

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2013.07.006

# 客户协同创新网络的复杂网络特性分析

李 斐<sup>1</sup>, 杨 育<sup>1</sup>, 谢建中<sup>1,2</sup>, 张 峰<sup>3</sup>, 包北方<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044; 2. 富士康科技集团, 深圳 518101;  
3. 武汉理工大学 机电工程学院, 武汉 430060)

**摘 要:** 客户协同产品创新系统是多主体参与的复杂协同知识工作网络系统。深入研究客户协同创新网络拓扑结构和创新主体间的复杂网络关系, 是提升协同创新效率的重要途径。针对客户协同创新过程的复杂性特征, 定义了客户协同创新网络, 建立了客户协同创新网络拓扑模型, 计算了客户协同创新网络的重要参数, 并对其网络结构和特性进行了分析。研究结论表明: 客户协同创新网络具有无标度和小世界特性。研究结果为客户协同产品创新过程多主体知识传播机制及网络传播动力学特征等的研究奠定了一定的理论基础。

**关键词:** 客户协同创新; 产品设计; 复杂系统; 无标度; 小世界

**中图分类号:** F270.7, N949 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-582X(2013)07-027-05

## Characteristic analysis of complex network for customer collaborative innovation network

LI Fei<sup>1</sup>, YANG Yu<sup>1</sup>, XIE Jianzhong<sup>1,2</sup>, ZHANG Feng<sup>3</sup>, BAO Beifang<sup>1</sup>

(1. The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. Foxconn Technology Group, Shenzhen, Guangdong 518101, China;  
3. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430060, China)

**Abstract:** Customer collaborative product innovation system is a complex collaborative knowledge work network system with multi-agent involved. Aiming at complex characteristics of customer collaborative innovation process, customer collaborative innovation networks(CCIN)is defined, CCIN topology model is proposed and important parameters of CCIN are calculated. In addition, the network structure and characteristics are analyzed. The results show that CCIN has the characteristics of scale-free and small world. The research results provide theoretical basis for the research on mechanisms of knowledge dissemination among agents and dynamical characteristics of network transmission.

**Key words:** customer collaborative innovation; product design; complex systems; scale-free; small-world

客户的知识、经验和技能是提高企业创新能力的最主要来源之一, 客户应作为创新主体参与到创新过程中<sup>[1]</sup>。客户协同产品创新(customer collaborative product innovation, CCPI)是一种能够更高程度发挥

客户潜力的创新模式, 自提出便引起国内外学者的广泛关注。然而, 创新主体间的复杂协同关系、知识流和信息流的多向流动以及网络化的协同工作环境等使 CCPI 过程呈现出明显的复杂性。这导致相关

收稿日期: 2013-03-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(71071173); 教育部高等学校博士学科点科研基金资助项目(20090191110004); 富士康科技集团校企合作项目

作者简介: 李斐(1987-), 男, 重庆大学博士研究生, 主要从事客户协同产品创新、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。

研究工作难以深入,成为分析、优化 CCPI 工作过程的重要瓶颈<sup>[2]</sup>。因此,如何揭示 CCPI 的复杂特性以及 CCPI 中创新客户与其他创新主体之间的复杂关系,以实现客户创新知识的充分利用及客户创新能力的更好引导和强化,并最终提高协同创新效率成为亟待解决的理论问题。

