

基于可拓基元理论的复杂社会网络分析模型

李珊珊¹, 刘巍², 高红²

1. 大连海事大学交通运输管理学院, 大连 116026

2. 大连海事大学数学系, 大连 116026

摘要 针对传统社会网络分析模型存在的不足, 根据可拓学中的基元理论, 结合社会网络分析理念及方法, 研究一种新的复杂社会网络分析模型。利用多维物元表示复杂社会的整体特征、节点属性和网络分析测度, 丰富节点的现实涵义; 利用多维关系元表示节点之间的关系, 充分体现网络中关系的多重性; 利用多维事元表示网络结构及环境变化的细节信息, 构建了复杂社会网络的多维可拓基元分析模型。通过实例分析, 验证了该模型的实用性及优越性。

关键词 复杂社会网络; 分析模型; 可拓基元

中图分类号 C912

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.36.002

A Complex Social Network Analysis Model Based on Extenics Basic-element Theory

LI Shanshan¹, LIU Wei², GAO Hong²

1. School of Transportation Management, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

2. Department of Mathematics, Dalian Maritime University, Dalian 116026, China

Abstract To solve the problem existing in traditional social network analysis models, we establish a new complex social network model of multidimensional basic-element by means of the extenics theory and using social network analysis concepts and methods. We present the expressions of the characteristics of complex social network and nodes using multidimensional matter-element, the relationships using relation-element, and the network dynamic evolution process using affair-element. We analyze the integration of the extenics theory and social network analysis in detail, so as to give full play to their respective advantages and obtain a good combination. Using a simple instance, we verify the practicality and superiority of the model.

Keywords complex social network; analysis model; extenics basic-element

现实世界中大量的复杂系统都可以通过网络视角加以描述。对复杂社会网络深入研究, 可以更好地了解现实世界之中社会、经济的复杂系统, 并进一步解释其一般本质。社会网络分析(social network analysis, SNA), 是研究复杂社会网络的最主要方法, 它能够对网络中行动者之间的关系进行量化分析, 以可视化的图形展示行为者之间的深层次关系, 描述群体关系的结构。SNA 为分析网络中节点在网络中的

地位、节点间的互动结构关系以及整体网络结构特征提供了良好的定量分析支撑^[1], 目前已广泛应用于社会学、经济学、人类学和情报学等领域。

但是伴随着网络复杂度的增加, 行动者关系的多重性体现得愈加明显。从连接结构看, 行动者之间的关系包括多个不同的主体, 它们相互连接构成关系网络; 从经济结构看, 执行不同活动的行动者之间在价值网中相互连接, 相互作用,

收稿日期: 2014-10-23; 修回日期: 2014-11-30

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(2014025004); 中央高校基本业务经费项目(3132014324); 大连海事大学教改项目(2014Y33)

作者简介: 李珊珊, 博士研究生, 研究方向为运输管理优化理论与应用, 电子信箱: tinalee@dmlu.edu.cn; 刘巍(通信作者), 教授, 研究方向为优化管理, 电子信箱: liuwei09@aliyun.com

引用格式: 李珊珊, 刘巍, 高红. 基于可拓基元理论的复杂社会网络分析模型[J]. 科技导报, 2014, 32(36): 21-25.

完成价值网络活动,形成商业网络;从社会结构看,不同组织的人员参与,有情感、认知、文化、语言等社会现象的连接,构成社会网络^[2]。即相同的一组行动者节点,可从不同角度出发,形成无数不同的网络结构,且随时间不断地变化,这就是关系的多重性^[3]。

在这一趋势下,如何更方便、更系统、更全面地表达和研究社会、经济网络,成为值得深入探讨的课题。在以往的网络分析模型中,网络节点及关系性质单一,若变换角度研究网络中节点的其他属性,或节点间的另一层关系,则必须重新构建网络。为了解决此类问题,提高网络分析的效率,本文研究一种基于可拓基元理论的复杂社会网络分析模型。

