

doi: 10.7690/bgzdh.2022.11.007

基于三角结构的空间信息网络节点重要度评估方法

刘 朦, 裴忠民, 罗章凯

(航天工程大学复杂电子系统仿真实验室, 北京 101416)

摘要: 针对复杂网络中节点重要度的度量问题, 提出一种社团介数与三角形结构结合的节点重要度评估模型。同时考虑节点度、节点的位置信息和网络的社团结构, 在多个空间信息网络模型上进行实验, 验证了提出模型的有效性。结果表明: 相对于其他指标, 该模型在空间信息网络上能更加精确地度量节点的影响力。

关键词: 空间信息网络; 节点重要度; 三角结构; H 指标

中图分类号: TP393.02 **文献标志码:** A

Evaluation Method for Node Importance of Spatial Information Network Based on Triangular Structure

Liu Meng, Pei Zhongmin, Luo Zhangkai

(Complex Electronic System Simulation Laboratory, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Aiming at the measurement problem of node importance in complex networks, a node importance evaluation model based on community betweenness and triangle structure is proposed. Considering the node degree, the location information of nodes and the community structure of the network at the same time, experiments are carried out on several spatial information network models to verify the effectiveness of the proposed model. The results show that, compared with other index, the model can measure the influence of nodes more accurately in the spatial information network.

Keywords: spatial information network; node importance; triangular structure; H index

0 引言

空间信息网络是以不同高度的卫星、轨道飞行器、地面终端为载体, 实时地获取、传输、接收、转发和处理空间海量数据的网络通信系统。空间信息网络节点众多、结构复杂, 可以看作是一个复杂网络, 倘若其中的某些关键节点失效, 就有可能导致级联失效, 使整个空间信息网络的抗毁性骤降, 甚至导致网络大规模失效; 同时, 构建高传输性能的空间信息网络也需要了解网络各节点的重要性。复杂网络中节点重要度的度量是提高网络的抗毁性和优化网络性能的重要环节^[1]。

度中心性是度量网络节点最直观也是最早使用的指标, 可以在一定程度上反映节点的重要性, 但是不能反映节点的位置信息和邻居节点的影响力^[2-3]。汪洋等^[4]结合节点度和节点承载的业务, 将不同节点分为不同层级, 提出面向电力通信网的节点重要度评估方法。该指标能充分考虑各节点业务的重要程度。Jorge Hirsch 提出了 H 指标, 该指标定义为若一个节点至少有 n 个邻居的度都不小于 n , 则该节点的 H 指标为 n 。该指标能很好地用于评估

研究人员的学术产出数量与学术产出水平, 但是会忽略一些度很大但邻居度都较小的节点。胡钢等^[5]依据节点度和传输能力构建了传输矩阵, 利用构建的重要度传输矩阵来评价网络节点的重要性, 能计算出节点的局部重要性和全局重要性, 然而重要度传输矩阵没有充分考虑节点的位置和邻居的信息。节点处于网络中的位置也会影响节点的重要性, 此类指标有介数中心性和紧密中心性等。李增辉等^[6]认为随着网络的动态变化, 网络中的关键节点和次关键节点可能发生变化, 选取节点度值和节点介数值为指标, 对网络节点重要度进行预测。鞠艳妮等^[7]考虑节点介数和系统弹性损失三角形, 提出基于介数和系统弹性的评价指标, 提高系统的可靠性和弹性, 但是没有考虑节点邻居的重要性。节点邻居的影响力也会影响节点的重要性, 主要通过节点的聚类系数和社团结构来衡量, 节点的聚类系数表示的是一个节点的邻居之间相互连接的程度。文献^[8]从节点与其邻居之间的拓扑和网络特征的角度对传统的邻域结构空洞指标进行了改进, 并将改进后的指标应用于网络节点的重要性评估; 同时, 为

收稿日期: 2022-07-01; 修回日期: 2022-08-03

基金项目: 复杂电子系统仿真实验室基础研究项目资助课题 (DXZT-JC-ZZ-2019-003); 复杂电子系统仿真实验室基础研究项目 (6142401004032106)

