

基于演化博弈的制造企业研发团队 知识转移网络演化

徐建中, 朱晓亚, 贯 君

(哈尔滨工程大学经济管理学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 为揭示制造企业研发团队知识转移与持续流动的微观机制, 结合演化博弈与复杂网络相关理论, 利用计算机仿真技术, 探究了无标度网络载体下, 制造企业研发团队知识转移行为的扩散现象. 研究表明, 组织激励奖惩制度、知识转移成本与知识协同收益之间的关系对制造企业研发团队知识转移网络演化结果有显著影响; 小规模知识转移网络的演化深度与速度对三者关系变化较中大规模网络更敏感; 知识转移直接收益与知识聚合收益对知识转移网络演化结果影响不显著.

关键词: 制造企业研发团队; 知识转移; 无标度网络; 演化博弈; 仿真

中图分类号: F270.7 文献标识码: A 文章编号: 1000-5781(2018)02-0145-12

doi: 10.13383/j.cnki.jse.2018.02.001

Evolution of knowledge transfer network of R&D team in manufacturing enterprises based on evolutionary game theory

Xu Jianzhong, Zhu Xiaoya, Guan Jun

(School of Economics and Management, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: To reveal the micro-mechanism of knowledge transfer and the continuous flow of R&D teams in manufacturing enterprises, this article studies the diffusion phenomenon of knowledge transfer behavior based on the scale-free network, applying related theories about evolutionary game and complex network and computer simulation technology. The research results are as follows. Firstly, the relationship among organization system, knowledge transfer cost and knowledge synergy profit has a significant impact on the evolution result of knowledge transfer network in R&D teams of manufacturing enterprises. Secondly, the depth and speed of small size networks' evolution are more sensitive to the relationship among the three parameters, compared with middle-sized and large-sized networks. Lastly, the direct profit of knowledge transfer and knowledge aggregation profit have little effect on the evolution of knowledge transfer networks.

Key words: R&D team in manufacturing enterprises; knowledge transfer; scale-free network; evolutionary game; simulation

收稿日期: 2016-05-16; 修订日期: 2016-10-31.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71273072); 黑龙江省自然科学基金资助项目(G201119); 黑龙江省青年科学基金资助项目(JJ2016QN0645); 黑龙江省应用技术与开发计划项目(GC14D501).

1 引言

在复杂多变的动态环境下,知识管理已成为现代企业核心竞争力的源泉^[1].企业要获得技术上的先发优势,必须依靠出众的信息捕获能力和知识整合能力^[2].研发团队作为制造企业的知识密集型组织,成员间知识转移行为是促进其发展与成长的动力,也是对制造企业发展潜力的解读.因而,保持研发团队知识转移的持续稳定性对制造企业发展至关重要.然而知识具有情景依赖性,垄断性,隐匿性等独特属性,这使得知识转移是个非常复杂的问题,它既不是一般意义上的有形物质转移,也不同于纯粹意义的市场交易^[3].因此,针对知识转移微观机制的研究既是提升制造企业核心竞争力的关键,也是知识管理领域的重点和难点.

目前,关于知识转移的研究主要包括知识转移过程机制及其影响因素等.其中知识转移过程机制的研究以仿真分析,博弈分析及案例研究为主.例如,文献[4]针对理性决策主体之间的交互影响,运用博弈论方法提出了治理制度结构;文献[5]在此基础上做了扩展,运用演化博弈方法,分析了虚拟科技创新团队知识转移的条件;文献[6]则以主从博弈为视角,探索了高新技术企业团队知识分享的内在微观机理及其影响机制;文献[7]通过建立区域创新网络演化的多主体仿真模型,研究了知识扩散,转移和创造的演化规律;文献[8]利用智能仿真方法研究了集群创新网络的知识转移过程机制;文献[9]利用案例研究方法分析了集群网络的知识转移过程机制;文献[10]则在已有仿真技术与案例研究方法基础上,运用复杂网络理论和仿真技术分析了东北三省新能源汽车集群创新网络知识增长绩效的演化规律及其影响因素.

知识转移绩效的影响因素研究则以调查研究,统计分析,回归分析等方法为主.比如,文献[11]从人的角度出发,利用回归分析方法研究了知识共享与社会资本,动机,机会,能力等因素的关系;文献[12]则从要素论与社会网络论出发,采用元分析技术探究了知识特性,知识受体,知识距离等因素对知识转移绩效的影响;文献[13]通过对178家中国跨国公司的追踪调查,采用层级回归探究了知识转移效果与制度距离的关系;文献[14]利用QAP多元回归方法分析了知识价值性与企业权力对知识转移的影响;文献[15]运用负二项回归模型研究发现,战略联盟网络的地理邻近性对联盟知识转移有显著的促进作用,而网络邻近性对联盟知识转移的影响不显著.

经过文献梳理发现,目前的研究主要运用经典博弈理论或数值仿真技术分析知识转移的宏观行为过程,未考虑现实网络的拓扑特征与个体异质性;较少研究涉及动态、有限理性和微观层面等群体行为特性;而且,研究对象主要集中于知识密集型企业,对于制造企业研发团队知识转移机制的研究文献较为缺乏;另外,针对知识转移影响因素的各个研究相互独立,结合知识转移过程各要素与网络实际情景的综合分析并不充分.

因此,针对现有研究的局限性,本文从过程角度出发,将制造企业研发团队知识转移过程各相关要素纳入知识转移收益函数,构建博弈收益矩阵,利用演化博弈理论探究知识转移的局部稳定性,在此基础上,结合现实网络拓扑结构,运用演化博弈理论,复杂网络理论与计算机仿真技术,构建制造企业研发团队知识转移网络演化算法,对知识转移过程进行仿真,从而更贴切地模拟了博弈人的学习行为.主要研究无标度网络载体下,制造企业研发团队知识转移的动态过程中具有什么演化规律?哪些因素对知识转移演化结果产生影响?产生什么影响?如何控制或调整这些影响因素以提升知识转移网络演化深度?从而更深入地揭示了制造企业研发团队知识转移的演化规律.

