



融入用户合作与领导激励的社交网络知识传播模型

顾秋阳¹, 琚春华^{2,3}, 吴功兴^{2,3}

(1. 浙江工业大学管理学院, 浙江 杭州 310023;

2. 浙江工商大学管理工程与电子商务学院, 浙江 杭州 310018;

3. 浙江工商大学统计学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 近年, 社交网络已经成为用户普遍使用的进行知识分享的媒介。对社交网络环境中的知识传播进行建模研究, 以期有关部门有效实施监管、提升用户的知识交流效率提供借鉴。以经典的 SIS 和 SIR 模型为基础, 融入用户合作和领导激励等因子进行优化, 并结合复制动态方程构建两种社交网络用户知识传播模型 (SISL/SIRL) 并进行分析, 最后给出数值与模型算例。结果表明: 存在领导者的社交网络知识传播速率更快。在社交网络知识传播过程中, 易感染用户数量减少, 免疫用户数量增加, 感染用户数量小范围内上下波动。构建的知识传播模型相对于经典模型与真实社交网络具有更强的拟合性。

关键词: 用户合作; 领导激励; 社交网络; 知识传播

中图分类号: G206

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2020284

Knowledge communication model of social network with user cooperation and leadership encouragement

GU Qiuyang¹, JU Chunhua^{2,3}, WU Gongxing^{2,3}

1. School of Management, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China

2. School of Management Science & Engineering, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

3. Institute of Statistics, Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310018, China

Abstract: In recent years, social networks have become a common medium for users to share knowledge. The knowledge communication in the social network environment was modeled and researched, with a hope to provide reference for relevant departments to effectively implement supervision and improve users' knowledge exchange efficiency. Based on the classic SIS and SIR models, factors such as user cooperation and leadership encouragement for optimization were integrated, and the replication of dynamic equations was combined to construct and analyze two social network user knowledge communication models (SISL/SIRL). Finally, the data and model examples were given. The results show that the speed of knowledge communication is faster in social networks with leaders. In the process

收稿日期: 2020-09-20; 修回日期: 2020-10-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 71571162); 浙江省哲学社会科学规划重点课题项目 (No. 20NDJC10Z); 浙江省自然科学基金资助项目 (No.LQ20G010002; No.LY18D010006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (No.71571162), Zhejiang Philosophy and Social Science Planning Key Project (No.20NDJC10Z), The Natural Science Foundation of Zhejiang of China (No.LQ20G010002, No.LY18D010006)

of social network knowledge communication, the number of vulnerable users decreases while that of the immune users increases, and the number of infected users fluctuates within a small range. Compared with the classic model and the real social network, the knowledge communication model constructed has a stronger fit.

Key words: user cooperation, leadership encourage, social network, knowledge dissemination

1 引言

随着社交网络的日益普及、信息化程度的不断加深以及 Web2.0 的迅猛发展,传播途径变得更加多样化和碎片化。社交网络作为一种新的信息组织和服务系统,在为其用户提供交流互动的同时,也为用户间的知识交流、合作和共享提供了平台。用户合作学习主要应用于世界各地的网络教育中,覆盖各年龄段的用户群体^[1-2]。Johnson^[3-4]等发现用户合作能够促进用户间关系的提升和沟通接受度,并有助于提升用户个体思维策略的多样性。Gillies 等^[5]阐述了领导用户及其互动行为在用户合作知识传播过程中的重要性;在用户合作过程中,处于不同群体的用户相互接触,从而形成网络。据中国互联网信息中心统计:截至 2018 年年底,我国个人互联网应用保持良好发展势头。其中,网上预约专车/快车用户规模最大,增长率高达 40.9%;其次为在线教育行业的用户规模年增长率高达 29.8%;网络文学的用户增长率高达 14.4%。截至 2018 年年底,我国在线教育用户规模达 2.01 亿,年增长率为 29.7%,使用率为 24.3%。

由于知识传播每时每刻都在网络中发生,是一个复杂的动态过程。Morone 等^[6]讨论了知识传播机制,认为社交网络中的用户知识传播机制特点和模型研究还不够深入,且知识在网络中的传播过程与传染疾病传播过程存在相似之处。在知识传播的过程中,某节点可以将知识信息共享到多个节点,同时也可以消除知识信息;知识通过个体间的直接接触进行传播和共享^[7-8]。关于社交网络用户信息传播的模型是复杂网络传播动力学研究的主要内容之一。其中,最常见的是 SIS 模型(易感染-感染-易感染)和 SIR 模型(易感染-

感染-免疫)。

当前国内外关于社交网络用户知识传播模型的研究主要偏重于结合回归方程和结构方程模型等方法进行模型构建,往往忽略了对于其本身模型的优化和应用。本文参照相关文献,在 SIS 和 SIR 模型中融入领导激励与用户合作要素生成 SISL 和 SIRL 模型,以增加模型的科学性和实用性。最后利用 MATLAB 与 Gephi 中的软件算法对社交网络环境中的用户知识传播动态演化过程进行数值与模型仿真实验。以期在现实生活中优化社交网络环境,提升知识协同共享绩效与知识创新提供理论依据;同时也为有关部门和民众更好地了解和使用社交网络知识平台,实现知识共创提供借鉴。

2 研究现状

2.1 文献回顾

近年来,国内外学者对用户知识传播及其过程已经有了卓有成效的研究。Zhu 等^[9]以隐性知识为研究对象,提出了两种知识传播机制,其中包括考虑意向机制和考虑员工流动性机制。Alves 等^[10]为网络中的知识传播概述了一个框架,以理解知识传播的方式及其在不同网络中表现的异同。目前,利用复杂网络理论进行知识传播的研究还较少,现有研究大多数集中于关注网络链接及其结构对知识扩散的影响。Cowan 等^[11]发现小世界网络中的知识传播速度快于其他网络。Kerchove 等^[12]研究了网络拓扑对知识信息传播的影响。Wang 等^[13]研究了复杂网络中,群体度及其聚类系数对知识传播效率的影响规律。武开等^[14]发现,组织结构特征会影响组织单位间的知识传播过程,且用户间的互动对知识传播也有显著影



响。Wanly 等^[15]发现知识传播与组织内的知识传播速率等因素有着密切的相关关系。且知识传播还受个体属性、传播内容、知识主体及与传播目标关系等因素的影响^[16-17]。

