

社交网络上理性者交互的群组传播谣言模型

任珈仪¹, 王友国^{1*}, 柴允², 李硕²

(1. 南京邮电大学理学院, 江苏南京 210023;

2. 南京邮电大学通信与信息工程学院, 江苏南京 210003)

摘要: 社交网络已经成为信息交流的重要媒介, 直接影响谣言传播的速度和范围, 因此研究谣言传播机制对谣言传播规律理解具有十分重要的意义。考虑到关于少数不相信谣言的理性者对谣言传播影响的研究还很少, 社交网络群组通过群组共享和传播信息方式对谣言传播的影响大, 在均匀网络和非均匀网络上构建了理性者交互群组传播谣言传播模型。利用微分动力学方法和下一代矩阵理论给出模型的无谣言平衡点和基本再生数。文中首先使用数值仿真验证模型的正确性, 然后通过 Monte Carlo 方法在 ER, WS, BA, Facebook 网络上分别模拟真实情况下未知者、理性者以及传播者的动态变化。仿真结果表明, 当谣言逐渐消失时, 4 种网络中的未知者密度和理性者密度均能趋于稳定; BA 网络和 Facebook 网络谣言传播速度和消失速度快于 ER 网络和 WS 网络。更大规模的群组能够增加谣言传播影响范围。更可信的理性者显著降低了网络谣言的传播时间和传播者密度峰值。

关键词: 社交网络; 理性者交互; 群组传播; 谣言传播模型; Monte Carlo 仿真

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2021)07-0105-08

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2021.07.018

A Rumor Spreading Model Considering Group Propagation and Rational Interaction in Social Networks

REN Jia-yi¹, WANG You-guo^{1*}, CHAI Yun², LI Shuo²

(1. School of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. School of Telecommunications and Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China)

Abstract: Social networks have become an important information media, resulting in the speed and range of rumor propagation. Therefore, it is of great significance to study the rumor spreading mechanism to understand the rumor spreading rules well. Considering few attentions to the influences of rational people who do not blindly faith in rumors, and members of social network groups through group sharing and propagation during the spreading of rumors, a rumor spreading model considering group propagation and rational interaction in homogeneous networks and heterogeneous networks is developed. The differential dynamic method and the next generation matrix theory are exploited to calculate rumor free equilibrium and basic influence number of the model. Numerical simulation is conducted to verify the proposed model, and the Monte Carlo method is then used to simulate the dynamic changes of the ignorant, the rational person and spreaders under real-world applications in the ER, WS, BA and Facebook networks. The simulation shows that both of the density of the ignorant and the rational in the four networks can reach stabilization under the condition that the rumor gradually disappearing, and the rumor in the BA and Facebook networks spread and disappear faster than that in the ER and WS networks. Theory and simulation analysis demonstrates that larger groups can enhance the influence range of rumor propagation and more credible rational people can significantly reduce the time and range of rumors propagation.

Key words: social network; rational interaction; group propagation; rumor spreading model; Monte Carlo simulation

0 引言

随着信息科学技术的快速发展, 谣言在网络中更

容易扩散, 许多不了解真相的未知者往往会受到谣言的影响, 进而影响到身边的家人和同事以及网络上的

收稿日期: 2020-08-02

修回日期: 2020-12-04

基金项目: 国家自然科学基金(62071248); 江苏省研究生科研创新计划(KYCX20_0730)

作者简介: 任珈仪(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为复杂网络谣言传播; 通信作者: 王友国(1968-), 男, 博士, 教授, 研究方向为社交网络信息传输与监控、随机共振理论与应用等。

其他用户,导致谣言传播速度和范围快速增加,对正常的社会安全和稳定带来巨大安全隐患。因此建立谣言传播模型并预测谣言传播行为,及时采取有效措施,把谣言扼杀在萌芽状态,是学术界和政府关注的焦点问题^[1]。

与病毒感染过程类似,谣言传播过程同样具有动力学传播特点,因此把传染病建模基本理论和方法迁移到社交网络谣言传播建模成为学术界研究的重要方法。其中,SI(susceptile-infected)模型、SIS(susceptile-infected-susceptile)模型和 SIR(susceptile-infected-removed)模型以及其改进方法受到人们普遍关注^[2]。Daley 和 Kendall^[3]借助随机过程理论建立了经典的 DK 谣言传播模型。Maki 和 Thompson^[4]对 DK 模型进行了改进,其假设谣言通过传播者与他人的直接连接进行传播。为了研究不同网络拓扑结构对谣言传播动力机制的影响,Zanette^[5-6]基于 SIR 模型研究了谣言在小世界网络中的传播情况,将模型中的个体状态分为从未听过谣言的易感染人群(S)、传播谣言的人群(I)、听过谣言而后免疫的人群(R)。Moreno^[7]把平均场方程引入到 SIR 模型,提出均匀网络与非均匀网络上的谣言传播动力学模型,通过实验发现非均匀网络传播效率更大且传播可靠度更小。

针对社交网络中部分用户对谣言的真实性心存怀疑,并不会立刻传播谣言的现象,夏玲玲^[8]在模型中引入权威信息态人群,提出两阶段传播的 SAIR 模型利用交互式马尔可夫链的方法推导出网络谣言与权威信息交互过程。基于谣言传播的反击机制和网络自抗性,咎永利^[9]提出反击态概念并建立了 SCIR 谣言传播模型。Jain A^[10]对未知者和专家之间的传播速率波动对均匀网络上谣言动态影响进行了详细的分析后发现,尽管传播过程存在专家干预,然而网络白噪声不仅会导致谣言始终存在,而且受影响用户数量仍然会出现波动现象。上述研究成果表明,考虑不同人群在谣言传播过程的行为能够提高谣言传播建模的准确性和直观性,由于信息技术的快速发展导致谣言传播速度和危害性快速提高,因此以降低谣言风险为目标的反谣言传播机制引起人们的关注^[11-12]。Dhar J 等人^[13]提出在线社交网络中的新闻传播模型,并分析了辟谣信息控制谣言的效果。另外,通过短信,公告,广播,反谣言网站等各种渠道发布辟谣信息也成为谣言抑制的重要手段^[14]。为利用两种抑制谣言机制的优点,Wen^[15]对比了阻止重要节点传播谣言以及发布真相以澄清谣言方法将两种谣言抑制机制结合起来,达到了更好的谣言抑制效果。由于谣言传播的复杂性,网络传播中存在理性反沉默螺旋形态^[16-17],即公众能够自主思考和分析,而不是盲目从众或者趋同,这些用户

