

基于利益分配的 复杂产品协同创新网络合作行为演化研究

周国华,李施瑶,夏小雨

(西南交通大学 经济管理学院,成都 610031)

摘要:针对复杂产品协同创新中各类企业的不同利益诉求,基于复杂网络、公共品演化博弈等理论构建复杂产品协同创新网络利益分配演化博弈模型,对网络的合作行为演化进行仿真分析。研究发现:当协同创新合作需求不同时,利益分配结构要有所区别;在利益分配结构中考企业的投入与重要度可以减少企业的搭便车行为;当利益分配机制的制定缺乏一定的公平合理性时,可以通过调动骨干企业的合作积极性来提高网络整体合作水平。

关键词:复杂产品;协同创新;复杂网络;公共品演化博弈;利益分配

中图分类号:F064.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1002—980X(2020)3—0010—11

复杂产品一般是指技术复杂、研发成本高、小批量定制生产的大型产品、复杂系统或重大基础设施,是国家产业发展的基础性产品,是衡量国家现代工业能力的重要指标,也是支撑国家产业发展的重要支柱。目前我国在航天、高铁、深潜等众多领域都取得了巨大的进步,但是相比于我国庞大的生产制造能力,复杂产品系统的创新水平仍处于弱势^[1],需要通过加强企业之间的协同创新来促进复杂产品创新水平的整体提升。

由于复杂产品的复杂性主要体现在对技术深度、宽度以及技术创新程度的要求之高,导致许多拥有研发技术的单个企业无法独自胜任复杂产品的技术创新,需要多个技术型企业组建创新联盟^[2]。同时,复杂产品还具有高度技术密集性的特点,这使得复杂产品的研发会根据其技术需求进行模块化划分^[3],需要大量的研发联盟来确保研发的总体进度,由于子模块之间还存在着一定的关联,所以每个企业都可能参与到多个研发联盟中,创新主体间基于复杂产品的创新项目而进行的创新交互,就构成了一个巨大的、受多因素影响的复杂产品协同创新网络。然而,目前针对复杂产品协同创新网络的研究大多集中于网络结构特性方面^[4-6],关于合作行为演化的研究尚属空白。因此,本文通过对复杂产品协同创新网络的演化博弈分析有助于了解网络中企间的合作行为以及相关影响因素,丰富复杂产品研究相关理论,为我国的复杂产品协同创新管理提供理论依据和对策建议。

一、文献综述

与普通产品相比,复杂产品的研发与生产需要企业具备更高技术能力、资金能力以及管理能力,复杂产品产业表现出了极强的寡头垄断特性。Dhanaraj和Parkhe^[5]认为复杂产品协同创新网络具有很强的核心企业主导特性,是一个由核心企业主导的网络;Wallner^[6]认为在复杂技术协同创新网络中,位于网络核心的大型企业通常主导着网络的发展结构,吸引优势企业与其构建创新联系,众多中小型企业又以这些优势企业为核心形成子网络,各级网络交织在一起形成大型复杂网络。例如,在AIC(Airbus Industrial Consortium)的A380型号飞机的研制项目中,AIC主要与其在法国、西班牙、德国、英国等分支机构的企业对产品进行联合研发,同时各分支机构又基于自身的社会资本关系构建新的协同创新关系,从而形成了A380飞机的协同创新网络。可见在复杂产品协同创新网络中存在三类企业,一是起到主导作用的核心企业,二是具有某项专长的骨干企业,三是具备一定研发能力的一般企业,其网络架构的主要联结机制是企业间的创新合作关系,以

收稿日期:2019—12—13

基金项目:国家社会科学基金“国家复杂产品生产能力比较研究”(15AZD057)

作者简介:周国华(1966—),男,江苏张家港人,西南交通大学经济管理学院教授,博士研究生导师,研究方向:大型复杂项目与复杂系统;李施瑶(1995—),女,黑龙江双鸭山人,西南交通大学经济管理学院硕士研究生,研究方向:大型复杂项目与复杂系统;夏小雨(1993—),男,河南固始人,西南交通大学经济管理学院硕士研究生,研究方向:大型复杂项目与复杂系统。

契约为纽带,以研发项目为内容,以创新主体的利益最大化为最终目的^[7]。由于网络中各类创新主体的利益诉求不同,在协同创新的过程中,必然进行着趋利的动态博弈,由创新活动产生的利益分配问题将直接影响各参与主体的合作行为^[8]。因此,本文以创新节点的利益诉求为切入点,研究复杂产品协同创新网络的合作行为演化现象。

针对合作利益诉求问题,曾德明等^[9]引入投入比例、风险分担率以及谈判力强度等影响因素,对高技术产业技术联盟的利益分配进行了研究;李军等^[10]构建了供应链企业协同创新收益分配模型,并设计了利益分配的有效性评价指标体系以确保利益分配的公平公正;Gao等^[11]提出了供应链不确定联盟情况下的利益分配方案;Harrison等^[12]对联盟中合作双方利益分配的最优化问题进行了深入研究。在研究方法上,大多采用shapely值法、经典博弈模型等,集中于设计合理的利益分配机制及寻求最优的利益分配系数,以保证合作关系的稳定发展。随着创新合作的网络化发展,针对创新网络合作行为演化问题。Cowan等^[13]基于双边合作模型,研究创新个体的模仿行为对网络合作行为演化的影响;Lee等^[14]运用博弈论和仿真分析法对创新网络的合作密度演化问题进行了研究;曹霞和张路蓬^[15]基于BA网络,探讨了不同利益分配对创新网络主体合作行为的影响;张丹和孔晓丹^[16]基于复杂网络和演化博弈相关理论探讨了网络结构对创新网络合作行为演化的影响。在上述对于创新网络合作行为演化的研究中,都是假定网络中的企业仅与其相邻的企业产生交互作用,采用“囚徒困境”“雪堆模型”等双人博弈模型与复杂网络理论相结合的方法,对创新网络的合作行为演化进行仿真分析。

通过对文献的梳理发现,国内外在企业合作利益分配以及创新网络合作行为演化方面均有了一定的研究积累,为本文的研究提供了理论基础。但是与一般的创新网络不同,复杂产品协同创新网络是一个由多个子联盟组成的网络,每个创新个体都会在联盟中进行创新投入,然后与其他成员共享收益,是一个多人博弈问题。而公共品博弈恰好为多人博弈提供了一种新的解决方式^[17],所以本文考虑将公共品演化博弈理论嵌入到复杂产品协同创新网络中,分析主体的合作行为。在经典的公共品博弈中,所有参与者均向一个公共池内进行投入,每个参与者均有两种合作策略,即合作和背叛,合作收益是所有投入之和增大到一定的倍数,在全体成员之间进行平均分配。然而,由于复杂产品协同创新网络中存在三类节点并且拥有不同的研发能力以及在网络中的重要度,这种平均分配的方式无疑会为一些技术资源匮乏或者有自利倾向的企业提供搭便车的机会,可以通过考虑主体的社会差异性来有效提高合作水平^[18]。同时,在复杂产品的协同创新过程中,当技术越复杂,合作需求就会越高,合作产出会受到技术复杂程度的影响^[19]。因此,为了使理论研究更贴近现实,本文对经典公共品博弈中的合作产出与利益分配模型进行了改进。

