

基于非理性博弈的舆情传播仿真建模研究

郭东伟^{1,2} 乌云娜^{1,2} 邹蕴^{1,2} 孟祥燕^{1,2}

摘要 随着社交网络的不断发展,借助社交网络进行传播的舆情信息的威胁越来越大.本文利用博弈论的方法研究了舆情信息的传播机制,从理性博弈和非理性博弈的角度出发对个体与邻居的交互行为进行建模.随后以目前较为成熟的传染病模型为基础,通过引入传播学中的社会威慑因素来构建基于非理性博弈的舆情传播模型,以实现适应舆情传播研究的仿真系统,继而将基于非理性博弈的舆情传播模型在无标度网络和小世界网络上的动力学特征进行理论分析.在仿真环境中对非理性博弈的舆情传播模型进行实验,分析模型参数、网络密度和舆情传播源对舆情传播的影响,其结果符合理论分析结果.最后对无标度网络上舆情传播的控制策略进行了研究,包括:社会威慑方法、目标免疫方法和正面消息方法,为社交网络上的政策制定提供了理论基础.

关键词 博弈论,非理性,舆情传播,舆情控制,仿真

引用格式 郭东伟,乌云娜,邹蕴,孟祥燕.基于非理性博弈的舆情传播仿真建模研究.自动化学报,2014,40(8):1721–1732

DOI 10.3724/SP.J.1004.2014.01721

Simulation and Modeling of Non-rational Game Based Public Opinion Spread

GUO Dong-Wei^{1,2} WU Yun-Na^{1,2} ZOU Yun^{1,2} MENG Xiang-Yan^{1,2}

Abstract With the continuous development of social networks, the threat of public opinions which spread on the social networks is growing accordingly. This paper studies the dissemination mechanism of public opinion based on the method of game theory, and builds a game model of agent interaction with neighbors from the view of rational and non-rational games. Then on the basis of the mature epidemic model, we implement a simulation system. The system can adapt to the research of public opinion spread by proposing a public opinion spread model based on non-rational game, and analyze the dynamics characteristic of the public opinion spread model based on non-rational game theoretically in scale-free networks and small-world networks. In the simulation environment, we experiment on the public opinion spread model based on non-rational game to analyze model parameters, network density. The infectious source's affection on spreading. The experimental results agree with the theoretic analysis. Finally, a control strategy of the spreading on scale-free network, which includes social deterrence methods, target immune methods, and positive messages method, is studied to provide a the theoretical basis for policy-making on social networks.

Key words Game theory, non-rational, public opinion spread, public opinion control, simulation

Citation Guo Dong-Wei, Wu Yun-Na, Zou Yun, Meng Xiang-Yan. Simulation and modeling of non-rational game based public opinion spread. *Acta Automatica Sinica*, 2014, 40(8): 1721–1732

舆情传播是指舆情信息等借助社交网络进行传播的行为,具有传播速度快、传播范围广泛和难以抑制等特点,其传播难以通过人工手段进行有效的限制.同时,网络管理的局限性和网络用户的虚拟性,为社交网络上的舆情传播提供了滋生的温床.舆情

有正面和负面两种,但如谣言、诈骗信息等负面信息随着社交网络的迅猛发展和网络用户数量的增长而急剧蔓延,负面舆情传播已经成为影响社会稳定和民生发展的重大隐患之一.在本文中提到的舆情一般指负面舆情,具有一定的社会危害性,应该受到法律、道德等的约束和规范,但在互联网时代,存在难以追溯、法不责众等特点,因此有必要对其传播过程进行分析,从而得到更加理想的控制方案.

目前国内外学术界对舆情传播的研究主要是通过建立仿真模型来进行的^[1–9],从而建立有效的舆情传播模型,有利于系统的分析舆情传播的动力学特征,并提出有效的防御控制策略.早期的舆情传播研究是通过引入物理学上的物质扩散、热传导模型和磁铁离子交互模型来进行舆情传播的,如 Sznajd

收稿日期 2013-07-15 录用日期 2014-01-27
Manuscript received July 15, 2013; accepted January 27, 2014
吉林省科技发展规划(20130101047JC)资助
Supported by Science and Technology Development Plan of Jilin Province (20130101047JC)
本文责任编辑 赵铁军
Recommended by Associate Editor ZHAO Tie-Jun
1. 吉林大学计算机科学与技术学院 长春 130012 2. 吉林大学符号计算与知识工程教育部重点实验室 长春 130012
1. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012 2. Key Laboratory of Symbolic Computation and Knowledge Engineering Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130012

模型、Deffuant 模型^[1-2]。另外还存在一些研究是通过概率模型和阈值模型来进行消息传播的,如 IC 模型、LT 模型^[3-4],分析预测舆情传播特性和趋势。

然而上述模型相对简单,与实际情况差距较大,舆情传播毕竟是基于人类的传播,其复杂程度可见一斑。学术界逐渐开始意识到趋于成熟的传染病模型的研究可以应用到舆情传播模型中,来研究网络用户的不同状态等对舆情传播的影响。如 Zanette^[5]研究了谣言传播的机制,将人群划分为谣言易感状态、感染状态和免疫状态,并将 SIR (Susceptible-Infective-Removal) 传播机制简化后在小世界网络上进行仿真实验。Moreno 等^[6]则将人群划分为谣言易感者、谣言传播者和听到谣言不传播者,发现谣言在均匀网络中不存在非零的传播临界值。Guo 等^[7]将 SIS (Susceptible-Infective-Susceptible) 模型和 SIR 模型加以融合,再添加治疗状态这一新状态,提出了基于个体特征 Agent 建模的传染病模型 SICRS (Susceptible-Infective-Cured-Removal-Susceptible) 进行舆情传播的仿真建模,并研究 SICRS 模型在无标度网络上的动力学特征。

虽然上述研究已经考虑到了网络用户的状态等因素,但是社交网络舆情的传播主要是受用户之间的交互行为影响;而博弈论作为人类行为研究的主要方法之一,基于博弈论的舆情传播模型研究更符合舆情传播的自然规律。Han 等^[8]提出了基于动态演化博弈论的舆情传播研究,主要是研究其上表现出的羊群效应,但是其使用过于简单的 Deffuant 模型作为基础,影响了实验效果。Zinoviev 等^[9]提出对星型社交网络中的信息传播利用单向的信息传播和反馈机制的博弈模型来进行仿真,并充分考虑交互个体的个性,然而该研究尚未给出合理的个体交互博弈分析。

现代传播学认为,个体进行负面信息传播的根本原因必然是其利益(经济利益、他人认同、心理发泄)超过其成本(国家法律或道德的威慑)。近年来舆情传播越来越严重的根本原因不是传播渠道(网络渠道等)的扩展,而是个体的素质意识问题。如果社会威慑力量较强,也就是错误认定成本过低高于所获得的利益,就能够在一定程度上抑制有害信息的传播^[10-12]。随着研究的深入,博弈论等工具也被引入进行传播学机制的研究^[13]。

近年来,博弈论作为决策工具,已经发展到成熟阶段。博弈论的“理性假设”早就获得了广大的质疑,已有很多研究对于非理性假设的博弈(简称非理性博弈)进行了理论分析^[14-15]。最近非理性博弈的研究得到了进一步的发展。Wolpert 等提出利用非理性博弈模型来对博弈论计算框架进行改进,替代

了基于重复博弈模型的非理性研究^[16]。其研究发现,当所有参与者都处于最优策略时,效益可能不是最佳的,而采用非理性策略则有可能使得效益有所提高。该研究结果已经和信息处理代价相结合进行决策行为的指定^[17]。不同研究者非理性的具体表现和作用方式目前尚未取得一致意见。在本文中,我们认为,在信息不完全情况下,个体可以对其邻居的决策行为进行预估,从而缩减行动空间,作出与理性博弈下不一致的决策。这也可以看作是一种非理性博弈的具体应用。在此基础上对于社交网络中的传播行为进行建模,模拟用户个体对舆情利益、邻居行为以及社会威慑进行的平衡制约,进而影响舆情转发行为。