作者简介: 刘 朦(1996—), 男, 河南人, 硕士, 从事系统科学、复杂系统与网络研究。E-mail: 1240221768@qq.com。

了避免人为地确定指标权重的主观性,通过结合指标值之间的差异和指标之间的冲突,使用基尼系数和肯德尔系数来计算评价指标的客观权重,得到的评价指标更客观。韩忠明等^[8]通过结合节点度指数和三角结构提出了一种新颖的节点影响力度量指标(local triangle centrality, LTC),能够同时考虑节点与邻居节点的结构和数目特征。通过大量实验对比证明,该指标计算量小且效果较好,但是该指标并不能很好地衡量节点在社团中的重要性。

要精确地建立节点重要度的模型,就要充分考虑节点度、所处的位置和节点邻居的信息。如果网络的社团结构明显,还要考虑节点的社团介数。空间信息网络从空间上来看可划分为空间、临近空间、低空、地面和海上系统等;从功能上来看,综合了多种功能子网,包括侦察(监视)、导航、预警、指控和攻击等功能子网。这些层内连接紧密,层与层之间连接稀疏,与复杂网络中社团结构内部连接紧密,社团间连接稀疏结构的特征极为相似。可以将不同功能或业务类型的空间信息网络节点看作不同社团结构构建网络,既保持了空间信息网络业务逻辑的独立性,又考虑了空间信息网络的整体性^[9]。社团介数是指任意 2 个社团的连边经过某个节点的次数,因此社团介数往往应用于社团结构明显的网络。2 个度指数和指标相同的节点,一个位于社团内部,一个连接了 2 个不同的社团。如果去掉连接 2 个社团的节点,则会对整个网络连通性产生较大的影响,后者更重要。

三角结构是复杂网络中一种特殊的结构,在网络的核心区域节点之间的链接概率更大,联系更紧密,会形成大量的三角形结构,而在网络边缘区域,节点较为稀疏,而且相互之间的连接较少,难以形成三角形结构。同度指数、介数中心性、紧密中心性等指标一样,一个节点所拥有的三角形数量也能衡量节点的重要性,数量越多节点相对越重要;与其他指标相比,节点的三角形数量是一个综合性的指标,一方面能反映节点度的大小,另一方面也能一定程度上反应节点的位置和其邻居的信息^[10]。笔者针对空间信息网络社团结构明显的特点结合三角结构理论提出一种节点重要度模型。该模型能同时考虑节点度、节点的位置信息和网络的社团结构。通过多个空间信息网络的仿真实验证明,该模型能精确地衡量空间信息网络的节点重要度。

1 节点重要度模型和算法流程

1.1 节点重要度模型

空间信息网络节点众多、结构复杂,是一个复杂网络,可以用图来表示。用图 $G=(V, E)$ 表示空间信息网络的拓扑结构,节点集合 $V=\{1, 2, \dots, n\}$ 表示空间信息网络的节点集合,链路集合 $E=\{e_{ij}|i, j \in V, i \neq j\}$ 表示节点间的连边集合, $e_{ij}=1$ 表示节点 i 和节点 j 相互连接。

$$e_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 相连} \\ 0, & \text{节点 } i \text{ 和节点 } j \text{ 不相连} \end{cases} \quad (1)$$

用 C_i 表示任意 2 个社团的连边经过节点 i 的次数,用 $T(i)$ 表示节点 i 拥有的三角形个数。针对空间信息网络社团结构明显的特点,结合三角结构理论提出下列改进指标,节点 i 的重要度为:

$$C(i) = \frac{\sum k(i)S(T(i))^\alpha C(i)^\beta}{\text{Max}_{i \in V} (\sum k(i)S(T(i))^\alpha C(i)^\beta)} \quad (2)$$

