文章编号:1672-3961(2024)01-0001-10 DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2022.390

基于节点多阶邻居递阶关联贡献度的重要性辨识

胡钢[1,2],王乐萌[1],卢志宇[1],王琴[1],徐翔[3]
(1.安徽工业大学管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243032; 2.复杂系统多学科管理与控制安徽普通高校重点实验室, 安徽 马鞍山 243032; 3.国防科技大学信息系统工程重点实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要:为更精细化地辨识节点重要性,扩展节点有效信息集聚范围和类别,对网络节点的空间位置属性信息与其直接及间接邻居节点间关联结构信息进行融合、集结,提出复杂网络多阶邻居递阶关联贡献度的节点重要性辨识方法。依据网络节点空间位置层级差异及层间交互信息给出节点层级位置属性贡献度定义;构建复杂网络目标节点多阶邻居递阶关联贡献度矩阵,表征直接邻居节点、间接邻居节点与目标节点间关联度对其影响力的递阶贡献;提出节点跨层跨级空间拓扑位置贡献度与多阶邻居递阶关联贡献度融合的节点重要性辨识方法。仿真试验表明:在 6 个真实网络上所提方法有效提升节点重要性辨识的精细性和准确性。本研究通过探究网络节点间多阶递阶交互行为,为深入探索网络背后的动态演化机理,进而做出预测和调控提供科学的理论基础。

关键词:复杂网络;节点重要性辨识;多阶邻居相似度;多阶邻居紧密度;多阶邻居递阶关联贡献度
中图分类号:TP391 **文献标志码**:A
引用格式:胡钢,王乐萌,卢志宇,等. 基于节点多阶邻居递阶关联贡献度的重要性辨识[J].山东大学学报(工学版),2024,54(1):1-10.
HU Gang, WANG Lemeng, LU Zhiyu, et al. Importance identification method based on multi-order neighborhood hierarchical association contribution of nodes[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(1):1-10.

Importance identification method based on multi-order neighborhood hierarchical association contribution of nodes

HU Gang[1,2], WANG Lemeng[1], LU Zhiyu[1], WANG Qin[1], XU Xiang[3]
(1. School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Maanshan 243032, Anhui, China; 2. Key Laboratory of Multidisciplinary Management and Control of Complex Systems of Anhui Higher Education Institutes, Maanshan 243032, Anhui, China; 3. Key Laboratory of Information Systems Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, Hunan, China)

Abstract: In order to identify the node importance more finely and extend the scope and category of effective information gathering of nodes, the spatial location attribute information of network nodes and their direct and indirect neighbor nodes were fused and clustered, a node importance identification method of multi-order neighbor hierarchical association contribution of complex networks was proposed. The definition of the contribution of node level location attributes was given based on the network node spatial location hierarchical differences and inter-layer association information. A complex network target node multi-order neighbor hierarchical association contributions matrix was constructed to characterize the hierarchical contribution of the associations between direct neighbor nodes, indirect neighbor nodes and target nodes to their influence. A node importance identification method that fused node topological location contribution across layers and levels of space with multi-order neighborhood hierarchical association contribution was proposed. The simulation experiments showed that the proposed method could effectively improve the precision and accuracy of node importance identification on six real networks. This study provided a scientific theoretical basis for in-depth exploration of the dynamic evolution mechanism behind the network, and then made prediction and regulation by exploring the multi-order hierarchical

收稿日期:2022-11-25
基金项目:国家自然科学基金资助项目(62072249);国家社会科学基金资助项目(19BGL254);安徽省自然科学基金资助项目(2108085MC236);安徽省高校自然科学研究项目(KJ2021A0385);安徽普通高校重点实验室开放基金资助项目(CS2021-05)
第一作者简介:胡钢(1970—),男,甘肃天水人,副教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为复杂网络建模与分析。
E-mail: hug_2004@126.com

interaction behaviors among the network nodes.

