

# 基于 SEIR 的社交网络信息传播模型

王 超, 杨旭颖, 徐 珂, 马建峰

(西安电子科技大学计算机学院, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 结合传染病动力学的 SEIR 模型, 本文建立了适用于社交网络的信息传播模型. 该模型基于社交网络用户的行为特征, 分析了社交网络的传播机理和网络参数对信息传播过程的影响, 得出了动力学演化方程组, 刻画了信息传播过程随时间的演化规律. 仿真实验的结果表明, 本文提出的模型能正确地反映社交网络上的信息传播的趋势, 较为准确地描述信息传播过程.

**关键词:** 社交网络; 信息传播模型; SEIR; 微分方程

**中图分类号:** TP393.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2014)11-2325-06

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>

**DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2014.11.031

## SEIR-Based Model for the Information Spreading over SNS

WANG Chao, YANG Xu-ying, XU Ke, MA Jian-feng

(School of Computer Science and Technology, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** It is established a model for information spreading over the social network originating from the SEIR model of the dynamics of infectious diseases. Analyses are given with the model on the effect of the propagation mechanism and network parameters on the processes of information spreading, based on the users' behavior characterization dynamic evolution equations are deduced and the temporal evolution rules of the processes of information spreading are elaborated. The results of simulation experiment show that the SEIR-based model presented is capable of reflecting the tendency and describing the processes of information spreading over the SNS.

**Key words:** social network; model for information spreading; SEIR; differential equation

## 1 引言

社交网络(Social Networking Services, SNS)是 Web2.0 体系下的技术应用架构, 极大地满足了人们非接触式的社交需求. Facebook(<http://www.facebook.com>)是典型的 SNS 型网站, 它以超过十亿的用户量成为了全世界最大的社交网站. 在国内, 微博(<http://weibo.com>)、人人网(<http://www.renren.com>)等社交网络的用户量已达数亿, 有一半以上的网民通过 SNS 交流、分享信息. 与传统媒体相比, SNS 具有用户覆盖面广、信息传播快捷迅猛等优势, 已成为当前最重要的信息传播载体之一. 2013 年 4 月 20 日, “中国地震台网速报”(<http://www.weibo.com/ceic>)在雅安地震发生 53 秒后通过新浪微博率先发布了地震消息, 并实时更新以便于抗震救灾. 然而, SNS 在信息传播上的优势也可能被恶意利用而造成巨大的损失. 2013 年 4 月 23 日, 黑客攻破美联社 Twitter 账号发布虚假信息, 造成金融市场的剧烈动荡, 华尔街遭遇

黑色三分钟<sup>[1]</sup>. 因此, 理解 SNS 上信息的传播机理和过程、掌握信息在 SNS 上的传播规律具有重要的现实意义.

在已有的相关研究中, SNS 的信息传播模型常常建立在传染病模型的基础之上. SNS 网络的用户用图的节点表示, 节点分为易感染节点(S)、传播节点(I)、免疫节点(R)等几类. 文献[2]借助传染病动力学理论, 形成在线社交网络上信息传播的动力学演化方程组, 建立了基于 SIR 的信息传播模型. Zhang 等人<sup>[3]</sup>分析了社交网络中的信息传播过程; 在已知网络拓扑的情况下, 根据节点的度对用户分类, 提出了改进的 SI 模型; 在未知网络拓扑的情况下, 采用概率和微分方程的方法描述信息的传播过程, 建立了改进的 SIR 模型. 类似地, Xu 等人<sup>[4]</sup>提出了基于 SIS 的信息传播模型. 与这些研究相关的, 还有谣言的传播<sup>[5,6]</sup>、BBS 的信息传播<sup>[7]</sup>、蠕虫的传播<sup>[8]</sup>、恶意软件的传播<sup>[9]</sup>等研究工作. Xu 等人<sup>[10]</sup>研究了网络管理员审核待发布信息造成的时间延迟, 建立了信

息传播的 S-SEIR 模型.但是,该时间延迟发生在信息传播之前,因此不会对信息传播的过程产生影响.