目前,国内外学者对客户协同创新的复杂特性进行了深入研究。Yilmaz 等<sup>[3]</sup>的研究表明产品创新是一种复杂适应现象,但其主要是针对一般意义上的产品创新方式,未考虑有客户参与到协同产品创新中的复杂性;Ojanen、Ertgar、Payne 等针对客户协同创新的复杂过程分别从 3 个角度构建了其框架模型,并对客户协同创新的发展阶段进行了研究,却缺少对客户协同创新过程中创新主体之间的复杂协作关系以及结构特性的分析<sup>[4-6]</sup>;王小磊等<sup>[7]</sup>提出 CCPI 是一种复杂的协同知识工作网络,定性地研究了客户协同创新的复杂特性,但缺少必要的定量分析,无法描述 CCPI 过程的动态变化;杨育等<sup>[8]</sup>针对客户协同创新中复杂的组织协同关系建立了客户协同创新的组织模型,但其主要从组织的宏观角度进行分析,未能反映出创新客户与客户、创新团队等的复杂关系。上述成果为 CCPI 的复杂性研究奠定了基础,但是,研究多从宏观和定性角度进行分析,无法为客户协同产品创新过程的复杂特性分析提供定量依据,且忽略了微观层面创新主体间的复杂协作关系,无法从根本上解释其复杂性产生机理。

复杂网络是复杂系统的抽象表示形式,反映了复杂系统各主体的相互关系,其研究起源于数学中的随机图论,并以小世界网络模型<sup>[9]</sup>和无标度网络演化模型<sup>[10]</sup>的提出为标志,拓展了图论的研究领域。复杂网络为研究交通网、电力网及协同生产网络等<sup>[11-14]</sup>各种网络的复杂特性,分析网络演化机制及动力学特征等提供了工具,也为研究客户协同创新系统提供了一种新的思路和视角。笔者将应用复杂网络理论对客户协同产品创新系统的复杂特性进行定量分析:首先,根据客户协同创新的复杂性特征,定义客户协同创新网络及其复杂性网络参数,建立客户协同创新网络拓扑结构模型;然后,基于某客户协同创新网络的实例,分析网络是否具有无标度、小世界等典型复杂网络特性。本文研究结论为进一步研究客户协同创新网络动力学特征奠定基础,并可为客户协同创新模式下领先客户的识别与管理、客户知识在网络中的传播特性分析等提供参考。

## 1 客户协同创新网络的定义及复杂性特征

CCPI 的整个过程包括需求获取、概念设计、创

意完善、创新产品设计以及创新产品评估,并把客户作为创新主体深度集成到产品创新团队中,其创新主体为客户与专业设计人员。创新主体借助各种网络化协同工作环境、创新设计工具和知识融合手段,互补各自在知识结构和创新技能方面的创新优势,通过协同进行产品创新,以开发出具有高度创新性和市场主导力的新产品。客户协同创新主体间存在复杂的协同知识工作关系<sup>[7]</sup>,创新主体间的结构关系实际也是一种复杂网络:客户、专业设计人员等创新主体为网络的节点,相互之间的联系、关联性和影响程度为网络的边。由此,客户协同创新网络(customer collaborative innovation networks, CCIN)是在网络环境下工作的多创新主体组成的信息-知识交流关系网络。

客户协同创新网络具有复杂系统的基本特征:非线性、开放性、动态性、多样性及不确定性<sup>[15]</sup>;首先,CCPI 多创新主体间的相互关联和相互制约决定了创新主体行为间复杂的非线性作用及关系;其次,创新过程中多创新主体为了获取更多的外部资源,加强彼此或与外部的密切联系,使得 CCPI 的过程更为开放;再次,客户需求的动态变化、先进设计工具的不断发展和创新主体的自主学习使得 CCPI 过程一直处于不断变化中;此外,创新主体既包括专业创新设计人员又包括了协同创新客户,且各自具有不同的特点;最后,创新过程存在大量随机、模糊和不确定因素的影响。

## 2 客户协同创新网络构建

为了对客户协同创新网络有更深入的认识,下面给出 CCIN 的形式化描述及网络参数定义。

### 2.1 CCIN 的图表示

为方便讨论,对要描述的客户协同创新网络做如下假设和简化:

1) 每个创新主体为节点,创新主体之间的关系为边。

2) 不具体区分创新主体间的关联性差异,统一使用无权图表示网络关系。

3) 任意两个创新主体之间只要有信息流就认为两个节点之间有连线,不考虑信息流的方向。

然后,给出 CCIN 拓扑图定义。

**定义 1** 以创新主体为节点,创新主体之间的关联性关系为边,其无向图可表示为

$$G = (V, E), \quad (1)$$

其中,  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  为创新主体集,  $E = \{(v_i, v_j)\}$  为边的集合。若  $(v_i, v_j) = (v_j, v_i)$ , 即  $(i, j)$  与  $(j, i)$  对应同一条边,则网络为无向网络。

**定义 2** 对于 CCIN 的拓扑结构,使用邻接矩阵

$A$  表示:

$$A_{n \times n} = \begin{bmatrix} a_{1,1} & \cdots & a_{1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n,1} & \cdots & a_{n,n} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中,  $a_{i,j}$  表示创新主体  $v_i$  与  $v_j$  的信息流关系,即

$$a_{i,j} = \begin{cases} 1, & v_i \text{ 与 } v_j \text{ 间存在信息流;} \\ 0, & v_i \text{ 与 } v_j \text{ 间不存在信息流.} \end{cases} \quad (1 \leq i, j \leq n)$$

## 2.2 CCIN 网络参数

在刻画复杂网络结构的统计特性上有诸多概念和方法,其中有 4 个基本的概念:度、度分布、平均路径长度和聚类系数。度和度分布反映出网络的无标度特性,平均路径长度和聚类系数则反映了复杂网络的小世界特性。下面对 4 个基本概念在 CCIN 中的意义加以阐释。

### 2.2.1 度与度分布

度(degree)是单独节点的属性中简单而又重要的概念<sup>[16]</sup>。与节点  $i$  相连的节点数目  $k_i$  被定义为该节点  $i$  的度。直观来看,一个节点的度越大则该节点在某种意义上“越重要”,即客户协同创新网络中该创新主体重要性越大。

度分布是网络中节点度的分布情况,可用分布函数  $P(k)$  来描述。 $P(k)$  表示的是一个随机选定的网络中节点度恰好为  $k$  的概率,简化之则为网络中度数为  $k$  的节点个数占总节点数的比例。

### 2.2.2 平均路径长度

网络的平均路径长度(又称“特征路径长度”)  $L$  定义为任意两个节点之间距离的平均值,计算采用弗洛伊德算法实现,即

$$L = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} d_{ij}, \quad (3)$$

其中  $N$  为网络节点数;  $d_{ij}$  为网络中两个节点  $i$  和  $j$  之间的距离,即连接这两个节点的最短路径上的边数。平均路径长度衡量客户协同创新网络中创新主体之间的传输性能与连通性。

### 2.2.3 聚类系数

假设网络中节点  $i$  的度为  $k_i$ ,则这  $k_i$  个节点之间最多存在  $k_i(k_i-1)/2$  条边。而  $k_i$  个节点间实际存在的边数  $E_i$  与总的可能边数  $k_i(k_i-1)/2$  之比定义为节点  $i$  的聚类系数  $C_i$ ,即

$$C_i = \frac{2E_i}{k_i(k_i-1)}. \quad (4)$$

从几何特点出发,式(4)的一个等价定义为

$$C_i = \frac{\text{与点 } i \text{ 相连的三角形的数量}}{\text{与点 } i \text{ 相连的三元组的数量}}. \quad (5)$$