2 制造企业研发团队知识转移的博弈模型

2.1 制造企业研发团队知识转移收益函数分布

基于张宝生等^[5],朱雪春等^[16]研究成果及制造企业实际情况,本文将与知识转移行为相关联的团队成员知识聚合效应,知识协同效应,知识转移成本,组织激励奖惩机制等因素皆纳入知识转移收益函数中.对于任意团队成员*i*和成员*j*,建立知识转移收益函数

$$v_i = v_i(\alpha_i k_j, \beta_i v_{i,0} k_j, \gamma_i k_i^m k_j^n, c_i k_i, \lambda k_i, \varphi_i), \quad (1)$$

其中 k_j 表示成员 j 向成员 i 转移的知识量, $\alpha_i k_j$ 表示成员 i 从成员 j 处成功获取的知识量, 称为知识转移直接收益, α_i 为转移系数, 取决于成员 j 的知识发送能力, 成员 i 的知识吸收能力及转移情景等因素, 体现知识转移的效率; k_i 表示成员 i 向成员 j 转移的知识量, $c_i k_i = C_i$ 表示知识转移成本, 即成员 i 进行知识转移行为所产生的成本和损失, c_i 表示知识转移成本系数; $\beta_i v_{i,0} k_j$ 表示知识聚合收益, 成员 i 将从成员 j 中获取的知识和自有知识进行综合与消化, 对原有知识进行一定的优化和改进, 可能会创造出少量新知识, 产生 $1 + 1 > 2$ 的效应, β_i 为叠加系数, 取决于成员 i 对知识的理解, 领悟和应用能力, $v_{i,0}$ 表示研发团队成员 i 的自有知识存量; $\gamma_i k_i^m k_j^n$ 表示知识协同收益, 即成员 i 与成员 j 通过不断交流、配合和反馈等知识转移行为协同创造出新知识, γ_i 为协同系数, 取决于成员 i 与成员 j 的创新能力和合作水平及知识互补程度等因素, m 与 n 分别表示成员 i 与成员 j 知识转移量的弹性系数, 且 $m, n > 0, m + n = 1$; λk_i 表示组织对成员 i 向成员 j 转移的知识的奖励值, λ 为奖励系数; φ_i 表示对机会主义, 搭便车, 不合作等行为的惩罚因子, 二者统称为组织激励奖惩因子。

为方便分析, 不失一般性, 本文将收益函数简化为

$$v_i = \alpha_i k_j + \beta_i v_{i,0} k_j + \gamma_i k_i^m k_j^n - c_i k_i + \lambda k_i - \varphi_i, \quad (2)$$

$$\varphi_i = \begin{cases} 0, & k_i > 0 \\ \varphi, & k_i = 0. \end{cases} \quad (3)$$

2.2 制造企业研发团队知识转移的博弈矩阵

当研发团队任意成员 i 和成员 j 发生博弈时, 不同策略组合下双方收益不同, 具体分析如下. 如果成员 i 和成员 j 同时采取转移策略, 则成员 i 的收益为 $H_i = \alpha_i k_j + \beta_i v_{i,0} k_j + \gamma_i k_i^m k_j^n - c_i k_i + \lambda k_i$, 成员 j 的收益为 $H_j = \alpha_j k_i + \beta_j v_{j,0} k_i + \gamma_j k_i^m k_j^n - c_j k_j + \lambda k_j$.

如果成员 i 采取不转移策略, 利用“机会主义”获取一定收益 $\alpha_i k_j + \beta_i v_{i,0} k_j$, 但同时会受到团队惩罚 φ , 此时成员 i 的收益为 $Q_i = \alpha_i k_j + \beta_i v_{i,0} k_j - \varphi$, 而成员 j 选择知识转移策略的收益为 $P_j = -c_j k_j + \lambda k_j$.

如果成员 i 采取知识转移策略, 而成员 j 采取不转移策略, 则成员 i 的收益受成员 j 机会主义行为的影响变为 $P_i = -c_i k_i + \lambda k_i$, 而成员 j 的收益变为 $Q_j = \alpha_j k_i + \beta_j v_{j,0} k_i - \varphi$.

如果成员 i 和成员 j 都选择不转移策略, 则成员 i 和成员 j 的收益将不受彼此机会主义的影响, 分别为 $R_i = -\varphi, R_j = -\varphi$.

根据合作决策的动态变化, 对制造企业研发团队中任意成员 i 和成员 j 建立知识转移博弈支付矩阵, 如表 1 所示.

表 1 制造企业研发团队知识转移博弈收益矩阵

Table 1 The Game Payoff Matrix of Knowledge Transfer of R & D Team in Manufacturing Enterprises

		成员 j	
		转移	不转移
成员 i	转移	H_i, H_j	P_i, Q_j
	不转移	Q_i, P_j	R_i, R_j

假设将制造企业研发团队看作一个系统, 该系统由两个有差别的群体 1 和群体 2 构成, 认为群体成员皆是学习速度很慢的有限理性个体. 在博弈初级阶段, 群体 1 中选择知识转移策略的成员比例为 x , 选择知识不转移策略的成员比例为 $(1 - x)$; 群体 2 中选择知识转移策略的成员比例为 y , 选择知识不转移策略的成员比例为 $(1 - y)$. 根据表 1 所列出的四种策略组合可得成员 1 选择知识转移策略的平均收益为

$$V_1 = yH_1 + (1 - y)P_1 = y(\alpha_1 k_2 + \beta_1 v_{1,0} k_2 + \gamma_1 k_1^m k_2^n) + (-c_1 k_1 + \lambda k_1), \quad (4)$$

成员 1 选择知识不转移策略的平均收益为

$$V_1' = yQ_1 + (1 - y)R_1 = y(\alpha_1 k_2 + \beta_1 v_{1,0} k_2) - \varphi, \quad (5)$$

成员 1 分别以 x 和 $(1-x)$ 的概率选择知识转移和知识不转移策略的平均收益为

$$\bar{V}_1 = xV_1 + (1-x)V_1' = x(y\gamma_1 k_1^m k_2^n - c_1 k_1 + \lambda k_1) + y(\alpha_1 k_2 + \beta_1 v_{1,0} k_2) - \varphi + x\varphi. \quad (6)$$

可得成员 2 选择知识转移策略的平均收益为

$$V_2 = xH_2 + (1-x)P_2 = x(\alpha_2 k_1 + \beta_2 v_{2,0} k_1 + \gamma_2 k_1^m k_2^n) + (-c_2 k_2 + \lambda k_2), \quad (7)$$

成员 2 选择知识不转移策略的平均收益为

$$V_2' = xQ_2 + (1-x)R_2 = x(\alpha_2 k_1 + \beta_2 v_{2,0} k_1) - \varphi, \quad (8)$$

成员 2 分别以 y 和 $(1-y)$ 的概率选择知识转移和知识不转移策略的平均收益为

$$\bar{V}_2 = yV_2 + (1-y)V_2' = y(x\gamma_2 k_1^m k_2^n - c_2 k_2 + \lambda k_2) + x(\alpha_2 k_1 + \beta_2 v_{2,0} k_1) - \varphi + x\varphi. \quad (9)$$

假定该策略比例的调整速度与其平均收益超过混合策略平均收益的幅度成正比, 则关于 x, y 的微分方程组(动态复制系统)可表示为

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = x(1-x)(y\gamma_1 k_1^m k_2^n - c_1 k_1 + \lambda k_1) + \varphi \\ \frac{dy}{dt} = y(1-y)(x\gamma_2 k_1^m k_2^n - c_2 k_2 + \lambda k_2) + \varphi. \end{cases} \quad (10)$$

2.3 局部稳定性分析

令 $\frac{dx}{dt} = 0, \frac{dy}{dt} = 0$, 可得 $x_1^* = 0, x_2^* = 1, y^* = \frac{c_1 k_1 - \lambda k_1 - \varphi}{\gamma_1 k_1^m k_2^n}, y_1^* = 0, y_2^* = 1, x^* = \frac{c_2 k_2 - \lambda k_2 - \varphi}{\gamma_2 k_1^m k_2^n}$, 均衡点为 $(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)$.