本文在目前较为成熟的传染病模型的基础上,引入传播学中的社会威慑因素,利用非理性博弈的方式对舆情传播的过程进行建模,提出基于非理性博弈的舆情传播模型。然后,对非理性博弈的舆情传播模型在无标度网络和小世界网络上的动力学特征进行理论分析。然后使用仿真算法对非理性博弈的舆情传播模型进行验证,并分析了模型参数、网络密度和舆情传播源对舆情传播的影响,其结果符合理论分析的结论,并能够与现实生活相对应。最后,对无标度网络上舆情传播的控制策略进行了研究,包括:社会威慑方法、目标免疫方法和正面消息方法,揭示了舆情传播控制策略的作用程度和机制,为社交网络上政策制定提供理论基础。

1 舆情传播仿真建模

1.1 舆情传播机制

本文中舆情信息的传播机制是借鉴传染病模型中的状态划分理念,从 SICRS 传染病模型中提取出 4 种状态作为舆情传播的状态,分别为:舆情未传播状态(S 状态)、舆情传播状态(I 状态)、舆情疲劳状态(C 状态)和舆情遗忘状态(R 状态)。其中舆情疲劳状态为个体从舆情传播状态到舆情遗忘状态的一个过渡状态,是个体已然接受舆情所携带的信息,但是不再进行信息的传播扩散。

传播机制中的状态转移过程如图 1 所示。舆情未传播状态的人群通过博弈分析计算的概率进入舆情传播状态,而处于舆情传播状态的个体以概率 ω 进入舆情疲劳状态,该状态下的个体还没有完全遗忘该信息,但不再传播舆情;在舆情疲劳状态的个体以概率 ρ 进入舆情遗忘状态;而彻底遗忘的个体也会以概率 ψ 成为舆情未传播人群。对于 S 状态到 I 状态的转换,本文中使用的博弈论进行建模,又可以具体划分为理性博弈模型和非理性博弈模型。

1.2 舆情传播的理性博弈建模

在社交网络中的舆情传播过程中, 个体的行为抉择受舆情信息和邻居群体行为的影响. 只有当邻居进行信息传播后, 个体才可以接触到该信息, 从而判断是否进行传播. 这一过程可以被建模成个体和邻居群体之间的博弈, 用来解释邻居群体行为对个体行为的影响; 而个体和舆情信息之间的影响关系可以在该博弈的收益/成本的量化过程中体现. 通过建立个体和邻居群体之间的行为博弈模型, 从微观上描述舆情传播的行为特点、量化代价和收益, 从而得到舆情传播的规律. 博弈模型的参与对象包括: 1) 网络个体; 2) 个体的邻居群体.

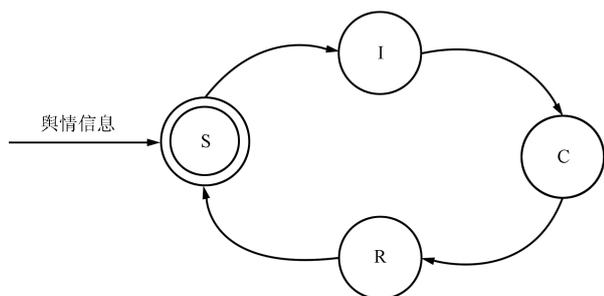


图1 舆情状态模型中的各状态及转换关系

Fig.1 The states and their conversation relationship of public opinion spread model

本模型假设: 个体通过传播舆情信息, 会得到一定的收益 (如网络知名度). 但同时也可能受到法律道德等社会威慑的惩罚, 而这种惩罚会被所有参与的个体所分担. 因此希望更多的邻居也进行转发分担惩罚, 这样个体的利益又会有所下降. 这是一个矛盾点, 却也是博弈论适合的应用场景.

网络中所有个体 i 的策略共有两种: 传播舆情 (Spread) 和不传播舆情 (Nonspread). 若处于舆情未传播状态的节点选择传播舆情策略, 则该个体将进入舆情传播状态. 个体 $user(i)$ (下文简称个体 i) 的邻居群体 $Nei(i)$ 共有 k_i 个个体, 其中 $(m+1)$ 个个体已经处于舆情传播状态, n 个个体处于其他状态. 从 $(m+1)$ 个个体中随机选择一个个体作为信息源, 即引起个体 i 进行博弈分析过程的个体. n 个处于其他状态的邻居群体是博弈的另一方, 然而由于每个个体都是具有思考能力的智能体, 邻居群体的整体策略会呈现多样性, 主要体现于未来可能转发消息的个体个数 s 的不确定性. 邻居群体有 $n+1$ 个策略, 如下所示:

$$\{(s \text{ 个个体传播舆情}, n-s \text{ 个个体不传播舆情}) \mid 0 \leq s \leq n\}$$

个体传播消息的收益使用固定值 u 来表示. 本文为简化分析, u 取固定值. 由于社会威慑值具有较

大的随机性和不确定性, 本文使用常用的正态分布函数 $v \propto N(V_g, \sigma_g^2)$ 来刻画社会威慑变量的随机分布. 并假定每个参与传播的个体均分社会威慑成本. 通过分析个体和邻居群体不同策略下的代价/收益, 给出如下量化表示:

1) 当个体采用传播舆情策略, 邻居群体采用的策略为 (s 个个体传播舆情, $n-s$ 个个体不传播舆情) 时, 个体 i 的收益为

$$G(s) = u - \frac{v}{m+s+1} \tag{1}$$

而个体的邻居群体的收益则用整个邻居群体收益的平均值来表示, 其中既包括现阶段处于舆情传播状态的个体贡献的收益, 也包含未来状态转变为舆情传播状态的个体贡献的利益, 其计算如下:

$$H(s) = \frac{\alpha \sum_{j=0}^m \left(u - \frac{v(j)}{m+s+1} \right) + \beta \sum_{k=0}^s \left(u - \frac{v(k)}{m+s+1} \right)}{n} \tag{2}$$

其中, α 表示 m 个已转发舆情信息的邻居产生收益的系数, β 表示估算 s 个未来转发舆情信息所产生收益的系数.

2) 当个体采用不传播舆情策略, 邻居群体采用的策略为 (s 个个体传播舆情, $n-s$ 个个体不传播舆情) 时, 首先对此策略组合的一种特殊情况进行分析 — 当邻居群体采用 (0 个个体传播舆情, n 个个体不传播舆情) 的策略, 且 $m=0$ 时: 个体 i 不参与舆情的传播, 则收益为 0 , 而所有邻居也都没有传播舆情, 则邻居群体的收益也为 0 . 然而在其他情况下, 个体 i 不参与舆情的传播, 则收益为 0 , 而邻居群体的收益为

$$J(s) = \frac{\alpha \sum_{j=0}^m \left(u - \frac{v(j)}{m+s} \right) + \beta \sum_{k=0}^s \left(u - \frac{v(k)}{m+s} \right)}{n} \tag{3}$$

总和起来邻居群体在此策略组合下的收益为

$$K(s) = \begin{cases} 0, & \text{群体策略为 } (0 \text{ 个个体传播舆情}, \\ & n \text{ 个个体不传播舆情}) \text{ 且 } m=0 \\ J(s), & \text{否则} \end{cases} \tag{4}$$

定义 1. 理性博弈模型表示为三元组 $G = (\Gamma, S, U)$, 其中的 3 个要素: a) $\Gamma = \{1, 2, \dots, n\}$, 参与对象集合; b) $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$, 参与对象

的策略空间, 其中 S_i 表示对象 i 的非空策略集合, 即 $\forall i \in \Gamma, S_i \neq \emptyset$; c) $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$, 每位参与对象定义在策略空间 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_n\}$ 上的收益函数.

理性博弈下个体 i 的博弈模型定义如下: $\Gamma = \{user(i), Nei(i)\}$, $S = \{S_1, S_2\}$, 其中 $S_1 = \{Spread, Nonspread\}$, $S_2 = \{0, 1, \dots, n\}$, $U = \{U_1, U_2\}$, 其中 U 的取值根据上面的式 (1)~(4) 计算.