具有较强的理性,往往通过分析判断得到接近事实的真相,通过网络交互不断修正偏离真相的舆论影响大众的行为,从而达到抑制谣言传播的效果。霍良安^[18]建立了突发事件中不实信息传播动力学模型,将系统内成员分为有限理性人群和理性人群。当“智者”的影响力较大,不实信息传播力度不高,谣言逐渐消失,反之,不实信息泛滥。因此既要提高公民素质,有自己的判断力,也要树立权威,信息公开。

目前大多数研究假设谣言传播通过网络节点之间的链接,没有链接的节点之间不会传播谣言。而实际上社交网络存在大量的社交组,群组成员可以相互加入其他群组。这些不同地理位置的群组成员往往并不熟悉,但群组成员能够顺畅共享信息,这些特点为谣言传播提供了巨大的空间和便利^[19]。Jia^[20]建立包含点对点传播与群组谣言传播模型,分析了模型的动态性和稳定性,更好地理解传播者的行为,为采取有效措施提供指导。总体来说,目前群组谣言传播研究还处于初期阶段,一些理论问题和实际应用还需要进一步研究^[19-20]。

考虑到理性者对谣言传播的抑制作用以及群组对谣言传播的巨大推动作用,提出社交网络的理性者交互群组传播谣言传播模型。利用微分动力学方法和下一代矩阵理论给出模型的无谣言平衡点和基本再生数,并通过多个仿真实验验证了模型正确性并讨论了模型参数的影响。该模型更加贴合实际,对研究谣言的传播机制和有效抑制都具有实际的意义。

1 理性者交互的群组传播模型

网络用户分为未知者(S_1),理性者(S_2)和传播者(I),其中未知者(S_1)表示只从未了解过谣言信息的用户,理性者(S_2)包括了解事情真相的专家和意识到谣言的错误,不相信谣言的个体。理性者保持谣言的反对意见,并可以在与未知者互动期间为他们提供指导。传播者(I)是社交网络上受到谣言影响的用户并传播谣言。当未知者与传播者和理性者接触时,未知者会根据自己的选择成为传播者或理性者。由于传播者在短期内相信谣言,因此假设模型不存在免疫节点且理性者不受谣言影响。考虑理性者在内的社交网络上谣言传播模型状态转移图如图 1 所示。

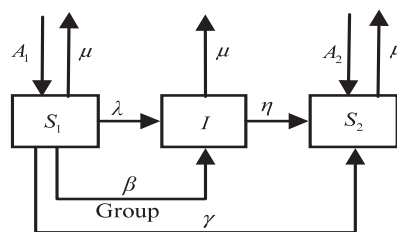


图 1 谣言传播模型状态转移图

为了构建模型,做出如下假设:

(1)当网络中的未知状态的节点与传播状态的节点交互,则未知状态的节点以概率 λ 转化为传播状态。同时,当未知状态的节点与理性状态的节点交互,则未知状态的节点以概率 γ 转化为理性状态。以个体交互方式传播信息,只有一个邻居节点接收到信息。

(2)在群组中,传播节点将以概率 β 将谣言传播给同一群组中的未知节点,使得未知节点转变为传播节点。

(3)未知者和理性者分别以 A_1, A_2 的平均增长率进入社交网络。同时,未知者,理性者,传播者均会因为对谣言不感兴趣而以流出速率 μ 离开社交网络。在一些紧急情况下,政府会干预谣言传播进程,取代传播谣言的用户,公布真实信息,使得该用户从传播者变成理性者,起到辟谣的作用,转变率为 η 。

1.1 均匀网络上的谣言传播模型

当未知个体节点与传播谣言的个体交互,它会以一定概率变成传播者节点,以指定的概率将谣言传送给它周围的个体用户节点或群组。均匀网络满足均匀性假设^[2],即假设每个节点的度 k_i 都近似等于平均度 $\langle k \rangle$ 。

设 $S_1(t)$ 、 $S_2(t)$ 、 $I(t)$ 分别是 t 时刻未知节点、理性节点、传播节点的数量。 $N(t)$ 为 t 时刻网络中所有节点的数量。文中假设社交网络中的用户流入率与流出率相等,即 $A_1 + A_2 = \mu$,此时 $N(t) = N$ 为一个固定常数。 $s_1(t), s_2(t), i(t)$ 表示 $S_1(t), S_2(t), I(t)$ 的密度, $s_1(t) + s_2(t) + i(t) = 1$ 。首先考虑传播个体与未知个体的交互,在均匀网络中,在 t 时刻一个传播节点选择一个未知节点的概率是 $\frac{S_1(t)}{N-1}$ 。在 $t+1$ 时刻转变为传播个体的数量为:

$$I(t+1) = I(t) + \lambda \langle k \rangle \frac{S_1(t)}{N-1} I(t)$$

若时间间隔变为 Δt ($\Delta t < 1$),则 $I(t+\Delta t) = I(t) + \langle k \rangle (\lambda \Delta t) \frac{S_1(t)}{N-1} I(t)$,其中 $\langle k \rangle$ 为网络节点平均度。

$$\text{当 } \Delta t \rightarrow 0 \text{ 时, } \frac{dI(t)}{dt} = \lambda \langle k \rangle \frac{S_1(t)}{N-1} I(t)。$$

$$\text{标准化后, } \frac{di(t)}{dt} = \lambda \langle k \rangle s_1(t) i(t)。$$

$S_1^G(t)$ 是群组中未知个体的平均数量, X 是群组的数量, \bar{m} 是群组的平均人数。 $\bar{G} = \frac{X\bar{m}}{N}$ 是个体所在群组的平均度,即一个用户所在的平均组数。一个传播节点在群组中的概率是 $\frac{\bar{G}}{X}$,通过群组与未知节点进行