现今复杂网络中的传播动力学研究的重点是复杂网络传播行为在自然界和人类社会中的传播机制、动态行为和控制方法。SIS 模型（易感染-感染-易感染）和 SIR 模型（易感染-感染-去除）是两种常见的传染病传播模型。在上述两种模型的基础上，Zhou 等^[18]、Yang 等^[19]提出了具有相同传染性的新模型。在此基础上，Juang 等^[20]提出了具有感染载体的改进模型。Zhang 等^[21]提出了一种新的具有网络反馈机制的 SIS 模型。Xia 等^[22-23]提出了包含感染介质因素的 SIR 模型，以及另一种包含时滞和介质的 SIR 模型。有些学者也使用 SIR 模型描述舆情在社交网络中的传播过程。Qian^[24]等提出了一种新的 SIR 舆情模型，该模型具有独立传播节点。Xia 等^[25]提出了一种具有犹豫机制的 SEIR 模型（易受感染-暴露-感染-免疫）。

社交网络分析（social network analysis, SNA）能够将用户结构及其相互联系可视化，已经在许多领域得到了广泛应用。Mansur 等^[26]讨论了社交网络中用户合作对知识传播聚类的影响。Chen 等^[27]在传统遗传算法的基础上，对用户合作模型进行优化研究。认为其会提高知识传播效率。Zhang 等^[28]提出了一种分组方案，该方案结合了多维度特征集群对网络知识传播进行了优化。Chen 等^[29-30]使用 SNA 方法研究了基于 Web 的用户合作环境，以及在网络中如何选择合适的领导者进行社交网络用户合作知识传播。

2.2 文献评述

通过上述对现有研究成果的梳理发现，社交网络中的用户知识传播过程已经受到了国内外学者的重视并得到丰富的研究。上述研究成果，既对本研究具有一定的借鉴意义，但也存在一些不

足：（1）已有很多学者对社交网络用户知识传播开展了一系列卓有成效的研究，但是多数集中在使用传统的结构方程与回归方法的应用和改进（如 Li 等^[31]），较少有研究使用其他方法对此过程进行探究；（2）现有文献大多集中于研究社交网络知识传播的算法更新（如左遥等^[32]），但还没有结合领导激励和用户合作对知识传播模型进行研究的；（3）几乎所有的相关文献多只应用单传播模型对知识传播过程进行模型仿真（如据春华等^[33]），很少有基于多重改进模型结合进行理论验证和仿真的文献记录；（4）现有关于社交网络知识传播的文献主要关注对于现有模型的应用（如张岩等^[34]），还未有学者在其模型中融入新角色进行验证的。

本研究基于以上综述，认为应在融入用户合作构建网络模型，并加入领导激励要素，加入领导节点分别对 SIS 和 SIR 模型进行改进，以构建 SISL 和 SIRL 模型。分别使用仿真参数与真实社交网络数据集对模型进行仿真实验，以确保模型有效性和科学性。以期在现实生活中优化社交网络知识传播环境、对有关部门改进知识创造环境提供理论依据；同时也为民众更好地实现多来源的知识学习提供参考。

3 模型构建

3.1 融入用户合作的社交网络模型构建

薛娟等^[35]将社交网络知识传播定义为在一定范围内的用户节点相互接触、影响并分享知识而构成网络。本文将每个用户作为一个节点，将用户间的链接作为边，得到一个存在权重与方向的社交网络知识传播模型。图 1 报告了由 Gephi 软件得到的 6 个高校班级学生用户群体在上课过程中使用社交网络软件“钉钉”进行知识共享的可视化图。在一学期的授课结束后，进行问卷发放，让每个学生写下其学习过程中所给予或得到知识的学生名字，以形成有向网络数据。笔者发现社交网络用户知识传播平均度为 $5 (< K \approx 5)$ ，且分

布呈指数型；均路径长度 $L=3$ ，平均聚类系数 $C=0.363\ 8$ ，远大于一个相同大小的随机网络 (ER)。结果显示，社交网络用户知识网络具有 WS 小世界网络 (Watts & Strogatz small world network) 的特征，学生间的互动合作为知识传播建立了动态联系，且两个节点间的链接关系会对其他节点产生影响，从而影响整个社交网络知识传播过程及其网络中各个学生获取知识的过程产生影响。社交网络用户知识传播复杂网络可视化如图 1 所示，节点代表学生用户，节点越大则度越大；在一个班级用户群体中，如果节点灰度相同，则表示其内部具有紧密联系。

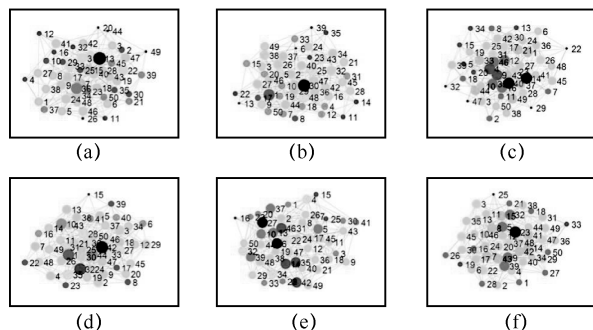


图 1 社交网络用户知识传播复杂网络可视化

3.2 融入用户合作和领导激励的社交网络用户知识传播模型

SIS 模型和 SIR 模型是复杂网络中的经典流行病模型，其中已经考虑了节点间的相互联系关系。社交网络中的知识传播类似传染病的传播和社交网络舆情传播过程。用户在进行合作的过程中，用户间的传播过程受很多因素的影响，如用户遗忘、自身兴趣和领导激励等。本文结合上述要素对知识传播的影响，探讨社交网络知识的传播过程。在 SIS 模型和 SIR 模型的基础上，本文建立了两种社交网络知识传播模型，并讨论了知识传播的动态传播机制。在上述模型中，领导节点处于感染状态，但其活跃度比普通节点更高。本研究参考文献[20, 24, 36-37]后，将具体参数名称及数值设置见表 1。

表 1 模型参数定义及其估计量取值

参数名称	参数定义	基本参数数值
α	易感染节点在接触到感染节点后获得知识的概率	0.1
β	感染节点遗忘并再次成为易感染节点的概率	0.05
γ	受领导激励影响，易感染节点变为感染节点的概率	0.3
λ	社交网络知识传播率	—
λ_c	社交网络知识传播阈值	0.194
$\langle k \rangle$	知识传播网络平均度	5

