

基于拓扑势的航空复杂产品生产网络模块化

肖灵机 徐思良* 汪明月

南昌航空大学 经济管理学院, 江西 南昌 330063

摘 要: 复杂网络模块化是研究复杂网络拓扑结构及其行为的一个重要方法。为了研究我国航空复杂产品生产网络的现状, 将拓扑势理论和熵权法相结合应用于C919生产网络的模块化中, 并分析了我国航空复杂产品生产企业的现状与不足, 为我国航空企业的发展提供了一点建议。

关键词: 航空复杂产品; 生产网络; 拓扑势; 熵权法; 模块化

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1007-5453(2016)01-0071-04

航空复杂产品的生产具有单位价值高、规模大、结构复杂、零部件数量多、生产周期长、涉及行业与企业多、质量控制严格等特点。对于复杂产品的生产来说, 模块化的外包生产是必然的。随着全球价值链的分工和转移, 复杂产品的模块化外包生产可以为核心企业降低成本、压缩时间, 从而提高竞争力。航空复杂产品的制造具有高复杂性, 航空复杂产品生产网络的模块化研究对此类产品的研发以及生产过程组织体系具有重要的意义。

1 航空复杂产品生产网络性质分析

1.1 复杂网络简介

一般认为, 由大量节点和节点之间的边构成的具备一定功能的复杂系统就称为复杂网络。其中, 节点表示研究的对象, 边表示节点对象之间的相互作用、相互联系^[1]。1998年Duncan J. Watts和他的导师Steve Strogatz教授在《Nature》上提出了复杂网络的小世界性质。1999年, 美国圣母大学物理学教授巴拉巴斯在《Science》上发表一篇题为“随机网络中标度的涌现”的文章, 提出了无标度网络的概念, 即网络中节点的度分布具有幂律分布形式。这两个发现极大地推动了复杂网络的发展。虽然复杂网络的研究正在快速发展, 但是却很少有学者将复杂网络理论应用于航空复杂产品的生产网络的研究中。

1.2 航空复杂产品生产网络分析

航空复杂产品生产企业分为系统集成商、模块供应商、零

部件供应商三个层次, 位于层次最顶端的系统集成商是模块化网络的核心企业, 也是模块化网络的主体。模块供应商一般分为专用供应商和通用供应商。模块供应商往往凭借自己的专用性资产、特殊知识、特殊技能等形成独特优势, 提供标准化的零部件、元器件等多层次的子模块。模块供应商通常表现为企业外部的专用、通用模块供应商, 有时候是企业内部的某个部门或子公司, 或者是小的模块构件供应商, 甚至是大的模块集成供应商。零部件供应商位于层次的最底端, 为系统集成商和模块供应商提供标准化的零部件和专门定制的零部件。

在航空复杂产品生产网络中, 将航空复杂产品零部件生产企业抽象为节点, 零部件供应关系和零部件相关性抽象为边。节点质量表示企业对其他企业的吸引力和该企业在网络中的重要程度。为了避免计算单一指标带来的片面性, 可以将节点企业的年营业收入(O)和接近度指标(CL)结合之后映射为节点质量。节点的接近度 CL_i 反映了网络中节点到其他节点的难易程度, 它更多的是反映一个节点对其他节点的间接影响力。计算公式如下:

$$CL_i = \frac{1}{\sum_{j=1}^n d(i, j)} \quad (1)$$

式中: n 表示网络中的节点数, $d(i, j)$ 表示是节点 i 到节点 j 的最短距离。由上式的定义可以看出, 节点 i 所在的层次越高, 该节点的接近度指标 CL_i 越小。所以接近度指标能反映节点在网络中重要程度。而节点企业的年营业收入是企业在一定时期内经济活动有效成果的综合反映。它代表了企业的生产能力和竞争力。

收稿日期: 2015-11-23; 录用日期: 2015-12-23

基金项目: 航空科学基金(2013ZG56033)

*通讯作者. Tel.: 13576033073 E-mail: 1217344345@qq.com

引用格式: XIAO Lingji, XU Siliang, WANG Mingyue. Modularization of aeronautical product manufacturing networks based on topological potential [J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(01): 71-74. 肖灵机, 徐思良, 汪明月. 基于拓扑势的航空复杂产品生产网络模块化 [J]. 航空科学技术, 2016, 27(01): 71-74.

