**中图分类号:**N949

**文献标志码:**A

## Topological characteristics of industry collaborative production networks

ZHANG Feng<sup>1</sup>, YANG Yu<sup>1</sup>, JIA Jian-guo<sup>1,2</sup>, WANG Jia-tian<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University,  
Chongqing 400044, P. R. China;

2. Chongqing Chemical & Pharmaceutical Holding (Group) Company, Chongqing 401121, P. R. China)

**Abstract:** It is an important way for co-production efficiency improvement and system robustness to deeply understand the relationship between the structure and function of interfirm collaborative production networks (ICPN). This paper develops the topological model for ICPN based on the analysis of the characteristics of interfirm collaborative production modes. By introducing complex networks, a case of Polyurethane industry is simulated. The results show that ICPN has the characteristics of small-world, scale-free and centralities of nodes. Moreover, complex network characteristics affect the capability and efficiency of production system.

**Key words:** collaborative production; graph theory; topology; small-world; scale-free; centralities of nodes

随着经济全球化和社会化分工的发展,越来越多的企业以产业链联盟、产业集群、工业共生(生态工业园)、产业集成等多种模式联合起来应对激烈的市场竞争,形成了复杂协同关系,构成了企业协同系统<sup>[1]</sup>。如何揭示企业协同系统内部的复杂联系,以及系统拓扑结构与功能特征的关系成为亟待解决的

理论问题。

企业协同系统的实质是一个由能源、物质、信息、资金、人员等多介质耦合成的一个复杂系统网络。各国对企业协同系统的发展十分重视,如欧盟基金支持的 COLL-PLEXITY 项目专项研究协同系统的复杂性。学术界也开始研究企业协同系统的复

收稿日期:2011-12-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71071173);重庆市科技攻关重点资助项目(2010GGB108);教育部高等学校博士学科点科研基金资助项目(20090191110004)

作者简介:张峰(1984-),男,重庆大学博士研究生,主要从事制造系统工程、协同创新、复杂网络等研究。

杨育(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)yuyang@cqu.edu.cn。

杂特性和结构特征, Hendrik 等采用性能分析方法研究单个企业对整体协同系统的功能影响, 但没有分析企业间的关系以及协同系统的结构<sup>[2]</sup>; Maiké 等用问卷调查方法研究系统特征, 建立了企业协同系统的 GeMoC 模型, 反映了协同系统内部结构, 却缺少对复杂特性产生机理的研究<sup>[3]</sup>; Schuh 等总结了应用复杂科学研究协同系统的各种模型, 并指出现有模型都只能反映系统的静态特征, 无法描述系统动态变化<sup>[4]</sup>。目前关于企业协同系统功能与复杂特性的研究多关注单个企业对整体系统的影响, 无法反映协同系统的动态特征, 没有解释协同系统复杂特性的产生机理。

1998 年 Watts 和 Strogatz 提出了小世界网络模型<sup>[5]</sup>, 1999 年 Barabasi 和 Albert 提出了无标度网络演化模型<sup>[6]</sup>, 这两项发现激起了对于复杂网络研究热潮, 拓展了图论的研究领域。国内外学者开始研究 Internet、交通网、电网、社会网络、病毒传播网、语言网络<sup>[7-12]</sup> 等各领域复杂系统的拓扑特性, 并分析各种网络的脆弱性、匹配性、社区划分、传播动力学特征等。图论及复杂网络的发展为研究复杂系统的拓扑特性提供了工具。

关于工业系统的拓扑结构分析也有丰富成果: Brigitte 研究了生物科技工业网络拓扑结构的无标度和小世界特性<sup>[13]</sup>; Wang 等研究了广东以 HONDA、NISSAN、TOYATO 为核心的汽车产业网络结构<sup>[14]</sup>; 宋雨萌等对比了中外典型工业共生网络的不同结构特性<sup>[15]</sup>; 肖忠东等研究了生态工业系统的出度、入度幂律指数的现实含义<sup>[16]</sup>; 陈静等提出了多产业链协同网络模型, 并验证了其无标度特

性<sup>[17]</sup>。以上研究多从个例入手研究其拓扑特性。蔡宁等提出了产业集成的拓扑结构对其功能影响作用机理<sup>[18]</sup>; ASHTON 等建立了生态工业的结构、功能与系统发展的研究框架<sup>[19]</sup>。但这些研究多从复杂系统理论出发, 缺少必要的定量分析。