以上的研究,大多是基于传染病研究的 SI、SIS、SIR 等模型,对社交网络中的信息传播进行理论建模,其前提是用户总是在线.而在实际的应用中该前提条件很难满足,因而以上的模型都存在一定的局限性.用户登陆 SNS 网站大多具有特定的规律,这个规律由用户的工作、生活等习惯决定,大多数用户不会一直保持在线状态.而在 SNS 网络中,用户在线或离线对信息的传播过程具有重要影响.对于某条信息,在线用户接收后可能会继续传播,离线用户需要登陆后才能传播,即信息的传播具有潜伏期.所以,不具有时滞的模型并不适用于描述 SNS 的信息传播过程.

Anderson 等人<sup>[11]</sup>研究了自然界中的传染病问题,在经典的 SIR 模型中增加了潜伏节点(E)得到 SEIR 模型,引入的潜伏节点用于模拟还不能传播该传染病的患者.本文借鉴其研究结果,在 SIR 模型中引入潜伏节点,用来表示能接收但还不能传播信息的离线用户,因此 SEIR 模型可用于刻画 SNS 用户的行为特征,很好地克服了 SIR 等模型的局限性.本文基于 SEIR 模型,解释了 SNS 的信息传播机理,建立了 SNS 信息的传播动力学模型,分析了用户登录频率和好友数量等因素对 SNS 信息传播的影响,并通过仿真实验验证了本文所提出模型的有效性.

## 2 基于 SEIR 的 SNS 信息传播模型

### 2.1 传播机理

SNS 中的节点分为易感染节点(S)、潜伏节点(E)、传播节点(I)、免疫节点(R)四类,分别表示没有接收信息、接收但不能传播信息、可传播信息、接收但放弃传播信息等四种节点的状态.SNS 网络中,一个用户发布的信息会传播到与其相关的用户处,接收该信息的用户从易感染者变成潜伏者.用户登录后,根据自己的喜好等因素决定是否继续传播该信息.若继续传播,则节点从潜伏状态转移到传播状态;若放弃传播,则这些潜伏者变成免疫者.在用户传播信息的过程中,如果遇到免疫者,传播者也以一定的概率变成免疫者.另外,传播者也不会无休止地传播,将在一定的时间内终止传播行为.

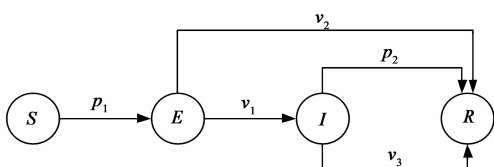


图1 节点状态转移图

在某条信息被传播的过程中,除产生该信息的节点处于 I 状态或 R 状态外,其他节点的状态可能在 S、E、I、R 之间转移(如图 1 所示).传播规则描述如下:

(1)对于易感染节点,若与一个传播节点相邻,则以概率  $p_1$  成为潜伏节点.

(2)对于潜伏节点,要么以速度  $v_1$  变成传播节点,开始传播信息,要么以速度  $v_2$  变为免疫节点,不再传播该信息.

(3)对于传播节点,若与一个免疫节点相邻,则以概率  $p_2$  成为免疫节点,停止传播该信息;同时以速度  $v_3$  停止传播从而变成免疫节点.

(4)对于免疫节点,将一直处于稳定的免疫状态.

### 2.2 传播模型

#### 2.2.1 节点的状态转移概率

对于 SNS 网络中的某个节点  $j$ ,其状态可能在 S、E、I、R 之间变化,在  $[t, t + \Delta t]$  时间段内,节点  $j$  发生状态转移的部分概率定义如表 1 所示.