式中: sigmoid 函数单增函数,能够将变量映射到 0~1 之间,值越大该节点拥有的三角结构越多,处于核心区域的可能性越大,也越重要; $S(x)$ 为一个激活函数,设 sigmoid 函数 $S(x)=(1+\exp(-x))^{-1}$; $k(i)$ 为节点 i 的度,度越大节点越重要; $C(i)$ 为节点 i 的社团介数,大小表示连接社团的作用; α 、 β 幂指函数,用来衡量 3 个参数的重要性, α 、 β 值越大,其对应的参数越重要,式(2)分母是为了归一化。用 NE_i 表示节点 i 的邻居节点集合, j 、 k 为网络中不同于节点 i 的任意 2 个节点,节点 i 拥有的三角结构数量可表示为:

$$T(i) = |NE_i \cap NE_j \cap NE_k| \quad (3)$$

如图 1 所示,这个网络一共有 20 个节点 68 条边,对于这类规模较小的网络,通过度值的大小可以得出 15、7、8 和 17 号节点为较重要的核心节点。对于度值相同的节点,度值却不能度量其重要性。1 号和 5 号节点度值都为 4,但是 5 号节点与核心节点 7 号和 15 号都相连形成三角结构,并且去除 5 号节点整个图不再连通,而去除 1 号节点整个图仍然能连通,显然 5 号节点重要性要大于 1 号节点,但是度值并不能很好区分。6 号节点仅与 17 号节点相连度为 1,2 号度为 2 并有 1 个三角形结构,16 号节点度为 3,有 2 个三角形结构,并且与核心节点 15 号直接相连接,显然 16 号重要性要大于 2 号,2 号要大于 6 号,但是介数中心性指标中 2、6 和 16 号节点的值都是 0。

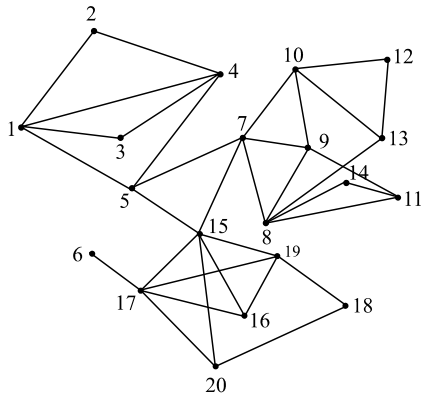


图 1 20 个节点的网络

1.2 算法流程

节点的重要度取决于节点度、邻居和位置。首先计算节点的度，然后根据式(3)计算节点的三角结构数量，最后根据节点重要度公式计算节点的重要度，其算法流程如下：

- 1) 输入：复杂网络对应的邻接矩阵 A ；
- 2) 输出：节点 i 的节点重要度 I_i ；
- 3) 由式(1)计算节点 i 的度 k_i ；
- 4) 由式(3)计算节点 i 的三角结构数量 T_i ；
- 5) 根据公式 $S(x)=(1+\exp(-x))^{-1}$ 计算 T_i 对应的值 ST_i ；
- 6) 根据式(2)计算节点 i 对应的节点重要度。

2 实验设计与结果分析

为分析改进的指标和其他典型指标的差异，选择图 1 的网络作为实例，分别计算节点的改进指标值、度中心性、介数中心性和 H 指标，然后对比分析。

该网络一共有 20 个节点 68 条边，各个节点对应各个指标的值如表 1 所示。

表 1 不同指标节点重要度排序

节点	度	改进指标	介数中心性	H 指标
1	4	0.245 1	0.195 1	2
2	2	0.148 4	0	2
3	2	0.148 4	0	2
4	4	0.245 1	0.195 1	2
5	4	0.705 0	0.709 4	4
6	1	0.063 4	0	1
7	5	0.883 9	1.000 0	4
8	5	0.324 4	0.369 5	2
9	4	0.353 4	0.104 4	3
10	4	0.259 8	0.254 2	2
11	3	0.223 1	0.008 9	2
12	2	0.129 9	0	2
13	3	0.174 8	0.036 5	2
14	2	0.148 4	0	2
15	6	1.000 0	0.932 0	3
16	3	0.335 3	0	3
17	5	0.369 9	0.222 7	1
18	2	0.088 8	0.003 9	2
19	4	0.338 3	0.106 4	2
20	3	0.229 5	0.094 6	2

对于度值指标不能区分的 1 号和 5 号节点，在改进指标里 1 号节点为 0.245 1，5 号节点为 0.705 0，与上述分析的 5 号比 1 号重要相吻合。介数中心性指标中 2、6 和 16 号节点的值都是 0，不能区分其重要性，而改进的指标中 2 号为 0.148 4，6 号节点为 0.063 4，16 号为 0.335 3，与上述分析的重要性排序 16>2>6 一致。