1 多维可拓基元模型的构建

蔡文教授创立的可拓学,建立了可拓基元的概念,把事

物、特征和量值综合考虑,用基元描述信息、知识、智能行为等,作为可拓论的逻辑细胞^[4,5]。基元包括物元、事元和关系元,基元概念将物(质)、事与关系的相应特征分别统一在一个三元组中,从而形式化描述物、事和关系^[6]。

基于多维可拓基元的复杂社会网络模型如图1所示。本模型可用于描述网络中的节点、关系连接、动态变化以及分析运算的规律。其目的在于能够完整地表达复杂社会网络的节点信息及关系信息,并且利用事元清晰地描述网络外界环境及节点变化规律,使得研究者能够对多元的静态网络属性、动态的网络演化行为进行表示、推理及量化分析,从而获得矛盾问题的求解策略,以期实现复杂社会网络结构矛盾问题解决策略的共享和重用。还可以在本模型基础上进一步研究网络基元的可拓性和物的共轭性,探讨可拓变换的类型和性质等。

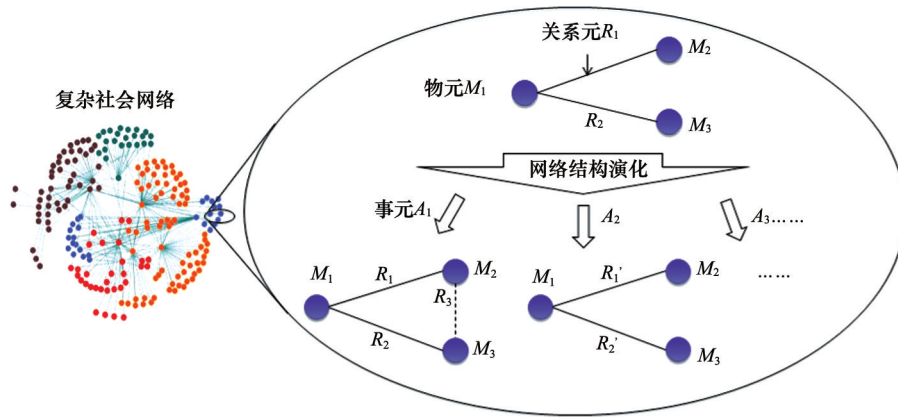


图1 基于可拓基元的复杂社会网络模型示意

Fig. 1 Complex social network based on basic-element

1.1 多维物元集合

物元是形式化描述物的基本元^[7],复杂社会网络中的节点具有多重特征,因此网络节点可用多维物元表示,称为节点物元。以节点 O_m 为对象, n 个特征 $c_{m1}, c_{m2}, \dots, c_{mn}$ 以及 O_m 关于 $c_{mi} (i=1, 2, \dots, n)$ 对应的量值 $v_{mi} (i=1, 2, \dots, n)$ 所构成的阵列

$$M = \begin{bmatrix} O_m & c_{m1} & v_{m1} \\ & c_{m2} & v_{m2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{mn} & v_{mn} \end{bmatrix} = (O_m, C_m, V_m)$$

作为网络的基本组成。其中

$$C_m = \begin{bmatrix} c_{m1} \\ c_{m2} \\ \vdots \\ c_{mn} \end{bmatrix} \quad V_m = \begin{bmatrix} v_{m1} \\ v_{m2} \\ \vdots \\ v_{mn} \end{bmatrix}$$

称为节点 O_m 的特征及特征值。

节点物元将节点的特征与特征值有机地结合起来,完整地反映了节点在网络中自身所拥有的特征和性质,从而形成

了信息完整的物元网络集合。

由于物元的可变性、关联函数的可变性以及论域的可变性,导致了用物元表示的节点特征的可变性。将时间变量 t 引入模型则得到动态节点物元,即

$$M(t) = \begin{bmatrix} O_m(t) & c_{m1} & v_{m1}(t) \\ & c_{m2} & v_{m2}(t) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{mn} & v_{mn}(t) \end{bmatrix} = (O_m(t), C_m, V_m(t))$$