2 拓扑势理论简介

受物理学中数据场理论启发而提出的拓扑势模型,是将复杂网络中的节点都视为具有质量的物质粒子且节点之间存在相互作用^[2]。每个节点的周围都有一个作用场,任何位于作用场中的节点都将受到场中其他节点的作用。根据对真实网络的分析可知随着网络距离增长,节点的作用力会急剧下降。所以短程场作用能够更好的揭示节点的聚类特性,采用数学性质良好的高斯函数来定义节点的作用场,并称为拓扑势场。节点的拓扑势反映了网络拓扑中节点受其他节点的共同作用所具有的势值^[3]。

在网络 $G=(V, E)$ 中, $V=\{v_1, \dots, v_n\}$ 为网络的节点集合, $E \subseteq V \times V$ 为网络的边集合, $|E|=m$ 。则节点 $v_i \in V$ 的拓扑势为:

$$\varphi(v_i) = \sum_{j=1}^n (m_j \cdot e^{-\frac{d_{ij}^2}{\sigma^2}}) \quad (2)$$

式中: $m_i \geq 0$ 是节点 $v_i \in V$ 的质量,用来描述节点的固有属性,

且满足归一化条件, $\sum_{i=1}^n m_i = 1$; d_{ij} 表示节点 v_i 到 v_j 的网络拓扑距离,一般是用最短路径长度来衡量;影响因子 $\sigma \in (0, +\infty)$ 用于控制节点影响范围的大小,即节点间的相互作用力程的长短。

凌文燕等^[4]认为,在给定 σ 值的情况下,单个节点的影响范围近似为 $l = \lfloor 3\sigma/\sqrt{2} \rfloor$ 跳的局部区域。改进的节点拓扑势

为: $\varphi(v_i) = \sum_{j=1}^{N_i} m_j \cdot e^{-\frac{d_{ij}^2}{\sigma^2}}$, N_i 是节点 v_i 的跳邻居节点集合。段松

青等^[5]为了解决有向加权网络中的节点角色分析问题,定义了入度拓扑势和出度拓扑势的概念,将无向网络的拓扑势概念延伸到有向加权网络中。基于所提出的二维有向拓扑势,提出了一种根据节点角色的变化,研究动态网络演化过程的分析算法。在对可重构网络虚拟资源分配问题的分析中,王子厚等^[6]基于拓扑势理论提出的虚拟网映射算法取得了很好的效果,在成功率和算法效率上相比于传统算法更有优势。针对如何发现能准确反映用户需求的有用评论的问题,姜巍^[7]将拓扑势方法应用于评论有用性的分析中,提出了基于拓扑势的评论有用性评价模型TPBM。将用户的主观评论与网络拓扑结构的客观影响融合,通过拓扑势理论对节点的重要性进行分析,对发现反映用户需求的高有用性评论具有较高的准确率和覆盖率。

3 基于拓扑势的航空复杂产品生产网络聚类算法

3.1 算法步骤

将航空复杂产品生产网络映射为无向图 $G=(V, E)$, $V=\{v_1, \dots, v_n\}$ 为网络的节点集合, $E \subseteq V \times V$ 为网络的边集合, $|E|=m$ 。

(1) 根据节点的零部件供应关系和零部件相关性确定航空复杂产品生产网络的邻接矩阵 $A=(a_{ij})_{n \times n}$ 两个节点企业之间有供应关系或节点企业所生产零部件之间有相关性则用 $a_{ij}=1$ 表示,没有股权关系和零部件供应关系则为 $a_{ij}=0$ 。

(2) 确定各个节点企业的两个固有属性:节点企业的年营业收入(O)和接近度指标(CL)。由于不同的指标的重要程度不一样,两个指标在数量级上也是不同的,为了确定两个属性映射为节点质量时的重要程度,通过计算两个不同属性的熵权值,确定它们的权重,两个属性的加权和映射为节点的质量。节点质量为:

$$m_j = W_1 \cdot V_j + W_2 \cdot CL_j, \quad j=1, 2, \dots, n \quad (3)$$

在 $G=(V, E)$ 中,共有 n 个节点,可以得到 n 个节点关于 $m=2$ 个属性(年产值(O)和接近度指标(CL))的标准评价矩阵 R 如下:

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \end{bmatrix}$$

第一行代表的是 n 个节点市值,第二行代表的是 n 个节点的接近度值。第 i 个属性的熵定义为 $H_i = -k \sum_{j=1}^n f_{ij} \ln f_{ij}$, $i=1, 2$ 。

其中, $f_{ij} = r_{ij} / \sum_{j=1}^n r_{ij}$, $k = 1 / \ln n$,且有 $f_{ij} = 0$ 时, $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。在一个 (m, n) 评价矩阵中,第 i 个属性的熵权 $W_i = 1 - H_i / m - \sum_{i=1}^m H_i$ 。则得到节点 j 的质量 $m_j = W_1 \cdot V_j + W_2 \cdot CL_j$, $j=1, 2, \dots, n$ 。

(3) 在给定的最优 σ 值下,求出每个节点的拓扑势值,进而求出势熵,得到 $H-\sigma$ 曲线。找出最小势熵值 $H_{\min}$ 所对应的最优 σ 值。

给定网络 $G=(V, E)$ 及其对应的拓扑势场,对于给定的 σ 值,节点 v_i 的拓扑势值为:

$$\varphi(v_i) = \sum_{j=1}^n ((W_1 \cdot V_j + W_2 \cdot CL_j) \times e^{-\frac{d_{ij}^2}{\sigma^2}}), \quad i, j=1, 2, \dots, n \quad (4)$$

可引入势熵来衡量拓扑势场的不确定性,拓扑势场的势熵可定义为: $H = -\sum_{i=1}^n \frac{\phi(v_i)}{Z} \log(\frac{\phi(v_i)}{Z})$, $Z = \sum_{i=1}^n \phi(v_i)$ 。根据势熵的定义可知,当 $\sigma=0$ 时, $\varphi(v_i \rightarrow v_j) \rightarrow 0$,节点间没有相互作用,势熵趋于 $H_{\max} = \log(N)$;当 $\sigma \rightarrow \infty$ 时, $\varphi(v_i \rightarrow v_j) \rightarrow m_i$,势熵趋于 $H_{\max} = \log(N)$ 。由此可知,随着 σ 的增大,势熵先减小后增大。节点的拓扑势值都相等时,势熵最大,不确定性最大;节点的拓扑势值分布最不均匀时,势熵最小,不确定性最小,此时的为最佳影响因子。最后通过Matlab迭代计算,找出最小势熵值 $H_{\min}$ 所对应的最优 σ 值。

(4) 在给定的最优 σ 值下,计算所有节点的拓扑势。通过Matlab计算找出节点拓扑势值的局部极大值,确定中心节点集。

(5) 根据中心节点集合和节点的拓扑势值将所有被唯一中心节点吸引的节点加入到相应社团内部。根据Raddichi

等人定义的强社团结构所出的效益函数 Q 来划分被多个中心节点吸引的节点。

在对应 σ 下的拓扑势场中,已知一个局部极大势值节点或一个局部极大势值节点集合 v^* ,若存在一个节点集合 $\{v_1, v_2, \dots, v^*\}$,其中 $\varphi(v_i) > \varphi(v_{i-1})$,则称 v_i 被 v^* 吸引,节点集合 $\{v_1, v_2, \dots, v^*\}$ 称为 v^* 的一条吸引链。在求出最佳影响因子 σ 后,求出此 σ 下所有节点的拓扑势值。若节点被唯一的一个中心节点吸引,则该节点划分到 v^* 所在的社团中。同时位于多个中心节点吸引链上的节点称为边界节点,根据Raddichi等人定义的强社团结构所出的效益函数 $Q_{s=1, \dots, t}(v_i) = \sum_{v_j \in C_s} a_{ij} - \sum_{v_k \in C_s} a_{ik}$ 来划分边界节点。一个节点对某个社团的效益值即该节点与社团内部节点的连边数减去该节点与社团外所有节点的连边数。