表 1 节点状态转移概率的定义

$p_{SS}^j$	节点 $j$ 保持易感染状态的概率
$p_{SE}^j$	节点 $j$ 从易感染状态转移到潜伏状态的概率
$p_{EE}^j$	节点 $j$ 保持潜伏状态的概率
$p_{EI}^j$	节点 $j$ 从潜伏状态转移到传播状态的概率
$p_{ER}^j$	节点 $j$ 从潜伏状态转移到免疫状态的概率
$p_{II}^j$	节点 $j$ 保持传播状态的概率
$p_{IR}^j$	节点 $j$ 从传播状态转移到免疫状态的概率

(1)假设节点  $j$  在  $t$  时刻处于易感染状态.显然有:

$$p_{SS}^j + p_{SE}^j = 1 \quad (1)$$

用  $m_1 = m_1(t)$  表示  $t$  时刻节点  $j$  的邻居节点中传播节点的数目.则有:

$$p_{SS}^j = (1 - \Delta t p_1)^{m_1} \quad (2)$$

因此:

$$p_{SE}^j = 1 - (1 - \Delta t p_1)^{m_1} \quad (3)$$

假设节点  $j$  有  $k$  条边,  $m_1$  是服从二项分布的随机变量:

$$\prod (m_1, t) = \binom{k}{m_1} p_1^k (1 - p_1)^{k - m_1} \quad (4)$$

其中,  $p_1(k, t)$  为  $t$  时刻从具有  $k$  条边的易感染节点连接到一个传播节点的概率:

$$p_1(k, t) = \sum_{k_1} p(k_1 | k) p(I_{k_1} | S_k) \quad (5)$$

其中:

$p(k_1 | k)$  为度相关函数,表示度为  $k$  的节点与度为  $k_1$  的节点相邻的条件概率;

$p(I_{k_1} | S_k)$  表示一个拥有  $k_1$  条边的节点,在它连接

到一个度为  $k$  的易感染节点条件下,处于传播状态的概率.

用  $p^l(k_1, t)$  表示  $t$  时刻度为  $k_1$  的传播节点的密度:

$$p_1(k, t) = \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^l(k_1, t) \quad (6)$$

则度为  $k$  的节点在  $[t, t + \Delta t]$  时间段内保持易感染状态的平均概率  $\overline{p_{SS}(k, t)}$  为:

$$\begin{aligned} \overline{p_{SS}(k, t)} &= \sum_{m_1=0}^k \binom{k}{m_1} (1 - p_1 \Delta t)^{m_1} \\ &\quad \cdot p_1(k, t)^{m_1} (1 - p_1(k, t))^{k - m_1} \\ &= (1 - p_1 \Delta t p_1(k, t))^k \end{aligned} \quad (7)$$

将式(6)代入式(7)中,得到:

$$\overline{p_{SS}(k, t)} = (1 - p_1 \Delta t \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^l(k_1, t))^k \quad (8)$$

所以,度为  $k$  的节点在  $[t, t + \Delta t]$  时间段内从易感染状态转移到潜伏状态的平均概率  $\overline{p_{SE}(k, t)}$  为:

$$\begin{aligned} \overline{p_{SE}(k, t)} &= 1 - \overline{p_{SS}(k, t)} \\ &= 1 - (1 - p_1 \Delta t \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^l(k_1, t))^k \end{aligned} \quad (9)$$

(2) 假设节点  $j$  在  $t$  时刻处于潜伏状态. 显然有:

$$p_{EE}^j + p_{ER}^j + p_{EI}^j = 1 \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} p_{EI}^j = \Delta t w_1 \\ p_{ER}^j = \Delta t w_2 \end{cases} \quad (11)$$

