

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2018.09.010

复杂网络中基于反应式的危险抑制方法^①

田 屏

遵义师范学院 信息工程学院, 贵州 遵义 563000

摘要: 复杂网络中的危险传播行为依赖于网络拓扑结构和节点的动态特性. 网络拓扑结构与危险传播的动力学机制是分离的, 因此需要结合节点的动态信息来分析网络中的危险传播机理. 本文针对该问题提出一种复杂网络中基于反应式的危险抑制方法, 该方法主要针对节点当前的感染模式, 采取相应的免疫策略进行防护. 通过仿真实验表明, 本文提出的免疫策略可以更加有效地抑制复杂网络中的危险传播.

关键词: 复杂网络; 免疫策略; 危险传播; 感染模式

中图分类号: TP391

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2018)09-0060-05

复杂网络中的危险传播^[1-3]主要描述了现实世界中各种危险的感染规律, 这些危险已经从生物范畴扩展到计算机领域中的恶意软件传播以及舆论传播等方面^[4]. 在抑制复杂网络的危险传播研究中, 一个很重要的问题是如何设计有效的免疫策略来预防或控制危险在网络中的蔓延^[2].

复杂网络中应对危险传播的免疫策略主要分为预防型策略和反应型策略两类. 其中, 预防型免疫策略利用网络中的危险传播信息, 在危险传播前对网络节点提前免疫, 从而加强网络应对危险传播的能力. 预防型策略需要提前知道网络中的拓扑结构信息. 比如, 目标免疫策略是一个典型的专门用于无标度网络的预防型免疫方法^[2]. 目标免疫策略的基本思想是对网络中具有高连接度的节点进行免疫, 这是因为这些节点在网络危险传播过程中属于感染传播的中心. 另外一个类似的方法是基于度的熟人免疫策略^[5], 该策略利用网络拓扑中的局部信息对邻居节点进行免疫. 与预防型策略不同的是, 反应型免疫策略从网络中当前的危险传播着手, 主要考虑网络中危险传播的动力学特征来选择最合适的节点进行免疫. 反应型免疫策略需要考虑与危险传播动力学相关的各方面特征: 比如节点本身对危险的意识^[6], 消息传递过程中的节点间相互作用^[7], 网络中的动力学反应^[8-9], 历史危险传播的信息^[10]以及免疫生效的时间^[11]等. 高风险免疫(HRI)^[13]是最典型的一个反应型免疫策略的例子, 该免疫策略主要对感染节点的周围邻居节点进行免疫. 通过对预防型策略和反应型策略的分析可知, 这两类策略分别只针对网络拓扑结构或者网络中危险传播特征. 由于危险传播与网络拓扑紧密相关、相互影响, 这种将传播自身与网络结构进行分离的研究势必会影响制定的免疫策略的效果.

针对以上问题, 本文在目标免疫策略的基础上, 提出了一种同时考虑网络中局部信息和全局信息的混合免疫策略. 该策略在考虑网络拓扑结构上节点中心性的同时, 还考虑了网络中与危险传播蔓延相关的节点, 针对节点当前的感染模式, 采取对应的免疫策略进行防护. 本文提出的免疫策略主要从感染节点本身出发, 来研究如何对网络中的危险传播采取反应式的控制措施. 最后, 在仿真实验中, 通过蒙特卡洛仿真将本文提出的免疫策略与几种常见的免疫策略进行对比, 来分析本文方法的有效性.

① 收稿日期: 2017-09-27

作者简介: 田 屏(1974-), 女, 硕士, 副教授, 主要从事计算机软件与理论研究.

1 基于反应式的免疫策略

由于免疫策略是基于传播模型来实施的, 本节首先介绍复杂网络中经典的 SIR(susceptible infected recovered model)传播模型, 在该传播模型的基础上介绍本文提出的基于反应式的免疫策略.

1.1 传播模型

SIR 模型是一个经典的用于研究疾病传播的模型^[13]. 该模型中的个体可以分为 3 类: 易感节点(S), 感染节点(I) 和恢复节点(R). SIR 模型中的疾病传播过程可以通过下面式子建立的数学系统进行描述. 该数学系统由描述不同状态节点随时间变化的 3 个非线性微分方程组成, 其中 β 和 γ 参数表示模型中的感染率和恢复率.

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{d(t)} = -\beta S(t)I(t) \\ \frac{dI(t)}{d(t)} = \beta S(t)I(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR(t)}{d(t)} = \gamma I(t) \end{cases} \quad (1)$$

SIR 模型假设在开始时系统只有一个被疾病感染的节点(称为零号病人), 然后在每一步蒙特卡罗过程中, 随机将一个被感染的节点以一定的概率进行恢复; 如果该被感染节点没有被恢复, 那么就随机地选择该节点周围一个健康的邻居节点以概率对其进行感染.