3.2.1 SISL 模型

基于经典 SIS 模型，本文定义了 SISL 模型 (易感染-感染-易感染-领导者)，该模型考虑了用户遗忘及领导激励对知识传播的影响。该模型中的普通用户节点存在两种状态，即易感染状态 (未知或遗忘) 和感染状态 (已知)。而领导节点的目的是使正确的知识尽可能地在网络中传播。

SISL 模型中的知识传播过程中的参数设置如下所示：在每个时间单位中，一个易感染节点在接触到感染节点后获得知识的概率为 α ；感染节点遗忘并再次成为易感染节点的概率为 β ($\beta \ll \alpha$)；受到领导激励影响，易感染节点变为感染节点的概率为 γ 。在该模型中，普通用户节点贯穿整个易感染-感染-易感染循环中，即未知用户由于用户合作或领导激励变为已知，然后又由于遗忘回到未知状态。由于领导节点的职责是促进知识在网络中的传播，故其一直保持在已知状态；当没有领导节点的激励时 ($\gamma = 0$)，模型会返回 SIS 模型。SISL 模型理论示意图如图 2 所示。

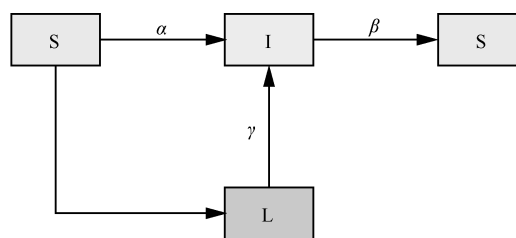


图 2 SISL 模型理论模型



由于社交网络知识传播具有WS小世界特征,故本研究假设在同构网络中,每个用户节点都存在大体数量相同的连接($k \approx \langle k \rangle$)。并将 $N_{(I)}$ 定义为处于感染状态的用户节点数量(包括领导节点); $N_{(S)}$ 为易感染的用户节点数量; $N = N_{(I)} + N_{(S)}$ 为用户节点总量。 $\rho(t)$ 和 $s(t)$ 分别代表感染节点和易感染节点在时间 t 的占比,且 $s(t) + \rho(t) = 1$ 。令 L 节点比例为 $\varnothing(t)$ 。考虑用户的遗忘和领导激励,社交网络中用户知识传播的系统动态方程可以表示为如式(1)所示:

$$\frac{d\rho(t)}{dt} = -\rho(t) + \lambda \langle k \rangle \rho(t)(1 - \rho(t)) + \gamma \varnothing(t)(1 - \rho(t)) \quad (1)$$

其中, $\lambda = \alpha / \beta$ (由表1中的定义与式(1)可知);当 $\beta = 1$ 时, $\lambda = \alpha$ 为社交网络用户知识传播率; γ 为由于领导激励,易感染用户转变为感染用户的概率,即领导节点所占比重。令 $\varnothing(t) = \beta_2 \rho(t)$,其中, $0 \leq \lambda, \gamma, \beta_2 \leq 1$,则可得如式(2)所示:

$$-\rho(t) + \lambda \langle k \rangle \rho(t)(1 - \rho(t)) + \gamma \rho(t)(1 - \rho(t)) = \rho(t)[(\lambda \langle k \rangle + \gamma \beta_2)(1 - \rho(t)) - 1] = 0 \quad (2)$$

化简可得如式(3)所示:

$$\lambda_c = \frac{1 - \beta_2 \gamma}{\langle k \rangle} \quad (3)$$

其中, λ_c 为社交网络知识传播阈值,该值与网络平均度分布 $\langle k \rangle$ 、 β_2 、 γ 相关。当没有领导节点时, $\lambda_c = 1 / \langle k \rangle$ 为SIS模型在同构网络中的传播阈值。

3.2.2 SIRL 模型

用户在社交网络中的合作过程存在明确的知识传播倾向;即当用户认为其拥有了他人不了解的知识信息时,其会产生尽快与周围邻近用户进行分享的意愿;当其周围的大多数邻近用户都了解这个知识时,此用户会认为这个知识已经不再新颖,即没有传播价值,会停止对这个知识学习的传播^[38]。本文认为此传播过程类似于SIR模型,故使用该模型为基础进行建模。

在经典SIR模型的基础上,本文研究增加了领导节点 L 来构建社交网络知识传播的SIRL模型(易感染-感染-免疫-领导),以考虑领导激励对用户知识传播的影响,但在此模型中不再考虑知识遗忘。SIRL模型如图3所示。

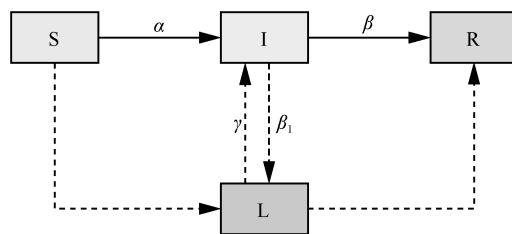


图3 SIRL模型理论模型

本文认为在该模型中存在3种状态,即易感染(未知)、感染(已知状态和传播状态)和免疫(已知但不传播)。普通用户节点处于上述3个状态之一。并设 L 节点均处于感染状态,但其比普通节点更活跃;当感染节点的比例非常大时,领导节点 L 将不再大规模地进行知识传播,而进入免疫状态。

本文研究将SIRL知识传播模型的参数描述如下所示:在每一单位时间内,一个易感染节点接触感染节点并转化为感染节点,获得知识的概率为 α ;同时,一部分用户通过有效吸收知识成为领导者 L ,同样处于感染状态,成为模型中最活跃的节点;领导节点 L 可能回归普通节点的概率为 γ 。当处于感染状态的节点占比足够高时,其传播兴趣大幅下降;用户节点处于免疫状态(已知但不传播)的概率为 β 。同时,由于领导激励,感染节点会转变为免疫状态的概率为 β_1 。在SIRL模型中,用户节点贯穿整个易感染-感染-免疫的循环中。社交网络知识传播模型中没有领导节点 L 时(如当 $\gamma = 0, \beta_1 = 0$ 时),该模型会转变为经典SIR模型。

与SIS模型类似, $s(t)$ 、 $i(t)$ 、 $r(t)$ 分别代表在时间节点 t 处于易感染、感染和免疫状态的用户占比,且 $s(t) + i(t) + r(t) = 1$ 。且 $\varnothing(t)$ 为领导节点 L 所占比例。设 $\varnothing(t)$ 等于 $\beta_2 i(t)$ 。基于平均场理论^[39],并考虑用户对传播内容的兴趣与领导激励的影响,