基于以上分析,本文结合复杂网络和公共品演化博弈理论,构建了复杂产品协同创新网络和协同创新演化博弈模型,运用仿真分析的方法从利益分配的角度探讨了不同初始状态和相关参数对系统的合作行为演化以及各类企业平均收益情况的影响。

二、基于利益分配的复杂产品协同创新网络博弈模型构建

(一)复杂产品协同创新网络的构建

根据前文对复杂产品协同创新网络的分析可知,核心企业是网络全局范围内的核心,而骨干企业主要作为网络局域范围内的核心,一般企业会围绕在核心企业与骨干企业附近形成子网络。因此,可以认为复杂产品协同创新网络具有全局择优特性^[20]和局域择优特性^[21]。基于这些特性,本文构建包含三类节点的复杂产品协同创新网络 $G(V, E)$,其中 V 为网络中节点的集合, E 为网络中边的集合。第一步,构建节点数为 m_0 、边数为 e_0 的初始网络;第二步,新增节点按照全局择优连接方式或者局部择优连接方式加入网络,以概率 $\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_{j \in Global} k_j}$ 或 $\Pi_i = \frac{k_i}{\sum_{j \in Local} k_j}$ 连接到全网络或者局域网络中的 m 或 n 个原有节点上;第三步,重复第二步,直至网络节点规模达到 N 。其中, k 表示网络中节点的度。

为使网络具有一定规模,设置总节点数 $N = 250$,按照节点在网络中的度将其划分为三类节点,分别代表核心企业、骨干企业和一般企业,其中核心节点5个,骨干节点45个,一般节点200个。最终生成的无标度复杂产品协同创新网络如图1所示。

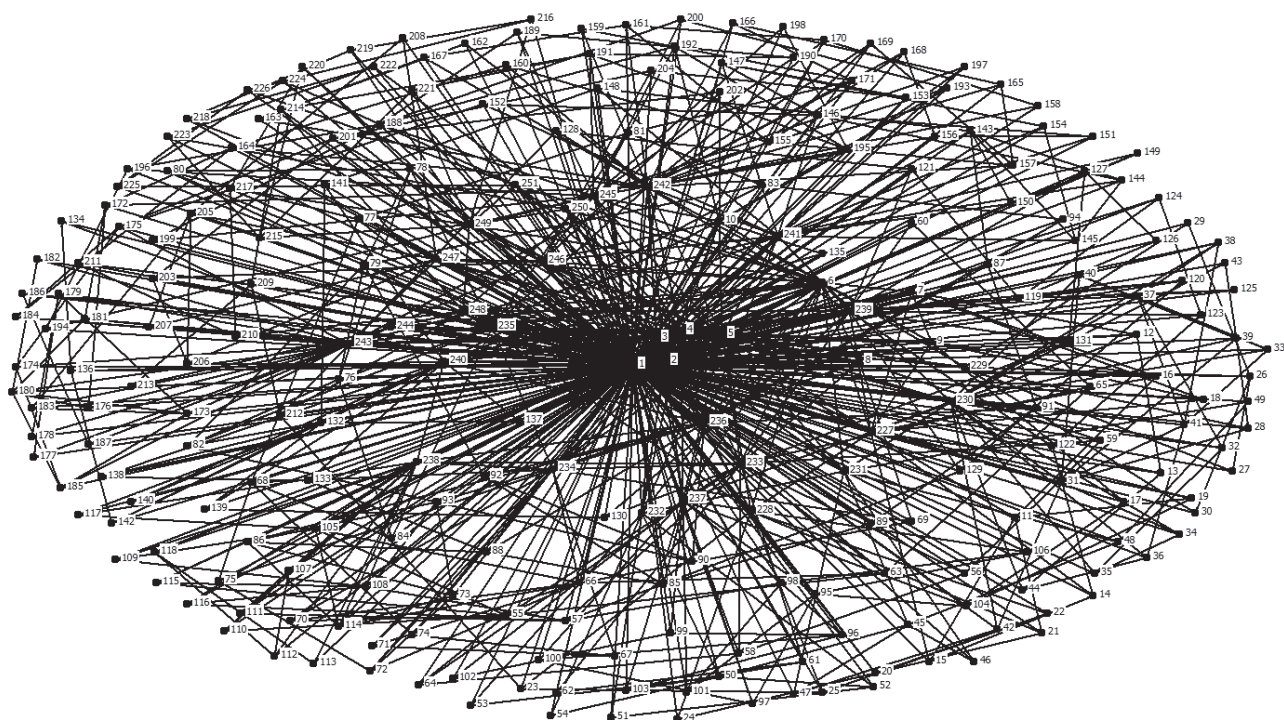


图1 复杂产品协同创新网络拓扑图

(二) 博弈模型的基本假设

本文基于经典公共品演化博弈模型的假设,并根据复杂产品协同创新模型构建的现实需求,提出以下四个假设:

假设1:节点 x 的度为 k_x ,共参与以自身为中心和以邻居为中心的 $k_x + 1$ 个邻域的博弈。一个邻域是指由某个中心节点和与其直接相连的节点共同组成的子博弈网络。实际上,一个邻域就相当于由若干个企业组成的联盟,每个企业都会参与到多个联盟中进行技术协同创新活动,从而降低创新风险。

假设2:每个企业只有合作(C)或者背叛(N)两个纯策略。企业节点之间进行着动态的博弈过程,即根据收益及其他企业的策略不断更新自身的策略,直至达成稳定的博弈关系。

假设3:由于技术的复杂性和自身的专业限制,很多工作企业无法独立完成,需要其他企业的帮助,所以复杂产品协同创新的过程中,各创新主体不仅要完成独立创新任务,还要与其他企业进行联合创新。为了更加形象地刻画复杂产品的协同创新过程,本文将企业的创新投入分为生产投入和合作投入。