1.2 免疫策略

在应对复杂网络危险传播的两类免疫策略中, 预防型策略仅仅从网络拓扑结构的角度对网络节点进行免疫, 没有考虑网络中危险传播的信息, 从而会降低网络中的免疫效率和针对性. 反应型免疫策略需要结合网络中危险传播的多个方面特征来对节点进行免疫, 这在一定程度上加大了免疫策略实施的难度. 为了结合两种方法各自的优势, 本文提出一种介于两者之间的方法, 即在网络静态拓扑结构基础上同时考虑网络中危险的感染模式.

由于目标免疫策略在预防型策略中具有最好的免疫效果, 因此本文在目标免疫策略的基础上, 提出一种同时考虑网络中局部信息和全局信息的混合免疫策略.

1.2.1 网络节点被感染因素分析

从网络结构和危险传播两方面来分析影响节点 i 被感染的因素, 主要总结为以下 3 个方面:

1) 网络拓扑结构中的节点度. 在实施目标免疫策略时, 网络节点上度的大小直接决定是否对其进行免疫. 因此, 网络拓扑结构中的节点度是本文免疫方法需要考虑的其中一个因素.

2) 被感染的邻居节点和易感染的邻居节点. 对于网络中的危险传播来说, 被感染的邻居节点比易感染的邻居节点具有更高的危险性. 因此, 针对网络中这两种节点上不同的危险传播模式, 需要采取不同的免疫措施.

3) 具有中心性特征的节点在危险传播过程中具有至关重要的作用, 因此需要重点考虑网络中的这一类节点.

1.2.2 节点传播危险可能性表示

为了对这些动态信息和静态信息进行统一描述, 我们定义了以下公式

$$S_i = d_i + \sum_{j \in N_i} \left[\beta \frac{\delta_{j,I}}{(d_j)^{1/2}} + \gamma \frac{\delta_{j,S}}{d_i} \frac{d_i - d_j}{d_i + d_j} \right] \quad (2)$$

其中, N_i 表示网络中第 i 个节点上的邻居节点集合, d_i 表示第 i 个节点上的度. $\delta_{j,I}$ 和 $\delta_{j,S}$ 分别表示被感染的邻居节点和易感染的邻居节点, β 和 γ 是两个 $[0, 1]$ 之间的自由变量, 当两者都为 0 时, 上述公式就变为了目标免疫策略. 阻尼系数 $(d_j)^{-1/2}$ 表示选择连通性较低的邻居节点, 该参数构成了网络中危险传播的瓶颈. 因此, 也可以通过直接移除该阻尼参数来降低网络中的危险蔓延. 其中, γ 参数同时还描述了网络中易感染邻居节点上的中心性特征, 它描述了在危险传播过程中节点 i 和其邻居节点之间的相互影响. 事实上,

中心性描述了一个节点在其邻居节点上的局部影响能力,因此它在通常的局部簇系数上又考虑了网络的局部信息.

2.2.3 免疫策略实施过程

公式(2)从动态信息和静态信息两方面定义了网络节点 i 容易引起危险传播的可能性.因此,我们的免疫方法基于该可能性对网络中的节点采取免疫.具体步骤如下:①首先识别出网络中所有的易感节点;②针对每一个易感节点,根据公式(2)计算其引起危险传播的可能性;③根据网络的重要程度和危险等级来定义网络中的免疫阈值;④对引起危险传播的可能性高于免疫阈值的易感节点进行免疫.最终实现对全网节点进行基于反应式的免疫部署.

2 实验验证

2.1 实验介绍

在仿真实验中,我们将本文提出的免疫方法(TI)与3种经典的免疫策略(目标免疫LMTI、熟人免疫AI和高风险免疫HR)进行比较,来验证本文提出免疫策略的有效性.

1)目标免疫(LMTI):在实施目标免疫策略时,根据网络中节点度的大小对节点进行免疫.与普通目标免疫策略不同的是,这里采用的目标免疫将在网络中的危险传播达到一定阈值时,根据反应式的过程进行免疫操作.另外,在免疫过程中,只对易感染的节点进行保护.

2)熟人免疫(AI):熟人免疫策略根据预期的免疫比例,对网络中随机选择的节点周围易感染的邻居节点进行直接免疫.