具体来说, 收益 U 可以表示为 $2(n+1)$ 的博弈收益矩阵, 如表 1 所示.

理性的决策过程就是从收益矩阵中计算出纳什均衡, 其对应的策略为个体 i 的行动. 当存在多个纳什均衡时, 则等概率选择策略作为个体的行动.

1.3 舆情传播的非理性博弈建模

在上文的理性博弈中, 个体通过对所有邻居的分析计算来追求自身利益的最大化, 而隐藏自己的本心追求, 进而选择个体的行为策略. 而在现实社会中, 人类通常不能够对所有邻居进行分析进而得出自己的最优策略. 人类通常只会考虑邻居的部分行为, 从而得出相应的策略. 在本文中, 个体会认为其所有邻居不会选择极端的行为, 即难以出现所有邻居都选择不传播, 或者都选择传播的情况, 在此基础上进行分析. 这种个体先验的假设可以看作一种非理性行为.

假设个体先验地认为至少会有 $bp \times n$, 至多会有 $ep \times n$ 个邻居传播舆情. 也就是说, 个体认为其邻居中有 bp 的比例一定会传播, 而 $1 - ep$ 的比例一定不会传播. 邻居群体的策略空间被缩减, 上面的理性博弈转化为非理性博弈.

定义 2. 非理性博弈 $G^w = \{\Gamma^w, S^w, U^w\}$. 在理性博弈 $G = (\Gamma, S, U)$ 的基础上, 调整三元素为: a) $\Gamma^w = \Gamma = \{1, 2, \dots, n\}$, 参与对象集合; b) $S^w = \{S_1^w, S_2^w, \dots, S_n^w\}$, 参与对象的策略空间, 满足 $\forall i \in \Gamma^w, S_i^w \subseteq S_i$ 且 $S_i^w \neq \emptyset$; c) $U^w = \{U_1^w, U_2^w, \dots, U_n^w\}$, 每位参与对象定义在策略空间 $S^w = \{S_1^w, S_2^w, \dots, S_n^w\}$ 上的收益函数.

这样, 邻居群体的策略空间缩减为定义为: $S_2 = \{(s \times Spread, (n - s) Nonspread)\}$, 满足条件 $bp \times n \leq s \leq ep \times n, 0.0 \leq bp \leq ep \leq 1.0$.

博弈收益矩阵变为 $2[(bp - ep) \times n]$ 的博弈空

间. 在该空间上计算的纳什均衡值对应着相应的非理性策略的行动选择.

2 网络拓扑构造

社交网络具有显著的高聚类特性和无标度特性^[18], 因此我们将在具有高度聚类特性的小世界网络和具有无标度特性的无标度网络上进行实验仿真.

小世界网络的构建采用 NW (Newman-Watts) 小世界网络构建方法^[19]. 我们对该构建方法进行了改进: 将二维网络的左边界和右边界连接, 上边界和下边界连接, 从而构成类似轮胎型的网络, 使网络中不存在边界节点的特殊性, 可以统一处理所有节点.

无标度网络的构建, 采用 BA (Barabási-Albert) 无标度网络构建方法^[20]. 其中 ϕ 表示无标度网络中新增加节点连接到已存在节点的边数, 用来调整网络的连接密度.

本文默认的小世界网络的节点规模 $N = 20\,000$, 边数为 95 587; 对于无标度网络, 节点规模 $N = 20\,000$, 边数为 99 995, ϕ 值为 10.

3 基于非理性博弈的舆情传播的理论分析

在本节中, 首先分析非理性博弈对舆情信息扩散的充分条件.

由于每个个体的社会威慑值都采取 $v \propto N(V_g, \sigma_g^2)$, 可以近似估算 s 个个体的社会威慑总值为 $\sum_{k=0}^t v(k) \approx tV_g$, 从而可以将式 (2) 和式 (3) 分别化简为

$$H \approx \frac{(\alpha m + \beta s) \left(u - \frac{V_g}{m + s + 1} \right)}{n} \tag{5}$$

$$J \approx \frac{(\alpha m + \beta s) \left(u - \frac{V_g}{m + s} \right)}{n} \tag{6}$$

现在利用式 (5) 和 (6) 计算博弈收益矩阵的纳什均衡, 从而得出个体 i 采用转发舆情策略的概率值. 将非理性博弈中 S_2 策略空间中 s 的最小值定义为 $p = \lceil bp \times n \rceil$, 最大值定义为 $q = \lfloor ep \times n \rfloor$. 不失一般性, 社会威慑应当不小于转发舆情信息所得的利益, 即 $V_g \geq u$. 这里划分为 $m = 0$ 和 $m \neq 0$ 两种情况进行分析, 可以得到:

表 1 博弈收益矩阵 (其中左侧的列为个体 i 的策略 S_1 , 上面一行表示个体 i 邻居的策略 S_2)

Table 1 The matrix of game profit (where the left columns are strategies set S_1 of agent i , the top rows are strategies

S_2 set of it's neighbour)

		$Nei(i)$					
		0	1	...	s	...	n
$User(i)$	Spread	$G(0), H(0)$	$G(1), H(1)$...	$G(s), H(s)$...	$G(n), H(n)$
	Nonspread	$0, K(0)$	$0, K(1)$...	$0, K(s)$...	$0, K(n)$

当 $m = 0$ 时, 个体 i 进行舆情转发的概率为

$$pr(i|m=0) = \begin{cases} 0.5, & p = 0 \text{ \& } V_g \leq (q+1)u \\ 1, & p \neq 0 \text{ \& } V_g \leq (q+1)u \\ 0, & V_g > (q+1)u \end{cases} \quad (7)$$

当 $m \neq 0$ 时, 个体 i 进行舆情转发的概率为

$$pr(i|m \neq 0) = \begin{cases} 1, & V_g \leq (q+m+1)u \\ 0, & V_g > (q+m+1)u \end{cases} \quad (8)$$

定理 1. 当满足条件: $V_g \leq (\Delta + 1)u$, $\Delta = \min\{\lceil bp \times k_i \rceil | 0 \leq i \leq N\}$ 时, 基于非理性博弈的舆情信息可以在小世界网络和无标度网络中传播扩散开来, 并且所有个体都能进行舆情的传播.

证明. 当 $m = 0$, 网络中所有节点满足:

$$V_g \leq (\Delta + 1)u \leq (\lceil bp \times k_i \rceil + 1)u \quad (9)$$

从而根据式 (7) 得知所有节点都可以在 $m = 0$ 情况下, 以 0.5 或 1.0 的概率进行舆情的传播扩散. 当 $m \neq 0$ 时,

$$L = q + m + 1 = \lceil bp \times (k_i - m - 1) \rceil + m + 1 \approx bp \times k_i + (1 - bp)m + 1 - bp \quad (10)$$

$$\frac{dL}{dm} = 1 - bp \geq 0 \quad (11)$$

得知对于任意的 m 值, 保持

$$(q + m + 1)u \geq (\lceil bp \times k_i \rceil + 1)u \geq V_g \quad (12)$$

因此, 由式 (8) 可知对于所有个体都能够在 $m \neq 0$ 时, 以 1.0 的概率进行舆情的传播扩散. 综上所述, 所有节点都能够在任意情况下以大于 0 的概率进行舆情传播, 从而使得舆情扩散到所有节点. \square

我们也可以推论出当不满足条件时, 舆情信息也有可能网络中扩散开来.

