

● 武 澎^{1,2}, 王恒山¹

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 河南大学, 河南 开封 475001)

基于特征向量中心性的社交信息超网络中重要节点的评判^{*}

摘 要: 文章主要将超网络和特征向量中心性的理论方法运用于社交网络信息交互过程中重要节点的评判研究, 在社交网络信息交互系统构成及关系进行分析的基础上构建一个社交信息超网络模型, 并通过例子构建超网络的邻接矩阵和网络直观图。根据现有方法存在的问题与不足, 提出了一种基于特征向量中心性的社交信息超网络节点信息交互综合能力的评判方法, 并通过实例进行了验证与分析。

关键词: 社交网络; 超网络; 特征向量; 信息交互; 知识节点

Abstract: This paper mainly uses the theoretical approaches of super-network and eigenvector centrality in the evaluation research on key nodes in the process of information interaction in social networks. On the basis of analyzing the composition and relationship of the social networks information interaction system, the paper constructs a model of social information super-network. The paper builds adjacency matrix and network pictorial diagram of super-network through examples. According to the problems and shortcomings of existing methods, the paper proposes an evaluation method of social information super-network key nodes information interaction comprehensive ability based on eigenvector centrality, which is verified and analyzed through examples.

Keywords: social networks; super-network; characteristic vector; information interaction; knowledge node

近年来社交网络信息交互相关问题的研究, 因其蕴含巨大的经济、社会价值, 引起了业界的极大兴趣与广泛关注, 而全面合理地对社交网络信息交互系统中的重要节点作出评判则具有十分重要的意义, 首先, 对这些重要节点的分析与探究, 有助于理解社交网络的演化以及社交网络中信息交互的模式和途径; 其次, 评判的结果可以用来干预社交信息的交互与散播, 如加速有重要社会价值信息的散播和监督防控谣言的流行; 另外, 研究的结果也可考虑应用于社会推荐及广告投放等领域^[1]。

从现有工作看, 较多研究偏重于同质节点的社交网络信息交互研究, 而对社交网络的信息交互系统而言, 同属性社交网络信息交互模型具有较多的局限性与片面性。作为一个复杂的社会信息系统, 社交网络信息交互系统中包含了多种不同要素, 在同属性或非同属性的要素之间还存在错综复杂的相互关联关系。如此复杂的构成及结构形态, 很难用单一要素模式的网络模型进行描述, 更难以进行全面深入的分析和探究。另外, 从社交网络信息交互管理的研究及应用来看, 也迫切需要建立较为真实的、具有代表性的、可较全面深入描述社交网络信息交互系统的整

体集成模型, 而同属性节点的社交信息网络无法满足这种要求, 因此, 只有在异质节点的社交信息网络思想基础上进一步深入探究才有可能。

对此本研究拟采用超网络的思想和方法进行研究。Nagurney 在处理交织网络时, 把高于而又超于现存网络的网络称为“超网络”(Supernetwork)^[2], 使得超网络的含义开始明确。王众托院士和王志平教授则进一步提出了超网络的特征^[3-4]。目前超网络的研究主要有: 基于变分不等式的研究^[5-7], 主要是将多分层、多标准的超网络平衡模型转化为优化问题, 然后用进化变分不等式来解决^[3]。基于系统科学的研究^[8-11], 主要从整体和局部对超网络进行研究, 包括超网络中网络与网络间关系的研究, 利用外界与网络间关系对网络的研究, 以及整体性能的研究。本研究的建模工作受到这方面研究的启发与帮助。基于超图的研究被认为是另外一个较为重要的研究方向^[11, 12-14]。

1 社交信息超网络建模

社交信息超网络模型是在笔者之前构建的 EIDSN 模型基础上进行的改进和应用^[10], 主要是将超网络理论方法应用于社交网络信息交互系统: 社交网络的信息交互系统中, 存在着众多的信息交互载体, 如移动通信终端(包括传统手机、智能手机、便携平板等)、互联网信息交互载体(包括电子邮件、微博、QQ 等形式)、人、固定电

^{*} 本文为国家自然科学基金资助项目“非常规突发事件的网络信息传播规律与预警机制研究”(项目编号: 71071098)和上海市一流学科建设项目(项目编号: S1201YLXK)的研究成果。