物元可拓网络能够较合理地描述实际中复杂社会网络的各个侧面及其变化,从而能够描述解决网络中产生的矛盾问题的过程。

1.2 多维关系元集合

社会网络分析中研究的重点即为节点间的关系数据,以往对于网络中节点连接关系的表示,大多停留在使用数值的基础之上,并不能体现出关系的“多重性”。关系元用以描述各类物元、事元、关系元之间的关系,这些关系的变化相互影

响,对应着社会网络中关系的变化、影响,关系元正是描述这类现象的形式化工具^[8]。

关系 O_r 和 n 个特征 $c_{r1}, c_{r2}, \dots, c_{rm}$ 以及相应的量值 $v_{ri} (i=1, 2, \dots, n)$ 所构成的 n 维阵列

$$R = (O_r, C_r, V_r) = \begin{bmatrix} O_r & c_{r1} & v_{r1} \\ & c_{r2} & v_{r2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{rm} & v_{rm} \end{bmatrix}$$

称为 n 维关系元。其中

$$C_r = \begin{bmatrix} c_{r1} \\ c_{r2} \\ \vdots \\ c_{rm} \end{bmatrix}, \quad V_r = \begin{bmatrix} v_{r1} \\ v_{r2} \\ \vdots \\ v_{rm} \end{bmatrix}$$

称为节点 O_m 的特征及特征值。 n 维关系元 $R(O_r, C_r, V_r)$ 用以描述 v_{r1} 和 v_{r2} 之间的关系,因此也可记作 $R(O_r, v_{r1}, v_{r2}, \dots, V_{rm})$, 其中一般来说 v_{r1} 为关系前项, v_{r2} 为关系后项,这意味着关系元可轻松地表示有向关系。

本文中关系元用以表示网络节点间的关系。这样,网络节点间的关系就可以不只是“有”(1)或“无”(0),或者一个数值,而是可以有许多属性及测值的关系,并且可以表达相同节点之间的多种关系,充分地表达复杂社会网络中节点关系的多重性^[9]。

同样,在关系元 R 中,若 R 表达的关系是某参数 t 的函数,则

$$R(t) = \begin{bmatrix} O_r(t) & c_{r1} & v_{r1}(t) \\ & c_{r2} & v_{r2}(t) \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{rm} & v_{rm}(t) \end{bmatrix}$$

称为参变量关系元。参变量关系元描述了 v_{r1} 和 v_{r2} 之间的关系随参数 t 变化而变化。当 t 为时间参数时,则 $R(t)$ 表示 v_{r1} 和 v_{r2} 之间的关系随时间 t 而产生动态的变化。

1.3 多维事元集合

事元是描述事件的基本元素,在网络中,它不但能够表达节点的动态变化,而且能够反映外界环境对网络的影响^[10-12]。

事件 O_a 和 n 个特征 $c_{a1}, c_{a2}, \dots, c_{an}$ 以及 O_a 关于 $c_{a1}, c_{a2}, \dots, c_{an}$ 取得的量值 $v_{a1}, v_{a2}, \dots, v_{an}$ 所构成的 n 维阵列为

$$A = (O_a, C_a, V_a) = \begin{bmatrix} O_a & c_{a1} & v_{a1} \\ & c_{a2} & v_{a2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_{an} & v_{an} \end{bmatrix}$$

本研究中,一切改变网络结构的节点行为及环境变化都可以用事元表示。这样,可为后续的节点自动响应网络结构变化及网络动态演化研究提供更方便的实现途径。

2 网络分析测度的整合

在复杂社会网络的多维可拓基元模型的基础上,结合网络分析方法,可对网络整体及节点进行一系列的测度分析,

这些测度是网络分析方法的精髓,帮助研究者分析网络属性、状态、节点的社会属性及在网络中担当的角色、地位等。

从传统社会学研究到复杂网络研究,对网络进行定量分析的测度指标有很多,但它们包含着递进的层次关系,即一些网络测度指标是在其他测度的基础之上得到的。这里讨论如何在可拓基元表示的复杂社会网络中进行网络分析测度的计算,如何将计算结果储存于基元之中,并且全面地总结传统社会学及复杂网络研究中常用的网络测度指标,将基本测度指标直接包含在节点物元、关系元之中,为其他深层次的测度指标的计算提供方便。

