

参照零模型的符号社交网络理论研究

许小可^{1,2}, 耿雪娜¹, 王雪³

1. 大连民族大学信息与通信工程学院, 大连 116600

2. 贵州省公共大数据重点实验室(贵州大学), 贵阳 550025

3. 大连民族大学图书馆, 大连 116600

摘要 结构平衡理论和地位理论是社交网络领域的重要理论,可以用来分析同时具有正向和负向连边的社交符号网络。提出了3种新的随机断边重连零模型,基于随机断边重连和符号随机置乱两大类零模型,对符号社交网络的地位理论和结构平衡理论进行了系统研究。发现基于零模型不但可以验证两种理论在实证网络中的准确性,还能揭示正边、负边拓扑结构和连边符号相关性对于整个网络性质的影响。提出了一个新框架,研究能否将有向符号网络转化为无向符号网络,发现目前常用的将有向符号网络转化成无向符号网络的方法在有些情况下对于研究社交网络理论是不合适的,存在着信息损失;讨论了非符号有向网络中的势能理论。

关键词 符号网络;网络零模型;在线社交网络;网络模体

符号网络是指既具有正向连边也具有负向连边的一类特殊的网络,其中正边表示“朋友”“信任”等积极关系,使用正号“+”表示;负边表示“敌人”“不信任”等消极关系,使用负号“-”表示。真实世界的许多网络中都存在对立的关系^[1],尤其在信息和社会领域,社交网络和社交媒体中不但有“朋友”“信任”等正向关系^[2],也显式或隐式存在着大量的“敌对”“不信任”等消极关系^[3]。符号社交网络的相关研究不但对分析、理解和预测社交媒体和社交网络中复杂的拓扑结构、功能、动力学行为具有十分重要的理论意义,并且对于个性化推荐、态度预测、用户特征分析与电子商务等也具有重要的应用价值^[4-5]。

符号网络的相关理论主要有以下2种:一是结构平衡理论,二是地位理论。结构平衡理论是符号网络中最早和最经典的理论^[6],是分析无向符号网络的基础理论,但是无法用该理论来处理有向符号网络。地位理论中链接的方向表示节点在网络中的地位,因此适用于分析有向符号网络^[7-8],但无法用来分析无向网络。在使用这2种理论对实证符号网络进行分析时,由于在符号网络中一般正边的数量要远大于负边的数量,因此仅使用网络统计量的绝对数值进行定性定量分析往往并不准确。科学和严谨的方式是借助于零模型网络,计算真实网络和该网络随机化零模型相同统计量比较后的相对值^[9-10],通过相对值的统计结果来说明实

收稿日期:2017-10-30;修回日期:2018-03-29

基金项目:国家自然科学基金项目(61773091,61603073,61374170);大连市青年科技之星项目支持计划(2015R091);贵州省公共大数据重点实验室开放课题(2017BDKFJ001)

作者简介:许小可,教授,研究方向为非线性时间序列分析和复杂网络,电子信箱: xuxiaoke@foxmail.com

引用格式:许小可,耿雪娜,王雪. 参照零模型的符号社交网络理论研究[J]. 科技导报, 2018, 36(8): 22-30; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2018.08.002

证网络的性质。如何构造出一个合适的符号网络零模型来为真实网络提供准确参照就成为一个关键问题,好的零模型可以通过结合统计量指标准确描述出实际符号网络的非凡特性。借助零模型构建一个通用框架研究实证符号社交网络是否满足结构平衡理论和地位理论。

在以前符号网络的研究中,一般仅采用符号置乱和连边完全置乱这两种方式来生成零模型。本研究系统性分析了符号网络的多种零模型及它们之间的相互关系,提出了3种能更精细化研究结构平衡理论和地位理论的零模型:正边随机断边重连零模型、负边随机断边重连零模型和正负边分别随机断边重连零模型。基于5种零模型,本研究不仅检验了2种理论在实证网络中的存在性和准确性,也揭示了正边和负边拓扑结构、连边符号相关性等对于整个网络性质的影响。发现目前常用的将有向符号网络转化成无向符号网络的做法在有些情况下存在着信息损失,并进一步发现了影响符号社交网络理论对于实证网络是否成立的主要模体。