交互,使得可能接收到谣言的未知节点数量为 $\frac{\bar{G}}{X} S_1^G(t)$,未知节点以概率 β 转化为传播节点。当一个传播者在群组中传播谣言时,群组中的所有未知者都可以同时接收到, $S_1^G(t)$ 的平均人数表示为 $\frac{\bar{m} S_1(t)}{N}$ 。

在 $t+1$ 时刻,通过群组交互的传播节点个数为:

$$I(t+1) = I(t) + \beta X I(t) \frac{\bar{G}}{X} S_1^G(t) =$$

$$I(t) + \beta \bar{G} I(t) \frac{\bar{m} S_1(t)}{N} = I(t) + \beta \bar{m} \bar{G} s_1(t) I(t)$$

时间间隔变为 Δt ($\Delta t < 1$),标准化后,

$$I(t+\Delta t) = I(t) + \Delta t \beta \bar{m} \bar{G} s_1(t) I(t)$$

$$\frac{i(t)}{dt} = \frac{I(t)}{N} \rightarrow i(t+\Delta t) = i(t) + \Delta t \beta \bar{m} \bar{G} s_1(t) i(t)$$

当 $\Delta t \rightarrow 0$ 时,将传播者与未知个体交互和群组传播的结果进行合并:

$$\frac{di(t)}{dt} = (\lambda \langle k \rangle + \beta \bar{m} \bar{G}) s_1(t) i(t)$$

理性个体与未知个体的交互可以表示为:

$$\frac{ds_2(t)}{dt} = \gamma \langle k \rangle s_1(t) s_2(t)$$

根据上述假设,该模型的动力学演化方程为:

$$\begin{cases} \frac{ds_1(t)}{dt} = A_1 - (\lambda \langle k \rangle + \beta \bar{m} \bar{G}) s_1(t) i(t) - \gamma \langle k \rangle s_1(t) s_2(t) - \mu s_1(t) \\ \frac{di(t)}{dt} = (\lambda \langle k \rangle + \beta \bar{m} \bar{G}) s_1(t) i(t) - (\eta + \mu) i(t) \\ \frac{ds_2(t)}{dt} = A_2 + \gamma \langle k \rangle s_1(t) s_2(t) + \eta i(t) - \mu s_2(t) \end{cases} \quad (1)$$

初始条件 $s_1(t_0) = s_1^0, i(t_0) = i^0, s_2(t_0) = s_2^0$,其中 t_0 为初始时刻。参数如表1所示。

表1 模型参数及其含义

参数	含义
A_1	未知者进入社交网络的平均增长率
A_2	理性者进入社交网络的平均增长率
λ	传播者与未知者的交互率
β	传播者与群组中的未知者交互率
γ	理性者与未知者的交互率
\bar{m}	群组平均人数
\bar{G}	个体所在群组的平均度
μ	所有用户离开社交网络的流失率
η	外部干预下传播者成为理性者的转变率

1.2 非均匀网络上的谣言传播模型

实际中,大部分社交网络具有非均匀网络特征:大部分节点只有少数几个链接,而某些节点拥有与其他节点的大量链接。设 $s_{1,k}(t)$ 、 $s_{2,k}(t)$ 、 $i_k(t)$ 分别是 t 时刻度为 k 的未知节点密度、理性节点密度、传播节点密度, $k=1,2,\dots,n$ 。 $s_1(t)$ 、 $s_2(t)$ 、 $i(t)$ 分别是 t 时刻未知节点密度、理性节点密度、传播节点密度。满足 $s_1(t) = \sum_k s_{1,k}(t)P(k)$, $s_2(t) = \sum_k s_{2,k}(t)P(k)$, $i(t) = \sum_k i_k(t)P(k)$, 其中 $P(k)$ 为度分布。满足均一化条件 $s_{1,k}(t) + s_{2,k}(t) + i_k(t) = 1$, $s_1(t) + s_2(t) + i(t) = 1$, $p(k|k)$ 表示度为 k 的节点与度为 k 的节点相连的概率。

若不考虑群组传播,传播个体与未知个体的交互可以表示为:

$$\frac{di_k(t)}{dt} = \lambda s_{1,k}(t) k \sum_k p(k'|k) i_k(t)$$

非均匀网络上谣言的群组传播的推导与均匀网络类似,可以表示为:

$$\frac{di_k(t)}{dt} = \beta m \bar{G} s_{1,k}(t) i(t)$$

理性个体与未知个体的交互表示为:

$$\frac{ds_{2,k}(t)}{dt} = \gamma s_{1,k}(t) k \sum_k p(k'|k) s_{2,k}(t)$$

根据上述假设,该模型的动力学演化方程为:

$$\begin{cases} \frac{ds_{1,k}(t)}{dt} = A_1 - \lambda k s_{1,k}(t) \Theta_1(t) - \beta m \bar{G} s_{1,k}(t) i(t) - \gamma k s_{1,k}(t) \Theta_2(t) - \mu s_{1,k}(t) \\ \frac{di_k(t)}{dt} = \lambda k s_{1,k}(t) \Theta_1(t) + \beta m \bar{G} s_{1,k}(t) i(t) - (\eta + \mu) i_k(t) \\ \frac{ds_{2,k}(t)}{dt} = A_2 + \gamma k s_{1,k}(t) \Theta_2(t) + \eta i_k(t) - \mu s_{2,k}(t) \end{cases} \quad (2)$$