社交网络知识传播动态方程可以表示为式 (4):

$$\begin{cases} \frac{ds(t)}{dt} = -\alpha \langle k \rangle s(t)i(t) - \gamma \varnothing(t) \\ \frac{di(t)}{dt} = \alpha \langle k \rangle s(t)i(t) - \beta i(t) + \gamma \varnothing(t) - \beta_1 i(t)\varnothing(t) \\ \frac{dr(t)}{dt} = \beta i(t) + \beta_1 i(t)\varnothing(t) \end{cases} \quad (4)$$

由于 $\beta = 1, \varnothing(t) = \beta_2 i(t)$ 且 $s(t) + i(t) + r(t) = 1$, 故可得 $s(\infty) \approx 1, i(\infty) \approx 0, r(\infty) \approx 0$ 。且可得式 (5):

$$\begin{aligned} \frac{df(r(\infty))}{dr(\infty)} \Big|_{r(\infty)=0} &= \frac{d(1-s(\infty))}{dr(\infty)} \Big|_{r(\infty)=0} = \\ -\frac{ds(\infty)}{dr(\infty)} \Big|_{r(\infty)=0} &> 1 \end{aligned} \quad (5)$$

基于式 (5) 可得式 (6):

$$\lambda > \frac{1 - \gamma \beta_2}{\langle k \rangle} \quad (6)$$

$$\lambda_c = \frac{1 - \beta_2 \gamma}{\langle k \rangle} \quad (7)$$

可知当 $\lambda \leq \lambda_c, i(t) = 0$ 或 $\lambda \geq \lambda_c$ 时, $i(t)$ 处于稳定的非负平衡点。在 SIRS 模型中, 传播阈值 λ_c 与感染用户 β_2 中领导节点 L 的比重、领导节点变为普通感染节点的概率 γ 以及社交网络知识传播模型中的平均度分布 $\langle k \rangle$ 有关。当不存在领导节点 L 时, $\lambda_c = 1 / \langle k \rangle$ 为 SIR 模型在同构网络中的传播阈值。

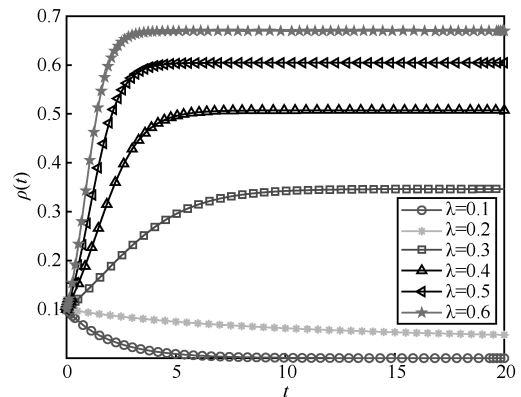
4 数值算例与结果

为了更直观地说明社交网络用户知识传播机制及其特性, 本文利用仿真参数进行仿真, 并参考王瑞琴等^[40]学者的做法控制其余参数, 在此基础上引用王忠义等^[41]学者的方法设置情景, 并使用 MATLAB7.1 软件便捷的微分方程求解器以及龙格—库塔算法求解模型得到仿真结果。

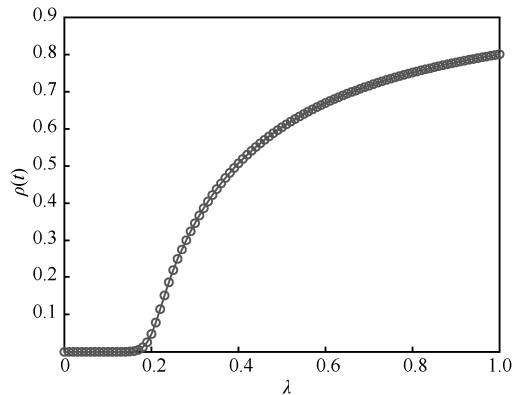
4.1 SISL 模型仿真结果

图 4 报告了当 $\rho(0) = 0.1, \langle k \rangle = 5, \gamma = 0.6, \beta_2 = 0.05, \lambda_c = 0.194$ 时, SISL 模型中知识传播率对感染节点动态演化。图 4 (a) 报告了当知识传播率 λ 取值为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6 时的曲线。可

知当 $\lambda > \lambda_c$ 时, $\rho(t)$ 随着时间的推移不断上升, 并收敛于极值; 当 λ 值越大时, $\rho(t)$ 达到极值的速度就越快, 且极值更高。当 $\lambda \leq \lambda_c$ 时, $\rho(t)$ 随着时间的推移逐渐下降并收敛于 0 或不发生变化。图 4 (b) 报告了感染节点的稳定比例随知识传播率 λ 变化的曲线。当 $\lambda > \lambda_c = 0.194$ 时, 知识可以在社交网络中进行传播, 且当知识传播率 λ 越大时 $\rho(t)$ 不断上升最后收敛于 0.8; 当 $\lambda \leq \lambda_c = 0.194$ 时, 知识不能在社交网络中传播, 且感染节点占比收敛于 0。本文认为这是由于当接受某项知识的难度非常高时, 其门槛会超过大多数用户的能力承受范围, 此时社交网络知识传播率相对较小, 故知识传播较困难; 即使有部分用户接受了该项知识也会因为得不到及时的二次巩固而遗忘, 最终使该项知识从社交网络中消失。而当接受某项知识的门槛越低时, 该项知识的传播就越容易; 但由于其他因素的影响, 最后还是有部分用户不能掌握该项知识。