我们使用 $S(t)$ 、 $I(t)$ 分别表示处于舆情未传播状态和舆情传播状态的个体在 t 时刻所占总人口的比例. 而另外两种状态之间的转换对舆情传播没有影响, 故该两种状态的规模密度合并表示为 $CR(t)$. 这三个状态的群体密度满足条件 $S(t) + I(t) + CR(t) = 1$. 定义网络中个体从舆情未传播状态到舆情传播状态的平均概率为 λ , 舆情疲劳状态和舆情遗忘状态转化到舆情未传播状态的概率为 $\eta = \rho\psi$. 当处于小世界网络 (均匀网络)

时, 三种群体密度的动态变化可以利用下述微分状态方程表示:

$$\frac{dS(t)}{dt} = \eta CR(t) - \lambda \langle k \rangle S(t) I(t) \quad (13)$$

$$\frac{dI(t)}{dt} = \lambda \langle k \rangle S(t) I(t) - \omega I(t) \quad (14)$$

$$\frac{dCR(t)}{dt} = \omega I(t) - \eta CR(t) \quad (15)$$

三个公式的起始条件满足 $S(0) = (N - 1)/N$, $I(0) = 1/N$, $CR(0) = 0$. 上式表明新增加舆情传播状态的群体密度与舆情传播速率 λ , 个体的平均度 $\langle k \rangle$, 舆情未传播状态的群体密度和舆情传播状态的群体密度成正比例.

当令式 (13)~(15) 右端等于 0, 则能够推出处于稳定状态时各状态的分布情况. 我们可以得到:

$$\begin{cases} S = 1.0, I = 0.0, CR = 0.0, \\ \lambda \langle k \rangle < \omega \\ S = \frac{\omega}{\lambda \langle k \rangle}, I = \frac{\eta \left(1 - \frac{\omega}{\lambda \langle k \rangle}\right)}{\eta + \frac{\omega}{\lambda \langle k \rangle}}, CR = 1 - S - I, \\ \lambda \langle k \rangle \geq \omega \end{cases} \quad (16)$$

对于式 (7) 中的第一个条件, 可以通过时间尺度无限延长, 得到 $0.5/(1 - 0.5) = 1.0$ 的舆情传播概率, 从而可以得知个体只能具有概率为 1.0 或 0.0 的舆情传播概率. 而在小世界网络中, 所有个体的 k 值接近一致, 导致平均舆情传播概率 λ 为 1.0 或 0.0, 从而得到如下定理:

定理 2. 在小世界网络中, 基于非理性的舆情传播的稳定状态对于参数 ep 的变化 (或是 V_g 值的变化) 呈现两极化的特征: 处于舆情传播状态的群体密度为固定值 $\eta(1 - \omega/\lambda \langle k \rangle)/(\eta + \omega/\lambda \langle k \rangle)$ 或者 0, 即舆情传播全面传播和舆情不传播的两种情景.

在无标度网络中, 由于 k 值变化范围大, 故不能利用网络均匀性的假设. 定义 $S_k(t)$, $I_k(t)$, $CR_k(t)$ 分别对应度为 k 的个体的 $S(t)$, $I(t)$, $CR(t)$.

$$\frac{dS_k(t)}{dt} = \eta CR_k(t) - \lambda k S_k(t) \theta(t) \quad (17)$$

$$\frac{dI_k(t)}{dt} = \lambda k S_k(t) \theta(t) - \omega I_k(t) \quad (18)$$

$$\frac{dCR_k(t)}{dt} = \omega I_k(t) - \eta CR_k(t) \quad (19)$$

其中, 对于非关联网, 满足如下条件:

$$\theta(t) = \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k kP(k) I_k(t) \quad (20)$$

令式 (17)~(19) 右侧等于 0, 可以得到 $I_k(t)$ 的稳定状态, 值为

$$I_k = \frac{\lambda k \theta}{\omega + \left(\frac{\omega}{\eta} + 1\right) \lambda k \theta} \quad (21)$$

对于 BA 无标度网络, 平均度和度分布分别为

$$\langle k \rangle = \int_m^\infty kP(k) dk = 2\phi, \quad P(k) = 2\phi^2 k^{-3} \quad (22)$$

将式 (21) 和 (22) 代入式 (20) 中, 得到:

$$\theta = \phi \lambda \theta \int_\phi^\infty \frac{1}{k} \frac{dk}{\omega + \left(\frac{\omega}{\eta} + 1\right) \lambda \theta k} = \frac{\phi \lambda \theta}{\omega} \ln \left(1 + \frac{\omega}{\phi \lambda \theta \left(\frac{\omega}{\eta} + 1\right)} \right) \quad (23)$$

从而

$$\theta = \frac{\omega}{\phi \lambda \left(e^{\frac{\omega}{\phi \lambda}} - 1\right) \left(\frac{\omega}{\eta} + 1\right)} \quad (24)$$

对网络中处于舆情传播状态的所有个体在稳定状态时的群体密度可以表示为

$$I = \sum_k P(k) I_k = 2\lambda \phi^2 \theta \int_m^\infty \frac{1}{k^2} \frac{dk}{\omega + \left(\frac{\omega}{\eta} + 1\right) \lambda \theta k} = 2\lambda \phi^2 \theta \times \left(\frac{1}{\omega \phi} - \frac{\left(\frac{\omega}{\eta} + 1\right) \lambda \theta}{\omega^2} \ln \left(1 + \frac{\omega}{\phi \lambda \theta \left(\frac{\omega}{\eta} + 1\right)} \right) \right) \quad (25)$$

把式 (24) 代入式 (25), 可得到:

$$I = \frac{2}{\left(e^{\frac{\omega}{\phi \lambda}} - 1\right) \left(\frac{\omega}{\eta} + 1\right)} \left(1 - \frac{\frac{\omega}{\phi \lambda}}{e^{\frac{\omega}{\phi \lambda}} - 1} \right) \quad (26)$$

对式 (20) 进行求导:

$$\frac{dI}{d\lambda} = \frac{2}{\left(\frac{\omega}{\eta} + 1\right)} \frac{\frac{\omega}{\phi \lambda^2} \left(e^{\frac{2\omega}{\phi \lambda}} - \frac{2\omega}{\phi \lambda} e^{\frac{\omega}{\phi \lambda}} - 1 \right)}{\left(e^{\frac{\omega}{\phi \lambda}} - 1 \right)^3} \quad (27)$$

而又得知

$$e^{2x} - 2xe^x - 1 > 0, \quad x > 0, \omega > 0, \lambda > 0, \eta > 0 \quad (28)$$

从而得出结论:

$$\frac{dI}{d\lambda} > 0 \quad (29)$$

可以推出在无标度网络中, 处于舆情传播状态的群体密度是随着 λ 的增加而逐渐增加的.

在无标度网络上, 个体之间的度差距很大. 通过式 (7) 和 (8) 可以看出, 随着 ep 值降低 (或者 V_g 值的提高), 个体不传播 (概率为 0.0) 的概率会逐渐增加, 从而降低整个网络的平均传播率 λ , 从而也降低了最终稳定状态时, 处于舆情传播状态的群体密度. 从而推出以下定理:

定理 3. 在无标度网络中进行基于非理性博弈的舆情传播时, 处于舆情传播状态的群体密度对于参数 ep 的变化 (或是 V_g 的变化) 呈现多层次化的特征: 即 ep 值 (或者 V_g 值) 不同, 会出现不同群体密度的舆情传播的稳定状态, 并且随着 ep 值的降低 (或是 V_g 值的增加), 稳定时的群体密度值会逐渐下降. 在稳定时舆情传播状态的群体密度值为

$$\frac{2}{\left(e^{\frac{\omega}{\phi \lambda}} - 1\right) \left(\frac{\omega}{\eta} + 1\right)} \left(1 - \frac{\frac{\omega}{\phi \lambda}}{e^{\frac{\omega}{\phi \lambda}} - 1} \right)$$

4 舆情传播仿真

仿真实验中模型参数分别设为: $u = 100, \sigma_g = 10, \alpha = 1.0, \beta = 1.0, \omega = 0.1, \phi = 0.3, \psi = 0.1$, 其他参数根据实验目的指定.