其中, $\Theta_1(t) = \sum_k p(k'|k) i_k(t) = \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k k' P(k')$
 $i_k(t)$, $\Theta_2(t) = \sum_k p(k'|k) s_{2,k}(t) = \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k k' P(k') s_{2,k}(t)$
 $i(t)$ 分别表示 t 时刻度为 k 的节点连接到传播者的概率,以及 t 时刻度为 k 的节点连接到理性者的概率。其中模型参数如表 1 所示。

2 模型的动力学分析

2.1 均匀网络上的动力学分析

稳态情况下,未知节点、理性节点、传播节点的平均密度随时间的变化率为 0。即:

$$\frac{ds_1(t)}{dt} = 0, \frac{di(t)}{dt} = 0, \frac{ds_2(t)}{dt} = 0$$

当没有传播者存在时 ($i(t) = 0$), 则模型具有无谣言平衡点。显然,模型(1)有一个无谣言平衡点 $E_0 = (s_1^{(0)}, 0, s_2^{(0)})$ 。

当假设 $(H_1): \frac{\mu}{\gamma \langle k \rangle} > s_1^{(0)}$ 成立时,无谣言平衡点 $E_0 = (s_1^{(0)}, 0, s_2^{(0)})$ 存在,其中:

$$s_1^{(0)} = \frac{a - \sqrt{a^2 - 4\mu^2 \gamma \langle k \rangle A_1}}{2\mu \gamma \langle k \rangle}, s_2^{(0)} = \frac{A_2}{\mu - \gamma \langle k \rangle s_1^{(0)}}$$

此处 $a = \mu^2 + \gamma \langle k \rangle (A_1 + A_2)$ 。

基本再生数表示一个传播节点进入网络中所产生的继发性传播节点的平均数目,有助于确定谣言是否会在网络中传播。为了计算基本再生数,该文使用下一代矩阵方法^[21]。

令 $x = (i)$, 模型(1)可以表示为:

$$\dot{x} = F(x) - V(x)$$

在均匀网络上,

$$F = DF(E_0) = (\lambda \langle k \rangle + \beta m \bar{G}) s_1^{(0)}, V = DV(E_0) = \eta + \mu$$

其中, F 和 V 分别是 $F(x)$, $V(x)$ 在无谣言平衡点处的雅可比矩阵。 FV^{-1} 是模型的下一代矩阵, $\rho(FV^{-1})$ 表示下一代矩阵的谱半径即为基本再生数

$$R_0 = \rho(FV^{-1}) = \frac{(\lambda \langle k \rangle + \beta m \bar{G}) s_1^{(0)}}{\eta + \mu}.$$

定理 1: 当基本再生数 $R_0 < 1$ 以及假设 $(H_1): \frac{\mu}{\gamma \langle k \rangle} > s_1^{(0)}$ 成立时,模型(1)在无谣言平衡点 $E_0 = (s_1^{(0)}, 0, s_2^{(0)})$ 处是局部渐近稳定的。

证明: 令 $q = \lambda \langle k \rangle + \beta m \bar{G}$, 模型(1)在无谣言平衡点 E_0 的雅可比矩阵为:

$$J_0 = \begin{pmatrix} -\gamma \langle k \rangle s_2^{(0)} - \mu & -\gamma \langle k \rangle s_1^{(0)} & -q s_1^{(0)} \\ 0 & 0 & q s_1^{(0)} - (\eta + \mu) \\ \gamma \langle k \rangle s_2^{(0)} & \gamma \langle k \rangle s_1^{(0)} - \mu & \eta \end{pmatrix}$$

特征方程 $f = (r + \mu)(r + (s_2^{(0)} - s_1^{(0)})\gamma \langle k \rangle + \mu)(r + (\eta + \mu) - q s_1^{(0)}) = 0$ 。

特征根 $r_1 = -\mu$, $r_2 = -(s_2^{(0)} - s_1^{(0)})\gamma \langle k \rangle - \mu$, $r_3 = -(\eta + \mu) + q s_1^{(0)}$ 。

因为 $R_0 = \frac{q s_1^{(0)}}{\eta + \mu} < 1$, $(H_1): \frac{\mu}{\gamma \langle k \rangle} > s_1^{(0)}$ 成立,所以雅可比矩阵的特征根 r_1, r_2, r_3 都具有负实部。根据 Routh-Hurwitz 稳定判据^[22], 当基本再生数 $R_0 < 1$ 时,模型(1)在无谣言平衡点 E_0 是局部渐近稳定的。易得,当 $R_0 > 1$ 时,无谣言平衡点是不稳定的。

Runge-Kutta 方法用于求解常微分方程的数值解,使用 MATLAB 进行数值模拟来分析谣言传播机制的影响,并验证上述理论分析的正确性。表 2 给出了数值仿真的假设。图 2 给出了在 $R_0 < 1$ 和 $R_0 > 1$ 时不同状态节点密度随时间的变化。

表 2 数值仿真假设

网络拓扑	参数值
节点数	$N = 1\ 000$
网络平均度	$\langle k \rangle = 6$
初始的传播节点比例	10%
初始的理性节点比例	1%
群组平均人数	$\bar{m} = 10$
各个节点的平均群组度	$\bar{G} = 3$

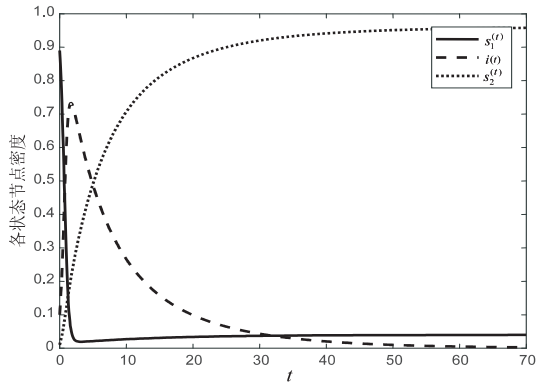
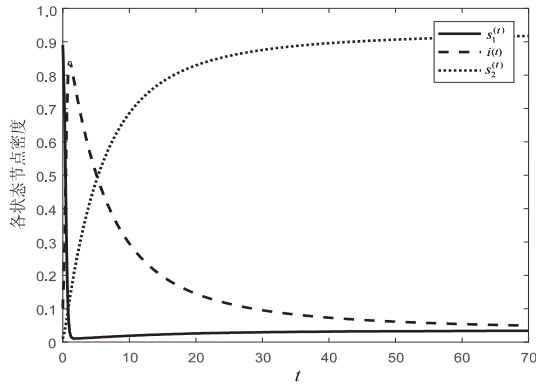
(a) $R_0 < 1$ (b) $R_0 > 1$