(a) 当知识传播率 λ 取值不同的曲线



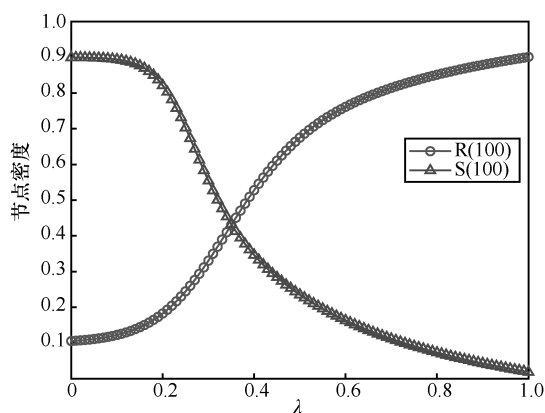
(b) 感染节点的稳定比例随知识传播率 λ 变化曲线

图 4 SISL 模型知识传播率对感染节点动态演化

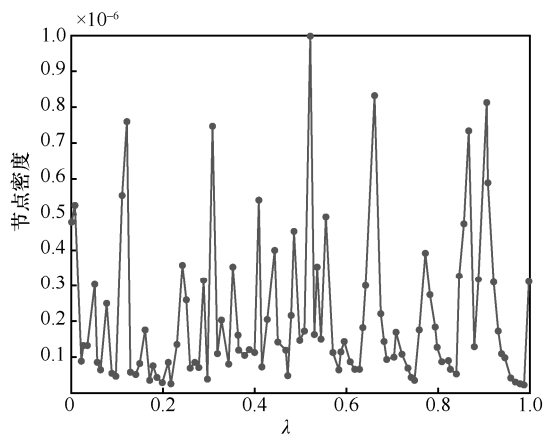


4.2 SIRL 模型仿真结果

图 5 报告了当 $\rho(0)=0.1, \langle k \rangle=5, \gamma=0.3, \beta_1=0.6, \beta_2=0.05$ 时, SIRL 模型中知识传播率对节点占比影响的动态演化。图 5(a) 报告了知识传播率 λ 对易感染节点和免疫节点数量的影响, 可知易感染节点占比随 λ 变大而减少, 免疫节点占比随之增加。图 5(b) 报告了知识传播率 λ 对感染节点比例的影响, 可知由于其他两种节点数量的变化, 感染节点的数量在小范围区间内进行震荡。



(a) 知识传播率 λ 对易感染节点和免疫节点数量的影响

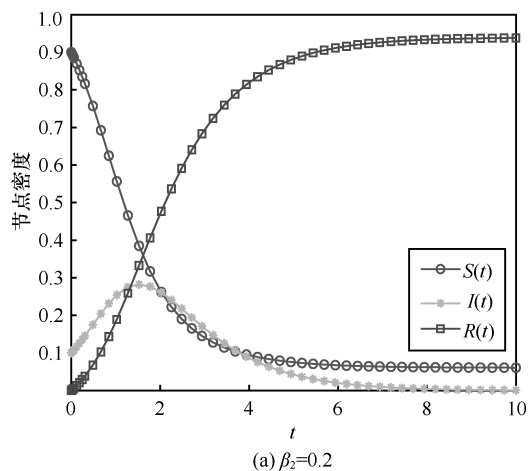


(b) 知识传播率 λ 对感染节点比例的影响

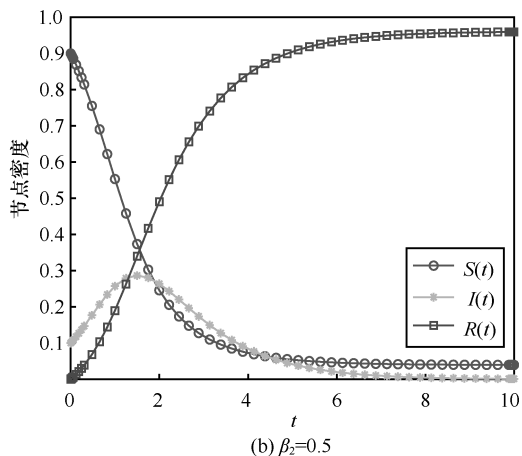
图 5 SIRL 模型知识传播率对节点比例影响动态演化

图 6 报告了 SIRL 模型中不同 β_2 的情景下, 3 种用户节点比重随时间推移而变化的动态演化。由图 6 可知, 在模型中易感染节点比例从 0.9 开始大幅下降, 最后大致趋向于 0; 免疫节点比重随着时间推移不断上升, 最后大致收敛于 1; 值得一提的是当模型最后趋于稳定时, 模型中的大多数都是

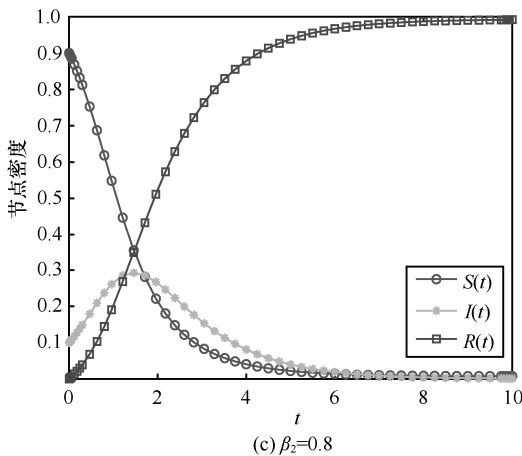
免疫节点, 但也存在少量易感染节点和感染节点。随着 β_2 增加易感染节点比重的最终收敛值有所下降, 而免疫节点比重的最终收敛值有所提高。本文认为这说明领导节点 L 在社交网络知识传播模型中起重要作用, 且 L 节点越多, 传播效果越好。



(a) $\beta_2=0.2$



(b) $\beta_2=0.5$



(c) $\beta_2=0.8$

图 6 SIRL 模型知识传播率对节点比例影响动态演化

在社交网络用户合作的过程中,最初只有少数用户掌握知识,故其有动力对知识进行传播。由于用户间的交流合作和领导激励,知识得以迅速传播;此时感染节点比重增加,易感染节点比重迅速减少。当网络中的大多数用户获得知识后,其传播兴趣会有所降低,合作交流的频率也会减少,从而使更多的用户从感染状态转变为免疫状态。而后传播得以停止,三类节点处于稳定状态。最终,大多数节点都处于免疫状态,只有少数处于易感染状态,几乎没有节点处于感染状态。

4.3 真实数据集中的实验结果

为进一步证明本文所建社交网络用户知识传播模型的适用性与科学性,本文在此进一步使用

真实社交网络数据集对所提模型进行模型仿真,此实验均由 MATLAB 与 Gephi 软件完成。本文选择了较早开始学习参与近期热点知识“如何预防新型冠状病毒”讨论的 10 个微博领导用户(关注数超过一万)及其好友列表作为社交网络的初始节点,利用 Python 软件爬取了新浪微博的真实用户数据集作为实验仿真的基础数据(爬取时间为 2020 年 1 月 23 日至 2020 年 2 月 15 日),数据集具有 16 207 个节点。除此之外,本研究还选用 Dell 公司公开的社交网络 Ideastorm 中的合作学习数据集作为实验网络^[35],该数据集具有 2 193 个节点。上述两种网络拓扑统计指标见表 2。

图 7 与图 8 分别报告了与图 4 (a) 和图 6 (c)

