

基于贡献矩阵的供应链网络节点重要度评估方法

杨鸿宇, 江 婧, 罗子健

中国民用航空飞行学院理学院, 四川 成都

收稿日期: 2024年11月9日; 录用日期: 2024年12月12日; 发布日期: 2024年12月19日

摘 要

信息化社会中网络无处不在, 大多数供应链系统具有网络结构。因此, 从网络角度出发, 分析和研究供应链中的相关问题更符合实际需要。已有研究成果多数考虑的是无向网络, 针对有向加权网络, 论文通过改进相对影响权重、交叉强度等定义, 给出了节点重要度评判的新参量。进一步, 本文结合相应参量构造出更加客观合理的重要度贡献矩阵, 并提出一种符合有向加权网络节点重要性评判的新指标。通过对网络节点重要性的算例分析, 验证了本文评估方法的有效性和可行性。另外, 本文的评估方法也同样适用于加权网络与无向网络。

关键词

供应链网络, 加权网络, 贡献矩阵, 节点重要度

Contribution Matrix Based Importance Assessment Method for Supply Chain Network Nodes

Hongyu Yang, Jing Jiang, Zijian Luo

Faculty of Science, Civil Aviation Flight University of China, Chengdu Sichuan

Received: Nov. 9th, 2024; accepted: Dec. 12th, 2024; published: Dec. 19th, 2024

Abstract

Networks are ubiquitous in the information society, and most supply chain systems have a network structure. Therefore, it is more in line with the practical needs to analyze and study the related problems in supply chain from the network perspective. Most of the existing research results

文章引用: 杨鸿宇, 江婧, 罗子健. 基于贡献矩阵的供应链网络节点重要度评估方法[J]. 运筹与模糊学, 2024, 14(6): 742-752. DOI: 10.12677/orf.2024.146573

consider the undirected network, for the directed weighted network, this paper gives a new parameter to judge the importance of nodes by improving the definitions of relative influence weights and cross strengths, etc. Further, the paper combines the corresponding parameters to construct a more objective and reasonable importance judgement. Further, the paper constructs a more objective and reasonable importance contribution matrix by combining the corresponding parameters, and proposes a node importance judgement index which is more in line with that of the directed weighted network. The effectiveness and feasibility of this paper's assessment method is verified through the example analysis of node enterprise importance. In addition, the assessment method of this paper is also applicable to weighted networks and undirected networks.

Keywords

Supply Chains Networks, Weighted Networks, Contribution Matrix, Node Importance

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

上世纪 90 年代以来, 复杂网络及其相关领域成为了科学研究的热点前沿。该理论揭示了现实中的各种网络现象及其演变规律, 并被广泛运用于实际生活中, 例如城市交通网络复原[1]、股价动态分析与社群识别[2]等。供应链网络就是现实中复杂网络的典型代表之一, 该网络由大量企业节点组成, 呈现出一定的网络拓扑结构[3]。同时, 供应链网络还具有大规模、非线性、高维度等特征。那么, 从网络科学理论出发探究供应链系统中的相关问题, 有利于发掘供应链演化的深层规律, 为企业在供应链中更好地发展提供了一定的理论参考。

在相关研究中, 如何根据供应链系统的特性, 评估其中各节点重要性成为了当前研究中的热点问题之一。该类问题的解决有助于提升与维护网络可靠性和抗毁性, 具有重要意义[4]。例如, Wiedmer 等[5]对复杂供应链网络中存在的拓扑结构进行实证研究, 结果为供应链网络中的社群结构、无标度结构和层级结构提供了证据。杨康等[6]通过建立多指标最优策略的企业重要性评估模型, 实现了对企业重要性的综合评估, 为企业发展提供了理论参考。张旭等[7]将节点重要度和邻居节点间关系重要度的加权之和作为评价节点重要度指标, 并对赋权方法进行改进, 使评估过程兼顾多个网络特征, 为供应链网络中的关键节点辨识提供了又一有效方法。上述研究表明, 供应链重要节点识别研究需要网络理论的支撑。

2. 相关工作

2.1. 文献综述

在网络理论研究方面, 节点重要性是设计网络拓扑结构、提升网络系统鲁棒性的基础, 也是研究网络传播效率等网络功能的必要前提。目前, 有不少关于节点重要性的研究聚焦于无向网络或无权网络上, 它们各自从不同角度提出了节点重要性评价指标。例如, 度中心性方法[8]认为与某节点相连的邻居节点越多, 该节点直接影响力越强。然而, 该方法适用于网络规模较大情形, 但未考虑非邻居节点的影响, 不能较好地反映网络全局特性和桥连接节点的重要性。为此, Chen 等[9]提出基于多级邻居信息指标的半局部中心测度方法。该方法只是将分析范围拓宽到了次近邻节点, 对网络全局结构特性的挖掘并不够充分。另外, 介数中心性[10]和紧密度[11]虽然提高了对桥连接节点的重视程度, 但时间复杂度较大, 不适