笔者拟应用复杂网络理论研究企业协同生产网络 (interfirm collaborative production networks, ICPN) 的拓扑特性与功能特征, 首先根据企业协同生产网络的特征, 建立 ICPN 拓扑模型; 然后基于重化工协同生产网络的实例, 分析网络是否具备小世界特性、无标度特性; 最后根据复杂网络特性分析网络的节点中心性, 并阐释结构特性对实际系统功能的影响。本文研究是进一步研究企业协同生产网络的鲁棒性、脆弱性及动力学特征的基础, 并可为实际生产系统的应急管理、安全资源布置等提供参考。

## 1 协同生产的概念和特征

企业协同包括协同创新、协同管理、协同生产、协同营销等内容<sup>[20]</sup>, 但业务的互补性或相似性是企业间建立协同关系的先决条件。物质交换关系是业务互补、相似性的媒介, 以物质交换关系构建的协同生产系统是企业协同的关键内容。

随着我国经济的发展, 在各行业都普遍采取了协同生产模式, 如各地兴起的专项工业园区, 比较典型有: 北京中关村 IT 业产业集群、广州汽车产业链网络、南京扬巴一体化石化生产基地等。协同生产有多种实现形式: 产业集成、产业集聚、产业链协同、工业共生等<sup>[1]</sup>, 如表 1 所示。

表 1 协同生产模式比较

	协同目的	企业自主性	企业关系	协同稳定性	产品类型	地理布局
产业集成	提升资源整合能力	半自主	生产协同与功能互补	稳固, 多以契约形式确定	相关产业的多种产品	区域集中
产业集聚	集聚效应带来的低成本	完全自主	合作生产与同行业竞争并存	易变化, 企业自发行	单一产业内的相似产品	区域集中
产业链协同	降低生产交易成本	依赖核心企业	围绕核心产品, 形成上下游链条	较稳固, 非核心企业会产生变动	以核心企业产品为主	区域相对集中
工业共生	环境友好、循环经济	完全自主	互相回收废弃物再生产	较稳固, 受政策影响大	多种产业的多种产品	区域集中

文中提出各种协同生产模式都具备以下共同特征:首先由具有自主经营功能的企业构成,企业生产经营在考虑自身利益的同时还要兼顾整体效益;其次企业协同具有动态性,企业间协同关系可能断裂或新建;再次生产协同模式多样,企业间关系紧密连接成一个整体,不存在孤立的企业;此外参加协同的企业都以获得一定竞争优势为目的;最后协同生产模式下各企业间存在物流关系,企业地理布局都相

对集中。

以国内某典型重化工协同生产网络为例,图 1 为该生产系统物料供应关系。该重化工协同生产网络是国有企业 A 与跨国公司 B 为投资主体、多家公司参与的大型重化工生产项目,其包含多个化工生产单元,形成了以天然气基化工生产为龙头,上、中、下产品链全面配套的企业协同生产系统。