表 2 两个真实社交网络知识传播数据集拓扑统计指标

网络名称	节点数量/个	节点边界数/个	节点平均路径	聚类系数	平均度
Ideastorm 网络	2 193	32 011	2.109	0.932	68.237
新浪微博网络	16 207	347 182	2.493	0.672	28.930

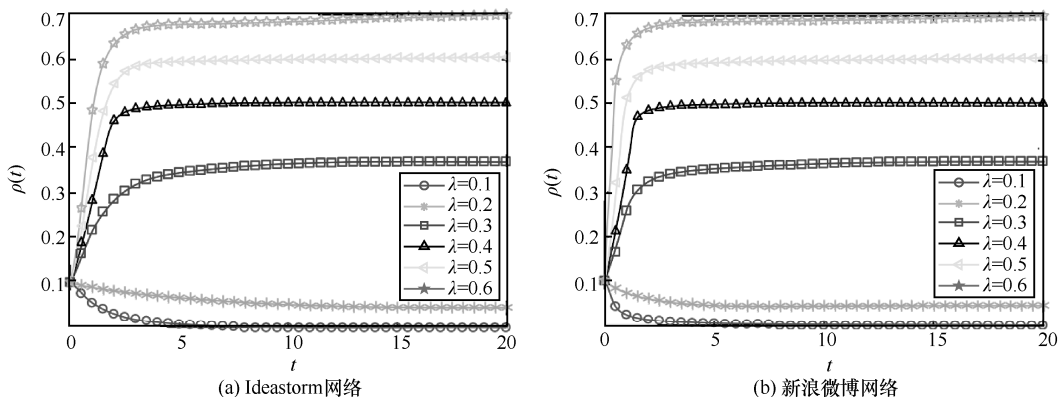


图 7 真实社交网络数据集中 SISL 模型中的知识传播率变动对感染节点的影响

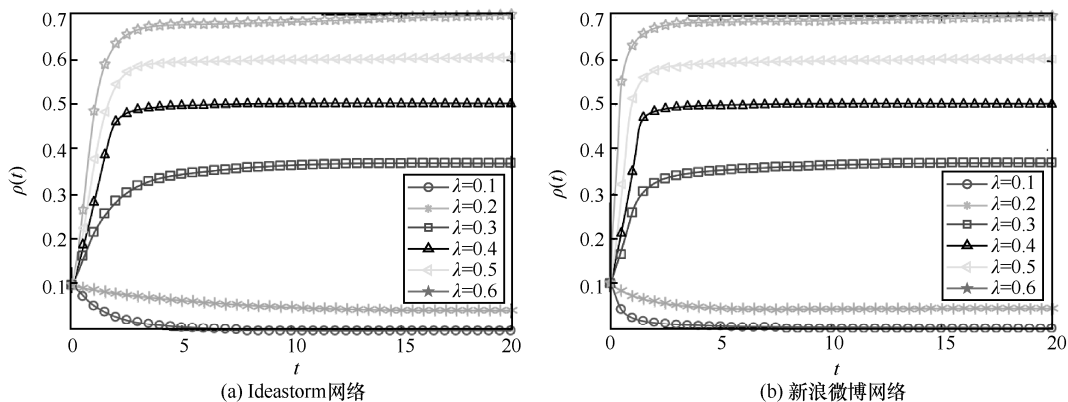


图 8 真实社交网络数据集中 SIRS 模型中知识传播率对节点比率的影响 ($\beta_2 = 0.8$)



同等参数条件下的两种真实社交网络数据集实验结果。可见在真实数据集中的结果几乎与在仿真数据集中的结果一致,故可以认为本研究所建模型较为稳健。

除此之外,本研究还在这两种真实社交网络中对经典 SIS 与 SIR 模型进行了对比实验。结论表明,本文所提融入用户合作和遗忘、领导激励等要素后的社交网络知识传播模型(SISL 和 SIRL)明显比传统模型更符合真实社交网络环境。经典模型中的知识传播效率明显更低,在此不再赘述。

5 结束语

本文以经典社交网络传播模型(SIS 和 SIR)为基础,融入用户合作要素进行网络环境优化,并加入领导节点以研究领导者对社交网络知识传播过程的影响,并结合用户遗忘进行优化,最后得到包括 SISL 和 SIRL 模型的社交网络知识传播模型。并结合真实的网络环境设置参数,并结合实验需求设置多种情景与真实社交网络数据集对模型进行仿真实验,以确保模型有效性和科学性。

通过上述研究,本文得出以下结论:(1)融入用户合作和遗忘、领导激励等要素后,知识传播模型(SISL 和 SIRL)更符合真实社交网络环境;(2)当知识传播率大于其阈值,即知识较容易被接受时,知识可以在社交网络中传播,且随着传播率变大,其传播速度会有所提升;当知识传播率小于其阈值,即知识不容易被接受时,知识无法在网络中传播;(3)在社交网络知识传播过程中,易感染节点数量不断下降,免疫节点数量不断上升,感染节点数量在小范围区间里保持震荡;(4)在社交网络知识传播的过程中,领导者越多越有利于知识传播;(5)在知识传播的最后阶段,大多数节点都处于免疫状态,只有少部分节点处于易感染或感染状态。

上述研究结论将为社交网络服务提供者、用户以及相关监管部门提供以下启示:(1)有关部门要积极构建和利用类似本文构建的仿真社交网络知识传播模型,对网络知识体系实行更好的管理和监控;(2)要提高知识的普适性,使广大社交网络用户能更好的理解知识,提高知识传播速度和广度;(3)积极构建知识型社交网络领导用户,以引导大众了解和学习科学文化知识;(4)要加强识别实时热点知识,并利用社交网络、社区、学校等维度及时构建用户合作群体,以加强知识传播和普及;(5)要对处于感染状态的用户数量进行监控,防止由于其数量过少出现知识传播速率过慢的现象;(6)有关部门一方面要加强监管力度,防止不法分子运用领导用户的影响力对社交网络用户知识信息进行获取;另一方面要积极进行用户安全教育,加强其对真伪知识的判断能力。

由于本文研究局限性,未来可以从以下几个方面展开进一步的研究。首先,除了在使用数值仿真以外,可以利用数据挖掘方法爬取社交网络中的真实数据进行模型仿真,以提高模型可信度。其次,除了在同质网络中对知识传播进行建模外,也可以尝试在异质网络中对知识传播过程进行建模和验证,这对现实更有指导意义。再次,可以融入更多人口统计学特征,基于不同用户群体及其对社交网络的使用习惯和特征对模型进行深度优化。最后,可以尝试融入心理学要素,从交叉学科的角度对模型加入新变量,以提高模型科学性、全面性和可信度。