用于大型网络。特征向量方法[12]以邻接矩阵最大特征值对应的特征向量元素作为各相邻节点的重要度指标,其实质仍是将单个节点拓扑性质的线性叠加,结果仍然较为片面。K-核分解法[13]有效反映了实际网络的节点重要性,但此方法会赋予不少节点相同重要度,故不适合树状网络和无标度网络的分析。

另一方面,现实中的网络往往是有向加权网络,例如城市交通网络[14]、城市基础设施系统[15]等。故在研究时,需要综合考虑节点间相互作用强度大小和作用的方向。针对这类网络节点重要性评价问题,Dong 和 Zhou [16]提出一种改进的影响节点识别方法,该方法采用信息熵和边缘加权度的混合机制来提高识别准确性,但算法暂对无向网络失效。王班等[17]分析了加权网络结构特征,提出了兼顾算法计算复杂度的加权网络节点重要性的评价方法。由于此方法只考虑了邻居节点间的交互信息,忽略了非直接相邻节点间的作用,也具有一定的片面性。郭进利等[18]通过定义交叉强度指标表示网络中节点局部重要性,进而构建三个影响力矩阵,并结合层次分析法等提出了新的评判方法。汪力行[19]结合 K 步可达矩阵的概念,构建了基于综合可观可控度的关键控制点选择方法。但此方法未考虑到权重因素影响,结论也存在一定欠缺。黄丽亚等[20]从风险传播的角度出发,基于结构熵与传播数探讨了网络异构性和节点重要性,但计算复杂度较高。王海燕等[21]提出一种加权供应链网络节点重要度评判模型。上述研究结果表明,在界定重要性影响因素时,不应单一地从网络局部信息或者整体结构进行探讨,应将两方面因素综合考虑,并兼顾节点间的相互作用强度的影响,这样确定出的评判指标才更为合理。

2.2. 本文研究

对实际供应链而言,企业间的关系、业务往来量等因素很大程度上决定了企业在供应链系统中的重要性。在将实际供应链系统抽象成网络时,单纯将其视为无向或无权网络存在着一定的缺陷,无法真实地体现供应链中各主体间的作用强度和影响程度。另外,不少研究节点重要性是基于网络结构、风险传播与抗毁性等,忽视了边权应如何赋值这样的问题,所得研究结论也缺乏一些说服力,值得深入探究。因此在构建供应链网络时,对有向边合理赋权,提出合理客观的评判指标,对供应链中节点重要性评估才更加全面客观。

本文将基于网络理论,提出评判节点重要度的新方法。首先,我们将供应链抽象为有向加权网络,从而刻画供应链网络的特点。其次,考虑供应链网络上各节点企业间的商品量和流向两个因素,借助相对影响力函数概念,构造节点间的相对影响权重,并将其视为有向边的权重值。在此基础上,从全局和局部两个角度构造出重要度贡献矩阵与综合评价公式,分析节点的重要性。通过仿真算例,论文对供应链等一些网络的节点重要性进行评估和解释。

3. 网络模型

下面先介绍一些网络理论的基础知识。

3.1. 基本符号

有向加权网络模型 $G=(V,E,W)$, 其中 $V=\{v_1,\cdots,v_n\}$ 为节点集合, $E=\{e_1,\cdots,e_n\}$ 代表边的集合。 $(v_i,v_k)\in E$ 代表从节点 v_i 到 v_k 的一条有向边。符号 $|V|$ 代表网络中的节点数目, $|E|$ 表示边数。 W 代表边的权重矩阵, w_{ik} 代表有向边 (v_i,v_k) 的权重值; 类似的, w_{ki} 代表有向边 (v_k,v_i) 的权重值。一般情况下, $w_{ik}\neq w_{ki}$, 即有向加权网络的邻接矩阵为非对称阵。对无权网络而言, $A=(a_{ik})_{n\times n}$ 代表网络邻接矩阵, 当存在一条有向边 (v_i,v_k) 时 $a_{ik}=1$, 否则 $a_{ik}=0$ 。

3.2. 基本概念

定义 1 节点邻居集合 $\Gamma^+(v_i)$ 为节点 v_i 的一个入向邻居节点集, 表示所有指向节点 v_i 的节点集合;

同理, $\Gamma^-(v_i)$ 为节点 v_i 的一个出向邻居节点集, 表示节点 v_i 指向所有邻居节点的集合。当网络为无向网络时, 则有 $\Gamma^+(v_i) = \Gamma^-(v_i)$ 。