(3) 假设节点  $j$  在  $t$  时刻处于传播状态. 显然有:

$$p_{II}^j + p_{IR}^j = 1 \quad (12)$$

用  $m_2 = m_2(t)$  表示  $t$  时刻节点  $j$  的邻居节点中免疫节点的数目. 则:

$$p_{II}^j = (1 - \Delta t p_2)^{m_2} (1 - v_3 \Delta t) \quad (13)$$

假设节点  $j$  有  $k$  条边,  $m_2$  是服从二项分布的随机变量:

$$\prod (m_2, t) = \binom{k}{m_2} p_2(k, t)^{m_2} (1 - p_2(k, t))^{k - m_2} \quad (14)$$

其中,  $p_2(k, t)$  为  $t$  时刻具有  $k$  条边的传播节点与某个免疫节点相邻的概率:

$$p_2(k, t) = \sum_{k_1} p(k_1 | k) p(R_{k_1} | I_k) \quad (15)$$

$p(R_{k_1} | I_k)$  为一个拥有  $k_1$  条边的节点, 在它连接到一个度为  $k$  的传播节点条件下, 处于免疫状态的概率.

用  $p^R(k_1, t)$  表示  $t$  时刻度为  $k_1$  的免疫节点的密度. 则:

$$p_2(k, t) = \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^R(k_1, t) \quad (16)$$

一个度为  $k$  的节点在  $[t, t + \Delta t]$  时间段内保持传播状

态的平均概率  $\overline{p_{II}(k, t)}$  如下:

$$\begin{aligned} \overline{p_{II}(k, t)} &= \sum_{m_2} \binom{k}{m_2} \{ (1 - p_2 \Delta t)^{m_2} p_2(k, t)^{m_2} \\ &\quad \times (1 - p_2(k, t))^{k - m_2} (1 - v_3 \Delta t) \} \\ &= (1 - \Delta t p_2 p_2(k, t))^k (1 - v_3 \Delta t) \\ &= (1 - \Delta t p_2 \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^R(k_1, t))^k \\ &\quad \times (1 - v_3 \Delta t) \end{aligned} \quad (17)$$

对于传播节点, 保持传播状态和从传播状态迁移到免疫状态的平均概率有:

$$\overline{p_{II}(k, t)} + \overline{p_{IR}(k, t)} = 1 \quad (18)$$

所以:

$$\begin{aligned} \overline{p_{IR}(k, t)} &= 1 - (1 - \Delta t p_2 \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^R(k_1, t))^k \\ &\quad \times (1 - v_3 \Delta t) \end{aligned} \quad (19)$$

### 2.2.2 信息传播的动力学演化方程

假设在  $t$  时刻, SNS 中度为  $k$  的节点总数为  $N(k, t)$ , 分别用  $S(k, t)$ 、 $E(k, t)$ 、 $R(k, t)$ 、 $I(k, t)$  表示度为  $k$  的四类节点的数量, 则有:

$$S(k, t) + E(k, t) + I(k, t) + R(k, t) = N(k, t) \quad (20)$$

在  $[t, t + \Delta t]$  时间段内, 各类节点的数量变化情况如下:

(1) 易感染节点

$$S(k, t + \Delta t) = S(k, t) \overline{p_{SS}(k, t)} \quad (21)$$

$$S(k, t + \Delta t) = S(k, t) (1 - p_1 \Delta t \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^l(k_1, t))^k \quad (22)$$

(2) 潜伏节点

$$\begin{aligned} E(k, t + \Delta t) &= E(k, t) + S(k, t) (1 - \overline{p_{SS}(k, t)}) \\ &\quad - E(k, t) (p_{ER} + p_{EI}) \\ &= E(k, t) + S(k, t) (1 - \\ &\quad (1 - p_1 \Delta t \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^l(k_1, t))^k) \\ &\quad - E(k, t) (\Delta t w_2 + \Delta t w_1) \end{aligned} \quad (23)$$