Keywords: complex network; identification of node importance; multi-order neighbor similarity; multi-order neighbor closeness; multi-order neighbor hierarchical association contribution

0 引言

复杂网络是复杂系统的抽象拓扑,通过复杂网络节点间关联关系表征复杂网络多属性特征。通过分析复杂网络中节点之间关联关系、节点层级之间关联关系以及跨层跨级节点邻域递阶关联关系可进一步拓展和增强对复杂网络一些属性特征的深入探讨与更深刻的认识。现实复杂网络中节点浩繁复杂,节点多属性特征在网络拓扑信息传输与拓扑结构中可有效反映网络拓扑特征与动力结构。关键节点辨识及应用已经成为复杂网络研究的热点领域。目前节点重要性辨识成果应用于传染病预防网络,对关键节点进行接种免疫可抑制病毒传播[1-2];电力网络关键线路及枢纽点进行维保[3-4];信息传播网络关键节点辨识可加速良性信息传播,抑制恶意信息泛滥[5-6]。节点重要性辨识研究及应用对网络结构识别、深度信息挖掘和网络机能维护等均具有重要意义。近年来,许多学者从网络不同的拓扑结构特征与网络拓扑动力演化关联对复杂网络节点的重要性进行分析研究。

基于复杂网络局部属性特征、全局属性特征、网络多层多级结构属性特征信息的来源范畴、信息融合集结等探讨节点的重要性,大部分研究成果的依据是节点在网络中不同的属性特征,如邻居节点数量、邻居节点之间拓扑结构、节点在网络中的拓扑位置属性等,应用度中心性[7]、介数中心性[8]、接近中心性[9]、特征向量中心性[10]和 Katz 中心性[11]等对目标节点重要性辨识进行定量定性分析。例如度中心性作为网络局部属性特征反映网络局部结构,就目标节点一阶范围内邻居节点的数量定义其重要性程度,邻居节点数目越多,目标节点越重要;网络的介数中心性作为全局属性特征表征目标节点在网络中沿最短路径传播信息的全局效率,目标节点充当网络中任意两节点间最短路径次数越高,目标节点越重要;网络接近中心性作为全局性属性特征,依据网络目标节点与其余节点最短路径的平均期望值定义目标节点接近网络几何中心的程度,该值越小,目标节点越重要。

基于复杂网络节点拓扑空间多层多级结构特征关联信息节点重要性的研究,文献[12]提出节点影响力由其在整个网络中的拓扑位置决定,对网络空间拓扑结构进行粗粒化分层分级划分,位于网络核心区的节点拥有更大影响力;文献[13]综合网络壳层节点分级残余度与已移除节点信息给出混合度分解辨识方法;文献[14]应用 K-shell 方法分析进一步细分同一层节点的邻居节点及次邻居节点的重要性影响;文献[15]给出目标节点最近邻居的影响排名;文献[16]考虑节点邻域 k 壳值与节点间的距离衡量节点的全局影响力;文献[17]提出迭代因子对网络进行分层;文献[18]融合结构洞指标和相邻节点的 K-shell 重要性指标确定相邻节点间重要度贡献关系,综合网络的局部和全局重要性。为集结融合网络局部结构中目标节点与直接邻居及间接邻居间的关联影响力,文献[19]提出半局部中心性指标,将目标节点影响力关联关系信息集结范围拓展至二阶邻居;文献[20]定义了邻居节点对之间相似程度信息辨识节点结构的重要性;文献[21]综合分析了节点的直接邻居影响力与间接邻居影响力;文献[22]集结融合每层邻居节点的数量表征邻居节点的重要性;文献[23]融合节点二阶邻居衡量节点的重要性;文献[24-25]、文献[26]进一步扩大节点影响力信息集结来源范畴,集结融合高阶邻居节点属性特征信息对目标节点重要性辨识的贡献。

上述节点重要性辨识方法从信息来源范畴、网络自身拓扑空间层级化、节点关联信息集结融合方面研究,对网络节点重要性的辨识取得了初步成果,在实践中得到推广应用。同时也存在一些问题,例如基于网络节点空间拓扑结构划分的过程忽视网络节点间跨层跨级交互关联关系对网络层级位置的影响;基于节点直接邻居信息重要性辨识方法仅考虑目标节点直接邻居范围内形成的节点间交互关系,忽视其他节点间多层多级大量关联信息,忽略节点间关联信息多层多级连续传输传递的客观存在;同时部分研究对目标节点二阶邻居范围内信息集结,没有考虑目标节点与