定义 2 交叉强度 交叉强度是对节点强度的拓展, 是衡量节点重要性的局部指标之一。为综合考虑节点的入强度与出强度, 定义节点 v_i 的交叉强度为:

$$I_i = \lambda_i^{in} I_i^{in} + \lambda_i^{out} I_i^{out} \quad (1)$$

其中 $I_i^{in} = \sum_{j=1}^n w_{ji}$ 为节点 v_i 的入强度, λ_i^{in} 表示节点 v_i 的入强度系数; $I_i^{out} = \sum_{j=1}^n w_{ij}$ 为节点 v_i 的出强度, λ_i^{out} 表示节点 v_i 的出强度系数, 且有 $\lambda_i^{in} + \lambda_i^{out} = 1$ 。当 $\lambda_i^{in} > \lambda_i^{out}$ 时, 认为节点入强度对节点影响更大; 反之, 认为节点出强度对节点影响更大。

本文交叉强度定义与文献[20]中的不同之处在于, 强度系数不再是固定常数, 而是随不同节点而变化的。具体而言, $\lambda_i^{in} = |\Gamma^+(v_i)| / [|\Gamma^+(v_i)| + |\Gamma^-(v_i)|]$, $\lambda_i^{out} = |\Gamma^-(v_i)| / [|\Gamma^+(v_i)| + |\Gamma^-(v_i)|]$, 其中 $|\Gamma^+(v_i)|$ 与 $|\Gamma^-(v_i)|$ 分别表示入向和出向邻居节点集合中元素个数。如此定义的强度系数能更精准地反映不同节点交叉强度的差异。当网络为无向加权网络时, 可视其为双向加权网络, 由于 $w_{ij} = w_{ji}$ 可得 $\Gamma^+(v_i) = \Gamma^-(v_i)$, 从而可知, 此时 $I_i^{in} = I_i^{out} = I_i$ 。

定义 3 入度和出度 有向无权网络节点 v_i 的入度为 $k_i^{in} = \sum_{j=1}^n a_{ji}$, 出度为 $k_i^{out} = \sum_{j=1}^n a_{ij}$, 则度为 $k_i = k_i^{in} + k_i^{out}$ 。易知, 有向图邻接矩阵第 i 行的和就是节点 v_i 的出度, 第 i 列和就是节点 v_i 的入度。进一步定义平均入度: $\langle k^{in} \rangle = \sum_{i=1}^n k_i^{in} / n$, 平均出度: $\langle k^{out} \rangle = \sum_{i=1}^n k_i^{out} / n$, 平均度: $\langle k \rangle = \sum_{i=1}^n k_i / n$ 。

3.3. 供应链网络

由于企业间的相互合作竞争关系, 供应链结构日趋复杂, 呈现出网络化特点。为判别出整个供应链中的关键企业节点, 构建合适的网络模型并加以分析是必要的。结合复杂网络理论, 供应链可视为由节点和连边构成的网络系统, 其节点集 $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ 代表着供应链中企业主体, 包括原材料企业、生产企业、供应商和分销厂家等。在该网络种, 我们暂忽略企业主体类型与承担的角色, 仅抽象为单一节点。网络中的有向边集 $E = \{e_1, \dots, e_n\}$ 代表企业间的业务往来, 例如资金流、产品流与信息沟通等。边的权重 w_{ij} 为相似权, 表示节点间的“距离”越小, 企业间相互影响越强, 它反映了企业之间关系密切程度。

4. 节点重要性评价

4.1. 基于相对影响权重的网络连边赋权

由于供应链中企业间的密切程度有所差异, 故在对供应链网络连边进行赋权时, 需要考虑到企业间的相互影响, 进而选则合适的业务关联程度等指标进行评价及赋权。然而真实问题的复杂性、不确定性和人们认识模糊性的限制, 人们对事物的评价往往难以精确描述, 从而对供应链网络连边权重的确定存在着差异。

文献[21]结合三角模糊数提出了模糊赋权方法, 该方法依赖于各个专家主观经验判断, 主观性较强, 对网络的赋权值未必客观真实, 故此方法的适用性有待商议。文献[22]在分析网络信息传播时, 引入节点间的相对影响权重。该权重值较为客观地反映了节点间相互影响的大小, 避免了主观判断的影响。受此启发, 结合供应链实际, 我们改进相对影响权重的定义, 并用于有向网络的边权值的确定。

设 m_{ik} 表示有向边 (v_i, v_k) 上有产量 m_{ik} 的商品从企业 v_i 流向企业 v_k 。当然, m_{ik} 还可表示相同价值的资金流向、业务流向等等, 如下图 1 所示。

