

文章编号: 1674-8190(2023)06-167-11

# 基于复杂网络的航空制造供应链关键节点识别研究

黄辉, 李瑞琪

(西北工业大学 管理学院, 西安 710072)

**摘要:** 随着不稳定因素的增加以及航空制造供应链的参与主体增多, 航空制造供应链的管理所面临的风险也随之增大。因此针对航空制造供应链网络的风险管理, 以复杂网络为工具研究供应链网络中的关键节点识别问题, 从而帮助航空供应链提升抗风险能力。通过分析我国航空制造供应链网络现状和特点, 提出供应链形成机制并划分供应链层级, 对航空制造供应链进行构建及指标界定, 对度中心性、介数中心性、接近中心性三种经典中心性算法以及传统K-Shell分解算法进行加权改进; 结合熵值-TOPSIS法提出一种针对加权网络的供应链关键节点识别算法——WKC算法, 通过构造网络来进行算例分析, 验证该种算法的有效性。结果表明: 本文提出的WKC算法原理科学、计算复杂度较低, 为航空制造等高端装备制造业供应链的风险管理提供了一定的参考。

**关键词:** 航空制造供应链; 复杂网络; 关键节点识别; 风险管理; 供应链管理

**中图分类号:** V267; F274

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16615/j.cnki.1674-8190.2023.06.19

## Research on key nodes identification of aviation manufacturing supply chain based on complex network

HUANG Hui, LI Ruiqi

(School of Management, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** With the increasing instability and the participation of more participants in the aviation manufacturing supply chain, the risks faced by the management of the aviation manufacturing supply chain is also increased. For the risk management in the aviation manufacturing supply chain network, the complex network is taken as a tool to study the identification of key nodes in the supply chain network to help the aviation supply chain improve its risk resistance ability. By analyzing the current situation and characteristics of China's aviation manufacturing supply chain network, the formation mechanism of the supply chain and dividing the supply chain hierarchy are proposed to construct the aviation manufacturing supply chain complex network and define the indicators. Three classical centrality algorithms, namely degree centrality, betweenness centrality and closeness centrality, and the traditional K-Shell method are weighted and improved. And in combination with the entropy-TOPSIS method, a WKC algorithm for identifying the key nodes of the supply chain for the weighted network is proposed. The feasibility and validity of this algorithm are verified by constructing a network to analyze a numerical example. The results show that the proposed WKC algorithm has scientific principles and low computational complexity, and provides a certain reference for risk management in the supply chain of high-end equipment manufacturing industries such as aviation manufacturing.

**Key words:** aviation manufacturing supply chain; complex network; key nodes identification; risk management; supply chain management

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-07-07

基金项目: 陕西省社会科学基金(2021R002); 陕西省软科学项目(2023-CX-RKX-132)

通信作者: 李瑞琪, 740832446@qq.com

引用格式: 黄辉, 李瑞琪. 基于复杂网络的航空制造供应链关键节点识别研究[J]. 航空工程进展, 2023, 14(6): 167-177.

HUANG Hui, LI Ruiqi. Research on key nodes identification of aviation manufacturing supply chain based on complex network[J].

Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2023, 14(6): 167-177. (in Chinese)

## 0 引言

随着我国经济结构的转型升级,以航空产业为代表的高端装备产业成为带动我国经济发展的重要引擎之一。当前,对航空产业进行研究的“切入点”众多,除了对航空飞行器装备及其性能的研究外,对航空产业供应链的研究也是较为热门的领域之一,例如张红旗<sup>[1]</sup>聚焦于航空研制企业这一对象,以项目利益为核心研究了航空研制企业绿色供应链等相关内容。随着航空产业的产品和技术日趋成熟,意味着供应链参与的主体、涉及的环节随之增多,从而使得供应链风险也随之增加。例如 C919 首飞推迟其中的原因之一正是由于节点供应商企业无法按时交付产品导致项目节点无法按时完成<sup>[2]</sup>。航空制造业供应链之复杂、供应链管理难度之高前所未有。

面对研究对象的日趋复杂,使得网络及其相关工具如贝叶斯网络、复杂网络等逐渐成为研究复杂系统的理想工具。如钱宇<sup>[3]</sup>等以贝叶斯网络为工具构建了运输飞机起飞时的超轮速风险指标体系,对飞机运行时的风险进行评估和管理。对于无标度网络来说,仅 5% 的关键节点发生故障就可以使整个网络陷入瘫痪<sup>[4]</sup>,关键节点识别的方法是通过识别网络中的关键节点并采取相应的节点保护措施高效地进行风险的事前防范,从源头上降低风险发生的概率,从而提高整个网络的鲁棒性和抗毁性<sup>[5]</sup>。

当前对复杂网络关键节点识别算法的研究大致可以归纳为两方面,即对单一算法的改进优化和多算法融合及应用优化。对单一算法的改进优化多集中于对经典算法进行研究,如针对复杂网络节点较为经典的统计特征“中心性”,M. Barthélemy<sup>[6]</sup>通过研究无标度网络中节点之间的最短路径,提出介数中心性在关键节点识别中的重要性;邓晓懿等<sup>[7]</sup>以真实网络中节点所处社区的结构特征为依据提出了一种基于网络拓扑结构的可达中心性算法;M. Kitsak 等<sup>[8]</sup>提出的 K-Shell 分解算法可以准确地对网络中影响力最大的节点进行识别;Wei B 等<sup>[9]</sup>、Zeng An 等<sup>[10]</sup>、J. Bae 等<sup>[11]</sup>针对基础算法的不足之处分别进行了改进;Lyu L Y 等<sup>[12]</sup>为了解决 Google 提出的最早用来对网页进行重要性排序的 PageRank 算法中的节点悬挂问题,提出了更具适用性的 LeaderRank 算法。