(3) 传播节点

$$\begin{aligned} I(k, t + \Delta t) &= I(k, t) + E(k, t) \overline{p_{EI}(k, t)} - I(k, t) \overline{p_{IR}(k, t)} \\ &= I(k, t) + E(k, t) \Delta t w_1 - I(k, t) \\ &\quad (1 - (1 - \Delta t p_2 \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^R(k_1, t))^k \\ &\quad (1 - v_3 \Delta t)) \end{aligned} \quad (24)$$

(4) 免疫节点

$$\begin{aligned} R(k, t + \Delta t) &= R(k, t) + E(k, t) \overline{p_{ER}(k, t)} + I(k, t) \overline{p_{IR}(k, t)} \\ &= R(k, t) + E(k, t) \Delta t w_2 + I(k, t) \\ &\quad (1 - (1 - \Delta t p_2 \sum_{k_1} p(k_1 | k) \\ &\quad R(k, t) p^R(k_1, t))^k (1 - v_3 \Delta t)) \end{aligned} \quad (25)$$

对于易感染节点:

$$\begin{aligned} & \frac{S(k, t + \Delta t) - S(k, t)}{N(k, t)\Delta t} \\ &= -\frac{S(k, t)}{N(k, t)\Delta t} [1 - (1 - p_1 \Delta t p_1(k, t))^k] \\ &= \frac{S(k, t)}{N(k, t)\Delta t} [1 - (1 - p_1 \Delta t \sum_{k_1} p(k_1 | k) \\ & \quad p^I(k_1, t))] \end{aligned} \quad (26)$$

即:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P^S(k, t)}{\partial t} \\ &= P^S(k, t) [1 - (1 - p_1 \Delta t \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^I(k_1, t))] \end{aligned} \quad (27)$$

对于潜伏节点、传播节点和免疫节点,同理可得:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial P^E(k, t)}{\partial t} = p^E(k, t) (-v_1 - v_2) + kp^S(k, t) \\ & \quad p_1 \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^I(k_1, t) \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p^I(k, t)}{\partial t} = v_1 p^E(k, t) - v_3 p^I(k, t) \\ & \quad - p^I(k, t) p_2 \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^R(k_1, t) \end{aligned} \quad (29)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial p^R(k, t)}{\partial t} = v_2 p^E(k, t) + v_3 p^I(k, t) \\ & \quad + p^I(k, t) p_2 \sum_{k_1} p(k_1 | k) p^R(k_1, t) \end{aligned} \quad (30)$$

公式(27)~(30)构成 SNS 网络上信息传播的动力学演化方程组,以偏微分方程的形式描述了 SNS 网络中四类节点随时间的演化规律,反映了用户的行为特征和网络参数等因素对信息传播过程的影响.

### 3 数值模拟及分析

根据文献[12]中的相关数据,本文将网络的度相关函数假设为 $-0.0036$ ,并且假设系统内用户群容量 $N = 10000$ ,初始状态 $I(0) = 1, S(0) = 9999, E(0) = R(0) = 0, p_1 = 0.6, p_2 = 0.1, v_1 = 0.25$ (次/小时), $v_2 = 0.3$ (次/小时), $v_3 = 0.05$ (次/小时).

#### (1) 四类节点随时间的演化

设置模型参数为 $k = 15$ .研究 SNS 网络中易感染节点、感染节点、传播节点和免疫节点等四类节点的密度随时间的变化情况.

从图 2 可以看出:易感染节点 $S(t)$ 的密度在初始阶段迅速减少到 0,表示信息在社交网络中扩散极快.潜伏节点 $E(t)$ 的密度在初始阶段迅速增大,达到最高点后迅速减少直到 0.初始阶段,大量的用户收到信息,但处于离线状态的用户不会立即传播该信息,所以 $E(t)$ 的密度快速增长. $E(t)$ 曲线到达顶点后,网络中不再有未接收信息的用户,并且收到信息的用户逐渐迁移到传播状态开始传播信息或者进入免疫状态拒绝传

播该信息, $E(t)$ 曲线迅速下降.传播节点 $I(t)$ 的密度也是先增大再减小到 0.信息传播初期,拥有该信息的用户开始传播信息,模型中的节点从潜伏状态进入传播状态, $I(t)$ 曲线升高,达到顶点后,不在有新的用户传播信息,并且之前传播信息的用户也逐渐停止传播,因此 $I(t)$ 曲线下降.免疫节点 $R(t)$ 的密度在初始阶段迅速增多,直到其密度趋于 1,表示所有的用户均会收到该信息.