1 符号网络零模型

在符号网络的研究中,研究者一般会使用多种统计量来刻画网络的性质,如常见统计量有平均度、度分布、节点正负度之差和匹配系数等^[11-12]。鉴于各种统计量的绝对数值往往是无量纲的,而且实际网络的规模大小各异、结构千差万别,仅仅计算出上述统计量的绝对数值来判断网络的宏观特性在定量和定性的分析上都不够准确^[13]。考虑到网络统计量的这种弊端,一种有效的解决方案是分别计算真实网络和该网络随机化零模型的同一个统计量,通过比较相对结果来说明实证网络的性质。把与一个实际网络具有某些相同性质的随机网络称为该实际网络的随机化副本,这类随机化网络在统计学上被称为零模型网络^[14-15]。一个好的零模型网络可为原始网络提供一个准确的参照,结合统计量指标就可以准确描述出实际复杂网络的非凡特性^[16-18],如基于零模型研究实证网络中是否存在富人俱乐部特性^[19]。

符号网络各种零模型的随机化程度之间的关系如图1所示,因为无向符号网络和有向符号网络可以使用统一的框架,因此为简便起见只显示了无向网络对应的零模型。0阶零模型是指仅和原始网络保持相同平

均度的零模型,如果不考虑网络连边的符号,其性质与Erdos和Eenyi提出的ER随机图模型是相似的。由于0阶零网络将原始网络随机化的程度太高,一般和实证符号网络的性质差别太大,因此在实际应用中很少采用。1阶零模型是在保持原始网络度序列不变的情况下对其进行随机化,传统上比较常用的是符号随机置乱零模型和完全随机断边重连零模型。考虑到完全随机断边重连零模型中随机化的程度比较高,无法有效推断出实证符号网络中究竟是正边拓扑结构、负边拓扑结构还是正负边符号相关性对网络的性质影响更大,因此本研究提出3种随机化程度较小的新模型:正边随机断边重连零模型、负边随机断边重连零模型和正负边分别随机断边重连零模型,这些零模型随机化程度之间的包含关系如图1所示。

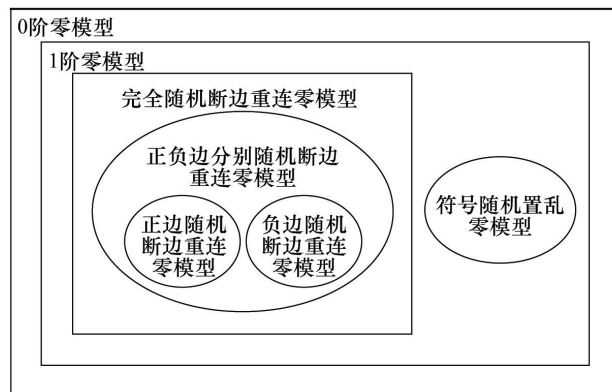


图1 0阶和1阶符号网络零模型以及它们之间的关系
Fig. 1 Zeroth and first order null models of signed networks and their relationship

以上5种1阶零模型的具体构造过程如图2所示,(a)为原始符号网络,(b)为最常使用的符号随机置乱零模型的构造过程示意图,(c)~(f)分别为进行完全随机断边重连、正边随机断边重连、负边随机断边重连和正负边分别随机断边重连后得到的零模型。在图2(a)中该网络有BC、DF和EF 3条正边,有AB、AC、CD和DE 4条负边。随机选取1条正边DF和1条负边AC,将它们的符号进行交换,此时AC边符号为正,DF边符号为负,则生成了图2(b)所示的符号随机置乱零模型。在网络规模较大的情况下,一般需要随机置乱多于2倍总连边数量的次数才能得到性能稳定的随机化网络^[20]。如果仅保持每个节点的度不变,而不考虑边的符号就可以生成完全随机断边重连零模型。将图2(a)中

AC 和 EF 这 2 条边先断开,再使节点 A 与 E 相连,C 与 F 相连,形成边 AE 和 CF,并让这 2 条边的符号分别与 AC 和 EF 相同(图 2(c)),就得到了完全随机断边重连零模型。

由于完全随机断边重连零模型不保证每个节点的正度和负度在置乱前后不变,因此随机化的程度较高。为了能更精确的得出正边拓扑结构和负边拓扑结构在网络性质中所起的作用,提出了随机化较弱的正边随机断边重连和负边随机断边重连 2 种零模型。在图 2(a)中随机选取的 2 条正边 BC 与 DF,先将这 2 条连边断开,再使节点 B 与 D 连 1 条正边,C 与 F 连 1 条正边,这样就得到 2 条新正边 BD 和 CF,如图 2(d)所示就得到了正边随机断边重连零模型。根据网络规模不断重复上述过程,就会使网络中的正向连边关系被完全随机置乱,同时置乱前后每个节点的正负度均保持不变,从

而保证了置乱前后该网络的正度和负度序列均相同。这种算法仅仅破坏了网络中正向连边的拓扑结构,对负向连边的拓扑结构没有任何影响,因此可以用来研究正边拓扑结构对于无向符号网络性质的影响。