系统 Jacobi 矩阵

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} (1-2x)(y\gamma_1 k_1^m k_2^n - c_1 k_1 + \lambda k_1 + \varphi) & x(1-x)\gamma_1 k_1^m k_2^n \\ y(1-y)\gamma_2 k_1^m k_2^n & (1-2y)(x\gamma_2 k_1^m k_2^n - c_2 k_2 + \lambda k_2 + \varphi) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

$$\text{Det } \mathbf{J} = (1-2x)(1-2y)(y\gamma_1 k_1^m k_2^n - c_1 k_1 + \lambda k_1 + \varphi)(x\gamma_2 k_1^m k_2^n - c_2 k_2 + \lambda k_2 + \varphi) - xy(1-x)(1-y)\gamma_1 k_1^m k_2^n \gamma_2 k_1^m k_2^n. \quad (12)$$

$$\text{Tr } \mathbf{J} = (1-2x)(y\gamma_1 k_1^m k_2^n - c_1 k_1 + \lambda k_1 + \varphi) + (1-2y)(x\gamma_2 k_1^m k_2^n - c_2 k_2 + \lambda k_2 + \varphi). \quad (13)$$

根据 Jacobi 矩阵的局部稳定性分析法对上述五个均衡点进行稳定性分析. 由于 $\text{Tr } \mathbf{J}|_{(x^*, y^*)} = 0$ 恒成立, 即在 $0 < x^*, y^* < 1$ 条件下, (x^*, y^*) 是演化博弈过程中的均衡点, 但它们始终不是稳定点, 故本文在此仅对 $(0, 0), (0, 1), (1, 0), (1, 1)$ 四个均衡点进行局部稳定性分析. 得出结论: 当 $c_1 k_1 > \lambda k_1 + \varphi, c_2 k_2 < \lambda k_2 + \varphi$ 时, $(0, 0)$ 为知识转移系统的演化稳定点; 当 $c_1 k_1 > \gamma_1 k_1^m k_2^n + \lambda k_1 + \varphi, c_2 k_2 > \lambda k_2 + \varphi$ 时, $(0, 1)$ 为知识转移系统的演化稳定点; 当 $c_1 k_1 < \lambda k_1 + \varphi, c_2 k_2 > \gamma_2 k_1^m k_2^n + \lambda k_2 + \varphi$ 时, $(1, 0)$ 为知识转移系统的演化稳定点; 当 $c_1 k_1 < \gamma_1 k_1^m k_2^n + \lambda k_1 + \varphi, c_2 k_2 < \gamma_2 k_1^m k_2^n + \lambda k_2 + \varphi$ 时, $(1, 1)$ 为知识转移系统的演化稳定点. 具体分析见表 2~表 5.

由表 2~表 5 可知, 知识转移成本, 组织制度, 协同收益之间的关系在一定意义上决定系统的最终稳定状态. 当团队知识转移激励惩罚制度与团队成员间协同收益之和大于知识转移成本时, 系统中选择知识转移策略的成员比例会逐渐增大, 直至达到团队内成员均选择知识转移策略的理想状态. 但四种情形下, 研发团队知识转移的具体演化过程及其差异性皆未能呈现; 两个群体的最终收敛状态只表现出两种可能(0 或 1).

单纯的演化博弈分析在一定意义上解释了制造企业研发团队知识转移行为的决策机制与知识可持续流动的机理. 但其所描述的知识转移机理及过程过于抽象化, 与现实中研发团队的知识转移情形差距较大, 且其所得结论与现实情况亦不相符. 复杂网络理论指出, 在现实中个体间的接触并非全耦合或者完全随机的, 现实世界中许多系统嵌于社会系统中, 具有拓扑统计特征, 其演化博弈过程与网络结构之间有密切的联系^[17], 个体间博弈后的占优策略组合可能会随着实际网络环境的变化而变化. 制造企业研发团队是在一定

的社会经济背景下, 通过团队成员间互动, 协同, 竞争和促进等非线性作用机制实现创新观点和信息在团队中的转移扩散, 从本质上看, 这是一个以复杂网络为载体的演化过程. 因此, 下面将结合复杂网络理论, 运用计算机仿真技术及复杂网络上演化博弈的分析方法研究制造企业研发团队知识转移网络演化规律.

表 2 $c_1 k_1 > \lambda k_1 + \varphi$, $c_2 k_2 < \lambda k_2 + \varphi$ 时局部稳定性的解Table 2 The solutions of local stability when $c_1 k_1 > \lambda k_1 + \varphi$, $c_2 k_2 < \lambda k_2 + \varphi$

(x, y)	Det $\mathbf{J}$	Tr $\mathbf{J}$	结果
(0, 0)	+	—	ESS
(0, 1)	不确定	不确定	鞍点
(1, 0)	不确定	不确定	鞍点
(1, 1)	不确定	不确定	鞍点
(x^*, y^*)	—	0	鞍点

表 3 $c_1 k_1 > \gamma_1 k_1^m k_2^n + \lambda k_1 + \varphi$, $c_2 k_2 > \lambda k_2 + \varphi$ 时时局部稳定性的解Table 3 The solutions of local stability when $c_1 k_1 > \gamma_1 k_1^m k_2^n + \lambda k_1 + \varphi$, $c_2 k_2 > \lambda k_2 + \varphi$

(x, y)	Det $\mathbf{J}$	Tr $\mathbf{J}$	结果
(0, 0)	—	不确定	鞍点
(0, 1)	+	—	ESS
(1, 0)	+	+	不稳定点
(1, 1)	—	不确定	鞍点
(x^*, y^*)	不确定	0	鞍点

表 4 $c_1 k_1 < \lambda k_1 + \varphi$, $c_2 k_2 > \gamma_2 k_1^m k_2^n + \lambda k_2 + \varphi$ 时时局部稳定性的解Table 4 The solutions of local stability when $c_1 k_1 < \lambda k_1 + \varphi$, $c_2 k_2 > \gamma_2 k_1^m k_2^n + \lambda k_2 + \varphi$

(x, y)	Det $\mathbf{J}$	Tr $\mathbf{J}$	结果
(0, 0)	—	不确定	鞍点
(0, 1)	+	+	不稳定点
(1, 0)	+	—	ESS
(1, 1)	—	不确定	鞍点
(x^*, y^*)	不确定	0	鞍点

表 5 $c_1 k_1 < \gamma_1 k_1^m k_2^n + \lambda k_1 + \varphi$, $c_2 k_2 < \gamma_2 k_1^m k_2^n + \lambda k_2 + \varphi$ 时时局部稳定性的解Table 5 The solutions of local stability when $c_1 k_1 < \gamma_1 k_1^m k_2^n + \lambda k_1 + \varphi$, $c_2 k_2 < \gamma_2 k_1^m k_2^n + \lambda k_2 + \varphi$