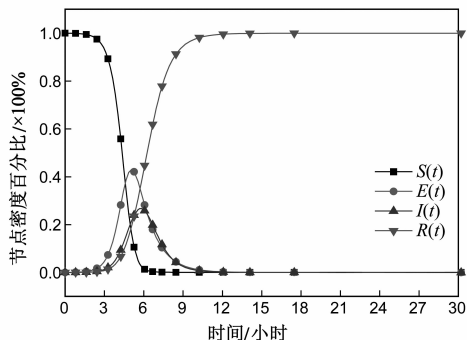


图2 四类节点的密度随着时间的变化

#### (2) 初始传播节点的度对信息传播的影响

假设初始传播节点的度分别为 $k = 7, 15, 30, 300$ ,研究在这四种情况下, SNS 网络中接收信息的节点数量(即潜伏节点、传播节点与免疫节点的密度百分比之和,下同)的变化情况(如图 3 所示).

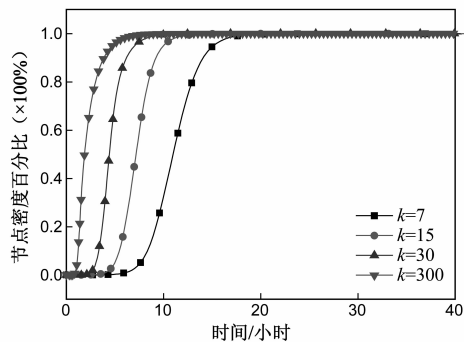


图3 不同 $k$ 值下,信息的传播随时间的变化

从图 3 可以看到,接收信息的节点数量与初始传播节点的度成正相关关系, $k = 7$ 时信息传播的速度最慢, $k = 300$ 时信息传播的速度最快.初始传播节点的度越大,初始时刻传播信息的用户的好友越多, SNS 网络中信息的传播速度越快,传播规模的生长越快.因此,初始传播节点的度的大小会对社交网络中信息传播有很大的影响.所以,为了能尽快地传播信息,应该选择度数较大的节点作为初始传播节点.但是,无论初始节点的度是多少,收到信息的节点密度百分比最终都会趋于稳定值 1,表示网络中所有的节点最终都将收到该信息.

### (3) 节点感染率 $p_1$ 对传播过程的影响

易感染节点与传播节点相邻,则以概率  $p_1$  被感染. $p_1$  分别取 0.1, 0.2, 0.6, 1.0,  $p_1$  对传播过程的影响如图 4 所示.

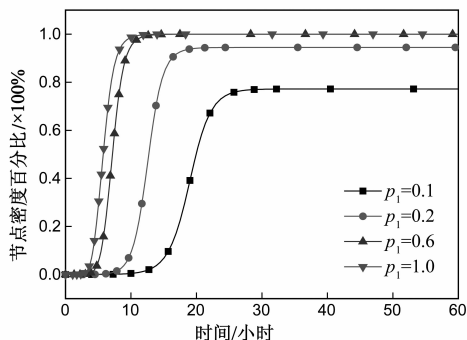


图4 节点感染率 $p_1$ 对传播过程的影响

从图 4 可以看出,节点越容易被感染,则信息传播的速度越快、越早趋于稳定、最终接收信息的节点也越多.对于 SNS 网络上某条信息,如果感兴趣的用户越多,转发的越多,最终接收该信息的用户也越多,信息传播的范围也越快达到稳定状态.图 4 也表明, $p_1$  对信息传播所覆盖的范围至关重要.当  $p_1$  值较小时,信息传播的范围对  $p_1$  的变化更敏感, $p_1$  值较小的增加会造成信息更大面积的扩散.因此,如果要广泛地传播信息,应该考虑如何有效地提高用户转发该信息的概率,使得信息的传播既快速又广泛.