同理,可以构造出如图 2(e)所示的负边随机断边重连零模型,仅研究负边拓扑结构对于无向符号网络性质的影响。为了研究正边和负边拓扑结构的叠加作用,还构造出了正负边分别随机断边重连的零模型,如图 2(f)所示。需要注意的是,在正负边分别随机断边重连零模型中正边只能和正边断边重连,负边只能和负边断边重连,因此它和完全随机断边重连零模型是有区别的。图 2(c)中的完全随机断边重连零模型中正负边之间也可以进行断边重连,因此完全随机断边重连零模型的随机化程度更高,对原始网络的拓扑结构特性破坏更大。

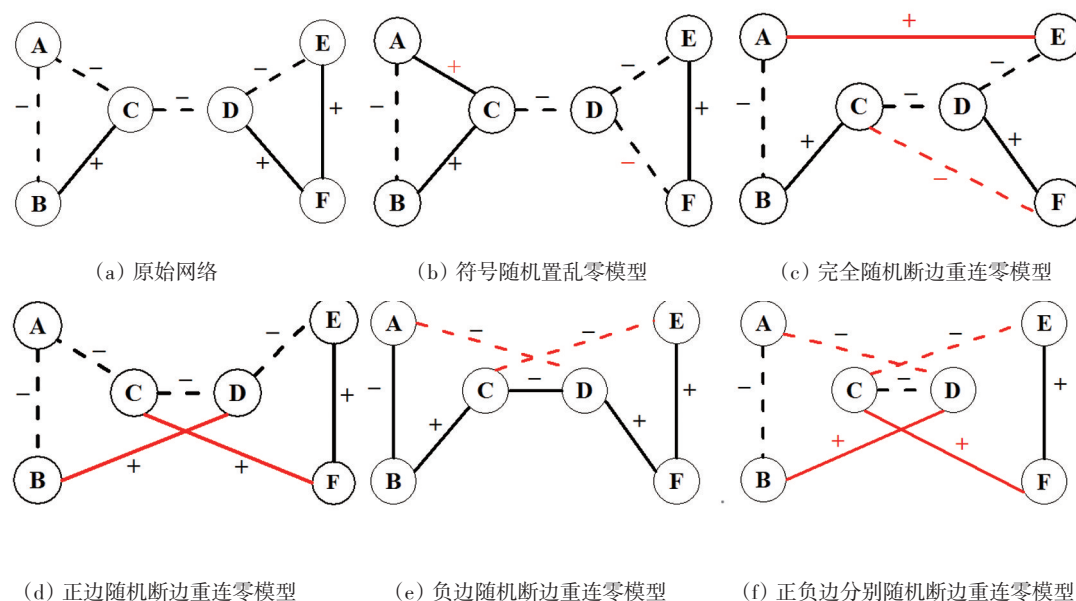


图 2 原始符号网络与它对应的 5 种 1 阶零模型示意

Fig. 2 Original signed network and its corresponding five first order null models

2 基于零模型的结构平衡理论检验

2.1 符号网络中的结构平衡理论

符号网络领域中最基础、最传统、最经典的理论就是结构平衡理论(structural balance theory)。结构平衡理论的基础是社会心理学,起源于 Heider 提出的人们对事物态度的平衡模型^[6]。该模型把人与人(或人与物)之间的关系分为积极和消极两种类型,并实证分析

了这两种关系类型的演化规律。Cartwright 和 Harary 将 Heider 的理论进一步加以推广,用数学语言将包含积极和消极两类关系的系统形式化地描述为符号网络^[21],网络中用边的正、负符号分别表示积极关系和消极关系^[1]。

结构平衡理论在微观上围绕三角形关系进行平衡性分析,这几种三角形关系也就是后面提到的模体。

结构平衡理论可以概括为4个直观认识:1) 朋友的朋友是我的朋友;2) 朋友的敌人是我的敌人;3) 敌人的朋友是我的敌人;4) 敌人的敌人是我的朋友。

考虑符号的不同,构成的三角形关系具有如图3所示的4种模式,根据4种三角形关系是否满足上述4个

直观认识,结构平衡理论认为图3(a)和(b)对应的2种三角形是结构平衡的,而图3(c)和(d)对应的2种三角形是结构不平衡的。因此结构平衡理论可以简单归纳为:如果三角形中有奇数条负边,则该结构不平衡;若三角形中有偶数条负边,则该结构平衡。

