

基于复杂网络的谣言传播模型

王长春, 陈 超

(国防科学技术大学 信息系统与管理学院 信息系统工程重点实验室, 长沙 410073)

摘 要 分析了谣言传播的心理机制和我双方的对抗策略, 引入谣言属性变量并藉此建立了平均场下的谣言传播新模型. 借助严格一阶随机电占和严格二阶随机电占的概念分别讨论了谣言属性、我双方干预强度、网络结构特征和谣言传播效果之间的关系, 提出并证明了具有重要管理意义的 4 个命题. 通过仿真实验进一步验证了命题的正确性.

关键词 舆论战; 复杂网络; 传播动力学; 随机电占

Rumor propagation model based on complex network

(王长春, 陈超, 国防科技大学, 长沙 410073)

Abstract The psychological mechanism and intervening strategies of rumor propagation were analyzed firstly. Using mean field approximation, we gave a new model in which rumor attribute was considered. By introducing strictly first order stochastic dominance and strictly second order stochastic dominance, we analyzed the relationships among rumor attribute, intervening intensity, network structure and diffusion effect, then derived and proofed four propositions that were very useful for us to explore rumor propagation. Finally, some propositions were verified by computer simulation.

Keywords public opinion warfare; complex network; transmission dynamics; stochastic dominance

1 引言

谣言是指围绕政治活动和军事斗争所传播的那些毫无根据或虽起之有因但却严重失实的消息^[1]. 一方面, 战争不仅是物质力量的冲突, 更重要的是精神力量的较量. 另一方面, 因为谣言传播是以人为主体的多因素、多变量的复杂体系, 且谣言传播具有动态性、非线性, 因而一直很难找到合适的定量分析方法对它们进行科学、准确的描述. 何寻求和建立一个能够描述和处理谣言传播效果评估的技术框架, 通过模型对诸多复杂现象和问题进行分析、判断和推理, 是当前谣言研究领域一项亟待解决的重大前沿性课题.

尽管谣言作为一种常见的社会现象已经有几千年了, 但是对谣言的科学研究却是始于 20 世纪. 由于谣言在社会网络中的散布和病毒扩散很相似, 和 V 于 20 世纪 60 年代借鉴传染病模型提出了谣言传播的数学模型 (简称 V 模型), 在谣言传播的定量研究中被广泛地运用^[2]. 后近 50 年, 许多学者为扩展其应用范围, 构建了形形色色的 V 改进模型 (模型). 根据研究方法的不同, 扩展模型又可以分为两种: 确定性传播模型和随机传播模型^[3]. 为了刻画网络拓扑结构对谣言传播的影响, 首先将复杂网络理论应用于谣言传播研究, 在静态和动态小世界网络上建立谣言传播模型, 得出了谣言传播临界值的结论^[4]. 等人又在无标度网络上建立了谣言传播模型, 得出不同个体相信谣言的概率差异, 不同拓扑结构的网络传播规律也不相同^[5]. 等人在分析前人研究的基础上, 在谣言传播模型中增加了度关联函数, 并且通过数值计算分析了网络拓扑对谣言传播的影响^[6]. 于同洋等人运用多智能体技术分析了各种干预策略对产品扩散问题的影响^[7]. 国防大学胡晓峰教授研究队认为谣言传播建模过程中要对谣言传播的复杂性、心理特征、蝴蝶效应进行入思, 在基础上建立了基于 A 的复杂网络的传播模型^[8-9].

收稿日 期: 2011-04-06

资助项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目 (1024006)-国家自然科学基金 (7110114)

作者简介: 王长春 (1973-), 男, 博士研究生, 研究方向: 体系对抗建模、网络安全等, E-mail: wangchun@vip.sina.com

尽管 , 笔者认为目前研

络). 外部因素在开始阶段促使个体了解信息, 在少数个体中形成扩散, 而内部因素则有助于形成、影响甚至改变个体观点和态度, 促使其选择拒绝或相信谣言. 为了明确问题, 提出以下假设

假设 1 谣言传播的基础是个体意见, 个体意见的形式化表 主要两种 用离散法和连续区间表 . 按照个体对谣言的态度, 将人群划分为两类 谣言接受者, 谣言拒绝者.

假设 2 所研究的社会网络结构在谣言传播过 中保 不变.

假设 3 个体从拒绝谣言转换到相信谣言的概率与谣言属性、邻居态度、和敌方干涉强度三种因素有关.

假设 4 根据本文的研究重点, 假设个体从相信谣言恢复到拒绝谣言的概率只与我方干涉强度有关.