3.2 算例分析

根据C919部件结构和功能上的相关性得到了C919部件结构关系图(见图1)和C919部件关系邻接矩阵。通过熵权法将C919部件结构网络的接近度指标 CL 和C919部件供应商的年营业收入加权求得节点质量公式为 $m_j = 0.9702 \cdot V_j + 0.9709 \cdot CL_j$ 。在此基础上得到拓扑势熵 H 和影响因子 σ 的关系曲线,如图2

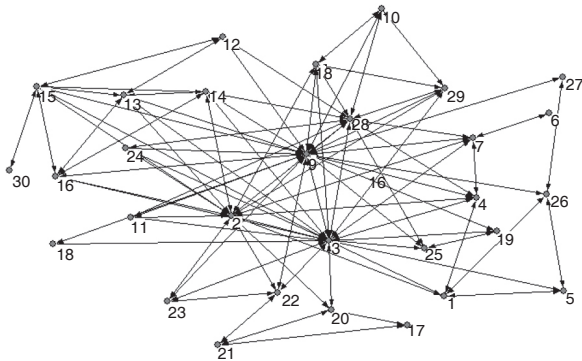


图1 C919部件结构关系图

Fig.1 The structure relationship of C919 parts

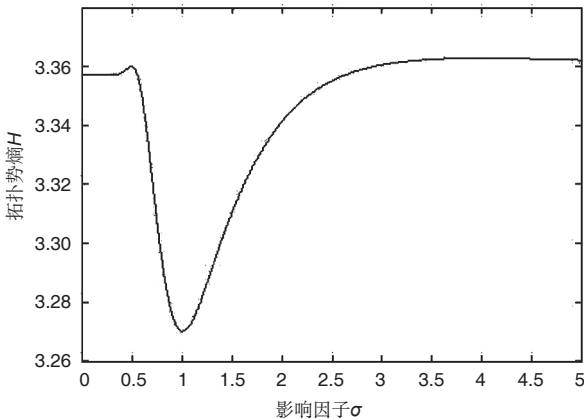


图2 拓扑势熵 H 与影响因子 σ 关系曲线

Fig.2 Relationship curve between topological potential entropy and influence factors

所示。进而求得最小势熵值 $H_{\min} = 3.2702$,所对应的最优 σ 值为1.0020。在最优 σ 值下求出所有节点的拓扑势 φ ,通过效益函数 Q 来划分边界节点。通过Matlab计算得到航空复杂产品生产网络社团划分结果,如表1所示。

表1 航空复杂产品生产网络社团划分结果
Table 1 Results of modularity in aeronautical product manufacturing networks

社团编号	社团中心节点	社团节点集合
1	1	1
2	2	2
3	3	3
4	9	9
5	13	13
6	12	12,22
7	15	15
8	20	20
		4,5,6,7,8,10,11,12,14,
9	22	16,18,19,21,22,23,24,
		25,27,29,30
10	26	26,17
11	28	28

由表1可以看出:(1)虽然网络划分成的社团较多,但是社团1、2、3、4、5、7、8、11中都只有一个节点,而这些节点模块大多独立性高,技术复杂。在这些节点模块的生产中,只有节点1(机头)、节点15(扰流板)、节点20(垂尾)是由中国的企业生产的,而节点2(飞控系统)、节点3(航电系统)、节点9(电源系统)、节点13(防冰系统)、节点28(液压系统)都是由国外供应商生产,而这些模块部件都是飞机生产中技术复杂的部分。由此说明我国的整体技术水平和国际领先水平还有较大差距。在航空复杂产品国际转包生产链中,只能承接一些位于生产链中下端的零部件模块生产。(2)社团9含有大量的节点,其中有部分零部件的生产是由中国的企业承担的。为了模块间接口的统一,同时也为了学习国外优秀企业先进的技术和管理经验,中国商飞作为C919的集成商可以在社团9中建立类似空中客车卓越中心(Center of Excellence, COE)的专业化交流的平台和中心,对相关知识和资源进行整合,对模块接口进行统一设计和协调。