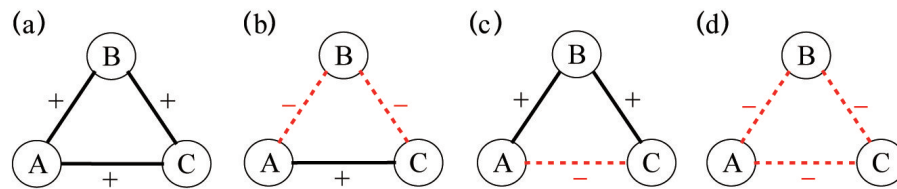


图3 结构平衡理论中的4种三角形关系

Fig. 3 Four triangle relations in the structural balance theory

2.2 实证网络中基于零模型的结构平衡理论验证

验证实证网络是否满足结构平衡理论,需要分别计算实证网络以及各种零模型中平衡模体和非平衡模体出现的数量。如果实证网络中平衡模体出现的数量比零模型网络中出现的数量多,同时实证网络中非平衡模体出现的数量比零模型网络中出现的数量少,那则说明该网络满足结构平衡理论。如果不满足上述条件,则说明该实证网络不满足结构平衡理论。

本研究使用的实证数据是消费者社交网站 Epinions 的数据。Epinions 是一个消费者评估网站,帮助用户确定购买决策,用户可以在网站上查看其他用户对商品的评分和评论,比较商品价格,参考其他消费者建议。该网站提供了一个“信任机制”,当前用户可以通过另一用户提供的产品评价的质量来判断是否信任该用户。如果信任,可将该用户纳入信任列表,即认为产生了正向链接;反之,也可将该用户纳入不信任列表,即产生了负向链接。需要说明的是,实际的符号社交网络非常多,每个实证网络的结果都是不同的,因此本研究重点介绍对于实际符号网络基于零模型的分析框架,而不是仅拘泥于某个具体实证网络的结果。

为了比较在实际网络中和5种零模型网络中每种模体的数量,设计了一个相对值来作为评价指标。如果某种模体在实证网络中出现的次数为 $N(j)$,而在零模型中出现的次数的平均值为 $\langle N_r(j) \rangle$,则在零模型网络中两者的比值为

$$R(j) = \frac{N(j)}{\langle N_r(j) \rangle}$$

如果 $R(j) > 1$,表示实际网络的设计或者演化过程促进了该拓扑特征的出现。相反,如果 $R(j) < 1$,则表示实际网络的设计或者演化过程抑制了该拓扑特征的出现。

将所有的模体分为两类,一类为平衡模体,另一类是非平衡模体。采用上面提到的方法可以计算出平衡模体以及非平衡模体在实际网络中和5种零模型中的相对数量(表1)。对于平衡模体,实际网络中的模体数都比零模型网络中的数值要高,从这一点上看原始网络是满足结构平衡理论的。对于两种非平衡模体,尤其是最后一种非平衡模体,可以看出使用传统的两种零模型(完全置乱零模型和符号置乱零模型),实际网络中该模体数量大于零模型网络的数量,是不满足结构平衡理论的。但是如果使用本研究提出的正边置乱和正负边分别置乱零模型,实际网络中该模体数量小于零模型网络中的数量,它又是满足结构平衡理论的。第一种非平衡模体的情况更复杂,明显受正边置乱的影响更大一些。从以上结果可以看出,Epinions 符号网络是否满足结构平衡理论是受参照的零模型影响的。在得出真实符号网络是否满足结构平衡理论时,必须指明所使用的零模型类型。使用不同的零模型作为参照物,有可能对实证网络性质有不同的判断,从而得出不同的结论。

由于新提出的3种零模型相对于传统的完全置乱零模型和符号置乱零模型,它们的随机化程度更低,更接近于原始网络,因此它们和原始实证网络的比较更能揭示出原始网络的非平凡特性。

表1 平衡模体和非平衡模体在实证网络和5种零模型网络中的数量
Table 1 Number of balanced and unbalanced motifs in the real-life network and its corresponding five null models

类型		实际网络	符号置乱	完全置乱	正边置乱	负边置乱	正负边分别置乱
平衡模体		4003024	1.42	3.87	3.58	1.00	3.58
		396545	1.13	2.78	2.21	1.65	2.35
非平衡模体		451704	0.26	0.73	1.59	0.96	1.33
		58733	2.45	4.80	1.00	0.66	0.66

3 基于零模型的地位理论检验

3.1 符号网络中的地位理论

很多符号社交网络不是无向的,而是有向的,此时就很难使用结构平衡理论去分析,因为该理论中要求1条连边的2个节点之间是互惠的,没有地位上的差别。为了能够分析有向符号网络,有学者建立了另外一套理论,即地位理论(status theory)^[8]。该理论认为,连边的符号取决于节点地位的差异。具体表述为:一条由A到B的正边可认为“B的地位比A高”,一条由A到B的