图 2 不同基本再生数下的数值模拟

其中图 2 的模型参数分别为 (a) $\lambda = 0.5$, $\gamma = 0.2$, $\beta = 0.01$, $\eta = 0.1$, $A_1 = 0.05$, $A_2 = 0.05$, $\mu = 0.1$; (b) $\lambda = 0.9$, $\gamma = 0.2$, $\beta = 0.01$, $\eta = 0.1$, $A_1 = 0.05$, $A_2 = 0.05$, $\mu = 0.1$ 。

图 2(a) 中 $R_0 = 0.6589 < 1$, $s_1^{(0)} = 0.0399$, $s_2^{(0)} = 0.9601$, 系统中渐近稳定的无谣言平衡点为 $E_0 = (s_1^{(0)}, 0, s_2^{(0)}) = (0.0399, 0, 0.9601)$ 。当 $R_0 < 1$ 时, 谣言将从社交网络中消失。图 2(b) 中 $R_0 = 1.1381 > 1$, 谣言在系统中爆发, 并未消亡。数值模拟与理论分析结果一致。

2.2 非均匀网络上的动力学分析

在非均匀网络上, 模型的稳态满足:

$$\frac{ds_{1,k}(t)}{dt} = 0, \frac{di_k(t)}{dt} = 0, \frac{ds_{2,k}(t)}{dt} = 0$$

当 $i_k = 0$ 时, 存在无谣言平衡点, 表示为 $E_0 = (s_1^{(0)}, 0, s_2^{(0)})$ 。

令 $x = (i_k)$, 模型(2)可以表示为:

$$\dot{x} = F(x) - V(x)$$

在非均匀网络上:

$$F = DF(E_0) = \left[\frac{\partial(\lambda ks_{1,k} \Theta_1 + \beta \bar{m} \bar{G} s_{1,k} i)}{\partial i_k} \right] =$$

$$\left[\frac{\partial(\lambda ks_{1,k} \sum_k p(k|k) i_k + \beta \bar{m} \bar{G} s_{1,k} i)}{\partial i_k} \right] =$$

$$\begin{bmatrix} (\lambda p(1|1) + \beta \bar{m} \bar{G}) s_{1,1} & \cdots & (\lambda p(n|1) + \beta \bar{m} \bar{G}) s_{1,1} \\ (2\lambda p(1|2) + \beta \bar{m} \bar{G}) s_{1,2} & \cdots & (2\lambda p(n|2) + \beta \bar{m} \bar{G}) s_{1,2} \\ \vdots & \cdots & \vdots \\ (n\lambda p(1|n) + \beta \bar{m} \bar{G}) s_{1,n} & \cdots & (n\lambda p(n|n) + \beta \bar{m} \bar{G}) s_{1,n} \end{bmatrix}$$

$$V = DV(E_0) = \eta + \mu$$

其中, F 和 V 分别是 $F(x)$ 和 $V(x)$ 在无谣言平衡点处的雅可比矩阵。 FV^{-1} 是模型的下一代矩阵, 谱半径即为基本再生数 R_0 。

$$R_0 = \rho(FV^{-1}) = \frac{1}{\eta + \mu} \left[\sum_k s_{1,k} (\lambda kp(k|k) + \beta \bar{m} \bar{G}) \right] = \frac{\lambda}{(\eta + \mu) \langle k \rangle} \sum_k k^2 P(k) s_{1,k} + \frac{1}{\eta + \mu} \sum_k \beta \bar{m} \bar{G} s_{1,k}$$

对比均匀网络上的基本再生数以及非均匀网络上的基本再生数, 当 $\lambda \rightarrow 0$ 时, 在两种网络中都可以得到基本再生数 $R_0 = \frac{\beta \bar{m} \bar{G} s_1^{(0)}}{\eta + \mu}$, 这意味着当人们倾向于通过群体发送谣言时, 系统的稳定性和谣言传播行为与网络拓扑结构关联不大。

3 仿真结果

网络具有 N 个节点和 E 条边。节点可以被视为用户, 边可以被视为用户之间的链接。下面分别在人工网络和 Facebook 网络中对理性者交互的群组传播模型表征的传播动力学过程进行仿真。先选取三种人工网络, 其中均匀网络选取 ER 随机网络^[23] 和 WS 小世界网络^[24], 非均匀网络选取 BA 无标度网络^[25]。同时在真实的社交网络的 Facebook 网络^[26] 进行仿真模拟。Facebook 网络来自于用户的好友列表, 该数据集是从使用 Facebook 的调查者收集而来的。仿真实验使用 MATLAB 进行 Monte Carlo 模拟, 所有模拟结果均是独立运行 100 次取平均值得到。

根据仿真需要随机将部分网络节点划分为群组,

根据群组数量和群组度设置群组内节点与节点的连接。初始的传播节点比例设为 10%, 初始的理性节点比例设为 1%。仿真中参数设置如下: $\lambda = 0.5$, $\gamma = 0.2$, $\beta = 0.01$, $A_1 = 0.05$, $A_2 = 0.05$, $\mu = 0.1$, $\eta = 0.1$, $\bar{m} = 10$, $\bar{G} = 3$ 。人工网络的节点数为 $N = 1\,000$, 其中 ER 随机网络的节点连接概率 $p = 0.006$, WS 小世界网络节点连接概率 $p = 0.2$, 平均度 $\langle k \rangle = 6$, BA 无标度网