节点连边的删除会导致网络连通性降低，连通性降低程度越大，对应的辨识方法越有效。基于表 1 的排序结果，连续删除节点的连边，对比删除节点连边后的子图数目与节点数目的比值和最大子图规模。比值越大或规模越小，连通性越差，对应的方法越准确。节点数目的比值如表 2 所示，最大子图比值如表 3 所示。

表 2 删除节点后最大子图规模

删除节点数	度	介数中心性	H 指标	改进指标
1	13	13	14	14
2	7	7	7	7
3	6	7	7	7
4	6	7	7	7
5	6	6	6	6
6	6	6	6	5
7	6	6	6	5
8	5	5	6	5
9	5	5	5	3
10	5	3	5	3
11	4	3	4	3
12	3	3	3	2
13	3	2	3	2
14	2	2	2	1
15	2	1	1	1
16	1	1	1	1
17	1	1	1	1
18	1	1	1	1
19	1	1	1	1
20	0	0	0	0

表 3 删除节点后子图与总节点数比值

删除节点数	度	介数中心性	H 指标	改进指标
1	0.15	0.15	0.15	0.15
2	0.25	0.25	0.25	0.25
3	0.30	0.30	0.30	0.30
4	0.40	0.35	0.35	0.40
5	0.45	0.40	0.40	0.45
6	0.55	0.50	0.45	0.55
7	0.55	0.60	0.50	0.65
8	0.60	0.65	0.60	0.65
9	0.65	0.70	0.70	0.70
10	0.65	0.70	0.80	0.75
11	0.70	0.80	0.85	0.85
12	0.75	0.90	0.90	0.90
13	0.85	0.90	0.95	0.95
14	0.90	0.90	0.95	1.00
15	0.95	0.95	0.95	1.00
16	1.00	0.95	1.00	1.00
17	1.00	1.00	1.00	1.00
18	1.00	1.00	1.00	1.00
19	1.00	1.00	1.00	1.00
20	1.00	1.00	1.00	1.00

表 2 和 3 相对应的曲线图如图 2、3 所示。从图 2 可知，笔者提出的改进指标对应的最大子图规模曲线下落较快。从图 3 可以看出，笔者提出的改进

指标对应的比值曲线上升较快,基本在其他指标上方,证明了该方法的有效性,能更有效地衡量节点的重要性。

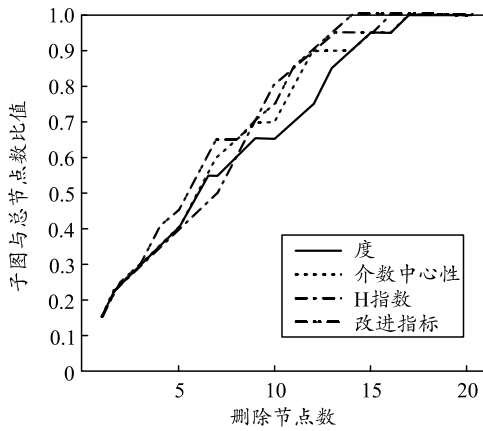


图 2 最大子图规模

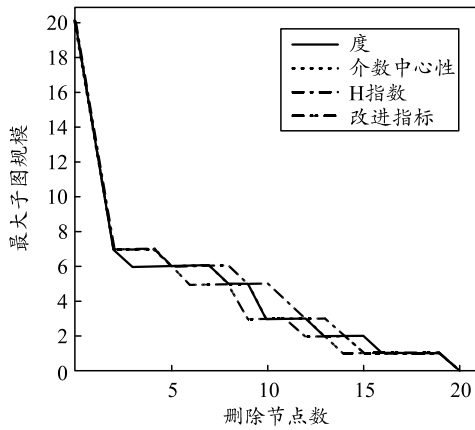


图 3 子图数与网络节点总数比值

空间信息网络在空间维度上可以划分为空基、路基和海基信息网络:空基信息网络中节点功能各不相同,可以划分为天基骨干网络、通信社团网络、导航社团网络、遥感社团网络等;路基信息网络结合其节点功能的特点,可以划分为移动通信网和互联网等;海基通信网络由海底光缆网、水下无线通信网等组成^[9]。