话等,但在当前的社交网络信息交互过程中,尤以互联网信息交互载体、人和移动通信终端这3种信息交互载体相对最为活跃和最具代表性,起的作用也更为重要,为了简化与凸显,本研究分别针对互联网信息交互载体、人和移动通信终端这3种信息交互载体建立3种类型的社交信息网络模型:①互联网信息交互载体和各个互联网信息交互载体之间的信息交互关系构建起来的网络称之为互联网信息交互载体的信息交互网络,简称之互联网信息交互载体网络,其节点为该网络中的各个互联网信息交互载体,边表示该网络成员之间的信息交互关系。②移动通信终端和各个移动通信终端之间的信息交互关系构建起来的网络称之为移动通信终端信息交互网络,其节点为该网络中的各个移动通信终端,边表示该网络成员之间的信息交互关系。③社交网络信息交互相关人员和他们之间的信息交互关系构建起来的网络称之为人际信息交互网络,其节点为该网络中的各个相关人员,边表示该网络成员之间的信息交互关系。

上述3个社交信息网络模型之间还存在着3种映射关系:①互联网信息交互载体与移动通信终端之间的映射,指哪些移动通信终端可以直接连接互联网,和哪些互联网信息交互载体存在信息交互关联,哪些互联网信息交互载体可以直接与哪些移动通信终端存在信息交互关联。②人与互联网信息交互载体之间的映射,指哪些人使用或可能使用互联网,与哪些互联网信息交互载体存在信息交互关联,哪些互联网信息交互载体与哪些人存在信息交互关联。③人与移动通信终端之间的映射,指哪些人使用或可能使用哪些移动通信终端,使用或可能使用哪些移动通信终端的有哪些人。在3个社交信息网络模型的基础上,可将上述映射关系也当作连边加进去,从而将移动通信终端信息交互网络、人际信息交互网络和互联网信息交互载体网络集成起来,构建起一个包含了3种类型节点和6种类型连边的超网络。该超网络的全名可称之为一种具有代表性的社会化信息交互超网络,本研究简称之为社交信息超网络(Social Information Interaction Supernetwork, SIISN)。

$$SIISN = f(G_i, G_p, G_m)$$

$$= G_i + G_p + G_m + E_{p-i} + E_{p-m} + E_{m-i} \\ = (I, P, M, E_{I-I}, E_{P-P}, E_{M-M}, E_{P-I}, E_{P-M}, E_{M-I})$$

其中, $G_m = (M, E_{M-M})$, $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 为移动通信终端信息交互网络成员的集合; $E_{M-M} = \{(m_i, m_j) \mid m_i, m_j \in M\}$ 为移动通信终端信息交互网络成员之间边的集合,边 (m_i, m_j) 表示移动通信终端信息交互网络成员 m_i 与 m_j 之间存在信息交互关联; $G_p = (P, E_{P-P})$, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_b\}$ 为人际信息交互网络成员的集合; $E_{P-P} =$

$\{(p_i, p_j) \mid p_i, p_j \in P\}$ 为人际信息交互网络成员之间边的集合,边 (p_i, p_j) 表示人际信息交互网络成员 p_i 与 p_j 之间存在信息交互关联; $G_i = (I, E_{I-I})$, $I = \{i_1, i_2, \dots, i_c\}$ 为互联网信息交互载体网络成员的集合, $E_{I-I} = \{(i_i, i_j) \mid i_i, i_j \in I\}$ 为互联网信息交互载体网络成员之间边的集合,边 (i_i, i_j) 表示互联网信息交互载体网络成员 i_i 与 i_j 之间存在信息交互关联; 令 $p_i \in P$, $i_j \in I$, $m_l \in M$ 分别表示人际信息交互网络、互联网信息交互载体网络、移动通信终端信息交互网络的任一节点,布尔变量 $\phi(p_i, i_j)$ 、 $\varphi(p_i, m_l)$ 、 $\gamma(i_j, m_l)$ 分别表示不同类型节点之间是否相互关联,当值为1时相互关联,为0时不相互关联, $E_{p-i} = \{(p_i, i_j) \mid \phi(p_i, i_j) = 1\}$ 表示相关人员与互联网信息交互载体之间边的集合; $E_{p-m} = \{(p_i, m_l) \mid \varphi(p_i, m_l) = 1\}$ 表示相关人员与移动通信终端之间边的集合; $E_{m-i} = \{(i_j, m_l) \mid \gamma(i_j, m_l) = 1\}$ 表示互联网信息交互载体与移动通信终端之间边的集合。

之前的EIDSN模型中的节点主要是信息载体,而SIISN中的节点则主要指信息交互载体,强调信息的双向交互而并非信息的单向传播或展现。EIDSN模型中的M节点主要是指传统手机,M-M网络为传统手机网络,但近些年,可以连接互联网的移动通信终端发展迅猛,2012年中国的智能手机拥有率从2011年的15%提升到2012年的31%,智能手机将成为继台式电脑后中国用户最主要的上网终端^[15],而平板电脑2012年的出货量达到1.28亿台,增幅78.4%,居全球智能联网设备之冠^[16],且最新的Adobe Digital Index显示,来自平板电脑的网络流量已超过了来自智能手机的网络流量^[17],而且越来越多的平板具备手机功能。由上可见,智能手机、便携平板等移动通信终端的快速发展使其在社交网络信息交互系统中的作用与地位不容忽视,因而本研究在构建SIISN模型的过程中特地指出此处M类节点代表移动通信终端,不仅包括传统手机更加涵盖智能手机、便携平板等新锐信息交互载体,而此处的M-M网络为移动通信终端信息交互网络,以期SIISN模型能够更加全面和具有代表性。