2.1 网络关系元的基本属性

社会网络分析中,节点间的连线,即行动者之间的关系,有若干基本的属性,包括前向节点、后向节点、是否有向、关系属性及关系值等。其中,关系属性、关系值可以包括不止一对,以此体现同一对节点之间的多重关系。

2.2 传统社会网络的测度指标

传统社会网络分析测度指标如表1所示。各项测度指标均来自于 Wasserman and Faust^[13] 的社会网络分析方法。

表1 传统社会网络分析测度指标
Table 1 Network measurements in traditional social network study

测度类型		测度指标
网络测度	网络整体测度	网络密度,中心势分析,网络直径,网络的连通性
	图论测度	节点出入度
节点测度	社会距离测度	节点的自我中心距离
	连通性测度	节点的可达性
	中心性分析测度	度中心性,亲近中心性,中介性,信息中心性,特征量中心性,子图中心性
	结构洞分析测度	有效规模,效率,约束,等级
子群测度	结构同型分析测度	Pearson 相关系数, Euclidean 距离, 匹配比例, Hamming 距离
	小团体分析测度	网络小团体定义, EI 指数, 互惠性, 传递性

这些指标包括两大部分,一部分是只涉及网络全体节点的基础网络测度指标,另一部分是在划分子群等结构操作之后的子群分析测度指标。

基础网络测度又包括网络整体测度和节点测度。网络整体测度的表示,可以建立网络物元,将网络整体的特征及特征值直接存储于网络物元之中,形成总体的网络可拓物元。节点测度指标,包括节点基础测度指标及节点复杂测度指标,都可以直接进行计算,加入到节点物元或网络物元的特征及特征值阵列之中,形成各个节点的多维可拓物元集合。

2.3 复杂社会网络的测度指标

近年来,得益于计算机及网络的发展,大量的容量巨大的数据都可以通过各种基于计算机网络的数据库获取,这使得人们能够收集、分析远大于以前规模的数据^[14]。大规模网络使网络结构分析的焦点从对单个的含节点数少的图以及图中个体节点或边的属性分析转变为对含大量节点数的图的统计属性进行研究。现有的一些复杂网络研究采用的重要定量分析统计指标包含表2所示内容。

表2 复杂社会网络分析测度指标

Table 2 Network measurements in complex social network study

测度类型	测度指标
平均最短距离	平均最短距离
网络分层测度	聚集系数, 分层模块性, 分层系数
节点度测度	节点度, 节点度分布
相关性测度	度相关性, 中介性相关, 同型系数
分布性测度	介数分布, 负载量系数
群结构测度	群识别算法, 群规模分布
自相似测度	Horton-Strahler 指数, 网络自相似系数
模体测度	模体测度
互惠性分析测度	有向网络互惠性分析
加权网络结构分析测度	边权重和节点强度测度, 加权聚集系数, 加权重相关性

以上这些深入分析的复杂社会网络测度,都必须在网络关系属性、基础网络测度的基础之上进行计算,也就是在建立了基础的网络可拓物元、网络关系元集合与节点物元集合之后方可简便地运算得到。

3 实例分析

以一个节点个数 $n=6$ 的小学儿童群体为行动者的集合,其节点为 Allison、Drew、Eliot、Keith、Ross 和 Sarah,则行动者集合 $N=\{n_1=Allison, n_2=Drew, n_3=Eliot, n_4=Keith, n_5=Ross, n_6=Sarah\}$ 。