4.1 非理性程度的影响

在基于非理性博弈的舆情传播仿真建模中, 人是舆情传播的主体, 人的非理性程度的高低直接影响人们对舆情传播 (邻居传播) 以及危害情况的判断. 因此, 能否反映非理性程度高低对舆情传播的影响是评估仿真模型有效性的重要指标之一. 通过实验发现, bp 参数对实现效果影响不大, 而 ep 参数显著影响实验结果. 这说明在舆情传播过程中, 那些绝对不进行传播的个体比例对舆情传播影响更显著. 不同 ep 参数下实验结果如图 2 (小世界网络) 和图 3 (无标度网络) 所示.

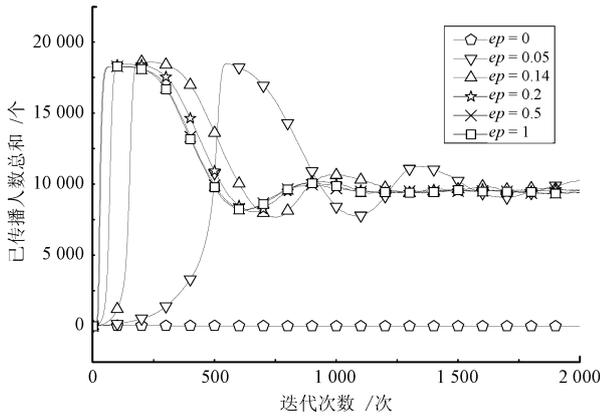


图 2 小世界网络中 ep 值对舆情传播的影响 ($v_g = 250$)

Fig. 2 The impact of ep value on public opinion spread in small world network ($v_g = 250$)

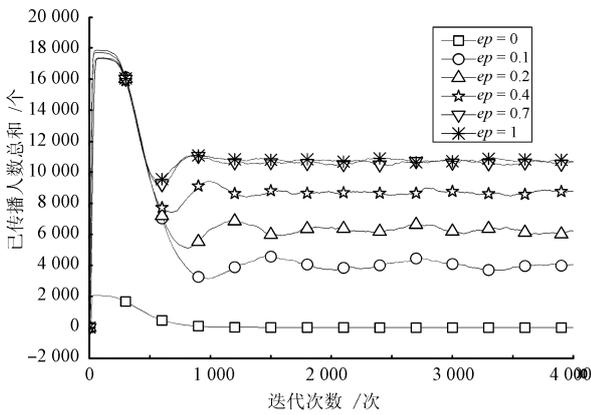


图 3 无标度网络中 ep 值对舆情传播的影响 ($v_g = 350$)

Fig. 3 The impact of ep value on public opinion spread in scale-free network ($v_g = 350$)

从图 2 中可以看出, 在小世界网络中个体非理性程度越小 (ep 值越大), 信息扩散越快. 另外, 该实验也证实了定理 2: 舆情传播的稳定状态只存在两种——扩散和不传播扩散, 且稳定时传播舆情的个体比例值也在定理计算值 0.5 附近. 在无标度网络中, 随着 ep 值的增加 (个体的非理性程度越小, 越具有随众的心理, 越不按照自己的内心意愿行事), 网络中最终稳定时, 传播舆情的个体数也会逐渐上升, 传播的更为广泛, 符合定理 3 的结论. 在两个实验中, 非理性程度对传播的最高峰值无任何影响.

4.2 社会威慑的影响

随着社交网络的快速发展, 舆情传播对社会稳定产生的负面影响逐渐加深, 从而促进国家制定相应的法律政策来对其进行控制. 在舆情传播仿真模型中, 社会威慑变量对舆情信息的转发与否起到至

关重要的作用. 为了考察仿真系统是否能够体现社会威慑对舆情传播的影响, 下面将分别比较 v_g (社会威慑值) 的不同取值对舆情传播的影响, 如图 4 (小世界网络的) 和图 5 (BA 无标度网络) 所示.

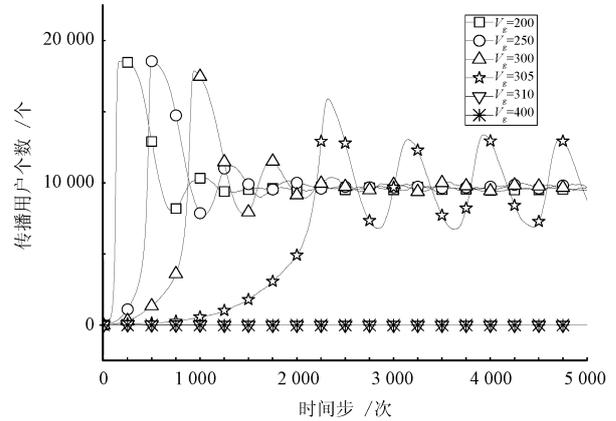


图 4 小世界网络中社会威慑对舆情传播的影响 ($bp = 0.0, ep = 0.1$)

Fig. 4 The impact of social deterrence on public opinion spread in small world network ($bp = 0.0, ep = 0.1$)

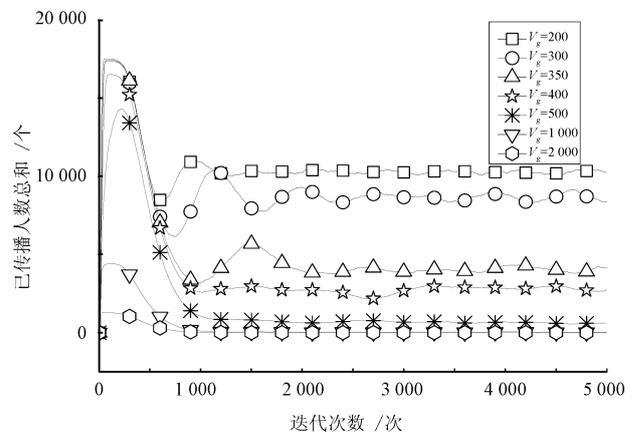


图 5 无标度网络中社会威慑对舆情传播的影响 ($bp = 0.0, ep = 0.1$)

Fig. 5 The impact of social deterrence on public opinion spread in scale-free network ($bp = 0.0, ep = 0.1$)

可以看出, 在小世界网络中当舆情能够传播扩散时, 大部分不同社会威慑值对应的最终舆情传播人数是相同的; 而且也存在舆情不能传播开的情况, 这符合定理 2 的结论. 另外发现在 $v_g = 305$ 时, 会出现周期性震荡的传播行为, 这也符合对于复杂网络的动力学研究发现^[21]. 社会威慑值的增大对延缓舆情传播的速度也有一定的控制作用. 对于无标度网络, 舆情的传播扩散是呈现出多层次的传播, 随着社会威慑值的增加, 舆情传播状态的群体密度值逐渐下降, 与定理 3 保持一致; 舆情传播的峰值也

随着社会威慑值的增大而逐渐下降. 社会威慑对控制舆情传播有着举足轻重的作用, 从而为政策的制定 (通过增大社会威慑来限制舆情传播) 提供理论依据.

在无标度网络中, 观察非理性程度和社会威慑对舆情传播稳定时, 处于舆情传播状态人数的影响, 仿真结果如图 6 所示. 可以看出, 当社会威慑较小时, 非理性程度变化对稳定状态的影响波动不大, 说明个体不再担忧社会的惩罚, 也不顾邻居群体的行为, 在舆情利益引诱下进行舆情转发. 但是随着社会威慑值逐渐增大, 非理性程度对传播人数影响很大, 这意味着此时个体的舆情传播会仔细考虑社会威慑, 进而想要与邻居群体进行社会威慑的分摊, 而不再只追逐舆情所带来的利益. 当个体非理性程度越大 (ep 值越小), 个体会更加考虑利益的得失, 从众的心理因素也就越小, 不易进行舆情信息的传播, 从而舆情传播人数也就越少. 可见当个体能够降低从众心理因素, 不再只追逐最大利益时, 能够降低舆情传播的影响.