络参数为 $m_0 = 6$, $m = 6$, m_0 是初始节点数, m ($m \leq m_0$) 是边的增长数量。Facebook 网络总共包含 4 039 个节点和 88 234 条边, 平均度 $\langle k \rangle$ 约为 40, 具有非均匀的特征, 属于非均匀网络。群组对不同状态节点密度影响的仿真结果如下:

图 3 表示考虑群组传播时, 三种状态节点密度在 ER 和 WS, BA, Facebook 网络上的变化。

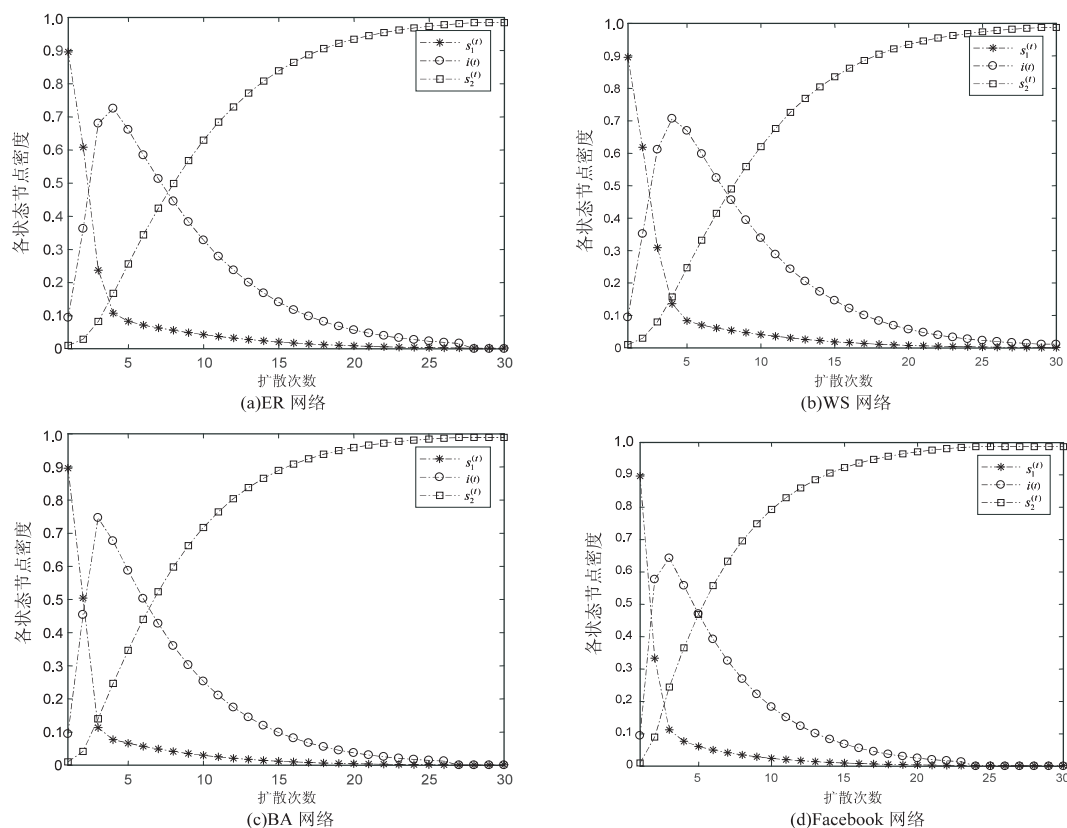


图 3 理性者交互的群组传播谣言模型仿真

在基本再生数 $R_0 < 1$ 的条件下, 随着谣言在网络中扩散, 传播者密度快速增加, 达到峰值之后, 随着时间的推移而逐渐减少, 最终在网络中消失。与此同时, 网络中的理性者在增加, 影响着网络中未知者转变为理性者, 未知者的数量逐渐减少, 达到稳定状态, 这与定理 1 所证明的结论是一致的。在相同的参数下, BA 网络和真实社交网络 Facebook 网络的谣言传播时间小于 ER 网络和 WS 网络。而在三个人工网络中, BA 网络的传播者密度峰值比 ER 和 WS 网络上大。这是由于非均匀网络中存在 hub 节点以及无标度特性会加速谣言的扩散。一旦 hub 节点变成传播节点, 它的邻居节点也会接收到谣言, 从而加速传播。由于 ER 和 WS 网络的均匀性, 可以发现图 3(a), 图 3(b) 与数值仿真图 2(a) 相似, 这说明了理论结果与仿真结果的一致性^[27]。

图 4 在节点平均群组度 $\bar{G} = 3$ 下分析了不同的群组的平均人数 (\bar{m}) 对谣言传播的影响。分别选取了

$\bar{m} = 1, 20, 100$ 代表社交网络中的无群组、小型群组、大型群组三种情况。群组传播与无群组传播相比, 传播者密度以更快的速度达到峰值, 谣言影响范围更大。通过图 4(a)、图 4(b)、图 4(c) 和图 4(d) 的对比可得, 群组大小对谣言在 ER 网络和 WS 网络上传播的影响更明显。在四种网络中, 均能发现当群组规模更大时, 传播者密度峰值更大, 传播速度加快。群组可以有效地传播谣言, 是一个重要的谣言传播途径。

图 5 表示理性者交互率 γ 与传播者交互率 λ 的比值变化时对传播者密度的影响。当 γ/λ 比值更大时, 说明理性者比传播者更可信, 更多的未知者选择转化为理性者。分别选取了 $\gamma/\lambda = 0.5, 1, 2$, 在四个网络中, 均能发现 γ/λ 比值越大时, 传播者密度峰值明显下降, 谣言传播时间减小, 消失速度更快。说明当理性者更可信时, 使得更多的未知者选择相信真相, 从而降低谣言传播规模, 对谣言抑制的效果越好。上述分析表明, 在谣言传播的过程中, 理性者可以有效地抑制谣言传播, 当更有公信力的理性者进入社交网络, 抑制谣