参考文献:

- [1] 李纲,巴志超. 科研合作超网络下的知识扩散演化模型研究[J]. 情报学报, 2017, 36(3): 274-284.
LI G, BA Z C. Research on evolutionary dynamics of knowledge diffusion based on collaboration hypernetwork[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2017, 36(3): 274-284.
- [2] 张永云,张生太. 社交媒体知识协作网络中的明星效应和经纪人

- 效应——来自 Wikipedia 社交媒体的发现[J]. 现代图书情报技术, 2015, 1(4): 72-78.
- ZHANG Y Y, ZHANG S T. Star effect and broker effect in social media knowledge collaboration network: discovery from wikipedia social media[J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2015, 1(4): 72-78.
- [3] JOHNSON D W, JOHNSON R T. Learning together and alone; cooperation, competition, and individualization[J]. Nacta Journal, 1979, 23(3): 214-223.
- [4] JOHNSON D W, JOHNSON R T. An educational psychology success story: Social interdependence theory and cooperative learning[J]. Educational researcher, 2009, 38(5): 365-379.
- [5] GILLIES R M. The effects of cooperative learning on junior high school students during small group learning[J]. Learning and Instruction, 2004, 14(2): 197-213.
- [6] MORONE P, TAYLOR R. Knowledge diffusion dynamics and network properties of face-to-face interactions[J]. Journal of Evolutionary Economics, 2004, 14(3): 327-351.
- [7] 朱宏淼, 张生太, 闫辛. 微信群中隐性知识传播模型研究[J]. 科研管理, 2019, 40(2): 106-115.
- ZHU H M, ZHANG S T, YAN X. A study of the tacit knowledge transmission model in a WeChat group[J]. Science Research Management, 2019, 40(2): 106-115.
- [8] KISS I Z, BROOM M, CRAZE P G, et al. Can epidemic models describe the diffusion of topics across disciplines?[J]. Journal of Informetrics, 2010, 4(1): 74-82.
- [9] ZHU H M, ZHANG S T, LANG Y J. Simulation study on the effect of employee mobility on the spreading of tacit knowledge among industrial enterprises based on the knowledge spreading model[J]. Journal of Digital Information Management, 2015, 13(6): 445-450.
- [10] ALVES J, DINIZ P B A. Knowledge sharing in horizontal networks: The proposition of a framework[J]. Pensamiento&Gestión, 2012, 1(33): 39-66.
- [11] COWAN R, JONARD N, ZIMMERMANN J B. Evolving networks of inventors[M]//Innovation, industrial dynamics and structural transformation. Heidelberg: Springer, 2007: 129-148.
- [12] KERCHOVE C, KRINGS G, LAMBIOTTE R, et al. Role of second trials in cascades of information over networks[J]. Physical Review E, 2009, 79(1): 106-114.
- [13] WANG W, SHEN Q, CHEN Y. Community degree, clustering coefficient and knowledge propagation efficiency in complex networks[M]//Advances in Grey Systems Research. Heidelberg: Springer, 2010: 561-569.
- [14] 武开, 张慧颖, 张亮. 产业集群内隐性知识传播的仿真研究[J]. 情报学报, 2015, 34(4): 371-379.
- WU K, ZHANG H Y, ZHANG L. Simulation analysis of tacit knowledge dissemination in industrial cluster[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2015, 34(4): 371-379.
- [15] WANLY H. The complex network model of knowledge diffusion[J]. Operations Research and Management Science, 2008, 17(5): 150-154.
- [16] 岳增慧, 许海云, 方曙. 基于微分动力学的科研合作网络知识扩散模型及影响机制研究[J]. 情报学报, 2015, 34(11): 1132-1142.
- YUE Z H, XU H Y, FANG S. Study on the model and influence mechanism of knowledge diffusion in scientific collaboration network based on differential dynamics[J]. Journal of the China Society for Scientific and Technical Information, 2015, 34(11): 1132-1142.
- [17] CYR S, WEI CHOO C. The individual and social dynamics of knowledge sharing: an exploratory study[J]. Journal of Documentation, 2010, 66(6): 824-846.
- [18] ZHOU T, LIU J G, BAI W J, et al. Behaviors of susceptible-infected epidemics on scale-free networks with identical infectivity[J]. Physical Review E, 2006, 74(5): 96-109.
- [19] YANG R, WANG B H, REN J, et al. Epidemic spreading on heterogeneous networks with identical infectivity[J]. Physics Letters A, 2007, 364(3-4): 189-193.
- [20] JUANG J, LIANG Y H. Analysis of a general SIS model with infective vectors on the complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015, 43(7): 382-395.
- [21] ZHANG J, SUN J. Stability analysis of an SIS epidemic model with feedback mechanism on networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2014, 39(4): 24-32.
- [22] XIA C Y, MA J H, CHEN Z Q. SIR epidemic model with infection medium on complex networks[J]. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(6): 818-823.
- [23] XIA C Y, WANG L, SUN S, et al. An SIR model with infection delay and propagation vector in complex networks[J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 69(3): 927-934.
- [24] QIAN Z, TANG S, ZHANG X, et al. The independent spreaders involved SIR rumor model in complex networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2015, 42(9): 95-102.
- [25] XIA L L, JIANG G P, SONG B, et al. Rumor spreading model considering hesitating mechanism in complex social networks[J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015, 43(7): 295-303.
- [26] MANSUR A B F, YUSOF N. Social learning network analysis model to identify learning patterns using ontology clustering techniques and meaningful learning[J]. Computers & Education, 2013, 6(3): 73-86.
- [27] CHEN R C, CHEN S Y, FAN J Y, et al. Grouping partners for cooperative learning using genetic algorithm and social network analysis[J]. Procedia Engineering, 2012, 2(9): 3888-3893.
- [28] ZHANG J P, JIN Z. The analysis of an epidemic model on networks[J]. Applied Mathematics & Computation, 2011, 217 (17): 7053-7064.
- [29] CHEN C M, HONG C M, CHENG C C. Mining interactive social network for recommending appropriate learning partners in a Web-based cooperative learning environment[C]//2008 IEEE conference on cybernetics and intelligent systems. Piscataway: IEEE Press, 2008: 642-647.