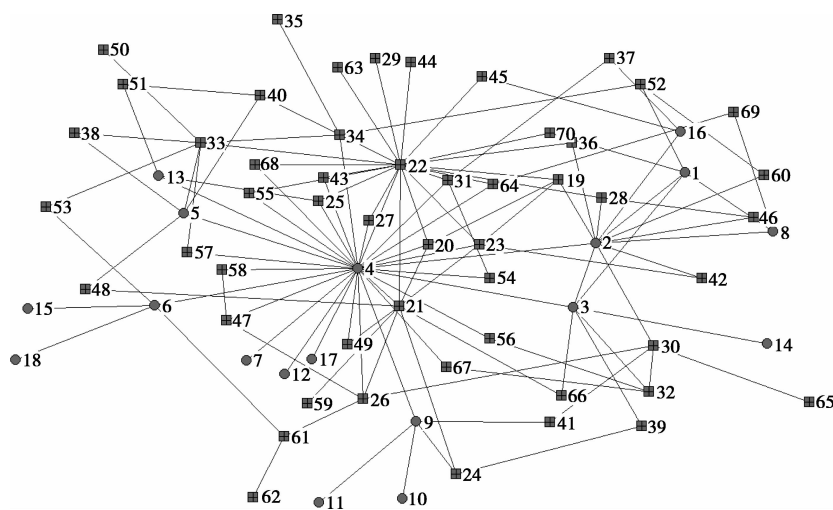
整个网络的聚类系数  $C$  就是所有节点  $i$  的聚类系数  $C_i$  的平均值,即

$$C = \frac{1}{n} \sum_i C_i. \quad (6)$$

聚类系数衡量网络的集团化程度,即创新主体节点领域内的聚集程度。

## 3 客户协同创新网络的拓扑特性

A 公司客户协同创新网络共包括 52 名客户创新人员及 18 名专家、专业设计人员,其拓扑结构使用邻接矩阵  $A_{70 \times 70}$  表示,拓扑结构图可以用无向图  $G=(V, E)$  表示。借助 Ucinet 软件的 NetDraw 工具,可绘得 CCIN 网络拓扑图如图 1 所示。



(圆形代表专业设计人员,方形代表客户协同创新人员)

图 1 某客户协同创新网络拓扑图

实证研究表明,无标度特性和小世界特性是复杂网络的两个基本特性,不少实际复杂网络兼具无

标度和小世界特性。下面从这两个方面一一研究客户协同创新网络的网络拓扑特性。

### 3.1 无标度特性

#### 3.1.1 验证方法

许多复杂网络的连接度分布函数具有幂律形式,节点的连接度没有明显的特征长度,此类网络称之为无标度网络。判断客户协同创新网络是否具有无标度特性的方法就是网络的节点度是否服从幂律分布<sup>[10]</sup>,即满足

$$P(k) \sim k^{-\gamma}, \quad (7)$$

其中  $\gamma$  为网络的标度,不同的网络具有不同的标度值。

为便于计算,在验证网络的无标度特征时,通常考察其双对数坐标下度的分布情况,如果  $\log P(k)$  与  $\log k$  之间存在线性关系,即满足

$$\log P(k) = -\gamma \log k + a, \quad (8)$$

则网络度分布具备幂律函数特征,网络具备无标度特性。

#### 3.1.2 验证结果

通过 Matlab 计算 CCIN 的度分布概率,并借助 Origin 拟合绘制其双对数坐标下的点对应关系,具体如图 2 所示。

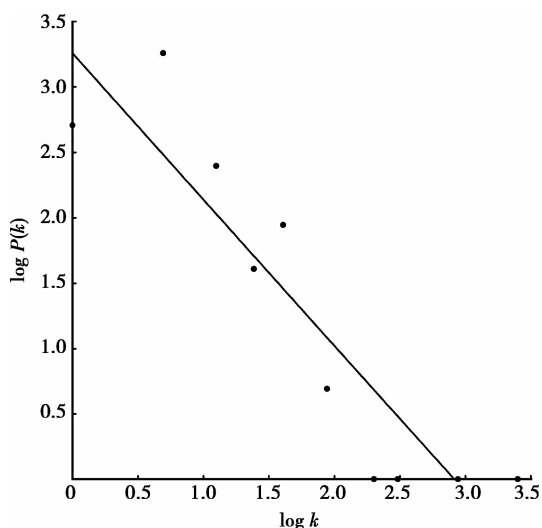


图 2 CCIN 度分布图-双对数坐标

拟合得知,  $\gamma = 1.1176$ ,  $a = 3.2581$ ,  $R^2 =$

0.8339,  $\log P(k)$  与  $\log k$  之间存在线性关系,满足  $\log P(k) = -\gamma \log k + a$ 。由此,CCIN 的度分布符合幂律规律,网络具有无标度特性。