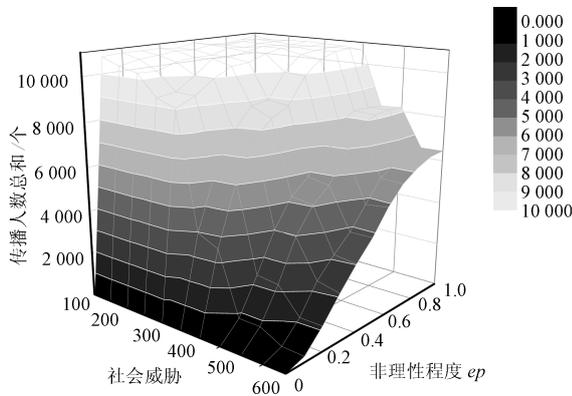


图 6 当舆情传播稳定时, 社会威慑和非理性程度对舆情传播状态人数的影响 ($bp = 0.0$)
 Fig. 6 The influence of social deterrence and non-rational on number of different state when the public opinion spread is steady ($bp = 0.0$)

4.3 网络密度的影响

网络密度对舆情传播也有着极其深远的影响, 是学术界关心的研究课题之一. 通过调节无标度网络中新增连接边数 ϕ 值来构造多个不同网络密度的网络仿真环境, 研究网络密度对舆情传播的影响. 仿真实验分别在 5 个不同网络密度的无标度网络上进行了模拟, 结果如图 7 所示.

从图 7 中可以看出, 随着网络密度值的增大 (即 ϕ 值的增大), 舆情的传播速度加快, 传播的峰值增加, 最终的稳定值也会不断增加. 说明网络中个体之间联系越紧密, 网络对舆情传播的抵抗力就越低, 越

易于爆发舆情传播.

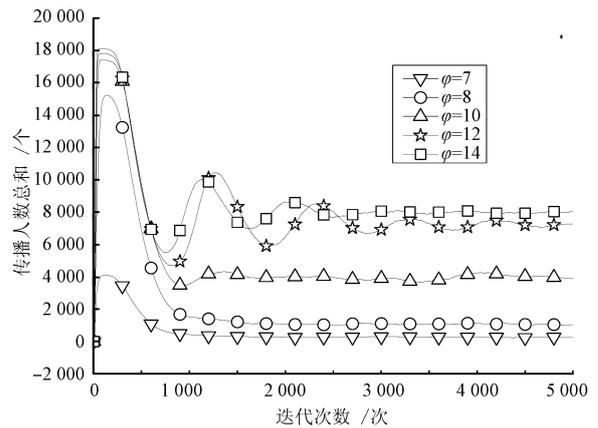


图 7 无标度网络中网络密度对舆情传播的影响 ($bp = 0.0, ep = 0.1, v_g = 350$)

Fig. 7 The impact of network density on public opinion spread in scale-free network ($bp = 0.0, ep = 0.1, v_g = 350$)

4.4 舆情传播源的影响

在社交网络中, 舆情可以从意见领袖 (个体度比较大) 或是普通用户 (个体度比较小) 开始进行传播. 在本节中将讨论无标度网络中舆情传播源的度对舆情传播的影响 (小世界网络节点的度比较接近, 故不再进行实验). 仿真实验分别在社会威慑值为 350 和 500 两种情景下进行, 实验结果如图 8 和图 9 所示.

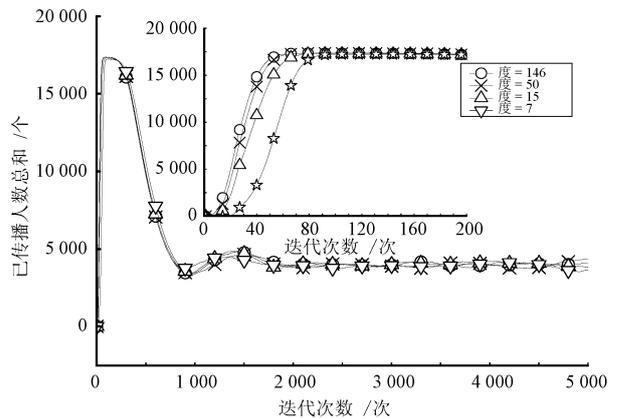


图 8 无标度网络中舆情传播源对舆情传播的影响 ($bp = 0.0, ep = 0.1, v_g = 350$)

Fig. 8 The impact of public opinion source on public opinion spread in scale-free network ($bp = 0.0, ep = 0.1, v_g = 350$)

从图 8 和 9 中可以看出, 传播源的度对最终网络稳定时的传播人数没有任何影响. 当社会威慑较小时, 传播源对传播的峰值也无影响, 但是对起始传

播速度有些影响: 随着传播源度的减小, 起始传播速度有所下降. 当社会威慑较大时, 传播源对舆情扩散的最高峰值会产生影响, 随着传播源度的减小, 舆情传播的最大范围也下降. 综合本实验和上述实验, 得知舆情传播的稳定值不会取决于传播源的特征, 而是取决于舆情本身的特性 (包括其引发的社会威慑) 以及个体的判断能力 (个体的非理性程度、个体的连接情况).

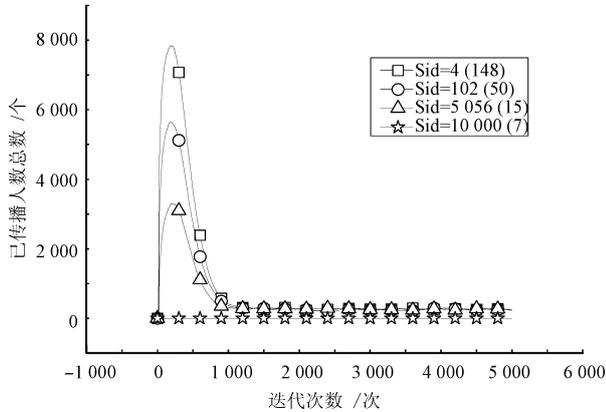


图 9 无标度网络中舆情传播源对舆情传播的影响
($bp = 0.0, ep = 0.1, v_g = 500$)

Fig. 9 The impact of public opinion source on public opinion spread in scale-free network
($bp = 0.0, ep = 0.1, v_g = 500$)

5 舆情传播控制策略研究

由于无标度网络对舆情传播的抵抗脆弱性^[22], 舆情扩散的行为更具显著特征, 因此本文将采用无标度网络进行舆情传播控制策略的研究.

5.1 社会威慑的控制策略研究

根据上文中图 5 和 6 得知社会威慑对舆情传播的控制作用. 可以发现, 当社会威慑不断增大时, 稳定状态的舆情传播总人数不断下降, 最终当达到临界值时, 舆情不再扩散. 社会威慑可以作为一种有效的手段来控制舆情信息的传播, 在真实社交网络中通过法律约束、经济制裁等提高社会威慑的手段能够有效限制舆情的传播^[23], 上面的实验结果也验证了这一点.

5.2 目标免疫的控制策略研究

在无标度网络上, 对舆情的免疫策略有三种: 随机免疫^[24]、目标免疫^[25] 和熟人免疫^[26]. 其中目标免疫是效率最高的一种免疫策略^[27]. 本文将利用目标免疫进行舆情传播的控制研究.

目标免疫是针对无标度网络中节点度的分布不均匀特性, 而采用对少数度大节点进行免疫的方法. 当节点被免疫后, 将会从网络中去除, 使得舆情传播

的路径减少. 定义免疫节点所占比例为 g , 且目标免疫的免疫临界值为 g_c . 图 10 表示当舆情传播达到稳定时, 免疫密度 g 对稳定时处于舆情传播状态的群体密度的影响, 其中纵坐标表示加入比例为 g 的免疫后的稳态传播群体密度与未加任何免疫的稳态传播群体密度的比值. 表 2 表示不同社会威慑对应的 g_c 值. 从图表发现随着社会威慑的增大, 免疫临界值 g_c 不断下降; 免疫临界值 g_c 值是随着 g 值的增大而出现传播范围突然下降时出现的; 当 $g \geq g_c$ 时, 舆情不再进行传播, 始终保持传播人数接近 0; 当 $g < g_c$ 时, 舆情传播范围依旧很大, 随 g 增加, 传播范围变化不大. 结果表明, 在基于非理性博弈的舆情传播模型中, 通过控制意见领袖们的舆论传播行为, 可以控制整个网络的舆情传播; 但是当被控制个体数目小于临界值时, 无法有效控制舆情. 因此在进行舆情控制时, 必须说服足够多的意见领袖才能起作用.