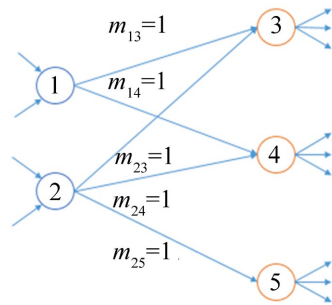


Figure 1. Local supply chain network diagram
图 1. 局部供应链网络图

定义 4 节点影响权重 设节点 $v_i \in \Gamma^+(v_k)$ 为节点 v_k 的一个入向邻居节点。从节点 v_k 角度出发, 节点 v_i 对节点 v_k 的入向影响力定义为:

$$f^+(v_i, v_k) = \frac{m_{ik}}{\sum_{v_l \in \Gamma^+(v_k)} m_{lk}} \quad (2)$$

从节点 v_i 角度出发, 节点 v_i 对节点 v_k 的出向影响力定义为:

$$f^-(v_i, v_k) = \frac{m_{ik}}{\sum_{v_r \in \Gamma^-(v_i)} m_{ir}} \quad (3)$$

那么, 节点 v_i 对节点 v_k 的影响力定义为:

$$f(v_i, v_k) = \frac{1}{2} [f^+(v_i, v_k) + f^-(v_i, v_k)] \quad (4)$$

由(2)~(4)式可知, 有向边 (v_i, v_k) 上流动商品量 m_{ik} 越大(或流动的产品价值量越高), 节点 v_i 对节点 v_k 的影响力也越大。下面, 表 1 给出了图 1 中节点间的商品量、相互影响力。

Table 1. Commodity flows between nodes and mutual influence
表 1. 节点间的商品流量及相互影响力

m_{ik}	$f^+(v_i, v_k)$	$f^-(v_i, v_k)$	$f(v_i, v_k)$
$m_{13} = 1$	0.5	0.3333	0.4167
$m_{14} = 2$	0.6667	0.6667	0.6667
$m_{23} = 1$	0.5	0.3333	0.4167
$m_{24} = 1$	0.3333	0.3333	0.3333
$m_{25} = 1$	1	0.3333	0.6667

定义 5 节点 v_i 对 v_k 的相对影响权重 若节点 v_i, v_k 互为邻居节点, 结合定义 4, 相对影响权重定义为:

$$Rw(v_i, v_k) = \frac{2f(v_i, v_k)}{f(v_i, v_k) + f(v_k, v_i)} \quad (5)$$

由于 $f(v_i, v_k) \neq f(v_k, v_i)$, 故 $Rw(v_i, v_k) \neq Rw(v_k, v_i)$ 。相对影响权重 $Rw(v_i, v_k)$ 作用在于将节点 v_i, v_k 的边权根据双方的相对地位和供应网络实际情况重新做了调整。对有向网络而言, 可将 $Rw(v_i, v_k)$ 视为有向边的权重值 w_{ik} , 进而用于节点重要度分析中。若为无向网络, 此时仍有 $Rw(v_i, v_k) \neq Rw(v_k, v_i)$ 。那么可取二者均值作为无向边的权值, 进而对节点重要度进行评估。

4.2. 网络特征参数

在构建节点重要度贡献矩阵前，还需要对相关参量进一步明确，如下：

定义 6 节点之间的最短距离

1) 对于无向无权网络，任意两节点 v_i 与 v_k 之间经过的最短路径为两点间的最短距离 d_{ik} 。对于无向加权网络，若节点 v_i, v_k 之间存在 k 条路径，分别经过节点 $v_r^l, \dots, v_s^l$ ，其中 $l \in \{1, \dots, k\}$ ，则每条路径的距离定义为 $d_{ik}^l = 1/w_{ir}^l + \dots + 1/w_{sk}^l$ ，其中 $w_{ir}^l, \dots, w_{sk}^l$ 为第 l 条路径相应边的权重。进一步，节点 v_i 与 v_k 的最短路径定义为使 d_{ik}^l 值最小的节点组合，其最短距离为 $d_{ik} = \min\{d_{ik}^l | l=1, \dots, k\}$ 。

2) 对于有向加权网络，若 v_i 与 v_k 间存在着 k 条 v_i 到 v_k 的有向路径，其最短有向距离为 $\hat{d}_{ik} = d_{ik}$ (d_{ik} 定义与无向加权网络定义一致)。若不存 v_i 与 v_k 间的有向路径，只存在 v_k 到 v_i 的最短有向距离 d_{ki} ，那么 v_i 与 v_k 间的最短距离定义为 $\hat{d}_{ik} = d_{ki}$ 。需要说明的是，若有向网络中的节点间不存在有向边时，则两节点间的距离 $\hat{d}_{ik}$ 视为 ∞ 。