日益复杂的现实场景、日渐丰富的研究方法催生了多算法融合及应用优化,一方面更注重对现实情况的需求进行满足,如牛军锋等<sup>[13]</sup>针对民用航空机场组成的航空网络提出了一种基于核极限学习机的关键节点识别方法来对关键机场节点进行识别;另一方面为避免单一算法带来的结果片面性,研究者选择将不同的经典算法进行融合,结合熵权法、层次分析法 (Analytic Hierarchy Process, 简称 AHP) 或者优劣解距离 (Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution, 简称 TOPSIS) 法对各种算法的指标进行合理的权重分配,从而提出更为科学的关键节点识别算法,例如 I. Mesgari 等<sup>[14]</sup>利用 TOPSIS 对多种单一的节点重要性测度指标进行融合从而对节点进行关键性排序。

当前针对航空制造供应链的关键节点研究较少且方法单一,为了提出对于航空制造供应链更具适用性和科学性的方法,本文将航空制造业供应链抽象为复杂网络,用复杂网络的统计特征对我国航空制造业的供应链网络进行刻画,并在此基础上引入节点中心性算法等关键节点识别算法,通过对算法进行加权改进,结合熵值-TOPSIS 法提出适用于航空制造加权网络的 WKC (Weighted K-Shell and Centrality) 算法,并通过构造网络来对算法的有效性进行验证,以期为我国航空供应链的风险防范提供一种新的思路。

## 1 基于复杂网络的航空制造供应链网络构建

对于航空制造供应链来说,运用复杂网络可以将其网络的复杂特性进行最大程度的还原,进而研究其网络的风险管理。对航空制造这类复杂产品的供应链可以采取层级划分、节点重要性指标界定等步骤进行逐步的复杂网络构建。

### 1.1 网络的抽象与构建

由于商用飞机是典型的复杂产品,且目前世界上的航空制造主供应商主要采取“主供模式”来进行供应链管理,因此一般可根据网络中每个节点企业供应的产品类型对现实中的航空制造供应链网络进行层级结构的划分,厘清层与层之间的关系可以更准确地进行该网络的刻画。

本文综合商用飞机制造产业的实际情况,将航空制造供应链划分为四个层级<sup>[15-17]</sup>。第一层级为主制造商,主要负责飞机的设计、特定机体部件的制造、总装以及后续适航证的取得和市场营销等方面,在商用飞机的制造过程中负责统筹协调、管理集成的重要任务。第二层级为核心部件供应商,包括发动机制造商、机载设备制造商、机体部件制造商,负责为主制造商提供各种关键机载设备和部件以及相应的服务,也叫做主制造商的一级供应商或子系统供应商。在这类供应商中,提供发动机的制造商数量较少,提供机体部件的制造商数量较多,而机载设备供应商数量最多。第三层级为零部件供应商,包括直接向第二层级的制造商供应零部件的制造商以及部分直接向第一层级的主制造商供应零部件的制造商,主要负责

向核心部件制造商和主制造商提供制造关键部件和设备所需的各种零部件、设备以及相关的服务。第四层级为原材料及标准件供应商,主要服务于前三层级的制造商,为其生产提供如钛合金、铝合金等原材料以及标准件,这一层级的企业具有种类丰富、数量多、位置分散的特征。

航空制造供应链网络抽象过程如图1所示,在划分层级的基础上将航空制造供应链网络四个层级的供应商以主制造商为中心重新排列,得到如图1(b)所示的同心圆,再将每一层级中的具体企业数量以节点的形式表示,最终得到如图1(c)所示的复杂网络图。复杂网络图不仅可以直观地展示每一层级的企业数量,还可以显示企业之间的连接关系,为研究供应商节点的风险和整个供应链网络的风险防范提供了形象化的工具。

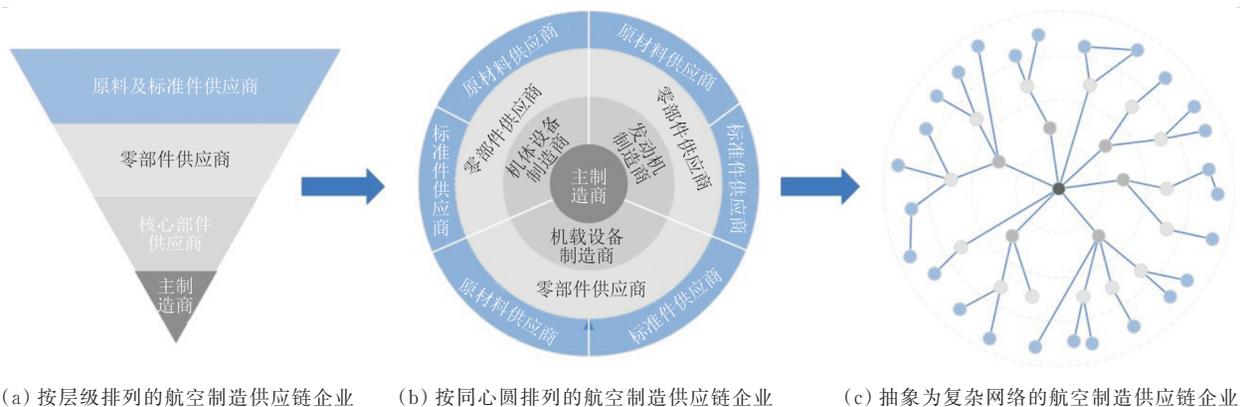


图1 航空制造供应链网络抽象过程

Fig. 1 Abstract process of aviation manufacturing supply chain network

## 1.2 复杂供应链网络节点重要性的指标界定

将航空制造供应链网络抽象为对应的复杂网络,供应链中的企业对应复杂网络中的节点,根据复杂网络统计性质和计算方法,结合航空制造供应链的形成机制,对航空制造供应链复杂网络中的指标进行如下界定:

1) 商业驱动形成机制与度中心性。对于商用飞机制造供应链来说,单个企业完成一整架飞机的设计及制造是极不具有经济性的,在地理空间上的邻近关系不仅可以使企业之间形成良好的分工,并且能使不同分工的衔接成本大幅度降低,从而提高生产效率,表现在实际中即遍布全国各地的航空产业园区。在航空制造供应链复杂网络中,商业驱动是供应链形成的机制之一,中心企业

为了供应链整体的经济性和最终产品在商业上的成功交付,会与若干企业进行交易,抽象到复杂网络中则表现为特定企业会与多个节点相连,而连接的节点越多,在一定程度上说明节点越为重要。因此在航空制造供应链复杂网络中用度中心性来表示节点企业在商业驱动中扮演的作用。

2) 技术驱动形成机制与介数中心性。纵观全球航空产业供应链,纵使成熟如波音和空客,也无法做到供应链完全“本地化”。我国商用飞机供应链中存在着数量占比不小的外国供应商企业,其中包括大量发动机、机载设备和系统等核心部件的供应企业。该类企业在我国商用飞机的供应链中可以类比为“技术中转站”,主要负责从主制造商处承接转包任务,再用自身技术调动下级供应商企业来完成核心部件的供应,以技术为桥梁起

到承上启下的作用,因此将技术驱动这一供应链形成机制抽象到复杂网络中,即上下游的节点需要通过位置处于中间层级的企业来进行相互的连接,因此用介数中心性来描述节点在技术驱动中扮演的作用。

3) 安全驱动形成机制与接近中心性。对于制造业的一般企业来说,当生产常规产品时,把握市场需求和应对市场不稳定都处于企业能力范围之内;而随着产品复杂程度上升,企业倾向于寻找其他企业结盟,以此来减小独自承担风险的可能性<sup>[18]</sup>。航空制造业的产品是典型的技术密集、知识密集型复杂产品,因此商用飞机制造供应链中部分企业的加入体现了该供应链的另一形成机制——安全驱动。安全驱动可以简要概括为航空制造的相关企业为了规避风险而选择加入供应链进行风险分担,而接近中心性可以表述为当节点在供应链中距离大部分节点的距离越近时,该节点受制于其他风险节点的可能性就越小。两个概念分别描述了企业和节点在风险规避时的情形,因此将其作为对应。

## 2 基于节点中心性的关键节点识别算法

### 2.1 关键节点识别基本算法

#### 1) 加权重中心性

度中心性是指与节点“度”这个概念紧密相关的节点中心性,指该节点在其局部网络中的中心程度。传统的度中心性计算公式如式(1)所示。

$$C_D^T(i) = k_i / \sum_{i=1}^N k_i \quad (1)$$

式中: $k_i$ 为节点*i*的度值; $N$ 为网络中的所有节点。该公式表示节点*i*的度占所有节点累计度的比例。

在无向无权复杂网络中,节点的度值是与节点相连的其他节点个数的和,以往对无向无权复杂网络的关键节点进行识别时最常用的也是这一经典中心性指标;而在加权复杂网络中,计算节点度值的传统做法为将与节点相连的所有连边的权值进行相加,在计算上具有低复杂度,但有较为明显的缺陷:该做法仅考虑了与节点相连的边的总权值,而未考虑边的数量对节点度值的影响,从而未能准确刻画包含该节点网络的真正拓扑结构。T. Opsahl等<sup>[19]</sup>认为在加权复杂网络中,节点的“度”和节点的“强度”应该进行区分,节点的“度”

为传统的无权网络中的度,即与节点相连的其他节点的个数之和;而节点的“强度”为考虑边权重的“点权重”,而点权重才是计算加权网络节点度中心性所应用到的“度”指标。传统的加权网络中节点强度如式(2)所示。

$$s_i = \sum_{i,j \in N} \omega_{ij} \quad (2)$$

式中: $\omega_{ij}$ 为节点*i*及其邻居节点*j*之间的连边的权重。

传统的加权网络中的度中心性算法由于仅考虑连边权重总和,因此计算结果与 $s_i$ 相同。而T. Opsahl等<sup>[19]</sup>认为在计算加权网络中节点的度中心性时还应考虑连边数量,因此在其提出的算法中加入了可调节变量 $\alpha$ ,即综合考虑了与节点相连的边的总权重以及边的数量,如式(3)所示。

$$C_D^W(i) = k_i^{(1-\alpha)} \times s_i^\alpha / \sum_{i=1}^N k_i^{(1-\alpha)} \times s_i^\alpha \quad (3)$$

式中: $k_i$ 为与节点*i*相连的边的数量; $s_i$ 为与节点*i*相连的边的总权重。

调节变量 $\alpha$ 可以根据具体研究内容和对象进行设置,从而调节边的条数对节点重要性识别的影响。与节点*i*相连的边的总权重确定时,当 $0 < \alpha < 1$ 时,与节点*i*相连的边数越多,节点的加权重中心性越大;当 $1 \leq \alpha$ 时,与节点*i*相连的边数越少,节点的加权重中心性越小。由于本文研究重点在于整体算法的提出,而不是边的总权重和边的数量对于节点重要性的影响,因此本文将两者重要性设置为相等,在计算中将 $\alpha$ 值取为0.5。