行动者之间包括三重关系,如表3所示。

表3 行动者关系对

Table 3 Actor Pairs in Relationships

关系1	关系2	关系3
学年初的友谊	学年末的友谊	住在附近
<Allison, Drew>	<Allison, Drew>	(Allison, Ross)
<Allison, Ross>	<Allison, Ross>	(Allison, Sarah)
<Drew, Sarah>	<Drew, Sarah>	(Drew, Eliot)
<Drew, Eliot>	<Drew, Eliot>	(Keith, Ross)
<Eliot, Drew>	<Drew, Ross >	(Keith, Sarah)
<Keith, Ross>	<Eliot, Ross>	(Ross, Sarah)
<Ross, Sarah>	<Keith, Drew>	
<Sarah, Drew>	<Keith, Ross>	
	<Ross, Keith>	
	<Ross, Sarah>	
	<Sarah, Drew>	

对于一个无向关系,比如说“住在附近”,用(*, *)表示其联系属于无向关系的行动者对。用<*, *>来表示属于有向关系的行动者对。

检查这样的列表是杂乱困难的,但用多维关系元集合表示,则可以十分清晰地看到行动者之间的关系,例如下列所示的部分关系元集合:

$$R_{A-R} = \begin{bmatrix} \text{关系A-R, 对象1,} & \text{Alli son} \\ & \text{对象2,} & \text{Ross} \\ & \text{学年始友谊,} & 1 \\ & \text{学年末友谊,} & 1 \\ & \text{住在附近,} & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{D-E} = \begin{bmatrix} \text{关系D-E, 对象1,} & \text{Drew} \\ & \text{对象2,} & \text{Eliot} \\ & \text{学年始友谊,} & 1 \\ & \text{学年末友谊,} & 1 \\ & \text{住在附近,} & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{A-D} = \begin{bmatrix} \text{关系A-D, 对象1,} & \text{Alli son} \\ & \text{对象2,} & \text{Drew} \\ & \text{学年始友谊,} & 1 \\ & \text{学年末友谊,} & 1 \end{bmatrix}$$

$$R_{D-S} = \begin{bmatrix} \text{关系D-S, 对象1,} & \text{Drew} \\ & \text{对象2,} & \text{Sarah} \\ & \text{学年始友谊,} & 1 \\ & \text{学年末友谊,} & 1 \end{bmatrix}$$

根据关系元集合中的数据信息,可以直接绘制出该网络社群图,为清晰地显示,将三重关系的社群图分别显示,如图2所示。

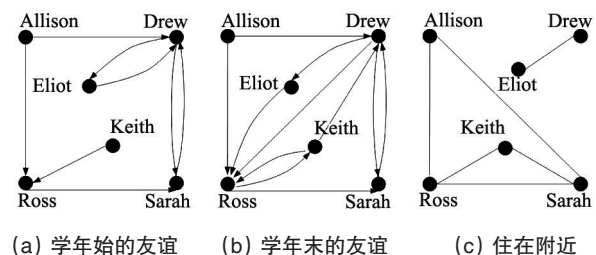


图2 网络社群图

Fig. 2 Network sociogram

利用网络物元、节点物元分别表示网络整体属性和节点属性,极大地体现了可拓物元的优点:信息的完整性及表达的条理性。节点物元及其属性可根据一系列的量化计算轻松完成,而网络整体属性也可一览无遗。该例中的网络物元集合如下所示:

$$M_{网} = \begin{bmatrix} \text{网络,} & \text{名称,} & \text{友谊网络} \\ & \text{节点个数,} & 6 \\ & \text{关系1,} & \text{学期始友谊} \\ & \text{有向否1,} & \text{是} \\ & \text{关系2,} & \text{学期末友谊} \\ & \text{有向否2,} & \text{是} \\ & \text{关系3,} & \text{住在附近} \\ & \text{有向否3,} & \text{否} \end{bmatrix}$$

利用事元,可表达节点关系从学期始到学期末的变化过程,例如事元集合:

$$A_1 = \begin{bmatrix} A_{D-E}, & \text{对象1,} & \text{Drew} \\ & \text{对象2,} & \text{Eliot} \\ & \text{友谊关系原值,} & 1 \\ & \text{友谊关系现值,} & 0 \end{bmatrix}$$