4.3. 重要度评价指标

下面从局部和全局两个角度出发，对节点在加权网络中的重要性进行综合评判。综合考虑网络中节点的各个指标，构建重要性评价矩阵，得到节点重要度的综合评价指标，从而较为全面地反映节点在网络中的重要程度。

4.3.1. 局部评价指标

在评估节点企业重要性时，通常是根据节点与其直接连接的节点存在的关系，选择度值、介数中心等指标进行计算。实际上相连节点存在着重要性依赖关系，企业会对周围的临近企业产生重要度贡献。根据文献[21]，本文在评价网络局部重要度时，首先构建重要度贡献比例矩阵 M_0 ，进而构建节点间的重要度贡献矩阵 M 。矩阵 M_0 构造如下：

$$M_0 = \begin{bmatrix} 1 & \dots & \frac{a_{1n}w_{1n}k_n}{\langle k \rangle^2} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_{n1}w_{n1}k_1}{\langle k \rangle^2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中， a_{ik} 为邻接矩阵 A 的元素。由于网络中的节点 v_i 会对周围节点产生影响，使得邻居节点重要性发生变动，故 $k_i/\langle k \rangle^2$ 可视为节点 v_i 将自身的重要度贡献给邻居节点比例。

当节点连边较多，处于相对影响较重要位置时，其对周围节点的重要性影响会较大。由此可知，节点的局部重要性还取决于节点的连接情况和相对影响力。故在重要度贡献比例矩阵中，引入交叉强度 I_i 表征节点的位置。矩阵 M 为：

$$M = \begin{bmatrix} I_1 & I_2 \frac{a_{12}w_{12}k_2}{\langle k \rangle^2} & \dots & I_n \frac{a_{1n}w_{1n}k_n}{\langle k \rangle^2} \\ I_1 \frac{a_{21}w_{21}k_1}{\langle k \rangle^2} & I_2 & \dots & I_n \frac{a_{2n}w_{2n}k_n}{\langle k \rangle^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ I_1 \frac{a_{n1}w_{n1}k_1}{\langle k \rangle^2} & I_2 \frac{a_{n2}w_{n2}k_2}{\langle k \rangle^2} & \dots & I_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

因此,局部重要度评价矩阵 M 既能表征节点对相连节点的重要性影响,又能表征节点在网络中的位置,起到评价节点局部重要性的目的。

4.3.2. 全局评价指标

节点的全局重要性表现为节点在网络中对信息传输起到的作用。下面采用网络效率指标评价节点的全局重要度评估指标。

定义 7 节点效率 结合定义 6, 节点 v_i 的效率 E_i 定义为:

$$E_i = \left(\sum_{i \neq k} 1/\hat{d}_{ik} \right) / (n-1) \quad (8)$$

节点效率越高,通过该节点的网络信息流通越容易,说明该节点的全局重要性越大。将网络效率、交叉强度和重要性评价矩阵综合,可得出节点 v_i 的重要度评价公式:

$$Z_i = I_i \times E_i \times \sum_{i \neq k, k=1}^n \frac{a_{ik} I_i w_{ik} k_k}{\langle k \rangle^2} \quad (9)$$

从(9)式中可看出,本文提出的节点重要度公式,综合了节点全局重要性指标(网络效率 E_i)和局部重要性指标(交叉强度、接近度、度值),并考虑到供应链网络中企业间相互关系(权重),故该方法更符合实际情况,能在一定程度上提高节点企业重要度评估的准确性与客观性。

4.4. 重要度评价算法步骤

本文基于节点 v_i 的重要度 Z_i 评价公式的算法流程如下:

- 步骤 1.** 如果连边权重未确定,结合定义 1, 4 和 5, 求出改进的相对影响权重,将其作为边权。
- 步骤 2.** 边权重已知或已确定,结合定义 3, 计算节点的度, 平均度等。
- 步骤 3.** 结合定义 6 和 7, 计算节点间的最短距离和节点效率。
- 步骤 4.** 结合定义 2, 计算节点的改进交叉强度。
- 步骤 5.** 计算矩阵 M_0 与贡献矩阵 M , 并根据评价公式(9)计算节点重要度评估值。
- 步骤 6.** 根据得到的综合评判指标值大小,对节点重要性进行排序。

5. 数值实验与分析

例 1. 现实中,一些网络节点之间相互作用或影响并非双向的,如引文网中,文章的引用一般是单向的。下面以图 2 所示的有向加权网络为例,运用本文提出的方法计算每个节点的综合评判指标 Z_i , 并与文献[17]与[18]中的方法进行对比分析。通过计算得到各个节点的重要性指标值和排序结果,结果见表 2。