#### 2) 加权介数中心性

介数中心性是指在网络中经过该节点的最短路径占总的最短路径的比例,因此在计算上需要对最短路径进行识别。在无权网络中,由于每条边的长度都看作1,最短路径只需要考虑两点之间包含节点或边最少的通路即可。传统的最短路径和介数中心性计算公式如式(4)~式(5)所示。

$$d^T(i, j) = \min(d_{ig} + \dots + d_{hj}) \quad (4)$$

$$C_B^T(i) = \sum_{j, k \in N} p_{jk}(i) / \sum_{j, k \in N} p_{jk} \quad (5)$$

式中: $d_{ig}$ 为节点*i*到其邻居节点*g*的路径长度; $d_{hj}$ 同理。

传统介数中心性计算公式中分子为经过节点*i*的节点*j*和节点*k*之间最短路径的条数;分母为网络中节点*j*和*k*之间的总最短路径的条数。

在加权网络中,传统做法是将计算公式中的每条边的长度“1”重新赋值为每条边的权重,接着再计算介数中心性。传统做法只适用于相异权网络,一些经典的计算最短路径的算法如Dijkstra算法都是基于“边权大小代表距离远近”的这类相异权网络提出的,而本文所研究的商用飞机制造业供应链网络属于相似权网络,即边权代表两企业间的供应关系的紧密程度,权重越大表示企业间实际“距离”越接近,这和传统的路径网络中“两节点间边权越大代表两节点距离越远”刚好成相反的关系,因此在计算相似权网络的最短路径时,采取将边权的倒数作为边长度的做法,定义加权网络最短路径计算公式如式(6)所示。

$$d^w(i, j) = \min \left( \frac{1}{\omega_{ig}} + \dots + \frac{1}{\omega_{hj}} \right) \quad (6)$$

在改进的计算最短路径的条件下进行加权介数中心性的计算,如式(7)所示。

$$C_B^w(i) = \sum_{j, k \in N} p_{jk}^w(i) / \sum_{j, k \in N} p_{jk}^w \quad (7)$$

### 3) 加权接近中心性

接近中心性通常由该节点到其他节点的最短距离和的倒数来衡量,是评判节点是否处于网络中心的关键因素。接近中心性在计算上和介数中心性一样,都与最短路径息息相关。传统的接近中心性和改进的加权接近中心性的计算公式分别如式(8)~式(9)所示。

$$C_C^T(i) = 1 / \sum_{i, j \in N} d^T(i, j) \quad (8)$$

$$C_C^w(i) = 1 / \sum_{i, j \in N} d^w(i, j) \quad (9)$$

### 4) 加权K-Shell分解算法

M. Kitsak等<sup>[8]</sup>最早提出将K-Shell分解算法应用于重要节点识别,该算法将关注点放在节点在网络中的位置这一属性上,指出最有影响力的节点应处于分解后的网络内层。K-Shell算法分解步骤如下:

(a) 找出网络中度值为1的节点,将“1”设定为这类节点的 $k$ 值,并将这类节点和其连边删除,得到新的网络;在新的网络中继续寻找度值为1的节点并将其 $k$ 值标记为1之后进行删除。进行该步骤直到网络中无法找到度值为1的节点。

(b) 找出网络中度值为2的节点,将“2”设定为这类节点的 $k$ 值,并将这类节点和其连边删除,得到新的网络;在新的网络中继续寻找度值为2的

节点并将其 $k$ 值标记为2之后进行删除。进行该步骤直到网络中无法找到度值为2的节点。

……

(i) 找出网络中度值为 $i$ 的节点,将“ $i$ ”设定为这类节点的 $k$ 值,并将这类节点和其连边删除,得到新的网络;在新的网络中继续寻找度值为 $i$ 的节点并将其 $k$ 值标记为 $i$ 之后进行删除。进行该步骤直到网络中无法找到度值为 $i$ 的节点;重复以上步骤直到网络分解完成。

经典的K-Shell分解算法的不足之处在于:大量的节点经过分解具有相同的 $k$ 值,并不能对网络中的节点进行有区别性的识别。为了解决这一问题,本文提出加权K-Shell分解算法。此处的“加权”和中心性算法的“加权”含义并不相同。在设计改进的加权中心性算法时,本文的做法是将网络中的实际边权融入中心性算法中,使得最终的中心性算法的结果是在考虑边权的基础上得出的;而在对网络进行K-Shell分解时,此处的“权重”来自于半局部中心性思想,即由原来K-Shell分解算法中对单一节点动态度值的考量转到对节点及其邻居的静态度值考量。由于K-Shell分解算法是对节点位置的重要性进行排序,因此本文依然沿用K-Shell分解网络的步骤来实施算法改进。

经典的K-Shell分解算法是以节点的度值为依据来对网络进行分解,本文考虑节点的“邻居的邻居”数量来重新对节点的“度值”进行赋值。首先,将任意一条边的权重重新定义为该条边所连接的节点的度值之和,具体表示为

$$\omega_{ij}^{ks} = k_i + k_j \quad (10)$$

于是,节点的强度即“加权 $k$ 度值”可以表示为

$$s_i^{ks} = \sum_{i, j \in N} \omega_{ij}^{ks} \quad (11)$$

然后用加权 $k$ 度值 $s_i^{ks}$ 代替经典的K-Shell分解算法中的节点度值为依据来对网络进行分解。加权K-Shell分解算法步骤如下:

(a) 按照式(10)和式(11)分别计算网络中所有节点的加权 $k$ 度值,找出网络中加权 $k$ 度值最小的点,将这类节点的加权 $k$ 值标记为1,删除这些节点及连边。