2 SIISN中重要节点的评判

此阶段可以利用一些社会网络分析工具来进行辅助研究。图1为一社交网络信息交互系统的三网融合之超网络示意图,图中移动通信终端信息交互网络从上到下的节点标识依次为:m1、m5、m4、m3、m2;人际信息交互网络从左到右的节点标识依次为:p6、p3、p5、p4、p2、p1、p7;互联网信息交互载体网络从上到下的节点标识依次为:i6、i3、i1、i2、i4、i5、i7。其邻接矩阵及基于SIISN模型的网络直观图可以通过UCINET、NetDraw得出,如

图2、图3所示,其中,互联网信息交互载体网络的节点用圆形符号标识,互联网信息交互载体网络成员之间的信息交互关系则由点线(·····)标识;人际信息交互网络的节点用三角形符号标识,人际信息交互网络成员之间的信息交互关系则由虚线(---)标识;移动通信终端信息交互网络的节点用正方形符号标识,移动通信终端信息交互网络成员之间的信息交互关系则由粗实线(——)标识;而各个同质子网络之间的关联关系则由细实线(——)进行标识,从而可以根据实际情况较为清晰分明地表示出该社交网络信息交互系统的结构形态与复杂构成。

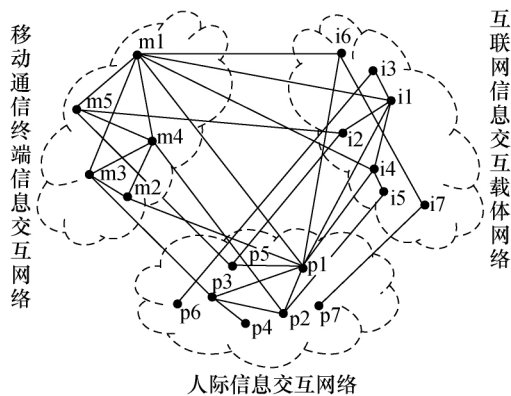


图1 三网融合之超网络示意图

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	m1	m2	m3	m4	m5	i1	i2	i3	i4	i5	i6	i7
1 p1	0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
2 p2	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
3 p3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
4 p4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
5 p5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
6 p6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
7 p7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
8 m1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
9 m2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10 m3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
11 m4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
12 m5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
13 i1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
14 i2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
15 i3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
16 i4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
17 i5	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
18 i6	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
19 i7	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

图2 SIISN的邻接矩阵

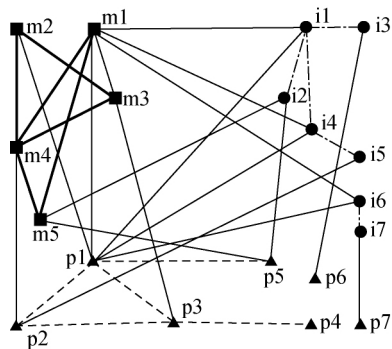


图3 SIISN的网络直观图

特征向量中心性理论认为一个节点的重要程度与其相连其他节点的重要程度息息相关,即对于一个节点来说,如果该节点与很多本身具有较高中心度的点相连接的话,

那么该点就具有高的重要程度^[18]。以 $C_E(v_i)$ 代表节点 v_i 的特征向量中心性,该值正比于所有邻居节点特征向量中心性度量总和,即: $C_E(i) \propto \sum C_E(j)$,也可以表示为: $C_E(i) \propto \sum_j A_{ij} C_E(j)$,其中 A 是该网络的邻接矩阵。节点 i 特征向量中心性定义如下: $C_E(i) = \lambda^{-1} \sum_j A_{ij} C_E(j)$ ^[18-19],式中, λ 为常数。特征向量中心性可以认为是度中心性的改进,即可以通过递归求解节点度中心性,从而得到特征向量中心性,具体算法描述如下:

set $C_E(i) = 1$ for all i ;

do

{ compute $C_E^*(i) = \sum_j A_{ij} C_E(j)$ for all i ;

set $\lambda = \sqrt{\sum_i [C_E^*(i)]^2}$;

set $C_E(i) = \frac{C_E^*(i)}{\lambda}$ for all i ;

} Until (λ stops changing)