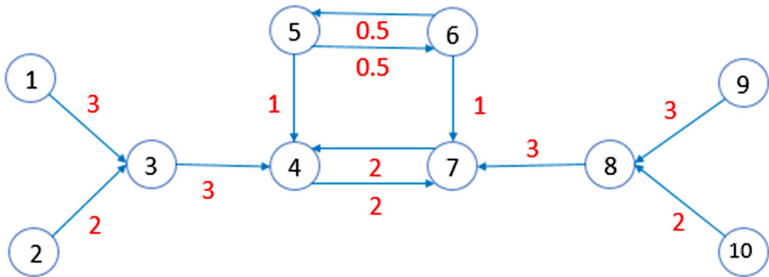


Figure 2. Structural diagram of a directed weighted network with symmetric structure
图 2. 具有对称结构的有向加权网络结构图

由表 2 可知,有向加权网络中节点重要度排序为: $v_3 = v_8 > v_4 = v_7 > v_1 = v_9 > v_2 = v_{10} > v_6 = v_5$ 。结果

分析：从图2中可知当网络为无向图时， v_4 和 v_7 为全局信息控制能力最大的位置，若遭到破坏，会导致网络不在连通。但此时的网络为有向供应链网络，节点 v_4 和 v_7 不能再被视为“桥节点”，反而可能为供应链末端的客户节点；而 v_3 和 v_8 在供应链网络中，可能为处于货物供应的中间商(如物流企业)，它们对周围企业节点的贡献比例较大，因而其重要性有所增加。另外，考虑到有向边上权重的大小，尽管 v_4 和 v_7 连边较多，但其传递的信息量多少与 v_3 和 v_8 无异。综合这两个原因， v_3 和 v_8 的重要性上升超过 v_4 和 v_7 ，为最重要的企业节点。节点 v_1 和 v_9 在网络中的相同位置，且都无入边，但边上权重大，因而对周围节点的影响较大，故重要性增加。由于 v_2 和 v_{10} 有向边上权重略小于 v_1 和 v_9 ，故重要性次于 v_1 和 v_9 。 v_5 和 v_6 在网络中属于连接较多的节点，但它们传播的信息量最小，导致对应的重要性度也最低。

Table 2. Importance ranking of network nodes in Figure 2

表 2. 图 2 中网络节点的重要性排序

节点 序号	本文评判方法					文献[17]		文献[18]	
	I_i	E_i	$\sum_{i \neq k, k=1}^n \frac{a_{ik} I_i w_{ik} k_k}{\langle k \rangle^2}$	Z_i	排序	重要度	排序	重要度	排序
1	3	0.5952	6.7708	12.090	5	-0.5108	5	0	7
2	2	0.4389	4.5139	3.962	7	-0.9163	7	0	9
3	4.3333	1.0222	10.4167	46.141	1	0.7340	3	0.1165	3
4	5	1.3156	6.9444	45.681	3	2.0794	1	0.3714	1
5	1.1667	0.2037	8.1163	1.929	9	-1.3863	9	0.0121	5
6	1.1667	0.2037	8.1163	1.929	9	-1.3863	9	0.0121	5
7	5	1.3156	6.9444	45.681	3	2.0794	1	0.3714	1
8	4.3333	1.0222	10.4167	46.141	1	0.7340	3	0.1165	3
9	3	0.5952	6.7708	12.090	5	-0.5108	5	0	7
10	2	0.4389	4.5139	3.962	7	-0.9163	7	0	9

从表2还可以看出，本文提供的方法与文献[17]评估方法得到重要度排序结果一致性高、差异小；排在前四位的节点仍然是 v_3 、 v_4 、 v_8 和 v_7 ，只是顺序略有变化，再次说明了本文设计方法是合理有效的。本文方法与文献[18]提供的重要度评价方法存在着显著的差异，其原因在于本文结合了有向边上的权重值、改进的交叉强度等因素考虑节点重要性，而非简单地将有向加权网络先视为无权网络，再构造影响力矩阵进行评判。因此，本文的方法在评判节点重要性上更符合实际需要。

例 2. 为进一步验证本文方法的有效性，下面以文献[21]中国华电煤供应链为例，运用本文提出的节点重要性评估方法，进行验证。煤炭运输时间长，运输环节多，受环境影响较大等特征是煤炭运输主要特点，反映在煤炭供应链网络上节点多、链接复杂等。对该网络中重要节点企业进行分析，并对其提供维护，可有效的防治供应链中断，一定程度上降低风险发生可能性。