(x, y)	Det $\mathbf{J}$	Tr $\mathbf{J}$	结果
(0, 0)	不确定	不确定	鞍点
(0, 1)	不确定	不确定	不稳定点
(1, 0)	不确定	不确定	不稳定点
(1, 1)	+	—	ESS
(x^*, y^*)	—	0	鞍点

3 无标度网络上演化博弈仿真实验

3.1 制造企业研发团队知识转移网络结构设定

在制造企业研发团队中, 存在多个研究小组, 每个小组负责不同的任务, 团队领导者与每个小组间均存在信息流通, 小组组长承担着与组内成员, 团队领导者及其他小组间的信息沟通和知识交流的工作, 对团队运作起着主导作用, 而成员则在组内信息交流频繁, 组间知识流动相对较少. 即制造企业研发团队所形成的知识转移网络中少数节点拥有大量连接, 而大部分节点只有少数连接, 具有严重异质性^[18]. 同时, 在制造企业研发团队中, 各成员倾向于与知识存量上占据优势, 知识素养较好的成员进行交流, 即该知识网络中度分布符合幂律分布($p(k) \sim k^{-\lambda}$)^[18,19]. 此外, 已有国内外研究表明, 现实网络具有无标度特性^[20,21]. 因此, 以无标度网络为载体研究制造企业研发团队知识转移过程更具有现实意义. 本文将网络规模分别设定为 50,

200, 500, 利用 MATLAB 软件仿真分析不同网络规模下的团队知识转移过程, 图 1、图 2 和 图 3 分别为演化初期随机生成的不同规模无标度网络的二位效果图, 图中的节点表示团队成员, 连线表示双方成员之间存在直接关系。

3.2 制造企业研发团队知识转移网络的前提假设

假设 1 假定制造企业研发团队知识转移网络是一个具有异质性的复杂网络 $G(V, E)$, 其中 V 表示知识转移网络中所有节点的集合, 代表团队成员, E 表示所有边的集合, $E = \{e_{ij}\}$, $e_{ij} = 1$ 表示节点 i 和 j 之间存在直接关系, $e_{ij} = 0$ 表示二者之间不存在直接关系。

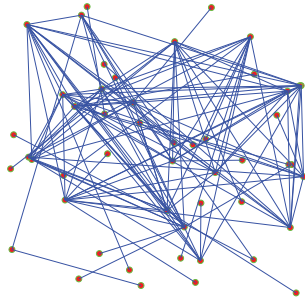


图 1 50 个节点的无标度网络

Fig. 1 Scale-free network of 50 nodes

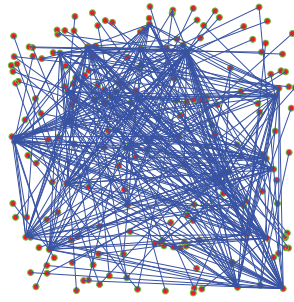


图 2 200 个节点的无标度网络

Fig. 2 Scale-free network of 200 nodes

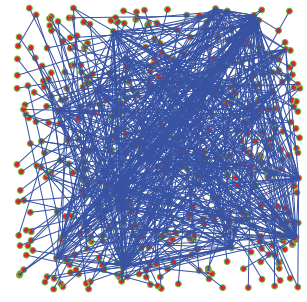


图 3 500 个节点的无标度网络

Fig. 3 Scale-free network of 500 nodes

假设 2 制造企业研发团队内异质性主体是有限理性的, 团队成员是否进行知识转移取决于预期收益的大小。

假设 3 根据霍曼斯社会交换理论中社会交换参与者对成本与报酬比率是否公平的主观判断标准, 制造企业研发团队成员在选择博弈对手进行博弈时, 范围 r 限定在邻域内, 即博弈半径 $r = 1$ 。

假设 4 制造企业研发团队所有成员采用同一策略更新规则, 且记忆长度为 1, 即团队成员的策略选择仅取决于上一次的博弈结果。

3.3 制造企业研发团队知识转移网络演化规则

在每一个演化周期, 研发团队成员根据此时所处的四种不同收益情景, 与其邻域内所有个体进行博弈, 每个博弈方的收益为与其每个邻居进行博弈所得收益的累加。

在网络上的演化博弈中, 个体策略的更新规则是以个体的学习机制来表示的^[22]。目前微观层面上的学习机制有模仿收益最大的邻居策略^[23,24]、按概率选择优胜邻居的策略^[25]、配对比较^[26-32]和基于 Moran 过程的自然选择规则^[33,34]。根据制造企业实际情况与仿真工具的可实现性, 本文选择配对比较学习机制。依据费米规则, 个体 i 随机选择一个邻居 j 进行收益比较, 若个体 j 本轮收益高于个体 i 自身收益, 则以一定的概率在下一轮中模仿对方的策略, 这种模仿概率一般表示为^[35]

$$P_{s_i \rightarrow s_j} = \frac{1}{e^{(U_i - U_j)/k}}, \quad (14)$$

其中 s_i, s_j 分别表示个体 i, j 本轮所采取策略, U_i, U_j 分别表示个体 i, j 的本轮收益, k 表示系统的噪声大小 ($k > 0$)。若 $k \rightarrow 0$, 则任何外界因素不会对个体策略更新造成干扰。

根据复杂网络理论, 节点 i 以概率 P 选择学习策略后, 将以概率 ω 随机地与网络中的其他节点进行断边重连。由于节点对知识转移对象的选择具有有限理性, 本文利用带有偏好的重连机制^[35]并参考文献^[36]确定节点 i 的出连接 j , 概率 ω 表示为

$$\omega_{ij} = \sum_{i \in G} \frac{U_j^\alpha}{U_i^\alpha}, \quad (15)$$

其中 α 表示偏好倾向, $\alpha = 0$ 表示网络个体间连接无任何偏好倾向, α 越大表示偏好倾向越明显。本文 α 取 1 作为仿真实验参数值。

制造企业研发团队知识转移网络中所有节点按照以上规则进行策略学习与调整, 策略分布将逐渐趋于稳定状态, 实现创新知识在组织内部的扩散。

3.4 基于无标度网络上演化博弈的仿真

1) 仿真步骤

步骤 1 $t \leftarrow 0$, 初始化给定一个制造企业研发团队知识转移网络 $G(V, E)$, 将博弈过程中的策略随机分配给网络中的节点, 并设定参数值;

步骤 2 $t \leftarrow 1$, 进行一次博弈;

步骤 3 $t \leftarrow 2$, 网络中节点随机选择邻居节点进行收益比较, 若收益大于或等于邻居收益, 则在下一轮博弈中不改变策略; 否则, 以概率 $P_{s_i \rightarrow s_j}$ (式(14)) 进行模仿, 此时若策略相同转入步骤 4;

步骤 4 $t \leftarrow 3$, 根据网络所具有的偏好机制(式(15)), 进行断边重连;