### (4) 用户登录频率对传播过程的影响

在本文提出的 SEIR 模型中,为了表示用户的离线行为而引入了潜伏状态 ( $E$ ),用户登录后,对应的节点状态发生迁移.设用户登录的频率分别为 1/8(次/小时)、1/12(次/小时)、1/24(次/小时)、1/48(次/小时),即每天登录 3 次、2 次、1 次和每 2 天登录 1 次.登录频率对信息传播的影响如图 5 所示.

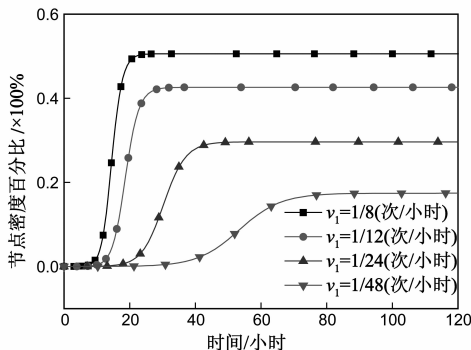


图5 用户登录频率对传播过程的影响

图 5 的结果表明,用户登录的频率对信息传播的速度和范围都有明显的影响.登录的频率越低,信息传播的速度越慢,传播的范围也越小;反之,信息的传播就

越快,传播范围也越大.用户的登录频率是其自身的行为特征,是网络固有的参数,难以从传播控制的角度去改变.

### (5) SEIR 模型与 SIR 模型的比较

SEIR 模型源于 SIR 模型.在已有的信息传播模型中,与 SEIR 模型最近似是 SIR 模型,图 6 显示了两个模型比较的结果.其中,SEIR 模型的  $v_1 = 1/24$ (次/小时),其他参数设置不变.

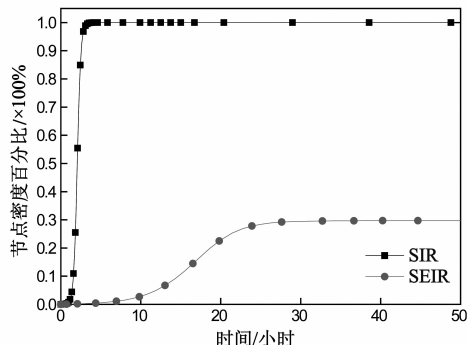


图6 SEIR模型和SIR模型比较

SEIR 模型中潜伏节点 ( $E$ ) 的存在,使得信息的传播无论在速度,还是传播范围上都明显处于劣势,SEIR 模型也需要更长的时间才能达到稳定的网络状态.现实中,用户大部分的时间都处于离线状态,离线行为有效阻碍了信息的传播.事实上,能使得网络中绝大多数节点都接收某条信息的传播过程还没有出现过.即使是讨论最热烈的话题,接收信息的节点的百分比也非常低.例如,“莫言获得诺贝尔奖”这个话题,根据作者在微博上若干次采样的结果估计,接收该信息的节点比例约为 15%.所以,SIR 模型是一种较为理想化的模型,与之相比,SEIR 模型更接近实际情况.

## 4 结束语

社交网络的用户难以保持在线状态,其在线或离线的规律形成其特有的用户行为特征.本文引入潜伏状态以描述用户的离线行为,提出了基于 SEIR 的社交网络信息传播模型,该模型刻画了信息传播过程随时间的演化规律.仿真实验的结果表明,本文提出的模型能反映社交网络上的信息传播的趋势,较为准确地描述信息传播过程.