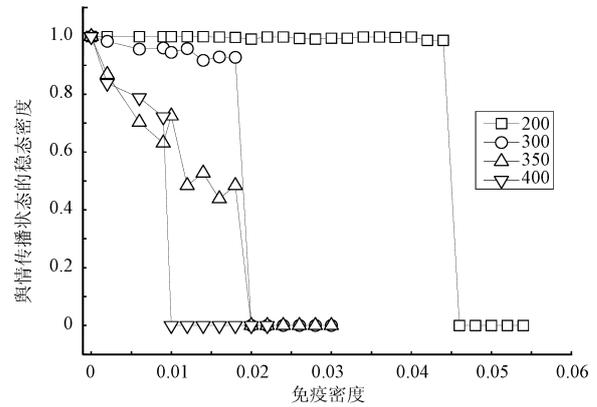


图 10 免疫密度对舆情传播控制的影响

Fig. 10 The impact of immunization density on public opinion spread control

表 2 社会威慑对免疫临界值 g_c 的影响

Table 2 The impact of social deterrence on immunization threshold

社会威慑	免疫临界值 g_c
200	0.046
300	0.021
350	0.021
400	0.011

5.3 正面消息的控制策略研究

正面消息是针对舆情事件的官方消息或权威消息, 更具有群众信服力. 本节将通过在网络中加入正面消息, 对正面消息和舆情信息的联合传播进行仿真建模, 来观察舆情传播的变化. 由于正面消息通常由权威机构发布, 具有可信度, 因此个体在得知消息时就会相信, 而不必通过博弈的过程.

正面消息的作用采用如下模型^[7]: 随机选择某个个体在舆情传播的峰值开始进行正面消息的传播. 正面消息的传播主要是在个体和邻居之间进行, 每个个体进行正面信息传播的概率是和周围邻居中的已转播正面信息的个体数目成比例. 正面消息与舆情消息的交互机制如图 11 所示, 其中细曲线表示负面消息传播的状态转换, 粗直线表示正面消息影响负面消息的两种模式, 即正面消息使得负面消息从 S 状态转换为 C 状态或者从 I 状态转换为 C 状态. 虽然正面消息能够改变个体的状态, 但该消息在网络中的传播速度, 也就是对舆情的控制效率是我们下面重点研究的内容.

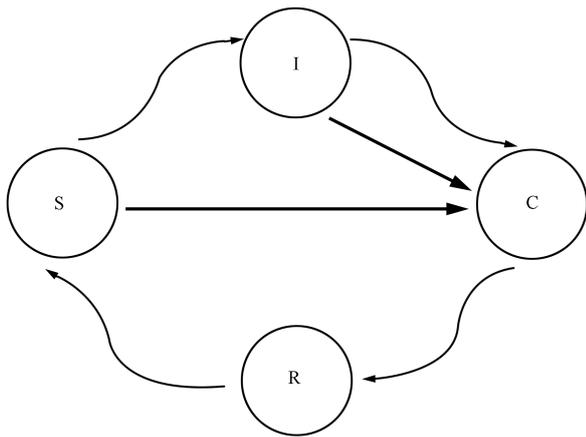


图 11 正面消息作用到舆情传播模型的状态转换关系

Fig. 11 The states conversation relationship of public opinion spread model after the positive message imported

对正面消息的实验仿真如图 12 所示. 该图为两种模式同时使用时的结果图, 可以看出, 当正面消息介入之后, 舆情传播状态的人数迅速下降到 0, 并且稳定值一直保持在 0 值; 但是此时大多数人都处于 R 状态. 正面消息能够快速抑制舆情信息的传播, 控制网络的舆情传播行为.

对正面消息的状态转换进行调整, 来观察分别单独使用 S 到 C 状态转换和 I 到 C 状态转换模式的实验结果, 仿真结果如图 13 和 14 所示. 从中可以看出, 当只使用 I 到 C 状态转换模式时, 舆情传播人数下降速度非常快, 和实验 7 保持相同; 但当单独利用 S 到 C 的状态转换模式时, 传播人数下降缓慢, 但是最终也能将传播人数限制在 0 值; 利用 I 到 C 的状态转换模式有助于将大部分个体限制在舆情未传播状态. 两种模式的控制效率差别很大, 说明正面消息能否起作用取决于已经接受反面消息的个体能否再接受正面消息, 而跟没有接受过反面消息的个体没有太大的关系. 因此在发布正面消息时, 关键在于必须有足够的说服力来改变那些已经接受到负面消息的人群, 而不是简单地影响那些未知人群.

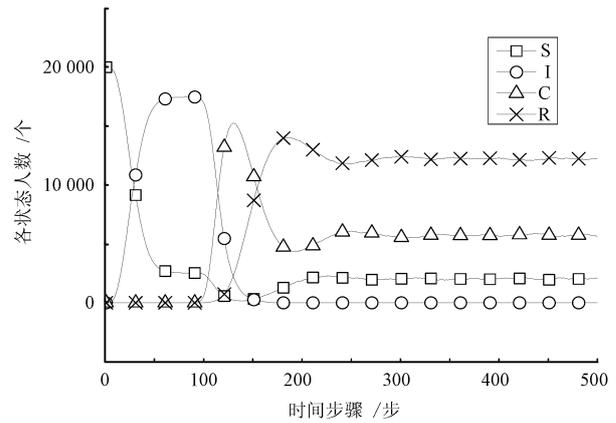


图 12 正面消息对舆情传播的影响

Fig. 12 The impact of positive message on public opinion spread

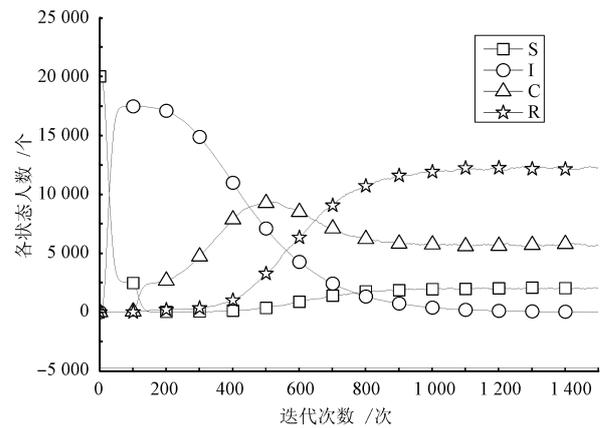


图 13 只利用 S 到 C 状态转换的正面消息对舆情传播的影响

Fig. 13 The impact of positive message on public opinion spread when only use the state conversation from S to C

6 总结

本文是在总结了目前舆情传播仿真模型研究进展的基础上, 考虑个体、邻居和舆情信息三个方面的交互研究舆情传播的动力学规律. 首先, 从理性博弈和非理性博弈的角度出发, 对个体与邻居的交互行为进行建模, 提出基于非理性博弈的舆情传播模型, 进而实现了适应舆情传播研究的仿真系统. 本文的贡献如下: 1) 提出个体与邻居之间的舆情传播的理性博弈模型与非理性博弈模型, 从而更为真实反映个体交互对舆情传播的影响; 2) 对非理性博弈的舆情传播模型在无标度网络和小世界网络上的动力学特征进行理论分析; 3) 使用真实仿真环境对非理性博弈的舆情传播模型进行验证, 并分析了网络密度和舆情传播源对舆情传播的影响; 4) 对无标度网络上舆情传播的控制策略进行了研究, 包括: 社会威慑

方法、目标免疫方法、正面消息方法, 发现当个体能够降低从众心理因素, 不再只追逐最大利益时, 能够降低舆情传播的影响. 对于正面消息, 只有当使得已经接受反面消息的个体信服正面消息才能真正地抑制舆情的传播.