步骤 5 $t \leftarrow 4$, 转步骤 2, 直至达到预定时间步长结束。

2) 制造企业研发团队知识转移网络演化测度

从组织总体来看, 知识转移的根本目的在于实现知识在团队中的充分共享与流通, 使个体知识转化为群体知识, 在团队中形成良好的交流氛围, 促进团队成员之间相互竞争并共同进步, 因此本文选用知识转移网络演化深度作为测度指标。为获得稳定的仿真结果, 每组参数测试 100 次, 取团队知识转移网络演化测度指标的平均值。

为体现团队成员个体异质性, 将研发团队成员分为两个群体, 群体 1 和群体 2, 结合演化博弈分析的初步结论与文献[36, 37], 设置参数 $v_{i,0} = 10$, $k_i = 10$, $\alpha_i = 0.3$, $\beta_i = 0.02$; c_i , γ_i , λ , φ 取值见表 6, 其中 $i = 1, 2$ 。仿真结果见图 4~图 6。

表 6 制造企业研发团队知识转移网络演化仿真参数设置

Table 6 The simulation parameters of knowledge transfer network evolution of R & D team in manufacturing enterprises

参数	γ_1	c_1	γ_2	c_2	λ	φ
D_1	0.1	0.6	0.1	0.7	0.1	2
D_2	0.1	0.3	-0.5	0.3	0.2	3
D_3	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	3
D_4	0.2	0.4	0.3	0.4	0.1	2

观察图 4, 在 50 个节点的无标度网络中, 当研发团队所有成员选择知识转移策略的奖励与选择知识不转移策略的惩罚之和小于知识转移成本, 即团队知识转移行为不能得到组织制度补偿时, 最终演化深度收敛于 0 (见图 4 中演化曲线 D_1), 所有成员均选择知识不转移策略, 团队知识流动趋于停滞。当组织激励奖惩之和大于转移成本, 而部分团队成员由于协同创新能力过低而使得其协同收益与组织奖惩之和小于转移成本时, 选择知识转移行为具有一定风险, 但由于博弈方的有限理性, 其首先能感知到的是组织制度倾向, 且受流行性压力与社会规范影响, 选择知识转移行为的概率更大, 最终网络演化深度达 100% 稳态 (见图 4 中演化曲线 D_2)。当研发团队组织激励奖惩制度与成员协同创新水平均较高, 即组织激励奖惩及其与团队成员协同收益之和均大于知识转移成本时, 知识转移网络能够迅速演化至 100% 稳态 (见图 4 中演化曲线 D_3)。当组织激励奖惩之和小于转移成本, 而其与知识协同收益之和大于转移成本时, 知识转移网络最终仍能演化至 100% 稳态 (见图 4 中演化曲线 D_4)。该情形下, 尽管组织激励奖惩制度不健全, 但团队中所有成员知识协同能力均较高, 能够补偿知识转移成本使团队成员得到额外净收益。

观察图 5 和图 6 中以 200 个节点和 500 个节点无标度网络为载体的制造企业研发团队知识转移网络演化结果可知, 与 50 个节点无标度网络演化结果相似。不同的是, 当研发团队组织激励奖惩制度较完善, 而部分成员由于知识协同创新能力过低致使组织激励奖惩与知识协同收益之和小于知识转移成本时, 知识转移网络的演化深度最终收敛于一个大于 0 小于 1 的常数, 且网络规模越大, 该常数值越小 (见图 5, 图 6 中演化曲线 D_2)。出现这种现象的原因可能是在大规模无标度网络中, 邻居节点相对较多, 且节点分布的不均匀性与异质性更加显著, 节点随机选择邻居节点进行收益比较与策略模仿学习的过程更

为复杂. 在策略选择时, 网络成员随机选择一个邻居成员进行收益比较, 若该邻居恰好选择了知识转移策略且有 $c_i k_i < \lambda k_i + \varphi + \gamma_i k_1^m k_2^n$, 则该成员选择该邻居策略的概率较大, 若该邻居选择了知识转移策略但有 $c_i k_i > \lambda k_i + \varphi + \gamma_i k_1^m k_2^n$, 则该成员选择知识不转移策略的概率更大. 经过一段时间的策略演化, 对于 $c_1 k_1 < \lambda k_1 + \varphi + \gamma_1 k_1^m k_2^n$ 的成员最终选择知识转移策略的概率更大, 对于 $c_2 k_2 > \lambda k_2 + \varphi + \gamma_2 k_1^m k_2^n$ 的成员最终选择知识不转移策略的概率更大, 因此以大规模无标度网络为载体的知识转移最终演化至一个大于 0 小于 1 的常数, 且规模越大越接近群体 1 与群体 2 中成员数之比.

从图 4~图 6 中相同参数设置不同网络规模的演化仿真结果看, 除 D_2 最终演化稳态不尽相同外, 其余参数设置下的最终知识转移演化深度一致, 即在无标度网络载体下, 网络规模对演化深度影响不大. 经对比演化曲线发现, 规模为 50 的知识转移网络在博弈 5 至 15 次时基本达到稳定状态, 规模为 200 与 500 的知识转移网络在博弈至 60 时才基本达到稳定状态, 由此可见, 网络规模越大, 知识转移演化速度越慢. 这可能是由于在小规模网络中节点度相对较小, 信息传递效率高, 而大规模网络中节点间进行博弈, 收益对比与策略学习的过程更为复杂, 信息传递效率较低.