算法中第一次执行完所得的结果 $C_E^*(i)$ 就是各节点的度中心性度量^[18-19]。以图1所示的社交网络信息交互系统为例,通过 UCINET 可计算出该社交网络信息交互系统中所有节点在整个超网络中的特征向量中心性如表1所示。

表1 各节点在整个超网络中的特征向量中心性

	1	2
	Eigenvec	nEigenvec
p1	0.441	62.313
p2	0.228	32.261
p3	0.209	29.526
p4	0.045	6.406
p5	0.178	25.217
p6	0.015	2.073
p7	0.010	1.388
m1	0.430	60.830
m2	0.213	30.110
m3	0.248	35.109
m4	0.292	41.360
m5	0.229	32.326
i1	0.297	41.976
i2	0.153	21.592
i3	0.068	9.557
i4	0.277	39.187
i5	0.10	15.501
i6	0.199	28.105
i7	0.045	6.399

由表1可见,节点 p1 的特征向量中心性为 0.441,节点 m1 的特征向量中心性为 0.430,相对较高。即在整个超网络中节点 p1 和 m1 连接的重要节点较多,系统地位比

较突出，它们在社交信息的交互过程中较为重要，可以通过调整或控制信息的交互而影响整个社交网络信息系统。在社交网络的信息交互过程中，若对 $p1$ 、 $m1$ 两个节点进行监测或干预，则会对整个社交网络信息交互系统影响较大，如可以相对有效地对有害信息的交互进行预警和控制；亦可加速有益信息的交互与传递，此外这两节点也是进行社会推荐或广告投放的较好选择。

特征向量中心性算法是当前最常用的重要节点的评判方法之一，有着广泛的应用，但在超网络视域下，该算法却存在一定的局限性：此处的特征向量中心性计算是将超网络中的所有节点一视同仁，未再区分各个节点各属于超网络的哪个子网络层级（SIISN 中有两个子网络层级：同质节点子网络层级，包括 $M-M$ 网络、 $P-P$ 网络、 $I-I$ 网络；异质节点子网络层级，包括 $M-P$ 网络、 $M-I$ 网络、 $P-I$ 网络）、各属于哪个子网络，而且各个节点之间的连边也没有进行区分，子网络内部的连边和子网络之间的连边没有区别。这样就未能体现某个节点在其所属子网络层级和所属子网络内的信息交互能力进行测度。参照图 3 与表 1，例如 $i6$ 节点，其特征向量中心性 $C_E(i6) = 0.199$ ；而 $i3$ 的特征向量中心性 $C_E(i3) = 0.068$ ，这样看似 $i6$ 节点比 $i3$ 节点的系统地位更为突出，但在同质节点的信息交互过程中， $i3$ 节点存在特征向量中心性， $i3$ 与 $i1$ 节点直接相连，与 $i2$ 、 $i4$ 、 $i5$ 间接相连，而 $i6$ 节点仅与 $i7$ 节点相连，且 $i6 \sim i7$ 与其他节点均不连通，即 $i6$ 此时的特征向量中心性为 0，故 $i3$ 节点比 $i6$ 节点更具重要地位，而在异质节点的信息交互过程中，如节点 $p2$ 、 $p3$ ，通过分析、计算可以发现有时 $C_E(p3) > C_E(p2)$ ，有时 $C_E(p3) < C_E(p2)$ ，同一层级的节点系统地位测度并未统一。另外现有特征向量中心性算法也未能体现某个节点在同质子网络间的连接地位，也就未能对该节点在同质子网络之间的信息交互能力即网际信息交互能力进行衡量。如节点 $m4$ ，其特征向量中心性 $C_E(m4) = 0.292$ ；节点 $m5$ ，其特征向量中心性 $C_E(m5) = 0.229$ ，这样看似 $m4$ 比 $m5$ 节点更为重要，系统地位更为突出，但从信息交互的具体情况看，在超网络中 $m5$ 与移动通信终端信息交互网络、人际信息交互网络、互联网信息交互载体网络都有关联，而 $m4$ 则只与移动通信终端信息交互网络和人际信息交互网络有关联，与互联网信息交互载体网络并不直接连通，从这个角度来说， $m5$ 比 $m4$ 更为重要，系统地位更为突出。为了避免上述不足，本文以 SIISN 模型为基础，构建一个社交信息超网络中重要节点的综合评判算法，以求兼顾。具体步骤如下：

设 i 为社交信息超网络中的任一节点，网内信息交互

能力采用特征向量中心性算法进行测度，网际信息交互能力采用文献 [10] 中提出的 $ZJCN(i)$ 算法进行测度比较， $ZJCN(i)$ 算法根据本研究需要调整后如下：