#### 3.1.3 结论分析

无标度网络的结构特点反映了节点度分布的自相似结构及其高度弥散性。网络大部分节点的度值很低,小部分中枢节点的度值很高。

CCIN 的度分布值大小及无标度特性说明<sup>[17]</sup>:

1) 客户协同创新网络中存在少数核心创新设计成员,这些核心成员既熟悉专业创新设计知识,又能通过与客户联系迅速、准确把握客户需求;

2) 在客户协同创新网络的管理中,可以根据创新主体密度作为评价创新主体地位和作用的一个关键指标,也可以作为评价创新用户群体中领先用户的重要因素;

3) CCIN 的边数较多而接近于完全网络,各创新主体间的信息联系较为广泛,各主体间耦合关系较强。

### 3.2 小世界特性

#### 3.2.1 验证方法

小世界网络具有较小的平均路径长度和较大的聚类系数,两个参数特点分别类似于随机网络和规则网络。因此,平均路径长度和聚类系数成为衡量网络小世界特性的两个关键指标。

验证网络的小世界特性,一般通过 Sporns 等提出的小世界系数转换不等式进行证明<sup>[18]</sup>。通过将网络与同等规模(相同节点规模和网络密度等)的随机网络比较,如果满足

$$\frac{C}{C_{\text{ran}}} > \frac{L}{L_{\text{ran}}}, \quad (9)$$

网络具有小世界特性,其中  $C_{\text{ran}}$  与  $L_{\text{ran}}$  分别代表同等规模随机网络的聚类系数和平均路径长度。

#### 3.2.2 验证结果

首先用 UCINET 软件生成与 CCIN 同等规模的 ER 随机网络,然后分别计算其平均路径长度和聚类系数,对比结果如表 1 所示。

表 1 CCIN 与 ER 随机网络对比

节点	网络密度	CCIN		ER 随机网络		对比	
		$C$	$L$	$C_{\text{ran}}$	$L_{\text{ran}}$	$C/C_{\text{ran}}$	$L/L_{\text{ran}}$
70	0.0493	0.1996	2.8052	0.0141	3.5516	14.1560	0.7898

通过比较,CCIN 的平均路径长度与相应的随机网络相当,聚类系数远大于随机网络,满足  $\frac{C}{C_{\text{ran}}} >$

$\frac{L}{L_{\text{ran}}}$ , 可判定 CCIN 存在小世界特性。

#### 3.2.3 结论分析

一般来讲,小世界网络中较短的平均路径反映了网络各节点间物质、信息、知识等较高的交换效率,平均路径越短,效率越高;较大的聚类系数反映

了网络较高的集团化程度<sup>[19]</sup>。客户协同创新网络具有小世界特性,一方面说明创新主体之间关系密切,物质、信息等的交换效率较高,保障了协同创新效率;另一方面,CCIN 创新主体节点领域内较高的聚集程度可以促进信息、知识等的传播扩散,但会相应降低网络的鲁棒性,即信息、知识等资源流失对 CCIN 的影响比一般创新网络较高。

## 4 结 论

1)在分析客户协同产品创新过程的基础上,定义了客户协同创新网络,分析了客户协同创新网络的复杂性特征。

2)基于创新主体间的信息等交流关系,构建了客户协同创新网络拓扑模型,并解析了复杂网络指标参数在客户协同创新网络中的现实意义,为从微观层面深入研究客户协同创新网络结构特征奠定了基础。

3)从无标度特性和小世界特性两个方面,分析了客户协同创新网络的拓扑结构,给出了客户协同创新复杂网络特性的验证及分析方法。

4)以某企业客户协同创新网络为例进行仿真,结果证明 CCIN 具备无标度、小世界等典型复杂网络拓扑特性,验证了模型与参数的可行性。

目前,该方面研究还处于起步阶段,笔者仅从微观层面有限地分析了客户协同创新网络的拓扑特性。下一步研究工作将基于 CCIN 的复杂网络特性,研究客户协同创新网络中多主体的知识传播机制、网络传播动力学特征等,为协同创新团队管理、提高客户协同创新效率等提供实质性参考。