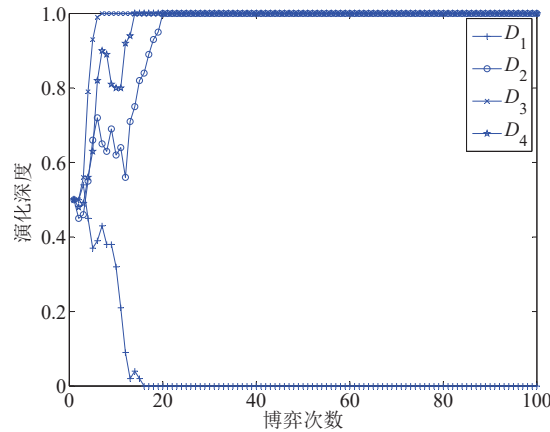


图 4 50 个节点知识转移网络的演化结果

Fig. 4 The evolution of knowledge transfer network of 50 nodes

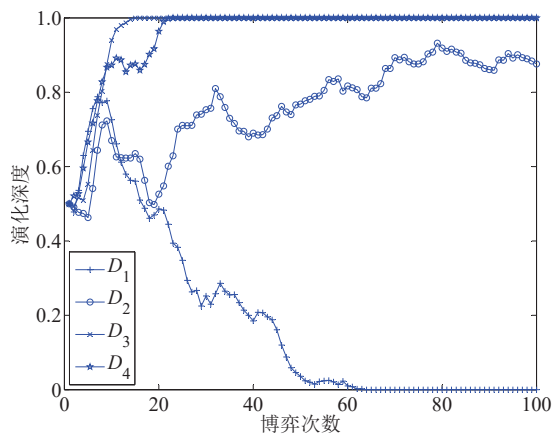


图 5 200 个节点知识转移网络的演化结果

Fig. 5 The evolution of knowledge transfer network of 200 nodes

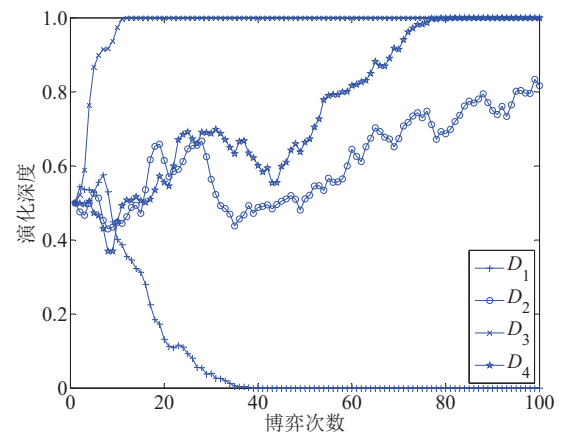


图 6 500 个节点知识转移网络的演化结果

Fig. 6 The evolution of knowledge transfer network of 500 nodes

3) 知识转移系数对知识转移网络演化影响分析

以制造企业研发团队知识转移网络演化测度分析中演化深度为 0 的情景为基础, 设置参数 $v_{i,0} = 10$, $k_i = 10$, $\gamma_i = 0.1$, $c_1 = 0.6$, $c_2 = 0.7$, $\lambda = 0.1$, $\varphi = 2$, 知识聚合系数 β_i , $i = 1, 2$ 取 0.02, 知识转移系数 α_i , $i = 1, 2$ 依次取值 0.3, 0.5, 0.7, 0.9, 分别用 D_1, D_2, D_3, D_4 表示, 结果见图 7~图 9.

4) 知识聚合系数对知识转移网络演化影响分析

在制造企业研发团队知识转移网络演化测度分析中演化深度为0的情景参数设置基础上, 知识转移系数 $\alpha_i, i = 1, 2$ 取 0.3, 知识聚合系数 $\beta_i, i = 1, 2$ 依次取值 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 分别用 D_1, D_2, D_3, D_4 表示, 结果见图 10~图 12.

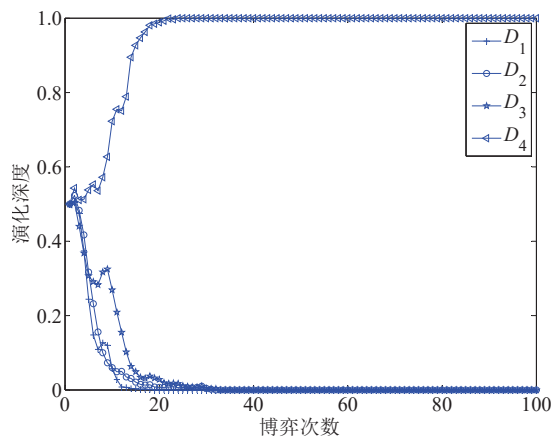


图 7 50 个节点无标度网络中知识转移系数对演化结果的影响

Fig. 7 The effect of knowledge transfer coefficient on the evolution of scale-free network of 50 nodes

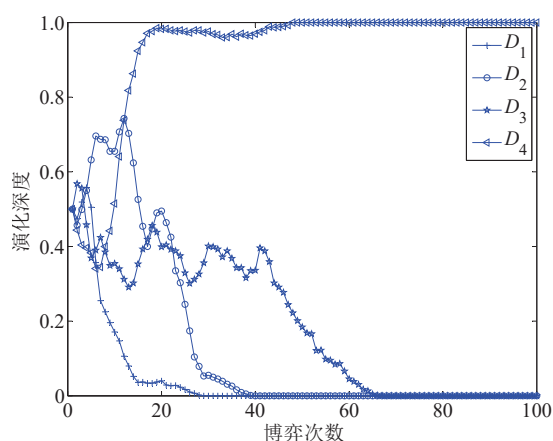


图 8 200 个节点无标度网络中知识转移系数对演化结果的影响

Fig. 8 The effect of knowledge transfer coefficient on the evolution of scale-free network of 200 nodes

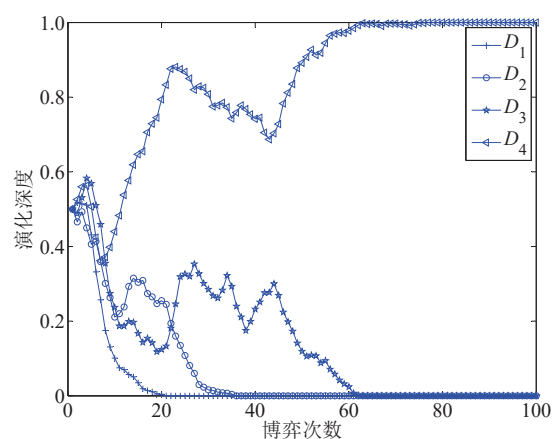


图 9 500 个节点无标度网络中知识转移系数对演化结果的影响

Fig. 9 The effect of knowledge transfer coefficient on the evolution of scale-free network of 500 nodes

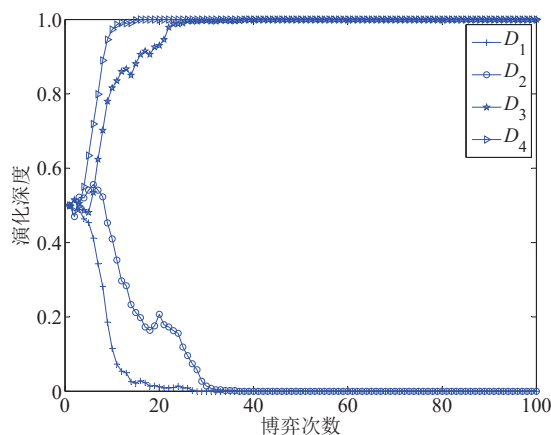


图 10 50 个节点无标度网络中聚合系数对演化结果的影响

Fig. 10 The effect of aggregation coefficient on the evolution of scale-free network of 50 nodes

观察图 10~图 12 可知, 在 50, 200, 500 个节点的无标度网络中, 当知识聚合系数 $\beta_i, i = 1, 2$ 取 0.02, 0.04 时, 知识转移网络最终均演化至稳态 0, 当知识聚合系数 $\beta_i, i = 1, 2$ 增加至 0.08 时, 知识转移网络演化稳态均达到 100%。不同的是, 当知识聚合系数 $\beta_i, i = 1, 2$ 取 0.06 时, 在 50 个节点的网络中, 演化稳态达到 100%; 在 200 个节点的网络中, 演化稳态收敛于小于 1 的常数; 在 500 个节点的网络中, 演化稳态为 0。这说明只有增大知识聚合系数 $\beta_i, i = 1, 2$ 至一定值时才能显著促进演化深度的提高, 且小规模网络对 $\beta_i, i = 1, 2$ 变化的反应相对中大规模网络更敏感。