言效果更好。

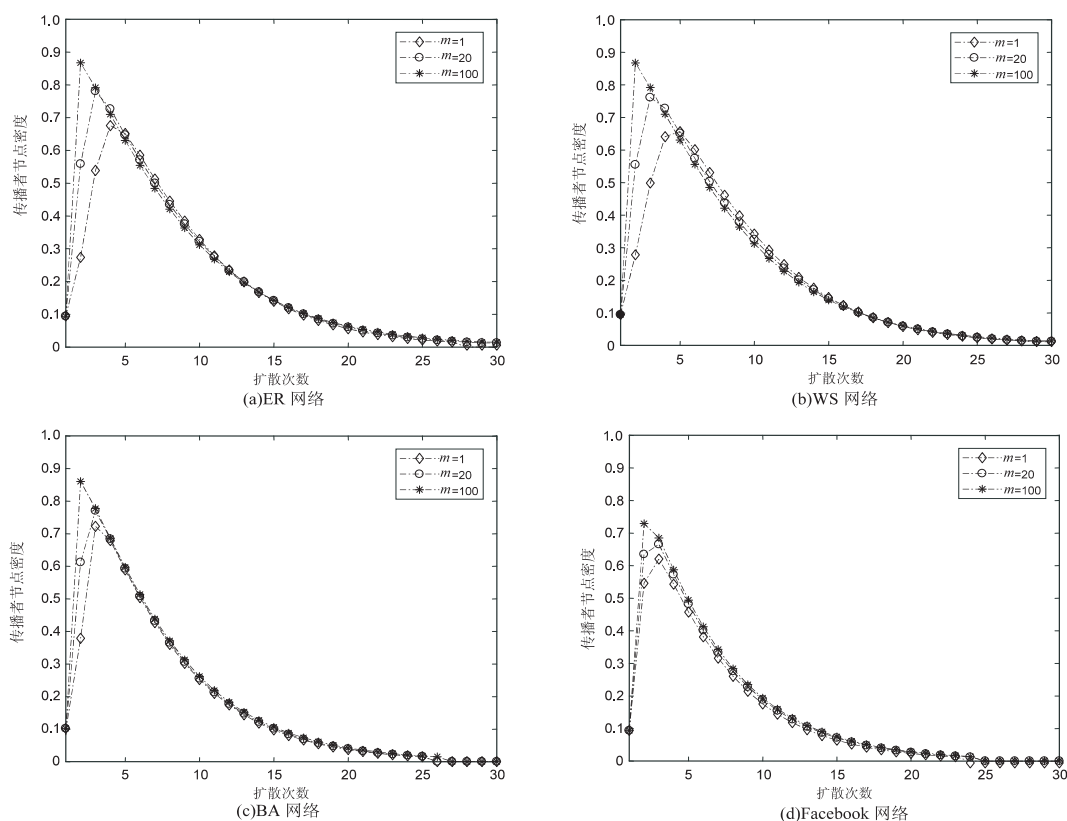


图4 群组平均人数对传播者密度的影响

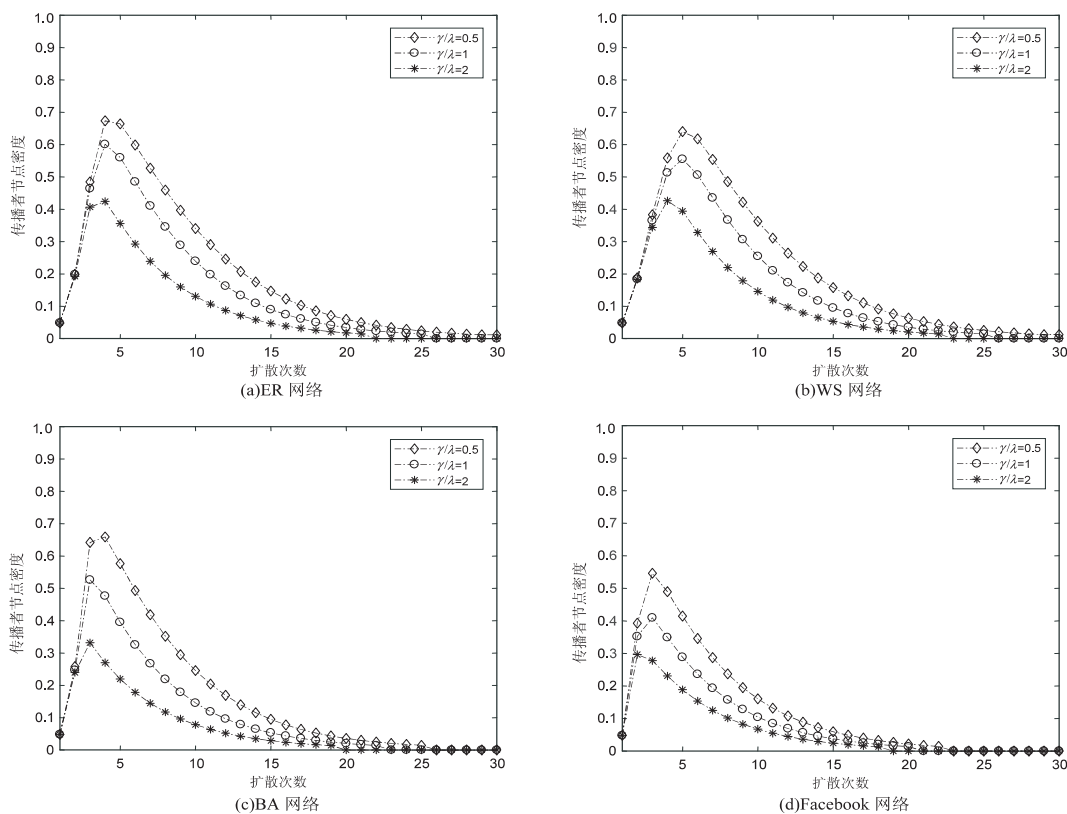


图5 γ/λ 变化传播密度动态过程

4 结束语

该文建立了考虑群组传播理性者交互的谣言传播

模型。不同于大多数研究者只关注网络个体谣言传播,把群组传播和理性者引入谣言传播模型,更好地理解社交网络信息传播速度和效果,为抑制谣言提出新

思路。

在均匀网络和非均匀网络上分别建立了谣言传播模型,推导了无谣言平衡点和基本再生数,当基本再生数 $R_0 < 1$, 系统在无谣言平衡点处渐近稳定,谣言逐渐消失。数值仿真验证了理论推导。此外,使用 MATLAB 进行了 Monte Carlo 仿真,并研究了群组传播对 ER, WS, BA, Facebook 网络中谣言传播的影响。结果表明,当 $R_0 < 1$, 4 种网络中的未知者密度和理性者密度均趋于稳定,传播者密度趋于 0, 谣言终将从网络中消失; BA 网络和 Facebook 网络谣言传播速度和消失速度快于 ER 网络和 WS 网络。群组的平均人数更多时,传播者密度峰值更大。理性者交互率与传播者交互率比值更大时,谣言抑制的效果更好,传播者以更快的速度消失,且谣言传播影响范围减小。因此提高理性者的公信力,增加可信度可以有效地抑制谣言,为相关部门采取措施提供了理论依据。虽然文中取得了一些有意义的结果,但是把发布辟谣信息、调动社会积极资源等抑制手段加入谣言传播模型,也是一个值得研究的方向。

参考文献:

- [1] 李春茹. 突发事件下谣言传播的机制与防控策略研究[D]. 成都:西南交通大学, 2016.
- [2] 孙玺菁, 司守奎. 复杂网络算法与应用[M]. 北京:国防工业出版社, 2015:100-104.
- [3] DELAY D J, KENDALL D G. Epidemics and rumours[J]. Nature, 1964, 204(4963):1118.
- [4] MAKI D, THOMPSON M. Mathematical models and applications[M]. New Jersey:Prentice-Hall, 1973.
- [5] ZANETTE D H. Critical behavior of propagation on small-world networks[J]. Physical Review E, 2001, 64(1):050901.
- [6] ZANETTE D H. Dynamics of rumor propagation on small-world networks[J]. Physical Review E, 2002, 65(4):041908.
- [7] MORENO Y, NEKOVEE M, PACHECO A F. Dynamics of rumor spreading in complex networks[J]. Physical Review E, 2004, 69(6):066130.
- [8] 夏玲玲. 复杂网络上的信息传播动力学建模与免疫策略研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2017.
- [9] 咎永利. 复杂网络中的反击谣言模型与多谣言同时传播动力学研究[D]. 济南:山东大学, 2015.
- [10] JAIN A, DHAR J, GUPTA V. Stochastic model of rumor propagation dynamics on homogeneous social network with expert interaction and fluctuations in contact transmissions[J]. Physica A, 2019, 519:227-236.
- [11] SUVAKOV M, MITROVIC M, GLIGORIJEVIC V, et al. How the online social networks are used: dialogues-based structure of MySpace[J]. Journal of the Royal Society Interface, 2013, 10(79):20120819.
- [12] LIU Y, ZENG C, LUO Y, et al. Dynamics of a new rumor propagation model with the spread of truth[J]. Applied Mathematics, 2018, 9(5):536-549.