负边可认为“B的地位低于A”,且这种地位高低关系具有传递性^[1]。Leskovec 和 Kleinberg 等通过实证研究,分析了大规模在线社交网络中用户建立连边的意图以及符号网络中三角形的关系模式,进一步发展了地位理论^[7]。此外,张千明等提出了非符号有向网络的势能理论,该理论和地位理论具有一定的等价性^[22]。图4给出了地位理论认为合理的8种有向边三角形关系组成模式^[23]。

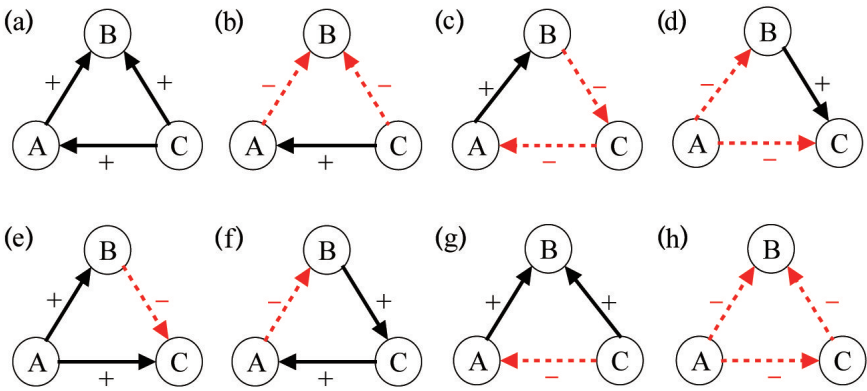


图4 符合地位理论的8种三角形关系
Fig. 4 Eight triangle relations in the status theory

3.2 实证网络中基于零模型的地位理论验证

与使用零模型研究结构平衡理论类似,计算了8种有向模体在实际网络中和5种零模型网络中的数量(表2)。如果表格中5种零模型的8种有向模体数值均大于1,则说明Epinions网络满足地位理论。相反,如果表格中对应的数值小于1,则说明该网络不满足地位理

论。由表2可以看出,除了模体2和4外,实证网络中其他6种模体出现的数量大多都远远小于零模型网络。同时,将这8种模体的数量合在一起,可以在总体上分析该实证网络是否满足地位理论。由表2中最后一行的结果比较可知,除了符号置乱和正边置乱零模型外,Epinions实证网络中8种满足地位理论的模体总量均小

于零模型中的数量,因此该网络总体上针对其他3种零模型也是不满足地位理论的。除了Epinions数据外,我们也采用同样方法分析了Slashdot和Wikipedia符号社交网络数据^[7],尽管结果有些差别,但这2个数据集同样也不满足地位理论。需要说明的是,本研究的主要目

的不是验证地位理论在符号网络中的普适性,因为现在能收集到的符号网络数量还偏少。本研究的主要目的是提出一个基于零模型来研究实证符号网络各种理论是否成立的框架,该框架可以让其他学者去分析他们的实证数据和相关理论之间的一致性。

表2 满足地位理论的8种模体在实际网络和5种零模型网络中的数量
Table 2 Number of eight motifs satisfying the status theory in the real-life network and its five null model networks

序号	类型	实际网络	符号置乱	完全置乱	正边置乱	负边置乱	正负边分别置乱
1		1084228	1.43	0.91	0.97	1.00	0.76
2		88543	1.88	0.95	2.73	1.89	2.01
3		10871	1.87	0.95	0.37	0.26	0.26
4		92052	1.97	1.02	1.72	1.42	1.28
5		115021	0.60	1.18	0.67	0.85	0.47
6		34152	1.47	0.44	1.30	0.74	0.15
7		37138	0.20	0.42	0.74	0.78	0.17
8		39684	3.42	0.85	0.23	0.72	2.73
合计	—	1501689	1.80	0.88	1.03	0.95	0.76

4 符号有向网络简化为无向网络的信息损失

4.1 结构平衡理论和地位理论的比较

符号网络可以分为2种:有向符号网络和无向符号网络。在绝大多数符号网络的研究中,研究者关注的是无向符号网络,因为无向网络更容易量化分析。然而在实际网络中,有向符号网络也是非常多的,如3.2节分析的Epinions社交网络数据。一个值得研究的问题是,有向符号网络与无向符号网络之间存在着怎样的转化关系,即能否将有向符号网络直接简化为无向符号网络来进行研究。在有向符号网络中如果A对B为正向的积极关系,这种积极关系仅可以理解为A认为B是自己的朋友,如果B对A也是正向关系,那么转化为无向网络研究就没问题。相反,如果此时B对A无关