果用节点表 个体, 那 人群就可以用社会网络来抽象刻 . 假设个体都相互连接, 令 $\{1, 2, \dots, N\}$, 表 包含有限个体的网络. 若个体 i 具有 k_i 个邻居, 则个体 i 的度为 k_i . 在对谣言传播过 进行建模时, 建立个体的交互规则是关 . 假设 p_i 表 个体相信谣言的概率, 且 $0 \leq p_i \leq 1$. 表 谣言内容属性, 用来刻 谣言内容是否符合人们情绪、愿望或需求, 且 $\alpha_i \geq 0$. 表 敌方对谣言传播的干预强度, 且 $\beta_i \in (0, 1)$. 根据假设 3 得到单位时间内节点 i 从拒绝谣言转换到相信谣言的概率为 $\alpha_i \cdot (1 - p_i)$, 且概率值 $\alpha_i \cdot (1 - p_i)$ 随着 α_i 的增大而增大. $\alpha_i \cdot (1 - p_i)$ 大于 1 时, 将个体接受谣言的概率值取为 1. 根据假设 4 得到单位时间内节点 i 从相信谣言恢复到拒绝谣言的概率为 $\beta_i p_i$, 其中 β_i 表 我方干预策略强度且 $\beta_i \in (0, 1)$.

3.2 谣言传播模型

平均场理论, 是把环境对物体的作用进行集体处理. 这一方法能把一个高次、多维的难以求解的问题转化为一个低维问题, 是统计物理中非常重要的一种理论分析方法. 社会网络 足够大, 网络个体同质且随

分布时, 谣言传播问题可以通过平均场方法来进行刻 [11-12]. 令 $\langle p \rangle$ 表 度为 k 的个体在人群中占的比例, 称为度分布, 其中, $0 \leq \langle p \rangle \leq 1$. 令 $P(k)$ 表 度为 k 的概率, 其中 $\sum_k P(k) = 1$ 为网络的平均度. 则个体相信谣言的概率表 为

$$\langle p \rangle = \sum_k P(k) p(k) \quad (1)$$

对于给定社会网络结构, 谣言传播过 可以看作一个马尔科夫过 . 在平均场近似条件下, 度为 k 节点相信谣言比例的演化方 可表 为

$$\frac{d\langle p \rangle}{dt} = (1 - \langle p \rangle) \langle \alpha k \rangle - \langle p \rangle \langle \beta k \rangle \quad (2)$$

式 (2) 第一项表 个体从不信谣言转换到相信谣言的比例, 第二项表 从相信谣言恢复到不信谣言的比例. 且 $\langle \alpha k \rangle \geq 0$ 时, 进一步可以得到传播系统均衡状态下度为 k 的个体相信谣言比例

$$p(k) = \frac{\alpha k}{1 + \alpha k + \beta k} \quad (3)$$

其中 $\alpha, \beta \geq 0$, 可以用来表 敌我双方干预策略的对抗强度. α 越大, 表 敌方干预策略强度更大, β 越小, 表 我方干越策略强度更大. 将 (3) 式代入到 (1) 式中, 进一步得到

$$\langle p \rangle = \frac{1}{\langle k \rangle} \sum_k \frac{P(k) \alpha k}{1 + \alpha k + \beta k} \quad (4)$$

式 (4) 刻 了谣言传播系统达到均衡时个体相信谣言的概率 满足的条件, 它与最终人群相信谣言比例 具有一一对应关系. 下一节将利用 (4) 式来分析、推 谣言传播系统中谣言属性、敌我双方干预策略、网络结构和谣言扩散效果之间的关系.

4 传播模型 理论分析

4.1 谣言属性影 分析

通过 (3) 式, 容易得到, $\alpha, \beta \geq 0$ 为谣言传播系统均衡状态之一. 但是, 系统是否还存在其它均衡状态呢 果存在应该满足什 性质呢 为了对谣言传播效果进行测度, 令 $\langle p \rangle, \langle k \rangle, \langle \alpha k \rangle$ 分别用来表 系统达到均衡状态时个体相信谣言

- 1) 果谣言属性 $\theta > 0$, 那 谣言传播传播系统只有一个均衡点且 $\theta > 0$
- 2) 果谣言属性 $\theta < 0$ 且敌我双方干预策略对抗强度 $\leq \frac{E_P(d)}{E_P(d^2)}$, 那 谣言传播系统只有一个均衡点且 $\theta < 0$
- 3) 果谣言属性 $\theta < 0$ 且敌我双方干预策略对抗强度 $> \frac{E_P(d)}{E_P(d^2)}$, 那 谣言传播传播系统有两个均衡点一个为 0, 另一个 $\theta < 0$.