为验证改进节点重要度指标的有效性,并一定程度上体现空间信息网络结构和功能,设计空间信息网络由天基骨干网络、通信社团网络、导航社团网络、遥感社团网络、移动通信网、互联网和水下无线通信网组成。笔者在 3 个空间信息网络中进行仿真实验,3 个网络的网络参数如表 4 所示。

表 4 网络的参数

网络	节点数量	边数量	平均度	聚集系数
1	103	341	4.53	0.57
2	138	565	5.96	0.63
3	121	435	5.63	0.67

分别在 3 个网络上,采用度、介数中心性、H

指标和笔者改进的指标,按照节点重要度大小,依次删除节点、计算子图与网络节点总数的比值来验证方法的有效性,仿真结果如图 4—6 所示。

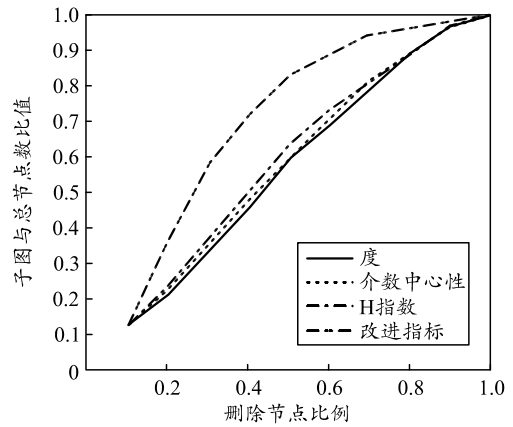


图 4 网络 1 破坏性试验

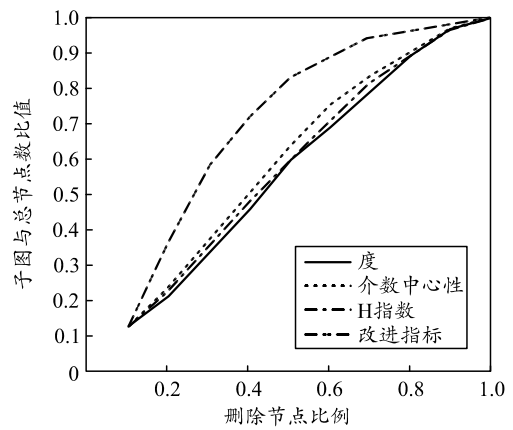


图 5 网络 2 破坏性试验

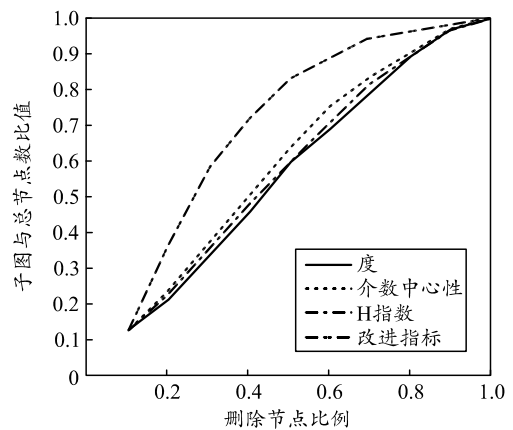


图 6 网络 3 破坏性试验

从图中可以看出,改进的指标对应的删除节点后子图与节点总数的比值曲线增加都更快,说明了网络破坏程度更严重,删除的节点更重要,证明了改进指标能更精确地衡量节点的重要性。

3 结论

笔者基于空间信息网络社团结构明显的特点,

提出一种社团介数与三角形结构结合的节点重要度评估模型。该模型能够同时考虑节点度、节点的位置信息和网络的社团结构。在 3 个空间信息网络模型上进行实验,验证了该模型在空间信息网络上相对于其他指标能更精确地度量节点的影响力。

参考文献:

- [1] 王梓行,姜大立,漆磊. 基于冗余度的复杂网络抗毁性及节点重要度评估模型[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2020, 17(3): 78-85.
- [2] ASENA K A, NIHAN B Z. Efficient Identification of Node Importance Based on Agglomeration in Cycle-Related Networks[J]. International Journal of Foundations of Computer Science, 2020, 31(7): 969-978.
- [3] SAEID A, TAGHAVI A S, ASGARALI B, et al. A Three-stage Algorithm for Local Community Detection Based on The High Node Importance Ranking in Social Networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2021, 563: 125420.
- [4] 汪洋,丁慧霞,李卓桐,等. 基于节点重要度的电力通