3)高风险免疫(HR):在实验过程中,我们借鉴文献[13]中的免疫思想,在免疫策略实施过程中,对99%被感染节点的第一个邻居进行免疫.

在无标度网络中,各节点之间的连接状况(度数)具有严重的不均匀分布性,因此这种复杂网络特征特别适合对这些免疫方法的免疫效果验证.本实验在无标度网络上对目标免疫、熟人免疫、高风险免疫以及本文提出的免疫方法进行仿真验证.在仿真实验中,我们将无标度网络中的节点个数设置为1000.本实验从网络中感染节点的密度来分析4种免疫策略上的有效性.

2.2 实验结果

通过蒙特卡罗仿真,对无标度网络中感染节点的恢复情况进行2次实验:①纯粹的无标度网络;②部分随机的无标度网络.在这两类仿真网络中,我们对这4种免疫策略在降低网络中危险传播的能力上进行了比较.

对于实验①的结果如图1所示,其中横坐标 $\langle d_v \rangle$ 表示网络中免疫节点的平均密度,纵坐标表示网络中感染节点的平均密度 $\langle d_R \rangle$.LMTI $_{m,n}$ 表示对网络中 m 个节点进行目标免疫,传播阈值设置为 n .

从实验①的结果可以看出,基于度的免疫策略在纯粹的无标度网络中具有最好的免疫效果.具体来说,目标免疫策略可以将网络中的危险传播降低到5%.而本文提出的免疫策略在参数设置为 $\beta=0.2$, $\gamma=0.5$ 时,与目标免疫策略的免疫效果相当,并且在网络中免疫节点的平均密度大于0.1时,本文提出的免疫策略表现出较好的免疫效果.而对于另外2个免疫策略(熟人免疫和高风险免疫),在整个仿真过程中,都表现出较差的免疫效果.

图2和图3分别展示了在无标度网络中添加100个和2000个随机节点后,本文提出的方法与目标免疫策略之间的对比结果.通过图2可以看出,当本文提出的免疫策略在参数设置为 $\beta=0.2$, $\gamma=0.5$ 时,仍然表现出与目标免疫相当的免疫效果.在网络中免疫节点的平均密度小于0.17时,本文的免疫策略表现出

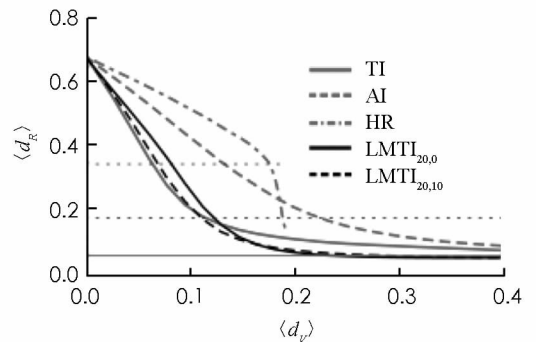


图1 免疫策略在纯粹的无标度网络中的对比实验结果

较好的免疫效果, 虽然在免疫节点的平均密度增大时, 本文提出的方法免疫效果会弱于目标免疫方法, 但整体效果仍然与目标免疫相当. 另外, 从图 3 可以看出, 当无标度网络中随机节点增大时, 本文提出的免疫方法仍然表现出较好的免疫效果.

值得说明的是, 虽然本文提出的方法在免疫效果上与目标免疫相当, 但是本文的方法不需要知道网络中的全局信息, 因此在实施过程中具有比目标免疫更低的代价. 因此, 本文提出的方法具有更高的使用价值.