证明 首先令

$$P(\theta) = \sum_k \frac{P(k)(1 + \theta k)}{(1 + \theta(k+d))} \tag{5}$$

一方面, 由于 $P'(\theta) = \frac{\partial H_P}{\partial \theta} = \sum_k \frac{\lambda k^2 P(k)}{\langle k \rangle (1 + \lambda(k\theta + d))^2} > 0$, 故 $P(\theta)$ 是关于 θ 的增函数, 又因 $P''(\theta) = \frac{\partial^2 H_P}{\partial^2 \theta} = - \sum_k \frac{2\lambda^2 k P(k)}{\langle k \rangle (1 + \lambda(k\theta + d))^3} < 0$, 故 $P(\theta)$ 是关于 θ 的凹函数.

另一方面, $P(1) = \sum_k \frac{kP(k)(k+d)}{\langle k \rangle (1/\lambda + (k+d))} = \sum_k \frac{kP(k)(k+d)}{\langle k \rangle (k+d)} = \sum_k \frac{kP(k)}{\langle k \rangle} = 1$, $P(0) = \sum_k \frac{\lambda k d P(k)}{\langle k \rangle (1 + \lambda d)}$, 并且 $\theta = 0$ 时, $P(0) = 0$. 由 可得 $P(\theta)$ 在 $\theta \in [0, 1]$ 上至少存在一个不动点, 最多存在两个不动点, 图 2 所 .

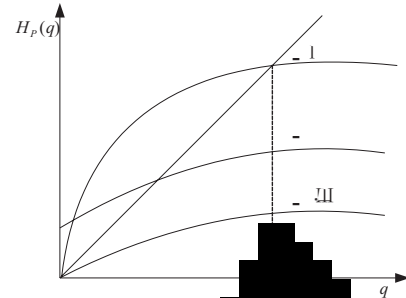


图 2 谣言传播系 图

因为, $\theta < 0$, $\theta < 0$ 且谣言传播系统 $\theta < 0$ 一个均衡状

生 谣言传播系统有且 一个均衡状
 , 命
 $\frac{P(k)}{1 + \lambda d}$, $\theta < 0$ 时, $P(0) = \frac{\lambda k^2 P(k)}{\langle k \rangle} = \frac{E_P(d)}{E_P(d^2)}$; $\theta > 0$ 时 $P(0) = 0$. 同理证
 得到, 谣言传播系统只有一个均衡点 $\theta < 0$. 同理证

' 严格二阶随 占 , 均 $\sum_k (k) f(k) \sum_k (k) f(k)$, 即对于 $\theta > 0$, 均 $\sum_k P(k) > P(k)$. 因而, $\theta > 0$, 根据 (6) 得到 $\rho \geq P(\cdot) > P(\cdot)$.

这与 $\rho \leq P(\cdot)$ 矛盾, 因而原命题成立. 证毕!

命题 3 对于 会网络, 和 ρ 的度分布分别为 $f(k)$ 和 $g(k)$, 假 个体相信谣言概率的最大值 $\rho < 1$, 果 ρ 严格一阶随 占 , 在 它条件相同 相信谣言比例满足 $\rho < \rho$.

证明 由 (3) 可以得到度为 k 的个体相信谣言比例为 $\rho(k) = \frac{\lambda(\theta k + d)}{1 + \lambda(\theta k + d)}$. 一方面由于 $\frac{\partial \rho(k)}{\partial \theta} = \frac{\lambda k}{(1 + \lambda(\theta k + d))^2} > 0$, 故 $\rho(k)$ 关于 θ 的单调增函 . 另一方面, 由命题 2 性质可知, ρ 严格一阶随 占 , $\rho < \rho$. 因 , 对于 意的 $\theta > 0$, 都 $\rho(k) > \rho$, $\sum_k \rho(k) > \sum_k \rho$. 进一步可以得到

$$\rho < \sum_k \rho(k) < \rho(k) \sum_k \rho(k) < \rho(k) \rho(k) \quad (7)$$

又因为 $\frac{\partial \rho(k)}{\partial k} = \frac{\lambda \theta}{(1 + \lambda(\theta k + d))^2} > 0$, 故 $\rho(k)$ 关于 k 的单调增函 , ρ 严格一阶随 占 , 根据 严格一阶随 占 性质, 可以得到

$$\sum_k \rho(k) < \rho(k) \sum_k \rho(k) \quad (8)$$

根据 (7) 和 (8), 得到 相信谣言比例 $\rho < \rho$, 命题 3 成立. 证毕!