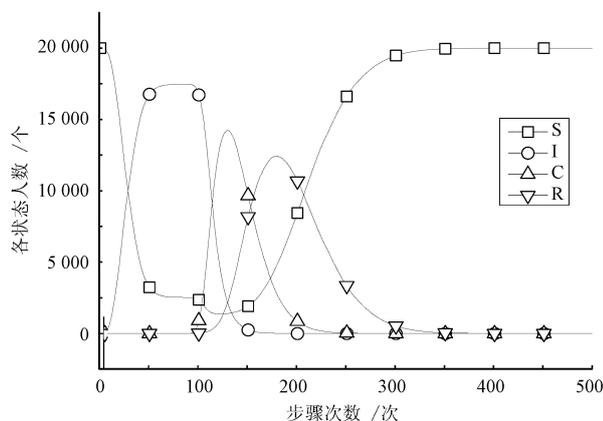


图 14 只利用 I 到 C 状态转换的正面消息对舆情传播的影响

Fig. 14 The impact of positive message on public opinion spread when only use the state conversion from I to C

根据上述实验和分析, 可以看出, 若想有效地控制不良舆情的传播, 可以采取加大社会威慑力度、控制足够数量的意见领袖的传播以及提供更加具有说服力的正面消息等方法. 本文为社交网络上舆情传播的研究提供了一个有效的仿真框架, 并进行了相关的控制策略研究, 为舆情传播政策的制定提供理论依据.

References

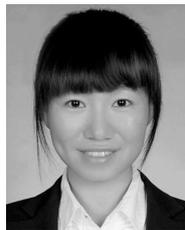
- Sznajd W K, Sznajd J. Opinion evolution in closed community. *International Journal of Modern Physics C*, 2000, **11**(6): 1157–1165
- Deffuant G, Neau D, Amblard F, Weisbuch G. Mixing beliefs among interacting agents. *Advances in Complex Systems*, 2000, **3**(01n04): 87–98
- Gruhl D, Guha R, Liben-Nowell D, Tomkins A. Information diffusion through blogspace. In: Proceedings of the 13th international conference on World Wide Web. New York: ACM, 2004. 491–501
- Kempe D, Kleinberg J, Tardos É. Maximizing the spread of influence through a social network. In: Proceedings of the 9th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining. New York: ACM, 2003. 137–146
- Zanette D H. Dynamics of rumor propagation on small-world networks. *Physical Review E*, 2002, **65**(4): 041908
- Moreno Y, Nekovee M, Pacheco A F. Dynamics of rumor spreading in complex networks. *Physical Review E*, 2004, **69**(6): 066130
- Guo Dong-Wei, Chen Jing, Zou Yun, Li Bing. Evolutionary characteristics of public opinion spread in social networks. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Computer and Computational Intelligence. Bali, Indonesia. 2012
- Han S C, Liu Y, Zhang Y C, Cheng H. Herd instinct of opinion based on dynamic evolutionary game theory. *Journal of Systems Engineering*, 2011, **26**(2): 275–281
- Zinoviev D, Duong V, Zhang H. A game theoretical approach to modeling information dissemination in social networks. In: Proceedings of the 14th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics. Orlando, USA: IEEE, 2010. **1**: 407–412
- Bai Yin. The dynamic spread analysis of network rumors. *Journalism & Communication*, 2010, (5): 91–96 (白寅. 网络流言传播的动力学机制分析. 新闻与传播研究, 2010, (5): 91–96)
- Zhu Xiao-Yu. The communication analysis of microblogging rumors. *Practical Journalism*, 2013, (4): 26–28 (朱小雨. 微博流言的传播学分析. 新闻实践, 2013, (4): 26–28)
- Dan Song-Tao. The psychoanalysis of network rumor spread. *Journalism & Communication*, 2012, (4): 252–253 (单松涛. 网络流言传播的心理分析. 新闻传播, 2012, (4): 252–253)
- Gong Ji-Ping. The game theory method of journalism and communication studies. *Journalism Lover*, 2009, **23**(12): 9–10 (龚际平. 新闻传播学研究的博弈论方法. 新闻爱好者, 2009, **23**(12): 9–10)
- Camerer C. *Behavioral Game Theory: Experiments in Strategic Interaction*. New York: Princeton University Press, 2003
- Fehr E, Tyran J R. Limited rationality and strategic interaction: the impact of the strategic environment on nominal inertia. *Econometrica*, 2008, **76**(2): 353–394
- Wolpert D, Jamison J, Newth D, Harre M. Strategic choice of preferences: the persona model. *The BE Journal of Theoretical Economics*, 2011, **11**(1), doi: 10.2202/1935-1704.1593
- Ortega P A, Braun D A. Thermodynamics as a theory of decision-making with information processing costs. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science*, 2013, **469**(2153), DOI: 10.1098/rspa.2012.0683
- Scott J. Social network analysis. *Sociology*, 1988, **22**(1): 109–127

- 19 Newman M E J, Watts D J. Renormalization group analysis of the small-world network model. *Physics Letters A*, 1999, **263**(4): 341–346
- 20 Barabási A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. *Science*, 1999, **286**(5439): 509–512
- 21 Ramani A, Carstea A S, Willox R, Grammaticos B. Oscillating epidemics: a discrete-time model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2004, **333**: 278–292
- 22 Pastor-Satorras R, Vespignani A. Epidemics and immunization in scale-free networks. *Handbook of Graphs and Networks: from the Genome to the Internet*, 2005: 111–130
- 23 Meier R F, Johnson W T. Deterrence as social control: the legal and extralegal production of conformity. *American Sociological Review*, 1977, **42**(2): 292–304
- 24 Anderson R M, May R M, Anderson B. *Infectious Diseases of Humans: Dynamics and Control*. Oxford: Oxford University Press, 1992
- 25 Pastor-Satorras R, Vespignani A. Immunization of complex networks. *Physical Review E*, 2002, **65**(3): 036104
- 26 Cohen R, Havlin S, Ben-Avraham D. Efficient immunization strategies for computer networks and populations. *Physical Review Letters*, 2003, **91**(24): 247901
- 27 Madar N, Kalisky T, Cohen R, ben-Avraham D, Havlin S. Immunization and epidemic dynamics in complex networks. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 2004, **38**(2): 269–276



郭东伟 吉林大学计算机科学与技术学院教授. 2002 年获得吉林大学博士学位. 主要研究方向为博弈论, 计算智能, 复杂网络, 传感器网络. 本文通信作者.
E-mail: guodw@jlu.edu.cn
(**GUO Dong-Wei** Professor at the College of Computer Science and Technology, Jilin University. He received his

Ph. D. degree from Jilin University in 2002. His research interest covers game theory, computational intelligence, complex network, and sensor network. Corresponding author of this paper.)



乌云娜 吉林大学计算机科学与技术学院硕士研究生. 2011 年获得吉林大学计算机科学与技术学院计算机系学士学位. 主要研究方向为博弈论与复杂网络.

E-mail: jinwyn0301@163.com

(**WU Yun-Na** Master student at the College of Computer Science and Technology, Jilin University. She received her bachelor degree from Jilin University in 2011. Her research interest covers game theory and complex network.)



邹蕴 吉林大学计算机科学与技术学院硕士研究生. 2011 年获得吉林大学计算机科学与技术学院计算机系学士学位. 主要研究方向为复杂网络.

E-mail: zouyun1989@gmail.com

(**ZOU Yun** Master student at the College of Computer Science and Technology, Jilin University. She received

her bachelor degree from Jilin University in 2011. Her research interest covers complex network.)



孟祥燕 吉林大学计算机科学与技术学院硕士研究生. 2012 年获得吉林大学计算机科学与技术学院计算机系学士学位. 主要研究方向为博弈论.

E-mail: mengxiangyan999@126.com

(**MENG Xiang-Yan** Master student at the College of Computer Science and Technology, Jilin University.

She received her bachelor degree from Jilin University in 2012. Her main research interest is game theory.)