假设4:复杂产品技术创新以研制一体为主,且多为单件小批量定制,其效益在很大程度上能够通过投入水平直接体现^[22]。

(三) 博弈模型的构建

1. 创新投入规则

(1)生产投入。由于复杂产品的协同创新一般依托于项目,会以契约的形式形成创新联盟,所以无论企业是否采用合作策略,都将在自身任务中进行生产投入。Cao等^[23]认为博弈主体在合作中的投入与自身的度相关,即度越大投入就越高;Zhang等^[24]认为博弈主体的投入与前期收益相关,即收益越高投入越大。本文用度和前期收益共同决定博弈主体在合作过程中的生产投入,企业在各邻域的生产投入由式(1)和式(2)确定。

$$a_{x,\hat{y}}(t_n) = (1 - w_1) \frac{e^{am_{x,\hat{y}}(t_{n-1})}}{\sum_{i=0}^{k_x} e^{am_{x,\hat{y}}(t_{n-1})}} + w_1 \frac{e^{ak_x}}{\sum_{i=0}^{k_x} e^{ak_i}} \quad (1)$$

$$\sum_{\hat{y}=0}^{k_x} a_{x,\hat{y}}(t_n) = C \quad (2)$$

其中: $\frac{e^{\alpha m_{x,\hat{y}}(t_{n-1})}}{\sum_{i=0}^{k_x} e^{\alpha \cdot m_{i,\hat{y}}(t_{n-1})}}$ 表示节点 x 在邻域 $\hat{y}$ 的收益与邻域 $\hat{y}$ 内总收益的标准化比值; $\frac{e^{\alpha k_x}}{\sum_{i=0}^{k_x} e^{\alpha k_i}}$ 表示节点 x 的度与邻域 $\hat{y}$

内所有节点的度之和的标准化比值; $t_n = 2, 3, \dots, T$ 表示博弈的轮数; $a_{x,\hat{y}}(t_n)$ 是节点 x 在第 t_n 轮博弈中对邻域 $\hat{y}$ 的所付出的生产投入; $m_{x,\hat{y}}(t_{n-1})$ 代表节点 x 在 t_{n-1} 轮博弈结束后在邻域 $\hat{y}$ 获得的收益; 节点 i 是邻域 $\hat{y}$ 内的节点, 当 $i = 0$ 时, 代表节点 x 本身; $m_{i,\hat{y}}(t_{n-1})$ 代表节点 i 在 t_{n-1} 轮博弈结束后在邻域 $\hat{y}$ 获得的收益; α 为调节系数, 当 $\alpha = 0$ 时, 节点 x 在其参与博弈的 $k_x + 1$ 个邻域中平均分配资源, 当 $\alpha > 0$ 时, 节点 x 向度越大和前期收益越高的邻域付出的生产投入越多; $w_1 (0 \leq w_1 \leq 1)$ 和 $1 - w_1$ 是度权重和收益权重, w_1 越大所付出的生产投入越倾向于度占优势的邻域, w_1 越小越倾向于收益占优势的邻域; C 为节点 x 在所有邻域的生产投入总量。

(2) 合作投入。在复杂产品协同创新活动中, 协助其他企业为其自身任务以外的事情, 因此只有当企业选择合作策略时, 才会进行合作投入, 而一些选择背叛策略的企业将产生搭便车行为, 不会进行合作投入, 同时企业会偏向于向付出较高生产投入的成员提供合作^[25]。因此, 第 t_n 轮博弈中节点 x 给予邻域 $\hat{y}$ 中节点 $i (i \neq 0)$ 的合作投入 $b_{xi,\hat{y}}(t_n)$ 可表示为

$$b_{xi,\hat{y}}(t_n) = \frac{e^{a_{i,\hat{y}}(t_n)}}{\sum_{i=0}^{k_x} e^{a_{i,\hat{y}}(t_n)}} b_{x,\hat{y}}(t_n) \quad (3)$$

$$b_{x,\hat{y}}(t_n) = BS_x \quad (4)$$

其中: $b_{x,\hat{y}}(t_n)$ 表示节点 x 在邻域 $\hat{y}$ 内进行的合作投入; B 表示节点 x 在邻域的合作投入总量; $S_x = \{0, 1\}$ 表示节点 x 的策略集。

2. 收益及其分配

(1) 收益。为了更加形象地刻画复杂产品协同创新特性, 本文将经典公共品博弈中的产出模型进行了改进。在复杂产品协同创新网络中, 考虑到各企业拥有不同的资源禀赋、不同的专业优势, 实际上, 每个子联盟都可以看做一个多主体参与的项目团队。在项目团队中, 各企业的产出水平不仅取决于它的生产投入, 也取决于其他团队成员给予的合作^[26], 节点 x 在 t_n 轮博弈结束后在邻域 $\hat{y}$ 的产出 $\pi_{x,\hat{y}}(t_n)$ 可以表示为

$$\pi_{x,\hat{y}}(t_n) = r [\theta a_{x,\hat{y}}(t_n) + (1 - \theta) \sum_{i=1}^{k_x} b_{ix,\hat{y}}(t_n) + \gamma a_{x,\hat{y}}(t_n) \sum_{i=1}^{k_x} b_{ix,\hat{y}}(t_n)] + \varepsilon_x \quad (5)$$

其中: $\sum_{i=1}^{k_x} b_{ix,\hat{y}}(t_n)$ 代表在第 t_n 轮博弈中邻域 $\hat{y}$ 中所有节点给予节点 x 的合作; θ 和 $1 - \theta$ 分别是节点 x 在邻域 $\hat{y}$ 的生产投入和节点 $i (i \neq 0)$ 给予节点 x 的合作对其产出的影响系数, 且满足 $0 < \theta < 1$, 当 $\theta \rightarrow 0$ 时, 表明其他团队成员 i 的合作对 x 的产出影响非常大, 即节点 x 对邻域中其他企业的合作需求越高; γ 表示同一个邻域中, 节点之间的合作对产出的潜在影响, 且满足 $0 < \gamma < 1$, γ 取值越大, 表明影响越明显; r 表示网络整体的投入增益系数; ε_x 为环境自然变量, 表示外界环境对节点 x 在邻域 $\hat{y}$ 的产出的影响, 且 $\varepsilon_x \sim N(0, \delta^2)$ 。