命题 2 和命题 3 明在 它条件相同 , 网络越密集, 越 有利于谣言的扩 . 这 因为网络越密集, 个体交互的 率就越高, 越 易产 网络 同效应, 从而 得个体相信谣言的概率就更高, 加 了谣言的扩 .

命题 4 对于 会网络, 和 ρ 的度分布分别为 $f(k)$ 和 $g(k)$, 假 个体相信谣言概率的最大值 $\rho < 1$, 果 ρ 严格二阶随 占 , 存在 θ_1 和 θ_2 , 得

- 1) 敌我 方对抗 度 $\frac{\lambda}{\theta} < \theta_1$ 足够小 , 均场意义下 相信谣言比例 $\rho < \rho$;
- 2) 敌我 方对抗 度 $\frac{\lambda}{\theta} > \theta_2$, 均场意义下 相信谣言比例 $\rho > \rho$.

证明 (3) 两边乘以 $(1 + \lambda(\theta k + d))$, 得到 $\rho(k) (1 + \lambda(\theta k + d)) = \lambda(\theta k + d) + \rho(k) (1 + \lambda(\theta k + d))$, 再对等 两边关于 k 和得到 $(1 + \lambda d) \sum_k \rho(k) (1 + \lambda \theta k) = \sum_k \lambda(\theta k + d) + \sum_k \rho(k) (1 + \lambda(\theta k + d))$, 结合 (1) 可以进一步得到 $(1 + \lambda d) \rho = \lambda d + \lambda \theta \rho^2$. 因 , 相信谣言比例

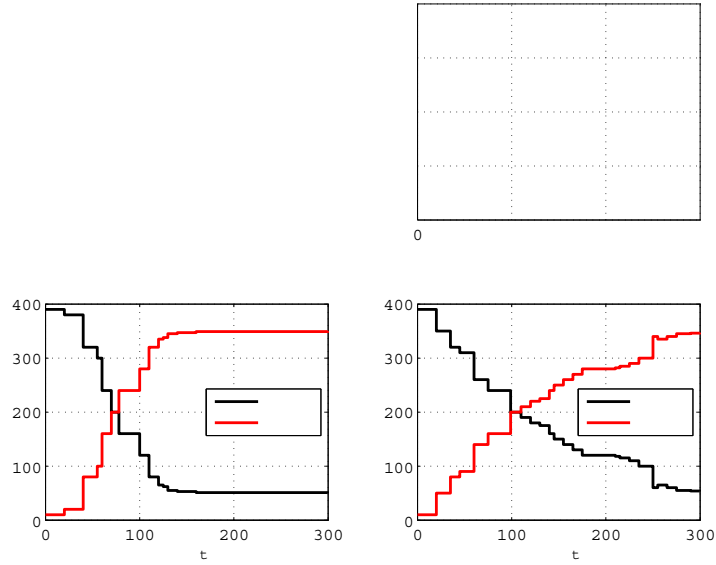
$$\rho = \frac{(1 - \lambda d) + \lambda \theta \rho^2}{1 + \lambda d} \quad (9)$$

一方面, 由 (9) 得到 $\frac{\partial \rho}{\partial \theta} = \frac{\lambda k}{1 + \lambda d} (1 - 2\rho)$, 因 $\rho < 1/2$, 相信谣言比例 关于个体相信谣言概率 的增函 $\rho < 1/2$, 关于 的减函 .

另一方面, 结合图 2, 根据 文分析可知, 对于 意给定的网络度分布 , 方干预 度 和谣言吸引力 都足够小 , 个体相信谣言概率 将 于 0 足够大 , 将 于 1. 因 , 我们可以找出 的干预 度 θ_1 和谣言吸引力 , 得 θ 和 λ 均小于 $1/2$, 也可以找出 θ 和 λ 的 值范围, 得 θ 和 λ 均大于 $1/2$. 由命题 2 可知, ρ 严格二阶随 占 , 均 $\rho < \rho$. 最后, 根据 函 的单调

的度分布为 $(k) \propto k^{-2.5}$ ，细算法见文献 [10, 13, 14]。全连接网络的度分布波动方差最小，也就是异质性最低，无标度网络的异质性最高，而指数网络异质性居中。

真选取 400 个个体，谣言属性取值 $\alpha = 2$ 。鉴于攻防资源的不对称性，令敌我双方干涉强度满足 $0 \leq \beta \leq 1$ 。随着时间的推移相信谣言的个体数量越来越多，直到谣言传播系统达到均衡。图 3 表 四种网络 1 次 真实验个体数量的演化图。图 4 表 四种网络 200 次 真结果相信谣言者数量平均值与敌我双方对抗强度之间的关系。