系或者是负向关系,即B并不认为A是自己的朋友,则将有向网络转化成无向网络就不合适了。

无向符号网络和有向符号网络最大的区别是对其进行分析的理论不同,无向网络使用的是结构平衡理论,有向网络使用的是地位理论。结构平衡理论中正边具有传递性,一般在一个社团的内部;负边具有排斥两个社团的作用,一般存在于社团和社团之间。结构平衡理论中每条连边两侧的节点地位都是平等的,节点很容易形成社团和环状结构。相反,地位理论认为连边的形成和符号取决于节点地位的差异,连边中每条边两侧的节点往往认为是不平等的,存在着明显的地位差异。因此,基于地位理论构建的有向符号网络是有很强层次化结构的,一般存在较少的环状结构,也不容易出现强的社团结构。

4.2 符号有向网络转化为无向网络的实证分析

综合结构平衡理论和地位理论,提出一个检测有向符号网络是否可以转化为无向符号网络的研究框架,其主要思想是首先找出无向网络中的结构平衡理论中提到的4种无向模体每一种在有向网络中代表的多种有向模体,整理后的结果如图5所示。由图5可

见,每一个结构平衡理论中的无向模体都对应着多个有向模体,数量少的为7个,多的为15个。将有向网络诸多不同的模体都压缩到少量的无向网络模体空间中,很有可能会损失原始网络的一些重要信息,以下提出将有向转化为无向网络的框架,并通过实例来具体分析。

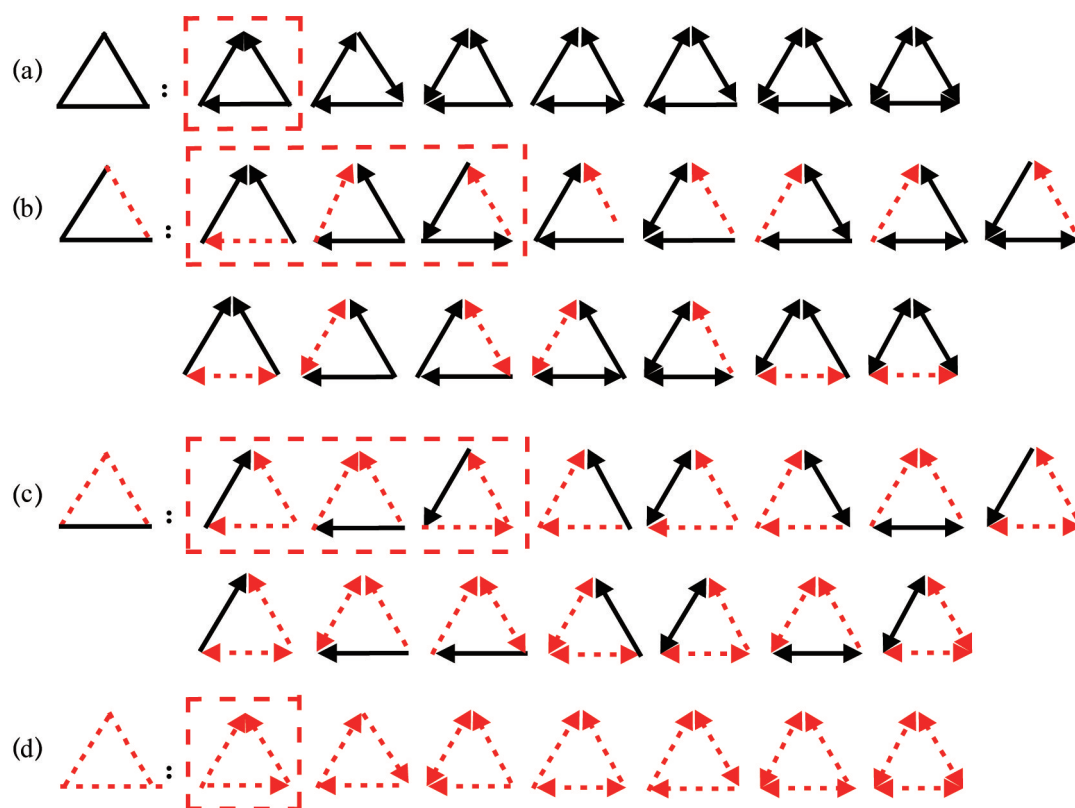


图5 无向模体和有向模体之间的对应关系

Fig. 5 Relationship between undirected motifs and directed motifs

在图5中,每一种无向模体所对应的1个或多个有向模体里面有满足地位理论的模体,我们单独做了标示(方框线中的模体)。可以看出无向模体和地位理论中的模体既有一对一的关系,如(a)和(d)模体;也有一对多这种关系,如(b)和(c)模体。如果是一对多这种关系,那么这两种理论对应模体所要表达的内容显然不是等价的。对于一对一这2种模体,即全是正边或全是负边这2种模体,在表3中单独列出了这2种模体在不同网络中的结果。可以发现,对于全正边模体,有向模体和无向模体的结果差异很大,因此有向网络转化成无向网络对于该模体的研究是不合适的。对于全负边模体,有向模体和无向模体的结果几乎是相同的,有向网络转化成无向网络对于该模体的研究是可行的。