邻域 $\hat{y}$ 内所有节点的产出之和为邻域 $\hat{y}$ 在第 t_n 轮博弈结束后的总收益 $\pi_{\hat{y}}(t_n)$, 即

$$\pi_{\hat{y}}(t_n) = \sum_{i=0}^{k_x} \pi_{i,\hat{y}}(t_n) \quad (6)$$

(2) 利益分配。本文对传统公共品博弈中的利益平均分配模式进行了差异化改进, 考虑了企业的投入与节点在网络中的度, 同时为了简化模型, 此处忽略了对企业创新投入的评估误差。在第 t_n 轮博弈结束后, 节点 x 在邻域 $\hat{y}$ 获得的净收益由式(7)确定:

$$m_{x,\hat{y}}(t_n) = \left[w_4 \frac{e^{\beta a_{x,\hat{y}}(t_n)}}{\sum_{i=0}^{k_x} e^{\beta a_{i,\hat{y}}(t_n)}} + w_3 \frac{e^{\beta b_{x,\hat{y}}(t_n)}}{\sum_{i=0}^{k_x} e^{\beta b_{i,\hat{y}}(t_n)}} + w_2 \frac{e^{\beta k_x}}{\sum_{i=0}^{k_x} e^{\beta k_i}} \right] \pi_{\hat{y}}(t_n) - a_{x,\hat{y}}(t_n) - b_{x,\hat{y}}(t_n) \quad (7)$$

由式(7)可知, 节点 x 在邻域 $\hat{y}$ 分配的收益由其在邻域的生产投入占比、合作投入占比和度占比共同决定; β 为调节系数, 含义和作用与 α 相同; w_2, w_3 和 w_4 分别表示节点 x 的度权重、合作投入权重和生产投入权重, 满足 $0 \leq w_2, w_3, w_4 \leq 1, w_2 + w_3 + w_4 = 1$ 。

在第 t_n 轮博弈结束后,节点 x 在 $k_x + 1$ 个邻域的总收益为

$$M_x(t_n) = \sum_{\hat{y}=0}^{k_x} m_{x,\hat{y}}(t_n) \quad (8)$$

当 $\hat{y} = 0$ 时,表示以节点 x 为中心的邻域。

3. 策略更新规则

节点 x 在每轮博弈结束后,随机选择邻居节点 y ,将自身的总收益 $M_x(t_n)$ 与邻居节点 y 的收益 $M_y(t_n)$ 进行比较。若 $M_x(t_n) < M_y(t_n)$,则节点 x 将调整博弈策略,按一定概率 W 跟随节点 y 在该邻域的策略。本文借鉴费米更新规则确定模仿概率^[27]:

$$W(S_x \rightarrow S_y) = \frac{1}{1 + \exp\left[\frac{M_x(t_n) - M_y(t_n)}{K}\right]} \quad (9)$$

其中: K 表示噪声强度,代表外界环境、有限理性等因素对企业的策略学习过程产生的干扰。当 $K \rightarrow 0$ 时,表示外界环境不会对企业的策略选择造成干扰,并且企业的非理性趋近于 0;而当 $K \rightarrow \infty$ 时,表示外界环境和有限理性对企业策略选择的影响非常大,以致无法做出理性决策。

三、复杂产品协同创新网络合作行为演化的仿真与分析

(一)复杂产品协同创新网络合作行为演化的仿真

利用 MATLAB 仿真平台对复杂产品协同创新网络演化博弈模型进行仿真,仿真算法和相关参数设定如下。

步骤 1:设置复杂产品协同创新网络的初始参数。其中 $r = 2, \alpha = \beta = 0.5, w_1 = w_2, w_3 = w_4, B = C = 1$, 噪声因子 $K = 0.1$, 博弈总轮数 $T = 400$ 。

步骤 2:确定复杂产品协同创新网络的初始博弈状态。初始时,各节点将可以付出的总生产投入在其参与博弈的各个邻域内平均分配,各节点的初始合作率为 0.5,且随机分配。

步骤 3:复杂产品协同创新网络中博弈主体按既定规则确定其所付出的创新努力,并按利益分配规则确定所有博弈主体的收益。

步骤 4:复杂产品协同创新网络中博弈主体的策略更新过程。博弈主体依据既定的策略更新规则更新策略。

步骤 5:循环执行步骤 3、步骤 4,达到设定的博弈迭代轮次后,仿真终止。

创新网络达到动态平衡的仿真结果为每组参数下后 50 轮的平均值,并且分别进行 5 次独立实验。

(二)协同合作特性对复杂产品协同创新网络合作密度的影响

本文首先分析了不同的分配结构下,协同合作特性对复杂产品协同创新网络合作密度的影响,协同合作特性可由复杂产品协同创新的合作需求 θ 和协同创新潜在影响系数 γ 来衡量,仿真结果如图 2 所示。网络合作密度是指网络中采纳合作策略的主体占全部主体的比重,是衡量网络整体合作状态的指标,又称合作率^[28]。

由图 2 可知,无论分配结构如何, θ 都与网络的合作密度负相差, γ 都与其正相关。具体来看,随着 γ 的增大,复杂产品协同创新网络的合作密度呈上升趋势,但 γ 增大带来的潜在影响远远小于 θ 增加减少的合作产出, θ 才是主导复杂产品协同创新网络合作密度走势的因素,可见复杂产品的合作需求对网络的合作密度影响较大。另一方面,随着 θ 的增加,网络的合作密度呈下降趋势,但在整个区间的下降速度并不一致。当 θ 较小 ($0 < \theta < 0.5$) 时,复杂产品协同创新网络的合作密度下降趋势较缓和;当 θ 较大 ($0.5 < \theta < 1$) 时,合作密度以较快的速度下降。可见,当复杂产品协同创新的合作需求不同时,网络合作密度的变化规律是不同的。因此,需要在不同的合作需求下,探讨利益分配结构对复杂产品协同创新网络合作行为演化的影响。