(b) 找出网络中加权 $k$ 值次最小的节点,将其加权 $k$ 值标记为2,删除这些节点及连边。

……

(i) 找出网络中加权 $k$ 值最大的节点,将其加

权  $k_s$  值标记为  $i$ 。至此,网络中所有节点都被赋予  $W_{k_s}$  值,网络分解完成。

以简单网络为例对加权 K-Shell 分解算法和经典 K-Shell 分解算法进行对比说明,如图 2 所示。

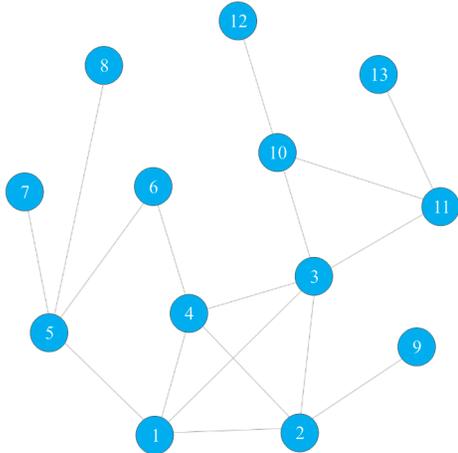


图 2 简单网络示意图

Fig. 2 Diagrammatic sketch of simple network

两种分解算法的具体数据如表 1~表 2 所示。

表 1 网络中的节点加权  $k_s$  度值

Table 1 Weighted  $k_s$  values of nodes in the network

节点编号	加权 $k_s$ 度值	节点编号	加权 $k_s$ 度值
1	33	8	5
2	30	9	5
3	43	10	18
4	31	11	18
5	16	12	4
6	12	13	4
7	5		

表 2 K-Shell 和加权 K-Shell 分解算法结果对比

Table 2 Comparison of K-Shell and weighted K-Shell decomposition algorithms

$k_s$ 值	节点编号(K-Shell)	$W_{k_s}$ 值	节点编号(加权 K-Shell)
1	7,8,9,12,13	1	12,13
2	5,6,10,11	2	7,8,9
3	1,2,3,4	3	6
		4	5
		5	10,11
		6	2
		7	4
		8	1
		9	3

从表 2 可以看出:与经典 K-Shell 分解算法相比,加权 K-Shell 分解算法将节点分为更多层次,从而使节点的差异更明显,相对于只能将节点在网络中的位置分为较少层次的 K-Shell 分解算法来说更加准确科学,有更精准的识别关键节点的能力。

## 2.2 WKC 算法

### 1) 算法思想

本文在传统中心性指标的基础上加入边权的影响,提出加权中心性指标;与此同时,选择加入改进的加权 K-Shell 分解算法,将其分解结果得出的  $W_{k_s}$  值作为指标,与三类加权中心性指标一起对网络关键节点进行识别,目的在于 K-Shell 分解算法可以更准确、更直观地从节点在网络中的位置分布这一特性出发来对节点的重要性进行描述,针对节点在网络中所处的位置层级将节点进行分类,结合节点的中心性属性,完成从节点的多属性、双维度来对节点的重要性进行较为全面的识别。

中心性是复杂网络中节点较为重要且较为经典的属性,在节点重要性识别上有较大的影响力,但单从节点中心性出发来衡量节点重要性则过于单一和不充分。本文考虑到节点的位置层级也是供应链风险传播中一个重要的影响因素,虽然中心性指标中或多或少都考虑到了节点的位置,但 K-Shell 分解算法是从更直观的位置层级维度来识别节点的位置,加入 K-Shell 分解算法可以使得本文算法从中心性、位置层级两个维度来全面地对节点进行识别。基于此,本文提出 WKC (Weighted K-Shell and Centrality) 算法,用熵值-TOPSIS 法来对  $W_{k_s}$  值、加权度中心性、加权介数中心性和加权接近中心性四个指标进行计算,从而得出每个节点的重要性评分。

### 2) 算法描述

首先,根据公式计算出网络中节点的加权度中心性、加权介数中心性、加权接近中心性和  $W_{k_s}$  值,将这四个指标构建矩阵如式(12)所示。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1j} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2j} & \cdots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & \cdots & a_{3j} & \cdots & a_{3n} \\ a_{41} & a_{42} & \cdots & a_{4j} & \cdots & a_{4n} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $n$ 为网络中的节点总数; $a_{1j}$ 为第 $j$ 个节点的加权重中心性; $a_{2j}$ 为第 $j$ 个节点的加权介数中心性; $a_{3j}$ 为第 $j$ 个节点的加权接近中心性; $a_{4j}$ 为第 $j$ 个节点的加权K-Shell值,同理可得到其他参数。

由于加权重中心性、加权介数中心性、加权接近中心性和加权K-Shell值都为效益型指标(即正向指标),因此按照公式(13)对其进行标准化处理,得到矩阵 $A'=(a'_{ij})_{4 \times n}$ 。

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij} - \min a_{ij}}{\max a_{ij} - \min a_{ij}} \quad (13)$$

式中: $\min a_{ij}$ 为每行数据的最小值; $\max a_{ij}$ 为每行数据的最大值。

其次,按照公式(14)对数据进行归一化处理,计算第 $j$ 个节点的指标在 $n$ 个节点中的比重,得到矩阵 $B'=(b'_{ij})_{4 \times n}$ 。

$$\begin{cases} \text{最优方案: } Z^+ = (Z_1^+, Z_2^+, Z_3^+, Z_4^+)^T = \{ \max Z_{ij} | j = 1, 2, \dots, n \} \\ \text{最劣方案: } Z^- = (Z_1^-, Z_2^-, Z_3^-, Z_4^-)^T = \{ \min Z_{ij} | j = 1, 2, \dots, n \} \end{cases} \quad (19)$$

计算每个节点的指标值到最优方案和最劣方案的距离。

$$\begin{cases} D_j^+ = \sqrt{\sum_i (Z_i^+ - z_{ij})^2} \\ D_j^- = \sqrt{\sum_i (Z_i^- - z_{ij})^2} \end{cases} \quad (20)$$

计算每个节点的相对接近度。

$$C_j = \frac{D_j^-}{D_j^+ + D_j^-} \quad (21)$$

算出的 $C_j$ 值介于0~1之间,将算出的每个节点的 $C_j$ 值按从大到小排序,得出相应的节点重要度排序结果。

### 3 算例分析

为了更清楚地阐释本文提出的供应链网络关键节点识别算法在航空制造供应链复杂网络中的应用,本文在考虑现实网络的基础上构造1个包含1个主制造商、3个核心部件供应商、6个零部件供应商、11个原材料及标准件供应商共21个节点的网络,以此为例来对本文提出的WKC算法进行进一步的演示说明。