综上所述,将有向符号网络转化成无向符号网络的方法在有些情况下是不合适的,存在着信息损失现象。

4.3 非符号有向网络中的势能理论

基于零模型研究了有向符号网络中的地位理论,实际上也可以基于相同的框架去研究非符号有向网络中地位理论是否成立。当将地位理论扩展到非符号有向网络中,该理论和张千明等在文献[22]中提出的势能理论具有一定的等价性。它们之间也有一定的区别,主要区别是地位理论是需要验证所有的子图结果是否都正确,而势能理论中只需要考虑特定功能的子图(模体)。张千明等的工作基于链路预测这一应用,验证了势能理论在非符号有向网络的正确性,其理论意义是对有向网络的微观构成有了更深刻的认识,他们发现

表3 平衡模体和非平衡模体在实证网络和5种零模型网络中的数量

Table 3 Number of balanced and unbalanced motifs in the real-life network and its corresponding five null models

	种类		实际网络	正边置乱	负边置乱	正负边分别置乱	完全置乱	符号置乱
全正模体	平衡理论		4003024	3.58	1.00	3.56	3.87	1.42
	地位理论		1084228	0.91	0.97	1.00	0.76	1.43
全负模体	平衡理论		58733	1.00	0.66	0.66	4.80	2.45
	地位理论		39684	0.85	0.23	0.72	2.73	3.42

在有向网络中节点会倾向于在局部范围以分层的方式进行自组织。本研究基于零模型的框架也可以从另外一个角度去研究势能理论和地位理论在实证非符号有向网络中是否成立。研究结果表明,势能理论在实证网络中是成立的,和文献[22]的结果具有一致性,但是地位理论在实证网络中依然是不成立的。

5 结论

以符号网络零模型为参照物建立了一个研究社交网络理论的新框架。首先提出了3种新的随机断边重连零模型,然后基于随机断边重连和符号随机置乱两类零模型系统性的对符号社交网络的地位理论和结构平衡理论进行了研究。发现基于零模型不但可以验证2种理论在实证网络中的准确性,也能揭示正边、负边拓扑结构和连边符号相关性对于整个网络性质的影响。研究表明,符号网络乃至其他类型社交网络中,针对社交网络理论和网络性质的研究都应该参考合适的网络零模型进行。最后,提出了一个新框架来研究能否将有向符号网络直接转化为无向符号网络,发现目前常用的将有向符号网络转化成无向符号网络的做法在有些情况下是不合适的,存在一定程度的信息损失,并进一步讨论了非符号有向网络中的势能理论。

参考文献(References)

- [1] 程苏琦, 沈华伟, 张国清, 等. 符号网络研究综述[J]. 软件学报, 2014, 25(1): 1-15.
Cheng Suqi, Shen Huawei, Zhang Guoqing, et al. Survey of signed network research[J]. Journal of Software, 2014, 25(1): 1-15
- [2] Guha R, Kumar R, Raghavan P, et al. Propagation of trust and

distrust[C]//Proceedings of Thirteenth International Conference on World Wide Web (WWW2004). New York, USA: ACM Press, 2004: 403-412.

- [3] Kunegis J, Lommatzsch A, Bauckhage C. The slashdot zoo (mining a social network with negative edges)[C]//Proceedings of Eighteenth International Conference on World Wide Web (WWW2009). Madrid, Spain: ACM Press, 2009: 741-750.
- [4] 伍杰华. 异构符号网络中正负社交关系的分类预测研究[J]. 情报科学, 2016, 34(1): 81-86.
Wu Jiehua. Positive and negative social relation classification prediction in heterogeneous signed network[J]. Information Science, 2016, 34(1): 81-86.
- [5] 胡心专, 郭景峰, 贺释千, 等. 一种节点相似度和参与度符号网络社区发现算法[J]. 小型微型计算机系统, 2017, 38(10): 2275-2280.
Hu Xinzhuang, Guo Jingfeng, He Shiqian, et al. Community detection algorithm of node similarity and node participation degree in signed networks[J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2017, 38(10): 2275-2280.
- [6] Heider F. Attitudes and cognitive organization[J]. The Journal of Psychology, 1946, 21(1): 107-112.
- [7] Leskovec J, Huttenlocher D, Kleinberg J. Signed networks in social media[J]. Human Factors in Computing Systems, 2010: 1361-1370.
- [8] Davis J A. Clustering and structural balance in graphs[J]. Human Relations, 1967, 20(2): 181-187.
- [9] Milo R, Itzkovitz S, Kashtan N, et al. Superfamilies of evolved and designed networks[J]. Science, 2004, 303(5663): 1538-1542.
- [10] Foerster J G, Foster D V, Grassberger P, et al. Edge direction and the structure of networks[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2010, 107(24): 10815-10820.
- [11] Costa L F, Rodrigues F A, Traverso G, et al. Characterization of complex networks: A survey of measurements[J]. Advances