(三)利益分配结构对复杂产品协同创新网络合作密度及收益的影响

为探讨不同利益分配结构下各类企业的收益情况以及网络的合作密度,进行了仿真实验,结果如下。

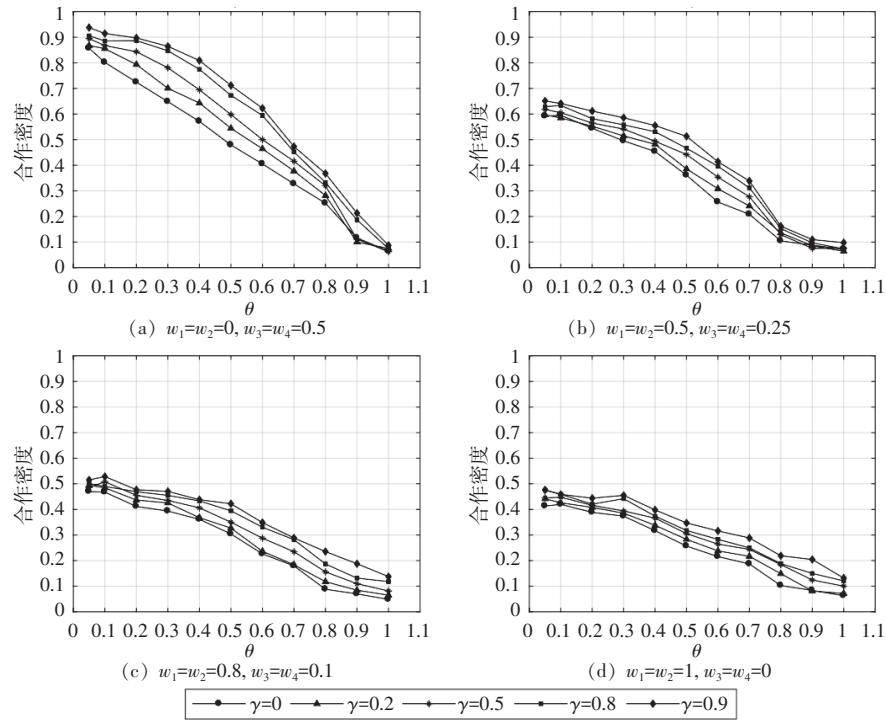
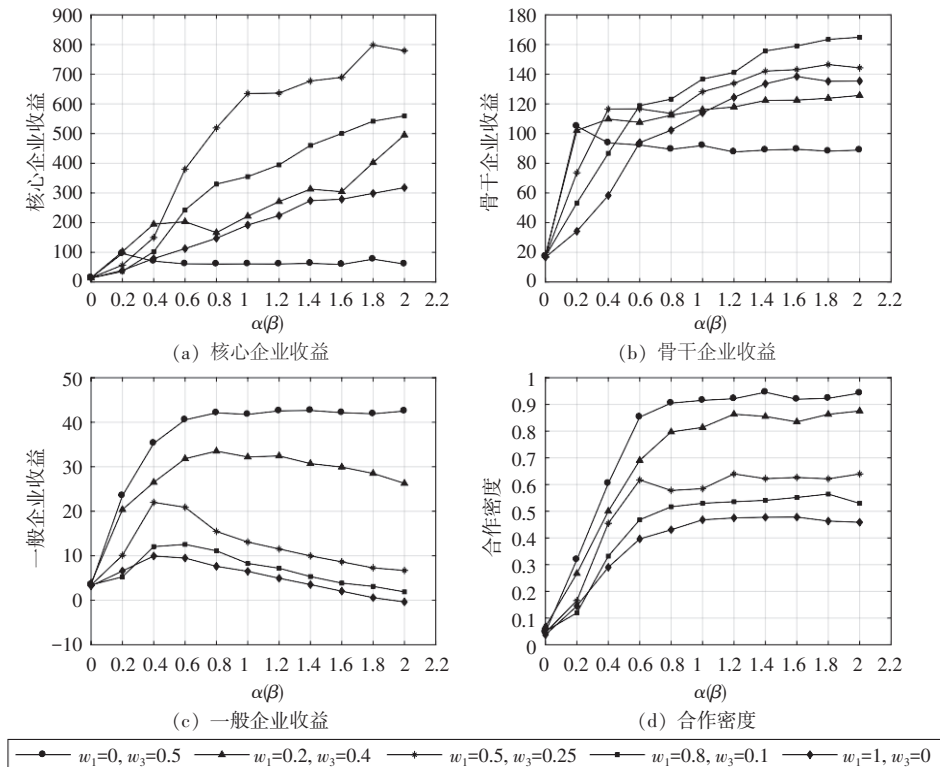


图2 协同合作特性对网络合作密度的影响

1. 复杂产品的合作需求较高

令 $\theta = 0.3, \gamma = 0.7$, 仿真结果如图3所示。由图3可知,分配结构对三类企业的收益以及网络合作密度的影响截然不同。对核心企业而言,当度权重较小时($0 \leq w_1, w_2 < 0.5$),随着利益分配结构中对度的考量力度的增加,其收益迅速增长,当度权重较大时($0.5 < w_1, w_2 \leq 1$),进一步强化度在利益分配结构中的重要性会使核心企业收益明显减少,当 $w_1 = w_2 = 0.5$ 时,核心企业的收益取得极大值。对骨干企业而言,其收益随

图3 $\theta = 0.3$ 且 $\gamma = 0.7$ 时,分配结构对企业收益及网络合作密度的影响

着度权重的增加而增加, $w_1 = w_2 = 0.8$ 时取得极大值。原因在于过高的度权重会使得很多一般企业选择背叛策略, 进而导致度较高的核心企业利益受损严重, 而骨干企业的受损程度要小于核心企业。对一般企业而言, 随着度权重 w_1 和 w_2 在利益分配规则中所占的比重提高, 其平均收益水平由高层次逐渐过度到低层次。由此可以看出, 当复杂产品协同创新网络合作需求较高时, 在利益分配规则中过多地关注度 ($0.8 < w_1, w_2 \leq 1$) 会导致“多输”的局面, 三类企业的平均收益均无法达到最优, 并且系统创新网络合作密度减少到相当低的程度。而适当的考虑度权重 ($w_1 = w_2 = 0.5$) 不仅可以很好的保证一般企业的收益, 还可以使得核心企业与骨干企业的收益维持在一个较高的水平, 从而极大地调动其合作积极性, 所以度权重应该控制在 0.5 左右。

由图 3 可知, 调节系数 α 和 β 对各类企业的收益和网络合作密度的影响不一。对核心企业和骨干企业而言, 随着 α 和 β 的增大这两类企业的收益也增加; 对一般企业而言, 当度权重较小 ($0 \leq w_1, w_2 \leq 0.2$) 且 α 和 β 取值较小时, 随着 α 和 β 的增加一般企业的收益也增加, 但若取值较大时, α 和 β 的增加基本不影响一般节点的收益, 当度权重较大时 ($0.5 \leq w_1, w_2 \leq 1$), 一般企业的收益随着 α 和 β 的增加呈先升高后降低的趋势, 并在 0.4~0.6 取得峰值; 对创新网络而言, 不论度权重如何, 合作密度总是先随着 α 和 β 的增加而增加, 当 α 和 β 的取值大到某一程度时, α 和 β 的取值基本不影响网络合作密度。这表明, 无论利益分配格局中度权重如何, 在投入规则和利益分配规则中将平均分配策略过渡为适当考虑度和投入的策略有利于提高各类企业的收益和创新网络的总收益。但是, 较高的调节系数会造成网络合作密度较高的假象, 长此以往, 会使得一般企业的收益低于其预期, 从而选择背叛策略, 不利于创新网络的稳定发展。因此, 为了避免一般企业的收益过低, 调节系数 α 和 β 的取值应该控制在 0.6 左右较为合适。