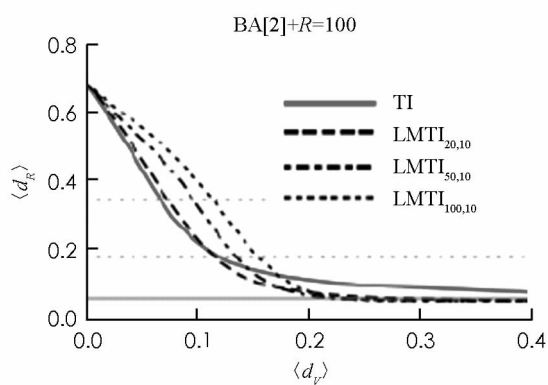


图 2 免疫策略在加入部分随机节点($R=100$)的无标度网络中的对比实验结果

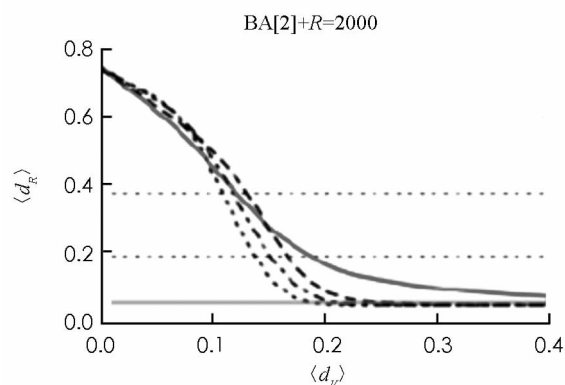


图 3 免疫策略在加入部分随机节点($R=2000$)的无标度网络中的对比实验结果

3 结 语

复杂网络上的危险传播不仅取决于网络中的静态拓扑结构, 同时还与网络中被危险感染的节点本身的动态特性有直接关系. 针对目前通常将静态拓扑中的连接结构与危险传播的动力学机制进行分离研究的现状, 本文在目标免疫策略的基础上, 提出了一种基于反应式的免疫策略. 该方法将网络中感染节点作为依据来设计反应式的免疫方法, 从而对复杂网络中的危险传播进行抑制. 最后通过与 3 种经典的免疫策略(目标免疫、熟人免疫和高风险免疫)进行实验比较, 表明本文提出的免疫策略在控制复杂网络中的危险传播上具有良好的有效性.

参考文献:

- [1] ALLARD A, SERRANO M Á, GARCÍA-PÉREZ G, et al. The Geometric Nature of Weights in Real Complex Networks [J]. Nature Communications, 2017, 8: 14103.
- [2] PASTOR-SATORRAS R, CASTELLANO C, VAN MIEGHEM P, et al. Epidemic Processes in Complex Networks [J]. Rev Mod Phys, 2015, 87(3): 120–131.
- [3] 李睿琪, 王伟, 舒盼盼, 等. 复杂网络上流行病传播动力学的爆发阈值解析综述 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2016, 13(1): 1–39.
- [4] NOWZARI C, PRECIADO V M, PAPPAS G J. Analysis and Control of Epidemics: A Survey of Spreading Processes on Complex Networks [J]. IEEE Control Systems, 2016, 36(1): 26–46.
- [5] 黄 斌, 赵翔宇, 吴春旺. 复杂网络独立集的免疫策略分析 [J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2014, 37(8): 138–143.
- [6] WANG W, TANG M, STANLEY H E, et al. Unification of Theoretical Approaches for Epidemic Spreading on Complex Networks [J]. Reports on Progress in Physics, 2017, 80(3): 036603.
- [7] ALTARELLI F, BRAUNSTEIN A, DALL'ASTA L, et al. Containing Epidemic Outbreaks by Message-Passing Techniques [J]. Physical Review X, 2014, 4(2): 021024.
- [8] 刘 影, 王伟, 尚明生, 等. 复杂网络上疫情与舆情的传播及其基于免疫的控制策略 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2016, 13(1): 74–83.

- [9] 曹进德, 王毅. 复杂网络疾病传播动力学研究进展 [J]. 大学数学, 2016(4): 1—11.
- [10] YAN S, TANG S, PEI S, et al. Dynamical Immunization Strategy for Seasonal Epidemics [J]. *Physical Review E, Stat Nonlin Soft Matter Phys*, 2014, 90(2): 022808.
- [11] 刘岩, 贾艳丽. 复杂网络传播免疫节点选择策略仿真分析 [J]. 计算机仿真, 2014, 31(2): 366—369.
- [12] NIAN F, WANG X. Efficient Immunization Strategies on Complex Networks [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2010, 264(1): 77—83.
- [13] HUANG C, CAO J, WEN F, et al. Stability Analysis of SIR Model with Distributed Delay on Complex Networks [J]. *PLoS One*, 2016, 69(3): 927—934.

An Risk Suppression Approach Based on Reaction in Complex Network

TIAN Ping

School of Information Engineering, Zunyi Normal University, Zunyi Guizhou 563000, China

Abstract: Risk propagation in the complex network depends on the topological structure of the network and the dynamic characteristics of the nodes. Since the topological structure is often separated from the dynamics mechanism of risk spreading, the dynamic information of the nodes should be used to analyze the propagation mechanism. In this paper, we propose a risk suppression approach based on the reaction mechanism for the complex network. This approach applies the appropriate strategy of vaccine immunization according to the current infection pattern of the node. Finally, the simulation experiment shows that the immunization strategy proposed in this paper is more effective when dealing with the risk spreading in the complex network.

Key words: complex network; immunization strategy; risk spreading; infection pattern

责任编辑 夏娟