## 参考文献:

- [ 1 ] Thomke S H, Hippel E V. Customers as innovators: a new way to create value[J]. *Harvard Business Review*, 2002, 80(4):74-81.
- [ 2 ] Tsai K H. Collaborative networks and product innovation performance: toward a contingency perspective [J]. *Research Policy*, 2009, 38(5):765-778.
- [ 3 ] Yilmaz L. Innovtion systems are self-organizing complex adaptive systems [R]. California: AAAI 2008 Spring Symposium Series, 2008.
- [ 4 ] Ojanen V, Hallikas I. Inter-organisational routines and transformation of customer relationships in collaborative innovation [J]. *International Journal of Technology Management*, 2009, 45(3/4):306-322.
- [ 5 ] Etgar M. A descriptive model of the consumer co-production process [J]. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 2008, 36(1):97-108.
- [ 6 ] Payne A F, Storbacka K, Frow P. Managing the co-creation of value [J]. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 2008, 36(1):83-96.
- [ 7 ] 王小磊, 杨育, 曾强, 等. 客户协同创新的复杂性及主体刺激-反应模型[J]. *科学学研究*, 2009, 27(11): 1729-1735.
- WANG Xiaolei, YANG Yu, ZENG Qiang, et al. Research on the complexity of customer collaborative product innovation and innovation agent stimulus-response model [J]. *Studies in Science of Science*, 2009, 27(11):1729-1735.
- [ 8 ] 杨育, 邢青松, 刘爱军, 等. 客户协同产品创新中的组织模型及协调效率[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(4):719-728.
- YANG Yu, XING Qingsong, LIU Aijun, et al. Organization model and coordination efficiency in customer collaborative products innovation [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(4):719-728.
- [ 9 ] Watts D J, Strogatz S H. Collective dynamics of 'small-world' networks [J]. *Nature*, 1998, 393(6684):440-442.
- [ 10 ] Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks [J]. *Science*, 1999, 286(5439):509-512.
- [ 11 ] Yang X H, Chen G, Sun B, et al. Bus transport network model with ideal<sub>n</sub>-depth clique network topology[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2011, 390(23/24):4660-4672.
- [ 12 ] Wei D Q, Luo X S, Zhang B. Analysis of cascading failure in complex power networks under the load local preferential redistribution rule [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2012, 391(8):2771-2777.
- [ 13 ] Roger G, Alejandro L, Esteban M, et al. Predicting human preferences using the block structure of complex social networks[J]. *PLoS One*, 2012, 7(9):1-7.
- [ 14 ] 张峰, 杨育, 贾建国, 等. 企业协同生产网络的拓扑特性分析[J]. *重庆大学学报*, 2012, 35(6):21-27.
- ZHANG Feng, YANG Yu, JIA Jianguo, et al. Topological characteristics of industry collaborative production networks [J]. *Journal of Chongqing University*, 2012, 35(6):21-27.
- [ 15 ] 秦书生. 复杂性技术观[M]. 北京: 中国社会科学出版社, 2004.
- [ 16 ] 汪小帆, 李翔, 陈关荣. 复杂网络理论及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [ 17 ] 王林, 戴冠中. 复杂网络的度分布研究[J]. *西北工业大学学报*, 2006, 24(4):405-409.
- WANG Lin, DAI Guanzhong. On degree distribution of complex network [J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2006, 24(4):405-409.
- [ 18 ] Sporns O, Honey C J, Kötter R. Identification and classification of hubs in brain networks[J]. *PLoS One*, 2007, 2(10):e1049.
- [ 19 ] Kühnert C, Helbing D, West G B. Scaling laws in urban supply networks [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2006, 363(1):96-103.