2. 复杂产品的合作需求较低

令 $\theta = 0.8, \gamma = 0.2$, 仿真结果如图 4 所示。由图 4 可知, 当复杂产品协同创新网络的合作需求较低时, 度权重 w_1 和 w_2 对骨干企业和一般企业的平均收益的影响机制完全不同, 伴随着度权重 w_1 和 w_2 的增加, 骨干企业的收益逐渐由低层次过渡到高层次, 并在度权重 $w_1 = w_2 = 1$ 时, 实现收益最大化, 但一般企业的平均收益逐渐由高层次过度到低层次, 仅在度权重 $w_1 = w_2 = 0$ 时, 实现收益最大化, 对核心企业而言, 度权重 w_1 和 w_2 的影响与高合作需求时基本一致。由此可以看出, 当复杂产品协同创新网络由高合作需求转变为低合作需求时, 骨干企业对度的依赖性增强, 只有很高的度权重才能使其收益达到最优。较高的度权重虽能较好地保证核心企业和骨干企业的收益, 但相比于合作需求较高的情况, 一般企业的平均收益会处于一个更低的水

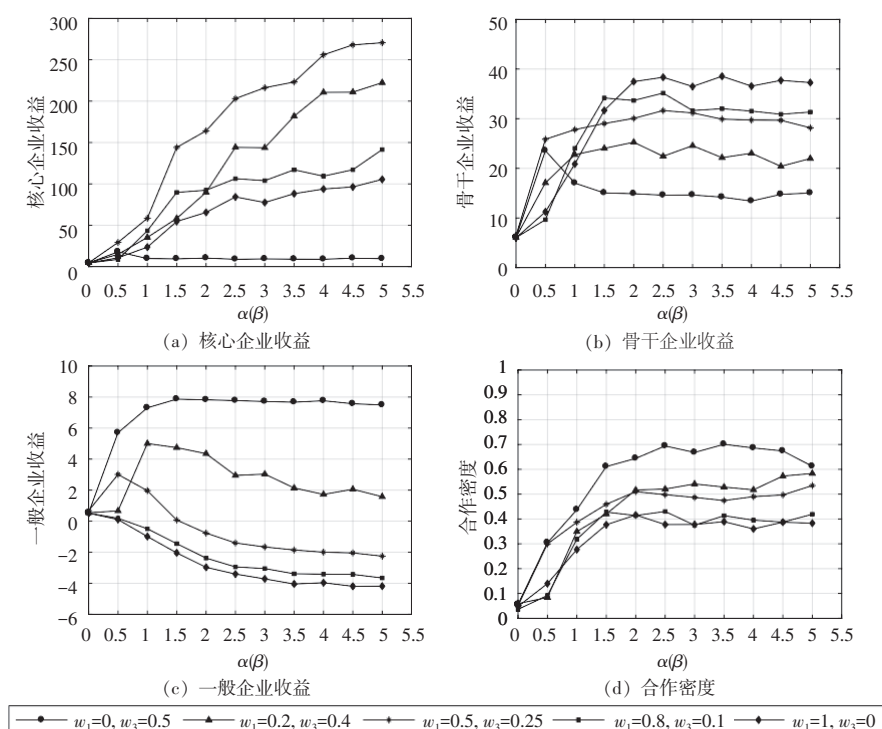


图 4 $\theta = 0.8$ 且 $\gamma = 0.2$ 时, 分配结构对企业收益及网络合作密度的影响

平。特别是当 $0.5 \leq w_1, w_2 \leq 1$ 时,创新网络的收益全部集中于核心企业和骨干企业,一般企业的平均收益为负,无疑会使得更多的一般企业产生“搭便车”行为,从而使总收益急剧下降。因此,相比于合作需求较高的情况,度权重应该设定一个较小的值,将其控制在 0.2 左右比较合适。

由图 4 可知,当调节系数 α 和 β 取值较小时 ($0 < \alpha, \beta \leq 0.5$),核心企业、骨干企业和一般企业的收益以及创新网络的合作密度均随着 α 和 β 的增加而增加,但当调节系数 α 和 β 的取值较大时,其对各类企业收益和创新网络合作密度的影响出现分化。对核心企业而言,其收益始终随着调节系数 α 和 β 的增大而增大;对骨干企业而言,当取值很大时 ($\alpha > 2, \beta > 2$),调节系数 α 和 β 的增加基本无法提高骨干企业的平均收益;对一般企业而言,较大的调节系数 ($\alpha > 2, \beta > 1$) 将使其收益迅速下降,同时,创新网络的合作密度将随着调节系数 α 和 β 的增加而减小。由此可以得出,相比于合作需求较高的情况,调节系数可以设定一个较大的值,将其数值控制在 1 左右比较合适。原因在于合作需求较高的情况下,联合创新会为企业带来更多的收益,而调节系数产生了更大的放大效应,使得收益差距变大,采用较高的调节系数使得更多的一般企业退出合作。

(四)初始合作策略对复杂产品协同创新网络合作密度的影响

为探讨不同利益分配结构下不同类别企业的初始条件对各类企业平均收益和网络合作密度的影响,在保持其他博弈主体初始合作策略不变的基础上,依次改变三类企业的初始合作状态,并对创新网络的合作密度进行仿真,与基准状态(各类企业的初始积极合作率均为 50%)进行比较。

为了弱化合作需求对网络合作密度的影响,令 $\theta = 0.05, \gamma = 0.9$,在保持其他两类企业初始策略不变的基础上,依次改变核心企业、骨干企业和一般企业的初始合作策略,对创新网络的合作密度进行仿真,仿真结果如图 5 所示。由图 5 可知,在不同的利益分配结构下,各类企业初始策略的改变对创新网络合作密度的影响不完全一致,即利益分配结构会改变各类企业在创新网络中的重要性。