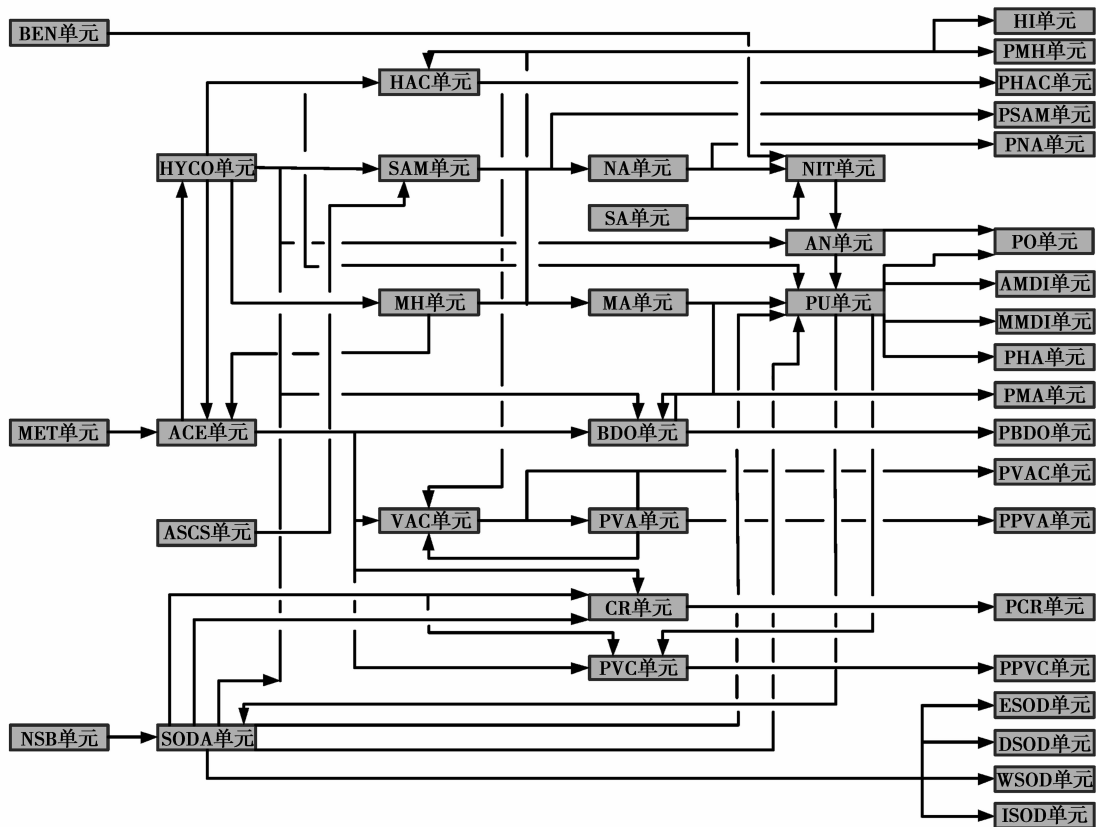


图 1 典型重化工协同生产网络物料供应关系

## 2 企业协同生产网络模型

为描述 ICPN 特征并建立模型,给出定义。

**定义 1** ICPN 是具备独立运营能力的多个半自律子功能单元根据相互物质交换关系结成的企业联盟,并在地理上集中布置而形成的复杂生产系统网络。

**定义 2** 将 ICPN 中各子功能单元视为网络节点。 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  为 ICPN 的点集, $n$  为 ICPN 的节点数。

以子功能单元间存在的物质交换关系作为 ICPN 的边。子功能单元间可能存在多种物质交换关系,如  $v_i$  与  $v_j$  间互为物料供应关系,或  $v_i$  向提供

$v_j$  多种物料。为表述物质交换关系与节点间的边给出定义 3 和定义 4。

**定义 3**  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_s\}$  为所有子功能单元间的物质交换关系集, $R_{i,j}$  为子功能单元  $v_i$  与  $v_j$  间存在物质交换关系集。 $v_i$  与  $v_j$  间存在物质交换关系则  $R_{i,j} \neq \emptyset$  且  $R_{i,j} \subseteq R$ , $v_i$  与  $v_j$  间不存在物质交换关系则  $R_{i,j} = \emptyset$ ,另单个子功能单元不存在物质交换关系即  $R_{i,i} = \emptyset$ 。

**定义 4** 将  $v_i$  与  $v_j$  存在物质交换关系视为网络的边,构造邻接矩阵

$$E_{n \times n} = \begin{bmatrix} e_{1,1} & \cdots & e_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ e_{1,n} & \cdots & e_{n,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$e_{i,j} = \begin{cases} 1, R_{i,j} \subseteq R; \\ 0, R_{i,j} = \emptyset; \end{cases} 1 \leq i, j \leq n.$$

$e_{i,j}=1$  表示  $v_i$  与  $v_j$  的边,  $k = \frac{1}{2} \sum e_{i,j}$  为 ICPN 包含的边数。

在 ICPN 中,子功能单元影响并受与其产生直接物质交换关系的子功能单元影响。为表述 ICPN 局部网络中节点连接特性给出定义 5。

**定义 5**  $d_i = \sum_j e_{i,j}$  为节点度,表示与节点  $v_i$  直接连接的节点数目或边的数目。 $\delta_i = \{v_j | e_{i,j} = 1\}$  为节点  $v_i$  的领域,表示与节点  $v_i$  直接连通的节点集合。