将网络及其变化过程利用可拓基元充分量化之后,还可进行进一步的计算与处理:

1) 利用网络数据,建立基于可拓基元的复杂社会网络模型,并利用计算机进行可视化仿真操作。

2) 根据网络特征,选择合适的网络结构测度指标评价复杂社会网络。

3) 结合可拓变换、可拓策略生成方法等,构建网络优化模型,将其细化为一系列判断条件下发生的事元。

4) 利用计算机实现自动化的网络优化动态仿真,并与优化前的网络测度指标进行对比,通过对优化过程的分析,找出网络演化过程中的瓶颈问题以及解决其中矛盾点的策略集。

4 结论

根据可拓基元理论并结合社会网络分析方法,利用每个方法的优势,建立了复杂社会网络的多维可拓基元分析模型。创新性地将研究对象从单纯的网络节点,拓展到基元节点,完整地体现了网络的结构信息,丰富了节点的网络测度及其值的实际意义;将网络中的节点关系,从一元关系拓展到包含多重信息的关系元,充分体现了复杂社会网络的关系多重性特征,为网络分析及优化提供了方便;利用事元表示网络结构及环境变化的细节信息,为进一步将事元运用到网络动态分析中提供了实现途径。因此,所建立的复杂社会网络多维可拓基元分析模型具有较强的实用性。

参考文献 (References)

- [1] Li S, Gao H, Liu W. Research on ports group internal co-competition based on social network analysis[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Service Operations and Logistics, and Informatics. Piscataway: IEEE Press, 2013: 186-191.
- [2] Luo J. Social network analysis[M]. 2nd ed. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2010.

- [3] Newman M. The structure and function of complex networks[J]. SIAM Review, 2003, 45(2): 167-256.
- [4] 杨春燕,蔡文.可拓学[M].北京:科学出版社,2014.
Yang Chunyan, Cai Wen. Extenics[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [5] 刘巍.物元神经网络.从物元分析到可拓学[M].北京:科学技术文献出版社,1995:311-317.
Liu Wei. The matter-element neural network from matter-element to extenics[M]. Beijing: Science and Technology Literature Press, 1995: 311-317.
- [6] 刘巍,张秀芳.基于可拓信息的知识表示[J].系统工程理论与实践,1998(1):104-107.
Liu Wei, Zhang Xiufang. Knowledge representation based on the extenics information[J]. System Engineering Theory and Practice, 1998(1): 104-107.
- [7] He X, Liu W, Ye J. Extension information and its application to criminal investigation[C]//Proceedings of 98 International Conference on Management Science & Engineering. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1998.
- [8] Liu W, Ye J. Extension information[C]//Proceedings of 96 International Conference On Management Science & Engineering. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 1996.
- [9] Matthew J, Yves Z. Economic analyses of social networks[M]. Northampton: Edward Elgar Publishing, 2013.
- [10] 杨春燕,李志明.基于可拓学的社会网络结构研究[J].广东工业大学学报,2014,31(1):1-6.
Yang Chunyan, Li Zhiming. Social network structure study based on the extenics[J]. Journal of Guangdong University of Technology, 2014, 31(1): 1-6.
- [11] 汪小帆,李翔.复杂网络理论及其应用[M].北京:清华大学出版社,2006.
Wang Xiaofan, Li Xiang. Complex network theory and its application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [12] 杨春燕.事元及其应用[J].系统工程理论与实践,1998,2(1):80-86.
Yang Chunyan. Affair element and its application[J]. System Engineering Theory and Practice, 1998, 2(1): 80-86.
- [13] Wasserman S, Faust K. Social network analysis: Methods and applications [M]. New York: Cambridge University Press, 1994.
- [14] 杨波.复杂社会网络的结构测度与模型研究[D].上海:上海交通大学,2007.
Yang Bo. Research of the complex social network structure characterization and model[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007.

(责任编辑 韩星明)



《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。