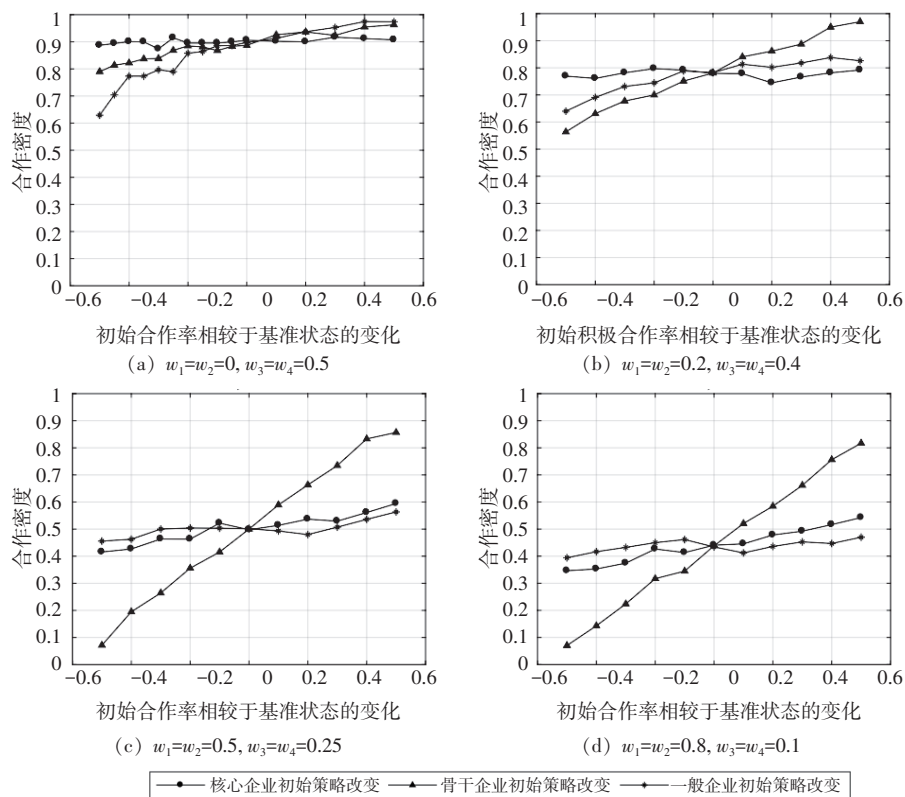


图 5 企业初始策略的改变对网络合作密度的影响

1. 创新投入主导利益分配

利益分配结构 $w_1 = w_2 = 0, w_3 = w_4 = 0.5$ 和 $w_1 = w_2 = 0.2, w_3 = w_4 = 0.4$ 是创新投入主导的分配结构。由图 5 可知,当利益分配结构不考虑或较少考虑各类企业在创新网络中的度,而主要依据其投入确定收益

时,若各类企业的初始合作策略变得更积极,则创新网络最终都可以达到较高的合作水平,若各类企业的初始合作策略变得更消极时,各类企业在创新网络中的重要性存在差异。首先,当核心企业由 50% 合作的基准状态开始变得更消极时,创新网络依然可以维持较高的合作密度。原因在于,当不考虑度而依据生产投入和合作投入决定收益时,一般企业的利益能得到很高程度的保障,从而充分调动其合作积极性,并通过骨干企业向核心企业扩散,最终使整个创新网络达到很高的合作密度。其次,骨干企业和一般企业的初始合作策略变得更消极时,将逐渐对整个创新网络带来负面影响。由此可以看出,当采用生产投入和合作投入主导的利益分配结构时,骨干企业和一般企业的初始合作策略都会对网络合作密度产生影响,但是影响幅度不大,原因在于无论企业的初始策略如何,较低的度权重都会使得网络的合作密度演化到一个较高的水平。

2. 度主导利益分配

利益分配结构 $w_1 = w_2 = 0.5, w_3 = w_4 = 0.25$ 和 $w_1 = w_2 = 0.8, w_3 = w_4 = 0.1$ 是度主导的分配结构。由图 5 可知,当度主导利益分配时,不同类型企业对创新网络合作密度的影响存在非常明显的差异。当不同类型企业的初始合作策略变得更消极时,创新网络合作密度都将较合作密度为 0.5 的基准状态出现较大幅度的下降;当不同类型企业的初始合作策略变得更积极时,创新网络都将较合作密度为 0.5 的基准状态出现较大幅度的上升;无论是策略变得更消极还是更积极,均表现为骨干企业的影响大于核心企业,核心企业大于一般企业。这可解释为,首先,度主导的利益分配结构是不利于一般企业的,无论它们的初始合作策略如何,达到均衡时其合作密度均较低,其初始合作策略对创新网络合作密度的影响不大;其次,核心企业在创新网络中的度最大,度主导的利益分配结构对其最有利,但核心企业的合作行为大多向骨干企业传递,且骨干企业合作的产出将有较大一部分由核心企业占有,因此即使核心企业采用完全的合作策略,对创新网络合作密度的促进作用也不大;最后,骨干企业不仅与核心企业存在合作,也与一般企业存在大量合作,在整个复杂产品协同创新网络合作中既“承上”又“启下”,地位举足轻重,因此,无论是初始合作策略变得更消极还是更积极,骨干企业对创新网络合作密度的负面和正面影响都非常明显。

四、结论与建议

本文运用复杂网络与博弈论的方法对复杂产品协同创新网络的合作行为演化问题进行了定性与定量分析。针对复杂产品协同创新的特点,构建具有核心企业、骨干企业和一般企业三类节点的协同创新网络,基于经典的公共品博弈思想,建立复杂产品协同创新的利益分配博弈模型,通过大量仿真实验进一步分析网络中三类节点的合作行为演化规律。研究表明:复杂产品协同创新的合作需求对网络的合作密度影响较大,并且当合作需求的取值范围不同时,对网络合作密度的影响规律不同;在利益分配结构中适当的度权重与调节系数不但可以避免一般企业的收益受损,还可以使得核心企业与骨干企业的收益处于一个较高的水平;相比于复杂产品协同创新合作需求较低的情况,合作需求较高时的最佳度权重较大,最佳调节系数较小;当采用度主导的利益分配结构时,骨干企业初始策略的改变将对网络的合作密度产生显著的影响。

依据以上研究发现,提出促进我国复杂产品协同创新网络稳定发展的建议:

(1)为了避免企业产生搭便车行为,同时更好地保障核心企业与骨干企业在复杂产品协同创新网络中的收益,协同创新网络中的创新主体在进行契约制定时,应积极地建立和健全企业协同创新的评估机制,并在利益分配中适当考虑企业的投入与重要程度。

(2)当复杂产品协同创新的合作需求不同时,利益分配结构也应有所区别。对于合作需求较高的情况,可以更多的考虑企业在网络中的重要程度,但同时要进行适当的调节,以防过大的收益差距使得更多的一般企业产生搭便车行为。对于合作需求较低的情况,应该适当的削弱对企业重要度的考虑程度,以此来调动一般企业的合作积极性。

(3)当利益分配机制的制定由于多种因素限制而缺少一定公平合理性时,政府可以通过制定相关优惠条件来调动骨干企业的合作积极性,以期对整个创新网络的合作起到正向的促进作用。

参考文献

- [1] BREZNITZ D, MURPHREE M. The run of the red queen: Government, innovation, globalization, and economic growth in