ICPN 中子功能单元可通过间接(通过其他直接联系生产单元)方式同功能单元产生关系,为表述单个节点与其他所有节点的连接特性给出定义 6。

**定义 6**  $\alpha_i(i,j)$  表示从节点  $v_i$  到节点  $v_j$  的一条路径所经过的边集,则  $\alpha_i(i,j) \subseteq E$ 。

$A(i,j) = \{\alpha_1(i,j), \alpha_2(i,j), \dots\}$  为从节点  $v_i$  到节点  $v_j$  的所有路径的集。ICPN 为连通图,不存在孤立节点,则  $A(i,j) \neq \emptyset$ 。

综上,ICPN 可以用无向图  $G = G(V, E)$  表示。根据定义 1-6,可得重化工协同生产网络拓扑结构示意图,如图 2 所示。

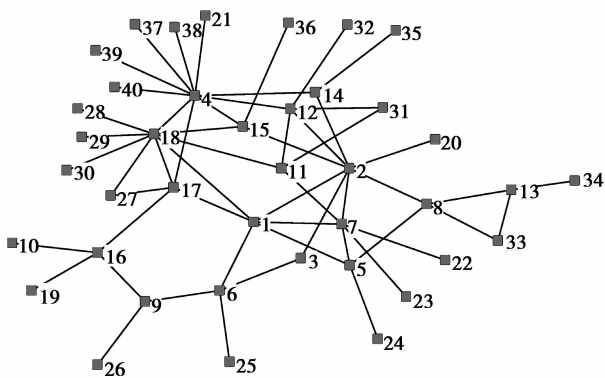


图 2 典型重化工协同生产网络拓扑结构

### 3 企业协同生产网络的拓扑特性

系统科学的一个基本观点认为系统结构决定了系统功能,文中拟通过小世界特性、无标度特性研究 ICPN 的复杂网络拓扑结构,并通过节点中心性分析结构特性及功能的关系。

#### 3.1 小世界特性

小世界网络具备同随机网络类似较小的特征路径长度,并具备与规则网格图近似的较大的聚类系

数。一般用特征路径长度和聚类系数来衡量网络的小世界特性<sup>[4]</sup>。

#### 3.1.1 网络参数

特征路径长度  $L$

$$l_{i,j} = \min_{a_q(i,j)} \sum e_{i,j}. \quad (2)$$

表示  $v_i$  与  $v_j$  最短路径长度,  $l_{i,j}$  可通过 floyd 算法实现。

$$L = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i \neq j} l_{i,j}. \quad (3)$$

特征路径长度衡量整个网络中所有节点对最短路径的平均值。

聚类系数  $C$

$$c_i = \frac{1}{d_i(d_i-1)} \sum_{j,h} e_{i,j} e_{i,h} e_{h,j}. \quad (4)$$

表示与同一节点  $v_i$  相连的两个节点间存在连接的概率。

$$C = \frac{1}{n} \sum_i c_i. \quad (5)$$

聚类系数衡量节点领域内(局部网络)节点聚集程度。

验证网络小世界特性,一般通过与同等规模随机网络比较,满足  $\frac{C}{C_{ran}} > \frac{L}{L_{ran}}$  时,即为小世界网络,其中  $C_{ran}$  为随机网络聚类系数,  $L_{ran}$  为随机网络的特征路径长度。

#### 3.1.2 计算结果

运用 UCINET 软件构造与 ICPN 同等规模 ( $n=40, k=55$ ) 的 Erdos-Renyi 随机连通图<sup>[21]</sup>, 计算其特征路径长度与聚类系数,并与 ICPN 特征路径长度与聚类系数作对比,结果如表 2 所示。

表 2 ICPN 与 ER 随机图网络参数对比

	$n$	$k$	$C$	$L$
ICPN	40	55	0.121 9	3.276 9
ER 随机网络	40	55	0.080 1	3.646 5

ICPN 的特征路径长度与相应的随机图大致相同,聚类系数大于随机网络,满足  $\frac{C}{C_{ran}} > \frac{L}{L_{ran}}$ , 说明 ICPN 具备小世界特性。

#### 3.1.3 功能分析

小世界网络中任意节点对间经过较短的路径就可产生联系,产生联系的介质可以是物质、能量、信号等。一般地,聚类系数对应着在网络中信息、物料、故障等的传播广度,特征路径代表着信息、物料、