更高阶邻居节点层级属性信息及拓扑结构[27]信息形成的递阶信息贡献。

本研究为扩展目标节点信息范畴、挖掘目标节点更多关联信息、增强目标节点重要性辨识准确性、综合分析节点跨层跨级的空间拓扑位置贡献度与多阶邻居递阶贡献度、精细化融合集结节点不同阶邻居间关联结构信息,提出基于节点多阶邻居递阶关联贡献度的节点重要性辨识(different order interaction topological relevance, DTR)方法。首先,依托节点不同层级关联关系的多样性,分析目标节点层级位置属性贡献度。其次,分析节点多阶共同邻居相似度表征节点间交互紧密程度,定义节点的多阶邻居关联贡献度;构建基于节点间关联关系的节点多阶邻居递阶关联贡献模型,并给出单一节点多阶邻居递阶关联贡献度综合值。最后,综合节点跨层跨级空间位置贡献度和节点多阶邻居递阶关联贡献度,给出节点重要性辨识 DTR 方法。在 6 个真实网络的仿真分析表明,本研究方法相比度中心性[7]、*K*-shell[12]等经典方法与现有研究中一些方法,本研究方法均有效提升节点重要性辨识的精确性和可靠性。

1　理论基础

设 $G=(V,E)$ 为无权无向复杂网络,其中 $V=\{v_1, v_2,\cdots,v_n\}$ 为 G 的非空节点集。邻接矩阵 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{N\times N}$ 表示网络节点间交互结构信息,矩阵元素 $a_{ij}=1$ 表明节点 v_i 与节点 v_j 有交互,反之 $a_{ij}=0$。依托下面节点多属性理论,可比较仿真试验方法的精确性和分辨率等指标验证,综合评估节点重要性。

(1)度中心性(degree centrality, DC)

度中心性是节点一阶邻居内局部属性特征的体现,主要思想是目标节点的直接邻居数目越多,传播和集结信息的量越大,节点越重要。节点 v_i 的度中心性 d_i 定义为:

$$d_i=\frac{k_i}{N-1}, \tag{1}$$

式中,N 为网络中节点总数量,$N-1$ 为节点最大可能度值,k_i 为节点 v_i 的度值。

(2)介数中心性(betweeness centrality, BC)

介数中心性是节点全局性属性特征体现,展现节点对沿最短路径传输信息的控制能力。目标节点充当网络中任意两节点间最短路径次数越高,则该节点越重要。节点 v_i 的介数中心性 b_i 定义为:

$$b_i=\sum_{i\neq s,s\neq t,t\neq i}\frac{\alpha(s,t\mid i)}{\alpha(s,t)}, \tag{2}$$

式中,$\alpha(s,t)$ 为节点 v_s 到 v_t 的最短路径数,$\alpha(s,t\mid i)$ 为节点 v_s 到 v_t 经过节点 v_i 的最短路径数。

(3)接近中心性(closeness centrality, CC)

接近中心性表示某一节点到其余节点距离的长短,节点到其余节点平均距离越短,该节点更可能是网络的核心节点。节点 v_i 的接近中心性 c_i 定义为:

$$c_i=\frac{N-1}{\sum_{j\neq i}d_{ij}}, \tag{3}$$

式中,d_{ij} 为节点 v_i 到节点 v_j 的距离。

(4)*K*-shell 方法

K-shell 方法是对复杂网络节点层级的粗粒划分,通过以下步骤将网络节点划分为若干层。首先在网络中确定一个度值为 1 的节点,删除其连边,然后在网络剩余节点中重复寻找度值为 1 的节点,删除其连边,并继续这个过程直到网络中没有度值为 1 的节点。该类节点的 k_s 值定义为 1,划分为网络边缘层节点。然后,在网络中确定一个度值为 2 的节点,删除其连边,并在网络剩余节点中重复寻找度值小于或等于 2 的节点,删除连边,直至网络中没有度值小于或等于 2 的节点,将该类节点的 k_s 值定义为 2。同理,重复上述过程,直至确定每个节点的层级位置属性值,如图 1 所示。

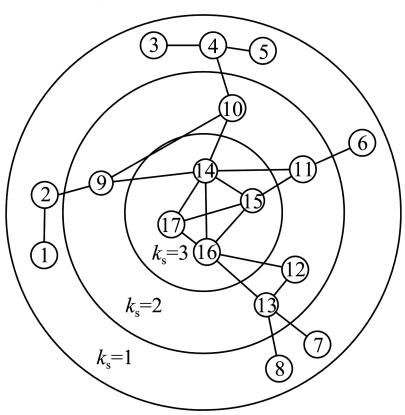


图 1　*K*-shell 分解示意图

Fig.1　*K*-shell exploded schematic diagram

然而,*K*-shell 存在一定局限性,仅能辨识网络节点粗略空间位置属性信息异质性,仍存在大量同层节点无法进一步精细化辨识。

2　网络节点多阶邻居递阶关联贡献度分析

从复杂网络全局角度分析节点的重要性,虽然