(上接第 17 页)

- [9] 田尧,王戈,宛延成,等. 一种多阶段航空物资运输规划方法[J]. 兵工自动化, 2021, 40(10): 70-73, 84.
- [10] 齐玉东,闫晓斌,谢晓方. 海军航空兵飞行团转场飞机选择模型[J]. 兵工自动化, 2012, 30(1): 30-32.
- [11] 陈力,王永吉,吴敬征,等. 基于树状线性规划搜索的单调速率优化设计[J]. 软件学报, 2015, 26(12): 3223-3241.
- [12] 黄晓霖,许璠,王书宁. 分片线性规划及应用[J]. 控制工程, 2010(S1): 66-68, 72.
- [13] 陈诚. 基于随机线性规划的水库概率约束调度模型与方法[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [14] 胡艳杰,黄思明,ADRIEN,等. 对偶性在线性规划预处理中的应用分析[J]. 中国管理科学, 2016(12): 117-126.

(上接第 26 页)

参考文献:

- [1] 晏希,李全俊,李锦,等. 大口径枪弹转子式结弹技术[J]. 兵工自动化, 2019, 38(2): 93-96.
- [2] 金翰林,李锦,谷岩波. 某枪弹装配系统的控制系统设计[J]. 兵工自动化, 2020, 39(6): 27-29.
- [3] 王斐,梁宸,韩晓光,等. 基于焊件识别与位姿估计的焊接机器人视觉引导[J]. 控制与决策, 2020(8):

电网可靠性保障方法研究[J]. 电力信息与通信技术, 2020, 18(10): 1-6.

- [5] 胡钢,高浩,徐翔,等. 基于重要度传输矩阵的复杂网络节点重要性辨识方法[J]. 电子学报, 2020, 48(12): 2402-2408.
- [6] 李增辉,向红艳. 考虑旅游景点的公路网节点重要度计算方法[J]. 公路, 2020, 65(9): 189-193.
- [7] 鞠艳妮,李宗平,陈宇帆,等. 区域轨道交通系统节点重要度及故障恢复研究[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(2): 112-119.
- [8] ZHENG G, WANG C, SHAO W, et al. A single-player Monte Carlo tree search method combined with node importance for virtual network embedding[J]. Annals of Telecommunications, 2020: 297-312.
- [9] 裴忠民,任林涛,熊伟,等. 基于社团结构的天基信息网络结构设计构想与仿真[J]. 天地一体化信息网络, 2020, 1(2): 81-86.
- [10] LU M. Node importance evaluation based on neighborhood structure hole and improved TOPSIS[J]. Computer Networks, 2020, 178: 107336.

[15] 任慧. 不确定环境下的区间数线性规划求解模型及最优值区间[D]. 厦门: 厦门大学, 2020.

- [16] 赵永佳. 线性规划译码的关键问题研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2018.
- [17] 赵文翠. 完全模糊线性规划及其模糊近似解[D]. 兰州: 西北师范大学, 2017.
- [18] 成亚丽. 变量为三角模糊数的线性规划问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [19] 陈忠强,王李管,熊书敏,等. 基于模糊预测性线性规划的矿山产能分配方案优化分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(9): 3166-3173.
- [20] LIU P P, MA X, GAO D, et al. Application of the Steepest Descent Approximate Linear Programming on Cyclic Cleaning Scheduling of Boiler[C]//第 25 届中国控制与决策会议论文集. 贵阳: 贵州大学, 2013.

1873-1878.

- [4] 范俊峰,景奉水,方灶军. 基于视觉传感的焊缝跟踪技术研究现状和发展趋势[J]. 热加工工艺, 2017(5): 6-10.
- [5] 计时鸣,黄希欢. 工业机器人技术的发展与应用综述[J]. 机电工程, 2015(1): 1-13.
- [6] 张春柳,张立建,胡瑞钦,等. 工业机器人在航天器装配应用中的质量安全管理[J]. 兵工自动化, 2019, 38(4): 92-96.