$QC_D(i)$ 表示节点 i 在整个超网络中的程度中心性， $ZC_D(i)$ 表示 i 在其所属同质子网络中的程度中心性， $LZS(i)$ 为节点 i 连接的同质子网络数目， $ZJBS(i)$ 为节点 i 在同质子网络之间的连边数目，从上文分析可以得到： $ZJBS(i) = QC_D(i) - ZC_D(i)$ 。

Select Case $LZS(A)$

Case $IS > LZS(B)$

$ZJCN(A) > ZJCN(B)$

Case $IS < LZS(B)$

$ZJCN(A) < ZJCN(B)$

Case $IS = LZS(B)$

Select Case $ZJBS(A)$

Case $IS > ZJBS(B)$

$ZJCN(A) > ZJCN(B)$

Case $IS < ZJBS(B)$

$ZJCN(A) < ZJCN(B)$

Case $IS = LZS(B)$

$ZJCN(A) = ZJCN(B)$

End Select

End Select

步骤 1：计算、比较节点 i 在其所属的同质节点子网络层级的特征向量中心性 $ZC_E(i)$ 。

步骤 2：计算、比较节点 i 在其所属的异质节点子网络层级的特征向量中心性 $JC_E(i)$ 和网际信息交互能力 $ZJCN(i)$ ，进而得到节点 i 在其所属的异质节点子网络层级的信息交互能力指数 $JIIA(i)$ 。

分析可知，在这个三网融合的超网络中，每一个节点必然会被包含到两个异质节点子网络中，因而任一节点必会得到对应的两个在异质节点子网络中的相应数值，且这两个都包含节点 i 的异质节点子网络地位均等， $JIIA(i)$ 的算法如下：

Select Case i

Case $IS \in M$

$$JIIA(i) = (J_{MP}IIA(i) + J_{MI}IIA(i)) * 0.5$$

$$= ((\frac{R(J_{MP}C_E(i)) - R_{\min}(J_{MP}C_E(i))}{R_{\max}(J_{MP}C_E(i)) - R_{\min}(J_{MP}C_E(i))} * (1 - w_1) + \frac{R(ZJCN_{MP}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{MP}(i))}{R_{\max}(ZJCN_{MP}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{MP}(i))} * w_1 + 0.5)^{-1} + (\frac{R(J_{MI}C_E(i)) - R_{\min}(J_{MI}C_E(i))}{R_{\max}(J_{MI}C_E(i)) - R_{\min}(J_{MI}C_E(i))} * (1 - w_2) + \frac{R(ZJCN_{MI}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{MI}(i))}{R_{\max}(ZJCN_{MI}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{MI}(i))} * w_2 + 0.5)^{-1}) * 0.5$$

Case IS $\in P$

$$\begin{aligned} JIA(i) &= (J_{MP}IA(i) + J_{PI}IA(i)) * 0.5 \\ &= ((\frac{R(J_{MP}C_E(i)) - R_{\min}(J_{MP}C_E(i))}{R_{\max}(J_{MP}C_E(i)) - R_{\min}(J_{MP}C_E(i))} * (1 - w_1) + \\ &\quad \frac{R(ZJCN_{MP}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{MP}(i))}{R_{\max}(ZJCN_{MP}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{MP}(i))} * w_1 + 0.5)^{-1} + \\ &\quad (\frac{R(J_{PI}C_E(i)) - R_{\min}(J_{PI}C_E(i))}{R_{\max}(J_{PI}C_E(i)) - R_{\min}(J_{PI}C_E(i))} * (1 - w_3) + \\ &\quad \frac{R(ZJCN_{PI}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{PI}(i))}{R_{\max}(ZJCN_{PI}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{PI}(i))} * w_3 + 0.5)^{-1}) * 0.5 \end{aligned}$$

Case IS $\in I$

$$\begin{aligned} JIA(i) &= (J_{PI}IA(i) + J_{MI}IA(i)) * 0.5 \\ &= ((\frac{R(J_{PI}C_E(i)) - R_{\min}(J_{PI}C_E(i))}{R_{\max}(J_{PI}C_E(i)) - R_{\min}(J_{PI}C_E(i))} * (1 - w_3) + \\ &\quad \frac{R(ZJCN_{PI}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{PI}(i))}{R_{\max}(ZJCN_{PI}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{PI}(i))} * w_3 + 0.5)^{-1} + \\ &\quad (\frac{R(J_{MI}C_E(i)) - R_{\min}(J_{MI}C_E(i))}{R_{\max}(J_{MI}C_E(i)) - R_{\min}(J_{MI}C_E(i))} * (1 - w_2) + \\ &\quad \frac{R(ZJCN_{MI}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{MI}(i))}{R_{\max}(ZJCN_{MI}(i)) - R_{\min}(ZJCN_{MI}(i))} * w_2 + 0.5)^{-1}) * 0.5 \end{aligned}$$