故障等传播深度<sup>[5]</sup>。ICPN 具有小世界特性,一方面对原料的加工效率比一般生产系统较高,保障了协同效率;另一方面网络结构将对故障的传播扩散起着很大的促进作用,即 ICPN 故障传播速度和影响范围高于一般的生产系统。

### 3.2 无标度特性

#### 3.2.1 网络参数

大多数人工网络都具备无标度特性,即网络节点度分布具备幂律函数特征<sup>[5]</sup>,满足

$$P(d) \sim d^{-\gamma} \quad (6)$$

其中, $P(d)$ 表示节点度为 $d$ 的节点在网络中出现的概率, $\gamma$ 为网络的度分布指数,在不同网络中 $\gamma$ 值不同。

验证网络的无标度特性一般分析其双对数坐标下的度分布情况,如果 $\log(P(d))$ 与 $\log(d)$ 存在线性关系,即满足

$$\log(P(d)) = -\lambda \cdot \log(d) + \alpha \quad (7)$$

则网络具备无标度特性。

#### 3.2.2 计算结果

计算 ICPN 度分布概率,并绘制双对数坐标。

如图 3 所示, $\log(d)$ 基本沿着斜率为 $-1.221$ ,截距为 $-0.940$ 的直线分布, $\log(P(d))$ 与 $\log(d)$ 存在线性关系,说明 ICPN 存在无标度特性。

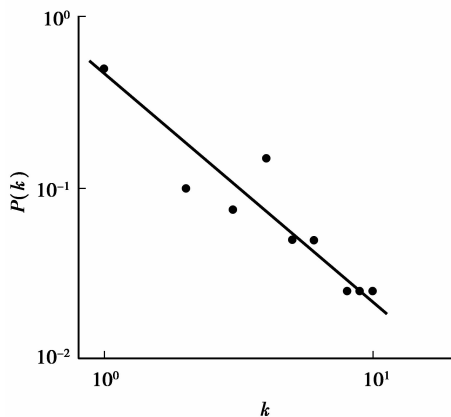


图 3 ICPN 度分布双对数坐标图

#### 3.2.3 功能分析

在 ICPN 中,度分布指数 $\lambda = 1.221$ ,反映了 ICPN 中边数很多而接近于完全网络(网络中任意节点对都有之间联系),各功能单元的物质联系都较为广泛,各功能单元间为强耦合关系<sup>[22]</sup>。

ICPN 具备无标度特性,网络结构对于随机故障拥有较强的鲁棒性,而对目标攻击(根据节点度大小选择攻击对象)又表现出脆弱性<sup>[6]</sup>,即整个生产系统对于一般异常工况具备很强的容错性、抗毁性,但

关键生产单元一旦出现故障会导致整个生产系统崩溃。

### 3.3 节点中心性

基于以上 ICPN 具备小世界特性和无标度特性的结论,有必要对 ICPN 的节点进行分析,区分节点中心性,探索节点对整个网络影响的性能。

#### 3.3.1 网络参数

复杂网络本质上是非同质拓扑结构,决定了网络中每个节点的重要程度是不同的。节点中心性度量方法包括:节点度、介数、凝聚度、网络流等。ICPN 具备整体功能,研究节点中心性须研究节点对所有节点的影响,这里选择介数指标作为衡量依据<sup>[23-24]</sup>。节点介数越大,节点中心性越强,节点对整个网络的重要性越大。

节点介数 $b_i$ 指网络中经过节点 $v_i$ 的最短路径中的数量占所有最短路径数量的比例。

$$b_i = \frac{1}{(n-1)(n-2)} \sum_{s \neq i \neq t} \frac{g_{s,t}(i)}{g_{s,t}} \quad (8)$$

$g_{s,t}$ 表示节点 $v_s$ 与节点 $v_t$ 之间最短路径数。 $g_{s,t}(i)$ 表示节点 $v_s$ 与 $v_t$ 之间经过节点 $v_i$ 的最短路径数。

#### 3.3.2 计算结果

计算 ICPN 各节点介数指标、排序并与度指标比较,结果如表 3 所示。

介数较大的节点对 ICPN 更重要,因为如果删除介数指标较大的节点,其会造成更多的最短路径中断,从而对整个网络的物料流动性能产生更大影响。在实际生产过程中应确保介数指标较大的生产单元的正常运行,如在布置安全资源、安排设备检修、制定经营策略等工作时应该以节点 4、2、1 等为重点。