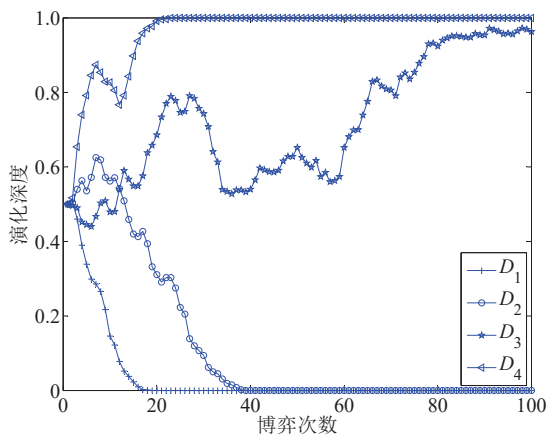


图 11 200 个节点无标度网络中聚合系数对演化结果的影响

Fig. 11 The effect of aggregation coefficient on the evolution of scale-free network of 200 nodes

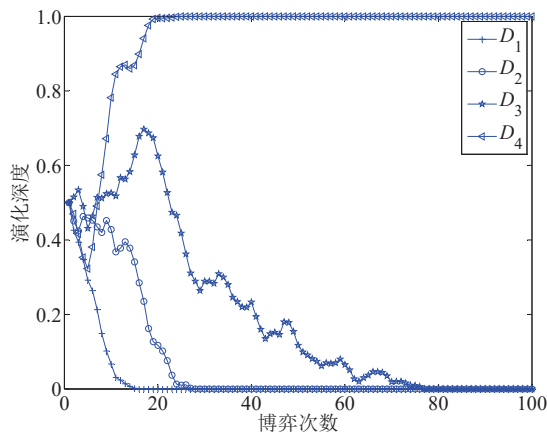


图 12 500 个节点无标度网络中聚合系数对演化结果的影响

Fig. 12 The effect of aggregation coefficient on the evolution of scale-free network of 500 nodes

4 结束语

本文基于知识转移收益视角构建了制造企业研发团队知识转移博弈模型。作为对比实验, 首先运用演化博弈理论建立了复制动态模型, 对知识转移演化路径进行了局部稳定性分析; 然后结合复杂网络理论与演化博弈理论, 利用 MATLAB 仿真技术实现了博弈模型的仿真分析, 揭示了制造企业研发团队知识转移行为网络式扩散的微观机制及知识转移成本, 知识协同收益, 组织激励奖惩制度, 知识转移直接收益, 知识聚合收益等重要因素对知识转移网络演化深度和速度的影响。对比实验规则与结果可知, 演化博弈分析方法虽然在一定程度上模拟了现实中的知识转移情形, 但所构建模型过于理想化, 未考虑博弈环境复杂性等影响因素, 不能很好地把握实际情形; 而复杂网络上演化博弈分析方法更能影射现实情景, 其研究结论更具有分析与参考价值。研究结论: 1) 制造企业研发团队知识转移网络演化深度对知识转移成本, 知识协同收益与组织激励奖惩制度之间关系的变化较敏感; 且网络规模越大, 知识转移网络演化深度收敛于稳定状态的速度越慢。2) 知识转移直接收益与知识聚合收益对制造企业研发团队知识转移网络演化深度与速度有一定影响, 但作用不大; 仅当知识转移系数与知识聚合系数增大到一定值时才能显著提高网络演化深度。

因此, 为提高制造企业竞争优势, 实现制造企业研发团队知识转移行为网络式扩散的有效运行, 组织决策者可以从以下几个方面着手: 尊重团队成员的自有知识, 保护团队成员的知识产权, 将团队成员在知识交流活动中的表现纳入绩效考核指标体系, 建立完善的知识转移激励奖惩制度, 以提高研发团队成员进行知识转移的动力; 建立多种知识转移平台与渠道, 疏通团队成员知识流动的途径, 以降低知识转移成本; 引入背景相似而知识差异化的员工, 保持团队知识异质性, 优化研发团队知识结构, 同时加强对团队成员专业知识, 社交与团队协作技能培训, 从而提高团队知识协同与聚合效益; 根据团队成员不同知识背景与岗位指导其制定科学的知识协同收益期望值, 避免因期望太高而降低知识转移愿望, 或因期望太低而不能有效利用知识交流机会; 加强对团队成员知识接收与发送能力的培养, 以提高团队成员知识转移直接收益; 同时, 合理配置组织机构, 将团队知识转移网络规模控制在恰当范围内, 以保证研发团队知识转移网络的灵活便

捷性与信息传递准确性。

参考文献:

- [1] 程 聪, 谢洪明, 杨英楠, 等. 理性还是情感: 动态竞争中企业“攻击-回应”竞争行为的身份域效应: 基于 AMC 模型的视角. 管理世界, 2015(8): 132-188.
Cheng C, Xie H M, Yang Y N, et al. Rationality and emotion: The identity domain effect of “attack-response” competitive behavior of enterprises in dynamic competition environment: Based on AMC model. Management World, 2015(8): 132-188. (in Chinese)
- [2] 潘 星, 王 君. 一种基于属性的知识地图渐进式增量模型. 系统工程学报, 2012, 27(2): 169-176.
Pan X, Wang J. Incremental incremental model of knowledge map based on attribute. Journal of Systems Engineering, 2012, 27(2): 169-176. (in Chinese)
- [3] Wang S, Noe R A. Knowledge sharing: A review and directions for future research. Human Resource Management Review, 2010, 20: 115-131.
- [4] Soekijad M. Condition for knowledge sharing in competitive alliances. European Management Journal, 2004, 21(5): 578-587.
- [5] 张宝生, 王晓红. 虚拟科技创新团队知识转移稳定性研究: 基于演化博弈视角. 运筹与管理, 2011, 20(5): 169-175.
Zhang B S, Wang X H. Research on the stability of knowledge transfer in virtual science and technology innovation team: Based on evolutionary game theory. Operations Research and Management Science, 2011, 20(5): 169-175. (in Chinese)
- [6] 吴丙山, 赵 骅, 罗 军. 高新技术企业中知识分享微观机制研究. 科研管理, 2012, 33(3): 65-71.
Wu B S, Zhao H, Luo J. Research on the micro mechanism of knowledge sharing in high tech enterprises. Science Research Management, 2012, 33(3): 65-71. (in Chinese)
- [7] 吕一博, 程 露, 苏敬勤. 知识搜索行为与区域创新网络演化. 系统工程学报, 2014, 29(6): 725-753.
Lü Y B, Cheng L, Su J Q. Knowledge search behavior and the evolution of regional innovation network. Journal of Systems Engineering, 2014, 29(6): 725-753. (in Chinese)
- [8] Wang X. Forming mechanisms and structures of a knowledge transfer network: Theoretical and simulation research. Journal of Knowledge Management, 2013, 17(2): 278-289.
- [9] Blumenberg S, Wagner H, Beimbom D. Knowledge transfer processes in IT outsourcing relationships and their impact on shared knowledge and outsourcing performance. International Journal of Information Management, 2009, 29(5): 342-352.
- [10] 周 文, 陈 伟, 郎益夫. 集群创新网络知识动态增长研究: 基于过程视角. 系统工程学报, 2015, 30(4): 431-441.
Zhou W, Chen W, Lang Y F. Research on knowledge dynamic growth of cluster innovation network: Based on the perspective of process. Journal of Systems Engineering, 2015, 30(4): 431-441. (in Chinese)
- [11] Chen C W, Chang M L, Tseng C P. Human factors of knowledge-sharing intention among taiwanese enterprises: A model of hypotheses. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries, 2012, 22(4): 362-371.
- [12] 李靖华, 常晓然. 基于元分析的知识转移影响因素研究. 科学学研究, 2013, 31(3): 394-406.
Li J H, Chang X R. Research on the influencing factors of knowledge transfer based on meta-analysis. Studies in Science of Science, 2013, 31(3): 394-406. (in Chinese)
- [13] 陈怀超, 范建红, 牛冲槐. 制度距离对中国跨国公司知识转移效果的影响研究: 国际经验和社会资本的调节效应. 科学学研究, 2014, 32(4): 593-603.
Chen H C, Fan J H, Niu C H. Research on the effect of institutional distance on knowledge transfer in Chinese Transnational Corporations: The moderating effect of international experience and social capital. Studies in Science of Science, 2014, 32(4): 593-603. (in Chinese)
- [14] 刘 立, 党兴华. 知识价值性, 企业权力对知识转移的影响研究. 科研管理, 2015, 36(12): 39-46.
Liu L, Dang X H. Research on the influence of the knowledge value, the power of the enterprise on the knowledge transfer. Science Research Management, 2015, 36(12): 39-46. (in Chinese)
- [15] 赵 炎, 王 琦, 郑向杰. 网络邻近性, 地理邻近性对知识转移绩效的影响. 科研管理, 2016, 37(1): 128-136.
Zhao Y, Wang Q, Zheng X J. The influence of network proximity and geographical proximity on the performance of knowledge transfer. Science Research Management, 2016, 37(1): 128-136. (in Chinese)
- [16] 朱雪春, 陈万明. 实践社群知识流动的可持续性研究: 基于进化博弈的视角. 北京理工大学学报, 2015, 17(5): 56-62.
Zhu X C, Chen W M. Research on the sustainability of knowledge flow in practical communities: A perspective of evolutionary game theory. Journal of Beijing Institute of Technology, 2015, 17(5): 56-62. (in Chinese)
- [17] Small M, Judd K, Zhang L. How is that complex network complex // Proceedings of 2014 IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Melbourne, Australia, 2014: 1263-1266.
- [18] Bárábasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random networks. Science, 1999, 286(5439): 509-512.