End Select

其中, $R(x)$ 为排序函数, 其计算结果为名次, $w_y \in [0, 1]$, 下同。

步骤 3: 计算、比较节点 i 在整个超网络中的特征向量中心性 $QC_E(i)$ 和网际信息交互能力 $ZJCN(i)$, 进而得到节点 i 在全网层级的信息交互能力指数 $QIIA(i)$ 。

$$\begin{aligned} QIIA(i)^{-1} &= \frac{R[QC_E(i)] - R_{\min}[QC_E(i)]}{R_{\max}[QC_E(i)] - R_{\min}[QC_E(i)]} * (1 - w_4) + \\ &\quad \frac{R[ZJCN(i)] - R_{\min}[ZJCN(i)]}{R_{\max}[ZJCN(i)] - R_{\min}[ZJCN(i)]} * w_4 + 0.5 \end{aligned}$$

步骤 4: 综合上述 3 个步骤的计算、分析结果, 根据具体情况综合评判该社交网络信息交互系统中的重要节点。

步骤 1 将超网络中的各个同质节点子网络都看成一个独立整体, 计算其中节点在该子网络中的特征向量中心性, 进而可以得到该子网络层级节点在该子网络层级中的一张特征向量中心性强弱表, 排定该子网层级节点在该子网层级中的信息交互能力强弱, 从同质节点子网络角度出发对重要节点的评判提供参考。步骤 2 主要是从异质节点子网络角度出发, 将超网络中的每个异质节点子网络看成一个独立的整体, 计算其中节点在该子网络中的特征向量中心性和网际信息交互能力测度, 从而可以得到该子网络层级节点在该子网络层级中的特征向量中心性和网际信息交互能力测度强弱表, 进而排定该子网络层级节点在该子网络层级中的信息交互综合能力强弱, 从异质节点子网络角度出发对重要节点的评判提供参考。步骤 3 包含原特征

向量中心性算法, 该步骤可以得到超网络中所有节点在整个超网络中的特征向量中心性和网际信息交互能力测度强弱表, 进而得到所有节点在全网中的信息交互综合能力指数强弱表, 从全局角度出发对重要节点的评判提供参考。当然在具体操作中, 还应依据实际情况确定参考的主次标准, 综合起来对重要节点进行评判, 其中 w 的取值也可根据实际需要进行调整、设定。

3 验证与分析

仍以图 1 所示的社交网络信息交互系统为例, 新算法的求解过程如下:

1) 可以通过计算社交网络信息交互系统中的节点在其所属同质子网络内的特征向量中心性得到, 其运算结果如表 2 所示。

表 2 同质子网层级的节点特征向量中心性

	1 Eigenvec	2 nEigenvec
1 p1	0.565	79.917
2 p3	0.565	79.917
3 p2	0.491	69.409
4 p4	0.245	34.705
5 p5	0.245	34.705
6 p6	0.000	0.000
7 p7	0.000	0.000
	1 Eigenvec	2 nEigenvec
1 m4	0.559	79.059
2 m1	0.470	66.462
3 m3	0.470	66.462
4 m2	0.351	49.574
5 m5	0.351	49.574
	1 Eigenvec	2 nEigenvec
1 i1	0.653	92.388
2 i4	0.500	70.711
3 i2	0.354	50.000
4 i3	0.354	50.000
5 i5	0.271	38.268
6 i6	0.000	0.000
7 i7	0.000	0.000

2) 其计算、分析的结果整理后如表 3 所示。

表3 异质子网层级的节点信息交互能力表 ($w=0.5$)

i	$J_{PM}IIA(i)$	$J_{PI}IIA(i)$	$J_{MI}IIA(i)$	$JIIA(i)$
p1	1.833	2.000	—	1.917
m1	1.189	—	2.000	1.595
i1	—	1.268	1.073	1.171
m4	1.333	—	0.957	1.145
i4	—	1.209	1.023	1.116
p2	0.978	1.156	—	1.067
m5	0.936	—	1.128	1.032
m3	1.128	—	0.917	1.022
p5	0.898	1.061	—	0.980
p3	1.023	0.867	—	0.945
i2	—	0.945	0.936	0.941
i6	—	0.981	0.898	0.940
m2	1.073	—	0.786	0.929
i5	—	1.020	0.688	0.854
i3	—	0.912	0.710	0.811
i7	—	0.852	0.667	0.760
p6	0.688	0.825	—	0.756
p7	0.667	0.800	—	0.733
p4	0.710	0.722	—	0.716