介数指标衡量节点重要性的结果与从化工工艺角度衡量生产单元重要性的结果基本一致。以节点 2 为例,其代表天然气制乙炔生产单元,整个 ICPN 都是以天然气基化工为基础,一旦其发生故障会影响整个 ICPN。

度指标与节点中心性存在联系,但并不决定节点中心性。例如节点 2 合成气生产单元为多个功能单元提供生产原料,其影响范围大。从整个生产系统角度来说其比节点 18 聚氨酯生产单元更为重要。

对于介数值为 0 节点的分析:10、19、20、21 单元在 ICPN 中为硫酸、苯、天然气、卤水等原料供应站或者原料存储罐区,其仅与需求相应原料的生产单元产生物质联系。22~40 单元为各种聚氨酯、合成橡胶、酸、碱的工业成品销售单元或存储罐区,仅

与直接生产单元有物质联系。以上节点不参与复杂生产过程,不具备与其他节点的复杂联系。

表 3 ICPN 节点介数、度比较

排 序	节 点	介 数 指 标	度 指 标	排 序	节 点	介 数 指 标	度 指 标
1	4	0.303	162	4	10	18	21
2	2	0.287	347	4	8	18	22
3	1	0.249	926	7	6	18	23
4	18	0.227	553	6	9	18	24
5	17	0.187	527	5	5	18	25
6	8	0.149	679	5	4	18	26
7	16	0.129	615	4	4	18	27
8	7	0.120	299	1	6	18	28
9	12	0.112	789	5	5	18	29
10	6	0.105		4	4	18	30
11	5	0.093	397	4	4	18	31
12	15	0.085	518	9	4	18	32
13	14	0.070	390	7	3	18	33
14	9	0.058	974	4	3	18	34
15	13	0.048	717	9	3	18	35
16	11	0.046	337	4	4	18	36
17	3	0.023	461	5	2	18	37
18	10	0		1	1	18	38
18	19	0		1	1	18	39
18	20	0		1	1	18	40

## 4 结 论

为提升企业协同生产效率、系统鲁棒性,论文基于复杂网络理论深入研究了企业协同生产网络拓扑结构与功能特性,研究取得以下结论。

1)在分析协同生产网络特征的基础上,基于功能单元物质互换关系,构建了协同生产网络拓扑学模型,为深入研究各种模式的协同生产网络结构特性与功能特性的关系奠定了基础。

2)结合小世界特性、无标度特性、节点中心性属性,分析了协同生产网络拓扑结构,给出了分析协同系统拓扑结构与功能特征耦合关系的拓扑参数及分析流程;

3)以典型重化工协同生产网络为例进行仿真,

结果表明该 ICPN 具备小世界特性、无标度特性、节点中心性,从而验证了模型与参数的可行性。进一步,给出了拓扑特性与实际系统功能的关系。

下一步研究工作将基于 ICPN 的复杂网络特性,研究提高协同系统的安全性、鲁棒性的具体方法及开发相应的工具集,研究网络传播动力学特征为制定生产运营策略、调配生产资源等提供实质性的参考。

## 参 考 文 献:

- [1] CAMARINHA-MATOS L M, AFSARMANESH H, GALEANO N, et al. Collaborative networked organizations - concepts and practice in manufacturing enterprises [J]. Computers & Industrial Engineering, 2009, 57(1):46-60.
- [2] JAHN H. Value-added process-related performance analysis of enterprises acting in cooperative production structures [J]. Production Planning & Control, 2009, 20(2):178-190.
- [3] SCHERRER-RATHJE M, ARNOSCHT J, EGRI P, et al. A generic model to handle complexity in collaborative networks [C] // Proceedings of Portland International Conference on Management of Engineering and Technology, Aug. 2-6, 2009, Portland, Oregon, USA. [S. l.]: IEEE Press, 2009: 271-287.
- [4] SCHUH G, MONOSTORI L, CSAJI B C, et al. Complexity-based modeling of reconfigurable collaborations in production industry [J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2008, 57(1): 445-450.
- [5] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. Nature, 1998, 393(6684): 440-442.
- [6] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks [J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [7] ZHOU S, MONDRAGON R J. Structural constraints in complex networks [J]. New Journal of Physics, 2007, 9:1-11.
- [8] DUCH J, ARENAS A. Scaling of fluctuations in traffic on complex networks [J]. Physical Review Letters, 2006, 96(21):1-4.
- [9] ROSAS-CASALS M, VALVERDE S, SOLE R V. Topological vulnerability of the European power grid under errors and attacks [J]. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2007, 17(7):2465-2475.
- [10] NEKOVEE M, MORENO Y, BIANCONI G, et al. Theory of rumour spreading in complex social networks