- [19] 胡海波, 王 林. 幂律分布研究简史. 物理, 2005, 34(12): 7.
Hu H B, Wang L. A brief history of research on power-law distribution. Physics, 2005, 34(12): 7. (in Chinese)
- [20] 朱 亮, 韩定定. 动态复杂网络的同步拓扑演化. 计算机应用, 2012, 32(2): 330–334.
Zhu L, Han D D. Synchronous topology evolution of dynamic complex networks. Journal of Computer Applications, 2012, 32(2): 330–334. (in Chinese)
- [21] Choi J, Sang-Hyun A, Cha M S. The effects of network characteristics on performance of innovation clusters. Expert Systems with Applications, 2013, 40(11): 4511–4518.
- [22] 王先甲, 全 吉, 刘伟兵. 有限理性下的演化博弈与合作机制研究. 系统工程理论与实践, 2011, 31(1): 82–93.
Wang X J, Quan J, Liu W B. Research on evolutionary game and cooperation mechanism under bounded rationality. System Engineering: Theory & Practice, 2011, 31(1): 82–93. (in Chinese)
- [23] Abrarnson G, Kuperman M. Social games in a social network. Physical Review E, 2001, 63(3): 030901.
- [24] Masuda N, Aibara K. Spatial prisoner's dilemma optimally played in small-world network. Physics letters A, 2003, 313(1/2): 55–61.
- [25] Hauert C, Doebeli M. Spatial structure often inhibits the evolution of cooperation in the snowdrift game. Nature, 2004, 428(6983): 643–646.
- [26] Santos F C, Pacheco J M. Scale-free networks provide a unifying framework for the emergence of cooperation. Physical Review Letters, 2005, 95(9): 098104.
- [27] Santos F C, Pacheco J M, Lenaerts T. Evolutionary dynamics of social dilemmas in structural heterogeneous populations. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2006, 103(9): 3490–3494.
- [28] Perc M, Szolnoki A. Social diversity and promotion of cooperation in the spatial prisoner's dilemma games. Physical Review E, 2008, 77(1): 011904.
- [29] Devlin S, Treloar T. Cooperation in an evolutionary prisoner's dilemma on networks with degree-degree correlations. Physical Review E, 2009, 80(2): 026105.
- [30] Devlin S, Treloar T. Evolution of cooperation through the heterogeneity of random networks. Physical Review E, 2009, 79(1): 016107.
- [31] Roca C P, Cuesta J A, Sanchez A. Effect of spatial structure on the evolution of cooperation. Physical Review E, 2009, 80(4): 046106.
- [32] Assenza S, Gomez-Gardenes J, Latora V. Enhancement of cooperation in highly clustered scale-free networks. Physical Review E, 2008, 78(1): 017101.
- [33] Lieberman E, Hauert C, Nowak M A. Evolutionary dynamics on graphs. Nature, 2005, 433(7023): 312–316.
- [34] Ohtsuki H, Hauert C, Lieberman E, et al. A simple rule for the evolution of cooperation on graphs and social networks. Nature, 2006, 441(7092): 502–505.
- [35] 汪小帆, 李 翔, 陈关荣. 网络科学导论. 北京: 高等教育出版社, 2012: 295–366.
Wang X F, Li X, Chen G R. An Introduction to Network Science. Beijing: Higher Education Press, 2012: 295–366. (in Chinese)
- [36] 曹 霞, 张路蓬. 基于利益分配的创新网络合作密度演化研究. 系统工程学报, 2016, 31(1): 1–12.
Cao X, Zhang L P. Research on the evolution of the innovation network's cooperation density based on the benefit distribution. Journal of Systems Engineering, 2016, 31(1): 1–12. (in Chinese)
- [37] 钱 成, 曹进德, 杨夏竹. 基于社会影响模型的观点演化规律研究. 系统工程学报, 2010, 25(6): 755–772.
Qian C, Cao J D, Yang X Z. Opinion evolution analysis based on social impact model. Journal of Systems Engineering, 2010, 25(6): 755–772. (in Chinese)

作者简介:

徐建中(1959—), 男, 河北丰润人, 博士, 教授, 博师生导师, 研究方向: 现代管理理论与方法, 经济管理与战略研究, Email: xujianzhongxjz@163.com;

朱晓亚(1988—), 女, 山东菏泽人, 博士生, 研究方向: 经济管理与战略研究, Email: zhuxiaoyahgc@163.com;

贯 君(1989—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士生, 研究方向: 经济管理与战略研究, Email: 946906230@qq.com.