#### 3.1 构建规则

1) 节点的设置。由于现实航空供应链第二层

$$b_{ij} = a'_{ij} / \sum_{j=1}^n a'_{ij} \quad (14)$$

然后,计算第 $i$ 个指标的信息熵 $e_i$ ,如公式(15)所示。

$$e_i = -\frac{1}{\ln n} \sum_{j=1}^n (b_{ij} \times \ln b_{ij}) \quad (i=1, 2, 3, \dots) \quad (15)$$

接着,计算各个指标的信息冗余值即差异系数 $g_i$ 与指标权重 $w_i$ 。

$$g_i = 1 - e_i \quad (16)$$

$$w_i = g_i / \sum_{i=1}^4 g_i \quad (17)$$

将熵值法算出来的指标 $i$ 的权重 $w_i$ 带入TOP-SIS法,构造加权规范化决策矩阵 $Z$ 。

$$Z = a'_{ij} \times w_i \quad (18)$$

确定正负理想解,即最优方案和最劣方案。

级主要由机体、发动机、机载设备系统三大部分组成,因此在此处将其简单地抽象为三个企业;除第一层级外,每一层级的数量大致按照前期资料统计数据所显示的1:2:3的比例分配;在现实网络中,中心的主供应商企业由于所连接的节点最多、涉及的供求关系最多,必然是最关键的节点,而在构建的小型网络中由于简化了大部分企业,因此不能很好地体现其重要性,于是在本节的关键节点识别中将其剔除,仅考虑剩下的节点。

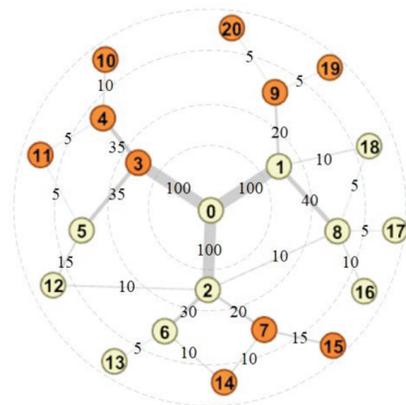
2) 边的形成。构造网络的过程中,将不同层级企业之间进行相互的连接,相邻的层级连线较多,同时也设计了隔层的连接来尽量还原真实网络的连接情况。

3) 权重的形成。在现实的供应链中,企业与企业之间存在复杂的交互关系,不仅是企业之间的资金流、信息流、物流等资源的流动,企业本身的地理位置、行业地位、产品质量、风险情况等各种要素都会对企业的关联和交互产生影响,而这些影响因素都可以通过一定的计算抽象为连边的权重。而本文研究的目标是从宏观的供应链角度来对国内航空制造供应链的风险节点进行判断,在构造的小型网络上进行WKC算法的模拟,因此在权重影响因素上仅选择两个影响供应商风险的

因素来简单模拟边权——交易量和国别。交易量是指对每两个有连边的企业间赋予一个数值模拟交易量,由于第二层级的三类供应商企业提供的产品在商用飞机的价值中占比大致相同,因此中心节点到第二层级的三个节点间的交易量赋值相同,其他层级的交易量逐级递减且随机;国别是指将供应商分为我国企业和外国企业,与国内供应商相连的边权重系数为 1,与国外供应商相连的边权重系数为 2。在现实网络中可以将企业进行更细致的划分,比如分为国内供应商、中外合资供应商、美国供应商、欧洲供应商等,并赋予不同的权重系数。

### 3.2 计算过程

根据 3.1 节的规则形成的网络示意图如图 3 所示。其中深色节点代表国外供应商,节点和边的信息已在图中给出。



(a) 构建的网络示意图

Node ID	Type	Node ID	Type
1	Local	11	Foreign
2	Local	12	Local
3	Foreign	13	Local
4	Foreign	14	Foreign
5	Local	15	Foreign
6	Local	16	Local
7	Foreign	17	Local
8	Local	18	Local
9	Foreign	19	Foreign
10	Foreign	20	Foreign

(b) 网络节点信息

图 3 航空制造供应链示例网络图及其节点信息

Fig. 3 Aviation manufacturing supply chain network diagram and node information

本文利用 Python3.8 对网络的中心性进行计算,得到该网络各节点的中心性指标,如表 3

所示。

表 3 网络各节点的中心性值

Table 3 Centrality values of nodes in the network

节点编号	加权重中心性	加权介数中心性	加权接近中心性
1	0.103	0.327	0.392
2	0.115	0.520	0.455
3	0.113	0.227	0.357
4	0.065	0.118	0.282
5	0.050	0.088	0.323
6	0.048	0.142	0.339
7	0.062	0.142	0.339
8	0.070	0.310	0.408
9	0.050	0.195	0.303
10	0.017	0.000	0.222
11	0.024	0.011	0.260
12	0.026	0.099	0.357
13	0.008	0	0.256
14	0.033	0.011	0.270
15	0.021	0	0.256
16	0.012	0	0.294
17	0.008	0	0.294
18	0.021	0	0.333
19	0.012	0	0.235
20	0.012	0	0.235

采用加权 K-Shell 分解法对图 3 的网络进行分解,得到的分解结果如表 4 所示。

表 4 加权 K-Shell 分解算法结果

Table 4 Results of weighted K-Shell decomposition algorithm

$W_{k_s}$ 值	节点编号	节点加权 $k_s$ 度值
1	10, 13, 15, 19, 20	4
2	16, 17	5
3	11, 14	10
4	12	11
5	18	12
6	4, 9	15
7	5, 6, 7	16
8	3	18
9	0	20
10	8	24
11	2	27
12	1	28