- [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, 374(1): 457-470.
- [11] MOEZ D. Epidemic processes on complex networks: the effect of topology on the spread of epidemics [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006, 363(1): 120-131.
- [12] LIU H T. The complexity of Chinese syntactic dependency networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2008, 387 ( 12 ): 3048-3058.
- [13] BRIGITTE G, BERNARD D. Innovation and network structural dynamics; study of the alliance network of a major sector of the biotechnology industry [J]. *Research Policy*, 2005, 34(10): 1457-1475.
- [14] WANG K Q, ZENG Z F, SUN D C. Structure analysis of supply chain networks based on complex network theory [C] // *Proceedings of the 4th International Conference on Semantics, Knowledge and Grid*, Dec. 3-5, 2008, Washington, D. C., USA. [S. l.]: IEEE Computer Society, 2008: 349-354.
- [15] 宋雨萌, 石磊. 工业共生网络的复杂性度量及案例分析 [J]. *清华大学学报: 自然科学版*, 2008, 48 ( 9 ): 1441-1444.  
SONG YU-MENG, SHI LEI. Complexity measurements for Kalundborg and Gongyi industrial symbiosis networks [J]. *Journal of Tsinghua University: Science & Technology*, 2008, 48 ( 9 ): 1441-1444.
- [16] 肖忠东, 查仲朋, 徐琛. 复杂网络理论在生态工业系统的应用研究 [J]. *系统工程*, 2010, 28(5): 58-63.  
XIAO ZHONG-DONG, CHA ZHONG-PENG, XUN CHEN. Application research on complex network of industrial ecological system [J]. *Systems Engineering*, 2010, 28(5): 58-63.
- [17] 陈静, 孙林夫. 业务关联的多产业链协作网络模型 [J]. *计算机集成制造系统*, 2010, 16(5): 1088-1095.  
CHEN JING, SUN LIN-FU. Model of business-related multi-industrial chain collaborative network [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2010, 16 ( 5 ): 1088-1095.
- [18] 蔡宁, 吴结兵, 殷鸣. 产业集群复杂网络的结构与功能分析 [J]. *经济地理*, 2006, 26(3): 378-382.  
CAI NING, WU JIE-BIN, YIN MING. The structure and function of industrial clusters' complex networks [J]. *Economic Geography*, 2006, 26(3): 378-382.
- [19] ASHTON W S. The structure, function, and evolution of a regional industrial ecosystem [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2009, 13(2): 228-246.
- [20] CAMARINHA-MATOS L, AFSARMANESH H. A comprehensive modeling framework for collaborative networked organizations [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2007, 18(5): 529-542.
- [21] ERDOS P, RENYI A. On the strength of connectedness of a random graph [J]. *Acta Mathematica Hungarica*, 1961, 12(1-2): 261-267.
- [22] 王林, 戴冠中. 复杂网络的 Scale-free 性、Scale-free 现象及其控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [23] 荣莉莉, 郭天柱, 王建伟. 复杂网络节点中心性 [J]. *上海理工大学学报*, 2008, 30(3): 227-236.  
RONG LI-LI, GUO TIAN-ZHU, WANG JIAN-WEI. Centralities of nodes in complex networks [J]. *Journal of University of Shanghai for Science and Technology*, 2008, 30(3): 227-236.
- [24] 赫南, 李德毅, 涂文燕, 等. 复杂网络中重要性节点发掘综述 [J]. *计算机科学*, 2007, 34(12): 1-17.  
HE NAN, LI DE-YI, TAN WEN-YAN, et al. Mining vital nodes in complex networks [J]. *Computer Science*, 2007, 34(12): 1-17.

(编辑 张小强)