- in Physics, 2010, 56(1): 167–242.
- [12] Newman M. The physics of networks[J]. Physics Today, 2008, 61(11): 33–38.
- [13] Amaral A N, Guimera R. Complex networks: Lies, damned lies and statistics[J]. Nature Physics, 2006, 2(2): 75–76.
- [14] 陈泉, 杨建梅, 曾进群. 零模型及其在复杂网络研究中的应用[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2013(1): 8–17.
Chen Quan, Yang Jianmei, Zeng Jinqun. Null model and its application in the research of complex networks[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2013(1): 8–17.
- [15] 尚可可, 许小可. 基于置乱算法的复杂网络零模型构造及其应用[J]. 电子科技大学学报, 2014, 43(1): 7–20.
Shang Keke, Xu Xiaoke. Construction and application for null models of complex networks based on randomized algorithms [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(1): 7–20.
- [16] 崔丽艳, 许小可. 参照零模型的双层网络结构相关性检测[J]. 科技导报, 2017, 35(14): 63–74.
Cui Liyan, Xu Xiaoke. Correlation detection of double-layer network based on null models[J]. Science & Technology Review, 2017, 35(14): 63–74.
- [17] 陈关荣, 汪小帆, 李翔. 复杂网络引论: 模型、结构与动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012: 217–218.
Chen Guanrong, Wang Xiaofan, Li Xiang. Introduction to complex networks: Models, structures and dynamics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2012: 217–218.
- [18] Zhao M, Zhou T, Wang B, et al. Relations between average distance, heterogeneity and network synchronizability[J]. Physica A—statistical Mechanics and Its Applications, 2006, 371(2): 773–780.
- [19] Colizza V, Flammini A, Serrano M A, et al. Detecting rich-club ordering in complex networks[J]. Nature Physics, 2006, 2(2): 110–115.
- [20] 李欢, 卢罡, 郭俊霞. 复杂网络零模型的量化评估[J]. 计算机应用, 2015, 35(6): 1560–1563, 1572.
Li Huan, Lu Gang, Guo Junxia. Quantitative evaluation for null models of complex networks[J]. Journal of Computer Applications. 2015, 35(6):1560–1563, 1572.
- [21] Cartwright D, Harary F. Structural balance: A generalization of heider's theory[J]. Psychological Review, 1956, 63(5): 277–293.
- [22] Zhang Q, Lu L, Wang W, et al. Potential theory for directed networks[J]. PLoS One, 2013, 8(2): e55437.
- [23] Leskovec J, Huttenlocher D, Kleinberg J. Predicting positive and negative links in online social networks[C]//Proceedings of Nineteenth International Conference on World Wide Web (WWW2010). Raleigh, USA: ACM Press, 2010: 641–650.

Theoretical studies of signed social networks based on null models

XU Xiaoke^{1,2}, GENG Xuena¹, WANG Xue³

1. College of Information and Communication Engineering, Dalian Minzu University, Dalian 116600, China

2. Guizhou Provincial Key Laboratory of Public Big Data, Guizhou University, Guiyang 550025, China

3. Library of Dalian Minzu University, Dalian 116600, China

Abstract The structural balance and the status are important issues in social network fields, which can be used to analyze signed social networks with a mixture of positive and negative interactions. In this study firstly three novel random link-mixing null models are proposed. Then the status and structural balance theories of signed social networks are studied based on the random link-mixing null models as well as the random sign-mixing null models. It is shown that, based on null models, not only the accuracy obtained based on both theories can be verified in the study of empirical networks, but also the impacts of the positive and negative edge topologies and the edge signed correlation on the whole network properties can be revealed. Finally, a new framework is proposed to study whether the directed signed networks can be transformed into the undirected signed networks. It is confirmed that the common methods for transforming the directed signed networks into the undirected signed networks are not suitable for studying social network theories, and the potential theory in unsigned directed networks is also studied.

Keywords signed network; null model; online social networks; network motif ●



(责任编辑 傅雪)