将各节点的加权重中心性、加权介数中心性、加权接近中心性、 $W_{ks}$ 值构建为矩阵,按照式(12)~式(21)依次进行处理和计算,最终得到各节点与最优解的贴适度及节点排名,如表5所示。

表5 节点重要性指标与重要度计算结果汇总  
Table 5 Summary of node importance indicators and importance calculation results

节点编号	$C_D^W(i)$	$C_D^W(i)$ 排序	$C_B^W(i)$	$C_B^W(i)$ 排序	$C_C^W(i)$	$C_C^W(i)$ 排序	$W_{ks}$ 值	$W_{ks}$ 排序	节点重要度	节点重要度排序
1	0.103	3	0.327	2	0.392	3	12	1	0.725 9	2
2	0.115	1	0.52	1	0.455	1	11	2	0.961 2	1
3	0.113	2	0.227	4	0.357	4	8	4	0.572 2	4
4	0.065	5	0.118	8	0.282	13	6	8	0.341 3	8
5	0.05	7	0.088	10	0.323	9	7	5	0.318 1	9
6	0.048	9	0.142	6	0.339	6	7	5	0.364 1	7
7	0.062	6	0.142	6	0.339	6	7	5	0.388 7	6
8	0.07	4	0.31	3	0.408	2	10	3	0.641 3	3
9	0.05	7	0.195	5	0.303	10	6	8	0.392 3	5
10	0.017	15	0	13	0.222	20	1	16	0.035 6	17
11	0.024	12	0.011	11	0.26	15	3	12	0.107 6	13
12	0.026	11	0.099	9	0.357	4	4	11	0.237 5	10
13	0.008	19	0	13	0.256	16	1	16	0.034 1	18
14	0.033	10	0.011	11	0.27	14	3	12	0.133 1	12
15	0.021	13	0	13	0.256	16	1	16	0.061 1	16
16	0.012	16	0	13	0.294	11	2	14	0.081 8	14
17	0.008	19	0	13	0.294	11	2	14	0.079 9	15
18	0.021	13	0	13	0.333	8	5	10	0.184 4	11
19	0.012	16	0	13	0.235	18	1	16	0.020 8	19
20	0.012	16	0	13	0.235	18	1	16	0.020 8	19

### 3.3 结果分析

用WKC算法对复杂网络进行分析可以得到节点重要性清楚的排名,从最终结果来看,在加权重中心性、加权介数中心性和加权接近中心性中排名一直最前的节点2、1、8、3,在最终的重要度排序中也处于前4位,这说明在中心性上重要的节点在最终的排序中也被证明重要,同时也符合该供应链的网络结构图中肉眼可见的结果,从这两方面也可以看出本文提出的算法的科学有效性,本文用熵值-Topsis法科学地将三种中心性和 $W_{ks}$ 值进行计算,得出最终的重要性结果,最终的结果能兼顾网络中节点的各种属性,同时也符合常规认知。在真实网络中,节点的数量远比本文构建的

网络庞大许多,节点的数量成千上万,在小型网络中肉眼可见的结果在大型网络中使用观察法会失效,而本文提出的算法计算复杂度小且方便高效,在大型复杂网络中将更实用。

从网络图来看,处于第二层级的节点1、2、3在最终的节点重要度排序中分别位于第2、1、4名,与其他节点相比,这三个节点连接的企业数量众多,并且处于外层节点与中心节点相连的重要中介位置上,因此在4个属性上的得分都排名靠前,并最终在重要度排序中靠前。在航空制造供应链网络中,位于第二层级的系统装备供应商、机身供应商、发动机供应商在网络中起到重要的“承上启下”的作用,主制造商通常将完整的核心部件转包给第二层级的供应商,这就意味着第二层级的供

应商不论是自己制造还是将其中一部分产品转包给更低一级的供应商,都需要和较多低层级的供应商有业务往来,最终将无数价值小的部件制造为关键核心部件并交付于主制造商,这样多连边、高权重的节点重要度也相应地排名靠前。

从计算过程数据来看,对于本文构造的网络来说,介数中心性这一指标所占比重最高,由熵权法的原理可知,对于该网络来说各节点的加权介数中心性这一指标的结果较为分散,包含的未知信息较多,因此导致该指标占比最高,这也是为什么节点 8 虽然位于第三层级但重要性超过节点 3 的主要原因,节点 3 虽然位于第二层级,但在最短路径上的表现略劣于与两个度为 1 的节点 16、17 直接相连的节点 8,因此在最终的重要性排序上也受到了影响。这一与常识相违背的结论也正体现了 WKC 算法的科学性,即用科学的数值经过计算来准确判断常识不能判断的情况,更加精准地识别网络中真正重要的节点。

在重要性排名中靠后的节点主要是位于网络最外层的节点,该类节点不仅处于网络的边缘位置,同时通过数值计算在各种中心性的排序上也排名靠后。在现实航空制造供应链网络中,位于网络最外层的供应商企业是原材料及标准件供应商,这类供应商不仅提供的产品相对于商用飞机整体价值来说占比低,而且由于整体数量众多,和供应链上的其他企业相比具有较大的可替代性,因此通过数值计算的重要性结果与对这类节点企业的常识判断的结果一致。

## 4 结 论

1) 本文基于节点重要性指标度中心性、介数中心性、接近中心性的识别算法,将分析出的供应链形成机制和复杂网络中的中心性指标进行对应,在此基础上提出关键节点算法,不仅使得本文提出的算法更有前后衔接性和科学合理性,而且证明了三种形成机制的合理性。

2) 本文提出的 WKC 算法能有效识别复杂网络中的关键节点,识别出的节点的各种复杂网络统计特征都强于其他节点,且该算法的原理合理且计算复杂度小,对于现实中的航空制造供应链网络或是其他高端装备制造业网络来说,本文提