图3描述了该煤炭供应链网络的结构，从中可知该网络为加权无向网络，其中各节点重要性如表3所示。由表3排序可知，国华电煤供应链节点企业的重要度排序为： $v_{10} > v_{11} > v_{14} > v_{12} > v_9 > v_2 > v_8 > v_4 > v_6 > v_5 > v_7 > v_{16} > v_{18} > v_{15} > v_1 > v_{17} > v_{13} > v_3 > v_{20} > v_{19}$ 。结果分析： v_{10} 为下水煤炭码头，由于煤炭进行采购后，经由公路、铁路运输至码头进行水运，该环节是运输途中的必备环节，也是信息进行交互的重要环节，因此节点 v_{10} 重要度最高。节点 v_{11} 与 v_{12} 作为海运企业，与码头联系密切，重要度较高，这与文献[21]的分析结果一致。此外，节点 v_4 ， v_5 ， v_8 ， v_9 作为陆运企业，负责煤炭的进出港和陆路运输，与

港口联系密切,因此重要度较高。与文献[21]的排序结果相比较,本文由于充分考虑到节点交叉强度等因素的作用, v_5 略有下降, v_4 , v_8 , v_9 排序有所上升,排序结果更加符合实际情况。

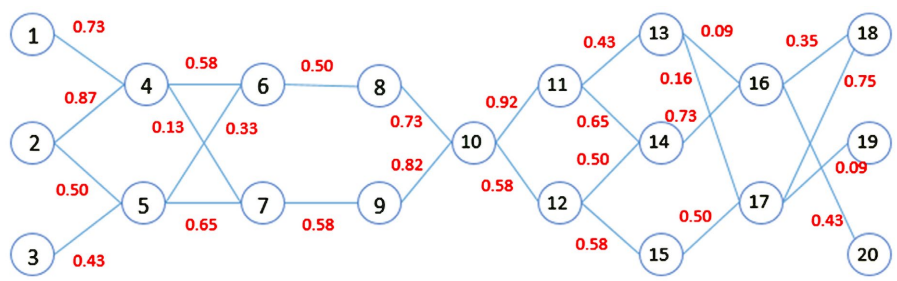


Figure 3. Coal supply chain network empowerment diagram
图 3. 煤炭供应链网络赋权图示

Table 3. Importance ranking of network nodes in Figure 3
表 3. 图 3 中网络节点的重要性排序

节点 序号	本文评判方法				文献[21]		
	I_i	E_i	$\sum_{i \neq k, k=1}^n \frac{a_{ik} I_i w_{ik} k_k}{\langle k \rangle^2}$	Z_i	排序	重要度	排序
1	0.73	0.179	0.999	0.131	15	0.027	17
2	1.37	0.218	1.754	0.524	6	0.118	12
3	0.43	0.149	0.486	0.031	18	0.008	19
4	2.31	0.238	0.873	0.480	8	0.485	3
5	1.91	0.231	0.828	0.365	10	0.393	5
6	1.41	0.230	1.348	0.437	9	0.343	7
7	1.36	0.230	1.153	0.361	11	0.103	13
8	1.23	0.256	1.63	0.513	7	0.189	10
9	1.4	0.271	1.83	0.694	5	0.261	8
10	3.05	0.341	1.85	1.924	1	1.578	1
11	2	0.291	2.332	1.357	2	0.601	2
12	1.66	0.263	1.65	0.720	4	0.366	6
13	0.68	0.179	0.609	0.074	17	0.030	16
14	1.88	0.263	1.636	0.809	3	0.438	4
15	1.08	0.208	0.871	0.196	14	0.072	14
16	1.6	0.213	0.777	0.265	12	0.141	11
17	1.5	0.184	0.453	0.125	16	0.194	9
18	1.1	0.180	0.997	0.197	13	0.055	15
19	0.09	0.058	0.08	0.0004	20	0.007	20
20	0.43	0.146	0.407	0.026	19	0.022	18

从表 3 中还可得知,部分节点重要性排序与文献[21]重要性排序结果一致,这体现出本文提出的评判

方法的有效性。另外, 节点 v_{11} 、 v_{12} 与 v_{14} 处于网络中较为重要的位置, 因此重要性较大, 这也表明节点位置对重要性的影响。本文提出的评估方法兼顾到了节点影响力、边权、网络结构等多个因素, 因而更加全面与客观。

6. 结束语

本文基于复杂网络理论, 研究了供应链网络中节点重要性评价问题。论文对平均度、节点效率等重要概念进行改进, 构造出重要度贡献矩阵并提出了评判节点重要性的新指标。在充分考虑交叉强度等影响因素下, 论文提出了一种适用于加权有向和无向网络的有效评判方法, 在一定程度上克服了已有研究方法的局限。通过数值算例与分析, 验证了论文提出方法的有效性。研究结果能为重要企业制定保护措施、维护供应链稳定与风险规避提供一定的理论参考。