本文的研究为社交网络上的信息传播提供了理论解释,为信息传播的控制提供理论参考.然而,社交网络上的信息传播是非常复杂的.本文忽略了不同用户的行为差异性的影响,为便于建模假设用户的行为特征都是相似的.从仿真实验的结果来看,不同用户的行为特征对信息传播有很大影响.因此,如何在 SEIR 模型中差异化地描述用户的行为是未来需要解决的难题.

## 参考文献

- [1] <http://www.reuters.com/article/2013/04/23/net-us-usa-whitehouse-ap-idUSBRE93M12Y20130423> [EB/OL]. 2013-04-30.
- [2] 张彦超,刘云,张海峰,等.基于在线社交网络的信息传播模型[J].物理学报,2011,60(5):050501-1-050501-7.  
Zhang Y C, Liu Y, Zhang H F, et al. The research of information dissemination model on online social network [J]. Acta Phys Sin, 2011, 60(5): 050501-1-050501-7. (in Chinese)
- [3] Zhang W, Ye Y Q, Tan H L, et al. Information Diffusion Model Based on Social Network [A]. Proceedings of MCSA 2012 [C]. Bremen: Springer Berlin Heidelberg, 2012. 145 - 150.
- [4] Xu B, Liu L. Information diffusion through online social networks [A]. Proceedings of ICEMMS 2010 [C]. New York: IEEE Press, 2010. 53 - 56.
- [5] Zhao L J, Wang J J, Chen Y C, et al. SIHR rumor spreading model in social networks [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2012, 391(7): 2444 - 2453.
- [6] Huang J Y, Jin X G. Preventing rumor spreading on small-world networks [J]. Journal of Systems Science and Complexity, 2011, 24(3): 449 - 456.
- [7] Zhang B B, Guan X H, Khan M J, et al. A time-varying propagation model of hot topic on BBS sites and Blog networks [J]. Information Sciences, 2012, 187(15): 15 - 32.
- [8] 冯朝胜,秦志光,袁丁,等. P2P 网络中被动型蠕虫传播与免疫建模 [J]. 电子学报, 2013, 41(5): 884 - 889.  
Feng C S, Qin Z G, Yuan D, et al. Modeling propagation and immunization of passive worms in peer-to-peer networks [J]. Acta Electronica Sinica, 2013, 41(5): 884 - 889. (in Chinese)
- [9] 顾亦然,王锁萍.一种恶意软件传播的离散概率模型 [J]. 电子学报, 2010, 38(4): 894 - 898.  
Gu Y R, Wang S P. A discrete probabilistic model of malware propagation [J]. Acta Electronica Sinica, 2010, 38(4): 894 - 898. (in Chinese)
- [10] Xu R Z, Li HL, Xing C M. Research on information dissemination model for social networking services [J]. International Journal of Computer Science and Application, 2013, 2(1): 1 - 6.
- [11] Anderson R, May R. Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control [M]. Oxford University Press: Oxford, 1991.
- [12] Fu F, Chen X J, Liu L H, et al. Promotion of cooperation induced by the interplay between structure and game dynamics [J]. Physica A, 2007, 383(2007): 651 - 659.

## 作者简介



王超男, 1976 年出生, 安徽肥东人. 博士, 西安电子科技大学副教授, 主要研究方向为社交网络、信息安全.

E-mail: wangchao@xidian.edu.cn



杨旭颖女, 1988 年出生, 黑龙江齐齐哈尔人. 西安电子科技大学硕士研究生, 主要研究方向为社交网络的信息传播.

E-mail: 393553509@qq.com

徐珂女, 1992 年出生, 河南周口人. 西安电子科技大学本科生, 主要研究方向为密码学和网络安全.

马建峰男, 1963 年出生, 陕西西安人. 教育部“长江学者”特聘教授, 西安电子科技大学教授、博士生导师, 主要研究方向为计算机安全和密码学.