3) 其计算、分析的结果如表4所示, 其中其全网节点的特征向量中心性的计算结果即为表5所示。

表4 节点在全网中的网际信息交互能力顺序表

次序	节点	关联子网数	网间边数
1	p1	3	5
2	m1	3	4
3	p2	3	2
3	m5	3	2
3	i2	3	2
4	i4	2	2
4	p5	2	2
4	i1	2	2
4	i6	2	2
5	p3	2	1
5	i5	2	1
5	m3	2	1
5	i3	2	1
5	m2	2	1
5	m4	2	1
5	p6	2	1
5	p7	2	1
5	i7	2	1
6	p4	1	0

4) 上述结果可以看出, 从各个节点在其所属同质节点子网络内的特征向量中心性来看, p1 和 p3 节点在人际信息交互网络中的特征向量中心性值最高且相等, $ZC_E(p1) = ZC_E(p3) = 0.565$, 即在人际信息交互网络内是 p1 和 p3 对等双强状态, p1 和 p3 在该子网络内连接的重要节点最多, 系统地位最为突出, 信息交互能力最强; m4

表5 全网中节点信息交互综合能力指数表 ($w=0.5$)

i	$R[QC_E(i)]$	$R[ZJCN(i)]$	$QIIA(i)$
p1	1	1	2.000
m1	2	2	1.593
i1	3	4	1.169
m5	7	3	1.154
p2	8	3	1.118
i4	5	4	1.098
m4	4	5	1.017
i2	13	3	0.968
m3	6	5	0.963
i6	11	4	0.928
p5	12	4	0.905
m2	9	5	0.891
p3	10	5	0.870
i5	14	5	0.793
i3	15	5	0.776
i7	17	5	0.744
p6	18	5	0.729
p7	19	5	0.714
p4	16	6	0.706

在移动通信终端信息交互网络中的特征向量中心性值最高, $ZC_E(m4) = 0.559$, m1 和 m3 的值比其略低, 即 m4 在移动通信终端信息交互网络中连接的重要节点最多, 系统地位最为突出, 信息交互能力最强, m1 和 m3 略次之; i1 在互联网信息交互载体网络中的特征向量中心性值最高, $ZC_E(i1) = 0.653$, 且远高于其他节点, 即 i3 在互联网信息交互载体网络中连接的重要节点最多, 系统地位最为突出, 信息交互能力最强; 在社交网络的信息交互过程中, 若对上述某些节点进行监测或干预, 则可以较强地影响、调控这些节点所属同质子网络中的信息交互, 如可以相对有效地对有害信息的交互进行预警和控制; 或可加速有益信息的交互与传递, 此外上述节点也是其所属同质子网络内进行社会推荐或广告投放的良好选择。而 i3 和 i6 在同质子网层级的特征向量中心性分别为 $ZC_E(i3) = 0.354$ 和 $ZC_E(i6) = 0$, 即此时 i3 连接的重要节点较多, 系统地位较为突出, 信息交互能力较强。而从异质子网的角度来看, M-P 网中 p1 的信息交互综合能力最强, m4、m1 次之; P-I 网内还是 p1 的信息交互综合能力最强, i1、i4 次之, 同时也可以看出此时 p1 在 P-I 网中的信息交互综合能力指数要强于 p1 在 M-P 网中的值, 即 p1 在 P-I 网中的系统地位更为突出、信息交互综合能力更强; M-I 网中 m1 的信息交互综合能力指数强于其他节点, 系统地位最为突出。若想对某异质子网内的信息交互施加影响 (如监测控制有害信息交互, 加速促进有益信息交互, 进行社会推荐或广告投放等) 则可对该异质子网对应的上述节点进行操作, 效果较好。从所有节点在整个超网络

中的信息交互综合能力指数来看, p_1 的值最高, $QIIA(p_1) = 2.0$; p_4 最低, $QIIA(p_4) = 0.706$; i_3 和 i_6 的值分别为 $QIIA(i_3) = 0.776$ 和 $QIIA(i_6) = 0.928$ 。这说明在该社交网络信息交互系统中, 节点 p_1 在整个超网络中系统地位最为突出, 信息交互综合能力最强。而此时 p_4 在整个超网络中的信息交互综合能力最弱, 地位最低。而 i_3 、 i_6 介于两者之间, 且 i_6 在全网层级的信息交互综合能力强于 i_3 。同时也可以从上述计算结果中分析得出, i_3 和 i_6 两节点相比较, i_3 在同质子网层级的信息交互综合能力较强而 i_6 在全网层级和异质子网层级的信息交互综合能力较强。另外由表 2 及表 5 可以看到, 虽然 m_4 在移动通信终端信息交互网络内的信息交互能力最强、系统地位最为突出, m_5 在移动通信终端信息交互网络内的信息交互能力最弱, 地位最低, 但从网络间的信息交互角度看, m_5 与 3 个信息交互子网络连通, 有 2 条网间连边, 而 m_4 仅连通 2 个信息交互子网络, 只有 1 条网间连边, 因而 m_5 的网际信息交互能力要比 m_4 更强一些。即节点 m_4 与 m_5 相比较, m_4 网内的信息交互能力较强、系统地位较为突出而 m_5 的网际信息关联地位较高、网间的信息交互能力较强。