基金项目

中国民用航空飞行学院博士创新能力提升计划: XJ2024002301。

参考文献

- [1] Serdar, M.Z., Koç, M. and Al-Ghamdi, S.G. (2022) Urban Transportation Networks Resilience: Indicators, Disturbances, and Assessment Methods. *Sustainable Cities and Society*, **76**, Article 103452. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103452>
- [2] Zhou, Y., Chen, Z. and Liu, Z. (2023) Dynamic Analysis and Community Recognition of Stock Price Based on a Complex Network Perspective. *Expert Systems with Applications*, **213**, Article 118944. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118944>
- [3] Brintrup, A., Wang, Y. and Tiwari, A. (2017) Supply Networks as Complex Systems: A Network-Science-Based Characterization. *IEEE Systems Journal*, **11**, 2170-2181. <https://doi.org/10.1109/jsyst.2015.2425137>
- [4] Lü, L., Chen, D., Ren, X., Zhang, Q., Zhang, Y. and Zhou, T. (2016) Vital Nodes Identification in Complex Networks. *Physics Reports*, **650**, 1-63. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2016.06.007>
- [5] Wiedmer, R. and Griffis, S.E. (2021) Structural Characteristics of Complex Supply Chain Networks. *Journal of Business Logistics*, **42**, 264-290. <https://doi.org/10.1111/jbl.12283>
- [6] 杨康, 张仲义. 基于节点重要性的供应链网络风险跨层次评估研究[J]. 系统科学与数学, 2015, 35(1): 110-120.
- [7] 张旭, 袁旭梅, 袁继革. 基于加权改进节点收缩法的供应链网络节点重要度评估[J]. 计算机应用研究, 2017, 34(12): 3801-3805.
- [8] 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.
- [9] Chen, D., Lü, L., Shang, M., Zhang, Y. and Zhou, T. (2012) Identifying Influential Nodes in Complex Networks. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **391**, 1777-1787. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2011.09.017>
- [10] Nikakhtar, A., Alireza Abbasian-Hosseini, S., Gazula, H. and Hsiang, S.M. (2015) Social Network Based Sensitivity Analysis for Patient Flow Using Computer Simulation. *Computers & Industrial Engineering*, **88**, 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.07.013>
- [11] Liu, M.M., Hu, Q.C., Guo, J.F., et al. (2021) Link Prediction Algorithm for Signed Social Networks Based on Local and Global Tightness. *Journal of Information Processing Systems*, **17**, 213-226. <https://doi.org/10.3745/JIPS.04.0210>
- [12] Xu, Q., Sun, L. and Bu, C. (2023) The Two-Steps Eigenvector Centrality in Complex Networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, **173**, Article 113753. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2023.113753>
- [13] Ma, R., Hu, Y. and Zhao, J. (2023) Random Node Reinforcement and K-Core Structure of Complex Networks. *Chaos, Solitons & Fractals*, **173**, Article 113706. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2023.113706>
- [14] Meng, Y., Tian, X., Li, Z., Zhou, W., Zhou, Z. and Zhong, M. (2020) Exploring Node Importance Evolution of Weighted Complex Networks in Urban Rail Transit. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, **558**, Article 124925. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2020.124925>
- [15] 王诗莹, 李向阳, 张佰尚. 面向脆弱性的城市 CIS 节点重要性评估方法[J]. 系统管理学报, 2017, 26(2): 210-218.
- [16] Dong, S. and Zhou, W. (2021) Improved Influential Nodes Identification in Complex Networks. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, **41**, 6263-6271. <https://doi.org/10.3233/jifs-202943>
- [17] 王班, 马润年, 王刚, 等. 改进的加权网络节点重要性评估的互信息方法[J]. 计算机应用, 2015, 35(7): 1820-

1823+1828.

- [18] 王雨, 郭进利. 基于多重影响力矩阵的有向加权网络节点重要性评估方法[J]. 物理学报, 2017, 66(5): 1-13.
- [19] 汪力行. 食品供应链中关键控制点的分析与选择方法[J]. 计算机工程与应用, 2018, 54(24): 221-226.
- [20] 黄丽亚, 汤川平, 霍宥良, 等. 基于加权 K-阶传播数的节点重要性[J]. 物理学报, 2019, 68(12): 307-317.
- [21] 王海燕, 赵宗可. 基于复杂网络理论的加权供应链网络节点重要度评价[J]. 物流技术, 2019, 38(1): 104-110.
- [22] 王金龙, 刘方爱, 朱振方. 一种基于用户相对权重的在线社交网络信息传播模型[J]. 物理学报, 2015, 64(5): 63-73.