言的扩散。相反, 度很小的个体与邻居交互次数很少, 对谣言扩散有抑制作用。在谣言传播过程中到底哪种因素占主, 取决于敌我双方的对抗强度。对抗强度比较低时, 第一种因素占主, 网络异质性有利于谣言扩散。对抗强度比较大时, 第二种因素占主, 网络异质性对谣言扩散有抑制作用。该真结论与命题 4 相一致。3) 从整体上看, 敌我双方对抗强度越大, 最终相信谣言者数量也越大。但是在指数网络和无标度网络真实验中, 分段区间内随着的增加反而减少。这个现象一方面说明网络的异质性改变了最终相信谣言者数量与对抗强度之间的单调关系。另一方面说明群体是否倾向于相信谣言, 不仅与网络平均度有关, 而且与网络的其它参数有关(网络的平均路径长度、聚集系数)。这些影响因素在论文中没有体现, 需要新的模型进行刻。

双方对抗强度 ≤ 0.2 的时候, 对谣言属性值分别等于 $\leq 5, \leq 10, \leq 15, \leq 20, \leq 25$ 五种情况下四种网络相信谣言者数量平均值进行敏感性分析, 见表 1。从表 1 中得到 1) 谣言属性值越大, 越有利于谣言扩散。并且刚开始阶段相信谣言者数量随着谣言属性值的增大而增加的很快, 随后增加速度逐渐减缓。2) 网络平均度越大, 最终谣言相信者数量越大。这个结论进一步验证了命题 2 和 3 的正确性。

表 1 谣言相信者数量平均值的敏感性分析

d	谣言相信者数量平均值							
	全连接网络		小世界网络		指数网络		无标度网络	
	$\langle k \rangle = 5$	$\langle k \rangle = 10$	$\langle k \rangle = 5$	$\langle k \rangle = 10$	$\langle k \rangle = 5$	$\langle k \rangle = 10$	$\langle k \rangle = 5$	$\langle k \rangle = 10$
5	175	195	165	185	144	188	165	201
10	191	211	184	198	162	197	167	192
15	213	243	200	213	187	207	178	195
20	225	251	216	221	196	214	183	203
25	237	255	223	228	214	221	188	212

6 结论

谣言的形成与传播包含了许多不确定性因素, 谣言内容属性、个体心理、敌我双方干预策略等等, 复杂网络传播动力学为谣言传播的分析与建模提供了崭新的思路。本文运用平均场方法建立了一个谣言传播新模型, 通过理论分析和计算真得到了具有管理意义的 4 个命题, 主要结论

1) 得到了谣言传播系统均衡状态的一般形式。系统达到均衡时个体相信谣言的概率与谣言内容属性和敌我双方干预强度有关, 见命题 1。

2) 网络越密集, 系统达到均衡状态时, 个体相信谣言的概率与人群相信谣言的比例就越大。

3) 网络异质性对人群相信谣言比例的影响与敌我双方干预策略的强度密切相关, 且 $\frac{\rho}{\gamma}$ 为正相关, $\frac{\rho}{\gamma} < 1$ 时为负相关。

这些结论对于揭示谣言传播规律, 辅助我方评估谣言传播效果和制定各种干预策略都有重要的意义。

然, 本文所得结论还需从实践和理论上进一步入推和论证, 未无相限提凸无响洋象小象绪无学晓拓要

- [7] 于同洋, 肖人彬, 龚晓光. 基于多智能体的网游产品扩散特性 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(5): 919-927.
Yu T Y, Xiao R B, Gong X G. Net game diffusion characteristic based on multi agent[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2010, 30(5): 919-927.
- [8] 罗批, 司光, 胡晓峰. 战争系统中民意 势测分 模型框架研究 [J]. 系统工程理论与实践, 2003, 23(10): 94-98.
Luo P, Si G Y, Hu X F. Study on the model architecture of the public opinion tendency for forecast & analysis in warfare system[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2003, 23(10): 94-98.
- [9] 刘常昱, 胡晓峰, 司光. 舆论涌现模型研究 [J]. 复杂系统与复杂性科学, 2007, 4(1): 22-27.
Liu C Y, Hu X F, Si G Y. Study on the consensus emergency model[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2007, 4(1): 22-27.
- [10] Jackson M O. The Economics of Social Networks[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2006.
- [11] Lopez P D. Diffusion in complex social networks[J]. Games and Economic Behavior, 2007, 62(2): 573-590.
- [12] Lopez P D. Contagion and coordination in random network[J]. International Journal of Game Theory, 2007, 34(4): 317-384.
- [13] Watts D, Strogatz S. Collective dynamics of small-world networks[J]. Nature, 1998, 393: 440-442.
- [14] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286: 509-512.