4 结论

本文将拓扑势理论和熵权法结合,将节点质量映射为企业的年营业收入(O)和接近度指标(CL),并应用于C9119生产网络的模块化中。利用Matlab计算得到C919生产网络模块化的划分结果,分析了我国与国外航空零部件供应企业的差距,并提出了一些建议。结果表明我国航空制造企业在国

际转包中仍处于供应链的末端,所承接的模块生产技术含量不高,而C919的生产正是我国航空制造企业与国际航空企业加强交流合作的一个契机,这对我国航空复杂产品制造技术的发展有一定的推动作用。

AST

参考文献

- [1] 张嗣瀛. 复杂网络的演化过程, $n(n-1)$ 律, 自聚律[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2005, 2(3): 84-90.
ZHANG Siying. The evolving processes of complex systems, rule of $n(n-1)$, self-clustering [J]. Complex Systems and Complexity Science, 2005, 2(3): 84-90. (in Chinese)
- [2] LI D. Artificial intelligence with uncertainty[M]. New York: CRC Press, 2007.
- [3] 肖俐平, 孟晖, 李德毅. 基于拓扑势的网络节点重要性排序及评价方法[J]. 武汉大学学报, 2008, 33(4): 379-383.
XIAO Lipig, MENG Hui, LI Deyi. Approach to node ranking in a network based on topology potential [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008, 33(4): 379-383. (in Chinese)
- [4] 淦文燕, 赫南, 李德毅, 等. 一种基于拓扑势的网络社区发现方法[J]. 软件学报, 2009, 20(8): 2241-2254.
GAN Wenyan, HE Nan, LI Deyi, et al. Community discovery method in networks based on topological potential [J]. Institute of Software, 2009, 20(8): 2241-2254. (in Chinese)
- [5] 段松青, 于兴隆, 吴斌, 等. 基于有向拓扑势的用户角色分析算法[J]. 通信学报, 2014, 35(12): 124-135.
DUAN Songqing, YU Xinglong, WU Bin, et al. User role analysis method based on directed topological potential [J]. Journal on Communications, 2014, 35(12): 124-135. (in Chinese)
- [6] 王子厚, 韩言妮, 林涛, 等. 可重构网络中基于中心度与拓扑势排序的资源分配算法[J]. 通信学报, 2012, 33(8): 10-20.
WANG Zihou, HAN Yanni, LIN Tao, et al. Resource allocation algorithms in the reconfigurable network based on network centrality and topology potential[J]. Journal on Communications, 2012, 33(8): 10-20. (in Chinese)
- [7] 姜巍, 张莉, 戴翼, 等. 面向用户需求获取的在线评论有用性分析[J]. 计算机学报, 2013, 36(1): 119-131.
JIANG Wei, ZHANG Li, DAI Yi, et al. Analyzing helpfulness of online reviews for user requirements elicitation [J]. Chinese Journal of Computers, 2013, 36(1): 119-131. (in Chinese)

作者简介

肖灵机(1963—) 男, 硕士, 教授。主要研究方向: 企业管理、技术创新管理。
徐思良(1991—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 复杂网络。
Tel: 13576033073 E-mail: 1217344345@qq.com
汪明月(1988—) 男, 硕士研究生。主要研究方向: 企业管理和技术创新。

Modularization of Aeronautical Product Manufacturing Networks Based on Topological Potential

XIAO Lingji, XU Siliang*, WANG Mingyue

College of Economics and Management, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China

Abstract: Modularization of complex networks is an important way to study the complex networks' topology structure and their behavior. To study the current situation of Chinese aeronautical product manufacturing networks, the topology potential theory was applied to the modularization of C919 production networks combined with entropy-right. Then, analyzed the current situation and deficiency of Chinese aeronautical product manufacturing enterprises, and provided some suggestions to Chinese aeronautical product manufacturing enterprises in order to enable them to develop better.

Key Words: aeronautical complex product; production network; topology potential; entropy-right method; modularization

Received: 2015-11-23; Accepted: 2015-12-23

Foundation item: Aeronautical Science Foundation of China(2013ZG56033)

*Corresponding author. Tel.: 13576033073 E-mail: 1217344345@qq.com