- China[M]. New Haven: Yale University Press, 2011.
- [2] HOB DAY M. Product complexity, innovation and industrial organisation[J]. Research Policy, 1998, 26(6): 689-710.
 - [3] 尹建华, 王兆华. 复杂产品模块化制造网络的运作模式研究[J]. 经济管理, 2008(6): 67-73.
 - [4] 李正锋, 叶金福. 复杂产品系统创新网络的构建及分析[J]. 工业工程, 2008, 11(2): 12-16.
 - [5] DHANARAG C, PARKHE A. Orchestrating innovation networks[J]. Academy of Management Review, 2006, 31(3): 659-669.
 - [6] WALLNER H P. Towards sustainable development of industry: Networking, complexity and eco-clusters[J]. Journal of Cleaner Production, 1999, 7(1): 49-58.
 - [7] FREEMAN C. Networks of innovators: A synthesis of research issues[J]. Research Policy, 1991, 20(5): 499-514.
 - [8] 孟卫东, 代建生. 合作研发中的双边道德风险和利益分配[J]. 系统工程学报, 2013, 28(4): 464-471.
 - [9] 曾德明, 张丹丹, 张磊生. 高技术产业技术创新战略联盟利益分配研究[J]. 经济与管理研究, 2015(7): 119-126.
 - [10] 李军, 朱先奇, 姚西龙, 等. 供应链企业协同创新利益分配策略——基于夏普利值法改进模型[J]. 技术经济, 2016, 35(9): 122-126.
 - [11] GAO J, YANG X, LIU D. Uncertain shapley value of coalitional game with application to supply chain alliance[J]. Applied Soft Computing, 2017(56): 551-556.
 - [12] HARRISON F, EL MOUDEN C. Exploring the effects of working for endowments on behavior in standard economic games[J]. Plos One, 2011, 6(16): 23-41.
 - [13] COWAN R, JONARD N, ZIMMERMANN J B. Bilateral collaboration and the emergence of innovation networks[J]. Management Science, 2007, 53(7): 1051-1067.
 - [14] LEE S, HOLME P, WU Z X. Emergent hierarchical structures in multiadaptive games[J]. Physical Review Letters, 2011, 106(2): 75-89.
 - [15] 曹霞, 张路蓬. 基于利益分配的创新网络合作密度演化研究[J]. 系统工程学报, 2016(1): 1-12.
 - [16] 张丹, 孔晓丹. 创新网络社区结构对合作行为演化的影响[J]. 软科学, 2018, 32(11): 80-85.
 - [17] 范厚明, 李筱璇, 刘益迎, 等. 北极环境治理响应复杂网络演化博弈仿真研究[J]. 管理评论, 2017, 29(2): 26-34.
 - [18] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
 - [19] 王经略, 周国华. 考虑过度自信的CoPS联合研发激励机制研究[J]. 科学学研究, 2019, 37(10): 1836-1845, 1856.
 - [20] CHOI J, HYUN A S, CHA M S. The effects of network characteristics on performance of innovation clusters[J]. Expert Systems with Applications, 2013, 40(11): 4511-4518.
 - [21] XIANG L, CHEN G. A local-world evolving network model[J]. Physica A-Statistical Mechanics & Its Applications, 2003, 328(1): 274-286.
 - [22] 周国华, 谭晶菁. 复杂产品关键共性技术供给模式比较研究[J]. 软科学, 2018, 32(6): 97-102.
 - [23] CAO X, DU W, RONG Z. The evolutionary public goods game on scale-free networks with heterogeneous investment[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2010, 389(6): 1273-1280.
 - [24] ZHANG H, SHI D, LIU R, et al. Dynamic allocation of investments promotes cooperation in spatial public goods game[J]. Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications, 2012, 391(8): 2617-2622.
 - [25] 韩姣杰, 周国华, 李延来. 基于互惠和利他偏好的项目团队多主体合作行为[J]. 系统管理学报, 2014, 23(4): 545-553.
 - [26] KRETSCHMER T, PURANAM P. Intergation through incentives within differentiated organizations[J]. Organization Science, 2008, 19(6): 860-875.
 - [27] SZABO G, HAUERT C. Phase transitions and volunteering in spatial public goods games[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11): 1-4.
 - [28] TRAULSEN A, NOWAK M A. Evolution of cooperation by multilevel selection[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(29): 10952-10955.

(下转第29页)

- logical turbulence[J]. *Journal of Business Research*, 2017, 70: 127-135.
- [40] CUNHA M P E, REGO A, OLIVEIRA P, et al. Product innovation in resource-poor environments: Three research streams [J]. *Journal of Product Innovation Management*, 2014, 31(2): 202-210.
- [41] CANKURTARAN P, LANGERAK F, GRIFFIN A. Consequences of new product development speed: A meta-analysis[J]. *Journal of Product Innovation Management*, 2013, 30(3): 465-486.
- [42] ACUR N, KANDEMIR D, BOER H. Strategic alignment and new product development: Drivers and performance effects[J]. *Journal of Product Innovation Management*, 2012, 29(2): 304-318.
- [43] EITENEYER N, BENDIG D, BRETTEL M. Social capital and the digital crowd: Involving backers to promote new product innovativeness[J]. *Research Policy*, 2019, 48(8): 1-15.

How Does Guanxi Drive Customer Involving in SMEs' New Product Development? A Moderated Mediating Effect Model

Xie Minglei¹, Liu Desheng²

(1. School of Business, ShanDong University of Political Science and Law, Jinan 250014, China;

2. School of Management, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250353, China)

Abstract: In order to study the mechanism of Guanxi driving the new product development of small and medium-sized enterprises (SMEs) innovation, a moderated mediating effect model was constructed, and the questionnaire data from 275 manufacturing SMEs in the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta were used for hypothesis testing. It is found that the Renqing and Xinren dimensions of Guanxi can directly improve the performance of new products of SMEs, and Guanxi can also indirectly improve the performance of new products of SMEs by encouraging customers to participate in the development of new products of SMEs through information-providing or co-developing. At the same time, the dynamic environment could positively moderate the relationship between customer involvement and new product performance.

Keywords: Guanxi; customer involvement; new product performance; Renqing; Xinren

(上接第 19 页)

Research on the Evolution of Cooperative Behavior of Complex Products Collaborative Innovation Network Based on Benefit Distribution

Zhou Guohua, Li Shiyao, Xia Xiaoyu

(School of Economics and Management, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: According to the different interest demands of various enterprises in the collaborative innovation of complex products, the evolutionary game model of interest distribution of collaborative innovation network of complex products was constructed based on the theories of complex network and public goods evolutionary game, and the evolution of cooperative behavior of network was simulated and analyzed. It is found that, when the demand of collaborative innovation cooperation is different, the structure of benefit distribution should be different. Considering the input and importance of enterprises in the structure of benefit distribution can reduce the free riding behavior of enterprises. When the formulation of benefit distribution mechanism lacks certain fairness and rationality, the overall level of network cooperation can be improved by mobilizing the enthusiasm of key enterprises.

Keywords: complex product; collaboration innovation; complex network; game of public goods evolution; profit distribution