- [13] DHAR J, JAIN A, GUPTA V K. A mathematical model of news propagation on online social network and a control strategy for rumor spreading[J]. Social Network Analysis & Mining, 2016, 6(1):57.
- [14] 王筱莉, 赵来军, 吴忠. 非均匀网络中考虑辟谣机制的谣言传播模型[J]. 系统工程, 2015, 33(12):139-145.
- [15] WEN S, JIANG J, XIANG Y, et al. To shut them up or to clarify: restraining the spread of rumors in online social networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2014, 25(12):3306-3316.
- [16] 刘汉森. 网络传播中反“沉默的螺旋”现象研究[D]. 长沙:中南大学, 2013.
- [17] 王小初. 考虑个体心理特征的谣言传播模型研究[D]. 南京:南京邮电大学, 2016.
- [18] 霍良安. 突发事件发生后不实信息的传播问题研究[D]. 上海:上海交通大学, 2012.
- [19] SAHAFAZADEH E, LADANI B T. The impact of group propagation on rumor spreading in mobile social networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2018, 506:412-423.
- [20] JIA P, WANG C, ZHANG G, et al. A rumor spreading model based on two propagation channels in social networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2019, 524:342-353.
- [21] DIEKMANN O, HEESTERBEEK J A, METZ J A, et al. On the definition and the computation of the basic reproduction ratio R_0 in models for infectious diseases in heterogeneous populations[J]. Journal of Mathematical Biology, 1990, 28(4):365-382.
- [22] DEJESUS E X, KAUFMAN C. Routh-Hurwitz criterion in the examination of eigenvalues of a system of nonlinear ordinary differential equations[J]. Physical Review A, 1987, 35(12):5288-5290.
- [23] ERDÖS P, RÉNYI A. On random graphs[J]. Publ. Math., 1959, 6:290-297.
- [24] WATTS D J, STROGATZ S H. Collective dynamics of ‘small-world’ networks[J]. Nature, 1998, 393(6684):440-442.
- [25] BARABASI A, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439):509-512.
- [26] LESKOVEC J. Stanford large network dataset collections[EB/OL]. 2013. <http://snap.stanford.edu/data>.
- [27] NEKOVEE M, MORENO Y, BIANCONI G, et al. Theory of rumour spreading in complex social networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics & Its Applications, 2008, 374(1):457-470.