- [30] CHEN C M, CHANG C C. Mining learning social networks for cooperative learning with appropriate learning partners in a problem-based learning environment[J]. Interactive Learning Environments, 2014, 22(1): 97-124.
- [31] LI J J, WU X J, WU X. Empirical analysis of learning network based on social network analysis, in: The 10th National Conference on Complex Networks[J]. Computers & Education, 2014, 23(1): 89-97.
- [32] 左遥, 梁英, 毕晓迪, 等. 社会化问答网站知识传播网络推断方法[J]. 计算机学报, 2018, 41(1): 82-97.
- ZUO Y, LIANG Y, BI X D, et al. An inference method of knowledge diffusion network in community question answering sites[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(1): 82-97.
- [33] 琚春华, 黄治移, 鲍福光. 融入音乐子人格特质和社交网络行为分析的音乐推荐方法[J]. 电信科学, 2015, 31(10): 122-130.
- JU C H, HUANG Z Y, BAO F G. A novel music recommendation method combining music sub-personality and social network behavior analysis[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(10): 122-130.
- [34] 张岩, 韩复龄. 基于自组织理论的网络社群知识传播研究[J]. 情报科学, 2018, 36(7): 98-103.
- ZHANG Y, HAN F L. Research on knowledge dissemination of internet community based on selforganization theory[J]. Information Science, 2018, 36(7): 98-103.
- [35] 薛娟, 丁长青, 卢杨. 复杂网络视角的网络众包社区知识传播研究——基于 Dell 公司 Ideastorm 众包社区的实证研究[J]. 情报科学, 2016, 34(8): 25-28, 61.
- XUE J, DING C Q, LU Y. Research on knowledge diffusion in network crowdsourcing community based on complex network—the empirical analysis of ideastorm crowdsourcing community of dell company[J]. Information Science, 2016, 34(8): 25-28, 61.
- [36] 顾秋阳, 琚春华, 鲍福光. 融入改进 SIR 模型的移动社交网络谣言传播用户群体动态演化仿真研究[J]. 情报科学, 2019, 37(10): 67-74, 80.
- GU Q Y, JU C H, BAO F G. Simulation research on dynamic evolution of rumor spreading user group on mobile social networks via integration improvement of SIR model[J]. Information Science, 2019, 37(10): 67-74, 80.
- [37] 林芹, 郭东强. 优化 SIS 模型的社交网络舆情传播研究——基于用户心理特征[J]. 情报科学, 2017, 35(3): 53-56, 75.
- LIN Q, GUO D Q. Research on the social network public opinion communication of optimized sis model—based on the user's psychological characteristics[J]. Information Science, Information Science, 2017, 35(3): 53-56, 75.
- [38] 鞠晓伟, 张晓芝. 组织间知识转移治理模型构建分析: 基于传播能力与吸收能力角色[J]. 情报理论与实践, 2018, 41(9): 83-89.

JU X W, ZHANG X Z. Governance model construction of inter-organizational knowledge transfer: the role of dissemination capacity and absorptive capacity[J]. Information Studies: Theory & Application, 2018, 41(9): 83-89.

- [39] 王新华, 车珍, 于灏, 等. 知识网络嵌入和知识集聚方式对组织创新力的影响差异性——知识共享意愿的视角[J]. 技术经济, 2018, 37(9): 46-55, 91.

WANG X H, CHEN Z, YU H, et al. Difference in influence of multidimensional embedding and agglomeration diversity on organization innovation: perspective of will of knowledge sharing[J]. Technology Economics, 2018, 37(9): 46-55, 91.

- [40] 王瑞琴, 潘俊, 李一啸. 基于多社交数据源的协同推荐方法研究[J]. 电信科学, 2015, 31(6): 85-91.

WANG R Q, PAN J, LI Y X. Research on collaborative recommendation method based on multiple data sources of social network[J]. Telecommunications Science, 2015, 31(6): 85-91.

- [41] 王忠义, 张鹤铭, 黄京, 等. 基于社会网络分析的网络问答社区知识传播研究[J]. 数据分析与知识发现, 2018, 2(11): 80-94.

WANG Z Y, ZHANG H M, HUANG J, et al. Studying knowledge dissemination of online q&a community with social network analysis[J]. Data Analysis and Knowledge Discovery, 2018, 2(11): 80-94.

[作者简介]



顾秋阳(1995—), 男, 浙江工业大学博士生, 主要研究方向为智能信息处理、数据挖掘、中小企业高质量发展等。



琚春华(1962—), 男, 博士, 浙江工商大学教授、博士生导师, 主要研究方向为智能信息处理、数据挖掘、电子商务与物流优化等。



吴功兴(1974—), 博士, 浙江工商大学副教授, 主要研究方向为智能信息处理、数据挖掘、电子商务与物流优化等。

收录声明

本刊已被中国核心期刊遴选数据库(万方)、中国学术期刊数据库(知网)全文收录,被本刊录用的文稿,将一律由编辑部统一纳入中国核心期刊遴选数据库(万方)、中国学术期刊数据库(知网)。若作者不同意被收录,将在来稿时向本刊说明,本刊将做适当处理。若无特别声明,视同将录用文稿的电子网络版、汇编或合订本的使用权授予本期刊社,本刊支付的稿费中已包含上述费用。

The articles of *Telecommunications Science* have been embodied by WANFANG DATA and CNKI. The accepted articles will be unified into WANFANG DATA and CNKI. If the author does not agree to his or her article to be included, the author must illustrate when the article is submitted. The editorial department will properly handle. If the authors do not give a special announcement, the editorial department believes that the authors have granted the right of their articles to *Telecommunications Science*. The expenses have been included in the fee paid by editorial department.

道德声明

本刊发表的文稿是作者独立取得的原创性研究成果,无一稿多投;文稿内容不涉及国家机密;未曾以任何形式用任何文种在国内外公开发表过;文稿内容不侵犯他人著作权和其他权利。若发生一稿多投、侵权、泄密等问题,文稿作者将承担全部责任。

The authors of *Telecommunications Science* guarantee that their submitted articles are original and contain nothing confidential. The said article is only submitted to *Telecommunications Science*. The said article has not been published before and has not been submitted elsewhere for print or electronic publication consideration. The said article is in no way whatever a violation or an infringement of any existing copyright or license from the third party. Otherwise, the authors of the said article shall take the blame for the violation or infringement of the related copyright and the leakage of secrets.

电信科学

Telecommunications Science



邮发代号: 2-397 国外代号: M841 定价: 68.00元

ISSN 1000-0801