出的关键节点识别算法在风险防范上具有一定的应用性和有效性,为我国制造业供应链网络风险管理打开了新的思路。

## 参考文献

- [1] 张红旗. 航空研制企业实施绿色供应链影响因素研究[J]. 航空工程进展, 2022, 13(6): 184-190.  
ZHANG Hongqi. Research on influencing factors of implementing green supply chain in aviation development enterprises[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(6): 184-190. (in Chinese)
- [2] 赵忆宁. “主供模式”与顶级供应商形成“命运共同体”[N]. 21世纪经济报道, 2015-11-02(016).  
ZHAO Yining. The "main manufacture-supplier patterns" and building the "life community" with top suppliers [N]. 21st Century Business Herald, 2015-11-02(016). (in Chinese)
- [3] 钱宇, 龙涛. 基于云贝叶斯网络的运输飞机超轮速风险评估[J]. 航空工程进展, 2022, 13(3): 171-178.  
QIAN Yu, LONG Tao. Risk assessment on transport aircraft exceeding tire speed rating based on cloud Bayesian network [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(3): 171-178. (in Chinese)
- [4] MARK G, JOSEPH Y, FANWEN M. A stochastic model for risk management in global supply chain networks [J]. European Journal of Operational Research, 2007(1): 164-173.
- [5] 单而芳, 蔡蕾, 曾晗, 等. 超网络中心性度量的  $\nu$ -Position 值方法[J]. 运筹与管理, 2020, 29(5): 135-142.  
SHAN Erfang, CAI Lei, ZENG Han, et al. The  $\nu$ -Position value measure on centrality of hypernetworks[J]. Operations Research and Management Science, 2020, 29(5): 135-142. (in Chinese)
- [6] BARTHÉLEMY M. Betweenness centrality in large complex networks[J]. The European Physical Journal B, 2004, 38(2): 163-168.
- [7] 邓晓懿, 杨阳, 金淳. 基于网络拓扑结构的重要节点发现算法[J]. 运筹与管理, 2019, 28(7): 91-99.  
DENG Xiaoyi, YANG Yang, JIN Chun. Identifying influential nodes based on network topology[J]. Operations Research and Management Science, 2019, 28(7): 91-99. (in Chinese)
- [8] KITSACK M, GALLOS L K, HAVLIN S, et al. Identification of influential spreaders in complex networks[J]. Nature Physics, 2010, 6: 888-894.
- [9] WEI B, LIU J, WEI D, et al. Weighted K-Shell decomposition for complex networks based on potential edge weights [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications,

- 2015, 420: 277-283.
- [10] ZENG An, ZHANG Chengjun. Ranking spreaders by decomposing complex networks[J]. *Physics Letters A*, 2012, 377: 1-14.
- [11] BAE J, KIM S. Identifying and ranking influential spreaders in complex networks by neighborhood coreness[J]. *Physica A: Statistical Mechanics & its Applications*, 2014, 395: 549-559.
- [12] LYU L Y, ZHANG Y C, CHI H Y, et al. Leaders in social networks, the delicious case[J]. *PLoS One*, 2011, 6(6): 1-9.
- [13] 牛军锋, 甘旭升, 孙静娟, 等. 航空网络关键节点辨识的核极限学习机算法研究[J]. *航空工程进展*, 2021, 12(1): 39-47.  
NIU Junfeng, GAN Xusheng, SUN Jingjuan, et al. Research on kernel extreme learning machine algorithm for key node identification in aviation network [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2021, 12(1): 39-47. (in Chinese)
- [14] MESGARI I, KERMANI M A M A, HANNEMAN R, et al. Identifying key nodes in social networks using multi-criteria decision-making tools[M]. Berlin: Springer International Publishing, 2015.
- [15] 张军, 李红启, 张禄. 全球大型商用飞机制造供应链企业调查与评价[J]. *北京交通大学学报(社会科学版)*, 2015, 14(4): 81-88.  
ZHANG Jun, LI Hongqi, ZHANG Lu. An investigation and evaluation on enterprises in large commercial aircraft manufacturing supply-chain [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University (Social Sciences Edition)*, 2015, 14(4): 81-88. (in Chinese)
- [16] 李红启, 陈莹. 全球大型商用飞机制造业供应链管理[J]. *供应链管理*, 2020, 1(1): 100-112.  
LI Hongqi, CHEN Yun. Large commercial aircraft manufacturing supply chain management [J]. *Supply Chain Management*, 2020, 1(1): 100-112. (in Chinese)
- [17] 王科, 肖刚, 周泓. 寡头竞争市场产业链纵向关系治理研究——以大型客机产业为例[J]. *科技管理研究*, 2012, 32(5): 100-105.  
WANG Ke, XIAO Gang, ZHOU Hong. Research on vertical relationship governance for industrial chain of oligarch market [J]. *Science and Technology Management Research*, 2012, 32(5): 100-105. (in Chinese)
- [18] 李迁, 丁翔. 基于计算实验的供应链联盟形成机制研究[J]. *管理学报*, 2013, 10(7): 1060-1064.  
LI Qian, DING Xiang. Mechanism of supply chain alliance based on computational experiment [J]. *Chinese Journal of Management*, 2013, 10(7): 1060-1064. (in Chinese)
- [19] OPSAHL T, AGNEESSENS F, SKVORETZ J. Node centrality in weighted networks: generalizing degree and shortest paths [J]. *Social Networks*, 2010, 32(3): 245-251.

#### 作者简介:

黄辉(1976—),男,博士,副教授。主要研究方向:供应链管理。

李瑞琪(1998—),女,硕士研究生。主要研究方向:供应链管理。

(编辑:丛艳娟)