由上可见本研究提出的基于特征向量中心性的社交信息超网络中重要节点的综合评判算法在一定程度上弥补了原方法的不足, 新算法分别从同质子网层级、异质子网层级、全网层级及网内维度和网间维度, 对社交网络信息交互载体节点的信息交互综合能力、系统地位等作出测度与评判, 从而更为全面与合理。

4 结束语

本文主要将超网络、特征向量中心性的理论方法应用于社交网络信息交互系统中重要节点的评判研究, 提出一种基于特征向量中心性的社交信息超网络节点信息交互能力、系统地位的综合评判方法, 并通过例子进行了验证与分析。相对而言, 社交信息超网络模型 SIHSN 在载体节点和关联关系上的定义及描述更加完善和具有代表性, 其应用面也更为宽广, 不仅涵盖 EIDSN 模型较多关注的不良信息交互的防控及引导, 而且有益信息交互的推广或促进(如网络救助信息的交互传递、微博打拐、科学知识推广普及等)、社会推荐、广告投放等也可纳入其中。SIHSN 模型可以作为之后社交网络信息交互相关问题研究的基础, 之后的许多工作可以在该模型上进行展开。我们目前的工作还比较粗糙, 希望广大专家与同行多多赐教与帮助。□

参考文献

[1] 科学网. PLoS ONE [EB/OL]. [2013-03-31]. <http://>

blog.sciencenet.cn/blog-3075-466991.html.

- [2] NAGURNEY A, DONG J. Supernetworks: decision-making for the information age [M]. Cheltenham: Edward Elgar Publishing, 2002.
- [3] 王志平, 王众托. 超网络理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [4] 王众托, 王志平. 超网络初探 [J]. 管理学报, 2008, 5 (1): 1-8.
- [5] NAGURNEY A. Optimal supply chain network design and redesign at minimal total cost and with demand satisfaction [J]. International Journal of Production Economics, 2010, 128 (1): 200-208.
- [6] NAGURNEY A, YU M, QIANG Q. Supply chain network design for critical needs with outsourcing [J]. Regional Science, 2011, 90 (1): 123-142.
- [7] 朱莉, 曹杰. 灾害风险下应急资源调配的超网络优化研究 [J]. 中国管理科学, 2012, 20 (6): 141-148.
- [8] 席运江, 党延忠, 廖开际. 组织知识系统的知识超网络模型及应用 [J]. 管理科学学报, 2009, 12 (3): 12-20.
- [9] 于洋, 党延忠, 吴江宁, 等. 基于超网络的知识传播趋势分析 [J]. 情报学报, 2010, 29 (2): 356-361.
- [10] 武澎, 王恒山. 突发事件信息传播超网络建模及重要节点判定 [J]. 情报学报, 2012, 31 (7): 722-729.
- [11] 武澎, 王恒山, 李煜, 等. 突发事件信息传播超网络中重要调控节点的判定研究 [J]. 图书情报工作, 2013, 57 (1): 112-116, 148.
- [12] SEGOVIA-JUAREZ J L, COLOBANO S, KIRSCHNER D. Identifying DNA splice sites using hypernetworks with artificial molecular evolution [J]. Biosystems, 2007, 87 (2-3): 117-124.
- [13] 王众托. 关于超网络的一点思考 [J]. 上海理工大学学报, 2011, 33 (3): 229-237.
- [14] 胡枫, 赵海兴, 马秀娟. 一种超网络演化模型构建及特性分析 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2013, 43 (1): 16-22.
- [15] 爱立信消费者研究室. 2012 年中国城市通信行为研究报告 [EB/OL]. [2013-03-31]. <http://www.199it.com/archives/100723.html>.
- [16] IDC. 2012 年全球智能上网设备出货量突破 10 亿台 [EB/OL]. [2013-03-31]. <http://tech.sina.com.cn/it/2013-03-28/08538190481.shtml>.
- [17] 全球平板电脑网络流量首超智能手机 [EB/OL]. [2013-03-31]. <http://m.donews.com/201303/1434967.shtml>.
- [18] 刘军. 整体网分析讲义: UCINET 软件实用指南 [M]. 上海: 格致出版社, 2009.
- [19] 王德正, 夏阳. 网络性能度量研究 [J]. 武汉理工大学学报, 2011, 33 (3): 375-378.

作者简介: 武澎, 男, 1981 年生, 博士生, 讲师。

王恒山, 男, 1948 年生, 教授, 博士生导师。

收稿日期: 2013-10-14